한국지하수토양환경학회 추계학술발표회
2004년 9월 9~10일 전 주 대 학 교

디젤오염토양복원을 위한 고온공기 주입/추출 공정의 토양 파일 공법에의 적용 연구

박민호, 박기호, 홍승모, 고석오*

*(주)대우건설 기술연구소 환경연구팀, *경희대학교 토목건축공학부 (giho@dwconst.co.kr)*

Abstract

A field pilot study on remediation of diesel-contaminated soil by hot air injection/extraction process constructing soil piling system was conducted to evaluate the effects of hot air on the removal of diesel and each constituent. After the heating process of 2 months, the equilibrium temperature of soil reached to 100℃ and soil TPH concentration was reduced to about 72% against the initial concentration. Additional extraction process of 2 months induced the continuous extraction of residual diesel and the increment of microbial activity, which made soil TPH concentration reduced to 95%. In addition biological removal of non volatile constituents in diesel was verified indirectly and the removal pattern of each DRO(diesel range organic) as soil temperature was explained.

key word : Hot air injection/extraction, soil piling, TPH, DRO

1. 서론

일반적인 토양증기추출법(SVE)에 의하여 유류성분을 제거 시 시간에 따라 추출되는 가스의 농도가 지속적으로 감소함으로써 처리 효과는 시간경과에 따라 낮아지게 된다. 이유는 강제적 추출로 인하여 유류성분의 휘발화(volatilization)가 비평형상태(kinetic limitation)를 유지함에 따라 휘발되는 가스양이 감소하며, 추출시간의 경과에 따라 BTEX와 같이 휘발성이 큰 성분은 초기에 제거되지만 저휘발성 성분의 비율은 증가하기 때문이다. 즉 장기간 추출에도 불구하고 저휘발성 오염성분의 제거에 한계가 있게 된다. 또한 유류오염물의 분산율이 낮음에 따라 복원기간이 길어지는 문제점이 있다. 일반적으로 증기압이 최소 1mmHg 이상이어야만 휘발에 의해서 제거 가능한 것으로 알려져 있는데 디젤이나 윤활유와 같은 유류 등은 증기압이 매우 낮아 제거가 어렵다. 따라서 고온 공기를 주입하게 되면 토양온도의 상승에 따라 휘발성분의 휘발화를 촉진시킬 뿐만 아니라 저휘발성 성분들의 증기압의 증가에 의해 휘발성을 증가시키게 되므로 저휘발성 성분의 제거효율을 증가시킬 수 있으며 또한 처리기간을 단축할 수 있다.

본 연구는 오염현장 여건에 의해 지중식(in-situ)대신 오염토양을 굴토하여 파일을 구성한 후 고온공기 주입/추출 공정을 적용한 디젤오염 복원현장의 운영을 통하여 이루어졌는데, 고온공기 주입/추출로 인한

토양온도의 상승에 따른 토양내 디젤의 제거특성을 관찰하였으며 표준물질(diesel range organics; DROs)별로 비교하였다.

2. 본론

2.1. 파일럿 플랜트 구성

고농도 디젤오염토양은 굴토되어 Fig.1과 같이 5m*10.8m*3.5m의 규모로 파일링되는데 주로 깊이 2~4m에 집중적으로 성토되었다. 경사면과 복토층은 비오염 토양으로 시공되었고 복토층의 표면은 최종적으로 우천시 토사의 유출을 방지하기 위해 폴리에틸렌 필름으로 처리되었다. 주입관정 및 추출관정은 54m^{2}의 오염토 평면적 내에 균등하게 배치되었는데 고온공기 주입관정은 횡형으로 3개소 설치되었으며 추출정은 연직방향으로 8개소 설치되었다. 원지반 심도 1m까지의 증기 추출을 위해 추출정은 파일 상단부터 원지반 내로 깊이 1m 정도까지 설치되었다. 주입관정의 경우 오염토양과 접한 모든 영역을 스크린 처리하였으며 추출정의 경우는 끝단으로부터 2m 높이까지 스크린을 설치하였다. 8개의 추출정은 분지형으로 배관하여 1기의 토양증기 추출장치로 일괄 추출되며 각 추출정에는 유량을 조절할 수 있다. 주입정의 각 외부 배관은 1기의 고온공기 주입장치에 연결되었다.

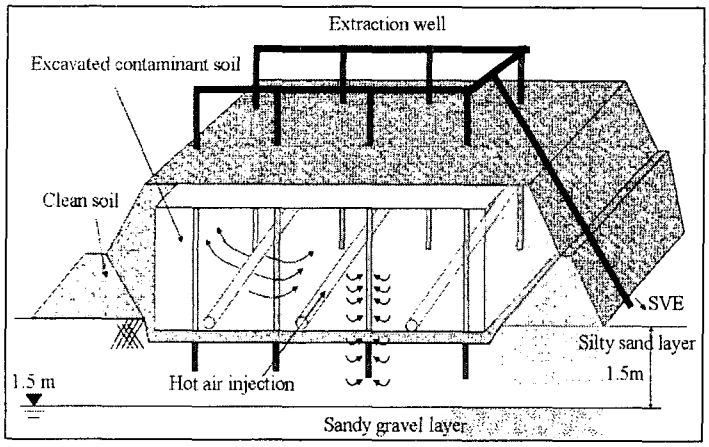

Fig. 1. Schematic diagram of piolt plant

2.2. 파일럿 플랜트 운전 및 실험 방법

공정 운전 방식은 크게 고온공기 주입/추출을 동시에 하는 공정과 추출만을 하는 공정으로 나뉘며, 전자는 2개월 동안, 후자는 3개월 동안 운영되었다. 에너지 소비가 비교적 많은 고온공기를 주입하면서 추출하는 공정을 통해 70% 이상의 토양내 디젤성분을 휘발시켜 추출하고, 이후 잔류 오염물은 토양내 잔여열을 이용한 추출과 이때 유도되는 대기의 공급을 이용해 미생물의 활성도를 증가시켜 생물학적으로 처리하였다. 타 현장 적용시에 고온공기 주입 기간 1개월에 영향반경 2m를 유지하며 지반이 열적 평형에 도달하였는데 토양굴착 후의 파일공법인 관계로 투기도(air permeability)가 크기 때문에 유량손실 및 열손실을 고려하여 2개월의 가열기간을 선택하였다. 3대의 고온공기 주입장치는 평균 300℃, 3 m^3/min의 유량으로 토양내 고온공기를 주입하였고, 추출장비를 통해 평균 3 m^3/min으로 토양증기를 추출하였다. 이후 고온공기 주입이 중단된 상태에서도 추출은 동일 유량으로 이루어졌다.

가열 전/후 및 2개월의 관찰 후, 총 3회에 걸쳐 토양파일의 위치별, 깊이별로 토양시료를 채취해 오염도 분석을 함으로써 저감정도를 확인하였는데, 모든 분석 과정 및 정량 방법은 토양오염공정시험법의 TPH 분석법에 준하여 실시되었다. 토양파일의 깊이 및 위치별 온도는 토양파일 상단 관측정에서 전자식 온도계에 의하여 시간별로 저장되었다.

2.3. 실험결과 및 고찰

공정운영에 따른 토양내 디젤의 제거특성을 살펴보기 위해 토양파일의 위치 및 깊이별로 초기(initial),

중기(intermediate), 말기(final)로 구분하여 오염도 분석을 실시하였으며, 파일구성 당시 최고농도 지점인 깊이 3~4m에서의 분석결과를 중심으로 제거특성을 살펴보았다. 여기서 초기는 고온공기 주입/추출 이전, 중기는 2개월의 가열 공정 직후, 말기는 추출공정 실시 2개월 경과 후를 의미한다. 디젤의 제거특성은 TPH 및 각각의 DRO를 기준으로 평가하였는데, DRO(C10~C28 중 짝수번의 alkanes)는 Fig.1과 같이 표준물질(Supelco DROs)을 이용하여 정량하였다.

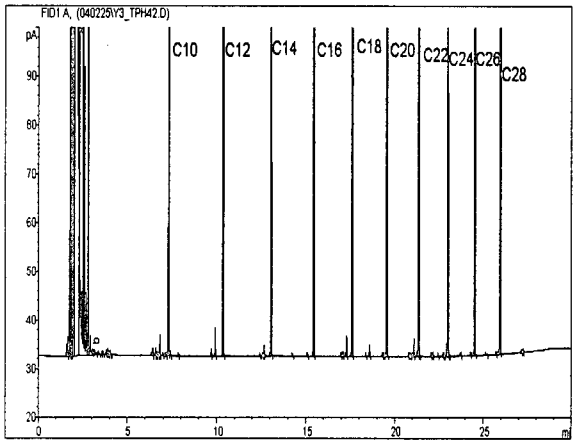

Fig. 2. Chromatogram of DROs

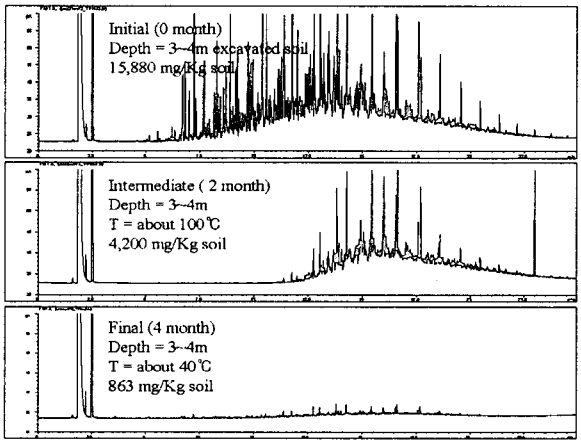

Fig. 3. Chromatogram of TPH in soil as time

각 단계에서의 디젤 오염도 저감을 Fig.3과 같이 chromatogram으로 나타내었는데 단계별로 휘발성 성분에서 비휘발성 성분까지의 저감추이를 확인할 수 있다. 2개월의 가열공정 후 토양의 온도가 약 100℃까지 상승하였으며 TPH 기준으로 약 72%까지 농도 저감하였고, 이 후 2개월의 추출공정을 통하여 토양온도는 40℃까지 낮아졌으나 중온영역에서의 계속적인 추출 및 미생물의 활성 증진으로 전체 95%의 제거율을 나타내었다.

Table1. Concentrations in soil as time

	Concentration in soil (mg/kg)		
	initial	interme.	final
TPH	15874.3	4203.8	863.4
C10	30.9	0.0	0.8
C12	276.3	0.6	7.1
C14	372.7	36.9	17.6
C16	286.0	116.2	16.9
C18	141.4	59.5	8.5
C20	96.1	51.1	4.1
C22	38.0	17.8	2.1
C24	13.6	9.9	1.7
C26	4.3	1.3	0.9
C28	1.3	1.1	0.5

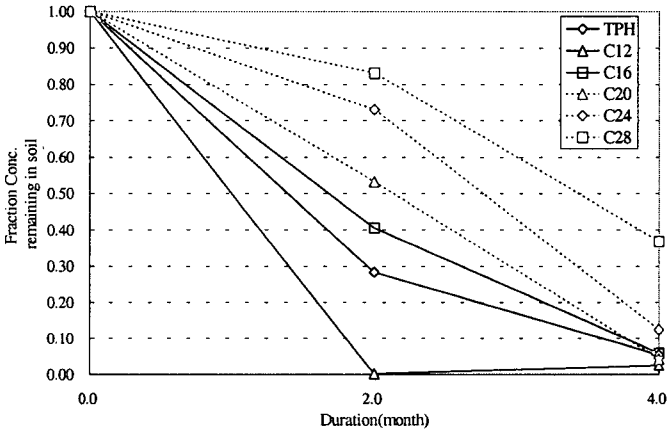

Fig. 4. Fraction concentration remaining in soil as time

각 DRO의 공정 단계별 제거특성은 Table1 및 Fig.4~8에 나타내었으며, Table1은 TPH 및 각 DRO의 단계별 정량적인 농도를 나타내었는데 각 단계에서의 TPH 중 총 alkanes의 비는 평균 7.1%로 나타났다. 이는 일반적인 디젤의 총 alkanes 성분비의 범주에 포함이 된다. 한편 일반적인 디젤의 각 DRO 성분비와 초기의 성분비는 거의 일치하였으나 C10의 경우는 약 83% 감소되었는데 이는 시료채취 및 분

석과정에서의 휘발 및 오염이력에 의한 것으로 판단된다. 탄소수의 증가에 따라 공정 단계별 제거율이 점차 감소하는 것을 Fig.4를 통하여 알 수 있으며 C20부터는 기울기의 크기가 중기에서 말기까지가 더 커짐을 알 수 있는데 이는 C20까지는 100℃까지의 토양온도의 증가에 따른 휘발성의 증가에 의해 제거되었지만 그 이후는 중온영역에서의 추출에 의한 영향도 있겠지만 대기의 유입에 따른 호기성 상태에서의 미생물 활성의 증가에 의한 제거 영향이 커짐을 증명하고 있다. 단계별 TPH의 저감 형태는 C12와 C16사이에서 결정되었는데 이는 디젤의 구성이 상대적으로 이 영역에 74%정도 분포하고 있어 이의 평균적인 개념에서 그 추이를 나타내고 있는 것이다. Fig.5는 공정 단계별로 각 DRO의 토양내 잔류농도를 나타낸 것으로 전체적인 농도저감의 추이를 살펴볼 수 있는데, 탄소수가 커짐에 따라 그 농도감소폭이 작아지는 것을 알 수 있다. 이를 총 alkanes에 대한 비로 나타내면 Fig.6과 같으며 중기에 휘발성 성분의 감소로 인하여 C10~C12의 상대적인 비율은 크게 감소하나 이후의 성분에 대한 성분비율은 초기에 비해 증가되며 최종 말기에는 비휘발성 물질까지 감소가 이루어지므로 다시 그 성분비는 초기의 경우와 유사해짐을 알 수 있다. Fig.7과 Fig.8은 각각 성분별 잔류율과 총 alkanes 대비 잔류율을 나타낸 것으로 단계별로 탄소수가 증가할수록 잔류율이 증가함을 보여주고 있는데 말기의 경우 이전 성분은 모두 제거되고 C24부터 증가추세를 보이고 있다. 이같은 결과는 일반적인 토양증기추출로는 예상하기 힘든 결과로서 고온공기 주입의 영향을 직·간접적으로 반영하고 있다.

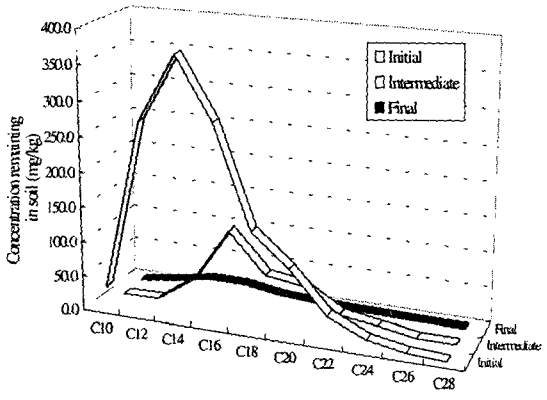

Fig. 5. Each DRO concentraions in remaining soil as time

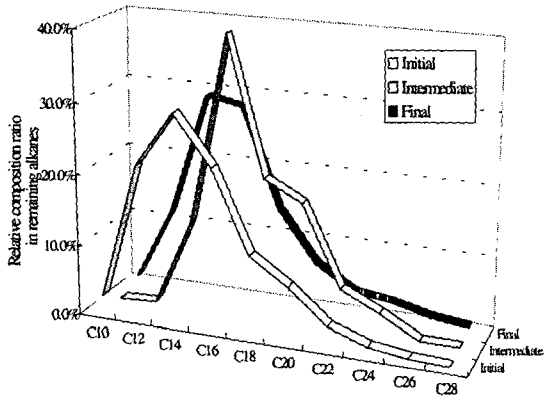

Fig. 6. Relative composition ratio in remaining alkanes as time

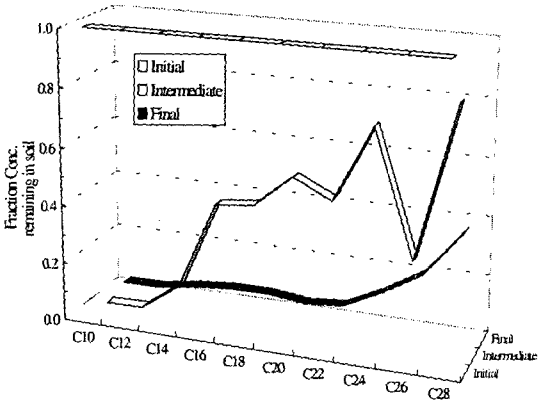

Fig. 7. Each DRO fraction concentraion in remaining soil as time

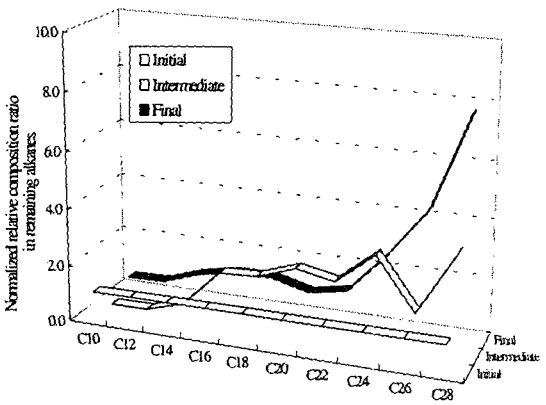

Fig. 8. Normalized relative composition ratio in remaining alkanes as time

토양파일의 전체적인 오염도의 저감을 살펴보기 위해 Fig. 9와 같이 공정의 단계별로 깊이2~3m와 3~4m의 위치별로 그 오염도를 나타내었는데 주입관정 주변인 깊이 3~4m에서는 토양온도의 증가에 따라 휘발된 성분이 확산 및 이류되어 추출됨으로써 농도가 저감됨을 확인할 수 있고 깊이 2~3m에서는 중기에 농도의 일시적인 증가를 보이는데 이는 주입유량이 추출유량보다 큼에 의해 3~4m에서 휘발된 물질이 이류되어 이 지역에서 응축됨을 나타내나 말기에 이르러서는 다시금 추출에 의해 저감됨을 보여주고 있다. 고온공기 주입/추출 공정과 고온유지 상태의 추출 공정으로 평균적으로 토양 TPH 기준 4,800에서 400mg/kg으로 90% 이상 제거되었으며 정확히 정량하지는 못하였지만 미생물의 활성의 증가로 잔여농도의 일부가 제거된 것으로 판단된다.

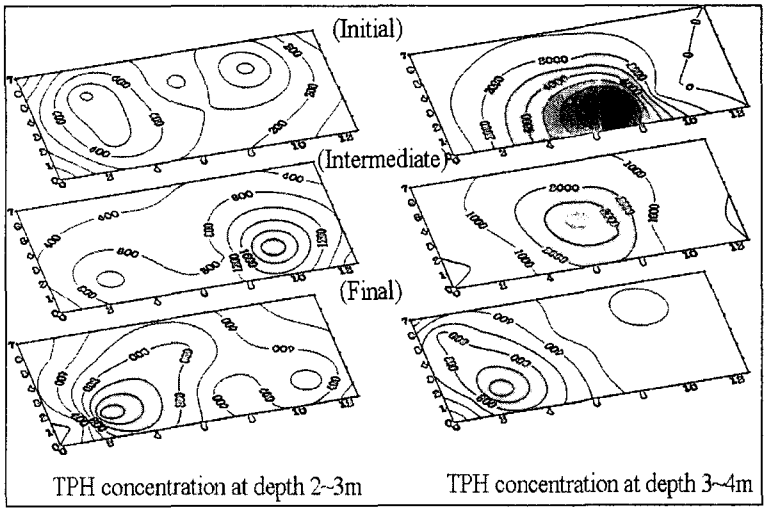

Fig. 9. Contour map of soil TPH (mg/kg) as time

3. 결론

오염 현장 여건에 따라 지중식 대신 굴토 후 토양파일을 구성하여 고온공기 주입/추출을 적용한 디젤 오염토양의 복원에 관한 연구를 수행하였으며 이 중 단계별로 토양내 디젤 오염도를 평가함으로써 고온공기의 주입/추출의 영향을 살펴보았다. 2개월의 가열공정 후 토양의 평형 온도가 약 100℃에 이르렀으며 TPH 기준으로 약 72%까지 농도 저감하였고, 이 후 2개월의 추출공정을 통하여 토양온도는 40℃까지 낮아졌으나 중온영역에서의 계속적인 추출 및 미생물의 활성 증진으로 총 95%의 제거율을 나타내었다. 또한 비휘발성 물질 영역에서의 미생물에 의한 처리를 간접적으로 확인할 수 있었으며 고온환경의 형성에 따른 각 DRO의 제거경향도 확인할 수 있었다.

4. 참고문헌

1) Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction, USEPA(1997)
2) Biopile design and construction design, BATTELLE(1996)
3) How heat can enhance in-situ soil and aquifer remediation: Important chemical properties and guidance on choosing the appropriate technique, USEPA.(1997)
4) Manual of Bioventing Principles and Practice, Vol. Ⅰ,Ⅱ,USEPA.(1995)