

Research Paper

# Mineral Carbonation of Red Mud Using CO<sub>2</sub> Microbubbles under Ambient Conditions

Dong Jun Kim<sup>1</sup> · Jin Chul Joo<sup>2,†</sup> · In Hyuk Hwang<sup>2</sup> · Yewon Cho<sup>2</sup> · Sangrae Kim<sup>1</sup> ·  
Soon Chul Kwon<sup>3</sup> · Jung Min Lee<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Center of Water Environment & Carbon Assessment, Korea Conformity Laboratories

<sup>2</sup>Department of Civil & Environmental engineering, Hanbat National University, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Civil Engineering, Pusan National University, Republic of Korea

<sup>4</sup>Land & Housing Institute, Republic of Korea

(Received October 4, 2025; Revised October 29, 2025; Accepted October 31, 2025)

**Abstract :** This study investigated the mineral carbonation and neutralization behavior of red mud (RM) using CO<sub>2</sub> microbubbles (CO<sub>2</sub> MBs) under ambient temperature and pressure conditions, and further assessed the feasibility of utilizing carbonated RM as a cement substitute. Batch experiments were conducted at various solid-to-liquid ratios (S/L = 0.001–1.0), monitoring pH, electrical conductivity (EC), and aqueous carbonic acid (H<sub>2</sub>CO<sub>3(aq)</sub>) concentrations. In the RM–CO<sub>2</sub> MBs system, pH initially dropped sharply and then recovered to the buffering zone (pH 7–8.5), while EC exhibited a rapid rise followed by gradual decline, indicating sequential ion release and carbonate precipitation. The H<sub>2</sub>CO<sub>3(aq)</sub> concentration decreased over time due to both carbonation consumption and pH-induced speciation shift. In continuous experiments (reactor dimensions: D = 14.6 cm, H = 34 cm, S/L = 0.025), both powdered (RM-P) and sludge-type (RM-S) samples achieved neutralization (pH = 7) within 4 minutes, accompanied by a characteristic EC decrease–rebound pattern. The total inorganic carbon (TIC)-based CO<sub>2</sub> uptake of RM-S reached 8.87 g-CO<sub>2</sub>/kg-RM, corresponding to approximately 84% of the theoretical maximum carbonation potential (TMCP). Mortar specimens incorporating carbonated RM as a partial cement replacement (0–15 wt%) exhibited decreasing compressive strength with increasing substitution ratio, yet 5 wt% replacement maintained adequate strength for non-structural construction materials. These results demonstrate that CO<sub>2</sub> MBs enable rapid (≤2 min), high-efficiency carbonation and neutralization of RM under ambient conditions without pressurized systems. The proposed process provides a low-energy, environmentally friendly pathway for simultaneous CO<sub>2</sub> sequestration and red mud valorization, contributing to sustainable carbon-neutral technology.

**Keywords :** Red mud, CO<sub>2</sub> microbubbles, mineral carbonation, cement replacement, CO<sub>2</sub> sequestration

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

† Corresponding author

E-mail: jincjoo@hanbat.ac.kr

Tel: 042-828-1264 Fax: 042-828-1476

© 2025, Korean Society of Environmental Engineers



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구논문

# 상온·상압 조건에서 이산화탄소 마이크로버블을 이용한 레드머드의 광물탄산화

김동준<sup>1</sup> · 주진철<sup>2,\*</sup> · 황인혁<sup>2</sup> · 조예원<sup>2</sup> · 김상래<sup>1</sup> · 권순철<sup>3</sup> · 이정민<sup>4</sup>

<sup>1</sup>한국건설생활환경시험연구원 물환경탄소평가센터

<sup>2</sup>국립한밭대학교 건설환경공학과

<sup>3</sup>부산대학교 사회기반시스템공학과

<sup>4</sup>NH토지주택연구원

**요약:** 본 연구는 CO<sub>2</sub> 마이크로버블(CO<sub>2</sub> MBs)을 이용하여 상온·상압 조건에서 레드머드(Red Mud, RM)의 광물탄산화 및 중화 반응 특성을 규명하고, 탄산화된 RM의 시멘트 대체재 활용 가능성을 평가하였다. 회분식 실험에서는 고체-액체비(S/L = 0.001-1.0) 조건에서 pH, 전기전도도(EC), 수중 탄산 농도(H<sub>2</sub>CO<sub>3(aq)</sub>)를 모니터링하였다. RM-CO<sub>2</sub> MBs 시스템에서 pH는 초기 급락 후 완충 영역(pH 7-8.5)으로 회복하였으며, EC는 초기 급상승 후 완만한 감소를 보여 용출-탄산염 형성에 따른 전형적 거동을 보였다. H<sub>2</sub>CO<sub>3(aq)</sub> 농도는 시간 경과에 따라 감소하였으며, 이는 탄산화 소비와 pH 상승에 따른 탄산중 전환이 동시에 작용한 결과로 해석된다. 연속식 반응에서는 D = 14.6 cm, H = 34 cm의 반응조를 이용하고 S/L = 0.025 조건에서 분말형(RM-P)과 슬러지형(RM-S) RM을 비교하였다. 두 조건 모두 주입 4분 이내에 중성(pH = 7)에 도달하였고, EC는 초기 급감 후 재상승하는 감소-회복 패턴을 보였다. RM-S는 총무기탄소(TIC) 분석 결과 8.87 g-CO<sub>2</sub>/kg-RM의 포집량을 나타내었으며, 이는 이론적 최대 탄산화 잠재량(TMCP)의 84%에 해당한다. 한편, 탄산화된 RM을 시멘트 대체재(치환율 0-15 wt%)로 적용한 모르타르의 압축강도는 치환율 증가에 따라 감소하였으며, 5 wt% 치환 시 상대적으로 양호한 강도 유지로 비구조용 건축자재로서의 활용 가능성이 확인되었다. 본 연구는 CO<sub>2</sub> MBs를 활용하여 고압장치 없이도 상온·상압에서 신속(≤2분)하고 효율적인 RM 탄산화 및 중화를 달성할 수 있음을 실증하였으며, 레드머드의 친환경적 처리와 자원화를 동시에 달성할 수 있는 저에너지·탄소중립형 기술임을 제시하였다.

**주제어:** 레드머드, CO<sub>2</sub> 마이크로버블, 광물탄산화, 시멘트 대체재, 이산화탄소 포집

## 1. 서론

기후변화는 단순한 기상 현상의 변화를 넘어 전 지구적 재난 양상을 보이며, 폭염, 한파, 이상 호우, 가뭄 등 복합 재난을 유발하고 있다[1]. 이러한 변화는 주로 18세기 후반 산업화 이후 인류 활동의 급격한 확대에 의한 온실가스(greenhouse gases, GHGs) 배출 증가에서 기인한다[2]. 화석연료 연소, 시멘트 생산, 농업 및 축산업은 대기 중 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O) 농도를 비선형적으로 증가시켜 지구 복사 평형을 교란시키며, 특히 CO<sub>2</sub>는 전체 복사 강제력의 약 76%를 차지하는 주요 온실가스로 보고되고 있다[3].

이산화탄소 누적 배출량과 지구 평균기온 상승 간의 선형적 관계가 규명되면서[4], CO<sub>2</sub> 저감은 기후변화 완화(mitigation)의 핵심 축으로 자리잡았다. 이에 따라 각국은 탄소중립(carbon neutrality) 달성을 위해 탄소 포집, 활용 및 저장(carbon capture,

utilization and storage, CCUS) 기술 개발을 국가 전략 기술로 지정하고 있다.

CCUS 기술은 대기 또는 배출원에서 포집된 CO<sub>2</sub>를 지하 저장, 화학적 전환, 또는 고체광물화 형태로 안정적으로 격리하는 통합 기술군이다. 이 중 광물 탄산화(mineral carbonation)는 CO<sub>2</sub>를 화학적으로 반응시켜 안정한 (중)탄산염(mineral carbonates) 형태로 고정하는 방법으로, 반응 후 역전(re-release) 가능성이 낮아 영구 격리가 가능하다는 장점이 있다[5]. 특히 고알칼리성 산업 부산물(예: 제철 슬래그, 석탄재, 시멘트 클링커, 레드머드 등)은 풍부한 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> 등의 양이온을 공급하여 저온·저압 조건에서도 반응이 진행될 수 있으며, 폐기물의 중화와 CO<sub>2</sub> 포집을 동시에 달성하는 순환경제형 저탄소 공정으로 주목받고 있다[6-8].

레드머드(Red Mud, RM)는 보크사이트(bauxite)로부터 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)을 추출하는 베이어 공정(bayer process)에서 생성

되는 고알칼리성 부산물로, 주성분은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O이며 pH 11~13의 강알칼리성을 나타낸다 [9, 10]. 전 세계적으로 연간 약 1.2~1.5억 톤이 발생하며 국내에서도 연간 약 20만 톤 이상이 발생하고 있으나 대부분 제련소 인근에 매립·적치되는 실정이다 [11, 12]. 이러한 RM의 단순 매립은 장기적으로 Na<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup> 용출에 따른 토양 알칼리화, 지하수 오염, 수계 부영양화 등 2차 환경피해를 유발할 수 있다. 따라서, RM의 친환경적 처리 및 자원화 전략이 시급히 요구되고 있다. 기존 재활용 연구는 흙작재, 촉매, 시멘트 대체재 등 다방면으로 진행되어 왔으나, RM의 고알칼리성 특성을 적극적으로 활용한 광물 탄산화 연구가 최근 활발히 수행되고 있다 [13-20].

RM를 이용한 CO<sub>2</sub> 포집 연구는 다수 보고되었으나 대부분 기체형 CO<sub>2</sub>를 고압 조건(≥ 10 bar)에서 주입하는 방식으로 수행되었으며, 마이크로버블을 이용한 상온·상압(ambient) 조건에서의 반응성 및 중화효과에 대한 실증적 연구는 최근에 진행 중이다. 또한 기존 연구들은 주로 반응 후 생성물의 결정학적 특성(XRD, FTIR 등)에 초점을 맞추어, 반응 중의 pH 변화, 전기전도도(electrical conductivity, EC), 무기탄소(total inorganic carbon, TIC) 축적 등 동적 지표 기반의 실시간 반응평가는 충분히 이루어지지 않았다. 따라서 RM의 실용적 탄산화 공정 설계 및 반응 메커니즘 규명을 위해서는 상온·상압 조건에서의 연속식 반응평가가 필수적이다.

마이크로버블(Microbubbles, MBs)은 직경 1~100 μm의 미세 기포로, 일반 버블 대비 비표면적이 커 물질전달계수가 높고, 내부 압력이 증가하여 기체의 용해 속도 및 반응 효율을 극대화할 수 있다 [21-24]. 특히 CO<sub>2</sub> 마이크로버블(CO<sub>2</sub> MBs)은 별도의 고압장치 없이도 수중에서 CO<sub>2</sub> 과포화를 유도하여 상온·상압에서도 탄산화 반응을 촉진할 수 있다. 이러한 특성은 고비용 압력장치를 요구하는 기존 기체 주입식 탄산화의 한계를 극복할 수 있는 에너지 효율적·저탄소형 대안 기술로 평가받고 있다. 최근 CO<sub>2</sub> MBs는 폐수처리, 금속이온 제거, 탄산칼슘 생성 등 다양한 환경공정에 적용되어 왔으며 레드머드 탄산화에도 잠재력이 크다 [25-29].

본 연구는 상온·상압에서도 CO<sub>2</sub> MBs를 이용한 RM의 광물 탄산화 및 중화 가능성을 검증하고, 이를 시멘트 대체재로 활용한 모르타르의 역학적 특성 평가를 통해 건축 자재로서 실용 가능성을 제시하고자 한다. 이를 위해 회분식(batch)과 연속식(continuous) 반응실험을 수행하여 pH, ORP, EC, TIC, 주요 양이온 농도의 시계열 변화를 분석하고, 최적 반응 조건을 도출하였다. 또한 CO<sub>2</sub> MBs 처리 RM을 활용해 시멘트 일부를 대체하여 모르타르를 제작하고, 압축강도 변화를 통해 구조적 활용 가능성을 평가하였다. 본 연구는 (1) CO<sub>2</sub> MBs를 활용한 상온·상압에서 RM 탄산화의 실증적 반응평가, (2) TIC 기반 정량적 CO<sub>2</sub> 포집량 산정, (3) RM 탄산화 부산물의 시멘트 대체재로의 재활용성 검증을 통해 폐기물 자원화 및 탄소중립에 기여할 수 있는 타당성을 평가하고자

**Table 1.** Major oxide composition of red mud analyzed by X-ray fluorescence spectrometer

Chemical composition	Mass (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34.57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.23
SiO <sub>2</sub>	17.23
Na <sub>2</sub> O	14.20
TiO <sub>2</sub>	8.24
CaO	1.24
MgO	0.14
Other compounds	1.15

한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 레드머드 특성 (Red Mud Characterization)

본 연구에 사용된 RM는 베이어 공정(bayer process)을 통해 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)을 정제하는 과정에서 생성된 산업 부산물로, 국내 K사로부터 제공받아 사용하였다. 시료는 수분함량이 높은 슬러지 상태로 제공되었으며, 초기 pH는 11~12로 강알칼리성(strongly alkaline)을 나타냈다. 초기 함수율은 38%로 측정되었으며, RM의 화학적 조성은 X선 형광분석기(X-ray fluorescence spectrometer, XRF)를 이용하여 정량 분석하였다. 주요 산화물 성분은 산화철(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)과 산화알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)으로, 각각 34.57% 및 23.23%를 차지하였다. 알칼리 성분 중 Na<sub>2</sub>O는 14.20%, CaO는 1.24%, MgO는 0.14%로 분석되어, RM이 나트륨계 알칼리성 폐기물(sodium-rich alkaline residue)임을 확인하였다(Table 1 참조). 이러한 조성을 바탕으로, RM의 탄산화 반응은 주로 Na-(hydr)oxide와의 반응을 통해 (중)탄산나트륨(NaHCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) 형태의 광물 탄산염이 생성될 것으로 예상된다. 이러한 결과는 선행연구에서도 Na<sub>2</sub>O가 RM 탄산화의 주요 반응물인 것으로 보고되는 이전 연구와 동일하다 [18, 30].

또한, 각 산화물 조성을 이용하여 이론적 최대 탄산화 잠재량(theoretical maximum carbonation potential, TMCP)을 계산하였다[31]. TMCP는 RM의 탄산화 반응 가능한 양이온(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>)이 전량 반응하여 생성할 수 있는 CO<sub>2</sub> 고정량을 의미한다. 계산식은 다음과 같다.

$$TMCP (g-CO_2/kg-RM) = 0.785(0.56\%CaO \times 0.7\%CaCO_3 \times \%SO_3) + 1.09\%MgO + 0.71\%Na_2O + 0.468\%K_2O$$

Table 1에 근거해서 산정한 본 시료의 TMCP는 10.58 g-CO<sub>2</sub>/kg-RM으로 산정되었으며, 이는 이산화탄소 포집 효율 평가의 기준값으로 활용하였다.

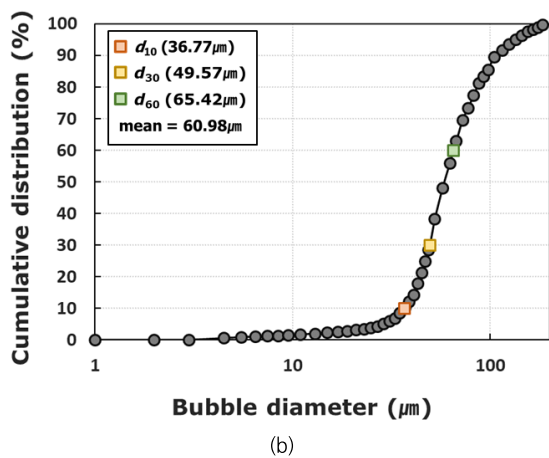
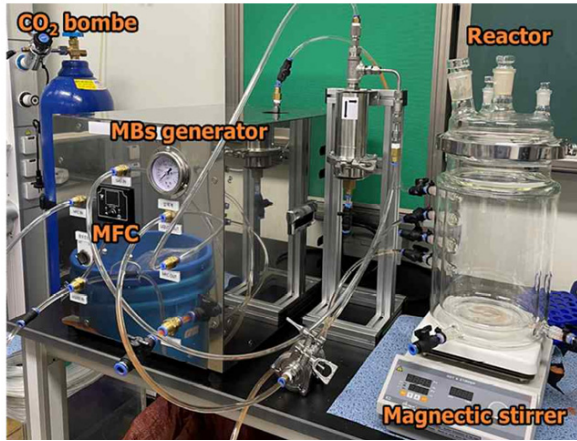


Fig. 1. (a) Experimental setup showing the CO<sub>2</sub> microbubble generation system, and (b) bubble size distribution of the CO<sub>2</sub> microbubble solution.

## 2.2. 이산화탄소 마이크로버블 용액 (CO<sub>2</sub> Microbubble Solution)

본 연구에서 사용한 이산화탄소 마이크로버블(CO<sub>2</sub> MBs) 용액은 초미세기포 발생장치(Ultra Fine Bubble Generator, SK ENF, Korea)를 이용하여 제조하였다(Fig. 1(a) 참조). 기체로는 고순도 이산화탄소(99.9%, SH Inc., Korea)를 사용하였으며, 질량유량제어기(mass flow controller, WIZ-701F, KMB Tech, Korea)를 통해 1.0 L/min의 일정 유량을 유지하였다. MBs 발생기의 작동 압력은 3.5 MPa, 반응조 내 회전 속도는 3,000 rpm으로 설정하여 균일한 기포 직경(1~100  $\mu\text{m}$ )을 확보하였다(Fig. 1(b) 참조). 생성된 CO<sub>2</sub> MBs 용액의 기체 용해도는 CaO 침전법(precipitation method)을 적용하여 총 용존 무기탄소 농도(total dissolved CO<sub>2</sub> concentration)를 정량화하였다. 측정 결과, 수중 CO<sub>2</sub> 농도는 4.41 g/L로 확인되어, 일반적인 상온·상압 조건의 이론적 용해도(1.45 g/L)를 약 3배 초과하는 과포화 상태임을 확인하였다. 이로써 고압장치를 사용하지 않고도 상온·상압에서 고농도 CO<sub>2</sub> 수용액을 제조할 수 있었으며, 이는 후속 탄산화 실험에서 반응속도 향상 및 pH

Table 2. Experimental conditions for batch and continuous experiments of CO<sub>2</sub> microbubble-red mud system

(a) batch experiment				
Sample	Red mud (g)	Liquid (mL)	Solid to liquid ratio	Measured data
RM-DI				pH
RM-CO <sub>2</sub> MBs	0.2~200	200	0.001~1.0	ORP (mV) EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) H <sub>2</sub> CO <sub>3(aq)</sub> (mg/L)
(b) continuous experiment				
Sample	Red mud (g)	Liquid (mL)	Solid to liquid ratio	Measured data
RM-DI				pH
RM-P	100	4,000	0.025	EC (mS/cm)
RM-S	161	3,939		ICP (mg/L) TIC (mg/L)

완충효과를 기대할 수 있는 조건이다.

## 2.3. 회분식 실험 (Batch Experiments)

회분식(batch) 실험은 RM과 CO<sub>2</sub> MBs 간 반응 특성(pH 변화, 중화속도, TIC 측정)을 평가하기 위해 수행하였다. 실험에는 250 mL 삼각플라스크를 사용하였으며, 고체 대 액체 비 (Solid-to-Liquid ratio, S/L, w/w)는 0.001, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0으로 설정하였다(Table 2 참조). 사용된 RM은 95°C에서 24시간 강제 순환 건조기로 건조한 후, 막자사발로 분쇄하여 균질한 분말 상태로 제조하였다. 이후 증류수(DI water)와 CO<sub>2</sub> MBs를 RM과 혼합하여 목표 S/L 비율을 조성하였다.

모든 반응은 상온(25 ± 2°C), 상압(1 atm) 조건에서 수행하였으며, 외기 CO<sub>2</sub>의 혼입을 방지하기 위해 플라스크 입구를 파라필름(parafilm)으로 밀봉하였다. 반응 기간은 7일이며, 0, 0.5, 1, 6, 12, 24, 48, 72, 120, 168 h 시점에서 시료를 채취하여 pH, ORP, EC, H<sub>2</sub>CO<sub>3(aq)</sub>를 분석하였다. 이를 통해 시간 경과에 따른 중화 및 탄산화 반응 진행도를 평가하였다.

## 2.4. 연속식 실험 (Continuous Flow Experiments)

연속식 실험은 실제 공정 적용을 모사하기 위해 수행하였다. 반응기는 직경 14.6 cm, 높이 34 cm의 원통형 유리 반응조 (cylindrical glass reactor)를 사용하였다(Fig. 1(a) 참조). 반응조 내 S/L 비율은 향후 RM과 CO<sub>2</sub> MBs 그리고 시멘트 복합체 제작을 고려해 RM과 CO<sub>2</sub> MBs의 비는 0.025 (w/w)로 설정하였다. RM은 두 가지 형태로 비교하였으며, 함수율 38%의 원상태 시료인 RM-S (슬러지형)과 건조·분쇄한 시료인 RM-P (분말형)를 각각 사용하였다. CO<sub>2</sub> MBs는 상향류(upflow)로 주입하였으며, 반응 중 실시간으로 pH 및 EC를 모니터링하였고, 일정 간격(1, 2, 3, 5, 10 min)마다 50 mL씩 시료를 채수하였다(Table 2 참조). 채수 시료는 고속 원심분리기(Combi-514R, Hanil Scientific Industrial, Korea)로 2,000 rpm, 5 min

**Table 3.** Design of mix proportions of red mud mortar (unit: kg/m<sup>3</sup>)

Case	Water (W) (g)	Cement (C) (g)	Red mud (R) (g)	Sand (S) (g)	Mix proportion
R0	415.95	831.9	0	831.9	W/(C+R) = 0.5 R/C = 0, 0.05, 0.1, 0.15 Binder(C+R)/S = 1
R5		790.3	41.6		
R10		748.7	83.2		
R15		707.1	124.8		

동안 원심분리하여 고상/액상을 분리하고, 0.45 μm 멤브레인 필터로 여과하였다. 양이온 분석은 IPC-OES (iCAP PRO, Thermofisher, USA)를 이용하여 진행하였으며 TIC는 TOC 분석기(TOC-L, Shimadzu, Japan)의 TIC mode를 사용하여 시료 내 총 무기탄소(TIC) 농도를 측정하였다. TIC 분석 결과를 통해 시간에 따른 이산화탄소 포집량(g-CO<sub>2</sub>/kg-RM)을 산정하였으며, TMCP 대비 포집 효율을 평가하였다.

**2.5. 레드머드 모르타르 실험 (Mortar Preparation and Mechanical Testing)**

RM의 건축자재로서의 활용 가능성을 평가하기 위해, CO<sub>2</sub> MBs 처리수를 배합수로, RM을 시멘트 대체재로 사용하여 모르타르를 제작하였다. 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement)를 사용하였으며, 시멘트 중량 대비 RM 치환율은 5%, 10%, 15% (wt%)로 설정하였다 (Table 3 참조).

모르타르 배합은 KS L ISO 679을 준용하였으며, 혼합은 행성식 믹서를 이용하였다. 시편은 직경 10 cm, 높이 20 cm의 원통형 몰드에 주입 후, 진동 테이블에서 30초간 탈기하였다. 각 시편은 하루 동안 대기 중(RH 60%, 25°C)에서 양생 후 탈형하였으며 이후 외부 요인의 영향을 최소화하기 위해 수

중 양생을 진행하였다. 양생 기간은 7, 14, 28일 수중 양생 (20±1°C, 수돗물)으로 구분하였으며 각 양생기간, 배합별로 3개 시편을 준비하였다.

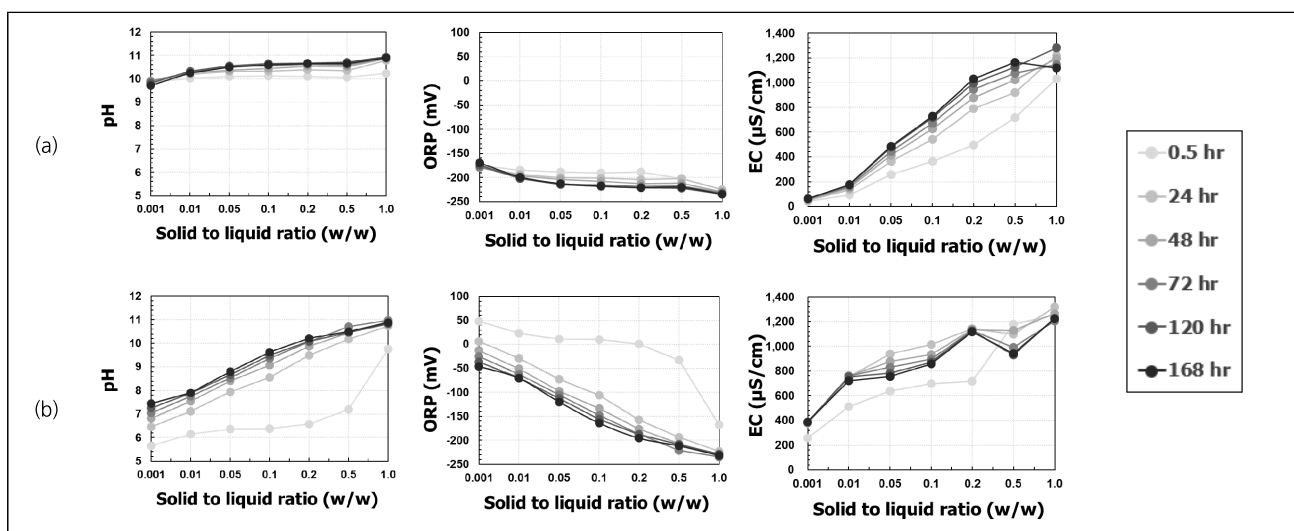
양생 후 시편은 표면수 제거 후, 만능 재료시험기(Universal Testing Machine, UH-F500kNX, Shimadzu, Japan)를 이용해 압축강도 시험을 수행하였다. 하중 재하 속도는 1 mm/min로 설정하였다. 각 조건별로 3개 시편을 시험하여 평균값을 산정하였으며, 표준편차를 함께 제시하였다.

**3. 결과 및 고찰**

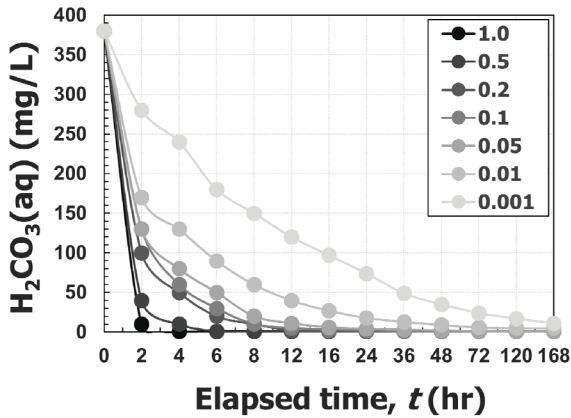
**3.1. 회분식 실험 결과(Batch Experiment Results)**

RM 수용액 내에서 CO<sub>2</sub> MBs 주입에 따른 pH, ORP, 전기전도도(EC), 용존 탄산성분(H<sub>2</sub>CO<sub>3(aq)</sub>) 변화를 Figs. 2, 3에 제시하였다. 각 반응계는 동일한 초기 조건에서 시작되었으며, 비교군으로 증류수를 사용한 RM-DI와 실험군으로 CO<sub>2</sub> MBs를 주입한 RM-CO<sub>2</sub> MBs를 설정하였다.

실험 전반에서 S/L 비가 낮은 조건(0.001~0.05)에서는 RM-CO<sub>2</sub> MBs의 초기 pH는 RM-DI 대비 유의하게 낮게 관찰되었으며, 이는 CO<sub>2</sub> MBs 주입에 따라 용존 CO<sub>2</sub>가 물과 반응하여 탄산(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)을 형성하는 수화반응(hydration reaction)으로 인



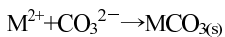
**Fig. 2.** Temporal variation in physicochemical parameters with different solid-to-liquid (S/L) ratios during batch experiments: (a) RM-DI and (b) RM-CO<sub>2</sub> MBs.



**Fig. 3.** Temporal variation in  $H_2CO_3(aq)$  concentration with different solid-to-liquid (S/L) ratios in RM- $CO_2$  MBs system during batch experiments.

한 것으로 판단된다. 시간이 경과함에 따라 pH는 점차 상승하였으며, 7일 경과 후 대부분의 S/L 조건에서 7.0~8.5 범위의 완충영역에 도달하였다.

반면 S/L 비가 증가할수록 pH 상승 속도 및 최종 pH가 높게 나타났는데, 이는 투입된 RM 양이 증가함에 따라 용출 가능한 알칼리 금속 양이온( $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) 공급량이 많고, 이들이 수용액 내  $OH^-$  이온 농도를 높여 완충능(buffering capacity)을 증대시킨 결과로 해석된다. 즉, RM 고체상의 알칼리 저장능이 S/L 비에 따라 중화 곡선을 지배함을 보여준다. 이러한 경향은 산-염기 중화 반응과 동시에 진행되는 광물 탄산화 반응(mineral carbonation)의 초기 단계로 해석할 수 있으며, pH 상승 구간( $\geq 7.0$ )에서는 다음 반응이 우세하게 진행되기 때문이다.



여기서  $M^{2+}$ 는  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  등의 이가 양이온을 의미한다.

EC 변화는 RM- $CO_2$  MBs 시스템 내 이온 종의 농도 변화를 반영하는 지표로, 양이온 용출(release)과 탄산염 침전(precipitation) 사이의 경쟁관계를 보여준다. RM-DI 조건에서는 시간이 지남에 따라 완만한 EC 증가가 관찰되어, 주로 RM 고체상에서의 용해 반응(dissolution)이 지배적인 것으로 판단된다. 반면 RM- $CO_2$  MBs 조건에서는 초기(0~6 h)에 급격한 EC 상승 후, 24 h 이후 점진적 감소가 관찰되었다. 초기 EC 급상승은  $CO_2$  MBs 주입에 따라 수용액 내 pH가 급격히 낮아지면서 고체상 RM으로부터  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  등의 용출이 촉진된 결과로 해석된다. 이후 EC가 점진적으로 감소하는 구간은 용출된 양이온들이 용존 탄산종( $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ )과 결합하여  $H_2CO_3(aq)$ 을 형성함으로써 수용액 내 자유 이온 농도가 감소한 데 기인한다. 이러한 급상승-완만한 감소 패턴은 광물 탄산화의 전형적인 전기전도도 변화로, 반응 진행의 간접

지표로 활용될 수 있다 [32]. 따라서 EC 감소 구간은 탄산염 침전 단계(precipitation phase)로 정의할 수 있다.

$CO_2$  MBs 주입에 따라 생성된  $H_2CO_3(aq)$  농도의 시간 변화를 Fig. 3에 나타냈다. 모든 S/L 조건에서  $H_2CO_3(aq)$  농도는 시간 경과에 따라 감소하였으며, S/L 비가 클수록 감소 속도가 빨라졌다. 이는 고체상 RM로부터 용출된 양이온 농도가 높을수록 탄산종과의 결합반응이 활발히 일어나기 때문이다. 즉, 반응 초기에  $H_2CO_3(aq)$ 가 주요 탄산종으로 존재하지만, 시간이 지남에 따라 pH가 상승함에 따라  $HCO_3^- \rightarrow CO_3^{2-}$  전환이 우세해진다. 따라서,  $H_2CO_3(aq)$  농도의 감소는 단순한 소비뿐만 아니라 화학평형 이동(chemical equilibrium shift)의 결과로 이해되어야 하며, 이는 TIC의 안정화 구간과 일치한다.

S/L ratio는 고체상-액상 간 접촉면적(surface area)과 용출 가능한 양이온 농도를 동시에 결정하는 주요 변수이다. 본 연구에서는 S/L 비가 높을수록 pH 회복 속도, EC 감소 속도,  $H_2CO_3(aq)$  소비 속도 모두 증가하는 것으로 나타나, 탄산화 반응이 고체-액상 계면 반응(controlled by surface-mediated reactions)임을 시사한다. 이는 고체-액상 계면에서 heterogeneous reaction kinetics 특성을 갖는 광물 탄산화의 일반적 거동과 일치한다 [32].

### 3.2. 연속식 실험의 이화학적 지표 분석 (Physicochemical indicators in continuous $CO_2$ MBs - RM system)

연속식 실험은 상온·상압 조건에서의 반응속도 및 연속 주입 안정성을 평가하기 위해 수행되었다. S/L 비 0.025 조건에서 RM-DI(대조군), RM-P(분말형), RM-S(슬러지형)의 시간별 pH와 EC 변화를 Fig. 4에 나타냈다. RM-DI의 경우 pH는 11 이상에서 실험 전 과정 동안 거의 변화가 없었으며, 이는 외부  $CO_2$ 의 공급이 없는 상태에서 RM 자체 완충능(buffering capacity)에 의해 유지된 결과이다. 반면,  $CO_2$  MBs가 주입된 RM-P와 RM-S에서는 초기 0~4분 사이 급격한 pH 하강(pH = 6~7)이 관찰되었다. 이는 수중에 주입된  $CO_2$ 가 즉시 용해되어 탄산을 형성하고, 탄산이 수산화이온( $OH^-$ )과 반응하여 중성화 반응을 유도한 결과이다. 결과적으로 pH를 급격히 중성 부근(pH = 7.0)에 도달시킨다(Fig. 4(a)). 이러한 단시간 내 완충 영역(neutral buffer zone) 진입은  $CO_2$  MBs의 고효율 용해와 높은 기체-액체 접촉면적에 기인한다. 또한 pH 하강 이후 완만한 평형 상태로 진입하는 구간은 이온 평형전이(ionic equilibrium shift) 구간으로,  $HCO_3^-$ 와  $CO_3^{2-}$  간의 전환 및 미세 침전 생성이 동시에 일어나는 복합 반응 단계임을 시사한다.

RM-S의 경우 RM-P보다 초기 pH가 다소 높게 측정되었으며, 중화 완료 시점 또한 약간 지연되는 것으로 나타났다. 이는 RM-S 시료가 수분 함량(38%)이 높아, 초기  $CO_2$  용해 및 확산 과정에서 기체-액체-고체 간 질량전달 저항(mass transfer resistance)이 상대적으로 크게 작용했기 때문이다. 그러나 장기적으로는 RM-S가 더 완전한 중화 상태에 도달하

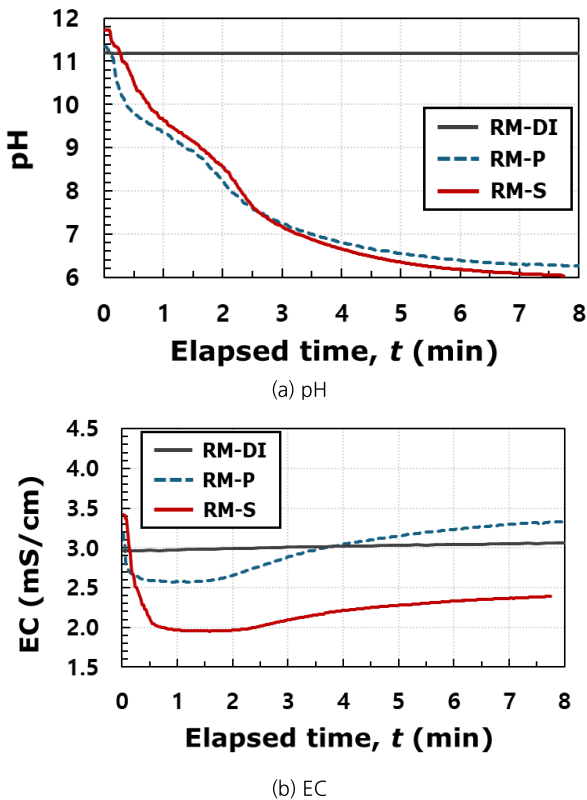


Fig. 4. Temporal variation in physicochemical parameters during continuous experiments: (a) pH and (b) EC.

며, 이는 슬러지 내 공극수(interstitial water)로부터 지속적 양이온 용출(sustained leaching)이 탄산화 반응을 유지시킨 결과로 해석된다.

RM-DI의 EC는 약 3.0 mS/cm 수준에서 일정하게 유지되었으며, 이는 RM 내 용해 가능한 알칼리 성분이 초기 평형에 도달해 추가적인 변화를 보이지 않은 결과이다. 반면, RM-P와 RM-S에서는 CO<sub>2</sub> MBs 주입 직후 EC가 급격히 감소(3.5 → 2.0 mS/cm)하였다가 이후 점진적으로 재상승하는 감소-회복(rebound) 패턴을 보였다(Fig. 4(b)). 이러한 변화는 세 단계의 반응 과정으로 해석되며, 초기 단계 (0~2 min)에는 이온 급 용출 및 급격한 EC 감소의 주요 원인은 CO<sub>2</sub> 주입에 따른 pH 급강하로 RM 고체상에서 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 등의 양이온이 빠르게 용출되며, 동시에 용출된 양이온이 수용액 내 탄산중(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)과 반응하여 불용성 (중)탄산염(MCO<sub>3(s)</sub>, MHCO<sub>3(s)</sub>) 침전물을 형성하여 자유 이온 농도가 급감하면서 EC가 급격히 감소한다.

이후 중간 단계 (2~4 min)는 침전-용해 평형 전이단계로 생성된 탄산염 침전이 미세입자 형태로 존재하며, pH 완충에 따라 일부가 재용해(re-dissolution) 되어 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 형태로 전환되어 이온 농도가 다시 증가하며 EC가 완만히 회복된다. 마지막으로 평형 단계(4 min 이후)는 안정화 구간으로 EC는 약 2.3~2.4 mS/cm 수준에서 평형을 유지하며, 이는 고체-액

상 간의 화학평형(chemical equilibrium)이 형성되었음을 의미한다. 이 구간은 TIC 농도의 평형 구간과 일치하며, 탄산화 반응이 종결된 상태를 반영한다.

이러한 EC 변화 패턴은 기존 연구 [17, 18]에서 보고된 RM 및 슬래그 기반 광물 탄산화 실험의 결과와 유사하며, EC의 감소-회복 구간은 반응 진행도 및 침전 형성 여부를 평가하는 유효한 간접 지표(indirect indicator)로 활용 가능하다. 결과적으로, CO<sub>2</sub> MBs를 연속 주입한 시스템은 상온-상압 조건에서도 빠른 pH 중화(약 4 min 이내)와 명확한 EC 변화 패턴을 보이며, 이는 RM 탄산화 반응이 진행되었음을 입증한다.

### 3.3. 연속식 실험의 양이온 농도 변화 분석 (Cation dynamics during continuous CO<sub>2</sub> MBs injection)

RM-P 및 RM-S 시스템에서 주요 양이온(Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>)의 시간별 농도 변화를 Fig. 5에 제시하였다. 모든 조건은 동일한 S/L 비(0.025) 및 상온·상압 조건에서 수행되었으며, CO<sub>2</sub> MBs 주입에 따른 pH 변화 및 EC 변동과의 상호연계성을 바탕으로 해석하였다. RM-P와 RM-S 모두에서 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 농도는 실험 초반부터 점진적 증가를 나타냈다. 이는 CO<sub>2</sub> MBs 주입 초기에 급격한 pH 하강(pH ≥ 11 → 7)으로 인해 RM 내 알칼리 금속/알칼리 토금속의 용해 반응이 촉진된 결과로 해석된다.

주요 양이온 들은 초기 용출 후 탄산중(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)과 반응하여 (중)탄산염 화합물(MHCO<sub>3</sub>, MCO<sub>3</sub>)을 형성함으로써 EC 감소 및 침전물 생성에 기여한다. 특히 Na<sup>+</sup>는 비침전성 이온(non-precipitating cation)으로서 수용액 내에 주로 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 결합한 NaHCO<sub>3(aq)</sub> 형태로 존재하며, 장기적으로는 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 전환에 따라 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·xH<sub>2</sub>O<sub>(s)</sub> 형태의 고체상이 형성될 수 있다 [33]. Ca<sup>2+</sup>와 Mg<sup>2+</sup>는 탄산염 침전 형성에 직접적으로 기여하는 이온으로, 초기에는 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 결합하여 Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2(aq)</sub>, Mg(HCO<sub>3</sub>)<sub>2(aq)</sub> 등의 중탄산염 용액형태로 존재하나, pH가 상승함에 따라 불용성 탄산염 고체상으로 전이된다.

Al<sup>3+</sup> 농도는 실험 초기에 급격한 감소(ΔC ≈ 90%)를 보였으며, 이후 안정화 구간에 도달하였다(Fig. 5). 이러한 거동은 pH 급강하 이후의 수산화알루미늄(Al(OH)<sub>3</sub>) 침전 반응에 기인한다. 또한 일부 Al<sup>3+</sup>은 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>와의 공침(co-precipitation) 또는 흡착(surface complexation) 형태로 탄산염 침전물 표면에 고정될 가능성도 존재한다 [34]. 이러한 공침 현상은 고체상 내 Al 함량 증가와 용액 내 Al 농도 급감의 상관성을 설명한다.

이러한 결과는 용액 내 이온 농도가 핵 형성 임계값(nucleation threshold)에 도달하지 못했거나, pH가 상대적으로 낮아(CO<sub>2</sub> MBs 지속 주입으로 인한 탄산화) 형성된 (중)탄산염이 용존 상태로 유지되었기 때문으로 판단된다. 특히 pH 6.5 이하 구간에서는 Ca<sup>2+</sup>와 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 간 결합이 Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2(aq)</sub> 형태로 존재하며, 이는 불용성 CaCO<sub>3(s)</sub> 대신 수용성 중탄산

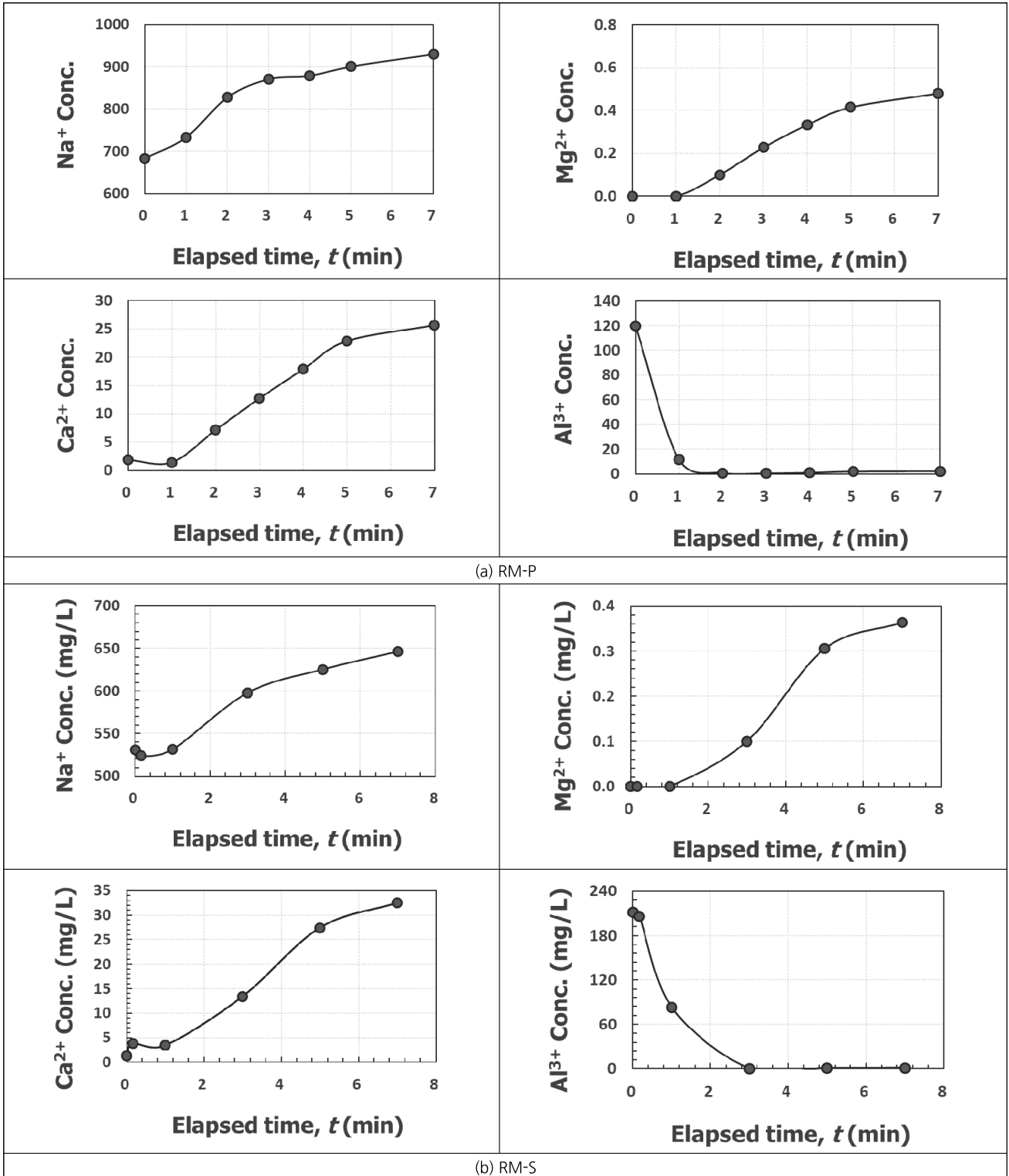
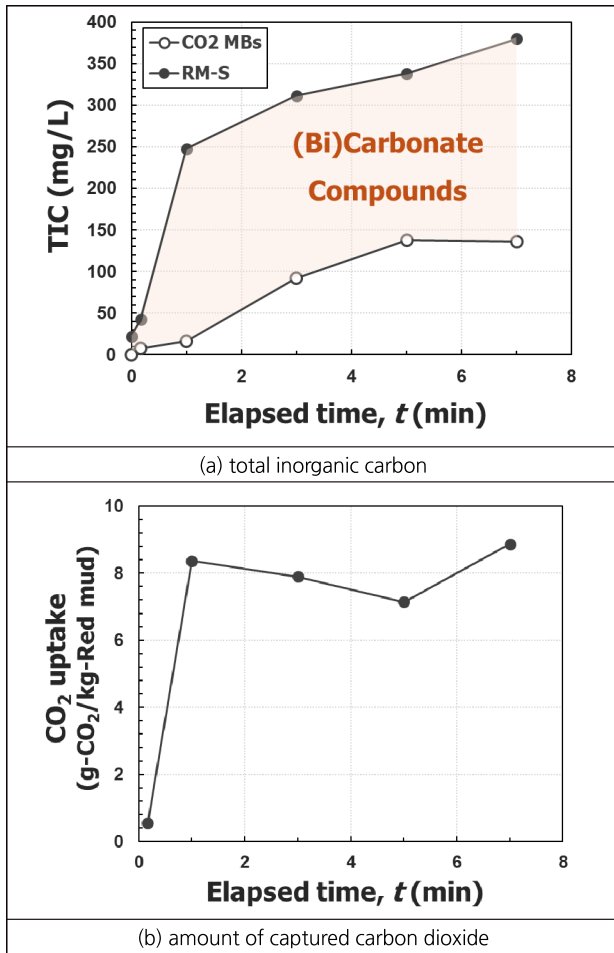


Fig. 5. Temporal variation in cation concentrations during continuous experiments: (a) RM-P and (b) RM-S.

염으로 잔류할 수 있음을 의미한다 [35]. 향후 고체상의 직접적인 확인을 위해서는 XRD, FTIR, SEM-EDS 등 보조분석을 병행하여 침전물 내 탄산염 상(phase) 및 Al 공침 구조를 검증할 필요가 있다.

### 3.4. 연속식 실험의 총 무기탄소(TIC) 분석(Variation of total inorganic carbon (TIC) in continuous CO<sub>2</sub> MBS-RM system)

연속식 조건(S/L = 0.025, 상온·상압)에서 CO<sub>2</sub> MBS 주입에 따른 RM-S의 시간별 TIC 농도 변화 및 TIC 기반 CO<sub>2</sub> 포집량을



**Fig. 6.** Temporal variation in (a) total inorganic carbon, and (b) amount of captured carbon dioxide during continuous experiments.

Fig. 6에 나타냈다. TIC 농도는 반응 초기에 급격히 증가한 뒤, 약 5분 이후 완만히 증가세가 둔화되며 평형 구간 (steady-state plateau)에 도달하였다(Fig. 6(a)). 이러한 거동은 광물 탄산화(mineral carbonation)의 전형적인 3단계 축적 경향으로 해석된다.

초기 반응 구간 (0~2 min)은 급속 용해-결합 반응 (rapid dissolution-complexation)으로 CO<sub>2</sub> MBs 주입에 따라 용존 CO<sub>2</sub>가 급격히 증가하면서 수용액 내 H<sub>2</sub>CO<sub>3(aq)</sub> 및 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 생성이 활성화된다. 동시에 RM으로부터 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>가 빠르게 용출되어, 이들 양이온이 탄산종과 결합해 용존형 (중)탄산염을 형성한다. 이 시점에서 TIC의 급격한 증가 (steep rise)는 주로 용존형 carbonate complex의 축적에 기인한다. 중간 반응 구간(2~5 min)은 이온 교환 및 침전 전이 단계 (ion exchange-precipitation transition)로 탄산종 농도 및 pH의 점진적 상승으로 인해, 일부 용존 (중)탄산염이 핵 형성 (nucleation)을 거쳐 미세 침전 (microprecipitate)으로 전이된다. 이 단계에서는 용존형 TIC 증가가 완료되며, 화학적 평형 전이 (chemical equilibrium shift)가 우세해진다. 마지막 평형

구간(≥ 5 min)은 반응 종결-탄산염 안정화 (steady-state equilibrium) 구간으로 약 5분 이후 TIC 농도가 일정한 수준에 도달하며, 이는 수용액 내 탄산종의 생성과 침전 소모가 균형을 이루는 평형 상태임을 의미한다. 이러한 결과는 CO<sub>2</sub> MBs 주입이 상온·상압 조건에서도 빠른 반응속도 (rapid kinetics)와 짧은 평형 도달 시간(≤ 2 min)을 확보할 수 있음을 실증한다.

TIC 농도 데이터를 바탕으로, RM 단위 질량당 이산화탄소 포집량(CO<sub>2</sub> uptake capacity, g-CO<sub>2</sub>/kg-RM)을 계산하였다 (Fig. 6(b)). 반응 초기 급격한 증가 구간(0~2 min)은 앞서 언급한 용존-결합 반응의 빠른 진행을 반영하며, 이후 5분 경과 시점부터는 증가폭이 완화된 후 평형 상태에 도달하였다. 최종적으로 RM-S의 CO<sub>2</sub> 포집량은 8.87 g-CO<sub>2</sub>/kg-RM으로 산출되었으며, 이는 RM의 이론적 최대 탄산화 잠재량(TMCP: 10.58 g-CO<sub>2</sub>/kg-RM)의 약 84%에 해당한다. 본 연구에서 적용된 CO<sub>2</sub> MBs 주입 방식이 고압 조건(≥ 5 bar) 없이도 이론적 포집 효율의 상한치(≥ 84%)에 근접할 수 있음을 입증한다.

### 3.5. 레드머드 모르타르의 압축강도 분석 (Compressive strength analysis of red mud - cement mortars with CO<sub>2</sub> MBs mixing water)

RM을 시멘트 대체재로 적용하여 제작한 모르타르의 양생 기간별 압축강도(7, 14, 28일) 측정 결과를 Fig. 7에 제시하였다. 각 배합은 시멘트 대비 RM 치환율을 0% (R0), 5% (R5), 10% (R10), 15% (R15)로 설정하였으며, 배합수로는 CO<sub>2</sub> MBs를 사용하였다.

모든 양생일에서 RM 치환률이 증가할수록 압축강도는 감소하였다. 양생 7일차에는 R0 대비 R5, R10, R15의 강도 감소폭이 각각 10%, 15%, 27% 수준으로 비교적 완만하나, 14일 이후에는 R10, R15의 강도 회복률이 둔화되며, 장기 양생(28일)에서도 초기강도 대비 추가강도 발현이 미미하였다. 특히 14일과 28일에서 R10, R15의 강도 저하폭이 30~40% 수준으로 나타나, 장기 양생에도 강도 회복 효과가 제한적임을 확인하였다. 이러한 결과는 기존 연구 [36, 37]에서도 보고된 바 있으며, RM의 낮은 수화활성 (hydraulic reactivity)과 비활성 미립자 (inert filler) 특성에 기인한다.

RM 치환에 따른 압축강도 감소는 복합적 요인에 의해 야기되는 것으로 판단된다. 즉, RM 치환률이 증가함에 따라 시멘트 유효 함량이 감소하여, Ca(OH)<sub>2</sub> 및 C-S-H 결정 생성량이 줄어드는 희석효과 (dilution effect)가 발생하여 압축강도가 감소되는 것으로 판단된다. 또한, CO<sub>2</sub> MBs는 pH 완충 및 CaCO<sub>3</sub> 미세결정 침전을 유도할 수 있으나, 과도한 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도는 시멘트 수화의 지연 (retardation effect) 및 C-S-H 결정 성장 억제제를 초래할 가능성이 있다. 특히 높은 치환률의 혼합비(R10, R15)의 경우, RM의 알칼리와 CO<sub>2</sub> MBs 내 탄산종이 복합적으로 작용하여 수화환경의 비정상적 완충화 (buffering)를 야기했을 가능성이 있다. 이는 강도 발현 지연

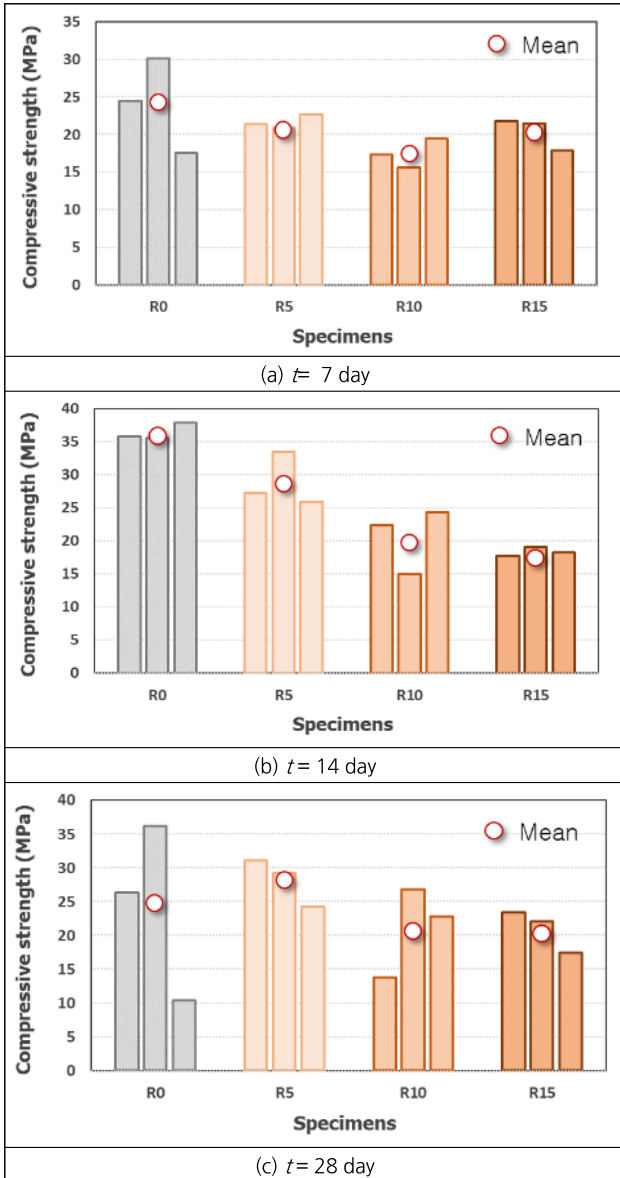


Fig. 7. Temporal variation in compressive strength of red mud mortar with curing age: (a)  $t = 7$  days, (b)  $t = 14$  days, and (c)  $t = 28$  days.

및 미세조직 밀도 저하로 연결된다. 향후 장기 내구성 확보를 위해서는 활성화제(alkali activator)나 혼화재 병용이 필요함을 시사한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 마이크로버블(CO<sub>2</sub> MBs)을 이용하여 상온·상압 조건에서 레드머드(RM)의 광물탄산화(mineral carbonation) 및 중화(neutralization) 반응 특성을 규명하고, 탄산화된 RM의 시멘트 대체재 활용 가능성을 평가하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

CO<sub>2</sub> MBs는 높은 기체-액체 접촉면적과 과포화 용존 CO<sub>2</sub>

농도(4.41 g/L)를 확보해 외부 압력 없이도 신속한 탄산화 반응을 유도하였다. 회분식 실험 결과, pH는 초기 급격한 하강 후 회복되었으며, 전기전도도(EC)는 초기 급상승 후 점진적 감소를 나타냈다. 이러한 거동은 RM로부터 용출된 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>가 용존 탄산종(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)과 반응하여 (중)탄산염 화합물을 형성했음을 보여준다. 또한 H<sub>2</sub>CO<sub>3(aq)</sub> 농도는 시간 경과에 따라 감소하였으며, 이는 탄산화 반응에 의한 소비와 pH 상승에 따른 탄산종 전환이 동시에 작용한 결과로 해석된다. 연속식 실험에서는 RM-P(분말형)과 RM-S(슬러지형) 모두 주입 4분 이내에 중성화(pH = 7)가 완료되었으며, EC는 초기 급감 후 재상승하는 감소-회복 패턴을 나타냈다. RM-S는 RM-P 대비 중화 속도는 다소 느리지만, 지속적 이온 용출로 인해 최종 중화 정도 및 CO<sub>2</sub> 포집 효율이 높게 나타났다. 이는 RM-S가 실제 공정 적용 시 지속적 반응성과 완충능 측면에서 우수함을 시사한다.

양이온 분석 결과, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 농도는 전반적으로 증가하였으며, Al<sup>3+</sup> 농도는 수산화알루미늄(Al(OH)<sub>3</sub>) 침전에 의해 급격히 감소하였다. 이러한 양이온의 시간적 변화는 pH와 탄산종 분포의 전이에 밀접히 연관되어 있으며, 초기 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>와 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 우세 구간에서 Ca<sup>2+</sup>와의 결합을 통해 용존형 Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2(aq)</sub>가 형성되고, 이후 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 전환에 따라 불용성 CaCO<sub>3(s)</sub>가 생성되는 단계적 탄산화 메커니즘을 확인하였다. 총 무기탄소(TIC) 농도는 반응 초기에 급격히 증가하여 약 5분 후 평형 상태에 도달하였다. TIC 기반 이산화탄소 포집량은 8.87 g-CO<sub>2</sub>/kg-RM으로 산출되었으며, 이는 RM의 이론적 최대 탄산화 잠재량(TMCP, 10.58 g-CO<sub>2</sub>/kg-RM)의 약 84%에 해당한다. 이러한 결과는 고압 장비 없이도 상온·상압 조건에서 높은 CO<sub>2</sub> 포집 효율(≥ 80%)을 달성할 수 있음을 입증하였다.

한편, 탄산화된 RM를 시멘트 대체재로 활용한 모르타르의 압축강도는 RM 치환률 증가에 따라 감소하였다. 이는 결합재 희석 효과와 낮은 수화 활성도에 기인하며, 고치환 혼합비에서는 미세구조 약화로 인해 장기 강도 발현이 제한적이었다. 다만, R5(5% 치환)는 무치환 대비 약 10% 수준의 강도 저하로 비교적 양호한 성능을 보였으며, 보도블록·연석·투수블록 등 비구조용 건축자재로의 활용 가능성이 확인되었다.

종합하면, CO<sub>2</sub> MBs를 이용한 RM 탄산화 공정은 상온·상압 조건에서도 신속한 반응속도(2분 이내)와 높은 포집 효율(84%)을 확보하였으며, 중화와 자원화를 동시에 달성할 수 있는 저에너지·친환경 처리기술로 평가된다. 향후에는 탄산화 생성물의 결정상 동정(XRD, FTIR, SEM-EDS) 및 장기 내구성 평가(인장·휨강도, 흡수율, 동결융해 저항성 등)를 수행하여, RM-CO<sub>2</sub> MBs 공정의 산업적 확장성과 실용적 적용성을 심층적으로 검증할 필요가 있다.

## Acknowledgement

본 연구는 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-RS-2023-00259995)을 받아 수행된 연구입니다.

## References

- UN Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). The human cost of disasters: An overview of the last 20 years (2000 - 2019). 2020. Available from: <https://www.undrr.org/quick/50922>
- Pachauri RK, et al. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Geneva: IPCC; 2014. Available from: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_Front\\_matters.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_Front_matters.pdf)
- Calvin K, et al. Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Geneva: IPCC; 2023. Available from: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2021: Sixth Assessment Report (WGI Front Matter). 2021. Available from: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_FrontMatter.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FrontMatter.pdf)
- Romanosky R. CO<sub>2</sub> mineral sequestration. Proceedings of the Advanced Research Power Program, National Energy Technology Laboratory, Mineral Carbonation Workshop; 2001; Pittsburgh, PA, USA.
- Zhao Y, Itakura K. A state-of-the-art review on technology for carbon utilization and storage. *Energies*. 2023;16:3992. <https://doi.org/10.3390/en16103992>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Direct air capture and mineral carbonation approaches for carbon dioxide removal and reliable sequestration: Proceedings of a workshop—in brief. 2018. <https://doi.org/10.17226/25132>
- Hills CD, Tripathi N, Carey PJ. Mineralization technology for carbon capture, utilization, and storage. *Front. Energy Res*. 2020;8:142. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00142>
- Samal S, Ray AK, Bandopadhyay A. Proposal for resources, utilization and processes of red mud in India—A review. *Int. J. Miner. Process*. 2013;118:43-55. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.11.001>
- Paramguru RK, Rath PC, Misra VN. Trends in red mud utilization—a review. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev*. 2004;26:1-29. <https://doi.org/10.1080/08827500490477603>
- Kang S-P. A study on the usability of red mud as activator of alkali-activated cementless binder. *J. Archit. Inst. Korea Struct. Constr*. 2012;28:133-140.
- Mahinroosta M, Karimi Z, Allahverdi A. Recycling of red mud for value-added applications: A comprehensive review. *Encycl. Renew. Sustain. Mater*. 2020:561-582.
- Wang K, et al. Summary of research progress on separation and extraction of valuable metals from Bayer red mud. *Environ. Sci. Pollut. Res*. 2022;29:89834-89852. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23837-5>
- Khaitan S, Dzombak DA, Lowry GV. Mechanisms of neutralization of bauxite residue by carbon dioxide. *J. Environ. Eng*. 2009;135:433-438. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000010](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000010)
- Revathy TDR, Palanivelu K, Ramachandran A. Sequestration of carbon dioxide by red mud through direct mineral carbonation at room temperature. *Int. J. Global Warming*. 2017;11:23-37. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2017.080988>
- Yadav VS, et al. Sequestration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) using red mud. *J. Hazard. Mater*. 2010;176:1044-1050. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.146>
- Sahu RC, Patel RK, Ray BC. Neutralization of red mud using CO<sub>2</sub> sequestration cycle. *J. Hazard. Mater*. 2010;179:28-34. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.052>
- Bonenfant D, et al. CO<sub>2</sub> sequestration by aqueous red mud carbonation at ambient pressure and temperature. *Ind. Eng. Chem. Res*. 2008;47:7617-7622. <https://doi.org/10.1021/ie7017228>
- Han Y-S, et al. Bauxite residue neutralization with simultaneous mineral carbonation using atmospheric CO<sub>2</sub>. *J. Hazard. Mater*. 2017;326:87-93. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.12.020>
- Johnston M, et al. Alkalinity conversion of bauxite refinery residues by neutralization. *J. Hazard. Mater*. 2010;182:710-715. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.091>
- ISO 21910-1:2020. Fine bubble technology—Characterization of microbubbles—Part 1: Off-line evaluation of size index. <https://www.iso.org/standard/72151.html>.
- Agarwal A, Ng WJ, Liu Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere*. 2011;84:1175-1180. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.054>
- Zhang M, Qiu L, Liu G. Basic characteristics and application of micro-nano bubbles in water treatment. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. 2020;510:042050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/510/4/042050>
- Ebina K, et al. Oxygen and air nanobubble water solution promote the growth of plants, fishes, and mice. *PLoS One*. 2013;8:e65339. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065339>
- Cha H-S. Present state and future prospect for microbubble technology. *Bull. Food Technol*. 2009;22:544-552.
- Bao XT, et al. Overview of research advances and application of micro-nano bubbles technology in fishery and aquaculture sector. *Water Purif. Technol*. 2016;35:16-22.
- Nam M, Park D, Doh J-H. Performance improvement of cement materials by mineral carbonation accelerated by CO<sub>2</sub> microbubble water. *Constr. Build. Mater*. 2024;447:138210. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138210>
- Wang J, Hu H. Microbubble-assisted pressure carbonation for

- preparation of high purity lithium carbonate. *J. Mater. Res. Technol.* 2020;9:9498-9505.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.089>
29. Bang J-H, et al. Precipitation of calcium carbonate by carbon dioxide microbubbles. *Chem. Eng. J.* 2011;174:413-420.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.09.021>
  30. Mucsi G, et al. Control of carbon dioxide sequestration by mechanical activation of red mud. *Waste Biomass Valorization.* 2021;12:6481-6495.  
<https://doi.org/10.1007/s12649-021-01466-2>
  31. Ilahi K, Debbarma S, Mathew G, Inyang HI. Carbon capture and mineralisation using red mud: A systematic review of its principles and applications. *J. Clean. Prod.* 2024;473:143458.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143458>
  32. Vogt S, Brück F, Weigand H. Design and test of a novel three-stage batch reactor for the accelerated carbonation of fresh concrete slurry waste. *Results Eng.* 2025;106418.  
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106418>
  33. Qin J, et al. Insights into active and passive carbon sequestration and causticity reduction in hazardous red mud slurry. *Carbon Res.* 2023;2:40.  
<https://doi.org/10.1007/s44246-023-00071-3>
  34. Xu Y, et al. Preparation of CaCO<sub>3</sub>/Al(OH)<sub>3</sub> composites via heterogeneous nucleation. *Materials.* 2023;16:498.  
<https://doi.org/10.3390/ma16020498>
  35. Xie H, et al. CO<sub>2</sub> mineralization of natural wollastonite into porous silica and CaCO<sub>3</sub> powders promoted via membrane electrolysis. *Environ. Earth Sci.* 2018;77:149.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-018-7330-9>
  36. Wang K, et al. Summary of research progress on separation and extraction of valuable metals from Bayer red mud. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022;29:89834-89852.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-23837-5>
  37. Senff L, Hotza D, Labrincha JA. Effect of red mud addition on the rheological behaviour and on hardened state characteristics of cement mortars. *Constr. Build. Mater.* 2011;25:163-170.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.043>

## Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## Authors and Contribution Statement

### Dong Jun Kim

Center of Water Environment & Carbon Assessment, Korea Conformity Laboratories, ORCID<sup>®</sup> 0009-0006-3122-5706: Conceptualization, Data curation, Data analysis, Methodology, Visualization, Writing - original draft, Writing - review and editing

### Jin Chul Joo

Department of Civil & Engineering, Hanbat National University, Professor, ORCID<sup>®</sup> 0000-0001-8551-3945: Funding acquisition, Project administration, Resources, Writing - review and editing.

### In Hyuk Hwang

Department of Civil & Engineering, Hanbat National University, ORCID<sup>®</sup> 0009-0005-9558-548X: Data analysis, Methodology, Visualization, Validation.

### Yewon Cho

Department of Civil & Engineering, Hanbat National University, ORCID<sup>®</sup> 0009-0003-0279-473X: Data analysis, Methodology, Visualization, Validation.

### Sangrae Kim

Center of Water Environment & Carbon Assessment, Korea Conformity Laboratories, ORCID<sup>®</sup> 0000-0001-5077-6446: Data analysis, Methodology, Visualization, Validation.

### Soon Chuol Kwon

Pusan National University, Professor, ORCID<sup>®</sup> 0000-0003-3764-331X: Methodology, Visualization, Validation.

### Jung Min Lee

Land & Housing Institute, ORCID<sup>®</sup> 0000-0002-4857-1262: Methodology, Visualization, Validation.