

# 오염 토양 · 지하수의 복원기술

Remediation Technologies of Contaminated  
Soil and Groundwater

유 동 준 · 유 찬  
농업기반공사 지하수사업처  
환경복원기획팀



## 1. 서 언

육지 생태계의 삶의 기반인 토양은 자정작용과 완충능력이 크고, 오염피해가 오랜 시간 후에 나타나기 때문에 지금까지 대기, 수질, 폐기물 오염에 비하여 관심이 적었던 것이 사실이다. 그러나, 지난 수십년 동안 불량 매립지의 침출수 누출 또는 공단 지역이나 군 주둔지역, 대규모 유류 취급소 등에서의 누유, 농약의 과다 사용, 각종 화학공장 에서 사용되던 유독 성분 등이 토양 생태계 내에 잔류하여 토양과 지하수를 오염시키고, 이로 인해서 발생하는 주변 주민의 피해가 보고되면서 심각한 사회문제가 되고 있다.

현재에도 우리 나라 각지에는 1,800여개의 방치된 비위생매립지와 각종 화학공장이 위치한 산업공단지역 8,000여개 정도의 주유소 및 지하 유류 비축기지 등이 산재해 있어 이로 인한 주변 토양 및 지하수의 오염실태를 파악해야 하며, 기 오염된 토양이나 지하수에 대해서는 인체나 자연 생태계에

대한 위해성 여부를 평가하여 그에 따른 대책을 수립해야 한다.

오염된 토지의 복원은 “토양이나 지하수가 오염되었을 경우에 그 영향이 인체나 자연 생태계에 미치지 못하도록 하거나 그 영향을 최소화하기 위하여 오염된 토지를 원래 자연적인 상태 혹은 적절한 조건이상으로 회복시키는 과정”으로 정의 할 수 있다. 그러나 토양이나 지하수의 오염은 그 오염원인이 다양하고, 토양이나 지하수의 물리·화학적 성질이나 오염물질의 성상에 따라서 매우 다양한 양상을 나타내고 있어 그 원인을 쉽게 밝히기 어렵고 오염된 토양을 복원하는데 많은 비용 뿐만 아니라 고도의 기술이 요구된다.

따라서 오염토양을 복원함에 있어, 선진국에서 유효성이 입증된 복원기술에 대해서는 적극적으로 도입하여 기술격차를 단시일 내에 해소하고, 특히 우리나라 토양특성과 복원작업 현실에 꼭 필요한 핵심기술은 집중적으로 연구 개발하여 선진국과 경쟁할 수 있도록 하여야 하며, 이에 대한 체계적인

자료수집과 아울러 면밀한 분석이 병행되어야 하겠다.

이에 본문에서는 현재 오염 토양 및 지하수에 복원을 위해서 광범위하게 적용되고 있는 공법의 종류를 알아보고 최근에 새롭게 개발·연구되거나 현장에서 적용되고 있는 공법에 대해서도 알아보고자 한다. 단, 유류 오염토양의 경우에는 열탈착 처리 기술을 중심으로 간단히 설명하고자 한다.

## 2. 복원기술의 종류

복원기술의 종류는 그 목적이나 처리과정 그리고 적용 장소 등에 따라서 여러 가지 방법으로 분류될 수 있으며, 우리 나라의 경우에는 환경부, 환경 관련단체의 인터넷 사이트 등에서 자세히 설명하고 있으며, 국립환경연구원(nier.go.kr) 자료에서는 오염 토양/지하수/가스의 처리공법 대해서 현장내

(In-situ) 처리와 현장외(Ex-situ) 처리공법으로 나누어 자세히 설명하고 있다.

한편 2001년 U.S. EPA에서 발표된 "Treatment Technologies for site cleanup: Annual status report(10th Ed.)"에서는 복원기술을 형태별로 오염원 조절처리(source control), 지하수(groundwater), 방치(no action) 등 3가지 항목으로 크게 구분하고 이를 다시 다음 표 2와 같이 12가지 세부항목으로 정리하고 있다(표 1 참조).

12개 항목 중에서는 미처리를 포함하여 오염토양 처리기법 4가지, 오염 지하수 처리기법 7가지가 포함되어 있으며, 다시 각각에 대해서 원리에 따라서 세분화되고 있다.

한편 Shakelford & Jefferies(2000)는 오염 토양 및 지하수의 복원기술의 종류를 표 2와 같이 처리위치에 따라서 현장(in-situ)과 현장외(ex-

표 1 Identification of remedy and ROD types at Superfund sites(EPA, 2001)

Source control Remedies :	
1. Source control treatment	Physical, chemical, thermal, bioremediation
2. Source control containment	Capping & Cover, bottom liner, drainage & erosion control, onsite landfilling, off-site landfilling, Vertical engineered barrier
3. Source control others	Institutional control, Engineering control, source monitoring, Population relocation
4. Source control monitored natural attenuation	
Groundwater remedies :	
5. Groundwater in-situ treatment	Physical, chemical, thermal, bioremediation
6. Groundwater pump & treatment	Physical, chemical, biological
7. Groundwater containment	Vertical engineered barrier
8. Groundwater others	Institutional control, Engineering control, source monitoring, Population relocation
9. Groundwater monitored natural attenuation	
10. Groundwater extraction	
11. Groundwater discharge	
No action remedies :	
12. No action or no further action (NA/NFA)	

situ)로 나누고 그 각각을 다시 차단과 처리기술로 나누고 있다.

유류 오염토양에서 지금까지 알려진 대표적인 유류 오염물질의 종류 및 효용성이 입증된 복원기술은 표 3과 같다. 일반적으로 기술린, 경유와 같은 경질유는 휘발성이 크고 끓는점(boiling point)이 낮기 때문에, 고농도의 경질유로 오염된 토양을 복

원하기 위해서는 탈착온도가 350℃ 미만에서 운전되는 저온열탈착(Low Temperature Thermal Desorption, LTTD)설비가 적합하다. 반면에, 윤활유 연진오일 등과 같이 휘발성이 작고 끓는점(boiling point)이 높은 중질유는 350~650℃에서 운전되는 고온열탈착(High Temperature Thermal Desorption, HTTD)설비가 적합하다.

표 2 Example of the classification of remediation technologies of contaminated soil and groundwater (Shakelford & Jefferies, 2000)

Treatment Location	Technology Category	Technique/ Process	Example(s)	Comment(s)
현장외 (Ex-situ)	차단기술 (Containment)	투 기 (Disposal)	Landfills	On-site vs. Off-site, New vs. Existing
	처리기술 (Treatment)	화 학 적 (Chemical)	Neutralization Solvent Extraction	Treated soil may require disposal in a landfill, or may be returned to the site.
		물 리 적 (Physical)	Soil Washing, Vitrification Stabilization/ Solidification,	
		생물학적 (Biological)	Biopiles Bioreactors	
		열 적 (Thermal)	Incineration Vitrification	
현장내 (In-situ)	차단기술 (Containment)	양수후 처리 (Pump & Treat)	Vertical wells Horizontal wells	Both passive and active containment are possible; In pump & treat, pumping is used to control hydraulic gradient and collect contaminated water; treatment is ex situ
		덮 개 (Capping)	Traditional & Alternative covers Geotechnical covers	
		연직차단 (Vertical Barriers)	Slurry walls, Grout curtains Sheet piling, Biobarriers Reactive Barriers	
		수평차단 (Horizontal Barriers)	Grout injected liners	
	처리기술 (Treatment)	화 학 적 (Chemical)	Oxidation Chemical Reduction	Technologies which (*) require removal of gas and/or liquid phases and treatment; Both passive and active treatment are possible
		물 리 적 (Physical)	Stabilization/Solidification Soil Vapor Extraction(SVE)* Soil Flushing*, Vitrification Air sparging(AS)* Electro-kinetics(EK)*	
		생물학적 (Biological)	Monitored Natural Attenuation Bioventing, Bioslurping Biosparging	
		열 적 (Thermal)	Steam injection* Radio Frequency Heating(RF)* Vitrification	

이러한 복원 기술들은 실제 그 적용에 있어서 그 효과뿐만 아니라 토질특성, 현장여건 그리고 경제적 상황 등이 모두 고려되어야 하며, 대부분의 경우에는 이 기술들 중에서 한가지만을 적용하는 경우는 드물고 많은 경우들에서 처리효과를 높이기 위하여 2가지이상의 기술들을 조합하여 처리하는 것이 일반적인 경향으로 나타나고 있다.

지금까지 살펴본 바와 같이 복원기법은 다양한 방식으로 분류될 수 있으므로 본 고에서는 간단히 오염원의 직접적인 처리(source treatment or source control)와 오염원의 차단(source containment)으로 나누어 각 처리공법별로 좀 더 자세히 알아보기로 한다.

### 3. 처리기술(source treatment or source control)

처리기술은 오염성분을 화학적 특성의 변환이나 분해과정 등을 통하여 농도를 낮추거나 유해하지 않은 성분으로 바꾸어 주는 기술로서, 오염 토양이나 지하수의 복원에 있어서 보다 적극적인 방법이다. 현재까지 고형화/안정화(Solidification/Stabilization, S/S), 유리화(Vitrification), 토양 증기추출법(Soil Vapor Extraction, SVE), 소각(incineration), 생물학적 통풍(Bioventing), 공기분산(Air Sparging), 토양세척(soil flushing 혹은 soil washing) 그리고 화학적 처리법(chemical treatment) 등 많은 기술이 개발되어 적용되고 있다.

이 중에서 토양증기추출법(SVE), 고형화/안정화

표 3 Typical remediation technologies of soils contaminated by petroleum, oil & grease, and lubricant

오염물질 종 류	복원위치	오염농도	적용 가능한 복원기술	
경 질 유 (가솔린, 경유)	In-Situ	저농도	자연저감 (w/ PRB+모니터링) 식물식재 (Phytoremediation) [생물]	
		고농도	토양증기추출(SVE)+바이오필터 [열+생물] Air Sparging/ Stripping [물리/화학] Soil Flushing [화학] Bio Slurping [생물]	
	Ex-Situ	저농도	농경작 (Land Farming) [생물]	
		고농도	저온 열탈착(LTTD) [열적] 토양세척(SW)+폐수처리 [물리+화학]	
	중 질 유 (윤활유, 엔진오일)	In-Situ	저농도	자연저감 (w/ 차단+모니터링)
			고농도	-
Ex-Situ		저농도	고온 열탈착(HTTD) [열적]	
		고농도	고온 열탈착(HTTD) [열적]	
중질유 + 유해불질	In-Situ	저농도	-	
		고농도	-	
	Ex-Situ	저농도	고온열탈착(HTTD)+대기방지 [열적+화학]	
		고농도	고온열탈착(HTTD)+대기방지 [열적+화학]	

(S/S), 소각공법 등은 기존에 많은 적용 사례를 가지고 있으며, 지금까지도 많이 적용되고 있는 공법이다. 토양중기 추출법은 불포화대의 휘발성 혹은 준휘발성 유기 오염성분을 제거할 수 있으며, 고형화/안정화공법은 물리/화학적 방법으로 오염성분의 이동성을 저감하거나 고립시키는 공법으로서 주로 중금속 제거를 위해서 많이 적용되고 있다. 소각공법에 대해서는 5장 열탈착 공법에서 설명하기로 한다.

또한 최근에 관심을 모으는 공법으로는 생물학적 복원공법(bioremediation), 자연정화법(monitored natural attenuation; MNA) 그리고 식물을 이용한 복원공법(phytoremediation) 등이 있다.

자연정화법은 오염 대상지역에 대해서 인위적인 간섭 없이 오염성분들이 자연적으로 발생하는 물리·화학·생물학적인 작용에 의해서 흡착이나 휘발, 산화·환원되도록 하거나 혹은 토착 미생물 등에 의해서 토양·지하수내의 오염성분의 질량이나 농도가 자연적으로 감소되도록 유도하는 과정을 말한다.

그림 1은 지하수내 염화계 휘발성 유기탄소(chlorinated volatile organic carbon; CVOC) 성분을 양수처리법을 적용하여 제거하는 과정에서

공사기간에 따른 누적 정화비용과 처리효과를 비교한 사례이다. 그림 (a)는 목표 정화값(5 ppb)까지 계속해서 양수처리법을 적용한 경우이며, 이때 처리 소요기간은 50년으로 나타났다. 한편 그림 (b)에서는 200 ppb까지는 양수처리를 하지만(이때까지의 소요 기간은 17년), 나머지 부분은 자연정화법에 의해 처리하는 경우이다. 그림에서는 동일한 기간이라고 하더라도 정화비용 측면에서 매우 효과적임을 알 수 있다.

그러나 자연정화법은 경제적이고, 과정이 단순한 데 반해서 부지 고유특성의 영향이 크다. 따라서 반드시 부지 고유특성을 먼저 파악해야 하는데, 자연 저감법을 적용함에 있어서는 (1) 도식화 등을 통한 오염정도, 규모 및 특성의 파악, (2) 대상지역의 수리지질의 특성, 그리고 (3) 자연저감의 증거자료 등을 수집·규명해야 하며, 각종 오염성분의 지중에서 이동이나 운명(fate)에 대한 충분한 이론적인 이해와 위해성에 기초한 정화활동(risk-based corrective action, RBCA) 혹은 기타 위해성 평가 프로그램 등을 이용하여 정화목표치를 설정하고 단계적인 위해성 평가를 실시하여 그 실효성과 효율성을 결정해주는 체계적인 과정이 필요하다. 또한 자연정화법으로 쉽게 정화될 수 있는

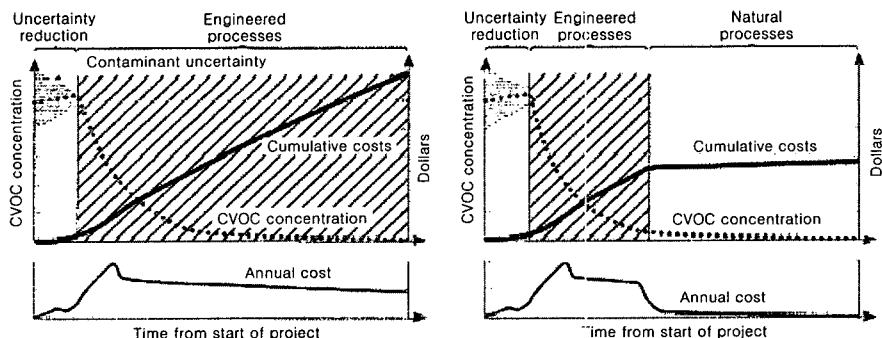


그림 1 hypothetical of cost versus cleanup curve [(a) Basic case;(b) Alternative case] (Rice and McNab, 1998)

성분이 있는 반면에 그렇지 못한 경우도 많으므로, 이러한 경우에는 다른 기술과 병행해 시행하는 것이 효과적이다.

생물학적 복원(bioremediation)법은 박테리아, 곰팡이(fungi), 식물, 효소(enzyme) 등의 생물학적 개체들이 토양이나 지하수, 공기중의 오염성분의 중량이나 독성을 감소시키는데 사용되는 것을 말한다. 생물학적 복원법에서는 유기성분을 단순한 분자로 바꾸어주는 단일 혹은 일련의 생물학적 반응을 이용하는 생물학적 분해(biodegradation)와 금속 등의 무기성분과 유기 화학성분을 생물학적 촉매작용으로 변환시켜 주는 반응을 이용하는 생물학적 변환(biotransforming) 두 가지가 있으며, 기존의 다른 기술들 보다는 저렴한 반면에 금속이나 고농도의 유기성분 그리고 여러 가지 오염성분들이 혼재되어 있는 경우에는 효과가 낮은 것으로 보고되고 있다. 즉, 완전분해라고 해도 대상 물질이 호기성(aerobic) 조건에서 이산화탄소와 물, 혐기성(anaerobic) 조건에서 메탄으로 변환되므로 이러한 생물학적 분해과정에 의해서 대상지역에서 독성이 반드시 저감된다고는 할 수 없다. 그러므로 현재는 생물학적 복원법이 단독으로 사용되는 경우보다는 생물학적 통풍(bioventing, BV), BSL(bio-slurping), 토양증기추출법 등의 다른 기술과 병용되어 사용되고 있다.

식물에 의한 정화방법은 생물학적 복원방법의 하나로서 식물의 성장과정중 토양내에서 발생하는 물리·화학·생물학적 작용에 의한 휘발, 용출 혹은 안정화 과정을 이용하여 토양·지하수내의 오염성분을 정화하는 기술을 말한다. 나무를 비롯한 각종 식물들은 휘발, 산화, 그리고 분해등의 각기 다른 방법으로 유기 오염물질을 처리할 수 있는데, 그림 2에서와 같은 과정 등을 이용해서 무기 오염물질도 처리할 수 있다. 또 그 적용 심도가 현재까

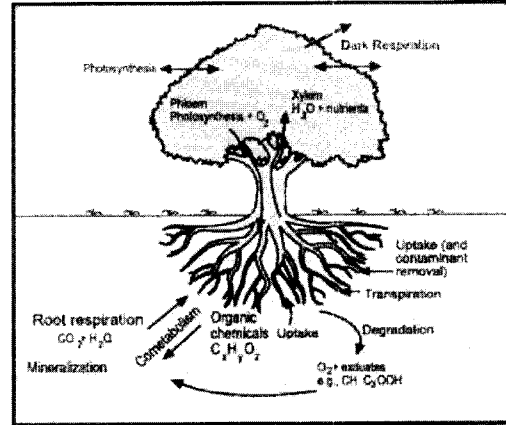


그림 2 Contaminant Fate in the Soil-Plant-Atmosphere Continuum (EPA, 2001)

지는 2m 이내로 제한되어 있는 단점이 있지만, 수목을 이용하여 6m~14m구간에 대해서도 적용성을 연구하고 있으며, 그 결과에 따라서는 적용 범위도 확대될 것으로 예상된다. 적용 수종은 포플러와 미루나무(cottonwood tree)가 많이 사용되고, 그 이외에도 해바라기(sunflower), Indian mustard, 그리고 목초류(ryegrass and prairie grasses) 등이 있다.

#### 4. 오염지역 차단기술(source containment)

차단(containment)기술은 오염성분에 대해서 화학적 성질의 변환이나 분해 등을 하지 않고 물리적인 방법에 의해서 오염의 확산을 차단하는 기술을 말한다. 차단 기술은 공사비가 저렴하며, 신뢰성 있는 공법이 개발되기 전까지 오염의 확산을 방지할 수 있고, 자연저감(natural attenuation)도 기대할 수 있는 장점이 있다. 또한 굴착·운반과정 등에서 발생할 수 있는 오염문제도 방지할 수 있다. 따라서 유럽(특히, 영국)에서는 약 20여년 전부터 차단기술을 많이 사용해 왔으며, 미국에서도 몇 년전부터 이에 대한 관심이 고조되고 있는 실정

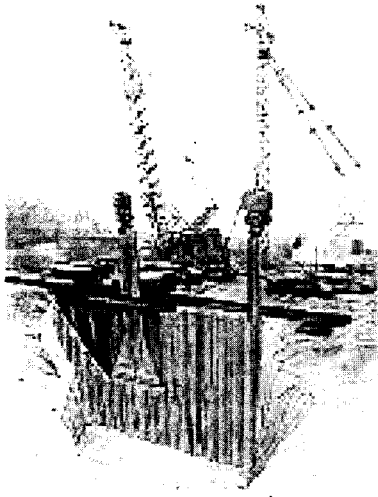


그림 3 Thin slurry cutoff wall with geomembrane (Manassero et al, 2000)

이다.

차단기술은 처리 대상지역의 지중에 수직이나 수평방향의 차단벽체를 형성하여 오염지역의 지표면에 우수 침투를 방지하고, 발생된 가스의 대기중 휘발을 방지하여 오염성분이 주변지역으로 확산되지 못하도록 하는 방법이다. 일반적으로 벽체는 그림 3과 같이 일반적으로 트렌치를 만들고 벤토나이트나 시멘트+벤토나이트 그리고 쉬트파일 등의 재료를 사용하여 형성해 주고 있으며, 오염지역의 범위가 넓지 않으면서 고농도의 오염성분이 특정지역에 분포하고 있는 경우에는 원위치에서 시멘트계 혹은 포조란 등의 재료를 사용하여 오염성분을 고형화/안정화시키는 방법이 있다.

오염지역을 대상으로 차단기술을 적용함에 있어서 그 종류를 나눈다면 크게 방치형과 처리형 두 가지로 나눌 수 있다. 방치형 벽체는 불투수성으로 형성되어 오염이 주변지역으로 확산되지 않도록 하

며, 오염성분에 대해서는 추가적인 처리가 고려되지 않고 일시 혹은 영구적으로 방치해 두면서 주기적인 관찰을 시행하는 경우이다. 슬러리웰(slurry wall), 쉬트파일(sheet pile), 흙교반벽(soil mixing wall) 등이 있다.

처리형 벽체로서는 그림 4와 같은 투수성 반응벽체(permeable reactive barrier: PRB)가 있으며, PRB의 시공방법은 기존의 차단벽체 형성과 유사하지만, PRB에서는 굴착후 반응재를 채워 벽체를 형성하며, 벽체의 투수성은 원지반과 같거나 커야한다. 반응벽체의 원리는 반응재와 오염성분간에 흡착 침전, 희석, 변환 등의 물리·화학적 반응을 일으켜서 복원시키는 방법이다. 반응재료는 0가 철, 플라이 애쉬, 제오라이트, 점토, 페타이어 조각, 고무 가루(ground rubber) 등이 사용되고 있다.

PRB의 설계시에는 우선 대상 성분이 반응벽체 내에서 처리되는 가능한 정화기작(attenuation mechanism)을 이해할 수 있어야 한다. 예로서 이온교환이나 흡착작용을 이용하여 처리해야 하는 경우에는 양이온교환능력(cation exchange capacity: CEC)이나 흡착용력이 뛰어난 제오라이트 등의 재료를 첨가해서 반응벽체를 만들어 주는 것이 유리하며, 침전(precipitation)의 경우에는 반응벽체를 통과하는 액체의 pH를 증가시켜 줄 수 있는 생석회(CaO), dolomitic quicklime(CaO·MgO), monohydrated dolomitic quicklime(Ca(OH)·MgO) 혹은 정재 처리된 벤토나이트, attapulgate 점토 재료를 첨가해 주는 것이 유리하다.

벤젠과 같은 유기성분의 흡착은 “소수(hydrophobic) 효과” 현상에 의해서 흙에서의 유기 탄소의 양과 직접 관련이 있다. 따라서 벽체내의 유기 탄소의 양을 증가시켜 주변 중요한 유기성분들에

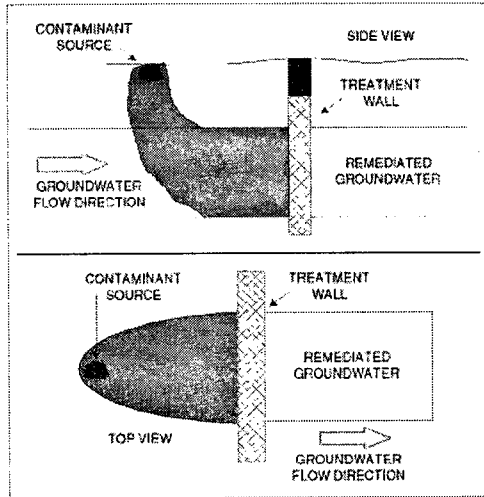


그림 4 Schematic of simple treatment wall system(Vidic & Pholand, 1996)

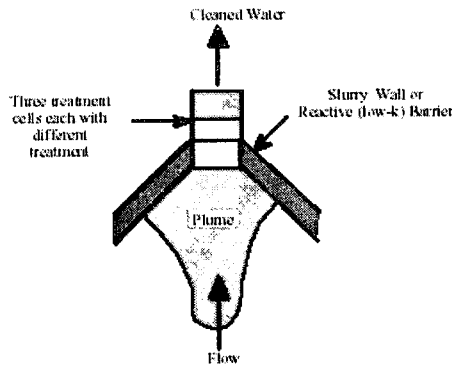


그림 5 Funnel-and-gate system(Shackelford & Jefferies, 2000)

대한 정화능력이 증가될 수 있다. 이때 사용될 수 있는 재료로는 high carbon fly ash, 고무 타이어 조각, 고무 가루(ground rubber) 혹은 granular activated carbon등이 있다. 한편 0가 철을 이용해 염기성 탄화수소(TCE)를 처리한 예도 있다.

한편 PRB의 개량형으로서 그림 5에서와 같은 "Funnel-and-Gate"시스템은 양쪽 벽체는 일반

슬러리벽이나 PRB형태로 구성할 수 있으며 오염 운(flume)을 중앙의 셀(cell)로 흐르도록 기울기를 주어 설치한다. 중앙의 셀은 대상 오염성분에 따라서 1층 이상의 구조를 가지며, 각 층마다는 다른 성분의 첨가재료를 혼합해 각각의 특정성분을 정화하도록 하는 기술이다.

### 5. 열탈착 기술

오염농도가 고농도(수만 ppm)이거나 중질유(탄소수 20 이상)로 오염되어 있을 경우에는 기술적/경제적 이유에서 생물학적 또는 화학적 처리방법에 비해 열적 처리방법이 처리효율이 월등히 높고 처리시간이 단기간이라는 점에서 특별한 장점이 있다. 타 공법에 비해, 운전기술이 복잡하고 처리비용이 고가라는 단점이 있지만, 가용토지가 적고, 높은 복원효율을 요구하는 국내 상황에서는 반드시 필요한 기술 중의 하나이다. 열적 처리는 크게 (1) 소각처리 방법과 (2) 열탈착으로 나눌 수 있다.

열탈착은 그림 6과 같이 2단계로 구분할 수 있다. 먼저, 산소가 희박한 분위기에서 토양을 550°C이하로 가열하여 유분을 토양으로부터 분리한 후에, 2차적으로 연소과정을 거쳐 수분과 이산화탄소를 배출하거나 응축하여 원료로 재활용시킨다. 소각은 이와 달리 산소가 충분한 분위기에서 토양을 보다 높은 온도(850°C 이상)까지 가열하여 유분을 휘발시킴과 동시에 연소시키므로 별도의 유해가스처리가 필수적이다.

열탈착은 저온 열처리라고도 불리우며 소각에 비하여 여러 가지 장점을 지니고 있다. 탈착가스의 처리방식에 따라서 응축형 및 저온산화 방식으로 분류하며, 일반적으로 유류의 농도가 높을 때는 응축형을 그리고 농도가 상대적으로 희박하면 산화촉매 등을 사용한 산화시스템을 적용한다.

가솔린, 경유 등으로 오염되어 있으며, 유기 염



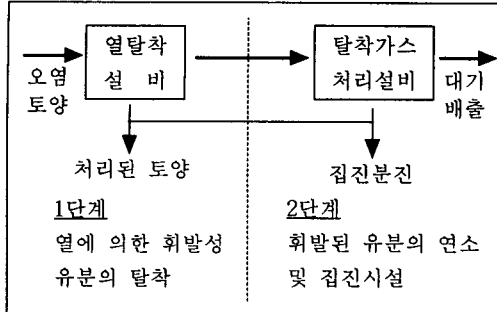


그림 6 The principle of thermal desorption

소계 물질이 함유되어 있지 않아 유해가스를 배출하지 않고, 오염토양이 대부분 사질토일 경우에는 저온 열탈착시설(LTTD)에서 열탈착 온도범위 38~350℃로 열탈착처리하는 것이 적합하다. 저온 열탈착설비는 대부분 차량 1대에 모든 장비가 탑재된 이동식으로 제작되어 있으며, 현장이동 및 설치가 간단한 반면, 중질유(윤활유/엔진유) 및 점질토로 오염된 토양의 복원에는 부적합한 경우가 많다.

높은 온도에서 기화하는 윤활유, 엔진오일, 원유 등으로 오염되어 있으나, 유기 염소계 물질이 함유되어 있지 않아 유해가스를 배출하지 않는 경우에는 고온 열탈착시설(HTTD)에서 열탈착 온도범위 650~1,200°F (343~ 650℃)로 열탈착처리하는 것이 적합하다. 고온 열탈착설비는 높은 온도를 유지해야 하기 때문에 저온열탈착에 비해 연료 소모량이 많고, 장비가 상대적으로 복잡하여 이동형으로 운영할 경우에도 운반차량 2대로 제작되곤 한다. 이 경우에도 토양이 점질토인 경우에는 열탈착기 내부의 토양시료 교환을 위한 별도의 장비보완이 필수적이다.

유류 오염토양 정화를 위한 열탈착 설비는 타 공법에 비하여 상대적으로 단기간에 처리가 가능하고 처리효율도 매우 높다. 또한, 경질유(경유, 디젤) 뿐 아니라, 다른 처리방법으로는 복원이 어려운 중

질유(엔진유, 윤활유)에 대해서도 높은 처리효율을 기대할 수 있다. 그러나, 운전기술이 복잡하고 처리비용이 고가이기 때문에, 경질유로 저농도 오염되어 있어 타 공법 사용이 가능하거나 처리대상 지역이 너무 광범위할 경우에는 본 공법의 선정에 신중을 기하여야 한다.

## 5. 결 언

오염 토양/지하수 복원기술은 대상 오염물질, 처리지역의 토양 특성, 처리요구 기간, 처리요구 수준 등 부지특성에 의해서 그 실용성과 효과가 매우 다르게 나타난다. 특히 외국에서 개발된 기존의 기술들은 우리 나라에 그대로 수입하기에는 그 적용성에서 문제점을 나타내고 있다. 그러나 현 시점에서 외국의 발전된 기술의 도입은 시급한 환경문제의 해결을 위해서는 필요 불가결한 과정으로 인식되고 있다.

다만 이제까지 언급되었던 복원기술들은 지식을 기반으로 하는 산업이기에 적용 이론에 대한 완전한 이해와 자료의 축적·분석 등을 통하여 전문성을 가지거나 응용기술의 개발이 용이한 이점이 있다. 따라서 앞으로의 연구와 투자, 그리고 기술개발 정도에 따라서는 그 발전 가능성이 많기에, 우리 모두의 관심과 지식을 결집해서 환경복원기술의 개발과 효과개선에 노력해야 하겠다.

## 참 고 문 헌

1. Azadpour-Keeley, A., H. H. Russell, and G. W. Sewell(1999), Microbial Processes Affecting Monitored Natural Attenuation of Contaminants in the Subsurface, Ground Water Issue, EPA/540/S-99/001
2. Cookson Jr., J. T.(1995), Bioremedi-

- ation Engineering, McGraw-Hill
3. Dharam Pal, Steve Fann and Scott Wight(1998), Application Guide for Thermal Desorption Systems, 236p
  4. ITRC(1999), Phytoremediation, Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group, Phytoremediation Work Team
  5. Manassero, M., C. H. Benson, A. Bouazza, 2000, SOLID WASTE CONTAINMENT SYSTEMS, GeoEng2000, Intl' Conf. on Geotech. &Geology, Australia, pp.
  6. Nyer, K. E. et al.(1996), In Situ Treatment Technology, Lewis Publishers
  7. Shakelford, C. D. & Jefferies, S.A. (2000), Geoenvironmental Engineering for In Situ Remediation, GeoEng2000, Intl' Conf. on Geotech. &Geology, Australia, pp. 121~185
  8. Rice, D.W., and W.W. McNab(1998), Natural biodegradation of organic contaminants in groundwater, Lawrence Livermore national laboratory, 14p
  9. Richard J. Feeney, P. James Nicotri and Daniel S. Janke(1999), Overview of Thermal Desorption Technology, 32P
  10. U.S. Army(1998), Remediation of Contaminated Soils by Thermal Desorption, 27p
  11. U.S. EPA(2001), Treatment technologies for site cleanup: annual status report (tenth edition), EPA-542-R-01-004
  12. Vidic, R. D., and F. G. Pohland (1996), Treatment Walls, Technology Evaluation Report, TE-96-01, GWRTAC series, 38p
  13. Wise, D.L. et al. (edit)(2000), Remediation Engineering of Contaminated Soils, Marcel Dekker