

## 슬래그 내 양이온 추출 및 불순물 분리 연구

이예환<sup>1</sup>, 강혜린<sup>1</sup>, 장영희<sup>1</sup>, 이시진<sup>2,\*</sup>, 김성수<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과  
16227 경기도 수원시 영통구 광교산로 154-42  
<sup>2</sup>경기대학교 환경에너지공학과  
16227 경기도 수원시 영통구 광교산로 154-42

(2019년 10월 2일 접수; 2019년 11월 5일 수정본 접수; 2019년 11월 5일 채택)

### A Study on Cation Extraction and Impurity Separation in Slag

Ye Hwan Lee<sup>1</sup>, Hyerin Kang<sup>1</sup>, Younghee Jang<sup>1</sup>, Si-Jin Lee<sup>2,\*</sup>, and Sung Su Kim<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Energy Engineering Graduate School of Kyonggi University  
154-42 Gwanggyosan-ro, Youngtong-ku, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16227, Korea  
<sup>2</sup>Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University  
154-42 Gwanggyosan-ro, Youngtong-ku, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16227, Korea

(Received for review October 2, 2019; Revision received November 5, 2019; Accepted November 5, 2019)

#### 요 약

제철산업에서 발생하는 슬래그의 자원화를 위하여 슬래그 내 양이온 추출 및 불순물 분리 연구를 수행하였다. 두 종류 (Slag-A, B)의 슬래그를 사용하였으며, XRD 및 XRF 분석을 통해 30 ~ 40%의 Ca<sup>2+</sup>와 함께 Fe<sup>3+</sup> (20 ~ 30%), Si<sup>4+</sup> (15%), Al<sup>3+</sup> (10%), Mn<sup>2+</sup> (7%), Mg<sup>2+</sup> (3 ~ 5%), 등 이온으로 구성되어 있음을 확인하였다. 2 M의 HCl을 추출용제로 사용하여 S/L ratio 별로 슬래그 주입하였으며, 추출액의 ICP 분석을 통해 S/L ratio가 높아짐에 따라 Ca<sup>2+</sup> 추출량이 증가하는 것을 확인하였다. Ca<sup>2+</sup> 추출 시 최적 S/L ratio는 0.1이며 Ca<sup>2+</sup> 추출량은 8,940 (Slag-A), 10,690 (Slag-B) mg L<sup>-1</sup>로 나타났다. 하지만 추출액은 강산성(< pH 1)을 띠었으며 Ca<sup>2+</sup> 이외에도 타이온(불순물)이 추출되었다. 슬래그를 고부가가치의 자원으로 이용하기 위해 Ca<sup>2+</sup>의 순도를 증진시키고자 pH-swing을 진행하였다. pH가 증가함에 따라 불순물이 침전되었으나 일정 pH 이상에서 Ca<sup>2+</sup>의 침전량이 급증 하였다. pH-swing을 통해 불순물을 분리하고 Ca<sup>2+</sup>의 선택도를 증진시킬 수 있음을 확인하였으며 pH 10.5 조건에서 Ca<sup>2+</sup> 선택도는 99% 이상으로 나타났다. Ca<sup>2+</sup>가 선택적으로 용해되어 있는 수용액은 탄산화 공정에 적용되어 CO<sub>2</sub>를 저감하고 탄산칼슘을 생산할 수 있을 것으로 기대된다.

**주제어** : 슬래그, S/L ratio, pH-swing, 선택도

**Abstract** : The cation extraction and impurity separation were studied in order to investigate the recyclability of a slag produced from the steel refinery industry. Two types of slag (Slag-A, B) were collected and characterized in this study. The initial characterization by X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF) confirmed the existence of various kinds of ions in the slag such as Ca<sup>2+</sup> (30 ~ 40%), Fe<sup>3+</sup> (20 ~ 30%), Si<sup>4+</sup> (15%), Al<sup>3+</sup> (10%), Mn<sup>2+</sup> (7%), and Mg<sup>2+</sup> (3 ~ 5%). Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) analysis on the extracted slag using 2 M HCl as a solvent indicated that a higher concentration of Ca<sup>2+</sup> was extracted as the S/L ratio was increased. The Ca<sup>2+</sup> extraction concentration were found to be 8,940 mg L<sup>-1</sup> (Slag-A) and 10,690 (Slag-B) mg L<sup>-1</sup> when the S/L ratio for Ca<sup>2+</sup> extraction was 0.1. However, the extract was strongly acidic (< pH 1) at 0.1 S/L. Also the other ions (impurities) were extracted simultaneously in addition to Ca<sup>2+</sup>. To increase the purity of Ca<sup>2+</sup> in order to transform the slag to a high value resource, a pH-swing was conducted. The impurities tended to precipitate at higher rate as the pH was increased. Notably, the Ca<sup>2+</sup> rapidly precipitated above a certain pH and at a pH of 10.5, while the selectivity of Ca<sup>2+</sup> was over 99%. It is expected that the aqueous solution in which high contents of Ca<sup>2+</sup> was selectively dissolved in this study would be suitable for the carbonation process for reducing CO<sub>2</sub> and for the production of calcium carbonate.

**Keywords** : Slag, S/L ratio, pH-swing, selectivity

\* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: sskim@kyonggi.ac.kr; Tel: +82-10-6209-7632; Fax: +82-31-248-3987

E-mail: sjlee@kyonggi.ac.kr; Tel: +82-10-9484-8929; Fax: +82-31-249-9744

doi: 10.7464/ksct.2019.25.4.309 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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. 서론

경제발전과 더불어 철강수요가 증가함에 따라 제철산업이 급속도로 발전하였으며, 생산 공정에서 철강 이외에도 산업 부산물인 슬래그와 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 비롯한 대기오염물질이 다량 배출되고 있다[1]. 국내에서 배출되는 CO<sub>2</sub>는 6억 7,970만톤(2017년)으로 2016년 대비 2.2%, 2007년 대비 24.6% 증가하였으며 경제협력개발기구(OECD) 회원국 35개국 중 CO<sub>2</sub> 배출량이 집계된 26개 나라 중 4위로 보고되었다[2]. 산업별 CO<sub>2</sub> 발생량은 발전소 이외에 시멘트 생산, 석유정제, 제철 공정 순으로 나타나며 제철 공정에서의 발생량은 연간 646 MtCO<sub>2</sub>으로 제철산업의 발달에 따라 점차 증가할 것으로 예상된다[3-4].

전 세계적으로 CO<sub>2</sub>에 의한 지구온난화의 심각성이 대두되고 있으며 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 노력이 이어지고 있다. 세계 흐름에 따라 정부는 2030년까지 배출전망치(business as usual, BAU) 대비 37% 감축을 목표로 로드맵을 수립하였으며 기술 발전을 위한 투자와 노력을 계속하고 있다. 하지만 현재 경제적이고 실용적인 기술의 부재로 인하여 최적 기술 개발이 시급하다.

또한 국내에서 발생하는 슬래그는 20.3백만톤(2010년)에서 수요 증가에 따라 점차 증가하는 실정이며 산업활동에 의해 발생하는 부산물 중 페콘크리트 다음으로 다량 배출된다[5-6]. 슬래그는 원료의 종류 및 공정 조건에 따라 조성과 물리화학적 특성이 상이하지만 대표적으로 Ca, Mg, Fe, Al, Si 등의 원소로 구성되어 있다. 현재 슬래그는 골재, 시멘트의 원료, 비료 등으로 재활용되고 있으나 특성에 따라 적용가능성이 다르며 사용할 수 없는 슬래그의 경우 매립되고 있어 환경적 문제를 유발시킨다[7].

이러한 문제를 해결하기 위하여 광물탄산화에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 이는 슬래그와 CO<sub>2</sub>를 동시에 저감할 수 있으며 최종생성물로 탄산칼슘을 생산하여 경제성을 확보할 수 있다는 장점이 있다. 또한 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>와 같은 알칼리이온과 CO<sub>2</sub>의 반응으로 생성되는 탄산염은 화학적으로 안정하게 CO<sub>2</sub>를 저장할 수 있다고 알려져 있다[8]. 이미 선진국의 경우 실공정 적용을 위한 테스트 베드급 규모의 공정을 운영 중이나 국내의 연구 수준은 비교적 낮은 수준이다[9]. Finland의 Aalto Univ.는 NH<sub>4</sub>Cl를 기반으로 슬래그에서 Ca<sup>2+</sup>를 추출하고 탄산화를 통해 침강성탄산칼슘(precipitated calcium carbonate, PCC)를 생산하는 Slag2PCC 공정을 개발 중이며 파일럿 플랜트를 운영 중이다[10]. 국내의 경우 원천 기술 확보 및 기술 최적화를 위한 연구를 수행 중이나 대량 처리, 경제성 확보가 가능한 기술은 없는 실정이다[11].

광물탄산화 공정에서 경제성을 확보하기 위해서는 공정 운영비용, 화학약품 사용량, 최종생성물을 판매 통한 부가가치 창출 등을 고려해야 한다. 고온·고압 조건보다 상온·상압 조건에서 운전하는 것, 추출제 및 효율 증진을 위한 첨가제의 투입량을 최소화하는 것, 최종생성물인 탄산염의 순도를 증진시키는 것이 중요하다. Lee et al. [12]은 사문암을 이용하여 고순도의 탄산마그네슘을 합성하였고 추출공정에서 발생하

는 NH<sub>3</sub>를 회수하여 재이용할 수 있는 연구를 수행하였으나 반응온도 300 °C의 고온 조건이 요구된다고 보고하였다. Back et al. [13]은 산 처리를 통해 사문석균을 용해시킨 후 NH<sub>4</sub>OH를 이용한 pH-swing을 통해 Fe<sup>3+</sup>, Si<sup>4+</sup>를 분리하였으며, 이를 통해 고순도의 탄산염 회수가 가능하다고 보고하였다. 하지만 NH<sub>4</sub>OH를 사용할 경우 NH<sub>3</sub>가 발생하고 공정 외부로 누설되어 악취가 발생할 수 있으며 인체에 흡입된 경우 호흡 장애 등의 피해를 유발할 수 있다[14].

본 연구는 슬래그와 CO<sub>2</sub>의 동시 저감 및 부가가치 창출을 위한 상온·상압조건의 탄산화 공정 중 추출단계, 추출 및 불순물 분리 조건에 대한 기초 연구 내용이다. 추출용제는 HCl, pH-swing을 위한 첨가제는 KOH이며, S/L ratio 및 pH-swing 별 추출효율을 비교하여 추출 경향 및 최적 조건을 도출하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 실험재료 및 방법

#### 2.1.1. 재료

본 연구에서는 칼슘이온 추출 조건을 최적화하는 실험을 진행하였다. 칼슘이온의 추출원은 슬래그를 이용하였고, 슬래그 내 양이온을 추출하기 위한 추출용제는 HCl (35 ~ 37%, Samchun Co.) 시약을 사용하여 제조하였으며, KOH (95%, Samchun Co.) 시약으로 pH-swing을 위한 첨가제를 제조하였다.

슬래그는 국내 제철산업에서 발생한 것으로 2종류(Slag-A, B)의 샘플을 준비하였다. Slag-A, B의 조성을 비교하기 위하여 X-선 형광분석법(X-ray fluorescence spectrometer, XRF)을 수행하였으며, 이를 Figure 1에 나타내었다. 슬래그는 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Si<sup>4+</sup>, Mn<sup>2+</sup> 등으로 구성되어 있으며 Ca<sup>2+</sup>는 CaO 기준으로 30 ~ 40%으로 가장 많이 포함되어 있다. 이외에 함량은 차이가 있지만 Fe<sup>3+</sup> > Si<sup>4+</sup> > Al<sup>3+</sup> > Mn<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup> 순으로 확인되었다. 또한, 샘플의 결정구조를 분석하기 위하여 X-선 회절분석법(X-ray diffraction, XRD)을 수행하였다(Figure 2). 그 결과 slag-A, B 모두 kirschsteinite (Ca(Mg,Fe)SiO<sub>2</sub>)를 포함하고 있으며 Ca<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Si<sup>4+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> 등으로 이루어진 화합물로 형성되어 있음을 확인하였다.

#### 2.1.2. 실험 방법

양이온을 추출하기 위하여 추출원(슬래그)과 추출용제(2 M의 HCl)를 250 mL 삼각플라스크에 넣고 magnetic stirrer로 20 min 교반하였으며 반응온도는 25 °C 조건에서 수행하였다. 교반 후 GF/C filter (CAT no. 1822-047, Whatman Co.)를 이용하여 추출액과 고형물을 분리하였다. S/L ratio 별 실험은 추출용제 100 mL 기준 추출원 1 ~ 10 g을 주입하였으며, pH 별 실험은 추출용제를 이용하여 추출원에서 이온을 추출시킨 이후 KOH 포화용액을 주입하여 pH를 조절하였다. 조건별로 분취한 샘플들을 여과한 후, 유도결합플라즈마(inductively coupled plasma, ICP) 분석을 수행하여 추출량을 정량화하였다(Figure 3).

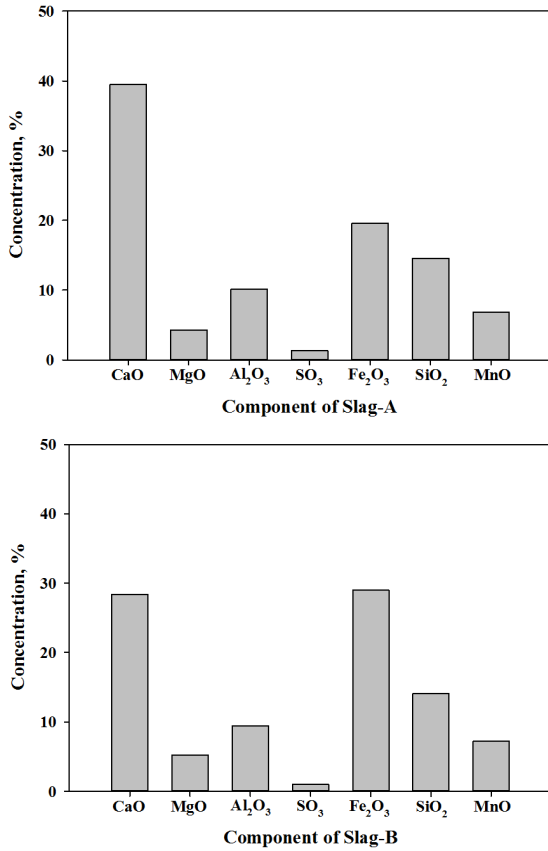


Figure 1. XRF analysis of slag A and B.

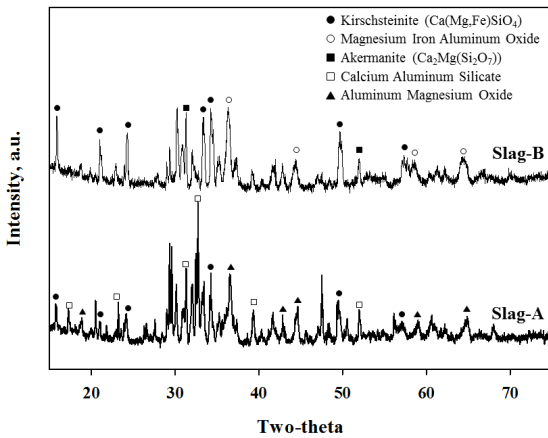


Figure 2. XRD patterns of slag A and B.

추출량을 통해 추출효율을 계산하였으며 계산식은 다음과 같다.

$$Extraction\ efficiency\ (\%) = \frac{C_{ion} \times V}{m_{slag} \times X_{ion-slag}} \times 100$$

$m_{slag}$ : 주입된 slag의 무게(mg)

$X_{ion-slag}$ : slag 내 이온 분율(mass%)

$C_{ion}$ : 추출액의 ICP 분석을 통한 이온 추출량(mg L<sup>-1</sup>)

V: 추출용제의 부피(L)

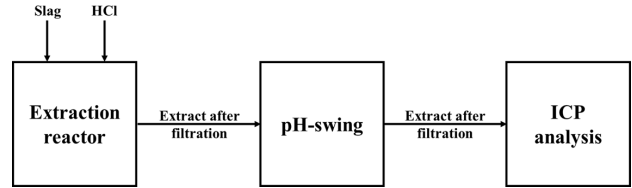


Figure 3. Schematic diagram of selective extraction process.

## 2.2. 분석 및 측정

### 2.2.1. X-선 형광분석법(X-ray fluorescence spectrometer, XRF)

본 연구에서 사용된 슬래그의 조성을 분석하고자 Rigaku Co.의 ZSX Primus를 이용하여 XRF 분석을 수행하였다. 정성 분석을 통하여 슬래그 내 포함되어 있는 물질을 확인한 후, 정량분석을 통하여 성분의 함량을 분석하였다.

### 2.2.2. 유도결합플라즈마(inductively coupled plasma, ICP) 분석

본 연구에서 사용된 슬래그의 조성 및 추출용제에 의해 생성된 추출액 내 양이온의 농도를 분석하기 위하여 Waters Co.의 waters 600E/431/125를 이용하여 ICP 분석을 진행하였다. 각 이온 별 표준용액을 이용하여 0 ~ 100 mg L<sup>-1</sup> 사이에 검량 선을 작성하였으며, 용액을 50 ~ 2500배 희석하여 분석하였다.

### 2.2.3. X-선 회절분석법(X-ray diffraction, XRD)

PAN Analytica Co.의 X'Pert PRO MRD를 이용하였다. Radiation source로는 Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1.5056 \text{ \AA}$ )가 사용되었으며, X-ray generator는 30 kW이고, monochromator는 사용하지 않았다.  $2\theta$ 는 10 ~ 90°의 범위에서 6° min<sup>-1</sup>의 주사속도에 의하여 측정되었다. 또한 시약급 KCl, CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>의 XRD 분석을 수행하였으며 추출 및 분리 후 XRD 분석 결과와 비교하여 화합물의 조성을 확인하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. S/L ratio의 영향

S/L ratio는 추출 용제(mL) 대비 주입되는 추출원(슬래그, g)의 양으로 나타난다. S/L ratio는 추출공정에서 가장 중요한 조건이며 추출효율, 주입되는 추출용제의 양에 따른 화학 약품 투입량에 영향을 미친다. Lee et al. [15]은 일정 농도에서 추출원의 주입량을 증가시켜도 추출량 차이는 미미하기 때문에 추출용제의 농도가 중요인자이며 추출원의 주입량을 최적화하여 추출 효율을 높일 수 있다고 보고하였다. 최적의 S/L ratio는 추출용제의 농도에 따라 변동되지만 농도가 일정할 경우 추출원의 조성에 영향을 받는다.

본 연구에서는 추출용제의 농도를 2 M로 정하고 S/L ratio 별 실험을 수행하였으며 추출량을 Figure 4에 나타내었다. 추출용제 100 mL 기준으로 슬래그 1, 5, 10 g을 주입하였으며, S/L ratio로 나타내면 0.01, 0.05, 0.1 mg mL<sup>-1</sup>이다. Slag-A의

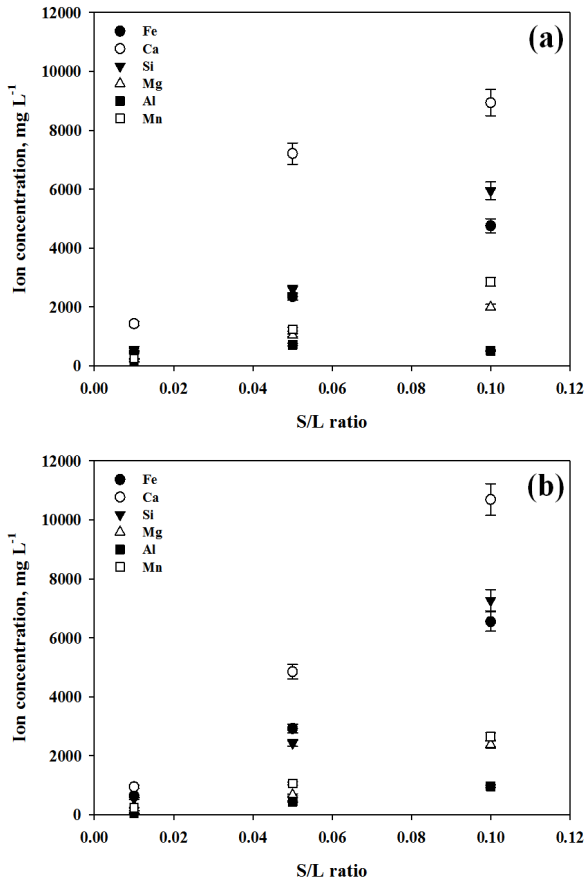


Figure 4. Dissolved ion concentrations at various solid/liquid ratio. (a) Slag-A, (b) Slag-B.

실험 결과 Ca<sup>2+</sup>의 추출량은 1,429 (33.4%), 7,212 (33.8%), 8,940 (20.9%) mg L<sup>-1</sup>으로 나타났으며 Slag-B의 경우 Ca<sup>2+</sup>의 추출량은 946 (31.3%), 4,847 (32%), 10,690 (35.4%) mg L<sup>-1</sup>이다. S/L ratio가 높아짐에 따라 추출량이 증가되었으나 추출효율의 경우 Slag-A는 감소하였고 Slag-B는 큰 변화가 없었다. Slag-A의 Ca<sup>2+</sup> 함량이 Slag-B에 비하여 높기 때문에 비슷한 양이 추출되어도 추출효율에서 차이가 크다. 또한 Ca<sup>2+</sup> 이외에 불순물의 조성과 추출량이 영향을 미친 것으로 판단된다. S/L ratio 0.1 조건에서 Fe<sup>3+</sup> (4754, 6550 mg L<sup>-1</sup>), Si<sup>4+</sup> (5950, 7275 mg L<sup>-1</sup>), Mg<sup>2+</sup> (1992, 2375 mg L<sup>-1</sup>), Al<sup>3+</sup> (509, 962.5 mg L<sup>-1</sup>), Mn<sup>2+</sup> (2851, 2650 mg L<sup>-1</sup>)이 추출되었다(Slag-A, Slag-B 추출량). 추출 반응 이후 여과한 추출액의 pH는 1 이하로 나타났다며 강산성을 띠었다.

### 3.2. 추출액 pH 조절의 영향

추출액의 pH가 낮을 경우 탄산화 공정의 효율을 감소시킬 수 있으며, CO<sub>2</sub>의 용해를 위해 알칼리성 첨가제를 사용할 경우 중화반응으로 인한 폭발이 발생할 수 있다[16]. 또한 pH를 증가시키면 Ca<sup>2+</sup> 이외의 불순물을 제거할 수 있다[17]. 본 연구에서는 추출액의 pH를 KOH로 조절하고 pH 별 불순물의 제거 성능을 평가하여 최적 pH를 도출하고자 하였다. 추출액은 S/L ratio 0.1 조건에서 2 M의 HCl과 추출원을 교반하여

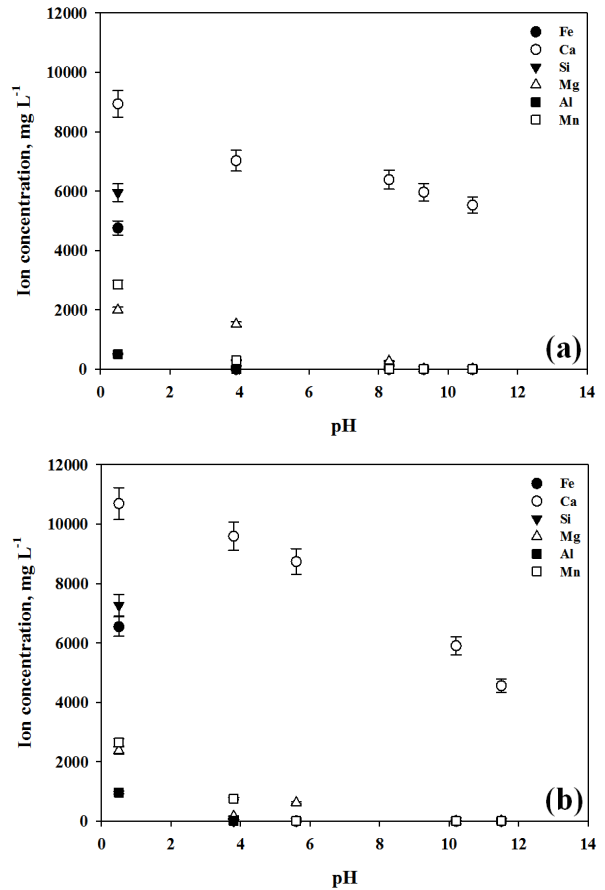


Figure 5. Dissolved ion concentrations at various extraction condition of pH. (a) Slag-A, (b) Slag-B.

제조하였다.

Figure 5에 나타나 있듯이 Slag-A의 경우 pH를 10.7까지 조절하였을 때 Ca<sup>2+</sup>의 농도는 8,940 mg L<sup>-1</sup>에서 5,530 mg L<sup>-1</sup>로 감소하였으나 Ca<sup>2+</sup>의 선택도는 99.6%까지 증가하였다. 이러한 결과는 pH가 증가함에 따라 Ca<sup>2+</sup> 이외에 Fe<sup>3+</sup>, Si<sup>4+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup>이 침전 제거되었기 때문이다. pH 3.9에서 Al<sup>3+</sup> 농도는 509 mg L<sup>-1</sup>(추출액)에서 3.1 mg L<sup>-1</sup>로 감소하였으며, pH 8.3에서 Fe<sup>3+</sup> 농도는 4,754 mg L<sup>-1</sup>에서 0.2 mg L<sup>-1</sup>, Si<sup>4+</sup>는 5,950 mg L<sup>-1</sup>에서 10.8 mg L<sup>-1</sup>, Mn<sup>2+</sup>은 2,852 mg L<sup>-1</sup>에서 4.0 mg L<sup>-1</sup>로 낮아졌다. Mg<sup>2+</sup>의 경우 pH 9.3일 때 1,992 mg L<sup>-1</sup>에서 13.3 mg L<sup>-1</sup>로 농도가 낮아졌다.

Slag-B의 경우 pH를 10.2까지 조절하였을 때 Ca의 농도는 10,690 mg L<sup>-1</sup>에서 5,905 mg L<sup>-1</sup>로 감소하였으나 Ca<sup>2+</sup>의 선택도는 99.7%까지 증가하여 Slag-A와 유사한 경향을 나타내었다. pH 3.8에서 Al<sup>3+</sup> 농도는 962.5 mg L<sup>-1</sup>(추출액)에서 3.6 mg L<sup>-1</sup>로 감소하였으며, pH 5.6에서 Fe<sup>3+</sup> 농도는 6,550 mg L<sup>-1</sup>에서 0.3 mg L<sup>-1</sup>, Si<sup>4+</sup>는 7,275 mg L<sup>-1</sup>에서 8 mg L<sup>-1</sup>, Mn<sup>2+</sup>은 2,650 mg L<sup>-1</sup>에서 8.72 mg L<sup>-1</sup>로 낮아졌다. Mg<sup>2+</sup>의 경우 pH 10.2일 때 4,181 mg L<sup>-1</sup>에서 6 mg L<sup>-1</sup>로 감소하였다. 오히려 pH를 11.5까지 조절하였을 때 Ca<sup>2+</sup>를 제외한 이온들의 농도 변화는 미미하였으나 Ca<sup>2+</sup>는 pH 10.2일 때보다 약 1,350 mg L<sup>-1</sup> 감소하였기 때문에 pH 10.5 조건에서 유리한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

슬래그의 자원화를 위한 양이온 추출 및 불순물 분리 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. XRF 및 XRD 분석을 통하여 슬래그에  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  등이 다량 포함되어 있는 것을 확인하였으며, 이온들은 화합물 형태로 존재함을 확인하였다. S/L ratio 0.1 조건에서 2 M의 HCl 을 이용하여 슬래그를 용출시켰을 때  $\text{Ca}^{2+}$ 는 8,940 (Slag-A), 10,690 (Slag-B)  $\text{mg L}^{-1}$  추출되었으며,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ 의 추출 또한 동반되었다. S/L ratio가 높아짐에 따라 대부분의 이온 추출량이 증가하는 경향을 확인하였으며, 추출액의 pH는 1 이하로 강산성을 띠었다.

불순물을 분리하기 위해 pH를 단계 별로 조절함에 따라 침전물이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. pH가 증가됨에 따라 불순물이 먼저 분리되었으나  $\text{Ca}^{2+}$ 의 침전이 동반되었고 특정 pH 이상에서는  $\text{Ca}^{2+}$ 의 침전량이 증가하여 선택도가 감소하였다. 이에 따라 최적 pH가 요구되며, 실험 결과 약 pH 10.5 조건에서  $\text{Ca}^{2+}$ 의 선택도를 증진시킬 수 있는 최적 pH로 판단하였으며 이때 선택도는 99% 이상이다. 추출액은 강산성을 띠기 때문에 pH 조절을 통해 불순물 분리와 동시에  $\text{Ca}^{2+}$ 의 탄산화 효율 증진에 유리할 것으로 기대된다.

#### 감사

본 연구는 2019년 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

#### References

- Ryu, K. W., and Choi, S. H., "The Mineral Carbonation Using Steelmaking Reduction Slag," *Econ. Environ. Geol.*, **50**(1), 27-34 (2017).
- Lee, S. M., Kim, Y. J., Choi, C. Y., and Lee, J. Y., "Characteristics of CO<sub>2</sub> Sequestration in Indirect Mineral Carbonation (IMC) Using Cement Kiln Dust (CKD)," *J. Korean Soc. Urban Environ.*, **18**(3), 303-310 (2018).
- Korea Meteorological Administration, Climate Change Information Center, Report of Global Atmosphere Watch 2013, Report No. 278 (2014).
- Intergovernmental Panel on Climate Change, Carbon Dioxide Capture and Storage, IPCC Special Report, Cambridge University Press (2005).
- Cho, B. S., Lee, H. H., and Kim, G. Y., "Status and Prospects of Recycling Blast Furnace Slag," *Magazine of RCR*, **7**(3), 9-12 (2012).
- Yoo, K. S., "Carbonation Technology for Waste Treatment," *Appl. Chem. Eng.*, **18**(3), 20-27 (2015).
- Choi, J. S., "The Status and Utilization Prospect of Steel Making Slag," *Architecture*, **56**(8), 18-22 (2012).
- Lee, S. M., Kim, Y. J., Kim, J. M., Lee, C. H., and Jeon, J. K., "Effect of pH Adjusting Contactor on Indirect Carbonation Efficiency Using Waste Concrete," *J. Korean Soc. Urban Environ.*, **17**(1), 65-75 (2017).
- Son, M. A., Kim, G. H., Han, K. W., Lee, M. W., and Lim, J. T., "Development Status and Research Direction in the Mineral Carbonation Technology Using Steel Slag," *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(2), 141-155 (2017).
- Mattila, H. P., "Utilization of Steelmaking Waste Materials for Production of Calcium Carbonate (CaCO<sub>3</sub>)", D. Dissertation, University of Abo Akademi, Turku (2014).
- Han, K. W., Kim, G. H., Son, M. A., and Lee, M. W., "Technical Aspects for Mineral Carbonation Using Steel Slag," *Korean Soc. Energy*, **10**, 28 (2016).
- Lee, S. W., Won, H. I., Choi, B. Y., Chae, S. C., Bang, J. H., and Park, K. G., "Mineral Carbonation of Serpentine: Extraction, pH swing, and Carbonation," *J. Miner. Soc. Korea*, **30**(4), 205-217 (2017).
- Baek, J. Y., Jo, Y. U., Lee, J. H., Jeong, H. I., Choi, S., and Roh, Y., "Nanomaterial Recovery and Mineral Carbonation from Serpentine Minerals Using Acid Dissolution and pH swing Processes," *J. Geol. Soc. Korea*, **10**, 271 (2015).
- Lee, H. H., Kim, K. W., and Hong, S. C., "Characterization Studies for the Selective Catalytic Oxidation of Ammonia Utilizing Ce/TiO<sub>2</sub> Catalyst," *Appl. Chem. Eng.*, **24**(5), 494-498 (2013).
- Lee, Y. H., Lee, S. H., Hwang, I. H., Choi, S. Y., Lee, S. M., and Kim, S. S., "A Study on the Calcium Ion Extraction for PCC Production," *Appl. Chem. Eng.*, **29**(1), 43-48 (2018).
- Youn, M. H., Park, K. T., Lee, Y. H., Kang, S. P., Lee, S. M., Kim, S. S., Kim, Y. E., Ko, Y. N., Jeong, S. K., and Lee, W. H., "Carbon Dioxide Sequestration Process for the Cement Industry," *J. CO<sub>2</sub> Util.*, **34**, 325-334 (2019).
- Lee, Y. H., Han, D. H., Lee, S. M., Eom, H. K., and Kim, S. S., "A Study on the Cation Extraction and Separation in Cement Industrial By-products for Applications to the Carbonation Process," *Appl. Chem. Eng.*, **30**(1), 34-38 (2019).