

# 토양오염 현황과 대책

정 명 채 (세명대학교 자원환경공학과)

## 1. 서론

토양은 인간생활의 터전이자 식량자원의 생성장소이다. 일찍이 동양에서는 흙(土), 물(水), 불(火), 나무(木), 쇠(金)를 물질을 구성하는 5가지 기본단위로 인지하여 토양을 이용한 생활체제를 구축하였으며, 서양에서도 흙, 공기, 물, 불 등을 물질의 기본단위로 생각하여 상호 유기적인 관계를 유지하며 문명을 이어왔다. 그러나 근대 및 현대사회로 들어서면서 도시화와 산업화로 말미암아 토양생태계의 균형이 깨지고 있다. 그 결과, 지력이 떨어져 식량 작물 생산량이 감소되고 있으며, 연간 300~800억 톤의 토양이 유실되고 있다. 특히 20세기 들어서 토양의 자정능력속도 이상으로 가속화된 산업체계의 변화에 의해 토양오염의 진행속도가 매우 빠르게 진행되고 있지만, 아직도 그 심각성을 인식하지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 토양생성기간이 수 천년 이상이 필요하다는 사실을 인식하고 토양오염 문제를 해결하기 위한 지속적인 노력이 필요하다.

일반적으로 토양오염의 원인 중에서 주요한 점오염 원으로는 휴/폐광산, 불량매립지, 유해화학공업단지 등이 있다. 국내에는 900여개의 금속광산, 380여개의 석탄광산 및 1,200여개의 비금속광산을 포함하여 총 2,500개소의 크고 작은 광산들이 있으며, 이들 중에서 약 80%가 휴광 또는 폐광된 광산으로써 적절한 환경복원시설이 설치되지 않아 주변 생태계가 위협받고 있다. 특히 폐금속광산에서는 과거 채광이나 선광·제련과정 등의 광산활동으로 인하여 배출된 광산폐기물들(폐석, 광미, 광석광물, 광산폐수 등)이 광산주변에 그대로 방치되어 있어 집중 강우나 강풍에 의해 하부

로 분산되어 광산하부의 농경지와 수계의 환경오염을 계속적으로 일으키고 있다. 또한 전국에는 약 3,000여개의 불량매립지가 산재되어 있어 토양 및 지하수의 환경문제가 심각한 수준이다. 그리고 전국에 등록된 유해화학물질 오염유발시설이 무려 50,000여개로서 이들에 의한 유류오염, 발암성 독극물 및 일부 군부대의 토양환경오염은 심각한 수준이 아닐 수 없다.

한편, 토양의 오염은 여타의 환경오염과는 달리 그 진행 속도가 느리기 때문에 초기단계에서는 자각하기 어렵지만 장기적으로 오염이 진행된 경우에는 그 정화 및 복원에는 막대한 노력과 처리비용이 수반되어야 한다. 특히, 우리 나라와 같이 협소한 토지를 다양하게 활용해야 할 필요가 있는 사회에서는 토지의 청정성 확보는 사회의 지속적인 발전을 위해 무엇보다 중요하다. 물론, 국내에서도 대학, 연구소, 기업 및 정부가 주도하여 오염된 토양에 대한 조사, 정화, 복원, 위해성 및 경제성의 평가에 대한 기술 연구와 개발이 지속적으로 이루어지고 있으나, 각 분야의 연계성 확보에 실패하여 아직은 외국에서 이미 개발된 기술의 이해 및 재현의 단계에 머무르고 있다.

## 2. 토양환경 기준

일반적으로 환경오염은 대기, 수질, 폐기물, 토양과 지하수, 소음과 진동 등으로 구분하여 관련법을 제정하고 관리하고 있다. 외국의 환경선진국에서는 토양환경에 대한 중요성을 일찍부터 인식하여 1970년대부터 토양환경과 관련된 법을 제정하고 토양오염

을 줄이기 위한 다양한 노력이 이루어졌다. 1960년대 일본에서는 광산에서 배출된 카드뮴에 의한 이타이이타이병과 수은에 의한 미나마타병이 발생하여 현재까지도 많은 사람이 고통을 받고 있으며, 미국에서는 1970년대 후반에 뉴욕의 Love Canal에 버려진 매립지에서 다량의 유해폐기물이 유출되어 주변의 토양과 지하수 오염가 오염되는 사고가 발생한 바 있다. 이를 계기로 자원보전과 자원재활용에 관한 법률(Resource Conservation and Recovery Act, 1976, RCRL)을 제정하였으며, 1980년과 1984년도에는 이를 강화하여 새로운 오염원을 제어하도록 하였다. 또한 1980년에는 종합 환경문제 대응, 보상, 책임에 관한 법률(Comprehensive Environmental

Response, Compensation and Liability Act, 1980, CERCLA)을 제정하였으며, 이를 기초로 'Superfund program'을 운영하고 있다. 이외에도 다양한 국가에서 토양환경에 대한 환경기준 강화와 효과적인 오염처리를 위한 연구사업을 지속적으로 추진하고 있다(한국지하수토양환경학회, 2001).

한편, 우리 나라에서도 토양오염의 중요성을 인식하고 이를 효과적으로 대처하기 위해 1995년 1월에 '토양환경보전법'을 제정하여 토양환경에 대한 종합적 대책과 정책을 수립하고 있다. 초기에는 우리 나라의 토양환경보전법에 제시된 토양오염물질은 총 11개였지만, 2001년도에 이를 개정하여 TCE, PCE, Zn, F, Ni 등의 오염물질에 대한 환경기준도 설정하였으며, 향후 의

표 1. 토양오염 우려기준 및 토양오염 대책기준

(단위 : mg/kg)

오염물질	토양오염 우려기준		토양오염 대책기준	
	가 지역	나 지역	가 지역	나 지역
카드뮴	1.5	12	4	30
구리	50	200	125	500
비소	6	20	15	50
수은	4	16	10	40
납	100	400	300	1,000
6가크롬	4	12	10	30
아연	300	800	700	2,000
니켈	40	160	100	400
불소	400	800	800	2,000
유기인화합물	10	30	-	-
폴리클로리네이티드비페닐	-	12	-	30
시안	2	120	5	300
페놀	4	20	10	50
유류(동·식물성제외)				
벤젠·톨루엔·에틸벤젠·크실렌(BTEX)	-	80	-	200
석유계총탄화수소(TPH)	-	2,000	-	5,000
트리카로로에틸렌(TCE)	8	40	20	100
테트라카로로에틸렌(PCE)	4	24	10	60

비고 :

1. 가지역 : 지적법 제5조제1항의 규정에 의한 전·답·과수원·목장용지·임야·학교용지·하천·수도용지·공원·체육용지(수목·잔디 식생지에 한한다)·유원지·종교용지 및 사적지
2. 나지역 : 지적법 제5조제1항의 규정에 의한 공장용지·도로·철도용지 및 잡종지
3. 다음 각목의 1에 해당하는 경우에는 지목 구분에 관계없이 나지역 토양오염우려(대책)기준을 적용한다.
  - 가. 토양오염유발시설이 설치된 경우
  - 나. 가지역에서 폴리클로리네이티드비페닐 또는 유류에 의한 토양오염사고가 발생한 경우
  - 다. 가지역을 제외한 지역에서 토양오염사고가 발생한 경우

국의 경우와 같이 더 많은 오염물질을 규정할 계획이다. 현재는 토양오염의 기준항목인 16개 토양오염물질에 대하여 가, 나지역으로 토양의 용도를 구분하고 각각에 대하여 오염정도에 따라 토양오염 우려기준과 토양오염 대책기준으로 구분하였다. 즉, 오염의 정도가 사람의 건강과 동·식물의 생육에 지장을 초래할 우려가 있어 토지의 이용중지, 시설의 설치금지 등 규제조치가 필요한 정도의 오염상태를 토양오염대책기준으로 설정하고, 대책기준의 약 40% 정도의 기준으로서 더 이상의 오염이 심화되는 것을 예방하기 위한 오염수준을 토양오염우려기준으로 구분하여 설정하였다(표 1).

향관에 따라 대기, 수질, 토양, 지하수, 폐기물, 소음 및 진동 등으로 구분하고 있다. 이러한 분류를 기초로 각 오염에 대한 오염원, 오염물질, 발생기구 및 그 영향을 고찰하면(표 2), 토양오염의 원인으로는 지질학적 풍화과정에 의한 중금속의 노출, 광산 및 제련활동 등의 광업활동에 의한 오염, 산업화와 도시화에 의한 오염과 유류오염 등으로 요약할 수 있다. 최근에는 불량매립지와 군사시설에서의 토양오염 문제도 자주 발생되고 있다.

### 3. 토양오염 현황

#### 3.1 환경오염원

일반적으로 환경에 영향을 주는 오염원은 주된 영

#### 3.2 토양측정망의 운영

국가에서는 전국 토양에 대한 환경오염실태와 변화 추이 등을 종합적으로 파악하여, 토양오염의 사전 예방, 오염토양의 정화·복원을 포함한 토양환경 보전정책의 기초자료로 활용하기 위하여 1987년부터 전국 토양에 대한 오염도를 조사하고 있다. 이 사업은 환경정책기본법 제15조(환경오염조사)와 토양환경보전법

표 2. 오염원별 오염물질, 발생기구 및 영향

	오염원	오염물질	발생기구	영향
대기	암석(방사능물질)	U, Th, Rn	풍화	방사능 유입
	화석연료의 소각	SOx, NOx, CO, CO2	연료의 불완전 연소	산성비, 광화학적 스모그, 산소 결핍, 온실효과 등
	공장, 산업활동	유독성 가스, 분진	연료의 소각, 보일러 등	산성비, 호흡기 장애 등
	자동차 배기가스	Pb, SOx, NOx, CO, CO2	antiknocking제, 연료연소	납중독, 호흡기 질병 등
	염화불화탄소	염소	Cl + O3 → ClO + O2 ClO + O3 → Cl + 2O2	오존층의 파괴, 자외선 노출, 피부병
수질	공장, 산업폐수	BOD, 유기물, 무기물	냉각수, 산업용수	수계오염, 수온증가, 부영양화
	생활하수	유기물, 무기물	세탁, 조리 등	하수오염, 하천오염
	광산폐수	중금속, 산성수	철의 산화, 황색침전, 백색 침전, 중금속의 용출	산성수의 유출, 하천수의 중금속오염
	농업폐수	NH4-N, 유기인	축산폐수, 비료와 살충제	하천오염, 부영양화
	유조선	유류	좌초, 침몰	해양의 유류오염
토양	지질학적 물질	방사능 물질, 흑색 세일	풍화	농경지오염, 수계오염
	광산, 제련활동	중금속, 분진	채광, 선광, 정광 등	중금속 농축, 호흡기장애
	산업활동	중금속, 분진	굴뚝, 수계유출	중금속 농축
	도시화	유기물, 무기물, 분진	도시활동	중금속 농축, 호흡기장애
	유류업	휘발성유기물 (VOCs)	유류의 유출	휘발성물질의 흡수
기타	핵발전소	방사능(고, 중, 저준위)	방사능 붕괴	수용성 방사능 유출
	폐기물	산업화, 도시화	복합적인 오염물질	동식물, 인간 건강 장애

제5조(토양오염도 조사) 및 동법시행규칙 제2조에 의거하여, 환경부(자연보전국 토양보전과)와 시도(보건환경연구원)에서 주관하며, 1987년에 250개 지역 조사를 시작으로 매년 운영하였으며, 1991~1995년까지는 격년제로 운영하다가 1997년부터 전국망과 지역망으로 이원화하여 운영하였다(환경부 홈페이지). 그리고 2002년부터 지역망은 토양오염실태조사 체계로 변경되어 실시하고 있다(표 3). 2001년에는 1,500지점의 전국망과 3,000지점의 지역망을 운영하였다. 이 사업은 전국토의 토양오염에 대한 실태와 변화 추이를 조사하여, 토양오염의 사전 예방과 오염토양의 정화 및 복원을 포함하는 향후 관리시스템의 운영과 종합적 환경보전을 위한 기초자료로 활용되고 있다.

가장 최근인 2001년도 조사에 의하면, 토양측정망 4,500개 조사지점중 20개 지점(약 0.4%)이 토양오염 우려기준을 초과하였으며, 9개 지점은 토양오염 대책기준을 초과하였다. 이를 중에서 전국망(토지이용도별)의 2개지점에서 As, Cd 오염물질이 토양오염우려기준을 초과하였으며, 토지이용도별로는 체육용지 1개와 전(田) 1개소(경인청 1, 금강청 1)이며, 오염원별로는 제련소주변 1개소 (As 초과), 기타지역 1개소 (Cd 초과)가 우려기준을 초과하였고 제련소주변 1개소에서는 대책기준을 초과하였다. 한편, 지역망(오염원별)의 18개 지점에서 Cu, Cd, As, Pb, Hg 등의 오염물질이 토양오염우려기준을 초과하였으며, 8개 지점은 토양오염대책기준을 초과하였다. 오염원별로는

금속광산 주변 13, 하천주변 2, 특수용수 1, 공업지역 1, 원광석·고철야적 등 지역 1개소이며, 이를 토지이용도별 보면 답 11, 전 3, 공장용지 1, 구거 1, 임야 1, 도로 1 개소이며, 대책기준초과지역은 광산주변 6, 하천주변 1, 특수용수 사용지역 1개소로 조사되었다(환경부 홈페이지).

### 3.3 대표적인 토양오염 사례

그 동안 국내에서는 몇 차례의 토양오염이 발생되었다. 전술한 토양측정망의 운영 결과에서도 알 수 있듯이 국내의 토양오염 우려 또는 대책기준을 초과하는 대부분의 경우는 광산 개발로 인한 주변 토양의 중금속 오염과 이들에 의한 농작물의 중금속 농축 사례로 조사되었다. 이에 대한 자세한 내용은 매우 방대한 내용이 수록되어야 하므로 이 논고에서는 개략적인 내용만을 수록하고자 한다. 광산 개발로 인한 환경문제에 대한 대표적인 사례로는 경기도 광명시의 가학광산, 충남 청양군의 구봉광산, 경남 기장군의 일광광산 주변 농경지의 중금속 오염 등이다. 국가에서는 광산지역에 대한 환경오염문제가 제기되면서 1995년 경기도 광명시의 가학광산을 대상으로 국고보조 19.2억원을 포함하여 총 38.4억원을 투자하여 정화작업을 시작한 이후, 1996년에는 달성광산, 서점광산, 구운동광산을 복원하였으며, 2002년까지 총 22개 광산을 대상으로 총 사업비 304.7억원(정부보조금 50% 포

표 3. 토양측정망 운영 상황

구 분		토양환경법 시행 이전			토양환경보전법 시행 이후	
년 도		'87~'90	'91~'95	'96	'97~'98	'99~2001
조사 지점	계				3,000	4,500
	전국망	250~254	520	780	1,000	1,500
	지역망				2,000	3,000
조사주기		년 1회	격년 1회		년 1회	
조사 항목	전국망	9개(pH, Cd, Cu, As, Pb, Hg, Zn, Cr, Ni)	7개(pH, Cd, Cu, As, Pb, Hg, Zn)	9개(pH, Cd, Cu, As, Pb, Hg, CN, Cr+6, 페놀)	12개(pH, Cd, Cu, As, Pb, Hg, Cr+6, CN, 유류, PCB, 페놀, 유기인)	12개 - 단, 토지이용도에 따라 구분 조사
	지역망				9개(pH, Cd, Cu, As, Pb, Hg, Cr+6, CN, 유류)	11개 - 단,오염원에 따라 구분조사

함)을 투자하여 광해복원사업을 추진한 바 있다(환경부 홈페이지). 하지만 아직도 국내의 광산에서의 중금속 환경오염은 지속적으로 발생되고 있다. 특히, 2002년도 여름에는 태풍 '루사'에 의해 강원도와 경상도 일부 지역 휴/폐광산의 광미땀이 붕괴 사고가 발생되기도 하였다. 이외에도 과거 미군부대에서 배출된 유류와 중금속을 함유한 폐기물을 단순히 매립하여 주변의 토양과 지하수가 오염되는 사고가 빈번하게 일어나고 있으며, 아직도 그 정화에 대한 책임에 대한 의견이 양립되어 있는 실정이다. 다행히 부산의 문현지구의 경우, 국가에서 이를 정화하는 사업을 추진하고 있으며, 지역을 밝힐 수는 없지만 국가공공기관 부지와 일부 개인 소유 토지에서 유류 또는 중금속

에 의한 토양오염이 보고되고 있으며, 이를 정화하기 위한 사업이 지속적으로 추진되고있다.

#### 4. 토양오염 복원 기술

일반적으로 토양오염을 정화하기 위한 처리 기술은 적용기술의 위치에 따라 현장처리기술과 이동처리 기술로 구분하고 있으며, 각각은 생물학적 처리 기술, 물리화학적 처리 기술, 열적처리기술 및 기타 등으로 세분하기도 한다(표 4). 다음은 일반적으로 적용되고 있는 오염토양 정화기술을 간략하게 요약한 것이다 (환경부 홈페이지).

표 4. 토양오염 처리 기술 분류

처리 위치	처리 방법	처리기술 종류
In-situ	생물학적	1. Biodegradation
		2. Bioventing
		3. White Rot Fungus
	물리화학적	4. Pneumatic Fracturing
		5. Soil Flushing
		6. Soil Vapor Extraction
		7. Solidification/Stabilization
	열적	8. Thermally Enhanced SVE
		9. Vitrification
	기타	10. Natural Attenuation
Ex-situ	생물학적	11. Composting
		12. Controlled Solid Phase Biological Treatment
		13. Landfarming
		14. Slurry Phase Biological Treatment
	물리화학적	15. Chemical Reduction/Oxidation
		16. Dehalogenation(BCD)
		17. Dehalogenation(Glycolate)
		18. Soil Washing
		19. Soil Vapor Extraction
		20. Solidification/Stabilization
		21. Solvent Extraction(chemical extraction)
		22. High Temperature Thermal Desorption
	열적	23. Hot Gas Decontamination
		24. Incineration
		25. Low Temperature Thermal Desorption
		26. Open Burn/Open Detonation
		27. Pyrolysis
		28. Vitrification
	기타	29. Excavation, Retrieval and off-site Disposal

## 4.1 현장처리기술(In-situ technology)

### 4.1.1 생물학적 처리

#### 1) Biodegradation(in-situ)

Water-based solution을 오염토양 내로 순환시킴으로써 토착미생물의 활성을 증진하여 유기물 분해능을 증대시키는 기술이며, 미생물의 생분해 능력 및 토양으로부터의 오염물질 흡수능력을 증대시키기 위하여 영양물질, 산소 및 기타 첨가제 등이 사용된다.

#### 2) Bioventing

오염된 불포화 토양에 공기를 주입하여 휘발성의 오염물질을 기화하여 이동시키는 한편, 토양내 산소 농도를 증대시킴으로써 미생물의 생분해능을 증진시켜 처리하는 기술이다.

#### 3) White Rot Fungus

White rot fungus는 리그린 분해효소를 분비하여 TNT등 난분해성의 폭발성 물질들을 잘 분해시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다. 지중 및 생물 반응기에서의 시험이 수행된 바 있으며 아직 pilot plant단계의 기술이다.

### 4.1.2 물리 화학적 처리기술

#### 4) Pneumatic Fracturing

투수계수가 낮고 압밀된 오염지반에 압축공기를 주입하는 기술로서 주로 다른 처리기술의 보조적 기술에 해당한다. 여타 지중 정화기술 적용 시 오염물 처리 및 추출효율을 증대시킨다.

#### 5) Soil Flushing

물 또는 오염물질 용해도를 증대시키기 위한 첨가제를 함유한 물을 토양 공극내에 주입하여 토양 오염물질을 추출하여 처리하는 기술이다. 보통 양수된 물은 처리하는 지상처리장치가 함께 사용한다.

#### 6) Soil Vapor Extraction (SVE) (in-situ)

오염토양내에 추출정을 굴착하여 진공 상태로 만들어 흡입력 및 농도구배를 형성하여 토양내의 휘발성 오염물질을 휘발, 추출하는 기술로서, 오염물질은 배출가스 처리공정에서 처리된다.

#### 7) Solidification/Stabilization (S/S) (in-situ)

시멘트 등의 고화제를 섞어 오염토양을 물리적으로

로 안정한 상태의 고화체로 만드는 한편 오염물질의 이동을 물리적으로 구속시키거나, 고화제와의 화학반응에 의해 토양내 오염물질의 독성과 이동성을 감소시키는 방법이다. 안정화 효과를 높이기 위해 첨가제를 쓰기도 한다.

### 4.1.3 열적 처리기술

#### 8) Thermally Enhanced Soil Vapor Extraction

준휘발성 물질의 이동성을 증진시키고 추출이 용이하도록 하기 위해 증기 및 뜨거운 공기를 주입하거나, 전기 또는 무선주파수에 의해 가열해 주는 기술이며, 기타사항은 SVE와 동일하다.

#### 9) Vitrification

전기적으로 오염토양 및 슬러지를 용융시켜 용출 특성이 매우 작은 결정구조로 만드는 방법이다.

### 4.1.4 기타 처리기술

#### 10) Natural Attenuation

토양 또는 지중에서 자연적으로 일어나는 희석, 휘발, 생분해, 흡착 그리고 지중 물질과의 화학반응 등에 의해 오염물질 농도가 허용 가능한 수준으로 저감되도록 유도하는 방법이다. 이 공정을 선택하기 위해서는 모델링, 오염물질 분해율, 처리방식 등에 대한 평가가 필요하며, 따라서 오염을 방지하는 것(no action)과는 다르다.

## 4.2 이동처리기술(Ex-situ technology)

### 4.2.1 생물학적 처리기술

#### 11) Composting

오염토양을 굴착하여 팽화제(bulking agent)로 나무 조각, 동식물 폐기물과 같은 유기성 물질을 혼합하여 공극과 유기물 함량을 증대시킨 후 공기를 주입하여 오염물질을 분해시키는 기술이다.

#### 12) Controlled Solid Phase Biological Treatment

굴착된 토양을 토질개량제와 혼합시켜 침출수 집

수시설 및 폭기시설이 갖추어진 처리용 ब्ल럭 상부에 펼쳐 놓고 생분해시키는 공정을 말하며, 생분해도 증진을 위하여 수분, 열, 영양물질, 산소, pH가 인위적으로 조절된다.

### 13) Landfarming

오염토양을 굴착하여 지표면에 깔아 놓고 정기적으로 뒤집어주어 공기를 공급해주는 호기성 생분해 공정이다.

### 14) Slurry Phase Biological Treatment

굴착된 오염 토양을 물 및 기타 첨가제와 적절히 혼합해 줌으로써 slurry상태로 만들어 반응기 내에서 생물학적 방법으로 처리한 다음 탈수시켜 처분한다.

## 4.2.2 물리화학적 처리기술

### 15) Chemical Reduction/Oxidation

굴착된 토양중의 오염물질을 산화-환원반응을 이용하여 안정화시켜 무독성 또는 저독성 화합물로 전환시키는 기술을 말한다. 산화제로는 오존, 과산화수소, 차아염소산 그리고 이산화 염소가 일반적으로 널리 사용된다.

### 16) Dehalogenation(Base-Catalyzed Decomposition)

유기염소화합물로 오염된 토양을 굴착하여 체로 거르거나, 잘게 부순 다음 NaOH와 같은 촉매제와 혼합, 로터리 반응기내에서 330℃이상으로 가열하여 탈할로겐화 하거나 부분적으로 휘발시킨다.

### 17) Dehalogenation(Glycolate)

PCBs등과 같은 할로겐화 방향족 화합물에 alkaline polyethylene glycol(APEG)을 혼합, 처리용기내에서 가열하여 탈할로겐화로 독성을 제거한다.

### 18) Soil Washing

오염 토양을 굴착하여 토양 입자 표면에 부착된 유/무기성 오염물질을 세척액으로 분리시켜 이를 토양 내에서 농축, 처분하거나, 재래식 폐수처리방법으로 처리한다. 중금속 오염토양 처리 방법으로 매우 유력한 기술이다.

### 19) Soil Vapor Extraction(ex-situ)

오염 토양을 굴착하여 지상에 쌓은 후 증기추출관

망을 그 내부에 설치하여 진공을 걸어줌으로써 오염물을 휘발시켜 추출, 처리한다. in-situ SVE와 비교해 볼 때 추출관망 설치가 용이하고, 지하수위에 의한 제한요소가 제거되며, 침출수 집수가 가능하고, 모니터링이 용이하다는 장점이 있는 반면, 굴착에 소요되는 비용으로 인해 전체 비용이 증가되는 단점이 있다.

### 20) Solidification/Stabilization(ex-situ)

처리공정은 in-situ S/S 기술과 동일하나 ex-situ S/S 기술은 처리후 토양의 처분작업이 필요하다. 주요 처리대상 물질은 방사성물질을 포함하는 무기성 오염물질이다.

### 21) Solvent Extraction

오염토양을 추출기내에서 용제류와 혼합시켜 오염물질을 용해한 후 분리기에서 분리하여 처리 또는 재사용 한다.

## 4.2.3 열적 처리기술

### 22) High-Temperature Thermal Desorption

폐기물 내의 유기오염물질을 315~538℃로 가열하여 휘발시킨 후 가스처리시스템으로 이송 처리하는 기술이다.

### 23) Hot Gas Decontamination

오염된 장비 및 물질에 대하여 일정한 시간동안 온도를 상승시켜, 이로부터 발생된 가스성분내의 모든 휘발성 오염물질을 연소한 후 시스템(afterburner system)내에서 처리하는 기술이다.

### 24) Incineration

산소가 존재하는 상태에서 오염토양을 871~1,204℃의 고온으로 가열하여 유기오염물질을 소각 분해시킨다. 유기성 물질로 오염된 토양에 대한 유력한 처리법이다.

### 25) Low-Temperature Thermal Desorption

오염토양 내의 수분 및 유기오염물질을 93~315℃로 가열, 휘발시켜 가스처리시스템으로 이송되어 처리한다. High-Temperature Thermal Desorption에 비하여 휘발성이 큰 오염물질에 적용되며 비할로겐화 VOCs나 유류처리에 적합하다.

26) Open Burn/Open Detonation(OB/OD)

폐화약 및 폭약류 또는 이들 물질로 심하게 오염된 토양을 처리하는 기술로, OB시스템에서는 외부 점화 후 자체 소각열에 의해 연소되며, OD 시스템에서는 초기 폭발을 유도한 후 자체적인 연쇄폭발에 의해 처리된다.

27) Pyrolysis

산소가 없는 상태에서 열을 가하여 오염토양중의 유기물을 분해시키는 방법으로서, 이때 유기물질은 가스상 물질과 고정 탄소 및 재를 포함하는 고형잔류물로 전환된다.

28) Vitrification(ex-situ)

굴착된 오염토양과 슬러지를 전기로 용융시켜 용출특성이 매우 적은 결정구조로 만드는 방법이다.

4.2.4 기타 처리기술

29) Excavation Retrieval and Off-Site Disposal

오염물질을 오염부지에서 제거하여 허가된 처리 처분 시설로 이송하는 방법이다. 따라서 이 방법은 후속처리 과정에서 비로소 실제 처리가 이루어진다.

4.3 외국의 기술 현황

토양오염 정화 기술의 선도적인 역할은 미국에서는 Superfund 사업을 통해 지속적인 정화사업을 추진하고 있다. 물론 처리 물질의 성상, 오염도 정도 및 물리화학적 특성에 따라 적용되는 기술은 다양하겠지만 오염토양의 처리에 활용된 기술을 통계적으로 조사한 결과(US EPA, 2001)에 의하면, 739개 오염부지에서 이동처리(58%)가 현장처리(42%) 보다 우위를 차지하고 있으며, 특히 고형화와 안정화의 비율이 가장 높은 편이다(표 5). 또한 US EPA의 비용분석에 의하면(그림 1), 오염물질 처리비용에서 열적처리기술(vitrification)이 400-870\$/ton으로 가장 고가이며, 저장기술이 10-80\$/ton으로 최소의 비용이 요구된다(US EPA, 1997). 최근에는 과거의 화학적 처리 방법에서 탈피하여 오염토양이 자연적으로 정화

될 수 있는 여러 가지 방법들이 고안되어 현장에 적용되고 있다.

5. 토양오염 대책

앞에서 기술한 바와 같이 토양오염의 주요한 원인은 휴/폐광산, 불량매립지, 유해화학공업단지 등의 산업화와 도시화에 의한 것들이다. 이러한 오염원에서는 지속적으로 중금속을 포함하는 무기오염물질과 유기오염물질들이 배출되고 있다. 그러므로 토양오염을 줄이기 위해 다음과 같은 노력이 필요하리라 판단된다.

1) 토양오염원의 현황 파악과 오염도 조사 사업의 추진

우선, 토양오염을 유발하는 시설 또는 장치들의 현황 파악이 이루어져야 할 것이다. 토양오염을 일으키고 있는 다양한 오염원들을 오염물질별로 구분하여 원인 규명과 함께 그 오염도를 지속적으로 측정, 관리해야 한다. 그 동안 국가와 지방자치단체에서는 토양오염측정망을 운영하면서 토양오염원의 규명과 오염도 분석을 위한 투자를 계속해 왔지만 아직도 국가 전체에 대한 토양오염도에 대한 기초적 자료마저도 불충분한 상태이다. 외국의 경우, 토양 또는 하상퇴적물을 활용하여 지구화학도(geochemical map)를 작성하여 오염도가 높은 지역을 'hot spot'으로 규정하고 지속적인 관리를 하고 있다. 우리 나라에서도 기본적인 지구화학도는 발간되었지만 아직도 많은 자료가 부족한 형편이므로 이를 위한 투자가 이루어져야 한다.

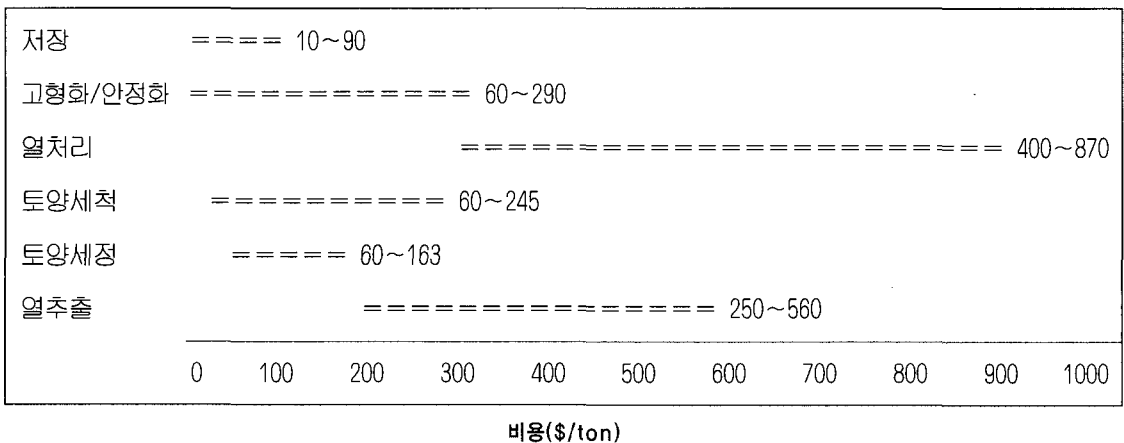
2) 오염물질의 물리화학적 특성 규명 사업의 추진

오염물질은 기후, 식생, 수계의 특성 및 오염물질의 화학적인 형태 등에 따라 그 독성이 다를 수 있다. 예를 들면 발암성물질로 알려진 비소의 경우, 3가의 비소가 5가의 비소에 비해 그 독성이 매우 강하므로 오염물질이 어떤 화학적 형태이며 어떠한 환경에 노출되었는가에 대한 정확한 분석과 평가가 필요하다. 이러한 연구의 결과는 위해성 평가와 오염물질의 처



표 5. 1982~1999년간 미국의 Superfund site에 적용된 기술통계(US EPA, 2001)

이동처리				현장처리				
기술	처리장 수	%	기술	처리장 수	%			
화학처리	10	1	토양증기추출	196	26			
소각(on-site)	42	6	현장 고형화/안정화	46	6			
생물복원	49	7	현장 생물복원	35	5			
열탈착	61	8	현장 토양세정	16	2			
소각(off-site)	94	13	기타 기술	열적 회수	6			
고형화/안정화	137	19				화학처리	5	
기타 기술	중화	7				식물정화	5	
	토양세척	6				이중상추출	3	
	기계적 토양 산화	5				전기분해	1	
	토양증기추출	5				열처리	1	
	용매추출	4				소계	21	3
	개방형 소각(분해)	2						
	열처리	2				계	314	42
물리적 분리	1	계				425	58	
소계	32	4						



참고1 : 저장기술은 caps와 slurry walls를 포함함  
 참고2 : 토양세정은 \$/yd<sup>3</sup>이며, 토양밀도는 100lb/ft<sup>3</sup>을 가정함

그림 1. 오염토양정화를 위한 기술들의 비용분석(US EPA, 1997)

리와 정화를 위한 기본적인 자료가 되므로 이에 대한 투자도 이루어져야할 것이다.

3) 오염처리 기술의 개발 사업의 추진

외국에서는 앞에서 기술한 다양한 토양오염처리기술이 개발되어 대부분 상용화 및 실용화 단계에 이르고 있지만 국내에서는 아직도 이들 기술의 답습에 머

무르고 있다. 물론 유류를 포함하는 탄화수소계의 오염처리와 일부 중금속과 산성광산배수의 정화기술은 외국기술 수준 대비 50~70% 수준이지만 여전히 많은 기술이 개발되어야 한다. 특히 이들 오염처리기술은 단기간의 연구로는 획득할 수 없는 것이므로 장기적인 투자와 집중적인 노력이 필요한 부분이다.

4) 지속적인 토양오염 관리와 대책의 수립

국가의 환경정책과 환경분야 투자에서 토양환경부분이 차지하는 비율이 결코 높지 않는 것이 현실이다. 이는 성과중심의 투자에 기인한 잘못된 현상으로써 분명히 고쳐야할 부분이다. 현재 환경분야의 가장 큰 연구 프로젝트인 ‘차세대 핵심환경기술개발사업’에서도 토양분야에 대한 비율이 낮으며 토양분야의 대부분 과제는 유기오염물질의 정화 사업이 차지하고 있어 무기오염물질의 처리를 위한 기술 개발이 둔화될 수도 있다. 그러므로 균형적인 환경기술개발의 투자와 함께 국가에서 종합적인 토양오염의 관리를 실시하고 연구 인프라 구축과 연구자의 질적 수준 향상을 위한 노력이 필요하다.

6. 결론

21세기에 들어서서 환경에 국민의 관심이 더욱 높아지면서 우리 나라에서는 2007년까지 세계 7위권 수준의 환경국가를 이룩하기 위한 ‘환경기술개발종합계획’이 지난해에 수립되었다. 2000년을 기준으로

세계의 환경시장규모는 약 5,800억불로서 미국, 독일, 일본 등의 선진국이 80% 이상을 점유하고 있으며, 2010년까지 연평균 6%, 아시아 환경시장은 18%까지 성장될 것이라는 보고가 나오고 있다(홍길표, 2002). 이 보고서에 의하면 국내 환경시장규모는 GDP의 1.5%인 약 8조원으로 평가하고 있다. 이러한 거대한 환경시장에서 토양환경에 대한 시장규모를 평가하기는 어렵지만 그 동안 토양환경 부분의 연구 투자와 기술의 개발은 매우 미약한 수준에 불과하였다. 하지만 이제는 토양환경의 보전과 오염된 토양의 정화 및 복원을 위해 노력할 시점이 되었다.

앞에서 기술한 바와 같이, 여타의 오염과는 달리 장시간의 노출 후에 감지되는 토양오염의 특성을 고려한다면 국가, 지방자치단체 및 연구기관들의 지속적인 노력이 요구된다. 장기적으로 토양오염에 대한 계획을 수립하고 이를 적극적으로 추진해야할 것이다. 다행히 최근에는 토양오염에 대한 관심이 높아지고 있으므로 토양환경보전을 위한 대책사업의 추진과 최적관리시스템의 수집이 절실하며, 모든 국민의 참여를 기대한다.

참고문헌

1. 한국지하수토양환경학회, 2001, 토양환경공학, 서울, 향문사, 394p.
1. 홍길표, 2002, 환경기술개발종합계획 수립배경 및 의의, 한국기술진흥원, 환경기술개발, 제 30호, p.6~11.
2. US EPA, 1997, Engineering Bulletin: Technology Alternatives for the Remediation of Soils Contaminated with As, Cd, Cr, Hg, and Pb, US EPA/540/S-97/500, 20p.
3. US EPA, 2001, US EPA Annual Report, EPA-542-R-01-004, US EPA, 38p.
4. 환경부 홈페이지, <http://www.me.go.kr>