

탄산화 반응 촉진제를 이용한 시멘트 페이스트의 탄산화 깊이에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Carbonation Depth of Cement Paste Using Carbonation Reaction Accelerator

정석만^{1*} · 양완희² · 박동철³Seok-Man Jeong^{1*} · Wan-Hee Yang² · Dong-Cheol Park³

(Received October 13, 2023 / Revised October 25, 2023 / Accepted October 26, 2023)

This study was conducted as part of maximizing the use of carbon dioxide by applying CCU(Carbon Capture, Utilization) among technologies for reducing CO₂ in the cement industry. In a carbon dioxide curing environment, changes in carbonation depth and changes in basic physical properties by age due to the mixing of carbonation reaction accelerators were usually targeted at Portland cement paste. In addition, in order to check the fixed amount of CO₂ in the concrete field, a thermal analysis method was applied to evaluate CaCO₃ decarbonization at high temperatures. As a result of the evaluation, it was confirmed that the carbonation depth in the cured body significantly increased due to the incorporation of CRA in the carbonation depth diffusion performance. In addition, it was confirmed that the weight reduction rate increased by 23.8 % and 40.77 %, respectively, compared to Plain, in the order of curing conditions for constant temperature and humidity and curing conditions for carbonation chambers, so it was confirmed that the amount of excellent CaCO₃ produced by the addition of CRA increased as the concentration of CO₂ increased.

키워드 : 탄산화, 탄산화 반응 촉진제, 탄소포집, 탄소활용

Keywords : Carbonation, Carbonation reaction accelerator, Carbon capture, Carbon utilization

1. 서론

최근 전 세계적으로 지구 온난화에 의한 기후변화 방지 대책을 검토 및 시행하기 위하여 약 200여개 국가들은 파리기후변화협약을 체결하여 이를 달성하기 위한 이행방안을 지속적으로 논의하는 등 온실가스 감축을 위해 노력하고 있다(Villani et al. 2014). 기후 변화에 관한 정부 간 패널(Intergovernment Panel on Climate Change, IPCC)은 목표 달성을 위한 과학적이고 구체적인 세부 목표를 제시하였는데, 이는 전 지구적으로 2030년까지 이산화탄소 배출량을 2010년 대비 최소 45% 이상 감축하고, 2050년경에는 탄소 중립을 달성하여야 한다는 것이다(IPCC 2018). 우리나라 역시 국가 온실가스 배출량을 2030년까지 2018년 대비 40 %를 감축하겠다는 국가 온실가스 감축 목표(Nationally Determined

Contribution, NDC)를 제26차 UN 기후변화협약 당사국총회(COP26)에 제출하며 2050년도까지 탄소중립을 달성하겠다는 국가적 목표를 선언하였다(Ministry of Environment 2021). 이산화탄소를 감축하는 방법에는 그 배출량을 제한하거나 흡수, 제거하는 방법이 있다. 이산화탄소를 흡수 및 제거하여 감축하는 방법에는 흡수원을 활용하는 방법과 이산화탄소 포집·이용·저장 기술을(Carbon Capture, Utilization & Storage, CCUS) 활용하는 방법이 있다(Carbon Neutrality and Green Growth Commission 2021). 흡수원은 산림, 해양 등 자연을 통하여 이산화탄소를 직접 흡수하는 것을 말하는데, 배출되는 막대한 양의 이산화탄소를 흡수원에만 의존하는 것은 현실적으로 무리가 있다. 한편 이산화탄소를 인공적으로 포집하고 저장하거나 이용하는 기술의 경우 산업 공정에서 발생된 이산화탄소가 대기배출되기 전에 먼저 포집하고

* Corresponding author E-mail: jsm0829@withmtech.com

¹주식회사 위드엠텍 기술연구소 책임연구원 (R&D CENTER, WITH M-TECH Co.,Ltd., Suwon-si, Gyeonggi-do, 16367, Korea)

²주식회사 위드엠텍 기술연구소 연구소장 (R&D CENTER, WITH M-TECH Co.,Ltd., Suwon-si, Gyeonggi-do, 16367, Korea)

³주식회사 위드엠텍 대표이사 (WITH M-TECH Co.,Ltd., Suwon-si, Gyeonggi-do, 16367, Korea)

이를 옮겨 반영구적 저장하는 것을 뜻하며, 화학적, 생물학적 변환 과정을 거쳐 유용한 자원으로 전환하는 기술로 이산화탄소 포집·이용·저장 기술(CCUS)라 한다. 이는 CCS 기술(Carbon Capture, Storage)과 CCU기술(Carbon Capture, Utilization)로 구분된다. 여기에서 CCU 기술이란 포집된 이산화탄소를 이용하는 기술이며, 포집된 이산화탄소를 이용하는 방법으로 이산화탄소의 화학전환, 생물전환, 광물 탄산화 등이 있다(Yoon 2021).

근래에 들어서 해외에서는 앞서 언급한 기술을 적극 활용하여 시멘트의 배합 및 양생 단계에서 이산화탄소의 추가적인 흡수가 가능한 첨가제의 연구가 활발하게 이루어지고 있으며(Mataalkah et al. 2021; Bertos et al. 2004), 나아가 상용화 단계에 이르러 시험체 양생 단계에서 분사를 통한 이산화탄소의 반응성 향상이 가능한 시제품이 출시되고 있다(Ergenç et al. 2018).

따라서 본 연구는 시멘트 산업의 CO₂ 저감을 위한 가장 핵심적인 기술 중 상기에서 언급한 CCU를 적용하여 이산화탄소의 활용을 극대화시키기 위한 일환으로 이산화탄소 양생 환경에서의 보통 포트랜드 시멘트 페이스트를 대상으로 하여 탄산화 반응 촉진제의 혼입 유·무에 따른 재령 별 탄산화 깊이 변화와 이에 따른 기초 물리 특성변화를 검토하고자 하였으며, 콘크리트 분야에서 CO₂ 고정량을 평가하기 위하여 가장 범용적으로 사용하는 방법인 고온에서의 CaCO₃ 탈탄산을 평가하는 열분석 방법을 적용하여 중량 감소율에 따른 결과를 검토하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합표는 Table 2와 같다. 이산화탄소 환경에서의 탄산화 반응 촉진제의 혼입 유·무에 따른 영향을 검토하기 위해 시멘트 페이스트로 실험을 진행하였다. 이는 이산화탄소의 활용을 극대화시키기 위한 일환에 따른 배합 측면의 대책으로 보통포트랜드시멘트(Ordinary Portland Cement 이하: OPC) 결합재에 소량의 탄산화 반응 촉진제(Carbonation reaction accelerator 이하: CRA)를 첨가하여 배합을 구성하였으며, 시멘트 페이스트의 양생 단계의 상압 조건에서 이산화탄소 농도에 따른 특성변화를 검토하고자 시멘트의 표준양생 조건인 항온항습기 챔버 양생 조건과, 탄산화 챔버 양생 조건으로 구분하여 각각의 실험을 진행하였다.

Table 1. Experimental plan

Factor			Levels	
Experiment of paste	Mixture	Binder	1	Ordinary Portland cement
		Accelerator	2	None. 2.5 %
	Curing	Curing environment	2	Temperature & humidity chamber
				Carbonation test chamber
	Test item	Hardened state	3	Compressive strength (3, 7, 28d)
				Carbonation depth measurement (14, 28d)
				Thermogravimetric analyzers (28d)

*) CRA: Carbonation Reaction Accelerator

Table 2. Binder mix proportion for paste

		W/B (%)	Binder (%)		CRA (B/%)
			OPC	Sum	
Temperature & humidity chamber	Plain	28	100	100	-
	CRA	28	100	100	2.5
Carbonation test chamber	Plain	28	100	100	-
	CRA	28	100	100	2.5

2.2 실험재료

시멘트는 밀도 3.15 g/cm³, 분말도 3,645 cm²/g의 1종 보통포트랜드시멘트를 사용했다. 본 연구에서 사용된 탄산화 반응 촉진제는, Fig. 1과 같이 연한 갈색의 분말형이며, 물리적 특성은 Table 3과 같다. 탄산화 반응 촉진제(CRA)는 이산화탄소와 시멘트의 반응을 이끌어내기 위한 Sodium Acetate(CH₃COONa)와 강도 저하를 보완하기 위한 알칼리 황산염(alkali sulfate: R₂SO₄) 등을 기반으로 한 제품(국내 W사)을 사용하였다.

Table 3. Physical properties of carbonation reaction accelerator

	Shape	Color	Density (g/cm ³)	Particle size (mm)	Water content (%)
CRA	Powder	Light brown	2.35 ± 0.1	< 0.15	< 0.2

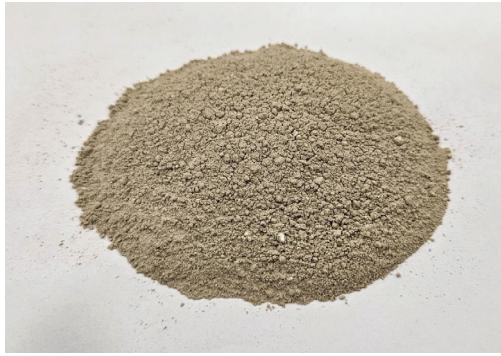


Fig. 1. Appearance of carbonation reaction accelerator

2.3 실험방법

2.3.1 시멘트 페이스트 시험체 제작 및 양생

시멘트 페이스트의 시험체 제작을 위해 KS L 9597에 따른 시멘트 페이스트의 혼합 방법에 따라 표준주도 물시멘트비를 확인하였으며, 확인된 물시멘트비를 기반으로 KS L 5105에서 명시하는 50 × 50 × 50 mm 입방형 몰드를 사용하여 시험체를 각 양생 환경과 재령에 대하여 3개씩 제작하였다.

이후 시멘트 페이스트의 양생 단계에서 상압 조건에서의 이산화탄소 농도에 따른 특성변화를 검토하고자 시멘트의 표준양생 조건인 항온항습기 챔버 양생 조건과 탄산화 챔버 양생 조건으로 구분하여 Fig. 2와 같은 챔버에서 시험체의 바닥면을 제외한 나머지 다섯 면이 탄산화 영향을 원활히 받을 수 있도록 각각 양생을 진행하였다. 이때 탄산화 챔버의 환경조건은 온도 20.0 ± 1.0 °C, 습도 60.0 ± 5.0 %, CO₂ 농도 20.0 %의 환경에서 양생을 진행하였으며, 항온항습기 챔버의 환경조건은 CO₂ 농도를 제외한 탄산화 챔버와 동일한 조건으로 온도 20.0 ± 1.0 °C, 습도 60.0 %의 환경에서 양생을 실시하였다. 이후 시험체 제작일을 기준으로 24시간 경과 후 몰드로부터 시험체를 탈형하여 목표 재령까지 동일 양생을 진행하였고 연구 계획에 따른 각각의 실험을 진행하였다.



(a) Temperature & humidity chamber



(b) Carbonation test chamber

Fig. 2. Curing environment of cement paste

2.3.2 압축강도 및 탄산화 깊이 측정

앞에서 설명된 시멘트 페이스트의 시험체 제작 및 양생에 따른 압축강도의 측정을 위해 KS L 5105에서 명시하는 압축강도 시험체 측정 방법에 따라 시멘트 페이스트의 재령별 압축강도를 측정하였으며, 시멘트 페이스트 시험체의 탄산화 깊이 측정의 경우 압축강도 시험체와 동일하게 제작되어 재령이 도래한 시험체의 종양을 바닥면과 수평하게 할렬하여 그 할렬 면을 측정 면으로 사용하였고 KS F 2596에서 명시하는 KS M 8238에서 규정한 페놀프탈레인 1 % 용액의 분무에 따라 측정 면에서 적자색으로 변색한 부분까지의 거리를 버니어 캘리퍼스를 이용하여 0.1 mm 단위까지 측정하여 그 깊이를 기록하였다.

2.3.3 열 중량 분석

열 중량 분석(Thermogravimetric Analysis 이하: TGA)은 시료의 온도를 변화시켰을 때의 질량 변화를 온도 또는 시간의 함수로 측정하는 열 분석 기법으로 온도 변화에 따른 샘플시료의 탈 수 및 탈 가스, 시료 분해 등에 대한 정량분석이 가능하다. 이에 따라 앞에서 제작되어 각각의 양생 환경조건을 만족하는 페이스트 경화체의 대표 샘플(시험체의 상부 표층으로부터 15 mm 깊이의 두께 5 mm의 직육면체의 샘플)을 채취하여 미분쇄 후 수화정지를 진행하였다. 이는 페이스트 시험체 내부에 남아있는 사용 수에 의한 추가적인 수화반응을 막아 실험의 일관성을 높여 측정 데이터 오차 범위를 좁히는데 기여한다. 분석조건으로 각 전 처리된 분말을 TGA 홀더에 넣고 고순도 질소 환경(N₂ 99.999 %)에서 온도 범위 25~1,000 °C, 승온 속도 10 °C/min 기준에서 중량 감소율을 측정하였다. 이때 실험에 사용된 TGA 열 중량 분석 장비는 퍼킨엘머(PerkinElmer) 사의 STA-8000 Model을 활용하여 측정되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시멘트 페이스트의 압축강도

시멘트 페이스트 배합실험에 따른 압축강도 결과는 Table 4와 같으며, Fig. 3과 같이 나타내었다. 실험결과 항온항습기 양생 조건인 3, 7, 28일 재령일 순서로 CRA가 혼합된 페이스트 배합의 경우 41.7, 45.6, 50.3 MPa로 측정되어 같은 양생 조건의 Plain 대비 32.5, 32.9, 30.5 % 감소하는 경향을 확인하였으며, 탄산화 챔버 양생 조건의 CRA 배합의 경우 44.0, 52.8, 72.1 MPa로 측정되어 동일 재령일 순서로 같은 양생 조건의 Plain 대비 18.7, 18.5, 10.1 % 감소하는 경향을 확인하였다. 또한, CRA 첨가 배합만을 놓

Table 4. Compressive strength of paste

		Compressive strength (MPa)		
		3 Days	7 Days	28 Days
Temperature & humidity chamber	Plain	61.8	68.0	72.4
	CRA	41.7	45.6	50.3
Carbonation test chamber	Plain	54.1	64.8	80.2
	CRA	44.0	52.8	72.1

고 각 양생 환경에 따른 측정 데이터를 비교해 보았을 때 3, 7, 28일 재령이 경과 함에따라 항온습습기 양생 조건의 Plain 대비 5.5, 15.8, 43.3 % 큰 폭으로 증가하는 경향을 확인하였다. 이를 통해 모든 양생 환경에서의 CRA 혼입에 따른 재령별 압축강도 저하 현상을 확인하였으나, 탄산화 챔버 양생 조건에서는 이산화탄소와의 반응을 통한 강도 증진에 따라 그 폭이 작아지는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 CRA의 혼입으로 증가 된 Na^+ 이 Ca^{2+} 을 대체함으로써 C-S-H gel 사이의 결합력을 감소시켜 CRA가 혼입된 페이스트의 압축강도가 저하된 것으로 추측된다. Šavija and Luković (2016)은 시멘트 경화체 탄산화 반응의 경우 대기 중에 존재하는 CO_2 가 시멘트 페이스트 공극 내에 존재하는 물에 용해되어 탄산이온(CO_3^{2-})을 생성하게 되고 이때 생성된 탄산이온은 시멘트 페이스트에 존재하는 $Ca(OH)_2$ 을 분해하여 $CaCO_3$ 을 형성하게 되는데 이때 형성된 $CaCO_3$ 은 시멘트 페이스트의 조직구조를 치밀하게 하여 압축강도 증가 및 내구성의 향상에 기여가 가능하다고 제시하고 있다. 따라서 CRA의 혼입으로 저하된 압축강도 성능이 궁극적으로 탄산화챔버 내의 풍부한 이산화탄소에 의해 탄산화 반응의 활성을 도와 압축강도 향상에 일부 기여가 가능하였다는 것을 확인할 수 있었다.

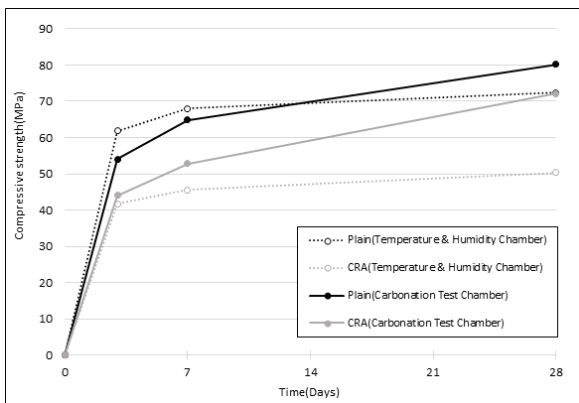


Fig. 3. Compressive strength of paste

3.2 시멘트 페이스트의 탄산화 깊이

시멘트 페이스트 배합실험에 따른 탄산화 깊이 실험결과는 Table 5와 같으며, Fig. 4와 같이 나타내었다. 실험결과 항온습습기 양생 조건의 14, 28일 재령일 순서로 CRA가 혼입된 페이스트 배합의 경우 10.28, 14.24 mm로 측정되어 같은 양생 조건의 Plain 대비 114.6, 119.1 % 탄산화 깊이가 증가하는 경향을 확인하였으며, 탄산화 챔버 양생 조건의 CRA 배합의 경우 12.18, 14.51 mm로 측정되어 동일 재령일 순서로 같은 양생 조건의 Plain 대비 100.3, 56.7 % 탄산화 깊이가 증가하는 경향을 확인하였다. 또한, CRA가 혼입된 페이스트배합을 기준으로 두 가지 양생 조건의 탄산화 깊이 이를 비교해 본 결과 탄산화 챔버 양생조건 CRA 배합의 탄산화 깊이가 일반 항온습습기 양생 조건대비 18.5, 1.9 % 증가하였다. 이를 통해 모든 환경에서의 CRA의 혼입에 따라 탄산화 깊이가 상당 부분 증가하는 현상을 확인하였으며, 특히 항온습습기 양생 조건에서의 탄산화 깊이 증가율이 Plain 대비 100 % 이상을 상회하는 수준으로 가장 반응성이 높은 것으로 확인하였다. 일반적으로 시멘트 수화반응 시 생성되는 $Ca(OH)_2$ 의 경우 pH12.5 이상의 강알칼리성을 띄게 되는데 이때 혼입된 CRA에 의해 시멘트의 초반 Ca^{+} 이온 용출이 활성화되었고 이에 따라 탄산화챔버 양생 조건에서 다량 존재하는 CO_2 로 인하여 더 많은 양의 $CaCO_3$ 생성을 도와 궁극적으로 pH가 급격히 감소 된 결과로 추측된다.

Table 5. Compressive strength of paste

		Carbonation depth (mm)	
		14 Days	28 Days
Temperature & humidity chamber	Plain	4.79	6.50
	CRA	10.28	14.24
Carbonation test chamber	Plain	6.08	9.26
	CRA	12.18	14.51

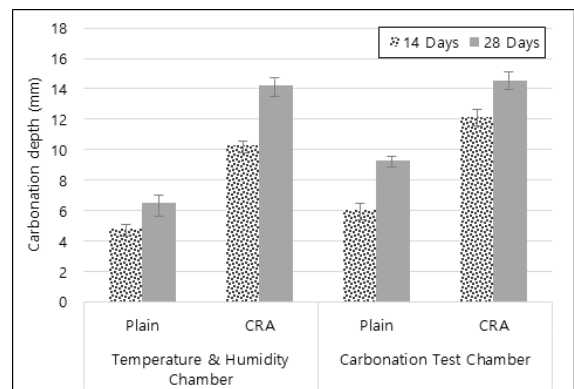


Fig. 4. Carbonation depth of paste

3.3 시멘트 페이스트의 TGA 분석결과

시멘트 페이스트 배합실험에 따른 열 중량 분석 TGA를 측정된 결과는 Table 6, Fig. 5와 같이 나타내었다. 측정 시 CaCO₃의 열분해 구간인 600~900 °C의 온도 구간을 기반으로 측정되었으며, 해당 구간의 중량 감소율을 확인하여 그 결과를 비교하고자 하였다. 측정결과 항온항습기 양생 조건의 시험체의 중량감소율의 경우 Plain 5.21 %, CRA 6.45 %로 측정되었으며, CRA의 경우 Plain 보다 약 1.24 %만큼의 추가적인 중량 감소를 확인하였다. 탄산화 챔버 양생 조건의 중량 감소율의 경우 Plain 8.78 %, CRA 12.36 %로 측정되었으며 CRA의 경우 Plain 보다 약 3.58 %만큼의 추가적인 중량 감소를 확인하였다. 궁극적으로는 CRA의 시멘트 페이스트 혼입에 따라 항온항습기 양생 조건, 탄산화챔버 양생 조건의 순서로 Plain 대비하여 각각 23.8 %, 40.77 %만큼의 중량 감소율이 증가한 경향을 확인할 수 있었다. Cui et al.(2015)의 연구에 의하면 양생 단계에서 CO₂ 농도가 증가할수록 콘크리트 표면에서 탄산염 형성의 증가에 따라 반응생성물이 치밀하게 형성하게 되고 이는 탄산화 깊이에 큰 영향을 미칠 수 있다고 보고하고 있다. 이는 시멘트 페이스트에 CRA 혼입에 따라 각각의 환경에서의 탄산화 반응의 촉진으로 Ca 이온 용출의 활성화와 CaCO₃ 생성량에 기여하는 것으로 사료 되며, 특히 CO₂가 다량 존재하는 탄산화챔버 양생 조건에서의 높은 반응성을 확인하였다.

Table 6. Thermogravimetry of paste

		Weight loss rate (%)	
		600~900 °C	
Temperature & humidity chamber	Plain	5.21	
	CRA	6.45	
Carbonation test chamber	Plain	8.78	
	CRA	12.36	

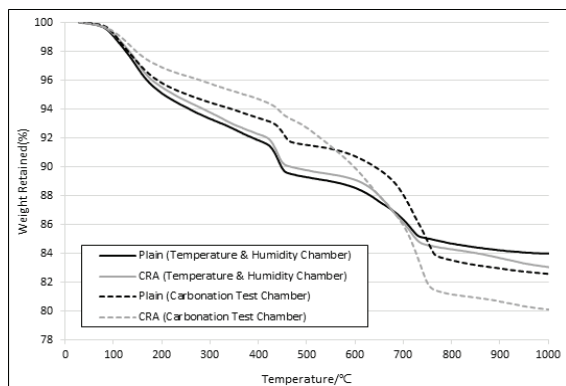


Fig. 5. Thermogravimetry of paste

4. 결론

본 연구에서는 시멘트 산업의 CO₂ 저감을 위한 가장 핵심적인 기술 중 상기에서 언급한 CCU를 적용하여 이산화탄소의 활용을 극대화 시키기 위한 일환으로 이산화탄소 양생 환경에서의 보통 포틀랜드 시멘트 페이스트를 대상으로 하여 탄산화 반응 촉진제(국내 W사)의 혼입 유·무에 따른 재령 별 탄산화 깊이 변화와 이에 따른 기초 물리 특성변화를 검토하고자 하였으며, 콘크리트 분야에서 CO₂ 고정량을 평가하기 위하여 가장 범용적으로 사용하는 방법인 고온에서의 CaCO₃ 탈탄산을 평가하는 열분석 방법을 적용하여 중량 감소율을 비교하고자 하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 페이스트의 압축강도 성능에 있어서 앞에서 언급한 두 가지의 양생 조건을 기반으로 탄산화 촉진제(CRA)의 혼입에 따라 두 조건 모두 압축강도 성능이 소폭 저하하는 경향을 확인하였으며, 특히 항온항습기 양생 조건에서의 압축강도 감소가 뚜렷한 것을 확인하였다. 이는 CRA의 활용 양생 단계에서의 낮은 CO₂의 농도에 따라 탄산화 반응성의 급격한 감소에 따라 탄산화 활성도가 감소한 결과로 판단된다. 한편 탄산화 챔버 양생 조건의 결과에서는 CRA의 혼입으로 저하된 압축강도 성능이 궁극적으로 탄산화챔버 내의 풍부한 이산화탄소에 의해 탄산화 반응의 활성을 도와 압축강도 향상에 일부 기여가 가능하였다는 것을 확인할 수 있었다.
2. 페이스트 경화체의 탄산화 깊이 성능에 있어서 모든 양생 환경에서의 CRA의 혼입에 따라 탄산화 깊이가 상당 부분 증가하는 현상을 확인하였으며, 특히 항온항습기 양생 조건에서의 탄산화 깊이 증가율이 Plain 대비 100 % 이상을 상회하는 수준으로 가장 반응성이 높은 것으로 확인하였다. 이는 혼입된 CRA에 의해 시멘트의 초반 Ca 이온 용출이 활성화되었고 이에 따라 탄산화챔버 양생 조건에서 다량 존재하는 CO₂로 인하여 더 많은 양의 CaCO₃ 생성을 도와 궁극적으로 pH가 급격히 감소 된 결과로 사료된다.
3. 열 중량 분석 TGA 결과 CRA의 시멘트 페이스트 혼입에 따라 항온항습기 양생 조건, 탄산화챔버 양생 조건의 순서로 Plain 대비하여 각각 23.8 %, 40.77 %만큼의 중량 감소율이 증가한 경향을 확인할 수 있었다.

이러한 결과를 통하여 시멘트 페이스트에 CRA 혼입에 따라 두 가지의 환경조건에서 모두 압축강도 성능이 소폭 감소하는 경향이 나타났지만, 탄산화 깊이 확산성능에 있어서 CRA의 혼입으로 경

화체 내의 탄산화 깊이가 상당 부분 증가하는 경향을 확인하였다. 또한, 항온항습기 양생 조건, 탄산화챔버 양생 조건의 순서로 Plain 대비하여 각각 23.8 %, 40.77 %만큼의 중량 감소율이 증가한 경향을 확인하였기에 CRA 첨가에 따른 우수한 CaCO₃의 생성량을 확인할 수 있었으며 CO₂의 농도가 증가할수록 그 생성량 또한 증가하는 것으로 확인하였다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구이며(RS-2022-00155521) 이에 감사를 드립니다.

References

Bertos, M.F., Simons, S.J.R., Hills, C.D., Carey, P.J.(2004) . A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂ Journal of Hazardous Materials, **112(3)**, 193-205

Carbon Neutrality and Green Growth Commission. (2021). 2050 Carbon Neutral Scenario, 89 [in Korean].

Cui, H., Tang, W., Liu, W., Dong, Z., Xing, F. (2015). Experimental study on effects of CO₂ concentrations of concrete carbonation

and diffusion mechanisms, Construction and Building Materials, **93**, 522–527.

Ergenç, D., Fort, R., Silva, A.S., Veiga, R., Sanz Arauz, D. (2018). The effects of DiloCarB as carbonation accelerator on the properties of lime mortars, Materials and Structures **51(1)**, 10.

IPCC. (2018). Global Warming of 1.5 °C–Summary for Policymakers, WMO · UNEP, 4.

Matakah, F., Jaradat, Y., Soroushian, P., Weerasiri, R. (2021). Effect of additives on carbon dioxide uptake and compressive strength of dry-cast concrete, Magazine of Concrete Research, **73(6)**, 288–301.

Ministry of Environment. (2021). Submit the increased ‘2030 National Greenhouse Gas Reduction Target (NDC)’ to the Secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change, Article 3, Paragraph 1 of the Enforcement Decree of the Carbon Neutral Basic Act, Press Release [in Korean].

Šavija, B., Luković, M. (2016). Carbonation of cement paste : understanding, challenges, and opportunities, Construction and Building Materials, **117**, 285–301.

Villani, C., Spragg, R., Tokpatayeva, R., Olek, J., Weiss, W.J. (2014). Characterizing the pore structure of carbonated natural wollastonite, 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures, 262–269.

Yoon, M.H. (2021). CCUS Policy and Technology Development Direction for Carbon Neutrality, KEITI · KONETIC, Domestic and International IP Analysis Report, 9 [in Korean].

탄산화 반응 촉진제를 이용한 시멘트 페이스트의 탄산화 깊이에 관한 실험적 연구

본 연구는 시멘트 산업의 CO₂ 저감을 위한 가장 핵심적인 기술 중 CCU(Carbon Capture, Utilization)를 적용하여 이산화탄소의 활용을 극대화 시키기 위한 일환으로 이산화탄소 양생 환경에서의 보통 포틀랜드 시멘트 페이스트를 대상으로 하여 탄산화 반응 촉진제의 혼입 유·무에 따른 재령 별 탄산화 깊이 변화와 이에 따른 기초 물리 특성변화를 검토하고자 하였으며, 콘크리트 분야에서 CO₂ 고정량을 평가하기 위하여 가장 범용적으로 사용하는 방법인 고온에서의 CaCO₃ 탈탄산을 평가하는 열분석 방법을 적용하여 중량 감소율에 따른 결과를 평가하였다. 평가결과, 시멘트 페이스트에 CRA 혼입에 따라 두 가지의 환경조건에서 모두 압축강도 성능이 소폭 감소하는 경향이 나타났지만, 탄산화 깊이 확산성능에 있어서 CRA의 혼입으로 경화체 내의 탄산화 깊이가 상당 부분 증가하는 경향을 확인하였다. 또한, 항온항습기 양생 조건, 탄산화챔버 양생 조건의 순서로 Plain 대비하여 각각 23.8 %, 40.77 %만큼의 중량 감소율이 증가한 경향을 확인하였기에 CRA 첨가에 따른 우수한 CaCO₃의 생성량을 확인할 수 있었으며 CO₂의 농도가 증가할수록 그 생성량 또한 증가하는 것으로 확인하였다. 이는 소요성능 수준 이상의 성능을 만족할 수 있을 것으로 사료되며, 탄산화 저감을 목표로 하는 모든 CCU 기술에 재료적 측면으로 접목 및 활용이 가능할 것으로 판단된다.