

토양증기추출(Soil Vapor Extraction)을 이용한 토양 내 Trichloroethylene (TCE)과 Toluene 정화 실험

이민희* · 강현민

부경대학교 환경지질과학과

Laboratory Tests for Trichloroethylene (TCE) and Toluene Remediation in Soil Using Soil Vapor Extraction

Minhee Lee* and Hyunmin Kang

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, 599-1 Daeyondong, Namgu, Pusan 608-737, Korea

Column experiments were performed to evaluate the removal efficiency of soil vapor extraction (SVE) for TCE (trichloroethylene) and toluene in soil. Homogeneous Ottawa sands and real soils collected from contaminated area were used to investigate the effect of soil properties and SVE operation conditions on the removal efficiency. In column tests with two different sizes of Ottawa sand, the maximum effluent TCE concentration in a coarse sand column was 442 mg/L and 337 mg/L in a fine sand column. However, after 20 liter gas flushing, the effluent concentrations were very similar and more than 90% of initial TCE mass were removed from the column. For two real contaminated soil columns, the maximum effluent concentration decreased 50% compared with that in the homogeneous Ottawa coarse sand column, but 99% of initial TCE mass were extracted from the column within 40 liter air flushing, suggesting that SVE is very available to remove volatile NAPLs in the contaminated soil. To investigate the effect of contaminant existing time on the removal efficiency, an Ottawa sand column was left stable for one week after TCE was injected and the gas extraction was applied into the column. Its effluent concentration trend was very similar to those for other Ottawa sand columns except that the residual TCE after the air flushing showed relatively high. Column tests with different water contents were performed and results showed high removal efficiency even in a high water content sand column. Toluene as one of BTEX compounds was used in an Ottawa sand column and a real soil column. Removal trends were similar to those in TCE contaminated columns and more than 98% of initial toluene mass were removed with SVE in both column.

Key words : SVE, TCE, Toluene, NAPL, Soil remediation

토양증기추출(Soil Vapor Extraction)법을 이용하여 대표적 휘발성 NAPL(Non-aqueous phase liquid)인 TCE (trichloroethylene)와 toluene을 토양으로부터 제거하는 칼럼 실험을 실시하였다. 균질한 Ottawa sand와 실제 오염지역의 토양들이 사용되었으며, 토양특성 및 증기추출 조건들이 정화효율에 미치는 영향을 규명하였다. 직경 2.5 cm, 길이 30 cm인 유리 칼럼이 사용되었고, 붉은색으로 염색된 TCE 또는 toluene 4 gram이 주입되었다. 주입 공기가 일정한 속도로 칼럼 내에 주입될 수 있도록 공기 유량계를 설치하여 0.03 L/min의 일정한 속도로 공기가 주입되도록 하고, 퍼지 장치를 설치하여 주입 공기의 습윤도를 99% 이상으로 유지하였다. 칼럼으로부터 유출되는 가스는 자동 가스시료주입 밸브장치를 이용하여 가스크로마토그래피 칼럼 내로 주입되게 하여, FID 검출기로 유출 가스 농도를 분석하였다. Ottawa sand로 충전된 칼럼실험에서는 매질의 입자크기, 함수율, 토양 내 오염물 체류시간 등을 변화시켜 실험을 반복하였다. TCE로 오염된 세립질 Ottawa sand 칼럼실험에서 유출 공기의 최대 농도는 조립질 Ottawa sand 칼럼의 유출 농도보다 약 20% 정도 감소하였고, 오염지역의 실제토양 칼럼실험에서는 최대유출농도가 조립질 Ottawa sand 칼럼의 농도보다 약 50% 감소하였으나, 20 liter 공기 주입 후부터는 모두 비슷한 농도감소 현상을 나타내었다.

*Corresponding author: heelee@pknu.ac.kr

며 초기 주입량의 90 % 이상이 제거되었다. 함수율증가에 따른 유출공기의 농도 감소는 거의 나타나지 않았으며, TCE 주입 후 7일 동안 방치하였다가 SVE를 실시한 칼럼 실험에서도 잔류하는 TCE의 양이 약간 증가하였지만 20 liter 공기 추출 후에는 초기 주입량의 90% 가, 40 liter 공기 추출 후에는 98% 이상이 제거되었다. Toluene 으로 오염된 칼럼 실험에서도 TCE와 비슷한 제거 경향을 나타냈으며 200 liter 공기 추출 후에는 오염물 초기 주입량의 98% 이상이 제거되었다. 본 실험 결과로부터 증기추출법을 이용한 TCE, toluene 정화 효율성이 규명되었으며, 휘발성 NAPL로 오염된 실제 토양을 복원하기위한 SVE법의 적용가능성을 확인할 수 있었다.

주요어 : TCE, toluene, SVE, NAPL, 오염정화, 토양, 증기추출법

1. 서 론

토양증기추출법(SVE: Soil Vapor Extraction)은 토양 내 공기흐름을 유도하여, 토양으로부터 휘발성 유기 오염 물질(VOCs: volatile organic compounds)을 가스 상으로 추출하는 방법으로, 불포화대에서 VOCs를 제거하는데 적합한 방법으로 사용되고 있다(EPA, 1991; EPA, 1995; EPA, 1999). 국외에서는 특히 주유소를 포함한 UST(underground storage tank) 주변의 VOCs 누출에 의한 토양오염정화에 널리 이용되고 있으며, 다른 정화 방법에 비해 소요 비용이 저렴하고, 설치가 용이하며, 토양 특성 상 발생하는 제한 요인들이 적기 때문에 유류나 염화용제들로 오염된 국내 토양오염 정화 방법의 하나로 고려되고 있다(Johnson *et al.*, 1990; Frank and Barkley, 1995; Poppendieck *et al.*, 1999; Kirtland and Aelion, 2000). 특정 오염 지역에서 SVE 정화 효율을 최대로 높이기 위해서는 토양 내에서 오염물질을 포함하는 기체의 거동에 영향을 주는 토양의 특성들과 이들이 SVE 정화 효율에 미치는 영향에 대한 정량적인 연구가 필요하다(Wilkins, 1995; Kaleris and Croise, 1997; Fischer *et al.*, 1998; Sawyer and Kamakoti, 1998; Yoon *et al.*, 2002). 국외에서는 90년대에 이미 SVE의 현장 적용성 시험을 끝내고 이들 자료를 근거로 하여 실제 오염지역에서 이용되고 있으나, 국내에서는 아직 이러한 적용성 실험에 관한 학문적인 연구가 부족한 실정이다(환경부, 1995). 본 논문은 토양 특성에 따른 SVE의 정화 효율의 변화를 실내 칼럼 실험을 통하여 규명함으로써 실제 오염토양에 SVE를 적용할 때 최대의 정

화 성과를 높일 수 있는 정화 방법의 설계 과정에 학문적인 정보를 제공함에 그 목적이 있다.

2. 실험방법

SVE 정화 실험을 위하여, 초순도의 TCE(Trichloroethylene: Sigma-Adrich Company 제품)와 toluene (Sigma-Adrich Company 제품)이 오염물질로 이용되었으며, Ottawa sand(US Silica Company 제품), 주유소와 군부대 실제 오염 토양이 직경 2.5 cm, 길이 30 cm인 유리 칼럼에 충전되었다. TCE나 Toluene은 오염 토양에서 발견되는 대표적인 VOCs 오염물질들로, 모두 헨리 상수가 $0.0001 \text{ atm} \cdot \text{m}^3/\text{mol}$ 보다 훨씬 높다(Montgomery and Welkom, 1990). 오염물질로 사용된 TCE와 Toluene의 물리/화학적 특징들이 Table 1에 나타나있다. Sudan IV로 붉은색으로 염색된 TCE나 toluene이 진공주사기를 이용하여 칼럼 내에 4g 씩 주입되었다(Fig. 1). 제로 에어(순도 99.9% 이상)가 일정한 속도로 칼럼 내에 주입될 수 있도록 공기 유량계(air flow meter: Cole-Parmer Company 제품)를 설치하여 0.03 L/min의 일정한 속도로 공기가 주입되도록 하고, 주입 공기의 습윤도(Humidity)를 99% 이상으로 유지하기 위하여 퍼지 장치를 설치하였다. 칼럼으로부터 유출되는 가스는 자동 가스시료 주입밸브 장치를 이용하여 가스크로마토그래피(GC: Agilent 6890 Plus with FID)의 칼럼 내로 주입하여 유출 가스 농도를 분석하였다(Fig. 2). 각각의 칼럼 실험마다 주입 공기량에 따른 유출 가스 농도 변화를 도시하여 정화 효율을 측정하였다. SVE 실험 후 칼럼을 메탄올

Table 1. Properties of TCE and Toluene (Montgomery and Welkom, 1990).

	Molecular formula	Molecular weight	Specific density	Aqueous solubility (mg/l)	Henry's constant (atm · m ³ /mol)
TCE	C ₂ HCl ₃	131.39	1.46	1100	0.0099
Toluene	C ₇ H ₈	92.14	0.87	515	0.0067

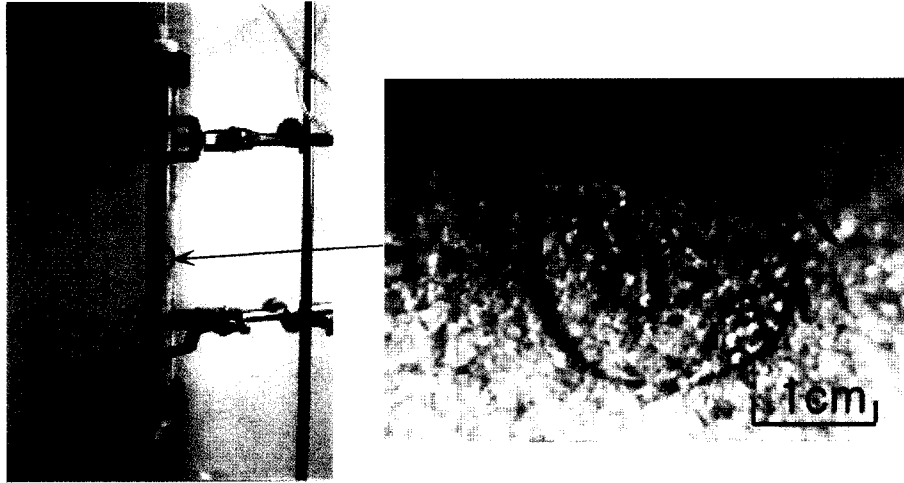


Fig. 1. Photograph of TCE contaminated column.

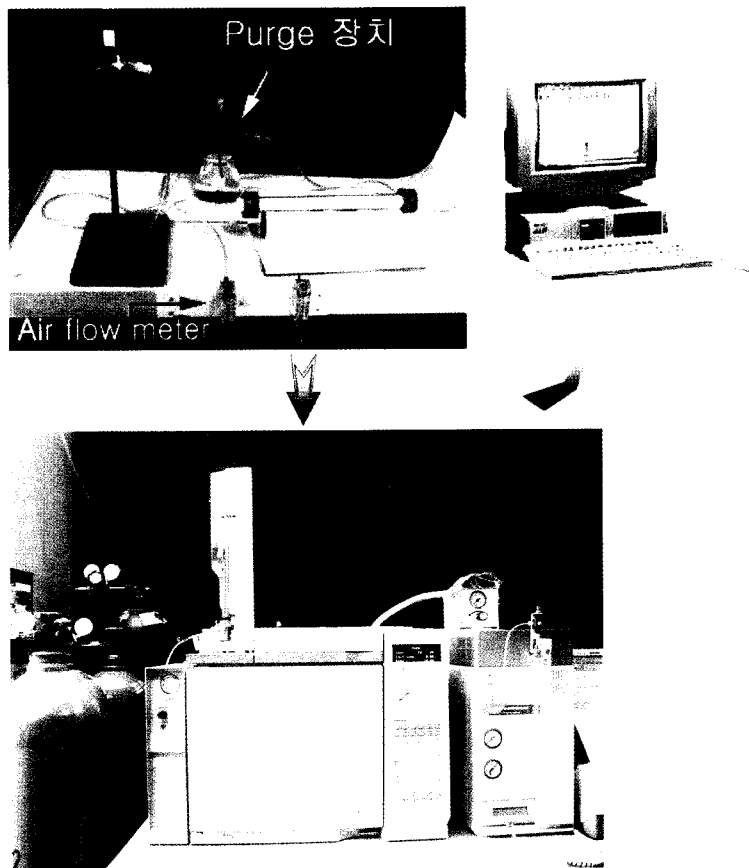


Fig. 2. Photograph of column experiment system.

로 세정(flushing)하여 GC로 분석함으로써 실험 후에 남아있는 오염물질의 양을 측정하였다.

매질의 입도가 정화 효율에 미치는 영향을 규명하기

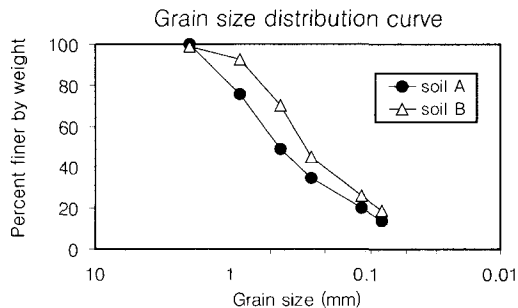
위하여 조립질과 세립질 Ottawa sand, 오염토양으로 각각 충전하여 칼럼 실험을 반복하였다. 조립질 Ottawa sand(F-35)는 체 가름을 하여 입자의 직경이

Table 2. Composition of Soil A and Soil B from XRF analysis (weight %).

Material name	Soil A-1 (1/3)	Soil A-2 (2/3)	Soil A-3 (3/3)	Soil A (average)	S.D.	Soil B-1 (1/3)	Soil B-1 (2/3)	Soil B-1 (3/3)	Soil B (average)	S.D.
SiO ₂	60.72	60.66	60.68	60.69	0.0346	65.80	65.79	65.81	65.80	0.0115
Al ₂ O ₃	17.94	17.95	17.95	17.95	0.0038	16.20	16.18	16.18	16.19	0.0096
TiO ₂	0.55	0.56	0.55	0.55	0.0015	0.82	0.82	0.82	0.82	0.0022
Fe ₂ O ₃	5.43	5.43	5.43	5.43	0.0047	4.40	4.41	4.41	4.41	0.0027
MnO	0.11	0.11	0.11	0.11	0.0003	0.09	0.09	0.09	0.09	0.0004
MgO	0.86	0.85	0.85	0.85	0.0055	0.99	1.00	1.00	1.00	0.0099
CaO	1.06	1.07	1.06	1.06	0.0043	0.91	0.91	0.91	0.91	0.0022
Na ₂ O	1.68	1.69	1.67	1.68	0.0093	1.18	1.17	1.18	1.18	0.0031
K ₂ O	2.82	2.82	2.82	2.82	0.0023	2.89	2.89	2.89	2.89	0.0022
P ₂ O ₅	0.09	0.09	0.09	0.09	0.0003	0.03	0.03	0.03	0.03	0.0003
LOI	7.12	7.12	7.12	7.12		5.05	5.05	5.05	5.05	
Total	98.39	98.34	98.33	98.35		98.35	98.34	98.36	98.35	

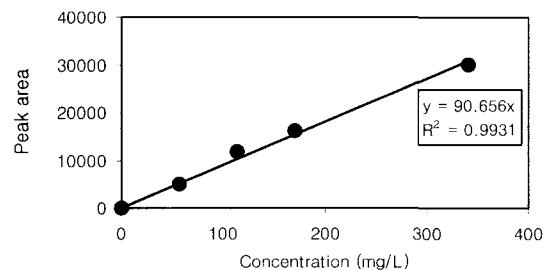
*S.D. : standard deviation.

0.85 mm 미만 0.425 mm 이상인 조립질 모래만을 이용하였고, 오염 토양들은 주유소 및 군부대 오염지역 (이하 “Soil A”와 “Soil B”로 명명)에서 상부 표층을 10~30 cm 제거한 후 500 ml 유리 용기(Teflon 마개)에 headspace가 없도록 채취한 후, 바로 4°C 이하 냉장 보관하였으며, 칼럼 실험을 위해 70°C 오븐에서 6 시간 동안 건조한 후 2 mm 체로 걸러 사용하였다. 오염 토양들은 실트질을 약 20%, 점토질을 약 10%, 유기물질을 5% 정도 포함하고 있는 사질토들이다. Table 2는 오염 토양의 XRF 주 원소 분석결과이고, Fig. 3은 오염 토양 매질의 입도 분포 곡선이다. 또한 매질 내 함수율을 변화하며 실험을 반복하여 함수율 변화에 따른 정화효율을 비교하였으며, 오염물의 칼럼 내 존재 시간의 변화가 SVE 정화 효율에 미치는 영향을 조사하였다. 국내 대부분의 VOCs들이 유류 성분임을 감안하여, BTEX 성분의 하나인 toluene을 Ottawa sand와 오염 주유소 토양에 오염시켜 칼럼 실험을 반복 실시하였다.

**Fig. 3.** Grain size distribution curves of real soils.

3. QA/QC (QUALITY ASSURANCE AND QUALITY CONTROL) FOR ANALYSIS

TCE와 toluene 농도 분석을 위하여 Agilent 회사의 6890 plus gas chromatography(검출기 : FID)와 가스 샘플링 밸브(6 port)를 사용하였다. Supelco 회사 제품인 capillary VOC-column(0.53 mm ID, 30 m in length, 3 m Film thickness)를 사용하였으며, Carrier gas는 N₂(99.99% 이상 순도 : 주입속도 5 psi.), 주입구 온도는 180°C였다. 칼럼으로부터 유출되는 가스는 0.5 ml 용량의 valve loop에 포집되어 GC칼럼에 주입되었고, 오븐은 80°C에서 8분 정치한 후 4°C/분 비율로 승온하여 100°C에서 5분 유지하였다. Detector 감도는 검출 농도 한계(S/N ratio=3)를 0.1 ng/l 이상으로 유지시켰다. 표준 시료는 Supelco 회사제품의 가스 표준 시료(모두 A.C.S. grade 이상)를 이용하였다. 표준가스의 농도와 검출기 면적 값의 상관 관계선을 작성하여, 검량선의 신뢰도가 r²=0.99 이상이 될 때만 검량선을 사용하였으며, 또한 매 5개의 가스 시료 분석 후 표준

**Fig. 4.** Calibration curve for TCE on GC analysis.

가스 시료를 분석하여 새로운 검량선을 작성하여, 새로운 검량선과 이전 검량선과의 편차가 3% 이내로 일치할 경우에만 검량선을 사용하고, 그 이외의 경우 표준시료를 다시 조제하여 신뢰도 이상의 경우에만 사용하였다. TCE의 표준 검량선의 한 예가 Fig. 4에 나타나있다.

4. 결과 및 토의

4.1. 매질 입도 변화 실험

Fig. 5는 TCE로 오염된 조립질 Ottawa sand(F-35)와 세립질 Ottawa sand(F-110) 칼럼의 SVE 정화 효율을 보여준다. 조립질 Ottawa sand 칼럼(이하 F-35 칼럼으로 명칭)의 유출 가스 최대 농도는 442 mg/l인 반면 세립질 Ottawa sand 칼럼(이하 F-110 칼럼으로 명칭)의 최대 농도는 337 mg/l로서 입자가 작아짐에 따라 최대 유출 농도가 감소하는 것으로 나타났으나, 두 칼럼 모두 약 20 liter 공기 추출 후에는 유출 농도가 비슷하며, 40 liter 추출 후에는 모두 초기 TCE의 약 98%가 제거되었다. Fig. 6은 F-110 칼럼 실험 결과와 오염 주유소(Soil A) 그리고 오염 군부대 토양(Soil B) 칼럼 실험들의 정화 효율을 나타낸다. 실제 오염토양 실험들의 최대 유출 농도는 246 mg/l와 179 mg/l로서

F-35 칼럼보다 약 50% 정도 감소하였으며, 농도 감소 현상도 지연되어 나타난다. 따라서 SVE 정화 효율은 입자의 크기보다는 입자의 불 균질성에 더 영향을 받는 것으로 사료된다. 그러나 40 liter 공기 추출 이후에는 유출 농도가 균질한 Ottawa sand 칼럼 실험에서와 유사하게 매우 낮게 나타나며, 200 liter 공기 추출 후 칼럼 내에 남아있는 TCE의 양이 2 mg(TCE 주입량의 0.05%) 이하였다. 오염 토양 칼럼 결과들은 SVE 방법이 실제 오염 토양에서 VOCs 정화에 적합하다는 것을 입증한다.

4.2. 함수율 변화 실험

일반적으로 토양에서 함수율이 높을수록 토양 내 가스가 차지하는 공극이 줄어들어 공기가 통과할 수 있는 공간이 감소하게 되어 SVE의 효율이 줄어들게 되므로, 토양의 함수율이 낮을수록 정화 효율이 좋은 것으로 알려져 있다. 그러나 함수율이 너무 낮을 경우, 오염물질이 토양에 오히려 강하게 흡착하여 SVE의 정화효율이 떨어진다는 연구도 있으므로, 적절한 함수율을 유지하는 것이 바람직하다. 함수율이 15%와 55%인 F-35 sand로 충전된 칼럼 실험 결과들이 건조한 F-35 sand 칼럼 실험 결과와 비교되어졌다(Fig. 7). 최대 유출 농도가 함수율의 증가에 따라 약간 감소하였으나, 예상과는 다르게 전체적으로 함수율증가에 따른 정화 효율의 감소 현상은 크게 나타나지 않았다. 이것은 공기의 칼럼 주입량(0.03 l/min)이 칼럼 내 Ottawa sand 매질의 공극률에 비하여 낮기 때문에, 함수율에 의한 공기 흐름량의 변화에 크게 영향을 주지 못한 결과라고 판단되며, 만약 공기의 흐름을 크게 증가시키면 정화 효율은 감소할 것으로 사료된다. 또한 TCE를 칼럼 내 오염시킨 후, 수 시간 내에 공기 추출을 함으로써, TCE 자유상(free phase)이 수용액상(aqueous phase)으로 충분히 전환되기 이전에, 대부분의 TCE가

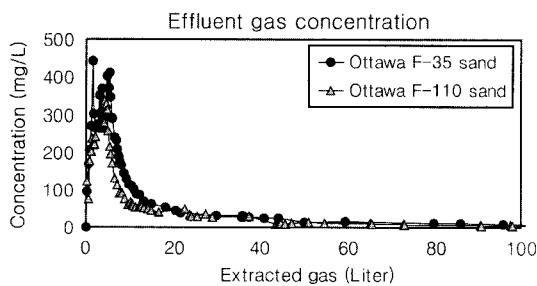


Fig. 5. Results of Ottawa sand column experiments contaminated with TCE.

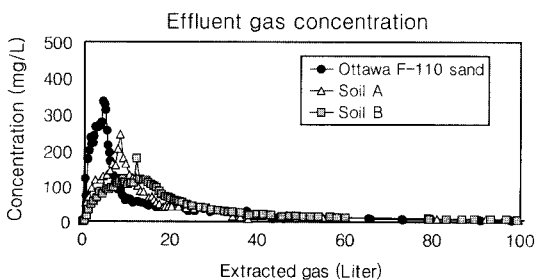


Fig. 6. Results of TCE column experiments with real soils.

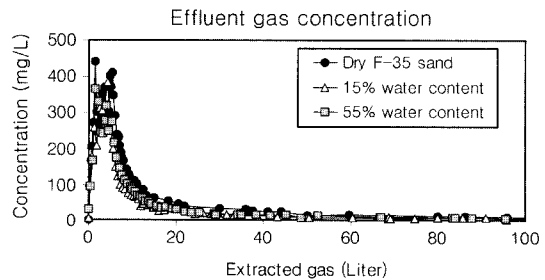


Fig. 7. Results of different water contents column experiments.

기상으로 전환되어 유출되기 때문에 발생하는 현상일 수 있다. 따라서 함수율과 SVE 정화 효율과의 관계 규명을 위해서는 보다 정밀한 실험이 요구된다.

4.3. 오염물의 매질 내 머무름 시간 변화에 따른 실험

실제 오염 토양 칼럼에 TCE를 오염시킨 후, 칼럼 양쪽을 밀봉하여 일주일 경과시킨 다음, 공기 추출을 실시하였다. Fig. 8은 일주일 경과 후 공기 추출을 실시한 칼럼 실험 결과와 오염물 주입 후 1시간이 지난 다음 바로 공기 추출을 실시하였던 기존의 칼럼 실험 결과를 나타낸다. 일주일 경과 후 공기를 추출한 실험에서 최대 유출 농도가 약간 감소하였으나 일반적인 정화 경향은 매우 흡사하였다. 다만 250 liter 공기 추출 후 각각의 칼럼 매질을 메탄올로 세정하여 칼럼 내에 잔존하는 TCE의 양을 측정된 결과, 일주일 경과 후 공기 추출을 한 칼럼에서는 7.8 mg, 오염 즉시 공기 추출을 실시한 칼럼에서는 0.35 mg이었다. 이 양은 초기 주입량(4000 mg TCE)과 비교하여 볼 때, 매우 적은 양으로 일 주일 경과 후 SVE를 실시한 칼럼에서도 높은 정화 효과를 나타내었으나, 일주일 동안 자

유상의 TCE가 토양의 점토질과 유기물질에 흡착되어 매질 내에 소량 남아있음을 추측할 수 있었고, 이러한 흡착량은 오염물이 매질에 존재하는 시간(오염 누출 후 경과 시간)이 증가함에 따라 증가할 것으로 사료된다.

4.4. 유류 오염물질의 대표성을 가지는 toluene 오염 정화 실험

대부분의 국내 토양의 VOCs 오염원이 유류 성분임을 감안하여, F-35 Ottawa sand와 주유소 토양에 toluene 4 g을 주입하여 칼럼 실험을 반복하였으며, Fig. 9는 이들 칼럼 실험 결과들을 보여준다. 유출 가스의 농도가 TCE 경우보다 낮고, 제거 시간도 길게 나타나는데, 이것은 toluene이 TCE 보다 휘발성이 적은 결과로부터 기인하며, 따라서 오염물질의 휘발 특성이 SVE의 정화 효율에 중요한 영향을 미치는 것으로 사료된다. 그러나 전체적인 제거 경향은 TCE 칼럼 실험과 유사하며, 두 칼럼 실험 모두 약 100 liter 공기 추출 시 초기 주입 toluene의 90%가 제거되고, 약 200 liter 추출 시 98% 이상이 제거되었다. 이와 같은 결과들로부터 SVE 방법에 의한 토양 내 VOCs를 제거가 매우 효율적이라는 것을 검증할 수 있었다.

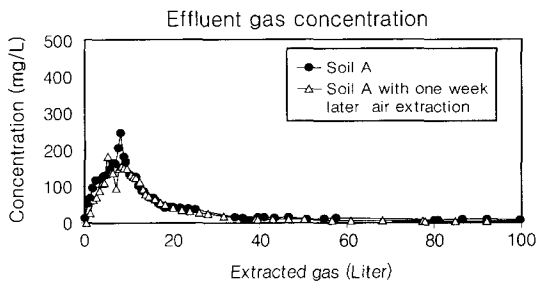


Fig. 8. Results of column experiments with different existing time of TCE.

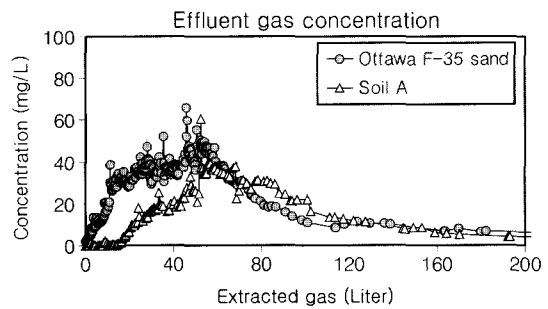


Fig. 9. Results of column experiments with toluene.

Table 3. Summary of column test results.

	Maximum effluent concentration (mg/l)		Total air extraction amount (liter)	Residual amount in column after air extraction	
	TCE	toluene		mass	%
Ottawa F-35 sand	442.1	-	199.3	-	-
Ottawa F-110 sand	337.4	-	280.4	-	-
Ottawa F-35 sand (15% water content)	384.1	-	157.8	-	-
Ottawa F-35 sand (55% water content)	364.6	-	150.9	-	-
Soil A	246.3	-	212.4	1.6	0.04
Soil B	179.1	-	225.4	-	-
Soil A with one week later air extraction	181.1	-	217.6	7.8	0.195
Ottawa F-35 sand (toluene)	-	65.7	245.2	0.007	1.75×10^{-4}
Soil A (toluene)	-	60.4	330.9	0.017	4.25×10^{-4}

5. 결 론

칼럼 실험 결과들이 Table 3에 요약되어있다. 본 실험을 통하여 토양의 특성들에 따른 SVE 정화 효율의 변화를 규명하였다. 본 실험에서는 토양의 입자 크기 자체나 토양의 함수율보다는 매질의 불 균질성에 의해, 그리고 오염물질의 특성에 의해 정화 효율이 변화하였다. 다양한 토양 조건에서의 칼럼 실험을 통하여 SVE 정화 방법은 VOCs를 정화하는데 매우 효율적이라는 사실을 확인할 수 있었다. 향후 SVE 방법의 보다 구체적인 설계와 정량적인 정화 효율 정보를 얻기 위해서는 2차원 실험이나 pilot 규모의 연구, 그리고 토양 변수 특성에 따른 정화 효율의 예측을 위한 수치 모델링 작업들이 필요하다고 사료된다.

사 사

이 논문은 2001년도 한국 학술진흥 재단의 지원(KRF-2001-041-D00261)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 환경부 (1995) 오염토양 정화기술 개발, 선도기술개발사업 "유해폐기물 처리기술 사업" 1차년도보고서. 삼성건설 기술연구소, 558p.
- EPA (1991) AWD Technologies integrated AquaDetox/SVE Technology: Applications Analysis Report. EPA/540/A5-91/002, 60p.
- EPA (1995) Subsurface volatilization and ventilation system (SVVS). EPA/540/R-94/529, 91p.
- EPA (1999) UVB (Vacuum Vaporization Well) system for treatment of VOC-contaminated soils: Innovative technology evaluation report. EPA/R-99/001, 47p.
- Fischer, U., Hinz, C., Schulin, R. and Stauffer, F. (1998) Assessment of nonequilibrium in gas-water mass transfer during advective gas-phase transport in soils. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 33, p. 133-148.
- Frank, U. and Barkley, N. (1995) Remediation of low permeability subsurface formations by fracturing enhancement of soil vapor extraction. *Journal of Hazardous Materials*, v. 40, p. 191-201.
- Johnson, P.C., Stanely, C.C., Kembrowski, M.W., Byers, D.L. and Colthart, J.D. (1990) A practical approach to the design, operation, and monitoring of in situ soil-venting systems. *Groundwater Monitoring Review*, v. 10, p. 159-178.
- Kaleris, V. and Croise, J. (1997) Estimation of cleanup time for continuous and pulsed soil vapor extraction. *Journal of Hydrology*, v. 194, p. 330-356.
- Kirtland, B.C. and Aelion, C.M. (2000) Petroleum mass removal from low permeability sediment using air sparging/soil vapor extraction: impact of continuous or pulsed operation. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 41, p. 367-383.
- Montgomery, J.H. and Welkom, L.M. (1990) Groundwater chemicals desk reference. Lewis Publishers, Michigan, 640p.
- Poppendieck, D.G., Loehr, R.C. and Webster, M.T. (1999) Predicting hydrocarbon removal from thermally enhanced soil vapor extraction systems 2. Field study. *Journal of Hazardous Materials*, v. 69, p. 95-109.
- Sawyer, C.S. and Kamakoti, M. (1998) Optimal flow rates and well locations for soil vapor extraction design. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 32, p. 63-76.
- Wilkins, M.D., Abriola, L.M. and Pennell, K.D. (1995) An experimental investigation of rate-limited nonaqueous phase liquid volatilization in unsaturated porous media: Steady state mass transfer. *Water Resources Research*, v. 31, p. 2159-2172.
- Yoon, H., Kim, J.H., Liljestrand, H.M. and Khim, J. (2002) Effect of water content on transient nonequilibrium NAPL-gas mass transfer during soil vapor extraction. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 54, p. 1-18.

2002년 3월 28일 접수, 2002년 6월 14일 게재승인.