

CO₂ 반응경화 시멘트를 혼입한 페이스트의 탄산화 양생에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Carbonation Induction in Paste with CO₂ Reactive Cement

김영진¹ · 류동우^{2*}

Kim, Young-Jin¹ · Ryu, Dong-Woo^{2*}

Abstract : After the Second Industrial Revolution, as global warming caused by environmental issues has intensified, the CO₂ emissions from the cement industry have become an urgent challenge. Therefore, this study aimed to reduce and utilize CO₂ emissions by using CO₂-reducing Calcium Silicate Cement.

키워드 : 이산화탄소 양생, 칼슘실리케이트시멘트, 탈석회화

Keywords : CO₂ curing, calcium silicate cement, decalcification

1. 서론

1.1 연구의 목적

제2차 산업혁명 이후 CO₂ 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 CO₂를 대량 방출하는 고탄소 배출업종으로 분류되고 있다. 시멘트 생산과정 중 1450°C의 소성과정에서 약 39%의 CO₂를 배출하고 있으며, 시멘트 주 원료인 석회석의 탈탄산 과정에서 약 60%의 CO₂ 배출되고 있다. 시멘트의 생산과정과 양생과정 중 CO₂를 저감 및 활용하기 위해 Rankinite와 Wollastonite로 구성된 CO₂ 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 CO₂ 배출량 감축이 가능하며, 또한 탄산화 양생 과정을 통한 추가적인 CO₂ 고정화로 CO₂ 감축을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 CSC를 활용한 시멘트 2차 제품을 개발을 목표로 CSC 치환율 및 CO₂ 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 × 50mm³ 크기로 제작하여 실험을 진행하였다. 이후 전 양생으로 증기양생(500°C·h)을 실시한 후, 탄산화 양생을 CO₂ 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 CO₂ 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)₂의 탄산화 이후 C-S-H겔의 탄산화가 진행되어 탈석회화로 인해 강도가 소폭 저하된 것으로 판단된다. 한편 CO₂ 농도 99%의 경우에는 탄산화 양생 4시간부터 압축강도가 증가하였으며 탄산화 양생 8시간에서 압축강도가 소폭 저하한 후 증가하는 경향이 나타나 CO₂ 농도 20% 결과와 동일한 사유로 판단된다. P-CSC50 배합의 경우 CO₂ 농도 20% 조건에서 17.62 ~ 22.5MPa, CO₂ 농도 99% 조건에서는 20.89 ~ 24.56MPa로 CO₂ 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 CO₂ 확산이 이루어질 경우 표층부에서만 탄산화가 이루어진 경우보다 C-S-H의 탄산화 영역의 증대로 인해 오히려 역학적 특성이 저하된 것으로 판단된다[1]. 반면 CO₂ 농도 99% 조건에서는 표층부에서 치밀한 CaCO₃층을 형성함으로써 내부로의 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 농도 99% 조건에서는 탄산화 양생 24시간까지 압축강도 발현과 탄산화 깊이가 증가하는 것을 확인할 수 없었다. 이는 고농도의 CO₂ 확산에 의해 반응 초기에 시험체 표층부의 급격한 탄산화로 생성된 CaCO₃이 미세공극을 충전시킴에 따라 CO₂ 확산이 저하되어 나타난 결과로 판단된다[2].

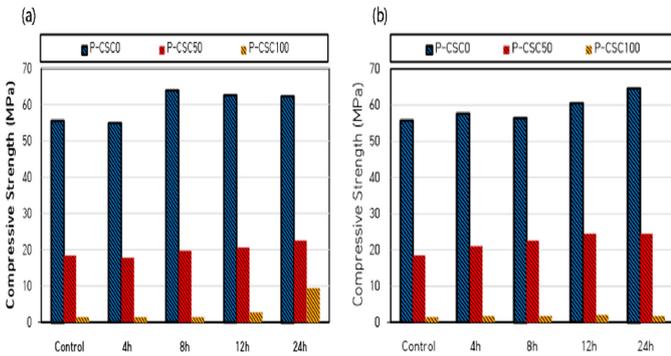


그림 1. 압축강도 측정결과 (a) CO₂ 20% (b) CO₂ 99%

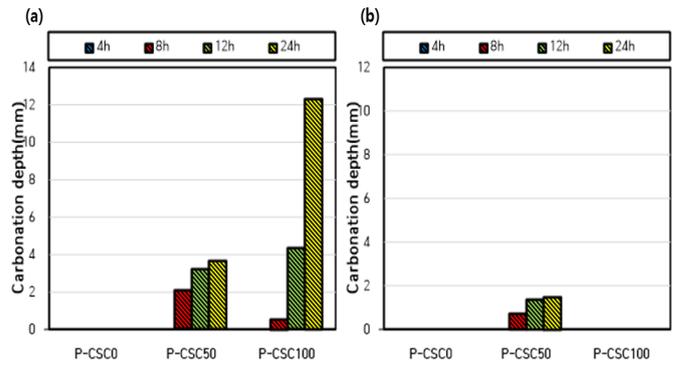


그림 2. 탄산화 깊이 측정결과 (a) CO₂ 20% (b) CO₂ 99%

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 CO₂ 농도 20%와 달리 CO₂ 농도 99%조건에서 강도증진이 전혀 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있었으며 이는 반응 초기 고농도의 CO₂ 확산에 의해 시험체 표층부의 급격한 탄산화로 생성된 CaCO₃이 미세공극을 충전시킴에 따라 CO₂ 확산이 저하되어 나타난 결과로 판단된다.

추후 연구를 통해 CO₂ 농도에 따른 탄산화 양생 시 시험체 표층부의 미세구조 분석을 통해 CO₂ 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 CO₂ concentrations of concrete carbonation and diffusion mechanisms. *Construction and Building Materials*. 2015. p. 522-527.