

모델을 이용한 음식물퇴비 혼합토양에서의 Pb 흡착 및 이동성 평가

The assessment of the adsorption and movement of Pb in mixed soil with food compost using model

주유연* · 강선홍

You-Yoen Joo, Seon-Hong Kang

광운대학교 환경공학과

(2008년 3월 3일 접수 ; 2008년 4월 10일 채택)

Abstract

Food compost, having a higher organic contents than soil, could be an alternative material to prevent the proliferation of heavy metals contamination in soil. In this study we used a convection-dispersion local equilibrium sorption model(CDE) and a two-site non-equilibrium sorption model to find the effects on the adsorption and transportation of Pb by mixing food compost with soil and we also tried to find the effect of velocity and concentration of the injected solution on the characteristics of Pb. We measured Pb concentrations in injection-liquid and in effluent, and then applied them to CXTFIT program. As a result of column experiments, some parameters(D , R , β , ω) used in two-site non-equilibrium adsorption model were obtained. Characteristics of Pb adsorption and transport were analyzed using the parameters(D , R , β , ω) obtained from the CXTFIT program, We could know that mixed soil with food compost showed a higher adsorption capacity from the retardation factor(R) calculated from the breakthrough curve(BTCs) of Pb. R_s of soil and mixed soil are 20.45, 37.45 respectively, indicating that the adsorption and the transportation characteristics could be accessed quantitatively by using of two-site non-equilibrium adsorption model.

Key words : transportation, assessment, heavy metal, adsorption, Pb, model

주 제 어 : 이동, 평가, 중금속, 흡착, 납, 모델

1. 서론

오염물질의 토양 내 이동은 이류(convection), 확산(dispersion), 흡착(adsorption), 화학반응(chemical reaction), 및 미생물 분해 등에 의해 영향을 받으며 그 중 토양입자에 오염물질의 흡착이 가장 중요한 역할을 한다(Guo, 1997). 토양의 흡착력은 각 중금속 자체의 특성에 따라 달라지기도 하고 토양의 pH, CEC(Cation Exchange Capacity), Clay, CaCO_3 , 유기물함량 등에 의해 크게 영향

을 받기도 한다(Bouchard, 1998).

음식물쓰레기로 만든 퇴비는 일반 토양에 비해 훨씬 많은 유기물을 함유하고 있어 토양개량에 효과적일 뿐만 아니라 중금속의 흡착에도 우수하여 토양 중금속오염이 확대되는 것을 막기 위한 효과적인 방안이 될 수 있다. 그래서 본 연구에서는 음식물 퇴비의 혼합에 따른 토양내 유기물함량 차이가 납(Pb)의 흡착 및 이동에 미치는 영향을 이류-확산 국부적 평형 흡착모델(convection-dispersion local equilibrium sorption model)과 Two-site 비평형 흡착모델

*Corresponding author Tel: +82-2-940-5075, FAX: +82-2-911-2033, E-mail: jyy@hanmail.net(Joo, Y.Y.)

(non-equilibrium sorption model)을 이용하여 파악하고 아울러 주입되는 중금속의 유속 및 농도 변화가 납(Pb)의 흡착 및 이동에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1. 평형흡착

일반적으로 흡착되는 화합물의 양은 일정온도에서 화합물의 농도(C)의 함수로 나타내는데, 이를 흡착 등온선(sorption isotherm)이라고 한다. 흡착등온선에는 식(2.1)의 선형흡착 등온선과 (2.2)와 (2.3)에 나타난 Freundlich 흡착등온선이 있다. 이때, 화합물의 흡착량을 S, 평형상태에서의 농도를 C_e, 화합물의 분배계수를 K로 나타낸다.

$$S = K_p C_e \quad (2.1)$$

$$S = K_F C_e^N \quad (2.2)$$

$$\log S = \log K_F + N \log C_e \quad (2.3)$$

여기서, K_F : Freundlich partition coefficient(L³/M)^N
N : Freundlich exponent coefficient(-)

본 연구에 사용된 토양내 용질 이동에 관한 개념적 모델은 일차원적 이류-확산 국부적 평형흡착모델(Convection-Dispersion local Equilibrium sorption model, 이하 '평형흡착모델'로 표기)로서 이류-확산 방정식에 흡착을 고려한 추가항을 포함하여 이용하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \rho \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.4)$$

여기서, C : 용질의 농도(M/L³)

D : 확산계수(L²/T)

t : 시간(T)

v : 평균 공극 유속(L/T)

x : 거리(L)

S : 흡착된 농도(M/M)

θ : 수분 함량(L³/L³)

ρ : 겉보기 밀도(M/L³)

식(2.4)에 선형관계를 나타내는 식(2.1)을 대입하면, 아래의 지연계수(R)를 포함한 식으로 표현된다.

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.5)$$

흡착평형을 이룬 토양과 용액사이의 관계가 선형의 경우 식(2.6)으로 나타낼 수 있으며, Freundlich 등온식의 경우

식(2.4)에 식(2.2)를 대입하여, 식(2.7)로 구할 수 있다.

$$R = 1 + \rho \frac{K_p}{\theta} \quad (2.6)$$

$$R = 1 + \frac{\rho}{\theta} K_p \cdot N \cdot C^{N-1} \quad (2.7)$$

2.2. 비평형 흡착

일반적으로 흡착현상은 토양 매체와 오염물질사이에서 평형상태에 도달한다는 가정하에서 이루어졌다. 그러나 정상상태 또는 비정상상태 흐름의(실내 컬럼실험에서) 빠른 공극유속하에서는 토양과 용액사이의 충분한 접촉이 이루어지지 않아 평형에 도달하지 않는 경우가 대부분이다.

비평형 two-site 흡착 모델(nonequilibrium two-site(bicontinuum) sorption model)은 토양의 흡착영역이 두 개의 부분으로 나누어져 있다고 가정한다. 하나의 흡착영역(type-1)은 순간적으로 발생하고 다른 하나의 영역(type-2)은 시간에 따라 발생한다. 평형을 이룰 때, 두 영역의 흡착은 선형 방정식으로 표현된다.

$$S_1 = k_1 C = FkC \quad (2.8)$$

$$S_2 = k_2 C = (1 - F)kC \quad (2.9)$$

여기서, S₁, S₂는 type-1과 type-2의 흡착영역을 의미하며 F는 1형지역(type-1)이 차지하는 분율을 나타낸다. 비평형흡착(nonequilibrium sorption)조건에서의 two-site sorption model은 식(2.5)의 평형흡착모델(equilibrium sorption model)에 속도제한적 흡착(rate-limited sorption)을 기술하는 항을 추가시킨 것이다.

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S_1}{\partial t} + \frac{\partial S_2}{\partial t} = Fk \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial S_2}{\partial t} \quad (2.10)$$

식(2.4)에 식(2.10)을 대입하면, 식(2.11)로 표현된다.

$$\left(1 + \frac{\rho}{\theta} FkK_p\right) \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho}{\theta} \frac{\partial S_2}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial t} = \alpha [(1 - F)K_p C - S_2] \quad (2.12)$$

여기서, α : 일차속도계수(T⁻¹)

식(2.11)과 식(2.12)는 식(2.13)~식(2.18)의 경계조건을 적용하여 풀 수 있다.

$$C(x, 0) = C_i \quad (2.13)$$

$$C(0, t) = C_0 \quad (2.14)$$

$$\left(-D \frac{\partial C}{\partial t} + v \cdot C\right) \Big|_{x=0} = v \cdot C_0 \quad (2.15)$$

여기서, C_i : initial concentration(M/L³)
 C_0 : input concentration(M/L³)

$$\frac{\partial C}{\partial t}(\infty, t) = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}(L, t) = 0 \quad (2.17)$$

$$C_m(x, 0) = C_{im}(x, 0) = C_i \quad (2.18)$$

여기서, C_m : concentration in mobile liquid region(M/L³)
 C_{im} : concentration in immobile liquid region(M/L³)

식(2.11)과 식(2.12)에 식(2.19)~식(2.27)의 무차원 변수를 도입하면 모델해석을 위한 무차원화(dimensionless)된 식(2.28)과 (2.29)로 정리된다.

$$T = vt/L = v_m t \Phi_m / L \quad (2.19)$$

$$z = x/L \quad (2.20)$$

$$p = V_m L/D \quad (2.21)$$

$$\omega = \alpha L/q = \alpha L/(\theta_m v_m) = k_2(1 - \beta)RL/v \quad (2.22)$$

$$\beta = \frac{\theta_m + f\rho K_p}{\theta + \rho K_p} = \frac{\Phi_m R_m}{R} \quad (2.23)$$

$$R_m = 1 + f\rho K_p/\theta_m \quad (2.24)$$

$$R = 1 + \rho K_p/\theta \quad (2.25)$$

$$C_1 = \frac{C_m - C_i}{C_0 - C_i} \quad (2.26)$$

$$C_2 = \frac{C_{im} - C_i}{C_0 - C_i} \quad (2.27)$$

$$\beta R \frac{\partial C_1}{\partial t} + (1 - \beta)R \frac{\partial C_2}{\partial t} = \frac{1}{p} \frac{\partial^2 C_1}{\partial z^2} - \frac{\partial C_1}{\partial z} \quad (2.28)$$

$$(1 - \beta)R \frac{\partial C_2}{\partial T} = \omega(C_1 - C_2) \quad (2.29)$$

여기서, C_1, C_2 : dimensionless concentration(-)

식(2.5)의 평형모델과 식(2.11)의 비평형 two-site model은 1984년 Parker와 Genuchten에 의해 비선형최소자승 영향인자 최적화법을 이용하여 만들어진 CXFIT 프로그램을 이용하며 모델에 대한 이론과 사용방법을 Toride(1999)가

구체적으로 설명하였다.

3. 실험 재료 및 방법

3.1. 토양

실험 대상 토양으로 수도권매립지 반입 토사를 사용하였으며 실험으로 파악된 토양의 기초적인 특성은 Table 1에 나타난 것과 같이 pH 7.2의 중성토로 유기물 함량 4.3%이었다.

3.2. 대상 시료

실험에 사용된 음식물 퇴비는 S시 소재 음식물퇴비화 시설에서 생산된 것으로 토양과 비교할 혼합토양은 토양과 음식물 퇴비를 9:1의 비로 혼합하여 제작하였다. Table 2에는 토양, 음식물 퇴비, 혼합토양 순으로 특성을 나타내었으며, 혼합토양의 유기물함량은 11.3%로 토양 4.3%보다 많은 유기물을 보유하는 것으로 나타났다.

3.3. 실험방법

실험에 사용한 칼럼은 Fig. 1에 나타난 것처럼 직경 5cm, 높이 20cm인 유리재질의 칼럼으로 하부는 유리필터를 사용하여 토양의 유출을 방지하도록 하였다. 대상 토양을 칼럼에 넣은 후 큰 공극(pore)이 생기지 않도록 밀이 평평한 등근판으로 일정한 압력을 가하여 다짐(packing)을 하였고 각 용액은 미세정량펌프(Masterflex, USA)를 사용하여 일정한 유속으로 주입하였다. 먼저, 납(Pb)이 없는 전해질 용액(0.005M CaSO₄)을 일정한 공극유속(pore-water velocity)으로 칼럼 내부에 주입하여 정상상태(steady-state)의 흐름에 도달한 이후에 비흡착성 물질인 염소(Cl)와 흡착성 물질인 납(Pb)을 주입하여 유출수내 각 물질의 농도를 파악하였다.

Table 1. 토양 특성

Characteristics	Soil
pH	7.2
Organic Contents (%)	4.3
Particle Density (g/cm ³)	2.42
Soil Texture	Loamy sand
Sand (%)	79.6
Silt (%)	18.6
Clay (%)	1.8
Pb Conc. (mg/kg)	nd

Table 2. 토양, 퇴비, 혼합토양의 특성비교

Type	pH	Comp.(%)			Pb (mg/kg)
		Moisture	Organic	Ash	
Soil	7.2	8.6	4.3	87.1	nd
Food compos	8.5	26.5	55.1	18.4	nd
Mixed Soil	7.8	12.1	11.3	75.6	nd

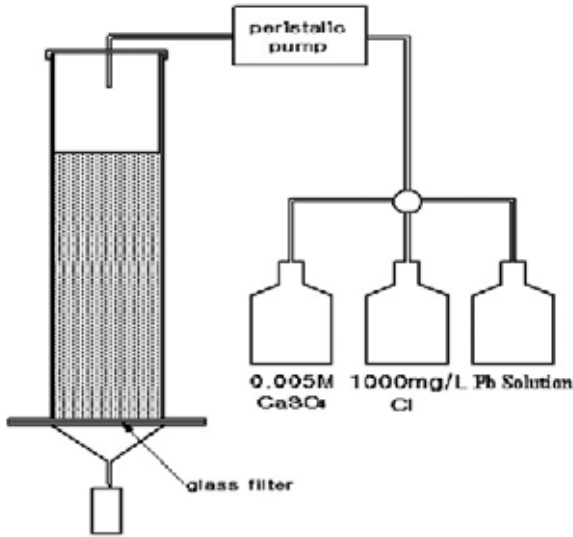


Fig. 1. 칼럼실험장치.

본 연구에서는 대상 토양의 유기물함량, 주입되는 납(Pb) 용액의 농도 및 유속에 따른 흡착 및 이동특성을 파악하고자 하였다. 유기물 함량에 따른 변화는 칼럼내 일반 토양과 음식물퇴비를 혼합한 토양을 충전하여 실험하였고 주입되는 납 용액의 농도는 10ppm과 50ppm으로 하였다. 유속은 33cm/day, 100cm/day로 하였는데 이는 토성, 밀도, 수분 함량 등에 따라 달라지기는 하나 일반적으로 토양내 유체의 이동속도는 $1 \times 10^{-2} \sim 10^{-5}$ cm/s의 범위를 가지므로 범위내 유속변화가 흡착 및 이동에 미치는 영향을 파악하고자 하였다(토양지하수환경학회, 2001).

4. 결과 및 고찰

4.1. 비흡착성물질(CI)

확산계수(D)의 추정을 위해 비흡착성물질인 염소(CI)의 이동실험을 각 유속에 대하여 실시하였으며, 공극내 유속을 33cm/day와 100cm/day로 하였을 때, 측정된 염소의 농도를 평형흡착모델에 적용(fitting)한 결과를 Fig. 2과 Fig. 3에 나타내었다.

측정된 염소의 파과곡선(이하, BTCs로 표기)은 매우 대칭적이었고, 평형흡착모델에 의해 잘 표현되었다. 이와 같이 측정된 값들이 대칭적인 평형 모델로 잘 표현된다는 것은 이동시 수리역학적 평형을 이루는 것을 의미한다. 즉, 토양의 미세공극구조 내로 주입되고 유출되는 염소의 질량전달이 칼럼내 토양과 용질이 평형을 이루는 체류시간에 비해 상대적으로 매우 빨리 발생한다는 것이다(Bouchard, 1999).

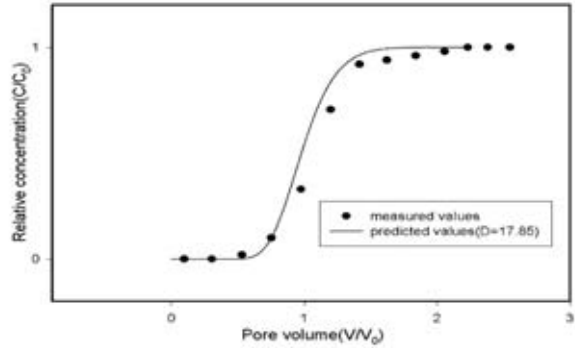


Fig. 2. 33cm/day 유속에서 염소의 이동 실측치 및 예측치.

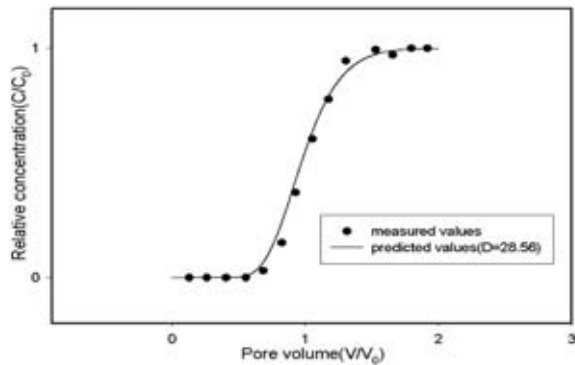


Fig. 3. 100cm/day 유속에서 염소 이동 예측치 및 실측치.

Table 3에는 공극내 유속을 33cm/day와 100cm/day로 하여 비흡착성 물질인 염소(CI)를 주입하였을 때 측정된 BTCs를 CXTFIT code의 inverse mode에 적용시켜 구한 확산계수(D)를 나타내었다.

Table 3. 유속에 따른 염소의 확산계수 비교

Parameter	Pore water velocity(cm/day)	
	33	100
Vol. water content(cm^3/cm^3)	0.447	0.510
Bulk density(g/cm^3)	1.19	1.15
Dispersion coefficient(D, cm^2/day)	17.85	28.56

유속이 33cm/day일 경우 확산계수(D)는 $17.85\text{cm}^2/\text{day}$ 로 나타났으며, 100cm/day일 경우, $28.56\text{cm}^2/\text{day}$ 로 나타나 유속이 증가할수록 확산계수(D)가 증가함을 알 수 있으며, Tran(1998)에 의한 연구결과와도 일치하였다.

4.2. 유속에 따른 납의 이동특성

납용액을 함유하지 않은 0.005M CaSO4 전해질 용액을 주입하여 토양내 물질의 흐름을 정상상태로 한 후 납용액을 함유한 용액을 주입하였다.

Fig. 4는 공극유속이 33cm/day 경우와 100cm/day 경우 일 때, 칼럼 유출수내 납(Pb)의 BTCs를 나타내었으며, 각 유속에 대한 측정값은 평형흡착모델과 비평형 two-site model을 사용하여 예측한 경우와 비교해 보았다. 유속에 대한 흡착은 서로 상반된 견해를 보이는데, Akrtanaku.(1983)에 의하면 유속이 증가할수록 흡착량도 커진다고 밝혔지만, Bajracharya(1989)는 반대의 경향을 나타낸다고 밝혔다. 납의 BTCs는 유속이 33cm/day일 경우 약 20 pore volume에서 발생하였고, 100cm/day인 경우에는 약 25 pore volume에서 발생하여, 유속이 클수록 BTCs가 늦게 발생함을 알 수 있었으며, 지연계수도 37.45, 122.3을 나타내어, 유속이 클수록 흡착이 증가한다는 것을 지연계수를 통해 알 수 있었다. 유속이 클수록 용질의 토양내 체류시간은 감소하여 흡착율이 감소하는 것이 일반적인 가정(postulation)이나 본 실험에서는 반대의 경향을 나타내었다. 이러한 원인은 유속이 증가함에 따라, 염소의 이동실험으로 파악된 것처럼 확산계수(D)가 증가하고 이것이 토양과 용질의 반응을 더욱 빨리 진행시키며, 결국 확산율의 증가가 토양과의 반응율을 증가시켜 유속이 클수록 흡착율이 증가하여 BTCs 발생이 늦게 나타난 것으로 사료된다.

각 유속에서 유출된 납의 BTCs를 평형흡착모델과 비평형 two-site 모델의 예측치와 비교해 보았을 때, 비평형 two-site 모델이 훨씬 잘 일치하였다. 평형흡착모델은 비흡착성

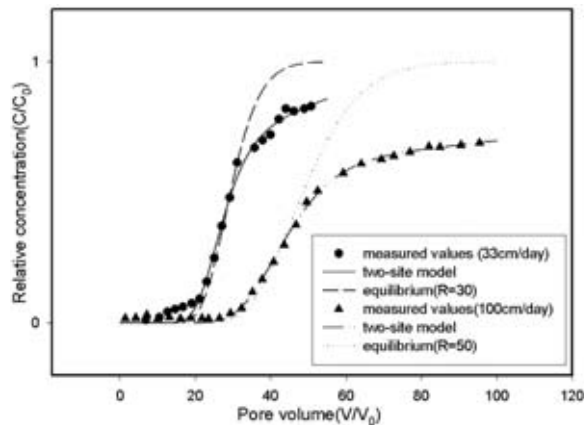


Fig. 4. 유속에 따른 납(Pb)의 BTC(Breakthrough Curve) 비교.

Table 4. 유속에 따른 납의 이동모델 변수비교

Parameter	Pore water velocity(cm/day)	
	33	100
pecllet number(p)	27.73	52.52
Rfitting	37.45	122.3
β	0.73	0.375
ω	0.44	0.51
Kinetic rate constant(k_2 , day ⁻¹)	0.0957	0.0444
Regression	0.993	0.999

물질인 염소의 실험으로 관측된 BTCs를 잘 표현하였으나, 흡착성물질인 납의 BTCs를 나타내는 데에는 상당한 편차를 나타내었는데, 이러한 원인은 납의 이동에 비평형이 영향을 주었기 때문이다. Table 4는 비선형 최소화승 최적화 프로그램인 CXTFIT를 사용하여 각 공극유속에 적용된 비평형 two-site 모델의 parameter를 나타내었다.

β 는 이동시 순간적인 지연(retardation)에 의해 발생하는 흡착(sorption)영역 분율을 ω 는 질량 전달 계수를 나타내며, 이 두 parameter들은 비평형의 정도를 나타낸다. 공극유속이 33cm/day와 100cm/day일 때, β 는 각각 0.73, 0.375를 나타내었는데, 이것은 순간적인 흡착이 토양흡착영역의 73%, 37.5%에서만 발생하였다는 것을 의미한다. ω 값이 1보다 큰 것은 흡착이 평형에 가깝다는 것이며, 1보다 적은 것은 비평형이 우세하다는 것을 나타낸다. 본 실험에서 구한 ω 값은 1보다 작았고 이것은 토양내 납의 이동시 비평형 흡착이 중요한 역할을 한다는 것을 나타낸다. 최적화 프로그램으로부터 구한 β 와 ω 를 이용하여 계산된 k_2 값은 33cm/day의 경우 0.0957 day⁻¹이고, 100cm/day의 경우 0.0444 day⁻¹이었으며, 이것은 33cm/day의 경우가 100cm/day보다 빨리 BTCs가 발생한다는 것을 의미한다.

two-site 비평형 흡착모델을 적용시켜 얻은 parameter 중 평형흡착이 발생하는 분율을 나타내는 β 값을 보면, 유속이 33cm/day과 100cm/day일 때, 0.73과 0.375를 파악되었고, 납의 BTCs에서 상대농도의 최대값은 0.83, 0.69을 나타내어, 유속이 증가함에 따라 순간적인 흡착평형이 발생하는 분율이 감소함을 BTCs의 상대농도 값으로 알 수 있었다.

4.3. 유기물 함량에 따른 납의 이동특성

Table 5는 칼럼에 채운 토양의 유기물함량에 따른 납의 이동특성을 파악하기 위한 각 칼럼의 특성을 나타내었으며, 확산 계수(D)는 유속에 대한 변수이므로 유속 33cm/day 일 때, 17.85cm²/day 값을 그대로 사용하였다.

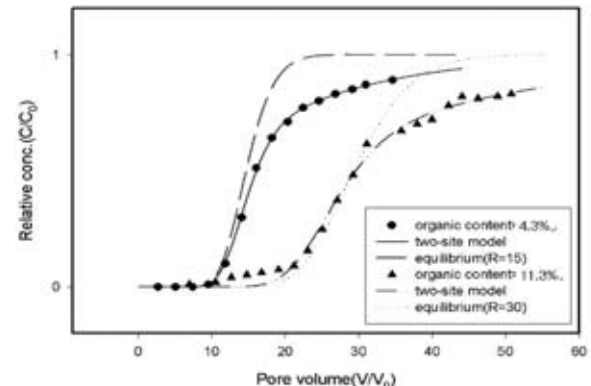


Fig. 5. 유기물함량에 따른 납의 BTC(Breakthrough Curve) 비교.

Table 5. 유기물 함량에 따른 BTC 파악을 위한 칼럼조건

Parameter	Organic content(%)	
	11.3	4.3
pore-water velocity	33	33
Vol water content(cm ³ /cm ³)	0.447	0.47
Bulk density(g/cm ³)	1.19	1.33
Dispersion coefficient(D, cm ² /day)	17.85	17.85

Table 6. 유기물함량에 따른 납의 이동모델 변수 비교

Parameter	Organic content(%)	
	11.3	4.3
pecllet number(p)	27.73	27.73
R _{fitting}	37.45	20.54
β	0.73	0.72
ω	0.44	0.4105
Kinetic rate constant(k ₂ , day ⁻¹)	0.0957	0.163
Regression	0.993	0.999

Fig. 5은 각 토양에서 유출된 납(Pb)의 BTCs와 평형흡착 모델과 비평형 two-site model을 사용하여 예측한 값들과 비교한 것으로, 납의 BTCs는 유기물 함량이 4.3%인 토양에서는 약 10 pore volume에서, 11.3%에서는 약 20 pore volume에서 발생하여, 유기물 함량이 적은 토양에서 BTCs가 빨리 발생함을 지연계수 값으로도 확인할 수 있었다.

Table 6은 유기물 함량이 다른 두 토양에서 유출된 Pb의 BTCs를 CXTFIT code에 적용시켜 얻은 비평형 two-site 모델의 parameter를 나타내었다.

이동시 순간적인 지연에 의해 발생하는 흡착영역 분율을 나타내는 β 는 비슷한 값을 나타내었으며, 질량 전달계수인 ω 도 1보다 적은 값을 나타내어 비평형 흡착작용이 중요한 작용을 함을 알 수 있었다. Baskaran(1996)에 의하면, 이러한 β , ω 값들은 토양과 용질의 특성 뿐만 아니라 흐름조건에 의해 영향을 받는다고 한다.

동력학 상수(Kinetic rate constant, k₂)의 경우, 유기물 함량이 적은 토양이 0.163으로 유기물이 많은 토양의 0.0957보다 높은 값을 나타내며, 유기물이 작은 토양의 BTCs가 빨리 나타남을 수치적으로 표현하였다.

4.4. 농도에 따른 납의 이동특성

본 실험에서는 칼럼에 주입되는 납의 농도를 10ppm과 50ppm으로 하였을 때 납의 이동특성을 파악하였다. Table 7에는 주입되는 납의 농도에 따른 이동특성을 파악하기 위한 각 칼럼의 특성을 나타내었다. 동일한 조건에서 실험을 수행하기 위해 공극 유속, 수분함량, 겔보기 밀도를 비슷하게 맞추었고, 이때 확산계수(D)는 유속에 대한 변수이므로 이전의 값을 그대로 사용하였다.

Table 7. 농도에 따른 납의 BTC 파악을 위한 칼럼조건

Parameter	Injection concentration of Pb	
	10 ppm	50 ppm
pore-water velocity(cm/day)	33	33
Vol water content(cm ³ /cm ³)	0.458	0.447
Bulk density(g/cm ³)	1.17	1.19
Dispersion coefficient(D, cm ² /day)	17.85	17.85

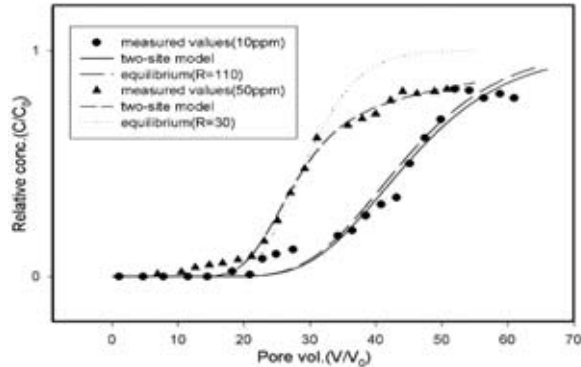


Fig. 6. 농도에 따른 납의 BTC(Breakthrough Curve) 비교.

Fig. 6에는 각 농도에 대한 납의 이동특성을 실험결과와 예측값으로 나타내었다. 실험결과 농도가 높을수록 BTCs가 빨리 발생하는 것을 알 수 있었는데, 이것은 높은 농도일수록 토양내 흡착 영역에서 포화(saturation)가 빨리 발생하여 유출수내 BTCs가 빨리 발생한 것으로 사료되며, Claudia(1998)에 의하면, 주입되는 농도가 감소함에 따라 확산의 정도(extent)가 증가하여 낮은 농도에서 더 강한 흡착을 나타낸다고 한다. Table 8은 농도를 10ppm과 50ppm으로 하여 주입하였을 때 유출수의 BTCs를 CXTFIT code에 적용시켜 얻은 비평형 two-site 모델의 parameter를 나타내었다.

토양내 순간적인 흡착영역의 분율인 β 값은 10ppm에서 0.6956으로 50ppm의 0.73보다 적은 값을 나타내었으며, 비평형 흡착의 정도를 나타내는 ω 는 10ppm에서 0.016으로 50ppm의 0.44에 비해 낮은 값을 나타내어 저농도일 때 더 큰 비평형 흡착이 발생함을 알 수 있었다.

Table 8. 농도에 따른 납의 이동모델 변수 비교

Parameter	Injection concentration of Pb	
	10 ppm	0.975
pecllet number(p)	27.73	27.73
R _{fitting}	66.31	37.45
β	0.6956	0.73
ω	0.016	0.44
Kinetic rate constant(k ₂ , day ⁻¹)	0.00174	0.0957
Regression	0.975	0.993



그리고 동력학 상수, k_2 는 10ppm의 0.00174보다 50ppm의 0.0957가 큰 값을 나타내므로 BTCs가 더 빨리 발생함을 알 수 있다.

5. 결론

음식물퇴비를 혼합한 토양과 일반토양을 대상으로 한 납의 흡착 및 이동실험을 실시한 결과 유기물함량이 많은 혼합토양의 흡착력이 크다는 것을 납의 파과곡선(BTCs)과 이를 통해 얻은 지연계수로 알 수 있었다. 토양과 혼합토양의 지연계수(R)는 각각 20.45, 37.45로 나타나 유기물의 증가가 납의 흡착 증가 및 이동 지연의 효과가 있음을 알 수 있었으며 이러한 흡착 및 이동 정도는 비평형 two-site 흡착모델에 적용시킴으로써 정량적으로 파악할 수 있었다.

유속 33cm/day와 100cm/day에서의 지연계수(R)는 각각 37.5, 122.3으로 나타났고 파과시간은 각각 9 day, 4 day로 나타나 유속이 증가함에 따라 지연계수가 증가하고 파과시간이 짧아지는 결과를 나타내었다. 순간적 흡착영역(β)은 각각 0.73, 0.375로 나타나 유속이 증가할수록 순간적 흡착영역(β)이 감소하였고, 물질전달계수(ω)도 33cm/day에서 0.44, 100cm/day에서 0.51로 1보다 적은 값으로 나타내어 비평형 흡착이 발생하였음을 알 수 있었다. 납과 같은 흡착성 물질의 이동특성은 비평형 two-site 흡착모델에 적용시킴으로써 파악할 수 있었다.

주입되는 납의 농도가 10ppm과 50ppm인 경우 납 파과곡선(BTCs)의 지연계수는 각각 66.31, 37.45로 산출되었고 파과시간도 각각 16.8 day, 9.09 day로 나타나 오염물질의 농도가 이동시 지연계수의 변화에 큰 요인으로 작용한다는 것을 알 수 있었다.



사사

본 연구는 환경부의 “토양지하수복원관리 환경기술교육 혁신지원사업단”의 지원을 받은 과제입니다.

참고문헌

1. Akratanakul, S., Boersma, L., Klock, G.O. (1993) Sorption Process in Soils as Influenced by Pore Water Velocity : II. Experimental Results. *Soil Sci*, 135, pp. 331-341
2. Bajracharya, K. (1989) *Transport of Cadmium in Soil*, D. Eng. thesis. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, pp. 183-198
3. Claudia Fesch, Werner Simon, Stefan B. Haderlein, Peter Reichert, Rene P. Schwarzenbach (1998) Nonlinear Sorption and Nonequilibrium Solute Transport in Aggregated Porous Media : Experiments, Process Identification and Modeling, *Journal of contaminant Hydrology*, 31, pp. 373-407
4. D.C. Bouchard, (1990) Sorption of Vinclozolin and Atrazine on Four Geosorbents, *Pestic Sci*, 55, pp.1095-1102
5. D.C. Bouchard (1998) Sorption Kinetics of PAHs in Methanol-Water System, *J. Contam. Hydrol.*, 34, pp. 107-120
6. Lei Guo, Robert J. Wagenet and John I. (1997) Nonequilibrium Transport of Reactive Solutes through Layered Soil Profiles with Depth-dependent Adsorption, *Environ. Sci. Technol.*, 31, pp. 2331-2338
7. S. Baskaran, N.S. Bolan, A. Rahman & R. W. Tillman (1996) Non-equilibrium Sorption during the Movement of Pesticides in Soils, *Pestic. Sci.*, 46, pp. 333-343
8. Toride N., Leij F.J., Van Genuchten M. T. (1999) *The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory and Field Tracer Experiments*, Version 2.0 US Salinity Lab Research Report No. 137
9. Y.T. Tran, K.Bajracharya, D.A. Barry (1998) Anomalous Cadmium Adsorption in Flow Interruption Experiments, *Geoderma*, 84, pp.169-184.
10. 수도권매립지관리공사(2007) *음식물류폐기물 부속토의 효율적인 활용방안 연구*
11. 한국지하수토양환경학회 (2001) *토양환경공학*, pp. 31-65, 향문사, 서울