

## 오염부지 정화기술과 그 이용기법

# Remedial Action Technologies for the Contaminated Soil and Groundwater, and its Usage

이민효(Min-Hyo Lee)\*

**요 약** : 산업의 급진적인 발달로 수많은 유해물질이 자연계로 유출되고 있으며 이들 오염물질은 환경매체중 최종 수용체인 토양에 유입되어 지하수까지도 위해를 주고 있다. 한편 토양 및 지하수는 유해물질에 의해 일단 오염되면 인위적으로 복원하기 전에는 치유가 되지 않는 특성을 가지고 있어 미국이나 서구유럽의 국가 등 우리보다 산업화가 먼저 이루어진 나라에서는 오염부지 정화 및 관련기술의 개발에 막대한 예산을 투자하고 있다. 그러나 우리나라는 토양오염으로 인한 실태파악이 미비하고 오염부지정화를 위한 관련기술의 개발이 아직 초기단계로 적정관리를 위한 기반이 취약한 실정이다. 따라서 본보에서는 오염부지의 적정관리를 위해 외국에서 개발·이용되고 있는 정화기술과 오염부지 복구시 관리절차에 대해 살펴보았다.

**Abstract** : Along with rapid industrial development, toxic chemicals have been discharged extensively into the environment. Many of them have flowed into the soil which is final acceptor of environmental pollutants. As a result, they have deteriorated soil and groundwater environment. Once the soil and groundwater were contaminated by pollutants, these media can not be easily restored without artificial remediation. Foreign countries which accomplished earlier industrialization compared to our country have invested enormous capital for the remediation of contaminated sites and the development of relevant technology. In our country the reserch on the development of remediation technology has been conducted for several years, but it is still in its initial stage. This report represents remediation technologies, their adaptability and clean up procedure etc. which are being used for the management of contaminated site in advanced countries.

### 서 론

최근 산업이 급속도로 진전됨에 따라 유해물질이 자연환경계로 대량유출되고 있으며 이들 오염물질은 대기, 수질, 폐기물 등 직·간접적인 다양한 통로를 통해 환경의 최종 수용체인 토양에 유입되고 있다. 특히 오염물질이 토양이나 지하수에 노출될 경우 이들 매질의 특성상 인위적으로 복원하기 전에는 이들 매체를 반영구적으로 오염시켜 인체에 위해를 가중시키고 있다. 우리보다 산업화가 일찍 이루어진 미국, 유럽, 일본 등에서는 최근 오염부지 정화 및 관련기술 개발을 위해 막대한 예산을 투자하고 있다.

국내에서도 최근들어 비위생매립지, 휴·폐광산, 유류를 포함한 유해물질 지하 저장시설, 공장·산업시설 등지에서 토양과 지하수의 오염이 우려되고 있어 이들 지역의 적정관리를 위해 정부에서는 지하수법('94. 12)과 토양환경보전법('96. 1)을 제정·시행하고 있다. 특히 토양환경보전법에서는 오염원이 많고 상시 우려되는 지하 유류저장시설이나 토양오염물질로 지정된 카드뮴, 시안 등 11종 물질을 저장하는 시설에 대해서는 주기적으로 토양오염도 검사를 실시하고 그 외 토양오염이 우려되는

여타지역은 국가 및 지방자치단체에서 토양오염측정망을 형성하여 상시 모니터링 감시하고 조사결과 기준치를 상회하는 지역은 오염시설을 제거하고 오염부지를 정화토록 명시되어 있다. 그러나 우리나라에서는 오염토양복구시 어떠한 기술로 어떻게 복구해야 할 것인지에 대해서는 아직 제도적인 뒷받침이 미흡한 실정이다.

본고에서는 오염부지의 적정관리를 위해 외국에서 개발·이용하고 있는 정화기술을 비교평가하고 오염복구시 정화절차 등에 대해 살펴보았다.

### 오염부지 정화기술

각국에서 상용화되어 이용하고 있는 기술을 중심으로 처리위치별 및 처리 기술별로 구분하여 소개하면 다음과 같다.

#### 처리위치별

처리위치별 토양정화기술은 오염토양내에서 처리하는 In-situ 처리기술과 오염토양 밖에서 처리하는 Ex-situ 처리기술로 구분되며, Ex-situ 처리는 오염토양위에서 처리하는 On-site 처리와 오염토양을 운반후 별도 장소에서 처리하는 Off-site 처리로 구분하고 있다.

또한 토양정화기술은 단순히 오염의 확산을 방지하기위한 오

\*국립환경연구원 토양환경과(Soil Environment Division, National Institute of Environmental Research, Eunpyung-Gu, Pulkwang-Dong 613-2, Seoul)

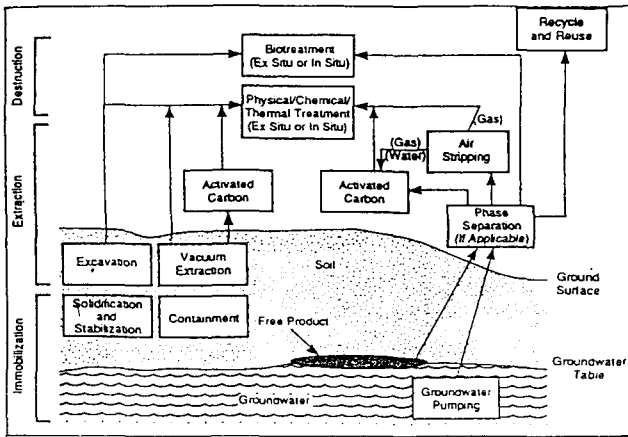


Figure 1. Overview of remediation measures.

염물질 차폐기술과 오염물질을 제거하는 기술로 구분할수있다 (Figure 1).

처리기술별 분류

(1) 열적 처리기술(Thermal Technology)

□ 처리개요

열적 처리과정은 통제된 환경에서 토양을 고온에 노출시켜 소각이나 열분해를 통해 토양중에 함유되어 있는 유해물질을 분해시키도록 고안된 기술이다. 열적 처리는 물질의 직접 연소에 의한 열처리(소각)와 간접연소에 의한 열처리(열분해)의 두 가지 형태로 구분된다.

열적 처리는 가장 높은 정화효율을 가지나 다른 정화기술에 비해 가장 높은 에너지 처리비용이 든다. 이 방법은 토양의 형태나 오염물질의 종류에 관계없이 적용범위가 넓기 때문에 이러한 문제를 가지고 있는 부지의 정화에 효과적으로 이용할 수 있다. 할로젠, 비할로젠 휘발성물질 및 준휘발성물질, PCB, 농약 등 유기성 오염물질은 모두 처리가능하나 카드뮴이나 수은을 제외한 중금속은 일정온도에서 처리가 되지 않으며 온도를 높이면 유리화가 된다.

소각장치는 보통 800-1200°C에서 운전되며 열분해장치는 약 400-800°C의 온도에서 운전된다.

열분해는 소각에 비해 장치가 복잡하고 고장요인도 많으나 소각을 하게되면 토양이 가지고 있는 성질은 잃게되므로 유류 오염 토양의 경우 열적처리기술을 적용할 경우 열분해 방법을 많이 채택한다(Table 1, 2).

□ 기술적용시 고려사항

폐기물의 성질은 소각작업에 영향을 미친다. 오염지역에서 특정폐기물을 사용한 처리능력 조사는 잠재적인 문제지역의 조사 및 확인시에도 포함시켜야 한다. 처리능력 조사에 앞서 혼합 폐기물에 대해 이화학적 성질에 대한 실험실적 분석이 행해져야 한다(밀도, 수분함량, heating value, 비가연성 재함량, 입도분석, PH, 금속의 종류 및 농도, 유기물질 종류 및 농도 등).

□ 비용

소각비용은 처리 system의 능력, feedstock의 형태등 여러요인에 따라 다양하나 상대적으로 높은 소각비용은 처리를 옵션화

Table 1. Suitability of thermal processes depending on the soil/grain size

soil/grain size mineral content	suitable	to some extent	not suitable
gravel	×		
medium sand	×		
fine sand	×		
silt	×		
clay	×		
loam	×		
building rubble	×		
sludge		×	
fine grain residues from soil washing	×		

Table 2. Suitability of thermal procedures depending on the pollutant

type of pollutant	suitable	to some extent	not suitable
mineral oil hydrocarbons	×		
polychlorinated aromatic hydrocarbons	×		
BTEX	×		
phenol compounds	×		
cyanides	×		
chlorinated compounds	×		
organic compounds with N, S, O, P		×	
Hg, Cd, As, So, Zn		×	
any other heavy metals			×

Table 3. Treatment cost by different remediation technologies

Remediation site	Technology	Treatment cost(weon)
On-site or off-site technology	Soil washing/extraction	60,000-210,000/ton
	Thermal treatment	60,000-900,000/ton
	Chemical treatment	12,000-120,000/ton
	Biochemical treatment	60,000-180,000/ton
	Stabilization/Solidification treatment	90,000/ton
	Incineration treatment	100,000-150,000/ton
In-site technology	Thermal treatment	180,000-500,000/ton
	Chemical treatment	150,000-250,000/ton
	Biochemical treatment	30,000-120,000/ton
	Stabilization/solidification	100,000-180,000/ton

(Hwang, 1996)

하므로써 경감시킬 수 있다(Table 3).

(2) 안정화 및 고형화 처리기술(Stabilization/Solidification Technology)

□ 처리개요

시멘트화에 의한 안정화/고형화(S/S)처리기술은 고형물질을 형성함으로써 오염물질의 이동을 방지하는 목적으로 사용되고 있는 기술로 Portland cement, 석회 및 Petrifix 등이 주로 사용되

며, 이중 Portland cement가 널리 사용되고 있다.

안정화란 물질을 불용해성으로 만드는 것이고, 고형화란 액상이나 스러지와 같은 폐기물을 접합제를 첨가하여 고상의 형태로 만드는 것을 의미한다. S/S 처리기술은 과거 10년 동안 많이 연구되어왔으며 S/S 처리기술에 이용되는 접합제는 크게 두 가지로 구분된다.

- 무기접합제 : 시멘트, 석회, Kiln dust, fly ash, 규산, 점토, 지올라이트
- 유기접합제 : 아스팔트, 폴리에틸렌, 레자, 에폭시, 우레아포름알데하이드, 폴리에스테르

유기성 접합제의 이점은 용해도가 높은 폐기물이나 유기성 오염물질을 화학적으로 접합시켜 안정화시키는 능력이 크다. 반면 무기 접합제보다 가격이 비싸기 때문에 핵폐기물이나 독성이 강한 산업폐기물 등의 처리에 국한되어 사용되고 있다.

유리화(Vitrification) 기술도 S/S 처리기술에 포함될 수 있으며 본 방법은 대상물질을 유리화시킴으로 유기성 물질을 파괴하고 중금속 물질은 고정시킴으로 확실한 처리기술이지만 고가의 비용이 소요되므로 넓은 면적의 오염부지에서는 본 기술을 적용하기는 어렵다.

S/S 처리기술은 In-situ 처리와 On-situ 처리 등 다양하게 적용될 수 있다. In-situ 처리는 땅을 굴착하는 것이 먼지의 비산 등 건강 등의 이유로 바람직하지 못하거나 굴착비용을 투자하지 않으려고 할 때 이용된다.

- S/S 처리과정

1) 전처리

토양을 on-site나 off-site에서 처리할때는 토양입자를 처리과정에 적합하도록 일정체에 그른다. 폐기물이 다량의 물을 함유하면 최종 고형화를 위해 탈수조치를 행해야 한다. 가능한 폐기물을 단일화 및 균질화시킨다. 접합제로 폐기물을 혼합하기 전에 화학물질을 첨가하여 오염물질을 독성이 없게 하거나 용해도가 낮은 형태로 만든다.

2) 혼합

폐기물과 접합제를 혼합하는 것은 In-situ나 Ex-situ에서 다 가능하며 Ex-situ에서의 혼합은 In-situ에서 보다 더 용이하다. 혼합은 본 과정에서 가장 중요한 단계로 원래 폐기물이 균질하지 않고 접합체와 혼합한 폐기물을 적절하게 분산시킬 수 있는 능력이 불충분하기 때문에 이 단계를 수행하는데 어려움이 있다.

3) 구조 및 숙성

혼합물은 몰드나 라군으로 보내진다. 혼합물이 작은 몰드내에서 구조 될 때는 혼합물을 빨리 넣어야 하며 라군에서 경화할 경우에는 시간에 큰 영향을 받지 않는다.

□ 기술적용시 고려사항

S/S 처리기술은 유기성 오염물질과 혼합된 중금속을 함유한 폐기물 등으로 오염되어 있는 특정지역에서 마땅한 처리방법이 없는 경우와 다른 처리기술에 비해 처리비용이 싸다는 두가지 요인에 의해 본 방법의 사용이 고려된다.

시멘트화 기술은 주요오염원이 중금속이고 유기성 오염물질이 주요문제로 고려되지 않는 조건에서 주로 사용되는 방법으로 고독성의 유기오염물질이 있거나 다량의 휘발성 유기오염물질이 있을 때는 사용이 곤란하다.

S/S 처리기술의 단점은 장기간의 시일이 경과 할 경우 오염물질의 용탈 등 내구성 문제와 고형화를 하는데 요구되는 다량의 화학물질로 인해 건조토양의 경우는 무게와 부피가 100~140% 이상 증가되어 매립지의 이용기간을 크게 단축시킨다.

□ 비 용

처리비용에 관한 정보는 많지 않으며 처리방법에 따라 비용이 상이함(Table 3).

(3) 토양증기 추출기술(Soil Vapor Extraction Technology)

□ 처리개요

토양증기 추출법은 토양내 통풍법(in situ soil venting: ISV)이나 토양진공추출법(soil vacuum extraction: SVE)으로도 알려져 있으며 가솔린, 용매, 휘발성 및 반휘발성 유기오염질을 처리하는데 이용되는 경제적인 처리기술이다. SVE는 오염된 토양 내 공극을 통해 오염 공기를 뽑아내어 처리하는 단순 기술이며 토양 및 지하수로부터 대기로 오염물질을 이동시키기 때문에 미생물처리 기술 등 다른 처리기술과 함께 이용되면 더욱 효과를 높일 수 있다. 이때 오염물질을 대기로 뽑아내는 효과는 오염물질의 화학적 특성, 불포화 지대를 통한 증기의 흐름정도 및 오염지역으로 이동되는 증기의 흐름도에 따라 크게 차이가 난다 (Table 4, 5).

SVE는 1970년대부터 매립지에서 나오는 Gas를 제거하는데 이용되어왔고 1980년대에는 지하저장탱크에서 누출되는 오염 토양을 정화하는데 폭넓게 이용되어왔으며, 최근에는 유해 폐기물 오염지역을 정화하는데 사용되어오고 있다. 본 기술은 건물이나 고속도로 등지에도 사용 가능하다(Figure 2).

- 처리과정

본 과정은 토양을 통하여 배기되는 공기는 토양 공극을 통과하며 저항성이 낮고 공기침투력이 큰 지대를 통하여 흐른다. 공극을 통해 배기되는 공기는 증기물질의 흡착을 통해 배출된다. SVE 체계의 기본은 증기운반 메카니즘이다. 통기작업의 효율성은 오염물질의 화학적 조성, 불포화지대를 통한 증기흐름율, 오염물질의 위치와 관련된 이동되는 증기의 흐름 통로의 이들 3가지 요인에 의하여 크게 지배된다.

오염물질중 증기의 압력이 0.5 mmHg 이상을 나타내며 Hen-

**Table 4.** Suitability of soil vapor extraction process on the soil type

type of soil	suitable	to some extent	not suitable
gravel	×		
medium sand	×		
fine sand	×		
silt		×	
clay			×

**Table 5.** Suitability of soil vapor extraction process on the pollutant

type of pollutant	suitable	to some extent	not suitable
VOC	×		
Semi VOC		×	
PAH's			×
Mineral oil			×
Heavy metal			×

Source: U.S. EPA 1989c.

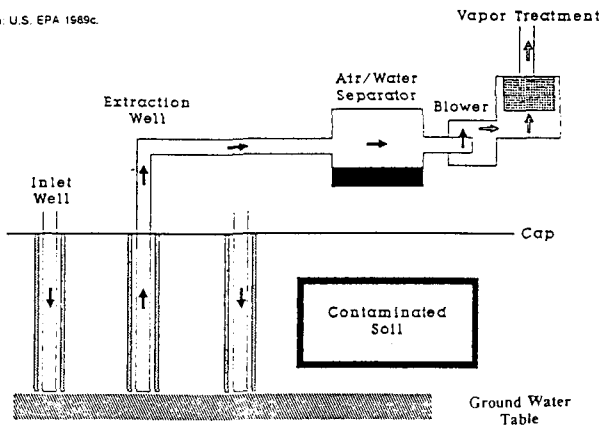


Figure 2. Soil vapor extraction system.

Table 6. Suitability of soil washing processes depending on the type of soil

type of soil	not suitable	to a limited extent	suitable
gravel			×
medium-grained sand			×
fine grained sand			×
silty sand	×		×
loam		×	
clay		×	
rubble			
sludge	×		
ash	×		

ly 법칙 상수치가 0.01보다 큰 혼합물질은 SVE에 의해 쉽게 처리된다. 그림은 토양증기 추출 체계를 나타낸 기본도로 1개 이상의 추출정, 1개 이상의 공기 입구 또는 주입정, 진공펌프 또는 공기 주입기, 유량 조절계, 진공게이지, 공기/물 분리기, 증기처리장치, 덮개 등으로 이루어져 있다.

□ 기술적용시 고려사항

본 방법으로 처리될 수 있는 최종 토양오염수준은 실질적으로 한계가 있다. SVE 기술적용시 부지의 불균일성이나, 오염지역에 대한 정확한 정보가 결여되면 SVE의 효율성이 크게 저하된다.

□ 비 용

오염부지에 대한 처리비용은 대상부지의 크기, 부지 특이성 및 오염범위(대상물질 및 오염정도), 부지의 정화기준에 따라 크게 달라진다(Table 3).

(4) 물리화학적 처리기술(Physical/Chemical Extraction Technology)

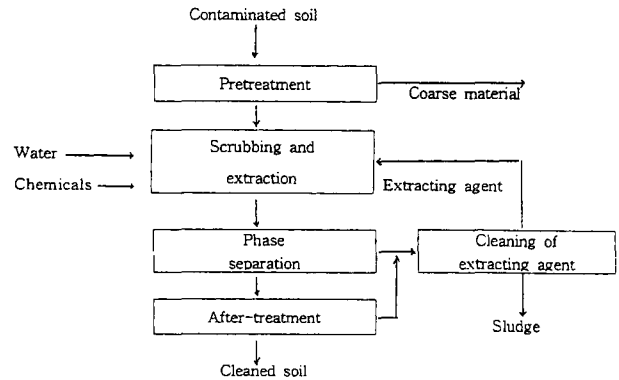
□ 처리개요

물리화학적 처리기술로 ex situ와 in situ에서 물, 산 및 유기용매를 이용하여 중금속이나 PAH's, PCB를 처리하는데 이용되는 추출법과 phenol물질을 In situ 상태에서 산화반응에 의해 처리하는 jet cutting 방법, 최근에 신기술로 연구개발 되고 있는 중금속 물질은 In situ 상태에서 처리하는 전기교정방법 등이 있다.

Ex situ 추출방법은 액상환경에서 입자의 분리, 용해 및 분산의 3단계로 이루어지며 In situ 추출방법은 심하게 오염되어 있

Table 7. Suitability of soil washing processes depending on the pollutant

type of pollutant	not suitable	to a limited extent	suitable
mineral oil hydrocarbons			×
polycyclic aromatic hydrocarbons		×	
highly volatile chlorinated hydrocarbons			×
aromatic hydrocarbons			×
polychlorinated biphenyls			×
dioxins and furans			×
cyanides		×	
heavy metals		×	



Source : Hinsenveld 1990.

Figure 3. The basic processes in extraction installations.

는 토양에서는 미세한 입자를 분리시키지 못하기 때문에 모래 토양 등에서 단지 제한적으로 적용되고 있다(Table 6, 7).

Jet cutting 방법은 phenol 등 쉽게 산화할 수 있는 오염물질을 In situ 상태에서 산화처리하는 방법이다.

한편 전기교정방법은 In situ 상태에서 중금속을 제거하는 신기술로 최근에 토양오염 현장지역에 도입되고 있는 방법으로 본 기술은 토양에 전장을 형성하여 오염물질에 대해서 electrophoresis라 불리는 electrical driving force, 전기삼투압이라 불리는 water flow를 유발시켜 용해된 오염물질을 한 곳으로 모아 처리하는 방법이다. 본 기술은 점토함량이 높은 식질토에 함유되어 있는 중금속을 제거하는데 적합한 것으로 알려져 있다.

• 추출기술의 원리

추출장치에 있어서 기본과정은 (1) 토양의 선별 (2) 추출물질과 혼합 (3) 액상과 고상의 분리 (4) 정화된 토양의 처리 (5) 물정화 및 슬러지 처리로 이루어져 있다. 본 기술은 실질적인 추출 이외에도 입자분리기술(입자의 크기나 밀도에 의한 분리), 화학적 처리(주로 산화) 및 부유기술 등 다른 여러 기술과 결합하여 이용되고 있다(Figure 3).

• 전기 교정방법의 원리

물의 흐름은 용매의 양전하에 의해 양극에서 음극으로 이동된다. 이 하전에 따라 복합물질들은 음극이나 양극으로 이동한다. 이때 음극쪽으로 흐르는 물은 용해된 이온과 함께 뽑아낸다. Hcl이나 Nacl 용액을 음극에 침투시켜 제거된 이온을 대체하고 평행상태를 방지토록 한다(Figuer 4).

□ 기술적용시 고려사항

추출기술은 입자의 분리과정이 추출과 조합화 되어 사용될 경우 특별한 제한 사항은 없다. 산화처리기술은 산화가 잘 되는 오염물질에 한정하여 적용하여야 한다.

□ 비 용

물리화학적 기술중 In situ 상태의 산추출방법이나 전기교정 방법 및 산화에 의한 Jet cutting 방법에 대한 처리비용산정은 자료가 부족함(Table 3).

(5) 미생물학적 처리기술(Microbial Treatment Technology)

□ 처리개요

오염지역 토양 및 지하수에 대한 생물학적 처리기술들은 토양세균을 활성화 또는 적정화 시키거나 특별히 개발된 세균 균주를 첨가하고 생존 조건을 적정화시켜 유기화합물의 생물분해를 촉진하는데 그 목표를 두고 있다. 미생물에 대한 유기화합물의 분해 pathway는 환경특성들에 따라 크게 달라진다. 즉 비할로겐 오염물질의 경우에는 호기적 환경에서 대부분의 할로겐 오염물질은 혐기적인 상태에서 가장 빠른 분해가 이루어진다 (Table 8).

생물학적 처리의 목적은 오염물질을 분해시켜 유해성이 없는 중간물질로 만들고 남아있는 오염물질과 분해물질에 대한 최종 생산물질의 농도가 적용기준 이내로 만드는데 있다. 최종 목적

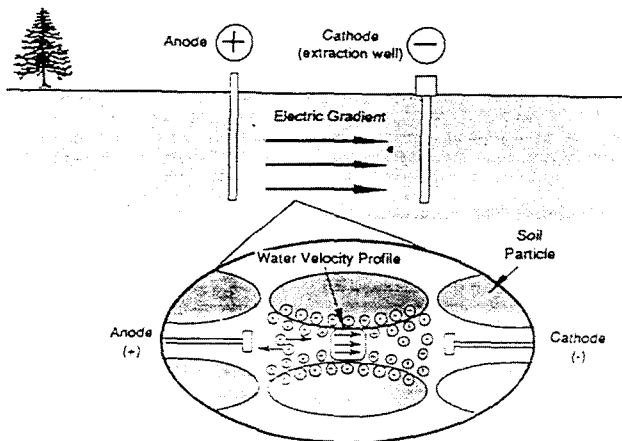


Figure 4. Diagram of a typical electrokinetic operation.

은 이들 오염물질을 완전 광물화시켜 탄산가스와 물로 분해하는데 있다.

기본적으로 생물적인 토양 정화기술은 In-situ 생물학적 분해 (Figure 5), 퇴비단식 생물학적 분해(On-or Off-site) 및 생물반응기(On-or Off-site)를 이용한 3가지의 기술로 나눌 수 있다.

• In situ 상태에서 토양 및 지하수의 생물학적 분해는 표준 환경에서 오염물질의 생물학적 분해 촉진에 목표를 두며 고유의 미생물 활성을 촉진하기 위해 산소를 주입하고 필요시 영양물질 및 기타 첨가제를 유입수에 혼합하여 토양속으로 투입한 후 다시 흡입하여 처리수를 처리한다. 지하수의 처리시 air stripper를 설치하고 활성탄 여과장치를 부착한다. In-situ 상태에서 생물학적 처리시 토양의 투수성은 매우 중요한 지표가 된다. 일반적으로 Kf치가 10<sup>-5</sup> m/s이면 성공적인 처리를 위해 요구되는 최소 투수치로 간주된다.

• 퇴비단식방법은 굴착된 오염토양을 퇴비단 형태로 쌓고 주기적으로 뒤집으면서 산소와 수분을 공급하여 미생물에 의한 오

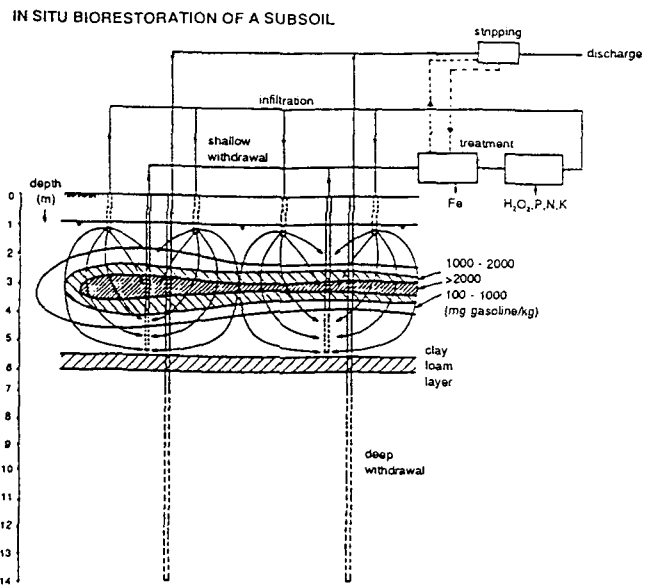


Figure 5. Cross-section of the soil with an overview of the restoration process.

Table 8. Microbial degradability of substances relevant for decontamination provided that they are bioavailable

class of substances	in principle, easily degradable	in principle, difficult to degrade
aliphatic hydrocarbons, mineral oil hydrocarbons and their derivatives	+	
monocyclic aromatic(e.g. BTX aromates) and hetero cyclic(e. g. pyridin, chinolin) hydrocarbons	+	
polycyclic aromatic hydrocarbons	+ <sup>1)</sup>	
highly volatile halogenated-in particular chlorinated hydrocarbons	+	+ <sup>2)</sup>
alicyclic chlorinated hydrocarbons and their derivatives	+	
polychlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans(PCDD and PCDF)		+*
pesticides and their derivatives		+*
heavy metals		not degradable

Some low-chlorinated congeners are in principle degradable/halogenable. For highly chlorinated congeners degradation cannot be confirmed at present.

<sup>1)</sup> up to ring 4 PACH, <sup>2)</sup> ring 5 and 6 PACH

염물질의 생분해 속도를 증진시킨다.

생물반응기 방법은 토양이나 지하수에 오염되어 있고 PAH'S 와 같은 처리가 힘든 다핵 방향족 탄화수소 물질을 처리하는데 이용되고 있다. 토양을 굴착된 오염토양을 물 및 기타 첨가제와 적절히 교반을 통해 미생물을 활성화 시키고 미생물에 의해 오염물질을 분해시킨다. 지하수는 양수된 지하수를 접촉성장 또는 부유성장 반응기 내에서 미생물과 접촉시켜 제거하는 방법이다.

□ 기술적용시 고려사항

생물학적 처리기술의 이용시 고려사항은 다음과 같다.

- 일반적인 사항

- 오염물질의 생분해도
- 미생물지표(전체 세포수 · 탄화수소 분해물질)
- 접종
- 산화 · 환원조건 · 산소요구도(TOC, DOC, BOD)
- 인산농도 · 가양분 요구도
- 오염물질 분해율 · PH, 온도
- 오염물질의 농도 · 중간생성물의 형성 및 운명
- 오염물질 및 중간생성물질의 잔류농도

- In-situ 상태의 생물처리

- 토양 및 지하수중 오염물질의 분배
- 토양 투수성
- 철 및 망간농도
- 토양의 불균일성
- 심토중 산소원의 행동과 미생물에 대한 산소공여 효과

- 지하수의 생물처리

- 토양 및 지하수 중 오염물질의 분배
- 토양 투수성

□ 경 비

In situ 상태에서 정화처리를 할 경우 지질 및 토양구조, 오염 형태 및 농도, 심토중 오염물질의 분포, 오염지역의 면적 및 처리량, 처리체계 특성 : 재순환 물 및 가스처리 등 조건들에 따라 그 비용은 크게 달라진다(Table 3).

모래질토양에서 In situ 상태를 처리할 경우 전체처리 비용은 Off-site 처리에 비해 70~80%로 추정되며, 산업지대에서 본공법으로 처리시 정화기간 동안 산업활동이 가능하므로 큰 이점이 있음.

주유소와 같은 작은 지역에서 비용은 40~250 US \$/m<sup>3</sup>(1990)이며 이들 전체 비용중 2/3는 시설의 가동 및 유지비용이며 1/3은 예비연구 및 시설 설치비용임.

(6) 오염지하수의 양수 처리기술(Pump and Treat Ground Water)

□ 처리개요

본 기술은 양수된 지하수를 처리하는 기술로 먼저 지표 밑에 있는 오염된 지하수를 끌어올려 땅 위에서 물리/화학적 기술이나 생물학적 처리기술 및 이를 조합한 기술을 이용하여 처리하는 방법이다. 양수 처리기술은 한정된 지대안으로 지하수중 오염물질을 가두어 대수층의 오염확산을 방지하거나 오염을 제거할 때 이용된다.

대수층의 오염원의 제거는 토양입자에 흡착 되어 있는 오염

물질을 입자로부터 탈착시켜 지하수의 용액중에 용해시켜 추출 관정을 통해 양수한다.

□ 기술적용시 고려사항

본 기술을 적용하기 전에 처리시스템의 설계를 위해 지하수의 유량, 오염물질의 양, 형태 및 성질, 오염 농도 등 수리지질학적 요인 및 지역의 지구화학적 특성 등에 대해 충분한 사전 조사가 행해져야 한다.

아래의 3가지 기술은 상업화가 가능하나 아래의 조건을 충족할 수 있도록 설계되어야 한다.

1) 탈기 및 활성탄 적용기술

- 탈기 및 활성탄의 효과적 흡착을 위해 설계 변수를 확인위해서는 적절한 처리능력 연구가 수행되어야 한다.
- 휘발성 및 타 흡착성 유기혼합물의 효과적인 제거를 위해서는 처리 과정이 적절히 설계되어야 한다.
- 전처리에는 철, 망간, 유류, 구리스 및 고형 부유물질이 제거되어야 한다.
- 화학물질은 여러 단계에서 미생물 성장을 통제하기 위해 사용할 필요가 있다.
- 처리 후 활성탄의 처분에 주의해야 한다.

2) 광-산화 처리기술의 적용

- 많은 유기물질이 처리될 때는 화학적 과정이 매우 복잡하므로 수학적 모델 등의 방법의 적용은 어려우므로 적절한 크기로 처리능력시험을 통해 적정가동조건, 산소공여 등을 결정하여야 한다.
- 처리과정에 발생하는 잔류물이 없으며, 휘발성 및 타 비휘발성 유기혼합물질 제거에 효과가 좋다.
- 전력 소모가 크므로 이를 고려하여야 한다.
- 전처리에서 철, 망간, 구리스, 유류 및 고형부유물질이 제거되어야 한다.

3) 침전기술

- 적정처리능력 연구가 사전에 필요하다.
- 카드뮴, 구리 및 타 중금속 제거에 효과적이다.
- 처리할 물의 양이 system 설계에 고려되어야 한다.
- 모든 중금속이 석회 및 유화소라에 제거되지 않으므로 PH와 관련한 금속의 용해도를 고려해야 한다.
- 처리과정에서 나오는 찌꺼기가 문제가 됨으로 금속의 회수도 고려해야 한다.
- 침전을 위해 요구되는 석회의 양은 처리할 금속의 양과 크게 관계가 없지만 유화소라는 직접적으로 관련이 있다.

□ 비 용

처리기술에 따라 상이함(Table 3).

다. 처리기술에 대한 평가

□ 열적 처리기술

- 고온 소각(on-situ 및 ex-situ)은 유기성 오염물질 분해에 효과가 탁월함.

- 저온열탈착은 휘발성 및 반 휘발성 폐기물의 처리에 효과가 높음

고온 소각시 토양의 비가역적 변화

□ 안정화/고형화 기술

- 안정화/고형화 기술은 중금속 등 무기물질을 고정시키는데

효과가 높음

- 장기간의 효용성은 입증되지 못함
- 과학적인 사실에 근거한 본 기술의 용탈조사가 현재 사용하는 방법보다 쉽게 비교할 수 있는 방법이 제공되어야 함.
- 토양중기추출 기술
  - 본 기술은 불포화지대에서 휘발성 및 반 휘발성 유기오염물질의 처리에 효과가 높음
  - 탈기된 가스는 현존의 여러 기술에 의해 처리가능
  - 타 기술에 비해 비용경제적인 처리기술임
- 물리/화학적 추출기술
  - 본 추출기술은 In situ 상태에서는 한계가 있다.
  - 반면 토양 위에서는 중금속, 유기성 오염물질의 처리에 매우 강력한 기술이다.
  - 전기교정 처리기술은 적극적으로 연구개발할 가치가 있는 기술이다.
- 미생물 처리기술
  - 실험실에서 현장까지 미생물 정화처리 규모를 확대하는 것이 어렵다.
  - 미생물이 분해할 수 있는 능력 및 처리 가능한 농도에 대해서는 추후 연구가 필요하다.
  - 토양에서의 미생물 접촉은 In situ 상태의 미생물 정화에 효과가 입증되지 않았다.
  - 토양의 투수성은 In situ 상태의 미생물 정화에 매우 중요한 요소이다.
- 지하수의 양수처리 기술
  - 양수 처리기술은 정화가 행해지는 대수층에서만 한정되어 사용되는 기술이다.
  - 배기 및 활성탄 사용방법은 부분적으로 효과가 있는 기술임.
  - 자외선 조사/산화처리 방법(Ultrox)은 지하수 중 휘발성 유기물의 농도를 적정수준까지 감소시킬수 있는 효과적인 기술임.
  - 석회 및 유화소다를 사용하는 침전방법은 카드뮴과 아연을 적정수준까지 감소시킬 수 있는 효과적인 기술임.

각국의 오염토양 정화기술 이용 및 연구, 개발 현황

네델란드

- 이용기술 및 처리현황
  - 오염토양 처리는 토양정화서비스센터(SCG)에서 전담.
  - 처리되는 성분은 평균 7~8종의 유해물질로 70%가 PAH's와 중금속류 임.
  - 처리기술 사용빈도 : 열적처리(60%), 물리화학적처리(40%) 임.
  - 열적처리의 규모는 800,000톤을 처리능력을 가진 5개의 고정 시설과 1개의 이동시설이 있고 가장 큰 시설이 200,000톤 규모 임.
  - 열적처리온도는 400~700°C 범위에서 처리, 배출가스는 800~1200°C의 after burner에서 처리
  - 물리화학적(CP) 처리규모는 300,000톤으로 6개의 고정시설과 1개의 이동시설이 있고 이들 시설의 평균 처리능력은 20,000~60,000톤 규모임.

- 토양처리기술 이용 경향 : 열적처리에서 물리/화학적 처리기술로 사용빈도 가. 점차 많아지고 있음.
- 보관능력은 7개 지역에서 최대 700,000톤임. 보관은 긴급한 경우에만 하고 있으며 평균 보관기간은 8개월임.
- 연구개발
  - 네델란드 종합연구프로그램(1986 설립)에서 수행
  - 토양의 다기능성 및 유해물질의 확산 및 영향
  - 위해성 평가방법 및 기준설정
  - 정화 및 방지기술
  - 열적처리 연구개발
    - 유기할로겐 물질로 오염된 토양처리 및 배출가스 정화
    - 고온상태에서 처리한 오염토양에 대한 건축자재로의 재활용성 평가
  - CP처리 연구개발
    - PAH's의 선택적 부상기술
    - 안정화를 위한 각 단계별 조사
  - 생물학적 처리
    - 효과적인 미생물균주 선발
    - 독성 분해산물의 확인
    - 토양중기 추출법과 미생물처리방법의 결합
- 주관심 대상
  - 오염부지내 가정
  - 지하수 오염
  - 저질 오염
- 관련법
  - 토양방지법('87), '94년 개정

미 국

- 이용기술 및 연구개발현황
  - SARA(1986)은 슈퍼펀드 혁신 기술평가(SITE) 프로그램을 만들어 혁신정화기술의 입증 및 평가를 위한 장치제공
  - 약 100개의 회사가 SITE에 참여하여 약 60개의 SITE 과제가 on-site 상태에서 신기술을 입증하고 있고 일부 과제는 완료됨.
  - 이들 대부분 과제는 물리/화학 처리, 생물학적 처리, 열적 처리, 안정화/고형화, 소각기술임.
  - 환경기술 확인프로그램(1993)이 캘리포니아에서 만들어져 확인된 기술의 시장화증대와 빠른 승인 획득에 목적을 둬.
  - 확인기준
    - 어떤 특별한 조작 조건에서 행해질 때 건강과 환경에 잠재적 위해가 있는 기술은 안됨.
    - 장비는 특별한 훈련이 없이도 작동할 수 있을 것
    - 유해폐기물 소각기술은 확인프로그램에 포함되지 않음.
- 주관심 대상
  - 유해폐기물투기, 지하수오염, 도시개발 지장초래
- 관련법
  - RCRA 84, CERCRA 80, SARA 86
  - 그 외 수개의 연방 주정부에서 관련법 제정

독 일

- 이용기술 및 현황

- 토양정화기술로 off-site, on-site 및 in situ에서 토양세척, 열적처리, 생물학적처리기술이 이용
- 59개의 토양처리시설이 있고 처리기술별로 열적처리(3), 토양세척(16) 및 미생물처리(40) 시설로 되어있으며, 처리능력은 150만톤 임.
- 연구개발
- 연방정부는 오염지역 탐지, 조사 및 정화기술을 증진시키는 노력 포함.
- 수개주 정부와 공동프로젝트 수행
- 신기술 개발
  - 새로운 containment 기술
  - 이동시설 포함 열적처리
  - in-situ, on-situ에서 미생물 정화
  - 토양세척
  - 유·무기 오염물질의 추출
  - 오염토양 재활용 연구
  - 유기오염물질의 in-situ 산화
- 미국과의 국제공동연구
- 오염토양 평가를 위한 기준설정
- 주관심 대상
- 오염부지내 가정
- 지하수 및 지표수 오염
- 도시개발지장
- 관련법
- 연방법은 토양방지법으로 안은 국회계류 중이며 시행되지 못함. 수개연방주정부에서 오염지역정화에 관한 법이 제정

### 정화기술의 적용기법

정화기술은 정화대상 부지의 특성에 따라 적합한 기술을 선택하여야 하며 이를 위해서는 오염의 물질종류, 오염정도, 위해도 등이 평가되고 이를 바탕으로 대상기술 및 효용성, 적용성, 처리비용 등의 평가 등 각 기술별 세부평가를 통해 적합한 기술이 결정되어질 수 있다.

미국의 superfund법에서 적용하고 있는 오염지역에서 정화를 위한 세부절차를 나타낸 것으로 각 단계별로 조사될 내용은 아래와 같다(Figure 6).

- 가. 예비평가
  - EPA는 관련정보를 받아 앞으로 조치여부를 결정
- 나. 부지조사
  - 광범위한 정보수집(필요에 약간의 시료채취)
- 다. NPL등재
  - 예비평가/부지조사시 얻은 자료를 점수화 모델에 입력, 점수가 높으면 NPL에 등재
- 라. R1/FS 범위조사
  - 주요문제 및 책임할당 등 토의를 위한 연구 참여자 모임
  - 문제점 평가 및 잠재적 노출경로 확인을 위한 부지 모델 개발을 위한 기존자료 평가하여 정화목Table 설정
  - 기존 자료가 과제의 범위 지정에 부적합시 제한된 현장조사 시작

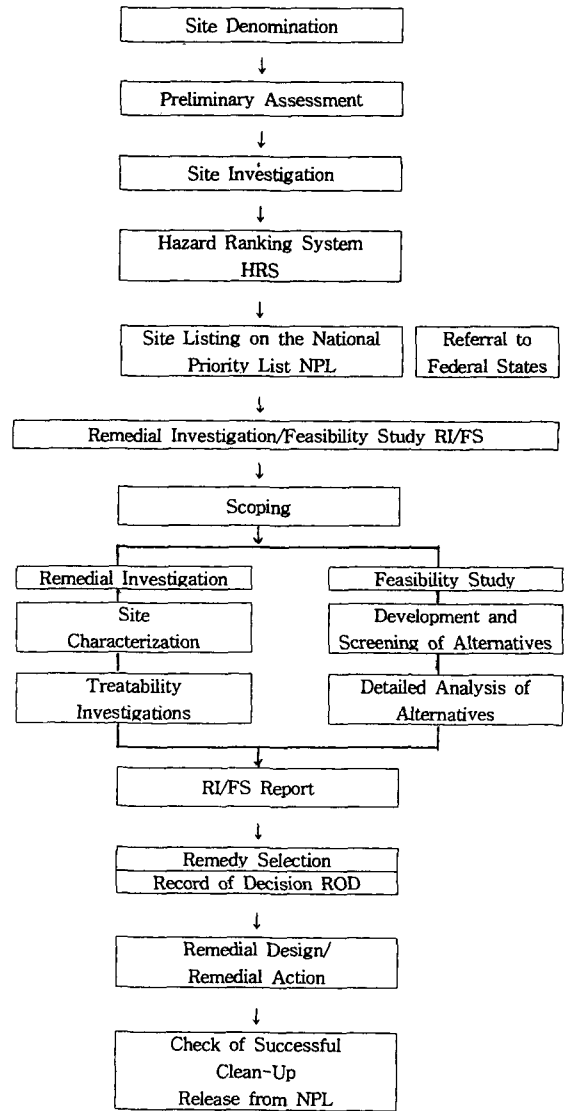


Figure 6. Superfund process.

- 지역특성과 정화에 적용할 예비기준 확인
- 잠재적 정화기술을 평가하기 위해 처리능력 연구를 위한 일 정확정
- 시료채취 분석을 위한 자료수집 프로그램 설계
- 추진과정 및 예측되는 앞으로의 일을 요약하여 문서화 하는 작업 개발
- 현장 조사시 조사자의 건강 및 안전대책 확인
- 지역사회와 관련계획 개발
- 마. R1/FS 범위조사
  - 현장조사 실시 : 오염범위(오염물질의 종류 및 농도, 오염길이, 오염면적)
  - 현장 시료분석 : 조사자가 결론을 도출할 수 있도록 공정한 시험방법으로 수행
  - 자료분석 결과를 토대로 부지 특성 평가 및 건강 및 환경위해도 평가를 위한 기본 위험평가
  - 기본 위험평가는 정화조치 필요여부 판단지침이며, 평가는



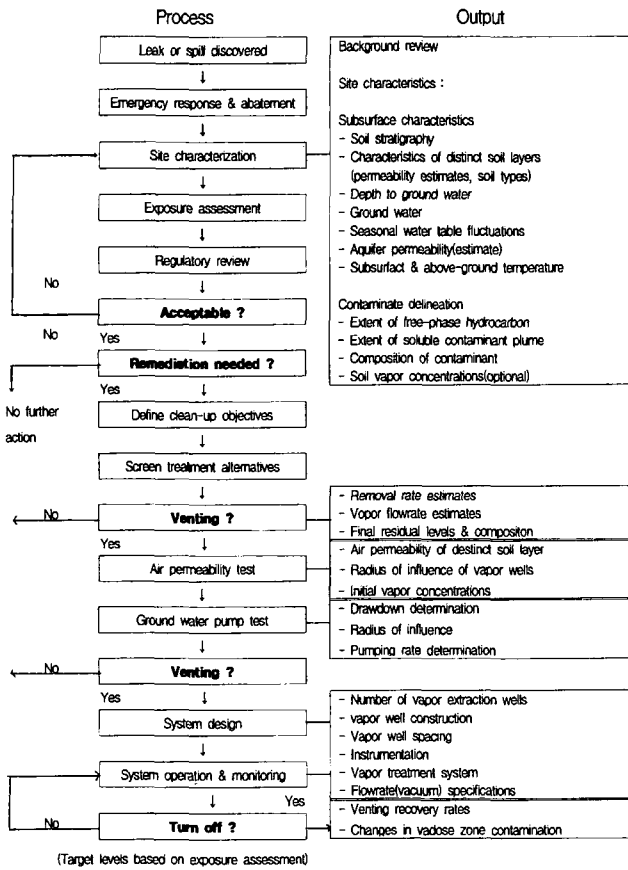


Figure 7. Guideline for deciding if SVE is applicable.

오염확인, 노출 및 독성평가, 위해평가

- 자료가 정화기술의 선택을 평가하는데 충분 여부 결정
- 바. 정화기술의 선택 및 개발
- 정화조치 목표 확인
- 이들 목표에 부합할 잠재기술 확인
- 기술의 선별
- 선별기준 : 효율성, 처리능력, 비용
- 선별된 기술을 모음
- 처리기술간 상대적 비교
- 자료가 정화기술선택 평가에 불충분할 경우 처리능력 조사 (bentch, pilot 규모)
- 사. 기술의 세부분석
- 건강과 환경의 전반적 보호
- 장기간 효율성 및 이행성
- 처리를 통한 오염물질의 독성, 부피 감소
- 비용
- 주정부 승인
- 지역사회 승인
- 아. 기술선택
- 자. 결정기록
- 선택기술들은 각 기준에 대해 다른 기술과 비교분석
- 선택된 기술의 요약 보고서를 공청회에 상의의견조치
- 의견 수렴후 선택기술을 ROD에 문서화

차. 정화처리  
 다. 해제

결론

이상에서 오염부지 복원을 위한 주요 정화기술의 개요 및 적용성, 외국의 오염부지 정화기술 이용·연구개발 현황 및 오염부지 정화 절차 등을 알아 보았다.

각 나라별로 이용되고 있는 오염부지 정화기술은 그 나라의 지역적 특성과 사회·경제적 실정에 따라 이용되고 있다. 이들 국가에서 이용되고 있는 정화기술은 기술개발이 활성화되어 있는 미국의 경우 60개 이상의 기술이 개발되어 상용화 또는 시험중에 있으나 앞에서 언급한 기술의 범주안에 포함되는 기술들로 이들 기술은 오염부지의 지질학적 특성, 오염물질 종류, 농도 등은 지역특성의 평가와 기술의 효용성, 경제성 등이 검토된 후 현장기술로 이용된다.

미국의 경우 NPL에 등재된 Superfund 지역의 정화를 위한 지역특성 조사를 위해 조사기간은 적어도 1~2년 이상 조사에 소요되는 예산은 약 150만불 정도로 막대한 비용이 소요되고 있어 대책사업을 행함에 있어 커다란 제약을 받고 있으며 단일 기술인 SVE 기술의 적용시에도 Figure 7과 같이 매우 세밀한 조사지침이 나와 있다.

국내에서도 토양환경보전법의 시행(96. 1)에 따라 토양오염 유발시설로 지정된 시설은 신고후 6개월이내 토양오염도 검사를 받도록 되어 있어 이들 지역에 대한 조사결과 그 기준치를 상회할 경우 복원토록 명시되어 있으나 우리나라의 경우 오염부지 복원을 위한 제도적인 절차가 미비하고 정화기술개발 연구가 일하다. 따라서 오염부지 정화시 기술의 적용 및 정화절차는 외국의 기존 자료와 Case study를 통하여 복원과정이 체계적인 절차를 거쳐 이루어져야 할 것으로 판단되나 우리나라의 사회·경제적 환경을 충분히 고려하여 정화기간을 가능한 단축하면서 효율적인 정화가 이루어지도록 충분한 연구검토가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

환경부, 1995, 오염토양정화기술개발(G-7 과제), 제 1단계 연차보고서.  
 황경엽, 1996. 한국 토양환경학회 창립총회 및 세미나자료, p. 41-62.  
 Domenic Grasso, 1993, Hazardous Waste Site Remediation, Lewis Publishers.  
 Grimski, O. and Reppe, S., 1995, Remediation of Soil and Ground Water as a Technical, Institutional and Socio-Economic Problem : Opportunities in Eastern Europe, Advanced NATO Research workshop(Country Report).  
 International Experience in Remedation of Contaminated Sites-Synopsis, Evaluation and Assessment of the Applicability of Methods and Concepts-, 1995, Federal Ministry of Education, Science, Research and Technology(Republic of German).  
 North Atlantic Treaty Organijation, 1993, Demonstration of

Remedial Technologies for Contaminated Land and Groundwater, Final Report, volume 1.  
North Atlantic Treaty Organization, 1993, Demonstration of Remedial Technologies for Contaminated Land and Groundwater, Final Report, volume 2-part 1.  
North Atlantic Treaty Organization, 1993, Demonstration of Remedial Technologies for Contaminated Land and Groundwater, Final Report, volume 2-part 2.