Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology
Vol. 33, No. 6 (2023) 226-233
https://doi.org/10.6111/JKCGCT.2023.33.6.226

p-ISSN 1225-1429
e-ISSN 2234-5078

Research on manufacturing secondary construction products using in-situ carbonation technology

Hye-Jin Yu, Sung-Kwan Seo† and Woo-Sung Yum

Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Carbon Neutral Materials Center, Jinju 52851, Korea

(Received November 20, 2023)
(Revised November 28, 2023)
(Accepted November 29, 2023)

Abstract In this study, the basic physical properties and microstructure of concrete interlocking blocks with amount of different CO_2 gas injection were analyzed according to determine the applicability of In-situ carbonation technology to construction secondary products. The amount of carbon dioxide gas injection was selected as 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 wt.% compared to cement amount. A lab-scale press equipment was designed to apply developed carbonation technology to real construction site. And mixer for stable CO_2 gas injection was designed. Using the designed devices, CO_2 gas injected samples were created and physical property of samples were performed. As a result of the physical property test, as the CO_2 injection amount increased to 0.3 %, it showed higher strength behavior compared to the original mix. And more than 0.5 % samples showed lower strength behavior than original sample, but they satisfied the standard of concrete interlocking block. This results were determined that CO_2 injection contributed to the creation of hydrates such as C-S-H. Therefore, the possibility of applying carbonation technology, which injects CO_2 during mixing, to various secondary construction products was confirmed.

Key words In-situ, CCUS, Carbon utilization, CO_2 injection, Concrete interlocking block

In-situ 탄산화 기술이 적용된 콘크리트 2차제품 제조 연구

유혜진, 서성관†, 염우성

한국세라믹기술원 탄소중립소재센터, 진주, 52851

(2023년 11월 20일 접수)
(2023년 11월 28일 심사완료)
(2023년 11월 29일 게재확정)

요 약 본 연구에서는 콘크리트 2차제품 제조시 기체상의 이산화탄소를 주입하는 In-situ 탄산화 기술의 적용 가능성 분석을 위해 이산화탄소 주입량에 따른 콘크리트 인터로킹 블록의 기초물성 및 미세구조 분석을 실시하였다. 안정적인 이산화탄소 주입을 위해 CO_2 가스 주입용 콘크리트 혼합 설비를 구축하였으며, 이산화탄소 주입량을 시멘트량 대비 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 wt.%로 제어하였다. 기초물성 시험 결과, 이산화탄소 주입량이 0.3 %까지 증가할수록 기존 배합 대비 높은 강도 거동을 보였으며, 주입량 0.5 % 이후에는 기존 배합보다 낮은 강도를 보였으나 콘크리트 2차제품의 강도 기준(보차도용 콘크리트 인터로킹 블록)을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트 인터로킹 블록 제조시 이산화탄소 주입에 따른 $CaCO_3$ 결정 및 C-S-H 등의 수화물 생성이 촉진된 것으로 판단되었다. 따라서 배합중 이산화탄소를 주입하는 탄산화기술을 다양한 콘크리트 2차제품 제조 공정에 적용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

1. 서 론

최근 전세계적으로 지구온난화의 가속화를 저지하기 위해 탄소중립에 관한 많은 관심 및 연구가 이어지고 있다. 이를 해결하기 위해 각국의 정부에서는 탄소중립에 관한 다양하고 장기적인 정책들을 발표하며 시행하고 있으며 국내에서도 2030 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC) 및 2050 장기 저탄소 발전 전략(Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategies, LEDS) 등과 같은 계획을 수립하고 달성하기 위해 노력하고 있다. 또한 탄소 배출 자체를 막을 뿐 아니라 이미 배출된 탄소를 포집하고, 저장하여 재사용하기 위한 방안을 도출하고 있다. 이의 대

†Corresponding author
E-mail: ssk@kicet.re.kr

www.kci.go.kr

표적인 예로 CCUS(Carbon Capture Utilization and Storage)가 있으며, 탄소중립을 실현할 수 있는 가장 현실적인 방안으로 각광받고 있다[1-3].

건설 산업에서도 탄소중립 정책 실현에 기여하기 위해 많은 노력을 기울이고 있으며, 탄소 배출을 감소하기 위한 시멘트 대체 물질 개발, 탄소 포집 건설재료 개발 등의 기술을 개발하여 현장에 적용하고 있다. 최근에는 해외 주요국에서 이미 이산화탄소를 콘크리트 및 콘크리트 2차제품 제조 공정에 적용하는 기술을 개발하여 실제 제품으로 생산 중에 있으며, 현재 우리나라에서도 시멘트 산업의 탄소중립 기술 개발의 일환으로 콘크리트 2차제품 배합 과정 중 이산화탄소를 적용하는 연구(In-situ 탄산화기술)를 수행하고 있다. 그러나 콘크리트 2차제품 제조 공정에 적용하기 위한 이산화탄소 정량 주입 및 고정화 기술은 현재까지 확립되지 않은 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 실험실 규모의 이산화탄소 정량 고정화 기술 개발을 목표로 기체상의 이산화탄소를 콘크리트 2차제품 배합 중에 주입하여 In-situ 탄산화기술의 콘크리트 2차제품 적용 가능성에 대해 연구하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1. 원재료의 기초물성 분석

본 연구에서는 In-situ 탄산화기술이 적용된 콘크리트 2차제품 제조를 위해 국내 H社의 일반 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC)를 사용하였다. 이산화탄소의 경우 고체, 액체, 기체상 중 본 연구 진행 공정에 가장 적합하다고 판단되는 기체상의 고순도 이산화탄소 가스를 사용하였으며, 안정적인 농도로 주입하기 위해 고순도(CO_2 99.999 %) 가스를 사용하였다. 연구에 사용된 시멘트의 기초특성 분석을 위해 화학성분, 입도분석 및 결정상 측정을 통한 미세구조 분석을 수행하였다. 화학성분 분석을 위해 X-선 형광분석기(XRF, Supermini 200, Rigaku社, JAPAN)을 이용하여 기초 산화물 분석을 실시하였으며, 그 결과는 Table 1에 나타내었다. 원재료의 입도 분포 분석을 위해 입도분석기(PSA, LA-950V2, Horiba社, JAPAN)를 이용하였으며 결정상 분석을 위해 X-선 회절 분석기(XRD, D8 Advance A25 Plus, Bruker社, USA)를 사용하여 원재료의 기본 물성을 측정하였다. 입도 분포 분석 결과는 Fig. 1에 나타내

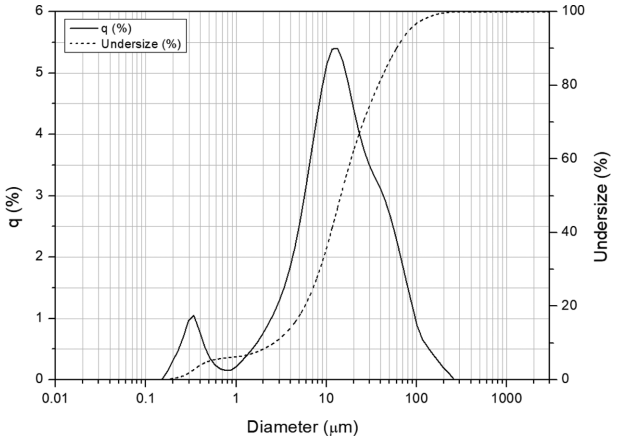


Fig. 1. Particle size distributions of raw material.

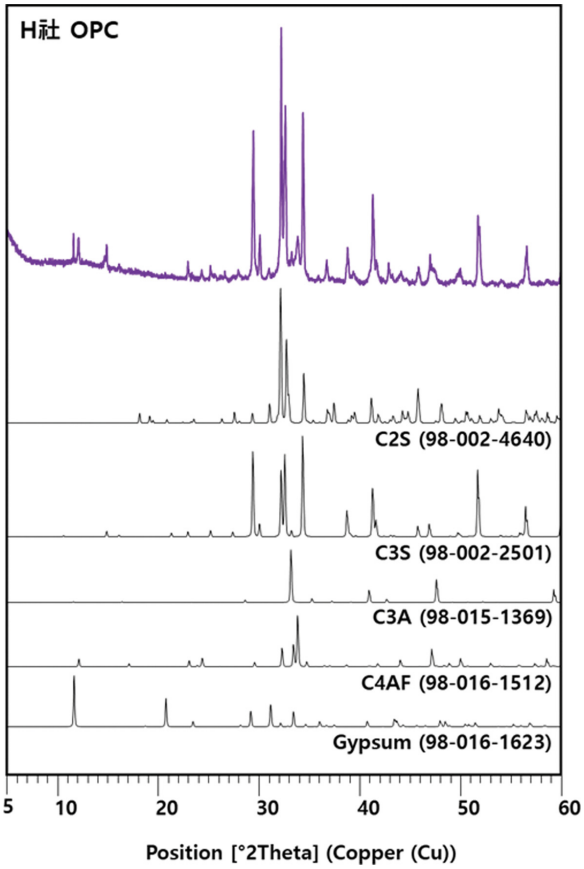


Fig. 2. XRD patterns of raw material.

었다. X-선 회절 분석 측정 결과는 X'Pert Highscore 소프트웨어의 '회절 데이터를 위한 국제 센터(International Center for Diffraction Data, ICDD)'의 PDF-2 데이터베

Table 1
Chemical compositions of raw material (Unit: wt.%)

MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3	Others
3.26	4.70	19.40	1.12	4.06	1.12	62.30	3.22	0.82

www.kci.go.kr

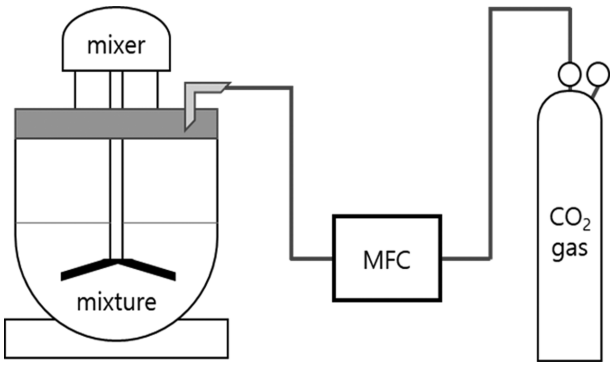


Fig. 3. Schematic of the mixer with CO_2 gas injection device.

이스와 '무기 결정 구조 데이터베이스(Inorganic Crystal Structure Database, ICSD)'를 사용하여 분석을 진행하였다. 그 결과는 Fig. 2에 나타내었으며 이 결과를 이용하여 추후 샘플 제조와 결정상 분석에 적용하였다.

입도분포 분석 결과, 시료의 평균 입자 크기는 25 μm로 나타났으며, 입도 분포의 경우 0.35 μm 및 15 μm 2그룹으로 분포되어 있는 것으로 측정되었다.

X-선 회절 분석을 통해 원재료의 결정으로 C_2S(Belite, $2CaO{\cdot}SiO_2$), C_3S(Alite, $3CaO{\cdot}SiO_2$), C_3A(Aluminate, $3CaO{\cdot}Al_2O_3$), C_4AF(Ferrite, $Ca_2(Al,Fe)_2O_5$) 및 Gypsum (석고)가 측정되었으며, 이는 일반 포틀랜드 시멘트의 주요 구성 광물과 일치한 결과로[4], 본 연구의 원재료로서 사용하는데 문제가 없는 것으로 판단되었다.

본 연구의 콘크리트 2차제품 공시체 제조를 위한 골재로서 S社의 표준사(ISO 표준사 Standard Sand(EN 196-1))이 사용되었으며, 조립률이 일정하게 맞추어진 조건으로 실험에 적용되었다.

2.2. In-situ 탄산화기술 적용 혼합 방법

콘크리트 2차제품에 In-situ 탄산화기술을 적용하기 위해 이산화탄소 가스를 재료 혼합 중 주입하는 방법을 선정하여 실험을 진행하였다. 혼합 중 이산화탄소 가스 주입을 위해 CO_2 가스 정량 주입이 가능한 장치를 추가하여 이산화탄소 주입용 믹서를 설계하였으며, 이에 대한 개요도를 Fig. 3에 나타내었다. 일정한 농도의 가스 주입 및 실험 환경 유지를 위해 CO_2 가스 정량 주입이 가능하도록 질량유량계(Mass flow controller, MFC)를 연결하여 사용하였다. 믹싱 중 이산화탄소 가스가 공기 중으로 유출되는 것을 방지하기 위해 믹서 덮개를 제작하였으며, 이산화탄소 가스 주입시 압력을 고려하여 2 cm 두께의 아크릴 재질로 제작하였다. 완전 밀폐 환경을 유지하기 위해 모든 틈에 고무 실링을 부착하였으며, 가스통에서 믹서까지 가스 이동 중 외부와의 온도 차이로 인한 가스 유실이 발생하지 않도록 가스 관에 히터를 부착하였다.

2.3. 이산화탄소 주입 샘플 제작 방법

혼합 중 이산화탄소 주입시 기존 배합 대비 물성을 알아보기 위해 시멘트 질량 대비 0, 0.1, 0.3, 0.5 및 0.7 %로 이산화탄소 주입량을 제어하였다. 이때 이산화탄소 가스는 기체상이고 부피 단위를 가지므로 CO_2의 몰질량을 고려하여 시멘트 무게 대비 중량으로 치환하여 사용하였다. 시멘트:골재 비는 1:3, W/C(water-cement ratio)는 0.35로 제어하였고 그 배합을 Table 2에 나타내었다.

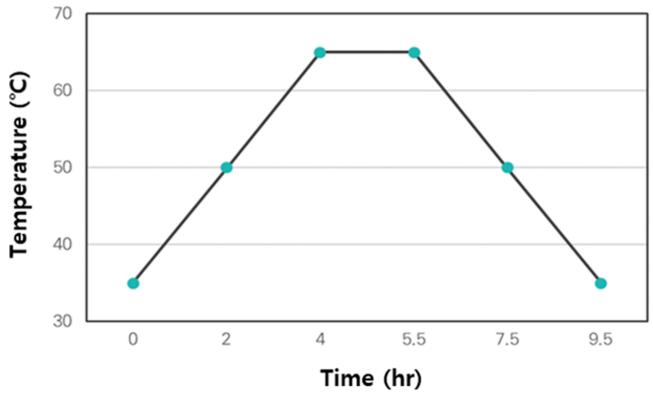
본 배합을 적용할 콘크리트 2차제품으로 보도용 콘크리트 인터로킹 블록을 선정하였으며 제조 및 물성 시험은 KS F 4419(보차도용 콘크리트 인터로킹 블록)을 준용하여 수행하였다. 콘크리트 인터로킹 블록을 제작하기 전 기본 물성 및 화학적 반응 조사를 위해 4 × 4 × 16 cm 규격의 각주형 공시체와 5 × 5 × 5 cm 정육면체 공시체(페이스트)를 만들어 동일 배합을 사용해 사전 실험을 진행하였다. 샘플 제작시 배합은 믹서볼(Mixer bowl)에 시멘트와 골재를 넣고 건비빔 후 물을 첨가하여 30초 혼합한 후 배합에 따라 30초간 이산화탄소를 주입하며 혼합, 이후 60초간 추가 혼합하는 순으로 진행하였으며, 총 혼합 시간은 2분으로 설정하였다. 페이스트 공시체의 경우 골재를 포함하지 않으므로 건비빔을 제외하고 이후 동일한 순서로 혼합하였다. 혼합된 반죽을 몰드에 타설 후 KS F 4419에 따라 요구되는 온도 범위에서 9.5시간 동안 고온 양생하였으며, 그 이후 시험 시까지 기건 양생(23 ± 1°C)하였다. KS 규정에서 요구되는 온도 범위는 500 적산온도이며 이를 계산한 내용을 Fig. 4에 나타내었다.

Table 2
Mixture proportions of samples

Sample*)	Cement (g)	Aggregate (g)	W/C	CO_2 (wt.%)
IB-0	450	1,350		0
IB-0.1	450	1,350		0.1
IB-0.3	450	1,350	0.35	0.3
IB-0.5	450	1,350		0.5
IB-0.7	450	1,350		0.7

*) Sample name 'IB'is abbreviation of Interlocking Block

www.kci.go.kr



(a) Curve of curing temperature

Temperature	Time (hr)
35℃ - 65℃	4
65℃ - 65℃	1.5
65℃ - 35℃	4

(b) curing temperature

Fig. 4. Calculation of curing temperature.

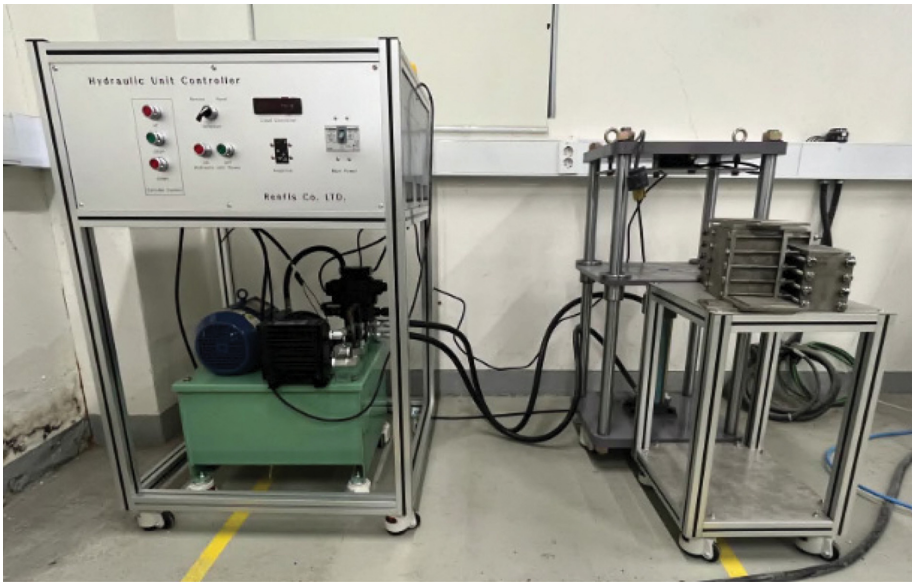


Fig. 5. Photo of lab-scale pressure press.

4 × 4 × 16 cm 규격의 각주형 공시체를 사용하여 작업성(flowability), 휨강도, 압축강도, 흡수율을 측정하였으며 각 시험은 KS L ISO 679(시멘트의 강도 시험 방법)에 따라 재령 1, 3, 7, 28일에 수행하였다. 5 × 5 × 5 cm 규격의 정육면체 공시체의 경우 골재를 제외한 페이스트로 제작하였으며, 이는 결정상 분석을 위한 X-선 회절 분석 측정을 위해 재령 1, 3, 7, 28일에 분쇄되었다. 분쇄 후 시험시까지 재령의 상태를 유지하기 위해 시료 속의 수분을 완전히 제거하여 수화정지하였다. 본 실험에서 사용한 수화정지 방법은 이소프로필 알코올(Isopropyl alcohol)을 이용한 용매 교환법이며[5,6], X-선 회절 분석 측정시까지 용매에 담긴 채로 보관되었다.

사전 실험 결과를 바탕으로 Mock-up scale의 콘크리트 인터로킹 블록(보도용 I형 보통 블록, 20 × 10 × 6 cm)을 제작하였다. 실제 콘크리트 인터로킹 제조 현장에서는 블록 성형시 진동 프레스 설비를 사용하여 블록에 높은 압력을 가하는 방식으로 운영됨에 따라, 실험실 규모의 프레스를 제작하여 블록 제작에 사용하였다(Fig. 5).

3. 실험 결과

3.1. 각주형 공시체 사전 실험 결과

블록 제작 전 이산화탄소 주입량에 따른 콘크리트 공시체의 물성을 분석하기 위해 4 × 4 × 16 cm 크기의 각주형 몰드를 제작하여 작업성(flowability), 흡수율, 재령별 휨강도 및 압축강도 시험을 수행하였다.

작업성 시험 결과 작업성이 측정되지 않았으며 이산화탄소 주입량에 따라 큰 차이가 확인되지 않았다(Fig. 6).

www.kci.go.kr

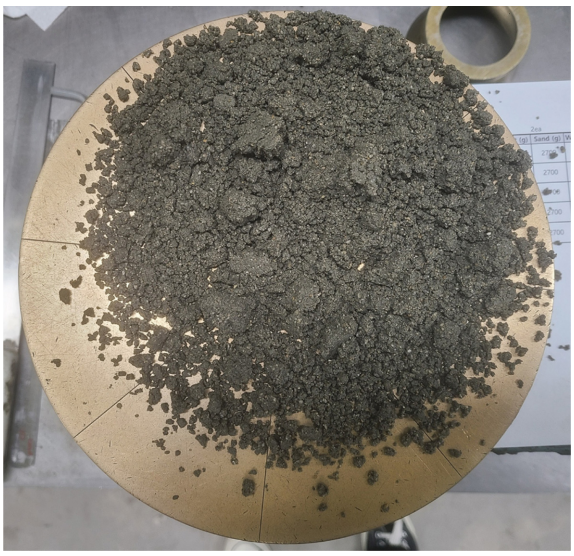


Fig. 6. Photo of flowability test result.

이는 본 연구에서 사용한 배합에서 물 양의 부족에 따른 결과로 판단되었으나 콘크리트 인터로킹 블록의 경우 물의 양이 많을 경우 프레스 가압 시 과잉의 물로 인해 성형이 제대로 이루어지지 않거나, 고온 양생 과정 중 수축 현상이 발생할 수 있어 In-situ 탄산화기술을 적용한 인터로킹 블록 제조에 큰 문제가 없을 것으로 판단되었다.

휨강도 시험 결과(Fig. 7) 이산화탄소 주입량 0.1 및 0.3 %에서 기존 배합보다 높은 강도 경향을 나타내었으며, 0.5 및 0.7 %에서 기존 배합 대비 소폭 낮은 강도 경향을 보였으나 KS F 4419에서 규정하는 휨강도 기준을 만족한 것으로 나타났다.

압축강도 시험 결과(Fig. 8) 휨강도 시험 결과와 동일하게 0.1 및 0.3 %까지는 이산화탄소를 주입하지 않은 샘플 대비 높은 강도를 나타내었으며, 0.5 % 이후부터는 기존 샘플 대비 주입량이 증가할수록 낮은 강도를 보였다. 압축강도의 경우 KS F 4419에서 규정하는 기준이 없지만, 이산화탄소 주입량을 최적 범위 내에서 조절할 경우 강도 증진 효과를 보여 In-situ 탄산화기술을 콘크리트 인터로킹 블록 외의 건설 2차제품에 적용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

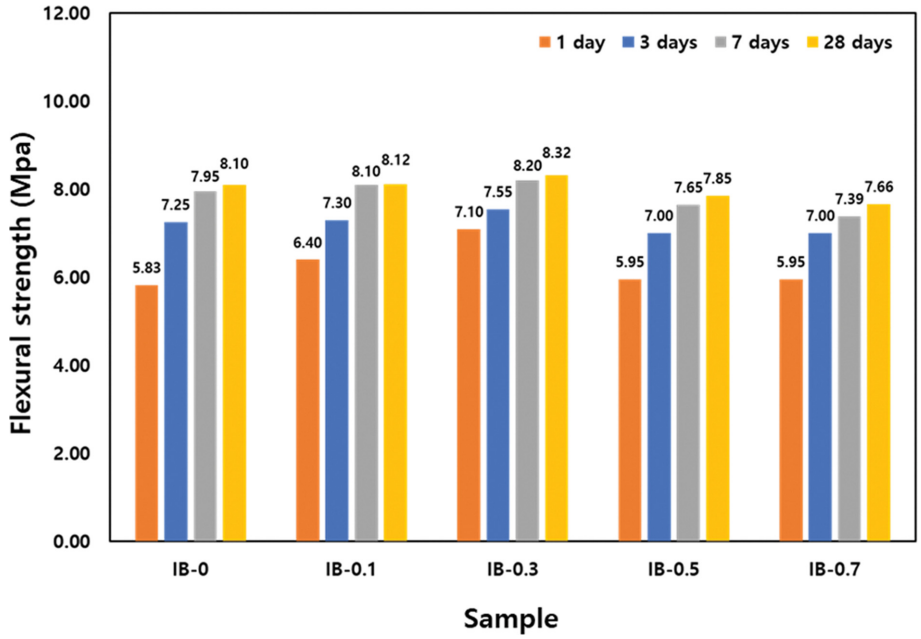


Fig. 7. Results of flexural strength test.

Table 3
Results of absorption test

Sample	Absorption rate (%)	W*)_wet (g)	W_dry (g)
IB-0	7.7	572.27	531.12
IB-0.1	8.1	574.90	531.59
IB-0.3	8.3	586.63	541.84
IB-0.5	8.6	572.44	526.96
IB-0.7	8.9	569.88	523.17

*) W : Weight

www.kci.go.kr

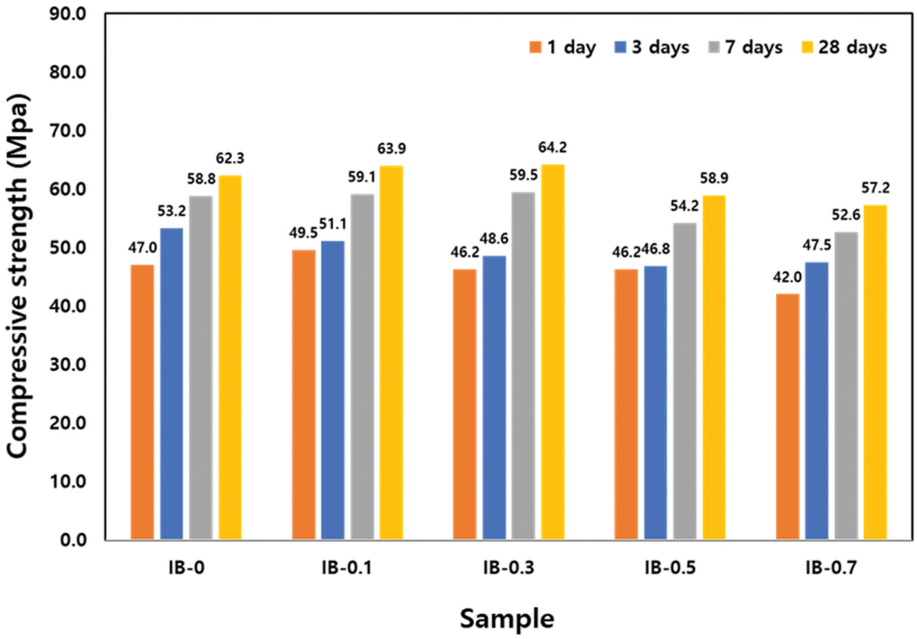


Fig. 8. Results of compressive strength test.

흡수율 시험 결과(Table 3) 이산화탄소 주입량이 증가할수록 낮은 흡수율 경향을 나타내었으나 모든 배합에서 KS F 4419에서 제시한 흡수율 기준을 만족하는 것으로 나타나 이산화탄소 주입 건설 2차제품 제작에 문제가 없을 것으로 판단되었다.

3.2. 정육면체 공시체 사전 실험 결과

각주형 공시체로 수행한 강도 시험 결과 분석을 위한 이산화탄소 주입량에 따른 시편 내부의 화학적 특성 및 결정성 변화 조사를 위해 5 × 5 × 5 cm 크기의 정육면체 시편을 제작하였다. 시편은 X-선 회절 분석을 위해 골재를 제외한 페이스트로 제작되었으며, 각 재령에 따라 63 μm 이하의 크기로 분쇄하여 분석시까지 수화정지 상태로 유지된 후 측정에 사용되었다.

X-선 회절 분석은 앞서 기술한 각주형 공시체의 강도 시험 결과에서 이산화탄소를 주입하지 않은 IB-0 샘플과 그에 비해 가장 높은 강도 경향을 나타낸 IB-0.3 샘플을 사용하였다. 두 샘플의 결정상 차이를 나타내기 위해 차이가 가장 두드러진 재령 7일의 X-선 회절 분석 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 이산화탄소 주입과 관계 없이 두 샘플 모두에서 Portlandite($Ca(OH)_2$), Calcite($CaCO_3$), Larnite(Ca_2SiO_4), Zeolite 및 Ettringite 결정이 관찰되었으며, 이 결정들은 시멘트 시편에서 일반적으로 나타나는 주요 광물이다[7,8]. 이 중 두 샘플 모두에서 Portlandite 결정의 활발한 생성이 관찰되었다[9,10]. 또한 생성된 Larnite는 시멘트 기본 광물인 C_2S의 일종이며[11], 시멘트 X-선 회절 분석 패턴 대비 C_2S 피크의 크기가 상당히 감소된 것으로 보아 반응이 완전히 이루어지지 않은 잔여 C_2S 결정이 측정된 것으로 보인다. 이산화탄소 주입에 따른 생성 결정 종류에는 거의 차이가 없는 것으로

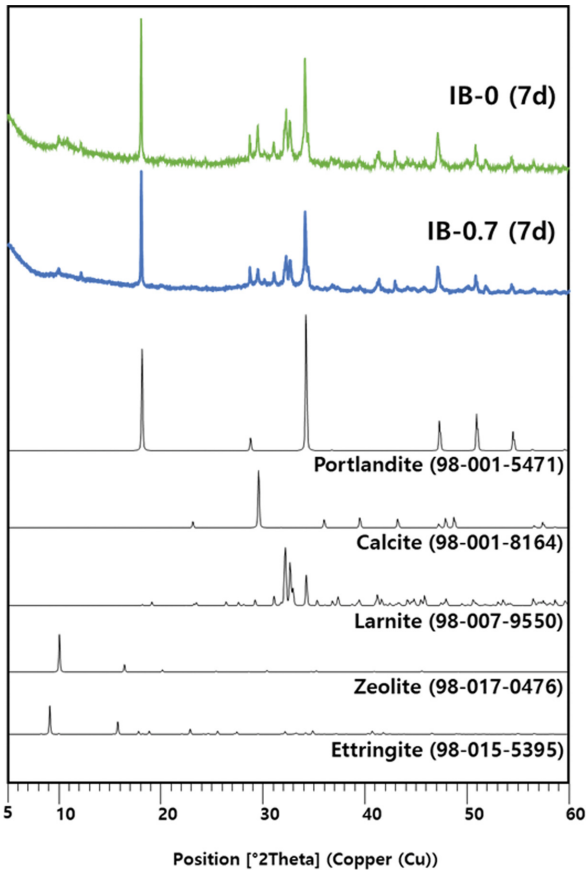


Fig. 9. XRD patterns of IB-0 (7d) and IB-0.7 (7d).

www.kci.go.kr

보이나, 이산화탄소 주입량이 증가할수록 Larnite의 잔여량이 대폭 감소하는 것으로 나타났다. 이를 통해 이산화탄소를 주입할 경우 시멘트 기본 광물인 C2S의 반응이 기존 샘플 대비 활발히 발생하여, C-S-H 등과 같은 수화생성물의 생성을 촉진하여[12] 보다 높은 강도를 나타낸 것으로 판단된다.

3.3. 콘크리트 인터로킹 블록 제조

앞서 진행한 사전 실험 결과 내용을 기반으로 하여 20 × 10 × 6 cm 규격의 시편을 제작하였다. 실제 현장 설비와 동일한 방법으로 블록을 제작하기 위해 실험실 규모의 프레스를 자체적으로 제작하였으며, 최적 가압 하중을 선정하기 위해 IB-0 샘플의 배합을 사용해 실험을 진행하였다. 제작한 프레스의 최소 및 최대 하중 범위 내에서 500 kg 단위로 블록을 제작한 후 재령 1일의 압축강도 측정을 통해 최적 가압 하중을 선정하였으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

실험 결과 가압 하중이 높을수록 높은 압축강도 경향을 보였으나, 4,500 kg 이상의 하중이 가해질 경우 샘플 내의 수분이 몰드 밖으로 새어 나오는 현상이 발생하여 4,000 kg을 최적 가압 하중으로 선정하여 블록을 제조하였다.

프레스의 최적 가압 하중 및 사전 실험과 동일한 배합비를 사용하여 콘크리트 인터로킹 블록을 제작하였으며, 이후 측정된 휨강도 및 압축강도 결과는 사전 실험 결과와 동일하게 나타났다(Table 5). 또한 이산화탄소 주입 여부와 관계없이 육안상 동일한 외관을 가지는 것으로 나타났다(Fig. 10).

즉, 최적 범위 내에서 이산화탄소를 주입할 경우 기존 배합 대비 높은 강도를 발현할 수 있으며, 최적 범위 이후에서도 기존 배합과 비슷한 수준의 강도 경향을 보였다. 따라서 추가 실험을 통한 다양한 현장 조건에 따른 배합 조건 선정을 통해 In-situ 탄산화기술을 다양한 콘크리트 2차제품에 활용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 In-situ 탄산화기술을 적용한 콘크리트 2차제품 제조에 대한 연구를 진행하였으며 이를 위해 이산화탄소 주입용 믹서 및 프레스를 설계·제작하여 이산화탄소 주입량에 따른 물성 및 미세구조분석을 수행하였다. 또한 사전 실험을 통해 최종적으로 제조될 콘크리트 인터로킹 블록의 물성을 예상 및 비교하였으며, 상기 분석을 통한 연구 결과는 다음과 같다.

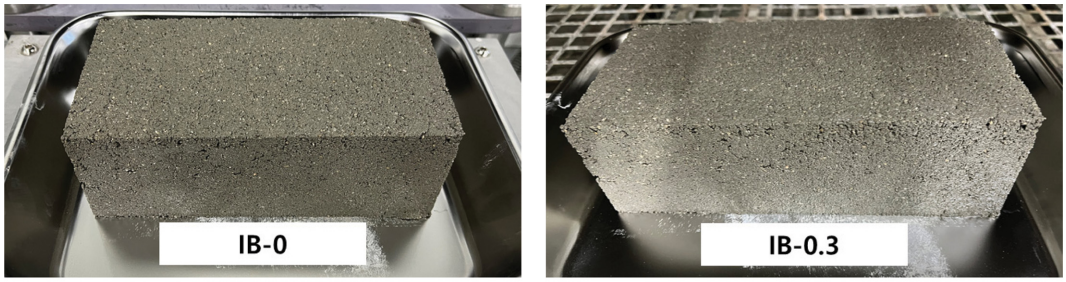
Table 4
Compressive strength test results on different pressure

Weight (kg)	2,000	2,500	3,000	3,500	4,000	4,500
C.S*) (MPa)	19.7	21.9	25.3	29.1	32.9	33.1

*) C.S : Compressive strength

Table 5
Flexural and compressive strength test results

Sample	Flexural strength (MPa)	Compressive strength (MPa)
IB-0	6.2	47.6
IB-0.3	6.7	51.4
IB-0.7	5.8	37.3



(a) IB-0 (b) IB-0.3

Fig. 10. Photo of concrete interlocking block with/without CO_2 gas injection.

www.kci.go.kr

1) 이산화탄소 주입량에 따른 휨강도 및 압축강도 결과는 시멘트량 대비 0.3 % 주입시까지 기존 배합 대비 높은 강도 거동을 보였으며, 0.5 % 이상의 배합에서도 기존 배합보다 소폭 낮은 강도를 가지지만 한국 산업 규격(KS) 상 콘크리트 인터로킹 블록의 강도 기준을 만족하는 결과를 보였다.

2) X-선 회절 분석 결과 이산화탄소 주입량이 증가할수록 Larnite 결정의 생성량이 대폭 감소하는 결과를 통해 이산화탄소의 주입이 C-S-H 등과 같은 수화생성물의 생성에 기인하여 높은 강도 거동을 나타내는 것으로 판단된다.

3) 따라서 콘크리트 2차제품에 이산화탄소를 주입하여도 강도가 유사 수준을 보이는 현상이 관측되었으며, 이를 통해 CCUS 관점에서 In-situ 탄산화기술을 다양한 콘크리트 2차제품에 활용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20212010200080, 시멘트 산업 발생 CO_2 활용 In-situ 탄산화 기술개발).

References

[1] C.W. Hargis, I.A. Chen, M. Devenney, M.J. Fernandez, R.J. Gilliam and R.P. Thatcher, “Calcium carbonate cement: A carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technique”, J. Mater. 14 (2021) 2709.

[2] J. Farfan, M. Fasihi and C. Breyer, “Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X”, J. Clean. Prod. 217 (2019) 821.

[3] M.G. Plaza, S. Martinez and F. Rubiera, “CO_2 capture, use, and storage in the cement industry: State of the art and expectations”, Energies. 13 (2021) 5692.

[4] J. Taylor and L. Aldridge, “Full-profile rietveld quantitative XRD analysis of portland cement: Standard XRD profiles for the major phase tricalcium silicate (C3S: 3CaO.SiO2).”, Powder Diffr. 8 (1993) 138.

[5] Z. Zhang and G.W. Scherer, “Physical and chemical effects of isopropanol exchange in cement-based materials”, Cem. Concr. Res. 145 (2021) 106461.

[6] A. Mezhov, D. Kulisch, A. Goncharov and S. Zhutovsky, “A comparative study of factors influencing hydration stoppage of hardened cement paste”, Sustainability 15 (2023) 1080.

[7] N.A. Voglis, G.T. Kakali and S.G. Tsivilis, “Identification of composite cement hydration products by means of X-ray diffraction”, Mikrochim. Acta. 136 (2001) 181.

[8] Z.H. Ou, B.G. Ma and S.W. Jian, “Comparison of FT-IR, thermal analysis and XRD for determination of products of cement hydration”, Adv. Mat. Res. 168-170 (2010) 518.

[9] K.L. Scrivener, T. Fullmann, E. Gallucci, G. Walenta and E. Bermejo, “Quantitative study of portland cement hydration by X-ray diffraction/rietveld analysis and independent methods”, Cem. Concr. Res. 34 (2004) 1541.

[10] A. Mendes, W.P. Gates, J.G. Sanjayan and F. Collins, “NMR, XRD, IR and synchrotron NEXAFS spectroscopic studies of OPC and OPC/slag cement paste hydrates”, Mater. Struct. 44 (2011) 1773.

[11] D. Wang, Y. Fang, Y. Zhang and J. Chang, “Changes in mineral composition, growth of calcite crystal, and promotion of physico-chemical properties induced by carbonation of β-C_2S”, J. CO2 Util. 34 (2019) 149.

[12] Y. Li, “Effect of post-fire curing and silica fume on permeability of ultra-high performance concrete”, Constr. Build. Mater. 290 (2021) 123175.

www.kci.go.kr