

카올리나이트의 납 흡착 특성

장경수* · 강병희

인하대학교 토목공학과

Adsorption Characteristics of Lead on Kaolinite

Kyung-Soo Jang* · Byung-Hee Kang

Department of Civil Engineering, Inha University

ABSTRACT

The laboratory adsorption batch tests were performed to investigate the adsorption characteristics of Pb on kaolinite. The characteristics such as adsorption equilibrium time, adsorption capacity, adsorption isotherm were studied, and also the effects of pH and the mixing ratio on the adsorption of Pb on kaolinite were investigated. Test results show that the adsorption equilibrium state was reached within 24 hours, and the adsorbed amount of Pb increased, but the adsorption efficiency over the initial concentration of 198 mg/l decreased, with increasing the initial concentration of Pb. And the adsorption constant, $1/n$ was obtained 0.9584 by Freundlich isotherm equation. Regardless of the initial concentration of Pb, the adsorbed amount of Pb as well as the adsorption efficiency were increased with increasing pH values and converged to a certain constant value above 8 of pH values. And also the adsorbed amount of Pb increased with the mixing ratio, but its efficiency increased with the mixing ratio up to 8 and then showed the decreasing tendency above that.

Keywords : Adsorption, Kaolinite, Lead, Contamination level, pH, Mixing ratio

요약문

본 연구에서는 카올리나이트에 대한 납의 흡착 특성을 규명코자 실내에서 회분식 흡착시험을 수행하였다. 회분식 흡착시험에서는 흡착평형도달시간, 흡착능 및 흡착동온식을 연구하였고 pH와 혼합비에 따른 카올리나이트에 대한 납의 흡착특성에 미치는 영향을 분석하였다. 실험결과 카올리나이트에 대한 납의 흡착은 24시간 이내에 평형에 도달하였고 초기오염농도가 증가함에 따라 카올리나이트에 대한 납의 흡착량은 증가하나 초기농도 198 mg/l 이상에서는 흡착율은 감소하였다. Freundlich 흡착동온식에 적용한 결과 흡착강도를 나타내는 계수 $1/n$ 은 0.9584이다. 그리고 pH 값이 증가함에 따라 초기오염농도에 관계없이 카올리나이트에 대한 납의 흡착량 및 흡착율은 증가되었으며 pH 8 이상에서는 일정한 값에 수렴하였다. 또한 혼합비가 증가함에 따라 흡착량은 증가하였다. 반면에 흡착율은 점점 증가하다가 일정 혼합비 8 이상에서는 감소하는 경향이 있음을 알 수 있었다.

주제어 : 흡착, 카올리나이트, 납, 오염농도, pH, 혼합비

1. 서 론

경제규모의 성장과 다양한 산업 활동의 증가로 인하여 지구가 날로 오염되고 있으며 환경보존의 문제가 큰 관심사로 부각되어지고 있다. 환경오염은 크게 수질, 대기, 토

양오염의 문제로 분류할 수 있다. 이 중 토양오염은 수질 오염이나 대기오염과는 달리 유동성이 적으며 육안으로 판별하기 쉽지 않다. 이러한 이유로 인해 토양오염에 대한 사회적 인식 및 기술적 자립도가 낮은 실정이다.

토양을 오염시키는 유발물질로는 유기물, 무기물, 농약, 중금속 등이 있다. 특히 카드뮴, 구리, 비소, 수은, 납, 6가 크롬과 같은 중금속은 유기물이나 무기물과는 달리 토양에 유입되면 자연적으로 분해하기가 어렵기 때문에 토

*Corresponding author : ks_jang12@hotmail.com

원고접수일 : 2002. 5. 24 게재승인일 : 2002. 10. 22

양 내에 거의 반영구적으로 잔존하게 된다. 잔존된 중금속은 동식물의 먹이연쇄나 지하수의 이동 등 다양한 경로를 통해 인간에게 유해한 오염물질로 작용하고 있으므로 이에 대한 정화대책이 시급한 실정이다.

잔존된 중금속을 토양으로부터 제거하기 위한 정화기술로써 토양세척기법, 동전기 정화기술, 반응벽체기술 등 물리화학적 정화기술이 고려될 수 있다. 그러나 이러한 정화기법 등을 현장에 올바르게 적용하기 위해서는 토양과 오염물질간의 상호 계면특성 즉, 흡착, 탈착, 양이온교환 능력, 계면동전위 등의 특성이 체계적으로 분석되어야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 토양과 오염물질과의 상호 계면특성 중 흡착 특성을 규명코자 한다.

이를 위해, 토양을 오염시키는 중금속 중 가장 많이 분포하는 납과 접토광물 중 비활성 접토인 카올리나이트를 선정하여 실내에서 회분식시험을 실시하여 흡착시간, 초기오염농도, pH, 혼합비 등의 영향인자에 의한 흡착특성을 분석하고자 한다.

2. 흙시료 및 시약

본 실험에서 사용된 흙은 국내산 상업용 카올리나이트로서 X-선 회절분석기로 분석한 결과 주된 구성광물은 석영이 포함된 카올리나이트이다. #200체(0.074 mm) 통과량은 100%로 입자가 고운 미백색상태이며 실험시 항온건조기에서 105°C로 일정량이 될 때까지 건조시킨 후에 데시케이터에 보관하면서 실험재료로 사용하였다. 사용시료의

물리적 특성 및 화학적조성은 Table 1과 Table 2와 같다.

Table 1에서 비표면적은 표면적분석기(surface area analyzer, model 22,000A, Micromeritics)를 사용하여 질소가스를 카올리나이트 표면에 흡착시켜 단분자층의 완료시 흡착량을 구하는 BET식¹⁾에 의해 구했다. 시료의 pH는 #10체(2 mm)를 통과한 시료 20 g과 중류수 50 ml를 혼합하여 자동교반기에서 1시간 동안 교반한 후 10분간 방치하고 잔류용액을 채취하여 pH를 측정하였다²⁾. 투수계수는 최적함수비보다 3% 큰 31%의 함수비로 전조밀도가 최대전조밀도의 95%이고 간극비가 0.92가 되도록 3층으로 나누어 정적으로 다짐하여 강성벽 투수시험기를 사용하여 KS F 2322에서 규정하고 있는 정수위투수시험방법에 의해 구했다.

Table 2에서 화학조성은 X선 형광분석기(X-ray fluorescence spectrometer, model MRS 400MP, Simens)를 사용하여 정량 및 정성 분석하였다. 작열감량은 Ball³⁾에 제안한 방법을 채택하여 시료 10 g를 사기도가니에 넣고 전기로에서 105±5°C로 완전히 건조시키고 무게를 측정한 후 다시 전기로에서 450°C로 24시간 가열한 후에 무게를 측정하여 구하였다.

실험시 오염물질로 이용한 시약은 수용성인 질산납을 사용하였다. pH측정을 위한 용액은 질산과 수산화나트륨을 이용하여 조절하였다. 실험에 사용된 모든 시약은 일본 순정화학의 제품이며 순도 93% 이상으로 분석시약급 이상으로 선정하였다. 사용시약의 화학적 특성은 Table 3과 같다.

Table 1. Physical Properties of Kaolinite

Specific gravity	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Plasticity index	Specific surface area (m ² /g)	pH	USCS	Maximum dry density (g/cm ³)	Optimum water content (%)	Coefficient of permeability (cm/sec)
2.62	42.9	25.8	17.1	35.1	6.5	CL	1.44	28.3	2.1×10 ⁻⁷

Table 2. Chemical Composition of Kaolinite (unit: %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	L.O.I*	Total
64.15	23.11	1.04	0.07	0.04	0.09	0.15	4.32	0.15	0.03	5.34	98.49

L.O.I*: Loss on Ignition

Table 3. Properties of the Chemical Reagent Selected

Reagent	Nitrate lead	Nitrate acid	Sodium hydroxide
Molecular formula	Pb(NO ₃) ₂	HNO ₃	NaOH
Molecular weight (g/M)	331.21	63.01	40
Degree of purity (%)	99.3	93	93

3. 실험

3.1. 실험계획

카올리나이트에 대한 납의 흡착평형도달시간과 흡착능을 분석하고 pH와 혼합비가 카올리나이트에 대한 납의 흡착 특성에 미치는 영향을 규명하기 위해 Table 4와 같은 실험 계획을 수립한 후 실내에서 회분식 흡착시험을 수행하였다.

카올리나이트에 대한 납의 흡착평형도달시간을 분석하기 위한 실험에서는 교반시간을 30분, 1시간, 2시간, 4시간, 8시간, 12시간, 1일, 2일, 3일 및 4일로 다르게 하여 실험을 수행하였다. 이때의 흙 중량에 대한 용액부피의 비율인 혼합비는 US EPA⁴⁾의 추천값 10을 사용하였다.

카올리나이트에 흡착할 수 있는 납의 최대량을 산정하기 위한 흡착능 실험에서는 초기오염농도를 30, 60, 250, 500, 1000, 1500 및 2000 mg/l로 다르게 하였으며 교반시간을 흡착평형도달시간 이상인 72시간 동안 충분히 교반하여 반응 시켰다. 산정된 납의 최대흡착량은 회분식흡착실험시 오염 농도 선정기준으로 이용되었다. 또한, 본 실험 자료를 Freundlich의 등온흡착식에 적용하여 흡착능을 분석하였다.

pH변화가 카올리나이트에 대한 납의 흡착특성에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험에서는 질산납 표준용액을 사용하여 초기오염농도 100, 200 및 400 mg/l인 납수용액을 준비한 후 건조시켜 준비한 카올리나이트 4g에 혼합한 다음 질산(HNO₃)과 수산화나트륨(NaOH)을 사용하여 pH값을 2, 4, 6, 8, 10 및 12로 다르게 적정하여 준비하였다. 이때의 혼합비는 10이었고 교반시간은 72시간 동안 흡착 반응시켰다.

혼합비변화가 카올리나이트에 대한 납의 흡착특성에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험에서는 질산납 표준용액을 사용하여 초기오염농도가 100, 200 및 400 mg/l의 납 수용액을 준비한 후 카올리나이트 4g과 혼합비 2, 5, 8 및 10에 상응하는 납 수용액 8, 20, 32 및 40 ml를 pH값을 6.5로 적정한 다음 항온교반기를 이용하여 72시간 동안 충분히 흡착 반응시킨 후 분석하였다.

흡착능실험을 제외한 다른 회분식 흡착실험에서의 오염 농도는 예비실험을 통해 결정된 카올리나이트에 대한 납의 최대흡착량 200 mg/l을 기준으로 이하와 이상의 농도인 100, 400 mg/l 및 상응하는 농도인 200 mg/l으로 세 가지로 선정하였다. 이러한 이유는 최대흡착량 이하의 농도에서는 모든 납이 카올리나이트 표면에 흡착되는 반면, 최대흡착량 이상의 농도에서는 흡착능에 상응하는 납만 카올리나이트 표면에 흡착되고 나머지 납은 간극수에 잔류되어 흡착특성에 영향을 미칠 것으로 예상되기 때문이다.

3.2. 실험방법

회분식 흡착시험은 다음과 같은 방법으로 수행되었다. ① 1000 mg/l의 질산납(Pb(NO₃)₂) 표준용액을 희석하여 일정농도의 용액을 준비한다. ② 혼합비에 상응하는 일정농도의 용액을 50 mL용량의 폴리에틸렌 원심분리관에 넣는다. ③ 원심분리관에 일정량의 카올리나이트를 넣은 후 질산과 수산화나트륨을 사용하여 일정한 pH로 적정한다. ④ 원심분리관 안에 있는 카올리나이트가 부유 상태로 존재하여 흡착할 수 있도록 항온교반기에 사용하여 25°C에서 1분간 60회 반복 운동시켜 교반시간만큼 반응시킨 후 중금속의 농도를 분석한다.

중금속의 농도분석 후 카올리나이트에 흡착된 납의 양 및 흡착율은 다음 식 (1)에서 구하였다.

$$\frac{X}{M} = \frac{(C_o - C_e)V_w}{W_s}, P(\%) = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \quad (1)$$

여기서 X/M 는 카올리나이트 단위중량당 흡착된 납의 양 (mg/kg), C_o 는 수용액상 납의 초기농도(mg/l), C_e 는 반응 후 수용액상 납의 평형농도(mg/l), V_w 는 용액의 부피 (ml), W_s 는 점토시료의 무게(g)이며 P 는 흡착율(%)이다.

3.3. 중금속의 농도분석

중금속의 농도분석은 표준시험법(APHA, AWWA and WEF, 1998)⁵⁾에 따라 원심분리기를 이용한 원심분리와 0.45 μm pore size의 멤브레인 필터로 고액 분리하여 전처리를

Table 4. Summary of Adsorption Test Program

Tests	Initial concentration of Pb (mg/l)	pH	Reaction time (hours)	Shaking ratio (ml/g)
Adsorption equilibrium time	50, 100, 200, 400	6.5	0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 24, 48, 72, 96	10
Adsorption capacity	30, 60, 250, 500, 1000, 1500, 2000	6.5	72	10
Effect of pH	100, 200, 400	2, 4, 6, 8, 10, 12	72	10
Effect of shaking ratio	100, 200, 400	6.5	72	2, 5, 8, 12

Table 5. Operating Condition of Atomic Absorption Spectrophotometer

Wave length (nm)	Bandpass (nm)	Light source	Fuel gas	Support gas
217.0	1.0	Hollow cathode	Acetylene	Air

시행한 후 AAS(atomic absorption spectrophotometer, model AA-Scan1, Thermo Jarrel Ash Co., 1993)⁶⁾를 사용하여 분석하였다. 분석시 측정조건은 Table 5와 같다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 흡착평형도달시간

시간경과에 따른 카올리나이트에 대한 납의 흡착특성을 분석하기 위해 흡착실험을 실시하여 흡착량 및 흡착율을 측정한 결과를 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에 도시하였다.

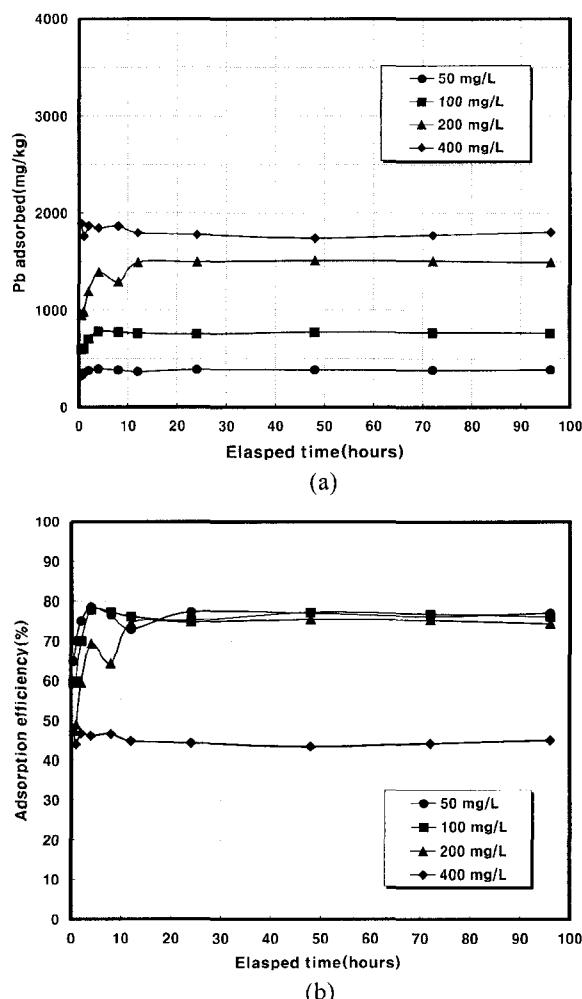


Fig. 1. Equilibrium time for the adsorption of lead on kaolinite.

Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 초기 오염농도에 따라 약간의 차이는 있으나 대체로 수 시간을 전후로 24시간 이내에 평형이 이루어져 비교적 짧은 시간에 평형에 도달하는 것을 알 수 있다. 최대흡착량을 나타내는 농도이하인 것으로 추정되는 50, 100 및 200 mg/l에서의 흡착율은 약 75~80% 정도로 거의 일정한 흡착율을 보이나 400 mg/l의 높은 농도에서의 흡착율은 약 45%에 불과하다. 최대흡착량에 대한 농도이상의 범위에서 흡착율이 감소되는 이유는 흡착능시험의 결과인 Fig. 2에서 확인할 수 있는 바와 같이 용질에 의해 흡착부위가 많이 포화된 상태에서는 납이온이 이온결합할 점토표면의 자리가 없기 때문에 흡착율이 감소한 것으로 생각할 수 있다.

Das와 Bandyopadhyay의 연구⁷⁾에서 혼합비가 400인 부유 상태에서 vermiculite에 대한 구리의 흡착실험을 실시한 경우 흡착이 평형되는 시간을 수 시간 이내라고 제시한 바 있다. 또한, Cline과 Reed의 연구⁸⁾에서도 초기오염농도가 10~1000 mg/l, pH 8, 혼합비 10인 조건에서 세립토 함량이 24.7%인 흙 시료에 대해 납을 흡착시키는 실험을 수행한 결과 거의 모든 흡착은 수분 내에 발생한다는 사실을 보여준 바 있다.

따라서 본 연구의 회분식 흡착실험에서 적용할 교반시간을 흡착평형시간 이상인 72시간으로 설정하였다.

4.2. 흡착능 시험

수용액상 초기오염농도가 카올리나이트에 대한 납의 흡착특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 흡착실험을 실시한 결과 카올리나이트 단위중량당 납의 흡착량과 초기오염농도와의 관계를 Fig. 2에 도시하였다.

Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 초기오염농도가 증가함에 따라 카올리나이트에 대한 납의 흡착량은 증가하나 흡착율은 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다.

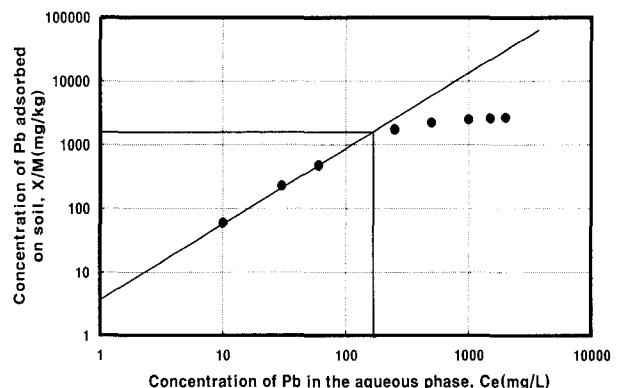


Fig. 2. Adsorption of lead on kaolinite.

Table 6. Parameters of Freundlich's Equation

Freundlich's equation	1/n	K
$X/M = 6.0 C_e^{0.9584}$	0.9584	6.0

초기오염농도가 증가함에 따라 카올리나이트에 대한 납의 흡착량이 증가하는 이유는 음전하로 대전된 점토표면에 양전하를 가진 납이온이 이온결합하여 안정화된 상태를 유지하려하기 때문에 점토표면에 납이온이 결합할 자리가 충분히 있는 경우 납이온의 농도가 증가함에 따라 흡착량은 증가한 것으로 생각할 수 있다.

또한, 초기오염농도가 증가함에 따라 카올리나이트에 대한 납의 흡착율이 일정 농도보다 큰 경우 감소하는 이유는 Brownawell 등⁹⁾이 보고한 바와 같이 용질에 의해 흡착부위가 많이 포화된 상태에서는 납이온이 이온결합할 점토표면의 자리가 없기 때문에 흡착이 덜 발생한 것으로 생각할 수 있다.

한편, 카올리나이트에 대한 납의 흡착능을 분석하기 위해 본 실험 자료를 Freundlich의 등온흡착식에 적용하였다. 적용된 Freundlich의 등온흡착식¹⁰⁾은 다음 식 (2)와 같다. 그리고 Freundlich의 등온흡착식에 적용하여 해석한 결과를 Table 6에 수록하였다.

$$\log(X/M) = \log K + 1/n \cdot \log C_e \quad (2)$$

여기서 X/M 는 카올리나이트 단위중량당 흡착된 납의 양 (mg/kg), C_e 는 수용액상 납의 평형농도(mg/l), K 는 수용액상 $1 \text{ mg}/\text{l}$ 에서 납의 흡착량을 나타내는 계수이며 $1/n$ 은 흡착강도를 나타내는 상수이다.

Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 카올리나이트에 대한 납의 흡착량의 계산은 Freundlich의 등온흡착식이 잘 적용될 수 있으며 평형농도 $198 \text{ mg}/\text{l}$ [10]상에서는 Freundlich식에 의한 흡착량보다 적게 흡착되는 것으로 보아 평형농도 $198 \text{ mg}/\text{l}$ [10]에서의 흡착량 $1,750 \text{ mg}/\text{kg}^{10}$ 카올리나이트에 대한 납의 최대흡착량으로 판단된다.

이 경우 계수는 6.0^{10} 이고 흡착강도를 나타내는 상수는 0.9584 이다. Carter 등의 연구¹¹⁾에 의하면 값이 $0.3\sim1.0$ 의 범위 내에 포함되는 경우에는 흡착이 잘 되며 2.0^{10} 이상인 경우에는 흡착이 매우 어렵다고 보고 된 바 있다.

4.3. pH변화에 따른 납의 흡착

pH 변화에 따른 카올리나이트에 대한 납의 흡착특성을 분석하기 위해 흡착실험을 실시한 결과 카올리나이트에 대한 납의 흡착량 및 흡착율을 Fig. 3(a) 및 Fig. 3(b)에 도시하였다.

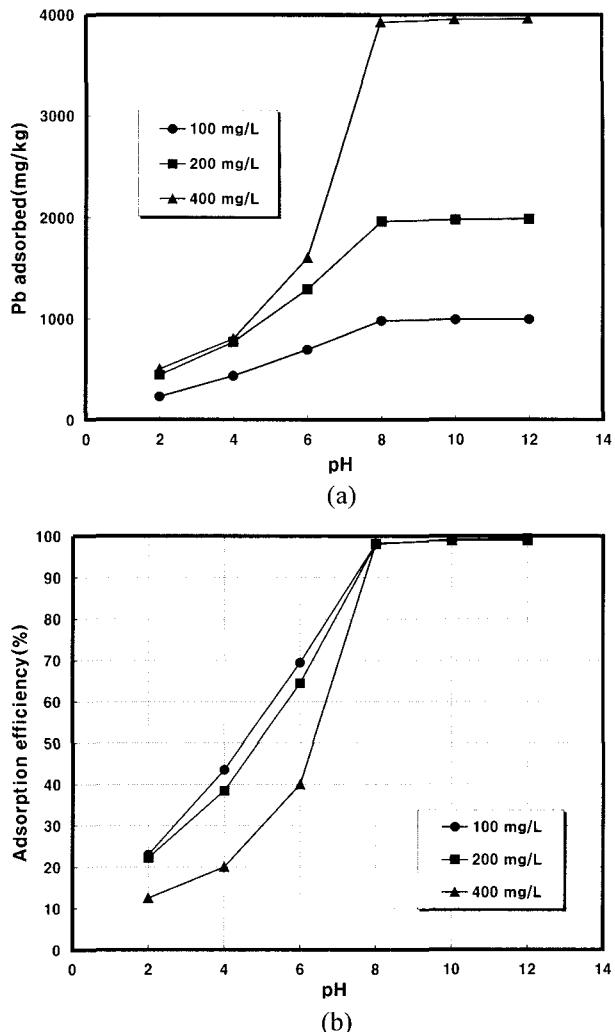
**Fig. 3.** The effect of pH on the adsorption of lead in kaolinite.

Fig. 3(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 초기오염농도에 관계없이 pH 값이 증가함에 따라 납의 흡착량은 증가하며 pH 값이 8이상에서는 납의 흡착량은 일정한 값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 3(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 초기오염농도에 관계없이 pH 값이 증가함에 따라 흡착율이 점점 증가하다가 pH 값이 8이상에서는 흡착율이 98% 이상으로 높은 흡착율을 나타남을 알 수 있다.

이러한 이유는 pH 값이 증가함에 따라 카올리나이트 점토광물표면에서 표면전하의 탈수소로 인해 음전하를 더욱 증가시켜 중금속과의 흡착반응을 증진시키기 때문이다. 그러나 일정 pH 이상에서의 흡착량의 증기는 탈수소에 의한 영향뿐만 아니라 중금속이온들의 가수분해에 의한 침전량이 흡착량에 포함되어 있는 것으로 생각된다. 즉, 가수분해반응에 의해 Pb^{2+} 이온과 OH^- 이온이 서로 결합하여 $\text{Pb}(\text{OH})_2$ 와 같은 침전물을 형성하기 때문이다¹²⁾.

이와 같은 연구결과는 Yong과 Phadungchewit의 연구¹³⁾ 결과와도 일치하며, Yong과 Mohamed 등의 연구¹⁴⁾에서 벤토나이트로 구성되어 있는 점토광물에 pH 값의 변화에 따라 납, 구리, 아연, 카드뮴을 4의 오염농도로 흡착실험을 수행한 결과와도 유사한 경향을 나타남을 확인할 수 있다. 또한, Wang의 연구에서도 카드뮴의 흡착실험에서 pH 값이 7이상에서는 흡착율이 98% 이상으로 높은 흡착율을 보여 준 바 있다¹⁵⁾.

4.4. 혼합비변화에 따른 납의 흡착

흙 중량에 대한 용액부피의 비율인 혼합비에 따른 카올리나이트에 대한 납의 흡착특성을 분석하기 위해 흡착실험을 실시한 결과 혼합비와 납의 흡착량 및 혼합비와 흡

착율과의 관계를 Fig. 4(a)과 Fig. 4(b)에 도시하였다.

Fig. 4(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 혼합비가 증가함에 따라 카올리나이트의 납 흡착량은 증가한다. 혼합비가 2에서 12로 6배 증가하는 경우 납의 흡착량은 초기오염농도에 관계없이 약 6배 정도 증가하였다.

또한, Fig. 4(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 혼합비가 증가함에 따라 카올리나이트의 납 흡착율은 초기오염농도에 관계없이 혼합비가 증가할수록 서서히 증가하다가 8이상에서는 감소하는 경향을 보인다.

혼합비가 8이상에서 흡착율이 감소하는 이유는 혼합비가 증가함에 따라 카올리나이트 단위 중량당 납 수용액의 양이 증가하기 때문에 납이온이 카올리나이트 표면에 반응할 수 있는 기회가 적어지므로 흡착률이 감소되었다고 생각된다.

5. 결 론

카올리나이트에 대한 납의 흡착 특성을 규명하기 위하여 반응시간, 오염농도, pH 및 혼합비에 따른 회분식 흡착시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 반응시간경과에 따른 카올리나이트에 대한 납의 흡착은 초기오염농도에 따라 약간의 차이는 있지만 대체로 수 시간을 전후로 24시간 이내에 평형이 이루어져 비교적 짧은 시간에 평형에 도달한다. 이 때 최대흡착량 이하의 농도에서의 흡착율은 약 75~80% 정도이다.

2) 초기오염농도가 증가함에 따라 카올리나이트에 대한 납의 흡착량은 증가하나 초기오염농도 198 mg/l 이상에서 흡착율은 점차적으로 감소한다. Freundlich 흡착동온식에 적용한 결과 흡착상수 $1/n$ 은 0.9584이고 계수 K 는 6.0이다. 또한 카올리나이트에 대한 납의 최대흡착량은 1,750 mg/kg 정도이다.

3) 카올리나이트에 대한 납의 흡착은 초기오염농도에 관계없이 pH 값이 증가함에 따라 흡착량 및 흡착율은 증가하다가 pH 값이 8이상에서는 흡착율이 98% 이상으로 높은 흡착율을 나타내며 일정한 값에 수렴한다.

4) 혼합비가 증가함에 따라 카올리나이트에서의 납의 흡착량은 초기오염농도에 관계없이 증가한다. 카올리나이트에서의 납의 최대 흡착율은 혼합비 8에서 나타나며 이 이상에서는 감소하는 경향이 있다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 인하대학교 연구비 지원에 의하여

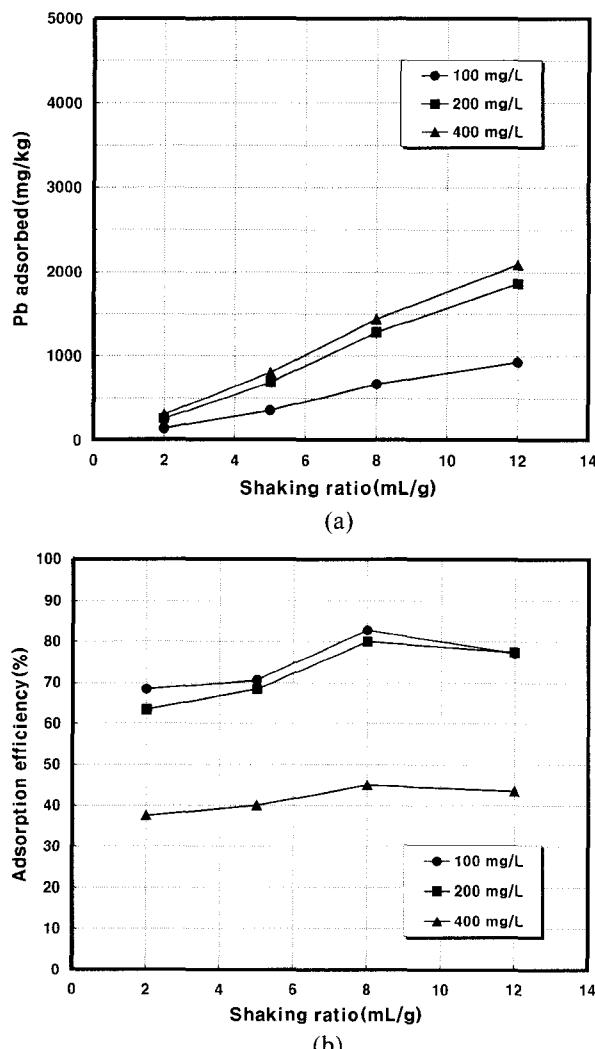


Fig. 4. The effect of shaking ratio on the adsorption of lead in kaolinite.

수행되었습니다. 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. Hiemenz, P.C., and Rajagopalan, R., Principles of Colloid and Surface Chemistry, Third Edition, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 425-433 (1997).
2. Rump, H.H., and Krist, H., Laboratory Manual for Examination of Water, Waste Water and soil, VCH, Verlagsgesellschaft, p. 190 (1988).
3. Ball, D.F. "Loss on Ignition as an Estimate of Organic Matter and Organic Carbon in Non Calcareous Soil", *Journal of Soil Science*, **15**, pp. 84-92 (1964).
4. US EPA, Engineering Guidance for the Design, Construction and Maintenance of Cover Systems for Hazardous Waste, United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/2-87/039 (1987).
5. APHA, AWWA, and WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition, Washington, D.C. (1998).
6. Thermo Jarrell Ash Corporation, AA Methods Manual for Flame Operation, Franklin, MA, pp. 9-79 (1993).
7. Das, N.C., and Bandyopadhyay, M. "Removal of Copper (II) Using Vermiculite", *Water Environment Research*, **64**(7), pp. 852-857 (1992).
8. Cline, S.R., and Reed, B.E. "Lead Removal from Soils via Bench Scale Soil Washing Technique", *Journal of Environmental Engineering*, **121**(10), pp. 700-705 (1995).
9. Brownawell, B.J., Chen, H., Collier, J.M., and Westall, J.C. "Adsorption of Organic Cations to Natural Materials", *Environ. Sci. Technol.*, **24**(8), pp. 1234-1241 (1990).
10. Weber, W.J., Physicochemical Processes for Water Quality Control, John Wiley, New York, pp. 204-273 (1992).
11. Carter, M.C., Weber, W.J., and Olmstead, K.P. "Effects of Background Dissolved Organic Matter on TCE Adsorption by GAC", *J. AWWA*, pp. 81-91 (1992).
12. Mohamed, A.M.O., and Antia, H.E., Geoenvironmental Engineering, Developments in Geotechnical Engineering 82, Elsevier, Amsterdam, p. 520 (1998).
13. Yong, R.N., and Phadungchewit, Y. "pH Influence on Selectivity and Retention of Heavy Metals in Some clay soils", *Can. Geotech. J.*, **30**, pp. 821-833 (1993).
14. Yong, R.N., Mohamed, A.M.O., and Warkentin, B.P., Principles of Contaminant Transport in Soils, Developments in Geotechnical Engineering 79, Elsevier, Amsterdam, p. 327 (1992).
15. Fang, H.Y., Introduction to Environmental Geotechnology, CRC, New York, p. 164 (1997).