

## 오염조사기술

### Pollution investigation technologies

#### 토양·지하수 오염조사지침 개발

#### Development of Guidelines for the Investigation of Soil and Groundwater Contamination

한국수자원공사

환 경 부

# 제 출 문

환경부장관 귀하

본 보고서를 “토양·지하수 오염조사지침 개발”과제 (위탁과제 “오염부지 조사 시 환경보호 및 보건관리에 관한 지침개발”)의 보고서로 제출합니다.

2010 년 3 월 31 일

주관연구기관명 : 한국수자원공사  
연구책임자 : 오은정  
연 구 원 : 김은미  
" : 김학철  
" : 최재원  
" : 김윤석  
" : 김정희  
" : 이종복  
" : 윤병석  
" : 최선영 외

위탁연구기관명 : 벽산엔지니어링(주)  
연구책임자 : 박인식  
연 구 원 : 김종원  
" : 지한구

## 보고서 초록

과제번호	172-081-003	해당단계 연구기간	2008.04.01 ~ 2010.03.31	구분	1단계/3단계
연구사업명	토양·지하수오염방지기술개발사업				
대분야명	토양·지하수오염방지기술개발사업				
중분야명	오염조사기술				
연구개발 과제명	국문명	토양·지하수 오염조사지침 개발			
	영문명	Development of Guidelines for the Investigation of Soil and Groundwater Contamination			
연구책임자	오은정	해당단계 참여연구원수	총 : 23명 내부 : 17명 외부 : 6명	해당단계 연구개발비	정부: 80,000 천원 기업: 천원 계 : 80,000 천원
		총 연구기간 참여연구원수	총 : 26명 내부 : 20명 외부 : 6명	총 연구개발비	정부: 160,000 천원 기업: 천원 계 : 160,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국수자원공사 K-water 연구원		참여기업명	-	
국제공동연구 위탁연구	상대국명 : -	상대국연구기관명 : -		-	
	연구기관명 : 벽산엔지니어링(주) 연구책임자 : 박인식				
요 약				보고서 면수	478
<p>지하수 및 토양오염이 증가함에 따라 국토의 효율적인 관리 및 보전의 중요성이 커지고 있다. 토양 및 지하수의 효율적 관리를 위해서는 정확하고 체계적인 오염조사가 요구되지만 현재 국내에는 관련 연구가 부족하여 실제 오염조사에 있어 어려움을 겪고 있는 실정이다.</p> <p>오염 조사 결과는 조사 방법에 따라 크게 달라질 수 있으며, 잘못된 오염조사로 인한 의사결정은 엄청난 비용의 낭비를 초래하거나, 환경오염으로 인한 피해를 가져올 수 있다.</p> <p>본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 국내 토양 및 지하수 오염조사 현황을 조사하여 개선이 필요한 사항을 도출하였으며 국외의 선진화된 오염조사 방법을 적용하여 개선 방안을 제시하였다.</p> <p>토양 오염조사의 경우, 주로 사용되는 ‘토양정밀조사지침’을 개선 대상으로 선정하여 격자 간 대상지역의 통합, 조사대상 오염지역의 구분, 배경농도 검토 등이 개선된 토양정밀조사지침(안)을 제시하였으며, 지하수 오염조사의 경우 국외의 지하수 오염조사 방법을 참고하여 오염조사절차를 포함하는 ‘지하수 오염조사 가이드라인(안)을 제시하였다. 또한 토양 및 지하수 오염조사 시의 환경오염 방지 및 보건 관리를 위하여 ‘토양·지하수 오염조사 관련 환경보호 및 보건관리 지침(안)’을 제시하였으며, 토양 및 지하수의 연계 관리 방안을 연구하였다.</p>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	토양, 지하수, 오염, 조사, 지침			
	영 어	Soil, Groundwater, Contamination, Investigation, Guideline			

# 요 약 문

## I. 제 목

토양·지하수 오염조사지침 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 물 부족 국가로 수자원의 확보가 중요해지고, 지하 및 토양의 오염 발생이 증가됨에 따라 토양 및 지하수의 효율적 관리 및 보전의 필요성이 부각되고 있다.
- 효율적인 토양 및 지하수 관리를 위해서는 정확한 오염 여부 파악을 위한 체계적인 오염조사가 필요하나, 현재 국내 관련 규정은 오염조사방법이 구체적이지 않아 실제 오염조사에 있어 어려움을 겪고 있는 실정이다.
- 오염조사 결과는 오염물질 및 오염원의 특성이나 시료채취 방법 등에 따라 크게 달라질 수 있으며 잘못된 오염조사로 인한 의사 결정은 엄청난 비용의 낭비를 초래하거나, 환경오염에 따른 피해를 가져올 수 있다.
- 따라서 본 연구에서는 토양 및 지하수를 조사함에 있어 비용의 낭비와 환경오염의 피해를 방지하고, 객관적이고 체계적으로 조사할 수 있는 오염조사지침의 개발을 목적으로 하였다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 국내·외 토양 및 지하수 오염조사 현황 조사
  - 국내 현황 조사를 통한 개선 사항 도출
  - 체계적이고 정확한 오염조사를 위한 통계적 오염조사 기법 등 국외 방법 조사
- 토양 및 지하수 오염조사 지침 개발
  - 선진화된 오염조사 방법 도입을 통한 지침 보완
  - 개선된 토양 및 지하수 오염조사절차의 제시
- 오염부지 조사 시 환경보호 및 보건관리에 관한 지침 개발

#### IV. 연구개발결과

- 국내 토양 및 지하수관리체계 및 오염현황, 그리고 토양 및 지하수의 오염특성에 대해 살펴보았다.
- 국내 토양 및 지하수 오염조사 현황 조사
  - 토양환경보전법을 중심으로 한 토양정밀조사지침(환경부), 토양환경평가지침(환경부), 군 환경오염조사 표준수행절차(국방부) 등 토양 오염조사 관련 규정을 검토하여 국내 토양 오염조사 현황을 파악하였다.
  - 지하수법을 중심으로 한 수질보전 등에 관한 규칙(환경부), 지하수 오염평가보고서 작성에 관한 규정, KS 규격 등 지하수 오염조사 관련 규정을 검토하였다.
- 국외 토양 및 지하수 오염조사 현황 조사
  - 미국, 일본, 캐나다, 호주, 영국, 독일 등의 토양 오염조사 관련 규정 및 조사체계에 대해 살펴보았다. 호주의 경우 오염부지 감독관 체계에 대해, 영국의 경우 실제 사례 조사를 통한 시료개수 선정 및 조사체계에 대해 구체적으로 살펴보았다.
  - UNESCO 및 미국 USGS의 지하수 오염조사 관련 규정을 구체적으로 검토하였으며 미국, 유럽, 일본 등 선진국의 지하수 관리 및 오염조사 현황에 대해 검토하였다.
- 통계적 기법을 이용한 토양조사 연구

토양조사 시 통계적 기법을 적용한 시료개수 산정 절차를 제시하였다. 또한 미국에서 의사결정에 필요한 신뢰성 있는 데이터 획득을 위한 방법으로 사용되는 DQO 절차와 시료채취 설계에 통계적 방법을 적용하는 VSP의 시료채취설계 소프트웨어 등 선진화된 조사 방법을 연구하였다.

○ 토양 및 지하수 오염조사 방법 개선안 제시

- 지하수 오염의 체계적 조사를 위해 ‘지하수 오염조사 가이드라인(안)’을 마련하여 지하수 오염조사 절차를 제시하였다.
- 국내 토양 오염조사 관련 규정 중 토양 오염조사에 많이 적용되고 있는 ‘토양정밀조사지침’을 개선 대상으로 선정하여, 격자 간 대상지역의 통합, 조사대상 오염지역, 배경농도 등이 개선된 토양정밀조사지침(안)을 제시하였다.

○ 토양·지하수 오염조사관련 환경보호 및 보건관리 지침(안) 제시

- 토양 및 지하수 오염조사를 실시함에 있어 수반되는 환경오염 및 보건관련 문제의 해결을 위해 토양·지하수 오염조사관련 환경보호 및 보건관리 지침(안)을 제시하였다.

○ 토양, 지하수 연계관리 방안 검토

- 동일 오염 체계에 있는 토양 및 지하수의 연계 관리 방안을 검토하여 개별적 조사가 아닌 상호 조사를 통한 연계관리 방안을 검토하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 국가 토양 및 지하수 오염조사 관련 규정의 개정 또는 제정 시 본 연구 결과의 반영을 통한 국가 정책 지원
- 토양, 지하수 오염 현황의 객관적 파악을 통한 정화방법 결정 등 합리적 의사 결정 지원
- 체계적 오염조사를 통한 토양 및 지하수의 효율적 관리로 국토 환경 보호

## S U M M A R Y

Recently the importance of effective management and the preservation of soil and groundwater have been increasing. The situation has become urgent and emergency steps are required to protect groundwater from soil and groundwater contamination which has become a frequent occurrence.

Although a precise and systematic inventory for the effective management and preservation of soil and groundwater is necessary, there are many difficulties in conducting a real inventory because the related regulations regarding a national inventory for soil and groundwater contamination is not sufficient.

It is possible that incorrect decisions could be made regarding the categorization of contaminated inventory. This could result in a drastic waste of expenses as well as being harmful to the environment. There are serious concerns because the results from the contamination inventory are greatly dependent on the inventory method that was adopted.

The main purpose of this study is to solve these problems.

The first step that requires action is to improve the items that were selected through the process of an investigation to determine the current states of the nationally regulated contamination inventories for soil and groundwater.

On the other hand, an improved inventory method was suggested by applying the statistical and advanced contamination inventories of USA, Europe and other foreign countries.

A detailed inventory guideline for soil contamination was selected to help improve the process. The improved detailed inventory guideline includes suggestions regarding the integration of areas between lattices, the division of contaminated areas and the examination of background concentrations.

Referring to the groundwater contamination inventories of UNESCO and USGS, the Groundwater Contamination Inventory Guidelines that were drafted include suggestions for setup plans, inventory implementation and the management of evaluation results.

In regards to problems related to implementation of inventory guidelines for soil and groundwater and other related environment protection and health management issues, A Guidance of Environment Protection and Health Management Draft was proposed. As well, soil and groundwater related management programs were examined to ensure that effective environmental protection procedures were sufficient.

# English table of Contents

<b>Chapter 1. Outline of Research and Development Projects</b> -----	<b>25</b>
Section 1. Purpose and Background of Research-----	27
Section 2. Details and Scope of Research-----	28
<b>Chapter 2. The Present State Of Technology at Home and Abroad</b> ----	<b>31</b>
Section 1. Outline of Investigation for Soil and Groundwater-----	33
Section 2. The Present State of Domestic Investigation for Soil-----	48
Section 3. The Present State of Domestic Investigation for Groundwater-----	60
Section 4. The Present State of Abroad Investigation for Soil-----	74
Section 5. The Present State of Abroad Investigation for Groundwater Contamination -----	144
Section 6. Connection Management for Soil and Groundwater-----	184
<b>Chapter 3. Achieved Details and Outcome of Research and Development</b> -----	<b>193</b>
Section 1. Investigation for Soil and Groundwater using Statistical Technique-----	195
Section 2. Investigation Methodology for Groundwater Contamination-----	264
Section 3. Guide Amendments for Detailed Investigation of Soil-----	278
Section 4. Guidelines for Investigation of Groundwater Contamination-----	288
Section 5. Environmental Protection and Health Care Related to Contamination Investigation for Soil and Groundwater-----	291
<b>Chapter 4. Degree of Objective Achievement and Contribution to Related Areas</b> -----	<b>335</b>
Section 1. Degree of Objective Achievement for Research and Development-----	337
Section 2. Degree of Contribution to Related Areas-----	339
<b>Chapter 5. Plan using to Result of Research and Development</b> -----	<b>341</b>
Section 1. Using Plan-----	343
Section 2. Hereafter a Direction of Research and Development projects-----	343

Chapter 6. Informations of Overseas Technology Obtained in Process of Research and Development-----	345
Chapter 7. A Bibliography-----	349

# 목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요-----	<u>25</u>
제1절. 연구 배경 및 목적-----	27
제2절. 연구의 범위 및 세부내용-----	28
2.1 세부내용-----	28
제 2 장 국내·외 기술개발 현황-----	<u>31</u>
제1절. 토양·지하수 조사 개요-----	33
1. 토양·지하수 현황-----	33
1.1 토양 현황-----	33
1.2 지하수 현황-----	33
2. 국내 토양·지하수 관리체계 및 오염 현황-----	34
2.1 토양 관리 현황-----	34
2.2 토양 오염원 현황-----	35
2.3 지하수 관리 현황-----	37
2.4 지하수 오염원 현황-----	40
3. 토양·지하수 오염 특성-----	41
3.1 토양 오염의 특성-----	41
3.2 지하수 오염의 특성-----	41
3.3 토양·지하수 오염의 상호 영향-----	43
3.4 오염물질의 특성-----	43
3.5 지하수의 오염 구분-----	45
3.6 오염 물질의 이동 특성-----	45
제2절. 국내 토양조사 현황-----	<u>48</u>
1. 토양오염조사 관련 규정-----	48
1.1 토양환경보전법-----	48
1.2 토양정밀조사지침-----	49

1.3 토양오염실태조사지침-----	49
1.4 토양측정망 설치계획 변경-----	50
1.5 토양환경평가지침-----	50
1.6 특정토양오염관리대상시설의 토양오염방지시설 및 오염토양의 정화방법 등에 관한 고시-----	50
1.7 특정토양오염 관리대상시설 관리지침-----	50
1.8 토양오염 위해성평가지침-----	51
1.9 주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침-----	51
1.10 군 환경오염조사 표준수행절차-----	52
1.11 광해방지사업이 완료된 사업장 주변 환경오염영향조사 지침-----	52
1.12 토양정화 검증방법에 관한 고시-----	52
1.13 토양오염공정시험기준-----	53
2. 지침별 세부 내용 비교 검토-----	53
2.1 조사절차-----	53
2.2 조사지역-----	54
2.3 조사항목-----	55
2.4 조사시기-----	55
2.5 시료채취 위치 선정-----	55
2.6 시료 채취 방법-----	57
2.7 시료채취 밀도 및 심도-----	58
2.8 시료채취 장비-----	59
<b>제3절. 국내 지하수 조사 현황-----</b>	<b>60</b>
1. 지하수오염조사 관련 규정-----	60
1.1 지하수법-----	60
1.2 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙-----	60
1.3 지하수수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획-----	61
1.4 오염지하수정화계획의작성내용-----	61
1.5 지하수 오염평가보고서의 작성에 관한 규정-----	62
1.6 KS 규격-----	62
1.7 지하수 업무수행 지침(건설교통부, 2006.12.)-----	63

1.8 지하수의 수질보전 등에 관한 업무처리 지침-----	63
1.9 기타-----	64
2. 지하수관련규정비교검토-----	64
2.1 조사절차-----	64
2.2 조사지역-----	68
2.3 조사항목-----	68
2.4 조사시기 및 주기-----	69
2.5 시료채취 위치-----	70
2.6 지하수 조사방법-----	71
2.7 지하수채취 밀도 및 심도-----	72
2.8 시료채취 장비-----	73
<b>제4절. 국외 토양오염조사 현황-----</b>	<b>74</b>
1. ISO지침-----	74
1.1 ISO 10381-1-----	74
1.2 ISO 10381-2-----	77
1.3 ISO 10381-3-----	79
1.4 ISO 10381-4-----	79
1.5 ISO 10381-5-----	80
2. 미국-----	82
2.1 현황 및 관련 법-----	82
2.2 토양오염 조사체계-----	83
2.3 토양오염조사-----	84
3. 일본-----	87
3.1 현황 및 관련법 -----	87
3.2 토양지하수 오염에 관한 조사 대책지침 -----	88
3.3 토양오염대책법과 토양오염상황조사-----	93
4. 캐나다-----	108
4.1 현황 및 관련 법-----	108
4.2 유콘주의 오염부지에서의 토양 시료 채취 절차 소개 -----	108

5. 호주-----	112
5.1 현황 및 관련 법-----	112
5.2 토양오염 조사 체계-----	112
5.3 부지검증에 필요한 최소 시료 개수-----	114
5.4 호주의 오염 부지 감독관 체계-----	115
6. 유럽-----	116
6.1 영국-----	124
6.2 독일-----	141
6.3 네덜란드-----	142
<b>제5절. 국외 지하수오염조사 현황-----</b>	<b><u>144</u></b>
1. UNESCO 지하수 오염조사-----	144
1.1 서론-----	144
1.2 지하수질과 오염-----	144
1.3 지하수 오염원-----	145
1.4 오염원 조사-----	148
1.5 지하수 오염원의 등급화-----	162
1.6 지도제작(지하수 오염조사 관련)-----	163
2. 미국-----	163
2.1 미국의 지하수 관리-----	163
2.2 USGS 지하수 오염조사-----	166
<b>제6절. 토양·지하수 연계 관리-----</b>	<b><u>184</u></b>
1. 토양, 지하수의 상관성-----	184
2. 토양 및 지하수 연계 관리 현황-----	184
2.1 국내 토양 및 지하수 연계 관리 현황-----	184
2.2 지하수 수질 기준-----	187
2.3 국외 토양 및 지하수 연계 관리 현황-----	188
3. 토양 및 지하수의 연계 관리 방안-----	191

<b>제 3 장 연구수행 내용 및 결과</b>	<b><u>193</u></b>
<b>제1절. 통계적 기법을 이용한 토양 및 지하수 조사</b>	<b><u>195</u></b>
1. 시료채취 위치 결정	195
1.1 판단에 근거한 시료채취	195
1.2 임의 시료채취	195
1.3 층위별 시료채취	196
1.4 규칙적 시료채취	196
1.5 중, 횡단 시료채취	197
2. 시료개수 산정	197
2.1 광산활동 관련지역	202
2.2 폐기물 관련지역	203
2.3 주유소 지역	206
2.4 사격장 지역	206
2.5 기타 지역	207
2.6 간단프로그램 산정	211
2.7 실제 환경오염조사 비교	212
2.8 조사 면적별 오염반경 변화에 따른 채취필요 시료 수 검토	214
3. 외국의 통계적 시료채취 프로그램	216
3.1 DQO process	216
3.2 DQO 사례조사	244
3.3 통계적 시료채취 설계 Software	247
4. 토양 및 지하수 오염조사 사례 비교	251
4.1 캠프 O1 지역 05년 반환/공여지 환경오염조사	251
4.2 캠프 O2 지역 05년 반환/공여지 환경오염조사	255
4.3 캠프 O3 지역 05년 반환/공여지 환경오염조사	257
4.4 종합적 고찰	261
<b>제2절. 오염 지하수 조사방법</b>	<b><u>264</u></b>
1. 지하수 오염조사 가이드라인 내용	265
1.1 지하수 오염조사 절차	265

1.2 조사 계획의 수립-----	266
1.3 기초조사 및 개황조사와 정밀조사-----	267
1.4 지하수위 측정-----	267
1.5 관측정의 설치 및 관리-----	268
1.6 퍼징방법-----	268
1.7 시료채취-----	269
1.8 퍼징 및 시료채취 장비-----	270
1.9 채취 시료의 정도관리-----	270
1.10 기타-----	270
2. 토양정밀조사지침 개선(안)의 지하수 조사연구-----	270
2.1 토양정밀조사지침의 지하수 오염조사 검토-----	270
2.2 토양정밀조사지침 지하수 조사 개선 방향-----	271
2.3 지하수 조사 개선 참고 자료-----	272
2.4 토양정밀조사지침(안)의 정밀조사 부분 지하수 오염조사 개선(안)-----	274
<b>제3절. 토양정밀조사 지침 개정안 방향-----</b>	<b><u>278</u></b>
1. 지침의 명칭에 대한 사항-----	278
2. 조사대상지역에 대한 사항-----	278
3. 조사대상지의 적용범위에 관한 사항-----	281
4. 시료채취밀도에 대한 사항-----	284
5. 시료채취심도 대한 사항-----	285
6. 배경농도조사에 대한 사항-----	286
7. 정밀조사결과 조치에 대한 사항-----	286
<b>제4절. 지하수 오염 조사 가이드라인(안)내용 설정방향-----</b>	<b><u>288</u></b>
1. 지하수 오염조사 방법 연구 목적-----	288
2. 가이드라인 형태 제시 이유-----	288
3. 지하수 오염조사 가이드라인의 적용 범위-----	288
4. 가이드라인 내용의 구성-----	289

<b>제5절. 토양·지하수 오염조사관련 환경보호 및 보건관리</b>	<b><u>291</u></b>
1. 토양·지하수 오염조사관련 환경보호 및 보건관리 현황 자료조사	291
1.1 환경보호	291
1.2 보건관리	304
1.3 국외 보건관리 규정 검토	319
2. 환경보호 및 보건관리 지침 평가 및 표준절차 제안	321
2.1 환경보호 및 보건관리 지침평가	321
2.2 표준절차 제안	323
3. 지반조사지침 및 조사인력기준	326
3.1 지반조사 지침 개발	326
3.2 조사인력의 자격기준	329
<b>제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여</b>	<b><u>335</u></b>
제1절. 연구개발목표 달성도	337
제2절. 관련분야 기여도	339
<b>제 5 장 연구개발결과 활용계획</b>	<b><u>341</u></b>
제1절. 활용계획	343
제2절. 향후 연구과제의 방향	343
<b>제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보</b>	<b><u>345</u></b>
<b>제 7 장 참고문헌</b>	<b><u>349</u></b>
<b>부록</b>	<b><u>357</u></b>
부록1. 토양정밀조사지침(개정안)	359
부록2. 지하수 오염조사 가이드라인(안)	395
부록3. 토양·지하수 오염조사관련 환경보호 및 보건관리 지침(안)	465

## 표 차 례

표 2-1 기관별 지하수 업무 담당 현황	37
표 2-2 기관별 임무	38
표 2-3 연도별 수질기준 초과율	39
표 2-4 지침 별 토양조사절차	54
표 2-5 지침 별 토양조사지역	54
표 2-6 지침 별 토양조사시기	55
표 2-7 지침 별 토양 시료채취 위치	56
표 2-8 지침 별 토양 시료채취 방법(1)	57
표 2-9 지침 별 토양 시료채취 방법(2)	57
표 2-10 지침 별 토양 시료채취 심도	58
표 2-11 지침 별 토양 시료채취 밀도(1)	58
표 2-12 지침 별 토양 시료채취 밀도(2)	59
표 2-13 지침 별 토양 시료채취 장비	59
표 2-14 지침 별 지하수조사절차	65
표 2-15 지하수 시료 채취를 위한 절차	67
표 2-16 지침 별 지하수 조사지역	68
표 2-17 지침 별 지하수 조사시기 및 주기	69
표 2-18 지침 별 지하수 시료채취 위치	70
표 2-19 지침 별 지하수 조사방법	71
표 2-20 지침별 지하수 시료채취밀도	72
표 2-21 지침 별 시료채취장비	73
표 2-22 ISO 10381-1지침이 제안하는 토양시료 채취지점의 분포 형태 예시	76
표 2-23 시료채취 시 도구 선택	78
표 2-24 농업 목적에 관련된 시료 수	79
표 2-25 시료채취 방법	80
표 2-26 조사 단계별 업무 범위	81
표 2-27 시료채취 지점 선정 방법	81
표 2-28 Phase I ESA의 절차	84
표 2-29 Phase I 과 Transaction Screen 비교	84
표 2-30 Phase II ESA 절차	85
표 2-31 RI/FS의 절차	85
표 2-32 부지조사 및 정화설계 기법에 따른 절차와 수행내용	86
표 2-33 해당계기목적과 주체에 따른 오염조사 진행의 3가지 유형	88
표 2-34 토양지하수 오염조사 대책지침의 조사 대상물질	89
표 2-35 토양 표층조사 함유량 참고치	90

표 2-36 토양오염대책법의 대상물질(지정유해물질) -----	95
표 2-37 사각격자형의 규칙적 시료채취 패턴을 이용할 경우 원형의 Hot Spot을 발견하기 위한 최소 시료채취 지점의 수	114
표 2-38 토양오염부지관리에 관한 유럽 국가들의 입법체계 -----	118
표 2-39 Soil sampling depth strategy in the different ESSG -----	119
표 2-40 Sampling strategy inside the sampling unit in ESSG -----	120
표 2-41 Description of the sample in the ESSG -----	121
표 2-42 Technical aspects of sampling in the ESSG -----	122
표 2-43 Pre-analysis treatment of soil samples in the ESSG -----	123
표 2-44 부지사용 용도 차이에 따른 원형의 대상이 되는 보통 Averaging Area크기를 결정하기 위해 필요한 시료채취 격자의 크기	131
표 2-45 부지 용도별에 따른 원형의 대상이 되는 지역의 보통 가장 작은지역의 크기를 결정하기 위해 필요한 시료채취의 격자크기	131
표 2-46 격자공간이 증가함에 따른 검출 가능성의 효과 -----	132
표 2-47 시료채취 깊이 차이에 대한 이론 -----	134
표 2-48 CASE STUDY 조사를 위한 중요 설계 요소 -----	138
표 2-49 Example of a checklist for the inventory of potential contamination sources -----	150
표 2-50 Application of surface geophysical techniques in groundwater investigations -----	156
표 2-51 Major borehole geophysical methods used in groundwater investigations and their application -----	158
표 2-52 Principal test drilling techniques -----	159
표 2-53 OTA가 정한 잠재오염원 분류 -----	164
표 2-54 현장 수질지시 인자의 안정화 판단기준 -----	176
표 2-55 토양 오염 우려기준 및 대책기준 -----	186
표 2-56 용도별 수질기준 -----	187
표 2-57 일본에서의 인간건강보호를 위한 환경수질기준 -----	190
표 3-1 귀무가설에 대한 판정 유형 -----	198
표 3-2 광산활동 관련지역 및 사격장의 2구역(수계확산우려지역)의 면적에 따른 시료개수 산정	204
표 3-3 폐기물 매립지역 및 사격장 피탄지의 면적에 따른 시료개수 산정 -----	205
표 3-4 주유소 지역의 면적에 따른 시료개수산정 -----	209
표 3-5 기타지역의 면적에 따른 시료개수 산정 -----	210
표 3-6 면적당 시료 개수 및 오염의심지역반경 -----	213
표 3-7 실제사례 면적 당 시료 개수 및 오염의심지역반경 -----	214
표 3-8 면적에 따라 확인 가능한 오염반경에 필요한 시료 수 -----	215
표 3-9 모수 및 비모수 통계적 가설검정 제시 -----	244
표 3-10 캠프 O1 지역 토양오염조사 실제 측정량 -----	252
표 3-11 캠프 O1 지역 개황조사에 따른 면적당 지점 수 -----	253
표 3-12 캠프 O1지역 정밀조사에 따른 면적당 지점 수 -----	254
표 3-13 캠프 O1 지역에 대한 시료채취 개수 -----	254
표 3-14 캠프 O2 지역 토양오염조사 실제 측정량 -----	255

표 3-15 캠프 O2지역 개황조사에 따른 면적당 지점수	256
표 3-16 캠프 O2지역 정밀조사에 따른 면적당 지점수	257
표 3-17 캠프 O2 지역에 대한 시료채취 개수	257
표 3-18 캠프 O3 지역 토양오염조사 실제 측정량	258
표 3-19 캠프 O3지역 개황조사에 따른 면적당 지점수	259
표 3-20 캠프 O3지역 정밀조사에 따른 면적당 지점수	260
표 3-21 캠프 O3 지역에 대한 시료채취 개수	260
표 3-22 UNESCO 지하수 오염조사 절차	266
표 3-23 안정화 기준의 예(1)	269
표 3-24 안정화 기준의 예(2)	269
표 3-25 주유소 부지 지하수 시료채취의 최소 준수사항	273
표 3-26 조사대상지역의 분류	279
표 3-27 지하수 폐공실태 현장조사표(앞면)	297
표 3-28 지하수 폐공실태 현장조사표(뒷면)	298
표 3-29 폐공 유형 분류	302
표 3-30 부지조사를 위하여 필요한 건강 및 안전조치	306
표 3-31 보호구 및 굴착작업 안전사항	316
표 3-32 보호구 및 굴착작업 안전사항(계속1)	317
표 3-33 보호구 및 굴착작업 안전사항(계속 2)	318
표 3-34 EPA Guidelines for PPE	320
표 3-35 국내 기관별 환경보호 지침	321
표 3-36 국내외 기관별 보건관리 지침	322
표 3-37 오염등급의 구분	324
표 3-38 환경보호 오염등급	324
표 3-39 보건관리 오염등급-휘발성물질	325
표 3-40 보건관리 오염등급-비휘발성물질	325
표 3-41 지반조사 조사 및 평가 항목	327
표 3-42 토양오염조사기관 기술인력	329
표 3-43 토양정화업 기술인력	330
표 3-44 엔지니어링 기술인력의 자격기준	331
표 3-45 기술자격 및 학력별 기준	332
표 3-46 해당분야 기술자격 및 학경력 기준	333
표 3-47 현장조사 시 최소인력 기준안	334
표 4-1 연도별 연구개발 목표의 달성도	338

## 그림 차례

그림 2-1 지하수의 오염 경로(환경부, 2008)	42
그림 2-2 지하수 오염조사 흐름도	66
그림 2-3 토양오염대책법의 일반적인 절차	94
그림 2-4 일본토양오염상황조사 절차	96
그림 2-5 통상적인 공장, 사업장의 경우 시료채취	101
그림 2-6 유해물질 사용특정시설 설치여부에 따른 시료채취	101
그림 2-7 오염가능성이 적은 부분을 포함한 경우 1의 시료채취	102
그림 2-8 오염가능성이 적은 부분을 포함한 경우2 의 시료채취	102
그림 2-9 휘발성 유기화합물의 토양조사에서 지정까지의 순서	103
그림 2-10 토양가스 조사를 근거로 한 오염 범위의 선정	104
그림 2-11 오염면적별 (m <sup>2</sup> ) 사례 수	105
그림 2-12 100m <sup>2</sup> 격자 상으로 구획한 경우	105
그림 2-13 900m <sup>2</sup> 격자 상으로 구획한 경우	106
그림 2-14 CASE 1과 CASE 2	107
그림 2-15 유콘주의 오염부지에서의 시료채취절차	110
그림 2-16 호주의 토양조사 감독관의 오염부지평가와 관리절차	117
그림 2-17 시료채취 패턴의 예	128
그림 2-18 Relationship between Probability of Detection and Relative Area	132
그림 2-19 CASE STUDY 예비(개황)조사	140
그림 2-20 CASE STUDY 정밀조사 1	140
그림 2-21 CASE STUDY 정밀조사 2	140
그림 2-22 오염물질 이동 기작	145
그림 2-23 지하수 오염조사 주요 단계	148
그림 2-24 A framework for field investigation planning	154
그림 2-25 Schematic diagrams of the most commonly used sampling devices	160
그림 2-26 Record of wellpurging	175
그림 3-1 임의 시료채취	196
그림 3-2 층위별 시료채취	196
그림 3-3 규칙적 시료채취	197
그림 3-4 종·횡단 시료채취	197
그림 3-5 현행 유류지역 개황조사와 정밀조사의 시료개수 및 통계적 방법을 통한 시료개수	199
그림 3-6 Consumer's risk( $\beta$ )와 R/G의 관계선	201
그림 3-7 현행 지침의 면적에 따른 95% 신뢰수준으로 발견할 수 있는 최소크기 오염지역 반경	202
그림 3-8 산업부지에서의 구역분류 예시	207

그림 3-9	시료채취개수 프로그램	211
그림 3-10	EPA DQO Process	216
그림 3-11	Gray region의 경계	234
그림 3-12	Decision performance goal 도표의 예	235
그림 3-13	Simple random 시료채취 설계	238
그림 3-14	체계적 시료채취 설계 선택	238
그림 3-15	Adaptive cluster sampling design	240
그림 3-16	예비조사를 전개하기 위한 DQO 절차의 사례 요약	245
그림 3-17	예비조사를 전개하기 위한 DQO 절차의 사례 요약(계속)	246
그림 3-18	VSP 프로그램	247
그림 3-19	DEFT의 실행화면	249
그림 3-20	ELIPGRID-PC의 메인 메뉴와 INPUT 화면	250
그림 3-21	캠프 O1, O2, O3에 대한 면적에 따른 시료채취개수(개황조사)	261
그림 3-22	캠프 O1, O2, O3에 대한 면적에 따른 시료채취개수(정밀조사)	261
그림 3-23	캠프 O1, O2, O3에 대한 95% 신뢰수준으로 발견할 수 있는 최소크기 오염지역 반경(개황조사)	262
그림 3-24	캠프 O1, O2, O3에 대한 95% 신뢰수준으로 발견할 수 있는 최소크기 오염지역 반경(정밀조사)	262
그림 3-25	지하수 흐름 방향을 알고 있을 경우	274
그림 3-26	지하수 흐름 방향을 알지 못할 경우	274
그림 3-27	일반적인 단위구획의 설정방법	282
그림 3-28	격자를 회전시키는 경우 단위구획의 설정방법	283
그림 3-29	가장자리에서 구획 병합의 조건 (10m*10m를 예시한 경우)	284
그림 3-30	관측공 폐공 시 되메움 모식도(케이싱 절단의 경우)	294
그림 3-31	되메움 주요 절차	296
그림 3-32	케이싱 인양 제거	300
그림 3-33	충적층 소형우물 구조도 및 되메움 모식도	303
그림 3-34	충적층 대형우물 구조도 및 되메움 모식도	304
그림 3-35	방사능 조사 시 착용 장비 및 복장	314

## 약어표

### *A*

AA : Averaging Area

ASTM : American Society for Testing Materials

ANZNMRC : Australian and New Zealand National Health and Medical Research Council

ANZECC : Australian and New Zealand Environment and Conservation Council

### *B*

BTEX : Benzene+Toluene+Ethylbenzene+Xylene

### *C*

CFC : Chloro Fluor Carbon

CSA : Canadian standards association

CERCLA : Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act

CLM Act : Contaminated Land Management Act

CH/DH : Clean Hand/Dirty Hand

COCs : Contaminants Of Concern

COPC : Contaminants of potential concern

### *D*

DEP : Department of Environmental Protection

DQOs : Data Quality Objectives

DNAPLs : Dense Non-Aqueous Phase Liquids

DEFT : Decision Error Feasibility Trials

DO : Dissolved Oxygen

DTW : Depth To Water

### *E*

EM : Electromagnetic Conductivity

EPA : Environmental Protection Agency

ESA : Environmental Site Assessment

ESSG : European countries Soil Sampling Guidelines

ER : Electrical Resistivity

EC : Electrical Conductivity

## *G*

GC : Gas Chromatography  
GC-MS : Gas Chromatography - Mass Spectrometry  
GS : Grid Size  
GPR : Ground-Penetration Radar  
GPS : Global Positioning System

## *H*

HC50 : Hazard concentration 50

## *I*

ICRCL : Interdepartmental Committee on the Redevelopment of Contaminated Land  
IHP : International Hydrological programme  
ISO : International Organization for Standardization

## *J*

JMOE : Japan Ministry of the Environment

## *L*

LNAPLs : Light Non-Aqueous Phase Liquids  
LBGR : Lower Bound of the Gray Region

## *M*

MARSSIM : The Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual  
MCLs : Maximum Contaminant Levels  
MM : Magnetometry

## *N*

NAPLs : Non-Aqueous Phase Liquids  
NIPHE : National Institute of Public Health and Environment  
NSW : NEW South Wales  
NEPC : National Environment Protection Council  
NHMRC : National Health and Medical Research Council  
NEPM : National Environment Protection M  
NMR : Nuclear Magnetic Resonance  
NTU : Nephelometric Turbidity Unit

## *O*

OTA: Office of Technology Assessment

## *P*

PAHs : Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

PCBs : Polychlorinated Byphenyls

PSQs : Principal Study Questions

PPE : Personal Protective Equipment

PID : Photo Ionization Detector

## *Q*

QA/QC : Quality Assurance/ Quality Control

## *R*

RA : Relative Area

RAP : Remedial Action Plan

RBCA : Risk Based Control Action

RCRA : Resource Conservation and Recovery Act

RI/FS : Remedial Investigation/Feasibility Study

RD/RA : Remedial Design/Remedial Action

RPD : Re-Producibility Deviation

## *S*

SARA : Superfund Amendments and Reauthorization Act

SCC : Soil Contamination Concentration

SOP : Standard operating procedure

SWDA : Solid Waste Disposal Act

SGV : Soil Guideline Values

SAC : Smallest Area of Concern

SR : Seismic Refraction

SDWA : Safe Drinking Water Act

SPT : Standard Penetration Test

## *T*

TPH : Total Petroleum Hydrocarbons

TSCA : Toxic Substances Control Act

TOC : Top Of Casing

## *U*

UNESCO : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

USGS : United States Geological Survey

UXO : Unexploded Ordnance

UTM : Universal Transverse Mercator

## *V*

VOCs : Volatile Organic Compounds

VSP : Visual Sample Plan

## *W*

WA : Western Australia

WHO : World Health Organization

## 제 1장 연구개발과제의 개요



# 제 1 장 연구개발과제의 개요

## 제1절 연구 배경 및 목적

토양은 물이나 공기에 비해 조성이 복잡하며, 유해물질에 대한 반응이 다양하게 나타난다. 또한 토양 내 오염물질의 이동이 완만하여 그 피해가 나타나기까지는 상당한 시일이 소요되며, 오염된 토양은 지하수 오염을 유발하기도 한다. 한번 오염된 토양 및 지하수는 원상회복이 어려우며, 정화를 위해 많은 시간과 비용이 소요되는 특징이 있다.

토양과 지하수 오염은 드러나지 않는 경우가 많고, 쉽게 감지할 수 없기 때문에 대기나 수질 오염에 비해 사람들의 관심이 낮았지만, 물 부족 국가로 수자원의 확보가 중요해지고 있는 지금, 하천·호소수 등과 함께 지하수에 대한 관리 및 보전이 중요하게 대두되고 있으며, 오염의 발생이 동일 체계에서 이루어지는 토양의 체계적 관리 또한 국토 환경 보전을 위해 필수적인 사항으로 부각되고 있다.

뉴욕 주 Love Canal에서의 유해화학물질 매립과 그로 인한 심각한 피해를 경험한 미국의 경우에는 이미 1980년에 슈퍼펀드법을 제정하여 조사주체, 조사과정, 비용부담 등 관련 규정을 정하고 오염 관리 및 정화를 지속적으로 실시하고 있다.

하지만 국내에는 지하수와 토양의 체계적 오염조사를 위한 구체적인 방법을 제시하고 있는 규정은 마련되어 있지 않아, 토양 및 지하수의 보존과 관리를 위해서는 관련 지침의 개선과 함께 가이드라인 제시 등 오염조사에 참고가 될 수 있는 자료의 제시와 관련 연구가 지속적으로 이루어질 필요가 있다.

현재 토양의 경우 ‘토양정밀조사지침’, ‘토양오염실태조사지침’ 등 토양 관리를 위한 관련 규정이 다양하나 유사한 목적의 규정임에도 오염조사와 관련하여 규정하고 있는 내용에 차이가 있으며, 오염조사방법이 구체적이지 않아 조사자의 주관에 따라 조정의 여지가 크다. 따라서 실제 조사에서는 정확한 오염 실태 파악, 오염조사를 통한 정화 방법 결정, 정화의 검증 등에 어려움을 겪고 있다.

지하수의 경우에도 ‘지하수 업무수행 지침’에서 지하수 이용 관련 현황 조사 방법을 구체적으로 다루고는 있으나, 오염조사와 관련해서는 구체적인 내용을 다루고 있지 않다.

오염 조사 결과는 오염물질 및 오염원의 특성이나 시료채취 방법, 시료채취 위치 등 조사 방법에 따라 차이가 클 수 있으며, 잘못된 결과에 따라 정화나 오염 확산 방지 시설의 규모 등의 의사 결정이 내려진다면 엄청난 비용의 낭비를 초래하거나, 환경오염에 따른 피해를 볼 수 있다.

본 연구의 주목적은 토양과 지하수의 오염 정도를 객관적이고 체계적으로 조사할 수 있는 오염조사지침의 개발이다. 이를 위해 현재 법적으로 관리되고 있거나 특정 기관에서 유사한 목

적으로 정하고 있는 국내 오염 조사 방법을 비교 검토하여 보완이 필요한 사항을 도출하였으며, 오염조사 관련 국외 현황을 조사하여 필요한 사항을 보완하였다.

연구의 효율성을 위해 행정적, 법적인 사항에 대해서는 현재의 국내 조사 관련 규정의 비교 검토로 국한하였으며, 시료채취 방법, 시료채취 밀도 등 오염 현황의 객관적인 파악을 위한 정확하고 과학적인 오염조사방법을 주 연구범위로 하였다.

본 연구에서 적용 가능성을 연구하고 제안한 내용은 크게 3가지로 나눌 수 있는데 첫째는 통계적 오염조사기법을 적용한 토양에서의 시료개수 선정 및 조사에 필요한 사항, 둘째는 지하수오염조사의 절차 및 세부 조사 내용, 셋째는 오염 조사와 관련하여 함께 고려해야 할 환경보호(2차 오염 예방) 및 보건관리에 관한 내용이다.

## 제2절 연구의 범위 및 세부내용

- 국내·외 토양 및 지하수 오염조사 현황 조사
  - 국내 현황 조사를 통한 개선 사항 도출
  - 체계적이고 정확한 오염조사를 위한 통계적 오염조사 기법 등 국외 방법 조사
- 토양 및 지하수 오염조사 지침 개발
  - 선진화된 오염조사 방법 도입을 통한 지침 보완
  - 오염조사절차의 제시
- 오염부지 조사 시 환경보호 및 보건관리에 관한 지침 개발

### 2.1 세부내용

- 『제 2 장 제1절 토양 지하수 조사개요』에서는 국내 토양 및 지하수관리체계 및 오염현황, 그리고 토양 및 지하수의 오염특성에 대해 살펴보았다.
- 『제 2 장 제2절 국내 토양 오염조사 현황』에서는 관련 규정 검토를 통해 국내 토양 오염조사 현황을 살펴보았다. 관련 규정으로는 토양정밀조사지침(환경부), 토양환경평가지침(환경부), 군 환경오염조사 표준수행절차(국방부) 등을 검토하였고 조사체계, 시료채취 방법 등 조사 내용을 구분하여 살펴보았다.
- 『제 2 장 제3절 국내 지하수 오염조사 현황』에서는 지하수 오염조사 관련 국내 규정을 검토 하였다. 관련 규정으로는 지하수법, 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙(환경부), 지하수 오염평가보고서 작성에 관한 규정, KS 규격 등을 검토 하였으며 시료채취 방법 등 조사 내용을 구분하여 살펴보았다.

- 『제 2 장 제4절 국외 토양 오염조사 현황』에서는 미국, 일본, 캐나다, 호주, 영국, 독일, 네덜란드의 관련 규정 및 조사체계에 대해 살펴보았다. 호주의 경우 오염부지 감독관 체계에 대해, 영국의 경우 실제 사례 조사를 통한 시료개수 선정 및 조사체계에 대해 구체적으로 살펴보았다.
- 『제 2 장 제5절 국외 지하수 오염조사 현황』에서는 UNESCO의 지하수 오염조사 방법에 관해 구체적으로 검토하였으며 미국, 유럽, 일본 등 선진국의 지하수 관리 및 오염조사 현황에 대해 검토하였다.
- 『제 3 장 제1절 통계적 기법을 이용한 토양조사』에서는 통계적 기법을 도입한 시료개수 산정 절차를 제시하였다. 또한 미국에서 의사결정에 필요한 신뢰성 있는 데이터 획득을 위한 계획 방법으로 사용되는 DQO 절차와 시료채취 설계에 통계적 방법을 적용하는 VSP 등의 시료채취설계 소프트웨어를 소개하였다. 통계적 기법의 적용 가능성 검토를 위해서는 토양오염 조사 사례인 2005년 캠프 지역 반환/공여지 환경오염조사 사례를 적용하여 기존 토양정밀조사 지침을 사용했을 경우와 비교 검토하였다.
- 『제 3장 제2절 오염 지하수 조사 방법』에서는 연구된 국내 및 국외의 지하수 오염조사 현황을 바탕으로 지하수 오염조사에 필요한 오염조사 절차 및 방법에 관하여 검토하였으며, 본 장의 내용을 토대로 부록 2의 ‘지하수 오염조사 가이드라인’을 제시하였다.
- 『제 3장 제3절 토양정밀조사지침 개정안 방향』에서는 부록으로 제시된 토양정밀조사지침(안)에 대해 기존지침과 비교하여 달라진 내용과 배경에 대해 설명하였다. 격자 간 대상 지역의 통합, 조사대상 오염지역, 배경농도 조사 등 추가된 내용에 대해 개정방향을 검토하였다.
- 『제 3장 제4절 지하수 오염조사 가이드라인(안) 내용 설정 방향』에서는 부록으로 제시된 지하수 오염조사 가이드라인(안)의 내용과 제시 배경에 대해 설명하였다.
- 『제 3장 제5절 토양·지하수 오염조사관련 환경보호 및 보건관리 현황』에서는 토양 및 지하수의 환경보호 및 보건관리에 대한 문제점을 살펴보고 관련 규정을 검토하였다.
- 『부록 1,2,3』에는 연구 내용을 바탕으로 작성한 ‘토양정밀조사지침(안)’, 지하수 오염조사 가이드라인(안), 토양·지하수 오염조사관련 환경보호 및 보건관리지침(안)을 제시하였다.



## 제 2장 국내• 외 기술개발 현황



## 제 2 장 국내·외 기술개발 현황

본 장에서는 토양·지하수 오염조사 방법에 대한 연구를 위해 토양 지하수에 대한 개괄적인 현황과 오염 특성, 관리 체계 등을 살펴보았다. 그 중에서도 오염조사와 관련이 있는 부분을 주로 다루고자 하였으며, 관리 현황 및 수치 자료의 경우 토양 및 지하수의 오염 관리를 담당하고 있는 환경부의 '환경백서(2009)'를 주로 인용하였다.

### 제1절 토양·지하수 조사 개요

#### 1. 토양·지하수 현황

##### 1.1 토양 현황

토양은 암석의 풍화산물인 무기물과 동식물의 유체, 생물체를 포함하는 고상, 토양수인 액상, 토양공기인 기상의 3상으로 구성되어 있으며, 홍수예방, 수원함양, 수질정화, 토사붕괴 방지, 침식억제, 지반침하 방지, 오염물질 정화, 토양생물상 보호, 식생보호 등의 환경적 기능을 수행한다.

우리나라의 경우 전국의 토지를 지적법에 의해 토지·용도별로 구분하여 설정하고 있는데 토양환경보전법의 오염조사를 위한 구분으로는 토양 오염기준 적용지역을 토지의 사용용도를 감안하여 비교적 오염이 적은 전, 답, 과수원, 어린이 놀이시설 등의 1지역과 임야, 염전, 창고용지, 잡종지 등인 2지역, 그리고 비교적 오염이 심한 공장용지, 주차장, 주유소용지, 도로, 철도, 국방, 군사시설부지 등인 3지역 등 3개 지역(1·2·3지역)으로 나누어 관리하고 있다. (2009년 6월 토양환경보전법 시행규칙)

##### 1.2 지하수 현황

우리나라는 현재 용수공급을 주로 지표수에 의존하고 있으며 지하수는 비상시의 대체용수 및 물이 부족할 경우 사용하는 대안으로 인식되고 있다. 하지만 지표수의 오염, 물소비량의 증가 등으로 지하수의 이용량은 점차 증가하고 있는 추세이다. 2007년 말 현재 우리나라의 연간 지하수 개발 가능량은 117억  $m^3$ /년이며 이중 총 이용량은 32 % (37억  $m^3$ /년, 지하염수 제외)에 머물러 장래 수원으로서의 가치가 매우 높음을 알 수 있다.

지하수는 지표수에 비해 수량과 수질변화가 크지 않은 안정적인 수자원이다. 지하수는 대부분 비나 눈에 의해 생성된 물이 땅 속으로 흘러들어 가면서 더러운 물질이 지층 내에서 자연 여과되는 과정을 거쳐 형성되므로 지표수에 비해 수질이 좋아 먹는 물이나 다른 용도로 이용함에 있어 훨씬 저렴한 비용이 소요된다. 이렇게 지속적으로 보충되고 재생 가능한 지하수를 오염시키지 않으면서 적정 수량을 개발하고 이용하는 것은 중요한 일이다.

지하수는 보충되고 재생 가능하지만 한번 오염되면 원래의 상태로 회복시키는데 상당한 시간과 비용이 소요되므로 관리의 필요성이 큰 자원이다. 2007년 말 현재 지하수 개발·이용시설은 1,332천개에 달하여 관리의 필요성이 증대되고 있다.

## 2. 국내 토양·지하수 관리체계 및 오염 현황

### 2.1 토양 관리 현황

#### 2.1.1 토양오염 기초조사

현재 우리나라의 토양은 환경부 소관의 「토양환경보전법」에 주로 근거하여 관리되고 있다. 「토양환경보전법」에서는 카드뮴, 구리, 비소, 유류 등 토양오염의 원인이 되는 21개 물질을 규제대상 토양오염물질로 규정하고 토양오염우려기준과 대책기준을 정하고 있다. 여기서 토양오염우려기준이란 각각의 물질에 대하여 사람의 건강 및 재산, 동·식물의 생육에 지장을 초래할 우려가 있는 정도의 토양 오염도를 말하며, 토양오염대책기준이란 우려기준을 초과하여 사람의 건강 및 재산, 동·식물의 생육에 지장을 주어 토양오염에 대한 대책을 필요로 하는 정도의 토양 오염도를 의미한다.

최근 2009년 6월에 토양환경보전법 개정에 따라 토양오염 우려기준 중 유류를 벤젠·톨루엔·에틸벤젠·크실렌(BTEX)의 합으로 정한 기준을 각각 물질별 기준으로 조정하여, 발암물질인 벤젠은 강화하는 등 유해성에 따른 기준을 적용하였다. 한편 카드뮴·6가크롬 등 중금속류의 분석방법을 용출방법에서 함량방법으로 변경하여 잠재 위험성에 대한 관리를 강화하였으며 토양오염검사주기의 세부 시행기준을 마련하는 한편, 검사완화에 따라 토양오염검사 시료채취 지점을 3개소에서 4개소로 확대하는 내용으로 개정되었다.

전 국토의 토양오염상황 및 오염 변화추이 파악을 위해서 전국 토양에 대한 오염도를 상시 측정하고 있는데 전국 토양오염조사는 환경부장관이 설치·운영하는 측정망과 시·도지사(시장·군수·구청장)가 실시하는 토양오염실태조사의 두 가지 경로를 통해 이루어진다.

#### 2.1.2 토양오염측정망 운영

환경부장관은 전국을 일정 단위로 구획하고 토양을 용도별로 나누어 측정망(1,521개)을 설치하여 농경지는 3~4월에, 기타지역은 5~6월에 시료 채취한 후 중금속(Cd 등 8개 항목), 일반항목(PCB 등 12개 항목) 및 토양산도(pH) 등 총 21개 항목에 대하여 매년 오염도를 측정하여 전국 토양에 대한 오염추세를 파악하고 있다.

### 2.1.3 토양오염실태조사

시장·군수·구청장은 공장지역, 광산 주변지역, 폐기물매립지 주변 등 토양오염이 우려되는 지역을 대상으로 매년 토양오염실태조사(2,000지점 이상)를 하고 있다. 토양오염실태조사는 오염지역을 적극 발굴하여 정화하기 위한 것으로 매년 조사지점을 달리하는데 이러한 점에서 고정 측정망과 차이가 있다.

토양오염실태조사결과 토양오염우려기준을 초과하는 지역에 대해서는 토양정밀조사를 실시하고 오염원인자에게 오염토양의 정화를 실시하도록 하고 있다.

최근 2009년 6월에 토양환경보전법 개정에 따라 국가유발 또는 시급한 정화가 필요한 오염부지에 대해 국가가 정밀조사 및 정화를 추진할 수 있도록 하고 국가에 의한 오염토양 등의 조사 및 정화 추진을 위한 “토양오염관리단” 설립, 국가(환경부)의 토양오염 정밀조사 및 오염토양 정화 등을 담당하도록 추진하였다.

## 2.2 토양 오염원 현황

### 2.2.1 특정토양오염 관리대상 시설

#### 1) 시설 현황

「토양환경보전법 시행규칙」 제1조의3 별표2에서 특정토양오염 관리대상 시설로 규정하고 있는 시설은 「위험물안전관리법」에 의한 2만 리터 이상 석유류 제조 및 저장시설, 「유해화학물질관리법」에 의한 유독물 제조 및 저장시설, 송유관안전관리법에 의한 송유관 시설, 기타 환경부장관이 고시한 시설 등이다.

#### 2) 토양오염검사

특정토양오염 관리대상 시설을 설치한 자는 정기적으로 토양관련전문기관으로부터 토양오염검사를 받아야 한다. 토양오염검사는 토양 중의 시료를 직접 채취하여 오염물질 함유정도를 검사하는 토양오염도검사와 저장시설의 누출여부를 검사하는 누출검사로 구분하여 실시하고 있다.

토양오염도 검사는 저장시설의 설치 년 수, 시설이 위치한 지역 등에 따라 1년~5년 주기로 실시하도록 되어 있다.

토양오염도검사 결과 토양오염우려기준을 초과한 경우에는 의무적으로 누출검사를 실시하여야 하고, 토양오염우려기준을 초과한 경우에는 시장·군수·구청장의 시정명령 등에 따라 시설의 개선이나 정밀조사의 실시 및 오염토양을 정화하여야 한다.

최근 2009년 6월에 토양환경보전법 개정에 따라 토양오염방지시설이 설치된 특정토양오염 관리대상 시설의 토양오염도 검사주기를 현행 3년 이내에서 5년 이내에 실시하도록 조정하

고 시장·군수·구청장은 토양오염을 조사하여 오염우려기준을 넘는 토양에 대하여는 토지 소유자 등에 오염정밀조사를 명하는 데, 이 정밀조사 이행 기간을 현행 1년 이내에서 6개월 이내로 조정(미 이행 시 6개월 추가)하도록 하였다. 또한 토양환경보전법 시행령·시행규칙 개정으로 토양오염도검사 주기 등이 변경됨에 2010년 1월 1일 부터는 누출검사와 토양오염도검사가 겹치는 해에도 토양오염도 검사를 받아야 하며 다만 개정된 시행령 제8조제1항에 따라 토양오염도 검사를 다음 해에 받을 수 있도록 하였다.

## 2.2.2 폐금속광산

### 1) 현황

우리나라 광산은 석탄광산, 금속광산, 기타 석회석광산 등으로 구분되며, 이중 금속광산의 광석에 포함되어 있는 중금속성분과 채련과정에서 사용되는 시안(CN)등 화학약품, 갱구에서 유출되는 갱내수 등이 주요 토양오염원이라 할 수 있다.

금속광산은 2007년 말 현재 936개소가 있으며, 모두 휴·폐광상태로 대부분 1940년대 이전에 개발되었으나 경제성 저하 등의 이유로 방치되어 있는 상태이다.

### 2) 정밀조사 및 토양오염방지사업

1970년도 이전에 폐광된 금속광산지역의 광물찌꺼기, 갱내수, 폐석 등으로 인한 주변 농경지, 하천 오염이 환경문제로 대두됨에 따라 1992년도부터 폐금속광산 주변지역 토양에 대한 개황조사와 정밀조사를 실시하고 오염이 확인된 지역은 토양오염방지사업을 실시하여 오고 있다.

2008년까지 419개소에 대한 토양오염실태 정밀조사결과 305개 광산(73%)이 토양오염우려기준을 초과하였고 이중 169개소에 대한 토양오염방지사업을 완료하였거나 추진 중에 있다.

2005년 「광산피해의 방지 및 복구에 관한 법률」이 제정되었으며 동 법률에 근거하여 2006년 6월에 ‘광해방지사업단’이 발족('07.6.1, ‘한국광해관리공단’ 명칭 변경) 함으로써 폐광산에 대한 광해방지사업을 본격적으로 수행하게 되었다.

또한 광해방지사업 완료 후에도 오염물질이 유출되는 등 지속적인 사후관리의 필요성이 제기됨에 따라 2005년 7월에 「광해방지사업이 완료된 사업장 주변 환경오염영향조사 지침」을 마련하여 광해방지사업이 종료된 후에도 5년간 시설물 관리실태, 토양, 수질 오염도 현황, 광미 등 오염물질 유실 여부 등에 대한 사후환경영향조사를 실시하고 있다.

## 2.2.3 기타 토양오염유발시설

시·도에서는 「체육시설의 설치·이용에 관한 법률」(문화체육관광부 소관)의 규정에 따라 전

국 골프장에 대하여 농약사용량 및 잔류량을 연 2회 조사하고 있으며, 환경부에서는 조사결과를 분석하여 골프장의 농약사용으로 인한 환경오염방지대책 자료로 활용하고 있다.

「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」에서는 골프장을 설치·관리하는 자는 골프장내에서 맹독성 및 고독성 농약의 사용을 금지하고 있으며, 수목의 해충·전염병 등의 방제를 위하여 관할행정기관의 장이 불가피하다고 인정하는 경우 승인을 받아 사용할 수 있도록 하고 있다.

## 2.3 지하수 관리 현황

### 2.3.1 지하수 관리체계

현재 지하수는 환경부, 국토해양부, 농림수산식품부, 행정안전부, 국방부, 교육과학기술부, 보건복지가족부 등 7개 부처가 지하수 이용 목적에 따라 11개 관련 법률에 의거 분산 관리하고 있다. 각 부처별 지하수 업무 담당 현황은 다음 표와 같다.

표 2-1 기관별 지하수 업무 담당 현황

부 처	관 장 업 무	관 련 법 률
환경부	<지하수 수질관리 총괄> · 지하수수질기준 제정 · 지하수 수질오염방지 · 먹는샘물 등 상수원용 지하수 관리	· 지하수법(환경부령) · 먹는물 관리법 · 수도법
국 토 해양부	<지하수 수량관리 총괄> · 지하수 관리기본계획 수립 · 지하수 기초조사 · 지하수 개발·이용 관리	· 지하수법 · 제주국제자유도시특별법 · 하천법
농림수산식품부	· 농업용 지하수 개발	· 농어촌발전특별조치법
행 정 안전부	· 온천 개발 · 민방위 비상급수시설 관리	· 온천법 · 민방위기본법
국방부	· 군사목적의 지하수시설 관리	· 국방군사시설 사업에 관한 법률
교육과학기술부	· 학교음용수 수질관리	· 학교보건법
보건복지가족부	· 식품관련 용수 수질관리	· 식품위생법

※ 출처 : 환경백서 2009(환경부)

### 2.3.2 지하수 수질측정망 설치 및 운영

전국적인 지하수의 수질 현황과 변화 추세를 정기적으로 파악하여 지하수 수질보전 정책수립을 위한 기초 자료를 확보하고자 「지하수법」 제18조(수질오염의 측정) 및 「지하수의 수질보전 등에 관한 규칙」 제9조(수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정계획의 수립·고시)에 근거하여 지하수 수질측정망을 설치·운영하고 있다. ‘지하수수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획(2009.8월 고시, 환경부)’에 따른 운영기관별 임무는 다음과 같다.

표 2-2 기관별 임무

기 관	업 무
환경부	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지하수수질측정망 설치· 측정 업무 총괄</li> <li>· 지하수수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획 수립(3월)</li> <li>· 지하수 수질측정 관리</li> </ul>
국립환경과학원	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지하수수질측정망 자료 검증 및 통계 분석</li> <li>· 지하수수질측정망 연보 발행</li> <li>· 지하수 수질측정 정도관리 및 교육</li> <li>· 지하수 수질측정· 분석기법의 개발 및 표준화</li> <li>· 수질오염공정시험기준 제· 개정</li> </ul>
유역(지방)환경청	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지역지하수수질측정망(오염우려지역) 운영</li> <li>· 수질측정결과 분석 및 보고</li> </ul>
한국환경공단	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지하수수질전용측정망 운영</li> <li>· 지하수수질전용측정망 수질측정결과에 대한 분석· 평가 및 보고</li> <li>· 타 기관 관측망 자료 취합· 관리</li> <li>· 지하수 수질자료 정보화 및 DB 관리</li> </ul>
타 기관 관측망 운영기관 (한국수자원공사 등)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지하수 수질측정결과 통보</li> </ul>
지방자치단체	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지역지하수수질측정망 운영</li> <li>· 수질측정결과 분석 및 통보</li> <li>· 지역지하수수질측정망 지점 관리</li> </ul>

2009년 지하수수질측정망은 총 2,380개소로 크게 국가지하수수질측정망과 지역지하수수질측정망으로 구분된다. 국가지하수수질측정망은 지하수수질전용측정망과 타 기관 관측망으로 구분되는데 지하수수질전용측정망은 배경수질전용측정망과 오염감시전용측정망으로 구분되며, 타 기관 관측망으로는 국가지하수 관측망, 해수침투조사 관측망, 먹는 샘물 관측망이 있다. 지역지하수수질측정망은 오염우려지역과 일반지역으로 나뉘어 관리되고 있다.

관측망 조사항목은 관측망 구분에 따라 달라지는데 지하수수질전용측정망의 경우 기본항목, 건강유해항목, 기타항목 등 62개 항목에 대해 연4회 측정· 분석을 실시하며 지역지하수수질측정망은 지하수 생활용수 20개 항목에 대해 연2회 측정· 분석을 실시한다.

타 기관 관측망으로 분류되는 국가지하수관측망은 전국의 주요지점에 지하수관측소를 설치하여 정기적이고 지속적으로 지하수관측을 실시함으로써 우리나라의 광역적인 지하수 수위· 수질 변동실태를 파악· 분석하기 위한 목적으로 설치하는데 현재는 국가지하수 관측망을 보완하는 보조지하수 관측망을 지속적으로 확대 설치하고 있다.

### 2.3.3 지하수 수질현황(수질측정망 운영결과)

2008년도 지하수 수질 측정망 운영 결과 총 조사시료 4,827개(2,499개 측정지점)중 6.9%인 335개가 수질기준을 초과하였다.

항목별로는 일반세균 33.4%, 질산성질소 26%, 트리클로로에틸렌 9.6%, 염소이온 11.6% 순으로 수질기준을 초과하였다. 암반지하수에서 나타나는 일반세균의 초과는 지하수 관정의 부실관리로 인한 지표수 또는 천층 지하수의 유입이 주원인이며, 질산성 질소는 생활오수와 폐기물 침출수, 과다 시비된 비료 등의 지하침투가 주된 기준초과의 원인이다. 2008년도는 2007년 초과율(5.4%)보다 초과율(6.9%)이 높아졌으며 지난 4년간의 증가추세를 볼 때 보다 강화된 수질관리가 요구되는 것으로 나타났다.

표 2-3 연도별 수질기준 초과율

연 도	2000년	2001년	2002년	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년
조사시료(A)	3,890	3,861	3,882	3,934	3,865	4,760	4,740	4,828	4,827
기준초과(B)	184	189	143	142	212	230	299	260	335
초과율(B/A)	4.7%	4.9%	3.7%	3.6%	5.4%	4.8%	6.3%	5.4%	6.9%

※ 출처 : 환경백서 2009(환경부)

### 2.3.4 지하수 수질기준 및 수질검사

지하수 수질기준은 지하수를 이용하기 위한 목적 이외에도 지하수의 오염을 방지하기 위한 목적에 적합하도록 지하수를 관리하기 위하여 설정되어 있다.

지하수의 수질기준은 이용목적별로 구분되어 있는데 지하수를 음용수로 사용하는 경우에는 먹는물 수질기준을 준수하며, 생활용수, 농업용수·어업용수, 공업용수로 사용할 경우에는 '지하수의 수질보전 등에 관한 규칙'의 용도별 기준을 준수한다.

지하수의 개발·이용을 허가받거나 신고한 자는 「지하수의 수질보전 등에 관한 규칙」에 규정된 지하수 수질기준에 적합한지 여부를 판정하기 위해 지하수관련 수질검사를 받아야 하는데 지하수 수질기준을 초과할 경우 지하수 개발·이용시설에 오염을 방지할 수 있도록 필요한 조치를 취하여야 한다.

### 2.3.5 지하수 수질보전 종합대책

생활수준의 향상 및 산업의 발달에 따라 지하수 수질오염 위험이 증가되면서 양질의 지하수를 보전하고 오염된 지하수를 정화하기 위해 지하수 수질관리를 위한 체계적인 대책이 요구되어 2005년 1월 5일 「지하수 수질보전 종합대책」이 수립되었는데 주요 내용은 다음과

같은 지하수 수질관리를 위한 당면과제를 포함하고 있다.

첫째, 지하수 환경에 미치는 각종 오염원의 영향을 평가하기 위한 지하수 환경 및 실태 파악을 위한 연구 사업을 추진하고 오염지역의 특성을 고려하여 오염정화 우선 순위목록을 작성한다.

둘째, 음용수, 생활용수, 농·어업용수, 공업용수의 지하수 사용 용도별 지하수 수질기준을 강화하고 장기적인 개선방안을 강구한다. 또한 생활용수 수준으로만 되어있는 현재의 오염 지하수 정화기준을 합리적으로 개선한다.

셋째, 수질측정 결과의 대표성을 확보하고 지속적 모니터링을 위해 국가에서 직접 운영하는 고정 수질측정망을 설치하는 등 측정망을 확충하고 운영방식을 개선한다.

넷째, 산업단지 등 오염우려지역에 대한 정밀조사를 실시하여 오염실태를 파악하고 정화대책을 강구하는 지하수 오염원에 대한 관리 강화와 지하수 관정에 의한 오염방지 및 지하수 오염유발시설 관리 체제를 개선한다.

## 2.4 지하수 오염원 현황

### 2.4.1 지하수오염유발시설 관리

유류 또는 유해화학물질을 지하에 저장하는 시설 등으로 지하수 오염을 일으키거나 현저하게 오염시킬 우려가 있는 시설을 지하수오염유발시설로 정하고 시설의 설치자나 관리자에게 오염물질의 누출여부를 확인할 수 있는 지하수 관측정을 설치하게 하여 지하수 오염여부를 지속적으로 관측하고 필요시 대책을 강구토록 하고 있다.

또한 지하수 수질조사 결과, 특정유해물질이 검출되거나 일반오염물질이 높게 검출된 지점은 주변 시설물에 대한 조사를 실시하고, 지하수오염유발시설에서 오염의 원인이 되는 물질이 검출되면 더 이상 배출·유출 또는 누출되지 않도록 개선 조치하도록 하고 있다. 특히 시장·군수가 필요하다고 인정하면 폐쇄 또는 철거조치를 명하도록 규정하고 있다.

### 2.4.2 지하수오염방지시설 등

지하수 오염의 경우 유입된 오염물질이 멀리 이동하고 지하 대수층 내에서 장기간 잔존하여 지표수에 비해 희석 또는 자정이 어려운 특성이 있으므로 무엇보다 일차적으로 오염이 되지 않도록 예방에 최선의 노력을 기울여야 한다. 「지하수법」에서는 취수정으로부터 오염물질 유입방지 및 부대시설의 보호를 위해 지표상부에 상부 보호공을 설치하고 지표하부에는 보호벽(케이싱)을 암반선 이하까지 설치하여야 하며, 토지굴착 후 토지와 보호벽 사이의 공간에는 차수용 재료를 주입하여 그라우팅을 실시하도록 하고 있다.

지하수의 개발·이용시설의 사용이 종료되거나 폐쇄될 경우에는 지표로부터 오염물질이 직

접 지하수층으로 유입될 소지가 있으므로 이들 폐공의 관리를 보다 철저히 할 필요가 있다. 이를 위해 2002년 7월에 정부에서는 폐공관리지침을 마련하여 사용 종료된 지하수관정 및 폐공에 대한 원상복구를 이행하도록 하고 있다.

2001년부터 실시한 폐공찾기운동 결과 2001년 839공 발굴을 시작으로 2007년 말 현재까지 20,742공을 발굴하고 19,203공을 복구 처리하였다.

### 3. 토양·지하수 오염 특성

#### 3.1 토양 오염의 특성

토양오염은 다른 환경오염과 달리 쉽게 눈에 보이지 않아 토양오염이 상당히 진전될 때까지는 인식하기 어렵고 피해를 입은 후에야 토양오염사실을 알게 되므로 피해를 면하기가 어렵다. 또한 토양오염은 주로 토양에 서식하는 생물체나 지하수를 사람이 먹거나 이용함으로써 피해가 발생하므로 오염행위와 피해 발생 간에 상당한 시차가 발생하게 되며 그 피해도 장기간에 걸쳐 나타나게 된다. 토양은 한번 오염되면 개선이 어렵고 개선에도 많은 시간과 비용을 필요로 한다.

유류에 의한 토양·지하수 오염은 이들 물질을 저장·보관하는 시설이 노후 되어 마모로 인한 누출과 유류 충전 시 부주의로 인한 쏟아짐 등에 의해 주로 발생되며, 이들 시설이 지하에 매설된 경우 지하배관의 이격에 의한 누출로도 발생된다.

#### 3.2 지하수 오염의 특성

우리나라 지하수법 제2조에 의하면 ‘지하수라 함은 지하의 지층이나 암석사이의 빈틈을 채우고 있거나 흐르는 물을 말한다.’로 지하수를 정의하고 있다. 지하수는 지표하부의 지층 중에 있는 고체 기질 사이의 빈틈을 포화상태로 채우고 있는 물을 말하는데 토양에 존재할 수도 있고 토양층보다 아래쪽의 암반에만 지하수가 존재할 수도 있다.

전통적으로 ‘지하수면 아래에 있는 물’을 지하수로 보고 있지만 최근에는 지표상의 오염물질의 유입, 토양 및 지하수 생태계, 지하수 오염과 정화 등과 관련하여 불포화대가 중요한 기능과 역할을 가지므로 함께 고려할 필요성이 대두되고 있다.

지하수 오염이란 사업 활동이나 인간 활동에 의해 지하 환경내로 유입된 오염물질이 인간의 건강이나 주변 환경에 피해를 미치는 경우를 뜻하며, 지하수 오염물질은 지하수 오염의 원인이 되는 유해물질을 의미한다.

자연 상태에서 지하수는 연간 1~5m 정도로 매우 느리게 이동하기 때문에 지하저수지 역할을 하는 대수층이 한 번 오염되면 오염물질은 대수층 내에서 반영구적으로 잔존하여 후세

에 가장 심각하고 지속적인 환경오염을 물려주게 된다.

다음 그림은 지표면 부근에서 누출된 유해물질로 인하여 지하수가 오염되는 경로를 보여주고 있다.

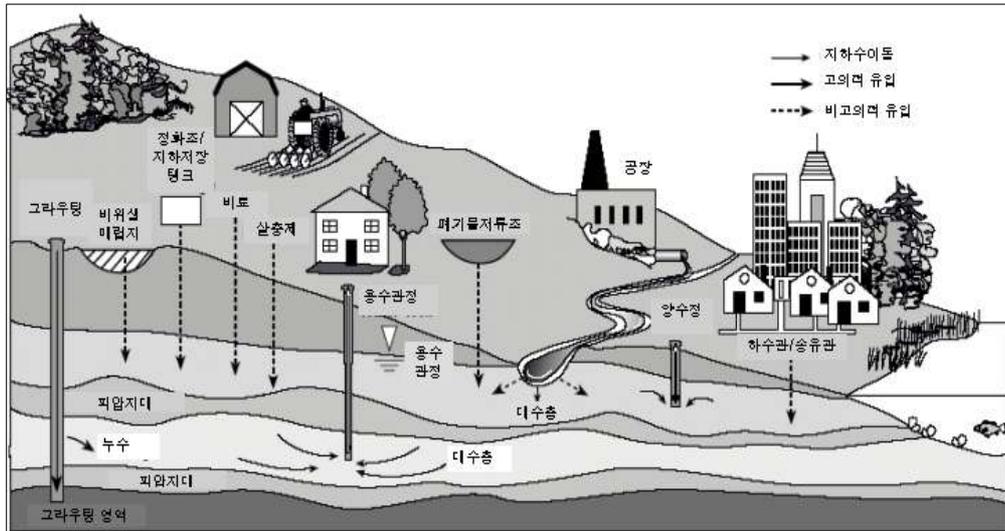


그림 2-1 지하수의 오염 경로(환경부, 2008)

※ 출처 : 환경백서 2009(환경부)

지하수의 거동은 지하 기질 내 공극의 포화여부에 따라 차이를 보이는데 불포화대에서는 중력의 영향이 상대적으로 커서 수직적 흐름이 수평적 흐름보다 우세하며, 포화도와 함수비에 따라 물의 투수성이 달라진다. 포화대에서는 지하수가 받는 압력이 물의 흐름에 주요하게 작용하며, 수평방향으로의 흐름이 우세하다. 따라서 지하에 관정을 굴착하면 포화대의 지하수만 관정으로 흘러들어가며 불포화대에서는 물이 지하기질의 장력에 잡혀 관정으로 흘러들어가지 않는다. 즉 포화대에 있는 물만이 양수정이나 우물을 통해 대량으로 뽑아 올릴 수 있는 물이다.

불포화 토양에 물에 섞이지 않은 비수용성 액체(Non-Aqueous Phase Liquids : NAPLs)가 누출되면 물과 NAPL, 물과 토양공기, NAPL과 토양공기간의 3개의 서로 다른 성질의 경계면이 형성되고 그 각각에 작용하는 표면장력이 달라지게 된다.

지하수는 흐름을 눈으로 관찰할 수 없기 때문에 대부분의 경우 오염원의 흐름방향을 명확하게 확인하기 어렵다.

지하수는 지질구성성분에 의해 유속의 영향을 받게 되는데 석회암지역의 지하수는 시간당 수 미터의 빠른 속도로 이동하는 반면 대부분의 지역에서는 연간 수 미터의 느린 속도로 이

동한다. 따라서 관측정이 오염원으로부터 원거리에 위치한 경우 오염원의 발견에 수년이 소요될 수도 있다.

### 3.3 토양·지하수 오염의 상호 영향

토양오염에 의해 야기된 지하수 오염은 일단 한번 오염되면 원상복구에 시간과 비용이 많이 소요되며, 오염물질을 제거하지 않는 경우 지속적으로 오염원으로 작용하게 된다.

토양오염물질은 물에 녹아 이동하거나 유류나 유기용매와 같이 물과 섞이지 않고 별도의 층을 형성하면서 서서히 물에 녹아 나오며 지하수를 오염시킨다. 비수용성유체(NAPL) 중 트리클로로에틸렌 등 물보다 무거운 DNAPL은 불투수층에 도달할 때까지 지하수층 아래로 침강하여 바닥에 깔려 오염 복원에 더 많은 어려움이 있다.

### 3.4 오염물질의 특성

#### 3.4.1 유기염소계화합물

유기염소계화합물은 테트라클로로에틸렌(PCE), 트리클로로에틸렌(TCE)은 안전하고 우수한 세정제로 기계부품의 세정과 드라이클리닝 등 광범위한 분야에서 사용되고 있다. 이들 물질은 물보다 비중이 크고 점성도가 적어 세제로서 이상적인 성질을 가지고 있지만 이러한 물리적 성질로 인해 땅속에서 깊고 넓게 오염되어 있다.

#### 3.4.2 중금속

중금속은 이들을 생산하는 금속광산 및 제련소 주변 농경지, 산업폐수, 도시 지역에서의 지표 유출수, 비료, 화석 연료 등에서 기인하며 Ba, Cd, Hg, Pb, As 등이 있다. 중금속은 아니지만 이와 유사한 성질을 가지고 있는 비소의 오염은 철, 금, 은, 구리를 채광하는 광산지역과 비소관련 제품 생산 공장의 배수가 유입된 하천수를 관개용수로 사용한 농경지 등에서 발견되고 있다.

#### 3.4.3 유류

원유의 분해증류 과정에서 얻어지는 석유류는 종류별로 수백 종의 탄화수소 화합물로 이루어져 있다. 이 중 가솔린의 경우 방향족 화합물인 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene)와 옥탄가 향상을 위해 첨가되는 산화제인 MTBE(Methyl Tertiary Butyl Ether) 등 인체에 유해한 물질이 다량 함유되어 있다. 또한 등유나 경유, 윤활유 속에는 다환고리 방향족 탄화수소(PAHs) 물질이 다량 함유되어 있다.

원유로부터 얻어지는 석유제품은 여러 가지 분획으로 이루어져 있는데 비점이 30~100°C 범위의 가벼운 가솔린, 비점이 100~200°C 범위인 비교적 무거운 가솔린, 비점이 200~300°C 범위인 디젤 및 등유로 구분되며 이들 물질은 대부분 비극성 유기물질이다.

#### 3.4.4 영양염류

질소와 인을 포함하는 이온이나 유기화합물로 질산성질소 등이 있으며 밭이나 골프장에서 비료 사용, 축산폐수, 공장배수, 생활하수, 정화조, 하수처리장 누수 등에서 기인한다.

#### 3.4.5 무기물질(Inorganic Species)

$\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  등은 지하수의 염도를 증가시킨다. 이러한 무기물 성분의 증가는 지하수를 생활용수 및 공업용수로 사용하는데 부적합하게 만들 수 있다.

#### 3.4.6 유기 오염물질(Organic contaminants)

석유 기원의 유기탄소화합물, 폐기물 매립장에서 발생하는 유기물질 등이 이에 속한다. 방향족탄화수소, 가솔린 첨가제, 다른 특정 원소와 결합한 형태의 HCs 등 탄화수소의 종류도 대단히 많으며 기원 또한 다양하다.

#### 3.4.7 미생물(Microbial contaminants)

중요한 미생물 오염원으로는 병원성 박테리아, 바이러스, 기생균류 등이 있다. 미생물의 공급원으로는 인간 및 동물과 관련된 오폐수가 가장 큰 역할을 한다. 하수처리장 혹은 정화조로부터의 하수 누출, 쓰레기 매립장의 침출수, 농업활동시의 부적절한 폐기물의 야적 및 방치 등에 의해 미생물에 의한 지하수 오염현상이 발생한다.

#### 3.4.8 방사성 오염물질

방사성 핵종을 다루는 산업, 핵발전소 등과 관계가 있다. 일반적인 방사성 오염물질은 우라늄, 스트론튬, 라돈 등이다.

#### 3.4.9 기타

폐기물 소각이나 제철·제강 산업공정에서 불완전 연소 시 생성되거나 농약에 함유된 부산물을 통해 환경 중으로 배출되는 다이옥신으로 인한 오염이 사회적 관심을 받고 있다.

(토양지하수환경, 2006 이민효 외)

### 3.5 지하수의 오염 구분

지하수의 오염원은 아래와 같은 분류로 살펴볼 수 있다.

#### 3.5.1 오염원의 점유 면적

점 오염원은 지하 유류 저장탱크에서의 기름 유출, 정화조, 위생 쓰레기 매립장 등 오염원을 확연하게 파악할 수 있는 소규모의 오염원을 말하는데 점 오염원에서 유발된 오염물질의 확산범위는 대체적으로 파악이 용이하다.

비점 오염원은 보다 넓은 지역의 범위를 점하고 작은 오염원들이 결합하여 하나의 큰 오염원을 이루므로 위치, 형태, 정확한 크기 및 오염의 확산범위 파악이 어렵다. 이 경우 지하수 내 오염물질의 농도가 지역에 따라 매우 다양하게 나타날 수 있으며 살포된 농약 및 비료, 가정에서 기인한 질산성 질소, 도로 제설제, 산성비 등이 있다. (토양지하수환경, 2006 이민효 외)

#### 3.5.2 오염유발 및 오염물질 배출에 소요되는 시간

순간 누출은 원유 수송차량의 전복이나 유류 저장탱크 파손에 의한 기름 누출과 같이 상대적으로 매우 짧은 시간에 일정한 농도의 오염물질이 오염원으로부터 누출되는 경우를 말한다. 연속 누출은 오염원으로부터 장기간에 걸쳐 오염물질이 지속적으로 누출되는 경우이다. 이 경우 오염물질의 농도가 일정할 수도, 시간에 따라 다양할 수도 있다. 산업폐기물 처분장, 공단 지역, 반응성 폐기물 야적장, 고형 폐기물 매립장 등은 농도가 다양하게 변하는 양상을 보인다. (토양지하수환경, 2006 이민효 외)

### 3.6 오염 물질의 이동 특성

오염의 확대는 오염물질의 성질과 지질 및 그 구조, 지하수의 흐름방향 및 속도 등에 따라 크게 영향을 받는다.

비중이 큰 중금속은 용해도가 낮고 지층에서의 확산속도가 완만하며, 오염이 확산되지 않고 일정 범위에 머무르는 경향이 강하다. 이와 반대로, 유기염소계화합물은 용해도와 분해성이 높아 지하수 등을 통해서 오염이 확대되는 경향이 강하다.

토양과 지하수의 오염은 오염물질에 따라 오염 메커니즘이 다르며 또한 지층, 지층의 투수성 등에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 토양·지하수의 오염조사에는 지층의 상세한 관찰이 매우 중요하다.

만약 유류와 유기염소계화합물이 지하수에 유입되면 물보다 비중이 낮은 유류는 일정부분 물에 용해되고 나머지는 지하수 위에 오염 띠를 형성하며 떠있게 되며, 트리클로로에틸렌 등 물보다 비중이 큰 유기염소계화합물은 일정 부분 물에 용해되고 나머지는 지하수면 밑으로 오염 띠를 형성한다. (토양지하수환경, 2006 이민호 외)

### 3.6.1 비수용성유체(NAPLS)의 특성

NAPL은 물에 쉽게 용해되지 않고 섞이지 않아 자연 상에서 물과 분리된 유체 상태로 존재한다. 매립장이나 지하저장시설, 송유관, 지상에서의 유류 누출 사고, 폐기물이나 폐액 처분 시설 등에서 지하로 유입될 수 있다. 지하로 유입된 NAPL은 물보다 가벼운 LNAPL(Light Non-Aqueous Phase Liquid)과 물보다 무거운 DNAPL(Dense Non-Aqueous Phase Liquid)로 나눌 수 있다. NAPL에는 가솔린, 연료유, 등유, 제트유, 자일렌, 톨루엔 등이 있으며 DNAPL에는 1,1,1-TCA, TCE, PCBs, Chlorophenols 등이 있다. (토양지하수환경, 2006 이민호 외)

지하로 유출된 NAPL은 이동하면서 이동 경로에 비이동성의 NAPL을 남기고 유동성 NAPL은 점점 작아져 이동성이 있는 NAPL은 없어진다. 이 때 이동 경로중의 비이동성 잔류 NAPL은 이동성이 없더라도 NAPL 내의 성분들이 지하수에 용해되어 지하수를 따라 계속 이동할 수 있으므로 지속적으로 지하수 오염의 원인이 된다. (토양지하수환경, 2006 이민호 외)

#### ○ NAPL 이동 및 분포 영향 요인

- NAPL의 누출량
- 누출의 표면적과 침투 면적
- 누출 후 경과시간
- NAPL의 성질(점성도, 밀도, 용해도 등)
- 기질의 특성
- 지하의 수분 이동(불포화대) 또는 지하수 이동(포화대) 조건
- 지하수면과 누출지점간의 거리 또는 불포화대 두께

### 3.6.2 지하수 관정에서의 NAPL의 이동

LNAPL은 물보다 가볍기 때문에 물로 포화된 지하수면 상부의 모세관대를 통과하기 어렵는데 LNAPL이 모세관대 위에 누적되어 상대적인 무게가 물의 부력을 이길 경우에만 모세관대를 통과할 수 있다. (토양지하수환경, 2006 이민호 외)

만약 지하수 관정을 뚫으면 관정 내부에는 모세관대가 존재하지 않으므로 관정을 통해 LNAPL이 바로 지하수면까지 도달하게 되며 관측정에서는 LNAPL의 두께가 실제 지하 환경에서 모세관대 위에 분포하고 있는 두께보다 더 두꺼운 LNAPL이 관측된다. (토양지하수 환경, 2006 이민호 외)

## 제2절 국내 토양조사 현황

국내에서의 오염 토양 관리 및 조사는 환경부 소관의 '토양환경보전법'에 주로 근거하고 있으며, 이와 관련한 세부 사항은 고시, 예규 훈령 등의 형태로 규정하고 있다.

이하에서는 아래 각 규정의 개괄적인 내용과 적용 범위를 검토하였다.

- 토양정밀조사지침
- 토양오염실태조사지침
- 토양환경평가지침
- 주한미군공여구역주변지역 환경기초조사지침
- 군환경오염조사표준수행절차
- KS규격
- 토양측정망설치계획
- 토양오염공정시험기준
- 특정토양오염관리대상시설관리지침
- 광해방지사업이 완료된 사업장주변 환경오염영향조사 지침 등

### 1. 토양오염조사 관련 규정

#### 1.1 토양환경보전법(2009.6 개정)

토양환경보전법은 토양오염으로 인한 국민건강 및 환경상의 위해를 예방하고, 토양생태계의 보전을 위하여 오염된 토양을 정화하는 등 토양을 적정하게 관리·보전함으로써 모든 국민이 건강하고 쾌적한 삶을 누릴 수 있게 함을 목적으로 하고 있다. 대부분의 토양관리 뿐 아니라 오염조사 관련 규정이 토양환경보전법을 근거로 하고 있어 토양환경 관련 핵심 법이다.

토양환경보전법은 1995년 제정 이래 여러 차례 개정이 이루어졌는데 2004년의 토양정화검증제도, 토양정화업등록제도, 위해성평가제도 도입, 2005년의 토양정화업 및 정화검증제도 도입 등을 통한 토양정화 활성화 등 지속적으로 보완·적용되고 있다.

오염조사 관련 사항으로 토양오염 기준, 토양 측정망 설치, 토양오염실태조사, 토양정밀조사, 토양환경평가, 토양오염의 신고, 특정토양오염관리대상시설, 토양오염검사, 오염토양의 정화 및 검증, 위해성평가, 오염토양개선사업 등의 내용을 담고 있다.

2009년 6월에는 개정된 토양환경보전법은 민간업체의 토양관리 참여 확대 및 관리체계 개선을 위해 토양환경평가기관, 위해성 평가기관을 분리·독립하고 정화비용 분담을 위해 업체의 자발적인 조합 설립 운영토록하며 국가의 토양정화를 위한 역할 확대하고

정화기준 합리화를 위해 국가유발 또는 시급한 정화가 필요한 오염부지에 대해 국가가 토양오염 정밀조사 및 오염토양 정화 추진하고 일정한 요건을 가진 오염부지에 대해 “위해성평가”를 적용, 건강·안전을 담보하는 범위 내에서 정화를 추진하여 사회비용 저감하고자하는 내용을 포함하고 있다.

## 1.2 토양정밀조사지침(환경부고시 제2009-181호)

“토양정밀조사”라 함은 토양오염우려기준을 넘거나 넘을 가능성이 크다고 판단되는 지역에 대하여 오염물질의 종류, 오염의 정도 및 범위 등을 환경부령이 정하는 바에 따라 조사하는 것(토양환경보전법 제2조제6호)을 말한다.

토양정밀조사는 조사대상지역의 토양의 이용현황, 토양의 종류별 분류 및 오염물질의 특성 등을 감안하여 가장 적합한 방법에 의하여 조사(토양환경보전법 시행규칙 제1조의4)하여야 하는데 이를 위하여 조사항목, 시료채취방법, 시료채취밀도 및 심도 등 정밀조사에 필요한 사항을 정한 토양정밀조사지침을 2001년 12월부터 시행하고 있다. 토양 정밀조사는 기초조사, 개황조사, 정밀조사의 3단계로 이루어져 있으며, 조사 대상지역을 그 특성에 따라 광산 활동 관련 지역, 폐기물 매립지역, 기타 지역(유류배출 가능지역, 유해화학물질 저장시설지역, 산업지역) 등 크게 3개 지역으로 구분하고 있다. 지침은 각 대상지역에 대해 시료채취밀도 및 채취방법 등을 달리하고 있는데, 오염면적 및 상황에 따라 조사자가 임의로 시료채취밀도를 조정할 수 있도록 하고 있다.

토양정밀조사는 전국적인 토양오염실태를 파악하기 위해 실시하는 측정망 토양오염도 조사 결과가 우려기준을 넘는 지역, 토양오염실태조사 결과 우려기준을 넘는 지역, 그 밖의 토양오염사고 등으로 우려기준을 넘을 가능성이 큰 지역(토양환경보전법 제5조제4항)의 경우 실시하며 토양오염물질을 생산·운반·저장·취급·가공 또는 처리하는 자가 그 과정에서 토양오염물질을 누출·유출한 경우(토양환경보전법 제11조제2항), 특정토양오염 관리대상 시설의 토양오염 검사 결과가 우려기준을 넘는 경우(제14조제1항) 실시한다.

토양정밀조사는 토양정밀조사 지침을 따르되 조사대상지역의 오염상황, 오염면적에 따라 필요한 경우 대상지역, 대상 시료의 산정 및 시료채취 밀도 등을 토양관련전문기관이 조정할 수 있다. 토양정밀조사는 토양오염조사기관이 실시한다.

## 1.3 토양오염실태조사지침(환경부 예규 제382호, 2009.8)

토양오염실태조사는 시·도지사 또는 시장·군수·구청장은 토양오염이 우려되는 관할구역 안의 지역에 대하여 토양오염의 실태를 조사하도록 되어있는데 토양오염실태조사의 대상지역 선정기준, 조사방법 및 절차 그 밖에 필요한 사항은 환경부령으로 정하도록 되어있다. (토양환경보전법 제5조 토양오염도 측정 등) 토양오염실태조사지침의 목적은 토양오염실태를 조사함에 있어 통일성 및 정확성을 기하기 위함에 있다.

#### 1.4 토양측정망 설치계획 변경(환경부 고시 제2009-40호)

토양환경보전법 제5조 및 제6조에 의하면 환경부장관은 전국적인 토양오염실태를 파악하기 위하여 측정망을 설치하고, 토양오염도를 상시 측정하여야 하며 측정망의 위치·구역 등을 명시한 측정망설치계획을 결정하여 이를 고시하고, 누구든지 그 도면을 열람할 수 있게 하도록 되어있다. 앞의 법에 의거한 토양측정망 설치계획의 내용으로는 설치목적, 법적근거, 조사지점, 조사기간, 조사항목, 시료채취방법, 측정망 설치계획 비치·열람이 있다.

#### 1.5 토양환경평가지침(환경부 고시 제2009-183호)

토양환경보전법 제10조의2(토양환경평가)에 의하면 토양오염 관리대상 시설이 설치되어 있거나 설치되어 있었던 부지를 양도·양수하거나 임대·임차하는 경우에 양도인·양수인·임대인 또는 임차인은 당해 시설이 설치된 부지 및 그 주변지역에 대하여 토양관련전문기관으로부터 토양오염에 관한 평가(토양환경평가)를 받을 수 있는데, 이에 따라 실시하는 토양환경평가에 필요한 세부 평가항목·방법 및 절차 등은 토양환경평가지침에서 규정하고 있다. 토양환경평가는 토양환경평가지침을 따르되 대상 부지의 상황에 따라 필요한 경우 평가 항목·방법 및 절차를 조정할 수 있도록 하고 있다.

#### 1.6 특정토양오염 관리대상 시설의 토양오염방지시설 및 오염토양의 정화방법 등에 관한 고시(환경부 고시 제2009-101호)

이 고시는 특정토양오염 관리대상 시설의 토양오염방지시설 설치(토양환경보전법 시행령 제7조) 및 오염토양의 정화기준 및 정화방법(토양환경보전법 시행령 제10조)과 관련하여 특정토양오염 관리대상 시설의 설치 시 필요한 방지시설의 종류 및 오염토양의 정화방법 등을 정함을 목적으로 한다.

내용으로는 특정토양오염 관리대상 시설의 설치자가 설치해야하는 토양오염방지시설, 오염토양 정화 시 고려할 사항과 그 세부내용 및 정화방법이 있다.

#### 1.7 특정토양오염 관리대상시설 관리지침(환경부예규 제360호, 2009. 8)

토양환경보전법 시행규칙 별표2에 명시된 특정토양오염관리대상시설은 석유류의 제조 및 저장시설, 유독물의 제조 및 저장시설, 송유관시설, 기타 상기 관리대상 시설과 유사한 시설로서 특별히 관리할 필요가 인정되어 환경부장관이 관계중앙행정기관의 장과 협의하여 고시하는 시설이다.

특정토양오염 관리대상시설 관리지침은 토양환경보전법 제12조(특정토양오염 관리대상 시설의 신고 등), 제14조(특정토양오염 관리대상 시설의 설치자에 대한 명령), 제15조의2(명령의

이행완료 보고) 및 동법 시행령 제6조(특정토양오염 관리대상 시설의 신고 등), 제8조의3(시정명령 등)에 의하여 시장·군수·구청장이 특정토양오염 관리대상 시설의 설치신고, 토양오염검사 및 관리대상시설 설치자에 대한 명령 등 관리대상시설 관리에 관한 업무를 처리함에 있어 필요한 사항을 규정함을 목적으로 하는 지침으로 주요 내용으로는 관리대상 시설의 신고, 토양오염검사가 있다. 토양오염검사에는 토양오염검사주기, 토양오염검사항목, 토양오염검사의 면제, 토양시료의 채취 등의 내용이 있다.

## 1.8 토양오염 위해성평가지침(환경부 예규 제383호, 2009.8)

이 지침은 토양환경보전법 제15조의5(위해성평가) 규정에 따른 토양오염 위해성 평가를 실시함에 있어 평가의 절차·내용 및 방법에 관한 구체적인 사항을 목적으로 한다. 토양환경보전법 제15조의5에 의하면 시·도지사 또는 시장·군수·구청장이 단서 규정에 의하여 토양정화를 하고자 하거나 오염토양개선사업을 하고자 하는 경우에는 오염물질의 종류 및 오염도, 주변 환경, 장래의 토지이용계획 그 밖에 필요한 사항을 고려하여 당해 토지의 오염물질이 인체와 환경에 미치는 위해의 정도를 평가하여 그 결과를 정화범위 및 정화시기 등에 반영할 수 있도록 하고 있다.

## 1.9 주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침(환경부예규 제381호, 2009.8)

주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침은 「주한미군 공여구역주변지역 등 지원 특별법」 제28조제2항 및 같은 법 시행령 제27조제4호의 규정에 따라 주한미군 공여구역주변지역의 환경기초조사를 실시함에 있어 단계별 조사범위, 절차, 항목 및 시료채취 방법 등 환경기초조사에 필요한 세부사항을 정함을 목적으로 한다.

「주한미군 공여구역주변지역 등 지원 특별법」 제28조(환경오염 및 예방대책의 추진)에 의하면 환경부장관 및 시장·군수·구청장 등은 공여구역주변지역 및 반환공여구역주변지역에 대한 환경기초조사를 정기적으로 실시하여야 하며 이를 기초로 하여 환경오염 및 예방대책을 수립·시행하도록 되어있다. 환경기초조사의 방법, 시기 등을 정하도록 되어있는 동법 시행령 제27조(환경기초조사의 방법·시기 등)의 내용은 다음과 같다.

1. 환경기초조사의 범위는 지하수 및 지표수의 수질, 대기, 토양 등에 대한 계획·조사 및 치유 대책을 포함한다.
2. 환경기초조사는 당해 기초지방자치단체장이 1단계 조사를 실시하고 환경부장관이 2단계 조사를 실시한다. 다만, 1단계 조사결과에 의하여 정상지역으로 판단될 때에는 2단계 조사를 실시하지 아니할 수 있다.
3. 제2호에 따른 1단계 조사는 매 3년마다 실시하고, 2단계 조사는 1단계 조사 판정 이후 1월내에 시행하여야 한다.
4. 환경기초조사의 1단계 조사 및 2단계 조사의 항목 등에 관하여 필요한 사항은 환경부장관이 정한다.

## 1.10 군 환경오염조사 표준수행절차(SOP, 2005.10)

군 환경오염조사 표준수행절차(Standard Operating Procedure; SOP) 지침은 환경오염 관리 계획에서 수립한 개황조사 및 정밀조사를 시행함에 있어 환경오염조사의 수행, 분석 등에 대한 기준을 마련하여 조사내용과 방법에 대한 표준화를 기함으로써 조사지역, 조사연도 및 조사수행기관의 차이로 인하여 발생할 수 있는 오차를 최소화하고 결과의 활용에 불편이 없도록 하는데 있다.

이 지침은 관련 국내법 등(토양환경보전법의 토양환경평가 및 토양정밀조사, 토양오염공정시험법의 내용과 지하수법의 지하수 업무수행지침, 지하수영향조사, 폐기물 관리법, 환경영향평가법 등)의 내용뿐 아니라 EPA 및 ASTM 등의 규정을 다소 포함하고 있으며, 크게 환경오염이 우려되는 지역의 오염실태를 조사함에 있어 필요한 환경조사수행절차, 시료채취절차, 시료 분석절차 및 관련용어 정리 등 환경오염조사에 필요한 세부사항 등으로 내용이 구성되어 있다. 타 규정에 비해 오염조사 분야를 구체적으로 다루고 있다.

## 1.11 광해방지사업이 완료된 사업장 주변 환경오염영향조사 지침(환경부 2007.2)

이 지침은 유역(지방)환경청장이 관할구역 내 휴·폐금속광산 중 광해방지 사업이 완료된 광산 주변의 환경오염의 영향을 파악함에 있어 필요한 절차, 관리주기, 조사방법, 결과보고 등에 관한 사항을 정함으로써 환경오염영향 조사에 통일을 기하고 광해방지사업이 종료된 휴·폐금속광산으로 인한 주변 환경오염피해나 지역주민의 재산 또는 건강상의 위해를 사전에 예방하기 위함을 목적으로 한다.

이 지침은 광해방지사업이 완료된 휴·폐금속광산의 주변 환경오염영향 조사에 적용하나 조사 대상 광산의 특성 및 여건에 따라 환경오염 영향조사 절차, 주기, 조사방법 등은 유역(지방)환경청장이 환경부 장관에게 보고하여 조정할 수 있다.

## 1.12 토양정화 검증방법에 관한 고시(환경부고시 제2009-67호)

이 고시는 토양환경보전법 제 15조의6제4항 및 같은 법 시행규칙 제 19조의4제1항의 규정에 의한 오염토양의 정화과정 및 정화완료에 대한 검증을 함에 있어 검증의 절차·내용 및 방법에 관한 구체적인 사항을 정하고 있다.

토양정화의 검증은 토양정화공사 착공 전에 실시하는 ‘검증계획의 수립단계’, 토양정화공사 진행 중에 실시하는 ‘과정검증단계’ 및 토양정화공사 완료시에 실시하는 ‘완료검증단계’로 구분하여 실시하도록 하고 있는데 과정검증단계 및 완료검증단계에서의 세부검증방법에 대한 내용을 간략하게 다루고 있다.

### 1.13 토양오염공정시험기준(환경부고시 제2009-255호)

환경 분야 시험·검사 등에 관한 법률 제6조에 의하면 환경부장관은 환경오염물질, 환경오염 상태, 유해성 등의 측정·분석·평가 등의 통일성 및 정확성을 기하기 위하여 「토양환경보전법」 제2조제2호의 토양오염물질을 포함하여 규정된 분야에 대한 환경오염공정시험기준을 정하여 고시하도록 하고 있다. 토양오염공정시험기준은 환경 분야 시험·검사 등에 관한 법률 제6조(환경오염공정시험기준)에 따라 토양오염물질을 측정함에 있어서 측정의 정확 및 통일을 유지하기 위하여 필요한 제반사항에 대하여 규정함을 목적으로 한다.

현재의 토양오염공정시험기준은 2010년 1월 1일 부로 시행하도록 되어있는 토양환경보전법의 개정사항을 반영하기 위해 2009년 10월 29일 개정 고시되었다.

#### ○ 제정내용

- 정도보증/정도관리 방법 신설, 토양오염기준에 추가되는 벤조(a)피렌 시험방법 신설, 누출 검사 시험방법 중 배관부 시험방법 신설

#### ○ 개정내용

- 토양오염관리대상시설 시료채취 1개 지점(탱크부) 추가(총4지점)
- 가용성 시험방법인 구리, 납, 카드뮴, 6가크롬의 시험방법을 전 함량 시험방법으로 전환 등

## 2. 지침별 세부 내용 비교 검토

본 절에서는 앞에서 조사한 토양관련 규정의 조사절차, 조사지역, 조사항목, 조사시기, 시료채취 위치, 시료채취 방법, 시료채취 장비, 시료채취 밀도, 시료채취 심도에 관해 세부적으로 비교 검토하였다. 전체 규정이 각각의 비교검토 내용을 포함하고 있는 것은 아니며 언급이 되어 있는 경우에 한해 비교 검토를 수행하였다.

### 2.1 조사절차

대부분의 오염조사는 크게 기초조사와 정밀조사의 2단계 또는 기초조사, 개황조사, 정밀조사의 3단계로 유사한 절차를 거치고 있다. 3단계 조사의 경우 기초조사는 자료조사, 현지조사, 청취조사 등의 방법을 통해 오염 가능성을 판단하는 절차이며, 개황조사는 개선대책이 필요한 지역의 오염물질, 오염면적, 오염범위를 파악하기 위한 절차이다. 마지막 정밀조사는 대상 부지에 대한 오염도를 정밀하게 조사하여 최종적으로 분석 및 평가하는 절차이다.

표 2-4 지침 별 토양조사절차

지침 항목	토양정밀 조사지침	토양오염실태 조사지침	토양환경 평가지침	주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침	군 환경 오염조사 표준수행절차	KS 지침	광해방지사업 이 완료된 사업장 주변 환경오염영향 조사 지침
조사 절차	기초조사 개황조사 정밀조사	자료조사 현지방문조사 오염현황파악 토양오염실태조사	1단계(기초조사) -자료조사 -방문조사 -청취조사 2단계(정밀조사) -조사계획수립 -조사활동평가 -조사결과해석 최종보고서작성	1단계 -개황조사 · 자료조사 · 현장조사 · 청취조사 -실태조사 2단계	오염개연성 조사 정밀조사	기초조사 확인조사 정밀조사	기초조사 개황조사 정밀조사

## 2.2 조사지역

오염 조사지역의 구분 형태를 조사한 결과 광산 활동 관련지역, 폐기물 매립지역, 사격장 등 이용 특성상 오염 발생이 가능한 지역별 구분과 유류, 중금속 등 오염물질에 따른 조사지역 구분, 토양오염관리대상시설 설치지역이나 주한미군공여구역, 도시 및 산업부지 등 특정 시설이나 토지 이용 용도에 따른 구분으로 크게 나눌 수 있었다.

표 2-5 지침 별 토양조사지역

지침 항목	토양정밀 조사지침	토양오염실태 조사지침	토양환경 평가지침	주한미군 공여구역 주변지역 환경기초 조사 지침	군 환경 오염조사 표준수행 절차	KS 지침	토양측정망 설치계획	광해방지사업 이 완료된 사업장 주변 환경오염영향 조사 지침
조사 지역	· 광산활동 관련지역 · 폐기물 매립지역 · 기타(유류 배출가능 지역, 유해 화학물질 저장시설 지역, 산 업지역)	· 공장 및 공업 지역, 폐기물 매립·소각지 역, 금속광산 지역, 사고발 생·민원유발 지역 등 · 이외 토양오 염의 가능성 이 높아 오염 실태파악 및 오염토양 복 원 등의 조치 가 필요한 지 역	토양오염 관리대상 시설이 설치되어 있거나 설치되어 있었던 부지를 양도·양 수하거나 임대·임차 하는 경우	주한미군 공여구역 주변지역 및 반환공 여구역주 변지역	· 군 환경 오염 조 사 수행 지역 -폐기물 매립지 역 -유류오 염지역 · 중금속 오염지역 · 사격장 (일반, 기총)	· 자연·준 자연 지 역, 농경 지역, 원 예 지역, 삼림 지 역 · 도시 및 산업 부 지	지적법에 의한 28개 지목 중 전, 답, 대 (埜), 공장 용지 등 국민건강 , 생활환 경과 밀접 한 15개 지목	광해방지 사 업이 완료 된 휴폐금 속광산주변

## 2.3 조사항목

토양오염 조사항목은 대부분 토양환경보전법의 토양오염대책 및 우려 기준으로 설정되어 있는 21개 항목에서 정해지며 조사 목적이나 지역에 따라 21개 전 항목 또는 그 중 일부 항목으로 정하고 있다. 과거 필요한 경우 조사 항목을 추가할 수 있음을 언급한 규정도 있으나 토양오염공정시험기준에서 정하고 있는 항목에 대해서 주로 조사가 되고 있는 실정이다. 토양오염대책 및 우려 기준으로 설정되어 있는 조사항목은 카드뮴, 구리, 비소, 수은, 납, 6가크롬, 아연, 니켈, 불소, 유기인화합물, PCB, 시안, 페놀, 유류(BTEX), 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, TPH, TCE, PCE, 벤조(a)피렌 등이며 단, 벤조(a)피렌 항목은 유독물의 제조 및 저장시설과 폐침목을 사용한 지역(예: 철도용지, 공원, 공장용지 및 하천 등)에만 적용한다. (2009년 10월 토양오염공정시험기준 개정)

## 2.4 조사시기

토양오염실태조사지침, 토양측정망 설치계획, 광해방지사업이 완료된 사업장 주변 환경오염영향조사 지침과 같이 주기적으로 오염조사를 실시하도록 하는 규정에서는 조사 시기를 언급하고 있으며, 오염 발생에 의해 시기와 상관없이 오염조사가 수행되어야 하는 경우에는 특정한 시기를 언급하고 있지 않았다.

표 2-6 지침 별 토양조사시기

지침 항목	토양오염실태조사지침 (환경부 예규)	토양측정망 설치계획	광해방지사업이 완료된 사업장 주변 환경오염영향조사 지침
조사 시기	·매년 3월~10월	·시료채취: 매년 3~4월(농경지), 5~6월(기타지역) ·시료분석: 3~12월	·시료채취: 3월이나 9월(가급적 우기는 피함)

## 2.5 시료채취 위치 선정

시료채취 위치 선정과 관련하여 규정을 종합해보면 시료채취 위치 결정을 위해서는 우선 자료조사, 현장조사 등을 통한 오염원 및 지질, 지형 등의 파악이 필요하다. 시료채취 위치는 사전 작업을 통해 파악한 수리, 지질, 지형, 풍향, 지하수 유동 등을 고려하여 오염가능성이 높고 3차원 분포를 파악할 수 있는 곳으로 정하도록 하고 있다. 각 규정은 대부분 시료채취 위치에 대해서는 구체적인 내용이 아닌 일반적인 사항을 다루고 있다.

따라서 실제 오염 조사를 수행함에 있어 조사자의 주관에 따라 시료채취 위치가 결정되어 조사자의 전문성이 결여된 경우 적합한 오염조사가 이루어 지지 않을 수 있다.

표 2-7 지침 별 토양 시료채취 위치

지침 항목	토양오염실태 조사지침	토양환경 평가지침	주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침	군 환경오염 조사 표준수행절차	KS 지침	광해방지사업이 완료된 사업장 주변환경오염영 향조사 지침
시료 채취 위치	자료조사, 현장조사 등을 통해 지형, 풍향, 지하수유동 및 상·하류 등을 고려하여 토양오염의 가능성이 가장 높을 것으로 추정되는 곳	오염이 인정된 지점, 오염 우려가 있는 지점, 수리지질 상황 등을 고려하여 대상 부지의 3차원 분포를 파악할 수 있도록 배치	·1단계 -개황조사결과 토양오염 개연성이 확인된 지역 -오염원인으로 추정되는 시설 또는 지역을 중심으로 지형구배가 낮은 하류 방향 쪽에 방사형태로 분산하여 선정 ·2단계 1단계 조사 결과 토양환경보전법에 따른 토양오염우려기준을 초과하여 토양오염이 확인된 지역을 중심으로 시료채취	오염이 인정된 지점, 오염 우려가 있는 지점, 수리지질 상황 등을 고려하여 대상 부지의 3차원 분포를 파악할 수 있도록 배치	· 조사의 목적과 이용 가능한 사전 조사 정보, 현장 조건에 따라 정함 -판단 시료채취 -규칙적시료채취	자료조사, 현장조사 등을 통하여 지형, 풍향, 지하수유동 및 상·하류 등을 고려하여 토양오염의 가능성을 가장 높을 곳으로 추정되는 곳

## 2.6 시료 채취 방법

각 규정의 시료채취 방법은 오염 물질별, 오염 지역별, 오염 유발 시설의 위치별, 시료채취 목적별로 다양하게 기술되어 있다. 각 규정별로 시료 채취 방법을 정하고 있더라도 그 외의 시료채취 방법은 토양오염공정시험기준에 준하도록 하는 경우가 많았다.

표 2-8 지침 별 토양 시료채취방법(1)

지침 항목	토양정밀조사지침			토양오염 실태조사 지침	토양환경 평가지침	주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사지침
시료 채취 방법	개 황 조 사	광산활동관련 지역	광산: 광산의 광미장을 기점으로 하천에 인접한 농경지에 대해 조사자 의 판단에 따라 채취	토양오염 공정시험 기 준 에 의함	·오염이 인정 된 지점, 오 염의 우려가 있는 지점, 수리 지질 상 황 고려 ·토양 오염의 3차원 분포 를 파악할 수 있도록 배치 ·추정되는 오 염범위 내에 서 5지점 이 상에서 채취	·유류 및 유동성 물 질로 인한 오염 지 역, 여러 개의 오 염원인 시설이 공 여구역주변지역에 분산되어 있는 경 우, 중금속 오염지 역 등을 구분하여 시료채취 지점 및 깊이별 시료를 달 리 정하고 있음. ·시료채취 기록·관 리 및 기타 사항을 언급
			제련소: 대상지역의 풍향을 고려하여 방위별로 시료 채취			
		폐기물	매립지 기타			
	정 밀 조 사	기타	저장 조실벽이 있는 경우			
			여러 시설이 혼재하는 경우			
		광산	개황조사와 동일. 심토와 1m까지 깊이별 시료는 거리 간격을 일정하게 하여 채취			
폐기물	개황조사와 같음					
기타	개황조사와 같음					

표 2-9 지침 별 토양 시료채취방법(2)

지침 항목	군 환경오염조사 표준수행절차	KS 지침	토양측정망 설치계획	토양오염공정시험 기준	특정토양오염 관리대상 시설관리지침	광해방지사업이 완료된 사업장 주변 환경오염영향조사 지침
시료 채취 방법	조 사 지 역 에 따라 달리 정하고 있음	표토와 심 토로 나누 어 교란 시료와 불 교란 시료 에 따라 구분 하여 채취	·논, 밭, 체육용 지: 표토 (0~ 15cm)를 채취 ·오염원이 심토 에 위치하는 경 우: 토양오염 범 위를 파악할 수 있는 깊이(60~ 100cm)에서채취 ·오염실태 및 오 염추세를 파악 하기 어려운 경 우: 지점을 변경 하여 토양시료 를 채취	일반지역과 토양 오염 유발 시설 에 따라 달리 정함 ·농경지: 지그재 그형으로 5~10 개 지점 선정 ·기타: 대상지역 의 중심이 되는 1개 지점과 주변 4방 위의 5~ 10m 거리에 있 는 1개 지점씩 총 5개 지점을 선정	토양오염공정 시 험기준에서 정한 방법에 따름	토양오염공정 시 험기준에서 정한 방법에 따름

## 2.7 시료채취 밀도 및 심도

각 규정의 시료채취 밀도 및 심도는 주로 오염 지역 및 오염물질에 따라 구분하여 정하고 있다. 예를 들어 토양정밀조사에서는 광산활동 관련지역, 폐기물 매립지역 등 지역별로 시료채취 밀도 및 심도를 각각 정하고 있다. 유사한 지역을 조사함에도 각 지침별로 조사하도록 되어있는 시료채취 밀도와 심도가 서로 다른 실정이다.

표 2-10 지침 별 토양 시료채취 심도

지침 항목	토양정밀조사지침		토양환경평가지침	주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침		군 환경 오염조사 표준수행절 차	토양측정망 설치계획	광해방지 사업이 완료된 사업장 주변 환경오염 영향조사 지침
	개황	정밀		개황	정밀			
채취 심도	개황	·광산: 30cm 심도 ·폐기물: 15m 깊이 ·기타: 15m 깊이	표 토 아래 0.5,1~5m 의 7심도 를 기본으 로 함	개황	유류:0~1, ~5m까 지 1m간격으로 총 5 지점	표 토 아래 0.5,1~5m 의 7심도 를 기본으 로 함	논, 밭, 체 육용지 : 0~15cm	30~100 cm
	정밀	·광산:0~10, 10~ 30,30~60, 60~ 100cm ·폐기물: 15m 깊이 ·기타: 15m 깊이		정밀	중금속: 0~0.3 ~ 2.0m 까지 0.3m 간격 으로 총 5 지점			

표 2-11 지침 별 토양 시료채취 밀도(1)

지침 항목	토양정밀조사지침						토양환경평가지침, 군 환경오염조사 표준수행절차
	개황			정밀			
	광산	폐기물	기타	광산	폐기물	기타	
면적 당 시료 개수	· A ≤ 100,000 m <sup>2</sup> : 10,000 m <sup>2</sup> 당 1개 : :	· A ≤ 10,000 m <sup>2</sup> : 1,000 m <sup>2</sup> 당 1개 : :	· A ≤ 1,000 m <sup>2</sup> : 500 m <sup>2</sup> 당 1개 : :	· 1,500 m <sup>2</sup> 당 1 개 : :	· A ≤ 10,000 m <sup>2</sup> : 500 m <sup>2</sup> 당 1개 : :	· A ≤ 1,000 m <sup>2</sup> : 100 m <sup>2</sup> 당 1개 : :	· A < 500 m <sup>2</sup> : 5 · 500 ≤ A < 2,000 m <sup>2</sup> : 7 · 2,000 ≤ A < 3,000 m <sup>2</sup> : 9 : : · 8,000 ≤ A < 9,000 m <sup>2</sup> : 20 · 9,000 ≤ A < 10,000 m <sup>2</sup> : 21 · 10,000 ≤ A < 15,000 m <sup>2</sup> : 25 · 15,000 ≤ A < 20,000 m <sup>2</sup> : 30 : : · 40,000 ≤ A < 45,000 m <sup>2</sup> : 52 · 45,000 ≤ A < 50,000 m <sup>2</sup> : 55
	· A > 100,000 m <sup>2</sup> : 50,000 m <sup>2</sup> 당 1개	· A > 10,000 m <sup>2</sup> : 2,000 m <sup>2</sup> 당 1개	· A > 1,000 m <sup>2</sup> : 1,000 m <sup>2</sup> 당 1개		· A > 10,000 m <sup>2</sup> : 1,000 m <sup>2</sup> 당 1개	· A > 1,000 m <sup>2</sup> : 500 m <sup>2</sup> 당 1개	

표 2-12 지침 별 토양 시료채취 밀도(2)

지침 항목	주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침(환경부 예규)		KS 규격	특정토양오염관리대상 시설 관리지침	광해방지사업이 완료된 사업장 주변 환경오염영향조사 지침	
	1단계	2단계			개황	정밀
면적 당 시료 개수	<ul style="list-style-type: none"> <li>· A ≤ 1,000 m<sup>2</sup> : 500 m<sup>2</sup> 당 1개</li> <li>· A &gt; 1,000 m<sup>2</sup> : 1,000 m<sup>2</sup> 당 1개</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· A ≤ 500 m<sup>2</sup> : 100 m<sup>2</sup> 당 1개</li> <li>· A &gt; 1,000 m<sup>2</sup> : 500 m<sup>2</sup> 당 1개</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 0-20,000 m<sup>2</sup>: 1</li> <li>· 20,000-50,000 m<sup>2</sup>: 2</li> <li>· 50,000-100,000 m<sup>2</sup>: 3</li> <li>· 100,000-150,000 m<sup>2</sup>: 4</li> <li>· 150,000-200,000 m<sup>2</sup>: 5</li> <li>· 200,000-300,000 m<sup>2</sup>: 6</li> </ul>	50만 L 이하 저장시설이 1개 이상: 3 지점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 폐광주변 500m 이내: 5개</li> <li>· 폐광주변 500m ~1km 이내: 3개</li> <li>· 폐광주변 1km ~1.5km 이내: 2개</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 폐광 하류방향 500m 이내: 2개</li> <li>· 폐광 하류방향 500m-1km 이내: 15개</li> <li>· 폐광 하류방향 1km-2km 이내: 8개</li> </ul>

## 2.8 시료채취 장비

시료채취 장비를 다루고 있는 경우는 많지 않으며 언급되고 있는 장비는 다음 표와 같다.

표 2-13 지침 별 토양 시료채취 장비

지침 항목	주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침	군 환경오염조사 표준수행절차	KS 규격
시료 채취 장비	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 표층토양: 모종삽, 오거, 튜브, 슬라이드 해머</li> <li>· 지중토양: 분리식 스푼, 회전식 채취기, 박벽새방식 튜브, 박벽피스톤, 타격식 장비</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 표층토양: 모종삽, 오거, 튜브, 슬라이드 해머</li> <li>· 지중토양: 분리식 스푼, 회전식 채취기, 박벽새방식 튜브, 박벽피스톤, 특수화박벽시료채취기, 타격식 장비</li> </ul>	굴착, 타격 탐침 (driven probe), 천공 (시추공)

## 제3절 국내 지하수 조사 현황

국내 지하수 관리는 국토해양부 소관의 '지하수법'에 주로 근거하고 있으며, 이와 관련한 세부 사항은 고시, 예규, 훈령 등의 형태로 관리되고 있다.

지하수법은 지하수의 적절한 개발·이용과 효율적인 보전·관리에 관한 사항을 정하여 지하수 개발·이용의 적정을 기하고 지하수오염을 예방하여 공공의 복리증진과 국민경제의 발전에 이바지함을 목적으로 하는 광범위한 내용의 법이며, 동법 시행규칙인 '지하수의 수질보전 등에 관한 규칙'에서 지하수의 수질보전 및 정화에 관한 사항을 주로 다루고 있다.

이 규칙에서는 오염된 지하수의 조사 및 정화의 필요성을 다루고 있으나 실질적인 지하수 오염조사 시 기준이 되는 별도의 관련 지침은 없는 실정이다. 다만 부처별 관리 목적에 따라 지하수 오염조사 내용을 일부 포함하는 지침을 가지고 있는 경우가 있는데 군 환경 업무 수행을 위한 국방부의 '군 환경오염조사표준수행절차'가 있다. '주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침'도 군 환경조사와 관련해 지하수 오염 조사 내용을 포함하고 있으나 전 국토에 적용하기 위한 지침은 아니다.

그 외 지하수 오염조사 관련 지침으로는 오염조사를 포함하는 일반적인 지하수 관련 업무 수행을 돕기 위한 '지하수 업무수행 지침'이 있으며, 수질보전을 위해 설치한 측정망 관리를 위한 '지하수수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획'이 있다. 지하수 오염조사 자체보다는 지하수 관리를 위한 행정적인 사항을 주로 담고 있는 규정으로는 '지하수 오염평가보고서의 작성에 관한 규정', '오염지하수정화계획의작성내용'이 있으며, 'KS규격'이나 '토양정밀조사지침'에서도 지하수 조사 관련 일부 내용을 포함하고 있다.

다음에서는 위에서 언급한 지하수의 수질보호 및 오염조사와 관련된 규정의 목적, 적용범위 등을 살펴보았는데, 이를 통해 연구하고자 하는 '지하수 오염조사 지침'에 포함되어야 할 내용을 파악하고자 하였다.

### 1. 지하수오염조사 관련 규정

#### 1.1 지하수법(법률 제9717)

국토해양부 소관의 지하수법은 국내 지하수 관리의 기본이 되는 법으로 관련 지침의 근거가 되며 국내 지하수 관리의 전반적인 사항을 다루고 있다. 대부분의 지하수 관리는 이 법에 근거하여 이루어지고 있다.

#### 1.2 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙(환경부령 제362호, 2010.2)

지하수법은 시행규칙이 2개로 나뉘는데 국토해양부령의 「지하수법시행규칙」과 환경부령의

「지하수의 수질보전 등에 관한 규칙」이 그것이다. 「지하수의 수질보전 등에 관한 규칙」은 「지하수법」 및 같은 법 시행령에서 위임된 지하수의 수질보전 및 정화에 관한 사항과 그 시행에 관하여 필요한 사항을 규정함을 목적으로 하고 있다. 내용으로는 지하수오염유발시설의 오염방지, 지하수오염방지명령, 수질오염의 측정 등으로 지하수의 수질보전을 위한 제반 사항을 담고 있다.

### 1.3 지하수수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획

(환경부고시 제2008-65호, 2009.4월 제2009-54호로 변경·고시)

「지하수수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획」은 「지하수법」 등에 의거 수질오염실태를 측정하는데 필요한 사항을 담고 있는데 근거가 되는 내용은 다음과 같다.

「지하수법」 제18조(수질오염의 측정)에 의하면 환경부장관은 지하수의 수질보전을 위하여 지하수 수질측정시설(수질측정망)을 설치하여 전국의 지하수에 대한 수질오염실태를 측정하도록 되어 있으며 수질측정망의 설치기준·설치구역 등에 관하여 필요한 사항은 환경부령으로 정하도록 하고 있다.

「지하수의 수질보전 등에 관한 규칙」 제9조(수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획의 수립·고시)에 의하면 환경부장관은 수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획(수질측정망 설치·측정계획)을 수립·고시하고, 그 계획에 따라 수질측정망을 설치하며 수질오염실태를 측정하며, 수질측정망 설치·측정계획에는 다음 각 호의 사항을 포함한다.

- 수질측정망의 설치시기
- 수질측정망의 배치도
- 수질측정소를 설치할 토지 또는 시설물의 위치
- 수질오염실태의 측정방법
- 그 밖에 수질측정망의 설치 및 수질오염실태의 측정에 관하여 필요한 사항

### 1.4 오염지하수정화계획의 작성내용(환경부고시 제2009-176호)

지하수법 제16조의 4(오염지하수 정화계획의 승인 등)에 의하면 지하수오염유발시설관리자는 오염된 지하수를 정화하거나 정화명령을 받은 때에는 환경부령이 정하는 오염지하수 정화기준에 맞도록 하여야 하며 대통령령이 정하는 바에 따라 오염지하수정화계획을 작성한 후, 이를 시장·군수에게 제출하여 승인을 얻도록 되어있다. 또한 지하수법 시행령 26조의4(오염지하수정화계획의 승인 등)에 의하면 오염지하수정화계획의 작성에 관하여 필요한 세부사항은 환경부장관이 이를 정하여 고시하도록 되어있다. 「오염지하수정화계획의작성내용」은 위 관련

오염지하수정화계획의 작성에 필요한 정화대상지역 및 정화방법·종류 등의 세부사항을 간단하게 언급하고 있다.

## 1.5 지하수 오염평가보고서의 작성에 관한 규정(환경부고시 제2009-178호)

지하수법 제26조의3(지하수오염유발관리자에 대한 조치)에 의하면 환경부장관 또는 시장·군수는 수질측정결과가 수질 기준에 적합하지 아니하게 된 경우 그 오염의 원인을 제공한 지하수오염유발시설관리자에게 환경부령이 정하는 바에 따라 지하수오염으로 인한 위해성·오염범위·오염 원인에 대한 평가 및 오염방지대책 등을 기재한 보고서(지하수오염평가보고서)를 제출하도록 명하도록 되어있다. ‘지하수 오염평가보고서의 작성에 관한 규정’의 지하수오염평가보고서의 작성내용에는 지하수 오염조사 시 필요한 개괄적인 절차를 포함하고 있어 오염 조사에 참고 할 수 있다. 참고할 만한 내용을 담고 있다. 지하수오염평가보고서의 작성 내용은 크게 다음과 같다.

- 지하수오염으로 인한 위해성
- 오염범위
- 오염 원인에 대한 평가
- 오염방지대책
- 그 밖의 사항

## 1.6 KS 규격

KS 규격 중 지하수 오염조사와 관련된 규격 중에는 ‘지하수의 시료 채취에 대한 지침’과 ‘오염지역 지하수의 시료채취에 관한 지침’이 있는데 ISO(국제표준화기구)의 가이드라인을 번역하여 작성되었다. 각 규격의 주요 내용은 다음과 같다.

- 지하수의 시료 채취에 대한 지침(KS I ISO 5667-11, 2006)

이 규격은 1993년 제 1판으로 발행된 ISO 5667-11 Water quality-sampling-Part II: Guidance on sampling of groundwaters를 번역하여 작성한 한국산업규격이다.

내용으로는 시료 채취 프로그램의 설계, 시료 채취 기술 및 물리적, 화학적 및 미생물학적 분석을 위한 지하수 시료의 취급이 있다. 또한 지하수 수질에 대한 일반적인 모니터링에 대하여 기술하고 있는데, 지하수 시스템의 복잡성 때문에 특정 상황의 시료 채취에 관한 세부적인 내용은 다루고 있지 않다.

일반적으로 지하수 시료채취 프로그램은 지하수 수질조사를 통해 지하수 오염을 막고, 오

염정도를 검사하여 지하수원을 관리하는데 목적이 있는데, 규격에 기술된 내용은 다음의 목적을 위해서도 적용할 수 있음을 언급하고 있다.

- 지하수가 먹는 물이나 공업/농업용수로 적당한지의 결정 및 공급되는 동안의 수질 관리
- 잠재 위험을 내포하고 있는 지표나 지표 하부의 활성화에 의한 대수층 오염 규명
- 오염 물질이 지하수 수질에 미치는 영향, 적절한 지하수 수질 모델을 확인하기 위한 오염 물질 이동에 관한 이해
- 최적의 수원 감독을 위한 지하수 수질의 완만한 변화 해석 및 개발
- 오염 관리 관련 법 집행을 위한 자료 수집

○ 오염지역 지하수의 시료채취에 관한 지침(KS I ISO 5667-18, 2006)

이 규격은 ISO 5667-18 Water quality-Sampling-Part 18 : Guidance on sampling of groundwater at contaminated sites를 번역하여 작성한 한국산업규격이다. 잠재적인 오염이 의심되는 지역의 지하수 시료 채취, 지표나 지하에 존재하는 오염원으로부터 수직 이동한 오염 물질에 의해 지표하 오염 가능성이 있는 경우에 적용할 수 있다.

### 1.7 지하수 업무수행 지침(건설교통부, 2006.12.)

지하수법이 1993년 12월 제정 후 수차례 개정되었으며 이에 따른 행정수요가 증가됨에 따라 지하수 업무를 담당하는 공무원과 지하수 업무 종사자들에게 도움을 주기 위해 만든 지침으로 법 해설 및 각종 행정절차, 기술적인 사항을 수록하고 있다.

지침서는 크게 총론, 행정절차 및 제도규정, 지하수 영향조사·심사, 지하수 정보관리, 지하수 관측망 설치 및 운영관리, 지하수 방치공 관리, 지하수 기초조사, 우물의 설계와 시공으로 구성되어 있는데 실무에 도움이 될 수 있는 구체적인 내용을 담고 있다.

### 1.8 지하수의 수질보전 등에 관한 업무처리지침(환경부, 2004.10.)

지하수의 수질보전 등에 관한 업무처리지침은 지하수법과 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙 등 지하수 수질보전과 관련한 제반 규정의 세부적인 업무수행 절차를 명확히 제시함으로써 지하수 수질보전을 위한 제반 업무가 올바르게 효율적으로 수행될 수 있도록 하기위한 목적으로 만든 지침이다. 지하수 수질보전을 위한 업무는 다음과 같이 구분되어 기술되고 있다.

- 지하수 관리 기본계획 수립 시 수질보전분야 반영사항
- 지하수 수질측정망 운영
- 지하수 수질검사

- 지하수 개발·이용시설의 관리
- 지하수 오염유발시설의 관리
- 지하수오염방지시설의 설치기준
- 지하수정화업의 등록

## 1.9 기타

그 외 오염 토양 조사를 위한 「토양정밀조사지침」과 「주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침」, 「군 환경오염조사 표준수행절차」에도 지하수 관련 내용이 포함되어 있다.

환경부에서는 ‘2008년도 지하수 오염 정밀조사’의 일환으로 ‘지하수 오염 정밀조사 표준수행절차 및 관리방안’에 대한 연구를 수행하였는데 내용은 지하수 오염조사 관련 법규 및 사례, 지하수 오염 정밀조사 개요 및 수행절차, 오염물질별 오염정밀조사 수행절차 및 관리방안을 포함하고 있다.

또한 지하수 조사관련 시료채취에 대한 표준방법 제시 필요성에 따라 2009년 환경부에서 관련 내용을 정리 하였으며, 조만간 관련 내용이 나올 것으로 기대된다.

## 2. 지하수 관련 규정 비교 검토

본 절에서는 앞에서 조사한 지하수관련 규정의 세부 내용 중 조사절차, 조사지역, 조사항목, 조사시기, 시료채취 위치, 시료채취 방법, 시료채취 장비, 시료채취 밀도, 시료채취 심도에 관한 내용을 비교 검토하였다. 규정에 따라 행정적인 사항을 주로 다루는 경우와 기술적인 사항을 다루는 경우가 있고 기술적인 사항의 경우도 개괄적 또는 세부적으로 다루는 등, 내용을 단순히 비교하기에는 어려움이 있지만 연구의 편의를 위하여 유사한 부분을 추려 비교하였다.

### 2.1 조사절차

지하수 업무수행 지침은 지하수 조사절차를 크게 지하수 기초조사와 세부조사로 나누고 있다. 지하수 오염조사가 아닌 기본현황조사를 포함한 기초조사를 주 내용으로 하고 있는데 현황 조사를 위한 조사 절차를 크게 지하수 기초조사와 세부조사로 나누고 있다. 군 환경오염조사 표준수행절차에서는 기본현황조사, 세부수리지질 조사, 종합분석 및 평가의 단계를 실시하고 있으며, 주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침에서는 1단계 환경기초조사와 2단계 환경기초조사로 구분하여 조사를 실시하고 있다. 1단계 환경기초조사는 다시 개황조사와 실태조사로 구분되어 실시되고 있다. KS 규격에서는 조사/모니터링, 장치설치, 관정폐징, 시료채취

등 오염조사에 필요한 구체적인 절차를 정하고 있다. 각 규정별 조사 절차를 다음 표에 정리하였다.

표 2-14 지침 별 지하수조사절차

지침 항목	KS 규격	지하수 업무수행 지침	주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침	군 환경오염조사 표준수행절차(SOP)
조사 절차	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 조사/모니터링</li> <li>■ 장치 설치</li> <li>■ 관정 정밀조사</li> <li>■ 관정 퍼징</li> <li>■ 시료채취여과현장 결정</li> <li>■ 시료보존과 이동</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 기본현황조사</li> <li>■ 세부조사</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1단계 환경기초조사               <ul style="list-style-type: none"> <li>-개황조사</li> <li>· 자료조사</li> <li>· 현장조사</li> <li>· 청취조사</li> <li>-실태조사</li> </ul> </li> <li>■ 2단계 환경기초조사</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 기본현황조사</li> <li>■ 세부수리지질 조사</li> <li>■ 종합분석 및 평가</li> </ul>

각 규정의 내용 중 조사 절차에 관한 내용을 다음에 세부적으로 살펴보았다.

### 1) 지하수 업무수행 지침

#### (1) 지하수 기초조사

- 기본현황조사
- 세부조사

### 2) 주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침(토양 조사와 같음)

#### (1) 1단계 환경기초조사

- 개황조사: 자료조사, 현장조사 및 청취조사 순으로 실시
- 실태조사: 개황조사 결과 환경오염 개연성이 있을 것으로 판단되는 지역에 대하여 환경오염물질의 종류, 오염원인 및 오염범위 등을 파악하기 위해 시행. 개황조사 결과 환경오염 개연성이 없을 것으로 판단될 경우는 실태조사를 생략할 수 있음

#### (2) 2단계 환경기초조사

1단계 조사결과 확인된 오염 지역을 중심으로 오염 원인과 오염량을 파악할 수 있도록 실시하되, 수리지질학적으로 오염가능성이 있거나 현지여건(산악, 하천, 호소, 대기, 도심 지역 등)에 따라 조사범위를 조정할 수 있음

### 3) 군 환경오염조사 표준수행절차(SOP)

- (1) 크게 기본 현황조사, 세부 수리지질조사, 종합분석 및 평가의 단계로 구분

(2) 지하수 기초조사 시 수행하여야 할 조사항목과 수집대상 자료, 조사결과를 토대로 행하여지는 일반적인 분석 평가기법 및 최종적으로 산출하여야 하는 평가결과 등의 절차는 <그림 2-2>과 같다.

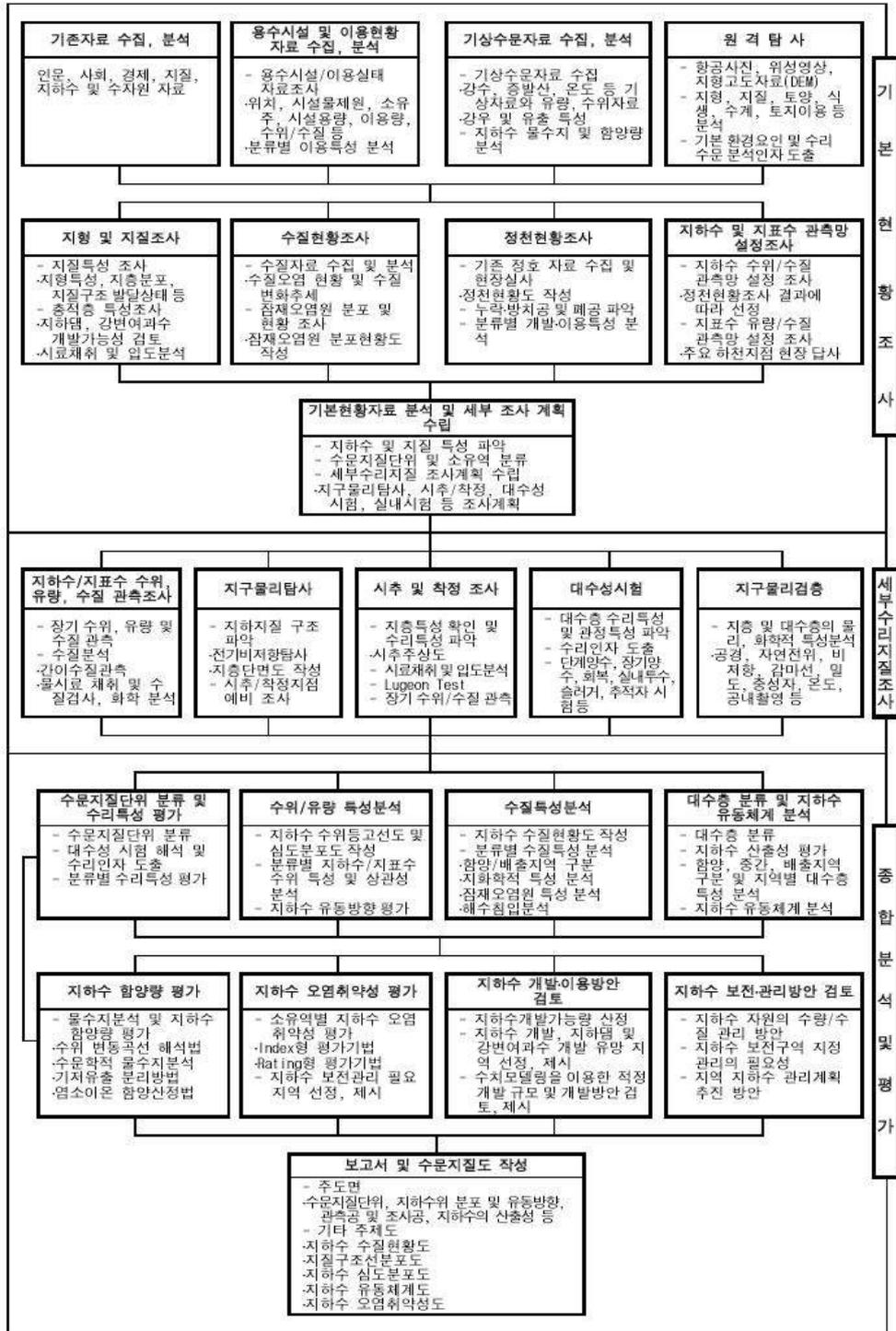


그림 2-2 지하수 오염조사 흐름도

4) KS규격(오염지역 지하수의 시료채취에 관한 지침;KS I ISO 5667-18, 2006)

KS 규격은 지하수 시료 채취를 위한 절차를 다음 표와 같이 나타내고 있다.

표 2-15 지하수 시료 채취를 위한 절차

단 계	절 차	필수 요소	비 고
조사/모니터링 단계	사용 가능한 데이터의 조사 ↓ 모의 연구 ↓ 개념 모델의 개발 ↓ 측량조사	데이터의 출처 확인  시추공/시료 채취망과 시료 채취 계획의 설계	지질학적, 지구 화학적 및 수리 지질학적 특성 규명
장치 설치	모니터링 지점의 시추기 설치 ↓ 관정 청소와 개발(development)	시추공 설계, 기구 선정과 설치 기술	
관정 정밀조사	수문학적 측정	수위 측정 수압테스트	수리 지질학적 특성 규명
관정 퍼징 (purging)	썩은 물의 제거 또는 분리 ↓ 퍼징 요소의 측정(EC, pH, 온도, ORP 등)	대표적인 지하수  대표적인 지하수의 검증	
시료채취 여과 현장결정	지하수 시료채취		적절한 방법으로 시료채취
	비여과시료	여과된 시료	pH, EC, 온도, ORP, DO 등과 같은 민감한 요소의 측정
	모든 유기 물질	알칼리도/pH	용기의 헤드 스페이스 제거
	용존가스	용존된 추적 금속들	최소한의 폭기와 감압
	민감한 무기물질	황화물과 다른 무기 물질들	최소한의 공기 접촉
	이동경로를 위한 추적자 금속들	주요 음이온과 양이온	시료보존
시료의 보존과 이동		분석하기 전 시료의 최소한의 손실	

## 2.2 조사지역

현재 지하수를 조사하고 있는 지역은 각 규정의 목적에 따라 정하고 있는데 다음 표에 지하수 조사가 필요한 지역에 대해 나타내었다.

표 2-16 지침 별 지하수 조사지역

지침 항목	지하수 업무수행 지침	주한미군 공여구역 주변지역 환경기초 조사 지침	지하수수질 측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획	지하수의 수질보전 등에 관한 규칙	기타 (토양정밀 조사지침)
조사 지역	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지하수 영향조사               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 개발예정지점을 중심으로 반지름 0.5km를 기준</li> </ul> </li> <li>· 지하수 기초조사               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 광역지하수조사 금강, 한강, 낙동강 및 섬진-영산강</li> <li>- 정밀지하수조사 행정구역 단위 기본</li> </ul> </li> </ul>	법 제2조제2호에서 정하는 공여구역주변지역	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 국가지하수수질 측정망</li> <li>· 지역지하수수질 측정망</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지하수보전구역에 설치된 다음의 시설               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 「토양환경보전법 시행규칙」 별표 2에 따른 특정토양오염관리대상시설</li> <li>- 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행규칙」 별표 4 제1호가목에 따른 폐수배출시설</li> <li>- 「폐기물관리법 시행령」 별표 3 제2호가목에 따른 매립시설</li> <li>- 그 밖에 가목부터 다목까지의 시설과 유사한 시설로서 특별히 관리할 필요가 있다고 인정되어 환경부장관이 관계 중앙행정기관의 장과 협의하여 고시하는 시설</li> </ul> </li> <li>· 지하수보전구역 외의 지역에 설치된 다음의 시설               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 「토양환경보전법 시행규칙」 별표 2에 따른 특정토양오염관리대상시설 중 「토양환경보전법」 제14조에 따라 오염된 토양의 정화조치명령을 받게된 시설</li> <li>- 「폐기물관리법 시행령」 별표 3 제2호가목에 따른 매립시설</li> <li>- 그 밖에 가목 또는 나목의 시설과 유사한 시설로서 특별히 관리할 필요가 있다고 인정되어 환경부장관이 관계 중앙행정기관의 장과 협의하여 고시하는 시설</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 폐기물 매립 지역</li> <li>· 기타(유류배출 가능 지역, 유해 화학물질 저장 시설 지역, 산업지역)</li> </ul>

## 2.3 조사항목

지하수의 오염 조사는 지하수 사용 용도에 따라 먹는 물, 농업용수, 어업용수, 공업용수로 구분하여 정해진 항목을 조사하고 있으며, 규정별 필요에 따라 조사 항목을 추가하고 있다. 지하수 수질측정망의 경우 유기인을 세부적으로 나누어 추가로 검사하고 있으며, 주한미군 공여구

역주변지역 환경기초조사 지침은 토양 오염조사 항목으로 포함되어 있으나 지하수의 수질기준에는 포함되어 있지 않은 TPH를 추가하여 조사하고 있다. 또한 지하수 업무수행 지침이나 지하수 수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획에서는 주 양이온/음이온 항목을 포함하여 조사를 실시하고 있다.

## 2.4 조사시기 및 주기

지하수 조사 관련 시기 및 주기는 관련 규정에 따라 필요한 최소한의 주기로 정해지고 있다. 각 규정별 관련 조사절차는 다음 표와 같다.

표 2-17 지침 별 지하수 조사시기 및 주기

지침 항목	KS 지침	지하수 업무수행 지침	지하수수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획	지하수의 수질보전 등에 관한 규칙
조사 시기 및 주기	KS M ISO 5667-1 및 그 밖의 국내 법 규에 시료 채 취 주기 추산 에 대한 일반 적인 지침이 기술	· 지하수생활용수 기준 수질 분석: 연 2회 (상반기 3~6월, 하반기 9~12월) · 주요 이온 분석: 필요시	· 국가지하수수질측정망 -1년차: 전 항목에 대 해서 분기별 1회 -2년차~ 5년차: 현장 수질측정항목, 주양 이온/음이온, 미생 물, 추가관심항목에 대하여 연 4회 · 지역지하수수질측정망 연 2회(상·하반기)	· 수질측정 주기 -지하수오염유발시설의 종류 중 제1호 및 제2호나목·다목의 시설 · 일반오염물질과 전기전도도, 지하수위 및 해당 지하수오염유발시설에서 배 출되는 유해물질의 경우: 분기 1회 이상 · 특정유해물질과 지하수오염유발시설 로부터 검출가능성이 있는 유해물질: 반기 1회 이상 -별표 2 제2호가목의 시설: 2년 동안 반 기 1회 · 수질검사 주기 -음용수: 2년마다 1회 -생활용수, 농·어업용수 및 공업용수: 3년마다 1회

## 2.5 시료채취 위치

지하수 시료채취 위치는 지하수의 수질오염이 예상되는 지점, 지하수의 흐름을 고려하여 오염되지 않은 배경지역과 오염여부를 즉시 탐지할 수 있는 지점 등으로 언급되고 있으나 구체적인 선정 방법은 나타나 있지 않아 조사자의 주관에 따른 조사가 이루어지고 있다. 각 규정별 시료채취 위치는 다음 표와 같다.

표 2-18 지침 별 지하수 시료채취 위치

지침 항목	KS 지침	지하수 업무수행 지침	주한미군 공여구역 주변지역 환경기초 조사지침	군 환경 오염조사 표준수행절차 (SOP)	지하수수질 측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획	지하수의 수질보전 등에 관한 규칙
시료 채취 위치	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 먹는물 공급을 위한 지하수 수질의 감독</li> <li>· 그 밖의 지하수 수질 목적               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하수의 확산오염</li> <li>- 점오염원에 의한 오염</li> </ul> </li> </ul> ⇒ 지하수 시료채취 위치 달리 적용	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 정전현황조사 결과를 토대로 조사지역내에 분포지질을 대표하는 지점</li> <li>· 타용수자원이 대수층으로 유입되거나 대수층의 지하수가 유출되는 지점</li> <li>· 수질현황 및 잠재오염원조사결과 지하수의 수질오염이 예상되는 지점</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 1단계 개황조사 결과 지하수오염 개연성이 확인된 지역내</li> <li>· 2단계 1단계 조사결과 지하수오염이 확인된 기존 관정(우물 포함) 설치 지점과 기지 경계 구간 중 토양오염이 발견된 지역을 중심으로 예상 지하수 흐름방향 등을 고려</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 오염이 예상되는 지역의 지하수 흐름 방향상류 쪽에 최소한 1개의 관측정을 위치, 하류에 2개 이상의 관측정을 설치</li> <li>· 예상 지하수 흐름 방향과 이에 따른 오염물질 이동방향을 고려하여 추가적인 관측정을 실시</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 국가지하수수질측정망               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하수수질전용측정망 지점</li> <li>- 배경수질전용측정망 지점</li> <li>- 오염감시전용측정망 지점</li> <li>- 보조지하수수질측정망 지점</li> </ul> </li> <li>· 지역지하수수질측정망</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지하수오염유발시설의 경계선에서 지하수주 흐름의 상류 지점으로서 오염이 발생되기 이전의 대표적인 지하수의 수질을 채취·분석할 수 있는 지점</li> <li>· 지하수오염유발시설의 경계선에서 지하수주 흐름의 하류 지점으로서 오염물질이 주위 지하수층으로 이동하는 것을 즉시 탐지할 수 있는 지점</li> </ul>

## 2.6 지하수 조사방법

지하수 조사방법으로는 지하수 이용 가능 수량 산정 등을 위한 기초 조사와 시료 채취를 위한 시료채취 절차 등이 다루어지고 있으며 각 규정별 지하수 조사방법은 다음 표와 같다.

표 2-19 지침 별 지하수 조사방법

지침 항목	KS 지침	지하수 업무수행 지침	주한미군 공여구역 주변지역 환경기초 조사지침	군 환경 오염조사 표준수행절 차(SOP)	지하수수 질측정망 설치 및 수질오염 실태측정 계획	지하수의 수질보전 등에 관한 규칙	기타 (토양정밀 조사지침)
조사 방법	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 관 정 의 세 정 과 개발</li> <li>· purging</li> <li>· micro purging</li> <li>· trial pit</li> <li>· LNAPLs DNAPLs 시료채취</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지하수 영향조사심사               <ul style="list-style-type: none"> <li>-조사대상지역의 선정</li> <li>-수문 및 수리지질 현황조사</li> <li>-지하수 개발가능량 (함양량) 산정</li> <li>-신규 개발가능량 산정</li> <li>-적정취수량 및 영향 범위 산정</li> </ul> </li> <li>· 지하수 기초조사               <ul style="list-style-type: none"> <li>-기본현황조사</li> <li>· 기존자료 수집 분석</li> <li>· 기상수문조사</li> <li>· 용수 시설 및 이용 실태 조사</li> </ul> </li> <li>· 세부 조사               <ul style="list-style-type: none"> <li>· 지표지질 조사</li> <li>· 지구물리탐사</li> <li>· 지하수위 조사</li> <li>· 지하수 수질조사</li> <li>· 시추조사</li> <li>· 착정 조사</li> <li>· 물리 검증</li> <li>· 지표수 유량조사</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 관측정 내 부의 지하 수 초기 수 위 및 관측 정 심 도 를 측정, 지하 수의 대표 성 확보</li> <li>· 오염물질의 종류에 따라 물질 특 성을 감안 한 각각 의 시료채 취</li> <li>· 수리지질 학 적 평가</li> <li>· 현장 상황 기록</li> <li>· 적정한 절 차에 따라 폐공 처리</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 퍼징</li> <li>· 최종수위측정</li> <li>· 교란이 일 어나지 않 도록 주의 하며 시료 채취</li> <li>· 오염물질의 종류에 따 라 물질 특 성을 감안 한 각각 의 시료채취</li> </ul>	국 가지 하 수 수 질 측 정망 과 지 역 지 하 수 수 질 측 정 망으로 나 뉘 시 료 채 취 방 법을 정 함	환경오염 공정시험 기준에 따 름	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 폐기물 매립 지역               <ul style="list-style-type: none"> <li>-평지: 6~8개 지점</li> <li>-구배가 있 는 지형: 3 ~4개 지점</li> </ul> </li> <li>· 기타(유류배 출 가능지역, 유 해 화 학 물 질 저 장 지 역, 산 업 지 역): 3 ~5개 지 점 에 토 양 채 취 깊 이 까 지 간 이 관 측 정 을 설 치 하 여 지 하 수 를 채 취 하 고, 사 용 종 료 후 에 는 되 메 음.</li> </ul>

## 2.7 지하수채취 밀도 및 심도

지하수 시료 채취는 기본적으로 지하에 존재하는 물을 채취하므로 시료채취 심도에 관해 구체적으로 언급하고 있는 규정은 없었으며, 시료채취가 토양보다 어렵기 때문에 토양의 시료 채취 수보다 훨씬 적은 수의 시료채취 수를 정하고 있다.

표 2-20 지침 별 지하수 시료채취밀도

지침 항목	주한미군 공여구역 주변지역 환경기초 조사지침	군 환경 오염조사 표준수행절차 (SOP)	지하수의 수질보전 등에 관한 규칙	기타 (토양정밀조사지침)
시료 채취 밀도	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지하수 흐름방향 상류 쪽으로 오염 발생 이전의 대표적인 지하수의 수질을 채취·분석할 수 있는 지점 1개</li> <li>· 하류 쪽에 오염물질 성분이 주위 지하수층으로 이동하는 것을 즉시 탐지할 수 있는 지점 2개</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 관측정 지점 수 및 위치는 개략적인 지하수 흐름의 평가 후에 결정</li> <li>· 지하수의 구배를 결정하는데 최소 세 개의 관측정 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지하수오염유발시설의 종류 중 제1호 및 제2호 나목·다목의 시설               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하수오염유발시설의 경계선에서 지하수 주 흐름의 상류지점으로서 오염이 발생되기 이전의 대표적인 지하수의 수질을 채취·분석할 수 있는 지점:1</li> <li>- 지하수오염유발시설의 경계선에서 지하수 주 흐름의 하류지점으로서 오염물질이 주위 지하수층으로 이동하는 것을 즉시 탐지할 수 있는 지점:3</li> </ul> </li> <li>· 지하수오염유발시설의 종류 제2호가목의 시설               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 지하수오염유발시설의 경계선에서 지하수 주 흐름의 상류지점으로서 오염이 발생하기 이전의 대표적인 지하수의 수질을 채취·분석할 수 있는 지점:1</li> <li>- 지하수오염유발시설의 경계선에서 지하수 주 흐름의 하류지점으로서 오염물질이 주위 지하수층으로 이동하는 것을 즉시 탐지할 수 있는 지점:1</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 폐기물 매립지역               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 평지: 6~8개 지점</li> <li>- 구배가 있는 지형: 3~4개 지점</li> </ul> </li> <li>· 기타지역(유류 배출 가능지역, 유해화학물질 저장시설지역, 산업지역)               <ul style="list-style-type: none"> <li>3~5개 지점에 토양 채취 깊이까지 간이관측정을 설치하여 지하수를 채취</li> </ul> </li> </ul>

## 2.8 시료채취 장비

지하수 시료 채취를 위한 장비로는 굴착장비와 펌프, 베일러 등이 있으며 세부 사항은 다음 표와 같다.

표 2-21 지침 별 시료채취장비

지침 항목	KS 지침	지하수 업무수행 지침	주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침	군 환경오염조사 표준수행절차(SOP)
시료 채취 장비	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 깊이 시료 채취기</li> <li>· 관성 펌프</li> <li>· 물주머니 펌프</li> <li>· 기체 작동 펌프</li> <li>· 기체 리프트 펌프</li> <li>· 수중 펌프</li> <li>· 표면 펌프</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 굴착장비</li> <li>-Cable Tool (Percussion Method)</li> <li>-회전식방법 (Rotary Method)</li> <li>-충격식방법 (Hydraulic Percussion Method)</li> <li>-분사방법 (Jetting Method)</li> <li>-오거방법 (Auger Method)</li> <li>-타설우물(Driven Well)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 관측정 굴착</li> <li>-재래식 충격 착정법 (Percussion Drilling)</li> <li>-회전식 착정법 (Rotary Drilling)</li> <li>-압축공기 회전 굴착법 (Air Rotary Drilling)</li> <li>· 시료채취 장비</li> <li>-수중펌프</li> <li>-블레이드 펌프</li> <li>-베일러</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 수중펌프</li> <li>· 블레이드 펌프</li> <li>· 베일러</li> </ul>

## 제4절 국외 토양오염조사 현황

이 장에서는 비교적 토양오염조사가 체계적으로 잘 시행되고 있는 선진 외국의 현황을 살펴보고, 국내의 토양오염조사 현황과 비교해 보고자 한다.

### 1. ISO지침

ISO는 148개국 국가표준화기관이 가입한 비정부기구(NGO)로서 나라마다 다른 공업규격을 조정, 통일하고 물자와 서비스의 국제적 교류를 원활히 하기 위한 국제기구이다. ISO가 제정·보유하고 있는 토양조사와 관련한 지침들은 ISO 10381 계열의 8개 지침이 있다. 우리나라의 지식경제부는 2004~2007년도에 이러한 ISO 10381 계열의 지침을 기술적인 내용 및 규격서의 서식을 변경하지 않고 번역하여 KS M ISO 10381 지침으로 발간하였다.

이 중 국내·외의 토양오염조사와의 비교를 위하여 ISO 10381-1~5의 지침들을 살펴보겠다.

- ISO 10381-1 : 시료채취 프로그램에 관한 지침
- ISO 10381-2 : 시료채취 기술에 관한 지침
- ISO 10381-3 : 안전에 관한 지침
- ISO 10381-4 : 자연, 준 자연 및 경작지 조사 절차에 관한 지침
- ISO 10381-5 : 토양오염과 관련된 도시 및 산업부지 조사 절차에 관한 지침

#### 1.1 ISO 10381-1

이 지침은 토양 시료 채취 프로그램을 설계하는 데 적용되는 일반적인 원리를 제공하고 있다. 이 장에서는 주로 시료채취의 목적, 시료채취의 위치와 시료채취 분포 형태에 대하여 살펴 보겠다.

##### 1.1.1 시료채취의 목적

시료채취의 프로그램을 설계함에 있어 시료채취의 목적을 확실히 해야 한다. 이는 채취위치, 밀도, 시기, 절차에 따르는 시료의 처리와 분석 요구도 등의 중요 인자를 결정하기 때문이다.

- 일반적인 토양 질의 정량을 위한 시료채취
  - 주로 농업 등 특정 목적을 위한 토양의 질을 평가하기 위하여 수행된다. 이 분야에서는 양분 상태나 pH, 유기물 함량, 미량 원소 농도에 관한 인자에 중점을 두는 경향이 있다.
- 토양도 작성을 위한 시료채취

자연적 발생 또는 인공적으로 형성된 토양의 생성과 분포에 대하여 선택된 위치의 화학적,

광물학적, 생물학적 조성과 물리적 특성에 대한 기본적인 정보를 구축하기 위한 토양 모니터링에 사용한다.

- 법과 규정적 활동을 위한 시료채취

시료채취 시 기준 조건을 설정하기 위해, 점오염원이나 비점오염원과 같이 원치 않는 물질의 유입과 같은 인위적 변동 효과를 수반하는 경우에 필요하다.

- 유해성과 위해성 평가를 위한 시료채취

오염 물질과 관련된 유해 물질을 확인하고 노출 경로와 부지의 현재나 미래사용과 관련된 위해성을 평가하기 위하여 필요하다.

- 특별한 목적

- 토양의 화학적 인자를 측정하기 위한 시료채취
- 토양 물리적 인자의 측정을 위한 시료채취
- 토양 생물 인자 평가를 위한 시료채취
- 토양조사와 관련된 기타 물질의 시료채취

### 1.1.2 시료채취 위치

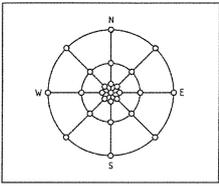
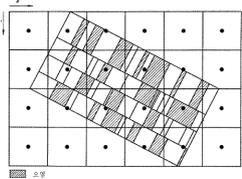
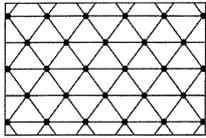
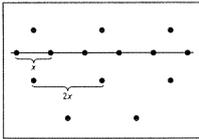
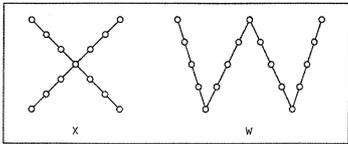
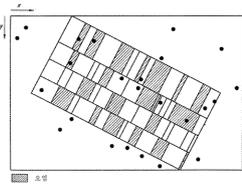
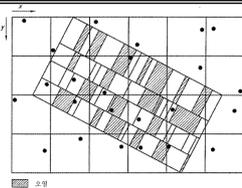
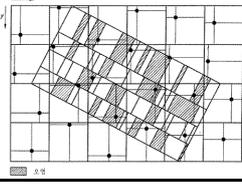
시료채취 위치는 일반적으로 조사의 목적과 이용 가능한 사전 조사 정보, 현장 조건에 따라 정한다. 시료채취 위치 확인은 농업적인 목적에 대한 혼합 시료의 채취 시에는 필요하지 않다. 시료채취의 위치는 적절한 정도의 정확성으로 미리 정해져야 한다. 실제 현장에서 장애물의 존재로 미리 정해진 위치에서부터 떨어진 곳으로 위치를 변경할 필요가 있을 수 있기 때문이다. 시료채취 위치가 재배치되어야 하는 경우는 그 이유에 대하여 보고서에 명확히 명시하도록 한다.

### 1.1.3 시료채취 지점의 여러 다른 형태

토양시료 채취지점의 분포 형태는 불규칙적인 형태, 규칙적인 형태, 불규칙적 형태와 규칙적인 형태의 상호간의 단점을 보완하는 형태의 크게 3가지로 구분할 수 있다.

<표 2-22>은 이러한 토양시료 채취지점 분포형태의 예시를 정리하여 나타냈다.

표 2-22 ISO 10381-1지침이 제안하는 토양시료 채취지점의 분포 형태 예시

규칙적인 형태		
원형 격자형		<ul style="list-style-type: none"> <li>저장탱크 등 오염원 주변의 영향파악에 적합함. 중심의 최고값과 오염 분포 정보를 제공함.</li> <li>채취밀도가 구역별로 차이가 나며 경우에 따라 모든 구역에서 최적의 위치를 벗어날 수 있음</li> </ul>
정규 격자형		<ul style="list-style-type: none"> <li>많은 경우에 적용되며, 격자 크기는 조사의 목적에 따라 달라짐</li> <li>토양오염 조사에 자주 사용됨</li> <li>격자의 설정과 변경이 용이함</li> </ul>
삼각 격자형		<ul style="list-style-type: none"> <li>정규격자형의 특징과 유사</li> </ul>
직선형		<ul style="list-style-type: none"> <li>지하매설관처럼 오염원이 선형으로 배치된 경우에 적합.</li> </ul>
불규칙적인 형태		
불규칙형(N,S,W, X 형)		<ul style="list-style-type: none"> <li>토양성분의 분포가 상대적으로 균일할 경우 적합하며, 농업·원에분야의 토지조사에 널리 사용됨.</li> <li>혼합시료로 분석하는 경우가 많아 오염의 위치를 제시하는 것은 어려우며 전체적 분포를 확인함</li> <li>고농도 오염지점 확인이 곤란함</li> </ul>
임의 선택형		<ul style="list-style-type: none"> <li>오염이 불규칙적으로 나타나는 경우에 적합하며, 지점은 난수표 또는 컴퓨터 프로그램을 이용하여 선정.</li> <li>불규칙함의 단점이 있으며, 토양조사에는 거의 사용되지 않음.</li> </ul>
규칙적인 형태+불규칙적인 형태		
정규격자식 임의선택형		<ul style="list-style-type: none"> <li>임의 선택형 지점선정의 단점을 일부 보완</li> <li>격자로 구획된 셀 내에서 임의 선택을 통해 지점을 선정.</li> </ul>
비선형 임의선택형		<ul style="list-style-type: none"> <li>정규격자식 임의선택형 지점선정의 방법과 유사.</li> <li>격자 내 임의 선택된 지점의 x, y 좌표 중 하나를 고정하고 나머지를 임의 선택하여 선정함</li> </ul>

## 1.2 ISO 10381-2

ISO 10381-2는 토양의 질에 대한 정보를 얻기 위한 실험에 사용할 토양 시료 채취와 보관 방법에 대한 지침이다. 이 지침에서는 시료채취 방법 시 선택사항과 시료채취 도구 선택법, 시료의 보관방법에 대해 설명하고 있다. 이 중 시료채취 방법 시 선택사항과 시료채취 도구에 대하여 살펴보겠다.

### 1.2.1 시료채취 방법 시 선택사항

시료 채취 방법의 선택은 구성 물질의 농도와 시료 채취 절차 및 분석법에 따라 달라진다. 다음은 시료채취방법의 선택 시 필요한 사항들을 간략하게 기술하였다.

- 토양의 층위별 성질을 알고자 할 경우 ⇨ 층위 시료(stratified sample) 채취
- 토양 성질의 수평적 변이를 조사하고자 할 경우 ⇨ 점 시료(spot sample) 채취
- 특정한 원소나 화합물의 농도를 측정하고자 하는 시료의 경우 ⇨ 점 시료(spot sample), 슬롯 시료(slot sample), 클러스터 시료(cluster sample) 채취
- 농업적 목적 등 구역 전체의 성질을 알고자 할 경우 ⇨ 구역대표 시료(spatial sample) 채취
  - 층위시료(stratified sample) : 균질하다고 판단되는 층이나 부위에서 채취한 점 시료의 혼합시료
  - 점 시료(spot sample): 한 지점에서 채취된 시료
  - 슬롯 시료(slot sample): 한 층위나 균질하다고 판단되는 부분 내의 수직의 슬롯에서 채취한 시료
  - 클러스터 시료(cluster sample): 조금씩 떨어진 인접한 지점에서 채취하여 혼합한 시료
  - 구역대표시료(spatial sample): 단일 필지 같은 일정한 구역 내에서 조금씩 채취한 시료를 혼합한 시료
- 그 외 시료채취 시 필요한 사항으로, 시료채취 과정에서 교차오염으로 인한 오염의 확산을 방지하여야 한다. 시료의 양은 조사 구역을 대표할 정도의 충분한 양이어야 하지만 구역 내에서 변이가 불명확해질 정도로 지나치게 많아서는 않도록 한다. 또한 대표시료는 다른 특성을 가진 시료들을 현장 분율에 비례하여 혼합한 시료로 한다.

### 1.2.2 시료채취 도구 선택법

시료채취 방법 선택 시 수작업을 할 것인지 기계를 이용할 것인지 결정해야 한다. 원하는 깊이의 시료를 채취하기 위해 굴착, 타격 탐침(driven probe), 천공(시추공)을 할 것인지도 결정한다. <표 2-23>는 이러한 시료채취 시 도구 선택법을 정리한 것이다.

표 2-23 시료채취 시 도구 선택

명칭	방법	지반 종류에 따른 적합성		채취 가능한 시료의 형태	채취 깊이	비고
		토양 종류에 부적합	토양 종류에 적합			
<b>수동방식</b>						
수동오거 (hand auger)	회전식	점성이 없는 자갈, 돌, 쇠석, 덩어리로 된 물질	점토, 실트, 등 점성이 있는 유형의 지반	교란	0~2.0	점성 모래 지반의 경우 5m 까지 시료 채취 가능
수동굴착 (hand excavation)	채굴식	고체 콘크리트나 비슷한 장애물	모든 유형	교란, 불교란	0~1.5	불안정한 지반의 경우 안쪽 지지벽 필요
<b>동력이용방식</b>						
동력오거 (power auger)	회전식	점성이 없는 물질	점토, 실트 등 점성이 있는 유형의 지반 점토	교란, 불교란	0.05~2.0	점성 모래 지반의 경우 5m 까지 시료채취 가능
진동 보링/동력탐침 <sup>㉑</sup>	타격식	자갈, 큰돌, 덩어리로 된 물질	점토, 실트 등 점성이 있는 유형의 지반	교란, 불교란	0.5~10	
다기능 드릴 (multifunction drill)	타격식 회전식 압력식	자연장애물 없음	모든 유형	교란, 불교란	0~100	동토(凍土)에 적합
경선(經線) (light cable)	타격식	타이어, 목재, 콘크리트 등	점토, 실트 등 점성이 있는 유형의 지반	교란, 불교란	0.5~30	
회전식 드릴 <sup>㉒</sup> (개방형)	회전식	고체장애물	모든 토양	없음	1.0~40	불필요한 상부 토양층을 통과 하는데 적합
회전식 드릴 (코어형)	회전식	고체장애물	모든 토양	없음	1.0~20	
연속 날개 오거 <sup>㉓</sup>	회전식	고체장애물	모든 토양	없음	1.0~20	필요한 상부 토양층을 통과하는데 적합
중공막대 오거 <sup>㉔</sup>	회전식	고체장애물	모든 토양	교란, 불교란	1.0~20	현장에서 오거의 자루로 채취
타격탐침 (driven prove)	압력식	고체장애물	모든 토양	교란, 불교란	0~30	코더 시료 일부 경우는 현장 내 시료 장비로 가능
<b>기계굴착</b>						
시 항	채굴식	큰 고체장애물	모든 토양과 물질	교란, 불교란	0~6	

### 1.3 ISO 10381-3

이 지침은 부지 평가를 할 때, 토양 시료를 채취 시 존재할 수 있는 오염 및 다른 물리적 위험도 뿐 아니라 시료채취 과정에 내재되어 있는 위험도를 포함하는 위험성에 대한 지침이다.

### 1.4 ISO 10381-4

이 지침은 자연·준 자연 지역, 농경 지역, 원예 지역, 삼림 지역 등의 토양 시료 채취 기술을 위한 지침이다. 이 지침은 시료 채취 프로그램 계획을 위한 적절한 전략과 현장 절차, 시료 전처리에 앞서 시료 운반 및 저장과 관련된 처리를 설정하고 있다. 그 중 시료채취 밀도와 시료 채취 방법을 언급하도록 하였다.

#### 1.4.1 시료채취 밀도

ISO 10381 계열의 지침은 일괄적인 심도나 밀도에 대한 규정이 없다. 이는 주로 목적별, 단계별로 다르게 나타나고 있으며 조사자가 현장의 특성을 파악하여 시행한다.

농업적 목적에 관련된 시료의 수는 일정한 토지의 이용 및 관리에 따라 채취해야 할 시료수를 정하고 있다.

표 2-24 농업 목적에 관련된 시료 수

혼합 시료 수 n	면적 A ha
1	0-2
2	>2-5
3	>5-10
4	>10-15
5	>15-20
6	>20-30
위에 주어진 면적보다 더 큰 경우 다음 식에 의하여 혼합 시료의 수를 결정한다. $n = 1 + \sqrt{A}$	

- ① pulse boring/dynamic probe
- ② rotary drills
- ③ continuous flight auger
- ④ driven probe

### 1.4.2 시료채취 방법

표토와 심토로 나누어 교란 시료와 불교란 시료에 따라 다르게 구분하여 시료를 채취한다.

표 2-25 시료채취 방법

	교란 시료	불교란 시료
표토층	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 단일 시료 또는 증분 시료를 단위 토양당 또는 단위 면적당 혼합시료를 형성하기 위해 채취.</li> <li>• 큰 돌 함유량은 추산되거나 특별한 경우, 2mm보다 작은 토양 입자를 분리한 후 정확하게 정량.</li> <li>• 삼림 토양층에서 광물층 위에 있는 유기물층 시료 채취시 절단 격자를 표면에 놓고 그 토양층 밑까지 시료 채취.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 한 층에서 몇 개의 실린더 시료를 채취 → 각 층에서 5개의 시료를 취하는 것 추천</li> </ul>
심토층	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 농업을 목적으로 하는 토양에서 심토층에 영양물을 공급하려 할 경우, 현장의 상황을 비교해서 증분 시료가 현장 유형에 따라 취해질 수 있고 단위 면적 또는 단위 토양당 대 표되는 혼합 시료로 섞는다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시추는 제한적으로 사용되므로 시험 구덩이를 준비.(깊이는 최소한 1m, 토양의 결합력과 종류에 따라 적절한 폭과 길이 설정)</li> </ul>

## 1.5 ISO 10381-5

이 지침은 토양오염이 있는 것으로 알려져 있거나 토양오염이 의심되는 도시 및 산업부지 조사를 위한 절차에 관한 내용을 제공한다. 이 중 토양오염조사절차와 시료채취지점 선정 방법에 대하여 알아보도록 하겠다.

### 1.5.1 조사절차

예비(기초)조사, 탐색(확인)조사, 본(정밀) 조사의 3단계 절차로 조사를 수행한다. 때에 따라 보다 상세한 목적의 추가적인 조사를 실시할 수도 있다. 각 단계별 조사와 범위를 <표 2-26>에 나타냈다.

표 2-26 조사 단계별 업무 범위

부지조사 단계	범위
예비조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실내조사와 부지 예비 점검(부지조사, 부지답사) 포함.</li> <li>• 부지의 이력과 다른 정보출처를 이용하여 진행. 오염의 가능성을 유추할 수 있으며 오염의 특성, 위치, 분포에 대한 가설 제기.</li> </ul>
탐색조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 토양과 지표수, 지하수, 토양기체 등의 시료 채취와 필요한 경우 채취된 시료의 적절하고 부수적인 분석 및 시험 등이 포함되는 현장조사.</li> <li>• 예비조사로부터 나온 가설을 평가하고 개념 모델의 다른 측면이 시험에 적절한지를 결정. 따라서 정량적 조사라기보다는 주로 정성적 조사. 보통 몇 점의 시료들만 분석.</li> </ul>
본 조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 오염된 지역의 특징과 영역, 오염의 정도를 설정</li> <li>• 위해성 평가를 가능토록 하는 적절한 자료 제공</li> </ul>

○ 시료채취 지점 선정 방법

시료채취 위치는 격자 분할 등에 의해 정의된 배치(즉, 체계적) 또는 전문가의 판단에 의하여 선택할 수 있다. 대부분의 조사에서는 두 가지 방식을 혼합하여 사용한다. <표 2-27>은 이러한 시료채취 지점 선정 방법을 정리한 것이다.

표 2-27 시료채취 지점 선정 방법

시료채취 형태	
판단 시료채취 (Judgemental sampling)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시료채취 위치는 오염의 특정한 근원이 알려지거나, 의심되는 경우 오염의 존재나 영역에 대한 확증이 필요한 경우에 판단 시료채취에 기초하여 선택.</li> <li>• 판단 시료채취가 가장 적합한 경우는 본 조사에서 보다 자세한 조사를 하기 전에 오염여부를 확인하기 위하여 오염된 물질이나 의심스러운 오염이 시각적으로 발견되는 지점에 대한 시료를 채취한 경우.</li> </ul>
규칙적 시료채취 (Regular sampling)	<p>탐색 및 본 조사에서는 일반적으로 체계적 시료채취(systematic sampling)를 수행하며, 시료채취 위치는 규칙적 형태에 의해 부지 전체에 걸쳐 분포된다.</p> <p>체계적 시료채취 형태 선택 이유:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 체계적인 형태의 시료채취 위치가 현장에서 수행하기 더 간단.</li> <li>• 오염지역의 확인과 추후 조사의 설계가 체계적인 형태를 사용하면 더욱 수행하기 쉬워짐.</li> </ul>

## 2. 미국

미국은 토양환경평가가 제일 먼저 제도화된 국가로서 ASTM(American Society for Testing and Materials)에 의한 규격을 정하고 있다. 이와 더불어 ESA(Environmental Site Assessment) 평가기법을 통한 미국의 토양오염조사 현황은 다음과 같다.

### 2.1 현황 및 관련 법

미국에서의 토양오염에 대한 문제는 폐기물매립지역을 포함한 폐기물 처분지역과 유해성 오염물질을 함유한 유기성 고형폐기물의 토지사용에 있다. 따라서 토양관리의 주요 문제는 폐기물처분지역의 정화와 토지에 사용되는 고형폐기물의 양적 규제에 있으며, 폐기물 처분지역에서의 토양오염은 침출수 누출에 의한 지하수의 오염에 직결되고, 총 음용수량의 절반이상을 지하수에 의존하고 있는 미국에서는 큰 문제로 대두되고 있다.

미국에서 환경법이 제정된 것은 1970년 부터였으며, 1976년에 RCRA(Resource Conservation and Recovery Act)가 제정되었다. RCRA는 SWDA(Solid Waste Disposal Act)<sup>①</sup>를 개정하여 제정된 법률이다. RCRA의 목적은 현재나 미래에 유해폐기물의 적절한 관리를 통해서 인간의 건강과 환경을 보호하고 에너지와 자연자원을 보전하며, 폐기물 발생량을 감소시키고 폐기물이 환경에서 건전한 방법으로 다루어지게 하는 것이다.

그러나 이러한 법들은 현재와 미래를 위해 오염물질의 생산, 운반, 배출을 규제하기 위한 것이었기 때문에 과거의 활동에 의해 발생한 토양오염에는 미치지 못하였다. 1978년 Love Canal사건이후 이를 해결하기 위해 과거의 규제되지 않은 유해물질의 누출을 조사하고 복원하는 포괄적인 법률인 CERCLA(Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act of 1980)를 제정하였다.

이후 미국은 1986년에 CERCLA를 개정하여 슈퍼펀드개정 및 재수권법(SARA, Superfund Amendments and Reauthorization Act)이 제정되었다.

미국의 토양관리는 CERCLA에 의한 국가적 오염복원 프로그램인 Superfund에 의해 과거에 유해물질로 오염된 부지를 복원하고, RCRA에 의해 현재 운영 중인 시설에 의한 오염지역을 복원한다. 그 외에 Clean Air Act, Clean Water Act, Solid Waste Disposal Act 등과 연계되어 있다. 토양오염지역의 관리 및 복원은 CERCLA에 의해 포괄적으로 주도되고 있으며, RCRA가 상호 보완적으로 작용하고 있다.

---

① 고형폐기물 관리시스템을 전면적으로 보완하고, 현재의 유해폐기물 관리 프로그램의 기초적인 체계를 설계

## 2.2 토양오염 조사체계

미국의 지하수 또는 토양오염이 우려되는 지역을 대상으로 관리하는 토양측정망은 없다. 민원이 제기되고 토양 및 지하수 오염이 우려될 경우 CERCLA, RCRA 등의 법에 따라 ASTM이 정한 Phase I, II, 및 III의 조사방법을 시행한다. 즉, ASTM에 제시된 방법에 따라 법이 규정하는 유해물질을 조사하고 있는 것이다.

대상 부지의 환경오염 조사 시에 널리 이용되는 ESA는 대상 부지의 오염여부 조사 후, 오염 지역으로 확인될 경우 정밀 조사하여 오염원 및 오염범위를 파악하고 향후 이를 복원하기 위한 적용기술과 이에 따른 소요비용을 산출하는 일련의 과정을 의미한다.

ESA에 사용되는 기법은 Phase I, Transaction Screen Process, Phase II, RI/FS(Remedial Investigation/Feasibility Study), RD/RA(Remedial Design/Remedial Action) 등이 있으며, 미국의 경우 이러한 부지조사기법은 American Society for Testing Materials, ASTM과 U. S. EPA(Environmental Protection Agency)에서 정한 규격과 절차에 따른다.

## 2.3 토양오염조사

부지조사에 사용되는 기법은 Phase I, Phase II, 및 RI/FS(Remedial Investigation/Feasibility Study) 등이 있다.

### 2.3.1 부지오염 기초조사(Phase I ESA)

Phase I 은 대상지역의 기본조사로서, 이를 수행하는 목적은 정해진 절차에 따라서 실행할 수 있는 정도까지 대상지역에 관하여 Phase I 의 목적은 표준화된 절차에 따라 대상 부지의 오염 개연성(Recognized Environmental Conditions, RECs)<sup>①</sup>을 확인하는 것이다.

Phase I을 수행하기 위해서는 표준화된 절차를 따르게 되는데, 현재는 ASTM(American Society for Testing and Materials) Designation E-1527-00 에서 제시하고 있는 절차가 폭넓게 이용되고 있다. Phase I ESA의 절차는 자료조사, 현장조사, 면담조사, 보고를 통해 이루어진다.

---

① 오염개연성(RECs)은 평가하고자 하는 대상 부지의 유해물질 누출 가능성 혹은 과거에 발생되었던 누출에 의해 유해물질이 존재하는 상태를 의미한다.

표 2-28 Phase I ESA의 절차

부지이력 및 개황조사	대상 부지에 관한 자료들(문서, 도면, 그림, 기록 등)을 검토
현장방문조사	오염 유발 물질이 위치한 장소, 보관상태, 대상 부지와 주변 지역의 지형, 지질 상황, 식물들의 성장상태, 오염이 예상되는 징후 등을 확인하고 상세히 기록하여 자료화
관계자 인터뷰	부지 관리자, 인근주민, 담당 공무원 등을 대상으로 면담

### 2.3.2 Transaction Screen Process

이 지침은 오염개연성을 확인하고, 부동산 거래와 관련하여 이전의 소유권과 사용용도에 대한 모든 적절한 조사에 활용하고자 제정되었다. 이 단계에서는 ASTM Designation E1528-00 지침을 참조한다. 본 지침의 수행을 위해 데이터베이스를 조사하고 부지의 사용이력, 현장 방문, owner 와 occupant를 조사한다.

표 2-29 Phase I 과 Transaction Screen 비교

Phase I ESA	Transaction Screen Process
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 환경전문가(EP)에 의한 평가</li> <li>• 부지이력조사, 표준화된 기록조사/검증</li> <li>• 현장조사 (site reconnaissance)</li> <li>• 인터뷰(직접 또는 전화)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 소유주/거주자, 관할 관청 공무원</li> </ul> </li> <li>• 문서화 및 보고서 작성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- EP에 의한 발견사항, 결론 및 의견 기록</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 비전문가에 의한 평가</li> <li>• 제한된 부지이력, 표준화된 기록조사</li> <li>• 현장방문(site visit)</li> <li>• 인터뷰(직접, 전화, 또는 우편)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 거주자</li> </ul> </li> <li>• 문서화 및 보고서 작성                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 규정양식에 따른 발견사항, 결론기록</li> </ul> </li> </ul>

### 2.3.3 오염 확인 조사(Phase II ESA)

Phase I 에서 도출된 오염 예상 지역과 유해 물질의 누출이 명백히 확인된 지역에 대하여 실제 시료 채취 및 분석 등을 통해 오염을 정확히 확인하는 단계이다. 이 단계에서는 ASTM E-1903-97이 정한 절차를 따르되 현장 상황 및 의뢰자의 요청에 따라 조사 범위가 결정된다.

표 2-30 Phase II ESA 절차

기존 자료 검토	Phase I의 자료를 토대로 오염을 확인하는 절차로서 업무수행 범위 결정, 오염물질의 잠재적인 분포와 이동성 확인
시료 채취	잠재적으로 오염농도가 높은 지점의 시료를 채취하기 위한 작업 부지의 지질 및 인문 상태에 따라 적절한 장비를 선택하는 것이 중요 시료채취 및 분석까지 전체 과정을 당사의 엄격한 QA/QC 기준을 따름
현장 시료 선별	시각적 관찰과 아울러 현장 오염도 스크린장비 등을 이용한 오염정도 파악
시료 분석	정확하고 신뢰성 있게 오염물질을 검출하기 위한 것으로 QA/QC가 필요

### 2.3.4 오염부지 복원조사 및 적용성 평가(Remedial Investigation/Feasibility Study)

Phase I 과 II 일련의 과정에서 오염 확인 지역에 대하여 실제 오염정도를 정확히 평가하는 단계로서, 오염물질의 잠재적 이동경로와 확산 및 오염량과 범위를 산정하고 대상 부지에 대한 지질학적, 수리지질학적, 기타 환경적 특성을 파악하여 복원 방법 선정에 필요한 정보를 제공하는 데 그 목적이 있다.

표 2-31 RI/FS의 절차

작업계획수립	정확한 작업 수행을 위하여 조사 목적에 맞게 시료 채취 지점 및 실험방법의 선정, 적절한 QA/QC방법의 이론적 근거제시
복원조사	부지의 수리 지질학적, 환경적인 특성을 파악하고 모델링을 통하여 조사 부지의 오염원개념 모델을 수립, 조사된 오염원의 특성에 맞게 적용성 평가를 통하여 복원 대안을 제시
적용성 평가	복원조사를 통해 얻어진 부지의 특성에 맞는 적절한 복원 대안들을 선정하고 선정된 방법을 선별하는 과정

표 2-32 부지조사 및 정화설계 기법에 따른 절차와 수행내용

구분	절 차	수행 내용
Phase I ESA	ASTM E 1527-00 Standard Practice for Environmental Site Assessment : Phase I Environmental Site Assessment Process	환경관련 자료 검토 및 관계자 인터뷰, 현장답사를 통한 - 부지 <u>오염개연성의 확인</u> - 부지 환경관리 문제점 도출 - 법적 규제의 준수사항 확인
Transaction Screen Process	ASTM E 1528-00 Standard Practice for Environmental Site Assessment : Transaction Screen Process	환경관련자료 검토 및 관계자 인터뷰, 현장답사 중 에 <u>규정된 질문서 작성</u> 을 통한 - 부지 <u>오염개연성의 확인</u> - 부지 환경관리 문제점 도출 - 법적 규제의 준수사항 확인
Phase II ESA	ASTM E 1903-97 Standard Practice for Environmental Site Assessment : Phase II Environmental Site Assessment Process	오염물질 확인/예측, 지하매설물 누출검사 및 오염 도 분석을 통한 - 부지 내 토양/지하수 오염여부 확인 - <u>오염원의 확인</u> - 추가 조사 필요성 판단
RI/FS	US EPA Guide for Conducting Remedial Investigation and Feasibility Studies (RI/FS) under CERCLA	토양/지하수/폐기물 시료채취 및 물리/화학/생물학 적 특성조사를 통한 - <u>오염범위 및 오염정도 파악</u> - 오염분포 및 오염량 산출 - 오염확산 및 거동 해석 - <u>복원기술 평가 방법 선정</u> - 복원 및 정화비용 산출
RD/RA	US EPA Remedial Design and Remedial Action (RD/RA) Handbook	과업 책임자(RPM)가 성공적으로 정화 설계 및 정 화 조치를 수행하기 위한 - 과업 관리 - RD/RA 과업 계획 - 정부 주도의 <u>정화 설계</u> - 정부 주도의 <u>정화 조치</u>

\* (서민우, 2005)

### 3. 일본

#### 3.1 현황 및 관련법

일본의 토양오염 역사는 1955년 처음으로 카드뮴에 의한 이따이이따이병과 같이 광산에 유래하는 중금속의 농용지 오염으로부터 시작되었다. 이 때문에 일본에서 최초로 제정된 법률은 1970년 공포된 “농용지 토양의 오염방지에 관한 법률”이었다. 이 법률은 농축산물에 대한 건강위해나 농작물의 생육저해방지를 목적으로 해 만들어진 것으로 카드뮴에 대해서는 쌀의 함유량이, 구리와 비소에 대해서는 농용지 토양 함유량이 기준치로 정해졌다.

기준치 이상의 카드뮴을 함유한 쌀이 생산된 지역 또는 우려지역과 구리, 비소의 함유량이 기준치 이상인 농용지로 인정되면 도도부현 지사가 대책지역으로 지정해 토양개선 등의 복원 대책을 실시하게 되었다. 그 후 공업의 발달로 공장으로부터의 배출, 탱크로부터의 누설, 매립 폐기물로부터의 용출, 부적절한 배수의 지하침투 등이 원인인 토양오염이 발생되었다. 그러나 이러한 오염은 공장부지내의 것으로 표면화되기 어렵고 충분히 인식되기도 어려웠다.

시가지의 토양오염으로 최초로 사회문제가 된 것은 1975년 6가크롬에 의한 토양지하수 오염이 계기가 되었다. 1991년에는 “사람의 건강보호와 생활환경보전을 위한 공해대책기본법(1994년 기준 개정에서는 환경기본법)”에 근거해 휘발성 유기화합물 15종, 2001년에는 불소와 붕소 2항목이 추가되어 27항목에 대해 토양환경기준이 설정되었다.

이 중 26항목에 대해서는 지하수 음용에 의한 건강위해의 관점에서부터 토양 용출량에 대한 기준치(용출기준)가 정해져 있다. 또 3항목에 대해서는 농작물에 대한 영향 또는 농작물의 섭취에 의한 건강위해의 관점에서부터 농용지 기준치가 정해져 있다.

또 중금속이나 트리클로로에틸렌 등의 화학물질에 의한 환경오염의 발각이나 불법투기 등의 폐기물의 부적절한 처리문제 등을 계기로 토양이나 지하수오염에 대한 관심이 높아져 지자체에서도 토양지하수보전을 위한 조례나 요강을 제정하고, 사업자들도 자발적으로 환경보전에 임하는 활동이 활발해져 토양지하수오염에 대한 조사를 자발적으로 실시해 오염이 판명되었을 경우에는 적극적으로 정화에 임하는 사례를 다수 볼 수 있게 되었다.

이러한 배경을 바탕으로 1986년 카드뮴 등 중금속과 관련되는 토양오염의 조사·대책의 일반적인 기술적 방법을 나타낸 “시가지 토양오염과 관련되는 잠정 대책지침”을 제정하여 운영하여 오다, 1997년부터 기존지침을 재검토해 새로운 토양오염의 조사·대책지침의 책정에 착수하여 1999년 1월 “토양·지하수오염과 관련되는 조사·대책지침 및 운용기준”을 책정하였다. 또한 1999년 7월에는 “다이옥신 류 대책 특별조치법”이 제정되어 토양오염에 대해서도 도도부현 지사가 대책지역 및 대책계획을 정하여 사업을 수행할 수 있게 되었다.

현재 일본의 토양지하수 오염은 “토양·지하수 오염에 관한 조사 대책지침”으로 관리되고 있으며 유해물질을 사용하는 특정시설에 대한 토양오염의 상황에 대한 부분은 2002년 공포된

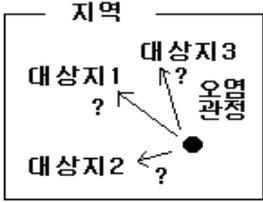
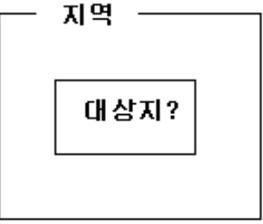
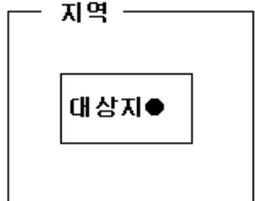
“토양오염대책법”을 통해 이뤄지고 있어 이절에서는 “토양지하수 오염에 관한 조사 대책지침”과 “토양오염대책법”의 토양오염상황조사에 대해 자세히 살펴보도록 하겠다.

### 3.2 토양지하수오염에 관한 조사 대책지침

#### 3.2.1 개요

본 지침은 토양지하수 오염조사 대책의 진행방법에 대해 1장 총론에서 다루고 있으며 해당계기목적과 주체에 따라 <표 2-33>와 같이 지하수 오염 계기형, 현황 파악형, 오염발견형의 3가지 유형이 있다.

표 2-33 해당계기목적과 주체에 따른 오염조사 진행의 3가지 유형

<p>① 지하수오염계기형</p> <p><b>계기</b> : 수질오염 방지법으로 상시 감시에 의한 지하수 오염의 판명  <b>오염</b> : 오염된 우물 존재  <b>목적</b> : 지하수 오염원의 규명 및 대책 실시  <b>주체</b> : 도도부현 지자체 또는 지자체 지도 등을 받은 사업자  <b>대응</b> : 관계지역을 설정하고 지하수 오염원 추정을 실시</p>	
<p>② 현황파악형</p> <p><b>계기</b> : 사업 활동으로 인한 오염의 소지가 있는 경우는 사업장의 이전 또는 재이용으로 토지 개선 기회 등에 실시  <b>오염</b> : 대상지내에 오염 유무는 미지  <b>목적</b> : 토양 지하수 오염상황을 파악  <b>주체</b> : 공유지 관리자 또는 사업자 등  <b>대응</b> : 기본적으로 대상지 전체에 대해서 사전 조사를 실시  오염이 판명된 경우는 지자체 연락 또는 적절한 대책실시</p>	
<p>③ 오염발견형</p> <p><b>계기</b> : 대상지 내의 토양 지하수 오염의 발견  <b>오염</b> : 토양 또는 지하수 오염이 존재  <b>목적</b> : 오염 원인의 규명 또는 대책 실시  <b>주체</b> : 오염을 발견한 공유지 관리자 또는 사업자 등  <b>대응</b> : 오염을 발견한 것을 지자체에 연락하고 발견된 오염 주변을 중점적으로 조사</p>	

조사대상물질은 다음 <표 2-34>과 같다.

표 2-34 토양지하수 오염조사 대책지침의 조사 대상물질

중금속등 13물질	휘발성 유기화합물 11물질
카드뮴, 총시안, 유기인, 납, 6가크롬, 비소, 총수은, 알킬수은, PCB, 티우람, 시마진, 티오벤카브, 셀렌	디클로로메탄, 사염화탄소, 1,2-디클로로에탄, 1,1-디클로로에틸렌, 시스-1,2-디클로로에틸렌, 1,1,1-트리클로로에탄, 1,1,2-트리클로로에탄, 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌, 벤젠, 1,3-디클로로프로펜

### 3.2.2 세부내용

세부조사는 2장 중금속등에 관한 조사와 3장의 휘발성 유기화합물에 대한 조사대책으로 나뉘며 표1의 조사 및 대책의 계기에 의한 3가지 분류유형에 따라 오염원추정조사, 대상지 자료조사, 그리고 개황조사, 상세조사의 순으로 조사가 수행되며 조사결과에 따른 응급, 또는 항구대책까지 포함한 내용을 포괄적으로 다루고 있다. 이 보고서의 주요 관점은 조사이므로 대책에 대한 부분은 생략하도록 하였다.

#### 1) 중금속등에 관한 조사

##### (1) 조사

###### ○ 중금속등에 관한 조사 진행방법

중금속에 대해서는 지하수 오염 계기형의 경우는 지하수 오염 추정조사를 포함해야 하며 현황 파악형과 오염 발견형의 경우는 지하수 오염 추정 조사를 포함하지 않고 대상지 개황 조사 또는 대상지 상세조사 순으로 조사를 진행한다.

##### (2) 지하수오염원추정조사

지하수 오염 계기형의 조사의 경우는 도도부현은 오염원을 추정하기 위해 지하수 오염원 추정조사를 행한다.

지하수 오염추정조사에는 관계지역에 있어서 대상물질의 배출상황, 수문, 지질상황, 지하수 오염의 현황 등을 파악하기 위하여 자료조사 등 지하수 조사를 실시하여 필요에 따라서 양케이트 조사, 설문조사 등을 행한다.

위의 조사결과로부터 오염원으로 생각되는 한 장소 또는 복수의 대상지를 선정한다.

##### (3) 대상지 자료 조사

대상지 자료 조사에는 대상지에 대한 개황을 파악하기 위하여 자료조사를 실시하거나

또는 설문조사 등을 포함한 현지답사를 행한다.

조사는 대상물질의 배출상황, 수문, 지질상황 등 중에 수행이 적절한 분야에 대해 실시한다.

유의 사항 또는 조사결과의 평가는 다음과 같다.

- 지하수 오염 계기형의 경우는 자료조사결과 해당 대상지가 오염원일 가능성이 적은 경우에도 대상지 개황조사 또는 대상지 상세조사를 행한다.
- 현황파악형의 경우는 대상지 자료조사결과, 분명한 오염의 우려가 없는 것으로 판명될 것 이외에는 해당 대상지에 있어서 개황조사를 실시한다.
- 오염발견형의 경우에는 오염의 원인을 규명하는 관점에서 대상지 자료 조사를 행한다. 또 지하수 오염이 판명된 경우에는 대상지 자료 조사결과, 해당 대상지가 오염원일 가능성이 없는 경우에는 오염원이 다르다고 생각되기 때문에 도도부현에서는 관계지역을 설정한 다음 가)지하수 오염계기형의 지하수 오염 추정조사를 행한다.

#### (4) 대상지 개황조사

대상지에 있어서 토양 지하수의 개황을 파악하기 위하여 표층토양의 오염상태에 대해서 또는 우물이 있는 경우에는 지하수의 오염상황에 대해서 조사를 한다.

토양지하수의 시료측정은 각각 토양환경기준 또는 지하수 환경기준 공정법에 의한다. 또 대상지 자료 등 조사결과에서 분명하게 오염의 우려가 없는 물질은 시료 측정대상항목에서 제외해도 좋다. 또한 토양의 표층조사에 있어서 카드뮴, 납, 비소, 총 수은을 대상항목으로 하는 경우에는 함유량에 대해서도 측정하고, 이 경우 함유량의 평가는 함유량 참고치에 의한다.

표 2-35 토양 표층조사 함유량 참고치

물질	함유량 참고치
카드뮴	건토 1kg 당 카드뮴 9mg
납	건토 1kg 당 납 600mg
비소	건토 1kg 당 비소 50mg
총수은	건토 1kg 당 수은 3mg

유의사항 또는 조사결과평가는 다음과 같다.

- 지하수 오염계기형의 경우는 자료조사결과 대상지내에 있어서 대상물질이 침투할 우려가 있는 장소에 대해서 중점적으로 토양 표층조사를 행한다.  
조사결과 대상물질의 침투 우려가 없는 장소에 대해서는 대상지의 전체에 토양에 표층조사를 행한다. 조사는 적절한 간이 측정법을 사용해도 좋다.
- 현황파악형의 경우는 부지전체에 걸쳐 공정법에 의한 토양표층조사를 행하고 환경기준에 의해 대상지 오염상황을 평가한다.  
환경기준에 적합하지 않는 토양이 있는 경우에는 계속적으로 대상지 상세 조사를 행한다. 표층조사에 있어 토양오염이 인정되지 않는 경우에도 우물에 지하수 오염이 있다고 생각되는 경우와 함유량 참고치를 초과하는 지점이 있는 경우 또는 하층 토양오염의 우려가 있는 경우에는 대상지 상세조사를 행한다. 또한 자료조사결과 대상물질이 침투할 우려가 있는 장소가 확인된 경우에는 해당범위에 있어서 중점적으로 토양의 표층조사를 행한다. 이때 적절한 간이 측정법을 사용해도 좋다.
- 오염발견형의 경우는 오염의 평면적인 분포를 파악하기 위하여 토양지하수 오염이 발견된 주변 대상지 조사에 의한 대상물질이 침투할 우려가 있는 경우에 중점적인 토양 표층조사를 행한다.

#### (5) 대상지 상세조사

대상지 개황조사에 의한 토양표층의 오염이 판명된 범위 또는 대상물질이 침투할 우려가 있는 범위에 있어서 보링 조사를 수행하고 토양에 대해서는 심도별 시료를 채취 측정하고 오염의 상황을 상세히 파악한다. 그 결과로부터 대책을 수립할 토양 및 지하수 범위를 설정한다. 이 경우 토양 또는 지하수 시료의 측정은 공정시험법에 의한다.

대책을 수립할 토양 지하수 범위는 토양환경기준 또는 지하수 환경기준에 적합하지 않은 토양 지하수로 한다. 또한 토양에 있어서 환경기준이 적합하더라도 토양이 비산 유출방지 등의 관점에 있어서 필요에 따라 대책을 강구할 경우에는 함유량 측정결과를 함유량 참고치에 기준하여 평가한다.

유의사항 또는 조사결과는 다음과 같다.

- 지하수오염계기형의 경우는 대상지 상세조사의 결과를 지하수 오염원 추정조사 결과와 종합하여 판단하고 대상지에 지하수 오염원이 있는지 없는지를 판단하는 것과 함께 오염이 인정되는 경우에는 대책을 취할 토양 지하수오염의 범위를 설정한다.
- 현황 파악형의 경우는 대상지 개황조사를 통해 토양 및 지하수 오염이 인정되는 범위

에 있는지 파악하고 대상지 상세조사를 통해 대책을 수립할 토양 지하수 오염의 범위를 설정한다.

- 오염 발견형에서 토양오염이 판명된 경우는 대책을 수립할 토양 오염의 범위를 설정한다. 지하수 오염이 판명된 경우, 지하수 오염원으로 우려가 있는 범위에 대해 대상지 상세조사를 수행하고, 토양오염이 인정되지 않는 경우에는 해당 대상지는 지하수 오염원이 아닌 것으로 판단한다.

#### (6) 자연적 원인의 취급

물질의 종류와 자료조사 등에 의하여 토양 지하수의 환경기준 초과가 자연적 원인에 의한 것으로 파악되는 경우가 있다. 이러한 경우는 전문가의 조언을 얻어 종합적으로 판단하는 것이 필요하다.

## 2) 휘발성 유기화합물에 관한 조사

### (1) 조사

#### ○ 휘발성 유기화합물에 관한 조사 방법

휘발성 유기화합물은 휘발성이 높고 액상으로 점성이 작은 물리화학적 성질을 갖기 때문에 중금속과는 다른 거동을 나타내며, 지하수의 수위변동 등 여러 가지 요인에 의한 그 영향범위가 변동할 우려가 있는 성질에 충분히 유의해야한다. 지하수 오염계기형의 경우는 지하수 오염 추정조사를 포함해야 하며 현황파악형과 오염발견형의 경우는 지하수 오염 추정 조사를 포함하지 않고 대상지 개황 조사 또는 대상지 상세조사 순으로 조사를 진행한다.

① 지하수오염원추정조사 : 중금속에 관한 조사내용과 같음

② 대상지 자료 등 조사 : 중금속에 관한 조사내용과 같음

#### ③ 대상지 개황조사

대상지 개황조사는 대상지의 토양 및 지하수의 개황을 파악하기 위하여 표층토양의 오염상태에 대하여 조사를 실시하며 우물이 있는 경우에는 지하수 오염상황조사를 실시한다.

휘발성 유기화합물은 휘발성이 높기 때문에 토양가스 조사법 등의 적절한 간이 측정법을 사용하여 토양 중의 휘발성 유기화합물분포를 파악하며 휘발성 유기화합물에 의한 오염이 인정된 경우 해당 결과를 근거로 조사범위를 설정하고 대상지 상세조사를 수행한다.

유의사항 또는 조사결과 평가는 다음과 같다

- 지하수 오염계기형의 경우 대상지 자료조사결과, 대상지역내에 있어서 오염물질이 침투할 우려가 있는 장소에는 토양가스조사법 등을 이용하여 중점적으로 토양의 표층조사를 실시한다.
- 현황파악형의 경우는 부지 전 지역에 대해서 토양가스조사법 등에 의한 토양 표층조사를 수행하고 휘발성유기화합물에 의한 오염 우려가 있는 경우, 해당조사결과를 근거로 조사대상범위를 선정하여 대상지 상세조사를 행한다.
- 오염발견형의 경우에는 오염의 평면적 분포를 파악하기 위해 토양 및 지하수 오염이 발견된 주변과 대상지 자료조사의 결과에 의해 오염물질이 침투할 우려가 있는 장소에 중점적으로 표층조사를 실시한다.

#### ④ 대상지 상세조사

대상지 개황조사에 의한 표층토양에서 오염이 확인된 지역과 그리고 오염물질이 침투할 우려가 있는 지역에 대해서는 보링조사를 수행하고 토양의 심도별 시료를 채취, 측정하며 오염 상황을 상세히 파악한다. 그 결과로부터 대책을 수립할 토양 및 지하수 범위를 설정한다.

유의사항 조사결과 평가는 다음과 같다.

- 지하수 오염계기형의 경우, 대상지 상세조사결과를 지하수 오염원 추정조사 결과와 종합 판단하여 대상지에 지하수 오염원에 있는지 없는지를 판단한다. 동시에 오염이 인정된 경우에는 대책을 수립할 토양 및 지하수 오염의 범위를 설정한다.
- 현황파악형의 경우는 대상지 개황조사에서 토양 및 지하수 오염이 인정된 지역에 대해 대상지 상세조사를 수행하고 대책을 수립할 토양 및 지하수 오염의 범위를 설정한다.
- 오염 발견형 중에 토양오염이 확인된 경우는 대책을 수립할 토양 오염의 범위를 설정한다. 지하수 오염이 확인된 경우에는 우려지역에 대상지 상세조사를 수행하고 토양오염이 인정되지 않는 경우, 해당지역은 지하수 오염원이 아닌 것으로 판단한다.

### 3.3 토양오염대책법과 토양오염상황조사

#### 3.3.1 토양오염대책법

2002년 5월에 공포된 일본의 토양오염대책법은 토양오염의 상황 파악에 관한 조치 및 그 오염에 의한 사람의 건강 피해 방지에 관한 조치 등을 정해 토양오염 대책의 실시를 도모하

는 것을 내용으로 하고 있다.

목적은 증가되고 있는 토양오염 판명사례건수에 대비하여 토양오염대책에 대한 법제도가 미비하고 토양오염에 의한 사람건강의 영향에 대한 염려와 법제도 확립의 사회적인 요청에 의해 토양오염의 상황파악에 관한 조치 및 그 오염에 의한 사람의 건강 피해 방지에 관한 조치 등을 통해 국민의 건강을 보호하는 것을 목적으로 제정되었다.

토양중의 유해물질이 자연적인 원인에 기인하는 경우 판정방법을 통해 법적용가부를 판단하여 자연적인 원인에 기인하는 것으로 판단되면 이법의 대상에 포함되지 않은 것으로 하고 있다.

다음 그림은 토양오염대책법의 일반적인 절차를 나타내고 있다. 토양오염대책법(2002) 제3조 또는 제4조에 근거한 토양오염상황조사는 토지 소유자 등(소유자, 관리자 또는 점유자)이 환경부장관 지정 조사기관에 의뢰해서 실시하는 것으로 유해물질 사용 특정시설의 사용중단 시와 토양오염에 의한 건강피해가 일어날 우려가 있을 때 그리고 도도부현 등이 인정할 경우에 조사를 실시하고 있다.

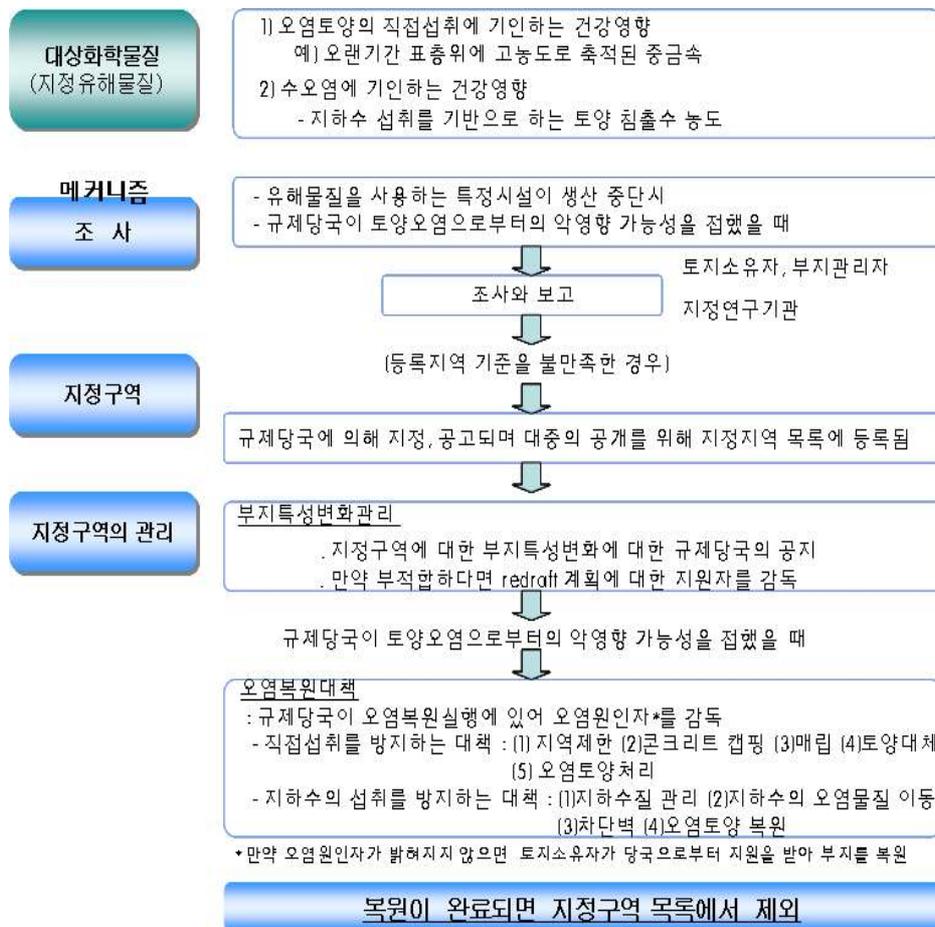


그림 2-3 토양오염대책법의 일반적인 절차

대상물질 또는 조사항목은 토양에 포함되어 사람의 건강에 피해를 일으킬 우려가 있는 물질로, 1) 오염된 토양의 직접 섭취에 의한 건강영향과 2) 지하수 등의 오염을 경유해서 발생한 건강영향에 대하여, 1)은 표층토양 중에 고농도 상태로 장기간 축적할 수 있다고 생각되어진 중금속 등 9개 물질에 대한 토양 함유량, 2)는 지하수 등의 섭취 관점에서 설정되어 있는 토양환경기준 용출항목 25개 물질에 대한 토양용출량(휘발성 유기화합물에 대해서는 토양 가스 포함)으로 표와 같이 납, 비소 등 25개의 물질을 대상으로 하고 있다.

구체적인 조사방법은 <그림 2-3>에 나타난 대로 대상지역과 조사물질을 확인하고 토양오염의 잠재성을 파악하여 대상물질별로 조사지점을 균등히 선정하여 시료채취와 분석을 실시한다. 또한 조사대상이 된 토양 범위는 원칙적으로 [공장 또는 사업장 부지로서 전 구역]이지만, 토지 소유자 등이 과중한 부담이 되지 않도록 토지 이력 등으로부터 오염이 존재할 우려가 적은 것으로 인정되는 구역 등에 대해서는 채취 지점 밀도를 대략적으로 하는 방안을 강구하고 있다.

표 2-36 토양오염대책법의 대상물질(지정유해물질)

Class 1 (VOC)	Class 2 (Heavy metals etc.)	Class 3 (Agrichemicals, PCB..)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• carbon tetrachloride</li> <li>• 1,2 - dichloroethane</li> <li>• 1,1-dichloroethylene</li> <li>• cis-1,2-dichloroethylene</li> <li>• 1,3-dichloropropene</li> <li>• dichloromethane</li> <li>• tetrachloroethylene</li> <li>• 1,1,1-trichloroethane</li> <li>• 1,1,2-trichloroethane</li> <li>• trichloroethylene</li> <li>• benzene</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• cadmium and compounds</li> <li>• hexavalent chromium and compounds</li> <li>• cyanide and compounds</li> <li>• total mercury and compounds</li> <li>• selenium and compounds</li> <li>• lead and compounds</li> <li>• arsenic and compounds</li> <li>• fluorine and compounds</li> <li>• boron and compounds</li> </ul> <p>Risk for direct ingestion (9항목)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• simazine</li> <li>• thiram</li> <li>• thiobencarb</li> <li>• PCB</li> <li>• organic phosphorus compounds</li> </ul> <p>Risk for ingestion through groundwater etc. (25항목)</p>

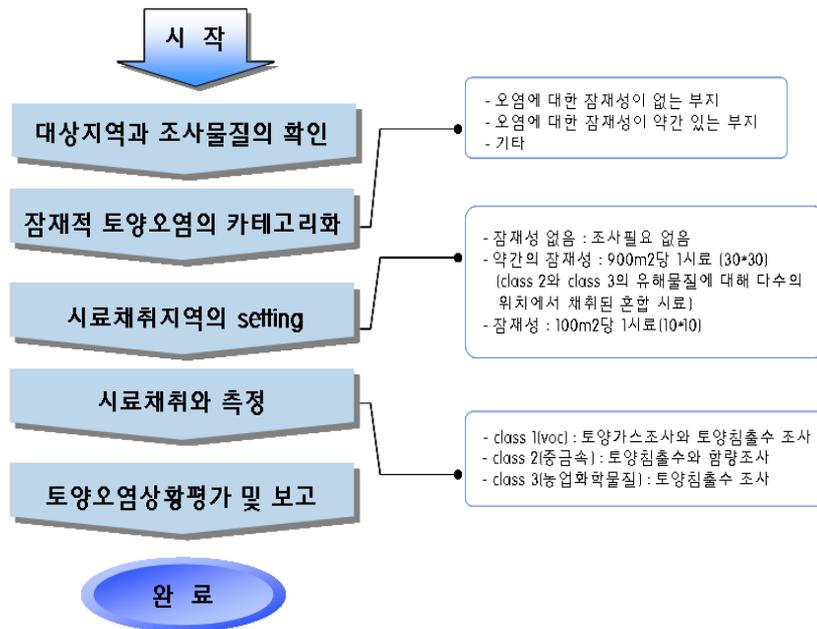


그림 2-4 일본토양오염상황조사 절차

### 3.3.2 토양오염상황조사

#### 1) 대상토지의 범위

법 제3조 제1항의 규정에 의한 토양오염상황조사를 실시할 토지의 범위에 대해서는 특정유해물질을 제조, 사용 또는 처리 했던 유해물질 사용 특정 시설이 존재하는 토지 전체에 대해 토양 오염 가능성이 있을 것으로 판단되는 구역으로부터, 원칙적으로 사용이 폐지된 유해물질 사용 특정시설에 관한 「공장 또는 사업장의 부지에 있었던 토지 전체 구역」으로 한다.

#### 2) 특정유해물질별 수행 조사

특정유해물질별로 실시해야 할 조사에 대해서는, 특정유해물질 특성에 의한 중금속 등, 휘발성 유기화합물, 농약 등 3종류로 분류하고(별지 1-1 참조), 중금속 등에 대해서는, 토양 함유량 조사 및 토양 용출량 조사를, 휘발성 유기화합물에 대해서는, 토양가스 조사 및 토양 용출량 조사를, 농약 등에 대해서는, 토양 용출량 조사를 각각 행하는 것으로 한다.

또한 휘발성유기화합물질에 관해서는 토양 용출량 조사를 행하는 것이 원칙이나, 휘발성 유기화합물은 토양 중에 존재하는 경우, 보다 심부에 침투하기 쉬우며, 휘발한 가스가 토양에 표층 부분에서 검출되기 쉬운 특성이 있으므로 토양가스 조사와 토양 용출량 조사를 조

합하여 조사를 행하는 것으로 한다.

또, 조사 대상 물질이 1,1,1-trichloroethane일 경우에는 그 분해 부산물인 1,1-dichloroethylene 조사를, 1,1,2-trichloroethane일 경우에는 1,1-dichloroethylene, cis-1,2-dichloroethylene 및 1,1-디클로로에탄 조사를, 트리클로로에틸렌의 경우에는 1,1-디클로로에틸렌 및 cis-1,2-디클로로에틸렌 조사를, 테트라클로로에틸렌의 경우에는, 트리클로로에틸렌, 1,1-디클로로에틸렌 및 cis-1,2-디클로로에틸렌 조사를 병행해야 한다.

### 3) 구체적인 조사방법

#### (1) 조사시료의 채취지점

채취지점의 선정방법에 대해서는 조사대상이 되는 범위 내에서 채취 지점의 밀도를 정하고 일률적으로 채취지점을 정할 수 있도록 해야 한다.

구체적으로는, 토양 오염 조사 대책·사례 및 대응 사항에 관한 조사 결과에 의해서 100m<sup>2</sup>에 1 지점의 밀도로 조사를 실시한다면, 오염이 존재했을 경우에 거의 발견할 수 있는 것으로 생각되므로(별지 2-3), 토양 함유량 조사, 토양 용출량 조사 및 토양 가스 조사 등 각 조사와 함께 100m<sup>2</sup>에 1지점 이상의 비율로 조사 지점을 균등하게 선정하는 것을 기본으로 한다. 채취 지점을 확정하는 방법으로는, 대상이 되는 토지 최북단의 지점(복수일 경우는 가장 동쪽)을 기점으로 하여 동서남북 방향으로 10m 사방 격자 상태로 구획하고, 1구획 안에 있어서 1점을 채취 지점으로 하는 것을 원칙으로 한다. 이 경우 격자의 선을 회전 시켜서 구획될 부분의 수를 줄일 수 있는 경우에는, 기점을 중심으로 해서 일정한 방법에 의한 격자의 선을 회전시키는 것을 인정하는 것으로 한다. 각 구획 내 채취 지점에 대해서는 유해물질 사용 특정시설 및 관련되는 배관, 지하 피트, 배수변 등 특정유해물질 사용 등으로 하는 시설의 직하 및 주변은 특별히 토양오염이 존재할 가능성이 높은 장소이므로 구획 내에 이런 장소가 있는 경우에는 반드시 채취 지점이 되도록 해야 하고 특별히 오염의 가능성이 높은 장소가 존재하지 않은 경우에는 구획의 중앙을 채취 지점으로 한다.

또한, 자료 조사 등에 의한 특정유해물질 오염이 존재할 가능성이 적은 부분에서는 도도부현 지사가 확인하고 900m<sup>2</sup>에 1지점 이상의 비율로 조사지점을 균등하게 선정할 수 있도록 한다. 이 경우에는 대상 범위를 원칙적으로 동서남북 방향으로 30m 사방의 격자 상태로 구획하고 각 구획의 중앙을 채취 지점으로 한다. 이 때, 휘발성유기화합물 이외의 물질에 대해서는 1 조사 지점 당 5지점을 균등 혼합법(중심 및 중심에서 동서남북 방향으로 10m의 지점 5 장소)으로 조사를 하는 것으로 한다. 법 제5조 제1항의 지정 구역 지정에 관한 기준(이하 지정기준이라 한다)을 초과한 구획에 대해서는 지정 구역의 범위를 더욱 좁히기 위하여 해당 구역을 다시 10m 사방 격자 상으로 구분하고, 각 구역의 중앙을 채취 지점으로 하는

것이 가능한 것으로 한다. (구획과 지정 구역의 지정 방법과의 관계에 대해서는 별지 2-4 참조)  
또, 조사 대상 지역의 1구획 또는 복수의 구획에 있어서 토양 오염의 존재가 확실한 경우에는 그 지점에서 토지 소유자 등이 조사 하지 않은 구획을 포함한 지정 구역으로서 적당하다고 희망하는 경우에는 조사의 효율화 및 조사비용 저감 관점에서 그 선택을 인정하는 것으로 한다. (별지 2-5)

## (2) 조사시료의 채취심도 등

### ① 중금속류 및 농약류

중금속류 및 농약류의 채취심도에 대해서는 이 물질들의 오염이 존재할 경우에는 토양 표층 부분에 해당 물질이 존재하고 있는 경우가 많으므로 토양 함유량 조사 및 토양 용출 조사를 이용한 시료를 표층부분에서 채취하는 것으로 하고 구체적으로는 표층(지표면에서 깊이 5cm)의 토양 및 그 직하에서 45cm까지의 토양을 깊이 방향으로 균등하게 채취하고 그것들의 동량을 균등하게 혼합하여 하나의 시료로 한다.

### ② 휘발성유기화합물

휘발성유기화합물에 있어서 토양가스 조사의 채취심도에 대해서는 오염이 존재하는 경우, 토양 가스를 검지할 수 있는 심도로 하고, 구체적으로는 지표에서 대개 1m의 지중의 토양 가스를 채취하는 것으로 한다. (지하수 등의 존재로 토양 가스가 채취 안 된 경우에는 해당 지하수 등을 채취하는 것으로 한다)

채취한 토양가스가 거의 불검출인 경우에는 조사를 종료하는 것으로 하지만, 그렇지 않은 경우에는 보링 조사를 한다. 보링 조사는 토양가스 농도가, 인접한 다른 구획에 비해 상대적으로 높은 구획(복수일 경우는 그 전부)에 대해서는 필요에 따라 구획 내의 고농도 지점만을 조사한 후에 지표에서 10m까지(첫 대수층 바닥이 지표에서 10m 이내에 있는 경우에는 대수층 바닥까지) 보링 하며, 표층, 지표에서 50cm 이하 및 지표에서 1m마다 10m의 심도까지(첫 대수층 바닥이 지표에서 10m 이내에 있는 경우에는 대수층 바닥까지) 토양을 채취하고 각각을 측정 시료로 하며, 토양 용출량을 측정하는 것으로 한다. 이 때, 어느 구획에서 오염의 존재가 인정될 경우에는 그 지점에서 보링 조사를 종료할 수 있다. 또, 토양 가스 조사에 의한 해당 물질이 검출된 구획이 있는 경우에는 보링 조사를 하지 않고, 토양 가스 조사에 의한 검출된 것으로 해당 구획을 지정구역으로 할 수 있다.

또, 토양가스가 채취 안 되기 때문에 지하수를 채취한 경우에는 해당 지하수가 수질 오락 방지법의 정화 기준을 초과한 경우에 토양 가스가 검출된 것과 동등한 것으로 보고 동일한 조사를 하는 것으로 한다.

### (3) 주변에 음용 이용이 있는 경우의 조사

해당 토지의 주변에 지하수의 음용 이용이 있는 경우로

① 해당 토지의 주변 지하수에 오염이 있는 경우 , 또는

② 해당 토지의 토양오염이 존재하는 것이 확실하기 때문에 법 제 4조 제 1항의 조사가 명령된 경우에는

(1) (2)의 조사에 의한 오염이 발견되지 않는 경우라도 다음조사를 해야 한다.

○ 해당 토지 주변의 지하수 오염이 있는 경우

해당 토지 오염 가능성이 높은 장소 1지점에 있어서 보링 등에 의한 지하수 오염조사를 하는 것으로 한다. 그 결과 지하수 오염이 판명된 경우에는 다시 해당 토지 오염 상황에 대해서 보링에 의한 토양 용출량 조사를 하는 것으로 한다.

○ 해당 토지에 토양오염이 존재하는 것이 확실한 경우

해당 토지 토양오염이 존재하는 것이 확실한 장소 1지점에 있어서 보링 등에 의한 지하수 오염 조사 및 토양 용출량 조사를 하는 것으로 한다.

### (4) 특정 유해물질 별 측정방법

특정유해물질 별 측정방법에 대해서는 토양 용출량에 대한 토양환경기준 측정 방법을 사용하는 것으로 한다.

또한, 토양가스의 구체적인 측정방법에 관해서는 조사대상지에 휘발성 유기화합물이 존재한 경우에는 대부분을 검출할 수 있는 수준의 검출 정도가 필요하고, 이것을 고려하여 채취한 토양가스를 가스크로마토그래프 등에 의해 분석하는 토양가스조사법(별첨자료)에 의한 것으로 한다.

#### ※ (4)의 「주변의 음용이용이 있는 경우 등」의 고려방법

토양오염에서 특정유해물질이 지하수에 용출한 경우에는 해당 특정유해물질을 포함한 지하수가 도달할 수 있는 것으로 생각되는 일정한 범위 내에 있어서 음용 이용이 있는 경우 등에 있는 것을 말한다. 또한 여기서 「일정한 범위 내」에 대해서는 특정유해물질의 종류, 각각의 토지에 있어서 지질과 지하수 상황 등에 따라 다른 것으로, 대략 지금까지 지하수 오염이 판명된 사례에 있어서 오염원에서 기준 초과 관정까지 최장거리 등의 실태와 휘발성유기화합물 및 중금속류의 토양오염에 기인하는 지하수 오염에 관한 시뮬레이션 결과에서 대

개 수백 m에서 수 km의 범위로 생각한다.

또한, 「음용이용이 있는 경우 등」에 대해서는 수질오탁방지법에 기준한 지하수정화 조치 명령의 발동요건과 같이 다음의 요건에 해당하는 경우로 한다.

- 사람의 음용에 제공 됐거나 또는 제공되었던 것이 확실한 경우
- 수도법에 규정하는 수도 사업, 수도용수 공급사업, 또는 전용 수도를 위한 원수로서 취수 시설에 의해 취수되거나 또는 취수되는 것이 확실한 경우
- 재해대책 기본법에 규정하는 도도부현 지역 방재 계획 등에 기준한 재해 시에 있어서 사람의 음용에 제공된 물의 수원으로 지정된 경우
- 수질환경기준이 확보되지 않은 공공수역의 수질오염의 주요원인 또는 원인임이 확실한 경우

**별지2-1 법 제 3조 제 1항의 조사 대상이 되는 토지 범위에 대해서..**

**(1) 기본 개념**

법 제3조 제1항의 조사 대상이 되는 토지 범위는 특정유해물질의 제조, 사용, 처리 하는 시설이 존재하는 일련의 토지전체에 토양 오염 가능성이 있는 것으로 「공장 또는 사업장의 부지에 있는 토지의 전 구역」으로 한다.

또한, 사업장 토지 내에서 오염이 존재할 가능성이 적은 부분(사무소, 관리동 등)을 구획하고 도도부현 지사가 확인 가능한 경우에는 조사방법에서 시료채취 지점의 밀도를 포괄적으로 취급을 한다. 또한 오염이 존재할 가능성이 없다고 생각되는 부분(운동장, 종업원용 주차장 등)을 구획하고 도도부현 지사가 확인 가능한 경우에는 시료채취를 하지 않아도 되는 것으로 한다.

**(2) 구체적 범위에 대해서**

다음의 범례를 <그림 2-5> ~ <그림 2-8>에 적용한다.

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>① : 일반적인 조사를 수행한다. (시료채취 100m<sup>2</sup> 당 1지점)</li><li>② : 시료채취 지점의 밀도를 포괄적으로 조사한다. (시료채취 900m<sup>2</sup> 당 1지점)</li><li>③ : 시료채취를 하지 않는다.</li></ul> |
|---|

(3) 일반적인 공장·사업장

- ① 유해물질 사용 특정시설이 설치되어 있던 장소뿐만 아니라 공장 사업장에 부지 전체를 일반적인 조사 대상으로 한다.

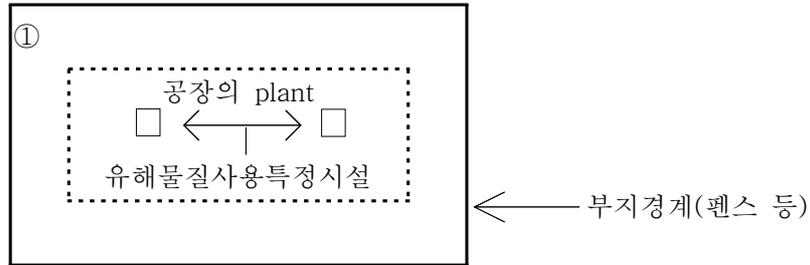


그림 2-5 통상적인 공장, 사업장의 경우 시료채취

- ② 공장 사업장의 부지가 공도 등에 의해 구분되고 한편으로는 유해물질 사용 특정시설이 설치되어 있지 않는 경우는 그 부지는 일반적인 조사 대상으로 하지 않는다. (단, 배관이 접속된 특정유해물질을 취급하는 공정 일부가 놓인 경우에는 특정유해물질을 취급하는 공정에서 배수를 받아들이는 경우에는 통상의 조사대상으로 한다.)

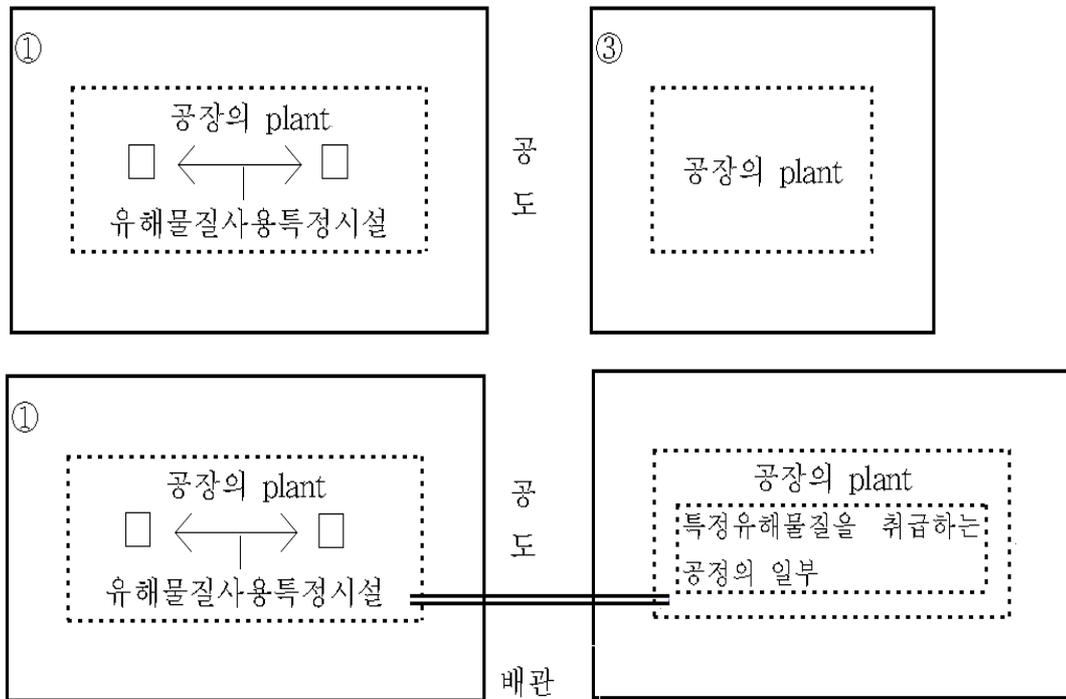


그림 2-6 유해물질사용특정시설 설치여부에 따른 시료채취

**(4) 오염 가능성이 적은 부분을 포함한 공장, 사업장**

- ① 공장, 사업장에 있어서 해당 공장, 사업장의 조업 중에는 사무소 등으로서만 사용된 것이 확인된 부분에 대해서는 시료채취지점 밀도를 포괄적으로 하는 것이 가능하다. 또한, 운동장, 종업원용 주차장 등의 부지는 시료채취를 하지 않아도 좋다.

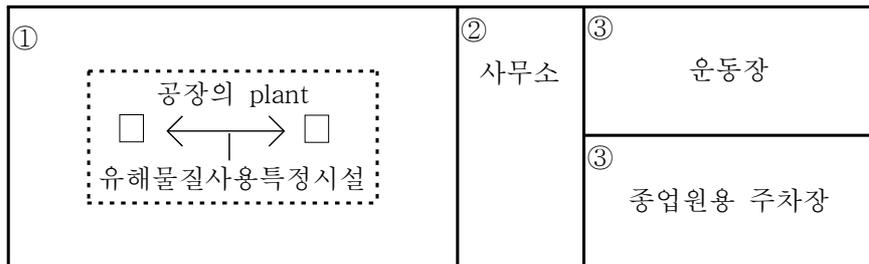


그림 2-7 오염가능성이 적은 부분을 포함한 경우 1의 시료채취

- ② 대학 등에 대해서는 교실동, 강당 등으로만 사용된 것이 확인 가능한 부분에 대해서는 시료채취 지점의 밀도를 포괄적으로 하는 것이 가능하다. 또한, 운동장, 종업원용 주차장 등의 부지는 시료채취를 하지 않아도 좋다.

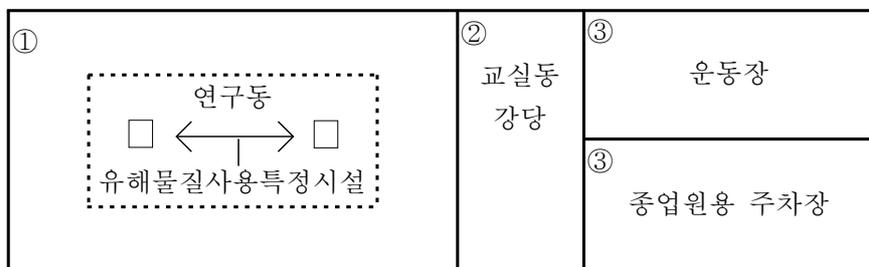


그림 2-8 오염가능성이 적은 부분을 포함한 경우 2의 시료채취

**별지 2-2 휘발성 유기화합물의 토양 오염 상황 조사에 대해서**

**(1) 휘발성 유기화합물의 토양 오염 상황 조사와 지정 구역의 지정**

법에 근거하여 실시되는 토양 오염 상황 조사에 대해서는 가능한 한 간이 및 저비용으로 오염 존재를 명확하게 파악할 수 있도록 할 필요가 있다. 이를 위해 토양 중 휘발성 유기화합물의 지하수 용출에 관한 토양 용출량 조사에 대해서는 휘발성 유기화합물의 특성인 휘발성을 이용하여 우선 표층에서 토양 가스 농도 측정에 의해 토양 중의 특정 유해물질의 존재 유무를 확인하여 오염 범위를 확정한다.

다음으로 오염 존재가 확인된 경우에는 토양 가스 농도가 인접하는 타 구획에 비해 상대적

으로 높은 구획(복수인 경우는 전부 포함)에 대해 보링 조사를 하고, 토양 중 특정 유해물질의 용출량이 지정 기준 초과 여부를 확인하고 지정 구역으로서 지정한다. 또한 토양 가스 농도가 상대적으로 높은 구획 모두에 대해 보링을 하고, 어떤 경우든 특정 유해물질의 용출량이 지정 기준을 밑도는 경우에는 기준 이하의 토양 오염으로서 조사를 종료한다. (첫 번째 장소에서 지정 기준 초과가 인정된 경우에는 보링은 한 장소로 좋다.)

표층의 토양가스 조사에 의해 특정 유해물질이 검출된 경우에는 그 밑부분이 지정 기준을 초과하는 오염 토양이 존재할 가능성이 높기 때문에 토지 소유자 등이 보다 저비용으로 조사를 원할 경우에는 토양 가스 조사 결과만으로 지정 구역으로서 지정한다.

### (2) 조사에서 지정까지의 순서

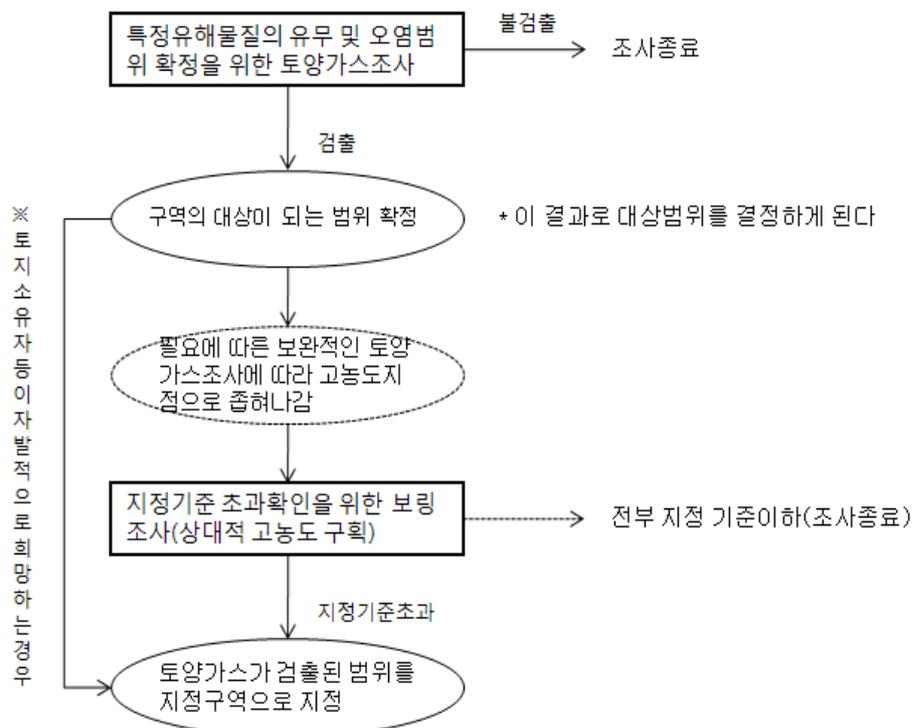


그림 2-9 휘발성 유기화합물의 토양조사에서 지정까지의 순서

### (3) 토양가스 조사를 근거로 한 오염 범위의 선정 방식

본 조사 방법은 지정 기준을 초과하는 오염 토양 유무 확인을 우선 목적으로 하고 있으므로 지정 기준을 초과하는 오염 토양 범위를 완전히 확인하는 것은 불가능하고, 확인을 위해서는 보다 많은 보링 조사를 할 필요가 있다. 따라서 지정 구역은 토양 가스 조사에 따라 유해물질이 검출된 구획을 지정하는 것으로 한다. 이러한 방식에 따라 지정된 범위는 실제 오염 범위보다 넓게 설정되는 것으로 볼 수 있으나 오염 제거 등의 조치로서 실시될 모니터

링 조사에 대해서는 보링 지점에 대해 실시하면 되고, 또한 밀봉 또는 정화(굴삭제법, 원위치 정화 등)를 실시하는 경우에는 필요에 따라 오염 범위를 확정하면서 조치를 실시하게 되므로 실태 상 문제는 일어나지 않을 것으로 판단된다.

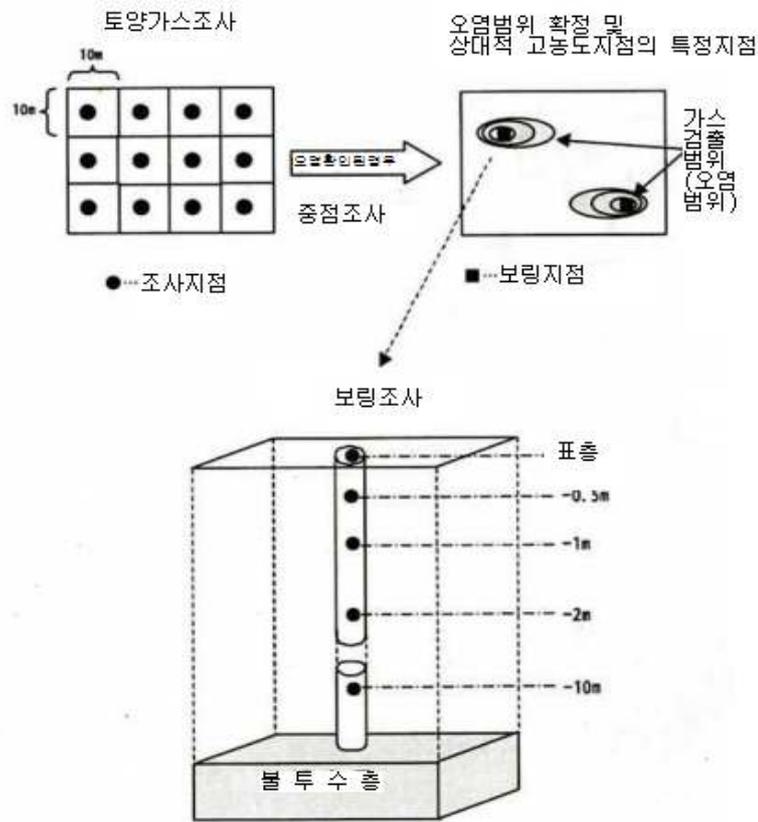


그림 2-10 토양가스 조사를 근거로 한 오염 범위의 선정

**별지 2-3 토양오염조사에 시료채취 지점의 밀도에 대해**

2000년 토양오염 조사·대책 사례 및 대응 상황에 관한 조사 결과(환경성 환경관리국 물 환경부)에 따르면 지금까지 판명된 토양환경기준을 초과하는 사례 중에 오염 면적이 파악된 경우는 다음 그림과 같으며 오염 면적이 100m<sup>2</sup> 이상의 사례가 330건 중에 267건으로 약 80% (중금속 등은 201건 중 174건으로 약 86%, VOC는 126건 중 93건으로 약 72%) 정도이므로 가령 100m<sup>2</sup> 당 1지점 이상의 밀도로 표층 토양 조사를 실시하면 토양 오염 상황이 거의 파악될 것으로 판단된다.

**별지 2-4 구획과 지정구역의 지정 방법**

지정구역의 지정은 격자 상으로 나눈 구획 마다 판단하며 구획 내에서 채취한 토양이 지정 기준을 초과하고 있는 경우에는 해당 구획 전체를 지정구역으로 하는 것을 기본으로 한다.

이 경우 1) 기본 100m<sup>2</sup>

※ 세부사항은 오른쪽과 같음

180 m <sup>2</sup> 이상	약 66%
225 m <sup>2</sup> 이상	약 62%
400 m <sup>2</sup> 이상	약 52%
625 m <sup>2</sup> 이상	약 44%

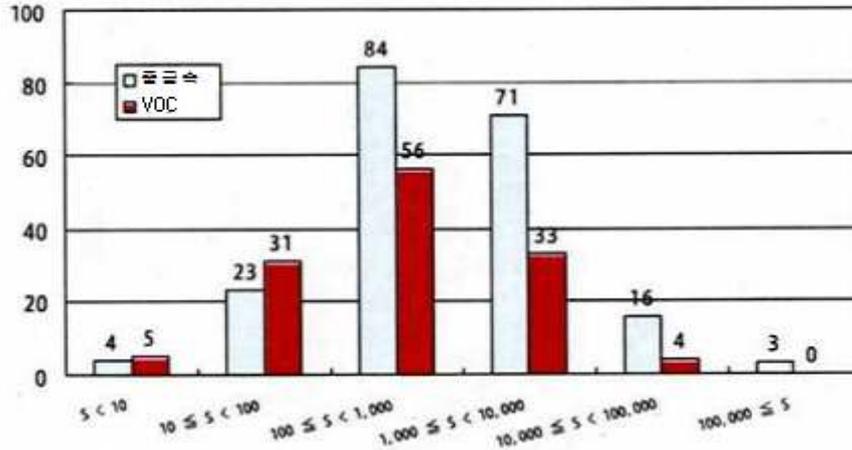


그림 2-11 오염면적별 (m<sup>2</sup>) 사례수

격자 상으로 구획한 토지의 경우, 2) 오염이 존재할 가능성이 낮은 부분으로서 900m<sup>2</sup> 격자 상으로 구획한 경우, 각각의 조사 지점 및 지정 구역은 다음과 같이 한다.

(1) 100m<sup>2</sup> 격자 상으로 구획한 경우

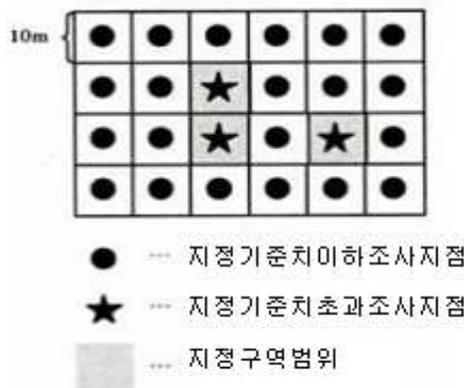


그림 2-12 100m<sup>2</sup> 격자 상으로 구획한 경우

이 경우는 구획 내에 한 지점을 조사한 결과 지정 기준을 초과한 100m<sup>2</sup> 구획 전체를 지정 구역으로 한다.

(2) 900m<sup>2</sup> 격자 상으로 구획한 경우

이 경우는 구획 내를 5 지점 균등 혼합법에 의해 조사한 결과, 지정 기준을 초과한 900m<sup>2</sup> 구획 전체를 지정 구역으로 한다. 지정 기준을 초과한 900m<sup>2</sup>에 대해 지정 구역 범위를 보다 좁히기 위해 내부를 100m<sup>2</sup> 단위로 구획한 경우는 새로운 9 구획 마다 또는 9구획 중 5 지점 균등 혼합법으로 시료 채취를 하지 않은 4구획 마다 구획 내 한 지점을 조사하고, 그 결과 지정 기준을 초과하지 않은 100m<sup>2</sup> 구획에 대해서는 지정 구역에서 제외시키는 것으로 한다.

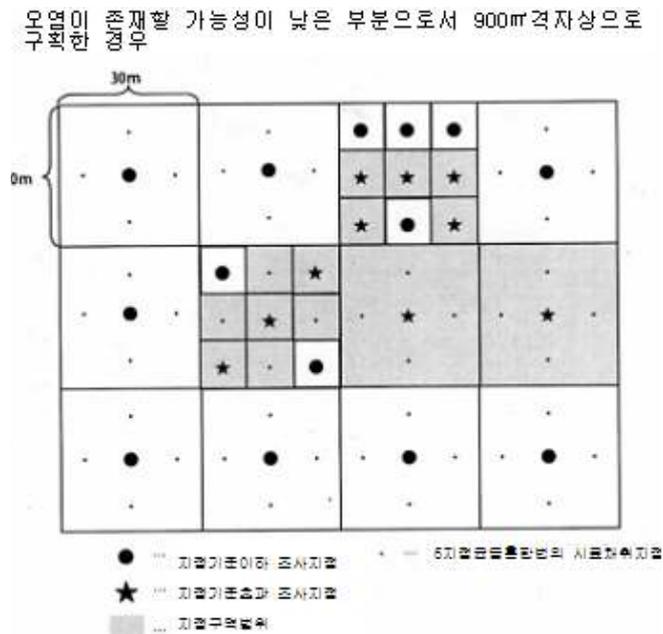


그림 2-13 900m<sup>2</sup> 격자 상으로 구획한 경우

별지 2-5 토양오염상황 조사에서 토지 소유자 등의 선택

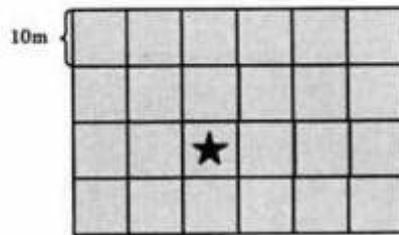
토양 오염 상황조사는 100m<sup>2</sup>의 한 지점의 밀도로 구획 전체를 조사하는 것을 기본으로 하지만 조사를 실시해서, 예를 들어 최초 첫 번째 구획에서 토양 오염이 확실한 시점에서 토지 소유자 등이 오염 범위를 상세히 조사한 상황에서 오염 제거 등 조치를 실시하려고 하는 경우에는 그 이상의 구획 조사는 오염 범위 확정을 위한 상세 조사와 중복될 가능성이 있다.

이러한 경우 토양오염 존재가 확실한 시점에서 토지 소유자 등이 모든 구획을 조사하지 않고 조사하지 않은 구획을 지정 구역으로 해도 무방하다고 할 경우 그 선택을 인정한다. 이때, 조사의 효율화 및 조사비용 저감 등의 관점에서 조사를 실시하는 구획 선택은 토지 소

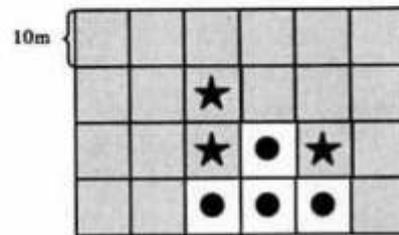
유자 등이 판단해서 실시하는 것으로 한다.

이 경우, 조사 결과와 지정 구역과의 관계에 대해서는 조사해서 지정 기준을 초과한 구획 및 조사하지 않은 구획을 지정 구역으로 하고, 조사해서 지정 기준 이하의 구획이 존재하는 경우에는 그 구획을 지정구역에서 제외한다.

CASE 1: 최초 1구역에서 오염이 판명되어 조사를 종료한 경우



CASE 2: 몇개 구역에서 조사한 후에 종료한 경우



- ... 지정기준 이하 조사지점
- ★ ... 지정기준 초과 조사지점
- ... 지정구역범위

그림 2-14 CASE 1과 CASE 2

## 4. 캐나다

### 4.1 현황 및 관련 법

캐나다는 미국과 유사하게 ASTM(American Society for Testing Materials)에 의한 규격에 의한 조사와 이와 더불어 Environmental Site Assessment(ESA) 평가기법을 통해 토양오염 조사가 이뤄지고 있다. ASTM E 1527과 Canadian standards association CSA STANDARD Z 768-01 : Phase 1 Environmental Site Assessment 을 토대로 기초, 정밀, 복원을 위한 추가 조사의 형태로 조사가 이뤄지고 있다.

이는 미국의 경우와 상당히 유사한 형태이므로 생략하고 캐나다의 유콘주의 오염부지에서의 토양 시료채취 절차를 소개하고자 한다.

### 4.2 유콘주의 오염부지에서의 토양 시료채취 절차 소개

유콘주에서의 오염부지 토양시료채취절차에 대해 살펴보겠다. 유콘주에서는 캐나다 정부의 ESA 방법 외에 주정부에서 토양오염부지에서 사용될 시료채취절차에 대해 표준화하고 일관된 접근법을 보증하도록 하기위해 오염부지에서의 토양시료채취절차에 대해 의정서를 마련하여 제시하고 있다. 특히 Step-Out and Step-Down 시료채취를 제시하여 오염의 범위를 명확하게 산정하고자 하였음을 알 수 있었다. 또한 현장토양시료채취의 2가지 형태인 부지 평가시료채취와 확인시료채취에 대해 역점을 두어 다루고 있다.

다음은 유콘주의 오염부지에서의 시료채취절차에 대한 내용이다.

#### 4.2.1 소개

이 법규는 토양, 퇴적물, 물, 눈 등 다른 환경매체에 이 법을 승인하고 적용하도록 장관에게 권한을 부여하였다. 또한 토양오염부지에서 사용될 시료채취절차에 대해 표준화하고 일관된 접근법을 보증하도록 설계되었다.

부지평가시료채취는 정확도를 하기 전에 수행되며 오염물질의 직접 굴착을 위해 또는 다른 적절한 정확도 방법을 선택하기 위한 자료 수집을 위한, 부지에서의 오염의 형태와 수준, 정도를 정하는데 주로 사용된다. 또한 관리될 필요가 있는 오염물질의 양을 최소화할 수 있도록 오염원과 오염물질 사이의 공간적 상관관계를 설정하도록 한다.

확인시료채취는 굴착이나 정확도가 모든 오염물질을 성공적으로 제거하였음을 확인하는데 사용된다.

부지소유자 또는 운영자의 책임은 모든 적용 가능한 유콘주의 법과 법규, 기준에 따라 오염물질이 적절하게 특성화되고 적절한 검증시료채취가 수행되었음을 보증하는데 있다.

특히 부지평가에서는 가능하다면 이동의 정도와 지역을 포함하여 부지에서의 오염물질의 정도와 심도, 특정지역들을 충분히 철저하게 파악해야한다.

굴착에 따르는 석유탄화수소와 같은 물질은 지상처리시설에서 일반적으로 처리되는데 처리 절차의 완료에 따라 제거되기 전에 반드시 시료채취 되어야 한다.

지상처리시설의 시료채취 물질에 대한 절차는 이 의정서에서 다루고 있지는 않다.

## 4.2.2 부지평가

### 1) 산업표준

부지조사(환경부지평가 1단계로 알려진)는 캐나다 기준 협회와 ASTM, 그리고 산업 사례에서 일반적으로 수용되는 것들과 같은 산업표준으로 관리할 뿐 아니라 오염부지법규에 따라 수행된다. 이 부지조사는 오염될 것으로 의심되는 위치에서의 장래 시료채취에 초점을 맞춰 지원한다. 부지평가(또한 환경부지평가 2단계로 알려진)는 캐나다 기준 협회와 ASTM, 그리고 산업 사례에서 일반적으로 수용되는 것들과 같은 산업표준으로 관리할 뿐 아니라 오염부지법규에 따라 수행된다. 시료들은 표준 산업사례에 따라 받아들여진다. 그리고 신뢰도 있는 결과를 얻기 위해 경험있는 전문가에 의해 채취된다.

### 2) 초기 특성화

부지의 초기특성화하는 동안 부지조사를 통해 확인된 핫스팟이나 핫스팟 우려지점에 초점을 맞춤으로서 편향된 시료채취가 수행될 수 있다. 어떤 경우에는 부지조사에서도 오염이 우려가능한 지점이 드러나지 않을 수 있는 지역과 같은 경우에는 시료채취는 아마도 시료 지점간 25~50m의 coarse 격자를 사용한다. 격자시료채취가 사용된 지역에서는 더욱더 큰 관심으로 부지조사동안 확인될 핫스팟 우려지점에 초점이 맞춰져야 될 것이다. 시료는 토양이나 복토재의 주요형태를 대표하도록 각 위치와 심도에서 상대적으로 균질해야한다. 표층 시료는 부지 표층 아래로 최대 0.5m 깊이에서 일정한 심도 간격으로 채취되어야 한다. (보통 0.5, 0.75, 1.0m 간격) 특정폐기물로 분류된 토양은 10m<sup>3</sup>, 다른 오염토양일 경우 50m<sup>3</sup>로 각 시료를 대표하도록 충분한 시료가 채취되어야 한다. 대부분의 경우 적어도 시료는 석유계탄화수소 계열에 대해서는 분석되어야 하며 다른 기준에 대해서는 오염의 특성에 따라 달라질 것이다. 분석되어야 할 석유계탄화수소 성분에 대한 정보는 의정서 5를 참고한다.

토양에서의 석유계탄화수소에 대한 캐나다-wide 표준에서 규정하고 있는 석유계탄화수소 계열에 대해 분석할 모든 시료는 grain 크기의 실험실 분석에서 수행되어야 한다. 만약 이러한 분석이 수행되지 않는다면 grain size의 가장 엄격한 기준이 적용될 것이다.

## Protocol for the Contaminated Sites regulation under the Environment Act

### - Soil sampling procedures at contaminated sites

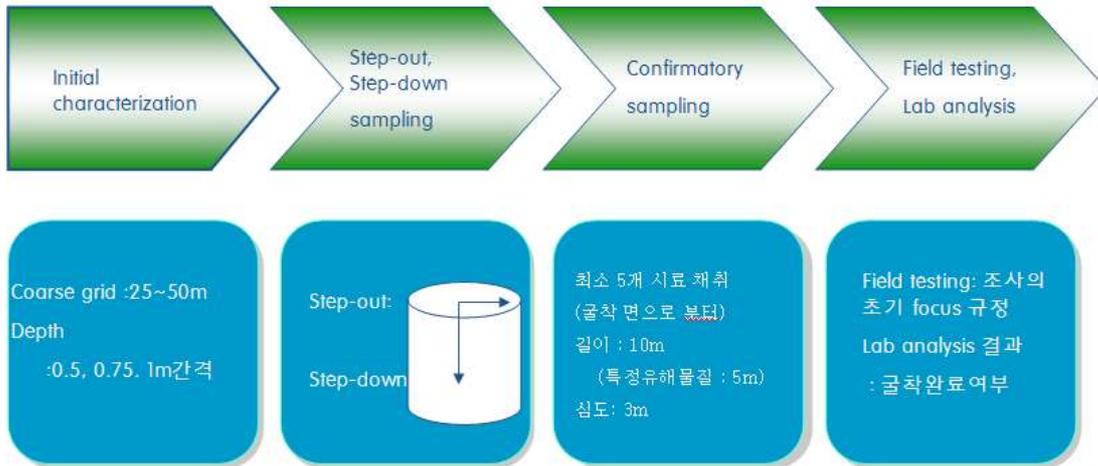


그림 2-15 유콘주의 오염부지에서의 시료채취절차

### 3) Step-Out and Step-Down 시료채취

오염지역으로 확인되고 확정되면 step-out 시료가 원래 시료와 같이 동일 심도에서 채취되어야 할 것이다. step-out 시료의 위치는 부지조사 하는 동안 수집되거나 또는 기존 분석 자료에서 수집된 정보를 기준으로 선정되어야 할 것이다. 시료가 오염을 나타내면 오염이 나타나지 않는 깊이와 오염이 나타나지 않는 가장 가까운 시료채취위치까지 오염지역 크기를 추정해야 할 것이다. 만약 step-out 시료 한 개가 채취되고 오염되지 않은 것으로 나타나면 오염은 원래 오염시료와 오염되지 않은 step-out 시료사이의 거리와 동일한 반경으로 원래 오염시료를 중심으로 하는 원이 만들어지도록 추정될 것이다. 만약 step-out 시료들의 채취가 없으면 오염지역의 크기는 산정하기 어렵다. 더 많은 시료가 채취되면 될수록 정확에 더 적은 비용이 들도록 기인하는 더 엄격한 오염 지역이 규정될 것이다. 가능하면 모든 방향에서 step-out 시료가 취해지도록 권장한다. 오염의 수평적 정도의 결정과 동시에 수직적 정도도 또한 반드시 step-down 시료를 이용하여 묘사되어야 할 것이다. 오염지역은 오염이 감지된 각 시료채취위치에서 가장 천부의 오염되지 않은 step-down 시료의 깊이로 규모가 추정될 것이다. 유콘 환경사회경제평가법은 만약 3000m<sup>3</sup> 이상의 오염물질을 포함하는 어떤 활동에 대해 허가가 이뤄지려면 평가의 수행을 요구한다. 이 평가는 허가가 나기 전에 완료되어야만 한다. 이러한 평가는 활동과 관련한 비용을 증가시키거나 중대한 지연을 일으키기도 한다. 그러므로 이러한 한계치를 불필요하게 초과하는 것을 방지하도록 가능한 한 엄격하게 오염지역을 규정하는 것이다. 만약 굴착이 정확의 방법으로 선택되었다면 기준을

초과하는 모든 물질이 굴착되어야 하며 적절하게 관리되어야 하며 굴착된 바닥과 벽면에서 검증시료채취가 이루어져야 한다.

#### 4) 검증시료채취

오염물질의 굴착 다음에, 그 위치에 남아있는 오염물질이 없다는 검증을 위해 굴착 바닥과 벽면에서 시료가 채취되고 분석되어야 한다. 굴착바닥에서 1개, 각 벽면에서 1개씩 최소 5개 시료가 굴착 면에서 채취되어야 한다. 각 굴착면에 대해 1개 시료가 10m 길이마다 채취되어야하며(특정폐기물에 대해서는 5m) 또한 각 3m 깊이마다 1개 시료가 채취되어야 한다.

#### 5) 현장실험 대 실험실 분석

부지평가나 굴착을 가이드하는데 실험실분석은 종종 분석 결과를 쓸 수 있는 적정시간 내에 완료되지 못하는 경우가 있다. 다양한 형태의 현장장비가 현장 작업하는 동안 오염수준을 추정하는데 사용될 수 있다. 실제로, 조사의 초기문제를 규정하는데 현장실험의 사용이 권장된다. 그러나 이러한 현장실험의 결과는 다른 법적 요구사항이나 오염부지법규를 준수하는데 사용되지는 않는다. 그러나 특별히 물질 특성화의 재배치에 사용되는 검증 시료와 시료들은 실험실분석에 따른다.

굴착은 검증 분석결과를 받기 전에 완료되어야 하며 만약 오염수준이 결과적으로 적용 가능한 부지 사용기준 이상으로 나타나면 부지가 오염부지법규에 따라 오염된 부지로 설계되어야 한다.

#### 6) 분석적 인자들

오염부지법규의 기준들은 시료매체의 특성에 의존한다. 어떤 기준은 pH-의존형이어서 즉, 적용 가능한 기준은 토양의 pH에 따라 변하며 또 다른 기준은 토양의 grain 크기에 따라 변한다. 시료가 특정 오염물질에 대해 분석되었을 때 이들 다른 인자들은 반드시 결과가 올바르게 해석될 수 있도록 측정되어야한다. 이들 인자들은 다른 분석들이 수행될 때 실험실에 의해 측정될 수 있다. 필요한 인자들이 보고되지 않는 지역에 대해서는 가장 엄격한 기준이 적용될 것이다.

## 5. 호주

호주는 CLM Act(Contaminated Land Management Act)를 통해 오염부지와 관련한 다양한 지침들을 제정하여 관리하고 있다. 그 중 Sampling Design Guidelines와 관련하여 호주의 토양오염조사현황을 알아보겠다.

### 5.1 현황 및 관련 법

호주 및 뉴질랜드 국립보건의학연구위원회(Australian and New Zealand National Health and Medical Research Council: ANZNHMRC)의 환경보건위원회(Australian and New Zealand Environment and Conservation Council: ANZECC)에서 호주와 뉴질랜드 양국의 토양오염관리 및 기준을 설정하여 토양환경을 관리하고 있다.

호주의 대표적인 주인 뉴사우스웨일즈(NSW ; NEW South Wales)주의 경우 오염부지의 관리는 환경청과 계획부 및 계획 승인기관들(주로 지방자치단체)이 분담하여 수행하며, 1997년에 지정된 오염부지관리법(CLM Act)을 통해 인체의 건강 및 환경에 심각한 위해성과 위험성을 가진 오염부지들을 환경청이 법적으로 관리하고 있다.

2008년 개정된 CLM Act의 주요 내용은 i)가능한 한 오염된 부지의 신속한 신고를 위한 신고 형식이 수정되었고, ii)부지 회계감사의 인가 수수료를 위한 적합한 계산 방식이 첨가 되었으며, iii)CLM Act의 명령에 따라 적합한 관리 수수료를 위해 1998년도 법을 개정하였다.

### 5.2 토양오염 조사 체계

#### 1단계 - 기초조사

기초조사의 주요 목적은 과거와 현재의 모든 잠재적인 오염 활동을 확인하고, 오염된 지역의 기초 평가를 제공하며, 만약 필요하다면 더 세밀한 조사를 근거로 제공한다. 기초조사는 오염이 문제가 되지 않는 곳은 필요하지 않다.

#### ○ 기초조사를 위한 시료채취 패턴<sup>⑧</sup>

-판단에 근거한 시료채취 패턴: 오염의 위치에 대한 충분한 정보가 있을 경우

-규칙적 시료채취 패턴: 오염 위치에 대한 충분한 정보가 없을 경우

#### 2단계- 정밀조사

정밀조사는 기초조사에서 부지가 오염되고, 오염의 가능성에 노출된 것을 나타냈을 때 필

<sup>⑧</sup> 시료는 오염수준이 가장 높은 심도에서 채취되어야 한다.

요하다. 정밀조사는 또한 복원을 이끌어 내는 데 필요하다. 정밀조사의 목적은 오염의 정도를 정하고 오염에 노출된 인간과 환경의 위험성을 평가하기 위함이다. 또한 충분한 정보를 얻어 복원 실행 계획(RAP, Remedial Action Plan)에 도움을 주기 위한 과정이다.

#### ○ 정밀조사를 위한 시료채취 패턴

-규칙적인 시료채취 패턴

- 조사자가 오염의 위치에 대한 정보가 없을 경우
- 오염분포가 무작위적인 것으로 판단될 경우(예를 들어 매립지)
- 오염분포가 상당히 균일한 것으로 판단되는 경우(예를 들어 농지)

-층위 시료채취 또는 판단에 근거한 시료채취 패턴

- 만일 오염의 위치에 대한 충분한 정보가 있을 경우

(그러나 판단에 근거한 시료채취는 시료채취지점의 분포가 상당히 균일하지 않을 수 있으며, 그런 경우 부지전체를 일정하게 커버하기 위해 채취지점이 추가 되어야 한다.)

-오염의 수직범위를 확인하기 위해서 시료는 각 채취지점의 두 개 이상의 다른 깊이에서 채취되어야 한다.

### 3단계 - 복원실행계획

RAP의 목적은 목표를 설정하고 복원될 지점의 과정을 문서화하는 것이다.

### 4단계 - 유효성 검사 및 모니터링

이 단계의 목적은 RAP가 객관적인 언급인지 아닌지 증명하기 위함이다. 주 환경계획정책 55(State Environmental Planning Policy 55)는 모든 복원 작업의 완료 공지를 필요로 하고 유효성 검사는 이 공지의 필요조건으로 중요하다.

모든 부지 조사가 이러한 4단계를 거쳐야 하는 것은 아니다. 만약 부지가 오염되었음이 확실히 확인된다면 1단계 예비 조사를 거치지 않고 바로 2단계인 정밀조사를 수행할 수 있다.

### 5.3 부지검증에 필요한 최소 시료 개수

부지검증에 필요한 시료의 개수는 오염의 복잡성, 조사자의 부지에 대한 지식 및 특별한 형태와 규모의 Hot Spot 발견 여부 등 부지특성에 따라 결정된다. 실제적인 시료의 수는 기초적인 부지특성에 대해 파악한 조사자에 의해 결정되어야 한다. 부지의 특정한 요구사항이 없을 경우에 <표 2-37>의 부지 특성평가에 필요한 시료채취지점의 최소 개수를 활용할 수 있다. 이는 조사 대상지역의 규모가 커질수록 채취밀도가 점차로 작아지며 확인될 수 있는 오염지역의 규모가 점차로 증가하는 것을 알 수 있다. <표 2-37>의 채취밀도는 국내 토양환경평가지침의 채취밀도와 동일함을 알 수 있다.

**표 2-37** 사각격자형의 규칙적 시료채취 패턴을 이용할 경우 원형의 Hot Spot을 발견하기 위한 최소 시료채취 지점의 수

부지규모(헥타르) 헥타르=10,000m <sup>2</sup>	권장 시료채취 지점 수	시료채취 밀도 (지점/헥타르)(지점/100m <sup>2</sup> )	95%의 신뢰도로 발견될 수 있는 Hot Spot의 지름(m)
0.05	5	100 (1.000)	11.8
0.1	6	60.0 (0.600)	15.2
0.2	7	35.0 (0.350)	19.9
0.3	9	30.0 (0.300)	21.5
0.4	11	27.5 (0.275)	22.5
0.5	13	26.0 (0.260)	23.1
0.6	15	25.0 (0.250)	23.6
0.7	17	24.3 (0.243)	23.9
0.8	19	23.8 (0.238)	24.2
0.9	20	22.2 (0.222)	25.0
1.0	21	21.0 (0.210)	25.7
1.5	25	16.7 (0.167)	28.9
2.0	30	15.0 (0.150)	30.5
2.5	35	14.0 (0.140)	31.5
3.0	40	13.3 (0.133)	32.4
3.5	45	12.9 (0.129)	32.9
4.0	50	12.5 (0.125)	33.4
4.5	52	11.6 (0.116)	34.6
5.0	55	11.0 (0.110)	35.6

\* 위 표는 사각격자형의 규칙적 선정방법을 이용할 경우 원형오염지역을 95% 신뢰수준에서 발견하기 위한 것임(5ha 이상의 부지인 경우 작은 구역으로 분할하여 적용)

## 5.4 호주의 오염 부지 감독관 체계

호주 대부분의 주(state)와 영역은 주 환경 보호 당국(The State Environmental Protection Authority) 하의 적합한 규정에 의해 승인된 전문가로부터 독립적인 감독관 시스템을 가진다. 이는 책임 있는 자가 조사에 참여하거나 적절한 조치를 취하여 자발적인 협약을 할 수 있도록 하고 오염부지의 조사와 정화에 대한 책임의 단계를 설립한다. 이 절에서는 Western Australia의 오염 부지 감독관 체계를 설명하겠다.

### 5.4.1 오염 부지 감독관 체계의 배경

오염된 부지의 평가와 정화작업은 1980년대 초기부터 호주에서 중요한 이슈였다. 전통적으로 이러한 작업은 기술자, 화학자, 지질학자, 환경기관과 규칙 승인 기관 같은 숙련된 전문가에 의해 착수되었다. 1989년 Victorian EPA는 Environmental Auditor(Contaminated Land) 체계를 소개하였고 이후 대부분의 다른 주(State)는 다양한 계획안을 설립하였다.

오염부지의 승인 감독관에 대한 지침은 DEP<sup>h</sup>에 의해 준비된 것이다. DEP는 Western Australian의 오염 부지 승인 평가 감독관의 책임과 인증에 대한 절차를 문서화 하였다. 이 문헌은 확립된 감독관체계에 대한 공적인 언급을 이야기 하고 있다. 특히 감독관은 Victoria의 경우에서와 같이 부지에 대한 판정을 할 수 있어야 하는지 또는 감독관이 판정을 할 만한 공신력을 갖는 인증시스템이 있어야 하는지를 묻고 있다.

1992년 NHMRC(National Health and Medical Research Council)과 결합한 ANZECC(Australian과 New Zealand Environment와 Conservation Council)는 오염부지 평가에 대한 지침을 처음으로 출간했다. 1992년 발간된 지침은 1995년 ANZECC/NHMRC 보호 아래 시작되었고, 이는 오염 부지 평가와 관련된 기술적인 문서와 정책이 국가 환경 보호 법안(NEPM)일부의 형식으로 결의되었다. 작업의 책임에 대한 문제는 ANZECC/NHMRC에서 NHMRC와 연계된 국가환경보호위원회(NEPC)<sup>①</sup>로 대체되었다.

1999년 12월에 설립된 NEPM은 오염 부지 평가에 대한 지침 10항목을 제정하였다. 이 지침 중 하나인 “전문성과 관련된 환경 감독관의 권한과 허용에 대한 지침”은 호주 전역을 걸쳐 오염된 부지의 감독관에 대한 접근법을 소개하였다.

### 5.4.2 감독관의 고용

#### 1) 자발적인 감독관의 고용

부지 점유자는 오염지역평가에 대한 개선과 확인과정에서 전문가의 기술적 충고가 필요할 때

<sup>h</sup> Department of Environmental Protection

<sup>①</sup> National Environment Protection Council

승인(인증)된 감독관을 종사시킬 수 있다. 이 때, 감독관 고용 시 증명서 입수 과정이나 DEP로부터 '지역정화'의 과정에 대한 요구사항이 의무적이진 않다. 이러한 보고서 작성시간을 단축시킴으로서 정부체계에 대한 작업량을 감소시키고 평가 비용도 줄어들게 된다.

## 2) 법에 규정된 감독관의 고용

Contaminated Site Bill 2000에 따르면 법률상 감독이 요구될 경우 auditor가 반드시 고용되어야 한다. 법률상 감독은 다음과 같은 경우에 요구된다.

- EPA가 Environmental protection ACT1986(개정안)의 38 또는 48A 조항 아래 위탁적 평가를 착수할 때 오염 부지의 평가, 확인, 개선이 중요한 환경적 요인이 되는 것으로 간주될 경우
- DEP에 규정된 사람에 의해 부지 조사를 할 경우
- DEP에 규정된 사람에 의해 부지 정화나 부지 관리를 할 경우
- 조사나 평가 또는 복원이 정부로부터 실질자금을 보조받고 contaminated site Bill 2000에 있는 복원 법률 조항에 대한 책임에 따라 정부가 마지막수단으로써 책임을 질 경우

## 3) 부지 평가와 관리과정에서 감독관의 역할

제안된 WA시스템 아래에서, 공인된 감독관은 오염된 부지에 대하여 조사하고 평가하여 정화 작업을 수행하는 자치적인 재검토자가 되어야 할 것이다.

<그림 2-16>은 공인된 감독관의 평가와 관리절차를 나타낸 것이다.

## 4) 감독관의 의무사항

위임된 감독관은 다음을 따라야 한다.

- (1) DEP에 권고사항과 기록을 제공하기에 앞서 부지에 관련한 적합한 정보를 평가한다.
- (2) 부지 조사와 정화 또는 부지 관리를 한 사람에 의해 수집된 충분한 정보를 확인한다.
- (3) 외부의 전문적 기술이 사용된 곳의 오염 부지 감독과 관련한 모든 정보를 재검토했음을 증명한다.
- (4) 오염부지 감독 수행에 대한 기록과 권고사항을 준비한다.
- (5) 부지 감독 진술서를 제공한다.
- (6) 오염부지와 관련된 조사, 평가, 정화 작업의 독립적 재검토를 수행하기 위해 위임된 사항을 DEP에 알린다.
- (7) DEP로 하여금 처음 부여된 승인과 관련된 상황의 변화에 대해 알리고 감독관으로서

- 승인을 유지하도록 하는 세세한 변동사항을 전달한다. (이는 다른 관할권에서의 승인 서류 및 취소를 포함한다.)
- (8) 논쟁이 있는 경우 위임된 감사자에 의뢰하여 어떤 신청자에 대한 논쟁을 공표하며 그 계약을 성사시키지 않는다.
  - (9) 그릇된 정보를 제공하거나 오염부지 감독에 대한 기록과 권고사항, 부지 감독 진술서와 관련된 적합한 진술에 맞지 않는 행동을 하지 않아야 한다.

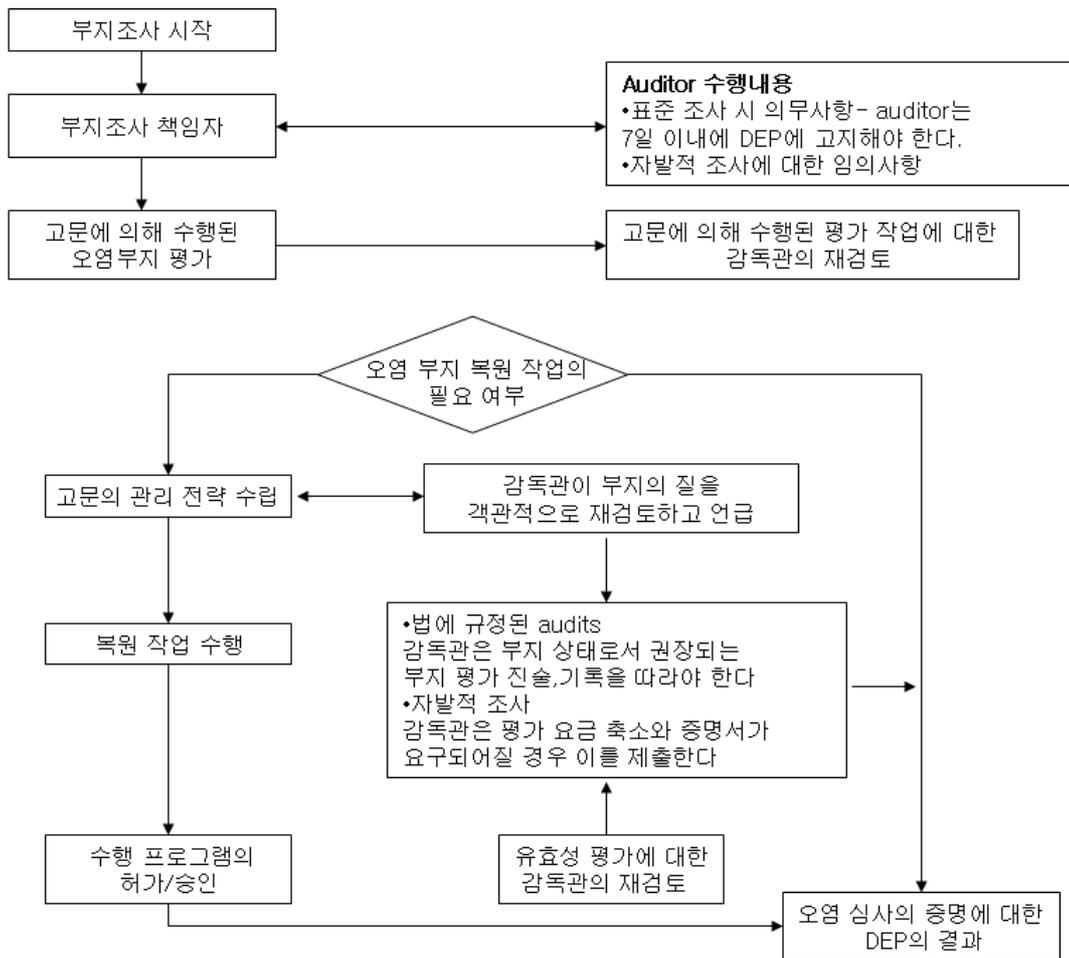


그림 2-16 호주의 토양조사 감독관의 오염부지평가와 관리절차

### 5) 오염부지 감독관에 대한 고찰

미국이나 호주는 이와 같은 환경감사 또는 오염부지 감독관(Environmental audit, contaminated sites auditor)이라는 이름으로 오염 부지의 평가와 정화작업을 하고 있다.

토양오염은 복잡한 요인과 결부되어 있는 경우가 많으므로 전문적 지식과 경험이 필요하기에 이러한 auditor제도를 통하여 단순히 기술적인 것에 한정하지 않고 전문성을 높임으로서

정화 책임 소재를 분명히 할 수 있다 하겠다. 그러나 국내도입을 위한 행정절차와 자격요건 등 그리고 전문성에 대한 권한과 허용에 대한 세부적 절차에 대해서는 좀 더 심도 있는 검토가 필요할 것으로 생각 된다.

## 6. 유럽

유럽의 토양오염에 대한 규제차원의 입법체계를 가진 나라는 몇 개국 정도였으며 대부분의 국가들은 폐기물과 지하수에 관한 일반적인 환경입법으로 토양오염문제를 접근하고 있다. <표 2-38>에 나타난 12개 국가에서는 부지의 확인 및 조사에 관해 국가차원 또는 지역적 차원의 지침을 마련하고 있으며 대부분의 국가들이 토지이용, 지하수와 지표수를 토양오염 정책의 잠재적인 목표로 간주하고 있다.

표 2-38 토양오염부지관리에 관한 유럽 국가들의 입법체계

	AT	BE	CH	DE	DK	ES	FI	FR	GR	IC	IE	IT	LU	NL	NO	PT	SE	UK
환경보호	○							○	○	○	○			○		○	○	○
폐기물법						○	○	○			○	○	○					
지하수법	○							○										
토양보호법				○	○	○								○	○			
토양복원법		○	○	○	○									○				

AT: Austria, BE: Belgium, CH: Switzerland, DE: Germany, DK: Denmark, ES: Spain, FI: Finland, FR: France, GR: Greece, IC: Iceland, IE: Ireland, IT: Italy, LU: Luxembourg, NL: Netherlands, NO: Norway, PT: Portugal, SE: Sweden, UK: United Kingdom

nm: not mentioned, both: grid or random

표 2-39 Soil sampling depth strategy in the different ESSG<sup>①</sup>

Country	Sampling(top) depth cm	Sampling(top) organic matter separately	Sampling related to soil profile horizons	Sampling in ad hoc sampling depths	Sampling for volume related data
Austria	0-20 or 30 arable 0-10 grass	No	No	Yes	Yes
Belgium	0-20, 0-5-, 50-100	No	No	Yes	Yes
Denmark	0-30	Yes	No	Yes	Nm
France	Plough layer, 0-10, 0-50	No	Yes	Yes	Yes
Finland	0-5, 5-10, 10-20, 20-30	Yes	Yes	Yes	Yes
Germany	A-horizon(-10) forest0-10	Yes	No	Yes	Yes
Greece	0-30, 30-60, 60-90	Yes	Yes	Yes	Yes
Italy	0-20 or 0-30	No	Yes	Yes	Yes
Luxembourg	(1)0-50, 50-100 (2)0-2, 2-10, 10-35 (3)0-5, 5-10, 10-35	Yes	Yes	Yes	Yes
Netherlands	0-50 up to 500	No	Yes	Yes	Yes
Portugal	0-20 or 1-10, 0-20 (arable) 0-20, 20-40, 40-60 (forest)	No	Yes	Yes	Nm
Spain B	0-2.5, 2.5-5, 5-15, 15-30 (forest)	Yes	Yes	Yes	Yes
Spain G	0-50, 50-100, 100-150	No	Yes	Yes	Yes
Switzerland	0-20 (arable, non-arable)	No	No	Yes	Yes
UK	0-30	Yes	Yes	Yes	Yes

위 <표 2-39>은 표토가 선택적으로 다른 깊이에서 채취된다는 것을 보여준다. 채취 시료의 혼합 여부 관점에서 살펴보면 오스트리아, 벨기에 등의 8개 국가는 외관상 구분되는 유기물과 무기물질을 별도로 구분하지 않고 혼합하여 채취하고 있다. 반면에 덴마크, 핀란드와 같은 다른 7개 국가의 지침에서는 유기오염 물질로 판단되는 시료에 대해서 별도로 시료채취를 하고 있다.

토양 심도별 층위(soil profile horizon)에 따라 시료채취를 하는 국가는 프랑스, 핀란드, 그리스 등 10개 국가로 나타났으며, <표 2-39>에 제시된 유럽의 모든 해당 국가는 특별한 지점을 정하지 않고 임의의 시료채취 깊이에서 시료를 채취하고 있다. ESSG의 대다수는 부피(용적)가 고려된 시료채취 형태를 취하고 있다.

① European countries Soil Sampling Guidelines(ESSG)

표 2-40 Sampling strategy inside the sampling unit in ESSG

Country	Division in sub-units	Specifying sampling density	Sampling pattern	Size of sampling area (m <sup>2</sup> )
Austria	nm	25ha	Both	1000
Belgium	nm	nm	nm	nm
Denmark	nm	Yes	nm	nm
France	Yes	nm	Both	nm
Finland	nm	8900 2400	Grid	400-900
Germany	Yes	362500 182500	Both	2500
Greece	nm	20ha	Both	Varies
Italy	nm	6-15ha	Both	Varies
Luxembourg	nm	2-5ha	Grid	10000
Netherlands	Yes	2-3ha	Grid	Varies
Portugal	Yes	3-4ha	Grid	10000
Spain B	Yes	144ha	Grid	625
Spain G	nm	nm	nm,	nm
Switzerland	Yes	16100	Grid	100
UK	Yes	20ha	Both	Varies

(nm: not mentioned, both: grid or random)

위의 표를 보면 7개 국가(프랑스, 독일 등)에서는 채취 시료의 분산, 편차, 불확도 등을 표현하기 위해서 부차적 단위를 사용하고 있으며, 채취 밀도 측면에서는 벨기에 등의 3개 국가에서는 채취밀도가 명시되어 있지 않고 나머지 다른 국가들은 채취밀도를 언급하고 있다. 채취 형태에 대해 살펴보면 핀란드 등의 6개 국가는 격자방법을 사용하고 있으며 격자와 임의방법을 동시에 사용하는 국가는 오스트리아 등의 6개 국가, 채취형태에 대한 언급이 없는 나라는 벨기에 등의 3개 국가로 나타났다. 채취 면적의 크기에 대해서는 언급이 없는 국가는 벨기에 등의 4개 국가이고, 이 4개 국가를 제외한 나머지 국가에서는 그 크기에 대한 규정을 언급하고 있다.

표 2-41 Description of the sample in the ESSG

Country	Detailed description of the sample	Simple of composite sample	Sampling only from soil profile	Mass volume related sample	Sample amount(kg)
Austria	Yes	Composite	No	Both	1
Belgium	nm	Simple	nm	Both	nm
Denmark	nm	Composite	Yes	nm	nm
France	Yes	Composite	Yes	Mass	0.5
Finland	nm	Composite	nm	Both	nm
Germany	Yes	Composite	nm	Both	nm
Greece	Yes	Composite	nm	Both	nm
Italy	Yes	Composite	nm	Both	nm
Luxembourg	Yes	Simple	nm	Both	1
Netherlands	Yes	Composite	nm	Both	>2
Portugal	nm	Composite	nm	nm	0.4
Spain B	nm	Composite	nm	Both	nm
Spain G	Yes	Composite	nm	Both	0.5
Switzerland	Yes	Composite	nm	Both	1-2
UK	nm	Composite	nm	Both	>0.5

(nm : not mentioned, both: grid or random)

구체적인 시료의 언급, 시료의 혼합 여부, 심도별 시료채취, 시료의 질량 혹은 부피와 관련된 기준 및 시료채취량에 대한 현황을 <표 2-41>에 제시하였다. 유럽 대부분의 국가에서는 토양 시료의 형태나 이력 등에 대해 정밀하게 기술하는 것을 규정하고 있으며, 단일 시료채취가 아닌 혼합시료 채취를 택하고 있다. 시료의 질량 혹은 부피와 관련해서 덴마크와 포르투갈은 구체적인 언급이 없으며, 프랑스는 질량을, 그 외의 대부분 국가는 질량과 부피를 사용하도록 하고 있다. 또한 영국 등의 8개 국가에서는 시료량에 관한 구체적인 지침이 정해져 있다.

토양 시료의 경우 위에서 살펴 본 바와 같이 모든 ESSG에 구체적으로 정확히 기술되어 있는 것은 아니다. 이러한 사실로 인하여 토양 오염도 조사 시에 재현성의 저하를 초래하게 된다. 따라서 토양 조사 시의 정확한 위치 및 조사방법 등이 구체적으로 지침에 기술되어 수행될 필요가 있다.

<표 2-42>에 QA/QC에 대한 언급, 시료의 혼합 여부 및 혼합 장소, 토양 시료의 체 걸음 유무, 토양 시료의 건조 및 보관 조건에 대하여 나타냈다. 영국의 경우 모든 항목에 대해 구체적인 언급이 없었으나 프랑스의 경우에는 모든 항목에 대해 언급하고 있음을 알 수 있다.

☒ 2-42 Technical aspects of sampling in the ESSG

Country	QA, QC field or lab	Mixing in the field	Mixing in the lab	Sieving 2mm	Drying	Storage conditions
Austria	Yes	Yes	nm	Yes	Air drying	Room temp.
Belgium	Yes	nm	Yes	nm	nm	nm
Denmark	Yes	Yes	nm	nm	nm	nm
France	Yes	Yes	Yes	Yes	Air drying	Cold
Finland	Yesnm	nm	nm	nm	nm	nm
Germany	Yes	Yes	Yes	Yes	Air drying	nm
Greece	Yes	Yes	nm	Yes	30-40°C	Room temp.
Italy	nm	Yes	nm	nm	nm	nm
Luxembourg	Yes	nm	Yes	nm	nm	nm
Netherlands	Lab	No	Yes	Yes	Varies	Cold
Portugal	nm	Yes	nm	nm	nm	nm
Spain B	nm	nm	Yes	Yes	30-40°C	nm
Spain G	nm	nm	nm	Yes	nm	nm
Switzerland	nm	No	Yes	Yes	40°C	Dry, cold, dark
UK	nm	nm	nm	nm	nm	nm

(nm : not mentioned)

표 2-43 Pre-analysis treatment of soil samples in the ESSG

Country	Sampling tool	Sampling tool material	Sampling tool size	Transport conditions	Transport vessels	Sampling period	Contamination precautions
Austria	Auger, corer, spade, pick	steel	20mm	Room	Plastic, glass	Whole year with exceptions	Tools
Belgium	Auger	nm	nm	nm	Plastic	nm	Technique
Denmark	Corer	nm	nm	nm	nm	nm	nm
France	Auger	Inert	nm	nm	Inert	3months after fertilisation, 6months after manuring	nm
Finland	Auger	Stainless steel	nm	Cold&dark	Plastic	nm	Tools
Germany	Split tube	Stainless steel	51mm	nm	Stainless steel	Before fertilisation	Tools
Greece	Auger, corer, spade, pick	nm	nm	nm	Plastic	nm	Technique, tools
Italy	Auger, corer, spade, pick	nm	nm	nm	nm	3-6months after fertilisation	Tools
Luxembourg	Auger, spade, excavator	nm	nm	Cold&dark	Plastic, glass	nm	Tools
Netherlands	Corer	Stainless steel	nm	Cold	Metal or glass	nm	Techniques, tools
Portugal	nm	nm	nm	nm	Plastic	nm	nm
Spain B	nm	nm	nm	nm	Plastic	nm	nm
Spain G	Corer	nm	nm	Cold	Glass	nm	Tools
Switzerland	Corer	Metal, steel	30mm	nm	Plastic	nm	Tools
UK	Auger	nm	30-40mm	nm	Appropriate	Whole year with exceptions	Tools

(nm : not mentioned)

시료채취 도구, 시료채취 기구의 크기와 물질, 시료 이송 조건, 시료 이송 용기, 시료채취 기간과 오염 예방 조치의 유형과 같은 토양 시료채취의 기술적 차이에 따른 양상을 <표 2-43>에 나타냈다.

위 문헌을 통해 유럽의 모든 국가가 일반적인 지침이나 법조항에 토양 시료채취에 대한 기준을 정하고 있지 않으며 또한 모든 유럽 국가들이 유사한 토양 시료채취 전략을 시행하는 것도

아님을 알 수 있었다. 각 나라별로 이론이나 접근법, 절차상에서 공통점이나 차이점을 가지고 있었으며 대부분의 나라에서 혼합시료를 사용하고 있음을 알 수 있었다.

최근에는 유럽전역의 시료채취계획의 유사성과 차이점을 확인하고 오차와 불확실성을 줄이기 위해 13개의 유럽국가와 스위스의 15개의 공공기관이 스위스 바젤근처의 D부지에서의 비교 시료채취에 참가하는 등 유럽국가들 내부에서 토양시료채취에 대한 표준화를 위한 노력이 진행되고 있음을 알 수 있다.

## 6.1 영국

이 장에서는 영국의 토양오염조사에 대해 알아보고 사례연구를 통해 보다 구체적인 조사체계와 시료채취 전략을 살펴보고자 한다.

### 6.1.1 현황 및 관련 법

영국에서는 명확한 토양보호제도가 없다. 다만, 토양오염문제를 환경보호법(Environment Protection Act 1990), 오염방지법(Control of Pollution Act 1974), 도시 및 시외지역의 계획법(Town and Country Planning Act 1991) 등 여러 법에서 다루고 있으며, 환경보호법(the Environmental Protection Act)에 의하여 지자체(地自體)에서는 건강과 환경을 위협하는 모든 종류의 오염을 감시하는 것을 의무화하여, 정화가 필요할 경우 이를 수행한다.

토양오염 기준에 관한 현재의 지침은 ICRCL(Interdepartmental Committee on the Redevelopment of Contaminated Land)에 의하여 발간되었다. ICRCL에는 환경부(DoE), 농수산식품부(Ministry of Agriculture, Fisheries and Food), Wales, Scotland, Northern Ireland 지역의 보건환경부(the Department of Health and Environment) 등 여러 개의 정부부처가 관련되어 있다.

### 6.1.2 토양오염조사체계

영국은 토양오염조사는 목적부합의 원칙에 따라서 토지기능의 안정성을 확보하는데 있다. 이 원칙은 목적에 부합된 토지의 이용 시, 인체 및 환경(생태계와 지하수 포함)에 위해가 없어야 한다는 것이다. 오염부지에 대한 새로운 지침서는 우선순위를 결정할 때의 보조 도구로서 오염원-경로-수용체 연계개념의 접근법을 제안하고 있다.

오염부지 확인은 예비조사 I (Preliminary Survey)와 예비조사 II (Preliminary Investigation) 단계로 구분된다.

## 1) 예비조사 I

### (1) 첫째 단계

- ① 부지의 개발(부지의 경계, 건물의 존재, 부지 부근의 이용용도 등), 지표수, 지하수에 관한 정보들이 수집된다.
- ② 이러한 정보들을 평가하여 오염부지는 A~C로 분류된다.

### (2) 둘째 단계

- ① 자료가 추가로 수집(개발계획의 신청/결정, 면허 및 보고서, 수리학/수리지질학적 지도, 사고, 화재, 오염물질 노출 등)된다.
- ② 부지에 대한 추가 조사가 실시되어 오염물질의 존재 여부, 잠재적인 이동경로, 인간과 환경에 대한 잠재적인 위해성 등이 평가되어 4개의 우선순위 그룹으로 분류(이 때 가능하다면, 오염물질이 SGV<sup>Ⓚ</sup>를 초과하는가를 평가)된다.

## 2) 예비조사 II

예비조사 II의 목적은 오염물질의 존재와 정밀조사의 필요성을 결정하는 것이다. 채취하는 토양시료의 수는 크기와 오염물질의 이동 깊이, 부지의 사용 목적 등에 따라 결정된다.

## 3) 정밀조사(Main Investigation)

이 조사는 특정 부지 상태를 시료 채취하여 분석하는 세부적인 단계이다. 정밀조사는 단독 또는 반복되는 절차로서 시행될 것이다. 각 단계는 이전의 작업으로부터 가능한 데이터를 기초로 설계되어야 한다. 일반적으로 이전의 조사로 얻은 좀 더 세부적인 정보일수록 위해성 평가 결과에 기술적인 신뢰도를 높일 것이다.

### (1) 정밀조사

정밀조사의 첫 번째 단계이다. 일반적으로 1단계 조사는 위해성과 관련된 오염물질의 일반적인 사진이나 오염분포도를 얻기 위해 상대적으로 넓은 범위 기준으로 실행하는 단계이다.

### (2) 정밀조사

일반적으로 부지의 전체나 일부에서 좀 더 세부적인 정보를 얻고자 실행하는 단계이다. 보통 기술적인 발견에서 신뢰도가 증가한다.

---

Ⓚ Soil Guideline Values

#### 4) 보완조사(Supplementary Investigation)

세부적인 설계 목적이나 정화 작업의 선택을 위해 위험성 평가를 좀 더 상세히 하기 위해 실행되는 단계이다.

##### 5.1.3 시료채취 지점의 수와 위치

시료채취 지점의 위치와 수는 부지설계의 인자이다. 두 가지 기본적인 접근법은 다음과 같다.

- 대상 오염물이 나는 판단에 근거한 직관적인 시료채취
- 사전 지식이 많지 않은 부지에 대한 체계적인 시료채취

실질적으로, 대부분의 시료채취 전략은 조사대상 부지에 대한 사전지식이 많고 적음에 따라 위 두 가지 방법을 혼합하여 쓰기도 한다.

혼합시료는 세 번째로 가능한 시료채취 접근법이다. 혼합시료는 다른 지역과 혼합된 지역으로부터 수집된 sub-sample의 수로부터 형성된다. 혼합 시료는 본래의 sub-sample이 수집된 곳의 위치를 대표하는 것으로 간주될 수 있다. 혼합시료는 토양의 비옥도를 결정하기 위한 농업분야의 적용에도 사용된다. 또한 대상오염물질과 토양에 대한 개입기준치를 뒷받침하는 네덜란드 시료채취 방법의 일부분을 형성한다. 영국에서는 일반적으로 사용되지 않았고 오히려 개별적인 spot samples(그리고 오염 범위 정보 결과)에 더 사용되었다. 혼합시료는 고가의 실험 검사와 시료증가를 가져오며 휘발성과 반(反)휘발성 물질의 혼합에는 적용되지 않는다. 또한 부지에서 혼합하는 과정에서 손실될 수 있고 혼합하는 시료유형에 따라(가령, 점토를 많이 함유하는) 실질적으로 어려움이 있기 때문이다. 혼합된 시료의 데이터 통계적 분석 또한 주의 깊은 관리가 요구된다.

##### 1) 대상 오염물질이 있다는 판단에 근거한 시료채취

이 방법은 조사자가 알고 있는 위치나 오염물질과 같은 것에 대한 연역적인 정보를 갖고 있을 때 사용된다. 이때 가능한 시료채취지점의 위치와 수는 쉽게 결정될 수 있다. 오염의 가능성은 매립지나 지상에서 만들어진 알려진 지역(누수되는 하수구; 토양 및 폐기물의 표면 침전물; 심해질 및 누수의 위치)을 포함한다(예: 매립지 연못).

이 방법의 주요 목적은 오염물의 존재와 적합한 장소, 오염의 이동 경로의 신속하고 효과적인 확인을 얻기 위한 것이다. 이는 또한 의심되는 지역이 오염되지 않았음을 확인하기 위해 사용될 수도 있다. 그러나 일반적으로 부지 상태의 사진 표시를 얻기 위하여나 오염 분포도를 그리기 위해 시도되는 것은 아니다.

대상 오염물질이 있다는 판단에 근거한 직관적인 시료채취를 수행한 후 오염물질의 존재

를 확인하지 못한 경우에 더 많은 시료채취를 반드시 수행하여야 하진 않는다. 예를 들어, 조사자는 이전의 Phase 1 위해성 평가 결과-오염물질이 존재하지 않을 것이라는-를 뒷받침하기 위해 몇 가지 제한된 시료채취를 수행하면 된다. 제한된 시료채취는 이러한 초기예상을 확인할 것이고 모든 가능한 정보의 기초에서 조사자는 더 이상의 절차가 필요로 하지 않음을 결정해야 한다. 그러나 대상 오염물질이 있다는 판단에 근거한 직관적인 시료채취를 통해 오염 의심이 확인되지 않는다는 것은 자동적으로 오염이 존재하지 않는다는 것을 의미하는 것이 아니라 조사자의 초기 의혹이 잘못되었고 재평가가 필요함을 의미한다.

## 2) 사전 지식이 많지 않은 부지에 대한 체계적인 시료채취

사전 지식이 많지 않은 부지에 대한 체계적인 시료채취는 조사자가 전체 부지의 상태 기초정보가 충분치 않은 부지에 대한 데이터를 얻기 위해 사용된다. 체계적인 시료채취는 통계적 기초를 갖는다. 이는 조사자가 그들이 지정된 지역의 물질을 분석하는데 얼마만큼의 신뢰성을 갖는지 명시할 수 있음을 의미한다.

사전 지식이 많지 않은 부지에 대한 체계적인 시료채취는 전체 부지를 나타내는 정보가 요구되는 정밀조사 단계에서 종종 사용된다.

효율적인 시료조사를 위해 다음의 네 가지 조건을 만족하여야 한다.

- 시료채취 대상의 각각의 지역은 일정한 sub-areas로 나뉘어야 한다.
- 각 sub-area는 한 개의 시료채취 지점을 포함하여야 한다.
- 시료채취는 체계적(systematic)이어야 한다.
- 시료채취 지점은 일직선으로 정렬되지 않아야 한다.

시료채취 패턴의 예를 들면 다음과 같은 4가지를 갖게 된다.

- 임의 시료채취 패턴(Simple random)
- 층위별 임의 시료채취(Stratified random)
- 정사각격자 패턴(Regular square grid)
- 가시무늬 시료채취 패턴(Herringbone design)

임의 시료채취와 층위별 임의 시료채취 패턴은 균질하지 않은 시료채취 밀도를 갖고 이는 상대적으로 시료채취 지점이 많은 부분과 적은 부분이 발생할 수 있음을 의미한다. 두 경우에 비교적 오염이 큰 지역은 모두 놓칠 수 있는 가능성이 있음을 인지해야 한다.

정사각격자 패턴은 현재 가장 많이 사용되는 시료채취 패턴이다. 오염이 격자의 방향으로 정렬되어 형성되지 않는 것을 조건으로 할 경우, 정사각격자 시료채취 패턴은 대부분의 시

료채취 요건을 충분히 만족시킨다.

체계적 시료채취에 대한 통계적 접근은 위해성 평가 항목에서 관심의 대상이 되는 오염물질의 특정한 지역을 정의하는 개념에 기초로 한다. 이를 통해 효과적인 시료채취 격자의 다른 크기가 어떻게 통계적 신뢰도의 특정화된 기준을 가지고 대상이 되는 지역을 검사할 수 있는지 테스트 한다.

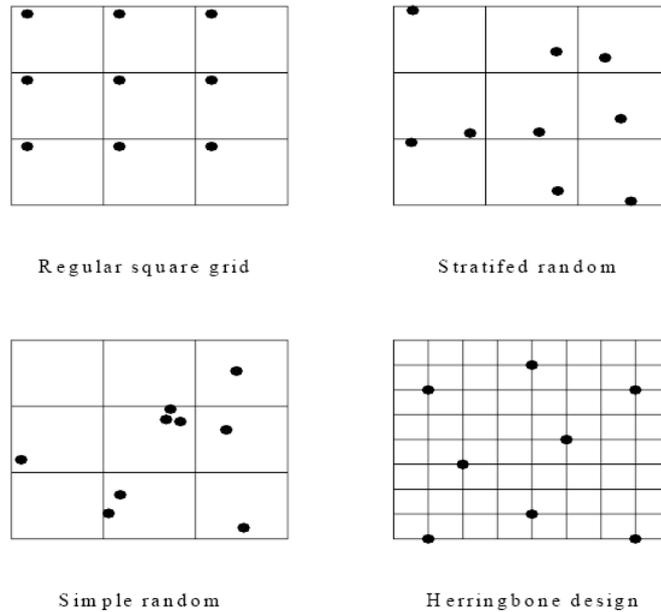


그림 2-17 시료채취 패턴의 예

대상이 되는 지역은 조사자에 의해 평가된다. 조사대상 지역의 크기는 자연과 수용체의 행동, 자연과 오염물질의 특징과 합당한 관계를 가져야 한다. Box 1은 사전 지식이 많지 않은 부지에 대한 체계적인 시료채취에 대해서 격자 크기를 맞출 때 고려할 더욱 세부적인 요소들을 논의했다.

통계적 정보는 조사자가 대상이 되는 지역의 결정된 크기에서 지식이 많지 않은 부지에 대한 체계적인 시료채취 계획의 유효성을 상세히 알기를 희망하는 곳에 필수적 요소이다. 그러나 오직 통계적인 고려만이 토양 데이터의 해석에 기본으로 하는 것은 아니다. 부지의 많은 지역이 심하게 오염됐음을 이미 제안한 모든 정보가 존재할 때(가령 예비 조사와 부지 관찰을 포함하는 1단계 조사) 2단계 조사에서 통계적인 기법을 기계적으로 실행하는 것은 매우 많은 시료채취 수가 산정될 수 있어 좋지 않다. 오염 지역의 가장자리를 나타낼 수 있는 자원을 사용하거나 명백하게 부지의 오염되지 않은 부분의 상태에 대해 기술적인 신뢰도를 증진시키는 것이 더 좋다. (Box 1)

<Box 1>

**정밀조사에서 샘플 수 결정**

1. 기본 원칙

정밀조사의 핵심 목표는 유해 물질의 농도 또는 수직, 수평 양쪽 지점의 토양과 연관된 신뢰성 있는 정보를 얻는 것이다.

만약에 기준이 초과되었다면, 불필요한 고가의 정화 작업이 진행 될 수 있다. 만약 농도가 기준 이하이면 인간과 환경에 위해를 미치지 않을 것이기에 시정 조치를 취하지 않을 수 있다. 지정된 영역이나 부피에 있는 물질의 정확한 농도를 알 수 없기에, 조사자는 시료채취로부터 얻은 데이터에 의존해야 한다.

평가자가 지역 또는 지상에 존재하는 농도 값의 평균과 범위를 신뢰하고 추정할 수 있는 샘플의 양을(또는 시험 실시) 결정해야 한다.

이는 두 가지 주된 요인에 의존한다.

- 어떤 물질이 지역에 실제로 분포되어 있는가.
- 시료채취 결과 조사자들이 희망하는 얼마만큼의 신뢰도를 가지는가.

만약 지역의 면적과 깊이를 통해 물질이 균일하게 분산된 것이라고 가정할 수 있다면, 단일 샘플은 정확한 평균 농도를 평가하는 데 충분할 것이다.

이 기준은 직접적으로 위험성을 평가하는데 사용될 수 있다. 예를 들면 부지 가까이에서 사는 식물과 동물이 흡입(섭취) 할 가능성이 있는 물질의 양을 계산함으로써, 또는 지표나 지하수, 대기로 여과되는 것에 의해 사용될 수 있다.

실제적으로, 오염 토양에서 위험 물질은 드물게 고른 분포로 되어 있다. 또한 수직, 수평적으로 비교적 짧은 거리에서 농도의 변화가 나타날 것이다. 이러한 변화는 위해성 평가항목에서 중요한 요소일 것이다.

대상이 되는 지역은 수용체가 노출되거나 위험한 상태를 만들어내는데 기여하는 지역을 일컫는다. 이 지역은 Averaging Area 항목으로 될 수 있다.

자연 발생과 Averaging Area의 크기는 보통 부지의 사용에 의존한다.

예를 들어;

- 개인의 정원
- 아이들의 놀이터
- 대중들에게 열린 공간
- 공식 또는 비공식 야생 동물의 서식지나 도시 계획 사업 지역
- 공공기관에 의해 점유된 지역
- 부지로부터 가깝거나 멀리 떨어진 위치에 있는 수용체에 영향을 미치는 바람이나 물에 의해 이동되는 물질에 영향을 받는 지역(e.g. 주택이나 학교 근처, 부지 밑에 흐르는 지하수, 표층수, 부지의 downwind나 downstream 위치한 생태적으로 중요한 지역)

깊이는 적합한 수용체와 경로의 자연적인 현상에 의존한다. 예를 들어 부지에 위치한 생태적

<Box 1> (계속)

수용체와 인간을 위하여 대상 지역의 깊이는 상대적으로 낮게 잡을 수 있다.(예를 들면, 표면, 지표 0.5m 이내 또는 수용체의 작용에 따라 1m까지) 가스, 증기, 물, 환경, 건물과 공공기관을 포함하는 적용을 위해 훨씬 깊은 곳에서의 토양 조건에 따라 분석할 필요성이 있다.

부지 토양은 변화할 수 있으므로 토양에서의 일부 샘플은(가스, 증기, 미량의 여과 능력) Averaging Area에서 현재 존재하고 있을 물질의 농도에 대한 믿을만한 정보 습득을 필요로 할 것이다.

실제로 이 조사자가 오직 Averaging Area에 의해 나타낸 것 보다 많은 좀 더 좁은 지역(가까운 깊이에서)을 분석해야 할 것을 의미한다; smaller areas는 Smallest Area of Concern(SACs)로 나타낼 수 있다.

<Box 2.>

**사전 지식이 많지 않은 부지에 대한 체계적인 시료채취에 대한 격자 크기 결정**

시료채취 격자 크기를 정해놓은 <표 2-44>은 부지사용의 차이에 따른 랜덤하게 위치한 대상 지역에서 원형의 Averaging Area의 크기를 탐지하기 위해(80%의 신뢰도를 가지고) 필요하다. (Averaging Area의 크기는 항상 특정 부지를 근간으로 하여 결정되고 표에 보여진 것과 다를 수도 있음을 기억하라). 대상 지역의 데이터와 유사하게 정해놓은 <표 2-45>는 관련된 Averaging Area(예를 들면 관련된 가장 작은 지역)보다 더 작고 Average Area 이내에 위치한 토양에 대한 농도 데이터 범위와 평균을 결정하기 위해 특성화해야 한다.

**표 2-44** 부지사용 용도 차이에 따른 원형의 대상이 되는 보통의 Averaging Area 크기를 결정하기 위해 필요한 시료채취 격자의 크기(P=0.80)

	AA의 보통 크기(m <sup>2</sup> )	RA(AA/GS)	GS의 크기	격자 크기(m)
정원 <sup>1</sup>	100	0.8	125	11
채소밭 <sup>2</sup>	250	0.8	312.5	18
공공지역 <sup>3</sup>	5000	0.8	6250	80
운동장 <sup>4</sup>	7500	0.8	9375	97

**표 2-45** 부지 용도별에 따른 원형의 대상이 되는 지역의 보통 가장 작은 지역의 크기를 정하기 위해 필요한 시료채취 격자의 크기(P=0.80)

부지 사용	SAC의 일반적인 크기(m <sup>2</sup> )	RA(SAC/GS)	GS의 크기(m <sup>2</sup> )	격자 크기(m)
정원 <sup>5</sup>	25	0.8	31.25	5.6
채소밭 <sup>6</sup>	50	0.8	62.5	8
공공지역 <sup>7</sup>	100	0.8	125	11
운동장 <sup>8</sup>	220	0.8	275	16.6

AA= Averaging Area

GS= 정사각 격자 단위

RA= 상대적인 크기(GS에 의해 나뉜 AA 또는 SAC)

SAC=대상이 되는 가장 작은 지역

P= 검출 가능성(신뢰도)

<표 2-44> 과 <표 2-45>를 예로 든 작업

채소밭에 대한 보통의 AA 크기

대상이 되는 주변 지역에 대한 그림 1로부터, RA= 0.8(80%의 신뢰도)

RA=AA÷GS, GS=250÷0.8=312.5m<sup>2</sup>

∴ 대략의 격자 크기는 √ 312.5= 18m

- |                          |                       |
|--------------------------|-----------------------|
| 1. 현재 거주 지역의 전형적인 정원의 크기 | 5. 아이들의 놀이터           |
| 2. 채소밭의 전형적인 크기          | 6. 채소밭에서 작은 지역        |
| 3. 도심지역에서 상대적으로 작은 부지    | 7. 놀이기구가 있는 지역        |
| 4. 축구장의 일반적 크기           | 8. penalty box의 약 30% |

<Box 2> (계속)

사전 지식이 많지 않은 부지에 대한 체계적인 시료채취에 대한 격자 크기 결정

<표 2-44> 과 <표 2-45>에 제시된 데이터 기록은 원형을 가정하였을 때이다. 임의의 위치와 임의의 타원형 지역과 격자가 평행한 지역에 대해서는 검출될 확률이 모든 경우에 훨씬 낮다.

<표 2-44> 과 <표 2-45>는 대상이 되는 지역의 크기로서 요구되는 시료채취 조건에 영향을 미치는 사항들을 나타냈다.

<표 2-46> 은 격자 공간으로서 검출 가능성에 영향을 미칠 관련된 사항들을 도식화하였다.

표 2-46 격자 공간이 증가함에 따른 검출 가능성의 효과

격자 크기(m)	GS의 크기(m <sup>2</sup> )	SAC의 평균 크기(m <sup>2</sup> )	RA(SAC/GS)	검출 가능성
5	25	25	1.00	90%
10	100	25	0.25	25%
15	225	25	0.11	10%
20	400	25	0.06	6%
30	900	25	0.03	3%

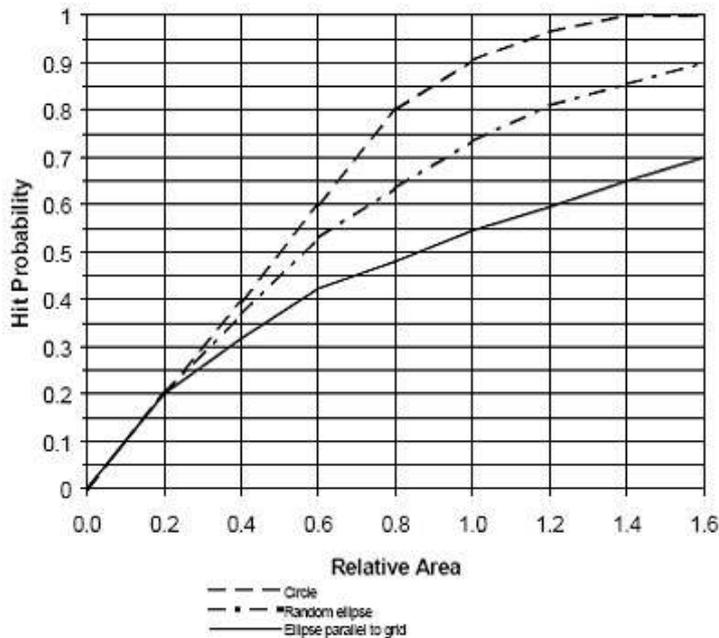


그림 2-18 Relationship between Probability of Detection and Relative Area  
표 2-40을 통한 예

격자가 10 m, GS =100 m<sup>2</sup>

SAC =25 m<sup>2</sup> 이고, RA= SAC÷GS 일 때, RA= 0.25

그림 1로부터, RA= 0.25에 대한 검출 가능성은 오직 0.25 또는 25% 이다.

#### 6.1.4 시료채취 깊이

토양의 특성은 상당히 두텁게 만들어진 지면이 존재하는 곳의 깊이와 함께 두드러지게 변경될 수 있다. 신뢰할 만한 토양 조건에서 깊이의 정보가 얻어져야 한다는 실질적인 이유가 많이 있다. 예를 들면:

- 오염 물질은 토양 심도(profile)에서 특정 깊이에 자리하기 때문에
- 노출 항목에서 적합한 깊이는 토양 심도(profile)의 특정 기준일 것이므로(예를 들면 재개발 사업, 최종 형성단계는 존재하는 부지 기준보다 낮은 지도 모른다.)

수직 이동경로를 따르는 가스와 액체는 적합한 깊이에서 물리적 토양 특징에 의해 결정될 것이기 때문에 토양 심도(profile)에서 시료채취의 다양한 깊이에 대한 이유가 아래 <표 2-47>에 기술되었다. 조사자는 관찰 부지에 기초한 적합한 깊이에서 다음과 같은 확인을 통해 샘플 수집을 수행해야 한다.

- 층과 다른 물질의 형상, 색깔, 냄새와 이러한 것들 안에서의 변화
- 건물의 기초와 벽, 탱크, 배수관들과 같은 지표면 아래 형상의 존재 유무
- 확실한 파손 지역(예: 건물 구조)

표 2-47 시료채취 깊이 차이에 대한 이론

깊이 범위	원리(이론)
0-0.5m	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 인간/동물의 피부 접촉과 섭취로 인한 오염</li> <li>• (오염된 토양과 먼지의) 섭취 또는 주위 대륙위에 침전을 이끄는 바람의 가능성</li> <li>• 지표수의 흐름(예를 들어 순간적인 범람(홍수) 때문에)</li> <li>• 얇은 뿌리를 가진 식물에 의한 흡수(uptake)(예를 들어 농작물, 관상용과 야생의 종)</li> <li>• 지하수로 흐르는 표토(surface)</li> </ul>
>0.5m in made or natural ground	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 비정상적인(또는 예상치 못한-예를 들어 아이들이 파는 굴) 굴착으로 인한 피부 접촉/섭취/흡입 또는 풀장이나 집의 확장과 같은 다른 목적을 위한 것</li> <li>• 뿌리 깊은 관목과 나무의 흡수(uptake)</li> <li>• 동물들이 파 놓은 굴로 인하여 발생하거나 흡입</li> <li>• 빌딩의 건축과 설비로 인해 발생하는 흡입, 예를 들어:               <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 기초(보통 마지막 형성 단계의 2m 이내)</li> <li>□ 물 공급 파이프, 통신, gas&amp;power (마지막 형성 단계의 0.5-1m)</li> <li>□ 하수구(from 0.5&gt; 1m of final formation level)</li> </ul> </li> </ul> <p>높은 곳에 있는 물이나 지하수 위치를 위해            형성된 지표의 깊이를 확인하기 위해            형성된 지표에서 가스나 증기에 대한 가능한 측면 경로 위치를 위해            지표로부터 용해도를 구성하기에 이르는 설정 범위를 위해            깊은(심한)오염을 검출하기 위해(예를 들어 불침투성 위에 위치한 고밀도 용제, 여과할 수 있는 물질, 가스를 생성하는 물질)            토양 질 배경에 정보를 습득하기 위해            이동 경로 측면의 'natural' 한 위치를 위해</p>

\*적용 가능한 지역을 기록한다(특히 국가적으로 사용되는 지역, 표토나 퇴적물이 바람에 날릴 가능성이 있는 지역, 동물과 얇은 뿌리를 가지는 식물군에 의한 흡수를 기록한다) 0-0.20m의 깊이 범위를 분석 할 것이 필요하다.

조사자는 깊이와 관련된 정보(오염물질의 농도, 지리적 층, 사람이 만들어낸 형상과 그 피해)의 존재를 기록해야 한다. 이는 오염물질의 분포와 sub-surface 환경에서 일어나는 일들에 대하여 좋은 이해의 자료가 된다. 이러한 정보는 특히 이동 경로 가능성-예를 들어 자연적인 층(모래와 자갈), 사람이 만들어 놓은 수도(예: 배수로)에 대한 평가에 유용하다.

### 6.1.5 CASE STUDY : PROPOSED HOUSING DEVELOPMENT SCHEME

다음의 내용들은 부지와 위해성 평가 항목, 오염 연계(PLs)의 개념적인 모델과 각 조사 단계의 결과, 개념적인 이론을 요약했다.

#### 1) 조사대상 지역 정보(SUMMARY SITE DETAILS)

- (1) 현재 이용 상태: 비어 있음; 이전 건축주의 작업장; 빌딩 하나의 위치(대략 1800m<sup>2</sup>)-구조에 석면의 증거가 없고; 북쪽으로 약 1000m<sup>2</sup>의 열린 지역으로서 주로 두껍게 덮

인 지역; 이전의 사용된 연료 저장 창고 주변으로 오염되어 있지만 눈으로 조사하는 동안 관찰된 오염 물질의 명백한 다른 흔적이 없음; 남동쪽에 위치한 강의 약 2m 위의 부지; 강으로 흐르는 명백한 오염 물질 없음; 눈으로 조사한 결과 강의 수질은 좋은 것으로 보임

- (2) 미래사용 가능성: 주거 개발로 제안됨; 정원과 함께 대략 70가구(대략 100-200m<sup>2</sup>의 정원 설립을 포함한 plot의 크기)의 도로/시설과 관련된 개발의 가능성
- (3) 현재 주변부지 사용: 서쪽의 목초지; 북쪽, 남동쪽으로의 주택; 부지의 2km 이내의 오염이 될 만한 산업이나 활동의 가능성이 없음
- (4) 부지 이력: 1956년까지는 개발되지 않았음; 1956~1985년 까지 경미한 기술 작업이 있었음; 1987~1998년 까지 건축주의 작업장이 있었음; 부지의 2km 이내에 오염의 활동이 있을 가능성이 없음
- (5) 지리적 정보: 적색 이회토 위에 약 5m의 층적 퇴적물(모래, 점토, 침니(沈泥))
- (6) 수문지질학적인 정보: 변하기 쉬운 침투성의 낮은 대수층으로서 환경부에 의해 분류된 지역; 남동에서 남서쪽의 방향으로 흐르는 북동쪽에 위치한 강의 수질은 B 등급; 부지의 2km 이내에서 허가된 물의 분리 지점이 없음
- (7) 생태적 정보: 부지의 가까운 곳(2km 이내)에서 보호되는 거주자/동·식물에 대한 기록이 없다.
- (8) 이전의 작업: 1982년에(3 boreholes) 엔지니어링 작업의 정도로 제안된 지질 공학의 부지 조사 기록; 기대된 지리적 결과 확인 기록; 부지의 동쪽과 남쪽이 기록된 filled ground(그 곳의 1m 깊이 까지); 지상 2m 이하로 물의 떨어짐
- (9) 다른 적합한 정보: 비록 주변의 세대주로부터 엔지니어링 작업이 끝남과 동시에 그 길 주변의 북쪽 지역에 solvent drum이 묻혀 있었다는 일화적인 정보를 들었다 할지라도 부지와 관련하여 발생하는 주요한 오염의 기록이 없다.

## 2) 위해성 평가 배경(RISK ASSESSMENT CONTEXT)

만약 거주 목적으로 사용된다면 인간의 건강과 환경적으로 받아들일 수 없는 위험의 가능성이 있는지 확실한 정도의 설립을 위한 것이다.

## 3) 개념적 모형의 주요 특징(MAIN FEATURES OF CONCEPTUAL MODEL)

조사대상 지형에 대한 설명으로 모형 설정 시 주된 쟁점은 긴 시간동안 오염된 토양과 증기의 노출로 인해 새로운 임차인의 건강에 영향을 줄 가능성, 지표에서 강으로 오염 물질이 흐를 가능성, 가용성 이거나 다른 유동적인 물질이 지하수로의 여과와 강물로 흐를 때 수중의 동물과 식물에 미치는 결과, 이전의 연료 저장 창고와 drum이 묻힌 부지로부터 발생 가능한 누수(누출)에 대한 평가이다.

- (1) 지대 설정과 단계: 주택으로 사용하고자 하는 전체 부지
- (2) 권장되는 사용을 기초로 하는 지역에 대한 명백한 이유가 없으나 이전의 사용됐던 부지를 기초로 두 지역(A&B) (이전의 연료 저장 창고 & drum이 묻혀 있었을 것이라고 단언되는 지역)이 확인됐다.
- (3) 남아있는 건물의 철거 이전에 예비 조사는 수행된다.

## 4) 예비 조사(답사)의 목적

- (1) 과거에 누출(누수)되었는지 입증하려고 하는 이전의 사용된 연료 저장 창고 지역(Zone A)의 검사를 위해
- (2) drum이 묻혔던 것으로 예측되는 지역(Zone B)을 검사하기 위해

## 5) 예비 조사(답사) 후 발견사항

석유가 확인된 Zone A에서의 시료채취는 1m까지의 깊이에 존재한다. 이 지역은 더 많은 분석이 필요하다; Zone B에서의 시료채취는 명확한 증기 해석(판단)-일관되게 drum이 있었다고 인정되는 곳의 중앙에 200ppm의 VOCs가 있었음-을 제공한다. auger holes의 20%가 통과하지 못 하는 sub-surface에 방해물이 존재하는 지표의 0.5m 지역은 더욱 조사되어야 한다.

## 6) 정밀조사 1단계의 조사목적

- (1) 전체 부지의 적절한 깊이에서 체계적인 분석, 평가를 하기 위함
- (2) 이전의 연료 저장 창고 지역의 유기탄소 오염 물질의 지역을 더욱 자세하게 분석, 평가하기 위함
- (3) drum이 묻혔던 것으로 단정되는 지역의 solvent 오염 물질의 지역을 더욱 자세하게 분석, 평가하기 위함

## 7) 정밀조사 1단계 후 발견사항

부지의 주요 지점에서의 조사는 비록 그것이 동쪽을 향하여 더 두껍게 존재하지만 그 부지의(0.20m~0.50m)의 많은 made ground의 얇은 층을 발견하였다. 인위적으로나 자연적으로 생성된 지형에서의 위험 물질이 증가했다는 오염 농도의 증거는 없다. 증가된 오염 물질의 농도는 침출수 샘플에서 검출되지 않았다.

과거 연료 저장 창고 지역의 조사는 oil이 수직적으로나 수평적으로 중요한 공간에 퍼지지 않음을 보여준다. 이러한 발견은 탄소 일부 범위의 GC-MS 분석과 기대된 토양-물 분배 움직임(behaviour)과 용해도 특징에 의해 확인됐다. oil 오염의 주어진 상대적 제한 정도와 제안되는 주택 부지사용은 부지로부터 그 물질이 제거되었기 때문에 더 많은 실험·분석이 요구되지 않는다.

drum이 묻힌 지역에서 몇 가지 특별히 부식된 drums은 여전히 solvent가 담긴 것으로 발견된다.

주요 solvent는 trichloroethylene으로 확인되었다. 현재 존재하는 drum의 수, solvent의 자연 현상, 이 지역에 대한 효과적인 복원 전략과 복원 수행 후 또는 복원 작업 활동 동안 수질 모니터링의 설계를 구체적으로 정하였다.

## 8) 정밀조사 2단계의 조사목적

2단계 조사의 목적은 세 개의 sub-areas의 더욱 세부적인 조사를 통해 부지의 주요 지점에서 오염 물질의 좀 더 좁은 지역일 수 있는지를 정하는 것이다.

## 9) 정밀조사 2단계 후 발견사항

비록 토양에서 카드뮴과 PAHs 농도가 모든 경우의 적절한 기준 이하이더라도 납의 높은 농도가 허용기준이상으로 존재한다는 것을 발견했다.

보충조사는 정밀조사 실시 후 추가적으로 필요 여부에 따라 결정하되 본 조사에서는 보충 조사를 실시하지 않았다.

10) 위에서 살펴본 바와 같이 CASE STUDY 조사를 위한 중요 설계 요소에 대해 각 단계별로 즉, 예비조사, 정밀조사(1단계), 정밀조사(2단계), 보충조사별로 <표 2-48>에 요약 정리하였다.

표 2-48 CASE STUDY 조사를 위한 중요 설계 요소

설계 작용 요소	6에비 조사(답사)	1단계 조사	2단계 조사
물질 /parameters	Zone A: petroleum hydrocarbons Zone B: solvent	petroleum hydrocarbons, PAHs, chlorinated solvents, 전체 & 침출될 금속&무기물, pH, 수분 항목, 유기 물질 항목, 물의 깊이, 특정 분석 크기, 용적 밀도	카드뮴, 납, PAHs
샘플 수와 위치	Zone A: 시료채취 지점의 수 3개 Zone B: (10m 공간) 토양 증기 조사	부지의 main body에서 중심 지점의 20m에서 (26개의 시료채취) 체계적인 시료채취 8m 깊이의 지질 공학적 시추공에서 3개의 시료채취 Zone A에서 추가적 시료채취 위치에서 4개의 시료채취 Zone B에서 30m길이까지 얇은 굴(trenches) 7개의 시료채취	3개의 sub-areas 에서 시료채취 지점이 12 개 까지
깊이	Zone A: 최대 4m 깊이까지 눈으로 관찰할 것을 기초로 하여 3m 깊이에서의 시료채취 Zone B: auger holes로 1m	부지의 main body-5개 샘플(보통 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0m bgl) 극미량 크기 분석을 위한 시추공 당 2개의 샘플(made ground&natural ground) Zone A에서 과학적으로 통제(관리)되어 결정된 TPH당 3개 Zone B에서 과학적으로 통제(관리)되어 결정된 깊이에서 10개	3개, 시료채취 깊이(0.25, 0.5, 1.0m bgl)
샘플의 유형과 양	Zone A에서 적게 분포된 샘플	TPHs/trenches-화학적 검사와 침출수 검사를 위해 작게 분포된 샘플 시추공-용적 밀도를 위한 분포되지 않은 샘플, 미립자 크기 분석을 위한 넓게 분포된 샘플	1단계 조사와 동일
부지 기술	Zone A: TPHs의 기계적 굴착 Zone B: manual soil auger holes	TPHs/trenches Shell과 지질 공학적 시추공을 위한 기계적 굴착	1단계 조사와 동일
화학 실험 분석	Zone A로부터 수집된 샘플을 기초로 한 IR에 의한 TPH	샘플 선택: 부지의 main body 로부터 TPH 샘플 <ul style="list-style-type: none"> <li>금속, 무기물, pH, 수분 항목에 대한 모든 샘플</li> <li>PAH에 대한 0-1.0m이내의 수집된 샘플</li> <li>부지 관찰에 기초로한 TPH의 선택된 샘플(명백하게 오염되지 않은 샘플을 확인하는 것을 포함)</li> <li>유기 물질 항목에 대해 0-2m이내의 샘플의 10% 선택</li> <li>금속과 무기물의 침출수 검사를 위해 0-2m 이내의 샘플 30% 선택(명백하게 오염되지 않은 샘플 확인을 포함)</li> </ul> Zone A로 부터의 TPH 샘플 <ul style="list-style-type: none"> <li>모든 샘플-TPH 분석</li> <li>carbon fraction 범위의 분석을 위한 5개의 샘플</li> </ul> Zone B로부터 trench 샘플 <ul style="list-style-type: none"> <li>모든 solvent 확인과 정량을 나타냄</li> </ul>	1단계 조사와 동일

### 11) 예비(개황)조사

A지역 내의 약 567m<sup>2</sup> 면적에 대해선 판단에 근거한 방법을 통하여 연료 탱크 주위로 3 지점의 시료를 채취하였고, 약 1,100m<sup>2</sup> 인 B지역에 대해선 10m 격자 간격으로 규칙적으로 분할하여 13개의 시료를 채취하였다. 즉 판단에 근거한 방법과 통계적인 방법을 동시에 사용하고 있다 할 수 있으며, <그림 2-19>에 시료 채취 지점을 확인 할 수 있다.

### 12) 정밀조사 1단계

약 9,800m<sup>2</sup> 인 총 면적에 대하여 20m 격자 간격으로 26지점에서 시료를 채취하였으며, 3지점에 대하여 토양의 특성을 파악하기 위하여 추가로 8m 깊이로 시료를 채취하였으며, 직관적인 방법에 의하여 추가적으로 4지점에 대하여 시료를 채취하였고, B지역에 대해선 30m 길이로 7 지점의 얇은 굴착을 통한 시료 채취를 하였다. 정밀조사 1단계에서도 통계적인 방법 뿐 아니라 판단에 근거한 방법을 통한 추가적인 시료 채취가 행해지고 있음을 알 수 있다. <그림 2-20>에 시료채취 대상 지역과 채취 지점을 나타내었다.

### 13) 정밀조사 2단계

C1, C2, C3의 세 구역에 대하여 보다 정밀하게 시료채취가 이루어 졌다. 약 221m<sup>2</sup> 인 C1 구역에서는 10개의 시료 채취 지점이, 약 225m<sup>2</sup> 인 C2 구역에서는 12개의 시료 채취 지점이, 약 36m<sup>2</sup> 인 C1 구역에서는 10개의 시료 채취 지점이 선정되었다. 이는 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경(R)이 2.6~3.5m로 매우 낮은 값을 보이고 있으며 이는 시료 채취 밀도가 가장 높은 국내 토양정밀조사지침의 기타지역의 경우(R이 약 5 m이상임) 보다도 낮은 값을 보여 시료채취 밀도가 매우 높음을 확인 하였다. <그림 2-21>에 시료채취 대상 지역과 채취 지점을 나타내었다.

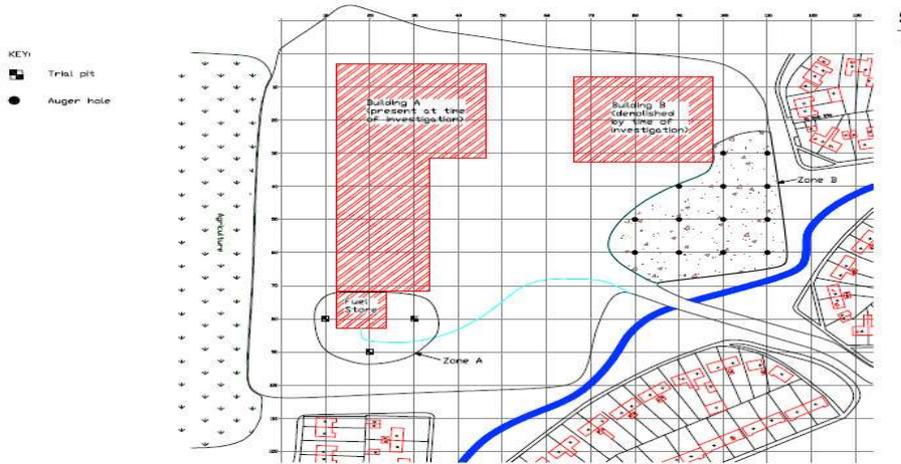


그림 2-19 CASE STUDY 예비(개황)조사



그림 2-20 CASE STUDY 정밀조사 1



그림 2-21 CASE STUDY 정밀조사 2

## 6.2 독일

### 6.2.1 현황 및 관련 법

독일의 토양보호는 토양보호계획이 착수된 이후 토양보호 및 오염토양정화에 대한 부문을 기존에 있는 법 및 규제에 수정 또는 포함시켰으며, 주정부(Lander)에서는 토양을 보호할 수 있는 주법(州法)이 따로 있다.

Baden-Wurtemberg주는 토양보호법을 1991년에 채택하였으며, Saxony주는 폐기물관리 및 토양보호에 관한 최초의 법을 제정하였다. Hamburg와 Berlin 주정부는 기술적인 지침을 마련하였다.

1992년 9월 연방정부는 연방 토양보호법(안)을 발표하였으며 이 법(안)에는 토양보호정책이 대기 및 수질보호 등과 동등한 지위를 가질 수 있도록 하고 있다.

토양에 관련된 다른 법으로 "폐기물 슬러지의 토지적용에 관한 법령(Ordinance on Land Application of Sewage Sludge)"이 1992년 6월에 변경되었으며, 이 법령은 토양질에 관한 기준을 제공하고 있다.

1990년 1월 연방정부는 '환경전문가위원회의 오염된 부지 특별의견서'를 제출하였다. 이 의견서에 기초하여 1991년부터 연방 토양보호법의 제정 작업을 착수했으며, 1992, 1994, 1996년 세 차례의 정부초안이 제안되었다. 최종적으로 1998년 의회에 제출된 '연방토양보호법(BundesBodenschutzgesetz)'이 승인되어 1999년부터 시행되고 있다. 연방토양보호 및 Altlasten 법령은 토양보호법을 시행하기 위한 주된 법령이다. 이 법령은

- ① 오염의심부지 및 Altlasten과 토양 질 악화에 대한 조사 및 평가 규정
- ② 토양 시료채취, 분석 및 토양 질 보증에 관한 규정
- ③ 오염제거, 봉쇄, 보호, 제한조치에 관한 규정과 특정부지에 대한 복원조사와 복원 계획에 관한 보충규정
- ④ 토양 질 악화 예방규정
- ⑤ 조사기준, 대책기준, 우려기준 및 허용 가능한 추가오염 부하에 대해 제시하고 있다.

### 6.2.2 토양오염조사체계

- 1) 토양 오염도 조사의 기본개념은 현재 및 미래의 토지 사용에 따른 토양기능의 안전성 확보에 있다.
- 2) 토양 오염도 조사체계는 공식적인 토양 측정망이 없으며, 민원에 의해서 수시로 조사를 실시한다.
- 3) 토양 오염도 조사목적은 지방자치단체별로 토양 오염이 우려되는 지역을 조사한다.

## 6.3 네덜란드

### 6.3.1 현황 및 관련 법

네덜란드의 토양보호정책은 1962년 사회 및 국민 건강부(Ministry of Social Affairs and Public Health)가 지하수질을 보전하기 위한 과학자문위원회를 설립한 이후부터 시작하였다. 이 위원회는 지하수질을 보전하기 위한 법적인 조치의 필요성을 제시함과 아울러 지하수보호를 위해 토양보호를 위한 법적 조치를 취할 필요성을 제시하였다. 1971년에는 토양보호를 위한 법적인 초안이 제안되었지만, 그 당시에는 토양보호를 국가적인 차원보다는 지역적인 문제로 인식하였기 때문에 법제화되지 못하였다.

1980년에는 토양오염에 관한 최초의 심각한 사회적 문제가 도시지역에서 발견된 이후 토양오염은 점차적으로 정치적인 쟁점으로 나타났다.

이 후 "잠정적 토양정화법(Soil Cleanup Interim Act)" 이 발효되어 토양정화에 관한 법적인 근거를 제공하였다.

"토양보호법(Soil Protection Act)" 은 1987년부터 시행되었으며 "잠정적 토양정화법(Soil Cleanup Interim Act)" 은 1993년에 토양보호법에 흡수되었다.

"주택, 물리적 계획 및 환경부" 는 토양보호 및 오염토양정화에 관한 일반적 정책에 책임이 있다. 오염토양의 정화는 해당지방정부 및 책임이 있는 지방정부와 상응한 정도의 대도시 자치단체 감독 하에 수행된다.

1994년 토양보호법의 적용 대상은 육지의 토양뿐만 아니라 수역(水域)의 토양도 포함하고 있다.

네덜란드의 토양보호 정책의 특징은 2가지이다.

- 높은 인구밀도, 낮은 지하수위, 높은 지하수 이용률로 인해 토양의 다기능성(Multifunctionality)의 유지·복원을 목표로 하며, 기본적으로 일률적인 정화기준을 사용하고 있다.
- 전반적인 환경정책과 같이 토양오염지역의 정화에 있어서도 정부와 산업계의 협정·협력을 중요한 기반으로 하고 있다.

### 6.3.2 토양오염조사체계

- 토양 오염도 조사의 기본개념은 토지의 다기능성 확보에 있다.
- 조사체계는 국립보건환경연구소(NIPHE)에서 실시한다.
- 토양 오염도의 조사목적은 토양 오염 우려지역, 오염원의 종류, 위치 등을 파악하는 데 있다.

### 6.3.3 네덜란드에서 오염부지의 확인 및 조사

#### 1) 예비조사 I (Preliminary Survey)

- (1) 부지의 역사와 지역 환경, 토양 및 수리지질학적 정보에 관한 자료를 수집하고
- (2) 토양과 지하수에 대한 간단한 시료 채취를 실시
- (3) 수집된 자료와 방문 결과 등을 종합하여 오염(분산)의 가능성을 검토. 한 개 또는 그 이상의 물질 농도가  $(I+T)/2$  보다 높다고 추정되면 토양오염으로 인식되고 추가적인 조사가 실시된다.

#### 2) 예비조사 II (Preliminary Investigation)

예비조사 I에서 수행된 것보다 훨씬 많은 토양시료를 채취하여 오염물질의 확산 정도를 조사한다.

#### 3) 정밀조사(Site Investigation)

분산 및 노출평가를 실시한다.

정밀조사 결과 개입기준을 초과하면 "심각하게 오염된 부지"로 등록되며, 복원의 긴급성을 결정하는 절차가 따른다. 복원의 긴급성을 결정할 때는 실질적인 인체 위해성 및 생태독성학적 위해성과 확산위해성을 평가하고 있다. 오염부지의 실질적인 노출결과, 인체 위해성이 HUMAN SCC(인체 독성에 근거한 개입기준)를 초과한 경우와 생태독성학적 위해성이 HC50을 초과하는 경우에는 복원이 시급한 것으로 간주하고 있다. 또한 실질적인 확산 위해성의 경우, 오염부지로 인해 개입기준을 초과하는 토양오염 부피가 연간  $25\text{m}^3$  또는 지하수오염 부피가 연간  $100\text{m}^3$ (지하수오염에 대한 개입기준의 부피척도)을 초과하는 경우에도 정화가 시급한 것으로 간주하고 있다.

## 제5절 국외 지하수오염조사 현황

### 1. UNESCO 지하수 오염조사

UNESCO(국제연합교육과학문화기구;United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)에서는 수자원의 합리적 관리를 위한 수문학 연구의 필요성을 인식하여 1975년 IHP(International Hydrological programme)를 개시하였다. 지하수의 질적 저하는 수자원 문제 중 가장 심각한 문제 중의 하나이므로 UNESCO에서는 IHP에서 ‘Groundwater contamination at risk’ 라는 주제로 5개의 프로젝트를 제안하였다.

그 중 하나인 ‘지하수 오염 조사(Groundwater contamination inventory)’는 지하수 오염 조사에 필요한 오염조사 계획에서부터 조사된 데이터의 이용에 이르기까지 전반적인 내용을 다루고 있으며 점오염원과 비점오염원을 포함하는 오염의 형태와 공간적 분포, 지하수원에 존재하는 오염원에 의한 잠재적인 위협의 기록 및 평가 등의 내용을 다루고 있다.

#### 1.1 서론

지하수 오염 조사는 광범위한 지하수 보호 사업에 꼭 필요한 부분이다. 적절한 보호조치가 만들어지고 수행되기 전에 지하수오염과 오염원은 확인되어야 하고 조사되어야 하며 지하수 질에 미치는 영향도 조사되어야 한다. 이러한 조사 내용은 성공적인 관리를 위한 오염의 잠재성에 대한 이해를 정부관계자, 관리자 등에게 제공하며, 여러 종류의 모니터링 프로그램에 적용할 기초데이터로 제공이 될 수 있다.

#### 1.2 지하수질과 오염

##### 1.2.1 지하수의 오염 메커니즘

오염물이 토양-암석-지하수계에 들어온 경우 지하수 흐름이 형성이 되어 확산이 된다. 확산의 과정은 오염물질을 희석하여 농도를 낮추며, 오염원에서 멀어질수록 오염물질의 농도가 낮아지게 된다. 확산현상은 지하수 유속이 클수록, 지하수 대수층의 불균일성이 클수록 증가한다.

오염물이 표층에 다다르자마자 여러 가지 과정이 그 행로를 결정하는데 그 과정에는 다음과 같은 것들이 있다.

- 1) 물리적 과정 : 수평흐름, 확산, 증발, 여과, 탈기
- 2) 지질화학적 과정 : 산염기반응, 흡착-탈착, 이온교환, 산화-환원, 침전-용해, 지체, 착화합물생성
- 3) 생화학적 과정 : 증산, 세균의 호흡, 세포합성의 붕괴

다음의 그림은 오염물질의 이동 기작을 나타낸 그림으로 포화대와 불포화대에서의 오염물질의 행로를 알 수 있다.

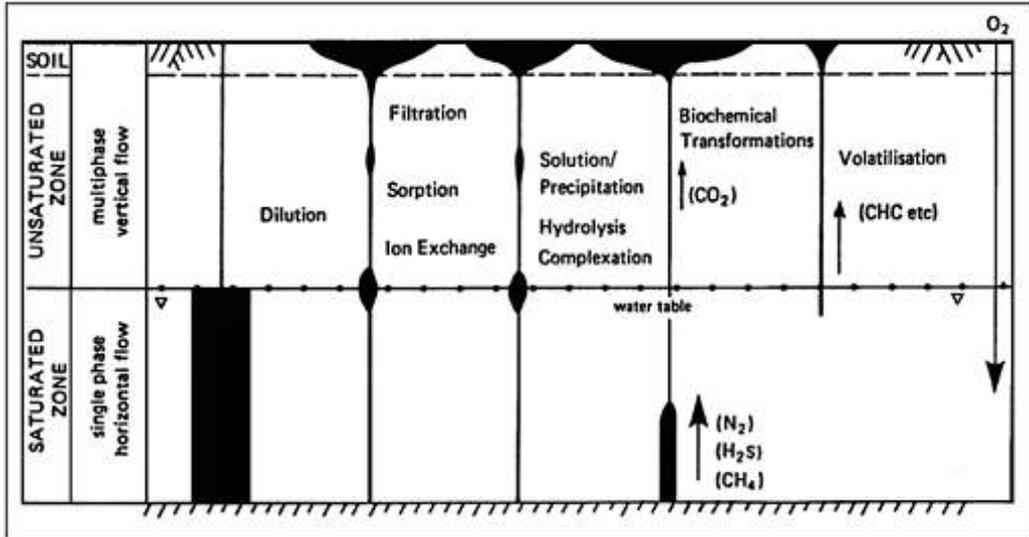


그림 2-22 오염물질 이동 기작

### 1.2.2 지하수의 오염물질에 대한 취약성

지하수가 어느 정도 오염에 취약한지를 알아보기 위해 오염취약성을 평가한다.

오염취약성의 평가는 여러 방법으로 설명되는데 오염물질의 부하량의 경우 오염물질 특성(지속성, 이동성), 오염물질의 배치(유입 깊이), 오염원의 오염정도(농도, 유출지역, 부하시간)의 항목으로 표현된다. 이러한 방법을 통한 오염취약성의 평가는 복잡하고 많은 비용이 들기 때문에 지하수의 상대적인 취약성 평가에는 여러 가지 등급 매김(rating) 방법이 사용된다.

## 1.3 지하수 오염원-지하수의 주된 오염원과 그것이 지하수 수질에 미치는 영향

### 1.3.1 오염원의 분류 방법

지하수오염의 원인과 원천은 여러 가지이며 인간의 활동에 따라 다양하다. (Zaporozec and Miller, 2000) 지하수오염원의 확인은 지하수의 보호를 위해 꼭 필요한 부분이다. 오염원의 분류 방법은 아래와 같이 나눌 수 있다.

- 1) 방출되는 방법 : 예) 배출, 이동
- 2) 기원에 따른 방법 : 예) 생활, 농업
- 3) 화학물질의 종류에 따른 방법 : 예) 중금속, 탄화수소류, 살충제

- 4) 위치에 따른 방법 : 지하수면 상부, 지표면 하부
- 5) 오염특성에 따른 방법 : 점오염원, 선오염원, 면오염원

일찍이 지하수 오염원의 분류는 1977년 EPA(Environmental Protection Agency)에 의해서 이루어졌다. 오염원은 배출 방식을 고려하여 4가지 카테고리로 나뉘었다. 1984년 미국의 미의회 기술평가국(OTA:Office of Technology Assessment)에서는 이 분류를 개정하여 다음 표와 같이 6가지의 카테고리로 확대하였다. 그 중 특히 중요한 개선점은 자연발생적인 오염원을 추가한 것이다.

### 1.3.2 오염원의 분류

미의회 기술평가국(OTA:Office of Technology Assessment)에서 분류한 6가지 카테고리는 아래와 같다.

#### 1) 자연 기인(Natural sources)

대부분의 지하수 오염원은 인간의 활동에 의한 것이지만 자연적인 원인을 갖는 오염원도 있다.

##### (1) 무기물질(inorganic substances)

지하수 중의 주된 무기이온들은 나트륨이온, 칼륨이온, 칼슘이온, 마그네슘이온, 실리카, 중탄산이온, 황산이온, 염소이온을 포함한다. 이러한 성분의 분포는 지하수가 흐르면서 접촉하는 지질학적 특성에 크게 의존한다.

무기물질 중 지하수에 불소이온이 고농도로 존재할 경우 반상치를 만들고 어린이들의 뼈의 성장을 방해한다.

##### (2) 미량금속(Trace metals)

지하수에 있어서 알루미늄, 카드뮴, 크롬, 코발트, 구리, 납, 니켈, 아연등과 같은 중금속은 극히 낮은 농도로 존재하지만 인간 활동에 의해 지하수로 유입될 수 있다. 지하수 중에 중금속이 고농도로 있을 경우 취수원으로 부적합 하며, 수생태계에 영향을 미친다.

##### (3) 방사성 물질(Radioactive elements)

방사능 물질에 의한 오염은 일반적으로 핵 발전 및 방사성물질 폐기와 같은 인간 활동과 관련이 있다. 하지만 자연적으로 발생하는 방사선도 결코 배제될 수 없다. 라돈, 라듐, 우라늄은 대부분의 토양과 바위에 자연적으로 미량 존재한다.

##### (4) 유기화합물(Organic compounds)

인간 활동 외에도 자연적으로 유기물이 방출될 수 있다. 휴믹산, 펙틴, 탄화수소는 지하수에서 자연적으로 발생하는 유기물이다. 자연적으로 발생하는 유기물의 농도는 낮고 지하수를 오염시킨다고 간주할 수는 없다.

#### (5) 미생물(Microorganisms)

자연적으로 발생하는 지하수중의 미생물은 수심이 깊어질수록 급격하게 감소한다. 미생물은 지하수중의 유기물과 관련이 있는데 이 유기물도 수심이 깊어질수록 감소한다. 지하수에는 산화-환원반응에서 중요한 역할을 하는 박테리아가 포함되어 있다. 잘 알려진 예로써 ① 박테리아는 이산화탄소와 유기물을 메탄으로 환원하는 것을 돕는다. ② sulfate가 sulfite로 환원되는 것을 돕는다. ③ 용존 철과 망간은 박테리아의 작용으로 산화철, 산화망간, 수산화철, 수산화망간으로 산화된다. 특히 마지막 두 작용은 지하수내의 박테리아 점액을 형성하여 지하수를 먹는 물로 적합하지 않게 하며 관정의 스크린을 막거나 지하수 채수에 문제를 유발한다.

#### 2) 농업과 산림(Agriculture and forestry)

산림과 함께 농업은 지하수에 영향을 주는 가장 넓은 범위의 인간 활동 중의 하나이다. 농약 및 비료의 사용과 저장, 축산 폐수, 사용된 관개용수, 비축물과 수확 잔류물, 식립과 벌채 등이 지하수에 영향을 미친다.

#### 3) 도시화(Urbanisation)

도시화에 따른 지하수 오염원으로는 가정 및 도시의 고형 폐기물의 처리, 생활하수의 처리, 하수 및 유출수의 처리, 폐품 및 고물 저장소, 기타 도시 오염원이 있다.

#### 4) 광업 및 산업 활동(Mining and industrial activities)

광산 부산물, 광산 배수 및 폐수, 산업 폐기물, 폐기된 우물 또는 주입정, 누출에 의한 지하수 오염이 발생한다.

#### 5) 부적절한 물관리(Water mismanagement)

부적절한 지하수정 설계, 염수 및 지하수 침투, 불완전한 지하수정 건설, 폐공, 관리되지 않은 토지 개발이나 관개 행위에 의해 지하수의 오염이 발생한다. 버려진 지하수정은 오염물질이 이동하는 수직 통로가 될 수 있다. 우물 또는 지하수공이 그대로 방치되면 쓰레기 배출지로 사용될 수 있고 공중 화장실로 생각될 수도 있다. 이 경우 대수층의 오염이 심각하게 일어난다.

#### 6) 기타 다양한 오염원(Miscellaneous sources)

## 1.4 오염원 조사

인간 활동이 지하수에 미치는 영향을 알기 위해서는 모든 오염원을 순서에 따라 문서화하여야 한다. 오염원에 대한 필요한 정보를 모으는 과정을 오염원 조사라고 한다. 오염원 조사에서는 조사수행을 이끄는 팀장이 활용 가능한 재정적, 인적 자원에 적합한 조사방법을 선택하는 것이 중요하다.

각 단계별 세부 내용은 다음과 같다.

### 1.4.1 조사 계획 수립

조사 계획의 주요 단계는 다음의 표와 같은데 크게 조사 계획(design)-조사 실행(implementation)-조사결과 평가(evaluation of inventory)로 나눌 수 있다.

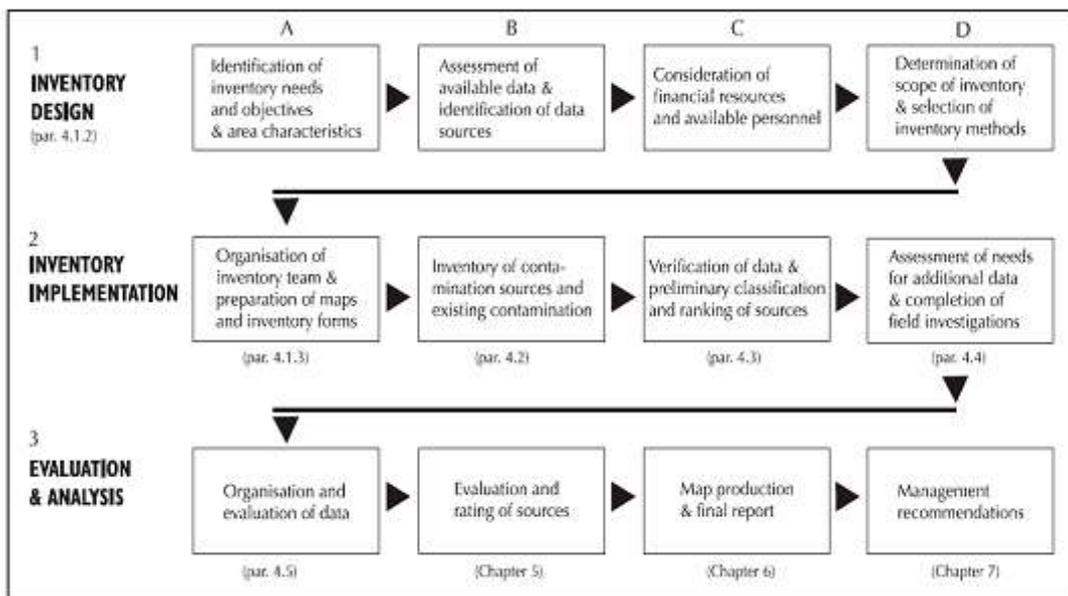


그림 2-23 지하수 오염조사 주요 단계

#### 1) 조사의 계획

- 조사의 필요성 및 조사 대상지의 특성을 파악하고 조사의 목적을 정의하는 일이 가장 먼저 해야 할 일이다. 지하수 오염 조사를 통해 다음의 평가가 필요하다.
  - 지하수질 악화의 잠재적 위험성 평가
  - 지하수 보호 계획
  - 정화방법과 기술의 계획

- 조사지역의 규모는 오염원조사 방법의 선택에 있어 주된 결정 요소가 된다.
- 활용 가능한 데이터(오염원의 개수와 형태)의 양과 질에 대한 예비적인 평가와 활용 가능한 정보의 출처를 파악해야 하며, 사용 가능한 예산과 인력을 고려해야 한다.
- 오염원 조사 과정은 조사의 세밀함 정도에 상관없이 서술된 정보를 모으고 해석하는 기본적인 단계를 포함해야 한다.
- 오염원 조사의 초기에는 조사 지역 안에 많은 오염원이 있을 거라는 가정을 하여야 한다. 그 지역에 있는 모든 가능한 오염원의 위치를 파악하는 노력을 하여야 한다. 그러므로 조사지역 안에 있을 것으로 예상되는 오염원에 대한 체크리스트를 모아 두는 것이 도움이 된다. 체크리스트의 예는 다음과 같다.

표 2-49 Example of a checklist for the inventory of potential contamination sources

1 ___ Abandoned well	23___ Manure spreading
2 ___ Aboveground storage tank	24___ Mine tailing pile
3 ___ Agricultural fertiliser use	25___ Mining operation (gravel pit, quarry, open mine, underground mine)
4 ___ Agricultural pesticide use	26 ___ Natural source of contamination (identify): _____
5 ___ Airport/air field	27___ Municipal sewer
6 ___ Animal feedlot or waste storage pit	28___ Oil or gas pipeline
7 ___ Auto repair and/or body shop	29___ Plastics manufacturing
8 ___ Cemetery	30___ Private well
9 ___ Cesspool, latrine, septic system	31___ Production or other well
10___ Chemical production or storage	32___ Salt water intrusion
11___ Drainage or disposal well	33___ Service or petrol station
12___ Dump	34___ Sewage treatment plant
13___ Electroplating/metal refinishing factory	35___ Spill site (chemical or waste)
14___ Fertiliser/pesticide storage, mixing, loading, or production facility	36___ Stockpile (chemical, road salt, etc.)
15___ Hazardous waste site	37___ Storage tank farm
16___ Industrial complex	38___ Underground storage tank
17___ Injection well	39___ Urban fertiliser/pesticide use
18___ Irrigation system (agricultural, golf course)	40___ Wastewater lagoon/pond
19___ Junk yard/Salvage yard	41___ Well construction
20___ Land disposal/spreading of wastewater, sludge, or septage	42___ Wood preserving facility
21___ Landfill (active or abandoned)	43___ Other (specify): _____
22___ Machine shop	_____

*Note:* Check the identified source off, locate it on the map using the corresponding number from the list above and a letter (A, B, ...) denoting a unique location, and include the map number on the line next to the item number (e.g. 2 A, 16 A, B). Then fill in a survey inventory form for each source (see examples in Table 4.2 and 4.3).

- 비록 발견한 모든 오염원이 반드시 지하수 오염에 위협이 되지 않는다 하더라도 상관없이 모든 오염원은 인지될 필요가 있다.
- 특정 지역에서의 데이터가 빠진 경우 활용 가능한 데이터가 드문 경우 새로운 정보를 수집하여야 한다.
- 데이터가 없는 경우 새로운 데이터를 얻기 위하여 현장조사 등 다양한 조사기법을 적용하여야 한다.

## 2) 조사의 준비

- 관리자는 어떻게 조사를 적절하게 수행할 것인지에 대한 조사의 목적과 과정에 대해서 정확하고 명쾌하게 직원들에게 알려주어야 한다. 이러한 의견교환이 잘 이루어지지 않은 경우 조사 수행의 실패의 주된 원인이 된다.
- 각각의 조사는 조사의 계획, 관리, 수행, 평가하는 책임을 갖고 예산안에서 조사를 지속하며 그리고 최종 결과물(지도, 보고서)에 대한 책임을 갖는 프로젝트 팀장 또는 그룹을 가지고 있어야 한다.
- 조사에서는 다음과 같은 단계를 밟아야 한다.
  - 조사팀 구성
  - 팀 구성원의 훈련 및 교육
  - 지도의 선택
  - 조사 인력을 위한 잠재적인 오염원에 대한 체크리스트 축적
  - 정보와 데이터 제공자 확인 및 그들의 주소(우편과 이메일), 전화번호 등의 기록
  - 오염원 확인방법의 결정
  - 조사에 필요한 양식 준비
  - 필요 장비와 설비 준비(차량, 컴퓨터 등)
  - 데이터 기록 및 처리 시스템 선택
  - 자료 관리인의 지정
  - 필요한 경우 조사자에 신분증 발급
  - 토지 소유자와 조사 지역 출입 허가 협의

### 1.4.2 오염원 확인 방법

오염원 조사의 수행을 위해서는 세심한 계획뿐만 아니라 조사에 적합한 오염원의 확인 방법의 선택이 필요하다. 조사는 초기 단계에서는 간단한 방법으로 시작하여 더 비용과 인력이 많이 필요한 방법으로 수행될 수 있다. 각 단계의 중요성은 조사 목적과 규모, 세부 조사 내용, 오염원의 특성 및 개수, 데이터의 유용성, 조사자의 전문성, 예산 등에 따라 달라진다.

#### 1) 사무실에서의 오염원 확인

오염원 조사의 첫 번째 단계는 주로 실내에서 이루어진다.

##### (1) 실재하는 오염원에 대한 정보

실질적인 오염원에 대한 정보는 일상적으로 기록된 문헌이나 정부기관의 자료가 있으며

지질조사기관, 수도사업자, 연구기관, 컨설팅회사, 통계기관 등으로부터 자료를 확보할 수 있다. 과거와 현재의 토지 이용에 관한 사항은 항공사진 기록, 오래 거주한 사람과의 인터뷰 등을 통해 확인할 수 있다. 중요한 정보는 출판된 문헌, 출판되지 않았지만 컨설팅 회사, 연구소 등에서 행해진 연구, 위성사진을 통해서도 확보할 수 있다.

### (2) 잠재적 오염원에 대한 정보

실제 오염원보다 정보를 모으기가 어렵다. 농업과 임업, 도시화, 광업과 산업 활동, 운송 등에 대한 조사를 수행한다.

### (3) 실재하는 지하수 오염의 공간적 범위

개념적으로, 오염된 지하수는 2개의 지역으로 구분할 수 있는데 하나는 오염원 지역이며 다른 하나는 용해된 오염물질의 띠 부분이다. 오염원 지역은 오염원에서부터 먼 구간까지 분포하는 오염 띠 지역에 비해 작은 구간을 차지한다. 많은 경우 지하 오염원의 범위 평가는 실내 작업의 단계에서의 조사로 충분하며 적합한 부지 특성화를 위해서는 현장 조사가 필요하다.

## 2) 조사 계획 가다듬기

조사를 수행함에 있어 조사의 목적을 재검토하고 조사를 통하여 알아낸 사실을 반영하여 조사를 재구성한다. 재구성할 때 고려해야 하는 사항은 우선 조사 목적, 오염원의 수와 형태, 자금 및 인력이다.

## 3) 오염원의 현장 확인

사무실 범위의 조사 이후에 조사자는 대부분의 오염원과 지하수 오염사고를 확인하게 될 것이다. 만약 이 자료가 부족하면 현장조사를 통하여 정보를 모아야 한다. 미지의 오염원에 대한 정보를 얻으려면 일반적으로 그 오염원에 대해서 가장 잘 알고 있을 것으로 예상되는 땅의 소유주와 직접 만나야 한다. 이러한 접촉은 편지, 전화, 가호방문 조사 또는 개인면담의 형태로 이루어진다. 이러한 면담과 조사는 잠재적 오염원과 오염사고를 확인하는 상대적으로 직접적인 방법이지만 어느 정도의 부족한 면이 존재한다. 인터뷰와 개인을 통한 조사는 현장조사와 조사대상 지역에서 오염원을 찾는 것으로 완전해질 수 있다. 현장조사는 조사에 참여하는 직원이 잠재적 오염원이 있는지 땅 소유주에 의존하지 않고 스스로 오염원에 대한 정보를 확인하고 찾아낼 수 있도록 한다.

### (1) 주요 인물과의 인터뷰

개인적인 면담은 매우 가치 있는 정보의 원천이 될 수 있다. 인터뷰는 여러 지방공무원, 공중보건사, 설비관리 및 운전자, 그 지역의 사업가, 농부, 지방 이익단체, 장기 거주자를

대상으로 짤 수 있다. 개인적인 면담의 장점은 다른 방법으로 얻기 어려운 매우 유용하고 많은 양의 정보를 얻을 수 있다.

(2) 질문지를 이용하는 경우

상대적으로 적은 비용으로 많은 사람들에게 메일과 전화를 통하여 정보를 얻을 수 있는 방법이다.

질문지는 간단하고 명료해야 하며 조사 대상이 되는 사람들의 수준에 맞게 작성되어야 한다.

(3) 가호방문 조사

조사지역내 거주지, 상업지, 산업지의 구도를 잡는 조사이다. 이러한 조사는 조사 지역이 작은 경우 적합한 방법이다.

(4) 현장 답사

가호방문조사와 비슷하게 계획되지만 완료하는 데 더 많은 시간이 필요하다. 사람이 직접 이동하며 하는 조사로 땅 사용에 대한 세세한 조사를 필요로 할 때 사용되는 방법이다. 비용이 많이 들고 노동 집약적이며 비교적 조사 지역이 작은 경우 적합한 방법이다.

(5) 차량을 이용한 조사

이 조사는 현장 조사나 검색보다 훨씬 짧은 시간에 이루어질 수 있는 조사이며 대부분의 오염원이 길 주변에 있을 경우에 사용한다. 이 조사에서 조사자는 세밀한 지도를 준비해야 하며 차량으로 움직이면서 창밖으로 관측되는 잠재적인 오염원에 대해서 기록하여야 한다. 현장조사보다 노동력이 적게 들고 비용이 적게 들며 그 지역 안의 많은 부분의 오염원을 파악할 수 있다.

### 1.4.3 결과의 예비 평가

현장조사 이후 새로운 평가를 통한 목적의 수정이 필요하다. 만약 평가에서 새로운 정보가 필요하다면 필요한 정보의 가치가 추가적인 지출을 정당화하는지를 판단하여야 한다. 얻어진 데이터는 검증은 하여야 하고 확인된 오염원은 각 등급으로 분류되어야 한다.

#### 1) 데이터의 검증

조사를 통해 모아진 데이터는 검증되고 평가되어야 하는데 데이터의 양, 정확도, 불확실도, 신뢰도의 항목으로 고려되어야 한다.

## 2) 오염원의 사전 분류와 등급 매김

기존의 데이터와 앞에 언급된 방법을 적용하여 얻은 데이터와 정보를 기본으로 오염원의 사전 분류와 등급 매김을 한 후 더 많은 시간을 필요로 하는 현장조사 단계를 결정하기 위해 수행해야 하는 단계이다. 이 단계의 목적은 데이터의 정확도와 신뢰도를 증명하기 위함과 오염원의 중요성에 따른 현장조사의 우선순위 결정을 위함이다.

지하수 오염의 잠재적인 원인은 그 종류가 매우 많으나 지하수에 미치는 위협의 정도는 다르므로 오염의 위협 정도를 어림잡는 등급 매김이 사용된다.

### 1.4.4 현장 조사

현장조사는 오염원 조사 중에 가장 나중에 시행되고 가장 오랜 시간과 비용을 필요로 하는 방법이다. 현장조사는 주로 자연발생적 오염원에 대한 조사와 이미 알려진 인간 활동에 의한 오염원(예를 들어 중공업, 광산업등)에 대한 세부 조사를 위하여 필요하다.

현장조사 계획의 주요 절차는 다음 그림과 같다.

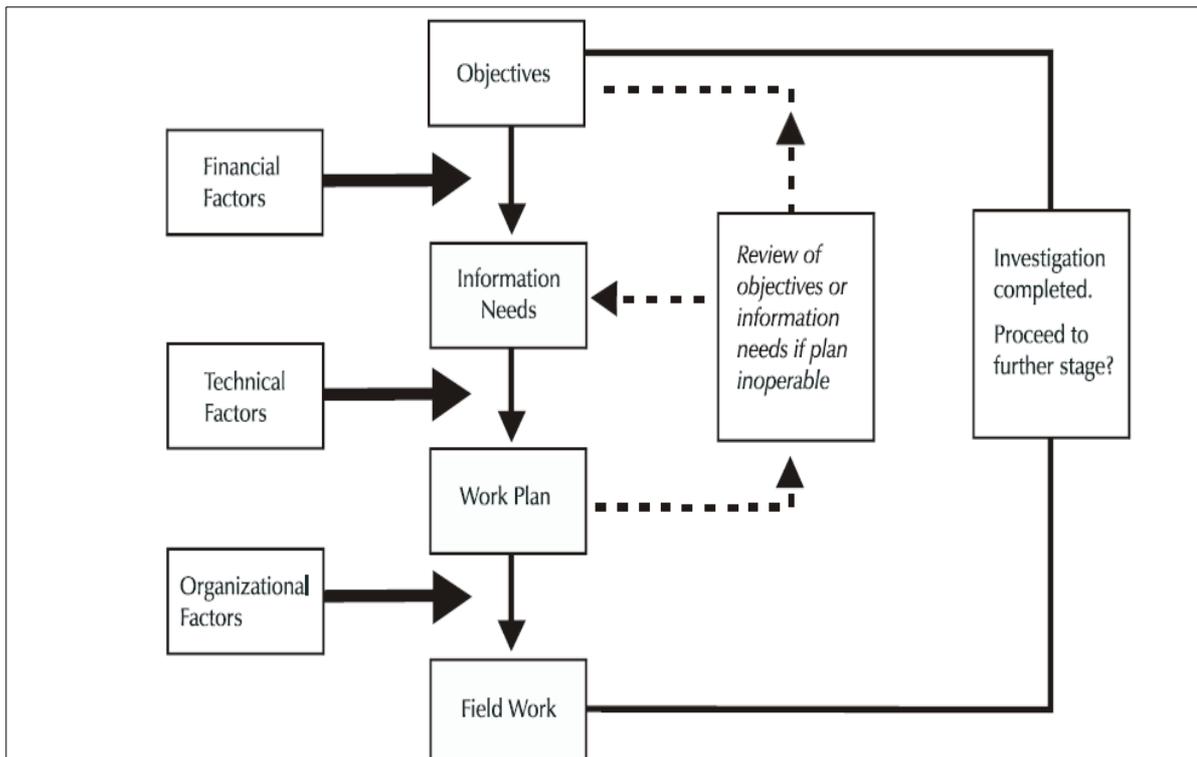


그림 2-24 A framework for field investigation planning

## 1) 현장조사 계획수립

조사자는 조사의 목적과 범위를 명확하게 제시해야 하며 기존의 데이터와 이전의 연구를 검토하고 조사의 목적을 정해야 한다. 또한 일과 시간 계획 정하기, 필요한 기술과 인력 결정, 예산의 준비가 필요하다. 현장조사는 현장작업, 실험실에서의 분석, 데이터의 해석, 보고서 작성 등으로 이루어진다.

## 2) 조사지역의 특성 파악

(1) 지하수 오염 부지 특성 파악은 오염 특성과 범위를 결정하고 정화 방법과 소요 비용을 결정하므로 지하수 오염조사에서 매우 중요한 부분이다. 지점의 특성 파악은 다음과 같은 조사가 수행된다.

- 오염물의 성질, 범위, 분포
- 오염된 지하수에 의한 잠재적 수용체와 위험 정도
- 수리지질학적 특성, 오염물 특성

(2) 조사지역의 특성 파악은 크게 두 가지로 나뉜다.

### ○ 첫째 : 지하수 흐름 시스템

수리지질학적 특성화 방법은 시추, 지표 또는 시추공의 지구물리학적 조사, 대수성 시험, 추적자 시험 등이 있다.

- 수리지질학적 배경에 대한 기술(지질 층위, 암질(lithology), 대수층의 연속성)
- 지하수의 깊이와 변동을 포함한 수리지질학적 데이터
- 대수층의 수리학적 특성(투과성, 수리전도도, 수리경사)
- 대수층 경계의 상태
- 지하수 흐름 속도와 방향
- 지하수의 함양 및 배출

### ○ 둘째 : 지하수 오염 평가

- 오염원과 배출 특성의 기술
- 오염의 종류, 농도, 오염 범위
- 수직, 수평적 이동 방향
- 오염물질의 이동 경로, 이동 속도 등의 특성

### 3) 현장조사 기법

현장 조사는 부지의 수리지질학적 특성과 지표 하 오염물질의 형태와 거동 특성을 잘 이해할 수 있는 신뢰성 있는 데이터를 얻는 것이 주요한 목적이다. 이러한 목적을 이루기 위해서 현장 정찰, 굴착, 시추공과 관정 테스트, 지하수 시료채취, 현장 측정과 테스트를 실시한다.

#### (1) 조사지점 답사

고비용 조사 전에 신속, 저비용으로 실시할 수 있는 방법으로 시공(Test Borehole), 관측정, 시료채취지점의 위치 결정에 필요한 예비적인 데이터를 얻을 수 있다.

- ① 지질도 작성 : 오염물질을 함유할 수 있는 지질 확인 가능
- ② 지구물리학적 조사 : 조사자가 조사지역의 상태와 오염을 특성화할 수 있게 함, 신속하고 조사지역을 교란시키지 않으며 굴착보다 저렴하고 신속한 방법임. 지하수 조사시에는 이하의 5가지 방법이 주로 사용됨

- GPR(Ground-penetration radar)
- EM(Electromagnetic conductivity)
- ER(Electrical resistivity)
- SR(Seismic refraction)
- MM(Magnetometry)

새로운 지구 물리학적 탐사 기법이 지속적으로 소개되고 있는데 NMR(Nuclear magnetic resonance) 등이 있다. 다음의 표는 지하수 조사의 내용에 따라 적용 가능한 지구 물리학적 탐사기법을 나타낸 표이다.

표 2-50 Application of surface geophysical techniques in groundwater investigations

Application	Geophysical technique				
	GPR	EM	ER	SR	MM
Changes in stratigraphy and lithology		•	•	•	
Depth to bedrock			•	•	
Fracture detection	•	•	•		
Karst features (cavities, sinkholes, etc.)	•	•			
Depth to water table			•	•	
Detection of plumes		•	•		
Location of buried objects (drums, UST, etc.)	•		•		•
Location of buried pipes	•	•	•		•
Location of abandoned wells	•				•

Note: • primary technique, • secondary technique.

- ③ 토양 증기 채취 : 휘발성 오염물질의 위치를 찾아내고 시료를 채취하는 방법이다. 박벽 (thin-wall)의 소구경의 튜브를 지하수면 보다는 위쪽의 지표면 하부(일반적으로 1.5~3m, 최대 6m)에 위치시키고 토양 증기를 채취한다.
- ④ 얇은 지하수 채취(Shallow groundwater sampling) : 얇은 지하수 채취 방법은 도로나 골목 또는 빌딩 내 등 시료 채취가 어려운 지점에서 사용할 수 있는 신속한 평가 방법이다. 이 방법은 토양 증기 채취법의 변형으로 박벽의 튜브를 지하수면보다 약간 아래쪽에 위치시켜 시료를 채취하고 현장 또는 시험실에서 분석을 실시한다. 더 깊은 곳까지의 시료 채취가 가능하더라도 권장되는 최대 깊이는 약 5~8m 이다.

## (2) 드릴링

지표면 이하의 조건을 보기 위한 그리고 우물을 만들기 위한 범용적인 드릴링 기법은 없다. 예상치 못한 문제가 발생했을 때 조사자는 드릴링 방법에 대하여 잘 숙지하여야만 주어진 시간과 예산안에서 일을 수행할 수 있다. 일반적으로 세 가지 방법이 쓰이는데 각 방법별 특징은 다음과 같다.

- auger drilling(얇은 구멍, 일반적)
- rotary drilling(더 깊은 구멍, 일반적)
- cable-tool(percussion) drilling(선진국에서는 잘 쓰이지 않으나 세계적으로 여러 나라에서 널리 사용됨)

## (3) 시추공과 관정 테스트

시추공 물리검층(Geophysical borehole logging)은 암석에 대한 정보를 알기 위해 토양과 암석 시료를 채취하는 것이다. 이를 통해 수질지질학적 특성 등 지하층의 세부적인 상태를 알 수 있다. 대부분의 물리 검층은 케이싱을 설치하지 않은 시추공에서 행해진다. 일반적으로 여러 물리 검층 방법이 사용되는데 이중 6가지가 대표적으로 쓰이며 각각의 특성은 다음 <표 2-51>과 같다.

표 2-51 Major borehole geophysical methods used in groundwater investigations and their application

<i>Logging method</i>	<i>Hydrogeological application</i>
Resistivity (normal or single-point)	Generally determine the character and thickness of the various strata; identify porous (sand) sediment; indicate water quality and possible contamination.
Spontaneous potential (SP)	Distinguish clay/shale and sand/sandstone lithology or fresh and brackish water.
Natural gamma (in both uncased and cased holes)	A qualitative guide for stratigraphic correlation and permeability or for estimating rock type.
Caliper	Measure the borehole diameter; determine casing depth; locate cavities; indicate joints in carbonate aquifers.
Flow meter	Determine source and movement of water in a well (especially, fractures producing water and zones of high permeability); locate intervals of leakage in artesian wells; trace casing leaks or plugged screen.
Fluid temperature	Trace the movement of the water injected into an aquifer and the dispersion, dilution, and movement of contaminants.

수리전도도는 대수층의 특성을 나타내는 중요한 요소로 양수시험을 통해 결정된다. 양수 전에 지하수위를 측정하고 양수를 하는 동안 지하수위의 변화를 관찰한다. 수리전도도가 작거나 관정의 직경이 작은 경우 슬러그테스트(slug test)를 수행할 수 있다. 테스트를 하는 동안 일정한 부피의 물을 넣거나 제거할 경우의 지하수위의 변화를 측정하고 이 변화를 수리전도도로 변환한다.

#### (4) 지하수 시료 채취

지하수 시료채취는 지하수 오염 조사를 위해 수행하는 가장 중요한 일 중 하나이다. 지하수 시료는 지구화학적 또는 오염물질에 대한 정보를 제공한다. 시추공 탐사와 수질 정보는 주요한 기본 정보이다.

지하수 시료 채취 시 2가지 기본적인 고려사항이 있다.

- 첫째 : 각각의 시료채취 지점의 확립(시간, 공간)
- 둘째 : 시료채취 규칙

시료 채취 장소와 시료채취지점의 개수는 수리지질학적 상태의 복잡성과 요구되는 정보의 정도에 따른다. 처음에는 적은 지점과 낮은 시료채취빈도로 시작하다가 단계적으로 늘어나가는 것이 좋다.

시료채취계획과 시료채취절차를 시료채취프로토콜이라 하는데 이는 현장 조사 이전에 결정 되어야 한다. 시료채취프로토콜은 정부의 지침서나 주어진 조사형태와 오염의 형태 따라 만들어질 수 있다. 일반적으로 시료채취프로토콜은 다음을 포함한다.

- ① 지하수위 측정은 시료채취 전에 측정
- ② 관정 퍼징(관정이나 시추공의 정체된 물 제거)
- ③ 시료의 채취, 보존, 취급
- ④ QA & QC
- ⑤ 시료 보관 및 이송
- ⑥ 절차의 기록

대표성 있는 시료 채취는 신중하게 짜여진 시료채취프로토콜, 잘 훈련된 인력, 현장-실험실간의 원활한 정보교환의 결과로 얻어질 수 있다. 시료는 “미리 정해진 정밀도와 정확도의 수준에서 관심의 대상이 되는 화학물질이 측정될 수 있도록 적절한 관정 퍼징 후에 흔들림이 없는 상태로 취해진 시료”이다.

다양한 종류의 장비가 시료 채취 시 사용될 수 있는데 크게 이동형과 고정형 시료채취 장비로 나눌 수 있다.

이동형 샘플러는 흡입형 장비 또는 비흡입형 장비가 있는데 다음 <표 2-52>는 이동형 장비의 특성을 나타낸 것이다.

표 2-52 Principal test drilling techniques

<i>Drilling technique</i>	<i>Common depth (m)</i>	<i>Geological material</i>	<i>Formation sampling capability</i>	<i>Drilling speed</i>
Auger drilling	15-45	Unconsolidated	Reliable samples	Rapid penetration
Rotary drilling (hydraulic or air)	100+	All types	Representative samples relatively difficult to collect	Fairly fast penetration
Cable-tool (percussion) drilling	20-100	Unconsolidated, caving formations, hard rock	Good samples	Slow penetration

다음의 그림은 가장 일반적으로 사용되는 이동형 시료 채취 장비이다.

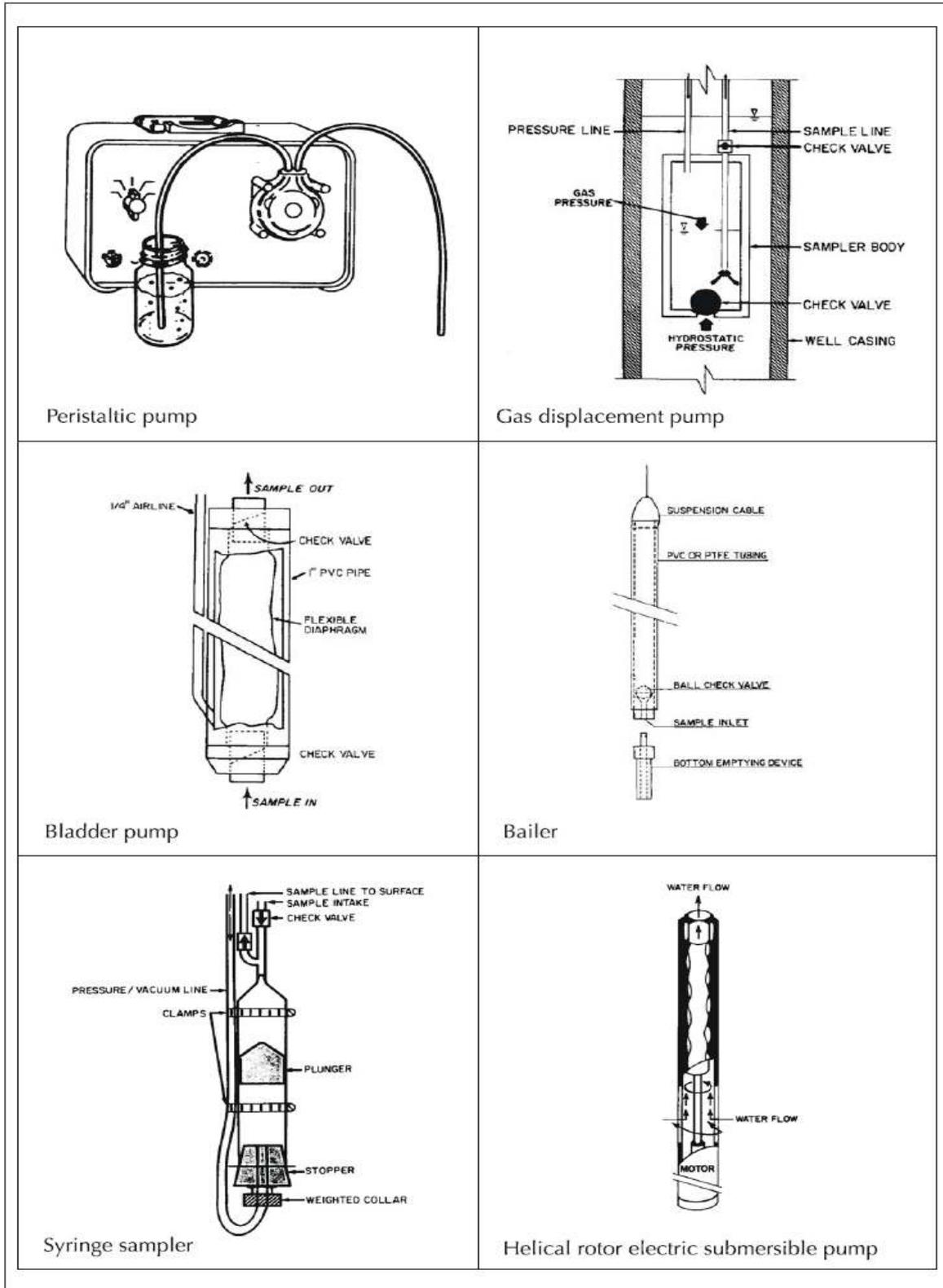


그림 2-25 Schematic diagrams of the most commonly used sampling devices

원위치 시료채취 프로브(In-situ sampling probes)는 상대적으로 최근에 나온 장비로 신속하게 시료를 채취할 수 있는 이동형으로 사용할 수도 있으며 지속적인 모니터링을 위해 고정시켜 이용할 수도 있다. 관측정에서 고정형 시료채취 장비는 시료 채취 사이에 필요한 장비 세척 작업을 덜어주며, 교차오염을 방지해준다. 고정형 시료채취 장비는 관측정 안에 설치되어 한 관측정의 시료만 채취하게 된다. 각 관정에 필요한 고정형 시료채취 장비를 설치하는 데는 전 지역을 시료채취 할 수 있는 이동형 장비를 구매하는 것보다 초기 비용이 더 많이 들어가지만 장비를 세척하거나 옮기는데 필요한 시간과 비용을 현저하게 감소시킨다.

#### (5) 기타 특성 조사 방법

현장 조사는 지하수위 측정, 추적자 시험, 지하구조 특성 조사 등 다양한 방법이 있다. 현장조사는 보통 지역 내의 관측정과 기존 우물의 지하수위를 측정하는 것으로 시작된다. 측정 결과는 조사를 위한 지도를 만드는데 이용된다. 측정은 보통 수작업으로 이루어지는데 강철재 줄자, 전기프로브 등이 사용된다.

추적자 실험은 물의 흐름 방향과 유속, 분산 속도, 오염물질의 운동방향, 운동속도, 오염원의 확인 등과 같은 여러 가지 수리지질학적인 변수를 측정하거나 어렵잡기 위해서 사용된다. 추적자의 종류, 지질학적 조건, 수리지질학적 조건 그리고 추적자주입 및 시료채취 방법을 조합하는 경우 추적자 실험의 종류는 거의 무한하게 될 수 있다. (Kass, 1998) 주로 사용되는 추적자는 크게 이온, 염료, 가스, 동위원소, 수온, 고체입자의 6개 그룹으로 나눌 수 있다.

#### 4) 데이터 관리

지하수 오염원 조사가 성공적으로 이루어지기 위해서는 데이터를 수집하고 저장하며 관리하는 데이터 관리 시스템이 있어야 한다. 데이터는 정보를 만들어내기 위한 원천이 된다. 데이터 관리 시 필요한 사항은 아래와 같다.

##### (1) 데이터 기록

##### (2) 데이터베이스 구축

조사에 있어 나중에 이용할 데이터 검색, 저장, 수집을 위한 정확하고 적절한 데이터베이스 시스템이 구축되어야 한다. 데이터베이스의 기능은 데이터가 정보가 될 수 있도록 데이터를 조직하고 접근 가능하게 해야 하는데 데이터베이스 구축 절차는 다음과 같다.

- 데이터베이스 사양의 구성
- 데이터베이스 운영자나 매니저의 지정
- 데이터 수집 및 기록
- 데이터 조사
- 데이터베이스 설계
- 데이터베이스 평가 및 수정

### (3) 데이터 저장, 접근 및 유지 보수

수집된 데이터는 수작업 또는 컴퓨터를 이용하여 저장할 수 있다. 비록 컴퓨터를 통한 자료의 저장과 취급이 선호되지만 필요한 하드웨어나 소프트웨어에 비용이 소요되고, 작업을 위한 담당자 훈련이 필요하다.

### (4) 데이터 처리 및 제시

## 1.5 지하수 오염원의 등급화(오염원의 성질, 오염 농도, 부하기간에 근거)

지하수 오염원 조사의 목적은 다양한지만 대부분의 경우 조사에서 모여진 데이터를 최대한으로 이용하기 위하여 오염원에 대한 일종의 분류, 순위 매김, 등급 매김이 필요하다.

이 지침서에서 순위란 오염원을 가장 심한 위해도에서 가장 약한 위해도 또는 다른 우선순위를 기준으로 상대적, 주관적으로 배열하는 것을 의미한다. 등급이라는 것은 오염원에서 지하수에 가해지는 잠재적 위험도의 정성 및 정량적 측정 절차에 사용된다.

등급화는 제한된 정보에 근거할 경우 지하수 오염 위험의 정도를 과소평가하거나 과대평가하는 오류의 가능성을 가지고 있다.

### 1.5.1 등급화 방식

지하수 오염원을 등급화하는 방법은 다음의 기준에 따라 나눌 수 있다.

- 1) 조사대상 오염원의 형태
- 2) 정보의 필요 정도(일반, 특정 목적, 세밀함 정도)
- 3) 평가 방법(지표의 집합 또는 구조적 시뮬레이션 모델들)
- 4) 결과의 형태(정성적, 정량적)

등급화 방법의 선택 시 고려사항은 다음과 같다.

- 1) 등급화의 목적
- 2) 활용 가능한 정보
- 3) 오염원의 개수와 특성
- 4) 평가팀의 능력

## 1.6 지도제작(지하수 오염조사 관련)

지하수오염원조사를 완료하고 오염원에 대한 순위 매김과 등급이 결정되면 그 다음 단계는 조사 결과가 의미 있고 책임 있는 방식으로 제공되도록 하는 것이다. 조사로부터 얻어진 사실과 결론 그리고 권장사항은 주로 문서나 지도의 형태로 제공된다.

사용 목적에 맞게 제작된 지도는 지하수 오염 조사 수행에 큰 기여를 할 수 있는 방법이다.

## 2. 미국

### 2.1 미국의 지하수 관리

미국의 지하수 관리는 연방정부와 주정부의 이원화된 체계로 이루어져 있는데, 연방정부 기관 중 환경청(뎀) 산하의 물관리부(Office of Water)가 지하수 수질관리의 중심역할을 수행하고 있으며, 내무부 산하 미지질조사소(USGS)에서는 국가 전체의 수자원에 대한 전반적인 조사를 실시하여 이들을 분석, 평가하고 있다. 지하수의 개발 및 관리에 대한 실질적인 권한은 각 주정부 혹은 주정부 산하의 지하수 관리 부서, USGS에 있으며 연방정부에서 제시한 법령, 지침, 기준 등을 근거로 각 주의 실정에 맞게 계획을 수립하여 시행하고 있다.

미국의 지하수 관리는 지질특성에 의해 분류된 대수층 단위로 이루어지고 있으며 오염에 대한 처리 역시 주정부와 USGS가 주로 처리해가고 있다. 또한 미국의 용수 이용량에 대한 모든 자료의 취합, 데이터베이스화, 분석 및 평가, 취합 용수통계 발간도 USGS에 의해 5년 간격으로 실시되고 있다.

미지질조사국에서는 국토를 66개의 주요 대수층으로 분류하여 이에 대한 지하수 개발·이용량을 조사·관리하고 있다. 그러나 국토전체가 이 분류에 포함되는 것은 아니라 지역적으로 충분한 양의 지하수를 공급하여 음용수원으로 사용될 수 있는 대수층만을 선별하여 주요 대수층으로 관리하고 있다. (USGS, 2006b)

우리나라 지하수 관리는 행정구역 중심으로 이루어지고 있는 반면, 미국의 지하수관리는 앞에서 살펴본 바와 같이 지질특성에 의해 분류된 대수층 단위로 이루어지고 있다.

미국의 기본적인 지하수 관리체계는 앞서 살펴본 바와 같이 연방정부에서는 기준 및 법령만을 제시하고 실질적인 지하수 관리는 주정부의 주도하에 시행되고 있다. 따라서 고지대 대수층 역시 각 주별로 시행하는 연구사업과 정책에 의해 개별적으로 관리되어 왔다. 그러나 최근 단일 대수층인 고지대 대수층의 정확한 이해와 효율적인 관리의 필요성이 대두되면서 주변지역 주정부들과 연방정부기관인 지질조사소(USGS) 간 협력의 중요성이 강조되어 대수층 통합관리를 추진하고 있다. 따라서 이들 간의 수문지질, 지질지구화학, 지질연대학, 지구물리학, 지

질공학 등의 자료를 서로 교환하고 협동연구를 추진하는 중이다.

토양 및 지하수의 오염은 오염지역의 지질학적 환경을 고려하여 오염지역의 특성을 조사하고 오염물의 종류, 오염 정도 및 거동과 위해성을 평가한 후 효율성 및 적용성 등에 근거하여 최적의 정화기술을 선정하며 정화 후 사후관리를 실시한다. 최근 전체적으로 위해성에 근거한 관리 및 정화(RBCA; Risk Based Control Action)가 점점 더 확산되고 있다.

1985년 미의회 기술평가국(OTA)은 지하수환경에 영향을 주는 주된 잠재오염원을 아래 표와 같이 6군 33종으로 대분류하였다.

표 2-53 OTA가 정한 잠재오염원 분류(6군 33종)

잠재오염원의 종류	개개시설물/활동에 따른			시설물질/활동종류		중요오염원
	독	공간적	시간적	알려진 오염물질의 변화성	것수 외량	
	적	정 태	형 태			
1군. 배출, 정류목적으로 설계된 오염물질						
1. 지하정류(중화조, Cesspools : 지하정류식 집하조 ; 분뇨처리수의 집하조)	W	P <sup>h</sup>	Y	대	다	X
2. 주 입 정(유해폐기물, 고농도염수의 처분, 축산폐수, 하수, 인공함양)	W/NW	P	YS	대	다	X
3. 지상살포(관개용 살포, 슬러지와 축산폐수의 농업용 지상살포, 유해 및 비유해폐기물 살포)	W	DP	S	중	중	X
2군. 오염물질의 처분, 처리장용도로 설계된 오염원으로 부터 누출						
4. 머리지(산업유해 및 비유해폐기물, 도시쓰러기 매립지)의 침출수	W	P <sup>h</sup>	S	대	다	X
5. 폐기물의 불법투기(open dump)	◊	◊	◊	대	중	X
6. 주거지에서 폐기물의 무단처분	◊	◊	◊	대	?	X
7. 지표저류시설(유해 및 비유해폐기물)	◊	◊	◊	대	다	X
8. 폐기물의 찌꺼기(Waste tailing)	◊	◊	◊	중	?	
9. 폐기물의 야적장(Waste pile)	◊	◊	◊	중	?	X
10. 비폐기물의 비축지(Non-waste stock piles)	NW	◊	◊	소	?	
11. 공동묘지	W	◊	◊	중	?	
12. 죽은가축의 매장지	W	◊	◊	소	?	
13. 지상저유탱크(유해, 비유해폐기물)	W/NW	◊	R	소	다	X
14. 지하저유탱크( ◊ )	◊	◊	R	중	중(?)	X
15. 컨테이너( ◊ )	◊	◊	R	소	소(?)	X
16. 야외소각장 및 발파지	W	P	S	소	소	
17. 방사능폐기물 처분장	W	P	YSR	소		
3군. 유출, 배관시설로 부터 누출						
18. 배관(유해폐기물, 비유해폐기물, 송유관, 하수관)에서 누출	W/NW	P <sup>h</sup>	R	소	중	X
19. 운송과정에서 누출	◊	P <sup>h</sup>	R	중	중	X
4군. 기타 활동으로 배출 및 살포된 오염물질						
20. 관개용수의 재순환	NW	D	S	소	중	
21. 농약살포	NW	D	S	소	다	X
22. 비료살포	NW	D	S	중	다	
23. 가축사육장(animal feeding operating)의 가축분뇨 및 폐수	W	P <sup>h</sup>	Y	소	중	
24. 제설, 제빙제 살포	NW	F	S	소	?	
25. 도시지역의 강수 유출	W	P,DF	S	중	중	
26. 광산개발에 따른 광산폐수	W		S	소	다	
27. 대기오염물질의 지하침투	W	D	S	중	?	
5군. 지하흐름 경로 변경						
28. 처수정(유정, 가스정, 지열온천정, 취수정에서 채수)	NW	P	Y	중	다	
29. 비폐기물 관련 기타 관정(관측정, 탐시시추공)	NW	P	Y	소	?	
30. 공사용 지하굴착	W	P,DF	S	소	?	
6군. 인간활동에 의해 자연적으로 발생하는 오염원						
31. 지표수와 지하수의 연관관계	W	F	S	소	NA	
32. 자연적인 침출	NW	DF	YS	중	NA	
33. 대수층내로 염수침입과 염수의 역상승현상(Upspring)	NW	DF	S	중	NA	

미국을 비롯한 선진국들은 이러한 잠재오염원으로부터 인근 지하수자원을 보호하기 위해 인공오염원을 평가하고 오염된 지하수의 정화 우선순위를 결정하기 위해 많은 노력을 기울이고 있는데, 지하수자원의 오염가능성은 제반 허가 과정에서 중요한 고려사항이 되고 있을 뿐만 아니라 오염원에 대한 계획된 조사평가를 철저히 요구하고 있다. 그러나 광범위한 지하수환경의 감시체계를 설정, 운영하기 위해서는 막대한 시간과 비용이 소요되므로 지하수자원 오염에 대한 수리지질학적인 취약성 조사와 평가방법에 대해 관심을 두게 되었다.

따라서 지하수자원 오염평가와 오염 우선순위 결정과 폐기물매립장을 비롯한 제반 위해시설물의 입지 선정과, 감시계획 및 허가서 발부의 기준으로 실증평가방법(Empirical assessment methodologies)을 널리 이용하고 있다.

실증평가방법은 인간 활동에 의해 발생하는 지하수 오염 가능성을 분류하거나 수치적인 지표를 개발 제시할 수 있는 접근법이다. 지하수 오염가능성은 오염물질의 특성과 지하수환경의 오염취약성 또는 상기 두 인자의 상호관계에 따라 달라지는데 실증평가방법은 전통적으로 위생 및 유해폐기물 매립장의 입지선정과 그 주변 지하수자원의 오염가능성 평가뿐만 아니라 액상폐기물, 지표저류시설에 의한 지하수오염가능성 평가 시 널리 이용되어 왔다.

미국의 지하수 관리 기준과약을 위해 조사한 수질관리 기준 설정 현황은 다음과 같다.

연방정부에서 EPA의 수질환경기준(Water Quality Criteria)를 통하여 수질관리의 원칙만 제시하고 있으며 지하수질에 관한 독립된 기준은 설정하고 있지 않다. 각 주별로 독자적인 지하수질 보전을 위한 대책기준을 설정하여 운용 중에 있다. (Wisconsin 주의 Public Health Groundwater Quality Standards(1992)와 Public Welfare Groundwater Quality Standards(1990) 등)

미국에서는 다양한 지하수 관련 제도를 통하여 지하수의 오염물질 유입방지 및 오염된 지하수의 처리대책을 수립 시행하고 있으며 대표적인 지하수 관련 제도들은 다음과 같다.

- 안전음용수법(Safe Drinking Water Act: SDWA)
- 지하수주입규제법(Underground Injection Control)
- 자원보전복원법(Resource Conservation Recovery Act: RCRA)
- 종합환경응급조치 및 보상법(Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act: CERCLA)
- 맑은 물법(Clean Water Act)
- 독성물질규제법(Toxic Substances Control Act: TSCA)

상기 법 등을 근거로 지하수 수질기준, 지하수 수질보호, 오염지하수 정화 및 보호를 강력하게 추진하고 있으며 지하수 수질보전을 위한 대책기준 등은 각 주별로 독자적으로 설정하여 운용하고 있다.

미국에서는 1976년 오염물질의 생산, 운반, 배출을 관리하기 위한 RCRA(Resource Conservation and Recovery Act)법을 제정하였는데 이는 현재와 미래의 활동에 의한 규제로서 과거의 활동에 의해 발생한 토양오염에는 적용되지 않는 제약이 있었다. 따라서 기존 RCRA의 한계를 해결하기 위해 1980년 과거에는 관리되지 않았던 유해물질의 누출을 조사하고 정확히는 포괄적인 법률인 CERCLA(Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act)를 제정하였다. 이 법은 유해물질과 오염물질을 대상으로 사용이 종료된 불량 매립지, 방치된 광산, 제조설비의 불량처리지 등의 광범위한 부지에 대해 적용하고 있으며 1986년 이 법을 개정한 SARA(Superfund Amendments and Reauthorization)을 제정하여 그 내용을 강화하였다.

영국은 토지소유권자가 자신의 토지 아래에서 나오는 지하수에 대해 절대적 권리를 갖고 있는데 반해 미국은 토지소유자가 다른 토지 소유자에게 피해를 주지 않고 합리적인 이용목적을 가지고 지하수를 합리적으로 이용하는 범위 내에서 이용권을 인정한다.

캘리포니아주는 미국 전체 지하수량의 18%를 사용하고 있을 정도로, 용수원으로 지하수를 의존하는 비율이 텍사스주 및 플로리다주와 함께 미국에서 가장 높은 지역 중 하나인데 지하수 수질 기준은 모두 먹는 물(drinking water)을 기준으로 평가가 이루어진다.

기준 위반에 대한 평가를 할 때에 우리나라의 모든 수질기준은 최대 허용 값만이 주어져 있어 일단 이 값을 초과하면 기준위반으로 인식되나, 미국의 경우는 한번 기준치를 넘었다고 해서 곧바로 기준의 위반이 되는 것이 아니며 경우에 따라 아주 오랜 기간 관찰한 후에 기준위반 여부를 판정한다. (Part 141.30, 141.31, USEPA 2000; 최승일, 2002)

미국은 음용수의 절반 이상을 지하수에서 충당하고 있기 때문에 오염된 토양의 관리는 지하수를 중심으로 설정하고 있다.

지금까지 미국의 일반적인 지하수 관리체계에 대해 살펴보았다. 상기 내용에 의하면 지하수 관리에 있어 USGS의 역할이 매우 큼을 알 있는데 이하에서는 USGS에서의 오염지하수 조사 방법에 관하여 구체적으로 살펴보려고 한다.

## 2.2 USGS 지하수 오염조사

USGS(미국지질조사소;United States Geological Survey)에서는 국가 수자원의 효율적인 관리를 위한 정보와 이해의 향상이라는 미션 수행을 위해서는 신뢰성 있는 데이터 수집이 필요함을 인식하여 현장에서의 대표성 있는 수질 시료 채취를 위한 'Nation Field Manual for the Collection of Water-Quality Data'을 작성하였다. 주요 내용은 지표수와 지하수의 대표성 있는 시료 채취에 관한 내용이다. 지하수의 대표성 있는 시료채취와 관련해서는 관정설치, 대수층, 지하수 시료의 오염 취약성, 관정 퍼징, 시료채취 절차 등에 관하여 다루고 있다.

## 2.2.1 부지 조사

USGS에서의 지하수 시료채취는 관측정(monitor well) 이나 공공이나 가정에 용수를 공급하기 위한 관정에서 행해진다. 관정과 조사 부지에 대한 정보는 사무실에서 부지 답사 전에 행해진다. 조사된 정보는 시료채취를 수행하기 적절한 장소의 결정에 이용된다. 실내 조사에서 조사팀은 존재하는 관정을 확인하고 관정을 설치할 곳의 후보지를 정하며, 그 외 추가적인 정보를 수집한다. 현장평가와 현장답사를 통해 관정 후보지역에 관정을 설치할 것인지를 결정하고, 부지의 특성에 따른 필요 장비를 확인한다. 현장 답사에서는 지하수의 함양 및 배출 구간을 확인하고 현장 장비 시험, 퍼징 및 시료채취 절차 시험, 대수성 시험, 오염원 확인, 대상 오염 물질 확인 등을 행한다.

### 1) 부지 조사 시 주의점

- 조사 목적과 요구되는 데이터의 정도
- 관정 선택과 설치에 대한 숙지
- 수질 기준에 대한 고려
- 조사 시간의 변화에 따른 변수 발생에 주의

### 2) 현장 조사 전 확인 사항

- (1) 관정 선택 및 설치에 대한 확인
- (2) 수집된 정보의 확인
- (3) 조사지역의 접근이나 시료채취에 대한 허가 받기
- (4) 관정 기록의 업데이트(소유자, 토지이용 등)
- (5) 굴착 전 지하 매설물 확인
- (6) 시료채취에 지장을 줄 수 있는 사항에 대한 확인
  - 펌프 가동 및 미가동 시간
  - 전원
  - 장비의 유지관리를 위한 시간
  - 계절적인 지하수위 감소
  - 부지 출입 제한 시간
  - 야생동물, 자물쇠 등

### 3) 현장 방문 전 또는 현장 방문 시 확인 사항

- (1) 조사 지역이 조사의 목적에 맞는 상태인지 확인
  - 관정의 화학적 처리
  - 밀폐 실패에 의한 지표 오염물질의 일시적인 영향 등

### 4) 현장 방문 시 확인 사항

- (1) 각 관정의 지하수위 측정 후 적당한 형태로 기록
- (2) 향후 조사 시 장비 변경이나 시료채취 방법의 변경이 필요한지 확인
- (3) 부지에 대한 상태 기록
  - 관정으로부터의 채취 시료에 영향을 줄 수 있는 사항 기록
  - 토지 이용의 변경 기록
- (4) 관정의 관리 번호를 확인하고, 잘 기록되어 있는지 확인
- (5) 펌프의 종류, 관정 직경 확인
  - 펌프 윤활유에 의해 물에 기름이 뜨는지 확인
  - 준비된 시료채취 기구가 사용에 적합한지 결정
- (6) 퍼징이나 시료채취에 적합한 펌핑 속도의 결정
  - 과도한 펌핑 속도에 의해 대기 중의 가스가 혼입되지 않도록 펌핑 속도를 조절
- (7) 관정 구조물이 온전한지 확인
- (8) 관정 내의 시료채취 지점까지의 접근 용이성
- (9) 지하수위 측정을 위한 장비 접근의 용이성

### 2.2.2 관정에서 대표성 있는 시료 채취를 위한 고려 사항

- 시료채취에 영향을 주는 요인
  - 시간 : 화학반응 또는 미생물 반응은 목적성분의 농도에 영향을 줄 수 있음
  - 압력 변화 : 지하수의 압력은 대기 중의 압력보다 크므로 시료가 대기 중에 노출되면 시료의 압력이 작아져 시료의 화학변화를 일으킬 수 있음
  - 용출 또는 흡착 : 시료와 접촉이 있는 장비로부터 화학 물질이 용출되거나 장비에 흡착
  - 대기 중 노출 : 대기 중의 가스나 입자가 시료에 들어가 영향을 줄 수 있음
  - 온도 : 지하수의 온도는 대기나 지표수의 온도보다 낮은 경향이 있는데 시료가 채취되어 온도가 올라가면 화학반응 속도가 증가하고 미생물 작용이나 대기 중으로 휘발이 일어남

○ 시료의 대표성을 유지하는 방법

- 오염을 피할 수 있는 순서로 시료채취 계획 수립 : 용존 고형물이나 조사 대상 오염물질로 오염이 되지 않았거나 오염이 적게 되었을 것으로 예상되는 지점부터 시료를 채취하여 오염이 높은 지점에서 시료 채취를 마침
- 깨끗한 장비 사용 : 세척된 장비를 사용하고 세척 과정의 효율을 판단(장비 블랭크 시료 측정)
- 정제된 물의 퍼징 : 관정 설치나 시료채취 장비 설치 시 발생한 물질을 제거. 가능하면 대수층에 무리를 주지 않는 퍼징 속도로 실시. 퍼징과 펌핑 속도는 관정의 형태나 조사 목적에 따름
- 시료의 분리
- 온도 변화를 피함 : 직접적인 직사광선은 피함
- 시료와 공기의 접촉을 피함
- 정도관리 시료 채취

○ 관정의 위치

- 관정의 설치나 시료채취에 필요한 장비가 접근 가능한 곳 등

○ 수리지질학적 구분

- 관정에 물을 공급하는 수리지질학적 단위 등
- 시료채취에 충분한 물의 산출량(최소한 1분 당 1갤런(3.785 L))

○ 관정의 기록, 구분, 계획, 재질, 구조

- 굴착, 개량 등 이용 가능한 기록이 충분해야 함
- 시추공이나 케이싱 직경이 장비 사용을 위해 충분해야 함
- 시료채취 구간별 깊이가 알려져 있고, 관정의 깊이나, 건설, 개량 등 이용가능한 정보가 충분해야 함
- 관정 스크린의 길이를 조사지역의 수평 수직적 규모에 비례하도록 설치
- 관정은 하나의 스크린 구간을 가지거나, 여러 개의 스크린 구간을 가질 경우 일정 간격을 두어야 함( 여러 개의 스크린 구간을 가질 경우 관심 대상 구간을 격리해야 하는데 완전한 격리가 어려움)
- 필터팩은 적당한 길이로 설치
- 조사 대상 물질이 용출되거나 흡착되지 않는 관정 재질의 사용

○ 펌프의 형태, 재질, 성능, 시료흡입부의 위치

- 유효를 위해 기름보다는 물을 사용하는 펌프를 이용
  - 압력 변화나, 산소와의 접촉, 기체로의 상변화가 있는 물질의 경우는 특히 접촉 흡인식 (suction-lift) 펌프, 제트 펌프, 공기접촉식 펌프는 피함
- 펌프나 파이프의 재질이 조사하고자 하는 물질의 농도에 영향을 미치지 않을 것
- 분석에 있어 펌핑 속도가 미치는 영향이 평가되어야 함

1) 관정의 건설과 구조

관정의 잘 못된 설치와 잘못된 구조는 데이터 수집 실패의 잠재적 요인일 될 수 있으므로 설치에 주의해야 함

(1) 관정 건설에 의한 영향

- 관정의 굴착, 완성, 개량 방법은 오랜 시간 시료의 성분에 영향을 미치는데 조사자는 과정 스크린과 케이싱의 길이와 직경뿐 아니고 관정 건설 방법과 재질을 검토해야 함
- 전체 대수층의 두께에 비해 짧은 스크린은 고농도 오염 지역 등 조사하고자 하는 주요 대상 지역의 시료 채취가 어려울 수 있음
- 적합한 관정 설계는 조사의 목적에 따라 달라진다. 만약 휘발성 유기화합물, 용존 가스, 미량 금속류 분석을 위해 자유면 대수층의 시료를 채취한다면 스크린 상부가 지하수면보다 충분히 아래쪽에(1 m 이상) 위치하여 지하수위가 낮아지더라도 스크린 구간이 지하수면과 교차하지 않도록 해야 한다. 이는 기체 확산에 의한 시료의 영향을 피하기 위함이다. 다른 한편 유류나 LNAPL이 지하수 표면에 부유하는 경우는 스크린이 지하수면과 교차하도록 설계 할 수 있음

(2) 관정의 노후화

- 관정에 이상이 없는지에 관한 평가는 최소 1년에 1회 확인이 되어야 함. 확인은 시료 채취 기간 이외에 하는 것이 좋으며 그렇지 않은 경우 시료채취가 완료된 후에 실시하여 시료의 오차 요인을 줄임
  - 지표 부분의 케이싱 상태와 밀폐 상태를 확인함
  - 케이싱 내부의 상태를 조사
  - 관정의 깊이 변화 확인
  - 관정 내 물의 탁도가 배경농도나 배경농도 근처로 돌아올 때까지 퍼징을 실시한다. 최종 탁도의 값은 관정 개량이 끝난 후에 기록되어야 한다. 지하수의 배경 탁도가 5(turbidity

units) 정도이더라도 적절하게 건설되고 개발된 관정의 탁도는 10(turbidity units) 정도 임. 퍼징이나 관정 개발 후의 탁도가 25(turbidity units) 이하로 내려가거나 원래 상태로 돌아오지 않는 경우는 관정이 적절하게 건설되지 않은 경우로 다른 관정을 선택하거나 새로운 관정을 설치해야 함

## 2) 수리학적 특성 및 대수층의 특성

관정의 수리학적 특성과 대수층의 구조와 구성 재질의 특성은 장비의 선택이나 시료채취 방법의 선택에 영향을 줌

### (1) 퍼징 속도

주어진 관정과 펌프 시스템에서 가능한 펌핑 속도는 관정에서의 물 산출 특성에 달려있는데 산출량에 따른 장점과 단점이 있다.

- 물의 산출량이 적은 곳에서 분당 수십 갤런을 펌핑할 경우 관정 내 수심이 급격하게 낮아질 수 있으며, 산출량이 큰 곳에는 그러한 일이 발생하지 않음
- 고속으로 펌핑 시 난류가 발생하여 탁도가 커져 데이터에 오차가 발생할 수 있음
- 저속 펌핑 시(3.8L~15L/min 속도) 관정이 깊은 경우 시료 채취에 수 시간이 걸릴 수 있음. 오랜 시간 튜빙 안에 있었던 시료는 원래의 시료 특성을 잃기 쉬움
- 퍼징 시 펌핑 속도는 일정하게 유지되는 것이 좋으며 시료 채취 시에도 일정하게 유지되는 것이 좋음. 펌핑 속도의 변동은 시료의 질에 영향을 미침

### (2) 저산출 관정

2 인치 또는 그 이상의 직경의 관측정의 경우 수심의 감소가 스크린 상부 끝에서부터 2 피트 이하이며 산출률이 3.75L/min 이상인 경우 적절한 것으로 권장되어진다. 100 mL/min 이하의 산출률을 가진 관정의 경우 퍼징을 하는 동안 심각한 수위 저하가 발생함. 회복이 느린 저산출 관정의 경우 수질 시료 채취용으로는 권장되지 않으나 사용을 해야 하는 경우가 발생한다.

(3) 저산출 관정은 부적절한 관정 설치의 예가 됨. 이 경우 관정을 재개발 하여 산출률을 향상시킴. Mechanical surging methods가 효과적이며 펌핑 방법은 산출률을 향상시키는데 효과적이지 않음

(4) 관정은 시료채취 전에 퍼징 되어야 하는데 퍼징 후 관정의 지하수위가 퍼징 시작 시의 90%가량 회복 되었을 때 시료채취를 시작함. 저 산출 관정의 경우 수 시간 또는 그 이상의 시간이 소요될 수 있음. 회복되는데 시간이 많이 걸릴수록 시료 대표성에 대한 신뢰도가 떨어짐

(5) 퍼징 후의 원 지하수위의 90%까지 회복되는데 24시간이 넘게 걸리는 관정에서는 시료를 채취하지 말 것

(6) 저 산출 관정에서 시료를 채취할 때 여러 사항을 따져서 시료채취기를 선택해야 함. 가능하면 저용량 수중 펌프를 사용함

- 배일러는 입자상 물질을 교란시킬 수 있고, 몇몇 항목 분석에 오류를 발생시킴
- 연동펌프(peristaltic pump) 등 흡입펌프를 이용하면 매우 낮은 속도로 펌핑이 가능하나 시료 채취 시 음압이 형성되므로 휘발성 물질의 손실이 일어날 수 있음
- 저속에서 전기 수중 펌프를 가동시키면 펌프를 통해서 시료가 흐를 때 열이 발생하여 시료 중의 가스가 제거되거나 휘발성 유기화합물(VOC)의 손실과 온도에 민감한 물질의 변화를 가져옴

(7) 대수층 매질에 대한 고려

시료의 특성에 대한 적절한 해석을 위해서는 대수층 간 간격과 관정에 실질적으로 물을 공급하는 대수층에 대한 고려가 필요하며 수리학적 상태에 대한 이해가 필요하다.

(8) 지하수 시료의 오염 취약성

○ 안내를 통해 데이터 질에 대한 모든 영향 요인을 다룰 수는 없으므로 조사자가 지하수 시료의 질을 저하시킬 수 있는 요인에 대해 인식하고 데이터의 오차를 줄일 수 있는 적절한 기술과 방법을 사용해야 함. 가장 일반적으로 발생하는 시료의 오염은 부적절하게 세척된 장비, 대기와의 접촉이나 입자성 물질이 들어가는 경우, 시료를 취급하는 동안 손, 이물질 등이 채취 시료를 접촉하는 경우임

- 적절한 현장에서의 취급 방법 사용 및 정도관리 시료 분석
- CH(Clean Hand)/DH(Dirty Hand) 시료채취 기법을 적용
- 적절한 장비 선택과 장비 세척 과정 적용
- 교란, 대기와의 접촉, 압력이나 온도의 변화를 피할 수 있는 시료채취 방법 이용
- 관정 내 물이 1.5m보다 낮게 있는 경우 바닥에서 부터의 부유물이 혼입될 수 있으므로 시료채취를 피함
- 깨끗하고 밀폐된 공간에 시료를 보관
- QC 결과에 따라 시험 결과를 재검토하고 필요한 경우 시료채취 계획이나 절차를 조정함

(9) 시추공 내 정체된 물

(10) 대기 중 가스와 용존 가스

○ 무산소, 저산소 상태의 시료가 대기 중에 노출되면 용존산소의 농도가 높아져 용존산소 값에 오차를 일으키고 입자상이나 용존상 금속류, 황화물, VOCs, CFCs, SF<sub>6</sub>, 미생물, pH, 알칼리도 등의 값에도 오차를 일으킴. 다음의 사항을 지켜 시료와 대기와의 접촉을 최소화 시키는 것이 좋음

- 펌프를 사용할 경우 잔잔하게 이동시키며, 시료 채취 용기에 교란이 없도록 담아야 함.
- 관측정에서 대기와 섞인 물을 흡입하여 시료 채취하는 것을 피하고, 어쩔 수 없는 경우 영향을 받는 항목에 대해서는 분석하지 않음.
- 투명한 튜빙을 사용하고 튜빙에 기포가 차지 않도록 하고, 기포가 생겼을 경우는 제거함
- 채수용 공간(processing chamber) 안에서 시료 용기에 담기
  - 시료 용기에 시료를 담는 효과적인 방법은 깨끗한 튜빙 끝을 채취 용기 바닥에 담고 바닥에서부터 물이 채워져 넘치도록 한 후 뚜껑을 빨리 닫는 것이다. 하지만 이러한 방법은 모든 시료채취 방법에 가능한 것은 아님
  - 대기 중의 산소는 채수용 공간을 깨끗하고 비활성인, 특히 아르곤과 같이 공기보다 무거운 기체로 채움으로서 완벽하게 제거되어야 함

#### (11) 시료채취 장비의 사용

퍼징과 시료채취에 사용하는 장비의 형태는 시료의 질에 영향을 미친다. 관측정에서의 지하수 시료는 주로 수중펌프, 정량펌프, 무벨브 정량펌프나 베일러, 흡입기(syringe)를 이용해서 채수됨

#### (12) 관정 바닥 협잡물

관정 바닥에서부터 시료로 들어가는 퇴적물이나 협잡물은 원 대수층의 수질 특성을 대표하기 어렵다. 이러한 것을 피하기 위한 방법은 다음과 같음

- 펌프나 다른 시료채취 장비를 천천히 부드럽게 원하는 위치로 내린다. 이렇게 함으로서 바닥의 교란을 유발하지 않을 수 있음
- 시료채취 장비의 흡입구를 바닥에서부터 멀리 떨어지게 해서 바닥의 협잡물이 들어가지 않도록 함
- 펌핑 속도가 너무 빨라 협잡물이 들어가지 않도록 속도를 조절

#### (13) 관정 퍼징

- 관정 퍼징은 시추공의 정체된 물을 제거하기 위해 실시함. 퍼징의 목적은 관정의 설치, 관정 개발, 시추공 벽과 관정 케이싱 사이에서 일어나는 반응에 의해 발생하는 화학적, 생화학적인 물질을 감소시키기 위해 행함.

#### (14) 표준 퍼징 절차

관정 부피의 3배 이상의 정체된 물을 제거한다. 현장에서 측정되는 항목은 pH, 온도, 비전기전도도, 용존산소, 탁도가 있다. 퍼징은 기본적으로 현장 측정항목이 안정되면 대표성 있는 물의 채수가 가능하다는 가정에 기초한 것이므로 조사자는 이러한 가정을 염두에 두고 조사해야 한다. 과거의 퍼징 기록과 조사된 물리 화학적 데이터의 검토는 어느 정도의 퍼징이 필요한지 결정하는데 도움이 됨.

- 케이싱된 관정의 퍼징 부피를 계산할 때
  - 케이싱과 시추공 벽 사이의 원형 공간에 저장된 물의 양도 포함한다.(시추공 직경에 관한 정보를 이용) 케이싱과 시추공 사이의 처리 방법에 상관없이 최소한 시추공 부피(케이싱 부피 + 케이싱과 시추공 벽 사이의 공간 부피)만큼의 퍼징 실시
  - 바닥부터 스크린구간 끝까지의 높이를 이용하여 관정 내 물의 부피를 계산하는 것이 아니라 바닥부터 지하수면까지의 높이를 이용하여 관정 내 물의 부피 계산
- 퍼징 해야 하는 물의 부피는 현장 측정값들이 안정화되는 시간에 달려있다.
  - 조사자는 언제 시료를 채취해야 하는지 알기 위해서는 시추공과 대수층 수리에 대한 이해가 있어야 함
  - 현장에서 측정하는 현장 특성 값은 일정한 시간 간격에 따라 연속적으로 기록되어야 한다. 측정 빈도는 관정 깊이와 직경, 대수층의 투과율에 따라 달라지는 퍼징 속도에 달려있음
- 3.75L/min의 속도로 퍼징을 하는 동안 수위저하가 크게 일어나면 안 되며 이상적인 것은 지하수위가 스크린 구간 위쪽 끝 보다 높게 유지되면서 정상상태를 유지하는 것임
- 퍼징량과 퍼징 시간의 평가

**관정부피(Well volume)= $V=0.0408 HD^2=$  \_ gallons**

V= 관정 안의 물의 부피(gallons)

D=관정의 내부 직경(inches)

H=수주의 높이(feet)

**퍼징부피(purge volume)=(n)(V)= \_ gallons**

n=퍼징을 하는 동안 제거된 관정부피의 수

**Q=퍼징속도(pumping rate)= \_ gallons/minute**

**퍼징시간(purge time) : 퍼징부피(purge volume)/Q=\_ minutes**

\* 관정부피(well volume) : 시추공(borehole)이나 케이싱된 관정의 물의 부피  
 실질적으로 퍼징에 걸리는 시간은 현장지시 항목의 안정화 속도에 달려있다.  
 퍼징 시 필요한 기록 사항은 다음 그림과 같다.

**RECORD OF WELL PURGING**

Date: \_\_\_\_\_ By: \_\_\_\_\_  
 SITE ID \_\_\_\_\_ STATION NAME \_\_\_\_\_

HEIGHT OF WATER COLUMN \_\_\_\_\_ DEPTH OF WELL \_\_\_\_\_

PUMP INTAKE (ft or m below MP): Start \_\_\_\_\_ End \_\_\_\_\_

WELL-PURGING METHOD AND PUMP TYPE (describe): \_\_\_\_\_

TIME	WATER LEVEL below *MP LS	DRAW-DOWN	TEMPERATURE	CONDUCTIVITY	pH	DISSOLVED OXYGEN	TURBIDITY	APPROX. PUMPING RATE
HR:MIN	*ft or m	*ft or m	°Celsius	µS/cm	standard units	mg/L	**	*gpm or L/min

\*Circle the unit used; MP, measuring point; LS, land surface; HR:MIN, hour and minutes; ft, feet; m, meter; µS/cm, microsiemens per centimeter at 25°C; mg/L, milligrams per liter; gpm, gallons per minute; L/min, liters per minute.  
 \*\*Select the appropriate turbidity unit from [http://water.usgs.gov/owq/turbidity\\_codes.xls](http://water.usgs.gov/owq/turbidity_codes.xls).

Well volume =  $V = 0.0408 HD^2 =$  \_\_\_\_\_ gallons. Purge volume =  $(n)(V) =$  \_\_\_\_\_ gallons.  
 $V$  = volume of water in well, in gallons;  $D$  = inside well diameter, in inches;  $H$  = height of water column, in feet;  $n$  = number of well volumes to purge.  
 Well volume is 0.16 gallons per foot for a 2-in. casing diameter.

그림 2-26 Record of wellpurging

현장 수질지시 인자의 안정화 판단은 다음 표에 의한다.

표 2-54 현장 수질지시 인자의 안정화 판단기준

FIELD MEASUREMENT	STABILITY CRITERIA <sup>1</sup>
pH	±0.1°C standard units
Temperature(T) (in degrees Celsius)	±0.2°C (thermistor thermometer) ±0.5°C (liquid-in-glass thermometer)
Specific electrical conductance(SC)	±5%, for SC ≤ 100µS/cm ±3%, for SC ≥ 100µS/cm
Dissolved-oxygen concentration(DO)	±0.3m/L
Turbidity(TBY) <sup>2</sup>	±10%, for turbidity < 100

<sup>1</sup> Allowable variation between 5 or more sequential field-measurement values.  
<sup>2</sup> Select appropriate TBY unit from [http://water.us.gs.owq/turbidity\\_codes.xls](http://water.us.gs.owq/turbidity_codes.xls)

(15) 표준 퍼징 절차의 예외

부지나 관정의 특성, 조사 목적에 따라서는 퍼징하는 지하수 양의 변경, 현장 측정·분석 방법의 추가나 변형 등 표준 퍼징 절차를 변형할 필요가 있을 수 있다. 표준 퍼징 방법을 변경할 경우에는 퍼징 절차가 기록되어야 한다. 만약 표준 퍼징 부피만큼 제거할 수 없다면 적어도 시추공 부피만큼의 퍼징을 실시하고, 현장 지하수로 샘플러나 샘플 튜빙을 세척할 수 있을 정도의 물을 뽑아내야 한다. 하지만 여의치 않을 경우 튜빙 부피의 3배의 증류수를 이용하여 튜빙과 펌프를 세척하고 깨끗한 질소가스를 이용하여 튜빙에서 지하수를 빼낸다. 현장 측정은 시료를 채취하기 전에 측정되어야 한다. 다음과 같은 경우는 퍼징 부피를 줄이거나 다른 변형된 방법을 이용할 수 있다.

- 관정부피의 3배 보다 충분히 많은 양의 지하수를 정기적인 간격으로 취수하거나 지속적으로 취수할 경우에는 현장 특성을 바로 모니터링 할 수 있음
- 시료 채취 구간이 팩커(packer)로 밀폐 되었을 경우
- 지하수위가 90 %까지 회복되는데 오랜 시간이 걸리는 경우
- 하나나 그 이상의 현장 측정 항목이 계속 변하는 경우 조사자의 결단이 필요함
- 저유량 퍼징의 경우 일반적인 퍼징 속도는 0.1~0.5L/min 이다.

(16) 관정에서의 시료채취 절차

(17) 현장조사 준비

조사를 위해서는 시료채취 계획을 세우고, 요구되는 데이터의 정도를 재검토하고 현장조사

준비를 위한 적당한 시간이 잡혀있어야 한다. 필요한 장비와 물품의 체크리스트를 준비하고 필요한 것을 준비한다.

- 조사 목적을 만족시키기 위해 표준 USGS 방법의 변형이 필요한지 고려하고 변형된 부분에 대해서는 기록을 한다.
- 계획된 정도관리(QC) 시료의 형태를 확인한다. USGS 조사에서는 특정 목적의 블랭크 시료가 요구된다. 최근에 분석된 블랭크 시료의 확인이 필요하다.
- 지하수위와 관정 산출량이 대표성 있는 시료 채취에 충분한지 결정한다.
- 시료가 채취되어야 하는 구간의 결정을 어떻게 할 것인지 고려한다. 팩커가 사용되었는지 스크린 길이가 채취 목적을 만족시킬 만큼 충분히 짧거나 긴지에 대해 고려하고 관정의 주요 지하수 공급원을 결정한다.
- 현장 기록 사항을 준비하고, 장비와 시료의 종류와 수 등을 포함하여 가급적 많은 정보를 기록한다.
- 필요 장비를 확인한다. 장비를 모을 때 장비의 상태가 양호한지 확인하고 예비 장비를 준비한다.
  - 유기물 분석용 시료: 시료채취 장비 중 유기물 분석용 시료와 접촉하는 부분은 테플론, 유리, 금속 재질을 사용한다. (예외: CFC 분석용 시료의 경우에는 테플론 샘플러나 튜빙은 사용하지 않음)
  - 무기물 분석용 시료: 시료채취 장비 중 무기물 분석용 시료와 접촉하는 부분은 테플론이나 다른 비활성의 무색 플라스틱이나 유리를 사용한다. 미량 분석을 위해서는 금속이나 고무재질은 사용하지 않는다. 스테인리스 스틸 표면의 펌프는 이용할 수 있지만 저농도의 크롬, 몰리브데넘, 니켈, 바나듐이 용출될 수 있다. 시료채취가 시작 전에 장비 블랭크 (equipment blank)를 만들어 시료채취 된 데이터가 이용 가능함을 증명한다.
- 깨끗한 작업 공간(주로 현장 차량)을 만들고 시료 취급이나 보존을 위한 작업공간을 만든다. 시료 채취와 취급을 시료 취급용 작업공간에서 행하고 필터링이나 다른 필요한 기구를 작업 공간 안에 배치한다. 발생기나 가스탱크는 작업용 차량으로 이동시키거나 안에 보관하지 말아야 한다.

### 2.2.3 US EPA(미국 환경보호청)

US EPA는 환경오염을 규제하여 환경을 보호·유지 또는 개선하기 위해 설립된 기관으로 지하수 시료 채취 방법 등을 가이드라인 형태로 제시하고 있다. 본 연구에서는 슈퍼펀드와 RCRA 프로젝트 수행에 있어 참고하고 있는 지하수 시료채취 가이드라인(Ground-Water Sampling Guidelines for Superfund and RCRA Project Managers)의 내용을 구체적으로

살펴보았다. 본 가이드라인은 지하수 관측정에 대한 시료채취 방법을 다루고 있는데 대표성 있는 시료채취에 관한 유용한 정보를 제공하고 있다.

## 1) 개요

본 가이드라인은 10피트 이하의 스크린 또는 개구를 가지고 있으며, 시료채취 장비가 들어가는 지하수 관측정에 대한 시료채취 가이드라인이다.

대수층의 교란을 최소화하도록 절차를 밟아야 가장 대표성 있는 지하수 시료를 채취할 수 있는데 여기에서는 현재 사용되고 있거나 권장되는 시료채취 절차를 요약 제시하고 있다.

이 가이드라인은 대부분의 사이트에 적용 가능하지만 특정 프로젝트를 위한 시료채취 계획을 대체하고자 한 것은 아니다. 이 가이드라인은 특정한 목적을 가진 경우에도 참고가 가능하지만 일반적인 환경이 아닌 특정 상황이 존재하는 경우에는 이 문서에 언급된 것 이상의 것이 필요하다. 이러한 경우에는 대안을 찾기 위해 다른 전문가와의 접촉이 필요하다.

지하수 시료채취의 목표는 시료 채취나 취급하는 동안 지하수 안의 화학물질이 변하는 것을 최소화 하고 현장의 지하수 상태를 대표하는 시료를 채취하는 것이다. 경험에 따르면 시료채취자나, 시료채취 절차, 시료채취 도구에 따라 지하수 시료채취나 취급 과정에서 수질 농도가 변하게 된다. (U. S. EPA 1995)

지하수 상태를 대표하는 시료 채취를 위해서 여러 다양한 지하수 시료채취 절차가 사용될 수 있다. 하지만 모든 시료채취에 적합한 방법은 없으며, 특정한 상태에서는 어떠한 방법이 가장 적합한지에 대해 여러 요소를 고려하여야 한다.

시료채취 목적, 이용 가능한 장비, 사이트 위치, 물리적인 제약 등이 현장을 특정 짓는 요소인데 이 문서에서는 이러한 상태 각각에 대해 다루면서 어떻게 하면 적절한 시료채취 방법을 선택할 수 있는지에 대해 다룬다.

이 문서는 단지 분리되거나 자유상, NAPLs이 존재하지 않는 관측정을 위한 시료채취 절차를 주로 다루고 있다. 취수정의 경우에는 이 문서에서 다룬 것 외에 특별한 시료채취 절차와 고려사항이 필요하다.

## 2) 시료채취 목적

좋은 시료채취 프로그램의 목적은 지하수 상태를 대표하는 시료를 채취하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해선 시료채취 장비, 시료채취 방법, 관측정 건설, 관측정의 운영과 유지, 시료 취급 과정이 시료의 화학적 특성을 바꾸지 않아야 한다. 잘 건설되지 않은 관정이나 부적절한 시료채취 장비나 시료채취 기술의 사용, 부적절하게 보존된 장비의 사용은 시험 결과에 오차를 유발한다. 대표성이 없는 시료는 지하수 수질을 잘 못 해석하게 한다.

전체 프로그램 비용 중 전체 모니터링 비용을 고려할 때 대표성이 있는 시료채취를 위해 소요되는 비용은 잘못된 데이터에 의해 정확도가 잘못 고려되는 것에 비하면 사소한 것이다.

DQOs를 적용하기 위해서는 시료채취와 데이터 사용 목적이 명확하게 정의되어야 하며, DQOs 프로그램의 시료채취 전체 과정이 완전하게 이해되고 적용되어야 한다.

이 가이드라인은 다양한 모니터링 프로그램에 적용될 수 있다. 여기에는 부지 평가, 오염물질 검출, 부지 특성규명, 복원, 교정 행위(corrective action), OO측정망(compliance monitoring) 등이 해당된다.

부지 특성 규명을 위한 시료채취와 복원 모니터링(remediation monitoring)을 위한 DQOs는 서로 다르다. 스크린에서 간격을 어느 정도로 시료를 채취할 것인지가 DQOs에 따라 달라진다. 부지 특성조사 목적의 경우에는 관측정 스크린에서의 간격을 조밀하게 하여 시료를 채취해야 하고 혼합물을 대표할 수 있도록 시료가 채취되어야 한다. 복원 모니터링 프로그램에 의한 모니터링은 스크린의 특정 부분을 대표할 수 있는 시료를 채취해야 한다.

추가적으로, 부지 특성 규명을 위해서는 넓은 범위의 오염물질에 대해 분석을 해야 하지만 복원 모니터링 프로그램용 시료채취는 적은 양만 분석하면 된다. 이러한 차이는 사용하는 시료채취 장비, 수집되는 정보의 타입, 시료채취 절차를 결정한다.

적합한 DQOs를 개발하기 위해서 부지 개념 모델이 개발 되어야 한다. 부지 개념 모델은 다이나믹 모델이어야 하는데 계속해서 수집되거나 선행된 새로운 정보를 추가할 수 있어야 한다. 개념 모델은 DQOs에 적용될 때 오염물질의 생애와 이동 경로와 같은 이동 프로세스, 지질 물질들이 오염물질의 경로를 제한하는 기작, 오염의 존재 형태, 오염물질의 농도에 영향을 주는 희석, 생물분해, 확산 등과 같은 오염물질의 생애와 이동 프로세스에 주안점을 두어야 한다. 개념 모델의 세부 내용은 보링이나 관측정의 수, 현재 존재하는 분석 데이터와 같이 이용 가능한 정보에 달려있다.

처음으로 조사가 이루어지는 사이트의 경우는 정화 조사나 계획이 이루어진 사이트, 혹은 정화 후 모니터링을 하는 사이트에 비해 간단한 개념모델을 가지고 있다.

개념 모델에 기술되며 지하수 시료채취 프로그램의 계획 수립에 영향을 미치는 파라미터에는 다음이 포함되어야 한다.

- (1) 두께, 측면의 범위, 수직, 수평 방향 흐름, 사이트에서의 오염 이동에 영향을 미치는 지질 구성 물질과 수리전도도 차이
- (2) 채취하는 오염물질(휘발성, 금속 등)의 형태, 시료채취 결과에 오차를 유발하는 요인 (금속 측정시 탁도, co-solvation effects on PCBs)
- (3) 오염의 수직, 수평적 분포

수직 대수층의 특성 파악은 지하수 관측정 설치에 앞서 강력하게 권고된다. 세부적인 수직 대수층 특성파악 프로그램에는 수리전도도, 수직 수평 흐름 방향의 결정, 암석이나 지질의 분포, 오염물질의 수직 수평적 분포와 같은 현장의 특성파악이 포함된다. 성공적인 대수층 특성 파악 프로그램은 기술인 사항과 관측정의 비용효과적인 배치에 관한 사항을 제공한다.

### 3) 시료채취 전에 필요한 정보

적당한 방법으로 수질시료채취 방법을 결정하기 위해서는 시료채취 전에 필요한 정보가 있다. 관정의 상태, 관정의 구조, 수위 정보, 오염 타입과 농도, 지하수 흐름의 방향과 같은 정보는 현장 활동을 시작하기 전에 확보가 되어야 한다. 지하수면 깊이, 총관정 깊이 측정은 퍼징을 하기 전 현장에서 측정이 필요하다. 현장 작업 전에 건강과 안전 계획은 사이트의 건강 보건 담당자 하에서 수립되어야 한다.

### 4) 백그라운드 데이터

관정의 구조와 유지관리 정보는 더 나은 시료채취 계획 수립과 대표성 있는 시료의 채취를 위해서 필요하다. 현장 작업 전에 작업자는 케이싱 직경, borehole의 직경, 케이싱 재질, 자물쇠 번호와 열쇠, 관정까지의 물리적인 접근, 관정 스크린의 길이와 깊이를 알아야 한다. 관정 케이싱의 직경은 관정을 퍼징하고 시료 채취하는데 적당한 장비와 기술을 선택하는데 이용된다.

접근을 제한하는 장애물이나, 접근 방법이 기술된 사이트 지도는 이동성, 수리의 용이성, 전원, 퍼징한 물의 관리, 관정의 접근성과 같은 여러 가지 요인에 기초하여 적절한 장비를 선택하는데 필요하다.

각 정의 스크린의 깊이, 지하수까지의 깊이는 시료채취 장비를 선택하고 퍼징 및 시료채취에 적합한 시료채취 장비의 흡입정 위치를 적합하게 배치하는데 있어서 중요한 정보이다. 정의 사용 가능 수량 등 개발관련 정보는 퍼징 및 시료채취 속도가 관정의 지하수 산출량을 초과했는지 여부를 확인하는데 필요한 정보이다.

이전 시료채취 정보는 예상되는 오염물질의 농도나 특성을 결정하고 평가하기 위해서 제공되어야 한다. 이것은 적합한 시료채취 방법의 결정이나 QA/QC용 시료채취(예를 들어 field duplicates, equipment blanks, trip blanks) 방법 결정을 위해서도 유용한 정보이다.

현장 조사자를 위한 시료채취 체크리스트는 시료채취를 하는 동안 접근을 용이하게 하기 위해 확보하고 있어야 한다.

이전의 시료채취 정보를 평가함에 있어 마지막으로 시료채취와 계획 하고 있는 시료채취와의 시간 간격을 고려해야 한다. 만약 이 간격이 일 년을 넘는다면 관측정의 개량 필요성을

고려해야 한다. 개량 필요성은 건설시 관측정 총 깊이와 측정값을 비교함으로써 평가할 수 있다. 관측정 총 깊이 측정 시 관측정 스크린이 퇴적물의 침적 등으로 막힌 증거가 발견되면 관측정은 시료채취 전에 다시 개발되어야 한다. 관측정의 상태 평가는 개발된 관측정의 회복을 위해 몇 주 전에는 완료되어야 한다. 이것은 이전 시료 채취 시 높은 탁도를 나타낸 경우에 특히 중요하다. 정의 개발 이후 안정화에 걸리는 시간은 지역 특이적인 지질특성에 달려있으므로 시료채취 계획 수립 시 지질 특성을 고려해야 한다.

## 5) 기준점(Reference point)

각각의 관측정 정보는 케이싱의 내부와 외부의 정 색인표에 명확하게 기록되어야 한다. 추가적으로 각각의 관측정은 영구적이고 쉽게 확인이 가능하며 모든 깊이 측정의 기준이 되는 기준점을 가지고 있어야 한다. 기준점(내부 케이싱, 외부 케이싱, 보안/보호 케이싱의 꼭대기)은 모든 측정에 있어 불변값으로 남아 있어야 하며 케이싱에 명확하게 표시 되고 기록되어야 한다. 가능하면 내부 케이싱이 기준점으로 권장되는데 외부 케이싱의 경우에는 동결에 의한 변형, 차량에 의한 손상, 케이싱의 이동을 유발할 수 있는 여러 현상이 발생할 수 있기 때문이다.

기준점의 고도, 경도와 위도는 알려져 있어야 하며 명확하게 표시되어야 한다.

## 6) 관측정 총 깊이

관측정 깊이는 관측정 안의 물의 양을 계산하거나 발생할 수 있는 침전물의 양을 문서화할 때 필요하다. 게다가 관측정 바닥까지의 깊이 측정을 통해 케이싱이 온전한지 확인할 수 있고 스크린에의 침적(siltation)을 확인할 수 있다. 부식은 관측정 케이싱의 파손이나 새는 현상 발생의 원인이 되며 잘못된 수위 측정이나 납의 값을 변화시킬 수 있다. 부식과 퇴적물 쌓임, 바이오파울링은 관측정의 스크린을 막아 지하수 화학 변화뿐만 아니라 수위 변화에 반응을 하지 않게 하거나 반응을 둔하게 만든다. 관측정의 개량이나 교체가 수질 시료의 정확한 채취를 위해 필요할 수도 있다.

총 정의 깊이는 추가 붙어있는 스틸 테이프를 이용하여 측정되고 10분의 1 foot 정도까지도 적합하게 기록되어야 한다. 오염된 스틸 테이프는 다른 정에 사용하기 전에 특정한 계획안에 의해 오염물을 제거해야 한다. 주의할 점은 스틸테이프와 추가 정의 바닥을 쳤을 때 정의 바닥에 존재할 수 있는 퇴적물이 교란되어 탁도의 증가로 시료채취 결과에 영향을 줄 수 있다는 것이다. 정의 전체 깊이 측정 빈도는 수리지질학적 상태와는 상관없이 변한다. 미국의 USGS에서는 최소 1년에 한번 측정 할 것을 권장하고 있다. USEPA 또한 1년에 한번 측정할 것을 권고하였다. 하지만 최근에는 수질을 측정하거나 수심을 측정하는 경우 매

회 측정할 것이 권장되고 있다. 따라서 가능하면 정의 전체 깊이 측정은 샘플링이 완료된 후에 행해져야 한다. 만약 정의 전체 깊이 측정이 시료채취 이전에 필요하다면 시료채취 전에 가능하면 많은 시간을 확보해야 하는데 최소한 24시간의 시간을 확보해야 한다. 전기 테이프(electric tape)의 추는 정확한 정의 깊이 측정에 사용하기에는 너무 가볍다. 만약 정의 깊이가 200피트보다 깊으면 테이프의 연장이 필요하다.

## 7) 지하수면 깊이

모든 수위는 추가 달린 스틸재 줄자와 쇼크 등을 이용하여 기준점으로부터 측정되어야 한다. 스틸재 줄자는 수심을 측정하는데 정확한 방법으로 흐름의 변동이 별로 없는 곳(0.015meter/meters)이나 깊은 곳에서 사용이 권장 된다. 그러나 흐름의 변화가 크고 수심에 유동이 있는 경우에는 보정된 전기 측정기가 권장된다. 수심은 관측정의 기준점에서 지하수면까지의 깊이를 뺀 값으로 계산된다. 대략 200피트이상의 깊이의 경우 수심 측정 장비는 신중하게 선택되어야 하고 일부 장비는 연장 가능한 측정 장치가 있어야 한다.

물까지의 깊이 측정은 시료를 채취하고자 하는 모든 우물에 대해 베일링, 펌핑, 수리 평가 등 수심을 변화시킬 수 있는 행위가 있는 경우 실시해야 한다. 모든 측정은 1/100 피트까지 세부적으로 기록되어야 한다.

측정한 날과 시간, 기준점, 측정 방법, 지하수위까지의 깊이, 계산 방법이 적절하게 기록되어야 한다. 더불어 수위에 영향을 줄 수 있는 조류의 사이클, 근처의 펌핑에 의한 영향, 주요한 기압 변화 등 알고 있는 외부 영향인자는 모두 기록되어야 한다.

## 8) 지하수 시료채취 방법

지하수 시료채취 방법은 부지 특성, 원하는 데이터의 질, 우물까지의 접근성 등에 따라 선택되어야 한다. 지하수 시료채취 방법은 사용하는 장비의 타입, 샘플러의 흡입구 위치, 적용하는 퍼징의 기준, 채취되는 시료의 조성(예를 들어 탁도 제4장. 국내 오염 지하수 조사 현황) 국내 지하수 관리는 국토해양부 소관의 '지하수법'에 주로 근거하고 있으며, 이와 관련한 세부 사항은 고시, 예규, 훈령 등의 형태로 관리되고 있다.

지하수법은 지하수의 적절한 개발·이용과 효율적인 보전·관리에 관한 사항을 정하여 지하수개발·이용의 적정을 기하고 지하수오염을 예방하여 공공의 복리증진과 국민경제의 발전에 이바지함을 목적으로 하는 광범위한 내용의 법이며, 동법 시행규칙인 '지하수의 수질보전 등에 관한 규칙'에서 지하수의 수질보전 및 정화에 관한 사항을 주로 다루고 있다.

이 규칙에서는 오염된 지하수의 조사 및 정화의 필요성을 다루고 있으나 실질적인 지하수 오염조사 시 기준이 되는 별도의 관련 지침은 없는 실정이다. 다만 부처별 관리 목적에 따라 지

하수 오염조사 내용을 일부 포함하는 지침을 가지고 있는 경우가 있는데 군 환경 업무 수행을 위한 국방부의 ‘군환경오염조사표준수행절차’가 있다. ‘주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침’도 군 환경조사와 관련해 지하수 오염 조사 내용을 포함하고 있으나 전 국토에 적용하기 위한 지침은 아니다.

그 외 지하수 오염조사 관련 지침으로는 오염조사를 포함하는 일반적인 지하수 관련 업무 수행을 돕기 위한 ‘지하수 업무수행 지침’이 있으며, 수질보전을 위해 설치한 측정망 관리를 위한 ‘지하수수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획’이 있다. 지하수 오염조사 자체보다는 지하수 관리를 위한 행정적인 사항을 주로 담고 있는 규정으로는 ‘지하수 오염평가보고서의 작성에 관한 규정’, ‘오염지하수정화계획의작성내용’이 있으며, ‘KS규격’이나 ‘토양정밀조사지침’에서도 지하수 조사 관련 일부 내용을 포함하고 있다.

다음에서는 위에서 언급한 지하수의 수질보호 및 오염조사와 관련된 규정의 목적, 적용범위 등을 살펴보았는데, 이를 통해 연구하고자 하는 ‘지하수 오염조사 지침’에 포함되어야 할 내용을 파악하고자 하였다.

## 제6절 토양·지하수 연계 관리

### 1. 토양, 지하수의 상관성

토양과 지하수는 수리수문학적으로 상호 연결되어 있어 토양이 오염되면 지하수도 함께 오염되며 그 반대의 경우도 발생한다. 특히 표토와 심토, 천층부 지하수는 거의 동시에 오염의 영향을 받는 물리적 연계선 상에 있다.

토양오염과 지하수오염은 매질 차이는 있으나 토양오염물질은 함양과정, 폐공 등을 통하여 하부 지하수를 오염시키는 등 발생 메커니즘이 동일 체계 내에서 이루어지고 있기 때문에 연계 관리할 필요성이 있다.

인체 위해성이 높은 중금속류 및 유류오염물질의 경우 토양 및 천층부 지하수 간 오염 때 확산범위 및 속도가 일정한 패턴을 보이는 것이 특징이다. 오염지하수는 하류 방향의 깨끗한 토양을 오염시켜 시간이 지남에 따라 토양·지하수계를 통해 오염면적이 점차 증가하는 경향이 나타난다. 특히 우리나라의 경우 지하수위가 지표면에 가까워 토양 내 오염물질이 빠르게 지하수로 이동하므로 토양 및 지하수 수질기준을 설정 및 관리 시 이러한 토양·지하수 동시 오염현상을 고려할 필요가 있다.

### 2. 토양 및 지하수 연계 관리 현황

#### 2.1 국내 토양 및 지하수 연계 관리 현황

국내 토양 및 지하수 수질기준의 설정은 개별적인 절차에 따라 이루어졌기 때문에 동시에 존재하는 토양과 지하수 오염현상이 고려되지 않고 있다.

우선 지하수 수질기준의 항목과 토양오염기준 항목이 먼저 토양, 먹는 물, 지하수 기준상의 오염물질이 매치되지 않는다. (오염물질간의 연관성이 없다) Se이나 B과 같은 무기물질이나 1,1,1-TCA, 디클로로메탄, 1,1-DCE, 사염화탄소, 카바릴, 1,2-DBCP와 같은 먹는물 수질 기준상의 몇몇 오염물질 등은 토양오염기준과 연계되지 않는다.

토양지하수 정화기준은 동시에 존재하는 토양지하수 오염현상에 대해 간과하고 있다. 비록 오염된 토양 지하수가 정화기준 이내로 복원됐음에도 불구하고 각기 토양 속에 남아있는 오염물질은 지하수에 영향을 주고 결과적으로 정화기준 이상으로 지하수 오염의 결과를 초래하게 된다.

현재 토양의 경우 '토양환경보전법', 지하수의 경우 '지하수법'을 기본으로 하여 별도의 체계에 따라 관리가 이루어지고 있다.

지하수의 수질은 '지하수법'의 일부 수질관련 규정과, 하위법령인 '지하수의 수질보전 등에 관한 규칙(환경부령)'에 의해 환경부에서 관리되고 있으며 지하수 수질측정망 운영 등을 통해 관리되고 있으며 수질 기준 항목은 용도별로 다르며 먹는 물의 경우 46항목의 수질기준을 적용하고 있다.

토양은 토양측정망 및 토양오염실태조사와 토양환경평가 등을 통해 관리되고 있으며 21항목의 토양오염기준을 운영하고 있다.

토양 및 지하수는 같은 공간 또는 인접한 공간에 존재하며 상호 영향을 주고 받으므로 연관성이 매우 크며 두 매체를 연계하여 관리할 경우 더 효율적인 관리가 가능함에 따라 최근 들어 토양 및 지하수의 연계관리 필요성이 대두되고 있다.

국가적으로 지하수 관리 및 기본계획 구축이 최근에 와서야 본격화 되면서 지하수 자원을 국가차원의 중요한 수자원으로서 인식을 하였지만 지하수의 효율적 활용 및 토양과의 연계를 통한 지하수 보전을 위한 구체적인 방안은 마련되어 있지 않은 실정이다.

우리나라의 경우 토양 및 지하수수질기준의 항목이 상이하고, 각 기준값 설정 시 토양·지하수 동시 오염현상이 고려되지 못하고 있어 이에 대한 접근이 필요한 실정이다. 또한 토양오염과 지하수오염에 대한 조사 및 정화절차 등이 독자적으로 이루어지고 있어 한 번의 조사·정화를 통한 토양 및 지하수 동시 관리가 어렵기 때문에 효율 측면에서 경제적 손실이 발생하고 있다.

국내 지하수법에서는 지하수의 수량이 풍부하거나 수질이 양호하여 보전할 가치가 있는 지역 또는 지하수 개발이 과도하게 진행되어 각종 지하수 장애가 발생하는 지역에 대해서 지하수 보전구역을 지정하여 관리를 하고 있다.

지하수보전구역 지정 대상 중 오염발생 및 수질악화 지역인 인체 유해오염시설의 존재지역, 오염유발시설의 밀집지역, 폐광 및 폐기물처리지역, 폐기물처리장 분포지역, 지하 유류 비축기지 및 화학약품 저장탱크 분포지역은 지하수보전구역의 지정범위에 속하여 관리되고 있는데, 이러한 시설들은 또한 토양오염 관리대상이기도 하다.

지하수 보전구역으로 지정되면 지하수의 수위저하·수질오염 또는 지반침하 등 명백한 위험을 가져오는 행위에 대한 제한을 받게 되는데 지하 유류 저장고 등 지하수를 오염시킬 우려가 있는 구조물의 설치, 폐기물매립장·특정폐기물보관시설·집단묘지 등의 설치, 규모 이상의 채광·토석채취 및 가축 등의 사육 등이 해당된다.

지하수보전구역에서의 토양관련 행위제한으로는 ‘토양환경보전법’에 의거하여 토양오염 관리대상 시설의 설치를 제한하고 있는데, 대상시설에는 석유류의 제조 및 저장시설, 유독물의 제조 및 저장시설, 송유관시설 등이 있다.

지하수오염유발시설은 지하수 오염방지시설을 설치하도록 되어있으며 지하수오염유발시설 중 토양관련 시설로는 토양환경보전법시행규칙의 규정에 따른 특정토양오염유발시설과 토양환경보전법 규정에 따라 오염된 토양의 정화조치 명령을 받게 된 시설이 포함된다.

## 1) 토양오염기준

1995년까지 물환경보전법은 토양, 작물 등의 오염 여부를 검사하기 위해 불완전하게 사용되어왔다. 1995년 1월 토양환경보전법은 토양오염부지 정화와 전국적인 토양오염 문제를 관리하기 위해 제정되었고 토양환경보전법시행규칙이 2010년 1월 1일 개정되었다. 토양환경보

전법의 토양오염기준은 토양오염우려기준과 토양오염대책기준으로 나뉘어져 있으며 각 대상지는 비교적 오염이 적은 전, 답, 과수원, 어린이 놀이시설 등의 1지역과 임야, 염전, 창고용지, 잡종지 등인 2지역 그리고 비교적 오염이 심한 공장용지, 주차장, 주유소용지, 도로, 철도, 국방, 군사시설부지 등인 3지역으로 나누어진다.

표 2-55 토양오염우려기준 및 대책기준

(단위:mg/kg)

물질	우려기준			대책기준		
	1지역	2지역	3지역	1지역	2지역	3지역
카드뮴	4	10	60	12	30	180
구리	150	500	2,000	450	1,500	6,000
비소	25	50	200	75	150	600
수은	4	10	20	12	30	60
납	200	400	700	600	1,200	2,100
6가크롬	5	15	40	15	45	120
아연	300	600	2,000	900	1,800	5,000
니켈	100	200	500	300	600	1,500
불소	400	400	800	800	800	2,000
유기인화합물	10	10	30	-	-	-
폴리클로리네이티드비페닐	1	4	12	3	12	36
시안	2	2	120	5	5	300
페놀	4	4	20	10	10	50
벤젠	1	1	3	3	3	9
톨루엔	20	20	60	60	60	180
에틸벤젠	50	50	340	150	150	1020
크실렌	15	15	45	45	45	135
석유계 총탄화수소(TPH)	500	800	2,000	2,000	2,400	6,000
트리클로로에틸렌(TCE)	8	8	40	24	24	120
테트라클로로에틸렌(PCE)	4	4	25	12	12	75
벤조(a)피렌	0.7	2	7	2	6	21

※ 비교

1. 1지역: 「지적법」에 따른 지목이 전·답·과수원·목장용지·광천지·대(「지적법 시행령」 제5조제8호 가목 중 주거의 용도로 사용되는 부지만 해당한다)·학교용지·구거(溝渠)·양어장·공원·사적지·묘지인 지역과 「어린이놀이시설 안전관리법」 제2조제2호에 따른 어린이놀이시설(실외에 설치된 경우에만 적용한다) 부지
2. 2지역: 「지적법」에 따른 지목이 임야·염전·대(1지역에 해당하는 부지외의 모든 대를 말한다)·창고용지·하천·유지·수도용지·체육용지·유원지·종교용지 및 잡종지(「지적법 시행령」 제5조 제28호 가목 또는 다목에 해당하는 부지만 해당한다)인 지역
3. 3지역: 「지적법」에 따른 지목이 공장용지·주차장·주유소용지·도로·철도용지·제방·잡종지(2지역에 해당하는 부지 외의 모든 잡종지를 말한다)인 지역과 「국방·군사시설 사업에 관한 법률」 제2조 제1항 제1호부터 제5호까지에서 규정한 국방·군사시설 부지

4. 「공익사업을 위한 토지 등의 취득 및 보상에 관한 법률」 제48조에 따라 취득한 토지를 반환하거나 「주한미군 공여구역 주변지역 등 지원 특별법」 제12조에 따라 반환공여구역의 토양 오염 등을 제거하는 경우에는 해당 토지의 반환 후 용도에 따른 지역 기준을 적용한다.
5. 벤조(a)피렌 항목은 유독물의 제조 및 저장시설과 폐침목을 사용한 지역(예:철도용지, 공원, 공장용지 및 하천 등)에만 적용한다.

## 2.2 지하수 수질기준

지하수 수질기준은 1994년 지하수법에 의거하여 제정되었으며 용도에 따라 기준을 달리 설정하고 있다. 먹는 물로의 수질기준 외의 용도별 수질기준은 다음 표와 같다.

표 2-56 용도별 수질기준

(단위 : mg/L)

항 목	이용목적별	수질기준		
		생활용수	농업용수· 어업용수	공업용수
일 반 오염물질 (5개)	수소이온농도(pH)	5.8~8.5	6.0~8.5	5.0~9.0
	대장균군수	5,000이하 (MPN/100ml)	-	-
	질산성질소	20이하	20이하	40이하
	염소이온	250이하	250이하	500이하
	일반세균	1ml중 100CFU이하	-	-
특 정 유해물질 (15개)	카드뮴	0.01이하	0.01이하	0.02이하
	비소	0.05이하	0.05이하	0.1이하
	시안	불검출	불검출	0.2이하
	수은	불검출	불검출	불검출
	유기인	불검출	불검출	불검출
	페놀	0.005이하	0.005이하	0.01이하
	납	0.1이하	0.1이하	0.2이하
	6가크롬	0.05이하	0.05이하	0.1이하
	트리클로로에틸렌	0.03이하	0.03이하	0.06이하
	테트라클로로에틸렌	0.01이하	0.01이하	0.02이하
	1,1,1-트리클로로에탄	0.15이하	0.3이하	0.5이하
	벤젠	0.015이하	-	-
	톨루엔	1이하	-	-
	에틸벤젠	0.45이하	-	-
크실렌	0.75이하	-	-	

## 2.3 국외 토양 및 지하수 연계 관리 현황

외국의 경우 나라에 따라 지하수와 토양의 연계 정도가 다르게 나타나고 있다. 나라별로 오염토양을 토양에 한정시키는 경우와 지하수를 포함하여 규정하는 경우가 있는데 네덜란드, 핀란드, 일본은 토양에 한정하고 있으며, 독일, 덴마크는 지하수까지를 포함하고 있다. 하지만 오염토양을 토양에 한정하는 국가들도 오염지역의 효율적인 관리 측면에서 대부분 지하수와 연계하여 관리하고 있다.

지하수를 오염토양에 포함하고 있는 나라의 경우 오염토양에 대한 정의는 다음과 같다.

- 독일 : 인간의 건강과 복지 및 가축, 작물 또는 지하수 등 경제적으로 중요한 자연적 재산에 직접적 또는 간접적인 악영향을 미칠 수 있는 토지(Federal Ministry for Research and Technology, 1981)
- 덴마크 : 지하수를 오염시킬 수 있거나 지역주민의 건강을 위협할 수 있는 오염물질이 있는 토지(Danish Agency of Environmental Protection, 1985)

### 2.3.1 미국

미국 연방 정부 차원에서의 토양기준은 제정되어 있지 않지만 주별로 토양에 대한 감시 및 관리의 책임을 가지고 있다. 지하수질에 대해서도 연방정부의 기준은 명시되어 있지 않고 대신 먹는 물 기준을 따르도록 되어있어 음용수 기준을 지하수 오염 방지와 정화를 위해 활용하고 있다.

미국 환경보호청에서 토양 정화 기준에 대한 몇 가지 가이드라인을 제공하고 있으며 각 주마다 고유의 토양과 지하수 정화 기준의 체제를 확립하고 있다. 전체적으로 미국 연방 정부와 주정부 수준에서의 토양과 지하수 정화 기준은 비교적 일치하는 체제를 가지고 있다.

법령의 경우 개별적이고 독립적으로 이루어진 국내 상황과는 달리 토양·지하수오염 정화 및 종합적인 환경 대응을 위한 보상, 책임 법령으로서 CERCLA(Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act of 1980)를 운영하여 조사·평가·재정 등에 대한 사항을 포괄적으로 다루고 있다.

### 2.3.2 일본

일본의 토양과 수질기준은 상당히 연관되어 있다. 토양과 물에 대한 정화의 기준에서 값과 항목이 동일하다. 이것은 다른 나라들에서는 기준이 종종 개별적으로 존재하고 있는 것과 비교해볼 때 독특한 점이다.

지하수를 포함하는 모든 수체는 수체의 형태와 상관없이 인간건강보호라는 공동의 목표 하에 제정되어있기 때문에 동일한 기준과 기준값을 가지고 있다.

일본의 환경수질기준은 인간건강에 관련된 26개의 물질에 대해 제정되어 있으며, 다른 수체의 수질기준과 같이 지하수도 인간건강을 위한 환경수질기준을 따르고 있다. 또한 먹는 물 기준값은 한국에서와 같은 WHO에서 제공된 지침값을 근거로 제정되었으나 한국과 비슷하거나 비교적 더 엄격한 값으로 관리되고 있다.

일본의 토양오염관리정책 발전 양상은 우리나라와 비슷하다. 일본의 경우 토양오염은 환경기본법에서 일곱 가지 공해의 하나로 일컬어지고 있지만, 토양오염 중 농경지 이외의 토양오염에 대해서는 관할 법률이 존재하지 않은 상태가 지속되어 왔다. 이는 사회적으로 큰 이슈가 되는 대규모 토양오염사건이 발생하지 않은 것, 시가지 토양오염의 대부분은 사유지이기 때문에 행정적 규제가 어려웠던 점 등을 그 이유로 들 수 있다. 토양오염방지 대책은 환경기본법과 이를 근거로 한 토양환경기준을 비롯하여, 농경지 토양의 오염방지법, 다이옥신류 대책특별조치법, 유해물질의 지하침투를 규제하는 수질오염방지법, 폐기물 매립방법을 규제하는 폐기물의 처리 및 청소에 관한 법률 등 여러 법률에서 산발적으로 다루었다. 법률 외에 행정지도의 형식으로 토양오염 조사·대책에 관한 지침인 「토양·지하수 오염에 관계되는 조사·대책지침 및 운용기준」이 적용되었다.

## 1) 토양오염 기준

토양오염 역탐지법에 인간건강과 자연환경보호에 바람직한 기준인 기본환경법을 근거로 27개 토양환경물질이 현재 규정되어 있다. (JMOE, 2002) 이러한 기준은 지속적으로 업데이트되고 있다.

토양오염과 관련된 환경기준은 토양시료를 10배 이상의 물로 희석시키는 elutriation 방법을 기초로 하여 설정되었다. 따라서 토양오염과 관련된 환경기준은 토양오염물질이 지하수로 이동하는 것에 근거한 값으로서 간주할 수 있다. 이점에서, 일본에서는 토양오염과 지하수에 대한 환경질기준이 밀접하게 관련되어 있다는 것을 알 수 있다. 또한 토양정화기준은 토양오염에 대한 환경기준과 동일하다.

## 2) 지하수 수질기준

일본의 기본환경법은 물의 오염과 관련하여 공공수역에서의 수질 기준을 인간건강보호를 위한 환경수질기준과 자연환경보호를 위한 수질기준의 2가지로 나누고 있다.

각각의 기준은 공공수질의 정책목표를 유지하고 달성하기 위해 적합한 수준으로 제정되었는데 인간건강보호 및 자연환경보전을 목표로 하고 있다.

일반적으로 환경수질기준은 인간건강에 관련된 26개의 물질에 대해 제정되었다(표2-57). 다른 수체의 수질기준과 같이 지하수도 인간건강을 위한 환경수질기준을 따르고 있다. 부가

적으로 모든 수체의 정화기준은 환경수질기준과 동일값을 가지고 있어 다른 나라에 비해 독특하다. 지하수정화기준은 파라티온, 메틸파라티온, 메틸디메톤, 에틸파라니트로페닐(EPN)과 같은 유기인 화합물에 대한 값이 지하수정화기준에서 불검출될 것으로 제정된 것 외에는 환경수질기준과 동일하게 1997년에 제정되었다.

표 2-57 일본에서의 인간건강보호를 위한 환경수질기준

Items	Standard Values
Cd	0.01 mg/L
Total cyanide	ND
Pb	0.01 mg/L
Cr <sup>+6</sup>	0.05 mg/L
As	0.01 mg/L
Total Hg	0.0005 mg/L
Alkyl Hg	ND
PCBs	ND
Dichloromethane	0.02 mg/L
Carbon tetrachloride	0.002 mg/L
1,2-dichloroethane	0.004 mg/L
1,1-dichloroethylene	0.02 mg/L
cis 1,2-dichloroethylene	0.04 mg/L
1,1,1-trichloroethane	1 mg/L
1,1,2-trichloroethane	0.006 mg/L
Trichloroethylene	0.03 mg/L
Tetrachloroethylene	0.01 mg/L
1,3-dichloropropene	0.002 mg/L
Thiram	0.006 mg/L
Simazine	0.003 mg/L
Thiobencarb	0.02 mg/L
Benzene	0.01 mg/L
Selenium	0.01 mg/L
nitrate-N and nitrite-N	10 mg/L
Fluoride	0.8 mg/L
Boron	1 mg/L

\*출처: JMOE, 1999

### 3. 토양 및 지하수의 연계 관리 방안

현재의 토양오염조사나 지하수 오염조사의 경우 토양오염과 지하수 오염이 동시에 발생하는 실제 오염현장의 특성을 잘 반영하지 못하고 있다.

지하수 관리에 포함되는 통상적인 지하수는 포화대의 지하수이지만 불포화대를 포함한 관리의 중요성이 커지고 있다. 이는 불포화대의 토양이 오염된 경우 지하수에 지속적인 영향을 미치기 때문이다.

토양오염이 우려 혹은 대책기준을 초과하는 경우 지하수 오염 조사를 필연적으로 수행해야 하는 규정이 마련되어야 할 것으로 판단된다. 즉 토양 조사 시 지하수위 부근에서 오염이 발견되는 경우 반드시 지하수 오염 조사를 의무화 하여 토양과 지하수오염조사가 연계 관리될 수 있는 방안 마련이 향후 필요할 것으로 판단된다. 또한 지하수 관측망에서 오염이 관찰될 경우 오염원을 파악하여 필요시 토양오염 조사를 수행하는 것이 필요하다. 이렇게 될 경우 불포화대와 포화대를 포함한 연계 관리가 가능할 것이다.

현재 구체적이지는 않지만 환경영향조사 등 토양 및 지하수를 조사하도록 되어있는 관련 규정이 많으나 각각을 따로 구분하여 조사를 실시하고 있다. 따라서 향후에는 토양 조사의 경우 지하수 관련 내용을, 지하수 조사의 경우 토양 관련 내용을 보완하는 작업을 지속적으로 실시해야 할 것이다.



## 제 3장 연구수행 내용 및 결과



## 제 3 장 연구수행 내용 및 결과

### 제1절 통계적 기법을 이용한 토양 및 지하수 조사

토양조사는 균일하지 않는 매체 특성 때문에 일부 토양시료의 결과를 통해 해당지역 전체에 대해 오염도를 유추하는 방법을 사용하고 있다. 즉 일부분의 시료를 통하여 전체 부지의 특성을 파악해야 하므로 표본의 특성을 통해 전체를 유추하는 통계학적 방법이 필요하게 된다. 미국이나 호주 등 외국의 경우에는 시료채취 계획 수립 시와 조사결과 해석 시에 통계학적인 방법을 사용할 것을 guideline 형태로 제공하여 그 사용을 권장하고 있다. 이번 장에서는 NSW-EPA, USEPA의 자료 검토를 통한 정밀조사단계에 필요한 시료채취개수 산정에 대해 살펴보고자 한다.

#### 1. 시료채취 위치 결정

통계에 기초한 시료채취 전략에서 대상 부지 내의 위치가 시료채취 지점으로 선택될 수 있는 동일한 기회를 가지는 등의 편향되지 않은 방법으로 채취되어야 한다. 시료채취 패턴은 다음의 기본 형태로 분류될 수 있다.

##### 1.1 판단에 근거한 시료채취(Judgmental Sampling)

이 방법에서 시료채취 지점은 조사부지 내의 오염의 분포 가능성에 대한 조사자의 지식에 근거해서 선정된다. 이것은 부지의 이력과 현장관찰사항 등을 이용할 수 있는 효과적인 시료채취방법이지만 편견에 치우치기 쉬운 단점이 있다. 시료채취·분석 결과의 질은 조사자의 경험과 유용한 부지이력 정보에 달려있다. 판단에 근거한 시료채취는 검증 시료의 채취에는 사용되어서는 안된다.

##### 1.2 임의 시료채취 (Random Sampling)

임의 시료채취에서, 채취지점은 무작위로 선정되지만 독단적으로 선정되는 것은 아니다. 시료채취 지점의 좌표를 결정하기 위해 적절한 “난수발생기”가 사용되어야 한다. 대부분의 공학용 계산기는 의도된 목적대로 충분히 무작위적인 숫자를 생성할 수 있다. 무작위 추출 과정은 조사 대상지역 내의 어떤 지점이라도 시료채취 지점으로서 선정될 수 있는 동등한 기회를 준다. 무작위 시료채취가 통계적으로 편향되지는 않지만 시료채취 지점이 공교롭게도 겹칠 가능성이 있다. 이 점은 Hot Spot의 발견과 오염의 공간적 분포에 대한 전체적인 그림을 제공하는 데 있어 임의 시료채취 패턴의 단점으로 작용한다. 실용적인 측면에서, 임의 시료채취는 오염

부지의 조사에서 제한된 용도를 가지고 있다.

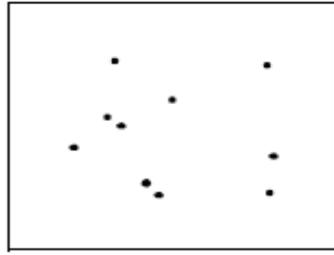


그림 3-1 임의 시료채취

### 1.3 층위별 시료채취 (Stratified Sampling)

대상 부지의 최초 분할은 지질학적, 지리적인 특성, 오염특성, 현장의 과거 부지이력, 각 분할 지역의 향후 용도 및 다른 관련 요인에 따른다. 각 분할지역은 독립적인 부지로 취급될 수 있으며 독립적인 시료채취 패턴과 밀도가 적용될 수 있다. 층위 시료채취 패턴에 의한 접근은 복잡한 오염물질 분포를 가진 대규모 부지의 조사에 가장 적합한 방법이다.

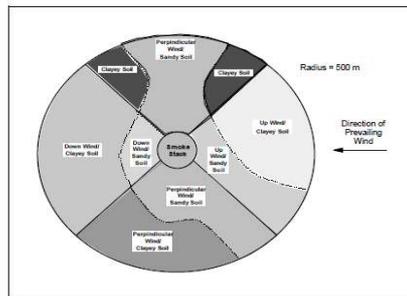


그림 3-2 층위별 시료채취

### 1.4 규칙적 시료채취 (Systematic Sampling)

시료채취 지점이 규칙적이고 등간격으로 선정되는 규칙적 시료채취는 통계적으로 편향되지 않으며, 최초의 채취지점의 좌표는 난수에 의해서 결정된다. 규칙적 시료채취는 지점이 겹치지 않으며 임의 시료채취에 비해 쉽게 채취지점을 조사할 수 있다. 사각격자는 규칙적 시료채취 패턴의 가장 일반적인 형태이다. 만일 오염수준이 알려져 있거나 또는 공간적으로 일정한 편차를 나타낼 것으로 추정된다면 시료채취 패턴은 그 편차의 규칙성을 나타내지 않는 지점이 선정되어야 한다. 주기적인 편차가 있으나 주기성의 원인이 파악되지 않은 경우 단계적인 임의시료채취 패턴이 고려되어야 한다. 이 방법은 대상지역을 사각격자로 분할하는 것을 포함한다. 그러나 격자의 교점에서 시료를 채취하는 일반적인 채취방법 대신에 각 격자의 내부에서 임의 시료가 채취되며, 격자 내의 정확한 채취지점은 무작위적으로 결정된다.

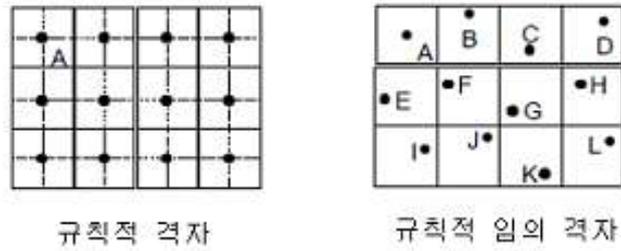


그림 3-3 규칙적 시료채취

### 1.5 종 · 횡단 시료채취 (Transect Sampling)

부지 내 종 · 횡단선을 긋고 일정간격으로 시료를 채취하는 방법이다. 여러 개의 선을 평행 또는 불규칙하게 규정하여 시료채취를 수행할 수 있다. 이 시료채취 접근방법은 오염범위를 확인하고 오염농도의 변화도를 작성하기 위하여 유용하게 사용된다. 이 방법은 지표면 유출과 같이 선형 오염물질 이동경로에 따른 오염을 파악하기 위하여 유용하게 사용될 수 있다.

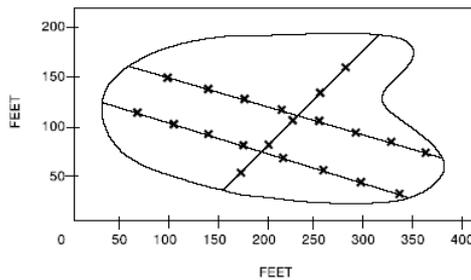


그림 3-4 종 · 횡단 시료채취

## 2. 시료개수 산정

통계학적 의사결정을 위해서는 통계학적으로 의미 있는 시료채취 개수 및 오류율(error rate) 등을 미리 정한 시료채취계획이 수립되어야 한다.

오류율은 부정확한 결정을 내릴 수 있는 확률범위를 설정하는 것이다. 차후 오염여부에 대한 결정은 가설검정(hypothesis test)을 통해 실수를 정량화하여 판단한다. 예상되는 조건 또는 기본적인 조건을 귀무가설(null hypothesis, Ho)로 규정하며, 판정결과 데이터가 귀무가설 각각이라는 결과를 내놓지 않은 이상 규정한 귀무가설은 유효하게 된다. 토양조사계획에서의 귀무가설은 「조사대상 지역이 토양오염우려기준 초과 농도를 갖는다(Dirty)」로 규정한다. 이와 같은 귀무가설에 대한 가설검정에서는 <표 3-1>에 정리한 바와 같이 4가지 판정 유형이 가능하며, 이중 두 가지 오류 경우수가 발생한다.

첫째, 실제로 토양오염우려기준 초과지역이나 기준 이하의 깨끗한 토양으로 결정한다. (Type I decision error, 제 1종 오류), 즉 귀무가설을 기각하는 결정이다.

두 번째, 실제로 토양오염우려기준 이하지역이나 기준 초과인 정화대상 토양으로 결정한다. (Type II decision error, 제 2종 오류), 즉 귀무가설을 받아들이는 결정이다.

표 3-1 귀무가설에 대한 판정 유형

DECISION	TRUE	
	H <sub>0</sub> 옳음 (Dirty)	H <sub>0</sub> 틀림 (Clean)
H <sub>0</sub> 채택 (Dirty)	Correct Certainty (1- $\alpha$ )	Type II Error ( $\beta$ )
H <sub>0</sub> 기각 (Clean)	Type I Error ( $\alpha$ )	Correct Power (1- $\beta$ )

시료채취로부터 얻어진 결과에 관해 확실한 것이 하나도 없을 수도 있다. 그래서 불확실성은 반드시 의미 있는 통계적인 명제를 위해 상술되어야 한다. 통계학에서 불확실성은 기술적으로 신뢰도 또는 위험도로 언급된다. 신뢰도는 백분율로 정량화된다. 위험도는 0~1 사이의 값을 가지는  $\alpha$ (alpha)로 표시된다. 95% 신뢰도는 0.05의 위험도와 동일한 의미이며, 만일 특정한 통계적인 명제가 95% 신뢰도 또는 0.05의 위험도를 가진 것으로 표현된다면, 이것은 평균적으로 그 통계적 명제가 100번 중에 95번 옳다는 것을 의미한다. 만일 부지 조사자가 다른 방식으로 기술하지 않는다면, USEPA는 모든 통계적 해석이 95% 이상의 신뢰도에서 수행된 것으로 간주하고 있다.

$$n = \sigma^2 \left( \frac{Z_{1-\alpha} + Z_{1-\beta}}{C_s - \mu} \right)^2 \quad (1) \text{ ①}$$

$$\sigma = \frac{C_H - C_L}{6} \quad (2)$$

n : 필요한 시료의 수

$\sigma$  : 시료채취 지역의 오염물질의 표준편차 추정치, mg/kg

$\mu$  : 시료채취 지역의 평균 농도 추정치, mg/kg

$C_s$  : 허용한계, mg/kg

$C_H$  : 채취 시료의 최대농도, mg/kg

① US EPA, 1989a, Methods for Evaluating the Attainment of Cleanup Standards Volume 1 : Soils and Solid Media, Washington, DC. 6-7page

$C_L$  : 채취 시료의 최소농도, mg/kg

$Z_{1-\alpha}$  : 제1종 오류 확률에서의 t-통계 값

$Z_{1-\beta}$  : 제2종 오류 확률에서의 t-통계 값

식(1)에 통계적 방법을 통한 시료개수 선정에 대해 나타내었다. 이 방법은 시료채취의 목적이 오염의 평균농도가 허용한계 이하라는 것을 확인하고자 할 경우 필요한 시료의 개수를 결정하기에 가장 적합하며, 이 방법은 한 지역 또는 토양더미의 시료채취에 적용될 수 있다. 또한 이 방법을 적용하기 위해서는 오염물질의 예상되는 평균 농도와 표준편차를 알고 있어야 한다. 이 방법은 이전에 수행된 시료채취 결과를 통해 평균 오염도와 표준편차를 알고 있을 경우 검증시료의 채취에 가장 적합한 방법이다.

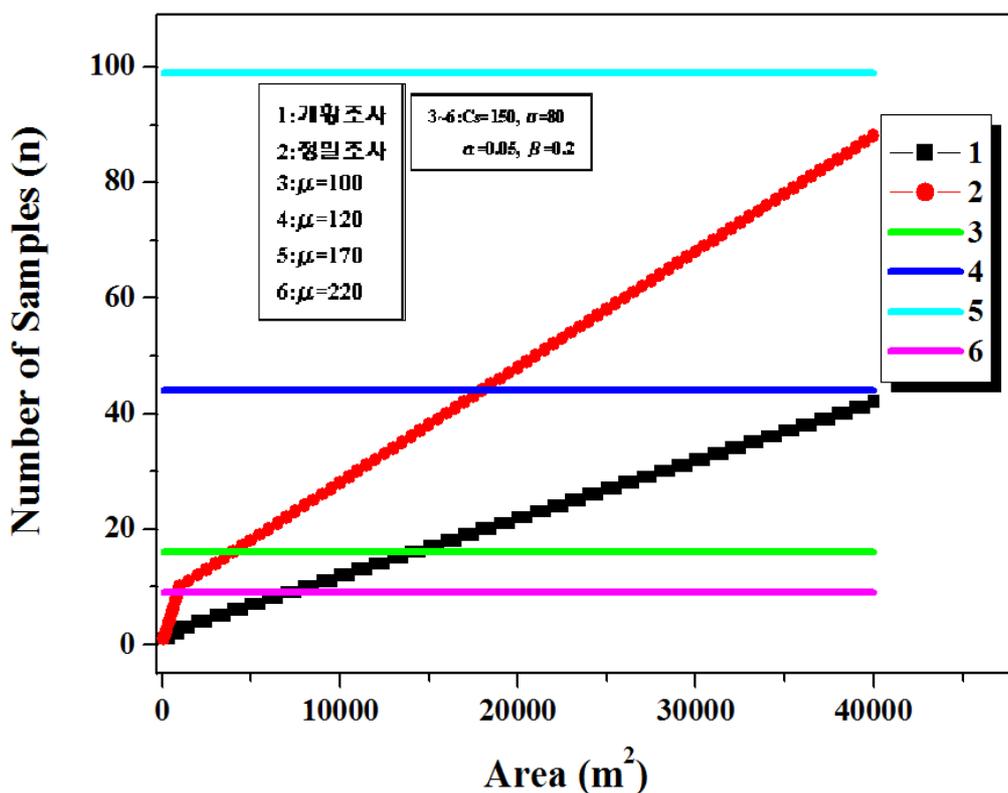


그림 3-5 현행 유류지역 개황조사와 정밀조사의 시료개수 및 통계적 방법을 통한 시료개수

<그림 3-5>에 식(1)의 각 변수에 따른 현행 유류지역 조사지침의 시료개수와의 비교를 하였다. 통계적 접근을 하기 위해서는 표본시료의 측정값의 평균과 표준편차에 대한 기초 데이터가 필요하게 되며, 그림에서 보는 바와 같이 통계적 기법을 통한 시료개수는 대상오염면적에

무관하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 95% 신뢰수준에서 표본의 측정농도 평균과 표준편차에만 의존하는 시료개수 산정을 의미한다. 즉 면적에 무관하며, 표본의 측정농도 평균과 표준편차에 따라 시료개수가 달라진다. 또한 오염분율을 이용한 시료채취개수 구하는 식이라든지 상대민감도를 이용한 시료채취개수 구하는 식 등을 고려해 보았으나 이들 역시 오염면적을 고려하지 않아 대상오염면적의 크기에 의존하는 통계적 방법이 필요하였다.

이에 호주 NSW-EPA의 시료채취 계획수립을 위한 지침(Sampling Design Guidelines) 중 95% 신뢰수준에서 확인할 수 있는 원형의 최소 오염지역의 크기(Hotspot)를 이용하는 방법에서 면적을 고려하고 있어 대상오염 면적크기에 따른 시료채취 개수산정에 활용 가능할 것으로 판단되었다. 호주의 시료채취 계획수립을 위한 지침(Sampling Design Guidelines)에서는 시료채취 밀도를 이용하여 정방형 격자형태로 시료를 채취하였을 때 95% 신뢰수준에서 확인할 수 있는 원형의 최소 오염지역의 크기를 제시하고 있다. <표 3-2>를 보면 조사 대상지역의 규모가 커질수록 채취밀도를 점차로 작게 산정하여 확인될 수 있는 최소한의 오염지역의 규모가 점차로 증가하며, 이는 국내 토양환경평가 지침의 채취밀도와 유사하다.

토양조사에서는 부지 전체에 걸친 오염분포 파악 등을 위해 통계적으로 편향되지 않고 채취지점 중복의 우려가 없으며, 적용이 쉬운 장점을 갖는 규칙적인 격자 형태를 이용하여 채취지점을 선정하는 경우가 많으며, 이 때 조사자의 직관적인 판단을 고려하기도 한다. 통계적 방법에 의한 채취지점 수의 산정방법의 연구는 Gilbert에 의해 정방형, 장방형, 삼각형 등 규칙적인 격자형태에 대해 수행되었다. 이 방법에 의하면 채취밀도에 따라 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 원형 오염지역의 반경은 아래의 수식에 따라 산정된다.

$$G = \frac{R}{0.59} \quad (3)$$

$$n = \frac{A}{G^2} \quad (4)$$

$$n = \frac{A \times (0.59)^2}{R^2} \quad (5)$$

n = 필요한 시료채취지점의 수

A = 시료채취지역의 면적(m<sup>2</sup>)

G = 격자의 크기가 같은 두 시료채취지점간의 거리(m)

R = 시료채취 과정에서 발견할 수 있는 최소규모의 오염의심지역의 반경(m)

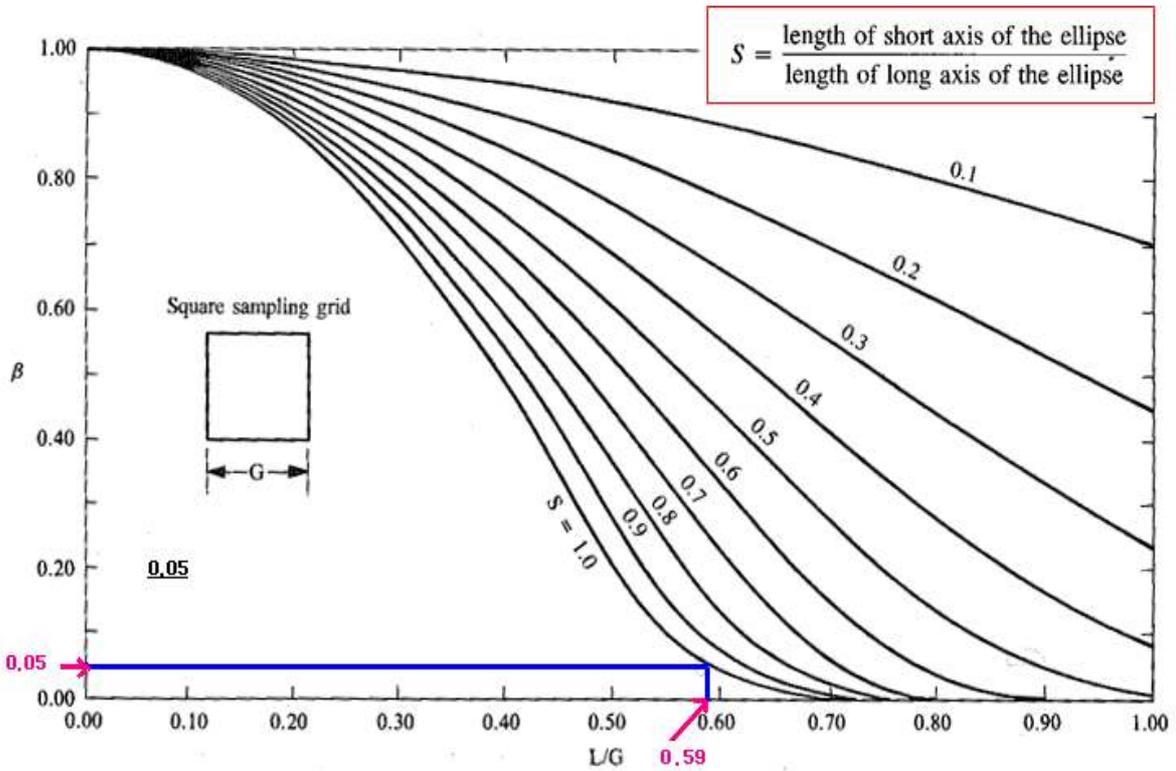


그림 3-6 Consumer's risk( $\beta$ )와 R/G의 관계선

식 (3)에 쓰인 0.59는 채취격자의 형태를 정방형으로 오염형태를 원형( $S=1$ )으로 가정하였을 때, 95% 신뢰수준으로 발견할 수 있는 최소 크기 오염지역의 반경 대 채취격자간 거리의 비 ( $R/G$ )를 의미하며, <그림3-6>의 그래프를 이용하여 구할 수 있다. <그림 3-6>⑩의  $\beta$ 는 조사자가 감수해야 할 위험도, 즉 오염지역의 미발견 확률을 의미한다.

식(5)는 오염지역의 형태가 원형일 경우이고, 오염지역의 형태가 타원일 경우(장축:단축=2:1,  $S=0.5$ )일 때는 식(6)의 형태를 갖게 되며 이는 같은 면적과 같은 시료채취 과정에서 발견할 수 있는 최소규모의 오염의심지역의 반경에 대하여 식(5)보다 약 2배의 시료개수가 많게 나타난다.

$$n = \frac{A \times (0.90)^2}{R^2} \quad (6)$$

식(5)를 이용하여 현행 지침에서 구분된 광산활동 관련지역, 폐기물 매립지역, 기타지역(유류 배출 가능지역 등)과 새롭게 제안하고자 하는 주유소 관련지역에 대해 시료개수 산정 및 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경에 대해 살펴보았다.

⑩ Gilbert, R.O. Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring, Van Nostrand Reinhold, New York, 1987

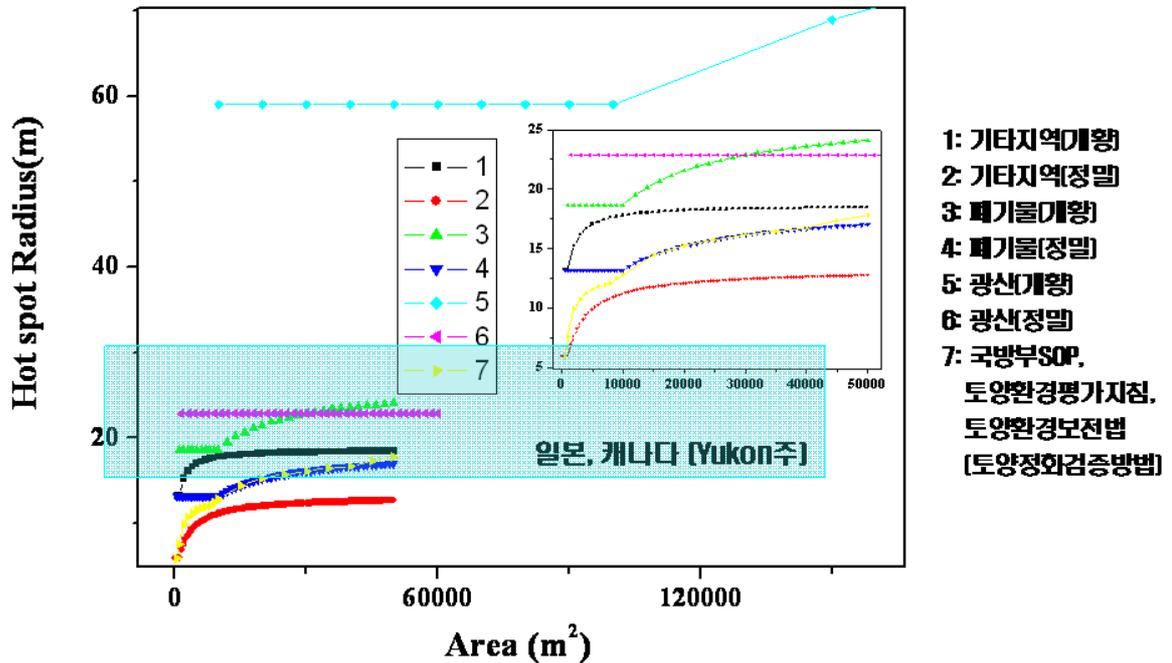


그림 3-7 현행 지침의 면적에 따른 95% 신뢰수준으로 발견할 수 있는 최소크기 오염지역 반경

<그림 3-7>에 현행 토양정밀조사 지침 및 관련 법규에서 지정한 면적에 따른 시료채취 개수를 식 5를 이용하여 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경으로 변환하여 나타내었다. 일본 및 캐나다 Yukon주의 경우 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경의 값이 15~30m를 나타내고 있었고, 이는 국내지침과 비교하여 볼 때 채취밀도가 그리 높지 않음을 의미하고 있다.

다음은 면적을 고려하되 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경을 기준으로 시료채취 밀도를 고려하도록 정밀조사지침의 토지 유형별로 신규 세분화 지역인 주유소 관련지역을 포함하여 살펴보았다. 심토의 경우에는 우선 현행 지침의 채취 밀도를 그대로 적용하였다.

## 2.1 광산활동 관련지역

광산활동 관련지역의 경우 현행 지침에서 정한 밀도로 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경은 개황조사에서 59~112m 이고, 정밀조사에서 23m 정도를 나타내었다. 광산이나 제련소 지역들의 오염은 주로 하천에 의한 수계확산 또는 바람에 의한 비산 등에 기인하므로 폐기물의 매립 또는 액상 오염물질의 누출 등으로 토양층을 통해 확산되는 경우에

비해 광범위한 지역을 오염시킬 가능성이 높아 채취밀도가 비교적 낮게 설정되는 것이 타당하다고 판단된다. 통계적 방법에 기초한 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경(R)을 개황조사의 경우 100,000m<sup>2</sup> 이하의 대상면적에는 50m, 100,000~500,000m<sup>2</sup>에는 현 지침에서 나타내는 면적증가에 따른 시료개수 증가 비율과 유사한 회귀식으로 표현하여 대상면적이 정하여 지면 R값이 결정되도록 하였다. 정밀조사의 경우에는 면적에 무관하게 R값이 20m가 되도록 하였으며, 이는 현 지침의 경우보다 해당 대상면적에서 시료수가 1~3개 정도 늘어나는 결과를 보이거나 채취밀도는 현행 지침과 비교하여 볼 때 유사한 수준을 보인다. 또한 심토의 개수는 현행 지침을 그대로 수용하여 대상 면적이 결정되면 표토 및 심토의 시료개수가 조사 단계별로(개황, 기초조사) 정하여 질 수 있도록 정리하였으며, 이를 <표 3-2>에 나타내었다. 그러나 광산지역의 경우는 대부분 오염대상면적이 넓고 광미장이나 선광장같이 비교적 높은 농도를 보이며 확산매체와 방향에 따라 오염물질의 분포가 달라지기 때문에 일률적인 방법적용에 한계가 있는 것으로 판단된다. 따라서 광산지역의 경우에는 통계적 방법을 이용한 총 시료개수 산정을 참고하고 시료채취방법상에 있어, 비산확산우려지역과 수계확산우려지역으로 나누어 비산확산우려지역에서는 풍향을 고려하여 방위별로 시료채취를 실시하고 비산확산지역은 광미장이나 폐수유입지역 등을 기점으로 하천에 인접한 부지에 대해 오염원의 특성과 기초조사에서 파악한 내용을 참고하여 거리별로 시료채취밀도를 적용하는 방법을 접목시켜 합리적인 시료 채취가 이뤄질 수 있도록 하고자 하였다.

## 2.2 폐기물 관련지역

폐기물 관련지역의 경우 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경은 개황조사에서 19~25m, 그리고 정밀조사에서는 13~18m를 나타내었다. 매립지역은 침출수 확산에 의해 주변지역이 오염될 개연성이 큰 점을 감안할 때 오염지역의 규모가 광산활동 관련 지역보다는 작고 액상 오염물질의 누출 등으로 인한 오염이 우려되므로 합리적인 수준의 밀도로 판단된다. 하지만, 통계적 방법에 기초한 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경(R)을 10,000m<sup>2</sup> 이하의 대상면적에는 개황조사의 경우 18 m, 정밀조사의 경우 13 m로 통계적 방법을 통한 R값을 기준으로 재선정하였다. 10,000m<sup>2</sup> 이하의 대상면적에는 현 지침에서 나타내는 면적증가에 따른 시료개수 증가 비율과 유사한 회귀식으로 표현하여 대상면적이 정하여지면 R값이 결정되도록 하였으며, 이를 <표 3-3>에 나타내었다.

표 3-2 광산활동 관련지역 및 사격장의 2구역(수계확산우려지역)의 면적에 따른 시료개수 산정

시료채취개수 결정			토양오염항목			
1) 시료 채취 지역의 면적(A)	광산활동 관련지역 사격장 2구역(개황조사)	~ 100,000m <sup>2</sup>				
		100,000 ~ 500,000m <sup>2</sup>				
2) 시료채취과정에서 95%신뢰도로 발견할 수 있는 오염의심지역(hot spot)의 반경(R)	광산활동 관련지역 사격장 2구역(정밀조사)	~ 100,000m <sup>2</sup>	50m			
		100,000 ~ 500,000m <sup>2</sup>	①			
	광산활동 관련지역 사격장 2구역(정밀조사)	~ 100,000m <sup>2</sup>	20m			
3) 표토의 시료채취 개수 (n <sub>0</sub> )						
4) 심토(10~30cm)의 시료채취 개수 (n <sub>1</sub> ) : 정밀조사						
5) 심토(30cm 이상)의 시료채취 개수 (n <sub>2</sub> ) : 정밀조사						
6) 심토( ~30cm)의 시료채취 개수 (n <sub>3</sub> ) : 개황조사						
7) 시료채취 총 개수 (n <sub>t</sub> )						
<p>주) - 1) 시료채취 지역은 그 특성에 따라 5곳으로 나뉘며 그중 광산활동 관련지역(비산확산, 수계확산) 및 사격장 2구역(수계확산우려지역)에 관한 것이며, 면적에 따라 시료개수가 달라진다.</p> <p>- 2) 오염의심지역이라 함은 토양오염우려기준 초과 의심지역을 의미하며, 조사대상 지역의 특성에 시료채취과정에서 95%신뢰도로 발견할 수 있는 오염의심지역(hot spot)의 반경(R)값에 따라 시료채취 개수는 달라진다.</p> <p>① <math>R = 82.0857 + 4.1936E^{-4} * A - 3.86539E^{-10} * A^2</math></p> <p>- 3) 통계학적 시료채취개수(n<sub>0</sub>) 산정</p> $n_0 = \left( \frac{A \times (0.59)^2}{R^2} \right)$ <p>조건) • 정사각형의 격자법을 사용하여 5지점 혼합시료 채취를 하는 경우</p> <p>- 4) 심토(10~30cm)는 표토시료수 3개 지점당 1개</p> <p>- 5) 표토시료수 3개 지점당 1개 지점비율로 표토에서 30cm 까지 토양채취</p> <p>- 6) 시료채취 총 개수(n<sub>t</sub>) = n<sub>0</sub> + n<sub>1</sub> + n<sub>2</sub> + n<sub>3</sub></p>						

표 3-3 폐기물 매립지역 및 사격장 피탄지의 면적에 따른 시료개수 산정

시료채취개수 결정			토양오염 항목			
1) 시료 채취 지역의 면적(A)	폐기물 관련지역 사격장 피탄지(개황)	~ 10,000m <sup>2</sup>				
		10,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>				
	폐기물 관련지역 사격장 피탄지(정밀)	~ 10,000m <sup>2</sup>				
		10,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>				
2) 시료채취과정에서 95% 신뢰도로 발견할 수 있는 오염의심지역(hot spot)의 반경(R)	폐기물 관련지역 사격장 피탄지(개황)	~ 10,000m <sup>2</sup>	18m			
		10,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>	①			
	폐기물 관련지역 사격장피탄지(정밀)	~ 10,000m <sup>2</sup>	13m			
		10,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>	②			
3) 표토의 시료채취 개수 (n <sub>0</sub> )						
4) 심토의 시료채취 개수 (n <sub>1</sub> )						
5) 시료채취 총 개수 (n <sub>t</sub> )						
<p>주) - 1) 시료채취 지역은 그 특성에 따라 5곳으로 나뉘며 그 중 폐기물 관련지역 및 사격장 피탄지 등에 관한 것이며, 면적에 따라 시료개수가 달라진다.</p> <p>- 2) 오염의심지역이라 함은 토양오염우려기준 초과 의심지역을 의미하며, 조사대상 지역의 특성에 시료채취과정에서 95%신뢰도로 발견할 수 있는 오염의심지역(hot spot)의 반경(R)값에 따라 시료채취 개수는 달라진다.</p> <p>① <math>R = 12.502 + 8.627E - 4 * A - 2.884E - 8 * A^2 + 4.786E - 13 * A^3 - 3.0879E - 18 * A^4</math></p> <p>② <math>R = 8.8479 + 6.1367E - 4 * A - 2.079E - 8 * A^2 + 3.5107E - 13 * A^3 - 2.3057E - 18 * A^4</math></p> <p>- 3) 통계학적 시료채취개수(n<sub>0</sub>) 산정</p> $n_0 = \left( \frac{A \times (0.59)^2}{R^2} \right)$ <p>조건) • 정사각형의 격자법을 사용하여 5지점 혼합시료 채취를 하는 경우</p> <p>- 4) 시료채취 총 개수(n<sub>t</sub>) = n<sub>0</sub> + n<sub>1</sub></p>						

## 2.3 주유소 관련지역

신규 세분화 지역인 주유소 관련지역은 특정오염 관리대상 시설로서 현재 시행 중인 토양오염도 검사의 주요한 대상이며, 부지 내 오염개연성을 명확하게 파악할 수 있는 특징이 있다. 이 지역은 부지의 규모가 비교적 작고 도시지역에 위치하는 경우가 많아 토양오염이 발생할 경우 주변지역에 미치는 환경적 영향이 큰 지역이다. 이는 주유소 지역에 대한 토양시료 채취 밀도가 다른 지역의 경우에 비해 좀 높게 설정 되어야 하며, 채취지점들은 주유소 부지 내의 오염개연성과 밀접한 연관을 가지도록 선정되어야 한다는 것을 의미한다.

개황조사의 채취밀도는 면적기준보다는 부지 내 오염개연성에 따라 결정되어야 하며, 오염개연성 한 개소 당 최소 1개 지점 이상의 채취지점이 선정되어야 한다. 특히 지하저장탱크지역의 경우 그 중요성과 규모가 다른 오염개연성에 비해 크므로 탱크지역을 중심으로 4개 방위에 대해 조사를 수행하여야 할 것으로 판단된다. 호주의 경우 주유소 지역의 토양오염 조사를 위해 2,000m<sup>2</sup>의 면적에 대해 최소 28개의 토양시료 채취지점을 선정하도록 규정하고 있으며 이 밀도는 정방형의 격자를 적용할 경우 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경이 5m를 의미한다. 따라서 2,000m<sup>2</sup> 면적을 기준하여 작은 면적에 대해 개황조사의 경우는 R값이 12m, 정밀조사의 경우에는 호주 지침과 같은 5m 가 되도록 하였다. 2,000m<sup>2</sup> 이상의 대상 면적에는 현 지침의 기타지역에서 나타내는 면적증가에 따른 시료개수 증가 비율과 유사한 회귀식으로 표현하여 대상면적이 정하여 지면 R값이 결정되도록 하였으며, 이를 <표 3-4>에 나타내었다.

## 2.4 사격장 지역

신규 지역인 사격장지역의 주 오염물질은 중금속류와 화약류가 될 가능성이 높고 오염지역은 주로 피탄지와 그 주변지역이 될 것이다. 피탄지 주변을 오염시킨 물질은 그 자리에 고정되어 토양오염을 지속적으로 유발시킬 수 있으며 사격장의 피탄지가 주로 경사지역에 위치하는 특성을 감안하면 인근의 하천 또는 강우시의 지표수 흐름을 따라 수계를 통해 확산될 가능성 또한 높다. 이러한 오염특성에 의한 오염범위는 비산에 의한 오염과 액상오염물질의 누출에 의한 오염범위의 사이에 있을 것으로 예측된다. 따라서 사격장 지역의 토양시료 채취밀도는 피탄지의 면적을 기준으로 폐기물 매립지의 기준을 기본적으로 적용하여 통계적 방법에 기초한 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경(R)을 10,000 m<sup>2</sup> 이하의 대상면적에는 개황조사의 경우 18m, 정밀조사의 경우 13m 로 통계적 방법을 통한 R값을 기준으로 <표 3-3>을 적용하고, 하천 등 지표수에 의한 오염 확산이 예측될 경우는 해당지역에 대해 별도로 광산 활동 관련지역의 수계확산의 기준을 적용하여 <표 3-2>를 이용하여 시료개수를 구하는 방법을 적용하여 별도의 표를 작성하지는 않았다.

## 2.5 기타지역(주유소 제외 유류배출 가능지역, 유해화학물질 저장시설지역, 산업지역 등)

기타지역의 경우, 유류배출가능지역은 주유소를 제외한 유류배출 가능한 지역으로 주로 산업 부지가 그 대상이라 볼 수 있어 그동안의 주요 정밀조사 대상 그룹이었던 주유소지역과는 차별성을 두고자 대상에서 주유소는 제외하는 것으로 하였다.

그러나 기타지역의 경우는 공장산업단지 등 면오염원지역과 유류, 유독물저장시설 등 점오염원지역의 복합지역으로 일률적으로 시료채취밀도를 적용하였을 경우의 불필요한 시료채취가 이뤄지거나 하는 등의 불합리한 문제점을 조정하고자 조사대상지를 중심으로 일단 3개 구역으로 오염의 존재 가능성을 중심으로 나눠보았다.

- 1구역 : 유류, 유독물 등 특정유해물질을 직접 다루는 부지로 오염이 존재할 가능성이 큰 구역
- 2구역 : 오염이 존재할 가능성이 적은 구역 (예: 사무소, 관리동 등)
- 3구역 : 오염이 존재할 가능성이 없다고 생각되는 구역 (예: 운동장, 직원용 주차장 )

아래 그림은 공장 부지를 예시로 하여 오염존재 가능성을 중심으로 1, 2, 3구역으로 분류해보았다.

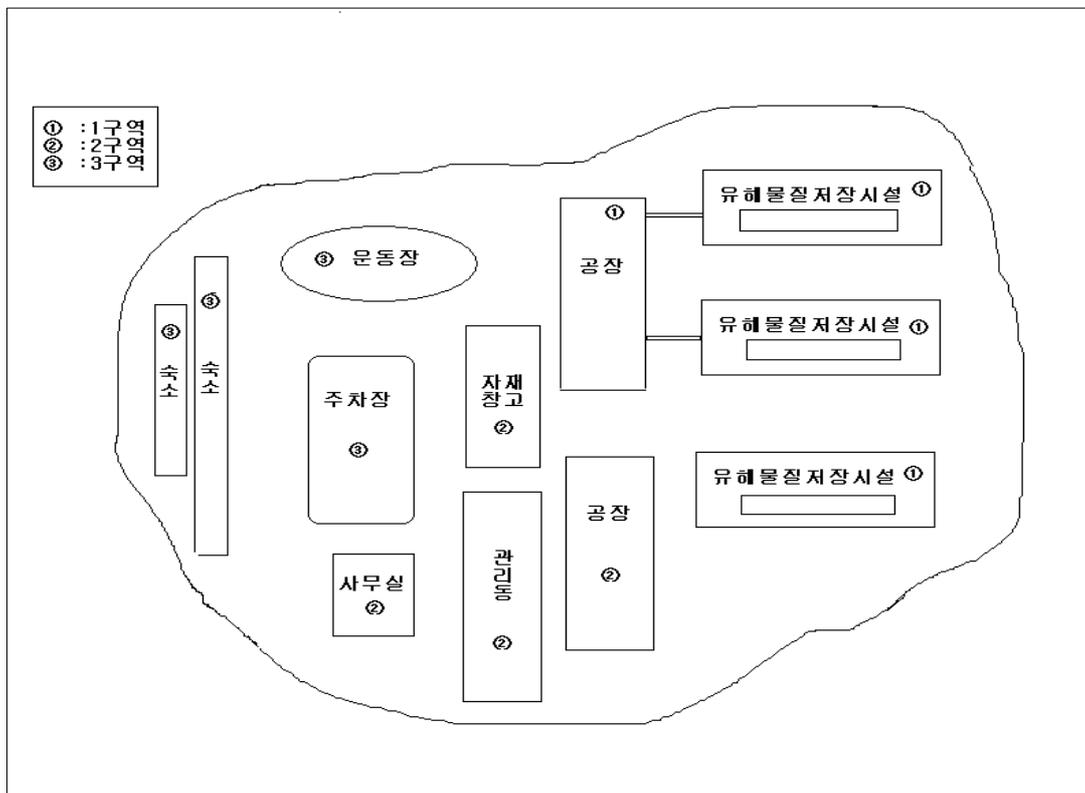


그림 3-8 산업부지에서의 구역분류 예시

통계적 방법 적용 시 기타 지역에 대해서는 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경은 개황조사에서 13~18m, 그리고 정밀조사에서는 6~11m 정도로 비교적 작게 나타났다. 이는 앞서 평가한 광산활동 관련 지역이나 폐기물 매립 지역의 밀도에 비해 상당히 높은 수준이며 토양층을 통해 오염이 확산되는 특성을 감안하면 합리적인 채취밀도라 판단된다. 그러나 위의 그림에 따라 일단 3개 구역으로 부지 내 오염가능성에 따라 구획을 짓고 3구역은 오염이 존재할 가능성이 없다고 생각되는 구역(예: 운동장, 직원용 주차장)으로 시료채취를 생략하는 것으로 하였고, 통계적 방법에 기초한 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경(R)을  $1,000\text{m}^2$  이하의 대상면적에는 1구역은 개황조사의 경우 10m, 2구역은 20m, 정밀조사의 경우 5m 로 통계적 방법을 통한 R값을 기준으로 재선정하였다. 1구역의 경우  $1,000\text{m}^2$ , 2구역의 경우  $10,000\text{m}^2$  이상의 대상면적에는 현 지침에서 나타내는 면적증가에 따른 시료개수 증가 비율과 유사한 회귀식으로 표현하여 대상면적이 정하여 지면 R값이 결정되도록 하였으며, 이를 <표 3-4>에 나타내었다.

표 3-4 주유소 지역의 면적에 따른 시료채취개수산정

시료채취개수 결정			토양오염항목			
1) 시료 채취 지역의 면적(A)	주유소 관련지역 (개황조사)	~ 2,000m <sup>2</sup>				
		2,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>				
	주유소 관련지역 (정밀조사)	~ 2,000m <sup>2</sup>				
		2,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>				
2) 시료채취과정에서 95%신뢰도로 발견할 수 있는 오염의심지역 (hot spot)의 반경(R)	주유소 관련지역 (개황조사)	~ 2,000m <sup>2</sup>	12m			
		2,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>	①			
	주유소 관련지역 (정밀조사)	~ 2,000m <sup>2</sup>	5m			
		2,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>	②			
3) 표토의 시료채취 개수 (n <sub>0</sub> )						
4) 심토의 시료채취 개수 (n <sub>1</sub> )						
5) 시료채취 총 개수 (n <sub>t</sub> )						
<p>주) - 1) 시료채취 지역은 그 특성에 따라 5곳으로 나뉘며 그 중 주유소 관련지역에 관한 것이며, 면적에 따라 시료개수가 달라진다.</p> <p>- 2) 오염의심지역이라 함은 토양오염우려기준 초과 의심지역을 의미하며, 조사대상 지역의 특성에 시료채취과정에서 95%신뢰도로 발견할 수 있는 오염의심지역 (hot spot)의 반경(R)값에 따라 시료채취 개수는 달라진다.</p> <p>① <math>R = 10.8698 + 9.1812E-4*A - 4.69117E-8*A^2 + 1.04772E-12*A^3 - 8.40949E-18*A^4</math></p> <p>② <math>R = 4.0092 + 7.1969E-4*A - 3.274E-8*A^2 + 6.765E-13*A^3 - 5.19824E-18*A^4</math></p> <p>- 3) 통계학적 시료채취개수 (n<sub>0</sub>) 산정</p> $n_0 = \left( \frac{A \times (0.59)^2}{R^2} \right)$ <p>조건) • 정사각형의 격자법을 사용하여 단일시료 채취를 하는 경우</p> <p>- 4) 시료채취 총 개수 (n<sub>t</sub>) = n<sub>0</sub> + n<sub>1</sub></p>						

표 3-5 기타지역의 면적에 따른 시료채취 개수 산정

시료채취개수 결정				토양오염 항목		
1) 시료 채취 지역의 면적(A)	기타 (개황 조사)	1구역	~ 1,000m <sup>2</sup>			
			1,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>			
	2구역	~ 10,000m <sup>2</sup>				
		10,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>				
	기타 (정밀조사)	~ 1,000m <sup>2</sup>				
1,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>						
2) 시료채취과정에서 95%신뢰도로 발견할 수 있는 오염의심지역 (hot spot)의 반경(R)	기타지역 (개황 조사)	1구역	~ 1,000m <sup>2</sup>	10m		
			1,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>	①		
	2구역	~ 10,000m <sup>2</sup>	20m			
		10,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>	②			
	기타지역 (정밀조사)	~ 1,000m <sup>2</sup>	5m			
1,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>		③				
3) 표토의 시료채취 개수	1구역	n <sub>0</sub>				
	2구역	n <sub>1</sub>				
4) 심토의 시료채취 개수 (n <sub>2</sub> )						
5) 시료채취 총 개수 (n <sub>t</sub> )						

주) - 1) 시료채취 지역은 그 특성에 따라 5곳으로 나뉘며 그 중 기타지역의 점오염원 성격의 유류배출 가능지역, 유해화학물질 저장시설지역 등에 관한 것이며, 면적에 따라 시료채취 개수가 달라진다.

- 2) 오염의심지역이라 함은 토양오염우려기준 초과 의심지역을 의미하며, 조사대상 지역의 특성에 시료채취과정에서 95%신뢰도로 발견할 수 있는 오염의심지역 (hot spot)의 반경(R)값에 따라 시료채취 개수는 달라진다.

$$\textcircled{1} R = 8.63581 + 0.00247 \cdot A - 2.791E-7 \cdot A^2 + 1.5932E-11 \cdot A^3 - 4.76035E-16 \cdot A^4 + 7.1003E-21 \cdot A^5 - 4.16796E-26 \cdot A^6$$

$$\textcircled{2} R = 12.502 + 8.627E-4 \cdot A - 2.884E-8 \cdot A^2 + 4.786E-13 \cdot A^3 - 3.0879E-18 \cdot A^4$$

$$\textcircled{3} R = 3.9305 + 0.00155 \cdot A - 1.48011E-7 \cdot A^2 + 7.72556E-12 \cdot A^3 - 2.19065E-16 \cdot A^4 + 3.16119E-21 \cdot A^5 - 1.81546E-26 \cdot A^6$$

- 3) 통계학적 시료채취개수 (n<sub>0</sub>) 산정

$$n_0 = \left( \frac{A \times (0.59)^2}{R^2} \right)$$

조건) • 정사각형의 격자법을 사용하여 단일시료 채취를 하는 경우

- 4) 시료채취 총 개수 (n<sub>t</sub>) = n<sub>0</sub> + n<sub>1</sub> + n<sub>2</sub>

<그림 3-7>에 현행 토양정밀조사 지침 및 관련 법규에서 지정한 면적에 따른 시료채취 개수를 식 5를 이용하여 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경으로 변환하여 나타내었다. 일본 및 캐나다 Yukon주의 경우 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경의 값이 15~30m 를 나타내고 있었고, 이는 국내지침과 비교하여 볼 때 채취밀도가 그리 높지 않음을 의미하고 있다.

다음은 면적을 고려하되 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경을 기준으로 시료채취 밀도를 고려하도록 정밀조사지침의 토지 유형별로 신규 세분화 지역인 주유소 관련지역을 포함하여 살펴보았다. 심토의 경우에는 우선 현행 지침의 채취 밀도를 그대로 적용하였다.

## 2.6 간단 프로그램 산정

위에서 조사한 내용을 바탕으로 엑셀로 쉽게 시료채취밀도를 구하는 간단한 프로그램을 만들어 보았다. <표 3-2~5>의 내용을 기준으로 오염부지 면적을 입력하면 표토와 심토의 개수를 포함하여 최종 시료채취개수를 산출하고 이를 분석항목의 분석비용과 연계하여 대략의 분석비용을 도출하는 간단프로그램으로 <그림 3-9>와 같다.

시료채취 개수 결정(주유소 관련지역)														
		입력란	오염물질 항목 (검사수수료, 원)											
			B	T	E	X	As	Hg	Pb	Cr	Zn	Ni		
채취 대상 면적(A)	개황조사	~ 2,000m <sup>2</sup>	2000											
		2,000~50,000m <sup>2</sup>	6000											
	정밀조사	~ 2,000m <sup>2</sup>	2000											
		2,000~50,000m <sup>2</sup>	5000											
시료채취 과정에서 95% 신뢰도로 발견할 수 있는 오염의심지역(hot spot)의 반경(R)	개황조사	~ 2,000m <sup>2</sup>	12											
		2,000~50,000m <sup>2</sup>	14.905											
	정밀조사	~ 2,000m <sup>2</sup>	5											
		2,000~50,000m <sup>2</sup>	6.870											
표토의 시료채취 개수(n <sub>0</sub> )	개황조사	5.0	4.8											
		10.0	9.401											
	정밀조사	28.0	27.8											
		37.0	36.872											
심토의 시료채취 개수(n <sub>1</sub> )	개황조사	~ 2,000m <sup>2</sup>	5.0											
		2,000~50,000m <sup>2</sup>	15.0											
	정밀조사	~ 2,000m <sup>2</sup>	45.0											
		2,000~50,000m <sup>2</sup>	60.0											
시료 총 개수(n <sub>2</sub> )	개황조사	~ 2,000m <sup>2</sup>	10	406,000	164,000	235,000	169,000	232,000	442,000	442,000				
		2,000~50,000m <sup>2</sup>	25	1,015,000	410,000	587,500	422,500	580,000	1,105,000	1,105,000				
	정밀조사	~ 2,000m <sup>2</sup>	73	2,963,800	1,197,200	1,715,500	1,233,700	1,693,600	3,226,600	3,226,600				
		2,000~50,000m <sup>2</sup>	97	3,938,200	1,590,800	2,279,500	1,639,300	2,250,400	4,287,400	4,287,400				
주) 1) -표토시료수 3개 지점당 1개 지점 2.5m 간격으로 15m까지 채취함. 따라서 표토시료수 3개 지점당 5개의 심토시료 채취(n1)														
<시료개수(광산)> <시료개수(폐기물)> <시료개수(주유소)> <시료개수(기타)>														

그림 3-9 시료채취개수 프로그램

이와 같은 프로그램을 다음 4절에서 논의될 외국의 VSP나 DEFT와 같은 software 처럼 발전시켜 우리나라의 경우도 외국처럼 환경부등의 인터넷상에서 쉽게 다운받아 사용가능하도록 하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 2.7 실제 환경오염조사 비교

아래의 <표 3-6>는 국내 지침별 면적 당 시료 개수 및 이에 따른 시료채취 과정에서 발견할 수 있는 최소규모의 오염의심지역의 반경을 나타내고 있고 <표 3-7>은 2005년도 실제 환경오염조사를 시행한 면적 당 지점수를 정리하여 나타낸 것이다.

오염의심지역의 반경은 식  $R = \sqrt{(A \times (0.59)^2) / n}$  을 적용한 것이다.

조사 면적이 커질수록 시료 개수가 증가함에 따라 95% 신뢰수준에서 발견할 수 있는 최소 오염의심반경도 대부분 같이 증가하는 추세임을 볼 수 있다. 기타지역의 정밀조사에서는 오염의심 반경이 약 6~13m 로 광산활동 지역의 개황조사에서의 최소 오염의심 반경(약 13~66m) 보다도 작게 나타남을 알 수 있다. 광산활동 지역의 개황조사 시 오염의심 반경이 다른 지역의 개황/정밀조사에 비해 크게 나타나는 것은 다른 경우에 비해 광범위한 지역을 오염시킬 가능성이 높아 시료채취 밀도를 비교적 낮게 설정했기 때문으로 보인다.

2005년도에 수행했던 캠프 O1, O2, O3 지역의 조사는 토양정밀조사지침에서 정한 면적 당 시료개수를 적용하지 않고, 현장답사를 통해 오염예상지역과 주변지역에 대한 지형 및 지질 특성 등을 검토 후 추정된 오염범위의 면적에 따라 시료채취 지점 수 기준에 준하여 시료를 채취하였다. 캠프 O2지역은 기타지역의 개황, 정밀조사보다 면적 당 시료 개수가 더 많게 채취하였다. 이에 따라 기타지역의 오염반경보다 실제로 조사한 캠프 O2지역에서의 오염반경이 더 작게 나타났다.

표 3-6 면적 당 시료 개수 및 오염의심지역반경

A(m <sup>2</sup> )	토양정밀조사지침												토양환경 평가지침	
	기타지역				폐기물지역				광산활동지역					
	개황		정밀		개황		정밀		개황		정밀		n	R(m)
n	R(m)	n	R(m)	n	R(m)	n	R(m)	n	R(m)	n	R(m)			
500	1	13.2	5	5.9	1	13.2	1	13.2	1	13.2	1	13.2	5	5.9
1,000	2	13.2	10	5.9	1	18.7	2	13.2	1	18.7	1	18.7	6	7.6
1,500	2	16.2	11	6.9	2	16.2	3	13.2	1	22.9	1	22.9	6	9.3
2,000	3	15.2	12	7.6	2	18.7	4	13.2	1	26.4	2	18.7	7	10.0
2,500	3	17.0	13	8.2	3	17.0	5	13.2	1	29.5	2	20.9	8	10.4
3,000	4	16.2	14	8.6	3	18.7	6	13.2	1	32.3	2	22.9	9	10.8
3,500	4	17.5	15	9.0	4	17.5	7	13.2	1	34.9	3	20.2	10	11.0
4,000	5	16.7	16	9.3	4	18.7	8	13.2	1	37.3	3	21.5	11	11.3
4,500	5	17.7	17	9.6	5	17.7	9	13.2	1	39.6	3	22.9	12	11.4
5,000	6	17.0	18	9.8	5	18.7	10	13.2	1	41.7	4	20.9	13	11.6
5,500	6	17.9	19	10.0	6	17.9	11	13.2	1	43.8	4	21.9	14	11.7
6,000	7	17.3	20	10.2	6	18.7	12	13.2	1	45.7	4	22.9	15	11.8
6,500	7	18.0	21	10.4	7	18.0	13	13.2	1	47.6	5	21.3	16	11.9
7,000	8	17.5	22	10.5	7	18.7	14	13.2	1	49.4	5	22.1	17	12.0
7,500	8	18.1	23	10.7	8	18.1	15	13.2	1	51.1	5	22.9	18	12.0
8,000	9	17.6	24	10.8	8	18.7	16	13.2	1	52.8	6	21.5	19	12.1
8,500	9	18.1	25	10.9	9	18.1	17	13.2	1	54.4	6	22.2	19	12.5
9,000	10	17.7	26	11.0	9	18.7	18	13.2	1	56.0	6	22.9	20	12.5
10,000	11	17.8	28	11.1	10	18.7	20	13.2	2	41.7	7	22.3	21	12.9
20,000	21	18.2	48	12.0	15	21.5	30	15.2	3	48.2	14	22.3	30	15.2
30,000	31	18.4	68	12.4	20	22.9	40	16.2	4	51.1	20	22.9	40	16.2
40,000	41	18.4	88	12.6	25	23.6	50	16.7	5	52.8	27	22.7	50	16.7
50,000	51	18.5	108	12.7	30	24.1	60	17.0	6	53.9	34	22.6		
60,000	61	18.5	128	12.8	35	24.4	70	17.3	7	54.6	40	22.9		
70,000	71	18.5	148	12.8	40	24.7	80	17.5	8	55.2	47	22.8		
80,000	81	18.5	168	12.9	45	24.9	90	17.6	9	55.6	54	22.7		
90,000	91	18.6	188	12.9	50	25.0	100	17.7	10	56.0	60	22.9		
100,000	101	18.6	208	12.9	55	25.2	110	17.8	11	56.3	67	22.8		
110,000	111	18.6	228	13.0	60	25.3	120	17.9	11	59.0	74	22.7		
120,000	121	18.6	248	13.0	65	25.4	130	17.9	11	61.6	80	22.9		
130,000	131	18.6	268	13.0	70	25.4	140	18.0	11	64.1	87	22.8		
140,000	141	18.6	288	13.0	75	25.5	150	18.0	11	66.6	94	22.8		

표 3-7 실제사례 면적 당 시료 개수 및 오염의심지역반경

A(m <sup>2</sup> )		실제사례		토양정밀조사지침												토양환경 평가지침			
				기타지역				폐기물지역				광산활동지역							
		개황		정밀		개황		정밀		개황		정밀		개황		정밀		n	R(m)
n	R(m)	n	R(m)	n	R(m)	n	R(m)	n	R(m)	n	R(m)	n	R(m)	n	R(m)	n	R(m)		
1,000	캠 프 O2	17	4.5	21	4.1	2	13.2	10	5.9	1	18.7	2	13.2	1	18.7	1	18.7	6	7.6
1,500		17	4.5	30	4.2	2	16.2	11	6.9	2	16.2	3	13.2	1	22.9	1	22.9	6	9.3
2,500		23	6.2	23	6.2	3	17.0	13	8.2	3	17.0	5	13.2	1	29.5	2	20.9	8	10.4
2,000	캠 프 O3	15	6.8	29	4.9	3	15.2	12	7.6	2	18.7	4	13.2	1	26.4	2	18.7	7	10.0
2,500		17	7.2	39	4.7	3	17.0	13	8.2	3	17.0	5	13.2	1	29.5	2	20.9	8	10.4
3,000		20	7.2	6.3	6.3	4	16.2	14	8.6	3	18.7	6	13.2	1	32.3	2	22.9	9	10.8
4,000		29	6.9	40	5.9	5	16.7	16	9.3	4	18.7	8	13.2	1	37.3	3	21.5	11	11.3
5,000		36	7.0	44	6.3	6	17.0	18	9.8	5	18.7	10	13.2	1	41.7	4	20.9	13	11.6
10,000	캠 프 O1	19	19.1	39	13.4	111	17.8	28	11.1	10	18.7	20	13.2	2	41.7	7	22.3	21	12.9
20,000		6	41.7	12	29.5	21	18.2	48	12.0	15	21.5	30	15.2	3	48.2	14	22.3	30	15.2
30,000		22	25.2	42	18.2	31	18.4	68	12.4	20	22.9	40	16.2	4	51.1	20	22.9	40	16.2
40,000		13	36.6	14	35.3	41	18.4	88	12.6	25	23.6	50	16.7	5	52.8	27	22.7	50	16.7

\* n= 시료 개수, R= 오염의심지역반경

비고) ‘토양환경평가지침’과 ‘토양정화 검증방법에 관한 고시’의 시료채취 면적 당 지점 수는 같은 기준을 적용한다. 이는 New South Wales EPA-CONTAMINATED SITES ‘Sampling Design Guidelines’의 부지검증에 필요한 최소 시료 개수와도 같다.

## 2.8 조사 면적별 오염반경 변화에 따른 채취 필요 시료 수 검토

다음은 앞의 통계 이론에 따라 조사 면적(A)이 변할 경우 확인하고자 하는 오염 반경에 따라 채취가 필요한 시료의 수가 어떻게 변하는지에 대하여 검토하였다. 확인하고자 하는 오염반경이 작을수록 필요한 시료 채취 개수는 급격하게 늘어나므로 시료채취 개수와 확인 가능한 오염반경 모두를 고려하여 적절한 시료 채취 개수를 정하는 것도 시료 채취 개수 결정을 위한 방법이 될 수 있을 것이다. 토양정밀조사지침 제1장 2. 적용범위 나 항의 “조사대상지역의 오염상황, 오염면적에 따라 필요한 경우 대상지역, 대상 시료의 선정 및 시료채취밀도 등을 토양관련전문기관이 조정할 수 있다.”에 따라 추가적인 시료채취 시 아래 <표 3-8> 면적에 따라 확인 가능한 오염반경에 필요한 시료 수를 참고하여 시료채취밀도를 조정하는데 참고자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

표 3-8 면적에 따라 확인 가능한 오염반경에 필요한 시료 수

면적(m <sup>2</sup> )	R	n	면적(m <sup>2</sup> )	R	n	면적(m <sup>2</sup> )	R	n	면적(m <sup>2</sup> )	R	n	면적(m <sup>2</sup> )	R	n
500	1	174.1	1000	1	348.1	2000	1	696.2	3000	1	1044.3	5000	1	1740.5
	2	43.5		2	87.0		2	174.1		2	261.1		2	435.1
	3	19.3		3	38.7		3	77.4		3	116.0		3	193.4
	4	10.9		4	21.8		4	43.5		4	65.3		4	108.8
	5	7.0		5	13.9		5	27.8		5	41.8		5	69.6
	6	4.8		6	9.7		6	19.3		6	29.0		6	48.3
	7	3.6		7	7.1		7	14.2		7	21.3		7	35.5
	8	2.7		8	5.4		8	10.9		8	16.3		8	27.2
	9	2.1		9	4.3		9	8.6		9	12.9		9	21.5
	10	1.7		10	3.5		10	7.0		10	10.4		10	17.4
	11	1.4		11	2.9		11	5.8		11	8.6		11	14.4
	12	1.2		12	2.4		12	4.8		12	7.3		12	12.1
	13	1.0		13	2.1		13	4.1		13	6.2		13	10.3
	14	-		14	1.8		14	3.6		14	5.3		14	8.9
	15	-		15	1.5		15	3.1		15	4.6		15	7.7
	16	-		16	1.4		16	2.7		16	4.1		16	6.8
	17	-		17	1.2		17	2.4		17	3.6		17	6.0
	18	-		18	1.1		18	2.1		18	3.2		18	5.4
	19	-		19	1.0		19	1.9		19	2.9		19	4.8
	20	-		20	-		20	1.7		20	2.6		20	4.4
7000	1	2436.7	9000	2	783.2	10000	2	870.3	20000	2	1740.5	40000	1	13924.0
	2	609.2		4	195.8		4	217.6		4	435.1		5	557.0
	3	270.7		6	87.0		6	96.7		6	193.4		10	139.2
	4	152.3		8	49.0		8	54.4		8	108.8		13	82.4
	5	97.5		10	31.3		10	34.8		10	69.6		15	61.9
	6	67.7		12	21.8		12	24.2		12	48.3		20	34.8
	7	49.7		14	16.0		14	17.8		14	35.5		23	26.3
	8	38.1		16	12.2		16	13.6		16	27.2		25	22.3
	9	30.1		18	9.7		18	10.7		18	21.5		30	15.5
	10	24.4		20	7.8		20	8.7		20	17.4		33	12.8
	11	20.1		22	6.5		22	7.2		22	14.4		35	11.4
	12	16.9		24	5.4		24	6.0		24	12.1		40	8.7
	13	14.4		26	4.6		26	5.1		26	10.3		43	7.5
	14	12.4		28	4.0		28	4.4		28	8.9		45	6.9
	15	10.8		30	3.5		30	3.9		30	7.7		50	5.6
	16	9.5		32	3.1		32	3.4		32	6.8		53	5.0
	17	8.4		34	2.7		34	3.0		34	6.0		55	4.6
	18	7.5		36	2.4		36	2.7		36	5.4		60	3.9
	19	6.7		38	2.2		38	2.4		38	4.8		65	3.3
	20	6.1		40	2.0		40	2.2		40	4.4		70	2.8
60000	1	2086.0	80000	1	2784.0	100000	1	3481.0	120000	1	4177.0	140000	1	4873.0
	5	835.4		5	1113.9		5	1392.4		5	1670.9		5	1949.4
	10	208.9		10	278.5		10	348.1		10	417.7		10	487.3
	13	123.6		13	164.8		13	206.0		13	247.2		13	288.4
	15	92.8		15	123.8		15	154.7		15	185.7		15	216.6
	20	52.2		20	69.6		20	87.0		20	104.4		20	121.8
	23	39.5		23	52.6		23	65.8		23	79.0		23	92.1
	25	33.4		25	44.6		25	55.7		25	66.8		25	78.0
	30	23.2		30	30.9		30	38.7		30	46.4		30	54.1
	33	19.2		33	25.6		33	32.0		33	38.4		33	44.8
	35	17.0		35	22.7		35	28.4		35	34.1		35	39.8
	40	13.1		40	17.4		40	21.8		40	26.1		40	30.5
	43	11.3		43	15.1		43	18.8		43	22.6		43	26.4
	45	10.3		45	13.8		45	17.2		45	20.6		45	24.1
	50	8.4		50	11.1		50	13.9		50	16.7		50	19.5
	53	7.4		53	9.9		53	12.4		53	14.9		53	17.3
	55	6.9		55	9.2		55	11.5		55	13.8		55	16.1
60	5.8	60	7.7	60	9.7	60	11.6	60	13.5					
65	4.9	65	6.6	65	8.2	65	9.9	65	11.5					
70	4.3	70	5.7	70	7.1	70	8.5	70	9.9					

\* R= 오염의심지역반경, n= 시료 개수

### 3. 외국의 통계적 시료채취 프로그램

미국 등 선진국 일부에서는 토양 및 지하수 등 환경에 대한 신뢰도 있는 의사결정을 위해 DQO Process (미 EPA)와 같은 체계적인 계획절차를 이용하여 대상목적을 명확히 하고 목적에 적합한 충분한 data를 생성하고 있으며, 통계적인 방법을 이용한 적절한 시료채취 개수와 위치를 선택할 수 있도록 다양한 프로그램을 지원하고 있다. DQO Process는 상당히 합리적이고 체계적인 절차를 가지고 있으나 우리나라 실정에서 바로 이와 같은 접근방식으로 전환하기 위해서는 전반적인 조사체계를 개정해야하는 어려움이 있어 지침에 직접적인 적용보다는 내용을 소개하는데 의의를 두고, 대신 내용에 대해서는 단계별로 자세히 소개하여 향후 새로운 방식의 토양지하수오염조사체계로 전환 시 이를 참고할 수 있도록 하였다. 이와 관련하여 DQO Process의 내용 소개와 미국에서 주로 사용되고 있는 통계적 시료채취 설계 software의 종류와 내용을 살펴보고자 한다.

#### 3.1 DQO Process

미국이나 캐나다 등은 환경 분석과 관련하여 시료채취계획을 수립할 때에 미국 EPA에서 제안한 DQO Process를 반영한 가이드라인(Guidance for the data quality objective process, EPA 2006a) 또는 매뉴얼 등을 사용하고 있다. DQO Process는 의사결정을 위한 수행과 허용 기준을 명확하게 해주고 사용목적에 맞는 충분한 data를 생성시킬 수 있는 체계적인 계획 절차이며 의사결정 오류를 관리할 수 있는 효과적인 도구라 할 수 있다. DQO Process는 <그림 3-10>과 같이 7단계로 구성되어 있다. 7단계 DQO 과정이 시료채취방법, 시료 개수, 수행할 분석과 분석수행요건 등을 파악하는데 사용된다.



그림 3-10 EPA DQO Process

DQO 프로세스는 수행 및 허용이 가능한 범위(또는 Data quality objectives)를 발전시키기 위하여 사용되는데, 이는 연구 목적을 명확히 하고, 필요한 데이터의 적절한 형태를 정의하며, 환경적 결정을 지지하기 위해 필요한 정량 및 정성 데이터를 수립하기 위한 기초로 사용되는 잠재적 의사결정 허용오차(Potential decision errors)를 명확히 하고자 함이다.

### 3.1.1 시료채취 프로그램 설계 시 일반적 고려사항

환경적인 연구에서 시료채취 프로그램을 설계할 때에는, 목적은 전체 연구를 완성할 수 있도록 모든 결정들을 해결하기 위해 충분한 양질의 자료를 수집해야 한다.

잠재적 비용이 현장 시료채취 팀의 동원 및 동원해제와 함께 발생되기 때문에, 한 가지 동원에 의해 모든 필요한 환경적 조사들이 수행되도록 노력을 기울여야 한다.

### 3.1.2 DQO 실행 절차

7단계 EPA DQO 절차를 실행하기 전, 많은 준비 단계가 먼저 수행되어야 한다. 이러한 단계들은 프로젝트 계획 회의 개최, 철저한 scoping 노력 수행, 의사결정 과정에 참여하는 규제기관들과의 인터뷰 실시, 규제기관에 의해 명시된 조건의 불일치 및 두 개 또는 그 이상의 규제기관들 사이의 의견 불일치를 해결하기 위한 국제 주제 회의 개최를 포함한다.

#### 1) 계획회의(Planning meeting)

프로젝트 관리자는 비슷한 범주의 프로젝트를 수행한 경험이 있는 한 명 또는 더 많은 기술적 고문자들과 함께 회의 계획을 수립 및 수행해야 한다. 이 회의의 목적은 프로젝트 계획, 예산, 소요인력(계획 팀) 및 이 프로젝트에 참여될 규제기관, 그리고 예상되는 조달 물품들을 확인하고자 함이다.

#### 2) 범위조사(Scoping)

시료채취 프로그램 설계의 필수 요소는 범위이다. 범위조사는 모든 적용할만한 역사적 문서, 기록, 자료, 지도, 다이어그램, 그리고 프로세스 적용에 관련된 사진, 폐기처분, 사전 환경적 조사 등을 포함한다. 범위조사 절차로부터의 결과들은 다음과 같은 DQO 프로세스의 1 단계에 사용된다.

- 관심오염물질(COCs; Contaminants Of Concern)의 확인
- 구상한 현장 모델의 개발
- 문제의 명확한 묘사 개발

### 3) 규제기관 인터뷰

DQO 절차의 시작에 앞서, 프로젝트 매니저는 프로젝트에 참여될 대표들의 이름을 명확히 하기 위하여 연방, 주, 지역의 규제기관과 접촉해야 한다. 이런 기관의 대표들이 명확해지면, 1~2시간 정도의 인터뷰가 각 기관 개별적으로 계획되어야 한다. 인터뷰의 목표는 모든 핵심 이슈와 DQO 절차에 언급되어야 할 문제를 명확히 하기 위함이다.

### 4) 국제 이슈 회의

국제 이슈 회의는 당신이 규제기관에 의해 명확화 된 필요조건들에 동의하지 않거나, 다른 규제기관의 필요조건이 다른 기관의 필요조건과 모순될 때 개최된다. 예를 들면, EPA는 CERCLA 법 절차 하에 보완조사가 필요할지도 모르나, 주 규제기관은 RCRA법 절차 하에 보완조사가 필요할지도 모른다. 이러한 회의는 프로젝트 매니저, 핵심 기술 프로젝트 직원, 의견 반대와 관련된 규제기관이 참석한다. 국제 이슈 회의의 결론에서 이루어진 모든 동의는 문서 기록으로 이루어진 기록물로 문서화되어야 한다.

### 5) 7단계 DQO 프로세스

7단계 DQO 프로세스는 자료수집활동을 준비하기 위해 EPA(EPA, 2006a)가 개발한 전략적 계획 접근방식이다. 이 프로세스는 자료 수집 설계가 언제/어디/어떻게, 샘플/방법들을 수집하는 것을 포함하고, 결정오류의 허용한계와 얼마나 많은 샘플/방법들을 수집할 것인가에 대한 범위를 규정하는 시스템적인 절차를 제공한다. DQO 프로세스의 장점 중 하나는 데이터 사용자와 연관된 기술자가 데이터 수집 계획 프로세스에 참여할 수 있다는 것인데, 데이터 수집 전에 데이터 필요량과 요구되는 데이터 질을 명확히 할 수 있다. DQO 프로세스는 잘못된 결론에 이르는 것을 고려하고 허용한계를 제공함으로써 데이터의 목적된 사용을 적절하게 수행하게 하고, 데이터 질을 정의하는 방법을 제공한다.

#### (1) 1단계 : 문제의 언급(state the problem)

- 목표 : DQO 1단계의 목표는 해결되어야 할 문제를 정의하는 것이다. 문제는 이해하기 쉽도록 언급되어야 한다.
- 활동
  - 프로젝트를 지지하는데 필요한 계획 팀(스태프 자원)의 멤버를 명확히 한다.
  - 의사결정자를 명확히 한다.(예 : 규제기관 대표)
  - 프로젝트와 연관된 마감일과 프로젝트 예산 통제를 명확히 한다.
  - 프로젝트에 영향을 미칠 수 있는 다른 통제사항을 명확히 한다.(예 : 직원 능력)

- 계획, 데이터 수집, 데이터 평가의 마감일을 명확히 한다.
- 문제 오염물질을 명확히 한다.
- 오염의 원인을 명확히 하고, 오염물질 이동 매커니즘, 오염물질 이동경로, 노출 경로, 잠재적 수용자들을 명확히 할 개념적 현장모델을 개발한다.
- 문제의 상세한 묘사를 전개한다.

### ① 배경

해결해야 할 문제를 명확히 하는 과정에서, 관리자와 과학적 활동의 조화가 이루어져야 한다. 관리자의 활동은 계획 팀의 멤버들을 명확히 하는 것을 포함한다.; 핵심적 의사결정자(예: 규제기관 대표자); 프로젝트의 다양한 양상을 지지하는 필요한 스테프 자원 목록; 예산과 프로젝트에 영향을 미칠 수 있는 다른 제약사항; 프로젝트를 계획하고, 자료를 수집하며, 자료를 평가하는데 연관된 마감시간 등. 과학적 활동은 문제시되는 오염물질을 명확히 하고, 개념적 현장 모델을 개발하고, 상세한 문제의 언급을 진행하는 것을 포함한다.

### ② 계획 팀(Planning team) 멤버의 명확화

프로젝트 매니저는 계획 회의의 계획 팀 멤버를 명확히 해야 한다. 계획 팀은 전체 프로젝트에서 현장 배경, 위험성 평가, 보충 대안 평가, 처리할 수 있는 시험(treatability testing), 보조설계 등을 처리하는 광범위한 기술적 배경지식을 가진 기술직원들로 구성되어야 한다. 그렇게 함으로서, 미래의 모든 프로젝트 관련 자료요구는 한 번에 고려될 것이다. 한 번의 현장 동원 아래 전체 자료 세트가 수집되도록 해야 하는데, 이로써 프로젝트 예산을 상당히 절약할 수 있기 때문이다.

멤버들에게 요구되는 기술적 배경지식은 프로젝트의 범위에 따라 다양하지만 종종 다음을 포함한다.

- 환경과학
- 환경 기술자
- 보조 설계
- 화학
- 방사화학
- 수문(수리) 지질학
- 지하수/ 지표수/ 대기 모델링
- 위험성 평가

- 통계학
- QA
- 폐기물 관리
- 규제순응도

### ③ 핵심적 의사결정자 명확화

프로젝트 매니저는 프로젝트 감독을 책임질 수 있는 규제기관을 계획 회의에서 명확히 해야 한다. 이러한 기관들은 연구에 권한이 있고, 계획 팀의 권고에 근거해 최종결정을 내릴 수 있는 책임이 있기 때문에 그들은 핵심적 의사 결정자로 언급된다.

### ④ 프로젝트 예산 제약사항 및 마감기한

프로젝트 매니저는 계획팀 내에서 예산 제약사항 및 연관된 마감기한을 명확히 해야 한다. 프로젝트 예산은 다음을 포함한다.

- DQO 프로세스 실행
- DQO 요약 보고서 준비
- 시료채취 및 분석 계획 준비
- 훈련 및 시료채취 활동 실행
- 시험실 분석 수행
- 자료증명 및 확인
- DATA Q/A 수행
- 결과자료 평가
- 결과요약보고서 준비

연구의 완성을 위한 모든 마감기한을 명확히 하는 것은, 프로젝트 매니저가 일에서 우선순위를 매기는 것을 돕는다.

### ⑤ 프로젝트에 영향을 미칠 수 있는 다른 제약사항 명확화

프로젝트 예산/스케줄에 잠재적으로 영향을 미칠 수 있는 모든 제약사항을 명확히 하도록 프로젝트 매니저가 계획 팀과 상담하는 것은 매우 중요하다. 몇 가지 제약사항은 다음과 같다.

- 직원 능력
- 훈련 가능성

- 높은 오염수준에 직면할 가능성
- 잠재적인 심각한 기후 상황
- 잠재적인 샘플 회복의 문제점
- 고고학적 물건과 대면할 잠재적인 가능성

#### ⑥ 관련 오염물질의 명확화

역사적 현장 기록/문서 및 범위조사 절차의 일부분으로 수행된 현장 인터뷰의 철저한 검토에 근거해, 잠재적 관심오염물질의 목록(COPCs; Contaminants of potential concern)이 명확화 된다. 이 COPCs 목록은 종종 수백 개의 조합들로 구성되어 진다. 이 목록은 다음과 같은 조합들을 제거함으로써 크기를 줄일 수 있다.

- 비발암성 및 비독성
- 단순히 분석적 방법에 의해 스크린 되었으나, 검출한계 밑으로 검출되지 않은 조합
- 검출한계 이상의 농도이지만, 아주 잠깐 보고되었을 때

(예: 잘못된 - 가 양성 결과값)

- 시험실에 의한 오염물질로 알려졌을 때(예 : 시험실 blank 샘플 또한 검출되었을 때)
- 위험성이 없는 매우 적은 양으로 사용되었음을 알았을 때
- 배경농도 이하의 농도로 검출되었을 때
- 반감기가 2년 이하인 방사성 물질

이 줄여진 조합 목록의 항목은 COCs(관심오염물질)로 언급되며, 이는 DQO 단계의 나머지를 통해 다루어진다.

#### ⑦ 개념부지모델 개발

개념적 현장 모델은 계획 팀이 현장 조건에 관해 현재 무엇을 이해하고, 어디서부터 상당한 자료 차이들이 있을지에 대한 이해를 돕는 것을 목표로 준비된다. 개념적 현장 모델은 오염물질 원천, 오염물질 이동 기작, 오염물질 이동경로, 노출경로, 잠재적 수용자들을 명확히 하도록 문서 또는 도표 형태로 준비될 수 있다.

#### ⑧ 문제의 상세한 묘사 전개

일단 개념부지모델이 설정되었으면, DQO 1단계의 마지막 활동은 현재까지 이해하고 있는 문제를 상세하게 묘사한다. 반드시 다음과 같은 형식을 사용해 문제의 묘사를 준비하도록 고려해야 한다.

[이 연구의 몇몇 이슈 또는 목표]를 [결정/달성/지지/이해/설립/확인/예방]하기 위하여 [오염물질 배분/ 특징/물리화학적, 생물학적 변수]와 관련된 데이터가 필요하다. (의도된 목표를 위한)

#### ⑨ DQO 1단계 결과

이 단계 실행된 결과로부터의 주요 산출물은 다음을 포함한다.

- 계획팀 멤버들 목록
- 핵심적인 의사 결정자 목록
- 연구하는 동안 필요한 스태프 채용의 목록
- 프로젝트 예산과 다른 제한요인의 요약(예:스태프 능력)
- 계획, 데이터 수집, 데이터 평가를 위한 적절한 마감기한
- 개념적 현장 모델(Conceptual site model)
- 상세한 문제의 묘사

#### (2) 2단계 : 연구 목적의 명확화

- 목 적 : DQO 2단계의 목적은 DQO 1단계에서 명확하게 된 문제를 해결하기 위해 언급된 의사결정 내역(의사결정 내역)을 개발시키기 위함이다.
- 활 동 :
  - 해결해야 할 주요 연구 질문(Principal study questions ;이하 PSQs)을 명확히 함
  - 각 PSQs 의 대답에 근거해 다루어질 대안 조치들을 정의
  - PSQs 와 조치들을 결정 내역에 포함
  - 결정내역을 순서 또는 우선순위로 정리

#### ① 배경

DQO 2단계는 이러한 질문의 대답에 근거해 발생하는 결과 또는 대안 조치과 함께 언급하려는 주요 연구 질문(핵심질문)들을 명확히 하는 것을 포함한다. 그 다음 PSQs 와 대안 조치들은 의사결정 내역으로 조합된다.

#### ② 주요 연구 질문들의 명확화

DQO 2단계에서 행해져야 할 첫 번째 활동은 DQO 1단계에서 확인된 문제를 풀기 위해 필요한 중요한 모든 연구 질문들을 명확히 하는 것이다. PSQs 는 알려지지 않은 핵심 조

건 또는 문제를 다루는데 해결해야 할 미해결된 이슈들을 명확히 하는 것이다. 대답해야 할 환경 자료에 필요한 질문들은 PSQs 에 포함되어야 한다. 예를 들어 “토양샘플을 수집하기 위해 split-spoon 또는 solid-tube sampler가 사용되어야 하는가?” 와 같은 질문은 DQO 단계에 포함되어서는 안 되는데, 이 결정은 경험에 근거해 이루어져야 하고, 대답할 분석적 데이터가 없기 때문이다. PSQs 에 대한 대답은 문제를 해결하기 위해 조치 단계에서 무엇을 다루어야 하는가를 결정하는데 근거를 제공할 것이다.

### ③ 대안조치 정의

각각의 확인된 PSQs를 통해 계획팀은 가능한 2개 이상의 조치들을 제시해야 하며, 이러한 대안조치는 PSQs가 해결된 이후에 다루어진다. 대안조치들 중 하나는 행해지지 않을 수도 있다.

대안조치들이 명확해졌다면, 의도하지 않게 잘못된 조치의 결과로 결정오류가 발생했는지 상황의 질적인 평가를 수행한다. 다시 말하면, 어떤 사람이 토양 개선 조치를 실시했으나, 대안 조치는 실행되지 않았다면, 이 오류의 잠재적 결론은 무엇이겠는가? 이 평가를 내릴 때에는, 미래에 현장이 어떻게 사용될지 결정해야 한다. (산업, 주거, 농장)

다음의 용어를 사용해 중요성을 표현한다.

- Low
- Moderate
- Severe

중요성을 평가할 때, 다음을 고려한다.

- 사람 건강
- 생태적 건강(식물상/동물상)
- 정치적 상황
- 경제적 상황
- 법적인 상황

이 중요성 평가의 결과는 통계적 또는 비통계적 시료채취 설계중의 선택을 돕기 위해 DQO 프로세스 이후에 사용된다.

### ④ 의사결정 내역 개발(Develop 의사결정 내역)

의사결정내역(의사결정 내역;DS)은 상응하는 대안 조치들과 함께 주요 연구 질문과 연계되어 진행된다. 의사결정내역들을 진술할 때 다음과 같은 서식이 사용된다.

- [PSQ1]을 결정하면 [Alternative action A; 대안조치 A]가 필요하고, 아니면 [Alternative action B; 대안조치 B]를 수행한다.

#### ⑤ 의사결정 내역 조합

모든 의사결정 내역이 명확해지면, 적절한 순서나 우선순위에 근거해 정리되어야 한다. 예를 들어, [② 주요연구 질문들의 명확화]에서, PSQ 2와 관련된 의사결정 내역은 PSQ 3과 관련된 의사결정 내역 전에 준비되어야 한다. 이것은 만약 우려되는 오염물질이 아직 지하수로 이동하지 않았다면, PSQ 3은 적용될 수 없기 때문이다. 우선순위에 근거해 의사결정 내역을 정리하는 것은 예산이 목표로 하는 모든 현장 일을 한꺼번에 수행하는 능력에 영향을 미칠 때 유용하다. 이 경우에는, 가장 높은 우선순위의 의사결정이라고 다루어진 시료채취에 대해 먼저 예산지원을 받을 수 있다. 반면에, 더 낮은 우선순위의 결정들의 시료채취는 더 늦은 시기에 예산지원이 이루어진다.

#### ⑥ DQO 2단계 산출물

이 단계의 실행으로부터의 중요한 결과물은 다음을 포함한다.

- 대답해야 할 PSQs(주요 연구 질문들) 목록
- 각각의 PSQs 대답에 근거해 이루어질 대안 조치들 목록
- PSQs 에 의해 개발된 결정 목록 및 상응하는 대응 조치

#### (3) 3단계 ; 입력 정보의 명확화

- 목 적 : DQO 3단계의 목적은 DQO 2단계에서 확인된 각각의 결정 목록들을 해결할 필요한 데이터의 형태를 명확히 하고, 이런 결정들을 해결하는데 사용할 적절한 양질의 존재하는 자료를 결정하는 것이다.
- 활 동 :
  - 확인된 DQO 2단계 결정 진술들을 다루는데 필요한 데이터를 명확히 한다.
  - 잠재적 데이터 출처를 명확히 한다.
  - 각각의 COCs 의 조치 단계를 정의한다.
  - 자료로 필요한 품질수준을 결정한다.
  - 존재하는 데이터의 적절성을 평가한다.
  - 필요한 자료를 제공하기 위해 현재의 시료채취와 분석 방법이 적절한 지 확인한다.

### ① 결정 목록을 언급하는데 필요한 데이터의 명확화

일반적으로, DQO 2단계에서 확인된 모든 결정 목록은 환경측정 또는 과학문헌에서 해결가능하다. 환경조사를 지지하는데 가장 일반적으로 요구되는 자료는 다양한 미디어 형태의 물리화학적 특성(properties)을 포함한다. 비록 모델링이 결정짓기 위해서 사용될 수 있을지라도, 모든 모델은 운영하기 위한 입력 데이터를 필요로 한다.

### ② 잠재적 데이터 출처의 명확화

①에서 확인된 각 자료의 필요성을 언급할 수도 있는 모든 잠재적인 데이터를 목록화 하고 명확히 하는 것은 매우 중요하다.

- 새로운 데이터 수집 활동
- 이전의 데이터 수집 활동
- 역사적 기록
- 과학적 문헌
- 규제 지침
- 전문적인 판단
- 모델링

### ③ 각 관심오염물질의 조치단계 규정

각 결정 목록을 해결하기 위해 필요한 자료의 질적 수준을 정의하기 전에 먼저 각각의 COCs 에 대한 조치단계가 무엇인지 정의해야 한다. 조치단계를 아는 것은 수집해야 할 새로운 자료의 검출한계를 설정하는데 필수적이며, 존재하는 데이터의 검출한계가 데이터 품질의 필요조건을 만족하는지 결정할 때 필요하다. 지하수와 지표수에서는 이러한 조치 단계들이 음용수 목표기준(예:Maximum contaminant levels(MCLS))이다. 토양과 퇴적물에서는 이러한 Action level 들이 전형적으로 위해성평가에 근거하거나 배경농도와 비교하여 계산된다.

### ④ 요구된 자료의 질적 수준 결정

각각 결정된 목록의 해결을 위한 자료의 질적 수준을 결정할 때에는, 잘못된 대안조치가 선택 및 실행되었을 때의 사람건강, 생태학적, 정치적, 비용, 법적 영향 등을 고려해야 한다.

우연히 잘못된 대안조치가 실행되었지만, 잠재적으로 사람 건강이나 생태적 영향이 없거나 매우 작을 때에는 조금 더 경제적인 분석방법(예 : Field screening, On-site laboratory measurements)이 요구될 것이다.

구체적인 분석방법과 분석 수행시 요구사항(예 : 검출한계, 상세한 조건)은 정도관리 요구사항과 함께 다음의 DQO 프로세스에서 구체화 된다.

#### ⑤ 존재하는 데이터의 적절성 평가

존재하는 데이터 세트가 하나 또는 그 이상의 의사결정 내역을 해결하기 위한 적절한 품질인지를 결정하기 위하여, 라)에 명시된 Data quality requirements 에 동반되는 Laboratory quality control data 로부터의 결과와 검출한계를 비교해야 한다. Laboratory quality control data 는 다음의 분석결과를 포함해야 한다.

- Spike samples
- Duplicate samples
- Blank samples

Spike 와 Duplicate 샘플의 결과들은 각각 분석 Methods 의 정확성과 정밀성을 추정하는데 사용된다. Blank 샘플은 기기가 이전 샘플의 분석으로부터 오염되지 않았음을 점검하기 위해 분석된다.

존재하는 데이터의 적절함을 평가할 때, 다음 또한 고려해야 한다.

- 기기 검출한계
- 시료 추출(Collected) 형태(예:Grab, Composite, Integrated)
- 시료 수집 설계(예:Random, Systematic, 판단적)

충분히 낮은 검출한계가 아니거나, 대표성이 없는 낮은 질의 데이터는 제거한다.

#### ⑥ 존재하는 시료채취와 분석 방법의 적절성 확인

필요한 새로운 분석 방법을 위해서는 잠재적으로 적절한 시료채취 및 분석 Methods 의 포괄적 목록을 구상한다.

#### ⑦ DQO 3단계의 산출물

이번 단계의 실행 결과의 주요 산출물은 다음을 포함한다.

- DQO 2단계에 명시된 의사결정 내역 를 해결하기 위해 필요한 환경자료 유형의 요약
- 필요한 데이터의 모든 잠재적인 출처의 목록
- 각각의 COCs 를 위한 조치 단계의 목록
- 필요한 데이터를 위한 Data quality 와 분석성능 요구사항
- 이미 존재하는 데이터가 적절한 양질의 데이터인지 아닌지의 결정
- 분석성능과 함께 수집될 필요가 있는 새로운 데이터의 목록

(4) 4단계 ; 연구의 범위 정의 (define the boundaries of the study)

- 목 적 : DQO 4단계의 목적은 시간 및 공간적으로 연구의 범위를 정의하는 것이다.
- 활 동
  - 관심 모집단 정의
  - 연구의 공간적 범위 정의
  - 연구의 시간적 범위 정의
  - 자료 수집에 가장 효과적일 때를 정의
  - 각각의 결정이 적용되는 시간 프레임 정의
  - 샘플/데이터 수집과 연관된 실질적인 제한사항 정의
  - 결정이나 추측이 이루어질 가장 작은 단위 명시

① 관심 모집단 정의

명확하지 않은 모집단에서 얻은 데이터로 결정을 내리는 것은 어렵다고 할 수 있다. “모집단”이란 용어는 연구 범위 내에서 잠재적 개인 시료채취 단위들의 총집합을 의미한다.

관심오염물질 농도 산정을 위해 모집단 전부를 채취하고 분석하는 것은 비용 제한적이기 때문에 모집단에 대한 통계적 시료채취가 이뤄진다.

② 연구의 공간적 범위 정의

확실한 좌표(예: 위도, 경도, 고도)나, 길이, 지역, 부피, 또는 법적 경계의 용어를 사용, 분명한 물리적 특성을 사용해 수집된 데이터는 전체 지질학적 구역을 정의해야한다.

Process history에 근거해 연구 지역을 연관된 동질의 환경적 특징을 가진 지층으로 나누는 것도 좋다. 누차 이 방식에 의거 현장을 나누는 것은 통계학적 시료채취 설계에서 수집해야 할 샘플의 수를 상당히 줄여줄 수 있다. 이것은 현장이 같은 Process history를 가진 지층으로 나누었을 때, 모집단에서 보다 적은 변동성을 지니기 때문이다.

### ③ 연구의 시간적 범위 정의

연구의 시간적 경계를 정의할 때, 목표하는 모집단의 대표성이 있는 자료를 수집하기 위해 각각의 결정이 적용되는 시간뿐 아니라 가장 효과적인 조건인 경우에 정의해야 한다.

#### ○ 조건이 자료수집에 가장 효과적일 때 정의

DQO 2단계에서 확인된 각각의 해결목록에 대해서, 목표하는 모집단의 대표적인 자료의 수집을 위해 가장 효과적인 조건일 때 결정하는 것이 중요하다.

### ④ 각각의 결정이 적용되는 시간 정의

DQO 2단계에서 확인된 의사결정 내역은 그것이 적용되는 특정한 시간을 가지고 있을 것이다. 큰 환경정화프로젝트와 연관된 많은 의사결정들에서 그 시간은 종종 7~10년 사이의 범위인데, 이것은 자연과 오염물질의 양을 정의하고, 사람과 생태적 모집단의 위험을 측정하며, 언급된 개선조치의 선택, 보충 설계 수행, 그리고 최종 조치를 실행하는데 필요한 평균 길이이다.

### ⑤ 시료/자료 수집에 연관된 실질적 제한요인 정의

자료 수집 설계의 전체적인 수행에 잠재적으로 방해가 될 수도 있는 제한사항이나 방해물을 명확화 한다. 이것은 시료채취 설계와 실행 스케줄 진행시 고려해야 한다. 이런 제한요인이나 방해물은 다음의 예를 포함한다.

- 시료채취가 불가능한 계절적 또는 기후적 조건
- 현장접근이나 알려진 고지에 입각한 동의의 불가능
- 사람, 시간, 장비의 획득불가
- 시료채취 지역에 접근을 방해할 수도 있는 빌딩 또는 다른 구조물의 존재
- 현장에 접근하기 위한 보안 해제 장비(Security clearance requirements)

### ⑥ 결정이 이루어질 가장 작은 단위의 명확화(의사결정의 규모)

“의사결정의 규모”는 계획 팀에 의해 정의되어야 한다. 이 용어는 데이터를 수집 및 분석하고, 결정을 내리기 위해 해석될 지역이나 공간의 가장 작은 단위를 말한다. 이것은 의사결정 오류를 제어하는데 도움을 주기 위해 정의하며, 이전에 논의된 시공간적 경계의 출현에 의해 정의된다.

### ⑦ DQO 4단계의 산출물

이 단계의 실행으로부터 나온 주요 산출물은 다음을 포함한다.

- 목표 모집단의 명확한 정의
- 연구의 시공간적 범위 정의
- 자료수집에 가장 효과적인 조건
- 각각의 결정에 적용되는 시간
- 자료 수집 설계의 전체적인 실행에 잠재적으로 방해가 될 수도 있는 제한요인(또는 방해물)의 목록

### (5) 5단계 : 분석적 접근방법의 개발(Develop the analytic approach)

- 목 적 : DQO 5단계의 목적은 관련 모수(예: 평균값, 중간값, 백분위수, 최대값)를 정의하고, 관련 모수를 이전 DQO 단계들의 산출물과 조합하는 것이다.
- 활 동
  - 우려되는 오염물질에 관한 추론을 만들기 위해 가장 적합하다고 고려되는 관련 모수를 정의
  - 관련된 모수, 조치 단계, 의사결정 규모, 대안 조치의 조합을 통해 DQO 2단계에서 확인된 각각의 의사결정 내역을 위한 의사결정 법칙 만들기

### ① 결정을 내리는데 사용된 관련 모수 정의

이 단계에서, 계획 팀은 DQO 2단계에서 확인된 의사결정 내역을 해결하기 위해 사용될 관련된 모수를 선택해야만 한다. 특히 Baseline risk 평가 수행 및 실행 가능한 연구와 관련된 EPA 지침서는 가장 적합한 관련 모수를 선택할 때에는 프로젝트 통계학자(전문가)와 상담해야 한다고 한다. 최종 선택 전에 고객과 규제 기관은 전문가의 상담을 받아야 한다.

현장을 구별하기 위해 가장 일반적으로 선택되는 모수는 "평균값"인데, 이는 평균값이 환경 오염물질에서 모델임의노출(Model random exposure)에서 종종 사용되기 때문이다. 또한 최대농도는 현장에서 가장 최악의 상황을 구별하기 위해 선택된다. 선택된 관련 모수는 DQO 7단계에서 설계 및 진행될 시료채취의 유형에 영향을 미칠 것이다. 예를 들어, 관련 모수가 "평균값"이라면 임의 또는 체계적 시료채취방법 접근이 선택되었지만 "최대값"이라면 판단적 시료채취방법 설계가 선택될 수도 있다.

“평균값” 모수는 모집단의 평균이다. “평균값” 모수 선택은 모집단의 평균을 조치단계와 비교할 수도 있다는 것이다. 이 모수는 장기간 만성적인 노출 이후에 암을 유발할 수 있는 화학물질에 적합하다. 오른쪽으로 길게 늘어진 치우친 분포(Long right tails)에서는 산술평균보다 기하평균이 더 관련이 있을 수도 있다. 값이 검출한계보다 크게 낮으면 유용하지 않을 수도 있다. (EPA 2006b)

“중앙값” 모수는 모집단의 중간을 말한다. “중앙값”은 매우 치우친(비대칭) 모집단에서 보다 개선된 중심 경향(Central tendency) 추정값을 제공하며, 모집단이 측정 검출 한계보다 낮은 많은 값들을 포함할 때 언급되기도 한다. “중앙값”은 모집단의 50%이상이 검출한계보다 낮으면 참 중앙값이 존재하지 않기 때문에 좋은 선택이 아니다. (EPA 2006b)

“백분위수”모수는 주어진 값 이하의 샘플 %를 나타낸다. 이 모수는 모집단의 일부분이 조치단계를 초과하는 것이 허용되는 유형에서 선택된다. 또한 화학물질이 극심한 건강 영향을 유발할 경우, 의사결정 규칙을 위해 종종 선택되며, 모집단의 큰 부분이 검출한계보다 낮은 값들을 포함할 때 유용하다.

## ② 의사결정 규칙 구상

관련 모수가 선택된 이후, 이 정보는 의사결정의 규모, 조치단계, 대안 조치들과 함께 조합된다. 의사결정 규칙은 다음의 일반적인 형태를 따라야 한다.

만약 [결정범위 내]의 [관련 모수]가 [조치단계]보다 더 크면, [대안조치 A]를 취하고, 그렇지 않으면 [대안조치 B]를 취한다.

## ③ DQO 5단계 산출물

이 단계의 실행으로부터 주요 산출물은 다음을 포함한다.

- 목표 모집단과 관련된 의사결정에 가장 적합한 관련 모수
- DQO 2단계에서 확인된 각각의 Decision statement를 위한 개별적 의사결정 규칙

## (6) 6단계 : 실행 또는 허용범위 명시(성능기준 또는 허용기준 지정)

- 목 적 : DQO 6단계의 목적은 통계적 설계사용에 다루어질 연구가설검정으로 의사결정 규칙을 명시하고, 의사결정오류(Decision errors)의 가능성을 허용한계에 두는 것이다. 비통계적 시료채취 설계는 DQO 7단계로 진행한다.
- 활 동
  - 통계적 vs 비통계적 시료채취 설계사용에 다루어질 의사결정 규칙 구분하기

- 판단적 설계사용에 다루어질 의사결정 규칙은, DQO 7단계로 진행한다.
- 통계적 접근 사용에 다루어질 의사결정 규칙은,
  - \* 통계적 가설검정으로 의사결정 규칙을 명시하고,
  - \* 각각의 통계학적 가설 실험으로부터 잘못된 의사결정의 결과를 검토하며,
  - \* 통계학적 가설 실험에서 잘못된 의사결정 오류의 가능성을 허용한계에 둔다.

#### ① 통계 및 비통계적 시료채취 설계 구분하기

DQO 6단계에서 수행될 첫 번째 활동은 판단적(비통계적) 설계(Field screening/surveying 을 활용할) 사용에 다루어질 의사결정내역을 통계적 시료채취 설계사용에 다루어 질 의사결정내역과 구분하는 것이다. 비록 EPA의 QA/G-4 DQO 지침서(EPA 2006)가 통계적 시료채취 설계에 집중한다 할지라도, 판단적 설계가 가장 적합한 여러 상황이 있다. 통계 및 판단적 설계를 선택할 때에 고려해야 할 여러 주요 사항은 다음을 포함한다.

- 결정오류를 범하는 것의 질적인 결과(Low/Moderate/Severe)
- 의사결정 내역이 적용되는 시간
- 재 시료채취가 필요한 경우 현장 또는 시설의 접근가능성

DQO process에서 이번 단계를 수행할 때는 통계전문가의 지도를 요청해야 한다.

#### ○ 의사결정 오류의 질적인 결과

의사결정 오류의 결과는 통계 및 판단적(비통계적) 시료채취 설계 선택 시 고려되어야 한다. 예를 들어, 화학적 또는 방사능성 오염물질 개선이 이루어진 환경부지에 어린이 탁아소가 건설될 예정이라면, 의사결정 오류(예: 실제적으로 부지가 여전히 오염되어 있으나, 깨끗하다고 결정내림)의 결과는 “Severe”이다. 어린이와 작업자들은 남아있는 오염물질에 노출되기 때문이다. 이 예에서, 통계적 시료채취 설계는 현장의 시료채취 완료 를 보장한다. 일반적으로 의사결정 오류의 결과가 “Moderate”에서 “Severe”일 때, 통계적 시료채취 설계는 종종 인정된다.

그러나 통계적 시료채취가 항상 적합하지는 않다. 예를 들어, 부지에서 사람 건강과 환경에 제기하는 최대위험을 결정할 필요가 있는 프로젝트도 많이 있다. 이 예에서, 최대 위험은 판단적 시료채취 설계사용 시 결정되기 때문에, 판단적 시료채취가 필요하다. 판단적 설계에서는 분석을 위해 어떤 시료를 수집할지에 대한 분쟁을 명확히 하기 위해 Field screening 형태를 사용할 수도 있다.

일반적으로, 의사결정 오류의 결과가 “Low”에서 “Moderate”일 때, 통계적 설계를 통해 (Selected over) 판단적 시료채취 설계가 선택된다.

○ 의사결정내역을 적용하는 시간

의사결정내역을 적용하는 시간은 통계적 설계 및 판단적 설계 선택 시 고려해야 한다. 의사결정 오류의 결과들은, 의사결정을 단기간 적용했을 때 보다 장기간인 경우에 더 심각하다. 더 장기간에 적용하는 결정들은 통계적 시료채취 설계의 선택을 선호한다. 예를 들어, 현장이 조치 단계(대중에게 공개될 수 있음) 이하로 복구되었는지에 대한 결정은 지속적으로 작용하고, 따라서 통계적 설계가 가장 적합한 것이다.

○ 재 시료채취가 필요한 경우 현장의 접근가능성

만약 현장이 단기간 동안만 시료채취를 허용한다면, 로버스트 통계적 시료채취 설계가 적당할 것이다.

② 비통계적(판단적) 접근 사용에 다루어질 의사결정 규칙

판단적 시료채취 접근 사용에 다루어질 이러한 의사결정 규칙은 DQO 7단계로 바로 진행된다.

③ 통계적 접근 사용에 다루어질 의사결정

통계적 시료채취 설계의 사용 목적은 의사결정 오류의 가능성을 허용할만한 수준으로 줄이는 것이다. DQO 6단계는 의사결정 오류의 가능성에 허용 한계를 규정하기 위해 규제기관에 방법(Mechanism)을 제공한다. 환경 산업(Environmental industry)에서 발생하는 가장 일반적인 의사결정 오류의 예는 다음을 포함한다.

- 오염부지에서 떠나기(Walking away from a dirty site)
- 비오염 부지 정화하기(Cleaning up a clean site)

두 개의 상황 중에서 오염부지에서 떠나는 것이 유발하는 의사결정 오류가 사람건강과 환경에 부정적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 더 심각하다. 비오염 부지를 정화하는 것의 의사결정 오류는 더 높은 개선비용을 초래한다.

시료채취 설계에서 의사결정 오류의 양을 제어하기 위해서는, 관련 모수로 가능한 농도 범위 정의, 결정오류의 형태, Gray region의 경계, 결정오류의 허용 한계를 정의하는 것이 필요하다. 이러한 범위는 수집을 위해 필요한 샘플 수를 결정하는 DQO 7단계에서 수행된 통계적 계산을 뒷받침하기 위해 필요하다. 이것은 다음 섹션에서 더 상세하게 논의된다.

○ 관련 모수의 가능 범위 결정

통계적 시료채취 설계에 근거해 설계하는 과정의 첫 단계는 각각의 우려되는 오염물질에 대한 통계적 관련 모수의 예상되는 농도범위를 결정하는 것이다. 통계적 관련 모수는 DQO 5단계에서 이미 선택된다. 통계적 관련 모수의 예상되는 범위(가장 낮은 것에서 높은 것까지의 값들; Lowest to highest values)는 역사적인(Historical) 분석 결과를 사용해 정의되어야 한다. 만약 사용가능한 역사적 자료가 없다면, 예상되는 범위를 추측하기 위해 단계적 지식(Process knowledge)이 사용되어야 한다.

○ 귀무가설<sup>㉑</sup> 선택하기

통계적 시료 설계에 근거해 설계하는 과정에서는 귀무가설 또는 현장의 기준 조건을 정의하는 것이 필요하다. 환경 부지에서 가능한 두 가지 귀무가설의 예는 다음과 같다.

- 깨끗한데 오염됐다고 판단되는 부지
- 오염됐는데 깨끗하다고 판단되는 부지

귀무가설을 선택할 때, 프로젝트가 궁극적으로 입증하길 원하는 것은 “반대;Opposite”라는 것을 명시해야 한다. 환경부지에서는 오염된 현장이 개선이 완료된 이후에 깨끗하다는 것을 보여주는 것이 목적이기 때문이며, 이 책에 제공된 모든 예는 “깨끗하게 보이지만 현장이 오염됐다”는 귀무가설을 가정한다.

○ 결정오류 명확화하기

위에서 논의 됐듯이, 일어날 수 있는 두 가지 형태의 의사결정 오류는 오염부지(False rejection)를 놓치는 것과 비오염부지(False acceptance)를 정화하는 것이다. 귀무가설이 현장은 깨끗한데 오염됐다고 가정할 때, 두 가지 결과 중에서 오염부지를 놓치는 것(False rejection)이 유발하는 의사결정 오류는 사람, 건강과 환경에 부정적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 더 심각하다고 할 수 있다. 비오염부지를 정화하는 의사결정 오류(false acceptance)는 더 높은 재생 비용을 초래한다.

○ Gray region의 경계 명확히 하기

The gray region 은 의사결정 오류의 결과가 비교적 작은 관련값(오염물질 농도)들의 가능한 모수의 범위이다. 그것은 조치 단계에 의해, 또 다른 한편으로는 의사결정 오류 결과와 관련된(오염물질 농도) 모수 값에 의해 제한된다.

---

㉑ - 설정한 가설이 진실할 확률이 극히 적어 처음부터 버릴 것이 예상되는 가설.  
- 두 집단을 대상으로 실험을 했을 때 각 집단에서 동일한 결과가 나올 것이라는 가설

Gray region 을 명확히 하는 것이 필요한데, 이는 모집단의 가변성과 측정 시스템에서 피할 수 없는 부정확성이 실제 모수 값(오염물질 농도) 조치단계와 매우 근접할 때, "Too close to call" 로 결정될 데이터에서 가변성을 만들기 위해 조합되기 때문이다.

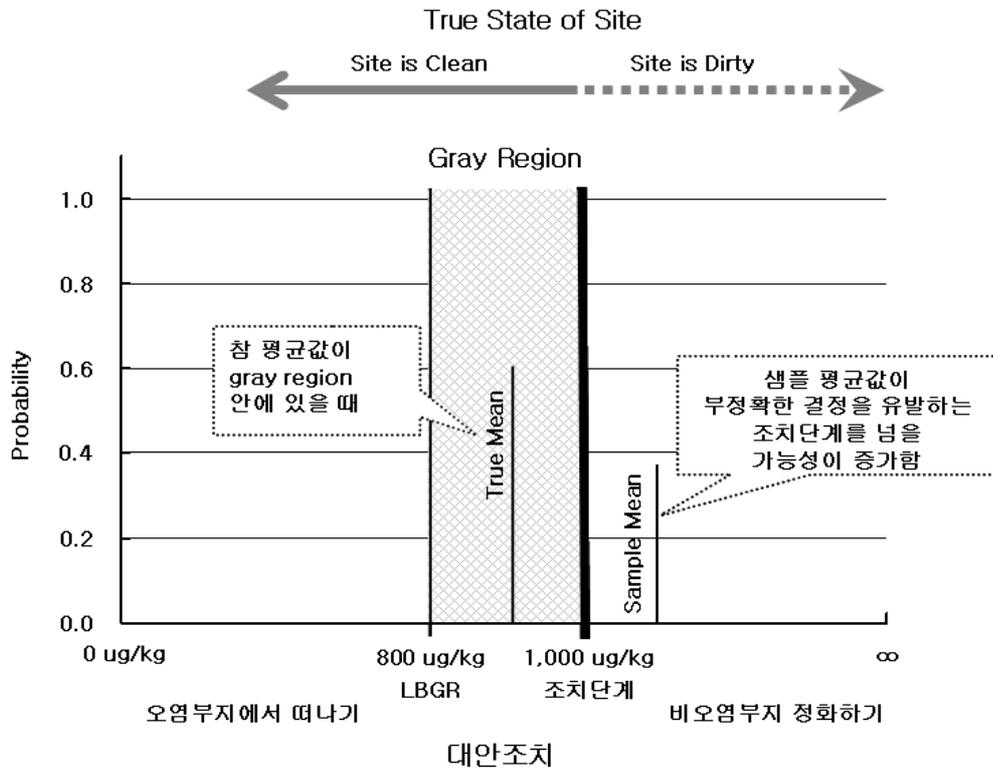


그림 3-11 Ggray region의 경계

위 그림에서, 토양에서 납 농도를 위한 Gray region 의 하한값은 (LBGR; the Lower Bound of the Gray Region)는 초기에 800ug/kg 으로 설정됐으며, Gray region의 상한값 조치 단계(1,000ug/kg)으로 설정되어 있다. LBGR 은 의사결정을 해결하는데 필요한 총 시료 수를 결정하기 위해 통계학적 계산들에서 사용된 많은 입력값들 중 하나이다. 토양에서 납 농도를 위해 더 좁은 범위를 설정하는 것은(900~1,000ug/kg), 불확실성은 낮지만 더 높은 시료채취 비용을 초래할 것이다. (더 많은 샘플수가 요구됨)

반면에 더 넓은 Gray region(예: 700~1,000ug/kg)은 더 낮은 시료채취 비용이 들지만 더 높은 불확실성을 초래할 것이다.

Gray region의 다양한 넓이를 선택하고, 샘플 규모에 무슨 영향을 끼칠지 살펴보는 것이 중요하다. 처음에는 전형적으로 LBGR 을 조치단계의 80%로 설정한다. LBGR 을 설정할 때, 의사결정 오류의 결과를 명심한다. 예를 들어, 덜 엄격한 Gray region(더 넓은

gray region)은 몇몇 의사결정들을 수용(예: 산업적 목적을 위한 현장 사용은 엄격하게 폐쇄) 할 수 있는 반면에 더 엄격한 Gray region(더 좁은 gray region)은 다른 의사결정들이 요구될 수도 있다. (예: 거주지 또는 농사 목적을 위한 현장 사용은 폐쇄)

MARSSIM(The Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual) (EPA 2000)은 처음에 임의적으로 조치단계의 50%에서 Gray region의 더 낮은 경계를 설정한 이후에 “Relative shift”를 제공하기 위해 1과 3 사이의 값에서 조정할 것을 권장한다. “Relative shift”는 모집단의 측정 표준편차에 의해 나뉘진 Gray region의 넓이이다. 측정 표준편차는 현장에 존재하는 역사적 자료(Historical data)를 사용해 계산된다. (예: 범위조사 또는 정의 데이터) 역사적 자료가 존재하지 않는다면, 분포 산정을 위해 몇 개의 제한된 예비 평가를(예: 10~20) 수행하거나, 이용 가능한 사이트 지식(EPA 2000)에 근거해 합리적 산정을 수행하는 것이 필요하다.

○ 의사결정 오류의 허용한계 정하기

통계적 시료채취 설계 준비의 다음 단계는 잘못된 결정을 내리는 것에 대한 허용한계를 반영하는 Gray region 초과 및 미만 지점의 확률 값을 정하는 것이다. 최소 조치단계 및 Gray region의 하한값에서 허용 가능한 결정 오류를 명확히 해야 한다. <그림 3-12>

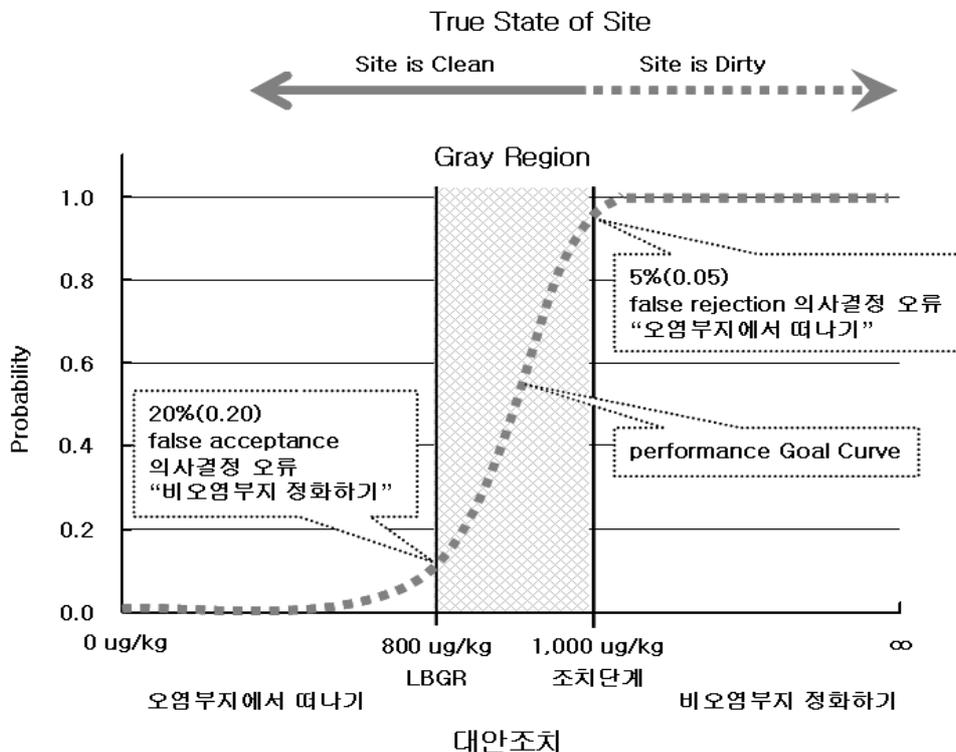


그림 3-12 Decision performance goal 도표의 예

EPA 1996 지침은 False rejection 결정 오류 한계를 위해 0.05(5%)의 값을 추천하고, False acceptance 결정오류 한계를 위해 0.20(20%)의 시작 값을 추천한다 할지라도, 계획 팀은 이러한 위험과 연관된 잠재적 결과들로 인해 잘못된 의사결정의 위험에 대한 균형을 완전히 분석해야 한다. False rejection(예 0.02 또는 2%) 및 False acceptance 결정오류(예 0.1 또는 10%)만 범하는 것의 가능성에 대해 초기에 매우 엄격한 한계를 설정할 것을 권장한다. 반복적인 단계에서, 이런 필요조건들은 결정오류와 비용사이의 균형이 이루어진 후에만 완화되어야 한다.

각각의 의사결정 오류 유형의 영역 내에서 다른 관점으로 의사결정 오류의 잠재적 결과들의 심각성평가를 고려해야만 하는데, 이는 결과의 심각성이 조치 단계로부터 모수의 이동을 더 크게 변화시킬 수도 있기 때문이다. 이것은 <그림 3-12>에 제시된 Performance goal curve를 창출하는 결과를 가져온다.

#### ④ DQO 6단계로부터의 산출물

이 단계의 실행한 결과 주요 산출물은 다음을 포함한다.

- 통계적 vs 판단적 시료채취 접근 사용에 다루어질 의사결정내역 목록
- 통계적 접근 사용에 다루어질 의사결정내역은 이번 단계에서 명확히 함
- \* 관련 모수의 가능한 범위(예: 평균값, 중앙값)
- \* 귀무가설
- \* The false rejection and false acceptance decision errors
- \* Gray region의 경계
- \* 의사결정 오류의 허용 한계

#### (7) 7단계 : 데이터 수집을 위한 계획 추진

- 목 적 : DQO 7단계의 목적은 DQO 1단계~6단계를 통해 명시된 최소한의 실행과 수용범위를 충족시키기 위해 수행될 수 있는 많은 대안적 시료채취와 분석 설계를 명확히 하기 위해 DQO 이전의 단계들에서 수집된 정보를 사용하는 것이다. 이후에는 비용을 고려해 프로젝트 수행과 수용범위를 최대한 달성할 수 있도록 시료채취 설계를 선택하고 문서화 한다.
- 활 동
  - DQO 1단계~6단계로부터의 산출물은 각각의 의사결정 내역을 해결하기 위한 대안적 시료채취와 분석 설계를 명확히 하는데 사용될 것이다.

- 이러한 설계 선택사항으로부터, 하나의 설계가 비용도 고려하여 모든 수행과 수용범위를 달성하는데 선택될 것이다.

### ① 비통계적(판단적) 설계들

비통계적 시료채취 설계는 스코핑 단계 중 모아진 정보를 사용하거나, 가장 많이 오염됐을 것 같은 지역의 조사에 집중하도록 하는 데이터를 수집하기 위한 Field screening / Surveying을 사용한다. 이런 유형의 시료채취는 판단에 근거한 시료채취라고도 한다. 판단에 근거한 시료채취 설계는 종종 지점에 가장 최악의 조건들을 나타내는 데이터를 제공한다. 이러한 이유로, 이런 유형의 시료채취의 목표는 자연과 화학 또는 방사능성 오염물질의 양을 확인하기 위한 지점 특성화 활동(Site characterization activities)을 지원하기 위해 사용된다. 또한 최악의 노출을 평가함으로써 위험 평가를 지원하기 위해 사용된다.

판단에 근거한 시료채취 설계의 장점 중 하나는 현장의 좋은 역사적 지식이 있을 경우 통계적 설계보다 실행 비용이 더 경제적이라는 것이다. 또한 일반적으로 통계적 설계보다 더 쉽다. 반면에, 판단에 근거한 시료채취 설계를 사용해 수집된 자료는 통계적 의사결정을 지원하는데 사용될 수 없다.

판단에 근거한 시료채취는 지점/시설 폐쇄 의사결정을 뒷받침하기 위한 자료를 수집할 때 이러한 데이터는 통계적으로 평가될 수 없기 때문에 사용되어선 안 된다. 심지어 지점 특성화 활동을 수행할 때, 이러한 데이터가 종종 위험성 계산, 모델링 연구 등의 보충자료를 필요로 하기 때문에 하나 또는 그 이상의 통계적 시료채취 접근과 결합하여 판단에 근거한 시료채취 설계를 수행하는 것은 드문 일이다. 판단에 근거한 시료채취가 하나 또는 그 이상의 의사결정 내역을 해결하기 위해 가장 적합하다고 결정되면, 다음 단계는 각 매체(Media; 예: 토양, 콘크리트, 페인트) 유형에 필요한 데이터를 제공하기 위해 잠재적으로 사용될 수 있는 모든 잠재적 조사 기술 또는 판단에 근거한 시료채취 방법들을 명확히 하는 것이다. 확인된 조사 및 시료채취 기법은 다양한 대안 가능한 실행 설계를 형성하기 위해 결합되어야 한다. 최종적으로, 각각의 실행 설계와 연관된 비용과 한계는 언급된 실행 설계의 선택을 지지하기 위해 사용되어야 한다.

### ② 통계적 설계들

통계적 설계의 목적은 통계적 시료채취 개념에 관한 일반정보를 제공하는 것이다. 즉, 무엇이 가장 일반적으로 사용되고, 사용가능한 것이 무엇이며, 관심 주제에 관한 보다 상세한 정보를 어디서 찾을 것인지에 대한 정보를 주는 것이다. 참조는 필요한 샘플의 수와 신뢰한계를 계산하기 위해 일반적으로 사용된 통계적 가설검정으로 만들어진다.

○ Simple random 시료채취

지점에 관한 역사적 정보가 거의 없을 때, Simple random 시료채취가 좋은 선택이다.  
(아래의 그림 참조)

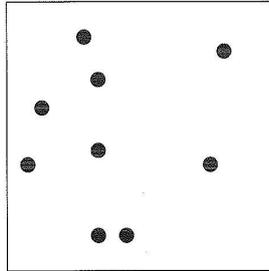


그림 3-13 Simple random 시료채취 설계

○ 층화 시료채취(Stratified sampling)

이 설계는 목표 모집단이 여러 다른 종류로 이루어져 있고, 지역이 예상되는 오염 농도에 근거해 세분화될 수 있을 때, 모수 평가에 유용하다.

○ 체계적 시료채취 (Systematic sampling)

체계적 시료채취 설계는 노출을 조사하고, 오염된 지역의 경계를 결정하기 위한 목적으로 사용된다. 체계적 시료채취 설계를 만들기 위해, 첫 번째 샘플 위치로부터 지역 내의 임의 좌표가 선택된다. 이것은 격자판이 만들어진 지점으로부터 처음 위치 또는 참고 기준선을 생성한다. 참고기준선이 생성되었다면, 샘플들은 격자의 종횡방향으로 체계적으로 취해진다. 격자는 정사각형, 직사각형, 또는 삼각형 모양이 될 것이다. <아래의 그림 3-14 참조>

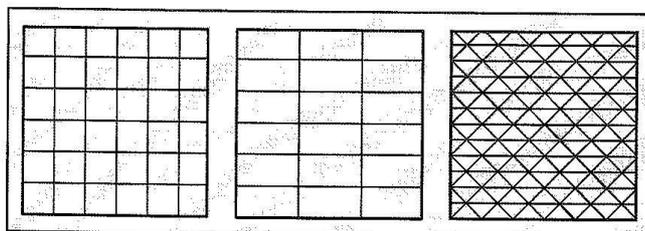


그림 3-14 체계적 시료채취 설계 선택

### ○ Ranked Set sampling

Ranked Set sampling은 현장 조사자의 전문적 판단 또는 현장에서 특정 시료채취 지역을 고르는 Field screening measurement method와 명백한 연관성에 의해 토양 또는 다른 환경매체(Environmental media)에서 보다 나은 평균 농도를 획득하는데 가장 유용하고 비용적으로 가장 효율이 좋은 창조적인 설계이다. Ranked set 시료채취는 현장 위치를 명확히 하고, 각 세트 내 지점들에 순서를 매기기 위해 값싼 분석 측정 방법들 (Analytical measurement methods)을 사용하여 시료채취를 위해 각 세트로부터 한 지점을 선택하는 2단계의 시료채취 설계를 사용한다.

Ranked set 시료채취에서는, Simple random 시료채취를 사용해 현장위치를 확인한다. 위치는 전문적 판단이나 값싼 Field screening measurements를 사용해 각각의 세트 내에서 독립적으로 정렬된다. 각 세트에서 하나의 시료채취 단위는 관련 오염물질을 위해 Standard laboratory analytical methods를 사용해 차후의 방법으로 선택된다. Simple random 시료채취에 관하여, 이 설계는 좀 더 대표적인 샘플들을 유도하여 관련 모수의 더 자세한 평가를 가져온다.

이 시료채취는 현장에서 정확한 위치를 찾아내는 것과 위치 정렬 비용이 실험실 분석 비용과 비교해 낮을 때 유용하며, 전문지식이 관련변수와 관련해 모집단의 단위를 정렬하기 위해 사용된다.

### ○ Adaptive Cluster 시료채취

Adaptive cluster 시료채취에서는 샘플들은 Simple random 시료채취를 사용해 취해지고, 추가적인 샘플들은 측정값이 한계 값들을 초과하는 지점에서 취해진다. 여러 추가적인 시료채취 및 분석이 요구될 수도 있다. Adaptive cluster 시료채취는 특정 지역의 과다 시료채취에도 불구하고 시료채취의 다음 단계를 위한 선택 가능성을 추적함으로써 모집단 평균값의 편향되지 않은 측정값이 계산되어질 수 있다.

초기와 마지막 Adaptive 시료채취 설계를 아래 <그림 3-15>에 나타냈다.

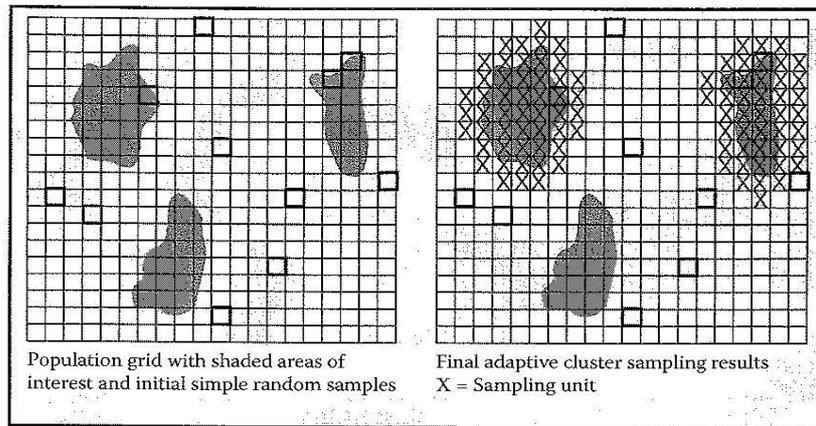


그림 3-15 Adaptive cluster sampling design

초기 측정은 Simple random 시료채취를 사용해 임의로 선택된 주요 시료채취 단위 (Unit)에서 이루어진다.(<그림 3-15 >에서 정사각형으로 표시됨) 시료채취 단위(Unit)가 관련 특징을 보여주는 것이 발견될 때마다, 본래 단위(Unit)에 근접한 추가적 시료채취 단위(Unit)들이 선택되고, 측정이 이루어진다. (EPA 2002)

○ 혼합 시료채취

혼합시료채취에서는, 여러 시료채취 위치에서의 물질 용량이 물리적으로 결합되고, 하나의 동질 샘플을 만들기 위한 노력으로 혼합된 후 분석된다. 이것은 분석해야하는 샘플의 수가 줄어들어 매우 경제적이며, 분석 비용이 시료채취 비용과 관련이 깊을 때 가장 경제적이다.

○ 순차적 시료채취

현장이 최소 또는 최대 오염되었다고 예상되면, 순차적 시료채취가 필요한 샘플 수를 많이 줄일 수 있다. 이전에 논의된 다른 시료채취 접근과는 다르게, 순차적 시료채취 설계는 필요한 샘플 규모를 미리 앞서 규정하지 않는다.

○ 통계적 가설검정

일단 적절한 시료채취 설계가 선택됐으면, 다음 단계에서는 귀무가설 실험을 위한 통계적 가설검정을 확인한다. 현장이 적절한 조치 단계를 충족하고 있는지 결정하기 위해 통계적 가설검정을 운영하는 것은 EPA(2000), EPA(2006a), EPA(2006b)에 의한 일반적 접근이다. 통계적 가설검정의 간단한 논의가 이루어진 이후에는 많은 통계적 가설검정들의 윤곽이 드러날 것이다.

실험 수행의 세부사항은 다양할지라도 통계적 가설검정의 결과 해석은 근본적으로 같다고 할 수 있다. 목적은 귀무가설을 기각하고 현장이 오염되지 않았다는 높은 신뢰도를 가지는 것이다. 이러한 의사결정을 내리기 위하여 관찰된 통계적 관련 모수(예: 평균값)가 수집된 샘플들로부터 계산된다. 이 관찰된 통계적 관련 모수는 조치단계와 비교된다. 만약 관찰된 관련 모수가 조치단계보다 상당히 낮으면, 귀무가설은 기각되고, 샘플 데이터는 현장이 오염되지 않았다는 결론을 뒷받침한다. 만약 관찰된 관련 모수가 조치단계보다 상당히 크면, 귀무가설은 기각될 수 없으며, 샘플 데이터는 현장이 오염됐다는 결론을 뒷받침한다.

두 개의 유형 모두에서, 현장의 실제 상태는 절대적인 확실성을 가지고 결정되지 않았음을 기억한다. 모집단 평균값이 조치단계 위 또는 아래임이 증명되지 않았다. 통계적 가설검정은 단지 귀무가설을 지지하거나 지지하지 않는 증거를 제공할 뿐이다. 항상 False-rejection이나 False-acceptance 의사결정 오류의 가능성이 있기 때문에 가정검정으로 증명되는 것은 아무것도 없다.

#### - 모수 및 비모수 통계적 가설검정

모수 및 비모수 두 종류의 통계적 가설검정이 있다. 두 종류의 검정 모두, 검정의 결과가 유효하게 해석될 수 있기 전에 충족되어야 할 추정을 가지고 있다. 그러나 비모수 검정의 추정이 모수 검정의 추정보다 덜 엄격하다. 모수와 비모수 실험 사이의 선택은 부분적으로 어떤 통계적 추정을 충족시켰는지의 평가에 근거하기 때문에, 이것을 결정할 때 통계학자의 조언을 구하는 것이 현명하다.

#### - 모수 검정

모수 가설검정은 모수검정이 유효하기 이전에 확인되어야 할 “분포상의 가정”을 가진 것으로 표현된다. 많은 모수 방법(Method) 논의들은 시료 데이터가 정규분포 또는 로그정규분포와 같은 알려진 이론적 분포와 함께 모집단으로부터 유래되어야 한다고 언급한다. 이런 종류의 논의는 오해의 소지가 있다. <모수 검정은 분포상의 추정을 만들어야 한다. -그러나 샘플이 간접적으로 도출된 모집단에 관해서만.> 대신, 모수 검정들은 시료 통계의 분포에 관한 흥미로운 추정을 만든다. 이 분포를 시료채취 분포라고 한다.

시료채취 분포의 개념은 예와 함께 잘 표현되어 있다. 과학자가 모집단으로부터 10개의 시료를 가지고 있으며, 10개 시료의 평균값을 계산했다고 가정해보자. 과학자는 다음의 과정을 반복한다. 10개 시료 중에서 2세트를 가지고 두 번째 평균값을 계산한다. 십중팔구 10개의 시료의 두 세트가 다르기 때문에 두개의 평균값을 다를 것이다.

과학자가 10개의 시료들을 가지고 무한히 반복해 평균값을 계산하는 똑같은 과정을 반복한다고 가정하자. 연구원은 이제 무한히 많은 평균값들을 가지고 있으며, 그것들로부터 확률분포를 생성할 수 있다. 이 분포는 시료 평균값들의 시료채취 분포라 불린다. 시료채취 분포는 또한 표준편차와 같은 다른 통계자료를 창출할 수 있다.

모수분포 가정 실험은, 통계 시료채취 분포 형태에 관한 흥미로운 추정을 만들어낸다. 그러나 모수 실험의 분포상의 추정은 실험이 이루어지기 전에 확인되어야 한다. 추정이 확인될 수 없다면, 모수 통계적 가설검정을 실시하는 것은 부적절하다. 예를 들어, T-test의 추정이 유효하지 않다면, T-test로부터의 결과들은 유효하게 해석될 수 없다. 이러한 이유 때문에, 실험의 분포 상 추정이 확인되지 않으면 모수 실험으로부터의 결과는 의사결정에 사용될 수 없다.

언급된 통계적 가설검정이 때론 모수 실험이기 때문에, 이 경고는 가치가 없다. 일반적이지만 위험한 실행은 언급된 통계적 가설검정으로써 모수 검정을 선택하기 위함이며, 일단 데이터가 수집되면 검정의 추정을 점검하지 않고 검정을 수행한다. 만약 추정들이 고정되면, 모수 검정으로부터의 결과들은 의미가 있다. 그러나 추정들이 고정되지 않으면, 결과가 현장의 실제 조건을 과대 또는 과소평가할지 예측할 방법이 없다. 추정을 점검하지 않은 연구원은 결과들이 의미 있는지 혹은 의미가 없는지 짐작할 수 없다.

#### - 비모수 검정

비모수 통계적 가설검정의 많은 논의들은 그들을 분포와 무관한 통계적 방법(Methods)이라 말하거나 모수검정이 모집단의 형태에 관한 추정을 만들지 않는 비모수적 검정이라고 진술한다. 이것은 사실이라고 할 수는 없다. 대부분의 비모수적 절차들은 시료들이 독립적일 것을 요구하며, 몇몇은 대칭적으로 도출된 시료들의 모집단을 필요로 한다. 그렇더라도 비모수 통계적 가설검정의 추정들은 모수 통계적 가설검정의 추정들보다 훨씬 덜 엄격하다. 그래서 모집단 분포가 알려지지 않거나, 정규와 다른 분포가 있는 상황에서는 비모수 통계적 가설검정이 가장 적합한 선택이 될 것이다. 환경 데이터가 대개 정상적으로 분포하지 않고, 결과들이 기기 검출한계보다 낮은 데이터가 상당히 많이 있기 때문에 EPA(2000)에서는 비모수통계적 가설검정의 사용을 추천한다.

#### - 모수 및 비모수 통계적 가설검정의 비교

모수 가정 검정들은 귀무가설이 기각되거나 혹은 수락되는 것을 결정하기 위하여 시료채취 분포에 관한 추정에 의존하고 있다. 모수적 통계 검정은 시료채취 분포 추정이 참(True)일 때에만 비모수적 통계검정보다 낫다고 할 수 있다. 실제 시료채취 분포가 추정된 것과 다르다면, 결과는 예측할 수 없다.

비모수 방법(Methods) 사용의 주요 장점은 배경농도이거나 배경농도 근처에 있는 데이터와 데이터가 기기 검출한계에 있거나 또는 검출한계 이하일 때 사용될 수 있다는 점이다. 후자는 "불검출 또는 검출한계이하" 라고 기록된다. 그러한 데이터는 모수 방법(Methods)으로는 쉽게 다루어질 수 없다. 데이터들이 "0"이하이거나 계산된 검출 한계 이하일지라도 많은 실제 측정 결과들을 항상 기록할 것을 추천한다. 그러나 비수치적인 결과들을 포함하는 데이터를 분석해야 한다면, 순위(Ranks)에 근거한 비모수 절차들이 많은 유형에서 여전히 사용될 수 있다.

비모수 검정이 많은 장점을 가지고 있지만 접근법은 몇 개의 결점을 가지고 있다. 비모수 실험들이 귀무가설을 기각할 똑같은 능력(힘)을 가지려면 모수 검정들보다 더 많은 시료들이 요구된다. 비모수 통계적 가설검정들을 수행하기 위해 방정식을 이용할 수 있으나, 필요한 시료 규모를 계산하기 위한 공식은 모의실험을 통해서만 개발될 수 있다.

많은 비모수 기술들은 측정된 데이터를 정렬하는 것에 근거한다. 데이터는 가장 작은 것에서부터 가장 큰 것까지 정렬되고, 상응하는 숫자나 순위를 할당받는다. 분석은 본래의 데이터 값들 보다는 순위로 수행된다. 그럼에도 불구하고, 비모수 방법들(Methods)은 심지어 모수 검정 적용에 필요한 조건들이 완료될 때 상응하는 모수 검정까지도 거의 수행한다. 특정 모수 실험 사용으로부터 얻는 효율이 거의 없다. 그러므로 비모수 검정을 사용하는 것은 대부분의 경우 신중하게 고려된다.

#### - 언급된 통계적 가설 선택하기

다음 논의는 최적 시료채취 설계로 Simple random sampling이 선택되었을 때 적합한 통계적 가설검정에 중점을 둔다. 다른 시료채취 설계에 적합한 통계적 가설검정들은 철학적으로는 비슷하나, 실행에 있어서는 더 복잡하다. 만약 또 다른 시료채취 설계가 선택되었다면, 통계적 가설검정이 적합한지 결정하기 위해 통계학자(전문가)와 상담해야 한다.

언급된 통계적 가설검정을 수행하기 전에, 수집된 데이터가 검정의 추정들을 충족시키는지에 대한 실험이 필수라는 것을 알아두어야 한다. 언급된 통계적 가설검정의 추정을 확인하기 위한 충분한 데이터를 수집하는 것이 현명하며, 수집된 데이터는 실험을 수행할 때, 대안적인 검정으로 적용될 수 있음을 확인한다.

언급된 통계적 가설검정의 선택은 다음에 의해 결정된다.

- 이루어질 비교. 다른 통계적 가설검정은 하나의 모집단을 조치단계와 비교할지, 두 개의 모집단을 다른 것과 비교할지에 따라 적합하다.
- 통계적 관련모수. 다른 통계적 가설검정들은 다른 관련 모수에 적합하다.
- 요구된 통계적 가설검정의 유형 : 모수 또는 비모수

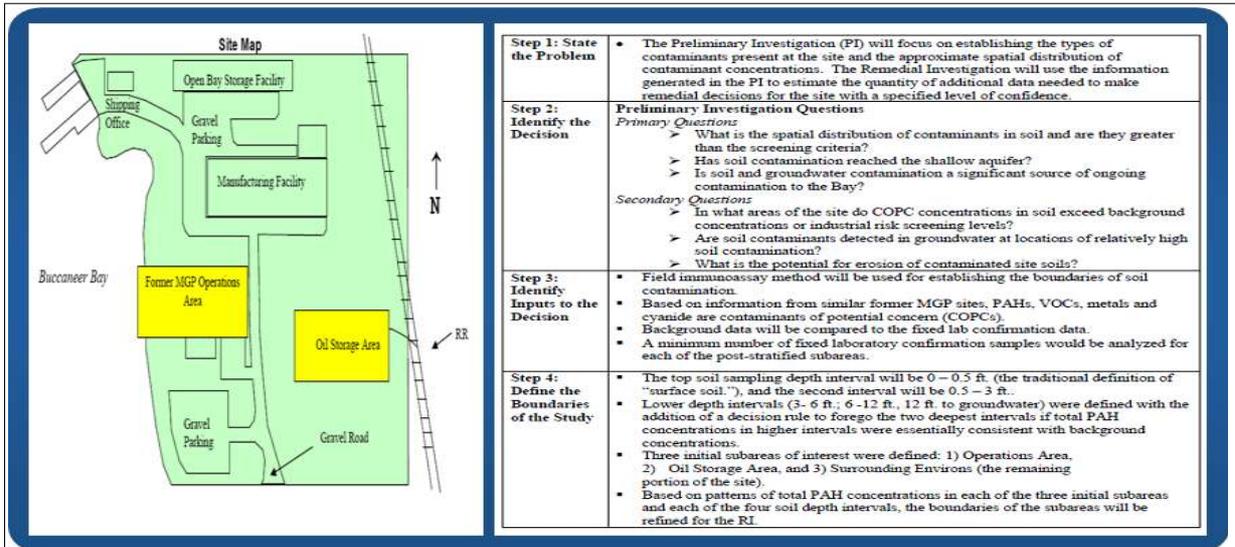
아래의 <표 3-9>는 일반적으로 사용되고 있는 많은 모수 및 비모수 통계적 가설검정을 제시한다. 언급된 통계적 가설검정을 선택하기 위해 이 표를 사용하려면, 우선 이루어질 비교 대상의 유형을 명확히 해야 한다. 현장 폐쇄가 공포되면, 적절한 비교는 하나의 모집단 vs 조치단계 또는 규제 한계점이다.

**표 3-9** 모수 및 비모수 통계적 가설검정 제시

Comparison	관심통계모수	통계가설검정유형	통계가설검정기법
One population to action level	평균값	모수 비모수	one-sample t-test Wilcoxon signed rank test
	백분위수 또는 비율	모수	one-sample proportion test
Two populations	평균값	모수	equal variances
		모수	Satterthwaite's two-sample test(unequal variances)
	백분위수 또는 비율	비모수 모수	Wilcoxon rank sum test Two-sample test for proportions

### 3.2 DQO 사례조사

미국에서 DQO 절차가 어떻게 진행되고 있는지 살펴보고자 문서 “Systematic Planning: A Case Study for Hazardous Waste Site Investigations EPA QA/CS-1”의 내용 중 일부사례를 요약하여 보았다. 이 사례는 위해성폐기물 매립지역에서 PAH 물질이 의심되는 부지를 중심으로 예비조사를 전개하기 위한 DQO 절차의 요약에 관한 내용으로 아래 <그림 3-16> ~ <그림 3-17>과 같다.



**Step1: 문제의 정확한 정의**

- 예비조사(PI)는 부지에 존재하는 오염물질의 종류와 오염물질농도의 대략적인 공간적 분포에 초점을 맞추어 진행될 것이다.

**Step 2: 무엇을 결정해야 하는지 확인**

■ 예비조사 질문사항

▷ 1차 질문사항

- 토양의 오염물질의 공간적 분포는 어떠한 스크리닝 기준보다 큰가?
- 토양오염이 천부대수층까지 도달하였는가?
- 토양과 지하수오염이 만(bay)까지 오염이 진행되고 있는 중요한 원인인가?

▷ 2차 질문사항

- 부지의 어떤 지역이 COPC농도가 배경농도나 산업용지 위해 스크리닝 기준을 초과했는가?
- 상대적으로 높은 토양오염지역의 지하수에서 토양오염물질이 검출되었는가?
- 오염부지 토양에서의 침식 잠재원인은 무엇인가?

**Step 3: 결정에 필요한 정보가 무엇인지 확인**

- 현장면역측정법이 토양오염의 범위를 정립하기 위해 사용될 수 있다
- 이전 MGP 부지들에서와 유사함을 근거로 PAHs, VOCs, 금속과 시안이 잠재적 관심오염물질이다.
- 배경자료는 고정 실험실 확인 자료와 비교될 것이다
- 고정실험실의 최소 확인 시료수는 이전의 층화지역에 대해 각각 분석되어야 한다.

그림 3-16 예비조사를 전개하기 위한 DQO 절차의 사례 요약

**Step 4: 조사의 범위를 정한다**

- 표층토양 시료채취 심도는 0 ~ 0.5ft (표층토양의 전형적인 정의에 의해) 그리고 2번째 심도는 0.5~3ft.
- 저층토양의 interval은(3-6ft, 6-12ft, 12ft-지하수층) 상층토양의 총 PAH 농도가 background의 PAH 농도와 같은 경우 제일 아래 2개 interval은 분석하지 않는 것을 원칙으로 한다.
- 3개의 초기 조사지역 결정: 1) Operations area, 2) Oil Storage Area 및 3) Surrounding Environs
- 3개 조사지역의 4개 깊이별 토양시료의 총 PAH 농도 패턴에 따라 RI를 위한 조사지역의 경계를 수정할 수 있다.

**Step 5: 결정방법을 정한다**

- 전반적인 결정규칙: 조사지역의 표층, 지표 아래 토양 및 지하수의 MGP 관련 오염물질의 농도가 PI risk를 바탕으로 한 screening 기준을 초과하거나, 표층의 COPC 농도 분석 결과 COPCs가 만(bay)으로 확산되고 있는 경우에는 이 지역에 대한 추가연구가 이루어져야 한다.
- 조사지역의 깊이별 토양시료에서 PAHs 농도가 background보다 높게 나타날 경우에는 MGP 관련 오염물질이 존재하는 것으로 추정할 수 있으며, 이 지역에 대해서는 추가연구가 이루어져야 한다.
- 조사지역에 어떤 성분이 background 보다 상당히 높은 농도로 존재하거나 최대검출농도가 screening 기준보다 높을 경우에는 그 성분은 COPC로 판단할 수 있으며 추가연구가 이루어져야 한다.
- 조사지역내 지하수에서 화학물질의 최대검출농도가 지하수 screening 기준을 초과할 경우 그 화학물질은 COPC라고 판단할 수 있다.
- 지표토양 조사결과 농도가 해안에 수직인 축을 따라 감소하는 경우 또는 시료채취 장소가 만에 인접한 지표토양의 농도가 screening 기준 이하인 경우에는 오염물질의 만으로의 이동은 무시할 수 있다.

**Step 6: 결정의 허용가능한 오차범위를 정한다**

- Oil storage와 Operation area에서 75ft 삼각형 격자를 사용한다(반장축의 길이가 45ft인 타원형의 hot spot을 맞출 확률이 95%). Site environs에서는 200ft 격자를 사용한다(반장축의 길이가 119ft인 타원형의 hot spot을 맞출 확률이 95%).

**Step 7: 데이터를 얻기 위한 계획의 최적화**

- Oil storage area(A)는 15개, Operations area(B)는 41개, Site environs(C)는 24개의 시료채취 지점이 있다(총 80개). 각 시료채취 지점마다 토양 깊이별 4개의 시료를 분석한다면 총 320개의 시료에 대한 분석이 수행되어야 한다. 시료채취 디자인은 조정 가능하므로 좀 더 작은 격자를 사용하면 시료 개수는 10%(32개) 늘어난다. PAH 면역측정법 조사 프로젝트의 총비용은 \$52.8K이다. fixed laboratory analysis에는 시료 1개당 약 \$1K의 추가비용이 발생한다. 다른 PAH 오염지역 조사경험으로 보아 fixed lab sample 개수는 30개이며, 몇 개의 QC 시료가 추가될 것이다.
- 지하수 시료채취 디자인은 표층토양의 PAHs 농도가 높게 나타난 각각의 조사지역에 대해서 이루어진다. 3개의 초기 조사지역에 2개의 upgradient 시료가 더해져 총 5개의 지하수 시료에 대해 PAH, SVOC 및 VOC 분석을 하게 된다. 조사비용은 시료 한 개당 \$700이며 hydropunch 시료의 경우 시료당 추가로 약 \$300이 발생한다.

PI 프로젝트의 총 비용은 토양 및 지하수 조사를 포함해서 \$87K이며 나머지 \$13K는 현장조사를 마치고 위한 펀드기금으로 사용하였다.

**그림 3-17** 예비조사를 전개하기 위한 DQO 절차의 사례 요약(계속)

### 3.3 통계적 시료채취 설계 software

미국, 캐나다 등 선진국 일부에서는 환경에 대한 신뢰도 있는 의사결정을 위해 통계적인 방법을 이용한 적절한 시료채취 개수와 위치를 선택할 수 있도록 다양한 프로그램을 지원하고 있다. 이에 미국에서 많이 사용되고 있는 VSP(Visual Sample Plan), DEFT(Decision Error Feasibility Trials), ELIPGRID-PC 등에 대해 전반적인 설명과 소개를 살펴보고자 한다.

#### 3.3.1 VSP (Visual Sample Plan)

Visual Sample Plan<그림 3-18>은 미국 에너지국, 환경보호국, 국방부에 의해 제공되는 공개 소프트웨어 툴로서, 간단하고 논리적인 시료채취 방법을 제공한다. 시료채취 목적에 맞는 통계적 검사를 통해 표본크기 산정식과 알고리즘을 제공하며 사용이 용이하다. 또한 지도나 항공사진, 통계적 시료채취 디자인을 통해 사용자가 최적의 시료 수와 지점을 결정하도록 도와준다. Visual Sample Plan은 토양 표층이나 퇴적물, 수체 등에서의 2차원 시료채취에 적합하다.

Visual Sample Plan관련 홈페이지는 <http://dco.pnl.gov/vsp/>이다.

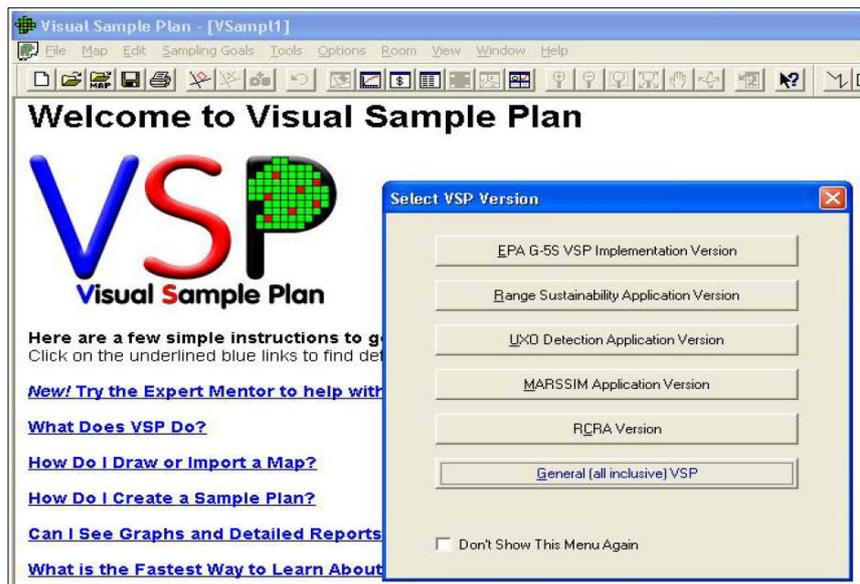


그림 3-18 VSP 프로그램

Visual Sample Plan는 다음과 같은 시각적 정보를 제공하는 것이 장점이다.

- Map view: site map, 시료채취 지점 및 면적을 보여줌
- Cost view: 시료 수, 비용, 확률 등에 관련된 통계결과를 보여줌

- Graph view: 그래프를 보여줌(기능 선택 가능)
- Plan view: 시료채취 지점의 (X,Y)좌표를 보여줌

4개의 View를 동시에 볼 수 있기 때문에 규제기관에서 오류허용오차를 결정하는 데 효과적이다. 예로 스크린에 Visual Sample Plan 소프트웨어 화면을 보여줌으로써 긍정오류(1종 오류,  $\alpha$ 오류), 부정오류(2종 오류,  $\beta$ 오류) 및 Gray-region 요구조건이 폭이 시료채취 비용(Sampling cost)에 미치는 영향을 볼 수 있다.

Visual Sample Plan를 이용하면 오류허용오차를 반복적으로 조정하여 시료채취 비용과 불확도가 균형을 이루도록 시료채취 디자인을 할 수 있다.

또한 Visual Sample Plan을 이용하여 조사지역을 정사각형, 직사각형, 원, 타원 등의 간단한 윤곽으로 스케치하거나 전자장비의 Site map을 불러올 수도 있다. 한번 Site map이 설정되면 마우스를 이동하여 시료채취를 하게 될 조사지점을 결정하게 된다. 그 후에는 사용자가 많은 디자인 옵션을 선택하도록 한다.

- 평균을 고정 Threshold값과 비교
- 평균을 Reference 평균값과 비교
- 평균값 추산
- 평균값의 신뢰구간 설정
- 비율을 고정 Threshold값과 비교
- 비율을 Reference 비율과 비교
- 비율을 추산
- 조사지점 선정

Visual Sample Plan는 사용자가 적절한 통계학적 가설검정을 선택할 수 있도록 한 후 필요한 입력(Input) 자료(예. 긍정오류, 부정오류, Gray region 폭, Action level, 표준편차 등)를 입력하도록 하여 필요한 시료채취 지점 및 시료의 수를 계산한다.

### 3.3.2 DEFT (Decision Error Feasibility Trials)

미국 환경보호국(EPA 2001)에서 과제별 특화된 시료채취 디자인을 지원하기 위해 개발하였으며, DEFT를 통해 의사결정자 등이 여러 시료채취 디자인에 대해 비용정보를 빠르게 얻을 수 있도록 한다.

DEFT는 아래와 같은 의문점을 해결하는 데 필요한 시료 크기를 계산하기 위해 개발되었다.

- 모집단 평균이 고정된 기준보다 큰지 작은지?
- 모비율이 고정된 기준보다 큰지 작은지?
- 두 모집단의 평균값의 차이가 통계적으로 유의한지?
- 두 모비율의 차이가 통계적으로 유의한지?

DEFT는 VSP 만큼 정교한 프로그램은 아니며 EPA는 DEFT를 DQO Step6를 통해 지정된 데이터의 실행여부를 평가하는 데에만 사용할 것을 권하고 있다. <그림 3-19>은 DEFT의 실행화면을 나타내고 있다. DEFT에 대한 보다 구체적인 정보는 EPA QA/G-4D(EPA 2001) 매뉴얼에 나와 있다.

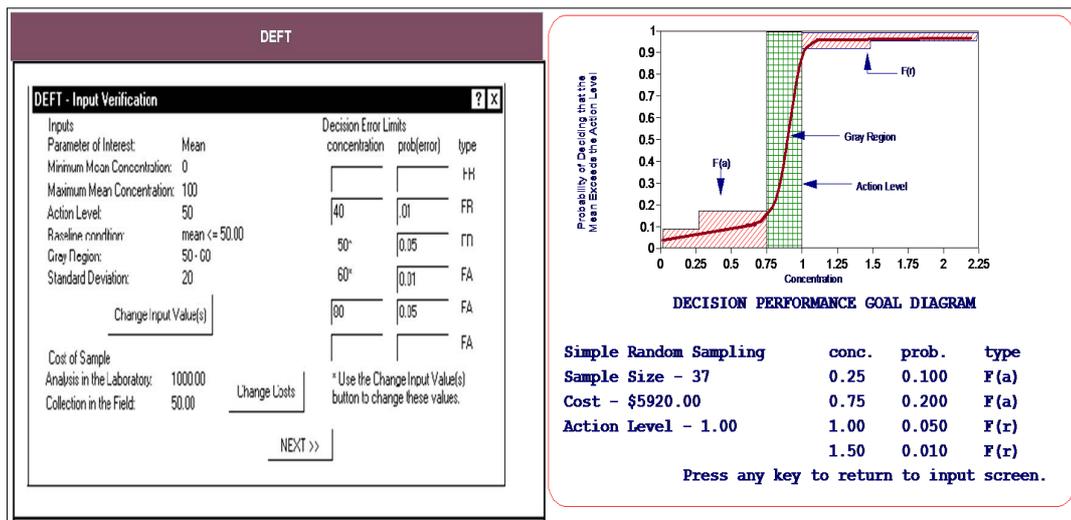


그림 3-19 DEFT의 실행화면

### 3.3.3 ELIPGRID-PC Software

ELIPGRID-PC는 정사각형, 직사각형 및 삼각형 격자를 이용하여 원형 또는 타원형의 “Hot spot”(Targets)을 위치시킬 확률을 계산하기 위해 개발된 통계적 시료채취 설계프로그램으로, 1995년 공개적으로 배포되었다. (Oak Ridge National Laboratory, 1994; 1995) 이 프로그램은 Visual Sample Plan 보다 훨씬 덜 복잡하다.

ELIPGRID-PC는 다음과 같은 기능이 있다.



Step 5: 다음의 자료를 입력

Shape of the elliptical hot spot: 1.0(원형이기 때문)

Length of semimajor axis: 5m

Angle of orientation to grid: 99.0°(random angle 가정)

Length of any side of square grid: 10m

Total area to sample: 5000m<sup>2</sup>

Individual sample cost: \$500

### 3.3.4 기타

아래는 위에 소개한 프로그램들 외에 무료로 사용할 수 있는 통계적 시료채취설계 프로그램이다.

- MARSSIM power 2000

([www.cvg.homestead.com/MARSSIMPower2000.html](http://www.cvg.homestead.com/MARSSIMPower2000.html))

- DQO-PRO([www.acs-envchem.duq.edu/dqopro.htm](http://www.acs-envchem.duq.edu/dqopro.htm))

- EOPACK([www.epa.gov/ada/csmos/models/geopack.html](http://www.epa.gov/ada/csmos/models/geopack.html))

## 4. 토양 및 지하수 오염조사 사례 비교

2005년에 수행되었던 캠프 O1, O2, O3 지역의 반환/공여지 환경오염조사에 대해 기존지침 및 제안된 지침내의 시료채취 개수를 비교 검토하여 제안된 지침에 의한 시료채취 밀도의 타당성을 확인하고자 하였다.

### 4.1 캠프 O1 지역 05년 반환/공여지 환경오염조사

토양시료 채취 작업은 지구물리탐사에 이어 2005년 4월 18일부터 2005년 5월 13일까지 32일간 수행하였으며, 총 1,000점(표토, 심토)(QA/QC 89점 포함)의 토양시료를 채취하였다. 개황조사 단계에서는 오염물질별 위치별 분포를 거시적으로 파악하였고 정밀조사단계에서는 오염물질의 범위와 오염정도를 파악하는 조사를 수행하였다.

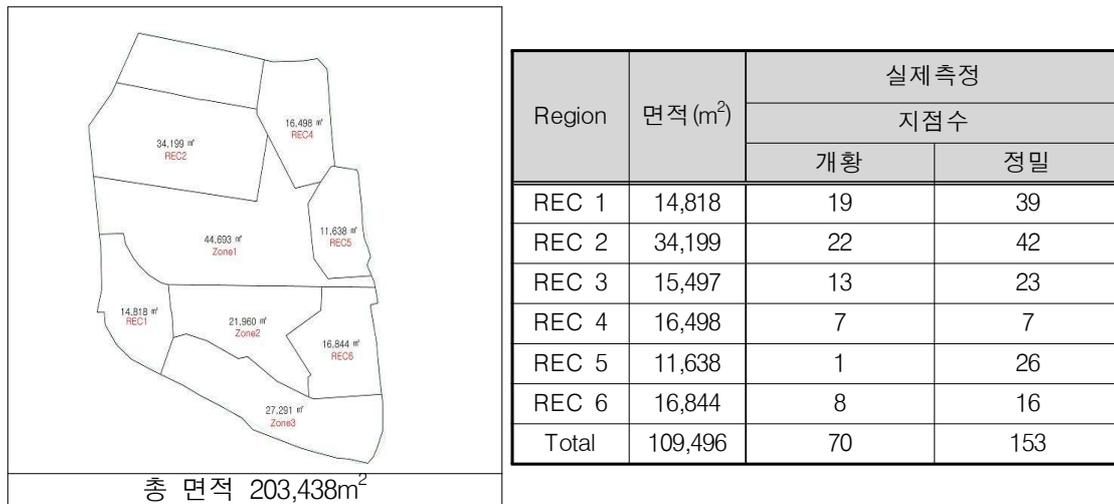
#### 4.1.1 캠프 O1 지역 토양오염조사 실제 측정량

토양오염도조사는 수립된 계획에 따라 수행하였다. 우선 시료채취지점은 오염이 인정된 지점, 오염의 우려가 있는 지점, 수리지질상황 등을 고려하여 대상 부지의 토양오염의 3차원

분포를 확실히 파악할 수 있도록 배치하고, 현장답사를 통해 오염예상지역과 주변지역에 대한 지형 및 지질 특성 등을 검토 후 추정된 오염범위의 면적에 따라 시료채취 지점 수 기준에 준하여 시료를 채취하였다. 다만, 필요에 따라 토양오염 추정범위 내의 자세한 오염현황을 파악하고자 하는 경우에는 채취 지점수를 늘려 조사하였고, 추정되는 오염범위의 경계부근은 격자간격을 조밀하게 하는 등 대상 부지 상황을 감안하여 적절하게 오염상황을 파악할 수 있도록 지점을 선정하였다.

조사방법은 오염방향에 따른 주요지점 선정 조사방법 (Transect survey)과 심도별 조사방법 (Profile survey) 등이 있다. 이 중 오염방향에 따른 주요지점 선정 조사방법은 오염물질이 일반적으로 특정한 방향을 통하여 흐르는 경향이 있으므로 사전에 오염물질의 예상 주 흐름 방향을 파악하여 오염물질의 이동방향에 따라 조사하는 방법이다. 반면에, 심도별 조사 방법은 토양의 불포화층에서는 오염물질의 이동이 토양공극을 통하여 일어나며 오염물질은 수직적인 분포를 이루게 되므로 지층의 수직적인 오염현황을 파악하는 방법이다. 이러한 위치 선정에 따라 토양시료채취계획을 수립, 시행하였다.

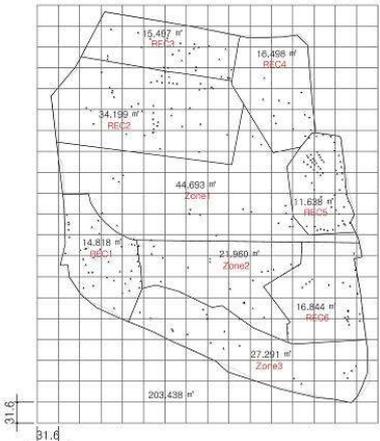
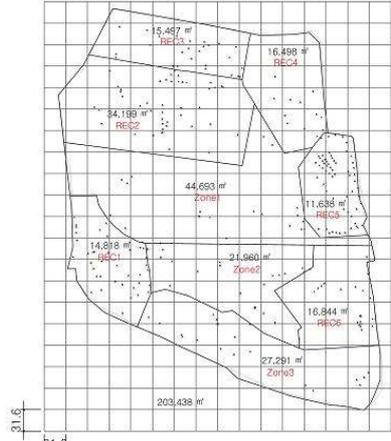
표 3-10 캠프 O1 지역 토양오염조사 실제 측정량



#### 4.1.2 개황조사에 따른 면적당 지점 수

기존 개황조사 지침을 바탕으로 하여 조사면적에 대한 이격거리로 조사지점수를 산정하였다.

표 3-11 캠프 O1 지역 개황조사에 따른 면적당 지점 수

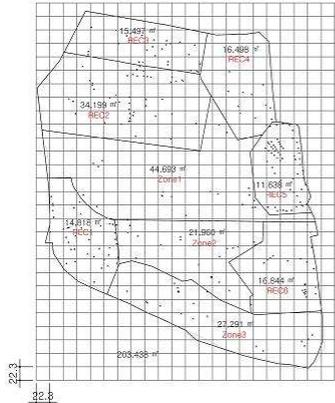
토양정밀조사지침 (환경부)	주한미군 공여구역주변지역 (환경부 예규)
	
<p>이격거리 30.7m (약 1000m<sup>2</sup>당 1지점)</p>	<p>이격거리 30.7m (약 1000m<sup>2</sup>당 1지점)</p>
<p>216지점</p>	<p>216지점</p>

캠프 O1 지역을 토양정밀조사지침(환경부)에 따라 이격거리 30.7m 로 나누어 보면 216지점의 조사 지점수를 얻는다. 주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사지침(환경부예규) 역시 이격거리 30.7m 로 나누어 보면 216지점의 조사 지점수를 얻는다.

#### 4.1.3 정밀조사에 따른 면적당 지점 수

기존 정밀조사 지침을 바탕으로 하여 조사면적에 대한 이격거리로 조사지점수를 산정하였다.

표 3-12 캠프 O1지역 정밀조사에 따른 면적당 지점 수

토양정밀조사지침 (환경부)	주한미군 공여구역주변지역 (환경부 예규)
	
이격거리 20.5m (약 500m <sup>2</sup> 당 1지점)	이격거리 21.4m (약 500m <sup>2</sup> 당 1지점)
269지점	245지점

캠프 O1 지역을 토양정밀조사지침(환경부)에 따라 이격거리 20.5m로 나누어 보면 269지점의 조사 지점수를 얻는다. 또한 주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사지침(환경부예규)에 따라 이격거리 21.4m로 나누어 보면 245지점의 조사 지점수를 얻는다. <표 3-13>에 캠프 O1지역에 대한 시료채취 개수를 정리하였다. 개황조사의 경우 토양정밀조사지침과 환경기초조사지침 그리고 통계적 기법을 적용한 경우(기타지역 1구역) 세경우의 값이 거의 유사함을 알 수 있었다. 정밀조사 또한 매우 유사한 값을 갖으나 제안된 기타지역이 밀도가 다소 높음을 확인 할 수 있다.

표 3-13 캠프 O1 지역에 대한 시료채취 개수

Region	면적 (m <sup>2</sup> )	토양정밀조사지침 (환경부)		환경기초조사 지침 (환경부 예규)		통계적기법 적용 기타지역	
		지점수		지점수		지점수	
		개황	정밀	개황	정밀	개황	정밀
REC 1	14,818	16	38	16	34	17	43
REC 2	34,199	36	77	36	73	36	83
REC 3	15,497	17	39	17	35	18	44
REC 4	16,498	18	41	18	37	19	46
REC 5	11,638	13	32	13	28	14	36
REC 6	16,844	18	42	18	38	20	47
Total	109,496	118	269	118	245	124	299

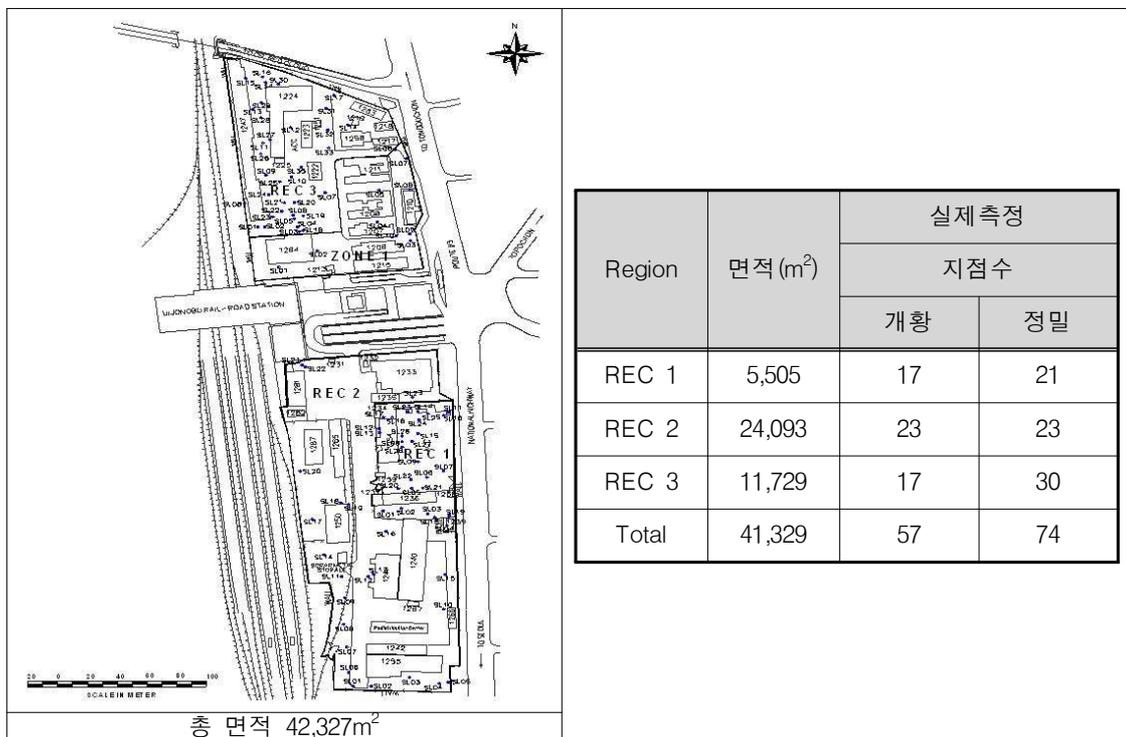
## 4.2 캠프 O2 지역 05년 반환/공여지 환경오염조사

시료채취저장운반, 시료분석, 품질관리 등 토양시료채취 및 분석절차는 국방부의 환경오염조사 표준수행절차(Standard Operating Procedure, SOP)에 근거하여 실시하였고, GPR 탐사에 의한 지하매설물 확인 후, 2005년 5월 16일부터 2005년 6월 24일까지 총 345점의 토양시료가 채취되었다.

### 4.2.1 실제 측정량

토양시료채취 지점은 현장답사를 통해 현장 사용용도, 오염예상지역, 지형, 지질, 수리지질특성 등을 종합적으로 검토하여 오염이 인정된 지점, 오염의 우려가 있는 지점 등을 대상으로 토양시료채취 지점을 선정하였으며, 토양오염 현황을 효율적으로 파악할 수 있도록 배치하였다. 추정된 오염범위의 면적에 따라 시료채취 지점 수 기준에 준하여 시료채취지점을 선정하였으며, 필요에 따라 토양오염 추정범위의 정확한 오염현황 파악이 필요한 경우에는 채취 지점수를 늘려 조사하였다.

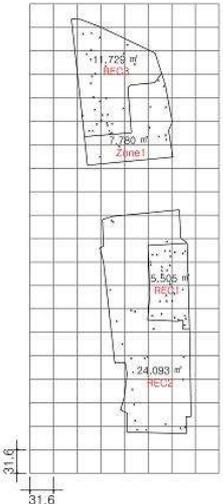
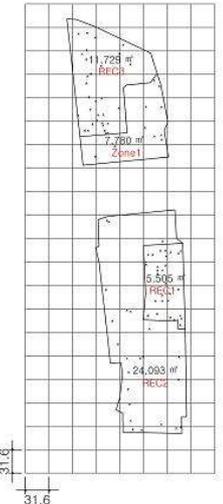
표 3-14 캠프 O2 지역 토양오염조사 실제 측정량



#### 4.2.2 개황조사에 따른 면적당 지점 수

기존 개황조사 지침을 바탕으로 하여 조사면적에 대한 이격거리로 조사지점수를 산정하였다.

표 3-15 캠프 O2지역 개황조사에 따른 면적당 지점 수

토양정밀조사지침 (환경부)	주한미군 공여구역주변지역 (환경부예규)
	
<p>이격거리 29.9m (약 1000m<sup>2</sup>당 1지점)</p>	<p>이격거리 29.9m (약 1000m<sup>2</sup>당 1지점)</p>
<p>46지점</p>	<p>46지점</p>

캠프 O2 지역을 토양정밀조사지침(환경부)에 따라 이격거리 29.9m로 나누어 보면 46지점의 조사 지점수를 얻는다. 또한 주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사지침(환경부예규)도 역시 이격거리 29.9m로 나누어 보면 46지점의 조사 지점수를 얻는다. 두 지침 사이의 개황조사 시에는 일치하는 값을 보인다.

#### 4.2.3 정밀조사에 따른 면적당 지점 수

기존 정밀조사 지침을 바탕으로 하여 조사면적에 대한 이격거리로 조사지점수를 산정하였다.

캠프 O2 지역을 토양정밀조사지침(환경부)에 따라 이격거리 19.2m로 나누어 보면 109지점의 조사 지점수를 얻는다. 주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사지침(환경부예규)에 따라 이격거리 20.6m로 나누어 보면 96지점의 조사 지점수를 얻는다. <표 3-17>에 캠프 O2 지역에 대하여 기존 지침과 제안된 지침의 시료채취 개수를 정리하였다.

표 3-16 캠프 O2지역 정밀조사에 따른 면적당 지점 수

토양정밀조사지침 (환경부)	주한미군 공여구역주변지역 (환경부 예규)
이격거리 19.2m (약 500m <sup>2</sup> 당 1지점)	이격거리 20.6m (약 500m <sup>2</sup> 당 1지점)
109지점	96지점

표 3-17 캠프 O2 지역에 대한 시료채취 개수

Region	면적 (m <sup>2</sup> )	토양정밀조사지침 (환경부)		환경기초조사 지침 (환경부 예규)		통계적기법 적용	
		지점수		지점수		기타지역	
		개황	정밀	개황	정밀	개황	정밀
REC 1	5,505	7	20	7	15	8	24
REC 2	24,093	26	57	26	53	26	62
REC 3	11,729	13	32	13	28	14	36
Total	41,329	46	109	46	96	48	122

### 4.3 캠프 O3 지역 05년 반환/공여지 환경오염조사

토양시료채취작업은 지구물리탐사에 이어 2005년 4월 20일부터 2005년 5월 13일까지 17일간 수행하였는데, 총 1,019점의 토양시료를 채취하였다. 개황조사단계에서는 오염물질별 위치별 분포를 거시적으로 파악하였고 정밀조사단계에서는 오염물질의 범위와 오염정도를 파악하기 위하여 조사를 수행하였다. 토양오염도 조사는 수립된 계획에 따라 수행하였다.

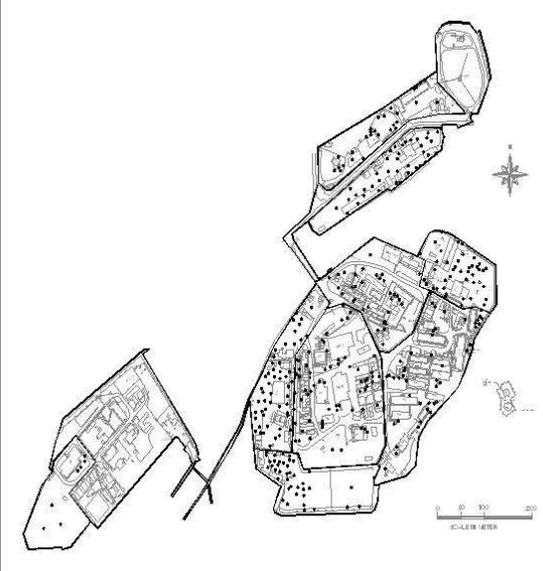
우선 시료채취지점은 오염이 인정된 지점, 오염의 우려가 있는 지점, 수리지질상황 등을 고려

하여 대상 부지의 토양오염의 3차원 분포를 확실히 파악할 수 있도록 배치하고, 현장답사를 통해 오염예상지역과 주변지역에 대한 지형 및 지질 특성 등을 검토 후 추정된 오염범위의 면적에 따라 시료채취 지점 수 기준에 준하여 시료를 채취하였다. 다만, 필요에 따라 토양오염 추정범위 내의 자세한 오염현황을 파악하고자 하는 경우에는 채취 지점수를 늘려 조사하였고, 추정되는 오염범위의 경계부근은 격자간격을 조밀하게 하는 등 대상 부지 상황을 감안하여 적절하게 오염상황을 파악할 수 있도록 지점을 선정하였다.

#### 4.3.1 실제 측정량

토양시료채취 지점은 현장답사를 통해 현장 사용용도, 오염예상지역, 지형, 지질, 수리지질 특성 등을 종합적으로 검토하여 오염이 인정된 지점, 오염의 우려가 있는 지점 등을 대상으로 토양시료채취 지점을 선정하였으며, 토양오염 현황을 효율적으로 파악할 수 있도록 배치하였다. 추정된 오염범위의 면적에 따라 시료채취 지점 수 기준에 준하여 시료채취지점을 선정하였으며, 필요에 따라 토양오염 추정범위의 정확한 오염현황 파악이 필요한 경우에는 채취 지점수를 늘려 조사하였다.

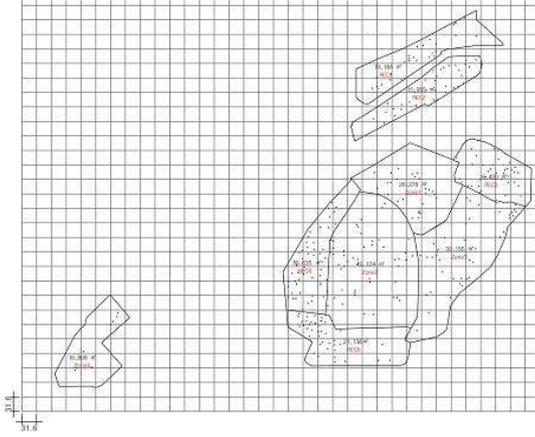
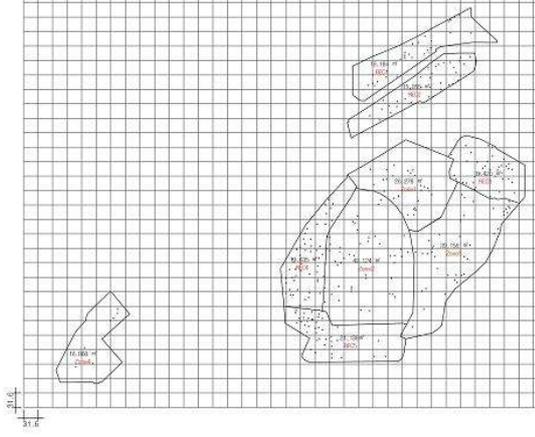
표 3-18 캠프 03 지역 토양오염조사 실제 측정량

	실제 측정			
	Region	면적 (m <sup>2</sup> )	지점수	
			개황	정밀
REC 1	19,184	15	29	
REC 2	15,955	18	39	
REC 3	16,420	19	37	
REC 4	19,635	18	56	
REC 5	21,136	17	39	
Total	92,332	87	200	
총 면적 92,330m <sup>2</sup>				

### 4.3.2 개황조사에 따른 면적당 지점 수

기존 개황조사 지침을 바탕으로 하여 조사면적에 대한 이격거리로 조사지점수를 산정하였다.

표 3-19 캠프 O3지역 개황조사에 따른 면적당 지점 수

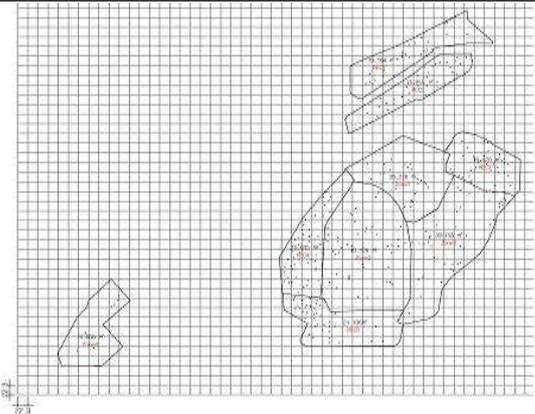
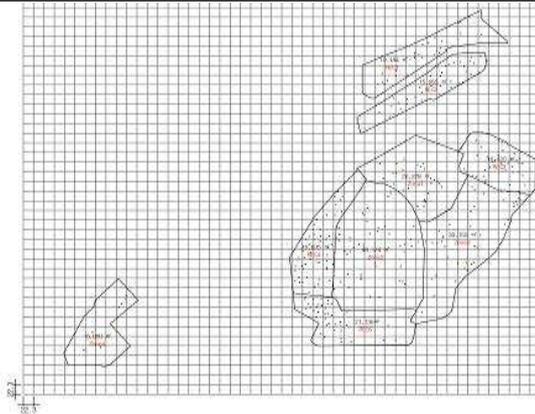
토양정밀조사지침 (환경부)	주한미군 공여구역주변지역 (환경부 예규)
	
<p>이격거리 30.7m (약 1000m<sup>2</sup>당 1지점)</p>	<p>이격거리 30.7m (약 1000m<sup>2</sup>당 1지점)</p>
<p>100지점</p>	<p>100지점</p>

캠프 O3 지역을 토양정밀조사지침(환경부)에 따라 이격거리 30.7m로 나누어 보면 100지점의 조사 지점수를 얻는다. 역시 주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사지침(환경부예규)도 이격거리 30.7m로 나누어 보면 100지점의 조사 지점수를 얻는다.

### 4.3.3 정밀조사에 따른 면적당 지점 수

기존 정밀조사 지침을 바탕으로 하여 조사면적에 대한 이격거리로 조사지점수를 산정하였다.

**표 3-20** 캠프 O3지역 정밀조사에 따른 면적당 지점 수

토양정밀조사지침 (환경부)	주한미군 공여구역주변지역 (환경부 예규)
	
이격거리 20.7m (약 500m <sup>2</sup> 당 1지점)	이격거리 21.4m (약 500m <sup>2</sup> 당 1지점)
227지점	207지점

캠프 O3 지역을 토양정밀조사지침(환경부)에 따라 이격거리 20.7m로 나누어 보면 227지점의 조사 지점수를 얻는다. 주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사지침(환경부예규)에 따라 이격거리 21.4m로 나누어 보면 207지점의 조사 지점수를 얻는다. <표 3-21>에 캠프 O3 지역에 대하여 기존 지침과 제안된 지침의 시료채취 개수를 정리하였다.

**표 3-21** 캠프 O3 지역에 대한 시료채취 개수

Region	면적 (m <sup>2</sup> )	토양정밀조사지침 (환경부)		환경기초조사 지침 (환경부 예규)		통계적기법 적용	
		지점수		지점수		기타지역	
		개황	정밀	개황	정밀	개황	정밀
REC 1	19,184	21	47	21	43	22	52
REC 2	15,955	17	40	17	36	19	45
REC 3	16,420	18	41	18	37	19	46
REC 4	19,635	21	48	21	44	22	53
REC 5	21,136	23	51	23	47	24	56
Total	92,332	100	227	100	207	106	252

#### 4.4 종합적 고찰

기존 국내지침[토양정밀조사지침, 주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사 지침(환경부예규 제304호)의 개황조사와 정밀조사 지침, 통계적 접근을 통한 제안된 토양오염조사지침, 과거에 현장조사를 실시하였던 실제조사와 비교 검토하여 개황조사, 정밀조사 별로 면적당 지점수를 모든 실제 시료채취 캠프들을 아래의 그래프로 나타내었다.

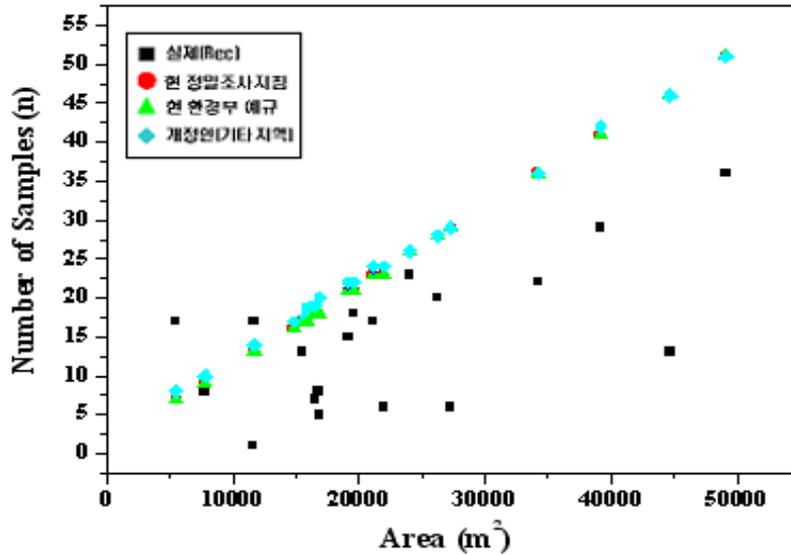


그림 3-21 캠프 O1, O2, O3에 대한 면적에 따른 시료채취개수(개황조사)

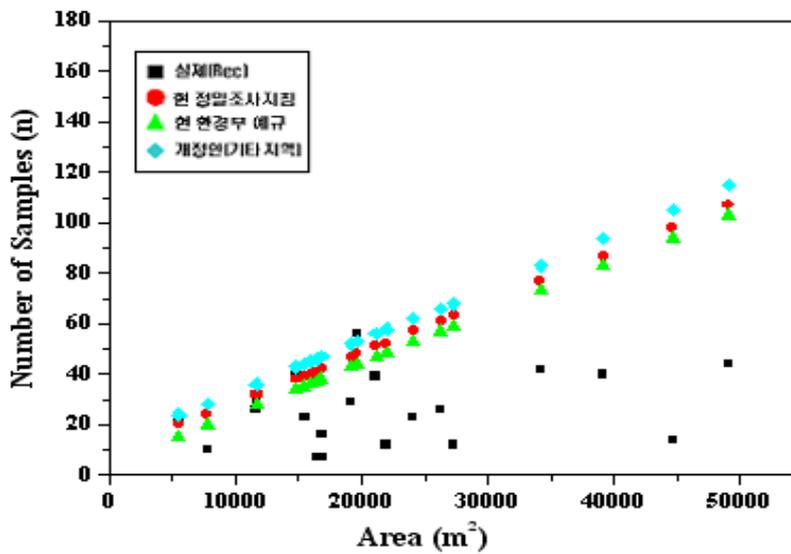


그림 3-22 캠프 O1, O2, O3에 대한 면적에 따른 시료채취개수(정밀조사)

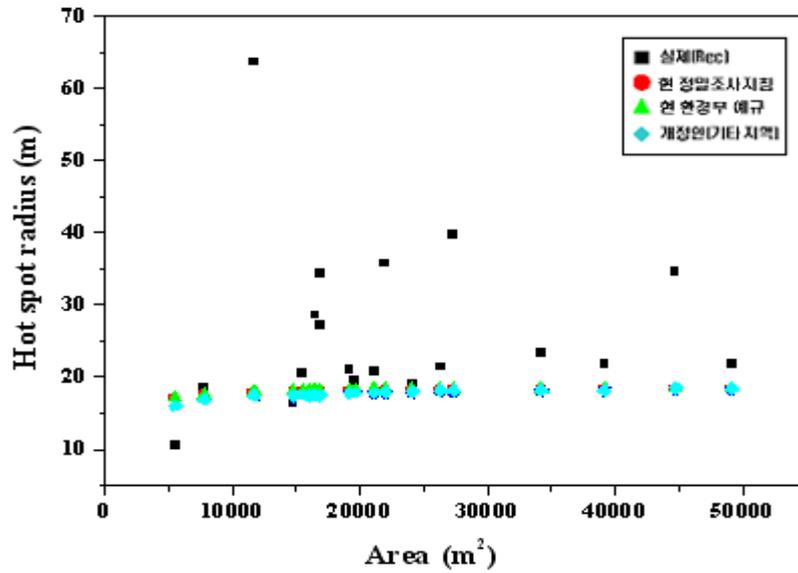


그림 3-23 캠프 01, 02, 03에 대한 95% 신뢰수준으로 발견할 수 있는 최소크기 오염지역 반경(개황조사)

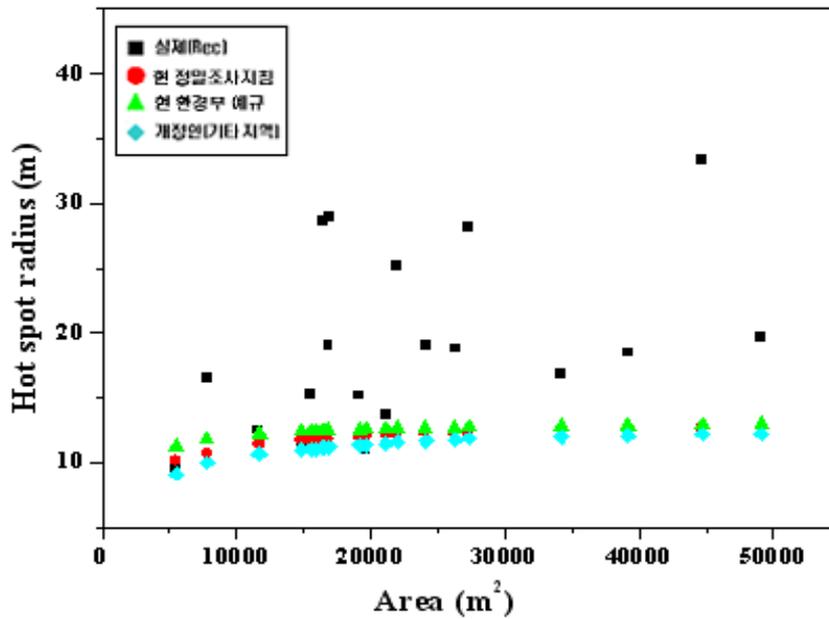


그림 3-24 캠프 01, 02, 03에 대한 95% 신뢰수준으로 발견할 수 있는 최소크기 오염지역 반경 (정밀조사)

개황 조사의 경우 비교적 작은 면적 즉 10,000m<sup>2</sup> 근처의 경우 기존 및 제안된 지침보다 많은 시료개수를 나타냈으며, 이는 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경이 작은 값을 가짐을 의미하고 이를 <그림 3-21~24>에서 확인 할 수 있다. 하지만 그 외의 면적과 정밀조사시의 대부분의 면적에 대해서는 지침보다 적은 시료 개수와 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경이 큰 값을 갖고 있음이 확인 되었다. 대부분의 지역이 지침보다 비슷하거나 낮은 시료채취 밀도를 갖는다. 또한 지침 간을 비교하여 볼 때 제안된 지침은 현 지침과의 면적에 대한 증가의 경향성이 유사하나 시료 채취개수는 다소 많았다. 하지만 전반적으로 큰 차이를 나타내지는 않았음을 확인할 수 있었다.

## 제2절 오염 지하수 조사 방법

지하수의 오염 조사는 지속적인 지하수오염관리 대상에 대한 조사인지, 토양오염지역 중 지하수 오염지역에 대한 조사인지에 따라 조사 방법이 달리 적용되어야 하며 또한 점오염원 지역과 비점오염원 지역, 충적층지하수와 암반층지하수와 같이 지하수의 심도에 따라서도 조사 방법을 달리 해야 한다.

보이지 않는 지표하를 조사하여 오염을 평가해야 하는 지하수 오염조사의 경우 변수가 매우 다양하여 지침의 형태로 조사 방법을 규정하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 우선적으로 지하수 오염조사에 있어 필요한 사항을 가이드라인 형태로 제시하였다.

국내의 경우 지하수 오염에 따른 큰 규모의 조사나 정화 등의 경험이 많지 않으므로 국내 실정에 맞는 오염조사 지침 마련을 위해서는 우선적으로 지하수 오염조사 방법 및 절차의 소개가 필요할 것으로 판단되었다.

외국의 경우에도 규격화된 지침 형태의 오염 조사 보다는 가이드라인 형태로 다양한 오염 조사 방법을 소개하고 오염 조사자가 오염 조사의 목적에 맞는 가이드라인을 취하여 조사를 실시하는 경우가 많다.

따라서 지하수 오염조사에 대한 연구나 경험이 많지 않은 국내의 경우에는 오염조사 가이드라인 형태로 오염조사 방법에 대한 보다 구체적인 내용을 소개하고 이러한 가이드라인의 적용을 통해 얻어진 경험을 바탕으로 지침이 만들어지는 것이 필요하다고 판단하였다.

가이드라인은 우선 국내에서 부분적으로 행해지고 있는 방법과 참고가 되고 있는 규정, 외국의 지하수 오염 조사 방법 중 국내에 적용이 가능할 것으로 보이는 방법들을 적절히 합하여 작성하였다. 외국의 자료의 경우 출처가 확실(UNESCO, EPA 등)하거나 출판물 형태의 자료로서 일반적으로 사용되는 방법이라고 판단된 경우에는 이미 오염 조사 방법으로서의 실효성과 객관성이 검증된 것으로 보아 가이드라인의 내용으로 바로 도입하였다.

본 보고서의 지하수 오염조사의 연구는 크게 2가지로 나눌 수 있는데 하나는 지하수 오염 조사를 주목적으로 하는 경우를 위한 ‘지하수 오염조사 가이드라인(안)’의 제시이고, 다른 하나는 오염토양을 조사함에 있어 지하수 조사가 함께 필요한 경우를 위한 ‘토양정밀조사지침’ 중 지하수 오염조사 방법의 추가에 관한 연구이다.

다음은 ‘지하수 오염조사 가이드라인’의 각 부분에 대한 연구 내용과 ‘토양정밀조사지침’에 포함된 지하수 오염조사 연구에 대해 간략하게 살펴보고자 한다.

## 1. 지하수 오염조사 가이드라인의 내용

부록2에 제시한 지하수 오염조사 가이드라인의 내용을 다음에서 살펴보았다.

### 1.1 지하수 오염조사 절차

가이드라인의 ‘지하수 오염조사 절차’에서는 지하수 오염조사에 필요한 절차를 개괄적으로 정리하였다.

앞에서 조사한 국내 지하수 오염조사 절차를 정리하면 다음과 같다.

주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사지침은 조사 단계를 크게 1단계 환경기초조사와 2단계 환경기초조사로 나누고 있으며 1단계 환경기초조사를 다시 개황조사와 실태조사로 나누어 조사하도록 하고 있다.

군 환경오염조사 표준수행절차의 경우 조사 단계를 크게 기본 현황조사, 세부수리지질조사, 종합분석 및 평가의 단계로 구분하고 있으며, KS규격(오염지역 지하수의 시료채취에 관한 지침;KS I ISO 5667-18, 2006)에서는 주로 시료채취에 관한 절차를 다루고 있는데 조사/모니터링 단계, 장치설치, 관정 정밀조사, 관정 폐징, 시료채취 여과 현장결정, 시료의 보존과 이동으로 구분하고 있다.

국외의 경우 UNESCO 에서는 지하수 오염조사의 주요 단계를 크게 조사 계획(Design), 조사 실행(Implementation), 조사결과 평가(Evaluation of inventory)로 나누고 있으며 각각의 내용은 다음 표와 같다.

표 3-22 UNESCO 지하수 오염조사 절차

조사절차	조사 내용
조사계획	-필요한 조사목록과 조사목적과 부지 특성의 확인 -이용 가능한 데이터와 데이터의 출처 확인 -이용 가능한 재정적, 인적 자원의 고려 -조사 범위 설정 및 조사 방법의 결정
조사실행	-조사팀의 구성 및 지도와 조사 기록지의 준비 -오염원과 존재하는 오염에 대한 조사 -데이터를 이용한 예비 오염원 분류 및 등급 결정 -추가 데이터 필요성 평가 및 현장 조사 완료
조사결과 평가	-데이터의 평가 -오염원의 등급 평가 -지도의 제작 및 최종보고서 작성 -관리 방법의 권고

‘지하수 오염조사 가이드라인’의 오염조사 단계는 토양정밀조사방법과 같이 기초조사, 개황조사, 정밀조사 단계를 기본으로 하였고 사전 계획과 조사결과의 평가를 추가하였다. 시료 채취 절차는 개황 및 정밀조사를 수행하는 현장조사 부분에 포함하였다.

## 1.2 조사 계획의 수립

조사계획의 수립은 조사 목적 달성을 위한 매우 중요한 단계이다. 조사 계획의 수립은 여러 단계에서 필요한데 우선 기초조사나 현장조사를 실시하기 전에 조사의 전체적인 방향이나 조사의 구체적인 정도를 결정하기 위한 계획이 필요하다. 이러한 조사 계획이 수립 되었다면 기초조사를 통해 구체적인 자료를 수집하게 되는데 여기서 수집된 오염원의 종류, 기존 관정의 형태, 과거의 수질 기록 등의 자료를 바탕으로 하여 현장 조사를 위한 개황조사 및 정밀조사 단계의 계획을 수립하게 된다.

개황조사를 통해 오염원과 오염물질이 확인되면 이를 바탕으로 구체적인 정밀조사를 위한 계획을 다시 수립하게 되는데 이러한 과정에서 고려가 필요한 사항들을 기술하였다.

### 1.3 기초조사 및 개황조사와 정밀조사

오염 조사를 함에 있어 현장 조사에 앞서 주로 실내에서 조사 대상지역과 관련된 각종 기존 자료를 수집하는데 이를 기초조사라고 한다. 기초조사는 주로 문헌조사, 청취조사, 현장 답사를 통해 이루어진다.

기초조사를 통해 조사되는 내용은 다음과 같은 것들이 있다.

- 오염 이력 조사
- 잠재오염원의 위치와 규모
- 조사 지역의 수리 수문학적 특성
- 사 지역의 지리, 토양, 지형·지질학적 조사
- 기후 및 기상 파악
- 수질현황

기초조사 후에는 현장에서 주로 조사가 실시되는 개황조사와 정밀조사를 하게 되는데 기초조사 결과를 바탕으로 수리·지질조사, 관측정 설치, 퍼징, 시료채취 등의 조사를 실시하게 된다.

가이드라인에서는 이러한 현장조사를 함에 있어 필요한 사항을 기술하였다.

### 1.4 지하수위 측정

지하수위 측정은 지하수 현황조사를 위한 기초조사에서 뿐만 아니라 오염조사에 있어 매우 중요한 부분이다. 미국, UNESCO의 지하수오염조사 가이드라인에서도 현장조사의 시작은 조사 지역 내의 기존 관측정 및 관정의 수위 측정에서 시작하는 것으로 되어있다. 국내의 경우 ‘지하수 업무수행 지침’에서 지하수 수위 측정 방법을 다루고 있는데 이는 오염조사를 목적으로 하고 있지는 않아, 국외 지하수위 측정 방법을 참고하여 구체적인 방법을 제시하였다.

지하수위는 지표면에서 관정까지의 깊이 측정값(지하수면 깊이)이나 깊이 측정값을 해발고도로 환산한 값을 혼용하여 사용하고 있는데 두 값은 전혀 다른 개념의 값이므로 기존에 혼용하여 사용하고 있던 지표면에서 관정까지의 깊이 측정값을 ‘지하수면 깊이’로 명칭하고 해발고도로 환산한 값만을 지하수위로 명칭 하였다.

지하수위는 주로 지하수의 흐름방향 결정을 위하여 조사하는데 조사 결과를 바탕으로 관측정의 설치 위치를 결정하는데 이용하게 된다.

## 1.5 관측정의 설치 및 관리

관측정은 오염물질의 확인을 위해 설치하는데 설치 위치와 깊이의 결정이 매우 중요한 사항이다. 관측정을 적합한 위치와 깊이로 잘 설치했는지에 따라 오염평가가 제대로 될 수도 그렇지 못할 수도 있다.

관측정의 위치는 오염원의 위치와 지하수 흐름방향을 주로 고려하여 결정되며 관측정 설치 깊이는 모니터링 하고자 하는 대수층의 깊이와 두께에 따라 결정된다. 관측정을 설치할 때는 지하수를 관측정 내로 유입시키는 스크린의 위치가 매우 중요한데 오염물질의 특성, 대수층의 위치에 따라 적당한 위치에 설치되어야 한다.

관측정의 설치는 대표성 있는 시료채취의 관점에서 중요하지만 잘못 설치되었을 경우 지하수의 오염을 확산시킬 수 있으므로 주의가 필요하다.

이와 관련하여 관측정 설치 시 고려해야 하는 사항에 대하여 가이드라인에 구체적으로 제시하였다.

## 1.6 퍼징방법

퍼징은 관측정에 정체되어 있는 지하수를 제거하여 자연 상태의 지하수를 대표하는 시료를 채취하기 위한 절차이다. 보통 관측정은 수질이나 수위 등의 모니터링을 목적으로 하여 설치한 관정을 말하는데 관측정 외에도 수질이나 수량 관측을 위해서는 취수정이나 다른 용도의 관정에서도 모니터링이 행해질 수 있기 때문에 관측정에서 필요한 퍼징의 내용과 오염조사 시 필요한 퍼징의 내용을 혼합하여 기술하였으며 오염조사의 목적에 따라 적절하게 퍼징의 절차를 적용할 수 있도록 상세 내용을 기술하였다.

퍼징은 크게 저유량 접근법(Low-Stress Approach)과 관정 부피 접근법(Well volume approach)에 기초하여 실시하는데 퍼징의 종료 시점은 DO, pH, 전기전도도 등의 수질지시인자가 안정화 되는 시점을 기준으로 한다.

외국의 수질지시인자 안정화 기준은 항목별로 각각 다른 범위의 기준을 가지고 있는데 국내의 관련 규정은 퍼징 시 수질지시인자의 안정화와 관련된 사항을 다루고 있지 않거나, 다루고 있더라도 전체 항목에 대해 일률적으로 10%의 기준을 두고 있다.

퍼징은 대표성 있는 시료채취를 위한 중요한 사전 단계이므로 수질 안정화 확인을 통해 대표성 있는 시료를 채수할 필요가 있다.

본 가이드라인에서는 USGS의 수질지시인자의 안정화 기준을 적용하여 제시하였다. USGS의 기준 외의 수질지시인자 안정화 기준은 아래의 표와 같은데 USGS의 제시 값과 거의 같은 값을 제시하고 있다.

표 3-23 안정화 기준의 예(1)

Parameter	Stabilization Criteria	Reference
pH	+/-0.1	Puls and Barcelona, 1996; Wilde et al., 1998
specific electrical conductance(SEC)	+/-3%	Puls and barcelona, 1996
oxidaiton-reduction potential(ORP)	+/-10millivolts	Puls and barcelona, 1996
turbidity	+/-10%(when turbidity is greater than 10 NTUs)	Puls and barcelona, 1996; Wilde et al., 1998
dissolved oxygen(DO)	+/-0.3milligrams per liter	Wilde et al., 1998

※ 출처 : Ground-Water Sampling Guidelines for Superfund and RCRA Project Managers(US EPA, 2002)

표 3-24 안정화 기준의 예(2)

Water Level Drawdown -----	< 0.3 ft*
pH -----	± 0.1 unit
Specific Conductance -----	± 3%
Temperature -----	± 3%
Dissolved Oxygen -----	± 10%
Turbidity -----	± 10% for values greater than 1 NTU
ORP/Eh -----	± 10 millivolts

※ 출처 : Low Flow Purging and Sampling Guidance(NEW JERSEY Departmental of Environmental Protection)

## 1.7 시료채취

시료채취는 지하수 오염 상태를 평가하기 위한 핵심적인 정보 취득을 가능하게 하는 절차이다. 시료채취는 단순히 관측정 안의 지하수를 채수로 끝나는 것이 아니며, 여러가지 고려할 사항을 가지고 있다.

시료 채취 전에 관측정의 구조를 확인하여 가능하면서도 적합한 시료채취 방법을 선택해야 하며 분석하고자 하는 항목에 따라서도 전처리 방법을 달리하여 시료를 채취해야 한다. 따라서 가이드라인에서는 오염물질별 시료채취 방법과 시료채취 시 주의사항, 시료의 보존 및 운반에 관한 사항을 기술하여 최적의 시료채취가 가능하도록 하였다.

## 1.8 퍼징 및 시료채취 장비

오염 조사 시에는 굴착을 위한 장비, 수리 및 지질 조사를 위한 장비 등이 필요한데 이 중에서 시료채취와 밀접한 관련이 있는 퍼징 및 시료채취 장비에 대해 상세하게 설명하였다.

## 1.9 채취 시료의 정도관리

오염 현장에서의 시료채취는 주변으로부터의 오염 요소가 많아 정도관리에 주의를 기울여야 한다. 본 가이드라인에서는 현장 이중시료(Field duplicate), 운반 바탕시료(Trip blank), 장비 세척 시료(Equipment rinsate blanks) 분석 방법을 제시하여 시험 분석결과의 신뢰성을 높이고자 하였다.

## 1.10 기타

‘예비 지하수 오염평가에 관한 사항’에서는 비용이 많이 소요되는 관측정 설치를 통한 수질 시료 분석 전에 신속하고 간단한 방법으로 오염현황을 조사할 수 있는 방법들을 소개하였다. ‘채취 시료의 여과’에서는 시료 채취 전처리 단계로서 여과가 필요한 경우를 위한 여과 시 주의 사항을 기술하였다.

이외에도 추가적으로 지하수 오염조사를 수행함에 있어 현장 조사 시 필요한 사항이나 조사자가 지하수 오염조사를 수행하기에 앞서 알아두면 좋을 내용을 기술하였다.

## 2. 토양정밀조사지침 개선(안)의 지하수 조사 연구

‘토양정밀조사지침’은 토양환경보전법의 관련 조항에 의한 구체적인 토양정밀조사 방법에 관한 내용을 담고 있는 환경부 지침이다.

토양과 지하수는 동일한 공간에 함께 존재하며 영향을 주고 받으므로 오염 토양이 정화되었다 하더라도 지하수 중의 오염 물질에 의해 다시 오염될 수 있는 가능성을 가지고 있다.

이러한 이유로 토양오염조사 시에는 지하수의 오염 및 영향을 함께 고려해야 할 필요성이 있어 ‘토양정밀조사지침’에서의 지하수오염조사 내용을 검토하고 개선점을 도출하였다.

### 2.1 토양정밀조사지침의 지하수 오염조사 검토

토양정밀조사지침은 조사지역을 광산활동지역, 폐기물 매립지역, 기타지역(유류배출 가능지역, 유해화학물질 저장시설지역, 산업지역)의 3지역으로 나누어 기초, 개황, 정밀조사를 실시한다. 이 중 지하수 관련 내용은 정밀조사의 폐기물 매립지역과 기타지역에서 간단하게 다루고 있는데 그 내용은 다음과 같다.

1) 기초조사

해당 내용 없음

2) 개황조사

해당 내용 없음

3) 정밀조사

(1) 광산활동 관련지역 : 해당 내용 없음

(2) 폐기물 매립지역

○ 대상시료 : 토양, 지하수

○ 시료채취 밀도 : 지하수의 흐름방향을 고려하여 평지의 경우 6~8개 지점, 구배가 있는 지형일 경우 3~4개 지점에 간이 관측정을 설치. 기존 관측정이 있을 경우에는 이를 이용

(3) 기타지역

○ 대상시료 : 토양, 지하수(필요시 하천수 포함)

○ 시료채취 밀도

개황조사 결과에 따른 토양오염도를 고려하여 3~5개 지점에 토양채취 깊이까지 간이 관측정을 설치하여 지하수를 채취하고, 사용 종료 후에는 되메움

○ 토양시료채취방법

개황조사 결과 토양오염도가 지하수의 흐름방향에 따라 일정하게 나타날 경우에는 대상지역을 중심으로 조사밀도를 높여 시료를 채취

## 2.2 토양정밀조사지침 지하수 조사 개선 방향

○ 현 토양정밀조사지침에 의하면 개황조사 결과 오염이 의심되는 지역에서 실시하는 정밀 조사를 실시할 때에만 지하수 오염조사 관련 내용이 들어가 있다. 이는 토양이 오염되었을 경우에 추가적으로 지하수 오염조사를 실시할 경우에만 지하수 오염조사를 실시하고 있는 것이다. 따라서 본 연구에서도 토양정밀조사지침 개정(안)의 개선 대상을 정밀조사 부분에 한정하여 내용을 보완하였다.

○ 토양정밀조사지침(안)의 오염지역 구분은 다음과 같이 5개 지역으로 구분하였으므로 각각의 지역에 대해 지하수 오염조사 방법을 제시하였다.

- 광산활동관련지역(제련소, 소각시설 및 금속광산, 폐수유입관련 지역)
- 폐기물 관련지역(폐기물 야적, 적환, 매립지역 등)
- 주유소 지역

- 사격장 지역
  - 기타 지역(유류배출 가능지역, 유해화학물질 저장시설지역, 산업지역 등)
- 각 지역별 접근 방법은 오염지역의 규모에 따라 점오염원과 비점오염원으로 구분하여 접근하였다.

## 2.3 지하수 조사 개선 참고 자료

### 1) 호주의 주유소 지역 지하수 오염 평가 방법

호주의 주유소 부지 평가를 위한 지침에서는 주유소 부지의 지하수의 오염 평가를 다음과 같이 하도록 하고 있다.

- 부지 내에서 지하수가 발견된 경우 지하수를 채취하여 분석을 실시한다.
- 지하수는 일반적으로 포화대와 불포화대가 접하는 지점에서 채취되어야 하며, 그렇지 않을 경우 오염에 대한 현장 관찰결과에 근거하여 좀 더 깊은 깊이에서 채취되어야 한다.
- 지하수가 존재하는 지역의 경우 지하수 수질을 평가하기 위해 최소 1개의 관측정을 설치하여야 한다. 관정의 수와 위치를 결정한 이유는 기록되어야 한다.
- 다음의 표는 지하수 시료채취의 최소 준수 사항인데 이 내용을 변경하여 적용하는 경우 그 이유를 기록해야 한다.

표 3-25 주유소 부지 지하수 시료채취의 최소 준수사항

위치	관측정의 수	작업내용	분석항목
오염원에 인접한 수리학적 하류부인 부지 내부	부지 내 오염지역 당 1개소	<ul style="list-style-type: none"> <li>관측정 설치 중 토양시료 채취</li> <li>설치깊이는 지역적, 수리지질학적 상황을 고려하여 결정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TPH/BTEX</li> <li>납<sup>2)</sup></li> <li>PAHs</li> <li>페놀<sup>3)</sup></li> </ul>
부지경계선에 인접한 수리학적 하류부인 부지 외부 <sup>1)</sup>	부지 당 1개소 (부지 내부의 지하수가 오염된 경우에 한함)		
부지경계선에 인접한 수리학적 상류부의 부지 외부	부지 당 1개소 (부지 내부의 지하수가 오염된 경우에 한하며 배경농도확인을 위함)		

- 비고 (1) 부지 외부의 경우 관련자 또는 단체의 동의와 승인이 가능한 경우 수행  
 (2) 납 항목의 연료가 납을 함유했거나 확인되지 않은 경우 분석  
 (3) 페놀 항목은 폐유 또는 원인불명에 의한 오염인 경우 분석

- 지하수오염이 확인될 경우 탱크 피트와 또는 다른 잠재적 오염원의 수리적 하류방향으로 최소 2개의 관측정을 설치하여 부지 외부로의 이동확산의 범위에 대한 조사가 이루어져야 하며 최소 1개의 관측정이 배경농도에 대한 조사를 위해 수리적 상류부에 설치되어야 한다. 관측정을 설치하는 동안 토양시료가 채취되어야 하며 채취 깊이는 포화대와 불포화대가 접하는 지점 또는 오염에 대한 현장 관찰결과에 근거하여 좀 더 깊은 깊이가 되어야 한다.
- 관측정을 포함하는 어떠한 지하수 시추공이라도 Water Act 1912의 파트 5에 근거하여 수자원국의 허가를 받아야 한다. 지하수 관측정의 설치가 대수층과 난투수층의 오염으로 진행되지 않도록 지하수층은 지표면의 오염물질로부터 불투수층에 의해 격리되어야 한다.
- 만일 탱크 피트에 대한 굴착, 화학적 실험 및 다른 오염지역의 현황 등 부지에 대한 조사결과 오염되지 않았거나 오염물질의 확산이 없었다는 것이 명백할 경우에는 관측정 설치하는 생략될 수 있으며 이러한 내용은 보고서에 기록되어야 한다.

2) 점오염원 지역의 일반적인 지하수 조사방법

다음은 미국에서 행해지고 있는 점오염원 지역의 지하수 오염조사 방법이다.

(1) 지하수 흐름 방향을 알고 있을 경우

- ① 오염원 상류 1지점
- ② 오염원 하류 1지점(예상 오염원이 여럿인 경우 각각 1지점씩 설치)

(2) 지하수 흐름 방향을 모를 경우

- ① 최소한 3개의 관측정 설치
- ② 조사 지역 주변에 등변삼각형 형태로 관측정 설치  
3개의 관측정 중 하나는 지형학적으로 가장 오염이 심할 것으로 예상되는 지역의 내리막 쪽에 위치시킴
- ③ 정삼각형 형태의 조사를 통해 지하수 흐름 방향을 결정한 후 각각의 오염원 하류에 하나씩의 관측정 설치

다음은 위 설명에 의한 방법을 <그림3-25 ~ 26>으로 나타내고 있다.

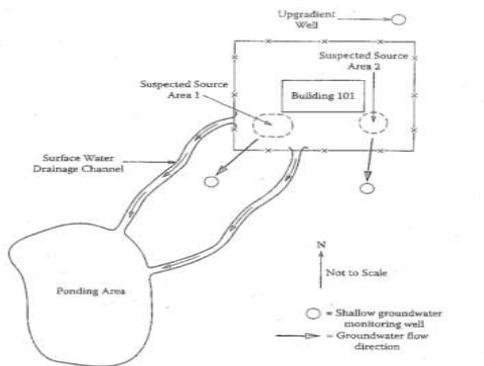


Figure 4-48 Common initial groundwater well configuration when the general groundwater flow direction is known. (From Byrnes, 1994, *Field Sampling Methods for Remedial Investigations*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.)

그림 3-25 지하수 흐름 방향을 알고 있을 경우

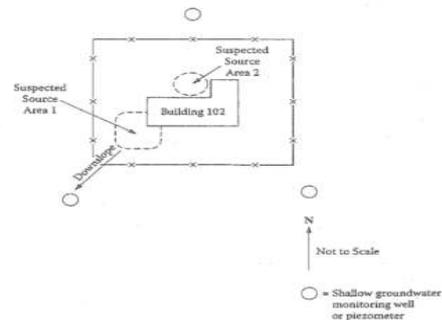


Figure 4-49 Common initial groundwater well configuration when the general groundwater flow direction is unknown. (From Byrnes, 1994, *Field Sampling Methods for Remedial Investigations*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.)

그림 3-26 지하수 흐름 방향을 알지 못할 경우

(3) 기타 국내·외 지하수 오염조사 방법

## 2.4 토양정밀조사지침(안)의 정밀조사 부분 지하수 오염조사 개선(안)

1) 광산활동관련지역

- 기존 : 지하수 조사 내용 없음
- 근거

개황조사로 오염이 확인된 지역이므로 점오염원의 오염 조사 방법 적용

○ 개선(안)

광미장 등 개황조사 결과 오염이 매우 심한 지역에 대해서는 오염지역을 중심으로 3개 이상의 관측정(삼각형 형태의 3개 지점 포함)을 설치하여 오염물질 특성 및 수리지질학적 특성을 고려한 깊이에서 지하수를 채취하고 사용 종료 후에는 되메움

- 지하수 흐름 방향을 확인한 경우 오염지역 상류와 하류지역에 각각 1개 이상의 관측정을 설치
- 관측정 설치로 인한 오염 확산이 되지 않도록 주의
- 삼각형 형태의 관측정 중 하나는 지형학적으로 가장 오염이 심할 것으로 예상되는 지역의 내리막 쪽에 위치시킴

2) 폐기물 관련지역

○ 기존 :

- 시료채취 밀도 : 지하수의 흐름방향을 고려하여 평지의 경우 6~8개 지점, 구배가 있는 지형일 경우 3~4개 지점에 간이 관측정을 설치. 기존 관측정이 있을 경우에는 이를 이용

○ 근거

개황조사로 오염이 확인된 지역이므로 점오염원 지역에서의 오염 조사 방법 적용

○ 개선(안)

개황조사 결과 오염이 확인된 지역을 중심으로 3개 이상의 관측정(삼각형 형태의 3개 지점 포함)을 설치하여 오염물질 특성 및 수리지질학적 특성을 고려한 깊이에서 지하수를 채취하고 사용 종료 후에는 되메움

- 지하수 흐름 방향을 확인한 경우 오염지역 상류와 하류지역에 각각 1개 이상의 관측정을 설치
- 관측정 설치로 인한 오염 확산이 되지 않도록 주의
- 삼각형 형태의 관측정 중 하나는 지형학적으로 가장 오염이 심할 것으로 예상되는 지역의 내리막 쪽에 위치시킴

3) 주유소 지역

○ 기존 : 지역 구분 없음(신규 설정 지역)

○ 근거

호주의 주유소지역 오염조사 방법과 점오염원 지역에서의 오염조사 방법을 일부 적용

○ 개선(안)

개황조사 시 오염이 확인된 지역(유류저장 탱크 등 점오염원)을 중심으로 3개 이상의 관측정(삼각형 형태의 3개 지점 포함)을 설치하여 오염물질 특성 및 수리지질학적 특성을 고려한 깊이에서 지하수를 채취하고 사용 종료 후에는 되메움

- 지하수 흐름 방향을 확인한 경우 오염지역 상류와 하류지역에 각각 1개 이상의 관측정을 설치
- 관측정 설치로 인한 오염 확산이 되지 않도록 주의
- 삼각형 형태의 관측정 중 하나는 지형학적으로 가장 오염이 심할 것으로 예상되는 지역의 내리막 쪽으로 점오염원에 인접하도록 위치시킴
- 지하수면 부근의 시료 1개는 반드시 채취하고 필요에 따라 깊이별로 시료를 채취하여 오염을 확인

4) 사격장 지역

○ 기존 : 지역 구분 없음(신규 설정 지역)

○ 근거

사격장은 규모가 매우 다양하나 개황조사 결과 오염이 확인된 지역이므로 점오염원으로 보아 점오염원 지역에서의 오염조사 방법 적용

○ 개선(안)

개황조사 시 오염이 확인된 지역을 중심으로 3개 이상의 관측정(삼각형 형태의 3개 지점 포함)을 설치하여 오염물질 특성 및 수리지질학적 특성을 고려한 깊이에서 지하수를 채취하고 사용 종료 후에는 되메움

- 지하수 흐름 방향을 확인한 경우 오염지역 상류와 하류지역에 각각 1개 이상의 관측정을 설치
- 관측정 설치로 인한 오염 확산이 되지 않도록 주의
- 삼각형 형태의 관측정 중 하나는 지형학적으로 가장 오염이 심할 것으로 예상되는 지역의 내리막 쪽에 위치시킴

5) 기타지역(유류배출 가능지역, 유해화학물질 저장시설지역, 산업지역)

○ 기존 :

- 시료채취 밀도

개황조사 결과에 따른 토양오염도를 고려하여 3~5개 지점에 토양채취 깊이까지 간이 관측정을 설치하여 지하수를 채취하고, 사용 종료 후에는 되메움

- 토양시료채취방법

개황조사 결과 토양오염도가 지하수의 흐름방향에 따라 일정하게 나타날 경우에는 대상 지역을 중심으로 조사밀도를 높여 시료를 채취

○ 근거

개황조사로 오염이 확인된 지역이므로 점오염원 지역에서의 오염 조사 방법 적용

○ 개선(안)

사격장 지역과 같음

### 제3절 토양정밀조사 지침 개정안 방향

앞장들에서 논의된 내용을 기준으로 통계적 기법을 이용한 조사방법을 적용하여 토양정밀조사지침 안(부록 참조)을 제안하였다. 특히 환경관리공단의 “토양정밀조사지침 개정을 위한 최종보고서(‘07.12)”에서 제시되고 있는 내용들이 본 연구진이 추진하고자 하는 연구내용(지침의 명칭, 조사대상, 배경농도, 결과조치 등)과 유사하고 잘 제시되어 있어 이를 인용하였으며 개황 및 정밀조사 부분은 본보고서 3장 제1절의 통계적 기법을 이용한 조사방법을 적용하여 작성하였다. 본 장에서는 기존의 토양정밀조사지침의 내용을 대상으로 문제점 및 지침개정을 위한 개선사항에 대해 논의하고자 한다.

#### 1. 지침의 명칭에 대한 사항

토양정밀조사지침안의 조사 절차상에 기초, 개황, 정밀조사 단계의 “정밀”이라는 용어가 중복하여 사용됨에 따라, 조사단계를 1단계조사, 2단계조사, 3단계조사로 변경하여 토양정밀조사의 수행에 있어 조사 수행자간 혼란을 일으킬 소지를 줄이는 방향으로 개선하고자 하였다.

#### 2. 조사대상지역에 대한 사항

현행 토양정밀조사지침은 시료채취지점 대상지역을 광산활동 관련지역(가행 또는 휴,폐광산 및 체련소 지역), 폐기물 매립지역 및 기타 지역(유류배출 가능지역, 유해화학물질 저장시설지역, 산업지역 등) 등 세 지역으로 분류하고 있다.

이를 다음 <표 3-26>과 같이 5개 지역으로 구분하고 오염특성에 따라 세부구역으로 분류하여 보다 구체적인 조사를 수행하고자 하였다.

이 중 광산활동 관련지역의 경우 대부분 오염대상면적이 넓고 확산매체의 종류와 방향에 따라 오염물질의 분포가 달라지기 때문에 면적 대비한 일률적인 시료채취밀도와 시료채취방법 적용에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 따라서 개정 지침(안)에는 광산활동 관련지역의 경우는 1, 2구역으로 분류하여 오염특성과 확산매체에 따른 합리적인 조사가 이뤄지도록 하였다. 1구역은 체련소 및 소각시설 등 오염물질 비산확산우려지역으로, 2구역은 금속광산 및 폐수유입 관련지역 등 오염물질 수계확산우려지역으로 나누어, 비산확산우려지역에서는 주풍향 및 착지지점을 고려하여 방위별로 시료채취를 실시하고, 수계확산우려지역은 광미장이나 폐수유입 지역 등을 기점으로 하천에 인접한 부지에 대해 오염원의 특성과 기초조사에서 파악한 내용을 참고하여 거리별로 시료 채취하는 방법을 적용하였다.

표 3-26 조사대상지역의 분류

조사 대상 지역	구분	세부지역 분류
광산활동 관련지역	1구역	제련소, 소각시설 등 오염물질 비산확산우려지역
	2구역	금속광산, 폐수유입관련지역 등 오염물질 수계확산우려지역
폐기물 관련지역	-	폐기물 야적, 적환, 매립지역 등
주유소 지역	-	주유소 지역
사격장 지역	1구역	피탄지 주변지역
	2구역	하천 등 지표수에 의한 오염의 수계확산 우려지역
기타 지역	1구역	오염이 존재할 가능성이 큰 구역
	2구역	오염이 존재할 가능성이 적은 구역
	3구역*	오염이 존재할 가능성이 없다고 생각되는 구역

신규 추가지역인 주유소의 경우는 현재 전국에 약 13,000여개 이상의 주유소가 운영 중에 있으며 주로 도시지역에 위치하고 있어 토양오염이 발생할 경우 주변지역에 미치는 환경영향이 크며 현재도 정밀조사의 주요 대상이 되고 있어 기타지역에서 제외하여 별도의 조사대상지역으로 하였다.

또한 사격장을 추가로 신규 대상지역에 포함시켰는데, 사격장의 경우도 역시 군사격장 외에 클레이사격장 등 민간사격장이 전국적으로 늘어나고 있는 실정이며, 일본, 미국, 유럽 등 세계적으로도 사격장에 대한 오염부분에 대해 대책을 마련하고 있는 실정이어서 조사대상지역에 포함하는 것을 제안하고자 한다. 특히 사격장의 경우 주 오염물질은 중금속류와 화약류가 될 가능성이 높고 오염지역은 주로 피탄지와 그 주변지역이 될 것이다. 주요오염원인 피탄지 주변을 오염시킨 물질은 토양오염을 지속적으로 유발시킬 수 있으며 사격장의 피탄지가 주로 경사지역에 위치하는 특성을 감안하면 인근의 하천 또는 강우시의 지표수 흐름을 따라 수계를 통해 확산될 가능성 또한 높다. 따라서 이러한 오염특성에 따라 피탄지 주변을 1구역으로, 인근 피탄지 주변 하천 등 지표수에 의한 오염의 수계확산 우려지역을 2구역으로 구분하고 사격장 지역의 토양시료 채취밀도는 피탄지의 면적을 기준으로 폐기물 매립지의 기준을 기본적으로 적용하고, 하천 등 지표수에 의한 오염 확산이 예측될 경우는 해당지역에 대해 별도로 광산활동 관련지역의 수계확산우려지역의 기준을 적용하는 것으로 하였다.

기타지역의 경우, 주유소 제외 유류배출가능지역, 유해화학물질 저장시설지역, 산업지역 등으로 유류배출가능지역은 주유소를 제외한 유류배출 가능한 지역으로 주로 산업부지가 그 대상이라 볼 수 있어 그동안의 주요 정밀조사 대상 그룹이었던 주유소지역과는 차별성을 두고자 대상에서 주유소는 제외하는 것으로 하였다.

그 밖에 현행 지침에서 적용했던 일률적인 시료채취밀도를 오염범위에 타당하도록 오염개연성을 바탕으로 조정하고자 하였다. 이에 조사대상구역을 1, 2, 3구역으로 부지 내 오염가능성에 따라 구획을 짓고 1구역은 유류, 유독물 등 특정유해물질을 직접 다루는 부지로 오염이 존재할 가능성이 큰 구역, 2구역은 사무소, 관리동 등 유류, 특정유해물질을 직접 다루지 않지만 오염이 존재할 가능성이 있는 구역으로 시료채취밀도를 비교적 포괄적으로 실시하고, 3구역은 오염이 존재할 가능성이 없을 것으로 판단되는 구역(예: 운동장, 직원용 주차장, 숙소 등)으로 시료채취를 생략하는 것으로 하여, 조금 더 합리적인 시료채취를 할 수 있도록 조정하였다.

앞의 1, 2, 3구역에 대한 분류를 좀 더 자세히 하면 다음과 같다.

1구역의 경우 토양오염이 존재할 가능성이 큰 구역으로 예를 들면 유류, 유독물 등 특정유해물질 사용 특정시설 및 그것을 설치하고 있는 건물, 특정유해물질 사용 특정시설과 연결되어 있는 배관, 특정유해물질 사용 특정시설과 배관으로 연결되어 있는 시설, 특정유해물질 사용 특정시설 및 그 관련 시설의 배수관 및 배수 처리 시설, 특정유해물질을 사용하는 작업장, 특정유해물질을 보관하는 창고, 특정유해물질 또는 특정유해물질을 포함하는 것의 침투·매설 장소 등을 들 수 있으며 범위 내에 특정시설과 연결되어 있는 지중 배관이 있을 경우 1구역으로 간주하여 조사한다.

2구역의 경우는 특정유해물질의 사용 등을 실시하고 있는 부지는 아니지만, 특정유해물질 사용 특정시설 및 그 관련 시설의 부지로부터, 그 용도가 전혀 독립하고 있다고는 말할 수 없는 부지를 가리킨다. 예를 들면, 사무소(종업원이 출입할 수 있는 곳에 한정), 작업장, 자재 창고, 작업 차량용 통로, 사업용 주차장, 사무실 앞뜰 공터(종업원이 출입할 수 있는 것에 한정), 복수의 공장 건물을 가지는 경우에 대해 유해물질 사용 특정시설과 일련의 생산 프로세스를 구성하고 있지 않는 공장 건물의 부지 등을 들 수 있다.

3구역의 경우는 특정유해물질 사용 특정시설로부터 그 용도가 완전히 독립하고 있는 상태가 계속되고 있는 부지를 가리키며 그 예로 산림, 완충녹지, 종업원의 숙소, 주차장, 운동장, 체육관, 그 밖의 미이용지 등을 들 수 있다.

다만 녹지, 주차장 등이어도, 조사 대상의 특정시설에서 사용한 특정유해물질에 관계하는 배관 등이 설치되어 있거나(과거사용 포함), 조사 대상의 특정유해물질에 관계하는 자재 창고, 특정유해물질 운반차량의 주차장으로 사용되는 경우는 1구역으로 간주하여 조사한다.

### 3. 조사대상지의 적용범위에 관한 사항

현행 토양정밀조사지침은 기초조사와 개황조사를 통해 토양오염우려기준을 초과하거나 초과할 가능성이 있는 지역에 대해 정밀조사를 실시하도록 규정하고 있으나 조사의 범위가 불분명하여 불필요한 범위까지 조사하는 문제를 야기할 수 있는 실정이다.

이에 현 지침 「제2장. 2.조사절차. 다.정밀조사의」 “개황조사 결과 토양오염우려기준을 초과하거나 이에 근접하는 지역에 대하여는 정밀조사를 실시한다.”의 부분을 “2단계조사 결과 토양오염우려기준을 초과하거나 토양오염우려기준의 40%이상의 지역에 대하여는 3단계조사를 실시한다.”의 내용으로 개정하여 실질적으로 현장 실무자들이 암묵적으로 활용하고 있는 토양오염우려기준의 40%로 구체화하여 조사범위를 명확히 하고자 하였다.

또한 일본의 토양오염대책법의 시료채취 대상지역의 격자 구획 설정방법을 적용하여 조사대상지를 구획할 때 비교적 통일된 방법을 사용할 수 있도록 적용하여 보았다. 개황조사 시 통계적 방법에 의해 시료채취개수를 구하고 대상지역을 규칙적인 격자로 나누어 시료채취지점을 산정할 때 규칙적인 사각격자의 기점을 대상지형도에서 가장 북쪽인 지점(당해지점이 복수인 경우 그 중 가장 동쪽에 있는 점)을 통과하도록 동서, 남북방향으로 격자를 긋고 이를 이용하여 조사대상지를 구획한다.

단 기점을 중심으로 격자선을 회전시켰을 때 격자의 개수를 감소시킬 수 있는 경우 격자의 수를 최대한 작아지도록 하며, 이때 기점을 중심으로 오른쪽으로 회전시키는 각도를 최소화시키는 방법으로 조사대상지를 구획하는 방법이다.

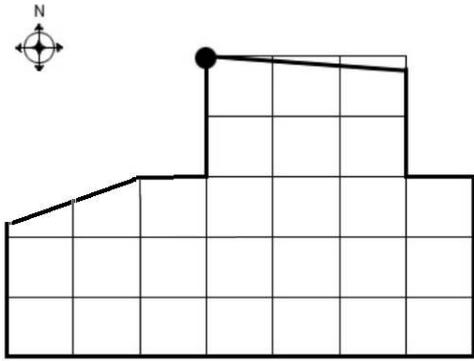
또한 격자 간 대상지역의 통합의 경우 조사대상 면적이 일정한 형태를 갖지 않음으로 인해 발생하는 잉여지역에 대해 한 격자 면적의 30%를 넘지 않는 범위에서 이웃한 지점 간에만 통합하도록 하여 보다 조사대상범위를 명확히 하도록 하였다.

자세한 사항은 다음과 같다.

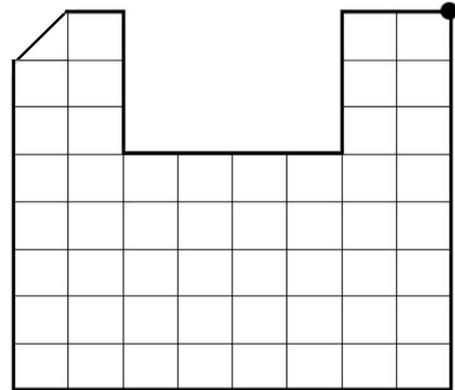
#### 1) 시료채취 대상지역의 격자 구획 설정방법

- (1) 조사대상지의 최북단 지점(2개 이상일 경우에는 가장 동쪽에 있는 지점)을 기점으로 한다.
- (2) 기점에서부터 동서방향 및 남북방향으로 각 대상지별 시료채취밀도에 적절한 간격으로 선을 그어 조사대상지를 격자 형태로 구획(단위구획)한다. <그림 3-27> 참조.

(범례)  
 □ : 조사대상지  
 • : 기점  
 □ : 단위구획



(a) 기본적인 기점배치

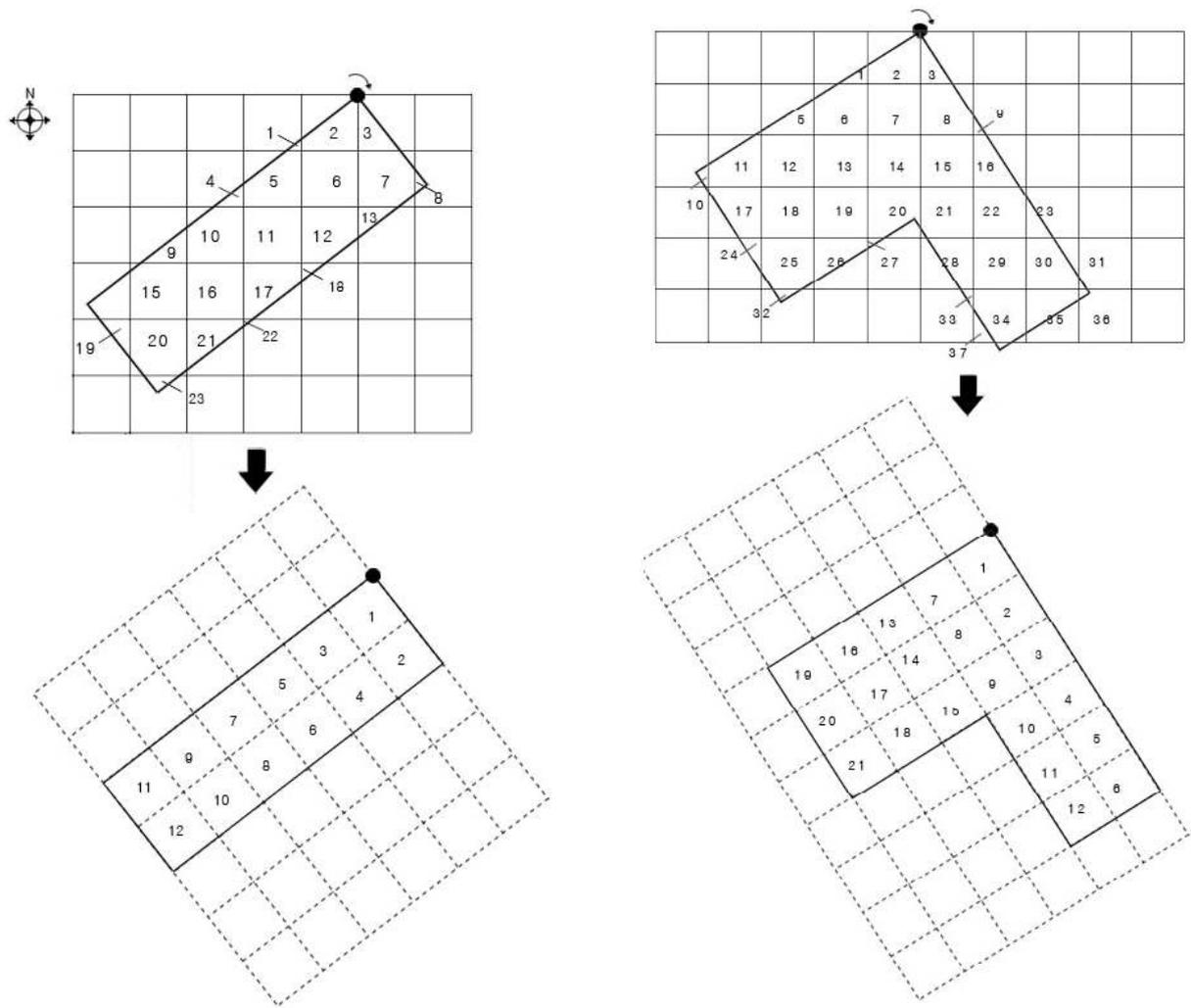


(b) 최북단 지점이 2개 이상인 경우

그림 3-27 일반적인 단위구획의 설정방법

조사대상지의 바깥 가장자리가 동서방향 및 남북방향과 직각을 이루지 않아 조사대상지 가장자리에 삼각형의 구획이 여러 개 생겨 단위구획의 수가 많아지는 경우에는 기점을 중심으로 격자 선을 시계방향으로 회전시켜 단위구획의 수를 최소로 하여 가장 효율적인 조사대상 면적이 되도록 한다. 또한 이 경우 회전 각도는 최소로 한다.

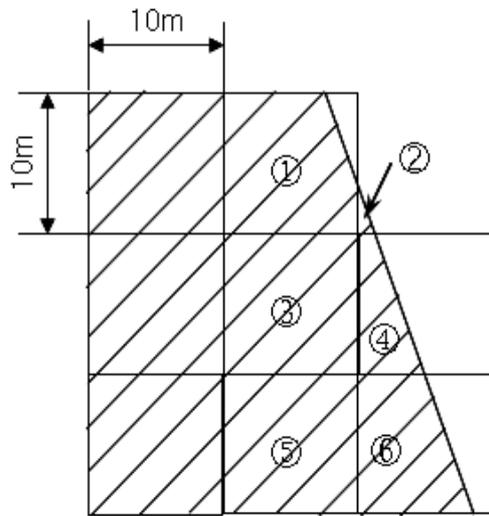
구체적으로는 조사대상지의 긴 변 방향으로 격자 선이 평행이 되도록 회전시키는 경우 등이 있다. <그림 3-28> 참조.



(범례)  
 □ : 조사대상지  
 • : 기점  
 □ : 단위구획

그림 3-28 격자를 회전시키는 경우 단위구획의 설정방법

(3) 시료채취 대상 면적이 격자 형태에서 많이 벗어나는 경우에는 <그림 3-29>에서 보는 바와 같이 격자에 모자라는 면적과 남는 면적간의 통합(격자 1개 면적의 30%이내)이 가능하다. 예를 들면 10m 격자의 경우 통합하는 면적이 130m<sup>2</sup> 이하이어야 하고 이웃한 지점 간에만 통합이 가능하며, 단위격자의 한 변의 길이가 20m를 초과하지 않는 범위(격자 1변 길이의 2배 이내) 내에서만 통합이 가능하다. 이는 면적이 작아도 장축이 길어지면 구획의 중심점을 오염여부를 나타내는 대표점이라 할 수 없기 때문이다.



인정 여부	조건
O	①+② < 130m <sup>2</sup>
O	③+④ < 130m <sup>2</sup>
X	⑤+⑥ > 130m <sup>2</sup>
O	④+⑥ < 130m <sup>2</sup>
X	②+③ < 130m <sup>2</sup> (인접하지 않음)
X	②+④+⑥ < 130m <sup>2</sup> (단위격자의 한변의 길이가 20m 초과)

그림 3-29 가장자리에서 구획 병합의 조건 (10m\*10m를 예시한 경우)

#### 4. 시료채취밀도에 대한 사항

시료채취밀도의 경우 토양오염정밀조사지침 개정안의 대상지역을 중심으로 3장 제1절에서 통계적 방법을 이용하여 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경의 변환을 통한 시료채취개수에 대해 고찰하여 보았다. 고찰한 결과 광산 활동 관련지역이나, 폐기물 관련지역 등은 현행지침과 큰 차이가 없어 굳이 통계적인 방법을 사용하기보다는 현행지침의 밀도를 그대로 사용하고자 하였다. 특히 3장 제1절에서와 같이 복잡한 회귀식을 사용하는 부분에 대해 사용의 편의성부분이 문제가 되어 되도록 기존지침방식과 같이 지침 안에 면적대비 지점수를 표로 나타내주는 방식을 선택하였다.

그러나 주유소의 경우는 신규지역으로서 호주의 주유소에 대한 토양시료채취밀도를 근거로 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경을 통한 개수 산정방식을 취하였으므로 별도로 부록1의 별표 5에 산정근거방식을 표로 나타내었다.

주유소의 경우 호주의 2,000m<sup>2</sup>의 면적대비 최소 28개의 밀도를 적용하였으며, 이는 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염반경이 5m를 의미하므로 2,000m<sup>2</sup> 면적을 기준하여 2,000m<sup>2</sup> 이하 면적에 대해 개황조사의 경우는 R값이 12m, 정밀조사의 경우에는 호주 지침과 같은 5m 가 되도록 하였다. 2,000m<sup>2</sup> 이상의 대상면적에는 현 지침의 기타지역에서 나타내는 면적증가에 따른 시료개수 증가 비율과 유사한 회귀식으로 표현하여 대상면적이 정하여지면 R값이 결정되도록 하였다.

주유소의 경우는 대부분 대상면적이 소규모이므로 정밀조사지침에 주어진 표의 10,000m<sup>2</sup> 안에서 거의 시료채취개수를 파악이 가능할 것으로 예상되나 만약 10,000m<sup>2</sup> 이상의 경우에 대해서는 별표 5의 회귀식을 이용하여 산정 가능하도록 하였다.

두 번째 신규지역인 사격장의 경우는 주요염원인 피탄지주변(1구역)과 주요염원인 피탄지를 중심으로 한 인근 하천 등으로 인한 수계확산오염우려지역(2구역)으로 구분하였으며 1구역의 경우는 폐기물관련지역의 채취밀도를 적용하였으며 2구역의 경우는 하천 등 지표수에 의한 수계확산오염우려지역이므로 광산 활동 관련지역의 2구역인 수계확산우려지역의 채취밀도를 적용하였다.

기타지역의 경우 통계적 방법을 이용하여 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 오염 반경의 변환을 통한 시료채취개수에 대해 고찰한 결과 현행의 개황이나 정밀 모두 기존지침과 거의 비슷한 수준으로 조사되었다.

다만, 현행지침에서 적용했던 일률적인 시료채취밀도를 오염범위에 타당하도록 오염개연성을 바탕으로 대상구역을 1, 2, 3구역으로 분류하였으므로 개정안에서는 2단계(개황)조사 1구역의 경우는 현행기타지역의 개황조사 밀도를 그대로 적용하였으며 2구역인 경우는 1구역보다는 포괄적인 밀도인 현행지침의 개황조사의 폐기물 시료채취밀도를 적용하였다. 기타지역 3단계(정밀)조사의 경우는 통계적 방법을 이용한 방법으로 산정한 밀도와 현행지침의 시료채취밀도가 거의 비슷하여 현행 시료채취밀도를 그대로 적용하였다.

## 5. 시료채취심도에 대한 사항

토양오염정밀조사지침 개정안에서는 현행지침의 채취심도 중 폐기물 관련지역, 기타지역의 경우 채취심도와 표토대 심토비율을 광산 활동 관련지역의 3단계(정밀)조사의 경우에 대해서는 표토대 심토비율을 수정 제안하고자 한다.

먼저 폐기물 관련지역과 기타지역의 경우 심토의 경우 원칙적으로 15m까지를 기준으로 총 5점을 채취하며 암반층이 나타날 경우 그 깊이까지 채취하도록 되어있으나 지표하 15m까지 확일적으로 채취하는 방식은 오염특성이 반영되지 않은 과도한 조사가 될 수도 있다. 혹은, 15m보다 더 깊은 지역까지 오염되었을 경우 오염 범위 파악에 오류를 범할 가능성이 있으므로 미국이나 호주등과 같이 심도를 일률적으로 규정하기보다는 오염특성에 맞게 조사자가 판단하여 채취심도를 결정하도록 하고자 하였다.

1단계(기초)조사를 통해 오염의 확산심도를 예측하고 2단계조사에서 예측된 심도를 바탕으로 오염의 특성에 따라 심도를 조정하여 시료를 채취하고 3단계(정밀)조사에서는 2단계 조사결과를 기준으로 오염의 수직분포를 확인하도록 하여 불필요한 조사비용을 줄이고 효율적인 시료채취가 이뤄질 수 있도록 하였다.

그리고 신규지역인 주유소 경우는 비교적 비슷한 분류지역인 기타지역에 준하여 채취심도를 산정하였다.

그리고 표토대 심토의 비율은 현행지침에서의 개황조사 모두 3:1의 수준이고 정밀조사에서는 광산 활동 관련지역에서만 6:1의 비율을 가지고 있다. 정밀조사에서 표토대 심토의 6:1의 수준은 토양오염의 수직적 분포 파악에 미흡한 것으로 판단되어 3:1수준으로 통합하는 것이 타당하다고 판단되어 광산 활동 관련지역 정밀조사의 경우 표토대 심토비율을 3:1로 수정, 제안하였다.

또한 폐기물관련지역, 기타지역, 주유소지역 등은 표토 오염파악 중심인 3:1의 표토대 심토의 비율보다는 침출수, 유류 등의 액상오염물질의 확산 등의 경우는 심토의 오염현황파악이 더 중요하므로 표토와 심토비율을 삭제하고 오염특성에 맞게 심도를 결정하도록 하여 효율적인 조사가 되도록 제안하였다.

## 6. 배경농도조사에 대한 사항

현재 토양오염의 기준으로 설정된 물질은 카드뮴, 구리, 납 등의 중금속과 불소, 유기인화합물 등의 유무기 유해화합물 및 유류(BTEX, TPH)와 유기용제류(TCE,PCE), 벤조(a)피렌 등 22개 항목이다. 이 중에서 일부는 자연 중에 자연적으로 존재하고 있는 물질도 있다. 토양오염이 “사업 활동 기타 사람의 활동에 따라 토양이 오염되는 것으로서 사람의 건강, 재산이나 환경에 피해를 주는 상태”로 정의된 것을 감안하면 자연 상태에서 검출될 수 있는 농도는 토양오염에서 제외되어야 할 것으로 판단된다.

그러나 현 지침에서는 토양정밀조사를 실시할 때 자연 상태에서 존재 가능한 오염물질의 배경농도에 대해서는 조사가 되고 있지 않으며, 실질적으로 일부지역에서는 배경농도가 토양오염우려기준치를 초과한 경우도 있어, 1단계조사(기초)에서 기존의 조사자료(예: 국가토양측정망)를 이용하거나 2단계조사(개황)에서 이들의 배경농도를 조사함으로써 좀 더 정확한 조사가 이뤄질 수 있도록 제안하였다.

## 7. 정밀조사결과 조치에 대한 사항

현 토양정밀조사지침에서 결과조치에 대한 사항은 정밀조사결과 보고서 작성과 보고 및 관리로 나누어진다. 그 중 정밀조사결과 보고서 작성부분에서 제 3장 토양오염방지대책방안에서 구체적인 토양오염방지 및 복원대책을 제시하도록 규정되어 있으며 그 내용은 다음과 같다.

○ 구체적인 토양오염방지 및 정화대책제시

- 토양 등의 오염범위, 오염정도를 감안하여 토양오염방지사업 추진필요 여부 및 타당성을 검토하여 제시

○ 조사지역의 지형, 지질 등 입지상태에 따른 기술적, 효과적인 토양오염방지사업 내용 제시

그러나 정밀조사 의뢰자는 실제의 토양정밀조사 과정에서 “구체적인 토양오염방지 및 정화대책”의 업무범위에 대해 정밀조사에서 제시하는 정화대책의 수준이 정화사업을 바로 시행할 수 있는 수준으로 오인하는 경우가 있어 조사자와의 이견이 있어온 것이 사실이다.

일반적으로 정밀조사결과만을 이용하여 토양오염 복원을 위한 정화계획을 수립하기 곤란한 경우가 많으며 정화계획을 수립하기 위해서는 실시설계가 진행된다. 실시설계는 공사의 규모가 매우 작거나 정화공법의 특성상 실시설계가 필요하지 않은 경우 또는 오염원인자와 시공사간의 합의에 의해 설계 없이 정화사업을 수행하는 등의 특수한 경우를 제외하고는 공사진행을 위해 필요한 절차이다.

보통 실시설계의 범위에는 지질, 수리지질학적 특성파악을 위한 현장시험 및 분석과 선별된 몇 개의 정화공법에 대한 현장 적용성 시험 등이 포함된다. 설계에 필요한 인자를 파악하기 위한 각종 시험분석은 적용하게 될 정화공법에 따라 그 내용이 매우 다양하기 때문에 공통된 표준항목으로 정리하기는 매우 어렵다. 이렇듯이 현행의 토양정밀조사지침 내의 과업 내용, 즉 시료채취와 분석을 위주로 한 조사에서 정화설계에 필요한 모든 인자를 정확히 파악하는 것은 곤란하며 또한 정밀조사의 내용에 실시설계에 포함되는 내용을 의무적으로 포함시키기도 곤란한 실정이다.

따라서 개정되는 정밀조사지침의 업무범위는 토양오염방지 및 정화대책의 범위를 제외하고 토양오염의 수평적 수직적 범위파악을 주목적으로 설정하는 것이 좀 더 생산적이고 효율적인 토양정밀조사를 수행하는데 도움이 될 것으로 판단된다. 따라서 지침 개정안에서는 “오염특성 및 부지현황을 고려한 적용 가능한 정화공법 선별 제시” 로 내용을 개정하였다.

## 제4절 지하수 오염조사 가이드라인(안) 설정 방향

본 절에서는 지하수 오염조사 가이드라인(안) 내용 설정 방향에 대한 검토를 통해 본 연구에서 제시된 연구 결과가 보다 효율적으로 이용될 수 있도록 하고자 한다.

### 1. 지하수 오염조사 방법 연구 목적

정부에서는 지하수의 합리적인 개발·이용과 체계적인 보전·관리를 위한 다양한 노력을 기울이고 있다. 지하수 자원의 보존 필요성이 높아지고 있는 지금 지하수의 오염 관리는 체계적인 지하수 관리를 위한 필수적인 사항이다.

하지만 현재 지하수의 일반적인 오염조사 방법을 다루고 있는 규정은 마련되어 있지 않은 실정이다. 지하수법에 근거한 ‘지하수업무수행지침’이나 국방부 관련 규정 중 일부가 지하수 오염조사 방법을 다루고 있으나 특정 목적을 위한 지하수 조사에만 적용되고 있다.

또한 지하수수질측정망 및 지하수 개발·이용시설 중 수질기준이 초과된 지점에 대한 오염원이 제대로 파악되지 못한 상태에서 소독, 관정폐쇄 등 일회성 사후조치만 이루어지는 경우가 많아 이에 대한 정확한 오염원 조사가 필요한 시점이다.

따라서 오염현황 파악 및 오염원인 규명을 위한 지하수 오염조사 방법을 제시함으로써 지하수 수질 보전에 일조하고자 하였다.

또한 토양 오염조사 관련 규정에 지하수 오염조사 내용을 포함시킴으로써 동일 체계에서 오염이 이루어지는 토양과 지하수의 연계 관리가 가능하도록 하였다.

### 2. 가이드라인 형태 제시 이유

지하수 오염조사는 조사 지역 및 조사 대상의 특성 등 여러 변수에 따라 조사 방법을 달리 적용해야 하는 경우가 많다. 따라서 일률적으로 적용해야 하는 지침의 형태보다는 필요한 부분을 취사선택하여 적용할 수 있는 가이드라인의 형태로 연구의 결과를 제시하였다.

### 3. 지하수 오염조사 가이드라인의 적용 범위

‘지하수법’ 등 지하수 오염조사와 관련한 국내 규정을 살펴보면 지하수오염유발시설 등으로부터의 지하수가 오염되었을 경우에 필요한 지하수 오염 조사와 지하수 수질 상태 파악을 위한 관측정의 운영과 시료채취에 관한 사항이 주를 이룬다.

지하수 오염조사 가이드라인에서는 지하수 오염이 예상되는 지역의 오염 상태 파악에 필요한 실무적인 사항을 주로 다루었다. 하지만 대표성 있는 시료의 채취 등 관측정 운영에 필요한 내용을 포함하므로 지하수 관측정 운영에 있어서도 참고가 될 수 있을 것이다.

#### ○ 관련 법규

- 지하수법 제16조의2(지하수오염유발시설의 오염방지 등) : 지하수를 오염시키거나 현저하게 오염시킬 우려가 있는 시설(지하수오염유발시설)의 설치자 또는 관리자는 지하수오염관측정을 설치하고 수질측정을 실시
- 지하수법 제16조의3 : 동법 제16조의2에 의한 수질측정 결과 지하수의 수질이 기준에 적합하지 않을 경우 지하수오염유발시설관리자는 지하수의 수질을 복원할 수 있는 정화작업을 실시
- 지하수법 제18조(수질오염의 측정) : 환경부장관은 지하수의 수질보전을 위하여 지하수 수질측정시설(이하 "수질측정망"이라 한다)을 설치하여 전국의 지하수에 대한 수질오염 실태를 측정하여야 함
- 지하수법 제20조(수질검사 등) : 허가를 받거나 신고를 하고 지하수를 개발·이용하는 자는 정기적으로 수질검사를 받으며, 수질검사 결과가 수질기준에 적합하지 아니한 경우 수질개선 등 필요한 조치를 해야 함
- 지하수법시행령 제2조(지하수의 조사) : 국토해양부장관은 지질조사·물리탐사·시추조사 및 지하수의 수위·수질조사 등을 통하여 전국의 지하수에 대하여 부존특성 및 개발가능량 등에 관한 기초적인 조사를 실시해야 함
- 지하수법시행령 제26조의3(지하수오염유발시설관리자에 대한 조치) : 지하수오염유발시설의 설치자 또는 관리자가 설치한 지하수오염관측정의 수질측정 결과가 수질 기준에 적합하지 아니하게 된 경우 지하수오염으로 인한 위해성·오염범위·오염 원인에 대한 평가 및 오염방지대책 등을 기재한 '지하수오염평가보고서'를 제출하고, 환경부장관 등은 이를 기초로 하여 지하수오염범위에 대한 정밀조사, 오염지하수의 정화사업 등 필요한 조치를 하도록 명하여야 함

## 4. 가이드라인 내용의 구성

지하수 오염조사는 조사자의 판단에 따라 적합한 오염조사 방법을 선택적으로 적용하여 최상의 객관적인 오염 지역 평가 결과를 도출해야 한다. 따라서 단순한 오염조사 절차의 나열보다는 오염조사와 관련하여 조사자가 충분히 이해하고 숙지해야 하는 내용에 관해 구체적으로 기술하고자 하였다.

전반적인 오염 절차 등 개괄적인 내용을 간단하게 제시하였고, 그 흐름에 맞게 오염을 조사하는데 필요한 지하수위 측정 방법, 관정의 설치 방법, 시료채취 방법, 퍼징 방법 등은 자세하게 제시하여 오염조사에 도움이 되도록 하였다.

또한 국내 지하수 오염조사 관련 규정을 수행함에 있어 필요한 사항을 포함시키고자 하였는데 ‘지하수오염평가보고서 작성에 관한 규정(환경부고시 제 2009-178호)’에서 정하고 있는 지하수오염평가보고서 작성 시 포함해야 하는 내용을 포함하도록 내용을 구성하였다.

## 제5절 토양·지하수 오염조사관련 환경보호 및 보건관리

### 1. 토양·지하수 오염조사관련 환경보호 및 보건관리 현황 자료조사

#### 1.1 환경보호

- 『한국산업규격 KS 지침』에서는 국내 토양지하수관리체계 및 오염현황, 그리고 토양 지하수 오염특성에 대해 살펴보았다.
- 『환경부 예규 304호』에서는 주한미군 공여구역주변지역 환경기초조사를 실시함에 있어 단계별 조사범위, 절차, 항목 및 시료채취방법 등 환경기초조사에 필요한 세부사항을 살펴보았다.
- 『SOP지침』에서는 국내 군 환경오염조사 표준수행절차에 대해 살펴보았다.
- 『2006 지하수 업무수행 지침-건설교통부, 한국수자원공사』에서는 지하수 관련 업무를 수행하는데 필요한 행정지침과 기술적인 정보를 살펴보았다.

##### 1.1.1 잔토처리 분야

###### 1) 『한국산업규격 KS M ISO 10381 - 2 : 2004』

외부로 노출된 물질들은 악취, 연소, 분진, 액체 오염 물질 및 오염된 물로 환경에 위해를 가할 수 있다. 예를 들면, 분진과 오염된 물은 하천이나 연못 및 인접한 지역으로 유입될 수 있다. 조사를 끝내는 것과 마찬가지로 중요한 것은 시추공을 되메움하는 것과 주변을 깨끗이 청소하여 환경오염이 발생하지 않게 하는 것이다. 천공과 시추할 때 밖으로 나오는 물질들은 아주 적은 양이어서 문제가 될 것 같지 않지만, 이것들도 모두 모아 적정하게 처리한다. 지하수위 이하로 시추할 경우, 시추공이 지하로 차면서 오염이 되거나 기름과 같은 물질로 표면이 덮일 수 있다. 이러한 경우, 오염 물질이 확산되거나 비오염 토양을 오염시키지 않도록 되메움하는 데 주의를 기울인다. 시추공이나 굴착 시 점토층과 같은 불투수층을 통과하는 경우 시추공이 오염 물질을 확산시키는 새로운 길을 만들어주는 역할을 할 수도 있으므로, 불투수층을 파손하지 않도록 조심하여야 한다. 시추공이 불투수층을 통과할 경우 벤토나이트와 같은 불투수 재질의 보호재로 불투수층 부위를 막아버리고, 그 곳을 시추공보다 작은 지름으로 시추를 계속하여 더 깊이 시추할 수도 있다. 이 경우 보호재가 오염 물질의 확산을 막아주는 역할을 하게 된다. 오염 물질이 아스팔트나 콘크리트층과 같은 불투수층 아래에 존재할 때, 이 불투수층의 파괴된 다음 다시 적정하게 막지 않을 경우, 강우의 침투량이 증가하여 오염 물질이 확산되어 지하수를 오염시킬 수 있다. 이러한 경우, 시추공이나 시추 지점을 저투수성 물질로 적정한 두께로 막는다. 되메움 부분의 지반 침하

가능성도 있으므로 일정 기간의 관리 기간을 조사 지침에 명시하여, 되메움 부분의 침하로 인한 영향을 수정할 수 있게 한다. 토양 시료를 채취하는 경우 시료가 있던 공간과 시료에 접근하기 위한 통로에 빈 공간이 생기게 된다. 이러한 빈 공간은 새로운 이동 경로로 작용할 수 있어 오염된 지역에서는 특히 더 관리하여야 한다. 큰 구멍은 생물체나 장비가 빠질 수 있는 위험 요소로 작용하고, 주위 지반 안정성에 영향을 줄 수 있다. 계속 모니터링을 하기 위해 장치를 설치하는 경우를 제외하고는 모든 시추공, 굴착된 곳을 다시 채워야 한다. 되메움하는 경우에는 굴착된 물질을 원래의 위치에 채워 넣을 수 있다. **만일 되메움으로 인해 오염 물질이 비오염 토양과 접촉할 것으로 의심되면, 깨끗한 물질로 대체하여 채워 넣고 오염 물질은 적절하게 처리하여 제거한다.** 굴착 지점의 표층은 깨끗한 물질로 대체하여 되메움하는 것이 바람직하다. 되메움이 끝나면, 지표면에 오염된 물질이 남아 있는지를 검사한다. 오염이 의심되면 시추공을 되메움하는 경우 그라우팅을 하여 오염의 확산을 방지하고 시추 때 나온 물질들은 적절하게 처리하여 제거한다.

## 2) 『환경부 예규 304호』

- (1) 토양 시료채취가 완료된 굴착공에 대하여는 오염물질의 유입을 방지하기 위해 되메움 작업을 실시한다.
- (2) 품질시험을 통과한 깨끗한 모래를 굴착공에 채운 후 벤토나이트 또는 시멘트 그라우팅을 통해 되메움 작업을 실시하고 시료채취 과정에서 발생한 오염된 잔류 토양은 수거하여 「토양환경보전법」 제15조의3 제3항에 따라 반출처리장으로 반출하여 처리한다.
- (3) 토양 시료채취 장비는 원칙적으로 시료채취 지점 및 깊이를 변경할 때마다 사용된 장비를 세척하여 사용함으로써 교차오염으로 인한 2차 오염을 방지하여야 한다.
  - ① 장비 세척은 20리터 양동이 3개를 이용하여 3차에 걸쳐 세척하여야 하며, 세제→수돗물→증류수 순에 따라 실시한다.
  - ② 세척이 완료된 장비 등은 세척수가 완전히 건조된 후 재사용한다.
  - ③ 시료채취용 장갑, 주사기, 약스푼, PE 팩 등은 원칙적으로 1회용을 사용한다.

## 3) 『SOP 지침』

토양 시료채취가 모두 끝나면 굴착공을 되메움기 하여야 한다. 품질시험을 통과한 깨끗한 모래를 굴착공에 채운 후 벤토나이트 또는 시멘트 그라우팅을 통해 되메움하는 작업이다. 작업순서는 다음과 같다. 하지만, 토양 굴착공은 되메움기 전에 대수층 여부를 확인하기 위하여 임시 관측공(Observation hole)으로 사용할 수도 있다.

- (1) 마지막 심도 시료채취 후 굴착공 되메우기
- (2) 주변 토양 되메우기, 깨끗한 모래 채움, 벤토나이트, 시멘트 그라우팅
- (3) 시료채취 후 잔류 토양은 수거하여 폐기

### 1.1.2 폐공관리 분야

#### 1) 『SOP 지침』

##### (1) 관측공 폐공

관측공의 용도가 끝나면 적절한 절차에 따라 폐공 처리하여야 한다. 폐공처리 과정은 케이싱의 인발이 가능한 경우와 불가능한 경우를 나누어 다음과 같은 절차를 따라 시행한다.

##### (2) 케이싱 인발 가능 시

- ① 관측공 케이싱 주변의 상부 마감(Surface completion)을 우선 제거한다.
- ② Surface seal 제거
- ③ Hollow-stem auger를 이용하여 관정 깊이까지 굴착한다.
- ④ 케이싱 및 스크린을 제거
- ⑤ 그라우트 실(Grout seal)로 되메움(3~5% 정도의 벤토나이트를 함유한 시멘트)
- ⑥ 지표면 아래 30cm 까지 되메움
- ⑦ 나머지 부분 Sealing 재료로 채움

##### (3) 케이싱 인발 불가능 시

- ① 주변 환경 검토 : 주변 환경 등 작업여건과 오염물질 유입 여부 점검
- ② 폐공제원조사 : 우물의 심도, 지하수위, 케이싱의 구경, 심도, 재질 등을 조사
- ③ 폐공 내 이물질 제거 : 펌프 등 공내에 이물질이 있는 경우 완전히 제거

##### (4) 지표부터 파기 : 터파기 심도는 1m로 하며 현장여건과 향후 토지이용계획에 따라 조정할 수 있음

- ④ 케이싱 제거 : 지표에서 1m까지 케이싱을 절단하여 제거(그림 3-30)
- ⑤ 불투수성 재료 주입 : 케이싱 절단 하부구간에 불투수성재료 주입(시멘트 밀크, 몰탈, 벤토나이트 등)

- ⑥ 지표부 표면처리 : 터파기구간 하부는 시멘트몰탈을 타설하고, 상부 나머지 구간은 주변 흙으로 되메움 (배합비 - 시멘트 : 모래 = 1:2, 타설 두께 : 20cm)
- ⑦ 주변정리 : 주변 환경에 어울리게 주변정리. 작업 중 발생한 폐자재는 운반하여 폐기처분

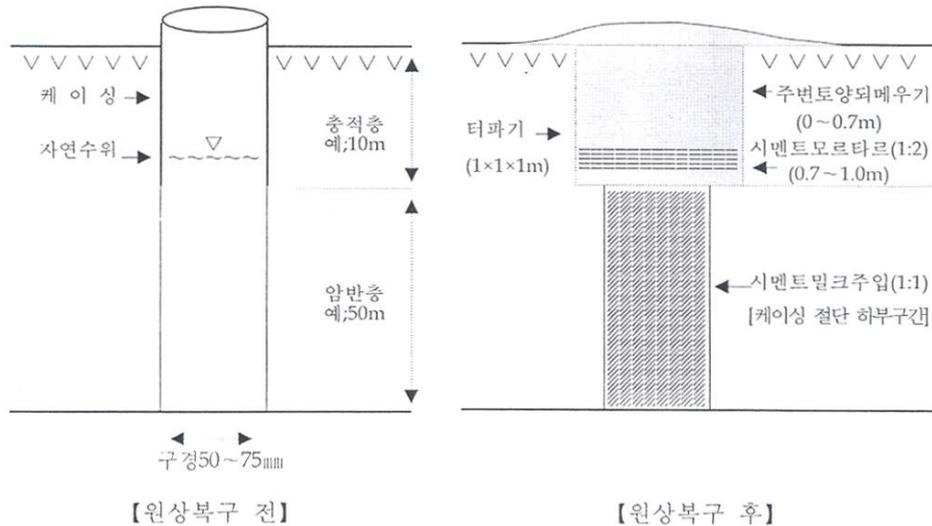


그림 3-30 관측공 폐공 시 되메움 모식도(케이싱 절단의 경우)

## 2) 『2006 지하수 업무수행 지침-건설교통부, 한국수자원공사』

### (1) 폐공의 원상복구

폐공 원상복구의 주목적은 지표오염원의 폐공 내 유입 방지, 오염원의 수직적 이동통로 차단, 케이싱 등의 우물자재를 제거해 지하수 오염을 방지함으로써 원래의 지하수 부존 환경으로 복원하는 데 있다. 또한 사용하지 않는 우물을 제거하여 우물 주변의 지표환경을 복원하고 직경이 큰 폐공의 경우에는 추락 등의 안전사고를 사전에 방지하는 효과도 기할 수 있다.

### (2) 원상복구 일반절차

폐공을 되메움할 때 가장 효과적인 방법은 폐공 전구간을 하부로부터 투수성 재료 되메움 구간, 불투수성 재료 되메움 구간 및 표면처리 구간으로 구분하여 각 구간별로 적합한 되메우기를 하는 것이다. 현장여건에 따라 지표부 표면처리 구간은 생략하여 되메움을 할 수도 있으며 심도가 깊은 폐공(300m 이상)은 조사 후 상부만 되메움 할 수도 있다. 그러나 오염된 폐공은 전구간 불투수성 재료로 되메움하여야 한다.

폐공 전구간 되메움 순서는 일반적으로 가)주변환경검토, 나)폐공현황 및 제원조사, 다) 폐공내 이물질 제거 및 우물소독, 라)투수성 재료 주입, 마)지표부 터파기, 바)케이싱 제

거, 사)불투수성 재료 주입, 아)지표부 표면처리, 자)주변 정리, 차)원상복구 보고서 작성 등의 순서로 시공한다. 케이싱 제거 유무와 토지이용계획에 따라 마), 아)항목의 작업공정은 생략할 수 있으며 주요 공정별 내용은 다음과 같다. <그림 3-31>

(3) 전 구간 되메움 일반 절차

① 주변 환경 검토

폐공 되메움 작업을 시행하기에 앞서 주변 환경과 지질조건에 대한 검토는 매우 중요하다. 만약 대규모의 오염원이 폐공 인근에 존재할 경우에는 전 구간을 불투수성 재료로 되메움할 필요가 있을 것이며 농약 등의 살포가 빈번하고 경작을 하는 농경지 등에서는 불투수성 재료 되메움 구간 심도를 깊게 하거나 지표부 표면처리를 반드시 시행하여야 한다. 또한 개발 당시의 자료를 확보, 지질조건이나 지층의 현황을 파악하는 것도 되메움의 재료 결정이나 불투수성 재료의 주입심도 등을 결정하는데 중요한 자료로 사용된다.

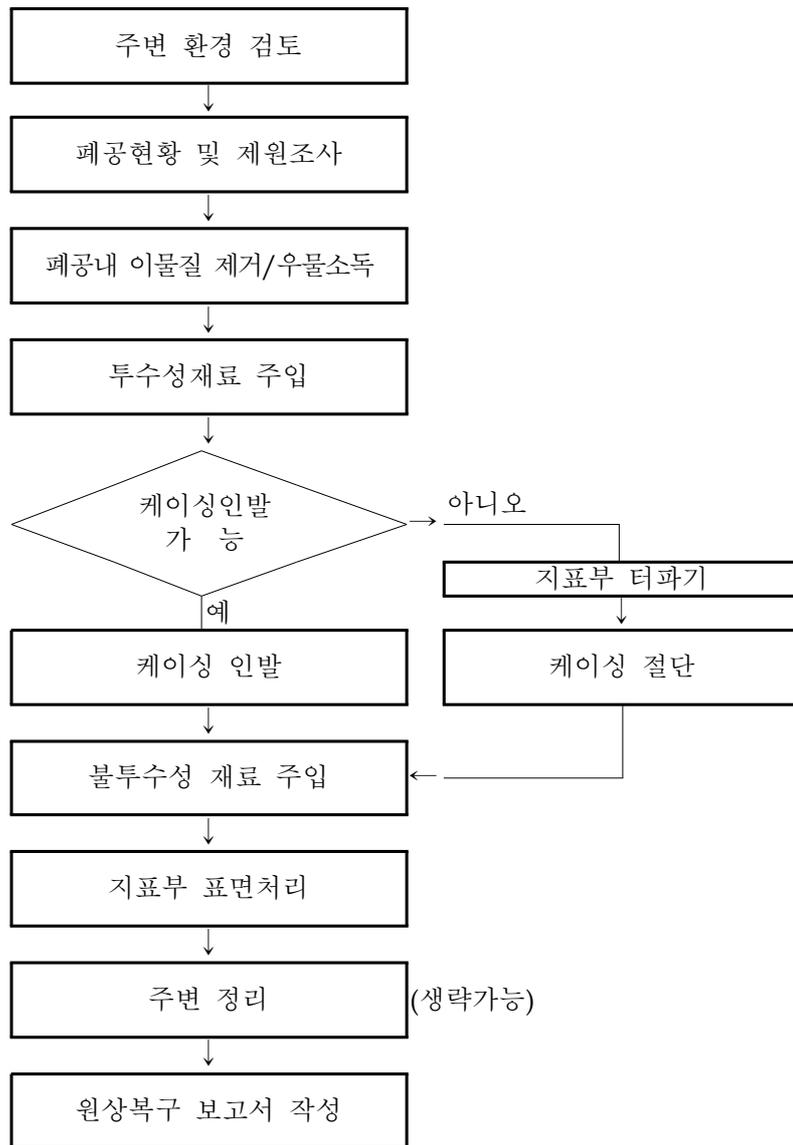
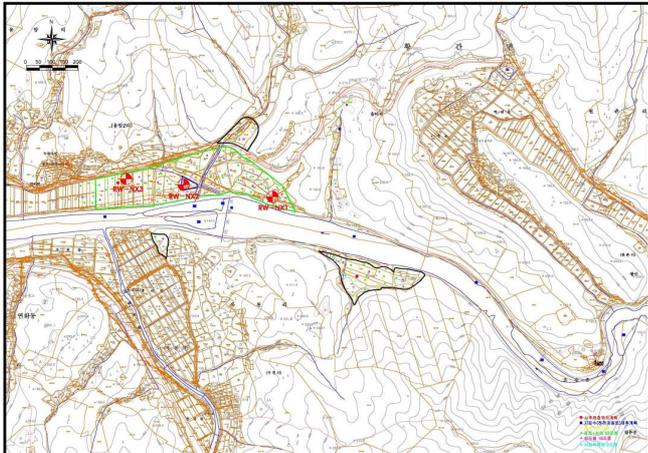


그림 3-31 퇴메움 주요 절차

표 3-27 지하수 폐공실태 현장조사표 (앞면)

지하수 폐공실태 현장조사표							
조 사 현 황							
일련번호				조 사 일			
조사기관				조사자명			
자료출처	지하수조사연보( ), 지하수현황일제조사( ), 두레박자료( ), 2001 신규폐공자료( ), 기타( )						
위 치 현 황							
정호위치	시도	시군구	(구)	읍면동	리	번지	
지명/건물명/지목				관리자			전 화
경 도				위 도			표 고
시 설 현 황							
우물유형	심도	외부케이싱 (유, 무)			내부케이싱 (유, 무)		
충적층우물( ), 암반층우물( ) 기타( )	m	구경	심도	재질	구경	심도	재질
		mm	m		mm	m	
양수펌프	종류( ), 펌프마력( HP), 설치심도( m), 토출구경( mm) 특이사항( )						
시설유무	유량계( ), 출수장치( ), 그라우팅( ), 상부보호공( ), 수위측정관( ), 전기가설( ), 보호건축물( )						
지하수위	자연수위 (지표하 m)						
시공업체				개발연도	년 월 일		
폐 공 현 황							
폐 공 원 인	수량부족( ), 수질악화( ), 상수도대체( ), 토지형질변경( ), 소유주변경( ), 용도변경( ), 사용중지( ), 염분증가( ), 기타( )						
폐 공 상태	미조치( ), 조치중( ), 조치완료(되메움, 재이용), 처리면제( )						
폐공발생일	년	월	일	폐공처리일	년	월	일
소유자							
수 질 현 황							
수질검사유무				잠재 오염원 종류			
수질검사결과							
총 합 검 토 의 견							
분 석 결 과							
원상복구	급수정 재활용			관측정 재활용			기타
추 진(처리) 현 황							

표 3-28 지하수 폐공실태 현장조사표(뒷면)

현장조사 사진 및 위치도	
<p>&lt;근경사진 또는 폐공 전&gt;</p>	
<p>&lt;원경사진 또는 폐공 후&gt;</p>	
<p>&lt;위치도&gt; 스캐치맵</p>	

## ② 폐공현황 및 제원조사

폐공의 원상복구를 위하여 폐공현황조사를 실시하여 폐공의 위치와 상태를 파악하고 그 지질조건에 따라 적절한 방법으로 되메움 하여야 한다.

폐공의 현황조사는 지하수 개발·이용의 신고 또는 허가 신청 시 제출한 원상복구계획서, 우물관리대장, 지하수이용실태조사 자료를 수집하고 현장조사를 실시한 후 지하수 폐공실태 현장조사표를 작성한다. (표 3-27 참조)

폐공의 현장조사에는 다음 자료를 조사 정리하여야 한다.

- 우물의 위치
- 우물의 유형, 심도와 구경, 지하수위
- 외부 케이싱의 구경과 심도 및 재질
- 내부 케이싱(우물자재)의 구경과 심도 및 재질
- 동력장치, 펌프종류, 마력, 설치심도, 시설내역 등 양수시설
- 우물의 기초적인 수질(pH, EC, 수온, 유류성분의 육안검사 등)
- 폐공발생 원인

## ③ 폐공 내 이물질 제거

폐공내의 상태를 점검하여 되메움 재료 주입에 방해가 되는 수중모터펌프 등의 양수장비와 기타 이물질을 되메움 재료 주입 전에 이를 제거하도록 하며, 폐공내부가 유류 등으로 오염되었다고 판단되면 에어써징(Air surging)을 실시하여 우물청소를 하여야 한다.

우물소독은 200mg/L 농도의 염소 용액을 공내 지하수에 넉넉히 주입하여 시행하는데, 이 용액은 5.25%의 클로린(Chlorine) 농축액 2L를 450L의 물에 희석하여 만든다.

## ④ 투수성재료 주입

케이싱 제거와 지표부 터파기에 앞서 실시하여야 한다. 폐공의 직경은 수cm 에서 수십 cm에 불과하므로 투수성 재료의 주입 시 브릿지(Bridge) 현상(되메움 재료를 폐공 내로 주입시 주입속도가 지나치게 빠르면 되메움 재료가 공 하부에 도달하기 전에 중간에 막히는 현상)에 유의하여야 한다. 브릿지 현상이 발생하면 브릿지 구간 하부는 되메움이 되지 않게 되며 일정 시간이 지나 중력에 의해 브릿지가 해소되면 브릿지 상부구간이 함몰되어 빈 공간이 다시 발생하므로 되메움의 효과가 떨어지게 된다. 그러므로 투수성 재료 주입 시는 주입량에 따른 주입심도를 측정하여 주입심도 20m마다 브릿지 현상 발생여부와 주입재 다짐상태를 점검해야한다

투수성 재료로는 모래, 잔자갈 및 돌부스러기(굴착슬러리) 등을 사용할 수도 있으며 오염이 되지 않은 깨끗한 재료를 사용하여야 한다. 화성암과 변성암 및 고결도가 높은 퇴적암의 균열 대수층에는 모래가 가장 적합하며, 석회암지대의 용해터널이나 현무암지대의

용암터널 및 균열이 매우 큰 파쇄대 암반에는 작은 자갈과 돌부스러기를 공동 내에 충전한 후 모래를 주입함으로써 재료의 유출을 방지할 수 있다.

투수성 재료의 주입 심도는 암반 대수층 구간을 대상으로 하며 불투수성 재료 주입 하한 심도까지 채운다. 투수성 재료를 주입한 후 적어도 12~24시간 정도의 대기시간이 지난 후에 불투수성 재료를 주입하도록 한다.

#### ⑤ 지표부 터파기

케이싱 인발이 되지 않을 경우 케이싱 절단을 위하여 실시한다. 터파기 심도는 현장 여건과 향후 토지 이용 계획에 따라 조정할 수 있으나 대략 1~1.5m 심도가 적당하다. 그러나 터파기는 케이싱 인발이 가능하거나 토지이용계획 등에 따라서는 실시하지 않아도 된다.

#### ⑥ 케이싱 제거

투수성재료 주입이 끝나면 케이싱을 가능한 한 인발(뽑기)하여 제거한다. 케이싱 인발 장비는 유압잭(Hydraulic jack), 체인블럭, 포크레인 등을 이용하여 인발하며 거의 대부분의 케이싱은 유압잭으로 인발이 가능하다. 케이싱의 외부 공벽에 그라우팅이 확실하게 되어 있어도 케이싱을 그대로 두면 장기적으로는 부식되어 오염원이 될 수 있으므로 가급적이면 인발하여야 한다. 케이싱 인발이 불가능하면 터파기를 실시하여 지표에서 1m까지 케이싱을 절단하여 제거한다. <그림 3-32>.



그림 3-32 케이싱 인양 제거

#### ⑦ 불투수성 재료 주입

##### ○ 주입재료의 특성

- 물 : 되메움 재료를 혼합하기 위한 것으로 깨끗한 물을 사용해야만 되메움 재료의 특성에 따른 주입효과를 기대할 수 있다.

- 시멘트 : 되메움 재료로서의 시멘트는 한국 표준규격의 포틀랜드시멘트를 사용하여야 하며 목적에 따라 급결재 혹은 지연재와 같은 혼합물을 사용할 수 있으며 이 경우 한국 표준규격 콘크리트 첨가 화학물질 표준 시방에 따라야 한다.

#### ⑧ 지표부 표면처리

지표부 터파기 작업을 실시한 경우 불투수성 재료의 주입이 끝난 상부구간을 표면처리토록 한다. 불투수성 재료 투입 후 24시간이 경과하면 불투수성 재료는 수축 또는 주변 토양으로 침투하기 때문에 약 1m 이상 수축하게 되는 데 이 부분을 불투수성 재료로 재충진한다. 재 충진한 불투수성 재료가 완전히 고결되면 터파기 하부 구간에 시멘트 몰탈을 약 30cm 두께로 타설한다. 시멘트 몰탈 타설이 끝나면 터파기 나머지 구간은 터파기 한 흙으로 다짐하면서 되메움을 하여 폐공처리 작업을 완료한다.

#### ⑨ 주변 정리

폐공처리 작업이 완료되면 주변 환경과 어울리게 주변 정리를 하고 폐공 작업 중에 발생한 케이싱, 우물자재 등의 폐자재를 운반 폐기 처분한다.

#### 원상복구 보고서 작성

원상복구가 완료되면 보고서를 일정 양식에 의거 작성, 보존함으로써 지하수 관리 자료로 활용하여야 한다. 보고서 양식은 작업일지와 처리모식도로 구분하여 작성하고 작업과정별로 사진을 촬영하여 첨부한다.

### 4) 우물의 분류

우물은 심도에 따라 암반층 상부에 위치한 모래, 자갈, 실트등 충적층 구간까지 또는 풍화대구간까지만 굴착한 “충적층 우물”과, 충적층 및 암반층 심부까지 굴착하여 암반대수층의 지하수를 주 대상으로 개발한 “암반층 우물”로 대분된다. 이는 다시 우물 구경에 따라 소형, 대형, 재래식 우물 등으로 분류되며 구경별 기준은 대략 다음과 같다.

- (1) 소형 : 구경이 100mm(4") 이하인 공, 시추 조사공 포함
- (2) 대형 : 구경이 100mm(4") 를 초과하는 공

구경 1000mm 내외의 우물로서 석축우물, 콘크리트관 우물 등은 재래식 우물로 분류한다. 또한 사용하는 우물자재 및 개발 방식에 따라 수굴정(Dug well), 관정, 집수정 등으로 분류하기도 한다. 본 지침에서는 충적층 우물과 암반층 우물을 구경별로 분류하여 각각에 대한 원상복구 방법을 제시한다. <표 3-29>

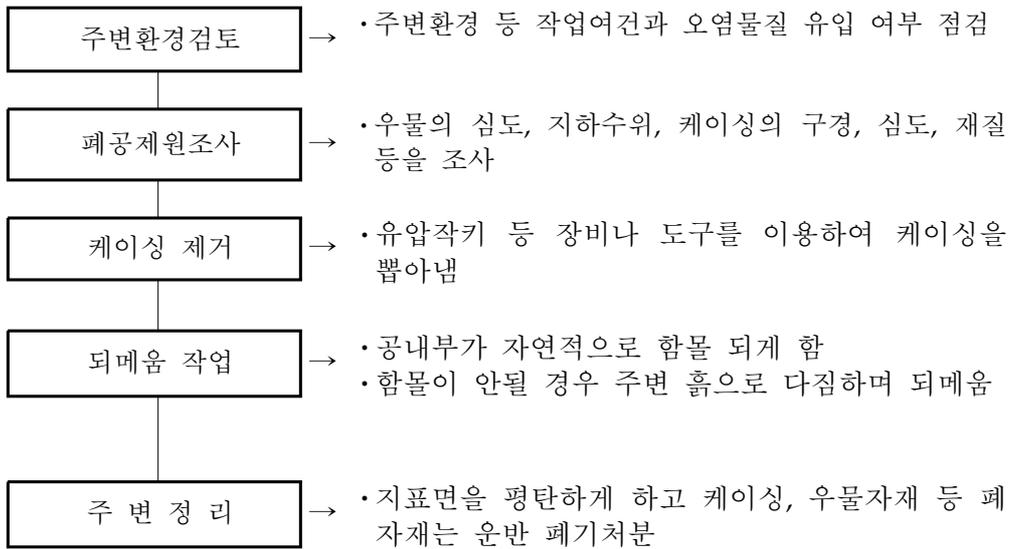
표 3-29 폐공 유형 분류

구 분	소 형		대 형		재래식
충적층	유형1		유형2		유형3
암반층	케이싱인발 가능	유형4	전구간 되메움		-
	케이싱인발 불가	유형5	부 분 되메움		-

5) 충적층 우물의 폐공

(1) 충적층 소형우물(유형1)

충적층 소형우물의 일반적 되메움 순서는 다음과 같다.



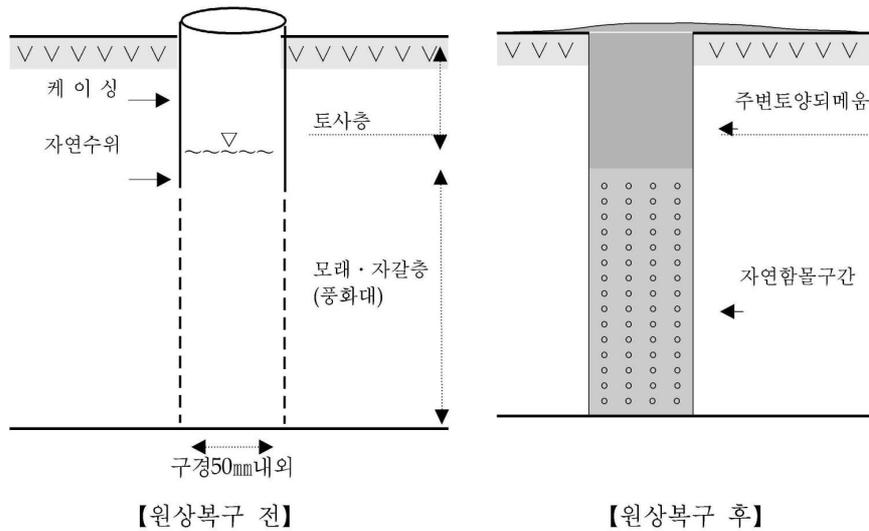
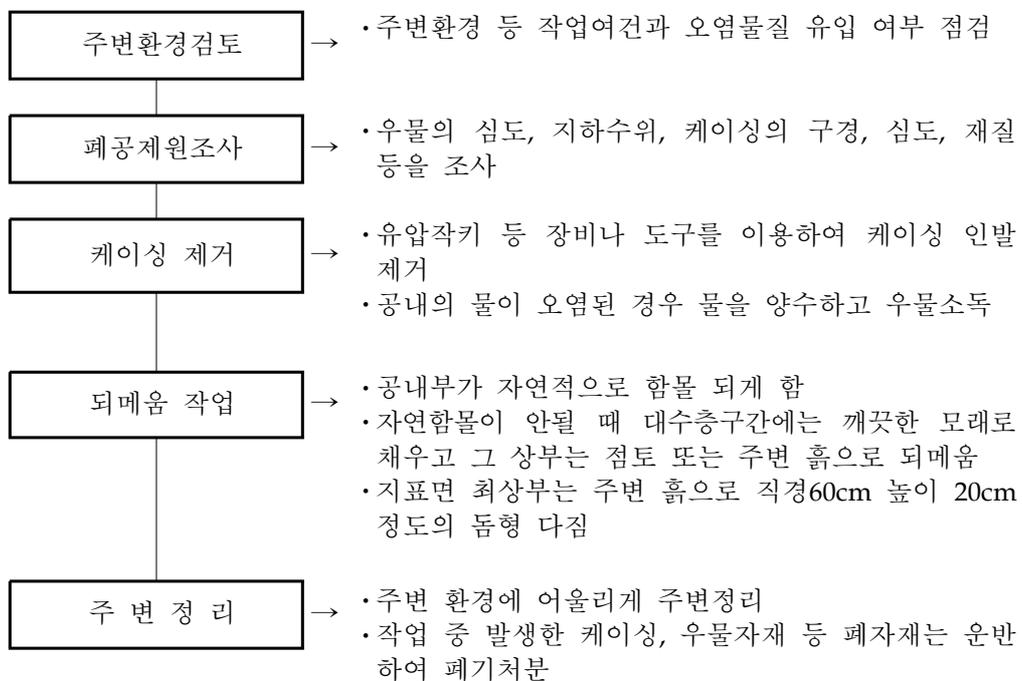


그림 3-33 충적층 소형우물 구조도 및 되메움 모식도

(2) 충적층 대형우물(유형2)

충적층 대형우물의 일반적 되메움 순서는 다음과 같다.



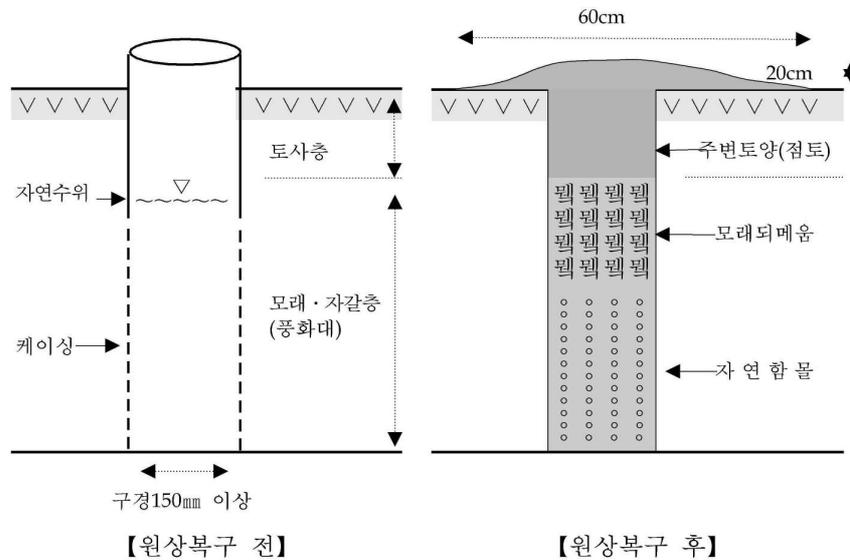


그림 3-34 충적층 대형우물 구조도 및 되메움 모식도

## 1.2 보건관리

- 『한국산업규격 KS 지침』에서는 국내 토양지하수관리체계 및 오염현황, 그리고 토양 지하수 오염특성에 대해 살펴보았다.
- 『SOP지침』에서는 국내 군 환경오염조사 표준수행절차에 대해 살펴보았다.
- 『산업안전기준에 관한 규칙(노동부)』에서는 지하수 관련 업무를 수행하는데 필요한 행정지침과 기술적인 정보를 살펴보았다.
- 『EPA Guidelines for PPE(Personal Protective Equipment)』에서는 국외의 개인보호 장비의 등급별 착용절차에 대해 살펴보았다.

### 1.2.1 국내보건관리 규정

#### 1) 『한국산업규격 KS M ISO 10381 - 2 6.1』

토양 시료 채취 과정에서 인명의 보건과 안전에 영향을 주는 과정들을 살펴보면,

- (1) 시료채취 도구나 장비를 취급하는 과정
- (2) 불안정한 지반이나 사면, 개방된 시굴이나 굴착된 곳
- (3) 시료 채취 중에 작업자, 주변에 거주하는 주민, 지나가는 사람 등이 오염 물질에 노출 되는 것
- (4) 중장비를 이용한 작업에서 소음, 분진, 악취 등에 의한 불편, 발파작업이 필요할 경우 전문가에 의해 작업이 이루어져야 하고, 발파 작업 전에 주변에 사람이나 장비가 없는지 확인한다.

시료채취 방법을 결정할 때는 인명의 안전에 위험이 될 수 있는 모든 요소들을 고려한다. 이러한 세심한 주의를 거치면 다른 생물, 구조물 및 환경에 대한 고려는 자동적으로 이루어진 것이다.

### 1.2.2 『한국산업규격 KS M ISO 10381 - 3 6.1』

#### 1) 안전정책

부지 조사와 시료 채취에 관련된 모든 기관은 안전한 작업을 위한 필수 조건인 안전 정책을 가지고 있어야 한다. 정책을 준수하는 것은 모든 종사자를 채용하는 조건의 일부가 된다. 이러한 정책에는 다음 사항이 포함되어야 한다.

- (1) 입법과 규칙에 대한 준수를 요구한다.
- (2) 부지 종사자가 위험에 대한 경계를 게을리 하지 않음으로써 조사와 시료 채취 동안의 위험으로부터 그들 자신을 보호해야 한다는 것을 강조한다.
- (3) 작업 절차서가 있을 경우 이를 준수해야 할 필요성을 강조한다.
- (4) 하청 업체 직원과 일반인을 포함하는 조사팀 구성원 각자의 책임을 설명한다.
- (5) 시료 채취나 다른 부지 조사를 수행할 동안 담배를 피우거나 먹고 마시는 행위를 엄금한다.

이 정책에는 일반적인 장소 또는 밀폐된 공간 같은 특별한 장소에서 안전한 작업을 위한 필수 조건을 규정하는 표준절차서가 있어야 한다. 이러한 절차서에는 방호복과 방호장비를 준비하고 사용하는 것, 부지 작업에 필요한 최소인원 같은 조항이 포함되어야 한다. 표준절차서에는 지역비상기구 연락방법, 통신방법, 세척 및 제염방법의 필요성을 명시하여야 한다.

#### 2) 안전기획 및 관리

부지조사 또는 시료채취 과정에서 작업자의 안전을 보장하기 위해서는 안전을 위한 계획 및 관리가 필요하다. 여기에는 다음 사항을 포함하는 조치가 필요하다.

- 부지에서 발생하는 위험의 평가
- 가능한 한 위험을 피할 것
- 안전을 고려한 시료채취방법 선택
- 개인보호장비 준비 및 사용방법
- 위험한 환경계측을 위한 장비준비
- 적절한 부지 근무자가 근무할 시설준비(Provision of appropriate personnel site facilities)

- 작업자 및 장비를 위한 제염설비의 준비
- 안전계획 및 안전조치 수행책임자 지명
- 책임의 명확한 분배
- 안전작업 절차기록
- 작업허가 시스템
- 관련자 전원에 대한 정보준비
- 훈련 및 구급약 준비
- 비상절차 계획 및 사용, 사고와 가능한 노출에 대한 기록 보존시스템 수립, 건강검진, 회사안전정책 준수, 작업종사자와 일반인의 건강과 안전에 관한 국내법규 준수

**표 3-30** 부지조사를 위하여 필요한 건강 및 안전조치

방호복 및 장비	감시장비	안전조치
작업복, 작업화, 장갑, 헬멧	손으로 드는 가스 감지기	훈련
눈보호장비	자동가스계측기	작업허가시스템
귀마개	개인감시기	응급서비스통지
안면보호대 및 여과기	환경감시	비상전화기위치
호흡기구		시설을 위한 제염설비
안전장구 및 밧줄		종사자를 위한 제염설비
안전토치		안전한 시료채취를 위한 절차서
소화기		안전한 시료취급을 위한 절차서
구급약		비상차량위치

부지에서 모든 형태의 조사를 시작하기 전에는 위험도 평가를 반드시 수행해야 한다. 위험평가는 특히 과거 산업단지와 폐기물처리장에서는 중요하다. 부지 개략조사가 예비조사의 일부일 경우에는 책상 연구결과에 따라 위험도 평가를 수행해야 한다. 일단 예비조사가 끝나면 평가를 좀 더 심도 있게 할 수 있으며, 조사가 진행되는 동안 계속 검토하여야 한다. 오염의 존재 또는 정도에 관한 의심이 있을 경우에는 보호 장비를 반드시 사용해야 한다.

작업 종사자가 건강에 해로운 물질에 노출되는 것을 방지하기 위한 국내 법령과 시스템은 반드시 준수해야 한다.

정확한 요건은 다를 수 있으나 종종 다음 사항을 필요로 하는 체제를 포함한다.

- 합리적으로 실행 가능할 때에는 피폭을 피한다.
- 이것이 가능하지 않다면, 피폭방지 또는 피폭을 “허용수준”으로 제한하기 위한 규제 조치를 사용한다.
- 이것이 가능하지 않다면, 개인보호 장비를 사용한다.
- 정보와 훈련에 관한 사항
- 건강검진 프로그램
- 장기간 피폭 기록의 보존

법적 요건이 없을 때에는 위의 사항은 작업 종사자를 위험한 물질로부터 보호하기 위한 정책을 위한 유용한 체제를 구성한다.

### 3) 특정 위험과 관련된 안전조치

일반적으로 특정 위험에 대한 안전 조치는 수행하는 조사의 방식이나 장소와 무관하다. 어떤 경우에는 예를 들면, 기계와 관련된 예방 조치 같은 것은 사용되는 기계의 크기와 성격에 따라서 좀 더 심도 있는 예방 조치가 필요하다. 예를 들면 폭약 이용과 같은 특별한 시료 채취 방식을 사용하는 경우에는 특별한 작업 종사자가 필요하다. 과거 전쟁터에서 화약이 존재하는 경우에는 굴착에 세심한 주의를 기울여야 하며 의심나는 물체를 발견했을 때는 적절한 감독기관에 신고하여야 한다. 굴착 시에는 아무것도 없을 것으로 예상되더라도 얕은 곳에 공공설비가 있는지 세심한 주의를 기울여야 한다. 이 경우 기계를 사용하지 않고 손으로 파는 것이 안전하다.

화학물질에 대한 주의 조치에는 부지조사자, 시료채취자 및 부지작업과 관련된 모든 인원이 화학물질과 직접 접촉하거나 오염물질, 유독가스를 섭취하거나 흡입하지 못하게 함으로써 이들을 보호하는 것이 모두 포함된다. 대부분의 시료채취 조건에서 부지와 접촉이 가장 손쉬운 신체부위는 손발이고 다음은 얼굴이다. 신체의 다른 부위는 넘어지거나 바닥에서 튀는 물질에 접촉함으로써 부지와 접촉할 수 있다. 화학물질에 견디는 안전화를 반드시 착용하여 부지와 접촉하지 않도록 하여야 한다. 헝겊으로 된 신발은 젖으면 오염물질이 발로 침투할 가능성이 있으므로 착용하지 않는 것이 좋다. 장갑을 착용하여 오염물질이 손에 닿지 않도록 하여야 한다. 적당한 작업복을 착용하면 신체의 다른 부위에 오염물질이 닿는 위험을 감소 할 수 있다. 장갑은 질기고 화학물질에 견디는 재질이어야 하며 작업복은 적어도 질긴 면으로 만든 것이어야 한다. 가능하면 방수작업복을 착용하도록 한다.

손에 묻은 오염물질이 얼굴에 묻는 것은 장갑을 벗음으로써 피할 수 있지만 오염물질이 튀는 것은 피하기 어려우므로 주의하는 수밖에 없다. 오염물질이 될 위험이 높은 경우, 특히 위험한 액체가 있다고 알려진 경우에는 적어도 보안경을 착용하고, 가능하다면 얼굴 전체를 가려야 한다. 화학물질로 오염된 부지에서 작업할 경우에는 보안경, 고글(goggle) 또는 얼굴 전체를 가리는 장비를 착용하여야 한다. 담배를 피우거나 음식물을 먹는 동안 오염물질을 흡입하거나 섭취하는 것은 화장실 사용 전후에 손을 씻고, 먹거나 마시거나 담배를 피우기 전에 손을 씻는 것과 같이 개인위행에 신경을 씬으로써 피해야 한다. 담배를 피우거나 먹고 마시는 것은 지정된 장소에서만 가능하다. 담배를 피거나 먹고 마시는 것은 의심나는 부지와 오염되었을 것으로 알려진 부지에서는 절대로 해서는 안된다. 더러운 손과 장갑에 의하여 얼굴과 눈이 오염될 가능성에 매우 주의해야 한다. 조사나 시료채취 시 발생하는 분진과 분무(aerosol)는 발생 지역을 벗어나서 문제가 가라앉기를 기다림으로써만 피할 수 있다. 이 문제는 발생 지역의 토양에 물을 분무하여 표면을 적심으로써 감소시킬 수 있다. 어떤 예방 조치도 불가능할 경우에는 별도로 공기가 공급되는 방호복을 착용하는 것도 하나의 방법이다. 부지로부터 오염이 확산되는 것을 방지하는 방법의 일환으로 방호복의 착용도 고려해야 한다. 이 경우에는 방호복을 제대로 처분하는 방법도 함께 고려해야 한다. 극단적인 경우에는 별도로 공기가 공급되는 방호복을 착용하여 조사자가 위험에 노출되는 것을 피하는 것이 필요하다.

**오염된 부지를 떠나기 전에 모든 장비, 기계, 차량의 바퀴를 세척하고 오염의 확산을 방지하기 위하여 세척액을 적절한 방식으로 처분해야 한다.**

### 1.2.3 『SOP 지침』

#### 1) 안전대책

환경오염조사 현장 작업에서 발생할 수 있는 보건 및 안전관련 사항들의 예방 및 조치를 기술한다. 현장 작업자들은 본 안전대책 항목을 숙지하고 첨부한 확인서에 서명을 하여야 한다. 현장 조사활동 안전대책은 오염물질 (화학물질, 유류 등)에 대한 보호대책/보호장구, 수동형 시료채취 오우거, 굴착기 등 중장비 사용에 따른 안전대책, 방사능오염 조사 시 보호장구·측정장비·기타 보호 대책, 조사활동 작업장에 대한 안전표식·안전모·복장 및 교통 통제 등에 관한 문제, 군부대 특성에 따른 사격장·폭발물 취급 훈련장 등에서 오염조사 활동에 따른 불발탄 등에 관한 내용을 다룬다. 조사기관은 현장기술자 및 조사 참여 인력들에 대한 안전 절차에 책임을 가진다.

(1) 현장 안전계획 일반

① 현장조직

현장조사를 수행하는 조사기관은 현장의 보건 안전관련 책임자를 선정한다. 현장감독 책임 하에 모든 현장 조사 장비 운영 및 관련 작업들을 수행한다.

현장감독 : ○○○
현장기술자 : □□□, △△△, ◇◇◇

② 현장 위험 사항

조사 현장에 대한 지형 및 시설물 확인을 통한 작업상 위험 정도를 파악하고, 과거 군부대 시설 사용에 따른 화학물, 폭발물 등과 관련된 위험 가능성을 조사한다. 보건 안전상 고려사항은 일반적인 시료 채취 관련 사항뿐만 아니라 다음사항들도 고려하여야 한다. 오염된 토양 및 지하수와의 접촉, 작업장 내 차량이동에 관한 사항, 지하매설물 등에 관한 사항 등도 확인하여야 한다.

③ 현장 안전 절차사항

조사 현장에 대한 현장 기술자들은 자체 안전 규범에 따라 현장조사를 수행할 것이다. 그러한 안전 규범에 추가하여 다음 사항들을 수행할 예정이다.

- 현장 작업복 및 안전모 등을 포함한 개인보호구를 반드시 착용한다.
- 비산먼지 방지용 마스크를 착용한다.
- 작업장 내 흡연, 음주 및 음식물 섭취를 일체 금한다.
- 원거리에서 작업 중임을 표시할 수 있는 작업띠를 착용한다.
- 불필요한 인원 및 외부인은 작업장에 출입을 금한다.
- 심도 1.5 미터 이하 구덩이 진입은 금한다.
- 현장 책임자는 작업 중에 불필요한 차량의 접근을 금하는 등 차량 통제를 실시한다.
- 응급처치상자를 항상 구비하여 접근이 쉬운 곳에 둔다.
- 작업 전에 현장기술자들에게 작업에 대한 충분한 사전지식을 교육한다.
- 우천이나 결빙에 의한 미끄럼사고 방지를 위한 대비책을 강구한다.
- 혹한기나 혹서기 때 작업시간을 조정하여 현장기술자들의 일사병 등으로 인한 재해 예방에 힘쓴다.
- 전기기구를 사용할 시 감전사고 예방을 위한 전격차단기 등의 활용을 의무화 한다.
- 위험지역 표지판 설치를 하여 사고예방에 만전을 기한다.

#### ④ 사고보고

모든 현장 사고 또는 발생 우려되는 사항들은 날짜, 시간 및 사고내용 등을 기록하여 현장감독에게 보고한다.

#### ⑤ 보건 안전 계획 확인

본 보건안전계획을 이행하겠다는 확인서를 첨부하였다. 현장 작업에 참여한 사람들은 첨부된 확인서에 반드시 서명을 하여야 한다. 또한, 긴급상황 발생 시 연락처도 항상 현장에 구비하여야 한다.

### (2) 오염물질에 대한 안전계획

환경오염조사 현장 작업에서 발생 할 수 있는 오염물질 (화학물질, 유류 등)에 대한 보건 및 안전관련 사항들의 예방 및 조치사항 들이다. 일반적인 안전 규범에 추가하여 오염물질에 대한 안전조치로 다음 사항들을 수행한다.

- ① 현장 작업복을 포함한 개인보호구를 반드시 착용한다.
- ② 오염물질(화학물질, 유류 등) 취급 시 비산먼지 방지용 마스크를 착용한다.
- ③ 작업 중 오염된 장비 및 개인 보호구를 외부 반출하지 않는다.
- ④ 개인 보호구 및 작업복은 작업 종료 시에 세척/세탁을 하거나 재사용 전까지 현장의 비닐백에 넣어 보관한다.
- ⑤ 모든 화기 및 인화성 물질 사용을 금한다.

### (3) 주요 유해물질

대상 부지의 토양 및 지하수를 오염시키는 주요 오염물질은 차량 주유용 및 건물 난방용으로 사용하는 등유(Kerosene) 계열의 JP-8, 경유(Diesel), 모가스(Mogas), 휘발유(Gasoline) 등 유류물질로 다음과 같은 화학물질로 주로 구성된다.

- ① 석유계총탄화수소 (TPH, Total Petroleum Hydrocarbons)
- ② 벤젠(Benzene)
- ③ 톨루엔 (Toluene)
- ④ 자일렌 (Xylene)

위 화학물질 중 가장 인체의 건강에 영향을 미칠 수 있는 물질은 석유계총탄화수소와 벤젠이다. 또한 대상 부지에 존재하는 유동상 기름은 고농도로 존재할 수 있으므로 화재 예방에 주의해야 한다.

○ 석유계총탄화수소(TPH) 응급조치 요령

- 흡입 : 노출된 후 즉시 이동할 것. 필요시 인공호흡(구조 호흡)을 할 수 있는 간이구명기 또는 이와 유사한 장치를 사용하도록 함. 의사의 치료를 받도록 할 것.
- 피부 접촉 : 오염된 의복, 장신구 및 신발을 즉시 제거할 것. 화학 물질이 완전히 제거될 때까지(최소 15-20분) 다량의 물을 사용하여 비누 또는 중성 세제로 세척할 것. 필요시 의사의 치료를 받도록 할 것.
- 눈 접촉 : 화학물질이 완전히 제거될 때까지 많은 양의 물이나 생리식염수로 아래 위 눈 까풀을 가끔씩 치켜들면서 즉시 눈을 씻을 것. 즉시 의사의 치료를 받을 것.
- 섭취 : 만약 구토가 일어나면 구토물이 기도를 막는 것을 방지하기 위해 머리를 둔부보다 낮추도록 할 것. 필요 시 의사의 치료를 받도록 할 것.
- 다량 유출 : 열, 화염, 스파크 및 기타 점화원을 피할 것. 작업자가 위험 없이 누출을 중단시킬 수 있으면 중단 시킬 것. 물 분무를 사용하여 증기의 발생을 감소시킬 것.
- 소량누출 : 모래 또는 다른 비가연성물질을 사용하여 흡수시킬 것. 누출된 물질의 처분을 위해 적당한 용기에 수거할 것. 일정 기준량 이상의 배출에 대해서는 배출내용을 보고 할 것.
- 눈 보호 : 보안경을 착용할 것. 작업장 가까운 곳에 분수식 눈 세척시설 및 비상세척설비(샤워식)를 설치할 것.
- 보호의 : 적절한 내화학성 보호의를 착용할 것.
- 안전장갑 : 적당한 내화학성 장갑을 착용할 것.
- 호흡 보호구 : 노출이 심한 경우에는 호흡용 보호구가 필요함.

○ 벤젠 (Benzene) 응급조치 요령

- 흡입 : 노출되면 출입이 안전할 때 이동할 것. 필요시 인공호흡(구조호흡)을 할 수 있는 간이구명기 또는 이와 유사한 장치를 사용하도록 함. 따뜻하게 하고 편안하게 쉬도록 할 것. 즉시 의사의 치료를 받을 것.
- 피부 접촉 : 오염된 의복, 장신구 및 신발을 즉시 제거할 것. 화학 물질이 완전히 제거될 때까지(최소 15-20분) 다량의 물을 사용하여 비누 또는 중성 세제로 세척할 것. 필요시 의사의 치료를 받도록 할 것.
- 눈 접촉 : 화학물질이 완전히 제거될 때까지 많은 양의 물이나 생리식염수로 아래 위 눈 까풀을 가끔씩 치켜들면서 즉시 눈을 씻을 것. 즉시 의사의 치료를 받을 것.
- 섭취 : 소방서(응급구조) 또는 의사에게 즉시 연락할 것. 의식 불명의 사람에게 토하게 하거나 음료수를 마시지 않도록 할 것. 구토를 하면, 구토물이 기도를 막는 것을 방지하기

위하여 머리를 둔부보다 낮추도록 할 것. 만약 사람이 의식불명이면 머리를 옆으로 돌리게 할 것. 즉시 의사의 치료를 받을 것.

- 의사에 대한 정보 : 흡입의 경우에는 산소의 공급을 고려할 것. 섭취의 경우에는 위세척을 고려할 것.
- 대기 중 유출: 물 분무를 사용하여 증기의 발생을 감소시킬 것.
- 토양 유출 : 처리를 위한 연못, 웅덩이 또는 같은 처리지역을 확보할 것. 추후의 처리를 위한 제방을 축조할 것. 모래 또는 다른 비가연성물질을 사용하여 흡수시킬 것.
- 수중 유출 : 흡수성 시트 또는 누출물 확산을 막을 수 있는 패드나 쿠션으로 덮을 것. 세제, 비누, 알코올 또는 기타 계면활성제를 사용할 것. 흡수제를 사용하여 적합한 용기에 수거할 것. 활성탄으로 흡수할 것. 호스를 사용하여 가두어 둔 물질을 흡입하여 제거할 것. 누출된 물질을 기계 장비를 사용하여 수거할 것. 상수도 및 하수도에서 떨어진 곳에 둘 것.
- 소량 누출 : 모래 또는 다른 비가연성물질을 사용하여 흡수시킬 것. 누출된 물질의 처분을 위해 적당한 용기에 수거할 것.
- 다량 누출 : 추후의 처리를 위한 제방을 축조할 것. 발화원을 제거할 것. 관계인 외의 접근을 막고 위험 지역을 격리하며 출입을 금지. 기준량 이상의 배출에 대해서는 보고할 것.
- 눈 보호 : 보안경을 착용할 것. 작업장 가까운 곳에 분수식 눈 세척시설 및 비상세척설비(샤워식)를 설치할 것.
- 보호의 : 적절한 내화학성 보호의를 착용할 것.
- 안전장갑 : 적당한 내화학성 장갑을 착용할 것.
- 호흡 보호구 : 노출이 심한 경우에는 호흡용 보호구가 필요함.

### (3) 중장비 사용 시 안전계획

환경오염조사 현장 작업 수행 중 중장비(시료채취 오우거, 굴착기 등) 사용에 따른 안전관련 사항들의 예방 및 준수해야 할 사항들이다. 일반적인 안전 규범에 추가하여 중장비 사용 시 지켜야 할 사항들이다.

- 현장 작업복 및 안전모 등 개인보호구를 반드시 착용한다.
- 현장 감독의 별도 지시 없이 중장비의 이동 및 굴착 등의 사용을 금한다.
- 중장비 작업 시 반경 10m 이내 중장비 작동과 관련 없는 인원은 출입금지.
- 모든 화기 및 인화성 물질 사용을 금한다.
- 중장비의 운전은 자격증 소지자가 하도록 사전에 운전원의 자격유무 파악

- 장비 이동 할 시에는 반드시 수신호자의 유도신호에 따른다.
- 전기기계는 반드시 안전 스위치를 부착하여 감전사고 예방 조치를 한다.
- 굴착장비의 운전 시 지반의 연약화 또는 연약지반상의 작업부주의로 전복사고 등이 나지 않도록 충분한 지지력을 확보한 상태에서 작업시작
- 운반 장비 사용 시 연결선의 부실로 운반자재의 낙하로 인한 인명손상이 없도록 충분한 안전조치를 강구하고 이동자재의 하부에 사람이 없도록 함.
- 크레인 작업 시 중량초과의 물체에 대한 인양 작업은 절대 금지시키고, 인양물의 하부에 작업원이나 다른 사람이 들어가는 것을 금지.
- 중장비 운전자와 수신호자 사이에 사용하는 신호는 사전 교육을 통하여 숙지하여 오해로 인한 장비의 오작동이 없도록 충분한 교육을 실시.

#### (5) 방사능 오염 조사 시 안전계획

##### ① 방사능 오염 보호 대책

방사능 오염 조사를 수행할 경우에 방사능 오염 조사에 따른 안전관련 사항들의 예방 및 준수해야 할 사항들이다. 일반적인 안전 규범에 추가하여 방사능 오염 조사 시 반드시 지켜야 할 사항들이다.

- 방사능 조사 관련 작업복 등 개인보호구를 반드시 착용한다.
- 방사능 오염의 우려가 있는 곳에 대하여는 사람의 출입을 관리해야 함.
- 방사능 오염 조사 시 지식과 경험을 갖춘 방사선조사 책임자의 관리 하에 방사선 관리구역을 설정하고 작업종사자 이외의 출입을 관리할 것.
- 방사선 관리구역으로부터 사람이 퇴거하거나 물품을 반출하는 경우에는 인체 및 의복·신발 등 인체에 착용하고 있는 물품과 반출하는 물품 표면의 방사성물질의 오염도 검사를 시행.
- 방사능 오염조사 작업은 반드시 2인 이상을 1조로 편성하여 작업을 수행하고 각 개인에 대한 직무를 분담한다.
- 방사능 조사 책임자는 방사선작업 전에 반드시 작업 현장을 확인하고 그 현장 환경에 적합한 작업방법, 절차 및 방사능 오염방지에 필요한 사항들을 정하여 방사능오염 작업종사자에 대하여 충분한 교육을 실시할 것.
- 방사능 오염 조사 수행 전 방사능오염조사장치의 정상작동상태를 확보하고 안전한 작업을 수행하기 위하여 감마선조사장치에 대한 점검절차서를 정하고 그 절차서에 따라 점검을 실시한 후 작업을 수행할 것.

- 조사 지역 내 작업구역 근처에 공기오염감시기를 설치하여 알파입자에 의한 공기오염도를 감시하고 법적 기준치를 초과하지 않도록 설정치 이상이 되면 경보음을 울리도록 함.
- 방사능오염조사 작업을 종료하는 경우에는 방사능조사장치 등의 안전성 여부를 확인하기 위하여 다음의 조치를 할 것.
- 감마선조사기의 방사능오염 정상상태를 확인할 것
- 조사자 개인 피복선량계를 확인할 것
- 기타 안전장치 및 도구에 대한 안전 상태를 점검할 것

② 방사능 오염 측정 착용장비 및 복장

방사능 오염 조사를 수행하는 현장기술자들은 열형광선량계 및 방호복을 착용하고 작업에 임해야 한다.



그림 3-35 방사능 조사 시 착용 장비 및 복장

③ 방사능 오염 조사 작업 시 주의 및 제한사항

- 방사선피폭에 대한 주된 책임은 작업자 본인에게 있다.
- 체내오염이 의심되는 작업자는 즉시 방사선 안전관리원에게 연락하여 체내오염검사를 받도록 한다.
- 현장 기술자들은 체내 오염검사(전신계측 등) 및 방사선 장해검사를 받아야 하며, 검사결과에 따른 조치에 순응해야 한다.

(6) 사격장 및 폭발물 취급 훈련장 오염조사 시 안전대책

사격장 및 폭발물 취급 훈련장 등에서 환경오염조사를 수행할 경우에는 토양시료채취 및 지하수 관정 설치 작업 전 불발탄(UXO)의 잔류 여부 및 지하매설물 확인을 위한 지구물리

탐사(전자기 탐사, 자력 탐사, 지표투과 레이더 탐사 등)을 실시하여 작업자의 안전 확보를 우선시 한다.

#### ① 불발탄 관련 안전 대책

불발탄 조사를 수행할 경우에 불발탄 조사에 따른 안전관련 사항들의 예방 및 준수해야 할 사항들이다. 일반적인 안전 규범에 추가하여 불발탄 조사 시 반드시 지켜야 할 사항들이다.

- 소화기를 항상 구비하여 놓는다.
- 불발탄 있을 우려가 있는 곳에 대하여는 사람의 출입을 통제해야 함.
- 불발탄 조사 지식과 경험을 갖춘 불발탄 전문가의 책임 하에 불발탄 조사를 수행하고 작업종사자 이외의 출입을 관리할 것.
- 불발탄 조사 작업은 반드시 2인 이상을 1조로 편성하여 작업을 수행하고 각 개인에 대한 직무를 분담한다.
- 불발탄 조사 책임자는 불발탄 작업 전에 반드시 작업 현장을 확인하고 그 현장 환경에 적합한 작업방법, 절차 및 불발탄 사고방지에 필요한 사항들을 정하여 불발탄 작업종사자에 대하여 충분한 교육을 실시할 것.
- 불발탄 조사 책임자는 불발탄 작업 전에 반드시 작업 현장을 확인하고 그 현장 환경에 적합한 작업방법, 절차 및 불발탄 사고방지에 필요한 사항들을 정하여 불발탄 작업종사자에 대하여 충분한 교육을 실시할 것.
- 불발탄 조사를 수행하는 인원은 반드시 보호 장구를 구비하여야 한다.

#### ② 폭발물 관련 안전 교육

불발탄 등과 관련된 폭발성, 발화성 및 인화성 물질의 취급 작업을 수행할 경우에는 조사 수행 전에 반드시 현장 기술자들에 대한 특별 안전보건교육을 이수한 후 진행해야 한다. 다음은 폭발물 관련 안전교육에 다룰 일반적인 내용이다.

- 불발탄 등의 폭발성, 발화성 및 인화성 물질의 특성 및 성질
- 불발탄 등의 폭발한계, 발화점 및 인화점 등에 관한 사항
- 불발탄 등의 취급방법 및 안전수칙에 관한 사항
- 불발탄 등 폭발물의 발견 시 응급처치 및 대피요령에 관한 사항
- 화기, 정전기, 충격 및 자연 발화 등에 관한 사항
- 작업순서, 취급주의사항 및 방호거리 등에 관한 사항

## 1.2.4 『산업안전기준에 관한 규칙(노동부)』

노동부령 산업안전기준에 관한 규칙사항 중 보호구 및 굴착작업 안전사항을 아래 <표 3-31 ~ 33> 에 정리하였다.

표 3-31 보호구 및 굴착작업 안전사항

### 제2장 보호구

제28조 (보호구의 지급등) ①사업주는 다음 각호에서 정하는 바에 따라 그 작업조건에 적합한 보호구를 동시에 작업하는 근로자의 수 이상으로 지급하고 이를 착용하도록 하여야 한다. <개정 2003.8.18>

1. 물체가 떨어지거나 날아올 위험 또는 근로자가 감전되거나 추락할 위험이 있는 작업 : 안전모
  2. 높이 또는 깊이 2m 이상의 추락할 위험이 있는 장소에서의 작업 : 안전대
  3. 물체의 낙하·충격, 물체에의 끼임, 감전 또는 정전기의 대전(대전)에 의한 위험이 있는 작업 : 안전화
  4. 물체가 날아 흩어질 위험이 있는 작업 : 보안경
  5. 용접 시 불꽃 또는 물체가 날아 흩어질 위험이 있는 작업 : 보안면
  6. 감전의 위험이 있는 작업 : 안전장갑
  7. 고열에 의한 화상 등의 위험이 있는 작업 : 방열복
- ②근로자는 사업주로부터 제1항의 보호구를 지급받거나 착용지시를 받은 때에는 당해보호구를 착용하여야 한다.

제29조 (보호구의 제한적사용) ①사업주는 보호구를 사용하지 아니하더라도 근로자가 유해·위험작업으로부터 보호를 받을 수 있도록 설비개선 등 필요한 조치를 하여야 한다.

②사업주는 제1항의 조치를 이행하였음에도 불구하고 유해·위험요인을 제거하기 어려운 때에 한하여 제한적으로 당해작업에 적합한 보호구를 사용하도록 하여야 한다.

제30조 (보호구의 관리) ①사업주는 제28조제1항의 규정에 의하여 보호구를 지급하는 때에는 이를 상시 사용할 수 있도록 관리하여야 하며 청결을 유지하도록 하여야 한다.

②사업주는 방진·방독마스크의 필터 등을 상시 교환할 수 있도록 충분한 양을 비치하여야 한다.

표 3-32 보호구 및 굴착작업 안전사항(계속1)

제31조 (전용보호구등) 사업주는 보호구의 공동사용으로 인하여 근로자에게 질병감염의 우려가 있는 때에는 개인전용의 보호구를 지급하고 질병감염을 예방하기 위한 조치를 하여야 한다.

**제3장 굴착작업등의 위험방지**

제1절 노천굴착작업

제1관 굴착시기등

제382조 (작업장소등의 조사) 사업주는 지반의 굴착작업에 있어서 지반의 붕괴 또는 매설물 기타 지하공작물(이하 "매설물등"이라 한다)의 손괴등에 의하여 근로자에게 위험을 미칠 우려가 있는 때에는 미리 작업 장소 및 그 주변의 지반에 대하여 보링 등 적절한 방법으로 다음 각호의 사항을 조사하여 굴착시기와 작업순서를 정하여야 한다.

<개정 2003.8.18>

1. 형상·지질 및 지층의 상태
2. 균열·함수(합수)·용수 및 동결의 유무 또는 상태
3. 매설물 등의 유무 또는 상태
4. 지반의 지하수위 상태

제383조 (지반 등의 굴착 시 위험방지 <개정 1994.3.29>) ①사업주는 지반 등을 굴착하는 때에는 굴착면의 기울기를 별표 6의 기준에 적합하도록 하여야 한다. 다만, 흙막이 등 기울기면의 붕괴방지를 위하여 적절한 조치를 한 경우에는 그러하지 아니하다.

<개정 1994.3.29, 2003.8.18>

②제1항의 경우 굴착면의 경사가 상이하여 기울기의 산정이 곤란한 때에는 당해 굴착면에 대하여 별표 6의 기준에 따라 붕괴의 위험이 증가하지 아니하도록 당해 각 부분의 경사를 유지하여야 한다. <개정 2003.8.18>

제384조 (토석붕괴 위험방지) 사업주는 굴착작업을 하는 때에는 지반의 붕괴 또는 토석의 낙하에 의한 근로자의 위험을 방지하기 위하여 법 제14조제1항의 규정에 의한 관리감독자로 하여금 작업시작 전에 작업 장소 및 그 주변의 부석·균열의 유무, 함수·용수 및 동결상태의 변화를 점검하도록 하여야 한다. <개정 2006.9.25>

제386조 (지반의 붕괴 등에 의한 위험방지) ①사업주는 굴착작업에 있어서 지반의 붕괴 또는 토석의 낙하에 의하여 근로자에게 위험을 미칠 우려가 있을 때에는 미리 흙막이 지보공의 설치, 방호망의 설치 및 근로자의 출입금지등 당해 위험을 방지하기 위하여 필요한 조치를 하여야 한다.

②사업주는 비가 올 경우를 대비하여 측구를 설치하거나 굴착사면에 비닐을 덮는 등 빗물 등의 침투에 의한 붕괴재해를 예방하기 위하여 필요한 조치를 하여야 한다.

표 3-33 보호구 및 굴착작업 안전사항(계속2)

제387조 (매설물등에 의한 위험방지) ①사업주는 매설물·조적벽·콘크리트벽 또는 옹벽등의 건설물에 근접하는 장소에서 굴착작업을 함에 있어서 당해 가설물의 손괴등에 의하여 근로자에게 위험을 미칠 우려가 있는 때에는 당해 건설물을 보강하거나 이설하는 등 당해 위험을 방지하기 위한 조치를 하여야 한다.

②사업주는 굴착작업에 의하여 노출된 매설물 등이 손괴함으로서 근로자에게 위험을 미칠 우려가 있는 때에는 당해 매설물 등에 대한 방호조치를 하거나 이설하는 등 필요한 조치를 하여야 한다.

③사업주는 제2항의 매설물 등의 방호작업에 대하여는 법 제14조제1항의 규정에 의한 관리감독자로 하여금 당해 작업을 지휘하도록 하여야 한다. <개정 2006.9.25>

제388조 (굴착기계 등의 사용금지) 사업주는 굴착기계·적재기계 및 운반기계 등을 사용함으로써 가스도관·지중전선로등 기타 지하에 위치한 공작물을 손괴하고 그 결과 근로자에게 위험을 미칠 우려가 있는 때에는 당해 기계를 사용하여 굴착작업을 하여서는 아니된다.

제389조 (운반기계의 운행으로 인한 위험방지) 사업주는 굴착작업을 하는 때에는 미리 운반기계·굴착기계 및 적재기계(이하 "운반기계 등"이라 한다)의 운행경로 및 토석의 적재장소에 출입방법을 정하여 관계근로자에게 주지시켜야 한다.

제390조 (운반기계 등의 유도) 사업주는 굴착작업을 함에 있어서 운반기계 등이 근로자의 작업장소에 후진하여 근로자에게 접근하거나 전락할 우려가 있는 때에는 유도자를 배치하고 운반기계 등을 유도하도록 하여야 하며, 운반기계 등의 운전자는 유도자의 유도에 따라야 한다.

제391조 (조명의 유지) 사업주는 굴착작업을 하는 장소에 대하여는 당해 작업을 안전하게 실시하기 위하여 적절한 조명을 유지하여야 한다.

제392조 (안전모의 착용) 사업주는 굴착작업을 하는 때에는 물체의 비산 또는 낙하에 의한 근로자의 위험을 방지하기 위하여 당해 작업에 종사하는 근로자로 하여금 안전모를 착용하도록 하여야 한다.

자료 : 노동부, 2008, 산업안전기준에 관한 규칙

## 1.3 국외 보건관리 규정 검토

### 1.3.1 EPA Guidelines for PPE(Personal Protective Equipment)」

미환경보호청(EPA)에서는 PPE관련하여 4개의 등급으로 나누어서 보건안전관리 규정을 수립하여 유해물질로부터 인간을 보호하고 있다. PPE규정의 기본적인 목적은 안전과 건강위험으로부터 작업자를 보호하기 위함이 첫 번째 목적이고 두 번째로는 부적정한 사용법과 PPE 기능불량으로 인한 위험요소를 막기 위해 규정을 제정하였다. PPE(Personal Protective Equipment)로 사용되어지는 것으로는 다음과 같다.

- 1) Fully encapsulating suits
- 2) Nonencapsulating suits
- 3) Aprons, leggings, and sleeve protectors
- 4) Gloves
- 5) Firefighters' protective clothing
- 6) Proximity or approach garments
- 7) Blast and fragmentation suits
- 8) Cooling garments
- 9) Radiation-protective suits

상기와 같은 보호 장비 선정 시 위험요소, 노출경로 및 PPE 성능에 따라서 선택되어야 하고 4개 등급별로 적당한 PPE가 선정되어야 한다. 다음 <표 3-34>는 미환경보호청(EPA)에서 규정하고 있는 등급별 PPE 적용기준을 제시한 것이다.

표 3-34 EPA Guidelines for PPE<sup>15)</sup>

구분	Respirator(호흡기)	Clothing(의상)	Hand Protection (손보호)	Foot Protection (발보호)	Head Protection (머리보호)	Communication (의사소통)	Optional(선택사항)
LEVEL A	Positive pressure full-Face piece SCBA or pressure demand supplied-air respirator with escape SCBA	Fully-encapsulating chemical-resistant suit	Inner chemical-resistant gloves	Chemical-resistant safety boots/shoes	Optional hard hat.	Two-way radio.	Cooling unit. Coveralls. Long cotton underwear. Disposable gloves and boot covers.
LEVEL B	Pressure-demand full-Face piece SCBA or pressure demand supplied-air respirator with escape SCBA	Overalls and long-sleeved jacket ; hooded, one or two-piece chemical splash suit; disposable chemical-resistant one-piece suit	Inner and outer chemical-resistant gloves	Chemical-resistant safety boots/shoes	Hard hat.	Two-way radio.	Face shield. Coveralls. Long cotton underwear. Disposable boot covers.
LEVEL C	Full-face piece, air purifying, canister-equipped respirator	Overalls and long-sleeved jacket ; hooded, one or two-piece chemical splash suit; disposable chemical-resistant one-piece suit Overalls.	Inner and outer chemical-resistant gloves	Chemical-resistant safety boots/shoes	Hard hat.	Two-way radio.	Face shield. Coveralls. Long cotton underwear. Disposable boot covers.
LEVEL D	Optional escape mask		Optional gloves	Safety boots/shoes	Hard hat. Safety glassed or chemical splash goggles	None.	Face shield.

15) Waste Management and Remedial Action Division 24-hour Hazardous Waste Operations Training, 1997, Overview of the Oak Ridge Reservation Hazardous Waste Sites and Operations

## 2. 환경보호 및 보건관리 지침 평가 및 표준절차 제안

### 2.1 환경보호 및 보건관리 지침평가

국내 환경보호지침 관련하여 각 부처별 사업특성이 상이하여 통일된 지침안이 개발되지 못한 실정이며, 그 내용은 크게 다르지 않은 것으로 확인되었다. 다음 <표 3-35>는 토양 및 지하수조사 관련 국내 각 부처별로 적용하고 있는 환경보호에 관한 지침 중 토양 및 지하수 오염조사와 관련된 환경보호지침만을 요약 정리한 것이다.

표에서 같이 각 부처별로 시료채취 과정에서 발생하는 잔류토양으로 인한 2차오염 예방을 위해 사업특성에 맞게 규정을 하고 있고, 현재 토양 오염조사 관련하여 주로 적용하고 있는 규정으로는 환경부에서 규정된 토양환경보전법 제15조의3 제3항의 기준을 주로 따르고 있으며 세부적인 지침은 국내적용 사례조사 및 관련법(토양환경보전법 및 폐기물관리법 등) 검토를 통해 구체적인 지침안을 마련하고자 한다. 또한 국내외 보건관리지침에 대해 정리하였으며, 국내 보건관리지침은 인명보호, 안전정책 등에 대해서만 포괄적으로 정리되어 있고 그 세부적인 지침은 없는 실정이며, 미국환경보호청(EPA) 규정에 개인 보호 장비를 추가로 정리하여 지침안을 마련하고자 한다. <표 3-36>

표 3-35 국내 기관별 환경보호 지침

구 분	내 용		
	지식경제부	환경부	국방부
환경보호	KSMISO10381-2 6.3 천공과 시추할 때 밖으로 나오는 물질들은 아주 적은 양이어서 문제가 될 것 같지 않지만, 이것들도 모두 모아 적정하게 처리한다. 시추나 굴착 시 불투수층을 파손하지 않도록 주의한다. 불투수층 통과시에는 불투수 재질의 보호재로 불투수층 부위를 막아버린다.	환경부예규 제304호 시료 채취 과정에서 발생한 오염된 잔류 토양은 수거하여 토양환경보전법'제15조의3 제3항에 따라 반출처리장으로 반출하여 처리한다. 토양 시료채취 장비는 원칙적으로 시료채취 지점 및 깊이를 변경할 때마다 사용된 장비를 세척하여 사용함으로써 교차오염으로 인한 2차 오염을 방지하여야 한다.	SOP 지침 3.1.5 시료 채취 과정에서 발생한 오염된 잔류 토양은 입구가 넓은 200ml 이상 용량의 유리병에 가득 담고 마개로 막아 밀봉한 후 0℃~4℃의 냉장 상태로 시험실로 운반하여 수분 보정용 시료로 사용한다.

표 3-36 국내외 기관별 보건관리 지침

구 분	내 용				
	지식경제부-한국산업규격	환경부	국방부	노동부	EPA
인명보호	KSMISO10381-2 6.1 시료 채취 방법을 결정할 때에는 인명의 안전에 위험이 될 수 있는 모든 요소들을 고려한다.	환경부예규 제304호 지중 폭발물 매설 가능성 등을 사전에 탐사하여 작업자의 안전을 확보한다. 폭발물 발견 시 즉시 신고	SOP 지침 2.2.7 현장 안전 절차사항 준수. 작업자는 확인서에 반드시 서명하고, 연락처 구비하여 긴급상황 발생 시 대처.	산업안전 기준에 관한 규칙 제2장 보호구 종류, 규정, 사용, 관리 등의 항목 등에 대한 일반 사항	미환경보호청에서는 PPE관련하여 4개의 등급으로 나누어서 보건안전 관리 규정을 수립하여 유해물질로부터 인간을 보호하고 있다.
안전 정책	KSMISO10381-3 6.1 부지조사와 시료채취에 관련된 모든 기관은 안전한 작업을 위한 필수 조건인 안전 정책을 가지고 있어야 한다. 이 정책에는 일반적인 장소 또는 밀폐된 공간 같은 특별한 장소에서 안전한 작업을 위한 필수 조건을 규정하는 표준 절차서가 있어야 한다. 부지에서 모든 형태의 조사를 시작하기 전에는 위험도 평가를 반드시 수행해야 한다. 작업 종사자가 건강에 해로운 물질에 노출되는 것을 방지하기 위한 국내 법령과 시스템은 반드시 준수해야 한다.	환경부예규 제304호 현장조사를 수행하는 조사기관은 현장의 보건 안전관련 책임자를 선정하여 현장안전 감독관의 책임하에 모든 현장 작업이 진행될 수 있도록 한다. 특히, 오염물질(유해화학물질, 유류 등)에 대한 보호대책/보호장구, 안전표식, 안전모 착용 및 교통 통제 등에 적절한 대책을 마련한 후 시행한다.	SOP 지침 2.2.7 현장조사를 수행하는 조사기관은 현장의 보건 안전관련 책임자를 선정하여 현장안전 감독관의 책임하에 모든 현장 작업이 진행 될 수 있도록 한다. 조사 현장에 대한 현장 기술자들은 자체 안전 규범에 따라 현장조사를 수행할 것이다.	산업안전 기준에 관한 규칙 제3장 굴착작업시의 위험방지 노천굴착작업 및 굴착시기등 굴착시에 대한 일반제한사항 규정	PPE규정의 기본적인 목적은 안전과 건강위험으로부터 작업자를 보호하기 위함이 첫 번째 목적이고 두 번째로는 부적절한 사용법과 PPE 기능불량으로 인한 위험요소를 막기위해 규정을 제정하였다.
특정 위험과 관련된 안전조치	KSMISO10381-3 6.3 각종 화학물질에 대한 주의 조치에는 직접 접촉하거나 흡입하지 못하도록 함으로서 이들을 보호하는 것을 모두 포함한다. 각종기계 장비를 다룰 경우 적절한 보호장비를 갖추고 작업자의 무리가 없는 한도 내에서 작업을 진행해야 한다.	-	SOP 지침 2.2.7 각종 화학물질에 대한 주의 조치에는 직접 접촉하거나 흡입하지 못하도록 함으로서 이들을 보호하는 것을 모두 포함한다. 각종기계 장비를 다룰 경우 적절한 보호장비를 갖추고 작업자의 무리가 없는 한도 내에서 작업을 진행해야 한다.		PPE(PersonalProtective Equipment)로 사용되어지는 것으로는 다음과 같다. - Fully encapsulating suits - Nonencapsulating suits - Aprons, leggings, and sleeve protectors - Gloves - Firefighters' protective clothing - Proximity or approach garments - Blast and fragmentation suits - Cooling garments - Radiation-protective suits

## 2.2 표준절차 제안

### 2.2.1 환경보호 및 보건관리 표준절차 작성

#### 1) 환경보호 표준절차

- (1) 시료채취 시 발생하는 물질의 적절한 처리(반출처리)
- (2) 시료채취 또는 굴착 시 불투수층을 통과하여 오염물질을 확산시키므로 철저한 조사 후 실시
- (3) 시료채취 완료 후 적절한 폐공처리 케이싱 제거 및 되메움 작업 실시
- (4) 기타 교차오염방지

#### 2) 보건관리 표준절차

- (1) 인명보호 : 유해화학물질, 지중 폭발물로부터 안전을 확보하고 긴급상황 발생 시 대처방안 수립
- (2) 안전정책 : 보건안전관련 책임자를 선정하여 조사 현장에 대한 현장 기술자들은 자체 안전규범에 따라 현장조사 수행
- (3) 안전조치 : 각종장비를 다룰 경우 적절한 보호 장비를 갖추고, 유해화학물질은 직접 접촉하거나 흡입하지 못하도록 함.
- (4) 개인보호구 : 유해화학물질 및 장비사용에 따른 안전보호구 착용
  - 안면보호구 : 유해화학물질에 의해 흡입 및 접촉 가능한 경우 착용
  - 보호의 : 유해화학물질에 의해 피부에 접촉 가능한 경우 착용
  - 보호장갑 : 감전, 유해화학물질 및 기계장비에 손이 노출되는 경우 착용
  - 안전화 : 물체의 낙하, 충격, 감전, 유해화학물질 및 기계장비에 발이 노출되는 경우 착용
  - 안전모 : 기계장비 및 낙하 위험물 또는 감전되거나 추락할 위험이 있을 경우 착용
  - 기타 : 기타 방사능오염조사의 경우 필요장비를 추가하여 착용한 후 조사를 실시한다.

### 2.2.2 표준절차서 작성

- 1) 국내외 토양지하수오염조사와 관련하여 국내에서 사용되고 있거나 외국에서 실행하고 있는 지침들을 검토하였으며, 국내 실정에 맞게 지침들을 수정 보완하여 상황에 맞는 최적의 지침을 조사자가 결정할 수 있도록 지침을 만들고자 한다. 아래 <표 3-37> 오염등급에 따라 등급별 환경보호 및 보건관리를 실시한다.

표 3-37 오염등급의 구분

등급	등급기준	색 구분	예시
I	토양오염우려기준의 40% 미만인 지역	청색	4 미만
II	토양오염우려기준의 40% 이상부터 토양오염우려기준 미만인 지역	녹색	4 이상 10 미만
III	토양오염우려기준 이상부터 토양오염대책기준 미만인 지역	노란색	10 이상 20 미만
IV	토양오염대책기준 초과지역	빨강색	20 이상

예시 : 토양오염우려기준이 10mg/kg, 토양오염대책기준이 20mg/kg으로 가정하였을 경우 오염등급 판정

위에서 보는 표와 같이 토양오염농도를 알 때

(1) 환경보호

표 3-38 환경보호 오염등급

구 분	내 용	조치사항	오염등급
오염물질 발생억제	토양 및 지하수 오염조사 굴착 시 발생	굴착 시 발생하는 토양 및 지하수의 반출 및 적정처리	Ⅲ이상
오염확산 방지		불투수층이상 굴착 시 조사자 (고급기술자이상) 인력의 허가	I 이상
교차오염 방지	시료채취과정의 교차오염	세제(DECON 90)를 이용한 장비세척	I 이상
폐공조치	조사완료 후 폐공조치	케이싱제거 후 불투수층 재료 주입 및 표면처리	I 이상

※ 기타 조사자의 필요 및 현장상황에 따라 환경보호를 실시한다.

(2) 보건관리-휘발성물질

표 3-39 보건관리 오염등급-휘발성물질

구 분	내 용	조치사항	오염등급
인명보호	유해화학물질	사전안전교육 실시	I 이상
안전정책	안전정책 수립	보건안전관련 책임자를 선정하여 자체 안전규범에 따라 현장 조사 수행	I 이상
안전조치	안전조치 수립	각종장비를 다룰 경우 적절한 보호장비 착용	I 이상
개인보호구	안면보호구	유해화학물질 취급 시	Ⅲ~Ⅵ
	보호의	유해화학물질 취급 시	I 이상
	보호장갑	감전, 유해화학물질, 장비사용 시 착용	Ⅱ이상
	안전화	장비사용 시 필히 착용	장비사용 시
	안전모	장비사용 시 필히 착용	장비사용 시

(3) 보건관리-비휘발성물질

표 3-40 보건관리 오염등급-비휘발성물질

구 분	내 용	조치사항	오염등급
인명보호	중금속 및 지중폭발물	사전안전교육 실시 (지중폭발물은 반드시 실시)	I 이상
안전정책	안전정책 수립	보건안전관련 책임자를 선정하여 자체 안전규범에 따라 현장 조사 수행	I 이상
안전조치	안전조치 수립	각종장비를 다룰 경우 적절한 보호장비 착용	I 이상
개인보호구	안면보호구	중금속함유물질 취급 시	Ⅲ이상
	보호의	중금속함유물질 취급 시	Ⅱ이상
	보호장갑	감전, 장비사용 시 착용	Ⅲ이상
	안전화	장비사용 시 필히 착용	장비사용 시
	안전모	장비사용 시 필히 착용	장비사용 시
	기타	기타 방사능오염조사 시 적정보호구 착용	방사능오염조사 시

※ 오염도평가가 이루어지지 않은 부지조사의 경우 Level Ⅱ등급이상의 기준을 적용한다.

※ 기타 조사자의 필요 및 현장상황에 따라 개인보호구 착용은 변경될 수 있다.

### 3. 지반조사지침 개발 및 조사인력기준

#### 3.1 지반조사 지침 개발

##### 3.1.1 지반조사의 기술업무 대상과 범위

기술업무는 지반조사의 목적과 규모에 따라 현장답사·시추조사 및 각종시험·계측 등의 자료획득 수단인 조사업무가 수행되어, 수집된 결과를 고찰하고 판정·해석하여 제공하는 엔지니어링 전 과정에서의 지식을 활용한 고도의 전문기술업무 영역이 주 대상이다.

일반적인 기술업무의 범위는 조사계획을 수립하고 기존자료의 수집과 관련 자료를 검토하며, 현지답사를 거쳐 수행된 중간보고서를 작성하여 계획변경을 협의하고, 특수시험 및 계획 등을 거쳐 수집된 지층의 토성 판정과 주상도 등을 검토하며, 조사위치도와 단면도를 작성하고 시험 계측값을 고찰하여 기존자료와 비교 검토하고, 추후의 상세 계획도를 수립하고 설정된 조건별로 해석·판정하며, 특수한 기술도 종합적으로 함께 검토하여, 보고서를 작성·집필하고 최종 보고하는 전 과정의 영역인 두뇌 활동의 지식을 활용하는 전문기술업무이다.

지표지질조사, 항공사진 판독, 고도의 기술을 요하는 원위치시험, 지구물리탐사 및 검층 업무, 토질 및 지질정수의 검토, 탐문조사, 지질도 편집·작성등도 전문지식을 요하는 대상 업무로, 고도의 전문적인 지식과 경험을 수반하는 기술업무이다.

##### 1) 조사업무

- (1) 시추·각종 시료채취 등 현장 수행 업무
- (2) 시추공을 이용한 간단한 원위치 시험
- (3) 각종 현장 원위치시험 및 투수시험
- (4) 실내시험(토질·암석) 및 분석(정량, 정성)

2) 조사항목 및 평가항목<sup>16)</sup>

표 3-41 지반조사 조사 및 평가 항목

구분	조사항목	평가항목
지표지질조사	지표지질조사	주변 지형·지질·구조의 검토 및 판정
	항공 위성사진 판독	
	시굴조사(trench)	
물리탐사	전기비저항탐사외	
시추조사	시추조사	지반정보 획득
	주상도 작성	
	불교란 시료채취	
지하수조사	현장투수시험	지반의 투수성 검토
	지하수추적	
	지중가스조사(VOC측정)	
원위치시험	관입시험	설계 시공상의 토질정수 설정
실내시험	토질 물성시험	

(1) 지표지질조사

지표에 노출된 암반이나 지층의 성상을 관찰하여 대상지역의 지층분포와 구조, 지괴의 안정성, 지표수, 지하수의 부존상황과 성인 등 광범위한 지반지질정보를 구명하는 일련의 조사과정이다. 전문기술자가 야외지질조사 도구를 이용하여 조사지역 내에 분포하는 모든 형태의 노두와 지형상에 나타난 사실을 관찰·기록하고 해석하여, 지형도에 기입·지질분포도 및 지질구조도 등을 작성하는 것으로, 노두가 적은 평지·구릉지·삼림지대는 지주권자의 허락 하에 조사·굴토·Trench로 관찰 자료를 얻어서 지반상태를 입체적으로 추정하고, 이를 지질평면도와 단면도에 기입하여 표현한다. 지표지질조사에서 얻어진 성과는 보다 명확한 제반 지반정보로서, 물리탐사나 시추조사 등 관련 후속조사가 수행되지 않더라도, 기초적인 중요한 위치선정도 가능하게 된다.

(2) 항공(위성)사진 판독

항공사진은 비행기나 기구 또는 위성에서 수직과 경사로 촬영한 지상사진으로 흑백과 컬러가 있으며, 지질조사에는 수직 촬영한 흑백사진을 실제경으로 지형패턴과 명암 상태를 주의 깊게 관찰하여, 지질과 관련된 지형 및 지질구조를 판독한다. 항공사진 판독은 판독목적과 그 내용에 따라, 지형도의 축척·사진수량·판독시간이 다르므로, 판독범위도 원형(지역)이나 선형에 따라 사진의 매수가 달라진다.

16) 자료 : 한국엔지니어링진흥협회, 2004, 지반조사 표준품셈

### (3) 시굴조사(Trench) 조사

지층 분포상황이나 단층의 활동성 등 상세한 지반정보를 국부적인 곳에서 얻고자 할 때, 중기나 인력으로 Trench나 Pit를 굴착하여 그 벽면의 지층을 관찰하고, 필요에 따라 시험 분석용 시료를 채취하기도 하며, 그 필요 규모와 굴착목적에 따라 방법에 차이가 있다.

### (4) 물리탐사

지하지반에 대한 탐사방법은 탄성과 전류·전자기파 등의 신호를 지하지반으로 보내서, 그것이 지하의 지질구조를 투과·굴절·반사하거나, 2차 유도에 의한 물리특성 변화 등에의 반응신호를 수신하여, 지질구조와 지하지반의 물성분포를 밝히는 기술로 지반환경 분야에 사용된다.

### (5) 시추조사

비고결지층인 토질을 대상으로 하는 토질조사시추와, 암반을 대상으로 하는 암반조사시추로 구분한다. 이외에도 얇은 토질지반을 대상으로 하는 시료채취용 소구경 Auger boring이 조사시추 범주에 속한다. 토질(비고결층)조사 시추는 비교적 소형 시추기와 적정용량·압력의 펌프와 동력과 기타 수요 장비로, 지반 표층부에서의 각종 시료채취 및 공내에서 실시하는 각종 원위치시험을 위한 공형성의 수단이며, 시추 자체가 그 목적의 전부는 아니다.

### (6) 원위치 시험

시료채취나 실내토질시험이 어려운 사질토와 연약 점성토지반의 연속적인 지반정보를 얻고자 할 때 수행되며, 토층지반의 관입저항, 원지반 흙의 강도 등을 직접 추정한다. 지반조사에는 많은 원위치 시험 항목이 있으나 지반환경 분야에서 많이 쓰는 SPT(표준관입시험)항목에 대해서만 언급한다.

SPT(표준관입시험)은 가장 일반적인 동적관입시험으로 시추와 동시에 시료채취를 수행하는 불연속시험으로, 일종의 시험타 시험의 경험적 통계를 계수화한 것이라 할 수 있다. 이는 주로 점성토층과 모래층 및 사질토층을 대상으로 하며, 연약한 점토층이나 사력층·자갈층·풍화토잔류토층에서는 참조 비교값으로 활용된다.

### (7) 실내시험

지반을 구성하는 흙이나 암석의 성질을 파악하기 위한 실내시험은 설계·시공의 필수적인 기초자료이다.

시험대상은 조사 시에 채취된 시료이므로 정밀도가 높은 지반조사가 선행되어야 한다. 토양물성시험은 교란된 시료를 이용하여도 무방하며, 밀도·함수비·입도·액성·소성한계 등을 분석한다.

(8) 지하수조사

지하수량 : 지하수위·수압·유속·유향·유량 등 수리학적인 물리량과, 대수층의 유효간극율·투수계수·저류계수 등의 수리정수 파악

지하수질 : 수질과 수질변화 등 지하수의 존재 실태를 파악하여, 산업용·생활용수와 생태계에의 적합성의 평가

### 3.2 조사인력의 자격기준

#### 3.2.1 토양관련전문기관의 지정기준(제17조의2제1항 관련)

##### 1) 토양오염조사기관

(1) 기술인력

표 3-42 토양오염조사기관 기술인력

기술인력	해당분야
1) 박사 또는 기술사 1명 이상	토양환경, 자연환경, 폐기물처리, 대기환경, 수질환경, 화학공학, 공업화학, 화공안전, 자원, 시추, 토목시공, 토목, 소방설비, 응용지질, 산업위생, 기계공학, 설비공학, 전자공학, 전기공학 또는 제어계측 관련 분야
2) 기사 1명 이상	
3) 산업기사 2명 이상	
4) 「고등교육법」 제2조에 따른 학교의 해당 관련 분야 졸업자 또는 이와 동등 이상의 자격이 있는 사람 4명 이상	환경학, 환경공학, 환경위생, 화학공학, 공업화학, 유기화학, 생화학, 자원공학, 지질학, 토목공학, 생물학, 기계공학, 농화학, 금속공학, 물리학, 화학, 설비공학, 전자공학, 전기공학 또는 제어계측공학 관련 학과

※ 비고

- ① 박사 또는 기술사는 해당 분야 기사 자격취득 후 토양 관련 분야 또는 해당 전문기술 분야에서 5년 이상 종사한 사람으로 대체할 수 있다.
- ② 기사는 해당 분야 산업기사 자격취득 후 토양 관련 분야 또는 해당 전문기술 분야에서 4년 이상 종사한 사람으로 대체할 수 있다.
- ③ 산업기사는 「고등교육법」 제2조에 따른 학교의 해당 분야를 졸업하고 토양 관련 분야 또는 해당 전문기술 분야에서 3년 이상 종사한 사람이나 환경부장관이 인정하는 토양지하수전문인력 양성 교육과정을 수료한 사람으로 대체할 수 있다.

- ④ 「고등교육법」 제2조에 따른 학교의 해당 관련 분야 졸업자는 공업계고등학교를 졸업하고 토양 관련 분야 또는 해당 전문기술 분야에서 3년 이상 종사한 사람으로 대체할 수 있다.
- ⑤ 표 3-42 중 1)란부터 3)란까지에 해당하는 기술인력 중 1명 이상은 토양환경기술사 또는 토양환경기사로 하여야 한다.

2) 토양정화업의 등록요건(제17조의4제1항 관련)

(1) 기술인력

**표 3-43** 토양정화업 기술인력

기술인력	해당분야
1) 박사 또는 기술사 1명 이상	토양환경, 자연환경, 폐기물처리, 대기환경, 수질환경, 화학공학, 공업화학, 화공안전, 자원, 시추, 토목시공, 토목, 소방설비, 응용지질, 산업위생, 기계공학, 설비공학, 전자공학, 전기공학 또는 제어계측 관련 분야
2) 기사 1명 이상	
3) 산업기사 2명 이상	
4) 「고등교육법」 제2조에 따른 학교의 해당 관련 분야 졸업자 또는 이와 동등 이상의 자격이 있는 사람 4명 이상	환경학, 환경공학, 환경위생, 화학공학, 공업화학, 유기화학, 생화학, 자원공학, 지질학, 토목공학, 생물학, 기계공학, 농화학, 금속공학, 물리학, 화학, 설비공학, 전자공학, 전기공학 또는 제어계측공학 관련 학과

※ 비고

- ① ~ ⑤ 토양오염조사기관 기술 인력과 같음.
- ⑥ 누출검사기관이 토양정화업의 등록을 하려는 경우에는 표 3-43 중 1)란에 해당하는 기술인력은 중복하여 갖추지 아니할 수 있다.

3) 엔지니어링기술 인력의 자격기준(제3조 제1항 관련)

표 3-44 엔지니어링기술 인력의 자격기준

직종별	등급별	업무내용	비고
기술자	기술사	해당 기술분야에서 고도의 전문지식과 실무경험을 응용한 종합적이고 총체적인 기술업무를 수행하고 집필하는 총괄책임자로서 사업관리 업무를 수행하는 기술자	토양 환경, 환경공학, 자연 환경, 폐기물처리, 수질 환경, 화학공학, 공업화학, 자원, 시추, 토목시공, 토목, 응용지질 관련 분야 기술자로서 기술업무의 수행영역
	특급	해당 기술분야의 실무경험에 입각한 수행계획·분석·시험 등, 전문지식에 대한 기술지도와 감리·운영의 사업관리를 수행하는 현장에 대한 기술 관리의 총괄책임기술자	
	고급	해당 기술분야에 관한 공학적 전문지식과 응용능력으로, 고도의 현장시험과 기계·기구·계기 등의 조작과 자료의 해석 등의 기술업무 수행능력자로서 현장기술지도 책임기술자	
	중급	해당 기술분야에 관한 기초지식과 적응능력으로, 제반시험과 기계·기구·계기의 조작과 자료의 해석 등의 기술업무수행 능력자로서 현장대리인 및 관리 책임기술자	
	초급	해당 기술분야에 관한 기초지식과 적응능력으로, 제반시험과 기계·기구·계기의 조작과, 자료수집 등의 기술업무 수행자로 현장기술 관리 보조 기술자	

4) 기술자격 및 학력별 기준

표 3-45 기술자격 및 학력별 기준

구분	기술자격 및 경험기준	학력 및 경험기준
기술사	기술사	
특급	·기사자격을 가진 자로서 10년 이상 해당 기술분야의 업무를 수행한 자 ·산업기사자격을 가진 자로서 13년 이상 해당기술분야의 업무를 수행한 자	·박사학위를 가진 자로서 3년 이상 해당 기술분야의 업무를 수행한 자 ·석사학위를 가진 자로서 9년 이상 해당 기술분야의 업무를 수행한 자 ·학사학위를 가진 자로서 12년 이상 해당 기술분야의 업무를 수행한 자 ·전문대학을 졸업한 자로서 15년 이상 해당기술분야의 업무를 수행한 자
고급	·기사자격을 가진 자로서 7년 이상 해당 기술분야의 업무를 수행한 자 ·산업기사자격을 가진 자로서 10년 이상 해당기술분야의 업무를 수행한 자	·박사학위를 가진 자 ·석사학위를 가진 자로서 6년 이상 해당 기술분야의 업무를 수행한 자 ·학사학위를 가진 자로서 9년 이상 해당 기술분야의 업무를 수행한 자 ·전문대학을 졸업한 자로서 12년 이상 해당기술분야의 업무를 수행한 자 ·고등학교를 졸업한 자로서 15년 이상 해당기술분야의 업무를 수행한 자
중급	·기사자격을 가진 자로서 4년 이상 해당 기술분야의 업무를 수행한 자 ·산업기사자격을 가진 자로서 7년 이상 해당기술분야의 업무를 수행한 자	석사학위를 가진 자로서 3년 이상 해당 기술분야의 업무를 수행한 자 ·학사학위를 가진 자로서 6년 이상 해당 기술분야의 업무를 수행한 자 ·전문대학을 졸업한 자로서 9년 이상 해당기술분야의 업무를 수행한 자 ·고등학교를 졸업한 자로서 12년 이상 해당기술분야의 업무를 수행한 자
초급	·기사자격을 가진 자 ·산업기사자격을 가진 자	·석사학위를 가진 자 ·학사학위를 가진 자 ·전문대학을 졸업한 자 ·고등학교를 졸업한 자로서 3년 이상 해당기술분야의 업무를 수행한 자

### 3.2.2 참여인력 기준(안)

실제적으로 직접 토양지하수오염조사를 실행하는 기관인 토양오염조사기관 및 토양정화업 등록기준 기술 인력에 대한 규정사항을 검토하고, 엔지니어링기술 인력의 자격기준 및 학력별 기준을 정리하였다. 위 사항을 검토하여 현장조사 시에 필요한 조사인력기준을 정리하면 부지 및 조사특성에 따라 다를 수 있으나, 조사인력 중 해당분야 기술사 또는 해당분야 박사학위 후 3년 이상의 기술인력 및 학력기준을 가진 인력이 1인 이상 필요하다.

표 3-46 해당분야 기술자격 및 학경력 기준

구 분	기술자격기준	학·경력기준	배점
과업책임자	지질 및 지반, 토양환경기술사	해당분야 박사학위 후 3년 이상	4
세부과업책임자 1 (토양, 지하수)	해당분야 기사 취득 후 10년 이상(특급)	해당분야 박사학위 후 3년 이상	3
		해당분야 석사학위 후 9년 이상	
		해당분야 학사학위 후 12년 이상	
세부과업책임자 2 (토양, 지하수)	해당분야 기사 취득 후 7년 이상(고급)	해당분야 석사학위 후 6년 이상	2
		해당분야 학사학위 후 9년 이상	
		해당분야 전문대졸 후 12년 이상	
과업참여자 1	해당분야 기사자격 취득 후 4년 이상(중급)	해당분야 석사학위 후 3년 이상	1.5
		해당분야 학사학위 후 6년 이상	
		해당분야 전문대졸 후 9년 이상	
과업참여자 2	해당분야 기사자격을 가진 자 (초급)	해당분야 고등학교졸업 후 3년 이상	1
		해당분야 전문대졸 이상	

#### 1) 과업책임자

과업책임자는 사업진행의 전반적인 책임을 지고 사업을 총괄할 수 있는 “기술사(지질 및 지반기술사, 토양환경기술사) 또는 특급기술자”(엔지니어링사업수행능력 평가기준 별표 2)여야 한다.

2) 세부과업책임자

세부과업책임자는 세부과업의 전반적인 수행능력이 있는 특급 및 고급기술자이상(엔지니어링사업수행능력 평가기준 별표 2)이어야 한다.

3) 과업참여자

과업참여자는 전반적인 토양지하수오염조사 수행능력이 있는 중급 및 초급기술자이상(엔지니어링사업수행능력 평가기준 별표 2)이어야 한다.

4) 현장조사최소인력 기준 안

토양지하수오염조사 현장조사 시 최소 인력으로 위 표에서와 같이 최초 현장답사는 과업책임자가 필히 참석하여야 하며, 전반적인 토양지하수 조사업무 수행 시 배점표 기준 3점 이상의 인력이 참여하여야 한다. 최소 고급기술자 1인(3점) 내지 중급기술자 2인(3점)은 현장조사 시에 반드시 참여하여야 한다.

표 3-47 현장조사 시 최소인력 기준 안

구분	인원	배점	구분	인원	배점	합계
기술사이상	1인	4점	-	-	-	4점
특급기술자	1인	3점	-	-	-	3점
고급기술자	1인	2점	중급기술자	1인	1.5점	3.5점
고급기술자	1인	2점	초급기술자	1인	1점	3점
중급기술자	2인	3점	-	-	-	3점

## 제 4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여



## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여

### 제1절. 연구개발목표 달성도

1차년도(2008년)에는 최종목표인 토양·지하수오염조사지침 개발을 위한 선행 작업으로 국내 토양 및 지하수 관리체계 및 오염현황 그리고 토양 및 지하수 오염특성에 대해 조사하였으며 국내토양조사 관련규정인 토양정밀조사지침(환경부), 토양환경평가지침(환경부), 군환경오염조사 표준수행절차(국방부) 등을 검토하여 조사체계, 시료채취방법, 조사내용 등에 대해 조사하였으며 국내지하수오염조사를 위해 관련 국내규정 검토 등 지침개발을 위한 기반작업을 실시하였다.

토양, 지하수 연계관리 방안에 대해서는 동일 오염 체계에 있는 토양 및 지하수의 연계관리 방안을 검토하여 개별적 조사가 아닌 상호 조사를 통한 연계관리 방안에 대하여 검토하였다.

통계적 기법을 도입한 시료개수 산정연구를 위해 호주, 미국 등의 해외 자료 등을 조사하여 산정절차를 제시하였으며, 엑셀프로그램을 이용한 간단시료개수 산정 프로그램을 만들었다. 통계적 방법이 사용되고 있는 프로그램인 VSP 등 선진외국의 통계적 소프트웨어 프로그램과 신뢰성 있는 데이터 획득을 위한 미국의 DQO 프로그램에 대해서도 소개하였다.

또한 2005년 캠프지역 반환/공여지 환경오염조사 사례를 적용하여 토양정밀조사지침을 사용했을 경우와 비교 검토함으로써 통계적 기법의 적용가능성에 대한 검토를 실시하였다.

1차적으로 국내외 토양오염조사현황조사 및 통계적 방법 적용검토 등을 바탕으로 토양오염조사지침 초안을 마련하였으며 오염부지 조사 시 환경보호 및 보건관리(안) 설정을 위한 기반작업으로 현 문제점과 국내외 문헌조사를 실시함으로써 1차년도에 계획한 목표를 성공적으로 달성하였다.

2차년도(2009년)에는 1차년도에 작성하였던 토양오염조사지침(초안)의 보완을 위해 일본, 캐나다 등 해외 현황조사를 더욱 심도있게 하였으며, 토양오염조사지침(초안)의 근간인 토양정밀조사지침을 대상으로 현문제점 도출과 개선방안에 대한 연구를 실시하여, 격자 간 대상지역의 통합, 조사대상 오염지역, 배경농도 등이 개선된 토양오염조사지침 최종안을 작성하였다.

국내에 오염조사절차 및 절차별 상세 조사방법이 제시되어있는 오염조사 가이드라인이 부족한 실정인 지하수오염조사지침의 경우에는 UNESCO 및 미국 USGS의 지하수 오염조사 관련 규정 검토 및 미국, 유럽, 일본 등 선진국의 지하수 관리 및 오염 조사 현황에 대해

구체적으로 검토하여, 계획수립에서부터 조사실행, 결과평가에 이르는 3단계의 세부적인 절차를 다루는 지하수 오염조사지침 가이드라인을 작성 제시하였다. 또한 기존의 토양정밀조사지침상의 일부 지하수오염조사 부분에 대해서는 호주의 지하수 오염지역 오염평가방법 등을 참고로 하여 수정 보완하였다.

마지막으로 오염부지 조사 시 환경보호 및 보건관리부분에서는 1차년도에 도출된 문제점을 바탕으로 환경보호지침과 보건안전관리 지침 표준절차서를 작성하였으며 표준절차서는 오염등급 기준에 따른 실질적인 적용이 가능하도록 하였다.

연구 기간 동안 1, 2차년도에 목표로 했던 가시적 결과물인, 토양오염조사지침(안), 지하수오염조사 가이드라인(안), 오염부지 조사 시 환경보호 및 보건관리지침(안)등에 대해 표 4-1과 같이 성공적으로 달성하였다.

표 4-1 연도별 연구개발 목표의 달성도

구분	연도	목표	연구개발 수행 내용	달성도 (%)
1차년도	2008	국내· 외 토양 및 지하수 오염조사 현황 조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 국내· 외 토양/지하수 연계관리 현황 및 분석방법, 분석항목 타당성에 대한 자료조사</li> <li>○ 국내· 외 부지조사지침 및 오염부지 조사 시 환경보호(2차오염 예방) 및 보건관리 현황 자료조사</li> </ul>	100
		토양 지하수 연계 관리 현황조사	○ 토양 지하수 연계 관리 현황조사	100
		토양 지하수 오염평가를 위한 개선 연구	○ 토양 및 지하수 시료채취 kit 개선	100
		토양 및 지하수 오염 부지조사지침 초안 마련(현행 오염조사 지침개선)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 토양환경조사 수량 개선</li> <li>○ 토양환경조사 방법 개선</li> </ul>	100
2차년도	2009	국내· 외 지하수 오염조사 현황 조사	○ 국내외 지하수 오염조사 현황조사	100
		오염부지 조사 시 환경보호(2차오염 예방) 및 보건관리 지침 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 조사 시 발생 오염물질의 전과정 관리 지침 개발</li> <li>○ 국내· 외 지하수 토양분야 보건관리 현황 조사를 통한 지침 개발</li> </ul>	100
		토양 및 지하수 오염 부지조사지침(안) 마련	○ 오염 토양 및 지하수 조사 방법 확립	100
		토양 및 지하수오염 조사 지침 최종안 마련	○ 각 조사지침별 최종 조사지침안 마련	100

## 제2절. 관련분야 기여도

- 토양 및 지하수 오염조사지침(안)을 제시함으로써 정부의 토양 및 지하수 환경정책 수립의 기초자료로 제공할 수 있다.
- 토양 및 지하수 오염조사에 대해 보다 구체화된 지침 제시에 따라 기관별 조사 오차의 감소로 오염조사절차상의 중복 조사 및 이에 따른 예산낭비를 방지할 수 있다.
- 토양오염조사지침의 통계적 기법의 도입을 통해 조사자의 주관에 따른 조사가 아닌 좀 더 합리적이고 객관적인 조사가 가능하다.
- 체계적인 국내 지하수 오염조사지침이 없는 실정에서 지하수오염조사의 체계적인 가이드라인 제시로 지하수오염조사 분야 연구 및 개발의 기틀을 마련할 수 있다.
- 오염부지 조사 시 환경보호 및 보건관리 가이드라인을 통해 발생할 수 있는 2차 오염 감소에 따른 환경보호 강화와 조사자들의 건강보호 강화를 예측할 수 있다.
- 비용 경제적으로 효율적인 지침 개발과 보급을 통한 오염지역의 환경개선으로 깨끗한 토양/지하수 환경보전 가능하다.
- 선진국의 토양 및 지하수 오염조사 문헌자료를 통해 향후 국내 토양 및 지하수 오염정책 방향을 예측해 볼 수 있다.



## 제 5장 연구개발결과 활용계획



## 제 5장 연구개발결과 활용계획

### 제1절. 활용계획

- 국가 토양 및 지하수 오염조사 관련 규정의 개정 또는 제정 시 본 연구 결과의 반영을 통한 국가 정책 지원
- 정부의 토양 및 지하수 환경정책 수립의 기초자료로 활용
- 오염부지 조사 시 조사지침개발을 통해 오염원의 위해성 평가 및 정화를 위한 기본 자료로 활용
- 토양, 지하수 오염 현황의 객관적 파악을 통한 정화방법 결정 등 합리적 의사 결정 지원
- 체계적 오염조사를 통한 토양 및 지하수의 효율적 관리로 국토 환경 보호
- 오염부지 조사 시 발생할 수 있는 2차 환경오염 및 실무자들의 건강위해를 감소할 수 지침으로 활용

### 제2절. 향후연구과제의 방향

토양지하수오염조사지침과 관련한 연구과제의 향후 방향에 대해 다음과 같이 몇 가지로 나누어 판단하여 보았다.

- 부지특성화에 따른 개념부지모델의 접근방식 연구  
현재 미국, 캐나다 등의 선진국에서는 토양지하수 오염조사뿐 아니라 대부분의 환경오염 조사에 부지특성화를 통한 개념부지모델 접근방식을 활용하여 정확하고도 효율적인 조사를 수행하고 있다. 우리나라와 같이 일률적인 가이드라인이 정해져 있는 게 아니고 체계

적인 계획수립부터 팀원구성, 다양한 의사결정 프로그램 방식 등을 통한 시스템적인 조사 접근방식을 택하고 있다. 우리나라의 경우도 상당 수준 현행 조사방법에 대한 경험이 축적되어 있으므로 개념부지모델과 같이 보다 선진국형의 체계적인 방식의 조사방법의 도입 및 적용성 평가에 대해 향후 심도있는 연구가 필요하다고 판단된다.

○ 외국수준의 통계적방법의 시료채취 소프트웨어 프로그램 개발

이번 연구를 통해 간단한 시료채취개수 산정 프로그램을 만들어 보면서 미국의 VSP등과같이 다양한 통계방식을 적용한, 웹상에서 사용자가 쉽게 사용할 수 있는 체계적인 소프트웨어 프로그램을 소개하였다. 우리나라도 환경부사이트와 같은 웹상에서 국내 사용자들도 쉽게 접근할 수 있는 통계적방법의 시료채취 소프트웨어 프로그램을 개발하여 좀더 정확하고 체계적인 오염조사가 이뤄질 수 있는 계기가 필요하다고 판단되며 이를 수행하기 위해서는 다양한 통계적 평가기법 등의 기반연구가 필요할 것으로 판단된다.

○ 2단계(개황)조사 시 현장조사방법 등의 활용

미국, 캐나다, 일본 등 선진국의 토양지하수 오염조사 방법 시 토양가스 시료채취방법 등을 많이 활용하고 있는데 미국의 경우에는 휘발성유기오염물질이나 유류 등의 석유계 탄화수소의 조사 시 PID등과 같은 현장 스크리닝 방법, 휴대용 GC와 같은 이동형 GC 조사방법과 수동적인 흡착 시료채취기를 이용한 방법 등을 이용하여 휘발성 유기오염물질이나 유류 등의 mapping을 하며 일본 역시 토양가스측정기나 지하수간이 보링공 등을 이용하고 있다. 우리나라의 경우도 활용이 되고 있는 것으로 알고 있는데 이와 같은 현장 조사방법의 체계적인 지침 도입에 대해 향후 연구가 이뤄져야할 것으로 판단된다.

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보



## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 일본, 토양오염대책법 시행규칙.
- 일본, 토양, 지하수오염에 관한 조사 대책지침 개요.
- 일본, 사격장에 관한 납 조사대책에 대한 개요.
- Groundwater contamination inventory, UNESCO.
- HANDBOOK OF GROUND-WATER SAMPLING(2007), Taylor & Francis Group, LLC.
- ENVIRONMENTAL SITE CHARACTERIZATION AND GROUND-WATER MONITORING(2006), Taylor & Francis Group, LLC.
- Secondary Model Procedure for the Development of Appropriate Soil Sampling Strategies for Land Contamination(2000), Bristol, UK. Environment Agency(ES)
- European Freshwater Monitoring Network design-Topic Report 10/96 ETC/IW. European Environmental Agency(S. C. Nixon)(1996a)
- Groundwater Monitoring in European-Topic Report 14/96 ETC/IW. European Environmental Agency(C. Koreimann, J. Grath, G. Winkler, W. Nagy and W.R. Vogel)(1996b)
- Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring, Gilbert, Richard O, 1987 Pacific Northwest Laboratory, Van Nostrand Reinhold: New York.
- Guidance for the data quality objective process, 2006a(EPA)
- FIELD SAMPLING METHODS for REMEDIAL INVESTIGATIONS, Mark Edward Byrnes, 2009.
- CONTAMINATED SITES Sampling Design Guidelines, NSW EPA, 1995.
- CONTAMINATED SITES Guidelines for Assessing Service Station Site, NSW EPA, 2003.
- PROTOCOL FOR THE CONTAMINATED SITES REGULATION UNDER THE ENVIRONMENT ACT, 2008, PROTOCOL NO. 3: Soil Sampling Procedures at Contaminated Sites, Yukon Department of Environment.

- European soil sampling guidelines for soil pollution studies, *The Science of the Total Environment* 264 51-62, 2001.
- *Methods for Evaluating the Attainment of Cleanup Standards Volume 1: Soils and Solid Media*, USEPA/230/02-89-042. US EPA, 1989.
- *Preparation of Soil Sampling Protocols: Sampling Techniques and Strategies*, EPA/600/R-92/128, Office of Research and Development, US EPA, 1992.
- *Superfund Program Representative Sampling Guidance*, EPA 540/R-95/141, Office of Emergency and Remedial Response, US EPA, 1995.
- *Soil Screening Guidance; Technical Background Document*, EPA/540/R95/128, US EPA, 1996.
- *Overview of the Oak Ridge Reservation Hazardous Waste Sites and Operations. Waste Management and Remedial Action Division 24-hour Hazardous Waste Operations Training*, 1997.
- *Guidelines for the Proposed Contaminated Sites Auditor Accreditation Scheme*, WESTERN AUSTRALIA, 2000.

## 제 7 장 참고문헌



## 제 7 장 참고문헌

- 1) 강순기, 광무영, 김무훈, 1998, 국내토양오염 유발시설별 오염현황조사, 한국토양환경학회지.
- 2) 건설교통부, 한국수자원공사, 2004, 국가 지하수관측망 운영관리 최적화 방안 연구 보고서.
- 3) 건설교통부, 한국수자원공사, 2006, 지하수업무수행지침.
- 4) 구자공, 2007, 미국의 토양 및 지하수 오염 정화 정보 사이트 기술동향, 대한환경공학학회.
- 5) 국립환경과학원, 2000, 각국의 먹는 물 수질기준.
- 6) 국방시설본부, 2005, 05 반환/공여지 토양환경조사 용역 2공구 캠프 0000.
- 7) 국방시설본부, 2005, 군 환경오염조사 표준수행절차[시료채취 및 분석].
- 8) 국방시설본부, 2005, 캠프 000 환경오염조사 결과보고서.
- 9) 국토해양부, 2007, 「국가지하수 정보관리 협의체」 구성 및 운영계획안.
- 10) 국토해양부, 2007, 지하수관리 기본계획.
- 11) 국토해양부, 2008, 지하수 기초조사 사업시행계획.
- 12) 김동호, 김종하, 김태승, 김혁, 남경필, 박종겸, 윤정기, 전성환, 정일록, 2005, 토양오염 기준 평가 및 확립에 관한 연구(II), 국립환경과학원.
- 13) 김동호, 김종하, 김태승, 김혁, 윤정기, 전성환, 정일록, 2004, 토양오염기준 평가 및 확립에 관한 연구(I), 국립환경연구원.
- 14) 노동부, 2008, 산업안전기준에 관한 규칙/RE-09, 2004.
- 15) 문유리, 유은혜, 2006, 주요 지질별 지하수 개발·이용 특성 및 수질관리 실태 비교연구, 한국정책·평가연구원.
- 16) 박상열, 박용하, 양재의, 2006, 토양오염실태조사 및 특정토양오염관리대상시설 부지 등에서 토양오염조사의 효율성 제고를 위한 환경정책의 고찰, 한국환경정책·평가연구원.
- 17) 박용하, 1997, 토양질 측정자료의 관리체계 구축방안, 한국환경정책·평가연구원.
- 18) 박용하, 송재우, 윤서성, 이양희, 장지수, 2003, 토양오염지역의 관리 및 복원방안 II, KEI/2003/RE-13.
- 19) 방상원, 정재현, 우리나라와 선진국간의 지하수 수질기준에 관한 고찰. 환경정책평가연구원.
- 20) 배계선 외(역), 2004, 토양과 지하수 오염대책(Soil and groundwater contamination measure), 21세기사.
- 21) 벽산엔지니어링, 2010, OO 석면광산 광해복원정밀조사 보고서(수행중).
- 22) 안윤주, 정승우, 2006, 토양오염기준과 연계한 위해성평가 실무지침 작성 연구.

- 23) 이양희, 황상일, 2004, 오염토양부지의 정보관리체계 효율화방안, 한국환경정책·평가연구원, KEI/200469) 한국표준협회, 토양의 질-시료채취-제2부 : 시료채취 기술에 관한 지침 KS M ISO 10381-2.
- 24) 임성재. 2007, 토양 및 지하수수질 보전제도 분석과 관리개선 방안, 환경부.
- 25) 정승우, 2003, 토양오염물질의 물리·화학적 특성과 이동성에 따른 환경영향평가 방안, 한국환경정책·평가연구원, KEI/2003/RE-20.
- 26) 주진철, 2008, 미국 내 토양 및 지하수 오염복원 기술 동향, 한국지반공학회지.
- 27) 지식경제부, 2004, KS M ISO 10381-1~7.
- 28) 지식경제부, 2009, 엔지니어링기술진흥법시행규칙 별표 1 엔지니어링기술인력의 자격 기준.
- 29) 지식경제부, 2009, 엔지니어링기술진흥법시행규칙 별표 2 엔지니어링사업수행능력의 평가기준.
- 30) 한국광해관리공단, 2009, OO·OO 광산 토양오염 복원정밀조사 보고서.
- 31) 한국엔지니어링진흥협회, 2004, 지반조사 표준품셈.
- 32) 한국표준협회, 2004, 토양의 질-시료채취-제2부 : 시료채취 기술에 관한 지침 KS M ISO 10381-2.
- 33) 한국표준협회, 2004, 토양의 질-시료채취-제3부 : 안전에 관한 지침 KS M ISO 10381-3.
- 34) 한국환경정책평가연구원, 2007, 지하수 수질기준 및 정화기준 재설정에 대한 정책방향.
- 35) 한정상, 1994, 미국 지하수자원의 최적관리기법과 보호전략에 관한 연구, The Journal of Engineering Geology.
- 36) 환경부, 2003, 연직차수벽과 지하수위조절에 의한 매립시설침출수 누출억제기술에 대한 세부검사방법에 관한규정.
- 37) 환경부, 2004, 지하수관련 전문기관 지정고시.
- 38) 환경부, 2004, 지하수의 수질보전 등에 관한 업무처리지침.
- 39) 환경부, 2005, 12, 지하수 수질관리 및 오염정화기준 합리적 개선방안연구.
- 40) 환경부, 2005, 2005년도 OO 산업단지 토양지하수 환경조사 보고서.
- 41) 환경부, 2005, 토양보전 기본계획 수립 연구.
- 42) 환경부, 2006, 2006년도 OO 산업단지 토양지하수 환경조사 보고서.
- 43) 환경부, 환경관리공단, 2006, 2006년도 지하수수질측정망 운영실태 및 개선방안 조사 연구 사업.
- 44) 환경부, 2007, 토양정밀조사지침 개정을 위한 연구.

- 45) 환경부, 2007, 토양정밀조사지침 개정을 위한 연구 최종보고서.
- 46) 환경부, 2007, 토양환경보전법.
- 47) 환경부, 2007, 토양환경보전법 시행규칙.
- 48) 환경부, 2007, 토양환경보전법 시행령.
- 49) 환경부, 2007, 환경부 예규 304호.
- 50) 환경부, 2007, 환경분야 시험·검사 등에 관한 법률 시행령.
- 51) 환경부, 2008, 먹는 물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙.
- 52) 환경부, 2008, 수질오염감시경보를 위한 측정별 측정항목과 항목별 경보기준고시.
- 53) 환경부, 2008, 수질자동측정망 운영계획.
- 54) 환경부, 2008, 지하수법 시행규칙.
- 55) 환경부, 2008, 지하수 오염 정밀조사 표준수행 절차 및 관리방안.
- 56) 환경부, 2009, 2009년도 먹는 물 수질관리지침.
- 57) 환경부, 2009, 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행규칙.
- 58) 환경부, 2009, 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행령.
- 59) 환경부, 2009, 수질오염감시경보를 위한 측정별 측정항목과 항목별 경보기준 일부개정.
- 60) 환경부, 2009, 수질측정망 운영계획.
- 61) 환경부, 2009, 토양정밀조사지침(환경부고시 제2009-181호).
- 62) 환경부, 2009, 토양환경보전법 시행령 별표 1 토양관련전문기관의 지정기준.
- 63) 환경부, 2009, 토양환경보전법 시행령 별표 2 토양정화업의 등록요건.
- 64) 환경부, 2009, 환경분야 시험·검사 등에 관한 법률 시행규칙.
- 65) 환경부, 2010, 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률.
- 66) 환경부, 2010, 환경분야 시험·검사 등에 관한 법률.
- 67) 일본, 사격장에 관한 납 조사대책에 대한 개요.
- 68) 일본, 토양, 지하수오염에 관한 조사 대책지침 개요.
- 69) 일본, 토양오염대책법 시행규칙.
- 70) Alexander Zaporozec, 2002, Groundwater contamination inventory, UNESCO.
- 71) DANID M. NIELSEN, GILLIAN L. NELSEN, 2007, HANDBOOK OF GROUND-WATER SAMPLING, Taylor & Francis Group, LLC.
- 72) DAVID M. NIELSEN, 2006, ENVIRONMENTAL SITE CHARACTERIZATION AND GROUND-WATER MONITORING, Taylor & Francis Group, LLC.

- 73) Environment Agency(ES), 2000, Secondary Model Procedure for the Development of Appropriate Soil Sampling Strategies for Land Contamination, Bristol, UK.
- 74) European Environmental Agency(S. C. Nixon), 1996a, European Freshwater Monitoring Network design-Topic Report 10/96 ETC/IW.
- 75) European Environmental Agency(C. Koreimann, J. Grath, G. Winkler, W. Nagy and W.R. Vogel), 1996b, Groundwater Monitoring in European-Topic Report 14/96 ETC/IW.
- 76) Gilbert, Richard O, 1987, Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring, Pacific Northwest Laboratory, Van Nostrand Reinhold: New York.
- 77) Guidance for the data quality objective process, 2006a, EPA.
- 78) Mark Edward Byrnes, 2009, FIELD SAMPLING METHODS for REMEDIAL INVESTIGATIONS.
- 79) NSW EPA, 1995, CONTAMINATED SITES Sampling Design Guidelines.
- 80) NSW EPA, 2003, CONTAMINATED SITES Guidelines for Assessing Service Station Site.
- 81) PROTOCOL FOR THE CONTAMINATED SITES REGULATION UNDER THE ENVIRONMENT ACT, 2008, PROTOCOL NO. 3 : Soil Sampling Procedures at Contaminated Sites, Yukon Department of Environment.
- 82) Sang Il Hwang, Jeongho Lee, Gayoung Yoo, Hun-Mi Kim, 2006, Improving Coherence between Soil and Groundwater Quality Standards, KEI/2006/RE-14.
- 83) S.P. Theocharopoulos, G. Wagner, J. Sprengart, M-E. Mohr, A. Desaulles, H. Muntau, M. Christou, P. Quevauviller, 2001, European soil sampling guidelines for soil pollution studies, The Science of the Total Environment 264 51-62.
- 84) US EPA, 1989, Methods for Evaluating the Attainment of Cleanup Standards Volume 1 : Soils and Solid Media, USEPA/230/02-89-042.
- 85) US EPA, 1992, Preparation of Soil Sampling Protocols : Sampling Techniques and Strategies, EPA/600/R-92/128, Office of Research and Development.
- 86) US EPA, 1995, Superfund Program Representative Sampling Guidance, EPA 540/R-95/141, Office of Emergency and Remedial Response.
- 87) US EPA, 1996, Soil Screening Guidance; Technical Background Document, EPA/540/R95/128.

- 88) Waste Management and Remedial Action Division 24-hour Hazardous Waste Operations Training, 1997, Overview of the Oak Ridge Reservation Hazardous Waste Sites and Operations.
- 89) WESTERN AUSTRALIA, 2000, Guidelines for the Proposed Contaminated Sites Auditor Accreditation Scheme.
- 90) [http://www.esakorea.com/business/business02\\_1.html](http://www.esakorea.com/business/business02_1.html)
- 91) <http://www.sgis.or.kr/newsgis/do?C=IrExUs>



## 부 록

부록 1. 토양정밀조사지침 (개정안)

부록 2. 지하수 오염조사 가이드라인(안)

부록 3. 토양·지하수 오염조사관련 환경보호 및 보건관리 지침(안)



부록 1. 토양정밀조사지침 (개정안)

# 토양정밀조사지침(안)

Guidelines for detailed investigation of soil

# 목 차

## 제 1 장 총 칙

1. 목적
2. 적용범위
3. 조사기관

## 제 2 장 조사방법

1. 조사항목
2. 조사절차 및 내용
3. 정밀조사결과 조치

## ※ 보고서식 및 참고자료

- 별표 1. 토양정밀조사결과보고
- 별표 2. 오염등급의 구분
- 별표 3. 시료채취 대상지역의 격자 구획 설정방법
- 별표 4. 기타지역의 1, 2, 3구역에 대한 설명
- 별표 5. 주유소 관련 지역의 시료채취개수 결정

## 표 차례

표 1 조사대상지역의 분류

표 2 대상지역의 오염면적 및 상황에 따른 토양시료채취 밀도(광산활동 관련지역)

표 3 대상지역의 오염면적 및 상황에 따른 토양시료채취 밀도(폐기물 관련지역)

표 4 대상지역의 오염면적 및 상황에 따른 토양시료채취 밀도(주유소 지역)

표 5 대상지역의 오염면적 및 상황에 따른 토양시료채취 밀도(사격장 지역)

표 6 대상지역의 오염면적 및 상황에 따른 토양시료채취 밀도(기타 지역)

표 7 대상지역의 오염면적 및 상황에 따른 지하수시료채취 밀도(주유소 지역)

표 8 대상지역의 오염면적 및 상황에 따른 지하수시료채취 밀도(사격장 지역)

표 9 오염등급의 구분

표 10 기타 지역의 1,2,3구역 구분에 대한 설명

표 11 주유소 관련 지역의 시료채취개수 결정

## 그림 차례

- 그림 1 토양시료 채취지점 선정을 위한 격자형태 예시
- 그림 2 폐기물 매립지 지형에 따른 시료채취방법
- 그림 3 기타지역에서 시료채취방법
- 그림 4 폐기물 관련지역의 시료채취방법
- 그림 5 일반적인 단위구획의 설정방법
- 그림 6 격자를 회전시키는 경우 단위구획의 설정방법
- 그림 7 가장자리에서 구획 병합의 조건 (10m\*10m를 예시한 경우)

# 토양정밀조사지침(안)

## 제1장 총 칙

### 1. 목 적

이 지침은 토양환경보전법 (이하 “법”이라 한다) 제2조제6호 및 같은 법 시행규칙 제1조의 4에 따른 토양정밀조사의 조사항목, 시료채취 방법 등 세부사항을 정함을 목적으로 한다.

### 2. 적용범위

가. 토양환경보전법 제5조 제4항, 제11조 제2항, 제14조 제1항 및 제15조 제1항에 따라 실시하는 토양정밀조사에 적용한다.

나. 토양정밀조사는 본 지침을 따르되 조사대상지역의 오염상황, 오염면적에 따라 필요한 경우 대상지역, 대상 시료의 선정 및 시료채취 밀도 등을 토양관련전문기관이 조정할 수 있다.

### 3. 조사기관

토양정밀조사는 법 제23조의 2에 따른 토양오염조사기관이 실시한다.

## 제2장 조사방법

### 1. 조사항목

다음 각 목에서 정한 항목에 대해 조사한다.

가. 토양측정망 운영, 토양오염실태조사 및 토양오염도 검사결과 토양오염우려기준 초과항목 및 토양 pH

나. 토양측정망 운영 및 토양오염실태조사 지점외의 지역으로서 토양오염우려기준을 초과할 가능성이 있다고 판단되는 항목 및 토양 pH

### 2. 조사절차 및 내용

토양정밀조사는 1단계조사, 2단계조사, 3단계조사의 단계로 실시한다.

가. 1단계조사

1단계조사는 자료조사, 청취조사, 현지확인조사 등을 통하여 대상지역의 오염개연성과 오염특성을 판단하기 위한 것으로 상호 유기적으로 수행되어야 하며 다음과 같은 조사활동을 포함한다.

(1) 자료조사

자료조사는 주로 대상지역의 토양오염과 관련이 있는 토지사용 이력과 시설내역에 관점을 맞추어 진행하며, 검토하여야 할 자료의 목록은 다음과 같다. 제시한 목록 외에 부지의 특성에 따라 더 많은 자료가 검토되어야 할 필요가 있을 경우 목록 외의 자료에 대해서도 검토하여 필요한 정보를 확보하도록 한다.

- 1) 대상 부지 및 주변지역 지적도 및 지형도
- 2) 대상 부지의 환경 관련 인허가 서류
- 3) 시설운영 개요 및 관련자료(특정토양오염관리대상시설, 지하매설물, 지상·지하 배관, 도로, 구조물, 냉난방시설, 하수 및 상수시설 등)
- 4) 부지의 오염도검사 관련자료(토양오염도 검사, 누출검사, 지하수오염 검사 등)
- 5) 배경농도 관련자료(토양측정망 자료 등)
- 6) 부지 내 토양오염물질, 유해화학물질 및 유독물의 생산·이송·보관·사용·처리·처분 관련 기록
- 7) 부지 내 폐수, 폐기물 등의 발생과 처리·처분 관련 자료(위치 및 양, 처리·처분기록 등)
- 8) 부지의 지질조사 관련자료
- 9) 오염물질의 누출 등 환경오염사고 관련자료
- 10) 부지의 굴토 및 복토, 매립 등 부지조성이력 관련자료
- 11) 오·폐수 및 우수 흐름도
- 12) 생산 공정도
- 13) 오염의 영향권 내에 위치하는 시설의 종류 및 위치, 인구수, 식생상태, 연간 강수량 등
- 14) 대상 부지 및 주변지역 항공사진
- 15) 기타 토양오염 상태의 확인에 필요한 자료
- 16) 부지 내 관측정 현황 및 하천 분포조사

## (2) 청취조사

토양오염 상태를 확인할 수 있는 대상 부지의 소유자 및 관리자, 장기 근무자, 지역 공무원 및 주변지역 거주자 등과의 접촉(직접 방문하여 면담하거나 전화 또는 서면으로)을 통하여 조사할 수 있다. 청취조사 대상자로는 다음 사항에 대해 알고 있는 자를 선정한다.

- 1) 과거 및 현재의 부지용도 및 이력
- 2) 대상 부지의 주요 시설현황 및 폐쇄 또는 이전 사항
- 3) 토양오염물질, 유해화학물질 및 유독물 등의 관리상태
- 4) 외부로 알려지지 아니한 오염사고 사례
- 5) 기타 부지환경 상태를 확인할 수 있는 사항

## (3) 현지 확인조사

현장에서 직접 신체의 감각기관을 통해 대상 부지의 오염개연성 및 오염특성을 확인하는 과정으로 조사 내용은 다음과 같다.

- 1) 특정 토양오염 관리대상 시설의 설치장소 확인 및 물질의 보관상태
- 2) 시설의 파손, 사고 등에 의한 오염물질의 누출여부 및 누출량
- 3) 대상부지와 주변지역의 지형·지질, 토양표면의 상태, 식물 성장상태, 지하수 관측정의 설치 장소 및 사용 유무, 특정토양오염관리대상시설 등
- 4) 과거 토양오염 사고 발생지역 및 조치 여부
- 5) 오염 예상지역의 누출흔적 및 변색 등 토양오염 징후
- 6) 각종 폐기물의 매립 또는 방치 여부
- 7) 기타 토양오염 상태를 확인할 수 있는 사항
- 8) 자료조사와 청취조사에서 확인된 오염개연성과 관련한 사항

## 나. 2단계조사

2단계조사는 토양 및 지하수 시료의 채취·분석을 통해 오염면적 및 오염범위를 파악하기 위한 사전 개략 조사이다. 개황조사는 부지 내 토양오염지역 및 기초조사에서 확인된 오염의 개연성이 있는 지역을 포함하여 실시한다.

시료채취지점 선정은 대상지역을 대표할 수 있는 토양시료를 채취하기 위해, 표 1

과 같이 광산활동 관련지역, 폐기물 관련지역, 사격장 지역, 주유소 지역, 기타 지역으로 분류하고 조사 대상지역에 대해 정사각형 격자 형태로 나눈 후 토양오염공정시험기준 ES 07130 2.0 시료의 채취방법에 준하여 채취한다.

조사 대상지역을 격자 형태로 나누어 조사할 때에는 별표3 시료채취 대상지역의 격자의 구획 설정방법을 참고하여 조사대상지를 구획할 수 있다.

표 1 조사대상지역의 분류

조사 대상 지역	구분	세부지역 분류
광산활동 관련지역	1구역	채련소, 소각시설 등 오염물질 비산확산우려지역
	2구역	금속광산, 폐수유입관련지역 등 오염물질 수계확산우려지역
폐기물 관련지역	-	폐기물 야적, 적환, 매립지역 등
주유소 지역	-	주유소 지역
사격장 지역	1구역	피탄지 주변지역
	2구역	하천 등 지표수에 의한 오염의 수계확산 우려지역
기타 지역	1구역	유류, 유독물 등 특정유해물질을 직접 다루는 부지로 오염이 존재할 가능성이 큰 구역
	2구역	오염이 존재할 가능성이 적은 구역
	3구역	오염이 존재할 가능성이 없다고 생각되는 구역

또한 고농도 오염지역을 분별하기 위해서는 판단에 근거한 시료채취 방법을 사용할 수 있다. 필요하다면 시료채취 계획 시 1단계조사의 자료에 근거하여 현장조사 방법(예: 토양 가스 시료채취)이나 육안관찰 등의 직관적인 방법을 활용하여 오염여부를 분별하도록 한다.

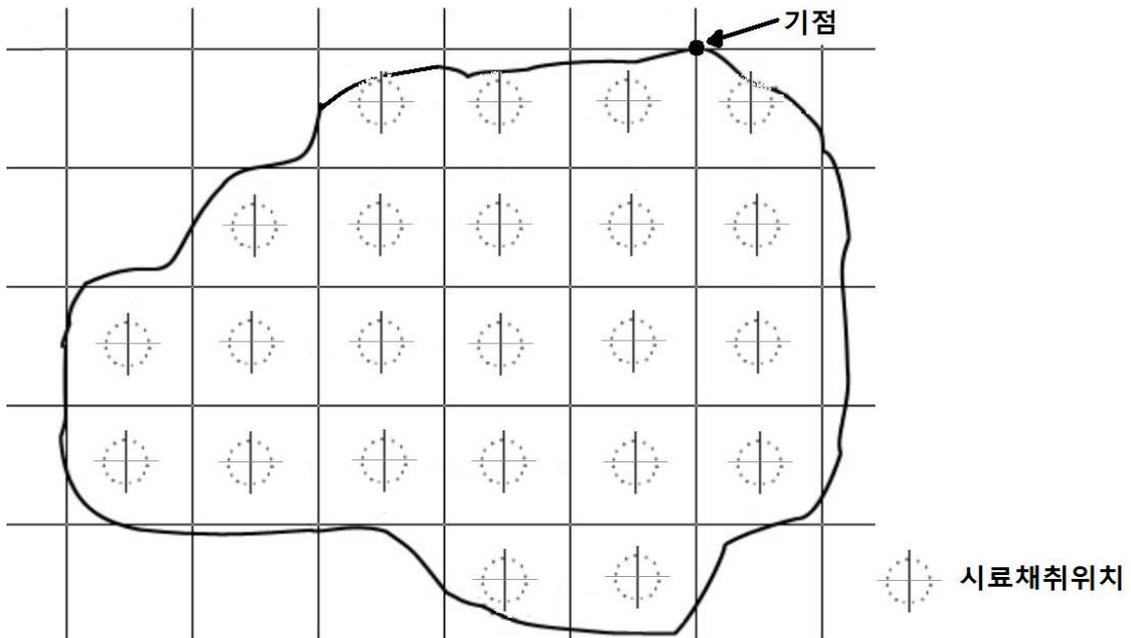


그림 1 토양시료 채취지점 선정을 위한 격자형태 예시

(1) 광산활동 관련지역 (금속광산, 폐수유입관련 및 체련소, 소각시설 관련 지역 포함)

(가) 대상지역: 관련시설 주변지역 및 하천 등 지표수 흐름지역

- 오염 특성에 따라 1, 2구역으로 구분하고 각 구역에 따라 채취방법을 달리한다.

- 1) 1구역 : 체련소, 소각시설 등 오염물질 비산확산우려지역
- 2) 2구역 : 금속광산, 폐수유입관련지역 등 오염물질 수계확산우려지역

(나) 대상시료: 토양

(다) 시료 채취밀도 및 채취심도(1구역, 2구역 동일 적용)

- 1) 표토(0 ~ 지표하 10cm): 오염가능지역의 면적이 100,000㎡ 미만일 경우에는 10,000㎡ 당 1개 지점씩으로 하고, 100,000㎡를 초과할 경우에는 50,000㎡ 초과할 때마다 1개 지점씩 추가하되, 대상지역의 오염면적 및 상황에 따라 시료채취 밀도 조정한다.

표 2 대상지역의 오염면적 및 상황에 따른 토양시료채취 밀도(광산활동 관련지역)

조 사 면 적	지점수	비 고
면적 ≤ 10,000㎡	1	10,000㎡당 1개 지점 추가
10,000㎡ < 면적 ≤ 20,000㎡	2	"
⋮	⋮	"
90,000㎡ < 면적 ≤ 100,000㎡	10	"
100,000㎡ < 면적 ≤ 150,000㎡	11	50,000㎡당 1개 지점 추가
150,000㎡ < 면적 ≤ 200,000㎡	12	"
200,000㎡ < 면적 ≤ 250,000㎡	13	"
⋮	⋮	"

- 2) 심토(지표하 10cm ~ ): 표토 시료 수 3개 지점 당 1개 지점의 비율로 채취하며, 대상지역의 오염면적 및 상황에 따라 시료채취 밀도를 조정한다.
- 3) 채취심도는 표토와 지표하 40cm까지의 심토를 기본으로 하며, 오염원의 특성과 1단계조사에서 파악한 내용을 참고로 하여 깊이를 조정, 오염의 확산깊이까지 채취한다.

(라) 시료 채취방법

- 1) 비산확산이 우려되는 체련소나 소각시설 등의 1구역의 경우 주풍향 및 착지지점을 고려하여 방위별로 시료를 채취하되, 1개 지점의 면적은 600~1000㎡를 1필지(匹地)로 하고, 그 지점의 시료채취는 토양오염공정시험기준 ES 070130 2.0 시료의 채취방법에 준하여 채취한다.
- 2) 주 오염원인 광산의 광미장, 광산배수유입지역 등을 기점으로 하천에 인접한 수계확산 우려지역에 대해서는 부지에 대해 오염원의 특성과 기초조사에서 파악한 내용을 참고로 하여 거리별로 시료를 채취한다.

- 3) 하천수, 지하수 등 수질시료와 수로 저질 시료가 필요한 경우, 시료채취는 환경 오염공정시험기준의 시료채취방법에 준하여 채취한다.

(2) 폐기물 관련지역(폐기물 야적, 적환, 매립지역 등)

(가) 대상지역: 관련시설 주변지역

(나) 대상시료: 토양, 필요 시 하천수, 농업용수, 수로저질 포함

(다) 시료 채취밀도 및 채취심도

1) 표토

오염영향범위의 면적이 10,000㎡ 미만일 경우에는 1,000㎡ 당 1개 지점씩으로 하고, 10,000㎡를 초과할 경우에는 2,000㎡ 초과할 때마다 1개 지점씩 추가하 되, 대상지역의 오염면적 및 상황에 따라 시료채취 밀도 조정 가능하다.

표 3 대상지역의 오염면적 및 상황에 따른 토양시료채취 밀도(폐기물 관련지역)

조사면적	지점수	비 고
면적 ≤ 1,000㎡	1	1,000㎡당 1개 지점 추가
1,000㎡ < 면적 ≤ 2,000㎡	2	"
⋮	⋮	"
9,000㎡ < 면적 ≤ 10,000㎡	10	"
10,000㎡ < 면적 ≤ 12,000㎡	11	2,000㎡당 1개 지점 추가
12,000㎡ < 면적 ≤ 140,000㎡	12	"
⋮	⋮	"

- 2) 채취심도는 오염원의 특성과 1단계조사에서 파악한 내용을 참고하여 깊이를 조 정하고 오염의 확산깊이까지 채취한다.

- 3) 토양시료는 1m 단위로 시료를 채취한다.

(라) 시료 채취방법

- 1) 평지에 위치하고 있는 경우 그림과 같이 오염물질이 확산되는 4방위 지역 및 그 주변 영향지역까지를 확산범위로 선정하고, 확산범위에 대한 시료점수는 상 기 채취밀도에 준한다.

2) 산간 계곡에 위치한 경우 그림과 같이 자료조사 및 현장조사를 통하여 오염 확산 및 추정지역의 영향범위를 선정하고, 영향범위에 대한 시료점수는 상기 채취 밀도에 준한다.

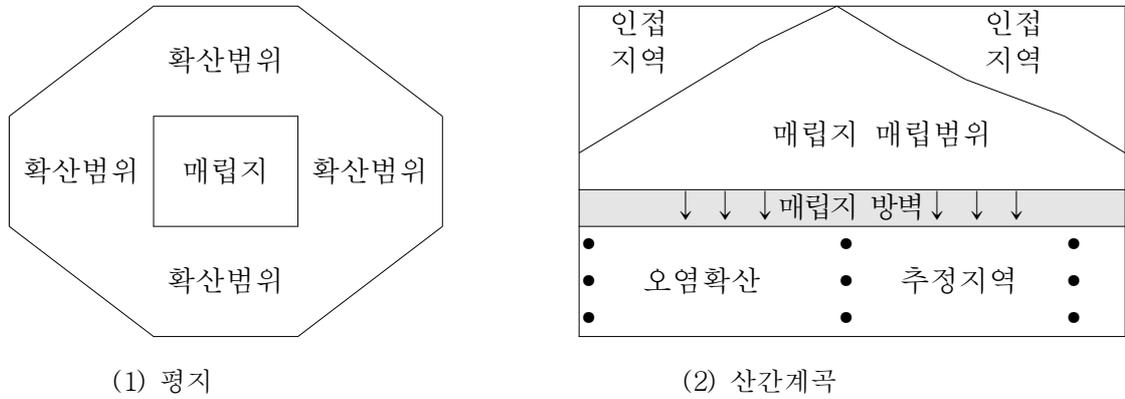


그림 2 폐기물 매립지 지형에 따른 시료채취방법

3) 하천수, 지하수 등 수질시료와 수로저질 시료가 필요한 경우, 시료채취는 환경 오염공정시험기준의 시료채취방법에 준하여 채취한다.

### (3) 주유소 지역

(가) 대상지역: 현재 또는 과거의 주유소 지역 및 주변지역

(송유관 및 송유시설 등 유류배출가능지역은 기타지역에 포함한다.)

(나) 대상시료: 토양

(다) 시료 채취밀도 및 채취심도

1) 채취밀도는 대상 부지 내에서 확인된 오염지역과 오염개연성 1개 지점 당 최소 1지점 이상을 선정하고 지하저장탱크의 경우 4방위 지역에서 채취하며, 대상지역의 오염면적 및 상황에 따라 시료채취 밀도를 조정하되 다음 표 4를 참고하여 시료채취 개수를 선정하고 10,000㎡ 이상의 면적에 대하여는 별표 5 주유소관련 지역의 시료채취개수 결정의 주 2)의 ①번 회귀식을 이용하여 선정할 수 있다.

표 4 대상지역의 오염면적 및 상황에 따른 토양시료채취 밀도(주유소 지역)

조사면적	지점수	조사면적	지점수
100	1	3500	7
200	1	4000	8
300	1	4500	8
400	1	5000	9
500	2	5500	9
600	2	6000	10
700	2	6500	10
800	2	7000	11
900	3	7500	11
1000	3	8000	12
1500	4	8500	12
2000	5	9000	13
2500	6	9500	13
3000	6	10000	14

- 2) 주유소 지역의 오염개연성은 주로 지하저장탱크, 지하배관, 주유대, 주입구, 펌프장 및 간이 유수분리기 등이며 누출사고 등 그 외의 오염개연성에 대해서도 조사한다.
- 3) 채취심도는 오염원의 특성과 1단계조사에서 파악한 내용을 참고하여 깊이를 조정하고 오염의 확산깊이까지 채취한다.
- 4) 토양시료는 1m 단위로 시료를 채취한다.

(라) 시료 채취방법

- 1) 지하시설물 및 조사자의 안전을 고려하여 지중탐사정비, 지하시설물의 도면 또는 주유소 관리자의 청취조사를 통해 지하시설물의 위치를 확인한 후 채취지점을 선정한다.
- 2) 채취지점은 오염여부 및 분포를 가장 잘 확인할 수 있는 지점으로 선정되어야 하며 오염원의 정확한 지점과 확산의 방향을 추정하기 곤란한 경우는 해당 지역의 동·서·남·북의 4방위에 대해 지점을 선정할 수 있다.
- 3) 오염원으로부터 거리별 채취지점을 선정하고, 깊이별 시료를 채취하여 오염물질의 분포를 파악한다.

(4) 사격장 지역

(가) 대상지역: 현재 또는 과거의 사격장 주변지역

- 오염 특성에 따라 1구역을 기본으로 하고 2구역이 우려될 경우는 1구역에 2구역의 시료채취밀도를 추가하여 산정한다.

1) 1구역 : 피탄지 주변지역

2) 2구역 : 하천 등 지표수에 의한 오염의 수계확산 우려지역

(나) 대상시료: 토양

(다) 시료 채취밀도 및 채취심도

1) 표토의 경우, 1구역을 기본으로 하되 2구역이 우려될 경우 다음 표 5를 참고하여 1구역의 시료채취밀도에 2구역의 시료채취밀도를 추가하여 산정하되 대상지역에 대한 오염면적 및 상황에 따라 시료채취 밀도 조정이 가능하다.

표 5 대상지역의 오염면적 및 상황에 따른 토양시료채취 밀도(사격장 지역)

	조 사 면 적	지점 수	비 고
1구역	면적 ≤ 1,000m <sup>2</sup>	1	1,000m <sup>2</sup> 당 1개 지점 추가
	1,000m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 2,000m <sup>2</sup>	2	"
	⋮	⋮	"
	9,000m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 10,000m <sup>2</sup>	10	"
	10,000m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 12,000m <sup>2</sup>	11	2,000m <sup>2</sup> 당 1개 지점 추가
	12,000m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 140,000m <sup>2</sup>	12	"
	⋮	⋮	"
2구역	조 사 면 적	지점수	비 고
	면적 ≤ 10,000m <sup>2</sup>	1	10,000m <sup>2</sup> 당 1개 지점 추가
	10,000m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 20,000m <sup>2</sup>	2	"
	⋮	⋮	"
	90,000m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 100,000m <sup>2</sup>	10	"
	100,000m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 150,000m <sup>2</sup>	11	50,000m <sup>2</sup> 당 1개 지점 추가
	150,000m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 200,000m <sup>2</sup>	12	"
	200,000m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 250,000m <sup>2</sup>	13	"
⋮	⋮	"	

- 2) 채취심도는 표토와 지표하 40cm까지의 토양채취를 기본으로 하며, 오염원의 특성과 1단계조사에서 파악한 내용을 참고하여 깊이를 조정하고 오염의 확산깊이까지 채취한다.
- 3) 지표하 10cm 이하의 심토는 1m까지는 30cm 간격으로, 그 이하는 1m 단위로 시료를 채취한다.

(라) 시료 채취방법

- 1) 1구역은 피탄지를 중심으로 오염특성에 따른 확산가능성을 고려하여 방위별로 시료를 채취하며, 2구역인 수계확산 우려지역에 대해서는 주요오염원인 피탄지를 기점으로 하천에 인접한 부지에 대해 오염원의 특성과 1단계조사에서 파악한 내용을 참고로 하여 거리별로 시료를 채취한다.

**(5) 기타 지역(주유소제외 유류배출 가능지역, 유해화학물질 저장시설지역, 산업지역 등)**

(가) 대상지역: 관련시설 주변지역

- 오염개연성에 따라 1, 2, 3구역으로 구분하고 각 구역에 따라 채취밀도를 달리하고 3구역의 경우에는 시료채취를 생략할 수 있다. (별표 4 참조)

- 1) 1구역 : 오염이 존재할 가능성이 큰 구역
- 2) 2구역 : 오염이 존재할 가능성이 적은 구역
- 3) 3구역 : 오염이 존재할 가능성이 없다고 생각되는 구역

(나) 대상시료: 토양

(다) 시료 채취밀도 및 채취심도

- 1) 표토의 경우, 1구역, 2구역 각 구역에 적합하도록 다음 표 6을 참고하여 시료채취 밀도를 선정하되 대상지역에 대한 오염면적 및 상황에 따라 시료채취 밀도조정이 가능하다. 3구역의 경우는 시료채취를 생략할 수 있다.

표 6 대상지역의 오염면적 및 상황에 따른 토양시료채취 밀도(기타 지역)

1구역				2구역			
조사면적 (m <sup>2</sup> )	지점수						
500	2	22,000	24	500	1	22,000	16
1,000	4	24,000	26	1,000	2	24,000	17
2,000	5	26,000	28	2,000	3	26,000	18
3,000	6	28,000	30	3,000	4	28,000	19
4,000	7	30,000	32	4,000	5	30,000	21
5,000	8	32,000	34	5,000	6	32,000	22
6,000	8	34,000	36	6,000	7	34,000	23
7,000	9	36,000	38	7,000	8	36,000	24
8,000	10	38,000	40	8,000	9	38,000	25
9,000	11	40,000	42	9,000	10	40,000	26
10,000	12	42,000	44	10,000	10	42,000	27
12,000	14	44,000	46	12,000	12	44,000	27
14,000	17	46,000	47	14,000	13	46,000	28
16,000	19	48,000	49	16,000	14	48,000	30
18,000	21	50,000	53	18,000	15	50,000	31
20,000	23			20,000	15		

3) 채취심도는 오염원의 특성과 1단계조사에서 파악한 내용을 참고하여 깊이를 조정하고 오염의 확산깊이까지 채취한다.

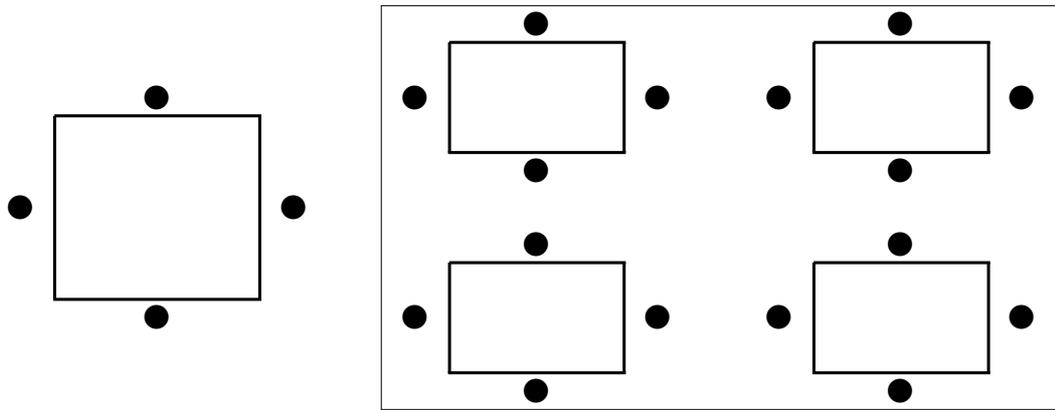
4) 토양시료는 1m 단위로 시료를 채취한다.

(라) 시료 채취방법

1) 지중탐사정비를 보유하고 있을 경우 오염원으로부터 거리별 채취지점을 선정하고, 깊이별 시료를 채취하여 오염물질의 분포를 파악한다.

2) 저장조 실벽이 있는 경우 아래 그림 3 (1)과 같이 4면에서 시료를 채취한다.

3) 여러 개의 토양오염관리대상시설 대상지역 내에 분산되어 있을 경우 아래의 그림3 (2)와 같이 각각의 시설 외곽 경계선을 기준으로 4방위에서 시료를 채취한다.



(1) 저장조 실벽이 있는 경우

(2) 여러 시설이 혼재하는 경우

그림 3 기타지역에서 시료채취방법

### (6) 배경농도 확인시료의 채취

(가) 중금속 등 오염물질이 자연 상태에 존재할 수 있는 물질인 경우 배경농도 파악을 위한 시료를 채취하여야 한다.

(나) 배경시료 채취지점은 부지 또는 주변지역 내에서 조사대상인 오염원의 영향을 받지 않은 지점이 선정되어야 하고 층별로 최소 2개 이상의 시료가 채취되어야 하며 2단계조사에서 채취한 방법과 동일하여야 한다.

### 다. 3단계조사

3단계조사는 2단계조사 결과 토양오염우려기준을 초과하거나 토양오염우려기준의 40% 이상의 지역에 대해 토양오염의 수평적·수직적 분포확인을 위해 실시한다.

#### (1) 광산활동 관련지역 (금속광산, 폐수유입관련 및 체련소, 소각시설 관련지역 포함)

(가) 대상구분: 오염 특성에 따라 1,2구역으로 구분하고 각 구역에 따라 채취방법을 달리한다.

- 1) 1구역 : 체련소, 소각시설 등 오염물질 비산확산우려지역
- 2) 2구역 : 금속광산, 폐수유입관련지역 등 오염물질 수계확산우려지역

(나) 대상지역

- 1) 1구역 : 관련시설 주변지역(오염가능 농경지 등)
- 2) 2구역 : 관련시설 주변지역 및 하천 등 지표수 흐름 주변지역

(다) 대상시료

- 1) 1구역 : 토양, 지하수·농업용수·수로저질 등 포함
- 2) 2구역 : - 토양
  - 지하수
  - 농업용수 : 3~8지점 (오염현황을 고려하여 조정)
  - 수로저질 : 3~8지점 (농업용수와 동일 지점)
  - 광재 : 2점
  - 갯내수 : 갯구당 1점

(라) 시료 채취밀도 및 채취심도(1구역, 2구역 동일 적용)

- 1) 표토(0~지표하 10cm): 가) 표토(0~10cm) 시료는 조사대상 예상지역을 산정하여, 1,500㎡ 당 1개 지점을 선정대상지역의 오염면적 및 상황에 따라 채취밀도를 조정 가능하다.
- 2) 심토(지표하 10cm~) 는 표토 시료 수 3개 지점 당 1개 지점의 비율로 시료 채취하며, 대상지역의 오염면적 및 상황에 따라 시료채취 밀도 조정 가능하다.
- 3) 채취심도는 2단계조사 결과 오염이 확산된 깊이까지 채취하며 암반층이 나타나면 그 깊이까지 한다.
- 4) 대상지역의 오염상황에 따라 필요할 경우 시료채취 밀도를 높일 수 있으며 2단계조사 지점과 중복되어서는 안 된다.
- 5) 지하수 조사의 경우 광미장 등 2단계조사 결과 토양오염이 매우 심한 지역에 대해서는 오염지역을 중심으로 3개 이상의 관측정(삼각형 형태의 3개 지점 포함)을 설치하여 오염물질특성 및 수리지질학적 특성을 고려한 깊이에서 지하수를 채취하고 사용 종료 후에는 되메움 한다.
  - 지하수 흐름 방향을 확인 한 경우 오염지역 상류와 하류지역에 각각 1개 이상의 관측정을 설치한다.
  - 관측정 설치로 인한 오염 확산이 되지 않도록 주의한다.
  - 삼각형 형태의 관측정 중 하나는 지형학적으로 가장 오염이 심할 것으로 예상되는 지역의 내리막 쪽에 위치시킨다.
- 6) 기존관측정이 있을 경우 이를 이용한다.

(마) 시료 채취방법

1) 1구역

- 2단계조사와 동일하게 실시하지만, 1개 지점이라 하면 면적 1,500㎡(약 500평)을 기준으로 한다. (논의 경우 천수답은 2~3필지에 해당하며, 경지 정리된 논은 0.5필지에 해당됨. 또한 밭의 경우는 논과 동일하게 적용)
- 심토와 1m까지 깊이별 시료는 30cm 일정간격으로, 그 이하는 1m 간격으로 채취한다.

2) 2구역

- 주 오염원인 광산의 광미장, 폐수유입지역 등을 기점으로 하천에 인접한 수계 확산 우려지역에 대해서는 부지에 대해 오염원의 특성과 1단계조사에서 파악한 내용을 참고로 하여 거리별로 시료를 채취한다.
- 시료채취방법은 2단계조사와 동일하게 적용한다.

3) 하천수, 지하수 등 수질시료와 수로저질 시료가 필요한 경우, 시료채취는 환경오염공정시험기준의 시료채취방법에 준하여 채취한다.

(바) 시료채취 지점도 및 오염분포도 작성

- 1) 축적 1/5,000 지도에 시료채취지점을 표기한다.
- 2) 토양오염우려기준 초과 물질에 한해 오염지도를 작성한다.
- 3) 오염등급을 4등급으로 구분·작성한다.
- 4) 오염지도 축적을 시료채취 지점도와 동일한 것 사용(기준초과 지역에 대해서는 오염지도에 지번, 지적자료 첨부)한다.

**(2) 폐기물 관련지역(폐기물 야적, 적환, 매립지역 등)**

(가) 대상지역: 관련시설 주변지역

(나) 대상시료: 토양, 필요시 지하수·농업용수·수로저질 등 포함

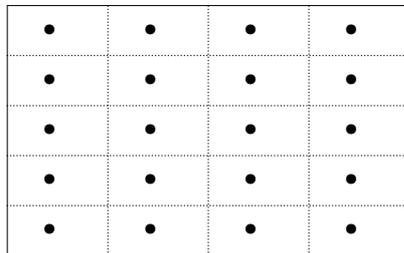
(다) 시료 채취밀도 및 채취심도

- 1) 토양 : 조사대상 예상면적이 10,000㎡ 미만일 경우에는 500㎡ 당 1개 지점씩으로 하고, 10,000㎡를 초과할 경우에는 1,000㎡ 초과할 때마다 1개 지점씩 추가하되, 대상지역의 오염면적 및 상황에 따라 시료채취 밀도를 조정한다.

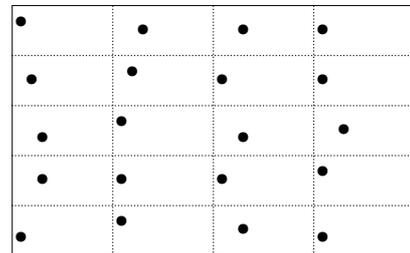
- 2) 지하수: 2단계조사 결과 오염이 확인된 지역을 중심으로 3개 이상의 관측정(삼각형 형태의 3개 지점 포함)을 설치하여 오염물질 특성 및 수리지질학적 특성을 고려한 깊이에서 지하수를 채취하고 사용 종료 후에는 되메움 한다.
- 지하수 흐름 방향을 확인한 경우 오염지역 상류와 하류지역에 각각 1개 이상의 관측정을 설치한다.
  - 관측정 설치로 인한 오염 확산이 되지 않도록 주의한다.
  - 삼각형 형태의 관측정 중 하나는 지형학적으로 가장 오염이 심할 것으로 예상되는 지역의 내리막 쪽에 위치시킨다.

(라) 시료 채취방법

- 1) 대상지역의 특성에 따라 2단계조사와 같은 방법으로 채취하고, 조사지점은 시료 채취밀도를 고려하여 그림 4와 같이 고정 격자법이나 임의 격자법에 준하여 선정한다.
- 2) 시료의 채취 깊이는 2단계조사와 동일하게 하며 토양시료는 1m 단위로 채취한다.



(1) 고정격자법



(2) 임의격자법

그림 4 폐기물 관련지역의 시료채취방법

- 3) 하천수, 지하수 등 수질시료와 수로저질 시료가 필요한 경우, 시료채취는 환경오염공정시험기준의 시료채취방법에 준하여 채취한다.

(마) 시료채취 지점도 및 오염분포도 작성

- 1) 축적 1/5,000 지도에 시료채취지점 표기
- 2) 토양오염우려기준 초과 물질에 한해 오염지도를 작성
- 3) 오염등급을 4등급으로 구분·작성(별표2 참조)
- 4) 오염지도 축적은 시료채취 지점도와 동일한 것 사용

**(3) 주유소 지역**

(가) 대상지역: 현재 또는 과거의 주유소 지역 및 주변지역

(나) 대상시료: 토양·지하수

(다) 시료 채취밀도 및 채취심도

- 1) 토양: 채취밀도는 대상 부지 내에서 확인된 오염지역과 오염개연성 1개 지점 당 최소 1지점 이상을 선정하고 지하저장탱크의 경우 4방위 지역에서 채취하며, 대상지역의 오염면적 및 상황에 따라 시료채취 밀도 조정하되 다음 표 7을 참고하여 시료채취 개수를 선정하고 10,000m<sup>2</sup> 이상의 면적에 대하여는 별표 5 주유소 관련지역의 시료채취개수 결정의 주 2)의 ②번 회귀식을 이용하여 선정할 수 있다.

**표 7** 대상지역의 오염면적 및 상황에 따른 지하수시료채취 밀도(주유소 지역)

조사면적	지점수	조사면적	지점수
100	2	3,500	33
200	3	4,000	34
300	5	4,500	36
400	6	5,000	37
500	7	5,500	39
600	9	6,000	40
700	10	6,500	41
800	12	7,000	42
900	13	7,500	43
1,000	14	8,000	44
1,500	21	8,500	45
2,000	28	9,000	46
2,500	28	9,500	47
3,000	31	10,000	48

- 2) 지하수: 2단계조사 시 오염이 확인된 지역(유류저장 탱크 등 점오염원)을 중심으로 3개 이상의 관측정(삼각형 형태의 3개 지점 포함)을 설치하여 오염물질특성 및 수리지질학적 특성을 고려한 깊이에서 지하수를 채취하고 사용 종료 후에는 되메움한다.

- 지하수 흐름 방향을 확인한 경우 오염지역 상류와 하류지역에 각각 1개 이상의 관측정을 설치한다.
- 관측정 설치로 인한 오염 확산이 되지 않도록 주의한다.
- 삼각형 형태의 관측정 중 하나는 지형학적으로 가장 오염이 심할 것으로 예상되는 지역의 내리막 쪽으로 점오염원에 인접하도록 위치시킨다.
- 지하수면 부근의 시료 1개는 반드시 채취하고 필요에 따라 깊이별로 시료를 채취하여 오염을 확인한다.

3) 채취심도는 2단계조사 결과 오염이 확산된 깊이까지 채취한다.

4) 토양시료는 1m 단위로 시료를 채취한다.

#### (라) 시료 채취방법

- 1) 대상지역의 특성에 따라 2단계조사와 같은 방법으로 채취한다.
- 2) 2단계조사 결과 토양오염이 지하수의 흐름방향에 따라 일정하게 나타날 경우에는 대상지역을 중심으로 조사밀도를 높여 시료를 채취한다.
- 3) 지하수 등 수질시료의 경우, 시료채취는 환경오염공정시험기준의 시료채취방법에 준하여 채취한다.

#### (마) 시료채취 지점도 및 오염분포도 작성

- 1) 축적 1/5,000 지도에 시료채취지점 표기
- 2) 토양오염우려기준 초과 물질에 한해 오염지도를 작성
- 3) 오염등급을 4등급으로 구분·작성(별표2 참조)
- 4) 오염지도 축적은 시료채취 지점도와 동일한 것 사용

### (4) 사격장 지역

#### (가) 대상지역: 현재 또는 과거의 사격장 주변지역

- 2단계조사결과 3단계 조사 필요 지역으로 필요시 1구역, 2구역으로 구분한다.

- 1) 1구역 : 피탄지 주변지역
- 2) 2구역 : 하천 등 지표수에 의한 오염의 수계확산 우려지역

(나) 대상시료: 토양·지하수

(다) 시료 채취밀도 및 채취심도

- 1) 2단계조사결과 3단계조사 필요지역을 대상으로 표토의 경우, 다음 표 8을 참고하여 1구역을 기본으로 시료채취밀도를 산정하고, 2구역이 우려될 경우 2구역의 시료채취밀도를 추가하여 산정하되 대상지역에 대한 오염면적 및 상황에 따라 시료채취 밀도 조정이 가능하다.

표 8 대상지역의 오염면적 및 상황에 따른 지하수시료채취 밀도(사격장 지역)

	조 사 면 적	지점수	비 고
1구역	면적 ≤ 500m <sup>2</sup>	1	500m <sup>2</sup> 당 1개 지점 추가
	500m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 1000m <sup>2</sup>	2	"
	⋮	⋮	"
	9,500m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 10,000m <sup>2</sup>	19	"
	10,000m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 11,000m <sup>2</sup>	20	1,000m <sup>2</sup> 당 1개 지점 추가
	⋮	⋮	"
2구역	조 사 면 적	지점수	비 고
	면적 ≤ 1,500m <sup>2</sup>	1	1,500m <sup>2</sup> 당 1개 지점 추가
	1,500m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 3,000m <sup>2</sup>	2	"
	⋮	⋮	"
	18,000m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 19,500m <sup>2</sup>	12	"
	⋮	⋮	"
	60,000m <sup>2</sup> < 면적 ≤ 61,500m <sup>2</sup>	40	"
⋮	⋮	"	

- 2) 채취심도는 2단계조사 결과 오염이 확산된 깊이까지 채취하며 암반층이 나타나면 그 깊이까지 하나 원칙적으로 표토 시료 수 3개 지점 당 1개 지점의 비율로 채취하며 대상지역의 오염상황에 따라 시료채취밀도를 조정가능하며 2단계조사 지점과 중복되어서는 안 된다.
- 3) 지하수: 2단계조사 시 오염이 확인된 지역을 중심으로 3개 이상의 관측정(삼각형 형태의 3개 지점 포함)을 설치하여 오염물질특성 및 수리지질학적 특성을 고려한 깊이에서 지하수를 채취하고 사용 종료 후에는 되메움 한다.

- 지하수 흐름 방향을 확인한 경우 오염지역 상류와 하류지역에 각각 1개 이상의 관측정을 설치한다.
- 관측정 설치로 인한 오염 확산이 되지 않도록 주의한다.
- 삼각형 형태의 관측정 중 하나는 지형학적으로 가장 오염이 심할 것으로 예상되는 지역의 내리막 쪽에 위치시킨다.

(라) 시료 채취방법

- 1) 대상지역의 특성에 따라 2단계조사와 같은 방법으로 채취한다.
- 2) 2단계조사 결과 토양오염이 지하수의 흐름방향에 따라 일정하게 나타날 경우에는 대상지역을 중심으로 조사밀도를 높여 시료를 채취한다.
- 3) 지표하 10cm 이하의 심토는 1m까지는 30cm 간격으로, 그 이하는 1m 단위로 시료를 채취한다.
- 4) 하천수, 지하수 등 수질시료와 수로저질 시료가 필요한 경우, 시료채취는 환경오염공정시험기준의 시료채취방법에 준하여 채취한다.

(마) 시료채취 지점도 및 오염분포도 작성

- 1) 축적 1/5,000 지도에 시료채취지점 표기
- 2) 토양오염우려기준 초과 물질에 한해 오염지도를 작성
- 3) 오염등급을 4등급으로 구분·작성(별표2 참조)
- 4) 오염지도 축적은 시료채취 지점도와 동일한 것 사용

**(5) 기타지역(주유소제외 유류배출 가능지역, 유해화학물질 저장시설지역, 산업지역 등)**

(가) 대상지역: 관련시설 주변지역

(나) 대상시료: 토양·지하수

(다) 시료 채취밀도 및 채취심도

- 1) 토 양: 2단계조사 결과, 1구역, 2구역 구분없이 3단계조사 필요지역을 대상으로 대상 면적이 1,000㎡ 이내일 경우 100㎡에 1개 지점, 1,000㎡를 초과하는 경우 500㎡에 1개 지점씩 추가하되, 대상지역의 오염면적 및 상황에 따라 시료채취 밀도 조정가능하다.

2) 토양시료는 1m 단위로 시료를 채취한다.

3) 지하수: 2단계조사 시 오염이 확인된 지역을 중심으로 3개 이상의 관측정(삼각형 형태의 3개 지점 포함)을 설치하여 오염물질특성 및 수리지질학적 특성을 고려한 깊이에서 지하수를 채취하고 사용 종료 후에는 되메움한다.

- 지하수 흐름 방향을 확인 한 경우 오염지역 상류와 하류지역에 각각 1개 이상의 관측정을 설치한다.
- 관측정 설치로 인한 오염 확산이 되지 않도록 주의한다.
- 삼각형 형태의 관측정 중 하나는 지형학적으로 가장 오염이 심할 것으로 예상되는 지역의 내리막 쪽에 위치시킨다.
- 오염물질이 유류 등인 경우 지하수면 부근의 시료 1개는 반드시 채취하고 필요에 따라 깊이별로 시료를 채취하여 오염을 확인한다.

(라) 시료 채취방법

- 1) 대상지역의 특성에 따라 2단계조사와 같은 방법으로 채취한다.
- 2) 2단계조사 결과 토양오염이 지하수의 흐름방향에 따라 일정하게 나타날 경우에는 대상지역을 중심으로 조사밀도를 높여 시료를 채취한다.
- 3) 하천수, 지하수 등 수질시료와 수로저질 시료가 필요한 경우, 시료채취는 환경오염공정시험기준의 시료채취방법에 준하여 채취한다.

(마) 시료채취 지점도 및 오염분포도 작성

- 1) 축적 1/5,000 지도에 시료채취지점 표기
- 2) 토양오염우려기준 초과 물질에 한해 오염지도를 작성
- 3) 오염등급을 4등급으로 구분·작성(별표2 참조)
- 4) 오염지도 축적은 시료채취 지점도와 동일한 것 사용

## 라. 공통사항

(가) 시료량, 시료의 운반 및 보관은 토양오염공정시험기준 ES 07130 2.0 2.1.2 시료의 채취 및 보관에 준하여 수행한다.

(나) 항목별 분석방법 및 계산과정은 시험기록부에 기록하며, 매체별 분석방법은 다음을 따른다.

- 1) 토양: 토양오염공정시험기준
- 2) 농업용수, 갭내수, 지하수: 수질오염공정시험기준
- 3) 수로저질, 광재: 토양오염공정시험기준(필요시 폐기물공정시험기준의 함유량 시험 방법에 준하여 실시)

(다) 시료채취기록부 및 시험기록부는 3년간 보관한다.

### 3. 정밀조사결과 조치

#### 가. 정밀조사결과 보고서 작성

##### (1) 조사결과 요약

- 1) 주변지역의 실태(거주인구, 가구수, 농경지 현황 등)를 요약 기술
- 2) 오염원으로 나타난 시설의 규모(종류, 발생량, 적치량, 용량 등)와 위치를 지도(A4)에 표시
- 3) 토양오염도 조사결과는 오염원으로부터 이격거리별로 오염분포도 제시{이격 거리, 오염도(평균, 최고, 최저)등}
- 4) 토양, 수질, 폐기물, 대기질, 수로저질 등에 대해서는 조사지점별, 깊이별, 항목별로 일목요연하게 정리하여 제시

##### (2) 오염도 등 조사결과에 따른 분석

- 1) 배경농도 확인에 따른 토양오염도의 해석 등
- 2) 오염원의 종류·규모, 오염물질의 종류, 오염정도, 오염기간, 오염범위 및 주변 토지이용실태 등에 따른 종합적인 토양오염상태 및 조사자 의견제시

##### (3) 토양오염방지대책방안

- 1) 토양 등의 오염범위, 오염정도 등을 감안하여 토양오염방지사업 추진 필요여부 및 타당성을 검토하여 제시
- 2) 오염특성 및 부지현황을 고려한 적용 가능한 정화공법 선별 제시

## 나. 보고 및 관리

- (1) 국립환경과학원 및 유역(지방)환경청장, 시·도지사는 토양정밀조사 실시 후 20일 이내에 그 결과를 「별표 1」 서식에 의하여 환경부장관에게 보고하여야 한다.
- (2) 시장·군수·구청장으로부터 정밀조사 명령을 받은 지역에 대하여 정밀조사를 실시한 토양관련전문기관은 완료한 후 7일 이내에 그 결과를 토양오염원인자 및 관할 시장·군수·구청장에게 통보하여야 한다.
- (3) 시·도지사는 정밀조사결과 토양오염우려기준을 초과한 지점(국립환경과학원, 유역(지방)환경청에서 조사한 지점포함)에 대하여 관리대장(토양오염실태조사지침 별지5호서식 참조)을 작성·비치하여 관리하여야 한다.

### 4. 향후 대책계획

※ 첨부자료 : 조사지역의 시료채취지점도(약도) 및 토양오염도

{시료채취지점 약도 별도작성 및 축척 1:5,000 지도 또는 1:3,000 지적도에 표시}

<보고서식 및 참고자료>

별표 1. 토양정밀조사결과보고

별표 2. 오염등급의 구분

별표 3. 시료채취 대상지역의 격자 구획 설정방법

별표 4. 기타지역의 1, 2, 3구역에 대한 설명

별표 5. 주유소 관련 지역의 시료채취개수 결정

<별표1>

토양정밀조사결과보고

1. 조사목적

2. 조사내용

가. 조사대상지역

나. 조사기간

다. 시료채취현황

종 류	조사지점 번호	지 번	면적 (m <sup>2</sup> )	토지용도 ( )	비 고
⋮					

※ 작성방법

(1) 종류 : 토양(표토, 심토 등), 수질(하천수, 지하수 등), 폐기물(광미 등),

(2) 조사지점번호 : 조사대상 종류별로 구분 부여

(3) 지번, (4) 면적 : 지적도 및 토지대장에 근거하여 기재

(4) 토지용도 : 지적법에 의한 분류 기재, ( )에는 현재 토지이용상황

라. 조사항목

3. 조사결과 및 종합의견

가. 조사지역 개황

※ 작성방법: 주변지역의 실태(거주인구, 가구수, 농경지 현황) 요약 포함

나. 오염실태조사결과 및 분석

(1)시료채취현황별 오염도조사결과 ※ 예시

시료종류	조사지점 번호	오염도(mg/kg)				
		pH	Pb	Cu	...	...
⋮						

(2) 토양, 광미 및 하천수 등 오염도조사결과 현황(총괄) ※ 예시

구분		시료수	오염도(mg/kg)				
			pH	Pb	Cu	...	...
토양 (평균 (최저~ 최고))	표토	12	5.7 (5.0~6.2)	5.419 (2.095~ 7.910)	5.586 (1.416~ 7.465)	...	...
	심토	4					
광미(광재)		2					
갱내수		1					
하천수		2					
⋮							
⋮							
기준(우려/대책)		-	-	100/300	50/125	1.5/4	6/15

(3) 분석

다. 대책 방안

(가) 토양 등의 오염범위, 오염정도 등을 감안하여 토양오염방지사업 추진 필요여부 및 타당성을 검토하여 제시

(나) 오염특성 및 부지현황을 고려한 적용 가능한 정화공법 선별 제시

#### 4. 향후 대책계획

※ 첨부자료 : 조사지역의 시료채취지점도(약도) 및 토양오염도

{시료채취지점 약도 별도작성 및 축척 1:5,000 지도 또는 1:3,000 지적도에 표시}

<별표2>

오염등급의 구분

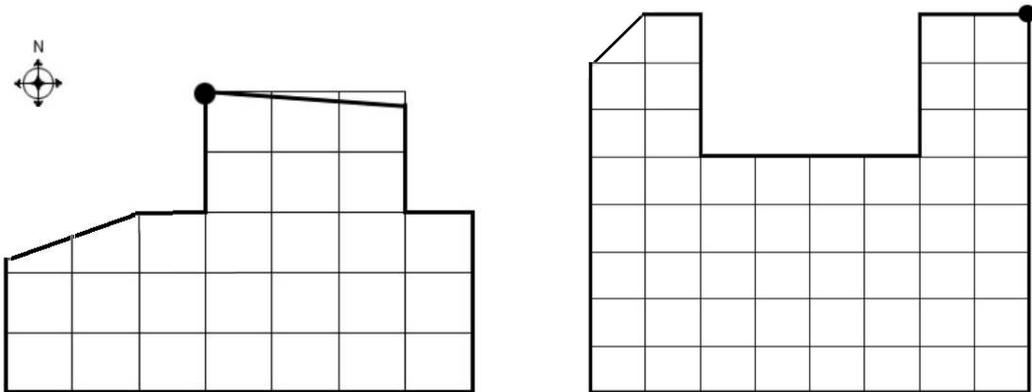
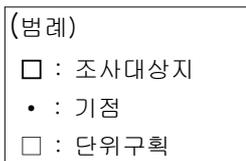
등급	등급기준	색 구분	예시
I	토양오염우려기준의 40% 미만인 지역	청색	4 미만
II	토양오염우려기준의 40% 이상부터 토양오염우려기준 미만인 지역	녹색	4 이상 10 미만
III	토양오염우려기준 이상부터 토양오염대책기준 미만인 지역	노란색	10 이상 20 미만
IV	토양오염대책기준 초과지역	빨강색	20 이상

예시 : 토양오염우려기준이 10mg/kg, 토양오염대책기준이 20mg/kg으로 가정하였을  
경우 오염등급 판정

<별표3>

시료채취 대상지역의 격자 구획 설정방법

- ① 조사대상지의 최북단 지점(2개 이상일 경우에는 가장 동쪽에 있는 지점)을 기점으로 한다.
- ② 기점에서부터 동서방향 및 남북방향으로 각 대상지별 시료채취밀도에 적절한 간격으로 선을 그어 조사대상지를 격자 형태로 구획(단위구획)한다. (그림 5 참조)



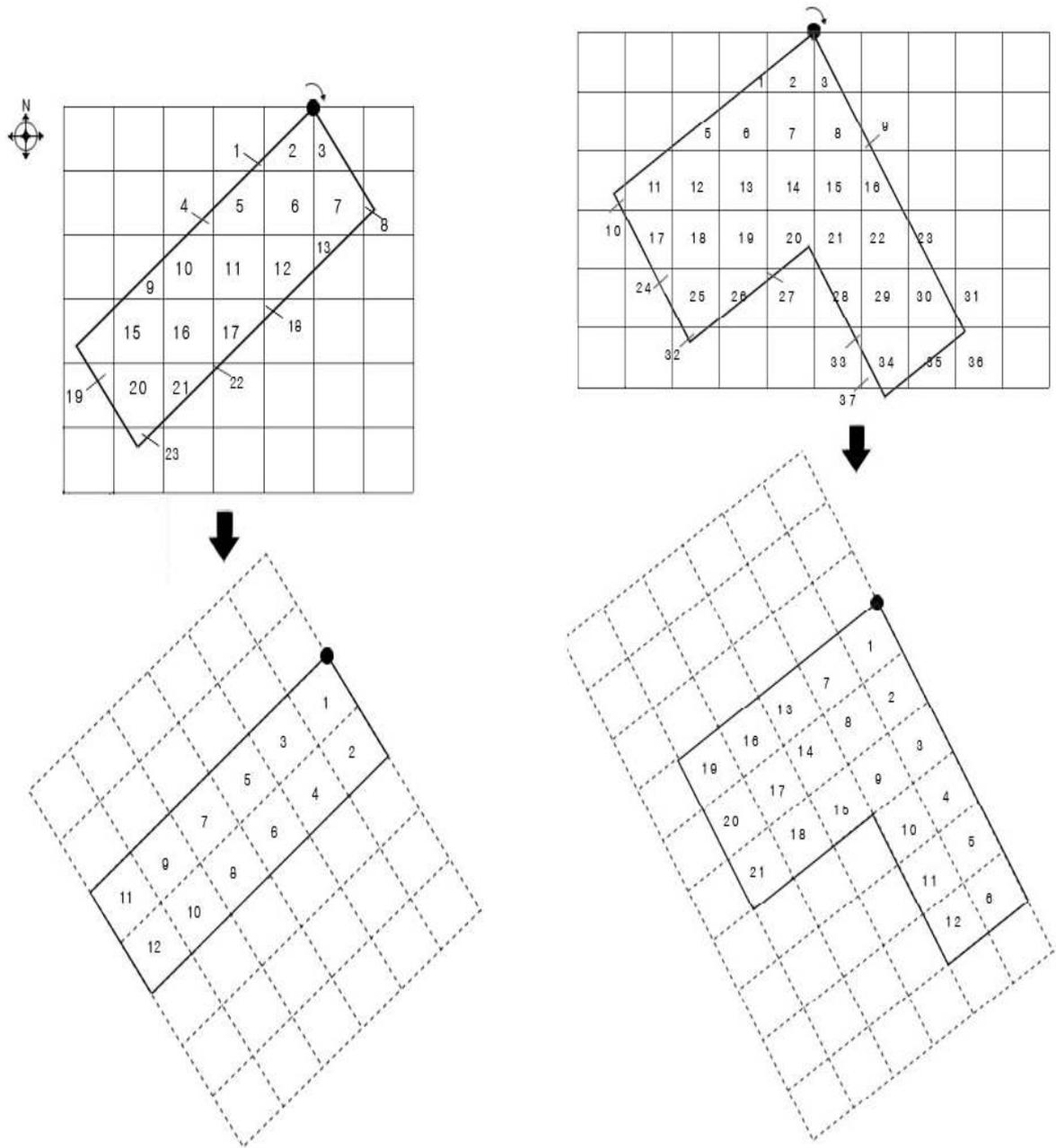
(a) 기본적인 기점배치

(b) 최북단 지점이 2개 이상인 경우

**그림 5** 일반적인 단위구획의 설정방법

조사대상지의 바깥 가장자리가 동서방향 및 남북방향과 직각을 이루지 않아 조사대상지 가장자리에 삼각형의 구획이 여러 개 생겨 단위구획의 수가 많아지는 경우에는 기점을 중심으로 격자 선을 시계방향으로 회전시켜 단위구획의 수를 최소로 하여 가장 효율적인 조사대상 면적이 되도록 한다. 또한 이 경우 회전 각도는 최소로 한다.

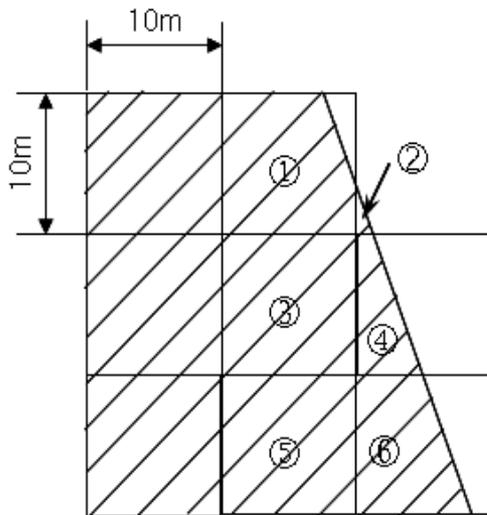
구체적으로는 조사대상지의 긴 변 방향으로 격자 선이 평행이 되도록 회전시키는 경우 등이 있다. (그림 6 참조)



(범례)  
 □ : 조사대상지  
 • : 기점  
 □ : 단위구획

그림 6 격자를 회전시키는 경우 단위구획의 설정방법

③ 시료채취 대상 면적이 격자 형태에서 많이 벗어나는 경우에는 그림 7에서 보는 바와 같이 격자에 모자라는 면적과 남는 면적간의 통합(격자1개 면적의 30% 이내)이 가능하다. 예를 들면, 10m 격자의 경우 통합하는 면적이 130m<sup>2</sup> 이하이어야 하고 이웃한 지점 간에만 통합이 가능하며, 단위격자의 한 변의 길이가 20m를 초과하지 않는 범위(격자 1변 길이의 2배 이내) 내에서만 통합이 가능하다. 이는 면적이 작아도 장축이 길어지면 구획의 중심점을 오염여부를 나타내는 대표점이라 할 수 없기 때문이다.



인정 여부	조건
O	①+② < 130m <sup>2</sup>
O	③+④ < 130m <sup>2</sup>
X	⑤+⑥ > 130m <sup>2</sup>
O	④+⑥ < 130m <sup>2</sup>
X	②+③ < 130m <sup>2</sup> (인접하지 않음)
X	②+④+⑥ < 130m <sup>2</sup> (단위격자의 한변의 길이가 20m 초과)

그림 7 가장자리에서 구획 병합의 조건 (10m\*10m를 예시한 경우)

<별표4>

기타 지역의 1,2,3구역 구분에 대한 설명

표 별표4-1 기타 지역의 1,2,3구역 구분에 대한 설명

구분	내용	예시
1구역	오염이 존재할 가능성이 큰 구역	유류, 유독물 등 특정유해물질 사용 특정시설 및 그것을 설치하고 있는 건물, 특정유해물질 사용 특정시설과 연결되어 있는 배관, 특정유해물질 사용 특정시설과 배관으로 연결되어 있는 시설, 특정유해물질 사용 특정 시설 및 그 관련 시설의 배수관 및 배수 처리 시설, 특정유해물질을 사용하는 작업장, 특정유해물질을 보관하는 창고, 특정유해물질 또는 특정유해물질을 포함하는 것의 침투·매설 장소
2구역	오염이 존재할 가능성이 적은 구역	사무소(종업원이 출입할 수 있는 곳에 한정), 작업장, 자재 창고, 작업 차량용 통로, 사업용 주차장, 사무실 앞뜰 공터(종업원이 출입할 수 있는 것에 한정), 복수의 공장건물을 가지는 경우에 대해 유해 물질 사용 특정 시설과 일련의 생산 프로세스를 구성하고 있지 않는 공장건물의 부지 등으로 특정유해물질의 사용 등을 실시하고 있는 부지는 아니지만, 특정유해물질 사용 특정 시설 및 그 관련 시설의 부지로부터, 그 용도가 전혀 독립하고 있다고는 말할 수 없는 부지
3구역	오염이 존재할 가능성이 없는 구역	산림, 완충녹지, 종업원의 숙소, 주차장, 운동장, 체육관, 그 밖의 미이용지 등 특정유해물질 사용특정시설로부터 그 용도가 완전히 독립하고 있는 상태가 계속되고 있는 부지

\* 다음의 경우는 1구역으로 간주하여 조사한다.

1. 범위 내에 특정유해물질 사용 특정시설과 연결되어 있는 지중 배관이 있을 경우
2. 3구역 중 녹지, 주차장 등이어도, 조사 대상의 특정 시설에서 사용한 특정유해물질에 관계하는 배관 등이 설치되어 있거나(과거사용 포함),
3. 2구역 중 자재창고나 주차장이어도 조사 대상의 특정유해물질에 관계하는 자재 창고, 특정유해물질 운반차량의 주차장으로 사용되는 경우

<별표5>

주유소 관련 지역의 시료채취개수 결정

표 별표5-1 주유소 관련 지역의 시료채취개수 결정

시료채취개수 결정			토양오염항목			
1) 시료 채취 지역의 면적(A)	주유소 관련지역 (개황조사)	~ 2,000m <sup>2</sup>				
		2,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>				
	주유소 관련지역 (정밀조사)	~ 2,000m <sup>2</sup>				
		2,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>				
2) 시료채취과정에서 95% 신뢰도로 발견할 수 있는 오염의심지역(hot spot)의 반경(R)	주유소 관련지역 (개황조사)	~ 2,000m <sup>2</sup>	12m			
		2,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>	①			
	주유소 관련지역 (정밀조사)	~ 2,000m <sup>2</sup>	5m			
		2,000 ~ 50,000m <sup>2</sup>	②			
3) 표토의 시료채취 개수 (n <sub>0</sub> )						
4) 심토의 시료채취 개수 (n <sub>1</sub> )						
5) 시료채취 총 개수 (n <sub>t</sub> )						
<p>주) - 1) 시료채취 지역은 그 특성에 따라 5곳으로 나뉘며 그 중 주유소 지역에 관한 것이며, 면적에 따라 시료개수가 달라진다.</p> <p>- 2) 오염의심지역이라 함은 토양오염우려기준 초과지역을 의미하며, 조사대상 지역의 특성에 시료채취과정에서 95%신뢰도로 발견할 수 있는 오염의심지역(hot spot)의 반경(R)값에 따라 시료채취 개수는 달라진다.</p> <p>① <math>R = 10.8698 + 9.1812E-4*A - 4.69117E-8*A^2 + 1.04772E-12*A^3 - 8.40949E-18*A^4</math></p> <p>② <math>R = 4.0092 + 7.1969E-4*A - 3.274E-8*A^2 + 6.765E-13*A^3 - 5.19824E-18*A^4</math></p> <p>- 3) 통계학적 시료채취개수(n<sub>0</sub>) 산정</p> $n_0 = \left( \frac{A \times (0.59)^2}{R^2} \right)$ <p>조건) • 정사각형의 격자법을 사용하여 단일시료 채취를 하는 경우</p> <p>- 4) 시료채취 총 개수(n<sub>t</sub>) = n<sub>0</sub> + n<sub>1</sub></p>						

부록 2. 지하수 오염조사 가이드라인(안)

# 지하수 오염조사 가이드라인(안)

Guidelines for investigation of groundwater contamination

# 목 차

## 제 1 장 서 론

1. 개요
2. 지하수 오염조사 방법

## 제 2 장 조사 단계

1. 계획수립
2. 조사실행
3. 조사결과 평가

## ※ 참고자료

- 참고 1. 지하수 개요 및 오염 특성  
참고 2. 오염 지하수의 정화  
참고 3. 용어정리

## 표 차 례

표 1 지하수 오염조사 방법

표 2 잠재오염원

표 3 수동 지하수위 측정 결과

표 4 지하수위 변동을 야기하는 요인

표 5 유역/대권역별 지하수면 깊이 및 수위 변동 폭

표 6 저유량 퍼징과 관정부피 퍼징의 특징

표 7 수질지시 인자의 안정화 기준

표 8 지하수오염평가보고서 작성에 관한 규정(환경부)

## 그림 차례

그림 1 경사 지역에서의 관측정 설치의 예

그림 2 여러 대수층 존재 지역에서의 관측정 설치의 예

그림 3 지하수위에 따른 지하수 흐름 방향

그림 4 지하수 함양 및 배출 지역에서의 지하수 흐름 방향

그림 5 지하수 흐름의 방향을 알고 있을 경우와 모르고 있을 경우의 조사

그림 6 오염물질의 특성에 따른 관측정 설치 방법

그림 7 지하수위와 스크린 구간에 따른 시료채취

# 지하수 오염조사 가이드라인(안)

## 제1장 서론

### 1. 개요

#### 1.1 목적

오염으로 인한 지하수 보호의 필요성이 증대함에 따라, 체계적인 지하수 오염조사 방법을 제시함으로써 정확한 오염조사를 통해 지하수오염을 방지하고 수질을 보호하고자 한다.

#### 1.2 내용

지하수 오염조사는 오염물질의 종류나 오염지역의 특성에 따라 적절한 방법을 선택하고 적용하는 것이 중요하다.

본가이드라인은 조사자가 오염조사의 전 과정을 이해하고, 적당한 오염조사 방법을 선택·적용하여 객관적인 오염 평가 결과를 도출할 수 있도록 개괄적인 오염조사 절차를 제시하고 각 절차에 따른 상세 내용을 기술하였다.

지하수 오염조사는 크게 계획수립, 조사실행, 결과평가 단계로 구분하였으며, 조사실행 단계를 오염기초조사와 현장조사로 구분하여 각 절차별로 실무에 필요한 내용을 기술하였다.

#### 1.3 적용범위

본 가이드라인은 ‘지하수법’, ‘지하수의 수질보전 등에 관한 규칙’ 등 지하수 관련 규정의 오염조사를 수행함에 있어 필요한 사항을 다루었다.

관련 규정에 의한 지하수 오염조사는 크게 오염원으로부터 기인한 오염 지역의 지하수 오염현황 조사와 관측정에서의 지하수 수질조사로 나눌 수 있다.

본 가이드라인은 지하수 오염현황 조사에 필요한 지하수 오염조사 절차 및 방법을 다루었으며, 지하수 오염현황 조사 시 필요한 관측정의 설치 및 대표성 있는 시료채취 방법을 포함하였다.

## 2. 지하수 오염조사 방법

지하수 오염조사는 크게 계획수립, 조사실행, 결과평가의 3단계로 나누어 실시한다.

조사실행 단계는 주로 실내에서 작업이 이루어지는 오염기초조사와 오염 현장 조사로 구분된다. 현장조사는 조사 순서에 따른 단위 조사 방법을 참고하여 실시한다.

가이드라인의 구성은 아래 표 1과 같다.

표 1 지하수 오염조사 방법

단위 조사 방법		
1. 계획수립		
2. 조사실행		
2.1 오염기초조사		
2.2 오염현장조사	2.2.3A 예비 지하수 오염 조사	
	2.2.3B 수리지질학적 조사	
	2.2.3C 지형조사	
	2.2.3D 지하수위 조사	
	2.2.3E 3차원 오염분포 조사	
	2.2.3F 오염이 진행 중인 경우의 조치	
	2.2.3G 지하수 관측정 설치 및 관리	
	2.2.3H 지하수 시료채취	1) 시료채취 일반사항
		2) 펌핑
		3) 조사항목
		4) 시료채취 장비
		5) 여과의 실시
		6) 시료의 채취 방법
		7) 시료채취 용기
		8) 오염물질 특성에 따른 시료 채취 방법
9) 시료의 보존 및 운반		
10) 시료채취량		
11) 채취 시료의 여과		
12) 펌핑 및 시료채취 장비		
13) 장비의 오염 제거(세척)		
14) 현장조사 기록		
15) 정도관리 방법		
3. 조사결과 평가		

## 제2장 조사 단계

### 1. 계획수립

조사의 필요성 및 조사 대상지의 특성을 파악하고 조사의 목적을 정의하는 것이 조사 계획 수립의 주요한 목적이다.

조사 계획의 수립은 주로 조사 초기 단계에서 이루어지나 오염기초조사나 현장 조사 등의 오염 조사를 통해 알아낸 사실을 반영하여 지속적으로 보완·수정하거나 재수립할 수 있다.

#### 1.1 조사 계획 수립 방법

- 명확한 조사 목적 및 조사규모를 설정하고 목적에 맞는 조사계획을 수립
- 시료채취 담당자 등 조사 팀 구성
- 사용 가능한 예산과 인적 자원을 고려하여 조사계획을 수립
- 수리지질학적 조건 등 부지특성을 고려한 계획 수립
- 수평적 오염 분포 조사와 함께 수직적 오염 분포도 조사할 수 있도록 계획 수립
- 이용 가능한 자료와 자료의 출처 확인
- 조사계획서 작성

#### 1.2 조사 계획의 내용

- 조사가 필요한 사항을 목록으로 작성
- 오염조사 범위 및 규모와 조사 방법의 결정
- 시료채취 방법 및 절차
- 장비 및 사용기술의 선정
- 보건·안전 계획 수립
- 일과 시간 계획, 필요 기술과 인력 결정

#### 1.3 조사 계획 수립 시 고려할 세부 사항

##### 1.3.1 조사 목적의 구분

- 1) 오염 현황 파악을 위한 조사

- 오염지역의 특성 규명
- 오염집중구간(Hot spots) 결정

2) 지하수 수질관리를 위한 기초자료 조사

- 오염이 수용할 수 있는 위험수준을 넘었는지 결정
- 환경 상태 모니터링 등

1.3.2 조사 규모의 결정

1) 광역조사

- 전반적인 지하수계에 대한 예비조사 수준

2) 국지(local)조사

- 광역조사와 부지특성조사의 중간 규모
- 특정 부지를 포함하는 수 km<sup>2</sup> 정도의 범위 조사

3) 부지특성(site-specific)조사

- 오염범위, 오염원, 오염물질의 이동에 영향을 미치는 물리적, 화학적 부지특성 등 다양한 인자를 확실하게 규명할 수 있는 조사

1.3.3 장비 및 설치기술의 선정

여러 영향 인자를 고려하여 장비를 선정하고, 시추공 설계 등 설치기술을 선정한다.

1) 장비 선택 시 고려 사항

- 이용 가능한 장비
  - 시료채취 장비의 흡입구 위치 등 장비의 형태
- 조사 지점의 위치(조사지점까지의 접근성)
- 부지 특성
- 관측정 또는 관정의 특성
  - 케이싱 내부 직경, 지하수위, 지하수면 깊이, 관정 내 지하수 부피, 스크린 설치

심도 등

- 적용하는 퍼징의 기준
- 채취할 오염물질의 형태 : 분석항목, 오염 예상 물질, 채취되는 시료의 조성(예를 들어 탁도나 휘발성 유기물의 함량 등)
- 시료채취 목적 및 원하는 데이터의 질

## 2) 장비가 필요한 조사 단계

장비가 필요한 조사 단계로는 관정 세척과 개량, 굴착, 퍼징 및 시료채취, 수위측정, 수리시험 등이 있다.

### 1.3.4 시료채취 방법 및 절차

#### 1) 시료채취 방법

시료채취 방법은 관련 규정, 조사 형태, 오염 형태, 시료채취 목적, 최적의 기술적인 기준 등에 따라 결정하는데 일반적으로 다음의 사항을 포함한다.

- 시료채취 위치 및 지점 결정
- 채취 시료의 분석항목
- 시료채취 시기 및 기간
- 시료의 수
- 관측정 설치 방법 등

#### 2) 시료채취 절차 사항

시료채취의 절차는 일반적으로 다음과 같다.

- 시료채취 전 수위 측정
- 관측정 개량 및 퍼징
- 시료의 채취, 보존, 취급
- 정도관리(QA & QC)
- 시료 보관 및 이송
- 절차의 기록

### 1.3.5 기타 고려 사항

#### ○ 조사 대상 오염물질의 물리화학적 특성

- 용해도, 휘발성, 반응성, 밀도(NAPL의 경우 부유하는지 가라앉는지의 여부)

#### ○ 오염물질의 이동 특성

- 오염물질이 불포화대를 통과하여 대수층(aquifer)으로 이동 시 발생할 수 있는 영향이나 화학적 특성 변화
- 조사지역의 대수층 깊이와 두께
- 각 대수층에서의 지하수 흐름 방향과 속도, 이러한 값들의 변동
- 대수층의 특성에 따른 수직, 수평 방향으로의 오염물질 확산
- 지하수에서의 오염 이동에 영향을 미치는 자연저감

## 2. 조사 실행

### 2.1 오염기초조사

현장 조사에 앞서 주로 실내에서 이루어지는 조사로, 대상 지역과 관련된 각종 기존 자료를 수집하고 분석하는 단계이다. 주로 자료조사, 청취조사, 현지조사를 통해 조사 지역의 오염 가능성 유무를 판단하기 위한 조사이다.

조사 대상 지역은 점오염원과 미생물오염원은 상대적으로 작게, 비점오염원, 자연기원 오염원은 상대적으로 넓게 설정한다.

#### 2.1.1 기초조사의 내용

- 1) 조사 지역의 관련 자료 수집
- 2) 모의 연구 및 개념 모델 개발
- 3) 종합 분석 및 평가를 통한 자료의 해석 및 결론 도출

자료조사, 현장조사 및 청취조사 등의 결과를 종합적으로 평가하여 지하수 오염의 개연성 여부를 평가하고, 오염 개연성이 인정될 경우 오염물질의 종류 및 오염범위를 추정함

- 4) 향후 조사 계획 수립

자료 수집 결과 분석을 통해 향후 조사 계획 수립에 참고

## 5) 보고서 작성

기초조사 완료시 작성하며, 평가의견을 객관화 할 수 있는 자료를 포함함

### 2.1.2 자료 수집 방법

오염기초조사는 자료조사, 청취조사, 현지조사 등을 통해 이루어진다.

#### 1) 자료조사

문헌 등의 자료를 통한 조사로 데이터의 신뢰성 확보를 위해 가급적 공식적인 자료를 사용하고 출처를 확인한다. 다음과 같은 조사 활동이 포함된다.

##### (1) 오염 이력 조사

대상 부지의 조성 초기부터 현재까지의 토지사용 용도, 과거 오염사고를 조사하여 부지 전체에 대한 오염 현황, 오염가능성 및 존재 가능한 오염 물질을 추정

###### ☞ 이용 자료

- 대상 부지의 토지대장, 건축물 대장, 인허가 서류
- 시설 개요 및 관련 자료(도로, 구조물, 냉난방시설, 하수시설, 상수시설 등)
- 대상 부지 소유권에 대한 기록, 감정서
- 지적도, 지리정보시스템 등

##### (2) 오염원의 위치와 규모

특정토양오염관리대상시설(저유소 등), 폐수배출시설, 매립시설 등 오염유발 시설이나 지방산업단지, 매립지, 광산지역(폐광산 포함), 축산단지, 농업단지, 유원지, 공원, 골프장, 도시주거지역, 특정토양오염관리대상시설, 폐수·하수 처리장, 공동묘지, 축사 등 오염원의 위치와 규모를 조사한다.

###### ☞ 이용 자료

- 오염유발시설 관련 자료(설치 신고서 등)
- 정부에서 시행하는 산업단지 토양·지하수 환경 조사 및 폐광산 정밀조사 결과, 통계기관, 연구기관 등의 자료 등
- 다음 표 2 잠재오염원 참고

표 2 잠재오염원

종 류	공간적 형 태	시간적형 태	중 요 오염원
□ 배출, 방류목적에 의해 설치된 오염물질			
- 지하침투식(정화조, 구정물웅덩이) - 주입정(폐기물, 염수) - 지상살포(관개용 살포, 슬러지와 축산폐수의 농업용 지상살포, 폐기물 살포)	Ph P D.P	Y Y,S S	
□ 오염물질의 처리 및 저장 또는 처분설비로부터 누출된 오염물질			
- 매립지(특정폐기물, 일반폐기물)의 침출수 - 폐기물의 불법투기 - 주거지에서 폐기물의 무단폐기 - 지표저류시설) - 폐광석의 보관장 - 폐기물의 야적장 - 채품, 원료 등의 야적장 - 공동묘지 - 죽은 가축의 매장지 - 지상탱크(유류, 유해화학물질) - 지하탱크(유류, 유해화학물질) - 저장용기(컨테이너) - 야외소각장 및 폭발현장 - 방사능 폐기물 처분장	Ph Ph Ph Ph Ph Ph Ph Ph Ph Ph Ph Ph Ph Ph P Ph	S S S S S S S S S R R R S Y.S.R	
□ 운송, 배관시설에서 누출된 오염물질			
- 배관(폐기물, 송유관, 하수관)에서 누출 - 운송·운반과정에서 누출	Ph Ph	R R	
□ 기타 활동에서 배출 및 살포된 오염물질			
- 관개용수의 재순환 - 농약살포 - 비료살포 - 가축사육장의 가축분뇨 및 폐수 - 제설·제빙제 살포 - 도시지역의 강수 유출 - 광산개발에 따른 광산폐수 - 대기오염물질의 지하침투	D D D Ph F P.D.F P.D.F D	S S S Y S S S S	
□ 지하수 유동로 변경에 따른 오염원			
- 채취정(유정, 가스정, 지열, 취수정) - 기타목적의 관정(관측정, 시험정) - 공사용 지하굴착	P P P.D.F	Y Y S	
□ 인간 활동에 의해 자연적으로 발생된 오염원			
- 지표수와 지하수의 연관관계 - 자연적인 침출 - 대수층내로 해수침입과 해수의 역상승현상	F D.F D.F	S Y.S S	
P : 점오염원    D : 비점오염원    F : 전면오염원    h : 국지오염원 Y : 연간        S : 계절            R : 불규칙적			

※ 출처 : 지하수의 수질보전 등에 관한 업무처리지침(환경부, 1997)

### (3) 조사 지역의 수리 수문학적 특성

지하수의 전반적인 현황 파악을 위한 광역적 지하수의 수위분포와 흐름방향, 조사지역의 지하수 함양량 및 산출성, 지표수와 지하수의 연관성, 대수층의 수리전도도, 지하수위 변동 등 조사 지역의 수리 수문학적 특성을 조사한다.

#### ☞ 이용 자료

- 기상대 관측자료, 수문관측소 관측자료(강수량, 증발량, 온도, 홍수빈도 등)
- 지하수관리기본계획 등
- 국가지하수관측망 관리 시스템
  - 대수성 시험 정보
  - 관측소 정보 : 측정 개요, 물리검층, 전기비저항 탐사 등

### (4) 조사 지역의 지리, 토양, 지형·지질학적 조사

오염물질의 이동가능성 평가에 중요한 자료 지형 및 지질, 토양의 물성, 입자구성, 함수율, 경사도, 광역지형지질, 선구조의 경향성 분석(Fracture-trace analysis), 부지내부와 인근의 하천 분포 조사 등을 실시한다.

#### ☞ 이용 자료

- 한국지질자원연구원 지질정보검색시스템
- 지형도(1/50,000, 1/25,000, 1/5,000), 지질도폭, 토양도
- 지질도, 지질조사보고서, 지층단면도, 수문지질도 등

### (5) 기후 및 기상 파악

기상수문자료를 수집하고 분석한다.

#### ☞ 이용 자료

- 기상청 자료 등

### (6) 수질현황

지표수의 유량과 수질, 지하수의 전반적인 현황 파악을 위한 배경수질(Back Ground Quality), 부지내부와 인근의 관측정 현황(기존 관측정 위치, 관측정 설치 방법, 수위 이력, 관측정 개량방법), 기존 관측정 및 관정에서의 수질 및 시료채취 관련 자료(오염된 관정의 수, 기존 분석 시료의 농도 이력, 자유상 오염물질의 존재 유무, 기존에 사용된 펌핑 방법 및 펌핑율, 탁도) 등을 조사한다.

#### ☞ 이용 자료

- 지하수수질측정망
- 국가지하수관측망 관리 시스템(수질시험 정보)

### (7) 기타

항공사진/위성영상의 수집 및 해석, 우물, 샘, 유출지하수 등의 이용현황, 토지이용현황, 행정구역, 토양오염도 및 누출 검사 자료, 오염 관련 보도 자료, 환경부 토양측정망 자료 및 수행된 환경오염관련 자료, 지하매설물 현황, 불용공 등의 조사를 실시한다.

## 2) 청취조사

오염 조사에 도움이 되는 주요 인물과의 접촉을 통한 조사로 직접 방문하여 면담하거나 전화, 서면조사 등을 통해 조사한다.

### (1) 청취 대상

- 소유자
- 지방, 중앙 행정기관 공무원
- 현장 담당자, 장기근무자, 장기 거주자 등

### (2) 청취 내용

- 대상지역의 주요 시설현황 및 폐쇄 또는 이전사항
- 오염물질 관리상태(오염방지시설의 여부 등)
- 외부로 알려지지 않은 오염사고 사례
- 기타 오염 상태를 확인할 수 있는 사항

## 3) 현지조사

조사 부지를 방문하여 다음 사항을 조사하여 개괄적인 상황을 파악한다.

- 오염유발시설의 설치장소 및 오염물질의 보관상태 확인
- 시설물 관리상태, 오염징후의 관찰
- 청취조사를 통해 획득한 자료의 현장 확인
- 조사지역의 수문 및 수리지질현황 파악
- 기타 지하수 및 토양 오염 상태를 확인할 수 있는 사항

## 2.2 오염현장조사

가장 오랜 시간과 비용을 필요로 하는 조사 방법으로, 조사 부지의 수리지질학적 특성과 지하 오염물질 형태 및 거동특성을 이해할 수 있는 신뢰성 있는 데이터의 확보가 주요 목적이다.

기초조사 결과 환경오염 개연성이 있을 것으로 판단되는 지역에 대하여 환경오염물질의 종류, 오염원 및 오염범위 등을 파악하고 오염 지역을 중심으로 오염량, 오염 확산 경로와 범위 등 지하수 오염도를 최종 평가할 수 있도록 조사를 실시한다.

관측정 설치 및 설계, 시료채취 절차 수립, 부지특성화 등 전문적인 작업은 전문가로 구성된 조직의 도움을 받을 수 있다.

## 2.2.1 일반사항

조사 지역 및 범위는 조사목적, 대상지역의 면적, 수문지질 특성 등에 따라 달라지나 주로 수질현황, 잠재오염원조사결과 등 오염기초조사 결과를 바탕으로 지하수 수질오염이 예상되는 지점의 조사를 실시한다. 조사 범위 설정 시는 수리지질학적, 수문학적인 경계조건을 고려하여 설정하며 분수령(수리지질학적으로 불투수성 구조에 의한 분수령)을 파악하여 오염 범위 파악에 참고한다. 오염지역이 하천, 호소 등과 인접한 경우 하천, 및 호소 수질 측정이 필요하다.

## 2.2.2 현장조사 계획 수립

오염기초조사 결과를 바탕으로 관측정 설치 등 현장조사 계획을 수립한다. 계획 수립은 본 가이드라인의 '1. 조사계획수립' 부분을 참고한다.

## 2.2.3 현장 조사 방법

### 2.2.3.A 예비 지하수 오염 조사

관측정 설치 및 시료채취를 통한 오염 조사에는 오랜 시간이 소요되므로 그 이전에 좀 더 쉽고 빠른 방법으로 오염을 확인할 필요가 있는 경우 활용할 수 있다. 사용 가능한 방법은 다음과 같으며 신뢰성이 떨어지는 경우가 있으므로 데이터 사용 시 주의가 필요하다.

#### 1) Direct push법

- 오염 파악이 신속하고 경제적이거나 초기 장비 도입 시 고비용 필요
- 다양한 심도에서의 시료 채취가 가능하여 3차원 오염분포 규명에 효과적
- 예비 지하수 특성화를 통한 관측정 설치 지점의 합리적 결정 가능

2) 이동 실험실

- 실험이 가능한 차량 등을 이용하여 현장에서 간단하게 실험을 하는 방법으로 신속한 시험 결과 도출이 가능

3) 토양 증기 채취

- 휘발성 오염물질로 오염된 경우 이용하는 방법으로, 박벽의 소구경 튜브를 지표면과 지하수면 사이(일반적으로 1.5~3m, 최대 6m)의 불포화대에 위치시키고 토양 증기를 채취하여 휘발성 오염물질 측정

4) 기존 관측정 및 관정에서의 지하수 시료채취 및 분석

- 관측정의 신규 설치 이전에 기존 관측정이나 관측 목적 외의 다른 관정에서 시료를 채취하여 분석하는 방법
- 오염 조사를 위해 기존 관측정을 이용할 경우 스크린 위치 등을 검토하여 목적하는 대수층의 수질을 나타내고 있는지 확인하고, 그렇지 않은 경우(채취 목적에 적합하지 않을 경우)에는 이용하지 말아야 함

5) 토양 시료 채취 및 분석

- 지하수보다 시료 채취가 용이한 토양 시료 채취 및 분석을 통한 오염 조사
- Geoprobe, 수동타격식 시료채취장비(MTK), 트렌치 조사 등이 있음

6) 얇은 심도의 지하수 채취

- 도로나 골목, 빌딩 내부 등 시료 채취가 어려운 곳에서도 용이한 방법
- 토양 증기 채취 방법의 변법으로 박벽의 튜브를 지하수면보다 약간 아래쪽의 시료를 채취하여 현장 또는 실험실에서 분석을 실시한다. 권장되는 최대 깊이는 약 5~8m임
- trial pit 방법 등이 있음

<trial pit 방법>

- Trial pit을 뚫은 후 시료 용기를 물속으로 잠기게 하거나 벽면에서 흘러나오는 시료를 채취
- Trial pit 굴삭 시 발생하는 토양과 구덩이 밑 부분에서의 지하수 혼합 등에 의해 시료수질이 영향을 받을 수 있음
- Trial pit에 의한 방법은 제한적인 방법으로, 주위의 오염 물질 유무를 나타내는 총체적인 지표로서만 값을 사용해야 함
- 심층부의 오염 물질 존재 여부를 나타내거나 상세한 분포를 나타내기에는 부적합함
- 적은 비용으로 신속하게 한 지점을 분석하는 데에는 유용하며, 좀 더 복잡하고 효과적인 시료 채취나 실질적인 작업을 실행을 위해 필요

### 2.2.3.B 수리지질학적 조사

지하수 오염 특성은 오염지역의 수리지질학적 특성에 따라 크게 영향을 받는다. 따라서 수리지질학적 조사를 통해 오염 특성을 파악하는 것이 필요하다.

수리지질학적 조사는 시추, 시추공 등을 이용한 원위치 시험, 투수시험, 각종 시료채취, 토질 및 암석 분석 등을 통해 이루어진다.

조사 방법으로는 지표지질 조사, 물리탐사, 물리 검층 등의 간접조사 방법과 수위 관측, 시추조사, 착정조사, 대수성 시험 등의 직접조사 방법이 있다. 각각의 조사 방법은 다음과 같다.

#### 1) 지표지질조사

현장에서의 지질 특성 조사 방법으로 지표에 노출된 암반이나 지층의 성상을 관찰하여 대상지역의 지질구성 및 선구조 조사, 절리면 등 암석의 특성 조사, 지하수 흐름 방향 예측, 지층분포와 구조, 지괴의 안정성, 지표수, 지하수의 부존상황 등 광범위한 지반지질정보를 규명하는 조사과정이다.

야외지질조사 도구를 이용하여 조사지역 내에 분포하는 노두와 지형을 관찰·기록하고 해석하여, 지형도에 기입하고 지질분포도 및 지질구조도 등을 작성한다.

#### 2) 물리탐사

지하 지반으로 보낸 탄성파, 전류, 전자기파 등의 신호가 지하 지질을 투과, 굴절, 반사하거나, 2차 유도에 의한 물리특성 변화 등에 따른 반응신호를 수신하여, 지질구조와 지하지반의 물성분포를 밝히고 지장물을 탐사한다.

### 3) 물리검층

시추공 내의 여러 물리적인 양을 깊이에 따라 연속적으로 측정해서 근방의 암석의 성질, 지층의 상태를 조사하는 방법이다. 전기검층, 방사능검층 등 여러 종류가 있다.

### 4) 시추 및 착정 조사

미고결지층 토질을 대상으로 하는 토질조사시추와, 암반을 대상으로 하는 암반조사시추로 구분한다. 이외에도 얇은 토질지반을 대상으로 하는 시료채취용 소구경 Auger boring이 조사시추 범주에 속한다. 시추조사는 시료채취 및 시추공 내에서 실시하는 원위치시험 등을 위해 실시한다.

다양한 지질 정보 획득과 암반대수층과 충적대수층의 조사가 가능하다.

일반적으로 다음의 세 가지 방법을 이용하여 굴착을 실시한다.

- auger drilling(얇은 구멍, 일반적)
- rotary drilling(더 깊은 구멍, 일반적)
- cable-tool(percussion) drilling

### 5) 대수성시험

대수층의 특성 및 지하수의 산출특성을 파악하는 방법으로 다음의 방법이 있다.

#### (1) 수위회복시험

대수층의 수리전도도를 구하는 시험으로, 일정 부피의 물을 더하거나 빼서 순간수위 변화를 발생 시킨 후 다시 원래의 수위로 회복되는 양상을 관측함

#### (2) 양수시험

비교적 넓은 지역에 대한 수리상수값(수리전도도, 저류계수, 비산출률, 투수계수)을 구하는 시험으로 양수정에서 일정 시간동안 일정량의 물을 양수한 후 주변 관측정에서의 시간에 따른 수위변화를 관측

※ 오염된 지역에서 수행할 경우 배출수 처리대책 필요

#### (3) 지표투수시험 : 불포화대(약 지표 30cm)에서 현장 수리전도도값을 획득하기 위한 시험

### 6) 지하수위 측정

지하수의 흐름 방향 결정을 위해 측정하는데 보통 현장조사는 조사 지역 내의 기존 관측정 및 관정의 수위를 측정하는 것으로부터 시작됨

## 7) 부지특성화 조사

부지특성화 조사를 통해 수리 지질학적 특성 및 오염특성을 규명한다.

- 지하수내의 오염물질이 주변지역으로 확산될 가능성이 있다고 판단되는 지역에서는 설치된 관측정을 활용하여 수리지질학적 평가를 실시
- 지하수 확산 모델링 프로그램을 이용하여 오염 확산 가능 범위 및 오염농도 분포 등을 평가할 수 있음
- 이러한 조사를 통해 지하수위 분포, 지하수 흐름 방향, 지하수 유속, 수리전도도 파악 및 지하수 수두 구배, 지하수 흐름도, 지하수량을 확인 하여 오염된 지하수량 산정이 가능
- 지하수 유동 특성 및 오염물질 확산 특성 파악을 위한 다양한 수리시험 실시
- 기초 조사 자료가 많지 않은 경우 가장 위쪽 대수층부터 수리학적 특성화를 시작하여 초기 작업을 하는 동안 더 아래쪽의 대수층 조사를 통해 자료를 확보하고 더 깊은 지점의 추가 조사 필요성을 결정한다.
- 추적자 시험(Tracer Test)을 통한 특성 조사
  - 물의 흐름 방향과 유속, 분산 속도, 오염물질의 운동방향, 운동속도, 오염원의 확인, 특정 두 지점 사이의 지하매질 연결성 확인, 지하수내 오염물질의 이동 특성 추정 등과 같은 여러 가지 수리지질학적인 변수를 측정하거나 어렵잡기 위해서 사용됨
  - 주로 사용되는 추적자의 종류는 이온, 염료, 가스, 동위원소, 수은, 고체가루가 있음

### 2.2.3.C 지형조사

다음과 같은 경우 조사지점의 측량을 실시한다.

- 구역 내 고저(지형)측량을 통한 기존 평면도 보완 작성
- 정확한 오염현황 및 오염량 산정을 위한 측량
- 지하수 관측정, 토양시료 채취 지점 등의 조사 위치 확인을 위한 측량
- 정확한 오염위치 확인을 위한 정밀 GPS 측위조사 및 수준측량 실시
- GPS 측위조사 방법은 거리측정방식에 의한 삼각법(triangulation)을 이용하여 위성과 수신기 안테나간의 거리를 구하며 정확한 지하수 유동 특성 파악을 위해 관측정 수준측량을 실시함. 모든 좌표는 UTM 좌표를 기준으로 조사함
- 지표면상의 자연 및 인공적인 구조물의 상호 위치관계를 수평적 또는 수직적으로 관측하여, 그 결과를 일정한 축척과 그림으로 평면도에 도시한 지형도를 작성하기 위한 측량

### 2.2.3D 지하수위 조사

지하수위는 대수층에서 지하수의 위치수두와 압력수두를 합한 값으로 해수면으로부터 지하수면까지의 높이 즉, 해발고도로 나타낸다. 지하수위 조사는 현장 조사에 있어 가장 먼저 측정하며 가장 기초가 되는 조사이다.

지하수는 흐름을 눈으로 관찰할 수 없기 때문에 대부분의 경우 오염원의 흐름방향을 명확하게 확인하기 어려우나 지하수위 조사를 통해 지하수 흐름 방향, 흐름 속도 등의 평가가 가능하므로 정확한 지하수위 측정 및 평가는 매우 중요한 일이다. 각 관측정은 위치에 따라 지표면의 고도가 달라 수심측정만으로는 각 지점 간 지하수위의 고저 파악이 어려우므로 보정을 통해 지하수위를 결정해야한다.

#### 1) 지하수위 측정의 단계

지하수위는 해발고도로 표시되는데 기준점의 해발고도에서 기준점으로부터 지하수면까지의 깊이를 빼서 결정한다.

##### (1) 기준점(Reference point) 설정

- 지하수위 측정 시 각 관측정에 쉽게 확인이 가능하고, 고정된 표고를 가지는 기준점을 설정함으로써 지하수위의 정확한 측정이 가능하며, 지하수위 고도 환산에 이용이 가능하다.
- 수준측량 결과 등을 토대로 수위 관측을 위한 기준점을 정하고 쉽게 확인이 가능하도록 표시한다.
- 내부 케이싱, 외부 케이싱, 보안/보호 시설물 꼭대기 등 쉽게 확인이 가능하며 고정된 지점을 기준점으로 삼는데 외부 케이싱의 경우 동결에 의한 변형, 차량에 의한 손상 등 변형 가능성이 있으므로 가능하면 내부 케이싱이 권장된다.
- 국가에서 관리하는 일반적인 고도, 경도, 위도 등이 명확하게 설정되어야 하며, 표시되어 쉽게 알 수 있어야 한다.
- 기준점은 측량을 하거나 1/5,000 이상의 대축척 지형도를 이용하여 좌표 및 표고를 파악하고 기록해 두어야 한다.

##### (2) 지하수면 깊이 측정

수위계를 이용하여 기준점에서부터 지하수면까지의 깊이를 측정한다.

##### (3) 지하수위 산정

기준점에서 지하수면까지의 측정값을 이용하여 지하수위를 고도로 환산한다.

#### (4) 기록사항

측정일시, 기준점(좌표, 고도 등), 측정방법, 계산방법, 지하수면 깊이, 지하수위 변동에 영향을 줄 수 있는 영향인자(조류의 사이클, 인근 지하수 이용에 의한 영향, 주변 하천의 유량, 강우, 주요한 기압 변화 등)를 기록한다.

### 2) 지하수위 측정을 위한 관측정 관련 사항

#### (1) 필요 관측정의 개수

- 하나의 대수층(zone)에서 지하수 흐름 방향 결정에 요구되는 최소한의 관측정 수는 3개이다.
  - 규모가 작고 지질학적으로 단순한 지역의 경우 지하수 흐름 방향 결정에 3개의 관측정으로 가능하나 그렇지 않은 지역의 경우에는 오류의 가능성이 있다.
  - 국소적인 지하수 충전, 배수로, 수리전도도의 변화 등에 따라 지하수위가 평평하게 형성되지 않는 경우가 많아 대부분의 지역에서는 3개 이상의 관측정이 필요하다.
- 규모가 크고 지질학적으로 복잡한 지역에 격자형으로 6~9개 관측정을 설정하면 지하수 흐름 방향 결정에 충분하며 복잡한 수위 파악이 가능하다.
  - 조사지역이 넓고 수리지질학적으로 복잡한 경우 단순하고 작은 지역 보다 많은 수의 관측정이 필요하다.
- 관측정의 수는 많을수록 좋으나 조사지역의 크기와 상태 지하수위 측정에 소요되는 인력, 시간, 비용, 능률 등을 고려하여 결정하여야 한다.
- 수리전도도의 차이가 큰 지역이 함께 있을 경우 스크린 구간이 다른 여러 개의 관측정이 필요하다.

#### (2) 관측정의 위치

- 지하수위 등고선도를 일정한 정밀도로 작성하려고 할 경우에는 관측지점은 가능한 등분포하도록 선정하며 다수의 격자형 배치가 어려울 경우 각 관측지점을 직선으로 연결하여 얻어지는 삼각형의 형태가 정삼각형에 가깝도록 관측지점을 배치하는 것이 좋다.

#### (3) 관측정 스크린의 깊이와 길이

- 관측정의 위치가 결정된 후에 관측정의 깊이와 스크린 구간이 결정되어야 하는데 스크린 깊이는 보통 지질학적 조사 자료가 준비된 후에 굴착 과정에서 결정된다.
- 낮은 수리전도도를 가진 지질층이 대수층을 구분하고 있는 경우 각각의 대수층에 스크린 구간을 설치한다.

- 각 관측정은 대수층의 적합한 지점에 스크린이 위치하도록 한다. 지형학적으로 경사가 있는 경우 지표면 경사를 고려한 관측정 설치보다 대수층 안의 적합한 지점에 스크린이 위치하도록 설치하는 것이 좋다. (다음 그림 1 참고)

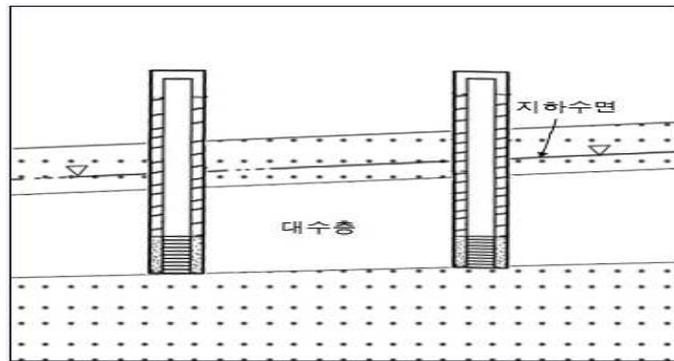


그림 1 경사 지역에서의 관측정 설치의 예

- 스크린 구간의 길이가 비슷한 스크린이 사용되어야 하며 모니터링 하고자 하는 개별 대수층에 스크린 구간 전체가 잠기도록 해야 한다. 이렇게 함으로서 각각의 대수층을 대표하는 수위 측정이 가능하며 대수층 간 오염 가능성을 최소화할 수 있다. 만약 스크린이 여러 대수층에 걸쳐 있다면 여러 대수층으로부터 영향을 받은 혼합된, 혹은 평균의 수위가 측정될 것인데, 이것은 개별 대수층(zone)의 수위를 대표할 수 없을 뿐만 아니라 지하수위 데이터 해석을 어렵게 한다.
- 특별한 목적을 위해서는 길거나 짧은 스크린이 제조되어 이용될 수 있겠지만 일반적으로 판매되는 관정 스크린의 길이는 1.5~3m이다.
- 지하에 깊이별로 여러 개의 대수층이 존재할 경우 스크린 구간이 다른 여러 개의 관측정을 설치하거나 한 개의 시추공에 한개 또는 여러 개의 관측정을 설치하는 방법을 사용할 수 있다. 관측정 설치의 예는 다음 <그림 2> 의 A, B, C와 같다.

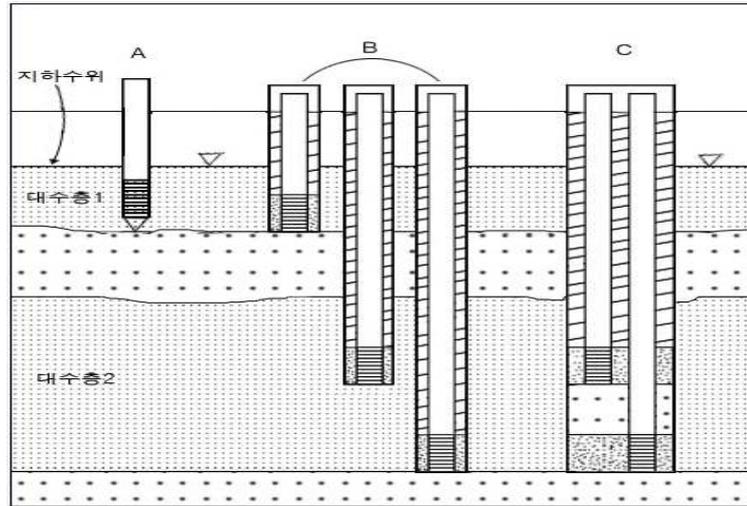


그림 2 여러 대수층 존재 지역에서의 관측정 설치의 예

#### (4) 관측정 설치

- 얇은 대수층에 오염물질이 존재하는 경우 그 이하의 깊이까지 관측정을 설치할 경우 오염물질이 하부 대수층으로 이동할 수 있으므로 설치에 주의를 기울인다.
- 정확한 수위 조사와 대수층 사이의 오염물질 이동 방지를 위해 한 개의 시추공에 한 개의 관측정을 설치하는 것이 좋다.
- 한 개의 시추공에 여러 개의 관측정을 설치하는 경우 적당한 시추공 직경과 외부 케이싱 직경을 선택하고 설치에 주의를 기울여야 성공적인 설치가 가능하다. 2개의 5cm 내부 케이싱을 설치할 경우 시추공 직경은 15~20cm가 적합하다. 이러한 방법은 기술적으로 시공이 가능하지만 대수층의 오염을 유발할 수 있으므로 가급적 사용하지 않도록 한다.
- 초기 지하수위 데이터 간 차이 분석 등 데이터가 분석된 후 상세한 지하수위 평가가 필요한지 판단하여 필요시 추가적으로 관측정을 설치한다.
- 지하수 흐름 방향의 평가가 필요한 대수층이 하나 이상 존재하는 조사지역이 많으므로 관측정 설치에 주의한다.

#### 3) 지하수위 측정 장비

조사지역의 지하수위를 고려해 수심이 깊은 경우에도 측정 가능한 장비를 준비한다. 교차오염 방지를 위하여 한번 측정한 후 다른 지점을 측정하기 전 장비를 세척한다.

##### (1) 수동 측정 장비 : 인력에 의해 측정

- 줄자 : 추가 달린 스틸제 또는 천으로 된 줄자

- 측정기준점에서 지하수면까지의 거리 측정은 줄자를 수중에 내려 관측정의 기준점에서부터 내려간 전체 길이를 읽은 후 끌어 올려 젖은 부분을 빼서 결정
- 측정값이 정확한 방법으로 흐름의 변동이 별로 없는 곳이나 깊은 곳에서 사용이 권장 됨

○ plopper 등 부저가 달린 지하수위 측정기

- 물과 접촉할 때 관정 내에서 소리가 나는 것을 인지하여 그 때의 수위 값을 읽는 방식

○ 전기적 측정 방법

- 흐름의 변화가 크고 수심에 유동이 있는 경우 권장됨

○ deeper 등

(2) 자동 측정 장비

- 압력식, 부력식, 플로트식, 레이저식, 초음파식 장비가 있음

4) 지하수위 평가 방법

- 관측정의 위치를 기본도(base map)에 표시한 후 지하수면까지의 측정값을 이용해 지하수위로 환산한 뒤 환산된 지하수위 즉, 고도 값을 기본도에 표시한 후 지하수위가 같은 지점을 연결한 선을 표기한 지도를 만든다.
- 공간적인 지하수위 분포를 파악하기 위하여 실내조사에서 수집된 자료와 현장에서 조사된 각 지점의 지하수위 자료를 정리하여 지하수위 등고선도를 작성한다.
- 지하수위 등고선도 작성 시에는 관측지점끼리 연결한 직선상에 지하수면 표고의 차이를 거리를 기초로 비례 배분한 등고선을 교차시킨다.
- 지하수위 등고선도 토대로 유선망(Flow nets)을 작성하여 지하수체의 연속 상황이나 흐름의 패턴을 파악할 수 있는데 이를 통해 오염물질의 주 이동방향을 알 수 있다.

(1) 간단한 지하수 흐름 방향 결정 예

지하수위 측정에 따른 결과의 예를 다음 표에 나타내었다. 규모가 작고 지질학적 구조가 단순한 지역에서 조사를 실시하여 아래 표 3과 같이 지하수위가 측정되었다고 가정하자. 다음의 표 3를 보면 1번 관측정의 지하수면 깊이가 2번 관측정보다 짧아 지하수위가 더 높은 것으로 보이지만 기준점의 고도를 감안하여 보정하면 2번 관측정의 지하수위가 더 높게 나타나므로 2번 관측정이 지하수 흐름의 상류 쪽이며 1번 관측정이 지하수 흐름의 하류 쪽이다.

표 3 수동 지하수위 측정 결과

관측정	기준점(TOC) 고도(A) (EL. m)	지하수면 깊이(B) ( <sup>o</sup> TOC~지하수면, m)	지하수위(A-B) (EL. m)
1	34.520	2.564	31.956
2	36.125	3.502	32.623

※ TOC : top of casing(기준점)

(2) 지하수 흐름 방향의 결정

- 지하수 흐름은 지하수위가 높은 지역에서 낮은 지역으로 형성되므로 오염 지역과 주변 지역의 지하수 구배(hydraulic gradient)를 판단하여 지하수 흐름의 상류와 하류를 결정한다.
- 지하수는 지하수위 등고선에 직교하는 방향, 즉 수리구배가 최대인 방향으로 흐른다. 따라서 지하수위 등고선도에서 능선 형태로 표현되는 부분은 지하수가 주변의 낮은 부분으로 발산되는 것을 의미하며, 반대로 골짜기 모양을 나타내는 부분은 주변의 지하수가 집중되는 것을 의미한다. 다음 <그림 3>은 지하수위에 따른 지하수 흐름 방향을 나타낸 것이다.

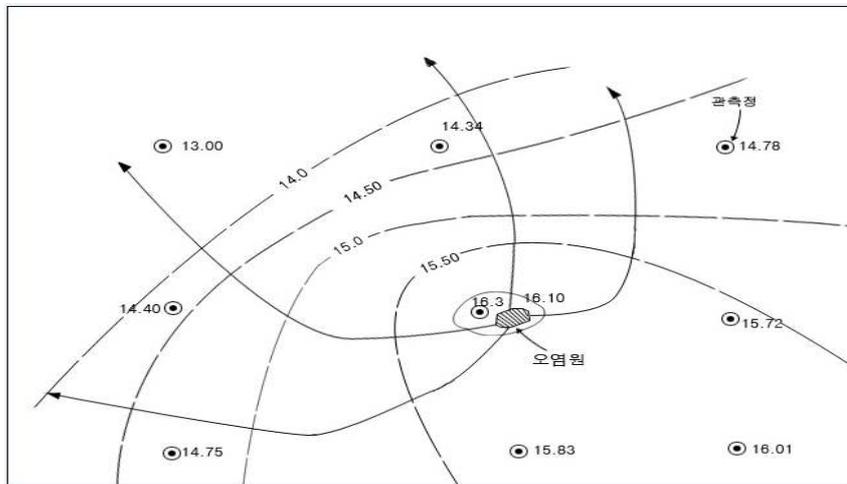


그림 3 지하수위에 따른 지하수 흐름 방향

- 지하수 흐름 방향을 나타내는 지하수 흐름선은 지하수위 등고선과 수직을 이루며 형성된다. 이와 같이 지하수 흐름에 대한 단순한 접근은 지질 매체가 동일하고, 주 흐름이 수평 방향이며, 동일 대수층에 관측정의 스크린 구간이 존재할 때에 적합한 방식이다. 그러나 지하의 오염 때 위치를 찾아내고 오염물질의 이동 경로 예측이 중요해지고 있어 수직 방향으로의 흐름을 나타내는 것이 필요하게 되었다.

○ 지하수의 함양과 배출이 일어나는 경우 함양 지역에서는 지하수가 아래쪽으로 흐르며, 배출 지역에서는 지하수가 위쪽으로 흐른다. 그리고 두 지역 사이에서는 거의 수평적인 흐름이 생긴다. 지질 매체가 다양한 경우 수리전도도 등의 차이에 의해 지하수 흐름이 복잡해지므로 정확한 조사가 필요할 경우 세부적인 지질 특성을 더 고려해야 한다. 다음 <그림 4>는 지하수의 함양 및 배출 지역에서의 지하수 흐름 예이다. B 관 측정 부근에서 함양이 이루어지고 있으며 A 관측정의 좌측에서 배출이 이루어지고 있다.

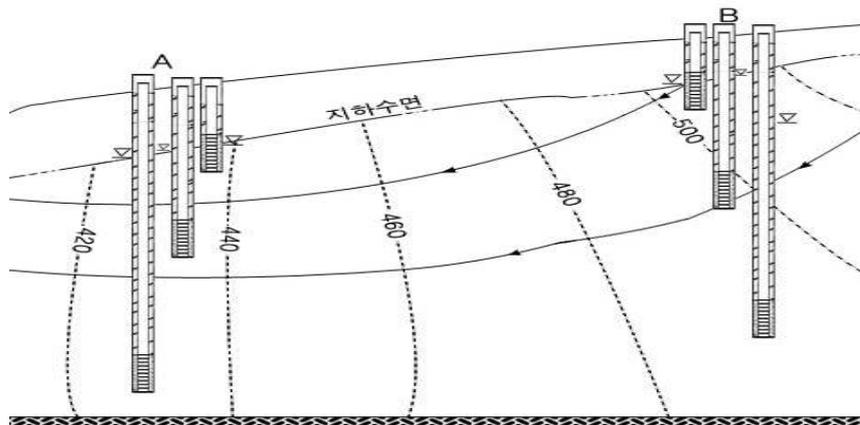


그림 4 지하수 함양 및 배출 지역에서의 지하수 흐름 방향

○ 지하수위는 지형도의 등고선과 항상 일치하지는 않지만 유사하게 형성되므로 이를 참고한다.

#### 5) 지하수위 측정 시 주의 사항

- 현장에서 가능한 많은 지하수위 자료를 수집한다.
- 측정 전 일시적으로 고인물인지의 여부를 확인한다.
- 가급적 단시간 내 관측을 완료하여야 하며 만일 기간이 길어지는 경우에는 한 지점으로부터 순서에 따라 조사 범위를 넓혀가는 방법을 취하여 적어도 인접한 관측 지점 사이에는 수위 측정 시간 간격이 커지지 않도록 하여야 한다.
- 지하수위는 계절적인 함양률, 기압, 조석, 인위적 양수, 강우 등의 변화에 따라 지속적으로 변하므로, 이러한 변화가 예상되는 경우 재측정하거나 지하수위 자동측정 장비를 이용하여 장기적으로 지하수위 변동을 관측한다.
- 장기적인 지하수위 관측이 필요할 경우 만약 지하수위의 유동이 계절적 요인에 의해서만 발생한다면 1년에 4번 수위를 측정하는 것이 필요하지만 조류, 하천유량, 지하수 사용 등 다른 요인에 의해 더 빈번하게 변동이 생긴다면 이러한 변동에 따라 지하수

의 흐름이 어떻게 바뀌는지를 판단하여 측정 빈도를 정해야 하는데 이러한 변동 경향은 각각의 대수층 특성에 따라 다르게 나타날 수 있다.

- 고도 조사와 지하수위 측정의 정확성은 지하수면의 경사나 관측정 사이의 거리에 달려있는데 지표면의 경사가 완만하거나 관측정이 서로 가까이 있는 경우 더 정확한 측정이 요구된다. 일반적으로 기준점의 고도와 지하수위는  $\pm 3\text{cm} \sim \pm 0.3\text{cm}$ 의 정확성을 가지고 측정되어야 하는데 가급적 mm 단위까지 측정하여 정확한 수위측정이 되도록 한다.
- 지엽적 지하수 함양은 지역적인 지하수 구배를 바꾸어 주된 지하수 흐름과 반대되는 지하수 흐름과 오염물질 이동이 생길 수 있으므로 이러한 경우가 발생할 수 있는지 확인한다. 지하수위 변동을 야기하는 요인은 다음 표 4와 같다.

표 4 지하수위 변동을 야기하는 요인

구 분	대수층 종류		발생원인		영 향 기 간				기후의 영향
	자유면	피압	자연적	인위적	단기	일간	계절	장기	
지하수 함양(지하수면으로의 침투)	✓		✓				✓		✓
증발산 작용 및 식물의 소비	✓		✓			✓			✓
하천 수위 변화	✓		✓				✓		✓
조석 간만	✓	✓	✓			✓			
대기압 변화	✓	✓	✓			✓			✓
외부 하중		✓		✓	✓				
지진	✓	✓	✓		✓				
지하수 채수	✓	✓		✓				✓	
인공 함양	심정주입	✓		✓				✓	
	지표살수	✓		✓				✓	
농업용 관개/배수	✓			✓				✓	✓
사면, 터널 등에서의 배수 처리	✓			✓				✓	

※ 출처 : 지하수업무수행지침(2006, 국토해양부)

#### 6) 국내 지하수위 현황

- 조사지역의 지하수위 현황은 일반적인 지하수위 분포와 다를 수 있으므로 측정에 주의
- 지하수위는 지형 표고와 밀접한 연관성을 가지며 우리나라의 지하수면 깊이는 대부분 5~10m 이내에 분포

- 암반층지하수 : 지하수 심도 (-1.36~69.64m), 평균 6.68m, 수위 변화 폭 5.75m
- 충적층지하수 : 지하수 심도 (-0.53~33.15m), 평균 4.86m, 수위 변화 폭 3.51m
- o 유역/대권역별 지하수면 깊이 및 수위 변동 폭은 다음 표 5를 참고

표 5 유역/대권역별 지하수면 깊이 및 수위 변동 폭

유역	대권역	구분	지하수 심도(m)			지하수 수위 변동 폭(m)		
			최소값	최대값	평균	최소값	최대값	평균
전국	-	암반	-1.36	69.64	6.68	0.69	51.15	5.75
		충적	-0.53	33.15	4.86	0.78	15.04	3.51
한강	한강	암반	-0.83	48.00	7.63	0.76	15.74	4.78
		충적	0.69	33.15	5.37	1.33	7.47	3.03
낙동강	낙동강	암반	-1.36	44.52	5.78	0.88	40.80	6.71
		충적	-0.53	15.99	4.60	1.20	10.25	3.52
금강	금강	암반	0.57	46.51	6.89	1.08	42.97	5.58
		충적	0.2	18.07	6.27	1.05	11.75	3.89
섬진강	섬진강	암반	1.14	12.00	4.61	1.17	6.12	3.38
		충적	1.17	8.87	4.11	1.15	5.34	3.15
영산강	영산강	암반	1.07	57.73	6.67	0.92	45.89	7.60
		충적	0.52	7.84	3.97	0.88	5.04	3.07
서해(북)	한강서해	암반	1.95	10.92	7.92	1.48	7.57	3.67
		충적	1.97	8.45	6.55	0.99	2.72	2.16
	안성천	암반	2.07	7.35	3.71	1.45	5.17	3.95
		충적	1.87	5.20	3.69	1.96	3.16	2.95
	삼교천	암반	2.00	20.19	6.71	1.07	7.12	3.65
		충적	1.30	7.82	4.49	1.13	4.74	3.05
금강서해	암반	0.96	19.18	7.13	0.73	9.66	5.55	
	충적	1.04	8.38	2.51	0.78	0.78	0.78	
서해(남)	만경·동진	암반	0.10	18.80	5.13	0.94	14.52	5.19
		충적	0.57	11.52	5.58	1.51	7.02	4.05
	영산강서해	암반	1.18	18.98	4.92	1.43	17.80	8.56
		충적	1.28	8.77	2.61	1.66	5.98	2.24
동해(북)	한강동해	암반	1.56	9.90	4.84	1.06	6.04	3.47
		충적	1.49	9.83	4.75	2.30	5.82	3.85
동해(남)	낙동강동해	암반	-0.23	28.00	5.96	1.81	20.43	9.03
		충적	-0.06	11.04	4.09	1.23	9.90	6.82
	형산강	암반	2.19	11.03	4.82	1.19	8.64	5.82
		충적	0.37	69.64	23.80	0.69	51.15	24.04
	태화강	암반	0.60	6.24	3.80	3.35	4.07	3.73
		충적	1.27	39.41	19.31	1.17	8.62	4.89
회야·수영	암반	1.24	2.45	2.25	1.21	1.21	1.21	
	충적	1.48	15.11	7.97	4.35	10.87	8.47	
남해(서)	영산강남해	암반	1.38	5.36	2.97	2.81	3.98	3.39
		충적	1.23	6.50	2.99	2.52	5.27	3.88
	탐진강	암반	1.27	21.13	5.59	1.17	15.03	4.94
		충적	2.47	18.34	5.01	2.76	15.04	6.38
남해(동)	낙동강남해	암반	0.20	13.37	3.93	2.01	8.67	4.57
		충적	1.78	6.89	3.45	2.16	5.11	3.64

주) 음수의 지하수 심도는 지표면보다 상승한 지하수 수위 즉, 자분하는 정도를 가리킴  
(심도 = 지표면 표고 - 지하수면 표고)

※ 출처 : 지하수관리 기본계획(2007, 국토해양부)

### 2.2.3.E 3차원 오염분포 조사

지하수 오염은 3차원으로 분포하므로 정확한 오염범위 및 오염량 결정이 필요한 경우 단계적 조사를 통해 3차원 오염 조사를 실시하여야 한다. 지하수 경사 방향으로 조사를 실시하고, 오염이 확인된 지역을 중심으로 주변부와 심도별 조사 즉, 3차원 조사를 실시한다.

3차원 조사가 가능한 시료 채취를 위해 관측정을 적합한 위치에 설치하고 다음 단계에 따라 시료를 채취하여 분석을 실시한다.

조사 기간이 촉박하거나 다른 사정에 따라 조사 단계의 조정이 가능하나 각 단계별로 오염범위가 확정되지 않은 경우에는 시료채취 및 분석과 해석 과정을 반복하여야 한다.

- 1) 1차 시료채취 및 분석 : 수리·지질학적 구배에 따라 시료를 채취 및 분석하여 구배방향의 1차원 오염범위 결정
- 2) 2차 시료채취 및 분석 : 수리·지질학적 구배의 연직 방향의 시료를 채취 및 분석하여 평면상의 2차원 오염범위 결정
- 3) 3차 시료채취 및 분석 : 2차원 오염 범위에서 깊이별 시료를 채취 및 분석하여 3차원 오염범위 결정

### 2.2.3.F 오염이 진행 중인 경우의 조치

오염조사 중 오염이 진행되어 시급하게 조치가 필요한 경우 관련자 및 기관과의 협의를 통해 조치 방법을 결정하고 조치를 시행한다.

조치 방법으로는 오염방지막 설치 등이 있으며, 이미 오염된 지역의 오염물질 확산을 막고, 정화계획을 마련하기 위해서는 주기적으로 수질검사를 수행해야 한다.

### 2.2.3.G 지하수 관측정 설치 및 관리

지하수 관측정은 수리지질학적 특성 규명, 오염 현황 파악 등을 위해 설치한다. 지하수 수질 조사는 지표수보다 훨씬 많은 비용이 소요되는데 이는 시료채취를 위해서는 관측정 설치가 필요하기 때문이다. 하지만 관측정 설치를 통해 수리지질학적 특성 및 오염 현황에 대한 결정적인 데이터 확보가 가능하므로 오염 현상을 눈으로 확인하기 어려운 지하수 오염 조사에 필수적인 방법이다.

관측정은 다양한 목적으로 설치되고 운영되는데 여러 가지 상황을 고려하여 적절하게 설치 및 운영되어야 한다.

‘관측정(monitoring well)’은 모니터링을 목적으로 설치되는 관정으로 ‘관정(well)’이 더 포괄적인 용어이다. 오염조사를 위한 시료의 채취가 반드시 관측정에서만 행해지는 것은 아니며, 다양한 용도로 설치된 관정에서도 행해지고 있다.

본 가이드라인에서는 오염물질 확인을 위한 관측정에 관한 내용이 주요하므로 ‘관측정’이라는 용어를 주로 사용하였으며 포괄적인 의미 사용이 필요한 경우 관정이라는 용어도 함께 사용하였다.

### 1) 관측정의 설치 목적

- 부지 특성규명 등 부지 평가
- 오염물질 확인
  - 오염물질 누출지역, 과거 오염사고 지역, 과거 폐기물 매립 지역 등 오염원 지역, 지하수 관련 민원 발생 지역, 토양오염이 발견된 지역 등에 관측정 설치
- 정화 및 정화 평가
- 측정망(compliance monitoring)

### 2) 관측정 설치 전 파악 사항

#### (1) 수직 대수층의 특성 파악

지하수층은 지층의 고결도에 따라 충적대수층 지하수와 암반대수층 지하수로 구분된다.

#### ① 충적대수층

- 대수층 두께 : 2~30m 정도
- 대수층의 특성상 지표수의 함양 등 지하수 함양조건이 암반대수층에 비하여 양호한 반면, 지표수와 연결되어 있어 하천의 수량변화와 수질오염에 민감

#### ② 암반대수층

- 지하수의 산출성은 최초 암석이 형성될 당시에 만들어진 1차공극과 그 후 지각변동에 의하여 형성된 절리, 단층, 파쇄대 등으로 이루어진 2차공극의 발달 정도에 따라 결정됨

#### <대수층 특성 파악 프로그램>

대수층 특성 파악을 위해서는 대수층 특성 파악 프로그램을 사용할 수 있다.

- 수직 대수층 특성파악 프로그램을 통해 수리전도도, 수직 수평 흐름 방향의 결정, 암석이나 지질의 분포, 오염물질의 수직 수평적 분포 등의 특성파악이 가능
- 기술적인 사항과 관측정의 비용효과적인 배치에 관한 사항을 제공

### 3) 관측정 설치 일반사항

- 관측전용으로 사용되는 관측정의 구경은 관측기기의 설치와 지하수 시료 채취 장비의 이용이 가능한 크기여야 하며, 대수층의 수리특성 파악 등 다른 목적이 있을 경우에는 목적을 만족시킬 수 있는 직경이어야 함
- 수질 급변 지역 등 특수한 목적의 지하수 관측 시에는 관측 자료의 정확성과 신뢰도가 매우 중요하므로 관측정 이력 사항의 명확한 파악을 위해 신규로 굴착 설치하는 것이 바람직함
- 대수층의 오염이나 변성을 최소화하는 방법 선택(예를 들면 개방 면적 및 길이 및 건설 방법 결정)
- 관측정 설치를 위한 굴착 시 가능한 한 그리스 제거제, 윤활유, 진흙, 기름 및 벤토나이트, 특히 유기화합물의 사용을 피해야 함
- 스크린 주위 자갈층을 밀봉하여 대수층 순환에 영향을 미치지 않도록 함
- 지표수에 의해 관측정이 오염되지 않도록 설치 시 각별히 주의
- 대수층이 깊이별로 여러 개 형성되어 있는 경우 서로 다른 대수층 간의 교차오염이 발생하지 않도록 각별히 주의
- 오염조사 시 관측정을 잘못 설치할 경우 비중이 물보다 무거운 DNAPLs 오염물질에 의해 광범위한 지역이 오염될 수 있으므로 관측정의 설치 깊이 등을 신중하게 검토하여 설치해야 함

### 4) 관측정 설치 위치 및 개수

- 관측정은 지하수 흐름 방향과 오염 지역의 위치를 고려하여 설치하는데 기본적으로 오염원의 상류와 하류에 설치하여 오염 전의 수질 상태(배경 농도)를 확인하고 오염으로 인한 영향을 확인한다.
- 관측정은 지하수의 오염탐색 및 오염물의 거동 파악을 위하여 지하수의 유동방향을 고려하여 수리경사에 따라 점진적으로 위치되어야 하는데, 지하수 구배의 상부와 하부에 모니터링 지점이 반드시 위치해야 함
- 수리지질학적으로 지하수 오염물질의 주변 확산이 가능한 지역이나, 주변지역 여건(산악, 농지, 해안가 등)에 따라 시료채취 지점을 탄력적으로 조정하여 오염물질의 확산에 따른 범위를 추정할 수 있도록 선정함
- 부지 조사 결과 지질 구조가 복잡하거나 넓은 범위의 물리적 화학적 성질을 가지는 오염 물질이 존재하는 것으로 확인된 경우, 적합한 오염 분포의 특성 규명을 위해 보다 많은 모니터링 지점이 설치되어야 함

- 오염 물질 영향에 대한 조기 경보 제공을 목적으로 시료를 채취할 경우, 오염 지역 안 뿐만 아니라 오염의 영향을 받는 수용체(receptor) 사이에도 관측정이 설치되어야 함
- 오염 지역 상류와 하류의 시료 채취 지점이 상·하부 조건에 부합됨을 입증할 수 있어야 하며(지하수위 평가 등), 정화의 실적과 효과를 측정할 수 있는 지점에 설치해야 함
- 관측지점의 수는 많을수록 좋으나 소요 인력, 시간, 비용, 능률 등을 고려하여 결정하여야 하며 3차원적 오염 조사가 가능한 위치에 관측정을 설치해야 함
- 관측정 설치시는 스크린과 필터팩의 길이, 위치 등에 대한 고려가 필요
- 오염물질의 특성상 확산이 빠르거나, 지질특성상 수리전도도가 높은 경우에는 넓은 범위의 오염 확인이 가능하도록 관측정을 배치
- 가능하면 오염원의 바로 밑에 관측정을 설치하여 지하수 수질을 조사하는 것이 좋으며, 적어도 하나의 시료는 지하수면 근처에서 시료를 채취하여 물보다 밀도가 낮은 오염물질을 탐지함
- 일정 간격으로 관측정을 설치할 경우 오염 띠의 확대 면적 규명이 가능
- 넓은 지역에서의 관측정에 의한 모니터링 시 관측정의 위치가 부적절한 경우 잘못된 수질 측정 결과를 가져오기 쉬우므로 모니터링 관측정은 오염을 탐색할 수 있도록 오염지역 가까이에 설치하여야 함

(1) 지하수 흐름 방향 인식 여부에 따른 설치 지점의 결정

다음의 방법은 오염 영향 확인을 위한 최소한의 방법이며 오염량 산정 등을 위해서는 추가적인 조사가 필요하다. 지하수 흐름의 방향을 알고 있을 경우와 모르고 있을 경우의 조사 방법은 다음과 같으며 아래 <그림 5>를 참고한다.

① 지하수 흐름 방향을 알고 있을 경우

가) 오염원 상류 1지점

나) 오염원 하류 1지점(예상 오염원이 여럿인 경우 오염원 하류 각 1지점)

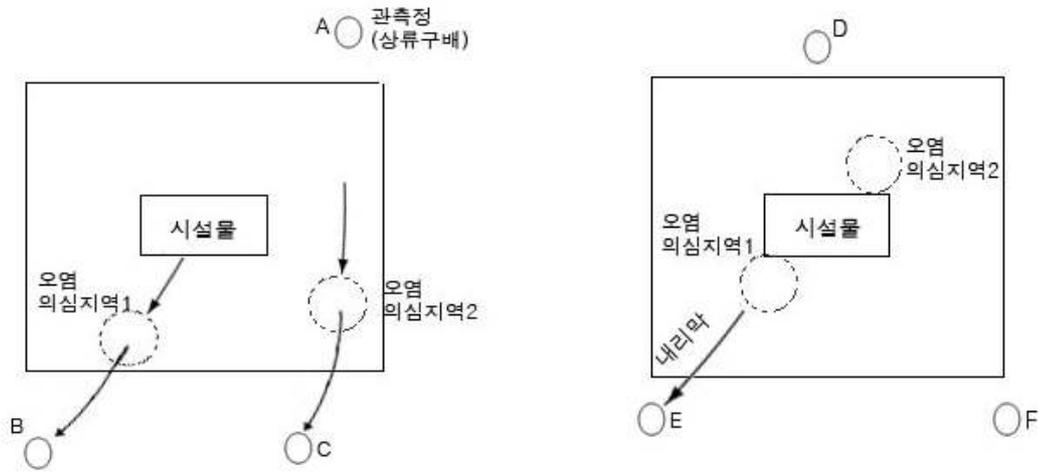
② 지하수 흐름 방향을 모를 경우(가급적 지하수위 평가를 통해 흐름 방향을 확인하도록 함)

가) 최소한 3개의 관측정 설치

- 조사 지역 주변에 등변삼각형 형태로 관측정(또는 piezometer) 설치

- 3개의 관측정 중 하나는 지형학적으로 가장 오염이 심할 것으로 예상되는 지역의 내리막 쪽에 위치시킴

나) 정삼각형 형태의 조사를 통해 지하수 흐름 방향을 결정한 후 각각의 오염원 하류에 하나씩의 관측정 설치



- a. 지하수 흐름 방향을 알고 있을 경우      b. 지하수 흐름 방향을 알지 못할 경우

그림 5 지하수 흐름의 방향을 알고 있을 경우와 모르고 있을 경우의 조사

#### 4) 관측정 및 스크린의 설치

- 조사하고자 하는 깊이에 스크린이 설치될 수 있도록 관측정의 설치 깊이 결정
- 대수층 발달 특성에 따라 지역별로 다른 깊이의 관측정 설치
  - 오염된 대수층(충적층대수층 또는 암반층대수층)의 특성을 파악할 수 있도록 설치
- 오염물질 특성 및 현장 여건에 따라 설치 깊이를 정하되 일반적으로 충적층 관측정은 지하수위 변화를 고려하여 지하수위보다 낮게 설치되도록 하며, 암반층 관측정은 풍화대 하부의 암반대수층에 설치함
- 필요한 경우 1개 관측지점에 2개 이상의 관측정 설치(암반관측정, 충적관측정, 심도별 관측정 등)

##### (1) 오염 물질 특성에 따른 심도 결정

- 물보다 가벼운 비수용성액체(LNAPLs ; Benzene, Toluene, Xylene 등)가 존재할 것으로 예상되는 경우 관측정의 스크린 상단이 지하수면 보다 위쪽으로 가도록 설치해야 한다. 스크린 상단이 지하수면 보다 0.6m 위쪽으로 가며, 나머지 스크린 구간은 지하수면 아래로 설치(그림 6의 관정 B)
- 물보다 무거운 비수용성액체(DNAPLs ; TCE, PCE, vinyl chloride)가 존재하는 것으로 예상되면 관측정 스크린의 바닥이 대수층의 바닥에 설치되어야 함 (그림 6의 관정 A)

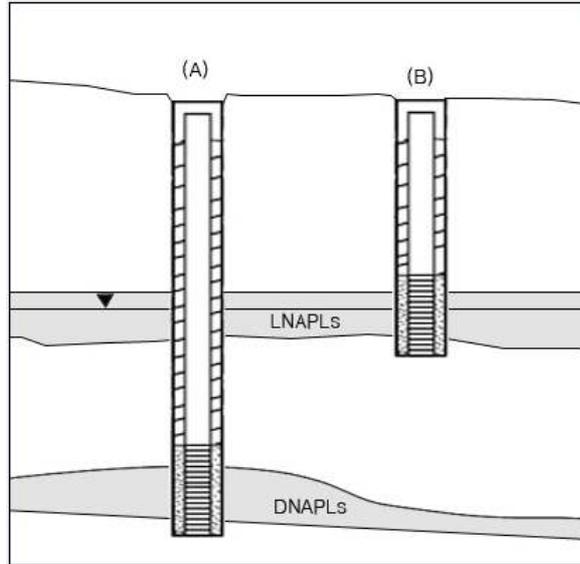
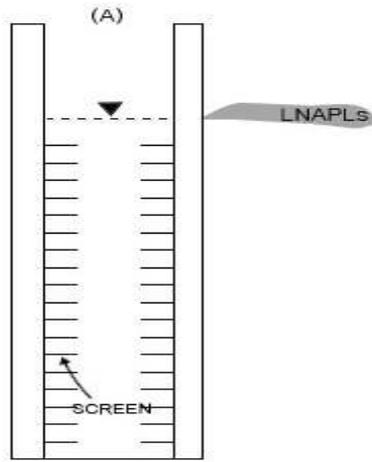


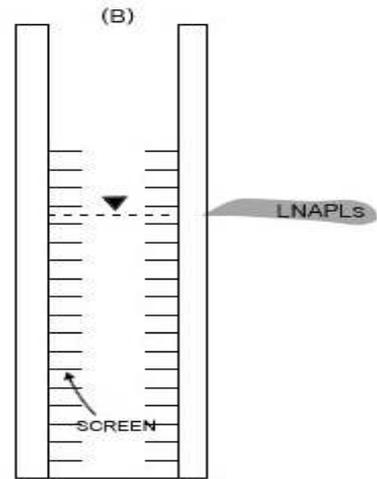
그림 6 오염물질의 특성에 따른 관측정 설치 방법

(2) 스크린 형태 및 위치

- 관측정내로 LNAPLs 형태의 오염물질 유입이 가능하도록 스크린 구간을 설정
- 그림 7A의 경우 지하수위가 스크린 구간의 상단 끝보다 높아 LNAPL 형태의 오염물질이 나공 구간에 걸쳐있으므로 시료채취를 통한 오염평가 시 오염도가 적게 평가될 수 있다. 따라서 그림 7B와 같이 오염물질이 스크린 구간을 통해 관측정에 유입될 수 있도록 해 대표성 있는 수질을 측정한다. 이러한 문제는 스크린 구간 설정 시 주변 지하수 관측망이나 기존 관정의 수위 자료와 지하수위 변동 폭을 검토하여 시공함으로서 해결할 수 있음



(그림 7A)



(그림 7B)

그림 7 지하수위와 스크린 구간에 따른 시료채취

#### 6) 관측정의 관리 및 상태 평가

- 오랜 기간 모니터링을 하는 경우 특히 필요
- 관측정이 부식된 경우 관측정 케이싱의 파손이나 누수 발생의 원인이 되어 잘못된 측정 결과를 얻을 수 있음
- 부식, 퇴적물 침적, 바이오파우링은 스크린을 막아 지하수 화학변화를 일으키고, 수위 변화에 둔감하게 함
- 대표 수질의 정확한 채취를 위해서는 관정의 재개발이나 교체가 필요할 수 있음
- 부적절하게 건설된 관측정 및 이의 부적절한 유지 관리는 시험결과의 오차를 유발하므로 적합한 설치 및 운영이 필요

##### (1) 관측정 내부의 일반적인 상태

- 스크린이나 필터팩의 물은 일반적으로 관정의 안팎을 통과할 수 있으므로 자연 상태의 일정한 흐름을 유지함
- 스크린 상부의 물은 상대적으로 고립되어 정체된 상태로 물리화학적으로 변하기 쉽고 지표나 건설 중에 유입된 이물질을 포함할 수 있어 시료 데이터의 대표성을 잃게 됨

##### (2) 기존 관측정의 관리 및 조치 사항(시료 채취 전 확인 필요)

- 관측정 내부 상태변화
  - 관측정 부착물 상태
- 관측정 총 심도 변화(관측정 바닥 상승 시)

- 에어써징 실시 : 관측정 장기 사용 시 토사 등이 가라 앉아 공저가 상승할 경우 대수층 유입통로가 막혀 지하수의 원활한 흐름이 방해되므로 토사를 제거하여 원활한 지하수 흐름을 유지하기 위해 수행

### (3) 관측정의 총 깊이 측정

관측정의 상태 파악을 위해 관측정의 총 깊이를 측정한다.

- 관측정 바닥까지 깊이를 측정하여 케이싱이 온전한지 확인하고 스크린 내부의 침적(siltation) 발생 여부를 확인한다.
  - 설치시의 관측정 깊이보다 낮게 측정되는 경우 침적이 발생되었을 수 있다.
- 측정값을 사용하여 관측정 안의 정체된 물의 양이나 발생 가능한 침전물 양의 계산이 가능하다.
- 깊이 측정 장비가 관측정의 바닥을 칠 경우 바닥의 퇴적물이 교란되어 탁도가 증가하여 시료채취 결과에 영향을 줄 수 있으므로 주의한다.
- 최소 1년에 한번 관측정 총 깊이를 측정하며, 가능하면 수질 또는 지하수면 깊이 측정 시 매회 측정한다.
- 관측정의 총 깊이 측정은 시료채취가 완료된 후 실시해야 하며, 시료채취 전에 측정할 경우 측정 후부터 시료채취 사이에 충분한 시간(24시간 이상)을 확보해야 한다.

### (4) 개량 필요성 판단

- 과거 시료채취 시점부터 계획된 시료채취 시점까지 1년이 넘는다면 관측정의 개량 여부 고려 필요
- 설치 당시의 관측정 깊이와 현재의 측정 깊이를 비교할 때 퇴적물 침적이나 스크린 막힘의 증거 발견 시 시료채취 전에 개량이 필요함

### (5) 관측정의 개량

#### ① 일반사항

- 관측정 개량의 목적은 지하수 시료 및 수리지질학적 시험 결과가 관측정 설치 지점 주변 지하수의 대표성을 가질 수 있도록 관측정 내부의 지하수 특성을 최적화 하는데 있음
- 시료 채취 사이의 시간차가 길 경우 시료 채취 전 수행되어야 함
- 관정 개량의 목적과 정도는 조사 목적과 모니터링 장비에 달려 있음
- 관정을 개량하는 동안 수위 감소와 회복율에 주의. 이러한 정보는 관정의 최적의 상태 관리를 위한 시료 채취와 정확에 필요한 최적의 유량을 결정하는 데에 이용될 수 있음

- 개량된 관측정은 회복에 시간이 필요하므로 시료채취 몇 주 전에는 완료하도록 하는데 이것은 이전 시료 채취 시 높은 탁도를 나타낸 경우 특히 중요함
- 관측정의 개량 이후 안정화에 걸리는 시간은 지역 특이적인 지질특성에 달려있으므로 시료채취 계획 수립 시 지질 특성을 고려해야 함
- 정확한 수질 분석 결과를 얻기 위해서 관측정이 설치된 후 적어도 24시간이 지난 후에 관측정 개량 실시
- 포화대에 모니터링 장치를 설치한 후 지하수를 채취하기 전 세정과 개량이 선행되어야 함
- 개량은 펌프 운동을 통해 이루어지며, 물이 매우 깨끗하고, 수질이 안정화될 때까지 행해짐. 수질은 전기전도도, pH, 온도, 산화환원전위, 용존산소, 탁도, 오염물질특성 등의 변수 측정으로 결정됨
- 관측정 개량용 장비 중 반복적으로 사용되는 장비들은 1개 관측정의 개량 작업이 완료된 후 다른 관측정에 사용 전 반드시 교차오염 방지를 위해 세척하여야 함

## ② 관측정 개량 방법

가). 기계적 써징 및 베일링 방법(Mechanical Surging & Bailing)

(가) 써징 블록을 관측정내에 삽입하여 수동 또는 드릴(drill rig)을 사용하여 관측정 내부의 이물질 청소

(나) 써징 블록의 관측정 내 삽입 전 지하수위 및 관측정 심도 측정

(다) 유공관이 시작되는 상부에서부터 써징 작업을 시작한 다음 베일러 또는 펌프를 이용하여 청소된 이물질 및 지하수를 양수

(라) 써징 작업 구간을 상부에서 하부 쪽으로 진행하면서 지속적으로 반복 수행

(마) 양수된 지하수의 탁도가 개선될 때 까지 지속적으로 양수 작업을 반복하여야 하며, 일반적으로 30분 이상 실시하여야 함

나) 써징 펌프 방법(Surge Pumping)

(가) 써징 펌프를 관측정내에 삽입하여 지하수 및 이물질 양수

(나) 써징 펌프를 관측정 내 삽입 전 지하수위 및 관측정 심도 측정

(다) 써징 펌프를 이용하여 유공관 하부에서부터 최대 양수량으로 양수를 실시하여 상부 방향으로 점차적으로 진행

(라) 써징 펌프 구간을 하부에서 상부 쪽으로 진행하면서 지속적으로 반복 수행

(마) 양수된 지하수의 탁도가 개선될 때까지 지속적으로 양수 작업을 반복하여야 하며, 일반적으로 30분 이상 실시

(6) 관측정 기록 사항

- 관측정 개량 작업과 관련하여 소요시간, 관측정 번호 및 개량 방법, 개량 날짜 등을 아래와 같이 기록하여야 함
    - 일반사항 : 관측정 번호, 위치, 개량 방법, 날짜 및 참여자
    - 개량부피 : 개량 전후의 지하수위 및 관측정 깊이 변화, 양수량, 개량 전후의 지하수 색깔 및 탁도 변화 등
    - 현장 여건에 따라 지하수 수질 지시인자(온도, pH, EC, 용존산소량, 탁도 등)의 측정 결과 기록
  - 관측정을 여러 개 설치할 경우 관측정 코드를 부여하여 구분 관리하며 각 관정 케이싱에 명확하게 작성된 색인표를 부착
  - 관측정의 목적에 따라 다음의 사항을 기록 관리
    - 조사지점번호, 위치, 심도구분, 오염원별 표시기호
    - 좌표 : 지도상에 위도(X), 경도(Y)좌표 기재  
(예 : 위도(X) 37°39' 58" , 경도(Y) 126°44' 46" 등 기재)
    - 표고 또는 기준점의 고도 : 기록되어 있는 자료를 이용하거나 현장 측정 후 기재
    - 관정의 시설 및 관리상태
      - 개발연도, 시공업체, 총심도(m, 층적, 암반), 구경(mm)  
: 해당사항을 기재하고 암반층, 층적층 중 해당사항에 ○표
      - 케이싱 길이(m), 스크린구간(케이싱상단 끝 기준 아래 - m, 또는 나공)  
: 해당사항 기재. 나공은 스크린이 설치되지 않은 것임
    - 정호의 형태 : 관정, 우물, 기타( )
- <좌표 및 고도 기록 방법의 예>

  - 1:5000 지형도 등을 활용하여 좌표를 산출하여 기록
  - 지자체 GIS 시스템 등이 구축되어 있는 경우 좌표 및 표고를 추출하여 기록
  - 공개된 인터넷 지도 프로그램을 이용하여 해당 지하수 관정 지점에 대한 좌표를 기재
- 수질분석결과 중 이상결과 및 조치사항 기록
    - 기준초과 항목에 대한 사항 기록
    - 수질이상시 조치사항 기록
  - 위치도 : 1/5,000 지형도 또는 지번도를 이용
  - 사진
    - 측정망 지점과 주변지역 사진

- 측정망 지점의 시설상태와 위치를 알아볼 수 있는 사진

(측정망 주변 사진, 관정 원경 사진, 관정 근경 사진, 관정내부 사진, 같은 지점에 심도별로 여러 관측정이 있을 경우 심도별로 각각 작성 필요)

(7) 관측정 지하수 오염 방지 시설 설치

○ 오염원으로 인하여 토양 등이 함께 오염된 경우 관정을 통한 유입으로 지하수 오염이 유발될 수 있으므로 오염의 유입을 막는 설비를 반드시 설치함

(8) 관측정 세정

○ 시추공을 뚫거나 완료하는 동안 유입된 물질을 제거하기 위해 실시

○ 관정의 세정과 개량은 시료 채취 시설이 설치된 직후나 최소한 시료 채취하기 1주일 전에 행하는 것이 이상적이며, 대수층의 투과율이 낮은 경우 48시간 간격으로 두 번 행함

(9) 관측정의 원상복구

○ 관측을 종료하거나 관측정으로서의 수명이 다한 시설은 원상복구 규정에 따라 원상복구

○ 오염조사가 완료된 경우 적절한 방법에 따라 관측정 원상 복구

### 2.2.3.H 지하수 시료채취

시료채취를 통한 시료의 분석은 지하수의 오염 여부를 확실하게 확인할 수 있는 방법으로 지하수의 오염 상태를 평가하는데 있어 매우 중요한 정보를 확보할 수 있는 절차이다. 대표성 없는 시료의 분석 결과는 지하수 수질을 잘못 해석하게 하므로 정화 결정 등 올바른 의사결정을 위해서는 적절한 시료채취가 필요하다.

시료채취 계획에 따라 시료를 채취하고 취급하는 동안 지하수의 화학 변화를 최소화하고, 현장의 지하수 상태를 대표(자연 상태로 이동하는 시료)할 수 있도록 시료를 채취한다.

#### 1) 시료채취 일반사항

##### (1) 시료채취 절차

① 관정의 세척과 개량 또는 설치

② 퍼징

③ 시료의 채취

④ 시료의 보존 및 운반

⑤ 정도관리 실시

(2) 시료채취 전 확인 사항

① 관측정의 상태

- 펌핑 및 시료채취 속도가 관정의 이용 가능 수량을 초과하지 않게 하기 위함
- 관정의 수량 등 관련 정보

② 관측정까지의 접근 방법 : 용이한 접근 방법 확인

③ 관측정의 구조와 유지관리 정보

- 가) 케이싱 직경 : 펌핑과 시료채취에 적합한 장비와 기술 선택에 이용
- 나) 시추공의 직경
- 다) 케이싱 재질

④ 잠겨 있을 경우 자물쇠 번호나 열쇠

⑤ 관측정 스크린의 길이와 깊이

- 시료채취 장비 선택, 펌핑 및 시료채취에 적합한 장비의 흡입정 위치 배치에 필요

⑥ 지하수위와 지하수 흐름 방향

⑦ 오염 형태와 농도

⑧ 조사 지역 지도(이동시 장애물, 접근방법 기술)

- 이동성, 수리의 용이성, 전원, 펌핑한 물의 관리, 정의 접근성 등에 기초한 장비 선택을 위함

⑨ 과거 시료채취 정보

- 예상 오염물질의 농도나 특성을 결정하고 평가하기 위함, QA/QC용 시료채취방법 결정을 위해서도 유용한 정보임

(3) 대표성 있는 시료 채취 방법

- 신중하게 짜여진 시료채취 절차
- 조사 인력의 교육
- 원활한 정보교환

(4) 대표성 없는 시료 채취에 의한 수질시험 결과 오차 유발 원인

수질 결과에 오차를 일으키는 경우는 대표성 없는 시료를 채취하거나 대표성 있게 채취된 시료를 부적절하게 취급하는 경우로 다음과 같은 예가 있다.

- 부적절한 시료채취 절차 및 방법, 취급 과정
- 부적절한 시료채취 기술의 사용
- 부적절한 시료채취 장비, 부적절하게 보존된 장비의 사용

- 부적절한 시료 용기의 사용
- 부적절한 전처리

#### (5) 기타

- 시료채취 절차(시료채취 프로토콜)는 현장 조사 이전에 결정해야 한다.
- 시료 채취의 장소와 시료채취지점 수는 수리지질학적 상태의 복잡성과 요구되는 정보의 정도에 따라 달라지는데 보통 처음에는 낮은 시료채취빈도로 시작하여 단계적으로 늘어나간다.
- 엄격한 시료채취 절차와 이동 과정, 훈련된 인력의 사용에 의한 시료의 수질 농도 변화 요인 관리가 필요하다.

## 2) 퍼징(purging)

관측정이 대기에 노출되었을 경우 산화가 발생하며, 휘발성 화합물 배출 및 시설에서 발생된 부산물의 누적, 관측정 재질에 의한 영향 등이 발생할 수 있으므로 대표성 있는 시료의 채수를 위해 지하수 시료 채취 직전에 고여 있는 물을 제거하는 퍼징을 수행한다.

일반적으로 시료채취는 취수정 내에 고여 있는 물의 3~5배를 퍼낸 다음 행하며, 퍼내는 지하수의 양은 수질지시인자(수소이온농도와 전기전도도 등)를 연속적으로 측정하여 이 값이 평행에 도달할 때까지로 한다. 퍼징 완료 후에는 최종 수위를 측정하고 기록한다.

### (1) 퍼징의 목적

- 관측정이나 시추공으로부터 제거 되어야 하는 정체된 물의 제거
- 관측정 내에 물이 정체된 경우 주변 지하수를 대표할 수 없으므로 시료의 대표성 확보를 위해 실시함. 퍼징을 하지 않을 경우 관측정 안의 물이 시료 채취 후 수개월 동안 관정과 접촉해 머물 수도 있음

### (2) 퍼징의 절차

퍼징의 일반적인 절차는 다음과 같다.

- ① 고인 물의 제거 또는 분리 → ② 수질지시인자 측정을 통한 안정화 여부 파악(EC, pH, 온도, 산화 환원 전위 등) → ③ 대표 시료 확보

### (3) 퍼징의 종류

- 퍼징은 저유량 접근법(Low-Stress Approach)과 관정 부피 접근법(well volume approach)으로 나눌 수 있으며 각각의 특징은 다음 표 6과 같다.

표 6 저유량 퍼징과 관정부피 퍼징의 특징

저유량 퍼징 (Low-Stress Approach)	관정부피 퍼징 (Well Volume Approach)
·스크린 지역에서의 저속 펌핑은 정체된 물을 하부로 이동시키지 않음을 가정	·스크린 상부의 정체된 물을 적합하게 퍼징 하는데 기초
·시료채취시기 : 수질지시인자(pH, ORP, DO, 탁도 등) 안정화 시	·시료채취 시기 : 수질지시인자 안정화 시, 또는 결정된 관정 부피만큼 퍼징 시
·조건 : 수위 저하가 0.1m 초과하면 안됨 → 펌핑 속도 조절 필요	·조건 : 추가 교란 없을 정도의 퍼징 속도 → 보통 5cm 정의 경우 3.8L/min 이하
·펌프 위치 : 관정 내 스크린부	·사용장비 : 유량 변화 가능한 펌프
·장점 : 퍼징 또는 채취하는 물의 최소화	·퍼징 용량 별 지하수 안정화 특성 확인 시 → 펌핑 속도가 같다면 퍼징이 필요한 관정의 부피 산정 가능
·탁도에 의한 시료채취 편차 발생 → 10NTU 이하 유지	
·퍼징하는 동안 수위측정을 통해 수위 저하량 관리 → 시료채취 속도 결정	

① 저유량 퍼징(Low-Stress Approach)

가) 가정

- 펌핑을 하는 동안 수위저하가 최소화 된다면 스크린 구간에서의 저속 펌핑은 정체된 물을 하부로 이동시키지 않음

나) 특징

- 펌프 흡입구가 시료 집수부와 수평이 되게 함
- 선택된 지점의 시추공 내의 물을 채취하고 외부 지하수의 유입을 감소시키기 위하여 펌핑 유량이 적은 펌프를 이용함
- 낮은 수리전도도의 대수층에 설치되어 낮은 회복을 보이는 저투과성 관측정의 경우 관측정에서의 수위 저하를 최소화하기 위해 퍼징의 속도를 가능하면 느리게 해야 함
- 수위저하가 0.1m를 초과하면 안 됨
- 시료채취 유량을 다양하게 바꿀 수 있는 저유량 시료채취 펌프를 이용
- 관측정 안의 수위 저하에 기초하여 지하수 회복률을 대략적으로 측정하여야 함

- 퍼징을 하는 동안 수위를 규칙적(측정 시간 간격은 대수층의 수리전도도, 관정의 직경, 펌핑 속도에 따라 달라짐)으로 측정해야 하는데 퍼징을 하는 동안의 수위 저하량을 기록하여 관정의 수위저하를 최소로 하는 시료채취 속도를 정함

다) 사용 조건

- 긴 스크린 구간을 가진 경우, 많은 양의 퍼징이 어렵거나, 시추공 하부 오염 물질에 의한 영향이 의심될 경우 적절한 방법임

라) 장점

- 취급하거나 채취하는 물의 양이 적어 신속하게 퍼징 완료 가능
- 탁도 발생 및 휘발성분의 휘발을 감소시킴

② 관정부피 퍼징(Well-Volume Approach)

가) 가정

- 수질지시인자가 안정화될 때까지 스크린 상부의 정체된 물을 적합하게 제거하는데 기초하는 방법이다.

나) 퍼징 방법

- 지하수면이 스크린 상부에 있는 관측정 모니터링을 위해서는 펌프가 관측정 수의 꼭대기 근처에 있어야 하며 펌핑을 하는 동안 천천히 아래쪽으로 내려져야 한다.
- 수위 저하에 의해 펌프 안으로 공기가 들어가지 않을 정도의 깊이에 펌프를 위치시켜야 한다.
- 펌프가 관정 바닥의 침전물에 닿거나 침전물을 끌어내지 않아야 하는데 특히 탁도에 의해 영향을 받는 인자 측정을 위한 시료채취 시는 더욱 그러하다.
- 관측정 퍼징 속도는 추가적인 교란을 일으키지 않을 정도여야 하는데 일반적으로 직경 5cm 관정에서 1분에 3.8L를 넘지 않아야 한다. 시료채취를 하는 동안의 펌프 속도는 부드럽게, 정류 상태를 만들어야 하며 시료 용기에 시료를 채우는 동안 난류를 형성시키지 말아야 한다. 결과적으로 대부분의 관정에서 예상되는 유속은 1분당 3.8L 이하여야 하며, 유량으로는 500mL/min 정도이다.

다) 안정화 기준

- 수질지시인자의 안정화 정도, 또는 미리 결정된 퍼징 부피(정의 부피 기준)에 따라 안정화를 판단한다.
- 수질 지시 인자의 안정화 요구조건은 저유량 퍼징에서와 같다.
- 수질 지시 인자를 3번 측정하여 안정에 다다랐다고 평가되면 시료를 채취하며, 매 관정의 부피만큼 퍼징 할 때마다 수질지시인자 값을 기록하여 관측정 특성을 파악한다.

- 시간에 따라 더 일관성 있는 수질지시인자의 결과를 얻고자 한다면 수질 지시 인자를 측정하는 동안 일정 시간 간격에 따라 규칙적으로 관정의 일정 부피만큼을 시료채취 하는 방법이 있다.
- 만약 관측정 특성이 충분히 평가되었다면 이전의 펌핑 속도와 정해진 수의 관정 부피만큼 퍼징을 실시한다.
- 수질지시 인자의 안정화에 의한 퍼징 기준이 휘발성 유기 화합물 등 측정 항목의 안정화를 항상 보증하지는 못하므로 퍼징 시 주의가 필요하다.

(4) 퍼징 유량 산정

- 퍼징 시 필요한 유량은 관측정의 지름과 수주(water column)의 높이에 따라 다른데 일반적으로 관측정 개량 시 보다는 적고 시료 채취 시 보다는 많다.
- 퍼징에 필요한 관정의 부피, 퍼징부피, 퍼징속도의 계산은 다음과 같다.

◆ **관정부피(Well volume)= $V_w=3.14HR^2=$  \_  $m^3$**   
 $V_w$ =관정 내 지하수 부피( $m^3$ )  
 $R$ =관정의 내부 직경(m)  
 $H$ =수주의 높이(m)=관정 바닥까지의 깊이 - 지하수면까지의 깊이  
 ※ 관정부피(well volume) : 시추공(borehole)이나 케이싱 관정 내 지하수 부피

◆ **퍼징부피(purge volume)= $V_p=(n)(V_w)=$  \_  $m^3$**   
 $V_p$ =퍼징된 총 지하수의 양( $m^3$ )  
 $n$ =퍼징 된 관정부피( $V_w$ )의 배수

◆ **퍼징속도(pumping rate)= $Q=$  \_  $m^3/분$**

◆ **퍼징시간(purge time) :  $V_p/Q=$  \_ 분**  
 ※ 실질적으로 퍼징에 걸리는 시간은 현장지시 항목의 안정화 속도에 달려있음

(5) 퍼징 시 수질 안정화 판단

- 안정화 판단을 위한 수질 지시인자는 다음과 같다.
  - 전기전도도(k), pH, 용존산소, 산화환원전위, 온도, 탁도 등
- 수질 지시 인자를 일정 시간간격으로 모니터링 하여 수질 안정화 여부를 판단한다. 모니터링 간격은 튜빙의 부피, 펌핑 속도와 수위저하 속도에 따라 달라지는데 일반적으로 5분에 3회 정도이다.
- 수질 지시 인자는 최소한 튜빙 부피만큼 퍼징 한 후에 측정 하며 측정 전 공기와 접촉이 없는 방법이나 장비를 이용해야 한다.
- 수질 지시 인자들은 다음 표 7과 같이 안정적으로 3번 측정되었다면 시료채취를 시작할 수 있다.

표 7 수질지시 인자의 안정화 기준

항목	안정화기준
pH	± 0.1
비전기전도도(SEC)	± 3 %
산화환원전위(ORP)	± 10 밀리볼트
탁도	± 10 % (10NTU 이상의 경우)
용존산소	± 0.3 mg/L

- 수질 지시 인자에 pH와 온도를 포함할 것을 권장하는데 퍼징이 완결되었음을 알려주기에는 민감하지 않지만 이들 인자가 빨리 안정화 되는 경향이 있기 때문이다. 산화환원전위는 지점의 조건에 따라 달라지므로 항상 적합한 안정화 인자가 되지는 못한다.
- 측정된 수질 지시 인자의 값은 기록하여 산화 조건이나 물질의 생애와 이동에 관한 정보로 사용한다.
- 오염물 시료채취 시에는 탁도에 의해 편차가 발생하므로 탁도값은 10NTU 이하로 안정화 되어야 하며 용존산소 값이 1mg/L 이하인 경우에는 낮은 값을 잘 측정할 수 있는 방법을 선택해야 한다.
- 측정 장비의 정확성과 분해능을 파악하고 수질 지시 인자를 측정한다.

(6) 퍼징 시 주의사항

- 퍼징 지점이 대표성 있는 시료 채취에 적합한 지점이라 할지라도 과도한 퍼징은 대수층에서 오염물질의 총화를 일으킬 수 있고, 오염물질의 농도를 증가시키거나 희석시킬 수 있다.
- 오염 물질이 분리되거나 비수용성액체(LNAPLs와 DNAPLs)인 경우 퍼징은 오염물질의 재분산 또는 확산을 초래하여 잘못된 결과를 도출하거나 문제를 악화시킬 수 있으므로 이러한 경우 마이크로 퍼징을 고려한다.
- 펌프를 이용할 경우 관측정 붕괴나 관측정내 교란을 방지할 수 있는 속도로 양수한다.
- 산출률이 높은 관측정(수위가 2시간 내에 80% 이상 회복되는 관측정)은 관측정의 전체 스크린 구간에서 지하수를 양수한다.
- 퍼징 작업 중 지하수 관측정이 수위가 급격하게 떨어지는 경우 최대한 2시간 경과 후 지하수위가 80%이상 회복되면 다시 퍼징 작업을 진행한다.
- 일반적으로 시료채취 전 퍼징 시 관측정 부피의 2~3배의 양수가 필요하며, 산출률이 낮은 관측정은 최소 관측정 부피만큼의 지하수를 양수한다.
- 시간에 따른 양수량, 펌프 중단 시간, 양수율을 기록한다.

### 3) 조사항목

법적 조사 항목(지하수 수질기준 등) 및 조사가 필요 항목을 결정하고 이에 부합하는 시료채취 방법 결정한다. 오염 조사 항목에 대한 설명은 참고1 지하수 개요 및 오염 특성을 참고하며 그 외의 사항은 다음과 같다.

#### (1) 현장수질측정항목

- 지하수의 특성상 현장에서 측정해야할 기본항목임
- 수위, 온도, 수소이온농도(pH), 용존산소(DO), 산화환원전위(ORP), 전기전도도(EC)

#### (2) 주양이온/음이온

- 지하수 수질 특성을 지구화학적으로 규정하기 위해 필요한 기본항목으로 배경수질 관측을 위해서는 반드시 측정해야 할 항목임
- $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$

### 4) 시료채취 장비

#### (1) 종류

##### ① 퍼징 및 시료채취 장비

- 펌프, 베일러 등

##### ② 현장 수질측정 장비

- 현장 수질 측정 항목을 측정할 수 있는 장비

##### ③ 시료채취 용기

- 규격 : 4L 이상
- 재질 : 측정 항목에 따라 유리 또는 폴리프로필렌, 플라스틱류

### 5) 여과의 실시

(1) 비여과 시료 : 모든 유기 물질, 휘발성 물질, 변화되기 쉬운 무기 물질(아질산염, 철(II), 암모늄 등), 총유기탄소(TOC), 총유기할로겐화합물(TOX), 추적자 금속

(2) 여과 시료 : 산도·알칼리도·중금속 및 기타 무기금속의 측정을 목적으로 하는 시료는 여과 후 채취함

- 수중의 부유물의 금속량을 함께 분석하는 것이 목적일 경우 여과를 실시하지 않아야 하는데 이와 같이 분석 목적에 따라 여과 필요성을 판단함

### 6) 시료의 채취방법

- 시료채취용기에 시료를 채울 때에는 시료의 교란이 일어나지 않도록 하며, 가능한 한 신속히 공기와의 접촉시간을 짧게 하여 채취함

- 현장의 여러 요소를 고려하여 다양한 시료채취 방법 중 가장 적합한 시료채취 방법을 적용
- 시료를 채우기 전에 채취 용기를 3회 이상 채수할 지하수로 씻은 후 사용함
- 유류 또는 부유물질이 함유된 시료는 침전물 등이 부상하여 혼입되지 않도록 시료의 균질성을 유지하여 채취하여야 함
- 지하수 시료를 채취할 때는 우선적으로 휘발성 유기물질 분석용 시료를 채취하여야 하는데 휘발성 유기물질은 시료채취 과정 중 대기와 접촉하여 손실될 가능성이 크기 때문임
- 기타 시료들은 시료채취 계획의 우선순위에 따라 적절한 순서에 의해 채취
- 대수층이 6m 이상의 두께일 경우 가장 오염이 밀집된 심도 확인을 위해 고정된 간격 별로 시료를 채취하는데 일반적으로 시료채취 간격은 약 3~6m 정도임
- 교차오염을 방지하기 위하여 일회용 장비를 사용하거나 세척을 실시함
- 용존가스, 환원성물질, 휘발성 유기물질, 유류 및 수소이온농도 등을 측정하기 위한 시료는 운반 중 공기와의 접촉이 없도록 용기에 가득 채워야 함
- 유류 또는 부유물질 등이 함유된 시료는 시료의 균질성이 유지될 수 있도록 채취하여야 하며, 침전물 등이 부상하여 혼입되어서는 안 됨

## 7) 시료채취 용기

- 수질기준 항목에 따라 수질오염(먹는물) 공정시험기준 등에 규정된 채수용기 사용
- 현장에서 한 용기에 담아 시험실에서 별도의 용기로 옮겨 담으면 안되며, 시료채취 장비에서 시료를 채취할 때 항목별로 적합한 용기에 구분하여 담아야 함

## 8) 오염물질 특성에 따른 시료 채취 방법

### (1) NAPLs의 시료 채취

#### ① 저밀도 비수용성 유체(light non-aqueous phase liquids, LNAPLs)

- 물과 다른 화학적 조성을 가지고 있으며, 이들의 유동과 분포는 지질학적 구조, 불포화대 및 지하수면에서의 화학적 상호 작용에 의해 영향을 받음
- 물보다 밀도가 낮아 지하수면에 뜰 수 있고 표면에 농축됨
- 불포화 지대에서도 발견될 수 있음
- LNAPLs의 존재 위치에서 시료 채취가 가능하도록 장비 설치, 즉 지하수면 부분의 시료는 1개 이상 반드시 채취함
- 지하수위 변동에 대응할 수 있는 위치에 관측정 스크린 설치

- 퍼징을 하기 전에 베일러 또는 펌프를 이용하여 채취
  - 베일러를 이용할 경우 관측정 내 지하수 유동에 의해 충격이 발생하지 않도록 조심스럽게 삽입하여 채취
  - 오염물의 특성을 고려하여 오염물 흡착 등으로 인한 영향을 방지(예: 테플론 재질 베일러 사용)
    - 무기물 분석을 위한 LNAPL 채취 : fluorocarbon resin 베일러 사용
    - 유기물 분석을 위한 LNAPL 채취 : 스테인레스 스틸 베일러 사용
- ② 고밀도 비수용성 유체(dense non-aqueous phase liquids, DNAPLs)
- DNAPLs 시료 채취 시는 조사 지역 하부의 DNAPLs에 대한 많은 정보가 필요함
  - 베일러 또는 펌프를 이용하여 퍼징 수행 이전에 교란이 최소화 되도록 채취
  - 관측정 바닥까지 바닥의 개폐가 가능한 베일러를 천천히 주입시킨 후 차단장치를 작동시켜 시료채취
  - 베일러 사용 및 시료용기에 옮길 때에는 최대한 공기와의 접촉이 생기지 않도록 천천히 이동
  - Double check valve 스테인레스 스틸 베일러 또는 구간별 시료채취기(kemmere, discrete interval)를 사용하는 것이 좋음
- (2) 휘발성 유기화합물질(VOCs : Volatile Organic Compounds)
- 증기압이 높아 대기 중으로 쉽게 휘발되는 유기 화합물로 공기와의 접촉을 최소화 하여 채취함
- 대상물질 : TCE, PCE, BTEX
  - VOCs Vial에 채취, 유색 유리병을 사용하여 상부 공기(Head Space)가 들어가지 않도록 천천히 시료를 담고, 마개를 통해 휘발이 발생하지 않도록 밀봉
- (3) 음이온 분석 시료
- 여과(공극 0.45 $\mu$ m 멤브레인 필터) 실시 후 시료 병에 시료채취
- (4) 양이온 및 중금속 분석 시료
- 여과(공극 0.45 $\mu$ m 멤브레인 필터) 실시 후 시료 병에 시료채취
  - 시료가 담긴 시료 병에 진한 질산을 이용하여 pH 2 이하로 함.
- (5) 기타 항목 시료
- 기타 각 항목에 적합한 전처리를 적용하여 시료채취
  - 유리병 벽면을 따라 천천히 시료를 담고 공기(Head Space)가 없도록 채취

## 9) 시료의 보존 및 운반

- 채취된 시료는 즉시 시험하여야 하며, 그렇지 못한 경우에는 수질오염공정시험방법 중 시료의 보존방법에 따라 보존하여 규정된 시간 내에 실험하여야 함
- 운반 중인 시료는 4℃이하로 유지되어야 함
- 시료의 운반 과정 중에 시료의 파손과 교차오염을 방지하기 위하여 다음과 같은 절차를 적용
  - 시료용기는 시료종류별 각각의 보관용기에 넣어 봉합
  - 모든 유리병들은 보관 및 운반과정 중에 서로 부딪혀 파손되지 않도록 적절한 도구 (plastic mesh sleeve, bagged ice, foam block)를 사용
  - 오염농도가 높을 것으로 추정되는 시료들은 그 밖의 다른 시료들과는 별도로 포장하여 운반
  - 운반 방법, 운반 책임자 등을 기록

## 10) 시료채취량

- 시료채취량은 시험항목 및 시험 횟수에 따라 차이가 있으나 보통 3~5L 정도이어야 함. 다만 시료를 즉시 시험할 수 없어 보존하여야 하는 경우 또는 시험항목에 따라 각각 다른 시료채취용기를 사용하여야 할 경우에는 시료채취량을 적정하게 증감할 수 있음

## 11) 채취 시료의 여과

### (1) 여과의 절차

- ① 여과 방법의 선택
- ② 여과지의 선택(재질, 표면적, 공극사이즈)
- ③ 여과지 전처리(필요시)
- ④ 현장에서의 여과 절차 수행

### (2) 여과 시 오차 유발 요소

- 오염물질의 필터 흡착(음의 오차)
- 필터로 부터의 오염물질 탈착(필터 재질 고려 필요)(양의 오차)
- 여과 시 필터 막힘에 의해 필터의 원 공극보다 사이즈보다 작은 물질이 통과되지 못함
- 시료채취 중에 공기와의 접촉에 의해 시료 중 분석 성분이 침전물을 생성하여 제거됨(수산화 금속 등)

⇒ 시료가 교란될수록 침전 속도가 빨라짐

- 용존 형태의 물질이 산화되어 여과에 의해 제거가 가능한 콜로이드 형태의 물질로 제거됨
- 시료 여과 동안 공기와 접촉하는 것을 최소화하기 위해 주의가 필요. 시료 용기에 시료를 채울 때는 천천히 채워야 하며 시료의 교란이 없도록 주의 깊게 여과 되어야 함.
- In-line 여과 방법은 시료의 화학적 성분 변화를 적게 하므로 선호되는 방법임

### (3) 여과 장치 종류

#### ① 양압(positive pressure) 여과 장치

#### ② 음압(negative pressure) 여과 장치

- 지하수는 포화대에서 지표로 노출되면 화학변화를 수반한 압력의 변화를 받아 용존 가스는 손실되고 용존 금속류는 산화하여 침전되는데 음압 여과 방법은 압력 변화와 시료의 산화에 따른 변화를 가속시키므로 양압 여과 방법이 더 선호됨

## 12) 펌핑 및 시료채취 장비

### (1) 일반사항

- 고여 있는 물을 제거하고 이동식 또는 관측정내 설치된 고정식 시료채취 장비를 이용하여 시료를 채취함
- 심부층 지하수의 경우 저속양수펌프 등을 이용하여 시료 교란을 최소화 하는 방식으로 저속으로 시료를 채취하고, 천부층 지하수의 경우 저속양수펌프 또는 정량이송펌프 등을 사용함
- 일부 장비는 pH, DO, 산화환원전위, 비전기전도도, 중금속의 농도를 변화시킬 수 있는 휘발과 높은 압력 차이를 발생시키므로 장비 선택에 주의 필요
- 장비의 종류와 특성이 매우 다양하므로 경제성, 내구성, 유지보수 편의성, 활동성 등을 고려하여 선택함
- 각종 장비 중 검정 규격이 있는 것은 검정에 합격한 것을 사용하고, 장비 선택시에는 정확도, 분해능 등을 확인하여 조사 목적에 적합한 장비를 선택

### (2) 장비 종류

#### ① 수중펌프(submersible pump)

- 휘발성 유기물질 및 무기물 시료채취 시 사용 가능하며 관측정의 깊이에 상관없이 이용할 수 있음
- 휘발성 유기물질은 저속(100~300mL/min 이하)으로 채취

② 블레이드 펌프(bladder pump)

- 휘발성 및 비휘발성 유기물 및 무기물 시료채취에 사용 가능하며 200ft(61m) 이하의 깊이에서도 사용이 가능
- LNAPL 하부의 지하수 시료채취가 가능하다.
- 산출률이 낮은 관측정에서 유용
- 유속은 100~300mL/min 정도에서 채취

③ 베일러(bailer)

- 천층부 지하수 시료채취에 보편적으로 사용함
- 베일러에 의한 시료채취는 시료채취 과정에서 휘발성 유기물질의 편차를 일으키고 탁도 증가에 의해 강한 소수성 물질이나 무기물에 편차를 일으킬 수 있으므로 가급적 사용하지 않는 것이 좋음
- PVE, 스테인리스, 테프론 등 다양한 재질의 베일러가 있음

④ 피스톤 펌프 (piston pump)

- hand-operated or motor driven suction pumps
- peristaltic pumps
- positive displacement pumps

(3) 장비의 선택 및 설치

- 베일러, 그랩 샘플러 등은 마이크로 퍼징에 적합하지 않으므로 마이크로 퍼징시는 적당한 장비를 선택
- 퍼징 장비의 흡입구는 스크린 상부나 스크린 구간 내 설치하는데 공기와의 접촉이 최대한 발생하지 않도록 주의함
- 관측정 내부에서 발생 가능한 유체 혼합을 방지하기 위하여 고정 펌프 설치하여 사용할 수 있는데 이 경우 관정 교란이 최소화되고, 장비의 오염 제거가 필요 없음
- 퍼징 및 시료채취 장비는 시료를 화학적, 물리적으로 변화시키지 않아야 하므로 오염물 형태, 검출한계, 필요한 데이터의 질을 고려하여 장비를 선택함
- 퍼징 장비를 시료채취 장비로도 사용할 경우 수층 교란이 최소화될 수 있음(교란 발생 시 수층 탁도와 용존산소를 증가시키며 휘발 현상을 증가시킬 수 있음)
- 장비는 탁도를 증가시키지 말아야 하는데 가급적 다양하게 유속 조절이 가능한 저유량수증펌프 또는 positive-displacement 펌프 사용이 권장됨
- 펌프는 가능하면 천천히 밑으로 내리고, 오랜 시간 가만히 두어 탁도와 휘발을 최소화 함

- 오염물질의 농도가 검출한계 근처로 예상되는 경우 장비의 재질에 의해 농도가 변할 수 있으므로 조사 물질에 따라 스테인레스나 테프론, 유리 또는 다른 비활성 재질로 만들어진 시료채취 장비를 사용함
- 시료 채취 시 회복율이 낮고(100~200 mL/min 이하), 제거할 지하수 양이 적은 경우 더블 체크 밸브가 있는 베일러나 유량 체크 밸브가 있고 바닥이 비어있는 장비(bottom-emptying device)를 사용할 수 있음
- 일반적으로 4.5~6m 이상의 깊이에서 물을 끌어 올릴 때는 부압에 의해 오염물질의 농도 편차가 일어나는데, 이러한 문제가 없다면 연동펌프(peristaltic pump)를 이용할 수 있음

### 13) 장비의 오염 제거(세척)

#### (1) 일반사항

- 현장에서 지속적으로 사용하는 장비는 시료의 교차오염을 방지하기 위해 현장에서 직접 오염을 제거(세척) 한 후 재사용해야 함
- 시료채취 및 각종 현장 시험에 사용되는 모든 장비들은 가능한 일회용을 사용하고, 일회용이 아닌 경우 사용 전에 세척을 실시하여 시료 간 교차오염을 최대한 방지함
- 세척된 장비들은 주변의 먼지들에 의해 오염되지 않도록 보호하면서 대기 중에서 건조시킴
- 세척된 장비는 맨손 접촉, 지표면에 방치 및 오염토양 주변에 방치하는 것을 금지함
- 현장에서 비교적 오랜 시간동안 보관하게 될 경우에는 주변의 먼지와 이물질로 오염되지 않도록 싸서 보관함
- 발생하는 폐수와 폐기물들은 현장에서 수집하여 보관한 다음 현장 밖으로 운반하여 처분함
- 예상 오염물질에 따라 적절한 세제용액 선정 및 세척 기술 선정
- 오염제거 과정의 효율성을 측정하기 위한 정도관리 시료를 분석하고 분석 결과를 확인하여 세척 방법의 적절성을 판단하고 적절하지 못한 경우 개선 실시

#### (2) 대상 장비

- 시료채취, 관측정 개량 등의 각종 현장 작업을 수행할 때 사용한 장비를 재사용하는 경우
- 수위계 등 수위측정 장비, 베일러 등 지하수 시료채취 장비 등

### (3) 제거 장소

- 오염제거장소로 적합한 위치를 선정하여 오염제거 실시
- 오염 제거 장소의 여건
  - 면적: 가로 세로 각 1m, 0.5m 이상으로 세척통 및 장비를 놓을 수 있는 공간
  - 쉽게 접근 가능한 지점
  - 세척 후 발생된 오염물질 처리가 용이한 지점
  - 세척된 장비의 보관이 용이한 지점
  - 세척된 장비의 오염을 방지하기 위하여 잠재 오염원로부터 떨어진 지역

### (4) 오염제거 시기

- 각각의 시료를 채취하기 전에 시행
- 관측정 개량에 사용된 장비들은 처음 사용할 때와 각각의 관정에 사용하기 전에 시행되어야 함. 그러나 드릴링 장비들은 한 지점에서 여러 깊이로 시료를 채취할 시에는 교차오염을 방지하기 위하여 세척 시행 빈도를 더 늘일 수 있음

### (5) 오염 제거 절차(3단계)

- ① 오염 물질에 따라 인(phosphate)을 함유하지 않은 세제, 산용액, 유기 용매 등 적합한 세척액을 선택하여 1차 세척
- ② 깨끗한 음용수 (수돗물)로 세척
- ③ 증류수로 세척

## 14) 현장조사 기록

### (1) 현장 조사 시 기록 사항

- 시료 용기에 기록
- 시료채취 정보
- 관측정 정보
- 현장 식별을 위한 사진

### (2) 일반사항

- 지하수 시료채취 과정에서 확인된 모든 사항은 지하수 시료채취 현장기록지에 자세히 기록해야 하며, 특히 유류 등 휘발성 유기물질 시료에 대하여는 시료 운반 방법 및 운반 책임자 등을 반드시 기록해야 함
- 취수정 또는 관정에서 시료를 채취한 경우 관정 위치(주소), 소유자, 관정 깊이 및 크기, 용도, 설치 년도, 현재 사용 여부, 냄새, 오염 징후, 지하수위 등을 기록

- 현장기록지 작성과 함께 현장작업 과정을 사진 촬영하여야 하며, 현장 위치확인이 가능한 저장물, 표지판, 건물과 함께 촬영하여 위치 및 규모 등의 확인이 가능하도록 함
- 현장에서 수행되는 모든 작업 내용은 정해진 현장기록장과 기록지에 기록함. 기록된 야외기록장과 기록지의 사본은 과업종료까지 각각 과업파일에 보관
- 작업자는 다음의 사항을 고려하여 기록함
  - 시료채취 및 현장 시험 등을 포함하는 모든 현장 활동을 야외기록장과 규정된 기록지에 정확하게 기록
  - 규정된 기록지의 모든 항목은 세부적인 사항들도 포함되어야 하고, 기록 시 장기간 기록 보존을 위해 수성이 아닌 필기도구를 사용
  - 모든 시료채취 용기에는 정해진 라벨을 부착

### (3) 라벨의 부착

- 라벨은 시료명 및 특이사항을 제외하고 미리 기록된 라벨을 부착하여 현장에서는 최소의 사항만 기록하도록 하여 시료명 중복으로 인한 시료의 혼합가능성을 배제
- 현장에서는 가능한 한 추가적인 접착용 테이프의 사용을 자제하여 접착제에 포함되어 있는 휘발성 유기화합물에 의한 오염을 방지

### (4) 지하수 시료채취 시 기록 사항

- 총심도, 지하수위, 위치, 시설 제원, 관측정 번호 등 관측정 정보
- 시료 특성 및 현장 수질분석 결과
- 시료채취 시간 및 기타 특이사항
- 비수용성액체(NAPLs) 존재 여부 관련 사항
- 시료채취 방법 : 비수용성액체(NAPLs) 등의 시료채취
- 날씨 등 현장 상황
- 시료채취 전후 지하수위 및 관측정 심도
- 적용한 퍼징 기준 및 퍼징 방법
- 퍼징 시작 시간 및 종료 시간
- 퍼징 부피 및 퍼징 속도
- 시료 번호
- 항목별 채수 용기 종류 및 번호
- 시료채취 날짜, 시작 시간, 종료 시간
- 분석 항목별 현장 전처리 여부 및 방법
- 시료채취 참여자 명단

- 시간에 따른 현장수질 분석 결과
- 퍼징 부피
- 시료 운반 방법 및 운반 책임자
- 시료채취 장비

15) 정도관리 방법(QA/QC; Quality Assurance and Quality Control)

정도관리는 더 신뢰성 있는 데이터를 확보하기 위한 방법으로 다음과 같은 사항을 포함한다.

(1) 기록의 유지

- 시료채취에서부터 운반까지 현장에서 발생하는 모든 사항을 정해진 양식에 따라 기록함. 기록을 통해 시료채취부터 실험실 운반까지 시료의 정확한 행적을 파악할 수 있으며, 시료의 분실 및 혼합 방지가 가능함

(2) 정도관리 시료 채취 및 결과 관리

- 토양 및 지하수 시료채취과정에서 교차오염을 방지하고 현장작업의 적합성을 보장하기 위하여 정도관리 시료를 채취하여 분석한다.

① 현장 이중시료(field duplicate)

- 현장에서 연달아 두 번 시료를 채취하여 분석을 실시하는데 항목별로 분석용 시료와 추가 시료의 채취 방법을 같게 함
- 두개의 결과값을 가지고 RPD(Re-Productibility Deviation, %)를 계산한 값이 20% 이하가 되도록 한다. 이 값은 항목별로 달리 적용할 수 있으며, 요구되는 데이터의 질을 고려하여 결정함

- RPD의 계산

- $RPD = 100 \times (X1 - X2) / X_m$
- X1 = 중복시료 중 하나의 측정값
- X2 = 중복시료 중 다른 하나의 측정값
- $X_m$  = 중복시료의 평균 측정값

- RPD 값이 정해진 기준(20 %)을 넘을 경우 시료채취 방법에 이상이 있는지 확인하고 개선을 실시

② 장비 바탕시료(equipment rinsate blanks)

- 현장 시료채취 과정 중 세척하여 재사용하는 장비로 인한 오염 여부를 확인하여 장비로 인한 시험 결과의 영향이 없음을 증명하고, 세척 절차의 효과를 평가하기 위해 분석을 실시

- 평소와 동일한 방법으로 장비 세척 후 현장 시료 채취 방법과 동일한 방법으로 지하수 대신 증류수를 이용하여 장비와 접촉시킨 후 정도관리 시료를 만들어 분석을 실시
- 장비 바탕시료 분석 시 오염이 확인되면 장비 세척 방법에 대한 개선이 필요하며, 그 날 채취한 시료에 대해서는 다시 채취를 실시해야 함

③ 운반 바탕시료(trip blanks)

- 시료중의 휘발성 유기화합물 분석을 실시할 경우 필요
- 채취한 시료가 운반 과정에서 오염되었는지를 확인하기 위한 방법으로 실험실에서 휘발성 유기화합물 용기에 증류수를 넣고 마개를 닫은 후 시료채취 장소까지 운반하였다가 다시 실험실로 가지고 와서 분석을 실시
- 시료와 같은 과정으로 운반해야 하며, 분석 시 오염이 확인된 경우에는 운반 과정의 개선이 필요함

④ 현장 바탕시료(field blanks)

- 현장에서 증류수를 시료채취 용기에 담아 실험실로 가지고 와서 분석을 실시함
- 시료 채취 과정 중에 현장에서 대기를 통한 오염 여부를 확인하기 위해 실시함

(3) 시료 분석 과정의 정도관리

- 시료의 분석을 실시할 때에는 수질오염공정시험기준, 먹는 물 수질오염 공정시험기준, 토양오염공정시험기준 등 관련 시험방법에 규정되어 있는 측정분석 정도관리 방법을 따름

### 3. 조사결과 평가

조사 결과 평가는 자연적, 인위적 오염원 등 지하수 오염원을 파악, 오염범위 파악, 전반적 수질 지시인자 분석을 통한 오염 진행 여부를 판단한다.

#### 3.1 평가 사항

- 수문지질단위 분류 및 수리특성 평가
- 지하수 및 지표수 수질 및 수위/유량 특성 분석
- 대수층 분류 및 지하수 유동체계 분석
- 지하수 오염취약성 평가
- 수질 측정결과 평가
- 오염 이동 및 확산 평가를 통한 지하수 오염 범위 및 오염량 산정
- 오염 항목 및 오염원 영향 파악

#### 3.2 평가 방법

- 참고자료를 첨부
- 수문지질도(1:50,000) 작성
- 3차원 오염도 작성
- 부지 개념 모델 전개를 통한 오염 확산 가능성 평가
- 오염 평가 및 보고서 작성

#### 3.3 일반사항

- 조사 지점이 수질측정망 운영 지점과 중복되는 경우 수질 분석 자료 공유
- 조사계획에 따라 적절하게 조사가 수행되었는지 평가
- 시료에서 검출된 오염물질이 대상 부지에서 기인한 것인지, 주변 지역에서 기인한 것인지, 자연현상에 의한 것인지 등을 해석

#### 3.4 조사결과 평가 보고서 작성

- 조사결과의 요약
- 굴착한 관정의 활용계획·오염방지계획과 활용하지 아니하는 관정 처리계획 등을 기술
- 우물 및 샘과 잠재오염원의 위치를 표기한 축척 5천분의 1의 지형도, 관정의 지질주상도와 구조도, 지하수의 수질분석자료, 현장사진 등을 첨부

- 조사방법에 따라 수집·분석한 내용을 조사항목별로 체계적·논리적으로 기술함
- 분석 결과의 표기 시에는 각 조사 물질별 정량한계와 표기 자리수를 고려하여 표기
- 법적 조사 항목의 경우 규정된 기준(먹는 물 수질기준, 지하수의 수질기준 등)을 적용하고 그 외 오염물질에 대해서는 국제적 또는 외국 기준에 준하여 분석결과와 비교 기술 및 평가
- 의무적으로 지하수오염평가보고서 작성이 필요한 경우 다음의 작성 내용 참고

표 8 지하수오염평가보고서 작성에 관한 규정(환경부)

<p>&lt;‘지하수오염평가보고서 작성에 관한 규정’ 중 지하수오염평가보고서 작성 내용&gt;</p> <p><input type="checkbox"/> 지하수오염으로 인한 위해성</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 수질기준 초과 관측정에 대하여 오염항목의 수질기준과 수질측정결과를 제시</li> <li>○ 오염항목 각각에 대해 WHO, EPA 등 국제기관에서 공인한 평가방법에 의해 위해성을 평가</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> 오염범위</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 수질기준 초과 관측정의 주변지역에 대해 자료수집, 수리지질조사, 지구물리탐사, 토양조사를 실시</li> <li>○ 조사결과를 토대로 개략적인 오염범위를 추정</li> <li>○ 추정된 오염범위에 대해 추가 관측정을 설치하고 오염물질 및 수리지질을 조사</li> <li>○ 등수위선도를 작성하여 수리지질 특성 및 지하수 유동특성을 분석</li> <li>○ 오염범위·농도를 2차원 및 3차원 도면으로 나타내고 오염물질 총량을 추정</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> 오염 원인에 대한 평가</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 지하수오염유발시설의 현황자료를 제시 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 시설의 배치를 알 수 있는 평면도와 시설의 기초·깊이를 알 수 있는 측면도</li> <li>- 시설, 배관 등에 관한 재질 및 설치·운영내역을 알 수 있는 자료</li> <li>- 유해물질 저장시설의 경우에는 저장물질의 명칭, 성상, 농도, 용량, 사용내역 등을 알 수 있는 자료</li> </ul> </li> <li>○ 지하수오염유발시설의 현황자료와 오염범위·농도를 나타낸 도면 등을 토대로 오염원인 및 오염경로를 평가</li> <li>○ 인근지역에 잠재오염원이 있을 경우에는 잠재오염원에 대한 분석자료(잠재오염원의 위치를 표기한 축척 5천분의 1의 지형도 포함)</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> 오염방지대책</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 지하수오염물질의 누출을 방지하기 위한 추가적인 시설의 설치</li> <li>○ 지하수오염물질의 운송·저장·처리방식의 변경</li> <li>○ 오염된 지하수의 정화사업 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 정화방법 선정 시 타지역 운반처리보다 현장처리를 우선적으로 고려</li> <li>- 정화방법별 비용·효과분석을 실시</li> <li>- 제한된 기간 내에 정화사업이 완료될 수 있는 공법을 선택</li> <li>- 정화방법에 따라 소규모 현장적용시험을 거침</li> <li>- 정화과정이 간단하고 정화결과에 대한 검증이 용이하여야 함</li> <li>- 정화과정에서 2차오염이 없어야 함</li> </ul> </li> <li>○ 당해 시설의 설비·운영의 개선</li> <li>○ 자연적 감소에 의하여 오염된 지하수가 자연정화되고 있는지 또는 자연정화될 수 있는지 여부의 조사</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> 그 밖의 사항</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 그 밖의 지하수조사 시 굴착한 관정의 활용계획·오염방지계획과 폐관정처리계획 등을 기술</li> <li>○ 관측정의 배치도, 지하수의 수질분석자료, 현장사진 등을 첨부</li> </ul>
---

### 3.5 조사성과의 활용

- 조사 완료 후 조사 성과를 지역지하수관리계획 수립과 연계하여 활용
- 조사 결과를 관련 시스템에 등록

### 3.6 부지개념모델의 이용

부지개념모델을 이용하여 지하수 오염평가 가능하다.

#### 1) 3차원 오염도 작성

#### 2) 부지 개념 모델의 전개

- 새로운 정보를 계속적으로 추가할 수 있는 다이나믹 모델 사용
- 부지 개념 모델에 기술되며 지하수 시료채취 프로그램 계획 수립에 영향을 미치는 변수로 포함되어야 하는 인자
  - 두께(thickness), 측면의 범위(lateral extent), 수직, 수평 방향의 흐름, 오염 이동에 영향을 미치는 지질 구성 물질과 수리전도도 차이
  - 채취하는 오염물질(휘발성, 반휘발성, 금속 등)의 형태, 시료채취 결과에 오차를 유발하는 요인(금속 측정시 탁도, co-solvation effects on PCBs)
  - 오염의 수직, 수평적 분포

#### 3) 오염 지하수의 양 및 지하수 오염범위 산정

- 굴착불가지역 오염량 산정

#### 4) 오염 이동 및 확산 평가

#### 5) 부지외곽 오염여부 평가

## [참고1] 지하수 개요 및 오염 특성

자연 상태에서 지하수는 연간 1~5m 정도로 매우 느리게 이동하기 때문에 대수층이 한번 오염되면 오염물질이 반영구적으로 잔존하므로 정확한 오염 조사를 통한 정화가 필요하다.

### 1. 지하수의 정의

우리나라 지하수법 제2조에서 지하수는 ‘지하의 지층이나 암석사이의 빈틈을 채우고 있거나 흐르는 물’로 정의되고 있다.

지하수는 일반적으로 지표하부의 지층 중에 있는 고체 기질 사이의 빈틈을 포화상태로 채우고 있는 물을 말하는데 충적층이나 암반층에 존재할 수 있다.

전통적으로 ‘지하수면 아래에 있는 물’을 지하수로 보고 있지만 최근에는 지표상의 오염물질의 유입, 토양 및 지하수 생태계, 지하수 오염과 정화 등과 관련하여 불포화대가 중요한 기능과 역할을 가지므로 함께 고려할 필요성이 대두되고 있다.

### 2. 포화정도에 따른 구분

토양 공극의 포화여부, 함수비에 따라 물의 투수성 등 거동에 뚜렷한 차이가 생긴다.

#### 2.1 포화대

지하수의 압력 성분이 물의 흐름에 주요하게 작용하며, 수평방향으로의 지하수 흐름이 우세하다. 따라서 지하에 관정을 굴착하면 포화대에서만 물이 관정으로 흘러들어가며 불포화대에서는 물이 지하기질의 장력에 잡혀 관정으로 흘러들어가지 않는다. 즉 포화대에 있는 물만이 양수정이나 우물을 통해 대량으로 뽑아 올릴 수 있는 물이다.

#### 2.2 불포화대

불포화대에서는 중력의 영향이 상대적으로 커서 지하수의 수직적 흐름이 수평적 흐름보다 우세하다. 불포화대에 비수용성 유체(Non-Aqueous Phase Liquids : NAPLs)가 누출되면 물과 NAPL, 물과 토양공기, NAPL과 토양공기간의 3개의 서로 다른 성질의 경계면이 형성된다.

### 3. 오염 물질의 이동 특성

#### 3.1 일반적 특성

오염의 확산은 오염물질의 성질과 지질 및 그 구조, 지하수의 흐름방향 및 속도 등에 따라 크게 영향을 받는다.

오염물질이 지하수에 도달하면 일반적으로 포화대 안으로 분산되는데 오염물질의 물리화학적 성질에 따라 대수층의 상층부, 중층부, 하층부로 밀집되거나 대수층 전체에 고루 분포하기도 한다.

비중이 큰 중금속은 용해도가 낮고 지중에서의 확산속도가 완만하며, 오염이 확산되지 않고 일정 범위에 머무르는 경향이 강하다. 유기염소계 화합물은 용해도가 높아 지하수에서 오염이 확산되는 경향이 강하다.

### 3.2 비수용성유체(NAPL)의 특성

비수용성액체(NAPL)는 물에 쉽게 용해되거나 섞이지 않아 자연 상에서 물과 분리된 상태로 존재하는 물질이다. 지하수를 심각하게 오염시키는 물질 중에는 NAPL이 많아 이로 인한 오염특성을 잘 파악할 필요가 있다.

비수용성액체는 매립장이나 지하저장시설, 송유관, 유류 누출 사고, 폐기물이나 폐액 처분 시설 등에서 가솔린, 연료유, 등유, 제트유 등의 형태로 지하로 유입될 수 있다.

지하로 유출된 NAPL은 이동하면서 이동 경로에 비이동성의 NAPL을 남기고 유동성이 있는 NAPL은 점점 작아져 없어지는데 비이동성 잔류 NAPL은 이동성이 없더라도 NAPL 내의 성분들이 지하수에 용해되어 지하수를 따라 계속 이동할 수 있으므로 지속적으로 지하수 오염의 원인이 된다.

NAPL은 물보다 가벼운 LNAPL(Light Non-Aqueous Phase Liquid)과 물보다 무거운 DNAPL(Dense Non-Aqueous Phase Liquid)로 나눌 수 있다.

LNAPL에는 벤젠, 톨루엔, 자이렌 등이 있는데 물보다 비중이 작아 충분히 높은 농도로 존재할 경우 대수층 상층부에 부유하는 경향이 있다.

DNAPL에는 1,1,1-TCA, TCE, PCE, PCBs, Chlorophenols, 사염화탄소 등이 있는데 물보다 비중이 커 대수층의 포화지역과 불포화 지역을 통과하여 대수층 하부에 밀집하는 경향이 있다. 하부로 이동시 진흙 등 투과성이 낮은 지질에 의해 방해받는 경우 순간적이거나 영구적으로 체류(residence) 할 수 있다.

만약 유류와 유기염소계 화합물이 지하수에 유입되면 물보다 비중이 낮은 유류의 경우 일정부분 물에 용해되고 나머지는 지하수 위에 오염 띠를 형성하며 떠있게 되며, 트리클로로에틸렌 등 물보다 비중이 큰 유기염소계 화합물은 일정 부분 물에 용해되고 나머지는 지하수면 밑으로 오염 띠를 형성한다. 화학적 물성이 물과 다르므로 지하수와 다른

방향, 다른 속도로 이동할 수 있으며 이동은 포화 대수층 하부의 지질학적 구조에 의해 영향을 받는다.

NAPL 이동 및 분포에 영향을 주는 요인으로는 NAPL의 누출량, 누출의 표면적과 침투 면적, 누출 후 경과시간, NAPL의 성질(점성도, 밀도, 용해도 등), 기질의 특성, 지하의 수분 이동(불포화대) 또는 지하수 이동(포화대) 조건, 지하수면과 누출지점간의 거리 또는 불포화대의 두께 등이 있다.

LNAPL은 물보다 가볍기 때문에 물로 포화된 지하수면 상부의 모세관대를 통과하기 어려운데 LNAPL이 모세관대 위에 누적되어 상대적인 무게가 물의 부력을 이길 경우에만 모세관대를 통과할 수 있다.

만약 지하수 관정을 뚫으면 관정 내부에는 모세관대가 존재하지 않으므로 관정을 통해 LNAPL이 바로 지하수면까지 도달하게 되어 관측정에서는 LNAPL의 두께가 실제 지하 환경에서 모세관대 위에 분포하고 있는 두께보다 더 두껍게 관측된다.

#### 4. 오염 토양에 의한 영향

토양에서 오염이 확인되었을 때에는 항상 지하수로의 오염물질 이동 가능성이 있다. 이러한 이동은 토양으로 물이 침투하는 이동 기작을 통해 가능하다. 이러한 이동 속도는 토양의 지구화학적, 물리적(수리전도도와 점토함량 등) 특성에 따라 달라진다.

토양오염물질은 물에 녹아 이동하거나, 유류나 유기용매와 같이 물과 섞이지 않고 별도의 층을 형성하면서 서서히 물에 녹아 나오며 지하수를 오염시킨다.

비수용성액체(NAPL) 중 트리클로로에틸렌 등 물보다 무거운 DNAPL은 불투수층에 도달할 때 까지 지하수층 아래로 침강하여 전단대 등 기반암의 절리면 사이에 침투하여 지속적으로 용출되므로 오염 정화에 더 많은 어려움이 있다.

#### 5. 지하수 오염 구분

##### 5.1 오염물질의 종류

###### 1) 유기 오염물질

석유 기원의 유기탄소화합물, 폐기물 매립장에서 발생하는 유기물질 등이 이에 속한다. 방향족탄화수소, 가솔린 첨가제, 다른 특정 원소와 결합한 형태의 HCs 등 종류도 대단히 많으며 인간 활동 또는 자연적으로 발생하는 등 기원 또한 다양하다.

휴믹산, 펙틴, 탄화수소 등 자연적으로 발생하는 유기물은 지하수를 오염시킨다고 하기 어려우며, 주로 인위적으로 배출되는 유기화합물이 오염의 원인이 된다. 유기염소

계화합물인 테트라클로로에틸렌(PCE), 트리클로로에틸렌(TCE)은 안전하고 우수한 세정제로 기계부품의 세정과 드라이크리닝 등 광범위한 분야에서 사용되고 있어 지하수를 오염시키는 대표적인 물질이며, 유류에 의한 오염도 광범위하게 일어나고 있다.

## 2) 무기 이온류

지하수 중의 나트륨이온, 칼륨이온, 칼슘이온, 마그네슘이온, 중탄산이온, 황산이온, 염소이온 등은 지하수의 염도를 증가시킨다. 이러한 성분의 분포는 지하수가 흐르면서 접촉하는 지질학적 특성에 크게 의존하는데, 이러한 무기물 성분의 증가는 음용이나 생활 및 공업용수로 지하수를 사용하는데 문제를 일으킬 수 있다.

## 3) 무기 금속류

대부분의 자연 상태의 지하수는 알루미늄, 카드뮴, 크롬, 코발트, 구리, 납, 니켈, 아연 등과 같은 중금속을 낮은 농도로 포함하고 있지만 인간 활동에 의해 금속 물질이 지하수로 유입될 수 있다. 지하수 중에 중금속이 고농도로 있을 경우 취수원으로 부적합 하며, 수생태계에 영향을 미친다.

중금속은 이를 생산하는 금속광산 및 제련소 주변 농경지, 산업폐수, 도시 지역에서의 지표 유출수, 비료, 화석 연료 등에서 기인한다. 중금속은 아니지만 이와 유사한 성질을 가지고 있는 비소는 철, 금, 은, 구리를 채광 하는 광산지역과 비소관련 제품 생산 공장의 배수가 유입된 하천수를 관개용수로 사용한 농경지 등에서 발견된다.

## 4) 영양염류

질소와 인을 포함하는 이온이나 유기화합물로 질산성질소 등이 있으며 농경지나 골프장에서의 비료 사용, 축산폐수, 공장배수, 생활하수, 정화조, 하수처리장 누수 등에서 기인한다.

## 5) 미생물

지하수를 오염시키는 미생물로는 병원성 박테리아, 바이러스, 기생균류 등이 있다. 가장 주요한 미생물 공급원은 인간 및 동물 관련 오폐수이다. 하수처리장 혹은 정화조로부터의 하수 누출, 쓰레기 매립장의 침출수, 농업활동시의 부적절한 폐기물의 야적 및 방치 등에 의해 미생물에 의한 지하수 오염현상이 발생한다.

자연적인 상태에서의 지하수중 미생물은 수심이 깊어질수록 유기물의 감소와 함께 급격하게 감소한다. 미생물은 점액을 형성하여 지하수를 먹는물로서 부적합하게 하며, 관정의 스크린을 막거나 지하수 채수에 문제를 일으키기도 한다.

## 6) 방사성 물질

방사성 물질에 의한 오염은 일반적으로 방사성 핵종을 다루는 산업, 핵발전 및 방사성물질 폐기와 같은 인간 활동과 관련이 있다. 하지만 라돈, 라듐, 우라늄 등의 방사성

물질은 대부분의 토양에 자연적으로 존재하여 오염의 원인이 되기도 한다.

## 5.2 오염원의 형태

### 5.2.1 점오염원

지하 유류 저장탱크 누출, 정화조, 위생 쓰레기 매립장 등 오염원을 확연하게 파악할 수 있는 소규모의 오염원을 말하는데, 유발된 오염물질의 확산범위 파악이 대체적으로 용이하다. 유류와 TCE, PCE 등이 점오염원에서 배출되는 대표적인 오염물질이다.

### 5.2.2 비점오염원

보다 넓은 지역의 범위를 점하고 있는 작은 오염원들이 결합하여 하나의 큰 오염원을 이루는 경우로 위치, 형태, 정확한 크기 및 오염의 확산범위 파악이 어렵다. 살포된 농약 및 비료, 도로 제설제, 산성비 등에 의한 오염이 있는데, 이 경우 지하수 내 오염물질의 농도가 지역에 따라 매우 다양하게 나타날 수 있다. 대표적인 비점 오염물질은 비료의 사용에 의한 질산성질소가 있다.

## 5.3 오염물질의 기원

### 5.3.1 인위적 기원

#### 1) 농업 및 축산업

농업 및 축산업은 지하수에 영향을 주는 가장 넓은 범위의 인간 활동 중의 하나이다. 농약 및 비료의 사용과 저장, 축산 폐수, 비축물과 수확 잔류물 등이 지하수에 영향을 미친다.

#### 2) 도시화

도시화에 따른 지하수 오염원으로는 가정 및 도시의 고형 폐기물의 처리, 생활하수의 처리, 하수 및 유출수의 처리, 폐품 및 고물 저장소, 기타 도시 오염원이 있다.

#### 3) 광업 및 산업 활동

광산 부산물, 광산 배수 및 폐수, 산업 폐기물, 폐기된 우물 또는 주입정, 누출에 의한 지하수 오염이 발생한다.

#### 4) 부적절한 물 관리

부적절한 관정 설계, 염수 및 지하수 침투, 불완전한 관정 건설, 불용공, 부적절한 토지 개발이나 관개 행위에 의해 지하수 오염이 발생한다. 버려진 관정은 오염물질이 이동하는 수직 통로가 되어 대수층의 오염이 심각하게 일어날 수 있다.

### 5.3.2 자연 기원

대부분의 지하수 오염원은 인간의 활동에 의한 것이지만 자연적인 원인을 갖는 오염원도 있다.

지질학적 특성 등 자연적인 원인에 의해 발생하는 오염원은 점오염원이나 비점오염원과 구분된다. 주된 자연기원 오염물로는 비소, 불소가 있으며 이러한 물질은 인위적으로도 생성되기 때문에 오염원 규명 시 주의가 필요하다.

## [참고2] 오염 지하수의 정화

대부분의 지하수 오염조사는 오염된 지하수의 정화를 목적으로 한다. ‘지하수 오염조사 가이드라인(안)’은 오염 현황을 파악하기 위한 조사이며 정화를 위한 조사나 설계와는 다른 절차이다.

하지만 정화를 위한 조사나 설계가 사전에 행해진 오염조사 결과를 바탕으로 진행되므로 효과적인 예산 사용과 효율적인 정화를 위해서는 오염정화의 개념을 염두에 둘 필요가 있다.

### 1. 정화 필요 지역

- 사고에 의한 오염물질의 유출
- 지하수오염유발시설 등 오염원에서 오염물질이 인근 지하수계로 누출된 경우
- 지하수 오염 관측정의 수질측정결과가 수질기준을 초과한 경우

### 2. 정화의 절차

- 부지 조사
- 지하수 오염 정화
- 오염 처리 후 지하수가 정상상태로 다다를 때까지의 기간
- 정화 후 모니터링을 위한 분석과 시료채취

### 3. 정화 평가

- 단기간의 평가 : 정화기간 동안의 평가
- 장기간의 평가 : 정화 목표 달성 평가

### 4. 정화기준의 결정

- 환경과 공중보건을 보호한다고 생각되는 농도
- 수질 기준을 바탕으로 한 농도

### 5. 토양과의 관계

- 토양오염에 의해 야기된 지하수 오염은 일단 한번 오염되면 원상복구에 시간과 비용이 많이 소요되며, 오염물질을 제거하지 않는 경우 지속적으로 오염원으로 작용하게 되므로 토양 정화를 함께 실시하여 지하수의 지속적 오염을 막아야 함

### [참고3] 용어정리

- 지하수(ground water) : 광의로는 지표면 아래에 있는 모든 물을 총칭하지만 지하수학에서 취급하는 협의의 지하수는 지하수면보다 밑에 있는 포화대내의 물을 말한다. 우리나라 지하수법에서는 ‘지하의 지층이나 암석사이의 빈틈을 채우고 있거나 흐르는 물’로 정의하고 있다. 지하수는 여러 영향 요소에 의해 정지하지 않고 계속 이동하며 지하수면의 높이 변화를 수반한다.
- 암반지하수(bedrock groundwater) : 일반적으로 지하심부에 존재하는 암석 내 지하수를 말한다. 암반지하수는 사암과 같이 1차 공극률이 큰 암석 내에 부존되어 있는 경우와 2차 공극인 균열이나 파쇄대 또는 단층대에 부존되어 있는 경우가 있다. 우리나라에 발달된 화강암은 다른 나라의 화강암과 달리 암석 내 절리가 비교적 많아 상당량의 물을 포함하고 있으며, 이 물은 지하수로 개발 이용되고 있다.
- 지하수 수위(지하수위) : 일정한 기준면(평균해수면)으로부터 지하수의 수면까지의 높이를 말한다.
- 지하수면(water table, groundwater table) : 대기압과 지하수의 수압이 같아지는 지점들을 연결한 면으로 포화대와 통기대 사이의 경계면을 말한다. 지하수면은 강수, 증발산, 기압, 조석 등의 영향으로 변동하고 자유수면이라고도 한다.
- 지하수면 깊이(DTW, depth to water) : 지표면에서 지하수면까지의 깊이를 말하며 지하수심도라고도 한다.
- 불투수층(impermeable layer) : 물을 포함하지 않고 통과시키지도 않는 불투수성 지층을 말한다. 점토층이나 결정질 암석과 같이 절리나 입자 사이의 공극이 극히 작은 암반 등이 이에 해당된다. 비투수층이라고도 한다.
- 포화대(zone of saturation) : 지표면 아래의 물을 포함하는 지층 중 대기압보다 더 높은 압력을 갖는 물에 의해서 모든 공극이 채워져 있는 부분을 말한다. 불포화대의 상대적인 개념으로 지하수면이 포화대의 상한이 된다.
- 불포화대, 통기대(unsaturated zone, zone of aeration, vadose zone) : 지표면과 지하수면 사이에 위치하여 물로 부분적으로 포화된 공극이 있는 부분을 말한다. 지하수면 아래에 위치하는 포화대와 구별된다.
- 피압대수층(confined aquifer) : 피압지하수를 가진 대수층을 나타내며, 자유면 대수층과 대비된다. 피압대수층에서는 그 상부 및 하부에 난대수층, 반대수층 또는 불투수층이 존재함으로써 지하수가 피압된다.
- 자유면대수층(unconfined aquifer, phreatic aquifer) : 토양 공극을 통하여 대기과 연결되어 있어 대수층 최상부 즉 지하수면의 압력이 대기압과 같은 대수층을 말한다.

지하수로 함양되는 수량에 따라 지하수면이 자유롭게 상하로 변한다. 자유면대수층은 위에 불투수층이 없어 그 압력을 받지 않는다. 비피압대수층 또는 불압대수층이라고도 한다.

- 지하수위등고선도(groundwater table contour map, Potentiometric Surface Map) : 지하수위가 동일한 지점을 연결하여 작성한 등고선도를 말한다.
- 지하수 관측정 : 지하수의 수위, 수질 등을 관측하기 위하여 지반을 굴착하여 형성한 우물을 말한다.
- 지하수 관측망 : 지하수 관측소 및 관측정을 다수 설치하여 네트워크화하여 운영하는 시설물의 총칭이다.
- 지하수영향조사 : 지하수의 개발·이용이 주변지역에 미치는 영향을 분석·예측하는 조사이다.
- 지하수보전구역 : 지하수의 수량이나 수질의 보전에 필요한 구역으로서 지하수법 제 12조의 규정에 의하여 지정된 구역이다.
- 지하수개발·이용 시 공업 : 지하수개발·이용을 위한 시설을 시공하는 사업이다.
- 지하수정화업 : 지하수에 함유된 오염물질을 제거·분해 또는 희석하여 지하수의 수질개선을 하는 사업이다.
- 취수정 : 먹는 샘물 원수를 직접 취수하는 관정을 말한다.
- 감시정 : 취수정의 지하수위와 수질변화를 감시하기 위하여 취수정 주변에 굴착된 관정을 말한다.
- 케이싱 : 관정의 매몰을 방지하기 위해 관정 외벽에 설치된 철관, 혹은 PVC관 등을 지칭하며, 지하수의 유입을 막는다. 반면 지하수가 유입될 수 있도록 케이싱에 슬롯(가는 홈)이 설치되어 있는 구간을 스크린 구간이라 지칭하는데 나공 구간은 케이싱과 스크린이 모두 설치되지 않은 구간이다.
- 그라우팅(grouting) : 토목공사에서 누수방지 공사나 토질안정 등을 위하여 지반의 갈라진 틈·공동(空洞) 등에 충전재를 주입하는 일을 말한다.
- 시추(boring) : 굴진장비에 의해 지하 또는 콘크리트 구조물 등에 원통형 천공을 하는 작업을 말한다. 시추는 지질 및 지반조사, 석유탐사, 가스탐사, 지하수 개발, 지열 개발, 강상 개발 등의 목적으로 이용되고 있지만 지질조사를 위한 시추가 가장 많다.
- 시추공(borehole, drill hole) : 시추작업으로 만들어진 원통형의 구멍을 말한다. 유전, 광상, 지하수, 지열을 조사하기 위해 굴착한 구멍이다.
- 대수층(aquifer) : 지하수로 포화되어 있는 지층 중에서 투수성과 저류성이 커 경제적으로 개발에 이용할 수 있는 정도의 지하수를 배출할 수 있는 지층을 말한다.

- 기본도 (base map) : 토양 조사 시 기본이 되는 항공사진, 지형도, 지적도 등을 말함
- 함양(recharge) : 강우나 하천 호소 등의 지표수가 침투하여 지하수가 증가하는 것을 말하여 하천의 수위가 지하수보다 높을 경우에는 복물함양 이라고도 한다.
- 연동펌프(peristaltic pump) : 단위 시간당 일정한 량의 액체를 송출하기 위해 고안된 펌프를 말한다.

# 토양·지하수 오염조사관련 환경보호 및 보건관리 지침(안)

Environmental protection and health care related to  
contamination investigation for soil and groundwater

# 목 차

1. 환경보호
2. 보건관리
3. 환경보호 및 보건관리 교육

## 표 차례

표 1 응급 상황 발생 시 비상연락처

표 2 보건안전계획서

## 그림 차례

그림 1 케이싱 인발 불가능 시 폐공조치

그림 2 방사능 오염조사 시 착용복장

## 부록 3. 토양·지하수 오염조사관련 환경보호 및 보건관리 지침(안)

### 1. 환경보호

#### 1) 천공 시추작업 시

- (1) 천공과 시추작업 시 밖으로 나오는 물질들은 모두 모아 적정하게 처리한다. (토양 및 지하수 포함)
- (2) 불투수층을 통과하는 경우 시추공이 오염물질을 확산시키는 새로운 길을 만들어주는 역할을 할 수도 있으므로, 불투수층을 파손하지 않도록 조심하여야 한다. 불투수층 이하의 시추가 필요할 경우 전문가와 충분한 협의 후 작업을 실시하되 최대심도의 오염농도값을 모니터링 한다.
- (3) 천공 시추작업 완료 후 시추공 되메움과 주변을 깨끗이 하여 환경오염이 발생하지 않게 한다.
- (4) 조사 완료 후 최대한 빨리 되메움작업을 실시한다.
- (5) 오염지역 트렌치(trench) 조사 시 되메움을 최대한 신속히 실시하여 빗물의 유입 및 기타 오염물질의 유입을 억제하여 추가오염발생을 방지한다.

#### 2) 교차오염방지

- (1) 지하수 관측정 설치 시 품질시험을 통과한 깨끗한 모래를 굴착공에 채운다.
- (2) 토양 시료채취 장비는 원칙적으로 시료채취 지점 및 깊이를 변경할 때마다 사용된 장비를 세척하여 사용함으로써 교차오염으로 인한 2차 오염을 방지하여야 한다.

#### 3) 폐공조치(되메움)

- (1) 되메움으로 인해 오염 물질이 비오염 토양과 접촉할 것으로 의심되면, 깨끗한 물질로 대체하여 채워 넣고 오염 물질은 적정하게 처리하여 제거한다.
- (2) 토양 시료채취가 모두 끝나면 굴착공을 되메우기 하여야 한다. 품질시험을 통과한 깨끗한 모래를 굴착공에 채운 후 벤토나이트 또는 시멘트 그라우팅을 통해 되메움하는 작업이다. 작업순서는 다음과 같다. 하지만, 토양 굴착공은 되메우기 전에 대수층

여부를 확인하기 위하여 임시 관측공(observation hole)으로 사용할 수도 있다.

(가) 마지막 심도 시료채취 후 굴착공 되메우기

(나) 주변 토양 되메우기, 깨끗한 모래 채움, 벤토나이트, 시멘트 그라우팅

(다) 시료채취 후 잔류 토양은 수거하여 폐기

(3) 케이싱의 인발이 가능한 경우와 불가능한 경우를 나누어 다음과 같은 절차를 따라 시행한다.

(가) 케이싱 인발 가능 시

① 관측공 케이싱 주변의 상부 마감(surface completion)을 우선 제거한다.

② surface seal 제거

③ hollow-stem auger를 이용하여 관정 깊이까지 굴착한다.

④ 케이싱 및 스크린을 제거

⑤ 그라우트 실(grout seal)로 되메움 (3~5% 정도의 벤토나이트를 함유한 시멘트)

⑥ 지표면 아래 30cm까지 되메움

⑦ 나머지 부분 sealing 재료로 채움

(나) 케이싱 인발 불가능 시

① 주변 환경 검토 : 주변 환경 등 작업여건과 오염물질 유입 여부 점검

② 폐공제원조사 : 우물의 심도, 지하수위, 케이싱의 구경, 심도, 재질 등을 조사

③ 폐공 내 이물질 제거 : 펌프 등 공내에 이물질이 있는 경우 완전히 제거

④ 지표부터 파기 : 터파기 심도는 1m로 하며 현장여건과 향후 토지이용계획에 따라 조정할 수 있음

⑤ 케이싱 제거 : 지표에서 1m까지 케이싱을 절단하여 제거 (그림 1 참고)

⑥ 불투수성 재료 주입 : 케이싱 절단 하부구간에 불투수성재료 주입(시멘트 밀크, 몰탈, 벤토나이트 등)

⑦ 지표부 표면처리 : 터파기구간 하부는 시멘트몰탈을 타설하고, 상부 나머지 구간은 주변 흙으로 되메움 (배합비 - 시멘트 : 모래 = 1:2, 타설 두께 : 20cm)

⑧ 주변정리 : 주변 환경에 어울리게 주변정리. 작업 중 발생한 폐자재는 운반하여 폐기처분

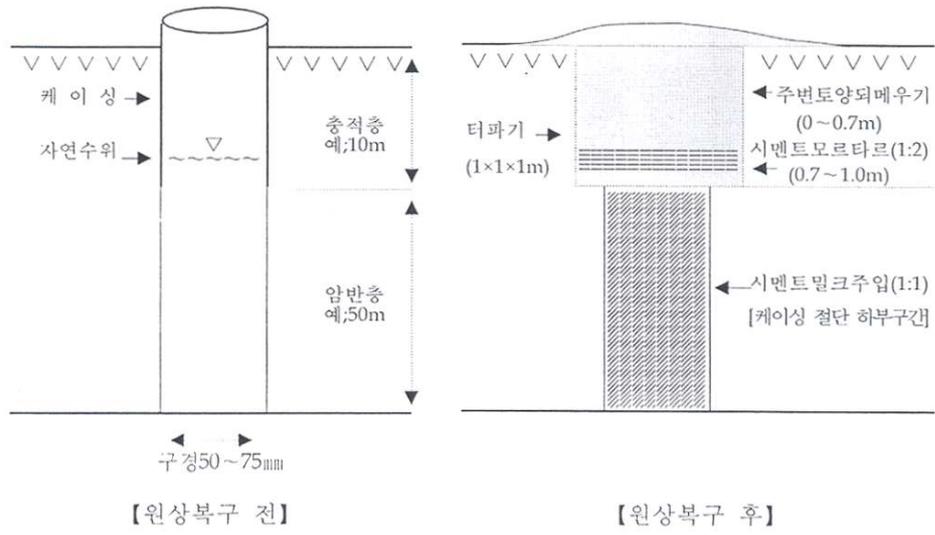


그림 1 케이싱 인발 불가능 시 폐공조치

## 2. 보건관리

### 1) 인명보호

인명의 보건과 안전에 영향을 주는 요소는 다음과 같다.

- (1) 시료채취 도구나 장비를 취급하는 과정
- (2) 불안정한 지반이나 사면, 개방된 시굴이나 굴착된 곳
- (3) 시료 채취 중에 작업자, 주변에 거주하는 주민, 지나가는 사람 등이 오염 물질에 노출되는 것
- (4) 중장비를 이용한 작업에서 소음, 분진, 악취 등에 의한 불편, 발파작업이 필요할 경우 전문가에 의해 작업이 이루어져야 하고, 발파 작업 전에 주변에 사람이나 장비가 없는지 확인한다.

### 2) 안전정책

- (1) 법과 규칙에 대한 사항을 준수한다.
- (2) 부지 종사자가 위험에 대한 경계를 게을리 하지 않도록 사전안전교육을 실시하여 조사와 시료 채취 동안의 위험으로부터 그들 자신을 보호해야 한다는 것을 강조한다.
- (3) 작업 절차서를 작성 교육하여 이를 준수해야 할 필요성을 강조한다.
- (4) 직원과 일반인을 포함하는 조사팀 구성원 각자의 책임을 설명한다.
- (5) 시료 채취나 다른 부지 조사를 수행할 동안 담배를 피우거나 먹고 마시는 행위를 엄금한다.
- (6) 표준절차서를 작성하여 모든 작업자가 표준절차에 따라 조사하는 것을 의무화 하고 절차서 내용은 보건안전계획( 표2 참고), 응급상황 발생 시 비상연락처(표 1 참고) 등을 담고 있어야 한다.

표 1 응급 상황 발생 시 비상연락처

구 분	위치(이름)	전화번호
병 원	00시 00병원	
구급차	119구급대, 00병원	
소방서	00소방서	
경찰서	00경찰서	
상수도	00시청 상하수도과	
전 기	한국전력공사	
가 스	한국가스공사	
현장감독	000	
현장기술자	000, 000, 000	

### 보건안전계획서

1. 오염된 토양 및 지하수와의 접촉, 작업장 내 차량이동에 관한 사항, 지하매설물 등에 관한사항 등을 확인한다.
2. 현장 작업복 및 안전모 등을 포함한 개인보호구를 반드시 착용한다.
3. 비산먼지 방지용 마스크를 착용한다.
4. 작업장 내 흡연, 음주 및 음식물 섭취를 일체 금한다.
5. 원거리에서 작업 중임을 표시할 수 있는 작업띠를 착용한다.
6. 불필요한 인원 및 외부인은 작업장에 출입을 금한다.
7. 심도 1.5 미터 이하 구덩이 진입은 금한다.
8. 현장 책임자는 작업 중에 불필요한 차량의 접근을 금하는 등 차량 통제를 실시한다.
9. 응급처치상자를 항상 구비하여 접근이 쉬운 곳에 둔다.
10. 작업 전에 현장 기술자들에게 작업에 대한 충분한 사전지식을 교육한다.
11. 우천이나 결빙에 의한 미끄럼사고 방지를 위한 대책을 강구한다.
12. 혹한기나 혹서기 때 작업시간을 조정하여 현장기술자들의 일사병 등으로 인한 재해예방에 힘쓴다.
13. 전기기구를 사용할 시 감전사고 예방을 위한 전격차단기 등의 활용을 의무화 한다.
14. 위험지역 표지판 설치를 하여 사고예방에 만전을 기한다.
15. 모든 현장 사고 또는 발생 우려되는 사항들은 날짜, 시간, 사고내용 등을 기록하여 현장감독에게 보고한다.
16. 기타 추가되는 보건안전사항은 현장감독 지시에 따른다.

위 사항을 충분히 숙지 검토하여 안전절차를 준수한다.

현장기술자 1 :

현장기술자 2 :

현장기술자 3 :

현장기술자 4 :

현장기술자 5 :

현장기술자 6 :

현장감독 :

### 3) 특정오염과 관련된 안전조치

대상 부지의 토양 및 지하수를 오염시키는 주요 오염물질은 차량 주유용 및 건물 난방용으로 사용하는 등유(Kerosene) 계열의 JP-8, 경유(Diesel), 모가스(Mogas), 휘발유(Gasoline) 등 유류물질로 구성되며 가장 인체의 건강에 영향을 미칠 수 있는 물질은 석유계총탄화수소와 벤젠이다. 또한 대상 부지에 존재하는 유동상 기름은 고농도로 존재할 수 있으므로 화재 예방에 주의해야 한다.

#### (1) 석유계총탄화수소(TPH) 응급조치 요령

- 흡입 : 노출된 후 즉시 이동할 것. 필요시 인공호흡(구조 호흡)을 할 수 있는 간이 구명기 또는 이와 유사한 장치를 사용하도록 함. 의사의 치료를 받도록 할 것.
- 피부 접촉 : 오염된 의복, 장신구 및 신발을 즉시 제거할 것. 화학 물질이 완전히 제거될 때까지(최소 15-20분) 다량의 물을 사용하여 비누 또는 중성 세제로 세척할 것. 필요시 의사의 치료를 받도록 할 것.
- 눈 접촉 : 화학물질이 완전히 제거될 때까지 많은 양의 물이나 생리식염수로 아래 위 눈꺼풀을 가끔씩 치켜들면서 즉시 눈을 씻을 것. 즉시 의사의 치료를 받을 것.
- 섭취 : 만약 구토가 일어나면 구토물이 기도를 막는 것을 방지하기 위해 머리를 둔 부보다 낮추도록 할 것. 필요시 의사의 치료를 받도록 할 것.
- 다량 유출 : 열, 화염, 스파크 및 기타 점화원을 피할 것. 작업자가 위험없이 누출을 중단시킬 수 있으면 중단 시킬 것. 물 분무를 사용하여 증기의 발생을 감소시킬 것.
- 소량누출 : 모래 또는 다른 비가연성물질을 사용하여 흡수시킬 것. 누출된 물질의 처분을 위해 적당한 용기에 수거할 것. 일정 기준량 이상의 배출에 대해서는 배출내역을 보고 할 것.
- 눈 보호 : 보안경을 착용할 것. 작업장 가까운 곳에 분수식 눈 세척시설 및 비상세척설비(샤워식)를 설치할 것.
- 보호의 : 적절한 내화학성 보호의를 착용할 것.
- 안전장갑 : 적당한 내화학성 장갑을 착용할 것.
- 호흡 보호구 : 노출이 심한 경우에는 호흡용 보호구가 필요함.

#### (2) 벤젠 (Benzene) 응급조치 요령

- 흡입 : 노출되면 출입이 안전할 때 이동할 것. 필요시 인공호흡(구조호흡)을 할 수 있는 간이구명기 또는 이와 유사한 장치를 사용하도록 함. 따뜻하게 하고 편안하게 쉬도록 할 것. 즉시 의사의 치료를 받을 것.

- 피부 접촉 : 오염된 의복, 장신구 및 신발을 즉시 제거할 것. 화학 물질이 완전히 제거될 때까지(최소 15-20분) 다량의 물을 사용하여 비누 또는 중성 세제로 세척할 것. 필요시 의사의 치료를 받도록 할 것.
- 눈 접촉 : 화학물질이 완전히 제거될 때까지 많은 양의 물이나 생리식염수로 아래 위 눈꺼풀을 가끔씩 치켜들면서 즉시 눈을 씻을 것. 즉시 의사의 치료를 받을 것.
- 섭취 : 소방서(응급구조) 또는 의사에게 즉시 연락할 것. 의식 불명의 사람에게 토하게 하거나 음료수를 마시지 않도록 할 것. 구토를 하면, 구토물이 기도를 막는 것을 방지하기 위하여 머리를 둔부보다 낮추도록 할 것. 만약 사람이 의식불명이면 머리를 옆으로 돌리게 할 것. 즉시 의사의 치료를 받을 것.
- 의사에 대한 정보 : 흡입의 경우에는 산소의 공급을 고려할 것. 섭취의 경우에는 위 세척을 고려할 것.
- 대기중 유출: 물 분무를 사용하여 증기의 발생을 감소시킬 것.
- 토양 유출 : 처리를 위한 연못, 웅덩이 또는 같은 처리지역을 확보할 것. 추후의 처리를 위한 제방을 축조할 것. 모래 또는 다른 비가연성물질을 사용하여 흡수시킬 것.
- 수중 유출 : 흡수성 시트 또는 누출물 확산을 막을 수 있는 패드나 쿠션으로 덮을 것. 세제, 비누, 알코올 또는 기타 계면활성제를 사용할 것. 흡수제를 사용하여 적합한 용기에 수거할 것. 활성탄으로 흡수할 것. 호스를 사용하여 가두어 둔 물질을 흡입하여 제거할 것. 누출된 물질을 기계 장비를 사용하여 수거할 것. 상수도 및 하수도에서 떨어진 곳에 둘 것.
- 소량 누출 : 모래 또는 다른 비가연성물질을 사용하여 흡수시킬 것. 누출된 물질의 처분을 위해 적당한 용기에 수거할 것.
- 다량 누출 : 추후의 처리를 위한 제방을 축조할 것. 발화원을 제거할 것. 관계인 외의 접근을 막고 위험 지역을 격리하며 출입을 금지. 기준량 이상의 배출에 대해서는 보고할 것.
- 눈 보호 : 보안경을 착용할 것. 작업장 가까운 곳에 분수식 눈 세척시설 및 비상세척설비(샤워식)를 설치할 것.
- 보호의 : 적절한 내화학성 보호의를 착용할 것.
- 안전장갑 : 적당한 내화학성 장갑을 착용할 것.
- 호흡 보호구 : 노출이 심한 경우에는 호흡용 보호구가 필요함.

#### 4) 중장비 사용 시 안전계획

환경오염조사 현장 작업 수행 중 중장비 (시료채취 오거, 굴착기 등) 사용에 따른 안전 관련 사항들의 예방 및 준수한다.

- (1) 현장 작업복 및 안전모 등 개인보호구를 반드시 착용한다.
- (2) 현장 감독의 별도 지시 없이 중장비의 이동 및 굴착 등의 사용을 금한다.
- (3) 중장비 작업 시 반경 10m 이내 중장비 작동과 관련 없는 인원은 출입금지.
- (4) 모든 화기 및 인화성 물질 사용을 금한다.
- (5) 중장비의 운전은 자격증 소지자가 하도록 사전에 운전원의 자격유무 파악
- (6) 장비 이동 할 시에는 반드시 수신호자의 유도신호에 따른다.
- (7) 전기기계는 반드시 안전 스위치를 부착하여 감전사고 예방 조치를 한다.
- (8) 굴착장비의 운전 시 지반의 연약화 또는 연약지반상의 작업부주의로 전복사고 등이 나지 않도록 충분한 지지력을 확보한 상태에서 작업시작
- (9) 운반 장비 사용 시 연결선의 부실로 운반자재의 낙하로 인한 인명손상이 없도록 충분한 안전조치를 강구하고 이동자재의 하부에 사람이 없도록 함.
- (10) 크레인 작업 시 중량초과의 물체에 대한 인양 작업은 절대 금지시키고, 인양물의 하부에 작업원이나 다른 사람이 들어가는 것을 금지.
- (11) 중장비 운전자와 수신호자 사이에 사용하는 신호는 사전 교육을 통하여 숙지하여 오해로 인한 장비의 오작동이 없도록 충분한 교육을 실시.

#### 5) 방사능 오염 조사 시 안전계획

- (1) 방사능 조사 관련 작업복 등 개인보호구를 반드시 착용한다. (그림 2 참고)
- (2) 방사능 오염의 우려가 있는 곳에 대하여는 사람의 출입을 관리해야 함.
- (3) 방사능 오염 조사 시 지식과 경험을 갖춘 방사선조사 책임자의 관리 하에 방사선 관리구역 설정하고 작업종사자 이외의 출입을 관리할 것.
- (4) 방사선 관리구역으로부터 사람이 퇴거하거나 물품을 반출하는 경우에는 인체 및 의복·신발 등 인체에 착용하고 있는 물품과 반출하는 물품 표면의 방사성물질의 오염도 검사를 시행.
- (5) 방사능 오염조사 작업은 반드시 2인 이상을 1조로 편성하여 작업을 수행하고 각 개인에 대한 직무를 분담한다.
- (6) 방사능 조사 책임자는 방사선작업 전에 반드시 작업 현장을 확인하고 그 현장 환경에 적합한 작업방법, 절차 및 방사능 오염방지에 필요한 사항들을 정하여 방사능 오염 작업종사자에 대하여 충분한 교육을 실시할 것.

- (7) 방사능 오염 조사 수행 전 방사능오염조사장치의 정상작동상태를 확보하고 안전한 작업을 수행하기 위하여 감마선조사장치에 대한 점검절차서를 정하고 그 절차서에 따라 점검을 실시한 후 작업을 수행할 것.
- (8) 조사 지역 내 작업구역 근처에 공기오염감시기를 설치하여 알파입자에 의한 공기 오염도를 감시하고 법적 기준치를 초과하지 않도록 설정치 이상이 되면 경보음을 울리도록 함.
- (9) 방사능오염조사 작업을 종료하는 경우에는 방사능조사장치 등의 안전성 여부를 확인.



그림 2 방사능 오염조사 시 착용복장

6) 사격장 및 폭발물 취급 훈련장 오염조사 시 안전대책

불발탄 조사를 수행할 경우에 불발탄 조사에 따른 안전관련 사항들의 예방 및 준수해야 할 사항들이다. 일반적인 안전 규범에 추가하여 불발탄 조사 시 반드시 지켜야 할 사항들이다.

- (1) 소화기를 항상 구비하여 놓는다.
- (2) 불발탄 있을 우려가 있는 곳에 대하여는 사람의 출입을 통제해야 함.
- (3) 불발탄 조사 지식과 경험을 갖춘 불발탄 전문가의 책임 하에 불발탄 조사를 수행하고 작업종사자 이외의 출입을 관리할 것.
- (4) 불발탄 조사 작업은 반드시 2인 이상을 1조로 편성하여 작업을 수행하고 각 개인에 대한 직무를 분담한다.
- (5) 불발탄 조사 책임자는 불발탄 작업 전에 반드시 작업 현장을 확인하고 그 현장 환경에 적합한 작업방법, 절차 및 불발탄 사고방지에 필요한 사항들을 정하여 불발탄 작업종사자에 대하여 충분한 교육을 실시할 것.

- (6) 불발탄 조사 책임자는 불발탄 작업 전에 반드시 작업 현장을 확인하고 그 현장 환경에 적합한 작업방법, 절차 및 불발탄 사고방지에 필요한 사항들을 정하여 불발탄 작업종사자에 대하여 충분한 교육을 실시할 것.
- (7) 불발탄 조사를 수행하는 인원은 반드시 보호 장구를 구비하여야 한다.

### 3. 환경보호 및 보건관리 교육

#### 1) 교육대상자

- (1) 당해 토양정화업 및 토양오염조사기관에 종사하는 기술인력으로 등록된 자

#### 2) 교육대상자 명단 통보 및 관리

- (1) 유역(지방)환경청장은 관할구역의 교육대상자 명단을 국립환경과학원장이 수립한 교육계획에 따라 당해 교육과정 개시 15일전까지 당해 토양정화업의 대표자 및 국립환경과학원장에게 통보하여야 함
- (2) 유역(지방)환경청장은 당해 교육과정 종료 시마다 국립환경과학원장으로부터 교육 이수결과를 통보받아 업소별 보유기술인력대장의 교육이수란에 기재
- (3) 교육이수자만 현장 기술인력으로 투입

토양환경보전법 시행규칙 제32조 (기술인력의 교육)

토양관련전문기관 또는 토양정화업의 기술인력은 다음의 구분에 따라 국립환경인력개발원장이 개설하는 토양환경관리의 교육과정을 이수하여야 한다. <개정 2006.3.7, 2008.7.30, 2009.6.30>

1. 신규교육 : 교육대상자가 된 날부터 1년 이내에 24시간
2. 보수교육 : 신규교육을 받은 날을 기준으로 5년마다 8시간

- 3) 국립환경인력개발원 교육과정 중 토양오염조사에서 환경보호 및 보건관리 내용을 추가 운영한다.