

층상이중 수산화물을 이용한 5가 비소 흡착 특성

Adsorption of Arsenate on the Synthesized Layered Double Hydroxide Materials

최영무* · 최원호** · 김정환*** · 박주양****

Choi, Young-Mu · Choi Won-Ho · Kim, Jung-Hwan · Park, Joo-Yang

Abstract

Layered double hydroxide is synthesized and used in the arsenate adsorption experiments. The shapes of two materials analyzed by TEM showed that unheated material is amorphous in shape, micro-sized while heat treated material showed more crystallized in shape and nano-sized. X-ray diffraction showed this result more obvious. N₂ adsorption-desorption results showed that the materials are mesoporous and the specific surface area of the heated material is more than two times larger than the unheated material. Adsorption of As(V) is expected to be more in the heated material than the unheated material. Kinetic test of arsenate adsorption showed very fast reaction. The reactivity of Fe with As(V) might be the main factor for this result. The reaction kinetic of the heated and the unheated materials were similar and even the adsorption isotherms showed similar results for both materials. Both materials are found to be useful in remediation of soil and groundwater polluted by waste mine tailings consist of high concentration of As(V).

Keywords : arsenate, layered double hydroxide, waste mine tailings, hydrothermal treatment

요 지

LDH(Layered double hydroxide) 물질을 제조하고 이를 이용하여 비소를 흡착시키는 실험을 수행하였다. TEM을 이용하여 제조한 LDH 물질의 형상을 살펴본 결과 열처리를 거친 시료는 나노크기의 결정화된 구조를 가지고 있고 열처리를 거치지 않은 시료는 아직 결정화가 완전히 이루어지지 않았으며 크기도 마이크로 범위에서 나타났다. X선 회절분석 결과를 보면 이 같은 결과가 뚜렷이 나타났으며, 열처리를 거친 경우는 뚜렷한 결정화를 보이고 있었다. N₂ 흡착 및 탈착 결과를 통해 LDH가 mesoporous한 공극 형태를 가지고 있다는 것을 알 수 있었다. 비표면적은 열처리를 거친 시료가 열처리를 거치지 않은 시료보다 2배 이상 크게 나타났다. 흡착 등은 실험 결과에서도 두 시료는 비슷한 흡착량을 보이며 기존 철산화물에 못지않은 흡착능을 나타내고 있다. 급변에 합성한 Mg-Fe-LDH 물질을 이용하여 토양 및 지하수의 비소 제거 공정에 적용할 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 비소, 층상이중 수산화물, LDH, 폐광산 오염, 열처리공법

1. 서 론

비소는 원자번호 33번의 준금속 물질로서 환경특성에 따라 다양한 형태의 산화상태(+5, +3, 0 그리고 -3)로 존재한다. 자연환경에서의 비소는 크게 나누어 무기비소와 유기비소의 형태로 존재하는데, 지하수 및 지표수에서 대부분의 비소는 무기비소 형태이며(Masscheleyn *et al.*, 2000; Yang and Chang, 2006), 무기비소는 대개 3가 비소와 5가 형태이다. 무기비소 중 용존 3가 및 5가 비소의 분포는 그 산화·환원 포텐셜에 의존하는데, 5가 비소는 산화 조건이 지배적인 조건에서 우세하며, 중성 pH 영역에서 oxyanion 형

태로 존재한다. 반면 약한 환원조건에서는 열역학적으로 3가 비소가 안정적이어서 pH 9.2 이하에서 H₃AsO₃⁰ 형태로 존재한다(Oremland *et al.*, 2003; Korte *et al.*, 1991).

비소는 암석에서 자연적으로 생성되는 물질이지만 목재의 방부제 용도 등의 상업 오염물질의 투기와 폐기물 처리장의 침출수 유입 등과 같은 인위적인 방법에 의해서도 토양 및 지하수를 오염시킨다(Kim *et al.*, 2003; Welch *et al.*, 2000). 토양에서의 비소 오염은 광산 개발 후 방치된 휴·폐 주로 발생하며, 이렇게 유출된 비소 오염수를 사람이 섭취할 경우 각종 피부병 및 폐암, 신장암, 방광암 등 여러 질병을 야기할 수 있으므로 매우 위험하다(Mukherjee and Bhattacharya,

*현대건설(주) 기술개발원 설계실 (E-mail : choiyoungmu@hdec.co.kr)

**정희원 · 한양대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : wono79@naver.com)

***정희원 · 한양대학교 토목공학과 박사후 연구원 (E-mail : genkj@hanyang.ac.kr)

****정희원 · 교신저자 · 한양대학교 토목공학과 부교수 (E-mail : jooypark@hanyang.ac.kr)

2001). 과거 비소 유출로 인한 인명피해 사건들 중 가장 큰 이슈가 되었던 방글라데시와 인도의 벵갈 지역의 경우 약 6천에서 7천 5백만 명의 인구가 비소에 노출되어 고질적인 비소중(arsenicosis)으로 고통 받고 있다. 이에 따라 세계보건 기구와 유럽연합은 비소의 음용수 기준을 10 ppb로 규정하고 있으며, 미국도 1940년대에 설정된 50 ppb의 기준치를 10 ppb로 강화할 것을 추진하였다.

이러한 비소를 처리하는 방법 중 가장 대표적인 방법은 철 소재를 이용한 흡착법으로서 산화수에 관계없이 철 산화물에 잘 흡착되는 비소의 특성을 이용하여 HFO, goethite 및 lepidocrocite 등의 소재로 비소를 흡착하는 연구가 이미 발표된 바 있다(Dixit and Hering, 2003). 최근에는 이 외에도 Layered double hydroxides(이하 LDHs) 계열의 물질을 이용한 비소 제거 연구도 이루어지고 있다. LDHs는 main layer에 2가 및 3가 금속이온이 자리하고 inter layer에 음이온성 물질이 자리하는 이중층상 구조의 물질로서, 천연 광물인 hydrocalcite와 구조적으로 흡사하여 hydrocalcite류 화합물이라고도 불리우기도 하고, aluminosilicate 층과 같은 양이온 층을 지니고 음전하를 나타내는 양이온성 점토와 거울상 이미지라 하여 음이온성 점토라고 불리우기도 한다. LDHs의 일반식은 $[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)_2][(A^{n-})_{x/n}H_2O]^{x-}$ 로서 M^{2+} , M^{3+} 는 각각 2가 또는 3가 양이온으로 이루어진 main layer를 뜻하고, A^{n-} 는 CO_3^{2-} 나 Cl^- 등의 n 가 음이온이 존재하는 inter layer를 의미한다. 특히 LDH의 interlayer 음이온은 쉽게 다른 음이온과 교환되는 성질이 있어 음이온 교환제, 흡착제 등으로 많이 사용되고 있다. 대표적인 oxy-anion 물질인 비소 역시 LDH로 처리 가능하여 이미 Al^{3+} 와 Mg^{2+} 로 제조한 LDH 물질을 이용하여 비소 흡착 특성을 연구한 결과, 기존 철 흡착제 못지 않은 제거능을 얻었다는 결과가 보고된 바 있다(Li *et al.*, 2006).

본 연구에서는 2가 양이온으로 Mg^{2+} , 3가 양이온으로 Fe^{3+} 를 이용하여 LDH 물질을 합성하고 이 물질의 비소 흡착 특성을 살펴보고자 한다. LDH 물질 제조시 열처리를 가할 경우 나노 크기의 입자로 개질된다는 것이 밝혀진 바 있으며(Zi *et al.*, 2006), 나노 크기의 입자로 개질된 시료는 기존의 LDH에 비해 큰 비표면적을 갖게 되어 보다 많은 양의 비소를 흡착·제거할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 일반적인 방법으로 제조된 LDH와 열처리를 거친 LDH 등 두 종류의 시료를 이용하여 비소 흡착 특성 및 재료의 일반적인 특성들을 비교하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 Mg-Fe-LDH 화합물 제조 및 분석

실험에 사용할 LDH 화합물은 Meng 등(2004)의 논문을 참고하여 co-precipitation 법으로 합성하였으며, 그 순서는 다음과 같다. 10 mmol의 $FeCl_3$ (Sigma-Aldrich)와 30 mmol의 $MgCl_2$ (Sigma-Aldrich, 99%)를 100 mL의 증류수(D.I. water)에 용해시키고 N_2 가스로 30분간 정제한 후 0.15M의 $NaOH$ (Sigma-Aldrich, 97%) 용액 400 mL로 처리하였다. 그리고 외부공기의 유입을 차단한 상태에서 용액을 교반시킨 후 침전물을 수집하여 원심분리 하였으며, 열처리를 위해

상등액을 버리고 깨끗한 비이온수를 주입하여 100 °C에서 16 시간 동안 보관하였다. 침전물을 원심분리 시켜서 따로 모아 건조시켰다. 이렇게 제조된 시료는 그 특성을 파악하기 위하여 다양한 분석기기로 분석을 시행하였는데, X-ray diffractometer (XRD, D/MAX-2500/PC)를 이용하여 합성된 물질의 결정구조, 화합형태 및 격자 크기를 분석하였고, FTIR(MAGNa-IR 760 E.S.P) 분석을 통하여 액정상에서의 분자구조 조성과 정렬 등을 관찰하였다. 또한 BET(ASAP 2010, MICROMETRICS)를 이용하여 소재의 비표면적 및 공극 형태를 조사하였으며, Transmission Electron Microscopy(TEM, JEM 2010)으로 물질의 형상과 크기를 관찰하였다. 비소의 농도는 Atomic Adsorption Spectrophotometer(Analytik Jena AAS Vario 6)에 hydride 기기를 장착하여 측정하였다.

2.2 시간별 흡착 농도 변화

1,000 ppm의 5가 비소 용액($Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$, JUNSEI, 99%)을 1 ppm으로 희석하여 stock solution을 만든 후, 그 중 15 mL를 증류수에 주입하여 750 mL의 20 ppb 용액을 제조하였다. 여기에 Mg-Fe-LDH를 0.1 g 넣고 150 rpm으로 교반해주는 상태에서 10분에서 4시간 동안 시간별로 10 mL의 용액을 채취하였다. 채취한 용액은 0.2 μm PVDF syringe 필터(Whatman)로 걸러낸 후 AAS로 비소 농도를 분석하였다.

2.3 비소의 흡착 등온선 조사

40 mL 바이얼에 Mg-Fe-LDH를 각각 0.01 g 씩 담고 비소 용액을 26.67 μM 에서 666.67 μM 까지 농도별로 40 mL 씩 담았다. 이를 2시간 동안 텀블러에서 교반시킨 후 원심분리 한 후 0.2 μm PVDF 필터로 걸러내어 비소 농도를 측정하였다.

2.4 pH에 따른 흡착 농도 변화

40 mL 바이얼에 Mg-Fe-LDH 0.01 g과 0.53 mM 비소 용액을 함께 주입한 후 HCl과 NaOH를 이용하여 pH를 조절하며 실험하였다. 각 시료는 2시간 동안 텀블러에서 교반시킨 후 평형상태에서 pH를 측정하였으며, 분석을 위해 원심분리 후 0.2 μm 필터로 필터링하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Mg·Fe-LDH의 특성

3.1.1 TEM을 이용한 합성 LDH의 결정구조 분석

TEM을 통하여 시료의 형상을 살펴본 결과, Fig. 1(a)에서 보여지는 바와 같이 열처리를 거치지 않은 시료는 결정구조가 뚜렷이 보이지 않고 1 μm 이상의 크기를 나타내었다. 이에 반해 열처리를 거친 시료는 사각형의 뚜렷한 결정구조를 볼 수 있었으며, 100 nm 이하의 나노크기 입자가 다량 관찰되었다(Fig. 1(b)). 이로써 100°C의 온도에서 16시간 동안 가열해 주는 비교적 간단한 방법만으로 나노 크기의 입자가 형성됨을 알 수 있었으며, 이는 향후 열처리를 거친 Mg-Fe-LDH를 오염물질 처리에 적용시 매우 긍정적인 효과로 작용할 수 있을 것이다.

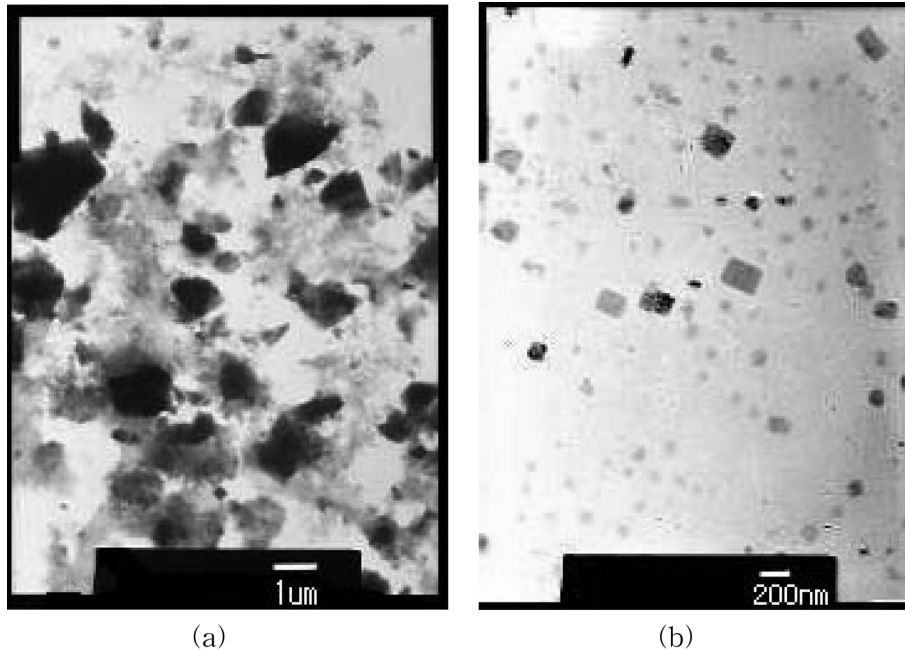


Fig. 1 TEM images of Mg-Fe LDHs synthesized by (a) conventional method, (b) hydrothermally treated at 100°C for 16 hrs

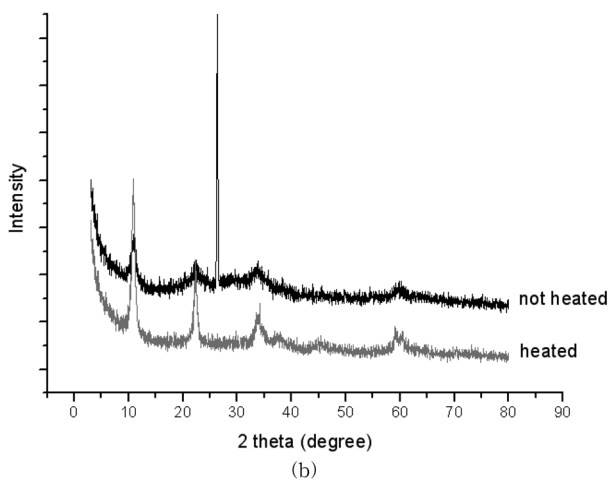
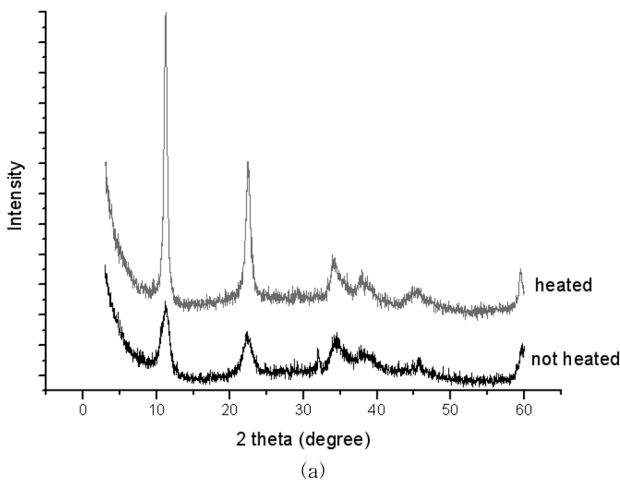


Fig. 2 X-ray diffraction of Mg-Fe-LDHs (a) without As(V), (b) with 150 mg/L of As(V)

이처럼 TEM을 이용한 구조 분석 외에도 합성된 물질이 과연 LDH의 특성을 갖는지 확인하기 위해 다음의 몇 가지 정성 분석실험을 추가로 수행하였다.

3.1.2 XRD를 이용한 합성 LDH의 정성분석

3~60° 범위에서 X선 회절을 통하여 소재의 특성을 알아보

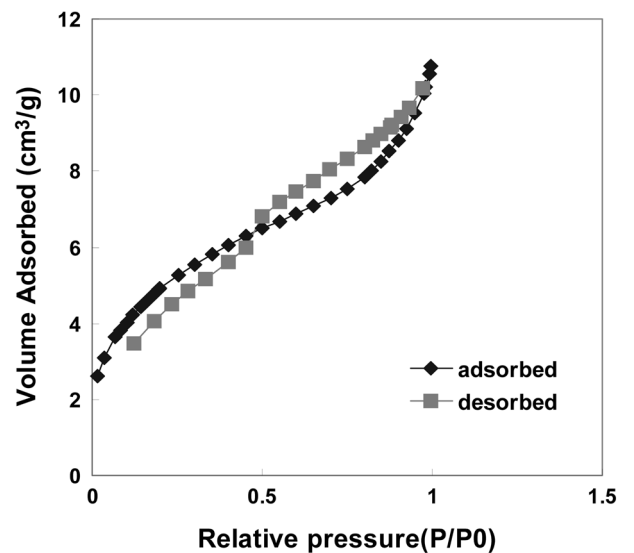


Fig. 3 Nitrogen adsorption-desorption isotherm of Mg-Fe-LDH

았으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 합성된 물질의 XRD 패턴은 기존 다른 LDH를 분석한 논문에서 제시한 패턴과 거의 유사하였으며, 이를 통해 제조된 물질이 LDH 물질이라는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다. 또한 XRD 패턴에 나타난 피크를 살펴보면 약 10° 부근에서 가장 뚜렷한 피크를 확인할 수 있는데, 특히 열처리를 거친 시료가 열처리하지 않은 시료에 비해 높고 날카로운 피크가 생성됨을 알 수 있었다. 이는 앞서 수행한 TEM 분석 결과에 비추어 판단할 때 합성된 물질의 결정화 상태와 연관이 있는 것으로 보이며, 열처리를 거친 시료가 더욱 결정성이 좋기 때문에 더욱 특징적인 피크가 나온 것으로 추측된다.

3.1.3 합성 LDH의 비표면적 및 공극 형태

N₂ 흡착을 이용한 BET 실험을 통해 합성된 LDH 소재의 비표면적과 공극 형태를 분석하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 분석실험 결과 나타는 N₂ 흡착 및 탈착 곡선의 형태는 IUPAC 제공 자료의 type IV와 유사하였으며, 이는

Table 1. Results of BET analysis of Mg-Fe-LDHs.

	BET surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Range of diameters (Å)	Mean pore diameter(Å)
Unheated	35.91	0.02	19.42-3329.13	27.10
Heated	90.18	0.12	19.42-3897.51	53.85

합성된 물질이 다공성(mesoporous) 물질이라는 것을 의미한다. 또한 열처리 유무에 따른 시료의 비표면적과 공극의 크기를 비교할 때, Table 1에 나타난 바와 같이 열처리를 거친 시료가 그렇지 않은 시료에 비해 2.5배 이상 큰 것으로 나타났으며, 이러한 비표면적과 공극 크기의 차이는 비소의 흡착능에 중요한 요인이 될 것으로 예상된다.

3.1.4 영전하점 실험을 통한 합성 LDH의 영전하점 분석

영전하점 실험을 통하여 시료의 표면 전하를 알아보았다. 영전하점 실험은 열처리를 거친 시료와 거치지 않은 시료를 각각 0.01 g 씩 담고 HCl과 NaOH를 농도별로 주입한 후 평형을 위해 2시간 동안 방치하였으며, 그 후 pH를 측정하고 다음 식 (1)로 표면전하를 계산하였다.

$$\sigma = F(C_A - C_B + [OH^-] + [H^+])a^{-1}S^{-1} \quad (1)$$

식(1)에서 F는 Faraday 상수, C_A는 산의 농도 C_B는 알칼리 농도 a는 시료의 농도 S는 비표면적이다. 다양한 pH 범위에서 재료가 갖는 표면 전하는 비소의 흡착에 지대한 영향을 미친다. Fig. 4에 열처리를 거친 시료와 거치지 않은 시료의 영전하점을 나타내었다. 두 시료의 영전하점은 9.8 정도로 거의 같으며, 기존의 철산화물과 비교할 때 다소 높은 영전하점을 나타내므로 보다 넓은 pH 영역에서 시료가 양전하를 띤다는 것을 알 수 있다(Table 2). 따라서 넓은 pH 영역에서 음이온성 오염물질에 대한 친화력이 높다는 장점을 발견하였다.

3.1.5 합성 LDH의 비소 처리시 XRD 피크 변화

0.1 g의 LDH를 비소 농도 150 mg/L인 용액에 넣고 평형상태에 이르렀을 때 침전물을 걸러내어 XRD로 측정하였다.

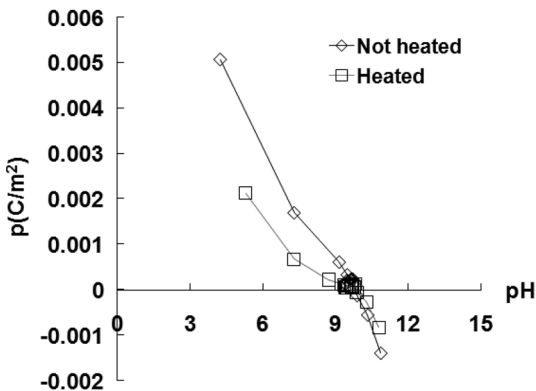


Fig. 4 Potentiometric titration curves of Mg-Fe-LDHs

Table 2. PZCs of iron oxides and Mg-Fe-LDH (Water chemistry, 2002)

Material	Fe ₃ O ₄	α-FeOOH	α-Fe ₂ O ₃	Fe(OH) ₃ ferrihydrite	Mg-Fe-LDH
pH _{PZC}	6.5	7.8	8.5	8.5	9.8

다. Fig. 2(a)에서 나타난 것과 같이 열처리를 거친 시료는 비소가 들어가도 XRD 패턴이 크게 달라지지 않는 것을 알 수 있다. 이에 반해 Fig. 2(b)에 나타난 열처리를 거치지 않은 시료는 26° 부근에서 날카롭고 큰 피크가 생기는데, 이는 기존에 발표된 자료들과 비교해 볼 때 ferric arsenate 계열의 화합물이 생긴 것으로 사료된다(Jia *et al.*, 2006). 열처리를 거친 시료의 경우에는 피크가 전반적으로 넓게 퍼지는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 시간에 따른 흡착 농도의 변화

시간에 따른 흡착 농도의 변화를 알아보았다(Fig. 5). 열처리를 거친 것과 거치지 않은 경우 모두 50분 이내에 반응이 끝나는 것을 볼 수 있는데 다음 식을 이용하여 반응속도 상수 k 값을 구하였다.

$$C = C_0 e^{-kt} \quad \text{식(2)}$$

k값은 열처리를 가하지 않은 시료가 0.673, 열처리를 가한 시료가 0.483으로 계산되었다. 앞선 BET 실험 결과와 달리, 열처리를 가하지 않은 시료가 비표면적이 작음에도 오히려 좀 더 빠른 반응 속도를 나타내었으나 그 차이는 크지 않았다. 따라서 합성 LDH 물질은 열처리 유무와 관계없이 비교적 빠르게 5가 비소와 반응한다는 것을 알 수 있었으며, 제조한 LDH 물질은 비소 흡착능에 있어 경쟁력이 있다고 판단된다.

3.3 Mg·Fe-LDH의 비소 흡착 등은 실험

합성 LDH를 이용하여 비소의 흡착 등은 실험을 실시한 결과, 열처리를 거친 시료와 거치지 않은 시료는 이번에도 큰 차이를 나타내지 않았다(Fig. 6). 이는 비소의 흡착이 입자의 크기와 무관하다는 것을 의미하며, pH를 조절하지 않

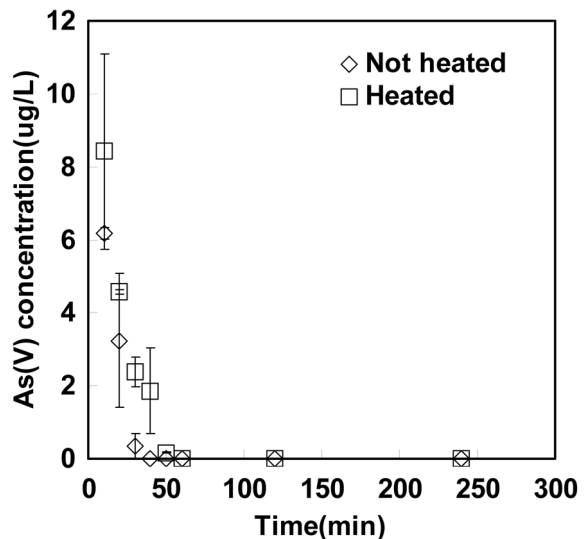


Fig. 5 Results of kinetic experiments of arsenate adsorption on Mg-Fe-LDHs

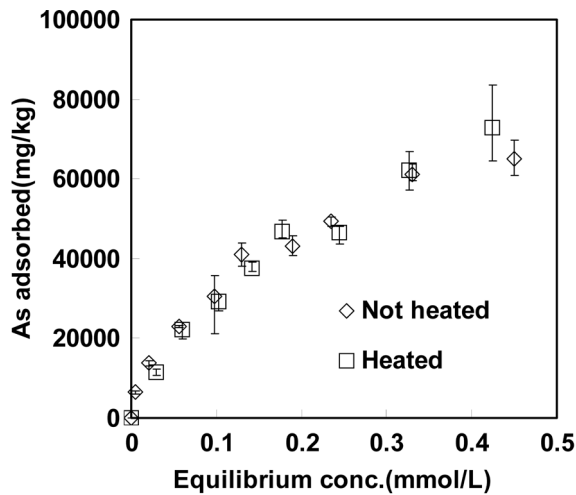


Fig. 6 Adsorption isotherms of As(V) on the Mg·Fe-LDHs

Table 3. Freundlich adsorption constants for the adsorption of As(V) on Mg·Fe-LDHs

	K	$\frac{1}{n}$	R ²
Unheated	11140.38	0.52	0.99
Heated	7538.76	0.66	0.98

은 상태에서 두 시료의 흡착특성은 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다. 흡착은 Freundlich 방식을 따르는 것으로 예상되고 다음과 같은 식을 만족한다.

$$q = kC_{eq}^{\frac{1}{n}} \quad \text{식 (3)}$$

양 변에 log를 취하여 $\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C_{eq}$ 공식에 대입하여 얻은 K값과 $\frac{1}{n}$ 값을 Table 3에 나타내었다. 흡착 등온선은 Freundlich 공식을 따르는 것으로 나타났고 이는 비소가 입자 표면에서 하나의 층을 형성하는 것이 아니라 다중층을 형성하기 때문이라고 판단된다. 흡착량에 있어서는 Li 등의 논문에 제시되어 있는 Mg·Al-LDH와 유사하다.

3.4 pH에 따른 합성 LDH의 비소 흡착능 실험

pH의 변화에 따라 Mg·Fe-LDH의 비소 흡착능이 어떻게 변화하는지 실험하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. pH 3~5 영역에서 열처리를 거치지 않은 시료는 pH를 조절하지 않는 경우보다 흡착량이 증가하는 경향을 나타내는데 이는 낮은 pH에서 시료가 양전하로 강하게 대전되기 때문인 것으로 추측된다. 또한 열처리를 거치지 않은 시료의 경우 TEM 분석 결과에서 알 수 있듯이 결정화가 온전히 이루어지지 않은 상태이므로 낮은 pH에서 해리가 이루어져 비소와 함께 침전되는 현상이 발생하는 것으로 사료된다. 반면, 열처리를 거친 시료의 경우 pH가 변화함에도 불구하고 비소 흡착능은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

그림에서 보는 것과 같이 비소의 농도는 pH가 상승 할수록 높아지는 것을 알 수 있다. pH가 낮은 영역에서 Mg·Fe-LDH가 더욱 강력하게 양전하를 띠고 있으므로 흡착이 잘 일어난다는 것을 알 수 있다. LDH의 영전하점을 넘어가게 되면 시료의 양전하가 줄어들고 음으로 대전되는데 이때 HAsO_4^{2-} 또는 AsO_4^{3-} 상태로 존재하는 비소와 정전기적으로 밀어내는 작용이 일어나는 것으로 보인다. 열처리를 거친

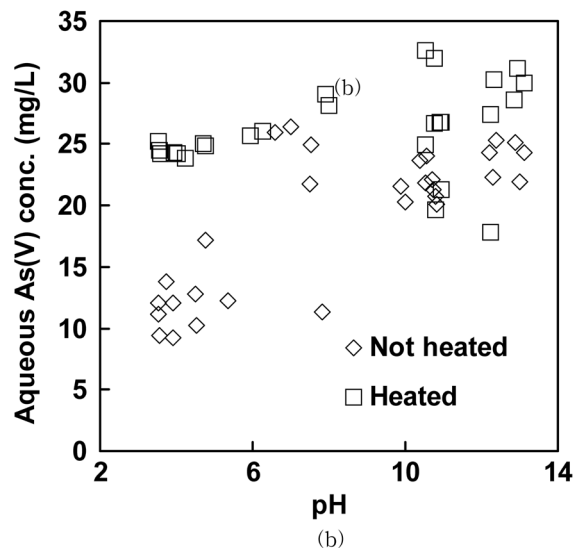
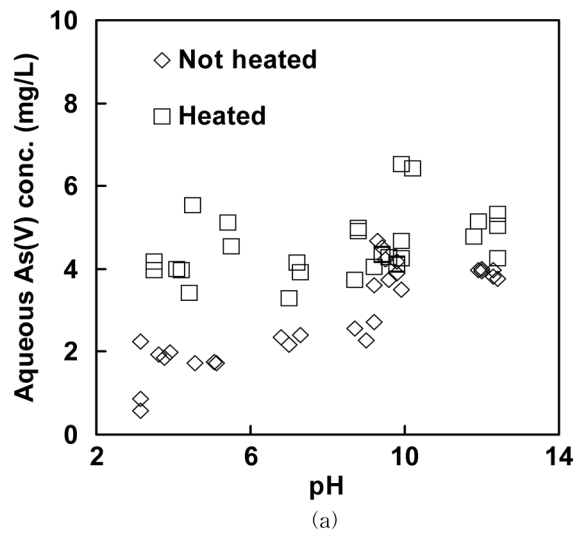


Fig. 7 Adsorption of arsenate in various pH conditions. Initial As(V) concentration is 10 mg/L for (a) and 40 mg/L for (b)

LDH의 경우에는 소재의 표면에 비소와 친화력이 강한 철 소재와 비소가 착물을 형성하는 것으로 판단된다. 비소의 경우는 NOM과 비슷한 흡착 성향을 보이는데 흡착 반응에서 OH를 내놓게 되고 표면에 음이온이 필요해지며, 따라서 약 산성을 띠는 환경에서 AsO_4^{3-} 와 같은 oxy-anion 들의 흡착이 쉽게 일어난다(Benjamin, 2002). 열처리를 거친 LDH 소재는 pH에 대한 영향으로 특성이 변하거나 해리가 많이 일어나지 않고 결정구조가 잘 이루어져 있는 것으로 보아 위에서 설명한 일반적인 철산화물에 대한 비소의 흡착특성으로 설명할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 비소로 오염된 토양 및 수질 개선을 위해 Mg·Fe-LDH 소재를 개발하였다. 개발된 합성 LDH 소재는 기존의 철 산화물과 비교하여 우수한 비소 흡착능을 나타내었으며, 또한 기존의 철 산화물에 비해 높은 영전하점을 가지므로 다양한 pH 영역에서 활용이 가능하다. 시료 제조 과정에서 열처리를 거친 시료의 경우는 열처리를 거치지 않은 시료보다 작은 크기의 결정질 입자를 가지게 되며 열처리를

거치지 않은 시료와 비표면적 및 입자 사이즈에서 큰 차이를 보이지만 pH의 변화에도 그 특성이 크게 변하지 않는다. 열처리를 거치지 않은 시료의 경우에는 비소가 주입되면 ferric arsenate와 같은 결정을 형성하게 되어 열처리를 거친 경우와 다른 흡착 기작을 갖는데 이 때 해리된 철이 재침전되어 철농도가 검출되지 않는 것으로 판단된다. 주요 흡착 기작으로는 표면 전하의 차이에 의한 surface complexation이 주요 요인으로 보이는데 열처리를 거친 시료의 경우와 열처리를 거치지 않은 시료의 차이점에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 그럼에도 이러한 연구 결과는 차후에 비소 흡착제로 Fe계열 합성 LDH 소재를 선택하게 되는 중요한 기초자료가 될 것으로 판단된다. 열처리를 거친 것과 거치지 않은 시료 사이에 존재하는 비표면적의 차이를 고려하면 열처리를 거치지 않은 것이 오히려 더 높은 비소 흡착량을 나타내었으며, 따라서 열처리를 거치지 않고 간단하게 제조된 시료에서 제안된 메커니즘에 대한 실증 실험이 보충된다면 더욱 훌륭한 소재로 사용할 수 있다고 생각된다. 지금까지 살펴본 Mg-Fe-LDH 소재는 저렴한 비용으로 쉽게 만들 수 있는 소재이므로 그 효용가치는 더욱 크다고 판단되며 산업 단지 및 공업용지의 비소오염을 복원하고 폐광산 침출수 중의 비소를 제거하는 등 토양정화 및 수처리에 다용도로 사용될 수 있을 것이다. 또한 흡착능 이외에도 LDH 소재 고유의 이온교환능으로 비소 이외의 음이온성 오염물질 등의 처리에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 김명진, 안규홍, 정예진(2003) 광미와 주변 농토양에서 비소 및 중금속의 수직분포 및 이동성. *대한환경공학회지*, 대한환경공학회, Vol. 25, pp. 544-553.
- 김윤희, 한무영(1999) 음용수에서 비소의 건강상 위해성과 제거 기술의 동향. *대한환경공학회 '99추계학술연구발표회 논문집(I)*, 대한환경공학회, Vol. 11, pp. 5-6.
- 양재규, 유대환, 이성일, 권혁기, 조주환, 성준용(2003) Iron Coated Sand를 이용한 독성 3가 비소 제거. *대한환경공학회 2003 춘계학술연구발표회 논문집*, Vol. 5.1-3, pp. 450-457.
- 양재규, 장운영(2006) 비소용출에 대한 토양의 물리화학적 특성 영향. *대한환경공학회지*, 대한환경공학회, pp. 731-737.
- 이석우, 강문자, 문희정(1995) 층상이중수산화물의 물리·화학적 특성규명 및 소성된 시료의 크롬산이온 수용액에서 재수화반응. *Journal of the Korean Chemical Society*, Vol. 39, pp. 627-634.
- Masscheleyn, P.H., Delaune, R.D., and Patrick, Jr, W.H. (1991) Effect of redox potential and pH on arsenic speciation and solubility in a contaminated soil, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 25, pp. 1414-1419.
- Oremland, R.S. and Stolz, J.F. (2003) The ecology of arsenic, *Science*, Vol. 300, pp. 393-944.
- Korte, N.E. and Fernando, Q. (1991) A review of arsenic(III) in groundwater. *Crit. Rev. Environ. Control*, Vol 21, pp. 1-39.
- Welch, A.H., Westjohn, D.B., Helsel, D.R., and Wanty, R.B. (2000) Arsenic in ground water of the united states : Occurrence and geochemistry. *Ground Water*, Vol 38, pp. 589-604.
- Mukherjee, A.B. and Bhattacharya, P. (2001) Arsenic in groundwater in the Bengal delta plain : slow poisoning in Bangladesh. *Environ Rev*, Vol. 9, pp. 189-220.
- Dixit, S. and Hering, J.G. (2003) Comparison of arsenic (V) and arsenic(III) sorption onto iron oxide minerals : Implications for arsenic mobility. *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 37, pp. 4182-4189.
- Yang, L., Dadwhal, M., Shahrivari, Z., Ostwal, M., Liu, P.K.T., Sahimi, M., and Tsotsis, T.T. (2006) Adsorption of arsenic on layered double hydroxides: Effect of particle size. *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 45, pp. 4742-4751.
- Xu, Z.P., Stevenson, G.S., Lu, C.-Q., Lu, G.Q., Bartlett, P.F., and Gray, P.P. (2006) Stable suspension of layered double hydroxide nanoparticles in aqueous solution. *J. AM. CHEM. SOC.*, Vol. 128, pp. 36-37.
- Zhang, J.S. Stanforth, R.S., and Pehkonen, S.O. (2007) Effect of replacing a hydroxyl group with a methyl group on arsenic(V) species adsorption on goethite. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 306, pp. 16-21.
- Raven, K.P., Jain, A. and Loeppert, R.H. (1998) Arsenite and arsenate adsorption of ferrihydrite: Kinetics, equilibrium, and adsorption envelopes. *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 32, pp. 344-349.
- Prasanna, S.V., Rao, R.A.P., and Kamath, P.V. (2006) Layered double hydroxides as potential chromate scavengers. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 304, pp. 292-299.
- Jia, Y., Xu, L., Wang, X., and George, P.D. (2007) Infrared spectroscopic and X-ray diffraction characterization of the nature of adsorbed arsenate on ferrihydrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 71, pp. 1643-1654.
- Benjamin, M.M. (2002) *Water chemistry*, McGraw-Hill, 1st ed., pp. 592.

(접수일: 2007.12.28/심사일: 2008.2.15/심사완료일: 2008.11.3)