

파일럿 규모에서 탄소포집벽돌 제조를 위한 이산화탄소 용존 배합수 제조 기초 연구

정진홍*, 박나리*, 김미선**, 곽도훈**, 임현만*, 김원재*

*한국건설기술연구원 환경연구본부

**과학기술연합대학교대학원

e-mail:jinhong98@kict.re.kr

Optimization on Improving the CCS(carbon capture storage) performance using carbon capture blocks

Gil-Dong Hong*, Cheol-Soo Kim**, Soon-Hee Kim* Jin-Hong Jung*, Na-Ri Park*, Mi-Seon Kim**, Hyun-Man Lim*, Weon-Jae Kim*

*Dept. of Environmental Research, Korea Institute of Civil Engineering and Construction Technology

**Department of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology

요약

탄소 배출량을 줄이고 콘크리트 제품에 이산화탄소를 영구적으로 포집하기 위하여 이산화탄소 용존 배합수 제조에 대한 기초연구를 수행하였다. 제조장치는 처리 시간과 대규모 장비가 필요한 기존 나노버블 기반 기술의 한계를 극복하고자 가압펌프-인젝터 가스-액체 혼합 방식을 사용하여, 이 시스템은 10분 이내에 100L/min 이상의 처리 용량으로 90% 이상의 용해 효율을 갖는 1,450mg/L 이상의 고농도 이산화탄소 용존수를 연속적으로 제조하였다. 용존수를 사용하여 제조한 이산화탄소 포집 벽돌은 기존 벽돌에 비해 압축 강도가 13% 증가한 32.5MPa(28.2MPa)를 나타냈으며, TGA 및 XRD 분석 결과, 유리 CaO가 CaCO₃로 전환되어 이산화탄소가 저장되는 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 이산화탄소 포집 및 활용(CCU) 기술의 현장 적용을 위한 실용적인 해결책을 제시하여 한국의 2030년 국가 온실가스 감축 목표 달성에 기여할 것으로 판단된다.

1. 서론

2015년 파리협정 채택 이후 전 세계는 지구 평균기온 상승을 산업화 이전 대비 1.5°C 이내로 제한하기 위한 노력을 가속화하고 있다(UNFCCC, 2015). 우리나라는 2020년 '2050 탄소중립' 선언과 함께 2021년 '2030 국가온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)'를 2018년 배출량(727.6 백만톤 CO₂-eq) 대비 40% 감축(436.6 백만톤 CO₂-eq)으로 상향 조정하였다(MOE, 2018). 이는 기존 26.3% 감축 목표에서 대폭 강화된 것으로, 부문별 감축 목표 달성을 위한 다양한 기술적 해법이 요구되고 있다. 특히 탄소 포집·활용·저장(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 기술은 2030년까지 640 만톤, 2050년까지 8,460 만톤의 CO₂를 감축하는 핵심 수단으로 제시되었다.

콘크리트 산업에서의 CO₂ 포집 및 활용 기술은 탄산화 시점에 따라 크게 후탄산화(Post-carbonation)와 선탄산화(Pre-carbonation)로 구분된다(Jang et al., 2018). 후탄산화는 콘크리트 제품 성형 후 고압·고온의 CO₂ 분위기에서 양생하여 탄산화를 가속화하는 방식이다. 프리캐스트 콘크리트

블록에 24시간 동안 5% CO₂ 농도의 가스를 주입하여 블록 1개당 약 181 g의 CO₂를 포집하였으며,

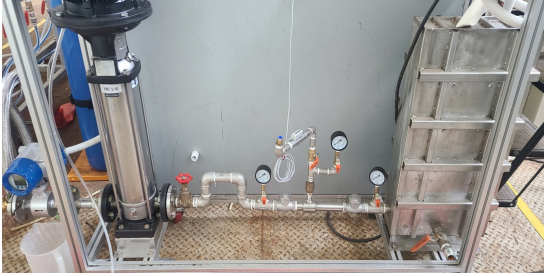
본 연구의 목적은 기존 나노버블 기술의 한계를 극복하고 현장 적용성이 우수한 컴팩트형 고농도 CO₂ 과포화수 조제장치를 개발하며, 이를 활용한 탄소포집 콘크리트의 물리·화학적 성능을 평가하는 것이다. 제조된 CO₂ 과포화수를 배합수로 사용한 탄소포집 콘크리트 시험체(페이스트, 모르타르, 벽돌)를 제작하고, 열중량분석(TGA) 및 X-선 회절분석(XRD)을 통해 탄산화 반응 메커니즘을 분석한다. 넷째, 압축강도 시험을 통해 탄소포집 콘크리트의 역학적 성능을 평가하고, 일반 콘크리트와 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 과포화수 제조장치

CO₂ 용해장치는 선행 연구에서 Lab-scale 규모의 CO₂ 용해장치를 기반으로 CO₂ 과포화수 조제장치는 가압펌프-인젝터 방식의 기-액 혼합 시스템으로 구성된다. 기존 나노버

블 방식 대비 용해 탱크 부피를 1/10 이하(32.4 L)로 소형화하여 현장 설치 공간을 최소화하였다.



[그림 1] CO₂ 과포화 배합수를 조제장치

CO₂ 과포화수 제조 공정은 가압펌프(5.5 kW)로 유입수를 고압 가압 물과 CO₂ 가스가 인젝터에서 흡입·혼합하고, 혼합된 기-액 유체가 용해탱크(32.4 L) 내에서 고효율 접촉을 통해 과포화수를 생성한다. 원수는 수돗물을 사용하였고, 다단 펌프로 8.0 ± 1.5 kgf/cm²로 가압하면서 인젝터 방식으로 이산화탄소를 가스상태로 주입한 후 가압탱크 내에서 이산화탄소가 과포화되도록 3.0 ± 1.0 kgf/cm²의 압력을 유지하였다 (Jung, 2024). CO₂ 주입에 따라 pH가 저하되는 현상을 방지하고 효율을 증가시키기 위하여 원수탱크에 설치된 pH 계측기 데이터를 기반으로 NaOH를 실시간으로 주입하여 목표 pH를 유지하도록 운전하였다.

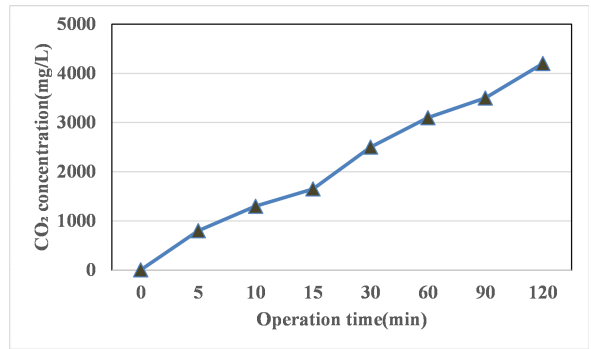
2.2 수질 분석방법

운전 초기 원수 및 시간별 순환수를 채수하여 수소이온농도(pH), 총알칼리도를 분석하였다. 측정에 사용한 기기로는 pH, 총알칼리도 측정을 위해 Mettler Toledo사 pH/Ion meter SevenDirect SD50 를 사용하였고, 총알칼리도의 측정을 위해 0.02 N ~ 0.2 N 황산을 이용하여 적정하였다. CO₂ 측정은 TOADKK사의 CGP-31를 보조적으로 사용하였다.

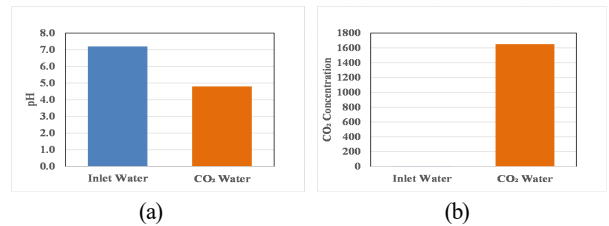
3. 실험결과

시간에 따른 CO₂ 농도 변화를 [그림 2]에 나타내었다. 순환수 유량 100 L/min, CO₂ 가스 유량 20 L/min 조건(G/L ratio 0.2)에서 15분 이내에 목표 농도 1,500 mg/L에 도달하였으며, 90분 이내 최대 3,500 mg/L를 달성하였다. 2시간 연속 운전 시 최대 4,200 mg/L까지 농도가 증가하였으며, 이는 이론적 평형 농도(25°C, 1 atm에서 1,450 mg/L)의 약 3배에 해당하는 결과를 나타내었다.

CO₂ 용해에 따른 수질 변화는 [그림 3]과 같다. CO₂ 주입 후 pH는 7.2에서 4.8로 급격히 감소하는 결과를 나타내었다.



[그림 2] 운전시간에 따른 CO₂ 용존 농도 변화



[그림 3] CO₂ 용존에 따른 수질 변화((a) pH, (b) CO₂ 농도

4. 결론

고농도 CO₂ 과포화수 조제장치를 개발하고, 이를 활용한 탄소포집 콘크리트의 성능을 평가하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 가압-인젝터 방식을 적용한 본 장치는 15분 이내에 목표 농도 1,450 mg/L를 초과하는 CO₂ 용해수를 100 L/min 이상의 대용량으로 제조하였다. 둘째, CO₂ 용해 시 pH는 7.2에서 4.8로 감소하였고, 알칼리도는 70% 감소하는 결과를 나타내었다.

사사

본 연구는 한국건설기술연구원 (26주요-전략-2) 도시형 CO₂ 포집 및 CCU 건설재료 기술 개발 (1/1) 과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] IEA (2020) Cement Technology Roadmap: Carbon Emissions Reductions up to 2050, International Energy Agency, Paris.
- [2] 정진홍, 김원재, 박나리, “탄소포집벽돌 제조를 위한 컴팩트형 고농도 CO₂ 과포화수 조제장치 성능평가”, KSWST. Jour. Wat. Trest. 33(6), 343-350, 589-595, 2025년
- [3] KICT (2022) Carbon Eating Concrete(CEC)