

SVE 및 생물학적 공법을 이용한 TPH 오염토양처리에 관한 연구

김 정 권

동의대학교 환경공학과

(2007년 10월 16일 접수; 2007년 11월 1일 채택)

The Study on the Remediation of Contaminated Soil as TPH using SVE and Bioremediation

Jung-Kwon Kim

Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

(Manuscript received 16 October, 2007; accepted 1 November, 2007)

Abstract

This study examined the contaminated soils with an indicator of TPH using SVE (Soil Vapor Extraction) and biological treatments. Their results are as follows.

Water content in the polluted soils slowly decreased from 15% during the initial experimental condition to 10% during the final condition. Purification of polluted soils by Bioventing system is likely to hinder the microbial activity due to decrease of water content. Removal rate of TPH in the upper reaction chamber was a half of initial removal rate at the 25th day of the experiment. The removal rate in the lower reaction chamber was 45% with concentration of 995.4 mg/kg. When the Bioventing is used the removal rate at the 14th day of the experiment was 53%, showing 7 day shortenting. Since the Bioventing method control the microbial activity due to dewatering of the polluted soil, SVE method is likely to be preferable to remove in-situ TPH. The reactor that included microbes and nutrients showed somewhat higher removal rate of TPH than the reactor that included nutrients only during experimental period. In general, the concentration showed two times peaks and then decreased, followed by slight variation of the concentration in low concentration levels. Hence, in contrast to SVE treatment, the biological treatment tend to show continuous repetitive peaks of concentration followed by concentration decrease.

Key Words : Contaminated soil, SVE, Bioremediation, TPH, Nutrients

1. 서 론

과거 환경오염의 범위가 대부분 수질, 대기 및 폐기물 등의 부분에 국한된 부분이 있었으나, 최근에

들어와서는 상당범위의 부분에서 환경오염 또는 환경문제가 제기되고 있는 실정이다. 특히, 토양의 경우는 매립된 폐기물 또는 주변의 유류 및 급속류 등의 물질에 의해 오랫동안 오염되어져 방치되어 있는 부분이 상당히 많다. 예를 들면 최근 문제가 되고 있는 군부대를 비롯한 불량매립지, 공장부지, 철도와 관련된 부지, 공장부지 등에서 토양오염과 더불어 지하수오염까지 진행되고 있는 형태이다^{1~3)}.

Corresponding Author : Jung-Kwon Kim, Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

Phone: +82-51-890-2077

E-mail: jungkkim@dongeui.ac.kr

본 연구에서는 驛舍의 歷史가 100여년에 가까운 B시 B역의 역사주변을 대상으로 토양복원을 진행하였다. 역사의 경우 차량의 정차 및 급유 시 발생할 수 있는 유류에 의해 오염이 진행된 것으로 확인되어 역사내의 토양복원이 실시하게 된 것으로, 토양복원의 경우는 물리, 화학적 그리고 생물학적 복원 등으로 대별될 수 있다^{4~6)}.

따라서, 본 연구에서는 B시의 B역에서 발생한 유류오염토를 실험실 규모에서 In-Situ 방법을 이용하여 물리적 처리방법의 일종인 SVE(Soil Vapor Extraction)공법으로 시간, 오염토 위치에 따른 TPH 처리효율의 검토 및 유사공법인 Bioventing처리와도 비교 검토^{7~9)} 하였으며, 또한 비교적 고농도의 유류 오염토를 생물학적 분해를 이용하여 현장에서 오염토 복원시 pH, 영양물질 및 미생물주입 여부에 따른 저감효율 비교를 행하였다. 이 결과를 바탕으로 현장에서 유류오염 토양을 In-Situ 형태에서 물리적 및 생물학적공법으로 정확할 경우의 필요한 설계인자를 제공함이 이 연구의 배경 및 목적이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상시료

2.1.1. SVE 공법

본 연구의 SEV 공법에서 사용한 대상시료는 외형적으로 상당히 경유계통의 냄새가 감지될 정도로 심하게 오염된 토양을 이용하였다. 이는 오염된 지역의 대부분이 진흙형태의 토양으로 되어있다.

따라서, 이러한 시료를 SVE공법에서 중요한 공기의 투과 및 진공흡입에 필요한 공극의 확보를 위해 실험실에서 풍건시켜 적당히 함수율(15%)로 낮추어서 우선 1.18 mm의 체로서 걸러서 걸러진 부분과 9.5 mm의 체로써 재차 걸러 이 두 형태를 2:1 형태로 혼합하여 시료로서 사용하였다.

Table 1은 본 연구에서 이용한 시료(풍건 완료 후)의 성상 분석 결과를 나타낸 것이다. 표에 나타난 것처럼 풍건 완료된 시료의 TPH는 약 1,689 mg/kg를 나타내어 80% 정도의 함수율을 가지던 시료를 약 15%로 낮추는 과정에서 상당히 낮게 나타났으나, 실제 현장에서의 원 시료는 이보다 높을 것으로 추정된다. 함수율은 15%정도로 맞추어 실시하였고, pH의 경우는 8.2를 나타내었다.

Table 1. Analysis results of contaminated soil(SVE)

	pH	Water content(%)	TPH (mg/kg)	BTEX (mg/kg)
Sample	8.2	15	1,689	15.4

2.1.2. 생물학적 공법

생물학적 공법에 이용한 시료는 B역사 오염토층 3부분(상층 A, 중층 B 및 하층 C층으로 명명)을 채취하여 원 시료로 이용하였다.

그러나, B층의 오염이 A 및 C층보다 상대적으로 심하여 본 연구에서는 A층과 B층을 그리고 C층과 D층을 각각 부피비로 50:50으로 혼합하여 하나의 시료를 합성하였다. 실험에 이용한 혼합시료 2종류를 균일을 유지하기 위해서 10 mesh의 체를 이용하여 거친 후 반응조 A와 B 및 C와 D에 각각 주입시켰으나, Table 2에 나타난 것처럼 반응조A와 B는 동일한 혼합시료를 이용하였으나, TPH 농도는 각각 1,786 mg/kg과 3,514 mg/kg을 각각 나타내어 반응조 B가 약 2배 정도 높게 나타났다. 역시 동일한 혼합시료인 반응조 C 및 D의 경우도 각각 5,111 mg/kg과 8,222 mg/kg을 나타내어 다소의 농도 차이를 나타내었다.

2.2. 실험장치 및 방법

2.2.1. SVE 공법

Fig. 1은 SVE 공법에서 이용한 실험장치를 나타낸 것으로 가로, 세로 및 높이가 각 500×300×500 mm 인 실험장치로, 총 0.375 m³ 용량의 시료를 충전시켜 실험을 진행하였고, 1대의 용량이 3.68 l/min(1대)인 2대의 공기주입펌프를 이용하여 하나의 펌프에 “ㄷ”자형의 파이프를 오염토층 내부에 삽입하여 공기를 불어 넣었다.

또한, 반응조 중간 부분에 오염토층 내부에서 발생하는 휘발성 배기가스를 파이프로서 흡입하여 의

Table 2. Analysis results of contaminated soil (Bioremediation)

	R A	R B	R C	R D
*C. Soil	C.Soil A+B	C.Soil A+B	C.Soil B+C	C.Soil B+C
TPH (mg/kg)	1,786	3,514	5,111	8,222

* C.Soil : Contaminated Soil

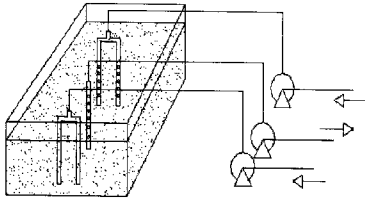


Fig. 1. Experimental Apparatus(SVE).

부로 배출시키기 위하여 용량 6.08 ℓ/min인 흡입펌프를 설치하였다. 이때 파이프는 총 길이 400 mm의 내경 13 mm이며 구멍은 40 mm 간격으로 7개를 내어 사용하였다. 중앙의 흡입펌프의 경우는 총 9개의 구멍으로 흡입시켰다. 또한 배가스가 밖으로 방출되지 않고, 흡입펌프를 통하여 외부로 배출될 수 있도록 반응조의 토양표면을 비닐 등으로 덮었다. 실험방법으로는 반응조 좌측과 우측에 삽입한 공기 주입 펌프로부터 공기를 주입시키면서 중앙의 흡입 펌프로서 배가스를 연속적으로 흡입하는 형태를 취하였으며, 운전시간은 펌프의 성능 및 가동한계(가열로 인한 고장) 등을 고려하여 아침 9시부터 저녁 11시까지 하루 14시간 연속으로 운전하였다. 또한, 흡입되어지는 배가스 중의 탄화수소물질 등을 측정하는 형태로 진행하였다.

2.2.2. 생물학적 공법

생물학적 공법에서는 Photo 1 및 Table 3에 나타난 것과 같이 반응조에 A층 및 B층 오염토 혼합토를 반응조 A 및 B에 그리고 B층 및 C층의 혼합토를 반응조 C와 D에 각각 충전시켰다. 그리고 반응조 RA 및 RC는 영양염류만 주입하고 반응조 RB 및 RD에는 영양염류와 미생물을 동등하게 1회 주입시 주사기를 이용하여 오염토 기준 1.8 ℓ/톤으로 주입하였다. 반응조는 가로, 세로 및 높이가 각각 25.5 cm, 10 cm 및 9 cm인 폴리 아크릴를 이용하였다. 그리고 반응조 중앙을 기점으로 1/3지점 및 2/3되는 지점에 지름 6 mm 정도의 다기공의 주입공을 각각 설치하였으며 또한, 토양중 일정한 온도를 유지하기 위하여 온도계를 설치하였다.

따라서, 반응조 온도를 일정온도(15℃)로 유지하기 위하여 수욕조를 이용하였다.

시료는 가능한 균일의 오염토양을 채취하기 위하여 채로 걸러 이용하였으며, 충전량은 반응조 A, B,

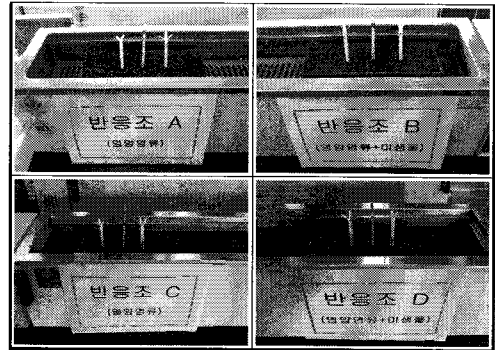


Photo 1. Experimental Apparatus(Bioremediation).

Table 3. Experimental conditions

	R A	R B	R C	R D
C. Soil	C. Soil A+B	C. Soil A+B	C. Soil B+C	C. Soil B+C
Temp.	15℃	15℃	15℃	15℃
Feeding condition.	Nutrient	Nutrient+ Microbes	Nutrient	Nutrient+ Microbes
Sampling Time	2-3/week	2-3/week	2-3/week	2-3/week
Packing volume	2.7Kg	2.7Kg	2.5Kg	2.5Kg

C 및 D 별 각각 2.7 kg, 2.7 kg, 2.5 kg 및 2.5 kg이다. 본 연구에서 사용한 미생물은 *Acinebacter junii* 등으로 균수는 1×10⁹ CFU/g인 재래토종 유류분해미생물을 이용하였다. 영양물질은 glucose를 비롯한 9개 물질을 이용하였다.

2.3. 시료채취

2.3.1. SVE 공법

분석을 위한 시료채취는 공기 주입에 따른 지점별 제거 효율을 검토하기 위하여 Fig. 1의 반응조의 중앙부분의 1/3지점 및 2/3지점 2곳을 시료채취지점으로 하였다. 시료채취는 매일 1회로서 1/3지점(상부) 및 2/3지점(하부) 2곳의 오염토 15g정도 채취하였으며, 흡입펌프로부터는 배가스 측정을 위하여 매일 1회씩 검지관으로 고급 및 저급탄화수소 측정을 하였다.

2.3.2. 생물학적 공법

시료샘플링의 경우 운전 시작일로부터 실험 15일

째까지는 2일에 한번(미생물 및 영양염류 주입 다음 날)씩 그리고 이후부터 실험 종료 시까지는 주 2회 샘플링함을 원칙으로 하였고, 샘플링의 경우는 미생물 및 영양물질을 주입하는 주입공 주변을 중심으로 실시하였다.

2.4. 분석항목 및 방법

분석항목으로서는 pH, 함수율 및 TPH는 토양오염공정시험법¹⁰⁾에 준하였고, 배가스 중의 고급 및 저급탄화수소는 휴대용 가스검출기 등을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. SVE 공법

3.1.1. pH 변화

Fig. 2는 실험기간동안 토양 중의 pH변화를 나타낸 그림이다. 그림에 나타낸 것처럼 시료의 pH가 약 8.2를 나타내었듯이 실험초기엔 약 8.2를 나타내었으나, 실험 3일째부터 7.8정도를 나타내어 전 실험기간동안 최고 8.0에서 7.7정도를 나타내어 대부분 중성을 나타내었다.

3.1.2. 함수율 변화

Fig. 3는 실험기간동안의 오염토양의 함수율 변화를 나타낸 것이다. 함수율은 공극에도 영향을 미치지만 실제 SVE공법에서는 무엇보다도 중요한 인자 중에 하나이다. 현장에서 채취한 토양의 경우 약 80%의 함수율을 보유하고 있어 실제 반응조에서 펌프를 통한 공기주입이 불가능하였기에 하루정도 강제풍건을 시킨 후 함수율을 15% 정도로 만들어 시료로서 이용하였으므로 실제 실험초기에 약 15% 전

후의 함수율을 나타내었다.

그러나, 시간의 경과와 더불어 공기주입량 및 시간이 길어짐으로서 건조가 서서히 진행되어 실험 19일째 정도부터는 약 12% 정도로 낮아져 실험완료지점인 30일정도 에서는 약 10% 전후를 나타내어 약 33% 정도 함수율이 감소되었다. 따라서, Bioventing¹¹⁾으로서 오염토를 정화할 경우 함수율 감소에 따른 미생물 활동의 저해가 일어날 수 있을 것으로 예상된다.

3.1.3. TPH농도 변화

Fig. 4, 5 및 6은 TPH농도 변화를 나타낸 것으로, 우선 Fig. 4는 반응조 상부(1/3지점)의 토양을 채취하여 분석한 결과이다. 실험 2일째 1,686.2 mg/kg을 나타내어 이후 감소하는 경향을 보였으나, 실험 4일째부터 증가하여 실험 7일째 최고 농도인 1,943.3 mg/kg를 보였다. 이후 소폭의 증가와 감소를 반복하였으나, 전체적으로는 감소하는 경향을 나타내었다.

최고의 농도를 보인 실험 7일째를 기점으로 약 10일후엔 1,482.9 mg/kg을 나타내어 약 24% 제거율을 보였고 20일후인 실험 27일째는 1,031.2 mg/kg으로 약 47% 제거율을 보였으며, 실험 완료지점에서는 약 50% 전후를 나타내었다.

따라서, 상부에서 TPH제거 경향은 최고농도 이후 약 25일 전후에서 절반정도의 제거율을 가져왔다.

Fig. 5는 반응조 하부(2/3지점)에서의 오염토의 TPH농도 변화를 나타낸 그림이다. 상부와 유사하게 초기에는 소폭의 증감을 보이다가, 실험 8일째 1,811 mg/kg으로서 최고의 농도를 나타내었다. 최

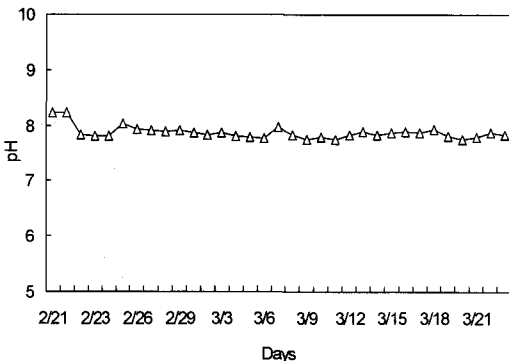


Fig. 2. Variation of pH.

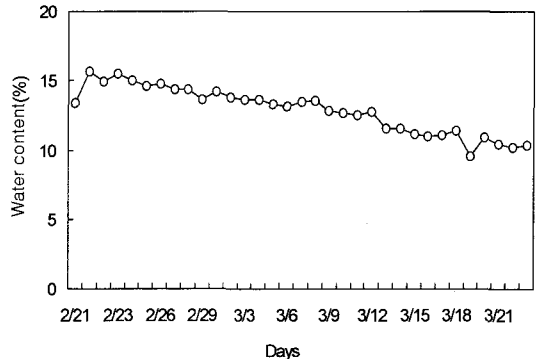


Fig. 3. Variation of water content.

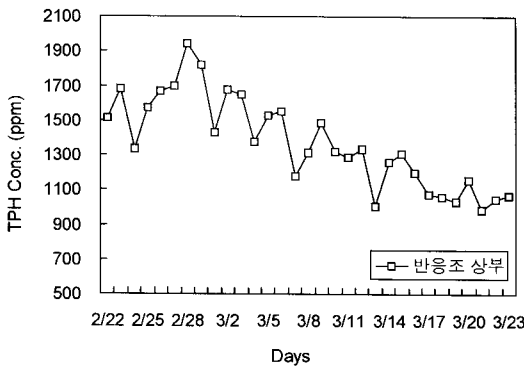


Fig. 4. Variation of TPH concentration at the upper part of Reactor.

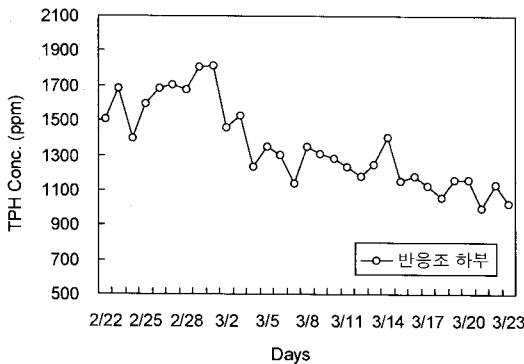


Fig. 5. Variation of TPH concentration at the lower part of Reactor.

고농도의 10일후인 실험 18일째 1,235.9 mg/kg을 나타내어 약 32%를 보였으며, 20일째에는 995.4 mg/kg을 나타내어 약 45% 제거율을 나타내었다. 오의 논문에서 약 1,588 mg/kg의 TPH를 Bioventing로서 제거할 경우 실험 약 14일째 약 52% 제거율을 나타내었으나¹²⁾, 이후엔 감소효율이 없었던 결과와 공법상에서 비교한다면 50%까지 제거되는데 걸리는 시간은 약 7일정도 차이가 생기나 이후의 농도변화를 예측할 경우 Bioventing공법은 건조에 따른 미생물활동의 제어가 생기므로 SVE공법을 이용한 현장에서의 TPH제거는 충분히 가능성이 있을 것으로 생각된다.

Fig. 6은 반응조 상부 및 하부의 TPH농도 변화를 동시에 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 상부 및 하부가 유사한 형태로 감소되고 있는 것을 보였지만, 실험 중반까지는 하부부분이 빨리 감소되

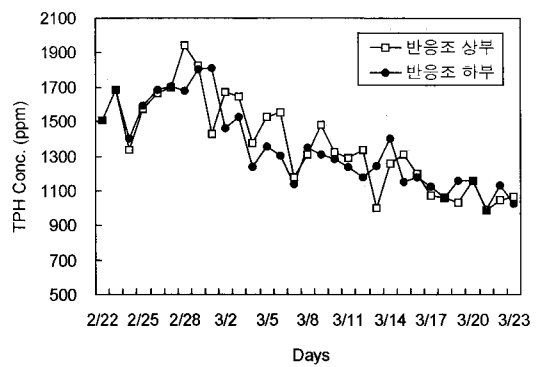


Fig. 6. Variation of TPH concentration at the upper and lower part of Reactor.

고 있는 경향을 보였으나, 중반 이후부터는 거의 유사하게 진행되고 있음을 알 수 있었다. 따라서, 오염토 자체가 불균일질이므로 상부와 하부를 비교하기는 다소 무리는 있지만 본 연구에서는 원시료를 풍건 후 체로서 걸러 충분히 혼합시켰기 때문에 그다지 무리는 없을 것으로 생각되어 SVE공법에 의한 TPH제거는 중반까지는 하부가 상부보다 다소 빠르게 감소되었지만 전체적으로 생각한다면 그다지 차이는 없는 것으로 생각되어진다. 그리고, 전체적인 농도변화가 큰 변화폭 없이 시간의 경과에 따라 점차 감소하는 패턴을 보인 것은 앞서 서술했듯이 시료를 충분히 혼합시켜 주입시킨 결과로 생각되어진다.

본 연구에서는 반응조에 연결된 공기주입 및 흡입펌프를 24시간이 아닌 14시간/일 로서 운전했기 때문에 실제 현장에서 운전시간 및 주입, 흡입용량의 운전조건을 달리하여 구체적인 인자를 검토한다면, 본 연구의 결과보다 다소 높은 효율을 가져올 것으로 생각된다.

3.1.4. 탄화수소농도 변화

Fig. 7 및 8은 배가스 중의 탄화수소농도를 나타낸 것이다. 인체에 대한 영향으로서는 농도가 낮은 탄화수소는 호흡기 계통에 자극을 줄 정도이나 심하면 점막이나 눈을 자극하게 된다.

본 연구에서는 이러한 물질을 저급 및 고급탄화수소 그리고 총 탄화수소(THC)로 분류하여 결과를 나타내었다. 우선 Fig. 7은 저급탄화수소의 농도 변화를 나타낸 것으로 실험초기(개시 후 2일 경과)에는 1,000 ppm을 넘는 경우도 있었으나, 이후 그림에

나타난 것처럼 실험 4일째에 200 ppm 정도로 낮아져 실험 9일째엔 약 90 ppm으로 낮아지는 등 이후 감소 경향을 나타내어 실험종료인 실험30일째 전후에서는 30 ppm 정도를 나타내었다.

고급탄화수소의 경우는 Fig. 8에 나타낸 것처럼 실험초기에는 100 ppm 정도가 시간의 경과에 따라 서서히 감소하여 실험 종료 시에는 약 10 ppm 전후를 나타내어 Fig. 7의 저급과 유사한 경향을 나타내었다. 본 실험의 경우는 고급탄화수소보다 저급탄화수소계통이 2배 이상 높게 나타남을 알 수 있었다. 실험초기에는 THC(고급 및 저급탄화수소합) 농도가 수천 ppm을 나타내는 등 높았으나, 실험 4일째는 약 300 ppm으로 낮아져 실험 11일째 비로소 100 ppm 정도를 보였다. 그 후 시간의 경과와 더불어 감소하기 시작하여 실험종료 시에 약 50 ppm 정도를 나타내었다. 그러나, 배가스 배출이 흡입파이프로

포집되어 흡입펌프로서 제거되는 부분 이외에 일반적으로 반응조의 토양공극을 통하여 대기 중으로 방출되는 부분이 많을 것으로 생각한다면 실제로는 이보다 높고 많은 양이 배출되고 있는 것으로 생각할 수 있다. 환경부에서 고시하는 기준¹³⁾에서는 도장 및 건조시설에서 배출량이 10,000 m³/hr 이상일 경우는 총 탄화수소 배출농도가 50 ppm이하, 그리고 10,000 m³/hr 이하일 경우는 100 ppm이하로 규정하고 있으나, 본 SVE실험에서는 실험초기에 이 기준을 상당히 초과하고 있었으며, 상당기간 동안 100 ppm 및 50 ppm을 초과하고 있음을 알 수 있었다. 따라서, 현장에서의 배가스 포집 및 활성탄흡착탑 등의 처리에 대한 충분한 검토가 이루어져야 할 것이다.

3.2. 생물학적 공법

3.2.1. pH변화

실험기간 중 각 반응조의 pH변화를 Fig. 9에 나타내었다. 생물학적 처리의 경우 토양중의 pH는 처리 효율에 영향을 미치는 인자 중 매우 중요한 인자이다. 우선 반응조 A 및 B의 경우는 반응조 A에서 실험 개시 4일 전후에서 pH 7.8 정도를 나타내었으나, 이후는 반응조 A 및 B에서 대부분 pH 6에서 7 정도를 나타내어 거의 중성을 유지하고 있음을 알 수 있어 실제 현장에서 생물학적 공법으로 오염토를 정화 할 경우 pH에 대한 문제는 그다지 없는 것으로 생각되어진다.

반응조 C 및 D의 경우에는 반응조 C에서 pH 7.3 ~ 5.0을 나타내었고 D의 경우는 7.0 ~ 4.8을 나타내

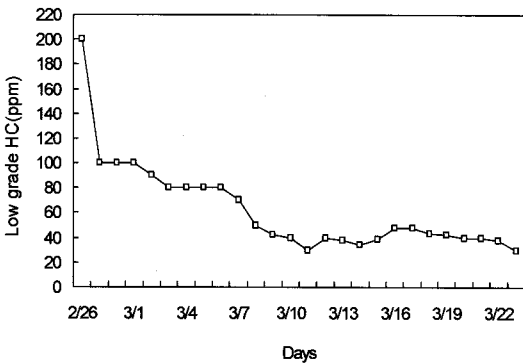


Fig. 7. Variation of low grade HC concentration in the exhaust gas.

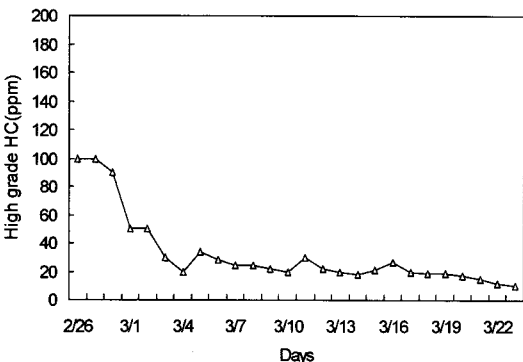


Fig. 8. Variation of high grade HC concentration in the exhaust gas.

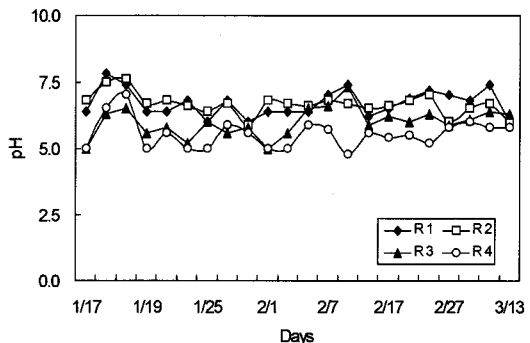


Fig. 9. Variation of pH at the Bioremediation treatment.

있고 특히 D의 경우는 실험 전 기간 pH 평균이 5.5로서 반응조 A 및 B 보다는 다소 낮게 나타났다. 이것은 저층의 토양의 경우 다른 영향(예를 들면 유기물 분해에 의한 유기산 영향 등)이 있을 수 있으며, 그렇지 않으면 상부토양인 반응조 A 및 B의 경우 표면에 포장된 알카리성의 시멘트에 기인하여 pH가 반응조 C 및 D보다 높게 나타날 수도 있다고 생각되어진다.

그러나, 미생물 성장에 크게 저해될 정도는 아니라고 판단되며, 더욱이 B시의 문헌동 토양복원¹⁾에서 Bio-file공법 적용시 이용된 토양의 pH가 5.3 정도였음을 감안한다면 문제는 없을 것으로는 생각되나, 실제 현장 적용시는 이러한 pH부분에도 주의가 요구된다.

3.2.2. 함수율 변화

Fig. 10은 실험기간 중의 함수율 변화를 나타낸 것이다. 생물학적 공법에 의한 토양복원의 경우 온도, pH와 더불어 함수율은 미생물활동 및 성장에 중요한 인자로서 나타난다.

실제 본 연구에서는 현장 적용성을 우선으로 하기 위하여 실험기간이 겨울철(1월 및 2월)이었던 부분을 감안하여 반응조를 수욕조에서 일정온도(15°C)로 유지하여 진행하였으나, 온도에 따른 토양의 건조가 빠르게 진행되어 실험 초기 함수율이 반응조 A, B 및 D에서 7.9, 3.8 및 6.9를 각각 나타내어 미생물이 온도의 영향보다 수분의 영향으로 저해작용을 받을 것으로 판단하여 이후부터 각 반응조별 함수율을 15~16% 전후로 조절하여 실험 중후반부터는

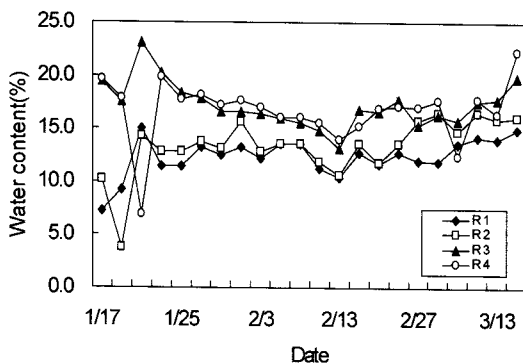


Fig. 10. Variation of water content at the Bioremediation treatment.

약 10~20%정도의 함수율을 나타내었다. 그러나, 실제 B시 문헌동 복원사업¹⁾의 경우에서 토양 중의 함수율이 9% 정도를 나타낸 것을 고려한다면 현장에서의 실제 토양복원을 진행할 경우 미생물 활동은 다소 느려질 수도 있을 것으로 판단된다.

3.2.3. TPH 농도변화

실험기간 중 TPH 농도변화를 Fig. 11에 나타내었다. 우선 반응조 A 및 B의 경우는 실험시작일 A 및 B에서 각각 6,062 mg/kg 및 5,763 mg/kg을 나타내어 사용한 시료의 농도 1,786.2 mg/kg 및 3,514.2 mg/kg 2~3배에 가까운 높은 농도를 나타내었다. 이후 두 반응조 모두 감소하는 경향을 나타내어, 반응조 A는 실험 9일째 2,600 mg/kg을 보였으나, 재차 증가경향을 나타내어 실험 26일째 2차 피크치인 5,150 mg/kg을 이후 소폭의 증감을 보이다가 실험 종료일인 실험 51일째 2,748 mg/kg을 나타내었다. 반면에 영양물질과 미생물제재를 함께 주입한 반응조 B의 경우에는 최고농도 5,763 mg/kg 이후 감소하는 경향을 나타내면서 실험 15일째 1,666 mg/kg을 보였다. 이후 재차 증가하여 2차 피크를 실험 26일째 농도 4,165 mg/kg 이후 소폭의 증감을 보이다가 실험 종료시에 2,666 mg/kg의 농도를 나타내었다.

이는 미생물제재를 주입하지 않은 반응조 A와 유사한 경향을 나타내었지만 초기농도가 반응조 A보다 B에서 약 2배 정도 높았던 것을 고려한다면 미생물과 영양물질을 주입한 반응조에서 다소 처리효율이 높은 것으로 나타났다. 그리고, 오염된 토양의 경우 이미 토양 중에 토착미생물이 존재하고 있기 때

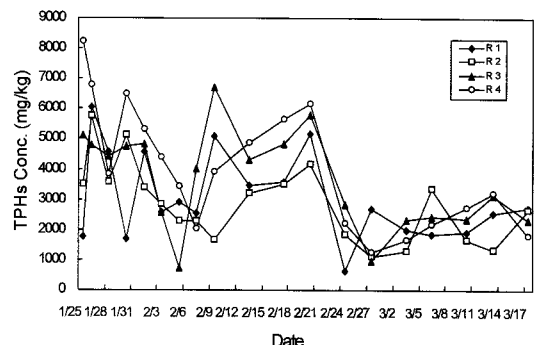


Fig. 11. Variation of TPH concentration at Bioremediation treatment.

문에 반응조 A처럼 영양물질을 외부에서 주입시켜 주는 것만으로도 어느 정도 분해가 진행되고 있다고 판단된다.

반응조 C 및 D의 경우에는 그림에 나타낸 것과 같이, 반응조 C에서는 시료의 농도 5,111 mg/kg이 시간의 경과에 따라 감소하다가 실험 11일째 최저 농도인 729 mg/kg을 나타내었으나, 이후 증가하여 실험 15일째 최고 농도인 6,717 mg/kg을 보였다. 이후 재차 감소하여 실험 33일째 954 mg/kg을 나타내었고, 실험 종료시에는 2,316 mg/kg을 보였다. 반응조 C와는 달리 영양물질 및 미생물제제를 동시에 주입하고 있는 반응조 D의 경우는 초기시료의 농도가 매우 높은 8,222 mg/kg을 나타내었고, 이후 감소하여 실험 13일째 2,013 mg/kg을 나타내었고, 재차 증가하여 실험 26일째 6,142 mg/kg의 2차 피크치를 보였다. 이후 소폭의 증감을 계속하여 실험 종료시에는 1,794 mg/kg을 나타내었다. 이는 반응조 A 및 B와 농도 및 시간의 차이는 다소 있으나, 실험 기간 중 2차에 걸친 피크치를 나타내면서 실험 후반기에는 낮은 농도로 증감을 계속하고 있는 경향을 나타내고 있다. 또한, 반응조 C 및 D간의 차이는 초기시료의 농도가 반응조 C보다 약 60%정도 높은 반응조 D에서 실험종료 시 낮은 농도를 나타내어 다소 영양물질 및 미생물주입 반응조에서의 처리효율이 다소 높은 것으로 나타났다. 그러나 이후 소폭의 증감 가능성도 있는 것으로 추정된다.

결과적으로 미생물과 영양물질을 주입한 반응조는 영양물질만 주입한 반응조보다 다소 TPH제거에 효율적인 것으로 나타났으며, 전반적으로 생물학적 처리는 물리학적 처리인 SVE공법과는 달리 2번의 피크치를 기록한 후 농도는 감소하여 이후부터 낮은 농도에서 소폭의 증감을 계속하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 실험기간 이후에도 소폭의 증감을 계속하다가 낮은 농도로 진행 또는 정화 될 것으로 생각되어진다. 그러나, 본 연구의 결과에 의하면 In-Situ로서 생물학적공법으로 고농도의 TPH제거를 행할 경우 현장에서 상당한 시간이 소요되어 화학적 처리 등이 병행될 필요가 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

B시 B역사의 유류오염토의 정화방법 중 SVE공

법 및 생물학적공법으로 TPH중심의 유류저감 연구를 실시한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) SEV 공법

SEV 공법으로 처리한 경우 실험초기 15%정도의 함수율이 시간의 경과에 따라 천천히 감소하여 실험 종료 부근에서는 10%정도를 나타내어 Bioventing으로서 오염토를 정화 할 경우 함수율 감소에 따른 미생물 활동의 저해가 일어날 수 있을 것으로 예상되었다.

TPH농도 변화는 반응조 상부에서 실험 완료지점에서 약 50% 전후를 나타내었다. 따라서, 상부에서 TPH제거 경향은 최고농도 이후 약 25일 전후에서 절반정도의 제거율을 가져왔다. 반응조하부에서는 실험 20일째에 약 45% 제거율을 나타내어 Bioventing 결과와 공법상에서 비교한다면 50%까지 제거되는데 걸리는 시간은 약 7일정도 차이가 생기나 이후의 농도변화를 예측할 경우 Bioventing공법은 건조에 따른 미생물 활동의 제어가 생기므로 SVE공법을 이용한 현장에서의 TPH제거는 충분히 가능성이 있을 것으로 생각된다. 실험에서 배가스 중의 THC농도가 수천 ppm을 나타내어 현장에서의 배가스 포집 및 활성탄흡착탑 등의 처리에 대한 충분한 검토가 이루어져야 할 것이다.

2) 생물학적 공법

비교적 저농도인 반응조 A, B에서 영양물질 및 미생물주입여부에 따른 TPH 제거의 경우, 반응조 A에서 실험 종료일인 실험 51일째 2,748 mg/kg을 나타내어 오히려 증가한 반면에 영양물질과 미생물제제를 함께 주입한 반응조 B의 경우에는 실험 종료시에 2,666 mg/kg의 농도를 나타내었고, 반응조 C에서는 시료의 농도 5,111 mg/kg이 실험 종료시에는 2,316 mg/kg을 보였다. 영양물질 및 미생물제제를 동시에 주입하고 있는 반응조 D의 경우는 초기시료의 농도가 매우 높은 8,222 mg/kg을 나타내었고, 실험 종료시에는 1,794 mg/kg을 나타내었다.

따라서, 미생물과 영양물질을 주입한 반응조는 영양물질만 주입한 반응조와 실험기간동안 TPH제거율이 다소 증가되었으며, 전체적으로 2번의 피크치를 기록한 후 농도는 감소하여 이후부터 낮은 농도에서 소폭의 증감을 계속하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 생물학적공법 적용에서는 본 연구의 SVE공

법인 물리적 처리와 달리 연속적인 피크를 반복하면서 이후 감소되어가는 경향을 나타내었다. 그리고, In-Situ.로서 생물학적공법으로 고농도의 TPH 제거를 행할 경우 현장에서 상당한 시간이 소요되어 화학적 처리 등이 병행될 필요가 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) 농업기반공사, 2003, 육군 「구 2정비창」 오염부지 정화사업 공법 실증시험보고서.
- 2) 박용기, 2004, 비위생매립장의 침출수 유동경로 탐지를 위한 물리탐사의 적용에 관한 연구, 석사학위논문, 동의대학교, 부산.
- 3) 한국농촌공사, 2006, 부산역구내 오염토양정화사업.
- 4) 송창수, 1997, 환경복원을 위한 물리·화학적 기술, 첨단환경기술, 2-9.
- 5) Del A. J. P., Franca F. P., 1995, Biodegradation of crude oil in sandy sediment, *International Biodeterioration and Biodegradation*, 44, 87-92.
- 6) Balba M. T., Al-Daher R., Al-Awadhi N., 1998, Bioremediation of oil-contaminated desert soil : The Kuwait Experience, *Environment International*, 24(1/2), 163-173.
- 7) 김석현, 공성호, 김상민, 2001, SVE와 Bioventing 기술을 이용한 유류오염 토양의 지중처리, *환경과학회지*, 22, 63-72.
- 8) Long G., 1992, Bioventing and Vapor Extraction; Innovation Technologies for Contaminated Site Remediation, *J. of the Air and Waste Management Association.*, 43(3), 345-348.
- 9) Ryan R., 1993, Fundamental of Bioventing Applied to Fuel Contaminated Sites, *Environmental Progress*, 12(1), 45-53.
- 10) 환경부, 1995, 토양오염공정시험법.
- 11) Lee J. Y., Lee C. H., Evaluation of Soil Vapor Extraction and Bioventing for a petroleum Contaminated Shallow Aquifer in Korea, *Soil and Sediment Contamination*, 10(4), 439-458.
- 12) 오영진, 2002, Bioventing을 이용한 디젤 오염토양 복원에 관한 연구, 석사학위논문, 부산대학교, 부산.
- 13) 환경부, 2007, 대기환경보전법.