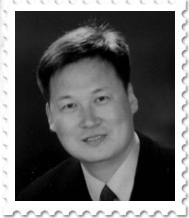


# 토양오염 사례 및 방재기술



이 재 영  
서울시립대학교 환경공학부 교수  
leejy@uos.ac.kr

## 1. 머리말

최근 급격한 산업화와 무분별한 자원개발에 따른 부차적인 현상 중의 하나가 환경오염이다. 환경오염의 종류에는 대기, 수질, 폐기물, 토양에 대한 오염을 들 수 있다. 토양은 수질, 대기와 더불어 사람뿐만 아니라 동·식물 등 생명체의 생존기반이라는 절대적인 기능을 갖고 있으며, 환경을 구성하는 중요한 요소이지만 일단 오염되면 그 영향이 장기간에 걸쳐 지속되는 축적성 오염이므로 오염을 사전에 방지하는 것과 함께 오염된 상태를 개선하기 위하여 적절한 처리를 할 필요가 있다.

미국, 캐나다, 네덜란드 등을 중심으로 한 많은 국가들은 토양오염방지를 위한 각종 법률 및 제 규정을 제정, 시행하면서 토양/지하수 오염지역 조사와 복원을 실시하고 있다. 1970년대 Love Canal 사건이후 1980년대 슈퍼펀드법으로 시작된 미국을 비롯한 독일, 일본, 네덜란드 등

의 토양정화사업을 통하여 수 많은 방재(복원)공법이 개발되고 실용화되었으나, 그 중 경제성과 기술적 관점에서 현장적용이 가능한 기술은 제한되어 있다.

국내에서 토양방재에 관심이 일기 시작했던 80년대 초의 주대상지는 비위생 매립지였으나, 오염토양에 대한 조사범위가 확대됨에 따라 최근에는 공단지역, 군사지역, 폐광산, 주유소 등과 같이 유해물질을 집중적으로 다루었던 곳으로 확대 시행되고 있다. 또한 최근에는 미군 기지 반환에 따른 반환미군기지 환경오염 정화사업(LPP사업)이 시행이 되고 있으며, 2009년도에는 환경부에서 『GAIA Project』라는 “토양·지하수 오염방지기술개발사업”을 공고하여 최근 사회적 문제가 되고 있는 비소 및 중금속 오염부지에 대한 최적 정화기술과 현장 실증화 및 오염토양 최적 처리 시스템 표준화를 위한 사업을 시행하고자 한다.

본 고에서는 대표적인 국내·외의 토양오염 사례를 살펴보고, 토양오염 정화의 광범위한 의미로서 방재기술에

대해서 간략하게 기술하고자 한다.

## 2. 국내·외 토양오염 사례

### 1) 미국 타임즈비치 사건

미국 미주리주 타임즈비치의 주민들은 비포장도로에서 날리는 먼지를 해결하기 위해 1971년부터 수 년 동안 도로에 기름을 살포하기 시작하였다. 그 과정에서 기름을 살포하는 업체가 경비를 줄이기 위해 기름에 인근화학공장에서 판매하는 폐유를 혼합하여 도로에 살포하였고, 이 때 폐유 속에 들어있던 다이옥신이 도로에 유출되었으며, 이것이 다시 토양으로, 대기로, 하천으로 유입되어 이 지역 모든 생명체에 치명적인 영향을 미치게 되었다.

### 2) 이탈리아 세베소 사건

이탈리아 북부의 세베소의 농약제조 회사의 생산공장에서 반응기 내부의 과압으로 인해 안전밸브가 열렸고, 반응기 내부에 있던 다량의 유독성 화학물질인 염소가스와 다이옥신이 15분간 대기로 방출되었다. 누출이 시작된 지 6일 만에 수 백마리의 동물이 죽거나 병들었고 많은 사람들이 염소가스로 인해 화상을 입은 것과 같은 피부병에 걸리게 되었다. 사건 발생 후 주민들은 다른 지역으로 긴급 대피하였고 대기가 회복된 후에도 토양에 잔류하는 다이옥신 때문에 이 지역의 접근이 금지되었다. 이 사건으로 인하여 다이옥신의 독성이 처음으로 명확하게 판명되었다.



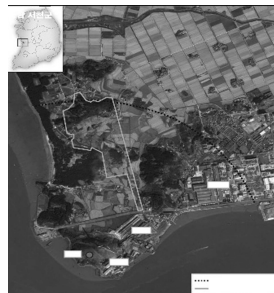
〈Fig. 1〉 폐쇄된 세베소 지역

### 3) 장항제련소 주변 중금속 오염

충남 서천군 장항제련소 주변지역은 1936~1989년 까지 장기간 제련소 운영과정에서 배출된 대기오염물질 등으로 인해 주변의 농경지에서 비소 및 중금속이 토양오염 우려기준을 초과해 검출되는 등 중금속 오염이 심각한 것으로 나타났다. 이 때문에 장항제련소 주변의 농경지에서 생산되는 농작물에도 다량의 중금속이 축적되었다. 이에 정부에서는 오염 부지를 매입하여 근본적인 문제해결을 하고자 노력을 하고 있다.

### 4) 폐 광산오염

경남 고성군 병산마을에서 주민들 중에 이타이이타이 병 의심환자가 발생했다는 주장이 제기되면서 폐광산 주변의 토양오염범위가 농경지, 하천수, 지하수 등뿐만 아니라 오염된 토양에서 생산된 농작물에 의한 2차 오염에 의해 주민들의 건강까지 위협할 수 있다는 가능성이 대두되었다. 또한 미국 리버광산지역 주변의 트레몰라이트 석면피해 소송에서 가해 기업인 WR 그레이스사가 피해 규모조사 및 방제비용 2억5000만 달러에 달하는 벌금을 내기로 합의했다고 발표된 바가 있다. 이는 미국이 환경 재난 지역의 피해를 복구하는 '슈퍼펀드법'을 제정한 이후 사상 최대 규모의 배상금이다. 국내에서는 충남 홍성과 보령, 충북 제천, 강원 영월에 이어 경북 영주에서도 석면광산 인근지역이 석면에 오염된 사실이 알려짐에 따라 석면 관련광산 지역 오염여부에 대한 관심이 증대되고 있다.



〈Fig. 2〉 장항제련소 오염 반경



〈Fig. 3〉 경남 고성 폐광갱구 입구

### 3. 토양오염 방지기술

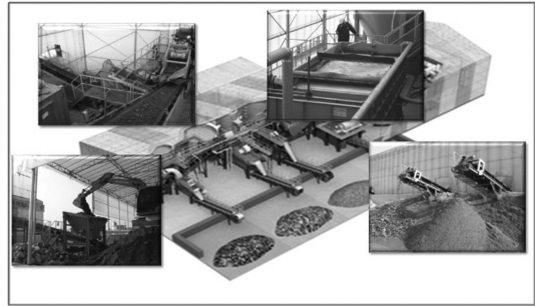
오염토양 방지기술 중 중금속 오염토양 및 유류오염토양에 대해 국내에서 주로 적용되고 있는 토양 세척법(Soil Washing), 동전기법(Electrokinetic : EK), 고형화/안정화법(Solidification/Stabilization), 열탈착법(Thermal Treatment), 토양 경작법(Land Farming) 및 토양증기추출법(Soil Vapor Extraction : SVE), 생물학적 통풍법(Bioventing), 자연정화기법(Natural Attenuation : NA/MNA)에 대해서 소개하고자 한다.

#### 3.1 중금속 오염토양 적용기술

##### 1) 토양 세척법(Soil Washing)

토양 세척법은 대표적인 Ex-situ 공법으로 오염토양 내 오염물 정화 및 추출과 오염미세토양을 분리하는 기술을 근간으로 한다. 본 공법은 적절한 세척제를 사용하여 토양입자에 결합되어 있는 유해한 유기오염물질의 표면장력을 약화시키거나 중금속을 액상으로 변화시켜 토양 입자로부터 유해한 유기오염물질 및 중금속을 분리시켜 처리하는 기법이다. 토양세척공정에서 일정 크기이상의 비오염 등은 분리 제거된 후 토양을 균질화하고, 추출제, 세정액, 산 또는 킬레이트제 등의 화학약품을 물과 함께 사용하여 오염물의 세척 효율을 증가시킨다. 이러한 오염물 중 농축된 미세토양들은 체 분리나 중력침강 등을 거쳐서 분리되며 일반적으로 슬러지 등의 형태로 추가적인 처리가 필요하고, 조립토 등의 복원된 토양은 복토재 등으로 재이용 할 수 있을 것이다. 이때 발생된 세척 폐액의 처리 방법은 이온교환, 용매추출, 응집 침전 등이 적용된다.

토양세척의 효과는 반영구적으로 오염물질 제거를 통한 토양재생뿐 만 아니라, 오염된 토양의 부피를 감소시키는 역할이라 볼 수 있다.

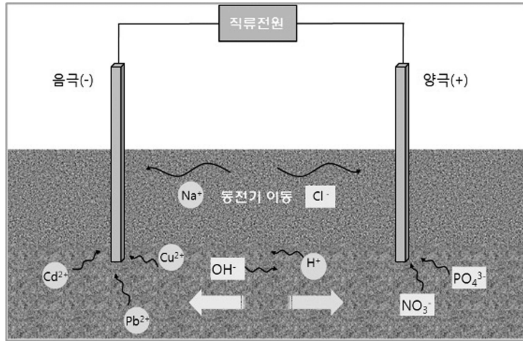


(Fig. 4) 토양세척 공정

##### 2) 동전기법(Electrokinetic: EK)

동전기 정화(Electrokinetic Remediation: EK)법은 토양과 같은 다공성매질에서 공극수 또는 공극수 및 토양표면에 흡착되어 있는 이온성 물질을 전기적인 힘에 의해 이동시켜 제거하는 방법이다. 특히 점토와 같은 미세토양에서도 오염물질을 이동시킬 수 있어 점토질 오염 토양의 정화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

EK정화처리의 일반적인 메카니즘으로는 전기분해(Electrolysis), 전기삼투(Electroosmosis), 전기이동(Electromigration), 전기영동(Electrophoresis)에 의하여 입자들이 이동한다.(Mitchell, 1991) 전기분해(Electrolysis) 반응은 전극에서 산화환원 반응에 의해 물이 분해되는 현상이고, 전기삼투(Electroosmosis) 반응은 포화된 토양에 전기장이 가해지면 지반 내 존재하는 양이온은 음극(-)으로 음이온은 양극(+)으로 이끌리게 반응이다. 또한, 전기이동(Electromigration) 현상은 지반에 직류전기장을 가했을 때 전기장에 의해 이온물질들이 자신의 전하특성에 따라 양이온은 음극(-)으로, 음이온은 양극(+)으로 각각 이동하게 되는 현상을 말하며, 전기영동(Electrophoresis) 현상은 교질 현탁액에 직류전위차가 가해지면 대전된 입자가 전극으로 이동한다. 즉, 음극(-)으로 대전된 점토 입자는 양극(+)으로 이동한다.



〈Fig. 5〉 동전기법 모식도

### 3) 고형화/안정화 공법(Solidification/Stabilization)

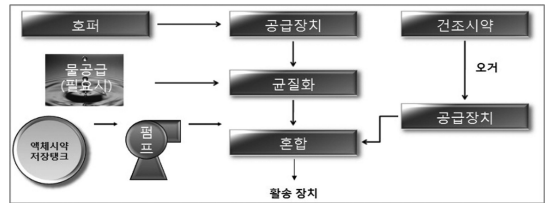
고형화/안정화(Solidification/Stabilization)는 일차적으로 유해성분의 유동성을 감소시키는 것을 목적으로 한다. 고형화(Solidification)는 대상 매체로부터 오염물질(주로 중금속)의 용출을 물리적으로 차단하여 유동성을 감소시키고, 조작이 용이하도록 물리적 특성을 변화시키는 공정이며, 충분한 양의 고화제를 대상 매체에 첨가하여 결과적으로 고형물질(고화체)을 형성시키는 기법이라 할 수 있다.

안정화(Stabilization)는 토양과 이를 구성하는 유독물질을 환경으로의 이동속도와 독성의 정도를 감소시킨 상태로 전환하기 위하여 첨가제(반응물)를 적용하는 공정, 즉 오염토양 중 유해물질을 분해하거나 무해화하여 독성을 제거하는 기법이다.

유해오염물질의 고형화/안정화는 일반적으로 ex-situ에서 적용되고 있으며, 장점으로는 첫째 부피의 감소가 가능하여 오염물의 취급이 용이해지고, 둘째 오염물이 용출되어 나올 수 있는 표면적이 감소되며, 셋째 오염물의 용해성이 감소되고, 마지막으로 오염물 내 오염물질이 독성 형태에서 비독성 형태로 변형된다.

근래에 들어서는 중금속으로 오염된 폐광이나 폐광인 근 농경지의 오염토양 정화와 관련하여 고형화보다는 안정화에 비중을 두고 있는 실정이다. 또한 비소 및 중금속 오염토양에서 오염물질의 저감을 위한 안정화 기술에 적용 가능한 안정화제들이 연구, 개발되고 있으며, 석회석

계열의 안정화 물질(석회석, 소석회, 석회비료 등), 자연광물계열의 안정화물질(인회석, 제올라이트 등), 산업부산물계열의 안정화 물질(제강슬래그, fly ash, bottom ash)등이 연구 개발되고 있다.



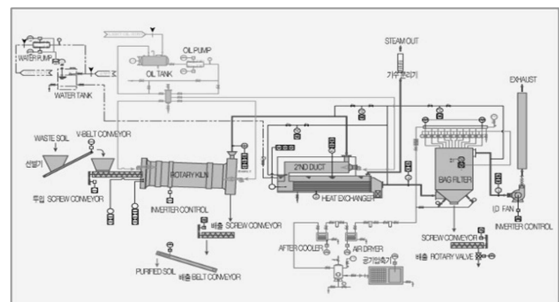
〈Fig. 6〉 고형화 및 안정화법의 처리공정도

### 4) 열탈착법(Thermal Treatment)

열탈착 공법은 토양, 슬러지 그리고 기타 고체 media로부터 유기 오염물을 제거하는 방법으로

소각이나 열분해와는 차이가 있다. 처리된 토양은 물리적 특성을 잃지 않으면서, 토양 내 유기물질도 존재하여 토양의 생물학적 활성을 유지할 수 있으며, 오염된 토양으로부터 주로 VOCs와 SVOCs를 휘발시켜 제거하는 방법이다.

열탈착 공법은 용매추출법보다는 비교적 높은 온도에서 진행되므로 유기물의 휘발을 증가시켜 처리효율을 얻을 수 있으며, 소각처리와 비교할 때에는 VOCs와 SVOCs 처리에만 한정되어 처리 가능한 물질의 범위가 제한되는 단점이 있으나 토양 내 유기물 파괴를 하지 않고도 오염물질의 분리가 가능하므로 처리된 토양의 재사용이 가능하며 소각에 비해 처리 온도가 낮으므로 적은 연료로 처리가 가능하여 비용절감의 이점이 있다. 처리온도의



〈Fig. 7〉 열탈착 공법의 공정도

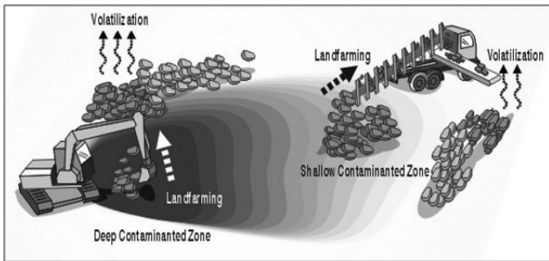


증기를 통해 오염물의 탈착을 용이하게 하고 끓는점이 높은 화합물로 오염된 토양의 처리에 근본적인 대처방법이라고 할 수 있다.

### 5) 토양 경작법(Land Farming)

토양 경작법(Land Farming)은 오염토양을 굴착하여 지표면에 깔아 놓고 정기적으로 뒤집어줌으로서 공기를 공급해 주는 호기성 생분해 공정을 말한다.

오염물질의 분해율을 최적화하기 위한 토양의 특성으로서는 수분함수량, 산소함수량, 양분, 질소, 황, pH, 토양부피 등이 있다.



〈Fig. 8〉 Land Farming의 처리공정도

## 3.2 유류 오염토양 적용기술

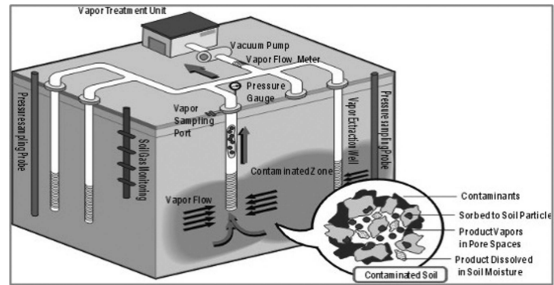
### 1) 토양증기추출법(Soil Vapor Extraction)

토양증기추출법(SVE)은 불포화 대수층위에 추출정을 설치하여 토양을 진공상태로 만들어 줌으로써 토양으로부터 휘발성, 준휘발성 오염물질을 제거하는 정화방법이다. 오염지역 외부에서 공기가 주입되어, 토양으로부터 추출되는 가스가 지상에서 처리되는 것 또한 오염물질과 가스의 처리에 있어서 새로운 정화방법이라 할 수 있다.

적용범위로서는 ① 토양굴착이 불가능한 지역, ② 오염토 부피가 많은 지역, ③ 생물학적 처리속도를 빠르게 할 필요성이 있는 지역에 많이 적용된다.

### 2) 생물학적 통풍법(Bioventing)

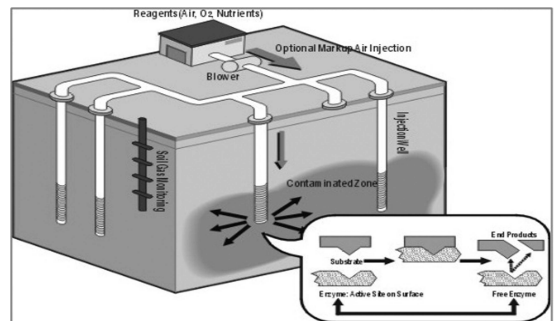
생물학적 통풍법(Bioventing) 기술은 기체상으로 존재



〈Fig. 9〉 SVE 시스템

하는 휘발성 유기물질을 추출하는 동시에(토양증기추출법) 기존의 토착 미생물에 산소 및 영양분을 공급하고, 토양 내 증기흐름속도를 공학적으로 조절함으로써 미생물의 지중 생분해능을 극대화하는데 중점을 둔 기술이다. 석유화합물류의 유기화합물들에 의해 오염된 토양의 정화에 성공적으로 적용되어 왔으며, 처리효율, 경제성, 현장 적용성 측면에서 매우 우수한 기술로 평가받고 있다.

Bioventing공정은 SVE와는 달리 미생물 활성을 유지하는 정도의 산소만 제공하면 되므로 산소흐름 속도가 낮아도 되는 장점이 있으며, 최근에는 불포화지대에만 적용되는 본 기술을 포화지하수대까지 동시에 적용할 수 있도록 하기 위해 Air Sparging 기술과 결합된 형태의 Bioventing 기술이 개발, 적용되고 있다.

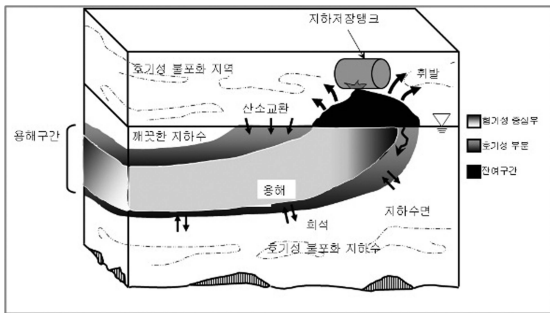


〈Fig. 10〉 Bioventing 시스템

### 3) 자연저감법(Natural Attenuation: NA/Monitored Natural Attenuation: MNA)

자연저감법에는 두 가지의 기법이 있는데 자연저감법(Natural Attenuation: NA)과 자연저감관측법

(Monitored Natural Attenuation: MNA)이 있다. 자연 저감법(Natural Attenuation: NA)은 토양 및 지하수 내에서 자연적으로 발생하는 물리적, 화학적, 생물학적 과정들에 의해 오염물질들의 부하, 농도, 유량 또는 독성이 감소되는 이들 과정들의 단일 혹은 복합적인 효과를 말한다. 또한 자연저감관측법(Monitored Natural Attenuation: MNA)은 자연저감과정들이 주변 환경에 영향을 주지 않고 정화목표가 합리적인 시간 내에 성취될 수 있는 충분한 속도로 이루어지고 있음을 확인하는 지하수 관측활동을 말한다.



〈Fig. 11〉 NA/MNA 모식도

#### 4. 맺음말

오염된 토양을 방재하기 위해 중금속오염토양 및 유류 오염토양의 방재기술을 설명하였다. 그러나 일반적으로 토양은 항상 불균질한 상태가 많고, 오염물질은 복합적으로 존재하는 경우가 많다고 본다. 그러므로 어느 한가지의 공법에 의하여 정화(방재)된다는 확신보다는 2~3가지의 방재공법이 함께 적용되어 오염토양을 정화하여야 한다고 판단된다. 또한 오염된 토양의 유실과 확산으로 인한 오염을 줄이기 위해서는 오염된 토양에 대한 방재기술의 확보가 필요하다. 오염토양방재기술은 오염원 관리·처리 체계를 통하여 오염토양을 자연 상태 또는 안정화된 형

태로 환원시키는 기술로써 선진 국가에서 방재기술의 연구 및 현장처리가 활발히 진행 중에 있다. 따라서 산·학·연이 유기적으로 연계하여 중금속 오염토양을 중심으로 국내 지질특성을 고려한 맞춤형 현장중심기술 개발 및 표준화연구를 실시하고, 최종적으로 선진적인 토양분야 통합관리기반을 구축하여 향후 국내 환경시장의 90% 이상이 국내기술로 대체되는 기술의 독립성을 갖추어야 하겠다.

#### 참고문헌

1. 토양지하수환경(2006), 이재영 외 4인 공저, 동화기술
2. 국외 토양오염 부지의 복원 및 재사용 사례(2001.9), 이재영, 지반환경
3. 광해에 의해 발생된 토양오염 복원 방법(2007.3), 김희중, 지반환경
4. 지반환경(2004), 구미서관,
5. 토양환경공학(2001), 한국지하수토양환경학회 편, 향문사
6. 2000년대 환경공학(2000), 대웅도서출판,
7. 식물정화에 의한 폐광산 지역 비소오염평가 연구보고서(2005. 12)
8. 토양오염정화의 진행현황(2007), 김수홍, 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회
9. 국내 및 외국의 토양복원 기술개발의 동향분석에 관한 연구(2006), 박익범 외 6인, 경기도 보건환경연구원보
10. 오염토양 복원 및 매립지 정화·침출수 처리(2007.7) 월간 폐기물 21
11. 국내 토양오염현황 및 대책(1997), 대우건설기술연구소
12. 토양오염 정화연구의 필요성(1997), 대우건설기술연구소
13. U.S.Environmental Protection Agency Cleaning Up the Nation's Wastes Sites : Markets and Technology Trends 2004 Edition, 542-R-04-015, 9-1-9-9.(2004)
14. International City/county Management Association(2001) Brownfields Development, The superfund Brownfield Research Institute, 2-5, 2001