

토양증기추출법을 이용한 유기화합물의 제거효율에 관한 연구

이 병 환 · 한 경 표 · 이 종 협
서울대학교 공과대학 화학공학과

1. 서 론

유기화합물로 오염된 토양은 쉽게 지하수를 오염시키며, 장기간 오염원으로 남아있는 특성이 있다. 연료유 또는 유기화합물은 일반적으로 물에 대해 낮은 용해도를 나타내며, 누출된 초기에는, 유기물 상태의 액체의 특성을 유지하며 불포화 토양지역을 흐르나, 시간이 지남에 따라 토양의 기공에 포화된 상태로 남게 된다. 즉, 토양의 미세 기공에 갇혀 있는 액체 상태의 유기 화합물은 물리적으로 커다란 안정성을 유지하여, 일단 토양과 혼합물을 이루게 되면 물과의 낮은 용해도로 인하여 장기간 토양 및 지하수의 오염원으로 남게 되는 것이다[1]. 따라서, 토양오염 정화기술은 토양의 거대기공에 포함된 유기화합물의 제거뿐만 아니라, 미세기공으로부터의 유기화합물 제거까지도 가능한 기술이어야 한다.

토양증기추출법(Soil Vapor Extraction : SVE)의 원리는 인공적인 방법으로 공기의 흐름을 유도함으로써 토양의 기공에 잔류하는 유기화합물의 증발을 촉진하는 것이다[2]. 오염토양에 기계적으로 진공 또는 가압의 공기를 공급함으로써 연속적인 공기 흐름을 유발시키고, 결국 공기압의 변화를 유도한다. 이 과정을 통하여 유기화합물과 같은 오염물질은 토양으로부터 공기로 전달된다. 오염된 공기는 대기중으로 배출되기 전에 처리되어야 한다.

토양증기추출법과 관련된 연구결과들을 종합하여 보면, 많은 변수가 토양증기추출법의 적용 가능성, 설계, 운전, 효율 및 경제성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이 변수들 중 오염된 토양의 기공도와 투수계수(permeability)가 토양증기추출법의 제어 및 운전에 매우 중요한 요소임이 밝혀졌다.

본 연구에서는 실험실 규모의 칼럼 형태의 반응시스템을 사용한 실험 연구를 하였으며, 토양의 특성에 따른 선택된 유기화합물의 연속적인 흡착 및 탈착 현상을 규명하였다.

2. 이 론

토양에서 오염물질의 제거에 관여하는 공정은 크게 다섯가지로 나눌 수 있다. 기상의 축방향으로의 이류, 지하수를 비롯한 수용액상으로부터의 기화, 토양입자로부터의 탈착, 수용액에 녹지 않은 상태로 존재하는 오염물질의 기화, 생분해 반응 등이 그것이다. 본 연구에서는 충전층 반응기에 인공토양을 채우고 실험을 수행하였다.

3. 실 험

본 연구에서 실험에 사용한 장치 구성도는 아래 Fig.1과 같다. B가 충전층 반응기로, 이곳에 시료를 채우고 오염물질을 시린지로 주입하여 흡착시켰다. 실험 도중 충전층 반응기에서의 온도와 압력 분포를 관찰하기 위하여 manometer(C)와 온도계(A)를 충전층 반응기에 연결하였다. 분석은 충전층 반응기 출구에서 행해지며 GC(H)를 사용하였다.

본 연구에서 시료는 인공 토양을 사용하였다. 실제 토양은 복합적인 요인이 작용하여, 여러 가지 혼합 요인을 분리하여 분석하려는 본 실험 목적에 부합하지 않는다. 따라서, 본 연구에서는 미세 기공이 없어 흡착능이 작은 glass beads로부터 흡착능이 강한 molecular sieve, activated charcoal 등의 인공 토양을 사용하였다.

본 연구에서 인공합성토양에서의 흡착 및 탈착현상의 규명을 위하여 헨리 상수, 점도, 밀도, 생분해성 등의 값들이 상대적으로 차이를 보이는 물질인 toluene, methyl ethyl ketone(MEK, 2-butanone)과 trichloroethylene(TCE) 등의 네 종류의 유기화합물을 오염물질로 선정하였다. MEK는 다른 종류의 화합물에 비하여 헨리상수가 작고, TCE는 밀도가 상대적으로 크며, 생분해 정도가 낮은 물질이다.

Table 1. Simulated soils

	Size [mm]	Pore volume [cc/g]	Pore size [Å]	Surface area [m ² /g]	Organic carbon content
Glass bead	0.5	-	-	1.57 × 10 ⁻³	-
Sand	0.45-0.6				
Molecular sieve 13X	1.41-2.38	0.148	10	348 or 459	-
Activated charcoal	powder				

Table 2. Contaminants

Contaminants	Henry's constant (at 15°C)	Octanol-water partition coefficient	Vapor pressure [mmHg]	Density	Solubility in water
Toluene	0.2081	2.69	22.4	0.866	0.05 ¹⁹⁾
MEK	0.0165		81.8 ²⁰⁾	0.805 ²¹⁾⁴⁾	35 ¹⁹⁾
TCE	0.2821	2.42	60 ²⁰⁾	1.466	0.1 ²²⁾

본 실험에서 충전층 반응기는 직경 2cm, 높이 10cm인 것을 사용하였으며, 토양층기추출법에 영향을 미치는 인자로, 본 연구에서는 공기의 유속, 초기의 토양오염 정도, 충전층 반응기내의 기공도, 충전층 반응기내의 수분 함량 등을 실험 변수로 설정하였다.

4. 결과 및 토론

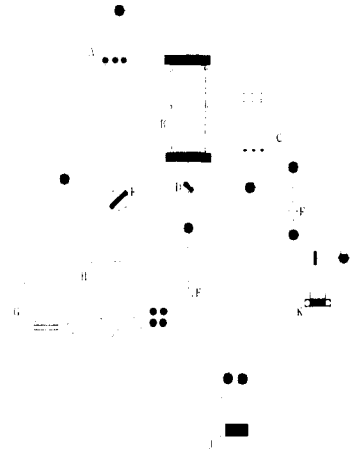
톨루엔을 오염물질로, 수분함량과 기공도, 초기농도를 동일하게 하고, 인공토양을 달리하여 실험을 수행하였을 때 제거효율이 glass bead, sand, molecular sieve 13X의 순으로 좋아, 미세기공이 적을수록 제거효율이 높음을 알 수 있었다. 그리고, 톨루엔을 오염물질로, glass bead를 인공토양으로 사용하여 초기농도를 동일하게 하고 수분함량을 변화시켜 가며 제거효율을 비교해본 결과, 인공토양이 일정량 이상의 수분을 포함하고 있으면 제거효율에 큰 영향을 미치지 않으며, 수분함량이 0일 때 제거효율이 급격히 낮아짐을 관찰할 수 있었다. 이것은 수분이 존재할 때는, 친수성인 glass bead의 표면이 일차적으로 수분에 의해 둘러싸이고 수분의 표면에 오염물질이 존재하므로 오염물질의 제거가 용이한 반면, 수분이 없을 경우, 오염물질인 유기화합물이 glass bead의 표면에 직접 흡착하므로 제거가 어려워지기 때문이다. MEK를 오염물질로 수분함량과 기공도, 초기

농도를 동일하게 하고, 인공토양을 달리하여 실험을 수행하였을 때 제거효율이 molecular sieve 13X, sand, glass bead의 순으로 좋아, 톨루엔의 실험결과와 반대의 양상을 보였다. MEK의 탈착 현상은 미세기공의 유무 혹은 다소보다는 흡착되는 토양의 구조에 좌우되는 것으로 예측된다. MEK를 오염물질로, glass bead를 인공토양으로 사용하여 초기농도를 동일하게 하고 수분함량을 변화시켜 가며 제거효율을 비교해본 결과, 톨루엔을 시료로 하여 실험한 결과와 유사하게 나왔다. 그러나, 톨루엔이 탈착 초기에 많은 양의 탈착이 일어난 반면, MEK는 수분 함량이 많을수록 탈착이 완만하게 천천히 일어남을 관찰할 수 있었다. 그 원인은 MEK의 물에 대한 용해도가 크기 때문이다. 아래 Fig.2와 Fig.3에 실험결과를 나타내었다.

이와 같은 실험결과를 이용하여 오염토양의 정화를 위한 공학적 방법을 개발하기 위한 연구가 진행 중이다. 이를 위하여 서로 다른 토양 특성에 따른 오염물질의 흡착, 탈착 현상에 대한 모델링 연구가 진행 중이다. 이 결과는 SVE를 이용하여 실제 오염토양을 정화하고자 할 때, 이 기술의 타당성을 비롯하여 제거에 필요한 시간, 유량 및 제거효율 등에 관한 정보를 제공할 것이다.

참 고 문 헌

1. Hunt, J.R., et al.: Water Res., 24(8), 1247(1988).
2. Downey, D.C. and Elliott, M.G.: Environmental Progress, 9(3), 169(1990).



- A. thermometer B. soil column C. manometers D. three-way valve E. sampling valve
 F. flowmeter G. personal computer H. gas chromatograph I. nitrogen J. contaminants
 K. mass flow controller

Fig.1. Lab. experimental apparatus

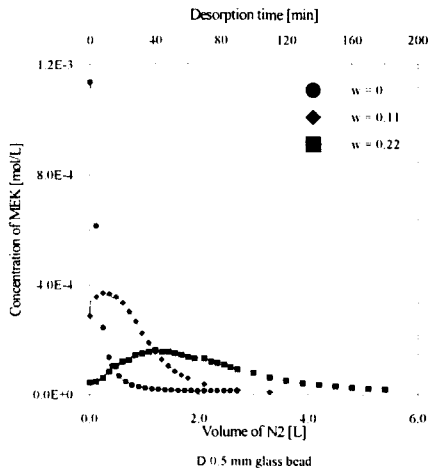


Fig.2 Desorption of MEK
(Effluent gas concentration)

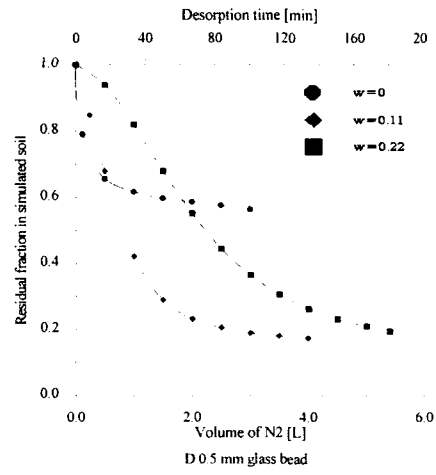


Fig.3 Desorption of MEK
(Desorption efficiency)