

# CO<sub>2</sub> 반응경화 시멘트 활용 모르타르의 양생조건에 따른 역학적 특성

## Mechanical Properties According to Curing Conditions of Mortar Using CO<sub>2</sub> Hardening Cement

서지석<sup>1\*</sup> · 태선규<sup>1</sup> · 이 준<sup>2</sup> · 이봉춘<sup>3</sup>

Ji-Seok Seo<sup>1\*</sup> · Sun-Gyu Tae<sup>1</sup> · Jun Lee<sup>2</sup> · Bong-Chun Lee<sup>3</sup>

(Received September 22, 2023 / Revised October 4, 2023 / Accepted October 4, 2023)

In this study, mortar test specimens were produced by varying the mixing ratio of CO<sub>2</sub> reaction hardening cement (CSC) and general cement (OPC), and the mechanical and carbonation characteristics were evaluated by controlling the primary curing temperature and secondary curing CO<sub>2</sub> pressure. Under all curing conditions, it was observed that the higher the CSC ratio in the binder, the lower the mechanical properties. Specifically, a first curing temperature of 60 °C yielded higher mechanical properties compared to the case of 20 °C, and a greater carbonation penetration depth was also observed. At a first curing temperature of 60 °C, it was noted that the curing pressure and bending strength during the second CO<sub>2</sub> curing were inversely proportional, while the compressive strength showed a proportional relationship. This phenomenon is believed to be due to excessive carbonation, which reduces mechanical properties, and the fact that flexural strength is more sensitive to these properties compared to compressive strength. However, based on the evaluation of the limited curing conditions, it is evident that future test conditions need to be expanded and reviewed more thoroughly.

**키워드** : 탄산화, 양생조건, 이산화탄소 반응경화

**Keywords** : Carbonation, Curing condition, CO<sub>2</sub> hardening

### 1. 서론

시멘트는 제조에 사용한 에너지대비 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량인 탄소집약도가 높은 산업이다. 시멘트를 제조하는 원재료 중 하나인 석회석은 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)을 주성분으로 하고 있으며 시멘트 클링커를 제조하기 위해서는 1,450 °C의 고온을 가하는 소성공정을 통해 석회석의 탈탄산 반응을 일으키는 것이 필수적이다. 석회석은 탈탄산 반응을 통해 소석회(CaO)와 CO<sub>2</sub>로 분리되며 이 때 직접배출되는 CO<sub>2</sub>량은 전체 제조공정의 60 %를 차지하고 있다. 이에 시멘트 산업계는 CO<sub>2</sub>를 비롯한 온실가스의 실질적인 Net-Zero를 달성하고 정부의 탄소중립 2050을 실현하기 위해 많

은 노력을 기울이고 있으며 다양한 기술을 연구하고 있다.

대표적인 기술로는 크게 공정배출 저감기술, 연료 배출 저감기술, 클링커 사용량 저감기술, 저탄소 대체 시멘트 개발 등이 있다. 공정배출 저감기술은 잠재적인 CO<sub>2</sub>를 포함하고 있지 않은 비탄산염 원료를 활용한 결합재를 개발하여 석회석을 대체하는 기술이다. 연료 배출 저감 기술은 시멘트 제조과정 중 많은 에너지가 소모되는 소성공정에서의 에너지를 저감하는 기술이다. 클링커 사용량 저감기술은 소성공정에서 생산되는 클링커를 고효율화하여 사용량을 저감하는 기술이다. 이외에도 탄소를 포집하고 직접활용할 수 있는 CCUS(Carbon dioxide Capture Utilization and Storage) 기술이 있으며 이는 다른 산업에서도 적용가능한 개념으로 시멘트

\* Corresponding author E-mail: jscivil@kcl.re.kr

<sup>1</sup>(재)한국건설생활환경시험연구원 대전충남센터 선임연구원 (Daejeon & Chungnam Center, Korea Conformity Laboratories, 26-34, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34113, Korea)

<sup>2</sup>(재)한국건설생활환경시험연구원 대전충남센터 수석연구원 (Daejeon & Chungnam Center, Korea Conformity Laboratories, 26-34, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34113, Korea)

<sup>3</sup>(재)한국건설생활환경시험연구원 스마트건설재료센터 센터장 (Daejeon & Chungnam Center, Korea Conformity Laboratories, 26-34, 73, Yangcheong 3-gil, Ochang-eup, Cheongwon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, 28115, Korea)

Copyright © 2023 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

산업에서는 광물탄산화 기술을 응용한 이산화탄소 반응경화 시멘트(Calcium Silicate based Cement, 이하 CSC)가 대표적인 기술이다. CSC는 물과 존재 시 CO<sub>2</sub>와 반응하여 경화하는 특성을 지닌 시멘트로서 CS(CaO · SiO<sub>2</sub>), C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>(3CaO · 2SiO<sub>2</sub>), C<sub>2</sub>S(2CaO · SiO<sub>2</sub>), 미반응 CaO 및 SiO<sub>2</sub> 등이 주요성분인 시멘트이다. CSC 내 주요 광물상은 CS 및 C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>로 CO<sub>2</sub>와 반응 시 CaCO<sub>3</sub>와 SiO<sub>2</sub>를 형성하고 결정성장을 통해 경화체의 물성증진에 기여하는 것으로 알려져 있다(Ashraf et al, 2016; Moon et al, 2022; Qian et al, 2016; Svensson et al, 2018). CSC는 현재 국내에서 상용화를 목적으로 개발한 사례가 없어 연구를 통해 개발 및 성능개선을 진행하고 있으며 해외에서는 Solidia Technologies에서 개발한 Solidia Cement가 대표적인 CO<sub>2</sub> 반응경화 시멘트로 알려져 있다.

이 연구에서는 개발한 CSC와 기존 시멘트(Ordinary Portland Cement, 이하 OPC)를 혼합한 결합재 구성비율, 초기양생 조건, CO<sub>2</sub> 가압양생 조건을 변수 요인으로 설정하여 탄산화 양생에 대한 표준 시험체의 역학적 특성을 실험적으로 평가하고 향후 CSC 적용 및 제품화와 표준화를 위한 기초적인 데이터를 제공하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 원재료 특성

시험체는 기타 부재료에 의한 영향을 최소화 하고 CSC에 대한 역학적 특성을 면밀히 고려하기 위해 결합재 및 배합수, 잔골재를 이용한 모르타르를 제작하여 실험을 수행하였다. 시험체에 제조에 사용할 결합재인 CSC는 앞서 기술한 바와 같이 CO<sub>2</sub>와 반응하여 경화하는 특성을 가진 시멘트이며 소요의 성능을 발현하기 위해서는 CO<sub>2</sub> 양생이 필수적이다. OPC는 기존의 모르타르 및 콘크리트를 제조하는데 사용하는 대표적인 결합재로서 배합수에 의해 경화하는 수경성을 가지고 있으며 적정 온도 및 습도에서 양생하여 강도를 발현한다. 현재 CSC는 제품화하기 위한 품질기준이 명확하게 제시되어 있지 않으며 콘크리트 및 모르타르 제조 시 성분에 대한 영향성이 또한 검토된 바가 없기 때문에 기본적인 물성시험은 배합설계를 위한 자료로 사용하기 위한 최소의 시험을 수행하였으며 특성에 영향을 미치지 않는 선에서 KS L 5201 “포틀랜드 시멘트”와 표준 내에서 인용하는 기준 및 방법에 준하여 평가하였다. 결합재의 기본물성은 Table 1에 나타난 바와 같다. 여기서, OPC는 KS 규격을 준수하는 A사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

Table 1. Mechanical properties of binder for mortar

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Loss ignition (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)
CSC	2.81	3,890	2.4	0.2	0.3
OPC	3.14	3,810	0.8	2.2	1.8

혼합수는 결합재가 강도를 발현하는데 유해한 성분이 포함되지 않는 통상의 혼합수를 사용하였으며 KS F 4009 “레디믹스트 콘크리트” 내에서 인용하는 기준 및 방법을 따라 평가하였다. 혼합수의 기본물성은 Table 2에 나타난 바와 같다.

Table 2. Mechanical properties of water for mortar

Material	Soluble evaporation residual content (g/L)	Suspended material content (g/L)	Chloride content (mg/L)	pH
Water	0.1	0.1	51	6.9

잔골재는 ISO 기준사를 토대로 검증되었으며 1,350 ± 5 g의 범위내로 포장된 제품을 사용하였다. ISO 표준사의 기본 물성은 Table 3에 나타난 바와 같다.

Table 3. Mechanical properties of fine aggregate for mortar

Material	Sieve size (mm)		
	Accumulated remain (%) (required)		
	2.0	1.6	1.0
Fine aggregate	0.0 (0)	7.1 (7 ± 5)	33.2 (33 ± 5)
	0.5	0.16	0.08
	66.9 (67 ± 5)	86.3 (87 ± 5)	99.6 (99 ± 1)
	Moisture (%)		SiO <sub>2</sub> contents (%)
	0.03 %	99.3 %	

양생에 사용한 CO<sub>2</sub>는 가압조건을 유지시키기 위해 고압충전한 99.5 % 순도의 가스를 사용하였다.

### 2.2 배합설계 및 양생조건

CSC는 CO<sub>2</sub> 및 혼합수가 동시에 존재할 때 경화하는 결합재로서 혼합수에 의해 경화하는 OPC와는 달리 일반적인 양생으로는 초결 등 경화가 일어나지 않기 때문에 탈형 시 공시체가 파손될 위험이 있다. CO<sub>2</sub> 양생을 효율적으로 수행하기 위해서는 양생 시 공시체의 모든 외면이 노출되어 있어야 하므로 초기양생 후 탈형은 필수적이다. CSC의 초결성능이 보완되면 공시체의 파손 위험

없이 안정적인 양생이 가능하기 때문에 결합재에 CSC와 OPC를 혼합하는 것이 유효한 대책이 될 수 있다. 이 연구에서는 상술한 단점을 보완하기 위해 CSC와 OPC를 혼합한 시험체를 제작하여 안정적인 탈형을 도모하고 CO<sub>2</sub> 양생에 의한 영향성을 검토 및 비교하기 위해 Table 4에 나타낸 바와 같은 모르타르 배합을 적용하여 역학적 특성을 평가하였다.

**Table 4. Mix design of mortar using blended binders**

Mix design	Proportion of binder (%)		W/B	FA/B
	OPC	CSC		
OPC	100	-	0.5	3
CSC30	70	30		
CSC50	50	50		
CSC70	30	70		
CSC100	-	100		

W/B : Water-binder ratio, FA/B : Fine aggregate-Binder ratio

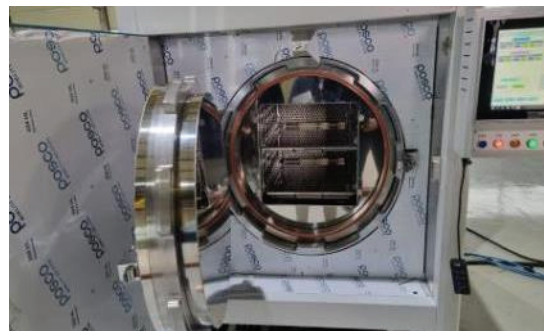
설계한 배합을 활용하여 제작한 공시체는 탈형을 위한 소요의 최소강도 확보를 위해 온도 20 ± 2 °C, 상대습도 95 % 이상을 유지할 수 있는 항온항습챔버에서 초기양생을 실시하였다. CO<sub>2</sub> 양생은 대상이 되는 공시체 또는 제품에 침투하여 이루어지므로 CO<sub>2</sub>의 내·외부 접촉에 영향을 미치는 요인을 제어해야 한다. 해외 CSC 개발사례 조사를 통해 CO<sub>2</sub> 양생 조건을 검토한 결과 CSC 배합설계, 단면의 형상, CO<sub>2</sub> 농도 및 노출시간으로 정리할 수 있다 (Li et al, 2022; Meyer et al, 2019; Sahu and Meininger 2020). 배합설계 요인이 빈배합(Poor mix)일 경우 골재와 같은 부재료의 입도에 의해 자연적으로 발생하는 공극이 CSC 페이스트에 의해 충전(Filling)되지 않으며 이로 인해 발생한 공극은 CO<sub>2</sub>가 침투하는 주요 경로로 활용되어 CSC의 반응경화 물질과 접촉효율이 높아진다. 또한, 단면의 세장비가 높은 경우 CO<sub>2</sub>가 전단면 침투하는 물리적인 거리가 감소하게 되며 배합설계 요인과 마찬가지로 CO<sub>2</sub> 양생 효율이 높아진다. CO<sub>2</sub>의 농도가 높을수록 및 노출하는 시간이 길수록 CSC 반응물질의 접촉하는 시간과 양이 많아지므로 CO<sub>2</sub> 양생이 더 가속화된다. 해당요인 외에 CSC의 CO<sub>2</sub> 반응경화 효율과

관련한 요인은 많으나 양생 설비 내에 압력을 주어 CO<sub>2</sub>를 보다 능동적으로 침투시키길 수 있는 가압양생 조건에 대한 요인은 검토되지 않거나 미미한 경우가 많다. 따라서, CSC 시험체를 제작하기 위해 결합재 비율을 제외한 배합설계, 단면형상, CO<sub>2</sub> 농도 및 양생시간을 동일하게 제어하고 1차 초기양생 온도, 2차 CO<sub>2</sub> 양생 압력을 변수로 한 양생조건을 설계하여 요인별 역학적 특성을 평가하고자 하였다. 적용한 양생조건은 Table 5와 같다. 양생을 위한 장비는 빠른 양생을 위한 가압조건, 양생온도, 고농도의 CO<sub>2</sub>를 적용하기 위해 오토클레이브 형식의 장비를 적용하였으며 전경은 Fig. 1에 나타낸 바와 같다.

CO<sub>2</sub>양생 챔버는 최대압력 20 bar, 최대온도 100 °C내에서 운영이 가능하며 가압용기 내 시험체 거치공간은 370 mm × 335 mm × 500 mm 이다.



(a) Exterior view of equipment



(b) Work chamber in equipment

**Fig. 1. View of CO<sub>2</sub> curing chamber**

**Table 5. Curing condition of mortar specimens**

Curing condition	1 <sup>st</sup> curing			2 <sup>nd</sup> curing			
	Relative humidity (%)	Temp. (°C)	Curing period (hr)	CO <sub>2</sub> concentration (%)	Temp. (°C)	Pressure (Bar)	Curing period (hr)
	95	20	24	99.5	30	6	3
	60	9					
		12					

### 3. 역학적 특성 시험방법

#### 3.1 힘 및 압축특성

CSC 시험체의 배합 및 양생조건에 따른 힘 강도 및 압축강도 특성을 평가하기 위해 KS L ISO 679 “시멘트 시험방법 강도 측정” 내에서 인용하는 기준 및 방법을 따라 평가하였으며 힘 강도와 압축강도 시험을 위한 시험체는 각주형태의 크기 40 mm × 40 mm × 160 mm로 제작하였다. 설계배합 및 양생조건 당 힘 강도는 3개를 1조, 하중제어 속도 50 ± 10 N/s 로 재하하여 측정하였고 압축강도는 힘 강도 후 파단된 시험체에 대하여 6개를 1조, 하중제어 속도 2,400 ± 200 N/s의 속도로 재하하여 측정을 수행했다. 힘 강도 및 압축강도의 식은 각각 다음과 같다.

$$R_f = \frac{1.5F_f l}{b^3} \quad (1)$$

여기서,  $R_f$ 는 힘 강도(MPa)이며  $F_f$ 는 파괴 시 시험체의 중앙에 가한 하중(N),  $l$  및  $b$ 는 각각 힘 지점 사이의 거리(mm), 각주의 직각을 이루는 파단면의 길이(mm)이다.

$$R_c = \frac{F_c}{1,600} \quad (2)$$

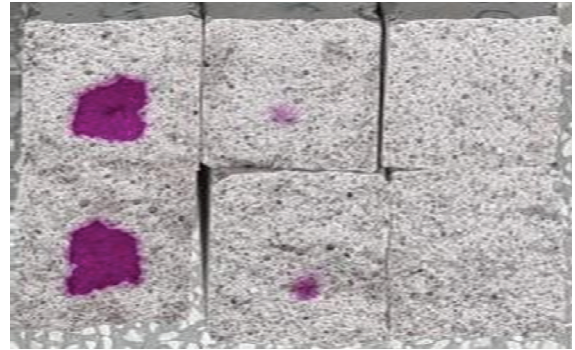
여기서,  $R_c$ 는 압축강도(MPa)이며  $F_c$ 는 최대 파괴 하중(N)이다. 상수인 1,600은 하중 측정 시 가압판 또는 보조판의 면적(mm<sup>2</sup>)이다.

#### 3.2 탄산화 특성

일반적으로 CSC를 이용한 복합체는 탄산화 양생을 통해 중성에 가까운 pH 특성을 가지고 있으나 탄산화 양생 전에는 일반적인 시멘트 복합체와 마찬가지로 페놀프탈레인(Phenolphthalein, C<sub>20</sub>H<sub>14</sub>O<sub>4</sub>) 지시약에 의한 발색특성을 나타낸다. 페놀프탈레인의 발색은 0.0~8.2 pH의 산성과 pH 12를 초과하는 초염기에서는 무색을 나타내나 pH가 음수인 초강산에서는 다홍색, 8.2~12.0 pH의 염기성에서는 자주색을 나타낸다. 사전시험 및 문헌조사를 통해 탄산화 양생 전 1차 양생을 마친 CSC 100 % 적용 시험체의 파단된 단면에 대해 Fig. 2에 나타난 바와 같이 발색정도를 평가한 결과 전단면이 자주색을 띠는 것으로 나타났으며 8.2~12.0 pH 사이의 염기성을 가지고 있는 것을 확인하였다(Jiménez et al. 2021).



(a) Before CO<sub>2</sub> curing



(b) After CO<sub>2</sub> curing

Fig. 2. View of discoloration appearance of phenolphthalein in mortar specimens using CSC binder (CSC100)

탄산화 특성을 평가하기 위해 KS F 2096 “콘크리트 탄산화 깊이 측정방법” 내에서 인용하는 기준 및 방법을 준용하여 평가하였으며 지시약을 제조하였다. 지시약의 제조는 95 % 에탄올 90 mL 을 용매로 페놀프탈레인 분말 1 g을 용질로 제조하였으며 물을 첨가하여 100 mL로 맞춘 것을 사용하였다. 탄산화 정도에 따라 발색 깊이가 다르기 때문에 조건별로 이를 측정하면 CO<sub>2</sub>를 이용하는 2차 탄산화 양생의 성숙도를 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

탄산화 깊이의 측정은 힘 강도를 통해 파단한 시험체를 이용하여 압축시험 전 제조한 페놀프탈레인 지시약을 단면에 분무한 후 수 분 내 발색이 완전해지면 단면을 구성하는 네 변의 중앙값을 기준으로 탄산화된 깊이를 측정 후 평균하였다.

### 4. 실험결과

#### 4.1 시험체 탈형 및 초기강도 특성

시험체 제작은 표준배합 모르타르를 제작하여 몰드에 타설하였으며 초기양생은 상대습도를 95 %로 제어하고 온도를 각각 20 °C,

60 °C로 설정하여 24시간 동안 실시하였다.

CSC의 CO<sub>2</sub> 기경특성으로 인해 OPC 배합의 초결이 일어나는 시간 동안 경화가 완료되지 않아 초기양생은 탈형을 진행하지 않은 채로 수행하였다. 24시간 후 탈형했을 때 나타난 유해한 외관상의 변화는 모든 양생온도 조건에서 찾아볼 수 없었으나 총 결합재 대비 CSC 비율이 높은 배합의 탈형 시 충격에 취약한 모서리 부분이 쉽게 변형되는 것을 확인할 수 있었으며 총 결합재 대비 CSC 비율이 낮을수록 이러한 경향은 나타나지 않았다. 또한, 양생온도가 60 °C일 경우 20 °C에 비해 OPC의 초결이 더 빨리 발현되는 것과 마찬가지로 CSC 배합에서도 다소 경화가 촉진되어 탈형에 의한 변형이 적게 일어나는 것을 확인하였으며 시험체의 제작 전 경과 양생전경은 Fig. 3과 같다. CSC 비율이 100 %인 배합에서는 상대습도 95 % 및 양생온도 20 °C에서 24시간 양생 직후의 휨 강도는 매우 미미하여 측정할 수 없었으며 압축강도는 평균 0.42 MPa로 나타났으나, 상대습도 및 양생시간이 동일하고 양생온도가 60 °C일 경우 휨 및 압축강도가 각각 평균 0.42 MPa, 1.02 MPa로 나타나 초기 양생온도가 높을수록 어느정도 강도를 발현했다.

### 4.2 휨 및 압축강도 결과

휨 및 압축강도는 1차양생 조건의 온도와 2차양생 조건의 압력을 변수로 측정하였다. 결과의 비교를 위해 OPC로 제작한 표준배합 모르타르를 28일간 수증양생하여 측정한 휨 및 압축강도 결과와 대조하였으며 그 결과는 Fig. 4에 나타났다.

CSC를 적용한 모르타르의 휨 강도는 1차 양생온도 20 °C보다 60 °C일 때 보다 높았으며 결합재 중 CSC 비율이 높을수록 휨 강도가 낮아지는 경향을 나타냈다. 그러나, 1차 양생온도 60 °C에서 CSC 비율이 50 %를 넘어가는 경우 2차 양생압력 12 bar에서 강도가 점차 증가하는 경향을 확인하였다. 이는 탄산화의 경향이 CSC 뿐만 아니라 OPC에도 영향을 미치기 때문인 것으로 생각되며 OPC 수화물인 Ca(OH)<sub>2</sub>가 CaCO<sub>3</sub>로 변환하는 메커니즘과 CS 및 C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>에 의해 CaCO<sub>3</sub>를 형성하는 메커니즘이 반응속도에 따라서 서로 상이하여 보다 높은 압력조건에서 CSC 비율이 높은 경우 강도 발현이 더 원활히 되기 때문으로 판단된다. 압축강도의 경우 휨 강도와 마찬가지로 1차 양생온도 조건이 60 °C일 때가 더 우수

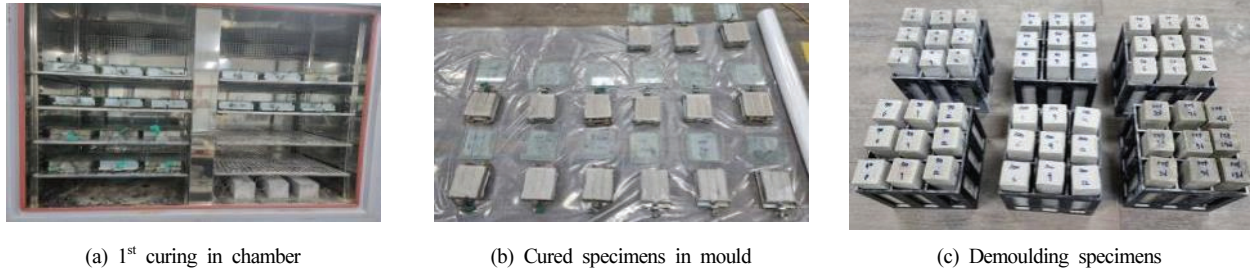


Fig. 3. View of curing and demoulding specimens

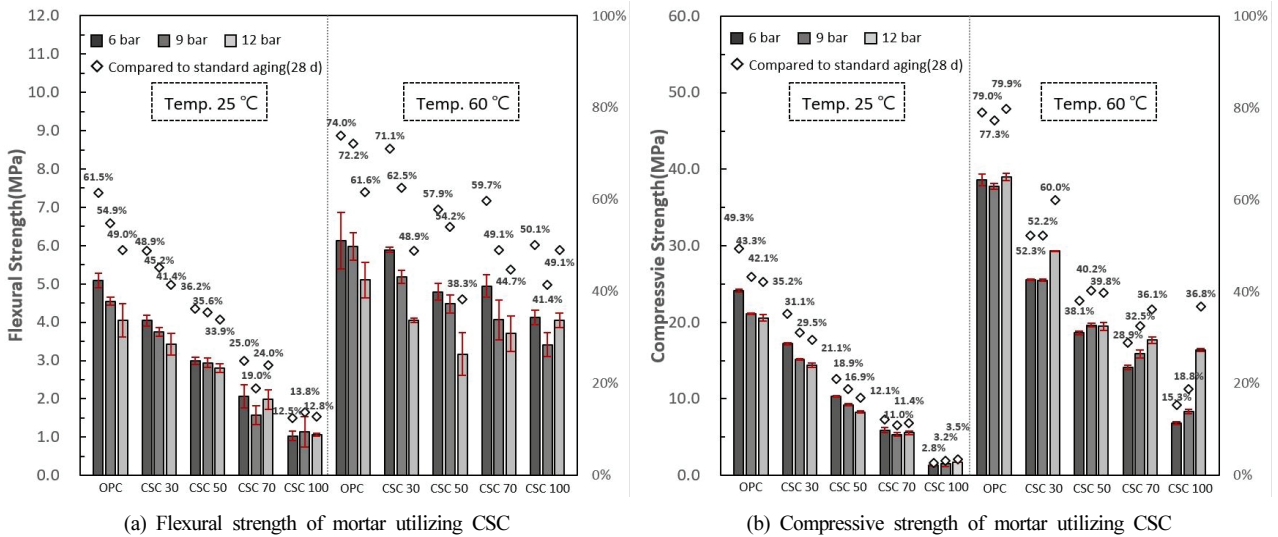


Fig. 4. Mechanical property results of CSC mortar

한 강도특성을 나타냈으며 CSC 비율이 높을수록 압축 강도가 낮아지는 경향을 나타냈다. 또한, 1차 양생온도 60 °C에서 CSC 비율이 50 %를 넘어가는 경우 2차 양생압력 12 bar에서 강도 감소 경향이 다소 완만해지는 것을 확인하여 힘 강도와 유사한 경향을 나타냈다.

1차 양생온도 60 °C, 같은 CSC 치환율 조건에 대해 양생압력이 변화할 경우의 경향은 힘 강도와 압축 강도경향이 다소 다른 것으로 나타났다. 힘 강도의 경우 CSC100을 제외하면 모든 배합조건에서 양생압력이 증가할수록 힘 강도가 감소하였으나 압축 강도의 경우 모든 배합조건에서 양생압력이 증가할수록 대부분의 조건에서 압축 강도 또한 증가하였으며 CSC100 조건에서 가장 큰 폭으로 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 힘 강도와 압축 강도측정시 적용되는 응력이 다른 것과 탄산화 시 OPC 수화물인 C-S-H gel이 탄산화에 따라 약화되는 경향이 있기 때문인 것으로 판단된다. C-S-H gel의 탄산화 과정은 용해, 확산, 반응의 3단계를 거치게 되며 최종적으로 완전히 미정질 탄산칼슘이 생성되고 C-S-H gel 구조를 와해하여 기계적 특성이 약화된다고 보고하고 있다(Liu, et al. 2022). 한편, 힘 시험 시 시험체에 작용하는 응력은 압축과 인장응력으로 전통적인 시멘트 복합체는 압축응력에 비해 인장응력이 매우 낮게 발현된다. 따라서, OPC 수화물인 C-S-H gel의 탄산화 가속화 되는 환경에서는 강도가 저하될 가능성이 있으며 힘 강도의 경우 압축 응력에 비해 상대적으로 더 민감한 인장 응력이 큰 폭으로 감소하여 힘 강도의 저하를 가져올 수 있을 것으로 판단된다. 반면, 압축 강도의 경우 순수 압축 응력만이 적용되기 때문에 C-S-H gel에 의한 구조적 약화가 미치는 영향이 크지 않고 CSC에 의한 강도발현 성능이 이를 압도하여 압축 강도가 점진적으로 증가되기 때문으로 판단된다. 이는 CSC의 치환비율이 50 %

이상이 될 경우 유의미한 강도증감 경향이 완화되는 것으로서 뒷받침 할 수 있다. 다만, CO<sub>2</sub> 양생에 의한 시멘트 복합체 내의 성상 변화는 매우 복잡하고 온도, 습도, 시간 등에 의해 생성물의 종류와 상도 크게 변화할 수 있다(Li et al. 2020). 따라서, 본 연구에서 적용하는 양생조건에 한해서만 참고해야할 것으로 판단되며 향후 2차 CO<sub>2</sub> 양생시간을 증가시킨 경우에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

### 4.3 탄산화 결과

탄산화 결과는 힘 및 압축 강도를 측정하기 위해 적용했던 변수와 동일하며 힘 시험 직후 페놀프탈레인 지시약을 사용하여 각 단면에 분무하여 탄산화 정도를 평가하였으며 그 결과는 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타냈다.

CSC를 적용한 모르타르의 탄산화 깊이는 1차 양생온도 20 °C보다 60 °C일 때 보다 높았으며 결합재 중 CSC 비율이 높을수록 탄산화 깊이가 증가하는 경향을 나타냈다. 또한, 1차 양생온도 60 °C에서 CSC 비율이 70 %를 넘어가는 경우 탄산화 깊이의 증가경향이 다소 완화되는 것으로 나타났으며 양생압력이 증가할수록 탄산화 깊이도 비례하였으나 CSC 100에서는 그 차이가 미미하였다. 이는 양생압력이 높을수록 탄산칼슘 등의 반응생성물이 시험체의 기공특성을 더 치밀하게 하여 CO<sub>2</sub>의 확산이 어려워졌기 때문으로 판단된다. 다만, 시멘트 복합체의 탄산화 특성은 CO<sub>2</sub>의 농도와 압력 뿐만 아니라 시간 의존적으로 증가하므로 현 조건보다 CO<sub>2</sub> 양생시간을 증가시킬 경우 탄산화 깊이가 더 증가할 수 있을 것으로 판단된다. 1차 양생온도 20 °C일 경우의 탄산화 깊이는 모든 조건에서 5 mm 미만의 탄산화 깊이가 분포하고 있으나 경향성

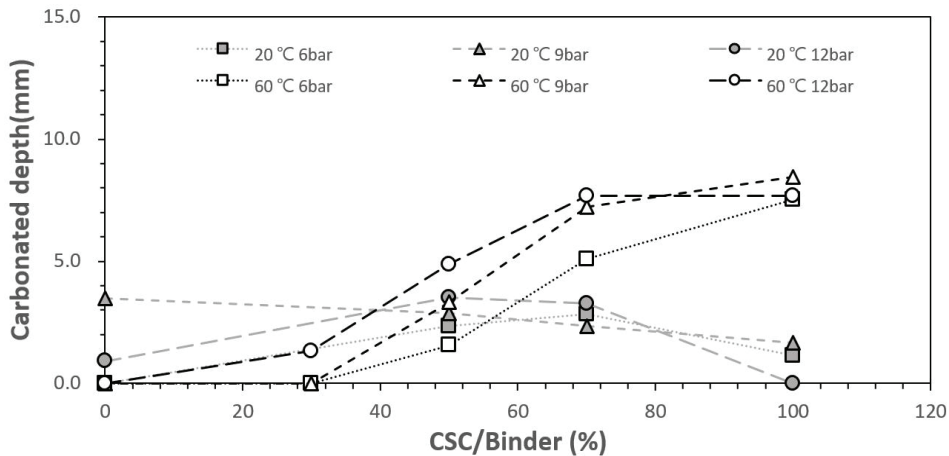


Fig. 5. Carbonated depth results of CSC Mortar

을 확인할 수 없었다.

1차 양생온도가 20 °C일 경우 페놀프탈레인에 의한 발색이 단면 내 연속성 없이 분포되는 양상을 나타냈으며 CSC 치환비율이 30 % 미만에서는 1차 양생온도 20 °C가 60 °C에 비해 탄산화 깊이가 더 큰 것으로 보이거나 전술한 바와 같이 경향성을 보이는 깊이 분포 연속성을 확인할 수 없었다. 이는 1차 양생온도 20 °C에서 OPC 수화생성물에 의한 공극이 60 °C에 비해 상대적으로 치밀하지 않아 보다 빠른 침투를 유도하는 것과 CSC 비율이 높아질수록 1차 양생온도 60 °C에서 20 °C에 비해 CO<sub>2</sub>와 반응하는 생성물의 비율이 높은 것이 복합적으로 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

OPC 수화생성물에 의한 콘크리트의 탄산화는 Ca(OH)<sub>2</sub>, C-S-H gel, 미반응 클링커 광물을 대상으로 진행되나 C-S-H gel의 경우 명확한 화학량론이 아직 밝혀지지 않았으며 본 연구에서 적용한 CSC의 경우도 마찬가지로 OPC와 혼합했을 때의 반응에 대해 연구된 바가 없어 탄산화 깊이에 대한 평가하는 실험적으로 평가하는 것이 한계이기 때문에 이를 보완하기 위한 연구가 필요하다.

탄산화 깊이와 역학적 특성에 대한 연관성을 확인해보기 위해 Fig. 7과 같이 연관성을 나타냈다. 탄산화 깊이 및 압축강도는 페놀프탈레인에 의한 발색 경계가 선명한 CSC 치환비율이 50 % 이상인 배합에 대해서 비교하였으며 역학적 특성 중 활용빈도가 비교

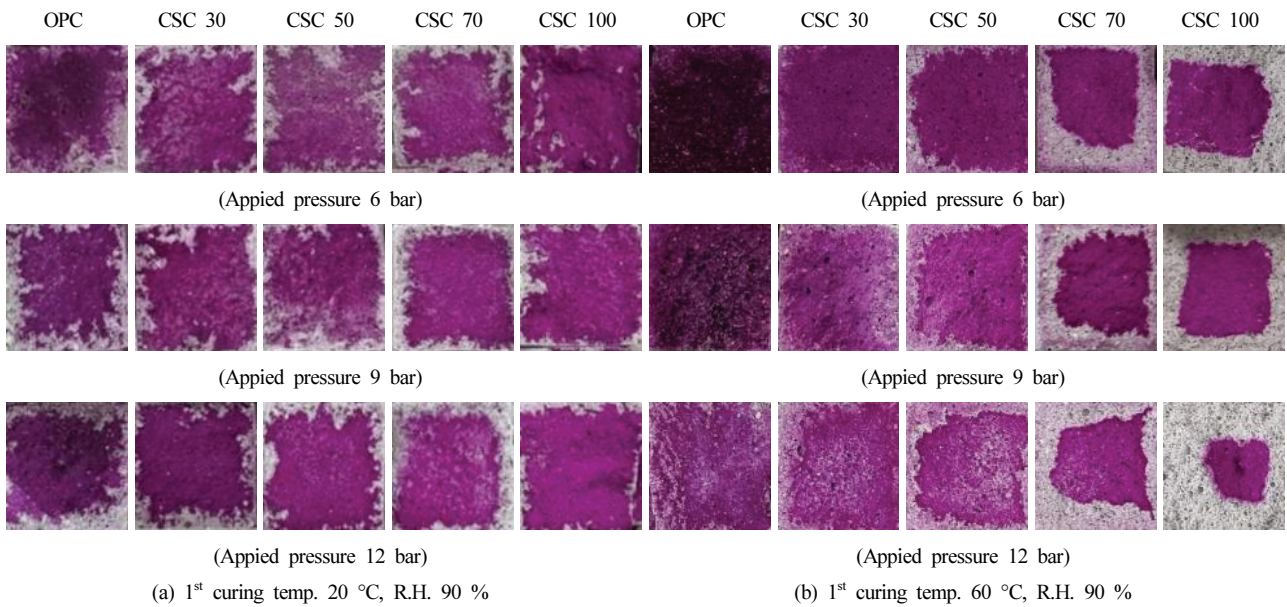


Fig. 6. Results of phenolphthalein spray test on mortar cross section with CO<sub>2</sub> curing applied

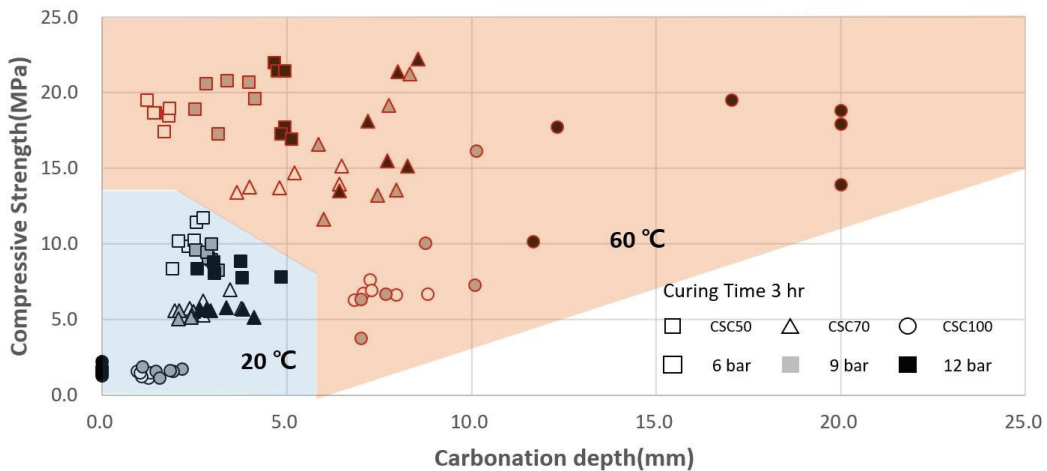


Fig. 7. Compressive strength comparison between carbonation depth

적 높고 강도 감소 요인이 비교적 적은 압축 강도를 활용하여 그 특성을 분명히 하고자 하였다. 1차 양생온도 20 °C 영역에서는 압축 강도와 탄산화 깊이의 분포가 매우 작았으나 1차 양생온도 60 °C 영역에서는 매우 광범위하게 분포하는 것을 확인할 수 있으며 이러한 양상은 1차 양생온도 및 CO<sub>2</sub> 압력이 높아짐에 따라 강도 및 탄산화 깊이와 같은 수치가 더 증가할 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 그러나, 2차 CO<sub>2</sub> 양생 시간이 3시간인 것과 시험체 적용한 모르타르 시험체의 단면이 40 mm 이내에서만 적용된 점을 고려해야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 반응경화 시멘트인 CSC와 일반 시멘트인 OPC의 혼합비율에 따라 모르타르 시험체를 제작하고 1차 양생온도 및 2차양생 CO<sub>2</sub> 압력을 제어하여 역학적 특성과 탄산화 특성에 대해 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 1차 양생온도를 20 °C, 60 °C 제어했을 경우 시험체 탈형 시 손상이 적은 온도조건은 60 °C 였으며 결합재 비율 중 OPC가 우세할수록 초기강도가 확보되어 탈형이 더 원활하게 이루어지는 것을 확인하였다.
2. 휨 강도 및 압축강도는 CSC 치환비율이 높을수록 1차 양생온도 및 2차 CO<sub>2</sub> 양생압력 조건에 상관없이 감소하였으나 이는 2차 CO<sub>2</sub> 양생 3시간 기준으로 향후 양생 시간이 증가할 경우 강도가 증진될 수 있다.
3. 휨 강도는 1차 양생온도 60 °C 일 때 2차 CO<sub>2</sub> 양생압력과 반비례하였으나 결합재의 CSC 치환비율이 50 % 이상일 때 양생압력 대비 휨 강도 감소율이 다소 완화되었으며 1차 양생온도 20 °C일 때는 2차 CO<sub>2</sub> 양생압력이 증가할수록 대부분의 휨 강도가 감소하였다.
4. 압축 강도는 1차 양생온도 60 °C일 때 2차 CO<sub>2</sub> 양생압력과 비례하였으며 CSC 치환비율이 50 % 이상일 때 양생압력 대비 압축 강도 증가율이 큰폭으로 나타났다. 반면, 1차 양생온도 20 °C일 때는 2차 CO<sub>2</sub> 양생압력이 증가할수록 압축강도가 감소하는 경향을 나타냈다.
5. 탄산화 깊이는 1차양생 온도 60 °C에서 CSC 치환비율과 2차 CO<sub>2</sub> 양생 압력에 비례하였으며 1차양생 온도 20 °C에서는 경향성을 나타내지 않았다.

## Conflicts of interest

None.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 이산화탄소반응경화 시멘트제조기술사업의 지원에 의해 수행되었습니다. (과제번호 RS-2022-00155521)

## References

- Ashraf, W., Olek, J., Atakan, V. (2016). Carbonation reaction kinetics, CO<sub>2</sub> sequestration capacity, and microstructure of hydraulic and non-hydraulic cementitious binders, *Proceedings of the Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Las Vegas, NE, USA, 7-11.
- Jiménez, C.P., Jain, J., Sagüés, A., Alexander, C.L. (2021). Improvement of corrosion related durability of steel reinforcement in a novel concrete formulation, *NACE CORROSION*, D111S 044R005.
- Li, N., Mo, L., Unluer, C. (2022). Emerging CO<sub>2</sub> utilization technologies for construction materials: a review, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, **65**, 102237.
- Li, Y., Liu, W., Xing, F., Wang, S., Tang, L., Lin, S., Dong, Z. (2020). Carbonation of the synthetic calcium silicate hydrate(CSH) under different concentrations of CO<sub>2</sub>: chemical phases analysis and kinetics, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, **35**, 303-313.
- Liu, X., Feng, P., Cai, Y., Yu, X., Yu, C., Ran, Q. (2022). Carbonation behavior of calcium silicate hydrate(CSH): Its potential for CO<sub>2</sub> capture, *Chemical Engineering Journal*, **431**, 134243.
- Meyer, V., Sahu, S., Dunster, A. (2019). Properties of solidia cement and concrete, *Proceedings of the 1st International Conference on Innovation in Lowcarbon Cement & Concrete Technology*, London, UK, 24-26.
- Moon, K.Y., Kim, B.R., Lee, S.H., Choi, M.K., Cho, K.H., Cho, J.S. (2022). Manufacturing properties and hardening characteristic of CO<sub>2</sub> reactive hardening cement, *Resources Recycling*, **31(6)**, 52-59 [in Korean].
- Qian, B., Li, X., Shen, X. (2016). Preparation and accelerated carbonation of low temperature sintered clinker with low Ca/Si



ratio, Journal of Cleaner Production, **120**, 249–259.  
 Sahu, S., Meininger, R.C. (2020). Sustainability and durability of solidia cement concrete, Concrete International, **42(8)**, 29–34.  
 Seifritz, W. (1990). CO<sub>2</sub> disposal by means of silicates, Nature, **345(6275)**, 486–486.

Svensson, K., Neumann, A., Menezes, F.F., Lempp, C., Pöllmann, H. (2018). The conversion of wollastonite to CaCO<sub>3</sub> considering its use for CCS application as cementitious material, Applied Sciences, **8(2)**, 304.

### CO<sub>2</sub> 반응경화 시멘트 활용 모르타르의 양생조건에 따른 역학적 특성

이 연구에서는 CO<sub>2</sub> 반응경화 시멘트인 CSC와 일반 시멘트인 OPC의 혼합비율에 따라 모르타르 시편체를 제작하고 1차 양생온도 및 2차양생 CO<sub>2</sub> 압력을 제어하여 역학적 특성과 탄산화 특성에 대해 평가하였다. 모든 양생조건에서 CSC 비율이 높을수록 역학적 특성이 감소하는 것으로 나타났다. 1차 양생온도가 60 °C인 경우가 20 °C인 경우보다 더 높은 역학적 특성을 나타냈으며 탄산화 침투 깊이 또한 더 큰 것으로 나타났다. 2차 CO<sub>2</sub> 양생의 양생압력과 힘 강도는 반비례하였으나 압축강도는 비례하는 관계로 나타났다. 이는 과도한 탄산화가 오히려 역학적 특성을 감소하는 것에 기인한 것과 힘 강도가 압축강도에 비해 이러한 특성에 더 민감하기 때문인 것으로 판단된다. 다만, 제한 양생조건에 대한 평가결과로 향후 시험조건을 확장하여 면밀한 검토가 필요하다.