

원위치 열처리기술을 활용한 오염지반 복원



김용성
서울대학교
건설환경공학부 박사과정
(escape2@snu.ac.kr)



박준범
서울대학교
건설환경공학부 부교수
(junbpark@snu.ac.kr)

1. 서론

쾌적하고 건강한 삶은 모든 이들의 공통된 바람이다. 오염토양 및 지하수가 새로운 환경문제로 떠오르는 가운데, 정부에 반환된 주한미군기지 내 토양 및 지하수 오염 실태가 공개될 예정에 있으며, 복구를 위한 비용은 천억 원 이상 될 것으로 추정되고 있다. 국내에서는 산업공단지역, 전국 각지에 산재해 있는 주유소 및 지하유류 비축기지 등으로 인해 주변 토양 및 지하수가 많은 경우, 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)로 오염되고 있다. 미국환경청은 우리나라에서 주로 사용되는 강철재 탱크의 경우 평균적으로 설치 10년 후부터 부식이 시작되며 지역조건에 따라 10~42%의 누출 가

능성을 갖는다고 보고한 바 있는데, 현재 국내에 설치되어 있는 10년 이상 된 지하저장탱크는 총 88,004기 중 31,484기(35.8%)이며, 그 중 20년 이상이 4,647기(5.3%)나 된다(행자부, 2003)(표1).

국내에서는 아직까지 표본조사를 실시하여 지하유류저장탱크의 누유발생율을 조사한 사례가 없다. 누유가 발생할 경우 누유사실을 공개하는 것을 꺼리는 사회적 분위기 때문에 실제 누유발생현황을 파악하는 것이 쉽지 않다. 토양환경보전법이 제정되기 전 (주)트래비스 엔지니어링과 대학연구팀이 28개월 동안 전국 175개 주유소의 529개 지하저장탱크를 대상으로 초음파를 이용한 검사를 실시한 결과 75%인 129개소의 191개 탱크에서 누유가 확인된바 있다(김미정, 2003). 지하저장탱크 시설의 불량 원인

표 1. 국내 지하저장탱크 연수별 현황 (행자부 예방소방행정 통계자료, 2003)

공계	10년 미만	10~20년 미만	20~30년 미만	30~40년 미만	40년 이상
88,004	56,520	26,837	3,822	761	64

표 2. 지하저장탱크 연령별 누유율 (행자부 예방소방행정 통계자료, 2003)

구분 (탱크연령)	5년 미만	6-10년 미만	11-15년 미만	16년 이상
누유율	11%	16.2%	27.7%	35.6%

표 3. 지하저장탱크 시설의 불량유형 (행자부 예방소방행정 통계자료, 2003)

불량탱크수	결함의 유형				
	미용접	기공	균열	탱크변형	배관 등
101	16 (15.8%)	35 (34.6%)	34 (33.7%)	12 (11.9%)	4 (4.0%)

은 대부분 부실시공 또는 균열발생으로 추정된다(표 2, 3).

이와 같은 VOCs는 최근 이슈화되고 있는 ‘채집중 후군’의 직접적인 원인으로 피부노출이나 호흡기 흡입을 통해 신경계에 장애를 일으키는 발암물질이다. 소아백혈병환자 중 10%가 태아 때 혹은 어린 시절 주유소 근처에 거주한 적이 있다는 2005년도 Science지의 연구결과가 입증하듯이, VOCs로의 노출은 치명적이고 노출경로가 워낙 다양하기 때문에 누출지역의 복원이 시급하게 이루어져야 한다.

오염지반에 대한 정화사업 증가 추세에 따라 국내에서는 토양증기추출법(Soil Vapor Extraction), 공기분산법(Air Sparging)과 생물학적 정화공법(Biodegradation)에 대한 기술도입이 유수의 엔지니어링 회사들에 의해 활발하게 이루어지고, 대학 및 정부출연 연구기관들에 의하여 여러 토양정화공법이 연구되고 있다. 본 고에서는 VOCs로 오염된 지반에 효과적으로 사용될 수 있으나 국내에서는 비교적 연구와 기술도입이 미진한 원위치 열처리기술의 원리, 특징과 적용사례 등에 대하여 소개하고자 한다.

2. 비수용성 오염물질의 특성 및 기존 복원공법의 소개

그림 1에 나타난 개념도에서 볼 수 있듯이, 비수용성 액체인(Non-Aqueous Phase Liquid, NAPL) 유류오염이 지중으로 누출되면 중력과 모세관 작용에 의해서 유류는 아랫방향으로 이동하기 시작해서 모세관대(capillary fringe)에 도달하여 모관압력에 의하여 더 이상의 이동 없이 저류되게 된다. 물론 유류의 누출이 지속적으로 발생한다면 모세관대의 저류 능력이 초과되어 유류 운(plume)은 다시 아래방향으로 이동하지만, 불포화구간에는 유동성이 낮은 잔류물들이 흙 입자의 표면이나 간극사이에 잔류상태로 남게 되어 토양오염의 원인이 된다. 이와 같은 불포화 대수층의 휘발성 유기오염물질을 제거하는데 가장 많이 활용되어온 기술은 토양증기추출법과 공기분산법이다(Heron et al., 1998). 이러한 기술은 불포화대에 관정을 설치하고 펌프를 이용하여 오염된 토양에서 오염물질의 기화를 유발시켜 제거하는 동일한 원리를 기초로 한다. 그러나 이들 공법의 가장 큰 한계점은 휘발성 오염물질의 mass transfer 저하에 의하여 발생하는 정화 소요기간의 장기화와 제거율의 감소이다(표 4 참조). 한 예를 들어 미국 텍사스주 IBM사의 경우 325L의 염화용제를 정화하기 위하여 1986년에서 2000년도까지 총 14년 동안 지속적으로 토양증기추출 장비를 가동한바 있다. 이와 같은 공법의 한계성을 극복하기 위해 연구개발이 꾸준하

원위치 열처리기술을 활용한 오염지반 복원

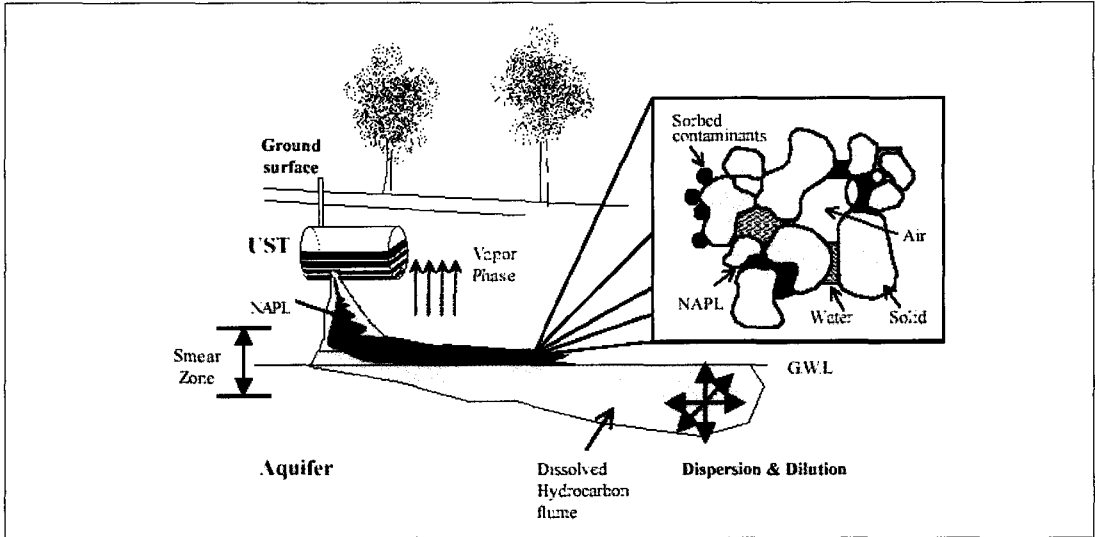


그림 1. 유류 오염성분의 지중분포 개념도 (김영웅, 2001)

표 4. 기존 복원공법들의 한계성

토양증기추출법과 공기분사법의 한계성

- 투수성이 높고 균질한 지반에만 효과적이다.
- 국지적 불투수성층에 의해 제거효율이 저하된다.
- 휘발성이 높은 물질에만 효과적이다.
- 높은 함수비를 갖는 지반의 경우 제거율이 저하되며 경제성이 떨어진다.
- 지하수위가 깊은 곳에 위치하여야 적용범위를 확대할 수 있다.

게 진행되고 있는 분야가 바로 원위치 열처리기술이다. 열처리기술은 전력을 활용하여 토양을 직접 또는 간접적으로 가열, 오염물질의 휘발성을 증대시켜 기존 토양복원공법의 제거율 증가와 복원소요시간 단축을 목표로 하는 기술이다. 복원에 소요되는 비용 절감의 지표는 효율이 높은 가열시스템의 개발에 있다고 할 수 있다.

3. 원위치 열처리기술을 활용한 VOC 제거 원리

토양증기추출법과 공기분사법과 같은 물리적 복원공법의 성능 향상에 있어서 가장 중요한 요소는 유류오염물질의 휘발성, 그리고 지반의 공기투과도이다. 오염물질의 휘발성이 중요한 이유는 아무리 공기추출률이 높아도 오염물질이 휘발하는 정도에 의하여 제거량은 제한될 수밖에 없기 때문이다. 유류오염과 같은 휘발성 오염물질의 휘발정도는 헨리상수 H (Henry's Constant)로 나타낼 수 있는데, 이는 오염물질의 증기압력을 용액 상으로 존재하는 오염물질의 몰분율로 나누어준 값이다. 따라서 헨리상수가 크면 클수록 오염물질의 휘발정도가 높아지며 토양

표 5. 온도에 따른 VOC 물질의 헨리상수 변화 (Dewolf et al., 1995)

VOC	온도(°C)	헨리상수 H
Benzene	0	0.071
	10	0.097
	25	0.194
Tetrachloroethylene (PCE)	0	0.157
	10	0.256
	25	0.601
Toluene	0	0.0767
	10	0.106
	25	0.224
Trichloroethylene (TCE)	0	0.101
	10	0.139
	25	0.351

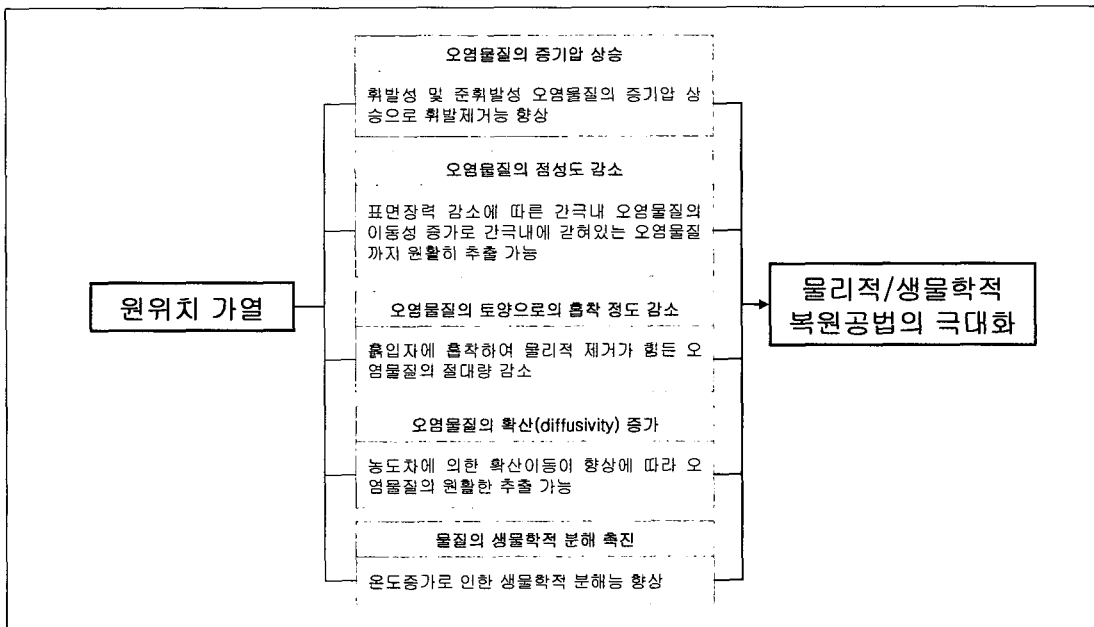


그림 2. 원위치 열처리기술을 통한 토양 및 지하수 복원기법의 효율증대 개념

증기추출법의 성능도 향상된다고 이해해볼 수 있다. 중요한 점은 이와 같은 휘발성 오염물질의 헨리상수가 온도에 종속적인 관계를 갖는다는 것이다. 예를 들어 휘발성 LNAPL(Light Non-Aqueous Phase

Liquid) 오염물질인 톨루엔의 경우 헨리상수는 H 는 2.0°C 에서 0.0767인 반면, 25.0°C 에서는 0.224로 거의 3배나 증가한다(표 5 참조). 또한, 지반의 공기투과도가 중요한 이유는 가해지는 압에 의한 공기의 흐

원위치 열처리기술을 활용한 오염지반 복원

름이 원활하게 발생하여야 휘발을 통한 오염물질의 제거가 원활하게 발생하기 때문이다. 결과적으로 국지적 불투수층의 경우 토양증기추출법과 공기분사법을 활용한 제거효율은 저하될 수밖에 없다.

지반의 원위치 가열기술은 토양증기추출법과 공기분사법의 성공 가능성을 좌우하는 (1)유류오염물질의 휘발성과 (2)지반의 공기투과도를 높임으로서 성능향상을 가능하게 한다. 기본적으로 가열기술은 헨리상수 H 의 증가 또는 오염물질의 휘발성 증가를 일으키며, 간극수의 증발을 통하여 지반의 공기투과도를 현저하게 높이게 된다. 이에 더불어 저온으로 가열을 발생시킬 경우 미생물 분해 촉진을 기대할 수 있다. 일반적으로 미생물 분해 속도는 10°C 의 온도 상승에 따라 2배 증가한다고 알려져 있다. 또한, 흡입자에 흡착하여 물리적으로 제거가 힘든 오염물질의 절대량을 감소시킬 수 있다(Heron et al., 1998). 정리해본다면, 그림 2와 같이 지반의 온도상승으로 인한 오염물질의 (1)휘발성 증대, (2)점성도 감소, (3)토양으로의 흡착을 저하, (4)지중 내 확산이동도 향상, 그리고 (5)생물학적 분해 촉진을 유도하게 된다.

4. 원위치 열처리기술의 종류 및 원리

오염된 토양을 굴착하지 않고 원위치에서 지반을 가열시키는 공법은 크게 세 가지로 분류된다: 고온 공기/증기 주입법(Hot Air/Steam Injection), 고온 물 주입법(Hot Water Injection), 그리고 전자기 가열법(Electromagnetic Heating)이다. 이들은 효과적인 원유 채취를 목적으로 석유산업에서 개발된 공법들로, 토양 및 지하수 복원에 응용된 것이라 할 수 있다. 그러나 동일한 공법이 두 분야에서 다른 목적

을 갖고 있음을 이해해야 된다. 석유채취 공정에서는 저유대가 높은 포화도를 갖으며 잔류 포화도가 50% 또는 그 이상이 되어도 문제가 되지 않으나, 오염지반 복원에서 목표로 하는 잔류 오염물질의 농도는 극히 낮은 수준이다.

4.1 고온 공기/증기 주입법

고온 공기/증기 주입을 통하여 오염된 토양과 지하수가 가열된다. 오염 지역으로부터 탈기된 VOC와 SVOC(준휘발성 유기화합물, Semi Volatile Organic Compounds)는 토양증기추출법, 공기분사법과 같은 물리적 복원공법에 의해 표면으로 이동된다(그림 3 참조). 그러나 고온의 공기를 주입해 지반의 온도를 상승시킬 경우 그 효율이 상당히 떨어지게 되는데 이는 공기가 매우 낮은 열용량($\approx 1\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)을 갖기 때문이다. 따라서 목표온도가 높을시 열용량이 공기의 4배($\approx 4\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)이며 증발열이 2000kJ/kg 이상인 고온의 증기를 활용하는 고온 증기 주입법이 더 높은 효율을 보인다. 증기 주입법의 특징은 적용시 현장지반의 함수비 증가를 불러온다는 것이다. 따라서 비교적 낮은 함수비를 갖는 현장지반에 적용되며, 특히

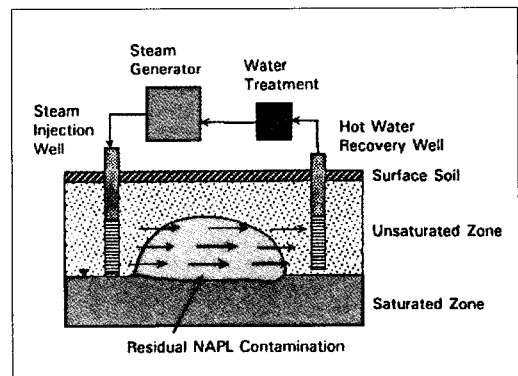


그림 3. 고온 증기 주입법의 개념도

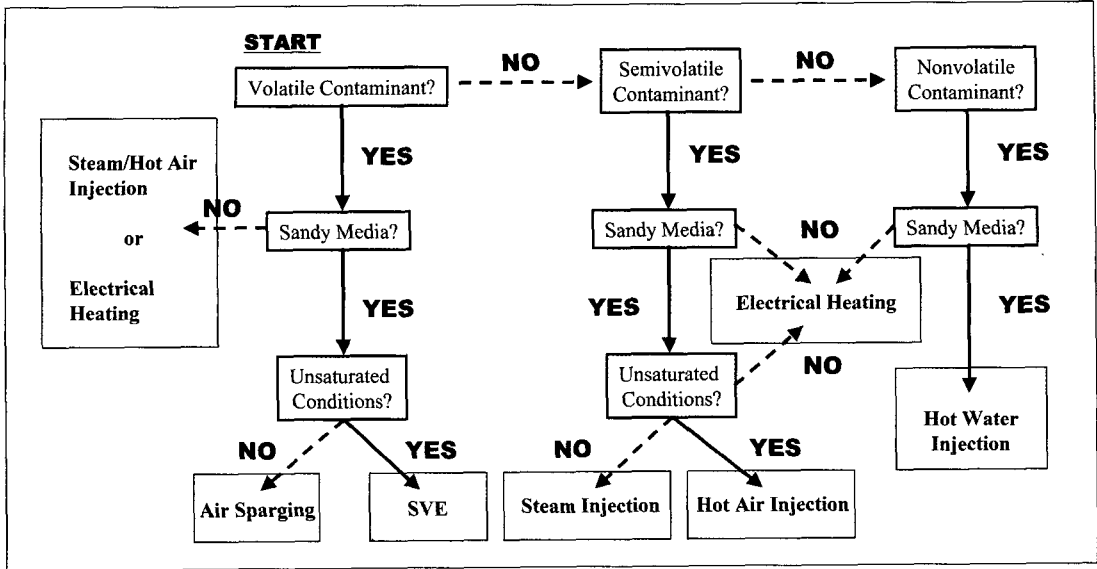


그림 4. 현장 조건별 원위치 열처리기술 선택 Flowchart (EPA, 1997)

높은 용용해도(solubility)를 갖는 오염물질의 경우 적용이 불가능하다는 단점이 있다.

4.2 고온 물 주입법 (Hot Water Injection)

고온의 물을 주입하는 공법에 사용되는 장치는 고온의 공기/증기를 주입하는 공법과 유사하나 오염물질을 제거하는 메커니즘이 상이하므로 이에 따라 적용 가능한 현장조건이 구분된다(그림 4 참조). 기본적으로 고온의 공기, 증기와 물 주입법은 주입물질의 오염물질과의 직접적인 접촉을 통하여 열에너지를 전달하는 동일한 원리를 바탕으로 한다. 그러나 고온 공기 주입은 휘발을 통하여 오염물질을 기상으로만 제거하게 되는 반면, 고온 증기 주입은 이동이 용이한 액상의 오염물질(mobile contaminant)을 밀어냄과 동시에 잔류 오염물질을 휘발시킴으로서 기상과 액상의 오염물질을 동시에 제거하게 된다. 고온의

물 주입의 경우 오염물질은 대부분 액상으로 지표면에서 회수된다. 이는 고온의 물 주입을 통하여 얻을 수 있는 가장 큰 효과가 오염물질의 점성도 감소에 따른 이동성 증가이기 때문이다. 따라서 고온 물 주입법은 물보다 비중이 낮은 LNAPL이 지하수위 위에 존재할 때 가장 효과적으로 적용될 수 있다. 고온의 물을 지하수위 밑으로 주입하면 주입된 물은 상승하게 되며 오염물질과의 직접적인 접촉을 통한 열전도가 효과적으로 발생하기 때문이다.

4.3 전자기 가열법

4.3.1. 전기저항 가열법

(Electrical Resistance Heating)

전기저항 가열법은 상대적으로 전도성이 높은 세립분 함량이 높은 지반을 가열하기 위해 전류를 사용한다. 이로서 상대적으로 전도성이 높은 지역에 갇혀있던 오염물이 휘발되거나 진공추출을 통해 제

원위치 열처리기술을 활용한 오염지반 복원

거된다. 전극은 투수성이 적은 토양 속에 직접적으로 삽입되며 흙의 전기전도 특성에 영향을 미치는 함수비, 간극수의 전기전도도, 세립분 함량과 온도와 같은 요소를 고려하여 적절한 전류를 가하게 된다. 전류의 흐름에 따라 발생하는 저항열을 응용한 기술로 가정에서도 흔히 볼 수 있는 삼상 전류원(3-phase electricity)을 사용한다는 점에서 현장적용이 간편하다는 장점이 있다. 전기저항 가열법은 주입매 질과의 열전도를 통하여 온도상승을 이루는 고온의 공기/증기/물 주입법과는 달리 직접적으로 에너지를 전달하기 때문에 100°C 이상으로도 가열이 용이하다. 전기저항에 의해 생성된 열은 갇혀있던 물을 휘발시켜 토양증기추출의 제거를 위한 증기 영역으로 이동시키며, 토양의 함수비와 투수성 변화로 인한 물리적 복원공법의 복원소요시간 단축을 기대할 수 있다. 그러나 전기저항 가열법에서 발생하는 열 에너지의 전달은 매질의 열전도 특성(heat

conduction)과 용액의 대류(fluid convection) 특성에 좌우되기 때문에 대상 토양을 균질하게 가열시키는 데에는 어려움이 있다. 전극 주변에 과도한 열에너지가 집중되며 전극과 멀어질수록 가열 효과가 감소하는 경향이 나타날 수 있다. 또한, 전기전도도가 높은 선택적인 지역을 중심으로 가열이 일어나며, 전극주변에는 과도한 가열로 인한 간극수의 증발로 인하여 전류의 흐름이 원활하게 이루어지지 않아 전도성 높은 용액이 주입될 필요가 있다(Heron et al., 1998). 비균질한 가열은 선택적인 지역에서만 오염물질의 휘발을 통한 제거를 발생키시며, 고온의 토양에서 휘발되는 오염물질 또한 저온의 토양을 통과하면서 다시 용액 상으로 축적되는 재분포(relocation) 현상이 발생하게 된다.

4.3.2 전파주기 가열법 (Radio Frequency Heating)

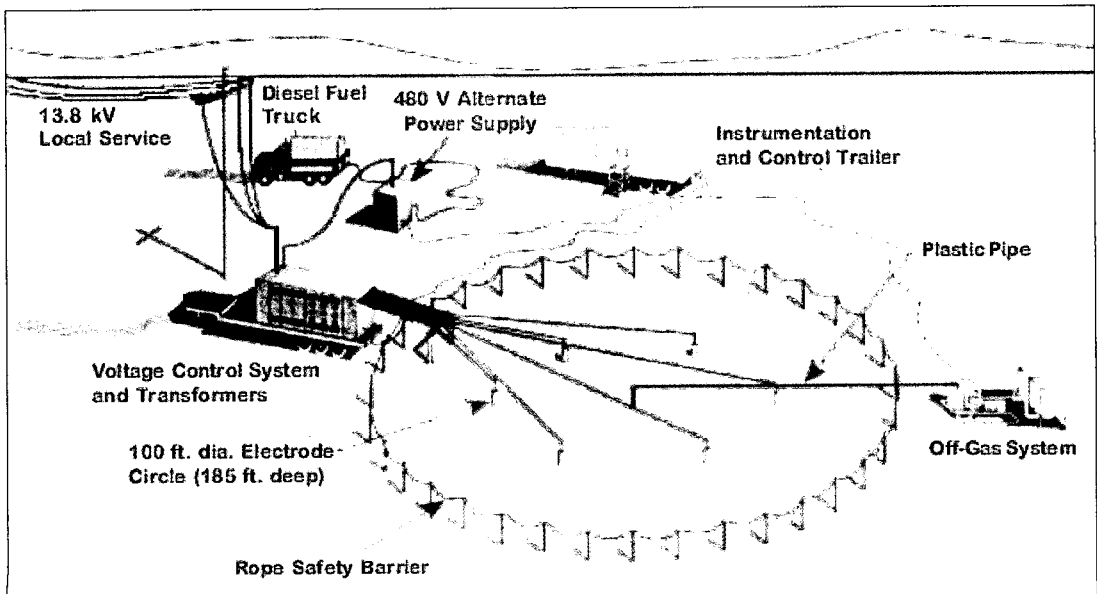


그림 5. 토양 주변에 원형으로 배열된 6개의 전극을 통해 전류를 공급하는 6상 전기저항 가열기술의 개념도 (EPA, 1995)

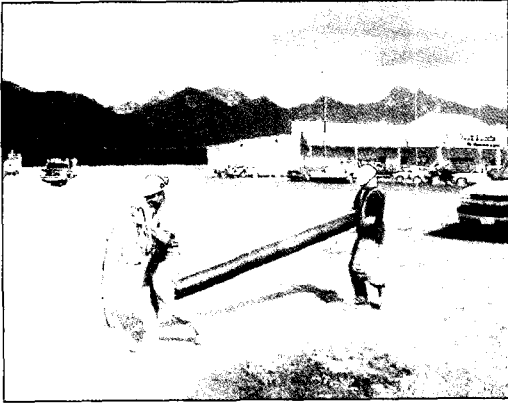


그림 6. 전기저항 가열 시스템의 핵심부품인 전극의 모습 (Kuhn, 2004)

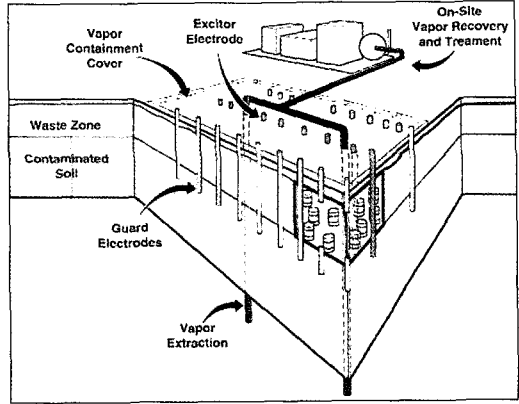


그림 7. 전파주기 가열법과 토양공기추출공법을 활용한 시스템 개념도 (Sandia National Laboratories, 2002)

전파주기 가열법은 전자기 에너지를 사용해 토양을 가열하여 토양증기추출 공정을 향상시킨 원위치 공정이다. 전기저항 가열법과는 달리, 매질의 열전도 특성과 용액의 대류 특성과는 관계없이 분자수준 (molecular level)에서 열을 발생시키기 때문에 대상 토양에 대한 균질한 가열을 얻을 수 있다(Price et al., 1999). 가정에서 흔히 사용되는 전자레인지와 동일한 원리인 전기쌍극자 재정렬 방식으로 저항열을 발생시키기 때문에 가열이 빠르고 효과적으로 이루어질 수 있다. 전파주기 가열공법은 토양에 삽입된 여러 줄의 전극을 사용해 분리된 일부 토양을 가열한다. 가열된 토양은 2열의 전극으로 둘러싸여 있으며, 가운데에 세 번째 열의 전극으로 에너지가 집중된다. 3열의 전극은 3중 콘덴서와 같이 작용한다. 에너지가 전극 배열에 적용될 때, 가열은 위쪽 중앙에서부터 시작되어 수직방향으로 아래쪽으로 진행되며, 토양을 따라 옆으로 나아간다. 일반적으로 5-10 mmHg의 낮은 증기압을 갖는 중휘발성 오염물질의 제거에 효과적으로 사용될 수 있으며 조건에 따라 최대 400°C까지도 가열이 가능하다고 알려져 있다 (EPA, 1997).

에너지 사용 효율에 있어서 전파주기 가열법은 전기저항 가열법에 비해 우수하다고 평가된다. 토양의 밀도와 열용량을 바탕으로 하는 열역학적 관계식으로부터 특정 부피의 토양을 목표온도로 가열시키는데 필요한 에너지를 도출해 볼 수 있는데, 균질한 가열을 이루는 전파주기 가열법이 에너지 소비량에서도 우위를 점하게 된다. 예를 들어 Price et al. (1999)는 지름 6m를 갖는 원통형 부피의 토양(함수비 5%)을 20°C에서 100°C로 균질하게 가열시킬 때, 간극수의 증발이 전혀 일어나지 않는다는 가정조건 하에서 2,500 kWh의 에너지가 필요할 것이라 예측하였다. 그러나 이 온도에서 간극수를 증발시키기 위해서는 2,800 kWh의 에너지가 추가적으로 필요하다. 이와 같이 간극수의 상변화에 필요한 증발은 많은 양의 에너지를 필요로 하기 때문에 간극수를 전혀 증발시키지 않고 100°C 이하의 목표온도까지 균질한 가열을 이룰 수 있는 전파주기 가열법이 더욱 경제적일 수 있는 것이다. 그러나 전파주기 가열법은 적절한 함수비가 균질하게 분포된 조건에서 높은 효율을 보인다는 단점이 있으며 주변에 전도성 매질로 이루어진 지하저장탱크와 같은 시설이 존재할 경우 적용이

불가능하다는 한계성을 지니고 있다.

5. 국내외 연구동향 및 적용사례

토양의 가열 공법은 기술의 특성상 지반공학, 환경공학, 전기공학과 열공학이 복잡하게 접목되어 있는 분야로서 종합적인 연구가 수행되어야 함에도 불구하고, 비교적 최근에 들어 연구가 수행되기 시작하여 아직까지는 그 연구성과가 미흡한 실정이다. EPA에 따르면 1996년까지 미국의 20개의 현장에서 토양가열공법의 적용성 평가가 수행되었으며 사용된 기술로는 오염토양 내에 무선주파수를 공급하여 가열을 일으키는 전파주기 가열법과 전류의 흐름 중에 발생하는 전기저항에 의한 열을 이용하는 전기저항가열 공법이 대부분을 차지하고 있다 (Smart, 2004). 현재 상용화단계에 이르러 있는 대표적인 토양가열공법은 전기저항 가열공법으로, 미국이 연구개발과 현장적용을 통해 기술축적을 활발하게 진행하고 있다. ET-DSP(Electro-Thermal Dynamic Stripping Process)공법을 보유하고 있는 McMillan-McGee사, ISTD(In Situ-Thermal Desorption) 공법을 보유하고 있는 Terra Therms사, 그리고 미국 에너지부(Department of Energy, DOE)와 함께 6상 토양가열법(Six-Phase Soil Heating, SPSH)을 개발한 Battelle사가 이 분야에서 주도적인 역할을 하고 있다.

전자기 가열공법에 관련된 연구는 1990년대 초반부터 해외학계에 보고되기 시작했는데, (1)토양에서의 열전달 메커니즘 파악, (2)토양의 가열에 영향을 미치는 영향인자 확인, (3)실내시험을 통한 각종 오

염물질의 제거효율 평가, (4)효과적인 가열 장비와 전극 배치, 그리고 (5)현장시험을 통한 적용성 평가에 대한 연구가 중심으로 이루어져왔다. 이를 통하여 표면전도 효과가 높아 전류의 흐름이 비교적 원활하게 발생하는 실트 및 점토 함량이 많은 지반에서 효과적으로 적용될 수 있음이 확인되었으며, 지반조건에 따라 비교적 낮은 증기압을 갖는 준휘발성 유기화합물에 대해서도 높은 제거율을 보인다고 보고된 바 있다(Gauglitz et al., 1994; Newmark et al., 1994; Aines et al., 1992). 또한, 토양증기추출법과 공기주입법에 더불어 추운 기후에서 생물학적 분해를 통한 정화(Bioremediation)를 향상시키는데 사용될 수도 있다고 보고된바 있으나(Price et al., 1999, EPA 1997), 아직까지 구체적인 연구성과는 보고되지 않은 상황이다.

최근에는 장기적인 현장 적용성 평가를 통하여 가열공법의 실용화를 다루는 논문들이 주로 발표되고 있는데, 주로 토양증기추출을 향상시키는 목적으로 활용되어 그 결과가 보고되고 있다. 특히, 석유계총 탄화수소(TPH)와 더불어 대표적인 DNAPL(Dense Non-Aqueous Phase Liquid) 오염물질로 꼽히는 TCE(Trichloro-ethylene) 제거에 관한 적용사례가 주목을 받고 있다. 켄터키주의 Paducah시에 위치하고 있는 DOE의 우라늄 농축 시설에서 발생한 TCE 누출사고 지역에서 Battelle사의 SPSH 공법이 토양 가열공법으로는 최초로 TCE로 오염된 토양 및 지하수 정화를 목적으로 사용되었으며, 토양과 지하수에서 98%와 99%의 높은 제거효율을 보였다(DOE, 2004). 이 외에도 Current Environmental Solutions(CES)사에 의하여 전기저항가열 공법은 미국 및 유럽의 토양오염지역에서 TCE, PCE, 그리

고 디젤유와 가솔린을 포함한 TPH 오염의 정화를 목적으로 활용되고 있으며 상당한 기술축적이 이루어지고 있다. 토양증기추출 공법뿐만 아니라, 공기분산법과 생물학적 정화공법의 제거효율을 향상시키고 공기 단축을 줄이려는 목적으로 가열공법의 적용분야는 확대되고 있는 추세에 있다.

국내의 경우 원위치 열처리기술과 관련한 연구는 선진국에 비해 아직 미비한 실정이다. 국내에서 수행된 대표적 연구사례로는 대우건설 기술연구소에서 수행한 “고온공기주입추출을 활용한 디젤오염토양의 복원”과 “전기저항가열을 이용한 휘발 및 준휘발성 오염토양의 복원”을 꼽을 수 있다(고석오와 윤여복, 2005). 이 기술로 용인에 위치한 군부대 내 파일럿 플랜트를 준공하였으며 이미 상당한 기술축적 상태에 있다고 한다. 토양을 직접적으로 가열하는 공법으로 경유 오염토양에 대하여 토양증기추출 공정을 향상시키는 목적으로 수행된 마이크로웨이브 가열을 활용한 연구(김종운과 박갑성, 2004)가 보고된바 있으며, 실내시험을 통하여 가열특성과 제거효율을 분석하는 성과를 보였다.

6. 결론

이상과 같이 오염지반복원에 사용되는 원위치 열처리 기술의 원리, 종류와 특징에 대하여 간단히 살펴보았다. 열처리기술은 오염지반복원에 단독적으로 적용되기는 어려우나 기존의 물리적/생물학적 복원공법의 효율을 극대화시킬 수 있다. 오염물질의 휘발과 이동성을 증가시킴으로서 기존 공법의 효율 향상을 기대할 수 있으며 계면활성제(surfactant) 또

는 공매제(cosolvent) 주입기술과는 달리 2차적인 오염발생이 없다는 장점을 갖기 때문에 국내에서도 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 선진국에서 유효성이 입증된 기술에 대해서는 적극적인 도입이 필요할 뿐만 아니라, 우리나라의 오염 및 지반 조건에 맞추어 적용될 수 있는 새로운 기술 개발이 병행되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. 고석오, 윤여복, “전기 저항열을 이용한 유류 오염토 복원 공정 적용을 위한 토양의 가열특성 연구”, 2005 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp. 376-379.
2. 김미정, 2003, “지하유류저장탱크의 관리 강화 방안”, 한국환경정책·평가연구원 연구보고서 RE-15.
3. 김영웅, 2001, “유류오염 토양/지하수 환경복원 조사 및 설계 사례”, 한국지구물리탐사학회 제3회 특별 심포지움, pp. 57-74.
4. 김종운, 박갑성, 2004, “마이크로웨이브 가열 토양증기추출 공정에 의한 경유 오염토양처리”, 한국지하수토양환경학회지, Vol. 9, No. 1, pp. 39-46.
5. 행자부, 2003, 예방소방행정 통계자료.
6. Aines R. et. al, 1992, “Dynamic Underground Stripping Project”, Waste Management Symposium, Lawrence Livermore National Laboratory.
7. Dewolf Jo, Drijvers David and Van Langenhove Herman, 1995, “Measurement of Henry’s Law Constant as Function of Temperature and Salinity for the Low Temperature Range”, Atmosphere Environment, Vol. 29, No. 3, pp. 323-331.

원위치 열처리기술을 활용한 오염지반 복원

8. Gauglitz P., Roberts JI, Bergman T., Schalla R., Caley S., Schlender M., Heath W., Jarosch T., Miller M., Eddy-Dilek C., Moss R., Looney B., 1994, "Six-phase Soil Heating for Enhanced Removal of Contaminants: VOC in nonarid soils.", Integrated demonstration, Savannah River Site; Report PNL-101184, UC-406, Pacific Northwest Laboratory, Richland, CA.
9. Heron G., Van Zutphen M., Christensen T.H., and Enfield C.G., 1998, "Soil Heating for Enhanced Remediation of Chlorinated Solvents : A laboratory study on Resistive Heating and Vapor Extraction in Silty, Low-Permeable Soil Contaminated with Trichloroethylene" , Environmental Science and Technology, Vol. 32, No. 10, pp. 1474-1481.
10. Kuhn A. Jeffrey, 2004, "Electrical Resistance Heating Technology Coupled with Air Sparging and SVE for Remediation of MTBE and BTEX in Soils and Goundwater in Ronan, Montana"
11. Newmark R et al., 1994, "Demonstration of Dynamic Underground Stripping at the LLNL Gasoline Spill Site", Final Report UCRL-ID-116964, Vol. 1-4, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
12. Price Stephen L., Kasevich Raymond SI, Johnson Mark A., Wiberg Dan, and Marley Michael C., 1999, "Radio Frequency Heating for Soil Remediation", Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 49, pp. 136-145.
13. Smart Jimmy, 2004, "Application of Six-Phase Soil Heating Technology for Groundwater Remediation", American Institute of Chemical Engineers, Vol. 24, No.1, pp. 34-43.
14. Sandia National Laboratories, 2002, "Thermal Enhanced Vapor Extraction System"
15. U.S. Envionmental Protection Agency, 1995, "In-situ Remediation Technology Status Report: Thermal Enhancements" EPA-542-K-94-009.
16. U.S. Envionmental Protection Agency, 1997, "Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction" EPA-542-R-97-007.

