

# Hybrid Pilot System을 이용한 철도 오염토양 복원

## Remediation of Contaminated Railroad Soils using by Hybrid Pilot System

박덕신<sup>1</sup>

Duck-Shin Park

**Key words** : Hybrid Pilot System(혼합형 파일럿 시스템), Remediation(복원), Bioventing(생물학적통풍), Soil Vapor Extraction(토양증기추출), Railroad Soil(철도토양)

### Abstract

In this study, we tested hybrid pilot system combined with soil vapor extraction and bioventing methods on the contaminated railroad soil. So, we found out the remediability and operating conditions. Air permeability(k) and gas phase(O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>/VOCs) level trend are very important to determine the remediation rate of the contaminated sites. Throughout hybrid pilot test on different conditions, the range of air permeability(k) was 1985~1194 darcy. The tests results in hybrid system was appropriate on this test sites, and the suitable injection air flow rate was 3.5m<sup>3</sup>/hr. So, we suggested a basic data for the remediation and management of contaminated railroad soil.

### 1. 서론

다양한 경로를 통해 토양으로 유입된 유류 성분은 토양의 미세 기공에 침착하여 오랜 기간동안 지하수를 오염시키는 원인이 되며[1], 이를 방지하기 위해서는 오염토양을 완전히 복원해야 한다[2]. 토양은 여러 가지 성상으로 불규칙하게 구성되어 있어 오염의 파악이 어렵고 한번 오염되면 복구에 많은 시간과 비용이 소요된다. 또한, 각종 농산물을 통하여 토양에 축적된 오염물질이 인체에 유입되어 인간에게 심각한 영향을 미친다.

현재 연료유나 지하수로 오염된 토양을 복원할

수 있는 기술은 다양하게 개발되어 현장에 적용되고 있다. 오염토양 및 지하수 처리방법은 크게 in-situ, on-site와 ex-situ로 나눌 수 있으며, 기술별로는 물리·화학적 처리방법과 생물학적 방법으로 나눌 수 있다. 물리·화학적 처리방법인 토양증기추출(soil vapor extraction)법은 불포화 층의 유류성분에 존재하는 휘발성물질을 제거하는 복원기술이며, 생물학적 방법인 생물학적통풍(bioventing)법은 휘발성이 비교적 높은 물질인 가솔린, 그리고 부분적으로 디젤, 난방유, 등유와 같은 물질의 처리에 효과적이다[3].

철도토양의 주요 오염지역은 유류저장탱크 주변 및 기관차 급유지역, 역의 경우 디젤기관차 정차지역, 디젤기관차 입·출고시 정차 및 대기 지역 등으로 크게 나눌 수 있으며, 철도토양의

1) 정회원, 한국철도기술연구원 시설전기연구본부

주요 오염원은 유류저장탱크 및 급유시설 배관으로부터 누출에 의한 오염, 디젤기관차에 연료유 급유시 낙유에 의한 오염, 디젤기관차의 낙유 및 누유에 의한 선로 주변지역의 오염 등으로 조사되었다. 특히, 철도현장에서는 디젤기관차의 연료유인 디젤을 다량 취급하며, 디젤의 취급과정에서 주변지역이 오염되기도 한다. 철도는 특성상 토양의 면적이 넓고, 오염원이 복합적이기 때문에 다양한 오염원을 제어하기 위해서는 우선 오염원을 오염물질 및 오염유형에 따라 분리하고, 복원 우선 순위를 설정하여 단계별로 복원을 실시해야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 디젤과 중유로 오염된 철도 토양오염 지역 중 디젤로 오염된 지역을 대상으로 연구를 수행했으며, 이 지역의 복원을 위하여 토양증기추출법과 생물학적통풍법의 혼합형 시스템을 이용하여 파일럿 테스트를 수행하고 토양증기추출법의 적용성 여부를 쉽게 판별할 수 있는 공기 투과도 (air permeability) 실험과 공기 추출량에 따른 가스상 물질의 농도를 파악하여 오염물질의 처리 가능성을 검토하였다.

## 2. 연구범위 및 실험방법

### 2.1 연구대상지역

본 연구의 대상지역은 유류저장탱크에서 약 6년 전에 디젤의 유출이 발생하였으며, 토양형태는 지하 7~8m의 매립지로 깊이 6~7m 부근에서 지하수가 흘러 오염이 확산되는 것으로 조사되었다. 대상지역의 시료채취는 Fig. 1에서와 같이 오염의 개연성이 높은 8번공 인근지역을 중간격자로 삼고, 그 외의 전 지역을 임의격자 및 임의선정에 의하여 정밀조사를 실시하였다. 이 지역에 대한 정밀조사는 총 17개 지점을 조사하여 깊이별 TPH(total petroleum hydrocarbons) 농도를 파악하였다. 정밀조사결과 16번공과 17번공 인근지역에서 상당한 유류오염이 발견되었으며, 이 지역에서는 지하수와 smearing zone을 따라 오염이 상당한 깊이까지 광범위하게 진행

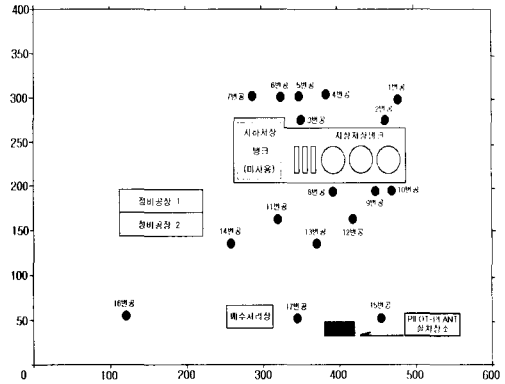


Fig. 1 Map of Sampling Points

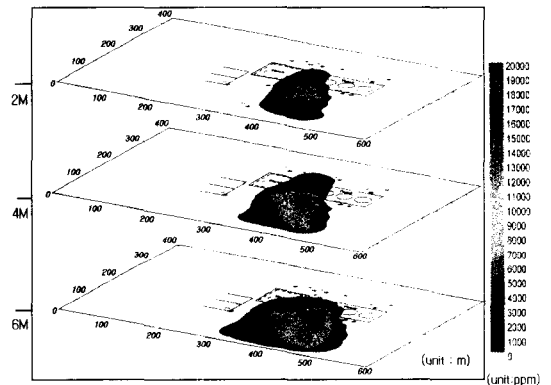


Fig. 2 TPH Concentrations of Test Site

된 것을 확인할 수 있었다. Fig 2는 연구대상지역의 깊이별 TPH의 농도 분포도로서 유류저장탱크를 중심으로 디젤이 확산되어 TPH가 2m 깊이에서는 약 0~10,000 ppm, 4m 깊이에서는 0~14,000 ppm, 그리고 6m 깊이에서는 약 0~18,000 ppm으로 깊이에 따라 오염범위가 넓어지며, TPH의 농도도 높아지는 것을 볼 수 있다. 파일럿 플랜트의 위치는 Fig. 1에 표시한 바와 같이 지도에서 대략 가로축 400m, 세로축 50m에 위치해 있으며, 토양 샘플링은 Geoprobe 540M(Geoprobe사, 미국) 시스템을 사용하였다.

**Table 1 Remediable Technologies Selected by Screening Tests**

Area	Pullutants	Pullution States	Technologies
Fuelling Area	Diesel	Medium	Soil Vapor Extraction, Bioventing
Station	Lubricant, Grease, Heavy Metals	Medium	Bioreactor, Soil Flushing, Soil Washing, Incineration
Station	Lubricant, Grease	High	Thermal Desorption
Fuelling Area Station	Diesel	Low	Bioremediation

## 2.2 오염원별 복원기술 선정

개황조사와 정밀조사를 통해 처리대상 오염물질과 오염물질의 농도를 파악하고, 스크리닝 테스트를 거쳐서 철도 오염토양에 대해서 오염원별로 몇 가지 적용 가능한 기술을 선정하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 급유시설 주변지역은 처리 대상물질이 주로 디젤이기 때문에 토양 증기추출법과 생물학적 통풍의 혼합형을 선정하였고, 유탄유/그리스/중금속으로 오염된 역의 선로

주변지역의 경우 bioreactor/soil flushing/soil washing/소각방법을, 고농도로 오염된 지역의 경우 열탈착기술(thermal desorption)을, 저농도 디젤로 오염된 지역의 경우 생물학적 복원(bioremediation)기술을 선정하였다. 본 연구에서는 앞서 서술한 바와 같이 급유지역에 토양증기추출법과 생물학적 통풍을 혼합한 파일럿 시스템을 설치하고 테스트를 실시한 결과를 기술하였다.

## 2.3 오염토양의 특성분석

Core 상태의 토양시료는 A 토양은 위로부터 10 cm 간격으로 A-1, A-2, A-3으로 3등분하였고, C 토양은 C-1과 C-2로 2등분하여 각각의 항목을 3번 반복하여 실험을 실시하였다. 오염토양의 분석결과 입도분포(%)는 모래가 약 80.15%, 실트가 11.97%, 그리고 점토는 7.95%로서 토양 종류는 loamy sand로 나타났다. pH는 7.21과 7.07, 간극율은 약 46.72% 이었으며, 유기물은 1.91%로 조사되었다. 모래의 구성비가 80.15%로 높기 때문에 공기의 투과가 잘되어 토양증기추출법의 적용이 효과적일 것으로 예상되었다.

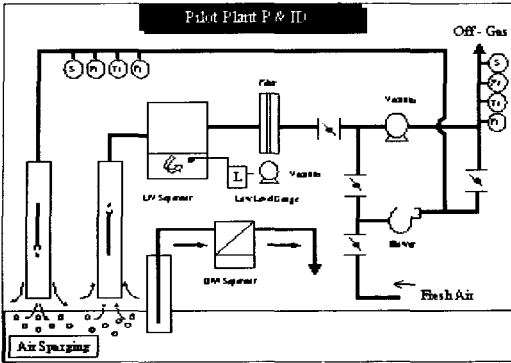
**Table 2 Physical and Chemical Characteristics of Contaminated Soils**

sample	pH (1:5)	BD <sup>1)</sup> g/cm <sup>3</sup>	Porosity %	$\theta m^{-3}$	$\theta v^{3)}$	CEC <sup>4)</sup> me/g	OM <sup>5)</sup> %	Particle Size(%)			Texture
								sand	silt	clay	
A-1	7.21	1.04	60.57	0.106	0.111	5.79	1.44	82.67	9.91	7.42	LS <sup>6)</sup>
A-2	7.26	1.44	45.56	0.115	0.166	5.71	2.13	82.41	10.05	7.54	LS
A-3	7.07	1.63	38.29	0.108	0.176	4.49	1.45	80.01	9.99	10.0	LS
C-1	6.94	1.40	47.09	0.136	0.190	3.89	2.56	77.55	14.97	7.50	LS
C-2	7.12	1.53	42.08	0.127	0.195	5.48	1.96	77.74	14.97	7.29	LS

sample	Inorganic Nutrients(mmolc/kg)						NO <sub>3</sub> -N (ppm)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (ppm)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S (ppm)	P (ppm)
	Na	Mg	K	Ca	Fe	Mn				
A-1	2.488	0.0263	0.7558	0.0417	<0.001	<0.001	74.09	131.73	11.33	21.33
A-2	2.483	0.0241	0.7545	0.0414	0.06	<0.001	72.73	129.29	15.24	39.75
A-3	2.331	0.0176	0.6083	0.0459	0.05	<0.001	73.48	42.86	10.33	24.37
C-1	3.578	0.0142	1.1128	0.0176	<0.001	<0.001	48.19	54.21	6.99	45.20
C-2	2.728	0.0154	0.7538	0.0253	0.08	<0.001	58.33	46.67	8.74	26.77

1) Bulk Density, 2) Mass Water Content, 3) Volume Water Content

4) Cation Exchangeable Capacity, 5) Organic Matter, 6) Loamy Sand



S, P1, T1, F1 (pressure, temperature, flow rate measuring sensor), L/V Separator (Liquid/Vapor Separator), O/W Separator (Oil/Water Separator)

Fig. 3 Layout of Hybrid Pilot Plant

또한, pH는 일반적으로 미생물이 잘 자랄 수 있는 환경인 pH 7~8의 범위이므로 생물학적 통풍법을 적용할 경우 이에 따른 제한요소는 없는 것으로 예상되었다. 파일럿 플랜트 주변의 오염 토양 토성분석결과를 Table 2에 나타내었다.

2.4 실험장치 및 실험방법

유류 오염토양 내 파일럿 플랜트는 토양증기 추출법과 생물학적통풍법의 혼합형 시스템으로 구성되어 있고, 토양증기추출 실험장치는 Fig. 3에서 진공펌프를 이용하여 진공으로 휘발성유기화합물(VOCs)을 추출할 수 있는 연결관인 추출정(extraction well), 수분과 가스를 분리하는 추출가스 분리기(air-water separator), 먼지제거를 위한 필터 등으로 구성되어 있다. 생물학적통풍 실험장치는 송풍기, 공기를 주입하는 연결관인 주입정(injection well)으로 구성되어 있다.

Fig. 4는 파일럿 플랜트 외부에 설치되어 있는 배관들로서 토양증기추출용 추출정 2기와 생물학적통풍용 공기 주입정 2기로 이루어져 있으며, 공기투과도 실험용 배관을 2, 4, 6m의 깊이로 설치하였다. 그리고, 주위에 7기의 감시정(monitoring well)을 설치하였다. 지표면에는 미국 EPA

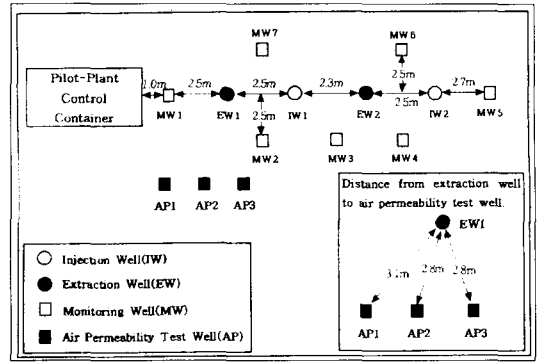


Fig. 4 Well Location on the Test Site

에서 추천하는 방법으로 추출/주입/감시정 주변에 각각의 성분을 덮어서 압력손실을 줄이고, 영향반경을 넓히기 위해 콘크리트 표면차단층을 설치했으며, 그 밑에는 시멘트 벤토나이트 그라우팅(30cm), 벤토나이트 차단재(100cm), 그리고 굵은 모래(2~8m)의 순서로 채워져 있다. 또한, 안쪽으로 약 2.0~7.7m까지 스크린을 설치하였다.

2.4.1 토양증기추출 실험

토양증기추출은 토양 중의 VOCs를 추출하는 실험이며, 이 실험은 오염지역의 토양 구성성분에 의해 가장 큰 영향을 받는다. 토양증기추출법에서 가장 중요한 인자인 공기투과도 실험을 통하여 일정한 압력을 가했을 경우에 어느 정도의 압력이 가장 적합한지 여부를 파악하는 기초실험을 실시하였다. 이 실험에서 추출정을 통하여 감압을 실시하고, Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 별도로 설치된 2, 4, 6m 깊이의 공기투과도 실험용 감시정의 압력 강하를 측정하여 나온 압력과 시간의 기울기 자료를 Hyper-ventilate ver. 2.01b 프로그램[4]에 입력하여 산출한 자료로 공기투과계수(k)를 구하였다. 이 프로그램에서 사용되는 공기투과계수(k)는 다음과 같다.

$$P(r, t) = \frac{Q}{4 \pi m(k/\mu)} \int_{\frac{r^2 \mu}{4kP_{atm} t}}^{\infty} \frac{e^{-X}}{X} dX \quad \text{---(식 1)}$$

$$P(r, t) = \frac{Q}{4 \pi m(k/\mu)} \left[ -0.5772 - \ln \left( \frac{r^2 \varepsilon \mu}{4kP_{Atm}t} \right) + \ln(t) \right] \quad \text{--- (식 2)}$$

$P'$ : gauge vacuum(g/cm-s<sup>2</sup>)

$\mu$ : air viscosity(0.018 centipoise)

$m$ : well screen interval

$\varepsilon$ : air-filled void fraction(%)

$r$ : radial distance from extraction well(cm)

$k$ : permeability of soil(cm<sup>2</sup>)

$Q$ : volumetric flow rate from extraction well(cm<sup>3</sup>/s)

$P_{Atm}$ : pressure(1atm=1.013×10<sup>6</sup> g/cm-s<sup>2</sup>)

$t$ : time

여기서,

$$A = \frac{Q}{4 \pi m(k/\mu)} \quad \text{---(식 3)}$$

$$B = \frac{Q}{4 \pi m(k/\mu)} \left[ -0.5772 - \ln \left( \frac{r^2 \varepsilon \mu}{4kP_{Atm}t} \right) \right] \quad \text{---(식 4)}$$

식 3은 유량  $Q$ 와 well screen interval  $m$ 을 알 경우 압력강하기울기  $A$ 를 이용하여 식 5와 같이 공기투과계수  $k$ 를 구한다.

$$k = \frac{Q \mu}{4 \pi A m} \quad \text{---(식 5)}$$

식 4는 유량  $Q$ 와 well screen interval  $m$ 을 모를 경우 압력강하기울기  $A$ 와 절편  $B$ 를 이용하여 식 6에서와 같이 공기투과계수  $k$ 를 구한다.

$$k = \frac{r^2 \varepsilon \mu}{4 P_{Atm}} \exp \left[ 0.5772 + \frac{B}{A} \right] \quad \text{---(식 6)}$$

토양증기추출 실험방법은 진공펌프의 속도 조절기를 이용하여 각각 1에서 7 m<sup>3</sup>/min으로 속도를 조절하면 Fig. 3의 추출정을 통하여 VOCs가 추출된다. 추출된 가스상 물질은 추출가스분리기에서 수분과 가스로 분리되며, 분리된 가스

는 필터를 거쳐 파일럿 시스템에서 대기 중으로 방출된다. VOCs의 측정위치는 추출가스분리기와 필터사이이며, 이 위치에서 시간에 따른 VOCs의 농도를 측정하여 컴퓨터로 on-line monitoring 되게 하였다.

## 2.4.2 생물학적통풍 실험

이 방법은 오염토양에 산소를 주입하여 호기성 미생물의 활성을 증진시켜 오염물질을 생분해하는 기술이다. 토양증기추출법의 공기투과도 실험과 같이 생물학적 통풍에서는 in-situ respiration 실험이 가장 중요한 인자이다. 호흡율은 각기 다른 속도로 일정기간(24~48시간) 동안 공기를 주입한 후 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 농도를 7개의 감시정을 통하여 2~4일 측정하였으며, 관측장비는 Fyrite Gas Analyzer CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Indicator (Bacharach사, 미국) 및 GV-100(Gastec사, 일본)을 이용하였다. 본 실험은 송풍기를 이용하여 속도 조절장치에서 속도를 조절하여 각각 1.1, 3.5, 5.5 m<sup>3</sup>/hr의 유량으로 공기 주입정에 공기를 주입한 후 시간에 따라 감시정에서 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>/VOCs의 농도변화를 GV-100을 사용하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 토양증기추출 실험결과

공기투과도 실험은 VOCs의 추출을 위한 지하의 공기흐름 정도를 파악할 수 있는 중요한 인자이다. 일반적으로 공기투과도가 클수록 VOCs의 제거효율이 높다고 알려져 있다. 본 실험에서는 U자 압력계를 이용하여 공기투과도 추출정(E1)에서 각각 3.1, 2.8, 그리고 2.8m 가량 떨어진 실험용 감시정 AP1(2m), AP2(4m), 그리고 AP3(6m)에서 측정한 압력변화 결과를 hyper ventilate 프로그램에 입력하여 공기투과계수( $k$ )를 구했다.

정 주위를 콘크리트로 포장하지 않고 6.5 m<sup>3</sup>/min의 유량으로 증기를 추출하였을 경우 공기투과계수 k는 AP1에서 1,738 darcy, AP2에서 3,137.8 darcy, 그리고 AP3에서 2,507.1 darcy였다. Fig. 5에서 각각 다른 깊이의 공기투과도 실험용 감시점에서 대체적으로 압력이 서서히 증가한 후 일정해지는 것을 볼 수 있다. 그러나, 2m 깊이의 배관에서 15~17분 경 추출정 주변 2m 깊이에서 높은 압력에 의해 수분, 미세한 토양 및 자갈 등이 몰려들었거나 압력을 이용한 공기 추출시 표면에서 손실이 발생한 것으로 판단된다.

정 주위에 콘크리트를 포장하지 않았을 때 표면에서의 손실을 보충해주기 위해 정 주위를 콘크리트로 포장하고 5.5 m<sup>3</sup>/min의 유량으로 증기를 추출했을 경우 공기투과계수 k는 AP1에서 1894.8 darcy, AP2에서 1197.7 darcy, 그리고 AP3에서 1985.3 darcy였다. 4m 깊이의 배관에서 공기투과계수가 상대적으로 낮은 것은 순간적으로 높은 압력에 의해 모래 및 자갈 계통의 물질들이 배관 흡 부분에 흡착된 것으로 판단된다. 정 주위를 콘크리트로 포장하고 3.5 m<sup>3</sup>/min의 유량으로 증기를 추출했을 경우 공기투과계수 k는 AP1에서 1,703 darcy, AP2에서 1,737 darcy, 그리고 AP3에서 1194 darcy로서 5.5 m<sup>3</sup>/min의 유량으로 증기를 추출하였을 때 보다 더 낮은 수치를 나타냈다.

정 주위를 콘크리트로 포장한 후 다양한 유량에서 공기투과도를 실험한 결과 3.5 m<sup>3</sup>/min 유량으로 증기를 추출했을 경우 1737~1194 darcy, 5.5 m<sup>3</sup>/min 유량으로 증기를 추출했을 경우 공기투과계수 k는 1985.3~1894.8 darcy 이었다. 또한, 두 유량으로 증기를 추출했을 경우를 비교해보면 압력은 5.5 m<sup>3</sup>/min의 유량에서 약간 높은 결과를 나타내었다. 추출유량에 따른 각 AP에서의 압력 값의 순위가 자기 다른 이유는 실험을 실시할 때의 제반 조건이 다르기 때문으로 판단된다. 실험결과에 의하면 공기투과계수 k가 1985~1194 darcy로서 높게 나왔으며, 이 결과를 전

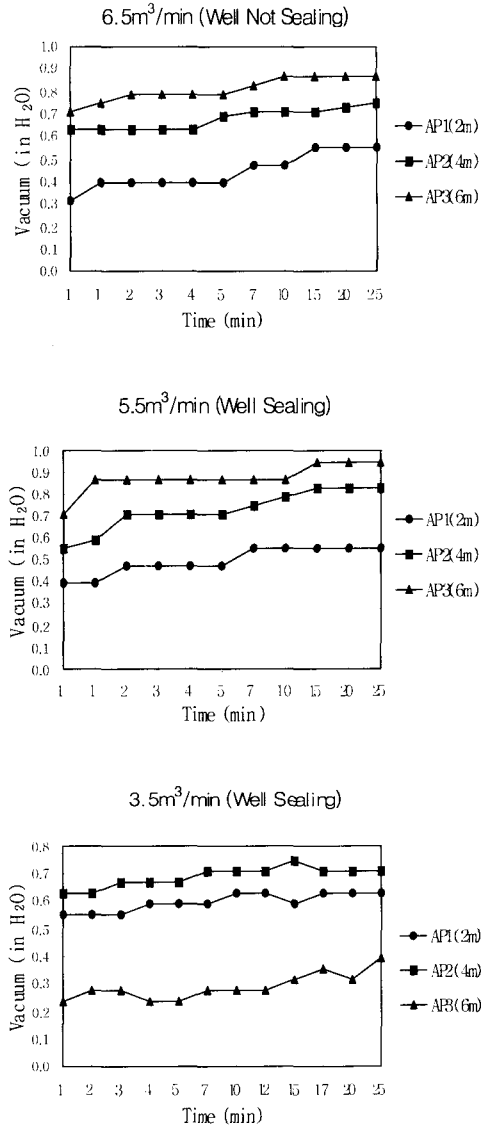


Fig. 5 Vacuum Variation at 3 Permeability Test Wells

제로 한다면 본 연구대상지역의 토양을 복원할 경우 토양증기추출법을 이용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

## 3.2 생물학적 통풍 실험결과

각 유량으로 공기를 주입하고 일정시간이 경과한 후 VOCs/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>의 농도변화를 살펴본 결과 평균유량 1.1 m<sup>3</sup>/hr로 주입했을 때 O<sub>2</sub>(%)의 변화량은 MW(monitring well)1에서 19.9~20.1%로 약 0.2%의 변화율이 있었으며, MW3에서는 19.5~20.1%로 약 0.6%의 변화율을 보였고, MW5에서는 19.5~20.0%로 약 0.5%의 변화율을 보였으므로 산소의 변화가 적었다. CO<sub>2</sub>(%)의 경우 최대의 변화율이 0.2% 정도로서 큰 변화율을 볼 수 없었다. 또한, VOCs(ppm)의 변화율도 Table 3에 나타낸 바와 같이 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 이 결과로 볼 때 1.1 m<sup>3</sup>/hr의 유량으로 공기 주입시 주입 정 2번에서 가장 거리가 먼 MW1에서는 산소의 양(%)이 19.0%로서 다른 MW과 비교할 때 낮게 나오므로 산소의 공급량이 충분하지 못하다는 것을 볼 수 있었다. 또한, 토양내 미생물의 활성이 있었다고 가정한다 해도 감시정에서의 VOCs/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>의 측정으로는 알 수 없었다. 시간에 따른 VOCs/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>의 변화율이 거의 없었으므로 미생물의 활성화가 이루어져 오염물질을 제거했다고 볼 수 없을 것으로 예측된다.

3.5 m<sup>3</sup>/hr의 유량으로 공기를 주입해준 결과, O<sub>2</sub>(%)의 경우 MW1에서 20~12.5%로서 약 7.5%의 감소율을 보였으며, MW3에서는 19.0~9.5%로 약 10%의 감소율을 나타내었고, MW5에서도 18%~8%로서 약 10%의 감소율을 보였다.

VOCs 또한 감소하는 것을 볼 수 있었는데 이것은 3.5 m<sup>3</sup>/hr의 유량으로 공기를 주입했을 경우 미생물이 성장하기에 적절한 충분한 산소의 양을 주입했었다는 것을 알 수 있었으며, 평균적으로 O<sub>2</sub>가 약 9%의 감소율과 CO<sub>2</sub>는 약 0.5%의 증가율을 보였으며, VOC 또한 미약하지만 감소하는 추세로 미루어 볼 때 산소의 공급으로 인해 미생물의 활성도가 높아짐에 따라 O<sub>2</sub>와 VOCs의 감소와 생분해에 의해 CO<sub>2</sub>가 증가했음 것으로 판단된다. 5.5 m<sup>3</sup>/hr의 유량으로 공기를 주입했을 경우, MW 1, 3, 5에서 O<sub>2</sub>(%)의 감소율

Table 3 VOCs Concentrations After Fresh Air Injection by Each Flow Rate

Location Flow rate	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	
1.1m <sup>3</sup> /hr	0.0 †	5.0	8.6	18.8	4.0	7.0	6.0	6.7
	5.0 †	5.0	8.6	18.8	4.0	7.0	6.0	6.7
	20.0 †	4.1	6.0	11.1	3.2	4.5	2.7	4.5
	24.0 †	2.0	4.7	4.1	1.3	6.0	2.4	2.3
3.5m <sup>3</sup> /hr	0.0	16.5	19.1	22.1	17.4	21.8	20.5	22.7
	5.0	13.8	16.6	18.4	14.1	18.1	17.9	18.9
	20.0	14.9	21.5	17.1	15.0	19.3	15.9	16.9
	24.0	14.9	21.5	17.1	15.0	19.3	15.9	16.9
5.5m <sup>3</sup> /hr	0.0	14.9	16.1	16.4	15.8	19.9	16.4	18.6
	5.0	13.5	17.9	16.2	15.3	17.9	16.8	19.2
	20.0	16.2	18.6	17.9	16.2	16.6	16.3	16.4
	24.0	16.2	18.6	17.9	16.2	16.6	16.3	16.4

† VOCs concentrations measured time after 48 hrs fresh air injection.

은 0.5%정도였으며, CO<sub>2</sub>는 약간의 증가율을 보였다. VOC 또한 약간 감소되지만 주입한 공기의 유량에 비해서는 생분해가 적게 되는 것으로 판단된다.

생물학적통풍 실험결과 3.5 m<sup>3</sup>/hr의 유량으로 공기를 주입했을 때 미생물의 활성도에 따른 생분해율이 가장 높았고, 5.5 m<sup>3</sup>/hr의 유량과 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않았으므로 본 연구 대상인 현장조건에서 적용할 수 있는 적정범위의 공기주입량은 3.5 m<sup>3</sup>/hr로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구를 통해서 철도토양의 주요 오염원과 오염지역을 확인할 수 있었다. 그리고, 혼합형 파일럿 플랜트를 설치하여 디젤로 오염된 철도 토양의 복원가능성과 파일럿 시스템의 운전조건을 파악하였다. 대상지역의 오염토양은 물리·화학적 특성분석결과 모래의 구성비가 높아 공기의 투과율이 좋아 보이며 이에 따라 토양증기추출의 적용이 효과적일 것으로 예상된다. 또한, pH는 미생물이 잘 자랄 수 있는 환경인 7~8의 범위이므로 생물학적통풍을 적용할 때 이에 따른 제한요인이 없을 것으로 판단된다. 공기투과

도 실험결과에 의하면 본 연구대상지역의 공기 투과계수(k)는 1985~1194 darcy로서 이 지역 오염토양의 복원에는 토양증기추출법의 적용이 바람직할 것으로 예상된다. 생물학적통풍실험에서는 실험결과 3.5 m<sup>3</sup>/hr의 유량으로 공기를 주입했을 때 미생물 활성도에 따른 생분해율이 가장 높았고, 5.5 m<sup>3</sup>/hr의 유량과 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않았으므로 본 연구대상인 현장조건에서 적용할 수 있는 적정범위의 공기주입량은 3.5 m<sup>3</sup>/hr로 판단된다. 연구결과를 종합하면 본 연구대상 지역과 같이 디젤로 오염된 철도토양에서의 혼합형 시스템을 이용한 오염토양 복원방법의 적용은 매우 바람직한 것으로 판단된다. 그리고, 철도토양은 오염원이 복합적이기 때문에 다양한 오염원과 광범위한 오염지역을 효과적으로 복원하기 위해서는 오염물질 및 오염유형에 따라 오염원을 분리하고, 스크리닝 테스트와 파일럿 테스트를 실시하여 적절한 복원기술을 선정하고, 복원 우선 순위를 설정하여 단계별로 복원을 실시해야 할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- [1] D.C. Downey, and M.G. Elliott, 1988, "Performance of Selected In Situ Soil Decontamination Technologies: An Air Force Perspective", *Environmental Progress* 9(3), pp. 169-173
- [2] T.K. Paul, and J.C. Edward, 1992, "Contaminated Soils; Diesel Fuel Contamination", Lewis Publishers
- [3] U.S. EPA., 1998, Federal Remediation Technologies Roundtable, Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide Version 2.0. <http://www.frtr.gov>
- [4] J.D. Colthart, and D.C. Byers, 1985, "A Practical Approach to the Design, Operation and Monitoring of Soil Venting System", John Wiley & Sons, Inc.
- [5] U.S. EPA., 1993, "Subsurface Characterization and Monitoring techniques": Volume I and II
- [6] G. Tchobanoglus, and S.A. Vigil, 1993, "Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues", McGraw-Hill Inc.
- [7] N. Wilson, 1995, "Soil and Groundwater Sampling", Lewis Publishers
- [8] C. Mattney, 1994, "Assessment and Remediation of Petroleum Contaminated Sites", Lewis Publishers
- [9] P.T. Kosteci, E.J. Calabrese, C.P.L. Barkan, 1993, Principles and Practices for Diesel Contaminated Soils Volume II, AEHS
- [10] 한국철도기술연구원, "철도 토양환경 개선에 관한 연구", 철도청, 1999