

인위적으로 풍화시킨 일라이트 표면의 Cs 흡착 특성

The Sorption Properties of Cs on the Surface of Artificially Weathered Illite

김 영 규 (Yeongkyoo Kim)* · 이 은 정 (Eun Jung Lee)

경북대학교 지질학과

(Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea)

요약 : 일라이트는 닳은 모서리(frayed edge)의 존재에 의하여 다른 알칼리 금속과 비교할 때 낮은 농도에서 선택적으로 Cs을 더 잘 흡수하는 것으로 알려져 있다. 이 닳은 모서리는 기존의 일반적인 흡착실험에 의하여 존재한다고 알려져 있지만 다른 분석방법으로는 증명되지 않은 상태이다. 일라이트 표면에서의 Cs의 흡착특성을 알아보기 위하여 닳은 모서리를 증가시킨 인위적으로 풍화된 일라이트와 Cs을 여러 농도에서 반응을 시켰다. 일라이트는 0.001 M의 HCl 용액에서 1시간, 2일, 14일 동안 반응시켜 K 이온의 방출 및 XRD, SEM, TEM 등으로 풍화상태를 확인하였다. 풍화되지 않은 일라이트와 풍화된 일라이트를 Na-일라이트로 교환한 후 $10^{-3} \sim 10^{-7}$ M 농도의 CsCl 용액에서 24시간 반응시켰다. Cs의 흡착특성은 10^{-5} M Cs 용액농도를 기준으로 뚜렷한 차이를 보인다. 일라이트에 흡착된 Cs은 낮은 Cs 농도 ($<10^{-5}$ M)에서 높은 Cs 농도보다 상대적으로 많은 Cs이 흡착되었으며 이러한 상대적 흡착 농도는 용액의 농도가 낮아질수록 높아진다. 일반적으로 흡착된 Cs는 풍화가 오래된 시료일수록 낮은 농도에서 뚜렷하나 높은 농도에서는 그 차이가 적다. 이러한 결과는 낮은 농도에서 닳은 모서리라고 불리는 흡착자리의 존재에 의한 것이고 이러한 자리는 풍화가 진행됨에 따라서 증가된다.

주요어 : 일라이트, 풍화, Cs, 닳은 모서리, 흡착

ABSTRACT : Illite has been known to adsorb Cs preferentially to other alkali cations, especially at lower Cs concentration due to the frayed edge site. This frayed edge site was only verified by isotherm experiments, but not by other analytical methods. To investigate the Cs sorption properties on the surface of illite, artificially weathered illite with increasing frayed edge sites was reacted with Cs at different solution concentrations. The illite was weathered for 1 hour, 2 days, 14 days in 0.001 M HCl solution. With increasing reaction time, increasing amount of K in solution was observed, indicating formation of frayed edges by weathering, which was also verified by XRD, SEM, and TEM analysis. Original and weathered illites were converted to the homoionic Na form and reacted with $10^{-3} \sim 10^{-7}$ M CsCl solutions for 24 hour. The aspect of Cs sorption was clearly distinguished around 10^{-5} M Cs concentration. The relative Cs amount sorbed on illite at low concentration ($<10^{-5}$ M) was higher than

*교신저자: ygkim@knu.ac.kr

high concentration and increased with decreasing Cs concentration. In general, the amount of sorbed Cs increases with increasing weathering time and this trend is more noticeable at lower concentration while not much differentiated with weathering time at high concentration. These results indicate that the selective Cs sorption site exists in illite at low concentration, known as frayed edge site, and the number of those sites increases with weathering time.

Key words : illite, weathering, Cs, frayed edge, adsorption

서 언

방사성 핵종들 중 하나인 ^{137}Cs 은 1950년대 후반 및 60년대 초반의 핵실험과 1986년의 러시아 체르노빌 원전 사고 등에 의해 자연환경에 많이 누출되었다. ^{137}Cs 은 30년의 비교적 긴 반감기를 가지고 있으며, 용존 특성이 매우 높아 자연환경에서 쉽게 이동되는 특징을 지닌다 (Alberts and Wahlgren, 1981; Chittenden, 1983; Beasley and Jennings, 1984; Maiti *et al.*, 1989; Santschi *et al.*, 1990). ^{137}Cs 같은 자연에 유입된 방사성 핵종들은 토양속의 광물들과의 반응을 통하여 고정되거나 재분배된다(Sawhney, 1972; Francis and Brinkley, 1976; Evans *et al.*, 1983; Cremers *et al.*, 1988).

토양은 주로 점토 광물로 구성되어 있고 이러한 점토광물 중 일라이트는 방사성 원소 중 하나인 ^{137}Cs 과 매우 친화적인 성질을 갖고 있다. 특히 일라이트는 낮은 농도에서 원자 반경이 작은 다른 알칼리 이온에 비해 Cs의 흡착능력이 강하다고 보고되어 왔으며 이는 일라이트에 존재하는 독특한 흡착 자리에 기인한다고 알려져 왔다 (Sawhney, 1970, 1972; Wendling *et al.*, 2004).

Sawhney (1970, 1972)는 일라이트가 양이온 교환 능력이 낮음에도 불구하고 낮은 Cs 농도 ($<10^{-5}$ M)에서 양이온 교환능력이 큰 버미큘라이트보다 Cs을 더 잘 흡수하는데 이는 일라이트의 흡착 자리 중에 낮은 농도에서 Cs의 흡착을 선택적으로 일으키는 흡착 자리가 존재하는 것으로 해석하였다. 일라이트에서 일반적으로 Cs이 흡착될 수 있는 주요 자리는 일라이트 결정 구조 맨 위아래의 평면자리(planar sites)와 깨어진 모서리(broken edges), 그리고 풍화에 의해 형성되리라 생각되는 닳은 모서리(frayed edge) 자리 등이 있다(Bolt *et al.*, 1963; Brouwer *et*

al., 1983; Evans *et al.*, 1983).

이 중 일라이트 위아래의 평면자리는 일라이트의 맨 위 면과 맨 기저 면에서 동형치환에 의해 발생된 음전하에 수반되어 발생하는 흡착 자리이며(e. g. $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Si}^{4+}$), 깨어진 모서리 자리는 수용액의 pH에 영향을 받는 흡착 자리이다. 그리고 닳은 모서리 자리는 일라이트의 층간이 풍화에 의해 K 이온이 빠져나가면서 가장자리가 벌어지면서 생성된 것이라 생각되는 흡착 자리이다.

일라이트의 층간에 채워진 K 이온은 양이온 교환 능력이 매우 낮기 때문에 풍화에 의하여 쉽게 팽창되지 않는다. 하지만 일라이트 결정의 가장자리 부근에서는 비교적 풍화가 쉽게 일어나서 K 이온이 용출되어 나온 자리가 벌어지면서 닳은 모서리 자리가 형성된다고 여겨지고 있다. 가장자리가 벌어져서 생긴 닳은 모서리 자리와 같은 흡착자리는 일반적으로 K 이온에 비해 상대적으로 원자 반경이 큰 Cs 이온에 선택적인 흡착 특성을 보인다. 즉 일라이트 위 아래의 평면 자리가 Cs 흡착에 대하여 친화력(affinity)은 낮지만 수용량(capacity)이 큰 반면, 닳은 모서리 자리는 수용량은 작은 자리이나 높은 친화력을 가지고 있는 자리이다. 하지만 닳은 모서리 자리는 그 구조가 미세하여 직접 관찰된 바 없으며, 농도에 따른 Cs의 흡착 특성 등에 의하여 간접적으로만 파악이 되어왔다(Sawhney, 1970; 1972; Eberl, 1980).

지금까지 일라이트에 대한 Cs의 흡착 특성은 많이 연구되어 왔으며 이 중 닳은 모서리의 존재에 대한 연구들은 Cs의 농도에 따른 흡착 거동만으로도 이 자리의 존재를 증명해 왔었다(Sawhney, 1970; 1972). 따라서 실제로 이러한 흡착자리에 대한 직접적인 증거는 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 흡착 자리의 존재를 확인하기 위하여 실험실에서 인공적으로 일

라이트를 풍화시킨 후 이 시료들을 각기 다른 농도의 Cs 수용액에서 반응시켜 Cs 흡착 거동을 밝히고, 풍화에 따른 흡착특성의 변화를 통하여 흡착자리의 특성 변화를 관찰해 보고자 하였다.

시료 및 연구방법

시료

실험에 사용된 일라이트는 유문암의 열수변질에 의해서 형성된 경남 양산 지역의 유광광산에서 산출된 시료를 사용하였다(Kim *et al.*, 1990). 이 일라이트는 2 M₁ 형의 일라이트로서 BET 방법으로 측정된 순수한 일라이트의 비표면적은 7.8 m²/g이고, 화학식은(K_{0.82}Na_{0.04}Ca_{0.01})(Si_{3.12}Al_{0.88})(Al_{1.98}Mg_{0.02})O₁₀(OH)₂로 Si-사면체층에서 발생하는 음 전하와 층간에 K 이온이 전하의 균형을 이루고 있음을 알 수 있다(Kim *et al.*, 1996). 이 시료를 증류수에 넣어서 유리막대로 저은 후 가라앉은 무거운 불순물을 제거한 후 위의 용액에 포함되어 있는 일라이트를 다시 건조시켜 막자사발에 부드럽게 간 후 실험에 이용하였다. 분리된 순수한 일라이트의 평균 직경은 4.2 μm였다.

흡착실험 및 분석방법

불순물을 제거시킨 일라이트 2 g을 0.001 M HCl 200 mL 용액과 항온수조기를 이용하여 25 °C의 일정한 온도에서 170 rpm의 속도로 각각의 시료를 1시간, 2일, 14일 동안 반응시켰다. 그 후 각각의 용액을 3000 rpm의 속도로 10분 동안 원심분리 시킨 후 상층액을 플라스틱 용기에 따라냈다. 이 상층액은 일라이트의 층간에서 빠져나온 K의 양을 측정하기 위해 기초과학 지원연구원 대구분소에서 원자흡수분광기(Atomic Absorption Spectroscopy, AAS, Spectra AA 800, Varian)를 이용하여 분석을 수행하였다.

원심분리 후 가라앉은 일라이트는 증류수로 한 번 세척한 후 60 °C의 오븐에서 하룻밤 동안 건조시켰다. 풍화된 시료와 풍화되지 않은 시료는 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM, S-4200, HITACHI)과 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM,

H-7100, HITACHI) 분석을 실시하였다(기초과학지원연구원 대구분소). 또한 이들 4개의 시료를 슬라이드글라스에 정방향 시료를 만들어 X선 회절분석(X-Ray Diffraction, XRD, Phillips, 기초과학지원연구원 대구분소)을 실시하였고 같은 시료로 에틸렌글리콜 처리한 후 다시 X선 회절분석을 실시하여 처리 전후의 변화를 관찰하였다.

Cs와의 반응을 위하여 풍화되지 않은 시료와 풍화된 시료 모두 Na-일라이트로 만들어 흡착자리를 동일하게 하였다(Poinsot *et al.*, 1999). Na-일라이트를 만들기 위하여 20 mL의 1 M NaCl 용액에 각각의 일라이트를 넣은 후 2시간씩 교반기에서 반응시켰다. 이 절차를 4번 반복한 후 원심분리 한 후에 용액은 따라내고 각 시료를 다시 여러 차례 증류수로 세척하여 AgNO₃와 반응하지 않을 때까지 계속하였다.

준비된 4개의 Na-일라이트와 Cs의 흡착에 사용된 Cs은 방사성 ¹³⁷Cs 대신에 화학적 특성이 동일하고 자연에서 100% 산출되는 비방사성 Cs인 ¹³³Cs을 이용하였다. CsCl 수용액은 10⁻³ ~ 10⁻⁷ M의 범위에서 다양한 농도로 희석시켰으며, 모두 배경전해질을 0.01 M NaCl 용액을 동일하게 사용함으로써 이온강도의 영향을 배제시켰다. 흡착실험은 40 mg의 일라이트 시료에 40 mL의 CsCl 수용액을 혼합하여 25 °C에서 24시간 동안 반응시킴으로써 평형에 이르게 하였다. 반응 후 용액은 원심분리 시키고, 유도결합플라즈마질량분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, ICP-mass, PQ3, VG Elemental Ltd., 대전 기초과학지원연구원)로 Cs의 농도를 측정하였다.

결과 및 토의

용출된 K-이온의 농도

일반적으로 일라이트와 같은 운모의 경우 풍화가 진행되면서 층간의 K 이온이 빠져나가게 된다(Bolt *et al.*, 1963). 따라서 일라이트의 풍화가 많이 진행될수록 층간의 K 이온의 용출 농도는 커지게 된다. 약간의 풍화가 일어날 경우에는 일라이트의 층간은 K 이온에 의해 강하게 결합되어 팽창되지 않는 상태에서 가장자리에서만 K이온이 빠져나오면서 닳은 모서리가 형성

Table 1. Concentrations of released K from weathered illite in 0.001 M HCl solution for 1 hour, 2 days, and 14 days

reaction time	K concentration (ppm)
1 hour	2.1
2 days	2.6
14 days	5.1

되기도 하고, 풍화가 심하게 진행되면 층간이 팽창되면서 층간으로부터 K 이온이 빠져나와 스�멕타이트화되기도 한다(Jackson, 1963; Rich, 1964).

본 실험에 사용된 일라이트의 시간에 따른 풍화는 Table 1에서처럼 반응시간이 길어질수록 K의 양이 증가함으로써 시간에 따른 풍화의 진행정도를 알 수 있다. 풍화에 의하여 발생할 수 있는 팽창성 층간의 생성 여부를 알아보기

위하여 강도비(Ir: Intensity ratio)를 Środoń and Eberl (1984)의 정의에 의하여 다음과 같이 구하였다.

$$Ir = \frac{I(001)/I(003) \text{ (air dried)}}{I(001)/I(003) \text{ (ethylene glycol-treated)}}$$

위의 값이 1에 근접하면 팽창성 있는 스�멕타이트 층이 거의 없다는 것을 의미하며 일반적으로 스�멕타이트 층이 존재할 경우는 위의 값이 1보다 훨씬 큰 값을 갖게 된다. 본 시료들의 Ir 값은 풍화시키지 않은 일라이트 1시간, 2일, 14일 동안 풍화시킨 일라이트의 순서대로 1.28, 1.25, 1.39, 0.82 등으로 실험의 오차를 고려하였을 때 대부분 1의 근처 값을 갖고 있으며 풍화시간이 길어질수록 Ir 값이 증가되지 않는 것으로 미루어 보아 풍화로 인하여 팽창 가능한 층의 증가가 일어나지 않았음을 보여준다.

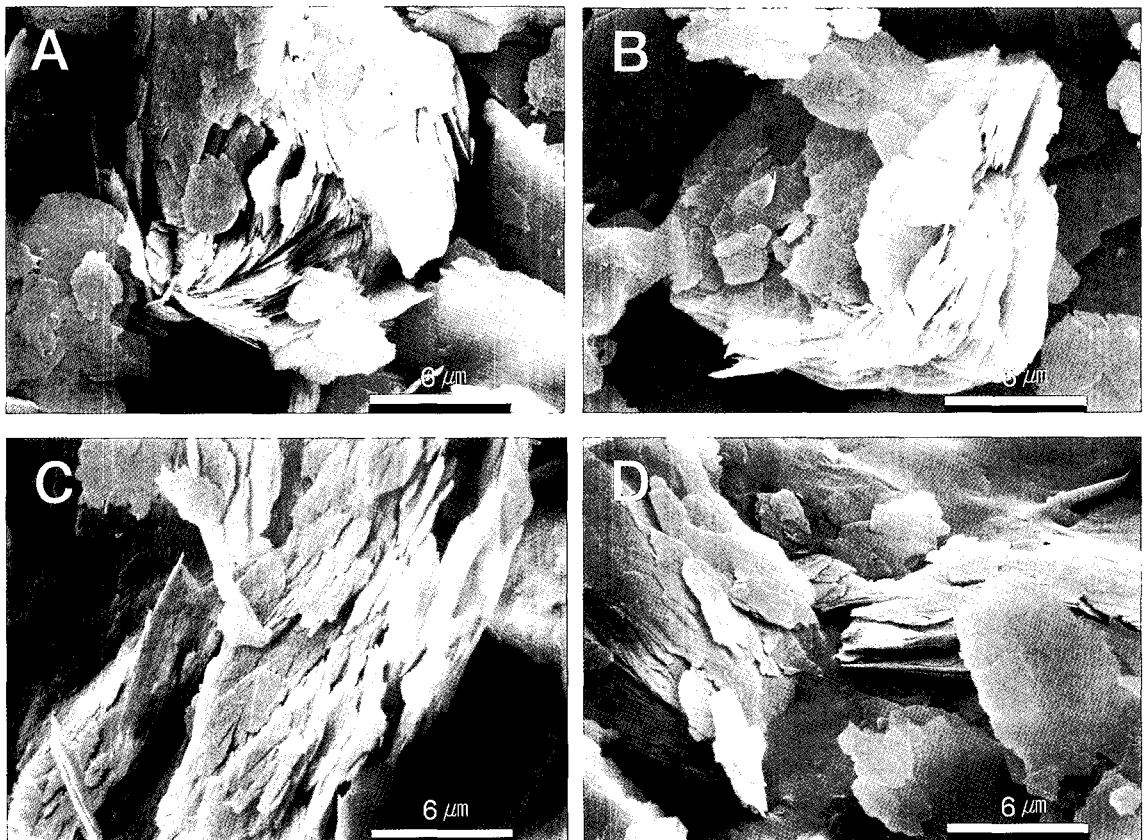


Fig. 1. SEM photographs of original (A), and weathered illites after reaction for B: 1 hour, C: 2 days, and D: 14 days.

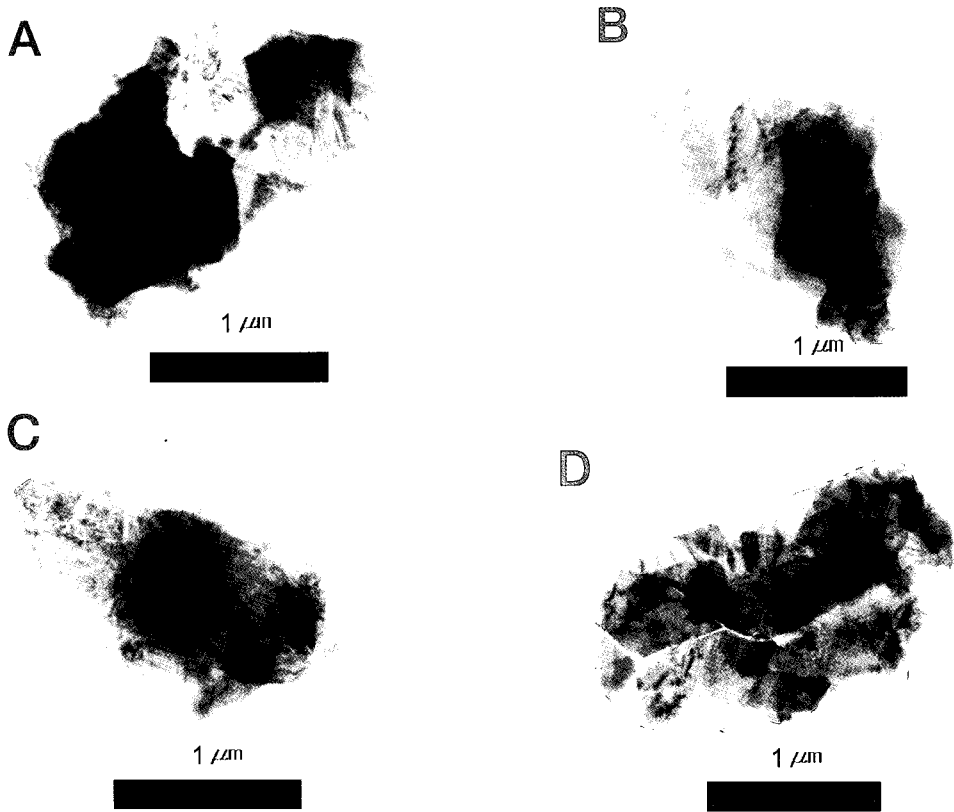


Fig. 2. TEM photographs of original (A), and weathered illites after reaction for B: 1 hour, C: 2 days, and D: 14 days.

전자현미경 분석

인위적인 풍화 실험에 의하여 팽창가능한 스�멕타이트 층이 발생하지 않은 것은 전자현미경 분석에서도 잘 나타나고 있다. 일라이트의 주사 전자현미경 분석 결과 반응시키기 전의 일라이트는 전형적인 일라이트의 모습을 보여주며 풍화시킨 일라이트의 경우에서도 스�멕타이트와 같은 층의 휨이 없고 또한 일라이트의 가장자리에 있어서도 별다른 변화를 관찰할 수 없었다(Fig. 1). 이러한 것은 풍화가 국지적으로 가장자리에서만 일어나서 닳은 모서리를 형성시켰음을 지시한다.

또한 투과전자현미경 분석 결과에서도 주사 전자현미경의 분석결과와 유사한데 즉, 풍화시간이 14일 된 시료에서도 일라이트 입자 가장자리의 양상이 그대로 존재하며 반응 전과 별다른 차이를 보이지 않고 있고 따라서 스�멕타이트 층을 함유할 만큼의 풍화는 일어나지 않은 것으로

Table 2. Cs concentrations of original CsCl solutions and concentrations after reaction with original and weathered illite for 1 hour, 2 days, and 14 days

CsCl solution (ppm)	original (ppm)	1 hour (ppm)	2 days (ppm)	14 days (ppm)
66.5	62.8	59.2	53.1	-
6.05	5.14	5.29	5.58	5.18
1.05	0.813	0.846	0.790	0.836
0.152	0.079	0.076	0.063	0.062
0.067	0.015	0.011	0.010	0.008
0.048	0.001	0.001	0.002	0.002

판단된다(Fig. 2). 즉 용출실험으로부터 관찰된 K 이온은 강도비 및 전자현미경 분석에서 흡착에 영향을 줄 수 있는 새로운 스�멕타이트 층이 발생하면서 용출된 것이 아니라 닳은 모서리에서만 용출되었음을 지시한다.

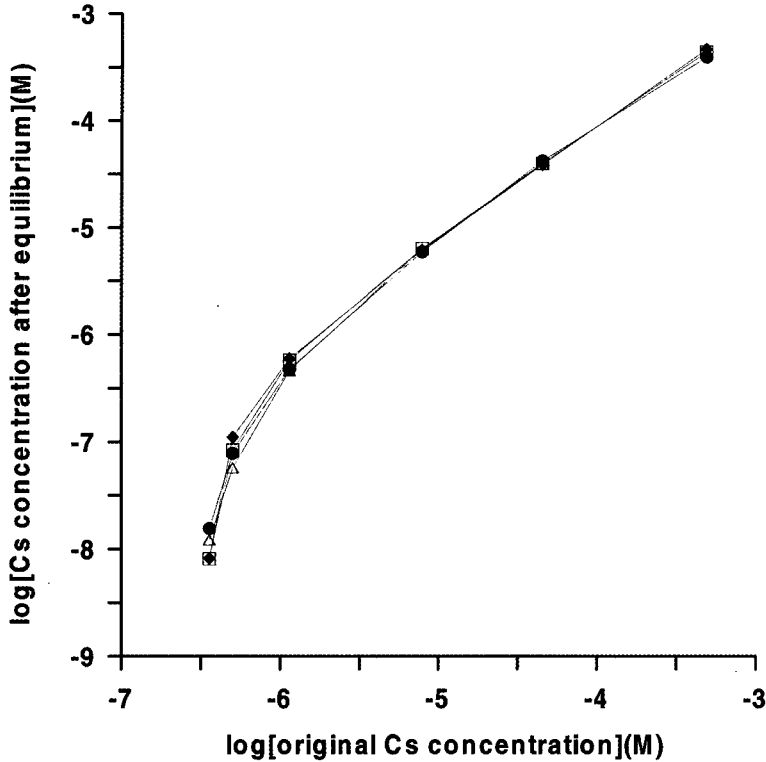


Fig. 3. Graph of Cs concentrations after reactions with unweathered and weathered illites against original Cs concentrations (◆: original, □: 1 hr., ●: 2 days, △: 14 days).

흡착 실험

Table 2는 반응 전 CsCl 용액에서의 Cs의 농도와 각각의 일라이트를 반응시킨 후 Cs의 농도를 측정된 결과이다. 이 표에서 14일 동안 풍화시킨 일라이트와의 반응 자료 중 반응전 CsCl의 농도가 66.5 ppm 인 경우에는 오차한계를 넘는 값이 측정되어서 본 자료에서 제외시켰다.

Fig. 3은 일라이트의 풍화에 따른 Cs의 흡착 양상을 알아보기 위해서 각 농도별로 반응 전 CsCl 용액의 Cs 농도에 대해서 반응 후 용액에 남아있는 Cs의 몰농도를 로그 함수로 나타낸 그래프이다. 일반적으로 흡착 실험결과는 반응용액의 농도에 대하여 흡착된 양을 표시하는 것이 일반적이지만 이런 등온흡착표시방법은 본 실험결과와 같이 낮은 농도에서의 변화를 표시하는 데는 제한점이 있어서 반응 전 농도와 반응 후 농도를 그래프로 비교하였다. 반응 후 용액 속의 Cs의 몰농도는 10^{-5} M의 Cs의 평형 농도 주

변에서 기울기의 양상이 뚜렷하게 구별되는데, 낮은 농도(10^{-5} M)에서의 기울기가 높은 농도에서 보다 급하게 나타나며 이는 낮은 농도에서 Cs가 상대적으로 많이 흡착됨을 지시한다. 풍화 시간에 따른 양상도 이 농도 주변에서 구별이 되는데 낮은 농도에서는 일라이트의 풍화시간에 따라 상대적으로 흡착된 양의 차이가 커지는 경향을 볼 수 있지만 높은 농도에서는 흡착된 양에 별다른 차이를 보이고 있지 않다. 가장 낮은 농도에서($10^{-6.5}$ M) 2일간 풍화된 일라이트에서의 Cs의 흡착된 양이 14일간 풍화된 일라이트보다 오히려 높게 나타났는데, 이것은 흡착된 양이 많아 용액 내의 Cs 양이 아주 적기 때문에 분석 오차 범위를 벗어남으로 결과의 정확성을 판단하기 힘들다. 이 분석 값을 제외하고는 전체적인 흡착된 양이 풍화의 시간이 길수록 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 일라이트에서는 낮은 농도에서 Cs의 흡착이 선택적으로 나타나는 흡착 자리가 존재하며 이러한

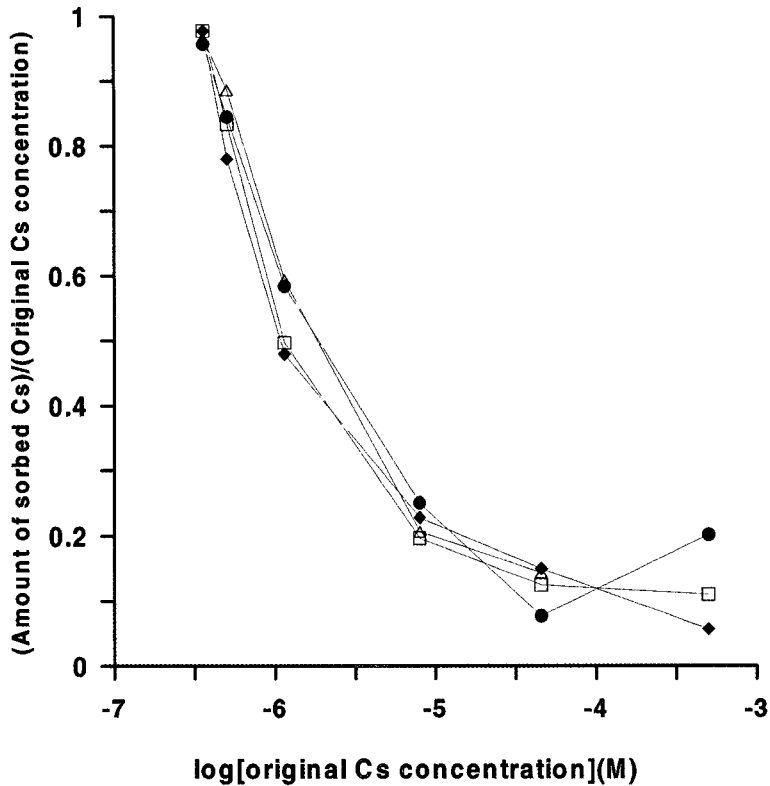


Fig. 4. Graph showing the relationship between amounts of sorbed Cs vs. original Cs concentrations (◆: original, □: 1 hr., ●: 2 days, △: 14 days).

흡착 자리는 풍화가 진행되면서 증가하는 것을 지시한다. 이러한 풍화시간 증가에 의한 변화는 풍화에 의하여 스펙타이트 층이 형성되지 않았기 때문에 풍화에 의하여 형성된 많은 모서리에 의한 것으로만 판단된다. 즉 풍화시간이 길수록 K 이온이 빠져나간 자리가 증가하여 새로운 흡착자리인 많은 모서리 자리의 수는 늘어나게 됨을 의미한다. 또한 모서리의 양 가장자리가 벌어져서 형성된 많은 모서리에서는 원자 반경이 K보다 큰 Cs이 일라이트의 위아래의 평면자리에 비하여 선택적으로 흡착되기 때문에(Bradbury and Baeyens, 2000) 이러한 흡착자리의 증가에 밀접한 관련을 보인다. 높은 농도에서는 Cs의 선택적인 흡착 및 풍화시간에 따른 흡착의 차이가 나타나지 않는 것은 많은 모서리의 수용량이 작기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 4는 농도에 따른 상대적인 Cs의 흡착된 양과 풍화에 따른 흡착된 양의 차이를 더 자세

히 비교해 보기 위해서 흡착된 Cs의 양을 반응 전 원래 용액의 농도 값으로 나눈 값을 반응 전 Cs용액의 농도에 대해 도시하여 각 농도별 흡착된 상대적인 양을 도시해 보았다. 흡착된 Cs의 상대적인 양을 도시한 그래프에서도 낮은 농도와 높은 농도에서의 뚜렷한 차이를 볼 수 있다. 흡착된 Cs의 상대적인 농도는 낮은 농도(10^{-5} M)에서 농도가 낮아질수록 높아지는 경향을 볼 수 있다(Bradbury and Baeyens, 2000). 하지만 높은 농도에서는 전체적으로 흡착된 Cs의 상대적인 양이 낮게 나타났으며 농도에 따른 흡착된 양의 차이가 크게 나타나지 않았다. 또한 풍화에 따른 흡착된 Cs의 상대적인 양도 낮은 농도에서 풍화시간이 길수록 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 가장 낮은 농도에서는 원래의 농도에 비하여 상대적으로 흡착된 Cs의 농도의 차가 거의 없는데 이것은 풍화여부에 상관없이 대부분의 Cs이 흡착된 상태로 존재하기 때문에 용액

내 남아있는 Cs이 거의 없기 때문이다.

참 고 문 헌

결 론

Cs 이온의 선택적 흡착에 관여하는 일라이트의 많은 모서리의 존재를 연구하기 위하여 순수한 일라이트를 1시간, 2일, 14일 동안 각각 풍화시켜서 인위적으로 풍화에 의한 많은 모서리를 만든 시료로 흡착실험을 실시하였다. 풍화된 일라이트에서 용출된 K 이온의 농도를 분석한 결과 일라이트의 풍화시간이 길수록 K 이온의 농도 또한 높게 나타났으며, 여기서 용출된 K 이온은 X-선회절분석, 주사전자현미경 분석, 투과전자현미경 분석 결과 일라이트가 스펙타이트화된 양상이 나타나지 않는 것으로 볼 때, 일라이트의 풍화로 인해 형성된 많은 모서리 자리에서 빠져 나온 것을 간접적으로 확인할 수 있었다.

이렇게 풍화된 일라이트에 대하여 Cs의 농도와 일라이트의 풍화시간에 따른 Cs의 흡착특성을 비교해 본 결과, 일라이트에서의 Cs의 흡착은 낮은 농도($<10^{-5}$ M)와 높은 농도에서 흡착양상이 구별되었다. 낮은 농도에서는 흡착된 Cs의 상대적인 양이 높은 농도에서 보다 높게 나타났다. 또한 풍화시간에 따른 흡착된 양을 비교해 보면 낮은 농도에서는 풍화시간이 길수록 상대적으로 흡착된 양이 크게 나타난 반면에 높은 농도에서는 풍화시간에 따른 흡착된 양의 차이가 거의 나타나지 않았다. 따라서 일라이트의 흡착 자리 중 낮은 농도에서 Cs의 흡착에 선택성을 보이는 흡착 자리가 존재한다는 것을 알 수 있고, 이 자리는 많은 모서리 자리이며, 풍화시간이 길수록 많은 모서리 자리의 양은 많아진다는 것을 알 수 있었다. 또한 Cs의 농도가 높을 때는 풍화에 따른 흡착된 양의 차이가 나타나지 않는 것으로부터 많은 모서리 자리는 수용량은 작지만 다른 이온에 비해 원자반경이 큰 Cs의 흡착이 선택적으로 일어나는 것을 지시한다.

사 사

이 논문은 한국과학재단의 지원(과제번호: R05-2002-000-00898-0)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다. 또한 건설적인 비평으로 보다 좋은 논문이 되도록 도움을 주신 조현구 교수님과 익명의 심사위원에게도 감사를 드립니다.

Alberts J.J. and Wahlgren M.A. (1981) Concentrations of $^{239,240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , and ^{90}Sr in the waters of the Laurentian Great Lakers. Comparison of 1973 and 1976. *Environ. Sci. Technol.*, 15, 94-98.

Beasley T.M. and Jennings C.D. (1984) Inventories of $^{293,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{137}Cs , and ^{60}Co in Columbia River sediments from Hanford to the Columbia River estuary. *Environ. Sci. Technol.*, 18, 207-212.

Bolt G.H., Sumner M.E., and Kamphorst A. (1963) A Study of the Equilibria Between Tree Categories of Potassium in an Illite Soil. *Soil Sci Soc. Proc.*, 27, 294-299.

Bradbury M.H. and Baeyens B. (2000) A generalised sorption model for the concentration dependent uptake of caesium by argillaceous rocks. *J. Contaminant Hydrology*, 42, 141-163.

Brouwer E., Baeyens B., Maes A., and Cremers A. (1983) Cesium and Rubidium Ion Equilibria in Illite Clay. *J. Phys. Chem.*, 87, 1213-1219.

Chittenden D.M., II (1983) Factors affecting the soluble-suspended distribution of strontium-90 and cesium-137 in Dardanelle Reservoir, Arkansas. *Environ. Sci. Technol.*, 17, 26-31.

Cremers A., Elsen A., de Peters P., and Maes A. (1988) Quantitative analysis of radiocesium retention in soils. *Nature*, 335, 247-249.

Eberl D.D. (1980) Alkali cation selectivity and fixation by clay minerals. *Clays Clay Minerals*, 28, 161-172.

Evans D.W., Alberts J.J. and Clark R.A. III (1983) Reversible ion-exchange fixation of cesium-137 leading to mobilization from reservoir sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 1041-1049.

Francis C.W. and Brinkley F.S. (1976) Preferential adsorption of ^{137}Cs to micaceous minerals in contaminated freshwater sediment. *Nature*, 260, 511-513.

Jackson M.L. (1963) Interlayering of expansible layer silicates in soils by chemical weathering. *Clays Clay Minerals*, 11, 29-46.

Kim S.J., Kim Y., Noh. J.H. (1990) Mineralogy and Genesis of Hydrothermal Deposits in the South-eastern Part of Korean Peninsula.: (1) "Napseok" Deposits in Yangsan Area. *J. Miner. Soc. Korea*, 3, 44-57.

Kim Y., Kirkpatrick R.J., and Cygan R.T. (1996) ^{133}Cs NMR study of cesium on the surfaces of kaolinite and illite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 4059-4074.

- Maiti T.C., Smith M.R., and Laul J.C. (1989) Colloid formation study of U, Th, Ra, Pb, Po, Sr, Rb, and Cs in briny (high ionic strength) groundwaters: Analog study for waste disposal. *Nuclear Technol.*, 84, 82-87.
- Poinsot C., Baeyens B. and Bradbury M.H. (1999) Experimental and modelling studies of caesium sorption on illite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63, 3217-3227.
- Rich C.I. (1964) Effect of cation size and pH on potassium exchange in Nason soil. *Soil Sci.*, 97, 384-390.
- Santschi P.H., Bollhalder S., Zingg S., Luck A., and Farrenkothén K. (1990) The self-cleaning capacity of surface waters after radioactive fallout. Evidence from European Waters after Chernobyl, 1986-1988. *Environ. Sci. Technol.*, 24, 519-527.
- Sawhney B.L. (1970) Potassium and Cesium Ion selectivity in relation to clay mineral structure. *Clays Clay Minerals*, 18, 47-52.
- Sawhney B.L. (1972) Selectivity sorption and fixation of cations by clay minerals: A Review. *Clays Clay Minerals*, 20, 93-100.
- Šrodoň J., and Eberl D.D. (1984) Illite. In Micas(ed. Bailey S. W.); *Rev. Mineral*, 13, 495-544.
- Wendling L.A., Harsh, J.B., Palmer, C.D., Hamilton, M.A., and Flury, M. (2004) Cesium sorption to illite as affected by oxalate. *Clays and Clay Minerals*, 52, 375-381.
-
- 2004년 8월 31일 원고접수, 2004년 9월 10일 게재승인.