

산업부산물을 사용한 콘크리트 벽돌의 CO₂ 양생 후 탄산화 평가

Carbonation Evaluation After CO₂ Curing of Concrete Bricks Using Industrial by-products

문 훈¹ · 이남곤^{2*} · 박정준³ · 류금성³ · 박기준⁴ · 장인동¹

Hoon Moon¹ · Namkon Lee^{2*} · Jung-Jun Park³ · Gum-Sung Ryu³ · Gi-Joon Park⁴ · Indong Jang¹

(Received October 16, 2023 / Revised October 21, 2023 / Accepted October 23, 2023)

This study investigated the carbonation of concrete brick cured in a CO₂ environment for the utilization of CO₂ captured in power plants. Concrete brick specimens were produced with electric arc furnace reducing slag (ERS) and electric arc furnace oxidizing slag (EOS), and cured for 3 days in a CO₂ chamber with a concentration of 20 % or in a constant temperature and humidity chamber. The weight change, compressive strength, flexural strength and carbonation depth of concrete bricks were measured. From the results, it was found that when subjected to CO₂ curing, CO₂ was absorbed at the level of 2.4 % of the weight of the specimen. The specimen incorporating ERS showed the highest carbonation depth, and satisfied KS F4004 standards for the concrete brick. Therefore, it is expected that the captured CO₂ can be utilized in the CO₂ curing process of concrete brick.

키워드 : 탄산화, CO₂ 포집, CO₂ 양생, 콘크리트 벽돌

Keywords : Carbonation, CO₂ uptake, CO₂ curing, Concrete brick

1. 서론

전 세계 CO₂ 배출량은 2022년 기준 약 368억 톤이며 매년 증가하고 있다(IEA 2023). 특히 최근 전 세계 곳곳에서 발생하고 있는 폭염, 한파 등의 이상 기후로 인해 냉·난방 수요가 급증함에 따라 발전소의 전력 생산량이 증가하고 있다. 2022년 기준 전 세계 전력 생산 시설에서 발생한 CO₂는 약 146억 톤으로 총 발생량의 약 40%를 차지하고 있다(IEA 2023). 전력 생산 시설은 전 세계적인 탈원전 추세로 인해 원자력 발전소의 가동이 중단되고 있으며, 이에 따라 화석 연료를 사용하는 발전소의 비중이 높아지고 있다. 그러나 인플레이션 및 연료 시장의 불안정 등의 이유로 많은 국가에서

천연가스 대신 석탄을 에너지원으로 사용하면서 CO₂ 배출량이 증가하고 있다(IEA 2023).

세계 각국에서는 대량으로 발생하는 CO₂를 감소시키고 발생된 CO₂를 처리하기 위해 다양한 방법으로 연구 개발을 진행하고 있으며 대표적인 방법이 CCUS(Carbon Capture, Utilization and Storage)이다. CCUS는 배출원에서 CO₂를 포집하여 유용한 물질로 활용하거나 지중 영구 격리하는 기술을 통칭한다. 대표적인 단일 CO₂ 배출원은 발전소이므로 이곳에서 발생한 CO₂를 포집하여 처리하는 것이 CCUS의 핵심 사안이다. 포집된 CO₂를 대량으로 처리하기 위해 대표적으로 지중저장 방법이 연구되고 있다. 이는 CO₂를 지하 심부(1000 m 이상)에 격리저장하는 방법으로 고갈된

* Corresponding author E-mail: nklee@kict.re.kr

¹한국건설기술연구원 구조연구본부 박사후연구원 (Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

²한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원 (Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

³한국건설기술연구원 구조연구본부 연구위원 (Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

⁴한국건설기술연구원 구조연구본부 전임연구원 (Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 10223, 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

유전 또는 가스전에 적용된다(Kim et al, 2008). 그러나 국내의 CO₂ 지중 격리 사업의 경우 2017년 발생한 지진 이후 지역사회의 반대로 인해 실증사업 플랫폼이 철거되는 등 난항을 겪고 있다. 따라서 국내에서는 지중저장 이외의 방법으로 CO₂를 활용·격리하는 방안이 필요하다.

한편 건설 산업의 경우 국내 CO₂ 총 발생량의 37%를 차지하고 있으며, 대부분 시멘트 생산과정에서 발생하고 있다(GIR 2020). 따라서 시멘트 제조 시 발생하는 CO₂ 감소를 위해 다양한 연구가 진행되었으며 주로 혼화재를 시멘트의 일부 치환시킴으로서 시멘트 사용량 자체를 줄이는 연구가 대다수이다(Gartner 2004; Yang and Moon 2012; Cho et al, 2015). 그러나 이러한 방법은 이미 발생한 CO₂를 처리하지 못하고 발생량 자체만을 감소시키는 수동적인 방법으로서 CCUS 기술로 포집한 CO₂를 활용하지 못하게 된다. 이에 따라 포집된 CO₂를 활용하기 위해 CO₂를 시멘트 페이스트와 반응시켜 콘크리트 내부에 영구광물화를 유도하거나 재생 골재 및 산업부산물 골재 안정화를 연구가 진행되었다(Park et al, 2018). 또한 시멘트 제품 양생에 CO₂를 활용하는 연구도 진행되었다(Shi et al, 2012; Kashef-Haghighi and Ghoshal 2013; El-Hassan and Shao 2014). 또한 순환골재의 표면에 존재하는 시멘트 페이스트의 중성화를 유도하므로 pH를 저감시켜 성·복토 재료로서의 활용성도 높일 수 있다(Kim et al, 2018; Chung et al, 2017). 또한 이러한 방법은 시멘트계 재료 내부에 존재하는 Ca(OH)₂가 CO₂와 반응하여 CaCO₃로 변환되며 공극을 채우고 조직을 치밀화 시키므로 강도 상승을 기대할 수 있다(Heo et al, 2021).

CO₂를 굳지 않은 시멘트 페이스트와 반응시킬 경우 응결시간 및 강도 발현이 촉진되는 것으로 알려져 있다(Rostami et al, 2012). 또한 시멘트 페이스트를 이용한 탄산화 연구 결과에 따르면 반응 온도가 상승할수록 CO₂ 소비량이 증가하는 것으로 나타났다(Park et al, 2021). 따라서 생산속도 단축을 위해 고온·증기양생을 적용하는 PC(Precast concrete)제품 생산과정에서 CO₂ 양생 기술을 적용한다면 대량으로 포집 CO₂ 활용이 가능할 것으로 기대된다. 또한 콘크리트 2차 제품의 경우 시멘트 사용량을 감소시키기 위해 고로 슬래그 미분말, 전기로 슬래그 등 다양한 혼화재를 시멘트의 일부 치환하여 제조된다. 이는 CO₂ 사용량을 줄이기 위해 적용되는 일반적인 방법과 연계되므로 탄소 저감에 더욱 유리할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트 2차 제품의 CO₂ 양생 적용을 위해 일반적으로 사용되는 콘크리트 벽돌을 대상으로 연구를 진행하였다. CO₂ 감소량을 증대시키기 위해 혼화재를 시멘트의 일부

치환한 시험체를 제작하여 CO₂ 환경에서 양생을 실시하고 탄산화를 분석하였다. 이를 통해 도출된 결과를 바탕으로 콘크리트 2차 제품을 활용한 CO₂ 영구 격리 방법의 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 탄산화 조건

발전소에서 CO₂를 포집하는 방법에는 크게 3가지로 연소 전 CO₂ 포집, 연소 후 CO₂ 포집, 순산소연소 CO₂ 포집으로 구분된다(Nord et al, 2009). 연소 전 CO₂ 포집 방법은 연료를 가스화시켜 CO와 수소를 만들어 CO 연료를 탄소를 포함하지 않는 수소 연료로 변환시킨다. 이 과정에서 생성된 CO₂를 포집하는 과정으로 이때 포집된 CO₂의 농도는 약 20% 정도이다(Park and Baek 2009). 연소 후 CO₂ 포집 과정은 연소 후 나오는 배가스를 화학 흡수, 건식 흡수 및 막분리법 등의 방법으로 CO₂를 포집하는 방법이다. 이 중 아민 흡수제를 사용한 화학 흡수법은 10~20% CO₂ 농도 수준을 가지는 가스처리에 적합하고 특히 화력발전소 적용에 가장 적합한 것으로 알려져 있다(Rao and Rubin 2002; Lee et al, 2012). 순산소연소 CO₂ 포집기술의 경우 고순도 산소를 사용하여 배가스 중의 CO₂ 농도가 높아져 분리하는 쉬워지나, 공기로부터 산소를 분리하는데 많은 에너지 소모를 초래한다. 따라서 현재는 소규모 발전시설에서만 운영되고 있으며 대규모 발전소에는 적용이 어려운 실정이다.

따라서 발전소에서 연소 전, 연소 후 방법으로 포집된 CO₂의 농도는 10~20% 사이의 농도로 판단되므로 본 실험에서 시험체의 탄산화 조건은 CO₂ 농도를 20% 수준으로 고정하여 실시하였다. 챔버 내부의 CO₂ 농도는 20%를 유지 할 수 있도록 Gas analyzers(SKY8000-CO₂, SAFEGAS, China)를 사용하여 모니터링하였다. CO₂가 시험체의 4면 모두 침투가 가능하도록 받침을 사용하여 시험체의 아랫면을 바닥에서 이격시켜 양생을 진행하였다.

2.2 사용재료

시험체 제작에 사용된 시멘트는 KS L 5201을 만족하는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 시멘트의 사용량 및 산업부산물의 재활용을 위해 혼화재로 고로 슬래그(Blast Furnace Slag, BFS) 및 전기로 환원 슬래그(Electric Arc Furnace Reducing Slag, ERS)를 미분쇄하여 사용하였다. 전기로 환원 슬

래그는 국내 제철소에서 생산된 것이며, Fig. 1과 같이 300 μm이하로 미분쇄하였다. 이후 Particle Size Analyzer(Mastersizer 3000, Malvern Panalytical, England)를 사용하여 입도분석 후 사용하였다. 잔골재는 입도 3~5 mm의 표준사를 사용하였으며, 산업부산물의 재활용을 위해 전기로 산화 슬래그(Electric Arc Furnace Oxidizing Slag, EOS)를 잔골재로 사용하였다.

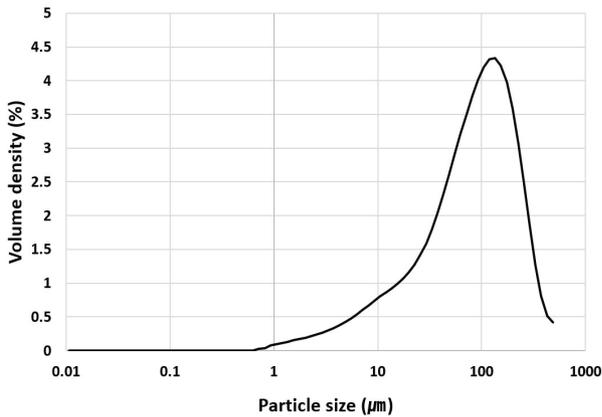


Fig. 1. Particle size distribution of ERS



Fig. 2. Specimen molding process

2.3 시험체 제작

CO₂ 양생을 거친 시험체의 탄산화를 평가하기 위하여 KS F 4004 “콘크리트 벽돌”을 참고하여 시험체(190 × 90 × 57 mm)를 제작하였다. 시험체의 성형은 Fig. 2와 같이 거푸집에 콘크리트를 타설하고 윗면을 균등하게 가압한 상태에서 진동다짐을 가한 후 탈형하였다. 이후 24시간 동안 기건 양생 후 온도 20 °C, 상대습도 60 %, 그리고 20 % 농도의 CO₂ 챔버에서 3일간 CO₂ 양생을 실시하였다. CO₂ 양생과 기건 양생의 비교를 위해 OPC, OPC-C 시험체는 온도 20 °C, 상대습도 60 %의 항온항습 챔버에서 3일간 양생을 실시하여 대조군으로 비교하였다.

시험체의 배합 상세는 Table 1과 같다. W/B는 0.35로 하였으며, OPC-C 배합의 경우 단위 체적당 시멘트량의 차이에 의한 탄산화 깊이 차이를 비교하기 위하여 W/B를 낮추어 배합을 실시하였다. BFS 배합은 고로슬래그 미분말을 시멘트 체적의 25 %를 치환하였으며, ERS 배합은 전기로 환원 슬래그 미분말을 시멘트 체적의 30 %를 치환하여 배합을 실시하였다. ERS-EOS 배합은 시멘트 체적의 30 %를 전기로 환원 슬래그 분말로 치환하고 잔골재로 입도 3~5 mm 크기의 전기로 산화 슬래그 100 % 중량 치환하여 배합을 실시하였다. ERS-EOS 배합의 경우 EOS 잔골재가 부순 모래 대비 낮은 흡수율을 가지므로 W/B를 25 %로 다른 시험체보다 감소시켜 배합을 실시하였다(Ryu et al., 2009). 이후 탄산화 측정 결과 CO₂ 포집 능력이 가장 우수했던 ERS 배합을 대상으로 제품 성형성 증가를 위해 증점제를 혼입한 배합(ERS-T), W/B 감소를 위해 증점제 및 감수제를 혼입한 배합(ERS-T-SP)을 추가로 실시하였다. 증점제는 시멘트 중량의 0.24 %, 감수제는 0.8 %를 사용하였다.

Table 1. Mix proportion of concrete block

Type	W/B (%)	Unit weight (kg/m ³)						Admixture (binder wt %)	
		Water	Cement	BFS	ERS	Sand	EOS	TA	SP
OPC	35	135	386	-	-	1931	-	-	-
OPC-C	28	131	468	-	-	1873	-	-	-
BFS	35	155	327	125	-	1805	-	-	-
ERS	35	158	326	-	124	1799	-	-	-
ERS-EOS	25	121	335	-	144	-	1877	-	-
ERS-T	35	158	326	-	124	1799	-	0.24	-
ERS-T-SP	25	119	342	-	130	1887	-	0.24	0.80

TA : Thickening Agent
 SP : Superplasticizer

2.4 탄산화 분석

2.4.1 CO₂ 챔버 내 무게 측정

El-Hassan et al.(2013)은 탄산화 양생을 거친 시험체와 거치지 않은 시험체의 무게 차이를 측정해 비교 할 경우, 실시간 CO₂ 흡수량을 비교할 수 있다고 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 CO₂ 양생의 효율을 파악하기 위하여 대표배합으로 OPC를 선택하여 무게 차이를 비교하였다. 시험체는 동일한 온도(20 °C)와 상대 습도(60 %)조건에서 일반 챔버와 CO₂ 챔버에서 각각 양생하면서 시험체의 무게 변화를 저울로 측정하였다.

2.4.2 탄산화 깊이

콘크리트 벽돌 시험체의 탄산화 깊이는 KS F 2596 “콘크리트 탄산화 깊이 측정방법”에 의거하여 측정하였다. 콘크리트 벽돌 시험체의 재령 4일차에 인장강도 측정 후 파괴 절단면에 페놀프탈레인 용액을 분무하여 탄산화 깊이를 측정하였다. 중심부를 기준으로 상하좌우 침투깊이를 측정하였으며, 각 배합별 3개 시험체의 탄산화 깊이를 측정하여 평균값을 비교하였다. 중심을 기준으로 위아래 12시 방향(타설면), 6시 방향(바닥면)으로 하였으며, 좌우는 각각 3시, 9시 방향에서 탄산화 깊이를 측정하였다. 100 % 탄산화가 진행된 경우 위아래는 30 mm, 좌우측은 45 mm로 판단하였다. 이는 각각 2방향에서 탄산화가 진행되므로 시험체의 절반 깊이로 판단한 것이다.

2.4.3 TGA

시멘트의 탄산화 반응은 Ca(OH)₂와 CO₂가 반응하여 CaCO₃를 생성하는 과정으로 시험체의 CaCO₃ 양을 분석할 경우 탄산화 평가가 가능하다. CaCO₃는 500~800 °C 영역에서 CaO와 CO₂로 분해되는 것으로 알려져 있다(Dweck et al. 2000; Collier 2016). 따라서 이 구간의 중량 차이를 분석할 경우 시료의 Portlandite와 Calcite 양의 정량분석이 가능하다. 분석을 위해 시험체의 표면부 및 중심부에서 드릴링(Drilling)하여 시험체를 채취하였다. 열중량 분석은 Thermal Analyzer(TGA N-1000, SCINCO M&T, Korea)를 사용하였으며, 10 °C/min의 속도로 850 °C까지 승온하여 측정하였다. 이후 500~800 °C 영역에서의 질량 감소율을 비교 분석하였다.

2.5 휨강도 및 압축강도

시험체의 휨강도는 KS F 4419 “보차도용 콘크리트 인터로킹 블록”을 참고하여 실시하였다. CO₂ 챔버에서 양생이 끝난 재령

4일차에 측정하였으며 3점 재하시험으로 시험체의 중심부가 파괴 되도록 측정하였다. 시험체의 압축강도는 KS F 4004 “콘크리트 벽돌” 규준을 참고하여 실시하였으며, 휨강도 측정 후 남은 벽돌을 사용하여 시험체의 흡수율 및 압축강도를 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 CO₂ 챔버 내 무게 변화

Fig. 3은 일반 챔버 및 CO₂ 챔버에서 양생중인 OPC 시험체의 무게 변화를 나타낸 것이다. 일반 챔버에서 양생중인 시험체는 시간이 지날수록 무게가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 시험체의 양생이 진행됨에 따라 내부의 수분이 증발하여 무게가 감소한 것으로 판단된다.

이에 반해 CO₂ 챔버에서 양생중인 시험체의 경우 양생 직후 3시간 이내에 무게의 증가가 관찰되었다. 이는 일반 챔버에서와 같이 동일한 수분 증발이 발생함에도 무게가 증가한 것으로, 이는 CO₂ 챔버에서 양생된 시험체가 CO₂와 화학적으로 반응하여 CaCO₃을 형성함에 따라 무게가 증가한 것으로 판단된다. 두 시험체 간의 무게변화율을 바탕으로 CO₂ 흡수량을 유추하였을 때, CO₂ 양생을 할 경우 3시간 이내에 CO₂ 흡수량이 급격히 증가하였으며 이후 완만한 상승을 나타내는 것으로 나타났다. 72 hrs 동안 양생 후 무게 변화로 유추한 CO₂ 흡수량은 2.41 % 로 나타났다. CO₂ 양생 전 콘크리트 벽돌 시험체의 무게가 약 1.717 kg 이었으므로, 벽돌 시험체는 약 41.33 g의 CO₂를 흡수할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 CO₂ 챔버에서 양생을 거친다면 효과적으로 CO₂를 흡수할 수 있는 것으로 판단된다.

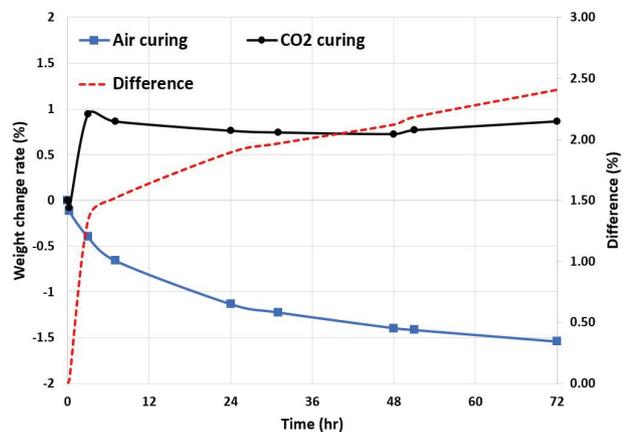


Fig. 3. Weight change rate and CO₂ absorption rate of test specimens cured in air chamber and CO₂ chamber

3.2 탄산화 깊이

Table 2는 시험체의 탄산화 깊이를 정리한 것이다. 기건 양생된 OPC 및 OPC-C 시험체는 Fig. 4와 같이 탄산화가 거의 진행되지 않는 것으로 나타났다. 이는 CO₂ 챔버에서 양생하지 않을 경우 초기 재령에서 CO₂를 흡수하지 못하는 것을 의미한다.

단위 시멘트량이 증가한 OPC-C 시험체의 탄산화 깊이는 13.5 mm로 21.2 mm가 진행된 OPC 시험체보다 CO₂ 흡수량이 낮은 것으로 나타났다. 이는 OPC 시험체에 비해서 단위 시멘트량 증가로 인해서 조직이 치밀해져 CO₂ 침투가 어려웠던 것으로 판단된다. OPC 시험체를 대상으로 기건양생과 CO₂ 챔버에서 양생된 시험체의 탄산화 깊이는 약 2.4배 가량 차이가 발생하였다. 따라서 CO₂ 챔버에서 벽돌 시험체를 양생할 경우 CO₂ 흡수량이 높아지는 것으로 확인되었다.

고로슬래그가 치환된 BFS 시험체의 탄산화 평균 깊이는 24.7 mm로 OPC만을 사용한 시험체보다 약 16.1 % 증가하였다. ERS 시험체의 평균 탄산화 깊이는 32.2 mm 측정되어 OPC 시험체 대비 51.5 %가 증가하여 고로슬래그를 치환했을 때 보다 CO₂ 흡수율이 높아지는 것으로 나타났다. 그러나 ERS-EOS 시험체의 경우

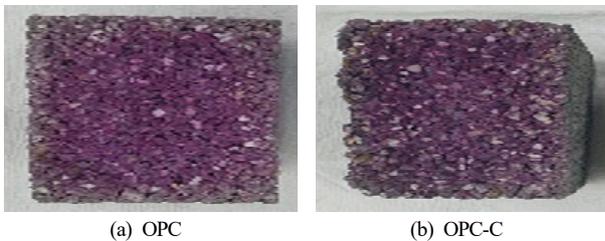


Fig. 4. Carbonation test of dry air cured specimens

평균 탄산화 깊이는 12.9 mm로 측정되어 오히려 탄산화깊이가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 OPC-C 시험체의 탄산화 깊이가 감소하는 것과 비슷한 경향으로 판단되며, W/B가 낮을수록 탄산화 진행에 불리한 것으로 생각된다. 1차 측정에서 ERS 시험체의 CO₂ 흡수율이 가장 높았으므로 이를 바탕으로 추가 배합을 진행한 ERS-T, ERS-T-SP 시험체는 100 % 탄산화가 진행된 것으로 나타났다. W/B가 감소한 ERS-T-SP 시험체에서도 100 % 탄산화가 유도되어 전기로 환원 슬래그를 사용할 경우 W/B가 감소하여도 CO₂ 흡수능력은 감소하지 않는 것으로 나타났다.

3.3 TGA

Fig. 5는 기건 양생된 시험체와 CO₂ 챔버에서 양생된 시험체의 500 °C 와 800 °C 에서의 질량 변화율을 나타냈으며, 3,2절의 탄산화 깊이와 비교한 것이다. 기건 양생된 시험체의 경우 탄산화 깊이는 측정되지 않았으나 TG 분석결과 CaCO₃가 존재하는 것으로 나타났다. 이는 탄산화가 깊게 진행되지 않은 ERS-EOS 시험체에서도 동일한 결과가 나타난 것을 볼 때, 포틀랜드 시멘트에 혼입된 석회석 미분말인 것으로 판단된다.

CO₂ 챔버에서 양생된 시험체의 경우 기건 양생된 시험체보다 질량 감소율이 높은 것으로 나타났다. 그러나 탄산화가 많이 진행된 시험체의 경우 대체적으로 표면부 보다는 중심부의 질량 감소율이 더 높아지는 경향을 나타냈다. 이는 공극이 많은 벽돌 시험체의 특성상 중심부까지 CO₂ 침투가 용이하여 탄산화가 쉽게 이루어진 것으로 판단되며 추후 연구를 진행하여 정확한 원인 분석이 필요할 것으로 생각된다.

Table 2. Carbonation depth of concrete blocks

Curing conditions	Type	Carbonation depth (mm)				Average (mm)		
		Upper side	Bottom side	Right side	Left side	Upper and bottom	Right and left	Total
Dry air	OPC	No carbonation observed						
	OPC-C	No carbonation observed						
CO ₂ curing	OPC	13.4	20.5	25.3	25.7	17.0	25.5	21.2
	OPC-C	8.6	15.4	15.4	14.6	12.0	15.0	13.5
	BFS	22.0	20.3	29.0	27.3	21.2	28.2	24.7
	ERS	24.5	26.6	39.3	38.2	25.6	38.8	32.2
	ERS-EOS	9.5	10.5	19.9	11.7	10.0	15.8	12.9
	ERS-T	30.0	30.0	45.0	45.0	30.0	45.0	-
	ERS-T-SP	30.0	30.0	45.0	45.0	30.0	45.0	-

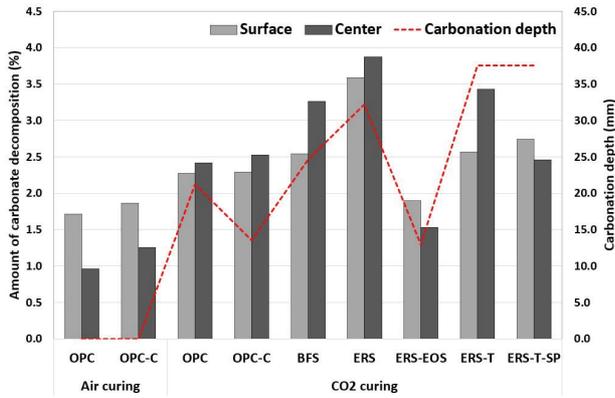


Fig. 5. Carbonate decomposition amount and carbonation depth of concrete bricks cured in air and CO₂ environments

3.4 휨강도 및 압축강도

Fig. 6은 벽돌 시험체의 휨강도를 나타낸 것이다. 기건 양생된 OPC 및 OPC-C 시험체의 휨강도는 각각 1.57 MPa, 2.23 MPa로 측정되었다. CO₂ 챔버에서 양생된 OPC, OPC-C 시험체의 휨강도는 2.03 MPa, 2.27 MPa로 나타났다. OPC 시험체의 경우 CO₂ 양생을 진행한 결과 약 30 % 수준의 강도 상승이 나타났으며, 이는 기건 양생 대비 월등히 진행된 탄산화에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 OPC-C 시험체는 기건 양생 및 CO₂ 양생에 따른 휨강도의 유의미한 차이점이 발견되지 않았으며, 이는 CO₂ 양생을 진행하였음에도 탄산화에 의한 강도발현에는 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

BFS 및 ERS 시험체의 휨 강도는 각각 2.27 MPa, 2.77 MPa로 나타났으며 OPC 시험체보다 약 10 %, 35 % 정도 강도가 상승한 것으로 나타났다. 이는 탄산화 깊이와 유사한 경향으로 탄산화가 많이 진행될수록 강도 발현에 유리할 수 있음을 나타낸다. ERS-EOS 시험체의 휨강도는 3.47 MPa로 측정되었으며 이는 탄산화의 영향보다는 낮은 W/B에 기인한 것으로 생각된다.

콘크리트의 탄산화 깊이는 같은 조건에서 강도가 상승할 경우 감소하는 것으로 알려져 있다(Chen et al, 2018). 이는 콘크리트의 미세구조는 강도가 상승할수록 밀도가 높아지고 기공률이 낮아지며, 기공 개방도가 작아지기 때문이다. 따라서 ERS-EOS 시험체가 다른 시험체에 비해 탄산화 깊이가 얇은 것은 타시험체 대비 높은 압축강도에 기인한 것으로 판단된다. ERS-T, ERS-T-SP 시험체의 경우 혼화제를 첨가하지 않은 ERS 시험체보다 약간의 강도 감소가 발생하였다. 휨강도 시험결과, 모든 시험체가 KS F 4419에서 제시하는 휨강도 5.0 MPa(보도용 투수성 블록 4.0 MPa)를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 이는 본 연구에서 벽돌

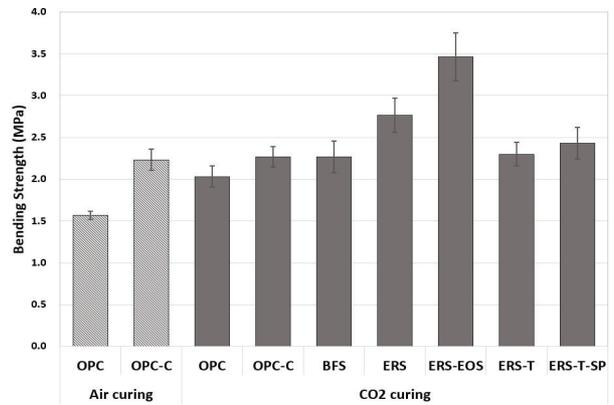


Fig. 6. Bending strength of concrete block specimens

Table 3. Compressive strength and absorption of concrete block specimens

Type	Compressive strength (MPa)	Absorption (%)
OPC-C	10.9	4.4
ERS-T-SP	9.9	4.9

시험체를 간이로 제작하였기 때문으로, 실제 공장에서 제조되는 바와 같이 강한 압력에 의한 다짐 및 초기 증기양생을 거칠 경우 강도 상승의 여지가 있을 것으로 예상된다.

Table 3은 OPC-C 및 ERS-T-SP 시험체의 압축강도와 흡수율을 정리한 것이다. 휨강도 시험결과 ERS-T-SP 시험체가 OPC 시험체 대비 강도가 증진되었다. 또한 성형성 및 탄산화 결과가 우수했으므로, 이를 콘크리트 벽돌로 활용하기 위해 압축강도 및 흡수율 시험을 진행하였다. 휨강도 시험에서 ERS-T-SP 시험체와 OPC-C 시험체가 유사한 강도를 나타냈으므로 압축강도는 이를 대조군으로 하여 비교하였다.

OPC-C 시험체의 압축강도 및 흡수율은 10.87 MPa, 4.41 %로 나타났다. ERS-T-SP 시험체의 압축강도는 9.89 MPa, 흡수율은 4.88 %로 측정되어 단위시멘트량이 높은 OPC-C 시험체와 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한 이는 KS F 4004에서 제시하는 2종 벽돌 기준인 압축강도 8 MPa, 흡수율 13 % 이하를 만족하므로 콘크리트용 벽돌로 활용이 가능할 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 발전소에 포집된 CO₂를 활용하기 위하여 콘크리트 벽돌 시험체를 제작 후 CO₂ 양생을 실시하였다. 이후 기건에서 양생된 시험체와 비교하여 탄산화 정도를 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 동일한 온도와 상대습도를 가지는 챔버와 CO₂ 챔버에서 양생된 OPC 시험체의 무게 변화율을 분석한 결과 시험체 무게의 약 2.4 % 수준의 CO₂를 흡수하는 것으로 나타났다.
2. 탄산화 깊이 및 TG 분석 결과 일반 항온항습 챔버에서 양생된 시험체보다 CO₂ 챔버에서 양생된 시험체의 탄산화 깊이가 깊었으며, 전기로 환원 슬래그를 치환할 경우 CO₂ 흡수율이 더 높은 것으로 나타났다.
3. 벽돌 시험체의 휨강도는 인터로킹 블록 규준을 만족하지 못하였으나, 콘크리트 벽돌의 2종 벽돌 규준을 만족하는 것으로 나타났다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 「친환경 Carbon Eating Concrete(CEC) 제조 및 활용 기술 개발」의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(No. 2023-0108).

References

- Chen, Y., Liu, P., Yu, Z. (2018). Effects of environmental factors on concrete carbonation depth and compressive strength, *Materials*, **11(11)**, 2167.
- Cho, H.M., Kim, S.W., Song, J.H., Park, H.M., Park, C.W. (2015). Experimental study on mechanical properties of carbon-capturing concrete composed of blast furnace slag with whanges in cement content and exposure, *International Journal of Highway Engineering*, **17(4)**, 41–51 [in Korean].
- Chung, C.W., Lee, M.H., Kim, S.O., Kim, J.H. (2017). The pH reduction of the recycled aggregate originated from the waste concrete by the scCO₂ treatment, *Economic and Environmental Geology*, **50(4)**, 257–266 [in Korean].
- Collier, N.C. (2016). Transition and decomposition temperatures of cement phases—a collection of thermal analysis data, *Ceramics-Silikáty*, **60(4)**, 338–343.
- Dweck, J., Buchler, P.M., Coelho, A.C.V., Cartledge, F.K. (2000). Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate, *Thermochimica Acta*, **346(1–2)**, 105–113.
- El-Hassan, H., Shao, Y., Ghouleh, Z. (2013). Effect of initial curing on carbonation of lightweight concrete masonry units, *ACI Materials Journal*, **110(4)**, 441–450.
- El-Hassan, H., Shao, Y. (2014). Dynamic carbonation curing of fresh lightweight concrete, *Magazine of Concrete Research*, **66(14)**, 708–718.
- Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements, *Cement and Concrete Research*, **34(9)**, 1489–1498.
- GIR. (2020). 2020 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea, 3F Osong Square, 210 Osongsaeemyeong-ro, Osong-eup, Heungdeok-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, Republic of Korea, 28166, Greenhouse Gas Inventory and Research Center(GIR) [in Korean].
- Heo, S.U., Kim, J.H., Chung, C.W. (2021). The effect of supercritical carbonation on quality improvement of recycled fine aggregate, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **9(1)**, 33–40 [in Korean].
- IEA. (2023). CO₂ Emissions in 2022, IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>, License: CC BY 4.0
- Kashef-Haghighi, S., Ghoshal, S. (2013). Physico-chemical processes limiting CO₂ uptake in concrete during accelerated carbonation curing, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **52(16)**, 5529–5537.
- Kim, H.M., Park, E.S., Synn, J.H., Park, Y.C. (2008). Greenhouse gas (CO₂) geological sequestration and geomechanical technology component, *Tunnel and Underground Space*, **18(3)**, 175–184 [in Korean].
- Kim, T.H., Lee, J.K., Chung, C.W., Kim, J.H., Lee, M.H., Kim, S.O. (2018). The neutralization treatment of waste mortar and recycled aggregate by using the scCO₂-water-aggregate reaction, *Economic and Environmental Geology*, **51(4)**, 359–370 [in Korean].
- Lee, J.H., Kwak, N.S., Lee, I.Y., Jang, K.R., Shim, J.G. (2012). Performance and economic analysis of domestic supercritical coal-fired power plant with post-combustion CO₂ capture process, *Korean Chemical Engineering Research*, **50(2)**, 365–370 [in Korean].
- Nord, L.O., Anantharaman, R., Bolland, O. (2009). Design and off-design analyses of a pre-combustion CO₂ capture process in a natural gas combined cycle power plant, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **3(4)**, 385–392.
- Park, J.H., Baek, I.H. (2009). Status and prospect of pre-combustion CO₂ capture technology, *KIC News*, **12(1)**, 3–14 [in Korean].
- Park, J.W., Kim, J.H., Lee, M.H., Chung, C.W. (2018). Carbonation

- mechanism of hydrated cement paste by supercritical carbon dioxide, *Journal of The Korea Institute of Building Construction*, **18(5)**, 403–412 [in Korean].
- Park, S.M., Moon, H., Kim, J.H., Lee, M.H., Chung, C.W. (2021). Reaction of hydrated cement paste with supercritical carbon dioxide, *Construction and Building Materials*, **281**, 122615.
- Rao, A.B., Rubin, E.S. (2002). A technical, economic, and environmental assessment of amine-based CO₂ capture technology for power plant greenhouse gas control, *Environmental Science & Technology*, **36(20)**, 4467–4475.
- Rostami, V., Shao, Y., Boyd, A.J., He, Z. (2012). Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing, *Cement and Concrete Research*, **42(1)**, 186–193.
- Ryu, D.H., Kim, K.H., Park, C.G., Son, Y.S. (2009). The study of concrete basic properties using oxidized electric furnace slag aggregate, *Journal of the Architectural Institute of Korea: Structure & Construction*, **25(8)**, 143–150 [in Korean].
- Shi, C., He, F., Wu, Y. (2012). Effect of pre-conditioning on CO₂ curing of lightweight concrete blocks mixtures, *Construction and Building Materials*, **26(1)**, 257–267.
- Yang, K.H., Moon, J.H. (2012). Design of supplementary cementitious materials and unit content of binder for reducing CO₂ emission of concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **24(5)**, 597–604 [in Korean].

산업부산물을 사용한 콘크리트 벽돌의 CO₂ 양생 후 탄산화 평가

본 연구에서는 발전소에서 포집된 CO₂의 활용을 위해 CO₂ 환경에서 양생된 콘크리트 벽돌의 탄산화를 분석하였다. 전기로 환원슬래그(ERS)와 전기로 산화슬래그를 사용하여 콘크리트 벽돌 시험체를 제작하고 20% 농도의 CO₂ 챔버에서 콘크리트 벽돌 시험체를 3일간 양생하여 항온항습 상태에서 양생된 시험체와 탄산화 수준을 비교하였다. 콘크리트 벽돌의 무게변화, 탄산화 깊이, 휨강도, 압축강도를 측정한 결과, CO₂ 환경에서 양생된 시험체는 무게의 2.4 % 수준의 CO₂를 흡수하는 것으로 나타났다. ERS를 사용한 시험체가 탄산화 깊이가 가장 깊었으며, KS F 4004 콘크리트 벽돌의 규준을 만족하였다. 따라서 포집된 CO₂는 콘크리트 벽돌의 CO₂ 양생 과정에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.