한국지하수토양환경학회 춘계학술대회
2002년 4월 12-13일 서울시립대학교

토양의 특성에 따른 토양증기추출법 (Soil Vapor Extraction)의 Trichloroethylene (TCE)과 Toluene 정화 효율 실험

강현민, 이민희, 정상용
부경대학교 환경해양대학 환경지질과학과

napl1004@empal.com

요 약 문

토양증기추출(Soil Vapor Extraction)법을 이용하여 대표적 휘발성 NAPL (Non-aqueous phase liquid)인 TCE (trichloroethylene)와 toluene을 토양으로부터 제거하는 칼럼 실험을 실시하였다. 토양특성 및 증기추출 조건들이 정화효율에 미치는 영향을 규명하는데, 균질한 Ottawa sand와 실제 오염지역의 토양들을 직경 2.5 cm, 길이 30 cm인 유리 칼럼이 충진시켰으며, 빨갛게 염색된 TCE 또는 toluene 4 g이 주입되었다. 공기 유량계를 설치하여 0.03L/min의 일정한 속도로 공기가 주입되도록 하고, 퍼지장치를 설치하여 주입 공기의 습윤도를 99% 이상으로 유지하였다. 가스크로마토그래피로 유출 가스 농도를 분석하였다. Ottawa sand로 충진된 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 나타내었으며, 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 복원하기 위한 SVE법의 적용가능성을 확인할 수 있었다.

key word : TCE, toluene, SVE, NAPL, 오염정화, 토양, 증기추출법

1. 서론

토양증기추출법(SVE : Soil Vapor Extraction)은 토양 내 공기흐름을 유도하여, 토양내의 휘발성 유기 오염 물질들(VOCs : volatile organic compounds)을 기체상으로 추출하는 방법이다(EPA, 1991; EPA, 1995; EPA, 1999). 국외에서는 특히 주유소를 포함한 UST (underground storage tank) 주변의 VOCs 누출에 의한 토양오염정화에 널리 이용되고 있으며, 다른 정화방법보다 소요비용이 저렴하고, 설치가 간편하며, 토양 특성상 발생할 수 있는 제한요인들이 적기 때문에 휘발성 유기오염물질로 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 오염지역에서 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 90년대 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 연구에서는 토양 특성에 따른 SVE의 TCE,

toluene의 정화 효율의 변화를 실내 칼럼 실험을 통하여 규명하였다.

2. 본론

2.1 실험방법

SVE 정화 실험을 위하여, Ottawa sand (US Silica Company 제품), 주유소 및 군부대 실제 오염지역 토양이 사용되었으며, 초순도의 TCE (Trichloroethylene : Sigma-Adrich Company 제품)와 toluene (Sigma-Adrich Company 제품)이 오염물질로 이용되었다. 직경 2.5 ㎝, 길이 30 ㎝인 유리 칼럼에 토양을 충진시킨 후, Sudan Ⅳ로 염색된 TCE나 toluene을 진공주사기를 이용하여 4g씩 주입되었다. 제로 에어 (순도 99.9%이상)가 일정한 속도로 칼럼 내에 주입될 수 있도록 Air flow meter(Cole-Parmer Company 제품)를 설치하여 0.03L/min으로 주입하였으며, 주입 공기의 습윤도 (Humidity)를 99%이상으로 유지하기 위하여 Purge 장치를 설치하였다. 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 0.85 mm 미만 0.425mm 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 ℃ 이하 냉장 보관하였으며, 칼럼 실험을 위해 70 ℃ 오븐에서 6시간 동안 건조한 후 2mm 체로 걸러 사용하였다. 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. 칼럼으로부터 유출되는 가스는 자동 가스시료 주입밸브장치를 이용하여 가스크로마토그래피 (GC : Agilent 6890 Plus with FID)의 칼럼 내로 주입하여 농도를 분석했으며, SVE 실험 후 칼럼을 메탄올로 세정 (flushing)하여 실험 후에 남아있는 오염물질의 양도 GC로 분석하였다.

2.2 결과 및 토의

2.2.1. 매질 입도 변화 실험

Fig. 1는 TCE로 오염된 조립질 Ottawa sand (F-35)와 세립질 Ottawa sand (F-110) 칼럼의 SVE 정화 효율을 보여준다. 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. 2은 F-110 칼럼 실험 결과와 오염 주유소 (Soil A) 그리고 오염 군부대 토양 (Soil B)칼럼 실험들의 정화 효율을 보여준다. 실제 오염토양 실험들은 F-35 칼럼보다 최대 유출 농도가 약 50% 정도 감소하였으며, 농도 감소 현상도 지연되어 나타난다. 따라서 SVE 정화 효율은 입자의 크기보다는 입자의 불균질성에 더 영향을 받는 것으로 사료된다.

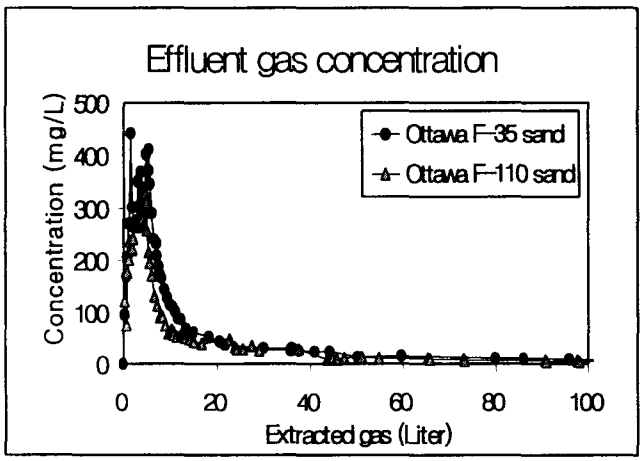

Fig. 1. Results of Ottawa sand column experiments contaminated with TCE.

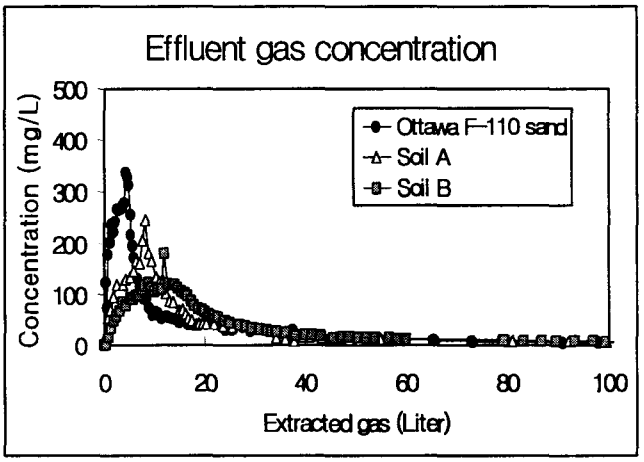

Fig.2. Results of TCE column experiments with real soils.

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 2mg (TCE 주입량의 0.05%) 이하였다.

2.2.2. 함수율 변화 실험

Fig. 3은 함수율이 15%와 55%인 F-35 sand로 충진된 칼럼 실험 결과들이 건조한 F-35 sand 칼럼 실험 결과와 비교되어졌다. 최대 유출 농도가 함수율의 증가에 따라 약간 감소하였으나, 예상과는 달리 전체적으로 함수율 증가에 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.

2.2.3. 오염물의 매질 내 머무름 시간 변화 실험

실제 오염 토양 칼럼에 TCE를 오염시킨 후, 칼럼 양쪽을 밀봉하여 일주일 경과시킨 다음, 공기 추출을 실시하였다. Fig.4는 일주일 경과 후 공기 추출을 실시한 칼럼 실험 결과와 오염물 주입 후 1 시간이 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 측정한 결과, 일주일 경과 후 공기 추출을 한 칼럼에서는 7.8 mg, 오염 즉시 공기 추출을 실시한 칼럼에서는 1.6 mg 이였다.

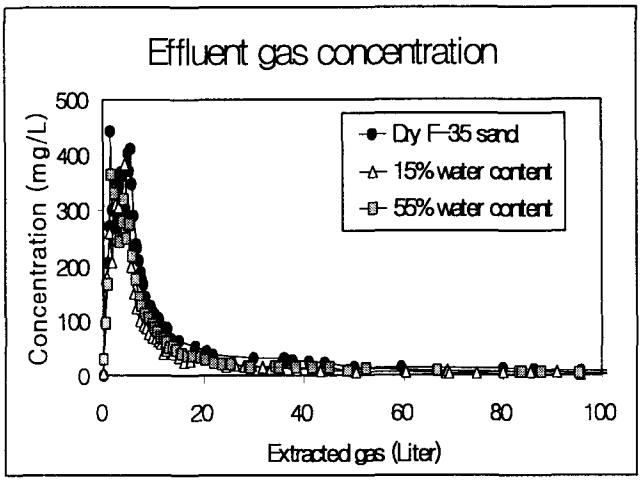

Fig.3. Results of different water contents column experiments.

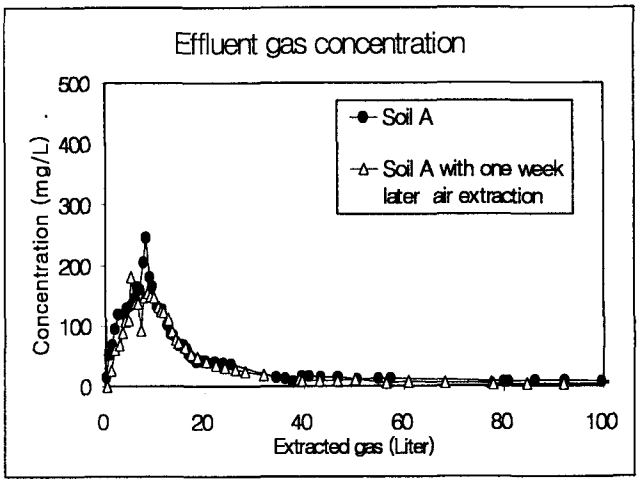

Fig.4. Results of column experiments with different existing time of TCE.

2.2.4 toluene 정화 실험

Fig.5는 F-35 Ottawa sand와 주유소 토양에 toluene 4 g을 주입하여 칼럼 실험한 결과들을 보여준다. 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.

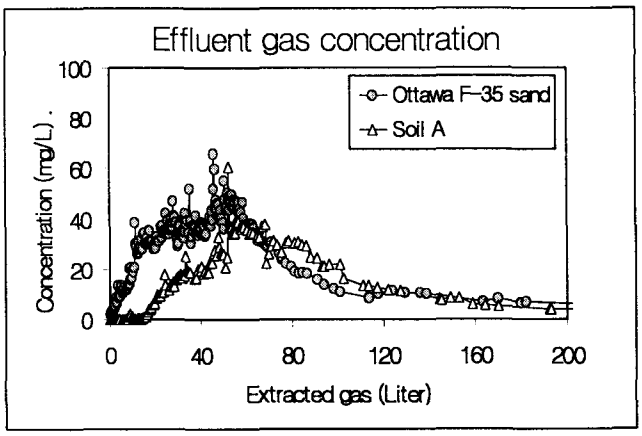

Fig.5. Results of column experiments with toluene.

3. 결론

본 실험을 통하여 토양의 특성들에 따른 SVE 정화 효율의 변화를 규명하였다. 본 실험에서는 토양의 입자 크기 자체나 토양의 함수율보다는 매질의 불균질성에 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 방법이 실제 오염현장에서 최대의 정화 성과를 거둘 수 있는 정보를 얻기 위해서는 2-차원 실험이나 pilot 규모의 연구, 그리고 토양 변수 특성에 따른 정화 효율의 예측을 위한 수치 모델링 작업들이 필요하다고 사료된다.

4. 참고문헌

환경부 (1995) 오염토양 정화기술 개발, 선도기술개발사업 "유해폐기물 처리기술 사업" 1차년도보고서, 삼성건설 기술연구소, pp. 558 (1995).

EPA (1991) AWD Technologies integrated AquaDetox/SVE Technology: Applications Analysis Report. EPA/540/A5-91/002, pp. 60.

EPA (1995) Subsurface volatilization and ventilation system (SVVS). EPA/540/R-94/529, pp. 91.

EPA (1999) UVB (Vacuum Vaporization Well) system for treatment of VOC-contaminated soils: Innovative technology evaluation report. EPA/R-99/001, pp. 47.

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., Kemblowski, 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, pp. 640.

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, 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 porpous 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) Journal of Contaminant Hydrology, v. 54, p. 1-18.