한국지하수토양환경학회 추계학술대회
2001년 9월 21-22일 전 주 대 학 교

사질토양에서의 PAC 함량에 따른 benzene의 흡착과 생분해 비교

황 인 · 김 동 주
고려대학교 지구환경과학과
djkim@korea.ac.kr

요 약 문

사질 토양에서의 유기물 함량이 벤젠의 흡착과 생분해에 미치는 영향을 분석하기 위하여 다양한 분말 활성탄(PAC)함량 조건에서 비평형 배치 실험을 실시하였다. 비평형 배치실험에서 벤젠의 흡착과 생분해를 비교하기 위하여 BTEX 화합물에 대한 분해능이 우수한 *Pseudomonas aeruginosam*의 유무에 따른 두 가지의 실험 조건을 설정하였다. 실험 결과 반응 시간 1일까지 빠른 흡착양상을 보였으며, 2일부터 20일 까지는 매우 느린 흡착 양상을 보였다. 활성탄의 함량이 증가할수록 벤젠의 흡착은 증가하는 것으로 나타났으며, *Pseudomonas aeruginosa*가 첨가된 실험에서는 PAC 함량이 증가할수록 흡착은 증가하였으나 bioavailability factor (B_f) 값이 감소하였다. 이는 bioavailability가 흡착에 의해 제한됨을 지시한다.

key word : Benzene, PAC, *Pseudomonas aeruginosa,* Sorption, Biodegradation, Bioavailavility

1.Introduction

산업화로인한 유기성 유해 폐기물의 발생 및 유기 용매의 사용의 증가에 따른 부적절한 관리 또는 누출 등에 의한 지하수 및 토양의 오염이 중요한 환경 문제로 대두되고 있다. 토양에서의 오염물질의 흡착은 미생물학적 activity, degradation, transport에 영향을 미치는 요인이므로(Joseph et al., 1996), 유기물 함량별 흡착 양상에 따른 오염물질의 거동에 관한 연구가 필요하다. 본 연구의 목적은 오염물질의 흡착제로 쓰이는 PAC의 흡착 양상에 따른 벤젠의 생물학적 분해능을 비평형 배치 실험을 통하여 비교하는데 있다.

2. Materials and Methods

2-1. Kinetic batch test without microorganism

멸균된 입경 2 mm 이하의 사질토양과 입경 27㎛ 이하의 분말 활성탄을 균질하게 혼합하여 만든 토양 시료 10g(PAC 함량 0%, 0.5%, 1%, 2%)을 500ml glass 플라스크에 넣은 후 M9배지를 포함한 pH 7.0, DO 8.6 ppm의 벤젠용액 300ppm을 주입하여 밀봉하고 140rpm으로 총 20일 동안 반응 시켰다. 반응 시간별 벤젠의 농도 변화를 조사하기 위하여 1ml glass syringe를 사용하여 3개의 중복시료를 추출하였다. 추출된 시료는 0.5ml e-tube에 주입하여 2400rpm으로 원심분리 후 상등액 0.2㎕를 채취하여 High Performance Liquid Chromatography로 분석하였다.

2-2. Kinetic batch test with microorganism

토양 시료 및 벤젠 수용액 그리고 시간별 시료채취 및 분석조건은 앞의 비평형 배치 실험과 동일하나 이 경우 미생물(*Pseudomonas aeruginosa*)을 10^9CFU/ml의 농도로 주입하여 벤젠 수용액에서의 미생물 농도를 10^7CFU/ml로 만들어 140rpm으로 총 20일 동안 흡착에 따른 벤젠의 생분해 효과를 측정하였다.

2-3. Analysis of biodegradation coefficients

미생물의 생물학적 이용도 Bioavailability factor B_f는 다음 식에 의하여 표현된다(D'Adamo et al, 2000).

$$r_b = -B_f k_b C \quad (1)$$

여기서 r_b는 rate of biological transformation [mg/L day $^{-1}$]로 미생물에 의해 일 일당 소비되는 벤젠의 농도, k_b는 first-order biodegradation rate constant [day $^{-1}$]로 일차 생분해 비계수, C는 벤젠 농도 [mg/L] 이다.

본 연구에서는 식(1)에 나타난 k_b(first-order biodegradation rate constant [day $^{-1}$])를 다음과 같은 식(2)에 의하여 산출하였다.

$$C = C_0 \times e^{(-k_b t)} \quad (2)$$

여기서 C_0는 수용액의 초기 농도[mg/L], C는 시간 t일 때의 수용액의 농도 [mg/L] 이다.

미생물에 의해서 분해된 벤젠의 양을 알기 위하여, 미생물이 존재하지 않는 벤젠 양에 흡착과 생분해가 동시에 발생한 벤젠 잔류량을 더하여 생분에에 의한 벤젠의 잔류농도를 다음실과 같이 구하였다.

$$RBC = SMC + RBCSB \quad (3)$$

여기서 RBC(Residual Benzene Concentration)는 벤젠의 상대 잔류 농도, SBC(Sorbed Benzene Concentration)는 흡착된 벤젠의 농도, RBCSB(Residual Benzene Concentration after sorption and biodegradation)는 미생물이 존재하는 kinetic batch test에서의 흡착과 생분해가 발생한 후 벤젠의 상대 농도이다. 따라서 시간에 따른 생분해 된 농도는 다음과 같이 표현 되었다.

$$BBC = 1 - RBC \quad (4)$$

여기서 BBC(Biodegraded Benzene Concentration)는 생분해된 벤젠의 상대 농도이다.

PAC 함량별 k_b'는 식(4)에 의하여 산정된 농도에 식(2)를 적용하여 결정되었으며, k_b는 매질체가 없는 수용액에서만의 미생물의 생분해에 의한 벤젠의 잔류 농도로부터 결정되었다(박과 김, 2001). 본 연구에서는 이 두가지 k_b 값의 비를 bioavailability factor로 설정하였다.

$$B_f = \frac{k'_b}{k_b} \quad (6)$$

여기서 B_f는 토양 시로별 bioavailability factor, k_b' 토양 시료별 일차 생분해비 계수 first-order biodegradation rate constant, k_b 벤젠 용액만 존재하는 상태에서의 first order biodegradation rate constant 이다.

3. Results and Discussion

3-1 Kinetic test without microorganism

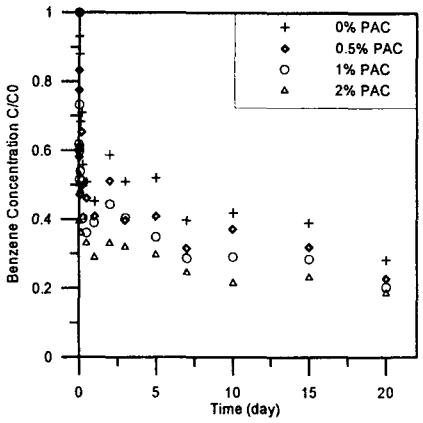

Fig. 1 Concentration of benzene with time obtained from the kinetic batch test without microorganism for various PAC content.

PAC 함량별 흡착에 의한 벤젠의 경시적 농도 변화가 그림 1에 도시되어 있다. 반응 시간 1일 내에 benzene의 상대농도 값은 0.45이하로 감소하는 빠른 흡착 양상을 보였으며, 그 이후 2일까지 벤젠의 농도가 일시적으로 증가하는 탈착현상이 나타났다. 2일부터 20일까지는 벤젠 수용액의 변화가 낮은 완만한 흡착단계를 보여주고 있으며, 20일 전후로 더 이상 흡착이 나타나지 않고 평형에 도달한 것으로 보인다. 이것은 Jaffe at al,(1995)이 설명하는 소수성 화합물 이동성에 대한 모델링에서의 흡착은 반응 시간에 따라 빠른 흡착과 느린 흡착 두 단계로 나뉜다고 한 결과와 일치하며 Xue(1995)가 Alachlor를 이용한 kinetic test에서 반응 초기의 빠른 흡착과 후기의 느린 흡착의 결과와도 유사한 양상을 보여주었다. 이러한 현상은 물질 반응이 평형에 도달 할 때까지 수용액과 토양입자 사이 상호 반응에 의한 것이라고 생각된다. 즉 초기에 빠른 흡착과 탈착, 그리고 후기의 일정 농도까지 반응이 일어나므로 이 두 경계에 서로 다른 기준이 적용되어야 한다고 사료된다.

PAC 함량이 증가할수록 토양에 흡착되는 벤젠의 양은 상대적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 토양내 유기물과 점토의 함량이 많을수록 제초제의 흡착은 증가, 탈착은 감소한다는 라 등(2000)의 연구 결과와 일치하며, 토양내 유기 탄소 함량과 제초제의 흡착율은 비례관계에 있다고 한 Mallawatantri(1996)의 결과와도 일치한다.

3-2 Kinetic test with microorganism

PAC 함량별 흡착과 미생물의 생분해에 의한 벤젠의 경시적 농도 변화가 그림 2에 도시되어 있다. PAC 함량별 농도 감소는 미생물이 존재하지 않는 kinetic 실험에서와 마찬가지로 1일까지의 빠른 흡착과 분해에 의한 농도 감소와 2일부터 20일까지 벤젠 농도변화가 낮은 완만한 흡착과 분해가 이루어 졌다. 20일 이후에 PAC 함량이 0.5%인 사질 토양에서의 농도가 가장 낮게 나타났으며, 다른 PAC 함량의 사질토양에서는 거의 유사한 값 들을 가지는 것으로 나타났다.

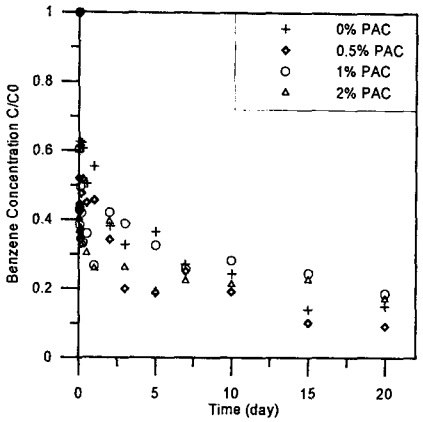

Fig. 2 Concentration of benzene with time obtained from the kinetic batch test with microorganism for various PAC content.

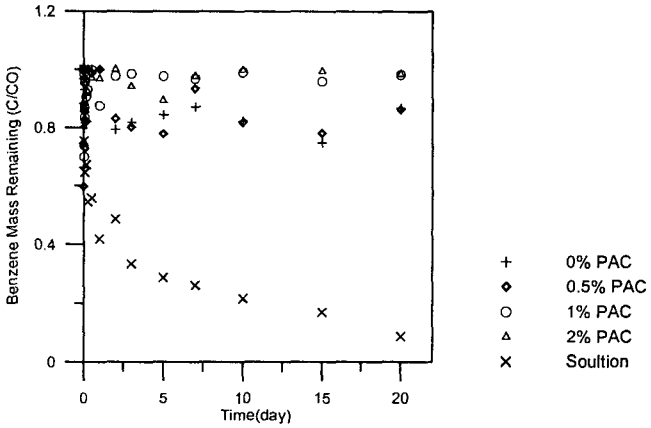

Fig. 3 Residual benzene concentration

PAC 함량별 미생물에 의한 벤젠 농도 감소 효과가 그림 3에 도시되어 있다. PAC 함량이 증가할수록 잔류하는 벤젠의 농도가 높은 것으로 나타났는데, 이는 토양입자 내부에 흡착된 벤젠을 미생물이 이용하지 못하여, 실질적인 생분해가 PAC 함량 증가에 따라 감소하는 것으로 사료된다.

Table. 1 k_b and B_f Values determined from benzene mass remaining

PAC Concentration	K_b [day ^{1}] 0 ~ 20 day	B_f [_] 0 ~ 20 day
Solution	0.110	1
0%	0.015	0.134
0.5%	0.014	0.128
1%	0.002	0.019
2%	0.002	0.015

PAC 함량에 따른 벤젠의 잔류량으로부터 산정한 k_b와 B_f는 표 1과 같다. 여기서 PAC 함량이 증가할수록 B_f가 급격히 감소하는 경향을 보이는데 이는 그림 3의 결과와도 일치한다. 즉 토양 입자에 흡착된 벤젠의 양이 PAC함량에 따라 증가하기 때문에 흡착이 생분해를 심

각하게 제한하여 때문에 B_f가 용액만 존재하는 상태의 값보다 매우 작은 값을 나타냈다고 사료된다. 결과적으로 흡착능이 큰 토양일수록 미생물의 효과는 감소하는 것을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 D' Adamo et al.(2000)의 결과와도 일치하였다.

4. 참고문헌

1. 라덕관, 박상숙, 정재성, 김영규, 오태선, The adsorption and desorption of Herbicides in Soil, J. of KSEE, 6, pp. 1045-1053 (2000).
2. 박춘화, 김동주, Biodegradation Kinetics of Benzene by *Pseudomonas aeruginosa,* manuscript in preparation
3. A. P. Mallawatantri, B. G. McConkey, and D. J. Mulla, Characterization of Pesticide Sorption and degradation in Macropore Linings and Soil Horizons of Thatuna Silt Loam, J, Environ. Qual., 25, pp. 227-235 (1996).
4. Joseph J. Piatt, Debera A. Backhus, Paul D. Capel, and Steven J. Eisenreich, Temperature-Dependent Sorption of Naphthalene, Phenanthrene, and Pyrene to Low Organic Carbon Aquifer Sediment, Environ. Sci. Technol., 30, pp. 751-760 (1996).
5. Peter C. D'Adamo, Edward J. Bouwer and William P. Ball., Contaminant Bioavailability and Relevance to Bioremediation, Proceedings of the International Symposium on Hydrogeoloty and the Environment, pp 1-7 (2000).
6. Peter R. J., and David M. Tuck., Theoretical study of the partitioning of organic solutes in soil, Princeton University
7. S. K. Xue and H. M. Selim., modeling Adsorption-Desorption Kinetics of Alachlor in a Typic Fragiudalf, Environmental Quality, 24, pp 896-903 (1995).