

# CO<sub>2</sub> 반응경화 시멘트를 혼입한 페이스트의 탄산화 양생에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on Carbonation Induction in Paste with CO<sub>2</sub> Reactive Cement

김영진<sup>1</sup> · 류동우<sup>2\*</sup>

Kim, Young-Jin<sup>1</sup> · Ryu, Dong-Woo<sup>2\*</sup>

**Abstract** : After the Second Industrial Revolution, as global warming caused by environmental issues has intensified, the CO<sub>2</sub> emissions from the cement industry have become an urgent challenge. Therefore, this study aimed to reduce and utilize CO<sub>2</sub> emissions by using CO<sub>2</sub>-reducing Calcium Silicate Cement.

**키워드** : 이산화탄소 양생, 칼슘실리케이트시멘트, 탈석회화

**Keywords** : CO<sub>2</sub> curing, calcium silicate cement, decalcification

## 1. 서론

### 1.1 연구의 목적

제2차 산업혁명 이후 CO<sub>2</sub> 배출량의 증가에 기인한 지구 온난화로 인해 인류의 생활환경이 위협받고 있다. 국제사회는 지구온난화 문제를 해결하기 위해 2015년 파리협정을 통해 기후체제를 수립하며 2050 탄소중립을 달성하겠다는 목표를 세웠다. 시멘트 산업은 CO<sub>2</sub>를 대량 방출하는 고탄소 배출업종으로 분류되고 있다. 시멘트 생산과정 중 1450°C의 소성과정에서 약 39%의 CO<sub>2</sub>를 배출하고 있으며, 시멘트 주 원료인 석회석의 탈탄산 과정에서 약 60%의 CO<sub>2</sub> 배출되고 있다. 시멘트의 생산과정과 양생과정 중 CO<sub>2</sub>를 저감 및 활용하기 위해 Rankinite와 Wollastonite로 구성된 CO<sub>2</sub> 반응경화형 시멘트인 Calcium Silicate Cement(이하, CSC)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. CSC의 생산은 OPC 대비 석회석 사용량 감소 및 소성온도(1250°C) 저하로 인해 최대 약 70%의 CO<sub>2</sub> 배출량 감축이 가능하며, 또한 탄산화 양생 과정을 통한 추가적인 CO<sub>2</sub> 고정화로 CO<sub>2</sub> 감축을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 CSC를 활용한 시멘트 2차 제품을 개발을 목표로 CSC 치환율 및 CO<sub>2</sub> 농도 조건을 달리하여 최적의 CSC혼입률 및 탄산화 양생 조건을 도출하기 위해 압축강도 및 탄산화 깊이를 측정하였다.

## 2. 실험방법 및 결과

### 2.1 실험방법

CSC 혼입 페이스트 일반적인 시멘트 2차 제품 제조 시 범용적으로 사용하고 있는 고로슬래그시멘트(이하, BSC)와 CSC를 사용하였다. CSC혼입률을 BSC 대비 0, 50, 100% 내할치환하였으며, W/B = 0.36으로 혼합하여 50 × 50 × 50mm<sup>3</sup> 크기로 제작하여 실험을 진행하였다. 이후 전 양생으로 증기양생(500°C·h)을 실시한 후, 탄산화 양생을 CO<sub>2</sub> 농도(20, 99%) 및 양생 기간(4, 8, 12, 24시간)으로 나누어 실시하였으며 압축강도 및 탄산화 깊이를 측정하였다.

### 2.2 실험결과

페이스트 실험체의 압축강도 측정결과는 그림 1에 나타내었다. 측정결과 P-CSC0의 경우 CO<sub>2</sub> 농도 20% 탄산화 양생 4시간에서 압축강도의 변화는 크게 나타나지 않았으며 8시간에서 압축강도가 약 9MPa 증가하였으나, 탄산화 양생 12시간 이후에는 8시간 대비 약 1.2MPa 저하하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 고로슬래그시멘트의 Ca(OH)<sub>2</sub>의 탄산화 이후 C-S-H겔의 탄산화가 진행되어 탈석회화로 인해 강도가 소폭 저하된 것으로 판단된다. 한편 CO<sub>2</sub> 농도 99%의 경우에는 탄산화 양생 4시간부터 압축강도가 증가하였으며 탄산화 양생 8시간에서 압축강도가 소폭 저하한 후 증가하는 경향이 나타나 CO<sub>2</sub> 농도 20% 결과와 동일한 사유로 판단된다. P-CSC50 배합의 경우 CO<sub>2</sub> 농도 20% 조건에서 17.62 ~ 22.5MPa, CO<sub>2</sub> 농도 99% 조건에서는 20.89 ~ 24.56MPa로 CO<sub>2</sub> 농도 99% 조건보다 탄산화

1) 대전대학교, 직위

2) 대전대학교, 교수, 교신저자(dwryu@daejin.ac.kr)

깊이가 증가하였음에도 불구하고 평균 2MPa의 낮은 압축강도 발현특성을 나타내었다. 이는 콘크리트 심부로의 충분한 CO<sub>2</sub> 확산이 이루어질 경우 표층부에서만 탄산화가 이루어진 경우보다 C-S-H의 탄산화 영역의 증대로 인해 오히려 역학적 특성이 저하된 것으로 판단된다[1]. 반면 CO<sub>2</sub> 농도 99% 조건에서는 표층부에서 치밀한 CaCO<sub>3</sub>층을 형성함으로써 내부로의 CO<sub>2</sub> 확산이 저하되고 이에 따라 내부의 CSC 탄산화 반응 및 C-S-H 탈석회화 구간이 감소함으로써 압축강도가 증가된 것으로 판단된다. P-CSC100 배합의 경우 증기 양생 직후에는 약 1.3MPa의 압축강도를 보여 수화반응이 이루어지지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이후 탄산화 양생 시 CO<sub>2</sub> 농도 20% 조건에서 탄산화 양생 12시간 이후 압축강도와 탄산화 깊이가 점차 증가하는 경향을 보이며, 탄산화 양생 24시간에 압축강도가 약 9.5MPa로 급격하게 증가한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 CO<sub>2</sub> 농도 99% 조건에서는 탄산화 양생 24시간까지 압축강도 발현과 탄산화 깊이가 증가하는 것을 확인할 수 없었다. 이는 고농도의 CO<sub>2</sub> 확산에 의해 반응 초기에 시험체 표층부의 급격한 탄산화로 생성된 CaCO<sub>3</sub>이 미세공극을 충전시킴에 따라 CO<sub>2</sub> 확산이 저하되어 나타난 결과로 판단된다[2].

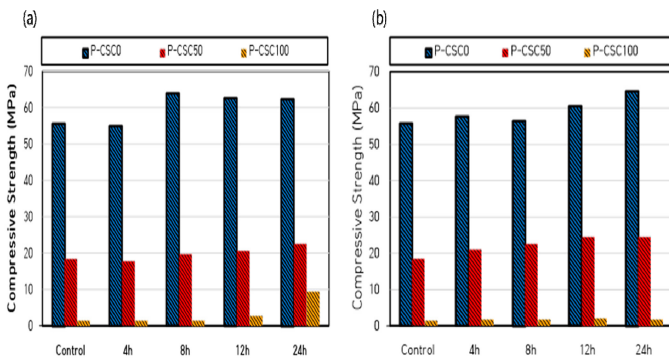


그림 1. 압축강도 측정결과 (a) CO<sub>2</sub> 20% (b) CO<sub>2</sub> 99%

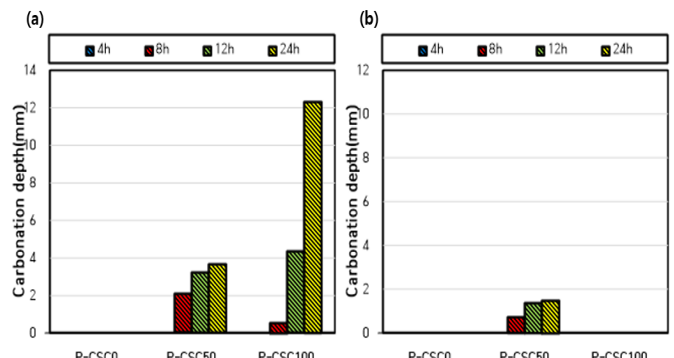


그림 2. 탄산화 깊이 측정결과 (a) CO<sub>2</sub> 20% (b) CO<sub>2</sub> 99%

### 3. 결론

CSC 혼입 페이스트의 실험결과 탄산화 양생 시 압축강도는 증가하는 경향을 보였으나 P-CSC0 배합의 경우 강도저하 구간이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 BSC 기반 수화생성물인 C-S-H의 탈석회화에 의해 강도감소 구간이 나타난 것으로 판단된다. 또한 P-CSC50 배합의 경우 CSC에 의해 탄산화 진행에 따른 강도증진이 예상되나, BSC 수화생성물인 C-S-H의 탈석회화가 진행됨에 따라 강도증진 효과가 상쇄된 것으로 판단된다. P-CSC100 배합의 경우 CO<sub>2</sub> 농도 20%와 달리 CO<sub>2</sub> 농도 99%조건에서 강도증진이 전혀 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있었으며 이는 반응 초기 고농도의 CO<sub>2</sub> 확산에 의해 시험체 표층부의 급격한 탄산화로 생성된 CaCO<sub>3</sub>이 미세공극을 충전시킴에 따라 CO<sub>2</sub> 확산이 저하되어 나타난 결과로 판단된다.

추후 연구를 통해 CO<sub>2</sub> 농도에 따른 탄산화 양생 시 시험체 표층부의 미세구조 분석을 통해 CO<sub>2</sub> 확산에 따른 역학적 특성 변화를 분석하며, 24시간 이후 장기적인 양생을 실시하여 CSC의 종국강도 확인을 추가적으로 평가하고자 한다.

### 감사의 글

본 논문은 2023년 산업통상자원부 국가연구개발사업(과제번호 : RS-2023-00155521)의 일환으로 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Biqin Dong, Qiwen Qiu, Jiaqi Xiang, Canjie Huang, Feng Xing, Ningxu Han. Study on the carbonation behavior of cement mortar by electrochemical impedance spectroscopy. *Materials*. 2014. p. 218-231.
2. Hongzhi Cui, Waiching Tang, Wei Liu, Zhijun Dong, Feng Xing. Experimental study on effects of CO<sub>2</sub> concentrations of concrete carbonation and diffusion mechanisms. *Construction and Building Materials*. 2015. p. 522-527.