

철/망간 산화물 피복제를 이용한 오염지하수에서의 As(III) 제거

김주용¹, 최윤형¹, 김경웅^{1*}, 안주성², 김동욱³

¹광주과학기술원 환경공학과 지질환경비소제어 국가지정연구소,
²한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ³공주대학교 환경공학과

Removal of As(III) in Contaminated Groundwater Using Iron and Manganese Oxide-Coated Materials

Ju-Yong Kim¹, Yoon-Hyeong Choi¹, Kyoung-Woong Kim^{1*}, Joo Sung Ahn² and Dong Wook Kim³

¹Arsenic Geoenvironment Laboratory(NRL), Dep. of Environmental Science & Engineering, Gwangju Institute of Science & Technology, Gwangju 500-712, Korea

²Groundwater and Geothermal Resource Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

³Department of Environmental Engineering, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

Permeable reactive barrier using iron oxide coated sand is one of effective technologies for As(V) contaminated groundwater. However, this method is restricted to As(III), because As(III) species tends to be more weakly bound to adsorbent. In order to overcome the limitation of iron oxide coated sand application to As(III) contaminated groundwater, manganese oxide materials as promoter of As(III) removal were combined to the conventional technology in this study. For combined use of iron oxide coated sand and manganese oxide coated sand, two kinds of removal methods, sequential removal method and simultaneous removal method, were introduced. Both methods showed similar removal efficiency over 85% for 6 hrs. However, the sequential method converted the As contaminated water to acid state (pH 4.5), on the contrary, the simultaneous method maintained neutral state (pH 6.0). Therefore, simultaneous As removal method was ascertained as a suitable treatment technology of As contaminated water. Moreover, for more effective As(III) remediation technique, polypropylene textile which has the characteristics of high surface area, low specific gravity and flexibility was applied as alternative material of sand. The combined use of coated polypropylenes by simultaneous method showed much more prominent and rapid remediation efficiency over 99% after 6 hrs; besides, it has practical advantages in replacement or disposal of adsorbent for simple conventional removal device.

Key words : arsenic, remediation, manganese oxide, iron oxide, polypropylene

철산화물 피복 모래를 이용한 투수성 반응 벽체는 As(V)로 오염된 지하수의 처리에 매우 효과적인 것으로 알려져 있다. 그러나 이 방법은 As(III)에 있어서는 그 제거효과가 제한적인 실정이다. 본 연구에서는 위 방법에 의한 3가 비소 제거의 한계를 극복하기 위해서 As(III)를 As(V)로 산화시킬 수 있는 능력을 가진 망간산화물 피복 물질을 비소 저감 촉진제로서, 철산화물 피복 물질을 이용한 처리 기법에 함께 적용하였다. 철산화물 피복 모래와 망간산화물 피복 모래를 함께 이용한 비소 제거 방법으로서, 순차 제거법과 동시 제거법이 연구되었다. 두 가지 처리 방법 모두 6시간 동안 85% 이상의 높은 비소 제거 효율을 보였으며, 처리과정 동안 흡착제 표면의 철이나 망간의 용해에 의한 2차적인 오염도 일어나지 않았다. 그러나, 동시 제거법은 비소 저감 후 처리수의 산성도를 pH 6.0의 중성상태로 유지하는 반면, 순차 제거법은 처리수를 pH 4.5의 산성상태로 변화시키는 작용을 일으켜, 음용수로서의 이용을 위한 오염 지하수의 비소 저감법으로는 동시 제거법이 적합한 것으로 판정되었다. 보다 높은 As(III) 제거 효과를 위해, 망간 및 철 산화물을 폴리프로필렌 섬유에 피복시켜 비소 제거에 적용하였다. 폴리프로필렌 섬유는 높은 표면적과 낮은 비중의 특성을 가진, 신축성 있는 스폰지와 같은 저렴한 중합체의 일종이다. 이를 이용한 비소 제거법은 피복모래를 이용한 방법보다 월등히 뛰어난 99% 이상의 높은 비소 제거 효율을 나타내었다. 또한, 피복 폴리프로필렌 섬유를 이용한 방법

*Corresponding author: kwkim@gist.ac.kr

은 비소에 오염된 물의 음용수로의 이용을 위한 간편한 처리기법으로서 적용하기에 좋은 많은 실용적인 장점들을 가지고 있다.

주요어 : 비소, 제거, 망간산화물, 철산화물, 폴리프로필렌

1. 서 론

음용수로 사용되는 지하수에서의 비소 오염은 방글라데시, 서베갈, 인도, 베트남, 칠레, 타이완, 미 서부 등 세계 여러 곳에서 발견되고 있으며(Nickson *et al.*, 1998; Berg *et al.*, 2001), USEPA, WHO, 유럽연합, 일본, 베트남 등에서는 음용수에서의 비소 농도 기준을 10 µg/L로 제한하고 있다. 특히 방글라데시 인구 1억 2천만명 중 3천 5백만명이 50 µg/L 이상의 비소를 함유하는 지하수를 음용수 및 생활용수로 사용하여 비소오염에 노출되어 있고 이중 250만명 이상은 피부흑색증, 피부암 등의 심각한 비소중독 증상을 나타내고 있다(Khan *et al.*, 2000).

일반적으로 지하수 내의 무기 비소는 주로 +5가와 +3가로 존재하며, +5가의 경우 주로 산소가 풍부한 산화, 호기성 환경에서 $H_2AsO_4^-$ 나 $HAsO_4^{2-}$ 등과 같은 음이온 형태로 거동한다. 반면 +3가의 경우 환원, 혐기성 환경에서 주로 $H_3AsO_3^0$ 의 형태로 거동한다. 이러한 지하수 내 비소 제거를 위한 상용적인 처리 기법으로는 염화철, 황화알루미늄 등과 의 응집, 역삼투, 이온교환, 라임 처리, 철 산화물이나 활성 알루미늄을 이용한 흡착 등이 있다(Zouboulis *et al.*, 1993; Viraraghavan *et al.*, 1999). 특히 최근에는 철 산화물을 이용한 흡착이 가장 보편적인 방법으로 널리 활용되고 있으며, 이러한 기법은 전기적 충성을 띠는 As(III)보다는 음이온 형태로 거동하는 As(V)에 더 좋은 효율을 보인다. 따라서 As(III)의 효율적인 제거를 위해서는 As(V)로의 산화과정이 필요하다.

Oxygenandozone, hydrogen peroxide, UV/iron system, TiO_2 /UV system 등과 같은 많은 산화제 혹은 산화제 생성 시스템(Wolfgang *et al.*, 1995; Lee *et al.*, 2003)과 함께 망간 산화물 역시 As, Co, Fe, Cr 등의 독성 및 이동도를 조절하는 비교적 강한 산화제로 알려져 있다. 본 연구에서는 As(III)로 오염된 지하수의 처리에 있어 철산화물을 이용한 흡착 제거기법에 망간 산화물에 의한 산화과정을 결합함으로써 기존의 흡착 제거기법의 한계를 극복하고자 하였으며, 또한 이러한 결과를 활용하여 방글라데시, 베트남 등과 같은 저개발국가 가정에서 저렴하고 손쉽게 이용할 수 있는

비소 제어 물질을 고안하고자 하였다.

2. 실험 방법 및 재료

2.1. 철/망간 산화물 피복 모래 및 폴리프로필렌

철산화물 피복 모래(iron oxide coated sand, IOCS)의 제조는 Thirunavukkarasu *et al.* (2003)의 방법을 따랐으며, 보다 효과적인 피복을 위해 2단계에 걸쳐 처리하였다. 첫 번째 단계에서는 $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (2 M; 20 mL)과 NaOH (1 M; 2.5 mL) 혼합 용액에 50 g의 세척된 모래를 섞어 110°C에서 4시간, 그리고 550°C에서 3시간 숙성시켰다. 두 번째 단계에서는 숙성된 모래를 1단계와 동일한 용액에 넣고 110°C에서 20시간 재숙성 후 냉각, 세척 과정을 거쳐 최종 철산화물 피복 모래를 합성하였다. 망간산화물 피복 모래(manganese oxide coated sand, MOCS)의 제조는 Manning *et al.* (2002)의 방법을 따랐다. $KMnO_4$ (0.4 M; 100 mL)와 HCl (12 M; 7.5 mL) 혼합용액에 50 g의 세척 모래를 섞어 90°C에서 10분간 가열 후 110°C에서 20시간 동안 숙성시켰으며, 이 과정을 2회 반복하여 최종 망간산화물 피복 모래를 합성하였다. 제조된 피복 모래에 대해 철 및 망간산화물의 광물조성을 확인하기 위해 XRD 분석(D/MAX-3, Rigaku)을 실시하였다. 철산화물 피복 폴리프로필렌(iron oxide coated polypropylene, IOCP)과 망간산화물 피복 폴리프로필렌(manganese oxide coated polypropylene, MOCP)의 경우 모래 대신 폴리프로필렌을 사용하여 피복 모래와 동일한 용액에서 90°C에서 30분간 숙성 후 60°C에서 건조하는 과정을 2회 반복하여 합성하였다.

2.2. 철/망간산화물 피복제에 의한 비소의 흡착, 산화 및 제거 배치실험

IOCS에 의한 As(III)와 As(V)의 흡착, MOCS에 의한 As(III)의 산화를 알아보기 위한 배치실험에서는 초기 농도 2,000 µg/L의 As(III)와 As(V) 용액 각각 360 mL와 6 g의 IOCS를 혼합하여 pH 6.5의 조건에서 1주일 동안 25°C, 100 rpm으로 교반하면서 비소 농도의 변화를 측정하였다.

IOCS와 MOCS를 이용한 As(III)의 제거 실험은 순

차 제거(sequential removal)과 동시 제거(simultaneous removal)의 두 가지 형태로 수행하였다. 순차 제거 실험에서는 1g의 MOCS와 500 µg/L의 As(III) 용액 50 mL를 혼합하여 2시간 동안 25°C, 100 rpm으로 교반하면서 반응시킨 후 용액을 분리하여 다시 0.2 g의 IOCS와 혼합하여 6시간 동안 반응시켰다. 동시 제거 실험에서는 산화 및 흡착 반응의 분리없이 1g의 MOCS, 0.2 g의 IOCS, 그리고 500 µg/L의 As(III) 용액 50 mL를 혼합하여 6시간 동안 25°C, 100 rpm으로 교반하면서 반응시켰다.

IOCP와 MOCP를 이용한 As(III)의 제거 실험은 IOCS/MOCS를 이용한 제거 실험과의 비교를 위해 동시 제거 실험 방식으로만 수행하였으며, 실험 조건은 동일하게 유지시켰다.

각 실험 종료 후 As(III)와 As(V)의 분리는 음이온 교환 카트리지(LC-SAX, Supelco)를 이용하였으며, 비소 농도는 Hydride-generation AAS (Perkin Elmer 5100)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. IOCS에 의한 As(V) 및 As(III)의 흡착

배치 실험에 앞서 IOCS에 대한 XRD 분석 결과 모래를 피복한 철산화물은 열역학적으로 가장 안정한 형태의 산화철 광물인 적철석(hematite)인 것으로 판명되었다(Fig. 1). 적철석은 표면이 양전하를 띠며, ferrihydrite, goethite 등과 유사한 비소 흡착 능력을 지닌 것으로 알려져 있다(Jain *et al.*, 1999; Raven *et al.*, 1998; Driehaus *et al.*, 1998).

IOCS에 의한 As(V) 및 As(III)의 흡착 배치 실험 결과를 Fig. 2에 나타내었다. As(V)와 As(III) 모두 시간이 지남에 따라 IOCS에 흡착되어 용액 내에서의 함

량이 감소하는 경향을 보인다. 적철석에 대한 비소의 흡착은 정전기적 부착으로 표면의 작용기에 직접 화학적으로 결합하는 것으로 알려져 있다(Cornell *et al.*, 1996). IOCS에 의한 As(V)와 As(III)의 흡착 차이를 살펴보면, 두 종 모두 반응 7일 후 99% 이상 흡착 제거되는 것으로 나타나지만 실험 초기에는 As(V)의 흡착이 As(III)보다 더 우세한 것으로 나타났다. 예를 들면, 반응 3일 경과 후 As(V)는 99% 이상 흡착되어 10 µg/L 이하의 농도를 보이는 반면 As(III)는 약 180 µg/L의 농도를 보인다. 즉 철산화물에 의한 As(III)의 흡착은 As(V)에 비해 제한적임을 알 수 있다. 이는 서론에서 언급한 바와 같이 As(V)는 중성 pH 영역에서 주로 음이온 형태로 존재하는 반면 As(III)는 주로 중성 전하를 띠기 때문이다. 따라서 As(III)의 효과적인 제거를 위해서는 As(V) 형태로의 산화과정이 필요하다.

3.2. MOCS에 의한 As(III)의 산화

배치 실험에 앞서 MOCS에 대한 XRD 분석 결과 모래를 피복한 망간산화물은 약하게 결정화된 버네사이트(birnessite, MnO₂)인 것으로 판명되었다(Fig. 3).

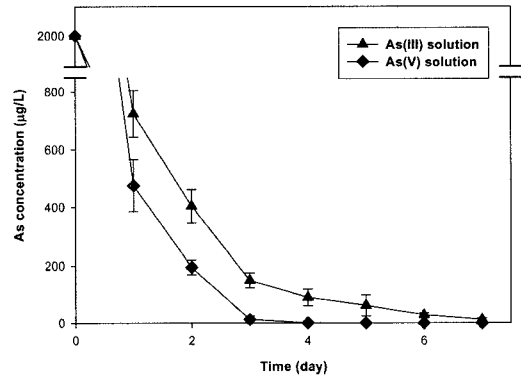


Fig. 2. Adsorption of arsenic species on IOCS.

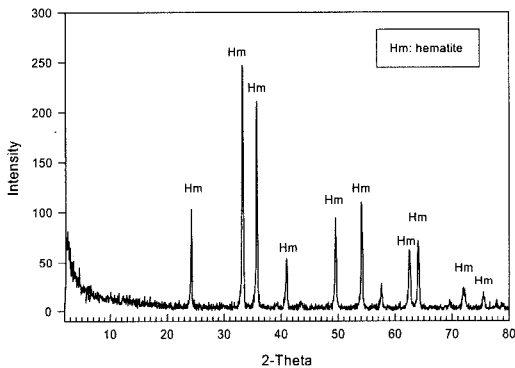


Fig. 1. XRD patterns of IOCS (Hm : hematite).

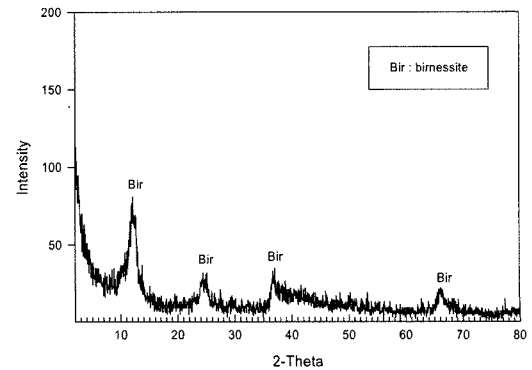


Fig. 3. XRD patterns of MOCS. Bir : birnessite

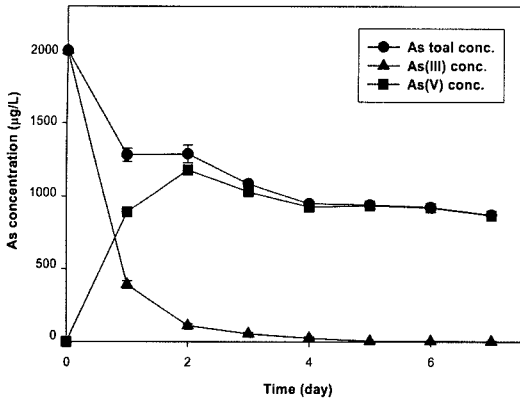


Fig. 4. Oxidation of As(III) by MOCS.

지하수 내의 As(III)는 용존산소나 광산화반응에 의해 자연적인 산화과정을 거치지만 반응속도가 느려 효과적인 처리를 위해서는 인위적인 산화제의 주입이 필요하다. 본 연구에서는 산화제로 망간산화물로 피복된 모래를 이용하였으며, 이에 의한 As(III)의 산화 정도를 평가한 배치 실험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 초기 2,000 µg/L의 As(III)는 시간이 지남에 따라 빠르게 산화되어 반응 시작 2일 후에는 약 90%의 농도 감소를 보인다. 반면 As(V)의 농도는 반응 시작 2일까지 빠르게 증가하다가 이후 소폭 감소하는 경향을 보인다. 시간 경과에 따른 비소 총 농도의 감소는 용존 비소가 MOCS에 흡착된 때문으로 판단된다. 따라서 As(III)의 농도 감소 및 As(V)의 농도 증가 경향으로 볼 때 MOCS가 As(III)의 산화에 크게 기여하며 IOCS와의 조합을 통해 As(III)를 보다 효과적으로 제거할 수 있을 것으로 예상된다.

3.3. IOCS와 MOCS 조합을 통한 As(III)의 제거

IOCS와 MOCS를 이용한 As(III)의 효과적인 제거를 위한 실험에 앞서 흡착제 혹은 산화제의 양, 반응 시간 등 비소 제거에 영향을 미치는 인자에 대한 예비 실험을 통해 최적 실험 조건을 도출하고자 하였으며, 그 결과에 따라 500 µg/L의 As(III) 50 mL를 처리하기 위한 IOCS의 양은 0.2 g, MOCS 1 g, 총 반응 시간은 6시간으로 설정되었다. IOCS와 MOCS 조합을 통한 As(III) 제거 배치 실험은 순차 제거와 동시 제거 두 가지 형식으로 진행되었으며, 방식은 2.2절에서 설명한 바와 같다.

순차 제거법에 의한 실험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 시간의 경과에 따라 As(III)의 농도가 급격하게 감소하여 반응 종료 후 초기 농도의 약 85%(최종 농도

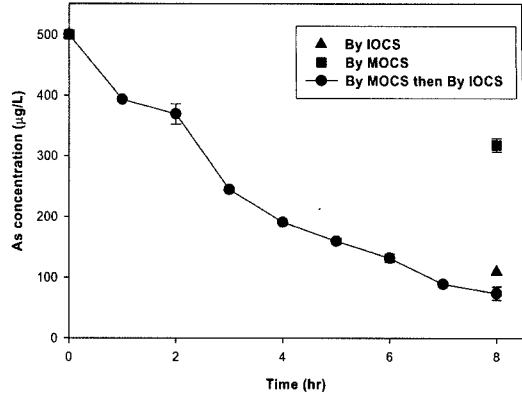


Fig. 5. Removal of As(III) by sequential removal method with IOCS & MOCS

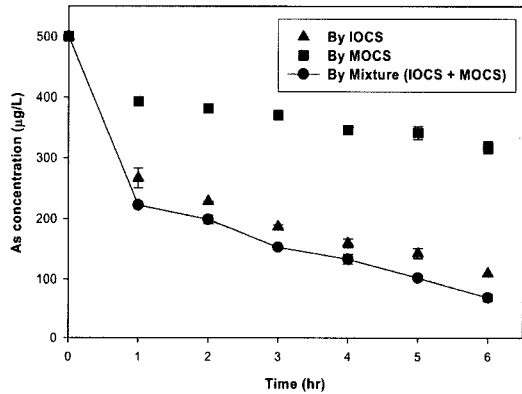
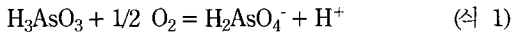


Fig. 6. Removal of As(III) by simultaneous removal method with IOCS & MOCS

74 µg/L)가 제거되었다. 이는 MOCS만 사용한 비교 실험에서의 효율(37% 제거)과 IOCS만 사용한 비교 실험에서의 효율(78%)에 비해 높은 것으로 나타났다. 0.2 g의 IOCS와 1 g의 MOCS를 혼합하여 6시간 동안 수행한 동시 제거법에서의 As(III) 농도 감소(최종 농도 70 µg/L) 경향 및 효율(86% 제거)은 순차 제거법과 큰 차이를 보이지 않고 매우 유사한 것으로 나타났다(Fig. 6). 하지만 실험 종료 후 최종 용액의 pH를 살펴 보면 동시 제거법이 6.0으로 중성 영역을 유지하는 반면 순차 제거법의 경우 4.5로 산성화되어 음용수 기준인 5.8~8.5의 범위를 벗어나는 것으로 나타났다. 순차 제거에서의 산성화 현상은 100 rpm에서의 교반에 의한 As(III)의 자연적인 산화과정(식 1)에 의한 것으로 판단된다. 반면 Christophe *et al.* (2002)의 연구에 의하면 망간산화물에 의한 As(III)의 산화과정은 수소이온의 소모를 동반하는 것으로 알려져 있으며, 이로 인해 동시 제거 방식에서는 산성화가 매우 미약하게 나

타나는 것으로 사료된다.



3.4. IOCP와 MOCP 조합을 통한 As(III)의 제거

철/망간 피복 모래의 경우 주로 폐광산 지역 등에서 비소 오염 지하수의 주변 확산을 막기 위한 투수성 반응 벽체의 흡착제로 사용하기 위해 개발되어 왔으나, 방글라데시, 베트남 등과 같은 저개발국의 일반 가정에서 식수 내 비소의 저감을 위해 간편히 활용하기에는 밀도가 높고, 교체가 어려운 등 여러 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점을 극복할 수 있는 대체물질로서 폴리프로필렌의 사용 가능성을 피복 모래와 동일한 조건의 실험을 통해 평가하였다.

철산화물 피복 폴리프로필렌(IOCP)과 망간산화물 피복 폴리프로필렌(MOCP) 각각의 As(III) 흡착과 산화능력을 측정된 배치 실험에서 IOCP는 IOCS보다 약간 우세한 흡착능력을 보였으며(Fig. 7), MOCP 역시 MOCS보다 우수한 산화능력을 보였다. 특히 MOCS의

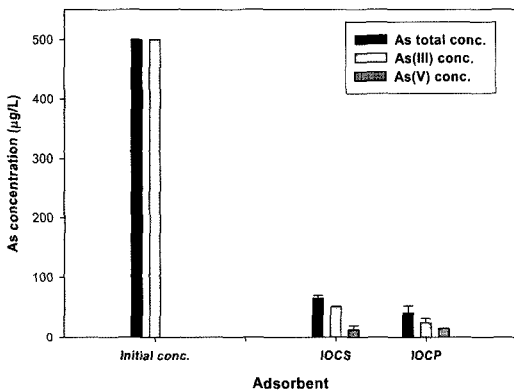


Fig. 7. Adsorption of As(III) on IOCP.

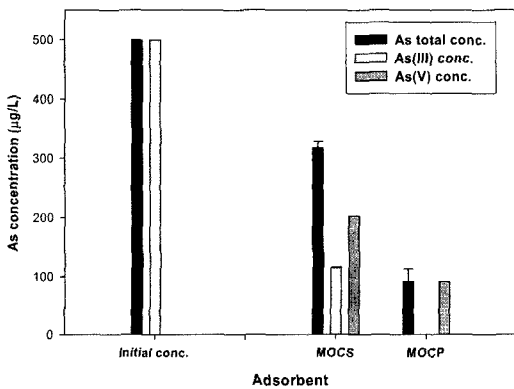


Fig. 8. Oxidation of As(III) by MOCP.

경우 실험 종료 후 약 20%의 As(III)가 산화되지 않고 남아 있는 반면 MOCP에서는 모든 As(III)가 산화되었으며, 흡착되는 비소의 양도 2배 이상 많은 것으로 나타났다(Fig. 8).

IOCP와 MOCP 조합을 이용한 동시 제거 실험 결과를 살펴 보면 실험 시작 5시간 경과 후 용액 내 비소 농도가 USEPA 음용수 기준인 10 µg/L 이하로 감소하였고, 6시간 후 99% 이상 제거되는 것으로 나타났다(Fig. 9). 반면 피복 모래를 사용한 경우 실험 종료 후에도 70 µg/L의 비소가 제거되지 않고 남아 있어 동일 조건 하에서 피복 폴리프로필렌에 의한 As(III)의 제거가 피복 모래를 이용한 경우보다 우수한 것으로 평가되었다.

피복 모래와 피복 폴리프로필렌의 비소 흡착 능력 차이를 검증하기 위해 초기 As(III)의 농도를 10,000 µg/L로 높이고, 흡착제의 양은 상기와 동일(IOCP와 IOCS 각 0.2 g, MOCP와 MOCS 각 1 g)하게 유지하여 동시 제거법으로 최대흡착량 평가 실험을 수행하였다. 그 결과 피복 모래의 경우 약 8시간이 경과하면서 최대흡착이 이루어져 이후 시간 경과에 따른 용액 내 비소 농도의 변화가 없었으며, 피복 폴리프로필렌의 경우 5시간 전후에서 최대흡착이 일어나는 것으로 나타났다(Fig. 10). As(III)의 최대흡착량을 비교하면 피복 모래의 경우 초기 10,000 µg/L에서 최대흡착 후 용액 내 함량이 약 6,000 µg/L로 40%의 흡착이 일어난 반면 피복 폴리프로필렌의 경우 약 80%의 흡착이 일어났다. 이를 흡착제 단위 그래프당(철 산화물 피복제와 망간 산화물 피복제의 양 비를 1:5로 유지) 흡착량으로 환산해 보면 피복 모래의 경우 167 µg As(III)/g, 피복 폴리프로필렌의 경우 332 µg As(III)/g 두 배 정도 높게

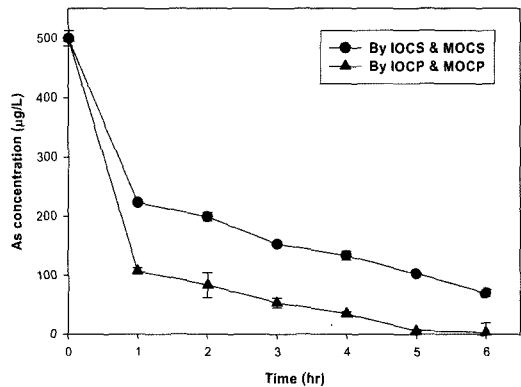


Fig. 9. Removal of As(III) by simultaneous removal method with IOCP & MOCP.

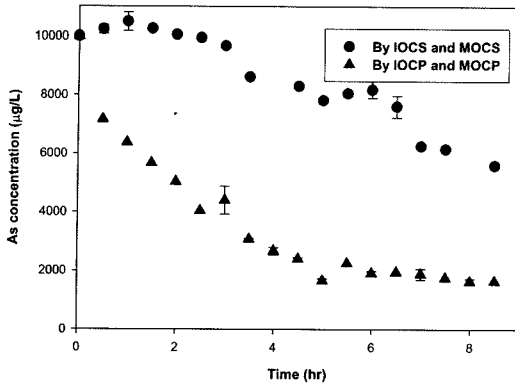


Fig. 10. Maximum removal capacity of adsorbents for As(III).

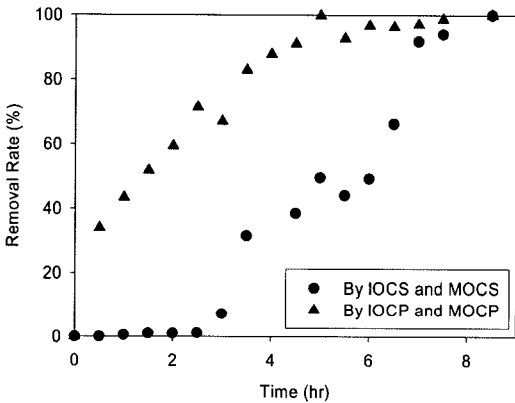


Fig. 11. Removal rate of adsorbents for As(III).

나타났다.

시간 경과에 따른 비소 농도 변화 경향을 보면 실험 초기에 피복 폴리프로필렌에 의한 제거가 피복 모래보다 더 빠르게 일어나는 것으로 보인다. 이를 확인하기 위해 최대 흡착이 이루어지기까지 제거 속도의 변화를 시간에 따라 도시해 보았다(Fig. 11). 그림에 나타난 것처럼 피복 폴리프로필렌의 경우 실험 초기부터 빠르게 제거가 진행되어 6시간 이내에 흡착이 완료되는 반면 피복 모래의 경우 실험 시작 후 2시간까지 흡착 반응이 매우 미약하다가 이후 8시간까지 선형에 가까운 형태로 반응이 진행된다. 즉, 피복 폴리프로필렌은 반응 초기에 피복 모래보다 빠르게 많은 양의 As(III)를 흡착, 제거하는 것으로 나타났다. 이는 폴리프로필렌의 낮은 비중으로 동일 무게의 모래보다 표면적이 넓은 특성 때문으로 판단된다.

이상의 결과에서 나타났듯이 피복 폴리프로필렌은 피복 모래보다 뛰어난 As(III)의 산화 및 제거 능력을 가지고 있으며, 가볍고, 저렴하며, 수명이 다했을 때 교

체의 용이성 등 여러 장점을 가지고 있어 비소로 오염된 지하수를 식수로 사용하는 가정에서 손쉽게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 비소오염 제어를 위해 기존에 주로 활용해 왔던 철산화물 피복 모래를 이용한 방식이 As(III)로 오염된 지하수에는 효율이 다소 제한적이며, 이를 보완하기 위해 망간 산화물 피복 모래를 조합하여 As(III)의 As(V)로의 산화과정을 보충하고자 하였다. 또한 철/망간 피복 모래의 경우 주로 폐광산 지역 등에서 비소 오염 지하수의 주변 확산을 막기 위한 투수성 반응 벽체의 흡착제로 사용하기 위해 개발되어 왔으나, 방글라데시, 베트남 등과 같은 저개발국가의 일반 가정에서 식수 내 비소의 저감을 위해 간편히 활용하기에는 비중이 크고, 교체가 어려운 등 여러 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점을 극복할 수 있는 대체물질로서 폴리프로필렌의 사용 가능성을 평가하고자 일련의 배치 실험들을 수행하였다.

실험 결과 망간 산화물 피복 모래는 As(III)의 산화에 크게 기여하였으며, 철 산화물 피복 모래와 혼합하여 동시 제거 방식으로 처리했을 때, As(III)의 효율적인 제거 및 처리 후 지하수의 산성화를 방지하는 효과를 나타냈다. 또한 동일한 조건에서 피복 모래 대신 피복 폴리프로필렌을 사용했을 때, As(III)의 산화, 제거율, 제거 속도 면에서 효율이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 아울러 폴리프로필렌은 가볍고, 저렴하며, 수명이 다했을 때 교체의 용이성 등 여러 장점을 가지고 있어 비소로 오염된 지하수를 식수로 사용하는 가정에서 손쉽게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 과학재단(국제공동연구)과 과학기술부(국가지정연구실)의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Berg, M., Tran, H. C., Nguyen, T. C., Pham, H. V., Schertlenib, R. and Giger (2001) Arsenic contamination of groundwater and drinking water in Vietnam. *Environ. Sci. Technol.*, v. 35, p. 2621-2626.
 Christophe T, Lairent C., Dirk B. and Alain C. (2002)

- Arsenic(III) Oxidation by Birnessite and Precipitation of Manganese(II) Arsenate. *Environ. Sci. Technol.*, v. 36, p. 493-500.
- Cornell, R. M. and Schwertmann, U. (1996) *The Iron Oxides-structure, Properties, Reactions, Occurrence and Uses*. VCH Publishers, New York, 573p.
- Driehaus, W. and Jekel, M. (1998) Determination of As(III) and total inorganic arsenic by on-line pretreatment in hydride generation atomic absorption spectrometry. *J. anal. Chem.*, v. 343, p. 352-356.
- Jain, A., Raven, K. P. and Loeppert, R. H., *Environ. Sci. Technol.* (1999) Arsenite and Arsenate Adsorption on Ferrihydrite: Surface Charge Reduction and Net OH-Release. *Stoichiometry*, v. 33, p. 1179-1184.
- Khan, A.H., Rasul, W. B., Munir, A. K. M., Habibuddowla, M., Alauddin, M., Newaz, S. S. and Hussam (2000) Application of a simple arsenic removal method for groundwater of Bangladesh. *J. Environ. Sci. Health, A*, v. 35, p. 1021-1041.
- Lee, Y. H., Um, I. and Yoon, J. (2003) Arsenic(III) Oxidation by Iron(VI) (Ferrate) and Subsequent Removal of Arsenic(V) by Iron(III) Coagulation. *Environ. Sci. Technol.*, v. 37, p. 5750-5756.
- Manning, B. A., Scott, E. F., Benjamin, B. and Donald, L. S. (2002) Arsenic(III) Oxidation and Arsenic(V) Adsorption Reactions on Synthetic Birnessite. *Environ. Sci. Technol.*, v. 36, p. 976-981.
- Nickson, R., McArthur, J., Burgess, W. and Ahmed, K. M. (1998) Arsenic poisoning of Bangladesh groundwater. *Nature*, v. 395, p. 338.
- Raven, K. P., Jain, A. and Loeppert, R. H. (1998) Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: kinetics, equilibrium, and adsorption envelopes. *Environ. Sci. Technol.*, v. 32, p. 344-349.
- Thirunavukkarasu, O. S., Viraraghavan, T. and Subramanian, K. S. (2003) Arsenic removal from drinking water using iron oxide-coated sand, water, air, and soil pollution, v. 142, p. 95-111.
- Viraraghavan, T., Subramanian, K. and Aruldoss, J. (1999) Arsenic in drinking water-problems and solutions. *Water Sci. Technol.*, v. 40, p. 69-76.
- Wolfgang, D., Reiner, S. and Martin, J. (1995) Oxidation of arsenate(III) with manganese oxides in water treatment. *Wat. Res.*, v. 29, p. 297-305.
- Zouboulis, A., Kydros, K. and Matis, K. (1993) Arsenic (III and V) removal from aqueous solutions. *Sci. Technol.*, v. 28, p. 2449-63.

2005년 8월 9일 원고접수, 2005년 9월 22일 게재승인.