

지열에너지 개발과 토양 및 지하수 오염

정 하 의

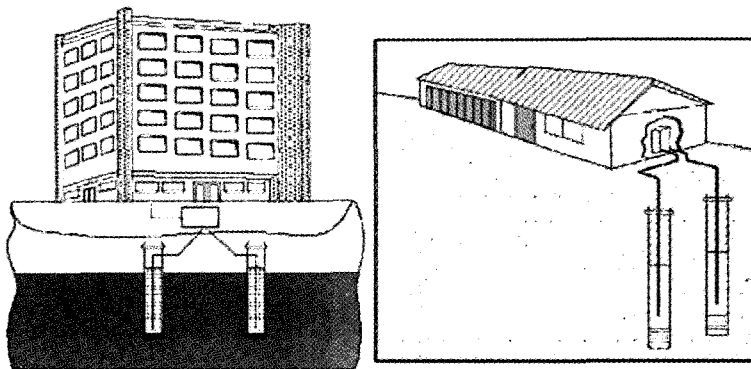
한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원

1. 서론

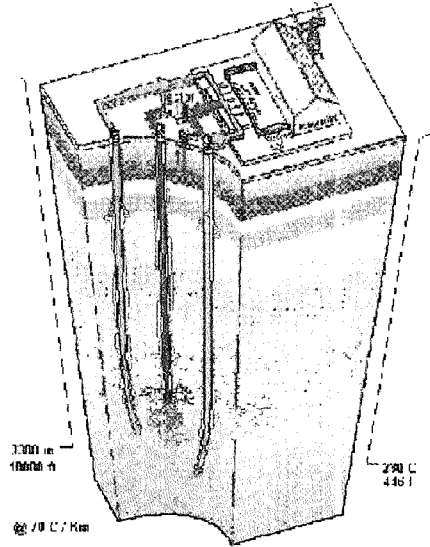
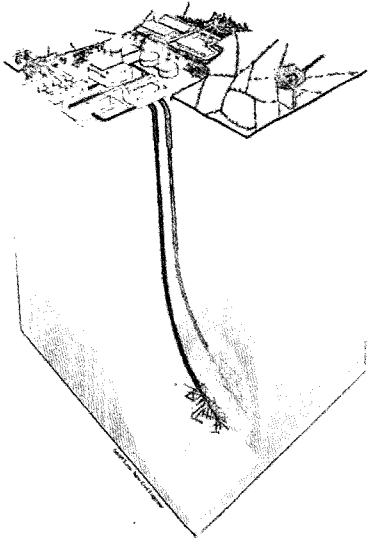
지열에너지는 지구 자체가 가지고 있는 열에너지로서 깊이에 따라 잠재력은 거의 무한이라고 할 수 있다. 지열은 지하심부에서 맨틀의 대류와 같은 지질학적인 작용에 의해 발생된 열로서 일종의 지구 내부에너지이다. 지구는 중심부로 들어갈수록 뜨거워지는데 지구 중심부의 온도는 약 4000℃에 달한다. 지열은 열원에 따라 화산성과 비화산성 지열로 구분할 수 있으며 이를 이용한 지열발전은 반영구적인 에너지 자원으로 활용될 수 있다. 국내에서는 아직까지 온천으로 이용하는 것 외에는 지열 에너지를 본격적으로 이용한 사례가 많지 않다. 최초 지열발전소는 1904년 이탈리아의 라르데렐로에 건설되었는데 이곳에서는

땅에 솟아오른 140×260℃의 증기를 파이프를 통해 터빈으로 보내 발전을 하였다.

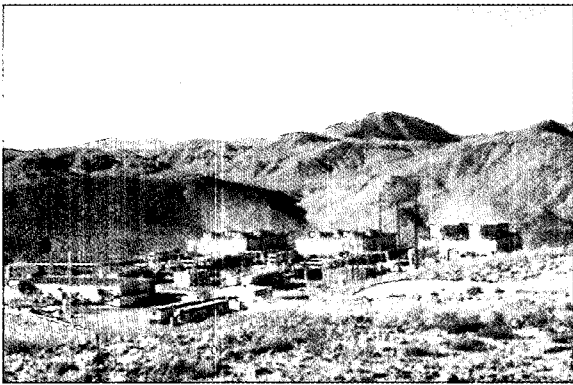
지열에너지를 얻기 위해서는 일반적으로 두 개의 시추공을 뚫어 한쪽 시추공으로 찬물을 주입시키고 다른쪽 시추공으로 뜨거운 물이 얻는 시스템을 구성한다. 한쪽 시추공으로 주입된 찬물은 지중 내부의 온도에 의하여 데워져서 다른쪽 시추공으로 올라오게 되어 지열을 얻게 된다. 그림 1은 지열에너지를 얻기 위한 시추공 설치개요도, 그림 2는 지열에너지 발전시스템, 그림 3은 지열에너지 발전소 전경을 나타낸다. 이와 같이 지열 에너지를 얻기 위해서는 지중내에 시추공을 설치하는 것이 필수적이다. 이러한 시추공의 공사 중이나 공사 후에 그리고 지열시스템 설치 중이나 및 가동 중에 토양 및 지하수의 오염이 발생할 가



[그림 1] 지열에너지를 얻기 위한 시추공 설치개요도



[그림 2] 지열에너지 시스템 및 파이프 설치개요도



[그림 3] 지열에너지 발전소 전경

능성이 높다. 따라서 본 고에서는 지열에너지 개발 및 운영에 따른 토양 및 지하수 오염 가능성 및 오염복원에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 지열에너지 개발에 따른 토양 및 지하수 오염

인구증가 및 산업발달로 인하여 부수적으로 발생하는 도시, 산업, 광산, 준설, 핵 등의 폐기물 및 나날이 사용량이 증가되고 있는 화학물질, 유류, 농약 등의 처리 및 처분의 불량으로 인하여 토양

및 지하수의 오염이 이루어지고 있다. 이와 같이 토양 및 지하수 오염원은 그림 4에서와 같이 매우 다양한 원인에 의하여 일어난다. 일반적으로 지반 내 오염물질의 농도는 대체로 낮은 분포를 보이지만, 때에 따라 농도가 기준치 보다 높거나 환경적으로 유해한 물질이 존재하는 경우에는 문제시 될 수 있다. 지반 내에 존재할 수 있는 오염물질의 종류에는 다음과 같은 것이 있다.

- 폐기물 : 생활폐기물, 산업폐기물
- 중금속 : 카드뮴, 납, 아연, 구리, 니켈 등
- 무기물질 : 황산염, 석면 등
- 유기물질 : 기름, 타르, 염화탄화수소, PCB, 다이옥신, 농약 등
- 방사능 : 천연방사능, 인공방사능
- 기타 : 매립지 가스, 산성비 등

지열에너지 개발과 관련하여 발생할 수 있는 토양 및 지하수 오염은 다음과 같다. 아래에 언급된 원인에 의하여 지열시추공 및 지열시스템 주변에 상기와 같은 오염물질에 의하여 주변 토양 및 지하수의 오염이 가능성이 발생 할 수 있다. 지열시스템 주변의 토양 및 지하수가 오염되는 경우에는

적정의 오염처리대책을 강구하는 것이 요구된다.

- 지열시추공 굴착공사로 인한 토양 및 지하수 오염
- 지열시추공 주변 지반그라우팅으로 인한 토양 및 지하수 오염
- 지열시추공 내부 지반그라우팅으로 인한 토양 및 지하수 오염
- 지열시추공 폐공으로 인한 토양 및 지하수 오염
- 지열시스템 배관시설 및 주변시설로 인한 토양 및 지하수 오염
- 지열시스템 순환물질로 인한 토양 및 지하수 오염
- 지열시스템 온도차이로 인한 토양 및 지하수 오염 등

3. 토양 및 지하수 오염 복원기술 분류

3.1 오염원 처리방법에 따른 분류

1) 치환방법

오염토양을 굴착하여 오염되지 않은 양질토로 치환하는 것이다. 이의 장점은 시공이 단순하고 용이하며 오염원을 완전히 제거하여 복원효과가 확실하다는 것이다. 반면에 단점은 순성토량이 많아지고 치환용 토취장 개발이 필요하고 굴착된

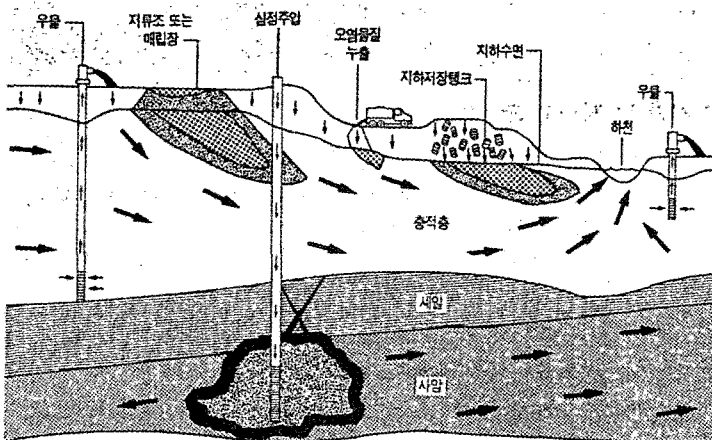
오염토양의 처리가 필요하며 처리장의 거리가 먼 경우 운반비가 과다하게 소요된다는 것이다.

2) 차단방법

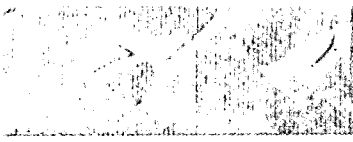
오염물질의 이동모체인 지하수와 오염물질과의 접촉을 차단하는 방법이다. 이러한 방법에는 오염토와 비오염토와의 사이에 차수벽을 설치하는 방법, 오염토의 상부에 불투수성 복토층을 설치하는 방법, 시멘트 등을 주입하여 오염토를 고화시켜 오염수의 유출을 막는 방법, 고압전류를 공급하여 오염토를 유리화 하는 방법, 약제를 주입하여 오염물질을 불용성 화합물로 바꾸는 방법 등이 있다.

3) 제거방법

오염토양 내에서 오염물질을 제거하는 방법이다. 오염물질을 제거하는 방법에는 오염현장에서 직접 제거하거나 오염된 토양을 굴착하여 지상에서 제거하는 방법이 있다. 이들 방법에는 산화, 환원, 계면활성제, 세척수, 진공, 증기 등을 이용하는 물리화학적 방법, 미생물, 박테리아, 영양소 등을 이용하는 생물학적 방법, 전기삼투, 전기이동 등을 이용하는 전기적 방법, 고온, 저온, 동결 등을 이용하는 열적 방법 등이 있다.



[그림 4] 토양 및 지하수 오염원



4) 독성저하방법

오염물질의 독성을 저하시키는 방법이다. 예를 들면 6가 크롬(Cr^{6+})에 환원제를 혼합하여 3가 크롬(Cr^{3+})으로 만들어 인체에 대한 독성을 저하시키는 방법 등이 있다.

5) 토지용도변경방법

오염토지의 용도와 형태를 변경하는 방법이다. 여기에는 매립지에 복토를 시행하여 녹지대로 변경하거나 오염지역을 주거지나 농공지로서의 이용을 금지하는 방법 등이 있다.

3.2 오염원 복원위치에 따른 분류

1) 현장내 처리방법

현장내 처리방법은 오염현장내 원위치에서 직접 오염 토양 및 지하수를 처리하는 것이다. 본 방법은 처리공정이 육안으로 확인할 수 없어 처리효율을 확보하기 어려우므로 기술적용 이전 단계에서 면밀한 부지평가가 이루어 져야 한다. 그러나 최근 들어 부지평가 및 모니터링 기술이 발달하고 현지 처리기술이므로 처리대상매체를 먼 거리로 이송하지 않아도 되기 때문에 활발하게 적용되고 있다.

2) 현장외 처리방법

현장외 처리방법은 오염 토양 및 지하수를 지상으로 끌어 올려 오염원을 처리하는 것이다. 본 방법은 오염물질에 대한 처리공정 관리 및 처리효율 평가가 용이한 반면 굴착 또는 양수, 이송 등에 대한 추가비용이 소요된다.

3.3 오염원 제거방법에 따른 분류

1) 물리적 방법

물리적 기법을 이용하여 오염원을 처리하는 것으로 표면복토, 굴착제거, 격리, 차폐, 공기세척, 증기세척, 진공추출, 지중고결, 수압파쇄 등이 있다.

2) 화학적 방법

화학적 기법을 이용하여 오염원을 처리하는 것

으로 산화, 중화, 이온교환, 용매, 계면활성제 등이 있다.

3) 생물학적 방법

생물학적 기법을 이용하여 오염원을 처리하는 것으로 미생물, 슬러지, 영양소, 퇴비, 공기 등이 있다.

4) 열적 방법

열적 기법을 이용하여 오염원을 처리하는 것으로 저온, 고온, 열분해, 가열, 무선주파수 등이 있다.

5) 전기적 방법

전기적 기법을 이용하여 오염원을 처리하는 것으로 전기삼투, 동전기, 전기주입 등이 있다.

4. 오염토양 복원기술

4.1 오염토양 복원기술 종류

오염토양 복원기술의 종류는 매우 다양하며 대표적인 것을 살펴보면 표 1에 제시된 바와 같다.

4.2 오염토양 복원기술 특성

1) Soil flushing 공법

오염토양 내에 적정의 세척제를 주입하여 오염물질을 추출·처리하는 것이다. 세척제로는 일반적으로 물, 계면활성제, 산, 염기, 착염제 등을 사용한다. 물은 친수성 오염물질, 계면활성제는 소수성 오염물질, 산, 염기 및 착화제는 금속물질을 추출시키는데 주로 사용된다. 토양으로부터 추출된 오염물질에 대한 처리 및 회수공정이 필요하다.

2) Soil vapor extraction 공법

불포화지역내의 오염토양에 진공압을 걸어 공기압에 의하여 주로 휘발성 오염물질을 제거하는 것이다. 본 공법은 주로 트리클로로에틸렌(TCE) 등의 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)이나 일부 준휘발성유기물질(semi-volatile

organic compounds, SVOCs)을 제거하는데 유효한 공법이다. 토양으로부터 추출된 오염 가스내의 오염물질에 대한 처리 및 회수공정이 필요하다.

3) Steam injection 공법

본 공법은 Steam stripping이라고도 하는데 오염지반 지중 내에 스팀을 주입하여 오염부지내의 온도를 상승시켜 오염물질의 휘발성을 증대시킴

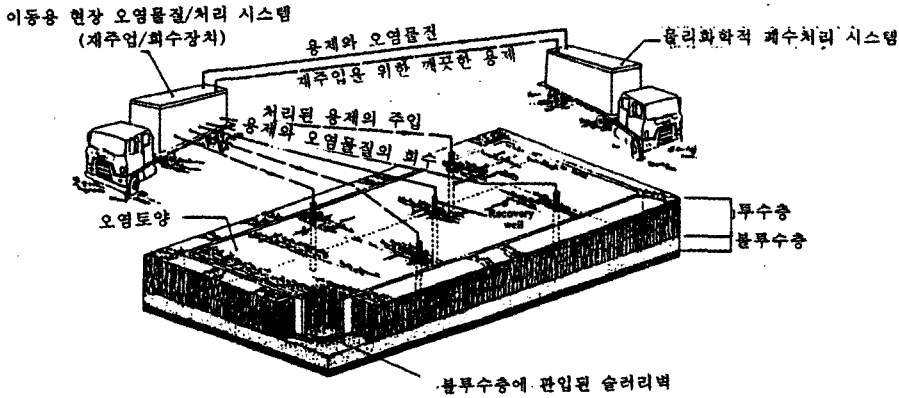
으로써 기존 SVE의 추출효율을 증진시킬 수 있는 공법이다.

4) Bioremediation 공법

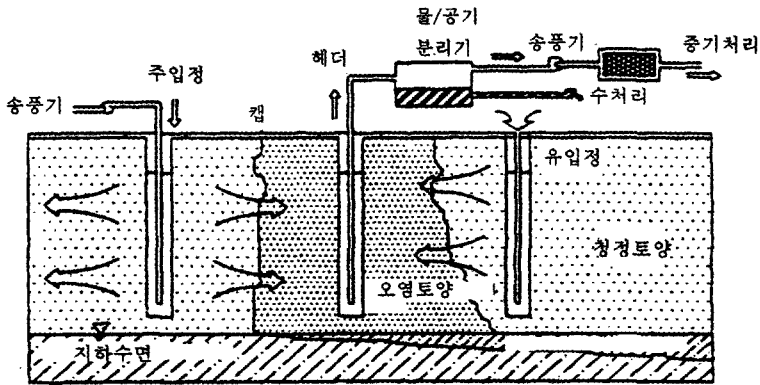
오염토양 내에 미생물, 박테리아 등을 주입하여 유기화합 오염물질을 분해하여 독성을 제거하는 방법이다. 본 공법은 가솔린, 디젤유, 원유, 크레오소트 등의 석유계탄화수소의 제거에 적용이 가

<표 1> 물질에 따른 열의 전도도 (Mitchell, 1993)

분 류		복원기술의 종류
In-situ 기술	생물학적 기술	- Bioventing - Bioremediation - Land Treatment - Natural Attenuation - Phytoremediation
	물리화학적 기술	- Electrokinetic Separation - Fracturing - Soil Flushing - Soil Vapor Extraction - Solidification/Stabilization
	열적 기술	- Thermally Enhanced Soil Vapor Extraction
Ex-situ 기술	생물학적 기술	- Biopiles - Composting - Fungal Biodegradation - Landfarming - Slurry-Phase biological treatment
	물리화학적기술	- Chemical Extraction - Chemical Reduction/Oxidation - Dehalogenation - Separation - Soil Washing - Soil Vapor Extraction - Solar Detoxification - Solidification/Stabilization
	열적 기술	- Hot Gas Decontamination - Incineration - Open Burn/Open Detoxination - Pyrolysis - Thermal Desorption
차단기술		- Landfill Cap - Landfill Cap Enhancement - Cut-off wall
기타 처리기술		- Excavation - Retrieval - Off-Site Disposal



[그림 5] Soil flushing 공법 개요도



[그림 6] Soil vapor extraction 공법 개요도

능하고 살충제, 염소용제, 할로겐 방향족탄화수소, PCB 등의 처리에도 적용이 가능하다.

5) Bioventing 공법

오염토양 내에 산소를 공급하여 지중 내에 있는 토착 지중 미생물의 활성을 촉진시켜 생분해도를 최대화시키는 공법이다. SVE공법과 비교해 볼 때 본 공법은 미생물활성을 지속시켜 줄 정도의 낮은 공기량을 사용한다는 차이점이 있다.

6) Biosluping 공법

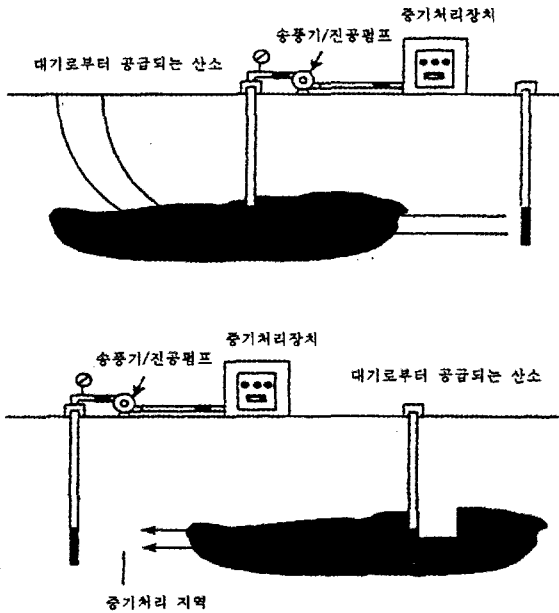
Bioventing과 Vacuum enhanced free-product recovery의 두가지 기술을 혼합한 것으로

Bioventing 공법의 호기성 생분해 촉진기술과 Vacuum enhanced free-product recovery 공법의 NAPL 추출기술을 복합적으로 이용하는 것이다.

7) Solidification/stabilization 공법

오염토양에 약재를 혼합해서 그것의 물리적 성질을 개선 및 변경하여 유해물질을 고형화 및 안정화하는 방법이다. 고형화 및 안정화 약재로는 석회, 플라이애쉬, 시멘트 등의 시멘트계 재료, 아크릴, 비닐에스테르, 에폭시, 폴리마 등의 유기계재료, 유기점토광물계 재료, 약액계 재료 등이 있다.

8) Electrokinetic 공법



[그림 7] Bioventing 공법 개요도

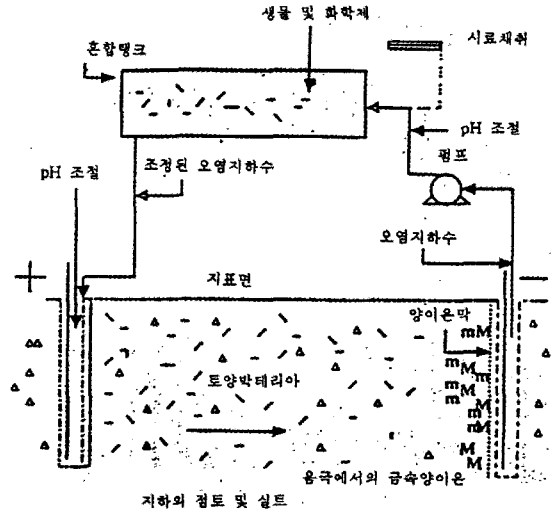
오염토양 내에 전기장을 가하여 오염물질의 전기적인 이동메카니즘에 의하여 오염물질을 추출하는 공법이다. 점토질의 세립토와 같이 투수성이 낮은 토양의 경우에 기존의 양수, 토양세척, 공기추출 등의 방법을 적용하기 어려운 경우에 적용성이 매우 높다. 최근에는 동전기기법을 이용하여 미생물을 토양내에 주입하여 오염된 토양을 복원하는 Bioelectrokinetic 공법이 개발되고 있다.

9) Prefabricated vertical drain 공법

토목분야에서 연약지반 개량공법으로 사용되고 있는 연직배수공법(PVD: prefabricated vertical drain)를 응용한 것이다. 오염토양 내에 연직배수재를 삽입하고 연직배수재를 통하여 오염물질을 제거하는 것이다. 이는 기존의 미생물복원공법, 진공추출공법, 토양세척공법과 병용하여 적용할 수 있다.

10) Ground fracturing 공법

지반파쇄공법이란 지반내에 물 또는 공기를 고압으로 분사하여 기존의 간극을 확장시키거나 새



[그림 8] Bioelectrokinetic 공법 개요도

로운 파쇄간극을 생성시켜 줌으로써 토양의 투과성을 향상시켜 오염물질의 추출 및 처리를 용이하게 하는 것이다. 주입대상 매체에 따라 고압수 또는 슬러리를 주입하는 수압파쇄공법 (hydraulic fracturing)과 고압공기를 주입하는 공기파쇄공법 (pneumatic fracturing)으로 구분된다.

11) Vitrification 공법

오염토양 내에 전극을 삽입하고 전기가열하여 오염토를 유리상(glass)으로 용융 고화하는 것이다. 이 공법을 하수슬러지의 처리에 적용하여 슬러지 중의 가연물은 소각하고 불연물은 1500°C 이상의 코크스 고온가스로 용융시켜 도로재, 콘크리트 골재로 사용 가능한 슬래그를 생산하기도 한다.

12) Electrical resistance heating 공법

오염토양내 전기의 통과에 의해 발생하는 전기적 저항에 의한 열을 이용하여 토양을 수축·건조시켜 균열을 발생시키고 오염물질을 휘발시킴으로써 오염물질의 추출을 용이하게 하는 것이다.

13) Radio frequency heating 공법

오염토양 내에 무선주파수파를 공급하여 열을

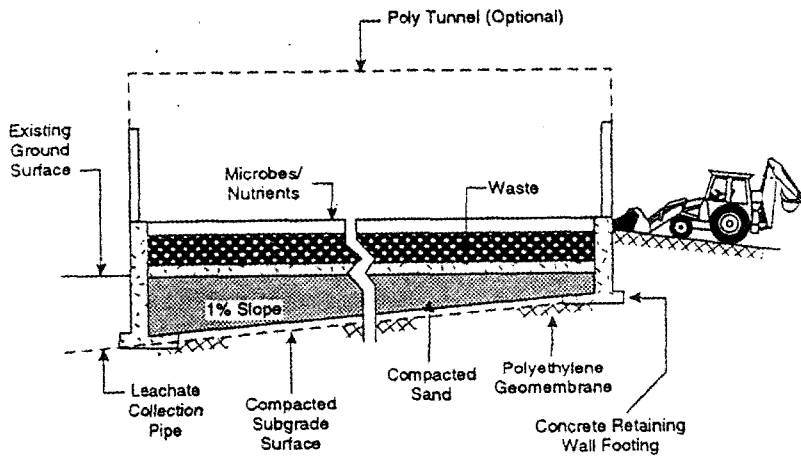
발생시켜 오염물질의 분자운동을 증대시킴으로 오염물질을 휘발시키는 것이다. 이는 다른 열처리 공정에 비하여 비교적 끓는 점이 높은 화합물까지 휘발이 가능하며 제거시간을 단축시킬 수가 있다. 오염부지내에 전극이나 안테나를 지표면 또는 지중에 설치한 다음 이를 통하여 무선주파수 전류를 흘려보낸다.

오염된 토양을 굴착하여 흙덩어리를 부순 다음 탱크에 넣고 물 또는 세척제로 세척하여 오염물질을 분리하는 것이다. 이는 다른 복원공법의 적용을 위한 전처리공정으로 사용되기도 한다.

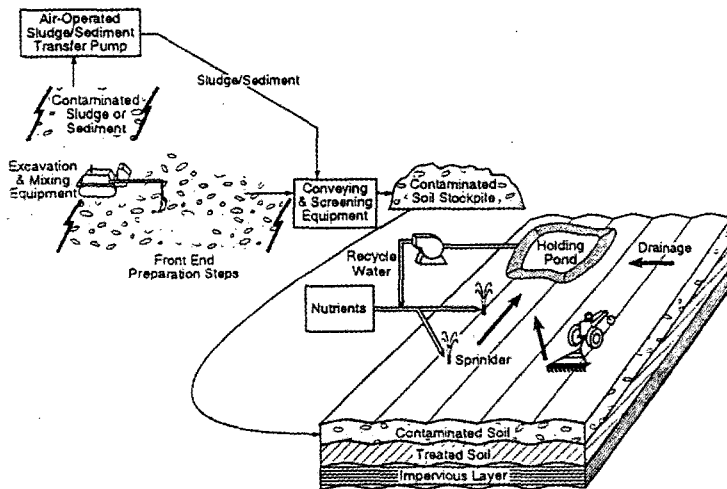
14) Soil washing 공법

15) Land farming 공법

오염토양을 지상에 일정한 두께로 포설한 후에 포크레인 등의 장비를 이용하여 교반시켜 호기성 조건으로 하여 오염물질의 생화학적 분해를 유도



[그림 9] Land farming 공법 개요도



[그림 10] Biopile 공법 개요도

하는 공법이다. 영양물질로는 질소, 인, 비료 등을 사용하고 필요에 따라 첨가제를 주입한다.

16) Biopile 공법

오염토양과 토양개량물질을 혼합한 후 침출수 집배수시설 및 유공관을 설치한 기초 위에 일정한 높이로 쌓아 놓고 강제주입식 또는 흡인식으로 공기를 공급하여 호기성조건으로 하여 오염물질의 생화학적 분해를 유도하는 공법이다. 영양물질로는 질소, 인, 비료 등을 사용하고 유기물질로는 분뇨, 슬러지

등을 이용하고 필요에 따라 첨가제를 주입한다.

17) Composting 공법

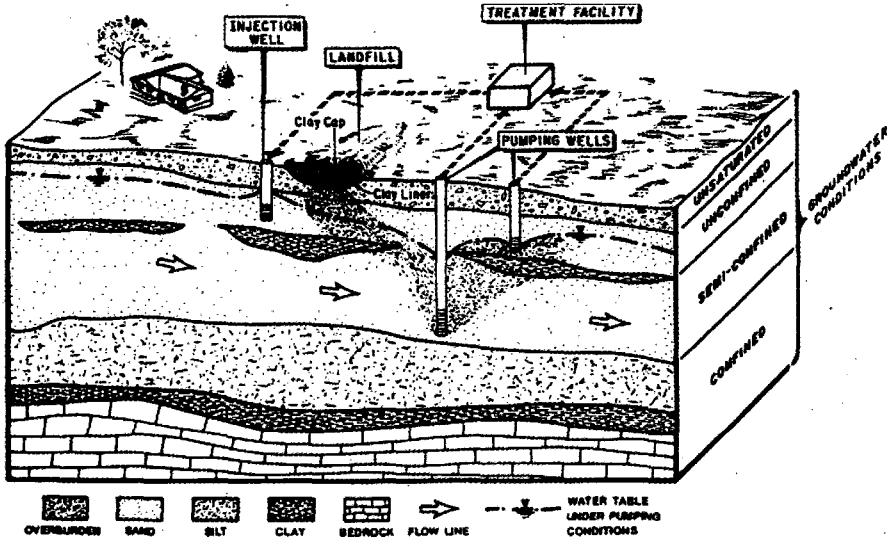
오염토양을 굴착하여 첨가제, 나무조각, 짚, 분뇨, 식물성 잔재물 등과 같은 유기성 물질을 혼합하여 미생물의 활성을 증진시킴으로 오염물질을 제거하는 것이다.

18) Bioreactor

굴착된 오염토양내에 물 및 첨가제를 적절히 혼

<표 2> 오염지하수 복원기술의 종류

분 류		복원기술의 종류
In-situ 기술	생물학적 기술	- Co-metabolic Treatment - Bioremediation - Land Treatment - Natural Attenuation - Phytoremediation
	물리화학적 기술	- Ground Water Pumping - Pump and Treatment - Collection Trench - Extraction Well - Aeration - Air Sparging - Bioslurping - Directional Wells - Dual-Phase Extraction - Fluid/Vapor Extraction - Hydrofracturing - In-Well Air Stripping - Hot Water or Steam Flushing/Stripping - Passive/Reactive Treatment Wells
Ex-situ 기술	생물학적 기술	- Bioreactors - Constructed Wetlands
	물리화학적 기술	- Adsorption/Absorption - Air Stripping - Ion Exchange - Separation - Sprinkler Irrigation - Ultraviolet Oxidation - GAC/Liquid-Phase Carbon Adsorption - Precipitation/Coagulation/Flocculation
차단기술		- Deep Well Injection - Slurry Wall - Sheet Pile Wall - Deep Soil Mixing



[그림 11] Pump and treat 공법 개요도

합하여 슬러리상태로 만든 다음 반응기내에서 생물학적 방법으로 처리하여 탈수시킨후에 처분하는 것이다.

19) Plasma 공법

플라즈마라는 4,000 이상의 고온에서 이온화된 기체를 이용하여 오염토양을 용융시켜 원소화하는 것이다. 이는 다양한 오염물질로 오염된 토양을 복원하는 데 사용된다.

5. 오염지하수 복원기술

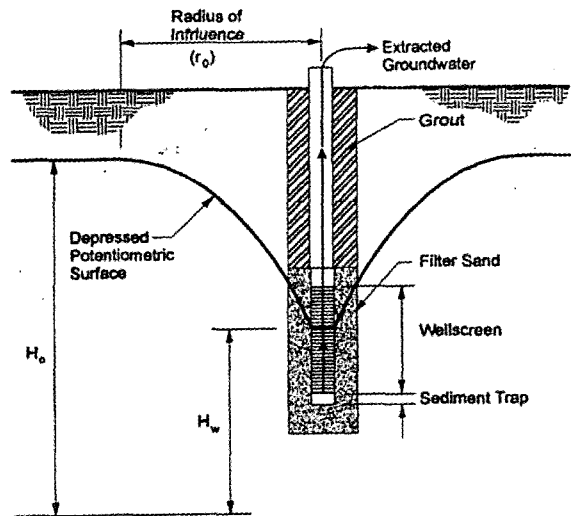
5.1 오염지하수 복원기술 종류

오염지하수 복원기술의 종류는 매우 다양하며 대표적인 것을 살펴보면 표 2에 제시된 바와 같다.

5.2 오염지하수 복원기술 특성

1) Pump and treat 공법

지중내의 오염지하수를 양수하여 지상에서 처리하는 것이다. 지하수처리 기법중에 가장 간단하고 가장 보편적으로 사용되고 있는 기법이다. 지상으로 유출된 오염지하수내의 오염물질을 처리하기

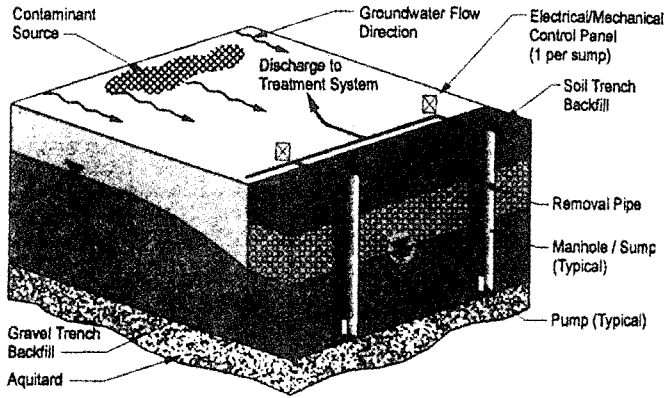


[그림 12] Extraction well 공법 개요도

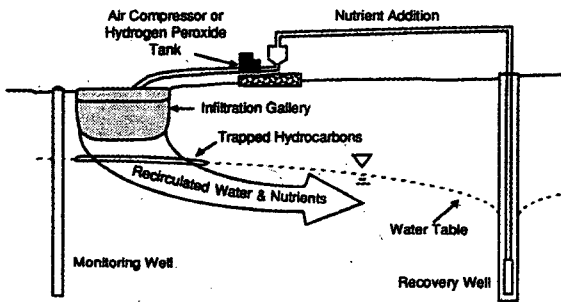
위한 장치가 필요하다.

2) Extraction well 공법

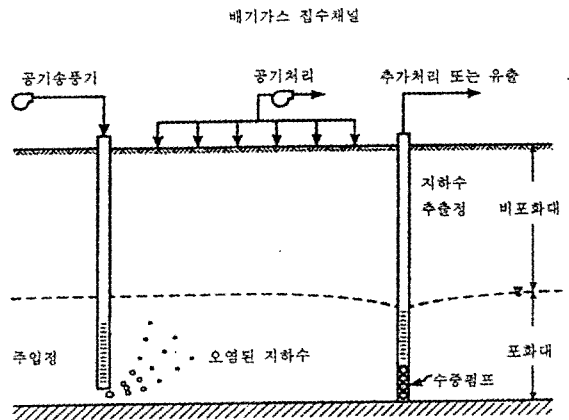
지중 내의 대수층에 추출정을 설치하여 오염지하수를 지상으로 추출하는 것이다. 추출정의 영향 반경 및 영향깊이는 대수층의 특성, 우물의 지하



[그림 13] Collection trench 공법 개요도



[그림 14] Bioremediation 공법 개요도



[그림 15] Air sparging 공법 개요도

학적 형상, 우물의 양수량에 근거하여 산정된다.

3) Collection trench 공법

지중 내의 대수층에 집수트렌치를 설치하여 오염지하수를 집수하여 유출시키는 것이다. 트렌치의 설치깊이는 지하수위의 계절적 변동, 오염원의 위치, 대수층내 오염원의 깊이 등을 고려하여 결정한다. 일반적으로 집수트렌치는 오염물질이 지하수위하부 약 15 m 이내의 얇은 깊이에 존재하거나 대수층이 암반이 아닌 굴착이 용이한 토사 지반으로 구성된 경우에 추출정보다 경제적인 공법이 될 수 있다.

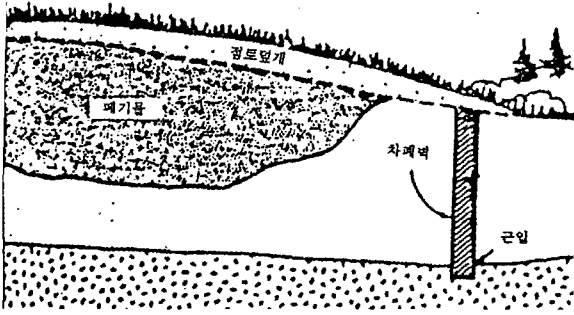
4) Bioremediation 공법

미생물, 박테리아 등을 오염지하수내에 주입시

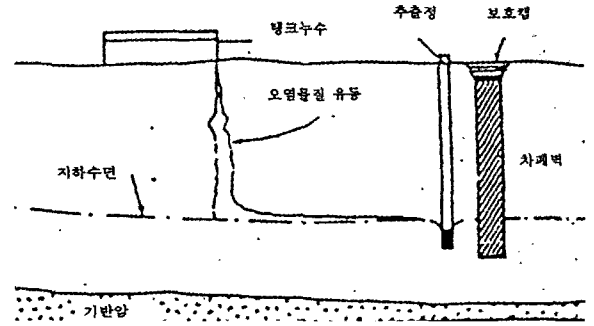
켜 오염지하수 내의 유기화합물을 분해하여 독성을 제거하는 방법으로 널리 사용되는 복원공법중의 하나이다.

5) Air sparging 공법

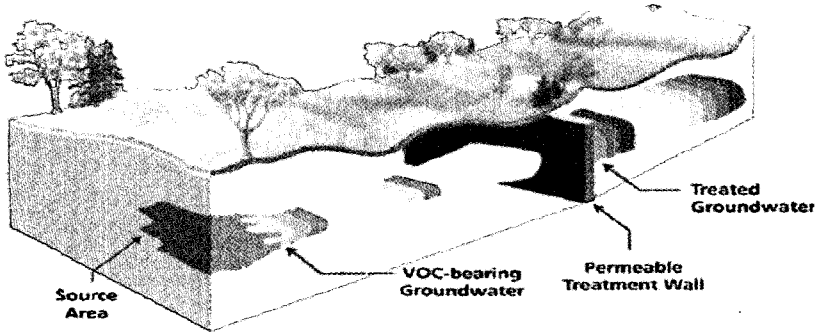
포화지역내의 VOCs를 공기주입에 의해 휘발시켜 추출, 처리하는 공법으로 대수층 내로 공기를 주입시켜 주입된 공기가 연직 또는 수평방향으로 이동하면서 오염물질을 휘발시켜 상부의 불포화대로 이동시킨 후 SVE와 연계하여 오염물질을 추출하여 제거한다. 본 공법은 SVE(soil vapor extraction)시스템을 토양 및 지하수에 모두 다



[그림 16] 삽입식 차단벽 개요도



[그림 17] 현수식 차단벽 개요도



[그림 18] Permeable reactive barrier 공법 개요도

가능토록 하는 보완공법이 될 수 있다.

6) Air stripping 공법

양수된 오염지하수를 다양한 포기장치를 이용하여 공기를 주입하여 VOC와 공기의 접촉면적을 증대시켜 오염물질을 휘발하여 제거하는 것이다.

7) Impermeable barrier 공법

불투수성 연직벽을 이용하여 오염지하수가 주변으로 이동 및 확산되는 것을 방지하기 위하여 차단벽을 설치하는 것이다. 차단시설로는 슬러리월, 시이트파일, 그라우팅벽, 심층교반벽 등이 있다.

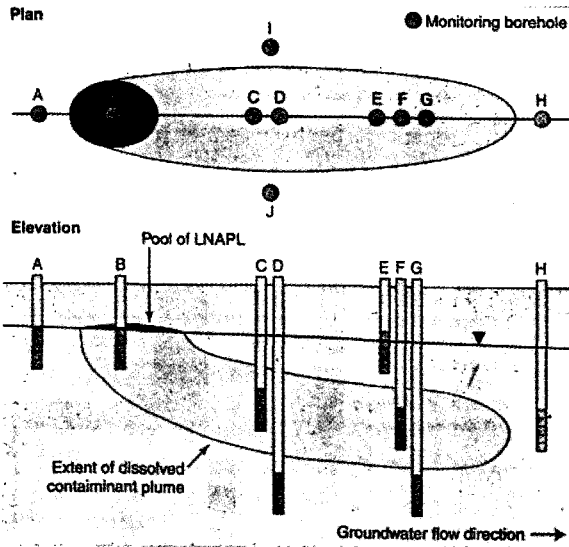
8) Permeable reactive barrier 공법

불투수성 차단벽을 이용하여 오염지하수를 완전히 차단하는 것이 아니라 투수성 반응벽을 이용하여 오염수를 통과시키면서 오염수내의 오염물

질을 제거하는 것이다. 토양 내를 좁고 길게 굴착한 후 굴착부에 오염물질 제거용 흡착성 재료로 채움을 실시한다. 반응벽은 시간이 지나감에 따라 포화되고 오염물질이 충전되기 때문에 재료의 흡착능력과 기간에 따라 필요시 재료를 교체해 주거나 재활성화해야 한다.

9) Natural attenuation 공법

오염지하수 주변의 토양이 보유하고 있는 자연연감 또는 자연희석 기법을 이용하는 것으로 최근에 들어와 효과적인 오염지하수 복원기법으로 평가되고 있다. 본 기법은 인공적인 복원기법과는 달리 토양환경 내에 존재하는 물리, 화학 및 생물학적인 흡착정화작용을 이용하여 시공간적으로 오염지하수내에 함유되어 있는 오염물질의 농도나 질량을 자연적으로 감소시키는 기법이다.



[그림 19] Natural attenuation 공법 개요도

6. 결론

지열에너지는 주택이나 사무실 및 산업시설에서 겨울철에 난방 및 여름철에 냉방 및 산업전력원으로 사용될 수 있다. 지열로부터 얻은 뜨거운 물은 단열 파이프를 통해서 먼거리까지 이송하여 관공서, 주택, 사무실, 수영장, 스포츠센터 등에 공급되어 사용된다. 한랭 적설지에서는 지열을 이용한 도로융설시스템을 적용하여 노반에 파이프를 매설하고 고온수를 통수시켜 도로를 가열하여 눈을 녹이는데 적용한다. 영농에서는 심층열수를 이용하여 대규모의 비닐하우스 등에 열원을 공급한다. 이와 같이 지열에너지는 우리 주변에서 쉽게 얻을 수 있고 또한 지열에너지 다양하게 사용되고 있다. 따라서 지열에너지는 우리들에게 대체 에너지로서 점차 가깝게 다가오고 있다.

지열에너지를 얻기 위해서는 시추공, 굴착공 및 그라우팅공이 필수적으로 수반되어야 한다. 이 과정에서 지열시스템 주변의 토양 및 지하수의 오염이 발생할 가능성이 매우 높다. 그리고 지열시스템, 시추공, 굴착공 등을 통하여 지상의 오염물질이 지하로 유입되어 지하의 오염을 가중시킬

수도 있다. 따라서 지열에너지 시스템 설치공사 및 운영 중에는 주변 토양 및 지하수의 오염에 대한 조사 및 검토가 필요하다. 그리고 지열시스템 주변 토양 및 지하수가 오염된 경우에는 적정의 조치를 취하는 것이 요망된다.

참고문헌

1. 정하익(1994), 오염지반 및 지하수의 정화기술, 건설기술정보, 통권 133호, 한국건설기술연구원.
2. 정하익, 이용수, 우재윤(1995), 오염지반 및 지하수 정화기술에 관한 연구, 한국건설기술연구원.
3. 정하익(1998), 지반환경공학, 도서출판 유림.
4. 정하익(1999), 오염지하수 복원기술에 관한 기초연구, 한국건설기술연구원.
5. 정하익(2001), 오염지하수 복원기술 개론, 2001 지반환경, 한국건설기술연구원.
6. 최희철, 지재성, 유도운(1997), 탄화수소화합물로 오염된 지반환경복원기술 개발연구, 한국건설기술연구원.
7. Federal Remediation Technologies(1997), Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, 3rd ed.
8. National Research Council(1994), Alternative for groundwater cleanup, Washington DC.
9. US EPA(1988), Guidance on remedial actions for contaminated water at superfund sites, EPA/540/G-88/003.
10. <http://kr.brog.yahoo.com/wmdfbtn01/1359634.html>
11. <http://geothermal.id.doe.gov/>
12. <http://www1.eere.energy.gov/geothermal/>
13. <http://www.energy.ca.gov/geothermal/>
14. <http://www.geothermal.org/>