

천연광물의 양극성 표면개질을 이용한 상수원수 중 중금속제거 특성

김남열 · 김영희†

호서대학교 벤처대학원 융합과학기술학과

Heavy Metal Removal from Drinking Water using Bipolar Surface Modified Natural Mineral Adsorbents

Nam-youl Kim and Younghee Kim†

Department of Convergence Engineering, Graduate School of Venture, Hoseo University

ABSTRACT

Objectives: The most commonly detected heavy metals in rocks and soils, including Pb, Cd, Cu, Fe, Mn and As, are representative pollutants discharged from abandoned mines and have been listed as potential sources of contamination in drinking water. This study focused on increasing the removal efficiency of heavy metals from drinking water resources by surface modification of natural adsorbents to reduce potential health risks.

Methods: Iron oxide coating and graft polymerization with zeolites and talc was conducted for bipolar surface modification to increase the combining capacity of heavy metals for their removal from water. The removal efficiency of heavy metals was measured before and after the surface modification.

Results: The removal efficiency of Pb, Cu, and Cd by surface modified zeolite showed 100, 92, and 61.5%, respectively, increases compared to 64, 64, and 38% for non-modified zeolite. This implies that bipolar surface modified natural adsorbents have a good potential use in heavy metal removal. The more interesting finding is the removal increase for As, which has both cation and anion characteristics showing 27% removal efficiency where as non-modified zeolite showed only 2% removal.

Conclusions: Zeolite is one of the most widely used adsorptive materials in water treatment processes and bipolar surface modification of zeolite increases its applicability in the removal of heavy metals, especially As.

Key words: Iron oxide coating, graft polymerization, heavy metal removal, natural zeolite, surface modification

I. 서 론

우리나라의 상수도 보급률은 2012년말 기준 98.1%로 OECD 국가 중 상위권에 속하지만, 도시지역(99.9%)에 비해 농어촌 지역은 87.8%로 지역별 편차가 매우 심한 실정이다. 특히 먼 단위 이하의 상수도 보급률은 62.2%에 불과한 수준이다.¹⁻³⁾

또한 농촌지역 소규모 상수도시설의 주요 수원지

인 지하수 오염현황을 보면, 농촌지역 관측망이 타 지역에 비해 상당히 높은 수질기준 초과율 나타남을 확인할 수 있다. 이는 농약, 비료 등에서 기인한 오염물질 유입으로 인한 토양 오염 및 지하수 오염으로 인한 것으로 판단된다.⁴⁻⁵⁾

특히, 마을상수도의 경우 운영상의 한계로 인한 수질기준 불만족 사례가 종종 발생하며, 이에 따라 운전기술이 용이하고 유지보수가 쉬운 기술에 대한 수

†Corresponding author: Department of Convergence Engineering, Graduate School of Venture, Hoseo University, 2497 Nambu beltway, Seocho-gu, Seoul, Korea, Tel: +82-2-2059-2354, E-mail: yhkim514@hoseo.edu
Received: 20 September 2019, Revised: 10 October 2019, Accepted: 11 October 2019

요가 지속적으로 증가하고 있다.^{6,7)} 이에 따라 농촌 지역 지하수 오염특성을 고려하여 중금속 및 음이온성 물질(질산성질소, 인산이온 등)의 처리에 초점을 맞춘 정수처리 기술이 요구된다.⁸⁻¹⁰⁾

현재까지 수중의 유해 이온성 물질 제거를 위해 흡착, 화학적 침전, 이온교환, 막 여과 등 다양한 수처리 기술의 개발 및 연구가 진행되어왔다. 특히, 흡착 소재를 이용한 물리화학적 처리방법은 다른 공정에 비해 편리하고 운용이 쉬우며, 공정 설계의 단순화 등 많은 장점을 갖고 있어 오염 물질의 제거에 널리 사용되고 있다. 흡착제는 크게 물리적 흡착제와 화학적 흡착제로 나눌 수 있는데, 활성탄, 제올라이트 등의 물리적 흡착제는 가격이 저렴하고 사용이 간편하나 성형 가공 면에서 한계가 있어 이를 보완하고 흡착능력을 극대화하기 위해 이온교환방법 등을 이용한 화학적 흡착제의 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 이온교환수지는 흡착용량이 우수하고 선택적으로 오염물질의 제거가 가능한 반면 유지관리가 어려우며, 처리시설의 규모 등 가격이 높아 경제성이 떨어지는 단점이 있다.¹¹⁻¹²⁾

반면 제올라이트는 가격이 비싸지 않고 활용이 편리한 장점을 바탕으로 다양한 방법의 표면개질을 통한 중금속등의 오염물질제거에 활용되고 있다. 금속 페라이트를 이용한 제올라이트의 자성표면개질은 구리의 제거나¹³⁾ 암모늄이온의 제거에 활용되기도 하고¹⁴⁾ 마그네슘과 제올라이트를 접목한 표면개질을 통하여 중금속뿐만 아니라 고농도의 유기물 제거효율을 향상시킨 사례도 있다.¹⁵⁾ 표면개질은 천연광물인 제올라이트뿐만 아니라 생물표면이나 톱밥등의 표면에 표면정질을 변화시킴으로써 미생물 담체로서의 활용성을 높이거나¹⁶⁾ 생물흡착제료의 가능성을 확보하기도 하였다.¹⁷⁾

이 연구는 양극 처리표면 개질에 의한 물리적 흡착과 화학적 흡착의 장점을 결합하여 제올라이트의 표면 흡착력을 변화시킴으로서 수처리능력을 높이는 데 중점을 두었다. 기존의 연구에서 중금속의 양이온 또는 음이온을 개별적으로 제거하는 것외에⁸⁻¹⁰⁾ 본 연구에서는 제올라이트 및 운모와 같은 천연광물에 대해 산화철에 의한 양이온성 표면개질 및 접목 중합에 의한 음이온성 표면개질을 수행하고 중금속 물질의 제거 특성을 조사하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 산화철-접목중합 표면개질 매커니즘

산화철-접목중합 표면개질의 매커니즘은 Fig. 1과 같이 먼저 $FeCl_3$ 수용액을 이용하여 광물 표면 양이온성 금속을 산화철로 치환하여 산화철 코팅을 실시한다. 이후 개시제를 첨가하여 OH라디칼을 생성시키면, 생성된 OH라디칼에 의해 산화철 구조의 OH 결합이 끊어지게 된다. 이후에 Methacrylic acid를 첨가하게 되면 C=C 이중결합이 끊어지면서 산화철과 결합하여 접목 중합이 진행되어 긴 사슬구조를 형성하게 된다. 이 때 가장 끝단에는 카르복실기(-COOH)가 형성되어 표면에 음전하를 가지게 된다. 이 반응은 모든 산화철 표면에 일어나지 않기 때문에, 수중에서 일부 산화철 작용기의 (+)전하와 카르복실기의 (-)전하가 공존하는 양극성의 표면을 가지게 된다.

2. 천연광물의 표면개질을 위한 실험방법

본 연구에서는 대표적인 양이온과 음이온 동시 선택성을 가지는 흡착제 개발을 위해 Fig. 2의 절차에 따라 천연광물 흡착소재인 제올라이트(Zeolite), 및 운모(Talc)를 대상으로 접목중합 표면개질을 실시하였다. 접목중합 표면개질은 오래전부터 산업계에서 사용되어 온 고분자 합성방법으로, 본 연구에서는 산화철 코팅과 접목중합의 두 단계로 수행하였다.

산화철 코팅은 염화제이철($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) 20wt% 용액을 이용하여 수행하였다. 염기성 조건에서 장시간 교반하며 수분을 날려준 후 고온에서 소성하면 광물소재 표면에 산화철(FeO)가 코팅되며, 수중에서 FeO^+ 형태의 작용기를 가져 음이온 선택성을 가지게 된다.

산화철 코팅이 완료된 표면에 $Na_2S_2O_5$ 와 $Na_2S_2O_8$ 수용액을 첨가하면 반응 개시제(Initiator)의 역할을 하여 수중에 라디칼($SO_4 \cdot$, $S_2O_8 \cdot$)을 형성한다. 이 라디칼들은 OH·을 유도하며, OH·의 강한 산화력으로 주변의 산화철 표면과 공극 내부의 이중결합을 끊어 불안정한 상태로 유도한다. 이 때 Methacrylic Acid는 C=C 이중결합을 깨고 안정화를 유도하기 위해 주변의 이온과 산화철 표면 또는 기공 내부의 주변 이온과 결합을 형성한다.

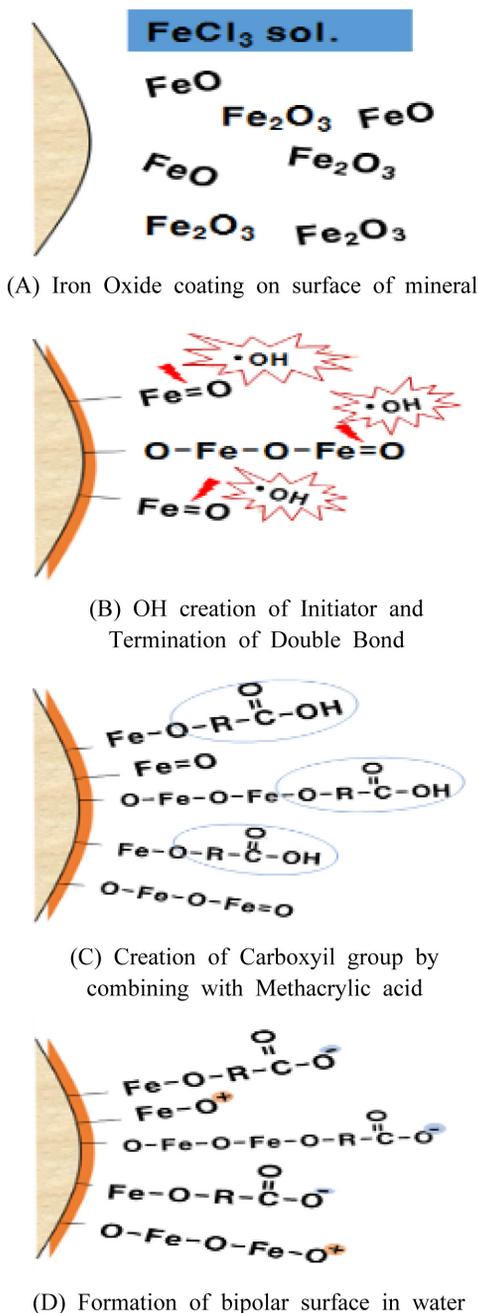


Fig. 1. Mechanism for bipolar surface modification using the iron oxide-graft polymerization

3. 표면개질 흡착제의 중금속 흡착실험 방법

양극성 표면 개질된 흡착제에 의한 중금속 제거 성능을 확인하기 위해 상수원수 중 중금속이 함유

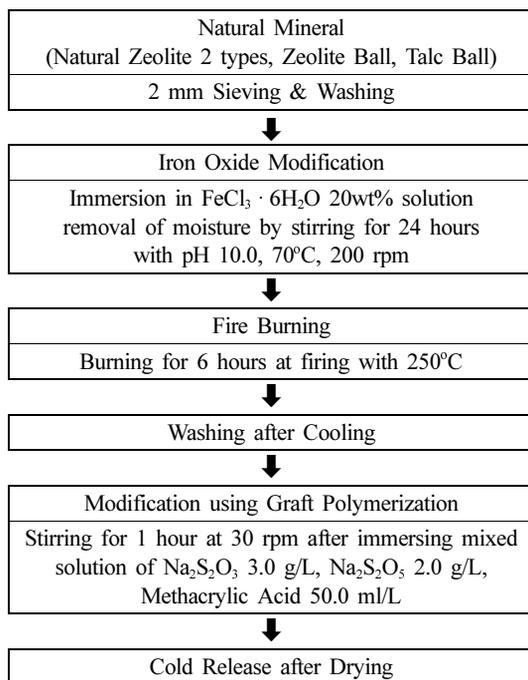


Fig. 2. Surface Modification Procedure of Natural Mineral Absorbent

되었을 경우를 가정하여 500 mL의 증류수에 10 mg-Cu/L, 1.0 mg-Cd/L, 1.0 mg-As와 같은 중금속을 혼합하여 시험용액을 제조하였다. 이때 사용한 시약은 아래와 같다(Cu(NO₃)₂ · 3H₂O (Sigma-Aldrich, purity ≥99%), Cd(NO₃)₂ · 3H₂O (Sigma-Aldrich, purity ≥99%), Na₂HAsO₄ · 7H₂O (Sigma-Aldrich, purity ≥98%)). 중금속을 함유한 제조수 500 mL를 산화철 및 점묵중합으로 개질된 4개의 천연광물(국내 과립 모양 제올라이트: 제올라이트 B, 몽골리아 과립모양 제올라이트 A, 국내 공모양 제올라이트 및 국내 공모양 탈크) 각각 5 g과 반응시켰다.

수소이온농도 pH 5~6, 온도 20±2°C에서 반응 후 600초 이내 시료 분석하였다. 중금속의 흡착제거는 UV-Vis 흡수 분광기(DR 5000, Hach Co., and USA)을 사용하여 중금속의 흡착정도를 측정하였다. 또한 개질전과 후 천연광물을 표면 특성을 알아보기 위하여 BET분석(ASAP2020, MICROMERITICS Co., and USA)을 하였다.

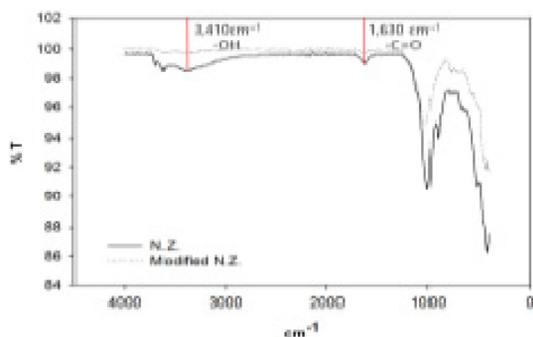


Fig. 3. FT-IR Analysis of Surface Modified Zeolite A using Graft Polymerization

III. 결과 및 고찰

1. 개질 전과 후 표면특성

천연광물의 표면에 양이온과 음이온 동시 선택성을 가지는 흡착제를 표면개질하여 특성을 관찰한 결과는 다음과 같다.

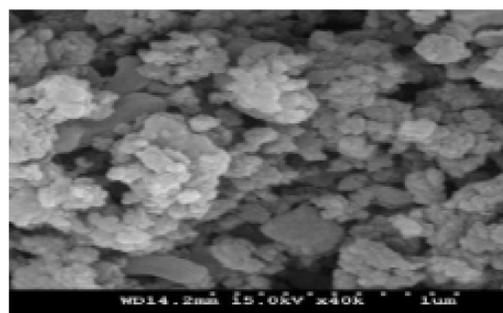
1.1. 양극성 표면개질의 확인

천연광물 접목중합 반응으로 인해 광물소재 표면에 음전하를 띤 카르복실기가 생성될 것으로 예상되며, 이를 확인하기 위해 FT-IR 분석을 실시하였다. Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 C=O결합의 $1,693\text{ cm}^{-1}$ 부근과 OH결합의 $3,387\text{ cm}^{-1}$ 부근의 피크의 관찰을 통하여 카르복실기의 형성을 유추할 수 있다. 특히 천연 제올라이트 A 소재에서 카르복실기 형성을 뚜렷하게 확인할 수 있었다. 제올라이트 기반 소재에서 공통적으로 관찰되는 $1,634, 1,013\text{ cm}^{-1}$ 부근의 피크는 제올라이트 소재의 고유 피크로 판단된다.

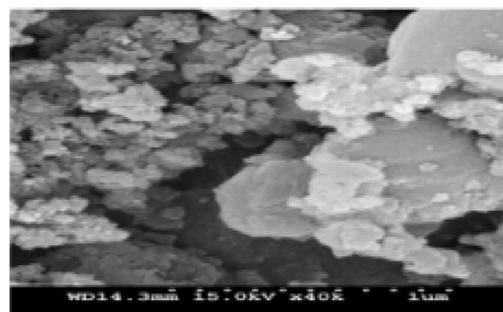
OH 및 C=O 그룹은 주요기능 그룹의 범주에 속하지 않으며 약 1000 cm^{-1} 부근의 피크는 비록 약하지만, 근본적인 제올라이트 특성을 나타내므로, 샘플이 없고 표면개질 이전에 불일치 C=O가 발생한다. 따라서 제올라이트의 기본 특성인 이온교환메커니즘이 아닌 표면개질을 통해 양이온과 음이온을 동시에 제거할 수 있는 물질로서 제올라이트의 흡착력을 확인하기 위한 표면개질을 완성 하였다.

1.2. 개질된 천연광물의 표면특성

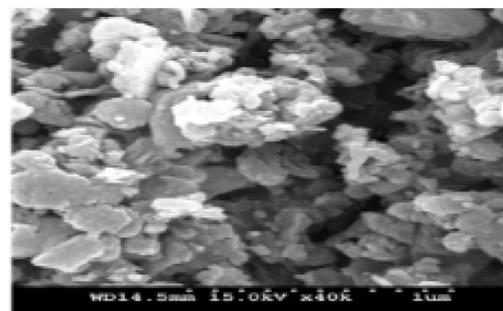
개질된 천연광물의 표면 관찰은 FE-SEM 분석을



(A) Before modification



(B) After iron oxide coating



(C) After iron oxide coating and graft polymerization

Fig. 4. Surface structure of natural Zeolite in each stage of surface modification

이용하였다(Fig. 4). 개질 전 제올라이트 결정구조는 Fig. 4의 A)와 같이 나타났으며, 산화철 코팅 후에는 기존 골격구조를 유지하면서 표면에 기존보다 큰 입자들이 불규칙적으로 형성되었음을 확인하였다(Fig 4의 B)). 또한 접목중합 후에는 개질전보다 기본 입자크기가 커지고 전체적인 입자 분포가 고르게 형성되어 있는 것을 확인하였다(Fig. 4의 C)).

Table 1. Changes of BET Surface Area & Pore Size by surface modification

Division	Sample Condition	Natural Zeolite A	Natural Zeolite B	Talc Ball
BET Surface (m ² /g)	Before Modification	41.3815	37.3171	39.8991
	After Modification	4.4489	6.5529	34.9939
Pore size (nm)	Before Modification	81.0254	84.0172	83.8950
	After Modification	186.3590	158.9102	80.7832

*Natural Zeolite A: Mongolia, Natural Zeolite B : Domestic

1.3. 천연광물 개질 후 표면적 및 기공크기

표면개질 전과 후의 천연광물의 표면적 및 기공사이즈 차이를 알아보기 위해 BET (Brunauer Emmett Teller), 비표면적 분석을 실시하였다. 분석 결과, 천연 제올라이트 A, B의 경우 점목중합 개질 후 BET 표면적이 크게 감소하고 기공 크기는 2배 이상 증가한 것으로 확인되었다.

Talc ball의 경우 pore size가 감소하였는데 BET도 감소한 이유는 해당 Talc ball의 BET 표면적 및 pore size 값의 변화는 제올라이트 2종에 비해 미미하였다(BET 약 5 m²/g 감소, pore size 약 3 nm 감소). 특히 pore size의 경우 샘플간의 차이라고 봐야 할 것으로 보이며, BET가 Talc ball (운모 불)의 경우 Zeolite A와 B에 비해서 약 5-8배 이상 큰데 중금속 제거율은 왜 Zeolite A와 B가 훨씬 높은 이유는 Talc ball (운모 불)은 제조 과정에서 분말 형태의 운모 가루를 가공하여 제작한 것으로 기존 광물의 쪼개짐 특성을 잃고 단단한 구 형태로 가공되었기 때문으로 이러한 형태적인 특징으로 제올라이트에 비해 상대적으로 낮은 거칠기를 가져 표면 개질이 이루어지기 힘든 것으로 판단된다. 실제로 Talc ball (운모 불)의 BET 표면적 변화는 매우 낮게 나타났는데(약 5 m²/g 감소) 이를 토대로 Talc ball (운모 불)의 경우 표면개질 과정이 원활히 이루어지지 않은 것으로 추정된다. BET 표면적 및 기공 크기 변화는 Table 1과 같다.

2. 표면개질 광물의 중금속 제거 평가

개질을 하지 않은 천연광물을 이용하여 카드뮴 제

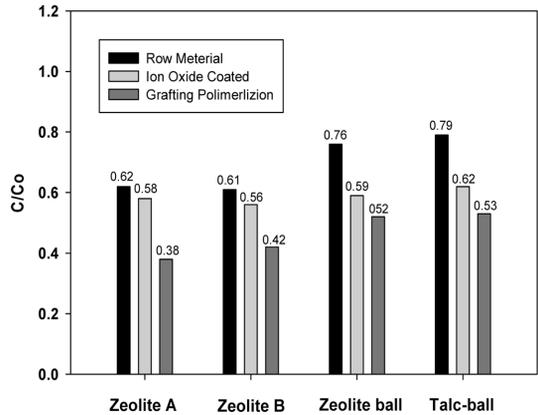


Fig. 5. Cd removal Efficiency by Surface Modification. C and C₀, indicate an initial concentration (before reaction) and a residual concentration (after reaction)

거효율 실험 결과 Fig. 5와 같이 제올라이트의 종류와 형태에 따라서 각각 38, 39, 24, 21%의 제거효율을 보였고 제올라이트 A의 제거효율이 가장 높게 나타났으며, 운모불의 제거효율이 가장 낮게 나타났다. 표면개질 처리에 따른 제거효율 비교 결과, 점목중합 개질 제올라이트>산화철 개질 제올라이트>미처리 순으로 제거효율이 높게 나타났다.

Fig. 6과 같이 점목중합 개질한 천연 제올라이트 A의 구리 제거효율은 약 92%로 매우 높게 나타났고, 점목중합 천연 제올라이트 B의 경우에도 약 90%가 제거되어 높은 효율을 보였다. 천연광물을 이용하여 구리 제거효율 실험결과 개질을 하지 않은 조건 제올라이트 A 64%, 제올라이트 B 57%의 원산지에 따른 차이는 미미한 것으로 확인되었다. 표면개질 전/후 따른 제거효율 비교 결과, 점목중합 개질 제올라이트>산화철 개질 제올라이트>미처리 순으로 제거효율이 높게 나타났다. 이는 점목중합 표면개질에 따른 양극성(Bipolar)형성이 기공확장으로 유효경이 확대되고 물질의 흐름이 원활하여 흡착능력이 향상된 것으로 판단된다. 카드뮴 제거실험의 결과에서도 천연 제올라이트의 점목중합 개질 후 처리효율이 불 형태의 점목중합 흡착제의 제거효율보다 높게 나타났는데, 이는 앞서 확인한 점목중합 개질 후의 기공크기 확장으로 인한 효과일 것으로 판단된다.

천연 제올라이트의 Al-Si 구조 약화로 기공 크기가 확장됨에 따라 비교적 입자사이즈가 큰 중금속의

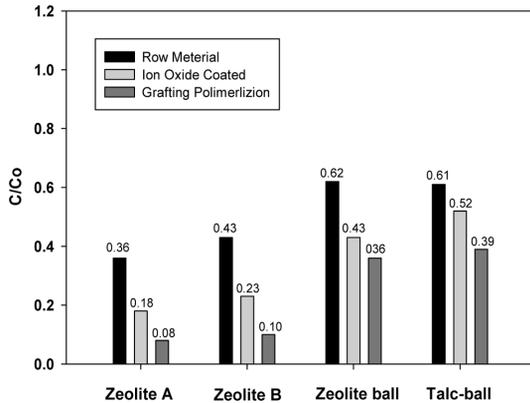


Fig. 6. Cu removal Efficiency by Surface Modification. C and C₀, indicate an initial concentration (before reaction) and a residual concentration (after reaction)

처리 효율이 높아졌을 것으로 판단된다. 다만 같은 제올라이트 소재인 제올라이트 볼의 경우에는 이미 볼 형태의 가공과정을 거치면서 내부 골격구조가 강화되어 큰 변화를 보이지 않은 것으로 판단된다. 또한 운모볼이나 제올라이트볼의 경우 구형표면으로 인한 거칠기의 차이로 인해 개질의 효율이 낮아질 수 있으며, 이에 따른 결과로 제거효율이 다소 낮아질 수 있을 것으로 보인다.

Fig. 7과 같이 천연광물을 이용하여 비소 제거효율 실험결과 개질을 하지 않은 조건 제올라이트 A, B 2%, 원산지에 따른 차이는 미미한 것으로 확인되었다. 접목중합 개질 후 제거효율의 경우 제올라이트 A 27%, 제올라이트 B 22% 개질전 보다 높은 효율로 확인 되었다. 또한 국내산보다 몽골산이 더 높은 효율의 경향성을 보였다. 표면개질 전/후 따른 제거 효율 비교 결과, 접목중합 개질 제올라이트>산화철 개질 제올라이트>미처리 순으로 제거효율이 높게 나타났다. 이는 앞전에 카드뮴 및 구리 제거효율 실험에서도 같은 경향성을 나타냈다. 그 이유는 앞서서도 언급한 바와 같이 접목중합 표면개질에 따른 양극성(Bipolar) 형성이 기공확장으로 유효경이 확대 되고 물질의 흐름이 원활하여 흡착능력이 향상된 것으로 판단된다.

Jar test를 통해 천연광물 흡착제의 종류 및 개질 단계별 샘플을 대상으로 각종 중금속의 제거효율을 확인하였으며, 이중 천연 제올라이트의 산화철 접목

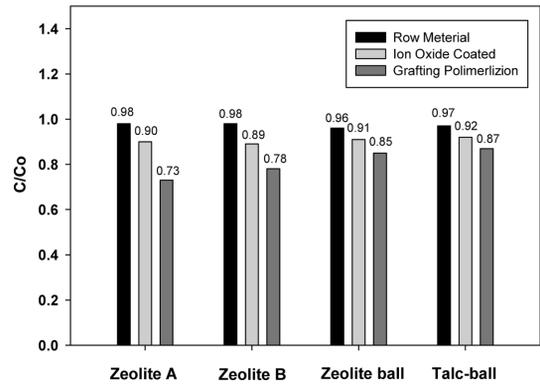


Fig. 7. As removal Efficiency by Surface Modification. C and C₀, indicate an initial concentration (before reaction) and a residual concentration (after reaction)

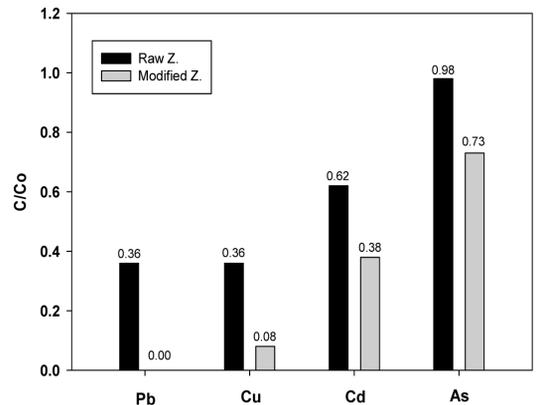


Fig. 8. Heavy metal removal efficiency by surface modified zeolite A using iron oxide graft polymerization. C and C₀, indicate an initial concentration (before reaction) and a residual concentration (after reaction)

중합 개질 결과 중금속 제거능이 가장 향상되는 것을 확인하였다.

이후 실험은 천연 제올라이트에 산화철 접목중합 코팅을 한 흡착제를 대상으로 진행하였다. 최적 흡착제 도출을 위한 실험을 통해 천연 제올라이트 기반의 표면개질 흡착제제가 가장 높은 오염물질 제거 성능을 나타냄을 확인하였다. 시스템을 통해 개발한 흡착제의 FT-IR 분석을 통해 개질 제올라이트의 표면 변화를 관찰하였으며, 다음 그림과 같이 표면에 -C=O 이중결합 및 -OH 결합 작용기가 확인되었다.

또한 생산된 제올라이트 흡착제를 이용하여 Jar test를 통해 중금속 제거효율을 확인하였다. Fig. 8과 같이 Pb, Cu, Cd, As를 대상으로 한 실험에서 Pb 100%, Cu 92%, Cd 61.5%, As 27.0%의 제거 효율을 보였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 산화철 개질 및 접목중합 개질과정을 통해 천연 제올라이트 및 운모볼의 표면을 개질하였으며, 개질 전과 후의 실험을 통한 중금속 제거 특성을 파악하였다.

1. FT-IR 분석을 통해 제올라이트 광물표면에 카르복실기가 형성됨을 확인하였으며, BET분석을 통해 개질 후 BET표면적이 감소하고 내부 기공이 확장됨을 확인하였다.

2. 접목중합 양극성 천연광물을 이용하여 납, 구리, 카드뮴, 비소의 제거실험 결과 각각 100, 92, 62, 27%의 제거효율을 확인하였으며, 모든 중금속이 천연 제올라이트보다 높은 효율로 제거가 가능함을 확인하였다.

3. 개질을 하지 않은 천연광물을 이용하여 카드뮴 제거효율 실험 결과 제올라이트 A의 제거효율이 가장 높게 나타났으며, 운모볼의 제거효율이 가장 낮게 나타났다. 표면개질 처리에 따른 제거효율 비교 결과, 접목중합 개질 제올라이트>산화철 개질 제올라이트>미처리 순으로 제거효율이 높게 나타났다.

4. 수중에서 수화물 형태로 음이온(Negative Charge)을 띠는 비소(As)를 대상으로 제거 실험을 한 결과 개질 전 약 2% 이하의 낮은 제거효율에서 접목중합 개질 후 27%의 제거효율을 보여 산화철에 의한 양이온성 개질이 음이온성 중금속의 제거가 가능함을 확인하였다.

따라서 천연 광물 제올라이트 표면개질을 통해 상수원수 중 중금속 물질 농도 제거 효율 향상이 가능할 것으로 판단된다.

References

1. Yoon SM. A Study of Water-Quality Characteristics of Simple Water works in Rural Area (Focusing on Hadong-gun). Thesis for Master. Gyeongnam

National University of Science and Technology. 2011.

2. Ministry of Environment. Water Supply Statistics. 2013.

3. Hwang ST. Policy Direction and Improvement Necessity of Outdated Water Supply System. Journal of water policy and Economy. 2016; 26(April): 53-60.

4. Park YS. A Study on Long Term Replacement Maintenance Plan for Multi-Region Water Pipelines considering Economics, Thesis for Master, University of Seoul. 2014.

5. Jeong SY. Decision method of efficient leak detection time zone using water pipe flow data of water supply system, Thesis for Master, Pusan national university. 2015.

6. Kim JE, Oh JW, Kang KB. Analysis of management status and water quality on small water system in Korea. Korean Society of Environmental Engineering. Autumn Conference. 2016; 353-357.

7. Kang M, Choi BW. Perception on Ground Water Quality of Small Scale Water Supply Facility Users, Autumn Conference. Korean Society of Water & Wastewater/Korean Society on Water and Environment, 2010; 37-38.

8. Jeon JS. Improvement plan of Operation & Management for Water Supply System in Rural Villages. Journal of Water Policy and Economy. 2010; 14(June): 93-101.

9. Park HR, Kim MK, Hong SP. Characteristics of Nitrate Contamination of Groundwater -Case Study of Ogcheon Area-. Journal of Environmental Impact Assessment. 2015; 24(1): 87-98.

10. Gi MG, Yoon H, Koh DC, Hamm SY, Lee CM, Kim H, A Comparative Study of Groundwater Vulnerability Assessment Methods: Application in Gumma, Korea. Journal of Soil & Groundwater. 2013; 18(3): 119-133.

11. Yeo IS, Park C, Ahn J. Study on Beta Zeolite Granulation with Bipolar Mezzo-Pores for removal of Heavy Metal Pollutants in Water. Proceeding abstract, 59th annual meeting, Korean Society of Industrial and Engineering and Chemistry. 2018; 393.

12. Kim MJ, Lee CH, Yoo SC, Park SJ. The Influence of Cation Exchange Capacity of Zeolite and Solution Chemistry on the Transport of Bacteria. Journal of Water Treatment. 2017; 25(5): 3-11.

13. Baek S, Nguyen V, Kim Y. Preparation of Zeolite Coated with Metal-Ferrite and Adsorption Characteristics of Cu(II). Applied Chemical Engineering.

- 2019; 30(1): 54-61.
14. Jung Y. Removal Properties of Aqueous Ammonium ion with Surface Modified Magnetic Zeolite Adsorbents, *Journal of Wetlands Research*, 2019; 21(2): 152-156.
 15. Choi H, Yu S. Heavy Metal Removal Using Modified Zeolite. *Journal of Water Treatment*. 2015; 23(4): 15-22.
 16. Kim I, Choi J, Joo J, Oh B. Development of Microbe Carrier for Bioremediation of Zn, As by using *Desulfovibrio Desulfuricans* and Zeolite in Artificial Sea Water. *Korean Society of Biotechnology and Bioengineering*. 2015; 30(3): 114-118.
 17. Lee HY, Jeon C, Lim KJ, Hong KC, Lim JE, Choi BS, Kim NW, Yang JE, Ok YS. Adsorption Characteristics of Heavy Metal Ions onto Chemically Modified Rice Husk and Sawdust from Aqueous Solutions. *Korean Journal of Environment and Agriculture*. 2009; 28(2): 158- 164.

<저자정보>

김남열(대학원생), 김영희(교수)