



# 토양오염방지 및 관리

## 6차시

# 1. 물리 · 화학적 처리방법

## 1.1. 토양증기추출 (Soil Vapor Extraction)

○ 토양증기추출법(Soil vapor extraction, SVE)은 진공추출이라고도 하며, 불포화 대수층위에 가스 추출정을 설치하여 토양을 진공상태로 만들어 증으로서 토양으로부터 휘발성 및 준휘발성유기화합물질을 제거하는 지중처리기술이다.

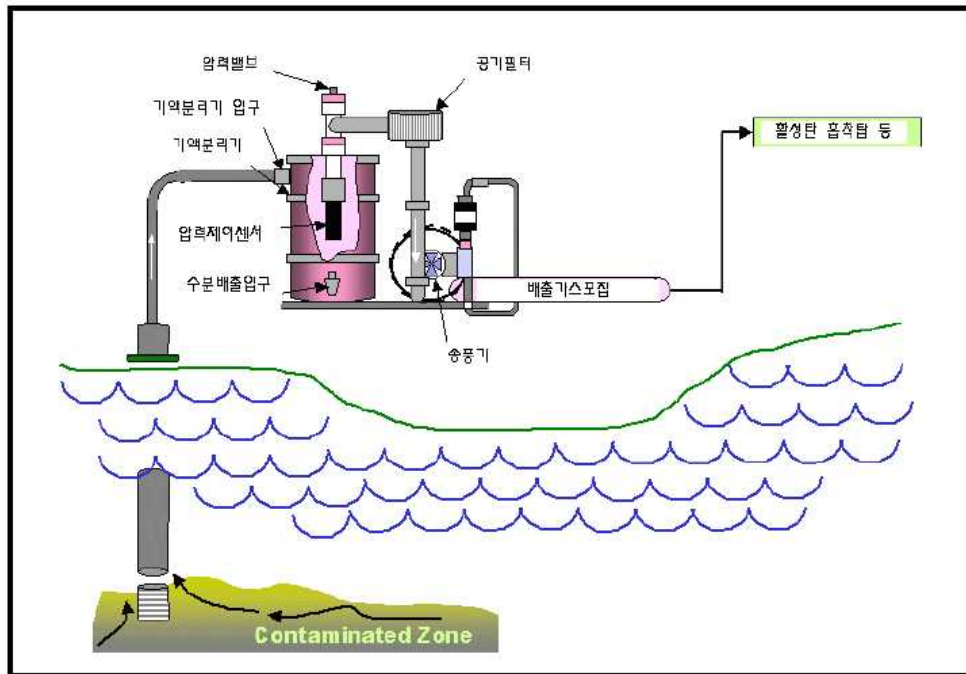
본 기술은 지하저장탱크 지역에서 석유계 화합물질 중 휘발성유기화합물질과 일부 준휘발성유기화합물질의 농도를 줄이는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 토양증기추출법은 일반적으로 휘발성이 높은 휘발유, 항공유 등으로 오염된 토양을 처리하는데 효율이 높은 반면 휘발성이 낮은 난방유, 윤활유 등으로 오염된 토양을 처리하기에는 효율이 낮은 것으로 보고되고 있다.

[표 4-16] 토양증기추출법의 기술분류 및 처리물질

기술분류	원위치/위치외	In-situ 적용		Ex-situ 적용	
	공정원리	생물학적 처리	물리/화학적 처리		열적 처리
	적용지역	불포화지역			포화지역
	적용매질	토양			지하수
	상용화 단계	상용화(full scale)	pilot scale		lab scale
처리물질	• 비할로겐 VOCs 및 유류				

[표 4-17] 토양증기추출법 장·단점

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> <li>소요 장비의 조달이 용이하며 설치가 간단함</li> <li>정화공사 중에도 부지를 활용할 수 있으며 접근이 불가능한 곳도 정화 가능</li> <li>정화비용이 타기술에 비해 저렴</li> <li>공기분산법(airspaging) 이나 지하수양수처리법 등의 다른 정화 기술과 조합 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>90%이상 농도를 저감시키기 어려움</li> <li>토양투수성이 낮거나 점토질의 함량이 높은 지역에 적용시 처리효과가 낮음</li> <li>배출가스 처리를 위한 비용이 추가됨</li> <li>불포화 대수층내 토양만 처리 가능</li> </ul>

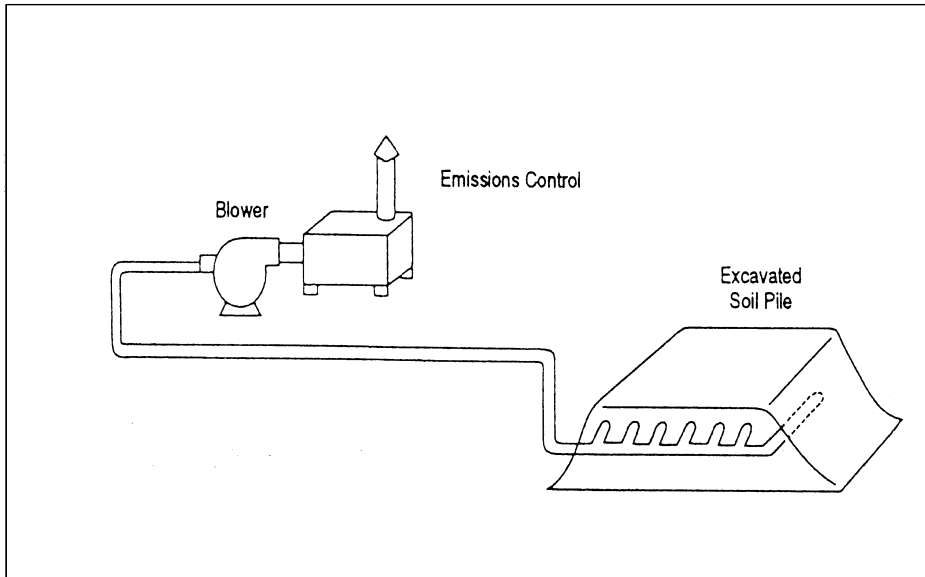


[그림 4-7] 토양증기추출법의 모식도

(자료, 환경부, 2007)

### 1) Ex situ

- 오염토양을 굴착하여 지상에 쌓은 후 증기추출관망을 그 내부에 설치하여 진공을 걸어 줌으로써 오염물질을 휘발시켜 추출처리하는 기술임
- In-situ와 비교해 볼 때 추출관망설치가 용이하고 지하수위에 의한 제한요소가 제거되며, 침출수의 집수가 가능하며 모니터링이 용이하다는 장점이 있는 반면 굴착에 소요되는 비용으로 인해 전체 비용이 증가되는 단점이 있음



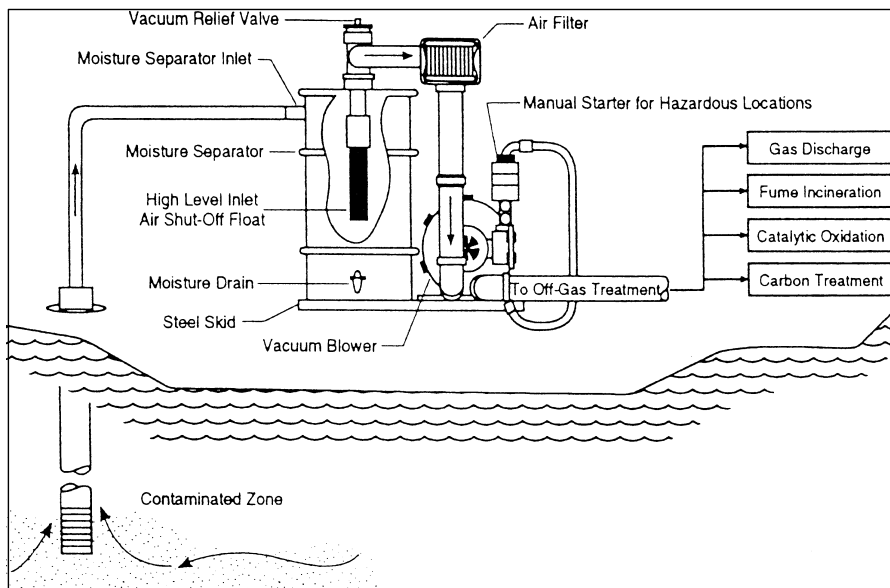
<그림 11> Soil Vapor Extraction [*ex-situ*] 공정도

- 주요 처리물질은 휘발성 유기물질임
- 장점은 일반적인 지상 토양증기추출법은 장기간 감시원이 없어도 수행이 가능함
- 단점은 i) 굴착에 소요되는 비용으로 인해 전체 비용이 증가하고, ii) 토양을 굴착하여 오염물질을 처리하는 과정에서 발생하는 배출가스를 처리해야 하며, iii) 토양에 잔류하는 액체의 처리와 활성탄소의 소비로 인해 공정의 비용이 증가하고, iv) 공간이 많이 필요
- 소요비용은 100/m<sup>3</sup>(방출가스처리비와 유출된 지하수처리비 제외)

## 2) In situ

○ 오염토양내 추출공을 굴착하여 진공상태로 만들어 줌으로써 압력 및 농도구배를 형성, 토양내 휘발성 오염물질을 휘발추출하는 기술로서 오염물질은 배출가스 처리공정에서 처리

- in-situ soil venting, in-situ volatilization, enhanced volatilization 또는 vacuum extraction으로도 불림



〈그림 12〉 Soil Vapor Extraction [*in-situ*] 공정도

[표 4-18] 토양증기추출법의 주요 영향인자

토양 투수성에 영향을 미치는 인자	오염물질 휘발성에 영향을 미치는 인자
고유투수계수 토양구조 및 지층구조 수분함량 토양 pH 지하수위	증기압 오염물질의 구성 및 비등점 헨리상수

(자료, 환경부, 2007)

### 3) 토양증기추출법 정화계획의 유효성 평가절차

정화계획의 유효성 평가는 정화계획 수립시 유류로 오염된 토양을 토양증기추출법으로 정화하고자 할 때 오염부지에 본 기술의 적용 가능여부 및 적절한 정화 계획 수립 등을 평가하기 위한 자료로 활용된다.

이러한 유효성 평가 절차는 아래와 같이 4개 부분으로 구성되어 있다.

#### □ 토양증기추출법의 유효성 평가절차

1단계 : 토양증기추출법의 초기 적용성 평가 단계에서는 토양증기추출법이 본 부지의 정화방법으로서 고려대상인지 여부를 신속하게 결정한다.

2단계 : 토양증기추출법의 세부 적용성 평가 단계에서는 토양증기추출법이 대상 부지의 정화에 효과적으로 적용될 수 있는지에 대한 토양 특성 및 오염물질의 특성 등 세부 기준들을 평가하며 실내 및 현장 실험, 자료 등의 검토를 통해 본 기술의 적용가능 여부를 최종 판단하게 된다.

3단계 : 토양증기추출법시스템 설계평가 단계로서 기본 설계를 위한 설계 인자 및 충분한 적용성 평가시험이 수행되었는지의 여부를 평가한다.

## 1.2 화학적산화법(Chemical Oxidation)

○ 화학적 산화법은 타기술에 비하여 유류 오염물질을 빠른 시간 내에 분해하여 처리할 수 있으며, 현재 다양한 산화제 및 오염물질을 효과적으로 접촉시키기 위한 다양한 방법이 개발되어 적용되고 있다.

화학적 산화법의 적용을 통하여 산화제와 접촉한 유류 오염물질은 지중에서 이산화탄소와 물로 분해되고 결과적으로 오염물질의 농도가 감소하게 된다. 화학적 산화법은 수십년 동안 폐수처리 공정에 효과적으로 사용되어 왔으며, 최근에는 원위치 토양 및 지하수 오염 정화 분야에도 활용되고 있다.

○ 화학적 산화법은 주로 포화지역과 모세관대(capillary fringe)의 오염원(source area)을 정화하기 위하여 사용되지만, 범위가 넓고 저농도로 오염된 지역에 적용하는 것은 비용적인 면에서 경제적이지 않다. 또한 오염물질의 농도가 매우 높거나 비수용액체상(Non Aqueous Phase Liquids ; NAPL)이 다량 존재할 경우에는 공정 운영의 안전성 또는 경제성 측면에서 화학적 산화법을 적용하기 전에 ‘유동유분의 회수법(free product recovery)’과 같은 타기술을 적용하는 것을 고려하여야 한다.

포화지역과 불포화지역의 오염원을 동시에 정화하기 위해서는 일반적으로 토양증기추출법과 같은 불포화지역 정화기술과 화학적 산화법을 연계하여 적용하기도 한다. 종종 토양증기추출법은 불포화지역의 오염원을 정화할 필요가 없다 할지라도 화학적 산화법과 연계되어 사용되기도 하는데 이는 화학적 산화공정 중 지중에서 발생하는 배기가스를 회수하거나 조절하는데 도움을 주기 때문이다.

○ 화학적 산화법에 사용되는 산화제 및 적용방법들은 각각의 장점과 단점을 가



지고 있다. 일부 산화제는 다른 산화제들보다 산화력이 강하고 지중에서 오염물질과의 접촉시간이 길어 효과적으로 오염물질을 분해할 수 있다. 다양한 산화제 중 적절한 산화제를 선택하기 위해서는 오염물질의 특성에 대한 구체적인 이해가 필요하다. 예를 들어 유류오염 지역에서 대표적으로 발견되는 벤젠과 같은 오염물질은 과망간산염을 이용한 원위치 화학적 산화법을 적용할 경우 쉽게 분해되지 않을 수도 있기 때문이다.

[표 4-35] 화학적 산화법의 기술분류 및 처리물질

기술분류	원 위치/위 치 외	In-situ 적용		Ex-situ 적용	
	공정원리	생물학적 처리	물리/화학적 처리	열적 처리	
	적용지역	불포화지역		포화지역	
	적용매질	토양		지하수	
	상용화 단계	상용화(full scale)	pilot scale		lab scale
처리물질	• 비할로젠 및 할로젠 휘발성유기화합물질, 비할로젠 및 할로젠 준휘발성유기화합물질, 연료유류, 무기물질, 방사성 물질				

(자료, 환경부, 2007)



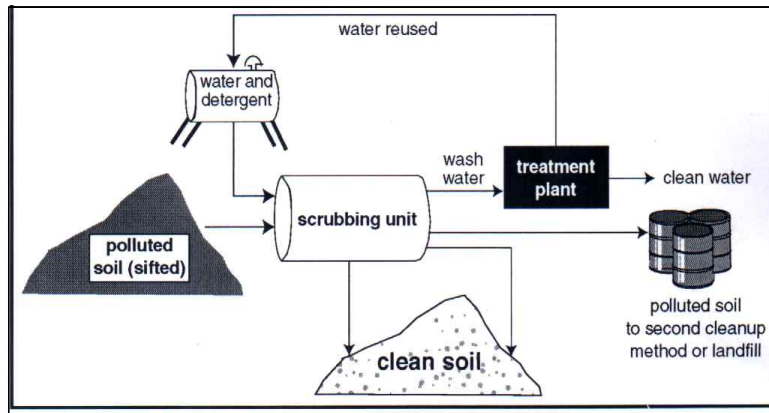
(자료, 환경부, 2007)

○ 여러가지 화학적 산화제가 유류 오염물질을 분해하는데 사용되고 있으며, 이 중 대표적인 산화제로는 과산화수소, 펜톤 산화제 및 오존을 들 수 있다. 과망간산 나트륨 및 과망간산칼륨은 실험실 또는 현장실험을 통하여 효과가 입증된 산화제 이나 과산화수소 및 펜톤 산화제에 비하여 사용실적이 적어 실제 사용하기에는 어려움이 있다.

○ 또한 현재 주목되고 있는 산화제 중의 하나는 과황산나트륨(sodium persulfate ;  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ )이 있으며, 과황산나트륨은 오염물질을 직접 산화시키는데 사용될 뿐 만 아니라 다른 산화제를 사용하기 전에 전체 산화제 소모량을 감소시키기 위한 전처리제로서 사용되기도 한다. 과황산나트륨은 2가철을 촉매제로 혼합할 경우 황산라디칼( $\text{SO}_4^-$ )을 형성하여 오염물질을 산화시킨다.

### 1.3 토양세척(Soil washing)

- 오염토양을 굴착하여 토양입자표면에 부착된 유무기성 오염물질을 세척액으로 분리시켜 이를 토양내에서 농축·처분하거나, 재래식 폐수처리 방법으로 처리한다. 중금속오염토양 처리방법으로 매우 유력한 기술임
- 처리전 토양의 굴착작업이 필요
- 화학적 처리는 토양으로부터 오염물과 반응하여 침출시키는 추출제를 첨가하여 오염물을 포함하는 용액이 깨끗해진 고체상태로 변환된 토양으로부터 분리시켜야 하며, 물리적 처리는 특정입자크기의 오염물을 농집시키는 선별과정과 같이 입자크기에 따라 분리

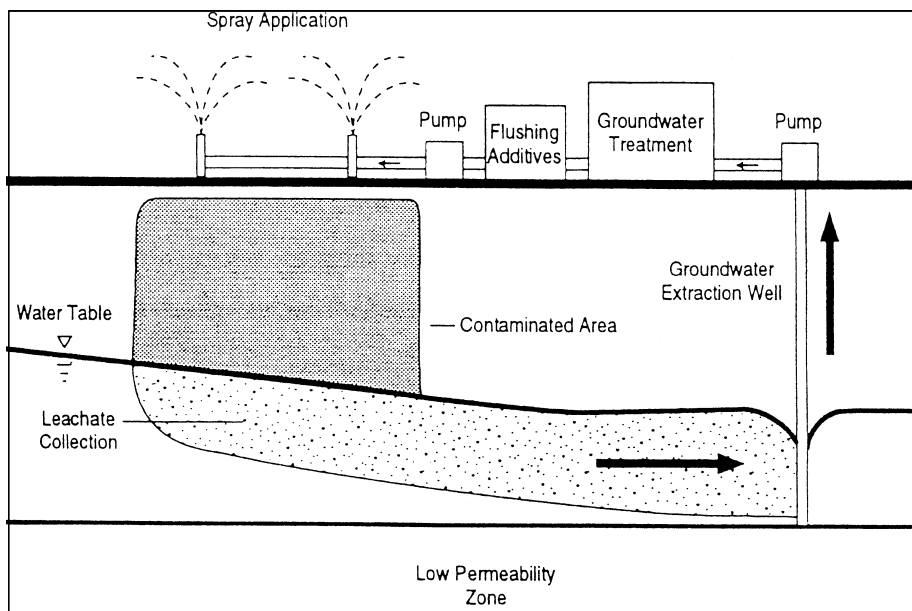


〈그림 3〉 토양 세척법 모식도 (EPA, 2001)

- 주요처리대상물질은 준휘발성유기화합물, 유류계 오염물질, 중금속, 휘발성유기화합물, 살충제, 기타 유무기오염물질 등임
- 이 기술은 장점은 생물학적 복원기술, 소각, 고형화/안정화와 같은 기술과 복합적으로 사용이 가능한 것임
- 단점으로는 미세토양입자를 분리하기 위해 응집제를 첨가하여야 하며, 복합오염물질(예, 유기물질을 포함한 중금속)인 경우 세척제의 선별제도가 쉽지 않고, 토양내 휴믹질이 고농도로 존재할 경우 전처리가 필요함
- 소요비용은 \$130-220/m<sup>3</sup>(굴착비용포함)정도임

## 1.4 Soil Flushing

- 물이나 오염물질의 용해도를 증가시켜주는 첨가제를 혼합한 용액으로 토양을 씻어낸 후 지하수로 침출된 오염물질을 처리하기 위해 지하수를 용출시켜 정화처리하는 방법임
- Flushing 사용된 용액은 재사용할 수 있음. 복원기간은 짧은 편이지만, 투수성이 낮거나 heterogeneous soil에서의 적용이 어려우며, 토양과 flushing 용액의 반응으로 인해 오염물질의 이동성을 감소시키거나, flushing 용액의 분리와 재처리 비용이 비싸다는 단점이 있음
- 처리 비용은 \$25~250/yd3가 소요(EPA, 1991; EPA, 1996)



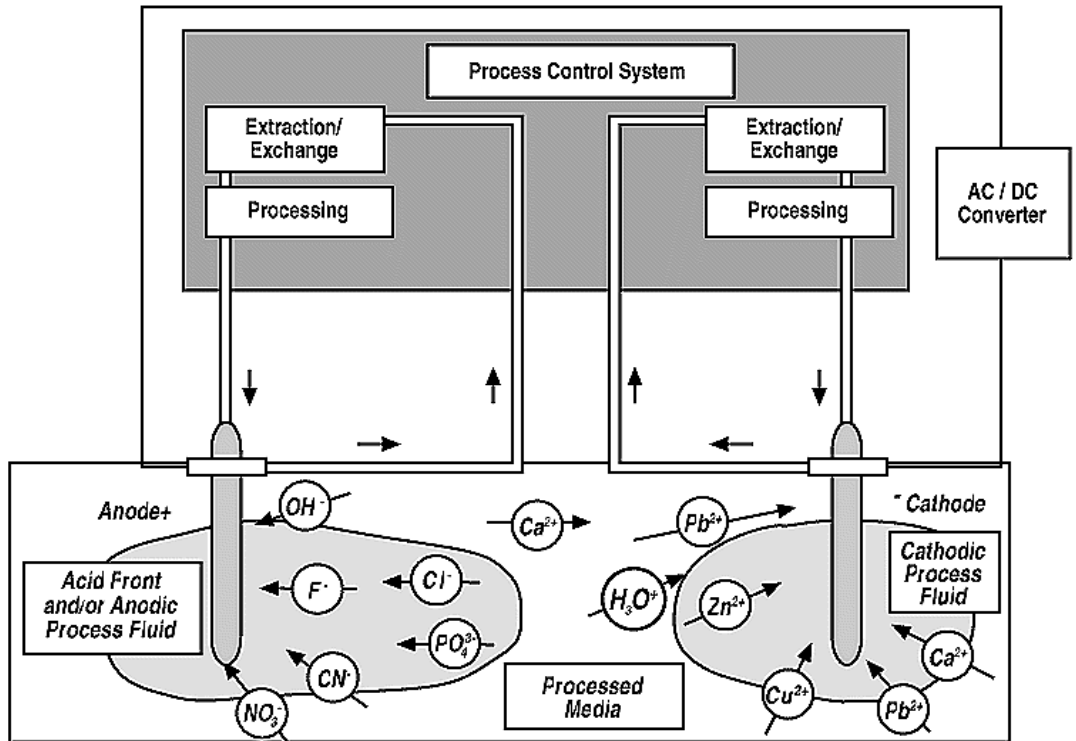
〈그림 4〉 Soil flushing의 모식도

- 주요처리물질은 방사능오염물질, 무기물질, 살충제, 휘발성유기화합물질, 준휘발성유기화합물질임

- 장점으로 중금속오염토양의 처리에 뛰어난 효과를 보임
- 단점은 i) 살충제, 휘발성유기화합물질, 준휘발성유기화합물질의 처리시 경제성이 떨어지고, ii) 세정용액에 의해 토양의 물리/화학적 특성이 변화됨. iii) 투수성이 낮은 토양은 처리하기가 어렵고, iv) 계면활성제 처리시 계면활성제가 토양에 부착되어 토양의 공극을 감소시키는 경우가 있음 v) 토양세정공장의 적용성을 결정하기 위해서는 처리효율실험을 먼저 수행하여야 함(자료, 환경부, 2007)

## 1.5 동전기 처리방법(Electrokinetic Separation)

- 투수성이 낮은 토양에서 중금속 등의 오염물질을 제거하는 방법으로 중금속을 토양에서 탈착시켜 분리제거하는 전기화학적(electrochemical)·전기동력학적(electrokinetic) 과정을 거치는 방법
  - 음전극과 양전극의 두 ceramic electrode에 낮은 전류를 흘려보내 음극과 양극으로 토양 중에 있는 양이온과 음이온을 이동시키는 것으로 토양이 산성조건일 때 중금속의 이동성을 증가시키기 때문에 더 유리
  - 전극으로 이동된 오염물질의 제거는 electroplating, 침전, 공침, 전극 주변 용액의 pumping, 이온교환수지에 의한 complexing 등이 이용
- 오염물질의 제거효율이 높고 단기간에 복원을 완료할 수 있다는 장점이 있지만, 오염물질의 이동성과 관련하여 토양 수분이 적어도 10%이상 (최적 : 14~18%)이 있어야 하며, clay 토양에서 최적이고, 극단적인 pH에서는 산화-환원 반응에 의해 오염물질의 변이가 발생되어 장애를 받는 단점이 있음
  - 비용은 \$50/m<sup>3</sup> 이상이 소요(USAEC, 1997; U.S. DOE, 1995)



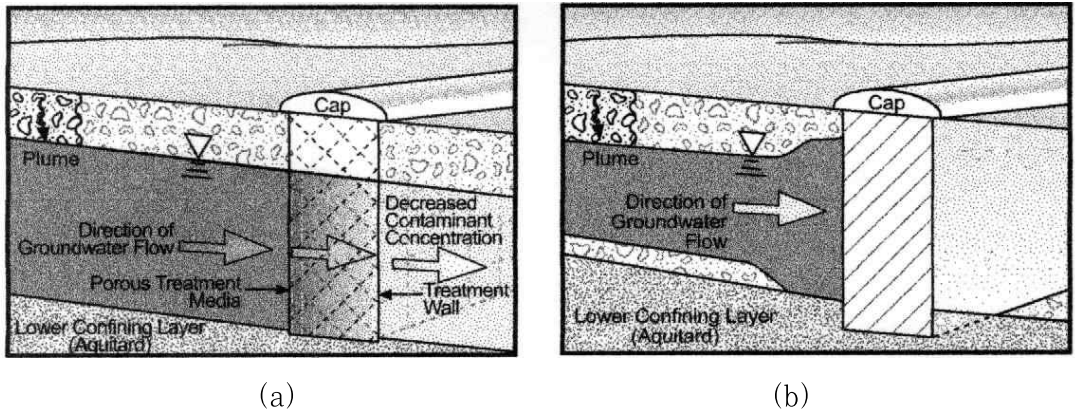
〈그림 13〉 electrokinetic separation에 의한 중금속의 제거

## 2. 기타 관리 기술

### 2.1 차단벽

- 차단벽(Subsurface Barriers)은 오염부지에서 지하수 흐름을 조절, 오염토양이나 지하수를 격리, 차단시키는 데에 이용되며 부지내 오염지하수의 유동성을 저하시키고 오염부지를 통한 순수지하수의 유출입을 제한함



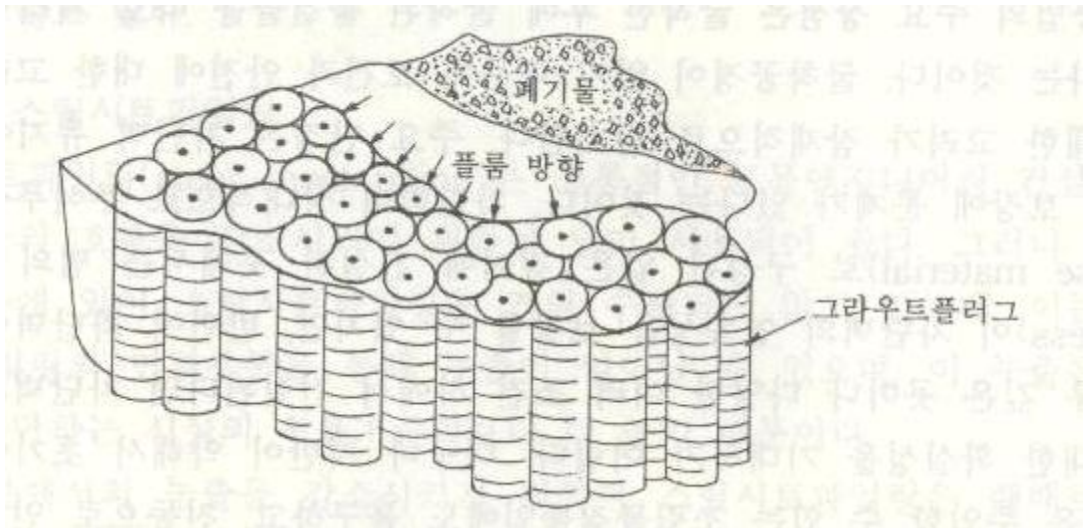


〈그림 3〉 투수성(a) 및 수직 차수 방벽(b)과 Capping 시스템 설치 모식도(USEPA, 2001)

- 수직차수벽(Vertical barriers)은 오염지하수의 유동을 최소화하고 외부지하수의 유입을 제한함으로써 오염물을 효율적으로 격리 차단함. 수직 차수벽은 오염부지 하부에 점토층 등 저투수성 암층까지 설치하여 수계의 상류, 하류지역은 물론 부지를 완전하게 둘러 도록하고 우수의 침투가 되지 않도록 capping system과 연계. 원형차수벽(Circumferencial barriers)은 부지로부터 오염물이 이탈되지 않도록 부지내로 집수system을 설치. 설치 심도는 트렌치 굴착기술 여건상 약 30ft 정도로 제한함
- 차수벽(Slurry wall) : 주변토양으로 유체의 유출손실이 없도록 하거나 붕괴방지를 위하여 제조된 slurry를 말하며 수직 트렌치내에 설치. 화학적 부식에 강한 토양과 벤토나이트를 혼합한 토양-벤토나이트(SB) 슬러리월이 가장 흔히 사용되며 벤토나이트-물 슬러리에 토양을 혼합한 강화형, 세멘트-벤토나이트(CB) 슬러리월을 쓰기도 함. 슬러리월은 저렴한 경비로 수직 경계막 설치에 흔히 이용되나 현지 지형, 지질, 부지의 오염 형태 등에 제약을 받으며 농집된 유기물이나 강산, 강염기성 물질들에 의해 성능이 저하됨.
- 그라우트 커튼(grout curtains) : 시추공을 천공하여 부지 주변 토양에 유체를 주입, 고화시킴으로써 오염지역을 통한 유체의 흐름을 저감시키는 방법으로 주입물질은 시멘트, 점토, 알칼리규산염, 유기폴리머 등을 사용. 비용상 점토를



가장 널리 활용하는데 슬러리월보다는 다소 경비가 고가이며 다공성 매질을  
 봉합하는데에 국한하여 활용

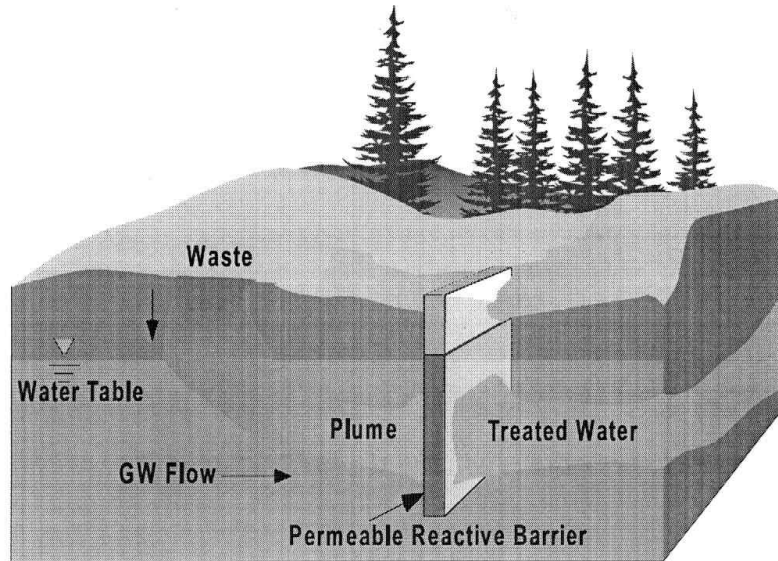


〈그림 4〉 오염된 플룸을 차단하기 위한 그라우트 커튼의 모식도(토양환경공학, 2001에서 인용)

- 스위트파일(sheet piles) : 철재 파일을 지층에 박아 방벽을 형성시켜 지하수 흐름을 제한하는 방법임. 통상 40-50ft 정도의 깊이의 소규모 지역에 천부 오염지역의 차단 격리에 사용되거나 SB 슬러리와 연계하여 통상적인 슬러리월의 설치가 곤란할 때 사용. 파일의 수명을 연장시키거나 산성부지에서의 부식 방지를 위한 부식방지 피복재나 탄소강을 사용하기도 함
- 수평차수벽(Horizontal Barriers) : 수평 차수벽은 오염부지를 불투수층으로 피복함으로써 오염물질의 하향 이동을 제한시키는데 이용되며 격자식 수평 수직 시추공을 굴착하고 그라우팅하여 수평 불투수성 지층을 형성시. 오염부지 위에서의 시추작업으로 인한 토양의 다짐현상과 과도한 시추시 하부 지층이 추가로 오염원에 의한 오염의 소지가 있음

## 1.2 반응벽

- 오염물질이 입자상으로 구성된 벽체를 통과하면서 물리화학적 또는 생물학적 반응을 거쳐 오염물질을 제거하는 지중에 설치된 벽체임
  - 반응벽(reactive wall)은 오염된 부지의 수리지질학적 특성과 선택된 처리방법의 효율에 따라 다양한 외형을 가짐
- 반응벽의 기본 요소는 수문(gate)을 통해 반응지역(reactive zone)으로 통과하는 지하수의 흐름을 산정하는 것임
  - 시스템은 제거대상 오염물질의 유입농도와 유출농도에 따라 설계. 시료 채취지점은 반응벽의 축을 따라 지정하며, 유입 및 유출지점도 포함
- 반응벽의 재료로 사용하는 재료는 지하수내의 오염물질이 반응할 만한 충분한 지하수의 체류시간을 보장해야 함
  - 반응물질의 예로서는 Feo(zero valent iron, iron fillings), 석회,沸石(Zeolite), 인회석수산화물(hydroxyapatite), 유기탄소, 미생물복합체(microbial consortium) 등이 있음



〈그림 5〉 투수성 반응성 방벽처리 사례

## 참고문헌

- 김정규, 이상환. 1997 Phytoremediation for polluted soil, Natural Resources Res. 6:43-63.
- 김정규 등. 2003.10 농업환경오염복원기술개발. 농림기술관리센터.
- 김정규, 중금속 오염토양의 식물정화, 제1회 식물을 이용한 환경복원기술 워크숍 - Phytoremediation -, 한국과학기술연구원, 토양환경복원연구회, 29-48, 1998.
- 양재의, 이규승. 2001. 농업환경. 한국환경농학회.
- 한국토양환경학회. 1997, 1998. 오염토양복원기술 및 제도발전에 관한 연구 용역 보고서, 1, 2, 3권.
- 환경부, 2007, 오염토양 정화방법 가이드라인
- Anderson, T.A., E.A. Gutherie and B.T. Walton. 1993. Bioremediation in the rhizosphere. Environmental Science & Technology. 27(13):2630-2636.
- Boyajian, G.E., and D.L. Devedjian. 1997. Phytoremediation: it grows on you. Soil & Groundwater Cleanup. February/March. pp. 22-26,
- Cataldo, D.A., S. Harvey, R.J. Fellows, R.M. Bean and B.D. McVeety. 1989. An Evaluation of the Environmental Fate and Behavior of Munitions

- Material (TNT, RDX) in Soil and Plant Systems. Final Report. U.S. Medical Research and Development Command. Project Order Number 88PP8853. Pacific Northwest Laboratory.
- Cunningham, S. D. 1997. Phytoremediation of Contaminated Soils: Progress and Promise. In Alleman, B.C., and A. Leeson: in situ & On-Site Bioremediation: Volume 3. Battelle Press. Columbus, OH. pp. 319.
- EPA. 1995. Bioremediation of hazardous wastes - research, development, and field evaluations, EPA/540/R-95/532, Sept., 1995
- EPA. 1996. A Citizens Guide to Phytoremediation. EPA 542-F-96-014.
- EPA. 1997. Potential for Phytoremediation Discussed. EPA Tech Trends. EPA 542-N-97-001. Issue No. 25.