

카올리나이트 KGa-1b (표준 점토)의 인산염 탈착 특성

Phosphate Desorption of Kaolinite KGa-1b (Source Clay)

조 현 구(Hyen Goo Cho)^{1*} · 김 순 오(Soo-Oh Kim)¹ · 추 창 오(Chang Oh Choo)² ·
도 진 영(Jin Young Do)³

¹경상대학교 지구환경과학과 및 기초과학연구소
(Department of Earth and Environmental Sciences and Research Institute of Natural Science,
Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea)

²안동대학교 지구환경과학과
(Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

³경주대학교 문화재학부
(School of Cultural Assets, Gyeongju University, Gyeongju 780-712, Korea)

요약 : 카올리나이트 KGa-1b (표준 점토)의 인산염 탈착 특성을 규명하기 위하여 벡치(batch) 흡착-탈착 실험을 실시하였으며, 탈착 과정은 연속추출법에 따라 pH 4에서 시행하였다. 인의 함량은 UV 분광분석기를 사용하여 측정하였으며, 이 때 파장은 820 nm를 이용하였다. 카올리나이트의 인산염 흡착-탈착 반응은 비가역적으로 일어나며, 흡착된 대부분의 인산염은 고착되는 경향을 나타낸다. 인산염 탈착 등온선은 반응 시간이 짧은 경우 프로인드리히 등온선에, 반응 시간이 긴 경우 템킨 등온선에 더 일치하는 경향을 보인다. 인산염 탈착 반응은 초기의 빠른 반응과, 후기의 느린 반응으로 구분된다. 흡착된 인산염의 농도가 높아질수록 탈착률은 감소하는 경향을 보이며, 탈착 시간이 길어지면 탈착률은 감소하는 경향을 보여준다.

주요어 : 카올리나이트 KGa-1b, 인산염 흡착-탈착, 연속추출법, 인산염 고착, 프로인드리히 등온선, 템킨 등온선

ABSTRACT : The characteristics of phosphate desorption on kaolinite was studied by batch adsorption-desorption experiments. Desorption procedure was carried out through sequential extraction method at pH 4. The phosphorous contents were measured using UV-VIS-IR spectrophotometer with 820 nm wavelength. The adsorption-desorption reaction of P on kaolinite was irreversible, and most of adsorbed P on kaolinite were not easily dissolved to aqueous solution, but may might be fixed on kaolinite surface. The desorption isotherms were well fitted with the Freundlich and Temkin equations in the case of short reaction and long reaction time, respectively. The desorption reaction was divided into the early fast reaction and the later slow reaction. The percentage of desorption generally decreased with increasing adsorbed P concentration and increasing desorption reaction time.

Key words : kaolinite KGa-1b, phosphate adsorption-desorption, sequential extraction method, phosphate fixation, Freundlich adsorption isotherm, Temkin adsorption isotherm

*교신저자: hgcho@gsnu.ac.kr

서 론

인은 토양 내에서 주로 인산염 상태로 존재하며, 자연적, 인위적인 활동(비료 등) 또는 유기물의 분해에 의하여 형성되는, 토양 환경 하에서 매우 흔한 화합물이다. 광합성을 하는 식물들은 가용성 인산염이 완전히 소비될 때까지 성장하는데, 만일 가용성 인산염이 모두 사용되어 없어지면 식물의 광합성 활동은 중지된다. 오염되지 않은 물에서 가용성 인산염은 제한된 영양분이므로, 토양 내에서 가용한 상태로 존재하는 인산염은 식물의 광합성을 제어하는 가장 중요한 인자 중의 하나로 인식되고 있다(Drever, 1997; Liu *et al.*, 2002; Brady and Weil, 2004).

토양수나 지하수 내에 존재하는 인은 농업과 환경적인 관점에서 매우 중요하다. 만일 토양 내에 가용한 인의 함량이 부족할 경우, 토양의 퇴화(degradation)를 일으켜 작물의 생장이 심각하게 억제되는 반면, 토양 내에 수용 가능한 용량 이상으로 인이 유입되면 이것은 지표수 또는 지하수를 통하여 유출된다. 인을 포함한 지표수나 지하수가 호소나 강 또는 바다로 과다하게 유입되면 조류(algae)의 과대증식을 초래하여 부영양화(eutrophication)를 일으켜, 녹조나 적조 등 심각한 환경오염을 발생시켜 수중 생물의 멸종을 초래하여 종래에는 생태계 파괴를 야기하게 된다(Rao and Prasad, 1997; Liu and Liptak, 2000).

인산염 탈착은 토양 내에 존재하는 인이 생물체에 의하여 이용되는 양을 정하는 기본적인 반응이다. 무기 인의 해리는 용액으로부터 인의 제거에 의해 발생한 비평형, 인산염의 리간드 교환 반응 또는 인산염을 포함하는 화합물의 해리에 의하여 발생된다(Sato and Comerford, 2006). 탈착은 토양 용액 내 인의 농도를 조절하는 중요한 인자이므로 이것을 정량화하는 것이 필요하다. 이를 정량화하는 방법으로 희석법(dilution), 연속 추출법(sequential extraction) 또는 음이온 수지 추출법(anion exchange resin extraction) 등이 주로 사용되고 있다(Bhatti and Comerford, 2002).

토양 내에 존재하는 점토광물은 유기물과 더불어 토양 내에서 화학적으로 가장 활성이 뛰어난 구성 성분으로서, 토양이나 퇴적물 내에 있는 오염물질의 환경적 운명(environmental fate)에 매우 강한 영향을 미친다(Boyd *et al.*, 2001; Sparks, 2003). 우리나라 토양의 경우 카올리나이트와 할로사이트

등 카올린광물이 가장 많이 존재하는 점토광물이며, 그 다음으로 일라이트와 수산화층간 질석(HIV)이 많다(황진연 등, 2000).

광물질이나 토양을 이용한 인산염 탈착에 관한 연구는 주로 토양학자들에 의하여 수행된 바 있다(Kafkafi *et al.*, 1970; Bhatti *et al.*, 1998; Sui and Thompson, 2000; Bera *et al.*, 2006; Sato and Comerford, 2006). 철과 알루미늄 산화물 및 카올리나이트를 이용하여 인산염의 흡착 특성이 비가역적임을 밝힌 연구 결과가 있는 반면(Kafkafi *et al.*, 1967; Hingston *et al.*, 1974), 알라바마(Alabama)와 퀸즈랜드(Queensland)의 토양과 호주의 2종류 토양을 이용하여 연구한 결과는 광물과 토양 현탁액에서 완전한 가역적 반응이 있었음을 보고하였다(White & Taylor, 1977; Barrow, 1983). 인산염 흡착의 가역성에 대한 이런 불일치는 적어도 일부는 실험 방법의 차이에서도 기인한다. 순수한 카올리나이트를 이용한 인산염 탈착 연구도 몇몇 학자에 의하여 수행되었지만(Kafkafi *et al.*, 1967; Nagarajah *et al.*, 1968; Al-Kanani and MacKenzie, 1991), 그 물리적-화학적 특성이 완전하게 파악된 표준점토(source clay)를 이용한 연구는 매우 드물다(Celi *et al.*, 2003; 조현구 등, 2008).

이번 연구에서는 표준점토의 하나로써 광물학적 특성이 잘 규명된 카올리나이트 KGa-1b의 인산염 탈착 특성을 배치 실험을 통하여 규명하였으며, 흡착 실험 결과를 이미 알려진 여러 종류의 흡착등온선에 투시하여 가장 잘 부합하는 모델이 무엇인가에 대해서도 고찰하였다.

시료 및 연구 방법

표준 점토 카올리나이트 KGa-1b

이번 연구에서는 미국 점토광물학회(Clay Minerals Society)에서 관리하는 표준 점토(Source Clay) KGa-1b 카올리나이트를 사용하였다. 카올리나이트 시료의 입자 크기와 그 분포를 BECKMAN COULTER사의 LS230 레이저 회절 입도분석기(Laser Diffraction Particle Size Analyzer)를 이용하여 분석하였으며, 각 시료당 3번씩 반복 측정하여 정확도를 높이고자 하였다. 정량 X선 회절 분석을 실시하여 광물 조성을 구하였는데, X선 회절 분석은 경상대학교 지구환경과학과에 있는 Simens/Bruker D5005 고분해능 X선 회절분석기를 이용하였으며, 흑연 단색

화장치(graphite monochromator)를 부착하여 단색화된 파장($\text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$)을 사용하였다. 분석 조건은 40 kV/35 mA, $3\sim 90^\circ 2\theta$ 구간에서 주사 간격 0.02° , 주사 시간 5초로 설정하여 스텝-스캔 방식으로 회절값을 기록하였으며, 슬릿은 $1.0-1.0-0.1^\circ$ 를 이용하였다. Siroquant v.3.0 프로그램 (Taylor, 1991)을 이용하여 정확한 광물조성을 결정하였다.

인산염 흡착-탈착 실험

인산염 흡착 및 탈착 실험과 관련한 실험 조건은 카올리나이트 KGa-1b와 KGa-2a를 이용하여 실험한 결과(조현구 등, 2006; 2008)를 참고로 하여 결정하였다. 흡착 실험에 사용된 인산염 용액은 KH_2PO_4 시약을 이용하여 0.5 mM 원액(stock solution)을 만든 후, 0.1 M KCl 배경 전해질을 이용하여 0.025, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40 및 0.45 mM 용액으로 묽힌 후 카올리나이트와 반응시켰다.

인산염 탈착 실험은 회석법, 연속추출법 또는 음이온 수지 추출법 등에 의하여 수행되는데(Bhatti and Comerford, 2002), 이번 연구에서는 연속추출법에 따라 pH 4에서 탈착실험을 하였다. 흡착 실험에 의하여 원심분리와 상층액 분리가 끝난 후, 시료가 들어있는 원심분리기 튜브의 무게를 측정하고 후 0.1 M KCl 용액을 튜브에 첨가하여 전체 부피가 25 mL이 되도록 한 후, 교반기를 이용하여 하루 동안 반응시킨 다음, 원심분리와 필터링을 거친 후 거른 후 pH를 측정하고, 인 함량을 분석하여 실시하였다. 반응 시간은 30분, 1시간, 2시간, 4시간, 8시간, 12시간 및 24시간으로 설정하여 같은 시료를 가지고 탈착 실험을 계속하였다.

모든 실험은 상온 상태에서 진행하였으며, 재현성을 입증하기 위하여 같은 조건에서 3회 반복하여 그 평균값을 사용하였다.

상층액 내 인 함량 분석은 경상대학교 지구환경과학과에 있는 BIOCHROM Libra S22 UV/VIS 분광분석기(spectrophotometer)를 이용하였으며, 820 nm 파장을 사용하였다. 발색용액은 6 N H_2SO_4 , 2.5% Ammonium Molybdate 및 10% Ascorbic Acid 용액을 KCl 용액에 혼합한 후 사용하였다(Eaton *et al.*, 2005). 발색용액을 섞은 후, 1시간이 경과한 후 측정하였다.

결과 및 고찰

광물 조성 및 입도

이번 연구에 사용된 카올리나이트 KGa-1b의 광물조성을 X선정량분석에 의하여 구한 결과, 카올리나이트 95.7%, 아나타제(anatase) 3.7%, 석영 0.6%로 구성되어 있는, 매우 순도가 높은 카올리나이트이다. 이같은 분석 결과는 기존에 연구된 결과인 카올리나이트(+ 디카이트) 96%, 아나타제 3%, 석영 1%와 거의 일치한다(Chipera and Bish, 2001). 카올리나이트 KGa-1b의 평균(mean) 입자 크기는 $13.52 \mu\text{m}$ 이고, 중앙값(median)은 $6.52 \mu\text{m}$ 이며, 입도 분포에서 10%에 해당하는 크기(d_{10})는 $1.21 \mu\text{m}$, 90%에 해당하는 크기(d_{90})는 $36.14 \mu\text{m}$ 이다. 미국 점토 광물학회(Clay Minerals Society)에서 KGa-1b와 KGa-2 등 두 종류의 카올리나이트를 표준점토(Source Clay)로써 제공하고 있는데, 이번 연구에 사용된 KGa-1b는 KGa-2와 광물조성은 거의 같지만, 평균 입자 크기는 작다(조현구 등, 2008).

카올리나이트의 탈착 특성

pH 4에서 뱃치 실험을 통하여 구한 흡착등온선과 탈착등온선은 그림 1에 제시되어 있다. 흡착등온선은 실선으로, 탈착등온선은 초기 이온 농도에 따라 30분, 1시간, 2시간, 4시간, 8시간, 12시간 및 24시간 후 구한 값으로, 여러 종류의 점선으로 표시되어 있다. 여기에서 초기 이온 농도는 흡착 실험을 시작한 농도를 의미한다. 탈착반응은 하나의 용기를 이용하여 연속추출법에 의하여 실시하였다. 탈착등온선의 초기 값은 같은 종류의 카올리나이트를 사용하여 20시간 동안 반응시킨 흡착등온선을 이룬다. 이것은 같은 카올리나이트를 사용하여 흡착 실험한 이전의 결과와 매우 잘 일치한다(조현구 등, 2006).

그림 1을 통하여 카올리나이트의 인산염 흡착-탈착 반응은 비가역적으로 일어난다는 사실을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 인 흡착-탈착 반응이 가역적으로 일어난다는 결과(White & Taylor, 1977; Barrow, 1983)보다 비가역적으로 일어난다는 실험 결과(Kafkafi *et al.*, 1967; Hingston *et al.*, 1974)에 보다 부합됨을 알 수 있다.

흡착등온선의 어떤 지점에서 흡착된 인산염의 양은 두 종류의 표면 인산염으로 구성된다(Kafkafi

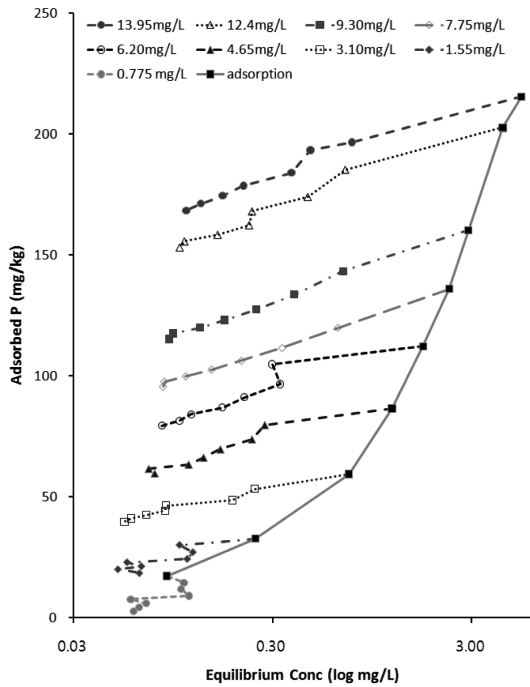


Fig. 1. Adsorption and desorption of phosphate for kaolinite KGa-1b at pH 4.0 in 0.1 M KCl.

et al., 1967). 즉, 용액으로 용출되지 않고 고정(fix) 되는 것과 용액과 평행상태를 이루면 용액으로 재 용출되는 동위원소적으로 교환되는 교환성 인산염 등 2종류가 존재 가능하다. 그러나 세척 과정이 진행되면 교환성 인산염의 일부는 고정되는 인산염으로 변화되기도 한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 카올리나이트에 흡착된 대부분의 인산염이 탈착되는 것이 아니고, 광물 내에 고착(fix)되는 경향을 나타낸다. 흡착된 인의 양이 많을 경우, 탈착이 지속적으로 일어나지만, 흡착된 인의 양이 적을 경우 (초기 농도 1.55 mg/L와 0.775 mg/L)에는 탈착이 불안정하게 일어나 탈착된 일부 인이 재흡착될 수도 있음을 보여준다. 이는 인산염의 농도가 높을 경우 흡착된 대부분의 인산염이 카올리나이트 표면에 고착되지만, 농도가 낮은 경우 교환성 인산염으로 존재함을 알 수 있다. 인산염의 농도가 낮을 경우 고정화(fixation)는 초기의 가역적인 상태를 거치지 않고 발생하는데, 이것은 인산염에 의하여 점유되는 자리가 낮은 수준일 경우 흡착된 이온은 보다 이동성이 강하고(mobile), 이미 존재하는 이온에 의하여 덜 숨겨지므로(hindered), 비가역적인 흡착 자리로 표면에서 이동이 용이하다는 사실을 지시한

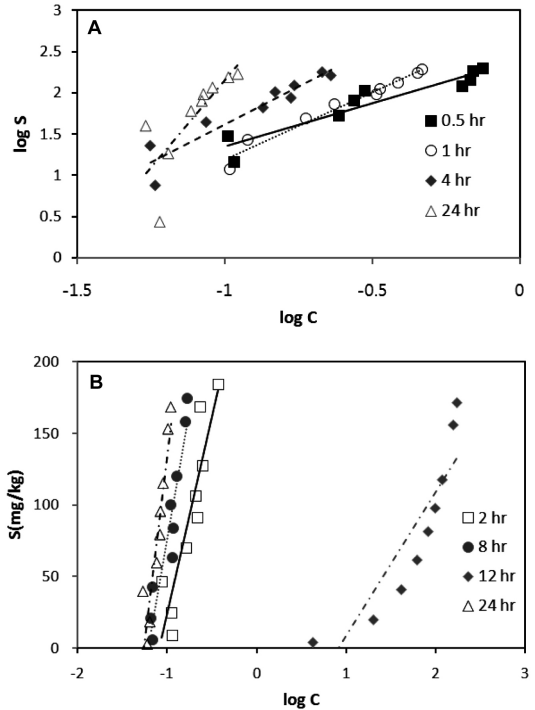


Fig. 2. Desorption isotherms for kaolinite KGa-1b at different reaction times. (A) Freundlich desorption isotherms, (B) Temkin desorption isotherms. C; equilibrium concentration (mg/L), S; adsorbed P (mg/kg).

다. 흡착등온선과 탈착등온선의 기울기가 서로 차이가 나는데, 이것은 흡착된 인산염은 카올리나이트 표면에서 강한 친화력(affinity)을 가지도록 변이(transformation)를 겪는다는 사실을 알 수 있다(Kafkafi *et al.*, 1967).

광물이나 토양 표면에 흡착된 이온의 양과 평형 상태에 도달한 용액 내 이온의 양을 나타내기 위하여 다양한 종류의 흡착등온선(adsorption isotherm)이 이용되고 있다. 인산염 이온 흡착의 경우, 프로인드리히(Freundlich) 흡착등온선, 랑미어(Langmuir) 흡착등온선 또는 템킨(Temkin) 흡착등온선에 의하여 설명되고 있다(Pissarides *et al.*, 1968; Chen *et al.*, 1973; Ioannou *et al.*, 1998; Zhou and Li, 2001).

카올리나이트 KGa-1b를 이용한 인산염 탈착 실험 결과를 랑미어 흡착등온선, 프로인드리히 흡착등온선 및 템킨 흡착등온선을 이용하여 계산하여 그 중 일부를 그림 2에 나타내었다. 표 1은 각 흡착등온선에서 실험값과 이론값 사이의 일치 정도를

Table 1. The coefficient of correlation (R^2), indicating goodness of fit to Langmuir, Freundlich, and Temkin equations for kaolinite KGa-1b desorption at pH 4

Time (hr)	Langmuir	Freundlich	Temkin
0.5	0.0194	0.8945	0.8779
1	0.5611	0.9652	0.9055
2	0.1904	0.6611	0.8279
4	0.3922	0.8872	0.8725
8	0.2908	0.7530	0.9042
12	0.1489	0.5728	0.8376
24	0.2252	0.6052	0.8768

나타내는 상관계수(coefficient of correlation, R^2)를 계산한 결과이다. 표 1에서 보는 바와 같이 랑미어 등온선의 상관계수는 0.0194에서 0.5611로써, 탈착 등온선과 부합되지 않음을 알 수 있다. 템킨 등온선의 상관계수는 0.8279에서 0.9055, 프로인드리히 등온선의 상관계수는 0.5728에서 0.9652로서 이번 실험의 탈착등온선과 대체로 잘 부합됨을 알 수 있다. 반응 시간이 2시간, 8시간, 12시간 및 24시간 일 경우에는 템킨 등온선이 탈착등온선과, 반응 시간이 30분, 1시간 및 4시간일 경우에는 프로인드리히 등온선이 탈착 실험 결과와 더욱 잘 일치한다. 반응 시간이 짧은 경우탈착등온선은 프로인드리히 등온선에 더 부합하지만, 반응 시간이 긴 경우 탈착등온선은 템킨 등온선에 더 일치한다. 그러나 랑미어 등온선은 모든 탈착 실험에서 인산염 탈착을 fitting하는데 실패하였다.

그림 3은 탈착 반응 시간에 따라 용액 중으로 해리되는 인산염의 농도를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 카올리나이트의 인산염 탈착은 반응 시간에 따라 결정된다는 것을 알 수 있다. 초기의 탈착 반응에 의하여 많은 양의 인산염이 해리되지만, 약 4시간이 경과하면 탈착되는 인산염의 양이 급격히 줄어들면서, 12시간 이후에는 매우 적은 양만이 해리된다. 즉, 전체적인 탈착 과정은 2개의 일차함수 반응, 즉 초기의 빠른 반응과 후기의 느린 반응으로 구성된다고 해석할 수 있다. 그러나 초기 인산염 농도가 매우 낮은 경우보다 높은 경우에 이런 양상이 훨씬 명확하게 나타난다. 높은 초기의 빠른 P 탈착 과정은 희석에 의한 P 용액 농도에서의 감소 때문에 유발되었으며, 이것은 표면 P와 점토 광물의 해리에 기인한 용액 내 Si 사이의 교환 반응

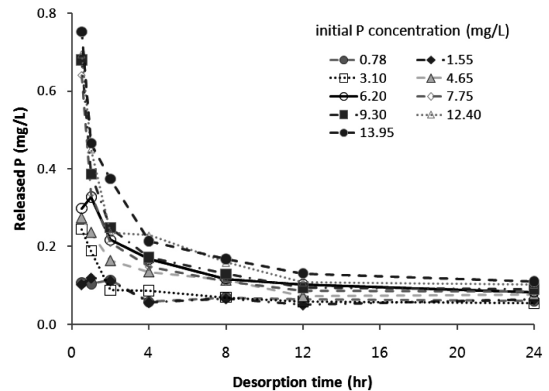


Fig. 3. Desorbed P as a function of desorption time and initial P concentration.

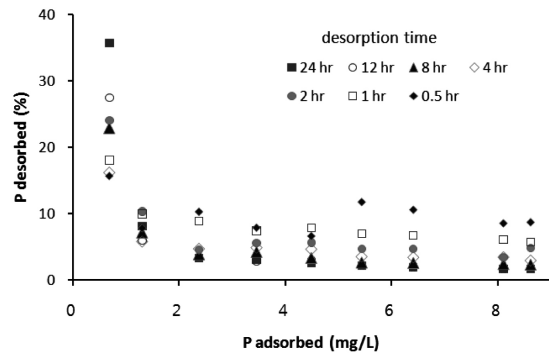


Fig. 4. Desorbed percent of adsorbed P from KGa-1b with reaction times.

에 의하여 가속된다(Bar-Yosef and Kafkafi, 1978). 그러나 느린 탈착 반응은 연속적으로 일어나므로 용액 내 Si 농도에 의하여 직접적인 영향을 받지 않는다.

카올리나이트 표면에 흡착된 인산염이 탈착되는 비율을 시간에 따라 표시한 것이 그림 4에 제시되어 있다. 흡착된 인산염이 탈착 반응에 의하여 용액 중으로 다시 해리되는 비율은 최소 1.6에서 최대 35.7%까지 매우 다양하다. 흡착된 인산염의 양이 0.69 mg/L로 매우 낮은 경우에만 탈착률이 10% 이상이고, 대부분 탈착률이 10% 이하이다. 흡착된 인산염의 농도가 높아질수록 탈착률은 감소하는 경향을 가진다. 탈착 시간과 탈착률은 흡착된 인산염의 양에 따라 매우 상반된 경향을 나타낸다. 흡착된 인산염의 양이 0.69 mg/L로 매우 낮은 경우에만 탈착 시간이 길어지면 탈착률이 감소하고, 나머지 경우에는 탈착 시간이 길어지면 탈착률은 감소하는

경향을 보여준다. 이것은 그림 3에서 초기에 탈착 반응이 빨리 일어나고, 시간이 경과할수록 탈착 반응이 서서히 일어나는 것과 일치되는 결과를 의미한다.

본 연구에서는 pH 4 조건에서만 탈착 반응을 실시하였기 때문에 이번 실험 결과만으로 카올리나이트의 탈착 반응을 완전하게 설명하기는 힘들므로, 추후 pH 조건을 바꾸면서 동일한 탈착 실험을 실시하면 카올리나이트의 탈착 특성에 대하여 보다 자세한 해석을 할 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

카올리나이트 KGa-1b를 이용하여 인산염 탈착 특성을 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) KGa-1b는 카올리나이트 95.7%, 아나타제 3.7%, 석영 0.6%로 구성되며, 평균 입자 크기는 13.52 μm 이다.

2) 카올리나이트의 인산염 흡착-탈착 반응은 비가역적으로 일어난다. 흡착된 대부분의 인산염은 고착되는 경향을 나타내지만, 인산염의 농도가 낮은 경우 교환성 인산염으로 존재하기도 한다.

3) 인산염 탈착 등온선은 반응 시간이 짧은 경우 프로인드리히 등온선에, 반응 시간이 긴 경우 템킨 등온선에 더 일치하는 경향을 보인다.

4) 인산염 탈착 반응은 초기의 빠른 반응과, 후기의 느린 반응으로 구분된다.

5) 흡착된 인산염의 농도가 높아질수록 탈착률은 감소하는 경향을 보인다. 흡착된 인산염의 양이 0.69 mg/L로 매우 낮은 경우에만 탈착 시간이 길어지면 탈착률이 감소하고, 나머지 경우에는 탈착 시간이 길어지면 탈착률은 감소하는 경향을 보여준다.

사 사

이 논문은 2006년 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었다(KRF-2006-311-C00605). 인산염 흡착-탈착 실험과 분광분석에 많은 도움을 준 경상대학교 지구환경과학과 최재호 군에게 감사드립니다.

참고문헌

조현구, Johnston, C.T., Premachandra, G.S. (2006) 카올리나이트 KGa-1b(표준 점토)의 인산염 흡착 특성. 한

국광물학회지, 19, 247-258.
 조현구, 최재호, 문동혁, 김순오, 도진영 (2008) 카올리나이트 KGa-2 (표준 점토)의 인산염 흡착-탈착 특성. 한 국광물학회지, 21, 117-127.
 황진연, 장명익, 김준식, 조원모, 안병석, 강수원 (2000) 우리나라 황토(풍화토)의 구성광물 및 화학성분. 한국 광물학회지, 13, 147-163.
 Al-Kanani, T. and MacKenzie, A.F. (1991) Sorption and desorption of orthophosphate and pyrophosphate by mineral fractions of soils, goethite, and kaolinite. Can. J. Soil Sci., 71, 327-338.
 Bar-Yosef, B. and Kafkafi, U (1978) Phosphate desorption from kaolinite suspensions. Soil. Sci. Soc. Amer. J., 42, 570-574.
 Barrow, N.J. (1983) On the reversibility of phosphate sorption by soils. J. Soil. Soc., 34, 751-758.
 Bera, R., Seal, A., Bhattacharyya, P., Mukhopadhyay, K., and Giri, R. (2006) Phosphate sorption desorption characteristics of some ferruginous soils of tropical region in Eastern India. Environ Geol., 51, 399-407.
 Bhatti, J.S. and Comerford, N.B. (2002) Measurement of phosphorous desorption from a spodic horizon using two different desorption methods and pH control. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 33, 845-853.
 Bhatti, J.S., Comerford, N.B., and Johnston, C.T. (1998) Influence of oxalate and soil organic matter on sorption and desorption of phosphate onto a Spodic horizon. Soil Sci. Soc. Am. J., 62, 1089-1095.
 Boyd, S.A., Sheng, G., Teppen, B.J., and Johnston, C.F. (2001) Mechanisms for the adsorption of substituted nitrobenzenes by smectite clays. Environ. Sci. Technol., 35, 4227-4234.
 Brady, N.C. and Weil, R.R. (2004) Soil Phosphorous, Potassium, and Micronutrients. In: Elements of the Nature and Properties of Soils (2nd Ed.). Prentice Hall, 422-471.
 Celi, L., De Luca, G., and Barberis, E. (2003) Effects of interaction of organic and inorganic P with ferrihydrite and kaolinite-iron oxide systems on iron release. Soil Science, 168, 479-488.
 Chen, Y.-S.R., Butler, J.N., and Stumm, W. (1973) Adsorption of phosphate on alumina and kaolinite from dilute aqueous solutions. J. Colloid Interf. Sci., 43, 421-436.
 Chipera, S.J. and Bish, D.L. (2001) Baseline studies of the clay minerals society source clays: Powder x-ray diffraction analyses. Clays Clay Miner., 49, 398-409.
 Drever, J.I. (1997) The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments (3rd ed.), Prentice Hall, 436p.
 Eaton, A.D., Clesceri, L.S., Rice, E.W., and Greenberg, A.E. (Eds) (2005) Standard Methods for the Exami-

- nation of Water and Wastewater (21st Ed). 4-159.
- Hingston, F.J., Posner, A.M., and Quirk, J.P. (1974) Anion adsorption by goethite and gibbsite. II. Desorption of anions from hydrous oxides surface. *J. Soil. Soc.*, 35, 16-26.
- Ioannou, A., Dimirkou, A., and Papadopoulos, P. (1998) Phosphate sorption by goethite and kaolinite-goethite system as described by isotherms. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 29, 2175-2190.
- Kafkafi, U., Posner, A.M., and Quirk, J.P. (1967) Desorption of phosphate from kaolinite. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 31, 348-353.
- Kafkafi, U., Giskin, M., and Hagin, J. (1970) Phosphate and silica adsorption and desorption from soils. *Israel J. Chemistry*, 8, 373-381.
- Liu, H.F. and Liptak, B.E. (ed) (2000) *Groundwater and Surface Water Pollution*. CRC Press LLC, 52-62.
- Liu, M., Hou, L., Xu, S., Ou, D., Yang, Y., Zhang, B., and Liu, Q. (2002) Adsorption of phosphate on tidal flat surface sediments from the Yangtze Estuary. *Environ. Geol.*, 42, 657-665.
- Nagarajah, S., Posner, A.M., and Quirk, J.P. (1968) Desorption of phosphate from kaolinite by citrate and bicarbonate. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32, 507-510.
- Pissarides, A., Stewart, J.W., and Rennie, D.A. (1968) Influence of cation saturation on phosphorous adsorption by selected clay minerals. *Can. J. Soil Sci.*, 48, 151-157.
- Rao, N.S. and Prasad, P.R. (1997) Phosphate pollution in the groundwater of lower Vamsadhara river basin, India. *Environ. Geol.*, 31, 117-122.
- Sato, S. and Comerford, N.B. (2006) Assessing methods for developing phosphorous desorption isotherms from soils using anion exchange membranes. *Plant and Soil*, 279, 107-117.
- Sparks, D.L. (2003) *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press, 352p.
- Sui, Y. and Thompson, M.L. (2000) Phosphorus sorption, desorption, and buffering capacity in a Biosolids-Amended Mollisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 164-169.
- Taylor, J.C. (1991) Computer program for standardless quantitative analysis of minerals using the full powder diffraction profile. *Powder Diffraction*, 6, 2-9.
- White, R.E. and Taylor, A.W. (1977) Reactions of soluble phosphate with acid soils: the interreception of adsorption-desorption isotherm. *J. Soil Sci.*, 28, 314-328.
- Zhou, M. and Li, Y. (2001) Phosphorus-sorption characteristics of calcareous soils and limestone from the Southern Everglades and adjacent farmlands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, 1404-1412.

접수일(2009년 11월 25일), 수정일(1차: 2009년 12월 8일),
 게재확정일(2009년 12월 8일)