

Analysis of mechanical properties of secondary concrete products using CO₂ captured material

Hye-Jin Yu, Sung-Kwan Seo[†], Kuem-Dan Park, Hyuk-Joon Kwon* and Jeong-Hwan Kim**

Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Carbon Neutral Materials Center, Jinju 52851, Korea

**SinWoo Industry Development Co., Ltd., Technical Research Center, CheonAn 31259, Korea*

***HANILECO INDUSTRY Co., Ltd., Technical Research Center, GongJu 32533 Korea*

(Received April 11, 2024)

(Revised April 16, 2024)

(Accepted April 19, 2024)

Abstract In this study, the applicability of CCMs (Carbondioxide conversion capture materials) manufactured by reacting carbon dioxide gas with DG (Desulfurization gypsum) as a cement substitute for secondary concrete products were evaluated and the basic physical properties of CCMs-mixed mortar and concrete specimens were measured to derive the optimal mixing ratio. The main chemical oxides of CCMs were CaO and SO₃, and the main crystalline phases were CaSO₄·2H₂O, Ca(OH)₂, CaCO₃, and CaSO₄. In addition, by the results of particle size analysis and heavy metal measurement, the applicability of CCMs as a cement substitute for secondary concrete products was confirmed. As a result of measuring the strength behavior using mortar and concrete specimens with CCMs, the compressive and flexural strength decreased as the mix ratio of CCMs increased, but requirements by the standards for interlocking blocks and retaining wall blocks, which are target products in this study, were satisfied up to the optimal mixing ratio of 10 wt.% substitution. Therefore, its applicability as a cement substitute for secondary concrete products was confirmed.

Key words Carbon capture, Utilization and storage, Desulfurization gypsum, Carbondioxide conversion capture materials, Secondary concrete products

이산화탄소 고정 탄산화물을 적용한 콘크리트 2차 제품의 기초 특성 분석

유혜진, 서성관[†], 박금단, 권혁준*, 김정환**

한국세라믹기술원 탄소중립소재센터, 진주, 52851

*신우산업개발(주) 기술연구소, 천안, 31259

**한일에코산업(주) 기술연구소, 공주, 32533

(2024년 4월 11일 접수)

(2024년 4월 16일 심사완료)

(2024년 4월 19일 게재확정)

요약 본 연구에서는 탈황석고(DG)에 이산화탄소를 반응시켜 제조한 탄산화물(CCMs)을 콘크리트 2차 제품의 시멘트 대체재로서 적용 가능성을 평가하고 최적 배합비 도출을 위한 탄산화물 혼입 모르타르 및 콘크리트 시편의 기초 물성 측정을 실시하였다. 탄산화물은 다량의 CaO 및 SO₃로 이루어져 있으며, 주요 결정상은 CaSO₄·2H₂O, Ca(OH)₂, CaCO₃ 및 CaSO₄로 나타났다. 또한 입도 분석 및 폐기물공정시험기준에 따른 중금속 측정 결과 콘크리트 2차 제품의 시멘트 대체재로서 탄산화물의 적용 가능성이 확인되었다. 모르타르 및 콘크리트 공시체 제작 후 강도 거동 측정 결과 탄산화물 혼입량이 증가할수록 강도가 감소하는 경향을 나타내었으나 최적 배합인 치환 비율 10 wt.% 배합까지 대상 제품인 인터로킹 블록 및 옹벽 블록의 기준에서 요구하는 모든 조건을 만족하였다. 따라서 콘크리트 2차 제품의 시멘트 대체재로서 적용 가능성이 확인되었다.

[†]Corresponding author
E-mail: ssk@kicet.re.kr

1. 서 론

시멘트 산업은 전 세계의 건설 분야뿐만 아니라 인류가 살아가는 데에 필요한 현대 인프라 구축에 필수적인 산업이다. 그러나 시멘트 생산에는 이산화탄소 배출, 높은 에너지 소비, 천연자원 고갈과 같은 상당한 환경 비용이 발생하고 있다[1,2]. 다양한 산업에 의한 환경 문제와 기후 변화, 자원 부족 등에 대한 우려가 전 세계적으로 심화됨에 따라 전 분야에서 지속 가능한 목표를 채택해야 한다는 필요성이 대두되고 있다. 이에 따라 우리나라에서도 2030 국가온실가스감축목표(NDC, Nationally Determined Contribution) 및 2050 장기저탄소발전전략(LEDS, Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategies)와 같은 장기적인 탄소 중립에 대한 목표를 수립·수행하고 있으며, 시멘트 업계에서도 탄소 포집·활용·저장 기술(CCUS, Carbon Capture, Utilization and Storage)를 적용한 지속 가능한 시멘트 관련 재료에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[3-5].

시멘트 생산에서 지속 가능성을 달성하기 위한 방법 중 하나는 산업 폐기물 및 부산물을 시멘트 원료의 대체재 또는 시멘트의 대체재(SCM, Supplementary Cementing Materials)로서 활용하는 것이다. 이를 위해 다양한 제조 공정에서 발생하는 부산물을 활용하기 위한 많은 연구가 진행되었으나, 재료 자체의 낮은 반응성, 일정하지 않은 재료 수급 및 폐기물에 대한 다양한 규제 등의 이유로 적극적인 활용이 어려운 실정이다. 그러나 산업 부산물 및 폐기물 활용의 환경적, 경제적, 기술적 영향의 잠재적인 이익에 대한 깊은 관심이 이어짐으로써 슬래그, 실리카폼, 플라이애쉬 등 일반적인 부산물에 국한되지 않는 대체 원료 또는 SCM으로서 적합한 다양한 범위의 재료에 대한 연구가 지속되고 있다[6-8].

본 연구에서는 순환 유통층 연소 보일러의 연소 과정에서 배출되는 산업 폐기물인 탈황석고(DG, Desulfurization Gypsum)에 이산화탄소 가스를 주입하는 공정을 통해 CCUS 기술을 적용한 탄산화물(CCMs, Carbondioxide conversion Capture Materials)의 콘크리트 2차 제품의 시멘트 대체재로서의 적용 가능성을 검토하고자 하였다. 이를 위해 탄산화물의 치환 비율을 제어하여 모르타르 강도 거동을 측정 후 최적 배합비 선정을 통해 Mock-up scale의 콘크리트 2차 제품을 제작하여 기준 배합(OPC) 대비 탄산화물 혼입 배합의 강도 특성을 조사·검토하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 산업 부산물인 탈황석고에 이산화탄소를 고정된 탄산화물을 콘크리트 2차 제품의 시멘트 결

합재로 적용하기 위해 국내 H社의 탈황석고를 사용하였다. 이후 국내 W社에서 이산화탄소 가스 주입·건조의 과정을 통해 탈황석고에 이산화탄소를 반응시킨 탄산화물을 제조하여 본 연구에 사용하였다.

탄산화물의 기초물성 및 콘크리트 2차 제품의 재료로서의 적용 가능 여부 파악을 위해 산화물 조성, 결정상, 밀도, 분말도 및 입도 특성 분석을 실시하였다. 산화물 조성 파악을 위해 X선 형광분석기(XRF, Supermini 200, Rigaku社, JAPAN)를 이용하였으며, X선 회절 분석기(XRD, D8 Advance A25 Plus, Bruker社, USA) 및 열중량분석기(TG-DTA, STA8122, Rigaku社, JAPAN)를 이용하여 배합별 샘플의 결정상 및 미세구조 분석을 실시하였다. 시료의 밀도 및 분말도는 각각 KS L 5110(시멘트의 밀도 시험 방법) 및 KS L 5106(공기 투과 장치에 의한 포틀랜드 시멘트의 분말도 시험 방법)에 따라 측정하였다. 또한 주사전자현미경(SEM, SU8220, Hitachi社, JAPAN), 입도분석기(PSA, LA-950V2, Horiba社, JAPAN)를 이용하여 탄산화물의 입도 특성 분석을 수행하였으며, 폐기물공정시험기준에 따른 중금속 용출 시험을 위해 유도결합 플라즈마 방출분광기(ICP-OES, optima 5300DV, Perkin Elmer社, USA)를 사용하였다.

탄산화물의 콘크리트 2차 제품 적용을 위해 2차 제품 중 콘크리트 인터로킹 블록과 콘크리트 PC 용벽 블록을 대상으로 선정하였다. 시멘트 결합재 적용시 블록의 기초 물성 분석을 위해 탄산화물 치환율을 0(OPC), 5, 10, 15 및 20 wt.%로 제작한 모르타르의 플로우, 휨강도 및 압축강도를 측정하였다. 모르타르 제조 및 압축강도 시험은 KS L ISO 679(시멘트의 강도 시험방법)에 따라 실시하였으며, 플로우는 KS L 5105(수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법)에 준하여 측정하였다. 이후 최적 배합비를 설정하고 Mock-up scale의 콘크리트 2차 제품을 제작하여 KS F 4419(보차도용 콘크리트 인터로킹 블록) 및 SPS-KCIC0001-0703(콘크리트 호안 및 용벽 블록)에 준하여 휨강도, 압축강도, 흡수율 및 동결융해 후 압축강도를 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1. 이산화탄소 고정 탄산화물 특성 분석

탄산화물은 국내 W社에서 국내 H社의 탈황석고에 이산화탄소를 고정·제조한 것을 사용하였으며, 주요 산화물 조성으로 CaO, SO₃ 등이 검출되었다(Table 1). 탄산화물의 열중량 분석 결과를 Fig. 1에 나타내었으며, Gypsum(≈ 110°C), Portlandite(≈ 420°C), Calcite(≈ 740°C) 및 추가 CO₂ 분해가 관찰되었다[9]. 총 중량 감소량은 33.5 wt.%

Table 1
Chemical compositions of CCMs

	CaO	SO ₃	SiO ₂	MgO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Others
CCMs	68.90	22.30	3.25	2.39	0.85	0.80	0.45	0.27	0.79

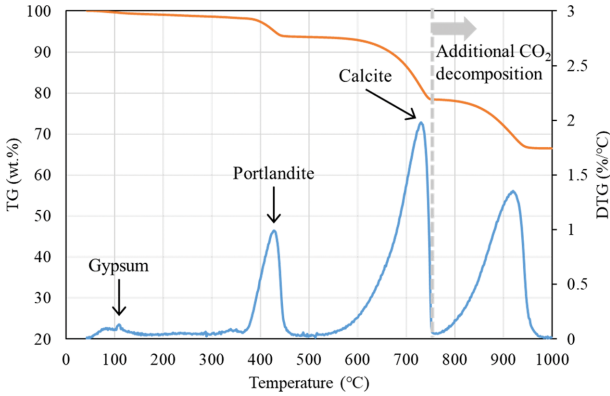


Fig. 1. TG/DTG results of CCMs.

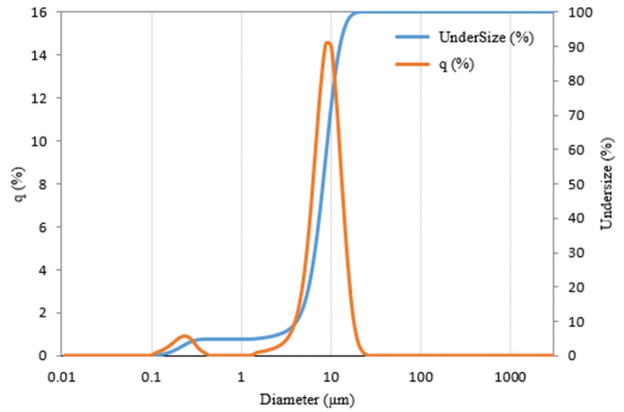


Fig. 3. Particle size distribution of CCMs.

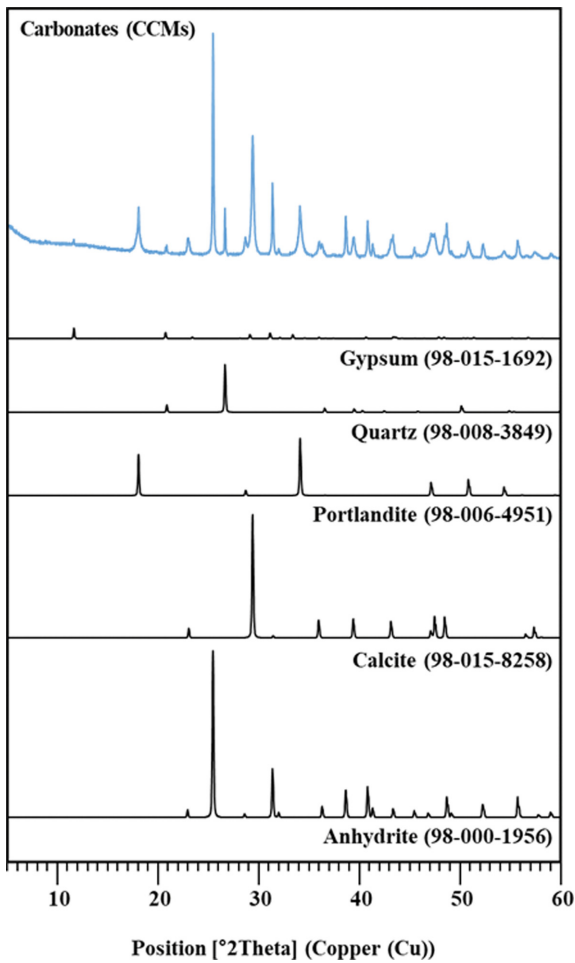


Fig. 2. XRD patterns of CCMs.

이며, 이는 고정된 이산화탄소의 탈탄산 반응에 기인한 것으로 나타나 W社의 탄산화 공정 설비에서 이산화탄소

고정이 활발하게 이루어진 것으로 판단되었다. Fig. 2의 X선 회절 분석 결과에 따라 탄산화물의 주요 결정상은 Anhydrite(CaSO₄), Calcite(CaCO₃), 및 Portlandite (Ca(OH)₂)로 나타났으며, 이는 탄산화물의 주요 성분인 미반응 CaO와 황 성분이 반응하여 생성된 것으로 판단되었다[10,11]. Portlandite의 경우 탈황석고에서 탄산화물로의 반건식 제조 공정에서 분사된 물과 미반응 CaO가 반응하여 생성된 것으로 추정되었다.

탄산화물의 밀도는 2.28 g/cm³으로 측정되었으며, 분말도 측정 결과는 3,322 cm³/g으로 나타났다. 입도 분석 결과 입도 분포는 0.2 µm 및 10 µm 2 그룹으로 분포되어 있으며, 시료의 평균 입자 크기는 8.3 µm로 측정되었다(Fig. 3). 탄산화물의 입도는 일반 포틀랜드 시멘트의 평균 입자 크기인 1~50 µm 이내인 것으로 나타났으며, 입자 크기에 기인한 강도 저하 영향을 없을 것으로 추정되어 콘크리트 2차 제품의 시멘트 대체 재료의 사용에 문제가 없을 것으로 판단되었다. SEM 측정 결과(Fig. 4), 균일하지 않은 직사각형 또는 마름모꼴 모양에 덩어리가 붙어 있는 형태로 나타났으며, 이는 마름모꼴 모양의 탈황석고에 이산화탄소가 반응하여 덩어리 형태의 Calcite가 표면에 생성된 것으로 보인다.

또한 콘크리트 2차 제품 제조 시 시멘트 대체재로 사용하기 위해 폐기물공정시험기준에 따라 유도결합 플라즈마 방출분광기를 사용하여 중금속 용출 시험을 수행한 결과 Pb, Cd, Hg, As, Cu 및 Cr⁶⁺ 등이 불검출되어 탄산화물의 시멘트 결합재로서의 사용이 가능한 것으로 사료되었다.

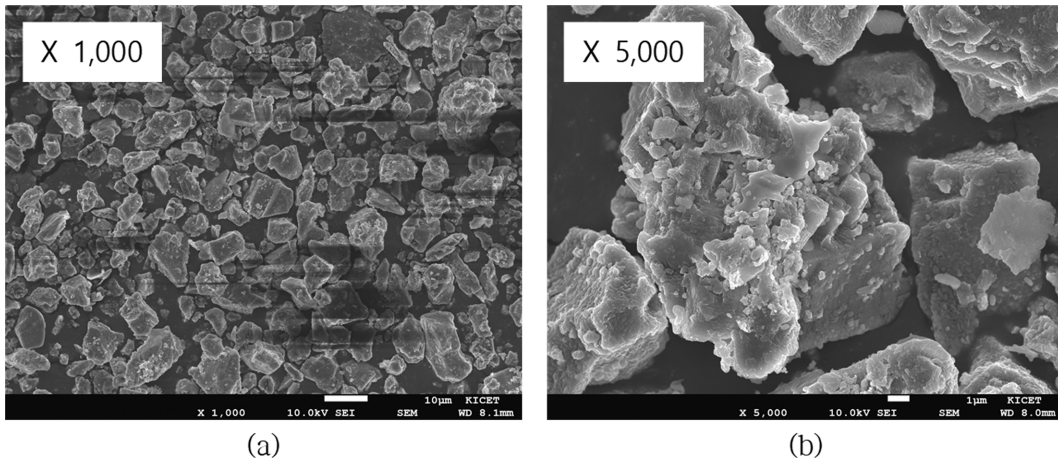


Fig. 4. Different scale of SEM images of CCMs.

3.2. 탄산화물 혼입 비율별 모르타르 물성 분석

탄산화물 적용 콘크리트 2차 제품의 대상으로 콘크리트 인터로킹 블록 및 콘크리트 프리캐스트 옹벽 블록을 선정하였으며, 탄산화물 치환 최적 배합 비율을 설정하기 위해 모르타르 공시체를 제작하였다. 다양한 탄산화물 치환율에 따른 모르타르 공시체를 제작하기에 앞서, 본 연구에서 2차 제품의 대상으로 선정한 콘크리트 인터로킹 블록의 경우 물/결합재비가 25% 이하이므로, 탄산화물 사용 가능 여부를 평가하기 위해 물/결합재비를 각각 25%, 50%, 탄산화물 치환율을 10 wt.%로 설정하여 사전 시험을 수행하였다. 그 결과 탄산화물의 주성분인 미반응 CaO와 석고의 높은 반응성 때문에 컨시스턴시 확보 문제 및 다짐성 저하에 기인한 압축강도 저하 현상이 나타났다. 따라서 본 기준 물/결합재비인 25%의 경우 50%일 때보다 낮은 압축강도가 측정되었으며(Fig. 5), 그 결과 모르타르 공시체의 물/결합재비를 50%로 제어하였다. 탄산화물의 시멘트 치환 비율은 0, 5, 10, 15 및 20 wt.%로 설정하였으며, 잔골재/결합재비(S/B)는

일정하게 제어되었다(Table 2). 제작된 공시체는 인터로킹 블록 및 옹벽 블록의 요구 기준에 맞추어 플로우, 휨강도 및 압축강도가 측정되었다.

플로우 시험 결과, 탄산화물의 혼입량이 증가할수록 낮은 플로우 경향을 나타내었으며, 특히 치환율 15 wt.%부터 급격히 낮은 플로우 값이 측정되었으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 따라서 작업성 측면에서 탄산화물 치환율 5~10 wt.%의 배합이 최적인 것으로 판단되었다.

탄산화물 치환 비율별 휨강도 및 압축강도 결과(Fig. 6), 탄산화물 혼입량이 증가할수록 압축강도가 낮아지는 경향을 보였으며, 특히 탄산화물 15 및 20 wt.% 치환 배합의 경우 기준 배합(C0) 대비 매우 낮은 강도 발현을 보였다. 휨강도 측정 결과 또한 탄산화물 치환량이 증가할수록 압축강도가 낮아지나, 치환율 15 wt.%부터 급격히 낮은 강도가 측정되었다. 이러한 결과는 Fig. 7의 X-선 회절 분석 결과와 같이 치환율 15 wt.% 시편부

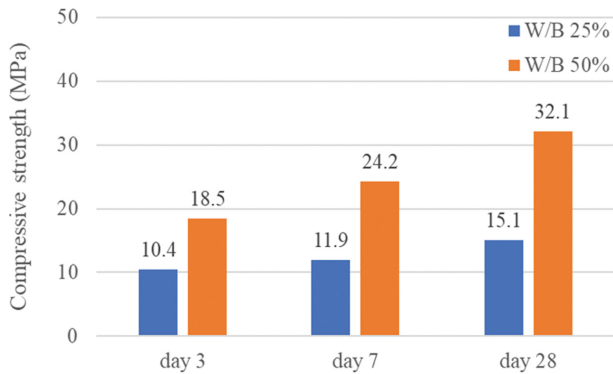


Fig. 5. Compressive strength test results of mortar with different W/B ratio.

Table 2
Mix proportions of mortar containing CCMs

Sample	Cement (%)	CCMs (%)	S/B	W/B
C0 (OPC)	100	0		
C5	95	5		
C10	90	10	3.0	0.5
C15	85	15		
C20	80	20		

Table 3
Flow test results (Unit: mm)

	C0	C5	C10	C15	C20
1	217	216	213	180	150
2	218	217	210	179	146
3	220	214	209	182	153
Average	218	216	211	180	150

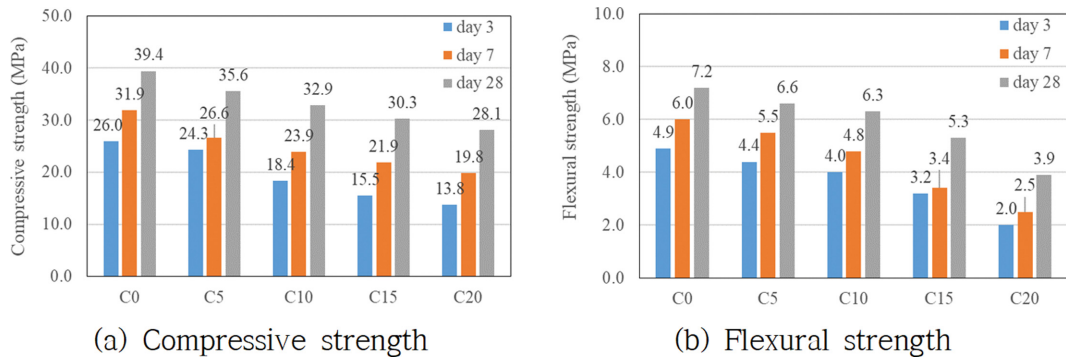


Fig. 6. Strength test results.

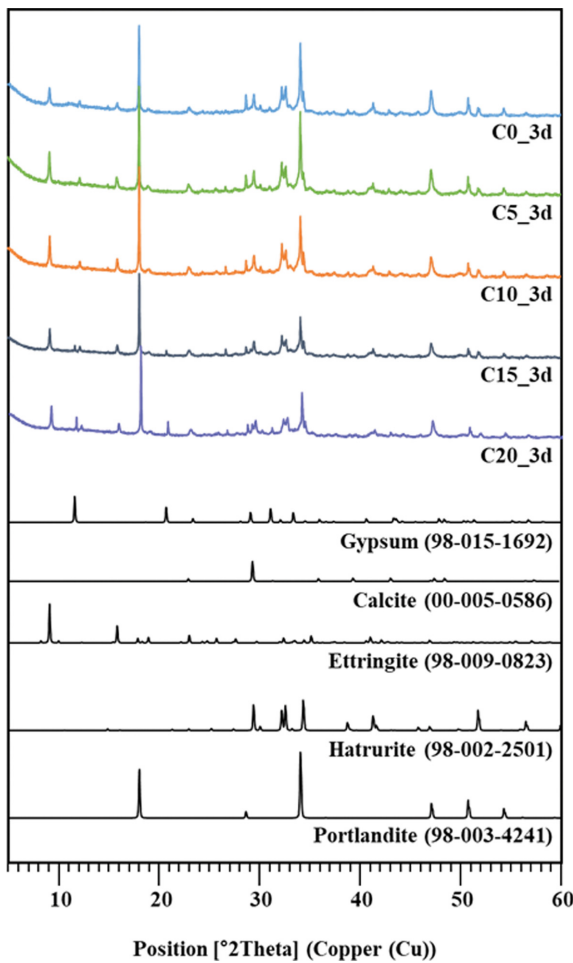


Fig. 7. XRD results of samples after curing 3 days.

터 강도 발현에 영향을 끼치는 portlandite 생성의 급격한 감소에 의한 것으로 판단된다. 또한 $9^{\circ} 20$ 부근에 나타난 ettringite의 피크가 기준 배합(C0)에 대비하여 탄산화물 혼입 배합에서 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 탄산화물에 존재하는 다량의 황산염 때문에 강도 발현에 영향을 미치는 C-S-H 상의 생성이 감소하고, ettringite의 생성량이 증가함에 따라 탄산화물 혼입량이 늘어날수

록 강도 감소 경향을 나타내는 것으로 추정된다[12,13]. 따라서 작업성 및 강도적 측면 모두를 고려하였을 때 콘크리트 2차 제품에 적용하기 위한 탄산화물 배합은 치환율 10 wt.%가 최적인 것으로 판단되었다.

3.3. 탄산화물 혼입 비율별 콘크리트 물성 분석

모르타르 공시체를 이용한 실험의 결과를 바탕으로 탄산화물 치환율 10 wt.% 배합으로 설정하여 콘크리트 인터로킹 블록 및 콘크리트 용벽 블록을 제작하여 각 제품의 기준에 맞추어 흡수율, 휨강도, 압축강도 및 동결융해 후 압축강도를 측정하였다.

콘크리트 인터로킹 블록의 흡수율 시험 결과를 Table 4에 나타내었으며 탄산화물 치환시 기준 배합(C0) 대비 흡수율이 증가하는 경향을 나타내었으나 본 제품에 적용한 치환율 10 wt.%인 경우 KS F 4419의 흡수율 기준인 평균 7% 이하를 만족하는 것으로 나타났다. 재령 28일의 휨강도 및 압축강도 측정 결과(Table 5) 탄산화물 혼입시 기준 배합(C0) 대비 강도가 저하되었으나 흡수율과 동일하게 탄산화물 치환율 10 wt.%의 경우 KS F 4419의 기준값인 5.0 MPa(휨강도)를 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 이를 통해 최적 배합비인 탄산화물 혼입 10%의 배합으로 Mock-up scale의 공시체를 제작하였으며, 그 결과 KS 기준에서 제시하는 치수·허용차, 휨강도, 흡수율 및 표면층 두께 모두 만족하였다.

콘크리트 용벽 블록 물성 측정 결과 탄산화물 치환시 반죽의 다짐성 및 강도 발현은 기준 배합(C0) 대비 감소하는 것으로 나타났으나, 탄산화물 치환 비율 10 wt.% 배합의 경우 SPS-KCIC0001-0703에서 제시하는 압축강도, 동결융해 후 압축강도 및 흡수율 기준을 모두 만족하였다. 위 실험 결과를 바탕으로 최적 배합비인 탄산화물 치환율 10 wt.%를 적용하여 Mock-up scale의 콘크리트 용벽 블록 공시체를 대상으로 품질 특성 실험을 진행한 결과를 Table 6에 나타내었으며, 단체표준에서 요구하는 모든 기준을 만족하는 결과를 보였다.

Table 4
Water absorption test results

Sample	No.	SSD ¹⁾ (g)	OD ²⁾ (g)	Absorption rate (%)	Average (%)
C0	1	309	294	5.10	5.34
	2	310	294	5.44	
	3	308	292	5.48	
C10	1	307	288	6.60	6.63
	2	306	287	6.62	
	3	304	285	6.67	

¹⁾SSD : Surface-Saturated-Dry condition mass, 표건상태의 질량

²⁾OD : Oven-Dry condition mass, 절건상태의 질량

Table 5
Compressive and flexural strength test results

Sample	No.	Compressive strength (MPa)		Flexural strength (MPa)	
		Value	Average	Value	Average
C0	1	33.3	33.1	6.6	6.4
	2	33.4		6.4	
	3	32.6		6.3	
C10	1	28.9	28.7	6.0	5.8
	2	28.6		5.8	
	3	28.6		5.7	

Table 6
Results of concrete block quality test

Subject	Results	Standards	
Dimension (mm)	Width	1,002	1,000 ± 5
	Length	703	700 ± 5
	Height	500	500 ± 5
Compressive strength (MPa)	35.2	≥ 28.0	
Compressive strength after freezing and thawing (MPa)	25.8	≥ 20.0	
Water absorption (%)	5.7	≤ 7.0	

모르타르 및 콘크리트의 탄산화물 치환율에 대한 모든 배합에서 기준 배합(C0) 대비 탄산화물의 치환량이 증가할수록 작업성 및 강도 거동이 감소하는 경향을 나타내었으나, 탄산화물 10 wt.% 치환시 Mock-up scale의 제품 제작 결과 각 콘크리트 2차 제품의 표준에서 제시하는 모든 기준을 만족하였다. 즉, 탄산화물은 원재료 특성에 따른 물/결합재비 및 치환율 제어 공정을 통해 콘크리트 2차 제품의 시멘트 대체제로 활용 가능한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 탄산화물의 콘크리트 2차 제품에서 시

멘트의 대체재로서 적용 가능성 검토 및 최적 배합비 도출을 위해 탈황석고에 이산화탄소를 주입하여 제작된 탄산화물의 결정성 분석 및 미세구조 분석을 통해 화학적·물리적 특성을 측정하였으며, 탄산화물 혼입율별 모르타르 공시체를 제작하여 기초물성을 측정하였다. 이를 통해 콘크리트 2차 제품 적용을 위한 최적 배합비를 도출하여 해당 배합비를 Mock-up scale의 시편에 적용하여 각 제품 표준에 준하여 품질특성 시험을 수행하였으며, 상기 분석을 통한 연구 결과는 다음과 같다.

1) 탄산화물의 주요 구성 산화물은 CaO 및 SO₃이며, X선 회절 분석 결과 주 결정상은 Gypsum(CaSO₄·2H₂O), Portlandite(Ca(OH)₂), Calcite(CaCO₃) 및 Anhydrite(CaSO₄)로 나타났다. 탄산화물의 Gypsum, Portlandite, Anhydrite는 탈황석고의 미반응 CaO와 황산염이 탄산화물의 반건식 제조 공정 중 분사되는 H₂O에 의한 것으로 판단되었다.

2) 탄산화물의 분말도 및 입도분포 측정 결과 일반 시멘트와 유사하며 주요 6대 중금속 또한 불검출되어 콘크리트 2차 제품의 시멘트 대체재로서 활용 가능한 것으로 판단되었다. 또한 2차 제품 특성상 물/결합재비가 25% 이하여야 하지만, 탄산화물의 석고와 같은 주요 구성 물질들의 물을 흡수하는 성질에 기인하여 모든 배합의 물/결합재비는 그 이상으로 제어되었다.

3) 다양한 치환율의 탄산화물을 적용한 모르타르 및 콘크리트 공시체를 제작하여 강도 거동 측정 및 품질 검

사 결과 탄산화물의 혼입량이 증가할수록 강도 거동의 저하를 보였으나 탄산화물 10 wt.% 치환 배합에서 각 제품의 표준이 제시하는 기준을 모두 만족하여 탄산화물의 콘크리트 2차 제품의 시멘트 대체재로서 적용 가능성이 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 중소벤처기업부의 규제자유특구혁신사업육성 지원에 의한 연구임.

References

- [1] S.H. Kim and J.P. Hwang, "The CO₂ emission in the process of cement manufacture depending on CaO content", *J. Korea. Concr. Inst.* 25 (2013) 365.
- [2] Y.K. Kim, "CO₂ emission structure analysis of industrial sector with environmental input-output table 2005", *Environmental and Resource Economics Review.* 20 (2011) 1.
- [3] S.M. Jeong, W.H. Yang and D.C. Park, "An experimental study on the carbonation depth of cemen paste using carbonation reaction accelerator", *J. Rec. Const. Resources* 11 (2023) 349.
- [4] S.C. Shin, J.M. Kim, G.W. Kim and I.G. Kang, "Recycling technology trend of waste concrete powder for carbon neutrality in the cement industry", *J. Rec. Const. Resources* 10 (2022) 465.
- [5] J.W. Park, J.H. Kim, M.H. Lee and C.W. Chung, "Carbonation mechanism of hydrated cement paste by supercritical carbon dioxide", *JKIBC* 18 (2018) 403.
- [6] J.W. Ahn, H.S. Kim, J.S. Cho, G.C. Han, K.S. Han and H. Kim, "Manufacture of ordinary portland cement clinker using cement paste of the waste concrete", *J. Korean Ceram. Soc.* 40 (2003) 804.
- [7] J.T. Park, G.S. Jung, C.H. Kang and H.S. Oh, "The feasibility study for utilization of blended cement as a activator of bottom ash from circulating fluidized bed combustor boiler", *J. Rec. Const. Resources* 8 (2020) 255.
- [8] K.Y. Moon, J.S. Cho, M.K. Choi and K.H. Cho, "Characteristics of manufacturing for special cement using high chlorine by-product", *J. Korean Inst. Resour. Recycl.* 30 (2021) 67.
- [9] C.W. Chung, Y.M. Lee, J.H. Kim and Y.S. Kim, "Investigation of properties of cement mortar using heat treated flue gas desulfurization gypsum", *J. Korea Inst. Build. Constr.* 16 (2016) 497.
- [10] D.Y. Cho, K.B. Park, Y.Y. Woo and B.K. Moon, "A study on asphalt paving filler development from industrial by-products and its characteristics in construction site", *J. Rec. Const. Resources* 4 (2016) 227.
- [11] H.J. Yu, Y.J. Lee, S.K. Seo, Y.S. Chu and W.S. Yum, "Applicability analysis of carbondioxide conversion capture materials produced by desulfurization gypsum for cement admixture", *J. Rec. Const. Resources* 33 (2023) 1.
- [12] I.S. Kim, J.H. Won, K.H. Choi, S.H. Choi, J.G. Lee, J.G. Sohn and K.B. Shim, "Fabrication of the cement for the solidification of the toxic waste using waste concrete powder", *J. Korean Ceram. Soc.* 39 (2002) 1133.
- [13] H.M. Lee and J.Y. Hwang, "Ettringite/thaumasite formation, stability and their effect on deterioration of concrete", *J. Miner. Soc. Korea.* 16 (2003) 75.