

환경오염지역의 정화 및 관리

서울대학교 공과대학
지구환경시스템공학부

남 경 필



목 차

- 8. 오염지역 정화 및 복원기술
- 9. 정화·복원 모니터링 및 관리



8. 오염지역 정화 및 복원기술 (1)

1) 생물학적 정화기술 (개요)

정의 및 원리

- ◆ (미)생물의 오염물질 분해 능력을 이용하여 오염토양 또는 지하수를 처리하는 기술
- ◆ 가수분해, cleavage, 산화, 환원, 탈수소화, 탈염소화, dehyrrohalogenation, 치환 등의 효소 촉매반응
- ◆ 공대사(Cometabolism) : 다른 물질을 분해하는 미생물의 효소에 의하여 우연히 일어나는 분해과정으로 탄소원이나 에너지원으로 이용되지 않음
- ◆ 전자수용체에 따라 호기성(O_2), 혐기성(NO_3^- , SO_4^{2-} , CO_2), 발효(유기물)로 구분

장단점

장점

현장처리(In-situ/On-site) 가능
오염성분의 궁극적 제거
비교적 저렴
타 기술과 연계 용이
부지/토양 특성변형 최소화
주민 친화성 양호

단점

일부 오염성분의 난분해성
처리효과가 부지 특성의 영향 받음
처리/사후 감시기간이 김
미지/독성 중간물질 생성 가능성
기술의 신뢰성에 대한 인식문제
기술 집약적

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (2)

2) 생물학적 정화기술 (원리)

효소촉매반응 Enzyme Reaction

- **Hydrolysis** : Exoenzyme에 의해서 이루어지는 반응. 물이 첨가되어 유기물분자가 간단한 형태로 끊어지는 반응
- **Cleavage** : 탄소-탄소의 단일/이중결합이 끊어지는 반응.
- **Oxidation** : Electrophilic form을 이용하여 유기물이 분해되는 반응
- **Reduction** : Nucleophilic form이나 직접적인 전자전달을 이용하여 유기화합물이 분해되는 반응
- **Dehydrogenation** : 수소 원자 2개를 잃음으로써 두 개의 전자와 두 개의 수소를 잃는 산화환원반응
- **Dechlorination** : 염소계 화합물이 전자수용체로 이용되어 염소가 떨어지고 수소원자가 붙는 반응
- **Dehydrohalogenation** : 유기화합물로부터 수소원자와 염소 원자가 떨어지는 반응
- **Substitution** : 한 원자가 다른 원자로 치환되는 반응

공대사 Cometabolism

- 어떤 기질을 분해하는 미생물의 효소가 낮은 기질특이성 때문에 에너지 생산이나 탄소 동화 등의 생장 과정과 관계없이 다른 기질 전환
- 오염물의 분해, 독성 감소 가능
- 염소계 지방족화합물, 다환성 방향족 화합물 등의 주요 분해기작

전자수용체 Electron Acceptor

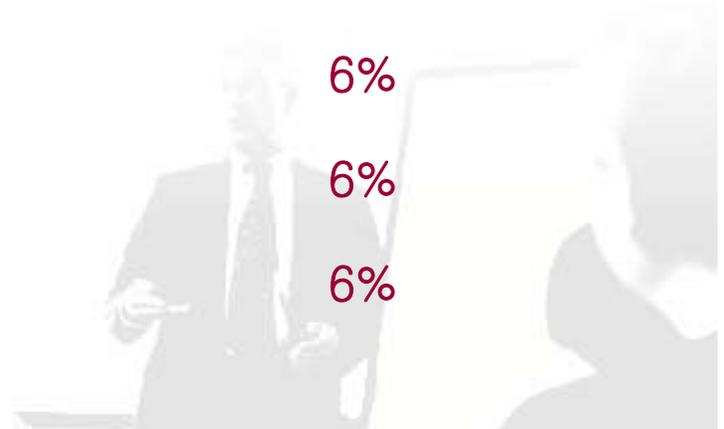
호기성	산소 O_2
혐기성	Nitrate (질산) NO_3^- Sulfate (황산) SO_4^{2-} Carbon dioxide (이산화탄소) CO_2
발효	기질을 전자공여체와 전자수용체로 동시에 이용하며 지극히 혐기적인 조건에서 발생

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (3)



(참고) 생물학적 정화기술 적용사례

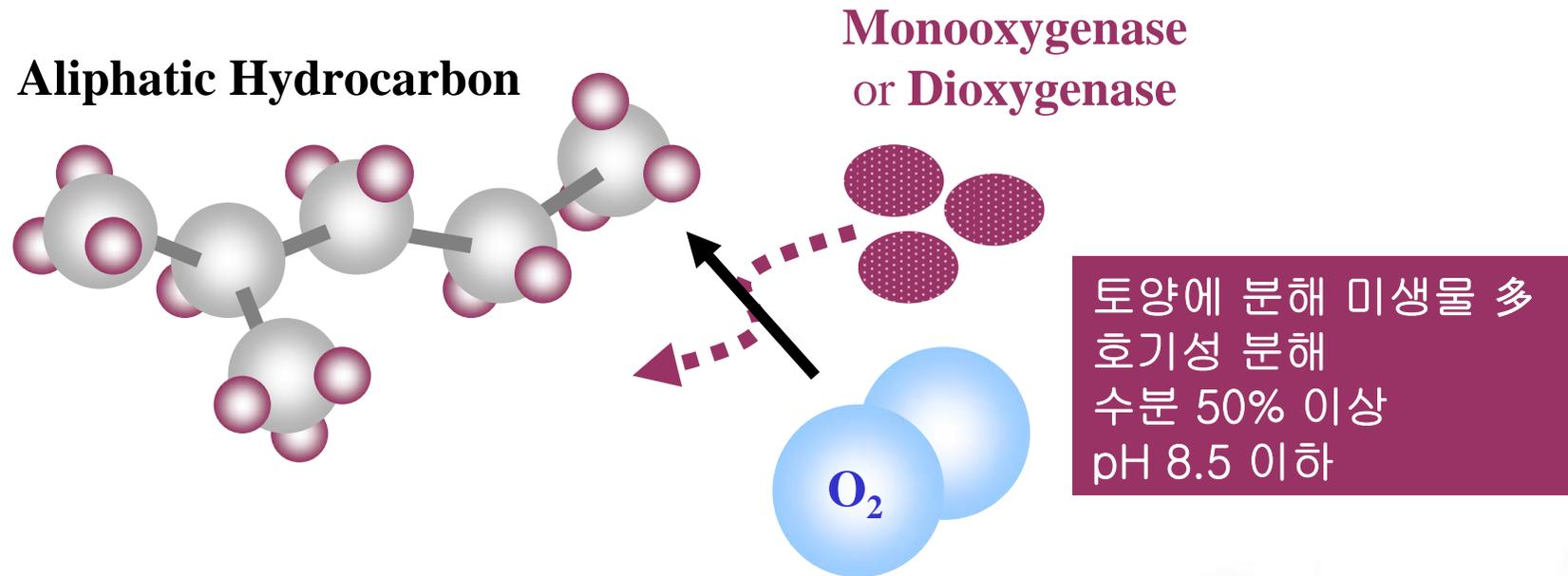
⊥ ()	Superfund ⊥ ('94)
	⊥ ⊥ 9%
	(⊥ 4%, 5%)
■	⊥ 30%
	⊥ / ⊥ 26%
()	SVE 17%
	6%
	6%
	() 6%



8. 오염지역 정화 및 복원기술 (4)

3) 생물학적 정화기술 (주요오염물의 분해 ①)

① Aliphatic Hydrocarbons 지방족 탄화수소



종류 : Alkanes, Alkenes, Alcohols, Aldehydes, Ketones, Acids
분해되는 정도

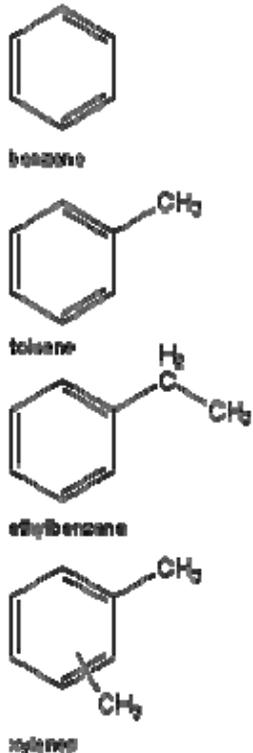
- Long Chain (C9 이상) > Short Chain
- Straight Chain > Branched Chain
- Saturated Hydrocarbons > Unsaturated Hydrocarbons

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (5)

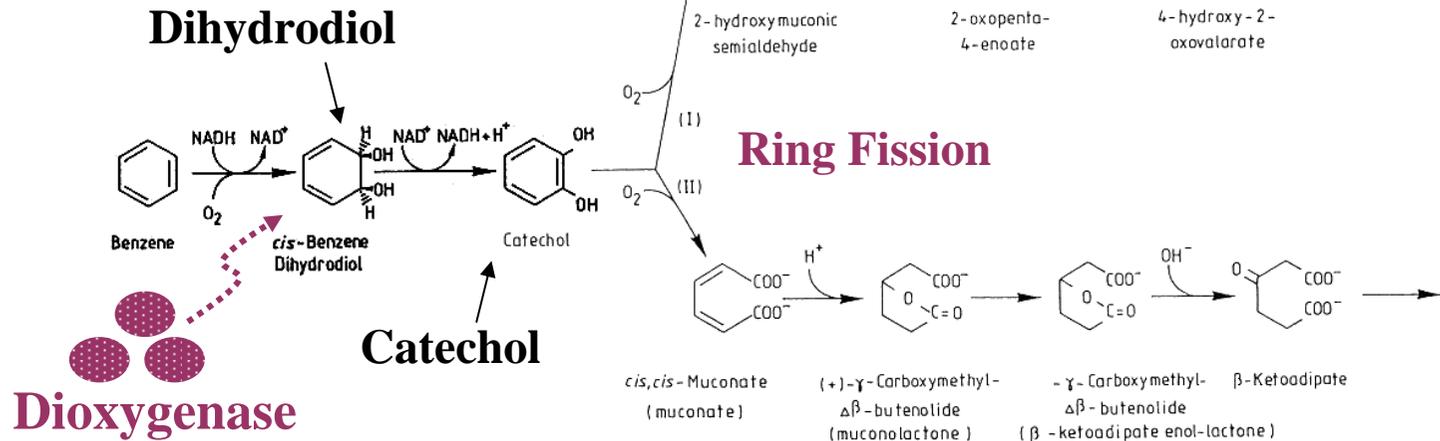
3) 생물학적 정화기술 (주요오염물의 분해 ②)

② Aromatic Hydrocarbons 방향족 탄화수소

BTEX



Benzene 생분해

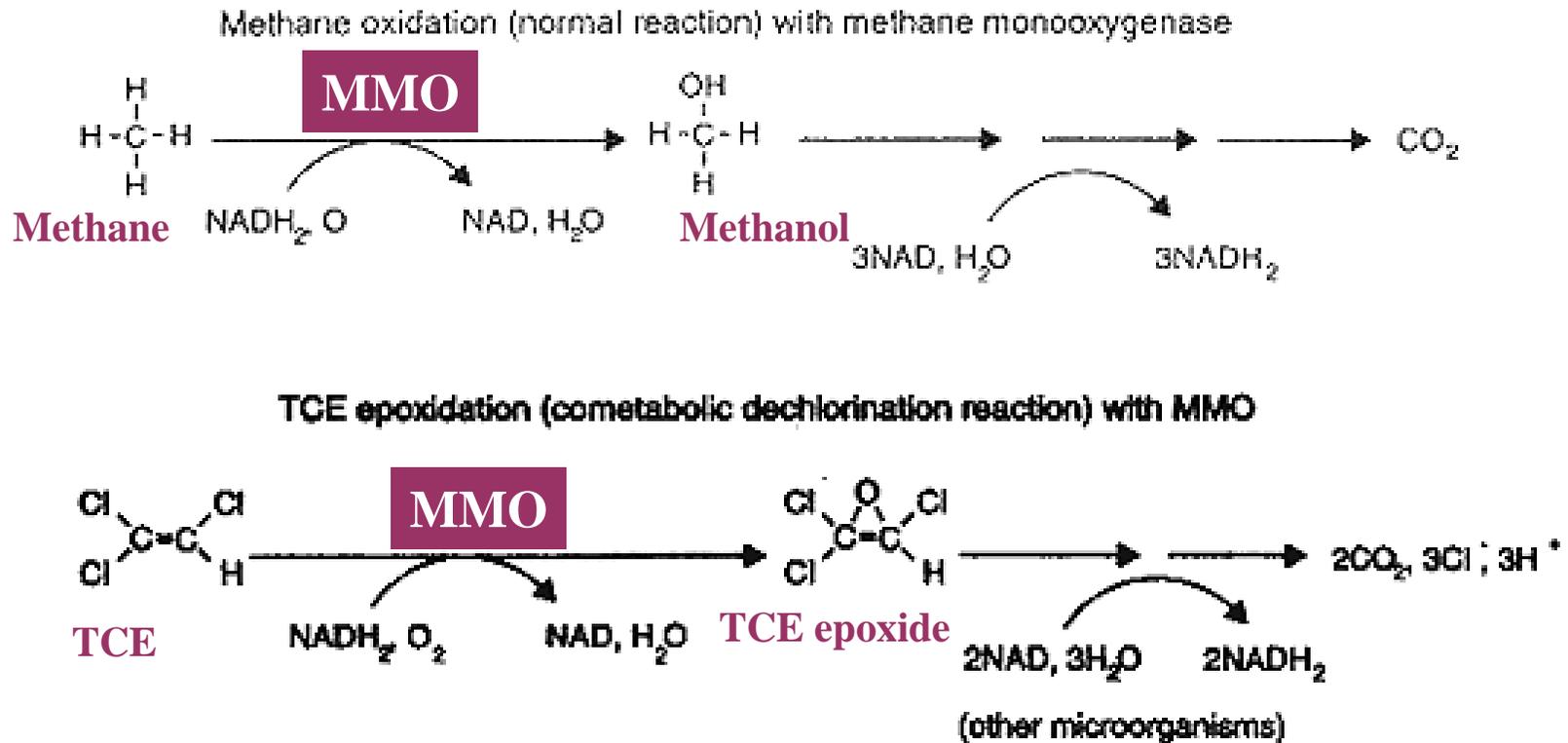


- 치환기의 위치, 수, 종류에 따라 분해성 차이
- 호기성 분해
- 탈질, 망간환원, 철환원, 황산염환원, 메탄생성 등 혐기조건에서도 분해
- 전자수용체의 이용가능성과 산화환원전위에 따라 결정

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (8)

3) 생물학적 정화기술 (주요오염물의 분해 ④)

(참고) Cometabolism of TCE by Methane Monooxygenase

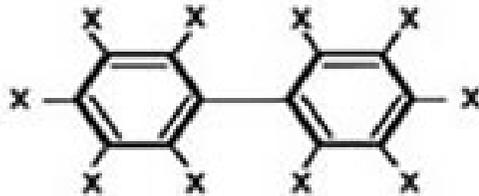


- Methanotrophic Bacteria가 생성하는 MMO의 기질특이성 부족으로 TCE의 공대사가 일어남
- 메탄농도가 높으면 MMO에 대하여 TCE와 메탄이 경쟁할 수 있음.
- PCE는 많이 산화된 상태이므로 공대사에 의해서도 분해되지 않음. 환원으로만 분해 가능.

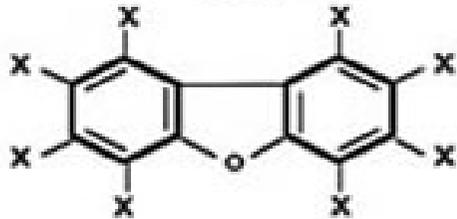
8. 오염지역 정화 및 복원기술 (9)

3) 생물학적 정화기술 (주요오염물의 분해 ⑤)

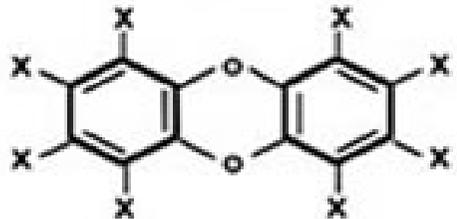
⑤ Chlorinated Aromatic Hydrocarbons 염소계 방향족 탄화수소



POLYCHLORINATED BIPHENYLS
(PCBs)



POLYCHLORINATED DIBENZOFURANS
(Furans)



POLYCHLORINATED DIBENZODIOXINS
(Dioxins)

X = Chlorine or Hydrogen

- 정화대상물질 – Chlorophenol, Chlorobenzene, Chloroaniline, PCBs, Pesticides

- PCBs : Polychlorinated Biphenyls, 탄소와 염소의 무게비로 구분하며 용해도가 작아서 지하수보다는 토양오염

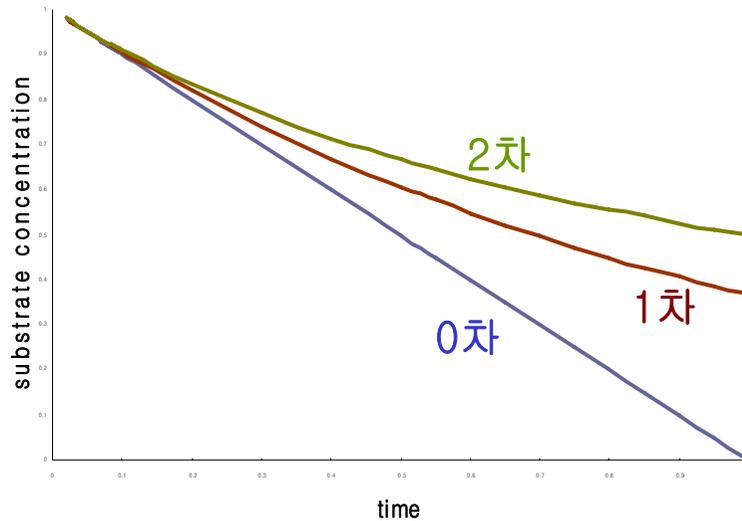
- 염소의 치환특성, 수, 위치에 의해 분해도 결정

- 호기조건에서 공대사(cometabolism)에 의해 분해

- 혐기조건에서 탈염소화(dechlorination)에 의해 분해 – 메탄생성 조건에서 효율적

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (10)

4) 생물학적 정화기술 (Kinetics & Rates)



- Thermodynamics
 - 반응(분해)의 가능성 문제
 - 과학자의 영역
- Kinetics
 - 반응(분해)속도의 문제
 - 농도, 미생물, 환경조건의 영향
 - 공학자의 영역

$$-\frac{dC}{dt} = k$$

0차 반응: 모든 기질이 이용가능한 상태. 대수적 감소

$$-\frac{dC}{dt} = kC$$

1차 반응: 속도가 기질농도에 비례

$$-\frac{dC}{dt} = kC^2$$

2차 반응: 실제와 가장 비슷

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (11)



5) 생물학적 정화기술 (환경조건의 영향)

미생물

- Bacteria
호기성 vs. 혐기성
독립영양 vs. 종속영양
- 토양입자표면에 붙어있음
- 지표 가까이에 많이 존재

영양분

- C, H, O, N이 95%, P, Ca 등이 3.5%
- Bacteria 화학식 $C_5H_7O_2N$
- 질소, 인 등이 부족
- 미생물사멸로 원소순환
- Growth factor 필요

온도

- 온도가 증가할수록 생화학 반응속도 증가
- 최적온도
Psychrophile($15 \pm 5^\circ C$)
Mesophile($25 \sim 40^\circ C$)
Thermophile($40^\circ C$ 이상)

pH

- 세포기능, 세포막을 통한 물질이동, 효소반응의 평형, 세포 내 에너지 생산 등에 영향
- 자연환경 pH 5~9
- 일반적으로 최적 6.5~7.5

수분

- 오염물질의 생물학적 이용성, 기체 전달, 오염물질의 위해성, 미생물의 움직임과 성장, 미생물 종의 분포에 영향
- 중력수 비율, FC로 측정

산화환원전위

- E_h로 표현
- (+)는 산화환경, (-)는 환원환경
- 오염물의 분해여부 결정
- 특정 산화제/환원제의 농도가 미생물 대사 활성에 영향

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (12)

6) 생물학적 정화기술

① Biodegradation 생분해법

개요

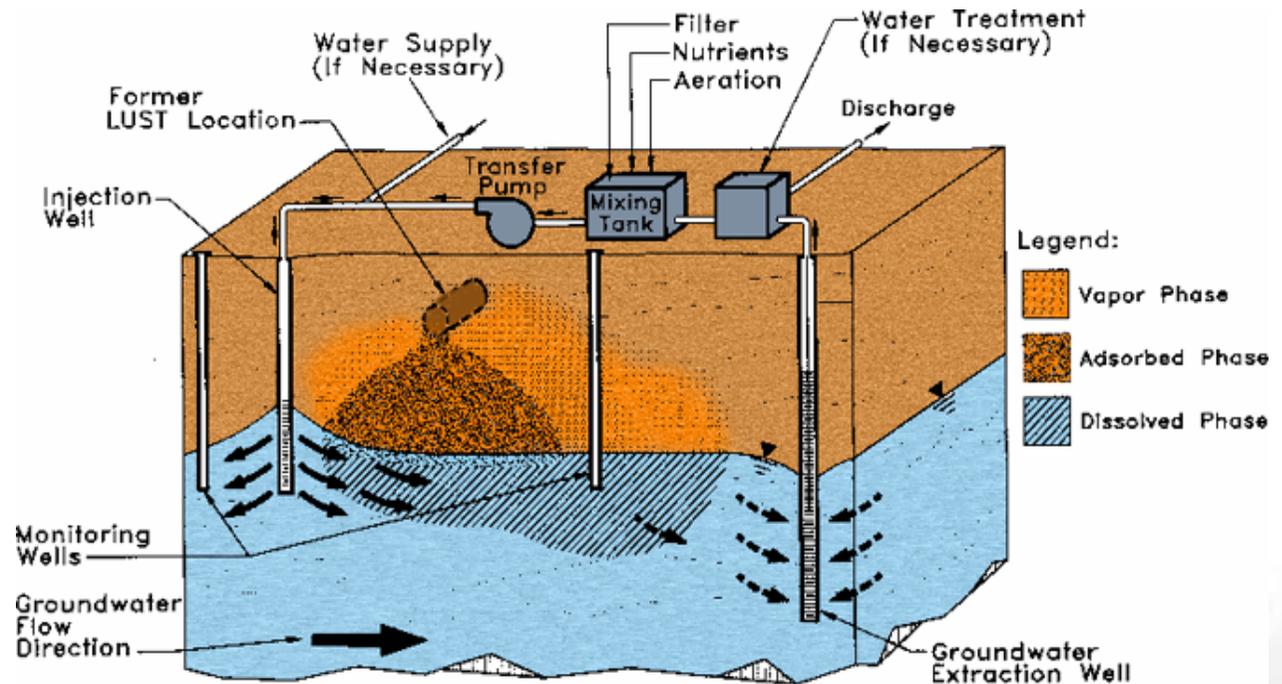
지중에 존재하는 오염물질을 분해하는 능력을 가진 미생물을 이용하여 토양 및 지하수 내의 유기오염물질을 분해하는 기술

처리물질

유류 탄화수소, 용매, 살충제, 기타 유기물

영향인자

오염물의 흡착성, 화학적 반응성, 생분해 가능성, 오염물의 농도, 오염물질과 미생물의 접촉 여부, 토양의 특성과 성상, 산화환원전위, 미생물 활성에 영향을 미치는 독성물질의 존재 여부



8. 오염지역 정화 및 복원기술 (13)

6) 생물학적 정화기술

① Biodegradation 생분해법

Biostimulation			Bioaugmentation
산소 공급 <ul style="list-style-type: none"> → 공기 주입: 저비용, 적용 용이, 낮은 산소전달률 → 산소 주입: 고비용, 높은 산소전달률 	산소발생물질 공급 <ul style="list-style-type: none"> → 과산화수소: 취급 용이, 자체독성 → MgO 등 산소발생 물질 주입 → 산소 녹아있는 물 	전자수용체 공급 <ul style="list-style-type: none"> → 질산: 탈질 활성화, 혐기조건 지역까지 정화가능, 질산나트륨 오염기준 및 독성 고려 필요 	미생물 공급 <ul style="list-style-type: none"> → 토착미생물 개체군을 지상에서 성장시킨 것이나 대상 오염물질을 분해할 수 있는 미생물을 토양에 접종 → ubiquity principle & 자생미생물의 오염물질 분해효소 증진 → 주입미생물 이동, 분포 및 현장적응도 문제
영양분 공급 <ul style="list-style-type: none"> → 질소, 인, 칼륨, 마그네슘 등 양분 공급: 주입구 주변 biofouling 가능성, pH 변화 주의 	1차 기질공급 <ul style="list-style-type: none"> → 아세테이트, 에탄올 등 공급: 혐기적 공대사능 향상, 환원적 탈염소화 촉진 	기타 <ul style="list-style-type: none"> → 메탄, 암모니아 등 영양염류 기체로 공급: CAH 공대사능 향상 → 혐기화: 설탕 주입 	

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (14)

6) 생물학적 정화기술

② Bioventing 생물학적 통풍법

개요

오염된 불포화지반에 산소를 공급함으로써 토양에 함유된 유류 탄화수소의 생분해를 활성화하는 기술

처리 물질

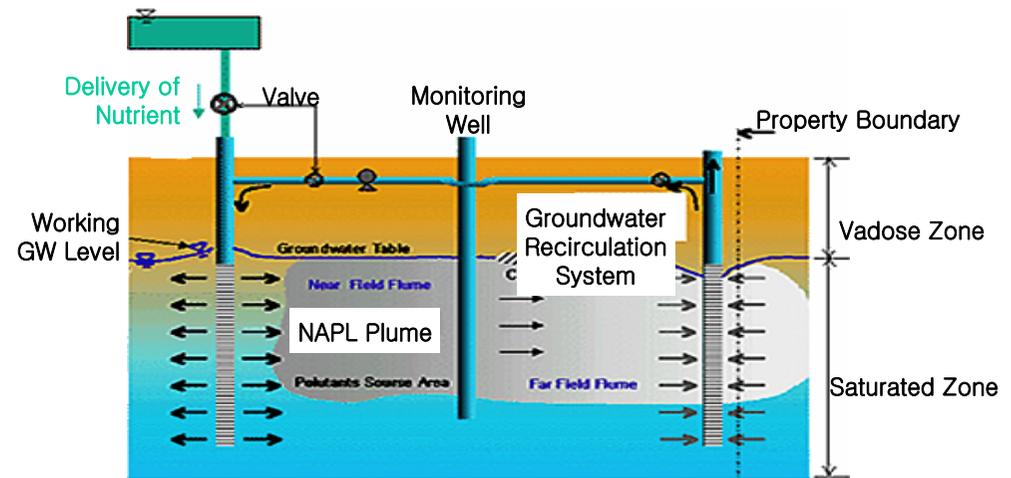
유류 탄화수소, 비염소계 용매, 살충제 등 유기화합물질

영향 인자

오염물의 생분해성, 충분한 산소, 토양의 pH와 온도, 통기성, 수분함량 및 영양분

설계 및 운전

현장지질조건 고려한 관정의 수와 위치 설계
토양함수비와 영양분에 대한 정기적 모니터링 필요



장점

낮은 압력으로 충분한 산소공급 가능
미생물 분해 외에도 휘발성 물질 제거 가능
무기물 흡착, 흡수, 응집, 농축 가능

단점

포화대에서는 Air Sparging 등 병행 필요
방출가스 처리시설 필요
무기물 분해 어려움

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (15)

6) 생물학적 정화기술

③ Composting 퇴비화

개요

미생물에 적정조건을 제공함으로써 혐기성 분해 또는 발효를 이용하여 오염물질을 생물학적 분해

처리
물질

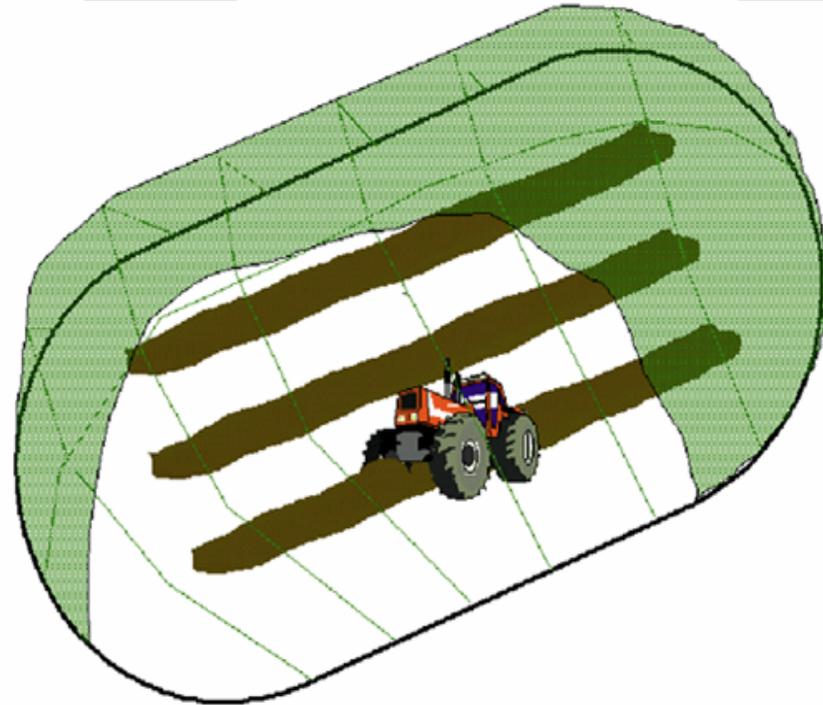
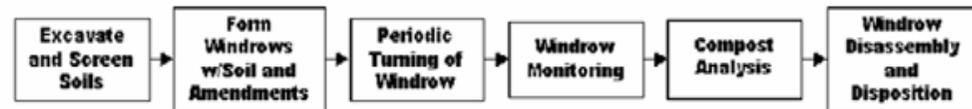
유기물 또는 생분해 가능한 물질

영향
인자

오염물질의 농도, 토양의 형태, 영양분, 미생물의 분해능력

한계

넓은 부지 필요
평화재의 사용으로 전체 부피 증가
중금속 분해 불가능



8. 오염지역 정화 및 복원기술 (16)

6) 생물학적 정화기술

④ Controlled Solid Phase Biological Treatment

개요

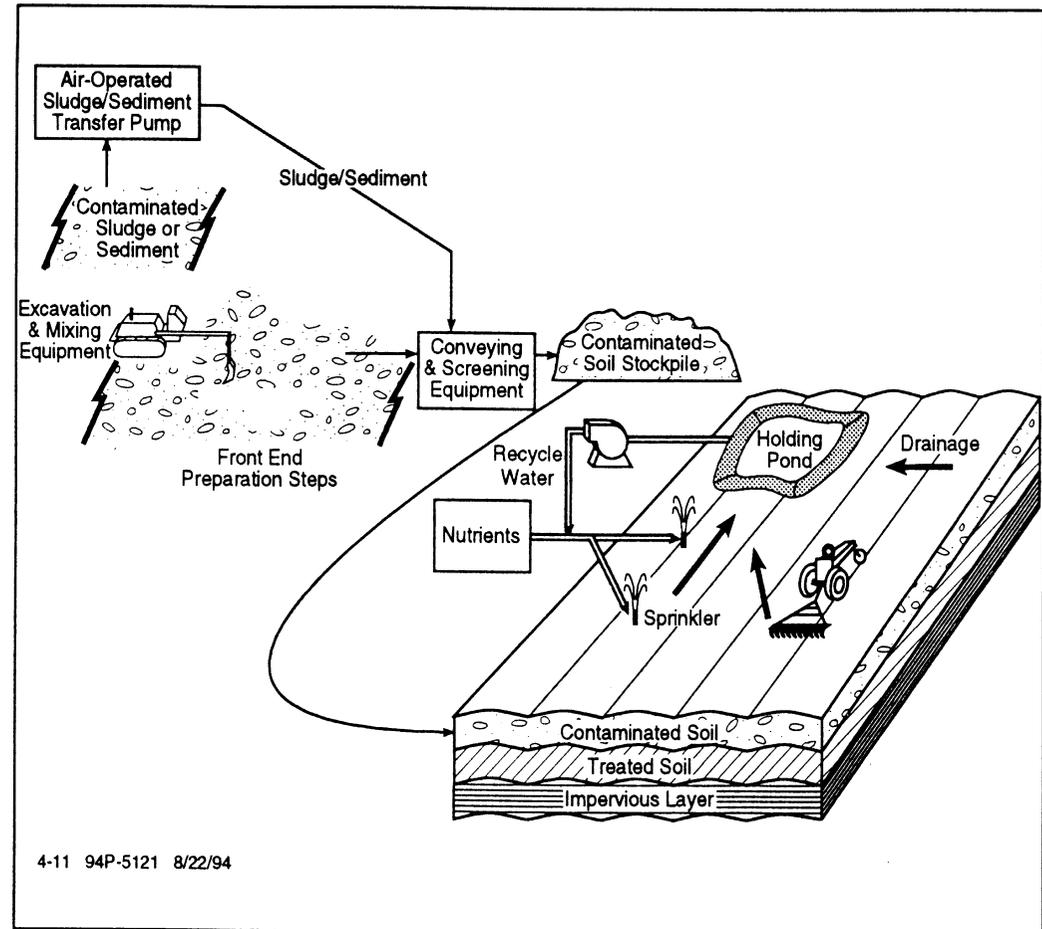
토양을 굴착하여 토양개선재와 혼합하고 침출수처리장치, 폭기 장치를 설치하여 생분해를 활성화하는 공법

처리 물질

유기물 또는 생분해 가능한 물질

한계

토양굴착 필요 (비용)
각종 장치 설치 필요
넓은 부지 필요
긴 처리기간



8. 오염지역 정화 및 복원기술 (17)

6) 생물학적 정화기술

⑤ Landfarming 토양경작법

개요

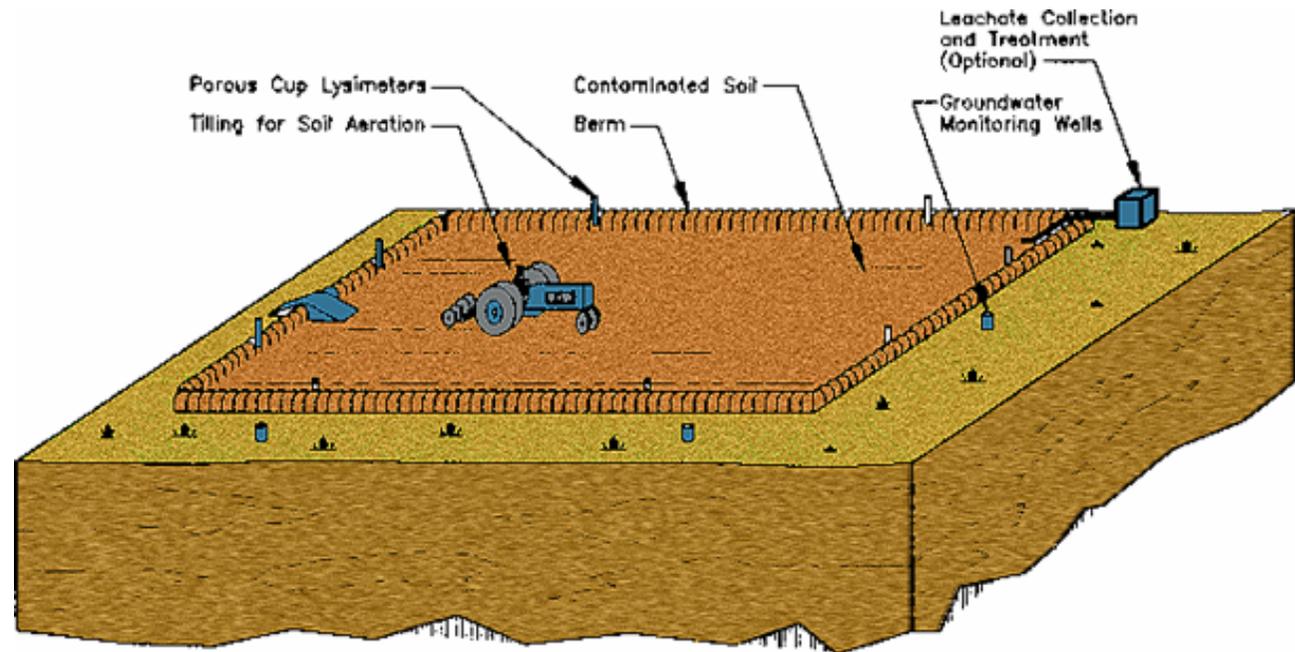
오염토양을 굴착하여 정기적으로 혼합해 줌으로써 호기적 생분해를 유도하는 공법

처리 물질

유류 탄화수소
살충제

영향 인자

오염물질의 농도와 독성
무기물질의 존재 여부
토양의 유기물 함량



한계

시설 설치를 위한 넓은 부지 필요
배출가스 정화시설 필요
상대적으로 긴 정화기간
중금속 등 무기물 분해 불가능

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (18)

6) 생물학적 정화기술

⑥ White Rot Fungus

개요

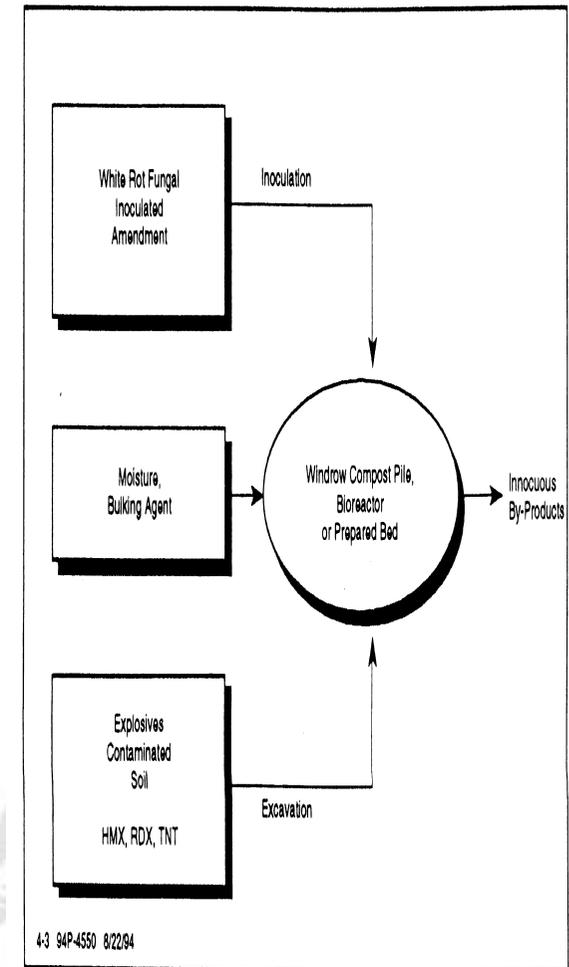
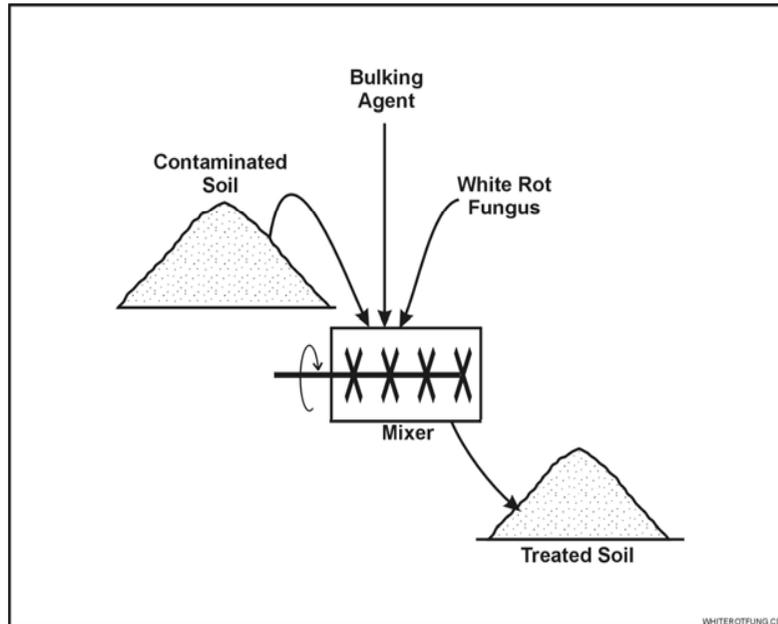
리그닌을 분해하는 효소를 가진 미생물을 이용하여 다양한 유기물질을 분해하는 공법

처리물질

TNT, RDX, HMX 등 폭약류
DDT, PAHs, PCBs, PCP 등 유기오염물

영향인자

오염물질의 농도
토착미생물군의 박테리아 수
오염물질의 화학적 흡착
다른 오염물질이나 토양의 특성



8. 오염지역 정화 및 복원기술 (19)

7) 물리화학적 정화기술

① Air Sparging 공기분무법

개요

취발, 생분해를 이용하여 포화대 내의 용해상, 자유상, 흡착상 오염물질 정화하는 기법

처리물질

헨리상수 10^{-5} atm-m³/mole 이상
증기압 0.5~1.0 mmHg
용해도가 낮은 물질 (BTEX, PCE, TCE 등은 저효율)
호기성 생분해가 잘 일어나는 물질

영향인자

대수층 종류 (자유면 vs. 피압)
토양 종류 (입도분포/ 균질 vs. 불균질)
지하수면 깊이, 투수성, 통기성
pH, 온도, 산소, 수분함량, 영양분
유기탄소 함량
오염물의 취발성, 용해도 및 생분해성

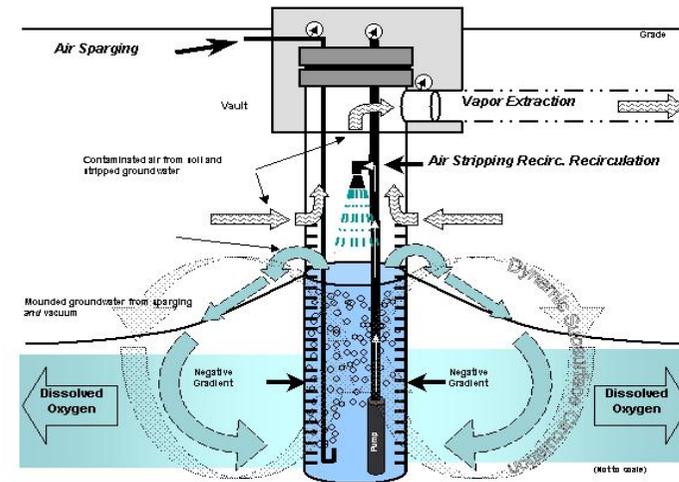


FIGURE 3-15
ART IN-WELL STRIPPER TREATMENT SCHEMATIC
RIVERFRONT SUPERFUND SITE
OPERABLE UNIT 1 FS

SOURCE: ADUTECH ENVIRONMENTAL, INC.

한계

피압대수층, 낮은 투수성 지반 불가능
불균질 매질에 적용 어려움
오염물 확산가능성, channeling 현상
주변구조물의 안정성에 영향
취발성 큰 오염물 적용 어려움
두께 1ft 이상의 NAPLs 효율 낮음

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (20)

7) 물리화학적 정화기술

① Air Sparging 공기분무법

<p>사전 조사</p>	<p>오염물의 종류, 위치, 분포양상 대수층 종류, 지하수면 깊이, 토양의 종류와 특성 등 수리지질학적 조건 불균질성에 따른 air plume 분포양상 주입률에 따른 air channel 분포 양상 Pilot test (압력, 용존산소량, 지하수면, 오염물 농도 변화 관측) 공기 분포 양상 및 영향반경 오염물의 휘발률과 산소공급률</p>	<p>타 기술과 병행</p>	
<p>설계 요소</p>	<p>목표정화수준 및 정화시간 주입형태 (continuous vs. pulsed) Standard vs. Site specific design 오염물질 종류 주입정, 추출정, 관측정 위치 및 개수 주입정의 clogging 여부</p>	<p>Horizontal Trench Sparging</p> <p>오염지대 깊이가 30ft 이하일 때 낮은 투수성 지반에 적용</p>	<p>In-Well Air Sparging</p> <p>공기주입에 비적합한 지역에서 casing을 이용, 공기흐름 형성</p>
		<p>Biosparging</p> <p>생분해만을 목적으로 하여 포화대에 낮은 유속으로 공기 주입</p>	<p>Vapor Recovery via Trenches</p> <p>얕은 지하수대, 작은 입자로 구성된 지역에 갇힌 증기 제거</p>

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (21)

7) 물리화학적 정화기술

② Soil Vapor Extraction (SVE) 토양증기추출법

개요

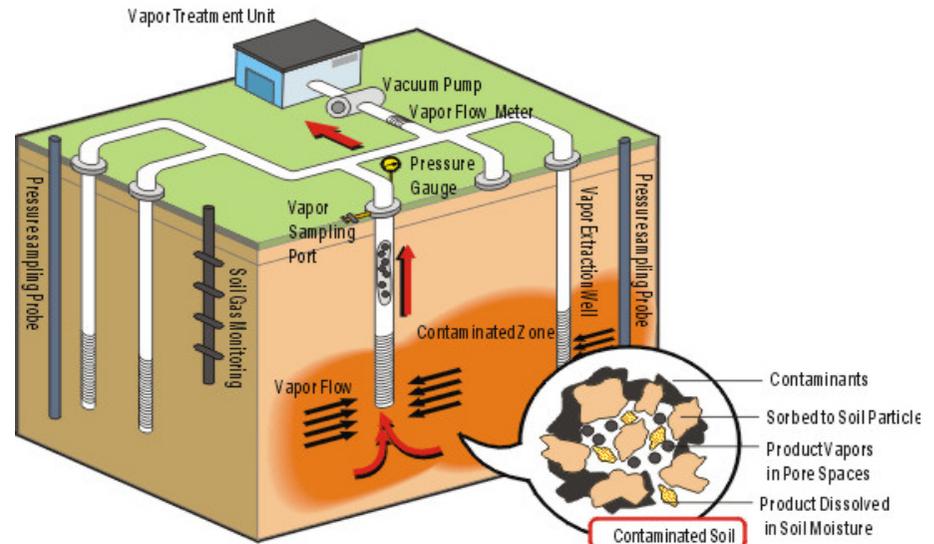
VOC/SVOC로 오염된 불포화대에 주입
정과 추출정을 설치하고 깨끗한 공기를
지중에 넣은 뒤 진공압을 이용해 공기를
빨아들임으로써 휘발성 오염물질이
공기와 섞여 배출되도록 하는 공법

처리 물질

불포화대의 휘발성 NAPL
지중에 잔류하거나(trapped), 자유 상
태(free-product)로 존재하는 NAPL

장점

추가로 주입되는 시약이 없음
부작용이 거의 없음
설치 용이, 비용 저렴, 신속
일반굴착보다 깊이 정화
공기 주입을 통한 생분해 활성화
접근하기 어려운 지역에 적용 가능



한계

증기압 0.5mmHg 이하 오염물 부적합
균질/투수성 불포화 지반에만 적용 가
능
점토지반에서는 파쇄공법 병행 필요
중금속, DNAPL, PCBs, Dioxins 부적합
Bioventing 등으로 추가 정화 필요
방출가스 처리시설 필요

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (22)

7) 물리화학적 정화기술

② Soil Vapor Extraction (SVE) 토양증기추출법

<p>사전 조사</p>	<p>오염물 휘발성, 증기압, Henry 상수 오염물 공기/물 분리계수, 용해성 오염물 분포 깊이, 형상, 면적 지반 공기투과성, 투수성, 공극률 유기탄소함유량, 함수비, 입도분포 지반과 지역 내로의 접근성</p>	<p>타 기술과 병행</p>	
<p>영향 인자</p>	<p>오염물 농도, 휘발성, 분포 및 면적, 적용 가능한 대수층 깊이, 토양 형태와 성분, 수분/유기물 함량, 공기투과도, 충분한 산소와 영양분의 존재 유무</p>	<p>SVE 적용 전 사전 양수</p> <p>지하수위 저하로 SVE를 통한 정화영역 확장</p>	<p>표면에 불투수성 장벽 설치</p> <p>공기의 순환주기가 너무 짧아지는 것을 방지</p>
<p>설계 요소</p>	<p>공기 추출률/량, 영향반경을 고려한 추출정의 수, 간격과 형상, 세정시간, 방출가스 처리, 지하수위 변동의 영향을 고려한 스크린 범위 결정, 물 침투 제어</p>	<p>공기 송풍기 설치</p> <p>송풍기로 공기 및 오염물질의 흐름을 원활하게 유도</p>	<p>Air Sparging</p> <p>지하수대 상부의 오염물질을 휘발시켜 함께 정화처리</p>

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (23)

7) 물리화학적 정화기술

③ Pump and Treat (P&T) 양수처리법

개요

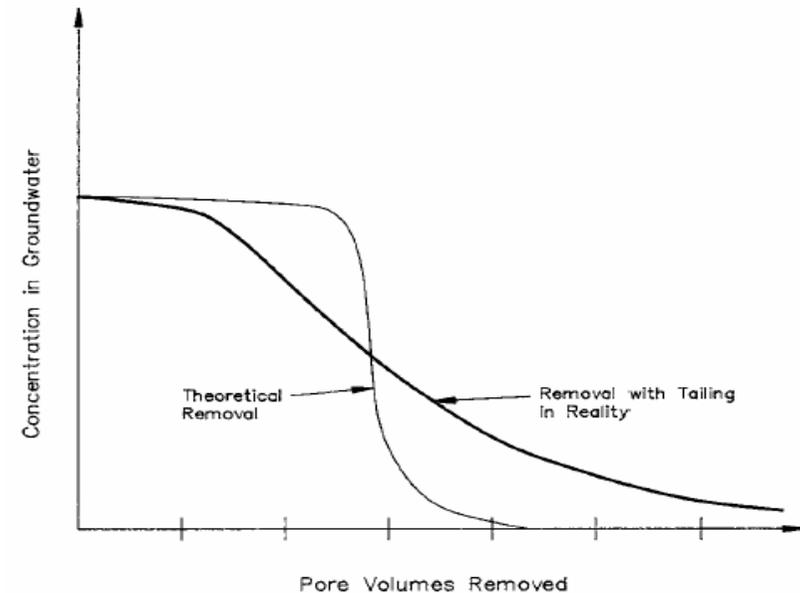
오염지역에 추출정을 설치, 오염된 지하수를 진공펌프로 양수하여 물리화학적 혹은 생물학적 처리를 거쳐 정화한 후 다시 지하수로 유입시키는 순환과정

장점

안정한 NAPL 활성화로 효율적 제거
지하수위 저하로 불포화대에 남은 LNAPL에 타 기술 적용
지하수위 경사에 따른 LNAPL 추출 용이
DNAPL pool 직접 제거 용이
적용초기에 오염물 신속히 제거 가능

한계

지하수위 저하를 위한 다수의 추출정 필요
비균질, 저투수성 지반에서 비효율적
Tailing Effect로 타 기술과 병행 필요



Tailing Effect

지하수대 간극수에 용해되어 있는 오염물과 달리 토양입자에 흡착되거나 간극속에 갇힌 용해되지 않은 상태의 오염물이 장기간 배출되지 않는 현상

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (24)

7) 물리화학적 정화기술

④ Soil Washing / Flushing 토양세척/수세법

개요

물이나 다른 수용체 또는 비수용액과 같은 적절한 용매를 사용하여 지반 내 오염물질을 씻어내는 방법

처리물질

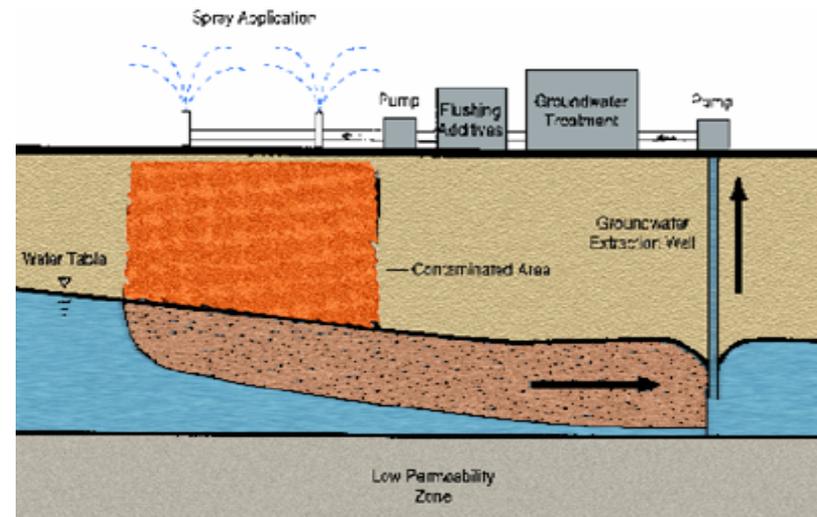
SVOC, 중금속 등과 특정 VOC, 유류오염물, 살충제, 방사능 오염물을 포함한 무기물, 광범위한 유기 및 무기오염물

사전조사

오염물의 농도, 특성, 깊이, 형상, 면적, 세척 용매와 지반 사이 오염물의 분리성, 지반의 특성에 미치는 세척액의 영향, 시스템설치와 침수에 대한 현장 적합성, 지역 내 특수지반의 유량과 흐름방향, 지반과 지역의 접근성

영향인자

세척용액과 오염물의 접촉, 오염물에 따른 적절한 용액의 선정, 오염물의 지반흡착계수, 지반의 투수계수



장점

성공 시 추가공정 불필요, 오염물의 영구적 제거, 투수성 지반에 적합, 중간정도의 비용

단점

세척용액의 독성, 오염물 확산 가능, 계면활성제 토양부착으로 공극 감소, 토양/계면활성제 상호작용으로 오염물 유동성 감소

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (25)

7) 물리화학적 정화기술

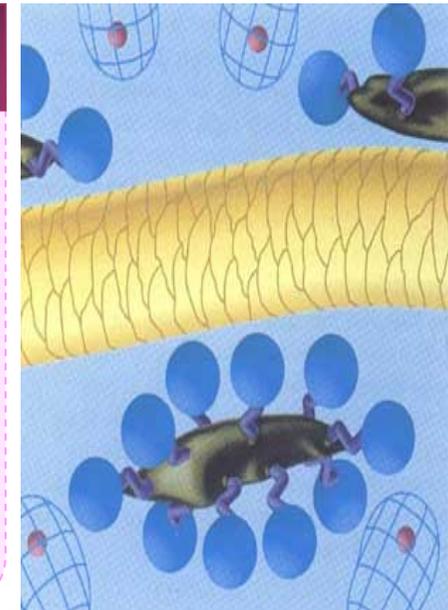
④ Soil Washing / Flushing 토양세척/수세법

ex-situ Soil Washing

오염토양을 굴착하여 부순 다음 세척제로 오염물 분리 후 정화된 토양은 현장에 다시 되돌리는 방법
 사질토 + 휘발성 오염물에 적합
 휴믹물질이 많으면 전처리 필요
 고농도 오염물 전처리 필요
 세척유출수 응집제 필요
 굴착 및 후처리 필요

in-situ Soil Flushing

오염지역에 세척용액을 주입, 추출정/배수관으로 배수 후 추출된 오염수를 처리하여 정화지역에 재순환
 오염물 용해, 유제형성, 세척용액과 화학반응
 세척용액 집수시설 필요



세척제

계면의 자유에너지를 낮추고 성질을 변화시켜 오염물을 토양으로부터 분리, 용해시키는 역할, 정화작업에 악영향을 미칠 수 있으므로 신중하게 선택

	↑
	□ ,
	□ , , □
	↑

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (26)

7) 물리화학적 정화기술

⑤ Hydraulic and Pneumatic Fracturing 수압/공기 파쇄공법

개요

저투수성 지반에 압축공기나 액체를 오염지역에 주입하여 기존 균열을 확장하고 2차 균열망과 Channel 형성하여 투수성과 영향반경을 증가시킴으로써 타 정화공법의 효율을 증대시키는 기술

공정 과정

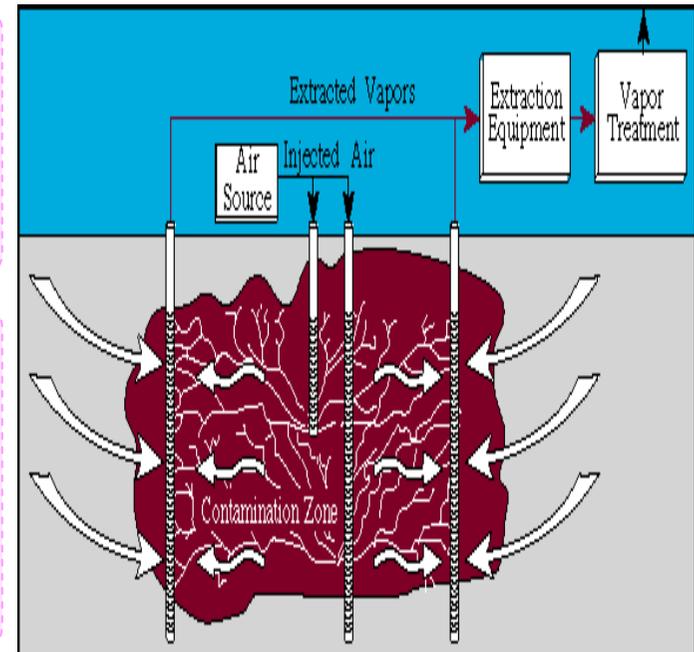
목적심도까지 시추 → 원하는 fracture 지점에 injector 설치 → Packer로 1~2ft를 밀폐 → 밀폐된 공간에 압축공기 약 30초 간 주입 → 다음 지점 injector 설치 및 위 과정 반복
Fracture cycle은 약 15분, 하루 한 개의 시추공에 15~20 fracture 생성

영향 인자

Injection flow rate, 토양의 점착력, 인장강도, 상재압, 토양입자 크기, 토양 액소성 한계, 일축압축강도, 점성, 주입기체/액체의 종류

장점

투수성 증가로 인한 SVE 영향반경 증가, 산소/영양분 등 공급으로 미생물분해 촉진, 철을 주입함으로써 CAHs 환원적 탈염소화 유도, 유리화법/동전기공에서 전극으로 사용가능



8. 오염지역 정화 및 복원기술 (27)

7) 물리화학적 정화기술

⑥ Solvent Extraction 용매추출법

개요

오염물질을 분해하지는 않지만 토양, 슬러지, 퇴적물질로부터 오염물질을 분리시켜 부피를 감소시키며 유기화합물질을 용매로 사용하는 공법

처리물질

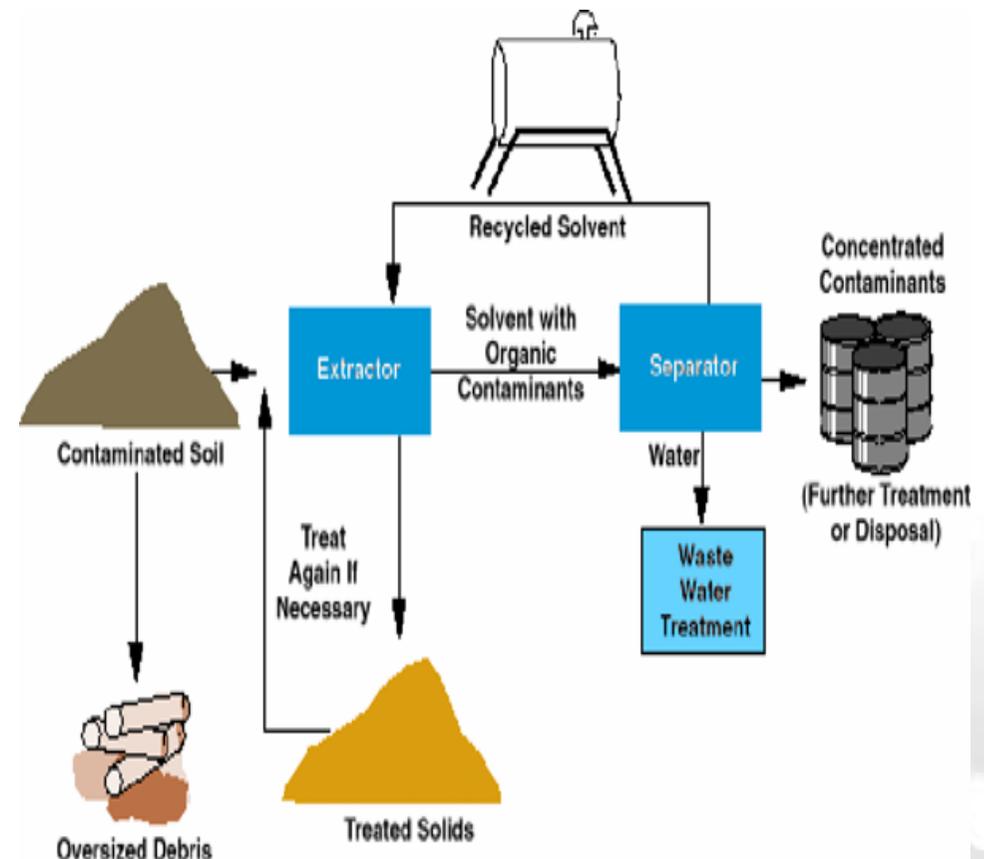
PCBs, 휘발성 유기물질, 할로겐 용매, 유류와 같은 유기오염물질

영향인자

토양의 입경, pH, 분배계수, 양이온치환능력, 유기물 함량, 수분 함량, 금속, 휘발성 물질, 점토, 복합오염물질의 존재 여부

영향인자

수분함량이 높으면 공정에 악영향, 청정제/유화제 존재 시 추출반응에 악영향, 추출용매 독성, 고분자 유기물질과 친수성 물질에 부적합



8. 오염지역 정화 및 복원기술 (28)

7) 물리화학적 정화기술

⑦ Thermal Desorption 열탈착공법

개요

토양에 열을 가해 오염물을 증발시켜 가스를 발생시킨 후, 가스를 처리장치로 수집하여 처리하는 공법

처리물질

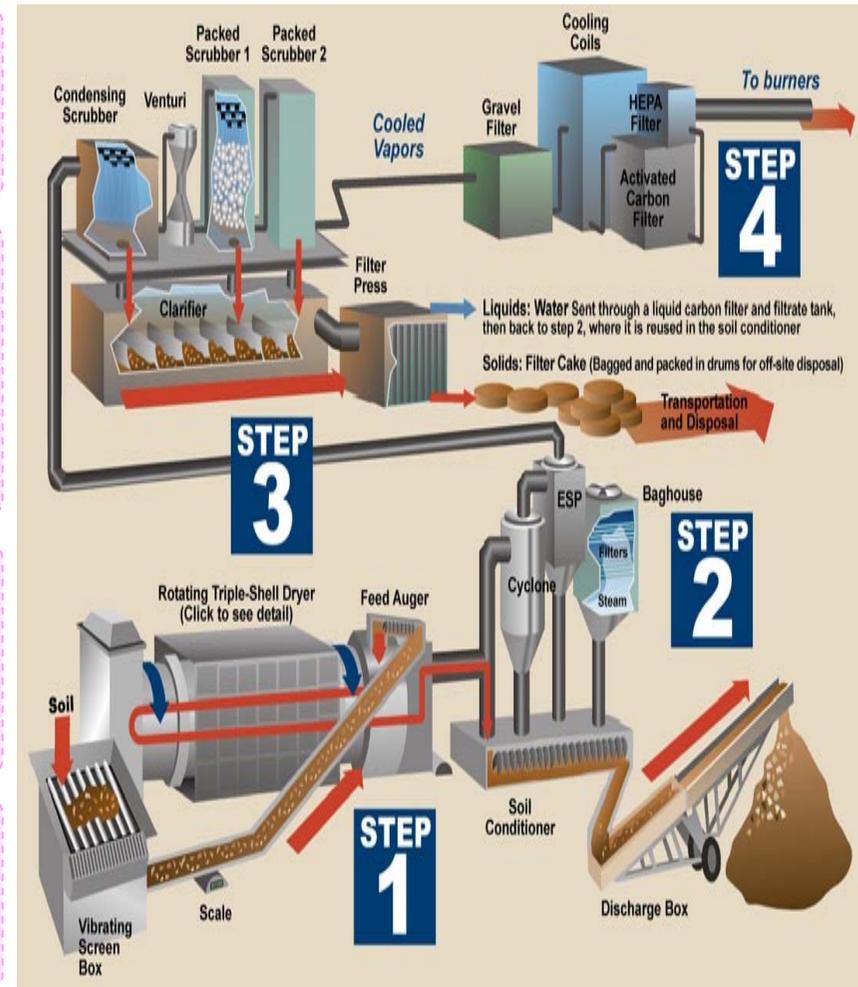
HTTD: 금속(수은 등) 처리 가능 Coal tar, 목재, creosote, (SVOCs, PAHs, PCBs, 농약 등VOCs)
 LTDD: 가능비염소계 휘발성 유기화합물, 연료, (SVOCs)

영향인자

토양 점착력, 입도분포, 함수비, 열 용적을, 유기물 농도, 오염물 농도, 끓는 점 범위, 증기압, 열에 대한 안정성, Dioxins 발생 가능성

설계인자

현장위치와 조건, 오염물의 수직적 분포에 따른 고려사항, 목표정화수준, 탈수여부, 처리된 토양의 처리문제

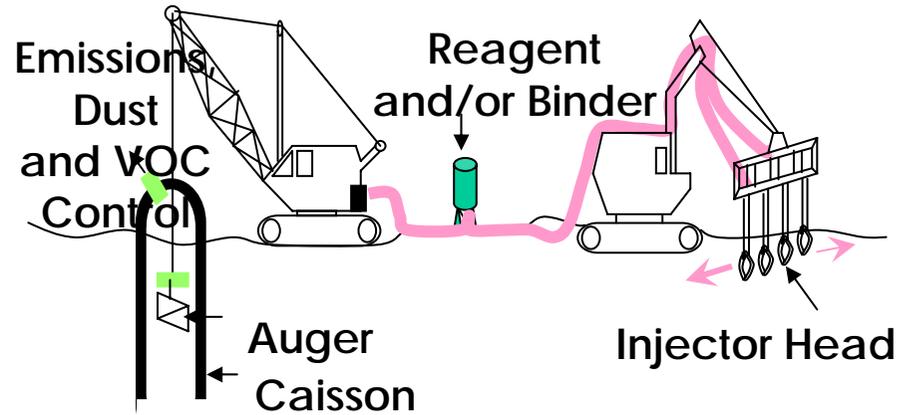


8. 오염지역 정화 및 복원기술 (29)

7) 물리화학적 정화기술

⑧ Solidification/Stabilization 고형화/안정화

개요	화학적, 물리적인 처리를 통해서 유동성을 감소시킴으로써 위해성을 낮추는 오염처리방법
처리물질	방사능 물질을 포함한 무기물질
영향인자	토양의 입경, 수분 함량, 중금속 농도, 황 함유량, 유기물 농도, 압축강도, 투수성, 토양의물리화학적 특성
한계	In-Situ: 깊이에 따라 특정 장치 설치 필요, ex-situ에 비해 시약 주입/혼합이 어려움, 처리효율 확인 Ex-Situ: 부피 증가(유기물 부피의 2배까지), 휘발성유기물질은 고정화되지 않음. 혼합되면 처리시간이 길어짐



<i>ex-situ</i>	<i>in-situ</i>
물리적으로 안정한 상태의 물질 내에서 고형화하나 안정화제를 첨가하여 화학반응에 의해 오염물질의 유동성을 감소시키는 방법 후처리 필요	오염지역에 약품을 주입하여 고형화(이동성 감소), 안정화(독성물질 이동성감소 및 처리)

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (30)

7) 물리화학적 정화기술

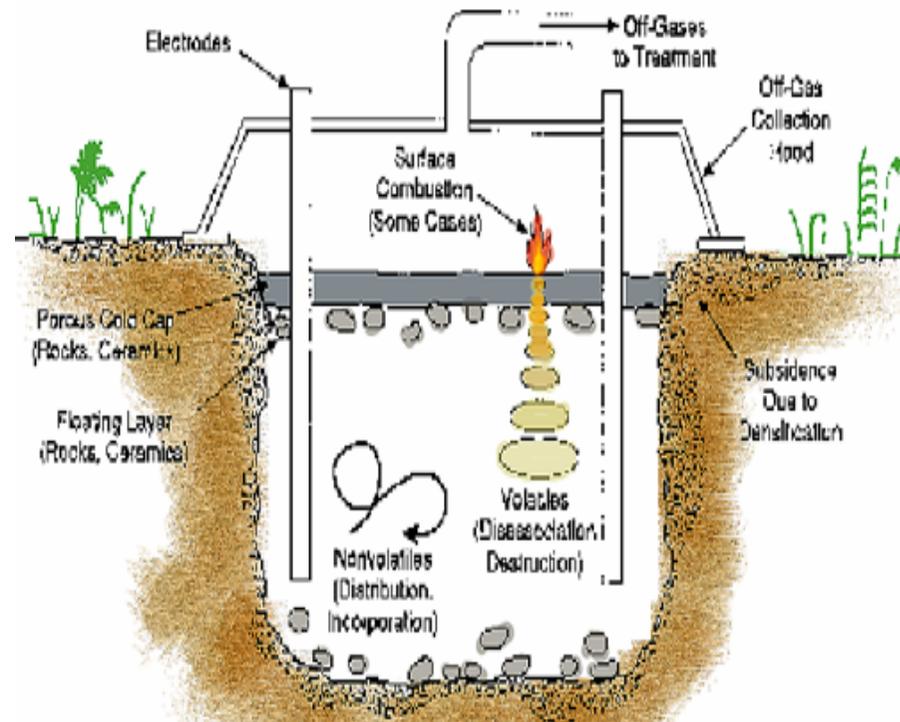
⑨ Vitrification 유리화

개요 오염토양 및 슬러지를 전기적으로 용융시킴으로써 용출특성이 매우 적은 결정구조로 만드는 공법

처리물질 VOCs, SVOCs, Dioxins, PCBs

영향인자 토양의 입경, 수분 함량, 유기물 함량, 밀도, 투수성, 물리화학적 특성, 입도 분포

한계 가스로부터 입자나 다른 오염물을 제거하는 방출가스 처리 장치 필요
자갈비가 20%가 넘으면 부적합
재오염 방지수단 필요
오염물 확산 가능
유리화물질 제거 후 토양 재이용 가능



8. 오염지역 정화 및 복원기술 (31)



7) 물리화학적 정화기술

⑩ Chemical Oxidation/Reduction 화학적 산화/환원

개요

오존, 과산화수소, 차아염소산염, 그리고 이산화염소 등을 이용하여 오염물질을 화학적으로 더 안정하고, 유동성이 없으며, 비활성 물질로 변화시키는 반응을 이용하는 공법

처리 물질

주로 무기오염물을 대상
VOCs, SVOCs, 유류 탄화수소 등의 비염소계 물질에는 비효과적

한계

오염물질과 사용된 시약에 따라 불완전산화 혹은 중간물질이 형성될 수 있음
시약이 많이 필요하므로 오염물질의 농도가 높을 때는 비경제적
토양에는 기름과 그리스 성분이 적어야 함

영향 인자

토양의 수분 함량, 알칼리 금속, 부식토 함량, 총 유기할로겐화합물
오염물질의 종류와 형태, 토양입자의 입경, 용매의 용해도 오염물의 농도 구배
약품의 종류

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (32)

7) 물리화학적 정화기술

⑪ Incineration 소각

개요

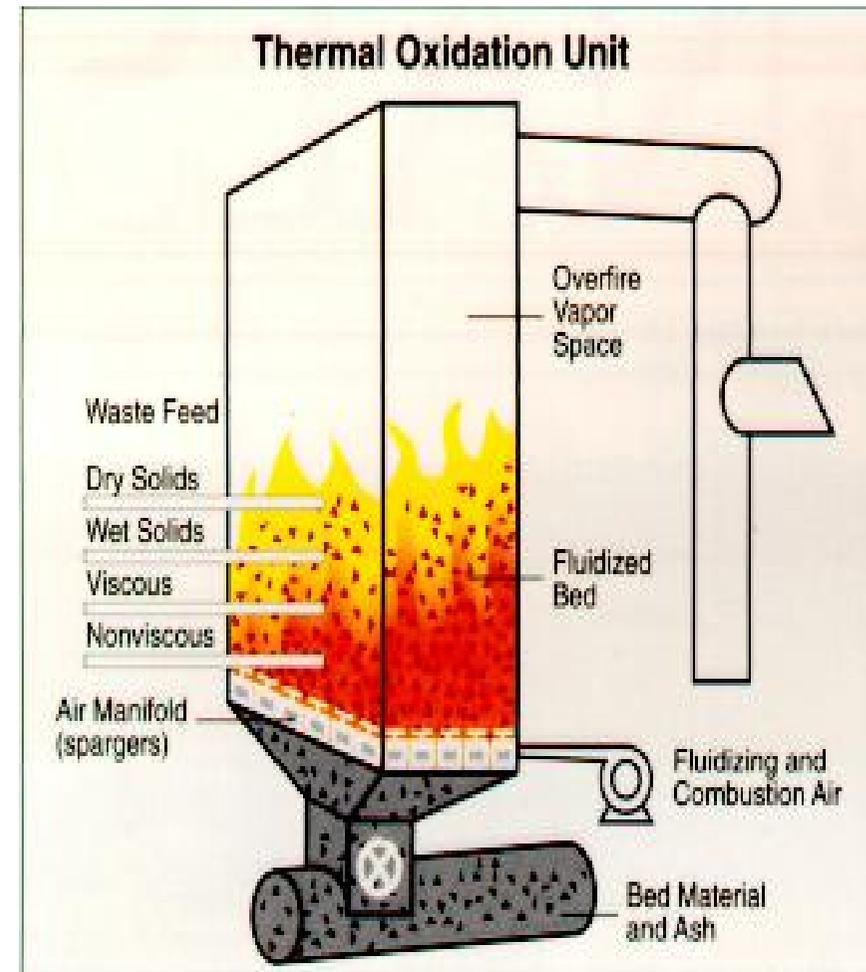
산소를 공급하여 유기물질을 연소/분해하는 열적으로 파괴하는 공정, 토양 내의 유해유기오염물을 871~1,204℃의 고온으로 소각하여 이산화탄소, 수증기, 황화수소, 할로겐화 수소로 분해

처리 물질

폭발성 물질, 염소계 탄화수소, PCBs , Dioxins

한계

불완전연소로 중금속, 독성 재 생성 가능
오염토양 투입량에 따라 소각로의 크기가 커지므로 처리비용 증가
금속은 염소, 황과 반응하여 유해물질 생성 가능, 가스정화장치 필요
저온에서 Na, K 재를 형성하고 점착성이 강한 입자를 형성하여 덕트를 막히게 함

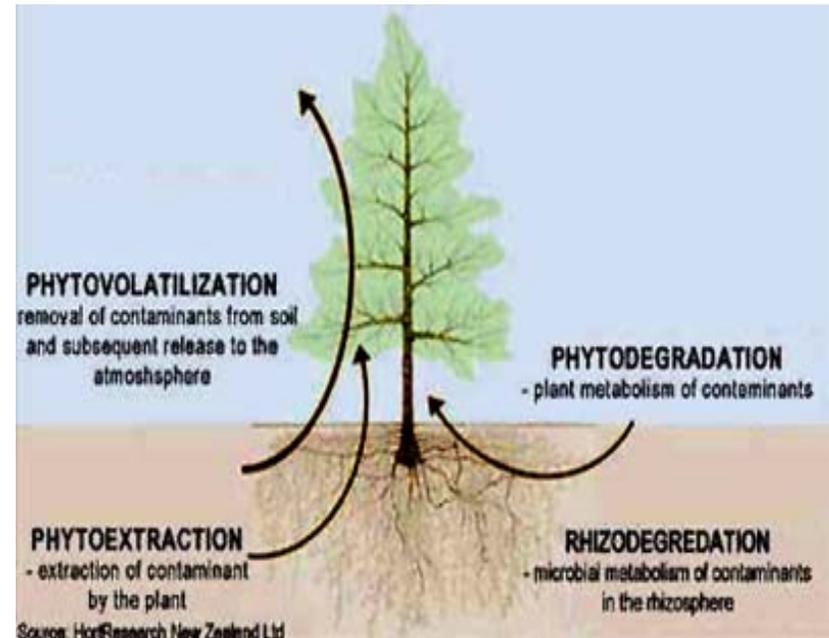


8. 오염지역 정화 및 복원기술 (33)

8) 기타 정화기술

① Phytoremediation 식생정화법

개요	오염 토양/지하수 정화를 위하여 식물 이용하는 방법으로 대부분의 정화는 식물 뿌리가 뻗는 부분의 토양층인 rhizosphere에서 발생 phytostabilization(오염물 안정화) phytoextraction(식물체로 오염물 이동)
처리 물질	중금속, 과잉 영양분(질산, 암모니아, 인산), 소수성 오염물(BTEX, 염소계 유기용매, PAHs, nitrotoluene, ammunition wastes), 제초제, 유기용매, 동위원소
장점	비용 저렴, 미관상 장점 오염물 누출 최소화, 토양 안정화
한계	적절한 기후조건, 장기간의 공정관리 필요 뿌리보다 깊은 곳의 오염물 추출 불가능



설계 및 운전

대상 오염물의 추출, 흡수, 화학적 분해에 적합한 식물의 종 선택
오염물이 궁극적으로 제거되는 것이 아니므로 식물 소각 등 후처리 필요

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (34)

8) 기타 정화기술

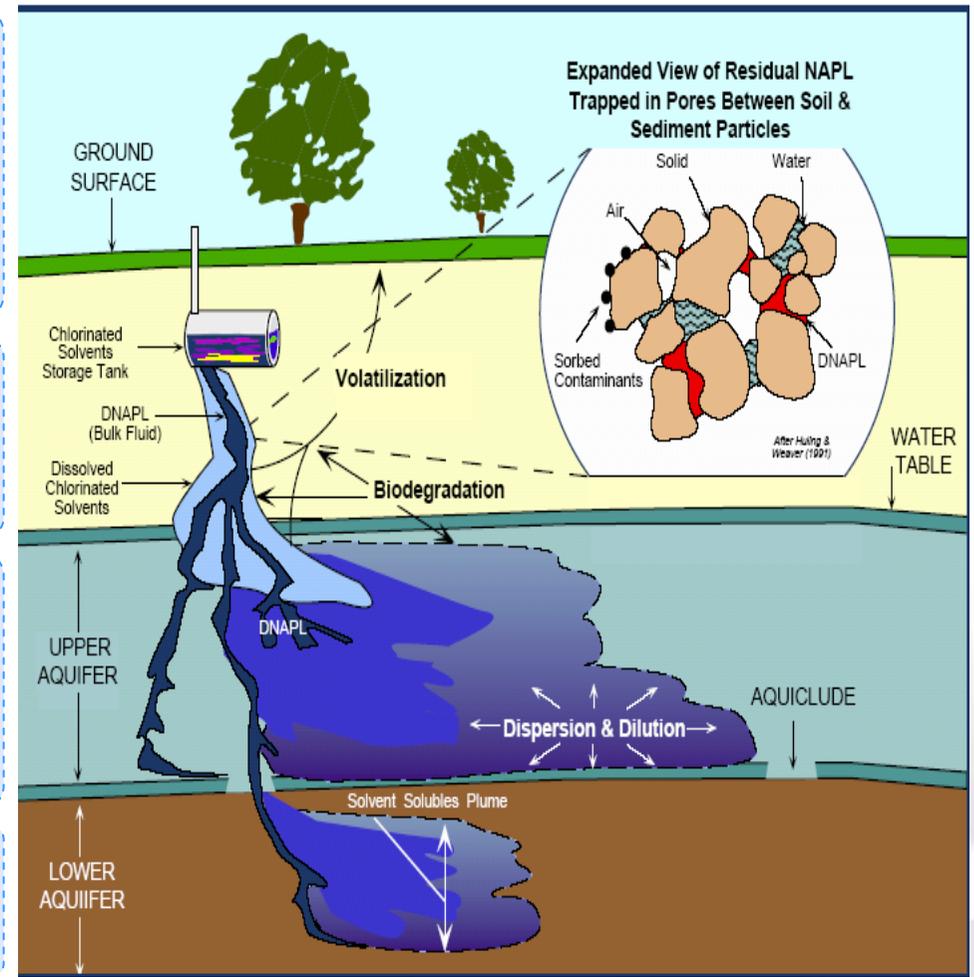
② Monitored Natural Attenuation 자연저감법

개요 오염물의 자연적인 정화나 이동 지체를 이용하는 방법. 방치와는 다른 개념. 다른 적극적인 정화방법에 비교하여 합리적인 시간 내에 목표정화수준에 도달할 수 있는 자연저감과정

주요 기작 미생물 분해, 분산, 희석, 흡착, 휘발, 방사성 붕괴, 화학적/생물학적 안정화, 변형, 파괴

적용부판단 Protocol: 작업에 관련된 규약, MNA를 적용하기 위해 고려해야 할 사항
Pattern: 오염물의 상황과 형태에 따른 MNA 사용 여부 판단

장점 비용경제적, 장비 등이 거의 불필요
감시 강도에 따른 유연한 시공비



8. 오염지역 정화 및 복원기술 (35)

8) 기타 정화기술

③ Permeable Reactive Barrier 투수성 반응벽체

개요

오염된 지하수가 흘러가는 곳에 오염물을 처리할 수 있는 수직 투수성 반응벽체를 설치하여 오염지하수가 벽체를 통과하면서 생물학적 또는 화학적으로 분해되도록 하는 현장 구조물



오염물질	오염원	구성요소	반응물질	반응기작
염화유기물	공단지역, 주유소, 정유공장 등의 산업 시설 및 군사시설	TCE, PCE	Fe ⁰ , GP dust, HRM Sludge	탈염소화
		PCBs	Pd/Fe Bimetal, Nanoscale Fe	촉매적 탈염소화
영양염류	매립지 침출수, 축산폐수	T-N, Ammonia	Zeolite	이온교환, 흡착, 철에 의한 탈질
	축산폐수	T-P	Wastelime, SM Slag	흡착 및 침전
중금속	산업 및 군사시설, 폐광산 산성폐수	Cr6+	HRM Sludge, SM Slag	환원
		Cd, Hg, Mn, As, Cu, CN, Pb	Zeolite, SM Slag	이온교환, 흡착
황산염	폐광산 산성폐수	Sulfate	AlOH, SM Slag, Wastelime	침전, 중화

8. 오염지역 정화 및 복원기술 (36)

8) 기타 정화기술

④ Electrokinetics 동전기법

개요	지층 속에 전극을 설치한 후 전류를 가하여 지층의 물리·화학적 및 수리학적 변화를 유도한 후 전도현상을 일으켜 오염물질을 이동·추출·제거하는 기술 전기삼투 / 전기이동 / 전기영동	
처리 물질	중금속, 핵종, 페놀, TCE, 톨루엔, 기타 유기 및 무기물	
물질 이동 기작	전기삼투 흐름에 의한 간극수 이류 (advection) 외적으로 제고 또는 내적으로 생성된 수위차에 의한 간극수 이류 (hydro-potential) 농도경사에 의한 확산 (diffusion) 전기경사에 의한 이온이동 (migration)	
영향 인자	점토의 완충능력, 양이온 교환능력, 유기물 함량, 포화대 내 점토광물 표면의 전하밀도, 양이온 물질의 특성과 농도, 유기질/탄산염의 존재, pH	

9. 정화·복원 모니터링 및 관리 (1)

1) 우리나라

- ① 오염기준 초과 → 시정명령 → 정화작업 수행
- ② 최종결과 보고서 제출 시 토양관련전문기관의 검사결과서 첨부 의무화
(검사결과서로 정화작업 수행 성공여부 확인)
- ③ 시료채취위치 및 숫자, 분석자료 통계처리 방법등에 대한 구체적 지침 미비
- ④ 정화목표달성 및 정화작업완료 여부를 평가할 수 있는 기준 미비
- ⑤ 정화 계획 수립, 검토, 허가 시에 정화작업 수행 효율 및 완료 모니터링 계획도 포함시켜야 함

9. 정화·복원 모니터링 및 관리 (2)



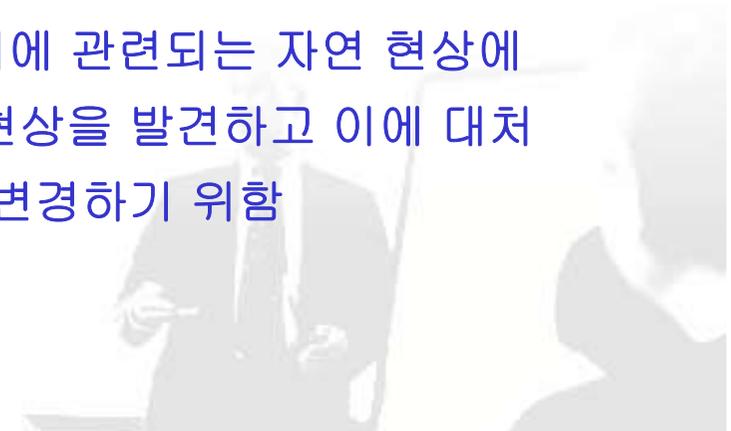
2) 선진국형

◆ 목적

- 정화/복원 효과와 효율 확인
- Compliance requirements 만족 여부 확인
- 정화/복원과정의 적절한 변경이 필요한지를 판단
(신기술의 개발, 효율저감, 예상치 못한 지하/지질 구조 등의 변수에 대처)

◆ 기본컨셉

정화/복원 과정과 자연의 현상에 대한 불확실성을 인정하고, 이런 과정을 반복적으로 측정함으로써 정화/복원 작업과 이에 관련되는 자연 현상에 관한 확신을 가지거나 사전에 인지하지 못한 현상을 발견하고 이에 대처할 수 있는 더 효과적인 방향으로 정화작업을 변경하기 위함



9. 정화·복원 모니터링 및 관리 (3)



3) 정화·복원 모니터링 계획 (Remediation Monitoring Plan)

- ① 시행되는 정화/복원 작업의 효과를 확인하거나 필요할 경우 계획된 정화/복원 작업을 변경하기 위하여 모니터링의 목적, 시간표, 보고서 포함사항, 시료채취, 장비, 분석 방법, 참여 인원 등을 포함
- ② 정화/복원 작업의 변경과정과 모니터링 작업 자체의 변경 과정도 모니터링 계획 (RMP)에 포함
- ③ RMP는 모니터링의 결과에 의해 모니터링 작업 계획을 변경하는 자체적으로 수정/보완 기능을 가져야 함



9. 정화·복원 모니터링 및 관리 (4)

4) RMP 핵심요소

RMP는 정화/복원의 3개 핵심 요소에 대한 주기적인 평가가 가능해야 함

- ① Compliance Monitoring
 - ② Performance Monitoring
 - ③ 현재와 미래의 부지 이용과 정화작업에서 전제로 한 노출 예측에 대한 모니터링
- √ 부지 이용과 정화/복원 방안의 선택은 중요한 관계에 있으므로 RMP는 주기적으로 부지 이용 상태를 모니터링해서 정화계획 수립에 전제된 부지 이용 상황이 변하지 않았음을 확인해야 함

9. 정화·복원 모니터링 및 관리 (5)

5) 복원 후 관리

① 목표정화수준의 설정과 달성

- Superfund site에서 정화 목표

- 인체와 환경을 보호할 수 있도록 영구적으로 오염물질이 없는 상태로 만들거나 (완전한 치유) 차선책으로 배경값(background level : 오염물질에 의해 영향을 받지 않은 비슷한 지역이나 대조군에서의 자연적인 값 ⇒ 자연적인 오염원의 존재를 인정)까지 낮추는 것임

- 배경농도를 채택하는 데 필요한 대조군(지역)

- 관련 주민과 관계자들이 포함된 위원회를 구성하여 결정. 대조지역이 선정되면 시료채취 계획을 수립하고 토양, 지표수, 지하수 및 공기 시료를 채취하고 분석하되 통계적으로 의미 있는 정도의 과정이 되어야 함

9. 정화·복원 모니터링 및 관리 (6)

5) 복원 후 관리

① 목표정화수준의 설정과 달성

- 목표정화수준 설정

- 제거되는 오염물질의 총 질량 (초기의 오염 총량에 대한 추정값의 적합성, 정확성을 보장하기 어려우므로 받아들이기 어려운 상황에 많음.)
- 오염물질 농도의 목표치를 설정 (받아들일 수 있는 척도. 그러나 실제 작업을 수행하는 입장에서는 달성하기가 어려운 상황이 발생할 수 있는 위험성 때문에 선호하지 않음)
- 일련의 시간 간격 모니터링에서 농도값의 변화 경사가 시간 경과에 따라 (-)이고 농도값이 기준치 이하로 내려갔을 때 정화 작업 완료 (농도 자료가 시간에 따라 fluctuation을 보이면 변화 경사와 현재 농도값에 대한 신뢰구간을 계산함.)

9. 정화·복원 모니터링 및 관리 (7)



5) 복원 후 관리

② Close Out Procedure (USEPA)

Remedial Action Completion

목표정화수준이 달성되면 절차에 따라 정화작업을 완료

- 정화 과정 중과 정화 작업 완료의 모니터링을 포함하는 개념
- in-situ 정화공법을 포함하는 경우 시설이 설치되면 작업 중 중간RA보고서 작성
- 목표정화수준이 완전히 달성되었다고 판단되면 최종RA보고서 작성

RA보고서 : 부지특성 및 이력, 부지조사 내용, 목표정화수준의 달성여부, 정화기술 및 모니터링 단계적 경과 및 완료, 운영상황 및 비용, 해당부지의 미래 토지용도계획 등의 정화공정 전반 내용 포함

Construction completion

RA 종료 후 재정 지원 및 정화공정 중 중요한 과정들이 모두 종료되는 시점

Site completion

모든 목표정화수준이 달성되고 인간과 환경에 안전하다고 판단되어 더 이상의 대응이 필요하지 않는 시점

Site full/partial deletion

Site completion이 완료된 대상부지에 대하여 NPL에서 부지를 완전히 또는 부분적으로 삭제하는 단계

9. 정화·복원 모니터링 및 관리 (8)

5) 복원 후 관리

② Close Out Procedure

- Operational & Functional (O&F)

물리적 공정들이 완료된 후 1년 후부터 설계한 대로 적절히 작용하는지 확인하는 작업
MNA를 제외한 모든 종류의 정화작업에 해당, 필요한 경우 시공자가 추가적인 수정 가능

- Long Term Response Action (LTRA)

RA(MNA 포함) 시작 후 처음 10년 간(전체 비용의 90% 차지)
지하수/지표수 복원의 유지, 관리, 모니터링 및 재정관리

- Operation & Maintenance (O&M)

정화의 효율과 본래성을 유지하기 위하여 필요
LTRA 기간이 지나도 목표정화수준이 달성될 때까지 관리 및 유지하는 것
RA가 종료되는 시점, LTRA가 진행되고 있을 경우 LTRA가 끝난 후 시작
지하수/지표수의 복원이 완전히 완료되고 적절한 동의나 기준을 만족하면 종료

- Cleanup Goal Achieved

지하수/지표수 정화에서 적용되는 개념으로 자연저감법을 포함
정화작업이 끝난 후 목표정화수준이 달성되지 않은 경우 계속 대상오염부지를 모니터링

9. 정화·복원 모니터링 및 관리 (9)

5) 복원 후 관리

② Close Out Procedure – (참고) O&M Operation and Maintenance

정화작업 기록, 부지특성, 관정과 장비 등에 대한 조사, 시료 채취/분석 및 모니터링, 일반적인 관리/유지, 보고 등으로 이루어짐

정화단계의 초기부터 계획 시작

O&M 의무에 대한 조직적 설계, 이용가능한 재정의 확인, O&F 결정을 위한 기준, O&M 기간과 설명, 필요한 인력과 장비, 공정, 비용, 종료조건 등의 구체적인 사항들을 포함 RI/FS에서 O&M에 드는 비용과 항목을 구체화하고 정화공정 설계 및 운영 중에 수정 및 확정하여 RA가 끝나는 즉시 조사 및 모니터링을 시작

