

토양내 저휘발성 유류오염물 제거를 위한 고온공기 주입/추출기술 연구

구칭완 · 고석오*

경희대학교 토목공학과 환경연구센터

Hot Air Injection/Extraction Method for the Removal of Semi-Volatile Organic Contaminants from Soils

Chung-Wan Gu · Seok-Oh Ko*

Department of Civil Engineering, Kyunghee University, Environmental Research Center, Korea

ABSTRACT

Contamination of soils and groundwater by leakage of petroleum compounds from underground storage tanks (USTs) has become great environmental issues. Conventional methods such as soil vapor extraction (SVE) used for the remediation of unsaturated soils contaminated with volatile organic compounds might not be applied for the removal of semi-volatile organic compounds such as diesel fuels and PCBs, which have low volatility and high hydrophobicity. The objective of this study is to develop a hot air injection method to remove semi-volatile compounds. Additionally, operation parameters such as temperature, air flow rate, and water content are evaluated. Experimental results show that diesel ranged organics (DROs) are removed in the order of volatility of organic compounds. As expected, removal efficiency of organics is highly dependent on the temperature. It is considered that more than 90% of organic contaminants whose carbon numbers range between 17 and 22 can be removed efficiently by the hot air injection-extraction method (modified SVE) over the 100°C. It is also found that increased air flow rate resulted in high removal rate of contaminants. However, air flow rate over 40 cc/min is not effective for the operation aspects, due to mass transfer limitation on the volatilization rate of the contaminants. The effect of the water content on the decane removal is minimal, but some components show large dependence on the removal efficiency with increasing water content.

Key words : Soil Vapor Extraction (SVE), Hot air, Diesel Range Organics (DROs), Vapor pressure, Mass transfer limitation

요 약 문

급격한 경제성장의 결과로서 최근까지 각종 유류관련 시설의 누출로 인한 토양 오염에 대한 관심이 고조되고 있다. 토양복원을 위하여 재래식 토양가스추출법(SVE)과 같은 공법이 사용되고 있으나 휘발성 유류성분의 제거에 적합하며 디젤, 방향족화합물 등과 같은 저휘발성 오염물의 제거에는 부적합한 결과를 보이고 있다. 본 연구에서는 디젤과 같이 저휘발성 유류성분을 제거하기 위한 효율적인 공기주입 및 SVE 공정 개발을 위해 디젤유의 개별성분들의 온도와 유량에 따른 제거효율, 수분함량에 따른 영향 평가를 실시하였다. 디젤범위의 오염성분(DROs)들은 온도의 증가에 따라 휘발성의 순서대로 제거되는 경향을 보이고 있다. 실험결과, 90% 이상의 DROs 범위 내 오염물은 온도를 100°C 이상으로 유지할 경우 효과적으로 SVE 방법에 의하여 제거할 수 있다고 판단된다. 유량이 증가함에 따라 오염물이 토양 내 잔류하는 비율이 빠르게 감소하지만 유량이 40 cc/min를 초과하면 감소 폭이 크지 않았으며 이는 큰 유량에 대하여 오염물이 휘발되는 속도에 있어서 물질전달상의 제한에 기인한다고 판단된다. 수분함량에 영향은 DROs성분 중 n-decane은 적은 것으로 나타났으나 다른 오염성분들은 수분이 존재함에 따라 제거효율이 좋아지는 결과를 나타내었다.

주제어 : 토양가스추출법, 고온공기, 디젤오염물, 증기압, 물질전달

*Corresponding author : soko@khu.ac.kr

원고접수일 : 2004. 3. 19 게재승인일 : 2005. 1. 7

질의 및 토의 : 2005. 4. 30 까지

1. 서 론

우리나라는 지속적인 고도성장을 위한 개발위주의 정책으로 환경에 대한 고려를 충분히 하지 않은 결과 많은 환경오염을 초래하였다. 특히 산업의 발달에 따른 연료사용량이 증가하면서 이들의 누출이나 사고 등에 의한 토양 및 지하수 오염도 증가하였다. 또한 향후 계속적인 인구의 증가와 도시화의 진전, 산업발전 등으로 연료 등에 의한 토양오염도 꾸준히 증가될 것으로 예상되므로 이에 대한 관리 및 대책이 요구된다고 할 수 있다. 특히 지하 저장탱크나 송유관의 부식에 의해 누출된 유류성분은 주로 비수용성 액체(NAPL)상태로 토양 불포화층을 통해 수직 이동하여 지하수면 위에 축적되는 경향을 보여준다. 이 과정에서 다량의 유류가 모세관 현상에 의해 불포화층 토양의 공극 사이에 일부분 포화된 상태로 존재하여 하천 또는 지하수의 장기적인 오염원으로 작용하게 된다.

일반적으로 휘발성이 높은 기술린으로 오염된 토양에 대해서는 토양증기추출(SVE)과 같은 공기 주입/추출방식 기술이 국내를 포함하여 전 세계적으로 적용되고 있다. 그러나 지역특성 및 오염물 존재형태에 따라 오염물의 물질 전달상의 한계, 확산 및 느린 탈착율에 의한 오염물의 꼬리현상(tailing) 및 오염농도 재증가(rebounding)의 문제를 보여 낮은 제거율 및 장기간의 복원이 소요될 수 있다. 이러한 SVE 방법이 효과적으로 적용되기 위해서는 오염물의 증기압이 최소 70 Pa 이상이어야 휘발에 의해서 제거할 수 있는 것으로 알려져 있는데 윤활유, coal tar 및 디젤과 같은 유류오염물의 경우는 수용액상에서의 용해도가 아주 낮을 뿐 아니라 증기압이 아주 낮은 값을 보이고 있다 (Poppendieck *et al.*, 1999a). 이러한 성분들은 토양/지하수에서 NAPL (nonaqueous phase liquid)로 존재하고 있으며 높은 점성에 의하여 낮은 흐름을 보여 잘 회수되지도 않고 상당한 잔류포화도(residual saturation)가 유지된다. 특히, 전체 유류 사용량의 25%에 이를 정도로 토양오염 유발 물질로서 매우 중요한 부분을 차지하고 있는 디젤유의 경우 대부분의 구성물질이 저휘발성이므로 SVE로는 적절히 처리될 수 없다. 따라서 저휘발성 오염물의 제거를 위하여 기존의 SVE 기술을 보완할 필요가 있으며 이를 위하여 오염물의 증기압을 인위적으로 증가시키는 방법이 쓰일 수 있다. 즉, 고온 공기를 주입하게 되면 휘발성분의 휘발화를 촉진시킬 뿐만 아니라 저휘발성 성분들의 증기압도 증가시켜 휘발성을 증가시키게 되므로 오염된 토양의 효과적인 복원을 위하여 고온공기의 주입 및 추출기술이 효과적으로 적용될 수 있다.

유류와 같은 유기성 물질로 오염된 토양이나 지하수의 복원을 위하여 적용될 수 있는 고온처리기술은 어느 정도 성능이 입증된 기술이다. 그러나 과거에 주로 적용된 고온 복원기술은 주로 부지의 (off-site) 복원방법에 적용된 것으로서 오염된 토양을 굴착한 후 오염된 토양을 소각함으로써 오염물을 처리하는 방식이었다. 실제 이 방법의 적용에 있어서 오염된 토양의 깊이가 깊을수록 경제적인 비용이 많이 소모되고 굴착 시 오염물에 노출되는 문제점을 가지고 있음에 따라 대안 기술로서 현장에서의 고온처리 기술의 개념이 도입되어 개발되었다. 이 기술은 굴착, 소각이나 다른 대안 기술에 비해 상대적으로 경제적이다. 토양을 가열하는 방법에 따라 많은 기술이 개발되어 왔으며 그 중 전기적 가열법에 의하여 TCE로 오염된 토양을 36일 이내에 99% 처리효과를 보이는 사례가 있다 (Heron *et al.*, 1998). 스팀이나 고온의 공기를 주입하는 연구 또한 많이 진행되었으며 유류나 PCBs 등의 제거에 뛰어난 효과를 나타내고 있다 (Di *et al.*, 2002; Tse *et al.*, 2001; Davis and January, 1998). 또는 마이크로웨이브나 Radio frequency 등을 이용한 방법이 개발되고 있다 (Poppendieck *et al.*, 1999b). 이와 같이 고온기술은 기존의 가스추출기술과 병합하여 가장 우선적으로 현장에 적용되기 쉬운 복원기술이라 할 수 있다. 따라서 디젤 유류와 같은 오염물의 증기압이 낮아 기존 SVE 기술을 적용하기 어려운 경우 고온을 가해 증기압을 증가시키면 고온 공기 주입/추출에 의해 많은 양의 오염물을 제거할 수 있다고 예측된다. 따라서 본 연구에서는 실험실 규모의 연구를 통하여 온도의 조건, 토양 조건, 주입/추출 조건별로 디젤성분의 유류오염물을 제거하기 위한 최적 조건을 찾는 것을 목표로 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 실험재료

본 실험에 사용된 토양은 주문진사를 사용하였으며 오염물은 저휘발성 유류성분으로서 디젤유에 많이 포함되어 있는 Alkane 성분 중 n-decane(n-C10), n-dodecane(n-C12), n-tetradecane(n-C14), n-hexadecane(n-C16)을 Aldrich사에서 구입하여 사용하였다. 각 성분의 특성치는 Table 1에 나타내었다.

2.2. 실험 방법

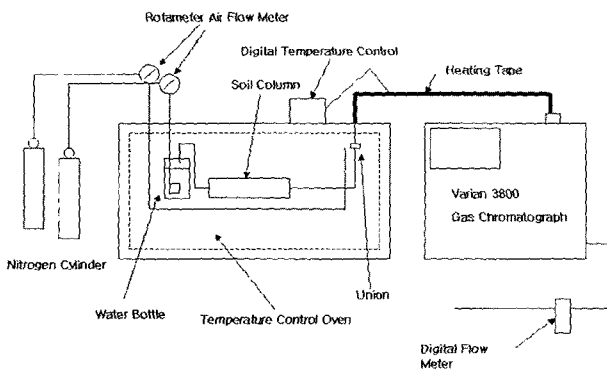
우선적으로 온도를 변화시켜 휘발성이 낮은 디젤유 범위의 오염성분들의 증기압 변화를 살펴보기 위하여 n-

Table 1. Physico-chemical characteristics of semi-volatile organic compounds used in this study (Lgreaga *et al.*, 2001)

| 오염물 분자식 | 분자량 (g/mol) | 증기압 (25°C, atm) -logP ^o | 용해도 (25°C, mol/L) -logC _w | 헨리상수 (25°C, L·atm/mol) logK _H |
|---------------------------------------|-------------|---------------------------------------|---|---|
| n-C10 C ₁₀ H ₂₂ | 142.3 | 2.76 | 6.57 | 3.81 |
| n-C12 C ₁₂ H ₂₆ | 170.3 | 3.80 | 7.52 | 3.72 |
| n-C14 C ₁₄ H ₃₀ | 198.4 | 4.89 | 7.71 | 2.82 |
| n-C16 C ₁₆ H ₃₄ | 226.4 | 5.73 | 7.80 | 2.07 |

C10, n-C12, n-C14, n-C16를 각각 25%(wt-%) 혼합(각 성분 몰분율=0.31:0.26:0.225:0.197)한 원액의 일정량을 500 mL의 병에 넣은 후 정해진 온도에서 24시간 동안 평형에 이르도록 유지한 후에 가스상에 있는 오염물을 1000 μ L 시린지를 이용하여 채취한 후 GC를 이용하여 농도를 분석하였다. 또한 토양을 가열 후 공기를 주입/추출하지 않는 경우를 가정하여 토양에 존재하는 오염물이 휘발되어 제거되는 정도를 파악하기 위한 실험을 실시하였다. 즉, NAPL 상태로 존재하는 오염물이 토양과 혼합되어 있는 경우, 온도에 대한 휘발 효과를 평가하기 위하여 20 mL Vial에 모래 5 g씩 넣고 field capacity(43548.4 mg/kg) 보다 약간 높은 50000 mg/kg으로 혼합오염물의 원액을 넣은 후 온도별 시간별 토양 내 잔류하는 오염물의 농도를 이중으로 하여 측정하였다. 이때 휘발된 오염물이 자연스럽게 온도별로 제거되도록 하기 위하여 vial뚜껑을 열어 놓은 상태로 실험을 실시하였다. 미리 정해진 시간별로 각 반응기에 Methylene chloride를 넣어 오염물을 추출 후 분석하였다.

토양 내에 존재하는 유류 오염물을 열적으로 휘발시킨 후 공기주입이나 추출에 의하여 외부로 방출시켜 제거하는 방법을 평가하기 위한 실험실 규모의 컬럼장치는 Fig.

**Fig. 1.** Schematic diagram of experimental setup for thermal SVE system.

1과 같다. 컬럼내 가스주입(sweeping air)을 위한 고순도의 질소가스를 함유한 압축실린더를 두었으며 압력 레귤레이터와 공기유량계를 두어 질소가스의 용량을 5 mL/min까지 조절 가능하도록 하였다. 컬럼은 스테인레스 관(25 cm 길이, 22 mm 직경)을 사용하였으며 온도를 조절하기 위하여 컬럼을 오븐안에 설치하였다. 또한 컬럼 출구에서 배출되는 가스를 GC를 이용하여 분석 후, 이송관 내 잔류하는 오염물을 제거하기 위해 또 다른 고순도의 질소가스를 함유한 압축실린더를 오븐에 연결시켜 질소를 흐르게 하는 동시에 온도조절이 가능한 가열 테이프에 의해 온도를 높여 잔류되는 오염물이 제거되도록 하였다. 또한 수분함량에 따른 제거 효율 평가를 위해 수분함량이 변하는 것을 방지하기 위해서 물이 담긴 병을 연결하였다.

본 실험에 사용한 토양의 오염물의 농도는 포화도 이하에서 실험을 진행하였으며 혼합오염물을 토양이 있는 300 mL 용량의 유리병에 넣은 후 손으로 격렬하게 병을 흔들어 토양과 유류가 균등하게 섞이도록 하였다. 혼합오염물에 오염된 토양을 컬럼내로 충전하기 위하여 오염된 토양을 조금씩 컬럼에 넣고 약 1 cm의 높이 마다 토양층의 다짐이 일어나도록 하였다. 토양의 일부분을 methylene chloride가 담긴 유리 바이알에 넣어 오염물을 용출 후 분석함으로써 초기에 토양에 존재하는 오염물의 농도를 평가하였다. 주문진사를 사용한 대부분의 경우 오염성분의 각 초기농도는 24000 mg/kg로 하였다. 오염된 토양이 충전된 컬럼을 미리 정해진 온도로 맞추어진 오븐 안에 넣은 후 가스실린더와 연결된 관에 연결한 후에 레귤레이터와 유량계 밸브를 조절하여 질소가스의 용량을 맞추었다. 질소가스가 컬럼을 통과하여 GC용 Autosampling valve에 있는 loop (500 μ L)에 채워지고 정해진 시간별로 오염물의 농도를 분석하였다. 오염물의 분석은 FID를 가진 Varian 3800 Gas Chromatograph를 이용하여 실시하였다. 주입기와 검출기 온도는 각각 260와 300°C로 하였으며 분석용 컬럼은 길이 30 m, 직경 0.53 mm (Varian, Inc)를 사용하였다.

3. 연구결과 및 토의

3.1. 오염물의 가스상의 농도

각 온도에 따라 혼합된 액상오염물에서 휘발되어 나타난 가스상의 오염물 농도를 분석하였고 다시 각 성분에 대한 증기압으로 바꾸어 주기 위하여 이상기체 식을 적용하였으며 각 오염물의 온도의 증가에 따른 포화증기압의 변화를 Table 2에 나타내었다. Table 2에 나타난 오염성

Table 2. Vapor pressure of hydrocarbons with varying temperature

| 온도 (°C) | 각 오염성분의 포화증기압 (Pa) | | | |
|------------|--------------------|-------------|---------------|--------------|
| | n-Decane | n-Dodecane | n-Tetradecane | n-Hexadecane |
| 30 | 140.06±14.3 | 31.395±7.4 | 2.15±0.29 | 0.38±0.1 |
| 60 | 610.97±9.3 | 189.11±52.2 | 6.78±0.84 | 0.68±0.1 |
| 80 | 881.38±37.4 | 331.52±57.9 | 66.64±9.5 | 5.71±2.5 |
| 100 | 1322.97±48.2 | 753.56±55.8 | 247.63±9.7 | 133.5±21.2 |

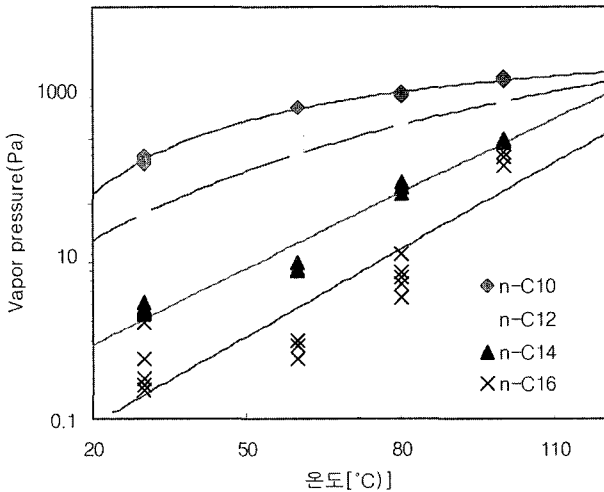


Fig. 2. Vapor pressure of hydrocarbons with varying temperature. Lines represent simulation results by Antoine equation.

분의 증기압은 온도에 따라 변하며 아래의 Antoine 식으로서 표현될 수 있다 (Poppendieck *et al.*, 1999b).

$$\ln(P_i^*) = -\frac{B}{T+C} + A \quad (1)$$

여기서 A, B, C는 온도에 따른 상수 값이며 T는 온도, P_i^{*}는 순수 오염성분 i의 포화 증기압이다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 온도별 증기압 변화에 대한 분석결과는 Antoine 식으로 잘 표현되었으나 저휘발성이 강할수록 약간 일치하지 않는 경향을 보이고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 가스상 오염물의 농도는 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 뚜렷하게 보여주고 있으며 상대적으로 휘발성이 강한 오염물(예, n-decane)은 온도증가에 따라 직선적인 증기압 증가를 보이며 휘발성이 낮은 물질일수록 대수적 증가경향을 보이고 있다. 이 결과는 온도를 어느 일정 수준으로 증가시키는 경우 저휘발성 오염물의 증기압이 급격히 상승하게 되어 결국 오염물을 신속하게 제거할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 상온에서는 오염물의 증기압

이 70 Pa 이상이 되는 경우에 SVE 공정의 효과가 있다고 알려져 있다. 그러나 Table 2에서 보는 바와 같이 n-C10만이 SVE 공정에 의해 효과적으로 제거될 수 있으며 나머지 성분들은 제거하기 어렵다는 것을 나타내고 있다. 온도의 상승에 따라 오염물 성분의 증기압은 점차 증가하게 된다. 온도가 60°C가 됨에 따라 n-C12의 증기압은 증가하게 되어 공기주입이나 추출에 의하여 용이하게 제거할 수 있게 된다. 위의 표에서 살펴보면 상온에서 거의 제거되지 않는 디젤범위의 오염성분(DROs)들은 온도의 증가에 따라 탄소수가 적은 순서대로 제거되며 대략 100°C 정도의 온도에서 대부분 DROs 오염물이 재래식 SVE방법에 의해 제거될 수 있다는 것을 보여주고 있다. 탄소수가 17개~22개 범위의 오염물에 대해서는 온도를 100°C 이상으로 증가시켜야 보다 효과적으로 SVE에 의하여 제거할 수 있다고 판단된다.

3.2. 온도에 의한 토양내 오염물질 휘발효율 평가

공기를 주입이나 추출하지 않을 경우 토양 내 존재하는

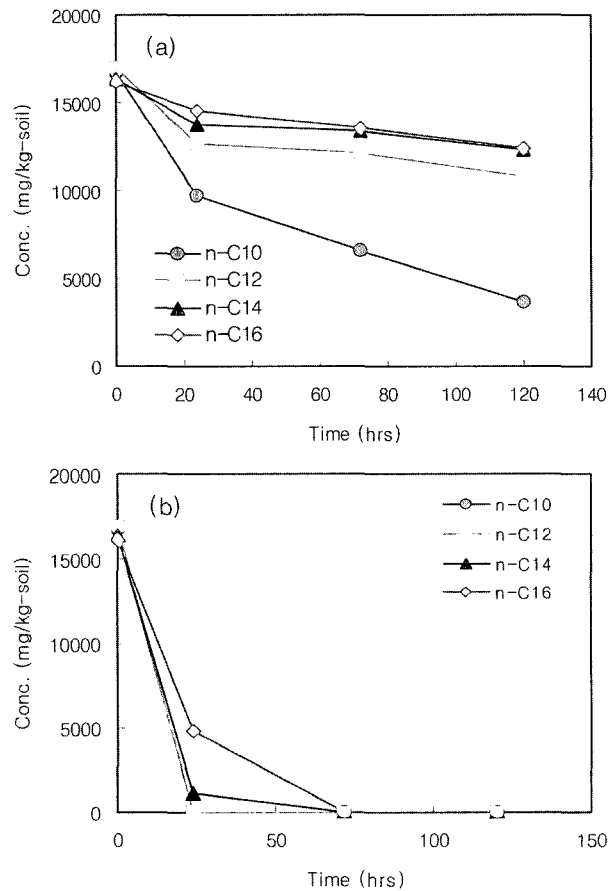


Fig. 3. Temporal changes of contaminants concentration in soils at the (a) 25°C and (b) 80°C.

오염물의 온도별 휘발과 이에 따른 제거효과를 판단하기 위한 실험결과를 Fig. 3과 같이 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 상온에서는 오염물 초기 농도에 대하여 휘발에 의한 제거 효율이 낮게 나타났으며 온도 50°C에서는 오염물의 제거 효율이 현저하게 증가하였으나 n-C14, n-C16의 제거는 크지 않았다. 온도가 80°C에서는 24시간 내에 거의 모든 오염물이 제거됨을 보여주고 있다. 이는 앞에서 실험한 오염물의 가스상의 농도의 결과로 볼 때 상온에서 거의 제거되지 않는 오염물이 80°C에서는 쉽게 제거될 수 있음을 나타내고 있다. 단, 가장 저휘발성인 n-C16의 경우 가스상으로 휘발되어지는 양이 상대적으로 적음을 알 수 있다. 따라서 SVE공법에 의해 디젤유와 같은 저휘발성 오염물로 오염된 토양의 복원 시에는 오염물의 가스상 농도를 증가시키기 위하여 오염물에 따른 적정 온도 선택이 매우 중요함을 알 수 있다.

3.3. 온도와 유량에 따른 제거효율 평가

3.3.1. 공기주입에 의한 가스상 오염물 농도변화
다젤범위의 오염물의 신속한 제거를 위하여 공기를 주

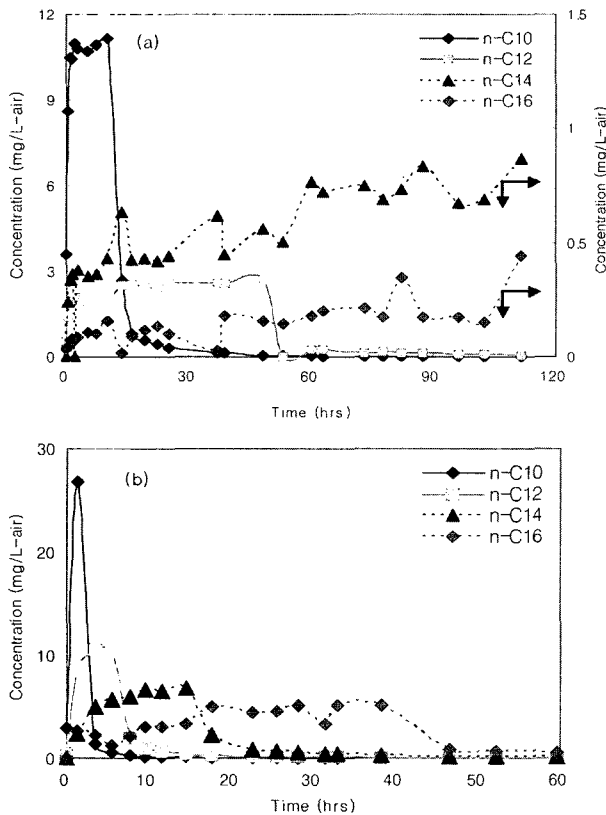


Fig. 4. Temporal variation of ambient concentration of contaminant at the (a) 60°C and (b) 100°C. Air flow rate is 40 cc/min for both experiments.

입/추출하는 방법의 효과를 평가하기 위한 컬럼 실험 결과, 온도별 오염물의 유출 농도의 시간별 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 각 성분의 가스상 농도의 상대적 변화는 아래의 이상기체식을 이용하여 설명할 수 있다.

$$C_i = x_i \frac{M_i P_i^*}{RT} \tag{2}$$

여기서, P_i^* 는 순수 오염성분 i 의 포화 증기압, x_i 는 몰분율, C_i 는 실험으로부터 구한 가스상 농도, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다. 즉, 오염물의 가스상 농도는 오염물의 몰분율(mole fraction, x_i)에 비례하게 된다. 온도 60°C에서 공기를 주입하는 경우 4개의 성분 중 가장 휘발성이 강한 n-decane은 초기부터 유출되는 가스상 농도가 처음 급격히 증가하다 토양내 몰분율이 감소함에 따라 지속적으로 감소함을 보여주고 있다. 다음으로 휘발성이 강한 n-dodecane의 경우 n-decane이 초기단계에서 감소함에 따라 n-dodecane의 몰분율이 초기보다 증가하게 되므로 유출되는 가스농도는 시간에 따라 증가함을 보여주고 있으며 일정 시간 후에는 n-dodecane의 몰분율도 감소함으로써 감소하는 농도분포를 보이고 있다. 다음으로 휘발성이 강한 n-tetradecane의 경우 초기의 유출농도는 작으나 시간에 따라 계속적으로 몰분율이 증가함으로써 유출되는 가스 농도 또한 지속적으로 증가함을 보여주고 있다. 그러나 휘발성이 60°C에서 그다지 크지 않음에 따라 유출되는 가스상 농도는 낮은 값을 보이고 있으며 120시간이 경과했음에도 유출농도는 계속 증가하여 토양 내에서 완전히 제거하기까지는 보다 긴 시간이 필요하다는 결과를 얻었다. 휘발성이 가장 낮은 n-hexadecane 또한 n-tetradecane과 마찬가지로 점차 유출농도가 증가하고는 있으나 유출되는 가스상 농도 자체가 아주 낮아 토양에서 제거되는 비율이 적다는 것을 알 수 있다. 약 5일 동안 공기주입을 한 결과, 탄소의 수가 14개 이상 되는 오염물부터는 완전한 제거가 이루어지지 않아 보다 긴 처리시간이 필요하다고 판단된다.

온도 100°C의 경우 유출되는 각 오염성분들의 가스상 농도변화는 보다 확실하게 이상기체 법칙에 따라 시간별로 차이를 보이고 있다. 즉, 그림에서 보는바와 같이 휘발성이 낮은 성분의 가스상 농도는 초기에 아주 낮은 값으로 존재하나 휘발성이 상대적으로 강한 오염물들이 시간 경과에 따라 휘발되어 토양내 잔류하는 오염물의 양이 줄어 몰분율이 감소하게 되면 상대적으로 휘발성이 낮은 오염물의 몰분율은 증가하게 된다. 따라서 유출되는 저휘발성 성분의 가스상 농도는 시간에 따라 증가하다 최종적으로

로 감소하는 값을 보이게 된다. 온도 100°C의 경우 60°C에 비하여 처리되는 시간 또한 많이 단축되어 60시간 후에 거의 모든 오염물이 제거되었다.

3.3.2. 온도 변화에 따른 제거 효율 변화

온도에 따른 제거 효율을 평가하기 위하여 주입가스의 유량을 20 cc/min로 고정한 후 온도별 컬럼 실험을 실시하였다. 이때, 토양내 잔류하는 오염물의 비율로 제거 효율을 나타내었으며 다음 식으로 계산하였다 (Poppendieck et al., 1999b).

$$\text{Fraction Remaining in Soil at Time } t = 1 - \left[\frac{G_t}{G_F + S_F} \right]$$

여기서 G_t 는 임의의 시간까지의 기간에 유출된 오염물량의 누적 값이며, G_F 는 실험 기간동안 유출된 오염물량을 합한 것이고, S_F 는 실험 종료 후 컬럼에 남아있는 오염물 양이다. 시간별 유출농도[mg/L-air]를 유량을 이용하여 시간당 유출되는 오염물의 양으로 환산한 다음[mg/min] 다

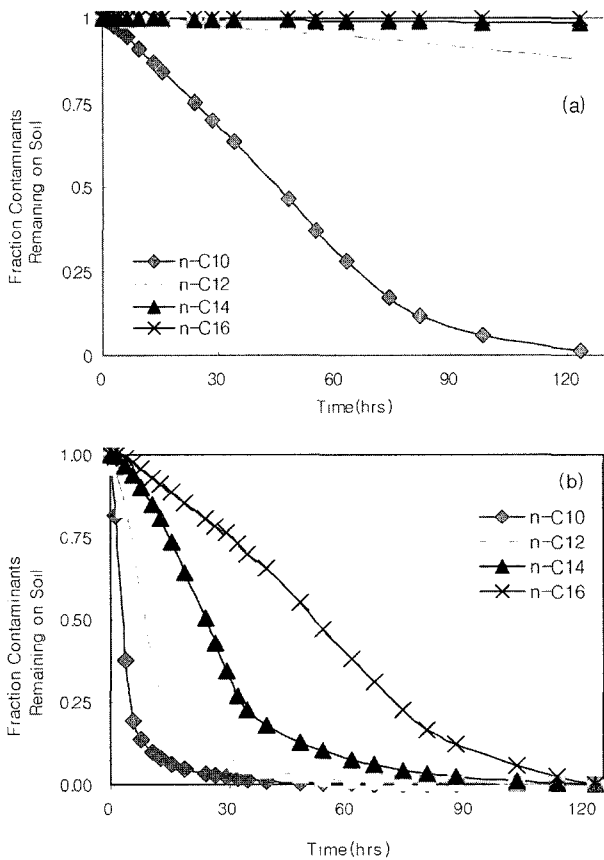


Fig. 5. Fraction contaminants remaining in soils with time and temperature: (a) 30°C, (b) 100°C. Gas flow rate was fixed to 20 cc/min.

시 경과시간을 곱해줌으로써 각 시간별 오염물의 양[mg]으로 나타낼 수 있게 된다.

Fig. 5에서 유량 20 cc/min에서 온도와 시간에 따른 토양내 잔류하는 오염물의 비율을 나타내었다. 그림과 같이 상온에 가까운 온도인 30°C에서는 포화증기압이 70 Pa 이상인 n-decane만이 주로 제거됨을 알 수 있다. 온도가 100°C가 되어야 모든 DRO 성분들이 5일 안에 제거가 됨을 알 수 있다. 이는 결과적으로 DRO 성분의 제거를 위하여 상온에서 공기를 주입하거나 추출하는 방법은 비효과적이라는 것을 보여주며 온도를 100°C 이상으로 올려야 만이 DRO성분들을 제거하는데 효과적임을 알 수 있다.

3.3.3. 유량 변화에 따른 제거 효율 변화

오염물을 효과적으로 제거하기 위한 적정 유량을 산정하기 위하여 오염된 컬럼을 100°C 상태에서 각 유량별로 혼합오염물에 대한 실험을 실시하였고 n-hexadecane에 대한 결과를 Fig. 6에 요약하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 유량이 증가함에 따라 오염물이 토양 내 잔류하는 비율이 빠르게 감소하지만 유량 40 cc/min를 기준으로 감소 폭이 크지 않음을 알 수 있다. 이는 유량에 따라 물질전달상의 제한(mass transfer limitation)으로 인한 유출 농도의 저하가 있음을 의미한다.

3.3.4. 수분의 함유량에 따른 제거 효율 변화

토양 내 수분으로 인한 제거 효율의 변화를 보기 위하여 수분함량별 실험을 실시하였다. 시간이 경과함에 따라 수분함량이 변하는 것을 방지하기 위하여 컬럼으로 들어가는 가스관에 물이 담긴 병을 연결하여 수분을 계속적으로 공급할 수 있게 하였다. 여기서 수분의 함유량은 주문진사의 최대 수분 포화도(21.4)이하인 10.5, 20.25%에서 실

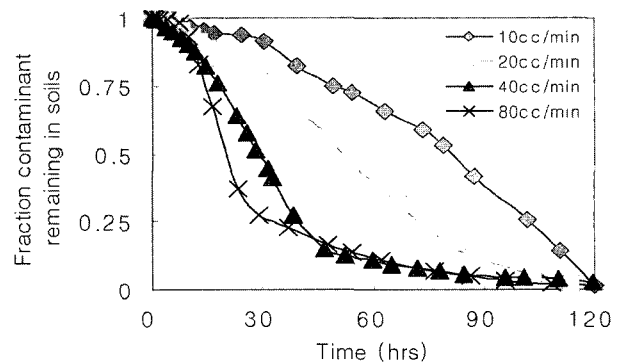


Fig. 6. Removal rate of n-hexadecane with time and gas flow rate. Temperature was fixed at 100°C.

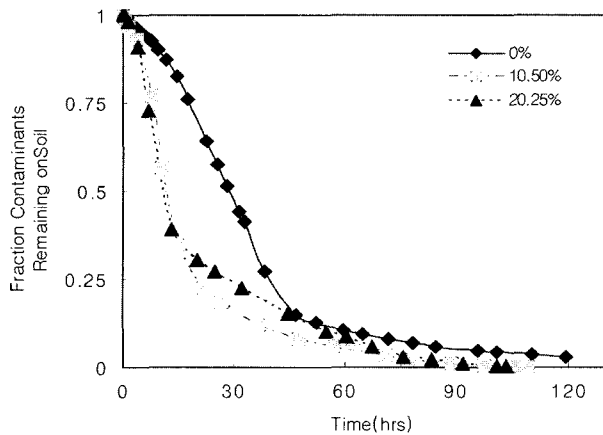


Fig. 7. Removal rate of n-hexadecane with moisture content. Gas flowrate and temperature was 40 cc/min and 100°C, respectively.

험을 실시하였고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7로부터 수분이 없는 상태에서의 오염물은 수분이 있는 것에 비해 상대적으로 낮은 제거율을 보임을 알 수 있다 이는 오염물과 토양과의 상호반응에 수분이 관여하고 있음을 암시하고 있다. SVE에 의한 복원에 있어서 휘발된 오염물의 토양 내 이동은 액체상태보다는 기체상태가 더욱 빠르므로 기체가 이동할 수 있는 공간이 넓어질수록 SVE의 효율은 높아진다. 따라서 토양습도가 낮아지면 유효 공극률이 높아지고 기체가 이동할 수 있는 공간이 넓어져 통기성이 좋아진다. 하지만 습도가 너무 낮으면 토양입자에 대한 오염물질의 흡착이 강해지므로 적절한 습도의 범위를 유지하는 것이 좋다는 것을 알 수 있다. 이것은 흡착된 오염물질이 직접 기체상태로 휘발되는 것보다는 흡착된 고체상태에서 액체상태를 거쳐 기체상태로 휘발되는 것이 물질전달 저항이 적기 때문이다 (Goss, 1992).

4. 결 론

디젤과 같이 저휘발성 유류오염토양의 제거하기 위한 효율적인 공기주입 및 SVE 공정 개발을 위해 디젤유의 개별성분들의 온도와 유량에 따른 제거효율을 평가, 수분 함량에 따른 영향 등에 대한 평가를 실시하여 다음의 결과를 얻었다.

1) 디젤범위의 오염성분(DROs)들은 온도의 증가에 따라 휘발성 순서대로 제거되며 대부분의 DROs 범위 내 오염물은 온도를 100°C 가량으로 증가시켜야 보다 효과적으로 SVE에 의하여 제거할 수 있다.

2) 공기주입에 의하여 온도별로 제거되는 오염가스의 농

도는 이상기체식을 따르며 토양 내 잔류하는 각 성분의 물분율에 비례함을 보여주었다.

3) 유량이 증가함에 따라 오염물이 토양내 잔류하는 비율이 빠르게 감소하지만 유량 40 cc/min를 기준으로 물질 전달상의 제한으로 인하여 감소 폭이 크지 않았다.

4) 수분함량에 영향은 DROs 성분 중 n-decane은 작은 것으로 나타났으나 다른 오염성분들은 수분이 있음으로 제거효율이 좋아지는 것을 알 수 있었다. 이는 토양내 수분이 존재함으로 인해 오염물의 가스상 이동을 쉽게 해주기 때문이다.

사 사

본 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업 (Ecotechnopia 21 project)”으로 지원받은 과제입니다.

참 고 문 헌

- Davis E.L. and January, 1998, Steam injection for soil and aquifer remediation, *Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory*, EPA/540/S-97/505.
- Di, P., Chang, D.P. and Dwyer, H.A., 2002, Modeling of polychlorinated biphenyl removal from contaminated soil using steam, *Environ. Sci. and Technol.*, **36**(8), 1845-1850.
- Goss, K-U., 1992, Effects of temperature and relative humidity on sorption of organic vapor on quartz sand, *Environ. Sci. Technol.*, **26**(11), 22-93.
- Heron, G., Zutphen, M.V., Christensen, T.H., and Enfield, C.G., 1998, Soil heating for enhanced remediation of chlorinated solvents: a laboratory study on resistive heating and vapor extraction in a silty, low permeable soil contaminated with trichloroethylene, *Environ. Sci. Technol.*, **32**(10), 1474-1481.
- Lagrega M.D., Buckingham P.L., and Evans J.C., 2001, Hazardous Waste Management, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York.
- Poppendieck, D.G., Loehr, R.C., and Webster, M.T., 1999a, Predicting hydrocarbon removal from thermally enhanced soil vapor extraction systems: 1. laboratory studies., *J. Hazard. Mater.*, **67**(1), 81-93.
- Poppendieck, D.G., Loehr, R.C., and Webster, M.T., 1999b, Predicting hydrocarbon removal from thermally enhanced soil vapor extraction systems: 2. field study, *J. Hazard. Mater.*, **67**(1), 95-109.
- Tse, K.K.C., Lo, S.-L., and Wang, J.W.H., 2001, Pilot study of in situ thermal treatment for the remediation of pentachlorophenol-contaminated aquifers, *Environ. Sci. Technol.*, **35**(24), 4910-4915.