

ORIGINAL ARTICLE

철산화물의 합성 및 이를 이용한 비소의 흡착제거

김연정 · 최식영¹⁾ · 김영훈^{2)*}

안동대학교 공동실험실습관, ¹⁾안동대학교 응용화학과, ²⁾안동대학교 환경공학과

Synthesis of Iron Oxide and Adsorption of Arsenic on Iron Oxide

Youn Jung Kim, Sik Young Choi¹⁾, Young-Hun Kim^{2)*}

Center for Research Facilities, Andong National University, Andong 36729, Korea

¹⁾Department of Applied Chemistry, Andong National University, Andong 36729, Korea

²⁾Department of Environmental Engineering, Andong National University, Andong 36729, Korea

Abstract

Arsenic is among the heavy metals commonly found in aqueous environments. Iron oxide is known as an efficient adsorbent for the arsenic. A new synthetic method was applied to provide iron oxide giving a large specific surface area. The mixing method affects the formation of iron oxide. Ultrasonic waves assisted the formation of very fine iron oxide in an organic phase. The synthesized iron oxide is amorphous type with a high surface area of more than 181.3 m²/g. Sorption capacity of the synthesized adsorbent was relatively very high for arsenic and varied depending on the oxidation state of arsenic: a higher capacity was obtained with As(V). Lower solution pH provided a higher sorption capacity for As(V). The competitive effect of co-exist anions such as chloride, nitrate, and sulfate was minimal in sorption capacity of the iron oxide for arsenic.

Key words : Iron-oxide, Adsorption, Arsenic, Heavy metal, Synthesis

1. 서론

비소는 지각에서 20번째로 풍부한 원소이며 인간에게 가장 위협이 되는 중금속의 일종이다. 비소는 발암물질로 알려져 있으며 간, 신장, 피부에 주로 영향을 미친다 (Fowler et al., 1974). 비소는 토양을 포함하는 환경매체에 포함되어 있으며 폐금속광산 인근 농경지의 경우 높은 농도의 비소오염이 확인되고 있고 농업활동에서 쌀을 포함하는 작물로 전이되기도 한다. 선행연구에서는 일부 폐광인근에서 재배한 쌀을 섭취했을 경우 인체의

발암 위해 확률이 허용수준인 10⁻⁴ 범위를 초과하기도 한다고 보고하고 있다(Kim et al., 2012). 토양 또는 광물에 포함된 비소는 물을 통하여 인체에 유입될 수 있다. 비소를 함유한 광물이 지하수와 접촉하게 되면 광물로부터 비소가 용출되며 지하수에서 농도가 높아지게 된다. 지하수를 수원으로 하는 먹는물에 비소가 검출되는 경우가 많으며 이는 범세계적인 문제이다. 특히 방글라데시, 인도, 중국 등을 포함하는 아시아지역의 먹는물의 위해성에 가장 큰 기여를 하는 원소이며 국내에서도 지하수에서 검출되어 국민의 건강에 위해를 미칠 수 있는 물질이다.

Received 26 November, 2018; Revised 10 January, 2019;
Accepted 28 January, 2019

*Corresponding author: Young-Hun Kim, Department of Environmental Engineering, Andong National University, Andong 36729, Korea
Phone : +82-54-820-5818
E-mail : youngkim@anu.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

우리나라 먹는물 수질기준은 $50 \mu\text{g}/\ell$ 에서 $10 \mu\text{g}/\ell$ 으로 강화되었으며 세계보건기구의 권고치도 $10 \mu\text{g}/\ell$ 이다. 중국, 인도, 멕시코 등의 국가는 여전히 $50 \mu\text{g}/\ell$ 을 먹는물 기준으로 하고 있으며 점차 기준이 강화되고 있는 경향이다. 자연상태에서 비소는 3가(As(III)) 상태와 5가(As(V))의 산화상태로 주로 존재하며 산화상태는 주로 산화-환원조건에 의해 결정된다. 두 산화상태의 비소는 As(III)이 As(V)에 비해 60배정도 높은 독성을 갖고 있는 것으로 알려져 있다. 카드뮴, 납, 구리 등의 대부분의 중금속이 수중에서 양이온상태로 존재하는 것에 반해 비소는 3가 상태와 5가 상태 모두 산화음이온 상태이며 흡착제거를 위해 양으로 하전된 표면이 필요하다. 대부분의 중금속이온은 높은 pH에서 침전되거나 고형화되어 수환경에서 이동성이 낮아진다. 그러나 비소의 경우 pH가 높아지면 음이온인 수산화이온과 경쟁하여 탈착이 촉진되어 이동이 보다 용이하게 된다.

비소를 물에서 제거하기 위한 방법은 매우 다양하며 이온교환, 흡착, 응집침전, 공침, 막분리, 역삼투, 전기투석 등이 활용될 수 있으나 각각의 방법은 장단점을 갖고 있다. 대부분의 방법은 큰 장치가 필요하거나, 운전이 어렵거나, 비용이 높거나, 슬러지 발생이 있거나, 비소제거 효율이 낮은 등의 단점을 있으며 흡착제거의 경우 비교적 높은 효율성과 적용방법이 간단하다는 장점이 있다. 비소의 흡착제거에는 산화철(iron oxide)이 흡착능, 경제성 등의 면에서 타흡착제에 비해 우수한 성능을 가진 것으로 알려져 있으며 세계적으로 다수의 연구자들에 의해 연구되고 있다(Sigdel et al., 2016; Luong et al., 2018). 국내에서도 다양한 흡착제를 이용한 비소제거 관련 논문이 최근 20년간 발표되었다(Choi et al., 2018; Lee et al., 2018). 제강슬래그 등 재활용 흡착제를 이용한 연구에서 흡착제의 비소흡착능을 증명하였으며(Yun et al., 2014; Guo et al., 2015), 자철석, 적철석, 침철석 등을 포함하는 다양한 산화철에 의한 흡착특성도 비교적 자세히 연구되었다(Kim et al., 2012). Kwon et al.(2018)은 산화철에 의한 비소흡착에 이은 자력분리로 비소의 제거에 관한 논문을 발표하였다.

산화철은 그 종류가 매우 다양하며 합성방법에 따라 그 구조와 표면적 및 표면작용기가 다르다. 선행연구에서 매우 다양한 산화철에 대한 연구가 수행되었으며 일반적으로 입자가 작은 나노입자 또는 비표면적이 큰 산

화철의 흡착능이 우수하였다(Kim et al., 2009; Nazari, 2017). 따라서 경제성 및 제거효율을 감안할 때 산화철의 흡착능은 중요하며 가능한 큰 비표면적을 가진 산화철의 제조가 중요하다. 본 연구에서는 기존의 합성방법을 변형하여 비교적 큰 비표면적의 산화철을 합성하고자 하였으며 합성된 산화철의 분석 및 이를 이용한 비소의 제거 특성에 관해 연구하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시약 및 재료

실험에 사용된 시약은 고순도시약급을 구입하여 사용하였으며 추가적으로 정제 등의 과정을 거치지 않았다. pH완충용액제조를 위해 sodium acetate anhydrous (CH_3COONa , 98%, Daejung, Kyeonggido, Korea)와 acetic acid (CH_3COOH , 99.7%, Samchun, Seoul, Korea)을 사용하여 pH 4용액을 제조하였으며 NH_4Cl 와 NH_4OH 을 사용하여 pH 10용액을 제조하였다. 3가 비소와 5가 비소 용액은 각각 sodium arsenite (NaAsO_2 , 98%, Sigma-aldrich, St. Louis, USA)와 sodium arsenite heptahydrate ($\text{HAsNa}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 98%, Sigma-aldrich, St. Louis, USA)을 사용하여 제조하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 나노입자의 산화철 합성법

기존연구에 사용된 미세입자의 산화철은 대부분의 물을 용매로 한 수열합성인 것과 달리 아세톤을 용매로 하여 합성하였다. 질산제2철9수화물($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, 98%, Duksan, Kyeonggido, Korea)을 아세톤에 첨가하여 용해시켰으며 산화철생성과정에 혼합방법을 달리하였으며 교반을 이용한 산화철(stirred iron oxide, STR-FeO)과 초음파를 가하여 산화철을 생성(ultrasonic wave assisted iron oxide, USW-FeO)시킨 것을 각각 유리섬유여지(GF/C)로 여과하여 침전물 시료를 얻었으며 침전물 시료를 80°C 로 건조하여 산화철 분말을 얻었다. 비교 시료는 시판되고 있는 yellow ferric oxide ($\text{FeO}(\text{OH})$, 98%, Junsei, Tokyo, Japan)를 사용하였으며 결정구조 분석결과 Goethite ($\text{FeO}(\text{OH})$)로 판명되었다.

2.2.2. 흡착실험

비소의 흡착실험은 산화철합성방법에 따른 산화철의

흡착능 테스트를 위한 실험과 용액의 pH 변화에 따른 흡착성능 및 공존 음이온의 영향을 측정하기 위한 목적으로 수행되었다. 교반 및 초음파를 가한 합성방법과 상업적으로 판매되고 있는 산화철을 비교하였으며 흡착등온선을 구하여 비교하였다. 각각의 실험조건에서 As(III)과 As(V)를 사용하여 흡착특성을 조사하였다. 용액의 pH에 따라 흡착제의 표면전하도 변화하고 비소의 화학종도 변화하므로 용액의 pH조건을 4와 10으로 변화시키면서 흡착제의 성능을 테스트 하였다. 실제 자연수 및 먹물에는 비소이온 외 다양한 음이온이 존재할 수 있으며 이들 음이온의 존재하에 흡착실험을 하여 경쟁음이온의 영향을 알아보았다. 진한비소 용액을 이용하여 5 ~ 300 mg/L의 비소용액을 제조하였으며 비소용액 50 ml 당 각각의 산화철 0.1 g 첨가하여 180 rpm으로 4시간 진탕시켜 흡착을 진행한 후 4,000 rpm으로 원심분리하였다. 상등액의 비소농도를 유도결합질량분석기(ICP/MS, 7800, Agilent, USA)를 이용하여 분석하였다. 음이온과 비소의 경쟁흡착 특성을 파악하기 위해 음이온과 비소를 각각 1 mM로 만들어 혼합하였으며 흡착시간 및 분석은 흡착등온실험과 동일하다.

합성된 산화철과 비소의 흡착평형실험 결과를 Langmuir와 Freundlich 등온식에 적용하여 흡착반응 특성을 평가하였다. Langmuir 흡착등온식은 대표적인 단층 흡착모델로써 아래 식 (1)과 같다.

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (1)$$

이때 q_e 는 평형상태에서 흡착제 단위질량당 흡착된 흡착질의 질량(mg/g), q_m 은 최대흡착량(mg/g), K_L 은 흡착제에 대한 흡착질의 친화도를 나타내는 Langmuir 상수(L/mg), C_e 는 흡착질의 용액상 평형농도(mg/L)이다.

Freundlich 흡착등온식은 흡착열이 표면 덮힘에 따라 지수적으로 감소하는 다층 흡착모델로써 아래 식 (2)와 같다.

$$q_e = K_F \times C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

이때 K_F 값은 Freundlich 상수(L/mg), n 은 흡착동력

을 나타내는 상수로써 그 값이 클수록 흡착이 용이하다. 일반적으로 n 이 2 이상일 때 흡착이 쉽게 일어나며, 1 이하인 경우 난흡착성 물질로 평가된다.

2.3. 분석

합성된 산화철시료의 결정성을 알아보기 위하여 X-선 회절 분석기(XRD, Ultima IV, Rigaku, Japan)를 이용하였다. 분석조건은 36 KV, 20 mA에서 X-ray Target은 Cu-K α 을 사용하였으며 scan speed 0.5°/min, step 0.05°, Scan degree 5~65°로 분석하였다. 시료의 비표면적은 비표면적측정기(BET, 3Flex, Micromeritics, USA)로 측정하였으며, 시료 전처리를 위하여 200 °C 상에서 8시간 동안 수분과 가스를 제거하고 질소를 흡착시켜 측정하였다. 시료의 입자크기는 입자크기 분석기(PSA, Mastersizer 2000, Malvern)로 측정하였으며, 에탄올에 분산시켜 측정하였다. 시료의 입자 모양은 전계 방출형 주사전자현미경(FE-SEM, MYRA 3 XMH, TESCAN)으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산화철의 합성 및 분석

산화철은 그 구조에 따라 흡착에 활용될 비표면적과 흡착자리의 밀도도 다르며 각 물질을 흡착하는 능력이 결정된다. 본 연구에서는 가능한 높은 비표면적과 높은 비소흡착능을 가진 산화철을 합성하고자 하였으며 합성 과정에서 일반적으로 행해지는 교반을 통한 혼합과 초음파를 이용한 합성을 동시에 수행하여 합성 산화철의 물리화학적 특성과 흡착능을 비교하였다. Fig. 1은 합성된 산화철과 상업적으로 판매되는 산화철의 입자모양을 전자현미경으로 비교한 것이다. 본 연구에서 합성된 산화철은 주로구형이며 포도모양으로 입자와 입자가 뭉쳐져 있으며 크기는 작은 입자는 약 0.3 μ m 정도이며 큰 입자는 약 1 μ m 정도이다. 교반과 초음파를 가한 시료의 입자모양과 크기에 큰 차이는 없으며 시판되고 있는 산화철(goethite)이 침상모양인 것과 비교된다.

산화철의 비표면적을 BET방법으로 측정하였으며 교반합성 및 초음파합성 각각 141.8 m²/g과 181.4 m²/g의 비표면적으로 시판되고 있는 goethite의 5.78 m²/g에 비해 매우 높은 것을 알 수 있다. 이는 기존의 수용액상에서 합성방법 즉 수열합성을 하지 않고 유기용매상에서

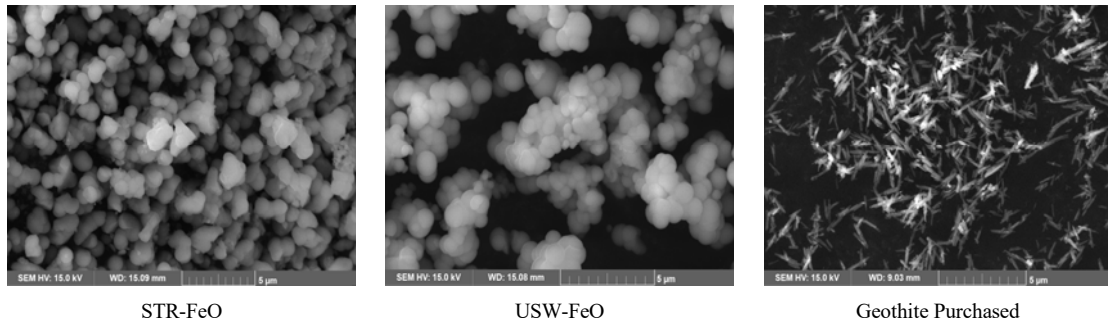


Fig. 1. SEM images of the synthesized iron oxide and geothite.

Table 1. BET surface, total pore volume and average pore size of the adsorbents

	BET surface area (m^2/g)	Total pore volume (cm^3/g)	Pore size (\AA)
STR-FeO	141.76	0.0952	26.8
USW-FeO	181.36	0.0993	21.9
Geothite	5.78	0.0214	148.6

합성한 것이 원인으로 판단되며 최근 발표된 선행연구 (Soon et al., 2018)에서도 유기용매상에서 합성하여 높은 비표면적을 얻은 것으로 보고되었다. 내부기공의 부피는 교반합성, 초음파합성 각각 $0.0952 \text{ cm}^3/g$, $0.0993 \text{ cm}^3/g$ 로 유사하나 geothite 비해 4-5배 정도 높아 내부에 흡착할 수 있는 공간이 있음을 알 수 있다. 기공크기는 geothite가 148 \AA 이고 본 연구에서 합성된 산화철은 $21 \sim 26 \text{ \AA}$ 정도로 geothite가 비교적 큰 기공을 소수 갖고 있는 것에 비해 합성된 산화철은 작은 기공의 부피가 크다는 것을 알 수 있어 흡착에 보다 유리할 것으로 예측된다. 결정형산화철의 비표면적과 비교하여 본 연구에서 합성된 산화철의 특징을 살펴볼 수 있다. 결정형 산화철의 비표면적은 magnetite (Fe_3O_4), goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$), lepidrocrite ($\gamma\text{-FeOOH}$) 등이 각각 $4 \sim 20$, 20 , $70 \sim 80 \text{ m}^2/g$ 정도로 알려져 있으며 이들 산화철에 비해 매우 높은 비표면적을 가진 철산화물을 합성하였음을 알 수 있다. 기존에 알려진 산화철 가운데는 2-Line ferrihydrite ($Fe_3HO_8 \cdot 4H_2O$)의 비표면적이 매우 넓으며 $200 \sim 300 \text{ m}^2/g$ 정도로 보고되었다(Schwertmann and Conell, 2000).

엑스선 회절시험을 통해 합성된 산화철의 결정구조를 파악하고자 하였다. Fig. 2에서 나타난 바와 같이 시판용

산화철인 geothite의 결정성이 뛰어난 것에 비해 본 연구에서 합성된 산화철은 비정질에 가까우며 35° 와 61° 부근에서 약한 피크를 보이고 있다. 선행연구에서 2-Line ferrihydrite의 경우 2-theta가 43° 와 77° 부근에서 약한 피크를 갖고 있어(Schwertmann and Conell, 2000; Jung et al., 2008) 본 연구에서 합성된 산화철은 비정질에 가까우나 2-Line ferrihydrite와는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다.

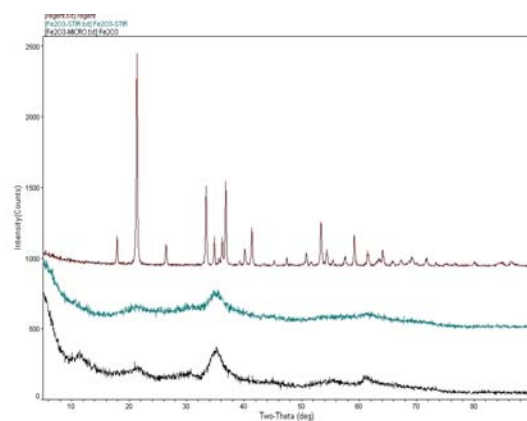


Fig. 2. XRD graph of the synthesized iron oxide (up: USW-FeO, down: STR-FeO).

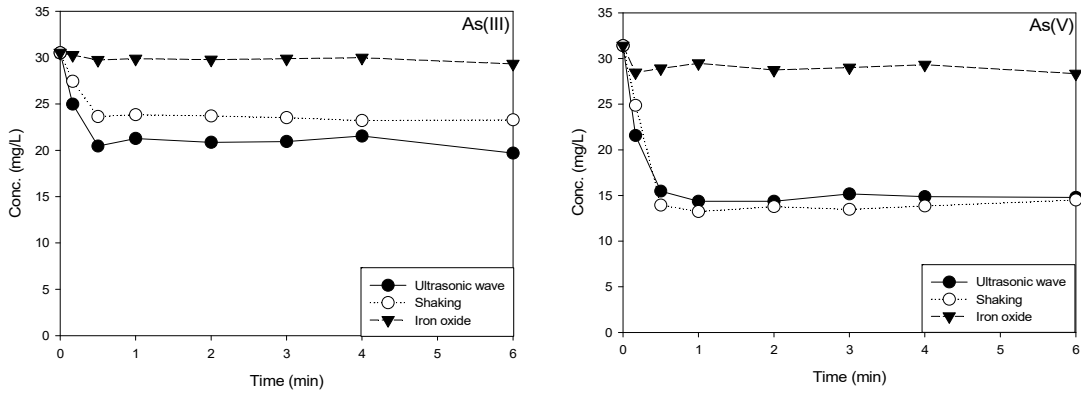


Fig. 3. Adsorption kinetic of As(V) and As(III) on the synthesized iron oxide and geothite.

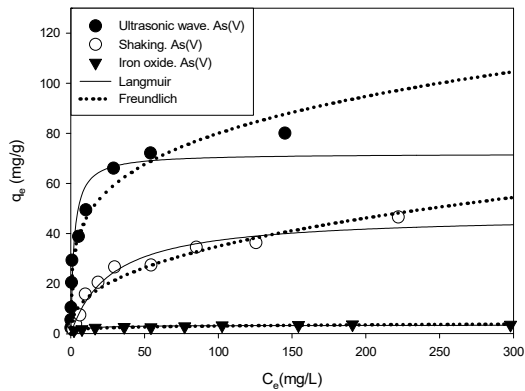


Fig. 4. Sorption isotherm of As(V) of the synthesized iron oxide and geothite.

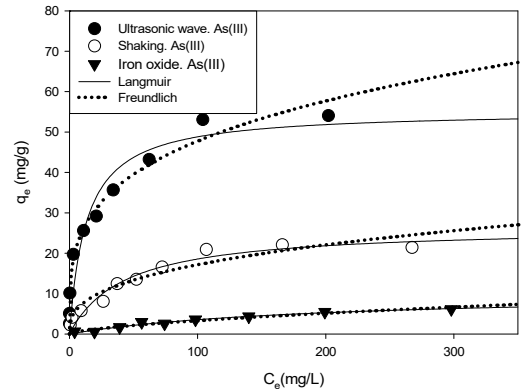


Fig. 5. Sorption isotherm of As(III) of the synthesized iron oxide and geothite.

3.2. 산화철의 흡착특성분석

산화철의 비소에 대한 흡착속도를 알아보기 위해 흡착시작 후 시간별로 비소의 농도를 측정하였다. 3가 비소 및 5가 비소 모두 초기 30분에 비소농도가 급격히 감소하고 그 이후 농도변화가 미미하여 대부분의 흡착은 초기 30분에 일어나는 것으로 판단된다. 흡착속도는 비소 제거를 위한 공정화에서 매우 중요하며 산화철을 이용한 흡착은 활성탄을 포함한 다공성흡착제에 비해 매우 빠르다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 흡착능시험은 흡착평형시간을 30분 보다 충분히 긴 4시간으로 하여 실험하였다.

산화철의 흡착능 측정을 위해 각각의 산화철을 이용하여 5가 비소와 3가 비소에 대한 흡착등온선을 구하였다. 각각의 흡착경향은 Langmuir모델과 Freundlich모

델을 적용하여 설명하고자 하였다. 본 연구에서 합성된 산화철은 매우 높은 비소흡착능을 가지고 있음을 증명하였으며 Langmuir모델과 Freundlich모델로 유사하게 설명되고 있다(Fig. 4, Fig. 5, Table 2). 합성된 산화철과 비소에 대한 흡착평형실험 결과를 Langmuir와 Freundlich 등온흡착식에 대입한 결과 USW-FeO의 최대흡착량(q_m)이 5가 비소의 경우 71.92 mg/g, 3가 비소의 경우 55.26 mg/g으로 STR-FeO의 최대흡착량에 최대 2배에 달하는 흡착능을 가지며, 시판 중인 geothite와는 월등한 수준의 흡착능을 가지는 것으로 확인되었다. 아울러 3종의 흡착제 가운데 가장 높은 흡착친화도를 나타냄으로써 낮은 수준의 비소 농도에서도 높은 수준의 흡착능을 가진다. 비소에 대한 흡착강도를 보면 USW-FeO가 5가 비소에 대하여 4.10, 3가 비소에 대하여

Table 2. Langmuir and Freundlich sorption isotherm constants

		Langmuir			Freundlich		
		q_m (mg/g)	K_L	R^2	K_F	n	R^2
As(V)	Ultrasonic wave	71.92	0.450	0.925	26.06	4.10	0.964
	Shaking	47.49	0.0366	0.968	5.43	2.47	0.946
	Iron oxide	3.46	0.146	0.856	1.26	0.196	0.959
As(III)	Ultrasonic wave	55.26	0.075	0.918	13.56	3.66	0.984
	Shaking	26.53	0.023	0.949	3.21	2.75	0.933
	Iron oxide	10.33	0.0052	0.971	0.17	0.63	0.948

2.75의 n 값을 보여주어 흡착반응이 아주 용이하게 일어남을 알 수 있으며, STR-FeO의 경우에도 2.47과 2.75의 n 값을 보여주어 비소에 대한 흡착이 쉽게 일어남을 알 수 있다. 그러나 시판 중이 geothite의 경우 0.196과 0.63의 낮은 수준의 흡착강도를 가지는 것으로 평가되어 비소에 대한 흡착반응이 용이하지 않음을 알 수 있다. 종합적으로 초음파를 가하여 합성한 흡착제는 교반에 의해 합성된 산화철에 비해 높은 흡착능을 보이고 있으며 시판되고 있는 geothite와 선행연구에서 보고된 산화철의 흡착능에 비해 높은 흡착성능을 갖고 있음을 보여준다. 5가 비소가 3가 비소에 비해 높은 산화철 흡착능을 보이고 있다. 이는 앞서 논의된 산화철의 높은 비표면적으로 설명이 가능하다. 높은 비표면적이 항상 높은 흡착능을 보장하는 것은 아니며 흡착자리를 충분히 제공하여야 한다. 본 연구에서 합성된 산화철은 높은 비표면적과 높은 흡착능을 보유하고 있음을 보여준다.

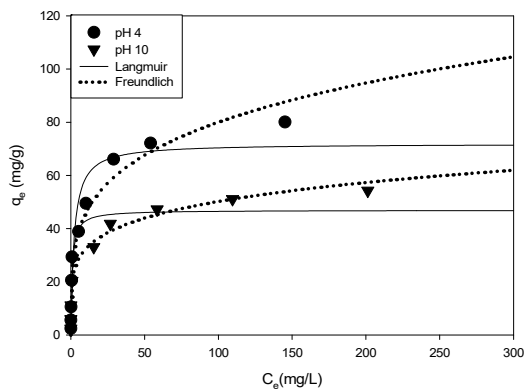


Fig. 6. Sorption isotherm of As(V) on the synthesized iron oxide at variable solution pH.

수용액상에 존재하는 오염물질의 흡착에서 가장 중요한 환경인자는 pH이다. 용액의 pH는 흡착제표면의 화학적 성질을 변화시키고 동시에 흡착질의 화학적 특정도 변화시킨다. 산화철을 이용한 비소의 흡착에 있어서 비소는 일반자연환경의 산화-환원조건에서 음이온으로 존재하므로 흡착제는 양의 전하를 띠는 낮은 pH가 선호된다. 본 연구에서는 pH 완충제를 이용하여 용액의 pH를 4와 10으로 조절하여 흡착특성을 연구하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 pH 4에서 높은 흡착특성을 보이며 pH 10에서 상대적으로 낮은 흡착량을 보이고 있다. 일반적으로 산화철의 영전하 점이 pH 6-8 부근임을 감안하면 낮은 pH영역에서는 흡착제의 표면이 양으로 하전 되어 있고 이보다 높은 pH의 경우 음으로 하전 되어 있다. 그러므로 낮은 pH에서 보다 높은 흡착용량을 보이는 것은 설명이 가능하다.

비소를 포함하는 물에는 비소 뿐 만 아니라 염소이온, 질산이온, 황산이온 등 다양한 음이온이 존재할 수 있다. 산화철의 흡착자리에 이들 음이온은 비소와 흡착경쟁을 할 수 있으며 비소의 흡착능을 감소시킬 수 있다. 본 연구에서는 염소이온, 질산이온 및 황산이온과 비소를 동일 몰비율로 혼합하여 흡착시험을 수행하였으며 음이온이 존재하지 않을 때와 비교하였다. Fig. 7과 Fig. 8에 나타난 바와 같이 5가 비소의 경우 2가 음이온인 황산이온의 존재 하에 흡착능이 약 10%정도 감소되는 경향을 보이거나 염소이온이나 질산이온과의 경쟁에서 흡착능이 감소되지 않는 특징을 보인다. 특히 상대적으로 독성이 높은 3가 비소의 경우 음이온의 존재가 흡착효율에 크게 영향을 미치지 못하며 특히 마이크로웨이브를 가하여 합성한 산화철의 경우 흡착효율의 감소는 3%미만이다.

Table 3. Langmuir and Freundlich sorption isotherm constants at pH 4 and 10

	Langmuir			Freundlich		
	q _m (mg/g)	K _L	R ²	K _F	n	R ²
Ultrasonic wave. As(V), pH4	71.92	0.450	0.925	26.06	4.10	0.964
Ultrasonic wave. As(V), pH10	46.91	1.048	0.903	20.75	5.21	0.962

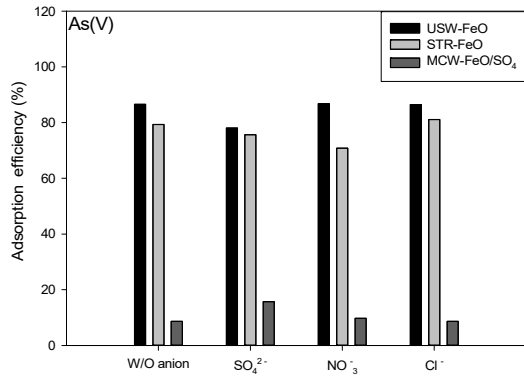


Fig. 7. Removal rate of As(V) by adsorbent in the presence of anions.

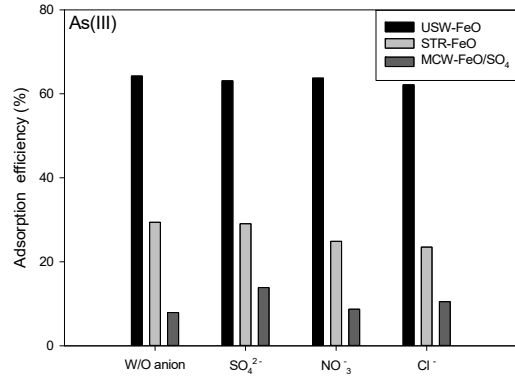


Fig. 8. Removal rate of As(III) by adsorbent in the presence of anions.

4. 결론

수열합성이 주를 이루는 기존의 산화철 합성방법과 달리 유기용매상에서 교반 또는 초음파를 가한 변형된 형태의 합성방법으로 높은 비표면적의 산화철을 합성하여 비소흡착제거 실험을 수행하여 다음과 같은 주요결과와 결론을 도출하였다.

합성된 산화철은 비정질이며 0.3~1 μm 크기의 구형 입자이며 교반에 의한 합성보다 초음파를 가한 경우 입자의 크기는 작고 비표면적이 보다 크게 측정되었다. 흡착능을 결정하는 중요한 인자인 비표면적이 초음파를 가한 경우 약 180 m²/g 정도로 선행연구에서 발표된 2-Line ferrihydrite와 유사한 정도이다. 비소에 대한 흡착능 실험결과 기존의 결정성 산화철에 비해 매우 높으며 2-Line ferrihydrite의 흡착능과 유사하거나 다소 높다고 판단된다. 낮은 pH에서 흡착제 표면이 양으로 하전되어 보다 높은 흡착특성을 보여주었다. 염소, 질산, 황산 이온 등 공존 음이온의 흡착능에 미치는 영향은 크지 않으며 특히 3가 비소와의 경쟁에서 흡착효율의 감소는 미미하였다. 공정화를 위한 대량합성 및 연속흡착 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2016학년도 안동대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

Choi, Y., San, P., Kashif, M., 2018, Development of a column reactor for adsorptive removal of arsenic from the aqueous phase, Proceeding of the Joint Conference of KSWE and KSWW, Ilsan, 28.

Fowler, B. A., Weissburg, J. B., 1974, Arsine poisoning, N. Engl. J. Med., 291, 1171-1174.

Guo, X., Shi, J., Yi, Y., Tian, Q, Li, D., 2015, Separation and recovery of arsenic from arsenic-bearing dust, J. Environ. Chem. Eng., 3, 2236-2242.

Jung, Y. I., Lee, W. C., Cho, H. G., Yun, S. T., Kim, S. O., 2008, Adsorption of arsenic onto two-line ferrihydrite, J. Miner. Soc. Korea, 21, 227-237.

Kim, S. H., Lee, W. C., Cho, H. G., Kim, S. O., 2012, Characterization of arsenic adsorption onto hematite, J. Miner. Soc. Korea, 25, 197-210.

Kim, S. O., Lee, W. C., Jeong, H. S., Cho, H. G., 2009,

- Adsorption of arsenic on goethite, *J. Miner. Soc. Korea*, 22, 177-189.
- Kim, W. I., Lee, J. H., Kunhikrishnan, A., Lee, W. R., Lee, J. M., Paik, M. K., Yoo, J. H., Kim, J. Y., 2012, Current research for arsenic contamination in agricultural environment and agro-food, *Proceeding of the Korean J. of Environ. Agric.*, Muju, 26-35.
- Kwon, H., Shin, T., Kim, J., Ha, D., Kim, M., Kim, Y., 2018, Removal of arsenic from aqueous phase using magnetized activated carbon and magnetic separation, *Prog. Supercond. Cryog.*, 20, 1-5.
- Lee, S. C., Jeong, Y., Kim, Y. J., Kim, H., Lee, H. Y., Lee, Y. C., Lee, S. M., Kim, H. J., An, H. R., Ha, M. G., Lee, G. W., Lee, Y. W., Lee, G., 2018, Hierarchically three-dimensional (3D) nanotubular sea urchin-shaped iron oxide and its application in heavy metal removal and solar-induced photocatalytic degradation, *J. Hazard. Mater.*, 354, 283-292.
- Luong, V. T., Canas Kurz, E. E., Hellriegel, U., Luu, T. L., Hoinkis, J., Bundschuh, J., 2018, Iron-based subsurface arsenic removal technologies by aeration: A review of the current state and future prospects, *Water Res.*, 133, 110-122.
- Nazari, A. M., Radzinski, R., Ghahreman, A., 2017, Review of arsenic metallurgy: Treatment of arsenical minerals and the immobilization of arsenic, *Hydrometallurgy*, 174, 258-281.
- Schwertmann, U., Cornell, R. M., 2000, *Iron oxides in the laboratory: preparation and characterization*, Wiley-VCH Publishers, New York, USA. 106-110.
- Sigdel, A., Park, J., Kwak, H., Park, P. K., 2016, Arsenic removal from aqueous solutions by adsorption onto hydrous iron oxide-impregnated alginate beads, *J. Ind. Eng. Chem.*, 35, 277-286.
- Yun, S., Kim, K. W., Kim, K. J., In, H. J., Choi, W. S., Yu, C., 2014, Arsenic and heavy metal adsorption properties of steelmaking slag by magnetic separation, *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, Byeonsan, 256.

-
- 김연정, 안동대학교 공동실험실습관 연구원
sanzo300@hanmail.net
 - 최식영, 안동대학교 응용화학과 교수
sychoi@andong.ac.kr
 - 김영훈, 안동대학교 환경공학과 교수
youngkim@andong.ac.kr