

해성점토와 풍화토의 오염물 흡착능에 관한 실험 연구

An Experimental Study on Contaminant Sorption Capacity of Marine Clay and Decomposed Soil

장연수(Yeon - Soo Jang)* · 임종주(Jong - Choo Lim)**

요 약 : 수도권 매립지 지반의 침출수에 대한 흡착성 분석을 위한 벡치실험과 컬럼실험을 수행하였다. 벡치실험에서는 제 1공구와 제 3공구 각각에서 채취한 지반토의 무기물, 중금속에 대한 흡착능과 흡착등온식을 알아보았으며 컬럼실험에서는 염소, 요오드, 칼륨, 납, 카드뮴을 사용하여 분산성과 오염 저감능력을 알아보았다. 시험결과 토양 시료 모두 Freundlich 등온식에 잘 따르는 것을 확인할 수 있었으며, 해성점토 시료 모두 중금속과 무기물인 칼륨에 대한 흡착력이 큰 것으로 확인되었다. 시료 채취 지점의 지질변화에 따른 실험된 성분 에 대한 흡착성의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

Abstract : Batch and column tests were performed to investigate the sorption capacity of bottom soils of Kimpo metropolitan waste landfill. Sorption capacity and sorption isotherm from the batch test for inorganic and heavy metal substances and retardation capacity of heavy metals from the column test are obtained. It was recognized from the tests that the samples match well with Freundlich isotherm and marine clay has good sorption capacity for potassium and heavy metals such as lead and cadmium. The soil samples with different geologic origins did not show significant differences in the sorption capacity of tested components.

서 론

1993년부터 매립이 시작된 수도권 매립장은 현재 1공구의 매립이 진행되고 있으며, 향후 매립을 위하여 3공구 매립장에 대한 준비가 진행중에 있다. 이러한 해안 매립장의 경우 두꺼운 자연 점토층을 차폐층으로 이용하고 있으며 합성 차수막을 설치한 경우도 연약한 점토 지반의 장기적인 압밀 침하로 인하여 합성 차수막이 손상되어 침출수가 누출될 수 있다. 따라서 해안 매립장의 경우 자연점토층에 대한 차폐기능 검증의 일환으로 그 동안 수도권 매립장의 차폐기능을 수행하는 바닥지반의 침출수 화학성분에 대한 흡착에 의한 오염물 이동성 저감능력을 파악하여 둘 필요가 있다.

본 연구에서는 수도권 매립지의 제 1공구와 제 3공구의 지반토를 모두 이용하였는데 제 1공구는 K블록에서 시추된 샘플을 기초로 천층, 중간층, 심부의 3개 지층의 흙을 선택하여 흡착실험을 실시, 깊이별 토성의 변화에 대한 흡착능의 변화를 알아보았다. 제 3공구는 지반토가 크게 3가지 지질기원 즉 분출화산암, 화강암, 편마암을 가진 점토로 구성되어 있는 점을 감안 각 기원별 토양이 위치하고 있는 지점에서 상부 점토와 하부 풍화토층 시료를 채취하여 벡치실험(Batch test)과 컬럼실험(Column test)을 실시하여 평면상에서 본 위치별 토성변화에

대한 흡착능의 변화를 알아보았다.

벡치실험에서는 제 1공구와 제 3공구 각각에서 채취한 지반토의 무기물, 중금속에 대한 흡착능과 흡착등온식을 알아보았으며 컬럼실험에서는 염소, 요오드, 칼륨, 납, 카드뮴을 사용하여 기반토와 상부점토에 대한 무기물, 중금속의 분산성과 흡착성을 알아보았다. 염소와 요오드는 본 매립장 지반이 염수에 의한 염소성분이 많은 점을 감안하여 비반응성 물질로서 염소와 요오드의 거동이 유사한가를 알아보기 위하여 사용되었으며 칼륨은 무기물을 대표한 화학성분으로, 납과 카드뮴은 중금속을 대표한 화학성분으로 각각 사용하였다.

이론적 배경

현재까지의 매립장의 차폐 기능을 수행하는 바닥 지반의 침출수 화학성분에 대한 흡착능이 어느 정도인가를 평가해 보는 조사연구는 한서 엔지니어링(1994), 동국대(1995), 김규연 등(1994)에 의하여 수행되었으며 비교적 이분야에서의 흡착능에 대한 연구는 미미한 형편이다.

본 절에서는 벡치실험에서의 흡착 등온식과 분석이론, 컬럼 실험의 농도분포로부터 분배계수와 분산지수를 산출하는 데 사용되는 식을 간략히 소개하였다.

벡치실험에서의 흡착 등온식

기상 또는 액상의 물질이 다른 액상이나 고상과 접촉할 때 계면에 있어서 상 내부와 다른 농도를 유지하고 평형이 되는 상태

*동국대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea)

**동국대학교 화학공학과(Department of Chemical Engineering, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea)

를 흡착이라고 한다. 흡착현상은 대부분의 물리, 화학, 생물학적인 자연현상에서 나타나며 활성탄이나 인조수지와 같은 고체의 흡착현상을 식수나 폐수 등의 산업에 널리 응용하고 있다. 흡착과정의 목적은 한 상(phase)에서 특정물질을 분리하여 다른 상의 표면에 축적(accumulation) 또는 농축(concentration)하는데 있으며, 여기서 흡착하는 상을 흡착제(adsorbent), 흡착제의 표면에 축적 혹은 농축되는 상을 흡착물 또는 흡착질(adsorbate)이라 한다.

흡착은 흡착물과 흡착제로 주어진 계에 수반되는 수많은 인자들에 의하여 영향을 받게 되는데 흡착물에 있어서는 농도, 분자량, 분자크기, 분자구조, 분자극성 등이며 흡착제에 있어서는 표면적, 표면의 물리화학적 성질, 흡착물의 분자나 이온에 이용되는 표면 정도, 흡착제 입자의 물리적 크기와 형태 등이 중요하며 이러한 인자들은 평형에서의 흡착량과 평형에 도달하는 속도 등을 결정한다. 특히 흡착능을 결정하는 가장 중요한 성질인 표면적과 기공크기의 분포 외에도 흡착제의 표면 화학적 성질은 특정 화학 물질의 흡착도와 흡착능을 결정하는데 매우 중요하며 주로 사용된 원료, 활성화 공정의 형태, 활성화 조건 등에 의하여 결정된다. 또한 계의 중요한 변수로는 온도와 pH 등이 있는데, 이러한 온도와 pH의 변화는 위의 인자들 중의 하나 이상에 변화를 주어 결국 흡착에 영향을 미치게 된다.

특정계에 있어 한 상에서 다른 상의 표면으로 물질이 흡착되는, 즉 계가 평형에 도달할 때의 상 간의 물질 분포를 열역학적으로 나타낼 때에는 q_e 를 C_e 의 함수로 표현하며, 이러한 표현 형식을 흡착등온식(adsorption isotherm)이라 한다. 여기서 C_e 는 두 인접한 phase 내의 일부가 흡착제에 흡착 제거되고 남은 흡착물의 평형농도를 나타내며, q_e 는 일반적으로 단위 흡착제 무게당 흡착된 흡착물의 양을 나타낸다. 상 농도간의 정량적인 평형 분포는 특정 흡착물, 흡착제 및 계의 상태 등의 조합으로 결정되며 이 분포특성은 결국 특정 사용목적에 따른 분리공정의 타당성에 영향을 미치며, 흡착물, 흡착제, 흡착이 일어나는 계 등의 성질에 관련된 여러 인자들의 영향을 받는다.

실제로 한 흡착제를 특정 용도에 적합한가 하는 타당성을 평가할 때 실험적인 흡착등온식을 이용하여 흡착능을 확인한다. 또한 등온식은 용도에 맞는 흡착제를 선택하고 흡착제의 필요량을 예비적으로 계산할 때 사용되며 흡착제를 분석하고 설계할 때 predictive modelling procedures로의 중대한 역할도 수행하며 흡착열같은 열역학적 인자를 이론적으로 계산하거나 해석할 때도 사용된다.

흡착등온식은 일정 온도에서 용액 내에 있는 흡착물의 농도에 따른 흡착평형 분포의 함수로 정의하며 보통 단위 흡착제당 흡착량은 농도가 증가할수록 증가하나 직접 비례하지는 않는다. 이러한 흡착등온식의 관계를 나타내는 몇 개의 평형모델이 개발되어 왔으며 Voice(1983)와 Weber(1980)가 여러 최근의 등온식 모델을 요약한 바에 의하면 모든 모델이 특정 조건에서는 매우 정확히 실험 data와 맞으나 일반성은 결여되는 것으로 밝혀졌다. 따라서 한 모델을 적용시에는 모델 전개시 사용되는 조건들에 유의하여야 한다.

일반적으로 많이 사용되는 흡착등온식에는 흡착량과 평형농도와의 사이에는 간단한 직선관계로 표시되는 것으로부터 지수

관계식에 근사한 것 등, 몇 개의 형태로 분류할 수 있다. 그 중에서 대표적인 것으로서 Henry 등온식, Freundlich 등온식, Langmuir 등온식, BET 등온식 등을 들 수 있으며 특히 Freundlich 등온식으로 나타낼 수 있는 경우가 많다. 이들의 흡착등온식 사이에는 상호 관련이 있으며, 예를 들면 Langmuir 등온식의 경우 저농도 영역에서는 Henry 형의 직선 관계에 근사하고, 중간의 농도 영역에서는 Freundlich 식에 근사한다.

Freundlich 등온식은 원래 경험적으로 구하여진 실험식이지만, 최근 불균일 표면에 있어서는 흡착이론으로부터 얻어진 흡착량과 흡착열과의 관계에 이 식이 대응하는 것이 밝혀졌으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_e = K_d C_e^P \quad (1)$$

여기서 K_d 와 P 는 상수로서 단일 성분의 경우 흡착실험 결과로부터 결정할 수 있다. 즉 흡착실험 결과로부터 얻어진 q_e 와 C_e 를 $\log(q_e)$ 와 $\log(C_e)$ 의 형태로 플롯하여 기울기와 절편으로부터 각각 상수 K_d 와 P 를 구할 수 있다.

위의 식 (4)의 K_d 는 흡착능을 상대적으로 나타내며, P 는 반응 에너지 혹은 반응세기를 나타내는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 P 가 0.1~0.5 이면 흡착은 용이하다고 하며, 반면에 P 가 2 이상의 물질은 난흡착성이라고 말하여진다.

분석 방법

벳치시험의 경우 납, 카드뮴, 칼륨의 농도는 원자흡광분광 광도계(Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)로 측정하였고 납, 카드뮴, 칼륨 각각의 용액 농도와 흡광도의 관계를 나타낸 표준곡선을 그린 결과 거의 선형으로 나타났다. 따라서 납, 카드뮴, 칼륨 각각의 용액 농도는 표준곡선으로부터 구하였고, 토양에 흡착된 납, 카드뮴, 칼륨의 양 q_e 는 다음과 같은 실험초기 및 평형에 도달한 후의 농도와의 관계식을 이용하여 구하였다.

$$C_{Lo} V_L = C_L V_L + C_G V_G + m q_e \quad (2)$$

여기서 C_{Lo} 는 초기 용액 농도를 나타내고, C_L 과 C_G 는 액상과 기상의 평형농도, V_L 과 V_G 는 각각 액상과 기상의 부피, 그리고 q_e 와 m 은 각각 평형상태에서의 흡착된 양과 사용한 토양의 양을 나타낸다. 한편 C_G 는 기-액 평형 상태에서 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$C_G = H C_L \quad (3)$$

여기서 H 는 헨리 상수이다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하고 q_e 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$q_e = \frac{V_L}{m} \left\{ C_{Lo} - C_L \left(1 + \frac{V_G}{V_L} H \right) \right\} \quad (4)$$

식 (4)의 $(V_G/V_L)H$ 항은 식 (4)의 다른 값에 비해 비교적 매우 작은 값이므로 본 연구에서는 $V_G/V_L H$ 값을 무시하고 계산을 하였다.

오염물이 흡수에서 흡착성이 있는 경우 컬럼내로의 오염물 이동을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - \bar{V} \frac{\partial C}{\partial X} \quad (5)$$

여기서 R은 지연계수(retardation coefficient)라고 부르고 다음과 같이 정의된다.

$$R = (1 + \frac{\rho_b}{n_{eff}} K_d) \quad (6)$$

여기서 ρ_b 는 흙의 건조단위밀도, n_{eff} 는 유효공극비, 그리고 K_d 는 분배계수(ml/g)이다. 컬럼시험의 경우는 컬럼 하부에서 침출되어 나오는 반응성 물질과 비반응성 요소의 속도로 부터 지연계수를 산출한 후 분배계수를 역산하여 구하였다.

실험 방법

벤티시험의 경우 흡착 평형에 도달하는 시간과 양은 흡착제의 조성, 온도 등에 따라 다르므로 납, 카드뮴, 칼륨의 흡착 평형에 도달하는 시간과 흡착량, 그리고 각 토양의 분배계수를 알아보려고 점토, 풍화토를 각각 2 g씩 취하여 1000 ppm 농도의 납, 카드뮴, 칼륨용액을 각각 25, 50, 75, 100 ppm으로 희석시켜 만든 20 ml의 용액을 취하여 토양과 혼합하였다. 실험시 사용한 시험관에 의한 중금속 및 무기물의 흡착상태를 보정하기 위해 별도로 동일한 시험관에 동일농도의 용액을 같은 시간동안 25°C 온도조건의 수욕상에서 진탕시켰으며 1시간 간격으로 용액을 채취하여 토양에 의한 오염물 흡착상태를 알아보았다.

실내 컬럼시험의 경우 기반토에 대해서는 변수두 투수시험기를 이용하여 폐놀, 납, 카드뮴 등의 분산성과 흡착능을 알아보았고 상부점토는 투수성이 매우 낮기 때문에 가압장비가 갖추어진 컬럼시험기를 사용하였다.

시험 결과 분석

Table 1. Residual concentration of Pb at equilibrium condition unit: ppm

soil layer \ ini. conc.	50	75	100
top	1.01	2.18	7.76
middle	1.45	1.95	5.30
bottom	3.09	3.44	11.60

Table 2. Residual concentration of Cd at equilibrium condition with different initial concentration and soil layers unit: ppm

soil layer \ ini. conc.	50	75	100
top	3.66	6.44	8.74
middle	3.67	3.41	8.67
bottom	8.56	14.06	26.40

벤티실험

제 1공구에 대해서는 K블록에서 시추된 시료를 기초로 천층, 중간층, 심부의 3개 지층의 흙을 선택하여 깊이별 토성의 변화에 대한 흡착능의 변화를 알아보았으며, 제 3공구는 지반토가 크게 3가지 지질기원 즉 분출화산암, 화강암, 편마암을 가진 점토로 구성되어있는 점을 감안하여, 3지점(시추공 번호 BH 28, 편마암 기원; BH 69, 분출화산암 기원; BH 77, 화강암기원)에서 상부 점토와 하부 풍화토층 시료를 채취하여 평면상에서 분위차별 토성변화에 대한 흡착능의 변화를 알아보았다.

제 1공구 : K공구에 대해 납, 카드뮴, 칼륨에 대한 흡착실험의 결과를 아래 Table 1~3에 각각 나타내었다. 칼륨의 경우 채취한 토양 시료에 많은 칼륨 이온이 존재하는 것이 확인되었으므로 각 토양 시료에 벤티실험에 사용한 동일한 부피의 증류수를 가하여 벤티실험과 동일한 조건에서 실험을 병행하여 실제 토양에 존재하는 칼륨이온의 양을 보정하였다.

Figure 1~3은 납, 카드뮴, 칼륨 각각에 대해 각 깊이의 토층에서의 평형농도와 흡착량의 관계를 나타내고 있으며 이 그림으로 각 시료의 흡착정도를 알 수 있다. 평형에 도달할 때까지의 시간은 납의 경우 4시간, 카드뮴의 경우 약 5시간, 칼륨의 경우 약 3시간이면 평형에 도달하는 것을 알 수 있었다.

위의 그림으로부터 평형에서의 흡착량을 Freundlich 등온식에 적용하여 구한 절편 K_d 와 기울기 p 는 Table 4에 나타내었으며 제 1공구의 납과 카드뮴, 칼륨의 흡착성은 Freundlich 등은

Table 3. Residual concentration of K at equilibrium condition with different initial concentration and soil layers unit: ppm

soil layer \ ini. conc.	20	40	60	80	100
top	1.47	7.73	10.93	15.99	21.97
middle	1.49	2.08	8.06	13.21	24.78
bottom	3.08	13.13	19.72	26.64	39.40

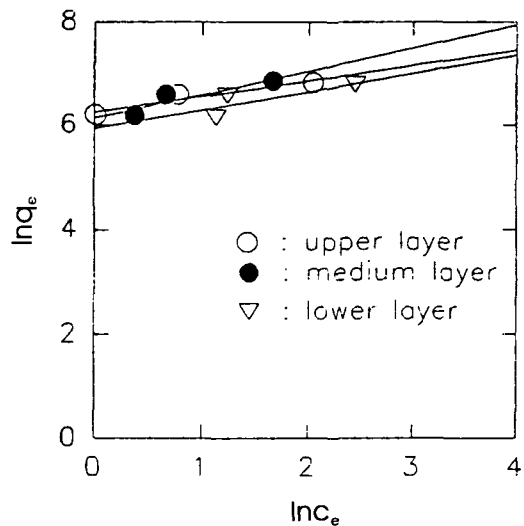


Figure 1. Equilibrium concentration versus absorbed mass of Pb for each soil layer.

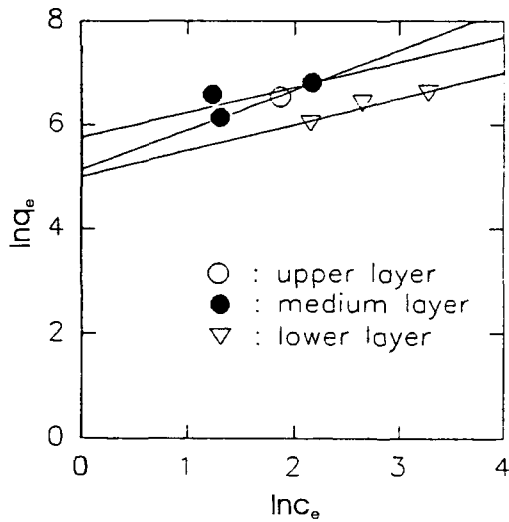


Figure 2. Equilibrium concentration versus absorbed mass of Cd for each soil layer.

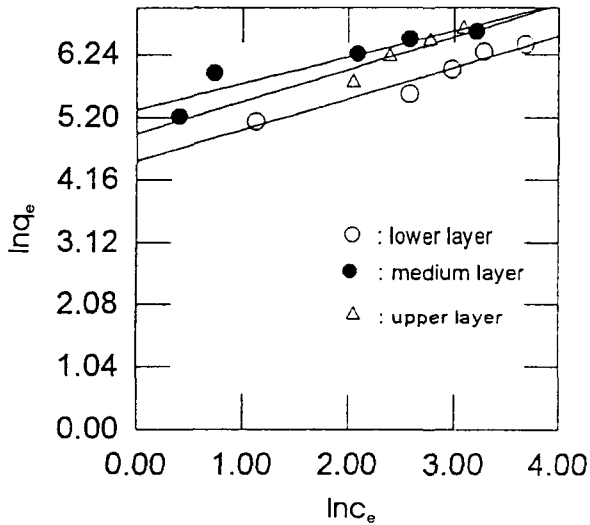


Figure 3. Equilibrium concentration versus absorbed mass of K for each soil layer.

식으로 잘 묘사되는 것을 알 수 있다.

제 3 공구 : 실험결과 각 토양마다 공극분포, 비표면적 등의 특성에 따라 흡착능에 차이를 보였는데 풍화토보다는 점토가 같은 종류의 시료라도 비표면적이 큰 커서 흡착능이 우수한 것으로 나타났다. 평형에 도달하는 시간을 측정하기 위해 일정 시간마다 용액을 채취하여 농도를 측정할 결과 납과 카드뮴은 약 6시간이면 평형에 도달하며 칼륨의 경우 약 3시간이 소요되는 것을 알 수 있었다.

다음 Table 5~7은 점토와 풍화토를 대상으로 초기농도를 25, 50, 75, 100 ppm으로 하였을 시의 각 초기 농도에 대한 납, 카드뮴, 칼륨의 평형에 도달했을 시의 수용액상의 잔류 농도를 각 나타낸 것이며, Figure 4~9는 납, 카드뮴, 칼륨에 대한 평형농도와 흡착량의 관계를 나타낸 곡선으로서 각 시료의 흡착정도를 나타낸 것으로 이들 평형농도와 흡착량의 관계는 Freundlich type 등

Table 4. Distribution coefficient and slope of Pb, Cd and K with respect to the depth of K block marine clay layer

parameter	soil layer			
	top	middle	bottom	
Intercept (K_d)	Pb	520.73	462.95	378.85
	Cd	169.68	316.62	148.63
	K	138.55	206.02	87.68
slope (P)	Pb	0.298	0.450	0.352
	Cd	0.766	0.481	0.500
	K	0.595	0.433	0.516

Table 5. Residual concentration of Pb at equilibrium condition for marine clay and decomposed soil with different initial concentration unit: ppm

type of soil	ini. conc.			
	25	50	75	100
clay at BH 28	0.920	1.532	1.114	3.364
clay at BH 69	0.946	1.188	2.728	4.684
clay at BH 77	0.980	1.916	2.912	6.604
decom. from volcanic	1.457	3.406	4.764	13.836
decom. from gneiss	1.078	2.064	3.084	7.084
decom. from granite	1.172	2.240	4.702	10.020

Table 6. Residual concentration of Cd at equilibrium condition for marine clay and decomposed soil with different initial concentration unit: ppm

type of soil	ini. conc			
	25	50	75	100
clay at BH 28	3.01	4.79	8.74	10.98
clay at BH 69	3.69	6.21	8.94	15.84
clay at BH 77	3.34	6.22	11.12	13.78
decom. from volcanic	4.37	9.91	15.86	20.12
decom. from gneiss	2.94	6.19	11.19	15.52
decom. from granite	4.20	10.10	16.12	19.78

Table 7. Residual concentration of K at equilibrium condition for marine clay and decomposed soil with different initial concentration unit: ppm

type of soil	ini. conc				
	20	40	60	80	100
clay at BH 28	1.194	7.761	18.926	16.926	28.299
clay at BH 69	1.964	10.194	17.942	22.488	37.867
clay at BH 77	1.200	7.688	12.314	20.270	34.700
decom. from volcanic	2.985	6.473	11.611	23.261	37.770
decom. from gneiss	2.288	8.060	12.538	20.344	34.566
decom. from granite	3.284	7.230	17.657	22.257	39.434

은식을 만족하는 것으로 판명되었다.

각 시료의 흡착량을 Freundlich type 등온식에 적용하여 구한 Freundlich 절편과 기울기 p는 다음 Table 8과 같다. Table 8에서 본 화학성분별 절편은 점토와 풍화토 시료 모두 납, 칼륨, 카드뮴 순으로 큰 것으로 나타나고 있으며 특히 납, 카드뮴, 칼륨 모두의 절편이 매우 커서 실제 지반차폐재를 통한 중금속의 이동은 매립장의 운전 및 보존기간 동안 거의 없는 교착상태를 보

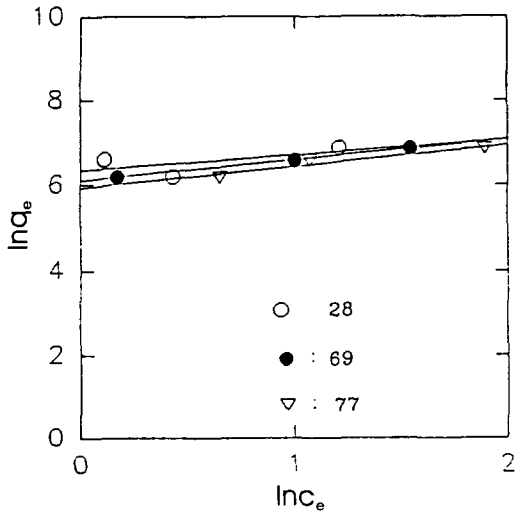


Figure 4. Equilibrium concentration versus absorbed mass of Pb for marine clay.

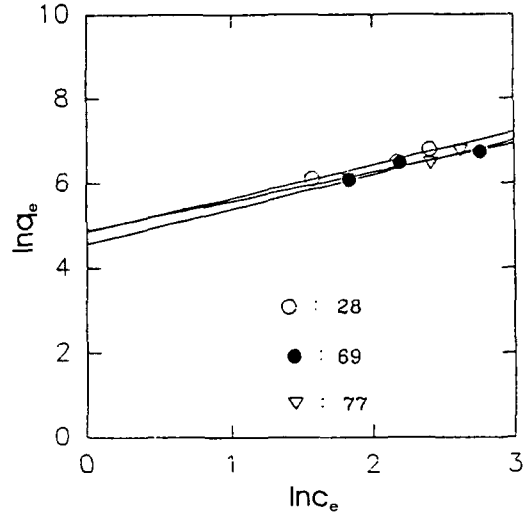


Figure 6. Equilibrium concentration versus absorbed mass of Cd for marine clay.

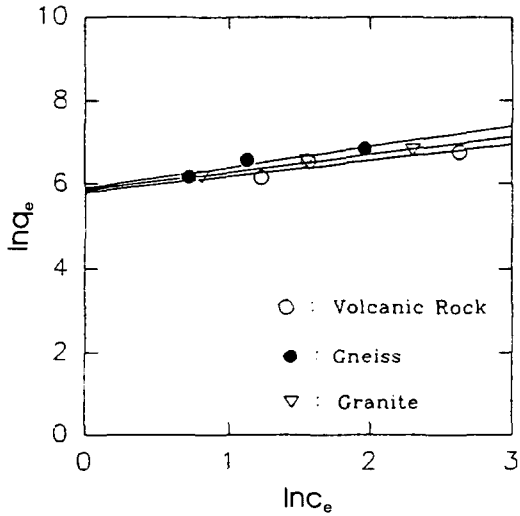


Figure 5. Equilibrium concentration versus absorbed mass of Pb for decomposed soil.

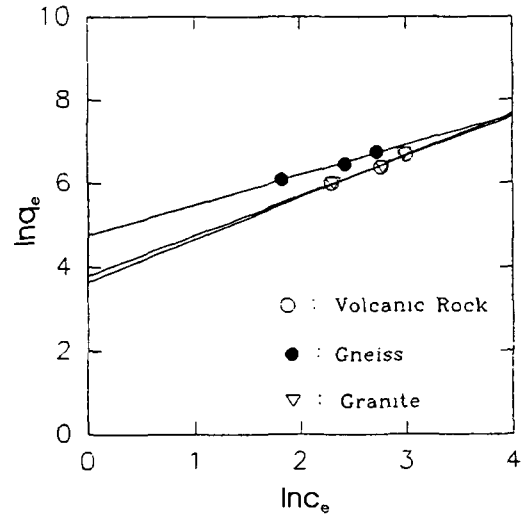


Figure 7. Equilibrium concentration versus absorbed mass of Cd for decomposed soil.

일 것으로 사료된다.

실내주상실험

중금속은 가압하였을 경우 깊이에 따라 밀도가 균일하지 않아 기반토에 대해서만 실험을 실시하였다. 중금속으로는 납과 카드뮴을 사용하였으며, 이때 사용한 중금속의 농도는 100 ppm과 1000 ppm이었다. 농도 100 ppm의 중금속 용액을 사용하여 실험한 결과에 의하면 납의 경우 간극부피(pore volume)의 약 24배 부피의 용액이 투과되어도 컬럼하부에서 납성분의 증가가 발견되지 않았으며, 카드뮴의 경우도 간극부피의 약 21배 정도 용액이 투과되어도 컬럼하부에서 농도 증가가 발견되지 않았다.

반면에 농도 1000 ppm의 중금속 용액을 사용했을 경우에는 납의 지연계수는 4.75로 나타났으며 분산지수(dispersivity)는 0.2

cm로 요오드의 경우 0.61~0.79 cm인데 비하여 1/3~1/4 정도의 작은 값을 보였다(Figure 10 참조). 동일 농도의 카드뮴의 경우 Figure 11에서 보는 바와 같이 지연계수는 8.44로 매우 큰 값을 나타냈으며, 분산지수는 요오드가 0.53 cm인 것에 비하여 0.18 cm로 1/3 정도의 작은 값을 보였다.

무기화합성분인 칼륨(potassium)의 지반내 이동특성을 알아보기 위하여 점토 시료에 대해서는 가압컬럼시험기를, 풍화토 시료에 대해서는 변수두투수시험기를 각각 이용하여 컬럼실험을 하였다. 점토 시료에 대한 실험에서는 압력을 2.0 kg/cm²로 유지시키면서 컬럼을 통과하는 용액을 채취하여 시간에 따른 농도를 측정하였다.

점토의 경우 상층과 중간층의 흡착거동 특성이 거의 동일한 양상을 보인다. 즉, 지연계수는 점토가 13.8로 측정되었고 하층의 풍화도는 이 값의 1/2 정도인 7.6으로 나타났다. Figure

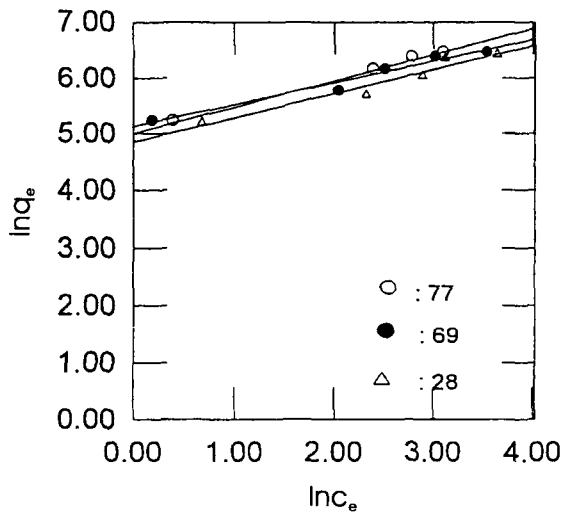


Figure 8. Equilibrium concentration versus absorbed mass of K for marine clay.

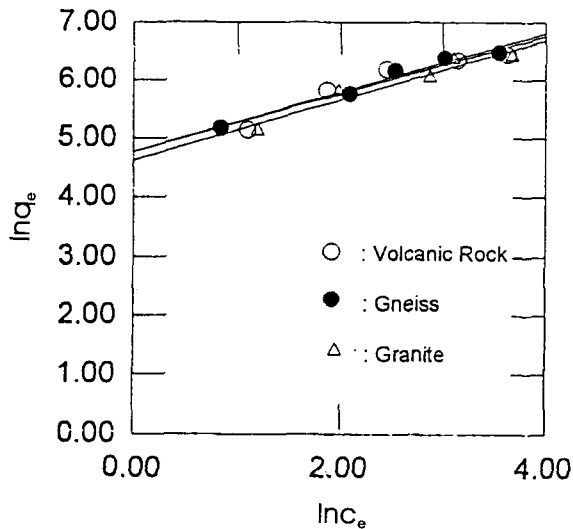


Figure 9. Equilibrium concentration versus absorbed mass of K for decomposed soil.

Table 8. Distribution coefficient and slope of Pb, Cd and K for marine clay and decomposed soil of different geologic origin

parameter		soil type					
		BH 28	BH 69	BH 77	volcanic	gneiss	granite
Intercept (Kd)	Pb	387.51	324.47	278.61	219.8	261.59	250.43
	Cd	79.14	70.34	73.03	56.46	96.72	60.55
	K	126.84	166.15	148.11	117.19	117.26	101.39
slope (P)	Pb	0.786	0.746	0.713	0.578	0.719	0.603
	Cd	1.010	0.947	0.932	0.866	0.793	0.839
	K	0.436	0.391	0.474	0.494	0.512	0.517

12와 13에서 볼 수 있는 바와 같이 점토와 풍화토에 대한 요오드의 분산지수가 각각 0.91, 0.53인 것에 반하여 칼륨의 경우 분산지수가 각각 0.2, 0.58로 나타났다.

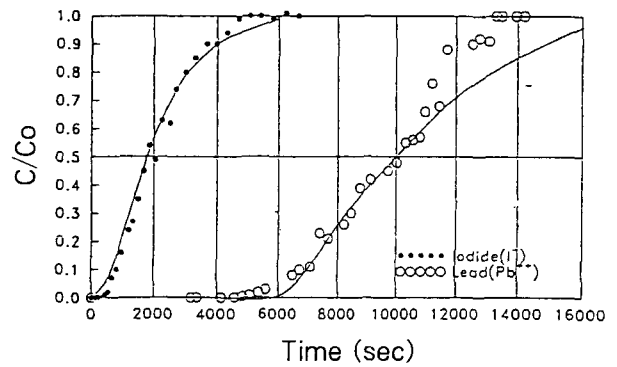


Figure 10. Comparison of concentration distribution of iodide and Pb for marine clay.

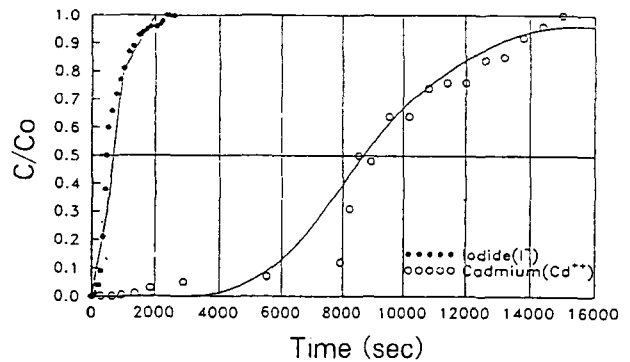


Figure 11. Comparison of concentration distribution of iodide and Cd for marine clay

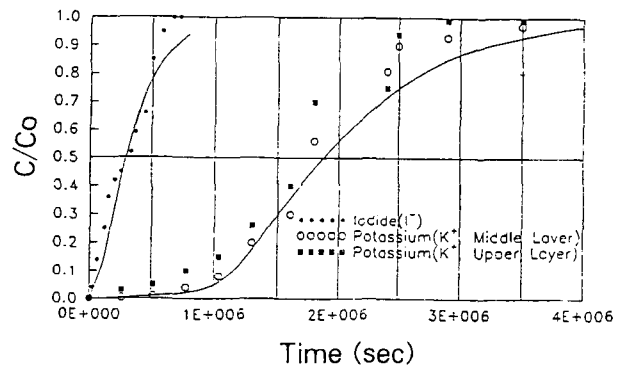


Figure 12. Comparison of concentration distribution of iodide and K for marine clay.

본 컬럼실험의 결과로부터 요오드와 납에 관하여 분산지수를 비교해 보면 각각 0.61~0.79 cm, 0.2 cm인 것을 알 수 있고 분배계수는 납 0.52 ml/g, 카드뮴 0.68 mg/l인 것을 알 수 있어(Table 9 참조) Table 4, 8의 벡치실험에서 구한 풍화토의 분배계수와 비교하여 매우 낮은 값을 갖고 있는 것을 알 수 있다. 이는 벡치실험의 경우 분산계수가 평형에 도달했을 때의 대상 시료가 흡착할 수 있는 페놀과 납의 최대값을 나타낸 것에 반하여 주상실험에서 얻어진 결과는 평형에 도달하기 전의 2~4시간 이내에 컬럼을 통과하면서 흡착되어진 결과이기 때문에 이

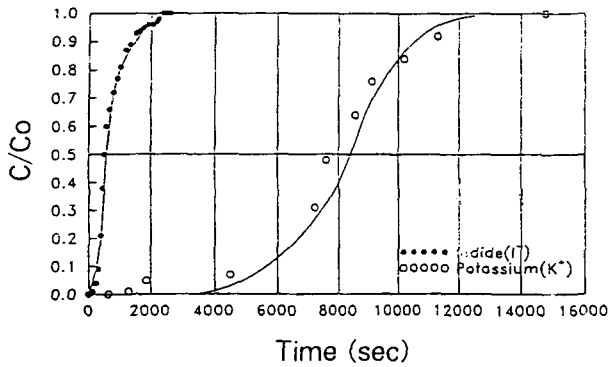


Figure 13. Comparison of concentration distribution of iodide and K for decomposed soil.

Table 9. Dispersivity and sorption capacity of Pb and Cd obtained from column test

parameter	origin of soil	
	volcanic	granites
hydraulic conductivity (K, cm/sec)	3.58×10^{-4}	4.68×10^{-4}
flow velocity (\bar{v} , cm/sec)	Iodine	1.90×10^{-3}
	Pb	4.00×10^{-4}
	Cd	-
dispersion coefficient (D, cm ² /sec)	Iodine	1.50×10^{-3}
	Pb	8.00×10^{-5}
	Cd	8.00×10^{-5}
dispersivity (α , cm)	Iodine	0.79
	Pb	0.20
	Cd	-
distribution coefficient (Kd, ml/g)	Iodine	0
	Pb	0.52
	Cd	0.68
retardation coefficient (R, VIodine/VPb or VCd)	Iodine	1.0
	Pb	4.75
	Cd	8.44

러한 차이가 나타나는 것으로 생각된다.

결론

김포 수도권 매립지 제 1공구 K블록과 3공구 지반의 침출수에 대한 흡착성 분석을 위한 주상실험과 벡치실험을 수행하였다. 벡치실험에서는 제 1공구와 제 3공구 각각에서 채취한 지반토의 무기물, 중금속에 대한 흡착능과 흡착등온식을 알아보았

으며 컬럼실험에서는 염소, 요오드, 칼륨, 납, 카드뮴을 사용하여 김포매립지반의 기반토와 상부점토에 대한 중금속의 분산성과 흡착성을 알아보았다.

시험결과 제 1공구 및 제 3공구 토양 시료 모두 Freundlich 등온식에 잘 따르는 것을 확인할 수 있었으며, 제 1공구의 경우 상부층, 중간층, 하부층의 시료 모두 중금속과 무기물인 칼륨에 대한 흡착력이 큰 것으로 확인되었고 제 3공구의 경우 각 지점 지질변화에 따른 흡착성의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

벡치시험 결과 제 1공구의 경우 납>카드뮴>칼륨의 순으로, 제 3공구의 경우 납>칼륨>카드뮴의 순으로 흡착능이 크게 나타났다. 특히, 납, 칼륨, 카드뮴 모두 상부점토와 하부 풍화토에 대한 흡착능이 대단히 커서 실재 매립장 지반토의 경우 대수층 내에 비균질성으로 인한 수로현상 (channeling phenomena)이 나타나지 않는 한 중금속의 지반차폐제 내부로의 이동은 미소할 것으로 생각된다.

컬럼시험의 결과 칼륨의 경우 컬럼을 통과하는데 걸리는 시간은 비반응성인 요오드의 통과시간에 비교하여 상층 및 중간층 점토층의 경우가 하층풍화토의 경우 보다 더 소요되어 흡착성이 우수한 것으로 나타났다. 납과 카드뮴은 매립장의 침출수 함유농도 보다 100배 이상 큰 농도인 100 ppm을 원수로 사용하여도 컬럼을 통과하는 동안 모두 흡착이 되었으며 매립장에서의 납과 카드뮴의 검출농도가 1 ppm 이하인 것을 감안하면 낮은 농도에서의 이들 중금속 물질의 매립지반 하부로의 이동성은 극소할 것으로 보인다.

컬럼실험의 결과로부터 구한 분배계수는 벡치실험에서 구한 풍화토의 분배계수와 비교하여 매우 낮은 값을 갖고 있는 것을 알 수 있다. 이는 벡치실험의 경우 분산계수가 평형에 도달했을 때의 대상 시료가 흡착할 수 있는 페놀과 납의 최대값을 나타낸 것에 반하여 주상실험에서 얻어진 결과는 평형에 도달하기 전의 2~4시간 이내에 컬럼을 통과하면서 흡착되어진 결과이기 때문에 이러한 차이가 나타나는 것으로 생각된다.

참고문헌

- 김규연, 이동훈, 김동민, 1994, 복토제로서 연탄재와 토양의 중금속 흡착능에 관한 기초연구, 대한환경공학회지, 16(2), p. 207-212.
- 동국대학교 산업기술 연구소, 수도권 매립지(제 3공구) 지반 흡착능 평가 연구 보고서.
- 한서 ENG, 1993, 화성사업소 기존매립장 안전성 조사용역 보고서.
- Voice, T. C. and Weber, W. J., 1983, Water Research, 17, 10.
- Weber, W. J., and Liu, K. T., 1980, Chem. Eng. Comm., 6, 49.