

# CO<sub>2</sub> 농도 및 탄산화 기간이 염소바이패스분진(CBPD) 탄산화에 미치는 영향

## The Influence of CO<sub>2</sub> Concentration and Carbonation Period on the Carbonation Degree of Cement Kiln Bypass Dust(CBPD)

유주안<sup>1</sup> · 박영민<sup>2</sup> · 이태우<sup>3</sup> · 길준호<sup>4</sup> · 염우성<sup>5\*</sup>  
 Juan Yu<sup>1</sup> · Young Min Park<sup>2</sup> · Taewoo Lee<sup>3</sup> · Jun-Ho Kil<sup>4</sup> · Woo Sung Yum<sup>5\*</sup>

(Received October 18, 2024 / Revised November 15, 2024 / Accepted November 21, 2024)

This study investigated the effects of CO<sub>2</sub> concentration and carbonation duration on the carbonation degree of cement kiln by-pass dust(CBPD). The results indicated that increasing the CO<sub>2</sub> concentration from 5 % to 10 % significantly enhanced the carbonation degree of CBPD(by 2-8 wt% based on the total sample mass). However, at a CO<sub>2</sub> concentration of 20 %, the carbonation degree of CBPD was comparable to that observed at 10 %. Regarding carbonation duration, the carbonation degree increased up to two days of curing.

**키워드** : 염소바이패스분진, 광물탄산화, CO<sub>2</sub> 포집, 산업부산물 재활용

**Keywords** : Cement kiln bypass dust, Mineral carbonation, CO<sub>2</sub>-uptake, Recycling of by-product

### 1. 서론

시멘트 산업은 대표적인 CO<sub>2</sub> 다배출 산업으로, 시멘트 1톤을 생산할 때 약 0.8톤의 CO<sub>2</sub>가 발생한다. 이는 전 세계 CO<sub>2</sub> 배출량의 7-8 %를 차지하며(Schneider 2019), 지구 온난화를 방지하기 위해서는 시멘트 산업의 탄소중립 실현이 필수적이다. Table 1은 시멘트 산업의 주요 CO<sub>2</sub> 배출원과 그 감축 방안을 보여준다(Ceramic Policy Focus 2021). 표에 따르면, 시멘트 생산 과정에서는 ① 석회석의 탈탄산, ② 전력 사용, ③ 연료 소비가 주요 CO<sub>2</sub> 발생 원인으로 확인되며, 이를 줄이기 위해 원료 대체, 폐열 발전 시스템 구축, 대체 연료 사용 등의 방법이 개발 및 활용되고 있다.

시멘트 분야에서 친환경 대체 연료란, 시멘트 소성에 필요한 열원을 기존의 유연탄 대신 폐합성수지나 페타이어와 같은 가연성

물질로 대체하는 것이다(Chatterjee and Sui 2019). 이는 유연탄 사용을 줄여 친환경적이지만, 연료에 포함된 염소가 소성 과정에서 기화하여 ① 시멘트 킬른 내부에 부착되어 crusting 및 clogging 현상을 일으키거나 ② 시멘트 내 염화물 함량을 증가시켜 품질 관리에 어려움을 초래할 수 있다(Wang et al. 2023).

이를 해결하기 위해 기화된 염소 기체를 분진 형태로 별도로

**Table 1. Major factors contributing to CO<sub>2</sub> emissions in the cement industry and strategies for reduction**

Factor	CO <sub>2</sub> emission contribution	Reduction strategy
Calcination of limestone	~60 %	Use of alternative raw materials
Electricity consumption	~10 %	Use of energy-efficient technologies
Fuel consumption	~30 %	Switching to alternative fuels

\* Corresponding author E-mail: wsyum@kicet.re.kr

<sup>1</sup>한국세라믹기술원 탄소중립소재센터 연수연구원 (Carbon Neutral Materials Center, Carbon Neutrality & Materials Digitalization Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology (KICET), 100, Soho-Ro, Jinju, 52851, Korea)

<sup>2</sup>한국세라믹기술원 탄소중립소재센터 학생연구원 (Carbon Neutral Materials Center, Carbon Neutrality & Materials Digitalization Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology (KICET), 100, Soho-Ro, Jinju, 52851, Korea)

<sup>3</sup>쌍용C&E(주) 기술연구소 책임연구원 (Ssangyong Technology Research Center, 396, Simokbugang-Ro, Sejong, 30078, Korea)

<sup>4</sup>쌍용C&E(주) 기술연구소 수석연구원 (Ssangyong Technology Research Center, 396, Simokbugang-Ro, Sejong, 30078, Korea)

<sup>5</sup>한국세라믹기술원 탄소중립소재센터 선임연구원 (Carbon Neutral Materials Center, Carbon Neutrality & Materials Digitalization Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology (KICET), 100, Soho-Ro, Jinju, 52851, Korea)

Copyright © 2024 by Korean Recycled Construction Resources Institute

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

포집하는 염소 바이패스 시스템이 국내 시멘트 공정 내에 도입 및 운영되고 있다. 이렇게 포집된 염소 바이패스 분진(CBPD)은 수세 및 필터 과정을 거쳐 고순도의 염화칼륨(KCl)과 잔류 CBPD로 남는다(Wang et al, 2023). 수세 과정을 통해 분류된 염화칼륨은 주로 농업 분야 비료로 재활용되고 있지만, 추출 후 남은 CBPD는 원료로 재투입 이외의 활용방안이 부족한 실정이다.

반면 최근, 폐기물로 구분되는 CBPD를 광물 탄산화하여 시멘트 혼화재 등 건설재료로 활용할 수 있는 방안이 제시되고 있다. CBPD의 광물 탄산화 과정에서 Ca(OH)<sub>2</sub>는 안정적인 물질인 CaCO<sub>3</sub>로 변환되며, 이 과정에서 CBPD 내부에 존재하는 유해 이온들이 고정화될 수 있어 도로공사의 아스팔트 채움재 또는 시멘트 혼화재의 활용성이 높아질 수 있다 (Adekunle 2024). 그러나 현재 CBPD의 광물 탄산화 최적화에 관한 연구는 부족한 실정이며, 따라서 광물 탄산화 조건에 따른 최적화 방안을 도출하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

따라서 본 연구는 CBPD의 광물 탄산화에 미치는 인자를 확인하기 위해 CO<sub>2</sub> 농도 및 탄산화 시간을 변수로 설정한 뒤 그에 따른 CBPD의 광물 탄산화 정도를 확인하였다. 또한, 실험 변수에 따른 광물 탄산화 정도 X-Ray Diffraction(XRD), pH 측정, 그리고 열중량 분석(TG/DTG) 실험을 통해 확인하였다.

## 2. 실험과정

### 2.1 원재료 분석

본 연구에서는 CaO 함량이 높은 수세 2회(CBPD2) 및 3회(CBPD3) 처리된 염소 바이패스 분진(Cement Kiln Bypass Dust, CBPD)을 사용하였으며, CBPD는 A사로부터 제공받았다. 수세 1회 처리된 CBPD는 수세 2회 및 3회 처리된 CBPD에 비해 탄산화에 필요한 Ca(OH)<sub>2</sub>의 양이 적어 본 연구에서 제외되었다. Table 2는 CBPD2 및 CBPD3에 대한 XRF 분석 결과이며, CBPD2와 CBPD3 모두 약 60 %의 CaO 함유량을 보였으며, 그 외 SiO<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O가 높은 비율로 포함되어 있는 것으로 나타났다.

Fig. 1은 CBPD2 및 CBPD3의 XRD 분석 결과를 나타낸다. 분석된 CBPD에는 Portlandite, Hydrocalumite, Syngenite, Silicon oxide, Sylvine, Calcite가 포함된 것을 확인하였다. XRD 분석 결

Table 2. Oxide chemical composition of raw cement kiln bypass dust (CBPD) in weight percentage

	CaO	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Others	Sum
CBPD2	60.21	11.01	8.28	5.56	14.94	100
CBPD3	60.09	11.61	7.50	4.37	16.43	100

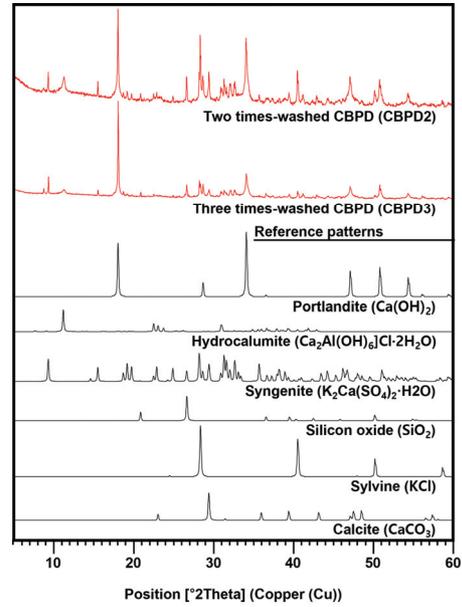


Fig. 1. XRD results of washed CBPDs

과에 따르면 CBPD 내부에는 이미 Calcite가 포함되어 있는 것으로 확인되었으며, 이는 다음 두 가지 요인으로 추측된다: ① 포집 후 CBPD가 외부 환경에서의 CO<sub>2</sub>와 반응 또는 ② 바이패스 포집 공정에서 소량의 석회석 원료가 혼합되어 생성된 것으로 판단된다 (Regnault et al, 2009; Van Balen 2005).

Fig. 2는 원재료인 CBPD2 및 CBPD3의 TG/DTG 분석 결과를 보여준다(승온 속도: 10 °C/분, 측정 범위: 50–1,000 °C). 실험 결과, XRD 결과와 유사하게 각각의 CBPD에서 Portlandite, Hydrocalumite, Calcite, 및 Sylvine에 의한 중량감소가 확인되었다. 또한, TG 분석을 통해 CBPD의 광물 탄산화 후, 탄산화율을 정확히 계산하기 위해 원재료에 이미 존재하는 calcite의 양을 산출하였다. 본 실험에서는 Sylvine의 DTG 피크 온도 범위(800–1,000 °C)를 고려하여 Calcite의 중량 감소 범위를 600–750 °C로 설정하고 실험을 진행하였으며, 사용된 calcite의 계산식은 식 (1)과 같다.

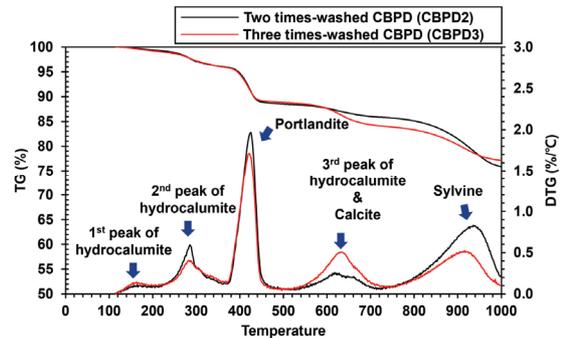


Fig. 2. TG results of washed CBPDs

$$CaCO_3 (\%) = W \times \frac{M_{CaCO_3}}{M_{CO_2}} \quad (1)$$

여기서 W는 TG 데이터에서 600-750 °C 범위의 무게 감소율을 나타내며, M<sub>CaCO<sub>3</sub></sub> 및 M<sub>CO<sub>2</sub></sub>는 각각 CaCO<sub>3</sub> 및 CO<sub>2</sub>의 물질량을 의미한다.

실험 결과, 본 연구에서 사용한 2회 및 3회 수세된 CBPD (CBPD2 및 CBPD3)의 Calcite 양은 각각 4.43 % 및 8.37 %로 나타났으며, 탄산화 이후 이 값을 차감하여 실제 탄산화 정도를 계산하였다.

## 2.2 실험방법

본 연구에서는 광물 탄산화를 위해 습식 탄산화 방법을 사용하였으며, CBPD와 물의 비율을 1:10으로 고정하여 실험을 진행하였다. 탄산화 실험을 위해 250 mL 비커에 20 g의 CBPD와 200 g의 물을 혼합한 후, 교반기를 사용하여 500 rpm으로 지속적으로 교반하면서 탄산화를 진행하였다. CO<sub>2</sub> 챔버의 온도는 23 °C로 유지되었으며, 탄산화 농도는 5 %, 10 %, 20 %로 설정하여 각각 1일, 2일, 3일 동안 광물 탄산화 실험을 수행하였다. 각 양생 기간 동안 시료는 필터링 처리하여 침전물과 용액으로 분류하였으며, 필터링된 용액에 대해 pH 분석을 수행하였다. 침전물은 100 °C에서 하루 동안 건조한 후 원재료 분석과 동일한 조건으로 TG 분석을 진행하여 탄산화율을 계산하였다. 각 시료의 탄산화율은 수식 (1)을 사용하여 계산하였으며, 최종 탄산화율의 식은 (2)와 같다.

$$\text{탄산화율} (\%) = C_1 - C_0 \quad (2)$$

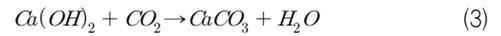
여기서, C<sub>1</sub>은 각 양생일 별 CBPD의 CaCO<sub>3</sub> 함량을 나타내며, C<sub>0</sub>는 원재료 CBPD의 CaCO<sub>3</sub> 함량이다. 본 연구에서 제시하는 탄산화율은 모두 전체 시료 질량을 기준으로 한 비율을 나타낸다.

## 3. 실험결과

### 3.1 pH 분석

Table 3은 필터링하여 추출한 용액의 pH 분석 결과를 나타낸다. 실험 결과, 탄산화 과정을 거치지 않은 시료는 pH 약 12의 알칼리성을 나타내는 것으로 확인되었으며, 이는 CBPD 내부에 존재하는 Ca(OH)<sub>2</sub>가 물에 용해되어 OH<sup>-</sup> 이온을 생성하기 때문이다. Ca(OH)<sub>2</sub>의 탄산화는 다음과 같은 식 (3)의 화학 반응을 통해 이루어진다(Regnault et al. 2009).

여기서 OH<sup>-</sup>는 CO<sub>2</sub>의 산소 원자와 반응하여 H<sub>2</sub>O로 전환되므로, 탄산화 과정을 거치면서 용액은 중성으로 변화하게 된다.



실험 결과, 모든 용액에서 탄산화 시간이 길어짐에 따라 pH가 낮아지는 경향을 확인할 수 있었다. 그러나 탄산화 2일 차 이후에는 모든 샘플의 pH가 중성으로 변화하여 더 이상 감소하지 않는 것을 확인하였다. 이는 모든 샘플의 탄산화가 완료되어 잔여 OH<sup>-</sup>가 소진되었기 때문으로 판단된다.

또한, 샘플에 주입되는 CO<sub>2</sub> 농도는 CBPD의 탄산화 속도를 가속화하는 것으로 나타났으며, 탄산화 1일 차 기준으로 CO<sub>2</sub> 농도가 증가할수록 샘플 용액의 pH가 더욱 낮아지는 경향을 확인할 수 있었다. 특히 CO<sub>2</sub> 농도가 20 %일 경우, 1일 차에 용액이 중성화되는 현상을 확인하였다.

또한, 샘플에 주입되는 CO<sub>2</sub> 농도는 CBPD의 탄산화 속도를 가속화하는 것으로 나타났으며, 탄산화 1일 차 기준으로 CO<sub>2</sub> 농도가 증가할수록 샘플 용액의 pH가 더욱 낮아지는 경향을 확인할 수 있었다. 특히 CO<sub>2</sub> 농도가 20 %일 경우, 1일 차에 용액이 중성화되는 현상을 확인하였다.

Table 3. pH analysis of filtered solutions derived from carbonated CBPD mixtures

CBPD type	CO <sub>2</sub> concentration (%)	CO <sub>2</sub> curing period (days)			
		0	1	2	3
CBPD2	5	12.1	10.6	7.8	7.8
	10		10.6	7.8	7.6
	20		7.6	7.4	7.4
CBPD3	5	12.3	11.7	7.8	7.8
	10		8.7	7.7	7.3
	20		7.8	7.6	7.3

### 3.2 TG/DTG 분석

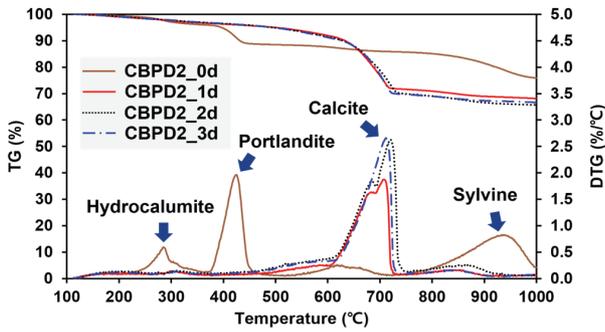
#### 3.2.1 CO<sub>2</sub> 농도 5 %

Fig. 3은 5 % CO<sub>2</sub> 농도에서 탄산화를 진행한 수세 2회 및 3회 CBPD(CBPD2 및 CBPD3)의 TG/DTG 분석 결과를 나타낸다.

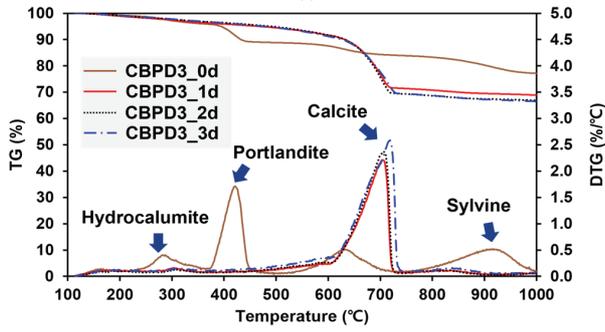
분석 결과, pH 변화와 유사하게 탄산화 2일 차까지 Calcite를 나타내는 DTG 피크(600-750 °C)가 높아지는 것을 확인할 수 있었으나 2일 차와 3일 차 사이의 DTG 피크 변화는 거의 없었다.

식 (1)과 (2)를 이용해 각각의 TG 분석 결과에서 Calcite 함량과 탄산화율을 계산하였으며, 이를 Table 4에 정리하였다. 분석 결과에 따르면 CBPD2와 CBPD3의 최대 Calcite 함량은 각각 48.96 % 및 50.85 %로, 탄산화 2일 차에 가장 높은 값을 보였다.

CBPD2와 CBPD3의 탄산화율을 비교했을 때, CBPD3의 Calcite 함량이 CBPD2보다 약 2 % 더 높았으나, 원재료 CBPD3의



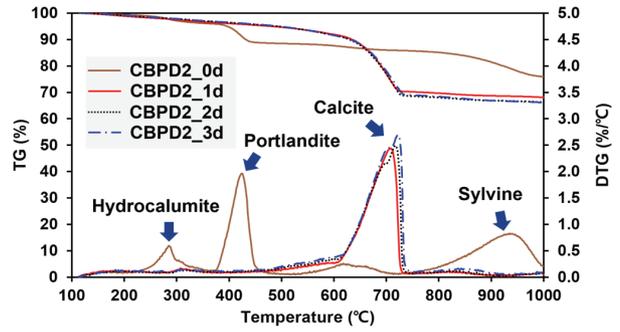
(a)



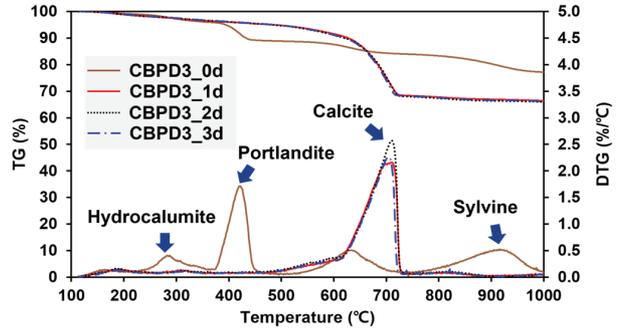
(b)

Fig. 3. TG results of CBPDs under 5 % CO<sub>2</sub> concentration: (a) CBPD2, and (b) CBPD3

Note that 0d indicates no carbonation, whereas 1d, 2d, and 3d represent carbonation curing durations of 1 day, 2 days, and 3 days, respectively.



(a)



(b)

Fig. 4. TG results of CBPDs under 10 % CO<sub>2</sub> concentration: (a) CBPD2, and (b) CBPD3

Note that 0d indicates no carbonation, whereas 1d, 2d, and 3d represent carbonation curing durations of 1 day, 2 days, and 3 days, respectively.

Table 4. The content of CaCO<sub>3</sub> and its carbonation degree of carbonated CBPDs (5 % CO<sub>2</sub> concentration) (wt% based on the total sample mass)

CBPD type	CBPD type	CO <sub>2</sub> curing period (days)		
		1	2	3
CBPD2	CaCO <sub>3</sub>	46.21	48.96	48.99
	Carbonation degree	41.78	44.53	44.55
CBPD3	CaCO <sub>3</sub>	46.12	50.85	49.78
	Carbonation degree	37.75	42.48	41.41

Table 5. The content of CaCO<sub>3</sub> and its carbonation degree of carbonated CBPDs (10 % CO<sub>2</sub> concentration) (wt% based on the total sample mass)

CBPD type	CBPD type	CO <sub>2</sub> curing period (days)		
		1	2	3
CBPD2	CaCO <sub>3</sub>	49.35	52.31	51.35
	Carbonation degree	44.92	47.87	46.92
CBPD3	CaCO <sub>3</sub>	52.94	52.76	52.33
	Carbonation degree	44.57	44.39	43.96

초기 Calcite 함량이 CBPD2보다 약 4 % 더 높았기 때문에 실제 탄산화율은 CBPD2가 CBPD3보다 약 2~4 % 더 높게 나타났다.

### 3.2.2 CO<sub>2</sub> 농도 10 %

Fig. 4는 10 % CO<sub>2</sub> 농도에서 탄산화를 진행한 CBPD2 및 CBPD3의 TG/DTG 분석 결과를 나타낸다.

분석 결과, 5 % CO<sub>2</sub> 농도에서의 탄산화 실험과 비교했을 때, 각 양생일 별 Calcite를 나타내는 DTG peak 차이가 감소한 것으로 확인되었다. 이는 CO<sub>2</sub> 농도가 증가함에 따라 Calcite 생성이 가속

화되어, 2일 차 이전에 대부분의 Calcite가 생성되었고, 그 결과 탄산화에 필요한 Ca(OH)<sub>2</sub>가 거의 소진되었기 때문에 판단된다 (Xu et al., 2022).

5 % CO<sub>2</sub> 농도 실험과 동일하게 식 (1)과 (2)를 사용하여 각 TG 분석 결과에서 Calcite 함량과 탄산화율을 측정하였으며, 그 결과는 Table 5에 정리하였다.

실험 결과, Calcite가 가장 많이 생성된 시점은 2일 차였으며, 10 % CO<sub>2</sub> 환경에서의 모든 탄산화 샘플들은 5 % CO<sub>2</sub> 환경보다 Calcite 함량과 탄산화율이 2~7 % 더 높게 나타났다.

### 3.2.3 CO<sub>2</sub> 농도 20 %

Fig. 5는 20 % CO<sub>2</sub> 농도에서 탄산화를 진행한 수세 2회 및 3회 CBPD(CBPD2 및 CBPD3)의 TG/DTG 분석 결과를 나타낸다.

실험 결과, CBPD2의 경우 각 탄산화 양생일 별 DTG 피크가 거의 유사하게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 반면 CBPD3의 경우, 3일차의 DTG 피크가 상대적으로 높게 나타났다.

5 % 및 10 % CO<sub>2</sub> 농도 실험 결과와 동일하게 식 (1)과 (2)를 이용하여 각 TG 결과에서 Calcite 양과 탄산화율을 측정하여 Table 6에 정리하였다.

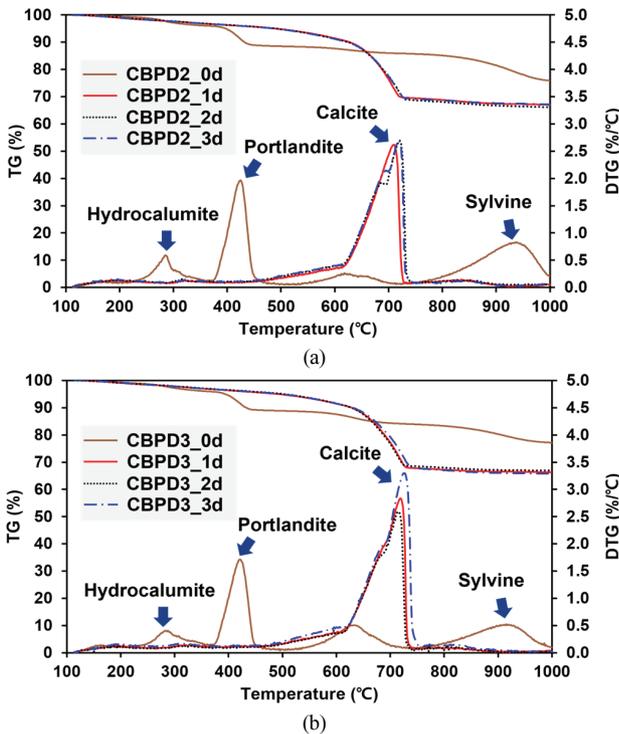


Fig. 5. TG results of CBPDs under 20 % CO<sub>2</sub> concentration: (a) CBPD2, and (b) CBPD3  
Note that 0d indicates no carbonation, whereas 1d, 2d, and 3d represent carbonation curing durations of 1 day, 2 days, and 3 days, respectively.

Table 6. The content of CaCO<sub>3</sub> and its carbonation degree of carbonated CBPDs (20 % CO<sub>2</sub> concentration) (wt% based on the total sample mass)

CBPD type	CBPD type	CO <sub>2</sub> curing period (days)		
		1	2	3
CBPD2	CaCO <sub>3</sub>	49.94	51.31	49.85
	Carbonation degree	45.51	46.87	45.52
CBPD3	CaCO <sub>3</sub>	53.92	52.44	54.15
	Carbonation degree	45.55	44.07	45.78

분석 결과, CBPD2는 10 % CO<sub>2</sub> 농도에서 탄산화된 샘플과 비교했을 때 Calcite 양이 거의 유사하거나 미미하게 감소한 것으로 나타났다. CBPD3의 경우 3일 차에 Calcite 함유량이 54.15 %, 모든 샘플 중 가장 높은 수치를 보였지만, 10 % CO<sub>2</sub> 농도 대비 증가폭은 1-2 %에 불과하여 CO<sub>2</sub> 농도 증가에 따른 Calcite 생성량의 변화는 크지 않은 것으로 판단된다.

### 3.2.4 CO<sub>2</sub> 농도 별 탄산화 비교

Table 7은 모든 샘플의 탄산화율을 정리한 표이다. 실험 결과, 20 % CO<sub>2</sub> 농도에서 탄산화를 진행한 CBPD3 샘플을 제외한 모든 샘플은 탄산화 2일 차에서 가장 높은 탄산화율을 보였다.

5 % CO<sub>2</sub> 농도에서 진행한 샘플과 비교했을 때, CO<sub>2</sub> 농도를 10 %로 증가시켰을 때 탄산화율이 약 2-7 %까지 증가한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 CO<sub>2</sub> 농도를 20 %까지 증가시켰을 때, CBPD3의 경우 탄산화율이 1-2 % 정도 증가했으나, CBPD2의 경우 탄산화율 증가가 거의 미미한 수준이었다.

Table 7. The carbonation degree of carbonated CBPDs (5 %, 10 %, and 20 % CO<sub>2</sub> concentration) (wt% based on the total sample mass)

CBPD type	CO <sub>2</sub> concentration	CO <sub>2</sub> curing period (days)		
		1	2	3
CBPD2	5 %	41.78	44.53	44.55
	10 %	44.92	47.87	46.92
	20 %	45.51	46.87	45.42
CBPD3	5 %	37.75	42.48	41.41
	10 %	44.57	44.39	43.96
	20 %	45.55	44.07	45.78

## 4. 결론

본 연구는 산업부산물인 염소 바이패스 분진(CBPD)을 시멘트 혼화재 등 건설재료로 활용하기 위해 광물 탄산화에 미치는 인자를 확인하는 연구를 수행하였다. 실험에는 수세 2회 및 3회의 CBPD를 사용하였으며, CO<sub>2</sub> 농도 및 탄산화 시간을 변수로 설정하였다. 실험 결과, 일정 범위 내에서 CO<sub>2</sub> 농도(10 % 이하) 및 탄산화 시간(2일차 이내)의 증가는 CBPD 내부의 Ca(OH)<sub>2</sub> 탄산화 반응을 촉진시키는 것으로 나타났으나, 그 이상의 CO<sub>2</sub> 농도 및 탄산화 시간에서는 탄산화를 증진 효과가 미미한 것으로 확인되었다. 구체적인 실험 결과는 다음과 같다.

1. pH 분석 결과, 모든 샘플에서 광물 탄산화가 진행됨에 따라 pH가 알칼리성에서 중성으로 변화하였으며, 이는  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 Calcite로 변화했기 때문이라고 판단되었다. 또한,  $\text{CO}_2$  농도가 높을수록 중성화 속도가 빨라지는 것이 확인되었다.
2. TG/DTG 분석 결과, 모든 샘플에서 600–750 °C 부근에서 Calcite와 관련된 중량 감소가 관찰되었고, Calcite 함량의 범위는 46~54 %로 확인되었다.
3.  $\text{CO}_2$  농도 별 CBPD 탄산화율 분석한 결과,  $\text{CO}_2$  농도를 5 %에서 10 %로 증가시켰을 때 탄산화율이 2–8 % 증가했으나, 10 %에서 20 %로 증가시켰을 때는 탄산화율의 증가가 미미하거나 오히려 감소하는 경향을 보였다.
4. 탄산화 기간별 CBPD 탄산화율을 분석한 결과, 탄산화 2일 차까지는 CBPD의 탄산화율이 지속적으로 증가했으나, 3일 차 이후로는 탄산화에 필요한  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 모두 소진되어 탄산화율의 추가적인 증가가 발생하지 않았다.

### Conflict of interest

None.

### 감사의 글

본 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(20018128).

### References

Adekunle, S. K. (2024). Carbon sequestration potential of cement kiln dust: mechanisms, methodologies, and applications, *Journal of Cleaner Production*, **446**, 141283.

Ceramic Policy Focus (2021). GHG Reduction Technologies for the Cement Industry, *Ceramic Policy Focus*, **03**, 13–24 [in Korean].

Chatterjee, A., Sui, T. (2019). Alternative fuels-effects on clinker process and properties, *Cement and Concrete Research*, **123**, 105777.

Regnault, O., Lagneau, V., Schneider, H. (2009). Experimental measurement of portlandite carbonation kinetics with supercritical  $\text{CO}_2$ , *Chemical Geology*, **265(1–2)**, 113–121.

Schneider, M. (2019). The cement industry on the way to a low-carbon future, *Cement and Concrete Research*, **124**, 105792.

Van Balen, K. (2005). Carbonation reaction of lime, kinetics at ambient temperature, *Cement and Concrete Research*, **35(4)**, 647–657.

Wang, J., Zeng, P., Liu, Z., Li, Y. (2023). Manufacture of potassium chloride from cement kiln bypass dust: an industrial implementation case for transforming waste into valuable resources, *Heliyon*, **9(11)**, e21806.

Xu, Z., Zhang, Z., Huang, J., Yu, K., Zhong, G., Chen, F., Chen, X., Yang, W., Wang, Y. (2022). Effects of temperature, humidity and  $\text{CO}_2$  concentration on carbonation of cement-based materials: a review, *Construction and Building Materials*, **346**, 128399.

#### **CO<sub>2</sub> 농도 및 탄산화 기간이 염소바이패스분진(CBPD) 탄산화에 미치는 영향**

본 연구는 염소 바이패스 분진(CBPD)의 광물 탄산화에  $\text{CO}_2$  농도와 탄산화 기간이 미치는 영향을 연구하였다. 실험 결과,  $\text{CO}_2$  농도를 5 %에서 10 %로 증가시키면 CBPD의 탄산화 정도가 2–8 % 향상되는 것을 확인하였다. 그러나  $\text{CO}_2$  농도가 20 %일 때, 탄산화 정도는 10 %에서 관찰된 정도와 유사하게 나타났다. 탄산화 기간 측면에서는, 탄산화 2일차까지 CBPD의 탄산화율이 지속적으로 증가하여 2일 차에 가장 높은 탄산화율을 기록하였으나, 3일 차 이후에는 탄산화에 필요한  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 모두 소진되어 추가적인 탄산화율의 증가는 발생하지 않았다.