

# 탄산화 공정 적용을 위한 시멘트 산업부산물 내 양이온 추출 및 분리 연구

이예환 · 한동희 · 이상문\* · 엄한기\* · 김성수\*,†

경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과, \*경기대학교 환경에너지공학과  
(2018년 10월 4일 접수, 2018년 10월 12일 심사, 2018년 10월 24일 채택)

## A Study on the Cation Extraction and Separation in Cement Industrial By-products for Applications to the Carbonation Process

Ye Hwan Lee, Dong Hee Han, Sang Moon Lee\*, Han Ki Eom\*, and Sung Su Kim\*,†

Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School of Kyonggi University, 154-42 Gwanggyosanro, Youngtong-ku, Suwon-si, Gyeonggi-do 16227, Korea

\*Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University, 154-42 Gwanggyosanro, Youngtong-ku, Suwon-si, Gyeonggi-do 16227, Korea

(Received October 4, 2018; Revised October 12, 2018; Accepted October 24, 2018)

### 초 록

탄산화 공정을 위한 Ca 추출원으로 시멘트 산업부산물을 사용하였다. ICP와 XRD 분석을 통하여 시멘트 산업부산물은 대부분 CaO와 KCl로 구성되어 있음을 확인하였다. 최적화된 추출용제의 종류 및 농도는 1.5 M of hydrochloric acid이며 최적의 고액비는 0.1 g/mL이었다. 추출 성능 실험 결과를 통해 양이온의 추출효율은 이온 결합 형태 및 용해도에 의존함으로 판단되었다. 또한 추출 공정 후, 첨가물의 종류 및 주입 순서에 따라 선택적으로 양이온이 분리될 수 있음을 확인하였다. pH를 9.5, 13으로 조절하기 위하여 NaOH를 주입하였을 때 불순물과 Ca(OH)<sub>2</sub>가 침전되었으며, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH를 주입한 경우 KCl 형태로 분리된 K가 침전되었다.

### Abstract

A cement industrial by-product was used as a Ca source for the carbonation process. It was confirmed that the most of cement industrial by-products was composed of CaO and KCl through ICP and XRD analyses. The optimal extractant type and concentration was 1.5 M of hydrochloric acid, and the solid/liquid ratio was 0.1 g/mL. It was assumed that the cation extraction efficiency was dependent of the pair ions and their binding formation and also the solubility from extraction efficiency results by varying extractants. After extraction process, it was also confirmed that the cation could be selectively separated from the solution with respect to the kind of additives and the injection order. When NaOH was injected into the solution to control pH values ranging from 9.5 and 13, impurities and Ca(OH)<sub>2</sub> were precipitated, whereas the separated K ion was precipitated in the form of KCl under the injected C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH.

**Keywords:** Mineral carbonation, Industry by-product, Calcium ion, Extraction, Separation

## 1. 서 론

최근 지구온난화로 인한 기후변화에 의해 심각한 피해가 발생하고 있다. 지구온난화에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 온실가스가 꼽히며 온실가스는 지구 표면에서 발산하는 열을 흡수 또는 반사하여 지구 전체의 온도를 높이는 기체를 일컫는다. 대표적인 온실가스 중 CO<sub>2</sub>는 다른 가스에 비하여 온실효과에 대한 영향은 낮지만 전체 온실가스 중 80% 이상을 차지한다[1]. 산업이 발달함에 따라 산업 현장에서

발생하는 CO<sub>2</sub>의 양은 매년 증가하고 있으며, 산업별 CO<sub>2</sub> 발생량은 발전소(10,539 MtCO<sub>2</sub>yr<sup>-1</sup>)가 가장 크고 시멘트 생산(932 MtCO<sub>2</sub>yr<sup>-1</sup>), 석유 정제(798 MtCO<sub>2</sub>yr<sup>-1</sup>), 제철 공정(646 MtCO<sub>2</sub>yr<sup>-1</sup>) 순으로 나타난다 [2,3]. 이에 따라 전 세계적으로 온실가스 감축을 위한 노력이 이어지고 있으며 CO<sub>2</sub>가 발생하는 산업 현장에 적용 가능한 기술 개발이 요구된다.

CO<sub>2</sub>를 저감하기 위한 방법은 크게 액화 탄산 기술, CO<sub>2</sub> 포집 저장 기술(CCS; Carbon capture & storage), CO<sub>2</sub> 포집 이용 기술(CCU; carbon capture & utilization)로 구분할 수 있다. 액화 탄산 기술은 CO<sub>2</sub>를 액화시켜 공업용, 청량음료 및 소화기용 등으로 사용하는 것으로 현재 국내 CO<sub>2</sub> 시장의 대부분을 차지하며 연간 100만 톤/년의 수요를 나타내지만 국내에서 발생하는 CO<sub>2</sub>를 저감하기 위한 방법으로는 제한적이다[4]. 또한 CO<sub>2</sub> 포집 저장 기술은 CO<sub>2</sub>를 포집하여 지중이나

† Corresponding Author: Kyonggi University,  
Department of Environmental Energy Engineering, 154-42 Gwanggyosanro,  
Youngtong-ku, Suwon-si, Gyeonggi-do 16227, Korea  
Tel: +82-31-257-7689 e-mail: sskim@kyonggi.ac.kr

Table 1. ICP Analysis of Cement Industry by-product Sample

Elements	K	Ca	Mg	Al	Fe	Si
Content	24.5	18.9	0.26	0.67	0.45	0.95

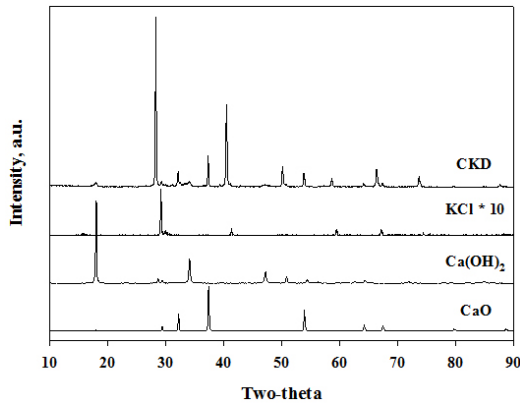


Figure 1. XRD patterns of cement industry by-product.

해양에 저장하는 기술로 실질적인 CO<sub>2</sub> 저감 기술이지만 저장 공간 확보가 어려우며 저장을 위한 투자 및 관리 비용이 요구되는 단점이 있다[5]. 이에 따라 최근 CO<sub>2</sub>를 포집 후 경제적으로 가치가 있는 물질로 전환하여 이용하는 기술인 CO<sub>2</sub> 포집 이용 기술에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

CO<sub>2</sub> 포집 이용 기술 중 광물탄산화 기술은 CO<sub>2</sub>를 알칼리토금속인 Ca 또는 Mg이 풍부한 물질과 반응시켜 탄산염 광물로 만드는 기술로써 CO<sub>2</sub>의 영구적인 저장이 가능하며 CO<sub>2</sub> 소비량의 제한이 없는 등 다양한 장점을 가지고 있다[6,7]. 광물탄산화 기술은 직접 탄산화 및 간접 탄산화 기술로 구분된다. 직접 탄산화의 경우 CO<sub>2</sub>와 알칼리토금속을 직접 반응시키는 기술로써 공정이 간단한 장점이 있으나 최종 생성물의 순도가 낮고 반응속도가 느려 고온 고압 등 반응 속도 증진을 위하여 추가적인 에너지가 소비된다[1]. 반면 간접탄산화의 경우 알칼리토금속의 추출 공정과 CO<sub>2</sub> 주입을 통한 탄산화 공정으로 구분되어 요구되지만 반응 속도가 빠르고 최종 생성물의 순도가 높아 경제적 가치가 있다[5].

과거에는 광물을 이용한 탄산화 연구가 많이 진행되었지만 최근에는 Ca, Mg 등 알칼리성 이온을 함유한 산업폐기물을 이용한 연구가 진행되고 있다[8-10]. 대표적인 산업폐기물에는 slag, cement waste, cement kiln dust, coal ash 등이 있으며 각각 33-50, 15-36, 20-60, 5-32%의 CaO를 포함하고 있다[11-15]. 현재 대부분의 산업폐기물의 경우 매립을 통해 처리되고 있으나 탄산화 공정에 원료로써 적용 시 CO<sub>2</sub>와 폐기물의 동시처리가 가능해지며 최종생성물을 통해 경제적 이익을 확보할 수 있다. 하지만 현재 전 세계적으로 slag를 이용한 탄산화 연구는 많이 진행되었으나 시멘트 산업부산물을 추출원으로 이용한 연구는 미비한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 시멘트 산업부산물 내 양이온을 추출하여 탄산화 공정에 적용하기 위한 최적 조건 및 최종생성물의 순도 증진을 위한 양이온 분리 조건을 도출하고자 한다. Ca 추출원인 시멘트 산업부산물 내 양이온을 추출하기 위하여 추출용제 종류, 농도, 추출원 투입량 등 다양한 조건에서 실험을 수행하였으며 최적의 추출 조건을 확인하고자 하였다. 또한 추출된 Ca를 선택적으로 분리하여 탄산화 공정에 적용하기 위해 K 등 불순물을 분리하고 Ca를 Ca(OH)<sub>2</sub> 형태로 제조하기 위한 조건을 확인하고자 하였다.

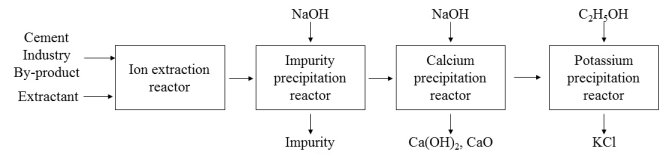


Figure 2. Schematic diagram.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험재료 및 방법

#### 2.1.1. 칼슘이온 추출원 및 추출용제

본 연구에서 사용된 시멘트 산업부산물의 화학적 조성을 확인하기 위하여 유도결합 플라즈마(ICP; inductively coupled plasma) 분석을 수행하였으며 구성 성분을 Table 1에 나타내었다. 분석 결과 시멘트 산업부산물은 K, Ca, Mg, Al, Fe, Si으로 구성되어 있으며 K와 Ca의 함량은 24.5, 18.9%로 주요 성분임을 확인하였다. 시멘트 산업부산물 내 조성의 화학적 구조를 확인하기 위하여 X-ray 회절(XRD; X-ray diffraction) 분석을 수행하였으며 Figure 1에 나타내었다. 분석 결과 주요 구성 성분 중 K는 KCl, Ca는 CaO 형태로 존재하였다.

시멘트 산업부산물 내 양이온을 추출하기 위한 추출용제는 ammonium acetate (97%, Samchun co.), ammonium chloride (98.5%, Samchun co.), sodium acetate (98.5%, Samchun co.), sulfuric acid (97%, Samchun co.), ammonium hydroxide (28%, Junsei), hydrochloric acid (35-37%, Samchun) 시약을 사용하여 제조하였다.

#### 2.1.2. 칼슘이온 추출 및 분리 실험 방법

일정한 온도 조건하에 칼슘이온 추출 실험을 진행하기 위하여 아크릴 재질의 항온 수조를 제작하였고 circulator를 이용하여 반응기의 온도를 유지하였다. 칼슘이온을 추출하기 위하여 magnetic stirrer를 이용하여 추출원과 추출용제를 교반하였다. 일정시간 교반 후 GF/C filter (CAT no. 1822-047, Whatman)를 이용하여 용액과 고형물을 분리하였다.

최적의 칼슘이온 추출 조건을 도출하기 위하여 추출용제의 종류, 용제의 농도, 추출원 투입량에 따른 실험을 수행하였다. 6종류의 추출용제를 0.5-3 M의 농도로 제조하였으며, 추출원 투입량은 추출용제 100 mL 기준 10, 30, 50 g으로 하였다.

양이온 분리 실험은 추출용제에 의해 추출된 추출액에 NaOH와 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH를 주입하여 수행하였다. 추출용제를 이용하여 시멘트 산업부산물 내 양이온을 추출한 상태를 Cond. 1, pH를 약 9.5으로 조절한 상태 Cond. 2, pH를 약 13으로 조절한 상태를 Cond. 3, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH를 주입한 상태를 Cond 4로 표기하였다. 전체적인 공정도를 Figure 2에 나타내었다.

### 2.2. 분석 및 측정

#### 2.2.1. ICP (inductively coupled plasma) 분석

시멘트 산업부산물 내 조성 및 추출액 내 양이온의 농도를 분석하기 위해 Waters의 Waters 600E/431/125를 이용하였다. 표준용액을 이

용하여 0-100 mg/L 사이에 검량선을 작성하였으며 추출원액을 50-2,500배 희석하여 분석하였다.

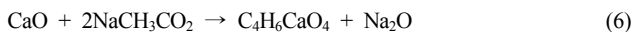
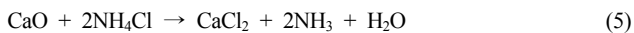
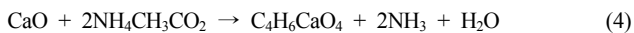
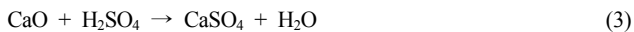
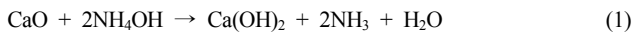
2.2.2. XRD (X-ray diffraction) 분석

시료의 결정구조를 분석하기 위하여 실시하였으며, PAN Analytical Co.의 X'Pert PRO MRD에 의하여 분석하였다. Radiation source로는 Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1.5056 \text{ \AA}$ )가 사용되었으며, X-ray generator는 30 kW 이고, monochromator는 사용하지 않았다.  $2\theta$ 는 10-90°의 범위에서 6 °/min의 주사속도에 의하여 측정되었다. 또한 시약급 KCl, CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>의 XRD 분석을 수행하였으며 추출 및 분리 후 XRD 분석 결과와 비교하여 화합물을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 다양한 추출용제의 영향

추출공정의 조건 중 추출용제의 종류는 양이온 추출 효율에 큰 영향을 미치며 탄산화 공정에 따라 다양한 추출용제가 사용된다[16,17]. Lee 등은 CaO 내 Ca 추출 경향을 확인하기 위하여 추출용제의 종류 및 농도에 따른 실험을 수행하였다[16]. Eloneva 등은 steel making slag 내 양이온을 추출하기 위하여 다양한 추출용제를 사용하였으며 용제의 농도에 따라 선택적으로 양이온을 추출할 수 있다고 보고하였다[17]. 본 연구에서는 산업폐기물 내 양이온 추출용제의 종류 및 농도에 따른 추출 경향을 확인하기 위하여 6가지의 추출용제별 추출효율을 평가하였다. 산업폐기물을 이용하여 탄산칼슘을 제조하기 위하여 양이온 추출 효율을 XRD와 ICP 분석을 통하여 시멘트 산업부산물 내 다양한 이온이 존재함을 확인하였으며 그중 Ca와 K가 주요 원소임을 확인하였다. 이에 따라 추출용제 종류 및 농도에 따른 시멘트 산업부산물 내 Ca 및 K의 추출 실험을 수행하였으며 추출량을 Figure 3에 나타내었다. 다양한 추출용제 중 hydrochloric acid를 추출용제로 사용하였을 때 Ca의 추출효율이 가장 우수하였으며 농도에 따라 8,205-16,578 mg/L의 추출량을 나타내었다. K 또한 우수한 추출량을 나타내었으며 최대 27,775 mg/L이 추출되었다. 이러한 추출 경향을 설명하기 위하여 반응식을 나타내었다.



위와 같은 반응식을 통해 Ca와 추출용제의 반응 후 생성되는 물질은 Ca(OH)<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>CaO<sub>4</sub>로 사료되며 용해도(20 °C 기준)는 CaCl<sub>2</sub> (74.5 g/100 mL), (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Ca (34.7 g/100 mL), CaSO<sub>4</sub> (0.21 g/100 mL), Ca(OH)<sub>2</sub> (0.173 g/100 mL) 순이다. 이에 따라 chloride이 포함된 추출용제 사용 시 Ca를 추출효율이 우수한 것을 확인하였다. 반면 hydrochloric acid와 ammonium chloride 비교 시 chloride가

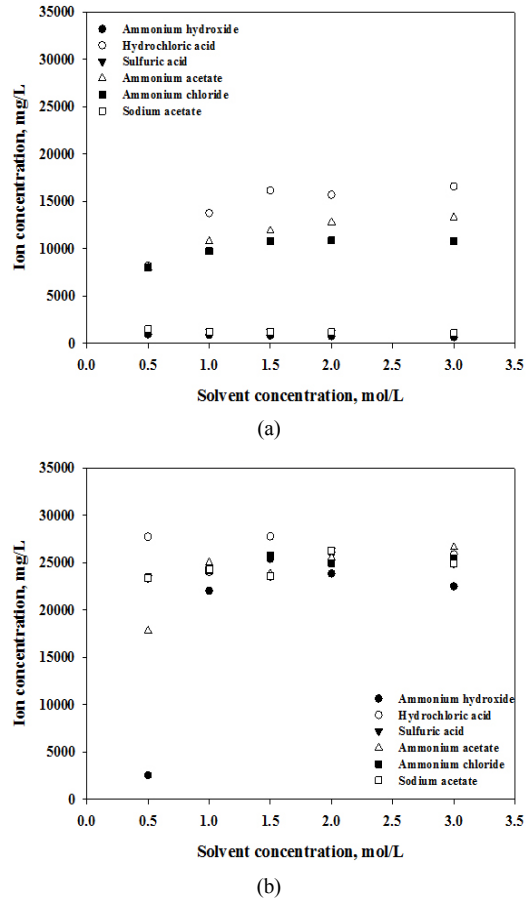


Figure 3. Dissolved (a) Ca and (b) K ion concentrations at various extractants and concentrations.

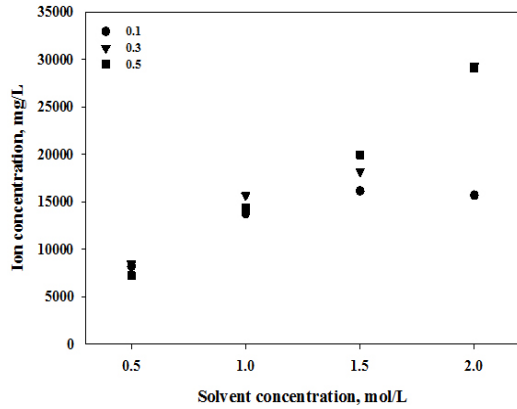
포함되어 있지만 hydrochloric acid를 사용하였을 때 추출 효율이 높은 이유는 pH에 따른 용해도 차이가 있기 때문이다. 이러한 결과는 CaO를 이용하여 수행하였던 선행 연구의 결과와 부합한다[16]. 시멘트 산업부산물 내에서 Ca가 추출될 때 식 (7)에 의하여 pH가 증가하게 되는데 Ca는 pH가 높아질수록 용해도가 낮아진다.



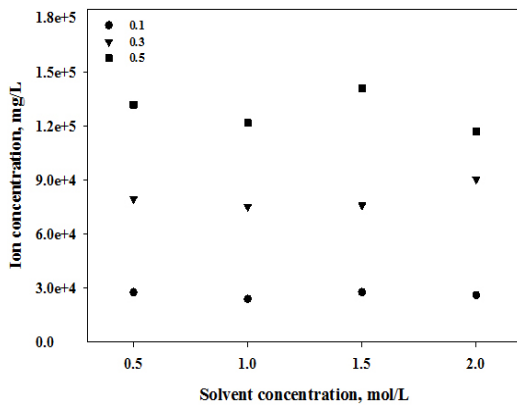
최종적으로 chloride를 포함하며 Ca 추출 시 높아지는 pH를 낮출 수 있는 hydrochloric acid가 최적의 추출용제임을 확인하였다.

3.2. 추출원 주입량의 영향

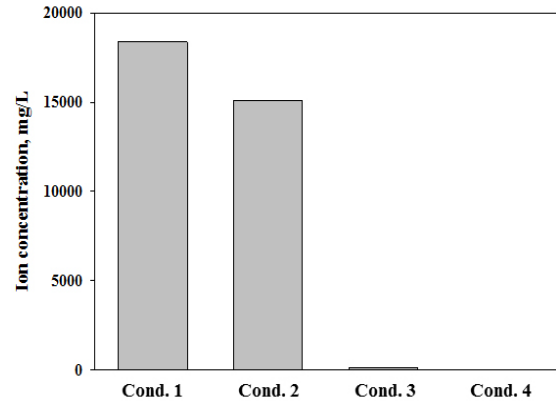
추출공정에 있어 추출원의 주입량은 공정의 크기를 결정하는데 있어 매우 중요한 인자이며 농도에 따라 최적의 주입량은 상이하다. Hu 등은 blast furnace slag와 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 비율이 1 : 3일 때 최적의 조건임을 확인하였다[18]. 시멘트 산업부산물 내 양이온을 추출하기 위한 최적의 추출원 주입조건을 도출하기 위해 상기 결과를 바탕으로 추출 효율이 가장 우수하였던 hydrochloric acid를 이용하여 추출용제의 농도가 0.5-2 M일 때 추출원 주입량에 따른 추출경향을 확인하였으며 Figure 4에 나타내었다. 추출원 주입량은 solid/liquid (추출원/추출용제, g/mL) ratio로 산정하였으며 0.1-0.5 g/mL에 따른 추출 경향을 확인하였다. Ca의 경우 1 M 이하의 추출용제를 사용하였을 때 추출원



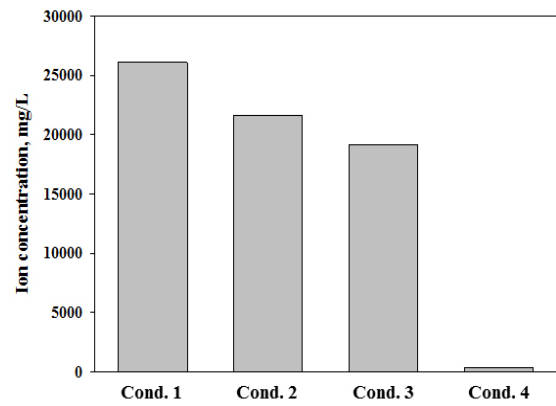
(a)



(b)



(a)



(b)

Figure 4. Dissolved (a) Ca and (b) K ion concentrations at various extractant concentrations and solid/liquid ratio.

Figure 5. Dissolved (a) Ca and (b) K ion concentrations at various extraction conditions.

의 주입량과 상관없이 유사한 추출량(약 14,600 mg/L)을 나타내었으나 1.5 M 이상에서는 추출원의 주입량에 따라 차이가 나타났다. 이는 추출원에서 추출될 수 있는 Ca 추출 시 증가하는 pH에 따른 용해도와 추출원 내에서 추출될 수 있는 Ca의 양에 한계가 있기 때문이다. 반면 K의 경우 추출용제의 농도와 상관없이 추출원의 주입량에 따라 비슷한 추출량을 나타내었다. 이에 따라 시멘트 산업부산물 내 최적의 양이온 추출 조건은 1.5 M의 hydrochloric acid 100 mL에 10 g을 주입하는 것으로 판단된다.

### 3.3. 첨가제 주입을 통한 양이온 분리

시멘트 산업부산물에서 추출된 양이온의 분리를 위하여 첨가제인 NaOH와 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH를 주입하였다. NaOH 주입을 통하여 pH를 조절하여 불순물 및 Ca(OH)<sub>2</sub>를 분리하였으며 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH를 주입하여 K를 침전 분리시켰다. 상기 결과를 통하여 도출한 최적의 추출 조건에서 추출 후 추출용제의 pH는 약 0.4이었다. Si, Al 등 불순물 분리를 위하여 pH를 약 9.5 사이로 조절하였으며 Ca(OH)<sub>2</sub>를 침전시키기 위하여 pH를 13 이상으로 조절하였다. 또한 Ca(OH)<sub>2</sub> 침전 분리 후 K를 분리하기 위하여 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH를 주입하였다. 첨가제 주입에 따른 Ca와 K의 추출량을 Figure 5, 침전물을 Figure 6에 나타내었다. Ca의 초기 추출량은 18,385 mg/L이며 NaOH를 주입하여 pH를 약 9.5로 조절한 조건의 경우 15,107.5 mg/L, pH 13에서는 146.4 mg/L의 Ca 농도를 나타내었다. K의 경우 pH의 영향을 크게 받지 않았지만 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH를 주입하였을 때

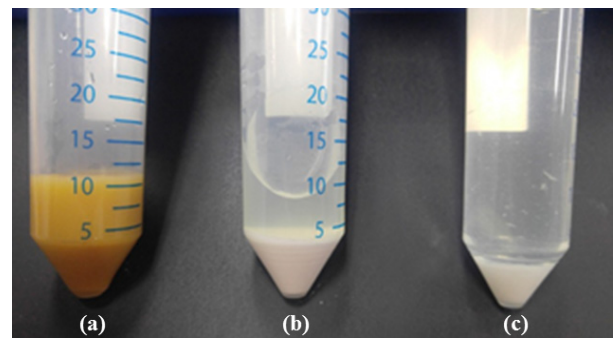


Figure 6. Precipitated ions ((a): Cond. 2, (b): Cond. 3, (c): Cond. 4).

대부분 침전 분리되었다.

침전된 침전물의 화학적 결합을 확인하기 위하여 시약급 CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>, KCl 및 조건에 고형물(침전물)의 XRD 분석을 수행하였으며 Figure 7에 나타내었다. Hydrochloric acid를 이용하여 추출한 후 남아있는 고형물에서 CaO, KCl peak는 확인되지 않았으며 대부분 추출된 것으로 확인된다. pH를 9-10 사이로 조절하였을 때 불순물에 해당하는 peak가 확인되었으며 pH를 13으로 조절하였을 때 Ca(OH)<sub>2</sub>가 침전되었음을 확인하였다. C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH를 주입하였을 때 침전된 침전물은 대부분 KCl로 확인되었다.

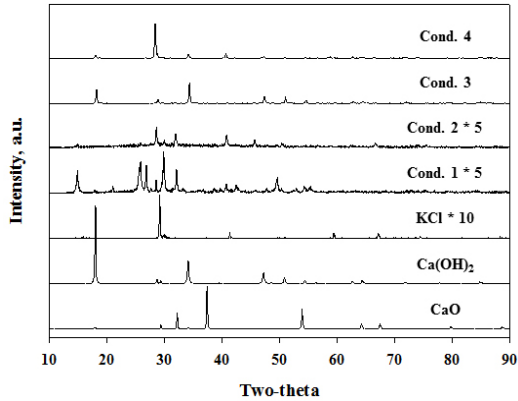


Figure 7. XRD patterns of the samples at various extraction conditions.

#### 4. 결 론

탄산화 공정 적용을 위한 시멘트 산업부산물 내 양이온 추출 및 분리 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. ICP 및 XRD 분석을 통하여 시멘트 산업부산물은 대부분 Ca와 K로 구성되어 있으며 CaO 및 KCl 형태로 존재함을 확인하였다. 다양한 추출용제 중 hydrochloric acid를 사용하였을 때 추출 효율이 가장 우수하였으며 최적의 추출용제 농도 및 추출원의 주입량은 1.5 M, 0.1 g/mL이다. 이는 추출 후 이온 결합 형태 및 용해도의 영향으로 판단된다.

2. 시멘트 산업부산물에서 추출된 양이온을 분리하기 위하여 첨가제(NaOH, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)를 주입하였으며 첨가제의 종류 및 주입 순서에 따라 선택적으로 양이온을 침전시켰으며 ICP 및 XRD 분석을 통하여 추출량 및 추출 형태를 확인하였다. NaOH를 주입하여 pH를 약 9.5로 조절한 경우 Si, Al 등 불순물이 침전되었으며, pH를 13 이상으로 조절하였을 때 Ca(OH)<sub>2</sub>가 침전되었다. 이후 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH를 주입하였을 때 KCl이 침전됨을 확인하였다. 침전된 Ca(OH)<sub>2</sub>의 경우 탄산화 공정 또는 새로운 추출 공정에 적용할 시 고순도의 탄산칼슘을 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20182010202100).

#### References

1. S. C. Chae, Y. N. Jang, and K. W. Ryu, Mineral carbonation as a sequestration method of CO<sub>2</sub>, *J. Geol. Soc. Korea*, **45**, 527-555 (2009).
2. Korea Meteorological Administration, Climate Change Information Center, Report of Global Atmosphere Watch 2013, 278 (2014).
3. B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, L. Meyer (eds.), IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom (2005).

4. M. Aresta, Carbon Dioxide Recovery and Utilization, p. 21-49, Springer, Berlin/Heidelberg, Germany (2013).
5. M. Son, G. Kim, K. Han, M. W. Lee, and J. T. Lim, Development status and research direction in the mineral carbonation technology using steel slag, *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**, 141-155 (2017).
6. H. S. Kim, S.-C. Chae, J. W. Ahn, and Y.-N. Jang, CO<sub>2</sub> fixation technology by mineral carbonation, *Miner. Sci. Ind.*, **22**, 71-85 (2009).
7. Inagendo, Carbon Capture Use & Storage (CCUS), [http://www.inagendo.com/res/default/inagendo\\_ccus.pdf](http://www.inagendo.com/res/default/inagendo_ccus.pdf) (2013).
8. S. Eloneva, S. Teir, J. Salminen, C. J. Fogelholm, and R. Zevenhoven, Fixation of CO<sub>2</sub> by carbonating calcium derived from blast furnace slag, *Energy*, **33**, 1461-1467 (2008).
9. M. W. Mun and H. C. Cho, Mineral carbonation for carbon sequestration with industrial waste, *Energy Procedia*, **37**, 6999-7005 (2013).
10. S. M. Lee, S. H. Lee, S. K. Jeong, M. H. Youn, D. D. Nguyen, S. W. Chang, and S. S. Kim, Calcium extraction from steelmaking slag and production of precipitated calcium carbonate from calcium oxide for carbon dioxide fixation, *J. Ind. Eng. Chem.*, **53**, 233-240 (2017).
11. D. Bonenfant, L. Kharoune, S. Sauve, R. Hausler, P. Niquette, M. Mimeault, and M. Kharoune, CO<sub>2</sub> sequestration potential of steel slags at ambient pressure and temperature, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **47**, 7610-7616 (2008).
12. R. M. Santos, J. V. Bouwel, E. Vandeveld, G. Mertens, J. Elsen, and T. V. Gerven, Accelerated mineral carbonation of stainless steel slags for CO<sub>2</sub> storage and waste valorization: Effect of process parameters on geochemical properties, *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **17**, 32-45 (2013).
13. H. J. Jo, S. H. Park, Y. N. Jang, S. C. Chae, P. K. Lee, and H. Y. Jo, Metal extraction and indirect mineral carbonation of waste cement material using ammonium salt solutions, *Chem. Eng. J.*, **254**, 313-323 (2014).
14. G. Montes-Hernandez, R. Perez-Lopez, F. Renard, J. M. Nieto, and L. Charlet, Mineral sequestration of CO<sub>2</sub> by aqueous carbonation of coal combustion fly-ash, *J. Hazard. Mater.*, **161**, 1347-1354 (2009).
15. D. N. Huntzinger, J. S. Gierke, L. L. Sutter, S. K. Kawatra, and T. C. Eisele, Mineral carbonation for carbon sequestration in cement kiln dust from waste piles, *J. Hazard. Mater.*, **168**, 31-37 (2009).
16. Y. Lee, S. H. Lee, I. Hwang, S. Choi, S. M. Lee, and S. S. Kim, A study on the calcium ion extraction for PCC production, *Appl. Chem. Eng.*, **29**, 43-48 (2018).
17. S. Eloneva, S. Teir, H. Revitzer, J. Salminen, A. Said, C. Fogelholm, and R. Zevenhoven, Reduction of CO<sub>2</sub> emissions from steel plants by using steelmaking slags for production of marketable calcium Carbonate, *Steel Res. Int.*, **80**, 415-421 (2009).
18. J. Hu, W. Liu, L. Wang, Q. Liu, F. Chen, Ha. Yue, B. Liang, L. Lü, Y. Wang, G. Zhang, and Chun Li, Indirect mineral carbonation of blast furnace slag with (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> as a recyclable extractant, *J. Energy Chem.*, **26**, 927-935 (2017).