

지질기원 토양오염 부지의 위해도 관리방안

Risk Management Strategies for Geogenic Soil Contamination Sites

신경희 | 김경호 | 양 경 | 이지예 | 현윤정

K O R E A
E N V I R O N M E N T
I N S T I T U T E

■ 저 자 신경희, 김경호, 양 경, 이지예, 현윤정

■ 연구진

연구책임자 신경희 (한국환경연구원 선임연구위원)
참여연구위원 김경호 (한국환경연구원 연구위원)
 양 경 (한국환경연구원 연구위원)
 이지예 (한국환경연구원 전문연구위원)
 현윤정 (한국환경연구원 선임연구위원)
 김순오 (경상국립대학교 교수)
 김윤승 (법무법인(유)광장 변호사)
 최현아 (한스자이텔재단 수석연구위원)

■ 연구자문위원 (가나다순)

김정관 (한국환경산업기술원 선임연구위원)
백기태 (전북대학교 교수)
윤여솔 (환경부 토양지하수와 과장)
이정호 (한국환경연구원 선임연구위원)
황상일 (한국환경연구원 선임연구위원)

© 2024 한국환경연구원

발행인 이 창 훈
발행처 한국환경연구원
 (30147) 세종특별자치시 시청대로 370
 세종국책연구단지 과학·인프라동
 전화 044-415-7777 팩스 044-415-7799
 <http://www.kei.re.kr>
인 쇄 2024년 9월 25일
발 행 2024년 9월 30일
등 록 제 2015-000009호(1998년 1월 30일)
ISBN 979-11-5980-949-1 93530
인쇄처 세일포커스(주) 02-2275-6894

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처를 표시해 주십시오.
신경희 외(2024), 「지질기원 토양오염 부지의 위해도 관리방안」, 한국환경
연구원.

값 7,000원

서 언

지질기원 토양오염은 인위적 활동과 무관하게 자연적으로 발생하여 국토 전반에 광범위하게 분포할 수 있는 환경 문제입니다. 최근 수도권에서 불소로 오염된 토양을 정화하는 비용이 5,853억 원에 달하는 등 토양오염 정화 비용 문제가 대두되고 있으며, 이는 개발사업 추진 시 분양가 인상을 가져와 국민 부담 증가로 이어지고 있습니다.

이러한 배경에서 규제심판부는 현행 토양 내 불소기준의 합리적 개선과 위해성평가제도 중심 정화체계로의 전환을 권고하였습니다. 현행 「토양환경보전법」에서는 자연적인 원인으로 인한 토양오염의 경우 위해성평가를 실시할 수 있도록 하고 있으나, 실제 수행 사례가 극히 소수에 불과하여 합리적 관리체계가 마련되어 있다고 보기 어려운 실정입니다.

본 연구의 목적은 자연적인 원인으로 인한 토양오염 부지의 적정 관리를 위한 제도 개선안을 도출하는 것입니다. 이를 위해 국내 오염 현황, 정화 현황 및 관련 법령 현황을 분석하고, 국외 지질기원 토양오염 관리 체계를 조사하여 시사점을 도출하였습니다. 본 연구가 향후 지질기원 토양오염을 효과적으로 관리하는 방향과 단계적 접근 방안을 마련하는 데 중요한 정책 자료가 될 것으로 기대합니다.

끝으로 본 연구를 수행한 한국환경연구원 환경평가본부의 신경희 박사, 김경호 박사, 양경 박사, 현윤정 박사, 이지예 전문연구원께 감사를 표합니다. 바쁘신 와중에도 자문을 통해 연구에 도움을 주신 한국환경산업기술원 김정관 선임연구원, 환경부 윤여솔 사무관, 전북대학교 백기태 교수께 깊은 감사를 드립니다. 또한 우리 원의 황상일 박사, 이정호 박사의 자문에도 감사를 표합니다.

2024년 9월

한국환경연구원

원장 이창훈

I 요약

I. 연구의 배경 및 목적

□ 연구 배경 및 필요성

- 최근 수도권에서 불소 관련 토양 정화비용으로 5,853억 원이 발생하는 등 토양오염 정화비용 문제가 대두됨
 - 국무조정실은 현행 토양 내 불소기준이 기업과 국민에게 큰 부담이 되고 있어 합리적 개선이 필요하다고 지적
 - 환경부에 인체·환경 위해가 없는 범위에서 국제 수준에 맞는 새로운 우려 기준안 마련을 권고
 - 중장기적으로 부지별 실정에 맞는 위해성평가제도 중심의 정화체계로 전환 추진을 제안
- 현행 「토양환경보전법」상 자연적 원인으로 인한 토양오염의 경우 위해성평가를 통해 정화 범위 등을 결정할 수 있으나, 실제 적용 사례는 극히 소수에 불과함

□ 연구 목적 및 개요

- 자연적 원인으로 인한 토양오염 부지의 적정 관리를 위한 제도 개선안을 도출함
- 국내 오염 현황, 정화 현황 및 관련 법령 현황 등을 분석하고, 국외 지질기원 토양오염 관리 체계를 조사하여 시사점을 도출함

II. 지질기원 토양오염 현황

1. 국내 지질기원 토양오염물질 분포 현황

- 불소와 비소에 대한 토양측정망 및 환경영향평가 토양정보 분석 결과
 - 불소 평균농도 157.5mg/kg, 비소 평균농도 3.20mg/kg으로 세계 평균 대비 낮음
 - 불소는 약 2.1%, 비소는 0.5%의 지점에서 1지역 오염 우려 기준 초과
 - 고농도 불소와 비소는 주로 수도권 및 도심 지역에서 발견됨

- 지질 단위별 분석 결과
 - 불소: 편마암, 쥐라기 화강암, 층적층에서 오염 우려 기준 초과 지점 다수 발견
 - 비소: 쇄설성 퇴적암, 편마암에서 오염 우려 기준 초과 지점 많음
 - 다공질 화산암과 탄산염암 지역에서는 불소와 비소 초과 지점 거의 없음

- 지질학적 특성과 오염 분포의 연관성
 - 불소는 화강암 및 화강암 기원의 편마암에서 농도가 높은 것을 확인함
 - 비소는 퇴적암에서 초과 빈도가 높음
 - 전반적으로 광역적 범위에서는 위험 수준에 미치지 않으나, 특정 지점에서 지질기원으로 인해 오염 우려기준을 초과할 가능성을 확인함

2. 토양정화 현황

- 불소 오염토양 정화 실적
 - 2022년 기준 전체 토양정화 매출액 중 불소 토양정화가 43% 차지
 - 수주 건수 기준으로는 28%를 차지
 - 대부분 지질기원임을 입증하는 절차 없이 정화를 실시하는 상황

3. 지질기원 토양오염 관리의 주요 한계점

- 지질기원 토양오염 입증을 위한 구체적인 조사 및 평가 방법 규정 부재
- ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’에 대한 명확한 정의와 판단기준 미흡
- 지질별 배경농도에 대한 기초자료 부족 및 관련 정보 공개 제한
- 지질기원 토양오염 발생 가능성이 높은 지역/사업에 대한 별도 관리 부재
- 반출정화 필요시 위해성평가 대상 제외로 인한 관리 체계의 비효율성 존재

III. 위해도 기반 토양오염부지 관리

1. 일본

□ 일본의 토양오염 관리 제도

- 「토양오염대책법」의 목적
 - 특정 유해물질에 의한 토양오염 상황 파악
 - 오염으로 인한 건강피해 방지조치 규정
 - 국민 건강 보호
- 건강피해 발생 가능성 판단
 - 지하수 음용과 일반인 출입 여부 고려
 - 건강피해 우려 시 오염 상황 조사 명령
- 구역 지정 및 관리
 - 조치실시구역과 형질변경 신고구역으로 구분
 - 오염 상태와 건강피해 가능성에 따라 구역 지정
 - 조치실시구역은 원칙적으로 형질변경 금지
- 자연 유래 토양오염 관리
 - 2017년 법 개정으로 자연 유래 오염토양 이동 허용

- 형질변경 시 신고만으로 가능하도록 규제 완화
- 자연 유래 특례구역 간 토양 이동 조건 규정

2. 독일

□ 독일의 토양오염 관리 제도

- 「연방토양보호법」에 따른 위해성평가
 - 오염물질의 종류, 농도, 확산 가능성 등 고려
 - 위해성평가 결과에 따라 정화 수준 결정
- 토양 상태 모니터링 프로그램 운영
 - 1985년부터 장기 토양 모니터링 지역(BDF) 운영
 - 토양의 일반적 상태와 변화 추이 지속 관찰
 - 토양 보호 정책 효과 평가 및 과학적 근거 마련
- 토양 평가(Bodenschätzung) 제도
 - 농업용 토지의 지도 작성 및 평가
 - 과세, 농업 질서, 토양 보호 등 다목적 활용
- 오염부지 통계 관리
 - 연방/주 토양보호 실무그룹(LABO)의 오염부지 통계 작성
 - 오염 의심 지역, 오염 확인 부지, 정화 현황 등 파악

3. 시사점

- 자연 기원 오염토양에 대한 별도 관리 체계 마련 필요
- 위해성에 기반한 토양오염 관리 체계 도입 필요
- 장기적이고 체계적인 토양 모니터링 체계 구축 필요
- 토양의 다양한 기능과 가치를 고려한 종합적 관리 접근 필요
- 토양오염 관련 정보의 체계적 관리와 공유 시스템 구축 필요

IV. 지질기원 토양오염 적정 관리 방안

- 자연 기원 토양오염 입증 방법 구체화
 - ‘자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안)’ 마련
 - 조사 대상 지역 선정 기준, 시료 채취 방법, 분석 항목 등 규정
 - 주변 지역과의 비교 분석, 지질학적/지구화학적 특성 평가 방법 제시
 - 인위적 오염 가능성 배제를 위한 검토 사항 포함
- 지질기원 토양오염 관리 합리화
 - 자연 기원 토양오염에 대한 법적 정의 신설 필요
 - 현행법상 토양오염 정의와 배치되는 부분 해소
 - 지질학적 원인으로 인한 오염임을 명시하고 위해도 관리 대상임을 규정
 - 지질기원 토양오염에 대한 차별화된 관리 방안 마련
 - 조사 방법, 위해저감조치, 반출/이동 관련 조건 등 규정
- 통합 정보 시스템 구축
 - 장기적이고 체계적인 토양 모니터링 시스템 구축
 - 물리적/화학적/생물학적 특성 등 다양한 토양 상태 지표 포함
 - 기존 분야별 데이터 활용 및 통합
 - 종합적인 토양오염 정보 시스템 구축
 - 오염원, 오염부지, 정화 현황, 위해성평가 정보 등 포함
- 위해도 기반 부지 관리 체계 도입
 - 토양환경보전법 체계의 위해성 기반 관리체계로의 전환 필요
 - 법적 체계 개선, 위해성평가 체계 구축, 전문인력 양성 등 추진
 - 위해소통 체계 강화 및 제도적 지원 확대

주제어: 지질기원, 토양오염, 위해성, 정보 시스템

| 차례 |

요 약	i
제1장 서론	1
1. 연구의 필요성 및 목적	1
2. 연구의 내용 및 수행 체계	3
제2장 지질기원 토양오염 현황	5
1. 국내 지질기원 토양오염 관리 체계	5
2. 지질기원 토양오염 사례	9
3. 지질기원 토양오염물질 분포	18
4. 토양정화 현황	33
5. 소결	36
제3장 위해도 기반 토양오염부지 관리	39
1. 일본	39
2. 독일	57
3. 소결	72
제4장 지질기원 토양오염 적정 관리 방안	74
1. 개선 방향	74
2. 이행방안	75
참고문헌	103

부 록	109
Ⅰ. 일본 토양오염대책법 시행규칙 별표 6(번역본)	111
Ⅱ. 일본 환경성 통지의 별지(번역본)	114
Ⅲ. 일본 토양오염 조사 및 조치 가이드라인의 Appendix-3(번역본)	117
Executive Summary	129

| 표차례 |

〈표 2-1〉 토양오염물질 위해성평가 대상	6
〈표 2-2〉 자연적인 원인으로 인한 토양오염 입증 방법	7
〈표 2-3〉 위해성평가 항목 및 방법	8
〈표 2-4〉 위해성평가 계획서 및 평가서의 내용 일부	8
〈표 2-5〉 세계 토양 및 상부대륙지각 내 미량원소 평균농도	19
〈표 2-6〉 환경부 토양측정망 지목별 조사 항목	21
〈표 2-7〉 토양측정망 조사 자료(2020~2021년) 불소 및 비소 농도의 통계량	24
〈표 2-8〉 토양오염 메타자료(토양측정망 및 환경영향평가 토양정보) 기반의 토양 내 불소(21,255 지점) 및 비소(46,599 지점) 농도 통계량	25
〈표 2-9〉 우리나라 주요 지질 단위와 세부 암상	30
〈표 2-10〉 토양오염 메타자료의 지질 단위별 토양 내 불소 농도 통계량	31
〈표 2-11〉 토양오염 메타자료의 지질 단위별 토양 내 비소 농도 통계량	32
〈표 2-12〉 최근 3년간 공공기관 토양정화 사업 중 토양세척 비율	33
〈표 2-13〉 최근 5년간 민간업체 부지개발 사업의 토양정화	33
〈표 2-14〉 A사의 최근 불소 오염토양 정화 사업	34
〈표 2-15〉 토양정화업 5년 매출 현황	35
〈표 3-1〉 토양오염 상황 조사의 대상	42
〈표 3-2〉 제1종 특정 유해물질(휘발성 유기화합물)의 환경기준	44
〈표 3-3〉 제2종 특정 유해물질(중금속 등)의 환경기준	44
〈표 3-4〉 제3종 특정 유해물질(농약, PCB 등)의 환경기준	45
〈표 3-5〉 오염 제거 등의 조치	46
〈표 3-6〉 형질변경 신고구역의 지정	49
〈표 3-7〉 형질변경 신고	50
〈표 3-8〉 형질변경 신고 필요 사항	51

〈표 3-9〉 자연 유래 토양오염의 요건	52
〈표 3-10〉 자연 유래 특례구역 지정	54
〈표 3-11〉 오염토양의 반출	55
〈표 3-12〉 자연 유래 특례구역 간 토양의 이동 조건	56
〈표 3-13〉 오염물질과 영향	63
〈표 4-1〉 자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안) 본문	79
〈표 4-2〉 자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안)[별표 1]	84
〈표 4-3〉 자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안)[별표 2]	85
〈표 4-4〉 자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안)[별표 3]	85
〈표 4-5〉 자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안)[별표 4]	86
〈표 4-6〉 자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안)[별표 5]	87
〈표 4-7〉 ‘토양측정망 및 토양오염실태조사 결과’ 보고서 목차	96
〈표 4-8〉 토양 장기 모니터링 항목(예시)	98
〈표 4-9〉 위해성평가 제도 도입 방안에 관한 선행연구 결과에 따른 개선 과제	102

| 그림차례 |

〈그림 1-1〉 연구 수행 체계도	4
〈그림 2-1〉 위해성평가 대상부지	10
〈그림 2-2〉 위해성평가 대상부지(평가단위 1, 2) 유효 노출경로	11
〈그림 2-3〉 위해성평가 결과	11
〈그림 2-4〉 세계 토양 및 상부대륙지각 내 미량원소 평균농도 비교	19
〈그림 2-5〉 미국 오하이오주 지질기원 토양 비소농도 분포	20
〈그림 2-6〉 토양측정망 조사 지점 및 조사 시기(7회)별 불소 및 비소 농도 현황	22
〈그림 2-7〉 토양측정망 조사 자료(2020~2021년) 불소 및 비소 농도의 통계분포	24
〈그림 2-8〉 토양오염 메타자료(토양측정망 및 환경영향평가 토양정보)의 토양 내 불소(21,255 지점) 및 비소(46,599 지점) 농도 분포도	26
〈그림 2-9〉 토양오염 메타자료(토양측정망 및 환경영향평가 토양정보)의 지질 단위별 토양 내 불소 및 비소 농도 비교	27
〈그림 3-1〉 일본 토양오염대책법에서 고려하는 건강피해 발생 경로	41
〈그림 3-2〉 일본 토양오염대책법에 규정된 특정 유해물질의 종류	43
〈그림 3-3〉 일본 구역 지정의 흐름도	45
〈그림 3-4〉 토지구분에 따른 지시 조치 내용	47
〈그림 3-5〉 자연 유래 특례구역 간 이동 가능 여부 예시	56
〈그림 3-6〉 독일의 토양 상태 장기 관측 지점들	59
〈그림 3-7〉 독일 표층토에서의 비소 배경값: 모암 그룹과 주요 토지이용 유형별	66
〈그림 3-8〉 독일 토양의 비소 배경값	67
〈그림 3-9〉 시군별 오염 의심 지역 수를 나타낸 지도	70
〈그림 3-10〉 시군별 오염부지 수를 나타낸 지도	71
〈그림 3-11〉 2010년부터 2022년까지의 오염된 토양(Altlasten)의 처리 현황 개요	72
〈그림 4-1〉 오염원지역별 기준 초과 지점 분류 및 분석 항목별 초과지점 수	96
〈그림 4-2〉 휴대람에서 토양분류 검색 결과 예시	99

제1장

서론

1. 연구의 필요성 및 목적

가. 연구의 필요성

지난 5년간('18~'22년) 수도권에서만 불소 관련 토양 정화비용이 5,853억 원 발생한 것으로 파악되었고, 전국적으로는 이보다 클 것으로 국무조정실은 추정하였다. 규제심판부는 이로 인한 정화비용이 주택 건설 등 개발사업 추진 시 분양가 인상을 가져와 국민 부담 증가로 이어진다고 지적하면서, “현행 토양 내 불소기준은 기업·국민에 큰 부담이 되고 있으므로 안전성·실현 가능성 등 제반사항을 감안하여 국제적 수준에 맞게 합리적으로 개선해야 한다”라고 지적하였다. 이에 따른 권고 사항으로 1) 환경부는 인체·환경에 위해가 없는 범위 내에서 국제 수준에 맞게 새로운 우려 기준안을 '24년 상반기까지 마련할 것, 2) 이와 함께 중장기적으로 선진국과 같이 부지별 실정에 맞게 토양오염을 관리하는 위해성평가제도 중심 정화체계로 전환을 추진할 것을 제시하였다.¹⁾

해당 자료(국무조정실 보도자료, 2023.9.25)에 따르면, 지반 대부분이 화강암(불소함유량 높음)으로 이루어져 자연상태에서 불소가 흔하게 발견(평균 배경농도: 258mg/kg)되고 우려 기준(주거지역: 400mg/kg)을 초과하는 지역이 전 국토의 11.5%(12~'21년 전 국토 배경농도 조사결과, 환경부)에 달하는 국내 지질 특성이 토양 내 불소기준에 반영되지 않은 것으로 보았다.

환경부는 규제심판부의 권고를 수용하여 관련 후속조치들을 신속히 추진해 나갈 계획이며,

1) 국무조정실 보도자료(2023.9.25), pp.1-2.

국무조정실은 추진상황을 지속 점검·지원할 예정이라고 밝혔다.²⁾ 이후 환경부는 서초구의 재건축 구역 내 불소 정화비용 관련 보도³⁾에 대한 환경부 보도설명자료(2023.11.2)에서, 현행 불소 기준의 적절성을 재검토하고 새로운 기준을 마련하기 위해 국외 기준 및 시험방법 조사, 국내 불소 배경농도 수준 분석, 위해성평가 등 과학적 조사를 진행하고 있다고 밝혔다. 또한 전문가 및 이해관계자의 의견을 충분히 수렴하여 국민 건강과 환경에 위해가 없는 범위 내에서 합리적 기준안을 조속히 마련하겠다고 설명하였다.

현행 「토양환경보전법」에서는 이러한 자연적인 원인으로 인한 토양오염의 경우, ‘위해성 평가’를 실시하고, 그 결과를 토양정화의 범위, 시기 및 수준 등에 반영할 수 있도록 하고 있다. 자연적인 원인으로 인한 오염의 경우, 위해도를 고려한 정화목표 등을 설정하도록 하고 있어, 인위적인 오염과는 차별화된 관리를 도입했다고 볼 수 있다. 하지만 현재까지 자연적인 원인으로 인한 토양오염에 위해성평가를 수행한 사례가 극히 소수에 불과하고, 위해성평가 결과를 반영한다고 하더라도 최종 정화를 실시해야 한다는 점을 고려하여 볼 때 합리적 관리체계가 마련되어 있다고 볼 수 없다.

규제심판부에서 권고한 바와 같이, 중장기적으로 선진국과 같이 부지별 실정에 맞게 토양 오염을 관리하는 위해성평가제도 중심 정화체계로 전환을 추진할 필요가 있다. 또한, 단기적으로는 자연적인 원인으로 인한 토양오염의 경우, 위해도를 고려한 적정 관리 방안의 도입이 필요하다.

나. 연구 목적 및 개요

본 연구의 목적은 자연적인 원인으로 인한 토양오염부지의 적정 관리를 위한 제도 개선안을 도출하는 것이다. 이를 위하여 국내 오염 현황, 정화 현황 및 관련 법령 현황 등을 분석하였다. 국외 지질기원 토양오염 관리 체계를 분석하여 시사점을 도출하고, 이를 통해 개선방안을 제안하였다.

2) 국무조정실 보도자료(2023.9.25), pp.1-2.

3) 한국경제(2023.11.1), “‘조합원당 4000만 원 더 내라’ 방배13구역 복병된 환경규제”, 검색일: 2024.3.20.

다. 용어

「토양환경보전법」 제15조의5 제2항에서 위해성평가를 실시하는 경우의 하나로 ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염이라고 대통령령으로 정하는 방법에 따라 입증된 부지의 오염토양을 정화하려는 경우’라고 정하고 있다. ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’에 대한 별도 정의는 없지만, 시행령에서 정하고 있는 입증 방법이 1) 해당 오염물질의 농도가 주변지역의 토양 분석결과와 비슷함을 증명할 것, 2) 해당 오염물질이 대상부지의 기반암으로부터 기인하였음을 증명할 것과 3) 그 밖에 과학적인 방법으로 해당 오염물질이 자연적인 원인으로 발생하였음을 증명할 것임을 볼 때, 주요 대상이 지질학적 원인으로 인한 토양오염임을 알 수 있다. 기타 화산활동, 산불, 방사성 물질 등으로 인한 원인도 고려할 수 있으나, 발생 가능성을 고려하면 지질학적인 원인으로 인한 오염이 주요하다고 볼 수 있다. 본 연구의 대상은 지질학적인 원인으로 인한 오염임을 명확히 하고자 ‘지질기원 토양오염’이라는 용어를 사용하였고, 법령 조항을 인용하기 위한 경우에만 ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’이라는 용어를 사용하였다.

2. 연구의 내용 및 수행 체계

가. 주요 연구 내용

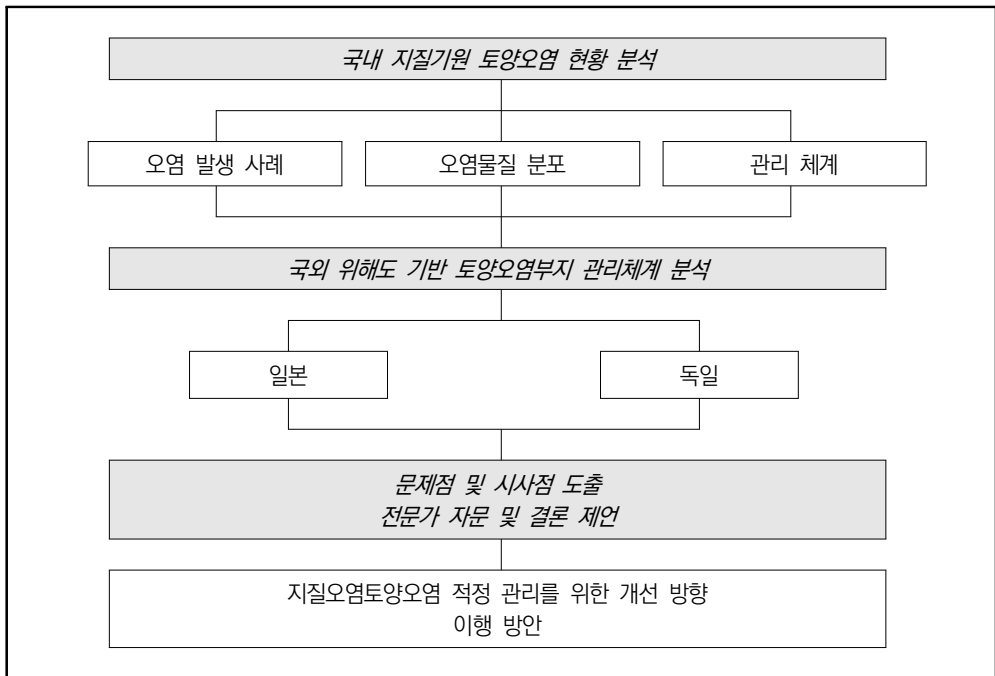
- 1) 국내 지질기원 토양오염 현황
 - 지질기원 토양오염 사례
 - 지질기원 물질 분포
 - 토양정화 및 관리체계
- 2) 국외 위해도 기반 토양오염부지 관리제도
 - 일본
 - 독일

3) 지질기원 토양오염 적정 관리 방안

- 개선 방향
- 이행 방안

나. 연구의 수행체계

본 연구에서는 국내 지질기원 토양오염의 발생 사례, 오염물질의 분포, 정화 현황 및 관리 체계와 관련하여 조사·분석하였다. 지질기원 토양오염과 관련한 국외 사례 조사를 통해 국내 적용에 대한 시사점을 도출하였으며, 관련 분야 전문가 및 실무자의 의견을 수렴하였다. 이를 통해 한계점, 시사점 및 전문가 의견 수렴을 종합하여, 지질기원 토양오염부지의 위해도를 적정 관리하기 위한 제도 개선 사항들을 제안하였다.



자료: 저자 작성.

〈그림 1-1〉 연구 수행 체계도

제2장

지질기원 토양오염 현황

1. 국내 지질기원 토양오염 관리 체계

가. 위해성평가 대상

「토양환경보전법」 제15조의5 제2항에서 위해성평가를 실시할 수 있는 경우를 정하고 있고, 제4호에 자연적인 원인으로 인한 토양오염의 내용을 정하고 있다. ‘위해성평가’에 대한 정의는 ‘오염물질의 종류 및 오염도, 주변 환경, 장래의 토지이용계획과 그 밖에 필요한 사항을 고려하여 해당 부지의 토양오염물질이 인체와 환경에 미치는 위해의 정도를 평가’하는 것이고, 위해성평가를 통해 토양정화의 범위, 시기 및 수준 등을 정할 수 있도록 하고 있다 (표 2-1 참조).

우리나라는 토양이 오염되면 이행기간 내에 일률적으로 정화기준 이내로 정화하는 것을 원칙으로 하고 있으나, 예외적으로 일정 조건이 만족할 경우에만 이와 같은 ‘위해성평가’를 통한 토양오염 관리를 적용하고 있다. 위해성평가가 가능한 예외적인 경우는 「토양환경보전법」 제15조의5 제1항 제1~5호에 규정되어 있는데, 앞서 언급한 자연적인 원인으로 인한 토양오염, 정화 곤란한 부지 등이 해당한다(표 2-1 참조).

‘토양정화의 범위, 시기 및 수준’ 등을 정할 수 있다는 내용은, 토양오염 우려 기준 이하로 낮추어야 하는 정화기준의 예외, 정화 이행기간의 조정 등으로 해석할 수 있다.

〈표 2-1〉 토양오염물질 위해성평가 대상

구분	토양환경보전법
조항	제15조의5(위해성평가)
내용	<p>① 환경부장관, 시·도지사, 시장·군수·구청장 또는 정화책임자는 제23조의2 제2항제1호에 따라 지정을 받은 위해성평가기관으로 하여금 오염물질의 종류 및 오염도, 주변 환경, 장래의 토지이용 계획과 그 밖에 필요한 사항을 고려하여 해당 부지의 토양오염물질이 인체와 환경에 미치는 위해의 정도를 평가(이하 “위해성평가”라 한다)하게 한 후 그 결과를 토양정화의 범위, 시기 및 수준 등에 반영할 수 있다.</p> <p>② 위해성평가는 다음 각 호의 어느 하나(정화책임자의 경우에는 제4호 및 제5호만 해당한다)에 해당하는 경우에 실시할 수 있다.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 제6조의3에 따라 토양정화를 하려는 경우(국유재산) 2. 제15조 제3항 각 호 외의 부분 단서에 따라 오염토양을 정화하려는 경우(정화책임자에 의한 정화곤란) 3. 제19조 제3항에 따라 오염토양 개선사업을 하려는 경우(대책지역 오염개선이 책임자에 의해 실시 곤란) 4. <u>자연적인 원인으로 인한 토양오염이라고 대통령령으로 정하는 방법에 따라 입증된 부지의 오염토양을 정화하려는 경우(제15조의3 제3항 단서에 따라 오염토양을 반출하여 정화하는 경우는 제외한다)</u> 5. 그 밖에 위해성평가를 할 필요가 있는 경우로서 대통령령으로 정하는 경우(공공이 정화책임자이고 정화곤란한 부지일 경우) <p>③~④ 생략</p>

자료: 국가법령정보센터, “토양환경보전법”.

나. 지질기원 토양오염 입증

위해성평가를 실시하기 위해서는 ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’임을 입증하여야 하는데, 이에 관한 방법을 「토양환경보전법 시행령」 제11조의2 제1항에서 정하고 있다(표 2-2 참조). 시행령에서 정한 3가지 방법에 관한 조사 방법, 분석 방법 및 평가 방법 등에 대한 하위 규정이나 지침은 없다.

시행령에서 규정한 방법으로 자연적인 원인으로 인한 토양오염임을 입증하고자 하는 정화 책임자는 토양 관련 전문기관이 작성한 보고서를 환경부장관에게 제출하여야 하고, 환경부장관은 보고서를 확인하여 그 결과를 정화책임자에게 통보하여야 한다(표 2-2 참조).

〈표 2-2〉 자연적인 원인으로 인한 토양오염 입증 방법

구분	토양환경보전법 시행령
조항	제11조의2(위해성평가의 대상 등)
내용	<p>① 법 제15조의5 제2항제4호에서 “대통령령으로 정하는 방법”이란 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 방법을 말한다.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 해당 오염물질의 농도가 주변지역의 토양 분석 결과와 비슷함을 증명할 것 2. 해당 오염물질이 대상부지의 기반암으로부터 기인하였음을 증명할 것 3. 그 밖에 과학적인 방법으로 해당 오염물질이 자연적인 원인으로 발생하였음을 증명할 것 <p>② 시·도지사, 시장·군수·구청장 또는 정화책임자는 법 제15조의5 제2항제4호에 따른 위해성평가를 실시하려는 경우에는 토양 관련 전문기관이 작성한 제1항 각 호의 사항에 대한 보고서를 환경부장관에게 제출하여야 한다.</p> <p>③ 환경부장관은 제2항에 따라 제출한 보고서를 확인하고 자연적 요인에 의한 토양오염 여부 등 그 결과를 시·도지사, 시장·군수·구청장 또는 정화책임자에게 통보하여야 한다.</p> <p>④~⑤ 생략</p>

자료: 국가법령정보센터, “토양환경보전법 시행령”.

다. 위해성평가 항목 및 방법

‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’으로 입증이 완료된 경우, 위해성평가를 수행한다. 위해성평가의 항목과 방법은 「토양환경보전법 시행규칙」 제19조의3에서 정하고 있다. 동 조 제1항에서 위해성평가 오염물질을 규정하고 있는데, 불소를 포함한 14개 항목이 대상이며 (표 2-3 참조), 제1항 제3호에서 말하는 ‘그 밖에 환경부장관이 인체와 환경에 위해를 줄 우려가 있다고 인정하여 고시하는 물질’에 대한 추가 규정은 없다.

위해성평가에 대한 세부적인 사항은 ‘토양오염물질 위해성평가 지침(환경부고시 제 2018-184호)’에 정해져 있는데, [별표2]와 [별표3]에서 ‘토양오염물질 위해성평가 계획서’와 ‘토양오염물질 위해성평가서’의 작성 내용을 확인할 수 있다. 해당 내용 중 ‘대상부지 현황 및 이력’, ‘평가대상지역 현황’ 및 ‘부지오염 현황’에 포함되어야 하는 내용은 다음 〈표 2-4〉와 같다.

〈표 2-3〉 위해성평가 항목 및 방법

구분	토양환경보전법 시행규칙
조항	제19조의3(위해성평가의 항목 및 방법)
내용	① 법 제15조의5 제1항에 따른 위해성평가(이하 “위해성평가”라 한다) 대상 오염물질은 다음 각 호와 같다. 1. 유류: 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, 석유계총탄화수소 2. 중금속류: 카드뮴, 구리, 비소, 수은, 납, 6가크롬, 아연, 니켈 2의2. 불소 3. 그 밖에 환경부장관이 인체와 환경에 위해를 줄 우려가 있다고 인정하여 고시하는 물질 ②~⑨ 생략

자료: 국가법령정보센터, “토양환경보전법 시행규칙”.

〈표 2-4〉 위해성평가 계획서 및 평가서의 내용 일부

구분	토양오염물질 위해성평가 지침	
	[별표2] 토양오염물질 위해성평가 계획서	[별표3] 토양오염물질 위해성평가서
내용	나. 대상부지 현황 및 이력 (1) 주소 (2) 과거/현재 토지이용도 및 장래 토지이용 계획 (3) 대상부지 및 주변지역 특성 (4) 시설물에 대한 개요 (5) 지하수 식수 사용 여부 (6) 수용체: <input type="checkbox"/> 주민(<input type="checkbox"/> 성인 <input type="checkbox"/> 어린이) <input type="checkbox"/> 근로자	다. 평가대상지역 현황 (1) 부지 및 주변지역 현황 (2) 부지 이력 (3) 장래 토지이용계획 (4) 부지의 지형/지질학적/수리학적/수리지질학적 현황 (5) 시설물에 대한 개요 (6) 지하수 식수 사용 여부 (7) 수용체: <input type="checkbox"/> 주민(<input type="checkbox"/> 성인 <input type="checkbox"/> 어린이) <input type="checkbox"/> 근로자 라. 부지오염 현황 (1) 오염원 및 오염 이력 (2) 오염매체(토양, 지하수) 및 오염 현황 (3) 오염물질 이동 경로 및 분포 현황 (4) 부지오염 영향지역 범위

자료: 국가법령정보센터, “토양오염물질 위해성평가 지침”.

현재 ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’임을 입증하기 위한 세부 방법이 없고, 이를 보완하기 위해 ‘토양오염물질 위해성평가 지침’을 활용하기에는 해당 내용 작성 방법이 구체적이지 않은 실정이다. 다만 ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’의 경우, 이를 입증하기 위한 보고서 작성 시 위해성평가 대상부지의 지질학적 특성을 비교적 상세하게 조사했다면 해당 내용을 활용할 수 있을 것이다.

2. 지질기원 토양오염 사례

가. 인천국제공항 건설 및 개발지역

인천국제공항 건설 과정에서 발생한 자연 기원 토양오염 사례는 국내에서 자연적인 원인으로 인한 토양오염에 대해 위해성평가를 적용한 사례이며, 환경부에서 공개한 자료를 토대로 볼 때 현재까지 유일한 사례이다. 2006년 공항 건설사업 부지 내 토양오염을 확인하였고, 이후 제2여객터미널 조성공사 현장,⁴⁾ 런업장⁵⁾ 등에 대한 위해성평가를 진행하였고, 관련 결과 일부는 공개한 바 있다.

1) 위해성평가서 공고 내용

최근 환경부는 2020년에 ‘인천국제공항 건설 및 개발지역 토양오염물질 위해성평가서’를 공고하였다.⁶⁾ 해당 공고문에 따르면 위해성평가의 배경, 주요 내용 및 조치계획은 다음과 같다.

가) 배경

- 자연적으로 불소 농도가 높은 주변지역의 암석을 채취·매립한 인천국제공항 건설 및 개발지역 부지에 대한 위해성평가 실시
- 인천공항 제2여객터미널 조성공사 위해성평가 검증 결과, 후속 관리 대책의 일환으로 시행

4) 환경부(2016.5.11), “인천국제공항 제2여객터미널 조성공사현장 위해성평가서 공고”, 검색일: 2024.5.15.

5) 환경부(2016.11.11), “인천국제공항 런업장 조성공사현장 위해성평가서 공고”, 검색일: 2024.5.15.

6) 환경부(2020.10.19), “인천국제공항 건설 및 개발지역 토양오염물질 위해성평가서 공고”, 검색일: 2024.5.15.

나) 위해성평가 개요

- (평가부지) 인천국제공항 건설 및 개발지역 운서동, 용유동 부지(약 14,091,990m²)
- (오염 원인) 공항공사에서 인천공항 3, 4단계 건설사업 부지에 자연적으로 불소 농도가 높은 주변지역의 암석을 채취·매립하여 토양오염 우려 기준 초과
- (평가기관) 경상대학교 부속 농업생명과학연구원

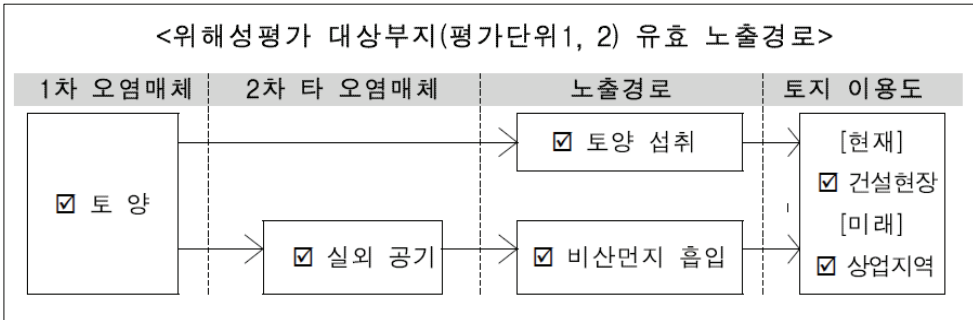


자료: 환경부(2020.10.19), “인천국제공항 건설 및 개발지역 토양오염물질 위해성평가서 공고”, 검색일: 2024.5.15.

〈그림 2-1〉 위해성평가 대상부지

다) 주요 내용

- 시료채취·분석
 - 9,568개(평가단위1 6,305개, 평가단위2 3,263개)의 토양 시료(표토)를 분석한 결과를 노출농도에 반영
- 노출평가
 - 현재 부지용도(건설현장)와 미래 부지용도(공항 관련시설 및 복합 리조트)를 고려하여 노출경로를 결정하고 노출경로별 노출량 산정(그림 2-2 참조)



자료: 환경부(2020.10.19), “인천국제공항 건설 및 개발지역 토양오염물질 위해성평가서 공고”, 검색일: 2024. 5.15.

〈그림 2-2〉 위해성평가 대상부지(평가단위 1, 2) 유효 노출경로

- 독성평가
 - 불소는 비발암물질이므로 총초과발암위해도는 평가하지 않고 비발암위해도만 평가함
- 위해성평가 결과
 - 인천공항 건설 및 개발사업 부지에 대한 위해성평가 결과, 비발암위해도를 나타내는 위험지수는 모든 수용체에 대하여 1 미만으로 인체에 허용 가능한 수준임(그림 2-3 참조)

평가단위	구분	대상	위험지수
평가단위1	현재	공사장근로자	1.37×10^{-1}
	향후	공항근무자	5.09×10^{-3}
평가단위2	현재	공사장근로자	1.51×10^{-1}
	향후	리조트근무자	5.61×10^{-3}
		여행객(성인)	4.66×10^{-4}
		여행객(어린이)	3.78×10^{-3}

※ 허용가능한 위험지수(He)는 1로 위험지수가 1보다 크면 비발암위해도가 있는 것으로 판정

자료: 환경부(2020.10.19), “인천국제공항 건설 및 개발지역 토양오염물질 위해성평가서 공고”, 검색일: 2024. 5.15.

〈그림 2-3〉 위해성평가 결과

라) 조치계획(안)

- 위해성평가 결과, 위험지수가 1 미만이므로 불소오염에 의한 비발암위해성은 없는 것으로 평가됨
- 현재 위해성평가 대상부지 지역에서 진행되는 공사로 인한 비산먼지가 주변지역에 확산하는 것을 방지하는 대책 및 공사 완료 시점의 확산 방지대책 시행
- 확산 방지 조치가 안정적으로 운영되는지 여부와 주변 불소오염이 확산하는지 여부를 확인하기 위하여 매년 관련법에 따라 모니터링 실시

2) 자연적인 원인으로 인한 토양오염 입증

공고문에서 밝힌 것처럼, 관련법에서 규정한 ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염이라고 대통령령으로 정하는 방법에 따라 입증된 부지의 오염토양을 정화하려는 경우’에 해당하여 위해성평가를 수행한 사례이며, 이를 입증하기 위한 과정이 선행되었을 것이다. 해당 과정에 대한 구체적인 보고서는 비공개 자료이므로 확인이 불가하지만, 이종환 외(2018)가 용유도 을왕산에 분포하는 암석 내 불소 기원에 관해 연구한 결과를 참고하여 볼 때, 자연발생적 기원임을 밝히는 과정에 다음의 방법들이 포함되었을 것으로 판단된다.

- 야외지질조사
- 전자현미경 관찰
- 기기분석

해당 연구(이종환 외, 2018)에서는 야외지질조사를 통해 암석의 야외 특성을 파악하여 암석학적 특징을 정리하였고, 구성 광물의 조직 및 상호관계를 파악하기 위해 암석시료를 박편으로 제작하여 편광현미경으로 관찰하였다. 연구지역 내 암석의 기기분석을 위해 암석 시료를 파쇄하여 파우더를 제작하고, 이를 이용하여 X-선 형광분석(XRF)으로 불소 함량을 분석하였다. 일부 시료에는 X-선 회절분석(XRD) 및 전자현미분석(EPMA)을 실시하였다. 연구 결과, 용유도 을왕산 내 암석의 불소는 흑운모화강암과 압쇄암에서 고농도로 존재하였고, 불소의 기원은 자연적인 기원인 것으로 판단하였다.

나. 군부대 부지

최근 토양오염 정화책임과 관련하여 판례가 있었다. 해당 판결⁷⁾은 자연적 원인에 의한 토양오염과 정화책임의 범위에 관한 사항을 포함하고 있다.

1) 개요

서울 서초구 A 일대에 위치한 국방부 소유의 군부대 부지에서 토양오염이 발견되었다. 이에 서초구청장은 2018년 9월 11일, 해당 부지의 TPH, 벤젠, 에틸벤젠, 크실렌, 불소 오염에 대해 국방부에 정화명령을 내렸다. 국방부는 2022년 8월 10일까지 불소를 제외한 오염물질에 대한 정화를 완료하였으나, 불소 오염에 대해서는 자연적 원인이라고 주장하며 정화명령의 무효 확인을 구하는 소송을 제기하였다.

2) 원고 주장의 요지

가) 법적 근거 부재

- 「토양환경보전법」 제6조의3에 따르면 국유재산으로 인한 오염의 경우 환경부장관으로 하여금 직접 오염토양을 정화할수 있도록 하고 있음
- 피고는 피고(서초구청장)는 「토양환경보전법」 제15조 제3항을 근거로 처분을 했으나, 이는 적용될 수 없음

나) 토양오염의 정의 불일치

- 해당 부지의 불소는 자연적 원인에 의한 것으로, 「토양환경보전법」 제2조 제1호의 ‘사업활동이나 그 밖의 사람의 활동에 의한’ 토양오염에 해당하지 않음

7) 서울행정법원 2023.11.30. 선고 2022구합86037 판결.

다) 정화책임자 해당 여부

- 원고는 1996년 1월 5일 이전에 해당 토지를 취득함
- 「토양환경보전법」 제10조의4 제2항 제2호, 제4호에 따라 정화책임자에 해당하지 않음

3) 법원의 판단

법원은 이 사건에 대해 다음과 같이 판단하였다.

가) 법적 근거 관련

「토양환경보전법」 제6조의3과 제15조 제3항이 서로 양립할 수 없는 관계라고 단정하기 어려우며, 환경부장관의 토양정화 절차가 진행된 사실이 없고, 원고도 처분권한을 문제 삼지 않았음을 근거로, 피고의 처분에 외형상 객관적으로 명백한 하자가 있다고 볼 수 없다고 판단하였다.

나) 토양오염의 정의 관련

토양정밀조사 결과, 불소오염이 자연적 원인에 의한 것으로 판단하였고, 피고도 처분서에 불소 부분에 대해서는 스스로 ‘자연적 원인’이라고 기재하였음을 지적하였다. 또한 자연적인 원인에 의한 오염은 「토양환경보전법」 제2조 제1호에서 정의하는 ‘토양오염’에 해당하지 않는다고 판단하였다. 해당 법률에서는 토양오염을 “사업활동이나 그 밖의 사람의 활동에 의하여 토양이 오염되는 것”으로 정의하고 있어, 자연적 원인으로 인한 오염은 이에 해당하지 않는다는 것이다. 따라서 불소오염이 「토양환경보전법」상 ‘토양오염’에 해당한다는 전제에서 이 사건 처분을 하였으므로 위 처분의 하자가 중대하고 객관적으로 명백하다고 판단하였다.

다) 정화책임자 해당 여부

원고가 1971~1972년경 해당 부지 소유권을 취득한 사실이 확인되었고, 「토양환경보전법」 제10조의4 제2항 제2호에 따르면, 1996년 1월 5일 이전에 토지를 양수한 경우 정화책임자에 해당하지 않는다. 이러한 근거를 바탕으로 법원은 불소 오염에 대한 정화명령에 증대하고 명백한 하자가 있어 무효라고 판결하였다.

라) 가분성 여부

법원은 다음의 사항들을 종합하여, 오염토양에 자연적 원인으로 인한 오염물질과 다른 오염물질이 함께 존재하는 경우에도 특정 오염물질이 오로지 자연적 원인에 의한 것임이 입증된다면 「토양환경보전법」 제15조의5 제2항 제4호에 따라 해당 오염물질에 대한 위해성 평가를 할 수 있다고 봄이 타당하므로, 피고의 2차 명령은 불소오염에 관한 이 사건 처분과 나머지 부분이 가분성이 있다고 봄이 타당하다고 판단하였다.

- 개별 오염물질별로 오염물량을 확인할 수 있고 정화 방법에 차이가 있으며, 원고는 다른 오염물질(TPH, 벤젠, 에틸벤젠, 크실렌)에 대한 정화를 이미 완료함
- 「토양환경보전법」 및 하위 법령은 오염토양에 존재하는 특정 오염물질이 자연적인 원인으로 발생한 경우 해당 오염물질을 대상으로 위해성평가를 실시할 수 있다고 규정하고 있음. 이와 달리 오염토양에 존재하는 오염물질 전부가 자연적인 원인에 의한 것이어야만 위해성평가를 실시할 수 있다고 해석할 만한 별다른 근거는 없음
- 토양 관련 전문기관은 대상 토지의 현황 및 이력 조사, 대상 토지 및 주변지역 토양의 비교 분석, 대상 토지 및 주변지역의 토양층, 기반암 등에 대한 광물학적·지구과학적 분석 등을 통하여 특정 오염물질이 자연적인 원인에 의한 것인지 여부를 상당 부분 입증하여 판별할 수 있을 것으로 보이므로, 오염토양에 존재하는 여러 가지 오염물질 중 일부 오염물질이 자연적 기원임을 판단하는 것이 불가능하다고 보이지도 않음
- 오염토양에서는 여러 가지 오염물질이 함께 검출되는 경우가 많을 수 있는데, 오염물질 전부가 자연적인 원인에 의한 것이어야만 위해성평가를 실시할 수 있다고 본다면 그 적용 범위를 부당하게 축소시킬 우려도 있음

4) 결론

법원은 피고가 원고에 대해 한 서울 서초구 일대 정화조치명령처분 중 불소에 관한 부분이 무효임을 확인하였다.

다. ○○산업(주) 석산개발사업 부지

전국에서 운영 중인 토석채취 사업장은 약 200~300개로 추정되며 2022년 기준으로 「환경영향평가법」에 따른 사후환경영향조사 대상 사업장은 139개이다. 대상 사업장에 대한 2019~2022년의 사후환경영향조사 통보서의 내용을 분석한 결과, 비소, 납, 카드뮴 등이 토양오염기준을 초과한 사업장은 14개소, 이 중 낙동강유역환경청 관할 사업장은 7개소로 확인되었다.⁸⁾ 이러한 오염은 해당 사업장의 지질에서 기원한 것으로 추정되나 이에 관한 입증 등의 절차가 추진되지는 않았다.

본 절에서는 오염이 확인되었고, 관할 지자체가 해당 오염에 대해 조치한 사항을 확인할 수 있는 ○○산업(주)의 오염 사례를 조사하였다.

울산광역시 울주군 ○○읍 ○○리 산○○○-○번지 일원에서 1990년부터 채석이 진행되었으며, ○○산업(주)이 1994년 동 지역에서 석산개발사업을 진행하였다. 2005년에는 채석 지역을 확장하여 약 27만m²를 대상으로 환경영향평가 협의를 완료하고 현재까지 채석이 진행 중이다. 사업으로 인한 영향을 모니터링하기 위한 사후환경영향조사 결과, 토양오염이 확인된 사례이다. 오염 확인 경위, 전문가 조사 결과 및 지자체의 정화조치 명령⁹⁾은 다음과 같다.

1) 경위

- 2020.11.3: 「토양환경보전법」에 따른 토양오염의 신고[○○산업(주) → 울주군청]
- 2020.11.10: 토양오염 우려 기준 초과에 따른 행정처분(토양정밀조사 명령)[울주군청 → ○○산업(주)]

8) 환경영향평가정보시스템, 검색일: 2024.5.15.

9) 환경영향평가정보시스템, 검색일: 2024.5.15.

- 2021.2.22: 토양정밀조사 실시 결과 보고
 - 비소: 전체 13개 지점/53개 시료 가운데 8개 지점/16개 시료에서 기준 초과
 - TPH: 전체 8개 지점/32개 시료 가운데 1개 지점/2개 시료에서 기준 초과
- 2021.4.20: ○○대학교 토양기술연구소 토양(비소)오염원 조사 실시
 - 외부 원자재들은 모두 1지역 토양우려 기준 이하
 - 토양 내 비소는 강우에 의한 용출이 어려운 형태임
 - 토양 내 비소 성분은 자연 기원(지질기원)으로 판단됨

2) 조사 결과

비소의 오염원에 대한 조사 보고서의 주요 결과는 다음과 같다.

- 대상부지로 유입되는 물질들의 비소 농도, 조사부지 내 미개발지의 심토와 표토 비소 농도, 토양-비소 결합 형태 분석, 주변 토양측정망 비소 농도 등을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻음
- 외부에서 조사부지로 유입되는 원자재들은 모두 1지역 우려 기준(25mg/kg) 이하로 나타났으며, 조사부지 내 존재하는 비소는 공정에 필요한 외부 유입물에 의한 오염은 아닌 것으로 판단됨
- 조사부지 내 채취지 표면(암반), 중앙 매립지역 심토, 부지 내 미개발(미굴착지) 심토에서 가장 높은 농도가 나타났다. 즉, 고농도 비소를 함유한 토양/지질이 자연 상태에서 존재하는 것으로 판단됨
- 조사토양 내 비소 성분을 결합 형태별로 연속 다단 추출하여 비소 존재 형태를 5단계로 분석한 결과, 강우에 의하여 쉽게 용출되는 1~2단계(Step 1~2)가 총 비소 농도의 15% 이하로 나타났다. 토양 내 비소의 약 85%는 강우에 의한 용출이 어려운 것으로 나타났으며, 따라서 조사토양 내 비소들은 이동성이 낮은 상태로 부지 내에 폭넓게 존재하는 것으로 판단됨
- ○○산업 조사부지와 지질구조(하양층군-진동층)가 동일한 토양측정망(울주망성)의

토양시료에서도 비소가 51.67mg/kg(2018년 기준)으로 검출된 기록이 있음

- 결론적으로 조사 대상부지의 토양 내 비소 성분은 채석장 활동과 관련된 자연 기원(지질기원)인 것으로 판단된다. 또한 현재 상태에서 조사부지 토양의 비소 성분은 용출로 인한 외부 유출 및 이동성은 매우 낮은 것으로 판단됨

3) 조치

2021년 6월 울주군은 TPH를 대상 항목으로 정화조치명령을 내렸으며, 비소에 대한 정화조치명령은 없었다. ○○산업의 정화조치명령 불이행으로 2022년 6월 정화조치명령이 재차 내려졌다. 이후 ○○산업은 반출정화를 통해 TPH 오염토양을 정화한 것으로 확인된다. 비소의 정화조치 필요 여부에 관련된 결정 근거 등은 관련 공문에서 확인할 수 없었으나, 전문가 조사 결과에서 자연 기원인 것으로 판단한 내용에 근거한 조치로 보인다.

3. 지질기원 토양오염물질 분포

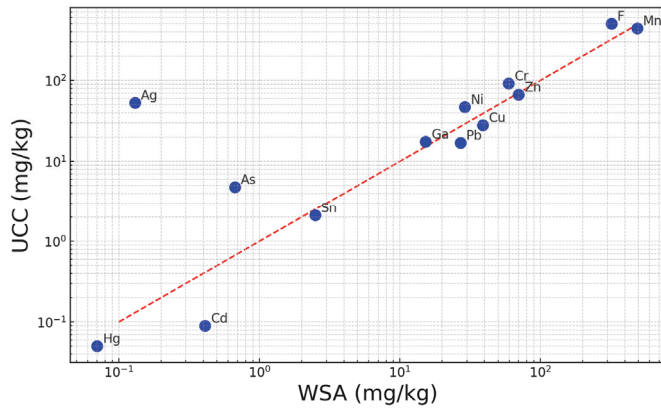
토양오염은 인간활동뿐만 아니라 자연적 원인에 의해서도 자주 발생한다. 지질학적 과정에 의해 토양의 모재인 암석 및 광물에서 유래한 다양한 미량원소(예: 중금속 및 준금속), 방사성 물질, 석면 등의 무기원소에 의한 오염이 발생할 수 있다(ISO, 2015; FAO and UNEP, 2021). 이러한 자연 기원의 토양오염은 지역별로 그 심각성이 다르지만, 일반적으로 광상 인근에서 국지적으로 인간 및 생태계 건강에 위해를 가할 수 있는 사례가 발생한다(Tian et al., 2017). 일반적인 조암 광물에는 비록 양이 적을지라도, 특정 종류의 지질에는 독성이 있는 미량원소들이 흔히 분포하여 토양 관리에 문제를 야기할 수 있다. 다시 말해 토양오염 물질로 분류될 수 있는 다양한 미량원소들이 토양 및 암석 내에 보편적으로 함유되어 있다(표 2-5 참조). 암석(지질)과 토양 내 미량원소들의 분포는 상관관계(1:1)가 높으므로(그림 2-4 참조), 기반암 내 무기원소 함량이 높을 경우 토양 내 배경농도가 증가할 가능성이 있다.

〈표 2-5〉 세계 토양 및 상부대륙지각 내 미량원소 평균농도

Element	WSA	(mg/kg)
Ag	0.13	53
As	0.67	4.8
Cd	0.41	0.09
Cr	59.5	92
Cu	38.9	28
Ga	15.2	17.5
Hg	0.07	0.05
Mn	488	438.59
Ni	29	47
Pb	27	17
Sn	2.5	2.1
Zn	70	67
F	321	500

주: WSA: World Soil Average.

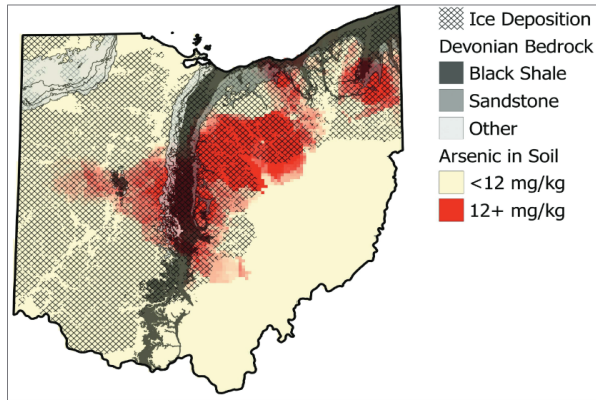
자료: Rudnick and Gao(2003); Kabata-Pendias(2011)를 토대로 저자 작성.



주: WSA: World Soil Average, UCC: Upper Continental Crust.

자료: Rudnick and Gao(2003); Kabata-Pendias(2011)를 토대로 저자 작성.

〈그림 2-4〉 세계 토양 및 상부대륙지각 내 미량원소 평균농도 비교



자료: Wanner(2018), p.12.

〈그림 2-5〉 미국 오하이오주 지질기원 토양 비소농도 분포

대표적으로 불소와 비소는 암석의 지구화학적 풍화 및 토양 생성 과정에서 토양과 퇴적물에 흔히 잔류하며, 이로 인한 심각한 지하수 오염에 따른 건강 문제가 다수의 국가에서 보고되고 있다(Podgorski and Berg, 2020, 2022). 미국 오하이오주에서는 흑색 셰일과 빙하 퇴적물에서 유래된 높은 비소 농도로 인한 광범위한 지질기원의 토양오염 사례가 보고되었다(Wanner, 2018). 이 사례에서 비소 농도의 범위는 2.0ppm에서 45.6ppm까지였으며, 대부분 10ppm 이상으로 모든 샘플에서 EPA의 토양 섭취 기준인 0.39ppm을 초과하는 농도가 확인되었다(그림 2-5 참조).

하지만 토양 내 미량원소 등의 자연 배경농도는 변동성이 크고 불균질하여 지질기원 오염 물질의 농도 분포를 단순히 일반화하여 위해도를 평가하는 것은 쉽지 않다. 우리나라에서는 주로 휴폐광산 지역에서 지질기원에 의한 다양한 토양오염이 국지적인 광해의 형태로 나타난다. 기반암 내 조암광물에 포함된 원소가 광범위한 토양오염을 야기하는 경우는 환경영향 평가 사례와 같이 불소 및 비소에 국한된 것으로 보인다. 즉 불소와 비소가 암석의 풍화와 토양 형성 과정에서 토양 및 퇴적물에 잔류하여 대표적인 자연 기원의 토양오염으로 나타난다. 이에 본 연구에서는 기반암에서 발생하는 비점오염 형태의 불소와 비소 농도 분포를 분석하여 지질기원 오염의 범위를 확인하고자 한다.

가. 토양측정망 불소 및 비소 농도 현황

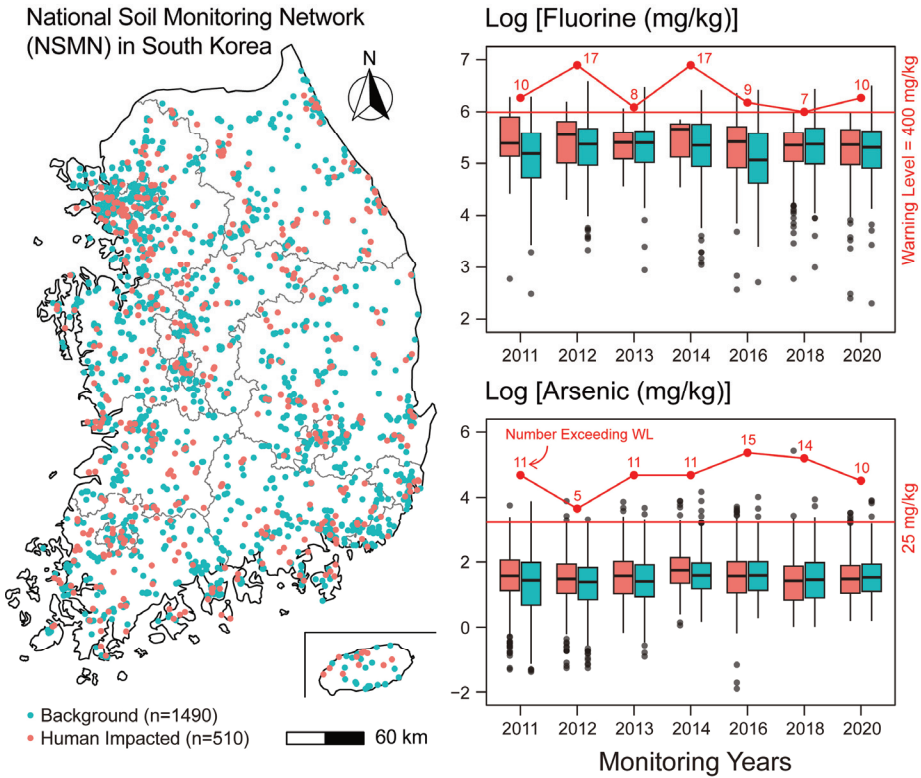
환경부는 전국적인 오염 추세를 파악하여 토양오염 예방 등 토양보전정책 수립의 기초 자료를 수집하기 위해 토양측정망을 운영하고 있다. 토양측정망 설치 및 운영계획¹⁰⁾을 토대로 토양측정망(2,000개 지점)을 격년제로 조사하고, 산도(pH), 중금속(8종), 유기오염물질(15종) 등의 조사 항목을 분석한 결과를 토양지하수정보 시스템에 공개하고 있다(표 2-6 참조). 나아가 측정망 운영 결과 토양오염 우려 기준을 초과한 지역에 정밀조사를 실시하고 법령에 따른 정화 등의 대책을 적용하고 있다. 본 절에서는 토양측정망 자료(2011~2020년)를 토대로 대표적인 지질기원 토양오염물질인 불소 및 비소의 농도 현황을 통계적으로 분석하고 살펴보기로 한다.

〈표 2-6〉 환경부 토양측정망 지목별 조사 항목

지목	조사 항목	
전, 답, 과수원, 임야, 목장용지, 공원, 유원지, 체육용지, 하천부지, 학교용지, 종교용지	중금속	Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr+6, Zn, Ni
	일반 항목	CN, 유기인(전, 답, 과수원, 체육용지에 한함)
	토양산도	PH
도로, 대(垓), 공장용지, 철도용지, 잡종지	중금속	Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr+6, Zn, Ni
	일반 항목	PCBs, CN, 페놀류, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, TPH, 불소, TCE, PCE, 1,2-디클로로에탄(이하 1,2-DCA), 벤조(a)피렌 *TPH: 대(垓)는 제외 *PCBs, 페놀류, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌: 공장용지, 잡종지에 한함 *TCE, PCE, 1,2-DCA: 공장용지에 한함 *벤조(a)피렌: 철도용지에 한함
	토양산도	PH

자료: 토양지하수정보 시스템, “토양측정망”, 검색일: 2024.5.15.

10) 국가법령정보센터, “토양측정망 설치 및 운영계획(환경부고시 제2020-37호)”, 검색일: 2024.5.15.



자료: 토양지하수정보 시스템, “토양측정망”, 검색일: 2024.5.15.

〈그림 2-6〉 토양측정망 조사 지점 및 조사 시기(7회)별 불소 및 비소 농도 현황

환경부는 전국 2,000개 토양측정망 지점을 대상으로 2010년부터 불소와 비소를 포함한 다양한 토양오염물질의 농도를 측정의 목적 및 지목별로 보고하고 있다. 비소는 중금속 항목으로 모든 지점(2,000개 지점)에서 분석되며, 불소는 도로, 대지, 공장용지 등 약 450개 지점에서만 조사된다. 2010년부터 2014년까지는 전체 조사 지점을 매년 분석하였으며, 2015년 이후부터는 격년제로 조사를 실시하였다. 이로 인해 총 7회의 조사 결과(2011년부터 2020년까지)를 바탕으로 조사 지점을 측정 목적(배경농도 및 인간활동 영향)에 따라 구분하여 비소와 불소를 시계열 분석하였다(그림 2-6 참조). 분석 결과, 지난 10년간 지목 및 측정 목적에 따라 불소와 비소 농도에 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 이는 불소와 비소 농도가 특정 지목이나 목적에 관계없이 전반적으로 일관된 수준을 유지했음을 의미한다. 또한 이

기간 동안 불소와 비소의 농도 및 오염 우려 기준 초과 지점의 수에 유의미한 증감이 없었다. 불소의 경우, 5~728mg/kg 범위로 관측되었으며, 중앙값은 185~221mg/kg로 나타났다. 이 중 7~17개 지점에서 불소 농도가 1지역 오염 우려 기준을 초과한 것으로 조사되었다. 비소의 경우, 0.15~228mg/kg 범위로 관측되었으며, 중앙값은 4.12~5.13mg/kg로 나타났다. 비소 농도의 경우, 5~15개 지점에서 오염 우려 기준을 초과한 것으로 나타났다. 이는 특정 지점에서 불소와 비소의 농도가 우려 기준을 넘을 가능성이 있지만, 전반적으로는 위험 수준에 도달하지 않았다고 평가된다.

우리나라 토양 내 불소 및 비소의 대표 농도는 최근 1회 조사(2020~2021년)의 분석 결과로 살펴보았으며, 해당하는 통계량 및 통계분포는 <표 2-7> 및 <그림 2-7>과 같다. 불소의 평균농도는 217.1mg/kg, 중앙값은 209.5mg/kg로 나타났으며, 변동계수는 50% 미만으로 농도의 변동성이 상대적으로 적은 편이다. 평균농도 등은 세계 토양 평균(WSA)인 321mg/kg보다는 낮지만, 상위 10%(90퍼센타일)의 농도는 356.1mg/kg로 일부 지역에서는 WSA를 초과할 수 있음을 보여주었다. 최댓값은 666mg/kg으로 상부대륙지각(UCC)값인 500mg/kg을 초과해 특정 지역에서 매우 높은 이상치가 존재함을 보여준다. 비소의 평균 농도는 5.40mg/kg, 중앙값은 4.4mg/kg로 나타났으며, 변동계수는 75%로 불소보다 변동성이 크다. 비소 농도의 상위 10%는 9.44mg/kg에 이르며, 최대치는 50.08mg/kg로 조사되었다. 최댓값은 UCC값인 53.00mg/kg에 근접한 수치로, 일부 지역에서는 비소 농도가 자연적으로 발생할 수 있는 수준을 초과할 가능성이 있음을 보여준다.

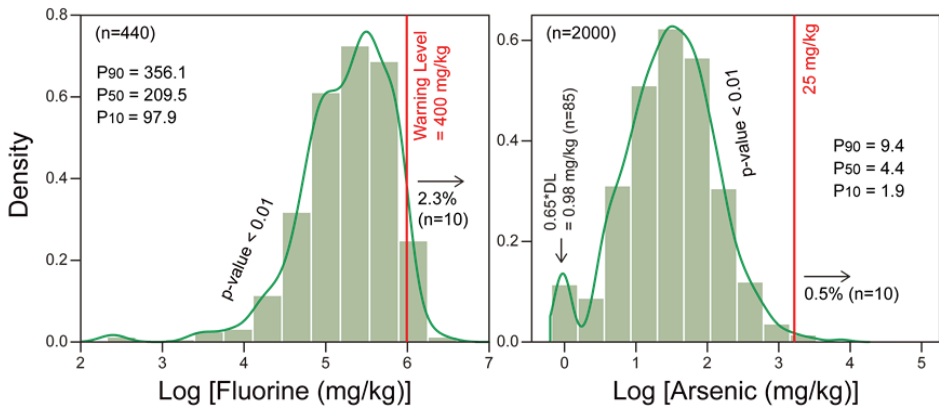
로그농도에 대한 정규성 검정 결과(Shapiro-Wilk Test)에 따르면, 불소와 비소의 농도 분포는 로그정규 분포를 따르지 않으며($p < 0.01$), 이는 특정 환경적 요인의 영향을 받는 지역적 또는 국지적인 변동성을 나타낼 가능성이 있다. 히스토그램 상으로 불소의 로그농도는 좌측으로 꼬리를 지닌 음의 왜도를 보이며, 이는 대체로 높은 농도 분포가 우세함을 의미한다. 반면 비소는 우측으로 꼬리를 지닌 양의 왜도를 보이며, 낮은 농도가 우세함을 시사한다. 결론적으로, 토양측정망 분석 결과에 따르면 비소와 불소의 배경농도는 대체로 높지 않으며, 90퍼센타일 등 높은 농도구간을 배경농도의 상위 문턱값으로 설정하더라도 일부 측정 지점에서만 오염 우려 기준을 초과하는 이상치가 관찰되었다.

〈표 2-7〉 토양측정망 조사 자료(2020~2021년) 불소 및 비소 농도의 통계량

Statistics	Fluorine (mg/kg)	Arsenic (mg/kg)
Number	440	2000
Mean	217.1	5.40
SD	101.0	4.06
CV	50%	75%
Minimum	10.0	1.22
P10	97.9	1.93
Median	209.5	4.44
P90	356.1	9.44
Maximum	666.0	50.08
WSA	321.0	0.13
UCC	500.0	53.00
Normality test	p<0.01	p<0.01

주: SD: Standard Deviation, CV: Coefficient of Variation, P10: 10th Percentile, P90: 90th percentile, WSA: World Soil Average (Kabata-Pendias, 2011), UCC: Upper Continental Crust (Rudnick and Gao, 2003).

자료: 토양지하수정보 시스템, “토양측정망”, 검색일: 2024.5.15.



자료: 토양지하수정보 시스템, “토양측정망”, 검색일: 2024.5.15.

〈그림 2-7〉 토양측정망 조사 자료(2020~2021년) 불소 및 비소 농도의 통계분포

나. 지질별 토양 불소 및 비소의 농도 분포

불소와 비소의 지질학적 연관성을 파악하기 위해, 10년에 걸친 7회의 토양측정망 조사 자료와 1990년부터 2022년까지의 환경영향평가 토양정보¹¹⁾를 포괄적으로 분석하였다. 이를 통해 토양측정망에서 수집된 12,508개 시료와 환경영향평가에서 수집된 42,994개 시료를 기반으로 광범위한 ‘토양오염 메타자료(n=55,574)’를 구축하였다. 최종적으로 불소 및 비소가 검출된 자료와 측정망의 최댓값과 최솟값을 초과한 데이터를 선별하여 불소 농도 데이터 21,255개와 비소 농도 데이터 46,599개를 확보하였다(표 2-8 참조).

〈표 2-8〉 토양오염 메타자료(토양측정망 및 환경영향평가 토양정보) 기반의 토양 내 불소(21,255 지점) 및 비소(46,599 지점) 농도 통계량

Statistics	Fluorine (mg/kg)	Arsenic (mg/kg)
Number	21,255	46,599
Mean	157.5	3.20
SD	108.8	5.34
CV	69.1	166.75
Minimum	0.001	0.0002
P10	30.5	0.07
Median	141.0	1.62
P90	312.0	7.84
Maximum	728.0	228.63
Exceeding Number	449	233

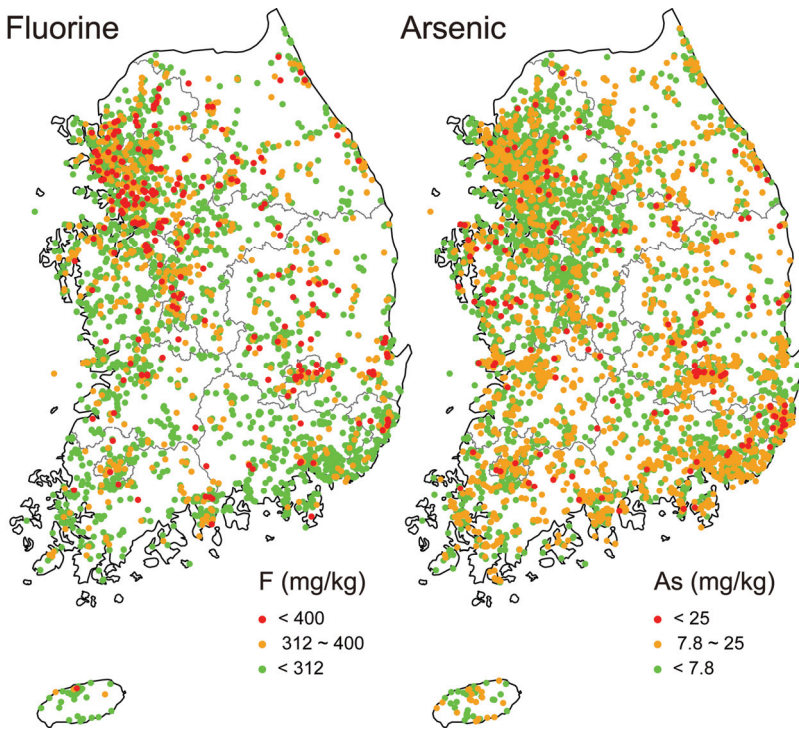
주: SD: Standard Deviation, CV: Coefficient of Variation, P10: 10th Percentile, P90: 90th percentile, Exceeding Number: 1지역 오염 우려 기준 초과 시료 수
 자료: 공공데이터포털(2021.1.20), “한국환경연구원_환경영향평가 토양정보”, 검색일: 2024.5.1; 토양지하수 정보 시스템, “토양측정망”, 검색일: 2024.5.15를 토대로 저자 작성.

토양오염 메타자료 분석 결과, 불소와 비소의 평균농도는 각각 157.5mg/kg(중앙값: 141.0mg/kg)과 3.20mg/kg(중앙값: 1.62mg/kg)으로, 토양측정망 대푯값(표 2-7 참조)보다 낮게 나타났다. 그러나 변동계수가 각각 69.1%와 166.75%로 높아, 농도가 보다 넓은 범위에 분포하고 있음을 보여준다. 분석된 시료 중 약 449개소(2.1%)의 불소 시료와 244개소

11) 환경영향평가정보지원시스템(EIASS)에 수록된 환경영향평가서 등을 토대로 한국환경연구원에서 구축된 자료로서 공공데이터포털(Data.go.kr)에서 제공(공공데이터포털, “한국환경연구원의 환경영향평가 토양정보”, 검색일: 2024.5.1).

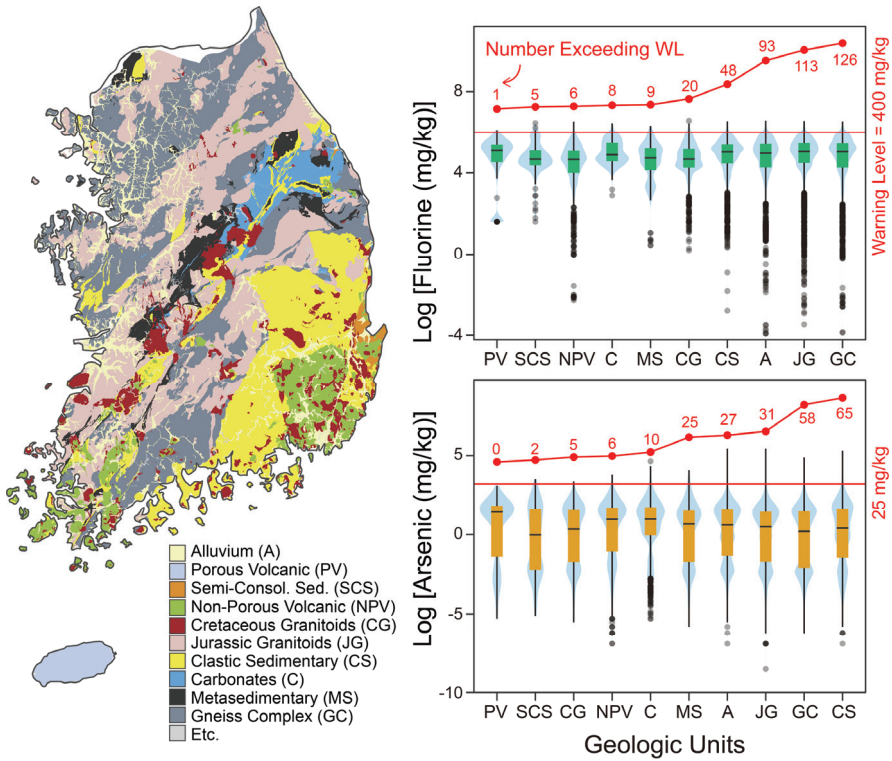
(0.5%)의 비소 시료가 1지역 오염 우려 기준을 초과한 것으로 나타나, 특정 지역에서의 토양오염을 보여주고 있다.

불소와 비소의 고농도 지점을 식별하기 위해 1지역 오염 우려 기준(불소: 400mg/kg, 비소: 25mg/kg)과 90퍼센타일 기준(불소: 312mg/kg, 비소: 7.8mg/kg)을 문턱값으로 설정하여 세 구간으로 나누어 공간분포를 도시하였다(그림 2-8 참조). 분석 결과, 수도권 및 도심 지역에서 고농도의 불소와 비소가 관측되었다. 이는 개발사업이 많이 추진되는 수도권 지역에서 환경영향평가를 위한 토양시료가 집중적으로 채취된 결과로 해석된다. 이에 따라 불소와 비소 농도의 공간적 변동성을 보다 정확하게 이해하기 위해 상세한 지질 현황과의 비교 분석이 필요하다.



자료: 공공데이터포털(2021.1.20), “한국환경연구원_환경영향평가 토양정보”, 검색일: 2024.5.1;
토양지하수정보 시스템, “토양측정망”, 검색일: 2024.5.15를 토대로 저자 작성.

〈그림 2-8〉 토양오염 메타자료(토양측정망 및 환경영향평가 토양정보)의 토양 내 불소(21,255 지점) 및 비소(46,599 지점) 농도 분포도



자료: 공공데이터포털(2021.1.20), “한국환경연구원 환경영향평가 토양정보”, 검색일: 2024.5.1; 토양지하수정보 시스템, “토양측정망”, 검색일: 2024.5.15를 토대로 저자 작성.

〈그림 2-9〉 토양오염 메타자료(토양측정망 및 환경영향평가 토양정보)의 지질 단위별 토양 내 불소 및 비소 농도 비교

토양오염 메타자료를 우리나라의 광역 지질 단위별로 구분하여 통계 분석을 수행하였으며, 지질별 농도 분포 및 1지역 오염 우려 기준 초과 빈도를 비교하였다(그림 2-9 참조). 상세 지질 단위 및 암석 정보 등은 〈표 2-9〉에 수록되었으며, 불소 및 비소의 통계량은 〈표 2-10〉과 〈표 2-11〉에 제시하였다.

지질 단위별 불소 농도 분석 결과 화산암에서의 평균농도가 다른 지질에 비해 유의하게 낮았으나, 나머지 지질 단위 간에는 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다. 그러나 오염 우려 기준 초과 빈도에서는 지질 단위별로 명확한 차이가 관찰된다. 편마암(126개 지점 초과)과 쥐라기 화강암(113개 지점 초과), 충적층(93개 지점 초과)이 오염 우려 기준을 가장 많이 초과했으며,

반면 다공질 화산암(1개 지점 초과)과 탄산염암(8개 지점 초과)에서는 초과 빈도가 현저히 낮았다. 결론적으로, 편마암, 백악기 및 쥐라기 화강암, 그리고 층적층에서 불소 오염의 가능성이 상대적으로 높을 것으로 판단된다. 이는 불소 오염 사례로 보고된 지역(제1절 참조)의 지질과 일치하는 결과로, 지질기원으로 인해 불소가 국지적인 오염을 야기할 수 있음을 시사한다.

지질 단위별 비소 농도 분석 결과, 평균농도는 탄산염암(4.56mg/kg)과 다공질 화산암(4.05mg/kg)에서 가장 높았으며, 기타 지질(2.35mg/kg)과 쥐라기 화강암(2.88mg/kg)에서 가장 낮게 나타났다. 변동성 측면에서 쇄설성 퇴적암의 변동계수(CV)는 191.99%로 가장 높아 비소 농도의 변동성이 큰 반면, 다공질 화산암은 83.70%로 가장 낮아 상대적으로 안정된 분포를 보였다. 1지역 오염 우려 기준을 초과한 지점 수를 살펴보면 쇄설성 퇴적암(65개 지점 초과)과 편마암(58개 지점 초과)이 가장 높은 초과 빈도를 기록한 반면, 다공질 화산암에서는 초과 지점이 없었다. 이러한 결과는 토양오염 메타자료상에서 쇄설성 퇴적암과 편마암이 비소에 오염될 잠재적 위험성이 높음을 시사한다.

일반적으로 암석 종류별로 불소 함량이 다르지만, 화강암류가 0.05~0.14%로 다른 화성암(0.01~0.05%) 및 퇴적암보다 현저히 높게 나타난다(Pertti and Backman, 2000, p.128). 화강암류의 높은 불소 함량은 마그마 정출 과정에서 기인한다. 마그마 내 불소 이온(F^- : 1.23~1.26Å)이 운모, 각섬석, 녹니석, 전기석 등 이온반경이 유사한 수산기(OH^- : 1.37~1.40Å) 함유 광물의 구조 내로 치환되어 포획되기 때문이다(Li et al., 2003). 다수의 연구에서 화강암 등의 산성암 내 흑운모의 불소 함량이 높음을 제안하고 있다(Seraphim, 1951; Kanisawa, 1979; Li et al., 2003). 예를 들어 Seraphim(1951)은 서로 다른 화성암 및 광물들을 비교하였으며 평균 함유량 기준으로 화강암 및 유문암에서, 그리고 인회석 및 흑운모 광물에서 높은 불소 농도를 관찰하였다. 국내에서는 Chae et al.(2006)이 중생대 화강암 내 흑운모가 지하수 중 불소의 주요 공급원임을 규명했다. 또한 지하수 불소 함량을 통해 화강암류, 화강편마암 및 이들의 혼합암이 화산암, 퇴적암보다 많은 불소를 함유하고 있음을 확인하였다(황정, 2001; Chae et al., 2007; Kim et al., 2014). 퇴적암은 대체로 불소 함량이 낮으나 인회석 등을 포함하는 셰일은 비교적 높은 수준을 나타내며, 변성암의 경우 기원암의 특성에 따라 그 함량이 결정될 수 있다.

쇄설성 퇴적암 지역에서 비소 오염 가능성이 높은 결과는 석산개발사업의 비소 오염 사례와 유사하다. 한편 편마암 복합체에서 높은 비소 초과율이 발생한 점에 대해서는 뚜렷한 보고가 없다. 변성암의 경우, 원래 암석에서 유래된 비소 농도와 유사한 농도를 가지는 경향이 있다. 예를 들어 석회암에서 유래한 변성암에서 형성된 토양은 비소 농도가 낮지만, 셰일에서 유래한 변성암은 비소 농도가 더 높을 수 있다. 암석 내 비소 농도는 암석 유형에 따라 크게 달라지며, 퇴적암이 일반적으로 화성암보다 더 높은 비소 농도를 나타낸다. 이는 퇴적암이 지질학적으로 다양한 환경에서 형성되고 퇴적 과정에서 금속 광물이 축적되기 유리한 조건을 갖추고 있기 때문이다(Tanaka, 1988). 예를 들어 환원 환경에서 퇴적되는 셰일과 셰립질 퇴적암은 조립질 퇴적암보다 비소가 많이 농축되는 경향이 있다.

토양 내 비소 농도는 암석과 마찬가지로 그 기원 암석에 따라 큰 차이를 보인다. 비소의 자연배경 농도에 대한 사례연구에 따르면 일부 지역을 제외하고 일반적인 토양 내 비소는 10mg/kg 미만으로 보고되고 있다(Adriano, 2013). Bhattacharya et al.(2002)에 따르면 화성암 기원 토양은 비소 농도가 상대적으로 낮으며, 퇴적암(셰일이나 이암) 기원 토양은 더 높은 비소 농도를 나타내는 것으로 보고하고 있다. 또한 철이 풍부한 토양에서는 비소가 철 산화물에 흡착되어 B층에서 비소 농도가 특히 높아지는 경향이 있다(Ciuro Juncosa, 2008). 따라서 지구화학적 관점에서 중금속의 산화환원 반응에 따른 침전 및 용해에 따라 비소의 분포가 달라질 수 있다.

토양의 비소 농도는 지질학적 특성뿐만 아니라 인간활동에도 크게 영향을 받는다. 우리나라에서도 산업활동(금속 제련소 및 광산), 농업(비소를 포함한 농약), 폐기물 처리시설 및 공장 지역 등에서 비소의 오염이 확인된 경우가 빈번하다(박용하 외, 1996). 예를 들어 (구)장항 제련소에 의해 평균 37.8mg/kg에 해당하는 비소의 토양오염이 발생하였으며, 세척 및 안정화공법을 적용하여 정화를 완료하였다(양경 외, 2014). 따라서 암석과 토양의 비소 농도는 지질학적 배경과 토양 형성 과정을 복합으로 반영할 수 있으며, 지역적 특성과 인간활동에 따라 농도 분포가 달라질 수 있다.

〈표 2-9〉 우리나라 주요 지질 단위와 세부 암상

지질 단위	지질시대 및 세부 단위	암상
미고결 쇄설성 퇴적층(A)	제4기 퇴적층	점토, 실트, 모래, 자갈
다공질 화산암(PV)	제4기 분출화산암, 신신기 장기층군 화산암	현무암, 조면현무암, 조면안산암, 조면암, 스킨리아, 응회암
반고결 쇄설성 퇴적암(SCS)	신신기 - 제4기 퇴적암 - 연일층군, 어일층군, 북평층군, 장기층군 및 범곡리층군 퇴적암 - 서귀포층	반고결 해성/육성 쇄설성 퇴적암
비다공질 화산암(NPV)	신신기 화산암 - 효동리 화산암, 범곡리층군 화산암, 백악기 화산암 - 경상누층군의 유천층군 화산암, 쥐라기 화산암 - 오서산 화산암, 부평 화산암	유문암, 안산암, 현무암, 응회암
백악기 관입 화성암(CG)	백악기 - 고신기 관입암 - 불국사 관입암	화강암, 화강섬록암, 섬록암, 알칼리화강암, 반암류
쥐라기 관입 화성암(JG)	쥐라기 관입암 - 대보 관입암	화강암, 화강섬록암, 섬록암, 반려암, 각섬석암, 조면암, 산성반암, 초염기성암
쇄설성 퇴적암(CS)	백악기 퇴적암 - 경상누층군의 신동층군 - 하양층군, 트라이아스기 - 쥐라기 퇴적암 - 반송층군, 남포층군, 석탄 - 트라이아스기 퇴적암 - 평안누층군	육성 쇄설성 퇴적암, 해성 및 육성 쇄설성 퇴적암(석회암 및 함탄층 협재)
탄산염암(C)	캄브로 - 오르도비스기 탄산염암 - 대석회암층군	해성 탄산염암(석회암, 백운암), 쇄설성 퇴적암 협재
변성퇴적암(MS)	선캄브리아시대 - 고생대 변성퇴적암 - 신원생대 옥천누층군, 백령층군, 구룡산층군, 미분류 변성퇴적층, 고생대 옥천누층군 양덕층군, 연천층군, 태안층, 구룡층군	편암, 천매암, 규암(석회암 협재)
변성암(편마암 복합체)(GC)	선캄브리아시대 준편마암 - 경기 편마암복합체, 태백산 편마암복합체, 소백산 편마암복합체, 지리산 편마암복합체, 서산층군, 선캄브리아시대 정편마암	흑운모편마암, 화강암질 편마암, 호상편마암, 혼성암질 편마암(규암 및 편암 협재), 화강암, 화강섬록암, 알칼리화강암, 우백질 화강암, 섬장암, 회장암, 토날라이트질 편마암, 각섬암

자료: 환경부(2023), p.18.

〈표 2-10〉 토양오염 메타자료의 지질 단위별 토양 내 불소 농도 통계량

Geologic Unit	Number	Mean	SD	CV	Minimum	P10	Median	P90	Maximum	Exceeding Number
다공질화산암	100	153.1	97.3	63.5	5.00	5.0	162.5	277.2	453.0	1
반고결퇴적암	158	142.4	106.5	74.8	5.00	57.6	106.5	316.8	645.0	5
백악기화강암	1092	133.9	99.7	74.5	1.22	32.1	106.6	267.8	716.0	20
변성퇴적암	414	136.5	103.0	75.5	1.59	26.3	113.3	267.1	554.0	9
비다공질화산암	1167	117.9	88.9	75.4	0.10	19.1	105.0	241.2	692.1	6
쇄설성퇴적암	2454	162.1	105.5	65.1	0.06	39.9	151.5	300.0	702.9	48
취라기화강암	5156	169.0	108.3	64.1	0.01	44.0	154.0	317.0	711.0	113
총적층	4567	156.9	110.7	70.5	0.01	24.9	141.2	315.8	728.0	93
탄산염암	324	172.6	103.8	60.1	18.00	74.1	132.2	326.4	635.0	8
편마암	4754	163.0	115.6	70.9	0.00	20.0	153.0	326.0	700.0	126
기타	1069	143.6	97.1	67.6	2.34	48.7	116.0	289.1	556.0	20
Total	21255	157.5	108.8	69.1	0.00	30.5	141.0	312.0	728.0	449

주: SD: Standard Deviation, CV: Coefficient of Variation, P10: 10th Percentile, P90: 90th percentile, Exceeding Number: 1지역 오염 우려 기준 초과 시료 수.

자료: 공공데이터포털(2021.1.20), “한국환경연구원_환경영향평가 토양정보”, 검색일: 2024.5.1; 토양지하수정보 시스템, “토양측정망”, 검색일: 2024.5.15를 토대로 저자 작성.

〈표 2-11〉 토양오염 메타자료의 지질 단위별 토양 내 비소 농도 통계량

Geologic Unit	Number	Mean	SD	CV	Minimum	P10	Median	P90	Maximum	Exceeding Number
다공질화산암	346	4.05	3.39	83.70	0.005	0.05	4.12	7.56	22.31	0
반고결퇴적암	382	3.29	5.09	154.57	0.006	0.05	0.98	9.73	34.33	2
백악기화강암	2883	3.04	3.90	128.42	0.004	0.08	1.40	8.10	29.61	5
변성퇴적암	1285	3.82	6.39	167.38	0.003	0.08	1.95	8.86	59.98	25
비다공질화산암	2317	3.76	4.35	115.54	0.001	0.09	2.60	9.16	45.00	6
쇄설성퇴적암	6234	3.73	7.16	191.99	0.001	0.06	1.49	9.18	199.76	65
취라기화강암	11487	2.88	4.42	153.58	0.000	0.07	1.63	7.03	228.63	31
층적층	9163	3.26	4.98	152.73	0.001	0.09	1.84	8.00	228.63	27
탄산염암	828	4.56	7.36	161.34	0.005	0.08	2.63	10.27	104.31	10
편마암	10039	3.03	5.63	185.66	0.002	0.06	1.22	7.30	132.18	58
기타	1635	2.35	4.60	196.05	0.001	0.05	0.70	6.58	112.45	4
Total	46599	3.20	5.34	166.75	0.000	0.07	1.62	7.84	228.63	233

주: SD: Standard Deviation, CV: Coefficient of Variation, P10: 10th Percentile, P90: 90th percentile, Exceeding Number: 1지역 오염 우려 기준 초과 시료 수.

자료: 공공데이터포털(2021.1.20), “한국환경연구원_환경영향평가 토양정보”, 검색일: 2024.5.1; 토양지하수정보 시스템, “토양측정망”, 검색일: 2024.5.15를 토대로 저자 작성.

4. 토양정화 현황

가. 불소

환경산업기술원 보고서¹²⁾에 따르면 2023년 기준 최근 3년간 서울 및 경기도 지역에서 공공기관이 발주한 불소 포함 오염토양 정화사업에 적용된 정화공법 중 토양세척의 비율은 점점 증가하고 있으며, 현재 토양세척 공법 적용 현장이 50%를 차지한다(표 2-12 참조).

〈표 2-12〉 최근 3년간 공공기관 토양정화 사업 중 토양세척 비율

연도	낙찰 건수			낙찰 금액		
	토양정화	토양세척	비율	토양정화	토양세척	비율
2022년	56건	31건	55%	589억 원	459억 원	78%
2021년	78건	25건	32%	1,401억 원	714억 원	51%
2020년	77건	32건	42%	985억 원	467억 원	47%

자료: 한국환경산업기술원, “자연 기원적 불소오염지역 특성을 고려한 토양정화 기술개발”, 검색일: 2024.4.15.

또한 최근 5년의 민간업체 부지개발 사업 결과를 보면 자연 기원 불소가 오염의 원인이 되는 서울 및 수도권 사업이 대부분을 차지하며, 이는 대부분 토양세척을 이용하는 것으로 확인된 바 있다(표 2-13 참조).

〈표 2-13〉 최근 5년간 민간업체 부지개발 사업의 토양정화

사업명	사업 연도	위치	오염물질	불소 원인	발주처	정화비용
삼성동 현대GBC	2020년	강남구 삼성동	불소	자연 기원	현대건설	200억 원
서초정보사 부지	2019년	서초구 서초동	불소, 유류	자연 기원	국방부	430억 원
청담동 삼익아파트 재건축사업	2021년	강남구 청담동	불소, 유류	자연 기원	재건축조합	100억 원
서울숲 주변공사	2020년	성동구 성수동	불소	자연 기원	건설업체	80억 원
한남동 유엔사부지	2019년	용산구 한남동	불소, 유류	자연 기원	LH, 미국기지본부	100억 원
서울양원 공공주택지구	2019년	중랑구 망원동	불소, 유류복합	자연 기원	LH	10억 원

자료: 한국환경산업기술원, “자연 기원적 불소오염지역 특성을 고려한 토양정화 기술개발”, 검색일: 2024.4.15.

12) 한국환경산업기술원, “자연 기원적 불소오염지역 특성을 고려한 토양정화 기술개발”, 검색일: 2024.4.15.

토양정화업체인 A사의 최근 토양정화 사례는 다음 <표 2-14>와 같다. 불소 단독으로 오염된 토양을 정화한 사례도 다수 포함되어 있으며, 톤당 단가는 복합오염과 크게 차이가 없음을 확인할 수 있다.

<표 2-14> A사의 최근 불소 오염토양 정화 사업

사업기간	사업 위치	오염 물량 (톤)	오염물질	발주기관	톤당 단가* (원)
2021.9~ 2022.10	서울 서초	94,887	중금속, 불소	OO건설	89,000
2022.10~ 2023.2	고양 향동	5,606	불소	OO랜드마크 PFV	76,800
2022.10~ 2023.3	서울 영등포	4,535	불소, 유류	OO종합건설	150,000
2022.6~ 2023.12	서울 서초	554,357	불소, 중금속	OO구역 주택재개발조합	95,450
2022.6~ 2023.12	인천 도화	137,824	불소	OOO	87,000
2022.8~ 2023.12	고양 풍동	25,682	불소, 유류	OO2지구 도시개발조합	72,000
2023.11~ 2024.3	경기 성남	20,000	불소	OO구역 주택재개발조합	73,000
2023.11~ 2027.9	서울 서초	66,530	불소, 비소	OO이엔씨	84,500

주: *상기 톤당 단가는 오염토양 굴착/상차, 가시설공사, 부대공사 등을 제외한 순수 '운반+정화 단가(부가세 별도)'.
자료: 비공개 자료에 따른 출처 생략.

또한 토양정화업체 통계 자료인 <표 2-15>는 추정치 자료이지만 대략적인 비율을 확인할 수 있다. 2019년 이후 지속적으로 20% 정도의 비율로 불소 토양정화사업이 추진되었으며, 최근 2022년에는 증가한 것을 확인할 수 있다.

〈표 2-15〉 토양정화업 5년 매출 현황

(단위: 백만 원)

항목	전체 토양정화		불소 토양정화		비율(불소/전체)	
	토양정화 매출	신규 수주 건수	불소 매출액	신규 수주 건수	매출액 기준	수주 건수 기준
2018년	118,618	209	29,394	18	25%	9%
2019년	169,631	164	47,586	25	28%	15%
2020년	155,479	192	62,538	30	40%	16%
2021년	207,179	230	73,258	33	35%	14%
2022년	260,985	206	111,536	58	43%	28%

자료: 비공개 자료에 따른 출처 생략.

나. 비소

박형민 외(2023)는 비소 및 중금속 오염토양을 정화하는 방법에 대해 다음과 같이 정리했다.

비소 및 중금속 오염 토양을 정화하는 방법은 크게 물리·화학적 및 생물학적 처리방법 등으로 구분할 수 있다. 물리·화학적 방법으로는 토양세척법(soil washing), 동전기정화법(electrokinetic method), 고형화 및 안정화법(solidification/stabilization) 등이 있으며, 생물학적 복원방법으로는 미생물을 이용한 생물학적 처리법(bioremediation), 식물 복원법(phytoremediation) 등이 있다. 다만, 생물학적 처리방법은 정화시간이 상당히 소요되며 오염물질에 따라 적용 가능한 생물이 한정적이고 농도가 높은 지역일 경우 생물이 성장이 저해되는 문제를 가진다. 또한, 휴·폐금속광산 지역의 경우 주로 고형화 및 안정화 공법이 적용되고 있지만, 중금속 이동성을 제한한 공법으로 환경변화에 따라 재용출될 수 있는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 국내의 경우 입도분리(physical separation)와 화학적 용출(chemical extraction)을 통해 비소 및 중금속을 제거하는 토양세척법을 주로 적용하여 정화 사업을 수행하고 있다.

한편 2017년 기준으로 국내에 적용되고 있는 주요 정화기술은 토양세척법(토양세정 포함 2,294,032톤), 토양경작법(595,166톤), 화학적 산화법(269,702톤), 열탈착법(206,968톤) 등순으로 이용되고 있어(이상우 외, 2020), 토양세척법이 가장 많이 적용되는 실정이다.

5. 소결

국내의 지질기원 토양오염 관련 규정, 원인이 입증된 사례, 관련 행정소송 사례, 지질기원 토양오염물질 분포 및 정화 실적 등을 살펴본 결과, 지질기원 토양오염의 관리에 관한 주요한 한계점을 다음과 같이 도출하였다.

- 지질기원 토양오염을 입증하기 위한 조사 및 평가 방법 등에 관한 구체적인 규정이 부재하다. 시행령에서 ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’을 입증하기 위한 방법 3가지를 규정하고 있으나, 이후 하위규칙이나 지침이 없으므로 지질학적인 정보를 수집하고 분석하는 방법을 보완할 필요가 있다. 이는 입증 과정에서 지질학적인 정보에 관한 전문성을 활용하고 결과의 신뢰성을 제고하기 위해 필수적이고, 원인 입증 보고서를 검토하는 과정에서 일관성 있게 판단하기 위해서도 중요하다.
- ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’에 관한 명확한 정의와 판단 기준이 미흡하다. 행정법원은 「토양환경보전법」에서는 토양오염을 “사업활동이나 그 밖의 사람의 활동에 의하여 토양이 오염되는 것”으로 정의하고 있어, 불소 오염이 이에 해당한다고 볼 수 없음이 명백히 보인다고 판단하기도 하였다.
- 관련 정보공개가 제한적이다. 지질기원 불소 오염으로 환경부의 확인을 받은 사례인 인천공항 개발사업 부지에 관해 공개된 자료는 위해성평가의 결과 요약 자료에 불과하고, 지질기원임을 입증한 방법, 판단 근거 등에 관한 정보는 전무하다. 관련 정보구축과 공개는 결과에 대한 대중 수용성 측면에서도 중요하며, 다양한 이해관계자에게 실제 데이터를 바탕으로 한 대응을 가능하게 할 수 있다. 예를 들어 정화책임자는 공개된 정보를 통해 조사, 정화 등 선제적 부지 관리 전략을 수립할 수도 있을 것이다.
- 우리나라 지질기원의 토양오염의 현황을 확인하기 위해서는 인위적인 영향이 없는 지점의 지질별 배경농도에 관한 기초자료가 필요하다. 이에 대표적인 지질기원 토양오염물질로 사료되는 비소와 불소에 대해 토양측정망(2011~2021년, n=12,508) 및 환경영향평가 토양정보(1990~2022년 n=42,994)를 기반으로 포괄적인 현황을 분석하였다. 분석 결과, 불소와 비소의 평균농도는 각각 157.5mg/kg(중앙값: 141.0 mg/kg)과 3.20mg/kg(중앙값: 1.62mg/kg)으로 세계 평균농도 등보다 낮게 나타났다.

그러나 변동계수가 각각 69.1%와 166.75%로 높아 농도 분포에 넓은 변동성을 보였다. 분석된 시료 중 불소는 약 449개 지점(2.1%), 비소는 244개 지점(0.5%)에서 1지역 오염 우려 기준을 초과했다. 불소의 경우, 1지역 오염 우려 기준(400mg/kg)을 초과한 지점들이 편마암(126개), 쥐라기 화강암(113개), 충적층(93개)에서 주로 발견되었고, 비소의 경우는 쇠설성 퇴적암(65개), 편마암(58개)에서 기준을 초과하는 지점이 많았다. 반면 다공질 화산암과 탄산염암 지역에서는 불소와 비소 초과 지점이 거의 없었다. 고농도의 불소와 비소는 주로 수도권 및 도심 지역에서 발견되었으며, 이는 개발사업으로 인해 해당 지역의 환경영향평가 시 토양 시료가 집중적으로 채취된 결과로 사료된다. 불소는 주로 화강암 및 화강암 기원의 편마암에서 높은 농도가 확인되었으며, 이는 지질기원에 의한 국지적인 불소 오염 가능성을 시사한다. 비소의 경우 퇴적암에서 초과 빈도가 높았으며, 이는 암석 내 비소의 자연 분포로 설명되며, 마찬가지로 지질학적 기원에 따른 오염 개연성을 시사한다. 결과적으로 전반적으로는 광역적인 범위(국가 규모)에서 불소와 비소의 농도가 위험 수준에 도달하지 않았으나, 특정 지점에서 지질기원으로 인해 오염 우려 기준을 초과할 가능성이 확인되었다.

- 지질기원 토양오염이 발생할 가능성이 높은 지역에 위치한 사업장에 대한 차별화된 관리가 필요하다. 토석채취사업의 경우, 채취한 암석의 파쇄, 선별, 세척, 가공, 적재 및 운반 등의 과정에서 석분으로 인해 토양이 오염될 가능성을 고려할 수 있다. 석분으로 인한 대기질, 수질 오염과 더불어 침전으로 인한 토양오염도 발생할 수 있다. 앞서 토석채취사업장, 특히 일정 지역의 사업장에서 토양오염기준을 초과하는 사례가 집중되어 나타나는 것은 이러한 지질학적인 원인으로 인한 토양오염이 특정 지역 및 사업 유형에서 집중되어 나타날 수 있고, 이에 대한 관리가 필요함을 보여준다.
- 지질기원 오염토양의 관리체계에 비효율성이 존재한다. 최근 토양정화 실적에 의하면, 지질기원일 가능성이 높은 불소를 정화한 비중이 상당히 높았다. 예를 들어, 2022년 기준으로 전체 토양정화 매출액 중 불소 토양정화가 차지하는 비율이 43%에 달하며, 수주 건수 기준으로는 28%를 차지한다. 이는 토양의 반출이 불가피한 택지개발 사업 등의 부지에서 오염이 확인될 경우, 대부분 지질기원임을 입증하는 절차 없이 정화를 실시하는 상황에 기인한 것으로 보인다. 즉, 반출정화가 필요한 경우, 지질기원 토양

오염의 입증 및 위해성평가 대상에서 제외되는 조항으로 인한 결과로 판단된다. ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’을 위해성평가 대상에 포함시킨 배경에는, 지질기원과 인위적 기원 오염의 추출 특성이 상이하며, 이로 인해 위해도가 달라진다는 점도 고려되었을 것이다. 현 관리 규정은 이러한 위해도를 확인하는 과정 없이, 반출이 필요하다는 조건만으로 정화를 시행하도록 하여 비효율성을 초래하고 있다. 위해도를 관리해야 한다는 전제는 유지해야 한다. 그러나 동시에 보다 효율적인 오염토양 관리 체계가 필요하다. 환경적 안전성과 경제성을 종합적으로 고려한 토양 관리 체계에 대한 새로운 접근이 요구되는 시점이다.

제3장

위해도 기반 토양오염부지 관리

1. 일본

가. 토양오염대책법의 목적 및 규제 방법

일본 환경성에서 2022년 발표한 ‘토양오염대책법의 개요와 시행상황 및 토양환경행정의 최신동향’이라는 제목으로 발표한 자료(이하 ‘환경성 발표자료’라 함)¹³⁾에 따르면, 토양오염대책법의 목적은 다음과 같다.

① 특정 유해물질에 의한 토양오염 상황을 파악하기 위한 조치 및 ② 해당 오염으로 인한 건강피해 방지조치 등을 규정하여 토양오염 대책을 실시하고, 이를 통해 ③ 국민의 건강을 보호하는 것을 목적으로 한다.

여기에서 ① 특정 유해물질에 의한 토양오염 상황을 파악하기 위한 조치는 다음을 포함한다.

- 토양오염으로 인한 건강피해를 방지하기 위해서는 우선 건강피해를 초래할 가능성이 있는 토양의 오염 상황을 정확하게 파악해야 한다.
- 오염 가능성이 낮은 토지까지 포함하여 전체 토지를 조사하는 것은 법의 목적에 비추어 볼 때 합리적이지 않으므로, 토양이 오염될 가능성이 높은 토지를 대상으로 조사 필요성이 높은 일정한 계기를 파악하여 토양오염조사를 실시한다.
- 법령으로 규정한 물질을 일정한 조사 방법에 따라 조사한다.

13) 일본 환경성, “토양오염대책법의 개요와 시행상황 및 토양환경행정의 최신동향”, 검색일: 2024.5.20.

또한 ② 해당 오염으로 인한 건강피해 방지 조치는 다음을 포함한다.

(오염이 발견된 구역 및 그 주변에 대한 방지 조치)

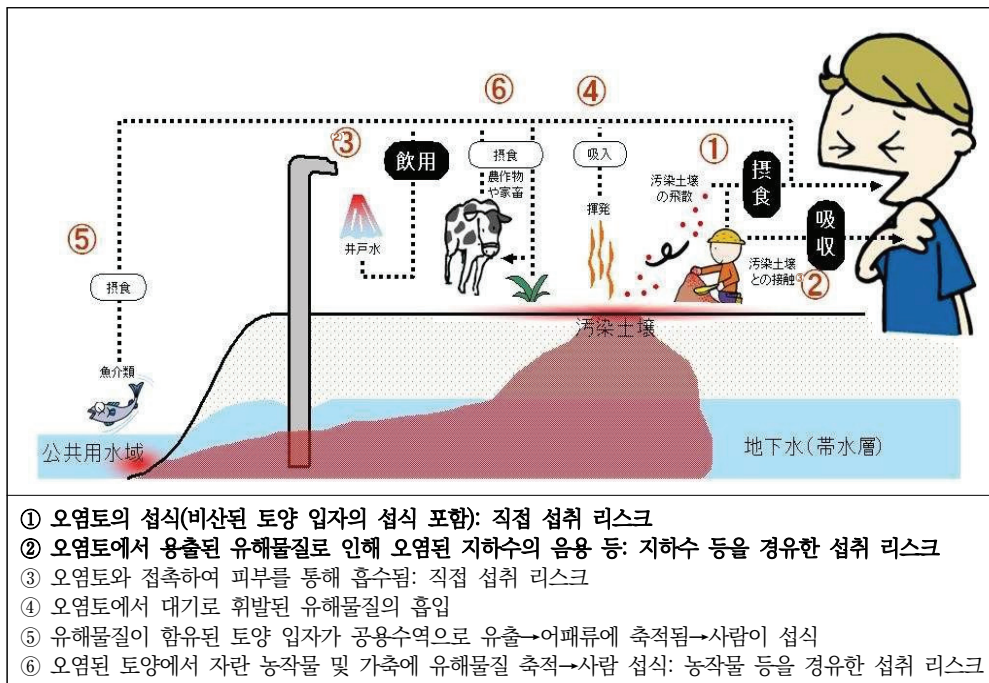
- 기준치를 초과한 경우, 오염의 정도와 건강피해 가능성의 유무에 따라 합리적이고 적절한 대책을 실시하기 위해 환경 리스크¹⁴⁾별로 구역을 분류한다.
- 도도부현지사는 조치실시구역에 오염 제거에 관한 계획을 수립할 것을 지시한다.
- 오염토가 존재하는 구역의 형질변경은 환경 리스크에 따라 적합한 방법으로 실시한다.

(반출 대상 지역에 대한 방지 조치)

- 반출되는 오염토가 부적절하게 처리되어 오염이 더욱 확산되지 않도록 오염토의 반출을 규제한다.

더불어 토양오염대책법에서는 토양오염으로 인한 건강피해 발생 경로 중 ①과 ②를 고려한다고 밝히고 있다.

14) 환경 리스크: 환경을 통해 인체에 부정적인 영향을 미칠 가능성으로, 화학물질 고유의 유해성 정도와 인체 노출 수준을 고려하여 책정한다.



출처: 일본 환경성, “토양오염대책법의 개요와 시행상황 및 토양환경행정의 최신동향”, 검색일: 2024.5.20.

〈그림 3-1〉 일본 토양오염대책법에서 고려하는 건강피해 발생 경로

나. 건강피해 발생 가능성 판단

「토양오염대책법」 제5조에서는 토양오염이 발생하였을 때 ‘사람의 건강에 피해가 발생할 우려가 있다고 정령으로 정한 기준에 해당하는 토지’가 있을 경우에 한하여 오염 상황을 조사하도록 하고 있다. 시행령 제3조에서는 이 기준을 정하고 있는데, 지하수의 음용과 일반인의 출입 여부를 고려하고 있다. 지하수의 음용에 관한 요건은 시행규칙 제30조에서 지하수의 유동 상황을 고려할 때 지하수 오염이 발생하여 지하수 오염이 확대될 우려가 있다고 인정되는 구역에 양수기의 취수구 지점 등이 있을 경우로 정하고 있다(표 3-1 참조).

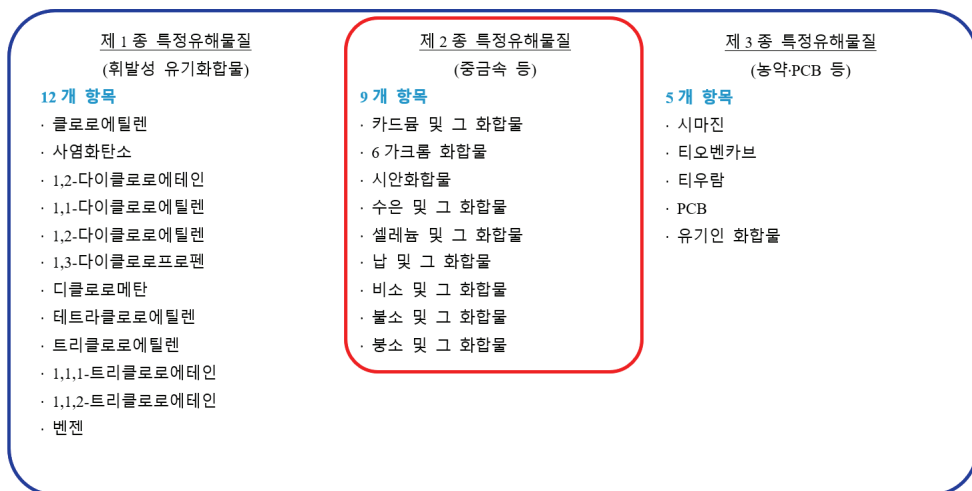
〈표 3-1〉 토양오염 상황 조사의 대상

구분	토양오염대책법	토양오염대책법 시행령	토양오염대책법 시행규칙
조항	제5조(토양오염에 의한 건강 위험의 우려가 있는 토지 조사)	제3조(토양오염 상황 조사의 대상이 되는 토지의 기준)	제30조(지하수의 이용 상황 등에 관한 요건)
내용	<p>제5조 도도부현지사는 제3조 제1항 본문 및 제8항 그리고 전 조 제2항 및 제3항 본문에 규정된 것 외에, 토양의 특정 유해물질에 의한 오염으로 인해 사람의 건강에 관한 피해가 발생할 우려가 있는 것으로서 정령으로 정하는 기준에 해당하는 토지가 있다고 인정할 때는, 정령으로 정하는 바에 따라, 해당 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상황에 대해, 해당 토지의 소유자 등에 대하여 (중략) 그 결과를 보고하도록 명령할 수 있다.</p> <p>2. (생략)</p>	<p>제3조 법 제5조 제1항의 정령으로 정하는 기준은 다음 각 호의 어느 것에도 해당하는 것으로 한다.</p> <p>1. 다음 중 어느 하나에 해당할 것.</p> <p>가. 해당 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 환경성령으로 정하는 기준에 적합하지 않음이 명확하고, 해당 토양의 특정 유해물질에 의한 오염에 기인하여 현재 환경성령으로 정하는 한도를 초과하는 지하수의 수질 오염이 발생하거나 발생할 것이 확실하다고 인정되며, 또한 해당 토지 또는 그 주변 토지에 있는 <u>지하수의 이용 상황 기타 상황이 환경성령으로 정하는 요건에 해당할 것.</u></p> <p>나. 해당 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 (중략) 한도를 초과하는 지하수의 수질 오염이 발생하고 있다고 인정되며, 또한 해당 토지 또는 그 주변 토지에 있는 지하수의 이용 상황 기타 상황이 가 목의 환경성령으로 정하는 요건에 해당할 것.</p> <p>다. 해당 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 환경성령으로 정하는 기준에 적합하지 않거나 적합하지 않을 우려가 있다고 인정되며, 또한 <u>해당 토지가 사람이 출입할 수 있는 토지(공장 또는 사업장의 부지 중 해당 공장 또는 사업장에 관한 사업에 종사하는 자 기타 관계자 이외의 자가 출입할 수 없는 토지를 제외한다. 제5조 제1호 나 목에서 같다)일 것.</u></p> <p>2. (생략)</p>	<p>제30조령 제3조 제1호가 목의 환경성령으로 정하는 요건은, 지하수의 유동 상황 등으로 볼 때 지하수 오염(지하수에서 검출된 특정 유해물질이 지하수 기준에 적합하지 않은 것을 말한다. 이하 동일)이 발생하고 있다면 지하수 오염이 확대될 우려가 있다고 인정되는 구역에 다음 각 호의 어느 하나의 지점이 있는 것으로 한다.</p> <p>1. 지하수를 사람의 음용에 제공하기 위해 사용하거나, 사용할 것이 확실한 우물의 스트레이너, 양수기의 취수구 기타 지하수의 취수구</p> <p>2.~4. (생략)</p>

자료: 일본 e-gov 법령검색(2022.6.17), “토양오염대책법”, 검색일: 2024.5.20; 일본 e-gov 법령검색(2024.4.1), “토양오염대책법 시행령”, “토양오염대책법 시행규칙”, 검색일: 2024.5.20.

다. 토양오염대책법에 규정된 특정 유해물질의 종류

「토양오염대책법 시행령」 제1조에서 특정 유해물질 26종을 규정하고, 시행규칙 제3조에서 특정 유해물질의 종류를 제1~3종으로 구분하고 있다. 지하수 등 섭취 리스크를 고려하여 26개 항목에 대한 토양용출기준을 정하고, 직접 섭취 리스크를 고려한 9개 항목은 토양함유량 기준을 정하고 있다(그림 3-2 참조).



출처: 일본 환경성(2022.10.25), “토양오염대책법의 개요와 시행상황 및 토양환경행정의 최신동향”, 검색일: 2024.5.20.

〈그림 3-2〉 일본 토양오염대책법에 규정된 특정 유해물질의 종류

토양오염대책법 시행규칙의 별표 3~5에서는 오염 상황을 판단하고 구역을 지정하기 위한 제2용출량, 용출량, 함유량 기준을 확인할 수 있다. 해당 별표 내용을 종별로 정리하고, 국내 「토양환경보전법」에 따른 우려 기준과 대책 기준과 함께 정리하면 다음 〈표 3-2〉부터 〈표 3-4〉까지와 같다.

〈표 3-2〉 제1종 특정 유해물질(휘발성 유기화합물)의 환경기준

구분	일본			한국					
				우려 기준			대책 기준		
	토양 함유량 (mg/kg)	토양 용출량 (mg/L)	제2용출량 (mg/L)	지역					
1				2	3	1	2	3	
클로로에틸렌	-	0.002	0.02	-	-	-	-	-	-
사염화탄소	-	0.002	0.02	-	-	-	-	-	-
1,2-디클로로에탄	-	0.004	0.04	5	7	70	15	20	210
1,1-디클로로에틸렌	-	0.1	1	-	-	-	-	-	-
1,2-디클로로에틸렌	-	0.04	0.4	-	-	-	-	-	-
1,3-디클로로프로펜	-	0.002	0.02	-	-	-	-	-	-
디클로로메탄	-	0.002	0.2	-	-	-	-	-	-
테트라클로로에틸렌	-	0.01	0.1	4	4	25	12	12	75
1,1,1-트리클로로에탄	-	1	3	-	-	-	-	-	-
1,1,2-트리클로로에탄	-	0.06	0.06	-	-	-	-	-	-
트리클로로에틸렌	-	0.01	0.1	8	8	40	24	24	120
벤젠	-	0.01	0.1	1	1	3	3	3	9

자료: 일본 e-gov 법령검색(2024.4.1), “토양오염대책법 시행규칙”, 검색일: 2024.5.20; 국가법령정보센터, “토양환경보전법 시행규칙”.

〈표 3-3〉 제2종 특정 유해물질(중금속 등)의 환경기준

구분	일본			한국					
				우려 기준			대책 기준		
	토양 함유량 (mg/kg)	토양 용출량 (mg/L)	제2용출량 (mg/L)	지역					
1				2	3	1	2	3	
카드뮴 및 그 화합물	45	0.003	0.09	4	10	60	12	30	180
6가 크롬 화합물	250	0.05	1.5	5	15	40	15	45	120
시안 화합물	50	불검출	1	2	2	120	5	5	300
수은 및 그 화합물	15	0.0005 (알킬 수은 불검출)	0.005 (알킬 수은 불검출)	4	10	20	12	30	60
셀레늄 및 그 화합물	150	0.01	0.3	-	-	-	-	-	-
납 및 그 화합물	150	0.01	0.3	200	400	700	600	1,200	2,100
비소 및 그 화합물	150	0.01	0.3	25	50	200	75	150	600
불소 및 그 화합물	4000	0.8	24	400	400	700	800	800	2,000
붕소 및 그 화합물	4000	1	30	-	-	-	-	-	-

자료: 일본 e-gov 법령검색(2024.4.1), “토양오염대책법 시행규칙”, 검색일: 2024.5.20; 국가법령정보센터, “토양환경보전법 시행규칙”.

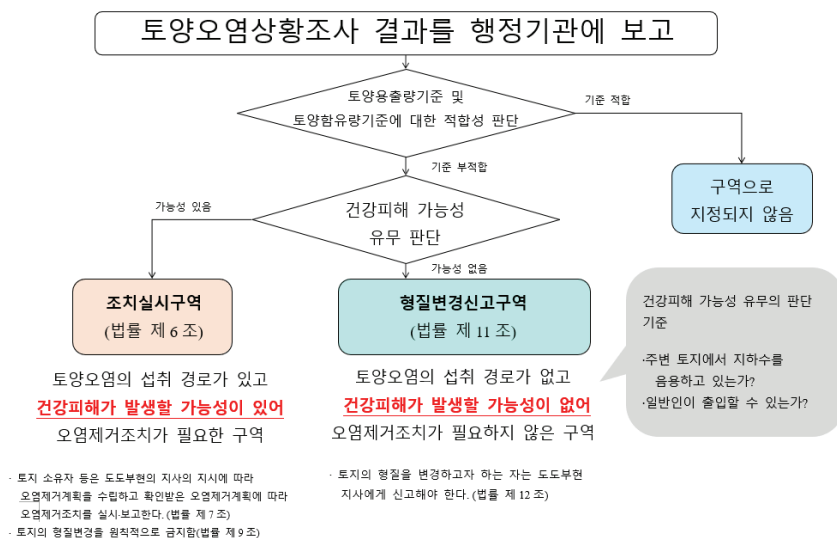
〈표 3-4〉 제3종 특정 유해물질(농약, PCB 등)의 환경기준

구분	일본			한국					
				우려 기준			대책 기준		
	토양 함유량 (mg/kg)	토양 용출량 (mg/L)	제2용출량 (mg/L)	지역					
1				2	3	1	2	3	
시마진	-	0.003	0.03	-	-	-	-	-	-
티오벤카브	-	0.02	0.2	-	-	-	-	-	-
티우람	-	0.006	0.06	-	-	-	-	-	-
PCB	-	불검출	0.003	1	4	12	3	12	36
유기인 화합물	-	불검출	1	10	10	30	-	-	-

자료: 일본 e-gov 법령검색(2024.4.1), “토양오염대책법 시행규칙”, 검색일: 2024.5.20; 국가법령정보센터, “토양환경보전법 시행규칙”.

라. 구역의 지정

토양오염 상황 조사 결과에 따른 구역 지정의 흐름도는 다음 〈그림 3-3〉과 같다. 기준에 대한 적합성을 판단하고, 건강피해 가능성 유무를 판단하여 ‘조치실시구역’ 또는 ‘형질변경신고구역’으로 지정한다.



출처: 일본 환경성(2022.10.25), “토양오염대책법의 개요와 시행상황 및 토양환경행정의 최신 동향”, 검색일: 2024.5.20.

〈그림 3-3〉 일본 구역 지정의 흐름도

‘조치실시구역’에서 강구하여야 할 ‘지시 조치’와 ‘실시조치’는 법 제7조에서 규정하고 있고(표 3-5 참조), 토지의 구분에 따른 조치 내용은 시행규칙 제36조와 별표 6에서 확인할 수 있다. 별표 6(부록 I 참조)의 내용을 지하수 오염에 따른 토지 구분과 환경기준 초과 상황에 따른 지시 조치의 내용과 함께 정리하면 다음 <그림 3-4>와 같다.

<표 3-5> 오염 제거 등의 조치

구분	토양오염대책법		토양오염대책법 시행규칙
조항	제6조(조치 실시구역의 지정 등)	제7조(오염 제거 등 계획의 제출 등)	제36조(지시 조치 및 지시 조치와 동등 이상의 효과가 있다고 인정되는 오염 제거 등의 조치)
내용	<p>제6조 도도부현지사는 토지가 다음 각 호의 어느 것에도 해당한다고 인정하는 경우에는 해당 토지의 구역율, 그 토지가 특정 유해물질에 의해 오염되어 있고, 해당 오염으로 인한 사람의 건강에 관한 피해를 방지하기 위해 해당 오염의 제거, 해당 오염의 확산 방지 기타 조치(이하 “<u>오염의 제거 등의 조치</u>”라 한다)를 강구할 필요가 있는 구역으로 지정한다.</p> <p>1. 토양오염 상황조사의 결과, 해당 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 환경성령으로 정하는 기준에 적합하지 않은 것.</p> <p>2. 토양의 특정 유해물질에 의한 오염으로 인해 사람의 건강에 관한 피해가 발생하거나 발생할 우려가 있는 것으로서 정령으로 정하는 기준에 해당하는 것.</p> <p>2~5 (생략)</p>	<p>제7조 도도부현지사는 전 조 제1항의 지정을 했을 때 환경성령으로 정하는 바에 따라, 해당 오염으로 인한 사람의 건강에 관한 피해를 방지하기 위해 필요한 한도 내에서, 조치실시구역 내 토지의 소유자 등에 대하여 (중략)한다.</p> <p>1. 도도부현지사에 의해 제시된 오염의 제거 등의 조치(다음 조 제1항에서 “지시 조치”라 한다) 및 이와 동등 이상의 효과를 가진다고 인정되는 오염의 제거 등의 조치로서 <u>환경성령으로 정하는 것 중</u>, 해당 토지의 소유자 등(중략)이 강구하고자 하는 조치(이하 “<u>실시조치</u>”라 한다).</p> <p>2.~3. (생략)</p>	<p>제36조 지시 조치는 별표 제6의 왼쪽 열에 기재된 토지의 구분에 따라 각각 같은 표의 중간 열에 정한 오염 제거 등의 조치로 한다.</p> <p>2 (생략)</p> <p>3 법 제7조 제1항 제1호의 환경성령으로 정하는 지시 조치와 동등 이상의 효과가 있다고 인정되는 오염 제거 등의 조치는 <u>별표 제6의 왼쪽 열에 기재된 토지의 구분에 따라 각각 같은 표의 오른쪽 열에 정한 오염 제거 등의 조치로 한다.</u></p>

자료: 일본 e-gov 법령검색(2022.6.17), “토양오염대책법”, 검색일: 2024.5.20; 일본 e-gov 법령검색(2024.4.1), “토양오염대책법 시행령”, “토양오염대책법 시행규칙”, 검색일: 2024.5.20.

유해물질	지하수 오염 여부	지시조치	제 1 위해도		제 2 위해도	
			유해물질	지시조치	유해물질	지시조치
제 1 종	X	지하수 수질측정				
	O	원위치 봉쇄 또는 차수공 봉쇄				
제 3 종	X	지하수 수질측정				
	O	차단공 봉쇄				
	O	원위치 봉쇄 또는 차수공 봉쇄				

유해물질	지하수 오염 여부	지시조치	제 1 위해도		제 2 위해도		제 3 위해도	
			유해물질	지시조치	유해물질	지시조치	유해물질	지시조치
제 2 종	X	지하수 수질측정						
	O	원위치 봉쇄 또는 차수공 봉쇄						
	O	원위치 봉쇄 또는 차수공 봉쇄						
	O(놀이시설 등)	토양오염 제거(오염 정화)						
	O(주거용지)	토양 입환(복토)						
	O(기타)	성토						

- 지하수 수질 측정: 해당 토지에서 지하수 수질 측정을 실시
- 원위치 봉쇄: 토지 기준 부적합 토양이 있는 구역의 측면에, 불투수층(두께가 5미터 이상이며, 투수계수가 초당 100나노미터(압반의 경우 루전값이 1) 이하인 지층 또는 이와 동등 이상의 차수 효력을 가진 지층을 말함. 이하 동일) 중 가장 얇은 위치에 있는 것의 깊이까지 지하수 유출 방지를 위한 구조물을 설치
- 차수공 봉쇄: 기준 부적합 토양을 해당 토지에서 굴착하고, 해당 토지에 지하수 유출 방지를 위한 구조물을 설치하며, 해당 구조물 내부에 굴착한 기준 부적합 토양을 되메우는 것
- 차단공 봉쇄: 기준 부적합 토양을 해당 토지에서 굴착하고, 해당 토지에 필요한 수밀성 및 내구성을 가진 구조물을 설치하며, 해당 구조물 내부에 굴착한 기준 부적합 토양을 되메우는 것
- 토양 입환: 토양을 굴착하여 지표면을 낮추고, 기준 부적합 토양 이외의 토양으로 덮을 것
- 성토: 기준 부적합 토양 이외의 토양으로 덮을 것
- 지하수 오염 확산 방지: 해당 토지에 지하수 오염의 확산을 방지하기 위한 구조물을 설치할 것
- 토양오염 제거: 기준 부적합 토양을 해당 토지에서 제거하거나 기준 부적합 토양 중의 특정 유해물질을 제거할 것
- 포장: 포장할 것
- 출입금지: 사람이 출입할 수 없도록 할 것
- 불용화: 기준 부적합 토양의 성상을 변경하여 특정 유해물질이 물에 용출되지 않도록 할 것

출처: 일본 e-gov 법령검색(2024.4.1), “토양오염대책법 시행규칙”, 검색일: 2024.5.20, [별표 6]의 내용을 토대로 저자 재구성.

〈그림 3-4〉 토지구분에 따른 지시 조치 내용

예를 들어 제2종 특정 유해물질의 조사 결과값이 함유량 기준을 초과하고 해당 부지가 주거용지로 사용되는 경우 토양입환을 실시하여야 한다. 이는 우리나라의 복토와 유사한 개념으로, 굴착하여 지표면을 낮추고, 오염토양을 제거하고, 비오염토로 다시 덮는 조치를 취하여야 한다. 또한 조치실시구역에서의 형질변경은 원칙적으로 금지한다.

마. 자연 유래 토양오염

1) 구역의 지정

환경성은 2019년 3월 1일에 ‘토양오염대책법 일부를 개정하는 법률에 의한 개정 후 「토양오염대책법」의 시행에 대하여(環水大土発第1903015号)¹⁵⁾라는 통지(이하 ‘환경성 통지’라 한다)를 발표했다. 이 문서는 2017년에 토양오염대책법의 일부가 개정되고, 이에 따라 시행규칙이 개정됨에 따라 이들을 시행하기 위한 기술적 조언을 담고 있다.

문서는 자연 유래 토양오염에 대한 구역 지정에 관해 다음과 같이 설명하고 있다.

이른바 자연 유래만의 토양오염(자연 유래 성토 등의 경우를 포함)에 대해서는 지질학적으로 동질한 상태로 오염이 확산되어 있기 때문에 일정한 구획만을 봉쇄하더라도 그 효과의 발현을 기대하기 어려운 것이 일반적인 경우라고 생각된다.

따라서 이러한 토양오염지 중 토양 용출량 기준에 적합하지 않게 오염된 상태인 것에 대해서는 그 주변 토지에 음용 우물이 존재하는 경우, 해당 주변 토지에 상수도 설치나 이수 지점에서의 대책 등 정화를 위한 적절한 조치를 취하는 등의 경우에는 “인체 건강에 관한 피해가 발생하거나 발생할 우려가 있는 것으로서 정령으로 정하는 기준”(법 제6조 제1항 제2호)에 해당하지 않는 것으로 간주하고, 형질변경시 요신고구역으로 지정하도록 처리하기 바란다.

다시 말해 자연 유래만으로 토양이 오염되었을 경우, 주변 토지에 음용 우물이 존재하면 원래는 ‘조치실시구역’으로 지정하여야 하는데, 자연 유래 오염토양의 특성, 즉 동질한 상태로 오염이 확산되어 있는 특성을 반영하여 ‘조치실시구역’이 아닌 ‘형질변경 신고구역’으로 지정

15) 일본 환경성(2022.10.25), “토양오염대책법 일부를 개정하는 법률에 의한 개정 후 토양오염대책법의 시행에 대하여(環水大土発第1903015号)”, 검색일: 2024.5.20.

하도록 하고 있는 것이다.

‘조치실시구역’은 앞의 <표 3-5>와 같이, 법 제6조에 의해 지정되며, 원칙적으로 형질변경을 금지한다. ‘형질변경 신고구역’은 법 제11조에서 정하고 있는데, 토양오염 상태가 기준에 적합하지 않으나 사람의 건강에 관한 피해가 발생하거나 발생할 우려가 없을 경우에 ‘형질변경 신고구역’으로 지정할 수 있다(표 3-6 참조).

<표 3-6> 형질변경 신고구역의 지정

구분	토양오염대책법
	(형질변경 신고구역의 지정 등)
내용	제11조 도도부현지사는 토지가 제6조 제1항 제1호에 해당하고 동항 제2호에 해당하지 않는다고 인정하는 경우에는 해당 토지의 구역을 특정 유해물질에 의해 오염되어 있으며, 해당 토지의 형질을 변경하고자 할 때 신고를 해야 하는 구역으로 지정해야 한다. 2 도도부현지사는 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 제거로 인해 전 항의 지정에 관한 구역(이하 “ <u>형질변경 신고구역</u> ”이라 한다)의 전부 또는 일부에 대해 동항의 지정 사유가 없어졌다고 인정할 때는 해당 형질변경 신고구역의 전부 또는 일부에 대해 동항의 지정을 해제해야 한다. 3~4 생략

자료: 일본 e-gov 법령검색(2022.6.17), “토양오염대책법”, 검색일: 2024.5.20.

2) 형질변경 신고

‘형질변경 신고구역’에서 형질변경의 신고에 대한 조항은 법 제12조에서 확인할 수 있다. 신고가 필요하지 않은 경우를 정하고 있는데, ‘오로지 자연 또는 오로지 토지 조성에 관한 수면 매립에 사용된 토사에서 유래한 것’이라고 기술했다. 여기서 ‘오로지 자연’에서 유래한 오염일 경우가 ‘자연 유래 토양오염’에 해당하고, 이 경우에는 신고하지 않아도 되는 예외 조항을 두고 있다(표 3-7 참조). 즉, 오염 기준을 초과하였으나 건강 피해가 없어 ‘형질변경 신고구역’으로만 지정하도록 한 것에 더하여, 자연 유래 토양오염의 경우는 형질변경 시에도 신고가 필요하지 않다는 의미로 해석할 수 있다.

〈표 3-7〉 형질변경 신고

구분	토양오염대책법
내용	(형질변경시 신고구역 내 토지 형질변경의 신고 및 계획 변경 명령) 제12조 형질변경 시 신고구역 내에서 토지의 형질을 변경하고자 하는 자는(중략) 신고해야 한다. 단, 다음에 해당하는 행위는 예외로 한다. 1. 토지 형질변경의 시행 및 관리에 관한 방침(환경성령으로 정하는 바에 따라 환경성령으로 정하는 기준에 적합하다는 도도부현지사의 확인을 받은 것에 한함)에 기초한 다음 모두에 해당하는 토지 형질변경 가. 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염이 오로지 자연 또는 오로지 토지 조성에 관한 수면 매립에 사용된 토사에서 유래한 것으로서 환경성령으로 정하는 요건에 해당하는 토지에서의 토지 형질변경 나. 인체 건강에 관한 피해가 발생할 우려가 없는 것으로서 환경성령으로 정하는 요건에 해당하는 토지 형질변경 2. 통상적인 관리 행위, 경미한 행위, 기타 행위로서 환경성령으로 정하는 것 3.~4. 생략

자료: 일본 e-gov 법령검색(2022.6.17), “토양오염대책법”, 검색일: 2024.5.20,

법 제50조에서는 ‘형질변경 신고구역’ 내에서 신고가 필요한 행위를 확인할 수 있는데, 가) 조치를 위해 구조물 변경을 추가하거나, 나) 면적이 10m² 이상이며 깊이가 50cm 이상 이거나, 다) 깊이가 3m 이상일 경우가 해당된다(표 3-8 참조).

자연 유래 오염토양의 경우, 위의 조건에 해당하여도 신고가 필요하지 않다. 다만, 자연 유래 오염토양을 반출하여 사용하기 위해 형질을 변경하는 경우엔 신고가 필요하다.

〈표 3-8〉 형질변경 신고 필요 사항

구분	토양오염대책법 시행규칙
	(형질변경 신고구역 내에서의 토지 형질변경 신고를 요하지 않는 통상적인 관리 행위, 경미한 행위 및 기타 행위)
내용	<p>제50조 법 제12조 제1항 제2호의 환경성령으로 정하는 것은 다음에 열거하는 행위로 한다.</p> <p>1. 다음의 어느 것에도 해당하지 않는 행위</p> <p>가. 오염 제거 등의 조치를 위해 설치된 구조물에 변경을 가하는 것.</p> <p>나. 토지의 형질변경으로, 그 대상이 되는 토지의 면적의 합계가 10제곱미터 이상이고, 그 깊이가 50센티미터 이상(지표에서 (중략) 이상)인 것.</p> <p>다. 토지의 형질변경으로, 그 깊이가 3미터 이상(중략) 깊이 이상)인 것.</p> <p>라. 다른 자연 유래 등 형질변경 신고구역 내의 토지 형질변경에 자연 유래 등 형질변경 신고구역 내의 자연 유래 등 토양을 자신이 사용하거나 타인에게 사용하게 하기 위해 해당 자연 유래 등 형질변경 신고구역 내에서 토지의 형질변경을 하는 것 또는 하나의 토양오염상황조사 결과에 기초하여 지정된 복수의 형질변경 신고구역 사이에서 다른 형질변경 신고구역 내의 토지 형질변경에 하나의 형질변경 신고구역에서 반출된 오염토양을 자신이 사용하거나 타인에게 사용하게 하기 위해 해당 형질변경 신고구역 내에서 토지의 형질변경을 하는 것.</p> <p>마. 자연 유래 등 형질변경 신고구역 내의 자연 유래 등 토양을 다른 자연 유래 등 형질변경 신고구역 내의 토지 형질변경에 자신이 사용하거나 타인에게 사용하게 하는 것 또는 하나의 토양오염 상황조사 결과에 기초하여 지정된 복수의 형질변경 신고구역 사이에서 하나의 형질변경 신고구역에서 반출된 오염토양을 다른 형질변경 신고구역 내의 토지 형질변경에 자신이 사용하거나 타인에게 사용하게 하는 것.</p> <p>2.~3. 생략</p> <p>2~5 생략</p>

자료: 일본 e-gov 법령검색(2024.4.1), “토양오염대책법 시행규칙”, 검색일: 2024.5.20.

3) 자연 유래 오염 판단

법 제12조에서 ‘오로지 자연’에서 오염이 유래한 것의 요건을 환경성령으로 정하도록 하고 있는데 (표 3-7 참조), 해당 내용은 시행규칙 제49조의4에서 확인할 수 있다. 4가지의 요건에 모두 해당하여야 하는데, 제2종특정 유해물질, 즉 시안화합물을 제외한 중금속류로 인한 오염이어야 하고, 오염 상태가 지질학적으로 동질한 상태로 퍼져 있고, 오염 상태가 제2용출량 기준에 적합하면서, 오염이 수면매립 등에 사용된 토사에 기인한 것이 아님을 만족시켜야 한다(표 3-9 참조).

〈표 3-9〉 자연 유래 토양오염의 요건

구분	토양오염대책법 시행규칙
	(오염이 전적으로 자연 또는 전적으로 토지 조성에 관한 수면 매립에 사용된 토사에 기인하는 것에 관한 요건)
내용	<p>제49조의4 법 제12조 제1항 제1호 가.의 환경성령으로 정하는 요건은 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 것으로 한다.</p> <p>1. 시행관리방침의 확인에 관한 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 전적으로 자연에 기인하는 것으로서 다음 요건의 모두에 해당한다고 인정되는 경우:</p> <p>가. 시행관리방침의 확인에 관한 토지를 포함한 형질변경 시 요신고구역의 지점에 관한 특정 유해물질의 종류가 제2종 특정 유해물질(령 제1조 제5호에 열거된 특정 유해물질의 종류를 제외함)일 것.</p> <p>나. 시행관리방침의 확인에 관한 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 지질학적으로 동질한 상태로 퍼져 있을 것.</p> <p>다. 시행관리방침의 확인에 관한 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 제2용출량 기준에 적합할 것.</p> <p>라. 시행관리방침의 확인에 관한 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 토지 조성에 관한 수면 매립에 사용된 토사 및 인위적 등에 기인할 우려가 없는 토지, 토지 조성에 관한 수면 매립에 사용된 토사에 기인할 우려가 없는 토지로서, (중략) 토지 조성에 관한 수면 매립에 사용된 토사 및 인위적 등에 기인하는 토지가 아니라고 인정되는 토지일 것.</p> <p>2. 생략</p>

자료: 일본 e-gov 법령검색(2024.4.1), “토양오염대책법 시행규칙”, 검색일: 2024.5.20.

환경성 통지¹⁶⁾의 별지(부록 II 참조)에서는 자연 유래 특례구역에 대해 오염 상태가 전적으로 자연에 의한 것으로 인정되는지 여부의 판단에 참조할 내용을 담고 있다. 이 별지 내용과 관련하여 2022년 8월 일본 환경성 물·대기환경국 물환경과 토양환경실에서 발표한 ‘토양오염대책법에 따른 조사 및 조치에 관한 가이드라인(개정 제3.1판)’¹⁷⁾¹⁸⁾(이하 ‘조사 및 조치 가이드라인’이라 한다)의 부록 3 ‘자연 유래에 의한 기준 부적합 토양의 판단 방법 및 그

16) 일본 환경성(2019.3.1), “토양오염대책법 일부를 개정하는 법률에 의한 개정 후 토양오염대책법의 시행에 대하여(環水大土発第1903015号)”, 검색일: 2024.5.20.

17) 일본 환경성(2022.8), “토양오염대책법에 따른 조사 및 조치에 관한 가이드라인(개정 제3.1판)”, 검색일: 2024.5.20.

18) 2019년 4월 1일부터 「토양오염대책법」의 일부를 개정하는 법률(2017년 법률 제33호)이 전면 시행됨에 따라, 실무에 종사하는 지방공공단체 및 사업자가 개정법에 근거한 조사 및 조치를 수행할 때 참고할 수 있는 지침서로서 ‘토양오염대책법에 근거한 조사 및 조치에 관한 가이드라인(개정 제3판)’을 작성하였고, 2022년에 개정 3.1판을 작성. 해당 가이드라인은 토양오염대책법의 개요, 토양오염 상황조사, 조치 필요 구역 등의 지정, 오염 제거 등의 조치에 관한 상세한 설명을 포함. 또한 자연적으로 발생한 토양오염에 대한 내용을 포함.

해설'에서 상세하게 설명하고 있다(부록 III 참조).

해당 자료에 따르면 2002년에 실시한 조사 결과 자연 유래 토양오염으로 판단된 사례는 비소가 31건으로 가장 많고, 납이 18건, 그리고 불소가 14건 등으로 많았다. 이 자료는 특정 유해물질로 인한 자연 유래 오염 여부를 판단하기 위한 정보를 제공하며, 자연 유래로 판단되는 경우의 함유량 상한값 등에 대한 자료를 포함한다. 또한 배경농도와의 비교와 화합물의 형태 등을 확인하여 자연적인 수준인지를 판단하도록 하고 있다(부록 III 참조). 가장 중요한 판단 방법인 분포 특성과 관련해서는 다음과 같은 특성을 확인할 수 있을 때 자연 유래 토양오염으로 판단할 수 있다.

- 해당 물질의 사용 이력 장소 등과의 관련성을 나타내는 지역성이 인정되지 않는다.
- 동일 지층 내에서 깊이 방향으로 함유량이 감소하지 않는다.
- 깊이 방향으로 용출량 또는 함유량의 연속적인 저하가 뚜렷하게 나타나지 않는다.
- 특정 유해물질의 침투로 인한 영향이 낮다고 판단되는 깊이보다 깊다.

4) 자연 유래 특례구역 간 오염토의 이동

환경성 통지¹⁹⁾에 따르면, 2017년 「토양오염대책법」의 주요 개정 내용은 다음과 같다.

- 토양오염 상황조사 실시 대상 토지 확대
- 오염 제거 등 조치 내용에 관한 계획 제출명령 신설 등
- 리스크에 따른 규제 합리화

여기서 '리스크에 따른 규제 합리화'의 세부 내용은 다음과 같이 자연 유래 관련 내용을 포함하고 있다.

- (1) 건강피해 우려가 없는 토지의 형질변경은 그 시행방법 등의 방침에 대해 사전에 도도 부현지사의 확인을 받은 경우, 공사별 사전신고 대신 연 1회 정도의 사후신고로 한다.

19) 일본 환경성(2019.3.1), “토양오염대책법 일부를 개정하는 법률에 의한 개정 후 토양오염대책법의 시행에 대하여(環水大土発第1903015号)”, 검색일: 2024.5.20.

(2) 기준 부적합인 자연 유래 등에 의한 토양은 도도부현지사에게 신고함으로써 동일 지층의 자연 유래 등에 의한 기준부적합 토양이 있는 다른 구역으로의 이동도 가능하도록 한다.

다시 말해 2017년 법 개정을 통해서 자연 유래 토양의 이동이 가능해졌다. 기존에는 자연 유래 오염토양이더라도 지정구역 외로 반출될 경우 오염토양 처리시설에서의 처리가 의무화되어 있었음을 확인할 수 있다.

2017년 법 개정 이전에는 자연 유래 특례구역에서 발생하는 기준 부적합 토양을 인근 유사한 구역으로 반출할 수 없어 활용이 어려웠고, 인근에 임시 보관하기가 불가능해 공사의 편의성이 좋지 않았다. 개정을 통해 자연 유래 특례구역 및 매립지 특례구역 간의 토양 이동 중 일정한 요건을 충족하면 신고를 통해 가능하도록 하였다.

앞서 설명한 바대로 자연 유래 토양오염의 경우 ‘형질변경 신고구역’으로 지정하고, 신고에 관해서도 예외를 두고 있다. 이를 ‘자연 유래 특례구역’이라 지정한다(표 3-10 참조).

〈표 3-10〉 자연 유래 특례구역 지정

구분	토양오염대책법 시행규칙
내용	(대장) 제58조 법 제15조 제1항의 대장은 장부 및 도면으로 작성하는 것으로 한다. 2~4 생략 5 요조치구역 등에 관한 제1항의 장부는, 적어도 다음에 열거하는 사항을 기재하는 것으로 하고, 그 양식은 요조치구역에 있어서는 양식 (중략) 제23호와 같다. 1. 조치필요구역 등으로 지정된 연월일 2~9. 생략 10. 자연 유래 특례구역(형질변경 시 요신고구역으로서 해당 형질변경 시 요신고구역 내의 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 오로지 자연에 유래한다고 인정되는 것을 말한다)에 있어서는, 그 취지

자료: 일본 e-gov 법령검색(2024.4.1), “토양오염대책법 시행규칙”, 검색일: 2024.5.20.

이러한 구역에서 토양 반출이 가능한 경우는 다음 〈표 3-11〉과 같다. 자연 유래 오염토양은 자연 유래 특례구역 간에는 다음과 같은 일정 요건을 충족하는 경우 이동이 가능하다.

- 자연 유래 등 형질변경 시 신고구역 내 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상황이 유사할 것[법 제18조 제1항 제2호 (가)목]
- 자연 유래 등 토양이 있었던 토지의 지질과 동일할 것[법 제18조 제1항 제2호 (나)목]

〈표 3-11〉 오염토양의 반출

구분	토양오염대책법
	(오염토양의 처리 위탁)
내용	<p>제18조 오염토양을 해당 요조치구역 등 외부로 반출하는 자(그 위탁을 받아 해당 오염토양의 운반만을 수행하는 자는 제외)는 해당 오염토양의 처리를 오염토양 처리업자에게 위탁해야 한다. 단, 다음에 해당하는 경우는 예외로 한다.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 오염토양을 해당 요조치구역 등 외부로 반출하는 자가 오염토양 처리업자이며 해당 오염토양을 스스로 처리하는 경우 2. 자연 유래 등 형질변경 신고구역 내의 자연 유래 등 토양을 다음 모두에 해당하는 다른 자연 유래 등 형질변경 신고구역 내의 토지의 형질변경에 스스로 사용하거나 타인에게 사용하게 하기 위해 반출을 수행하는 경우 <ul style="list-style-type: none"> 가. 해당 자연 유래 등 형질변경 신고구역과 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상황이 유사하다고 환경성령에서 정하는 기준에 해당하는 자연 유래 등 형질변경 신고구역 나. 해당 자연 유래 등 토양이 있었던 토지의 지질과 동일하다고 환경성령에서 정하는 기준에 해당하는 자연 유래 등 형질변경 신고구역 3.~5. 생략 <p>2 전 항 제2호의 “자연 유래 등 형질변경 신고구역”이란 형질변경 신고구역 중 토양오염 상황조사 결과 해당 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염이 전적으로 자연 또는 전적으로 해당 토지의 조성에 관한 수면 매립에 사용된 토사에 기인하는 것으로, 환경성령에서 정하는 요건에 해당하는 토지의 구역을 말하며, 동 호의 “자연 유래 등 토양”이란 해당 구역 내의 오염토양을 말한다.</p> <p>3 생략</p>

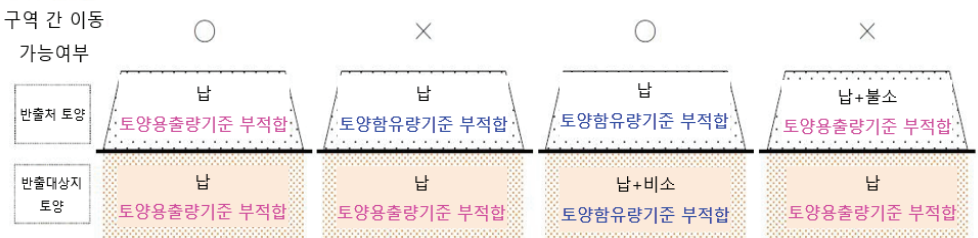
자료: 일본 e-gov 법령검색(2022.6.17), “토양오염대책법”, 검색일: 2024.5.20.

이에 대한 상세 기준은 시행규칙 제65조의2와 3에서 다음 〈표 3-12〉와 같이 정하고 있다. 기본적으로 형질변경하는 토지(토양을 반출하는 토지)의 오염 상태가 반출 목적지(반출된 토양이 사용되는 토지)의 오염 상태보다 양호하여야 한다. 동시에 오염 상태가 지질학적으로 동질한 상태로 퍼져 있어야 한다.

〈표 3-12〉 자연 유래 특례구역 간 토양의 이동 조건

구분	토양오염대책법 시행규칙	
	(자연 유래 등 형질변경 신고구역에 관한 처리 위탁의 예외에 관한 기준)	
내용	제65조의2 법 제18조 제1항 제2호 (가)목의 환경성령으로 정하는 기준은, 자연 유래 등 형질변경 시 신고구역의 지정에 관한 특정 유해물질의 종류별로 다음 표의 상단에 제시된 오염 상태인 경우에, 반출 목적지인 자연 유래 등 형질변경 신고구역 내 토지가 각각 같은 표의 하단에 제시된 오염 상태인 것으로 한다.	
	자연 유래 등 형질변경 신고구역 내 토지의 오염 상태	반출 목적지인 자연 유래 등 형질변경 신고구역 내 토지의 오염 상태
	토양 용출량 기준에 적합하지 않으며, 토양 함유량 기준에 적합한 것	토양 용출량 기준에 적합하지 않으며, 토양 함유량 기준에 적합하지 않은 것
	토양 용출량 기준에 적합하며, 토양 함유량 기준에 적합하지 않은 것	토양 용출량 기준에 적합하며, 토양 함유량 기준에 적합하지 않은 것 또는 토양 용출량 기준 및 토양 함유량 기준에 적합하지 않은 것
	토양 용출량 기준 및 토양 함유량 기준에 적합하지 않은 것	토양 용출량 기준 및 토양 함유량 기준에 적합하지 않은 것
	제65조의3 법 제18조 제1항 제2호 (나)목의 환경성령으로 정하는 기준은 다음과 같다.	
	1. 자연 유래 등 형질변경 신고구역 내 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염이 전적으로 자연에 유래하는 경우에는 해당 자연 유래 등 형질변경 신고구역 내 토지와 반출 목적지인 자연 유래 등 형질변경 신고구역 내 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 지질학적으로 동일한 상태로 퍼져 있는 것. 2. 자연 유래 등 형질변경 시 신고구역 내 토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염이 전적으로 해당 토지의 구성에 관한 수면 매립에 사용된 토사에 유래하는 경우에는 해당 자연 유래 등 형질변경 시 신고구역의 항만(어업용 항만을 포함한다. 이하 이 호에서 같다) 내의 공유수면 매립에 관한 매립지와 반출 목적지인 자연 유래 등 형질변경 시 신고구역의 항만 내의 공유수면 매립에 관한 매립지가 동일한 항만인 것.	

자료: 일본 e-gov 법령검색(2024.4.1), “토양오염대책법 시행규칙”, 검색일: 2024.5.20.



출처: 일본 치바현 환경생활부 수질보전과 지질오염대책반(2023.3.23), “자연 유래 오염조사에 대한 기초해설, 자연 유래 특례구역에 관한 규제 개요”, 검색일: 2024.5.20.

〈그림 3-5〉 자연 유래 특례구역 간 이동 가능 여부 예시

2. 독일

가. 위해성평가²⁰⁾

독일은 1999년 연방토양보호법을 제정하여 토양오염 관리에 대한 체계적인 접근을 시작했으며, 이 법은 토양오염의 예방과 정화에 관한 기본적인 틀을 제공한다.

「연방토양보호법」에 따른 토양오염 확인 절차는 일반적으로 탐색조사, 상세조사, 정화조사 순서인데, 조사와 더불어 위해성평가가 동시에 진행된다. 특히 상세조사와 관련해서 동법 제9조(위해성평가 및 조사명령)에서 유해물질의 종류, 농도 및 환경으로의 확산 가능성, 인간, 동물 및 식물로의 흡수 가능성, 토지이용 등의 고려를 위한 조사 및 평가의 틀로서 위해성평가를 규정하고 있다. 다만 「연방토양보호법」에서는 위해성평가를 위한 체계만 제시하고, 상세한 사항은 각 주에서 지침 등으로 제시하고 있다.

동법 제2조 제7항 제1호 내지 3호에서 정화(또는 복원)는 오염물질 제거 및 감소(오염 제거 조치), 오염물질을 제거하지 않고 오염물의 확산을 장기적으로 저지 또는 감소(안전 조치), 토양의 물리·화학·생물학적 성질의 유해한 변질을 저지 또는 감소시키는 것으로 정의하고 있다. 즉, 오염 제거 조치 외에 위해도저감 조치 등을 통해 해당 부지의 위해도를 관리하는 방식으로 접근하고 있음을 확인할 수 있다.

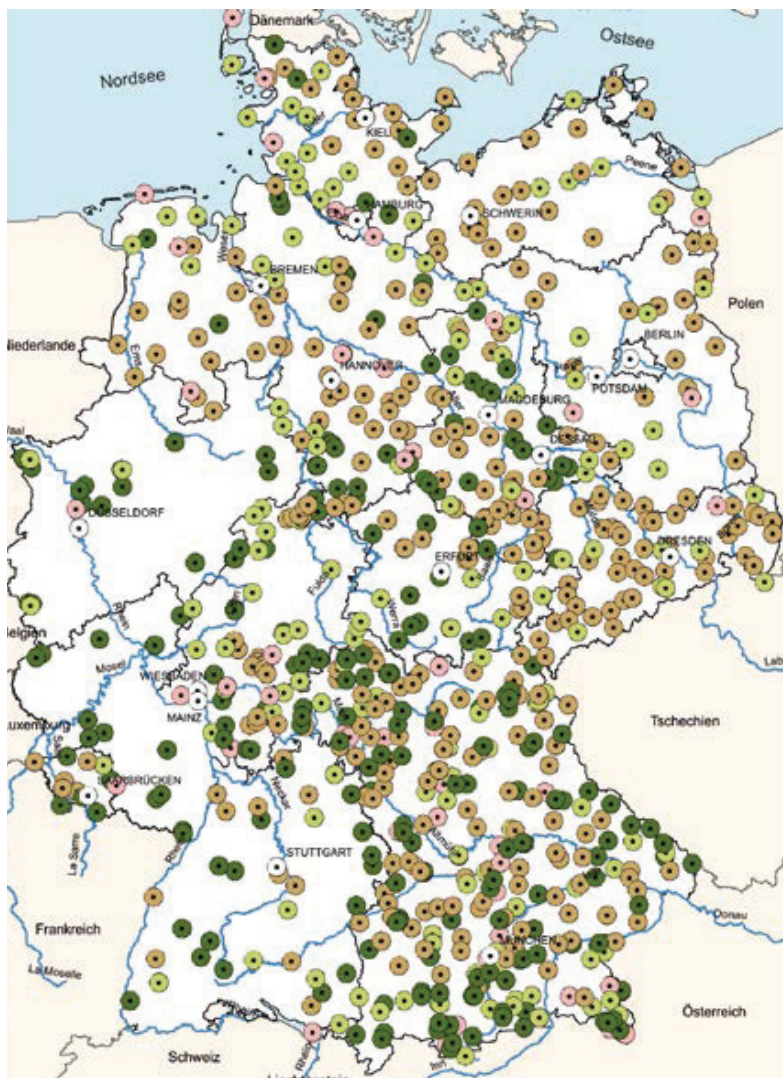
나. 토양 상태 모니터링 프로그램(Programme zur Erfassung des Bodenzustands)

독일연방환경청(German Environment Agency, 2015a)에 따르면 1985년 독일 바이에른주와 바덴뷔르템베르크주에 최초의 장기 토양 모니터링 지역(BDF: Boden-Dauerbeobachtungsflächen)이 설치되었다. 이는 특히 바이에른주에 큰 이점이었는데, 체르노빌 원전 사고 이후 1986년에 후속 조사를 실시하고 이를 전년도 방사성핵종 측정 결과와 비교함으로써 방사성 낙진을 추정할 수 있었기 때문이다. 이후 다른 연방주도 이에 따라 BDF를 설치하였으며, 독일 재통일 후 BDF 프로그램은 새로운 연방주로 확대되었다. 이 프로그램은 연방주가 운영하며, 연방-주 공동 작업체인 Bodenschutz(LABO)가 BDF의

20) 김도형(2019a), pp.75-91을 저자 발췌 및 정리.

설치 및 운영에 대한 권장 사항을 작성했다. 이 조사에서는 ‘핫스팟’은 조사 대상으로 포함하지 않으며, 이는 토양의 일반적인 상태를 파악하기 위함이라고 한다.

2014년 기준 BDF의 수는 약 800개로, 주요 사용 용도에 따라 경작지, 초지 및 산림으로 나뉘어 있으며(그림 3-6 참조), 일부는 주거지역이나 기타 용도의 토지에도 위치해 있다. 일부 주에서는 국제 산림 대기오염 영향 평가 및 모니터링 협력 프로그램(ICP Forests: International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests), 대기, 지하수, 수자원 관리 지침(WRRL: Wasserrahmenrichtlinie) 및 서식지 지침(FFH: Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie)의 측정 네트워크와 연계되어 있다.



Types of use and their respective numbers

- Arable land (345)
- Forest (249)
- Grassland (143)
- Other (52), including urban parks, wine-growing, hop-growing, fallow land and nature reserves

자료: 독일 연방환경청(2015.11), “국제 토양의 해를 맞이한 독일의 토양 상태”, 검색일: 2024.6.20.

〈그림 3-6〉 독일의 토양 상태 장기 관측 지점들

1) 목적²¹⁾

- 현재 토양 상태 설명
- 토양 변화에 대한 장기적 모니터링
- 미래 발전에 대한 예측 도출
- 토양 상태의 보편적 변화에 대한 기준 지역 제공, 정책 조치의 효과성을 위한 통제 도구로도 활용
- 기본 BDF: 토양 특성 변화 기록(특성 문서화)
- 집중 BDF: 토양 변화의 특성 및 과정 문서화(과정 문서화)
- 환경 전문가 및 환경 정책 결정 과정을 위한 신뢰할 수 있는 데이터 기반 제공
- 연방 및 주의 토양보호법 이행

2) 활용/적용 분야²²⁾

- 적절한 보호 및 적응 조치 계획(정책적 및 전문적)
- 환경 교육을 목적으로 한 정기적 발표
- 국내외 보고 및 정책 자문
- 허용 가능한/용인 가능한 물질 유입에 대한 기준 정의
- 다른 매체에 대한 물질적 토양 변화의 영향 검토
- 기후변화로 인한 토양 변화 연구 및 탄소 흡수원 또는 발생원으로서의 토양의 중요성
- 지역 및 이용 유형별 부식 함량, 변동, 부식 감소 또는 증가, 부식 저장량, 생산 기능
- 잔류성유기오염물질(Persistent Organic Pollutants, POPs)에 대한 글로벌 모니터링 계획 개념을 위한 데이터 기반
- 기후 모델 평가

21) 독일 연방환경청(2020.5.1), “독일의 토양 데이터- 주요 토양 측정 및 조사 활동 개요”, 검색일: 2024.6.20.

22) 독일 연방환경청(2020.5.1), “독일의 토양 데이터- 주요 토양 측정 및 조사 활동 개요”, 검색일: 2024.6.20.

다. 토양 평가(Bodenschätzung)²³⁾

1) 개요

「토양평가법(Bodenschätzungsgesetz, BodSchätzG)」에 따른 토양 평가는 농업용 토양의 지도를 작성하고 평가하기 위한 검증된 방법이다. 토양 평가의 목적은 농업 지역의 과세, 농업 질서, 토양 보호 및 토양 정보 시스템 구축에 사용하는 것이다. 1936년부터 1952년 사이에 모든 농업 지역에 대한 전면적인 최초 평가가 이루어졌으며, 자연적인 수확 조건이 지속적으로 변경된 경우 재평가를 수행하고 있다.

토양 평가 과정에서는 주로 변하지 않는 토양 특성(예: 토양 유형, 유기물 함량, 돌 포함량, 깊이)에 대한 데이터를 수집하고, 평가 결과는 필지 단위로 1:2,000의 축척으로 지도와 책자 또는 전자 시스템에 표시된다.

2) 데이터 수집 및 평가 방법

- 전국적으로 통일된 방식으로 토양 특성을 평가
- 토양 평가 프레임워크와 현재 법적으로 유효한 4,131개의 표본 지점(프로필 설명 및 토양 물리적·화학적 분석 데이터가 포함된 표본 프로필)을 사용
- 현장 조사는 40×40m 간격(동질적인 토양 조건에서는 50×50m 간격)으로 보링하여 수행
- 동일하거나 유사한 보링 지점을 대표하는 전형적인 토양 프로필(굴착 구멍)을 자세히 조사하며, 토양 평가 명명법에 따라 설명
- 전국적으로 약 2,000만 개의 굴착 구멍에 대한 프로필 설명이 평가를 위해 제공
- 법적 구속력이 있는 표본 지점의 평가와 현장 평가 작업 사이의 중요한 연결 고리는 비교 지점. 이는 하나의 구역에 약 4~8개의 매우 전형적인 토양 프로필로, 많은 연방주에서는 토양 조사와 함께 수행
- 비교 지점에 대한 분석 데이터도 자주 제공

23) 독일 연방환경청(2020.5.1), “독일의 토양 데이터- 주요 토양 측정 및 조사 활동 개요”, 검색일: 2024.6.20.

3) 토양 상태 평가 프로그램과 토양 평가

토양 평가는 주로 농업용 토양의 수확 능력과 관련된 특성을 평가하는 반면, 토양 상태 평가 프로그램의 목적은 토양의 전반적인 화학적·물리적 상태를 모니터링하여 환경보호와 관련된 정책 결정에 기여하기 위함이다. 두 프로그램에서 수집된 데이터는 서로 보완적이며, 토양 보호와 관리에 대한 포괄적인 이해를 제공하는 데 사용된다. 또한 두 프로그램 모두 전국적으로 통일된 방법론을 사용하여 일관된 데이터 수집과 평가를 보장하고 있다.

이처럼 토양 평가(Bodenschätzung)와 토양 상태 평가 프로그램(Programme zur Erfassung des Bodenzustands)은 독일의 토양 관리와 보호에서 상호 보완적인 역할을 하며, 종합적인 토양 상태 모니터링과 평가를 제공하고 있다.

라. 토양의 오염물질

독일연방환경청에 따르면 중요한 오염물질을 다음 <표 3-13>과 같이 구분하고 있다. 중금속과 비소, 지속성 유기 오염물, 산성 물질, 분해가 어려운 농약 잔류물, 약물 및 방사성 핵종을 포함한다.

해당 보고서(German Environment Agency, 2015a)에서는 오염물질은 자연적 원천, (역사적인) 광산업, 산업 공정, 상업 활동, 화석연료의 연소, 도시 폐기물 및 하수, 농업 및 임업 또는 정원에 사용되는 비료와 농약, 교통, 가정에서 유래하는 것으로 보고 있다. 토양 오염물질의 자연적 원천은 토양을 형성한 기초 암석에 포함된 광물로, 풍화에 의해 오염물질이 방출되고, 지표 근처에 농축된 광물과 그 풍화가 지역적으로나 자연적으로 높은 오염물질 농도를 토양에 초래할 수 있음을 언급하고 있다. 또한 산불과 화산 폭발도 토양에 오염물질을 유입시키는 원인으로 지적하고 있다. 오염물질의 유입, 화학적 상태, 배경오염값에 대해 다음 1)~3)과 같이 설명하고 있다.

〈표 3-13〉 오염물질과 영향

오염물질군	영향
무기 물질(예: 중금속) - 수은(Hg) - 납(Pb) - 카드뮴(Cd) - 구리(Cu) - 아연(Zn)	토양에 축적되어 식물 생장에 유해. 식품 및 사료 식물을 통해 먹이사슬로 전이되어 인간과 동물에게 위험
유기 물질 - DDT, 폴리염화비페닐(PCB), 다이옥신 - 염화탄화수소(예: HCH, 알드린 등) - 다이옥신/퓨란 - 폴리염화비페닐(PCB) - 다환방향족탄화수소(PAH) - 플라스틱(예: PET)	난분해성 유기화합물로, 매우 독성이 강하고 생물에 축적됨. 인간과 동물의 조직에 장기간 축적
산성화 물질 - 황산화물(SO _x) - 질소산화물(NO _x) - 황화수소(H ₂ S)	토양 산성화('산성비'), 중금속 이동성 증가, 식물 영양소 유출, 토양 구조 악화
영양물질 - 질소 화합물(NO ₃ , NH ₄) - 인산염(PO ₄) - 황산염(SO ₄)	수질 부영양화로 산소 부족 초래. 식물 및 동물상 변화, 지하수 오염, 해양 생태계 파괴
방사성핵종 - 세슘(Cs-137) - 스트론튬(Sr-90)	기술 사고로 인한 방출. 토양 및 생물에 축적, 먹이사슬을 통한 전이로 건강 위험
의약품 - 항생제 - 호르몬 제제 - 항생제	인간과 동물에 의해 배설된 후 하수를 통해 환경으로 유입. 특히 항생제는 박테리아의 내성 발달에 영향

자료: 독일 연방환경청(2015.11), "국제 토양의 해를 맞이한 독일의 토양 상태", 검색일: 2024.6.20.

1) 토양으로의 오염물질 유입²⁴⁾

토양에 오염물질이 축적되는 주요 원인으로는 다양한 배출원에서 발생하는 대기 오염 물질의 침적과 농업 및 임업에서 사용되는 비료와 농약이 있다. 단일 오염원, 예를 들어

24) 독일 연방환경청(2015.11), "국제 토양의 해를 맞이한 독일의 토양 상태", 검색일: 2024.6.20.

산업이나 광산 부지, 매립지, 사고 등에서 발생한 오염은 국지적으로 오염 지역을 만들어 복원하거나 안전 조치를 취해야 하고, 농경지와 초지의 오염물질 농도가 높아지면 위험을 방지하기 위해 식량이나 사료작물의 재배를 제한하거나 금지해야 한다.

2) 토양의 화학적 상태²⁵⁾

토양의 전형적인 화학적 상태는 배경값을 통해 설명할 수 있다. 배경값은 자연적인 성분과 인간 활동으로 인해 유입된 무기 및 유기 오염물질의 기여로 구성되며, 이러한 오염물질은 수많은 널리 분포된(확산된) 출처에서 기인한다. 배경값을 산정할 때 특정 오염된 토양(예: 오염 지역, 광산 부지 또는 교통로 주변 토양)은 고려하지 않고, 배경값은 토양 이용과 토양 층에 따라 구분한다. 무기 오염물질의 경우 토양 형성의 기초 암석에 따라 추가 구분이 필요하다.

자연적 원천은 주로 토양을 형성한 기초 암석에 포함된 무기 물질이다. 기초 암석의 화학적 구성은 매우 다양한데, 예를 들어 모래에서 형성된 토양의 카드뮴 농도는 화성암 및 변성암에서 형성된 토양보다 훨씬 낮다.

대부분의 유기 오염물질은 자연적 기원을 배제할 수 있다. 그러나 다환 방향족 탄화수소(PAKs)는 산불이나 화산 폭발과 같은 자연적 과정에 의해 토양에 유입될 수 있다.

3) 토양의 배경 오염 수준²⁶⁾

토양의 배경 오염 수준을 설명하기 위해 각 연방주는 ‘연방주별’ 배경값을, 연방정부는 ‘전국적’(연방주를 초월하는) 배경값을 도출한다. 이 배경값은 연방/주 공동 작업체인 토양 보호(LABO)가 개발한 방법에 기반한다. 배경값은 언급된 LABO 보고서에서 확인할 수 있으며, 토양 보호 및 환경 관련 물질 데이터베이스(STARS: Stoffdatenbank für Bodenschutz-und umweltrelevante Stoffe)²⁷⁾에서 검색할 수 있다.

25) 독일 연방환경청(2015.11), “국제 토양의 해를 맞이한 독일의 토양 상태”, 검색일: 2024.6.20.

26) 독일 연방환경청(2015.11), “국제 토양의 해를 맞이한 독일의 토양 상태”, 검색일: 2024.6.20.

27) 독일 토양 보호 및 환경 관련 물질 데이터베이스(STARS), 검색일: 2024.6.20.

- 무기 오염물질: 전국적인 배경값은 1995년부터 도출되었으며 정기적으로 업데이트
- 유기 오염물질: 아직까지 전국적인 배경값은 존재하지 않음. 2007년부터 2012년 사이에 650개 지점에서 농업용 토양에 대한 전국적인 유기 오염물질 농도를 조사
- 산림 토양 상태 조사(BZE II): 환경청의 의뢰로 474개 산림 지점에서 선택된 유기 오염물질의 농도를 조사

전국적인 조사에 기반하여 처음으로 농업 및 임업용 토양에 대한 유기 오염물질의 전국적인 배경 오염 수준을 설명할 수 있게 되었다. 선택된 무기 오염물질(카드뮴, 납, 비소)에 대한 전국적인 배경값과 유기 오염물질(PAK16, 다이옥신/퓨란, PCB6, 다이옥신 유사 PCB)에 대한 전국적인 배경 오염 수준의 첫 번째 추정을 다음과 같이 제시한다.

가) 비소(As)²⁸⁾

비소(Arsen)는 자연적으로 존재하는 반금속으로, 독성, 유전자 변형 및 발암 효과가 있다. 토양에서 비소는 이동성이 적으며, 일반적으로 식물은 뿌리를 통해 소량만 흡수한다. 그러나 매우 산성이거나 습기가 많은 토양에서는 비소의 식물 흡수율이 증가할 수 있다. 또한 뿌리나 지표면 근처의 식물 부위에 부착된 토양은 식량 및 사료작물의 품질을 저하시킬 수 있다. 아이들은 놀이 중에 비소가 포함된 토양을 직접 섭취할 수 있으며, 동물들은 방목 중에 비소가 포함된 토양을 섭취할 수 있다. 공기 중에 포함된 비소가 함유된 미세 입자는 호흡을 통해 인간과 동물의 체내에 축적될 수 있다.

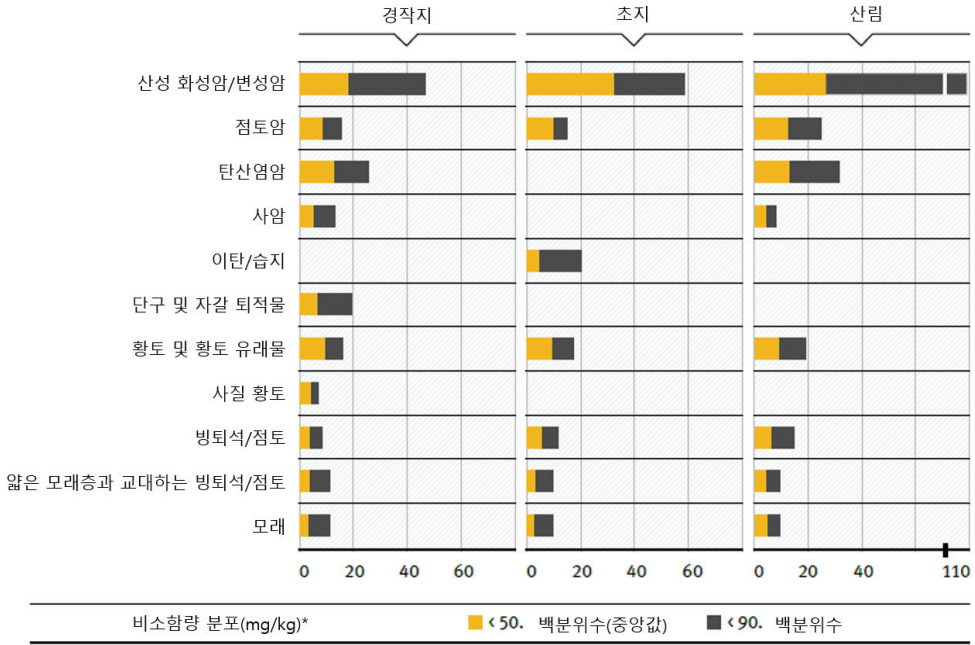
토양에서 비소 농도가 높은 자연적 원인은 비소가 풍부한 토양 형성의 기초 암석과 지표면 근처의 광산이다. 자연적 원천 외에도 광산업이나 산업활동을 통해 토양에 비소가 유입될 수 있다. 과거 주요 원천은 광석의 제련이었으며, 현재는 주로 쓰레기와 석탄의 연소가 주요 배출원이다. 예를 들어 포도 재배에서 해충 방제를 위해 사용된 비소 함유 살충제는 오늘날에도 토양에서 검출되는 비소 농축의 원인이 되었으며, 이는 20세기 40년대부터 금지되었다.

독일 토양의 비소 배경값은 토양 형성의 기초 암석과 토양 사용에 따라 다르다. <그림

28) 독일 연방환경청(2015.11), “국제 토양의 해를 맞이한 독일의 토양 상태”, 검색일: 2024.6.20.

3-7)은 표토에서 비소의 평균농도(50번째 백분위수)와 배경 오염의 상위 수준(90번째 백분위수)을 보여준다. 독일 전역의 배경값은 50번째 백분위수를 기준으로 한다. 경작지에서 사용되는 모래 토양의 표토는 2.7mg/kg, 초지와 산림에서 사용되는 산성 화성암 및 변성암 토양의 표토는 32mg/kg의 비소 농도를 가진다.

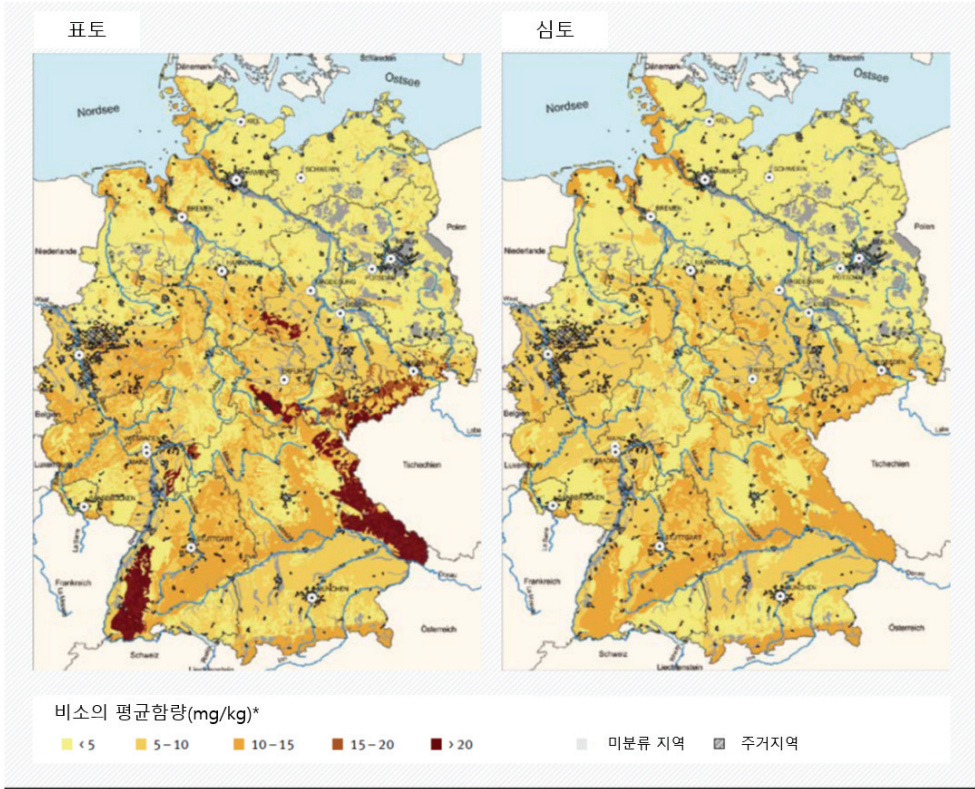
비소의 평균농도의 공간적 분포는 <그림 3-8>에 나타나 있다. 토양 형성의 기초 암석에 따라 표토와 심토는 종종 유사한 농도 수준을 보인다. 그러나 산성 화성암 및 변성암의 경우에는 차이가 뚜렷하다. 초지와 산림 표토의 비소 농도는 심토보다 훨씬 높다.



* 황수분해법에 의함

자료: 독일 연방환경청(2015.11), “국제 토양의 해를 맞이한 독일의 토양 상태”, 검색일: 2024.6.20.

<그림 3-7> 독일 표층토에서의 비소 배경값: 모암 그룹과 주요 토지이용 유형별



* 황수분해법에 의한

자료: 독일 연방환경청(2015.11), “국제 토양의 해를 맞이한 독일의 토양 상태”, 검색일: 2024.6.20.

〈그림 3-8〉 독일 토양의 비소 배경값

마. 오염부지 통계²⁹⁾

연방/주 토양보호 실무그룹(LABO)의 오염부지 위원회는 2002년 처음으로 연방주들에 전국적인 오염부지 통계를 위한 지표를 제출하도록 요청하였고, 이에 각 주는 오염부지 상황에 대한 데이터를 수집하고 이를 정리한 보고서를 작성한다.

바덴뷔르템베르크주는 1987년 이후 가정, 상업 및 산업 폐기물을 포함한 옛 쓰레기 매립지와 환경 위험 잠재력이 있는 상업-산업 부지로부터 발생할 수 있는 위험을 체계적으로

29) 바덴뷔르템베르크주 환경청(2023), “2022년 오염부지 통계”, 검색일: 2024.6.20.

파악하고 목표를 정해 제거하는 작업을 수행해왔다. 2002년 말 오래된 매립지와 오염부지의 오염 의심 지역에 대한 조사를 처음으로 주 전체적으로 완료하였다. 그 이후 추가적인 관련 부지 조사를 시와 군에서 지속적으로 진행하고 업데이트하고 있으며, 초기 의심 지역과 각각의 처리 상태는 시와 군의 토양보호 및 오염부지 등록부에 기록된다. 바덴뷔르템베르크주 환경청은 2023년에 “2022 오염부지 통계-바덴뷔르템베르크주의 오염부지 처리 현황에 대한 수치와 사실”이라는 보고서를 발간하였다. 이 보고서는 데이터 수집 및 분석 방법, 오염 의심 지역 수, 오염 확인 부지 수, 정화 및 지방자치단체의 오염부지 처리 현황 등의 내용을 포함하고 있다.

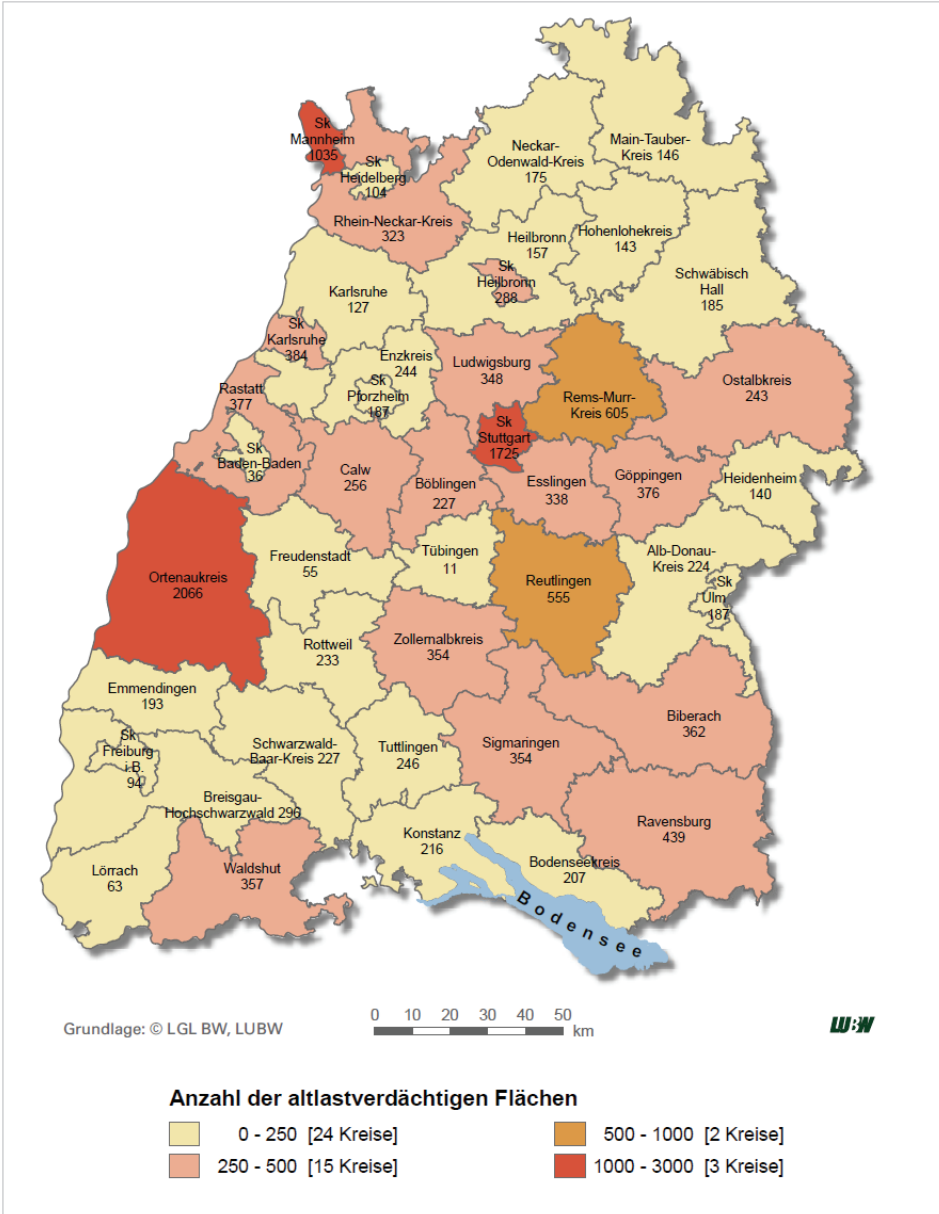
해당 보고서³⁰⁾에서 ‘오염 의심 지역’, ‘오염 확인 부지’ 및 ‘정화’에 대한 내용은 다음과 같다.

- 관련법에 따른 ‘오염 의심 지역’은 2022년 말 기준으로 주 내에 15,082개이고, 이는 토양보호 및 오염부지 등록부(BAK)에 등록되어 있다. 이들은 주로 예비 조사나 상세 조사 단계에 있다(그림 3-9 참조). 지속적인 조사로 인해 2022년 말까지 오염 의심 지역의 수가 꾸준히 증가하여 15,082건에 이르렀고, 이 중 13,572건 또는 90%가 오염부지이다. 향후 산업 및 상업 부지의 폐쇄나 부분 폐쇄로 인해 더 많은 오염 의심 부지가 추가될 것으로 예상된다.
- 오염부지는 담당 기관의 평가 후 환경에 대한 구체적인 위험 상황이 확인된 사례로 정의된다. 이 경우 위험 방지 조치로서 정화 조치가 원칙적으로 필요하다. 위험성 평가를 위한 기술적 조사가 완료되고 ‘정화(Sanierung)’, ‘정화 조사(Sanierungsuntersuchung)’, ‘B-현재 감수할 수 있는 위험 상황(B- Gefahrenlage hinnehmbar)’ 또는 ‘관리-적절한 수단으로 더 이상 조사할 수 없는 위험 상황을 제외한 모든 기준(Überwachung)’으로 평가된 오래된 매립지와 오염부지는 오염부지로 간주된다. 2022년에는 총 2,761건의 사례가 오염부지로 처리 중이었으며, 이 중 923건은 오래된 매립지, 1,838건은 오염 부지였다. 44개 시군의 수치와 지역별 차이는 <그림 3-10>에 나타나 있다. <그림 3-10>의 시군 지도 표현을 보면 현재 오르테나우군(바덴뷔르템베르크에서 가장 큰 군)에 가장 많은 수의 오염부지(244개)가 등록되어 있으며, 그다음으로 주도 슈투트가

30) 바덴뷔르템베르크주 환경청(2023), “2022년 오염부지 통계”, 검색일: 2024.6.20.

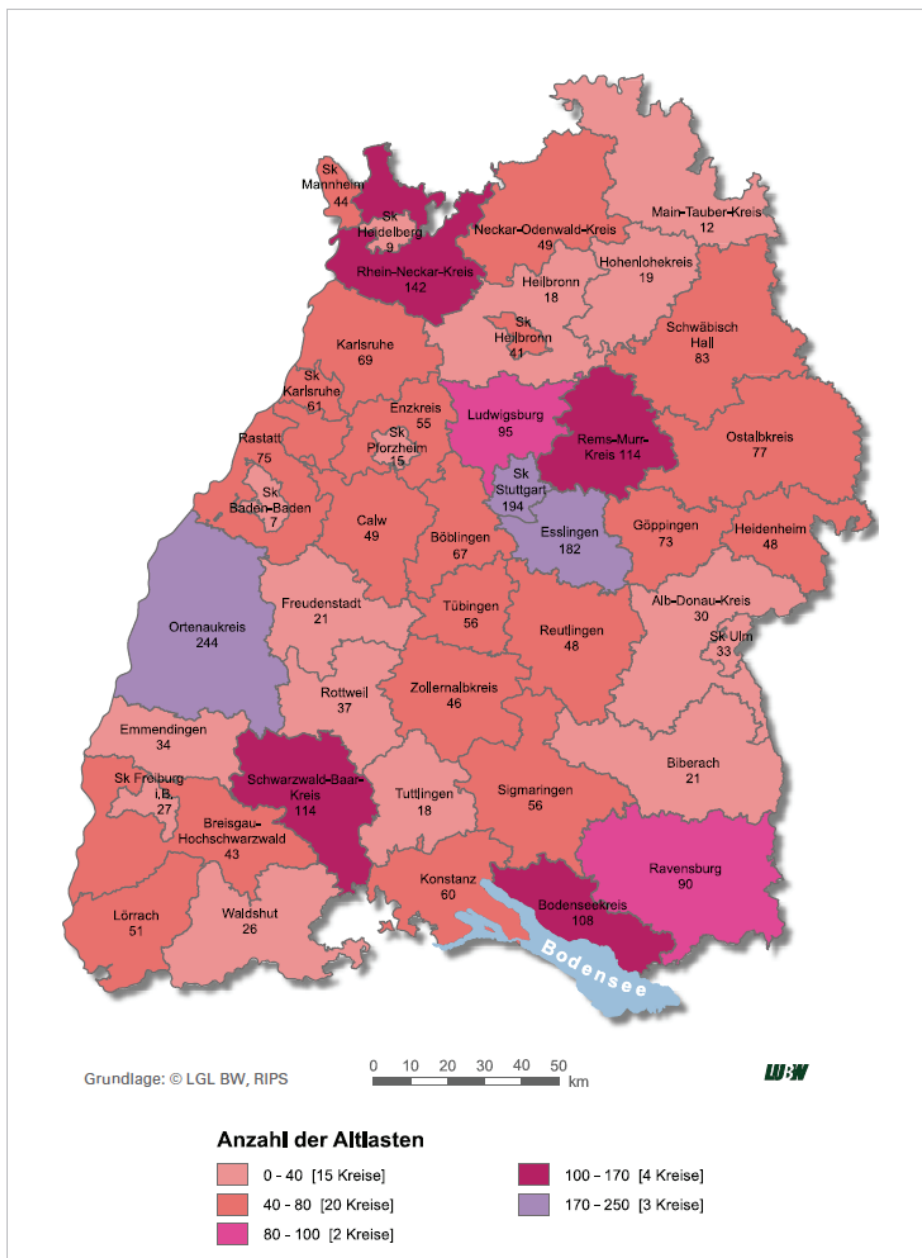
르트가 194개, 에슬링겐군이 182개의 오염부지를 가지고 있다. 바덴바덴과 하이델베르크시(상대적으로 작은 면적)는 한 자릿수의 오염부지를 보여준다. 호헨로예군과 같은 농촌 지역에서는 정화나 감시가 필요한 오래된 매립지(16 AA)의 수가 오염부지(3 AS)의 수보다 훨씬 많다. 반면 라인-네카르 대도시 지역과 같은 산업화된 지역에서는 처리해야 할 오염부지의 수가 더 많다.

- 2010년부터 2022년까지 기술적 조사 후 비례성의 이유로 정화할 수 없는 사건의 수가 지속적으로 증가했다. 이것은 특히 'B-현재 감수할 수 있는 위험 상황'으로 분류된 오염된 토양과 일부 '관리' 상태에 있는 오염된 토양에 해당한다. '정화 조사(SU)' 단계에서 처리 중인 오염된 토양의 수는 약간 감소하고 있으며, '정화(S)' 단계에서 조치가 필요한 오염된 토양의 수도 마찬가지로 감소하고 있다(그림 3-11 참조).



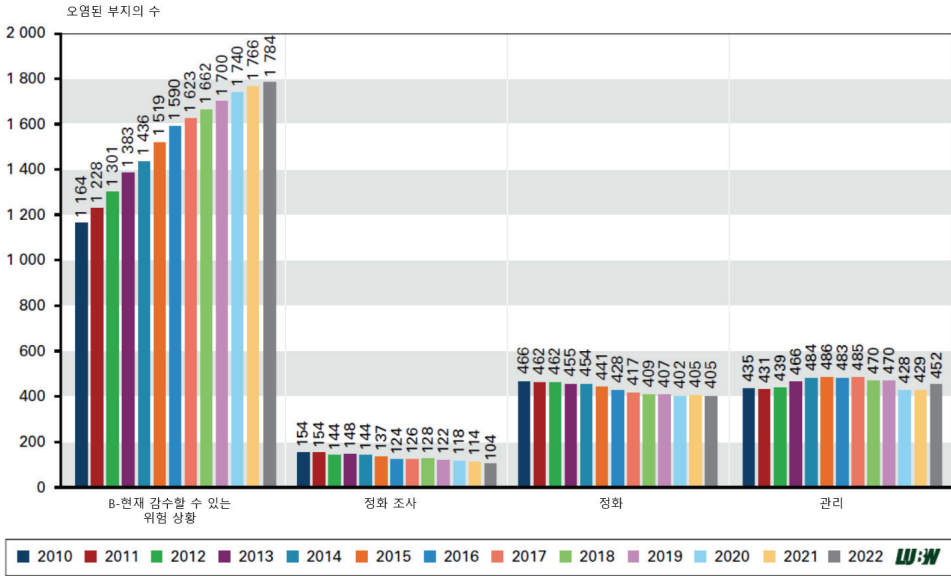
자료: 바덴뷔르템베르크주 환경청(2023), “2022년 오염부지 통계”, 검색일: 2024.6.20.

〈그림 3-9〉 시군별 오염 의심 지역 수를 나타낸 지도



자료: 바덴뷔르템베르크주 환경청(2023), “2022년 오염부지 통계”, 검색일: 2024.6.20.

〈그림 3-10〉 시군별 오염부지 수를 나타낸 지도



자료: 바덴뷔르템베르크주 환경청(2023), “2022년 오염부지 통계”, 검색일: 2024.6.20.

〈그림 3-11〉 2010년부터 2022년까지의 오염된 토양(Altlasten)의 처리 현황 개요

3. 소결

일본과 독일의 토양오염 관리 제도를 분석한 결과, 우리나라의 토양오염 관리 방안 수립에 적용할 수 있는 주요 시사점은 다음과 같다.

첫째, 자연 기원 오염토양에 대한 별도 관리 체계 마련이 요구된다. 일본은 2017년 토양 오염대책법 개정을 통해 자연 유래 오염토양의 이동을 허용하고, 형질변경 시 신고만으로 가능하도록 규제를 완화했다. 또한 자연 유래 오염토양의 판단 기준과 조사 방법 등을 상세히 규정하고 있다. 우리나라도 자연 기원 오염토양에 대한 명확한 정의와 판단 기준을 마련하고, 인위적 오염토양과는 차별화된 관리 방안을 수립할 필요가 있다. 특히 위해성이 낮은 자연 기원 오염토양의 경우 재활용을 촉진하는 등 보다 유연한 관리 방안을 모색해야 한다.

둘째, 위해성에 기반한 토양오염 관리 체계를 도입할 필요가 있다. 일본의 경우 토양오염 대책법에서 토양오염으로 인한 건강피해 발생 가능성을 판단하여 구역을 지정하고 조치

내용을 결정한다. 독일 역시 연방토양보호법에 따라 위해성평가를 실시하여 정화 및 안전조치의 수준을 결정한다. 이는 획일적인 기준 적용이 아닌 부지별 특성과 위해 가능성을 고려한 맞춤형 관리를 가능하게 한다. 우리나라도 토양오염 관리에 위해성평가 제도를 보다 적극적으로 도입하여 과학적이고 합리적인 관리체계를 구축할 필요가 있다.

셋째, 장기적이고 체계적인 토양 모니터링 체계를 구축할 필요가 있다. 독일의 경우 1985년부터 장기 토양 모니터링 지역(BDF)을 운영하여 토양의 일반적 상태와 변화 추이를 지속적으로 관찰하고 있다. 이를 통해 토양 보호 정책의 효과를 평가하고, 미래 예측 및 정책 결정을 위한 과학적 근거를 마련하고 있다. 우리나라도 전국적인 토양 모니터링 네트워크를 구축하여 장기적인 관점에서 토양 상태의 변화를 추적하고, 이를 토양 관리 정책에 반영할 수 있는 체계를 마련해야 한다.

넷째, 토양의 다양한 기능과 가치를 고려하여 종합적으로 관리하는 접근이 필요하다. 독일의 토양 평가(Bodenschätzung) 제도는 농업용 토지의 생산성뿐만 아니라 과세, 토지 이용 계획, 토양 보호 등 다양한 목적으로 활용되고 있다. 우리나라도 토양을 단순히 오염 관리의 대상으로만 볼 것이 아니라 농업 생산, 탄소 저장, 생태계 서비스 제공 등 토양의 다양한 기능을 고려한 통합적 관리 체계를 구축해야 한다.

마지막으로, 토양오염 관련 정보의 체계적 관리와 공유 시스템을 구축할 필요가 있다. 독일의 경우 토양 상태 평가 프로그램을 통해 수집된 데이터를 토양 보호 및 환경 관련 물질 데이터베이스(STARS)에서 관리하고 있다. 이를 통해 정책 결정자와 전문가들이 신뢰할 수 있는 데이터에 쉽게 접근할 수 있다. 우리나라도 토양오염 조사 결과, 정화 이력, 토양 특성 등 다양한 토양 관련 정보를 통합적으로 관리하고 활용할 수 있는 시스템을 구축해야 한다.

제4장

지질기원 토양오염 걱정 관리 방안

1. 개선 방향

제2장에서 국내 지질기원 토양오염 관리 현황을 조사한 결과, 다음과 같은 문제점을 확인하였다.

- 지질기원 토양오염을 입증하기 위한 조사 및 평가 방법 등에 관한 구체적인 규정이 부재함. 시행령에서 자연적 원인 입증 방법을 규정하고 있으나, 구체적인 조사 및 평가 방법에 대한 하위규칙, 지침이 부재함
- ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’에 관한 명확한 정의와 판단 기준이 부재함
- 인위적인 영향이 없는 지점의 지질별 배경농도에 관한 기초자료가 부족함. 더불어 위해성평가, 자연 기원 오염에 대한 입증 등에 관한 정보가 공개되지 않음
- 지질기원 토양오염 발생 가능성이 높은 지역에 위치하고 공정상 토양오염을 발생시킬 가능성이 높은 사업유형을 별도 관리할 필요가 있음
- 반출정화가 필요한 경우 위해성평가 대상에서 제외되어 지질기원 토양오염 관리 체계에 비효율성이 존재함

제3장에서 일본과 독일의 제도 및 운영 현황을 조사, 분석한 결과 다음과 같은 시사점을 도출하였다.

- 자연 기원 오염토양을 별도 관리하는 체계를 적용하고 있으며, 판단 기준과 조사 방법 등을 상세히 규정

- 인위적 오염토양과는 차별화된 관리 방안을 적용하고, 위해성이 낮은 자연 기원 오염 토양의 경우 재사용을 촉진하는 등 보다 유연한 관리 방안을 적용
- 장기적이고 체계적인 토양 모니터링 체계를 구축하여 지속적으로 상태를 관찰
- 건강피해 발생 가능성 등 위해도에 기반한 관리 체계를 운영

국내 지질기원 토양오염의 현황 분석과 해외 사례 조사를 통해 도출된 시사점을 바탕으로 다음과 같은 개선 방향을 제시한다.

첫째, 지질기원 토양오염에 대한 명확한 정의와 판단 기준을 마련한다. 현행 법령에서는 ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’이라는 용어만 사용하고 있어 구체적인 정의와 판단 기준이 미흡한 실정이다. 이에 지질기원 토양오염에 대한 법적 정의를 명확히 하고, 과학적이고 객관적인 판단 기준을 수립해야 한다.

둘째, 위해성에 기반한 토양오염 관리 체계로 전환한다. 현재의 획일적인 기준 적용 방식에서 벗어나, 부지별 특성과 위해 가능성을 고려한 맞춤형 관리 체계를 구축해야 한다. 이를 통해 불필요한 정화 비용을 절감하고, 실질적인 위해 저감 효과를 얻을 수 있다.

셋째, 장기적이고 체계적인 토양 모니터링 시스템을 구축한다. 전국적인 토양 모니터링 네트워크를 통해 토양 상태의 변화를 지속적으로 관찰하고, 이를 토양 관리 정책에 반영할 수 있는 체계를 마련한다.

넷째, 토양오염 관련 정보의 통합 관리 및 공유 시스템을 구축한다. 토양오염 조사 결과, 정화 이력, 토양 특성 등 다양한 토양 관련 정보를 체계적으로 관리하고 활용할 수 있는 플랫폼을 마련한다.

각 개선 방향에 따른 부문별 이행방안에 관한 세부 내용은 다음 제2절에 기술하였다.

2. 이행방안

지질기원 토양오염부지를 위해도에 기반하여 관리하는 체계로 전환하기 위해서는 현행 법령을 개선할 필요가 있다. 현재 법령에서는 지질기원 토양오염부지의 경우, 우선적으로 위해성평가를 통해 정화 등 부지관리 방안을 결정할 수 있도록 하고 있다. 그러나 이 과정에

여러 제약 요인이 존재하여 개선이 필요한 상황이다. 특히 위해성평가 대상으로 선정되기 위한 절차, 즉 ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’임을 입증하는 과정에서의 제약 요인을 개선해야 한다. 앞선 분석에 따르면, 입증과 관련한 세부 방법론이 부재하다는 점과 반출 정화 대상일 경우 위해성평가 대상이 될 수 없다는 조항이 가장 큰 제약 요인으로 보인다.

본 연구에서는 현재와 같이 제한적으로 위해성평가 대상과 물질을 적용하는 체계에서 고려할 수 있는 제안을 중심으로 다루었다. 이는 세부 방법을 규정하는 방안, 지질기원임을 판단하기 위한 기초자료의 구축, 오염토양을 차별화하여 관리하는 방안 등을 포함한다. 이러한 방안들은 단기적으로 적용 가능한 개선책으로 볼 수 있다(가~다. 참조).

더불어 「토양환경보전법」 체계를 위해성에 기반한 관리체계로 전면 개편하는 것에 대한 논의가 진행 중이며, 최근 규제심판부도 중장기적으로 이러한 체계로 전환하도록 권고한 상황이다. 위해성에 기반한 정화체계로 전환하면 지질기원 토양오염에 대한 별도 체계가 필요하지 않으며, 지질기원 토양오염도 위해도를 고려하여 합리적으로 관리할 수 있음이 분명하다. 이러한 측면에서 지질기원 토양오염의 위해도 관리를 위해서도 위해성평가 중심으로 정화체계를 전환할 필요가 있다. 이에 중장기적으로 이러한 정화체계 전환을 위해 필요한 사항을 선행연구 결과를 요약, 재정리하여 기술하였다(라. 참조).

최근 환경부는 선진국 기준과 인체 위해성 등을 종합 고려해 불소 기준을 개선하는 계획을 밝힌 바 있다.³¹⁾ 현재까지는 국내에서 불소로 인한 지질기원 토양오염만이 다수 발견되고 있기에, 불소 기준의 재설정이 이루어질 경우 본 연구에서 제안하는 자연 기원 토양오염 관리 방안들을 도입할 필요성이 감소할 수 있다는 측면도 있다. 그러나 불소뿐만 아니라 지질기원으로 인한 토양오염물질은 비소를 포함하여 다수의 중금속류로 인해 발생할 수 있고, 일본과 국내 석산 사례에서도 확인할 수 있듯이 기타 비소, 납 등으로 인한 지질기원 토양오염이 발생할 가능성도 있다.

따라서 국내 토양 기준이 국내 지질학적 특성과 지역별 배경농도 등을 반영하고 있는지를 전면적으로 재검토하고 조정하지 않는 한 지질기원 토양오염이 지속적으로 발생할 가능성이 있음을 고려하여 다음과 같은 개선 사항을 제안하고자 한다.

31) 환경부 보도자료(2024.1.26), p.7.

가. 자연 기원 토양오염 입증 방법 구체화

1) 조사 및 평가 지침 제정

「토양환경보전법」 제15조의5 제2항에서 위해성평가를 실시할 수 있는 경우를 정하고 있고, 제4호에 자연적인 원인으로 인한 토양오염의 내용을 정하고 있다. 또한 자연적인 원인으로 인한 토양오염임을 입증하기 위한 방법은 시행령 제11조의2 제1항에서 다음과 같이 정하고 있다.

- 해당 오염물질의 농도가 주변지역의 토양 분석 결과와 비슷함을 증명할 것
- 해당 오염물질이 대상부지의 기반암으로부터 기인하였음을 증명할 것
- 그 밖에 과학적인 방법으로 해당 오염물질이 자연적인 원인으로 발생하였음을 증명할 것

이후 세부적인 방법과 절차에 관한 하위규칙과 지침이 부재한 상황이다. 또한 위해성평가 보고서 및 정밀조사 보고서 작성과는 달리 작성을 담당할 수 있는 전문기관에 대한 규정도 없는 실정이다. 이는 입증 과정의 관계자인 정화책임자, 이를 검토하는 환경부 및 실무자들에게 제약 요인으로 작용할 수 있다.

일본의 경우, 1,200여 페이지에 달하는 조사 및 조치 가이드라인³²⁾을 작성, 배포하고 있다. 이 가이드라인은 자연 유래 토양오염에 대해서도 이를 조사하기 위한 조사 범위 설정, 조사 지점 선정, 시료 채취 방법, 분석 방법 및 판단에 관한 상세한 내용을 포함하고 있다. 특히 가이드라인의 부록 3에서는 자연 유래에 의한 기준 부적합 토양을 판단하는 방법 및 해설을 상세히 제공하고 있다. 이 가이드라인에 따르면 특정 유해물질의 종류, 함유량 범위 및 분포 특성 등을 종합적으로 고려하여 자연 유래 토양오염을 판단하도록 하고 있다.

본 연구에서는 다음의 사항을 고려하여 ‘자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안)’을 마련하였다.

32) 일본 환경성(2022.08), “토양오염대책법에 따른 조사 및 조치에 관한 가이드라인(개정 제3.1판)”, 검색일: 2024.5.20.

- 기존 ‘토양정밀조사의 세부 방법에 관한 규정’, ‘토양오염물질 위해성평가 지침’ 및 ‘토양환경평가’ 지침과의 연계성을 고려
- 기기분석 방법의 경우 공용적이고 범용적인 방법을 활용하도록 규정
- 관계자(지질 전문가, 토양오염 조사기관 전문가, 위해성평가 전문가 및 환경부) 의견 반영

위의 사항을 고려하고 다음의 내용을 포함하여 지침(안)을 마련하였고, 세부 내용은 다음 <표 4-1>부터 <표 4-6>의 내용과 같다. 표준화된 지침 마련을 통해 지질기원 토양오염 여부를 객관적이고 과학적으로 판단할 수 있는 근거를 제공할 수 있을 것이다.

- 조사 대상 지역 선정 기준
- 시료 채취 방법 및 분석 항목
- 주변 지역과의 비교 분석 방법
- 지질학적·지구화학적 특성 평가 방법
- 인위적 오염 가능성 배제를 위한 검토 사항
- 조사 결과의 해석 및 평가 기준

자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안)은 「토양환경보전법」에 근거하여 자연적인 원인으로 인한 토양오염을 입증하고 정화하는 과정에 적용하기 위함이다. 중금속류와 불소 등 특정 오염물질에 한하여 적용되며, 토양오염 조사기관이 조사 및 평가를 수행해야 한다고 제안하였다. 다만 현재 토양오염 조사기관의 지정 기준에 따른 장비와 기술인력 조건에는 암석학적·광물학적 분석을 위한 장비(표 4-4 참조)가 필요하지 않으며, 지질 전문가 확보가 필수적이지 않아, 이에 대한 향후 보완 방안이 필요하다.

조사 과정은 예비조사와 본조사로 구분하였다. 예비조사에서는 토양정밀조사 결과, 지질 현황, 주변 오염 현황 등을 분석하여 자연 기원 토양오염의 개연성을 판단한다. 본조사는 세 가지 주요 방법으로 수행하는데, 첫째, 해당 오염물질의 농도가 주변지역의 토양분석 결과와 비슷함을 증명하는 방법으로, 주변지역 배경농도를 조사하고 통계적으로 비교한다.

둘째, 해당 오염물질이 대상부지의 기반암으로부터 기인하였음을 증명하는 방법으로, 기반암 시료를 채취하여 지질학적(암석학적 및 광물학적) 및 화학적 분석을 실시한다. 이 과정에서 시추조사, 지표 노두 조사, 시료 채취 및 전처리, 그리고 다양한 분석 기법이 사용된다. 셋째, 기타 과학적 방법으로 자연적 원인을 증명하는 방법으로, 연속추출법, 용출실험, 심도별 오염농도 분포 분석, 상관관계 분석 등이 포함된다.

조사 결과의 평가는 각 방법에 따라 다르게 이루어진다. 주변지역 농도 비교의 경우 통계학적 방법(표 4-5 참조)을 사용하며, 기반암 조사의 경우 지질학적 맥락에서 오염물질의 기원을 평가한다. 기타 과학적 방법의 경우 토지이용 이력 및 지질학적·토양학적 근거를 종합적으로 고려하여 오염 기원을 평가한다. 최종적으로 자연 기원 토양오염 입증 보고서를 작성하여 환경부장관에게 제출해야 하며, 이 보고서에는 조사 개요, 조사 결과, 평가 결과, 향후 추진계획 등이 포함되어야 한다.

〈표 4-1〉 자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안) 본문

규정(안)
<p>제1장 총칙</p> <p>1. 목적 이 지침은 「토양환경보전법」(이하 “법”이라 한다) 제15조의5제2항제4호 및 같은 법 같은 법 시행령 제11조의2제1항 각호의 세부 사항을 정함을 목적으로 한다.</p> <p>2. 적용 범위 가. 본 지침은 법 제15조의5의 제2항제4호의 토양오염 위해성평가 대상부지에 대해 정책책임자가 해당 오염물질이 자연적인 원인으로 유래되었음을 입증하고 토양오염을 정화하는 과정에 적용한다(제15조의3제3항 단서에 따라 오염토양을 반출하여 정화하는 경우는 제외한다). 나. 법 시행령 제11조의2제1항의 다음 각 호는 본 지침에 따라 실시하여야 한다. 다만 필요한 경우, 조사 지점, 분석 방법, 통계분석 방법 등을 일부 조정하여 조사 및 평가를 실시할 수 있다. 다. 나 목 단서에 따라 조사 및 평가 내용을 일부 조정하여 실시한 경우 조사기관은 조정 사유와 이를 증명할 수 있는 자료를 입증 보고서에 포함하여 작성·제출하여야 한다.</p> <p>3. 조사 대상 토양오염 물질 가. 자연적인 원인으로 인한 토양오염 물질은 법 시행규칙 제19조의3 제1항제1호를 제외한 제2호 및 제2의2호의 규정에 따른 다음 각 호의 오염물질에 한한다. 1) 중금속류: 카드뮴, 구리, 비소, 수은, 납, 6가크롬, 아연, 니켈 2) 기타: 불소</p>

〈표 4-1〉의 계속

규정(안)

4. 수행기관

자연 기원 토양오염을 입증하여 위해성평가를 하고자 하는 환경부장관, 시·도지사 또는 시장·군수·구청장 및 정책책임자는 법 제23조의2제1항제3호에 따른 토양오염 조사기관으로 하여금 조사 및 평가를 수행하게 하여야 한다.

제2장 조사 및 평가 방법

1. 예비조사

가. 법 제2조제6호에 의한 ‘토양정밀조사’ 결과를 활용하여 다음의 내용을 수집·분석하여야 한다.

1) 조사 개요

조사 배경 및 목적을 포함하여 오염 발견 경위 및 조사 추진 과정의 특이사항을 포함하여 작성하여야 한다.

2) 조사 결과

- 가) 부지의 과거 및 현재 토지이용 현황(토지피복도, 토지이용현황도, 지형도 등)
- 나) 오염원 분포 여부 및 시설의 규모
- 다) 조사 지점별, 깊이별, 항목별 조사 결과
- 라) 기타 조사 관련 자료

3) 조사 결과 분석

- 가) 대상 오염물질과 부지 내 시설과의 관련성
- 나) 부지 깊이 방향으로 농도 변화
- 다) 대상 오염물질의 부지 내 침투 가능 깊이와의 비교

나. 오염부지 및 주변을 대상으로 지질 현황을 확인할 수 있는 다음의 자료를 수집하여야 한다.

1) 지질도, 지질조사보고서, 시추조사 결과 등의 가용한 지질자료

다. 주변의 오염 현황을 확인할 수 있는 다음의 문헌자료를 수집하여야 한다.

1) 주변부지의 토양 및 지하수 오염도 조사 자료

라. 예비조사 자료를 종합적으로 평가하여 자연 기원 토양오염 개연성 여부를 [별표 1]의 체크리스트를 참고하여 판단한다.

2. 본조사

예비조사 결과에 따라 제11조의2제1항 각 호의 증명 방법을 선정하여 다음 각 목에서 정한 절차 및 방법으로 본조사를 실시한다.

가. 해당 오염물질의 농도가 주변지역의 토양분석 결과와 비슷함을 증명할 것

1) 주변지역 조사 지점 선정

예비조사 결과를 토대로 [별표 2]에 따라 주변지역 배경농도 조사 지점을 선정한다.

2) 주변지역 배경농도 조사

주변지역으로 선정된 조사 지점을 대상으로 시료채취를 수행하고 해당 토양오염물질을 분석하여 오염부지와 비교 가능한 배경농도를 조사하여야 한다. 다만 해당 오염부지의 토양오염조사 결과가 비교분석에 불충분할 경우 오염부지를 대상으로 오염농도를 추가하여 조사하여야 한다.

〈표 4-1〉의 계속

규정(안)

가) 시료채취 및 분석 방법

- (1) 토양시료채취 개수는 「토양오염물질 위해성평가 지침」의 [별지 제1호서식] (2)의 방법에 따라 결정한다.
- (2) 시료량, 시료의 운반 및 보관 등은 「토양오염공정시험기준」에 따른다.
- (3) 토양시료는 「토양오염공정시험기준」에 따라 분석한다.
- (4) 필요한 경우 대상부지 토양의 이화학적 특성 분석 등을 실시할 수 있다.
- (5) 조사 전 과정에 대하여 정도관리(QA/QC)를 수행해야 하며, 그 결과를 보고서에 포함하여야 한다. 정도관리에는 시료채취 방법, 채취 장비 및 측정분석 장비의 관리 및 기기보정, 시료·바탕시료 및 표준물질의 조제 등에 관한 제반 사항을 포함하여야 한다.

나. 해당 오염물질이 대상부지의 기반암으로부터 기인하였음을 증명할 것

토양오염이 기반암에서 기원하였음을 과학적으로 입증하기 위해, 해당 부지의 오염토양과 모재인 기반암을 대표하는 암석 및 퇴적물 시료를 채취하고, 이에 대한 지질학적(암석학적 및 광물학적) 및 화학적 분석을 다음의 절차와 방법으로 실시한다.

1) 기초자료 분석

- 가) 기초자료(지질도, 지질조사보고서, 시추자료 등)를 분석하여 부지의 기반암 종류와 분포, 단층 및 절리 등의 지질구조, 토양 단면, 기반암의 깊이와 특성을 파악하고 시료채취가 필요한 부분을 선정하여야 한다.
- 나) 기초자료를 토대로 현장을 답사하여 실제 지형과 지질 상태를 확인하여야 한다. 지표 노두와 시추 가능한 위치 및 접근성을 파악한 후, 시추조사 및 시료채취 등 조사계획을 수립한다.
- 다) 자연 기원을 입증하기 위해 토양 모재(토양 단면을 따라 형성된 표토, 심토, 퇴적물, 풍화암, 기반암 등)를 선정하고, 이에 따른 분석 방법을 결정하여 조사계획에 반영하여야 한다.

2) 조사 지점 선정

- 가) 조사는 시추조사를 기본으로 하되, 현장 조건에 따라 지표 노두만을 조사할 수 있다. 조사 지점은 토양 모재(기반암, 풍화암 및 퇴적물)를 중심으로 선정하며, 토양 단면을 따라 토양 형성 과정에서 오염물질의 부하를 관측할 수 있도록 해야 한다. 선정 시 다음 원칙을 고려하여야 한다.
 - (1) 대표성: 선정된 지점이 해당 지역의 토양 기원과 지질 특성을 대표해야 한다.
 - (2) 오염분포 특성: 오염물질의 농도가 높거나 오염토양과 연계된 지점을 포함해야 한다. 또한 심도별 오염분포 특성을 파악할 수 있어야 한다.
 - (3) 접근성: 시료채취와 시추장비 운용이 가능한 접근성을 고려해야 한다.
- 나) 분석(화학적 및 광물학적 분석 등) 및 시료채취 방법(시추 및 표층 시료 채취 등)을 결정하고 부지 지질의 복잡성을 고려하여 적절한 조사 지점 수를 선정하여야 한다. 해당 부지가 불균질할 경우 중복지점을 선정하여 결과의 신뢰성을 확보한다.
- 다) 사전에 수행된 토양정밀조사 등의 시추 코어가 해당 부지의 기반암 등 토양 모재를 반영할 경우, 이러한 시료를 활용하여 분석을 진행할 수 있다.

3) 시료채취 및 전처리

- 가) 시추조사는 지질구조와 현장 조건을 고려하여 풍화층을 통과해 신선한 기반암이 나타날 때까지 진행한다. 코어 시추를 통해 토양 및 지질단면을 관찰하며, 토양(표토 및 심토), 퇴적물, 풍화암, 기반암의 변화를 상세히 기록하고 분석에 필요한 기반암 등의 시료를 획득한다. 지표 노두를 조사할 경우, 대상 지역의 지표 노두를 체계적으로 조사하여 풍화되지 않은 신선한 기반암 시료를 채취한다.

〈표 4-1〉의 계속

규정(안)

3) 시료채취 및 전처리

- 가) 시추조사는 지질구조와 현장 조건을 고려하여 풍화층을 통과해 신선한 기반암이 나타날 때까지 진행한다. 코어 시추를 통해 토양 및 지질단면을 관찰하며, 토양(표토 및 심토), 퇴적물, 풍화암, 기반암의 변화를 상세히 기록하고 분석에 필요한 기반암 등의 시료를 획득한다. 지표 노두를 조사할 경우, 대상 지역의 지표 노두를 체계적으로 조사하여 풍화되지 않은 신선한 기반암 시료를 채취한다.
- 나) 시료 보관 및 관리: 채취한 시료는 오염을 방지하기 위해 깨끗하고 건조한 비닐백이나 특수 제작된 시료 용기에 안전하게 보관한다. 각 시료에는 채취 위치, 깊이, 날짜 및 시료를 채취한 조사자의 이름을 포함하는 라벨을 부착해야 한다.
- 라) 채취한 시료는 분석 목적에 따라 적절한 전처리 과정을 거쳐야 한다. 이 과정에는 일반적으로 건조, 분쇄, 체질 등의 기본적인 물리적 처리와 화학적 전처리가 포함될 수 있으며, 각 분석 항목별 전처리 방법은 해당 표준 절차를 준수하여 수행하여야 한다.

4) 분석 방법

- 해당 오염물질이 대상부지의 기반암으로부터 기인하였음을 증명하기 위해, 오염토양 모재(기반암 및 퇴적물)의 지질학적 및 화학적 분석 등을 통해 오염물질의 기원을 확인하고 추적해야 한다.
- 가) [별표 3]에 제시된 지질학적 및 화학적 분석 등을 통해 해당 오염물질이 대상부지의 기반암으로부터 기인하였음을 입증하여야 한다.

다. 그 밖에 과학적인 방법으로 해당 오염물질이 자연적인 원인으로 발생하였음을 증명할 것

자연적인 토양오염물질 유래를 과학적으로 증명하기 위해 다음을 포함한 기타 과학적인 방법을 활용할 수 있다. 해당 방법은 토지이용 이력, 지질학적 및 토양학적 근거를 고려한 종합적인 접근을 포함하여야 한다.

1) 연속추출법

- 가) 연속추출법은 오염물질의 존재 형태와 화학적 거동을 파악하는 데 필수적인 기법으로, 이를 통해 오염물질이 자연적으로 형성된 광물학적 잔류물인지 아니면 외부적인 오염원으로부터 유입된 것인지를 판단하여야 한다.
- 나) 토양 시료에서 오염물질을 단계적으로 추출하여, 각 단계에서 각 추출 단계 후의 시료를 분석하여 오염물질의 화학적 형태와 결합 상태 및 존재 형태를 확인한다.

2) 용출실험 방법(SPLP, TCLP, MWEP, MEP, CLT 등)

- 가) 용출실험 방법은 토양 용출을 통해 오염물질의 용출 용이성을 평가하여야 한다.

3) 오염부지 내 심도별 오염농도 분포

- 가) 심도별 오염물질의 농도분포를 평가하여 인위적 및 자연적 기원을 추정하여야 한다.

4) 상관관계 분석

- 가) 오염물질과 기타 토양에 포함된 기원이 명확한 다른 원소 간의 지구화학적 상관관계를 확인하여 기원을 추정하여야 한다.

5) 기타

- 가) 인위적 오염이 현저하게 배제되거나 지하수-토양의 상호작용에 따른 자연적 기원이 증명되는 등 다양한 방법을 통해 증명하여야 한다.

〈표 4-1〉의 계속

규정(안)

3. 조사 결과 평가

본조사 결과는 선정된 증명 방법에 대하여 다음 각 목에서 정한 절차 및 방법으로 평가를 실시한다.

가. 해당 오염물질의 농도가 주변부지의 토양분석 결과와 비슷함을 증명할 것

1) 오염부지와와의 농도 비교

오염부지 내 각 오염항목별 농도와 주변부지의 농도(배경농도)를 통계학적으로 비교하여 유의한 차이가 없음을 입증한다. 통계학적 입증 방법은 [별표 4]를 따른다.

나. 해당 오염물질이 대상부지의 기반암으로부터 기인하였음을 증명할 것

오염토양의 모재인 기반암 등에 대한 지질학적(광물학적 및 암석학적) 및 화학적 분석 기법별로 목적 ([별표 3])에 맞게 분석 결과를 해석하고 오염물질의 기원을 평가한다.

1) 분석 기법에 따른 기반암 시료 내 오염물질 함유 광물의 존재 및 화학적 농도 등을 정량적으로 확인하고 풍화 및 토양 형성 과정에서 오염토양 내에 부하될 가능성을 평가한다.

2) 기반암 등의 광물학적 및 암석학적 지질 특성을 종합적으로 분석하고, 부지의 토양오염 분포를 고려하여 지질학적 맥락에서 오염물질의 기원을 평가한다. 예를 들어 토양단면 구조와 지질의 관련성을 분석하여 오염물질의 이동 경로를 추적할 수 있다.

다. 그 밖에 과학적인 방법으로 해당 오염물질이 자연적인 원인으로 발생하였음을 증명할 것

토양오염의 기원을 평가하기 위해 선정된 조사 방법에 따라 결과를 분석하고, 토지이용 이력 및 지질학적·토양학적 근거를 종합적으로 고려하여 오염기원을 평가할 수 있으며, 주변지역 배경농도 비교 및 기반암 조사 결과에 대한 추가 근거로 활용할 수 있다.

제3장 자연 기원 토양오염 조사 및 평가 결과 보고**1. 자연 기원 토양오염 입증 결과 보고서 작성**

토양오염 조사기관은 [별표 5]에 따라 다음과 같은 사항을 고려하여 자연 기원 토양오염 입증 보고서를 작성하여야 한다. 정화책임자는 [별표 5]에 따라 작성한 보고서를 환경부장관에게 제출하여야 한다.

가. 조사 개요

일반적으로 (1) 조사의 목적 및 범위, (2) 조사 및 평가 기간, (3) 용어 설명이나 상황 또는 제한조건 등을 포함한다.

나. 조사 결과

예비조사와 본조사 결과를 구분하여 정리하고, 대상부지의 특징, 지질학적 현황, 토양오염 분포, 입증 방법별 조사 결과를 포함한다.

다. 평가 결과

예비조사와 본조사 결과를 토대로 자연 기원 토양오염 가능성에 대한 평가 의견을 충분한 설명을 포함하여 기술한다.

라. 향후 추진계획

조사 및 평가 결과에 따른 위해성평가 등 후속 추진계획을 기술한다.

마. 부록

관련 사진, 시추기록표(boring log), 실험 데이터, 이전의 조사 보고서 등 최종 판단에 참고가 될 수 있는 각종 자료를 포함한다.

2. 보고 및 관리**제4장 행정 사항**

자료: 저자 작성.

〈표 4-2〉 자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안)[별표 1]

자연 기원 토양오염 개연성 판단을 위한 체크리스트	
부지 현황	자연 기원 오염 개연성 판단 기준
1. 토양오염관리대상시설 현황	
- 과거 및 현재 설치 여부 (입증 대상 물질 관련)	설치 이력이 있을 경우, 인위적인 오염 개연성 있음
- 과거 개황조사, 정밀조사 수행 여부 (입증 대상 물질 관련)	오염 이력이 있을 경우, 인위적인 오염 개연성 있음
2. 대상부지 일반 현황	
- 과거 부지 이용 이력	과거 입증 대상 물질을 취급한 시설이 설치되었던 이력이 있을 경우, 인위적인 오염 개연성 있음
- 토지대장 및 건축물대장	검토 후 판단
- 지형 변경 이력	검토 후 판단
- 부지 바닥 피복 상태 및 굴토/복토 여부	검토 후 판단
3. 대상 오염물질의 분포 특성	
- 오염 분포 지점 및 면적	해당 물질의 사용 이력 및 취급 장소와의 관련성이 없을 경우, 인위적인 오염 개연성 낮음
- 심도별 오염도	깊이 방향으로 함유량이 감소하지 않거나 해당 물질이 침투할 수 있는 영향 깊이보다 깊을 경우, 자연적인 오염 개연성이 있음
4. 주변 부지의 지질 및 오염 현황	
- 조사부지와 주변 부지의 지질	검토 후 판단
- 주변 토양 및 지하수 측정망, 실태조사 결과	조사부지와 주변 부지의 오염물질 분포 특성이 유사할 경우, 자연적인 오염 개연성이 있음

자료: 저자 작성.

〈표 4-3〉 자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안)[별표 2]

주변지역 배경농도 조사 지점 선정 기준	
가) 주변지역의 토지이용 이력 및 시설 현황을 확인하여 오염원이 없거나 인간 활동의 영향이 최소인 지점을 선정한다.	
나) 오염부지와 지질학적 및 지리학적 연속성이 있는 지점을 선정한다.	
다) 오염부지의 토양과 물리화학적 특성이 유사한 지점을 선정한다.	

자료: 저자 작성.

〈표 4-4〉 자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안)[별표 3]

기반암 기원 증명을 위한 기기분석			
구분	분석 항목	분석 방법	목적
암석학적 분석	암석의 분류, 구조, 노출 및 풍화 상태	현장 육안 관찰, 실내 편광현미경	해당 암석의 기원 분석 및 오염 물질의 기원 가능 여부 확인
	암석의 화학성분	X-선 형광분석(XRF)	해당 암석의 원소 함량 분석 및 암석 시료 내 오염물질의 총농도 분석
광물학적 분석	구성 광물, 광물 조직 및 상호관계	현미경 관찰, 실내 modal 분석	해당 암석 시료 내 오염물질 함유 광물 존재 여부 및 오염물질 용출 가능성 확인
	광물 조성(정성적/정량적)	X-선 회절분석(XRD)	오염물질 함유 광물 존재 여부 확인 및 해당 광물 함유량 확인
	광물 내 원소 함유량	주사전자현미경-에너지 분산분광분석(SEM-EDS), 전자탐침미세분석(EPMA)	해당 광물 내 오염물질의 총농도 및 농도 분포 분석
화학적 분석	시료 내 해당 오염물질 농도	오염물질별 「토양오염 공정 시험기준」에 제시된 분석 방법	시료 내 오염물질 농도 및 심도별 농도분포 파악

자료: 저자 작성.

<표 4-5> 자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안)[별표 4]

오염부지와 주변부지의 농도 비교를 위한 통계학적 방법

1) 통계량 산정 및 농도분포 검정

- 가) 통계량 산정: 지질 및 토양 유형의 특성을 반영하여 토양오염부지의 농도와 주변지역의 배경농도 자료의 통계적 분포를 기술할 수 있는 적절한 통계량을 산정해야 한다.
- 나) 농도분포 비교: 산정된 통계량과 그래프를 이용하여 토양오염부지와 주변지역의 조사 결과 토양오염 물질 자료의 농도분포를 시각적으로 확인하여야 한다.
- 다) 정규성 검정: 토양오염물질의 농도자료가 정규분포(normal distributioin)를 만족하는지 여부를 확인하기 위해 그래프 및 정규성 검정(normality test)을 실시하고, 정규성을 만족하지 않는 경우 로그 변환을 통해 농도 자료를 정규화한 후 분석을 수행하여야 한다. 구체적인 정규성 검정 방법은 [표 1]을 따른다.

[표 1] 토양오염물질 농도의 통계적 분포 기술 및 정규성 검정을 위한 방법

통계적 방법		비고
기술 통계량 산정	평균, 중앙값, 분산, 표준편차, 범위(최대, 최소), 사분위수, 변동계수 등	-
그래프 작성	히스토그램, 상자도표, QQ plot 등	-
정규성 검정	Shapiro-Wilk test 등 (귀무가설: 농도자료가 정규분포를 갖는다)	유의 수준(0.05) 미만일 경우(귀무가설 기각) 자료는 정규분포가 아님

※ 토양오염물질 농도의 통계적 분포를 기술하기 위해 평균(mean), 중앙값(median), 분산(variance), 표준편차(standard deviation), 최댓값(maximum), 최솟값(minimum), 사분위수(quantile) 등의 통계량을 제시하여야 한다.

※ 토양오염물질 농도의 통계적 분포를 시각화하기 위해 박스플롯(box plot), 히스토그램(histogram), QQ 플롯(quantile-q uantile plot) 등의 그래프를 이용하여야 한다.

※ 정규성 검정은 데이터가 정규 분포를 따르는지 평가하는 과정으로 여러 통계적 방법이 있으며(예: Shapiro-Wilk Test), 이를 통해 적합한 비교분석을 위한 통계적 분석 방법을 선정할 수 있다.

2) 농도 비교를 위한 통계적 검정

- 가) 토양오염부지의 농도와 주변지역의 배경농도를 통계적으로 비교하기 위해 통계적 가설검정*을 선정하여 수행하고, 부지 사이의 농도 차이가 우연에 의한 것인지(차이가 없는지) 또는 유의한 차이가 있는지를 평가하여야 한다. 토양오염물질 농도 자료를 비교하기 위해 사용할 수 있는 다양한 통계적 검정 방법이 있으며, 활용 가능한 통계적 검정 방법은 [표 2]를 참고하여 선정할 수 있다.

[표 2] 토양오염물질 농도의 통계적 분포 비교를 위한 통계적 검정 방법

검정 방법(다중그룹)	목표	비고
t-test (ANOVA)	두 독립표본(여러 그룹)의 평균 비교	정규분포를 가정할 경우 불검출 및 이상치에 민감
Mann-Whitney U test (Kruskal-Wallis test)	두 독립표본(여러 그룹)의 중앙값 비교	비모수적(정규분포를 따르지 않을 경우) 농도 데이터의 50% 이상이 검출값일 때 적용 이상치에 강함

〈표 4-5〉의 계속

오염부지와 주변부지의 농도 비교를 위한 통계학적 방법
<p>나) 통계적 가설검정을 위해 귀무가설(H0)과 대립가설(H1)을 설정하고, 주어진 유의수준에서 검정통계량을 계산하여 귀무가설을 기각할지 여부를 결정하는 과정을 수행하여야 한다.</p> <p>다) 통계적 검정 결과를 바탕으로 토양오염물질 농도 차이가 유의한지 여부를 해석한다. 토양오염부지의 농도와 주변지역의 배경농도 사이에 유의한 차이가 발견되지 않으면 해당 지역의 토양오염이 자연적 배경 수준임을 추정할 수 있다.</p> <p>라) 토양분석 결과 농도 비교에서 두 농도 자료 간에 유의한 차이가 있거나, 지질학적 불확실성으로 인해 표본자료의 신뢰성이 낮은 경우, 추가적인 시료채취 및 분석, 그리고 다른 방법론에 따른 조사를 검토하여야 한다.</p> <p>※ 통계적 검정의 정의: 통계적 검정은 서로 다른 자료 사이의 차이를 평가하기 위한 방법으로, 두 자료가 동일한 모집단에서 왔는지 아니면 서로 다른 모집단에서 왔는지를 판단한다.</p> <p>※ 귀무가설(H0): 토양오염부지의 농도와 주변지역의 배경농도 간에 유의한 차이가 없다.</p> <p>※ 대립가설(H1): 토양오염부지의 농도와 주변지역의 배경농도 간에 유의한 차이가 있다.</p> <p>※ 유의수준(α): 유의수준은 귀무가설을 기각할 기준이 되는 확률로, 일반적으로 0.05 또는 5%를 사용한다. 이는 귀무가설이 참일 때 데이터를 통해 귀무가설을 기각할 확률을 의미한다.</p>

자료: 저자 작성.

〈표 4-6〉 자연 기원 토양오염 조사 및 평가를 위한 세부 방법에 관한 규정(안)[별표 5]

자연 기원 토양오염 입증 보고서
<p>가. 조사 개요</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 조사의 배경과 목적 2) 조사 및 평가 기간: <ul style="list-style-type: none"> - 예비조사 기간 - 본조사 기간(시료채취, 시료 분석 기간으로 구분) - 평가 기간 3) 조사 참여자 명단(시료채취와 분석, 평가 등으로 구분) <p>나. 조사 결과</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 예비조사 결과 <ol style="list-style-type: none"> 가) 부지의 과거 및 현재 토지이용 현황을 요약 기술 나) 오염원 분포 여부 및 시설의 규모와 위치를 지도에 표시 다) 대상 오염물질과 부지 내 시설과의 관련성 라) 조사 지점별, 깊이별, 항목별 조사 결과를 일목요연하게 정리하여 제시 마) 부지 깊이 방향의 농도 변화 바) 조사부지 및 주변부지의 지질 현황을 비교하여 기술 사) 조사부지 및 주변부지의 토양 및 지하수 오염도 비교하여 기술 아) 자연 기원 토양오염의 개연성에 대한 최종 판단과 근거를 요약 기술

〈표 4-6〉의 계속

자연 기원 토양오염 입증 보고서

2) 본조사 결과

- 가) 해당 오염물질의 농도가 주변지역의 토양분석 결과와 비슷함을 증명
 - 주변지역 배경농도 조사 지점 위치를 지도에 표기하고 선정 근거를 설명
 - 시료채취 및 분석 방법을 요약 기술
 - 정도관리 수행 결과를 요약 기술
 - 조사 지점별, 깊이별, 항목별 조사 결과를 일목요연하게 정리하여 주변지역 오염도를 제시
 - 부지 깊이 방향의 농도 변화
- 나) 해당 오염물질이 대상부지의 기반암으로부터 기인하였음을 증명
 - 부지의 기반암 종류와 분포, 단층 및 절리 등의 지질구조, 토양 단면, 기반암의 깊이와 특성 등에 대해 요약 기술
 - 시추조사를 위한 지점 위치(깊이 포함)를 지도에 표기하고 선정 근거를 설명
 - 시료채취 및 분석 방법을 요약 기술
 - 해당 물질 함량에 대한 정량적 결과, 암석 내 구성 광물 분석 결과 등을 정리하여 제시
 - 심도별 분포를 정리하여 제시
 - 필요시 현미경 사진 등을 정리하여 제시
- 다) 그 밖에 과학적인 방법으로 해당 오염물질이 자연적인 원인으로 발생하였음을 증명
 - 기타 방법을 선정한 근거를 설명
 - 연속추출법, 용출실험 방법 등의 방법을 요약 기술
 - 오염물질의 화학적 결합 상태, 존재 형태, 용출 용이성 등을 정리하여 제시

다. 평가 결과

- 가) 해당 오염물질의 농도가 주변지역의 토양분석 결과와 비슷함을 증명
 - 통계량 산정 및 정규성 검정을 위한 방법과 결과를 요약 기술
 - 오염부지 내 농도와 주변부지의 농도의 통계적 분포 비교를 위한 검정 방법과 결과를 요약 기술
- 나) 해당 오염물질이 대상부지의 기반암으로부터 기인하였음을 증명
 - 오염물질 함유 광물의 존재 및 화학적 농도를 확인한 결과를 요약 기술
 - 풍화 및 토양 형성 과정에서 오염토양 내에 부화될 가능성을 평가한 결과를 요약 기술
 - 지질학적 맥락에서 오염물질의 기원 평가 결과를 요약 기술
- 다) 그 밖에 과학적인 방법으로 해당 오염물질이 자연적인 원인으로 발생하였음을 증명
 - 오염기원에 관한 평가 결과를 요약 기술

라. 향후 추진계획

- 1) 위해성평가 추진계획 제시

마. 부록

자료: 저자 작성.

나. 지질기원 토양오염 관리 합리화

1) 자연 기원 토양오염의 정의 신설

서울행정법원의 최근 판결³³⁾에서 '토양오염 위법 사유'에 관해 '불소오염은 자연적 원인에 의한 것으로서 「토양환경보전법」 제2조 제1호에서 정한 “사업활동이나 그 밖의 사람의 활동에 의한” 토양오염에 해당한다고 볼 수 없음이 명백해 보이고, 달리 사실관계의 자료를 정확히 조사하여야 비로소 그 하자 유무가 밝혀질 수 있는 경우에 해당한다고 보기 어렵다' 라고 판단한 것을 살펴볼 필요가 있다.

가) 토양환경보전법상 토양오염의 해석

「토양환경보전법」 제2조 제1호에서는 토양오염을 “사업활동이나 그 밖의 사람의 활동에 의하여 토양이 오염되는 것으로서 사람의 건강·재산이나 환경에 피해를 주는 상태를 말한다.” 라고 하고 있으나, 하위법령 등으로 '사업활동이나 그 밖의 사람의 활동'의 구체적 범위를 밝히거나 '사람의 건강·재산이나 환경에 피해를 주는 상태'를 구체적으로 규정하고 있지는 않다. 다만 「토양환경보전법」 제4조의2는 “사람의 건강·재산이나 동물·식물의 생육에 지장을 줄 우려가 있는 토양오염의 기준은 환경부령으로 정한다.”라고 하고, 동법 시행규칙 제1조의5 [별표3]에서 우려 기준을 정하고 있다. 그리고, 정밀조사를 “우려 기준을 넘거나 넘을 가능성이 크다고 판단되는 지역”에 대하여 하도록 하고(제2조 제6호), 국유재산 등에 대한 토양정화를 “우려 기준을 넘는 토양오염이 발생하여 토양정화가 필요한 경우”에 하도록 하며(제6조의3 제1항 제1호), 토양환경평가를 거쳐 오염 정도가 우려 기준 이하인 것으로 확인된 경우 토양오염 사실에 대한 선의과실을 추정하고(제10조의2 제2항), 토양오염의 신고 후 또는 상시 측정, 토양오염 실태조사 또는 토양 정밀조사 결과 오염도가 우려 기준을 넘는 토양에 대해서는 이를 '오염토양'으로 하여 정화조치명령 등을 할 수 있도록 하며(제11조 제3항, 제15조 제3, 6항), 특정 토양오염 관리대상 시설 설치자에 대한 정밀조사 및 정화조치명령 또한 토양오염도 검사 결과 우려 기준을 넘는 경우에 하도록 하고 있다(제14조 제1항 제1호). 나아가 「토양환경보전법」 제15조의3 제1항 및 동법 시행령 제10조 제1항에서는

33) 서울행정법원 2023.11.30. 선고 2022구합86037 판결.

오염토양의 정화기준을 우려 기준으로 정하고 있다.

「토양환경보전법」에서는 “토양오염물질의 누출·유출·투기·방치 또는 그 밖의 행위로 토양오염을 발생시킨 자”를 정화책임자로 정하고(제10조의4 제1항 제1호), “토양오염물질을 생산·운반·저장·취급·가공 또는 처리하는 자가 그 과정에서 토양오염물질을 누출·유출한 경우” 및 “토양오염 관리대상 시설을 소유·점유 또는 운영하는 자가 그 소유·점유 또는 운영 중인 토양오염 관리대상 시설이 설치되어 있는 부지 또는 그 주변지역의 토양이 오염된 사실을 발견한 경우”를 토양오염 신고를 해야 하는 경우로 정하고 있다(제11조 제1항 제1, 2호). 그리고 석유류, 유해화학물질의 제조 및 저장시설 및 송유관시설 등을 말하는 특정토양오염 관리대상 시설을 포함한 “토양오염물질의 생산·운반·저장·취급·가공 또는 처리 등으로 토양을 오염시킬 우려가 있는 시설·장치·건물·건축물 및 그 밖에 환경부령으로 정하는 것”을 토양오염 관리대상 시설로 규정하고 있다(제2조 제3, 4호 및 동법 시행규칙 제1조의3 [별표 2]).

이상과 같은 「토양환경보전법」의 문언과 체계를 종합해 볼 때, 토양오염은 (i) 사업활동이나 그 밖의 사람의 활동에 의하여 발생한 오염으로[(i) 요건] (ii) 우려 기준을 넘는 토양이 존재하여 이를 우려 기준 미만으로 정화하여야 하는 상태를 가리키는 것으로 해석할 수 있다. 토양오염을 발생시키는 ‘사업활동이나 그 밖의 사람의 활동’은 ① 토양오염물질을 누출·유출·투기·방치 또는 그와 유사한 행위를 직접 발생시키는 행위[(ii)의 ① 요건]와 ② 토양오염물질을 발생시킬 수 있는 토양오염 관리대상 시설을 소유·점유 또는 운영한 행위[(ii)의 ② 요건]를 의미한다고 볼 수 있다.

나) ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’이 ‘토양오염’에 해당하는지 여부

「토양환경보전법」에서는 제15조의5 제2항 제4호 및 동법 시행령 제11조의2 제1항 제1~3호를 통한 입증을 통해 위해성평가를 실시할 수 있는 경우 중의 하나인 “자연적인 원인으로 인한 토양오염”으로 규정하고 있다. 그런데 아래와 같은 위해성평가의 목적 및 자연적인 원인으로 인한 토양오염에 대하여 위해성평가를 허용한 범위 등을 고려할 때, 여기서 말하는 자연적인 원인으로 인한 토양오염은 토양오염과 별개로 규정된 것이 아니라 토양오염의 일종으로서 규정된 것인바, ‘자연적인 원인으로 인한 토양오염’ 또한 ‘토양오염’의 한 종류로

해석된다.

즉 「토양환경보전법」 제15조의5 제1항에서는 위해성평가를 “그 결과를 토양정화의 범위, 시기 및 수준 등에 반영할 수 있다.”라고 하여 토양정화를 전제로 실시하는 것임을 분명히 하고 있다. 또한 「토양환경보전법」 제15조의5 제2항에서는 자연적인 원인으로 인한 토양오염이 입증된 경우를 정화책임자가 위해성평가를 할 수 있는 경우 중의 하나로 정하고 있다. 같은 항 제4호에서는 ‘오염토양을 반출하여 정화하는 경우’에는 위해성평가를 할 수 없다고 정하고 있는바, 결국 자연적인 원인으로 인한 토양오염은 그 지질기원성을 입증하고, 현장에서 정화하는 경우라면 환경부장관, 지자체장 또는 정화책임자가 위해성평가를 한 후 그 결과를 토양정화에 반영할 수 있게 되는 토양오염의 일종임을 알 수 있다.

다) 문제점

자연적인 원인으로 인한 토양오염의 경우 위 (1)에서 살펴본 토양오염의 요건 중 (i) 요건을 만족한다는 점에는 의문이 없으나, (ii)의 요건을 만족하는지 여부, 즉 사업활동이나 그 밖의 사람의 활동으로 인한 것인지에 대해서는 의문이 있다. 특히 (ii)의 ①, ② 요건 모두 ‘토양오염 물질’의 직접 취급 내지 이를 취급하는 시설의 운영을 통한 간접 취급 등의 활동을 요한다는 점에서 기반암에 포함된 토양오염물질로 인한 지질기원 토양오염이 이와 같은 활동으로 인해 발생할 가능성을 상정하기 어렵기 때문이다.

개발행위 시 정지작업 등을 위한 기반암의 파쇄, 굴착, 이동 등의 경우 이와 같은 활동으로 볼 여지가 일부 있기는 하다. 그러나 해당 활동 또한 기반암을 대상으로 한 것이고 토양오염 물질을 대상으로 한 것이 아니라는 점에서는 명백히 토양오염을 발생시키는 활동에 포섭된다고 보기 어렵다.

해당 판결³⁴⁾에서도 토양오염 위법사유에서 자연적인 원인으로 인한 서초구 부지의 불소 오염은 「토양환경보전법」 제2조 제1호에서 정한 사업활동이나 그 밖의 사람의 활동에 의한 것이 아니므로 토양오염에 해당한다고 볼 수 없다고 판단하였다.

나아가 「토양환경보전법」이 이와 같은 활동과 무관하게 자연 풍화 등으로 발생한 토양

34) 서울행정법원 2023.11.30. 선고 2022구합86037 판결.

오염을 명시적으로 자연적인 원인으로 인한 토양오염에서 배제하고 있는 것도 아니라는 점에서도 (ii)의 ①, ② 요건 해당성을 면밀히 고려하지 않고 자연적인 원인으로 인한 토양오염을 토양오염의 일종으로 규정했음을 추정할 수 있다.

결국 현재 토양환경보전법 제15조의5에서 자연적인 원인으로 인한 토양오염을 위해성 평가의 대상이 되는 토양오염으로 보고 있는 것은 토양오염의 정의 조항 및 신고, 정밀조사, 정화조치 및 우려 기준을 정화기준으로 한 정화 등을 규정한 다른 법 조항과 배치되는 부분이 있다고 판단된다.

라) 정의 규정 마련 필요성

위에서 지적한 대로 지질기원 토양오염은 현행 「토양환경보전법」상 토양오염의 요건이 결여된다고 볼 여지가 있어, 이에 대한 별도의 정의가 필요한 상태로 보인다. 따라서 지질기원 토양오염은 토양오염물질의 누출·유출·투기·방치 등 또는 토양오염 관리대상 시설 등과 무관하게 기반암으로 인하여 발생한 것으로, 토양오염과 다르다는 점을 명시하여 별도 정의하고, 대신 건강과 환경상의 위해를 방지하기 위한 위해도 관리의 대상이 된다는 점 등을 분명히 하도록 법을 개정할 필요가 있다.

정의를 신설할 때는 다음과 같은 내용을 고려해야 한다:

- 자연적 과정에 의해 발생한 토양오염임을 명시
- 지질학적·지구화학적 특성에 의한 것임을 명시
- 건강상, 환경상의 위해 방지를 위해 위해도 관리의 대상이 된다는 점을 명시

예를 들어 “지질기원 토양오염이란 인위적 활동의 영향 없이 지질학적·지구화학적 특성에 의해 자연적으로 발생하여 광역적으로 분포하는 토양오염을 말한다”와 같은 정의를 고려할 수 있다.

일본의 경우 토양오염대책법 시행규칙 제3조 6항 1호에서 ‘오염 상태가 자연에서 유래할 우려가 있다고 인정되는 경우’를 별도로 규정하고 있다. 이를 통해 자연 유래 오염에 대한 별도의 조사 및 관리 체계를 마련하고 있다. 우리나라도 이와 같이 법령에 지질기원 토양

오염에 대한 명확한 정의를 신설함으로써, 이에 대한 차별화된 관리의 근거를 마련할 수 있을 것이다.

이와 같이 지질기원 토양오염을 토양오염과 다르게 취급하면 지질기원 토양오염에는 정화 책임자를 정해 정밀조사 및 정화조치명령을 발하는 등 관련 의무를 부과할 수 없게 되므로, 관련 지질기원의 조사·입증 및 위해도 관리와 비용부담의 주체를 정하는 문제, 부지개발을 위해 반출하여야 하는 경우의 위해도 관리 방안 등의 전반적 제도도 함께 개선할 필요가 있다.

2) 관리 방안 차별화

지질기원 토양오염이라 하더라도 건강 및 환경상의 위해 발생 정도에 따른 위해관리는 필요하다. 앞서 기술한 것처럼 지질기원 토양오염을 별도로 정의할 경우, 지질기원 토양오염에는 정화책임자를 정해 정밀조사 및 정화조치명령을 발하는 등 관련 의무를 부과할 수 없게 된다. 따라서 지질기원의 조사·입증 및 위해도 관리 방안 등을 별도로 정할 필요가 있다.

일본이 조사 명령, 조사 방법, 형질변경, 반출 등에 관한 규제에서 ‘자연 유래 토양오염’에 관한 사항을 세부적으로 규정한 것을 주목할 필요가 있다. 예를 들어 자연 유래 토양오염 가능성이 있는 부지 ‘근방’³⁵⁾에 대한 조사 발동 요건을 정한 점, 자연 유래 토양오염이 확인된 경우에도 ‘조치실시구역’이 아닌 ‘형질변경 신고구역-자연 유래 특례구역’으로 지정하도록 차별화한 점 등이다³⁶⁾. 또한 ‘형질변경 신고’가 필요한 기준도 인위적인 오염 대비 완화하여 규정하고 있으며, 2017년 법 개정 이후에는 특례구역 간에 일정 요건을 충족한 경우에는 신고를 통해 이동이 가능하도록 허용하고 있다³⁷⁾. 일본이 이처럼 자연 유래 토양오염에 대해 규제를 완화하는 배경에는 자연 유래 토양오염의 경우 지질학적으로 동질한 상태로 오염이 확산되므로 특정 구획만 봉쇄하고, 조치를 취하는 것의 효과성이 낮다는 이유도 있

35) 일본의 토양오염대책법에서는 자연 유래 토양오염이 확인된 부지 ‘근방’의 토지도 이와 동등한 수준으로 오염되었을 가능성을 고려하고 있으며, 이 ‘근방’의 범위를 정하기 위한 세부 기준도 정하고 있음.

36) 일본 e-gov 법령검색(2022.6.17), “토양오염대책법”, 검색일: 2024.5.20.

37) 일본 환경성(2019.3.1), “토양오염대책법 일부를 개정하는 법률에 의한 개정 후 토양오염대책법의 시행에 대하여(環水大土発第1903015号)”, 검색일: 2024.5.20.

지만, 이와 더불어 지질기원과 인위적 기원 오염의 추출 특성이 상이하며, 이로 인해 위해도가 달라진다는 점도 고려했을 것이다.

우리나라도 현재와 같이 지질기원 토양오염이 입증되면 위해성평가 절차를 통해 토양 정화의 범위, 시기 및 수준 등을 정하도록 하기보다는, 지질기원 토양오염의 경우에는 조사 범위, 방법, 정화, 관리 등을 차별화하는 것이 합리적일 것이다.

더불어 현행 법 제15조5의 제2항 제4호의 ‘제15조의3 제3항 단서에 따라 오염토양을 반출하여 정화하는 경우는 위해성평가 대상에서 제외한다’라는 조항에 따른 상황을 이해하는 것도 중요하다.

현재 토양오염물질 위해성평가 지침에 따르면, 평가 결과 위해성이 있다고 결정되면 발암 및 비발암 정화목표치를 환경매체별(토양, 지하수 등)로 설정하여 오염부지의 위해도 저감 방안을 선정할 때 이용할 수 있다. 다만 위해도가 허용 가능한 수준인 경우, 확산 방지 조치 계획 등을 수립하고, 방지 조치에 대한 운영 적절성을 모니터링하도록 하고 있다.

인천국제공항 건설 및 개발지역에 대한 위해성평가 결과, 위험지수가 1 미만으로 비발암 위해성이 없는 것으로 평가하고, 공사로 인한 비산먼지 방지대책 등을 시행하고 모니터링을 실시하는 것도 이에 해당하는 사례이다.

지질기원 토양오염의 경우도 위해도가 허용기준 이내일 경우, 이러한 사례와 같이 정화 시행이 아닌 기타 조치만을 시행하는 방안이 가능하다. 다만 앞서 살펴본 최근 민간업체 부지개발 사업의 토양정화 실적에 비추어 볼 때, 대부분의 오염부지가 지질기원 토양오염임을 입증하는 절차를 거치지 않고 정화를 시행하고 있는 것으로 판단된다. 물론 해당 부지에 대한 지질조사 결과가 없으므로 지질기원 토양오염일 가능성을 예측하기엔 분명 한계가 있다. 하지만, 대부분의 개발사업 부지들이 과거 녹지 또는 주택지구로 사용되었던 이력을 고려해 보았을 때 지질기원 불소 오염일 개연성이 높다. 그러나 이러한 부지들의 지질기원 토양오염을 입증하기가 불가하였던 이유는 다음 법 제15조5의 제2항 제4호의 ‘제15조의3 제3항 단서에 따라 오염토양을 반출하여 정화하는 경우는 제외한다’라는 조항에 따른 것이다. 즉, 부지개발을 위해 토양의 반출이 불가피한 대부분의 개발사업의 특성을 살펴볼 때 위해성 평가의 대상으로 볼 수 없고, 이에 정화를 통한 오염물질 제거를 선택했다고 볼 수 있다.

오염된 토양이 반출될 경우, 위해도를 재산정하여야 하고 관리 주체 설정, 지속적 위해도

관리 등이 어려워진다는 점에 주의가 필요한 것은 명확하지만, 이러한 제한으로 인해 과도한 정화가 이루어지고 있음에도 주목할 필요가 있다.

지질기원 토양오염에 대한 차별화된 관리 방안을 다음의 사항을 포함하여 시급히 마련해야 할 것이다.

- 지질기원 토양오염 가능성이 있는 부지를 조사하는 방법(조사 범위 등)
- 오염이 확인되었을 경우, 위해저감조치(정화 이외의 방법 포함)
- 반출 및 이동에 대한 조건 및 관리 방안

다. 통합 정보 시스템 구축

1) 토양 모니터링 시스템

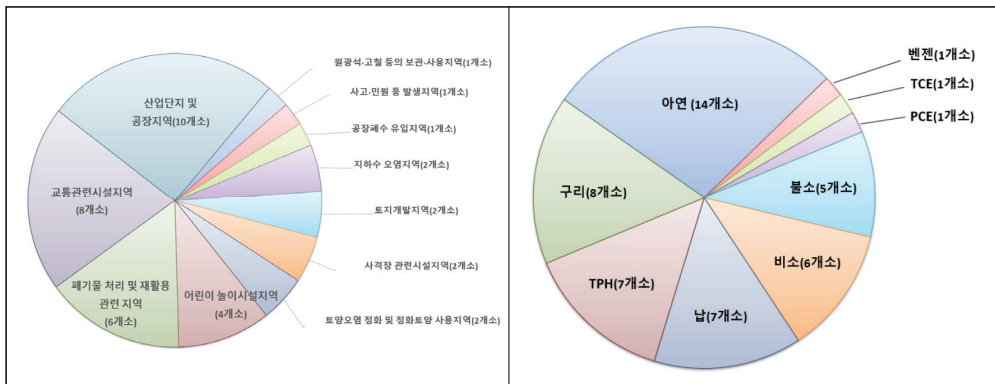
국내 토양 관련 정보 시스템으로는 ‘토양지하수정보 시스템’이 구축되어 있다. 이 시스템은 토양측정망, 토양오염실태조사 및 특정 토양오염관리 대상시설 통계 등의 토양 데이터를 제공한다. 사용자는 연도별, 지역별, 지목별 등 다양한 옵션에 따라 데이터를 조회할 수 있으며, 결괏값은 지점별·오염물질별 농도값이 엑셀 파일로 제공된다.

매년 환경부와 국립환경과학원은 ‘토양측정망 및 토양오염실태조사 결과’ 보고서를 발간하며 세부 보고서 목차는 다음 <표 4-7>과 같다. 이 보고서는 전국 평균오염도 현황, 토지 이용도별 오염도 현황, 측정 목적별 오염도 현황, 연도별 오염도 현황 등의 토양측정망 주요 통계와 함께 토양오염실태조사 결과의 기준 초과 현황을 담고 있다. 오염지역별 기준 초과 지점 분류 결과와 분석 항목별 초과지점 수 등의 결괏값도 제공한다(그림 4-1 참조).

〈표 4-7〉 ‘토양측정망 및 토양오염실태조사 결과’ 보고서 목차

오염부지와 주변부지의 농도 비교를 위한 통계학적 방법	
제1장 토양측정망	
1. 2020년 토양측정망 결과	
2. 토양측정망 주요 통계	
3. 토양측정망 지점 수 및 운영기관별 오염도 등	
3-1. 토양측정망 지점 수	
3-2. 운영기관별 오염도	
3-3. 토지용도별 오염도	
3-4. 측정 목적별 오염도	
3-5. 연도별 오염도(평균)	
4. 2020년 토양측정망 데이터	
제2장 토양오염실태조사	
1. 2020년 토양오염실태조사 결과	
2. 토양오염 우려 기준 초과지역 현황 등	
2-1. 2020년 토양오염실태조사 초과지점 현황	
2-2. 2020년 토양오염실태조사 지점 수	
2-3. 2020년 토양오염실태조사 시료 수	
2-4. 조사기관별 오염도	
2-5. 조사지역 종류별 오염도	
2-6. 조사지역 종류별 오염도(총괄)	
3. 2020년 토양오염실태조사 데이터	

자료: 환경부, 국립환경과학원(2022.10.4), “2020년도 토양측정망 및 토양오염실태조사 결과”, 검색일: 2024. 7.15.



자료: 환경부, 국립환경과학원(2022.10.4), “2020년도 토양측정망 및 토양오염실태조사 결과”, 검색일: 2024. 7.15.

〈그림 4-1〉 오염원지역별 기준 초과 지점 분류 및 분석 항목별 초과지점 수

그러나 현재의 보고 방식은 주로 토양오염 우려 기준 초과 여부에 초점을 맞추고 있어, 조사 결과를 종합적으로 분석하여 정책적으로 활용하기에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하고 조사 자료의 정책적 활용도를 높이기 위해서는 조사 결과에 대한 체계적인 데이터 분석 및 통계처리를 통해 환경배경농도를 설정하고 토양오염도의 시공간적 분포와 변화를 파악하는 방법을 활용할 필요가 있다.

환경배경농도는 자연적 및 인위적 요인이 복합적으로 작용하여 지역별로 일반적으로 나타나는 토양오염물질의 농도 범위로 볼 수 있다. 이는 상위 신뢰범위로 정의된 문턱값을 설정하여 오염도의 지역별·시기별 상대적 수준 및 변화를 파악하는 데 활용할 수 있다. 특히 지질기원 토양오염을 관리하기 위한 기초자료로서 환경배경농도의 확보는 매우 중요하다.

나아가 토양의 상태를 종합적이고 장기적으로 모니터링하면 다양한 환경 분야에 활용할 수 있다. 독일의 사례를 참고하면, 기후변화로 인한 토양의 변화, 탄소흡수원/발생원으로서의 토양 기능 변화, 환경기준 정의를 위한 물질 유입 모니터링 등 다양한 측면에서 활용할 수 있다.

따라서 현재 오염도 조사에 국한되어 있는 토양조사 항목을 확대할 필요가 있다. 전국적으로 다수의 모니터링 지점을 선정하고, 토양오염물질의 농도뿐만 아니라 토양의 상태를 설명할 수 있는 다수의 인자에 대한 조사를 실시하며(표 4-8 참조), 이를 통합적으로 관리하는 시스템 구축이 요구된다.

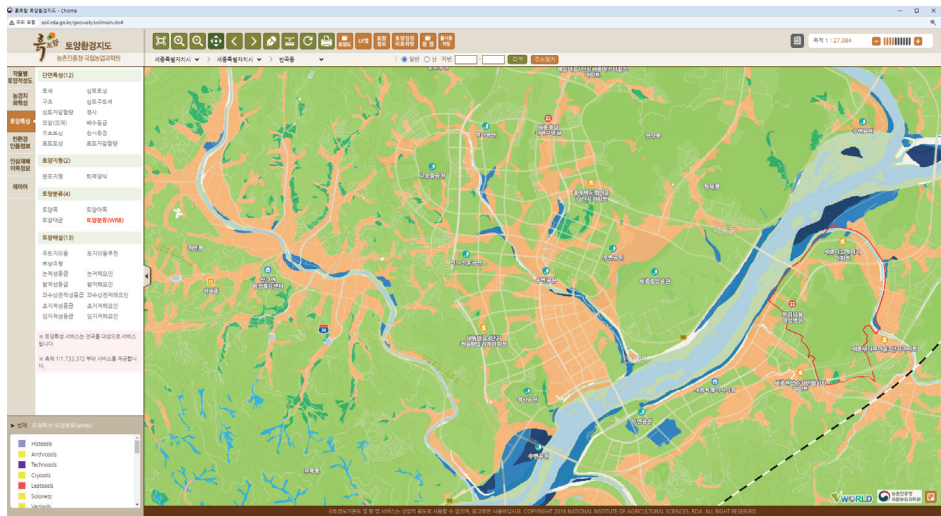
〈표 4-8〉 토양 장기 모니터링 항목(예시)

분류	세부 항목
물리적 특성	<ul style="list-style-type: none"> - 토양 구조 - 토양 질감(모래, 실트, 점토 비율) - 용적 밀도 - 공극률 - 수분 보유 능력
화학적 특성	<ul style="list-style-type: none"> - pH값 - 유기물 함량 - 질소(N) 함량 - 인(P) 함량 - 칼륨(K) 함량 - 탄소(C) 함량 - 양이온 교환 용량(CEC) - 중금속 함량(예: 카드뮴, 납, 수은, 아연 등)
생물학적 특성	<ul style="list-style-type: none"> - 미생물 다양성 - 토양 효소 활성 - 토양 호흡률
토양 프로파일	<ul style="list-style-type: none"> - 토양 층위 구조 - 토양 깊이 - 토양 색상
토지이용	<ul style="list-style-type: none"> - 현재 및 과거의 토지이용 형태 - 농업 형태
지형 및 기후요소	<ul style="list-style-type: none"> - 경사도 - 고도 - 기후 데이터(강수량, 온도 등)
침식 위험	<ul style="list-style-type: none"> - 풍식 및 수식 위험 평가
압밀 상태	<ul style="list-style-type: none"> - 토양 압밀 정도
지질 특성	<ul style="list-style-type: none"> - 모재 정보 - 토양 생성 요인 - 세부 지질 및 암상
지하수 현황	<ul style="list-style-type: none"> - 지하수위 - 지하수 오염 가능성
토양 분류	<ul style="list-style-type: none"> - 토양 분류 체계에 따른 분류

자료: 저자 작성.

국립농업과학원의 ‘토양환경정보 시스템’에서는 토양 특성에 맞는 작물 재배와 적정 비료량 추천을 위해 작물별 토양적성도, 농경지화학성, 토양 특성, 정밀농업기후도, 생물상분포, 농업환경변동 정보 등을 제공하고 있다(그림 4-2 참조). 한국지질자연연구원의 ‘지오빅데이터 오픈 플랫폼’에서는 국토지질 정보, 해저지질 정보, 지질환경 정보, 지질주제도, 지형 정보 등을 제공하고 있다.

이러한 기존 분야별 데이터의 활용 및 통합을 통해 종합적인 토양 상태 모니터링 시스템을 구축하는 방안이 효과적일 것이다. 이는 토양의 다양한 특성과 기능을 포괄적으로 이해하고 관리하는 데 기여할 수 있으며, 더 나아가 기후변화 대응, 환경보전, 농업생산성 향상 등 다양한 분야의 정책 수립과 의사결정에 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.



자료: 토양환경정보 시스템 휴토람, “토양환경지도”, 검색일: 2024.7.15.

〈그림 4-2〉 휴토람에서 토양분류 검색 결과 예시

2) 토양오염 정보 시스템

토양오염 및 오염부지 관리 현황에 대한 종합적인 정보 제공의 필요성이 대두되고 있다. 현재 국토의 토양오염 상태와 오염부지 관리 현황을 종합적으로 파악하고, 이를 바탕으로 효과적인 정책을 수립하기 위한 정보 시스템 구축이 시급한 실정이다.

현재 전국 토양오염 실태조사 결과와 환경부 통계연감을 통해 토양오염 관리 통계가 제공되고 있으나, 이는 단편적인 정보에 그치고 있어 토양오염 및 오염부지의 전반적인 상황을 종합적으로 파악하는 데 한계가 있다. 특히 오염부지에 대한 공간 정보가 전무하고 위해성 평가 등에 대한 정보 공개가 매우 제한적이어서, 현재의 정보 제공 체계로는 효과적인 정책 수립을 지원하기 어려운 상황이다.

한국환경공단에서는 최근 위험물·유독물·폐기물 관련시설 및 골프장 등 잠재적 오염원에 대한 자료 수집과 데이터베이스 구축, 국토의 배경오염지도 제작, 토양환경정보 통합관리 추진 등의 사업을 진행 중이다. 또한 전 국토의 토양에 대해 납, 카드뮴, 구리 등 토양오염물질 10종의 배경농도를 조사하여 정책 자료로 활용할 계획을 수립하였다.

향후 더욱 효과적인 토양오염 관리를 위해서는 이러한 자료들과 함께 오염의심지역 정보, 오염지역 정보, 정화 현황, 위해성평가 정보 등 토양오염 관련 자료를 포함한 종합적인 정보 시스템을 구축할 필요가 있다. 이러한 시스템에는 다음과 같은 정보들이 포함되어야 한다: 1) 잠재오염원 및 오염발생 시설을 포함한 오염원 정보, 2) 오염의심지역 목록, 오염확인 부지 목록, 정화완료 부지 목록 등 오염부지 정보, 3) 전국 오염도 현황, 4) 정화 기술 및 재원을 포함한 처리 현황, 5) 개발계획 및 위해성평가 등의 기타 관련 정보.

이러한 종합적인 정보 시스템 구축을 통해 국토의 토양오염 및 오염부지 상황을 더욱 정확하게 파악하고, 이를 바탕으로 효과적인 토양오염 관리 정책을 수립하고 실행할 수 있을 것이다.

라. 위해도 기반 부지 관리 체계 도입

본 절에서는 위해성평가를 확대하여 위해도 기반 부지 관리 체계가 도입될 경우, 지질기원 토양오염에 대한 현재의 한계점들이 해결될 수 있는 점을 고려하여 위해성평가의 확대 또는 전면 시행을 위해 필요한 사항들을 정리하고자 한다.

국내 토양오염부지 관리를 위해도 기반 관리 체계로 전환하기 위해 필요한 개선 방안에 대한 선행연구들의 제언 사항을 토대로 국내 토양오염물질 위해성평가를 개선하는 방안을 정리하였고, 2005년 이후 토양오염 위해성평가 관련 정책연구 결과를 중심으로 살펴보았다. 관련 선행연구는 다음과 같다.

- 김도형(2019b), “위해도 기반의 오염부지관리를 위한 법제화 방안”, 「환경법연구」, 41(1), 환경환경법학회, pp.1-36.
- 박용하 외(2005), “토양오염 지역의 위해성평가에 관한 외국 정책의 비교분석 및 우리나라의 정책 개선에 관한 고찰”, 「지하수토양환경」, 10(5), 한국지하수토양환경학회, pp.1-10.
- 박용하(2017), “토양오염부지의 위해성평가에 대한 우리나라의 정책분석 및 개선”, 「환경정책」, 25(2), 한국환경정책학회, pp.183-198.
- 조명현, 김도형, 백기태(2017), “위해성 기반 오염부지관리를 위한 정책 및 기술개발 방향”, 「지하수토양환경」, 22(5), 한국지하수토양환경학회, pp.48-62.
- 황상일 외(2018), 「토양오염부지의 환경매체 연계관리 방안」, 한국환경연구원, pp.42-46.

선행연구 결과의 주요 제안 사항을 법적 체계 개선, 사후관리 체계 구축 등의 9개 분야로 구분하고, 각 분야에 해당되는 세부 추진 과제로 정리한 결과는 다음 <표 4-9>와 같다.

토양오염 위해성평가 제도를 효과적으로 도입하고 운영하기 위해 다양한 개선 방안이 제시되고 있다. 우선 「토양환경보전법」 개정을 통한 위해성평가 제도의 법적 근거를 마련해야 한다. 이를 통해 위해성 기반 정화 및 관리를 위한 법적 체계를 구축한다. 또한 국내 실정에 맞는 위해성평가 지침 및 매뉴얼 개발이 시급하며, 부지 특이적 위해성평가 기법의 개발 및 적용이 요구된다. 위해성에 근거한 정화목표 설정과 맞춤형 정화 전략 수립, 그리고 자연 저감 등 다양한 정화 방법을 고려하고 적용할 필요가 있다.

전문인력 양성 및 역량 강화를 위해 위해성평가 전문가 교육 프로그램 개발과 인증제도 도입, 그리고 정부, 학계, 산업계 간 협력 강화가 중요하다. 토양오염 및 위해성 관련 정보의 체계적 수집과 데이터베이스 구축, 그리고 위해성 기반 오염부지 관리를 위한 정보 시스템 개발도 필요하다. 위해성평가 결과에 대한 투명한 공개와 이해관계자 간 소통 채널 구축, 주민 참여 및 의견 수렴 절차 마련을 통해 위해소통 체계를 강화해야 한다.

제도적 지원 확대를 위해 위해성평가 관련 연구개발(R&D) 지원을 확대하고, 위해성 기반 오염부지 관리를 위한 정책 및 기술개발을 지원한다. 또한 토양, 지하수, 대기 등 다른 환경

매체와의 통합적 위해성평가와 복합오염에 대한 위해성평가 기법을 개발할 필요가 있다. 위해성평가 이후의 지속적인 모니터링 및 관리 체계 구축과 장기적 관점에서의 토양오염 관리 방안 수립도 중요하다.

마지막으로, 위해성 기반 관리의 경제적 효과 분석과 비용-편익 분석을 통한 정책 효과성 평가 및 최적화된 관리 방안 도출이 요구된다. 이처럼 종합적으로 접근하면 우리나라의 토양오염 위해성평가 제도를 효과적으로 도입하고 운영할 수 있을 것이다.

〈표 4-9〉 위해성평가 제도 도입 방안에 관한 선행연구 결과에 따른 개선 과제

분야	세부 과제
법적 체계 개선	- 「토양환경보전법」 개정을 통한 위해성평가 제도의 법적 근거 마련 - 위해성평가 관련 조항 신설 및 보완 - 토양 정밀조사 및 위해성평가 개념 명확화
위해성평가 체계 구축	- 오염부지별 맞춤형 위해성평가 도입 - 위해성평가 지침 및 매뉴얼 개발 - 위해성평가 절차 및 방법 표준화
타 환경매체와의 통합적 접근	- 토양, 지하수, 대기 등 다른 환경매체와의 통합적 위해성평가 접근 - 환경매체 간 상호작용을 고려한 종합적 위해성평가 모델 개발
사후 관리 체계 구축	- 위해성평가 이후의 지속적인 모니터링 및 관리 체계 구축 - 장기적 관점에서의 토양오염 관리 방안
위해성평가 적용 확대	- 오염부지 정화 시 위해성평가 의무화 - 위해성에 근거한 정화목표 설정(TCL: Target Cleanup Level) - 자연저감 등 다양한 정화 방법 고려
전문인력 양성 및 역량 강화	- 위해성평가 전문가 교육 프로그램 개발 - 인증제도 도입을 통한 전문성 확보 - 정부, 학계, 산업계 간 협력 강화
데이터베이스 구축 및 관리	- 토양오염 및 위해성 관련 정보 체계적 수집 - 국가 차원의 데이터베이스 구축 및 공유 - 지속적인 모니터링 및 업데이트
위해소통 체계 강화	- 위해성평가 결과에 대한 투명한 공개 - 이해관계자 간 소통 채널 구축 - 주민 참여 및 의견 수렴 절차 마련
제도적 지원 확대	- 위해성평가 관련 연구개발(R&D) 지원 확대 - 중소기업 등에 대한 기술적·재정적 지원 - 국제 협력 및 선진 사례 벤치마킹

자료: 박용하 외(2005, 2017); 조명현, 김도형, 백기태(2017); 황상일 외(2018); 김도형(2019)을 토대로 저자 작성.

| 참고문헌 |

[국내문헌]

- 김도형(2019a), “위해도 기반의 오염부지관리를 위한 법제화 방안에 관한 연구”, 한양대학교 박사학위 논문, pp.75-91.
- 김도형(2019b), “위해도 기반의 오염부지관리를 위한 법제화 방안”, 『환경법연구』, 41(1), 환경환경법학회, pp.1-36.
- 박용하 외(1996), “토양오염지표에 의한 국내 토양의 중금속과 비소 오염도 및 향후 전망”, 『지하수토양환경』, 1(1), 한국지하수토양환경학회, pp.55-65.
- 박용하 외(2005), “토양오염 지역의 위해성평가에 관한 외국 정책의 비교분석 및 우리나라의 정책 개선에 관한 고찰”, 『지하수토양환경』, 10(5), 한국지하수토양환경학회, pp.1-10.
- 박용하(2017), “토양오염부지의 위해성평가에 대한 우리나라의 정책분석 및 개선”, 『환경정책』, 25(2), 한국환경정책·평가연구원, 한국환경정책학회, pp.183-198.
- 박형민 외(2023), “토양세척공법을 적용한 비소 및 중금속 오염토양 정화 전·후 토양건강성 평가”, 『한국자원공학회지』, 60(1), 한국자원공학회, pp.1-11.
- 서울행정법원 2023.11.30. 선고 2022구합86037 판결.
- 양경 외(2014), “(구) 장항제련소 매입구역의 비소 오염도와 생물학적접근성을 반영한 위해성 평가 및 정화수준 결정에 관한 연구”, 『지하수토양환경』, 19(4), 한국지하수토양환경학회, pp.52-61.
- 이상우 외(2020), “오염토양 정화공정에 의한 토양의 특성 변화 및 정화토의 회복기술”, 『자원환경지질』, 53(4), 대한자원환경지질학회, pp.441-477.
- 이종환 외(2018), “용유도 을왕산에 분포하는 암석 내 불소 기원”, 『자원환경지질』, 51(6), 대한자원환경지질학회, pp.521-529.
- 조명현, 김도형, 백기태(2017), “위해성 기반 오염부지관리를 위한 정책 및 기술개발 방향”, 『지하수토양환경』, 22(5), 한국지하수토양환경학회, pp.48-62.

환경부(2023), 「제4차지하수관리기본계획」, p.18.

황상일 외(2018), 「토양오염부지의 환경매체 연계관리 방안」, 한국환경연구원, pp.42-46.

황정(2001), “금산-완주지역 형석광화대내 석회암 및 화강암지역 지하수의 불소분포 특성 및 저감방안” 「자원환경지질」, 34(1), 대한자원환경지질학회, pp.105-117.

[국외문헌]

Adriano, D. C.(2013), *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals*, Springer Science & Business Media, pp.219-256.

Bhattacharya, P. et al.(2002), *Arsenic in The Environment: A Global Perspective. Handbook of Heavy Metals in The Environment*, Marcell Dekker Inc., pp.147-215.

Ciuró Juncosa, E.(2008), “Adsorption Properties of Synthetic Iron Oxides: As (V) Adsorption on Goethite (Alpha-FeOOH)”, Master’s thesis, Lulea University, pp.1-31.

Chae, G. T. et al.(2006), “Batch Dissolution of Granite and Biotite in Water: Implication for Fluorine Geochemistry in Groundwater”, *Geochemical Journal*, 40(1), pp.95-102.

Chae, G. T. et al.(2007), “Fluorine Geochemistry in Bedrock Groundwater of South Korea”, *Science of the Total Environment*, 385(1-3), pp.272-283.

FAO and UNEP(2021), *Global Assessment of Soil Pollution: Report*, pp.1-58.

International Organization for Standardization: ISO(2015), 11074: 2015 (Soil quality—Vocabulary), Geneva, pp.1-105.

Kabata-Pendias, A.(2011), *Trace Elements of Soils and Plants*, 4th ed., Boca Raton: CRC press, Taylor & Francis Group, pp.28-534.

Kanisawa, S.(1979), “Content and Behaviour of Fluorine in Granitic Rocks, Kitakami Mountains, Northeast Japan”, *Chemical Geology*, 24(1-2), pp.57-67.

- Kim, K. H. et al.(2014), “Model-Based Clustering of Hydrochemical Data to Demarcate Natural Versus Human Impacts on Bedrock Groundwater Quality in Rural Areas, South Korea”, *Journal of Hydrology*, Vol.519, pp.626-636.
- Li, Z. et al.(2003), “Chemical Characteristics of Fluorine-Bearing Biotite of Early Paleozoic Plutonic Rocks from the Sør Rondane Mountains, East Antarctica”, *Geochemical Journal*, 37(2), pp.145-161.
- Pertti, L. and B. Backman(2000), *The Occurrence and Geochemistry of Fluorides with Special Reference to Natural Waters in Finland*, Geological Survey of Finland, p.128.
- Podgorski, J. and M. Berg(2020), “Global Threat of Arsenic in Groundwater”, *Science*, 368(6493), pp.845-850.
- Podgorski, J. and M. Berg(2022), “Global Analysis and Prediction of Fluoride in Groundwater”, *Nature Communications*, 13(1), pp.4232.
- Rudnick, R. L. and S. Gao(2003), “The Composition of the Continental Crust”, *Treatise on Geochemistry*, Vol.3, pp.1-64.
- Seraphim, R. H.(1951), *Some Aspects of the Geochemistry of Fluorine*, Ph.D.diss, Massachusetts Institute of Technology, pp.1-96.
- Tanaka, T.(1988), “Distribution of Arsenic in the Natural Environment with Emphasis on Rocks and Soils”, *Applied Organometallic Chemistry*, 2(4), pp.283-295.
- Tian, K. et al.(2017), “Geochemical Baseline Establishment and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Greenhouse Soils from Dongtai, China”, *Ecological indicators*, Vol.72, pp.510-520.
- Wanner, N.(2018), “Background Concentrations of Arsenic in Ohio Soils: Sources and Influencing Factors”, *The Ohio Journal of Science*, 118(2), pp.2-15.

[온라인 자료]

- 국가법령정보센터, “토양오염물질 위해성평가 지침”, <http://www.law.go.kr/행정규칙/토양오염물질위해성평가지침>, 검색일: 2024.5.1.
- 국가법령정보센터, “토양측정망 설치 및 운영계획(환경부고시 제2020-37호)”, [https://www.law.go.kr/행정규칙/토양측정망 설치 및 운영계획/\(2020-37,20200212\)](https://www.law.go.kr/행정규칙/토양측정망_설치_및_운영계획/(2020-37,20200212)), 검색일: 2024.5.15.
- 국가법령정보센터, “토양환경보전법”, <http://www.law.go.kr/법령/토양환경보전법>, 검색일: 2024.5.1.
- 국가법령정보센터, “토양환경보전법 시행규칙”, [http://www.law.go.kr/법령/토양환경보전법 시행규칙](http://www.law.go.kr/법령/토양환경보전법_시행규칙), 검색일: 2024.5.1.
- 국가법령정보센터, “토양환경보전법 시행령”, [http://www.law.go.kr/법령/토양환경보전법 시행령](http://www.law.go.kr/법령/토양환경보전법_시행령), 검색일: 2024.5.1.
- 국무조정실 보도자료(2023.9.25), “규제심판부, ‘국민·기업에 부담되는 불소규제, 국제적 수준에 맞게 개선해야’”, pp.1-2, <https://www.opm.go.kr/opm/info/regulation02.do>, 검색일: 2024.5.30.
- 공공데이터포털(2021.1.20), “한국환경연구원_환경영향평가 토양정보”, <https://www.data.go.kr/data/15083167/fileData.do>, 검색일: 2024.5.1.
- 독일 연방환경청(2015.11), “Bodenzustand in Deutschland zum-Internationalen Jahr des Bodens(국제 토양의 해를 맞이한 독일의 토양 상태)”, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bodenzustand-in-deutschland>, 검색일: 2024.6.20.
- 독일 연방환경청(2020.5.1), “Bodendaten in Deutschland-Übersicht über die wichtigsten Mess- und Erhebungsaktivitäten für Böden(독일의 토양 데이터- 주요 토양 측정 및 조사 활동 개요)”, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bodendaten-in-deutschland-0>, 검색일: 2024.6.20.
- 독일 토양 보호 및 환경 관련 물질 데이터베이스(STARS), <http://www.stoffdaten-stars.de/index.php?page=information>, 검색일: 2024.6.20.
- 바덴뷔르템베르크 주 환경청(2023), “Altlastenstatistik 2022(2022년 오염부지 통계)”, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bodenzustand-in-deutschland>

- //pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10582, 검색일: 2024.6.20.
- 일본 치바현 환경생활부 수질보전과 지질오염대책반(2023.3.23), “自然由来汚染調査の基礎解説 自然由来特例区域の規制概要(자연 유래 오염조사에 대한 기초해설, 자연 유래 특례구역에 관한 규제 개요)”, <https://www.pref.chiba.lg.jp/suiho/chikasui/documents/dojoshizenyurai.pdf>, 검색일: 2024.5.20.
- 일본 환경성(2022.10.25), “土壤汚染対策法の概要、施行状況と土壤環境行政の最新動向(토양 오염대책법의 개요와 시행상황 및 토양환경행정의 최신동향)”, https://www.jeas.or.jp/dojo/business/promote/seminar/files/2022a/env_01.pdf, 검색일: 2024.5.20.
- 일본 환경성(2022.8), “土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン(改訂第3.1版(토양오염대책법에 따른 조사 및 조치에 관한 가이드라인(개정 제3.1판)))”, <https://www.env.go.jp/content/000076380.pdf>, 검색일: 2024.5.20.
- 일본 환경성(2019.3.1), “土壤汚染対策法の一部を改正する法律による改正後の土壤汚染対策法の施行について(토양오염대책법 일부를 개정하는 법률에 의한 개정 후 토양오염대책법의 시행에 대하여)”, https://www.env.go.jp/water/dojo/law/kaisei2009/no_1903015.pdf, 검색일: 2024.5.20.
- 일본 e-Gov 법령검색(2022.6.17), “土壤汚染対策法(토양오염대책법)”, <https://laws.e-gov.go.jp/law/414AC0000000053>, 검색일: 2024.5.20.
- 일본 e-Gov 법령검색(2024.4.1), “土壤汚染対策法施行令(토양오염대책법 시행령)”, <https://laws.e-gov.go.jp/law/414CO0000000336>, 검색일: 2024.5.20.
- 일본 e-Gov 법령검색(2024.4.1), “土壤汚染対策法施行規則(토양오염대책법 시행규칙)”, <https://laws.e-gov.go.jp/law/414M60001000029>, 검색일: 2024.5.20.
- 토양지하수정보 시스템, “토양측정망”, <https://sgis.nier.go.kr/web>, 검색일: 2024.5.15.
- 토양환경정보 시스템 흙도람, “토양환경지도”, <http://soil.rda.go.kr/geoweb/soilmain.do>, 검색일: 2024.7.15.
- 한국경제(2023.11.1), “‘조합원당 4000만원 더 내라’ 방배13구역 복병된 환경규제”, <https://www.hankyung.com/article/2023110157081>, 검색일: 2024.3.20.
- 한국환경산업기술원, “환경R&D 과제 보고서- 자연 기원적 불소오염지역 특성을 고려한 토양

- 정화 기술개발”, https://ecoplus.keiti.re.kr:9443/pms/rin/main/rin_0102.jsp?PROJ_RQST_NO=ARQ202002035&PROJ_ANN=3&prevUrl=pop, 검색일: 2024.4.15.
- 환경부(2016.5.11), “인천국제공항 제2여객터미널 조성공사현장 위해성평가서 공고(환경부 공고 제2016-412호)”, https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10264&seq=6716, 검색일: 2024.5.15.
- 환경부(2016.11.11), “인천국제공항 런업장 조성공사현장 위해성평가서 공고(환경부 공고 제2016-799호)”, https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10264&seq=6815, 검색일: 2024.5.15.
- 환경부(2020.10.19), “인천국제공항 건설 및 개발지역 토양오염물질 위해성평가서 공고(환경부 공고 제2020-884호)”, <https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=10524&boardMasterId=39&boardCategoryId=55&boardId=1404300>, 검색일: 2024.5.15.
- 환경부, 국립환경과학원(2022.10.4), “2020년도 토양측정망 및 토양오염실태조사 결과”, https://sgis.nier.go.kr/web/board/6/1327/?searchWord=2020&searchType=ALL&pMENU_NO=82, 검색일: 2024.7.15.
- 환경부 보도자료(2024.1.26), “2024년 환경부 주요정책 추진계획”, <https://www.me.go.kr/home/file/readDownloadFile.do?fileId=271580&fileSeq=2>, 검색일 : 2024.5.30.
- 환경부 보도설명자료(2023.11.2), “불의 토양오염우려기준을 합리적으로 개선하겠음”, <https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%EB%B6%88%EC%86%8C&menuId=10525&orgCd=&boardId=1634660&boardMasterId=1&boardCategoryId=&decorator=>, 검색일: 2024.5.30.
- 환경영향평가정보지원시스템, <https://eiass.go.kr>, 검색일: 2024.5.15.

부 록

- I. 일본 토양오염대책법 시행규칙 별표 6(번역본)
- II. 일본 환경성 통지의 별지(번역본)
- III. 일본 토양오염 조사 및 조치 가이드라인의 Appendix-3
(번역본)

부록 I. 일본 토양오염대책법 시행규칙 별표 6(번역본)

토지	지시 조치	법 제7조 제1항 제1호의 환경성령으로 정하는 오염 제거 등의 조치
<p>1. 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 토양 용출량 기준에 적합하지 않고, 해당 토양의 특정 유해물질에 의한 오염에 기인한 지하수 오염이 발생하지 않은 토지</p>	<p>해당 토지에서 지하수 수질 측정을 실시할 것(이하 “지하수 수질 측정”이라 함)</p>	<p>다음 항부터 6항까지의 왼쪽 열에 기재된 토지의 토양오염 상태에 따라 각각 이들 항의 중간 열에 정한 지시 조치 및 오른쪽 열에 정한 오염 제거 등의 조치</p>
<p>2. 토양의 제1종 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 토양 용출량 기준에 적합하지 않고, 해당 토양의 제1종 특정 유해물질에 의한 오염에 기인한 지하수 오염이 발생하고 있는 토지</p>	<p>토지 기준 부적합 토양이 있는 구역의 측면에, 불투수층(두께가 5미터 이상이며, 투수계수가 초당 100나노미터(임변)의 경우 무전값이 1) 이하인 지층 또는 이와 동등 이상의 차수 효력을 가진 지층을 말함. 이하 동일) 중 가장 얇은 위치에 있는 것의 깊이까지 지하수 유출 방지를 위한 구조물을 설치할 것(이하 “원위치 봉쇄”라 함) 또는 기준 부적합 토양을 해당 토지에서 굴착하고, 해당 토지에 지하수 유출 방지를 위한 구조물을 설치하며, 해당 구조물 내부에 굴착한 기준 부적합 토양을 퇴폐하는 것(이하 “차수공 봉쇄”라 함)</p>	<p>가. 해당 토지에 지하수 오염의 확산을 방지하기 위한 구조물을 설치할 것(이하 “지하수 오염 확산 방지”라 함) 나. 기준 부적합 토양을 해당 토지에서 제거하거나 기준 부적합 토양 중의 특정 유해물질을 제거할 것(이하 “토양오염 제거”라 함) 다. 지하수 수질 측정(해당 토지의 기준 부적합 토양의 범위와 깊이, 기타 토양오염 상황 및 오염 제거 등 계획 작성에 필요한 정보에 대해, 시추에 의한 토양 채취 및 측정 기타 방법으로 파악한 결과, 해당 토지의 토양 및 지하수의 제1종 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 목표 토양 용출량 및 목표 지하수 농도를 초과하지 않는 것이 확인된 경우에 한함)</p>
<p>3. 토양의 제2종 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 제2용출량 기준에 적합하지 않고, 해당 토양의 제2종 특정 유해물질에 의한 오염에 기인한 지하수 오염이 발생하고 있는 토지</p>	<p>원위치 봉쇄 또는 차수공 봉쇄</p>	<p>가. 기준 부적합 토양을 해당 토지에서 굴착하고, 해당 토지에 필요한 수밀성 및 내구성을 가진 구조물을 설치하며, 해당 구조물 내부에 굴착한 기준 부적합 토양을 퇴폐하는 것(이하 “차단공 봉쇄”라 함) 나. 지하수오염 확산 방지 다. 토양오염 제거</p>

토지	지시 조치	법 제7조 제1항 제1호의 환경성령으로 정하는 오염 제거 등의 조치
<p>4. 토양의 제2종 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 토양 용출량 기준에 적합하지 않고, 해당 토양의 제2종 특정 유해물질에 의한 오염에 기인한 지하수 오염이 발생하고 있는 토지(전 항에 기재된 토지를 제외)</p>	<p>원위지 봉쇄 또는 차수공 봉쇄</p>	<p>가. 기준 부적합 토양을 특정 유해물질이 물에 용출되지 않도록 성상을 변경할 것(이하 “불용화”라 함) 나. 차단공 봉쇄 다. 지하수 오염 확산 방지 라. 토양오염 제거 마. 지하수 수질 측정(해당 토지의 기준 부적합 토양의 범위와 깊이, 기타 토양오염 상황 및 오염 제거 등 계획 작성에 필요한 정보에 대해, 시추에 의한 토양 채취 및 측정 기타 방법으로 파악한 결과, 해당 토지의 토양 및 지하수의 제2종 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 목표 토양 용출량 및 목표 지하수 농도를 초과하지 않는 것이 확인된 경우에 한함)</p>
<p>5. 토양의 제3종 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 제2용출량 기준에 적합하지 않고, 해당 토양의 제3종 특정 유해물질에 의한 오염에 기인한 지하수 오염이 발생하고 있는 토지</p>	<p>차단공 봉쇄</p>	<p>가. 지하수 오염 확산 방지 나. 토양오염 제거</p>
<p>6. 토양의 제3종 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 토양 용출량 기준에 적합하지 않고, 해당 토양의 제3종 특정 유해물질에 의한 오염에 기인한 지하수 오염이 발생하고 있는 토지(전 항에 기재된 토지를 제외)</p>	<p>원위지 봉쇄 또는 차수공 봉쇄</p>	<p>가. 차단공 봉쇄 나. 지하수 오염 확산 방지 다. 토양오염 제거 라. 지하수 수질 측정(해당 토지의 기준 부적합 토양의 범위와 깊이, 기타 토양오염 상황 및 오염 제거 등 계획 작성에 필요한 정보에 대해, 시추에 의한 토양 채취 및 측정 기타 방법으로 파악한 결과, 해당 토지의 토양 및 지하수의 제3종 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 목표 토양 용출량 및 목표 지하수 농도를 초과하지 않는 것이 확인된 경우에 한함)</p>

토지	지시 조치	법 제7조 제1항 제1호의 환경성령으로 정하는 오염 제거 등의 조치
<p>7. 토양의 제2종 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 토양 함유량 기준에 적합하지 않은 토지(영유아의 모래놀이 또는 흙놀이에 일 상적으로 이용되는 모래밭이나 정원의 부지 또는 놀이공원 기타 놀이 설비로 영유아에게 실외에서 놀이를 하게 하는 시설의 용도로 재공되는 토지로서, 토지의 형질변경이 빈번 하게 이루어짐으로써 다음 항 또는 9항에 정한 조치의 효과 확보에 지장이 생길 우려가 있다고 인정되는 것에 한함)</p>	<p>토양오염 제거</p>	<p>가. 포장할 것(이하 “포장”이라 함) 나. 사람이 출입할 수 없도록 할 것(이하 “출입 금지”라 함)</p>
<p>8. 토양의 제2종 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 토양 함유량 기준에 적합하지 않은 토지(현재 주로 주거용으로 재공되는 건축 물 중 지표면에서 높이 50센티미터까지의 부분에 오로지 주거용으로 재공되는 부분이 있는 것이 건축되어 있는 구역의 토지로서, 지표면을 50센티미터 높임으로써 해당 건 축물에 거주하는 자의 일상생활에 현저한 지장이 생길 우려가 있다고 인정되는 것에 한하며, 전 항에 기재된 토지를 제외)</p>	<p>토양을 굴착하여 지표면을 낮추고, 기준 부속합 토양 이외의 토양으로 덮을 것(이하 “토양 임환”이라 함)</p>	<p>가. 포장 나. 출입 금지 다. 토양오염 제거</p>
<p>9. 토양의 제2종 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 토양 함유량 기준에 적합하지 않은 토지(전 두 항에 기재된 토지를 제외)</p>	<p>기준 부속합 토양 이외의 토양으로 덮을 것(이하 “성토”라 함)</p>	<p>가. 포장 나. 출입 금지 다. 토양 임환 라. 토양오염 제거</p>

부록 II. 일본 환경성 통지의 별지(번역본)

(별지)

토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 자연적으로 유래했는지 여부의 판정 방법

1. 토양용출량 기준에 적합하지 않은 경우

토지의 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 자연적으로 유래했는지 여부를 판단할 때는 오염의 유래가 불명확한 점, 토양오염상황조사에서 토양오염이 지질학적으로 동질한 상태로 넓게 퍼져 있는 점에 더해, 특정 유해물질의 종류 등 특정 유해물질의 함유량 범위 등, 특정 유해물질의 분포 특성의 3가지 관점에서 검토를 실시하고, 그 모두에 대해 다음의 조건을 충족하는지 여부로 판단한다.

(1) 특정 유해물질의 종류 등

토양용출량 기준에 적합하지 않은 특정 유해물질의 종류가 시안화합물을 제외한 제2종 특정 유해물질(비소, 납, 불소, 붕소, 수은, 카드뮴, 셀레늄 또는 6가 크롬) 중 8종류 중 어느 하나여야 한다.

단, 8종류 중 어느 하나인 경우에도 토지이력, 주변의 유사한 사례, 주변의 지질학적 상황, 해역과의 관계 등의 상황을 종합적으로 고려하여 다음 사항을 감안하면서 판단할 필요가 있다.

- i) 비소, 납, 불소 및 붕소에 대해서는 자연적 기원의 오염 가능성이 높다는 점
- ii) 용출량이 토양용출량 기준의 약 10배를 초과하는 경우에는 인위적 기원일 가능성이 비교적 높아지며, 자연적 기원의 오염인지 여부의 판단 재료 중 하나가 될 수 있다는 점.
그러나 이 경우에도 자연적 기원의 오염인 경우도 있다는 점에 유의할 필요가 있다.

(2) 특정 유해물질의 함유량 범위 등

특정 유해물질의 함유량이 개략적으로 아래 표에 제시된 농도 범위 내에 있어야 한다. 그때의 함유량 측정 방법은 토양오염상황조사에서의 함유량 조사의 측정 방법에 의하지 않고 전량분석에 의한다.

단, 표에 제시된 농도 범위를 초과하는 경우라도 배경농도와의 비교 또는 화합물 형태 등의 확인으로부터 자연적 유래로 인한 오염으로 확인할 수 있는 경우에는 자연적 기원의 오염으로 판단할 수 있다.

〈표 1〉 자연적 기원의 오염이라고 판단하는 데 있어서의 함유량(전량분석)의 상한치의 기준

단위: mg/kg

물질명	비소	납	불소	붕소	수은	카드뮴	셀레늄	6가 크롬
상한값의 기준	39	140	700	100	1.4	1.4	2.0	-

※ 토양오염상황조사에서의 토양함유량 측정 방법(산추출법 등)에 의해 표의 상한치의 기준을 초과한 경우에는 인위적 기원에 의한 가능성이 높다고 판단한다.

산추출법의 물질로 그 측정치가 모두 표의 상한치의 기준 범위 내에 있는 경우는 해당 측정치가 가장 높은 시료에 대한 전량 분석으로 함유량을 구하고, 표의 상한치의 기준과 비교한다.

표의 상한치의 기준은 전국 주요 10개 도시에서 채취한 시가지 토양 중의 특정 유해물질의 함유량 조사 결과를 통계 분석하여 구한 값(평균값+3σ)이므로, 광맥·광상 분포지대 등의 지질 조건에 따라서는 이 상한치의 기준을 초과하는 경우가 있을 수 있다는 점에 유의할 필요가 있다.

(3) 특정 유해물질의 분포 특성

특정 유해물질의 함유량 분포에 해당 물질의 사용 이력 장소 등과의 관련성을 나타내는 국재성이 인정되지 않아야 한다.

2. 토양함유량기준에 적합하지 않은 경우

토지의 토양 중 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 자연적으로 기인한 것인지 판단할 때에는 오염의 기원이 불분명하고, 토양오염실태조사에서 토양오염이 지질학적으로 동질한 상태로 광범위하게 퍼져 있는 것 외에도 특정 유해물질의 종류, 주변 배경농도와의 비교, 화합물 형태 등의 관점에서 다음의 2가지 조건을 만족시킬 때 자연적 기원의 오염으로 판단할 수 있다. 한편 지금까지의 지견으로는 이른바 자연적 기원의 오염에 의해 토양함유량기준에 적합하지 않을 가능성이 있는 물질은 납과 비소라고 여겨진다.

- (1) 배경농도 또는 화합물 형태 등으로부터 해당 토양 중의 특정 유해물질이 자연적으로 기인한 것임을 확인할 수 있을 것
- (2) 특정 유해물질의 함유량 분포에 해당 물질의 사용 이력이 있는 장소 등과의 연관성을 나타내는 국소성이 인정되지 않을 것

부록 Ⅲ. 일본 토양오염 조사 및 조치 가이드라인의 Appendix-3(번역본)

- 자연 유래에 의한 기준 부적합 토양의 판단 방법 및 그 해설-

목차

1. 개념

2. 특정 유해물질로 인한 토양오염 상태가 자연적인 기원인지 여부를 판단하는 방법

2.1 토양 용출량 기준에 부적합할 경우

2.1.1 특정 유해물질의 종류 등

2.1.2 특정 유해물질의 함유량 범위 등

(1) 토양 중 중금속 등의 함유량이 자연적 수준으로 간주될 수 있는 범위

(2) 함유량 측정법

(3) 지역적 특성 고려 사항

① 배경농도와의 비교

② 화합물 형태 등 확인

2.1.3 특정 유해물질의 분포 특성

(1) 함유량을 지표로 사용하는 이유

(2) 함유량 조사 밀도

(3) 함유량 분포에 따른 판단

2.2 토양 함유량 기준에 부적합할 경우

본 자료는 토양오염상황조사 등으로 실시된 토양용출량시험·토양함유량시험 등의 데이터가 자연에 기인한 것인지를 판단하는 방법 및 그 해설이다. 따라서 본 자료에서 제시한 방법 이외에도 대상 토지의 토양이 자연에 기인한 것인지를 판단하는 방법은 존재한다. 자연 유래에 의한 기준 부적합 토양의 판단 방법으로는 조사 대상지에서의 데이터 분포 특성, 타 물질과의 관련성, 지질 상황 등을 이용하는 것도 유효할 경우가 있다.

1. 개념

조사 대상지의 토지 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 자연에 기인하는지 여부를 판단할 때는 기준 부적합의 원인이 인위 등에 기인할 우려가 확인되지 않은 것, 토양오염상황 조사에서 토양오염이 지질학적으로 동질한 상태로 퍼져 있는 것에 더해 특정 유해물질의 종류, 함유량 등을 종합적으로 감안하는 것이 적당하다.

2. 토지 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 전적으로 자연에 기인하는지 여부의 판정 방법

2.1 토양용출량기준에 적합하지 않은 경우

토지 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 전적으로 자연에 기인하는지 여부를 판단할 때는 오염의 유래가 불명확한 것, 토양오염상황조사에서 토양오염이 지질학적으로 동질한 상태로 퍼져 있는 것에 더해 특정 유해물질의 종류 등, 특정 유해물질의 함유량 범위 등 특정 유해물질의 분포 특성의 세 가지 관점에서 검토를 행하고 그 전부가 다음 조건을 만족하는지 여부로 판단하는 것으로 한다.

- (1) 특정 유해물질의 종류 등
 - (2) 특정 유해물질의 함유량 범위 등
 - (3) 특정 유해물질의 분포 특성
- (통지 별지 1)

여기서 말하는 “오염 원인이 인위 등에 기인할 우려가 확인되지 않은 것”이란 수면 매립 토사 유래를 포함한 인위적 원인에 의한 토양오염 가능성을 생각하기 어려운 것을 말한다.

2.1.1 특정 유해물질의 종류 등

토양용출량기준에 적합하지 않은 특정 유해물질의 종류가 시안화합물을 제외한 제2종 특정 유해물질(비소, 납, 불소, 붕소, 수은, 카드뮴, 셀레늄 또는 6가 크롬) 8종류 중 어느 하나인 것으로 한다.

단, 8종류 중 어느 하나인 경우에도 토지이력, 주변의 유사 사례, 주변의 지질적 상황, 해역과의 관계 등의 상황을 종합적으로 감안하여 다음 사항을 고려하면서 판단할 필요가 있다.

- i) 비소, 납, 불소 및 붕소에 대해서는 자연 유래 오염 가능성이 높을 것
- ii) 토양용출량이 토양용출량기준의 대략 10배를 초과하는 경우는 인위 유래 가능성이 비교적 높아지고 자연 유래 오염인지 여부를 판단하는 자료 중 하나가 될 수 있을 것. 그러나 그 경우에도 전적으로 자연 유래 오염인 경우도 있음에 유의할 필요가 있다.

(통지 별지 1.(1))

토양환경센터가 회원사를 대상으로 실시한 자연 기원 토양오염(자연 유래 토양용출량기준 부적합)의 실태에 관한 설문조사(2002년 10월 실시, 45사 회신)에 따르면 자연 기원 토양오염으로 판단된 사례의 수가 가장 많은 물질은 비소이고, 그다음으로 납, 불소, 수은 순이었다(표 1).

〈표 1〉 자연 기원의 토양오염으로 판단된 사례 수(토양 환경 센터 설문조사 결과)

물질명	비소	납	불소	붕소	수은	카드뮴	셀렌	6가 크롬
사례 수	31	18	14	1	8	4	2	0

〈표 1〉의 결과를 보면 비소는 자연 기원에 의한 토양오염의 과반수를 차지하는 것을 알 수 있다. 또한 납, 불소의 사례도 1/3 정도를 차지한다. 설문조사가 반드시 일본 전국의 사례를 모두 망라한 것은 아니라는 점을 감안하면 이들 3종의 중금속 등에서는 자연 유래 토양용출량기준 부적합이 발생할 가능성이 높다고 판단할 수 있다. 또한 붕소에 대해서는 본 설문조사에서의 사례 수는 적지만 자연 유래 토양오염이 원인으로 생각되는 지하수오염 사례 보고가 상당히 있다. 한편 수은, 카드뮴, 셀레늄에 대해서는 본 설문조사 결과만 보면 전국적으로 널리 분포한다고 말할 수는 없지만 자연 기원 토양오염으로 판단된 사례가 존재

한다. 그러므로 이들 물질에 대해서는 해당 토지에서의 해당 물질의 사용이력, 해당 토지의 조성이력, 대상지 주변의 퇴적환경과 배후지 상황, 해역과의 관계 등을 종합적으로 감안하여 자연적으로 토양 중에 특정 유해물질이 포함될 가능성을 판단한다. 또한 6가 크롬에 대해서는 상기 설문조사에서는 토양오염 사례가 보이지 않았지만, 사문석대가 분포하는 지역에서는 지하수 중 6가 크롬의 농도가 지하수환경기준에 적합하지 않은 오염 사례가 있으므로 주변의 지질조건에 따라서는 자연 유래 토양오염 가능성이 고려되며 같은 방식으로 판단한다.

더욱이 자연 기원 중금속 등이 극단적으로 고농도로 존재하는 것은 통상 생각하기 어렵다. 지자체 청취조사에서는 세 곳의 지자체(도쿄도, 가와사키시, 오사카부)에서 토양용출량이 환경기준치의 오더(order)에 있는 것이 이른바 자연 유래 오염 가능성의 판단 자료 중 하나로 언급되었다. 그러므로 토양용출량이 토양용출량기준의 대략 10배를 초과하는 경우는 인위 등에 기인할 가능성이 비교적 높아지고 자연 유래 오염인지 여부의 판단 자료 중 하나가 될 수 있다.

2.1.2 특정 유해물질의 함유량 범위 등

특정 유해물질의 함유량이 개략적으로 아래 표에 제시된 농도 범위 내에 있는 것으로 한다. 그때의 함유량 측정 방법은 토양오염상황조사에서의 함유량 조사 측정 방법에 의하지 않고 전량분석에 의한다.

단, <표 2>에 제시된 농도 범위를 초과하는 경우라도 배경농도와의 비교 또는 화합물 형태 등의 확인으로부터 자연 유래에 의한 오염으로 확인할 수 있는 경우에는 자연 유래 오염으로 판단한다.
(통지 별지 1.(2))

〈표 2〉 자연 유래 오염으로 판단할 때의 함유량(전량분석) 상한값의 기준

단위: mg/kg

물질명	비소	납	불소	붕소	수은	카드뮴	셀렌	6가 크롬
상한값 기준	39	140	700	100	1.4	1.4	2.0	-

※ 토양오염 상황조사에서 토양 함유량의 측정 방법(산추출법 등)에 의해 표의 상한값 기준을 초과한 경우에는 인위적 등에 의한 가능성이 높다고 판단한다. 산추출법의 물질에 대해, 그 측정값의 모두가 〈표 2〉의 상한값 기준 범위 내에 있는 경우에는, 해당 측정값이 가장 높은 시료에 대해 전량분석으로 함유량을 구하고 표의 상한값 기준과 비교한다.

(시행 통지의 별지 1.(2))

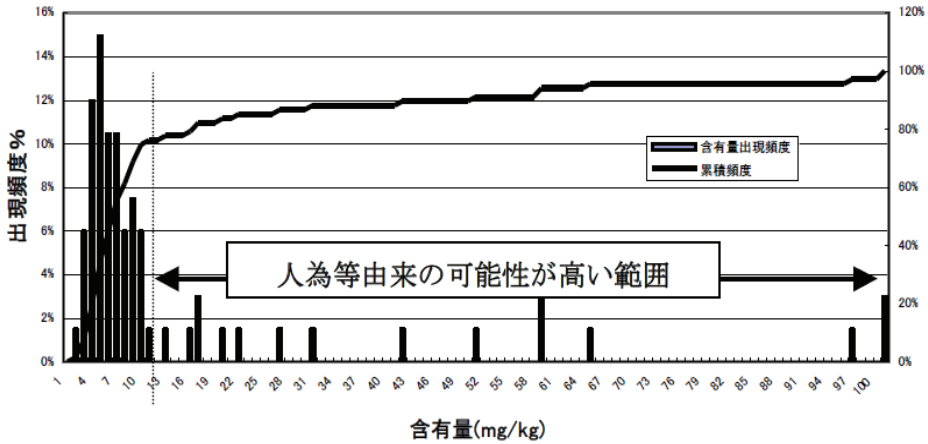
(1) 토양 중 중금속 등의 함유량이 자연적 수준으로 간주되는 범위

중금속 등은 자연계에 존재하는 것이므로 인위 등에 기인하는 작용을 받지 않는 토양이라도 토양 중에 중금속 등이 포함된다. 환경청이 1999년도에 실시한 함유량 참고값 재평가 업무에서는 전국 10개 도시의 총 193지점에서 토양시료를 채취하여 함유량 측정(전량분석)과 그 통계해석이 이루어졌다. 이 통계해석 결과에 기초하면 토양 중 중금속 등의 함유량 평균값+3 σ 는 표 2의 수치가 되지만, 평균값+3 σ 의 값은 '시가지 토양오염 문제 검토회 보고서'(1986년 1월 환경청 수질보전국)에서 '이를 상회하면 어떤 인위적 부하가 있는 것으로 인정되는 값'으로 하고 있으므로 표 2의 수치를 초과하는 경우에는 인위 등에 기인하는 작용을 받았을 가능성이 높다고 생각된다.

단, 표 2의 상한값 기준은 전국 주요 10개 도시에서 채취한 시가지 토양 중 특정 유해물질의 함유량 조사 결과를 통계해석하여 구한 값(평균값+3 σ)이므로 광맥·광상 분포시대 등의 지질 조건에 따라서는 이 상한값 기준을 초과할 경우가 있음에 유의할 필요가 있다.

또한 충분한 수의 함유량 측정값이 구해진 경우에는 함유량의 통계해석에 의해 인위 등에 기인할 가능성이 높은 범위를 사이트마다 구할 수도 있다.

그리고 자연 유래 토양오염은 총합적으로 판단하므로 함유량만으로 판단하지 않도록 유의해야 한다.



〈그림 1〉 함유량의 통계분석에 의한 판정 예시

(2) 함유량의 측정법

함유량 측정 방법에는 토양에 포함된 중금속 등을 강산이나 알칼리로 분해하여 전량을 측정하는 방법(전량분석)과 토양 중 중금속 등이 체내에서 섭취되는 실태를 고려하여 보다 약한 산으로 추출하여 측정하는 방법(산추출법)이 고려된다. 전량분석의 분해 및 측정 방법을 표 3에 제시했다. 환경청에 의해 1999년도에 실시된 시가지 토양 중 중금속 등 함유량조사에서는 전자가 사용되었으며, 또한 지하체가 보유한 중금속 등의 함유량 정보의 대부분도 이 수법이다. 한편 법에 기초한 함유량 측정의 대부분은 후자의 1mol/L 염산으로 추출하는 방법이 사용된다.

산추출법으로 측정된 함유량은 전량분석에 의한 값과 비교하여 명백히 작아진다. 그러므로 토양오염상황조사 등으로 측정된 함유량(산추출법)이 <표 2>에 제시된 수준을 초과하면 전량 분석 측정을 하지 않고 해당 토양 중 중금속 등의 함유량이 자연적 수준으로 간주될 수 없다고 판단할 수도 있다.

또한 산추출법에 의한 함유량이 표-2에 제시된 수준 범위 내인 경우는 동일 시료로 전량 분석을 행할 필요가 있지만, 전량분석에 의한 함유량을 반드시 모든 시료에 대해 행할 필요는 없다. 산추출법으로 측정된 함유량이 가장 높은 것(3개 시료 정도가 바람직함)에 대해 전량

분석에 의한 함유량 측정을 행하고, 그 값이 <표 2>에 제시된 수준 범위 내이면 토지 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 전적으로 자연에 기인하는지 여부를 판단할 때의 고려 요소 중 하나가 될 수 있다고 생각할 수 있다.

<표 3> 함유량(전량분석) 분석 방법

물질명	전처리 방법	측정 방법
비소	산분해(질산-염산)	수소화물 생성 원자흡광광도법
납	산분해(질산-염산)	프레임 원자흡광광도법
불소	알칼리 용융(탄산나트륨) - 수소화물 생성	란탄-알리자린 콤플렉스 흡광광도법
붕소	메틸렌블루 흡광광도법	메틸렌블루 흡광광도법
수은	산분해(질산-염산-과망간산칼륨)	환원기화 원자흡광광도법
카드뮴	산분해(질산-염산)	프레임 원자흡광광도법
셀렌	산분해(질산-염산)	수소화물 생성 원자흡광광도법

(3) 지역 특성의 고려 등

중금속 등을 포함하는 광상이 근처에 분포하는 등 지역의 조건에 따라서는 인위 등에 기인하는 작용을 받지 않는 토양이라도 표-2를 초과하는 함유량이 보일 것으로 예상된다. 이러한 경우에는 다음 방법을 사용하여 해당 토양 중 중금속 등의 함유량이 자연적 수준인지 여부를 판단한다.

① 배경농도와의 비교

해당 토지 주변의 인위 등에 기인하는 영향을 받지 않는 토지의 중금속 등 함유량 측정값과 해당 토지 내에서 측정된 함유량이 같은 수준인지 확인한다.

② 화합물 형태 등의 확인

예를 들어 납의 경우 토양 중에서의 존재 형태가 “광물 중에 포함된 것(방연석(황화납) 등의 납광물이나 토양 중 미생물이 만드는 황화철광물 중의 납 등)”, “유기물에 포함된 것(후민

등의 부식유기물과 킬레이트화합물을 형성하고 있는 납)”, “흡착-이온교환에 의해 토양에 포함된 것(점토광물이나 철수산화물 등 광물의 표면 등에 흡착이나 이온교환으로 유지되고 있는 납)”인 경우에는 자연 유래일 가능성이 있다. 반면 천연에서는 발견하기 어려운 형태(예를 들어 금속납, 산화납 등)로 존재하는 경우는 인위 등에 기인하는 오염으로 생각되는 경우도 있다. 또한 납의 경우 동위체비($^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$)로부터 판별하는 것도 가능하다. 다만 이들 분석에는 설비나 경험 등이 필요하므로 대응이 가능한 기관은 예를 들어 대학, 국가, 지자체의 연구기관에 한정된다.

2.1.3 특정 유해물질의 분포 특성

특정 유해물질의 함유량 분포에 해당 물질의 사용이력 장소 등과의 관련성을 나타내는 국소성이 인정되지 않아야 한다.
(통지 별지 1.(3))

도쿄도, 오사카부, 지바현, 니가타현, 가와사키시를 대상으로 한 지자체 청취조사에서는 어느 지자체든 자연 유래 토양오염의 판단 방법으로 오염물질의 분포상황 특성을 고려한다는 회답을 얻었다. 또한 토양환경센터 회원사를 대상으로 한 설문조사에서도 자연 유래로 판단하는 근거로 가장 많은 것이 “기준 초과 범위가 일정하게 분포하고 있어 인위 등에 기인한다고 생각되지 않았다”는 것이다. 따라서 토양 중 해당 특정 유해물질의 분포 특성으로부터 판단하는 방법이 일반적으로 널리 사용되고 있다고 봐도 좋다. 다만 분포 특성을 평가하기 위한 지표로는 토양용출량이 사용되는 경우가 많이 보이지만, 여기에서는 아래 이유로 함유량을 지표로 평가하기로 한다.

(1) 함유량을 지표로 사용하는 이유

토양에 포함된 특정 유해물질의 양을 측정하는 방법에는 토양용출량과 함유량이 있다. 토양용출량은 용출조건에 따른 변화를 받기 쉬우므로 토양용출량을 자연 유래 토양오염의 지표로 하는 것은 적절하지 않다. 반면 함유량은 토양용출량에 비해 측정 조건에 따른 변화를

받기 어려우므로 일반적인 판단지표로 사용할 때는 함유량을 채택하는 것이 바람직하다. 한편 함유량 측정 방법에는 종래 사용되던 전량분석에 의한 방법과 법에 기초한 방법(산추출법 등)이 있는데, 함유량의 분포 특성을 파악하는 목적에서는 방법을 통일하면 어느 방법을 사용해도 좋다고 생각된다.

(2) 함유량의 조사밀도

토양오염상황조사 결과에 따른 특정 유해물질의 토양함유량 분포(평면적 분포)로부터 국소성 유무를 판단하기 위해서는 충분한 밀도로 토양함유량이 측정되어 있을 필요가 있다. 구체적으로는 오염이 존재할 우려가 비교적 많은 부분으로 100m²당 1지점 조사를 행하도록 되어 있는 범위에 대해서는 100m²당 1지점, 오염이 존재할 우려가 적은 부분으로 900m²당 1지점 조사를 행하도록 되어 있는 범위에 대해서는 최소한 900m²당 1지점의 밀도(1조사 지점당 5지점 균등혼합법에 의한 조사)로 토양오염상황조사가 생략되지 않고 이루어질 필요가 있다.

(3) 함유량 분포에 의한 판단

인위 등에 기인하는 토양오염에서는 오염물질이 침투한 지점 주위에서 특정 유해물질의 함유량 증가가 보이는 사례가 많다. 또한 오염물질이 지표에서 지하로 침투한 경우에는 깊어질수록 함유량이 저하하는 경향을 보인다. 반면 토양에 포함된 특정 유해물질이 자연에 기인할 경우에는 이런 국소적인 함유량 증가나 감쇠 경향은 보이지 않는다. 다만 지층이나 성토를 구성하는 지질이 실트질인 경우에는 사질의 지층에 비해 함유량이 높아지는 경향이 보인다. 따라서 아래 순서에 따라 이것이 인위 등에 기인하는 함유량 증가인지 여부를 판단한다.

- ① 토양오염상황조사 대상이 되는 지표 부분 토양에 포함된 특정 유해물질의 함유량 평면 분포에 국소성이 인정되지 않는 경우에는 인위 등에 기인할 가능성이 낮다고 판단한다. 여기서 국소성이란 어떤 지점을 중심으로 함유량의 집중이 보이는 것을 말한다.
- ② 함유량의 평면분포에 국소성이 인정되지만, 이 장소와 특정 유해물질을 사용한 특정시설 및 그와 관련된 시설의 위치 등과의 관련성이 없는 경우에는 함유량의 중심 부분에서

깊이 5m 정도까지의 보링조사를 실시한다. 일정 깊이마다 토양시료를 채취하여 함유량의 심도 방향 분포 및 토질과의 관련성을 검토한다. 이 결과 동일 지층 내에서 함유량의 심도 방향 감쇠가 보이지 않는 경우에는 인위 등에 기인할 가능성이 낮다고 판단한다.

- ③ 함유량의 평면분포에 국소성이 인정되고, 이 장소와 특정 유해물질을 사용한 특정 시설 및 그와 관련된 시설의 위치 등과 관련성이 있는 경우에는 인위 등에 기인할 가능성이 높다고 판단한다.
- ④ 이런 장소에서 지하 심부까지 토양용출량기준 부적합이 보이는 경우에도 토양용출량 또는 함유량의 심도 방향의 명백한 연속적인 저하가 동일 지층 내에서 보이지 않는 것 등 특정 유해물질의 침투에 의한 영향을 받을 가능성이 낮다고 판단할 수 있는 심도 이심에서는 인위 등에 기인하는 토양오염 가능성이 낮다고 판단한다.

상기 순서에 따라 인위 등에 기인하는 함유량 증가일 가능성이 낮다고 판단된 범위는 자연 유래 오염 가능성이 높다고 종합적으로 판단할 수 있다.

2.2 토양함유량기준에 적합하지 않은 경우

토지 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 전적으로 자연에 기인하는지 여부를 판단할 때는 오염 원인이 불분명한 것, 토양오염상황조사에서 토양오염이 지질학적으로 동질한 상태로 퍼져 있는 것에 더해 특정 유해물질의 종류, 주변 배경농도와의 비교, 화합물 형태 등의 관점에서 아래 두 가지 조건을 만족할 때는 자연 유래 오염으로 판단한다. 한편 지금까지의 지견으로는 이른바 자연 유래 오염에 의해 토양함유량기준에 적합하지 않을 가능성이 있는 물질은 납 및 비소라고 생각된다.

- (1) 배경농도 또는 화합물 형태 등으로부터 해당 토양 중 특정 유해물질이 전적으로 자연에 기인하는 것임을 확인할 수 있을 것.
- (2) 특정 유해물질의 함유량 분포에 해당 물질의 사용이력이 있는 장소 등과의 관련성을 나타내는 국소성이 인정되지 않을 것.

(통지 별지 2)

중금속 등의 함유량(전량분석)의 자연적 수준 범위의 기준과 함유량 기준(산추출법)의 관계를 <표 4>에 제시했다. 다만 자연 유래 오염은 종합적으로 고려하는 것이므로 함유량만으로 판단하지 않도록 유의해야 한다.

<표 4> 자연적 레벨의 범위의 기준값과 토양 함유량 기준값의 대비

단위: mg/kg

물질명	비소	납	불소	수은	카드뮴	셀렌	붕소
자연적 레벨	39	140	700	1.4	1.4	2.0	100
토양 함유량 기준값	150	150	4,000	15	45	150	4,000
비율	0.26	0.93	0.18	0.09	0.03	0.01	0.03

자연적 수준 범위의 기준이 전량분석에 기반을 둔 것인 반면 토양함유량기준은 산추출법에 기반을 둔 것이라는 차이는 있지만, 납 및 비소를 제외하면 자연적 수준은 토양함유량기준보다도 충분히 작은 값이 되고 있다. 따라서 납 및 비소를 제외한 물질에서는 토양함유량기준을 초과하면 인위 등에 기인하는 것일 가능성이 높다고 할 수 있다.

또한 이것이 자연 유래 오염이라고 판단하기 위해서는 주변의 인위 등에 기인하는 영향을 받지 않은 토지에서의 토양 중 특정 유해물질 함유량(배경농도)과의 비교 또는 화합물 형태 등의 측정에 의해 해당 토양의 특정 유해물질에 의한 오염 상태가 전적으로 자연에 기인하는 것임을 확인할 필요가 있다.

또한 2.1.3과 마찬가지로 특정 유해물질의 분포 특성을 확인하고 자연 유래 오염에 대해 판단한다.

Executive Summary

I. Research Background and Objectives

- Research background and necessity
 - Recent soil remediation costs for fluorine-related contamination in the Seoul metropolitan area reached 585.3 billion won, highlighting the issues associated with soil pollution cleanup costs.
 - The Office for Government Policy Coordination has pointed out that current soil fluorine standards place a significant burden on businesses and citizens, requiring rational improvement.
 - It was recommended that the Ministry of Environment establish new soil contamination standards in line with international levels, ensuring that they remain within a range that does not harm human health or the environment.
 - This study proposes promoting the transition toward a risk-assessment-based remediation system tailored to site-specific conditions over the mid- to long-term.
 - The scope of remediation for naturally occurring soil contamination can be determined through risk assessment according to the Soil Environment Conservation Act; however, this rarely occurs in practice.
- Research objectives and overview
 - To develop institutional improvement measures for the proper management of contaminated sites resulting from natural causes

- To analyze domestic contamination status, remediation status, and related legal framework; to investigate foreign management systems for geogenic soil contamination in order to derive implications

II. Current Status of Geogenic Soil Contamination

1. Distribution of geogenic soil contaminants in Korea

- Analysis results of the soil monitoring network and soil information in environmental impact assessments for fluorine and arsenic
 - Average concentrations are lower than global averages, with fluorine at 157.5mg/kg and arsenic at 3.20mg/kg.
 - 2.1% of sites exceeded Zone 1 soil contamination concern levels for fluorine, while 0.5% exceeded those levels for arsenic.
 - High concentrations of fluorine and arsenic were mainly found in metropolitan and urban areas.
- Analysis results by geological unit
 - Fluorine: Many sites exceeding concern levels were found in gneiss, Jurassic granite, and alluvial layers.
 - Arsenic: Many sites exceeding concern levels were found in clastic sedimentary rocks and gneiss.
 - Few exceedances of both fluorine and arsenic were observed in porous volcanic rocks and carbonate rock areas.
- Correlation between geological characteristics and contamination distribution

- High fluorine concentrations were confirmed in granite and granite-derived gneiss.
- A high frequency of arsenic exceedances was observed in sedimentary rocks.
- While most wide-area regions are generally not at risk levels, there is potential for exceedances of concern levels at specific points due to geogenic sources.

2. Soil remediation status

□ Remediation performance for fluorine-contaminated soil

- Fluorine soil remediation accounted for 43% of total soil remediation sales in 2022.
- It represented 28% in terms of the number of contracts awarded.
- Most remediation projects were conducted without verifying the geogenic origin.

3. Major limitations in managing geogenic soil contamination

- There is a lack of regulations on specific investigation and evaluation methods to prove geogenic soil contamination.
- Definitions and judgment criteria regarding “soil contamination due to natural causes” are not clearly established.
- There is a lack of fundamental data on background concentrations by geological feature, along with limited disclosure of related information.
- Areas or projects with a high potential for geogenic soil contamination are not managed separately.
- When there is a need for shipping out of contaminated soil for its

remediation, it is excluded from risk assessment, leading to inefficiencies in the management system.

III. Risk-based Management of Contaminated Sites

1. Japan

- Japan's soil contamination management system
 - Objectives of the Soil Contamination Countermeasures Act
 - Identify soil contamination status by specific harmful substance
 - Stipulate preventive measures to mitigate health damage from contamination
 - Protect public health
 - Assessment of potential health damage
 - Considers groundwater consumption and public access
 - Issuance of an order to investigate contamination status when health risks are suspected
 - Designation and management of areas
 - Classified into areas requiring action and areas requiring notification of changes in land form
 - Area designation based on contamination status and potential health risks
 - Changes in land form principally prohibited in areas requiring action
 - Management of naturally occurring soil contamination
 - The law amendment in 2017 permitting the movement of naturally contaminated soil
 - Relaxed regulations to allow changes with only a notification

- Regulations regarding specific conditions for soil movement between special areas of naturally occurring contamination

2. Germany

- Germany's soil contamination management system
 - Risk assessment under the Federal Soil Protection Act
 - Considers types of contaminants, concentrations, potential for spread, etc.
 - Determines remediation levels based on risk assessment results
 - Operation of the soil condition monitoring program
 - Long-term soil monitoring areas (BDF) in operation since 1985
 - Continuous observation of general soil conditions and trends in changes
 - Evaluate the effectiveness of soil protection policies and provide a scientific basis
 - Soil evaluation (Bodenschätzung) system
 - Mapping and evaluation of agricultural land
 - Multi-purpose utilization including taxation, agricultural planning, and soil protection
 - Management of statistics related to contaminated sites
 - Compilation of statistics related to contaminated sites by the Federal/State Working Group on Soil Protection (LABO)
 - Identify suspected contaminated areas, confirmed contaminated sites, remediation status, etc.

3. Implications

- Need for a separate management system for naturally occurring contamination
- Need to introduce a risk-based soil contamination management system
- Need to establish a long-term systematic soil monitoring system
- Need for a comprehensive management approach that takes into account various functions and values of soil
- Need to establish a systematic management and sharing system for soil contamination-related information

IV. Appropriate Management Measures for Geogenic Soil Contamination

- Specify methods to prove naturally occurring soil contamination
 - Establishment of the Detailed Methods for the Investigation and Evaluation of Naturally Occurring Soil Contamination (Draft)”
 - Specify criteria for selecting investigation areas, sampling methods, analysis items, etc.
 - Present methods for analysis to compare with surrounding areas and methods to evaluate geological/geochemical characteristics
 - Include review items to exclude the possibility of artificial contamination
- Rationalize the management of geogenic soil contamination
 - Need to establish the legal definition of naturally occurring soil contamination
 - Resolve inconsistencies with the current legal definition of soil contamination

- Specify that contamination has resulted from geological causes and designate the area as subject to risk management
- o Develop differentiated management measures for geogenic soil contamination
 - Stipulate investigation methods, risk reduction measures, conditions for removal/movement, etc.

- Establish an integrated information system
 - o Build a long-term systematic soil monitoring system
 - Include various soil condition indicators, including physical, chemical, and biological characteristics
 - Utilize and integrate existing data from various fields
 - o Construct a comprehensive soil contamination information system
 - Include information on contamination sources, contaminated sites, remediation status, risk assessments, etc.

- Introduce a risk-based site management system
 - o Need to transition from the current system under the Soil Environment Conservation Act to a risk-based management system
 - Improve the legal framework, establish a risk assessment system, train professional personnel, etc.
 - Strengthen the risk communication system and expand institutional support

Keywords: Geogenic, Soil Contamination, Risk Assessment, Information System

■ 저자약력

신경희 (연구책임)

광주과학기술원 환경공학 박사
한국환경연구원 선임연구위원(현)
khshin@kei.re.kr

주요 연구실적

- 원자력발전소 해체 시 비방사성폐기물 관리 방안 (2020)
- 북한 토양·지하수 오염관리를 위한 남북협력 방안 (2019)
- 원자력시설 해체 부지의 재사용을 위한 환경관리 전략 (2018)

김경호

한국환경연구원 연구위원(현)
khkim@kei.re.kr

양 경

한국환경연구원 연구위원(현)
kyang@kei.re.kr

이지예

한국환경연구원 전문연구위원(현)
jylee@kei.re.kr

현윤정

한국환경연구원 선임연구위원(현)
yjhyun@kei.re.kr