

석탄 바닥회를 이용한 광산배수의 중금속 제거 공정 연구

김혜림 · §이정미 · 한인규

한국광물자원공사 기술기획팀

The Study on the Removal Process of Heavy Metals from Mine Drainage Using Coal Bottom Ash

Hye Rim Kim, §Jung Mi Lee and In Kyu Han

Technology planning team, Korea Resources Corporation, Wonju 26464, Korea

요 약

본 연구는 유동층 석탄보일러에서 발생하는 석탄 바닥회를 중금속 처리제로 활용하기 위하여 수행하였으며, 산성광산배수 중의 중금속 성분을 제거하기 위한 실험을 실시하였다. 대상 중금속은 구리, 카드뮴, 크롬, 납으로 선정하여 산성광산배수 모사액을 제조하였고, 석탄회 첨가량, 시험용액의 초기 중금속 농도에 대한 제거실험을 실시하였다. 실험결과, 석탄회 농도가 중량물 시료 15 g/L, 경량물 시료 10 g/L로 첨가된 조건에서 총 중금속의 제거능은 각각 30.8 mg/L, 46.4 mg/g로 나타났다. 이후 비소를 추가하여 5종 중금속에 대한 최대 제거능을 파악하기 위하여 장기 컬럼실험을 실시하였으며, 각각의 중금속 성분에 대한 제거능을 조사하였고, 약 60일간 가동 후 pH 9.25에서 최대 중금속 제거능은 23.6 mg/g이었다.

주제어 : 석탄회, 산성광산배수, 중금속, 제거

Abstract

This study was carried out to utilize the coal bottom ash generated in a circulating fluidized bed combustion boiler as a treatment agent for heavy metal ions, and experiments were conducted to remove heavy metal ions from the acid mine drainage. The batch experiments were conducted to investigate the influence of dosage of ash, initial concentration of solution on the removal capacity of heavy metal ions (Cu, Cd, Cr, Pb). The results of the experiment showed that the total removal capacity of heavy metals was 30.8 mg/L and 46.4 mg/g, respectively, under the condition that the concentration of coal ash was added as 15 g/L of heavy materials and 10 g/L of light materials. After that, a long-term column experiment was performed to determine the maximum removal capacity of heavy metal ions (Cu, Cd, Cr, Pb, As), and the removal capacity for each metal component was investigated. After approximately 60 days of operation, the maximum removal capacity of heavy metals was 23.6 mg/g at pH 9.25.

Key words : coal ash, acid mine drainage, heavy metals, removal

· Received : October 23, 2020 · Revised : December 4, 2020 · Accepted : December 11, 2020

§ Corresponding Author : Jung Mi Lee (E-mail : zenithlee@kores.or.kr)

Technology Planning Team, Korea Resources Corporation, 199, Hyeoksinsin-ro, Wonju-si, Gangwon-do 26464, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. 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.

1. 서 론

석탄회는 석탄화력발전소에서 부산물로 발생하는 회(재)로, 국내 석탄화력발전소에서는 매년 800만 톤 이상의 석탄회가 배출되고 있다¹⁾. 석탄회의 종류는 공정 위치에 따라 비산회(fly ash)와 바닥회(bottom ash)로 구분할 수 있으며, 비산회는 화력발전소 보일러의 연소 가스가 집진장치를 통과할 때 포집되는 석탄회로 총 석탄회 발생량의 70~90%를 차지하고, 바닥회는 보일러 내에서 연소한 후 하부로 낙하되는 입경이 큰 회성분으로 전체 석탄회 발생량 중 10~30%를 차지한다²⁻⁴⁾.

전 세계에서는 그동안 미분탄 연소방식(pulverized coal combustion, PCC)의 화력발전이 주를 이루었으나, 최근 들어 순환유동층방식(circulating fluidized bed combustion, CFBC)의 보일러가 건설되어 운영되는 추세이다. 미분탄 연소방식의 보일러에서 발생하는 석탄회는 연소온도가 높고, 연소실의 상승기류 속도가 낮으며 별도의 탈황 설비를 운영하기 때문에 실리카 함량이 높은 과상으로 산출되는 것을 특징으로 한다. 반면 순환유동층방식의 보일러에서 발생하는 석탄회는 연소온도가 낮고, 연소실의 상승기류 속도가 빠르며 연소실 내에 직접 탈황용 석회석을 투입하기 때문에 유리석회(free lime, CaO)와 무수석고(anhydrous gypsum, CaSO₄) 등의 함량이 풍부하고 미세한 입자로 산출된다^{2,5-6)}.

석탄회가 함유하는 생석회, 무수석고, 산화마그네슘 등 다수의 화합물은 알칼리도가 높은 특성을 가지므로 산성용액을 중화시키는 데 용이하다. 또한, 물리적으로 다공성 구형 입자, 입도 10~100 μm(평균 20~30 μm), 비표면적 2,000~4,000 cm²/g의 특성을 갖고 있어 흡착제로의 활용성이 뛰어난 물질로 알려져 있다⁷⁻⁸⁾. 따라서 석탄회를 활용하면 폐광산에서 발생하는 산성광산배수(acid mine drainage, AMD)를 중화시키면서 광산배수 내 가용성 중금속을 효과적으로 흡착 및 침전시켜 제거할 수 있을 것으로 보인다^{9,10)}.

본 연구의 목적은 순환유동층방식의 석탄화력발전소에서 발생하는 석탄 바닥회를 재활용하기 위하여 수행되었으며, 석탄회의 주성분인 석회와 무수석고의 특성을 이용하여 산성광산배수를 중화시키면서 중금속 처리제의 원료로 활용하기 위한 기초연구를 수행하였다. 석탄회 첨가량, 산성광산배수의 중금속 농도 변화에 따른 중금속 성분별 제거실험을 수행하였고, 장기 컬럼실험을 통하여 석탄회의 최대 중금속 제거능을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 석탄회 시료

본 연구를 위한 중금속 처리제로 강원 영동지역 화력발전소의 유동층 석탄보일러에서 발생한 석탄 바닥회를 제공받아 사용하였으며, 체질과 비중선별을 통한 조립분의 중량물과 미립분의 경량물로 분류하여 2종의 시료를 준비하였다. 각각의 시료는 50°C 건조기에서 24시간 이상 건조한 후 사용하였으며, 세부 성상을 파악하기 위하여 XRD(D/Max-2500V, Rigaku)와 XRF(ARL PERFORM X, Thermo Fisher Scientific)를 사용하여 분석하였다. 중금속 제거실험은 2종의 시료를 사용하여 각각의 시료에 대한 비교실험을 진행하였고, 장기 컬럼실험은 경량물 시료의 경우 다량의 미립분으로 인하여 컬럼 용출 시에 투수성이 낮아 중량물 시료만을 사용하여 진행하였다.

2.2. 중금속 제거실험

중금속 제거실험을 위한 오염물질로 구리, 크롬, 카드뮴, 납을 선정하였으며, 증류수에 염화물 형태의 시약(CdCl₂, CrCl₃, CuCl₂, PbCl₂)을 첨가하여 중금속 농도가 각각 약 50~200 mg/L가 되도록 모사 산성광산배수를 제조하였다. 제조한 시험용액 100 mL에 석탄회를 5~20 g/L 농도가 되도록 첨가하여 상온의 진탕배양기 내에서 1시간 동안 교반하며 반응을 진행하였다. 반응이 끝난 슬러리는 pH를 측정 후 원심분리하여 상등액을 채취하였으며, ICP-OES(5110VDV, Agilent Technologies)를 사용하여 반응 전·후 용액의 중금속 농도를 분석하였다.

중금속 처리제에 의한 중금속의 제거능은 식 (1)과 같이 계산되었다.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \quad (1)$$

식에서 q_e 는 중금속 처리제 단위 질량당 제거된 중금속량(mg/g), C_0 는 시험용액의 초기 중금속 농도(mg/L), C_e 는 반응 후 용액의 잔류 중금속 농도(mg/L), V 는 시험용액 부피(L), W 는 처리제의 질량(g)이다.

2.3. 장기 컬럼실험

석탄 바닥회 시료의 최대 중금속 제거능을 파악하기 위

Table 1. Concentration of major metals in AMD and synthetic AMD (Unit : mg/L)

Sample	pH	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
AMD	3.43	0.03	0.01	0.03	0.11	0.05	12.06	552.49
Synthetic AMD	3.41	199.55	197.23	203.75	225.32	20.22	1,257.94	758.71

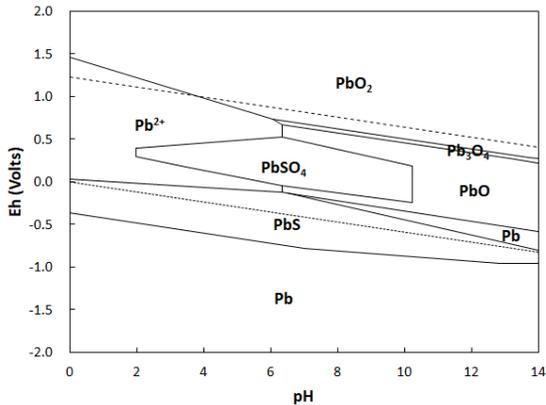


Fig. 1. Eh-pH Diagram for Pb-S-O system at 25°C by HSC Chemistry.

하여 장기 컬럼실험을 진행하였으며, 컬럼실험을 위한 시험용액으로 강원도 정선 소재의 광산 폐수처리장 유입수를 채수하였다. 채수한 산성광산배수 용액을 분석한 결과 중금속 성분이 미량으로 나타났으므로, 광산배수에 오염물질로 구리, 크롬, 카드뮴, 납, 비소 5종의 중금속 시약 (CdCl₂, CrCl₃, CuCl₂, PbCl₂, As₂O₃)을 첨가하여 각 중금속 농도가 약 200 mg/L이 되도록 시험용액을 제조하였다. 실제 광산배수 용액과 모사 광산배수 용액의 조성을 Table 1에 나타내었으며, 납의 경우 시험용액 중의 농도가 20.2 mg/L로 첨가량 대비 낮은 농도로 분석되었다. 이는 앞서 채수한 광산배수가 다량의 황산염(sulfate, SO₄²⁻)을 함유하고 있음에 따라 납이 황산염과 반응하여 황산납(lead sulfate, PbSO₄) 형태로 침전된 것으로 보이며, Fig. 1의 Eh-pH 다이어그램에 따라 pH 3 이상의 영역에서 황산납이 쉽게 침전됨을 알 수 있고, 실제 시험용액 제조 시 과량의 침전물이 발생하는 것을 확인하였다.

컬럼실험을 위하여 지름 150 mm, 높이 600 mm 규격의 아크릴 컬럼을 제작하였으며, 반응 후 용출액을 채취하기 위하여 컬럼 하부에 밸브를 설치하였다. 설치한 아크릴 관에 석탄회 중량시료 5kg을 충전하였으며, 증류수를 아크릴 관 하부로부터 천천히 주입하여 석탄회 층 사이의 공기를 완전히 추출하였다. 충전층 상단까지 증류수가 도달

하였을 때 증류수의 주입을 차단한 후, 충전층 상단부로부터 시험용액을 주입하면서 하부밸브를 열어 시험용액을 석탄회 층으로 유입시키고 24시간 동안 정치시켰다. 24시간 후 충전층 상부에 또다시 시험용액을 유입시킨 다음 하부밸브를 열어 1 pore volume의 용출액을 채취하였으며, pH를 측정 후 원심분리하여 상등액에 대한 중금속 농도를 측정하였다. 이와 같은 조작을 석탄회의 중금속 처리능이 소실될 때까지 수행하였고, 실험종료 후, 용출액을 모두 배출하였다. 이후 반응이 끝난 잔사를 아크릴 관 상부에 서부터 하부까지 5구간으로 나누어 채취하였으며, 일정시간 건조시킨 후 중금속 침전농도를 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 석탄회의 물성

석탄 바닥회의 XRF 분석결과를 Table 2에 나타내었으며, 중량물 시료의 경우 이산화규소(SiO₂)와 산화알루미늄(Al₂O₃), 산화칼슘(CaO)을 주성분으로 하며, 산화철(III)(Fe₂O₃), 산화마그네슘(MgO), 무수황산(SO₃) 등을 일부 함유하고 있는 것으로 나타났다. 경량물 시료의 경우에는 산화칼슘(CaO)과 무수황산(SO₃)이 높은 함량을 나타내었는데, 이는 시료 중의 칼슘 성분이 황산칼슘(CaSO₄) 형태로도 일부 존재한다고 볼 수 있다. 석탄회 시료는 수용액 상에서 9~11 정도의 높은 pH 값을 나타내는데, 이는 석탄회가 함유하고 있는 알칼리도가 높은 화합물인 산화칼슘, 산화마그네슘 등이 액상으로 용출되면서 용액 상의 수산화기(hydroxy group, OH⁻) 농도가 증가하기 때문으로 보인다. 따라서 석탄회 시료와 산성광산배수가 접촉하면 광산배수 내 가용성 중금속을 불용성 형태로 변환하여 수산화물로 침전시킬 수 있다⁷⁾. 석탄회를 중금속 처리제로 사용할 때 중금속을 함유하고 있는 용액의 pH가 금속 수산화물이 형성되는 pH 범위에 가까워질수록 흡착 또는 분리가 잘되는 것을 볼 수 있다. 이는 금속 수산화물 침전 반응과 중금속 흡착반응이 다른 성격이라 할 수 있지만, 실제로는 금속 수산화물의 형성은 용액의 pH와 함께 흡

Table 2. Chemical composition of bottom ash samples (Unit : Wt%)

Sample	Size (μm)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	As ₂ O ₃	CdO	Cr ₂ O ₃	CuO	PbO
Heavy materials	P ₈₀ >250	11.8	49.0	23.5	3.1	1.9	5.9	-	-	0.026	0.004	0.004
Light materials	P ₈₀ <44	41.9	11.1	6.8	6.5	3.6	28.3	0.015	-	0.014	0.013	0.005

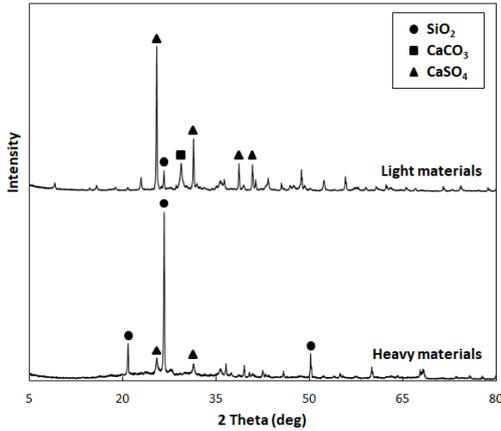


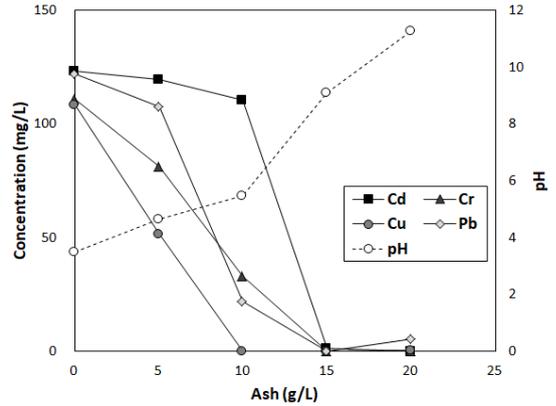
Fig. 2. XRD patterns of bottom ash samples.

착에 밀접한 영향이 있다고 볼 수 있다¹¹⁾.

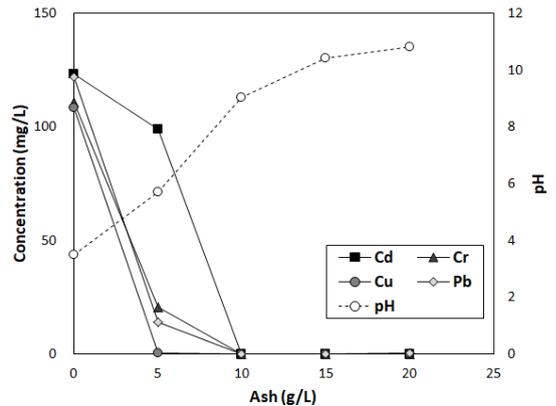
Fig. 2는 두 시료의 XRD 그래프로 중량물의 경우 이산화규소와 황산칼슘이 주로 검출되었으나 경량물 분석 결과에서는 황산칼슘의 피크가 더욱 강하게 검출되었고 탄산칼슘도 일부 검출된 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 경량물 시료의 경우 산성용액에 대한 중화능이 다소 높게 나타날 것으로 보이며, 이에 따라 중금속 제거율도 우수할 것으로 예측하였다.

3.2. 중금속의 제거 특성

석탄회 첨가량에 대한 중금속의 제거 특성을 조사하기 위하여 4종 중금속 농도가 각각 100 mg/L가 되도록 제조한 시험용액 100 mL에 석탄회 시료 2종을 5, 10, 15, 20 g/L 농도가 되도록 각각 첨가하여 실험을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 중량물 시료 첨가량에 따른 용액의 pH 및 중금속의 잔류농도를 나타낸 그래프로, pH 변화곡선을 보면 석탄회 첨가량이 증가할수록 용액의 pH가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 석탄회가 함유하는 알칼리성 화합물인 산화칼슘(CaO), 산화나트륨(Na₂O), 산화마그네슘(MgO) 등이 산성용액과 반응하면서 수용액 상으로 용출되어 용액의 pH를 상승시키는 것



(a) Heavy materials



(b) Light materials

Fig. 3. Variation of pH and residual concentration of heavy metals from bottom ash as a function of ash dosage.

으로 보이며, 이에 따라 중금속 성분은 수산화물 형태로 침전되어 제거된다. 석탄회 첨가량에 대한 중금속의 잔류농도를 보면 석탄회 농도 10 g/L의 조건에서 카드뮴의 잔류농도는 110.4 mg/L로 초기농도 123.0 mg/L 대비 매우 낮은 제거율을 나타내었으나, 크롬과 납은 각각 33.1 mg/L, 22.0 mg/L로 잔류하였으며 상당 부분 제거된 것을 확인하였다. 구리의 경우 잔류농도는 0.16 mg/L로 99.9% 이상 제거되었으며, 이에 따라 구리의 제거율이 가장 우수

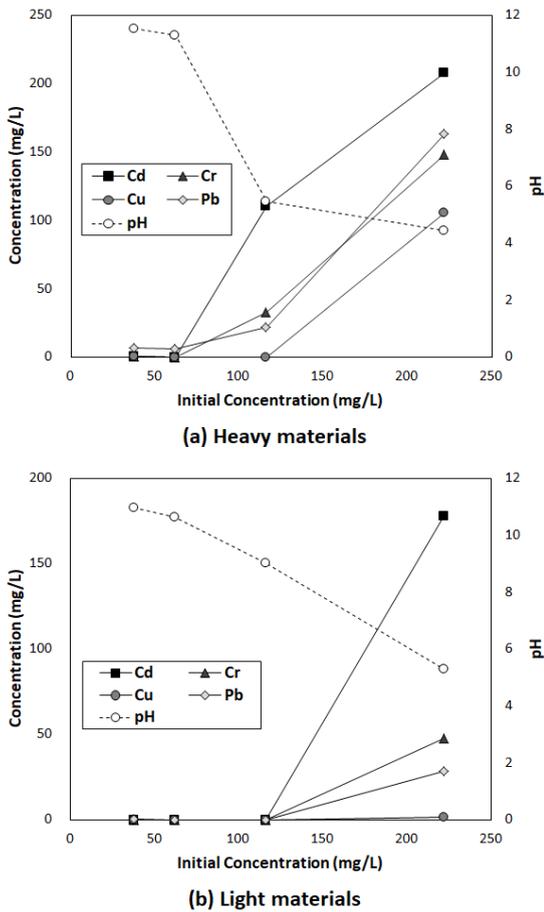


Fig. 4. Variation of pH and residual concentration of heavy metals from bottom ash as a function of initial concentration.

함을 알 수 있다. 석탄회 농도 15 g/L 조건에서 중금속의 잔류농도는 Cd 1.1 mg/L, Cr 0.2 mg/L, Pb 0.2 mg/L, Cu 0.2 mg/L로 모든 성분이 99% 이상 제거되었으며, 이때 중금속 제거능은 Cd 8.1 mg/g, Cr 7.4 mg/g, Pb 8.1 mg/g, Cu 7.2 mg/g이며 총 제거능은 30.8 mg/g으로 계산되었다. Fig. 3(b)는 경량물 시료 첨가량에 따른 용액의 pH 및 중금속 잔류농도를 나타낸 그래프로, 석탄회 5 g/L 조건에서 카드뮴을 제외한 모든 성분의 잔류농도가 급격하게 감소하였으며 중량물 시료에 비해 제거능이 우수한 것을 확인하였다. 이는 앞선 분석결과에서 나타낸 것과 같이 중량물 시료의 주성분이 이산화규소, 산화알루미늄 등인 것에 반해 경량물 시료의 주성분은 산화칼슘으로 알칼리성 화합물을 다량 함유하고 있기 때문으로 보인다. 석탄

회 10 g/L 조건에서 모든 성분의 잔류농도는 0.1 mg/L 이하로 대부분 제거되었으며, 이때의 중금속 제거능은 Cd 12.3 mg/g, Cr 11.1 mg/g, Pb 12.2 mg/g, Cu 10.8 mg/g이며 총 제거능은 46.4 mg/g으로 계산되었다.

광산배수 중의 초기 중금속 농도에 대한 중금속 제거 특성을 조사하기 위하여 4종 중금속이 각각 약 40, 60, 100, 200 mg/L가 되도록 제조한 시험용액 100 mL에 석탄회 농도 10g/L가 되도록 첨가하여 실험을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 중량물 시료에 대한 실험 결과이며, 초기농도가 100 mg/L 이상으로 증가하면 반응 후 용액의 pH가 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 초기 중금속 농도 60 mg/L 조건에서 납을 제외한 모든 중금속 성분은 0.1 mg/L의 잔류농도를 나타내었으며, 납의 잔류농도는 6.04 mg/L로 분석되었다. 이때의 중금속 제거능은 Cd 6.7 mg/g, Cr 5.9 mg/g, Pb 5.8 mg/g, Cu 5.8 mg/g이며 총 제거능은 24.3 mg/g으로 계산되었다. 초기농도 100 mg/L 이상에서 카드뮴의 잔류농도는 급격하게 증가하였으며, 크롬과 납의 경우도 일부 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 반응 후 용액의 pH가 5.5 이하로 하락함에 따라 충분히 중금속 수산화물을 침전시키지 못했기 때문으로 보인다. Fig. 4(b)는 경량물 시료에 대한 실험 결과로, 초기농도가 100 mg/L로 증가할 때까지 모든 중금속 성분은 대부분 제거되는 경향을 나타내었으며, 200 mg/L 이상의 농도에서 카드뮴의 잔류농도가 급격하게 증가하였고, 크롬과 납의 경우도 상당량 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 구리의 경우 잔류농도 1.4 mg/L로 대부분 제거되었는데, 이를 통하여 구리의 경우 pH 범위 5 이상의 조건에서 효과적으로 침전 제거시킬 수 있음을 알 수 있다.

3.3. 장기 컬럼실험

회분식 실험에 사용한 중금속 4종에 비소를 추가하여 총 5종 중금속(As, Cd, Cu, Cr, Pb) 농도가 각각 200 mg/L가 되도록 시험용액을 제조하여 장기 컬럼실험을 수행하였다. Fig. 5는 컬럼 가동시간에 따른 pH 변화 및 중금속 잔류농도를 나타낸 그래프로, 컬럼 가동시간이 증가함에 따라 용액의 pH가 지속적으로 감소하는 것을 확인하였다. 초기 용출액 중의 중금속 농도는 1 mg/L 이하로 미량의 잔류농도를 나타내었으며, 약 60일이 경과하여 용액의 pH가 7~9 수준으로 감소하였을 때 카드뮴과 비소의 잔류

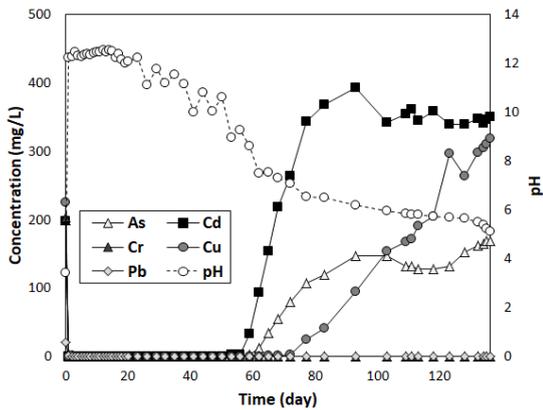


Fig. 5. Variation of pH and residual concentration of heavy metals from bottom ash as a function of elution time.

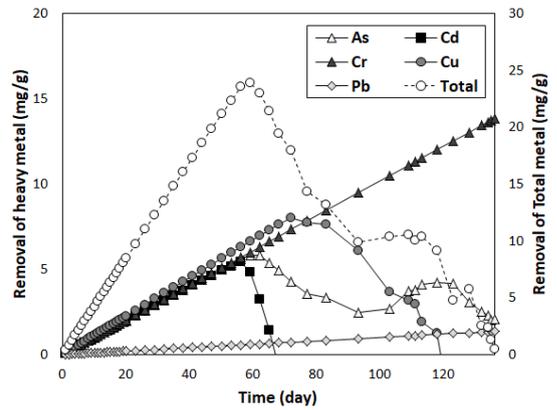


Fig. 6. Variation of removal capacity of heavy metals from bottom ash as a function of elution time.

Table 3. Chemical composition of bottom ash samples after column test (Unit : Wt%)

Sample	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	As ₂ O ₃	CdO	Cr ₂ O ₃	CuO	PbO
Heavy materials	11.79	49.00	23.45	-	-	0.026	0.004	0.004
Residue 1	0.76	18.79	11.34	20.83	0.14	26.40	0.55	2.38
Residue 2	1.09	26.33	14.04	15.65	0.07	21.44	0.46	1.77
Residue 3	2.06	35.51	20.29	6.22	0.03	13.23	0.45	0.49
Residue 4	2.13	38.86	23.50	4.19	0.03	10.26	0.59	0.34
Residue 5	2.82	45.15	23.75	3.20	1.02	2.64	5.06	0.15

농도가 증가하면서 중금속 제거율이 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 이는 카드뮴과 비소를 충분히 침전제거시키기 위하여 용액의 pH를 9 이상으로 유지시켜주어야 함을 나타낸다. 특히 카드뮴의 경우에는 약 70일이 경과하여 pH가 7.3 이하로 감소하면 용출액 중의 잔류농도가 초기 용액의 농도보다 증가하는 현상을 나타내었는데, 이는 용액의 pH가 감소함에 따라 이미 생성된 카드뮴 수산화물 침전이 용액 상으로 재용출된 것으로 보인다. 컬럼 가동이 약 80일간 경과하여 pH가 6.5 이하로 감소한 시점부터 구리의 잔류농도가 급격하게 증가하였으며, 이후 컬럼 가동시간이 증가함에 따라 구리도 역시 재용출되는 것을 확인하였다. 크롬과 납의 경우 pH가 5 수준으로 감소할 때까지 잔류농도 1 mg/L 이하로 미량을 나타내었다. 이는 낮은 pH 범위에서도 수산화물 침전물을 형성할 수 있음과 동시에, 광산배수가 다량 함유하고 있는 황산염 성분이 크롬 및 납과 반응하면서 황산화물 침전을 형성하여 대부분 제거된 것으로 보인다. 장기 컬럼실험 결과에 따른 잔류농도를 바탕으로 중금속 성분별 제거능을 계산하였

으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 상기 실험에서의 모든 중금속 성분을 고려한 최대 제거능은 컬럼 가동이 약 60일간 경과하여 pH 9.2로 감소한 시점이고, 각 중금속별 제거능은 As 5.6 mg/g, Cd 5.4 mg/g, Cr 5.7 mg/g, Pb 0.57 mg/g, Cu 6.3 mg/g이며 총 제거능은 23.6 mg/g이다.

Table 3은 컬럼실험 후의 석탄회 잔사를 구간별로 채취하여 분석한 결과이다. 비소와 크롬의 경우 잔사 중에서 다량이 검출되었는데, 크롬의 경우에는 앞선 잔류농도 그래프에서 나타난 것과 같이 용액 중으로 거의 용출되지 않았으므로 다량의 침전물을 형성한 것으로 보인다. 카드뮴, 구리, 납의 경우 잔사 중의 성분이 미량으로 검출되었는데, 카드뮴과 구리는 대부분의 성분이 산성용액 중으로 용출되면서 침전물이 적게 생성된 것으로 보인다. 납은 컬럼실험 전에 이미 시험용액에서 대부분이 침전되어 소실되었다.

4. 결 론

강원 영동지역의 유동층석탄보일러에서 회수한 석탄

바닥회는 산화칼슘(CaO), 산화나트륨(Na₂O), 산화마그네슘(MgO) 등 알칼리성 화합물을 주성분으로 하므로, 폐광산에서 배출되는 산성광산배수의 중화 및 광산배수 중의 중금속 처리에 효과적이다. 석탄 바닥회를 증량물과 경량물 시료로 분류하여 각각의 중금속 제거실험을 수행하였으며, 증량물의 경우 바닥회 농도 15 g/L 조건에서 모든 중금속 성분이 99% 이상 제거되었고, 이때의 중금속 제거능은 Cd 8.1 mg/g, Cr 7.4 mg/g, Pb 8.1 mg/g, Cu 7.2 mg/g, 총 제거능은 30.8 mg/g로 나타났다. 경량물의 경우 산화칼슘 성분을 주성분으로 하므로 더 우수한 효율을 나타내었고, 바닥회 농도 10 g/L 조건에서 제거능은 Cd 12.3 mg/g, Cr 11.1 mg/g, Pb 12.2 mg/g, Cu 10.8 mg/g, 총 제거능은 46.4 mg/g로 나타났다. 석탄 바닥회를 사용한 최대 중금속 제거능을 파악하기 위한 장기 컬럼실험에서 모든 중금속 성분을 효과적으로 제거하기 위하여 pH가 9.2 이상이 되어야 함을 알 수 있었고, 이때의 각 중금속 제거능은 As 5.6 mg/g, Cd 5.4 mg/g, Cr 5.7 mg/g, Pb 0.57 mg/g, Cu 6.3 mg/g이며 총 제거능은 23.6 mg/g으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “이전공공기관연계 육성사업(과제번호 : P0002063)”의 지원을 받아 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

References

1. Suh, D. H., Maeng, J. H., 2015 : A Study on expanding the recycling of coal ash for minimizing environmental impact imposed by the establishment of thermal power plant ash ponds, J. Environmental Impact Assessment, 24(5), pp. 472-486.
2. Jang, J. G., Ji, S. W., Ahn, J. W., 2017 : Utilization of circulating fluidized bed combustion ash and related specifications for mine backfills, J. Korean Institute of Resources Recycling, 26(2), pp.71-79.
3. Chae, D. H., Kim, K. O., Shin, H. Y., et al., 2014 : Dynamic characteristics of liquidity filling materials mixed with reclaimed ash, J. Korean Geo-Environmental Society, 15(4), pp.5-11.
4. Yoo, J. C., Ji, S. W., Ahn, J. W., et al., 2017 : A case study of mine environment restoration using coal ash, J. Korean Institute of Resources Recycling, 26(2), pp.80-88.
5. Basu, P., 1999 : Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: a review, Chemical Engineering Science, 54(22), pp.5547-5557.
6. Manz, O. E., 1997 : Worldwide production of coal ash and utilization in concrete and other products, Fuel, 76(80), pp. 691-696.
7. Oh, S. J., Kim, S. C., Ko, J. I., et al., 2011 : Evaluating stabilization efficiency of coal combustion ash (CCA) for coal mine wastes: column experiment, Korean J. Soil Science and Fertilizer, 44(6), pp.1071-1079.
8. Kwon, S. D., Kim, S. J., 1999 : A Study on the treatment of the acid mine drainage using the steel mill slag, J. Soil and Groundwater Environment, 6(4), pp.206-212.
9. Hwang, J. H., Chon, H. T., Jung, M. C., 1999 : A study on the treatment of the acid mine drainage in the vicinity of the dogye coal mine, Korea, J. Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 36(4), pp.260-268.
10. Song, Y. J., Lee, G. S., Shin, K. H., et al., 2012 : Adsorption of heavy metals on sludge from the treatment process of acid mine drainage, J. Korean Institute of Resources Recycling, 21(4), pp.35-43.
11. Yoo, J. K., Hong, S. C., Kim, I. K., et al., 1997 : The adsorption characterization of coal fly ash for removal of heavy metals from waste water, J. Korean Society of Environmental Engineers, 19(5), pp.651-660.

김혜림

- 과학기술연합대학원대학교 자원순환공학과 석사
 - 현재 한국광물자원공사 기술기획팀 과장
-

이정미

- Colorado School of Mines 자원공학과 박사
 - 현재 한국광물자원공사 기술기획팀 팀장
-

한인규

- 과학기술연합대학원대학교 자원순환공학과 석사
 - 현재 한국광물자원공사 기술기획팀 선임과장
-