

# 고온공기주입추출에 의한 디젤오염토양의 복원

박민호<sup>\*1</sup>, 박기호<sup>\*2</sup>, 이의신<sup>\*3</sup>

## 1. 서론

일반적인 토양증기추출법(Soil Vapour Extraction, SVE)은 상온에서 70Pa이상의 증기압을 보이는 유기오염물을 대상으로 적용되어 왔으며, 특히 유류오염물의 경우는 가솔린에 주로 적용되어 왔다. 디젤의 경우 가솔린에 비해 같은 온도에서 낮은 증기압을 나타내며 150℃에서 약 70Pa의 증기압(C12~C20)을 보이므로 토양증기추출법을 적용하기 위해서는 토양 내에 고온의 환경을 형성해주어야 한다. 이에 본 연구에서는 여러 가지 가온 방법 중에서 열용량이 낮은 단점은 있지만 시설의 설치 및 유지가 용이한 고온공기의 주입/추출을 가온 방법으로 결정하였으며 기수행된 컬럼실험 및 실험실 규모의 파일럿 실험을 바탕으로 도출된 인자를 토대로 현장 규모의 파일럿 실험을 수행하였다. 현장 적용 부지는 지하수위가 7m 이하이며 디젤오염의 정도가 TPH 기준으로 국내 토양오염 우려기준인 5,000mg/kg 이상인 지역으로 선정하였다. 본 현장 적용 연구의 최종목적은 1차적으로 고온공기 주입/추출을 통하여 단기간에 TPH 5,000mg/kg 이상의 고농도로 오염된 지역에서 90%이상의 제거를 거두고 2차적으로 잔류오염을 고온이 형성된 지반내에 생물복원공정을 적용하여 제거함에 있는데, 현재 고온공기 주입/추출에 의한 현장 실험은 완료 단계이며, 생물복원공정은 적용 고려 및 관측 중에 있다.

## 2. 현장특성 및 운전/실험 방법

### 2.1 현장 특성

적용 현장은 그림 1에 나타난 바와 같이 철도차량 기지의 디젤 유류 탱크로부터 누출되어 지하수 흐름 방향으로 오염되었으며 그 기간이 약 5년 정도 되었으며, 주로 실트질 모래로 이루어진 매립토이다. 평균 공극률 및 함수비가 각각 0.36 및 18.7%로 나타났다. 지하수위는 6.5~7m 정도로 측정되었다. 주입 및 추출영향반경의 측정을 통해 공기투과도는 2.7~3.8 darcy로 산정되었는데, 이는 공기 주입/추출 공정의 적용가능범위에 포함된다. 디젤오염은 심도 5~8m 사이에 집중적으로 되어 있었으며 평균 TPH 기준 6,900mg/kg 정도이었다.

### 2.2 운전 방법

#### 1) 파일럿 플랜트 구성

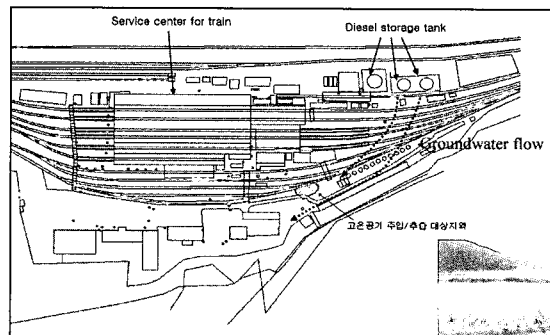


그림 1. 파일럿 플랜트 설치 대상 지역의 주변도

\*1 비회원, (주)대우건설 기술연구소

\*2 비회원, (주)대우건설 기술연구소

\*3 비회원, (주)대우건설 기술연구소

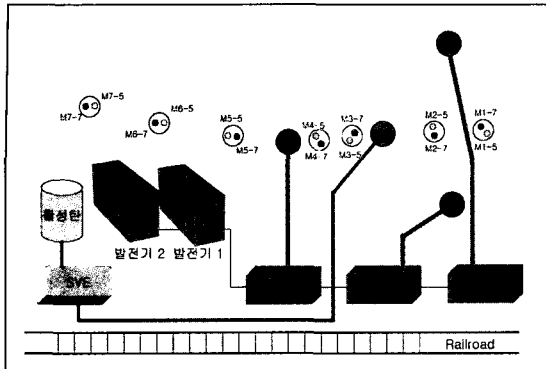


그림 2. 파일럿 플랜트 공정 설치도

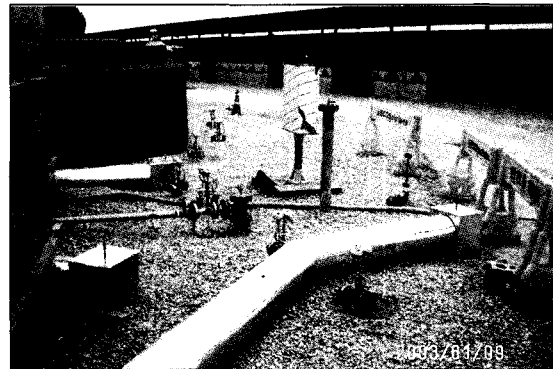


그림 3. 파일럿 플랜트 설치 전경

표 1. 시간에 따른 시스템의 운전 방법

가동 시간 (hr)	주입 유량 (m <sup>3</sup> /min)	추출 유량 (m <sup>3</sup> /min)	공기온도 (℃)
0 ~ 110	4	3.2	300
110 ~ 150	System off		
150 ~ 170	2	2	
170 ~ 200	3.5	2	
200 ~ 250	2	2	
250 ~ 470	4	3	
470 ~ 510	System off		
510 ~ 730	2	4	
730 ~ 1500	System off		

파일럿 플랜트는 그림 2 및 3과 같이 크게 관정시설, 고온공기 주입시설, 추출시설 및 후처리 시설과 데이터 수집시설로 구성되어 있다. 관정 시설은 3개의 고온공기 주입정이 1개의 추출정 주변을 각각 2m의 거리를 두고 방사형으로 위치하여 있으며, 추출 장비를 통해 추출된 공기는 기액분리기에서 수분이 1차 제거된 후 활성탄탑에서 후처리된 후 대기로 분산된다. 주입/추출 관정 주위에는 온도 및 압력 센서가 설치된 7개의 관측정이 필요 위치에 각각 5m 및 7m의 심도로 설치되어 있으며, 관측정에서 얻어진 일련의 온도 및 압력 데이터는 자동 수집/저장되어 분석가능토록 하였다. 추가로 토양내의 수분 및 오염도의 변화를 모사하기 위해 관측용 관정을 설치하였다. 파일럿 플랜트의 설치 개념도 및 설치 전경을 그림 2와 그림 3에 각각 나타내었다.

## 2) 파일럿 플랜트 운전

주입공기의 온도를 전체운전 시간동안에 300℃로 유지하였으며 현장 사정과 토양의 가열 상태에 따라 시간별로 운전방법을 달리 하였다. 표 1은 시간별로 전체 파일럿 플랜트의 운전 방법을 나타낸 것인데 0~110시간까지의 운전은 시스템 보정을 위한 시운전이다.

## 2.3 실험 방법

### 1) 토양오염도분석

기본적으로 모든 시료의 추출 및 TPH분석은 토양 오염공정시험에 의하여 수행하였다.

### 2) 관정별 가스상 오염도 분석

추출정에서는 운전기간동안 약 1일에 1회씩 가스를 샘플링하여 농도 분석을 실시하였다. 추출정의 샘플링 포트에 1차로 흡수병을 설치한 후 수분 및 응축 가능한 유류성분을 걸러내고 후단에 활성탄 튜브를 설치하여 잔여 유류성분을 흡착시켰다. 활성탄 튜브의 후단에는 적산이 가능한 가스 유량계를 설치하여 공기의 총유량을 알게 하였으며, 유량계 후단에는 실험용 펌프를 설치하여 관정내부의 공기를 강제로 뽑아내었다. 추출정의 경우 분당 약 2.5L/min의 유량으로 총 50~100L의 공기를 뽑아내었다. 흡수병 및 연결 튜빙에 응축된 유류성분은 현장에서 즉시 메틸렌 클로라이드 적당량으로 흡수시켜 무수황산나트륨

으로 수분을 제거 후 분석하였으며, 활성탄 튜브의 전처리 및 시료 제조는 토양의 것과 같이 하였으며 분석은 TPH 총량을 공기 총유량 대비에 관하여 표시하였다.

관측정에서는 시스템 운전동안 14개의 지점에서 총 2회와 필요에 따라 해당 관정에서 흡수병을 사용하지 않고 연결 튜빙을 최소화시켜 활성탄 튜브에 직접 흡착시켰다. 활성탄 튜브안의 수분 응축을 방지하고자 추출정에 비해 추출 공기 유량을 적게 하였다.

### 3) 지하수 오염도 분석

필요에 따라 지하수를 bailer로 채취하여 분별깔대기에 메틸렌클로라이드와 지하수를 20mL 씩 1:1로 섞어 약 30분정도 흔든 후 완전 층분리된 상태에서 메틸렌클로라이드 층만 분리한 후 무수황산나트륨으로 수분을 완전히 제거 후 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 토양내 온도분포

시스템의 운전 능력상 토양내의 온도가 정상상태에 도달되었다고 판단된 후 표토 층으로부터 깊이 10cm에서의 온도 분포를 평면에 대해서 나타낸 그림 4를 살펴보면 주입정 부근이 높은 편이고 전체적으로 보았을 경우 15~30℃ 정도의 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 당시 주입정에서 주입되는 공기의 양은 각 관정당 평균 4.2Nm<sup>3</sup>/min 이고 공기 온도는 300℃에 설정되었다. 한편 추출정에서의 추출공기 온도는 최대 85℃까지 승온하였다. 기호 I1, I2, I3는 각각 주입정 1번, 2번, 3번을 의미하며 Ext는 추출정을 의미한다.

정상상태의 깊이별 온도 분포를 그림 5에 나타내었는데 온도를 나타내는 범위는 추출정을 기준으로 한 방향으로만 제한하였다. 그림 5에서 추출정 기준으로 왼쪽에 I3가 위치해 있는데 Ext 기준 오른쪽으로 I1과 I2가 운전 중이다. 그 이유로 I3를 기준으로

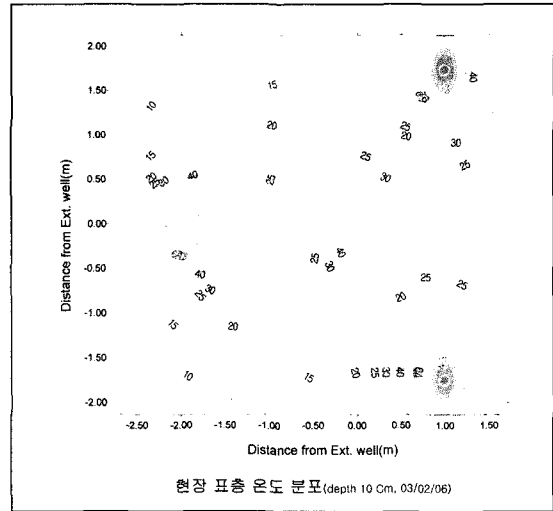


그림 4. 현장 표층 온도 분포

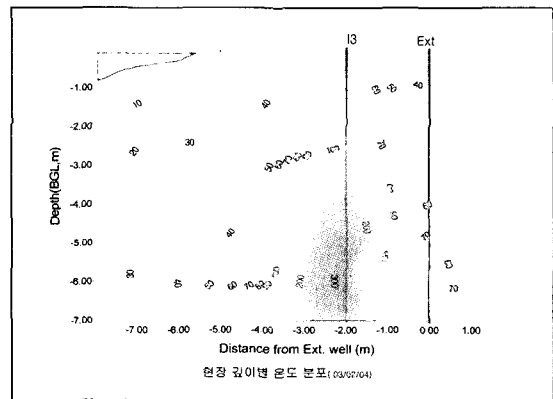


그림 5. 현장 깊이별 온도 분포

등온선 분포가 일정하게 나타나지 않음을 볼 수 있다. 기존 수행된 컬럼실험의 결과에 의해 토양의 온도가 70℃ 이상이 되면 TPH 제거율이 60%, 90℃가 되면 80% 정도임을 알 수 있었는데 이 근거에 의하면 연구 목적상 유류 오염물의 제거 가능한 유효 영역은 주입정을 기준으로 반경 2m 영역이며 주입/추출이 동시에 이루어질 경우 추출정에서 약 4m까지임을 알 수 있다. 이는 파일럿 플랜트 설계시에 예측된 바와 일치하며 차후 현장 적용에의 설계인자로 활용가능할 것으로 판단된다. 물론 이와 같은 온도 영역 외부에서도 일정부분은 제거가 되는 것으로 보아

야 한다. 또한 추출정으로부터 직선거리 6m 이상의 영역은 중온 영역으로서 미생물의 활성화 증가에 크게 도움이 되리라 판단되어 2차 처리 공정인 생물복원공정 적용시 제거효율을 증가시킬 것으로 판단된다. 그러나 주입정 부근의 토양은 예상이 되었고 또한 실제 시추를 통해 확인된 사항이지만 그 상태가 완전히 건조된 토양의 형태를 보여 주었다. 이 경우는 수분이 없고 고온의 환경이므로 미생물에 의한 TPH 분해를 기대하기가 어렵다. 따라서 잔류하는 유류 오염물의 미생물에 의한 분해는 토양이 충분히 냉각이 이루어진 후 외부 혹은 자연적으로 수분이나 영양분의 공급이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 심지어 토양 미생물이 멸균되었다고 판단되었을 시에는 식종까지 이루어져야 할 것이다. 현재 최종 고온공기 주입 후 온도의 하강 추이도 관찰중에 있는데 상온까지의 복귀까지 수개월이 걸릴 것으로 예측된다. 이 또한 생물복원공정 적용시 고려해야 할 사항이다.

### 3.2 토양내 유류 회수

추출정에서의 디젤 유류의 회수는 TPH를 기준으로 해석되었으며, 회수 경향은 추출정 주변 토양의

온도 상승과 밀접한데 그 관계를 그림 6에 나타내었다. 여기서 M2, M3, M4는 추출정과 근접한 관측정으로서 각각 추출정으로부터 0.92, 0.84, 1.62m의 위치에 있으며, 최근 주입정으로부터 각각 1.52, 1.29, 0.5m에 위치해 있는데 토양내 온도는 각 관측정별로 5m와 7m 심도에서 측정되었다. 토양내 온도는 운전이 안정화되면서 서서히 증가하게 되는데, 주입정에 가까울수록 상승률이 큼을 알 수 있고, 특이한 사항은 운전이 중단되면 오히려 토양내 온도가 증가되는데 이는 공기의 흐름에 의해 발생하던 기화열의 손실이 없기 때문이며 일시적인 현상이다. 토양내 온도변화의 추이에 따라 추출정에서의 가스상 농도가 증가함을 알 수 있고 영역내 오염도가 감소함에 따라 하강추세를 나타낸다. 최고 농도는 300 시간의 운전후 약 12,000mg/Nm<sup>3</sup> 이었다. 실험 전 구간동안 가스상 TPH 농도를 추출유량으로 대비로 환산하여 추출 총량을 산정하면 약 250kg이었으며 그림 6에 그 추이가 함께 나타내어져 있다. 한편 운전 중에 현장 상황에 따라 간헐적으로 운전을 중단시켰는데 재가동시마다 농도 추이가 리바운드하며 대폭 증가함을 알 수 있었는데 이는 추출의 간헐 운전이 효율적임을 나타내며, 차기 파일럿 실험시 중요 운전 인

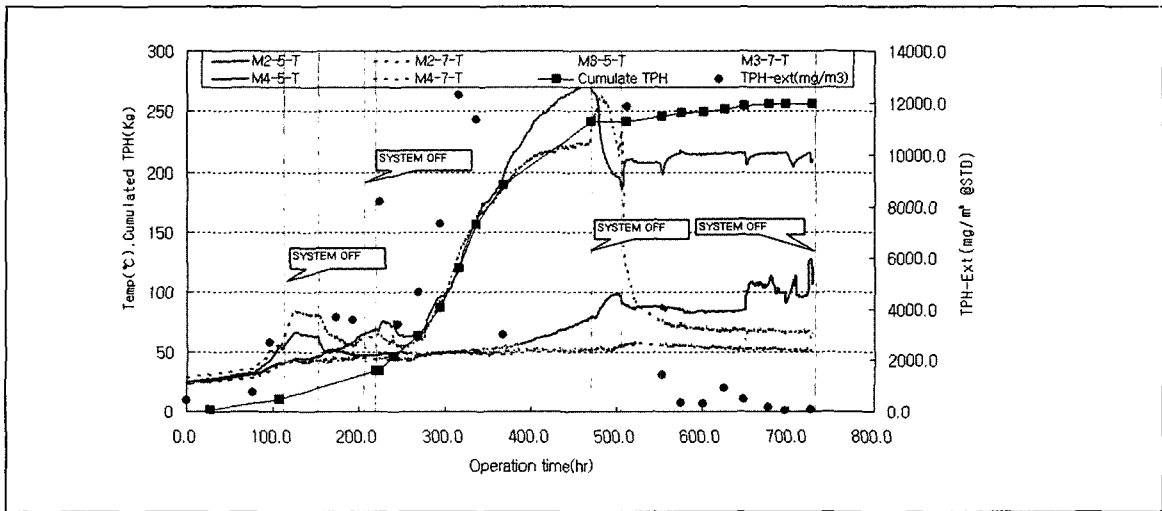


그림 6. 관측정의 온도 및 추출정의 가스상 TPH 농도 profile

표 2. 운전 전후의 현장 토양의 TPH 농도 및 수분 변화

운전전 위치별 농도			운전 종료후 위치별 농도		
Sample #	함수비(%)	mg/kg	Sample #	함수비(%)	mg/kg
E-5M	16.2	6802.1	M5 4-5M	7.2	326.8
			M5 5-6M	8.9	450.3
E-7M	19.9	7212.2	M5 7M 끝단	12.2	126.7
			M5 7.5-8M	15.7	7235.4
수분웰6M	12.5	2061.8	I1 5-6M	0.6	89.3
			E&I1 5-6M	0.1	131.3
I3-5M	14.3	5642.1	E&I1 6-7M	0.2	79.9
			E 5-6M	0.1	153.1
I2-5M	23.3	5746.5	E 6-7M	ND	268.7
			E 7-8M	9.2	220.4
I2-7M	21.3	8385.5	수분웰 5-6M	7.5	328.1
			수분웰 6-7M	9.5	950.6
I1-6M	16.2	11159.9	수분웰 7-8M	7.8	2711.1
			I3&M5 7-8M	ND	243.0
I1-7M	25.9	8078.4	수분웰 처리전	8.1	3150.1
			수분웰 처리후	1.2	483.2

자료 고려할 계획이다.

표 2는 고온공기 주입/추출 전후의 적용지반의 오염도와 수분의 변화를 나타낸 것인데 심도 5~7m의 초기 평균 농도가 6,900mg/kg이었으나 전체 운전 후 7~8m의 경우를 제외하고는 모두 평균 300mg/kg로 90%이상 저감하였다. 또한 토양내 수분은 초기 평균 함수비 18.7%에서 최종적으로 5.6%로 나타났으며, 이는 인공적으로 토양내 수분 및 오염도의 변화를 관측하기 위한 수분용 웰에서의 저감으로 파악된다. 그러나 NAPL이라고 판단되는 지하수위부근인 7~8m의 경우는 거의 저감이 되지 않았다. 즉 공기의 흐름이 하향으로는 이루어지지 않는다는 의미이며, 지하수까지의 통합형 복원을 위해서는 NAPL의 처리도 필수인데 추가적인 적용공법이 필요한 상태이다.

### 3.3 경제성 평가

각 주입정별 오염물 제거 가능 반경이 2m, 오염심도가 3m, 90% 정도의 제거율이라는 근거로 전력량만으로 비용분석을 실시하면 건조토양 1톤당

116.2KWh의 전력이 소비되었으며, 이는 국내 전력비로 산정하였을 때 1톤당 15,000원 정도이다. 운전기간의 안전율을 2로하여 추출만을 할 경우와 비교하게 되면 고온공기 주입/추출의 경우 2개월, 추출만의 경우 2년 정도로 판단되는데, 1톤당 처리비용으로 환산하면 각각 30,000원과 45,000원으로 추정된다. 가정이 포함된 정확한 추정은 아니지만 비용면에서 절감됨은 확실하며 또한 기간면에서 90%정도 단축됨을 판단할 수 있다.

### 참고문헌

1. USEPA.(1997), Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction
2. USEPA.(1997), How Heat Can Enhance In-Situ Soil and Aquifer Remediation: Important Chemical Properties and Guidance on Choosing the Appropriate Technique
3. USEPA.(1995), Manual of Bioventing Principles and Practice; Vol. I, II