

## 처리조건에 따른 중금속 이온의 안정화 거동

엄태호<sup>†</sup> · 김유탉

경기대학교 재료공학과  
(2003년 4월 18일 접수; 2003년 5월 7일 승인)

### Stabilization Behavior of Heavy Metal Ions by Treatment Conditions

Tae-Ho Um<sup>†</sup> and Yootaek Kim

Department of Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 442-760, Korea  
(Received April 18, 2003; Accepted May 7, 2003)

#### 초 록

폐기물 함유 세라믹 재료의 성형과정에서 일어나는 일차적인 중금속 안정화 과정을 알아보기 위하여 중금속(Cd, Cr, Zn) 표준용액의 농도(10-30 ppm)와 pH(pH 3-9)를 조절하여 적점토, 백토와 제올라이트에 대해 회분식 흡착실험을 행하였다. pH 증가에 따라 모든 흡착원료에서 Cd와 Zn의 흡착률은 증가하였고 pH 5 이상에서는 완만한 증가를 보였다. Cr의 경우 pH 증가에 따른 흡착률의 증가는 관찰할 수 없었고 오히려 적점토와 백토를 혼합한 원료의 경우에는 pH 3에서의 흡착률에 비해 pH 5 이상에서는 50%의 흡착률 감소를 보였다. 세 가지 중금속 Cd, Cr, Zn을 함께 혼합한 중금속 용액을 적점토에 대해 실험한 결과 흡착률은 Cd, Zn > Cr 순이었으나, Cu, Fe, Pb의 중금속이 추가적으로 첨가될 경우 Fe > Pb, Cu > Cr > Zn > Cd 순으로 흡착률이 변화하였다. 이는 공존 양이온의 종류가 흡착률을 좌우하며 주어진 조건에서 서로 경쟁적인 관계를 가지고 흡착하기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 공존음이온으로 Cl<sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>를 1-20 ppm까지 첨가한 경우 공존 양이온의 경우와는 달리 중금속 흡착률에는 큰 영향을 주지 못하였다.

#### ABSTRACT

Cation exchange capacity of clay, white clay and zeolite was measured by the adsorption test for 3 different heavy metal (Cd, Cr, Zn) standard solutions whose concentrations were varied by 10, 20, 30 ppm and pH were varied by 3, 5, 7, 9, respectively. The adsorption rate of Cd and Zn increased with increasing pH and slowly increased with increasing pH above pH 5. However, adsorption rate of Cr did not increase with increasing pH. Especially, Cr adsorption rate of the mixture of clay and white clay at pH 5 showed an half decrease compared to that at pH 3. The adsorption rate of mixed heavy metal solutions was in the order of Cd, Zn > Cr; however, the order was changed by Fe > Pb, Cu > Cr > Zn > Cd in case of Cu, Fe and Pb addition.

**Key words :** Cation exchange capacity, Heavy metal adsorption, pH, Clay, White clay, Zeolite

#### 1. 서 론

전세계적으로 급속한 산업발전과 인류문명의 발달에 따른 생산활동의 다양화로 인하여 각종 환경오염물질의 종류가 계속 증가하고 있으며, 발생량 또한 급증하고 있는 추세이다. 근래에 환경오염에 대한 관심이 고조되면서 폐기물의 처리, 처분 문제가 심각하게 대두되고 있다.<sup>1)</sup> 따라서 폐기물을 원료로 하여 인공경량골재, 벽돌, 담체 등의 세라믹 재료를 제조함으로써 폐기물을 합리적으로 처분함과 동시에 유용한 순환자원으로 활용하는 것이 요구된다.

폐기물을 원료로 한 세라믹 순환재료에서 유해 중금속의 용출이 문제가 될 수 있으나, 이는 성형과정에서의 이온교환과 흡착반응에 의한 일차적 안정화와 소성 공정에서의 공융반응에 의한 이차적 안정화에 의해 안정화될 수 있다고 보고된 바 있다.<sup>2)</sup>

점토광물 입자의 표면은 이온들의 불완전한 치환에 의해 극성을 띠게 되며 반대의 극성을 띠는 이온을 흡착함으로써 극성의 균형을 맞추게 된다. 점토(clay)는 표면적이 매우 넓고 표면이 음전하를 띠기 때문에 양이온들을 잘 흡착하는 것으로 알려져 있다.<sup>3)</sup> 점토광물에 대한 중금속의 흡착반응에는 점토광물,<sup>4)</sup> 유기물,<sup>5)</sup> 교환성 양이온<sup>6)</sup> 및 무정형 산화물<sup>7)</sup>의 존재여부 및 양과 같은 점토광물 자체의 물리화학적 특성뿐만 아니라 pH,<sup>8)</sup> 경쟁 양이온,<sup>9)</sup> ionic strength 및 ligand<sup>10)</sup>와 같이 첨가되는 중금속 용액의 화학적인 조성<sup>11)</sup>도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

<sup>†</sup>Corresponding author : Tae-Ho Um  
E-mail : hoyak2k@empal.com  
Tel : +82-31-249-9774 Fax : +82-31-249-9775

일반적으로 중금속의 흡착은 pH가 높은 경우에 잘 일어나며 유기물질과의 결합도 pH의 영향을 받는다.

본 연구에서는 폐기물 함유 세라믹 재료의 성형과정에서 이온교환과 흡착에 의한 중금속 안정화 거동을 알아보기 위하여 pH 3.0-9.0의 범위에서 중금속(Cd, Cr, Zn) 표준용액의 농도를 각각 10, 20, 30 ppm으로 조절하여 적점토, 백토(white clay), 적점토와 백토 혼합물, 제올라이트(zeolite)를 흡착원료로 회분식 흡착실험을 하여 중금속 흡착능력을 비교 분석하였고 혼합중금속용액에서 적점토의 흡착선택성 비교와 공존음이온이 적점토의 흡착능에 미치는 영향에 대해서도 고찰하였다.

## 2. 실험방법

흡착실험에 사용된 원료는 일반 점토벽돌 제조시 사용하는 적점토와 백토, 제올라이트를 100°C에서 24시간 이상 건조시킨 후 분쇄하여, 40 mesh(425 μm) 표준체를 통과시킨 후 사용하였으며 다른 전처리 과정은 거치지 않았다. 흡착원료는 XRF(X-ray Fluorescence Spectrometer; Philips PW2400)로 화학조성분석을 하였고, 광물상은 니켈필터가 부착된 Cu- $\alpha$ 선을 이용하여 30 kV, 30 mA의 조건에서 XRD(X-Ray Diffractometer; Philips PW1840)를 사용하여 측정하였다. 각각의 원료들은 KS M 9727 토양의 질-pH 8.1에서 염화바륨 완충 용액을 사용한 잠재 양이온 교환능력 및 교환가능 양이온 함량 측정 방법을 참고하여 양이온 교환능력(CEC; Cation Exchange Capacity)과 교환가능한 양이온의 양을 구하였다.

중금속 농도 및 pH에 따른 흡착능력 비교를 위해 Aldrich사의 Cd, Cr, Zn 1000 ppm 표준용액을 증류수로

10-30 ppm으로 희석하여 제조한 중금속용액을 NaOH와 CH<sub>3</sub>COOH로 pH를 3.0-9.0으로 조절하고 이를 각각의 점토광물(적점토, 백토, 적점토와 백토 혼합, 제올라이트) 5 g이 들어있는 비이커에 100 ml씩 정량을 취하여 회분식 흡착실험을 행하였다. 준비된 용액은 25°C에서 2시간 동안 약 200 rpm으로 교반하였으며 GF/C(110 mm) 여과지로 여과하여 유도결합 플라즈마방출 분광기(ICP-AES)로 잔류 중금속 농도를 측정하였다(Fig. 1). 점토광물에 흡착된 중금속 이온의 흡착률은 다음의 식에 의하여 결정하였다.

$$\text{흡착률(\%)} = \frac{\text{점토광물표면에 흡착된 중금속이온의 농도}}{\text{표준 용액중금속이온의 농도}} \times 100$$

$$= \frac{(\text{표준용액중금속이온의 농도}) - (\text{교반후 측정농도})}{\text{표준 용액중금속이온의 농도}} \times 100$$

혼합중금속 용액에서의 흡착 선택성을 비교하고자 Cd, Cr, Zn을 각 30 ppm을 혼합한 중금속용액을 사용하여 pH 5에서 적점토에 대해 회분식흡착실험을 행하였고, Cd, Cr, Zn, Cu, Fe, Pb를 각 30 ppm을 혼합한 중금속용액에서도 동일한 흡착실험을 반복하여 잔류 중금속 농도를 측정하였다. 또한, 공존 음이온의 영향을 비교하고자 Cd를 30 ppm 포함한 중금속용액에 Cl<sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>를 1-20 ppm을 첨가하여 회분식 흡착실험을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

본 실험에서 사용한 원료의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 적점토는 일반 점토벽돌을 만드는데 사용하는 적점토의 성분과 같고 백토는 적점토에 비해 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 많았으며 제올라이트는 SiO<sub>2</sub> 함량이 많았다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 X-선 회절분석 결과, 적점토는 quartz(JCPDS No. 33-1161), albite(JCPDS No. 10-393)와 kaolinite(JCPDS No. 29-1488)로, 백토는 anorthite(JCPDS No. 41-1486), quartz, halloysite(JCPDS No. 29-1487)와 tremolite(JCPDS No. 44-1402)로, 제올라이트는 anorthoclase(JCPDS No. 09-0478), makatite(JCPDS No. 23-0703), tridymite(JCPDS No. 18-1170)와 sanidine(JCPDS No. 25-0618)으로 구성되어 있었다. X-선 회절분석에서 장석류와 카올린 광물을 확인하였으므로 카올린 광물에 의해 양이온 교환반응이 일어나 중금속 이온들이 카올린 광물에 흡착되어 일차 안

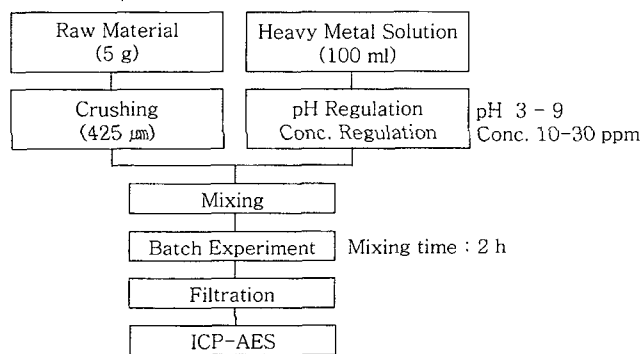


Fig. 1. Flowchart of experimental procedure.

Table 1. Chemical Composition of Raw Materials (wt%)

Composition	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Ig.L.	Total
Clay	57.69	19.02	7.05	0.20	1.04	0.09	2.53	0.92	0.17	0.22	11.00	99.93
White Clay	51.43	30.52	1.79	4.76	0.85	2.39	1.03	0.15	-	-	6.93	99.85
Zeolite	67.24	14.63	2.70	2.29	1.26	2.37	2.73	0.35	0.08	-	6.28	99.93

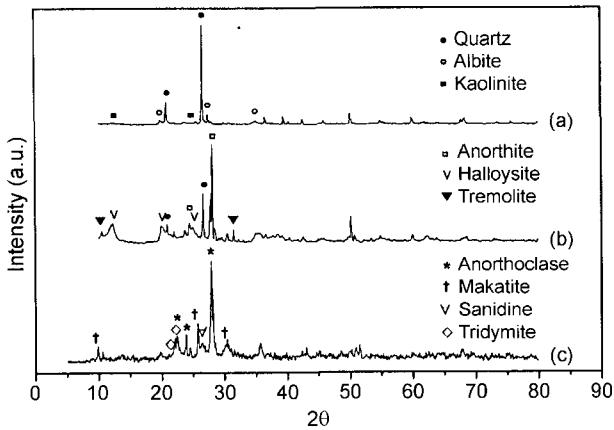


Fig. 2. XRD patterns of raw materials : (a) clay, (b) white clay, and (c) zeolite, respectively.

Table 2. Cation Exchange Capacity and Exchangeable Cation of the Clay, White Clay, and Zeolite

Raw material	C.E.C (meq/100 g)	Exchangeable cation (meq/100 g)			
		Na	K	Ca	Mg
Clay	5.58	0.58	0.03	0.24	0.17
White Clay	3.21	0.51	0.03	0.29	0.07
Zeolite	15.72	0.68	0.02	0.20	0.06

정화를 이룰 것으로 사료되었다. KS M 9727 실험방법에 의해 구한 세 가지 점토광물의 양이온 교환능과 교환가

능 양이온 함량을 Table 2에 나타내었다. 양이온 교환능력은 제올라이트가 15.72 meq./100 g으로 가장 큰 값을 나타내었고 적점토와 백토는 각각 5.58, 3.21이었다. 하지만 중금속 이온을 흡착하여 일차 안정화를 이루기 위해서는 점토광물의 양이온교환능 보다는 교환가능 양이온 함량이 더 중요하다. 적점토는 4가지 교환 가능한 양이온 중에서 Mg 이온의 함량이 0.17로 상대적으로 많았으나 제올라이트는 Na 이온의 함량이 0.68로 실험원료 중 가장 큰 값을 보였다. 따라서 Table 2의 결과로부터 적점토가 2가 중금속이온을 잘 흡착하고 제올라이트가 1가와 3가 중금속 이온을 잘 흡착할 것이라는 예상을 할 수 있다.

Fig. 3은 적점토, 백토, 적점토와 백토 혼합물, 제올라이트의 중금속 용액 초기농도와 pH에 따른 Cd의 흡착률 변화를 나타낸 것이다. Cd의 흡착률은 초기농도가 증가할수록 직선적으로 감소하였는데, 이는 흡착원료 표면의 Cd 이온으로 점유된 흡착자리가 증가함에 따라 빈 흡착자리를 두고 용액중의 Cd 이온간 경쟁반응의 증가와 흡착표면의 활동도계수 증가로 인한 결합에너지 감소에 기인한 것으로 사료된다.<sup>12)</sup> pH 변화에 따른 Cd 흡착률 변화는 pH 증가에 따라 흡착률이 증가하는 경향을 보였으나 pH 5.0 이상에서는 흡착률의 변화는 관찰되지 않았다. pH 3.0에서는 적점토와 백토가 흡착에 더 유리하였으나 pH 5 이상에서는 제올라이트의 흡착능이 더 높게 나타났다. 적점토와 백토 혼합물의 경우에는 혼합하지 않은 경우에 비

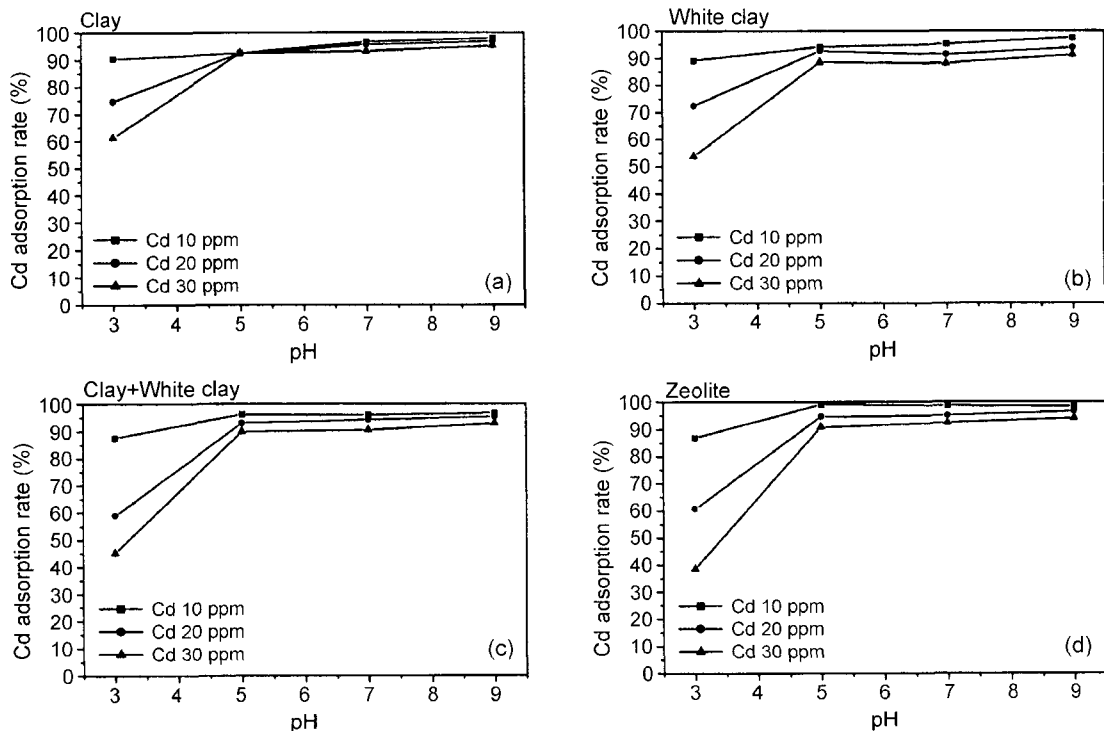


Fig. 3. Adsorption rate of Cd ion in the four different solutions at different pH and concentration : (a) clay, (b) white clay, (c) clay + white clay mixture, and (d) zeolite.

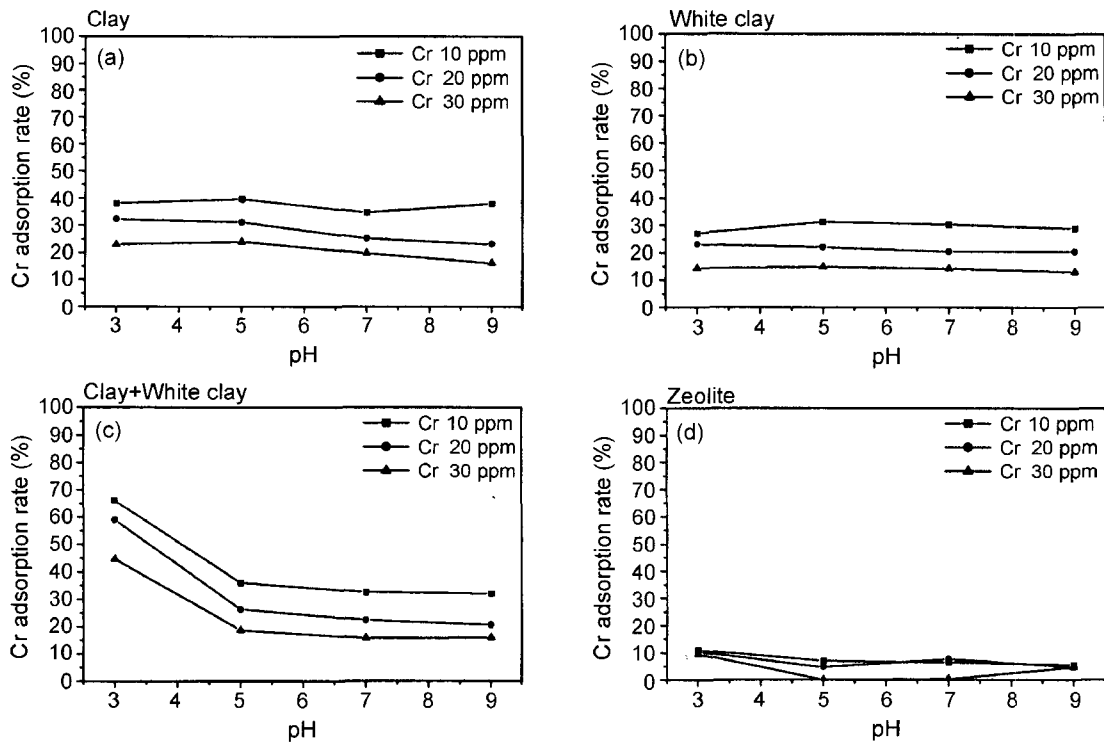


Fig. 4. Adsorption rate of Cr ion in the four different solutions at different pH and concentration : (a) clay, (b) white clay, (c) clay + white clay mixture, and (d) zeolite.

해 흡착능이 좋아지지 않아 Cd의 경우 혼합효과는 없는 것으로 나타났다.

중금속 용액의 초기농도와 pH 변화에 따른 Cr 이온의 흡착률 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 초기농도가 증가할수록 흡착률이 감소하는 경향은 동일하나 pH 증가에 따른 흡착률의 증가는 관찰되지 않았다. 이는 크롬(6가, 3가) 이온은 용액 중 수용액의 H<sup>+</sup> 이온 농도와는 무관하며 서로 경쟁적 흡착관계가 아님을 알 수 있었다. 특이하게도 Cr 이온은 효과적인 흡착제가 많지 않은 것을 고려할 때 적점토와 백토를 혼합한 경우 pH 3.0에서 45~70%의 비교적 높은 흡착률을 나타내고 있는 사실을 눈여겨보아야 한다. 따라서 Cr 이온을 선택적으로 흡착하기 위해서는 적점토와 백토를 혼합한 흡착제를 낮은 pH 환경에서 사용하는 것이 바람직하다. 하지만 pH를 5.0 이상으로 증가시키면 Cr의 흡착률은 적점토와 백토를 독립적으로 사용한 경우의 흡착률과 대동소이하게 되어 혼합효과를 볼 수 없었다. Cr 흡착의 경우 제올라이트는 10% 이하로 Cr을 거의 흡착하지 못하여 사용한 점토광물 중 가장 낮은 흡착률을 보였다. 현재로서는 점토나 백토 단일 원료일 때와는 전혀 다른 경향을 보이고 있다는 결과밖에 언급할 수 없으며 혼합효과에 대한 원인을 규명하기 위한 추가실험이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

Fig. 5는 적점토, 백토, 적점토와 백토 혼합물, 제올라이트의 중금속 용액 초기농도와 pH 변화에 따른 Zn 이온

의 흡착률 변화를 나타낸 것이다. 10 ppm의 낮은 중금속 농도일 경우 pH 5 이상에서는 흡착 증가율이 거의 포화되어 더 이상 증가하지 않으나 30 ppm의 비교적 높은 농도에서는 pH 9까지 거의 직선적으로 증가하여 95%의 흡착률을 보였다. 이는 앞에서 언급한 2가 이온인 Cd의 흡착경향과 비슷한 결과로 2가의 중금속들은 낮은 pH에서 H<sup>+</sup> 이온과 경쟁적으로 흡착함을 알 수 있었다.

지금까지 몇몇 단일 중금속 용액을 이용하여 점토광물의 흡착률이 pH와 초기농도에 따라 어떻게 변화하는지 알아보았다. 지금부터는 여러 중금속을 혼합한 용액을 사용하여 여러 중금속이 용액에 공존할 경우 각 원소의 흡착률 변화를 살펴보고자 한다.

혼합중금속용액에서의 중금속 흡착거동을 알아보기 위해 적점토 5g과 pH 5.0인 Cd, Cr, Zn을 각각 30 ppm씩 혼합한 혼합중금속용액을 동일한 흡착실험방법으로 수행하였다(Fig. 6). pH를 5.0으로 조절한 이유는 폐기물 습식 처리시 일반적인 용액의 pH이기 때문이다. 흡착실험 결과 Cd와 Zn은 약 80%의 흡착률을 보였고 Cr은 50%의 낮은 흡착률을 나타냈다(Cd, Zn > Cr). 이는 단일 중금속 용액을 사용한 경우 흡착률 결과에서 예측할 수 있던 결과이며 Cd와 Zn이 같이 공존하는 경우 Cd 이온이 보다 흡착률에서 우위를 보임을 알 수 있었다. 혼합중금속용액에 Cu, Fe, Pb를 30 ppm씩 추가로 첨가한 경우는 새로 첨가된 Cu, Fe, Pb의 흡착률은 95% 이상의 흡착률을 보였

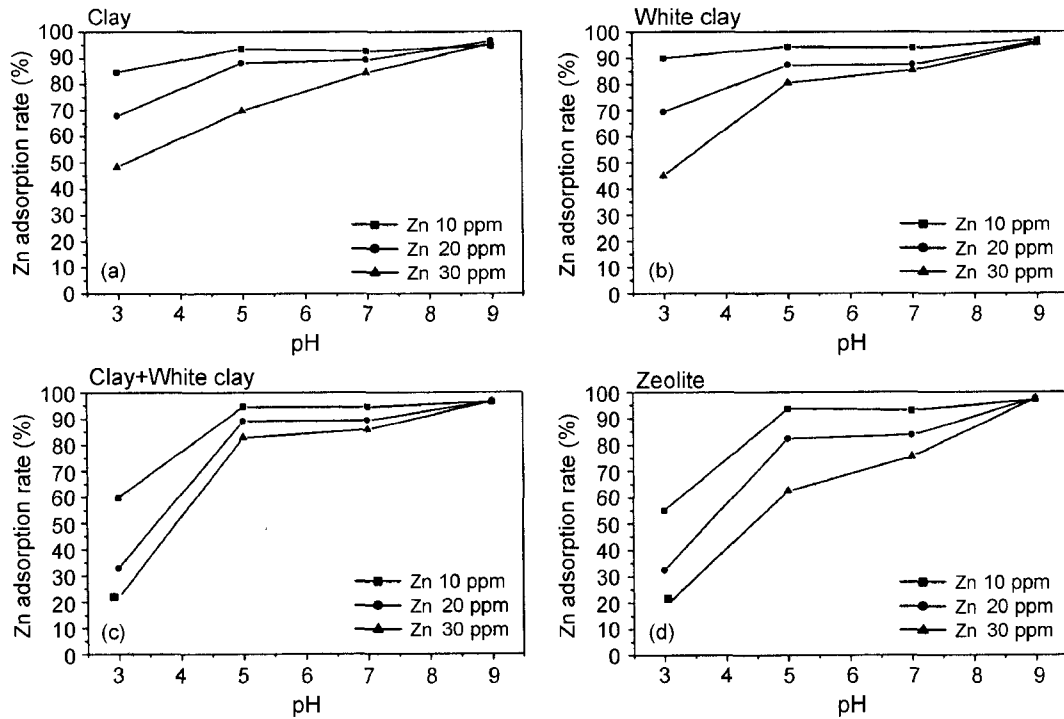


Fig. 5. Adsorption rate of Zn ion in the four different solutions at different pH and concentration : (a) clay, (b) white clay, (c) clay + white clay mixture, and (d) zeolite.

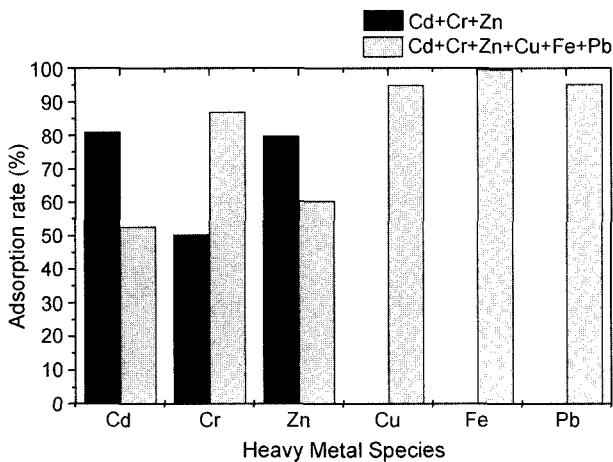


Fig. 6. Competitive adsorption of heavy metals by clay in mixed heavy metal solution.

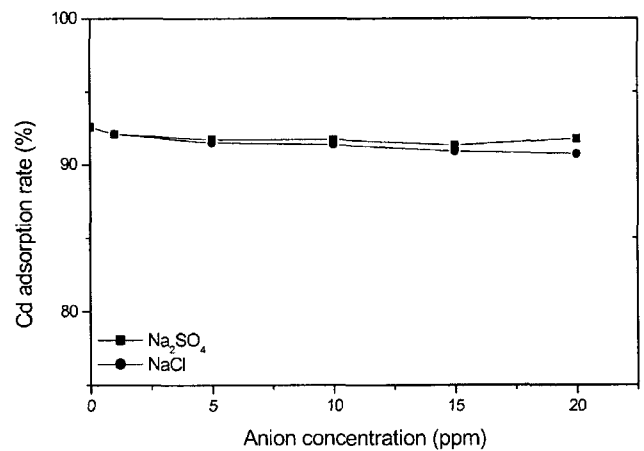


Fig. 7. Effects of anion( $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ) on Cd adsorption in the clay solution.

으나 Cd와 Zn은 50-60%로 감소하였고 Cr의 경우는 오히려 85%로 흡착률이 증가하였다(Fe > Pb, Cu > Cr > Zn > Cd). 이는 Cd와 Zn 이온에 비해 Cu와 Fe, Pb의 흡착 선택성이 더 높으며 공존 양이온 조성이 흡착선택성에 영향을 주었기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 특정 이온을 선택적으로 제거하기 위해서는 특정한 흡착제를 사용하는 것만 중요한 것이 아니라 용액 내에 존재하는 공존 양이온의 양이 중요하다는 사실을 알 수 있었다. 지금까지의 결과로부터 특정 이온의 흡착에 공존양이온이 큰 영향을

미치는 것을 알았다. 따라서 용액내 공존음이온의 영향에 대해 위와 같은 방법으로 조사하였다.

공존 음이온으로  $Cl^-$ 와  $SO_4^{2-}$ 를 ~20 ppm까지 첨가한 경우 이온강도와 공존음이온의 종류에 무관하게 흡착률은 큰 영향이 없었다(Fig. 7). 이러한 결과는 비교적 낮은 농도의 공존음이온 용액을 사용하였기 때문이며, 용액 중  $Na^+$  이온의 농도를 더욱 증가시킬 경우 중금속 이온과의 상호경쟁작용으로 인해 Cd의 흡착률은 감소될 것으로 사료된다. 또한  $Cl^-$ 와  $SO_4^{2-}$ 의 공존음이온 농도가 증가할 경

우 용액 내에 존재하는 공존음이온은 Cd와 Complex를 형성하기 때문에 그 흡착률이 감소할 것으로 예상된다.<sup>13)</sup>

Figs. 3~5의 그래프와 각각의 원료들의 양이온 교환능 (Table 2)을 비교하여 살펴보면 양이온 교환능과 흡착률 간에 정확한 비례관계가 성립하지 않는 것을 알 수 있다. 측정된 양이온 교환능력이 가장 큰 제올라이트의 경우, 중성 이상에서는 높은 흡착률을 나타내나 산성 영역에서는 그 외의 원료들과 비교해 상대적으로 낮은 흡착률을 보이고 특히 Cr은 거의 흡착하지 못한다. 이러한 결과는 교환가능 양이온 등 흡착원료 자체의 물리적 특성뿐만 아니라 pH, 경쟁양이온, 이온강도, 리간드와 첨가되는 중금속 용액의 화학적 조성에 따라 양이온 교환 및 흡착반응이 활성화되는 영역이 존재함을 나타내며, 흡착특성의 평가는 양이온 교환능력(CEC)만으로 평가할 수 없으며 동시에 교환가능 양이온의 조성과 pH 등 반응조건 변화로 인한 영향도 고려해야 한다는 Yim<sup>14)</sup>의 결과와 일치한다.

예를 들어 Cr 6가 이온의 선택적 흡착을 위해서는 우선 용액내 공존하는 중금속 이온의 종류 및 농도를 파악해야 한다. 이 자료에 따라 Cr 6가 이온을 가장 잘 흡착하는 흡착제를 사용하고 또한 pH 및 공존 음이온의 농도를 조절해주면 Cr 6가 이온을 효과적으로 그리고 선택적으로 흡착할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

폐기물 함유 세라믹 원료의 성형과정에서 일어나는 이온교환 및 흡착에 의한 일차적인 중금속 안정화 과정을 알아보기 위하여 중금속(Cd, Cr, Zn) 표준용액의 농도(10-30 ppm)와 pH(pH 3.0-9.0)를 조절하여 적점토, 백토, 적점토 및 백토 혼합물 그리고 제올라이트에 대해 회분식 흡착실험을 행한 결과는 다음과 같다.

1. 모든 흡착원료에서 pH 증가에 따라 Cd와 Zn의 흡착률은 증가하였고 pH 5 이상에서는 거의 포화되어 흡착률은 완만히 증가하였다. 그러나 Cr의 경우는 흡착률 증가를 관찰할 수 없었다

2. 세 가지 중금속 Cd, Cr, Zn을 혼합한 중금속 용액과 Cu, Fe, Pb를 추가적으로 첨가한 경우의 흡착선택성은 서로 다른 경향을 보였다. 공존 양이온 조성의 변화가 흡착선택성에 영향을 주었기 때문인 것으로 사료된다.

3. 공존음이온으로 Cl<sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>를 1-20 ppm까지 첨가한 경우 공존 양이온의 경우와는 달리 중금속 흡착률에는 큰 영향을 주지 못하였다.

4. 양이온 교환능(CEC)과 흡착률은 정확한 비례관계가 성립하지 않았다. 교환가능 양이온 등 흡착원료 자체의 물리적 특성뿐만 아니라 pH, 경쟁양이온, 이온강도, 리간

드와 첨가되는 중금속용액의 화학적 조성도 흡착률에 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2002학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구 과제) 지원에 의하여 수행되었음.

#### REFERENCES

1. S.-W. Bae, C.-Y. Han, B.-J. Lee, and Y.-B. Kwon, "Characteristics of Cement Based Solidification for Municipal Solid Waste Incineration Plant Fly Ash," *J. Kor. Solid Waste Eng. Soc.*, **16** [1] 67-72 (1999).
2. J.-O. Hong, S.-G. Kang, K.-G. Lee, Y.-T. Kim, Y.-J. Kim, J.-H. Kim, and M.-S. Park, "Characteristics of Sintered Bodies Made from the System of Paper Sludge Ash-fly Ash-clay," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [10] 908-13 (2001).
3. C. W. Fetter, *Applied Hydrogeology*(3rd ed.), pp. 691, Macmillan College Pub., 1994.
4. M. R. Reddy and H. F. Perkins, "Fixation of Zinc by Clay Minerals," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **38** 229-31 (1974).
5. N. S. Randhawa and F. E. Broadbent, "Soil Organic Matter Complexes-6. Stability Constants of Zinc-humic Acid Complexes at Different pH Values," *Soil Sci.*, **99** 362-66 (1965).
6. U. C. Shukla, S. B. Mittal, and R. K. Gupta, "Zinc Adsorption in Some Soils as Affected by Exchangeable Cations," *Soil Sci.*, **129** 366-70 (1980).
7. M. Kalbasi, G. J. Racz, and L. A. Lowen-Rudgers, "Mechanism of Zinc Adsorption by Iron and Aluminum Oxides," *Soil Sci.*, **125** 146-50 (1978).
8. S. Kuo and A. S. Baker, "Sorption of Copper, Zinc, and Cadmium by Some Acid Soils," *Soil Sci., Soc. Am. Proc.*, **44** 969-74 (1980).
9. H. A. Elliot, M. R. Liberati, and C. P. Huang, "Competitive Adsorption of Heavy Metal by Soils," *J. Environ. Qual.*, **15** [3] 214-19 (1986).
10. W. L. Lindsay, *Micronutrients in Agriculture*, pp. 41-57, *Soil Sci. Soc. Am. Inc.*, 1972.
11. M. A. Elashidi and G. A. O'Conner, "Influence of Solution Composition on Sorption of Zinc by Soils," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46** 1153-58 (1982).
12. P. W. Inskeep and J. Baham, "Adsorption of Cd(II) and Cu(II) by Na-Montmorillonite at Low Surface Coverage," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **47** [4] 660-65 (1983).
13. Y. Egozy, "Adsorption of Cadmium and Cobalt on Montmorillonite as a Function of Solution Composition," *Clays Clay Min.*, **28** [4] 311-18 (1980).
14. G. Yim and Y.-W. Kim, "Adsorption Effects of Zeolite for Treatment of Heavy Metals in Wastewater (I)," *J. KSWPRC Dec.*, **5** [2] 15-22 (1989).