

사질토양에서의 Benzene의 이동성에 관한 연구

Transport and Fate of Benzene in a Sandy Soil

백두성(Doo-Sung Baek) · 김동주(Dong-Ju Kim)

요약 : 토립자 표면에서의 흡착에 의한 토양에서의 탄화수소계 화합물의 지연효과는 잘 알려진 현상이다. 본 연구에서는 배치시험과 주상시험을 수행함으로써 사질토양에서 Benzene의 이동성에 대한 지연효과를 조사하였다. 배치시험을 위하여 토양시료와 다양한 초기농도의 Benzene 용액을 48시간 반응시켰고, 초기용액과 평형상태의 Benzene 용액의 농도를 HPLC를 이용하여 분석하였다. 주상시험은 파과곡선으로 알려진 시간에 따른 용액의 농도를 측정함으로써 수행되었다. 추적자로는 10 g/L 농도의 KCl과 0.88 g/L의 Benzene 용액을 사용하였고, 각각의 용액을 토양시료의 상부경계면에 순간주입한 후 정상류 상태에서 배출구로 빠져나온 용탈수의 농도를 EC-meter와 HPLC를 이용하여 측정하였다. 배치시험의 결과로부터 linear adsorption isotherm에 의한 분배계수가 측정되었고 주상시험 조건의 용적밀도 및 함수율을 고려한 지연계수가 산정되었다. 주상시험의 결과 i) Benzene의 첨두농도는 KCl의 첨두농도보다 상당히 낮았으나, ii) 첨두농도의 도달시간은 거의 일치하였다. 첨두농도의 도달시간이 일치한다는 결과는 지연효과가 일어나지 않았다는 것을 지시하며, 배치시험의 결과로부터 산정된 지연계수를 고려하여 예측된 파과곡선은 Benzene의 주상시험 결과와 일치하지 않았다. Benzene 농도의 뚜렷한 감소를 설명할 수 있는 유일한 방법은 convection-dispersion equation(CDE) 모델에서 비가역 흡착에 의한 농도의 절대적 감소를 고려하는 감쇄계수(decay or sink coefficient)를 적용해야 하는 것으로 판단된다.

Abstract : Hydrocarbon compounds in vadose zone soils caused by adsorption onto the surfaces of solid particles are generally considered to show retardation effect. In this study, we investigated the retardation effect on the transport of Benzene in a sandy soil by conducting batch and column tests. The batch test was conducted by equilibrating dry soil mass with Benzene solutions of various initial concentrations, and by analyzing the concentrations of Benzene in initial and equilibrated solutions using HPLC. The column test consisted of monitoring the concentrations of effluent versus time known as a breakthrough curve (BTC). We used KCl and Benzene solutions with the concentration of 10 g/L and 0.88 g/L as a tracer, and injected them into the inlet boundary of the soil sample as a square pulse type respectively, and monitored the effluent concentrations at the exit boundary under a steady state condition using an EC-meter and HPLC. From the batch test, we obtained a distribution coefficient assuming that a linear adsorption isotherm exists and calculated the retardation factor based on the bulk density and porosity of the column sample. We also predicted the column BTC curve using the retardation factor obtained from the distribution coefficient and compared with the measured BTC of Benzene. The results of the column test showed that i) the peak concentration of Benzene was much smaller than that of KCl and ii) the travel times of peak concentrations for the two tracers were more or less identical. These results indicate that adsorption of Benzene onto the sand particles occurred during the pulse propagation but the retardation of Benzene caused by adsorption was not present in the studied soil. Comparison of the predicted with the measured BTC of Benzene resulted in a poor agreement due to the absence of the retardation phenomenon. The only way to describe the absolute decrease of Benzene concentration in the column leaching experiment was to introduce a decay or sink coefficient in the convection-dispersion equation (CDE) model to account for an irreversible sorption of Benzene in the aqueous phase.

Introduction

최근들어 쓰레기, 핵폐기물 등과 같은 유해물질의 토양매립으로 토양 및 지하수자원은 심각한 영향을 받고 있으며, 특히 주유소나 지하유류저장탱크에서 유출되는 탄화수소계 화합물은 토양층을 오염시키고 나아가 지하수 자원까지 위협하고 있는 실정이다. 탄화수소계 화합물은 암이나 돌연변이 유발원으로 작용할 수 있어 주요 관심의 대상이 되고 있으며(Alexander, 1981), 이러한 탄화수소계 화합물은 높은 점성도와 흡착에 의

한 지연효과 및 낮은 투수성으로 인해 상당히 느린 속도로 불포화대수층을 이동하고(Drachenberg and Goetz, 1995; Haus and Czurda, 1995), 그로 인하여 오염이 발생한 후 인지되는데 걸리는 시간뿐만 아니라 복원에 걸리는 시간도 매우 큰 특징이 있다. 그러므로 탄화수소계 화합물의 이동성을 파악하는 것은 토양 및 지하수의 오염을 예방하거나 정확히 하는데 있어서 필수적이라고 할 수 있다.

탄화수소계 화합물의 이동성에 대하여 Mehran *et al.*(1987)은 점토와 사질토양에서 Trichloroethylene(TCE)의 분배계수를 실험적 및 이론적 방법으로 결정하였으며, MacIntyre *et al.*(1991)은 낮은 유기탄소 함량의 대수층 매질체에 대하여 배치,

* 고려대학교 이과대학 지구환경과학과(Dept. of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Korea University, Seoul 136-701, Korea)

주상시험 및 박스시험을 수행하여 Naphthalene의 분배계수를 비교하였다. 한편, Priddle and Jackson(1991)은 대수층 매질체에 대한 휘발성 유기화합물(VOC)의 지연계수를 주상시험을 통하여 측정하고 현장에서의 측정치와 비교하였다.

본 연구에서는 탄화수소계 화합물중 수용성이 높아 지하수 오염에 있어서 추적자로 사용될 수 있는 Benzene에 대하여 불포화 토양층이나 자유면 대수층을 구성하고 있는 사질 토양에서의 이동성을 파악하고자 하며, 이를 위하여 배치시험 및 주상시험을 수행하였다. 배치시험을 통하여 구득한 분배계수로부터 지연계수를 산정하여 보존성 화합물질인 KCl과 Benzene에 대한 주상시험으로부터 흡착성에 의한 지연효과를 조사하였고, CDE 모델에 의한 Benzene 파과곡선의 추정치와 측정치를 비교분석하였다.

Transport Theory

다공성 매질체에서 지연, 감소 혹은 분해작용을 일으키는 반응성 화합물질에 대한 일차원 운송방정식은 다음과 같다(Parker and van Genuchten, 1984).

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} - \mu C \quad (1a)$$

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} K_d \quad (1b)$$

여기에서 C는 수용액내의 용질의 농도, R은 지연계수, D는 확산계수, V는 공극수의 속도, μ 는 감쇄계수, t는 시간, x는 거리, ρ_b 는 용적밀도, θ 는 함수율, 그리고 K_d 는 분배계수이다.

van Genuchten and Alves(1982)에 의하면 순간주입 조건에서 침출수 농도의 BTC에 대한 식 (1a)의 해석해는 다음과 같다.

유한한 길이의 다공성 매질체에서의 초기조건:

$$C(x, 0) = C_i \quad (2a)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x}(\infty, t) = \text{finite} \quad (2b)$$

$$C(0, t) = \begin{cases} C_0 & 0 < t < t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases} \quad (2c)$$

해석해:

$$i) C(x, t) = C_0 \cdot B(x, t) \quad (0 < t < t_0) \quad (3a)$$

$$B(x, t) = \frac{1}{2} \text{EXP} \left[\frac{(V-u)x}{2D} \right] \text{Erfc} \left[\frac{Rx-ut}{2(DRt)^{1/2}} \right] + \frac{1}{2} \text{EXP} \left[\frac{(V+u)x}{2D} \right] \text{Erfc} \left[\frac{Rx+ut}{2(DRt)^{1/2}} \right] \quad (3a)$$

$$u = V \left(1 + \frac{4\mu D}{V^2} \right)^{1/2}$$

$$ii) C(x, t) = C_0 B(x, t) - C_0 B(x, t-t_0) \quad (t > t_0) \quad (3b)$$

여기에서 C_0 는 주입용액의 농도, t_0 는 주입시간이다.

Materials and Methods

Batch Test

본 연구에서는 입자 크기 2 mm 이하의 사질토양이 사용되었으며, 직경 23 μm 이하의 입자는 1.62 %이다(Figure 1). 배치시험에 사용된 Benzene 용액의 초기농도는 각각 44.0, 88.0, 219.9, 439.7, 879.4 mg/L로, 105°C에서 24시간 동안 건조된 vial에 건조 토양시료 10 g과 Benzene 용액 40 mL를 넣은 후 밀봉하여 48시간 동안 교반기를 이용하여 반응시켰다. 반응후 평형상태의 용액을 3000 rpm으로 10분간 원심분리한 후 상등액 20 mL를 채취하였고, High Performance Liquid Chromatography(HPLC)를 이용하여 초기농도 및 평형상태 용액의 농도

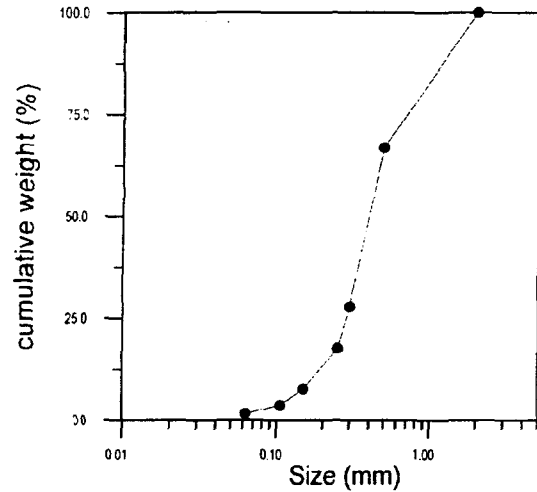


Figure 1. Particle size distribution of the sandy soil.

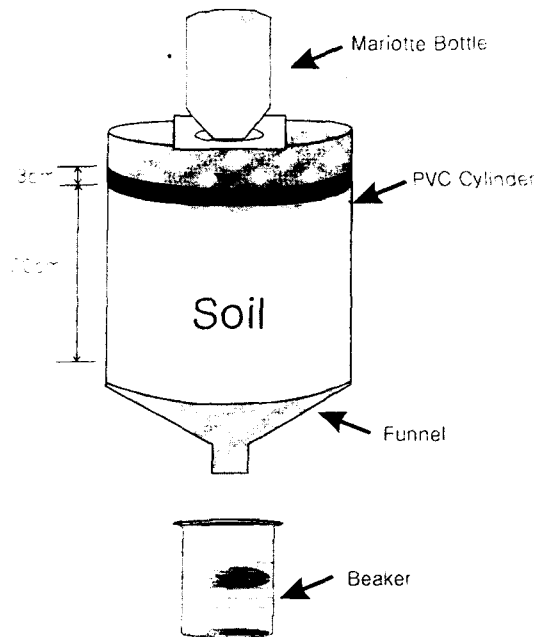


Figure 2. Experimental set-up for column test to determine breakthrough curve (BTC).

를 분석하였다. HPLC 분석에는 Waters 510 pump와 Waters 712 WISP autosampler, Waters 990 photodiode array detector 그리고 Waters Delta Pak 5 μL C_{18} column이 사용되었으며, $\text{ACN} : \text{dH}_2\text{O} = 60 : 40$ 의 mobile phase를 0.5 mL/min의 flow rate하에서 시행되었다. Benzene의 농도를 구하기 위하여 여러 가지 농도의 표준용액에 대한 분석을 수행하여 농도와 시간에 따른 peak의 면적에 대한 검정선을 작성하였다.

Column Test

본 연구에 사용된 사질토양은 직경 및 높이가 각각 20 cm 인 PVC 실린더에 균질하게 성형되었으며 동일 토양에 대하여 두 번의 주상시험이 수행되었다(Figure 2). 첫 번째 시험은 KCl 을 그리고 두 번째는 Benzene을 추적자로 수행되었으며 각각 10 g/L와 0.88 g/L의 용액 314 mL를 정상류상태에서 토양시료 표면에 순간주입하였고, 주입이 끝난 후 tap water(0.20 mS/cm)로 3 cm 높이의 일정 수두를 부과하였다. 정상류 흐름상태에서의 단위면적당 침출유량(Darcian flux)은 733.8 cm/day였고, 추적자의 주입시간(t_0)은 KCl과 Benzene이 각각 2.2, 2.1분이었다. KCl에 대한 주상시험의 경우, 침출수의 전기전도도(EC(mS/cm))를 시간별로 측정하였고, 전기전도도와 농도의 상관관계에 대한 검정곡선을 이용하여 농도로 환산하였다. Benzene의 경우, 침출수를 시간별로 50 mL vial에 채취한 후 HPLC 분석을 통하여 농도를 측정하였다.

Calibration of EC measurement

EC-meter로 측정된 전기전도도(mS/cm)를 농도단위(g/L)로 환산하기 위해서 500 mL의 tap water에 일정량의 KCl을 단계적으로 첨가함으로써 농도를 알고 있는 KCl 용액에 대하여 각각의 전기전도도를 측정하고 후 회귀분석을 통하여 전기전도도에 대한 농도의 관계식을 구하였다(Figure 3).

Data analysis

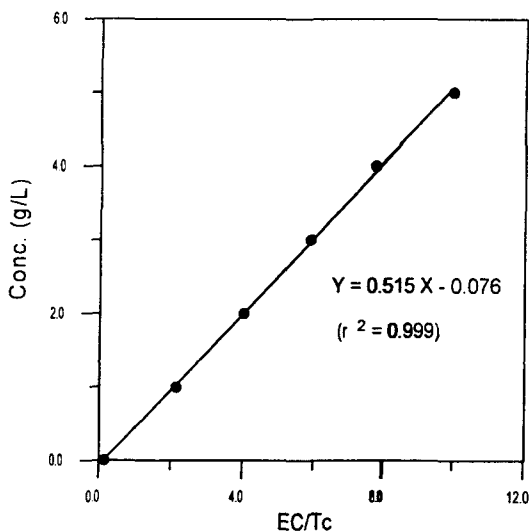


Figure 3. Relationship between electrical conductivity (mS/cm) and concentration (g/L) of KCl.

분배계수(K_d)는 초기농도와 평형농도 자료로부터 linear adsorption isotherm을 사용하여 흡착된 양($\mu\text{g/g}$)에 대한 평형상태의 농도(mg/L)의 비로 산정되었으며 식 (1b)에 의해서 지연계수를 산정하였다. 이때 용적밀도(ρ_b)와 수분함량(θ)는 주상 시험시료에 대하여 측정되었으며 각각 1.6 g/cm^3 와 0.4이었다.

대류계수(V)나 확산계수(D)와 같은 운송 파라미터는 비선형 최적역산법에 근기한 CXTFIT code를 이용하여 식 (2)로부터 추정되었다(Parker and van Genuchten, 1984). KCl의 BTC로부터 추정된 운송 파라미터(V, D)와 분배계수로부터 계산된 지연계수(R)를 이용하여 Benzene의 BTC를 예측하였고, 측정된 Benzene의 BTC와 비교하였다. 또한 Benzene의 BTC로부터 V, D, R을 동시에 추정하여 KCl의 운송 파라미터와 비교하였고, KCl의 BTC로부터 추정된 운송 파라미터(V, D)와 함께 식 (2)의 감쇄계수(μ)를 추정하였다.

Results and Discussions

본 연구에 사용된 사질토양의 경우 Benzene에 대한 분배계수는 11.7 mL/g이었고, 용적밀도와 함수율을 고려한 지연계수는 46.6이었다(Table 1). van Leeuwen(1995)은 동일한 대수층에서 채취된 지하수 및 토양시료에서의 Benzene의 농도를 이용하여 측정된 분배계수와 유기탄소함량에 근기한 흡착상수(K_{oc})와 토양시료내의 총유기탄소함량의 점유율(f_{oc})을 이용하여 추정된 분배계수를 비교하였는데, 사질토양에서 측정된 분배계수는 평균 0.14 mL/g으로 본 연구결과보다 상당히 낮았으며 octanol-water model로부터 추정된 분배계수는 0.0056 mL/g으로 더 낮은 값을 보였다. 본 연구의 배치시험 결과와 이렇게 큰 차이를 보이는 것은 자연상태에서의 현장시험과 실내 배치시험과의 상이점, 매질체 조성 및 Benzene의 평형농도 범위의 차이 등에 기인한다고 사료된다. 배치시험이나 주상시험으로부터 탄화수소계 화합물의 분배계수를 구하는 연구들 중 몇몇 연구가 낮은 유기탄소 함량을 가진 대수층 매질체를 대상으로 수행되었다(Bouchard et al., 1988; Ptacek et al., 1987; MacIntyre and Stauffer, 1988; MacIntyre et al., 1991; Priddle and Jackson, 1991). 배치시험과 주상시험의 결과는 대체적으로 일치하지만, 상당한 차이를 보이는 경우도 보고되었는데 그 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다(MacIntyre et al,

Table 1. Distribution coefficient and retardation factor of Benzene in the studied sandy soil

C_i (mg/L)	C_{eq} (mg/L)	C^* ($\mu\text{g/g}$)	K_d (mL/g)	ρ_b (g/cm^3)	θ	R
43.97	8.10	143.49				
87.94	9.11	315.33				
219.85	44.69	700.63	11.71	1.58	0.41	46.55
439.7	136.13	1214.28				
879.4	199.71	2718.78				

(C_i : initial concentration of Benzene in solution, C_{eq} : equilibrium concentration of Benzene in solution, C^* : amount of Benzene sorbed per dry weight of soil, K_d : Distribution coefficient, ρ_b : bulk density, θ : porosity, R: retardation factor).

1991); 배치시험시 평형상태에 도달하는데 필요한 시간의 부족, 주상시험에서 평형상태에 도달하지 못했거나, 주상시험시 칼럼의 말단부에서 흡착제의 유실, 공극 유속의 변화, flow channeling. MacIntyre *et al.*(1991)은 낮은 유기탄소 함량의 Columbus 대수층 매질체를 2 mm 체로 거른 사질토에 대하여 배치, 주상시험 및 박스시험을 수행하여 Naphthalene의 분배계수를 비교하였는데, 세가지 방법으로 산정된 분배계수가 0.06-0.20 mL/g의 범위에서 상당히 일치하는 것은 모든 방법에 있어서 대상 매질체와 추적자가 충분히 빨리 평형에 도달했다는 것을 의미한다고 보고하였다. 그러나 본 연구의 배치시험과는 추적자의 종류와 반응시간, 평형농도 범위 등이 달랐기 때문에 상이한 결과를 보였다고 사료된다. Mehran *et al.*(1987)은 점토 및 사질 토양에서 Trichloroethylene(TCE)의 분배계수에 대한 연구에서 지하수 및 토양에서의 농도를 이용한 현장시험에

의한 분배계수의 평균치는 0.19 mL/g으로 유기탄소함량에 근기한 흡착상수(K_{oc})와 토양시료내의 총유기탄소함량의 점유율(f_{oc})에 대한 이론적 방법으로부터 결정된 값과 유사하다고 보고하였다.

KCl에 대한 주상시험의 결과는 Figure 4와 같으며 추적자 주입지점으로부터 20 cm 거리의 출구에서 측정된 침출수의 침투농도는 주입농도의 14.2%로 감소하였고, 침투농도의 도달시간은 약 14분으로 나타났다. 한편 Benzene의 경우 침출수의 침투농도는 주입농도의 7.1%로 감소하였고, 침투농도의 도달시간은 약 15분으로 나타났다. 따라서 Benzene의 침투농도는 KCl의 침투농도보다 약 50% 낮았으나 침투농도의 도달시간은 거의 일치하였으며(Figure 5). 이는 Benzene이 토양 입자에 흡착되었으나 흡착으로 인한 침투농도의 지연효과는 일어나지 않은 것으로 사료된다. 이것은 본 연구의 실험조건, 즉 추적자 주입 전후에 부과된 낮은 배경농도의 정상류 흐름상태에서는 탈착이 일어나지 않았기 때문인 것으로 판단된다. Priddle and Jackson(1991)에 의하여 수행된 Gloucester의 대수층 매질체인 사질토양에서의 주상시험 결과 Benzene의 지연계수는 10-14.3으로 나타났으며 현장에서의 지연계수는 8.8로 실험실에서의 결과와 유사하였다. 본 연구의 배치시험 결과인 46.6과 약 5배의 차이를 보였지만 매질체의 구성물질과 Benzene의 평형농도 범위 등을 감안하면 적절한 결과라 할 수 있다. Priddle and Jackson(1991)에 의하면 지하수 유속이 45 cm/day에서 90 cm/day로 증가하면 지연계수는 14.3에서 10으로 약 30% 감소하여 지하수 유속이 지연계수와 관련되어 있음을 알 수 있었다. 한편 본 연구의 주상시험에서는 지연효과가 나타나지 않았는데, 본 연구에서의 공극유속이 Priddle and Jackson(1991)의 주상시험에 비하여 상당히 빠른 조건이었으며 주상시험에 사용된 토양의 용적 축, 토양의 흡착능이 더 컸고 추적자의 양이 상대적으로 적어 비가역 흡착(irreversible sorption)이 발생하였

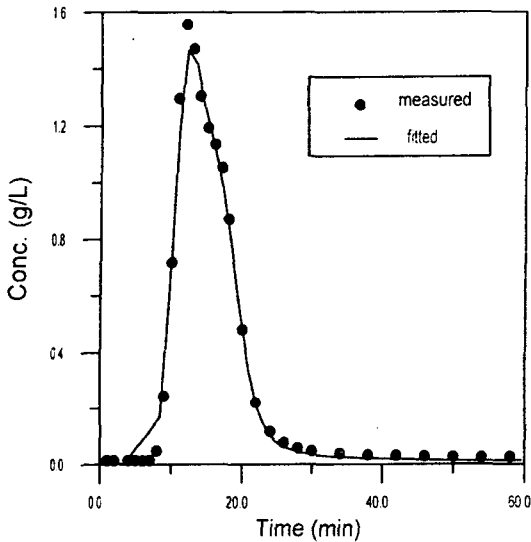


Figure 4. The measured breakthrough curve (BTC) of KCl and the fitted with CDE model with R = 1.

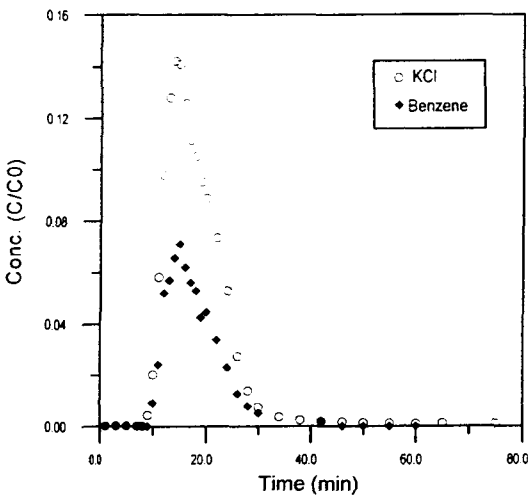


Figure 5. The measured BTCs of KCl and Benzene in the sandy soil.

Table 2. Estimated transport parameters of KCl and benzene BTCs when fitted with CDE model. NA denotes not available (V: cm/min, D: cm²/min, μ : -)

Case	Optimization condition	Estimated parameters	KCl	Benzene	Remark
1	R = 1 $\mu = 0$	V	1.13	NA	
		D	0.97	NA	
2	R \neq 1	V		NA	
		D		NA	
3-1	R = 1	V		1.10	
		D		1.09	
		μ		0.05	
3-2	R=1 $\mu \neq 0$ V=1.13 D=0.97	μ		0.06	V, D From KCl
4	R \neq 1 $\mu \neq 0$	V		2.75	
		D		2.49	
		R		2.44	
		μ		0.14	

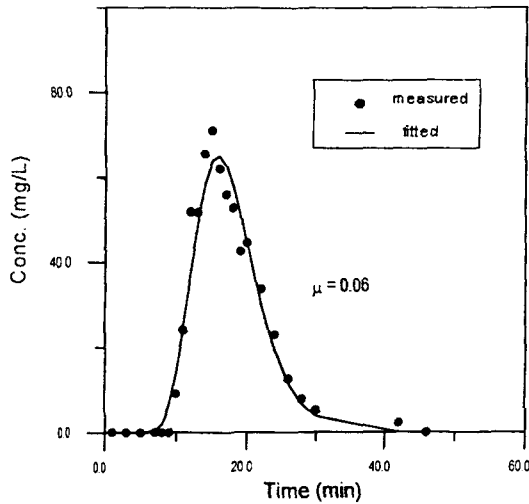


Figure 6. BTC of Benzene fitted to the measured data with a decay coefficient in the CDE model (V, D from KCl BTC. R = 1).

기 때문일 것으로 사료된다.

다양한 조건에 대하여 해석해 (식 (2))로부터 계산된 운송 파라미터들은 Table 2와 같다. 지연효과와 흡착에 의한 농도 감소가 일어나지 않는다고 가정했을 때(Case 1), KCl의 V와 D는 각각 1.10 cm/min과 1.13 cm²/min이었으나, Benzene의 경우 질량회복도의 큰 오차로 인한 최적화기법의 실패로 운송 파라미터는 추정할 수 없었다. 지연효과는 발생하나 농도 감소가 일어나지 않는다고 가정했을 때(Case 2)에도 Benzene의 경우 역시 같은 결과였다. Case 1과 2의 결과로부터 지연효과로는 측정된 Benzene의 BTC를 설명할 수 없다고 사료되며, 이것은 지연계수가 1보다 큰 값이면 침투농도의 도달시간이 지연되기 때문이다.

감쇄계수를 적용하면(Case 3, 4) 측정된 BTC와 일치하는 결과를 얻을 수 있었는데, Case 3-1에서는 지연효과는 발생하지 않고(R=1) 농도의 감소만 일어난다($\mu \neq 0$)고 가정할 경우, V, D, μ 가 추정되었고, Case 3-2에서는 KCl의 BTC로부터 구득한 V, D를 이용하여 μ 만을 추정하였다. 두 경우 모두 추정된 μ 는 거의 일치하였고, 이것으로 감쇄계수만이 비흡착성 물질인 KCl에 대한 Benzene의 절대적 농도 감소를 설명할 수 있다고 사료된다. Case 4에서 Benzene의 BTC에 대하여 모든 파라미터 (V, D, R, μ)를 추정할 경우 Case 3에서보다 훨씬 큰 V, D, μ 값을 보였으며, 증가한 정도는 추정된 지연계수인 2.4와 거의 일치하였다. 그러나 측정된 Benzene의 BTC에서 침투농도의 도달시간은 KCl의 BTC와 거의 일치하여 지연효과는 발생하지 않았기 때문에, Case 4에서 추정된 운송 파라미터로는 Benzene의 BTC를 설명할 수 없다고 사료된다. Case 1과 Case 3-1에서 추정된 V, D가 유사한 결과를 보이는 것도 감쇄계수가 본 연구에 사용된 시료에서의 Benzene의 운송을 정확히 반영한다는 것을 의미한다. Figure 6은 Case 3-2에 대하여 최적화된 BTC와 측정된 BTC를 보여준다. 한편, 배치시험으로부터 추정된 지연계수와 KCl의 BTC로부터 추정된 V, D를 이용하여 예

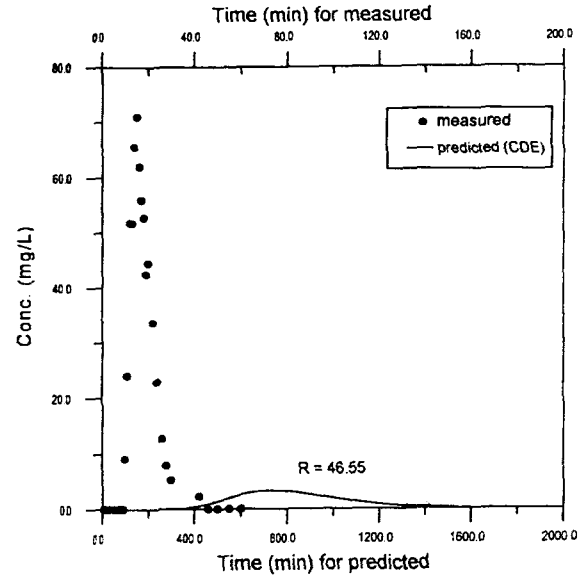


Figure 7. Predicted BTC of Benzene with the retardation factor obtained from batch test and measured BTC.

측한 Benzene의 BTC는 일치하지 않았으며(Figure 7), Benzene 농도의 뚜렷한 감소를 설명할 수 있는 유일한 방법은 convection-dispersion equation(CDE) 모델에서 비가역반응에 의한 농도의 절대적 감소를 고려하는 감쇄계수(decay or sink coefficient)를 적용해야 하는 것으로 판단된다.

Conclusion

사질토양에서 Benzene의 지연효과와 그에 따른 이동성을 조사하기 위하여 표준절차에 따른 배치시험과 정상류 상태에서의 파과곡선실험으로 알려진 주상시험을 수행하였다. 배치시험으로부터 산정된 분배계수는 11.7 mL/g이었고, 용적밀도와 함수율을 고려한 지연계수는 46.6이었다. 주상시험의 결과 Benzene의 침투농도는 KCl의 침투농도보다 상당히 낮았으나 침투농도의 도달시간은 거의 일치하였다. 침투농도의 도달시간이 일치한다는 것은 지연효과가 일어나지 않았다는 것을 지시하며, 배치시험의 결과로부터 산정된 지연계수를 고려하여 예측된 파과곡선은 Benzene의 주상시험 결과와 일치하지 않았다. 배치시험으로부터 추정된 Benzene의 지연계수와 보존성 용질인 KCl의 운송 파라미터를 이용하여 예측된 BTC는 Benzene의 운송을 적절히 설명할 수 없었다. 그러므로 Benzene의 흡착에 의한 지연효과는 본 연구에 사용된 시료에서는 일어나지 않았으며, 이는 주상시험의 조건이 토양의 흡착능에 대한 추적자의 질량이 상대적으로 낮았으며, 탈착을 유발할 수 없는 실험조건이었기 때문이라고 사료된다. Benzene의 운송에 있어서 농도의 뚜렷한 감소를 설명할 수 있는 유일한 방법은 CDE 모델에서 비가역 흡착에 의한 농도의 절대적 감소를 고려하는 감쇄계수(decay or sink coefficient)를 적용하는 것이었다.

Acknowledgement

본 연구는 과학재단의 특정기초연구사업 (98-0703-03-01-3)의 재정적 지원으로 수행된 연구과제로, 연구비를 지원해주신 관계기관에 감사 드린다.

References

- Alexander, M., 1981, Biodegradation of chemicals of environmental concern. *Science*, 221, p. 132-138.
- Bouchard, D. C., Wood, A. L., Campbell, M. L., Nkedi-Kizza, P., and Rao, P. S. C., 1988, Sorption nonequilibrium during solute transport. *J. Contam. Hydrol.* 2, p. 209-223.
- Drachenberg, I. and Goetz, D., 1995, The Mobility of Hydrocarbons at Unsaturated Water Conductivity under Field and Laboratory Conditions, p. 369-370, in W. J. van den Brink, R. Bosman and F. Arendt, Eds., *Contaminated Soil '95* Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Haus, R. and Czurda, K. A., 1995, Changes in Microstructure Influence the Transport of Hazardous Hydrocarbons in Clays, p. 293-302, in W. J. van den Brink, R. Bosman and F. Arendt, Eds., *Contaminated Soil '95* Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- MacIntyre, W. G. and Stauffer, T. B., 1988, Liquid chromatograph applications to determination of sorption on aquifer materials. *Chemosphere*, 11, p. 2161-2173.
- Mehran, M., Olsen, R. L., and Rector, B. M., 1987, Distribution Coefficient of Trichloroethylene in Soil-Water Systems. *Ground Water*, 25(3), p. 275-282.
- Parker, J. C. and van Genuchten, M. Th., 1984, Determining transport parameters from laboratory and field tracer experiments. *Bull.* 84-3, 96p., Virginia Agricultural Experiment Station, Blacksburg.
- Priddle, M. W. and Jackson, R. E., 1991, Laboratory Column Measurement of VOC Retardation Factors and Comparison with Field Values. *Ground Water* 29(2), p. 260-266.
- Ptacek, C. J., Cherry, J. A., and Gillham, R. W., 1987, Mobility of dissolved petroleum derived hydrocarbons in sand aquifers, in J. H. Vandermeulen and S. E. Hruday, Eds., *Oil in Freshwater*. Pergamon Press, New York, p. 195-215.
- van Genuchten, M. Th. and Alves, W. J., 1982, Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation, U. S. Dept. of Agriculture, *Tech. Bull.*, no. 1661, 151p.
- van Leeuwen, J. L. M., 1995, Sorption of organic contaminants to soil in Rotterdam, in W. J. van den Brink, R. Bosman and F. Arendt, Eds., *Contaminated Soil '95*, p. 445-452. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.