

## 選炭硬石과 鐵酸化物로 製造한 擔體의 重金屬 不溶化 特性研究<sup>†</sup>

李桂承 · <sup>†</sup>宋泳俊

江原大學校

## A study of Immobilizing Heavy metals by pellets manufactured from Coal tailings and Iron oxide<sup>†</sup>

Gye-Seung Lee and <sup>†</sup>Young-Jun Song

Kangwon National University

### 요 약

선탄경석을 환경개선물질로 순환자원화하기 위해 철산화물과 혼합하여 중금속 불용화제를 제조하고 이의 적정제조 조건과 중금속 속도에 대한 불용화 성능을 평가하였다. 선탄경석을 분쇄한 후 철산화물의 분말을 혼합하여 구형의 펠릿을 제조하고 이를 가열하여 중금속 불용화제를 제조하였다. 온도별로 가열한 결과, 1100°C부터 선탄경석에 함유된 탄질분에 의해 영가철이 생성되었다. 제조된 불용화제는 구형의 다공체로서 공극률은 34.63%, 겉보기 밀도는 1.31 g/mL, 공극의 평균크기는 9.82  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 불용화제를 비소(V), 구리(II), 크롬(VI), 카드뮴(II)이 함유된 각각의 중금속 용액과 반응시킨 결과, 영가철이 생성된 1100°C에서 제조된 펠릿이 중금속 불용화도가 높고 pH를 더 높이는 것으로 나타났다. 중금속농도 10 ppm의 용액을 99.9% 이상 불용화하기까지 비소의 경우 1 시간, 크롬의 경우 2 시간, 구리의 경우 4 시간이 필요하였다. 그러나 카드뮴의 경우 불용화도가 낮게 나타났고 중금속농도가 높을수록 불용화도가 더 낮아지는 것으로 나타났다.

**주제어** : 선탄경석, 철산화물, 불용화, 중금속

### Abstract

Porous pellets for immobilizing heavy metals were manufactured from coal tailings and iron oxide powder. Coal tailings was pulverized and mixed with iron oxide powder. The mixed powder was granulated into spherical pellets and roasted. Over 1100°C, residual coal in coal tailings reduced iron oxide to ZVI(Zero-Valent Iron). The pellets have 34.63% of porosity, 1.31 g/mL of bulk density, and 9.82  $\mu\text{m}$  median pore diameter. The pellets were reacted with synthetic solutions containing each heavy metals: arsenic(V), copper(II), chrome(VI), and cadmium(II), respectively. On the test of immobilizing heavy metal, the pellets made at 1100°C were superior to the other pellets made under 1000°C. Immobilizing over 99.9% of 10ppm heavy metal solutions required 1 hour for arsenic, 2 hours for chrome, and 4 hours for copper. However, immobilizing capacity of cadmium was inferior to that of the other metals and it was decreased in reversely proportion to initial concentration of the solutions.

**Key words:** Coal tailings, Iron oxide, Immobilization, Heavy metals

### 1. 서 론

대부분의 중금속들은 높은 pH영역에서 수산화물을 생성하므로 침강, 흡착 등으로 처리될 수 있지만, 비소와

같이 여러 산화상태로 존재하며 높은 pH영역에서 용해도가 큰 원소는 쉽게 처리되지 않는다.<sup>1)</sup> 최근에는 중성 영역에서 활성알루미나, 활성탄, 영가철, 수산화철 등을 이용하여 불용화시키는 방법이 고려되고 있다.<sup>2,3)</sup> 그러나 상기 물질 들은 토양 등에 사용할 경우 유실되기 쉽기 때문에 이를 지지할 담체가 요구된다.

국내 석탄광에서 발생하는 선탄경석(coal tailings)은

<sup>†</sup> 2012년 1월 13일 접수, 2012년 1월 25일 1차수정

2012년 2월 6일 수리

<sup>\*</sup> E-mail: yjsong64@kangwon.ac.kr

광업소 인근에 적치되어 주변의 환경오염원으로 작용하고 있다. 과거 선탄경석을 순환자원화하기 위한 연구가 여러 제시되었으나, 대부분 점토벽돌 등의 부원료로 활용하는 방법이었고 현재 거의 활용되지 않고 있다.<sup>4-6)</sup> 선탄경석이 발생하는 광산지역의 지리적 위치나 지역의 오염상태를 고려할 때, 선탄경석은 광업소 주변 오염수나 오염토양을 개선하기 위한 환경개선물질로 활용하는 것이 유리하다고 본다. 예를 들어 광산주변에서 일어날 수 있는 수은, 카드뮴, 구리, 비소와 같은 중금속오염에 적용할 수 있는 불용화제를 선탄경석과 혼합하여 담체를 제조하는 방안이 고려될 수 있다.

선탄경석 혼합하여 제조할 중금속 불용화제로는 철산화물을 선택하였다. 철산화물로는 부산물로 많이 발생하는 밀스케일 등을 활용할 수 있으므로 경제성 또한 확보될 수 있을 것으로 본다. 그리고 선탄경석은 자체에 석탄의 탄질부를 가지고 있으므로 철산화물과 같이 가열할 경우에 철산화물을 환원시켜 중금속의 불용화에 많이 활용되는 영가철을 생성시킬 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 본 연구는 선탄경석과 철산화물을 활용하여 중금속 불용화에 사용할 담체를 제조하기 위한 기초 연구로서, 선탄경석과 철산화물의 분말을 혼합, 과립(pelletizing), 가열하여 구형의 다공성 펠릿을 제조하고 이의 적정제조조건과 중금속 불용화성능을 시험하였다.

## 2. 시료 및 실험방법

선탄경석은 장성광업소 철암생산부의 협조를 받아 채취하였다. 광업소의 선탄공정은 상승류에 의한 선별과 배출구의 컨베이어 벨트에서 이루어지는 수선(hand picking)으로 구성되며, 주로 5~30 cm 크기의 괴상으로 배출된다. 본 연구에서는 배출되는 선탄경석을 채취하여 조크러셔(Jaw crusher)로 조쇄를 한 후, 불 밀과 진동체에 의한 사분(sieving)을 반복하여 전체를 60mesh 체의 사하산물(undersize)로 제조하여 사용하였다. 철산화물로는 시판되는  $Fe_2O_3$  분말시약을 사용하여 철산화물의 활용가능성을 시험하였다.

불용화제의 제조공정은 선탄경석의 분쇄, 철산화물과의 혼합, 펠릿의 제조, 가열의 순으로 이루어졌다. 상기 분쇄한 선탄경석에 철산화물분말을 5%, 10%, 20%로 혼합하여 세가지 시료를 제조하고 이를 각각 pan type의 과립기(pelletizer)에서 순수를 분무하여 과립하였다. 과립된 구형의 펠릿은 건조한 후 체가름하여 3~5 mm 크기의 펠릿만을 선별하였다. 이후 펠릿을 도가니에 넣

고 뚜껑을 닫아 공기를 차단한 후 900°C, 1000°C, 1100°C의 온도에서 각각 2시간씩 가열하여 구형의 다공성 담체인 불용화제를 제조하였다.

선탄경석은 한국공업규격 [KS E 3705]에 따른 공업분석(proximate analysis)을 통해 수분, 휘발분, 회분, 고정탄소의 양을 측정하였다. 화학성분은 전기로에서 900°C로 가열하여 완전연소시킨 선탄경석을 XRF(X-Ray Fluorescence Spectrometers: ZSX100e, Rigaku)로 분석하여 조사하였다. 시료의 입도는 입도분석기(FRITSCH, Analysette-22)를 이용하여 측정하였다. 제조된 불용화제는 다공질 구조체이므로 공극률과 기공크기분포 등의 특성을 pycnometer (AutoPore IV 9500, Micromeritics Instrument Co.)에 의한 Hg-intrusion으로 분석하였다.

불용화성능의 평가는 인위적으로 제조한 중금속용액과 반응시켜 파악하였다. 용액은 As, Cd, Cu, Cr의 각 금속화합물을 순수에 용해시켜 제조하였는데, 비소는  $As_2O_5 \cdot 5H_2O$ , 카드뮴은  $CdSO_4 \cdot 8/3H_2O$ , 구리는  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ , 크롬은  $K_2Cr_2O_7$ 을 용해시켜 제조하였다. 모든 용액은 산성광산배수를 고려하여 황산으로 pH를 3.0으로 조정한 후 실험에 사용하였다. 실험은 각 용액에 불용화제를 5 g/100 mL의 비율로 첨가하여 200 rpm으로 교반한 후, 시간에 따라 회수하고 원심분리하여 상등액을 채취하였다. 채취된 상등액은 모두 원심분리 한 후 pH를 측정하고 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma - AES, Varian)를 통해 잔류 금속농도를 분석하여 불용화도를 계산하였다.

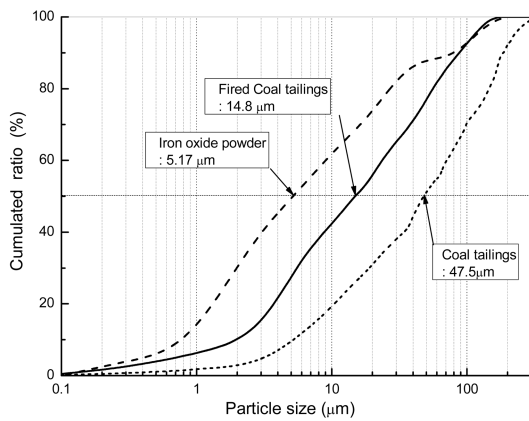
## 3. 실험결과 및 고찰

공업분석을 통해 조사한 선탄경석의 수분, 휘발분, 고정탄소 및 회분 함유량과 선탄경석을 연소시킨 시료의 XRF분석결과를 Table 1에 나타내었다. 선탄경석이 함유하는 휘발분과 고정탄소는 각각 2.25%와 11.65%로 발열량 또한 약 1210 kcal/kg의 낮은 값을 나타내었다. 회분의 양은 약 84.35%이며 이를 분석한 XRF결과를 보면 주성분이  $SiO_2$ 와  $Al_2O_3$ 이고  $SiO_2/Al_2O_3$  또한 1.88로서 일반적인 토양구성광물과 비슷하다. 따라서 선탄경석이 환경개선을 위한 세라믹재료로 적합함을 알 수 있다.

불용화제인 다공체를 구성하는 것은 선탄경석이 연소되고 남는 부분과 철산화물입자 등일 것이다. 따라서 선탄경석을 비롯한 세 가지 시료의 입도를 분석하였고 이

**Table 1.** Proximate analysis of coal tailings and chemical composition of fired coal tailings (wt. %)

Proximate analysis	Moisture		Volatile matter		Fixed carbon		Ash	Sulfur	Heating value (kcal/kg)	
	1.10		2.25		11.65		84.35	0.65	1210	
XRF analysis	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	
	58.54	31.13	0.14	3.59	0.83	0.64	3.64	1.32	0.06	

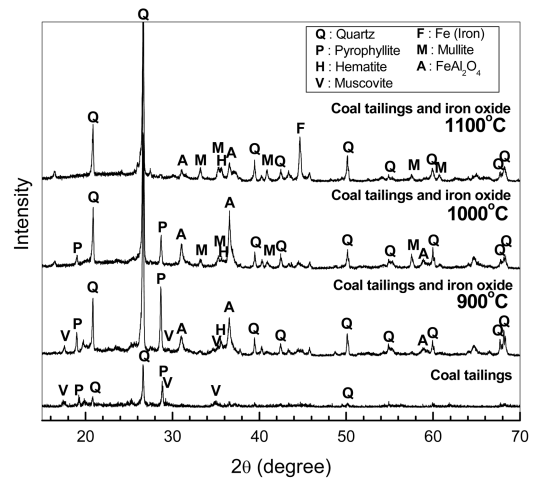


**Fig. 1.** Particle size analysis of coal tailings and iron oxide powders.

를 Fig. 1에 나타내었다. 결과를 보면 선탄경석이 47.5 μm의 평균입도를 가지며 이것이 산화되었을 경우 입도는 14.8 μm로 낮아지고 철산화물의 경우 평균입도가 5.17 μm이었다.

적정 제조조건을 파악하기 위하여 철산화물을 10%로 혼합하고 900~1100°C로 가열하여 제조한 불용화제를 XRD분석하였고 이를 Fig. 2에 나타내었다. 가열하지 않은 선탄경석은 주로 quartz, pyrophyllite, muscovite 등으로 구성되어 있었다. 철산화물과 혼합하여 가열하면 선탄경석과 반응하여 FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>가 생성되었으며 1000°C이상에서는 mullite, 1100°C이상에서는 환원에 의해 금속상태의 철이 생성되었다. 900°C에서 가열한 것은 펠릿의 강도가 낮았기 때문에 이후 중금속 불용화 실험에서는 1000°C와 1100°C로 가열하여 제조한 것을 사용하였다.

불용화제에 혼합한 철산화물 중 환원되어 반응하기 쉬운 형태로 변환된 양을 알아보기 위해 철산화물을 3%, 5%, 10%, 20%씩 혼합한 펠릿을 각각 제조하고 이를 1000°C와 1100°C에서 가열하여 환원을 유도하였다. 환원에 의해 생성된 금속상태의 철분은 약산으로도 쉽게 용해될 것으로 판단하여 상기 각 조건에 따라 제



**Fig. 2.** XRD patterns of pellets and coal tailings (Cu Kα).

**Table 2.** Content of soluble iron content in pellets (wt. %)

Roasting temp.	Iron oxide content (wt. %)			
	3	5	10	20
1000°C	0.0	0.0	0.3	0.3
1100°C	0.4	1.9	3.8	-

조한 불용화제를 분쇄한 후 묽은 염산(1/20)으로 30분간 용해시키고 용해된 철분의 양을 분석하였다(Table 2).

결과를 보면 상기 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 철산화물의 환원은 1100°C부터 일어나고 이에 따라 1000°C에서 가열한 펠릿은 철분이 거의 용해되지 않았다. 그리고 1100°C에서 가열한 경우는 5%이상에서 철산화물의 혼합량에 따라 철분의 용해량이 같은 비율로 증가하여 10% 혼합체의 경우 용해될 수 있는 철분이 약 3.8 wt.% 포함됨을 알 수 있었다. 혼합량 20%의 경우는 1100°C로 가열하였을 경우에 소결이 급속히 진행되면서 펠릿의 형태를 잃어버렸기 때문에 사용할 수 없었다. 따라서 선탄경석에 철산화물 혼합량은 5%이상 20%미만이 적절하다고 생각된다.



Fig. 3. Picture of pellets made from coal tailings and iron oxide (10%).

Fig. 3은 선탄경석에 철산화물을 10% 혼합하고 1100°C에서 2시간 가열하여 제조한 불용화제의 사진이다. 보이는 바와 같이 구형의 펠릿이며 3~5 mm의 크기의 다공체이다. 이 다공체가 갖는 공극의 크기와 특성을 알기 위해 Hg-intrusion 분석을 실시하였다(Fig. 4). 측정결과 공극률은 34.63%인 것으로 나타났으며 0.1 psi의 압력으로 주입하였을 때 채워지지 않은 부분의 부피를 펠릿의 겉보기체적으로 가정하여 계산한 겉보기 밀도는 1.31 g/mL로 나타났다. 그리고 공극의 평균크기는 9.82  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다.

상기 결과를 토대로 철산화물 5%와 10%를 혼합한 각각의 펠릿을 1100°C에서 2시간 가열하고 또한 철산화물 10%를 혼합한 펠릿을 1000°C에서 가열하여 세가지 불용화제를 제조하였다. Fig. 5는 As, Cu, Cr, Cd의 중금속 농도 한가지를 약 10 ppm 함유한 각각의 액에 상기 불용화제를 5 g/100 mL의 비율로 첨가하고 200 rpm으로 교반하며 시간에 따라 중금속의 농도와 pH를 측정된 결과이다.

결과를 보면 시험한 네가지 중금속 모두에서 시간에 따라 중금속의 농도가 감소하고 pH가 증가하는 경향을 보였다. 그리고 철산화물을 10% 혼합한 펠릿이 5% 혼합한 펠릿보다 중금속의 불용화도가 높고 pH를 더 증가시키는 것으로 나타났다. 불용화제 중 1000°C에서 제조한 것은 크롬과 비소의 경우에서 1100°C에서 제조한 것 보다 더 낮은 결과를 보여주었으나 구리와 카드뮴에서는 낮은 성능을 보여주었다. 그리고 pH는 1100°C에서 제조한 것이 1000°C에서 제조한 것보다 모두 높게 나타났다.

상기 XRD 결과로 볼 때, 1000°C와 1100°C에서 제조한 불용화제의 차이는 1100°C에서 영가철이 생성된다는 것이다. 영가철이 수용액에 존재할 경우 다음과 같

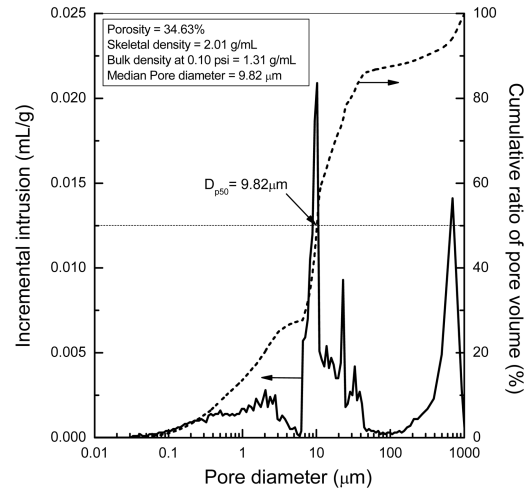
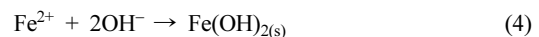
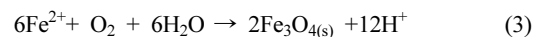
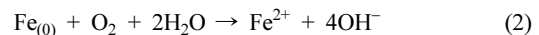
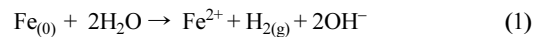


Fig. 4. Pore characteristics of pellets measured by mercury intrusion.

은 (1)식과 (2)식의 반응이 일어날 수 있으므로 영가철의 함유량이 높을수록 pH가 높게 나타난다고 볼 수 있다.<sup>7)</sup> 이와 같은 반응으로  $\text{Fe}^{2+}$  이온이 많이 생성될 경우 (3)식 및 (4)식과 같은 반응에 의해 철의 산화물과 수산화물이 생성되며 pH를 낮출 수도 있다.<sup>7,8)</sup>



중금속 불용화의 효과가 가장 좋았던 것은 비소의 경우로 1시간 이내에 99.9% 이상이 불용화되었다. 비소의 불용화과정을 고찰해보면 본 연구와 같이 철이 여러 상태로 존재하는 경우에는 다음 문헌의 주장이 들어맞는다. 즉, 실험에 사용한 비소는 As(V)이며 측정된 pH는 4~6범위이므로 이 범위에서 존재하는 비소이온의 형태는  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ 이다.<sup>1)</sup> 철산화물의 존재하는  $\text{Fe}^{2+}$  수용액에 비소가 투입되면  $\text{Fe}^{2+}$ 와  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ 가 철산화물 표면에 같이 흡착되며 비소는  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ 로 환원된다. 그리고  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ 가 철산화물 표면의 Fe(II), Fe(III)와 반응하여 고체상( $\text{Fe}_2\text{AsO}_4$ )을 형성되어 불용화한다.<sup>1,9)</sup>

구리의 경우는 철산화물을 10% 혼합한 1100°C의 펠릿이 가장 효과적으로 1시간에 0.5 ppm, 그리고 4시간

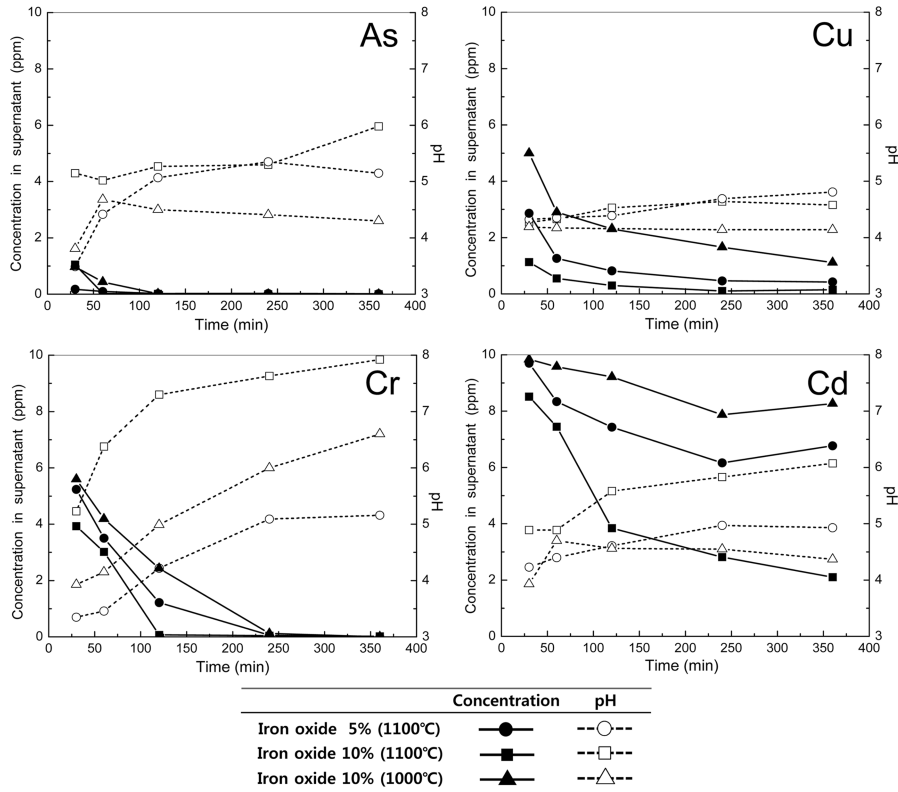
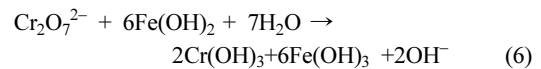
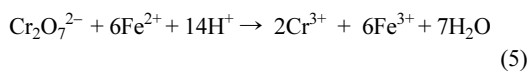


Fig. 5. Variation of pH and concentration of residual metals in supernatant.

에 0.1 ppm까지 낮아졌다. 1000°C의 펠릿은 6시간에 1.1 ppm까지 낮아져서 산화물 상태보다 영가철이 더 효과가 있음을 알 수 있었다.

크롬의 경우 1100°C의 펠릿이 2시간에 0.07 ppm이하로 낮아져 99.9%이상이 불용화되었고 철산화물이 많을수록, 가열온도가 높을수록 불용화도가 높았다. 크롬의 불용화과정을 고찰해보면 Fe(II)가 환원제로 작용하여 Cr(VI)를 다음 식 (5)와 같이 환원시킬 수 있고 Cr(III)는 용해도가 낮아 쉽게 불용화된다. 그리고 식(4)와 같이 철수산화물이 생긴다고 가정하면 이는 식(6)과 같이 작용하여 크롬을 수산화물로 불용화시킬 수 있다.<sup>10)</sup> 또한 식(4)는 수산화이온을 소모하여 pH를 낮추지만 식(6)은 수산화이온을 생성시켜 낮아진 pH를 높일 수 있고, 이로 인해 철산화물 10%(1100°C)의 경우 pH가 7.92까지 이르렀다.



카드뮴은 다른 금속에 비해 불용화도가 낮아서 철산화물 10%(1100°C)의 경우도 6시간에 2.1 ppm까지 불용화시킬 수 있었다. 카드뮴의 불용화과정은 산화-환원 반응으로 영가철표면에 카드뮴이 흡착되며 매우 효과적인 불용화방법으로 알려졌으나<sup>11)</sup> 본 연구에서는 효과가 높지 않은 것으로 나타났나 이에 대한 추가 연구가 필요하다고 생각된다.

불용화제가 처리할 수 있는 중금속의 양을 평가하기 위해 50 ppm까지 농도를 높여서 1시간, 2시간의 반응 시간을 주어 평가하였다. Fig. 6의 결과를 보면, 비소의 경우에 2시간만에 5%의 철산화물을 혼합한 펠릿도 0.1 ppm이하까지 불용화가 가능하였다. 구리의 경우도 2시간의 반응시간에 5%의 철산화물을 혼합한 펠릿이 5.4 ppm이하까지, 그리고 10%의 펠릿이 2.6 ppm까지 불용화가 가능하였다. 크롬의 경우 10%의 펠릿이

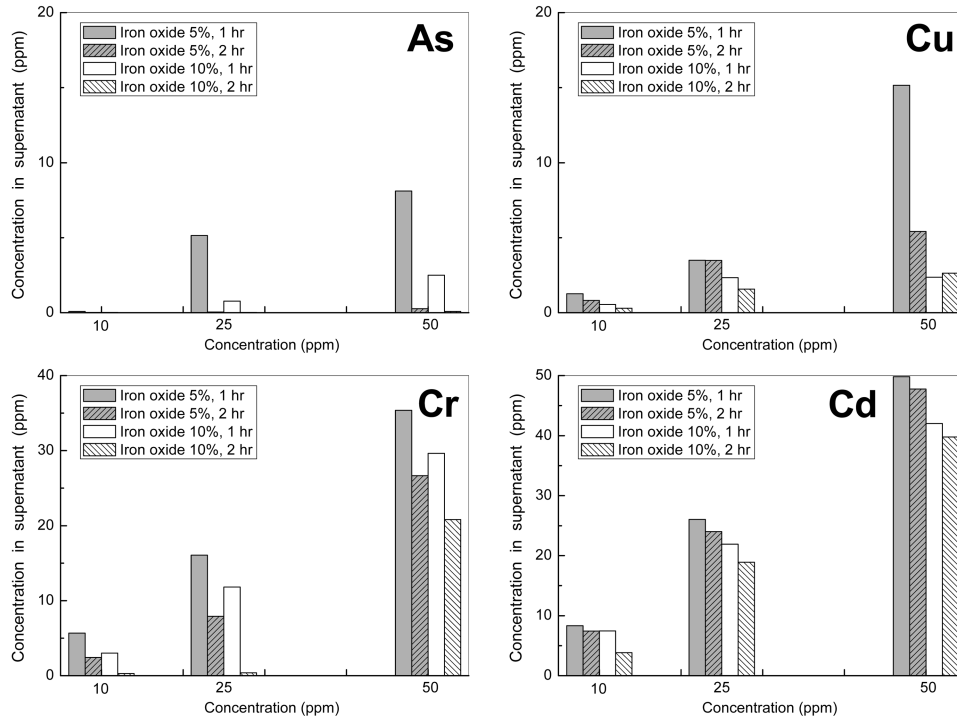


Fig. 6. Concentration of residual metals in supernatant as variation of initial concentration.

25 ppm용액까지는 2시간만에 불용화하였으나 50 ppm용액에서는 20.8 ppm까지만 가능하였다. 카드뮴의 경우는 불용화도가 낮았고 농도가 높을수록 불용화 정도는 더욱 낮아서 5% 펠릿의 경우 50 ppm에서 거의 불용화하지 못하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 선탄경석은 환경재료로서 세라믹담체를 제조하는데 적절하고, 또한 철산화물과 혼합하여 제조할 경우에는 선탄경석이 함유한 탄질물에 의해 철산화물을 환원시켜 담체내에 영가철을 제조할 수 있다. 그리고 제조한 펠릿은 비소, 구리, 크롬 등의 불용화제로 활용할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 선탄경석과 철산화물 모두 부산물로 발생하는 양이 많기 때문에 경제성이 높다고 볼 수 있다. 본 기술을 이용하여 선탄경석이 발생하는 광업소부근의 환경을 개선하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

선탄경석을 순환자원화하기 위한 방법으로 철산화

물과 혼합하여 중금속의 불용화제를 제조하고 이의 적정제조 조건과 불용화 성능을 평가하였다. 선탄경석을 60 mesh이하로 분쇄한 후 철산화물분말과 혼합하여 3~5 mm크기의 구형 펠릿을 제조하였다. 공기를 차단하고 펠릿을 가열한 결과, 1100°C부터 선탄경석에 함유된 탄질분에 의해 철산화물이 환원되어 영가철이 생성될 수 있음을 알 수 있었다. 제조된 불용화제는 구형의 다공체로서 공극률은 34.63%, 겉보기 밀도는 1.31 g/mL, 공극의 평균크기는 9.82  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 불용화제를 비소(V), 구리(II), 크롬(VI), 카드뮴(II)이 약 10 ppm 함유된 각각의 중금속 용액과 반응시킨 결과, 영가철이 생성된 1100°C의 펠릿이 중금속 불용화도가 높고 pH를 더 증가시키는 것으로 나타났다. 중금속의 99.9% 이상이 불용화되기까지 비소의 경우 1시간, 크롬의 경우 2시간, 구리의 경우 4시간이 필요하였다. 농도를 50 ppm까지 시험한 결과, 비소는 2시간 만에 50 ppm까지, 크롬과 구리는 25 ppm까지 불용화되었다. 그러나 카드뮴의 경우 불용화도가 낮게 나타났고 중금속농도가 높을수록 불용화도가 더 낮아지는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. Fields, K. Chen, A., Wang, L., 2000 : Arsenic removal from drinking water by iron removal plants, EPA report, EPA/600/R-00/086.
2. Kanel, S.R., Manning, B., Charlet, L. and Choi, H., 2005 : Removal of arsenic(III) from groundwater by nanoscale zero-ValentIron, Environ. Sci. Technol., **39**(5), pp12911298.
3. 전병훈, 김선준, 이상훈, 정우식, 2008 : 토양 및 지하수의 비소오염과 제거기술 동향, 광해방지기술, **2**(1), pp3~13.
4. Song, T., Ahn, J. and Kang, H., 1967 : Study on the utilization of coal-refuse: Fundamental studies on the production of fireproof material and lightweight aggregate from coal refuse (part 1), J. of the Korean Society for Geosystem Eng., **4**, pp21-28.
5. Hyun, J., Jeong, S. and Chae, Y., 2005 : Utilization of a coal-preparation refuse as a raw material for clay brick, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, **14**(4), pp3-9.
6. Jeong, S., 2004 : Effective utilization for the domestic coal refuse, Research Report of Korea Ins. Geosci. Mineral Res., KR-04(C)-19.
7. Giasuddin, B. M. A., Kanel R. S., Choi H., 2007 : Adsorption of Humic Acid onto Nanoscale Zerovalent Iron and Its Effect on Arsenic Removal, Environ. Sci. Technol., **41**(6), pp2022 - 2027.
8. Lim J., Kim K., Lee, S., Kwon O., Yang J., Ok Y., 2010 : Stabilization of As (arsenic(V) or roxarsone) contaminated soils using zerovalent iron and basic oxygen furnace slag, Kor. Soc. Env. Eng., **32**(6), pp631-638.
9. William, R. R., Mitch, L., Jonathon, M., Gordon, M. P., 2004 : Arsenic Removal from Aqueous Solution via Ferrihydrite Crystallization Control, Environ. Sci. Technol., **38**(8), pp2368–2372.
10. Mouedhena, G, Fekia, M., Petris-Weryb, M., Ayedi, H.F., 2009 : Electrochemical removal of Cr(VI) from aqueous media using iron and aluminum as electrode materials: Towards a better understanding of the involved phenomena, J. of Hazardous Materials, **168**, pp. 983-991.
11. Boparai, K. H., Joseph, M., O' Carroll, M. D., 2011 : Kinetics and thermodynamics of cadmium ion removal by adsorption onto nano-zerovalent iron particles, J. of Hazardous Materials, **186**, pp458–465

---

李 桂 承

- 2002년 8월 인하대학교 자원공학과 공학박사
  - 강원대학교 삼척캠퍼스 에너지자원공학과 조교수
- 

---

宋 泳 俊

- 현재 강원대학교 재료금속공학과 부교수
  - 당 학회지 제 19권 2호 참조
-