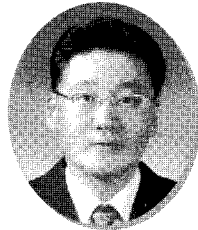


# 미국 내 토양 및 지하수 오염복원 기술 동향



주진철  
한국건설기술연구원  
선임연구원  
(jcjoo@kict.re.kr)

## 1. 서론

토양은 대기 계, 수 계와 함께 생명을 구성하는데 필요한 원소들을 저장, 순환시키는 지구상의 가장 기초적인 계이며 다양한 유기물과 무기물의 복합체인 유한한 자원이다. 그러나 인구증가에 따른 도시의 확장, 급속한 산업화, 소비생활의 향상 등으로 토양으로 배출되는 오염물의 종류와 양은 급증하여 토양과 지하수 오염이 지속적으로 발생하고 있으며 이로 인해 토양생태계가 파괴되고 다시 인간에게 직, 간접적인 부정적 영향을 끼친다. 특별히 토양 및 지하수 오염은 대기나 수질 오염에 비해 많은 처리 비용과 시간이 요구되며 장기간 피해를 야기하는 만성적인 영향을 주게 된다.

국내의 경우 전국적으로 산재해 있는 유류 및 유해

물 관련시설, 미군부대를 포함한 군부대 시설, 휴·폐광산 지역, 폐기물 매립지 및 소각장 등에서 발생한 유출수 및 침출수 등에 의한 점 오염원 뿐 아니라 골프장, 농경지 등 기타 비점 오염원에서 발생하는 각종 오염물의 증가로 인해 토양 및 지하수 오염이 심화되고 있다. 실제 환경부에서 2006년에 조사한 전국 3,794개 지점에 대한 토양 측정망 및 실태조사 결과에 따르면 90개 지점(2.4%)이 토양오염우려기준을 초과하였고, 이중 37개 지점(1.0%)이 토양오염대책기준을 초과한 것으로 나타났다(환경부 2007).

하지만 국내의 토양 및 지하수 오염 복원산업은 전체 환경산업 내 5% 내외(2005년 기준)로 대기 및 수질 환경산업에 비해 상대적으로 낮은 실정이며(김태용 2004), 선진국의 토양 및 지하수 오염 복원기술 수준에 비해 다양성 및 현장적용성에서 미비한 실정이

다. 그러나 토양 및 지하수 오염 복원산업의 규모가 점차 확대되고, 특별히 23개의 주한미군 반환기지의 토양 및 지하수 복원 시 요구되는 비용이 2조원에 이를 것으로 밝혀졌다(국회환경노동위원회 2007). 따라서 국내의 환경산업 여건변화에 적극 대처하기 위해 환경부에서는 차세대핵심기술개발사업의 일환으로 오염토양/지하수복원기술을 지원하고 있으며 핵심기술이 완료되는 2010년에는 국내의 토양 및 지하수 오염 복원기술이 선진국 대비 70~80% 수준에 이를 것으로 전망하고 있다(박정구 2007).

따라서 본 보고서에서는 세계 환경시장에서 큰 비중을 차지하고 있고 수출 전략 육성 1순위 산업으로 환경산업을 집중 지원하고 있는 미국 내 토양 및 지하수 오염 복원기술의 동향을 미국 EPA(Environmental Protection Agency)에서 2007년 9월에 발간한 Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report(12th ed.)에 근거하여 살펴보고자 한다. 또한 최근의 국내의 토양 및 지하수 오염 복원기술 연구동향을 간략히 소개하고자 한다.

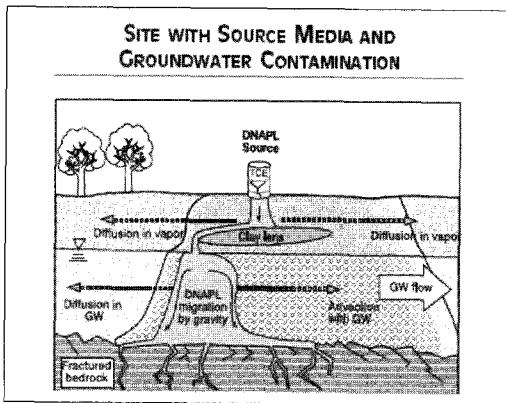


그림 1. 고밀도 비수용상액체(DNAPL: Dense Non Aqueous Phase Liquid)에 의해 오염된 오염매체(source media)와 지하수(groundwater) (EPA 2007)

## 2. 본론

미국 EPA에서 2007년에 발간한 연차동향보고서 (Annual Status Report, 12th ed.)는 NPL(National Priority Lists)에 등재된 각 오염지역의 오염된 토양, 고형 및 액상폐기물 그리고 지하수의 복원에 적용된 기술을 서술하였으며, 그림 1과 같이 오염원/오염매체(source/source media)와 지하수 (groundwater)의 오염을 구분하여 각각 해당하는 복원기술의 동향을 조사하였다. 또한 표 1에는 오염원/오염매체와 지하수의 오염을 복원하는 기술을 각각 처리기술

표 1. 오염원/오염매체(source/source media)과 지하수(groundwater) 오염의 복원기술 종류(EPA 2004, 2007)

Remedy Types		Source Media	Groundwater
Treatment	Active	Ex-situ physical, chemical, and biological treatment	Pump and Treat
	Passive	In-situ physical, chemical, and biological treatment	In-situ physical, chemical, and biological treatment
Containment	Active	Land filling	Vertical, engineered, subsurface impermeable barrier
	Passive	Caps, liners, covers, and walls	Monitored natural attenuation
Other		Institutional controls, monitoring, and population relocation	Water use restriction, alternative water supply

## 미국 내 토양 및 지하수 오염복원 기술 동향

(treatment technologies)과 저장기술(containment technologies)로 분류하여 정리하였다.

### 2.1 오염원/오염매체 복원기술

#### 2.1.1 오염원/오염매체 복원기술 동향

지반 내 오염원/오염매체는 토양, 침적물, 슬러지, 고형 폐기물 및 비수용상액체(NAPL)를 포함하지만 지하수 오염은 포함하지 않는다. 지반 내 오염원/오염매체 복원기술은 표 1과 같이 분류할 수 있으며, 1982~2005년에 적용된 총 2,976개의 복원기술 중 67%인 1,994개의 복원기술이 오염원/오염매체 복원기술로 적용되었으며 이 중 (1) 오염원/오염매체 처리기술은 1,104건, (2) 오염원/오염매체 저장기술은 731건, 그리고 (3) 기타 복원기술은 159건이 되었다. 이들 오염원/오염매체 복원기술의 연도별 변화는 그림 2에 설명되었다. 그림 2와 같이 1987~2003년(1997년과 2000년 제외)동안 오염원/오염매체 처리기술이 저장기술보다 많이 적용되었지만 2004년 이후로는 오염원/오염매체 저장기술이 처리기술보다 많이 적용되었다. 참고로 본 보고서에서는 처리기술의 동향만을 살펴보기로 하겠다.

#### 2.1.2 현장 내 또는 외 처리기술(in situ vs. ex situ Treatment Technologies)

현장 내 처리기술은 오염물 또는 오염토양을 굴착 및 이송시키지 않고 제거, 분해, 고정화시키는 기술이며 현장 외 처리기술은 이들을 굴착 및 준설을 통해 복원 전에 이송시키는 기술이다. 1982~2005년에 적용된 총 처리기술 중 현장 외 기술(53%)이 현장 내 기술(47%)보다 많이 적용되었으며, 현장 외 기술 중에는 고형화/안정화(solidification/stabilization)

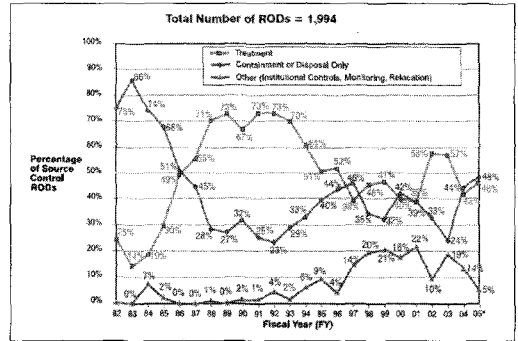


그림 2. 1982~2005년에 오염원/오염매체(source/source media) 복원기술 동향(EPA 2007)

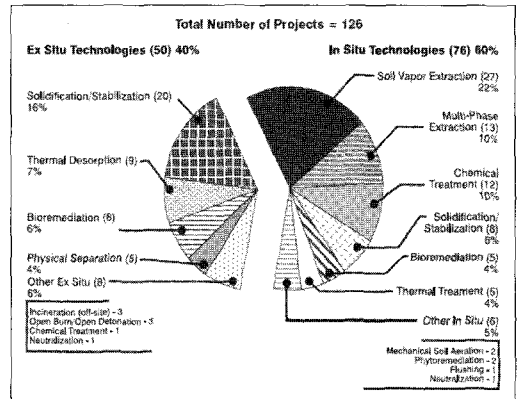


그림 3. 2002~2005년에 오염원/오염매체(source/source media) 복원기술 동향(EPA 2007)

가 현장 내 기술 중에는 토양 증기 추출(soil vapor extraction)이 가장 많이 적용되었다(EPA 2007). 그러나 그림 3과 같이 최근 2002~2005년에는 현장 내 기술(60%)이 현장 외 기술(40%)보다 많이 적용되었으며, 이는 현장 내 기술이 오염물 또는 오염토양을 굴착 및 이송시킬 필요가 없으므로 오염원에 노출될 위험과 경제적 비용을 줄일 수 있기 때문이다. 그리고 2002~2005년에는 현장 내 기술 중 토양 증기 추출의 적용이 감소한 반면 다상 추출(multi-phase extraction)과 화학적 처리(chemical treatment)의

Technology	Total number of projects*	Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)	Other nonhalogenated semivolatile organic compounds	Benzene-toluene-ethylbenzene-xylene (BTEX)	Other nonhalogenated organic compounds	Organic pesticides and herbicides	Other halogenated volatile organic compounds	Halogenated semivolatile organic compounds	Poly chlorinated biphenyls	Metals and metalloids
Bioremediation	113	37	51	33	33	24	17	22	2	5
Chemical Treatment	29	1	2	3	4	1	4	12	4	13
Multi-Phase Extraction	46	9	3	11	6	4	8	18	1	1
Electrical Separation	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Flushing	17	3	5	5	5	1	3	11	0	5
Incineration	147	27	41	33	29	36	34	52	36	6
Mechanical Soil Aeration	7	0	0	3	1	0	1	7	0	0
Neutralization	15	2	0	0	0	0	0	0	0	6
Open Burn/										
Open Detonation	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Physical Separation	21	4	2	1	0	3	0	0	4	5
Phytoremediation	7	1	2	2	2	1	1	4	0	4
Soil Vapor Extraction	255	15	31	107	51	3	33	217	1	0
Soil Washing	6	1	1	0	0	2	0	0	1	2
Solidification/										
Stabilization	217	17	18	13	13	16	7	20	35	180
Solvent Extraction	4	2	1	0	1	1	0	2	2	1
Thermal Desorption	71	21	17	24	15	8	12	33	16	0
In Situ										
Thermal Treatment	14	5	0	2	0	3	3	8	0	0
Vitrification	3	0	0	1	1	0	1	3	2	1
Total Projects	977	145	175	238	155	103	124	410	104	229

그림 4. 오염원/오염매체 복원기술에 의해 처리된 주요 오염물

적용이 증가하였으며, 현장 외 기술 중 고형화/안정화의 적용 사례가 증가한 반면 소각(incineration)의 적용이 감소하였다.

### 2.1.3 처리된 오염물의 종류

오염원/오염매체 처리기술에 주요 대상이 된 9개 목록의 주요 오염물은 다음 그림 4에 정리되었다. 주요 오염물 목록과 각 목록에서 일반적으로 적용되는 복원기술을 정리하면 다음과 같다.

- 할로젠족 휘발성 유기화합물(halogenated volatile organic compounds), BTEX (benzene, toluene, ethyl benzene, and xylene), 그리고 비 할로젠족 휘발성 유기화합물(non-halogenated volatile organic compounds): 토양 증기 추출
- 비 할로젠족 반 휘발성 유기화합물(non-halogenated semivolatile organic compounds)과 PAHs (polynuclear aromatic hydrocarbons): 생분해

- PCBs(polychlorinated biphenyls), 유기 용매, 살충제 및 제초제, 그리고 할로젠족 반 휘발성 유기화합물: 소각

- 중금속: 고형화/안정화

## 2.2 지하수 오염(Contaminated Groundwater) 복원기술

### 2.2.1 지하수 오염 복원기술 동향

지반 내 지하수 오염 복원기술은 표 1과 같이 분류할 수 있으며, 이러한 복원기술 중 일부는 또한 오염원/오염매체 복원에도 적용된다. 1982~2005년에 적용된 총 1,072개의 지하수 복원기술 중 pump and treat가 728개의 지역에 적용되었고 다수의 지하수 오염은 pump and treat와 현장 내 처리기술과 자연 저감법(natural attenuation)을 병행하여 처리하였다. <그림 5>와 같이 pump and treat만 사용하

## 미국 내 토양 및 지하수 오염복원 기술 동향

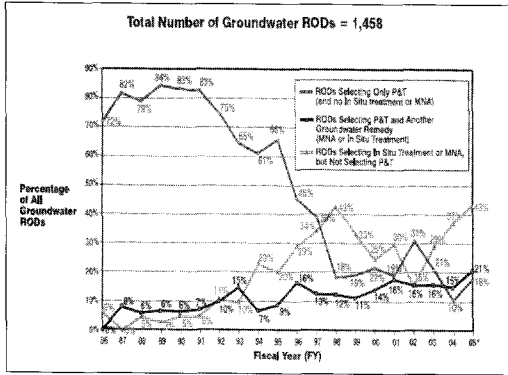


그림 5. 1982~2005년 지하수 오염 복원기술의 동향 (EPA 2007)

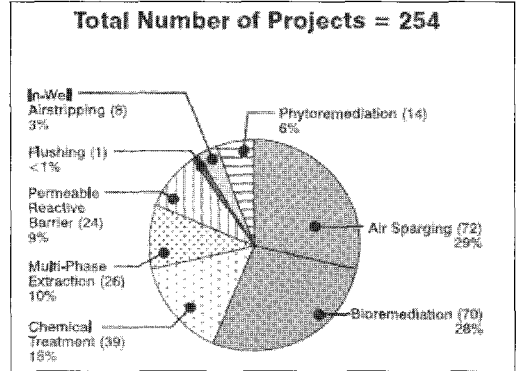


그림 6. 2002~2005년 적용된 지하수 오염 복원기술의 동향 (EPA 2007)

는 복원기술은 1991년 이후로 급격히 감소한 반면 pump and treat와 현장 내 처리기술, pump and treat를 적용하지 않는 현장 내 처리기술과 자연 저감법을 병행하는 기술은 꾸준히 증가하는 추세를 보였다. pump and treat의 감소이유는 비용대비 효율성이 우수하지 못했기 때문이고, 다른 복원기술과의 병행처리시 pump and treat의 처리 시간을 감소시킬 수 있으며 오염원/오염매체와 지하수를 동시에

복원할 수 있기 때문에 병행처리는 꾸준히 증가하는 추세이다.

### 2.2.2 현장 내 지하수 처리기술(in situ Groundwater Treatment)

널리 적용되는 현장 내 지하수 처리기술로는 공기 분무(air sparging), 생분해(bioremediation), 화학적 처리, 투수성 반응 벽체(permeable reactive

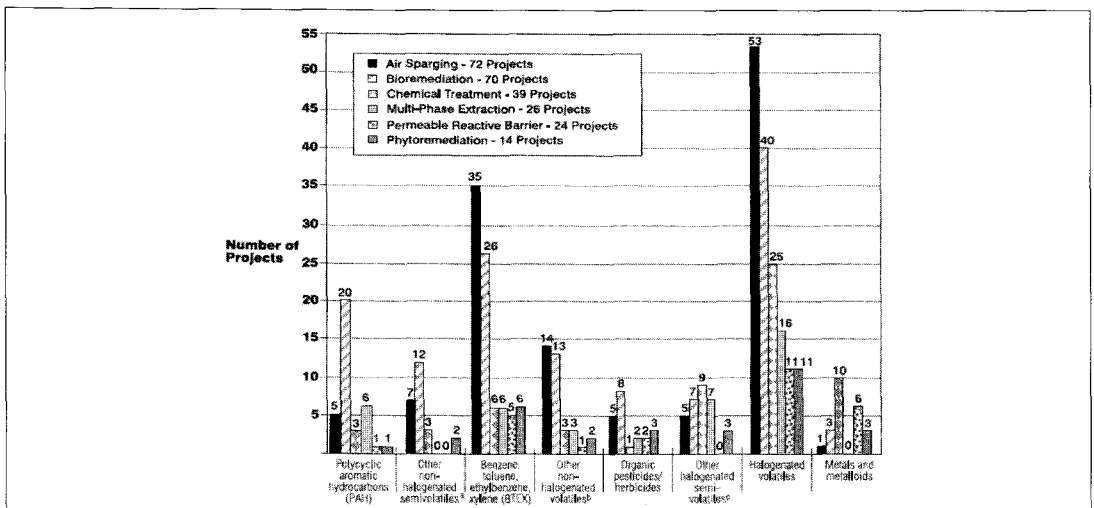


그림 7. 지하수 오염 복원기술에 의해 처리된 주요 오염물

barriers), 그리고 다상 추출 등이 있다. 1982~2005년 사이에 적용된 총 지하수 처리기술 중 생분해와 공기 분무가 50% 이상 되었으며 그림 6과 같이 최근 2002~2005년에는 공기 분무가 감소하고 화학적 처리의 사례가 증가하였다.

현장 내 지하수 처리기술의 주요 대상이 된 8개 그룹의 주요 오염물은 다음 그림 7에 정리되었다. 주요 오염물 목록과 각 목록에서 일반적으로 적용되는 복원기술을 정리하면 다음과 같다.

- 할로젠족 및 비 할로젠족 휘발성 유기화합물과 BTEX : 공기 분무
- PAHs, 비 할로젠족 반 휘발성 유기화합물과 유기 살충제/제초제 : 생분해
- 중금속류 : 화학적 처리와 투수성 반응 벽체

### 2.2.3 국내외 토양 및 지하수 복원기술 연구 동향

일반적으로 토양 및 지하수의 오염은 오염지역의 지질학적 환경을 고려하여 오염지역의 특성을 조사하고 오염물의 종류, 오염 정도 및 거동과 위해성을 평가한 후 효율성 및 적용성 등에 근거하여 최적의 복원기술을 선정하며 복원한 후 사후관리를 실시한다. 혁신적인(innovative) 복원기술이란 기존의 기술로는 복원이 어렵다고 간주된 오염원/오염매체 그리고 지하수를 보다 경제적이고 효율적으로 제거, 처리하는 기술을 일컫는다. EPA 연차보고서에 따르면 그림 8과 같이 혁신적인 복원기술은 1991년 이후 기존의 복원기술을 대체하고 있으며, 현재에도 다양한 오염물과 오염지역의 특성에 적용 가능한 새로운 기술이 지속적으로 개발되고 있다.

최근의 혁신적인 기술의 동향은 현장 내 생물학적 복원기술과 다양한 다른 복원기술을 병합하여 사용

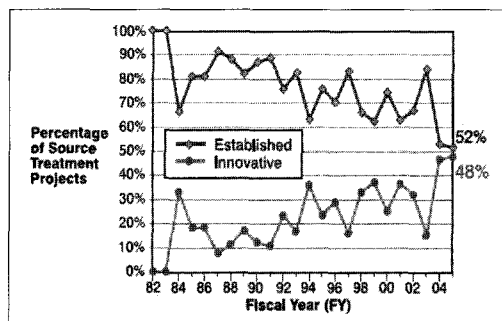


그림 8. 1982~2005년 적용된 기존의 복원기술과 혁신적인 복원기술의 동향(EPA 2007)

하며 위해성에 근거한 지속가능한 친환경적인 복원 방법을 선호하고 있으며, 국내외 혁신적인 토양 및 지하수 복원기술 주요 연구동향은 다음과 같다(박정구 2007, 최재영 2007, EPA 2004, 2007).

- 식물복원기술을 이용한 토양 오염 복원
- 복합 투수성 반응 벽체를 이용한 침출수 및 산성 광산 폐수 처리
- 영가철과 점토를 이용한 할로젠족 화합물 처리
- 연직차수벽을 이용한 오염된 지하수 이동 억제
- 바이오필터를 이용한 휘발성 유기화합물 및 악취 제거
- 반응성 나노물질을 이용한 오염물 제거
- 개량점토와 인산염을 이용한 중금속 고정화
- 분자생물학적 기법을 활용한 미생물의 이동성 및 분해능 측정
- 전자기기술을 활용한 토양 및 지하수 오염 복원

### 3. 요약 및 결론

국내의 토양 및 지하수 오염 복원시장이 확대되고 전환점을 맞이하고 있으나 국내외의 토양 및 지하수

## 미국 내 토양 및 지하수 오염복원 기술 동향

오염 복원기술은 선진국에 비해 다양성 및 현장적용성에서 미비한 실정이다. 따라서 세계 환경시장에서 큰 비중을 차지하고 있는 미국 내 토양 및 지하수 오염 복원기술의 동향을 미국 EPA에서 2007년 9월에 발간한 Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report(12th ed.)에 근거하여 살펴 보았으며 이를 통해 국내에서도 오염물과 오염지역의 특성에 적용 가능한 경제적이고 효율적인 기술을 개발하여 국내외 토양 및 지하수 복원산업 수요와 미래기술수요에 부응해야 할 것이다. 본 보고서의 요약 및 결론은 다음과 같다.

- 1987~2003년 동안 오염원/오염매체 처리기술이 저장기술보다 많이 적용되었으나 2004년 이후로는 오염원/오염매체 저장기술이 처리기술보다 많이 적용되었다.
- 1982~2005년 사이에 적용된 총 오염원/오염매체 처리기술 중 현장 외 기술(53%)이 현장 내 기술(47%) 보다 많이 적용되었으며, 현장 외 기술 중에는 고형화/안정화가 현장 내 기술 중에는 토양 증기 추출이 많이 적용되었다. 하지만 최근 2002~2005년 사이에는 현장 내 기술(60%)이 현장 외 기술(40%)보다 많이 적용되었으며, 현장 내 기술 중 토양 증기 추출의 적용이 감소한 반면 다상 추출과 화학적 처리의 적용이 증가하였으며, 현장 외 기술 중 고형화/안정화의 적용 사례가 증가한 반면 소각의 적용이 감소하였다.
- pump and treat만 적용하는 복원기술은 1991년 이후로 급격히 감소한 반면 pump and treat와 현장 내 복원기술, 자연저감법을 병행하는 기술은 꾸준히 증가하는 추세를 보였다. 다른 복원기술과의 병행처리 시 pump and treat의 처리

시간을 감소시킬 수 있으며 오염원/오염매체와 지하수를 동시에 복원할 수 있기 때문에 병행처리는 꾸준히 증가하는 추세이다.

- 1982~2005년 사이에 적용된 총 지하수 처리기술 중 생분해와 공기 분무가 50% 이상 되었으며 최근 2002~2005년 사이에는 공기 분무가 감소하고 화학적 처리의 사례가 증가하였다.
- 토양과 지하수는 여러 가지 혼합 오염물에 의해 오염되는 것이 일반적이므로 기존의 복원기술들을 함께 병행하는 것이 효율적이다. 최근의 혁신적인 기술의 동향은 현장 내 생물학적 복원 기술과 다양한 다른 복원기술을 병합하여 사용하며 위해성에 근거한 지속가능한 친환경적인 복원방법을 선호하고 있다.

## 참고자료

1. 국회환경노동위원회(2007), "주한미군 반환기지 환경치유에 관한 청문회 결과보고서"
2. 김태용(2004), "환경산업의 현황과 전망", 삼성지구환경연구소
3. 박정구(2007), "지하수, 토양오염의 현상 및 복원기술 동향", 코네틱 레포트
4. 최재영(2007), "국내의 토양 및 지하수 오염정화 기술 연구, 기술동향", 코네틱 레포트
5. 환경부(2007), "2006년도 토양 측정망 및 실태조사 결과"
6. EPA (2004), "Cleaning Up the Nation's Waste Sites: Markets and Technology Trends"
7. EPA (2007), "Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report (12th ed.)"