

가스상 물질의 농도변화를 이용한 오염토양 복원의 타당성 평가

박덕신 · 정우성 · 강순기* · 김무훈*

한국철도기술연구원 철도환경·재료연구팀
*삼성엔지니어링(주) 기술연구소

(2000년 1월 15일 접수, 2000년 4월 14일 채택)

The Effective Evaluation of Soil Remediation Technology by Gas Phase Concentration Trend

Duck-Shin Park · Woo-Sung Jung · Sun-Ki Kang* · Moo-Hoon Kim*

Korea Railroad Research Institute(KRRI)

**Samsung Engineering R&D Center*

ABSTRACT

The purpose of this study is to see the remediability and pilot system operating condition on diesel contaminated areas. Air permeability(k) and trend of gas phase ($O_2/CO_2/VOCs$) concentration to determine the remediation rate of the contaminated sites are very important. So we tested air permeability and trend of gas phase concentration. Throughout soil vapor extraction(SVE) and bioventing hybrid pilot test on different conditions, the range of air permeability(k) was 1985~1194 darcy. The tests result in soil vapor extraction and bioventing hybrid system was appropriate on this test sites, and the suitable injection air flow rate was $3.5m^3/hr$.

Key Words : Soil Vapor Extraction(SVE), Bioventing, Air Permeability, Biodegradation, Pilot Test, Hybrid System

요 약 문

디젤로 오염된 토양에서 토양증기추출(soil vapor extraction)과 생물학적통풍(bioventing)을 혼합한 파일럿 테스트를 실시하여 기술의 적용 가능성과 운전조건을 파악하였다. 본 연구에서는 오염된 지역의 복원율을 평가하는 중요한 인자인 공기투과도(air permeability)와 가스상 물질의 농도변화를 구하였다. 실험결과 공기투과도는 1985~1194 darcy로서 토양증기추출의 적용에 적합한 것으로 나타났다. 생물학적통풍 실험에서는 실험결과 3.5 m³/hr의 유량으로 공기를 주입했을 때 미생물 활성도에 따른 생분해율이 가장 높았으며, 연구결과 이 지역과 같이 디젤로 오염된 지역에서 혼합형 시스템을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

주제어 : 토양증기추출, 생물학적통풍, 공기투과계수, 생분해, 파일럿 테스트, 혼합형 시스템

1. 서 론

다양한 경로를 통해 토양으로 유입된 유류 성분은 토양의 미세 기공에 침착하여 오랜 기간동안 지하수를 오염시키는 원인이 된다.¹⁾ 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.

오염토양 및 지하수 정화기술에 있어서 몇 가지 선택방법이 있는데, 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.

오염토양 중에 존재하는 미생물의 활성도를 높이기 위하여 다양한 매체를 이용한 기술이 사용중이거나 개발중이다. Downey 등¹⁾은 불포화층(vadose zone)에서 영양염류와 산소를 함유한 용액으로 연료잔류물을 세척하여 오염물질을 생분해하려는 시도를 하였으나 용액의 흐름이 대부분 토양 중의 거대기공(macropore)에서 발생하여 오염물질의 제거가 효과적이지 못하였다. 또한, Wilson 등²⁾에 의한

연구에서도 토양을 통과하는 용액이 미세기공에 포집된 연료잔류물과의 접촉이 원활하지 못하여 생분해율이 낮은 것으로 나타났다. 이런 제한요인 때문에 토양증기추출법에서 휘발성 탄화수소의 제거에 공기를 접촉 매체로 이용하는 방법이 광범위하게 이용되고 있다. 공기는 물보다 점성이 낮기 때문에 용액보다 토양 미세기공에 포집된 연료잔류물과의 접촉이 원활하다. Wilson과 Ward³⁾는 물 흐름이 어렵거나 불가능한 불포화 토양까지 산소를 운반하는 데에는 공기가 물보다 천 배정도 효과적이라고 하였다. 최근의 현장 실험에서도 생물학적통풍법은 산소를 토양 중으로 공급하여 연료잔류물의 호기성 생분해를 자극하는데 효과적이라는 것을 보여준다.

본 연구는 디젤과 중금속으로 오염된 복합 오염토양 지역의 복원을 위하여 토양증기추출법과 생물학적통풍법의 혼합형 시스템을 이용하여 파일럿 테스트를 수행하고 토양증기추출법의 적용성 여부를 쉽게 판별할 수 있는 공기투과도(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 5년 전에 디젤의 유출이 발생하였으며, 토양형태는 지하

2.2. 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 particle size distribution(%)은 sand가 약 80.15%, silt가 11.97%, 그리고 clay는 7.95%로서 토양 종류는 loamy sand로 나타났다. pH는 7.21과 7.07, porosity는 약 46.72% 이었으며, 유기물은 1.91%로 조사되었다. Sand의 구성비가 80.15%로 높기 때문에 공기의 투과가 잘 되어 토양중기추출법의 적용이 효과적인 것으로 예상되었다. 또한, pH는 일반적으로 미생물이 잘 자랄 수 있는 환경인 pH 7~8의 범위이므로 생물학적통풍법을 적용할 경우 이에 따른 제한요소는 없는 것으로 예상되었다. 파일럿 플랜트 주변의 오염토양 토성분석결과를 Table 1에 나타내었다.

2.3. 실험장치 및 실험방법

유류 오염토양 내 파일럿 플랜트는 토양중기추출법과 생물학적통풍법의 hybrid 시스템으로 구성되

Fig. 1. Total petroleum hydrocarbon concentrations of test site.

7~8 m의 매립지로 깊이 6~7 m 부근에서 지하수가 흘러 오염이 확산되는 것으로 조사되었다. Fig. 1은 연구대상지역의 깊이별 TPH(total petroleum hydrocarbons)의 농도 분포도로서 유류저장탱크를 중심으로 디젤유가 확산되어 TPH가 2 m 깊이에서는 약 0~10,000 ppm, 4 m 깊이에서는 0~14,000 ppm, 그리고 6 m 깊이에서는 약 0~18,000 ppm으로 깊이에 따라 오염범위가 넓어지며, TPH의 농도도 높아지는 것을 볼 수 있다. 파일럿 플랜트의 위치는 Fig. 1에서 대략 가로축 400 m, 세로축 50 m에 위치해 있으며, 토양 샘플링은 Geoprobe 540 M (Geoprobe사, 미국) 시스템을 사용하였다.

Table 1. Physical and chemical characteristics of contaminated soils

Unit	pH	BD ¹⁾	Porosity	θ_{m^2}	θ_{v^3}	CEC ⁴⁾	OM ⁵⁾	Particle Size(%)			Texture
	(1:5)	g/cm ³	%					me/g	%	sand	
A-1	7.21	1.04	60.57	0.106	0.111	5.79	1.44	82.67	9.91	7.42	LS ⁶⁾
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

Unit	Inorganic Nutrients(mmolc/kg)						NO ₃ ⁻ -N (ppm)	NH ₄ ⁺ -N (ppm)	SO ₄ ²⁻ -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

어 있고, 토양증기추출 실험장치는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 진공펌프를 이용하여 진공으로 휘발성유기 화합물(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. 3은 파일럿 플랜트 외부에 설치되어 있는 배관들로서 토양증기추출용 추출정 2기와 생물학적통풍용 공기 주입정 2기로 이루어져 있으며, 공기투과도 실험용 배관을 2, 4, 6 m의 깊이로 설치하였다. 그리고, 주위에 7기의 감시정(monoring well)을 설치하였다. 지표면에는 미국 EPA에서 추천하는 방법으로 추출/주입/감시정 주변에 각각의 성분을 덮어서 압력손실을 줄이고, 영향반경을 넓히기 위해 surface sealing을 설치했으며, 그 밑에는 cement-bentonite grout(30 cm), bentonite seal(100 cm), 그리고 굵은 sand(2~8 m)의 순서로 채워져 있다. 또한, 안쪽으로 약 2.0~7.7 m까지 스크린을 설치하였다.

2.3.1. 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 나타난 바와 같이 별도로 설치된 2, 4, 6 m 깊이의 공기투과도 실험용 감시정의 압력 강하를 측정하여 나온 압력과 시간의 기울기 자료를 Hyper-ventilate ver. 2.01b 프로그램⁴⁾에 입력하여 산출한 자료로 공기투과계수(k)를 구하였다. 이 프로그램에서 사용되는 공기투과계수(k)는 다음과 같다.

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

여기서, $r^2 \epsilon \mu / 4kP_{Atm}t < 0.1$ 일 경우 다음 식을 이용한다.

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

Fig. 2. Pilot-plant system layout.

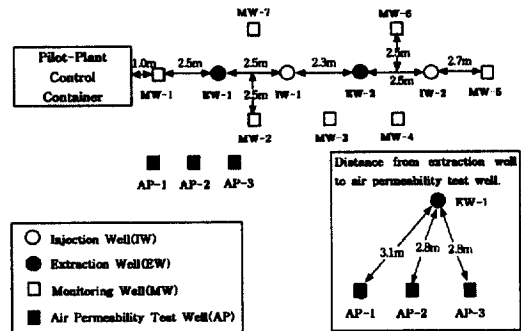


Fig. 3. Well location and distance on the test site.

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

- P' : gauge vacuum(g/cm · s²)
- m : stratum thickness
- r : radial distance from extraction well (cm)
- P_{Atm} : pressure(1atm=1.013×10⁶ g/cm-s²)
- Q : volumetric flow rate from extraction well(cm³/s)
- μ : air viscosity(0.018 centipoise)
- ϵ : air-filled void fraction(%)
- k : soil permeability(cm²)
- t : time

여기서,

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

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

식 (3)은 유량 Q와 well screen interval m을 알 경우 압력강하기율기 A를 이용하여 식 (5)와 같이 공기투과계수 k를 구한다.

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

식 (4)는 유량 Q와 well screen interval m을 모를 경우 압력강하기율기 A와 절편 B를 이용하여 식 (6)에서와 같이 공기투과계수 k를 구한다.

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

2.3.2. 토양증기추출 실험방법

진공펌프의 속도 조절기를 이용하여 각각 1에서 7 m³/min으로 속도를 조절하면 Fig. 2의 추출정을 통하여 VOCs가 추출된다. 추출된 가스상 물질은 추출가스분리기에서 수분과 가스로 분리되며, 분리된 가스는 필터를 거쳐 파일럿 시스템에서 대기 중으로 방출된다. VOCs의 측정위치는 추출가스분리기와 필터사이이며, 이 위치에서 시간에 따른 VOCs의 농도를 측정하여 컴퓨터로 on-line monitoring 되게 하였다.

2.3.3. 생물학적통풍 실험방법

이 방법은 오염토양에 산소를 주입하여 호기성 미생물의 활성을 증진시켜 오염물질을 생분해하는 기술이다. 토양증기추출법의 공기투과도 실험과 같이 생물학적통풍에서는 in-situ respiration 실험이 가장 중요한 인자이다. 이 인자를 통해 최상의 공기 주입 효율을 구하기 위해서는 최소 6개월에서 3년 정도의 기간이 소요된다. 호흡율은 각기 다른 속도로 일정기간(24~48시간) 동안 공기를 주입한 후 O₂/CO₂ 농도를 7개의 감시정을 통하여 2~4일 측

정하였으며, 관측장비는 Fyrite Gas Analyzer CO₂/O₂ 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 m³/hr의 유량으로 공기 주입정에 공기를 주입한 후 시간에 따라 감시정에서 O₂/CO₂/VOCs의 농도변화를 GV-100을 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 공기투과도 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(E-1)에서 각각 3.1, 2.8, 그리고 2.8 m 가량 떨어진 실험용 감시정 AP-1(2 m), AP-2(4 m), 그리고 AP-3(6 m)에서 측정한 압력변화 결과를 hyper ventilate 프로그램에 입력하여 공기투과계수(k)를 구했다.

정 주위를 콘크리트로 포장하지 않고 6.5 m³/min의 유량으로 증기를 추출하였을 경우 공기투과계수 k는 AP-1에서 1,738 darcy, AP-2에서 3,137.8 darcy, 그리고 AP-3에서 2,507.1 darcy였다. Fig. 4에서 각각 다른 깊이의 공기투과도 실험용 감시정에서 대체적으로 압력이 서서히 증가한 후 일정해지는 것을 볼 수 있다. 그러나, 2 m 깊이의 배관에서 15~17분경 추출정 주변 2 m 깊이에서 높은 압력에 의해 수분, 미세한 토양 및 자갈 등이 물려들었거나 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 m³/min의 유량으로 증기를 추출했을 경우 공기투과계수 k는 AP-1에서 1894.8 darcy, AP-2에서 1197.7 darcy, 그리고 AP-3에서 1985.3 darcy였다. 4 m 깊이의 배관에서 공기투과계수가 상대적으로 낮은 것은 순간적으로 높은 압력에 의해 모래 및 자갈 계통의 물질들이 배관 홈 부분에 흡착

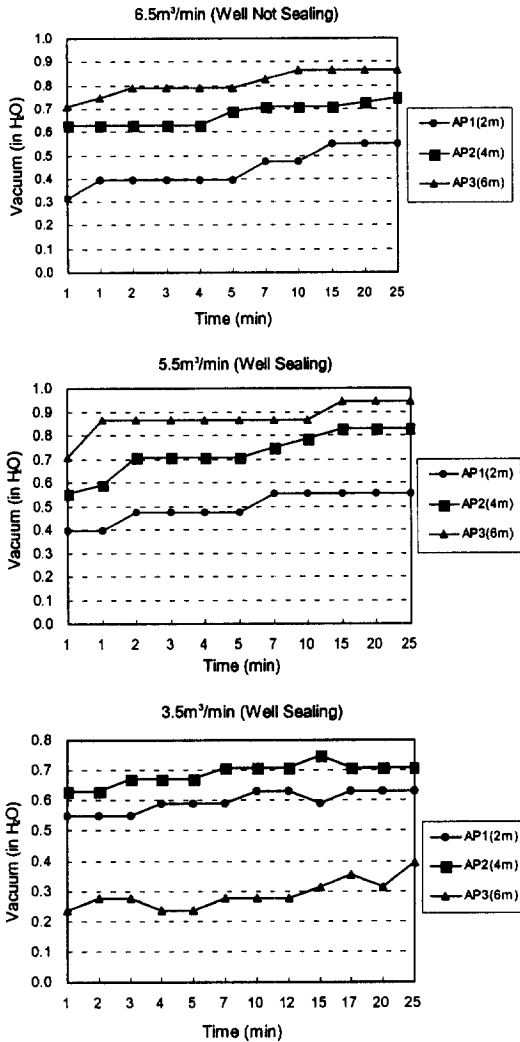


Fig. 4. Vacuum at 3 air permeability test wells.

된 것으로 판단된다. 정 주위를 콘크리트로 포장하고 3.5 m³/min의 유량으로 증기를 추출했을 경우 공기투과계수 k는 AP-1에서 1,703 darcy, AP-2에서 1,737 darcy, 그리고 AP-3에서 1194 darcy로서 5.5 m³/min의 유량으로 증기를 추출하였을 때 보다 더 낮은 수치를 나타냈다.

정 주위를 콘크리트로 포장한 후 다양한 유량에서 공기투과도를 실험한 결과 3.5 m³/min 유량으로 증기를 추출했을 경우 1737~1194 darcy, 5.5 m³/min 유량으로 증기를 추출했을 경우 공기투과계수 k는 1985.3~1894.8 darcy이었다. 또한, 두 유량으로 증기를 추출했을 경우를 비교해 보면 압력은 5.5 m³/min

의 유량에서 약간 높은 결과를 나타내었다. 그러나 주위 감시정에서의 VOCs/CO₂/O₂의 산화농도를 비교해 보면 3.5 m³/min에서의 추출이 가장 적절할 것으로 판단되었다. 따라서 본 실험결과에 의하면 공기투과계수 k가 1985~1194 darcy로서 높게 나왔으며, 이 결과를 전제로 한다면 본 연구대상지역의 토양을 복원할 경우 토양증기추출법을 이용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3.2. 생물학적통풍 실험결과

각 유량으로 공기를 주입하고 일정시간이 경과한 후 VOCs/CO₂/O₂의 농도변화를 살펴본 결과 평균 유량 1.1 m³/hr로 주입했을 때 O₂(%)의 변화량은 MW(monoring well)-1에서 19.9~20.1%로 약 0.2%의 변화율이 있었으며, MW-3에서는 19.5~20.1%로 약 0.6%로 약간의 변화율을 보였고, MW-5에서는 19.5~20.0%로 약 0.5%의 변화율을 보였으므로 산소의 변화가 적었다. CO₂(%)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 m³/hr의 유량으로 공기 주입시 주입정 2번에서 가장 거리가 먼 MW-1에서는 산소의 양이 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/CO₂/O₂의 측정으로는 알 수 없었다. 시간에 따른 VOCs/CO₂/O₂의 변화율이 거의 없었으므로 미생물의 활성화가 이루어져 오염물질을 제거했다고 볼 수 없을 것으로 예측된다.

3.5 m³/hr의 유량으로 공기를 주입해준 결과, O₂(%)의 경우 MW-1에서 20~12.5%로서 약 7.5%의 감소율을 보였으며, MW-3에서는 19.0~9.5%로 약 10%의 감소율을 나타내었고, MW-5에서도 18~8%로서 약 10%의 감소율을 보였다. VOCs 또한 감소하는 것을 볼 수 있었는데 이것은 3.5 m³/hr의 유량으로 공기를 주입했을 경우 미생물이 성장하기에 적정한 충분한 산소량을 주입했었다는 것을 알 수 있었으며, 평균적으로 O₂가 약 9%의 감소율과 CO₂는 약 0.5%의 증가율을 보였으며,

Table 2. Oxygen concentrations after 48 hrs fresh air injection (unit: %)

Flow rate		Location	MW #1	MW #2	MW #3	MW #4	MW #5	MW #6	MW #7
1.1m ³ /hr	0.0†	19.9	19.8	19.9	20.0	19.8	20.1	20.0	
	1.0†	20.1	20.1	20.0	20.0	19.9	20.1	20.0	
	5.0†	19.7	19.7	19.7	19.8	19.6	19.8	19.7	
	17.0†	19.6	19.6	19.5	19.7	19.5	19.8	19.6	
	20.0†	20.0	19.9	20.1	20.1	19.9	20.2	20.2	
	24.0†	20.1	20.1	20.0	20.1	20.0	20.3	20.3	
3.5m ³ /hr	0.0	20.0	19.5	19.0	18.5	15.0	16.0	17.5	
	1.0	20.0	19.5	19.0	18.5	15.0	16.0	17.5	
	5.0	20.0	19.5	19.0	18.5	15.0	16.0	17.5	
	17.0	19.0	18.5	18.0	18.5	18.0	17.0	17.0	
	20.0	17.0	18.0	17.0	17.0	17.5	13.0	13.0	
	24.0	12.5	10.5	9.5	8.5	8.0	8.0	7.5	
5.5m ³ /hr	0.0	20.0	20.0	19.5	20.0	20.0	19.0	19.0	
	1.0	20.0	20.0	19.5	20.0	20.0	19.0	19.0	
	5.0	18.8	17.0	17.0	17.0	15.9	14.7	14.1	
	17.0	18.8	17.0	17.0	17.0	15.9	14.7	14.1	
	20.0	18.8	17.0	17.0	17.0	15.9	14.7	14.1	
	24.0	19.5	19.5	19.5	19.0	19.0	19.0	19.0	

† Oxygen concentrations measured time after 48 hrs fresh air injection

Table 3. VOCs concentrations after 48 hrs fresh air injection (unit : ppm)

Flow rate		Location	MW #1	MW #2	MW #3	MW #4	MW #5	MW #6	MW #7
1.1m ³ /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 ³ /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 ³ /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

VOC 또한 미약하지만 감소하는 추세로 미루어 볼 때 산소의 공급으로 인해 미생물의 활성도가 높아짐에 따라 O₂와 VOCs의 감소와 생분해에 의해 CO₂가 증가했을 것으로 판단된다.

5.5 m³/hr의 유량으로 공기를 주입했을 경우,

MW 1, 3, 5에서 O₂(%)의 감소율은 0.5% 정도였으며, CO₂는 약간의 증가율을 보였다. VOC 또한 약간 감소되지만 주입한 공기의 유량에 비해서는 생분해가 적게 되는 것으로 판단된다.

생물학적통풍 실험결과 3.5 m³/hr의 유량으로 공

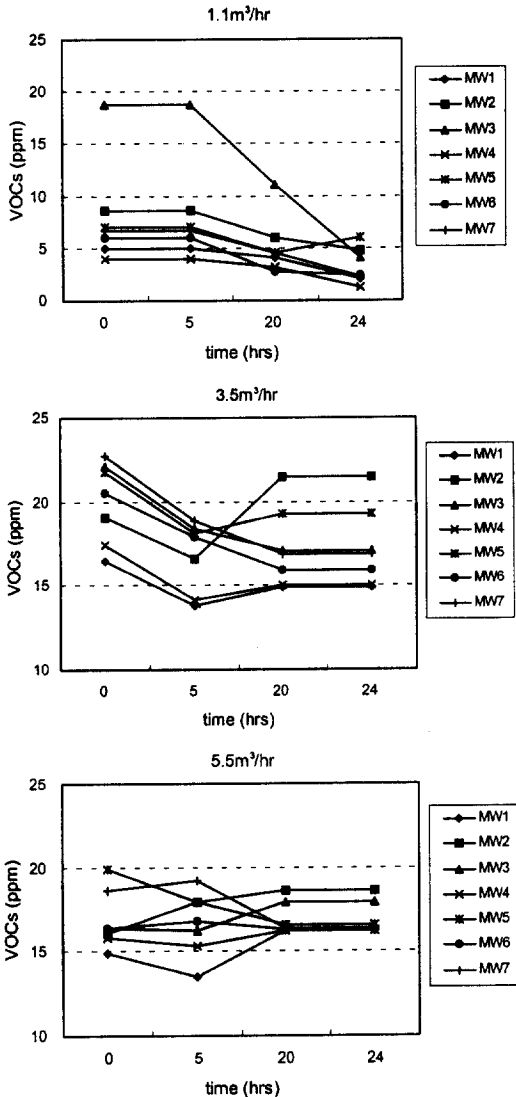


Fig. 5. VOCs concentrations after fresh air injection by each flow rate.

기를 주입했을 때 미생물의 활성도에 따른 생분해율이 가장 높았고, 5.5 m³/hr의 유량과 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않았으므로 본 연구대상인 현장조건에서 적용할 수 있는 적정범위의 공기주입량은 3.5 m³/hr로 판단된다.

4. 결 론

디젤로 오염된 토양에 토양증기추출과 생물학적

통풍을 혼합한 파일럿 플랜트를 설치하여 토양증기추출 실험과 생물학적통풍 실험을 실시하였다. 이 지역 오염토양의 물리·화학적 특성은 분석결과 particle size distribution(%)은 대략 sand 80.15%, silt 11.97%, clay 7.95%로 나타났으며, pH는 중성이었다. Porosity는 46.72%, 유기물 함량은 1.91%이었으며, sand의 구성비가 높아 공기의 투과율이 좋으며 이에 따라 토양증기추출의 적용이 효과적인 것으로 예상된다. 또한, pH는 각각 7.21과 7.07로서 일반적으로 미생물이 잘 자랄 수 있는 환경인 pH 7~8의 범위이므로 생물학적통풍을 적용할 때 이에 따른 제한요인이 없을 것으로 판단된다.

공기투과도 실험결과에 의하면 본 연구대상지역의 공기투과계수(k)는 1985~1194 darcy로서 이 지역 오염토양의 복원에는 토양증기추출법의 적용이 바람직할 것으로 나타났다. 생물학적통풍 실험에서는 실험결과 3.5 m³/hr의 유량으로 공기를 주입했을 때 미생물 활성도에 따른 생분해율이 가장 높았고, 5.5 m³/hr의 유량과 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않았으므로 본 연구대상인 현장조건에서 적용할 수 있는 적정범위의 공기주입량은 3.5 m³/hr로 판단된다. 연구결과를 종합하면 본 연구대상 지역과 같이 디젤로 오염된 지역에서 혼합형 시스템을 이용한 오염 토양복원방법의 적용은 매우 바람직한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- Downey, D. C. and Elliott, M. G., "Performance of Selected In Situ Soil Decontamination Technologies: An Air Force Perspective," *Environmental Progress*, 9(3), 169~173(1988).
- Wilson, J. S. and Conrad, S. H., "Is Physical Displacement of Residual Hydrocarbons a Realistic Possibility in Aquifer Restoration?," in *Proceedings of NWWA/API Conference on Petroleum Hydrocarbons in Ground Water*, Houston, TX(1984).

3. Wilson, J. T. and Ward, C. H., "Opportunities for In-Situ Remediation of Aquifers Contaminated with Petroleum Hydrocarbons," *J. Ind. Microbiol.*, **27**, 109~116 (1987).
4. Colthart, J. D. and Byers, D. C., A Practical Approach to the Design, Operation and Monitoring of Soil Venting System, John Wiley & Sons, Inc.(1985).
5. Lee, M. D., Thomas, J. M., Borden, R. C., Bedient, P. B., Ward, C. H., and Wilson, J. T., "Bioremediation of Aquifers Contaminated with Organic Compounds," *CRC Crit. Rev. Environ. Control*, **18**, 29(1988).
6. Hinchee, R. E., Downey, D. C., and Coleman, E. J., "Enhanced Bioremediation, Soil Venting and Ground Water Extraction: A Cost Effectiveness and Feasibility Comparison," in *Proceedings of NWWA/API Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water*, Houston, TX (1987).
7. Downey, D. C., Hinchee, R. E., Westray, M., and Slaughter, J., "Combined Biological and Physical Treatment of a Jet Fuel Contaminated Aquifer," in *Proceedings of NWWA/API Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground water*, Houston, TX, **2**, pp. 627~645(1988).
8. Hinchee, R. E. and Miller, R. N., "Bioremediation for In-Situ Remediation of Jet Fuel," in *Proceedings of Air Force Environmental Restoration Technology Symposium*, San Antonio, TX(1991).
9. Miller, R. N., Vogel, C. M., Hinchee, R. E., Dupont, R. R., and Downey, D. C., "A Field Scale Investigation of Enhanced Petroleum Hydrocarbon Biodegradation in the Vadose Zone-Tyndall AFB FL," in *Proceedings of the NWWA/API Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground water*, Houston, TX, **4**(39), 351(1990).
10. Hinchee, R. E. and Arthur, M. F., "Bench-scale Studies on the Soil Aeration Process for Bioremediation of Petroleum Contaminated Soils," *J. Appl. Biochem:Biotech.*, **28/29**, 901~906(1990).
11. Srivastava, V. J., "Bioremediation of Former Manufactured Gas Plant Soils", *Proceedings of 44th Industrial Waste Conference*, Purdue University(1989).
12. Johnson, P. C., Kemblowski, M. W., and Colthart, J. D., "Quantitative Analysis for the Cleanup of Hydrocarbon-Contaminated Soils by In-Situ Soil Venting," *Ground Water*, **28**(3)(1990).
13. DePaoli, D. W., In Situ Soil Venting Demonstration Project-Hill AFB, Draft Report to Air Force Engineering and Services Laboratory(1990).