



# 토양오염방지 및 관리

## 5차시

# 1. 토양 정화

## 1.1. 정의 및 종류

- 「토양환경보전법」의 제 2조 (정의)에 따르면, "토양정화"란 생물학적 또는 물리적·화학적 처리 등의 방법으로 토양 중의 오염물질을 감소·제거하거나 토양 중의 오염물질에 의한 위해를 완화하는 것을 말한다.
- 환경부 고시 「특정토양오염관리대상시설의 토양오염방지시설 및 오염토양의 정화방법 등에 관한 고시」의 별표 2(오염토양 정화방법 등)에 따르면, 정화장소에 따른 정화방법은 다음과 같이 구분할 수 있다.

가. 현장 내 정화(On Site) : 오염부지 내에서 직접 정화하는 방법

- 1) In-situ(오염토양을 수거하지 아니하고 현 위치에서 정화)
- 2) Ex-situ(오염토양을 수거하여 부지 내 다른 장소에서 정화)

나. 현장 외 정화(Off Site) : 오염토양을 토양정화업체의 반입정화 시설이 설치된 외부의 장소로 반출하여 정화하는 방법

- 또한 처리기술별 오염토양 정화방법은 다음과 같이 기술되어 있다.

#### 가. 생물학적 처리방법

오염토양에 영양분과 수분, 공기 등을 주입하여 미생물이나 식물 등의 생장을 촉진하여 토양 중의 오염물질을 분해·흡수·흡착·침전 등을 통해 오염토양 정화기준 미만으로 오염물질을 제거·감소시킬 수 있는 처리방법을 말하며, 처리방법으로는 생물학적 분해법(Biodegradation), 생물학적 통풍법(Bioventing), 토양경작법(Land farming), 바이오과일법(Biopile), 식물재배정화법(Phytoremediation) 및 퇴비화법(Composting) 등이 있다.

#### 나. 물리적·화학적 처리방법

오염물질의 흡착, 휘발, 물리적 접촉, 화학적 산화/환원 또는 전기장에 의한 이동 등 물리적·화학적 작용을 통해 토양 중의 오염물질을 오염토양 정화기준 미만으로 제거·감소시킬 수 있는 처리방법을 말하며, 처리방법으로는 토양세정법(Soil Flushing), 토양증기추출법(Soil Vapor Extraction), 토양세척법(Soil Washing), 용제추출법(Solvent Extraction), 화학적 산화/환원법(Chemical Oxidation/Reduction) 및 동전기법(Electrokinetic Separation) 등이 있다.

#### 다. 열적 처리방법

오염토양에 열이나 전기를 가하여 토양오염물질을 휘발·탈착, 소각, 열분해 및 용융 등의 과정을 통해 토양 중의 오염물질을 제거·감소 또는 유리화하여 오염토양 정화기준 미만으로 처리할 수 있는 방법을 말하며, 처리방법으로는 열탈착법(Thermal Desorption), 소각법(Incineration), 유리화법(Vitrification) 및 열분해법(Pyrolysis) 등이 있다.

#### 라. 두 가지 이상의 방법을 조합한 처리방법

가목부터 다목에 해당하는 처리방법 중 두 가지 이상의 방법을 조합하여 토양 중의 오염물질을 제거·감소 등을 통해 오염토양 정화기준 미만으로 처리할 수 있는 효율을 가지는 처리방법을 말한다.

- FRTR(Federal Remediation Technologies Roundtables) (2002)에 따른 오염토양 정화기술의 종류는 다음과 같이 분류할 수 있다.

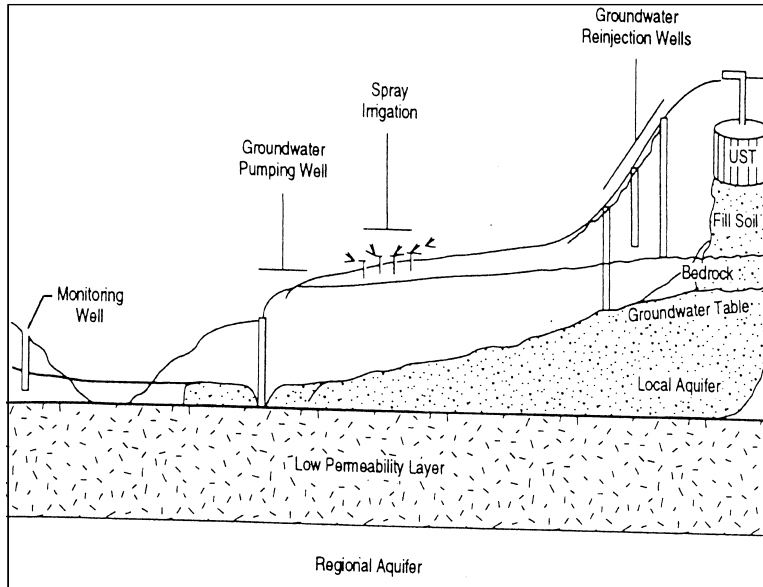
분 류		처리기술의 종류
토 양 처 리 기 술	지중 처리 (In-situ)	생물학적 - Bioventing - Phytoremediation - Enhanced Bioremediation
		물리·화학적 - Chemical Oxidation - Soil Flushing - Electrokinetic Separation - Soil Vapor Extraction - Fracturing - Solidification/Stabilization
		열적 - Thermal Treatment
	지상 처리 (Ex-situ)	생물학적 - Biopiles - Landfarming - Composting - Slurry Phase Biological Treatment
		물리·화학적 - Chemical Extraction - Separation - Chemical Reduction/Oxidation - Soil Washing - Dehalogenation - Solidification/Stabilization
		열적 - Hot Gas Decontamination - Pyrolysis - Incineration - Thermal Desorption - Open Burn/Open Detonation
	차폐	- Landfill Cap - Landfill Cap Enhancements
	기타 처리기술	- Excavation, Retrieval, and Off-Site Disposal

## 2. 생물학적 처리방법

- 오염토양에 영양분과 수분, 공기 등을 주입하여 미생물이나 식물 등의 생장을 촉진하여 토양 중의 오염물질을 분해흡수흡착침전 등을 통해 오염토양 정화기준 미만으로 오염물질을 제거감소시킬 수 있는 처리방법을 말한다.

### 2.1. 생물학적 분해법 (Biodegradation)

- Water-based solution을 토양내로 순환시킴으로써 토착미생물의 활성을 증진하여 유기오염물질의 분해능을 증진시키는 기술, 미생물의 생분해 능력 및 토양으로부터 오염물질 흡수능을 증대시키기 위하여 영양물질, 산소 및 기타 첨가제가 사용



〈그림 6〉 Biodegradation의 공정도

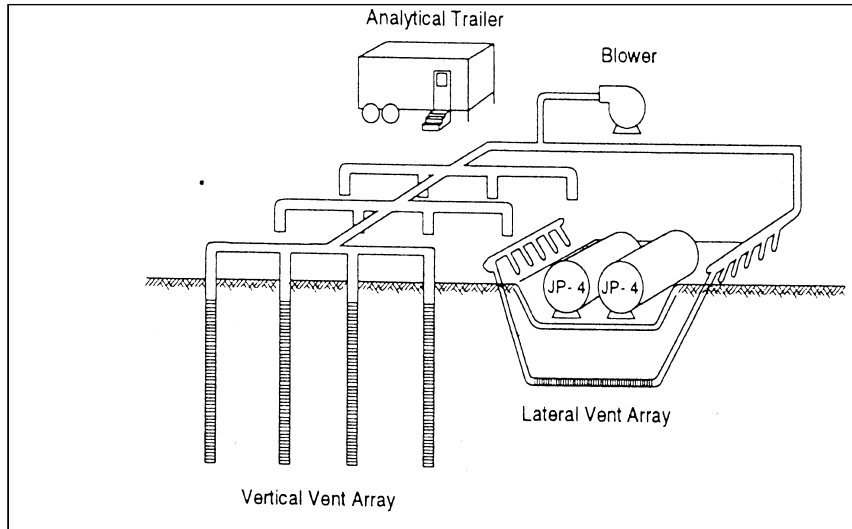
- 주요처리물질은 유류탄화수소, 솔벤트, 살충제, 기타 유기화학물질 등임
- 생물학적 분해법에서 오염물질을 분해하는 생분해 과정은 호기성 생분해 과정과 혐기성 생분해과정으로 구분되며, 일반적으로 호기성 생분해 과정이란 미생물이 대사작용에 산소를 전자수용체로 이용하여 유기오염물질을 이산화탄소, 물, 그리고 미생물세포 등으로 변화시키는 과정을 말하며, 이와는 달리 혐기성 생분해 과정이란 산소가 충분하지 않을 경우 산소 이외에 다른 물질을 미생물 대사작용의 전자수용체로 이용하여 메탄, 이산화탄소, 수소 등으로 변화시키는 과정을 말한다.
- 호기성 및 혐기성 생분해 과정이 오염물질의 분해를 위해 모두 사용될 수 있지만 보통 호기성 생분해 과정에 의한 오염물질의 처리가 용이하기 때문에 일반적

으로 오염토양 정화에는 호기성 생분해를 이용한 생물학적 분해법이 대부분 활용된다. 따라서 지중의 오염물질의 분해속도를 높이기 위해서는 미생물의 호기성 생분해를 촉진시킬 필요가 있으며, 이를 위하여 필수적인 요건인 산소 및 영양물질을 적절히 공급해야 한다.

- 장점은 i)저농도로 광범위하게 오염된 토양의 정화에 효과적이고, ii)무기오염물질의 평형상태를 변화시켜 흡착응집농축을 통한 안정화가 가능하며, iii) in-situ 처리시 오염된 토양과의 혼합을 방지할 수 있음. iv) 오염된 토양과 지하수를 동시에 처리할 수 있어 경제적인
- 단점은 i) 오염물질과 미생물의 접촉이 원활하지 않은 경우 정화효과가 낮고, ii) 지중분해과정은 세척수의 순환으로 오염물질의 유동이 증가, 비오염된 지하수의 오염우려가 있음, iii) 미생물이 선택적으로 증가하기 때문에 양분이나 물 주입정을 막히게 함. iv) -Channelling현상은 주입액과 오염물질사이의 접촉을 감소시켜 산소의 전달을 감소시키므로 clay가 많은 토양에서는 오염물질의 분해율이 낮음. v) 중금속, 염소계 유기물질, 염분 등의 농도가 높을 경우에 미생물의 생장에 해롭고, vi) 온도가 낮을 경우 생분해속도가 느리au, vii) in-situ 처리시 시간이 많이 소요되고 처리과정을 측정하는데 어려움이 있음
- 소요비용은 in-situ 처리시 \$30-100/m3 정도임

## 2.2. 생물학적 통풍법 (Bioventing)

- 오염된 불포화토양에 공기를 주입하여 휘발성 오염물질을 기화하여 이동시키는 한편, 토양내 산소농도를 증가시킴으로써 미생물의 생분해능을 촉진시켜 처리하는 기술임



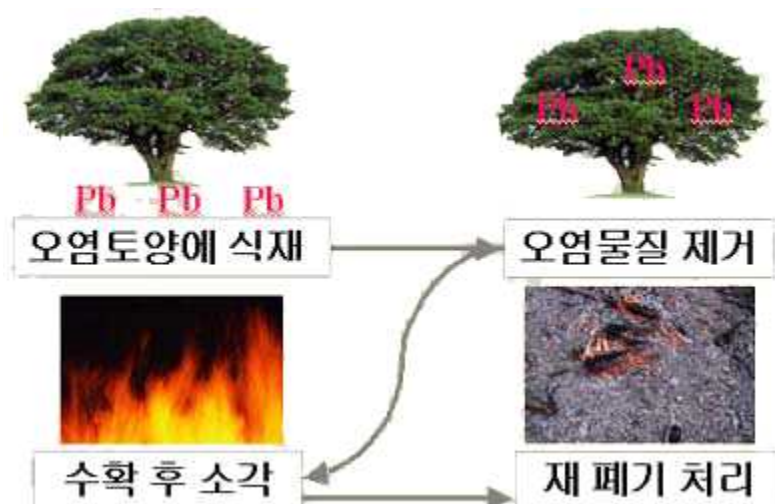
〈그림 7〉 bioventing 공정도

- 주요처리물질은 유류탄화수소, 비염소계 용매, 살충제, 기타 유기화합물질 등임
- 장점은 무기오염물질의 안정화가 가능, 시설의 운전과 유지에 인원과 비용이 적게 듬
- 단점은 i) 토양에서 가스의 통기성을 알아보기위해 pilot-scale의 in-situ 실험을 해야 함. ii) 지표아래 2-2.5m 아래에 지하수가 분포하거나 토양lenses가 포함되어 있는 경우, 그리고 통기성이 낮은 토양에서는 처리효율이 낮음. iii) 수분함량이 낮으면 생분해와 통풍의 효율이 감소. iv) 지상의 방출가스를 측정해야 함. v) 염소계화합물의 호기성생분해는 상호대사를 이용하지 않는 경우나 혐기성상태에서는 효과가 없음. vi) 온도가 낮은 경우에는 생분해가 느림
- 소요비용은 \$10-70/m3 정도임

## 2.3. 식물재배정화법 (Phytoremediation)

○ 식물재배 정화법은 식물을 이용하여 오염토양 및 지하수를 포함한 수질을 정화시키는 새로운 자연친화적인 토양정화기술이다. 식물재배 정화법은 오염지역에 정화에 필요한 식물들을 식재 후 식물에 의해 발생하는 오염물질의 추출, 안정화 등의 원리를 이용하는 방법으로서 뿌리가 접촉하는 면에 한정되어 일어나기 때문에 오염원의 깊이가 중요한 고려요소이며, 식물종, 식물의 성장속도, 오염물질의 농도, 주변 생태계 및 환경과의 관계 등도 기본적으로 고려해야할 사항들이다.

- 이 방법은 오염지역 토양에 물리적, 화학적 부하를 최소로 할 수 있는 방법이지만, 식물을 직접 이용하는 방법이기 때문에 다음과 같은 제약이 따름
  - 처리 깊이는 처리에 이용된 식물에 따라 다르지만 대체로 얇은 편임
  - 유해물질의 농도가 너무 높을 경우 식물의 성장에 영향을 미칠 수 있으며, 기후나 계절, 위치 등에 의존적이고, 적용할 수 있는 식물의 종류가 제한적임(Boyajian and Devedjian, 1997; EPA, 1996)





## 〈그림 8〉 Phytoremediation에 의한 중금속의 제거

(출처, 환경부, 2007)

- phytoextraction (식물에 의한 추출), phytostabilization(식물안정화), rhizofiltration(뿌리에 의한 여과법)이 있음
  - phytoextraction(식물에 의한 추출) : 토양으로부터 식물의 뿌리나 싹순에 흡착시켜 금속을 제거하는 초농축식물(hyperaccumulating plant)을 활용. 이는 지상의 식물싹에 0.1% 이상의 크롬, 코발트, 동, 니켈, 1%이상의 아연, 망간 농도를 허용하는 식물을 의미하며 오염부지에서 금속의 제거를 위해 이들 식물싹들은 추수, 위해성 폐기물로 폐기되거나 금속의 회수를 위해 재처리됨
  - phytostabilization(식물안정화) : 토양내 금속의 이동성을 제한하거나 생물학적 이용효용성을 제한시키는 식물을 활용하는 방법으로 타 정화기법의 개발이전 또는 경제성으로 타당성이 떨어질때에 임시적인 억제책으로 사용.
  - rhizofiltration(뿌리에 의한 여과법) : 식물뿌리에 흡착, 농집, 침전시킴으로써 오염지하수로부터 금속을 제거. 토양보다는 지하수 정화에 사용하며 저준위 금속오염된 다량의 지하수 정화에 보다 효과적임. 뿌리가 지하로 길고 더 섬유상으로 발달하여 상호반응하는 표면적이 커지므로 수생식물보다는 육생식물이 유리하다. 습지의 경우가 비용면에 저 효과적이라고 알려져 있음
- 처리비용은 저렴하여 1acre의 납(Pb)으로 오염된 토양을 깊이 50cm로 정화하는데 \$60,000 ~ \$100,000가 소요(USAEC, 1997).

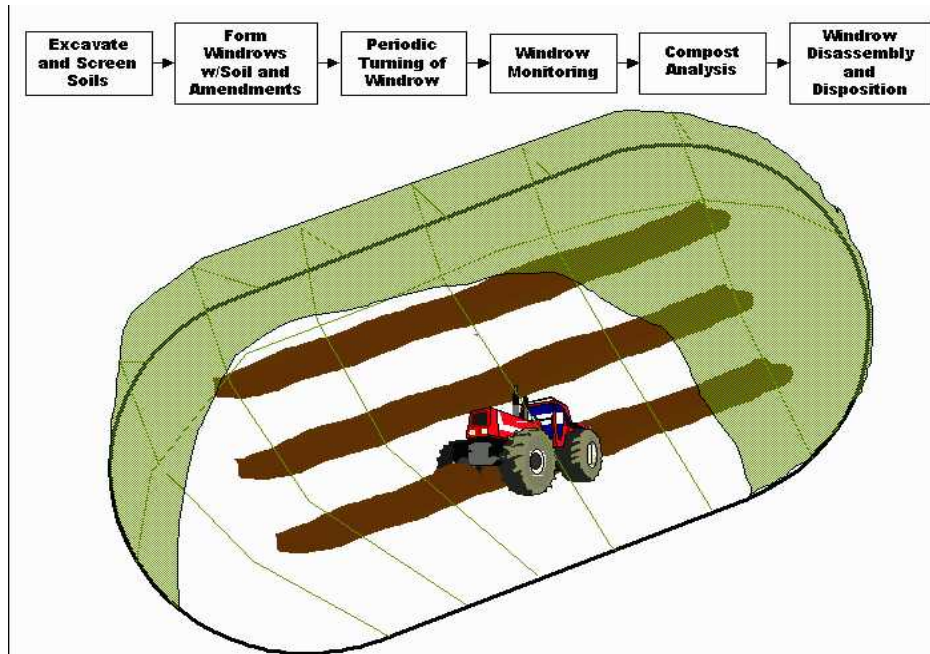
## 2.4. 퇴비화법 (Composing)

- 퇴비화법은 지상처리(Ex-situ)기술로서 폐슬러지 등의 폐기물 및 오염토양을 굴착하여 파일을 만들어 유기오염물질을 인위적으로 퇴적 분해시키는 방법을 말한다. 본 기술은 바이오파일과 같이 미생물에 의한 생분해를 이용하지만 오염물질

을 물과 이산화탄소로 완전분해하지 않고 일부 무독성의 유기물로 안정화시켜 토양개량제 등으로 활용할 수 있다는 점이 다르다.

○퇴비화법은 호기성 상태에서 미생물에 의해 분해 가능한 오염물질을 50~55℃의 온도에서 생물학적으로 분해안정화시키고 병원균을 사멸시킨다. 퇴비화법에 있어서 온도를 적절히 조절하는 것은 매우 중요하기 때문에 호기성 상태의 유지를 위해 다량의 공기를 과잉으로 주입하는 것은 파일안의 온도를 낮출 수 있기 때문에 유의하여야 한다. 반면 유기물질이 분해될 때 발생하는 열을 이용하면 적절한 온도를 유지시킬 수 있다. 퇴비화법의 최대 처리 효율은 수분함량, pH, 산소, 온도, 그리고 탄소/질소비가 적절할 경우 얻을 수 있다.

○퇴비화법은 일반적으로 하수슬러지의 처리와 같은 폐기물 처리에 주로 활용되어온 기술로서 폐기물 처리에 있어서는 경제성 및 적응성이 입증된 처리기술이라 할 수 있다. 그러나 본 기술은 팽화제의 첨가로 인해 처리해야 할 오염토양의 부피가 증가할 수 있고 악취 등이 발생될 수 있는 등의 단점으로 인하여 국내 오염토양 처리에는 거의 활용되지 못하고 있다.



[퇴비화법의 처리 공정도]

(자료, 환경부, 2007)

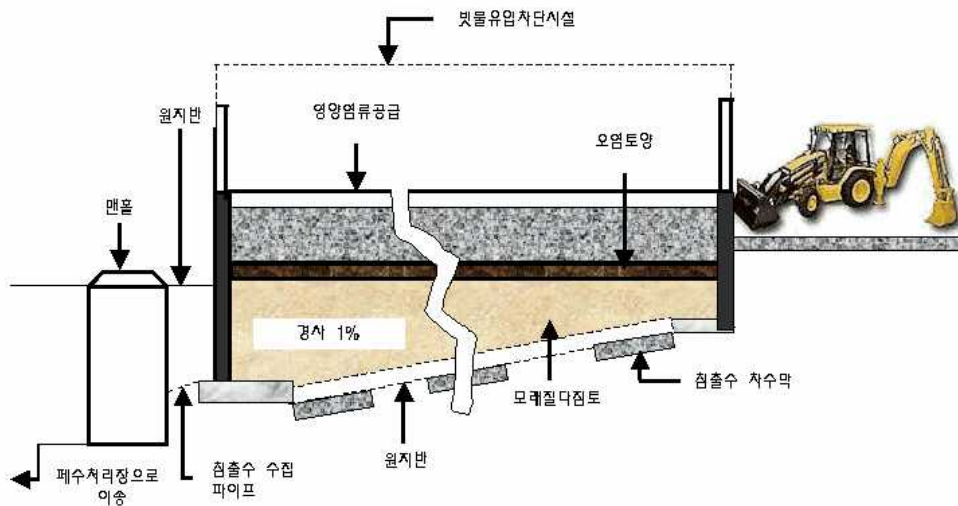
- 주로 생분해(퇴비화)가 가능한 물질 등에 적용
- 이 기술은 폭발성물질로 오염된 토양에서 효과적이며, 공정에 필요한 장치가 상대적으로 단순하고, 열적 처리를 이용하지 않는다는 장점이 있음
- 이 기술을 적용하기 위해서는 i) 퇴비화를 위해서는 넓은 공간이 필요하고, ii) 오염된 토양을 굴착해야하고 제어되지 않은 휘발성 유기물질이 방출될 수 있으며, iii) 팽화제의 첨가로 인해 처리해야할 오염토양의 부피가 증가하고, iv) 이 방법에 의해 중금속은 처리될 수 없으며 중금속은 미생물에 독성으로 작용할 수 있음
- 소요비용은 \$130-260/m<sup>3</sup>임

## 2.5. 토양 경작법 (Land farming)

○ 토양경작법은 오염토양을 굴착하여 지표면에 깔아 놓고 정기적으로 뒤집어줌으로써 공기를 공급하여 미생물에 호기성 생분해 조건을 제공함으로써 토양에 잔류되어 있는 유기성 오염물질을 제거하는 생물학적 정화기술이다. 또한 오염된 토양과 공기와의 접촉을 최대로 증가시킴으로써 토양에 흡착되어 있는 휘발성유기화합물질의 휘발을 촉진시키는 물리/화학적 공정도 포함되어 있다.

○ 본 기술은 생물학적통풍법과 적용원리는 유사하지만 생물학적통풍법이 지중처리기술인 반면 본 기술은 지상처리기술이라는 점이 기본적으로 다르다.

○ 주요 처리대상물질은 디젤연료, No.2, No6 연료기름, JP-5, 기름슬러지, 나무보호제로 오염된 토양, 석탄오염토양, 살충제 등임



<그림 1> 토양경작방법의 모식도

(자료, 환경부, 2007)

- 장점으로는 유류산업에 의해 발생하는 수많은 슬러지에 대하여 적용이 가능하고, 미생물학적 처리와 마찬가지로 오염물질을 해롭지 않은 물질로 변환시킴
- 단점으로는 i) 많은 공간이 필요하고, ii) 오염된 토양을 굴착해야한다면 비용이 더 소요되며, iii) 오염물질의 분해를 위한 적절한 상태가 조성되지 않으므로 분해가 어려운 물질의 완전한 제거에 시간이 많이 소요되고, iv) 휘발성 유기물질의 농도는 생분해 보다는 휘발에 의해 감소됨. v) 유기용매가 대기중으로 방출되어 대기를 오염시키기 때문에 방출되기 전에 미리 처리해야 하며, vi) 입자성물질은 먼지가 될 수 있으므로 지속적으로 측정해야 하고, vii) 중금속이온은 미생물에 독성으로 작용할 수 있으며 오염된 토양으로부터 비오염토양으로 흘러들어갈 수 있음
- 처리 비용은 매우 저렴한 편으로 \$30 ~ \$70m<sup>3</sup>가 소요

### 3. 열적 처리방법

- 오염토양에 열이나 전기를 가하여 토양오염물질을 휘발탈착, 소각, 열분해 및 용융 등의 과정을 통해 토양 중의 오염물질을 제거감소 또는 유리화하여 오염토양 정화기준 미만으로 처리할 수 있는 방법을 말한다.

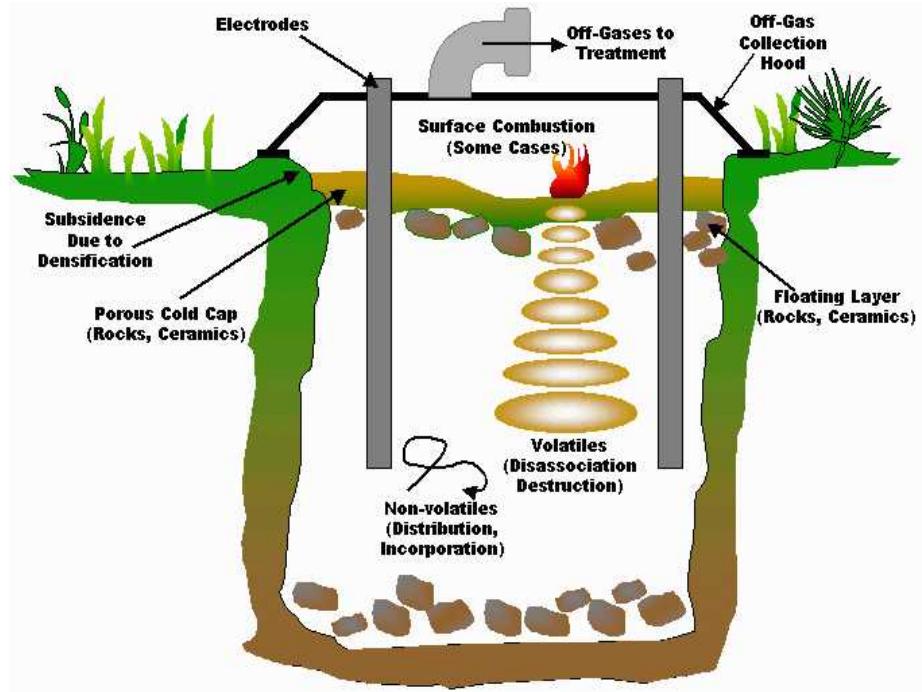
#### 3.1. 유리화법 (Vitrification)

- 유리화 공정은 굴착한 오염토양을 전기적으로 용융시킴으로써 용출특성이 매우 적은 결정구조로 만드는 기법으로써 이 기술은 오염물질의 농도를 감소시키기 보다는 오염물질을 둘러싸 고립화시키는 지중처리(In-situ) 기술이다.
- 유리화법은 전극을 지중에 연결하여 전류를 흐르게 함으로써 열을 발생시켜

오염토양을 결정구조로 만드는 공정이기 때문에 열을 이용한다는 면에서 열처리 방법에 속하기도 하지만 결정구조 안에 오염물질을 포획하여 이동성을 감소시킨다는 점에서 일종의 고정화/안정화법이라 할 수 있다.

○따라서 본 기술은 공정 운영 중 발생하는 열을 이용하여 오염토양에 존재하는 유기오염물질을 정화할 수 있을 뿐만 아니라 고정화 원리를 이용하여 중금속 등의 무기물질을 처리할 수도 있다.

○유리화법은 중금속을 비롯한 다양한 오염물질을 처리할 수 있다는 점에서 활용도가 높은 기술이지만 소요되는 에너지 비용이 높고 유리화 공정 중 발생하는 방출 가스를 처리해야 하며, 유리화 된 슬래그를 다시 처분해야 하는 단점을 가지고 있다.



[유리화법의 처리 공정도]

(자료, 환경부, 2007)

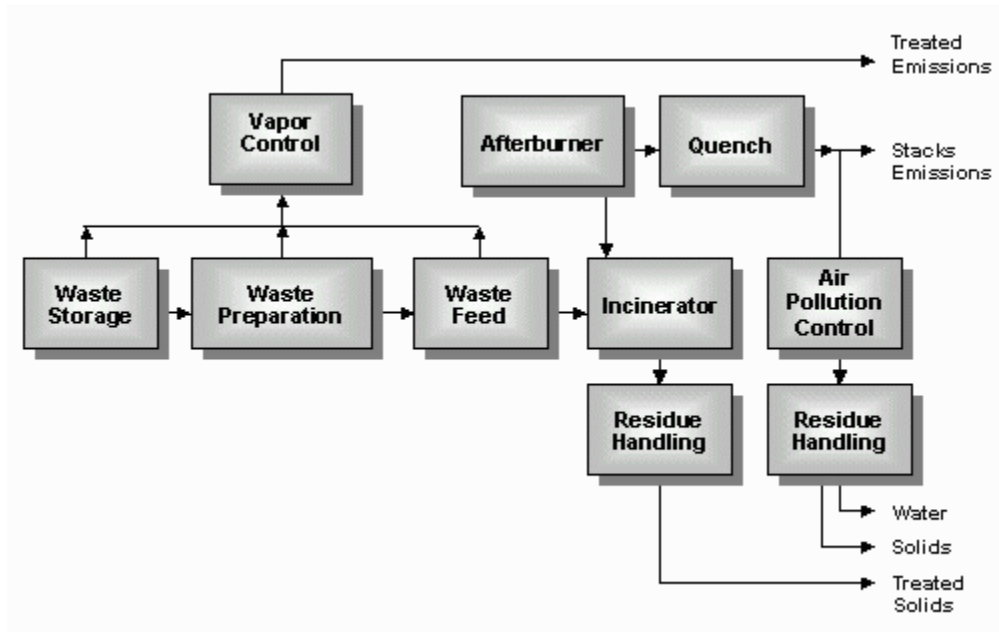
### 3.2. 소각법 (incineration)

○이 공정은 적당량의 산소를 공급하여 유기물질을 연소시켜 분해하는 열적 파괴공정이다. 오염토양의 유기물질을 871~1,204℃의 고온으로 토양내의 유기오염물질을 소각하여 이산화탄소, 수증기, 황화수소, 그리고 할로겐화 수소로 분해한다. 독성 유기오염물질은 고온 산화로 분해할 수 있지만 불완전 연소가 될 경우 중금속을 함유한 독성의 소각재가 생성될 수 있다.

○일반적인 소각로의 오염물질 제거효율은 99.99% 이상이고, PCB나 다이옥신(dioxins)에 대해서는 99% 정도의 효율을 나타낸다. 보통 소각법은 오염토양 처리 방법이라기 보다는 폐기물 처리에 주로 활용되고 있는 기술로서 다양한 오염물질을 매우 낮은 수준까지 효과적으로 정화할 수 있는 기술 중의 하나이다. 그러나 처리비용이 타기술에 비하여 매우 높고 중금속으로 오염된 토양을 소각하는 경우 중금속을 포함한 소각재가 발생되므로 소각 후 다시 처분해야 하는 단점을 가지고 있다.

○또한 납, 카드뮴, 수은, 비소 등의 휘발성 중금속은 연소 시 유해성 가스를 발생시키며, 이외에 분진, 에어로졸, 염산, 화산화물, 기타 가스 등을 발생시키므로 이를 처리하기 배기가스처리장치를 설치하여야 한다.

소각법은 토양중의 오염물질 뿐 만 아니라 토양 미생물 및 유기물질까지 모두 분해시키기 때문에 향후 소각된 토양은 토양으로서의 기능을 상실하게 되므로 친환경적인 기술이라 할 수 없다.



[소각법 처리 공정도]

(자료, 환경부, 2007)

### 3.3. 열탈착법 [thermal desorption]

○ 열탈착법은 통제된 환경에서 토양을 일정온도로 가열하여 토양에 흡착된 오염 물질을 휘발 및 탈착시키는 지상처리기술로서 오염지역의 굴착된 오염토양을 열 탈착장치에 투입하여 처리하는 방법이다. 열적 처리는 직접 연소에 의한 열처리(소각)와 산소가 없는 혐기성 상태에서 열을 가해 유기물질을 분해하는 열처리(열 분해)의 두 가지 형태로 구분되며, 다시 열분해 형태는 오염물질을 제거하기 위한 운전 온도에 의해 고온열탈착법(400~800℃)과 저온열탈착법(약 400℃ 이하)으로 구분된다.

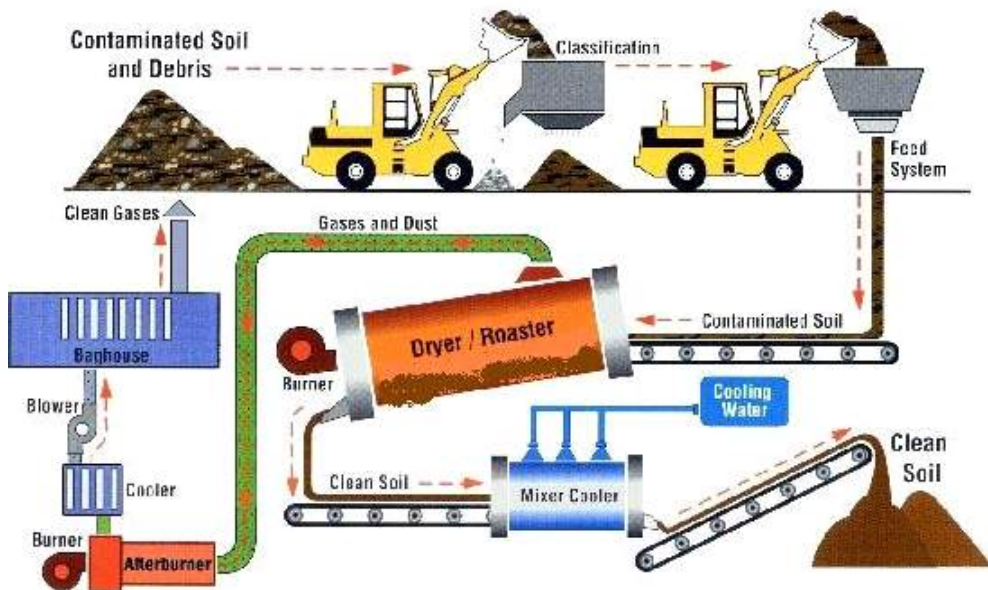
○ 열탈착법은 보통 유기물 성분을 분해하지 않고 오염물질을 열을 이용하여



토양으로부터 분리하지만 시스템의 온도와 특정유기물 존재에 따라 가스상의 2차 생성물을 발생시킨다. 이런 가스상의 물질은 대기로 방출되기 전에 2차 처리 장치(후연소장치, 촉매산화탑, 응축기, 또는 흡수탑)에 의해 처리된다.

○ 또한 저온열탈착법을 적용하기 위해서는 일부 사전 또는 사후 공정이 필요하다. 예를 들어 굴착된 오염 토양 중 입경이 큰자갈(2인치 직경이상)은 선별을 통해 먼저 제거하고, 선별된 토양은 다시 탈착기로 유입되기 전에 분쇄 및 파쇄 과정을 거치게 된다. 또한 탈착기에서 처리된 토양은 냉각과정에서 분진 등을 저감하기 위해 살수작업 및 안정화 작업 등을 수행한다.

○ 저온열탈착은 휘발유, 항공유, 중유, 경유, 난방유 및 윤활유를 포함하는 석유계 화합물의 농도를 감소시키는 데에 매우 효과가 있는 것으로 알려져 있다.



## [저온열탈착 시스템 흐름도]

(자료, 환경부, 2007)

## 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 영역 보고서, 1, 2, 3권.
- 환경부, 2007, 오염토양 정화방법 가이드라인
- Anderson, T.A., E.A. Guthrie 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.