

철 및 망간 산화물로 코팅된 입자활성탄을 이용한 수용액 중 As(III) 및 As(V)의 제거 Removal of As(III) and As(V) in Aqueous Phases by Fe and Mn Oxides Coated Granular Activated Carbon

이희용 · 양중석* · 최재영* · 이승목 †
Hee-Yong Lee · Jung-Seok Yang* · Jaeyoung Choi* · Seung-Mok Lee †

관동대학교 환경공학과 · *한국과학기술연구원 강릉분원
Department of Environmental Engineering, Kwandong University
*Korea Institute of Science and Technology-Gangneung Institute

(2009년 3월 20일 접수, 2009년 7월 14일 채택)

ABSTRACT : The objective of this study was to evaluate the efficiency of Fe and Mn oxides coated granular activated carbons (FMOCGs) for the removal of arsenite and arsenate by oxidation and adsorption mechanisms using surface characterization and batch adsorption experiments. Within four manufactured adsorbents, Fe and Mn contents of FMOCG-1 was the highest (178.12 mg Fe/g and 11.25 mg Mn/g). In kinetic results, As(III) was removed by oxidation and adsorption with FMOCGs. Removal of arsenic by FMOCGs increased as pH value of the solution decreased. The adsorption isotherm results were well fitted with Langmuir isotherm. Adsorption amount of As(V) onto FMOCGs was higher than that of As(III) and the maximum adsorption capacities of FMOCGs for As(III) and As(V) were 1.38~8.44 mg/g and 2.91~9.63 mg/g, respectively.

Key words : Arsenic, Oxidation, GAC, Adsorption

요약 : 본 연구에서는 수용액상의 비소를 산화 및 흡착기작을 이용하여 제거하기 위해서 철과 망간 산화물로 코팅된 입자활성탄 (FMOCG)을 제조하고, 이의 표면특성 및 회분식 실험을 통하여 비소제거 특성을 규명하였다. 회분식 실험에서는 네 가지 코팅매질의 비소 산화 및 흡착 동역학, pH 영향, 등온흡착실험을 실시하였다. 코팅매질의 철과 망간 함량은 FMOCG-1(178.12 Fe mg/g, 11.25 Mn mg/g)가 비교적 많은 것으로 나타났다. 비소흡착 동역학을 통하여 As(III)의 경우 산화 및 흡착을 통하여 제거됨을 확인하였다. pH 영향실험 결과 pH가 낮을수록 비소의 제거율이 높아지는 것으로 나타났다. 등온흡착실험 결과는 Langmuir isotherm에 잘 적용되었으며 As(III)보다 As(V)의 흡착량이 약간 높았으며, 최대 흡착량은 1.38~8.44 mg As(III)/g과 2.91~9.63 mg As(V)/g이었다.

주제어 : 비소제거, 산화, 입상활성탄, 흡착

1. 서론

비소는 전 세계적으로 생명체에 심각한 환경문제를 야기한다. 비소의 오염은 비소함유 광물의 풍화작용으로 인한 지하 및 지표수로의 용출에 의한 자연적인 오염과 광산 활동, 폐기물의 부적절한 처리, 농약 및 석탄재로 인한 오염 등 인간 활동에 의한 인위적인 오염이 존재한다.¹⁾ 비소함유 광물은 세계적으로 다양하게 분포하고 있다. 대표적으로 방글라데시를 비롯한 동남아시아에는 비소함유 광물로 인한 지하수 오염이 심각한 상황이다.^{2~4)} 우리나라에서도 광산폐기물의 용출로 야기된 비소오염이 환경적인 문제로 대두되고 있다. 2008년 폐금속광산 주변지역 토양·수질오염실태 정밀조사결과 전국 100개 광산 중 87개 광산이 토양 및 수질오염 기준을 초과(초

과율 87%)하였고, 이 중 경기 가평군 북장광산에서 비소가 기준치(6 mg/kg)를 236배 초과(1,414 mg/kg)하는 등 오염도가 높은 것으로 나타났으며 다수의 하천수, 갯내수, 지하수에 서도 비소오염이 확인되었다.⁵⁾

이러한 수중환경에서 유해한 비소를 제거하기 위하여 현재까지 다양한 방법이 개발되었다. 비소를 처리하기 위한 대표적인 방법으로는 산화, 침전, 응집, 흡착, 여과, 전기투석법 등이 존재한다. 이중 흡착을 이용한 비소의 처리방법은 비소의 제거 속도가 빠르고 오염물질을 강하게 흡착하여 안정한 화합물을 만드는 장점이 있다. 흡착방법을 이용하는 대표적인 기술로 철코팅사를 이용한 비소제거가 있다.^{1,6)} 그러나 철코팅사는 지지체인 모래의 작은 표면적으로 인하여 비소의 흡착량이 낮은 단점이 있으며 이를 해결하기 위한 방법으로 모

† Corresponding author : E-mail : leesm@kwandong.ac.kr Tel : 033-649-7535 Fax : 033-642-7635

래를 대체한 레진, 슬래그, 시멘트, 제올라이트, 입자활성탄 등 다양한 지지체를 이용하고 있다. 이중 입자활성탄은 비표면적이 매우 크고 다양한 기공크기를 가지고 있어 철코팅을 통해 높은 비소 제거능을 가질 수 있다.⁷⁾ 비소는 다양한 화학종으로 존재하는데 3가 비소인 arsenite와 5가 비소인 arsenate가 주로 존재한다.^{8~10)} 철 코팅사를 비롯한 흡착제의 대부분은 5가 비소에 대한 흡착력은 높으나 3가 비소에 대한 흡착력은 낮기 때문에 3가 비소를 처리하기 위하여 산화제를 투입하여 3가 비소를 5가 비소로 먼저 산화시킨 후 5가 비소를 흡착제를 통하여 제거하는 방법이 이용되고 있다.

본 연구에서는 3가 비소와 5가 비소를 효과적으로 처리하기 위하여 철과 망간 산화물을 입자활성탄에 코팅하여 철과 망간의 함유량이 다른 네 가지 다른 흡착제를 개발하고, 산화·흡착 실험을 통하여 각 흡착제의 비소처리 성능을 파악하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 재료

실험에 사용한 입자활성탄(granular activated carbon, GAC)은 Darco 사의 20~40 mesh 크기이며 Sigma-Aldrich(St. Louis, MO, USA)에서 구입하였다. 코팅을 위해 사용한 철과 망간의 원료로는 $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (Junsei Chemical, Japan)와 $KMnO_4$ (Yakuri Pure Chemical, Japan)를 이용하였다. As(III)와 As(V)의 표준용액(1,000 mg/L)은 $NaAsO_2$ (Fluka, USA)와 $Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$ (Sigma-Aldrich)를 이용하여 제조하였다. 용액의 pH는 NaOH(Junsei Chemical Co., Japan)와 HNO_3 (Junsei)를 이용하여 조절하였다. 용액의 이온강도 조절은 $NaNO_3$ (Junsei)를 이용하였다. 분석에 사용한 분석표준용액은 AccuStandard(USA)의 1,000 mg/L standard 용액을 이용하여 제조하였다. As(III)와 As(V)의 화학종 분석의 분리에 이용한 이온교환수지는 Dowex[®] 1×8-100(Cl) ionexchange resin(Sigma-Aldrich)을 이용하였다.

2.2. 분석방법

각 매질의 철과 망간의 코팅 함량은 전 함량 분석법을 사용하여 분석하였다. As(III)가 As(V)로의 산화 및 제거속도를 확인하기 위하여 이온교환수지를 사용하여 As(III), As(V)로 분리하였다. 용액의 pH는 pH meter(Mettler Toledo, USA)를 사용하여 측정하였고 각 실험의 시료는 0.45 μ m 주사기 필터(syringe filter, RC(PVDF), 25 mm, Sartorius)

Table 1. Preparation conditions of adsorbents (unit : mL)

	FOCG	FMOCG-1	FMOCG-2	MOCG
$Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (2 M)	200	200	200	0
$KMnO_4$ (1 M)	0	200	100	200

로 여과한 후 유도분극플라즈마흡광광도계(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, ICP-OES, 730-ES, Varian, USA)를 이용하여 측정하였다. 또한 전계방출주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM, Hitachi S-4700, Japan)을 이용하여 흡착제 표면을 관찰 하였다.

2.3. 코팅 매질의 제조방법

입자활성탄의 이물질 제거와 작용기를 증가시키기 위해 0.1 N 염산에 하루 동안 담아둔 후 증류수로 수회 세척하여 건조기에서 110℃로 하루 동안 건조하였다. GAC 100 g과 철 및 망간용액을 Table 1과 같이 각각의 양에 맞게 1 L 플라스크 병에 넣어 상온에서 교반기로 하루정도 교반한 후 110℃ 건조기에서 수분이 없어질 때까지 건조하여 증류수로 수회 세척 후 다시 건조기에서 110℃로 하루 동안 건조하였다. 건조된 매질을 균일한 입자로 모으기 위하여 50 mesh 표준체로 체가름 하여 입자상의 활성탄을 실험에 사용하였다. 제조된 흡착제는 FOCG(Fe Oxide Coated GAC), FMOCG-1(Fe-Mn Oxides Coated GAC-1), FMOCG-2(Fe-Mn Oxides Coated GAC-2), MOCG(Mn Oxide Coated GAC)로 명명 하였다.

2.4. 코팅 매질의 Fe, Mn 함량

코팅 매질 내에 존재하는 철과 망간의 함유량을 분석하기 위해서 전 함량 분석법을 이용하였다. 코팅 매질 0.1 g에 농염산 1.8 mL과 농질산 0.6 mL을 넣고 2시간 동안 상온에 방치하였다. 이후 2시간 동안 block heater에서 70℃로 가열한 후 상온냉각한 후 증류수를 넣어 총 10 mL이 되게 하였다. 여과 후 여과액 중 철과 망간의 함량을 ICP-OES를 이용하여 측정하였다.

2.5. pH에 따른 흡착제의 용출실험

50 mL conical tube에 매질 0.1 g을 각각 담고 증류수 25 mL, 이온강도가 0.01 N이 되도록 0.1 N $NaNO_3$ 를 3 mL, As(III)나 As(V)의 농도가 10 mg/L가 되도록 표준용액을 각각 주입하였다. pH 범위를 2~11이 되도록 HNO_3 와 NaOH를 사용하여 pH를 조절한 후 용액의 부피가 30 mL이 되도록 증류수를 주입하였다. 이것을 교반기에서 25℃, 150 rpm으

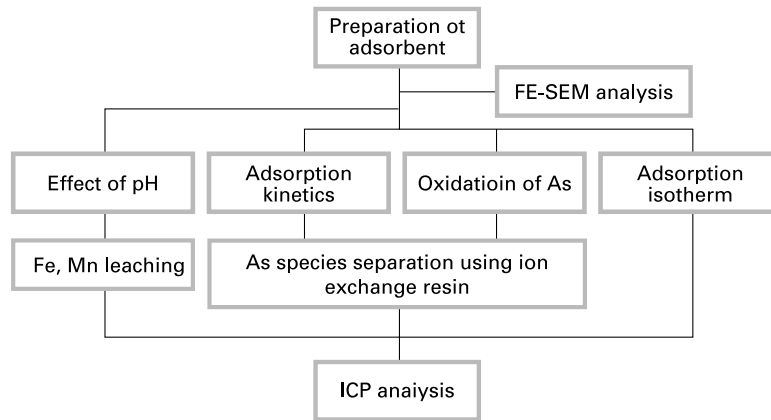


Fig. 1. Flow chart of experiments.

로 교반하여 10일간 실험을 진행하였다. 실험 후 유출액의 철과 망간의 농도를 ICP-OES로 분석하여 흡착제에 존재하는 철과 망간의 용출량을 계산하였다.

2.6. 코팅 매질의 비소 흡착반응속도

비소의 코팅 매질의 흡착반응속도를 알아보기 위하여 50 mL conical tube에 매질 0.1 g을 각각 담고 증류수 25 mL, 이온강도가 0.01 N이 되도록 0.1 N NaNO₃를 3 mL, As(III)나 As(V)의 농도가 10 mg/L가 되도록 표준용액을 각각 주입하였다. pH 7이 되도록 HNO₃와 NaOH를 사용하여 pH를 조정된 후 용액의 부피가 30 mL이 되도록 증류수를 각각에 맞게 주입하였다. 이것을 교반기에서 25°C, 150 rpm으로 교반하여 시료를 5분, 10분, 20분, 30분, 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h 시료채취 후 하루 간격으로 시료를 채취하고 각 시간에 pH를 측정하면서 10일간 실험을 진행하였다.

As(III)가 As(V)로의 산화 및 흡착속도를 확인하기 위하여 이온교환수지를 사용하였다. As의 분리는 이온교환수지의 전처리, As(III)와 As(V)의 분리, 이온교환수지의 후처리를 반복하면서 진행하였다. 이온교환수지의 전처리는 이온교환수지 2 mL를 뷰렛에 채우고 증류수 20 mL을 통과시켜 세척한 후에 CH₃COOH를 이용하여 이온교환수지를 CH₃COO⁻로 사 전결합을 시켜주었다. 이후 잔존 CH₃COO⁻를 제거하기 위하여 20 mL 증류수를 추가하여 통과해 세척해 주었다. 비소화 학종의 분리는 초기 용액은 버리고 중간 용액을 회수하여 이 용액에서 As(III)의 농도를 구하였다. 초기 이온교환수지를 통과시키지 않은 원액의 농도를 As(III)와 As(V)를 합한 농도로 계산하고 As(V)는 이 초기 농도에서 이온교환수지를 통과해서 나온 용액 내 As(III) 농도를 제외하여 구하였다. 이온교환수지의 후처리는 1 N 염산을 20 mL 흘려주어 이온교환수지를 재생한 다음 증류수 20 mL을 통과시켜 세척해 주었다. 지

속적인 이온교환수지를 사용하기 위하여 다시 전처리 단계를 통하여 As(III)와 As(V)를 분리하였다.

2.7. As(III), As(V)제거의 pH영향

50 mL conical tube에 매질 0.1 g을 각각 담고 증류수 25 mL, 이온강도가 0.01 N이 되도록 0.1 N NaNO₃를 3 mL, As(III)나 As(V)의 농도가 10 mg/L가 되도록 표준용액을 각각 주입하였다. 용액의 pH가 2~9가 되도록 HNO₃와 NaOH를 사용하여 pH를 조정된 후 용액의 부피가 30 mL이 되도록 증류수를 주입하였다. 이것을 교반기에서 25°C, 150 rpm으로 교반하여 10일간 실험을 진행하였다.

2.8. As(III), As(V)제거의 등온흡착

50 mL conical tube에 매질 0.1 g을 각각 담고 증류수 25 mL, 이온강도가 0.01 N이 되도록 0.1 N NaNO₃를 3 mL, 초기 As(III)나 As(V)의 농도가 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 mg/L가 되도록 각각 주입하였다. pH 7이 되도록 HNO₃, NaOH를 사용하여 pH를 조정된 후 용액의 부피가 30 mL이 되도록 증류수를 각각에 맞게 주입하였다. 이것을 교반기에서 25°C, 150 rpm으로 교반하여 10일간 실험을 진행하였다. 최종 수용액 상의 비소농도를 ICP-OES로 측정하여 흡착 전후의 비소농도차로 매질의 비소흡착량을 계산하였다.

앞서 설명한 실험방법의 개략적인 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 흡착제를 제조하여 FE-SEM으로 표면특성을 파악하였으며, 제조된 흡착제를 사용하여 pH 영향 실험, 흡착반응속도 실험, 등온흡착실험을 진행하였다. 그리고 흡착반응속도실험을 마친 시료를 이온교환수지 칼럼을 이용해 비소산화속도 실험을 진행하였다. 또한 ICP-OES를 이용하여 As, Fe, Mn 등을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 코팅 매질의 특성

제조한 매질의 철과 망간의 함량은 Table 2에 나타내었다. 망간 산화물을 이용하여 제조한 매질은 같은 양의 철을 주입하였음에도 서로 다른 철 함량을 나타내었다. 철을 주입한 FOCG, FMOCG-1, FMOCG-2 매질 중에서 망간을 많이 주입했던 FMOCG-1 매질이 가장 높은 철 함량을 나타내었다. FMOCG-1은 망간의 산화반응에 의해 철의 코팅 함량이 높은 것으로 판단된다.

입자활성탄에 철과 망간의 산화물이 어떤 모습으로 코팅되어 있는지 알아보기 위하여 FE-SEM을 이용하여 관찰한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서와 같이 입자활성탄은 아주 큰 비표면적을 가지고 있어 모래 등과 같은 매질에 비해

Table 2. Fe and Mn contents of each adsorbents (unit : mg/g)

	Fe	Mn
FOCG	133.68	0.20
FMOCG-1	178.12	11.25
FMOCG-2	159.52	11.12
MOCG	0.32	37.00

많은 양의 철과 망간이 코팅되거나 공극 내로 침전되어 비표면적은 줄어드는 반면 비소가 쉽게 흡착할 수 있는 장소가 늘어남을 알 수 있다.

3.2. pH에 따른 흡착제의 용출실험

pH에 따른 흡착제에 코팅된 철과 망간의 용출실험을 실시하여 Fig. 3에 흡착제의 코팅량과 용출량의 비를 백분율로 나타내었다. 코팅된 흡착제의 용출은 용액의 pH에 민감하게

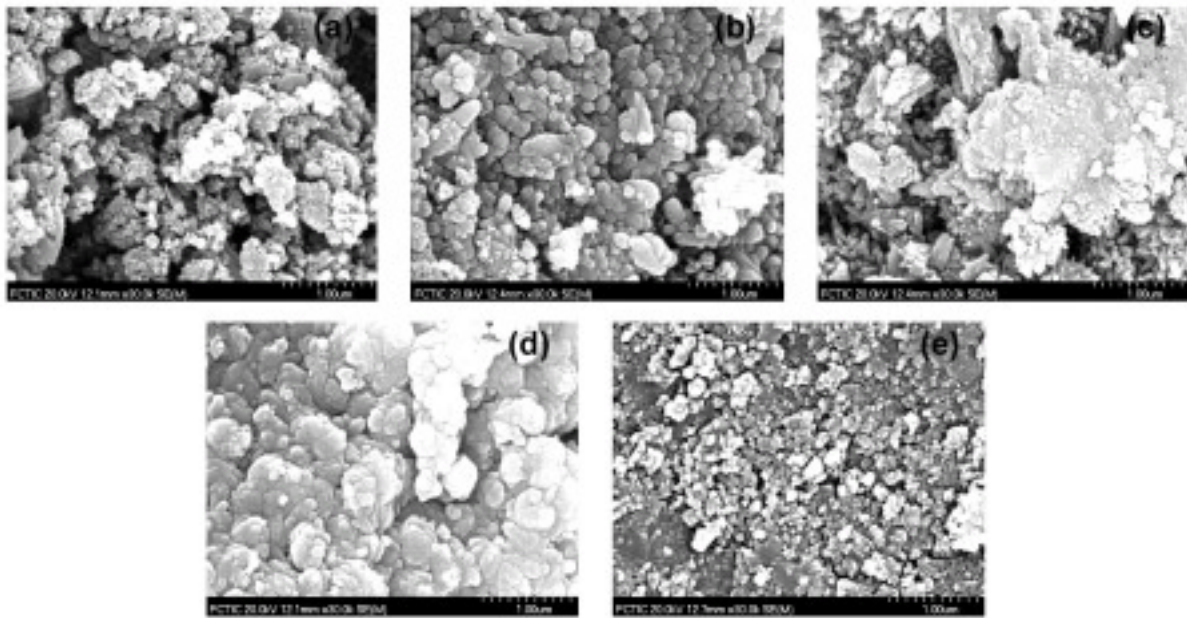


Fig. 2. FE-SEM images of (a) GAC, (b) FOCG, (c) FMOCG-1, (d) FMOCG-2, and (e) MOCG.

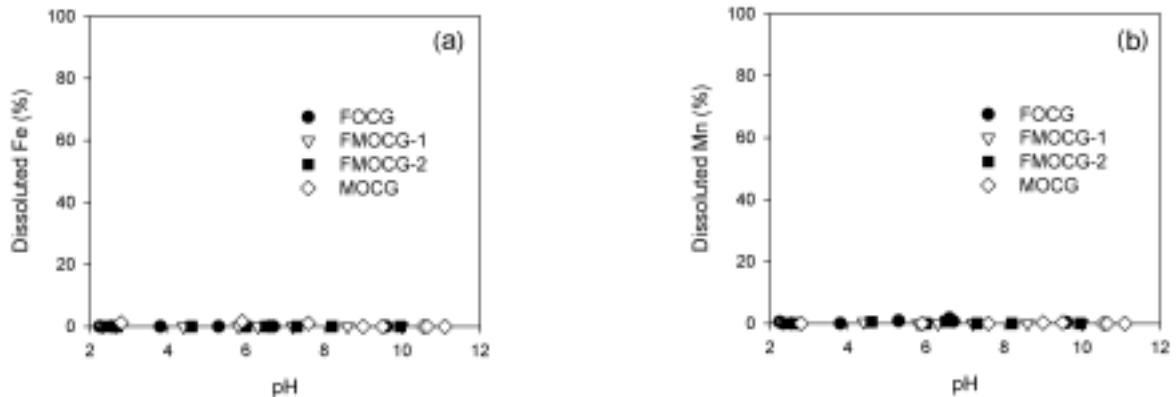


Fig. 3. Dissolution of Fe and Mn from adsorbents with variation of pH.

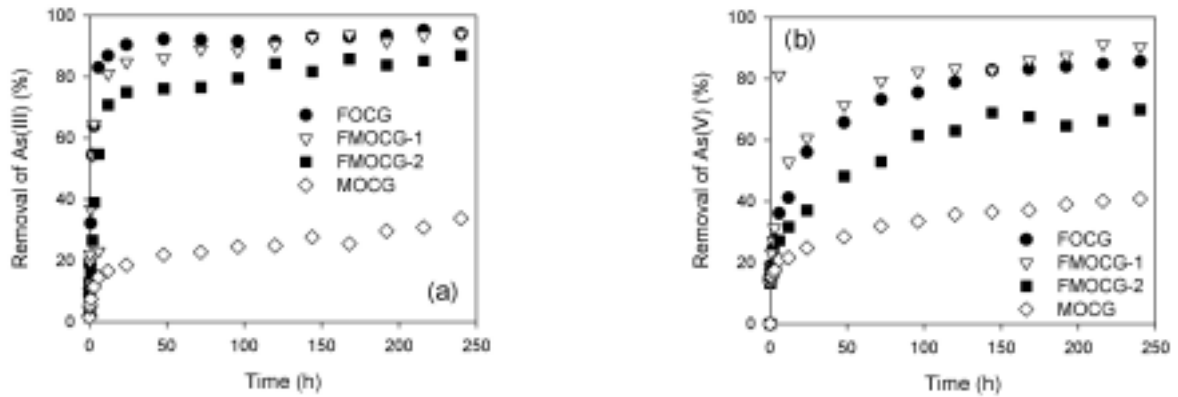


Fig. 4. Adsorption kinetics of (a) As(III) and (b) As(V) onto adsorbents.

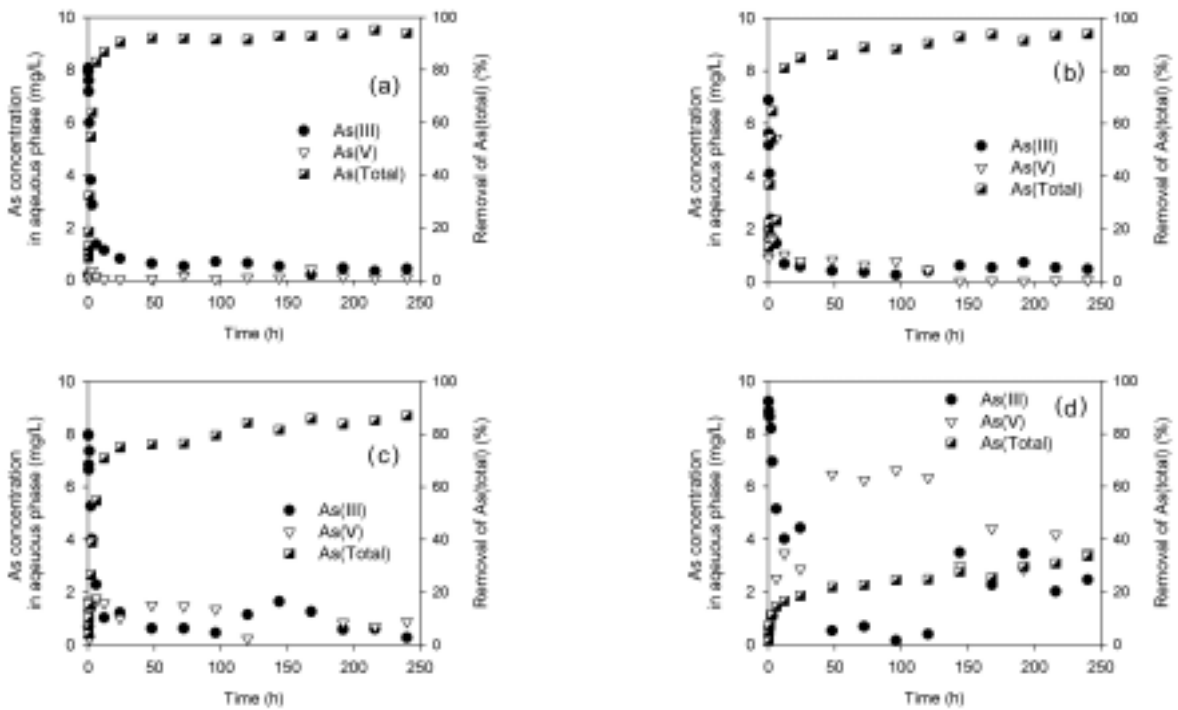


Fig. 5. Removal kinetics of arsenite by (a) FOCG, (b) FMOCG-1, (c) FMOCG-2, and (d) MOCG.

의존하는데, 제조한 흡착제들로부터 용출되는 철 및 망간은 분석기기의 검출한계 이하의 좋은 결과를 나타내었다. 본 연구에서 제조한 흡착제는 모든 pH 환경조건에서 발생하는 비소를 함유한 오염수 처리를 위한 흡착재질로 응용시 철 및 망간의 용출에 의한 환경문제가 발생하지 않을 것으로 여겨진다. 또한 비소의 제거는 용해성 철과 망간이온에 의하여 침전 등의 제거가 아니라 흡착제에 의한 흡착반응에 기인한 것임을 알 수 있다.

3.3. 코팅 매질의 비소 흡착반응속도

철과 망간 산화물로 코팅된 입자활성탄을 이용한 As(III), As(V) 제거 동역학을 분석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

As(III)는 50 h 이후에 흡착평형이 이루어졌으며 As(V)는 120 h 이후에 흡착평형에 도달함으로써 As(III)의 흡착속도가 As(V)의 흡착속도보다 빠르게 진행됨을 알 수 있었다. FOCG와 FMOCG-1의 비소 제거 속도가 As(III)와 As(V)의 경우 모두 빠르게 진행됨을 알 수 있었다. 철과 망간 산화물 코팅매질을 이용한 As(III) 제거의 흡착 동역학을 진행한 시료를 이온교환수지를 충전한 칼럼을 사용하여 As(III)와 As(V)를 분리 비교분석한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 코팅매질 중 FOCG와 FMOCG-1이 As(III)와 As(V) 흡착 동역학 실험결과 좋은 산화 및 흡착능을 가졌다. 철의 금속산화력은 극히 미량으로 판단되며, 따라서 FOCG의 As(III) 흡착은 As(III)가 미량 산화하여 흡착된 것으로 판단되어진다.

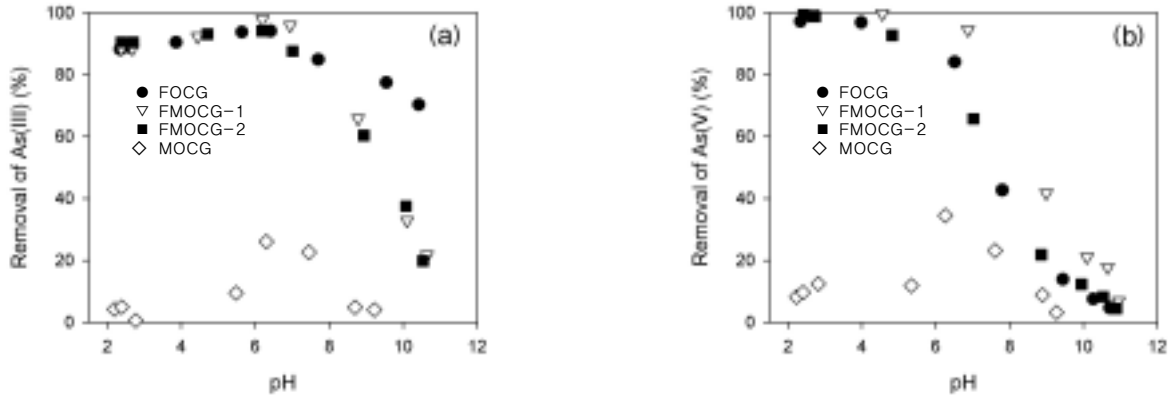


Fig. 6. Adsorption of (a) As(III) and (b) As(V) onto adsorbents with variation of pH.

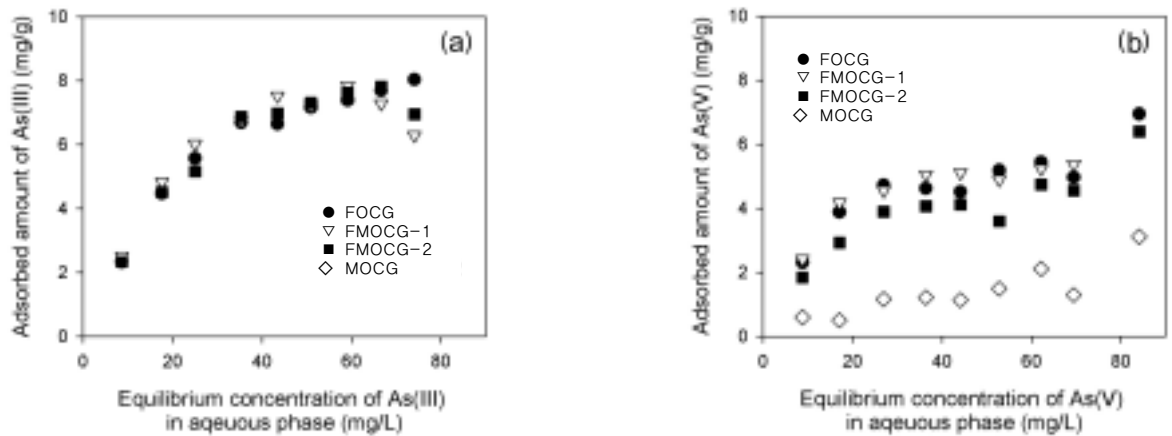


Fig. 7. Adsorption isotherm for (a) As(III) and (b) As(V) by the adsorbents.

또한 Eary 등¹¹⁾은 용존산소에 의한 As(III)가 산화하는데 필요한 반감기는 1년 정도가 된다고 보고하였다. 그러므로 FMOCG는 표면에 코팅된 MnO₂에 의한 촉매작용 또는 직접적인 반응에 의한 As(III)의 빠른 산화가 이루어져 FMOCG의 As(III) 산화능이 뛰어난 것으로 사료된다. 철과 망간 산화물 코팅매질을 이용한 As(III)의 산화 및 흡착 동역학을 살펴보았을 때 코팅매질에 코팅된 망간의 함량이 증가할수록 As(III)가 As(V)로 보다 빨리 산화 되었으며 망간산화물에 의한 비소의 산화가 흡착속도에 있어서 저해요인으로 작용한 것으로 생각되어진다.

3.4. As(III), As(V)제거의 pH영향

Fig. 6과 같이 철과 망간 산화물 코팅매질을 이용한 As(III)와 As(V)흡착에 있어서 pH가 낮아질수록 비소의 흡착이 증가하고 pH가 높아질수록 비소의 흡착량이 감소하였다. 또한 As(III)는 pH 7 이후부터 서서히 흡착능이 떨어지는 것을 볼 수 있으며, As(V)는 pH 7 이후에 급격히 흡착능이 떨어지는 것을 확인 할 수 있다. FOCG, FMOCG-1,

FMOCG-2는 pH 7 이하에 비소의 제거 효율이 높았으며, MOCG의 경우는 pH 6과 pH 7 사이에서 비소제거효율을 보였다. 그리고 각 흡착제 모두 pH 10 이상에서는 비소제거를 기대 할 수 없었다.

철산화물의 경우 pH가 감소하면 양이온을 띄고, 비소의 경우 pH 2 이상에서 음이온을 띄기 때문에 흡착률이 높다. 하지만 pH가 증가하면서 철산화물은 음이온을 띄고, 비소 또한 음이온을 띄기 때문에 pH가 증가하면 흡착은 감소하게 된다. 또한 OH⁻기의 증가로 인해 As(V)와 경쟁반응으로 인해 철산화물에 비소흡착은 감소하게 된다. FOCG, FMOCG-1, FMOCG-2의 흡착제가 낮은 pH 범위에서 높은 제거효율을 보임으로 pH가 낮은 휴·폐광산 지역의 비소 및 중금속 제거에 효과적일 것으로 판단되어진다.

3.5. As(III), As(V)제거의 등온흡착

철과 망간 산화물 코팅 매질을 이용하여 As(III)와 As(V)제거하는데 최대 비소흡착량을 파악하기 위하여 등온흡착실험을 진행한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이 결과는 아래의

Table 3. Langmuir isotherm parameters for As(III) and As(V) adsorption on adsorbents

	Adsorbent	$Q_{max}(mg/g)$	b	r^2
As(III)	FOCG	8.44	65.06	0.93
	FMOCG-1	8.05	39.90	0.99
	FMOCG-2	7.47	123.90	0.92
	MOCG	1.38	0.33	0.08
As(V)	FOCG	9.63	49.91	0.85
	FMOCG-1	8.89	77.97	0.77
	FMOCG-2	7.94	567.79	0.90
	MOCG	2.91	0.44	0.91

Langmuir isotherm에 잘 적용되었으며 매개변수를 Table 3에 정리하였다.

$$Q = Q_{max} \frac{bC_e}{1 + bC_e}$$

각 흡착제의 비소제거 효율은 FOCG, FMOCG-1, FMOCG-2, MOCG 순으로 나타났으며, 최대흡착량(Q_{max})은 1.38~8.44 mg As(III)/g과 2.91~9.63 mg As(V)/g로 As(III)보다 As(V)의 흡착량이 약간 높았다. 이는 As(III)가 As(V)로 산화되는 시간이 필요하여 발생하는 현상으로 판단된다. 비소의 흡착은 철 산화물뿐만 아니라 망간 산화물 표면에 함께 이루어지는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

철, 망간 산화물을 이용한 코팅매질의 물리화학적 특성과 각 매질의 As(III), As(V) 산화 및 제거 특성을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 철, 망간 산화물을 이용하여 제조한 매질은 같은 양의 철을 주입하였음에도 서로 다른 철 함량을 보여주었다. 철만을 주입한 FOCG에 비해 철과 망간을 함께 주입한 FMOCG-1, FMOCG-2의 철 함량이 증가되어짐을 확인할 수 있었다.
- 2) 철, 망간 산화물 코팅 매질을 이용한 As(III), As(V)제거 동역학을 분석한 결과 As(III)의 제거속도가 As(V)의 제거속도보다 빠르게 진행되어 As(III)의 경우 50 h 이후 평형을 이루었다. 코팅 매질 중 FOCG가 As(III), As(V)제거 실험에서 가장 좋은 제거속도와 제거효율을 가진 것으로 판단되어진다.
- 3) 철, 망간 산화물 코팅 매질을 이용한 As(III), As(V)흡착에 있어서 pH가 낮아질수록 비소의 흡착량이 증가

하고 pH가 높아질수록 비소의 흡착량이 가하고는 경향을 보였다. 낮은 pH에서 높은 제거효율을 보임으로 pH가 낮은 곳의 중금속 제거에 효과적일 것으로 판단되어진다.

- 4) 코팅된 흡착제의 용출은 용액의 pH에 민감하게 의존하는데, 제조한 흡착제들로부터 용출되는 철 및 망간은 분석기기의 검출한계 이하의 좋은 결과를 나타내었다.
- 5) 각 코팅매질의 최대 비소 흡착량을 파악하기 위한 등온흡착실험을 진행한 결과Langmuir isotherm이 잘 적용되었다. 각 흡착제의 비소제거 효율은 FOCFG, FMOCG-1, FMOCG-2, MOCG 순으로 나타났으며, 최대흡착량은 1.38~8.44 mg As(III)/g과 2.91~9.63 mg As(V)/g로 As(III)보다 As(V)의 흡착량이 약간 높았다.

KSEE

사 사

본 연구는 한국과학기술연구원 기관고유사업(2Z03290)의 일환으로 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 양재규, 이성일, 유대환, 권혁기, 성준용, 소주환, "Iron-Coated Sand의 독성 3가 비소 흡착성능", 대한환경공학회지, **25**(7), 853~859(2003).
2. Chen, W., Parette, R., Zou, J., Cannon, F. S., and Dempsey, B. A., "Arsenic removal by iron-modified activated carbon", *Water Res.*, **41**, 1851~1858(2007).
3. Zhang, G., Qu, J., Liu, H., Liu, R., and Wu, R., "Preparation and evaluation of a novel Fe-Mn binary oxide adsorbent for effective arsenite removal", *Water Res.*, **41**, 1921~1928(2007).
4. Zhang, G., Qu, J., Liu, H., Liu, R., and Li, Gu., "Removal mechanism of As(III) by a novel Fe-Mn binary oxide adsorbent: Oxidation and sorption", *Environ. Sci. Technol.*, **41**(13), 4613~4619(2007).
5. 환경부, "전국 폐금속광산 주변지역 토양·수질오염실태 정밀조사결과"(2008).
6. 김병권, 임재우, 장운영, 양재규, "망간코팅사 종류별 독성 3가 비소의 산화특성에 관한 비교 연구", 지하수토양환경, **13**(2), 62~69(2008).
7. Yang, J. K., Park, H. J., Lee, H. D., and Lee, S. M., "Removal of

- Cu(II) by activated carbon impregnated with iron(III)”, *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, **337**, 154~158(2009).
8. Gupta, V. K., Saini, V. K., and Jain, N., “Adsorption of As(III) from aqueous solution by iron oxide-coated sand”, *J. Colloid Interface. Sci.*, **288**, 55~60(2005).
 9. Dinesh, M., and Charles, U. P. Jr., “Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents-A critical review”, *J. Hazard. Mater.*, **142**, 1~53(2007).
 10. Mushtaque, A., and Chowdhury, R., “Arsenic crisis in bangladesh”, *Sci. Am.*, 86~91(2004).
 11. Eary, L. E., and Schramke, L. A., “Rates of inorganic oxidation reactions involving dissolved oxygen in chemical modeling of aqueous systems”, II, D. C. Melchior and R. L. Bassett, eds., *ACS Symp. Ser.*, **416**, 379~396(1990).