

토양증기추출법을 이용한 휘발성유기오염물의 제거에 관한 연구

Removal Behavior of VOCs in unsaturated Zone By Soil Vapor Extraction

이재훈* · 박규홍

*중앙대학교 토목공학과

I. 서론

오염된 지하수계를 치유하기 위한 기술들에는 가장 전통적인 양수처리법(Pumping and Treatment)을 비롯하여 오염물질의 물리, 화학적 성질을 이용한 초임계 용매추출법(Supercritical Solvent Extraction), 증기 추출법(Vapor Extraction), 생물학적 저감방안(Biological Degradation)등의 방법들이 오염된 토양의 정화에 적용되고 있다.

이러한 여러 가지 방법들 중에서 토양증기추출법은 상대적으로 적은 비용과 간단한 설계와 운전인자들로 인하여 현재 가장 널리 적용되고 있는 방법이라 할 수 있겠다.

토양증기추출법은 불포화 지층내의 한 개 또는 그 이상의 지역(Well)으로 공기를 주입하는 것으로 흘러들어간 공기흐름은 휘발성 유기화합물(VOCs)의 증발과, 잔류공극수내에 용해된 화합물의 휘발, 토양입자 표면에 흡착된 화합물의 탈착등을 일으켜 오염물을 정화하는 기술이다. 유동화된 유기성 증기와 공기는 오염물의 제거를 위해 설치된 추출정(Extraction Well)까지의 유로를 따라서 움직이게 된다.

본 연구에서는 첫 번째로 서로 다른 평균입경을 가지는 토양시료에 대하여 일정한 압력, 유량으로 추출을 실시하였을 경우 각 오염물의 잔류포화정도와 제거효율에 대해서 알아보고, 두 번째로 하나의 토양시료에 대하여 압력을 변화시켜 추출을 실시하였을 경우 각 오염물의 제거 양상이 어떻게 변화하는가에 대해서 조사하였다.

그리고 주입되는 공기의 유량을 변화시켰을 경우 제거효율의 변화에 대하여 알아보는 것이며, 마지막으로 간헐적인 추출을 실시하였을 때 연속적으로 추출하는 경우와 비교하여 제거효율의 변화에 대하여 조사하여 보았다.

II. 본론

II-1. 실험장치

실험은 지름7cm, 길이30cm의 일차원적 토양컬럼을 이용하였으며, 토양시료는 일반적으로 쉽게 얻을 수 있는 현장토를 사용하며 표준체를 이용하여 입경별로 구분하도록 하며, 토양의 물리적인 특성은 다음의 표와 같다.

<표1> 토양시료의 물리적 특성

U.S Std. Sieve #	Mean grain size (D_{50} , mm)	Porosity	Organic content (%)	Hydraulic conductivity (cm/s)
10-20	1.20	0.39	0.908	7.64×10^{-1}
20-40	0.6	0.36	1.000	1.14×10^{-1}
40-60	0.3	0.33	0.982	6.65×10^{-2}

또한 컬럼의 하부에서 8cm, 15cm, 22cm지점에 각각 thermocouple을 삽입하여 토양내 온도변화를 측정하였으며, 추출되는 기체시료는 GC/FID를 이용하여 분석하였다.

II-2. 실험방법

함수비10%정도를 유지하도록 토양시료를 준비한다. 이 때 미생물에 의한 생분해를 막기 위해 0.02%(by weight)의 Sodium azide를 사용한다. 진공펌프를 이용하여 Column내부를 진공상태로 만든 후 BTEX 혼합물을 상향류로 Column내에 흡입시킨 후 토양내 BTEX의 충분한 확산이 일어날 수 있도록 24시간 이상 방치한다. 유입/유출 밸브를 닫은 상태에서 컬럼내 시료의 온도가 상온이 될 때까지 한시간 가량 방치한 뒤 유입/유출 밸브를 열고 컬럼을 통해 공기를 주입한다. 이때 샘플링을 위하여 상향류로 압력을 걸어준다. 건조한 상태에서는 오염물의 흡착이 상당히 강하게 이루어질 수 있기 때문에 실험이 진행되는 동안 시료내 함수비의 저하를 막기 위하여 유입되는 공기에 적절한 수분을 함유시켜 컬럼내에 주입하도록 한다.

이 측정결과와 유량 Q (L/min)을 측정하여 휘발에 의한 오염물의 제거량을 계산한다. 오염물의 제거량 (M_{lost})은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

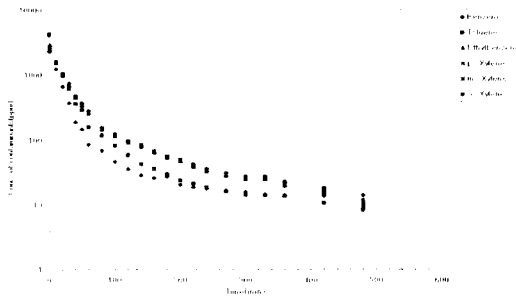
$$M_{lost} = \int_0^t QC_{vapor} dt \approx \sum_{i=1}^n (QC_{vapor}(t_i - \Delta t_i) + QC_{vapor}(t_i)) \Delta t_i$$

II-3. 실험결과

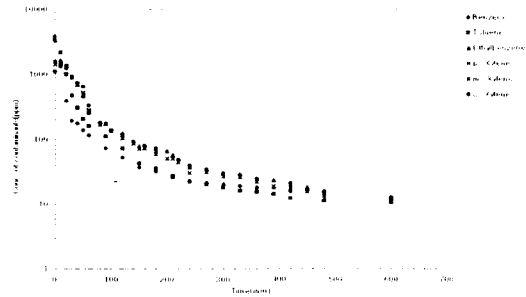
실험은 균일한 입경을 가지는 세가지 종류의 토양시료를 이용하여 실시되었다. 일반적으로 증기추출과정에서 추출된 오염물의 농도는 시간에 따라서 다음의 세 가지 상태로 제거가 된다. 초기단계(flushing phase)에서는 오염된 기체의 농도가 상대적으로 높으며, 장시간의 토양-가스상 평형상태를 반영한다. 두 번째 단계(evaporation phase)에서 오염물은 추출 증기가 쉽게 흐를 수 있는 좁더 통기성이 좋은 지역내 오염물의 신속한 제거가 이루어진다. 세 번째 단계(diffusion phase)는 통기성이 나쁜 지역내의 오염물이 더욱 좋은 지역으로의 확산을 통하여 오염물의 제거가 이루어지므로 아주 느리게 이루어진다.

중력에 의한 배수가 끝난 뒤 오염된 토양내 오염물의 잔류포화도는 조립토($D_{50}=1.2\text{mm}$)와 세립토($D_{50}=0.31\text{mm}$)에서 20~28%정도를 보이며, 이는 상대적으로 세립토에서 모세관력이 크기 때문에 입경이 증가할수록 잔류포화도가 높아진다.

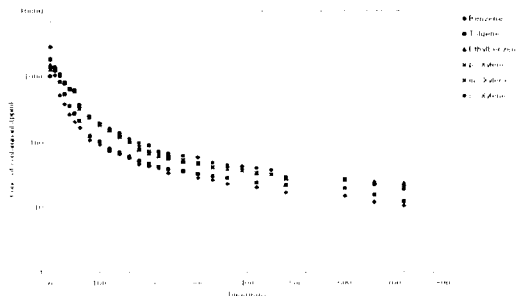
오염물의 시간에 따른 농도변화는 세가지 종류의 토양에서 모두 비슷한 양상을 보이며(그림 1~3), 시간에 따라 오염물의 농도는 급격하게 감소하며 점차 일정한 농도를 가지게 된다.



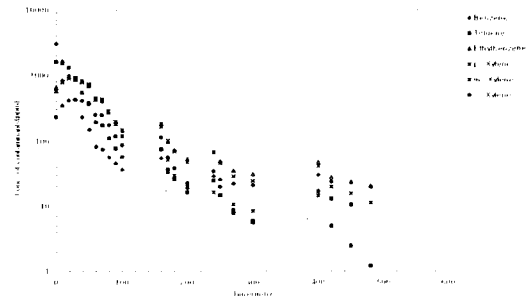
<그림 1> $D_{50}=1.2\text{mm}$ 의 경우



<그림 2> $D_{50}=0.61\text{mm}$ 의 경우



<그림 3> $D_{50}=0.31\text{mm}$ 의 경우



<그림 4> pulsed venting

증기추출의 초기단계에서 오염물의 배출가스농도는 조립토에서 높은농도를 가진다. 모든 실험의 초기농도값은 각 오염물의 포화농도 이상의 높은 값을 가지는데, 이는 오염물의 액상덩어리의 존재로 인하여 추출이 이루어지면서 재부유가 일어나기때문으로 보인다.

또한, 주기적으로 진공펌프의 추출을 정지시켜서 실험을 실시하였다. 그림4에서 보는바와 같이 추출을 정지시킨 동안 토양입자의 표면에 흡착된 오염물이 기체상으로 서서히 확산되어 보다 높은 농도로 제거됨을 볼 수 있다. 결과적으로 제거효율은 연속류 상태와 비슷하나 제거시간의 단축을 가져올 수 있었다.

III. 결 론

1. 제거시간에 따라 배출되는 오염물의 농도는 감소하며, 오염물의 상당량이 초기단계에 제거됨을 볼 수 있다.
2. 세립토에서보다 조립토에서 제거효율이 높음을 볼 수 있으며, 제거시간도 단축된다.
3. 단속류의 흐름을 발생시킴으로서, 연속류상태에서와 비슷한 제거효율을 얻을 수 있으나 상대적으로 작은 제거시간을 얻을 수 있다.

참고문헌

1. Sims, R, C " Soil Remediation Techniques at Uncontrolled Hazardous waste sites, A Critical Review." *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol 40, p 704, 1990
2. Brusseau, M.L., Jessup, R.I., and Rao, P.S.C., "Transport of Organic Chemicals by Gas Advection in Saturated or Heterogeneous Porous Media. Development of a Model and Application to Column Experiments," *Water Resour. Res.*, vol 27, p. 3189, 1991
3. Gierke, J.S., Hutzler, N.J., and McKenzie, D.B. "Vapor Transport in Column of Unsaturated Soil and Implications for Vapor Extraction," *Water Resour. Res.*, vol 25, no. 1, p. 81, 1989
4. Marley, M. C. and Li, F., "Air Sparging: An efficient Groundwater and Soils Remediation Technology", *Air Sparging for Site Remediation*, Lewis Publishers, pp. 23-37, 1994.
5. Marley, M. C., Hoag, G. E., Baehr, A. L., "Removing Volatile Contaminants From the Unsaturated Zone by Inducing Advective Air-phase Transport", *J. Contaminant Hydrology*. 1989