

스마트 시티 구현을 위한 요소기술로써 균열 자기치유 캡슐 활용 프리캐스트 콘크리트의 품질특성 평가에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Quality Properties of Precast Concrete Utilizing Self-Healing Capsules as an Essential Technology for Smart City Implementation

오성록¹ · 남은준^{2*} · 양능원³ · 최연왕⁴

Sung-Rok Oh¹ · Eun-Joon Nam^{2*} · Neung-Won Yang³ · Yun-Wang Choi⁴

(Received December 6, 2023 / Revised December 14, 2023 / Accepted December 15, 2023)

This paper aims to evaluate the quality characteristics and healing performance of precast concrete incorporating self-healing technology as a key technique for the construction of smart cities. The study found that precast concrete mixed with hybrid capsules exhibited a tendency of reduced slump and air content, impacting the quality characteristics. Specifically, the slump decreased by up to 14 %, and the air content by up to 9 %. Moreover, the inclusion of hybrid capsules in the concrete resulted in a maximum decrease of 16 % in compressive strength and 18 % in flexural strength. However, the introduction of hybrid capsules significantly enhanced the crack healing performance. The assessment through water permeability tests showed that the healing rate of 0.3 mm crack width after a 28-day healing period improved as the mixing ratio increased, with the healing rates at 1 %, 3 %, and 5 % hybrid capsule mixtures observed to increase by approximately 16 %, 25 %, and 32 %, respectively.

키워드 : 균열, 스마트 시티, 자기치유, 프리캐스트 콘크리트, 하이브리드 캡슐

Keywords : Crack, Smart city, Self-healing, Precast concrete, Hybrid capsule

1. 서론

기존의 현장타설 공법을 이용한 철근 콘크리트 구조물은 거푸집 설치 및 콘크리트 타설 시 외부 요인에 영향을 받아 품질 확보에 한계가 있으며, 인력 위주의 시공으로 인한 부실시공 및 안전사고의 위험이 증가하여 공사비용과 공사기간이 증가하는 경향이 있다 (Oh et al. 2020; Park 2017). 이러한 측면에서 프리캐스트 공법은 플랜트에서 완제품 또는 반제품 형태로 사전제작하여 보관하며 (Kim 2018; Choi 2001), 필요시 현장에서 양중 장비를 이용하여 조립하는 방식이기 때문에 현장타설 공법과 달리 현장작업의 간소화 및 작업 효율이 증대되어 공기 단축이 가능하며, 철근 콘크리트

구조물 본래의 고품질을 확보할 수 있다(Han 2005; Kang et al. 2017). 이러한 장점으로 인하여 프리캐스트 공법을 활용한 콘크리트는 최근 대두되고 있는 스마트 시티 구현을 위한 다기능성 콘크리트 제조시 용이하며, 모재로써 활용이 가능하다. 스마트 시티에 적용하기 위한 스마트 콘크리트는 구조물의 실시간 모니터링을 가능하게 하는 센서, 무선 통신, 데이터 분석 기술을 통합하여 광범위하게 다루고 있다. 이러한 기술들은 궁극적으로 콘크리트에 발생하는 균열을 감지하여 사전에 예측이 가능하도록 기능을 부여하는 것으로 응력이나 진동을 사전 감지하여 균열이 발생되지 않도록 유지 관리를 실시하거나 균열이 발생된 곳을 사후보수하는데 있다. 균열에 대응하기 위한 다양한 방법이 있지만 콘크리트

* Corresponding author E-mail: eunjoon.nam@gmail.com

¹(주)뉴저스트 기술연구소 책임연구원 (Research & Development Team, Newjust Co., Ltd., Gwangmyeong, Gyeonggi, 14348, Korea)

²고려대학교 미래건설환경융합연구소 박사후연구원 (f-ace lab, Korea University, Seoul, 02841, Korea)

³세명대학교 토목공학과 박사과정 (Department of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon, Chungbuk, 27136, Korea)

⁴세명대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon, Chungbuk, 27136, 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

자체의 재료적 측면에서는 최근 보고되고 있는 균열 자기치유 기술을 활용할 수 있다.

특히, 균열 자기치유 기술은 유지보수 비용을 줄이고 구조물의 수명을 연장하는데 목적이 있으며, 반응기구는 내부의 균열을 스스로 복구할 수 있는 능력을 극대화하는 데 있다. 이는 건조수축균열, 중성화 및 동해와 같은 다양한 원인으로 인한 구조물의 손상을 예방할 수 있다(Schlangen and Sangadji 2013; An and Shin 2014). 자기치유를 위한 소재는 캡슐, 박테리아, 유기물 혼합제 등 다양하지만 캡슐의 경우 타 소재와는 다르게 치유소재가 캡슐막에 의하여 보호되므로 초기뿐만 아니라 장기재령에도 효과를 유지할 수 있다는 이점이 있다(Kim et al. 2022; Oh et al. 2019; Choi et al. 2022). 매커니즘은 균열이 발생할 경우 캡슐이 파괴되어 내부의 치유 소재가 균열부위로 흘러나와 반응생성물에 의하여 균열을 치유하는 방식이다. 캡슐은 사이즈에 따라 나노, 마이크로 및 매크로 캡슐 등 분류할 수 있지만 치유소재의 상(Phase)에 따라서도 분류할 수 있다. 액체타입의 소재인 액상캡슐 및 고체타입의 고상캡슐은 각각 다른 매커니즘을 가지며, 반응생성물, 치유양생의 방법도 달라 서로 다른 장단점을 가지고 있다. 따라서 종래에는 각 타입의 캡슐을 각각 사용한 연구가 보고되고 있지만 2가지 타입을 혼합 사용한 하이브리드 캡슐 또한 연구결과를 찾아볼 수 있다. 하이브리드 캡슐은 다양한 종류의 치유 소재를 결합하여 서로의 장점은 부각하고 단점을 상호보완하여 균열 복구 능력을 향상시킬 수 있다(Park 2021; Choi et al. 2022).

따라서 본 연구에서는 스마트 시티 구현을 위한 요소기술로써 자기치유 기술을 접목한 프리캐스트 콘크리트의 품질특성을 평가하고자 하며, 치유성능을 검토하였다. 자기치유 기술은 하이브리드 캡슐을 활용한 균열 자기치유 캡슐을 활용하여 적용 가능성 및 실용성을 고찰하였다. 본 연구의 결과는 스마트 시티 구축에 있어서 지속 가능한 건축 자재의 중요성을 강조하며, 미래 도시의 효율적이고 지속 가능한 인프라 구축을 위한 새로운 접근 방법을 제시하고자 한다. 또한, 이 연구는 스마트 시티 기술의 혁신적인 발전과 적용을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 균열 자기치유 캡슐

2.1.1 고상캡슐

고상캡슐(Solid Capsules, SC)에 사용된 재료는 무기재료인 아연계 팽창제(Calcium Sulfoaluminate, CSA)와 무수석고(Anhydrous

Table 1. Chemical composition of expansion materials

Type	%
Calcium oxide	45 - 55
Calcium sulfate, gypsum	25 - 35
Calcium sulfoaluminate	5 - 10
Aluminium dicalcium, iron pentaoxide	1 - 5

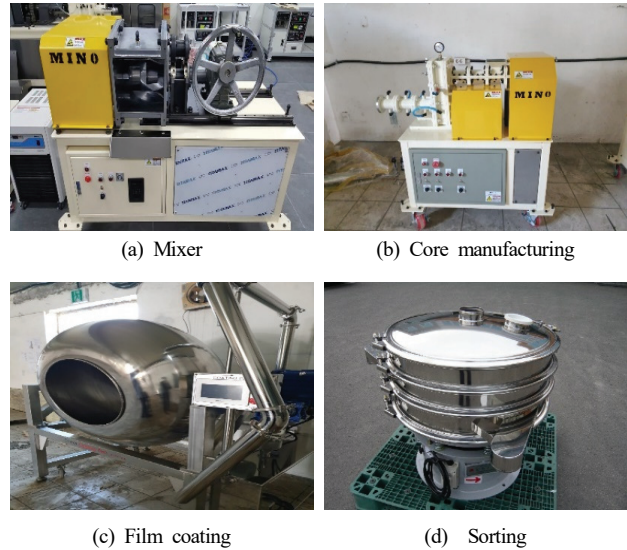


Fig. 1. Equipment of solid capsules

Gypsum, $CaSO_4$)를 혼합하여 사용하였다. CSA는 수화반응에 의하여 침상형 결정인 에트링가이트(ettringite)를 생성하며, $CaSO_4$ 는 결정성장 촉진 및 육각판상의 결정을 생성한다. CSA 및 $CaSO_4$ 의 치유반응은 무수석고의 결정을 통하여 균열 영역의 공간을 충전하며, 아연계 팽창제의 결정을 통하여 썩기효과를 얻을 수 있다(Nam 2020).

SC의 코어재료 제조를 위해서는 분말 상태인 재료를 일정 크기로 입자화하기 위하여 응집제를 사용하여 반죽한 다음 코어재료로 제조된다. 응집제(coagulant)는 입자화 과정 중 반응하는 것을 방지하기 위하여 수분함량이 최소화된 응집제를 적용하여야 하며(Oh 2017), 또한 입자화하기 위한 점성이 요구되므로 본 연구에서는 우레탄계 응집제를 사용하였다. 응집제를 통하여 입자화된 코어재료는 수분과 반응하기 때문에 콘크리트와 혼합시 배합수와의 반응을 방지할 수 있어야 하며, 코어재료의 표면강도를 증가시키기 위하여 막재료를 코팅하였다. Table 1은 팽창재료의 화학적 성분을 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 막재료는 폴리우레탄(polyurethane)을 사용하였으며, 폴리우레탄의 점성조절을 위하여 톨루엔(toluene)을 첨가하였다.

Table 2. Chemical composition and physical properties of silicate-based materials

Type	Potassium silicates	Sodium silicates	Lithium silicates
Specific gravity (20 °C)	1.27-1.29	≥ 1.38	1.15-1.20
K ₂ O (%)	10.0-11.0	-	-
Na ₂ O (%)	-	9.0-10.0	-
Li ₂ O (%)	-	-	1.0-1.5
SiO ₂ (%)	21.5-22.5	28.0-30.0	18.0-22.0
Fe ₂ O ₃ (%)	0.05	0.03	-
Mole fraction	3.2-3.5	3.10-3.30	8.5
Viscosity (cps, 20 °C)	≤ 20	-	-
Solids content (%)	20-52	30-56	20-25

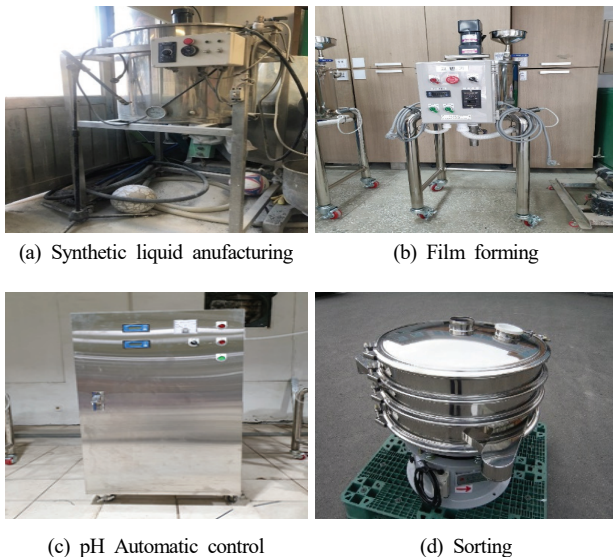


Fig. 2. Equipment of liquid capsules

Fig. 1과 같이 SC는 Fig. 1 (a)의 장비를 통하여 코어 재료를 반죽한다. 반죽된 코어는 Fig. 1 (b)의 장비를 통하여 코어를 입상화하며, 제조된 코어는 Fig. 1 (c)의 장비를 통하여 막 코팅을 실시한다. 최종적으로 Fig. 1 (d)의 장비를 통하여 크기를 분류하여 제조된다.

Fig. 3 (a)는 SC의 형태 및 크기를 나타낸 것으로 SC의 크기는 600~2,360 μm로 제조되었다. 본 논문에서는 선행연구(Oh et al. 2019; Nam 2020)를 통하여 적정 크기를 선정하였으며, 본 논문에서는 850 μm의 크기만을 선별하여 사용하였다.

2.1.2 액상캡슐

액상캡슐(Liquid Capsules, LC)에 사용된 재료는 무기재료인 규산염계 무기재료를 사용하였다. 규산염계 무기재료는 규산칼륨

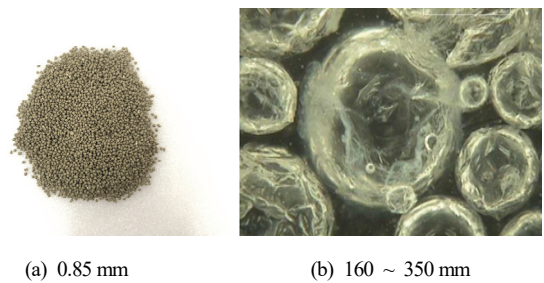


Fig. 3. Capsule samples

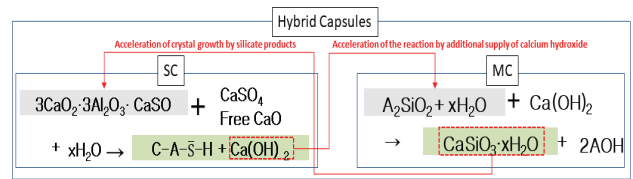


Fig. 4. Hybrid capsules mechanism

(Potassium Silicates, PS), 규산나트륨(Sodium Silicates, SS) 및 규산리튬(Lithium Silicates, LS)를 혼합하여 사용하였다. Table 2는 LC의 코어재료에 사용된 규산염계 무기재료의 화학성분을 나타낸 것이다. 규산염계 무기재료의 반응은 시멘트 수화물인 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과 반응하며, 규산칼슘 수화물(CaSiO₃ · xH₂O)과 강알칼리 금속이온인 K⁺, Na⁺ 및 Li⁺을 생성한다. 치유반응은 규산칼슘 수화물이 겔화되어 균열영역을 충전하며, 강알칼리 금속이온은 균열주위의 미수화 시멘트의 추가 수화를 촉진시킨다. 또한 이러한 생성물들은 균열 치유뿐만 아니라 모체내부를 치밀하게 해주며, 강알칼리인 콘크리트의 pH를 유지하거나 보충하는 효과를 얻을 수 있다(Kim 2021).

LC의 막재료는 일반적인 폴리우레탄(polyurethane, PU), 우레아(urea) 및 포름알데히드(formaldehyde)를 사용하였으며, PU의 점도조절을 위하여 톨루엔(toluene)을 첨가하여 약 60 % 용해하였다(Kim 2021). LC는 Fig. 2 (a)의 장비를 통하여 코어 재료를 합성하며, 합성된 코어는 Fig. 2 (b)의 장비를 통하여 막 형성을 실시한다. 이 때 Fig. 2 (c)의 장비를 통하여 pH 조절을 실시하며 합성한다. 최종적으로 Fig. 2 (d)의 장비를 통하여 크기를 분류하여 제조된다. Fig. 3 (b)는 LC의 형태 및 크기를 나타낸 것으로 LC의 크기는 30~350 μm로 제조되었다. 본 논문에서는 선행연구(Kim 2021)를 통하여 적정 크기를 선정하였으며, 최적의 입자범위인 160~350 μm를 사용하였다.

2.1.3 하이브리드 캡슐

SC의 단점 및 LC의 단점을 서로 상호 보완할 수 있도록 2가지 타입의 캡슐을 혼합한 하이브리드 캡슐(hybrid capsules, HC)은

입경 차이에 의한 입도 보정 효과를 얻을 수 있으며, SC로부터 발생하는 수산화칼슘은 LC의 반응 촉매제로 작용하고 마이크로 캡슐로부터 발생하는 규산염은 SC 촉매제로 작용할 수 있다. 수분에 취약한 LC의 경우 치유 물질이 수분에 해리되더라도 주위의 SC 반응을 촉진하는 효과를 얻을 수 있어 서로의 장점을 부각시키고 단점을 보완할 수 있다. Fig. 4는 HC의 메커니즘을 나타낸 것이다.

2.2 사용재료

프리캐스트 콘크리트에 사용된 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트(ordinary portland cement, OPC)를 사용하였다. 또한 실험에 사용된 골재는 강모래(river sand, S) 및 최대치수 20 mm의 부순 자갈(crushed gravel, G)을 사용하였다. 실험에 사용된 화학혼화제(chemical admixture, ad)는 캡슐의 분산 및 워커빌리티 확보를 위하여 국내 H사의 폴리카본산계 고성능 감수제를 사용하였다.

2.2.1 배합

최근 설계기준(Korean Design Standard, KDS) 및 표준시방서(Korean Construction Specification, KCS)가 2021년 건설기준코드로 통합체제로 개편되었다. 따라서 프리캐스트 콘크리트의 배합은 KCS 14 20 52 프리캐스트 콘크리트(2021)에 준하였으며, 이외의 사항은 KCS 14 20 10 일반콘크리트(2021)에 준하여 배합설계를 실시하였다. 본 논문에서 사용된 프리캐스트 콘크리트의 배합 기준은 수처리 구조물인 콘크리트 수조에 적용되는 배합을 적용하였다.

Table 3은 콘크리트 제조를 위한 제원표를 나타낸 것이며, Table 4는 콘크리트의 배합표를 나타낸 것이다. HC는 잔골재의 질량에 대하여 혼합량 4수준(0 %, 1 %, 3 % 및 5 %)을 적용하였으며, 치유성능에 국한하여 콘크리트의 굵은 골재를 분리하여 평가하였다.

2.3 평가방법

2.3.1 기초 품질성능

프리캐스트 콘크리트의 기초 품질성능은 유동성능 및 역학성능을 평가하였다. 유동성능에서는 슬럼프 및 공기량을 평가하였으며, KS F 2402 “포틀랜드 시멘트 콘크리트 슬럼프 시험방법” 및 KS F 2421 “굳지 않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기 함유량 시험방법”에 준하여 실시하였다. 역학성능에서는 압축강도를 평가하였으며, KS F 2405 “콘크리트의 압축강도 시험방법”에 준하여 실시하였다.

Table 3. Specification of precast concrete

Item	Required performance
Compressive strength	45 MPa
Air	3 %
Slump	170 mm
Gmax	25 mm

Table 4. Precast concrete mixing table

Type	W/C	S/a	Unit weight of material (kg/m ³)				ad (C mass × %)	HC (S vol. × %)
			W	OPC	S	G		
HC-0	39.3	49.0	165	420	862	908	0.8	0
HC-1	39.3	49.0	165	420	862	908	0.8	1
HC-3	39.3	49.0	165	420	862	908	0.8	3
HC-5	39.3	49.0	165	420	862	908	0.8	5

2.3.2 치유성능

자기치유 성능은 KS규격 및 기준이 명확하게 제시되어 있지 않으므로 이에 따라 국내 친환경 자기치유 콘크리트 연구단(SHGC)에서 한국콘크리트학회에 제시한 제규격을 인용하였으며, “KCI-CT114 모르타르의 자기치유 성능평가를 위한 정수위 투수시험 방법”에 의하여 평가를 실시하였다. 균열 유도기간은 재령 28일이 경과 되었을 때 균열을 유도하였으며, 균열폭 0.3 mm가 되도록 균열 유도 필름을 삽입하여 균열을 제어하였다. 균열이 유도된 시험편은 치유재령 28일에 따라 각각 제작하였으며, 치유재령 일에 따라 각각 정수위 투수시험을 실시하여 투수량의 변화를 평가하였다. 정수위 투수시험 조건은 전자저울을 컴퓨터에 연결하여 실시간 투수량을 측정할 수 있도록 하였으며, 시험편의 함수상태를 동일하게 하기 위하여 최초 5분간의 투수량은 버리고 이후 1분 단위로 5분간 측정하여 실시간 투수량을 측정하였다. Fig. 5는 정수위 투수시험 전경을 나타낸 것이며, Fig. 6은 균열면 관찰 전경을 나타낸 것이다.

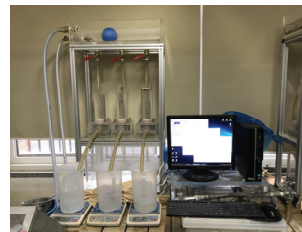


Fig. 5. Constant water head permeability test



Fig. 6. Crack surface observation test

3. 실험결과 및 고찰

3.1 콘크리트의 품질성능

Fig. 7은 HC 혼합률과 슬럼프 로스의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 7의 결과, HC 혼합에 따라 슬럼프가 감소하는 경향이 나타났으며, 혼합률이 증가함에 따라 슬럼프가 감소하는 것으로 나타났다. HC-0의 슬럼프는 약 175 mm로 나타났으며, HC-1, HC-3 및 HC-5의 슬럼프는 HC-0의 슬럼프와 비교하여 HC 혼합률 2% 증가함에 따라 약 4%, 8% 및 14% 감소하였다. 이러한 결과는 선행연구에 따르면(Oh 2017; Kim 2021; Park 2021), HC는 혼합되는 과정에서 손실량이 약 10% 있는 것으로 보고하고 있으며, 그 원인으로는 콘크리트의 구성재료인 골재 및 믹서 블레이드와의 마찰 등에 의한 것으로 분석하고 있다. 따라서 이러한 결과는 이러한 원인에 기인하여 슬럼프가 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 HC 혼합률과 공기량의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과, HC-0의 공기량은 약 3.3%로 나타났으며, HC-1, HC-3 및 HC-5의 공기량은 약 3%, 6% 및 9% 감소하는 결과가 나타났다. 또한 HC 혼합률 2% 증가에 따라 비례적으로 약 3%씩 감소하는 결과가 나타났다. 이러한 결과는 HC 혼합에 따라 공기량이 다소 감소하는 것으로 판단되지만 오차범위 이내에서 감소수준이 크지 않으므로 HC 혼합률에 관계없이 동등수준인 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통하여 HC가 콘크리트의 공기량 확보에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 재령에 따른 HC 혼합률과 압축강도의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 9의 결과, HC-0의 재령 28일 압축강도는 약 45.6 MPa로 나타났으며, HC-1, HC-3 및 HC-5의 재령 28일 압축강도는 HC-0의 압축강도와 비교하여 4%, 7% 및 16% 감소하였다. 이러한 결과는 선행연구에 따르면(Oh 2017; Kim 2021; Park 2021), HC는 입자 강도가 콘크리트의 결합재 및 골재보다 상대적으로 작기 때문에 HC가 존재하는 영역은 하중을 부담할 수 없어 강도가 감소하는 것으로 판단되며, HC 혼합률이 증가할수록 감소하는 경향이 나타난 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통하여 HC가 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향은 HC 혼합에 따라 압축강도를 감소시키는 것으로 판단되며, 혼합률 증가에 따라 감소하여 최대 16% 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 재령에 따른 강도 발현율은 배합 종류에 관계없이 유사한 수준으로 나타나 HC 혼합이 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여 HC가 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향은 HC 혼합에 따라 압축강도를 감소시키는 것으로 판단되며, 혼

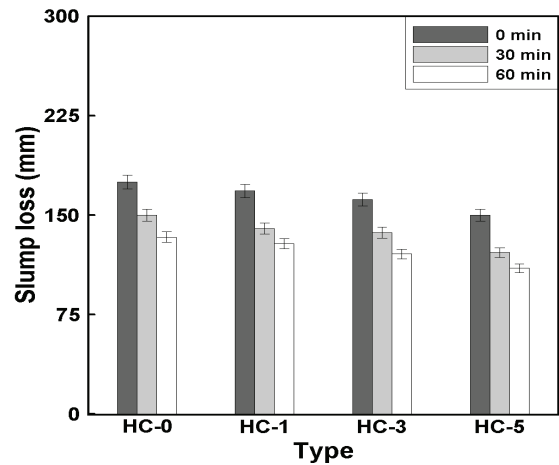


Fig. 7. Relationship between HC mixing rate and slump loss

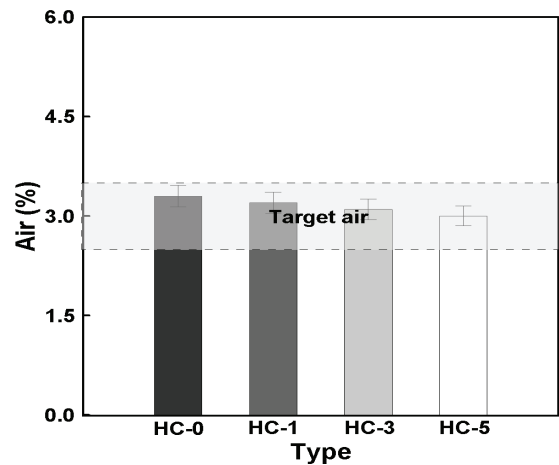


Fig. 8. Relationship between HC mixing rate and air

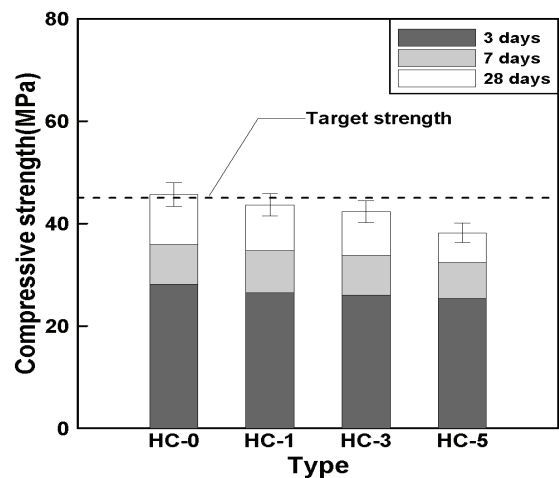


Fig. 9. Relationship between HC mixing ratio and compressive strength according to age

합률 증가에 따라 감소하여 최대 16 % 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 재령에 따른 강도 발현율은 배합 종류에 관계없이 유사한 수준으로 나타나 HC 혼합이 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.

3.2 콘크리트의 치유성능

Fig. 10은 HC-0, HC-1, HC-3 및 HC-5의 치유재령에 따른 초기 투수량과 치유율의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 10의 결과, 모든 배합은 치유기간 경과에 따라 치유율이 증가하는 경향이 나타났으며, HC 혼합률이 증가함에 따라 치유수준이 증가하는 결과가 나타났다. 이러한 결과는 HC를 혼합하지 않은 HC-0의 경우에도 자연적인 치유성능을 가지고 있음을 의미하며, 균열 주변의 미수화 시멘트 입자에 의하여 결정물이 균열에 생성되어 균열폭 저감에 의한 유출수가 감소된 것으로 판단된다. HC의 효과는 기존의 자연적인 치유성능을 촉진시키고 향상시키는 것에 있다. HC는 SC에 의하여 침상형 에트리사이트 및 판상형 수산화칼슘 결정을 생성시키며, LC에 의하여 규산염계 생성물과 강알칼리 이온을 용출시킴으로 SC 및 LC의 상호보완 효과 뿐만 아니라 기존의 자연적인 치유성능을 향상시킬 수 있는 것이다. 선행연구에 따르면 초기 투수량이 1.0~1.8 ml/min.mm 일 때 0.3 mm 균열폭에 해당 투수량인 것으로 보고하고 있다.

초기 투수량이 1.0~1.8 ml/min.mm 영역의 회귀곡선을 통하여 0.3 mm 균열폭의 치유율은 치유기간 28일 경과 후 HC-0은 약 62 %, HC-1은 약 78 %, HC-3은 약 87 % 및 HC-5는 약 94 % 나타났다. HC 혼합에 따른 효과는 HC-0의 자연치유 성능에 대하여 HC-1은 약 $\Delta 16\%$, HC-3은 약 $\Delta 25\%$ 및 HC-5는 약 $\Delta 32\%$ 향상시키는 것으로 나타났다. HC 혼합률에 따른 치유성능은 HC가 최대인 HC-5의 치유율이 상대적으로 큰 경향이 나타났으며, 이러한 결과는 HC 혼합률이 증가할수록 상대적으로 많은 치유 생성물 발생 및 치유속도가 증가하기 때문에 치유율이 증가된 것으로 판단된다.

그러나 치유율을 증가시키기 위하여 다량의 HC를 혼합할 경우에는 기초품질이 저하되는 특징이 있으므로 목표 성능을 만족하는 수준에서 HC 혼합률을 결정하여야 할 것으로 판단된다. 본 연구조건에서는 관통균열을 기반으로 극한 조건의 치유율을 나타낸 것이므로, 실제 균열의 경우에는 보다 적은 혼합률로도 치유효과가 충분할 것으로 판단된다. 이러한 이유는 실제환경의 균열은 초기 미세균열이 발생하게 되며, 점차 확장되는 개념이다. HC는 균열 발생 즉시 반응이 시작되므로 초기 미세균열의 치유뿐만 아니라 균열 확장을 저감할 수 있기 때문에 더 적은 사용량을 통하여 큰

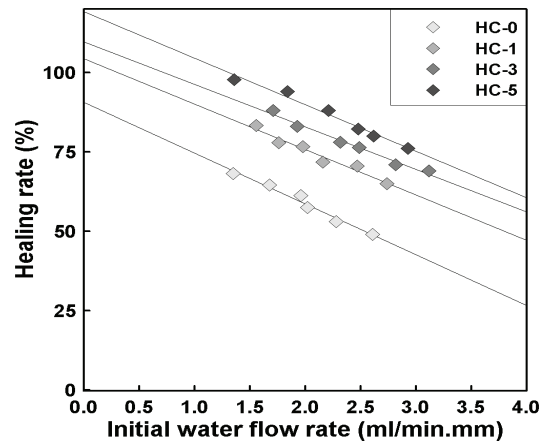


Fig. 10. Relationship between initial water flow rate and healing rate

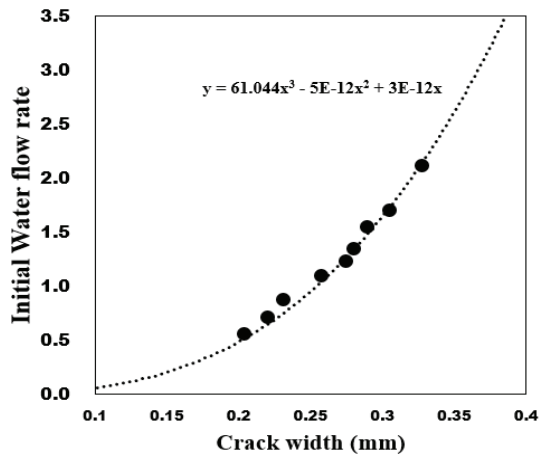


Fig. 11. Relationship between crack width and initial water flow rate

치유효과를 얻을 것으로 판단된다.

Fig. 11은 초기 투수량과 균열폭과 치유율의 관계를 나타낸 것으로 Fig. 11의 결과, 균열 도입 후 초기 유출수는 균열폭과 일정한 상관관계가 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 균열 도입 직후이므로 초기 유출수는 균열폭에 크게 의존한다는 것을 의미하며, HC 혼합이 되더라도 치유반응 이전의 결과이므로 초기 유출수만으로 균열폭 환산이 가능함을 의미한다. 선행연구에 따르면 (Lee et al. 2020; Lee et al. 2021), 등가 균열폭 개념을 도입하여 초기 투수량을 통하여 균열폭을 예측할 수 있다. 균열유도 시험편의 균열은 표면의 균열폭만 관찰이 가능함에 따라 시험편의 전체 균열폭을 예측하기 어렵다. 따라서 균열폭과 초기 투수량의 관계를 통하여 초기 투수량으로 균열폭을 예측하기 위한 분석을 실시하였다.

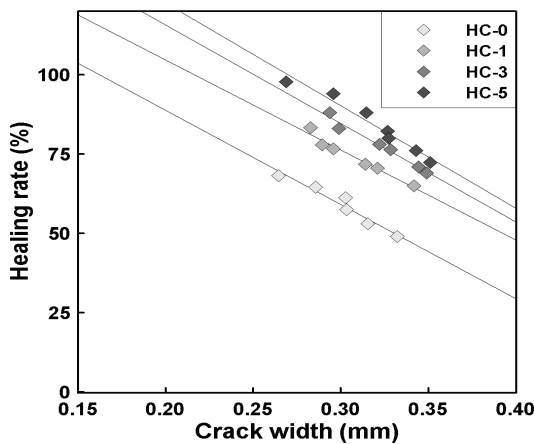


Fig. 12. Relationship between crack width and healing rate according to HC mixing ratio (healing age 28 days)

이러한 결과는 정수위 투수시험에 따른 초기 투수량을 통하여 균열폭을 예측하고 해당 균열의 자기치유 성능을 평가하는 지표로 활용할 수 있다.

Fig. 12는 Fig. 10 및 Fig. 11을 활용하여 변환시킨 HC 혼합률에 따른 초기 균열폭과 치유율을 나타낸 것이다. 이러한 결과는 정수위 투수 시험에 의한 실험결과를 균열폭으로 환산함에 따라 상대적으로 직관적인 평가가 가능하며, 정수위 투수 시험에 의한 실험결과를 균열폭 측면에서 분석하는데 활용 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 스마트 시티 구현을 위한 요소기술로서 자기치유 기술을 접목한 프리캐스트 콘크리트의 품질특성을 평가하고, 치유성능을 검토하였으며, 균열 자기치유 캡슐 활용 프리캐스트 콘크리트를 제조하여 적용 가능성 및 실용성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 균열 자기치유 하이브리드 캡슐을 혼합한 프리캐스트 콘크리트의 품질성능을 평가한 결과, 슬럼프는 하이브리드 캡슐을 혼합한 경우 최대 약 14 % 감소하였으며, 공기량은 최대 약 9 % 감소하였다.
2. 균열 자기치유 하이브리드 캡슐이 압축강도에 미치는 영향은 재령 28일 기준 최대 16 % 감소하였으며, 휨강도는 최대 18 % 감소하였다. 치유성능은 0.3 mm 균열 폭에 대하여 균열 자기치유 하이브리드 캡슐을 혼합한 경우 혼합율이 증가함에 따라 치유율이 증가하는 경향이 나타났다.

3. 균열 자기치유 하이브리드 캡슐의 혼합율이 치유성능에 미치는 영향은 기준 콘크리트의 치유성능을 1 %의 경우 약 $\Delta 16\%$, 3 %의 경우 약 $\Delta 25\%$ 및 5 %의 경우 약 $\Delta 32\%$ 향상시키는 것으로 나타났으며, 최소 75 %에서 최대 90 %의 치유율을 보여주었다.

이러한 결과를 통하여 스마트 시티 구현을 위한 요소기술로서의 균열 자기치유 캡슐 활용 프리캐스트 콘크리트의 가능성을 보여줄 수 있으며, 지속 가능하고 안전한 도시 인프라 구축에 기여할 것으로 기대된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통 DNA플러스 융합기술대학원 육성사업의 연구비 지원(과제번호 RS-2023-00250434)에 의해 수행되었습니다.

References

- An, E.J., Shin, M.S. (2014). Healing mechanisms and assessment techniques of self-healing concrete, Proceedings of Korea Concrete Institute, **26(2)**, 477-479 [In Korean].
- Choi, W.J. (2001). An Experimental Study on Structural Properties of the Splice Sleeve for the P.C Members, Master's Thesis, Myongji University [in Korean].
- Choi, Y.W., Kim, C.G., Nam, E.J., Oh, S.R. (2022). An experimental study on the healing performance of complex capsules using multiphase inorganic materials for crack self-healing of cement mortars, Materials, **15(24)**, 8819.
- Han, J.H. (2005). An Experimental Study on Dry-Connections for Precast Concrete Walls, Master's Thesis, Seoul National University [in Korean].
- Kang, D.M., Park, Y.G., Lee, H.J., Moon, D.Y. (2017). Experimental studies on bond and splice performance of splice sleeve for connecting rebar, Journal of the Korean Society for Railway, **20(2)**, 257-264 [In Korean].
- Kim, C.G. (2021). A Study on the Development of Sectional Repair

- System Utilizing Crack Self-Healing Microcapsules, Ph.D Thesis, Semyung University [In Korean].
- Kim, C.G., Choi, Y.W., Choi, S., Oh, S.R. (2022). A study on the healing performance of mortar with microcapsules using silicate-based inorganic materials, *Materials*, **15(24)**, 8907.
- Kim, S.G. (2018). Structural Performance of Horizontal Joint of Precast Concrete Structural Wall, Master's Thesis, Korea National University of Transportation [In Korean].
- Lee, K.M., Kim, H.S., Min, K.S., Choi, S. (2020). Evaluation method of self-healing performance of cement composites, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **8(1)**, 134-142 [In Korean].
- Lee, W.J., Kim, H.S., Choi, S., Park, B.S., Lee, K.M. (2021). Evaluation method of healing performance of self-healing materials based on equivalent crack width, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **9(3)**, 383-388 [In Korean].
- Nam, E.J. (2020). A Study on the Self-Healing Properties of Cement Composites Using Solid Capsules with Crystal Growth Type Inorganic Materials, Master's Thesis, Semyung University [In Korean].
- Oh, S.R. (2017). A Study on the Development and Properties of Cementitious Composite Materials Utilizing Capsules for Crack Self-Healing, Ph.D Thesis, Semyung University [In Korean].
- Oh, S.R., Choi, Y.W., Kim, Y.J. (2019). Effect of cement powder based self-healing solid capsule on the quality of mortar, *Construction and Building Materials*, **214**, 574-580.
- Oh, Y.H., Moon, J.H., Lee, G.C. (2020). Structural behavior of the connections in PC double-walls as a lateral force resisting system, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **36(6)**, 201-210 [In Korean].
- Park, B.H. (2017). Construction Period and Cost Analysis of Composite Method Using Hollow-PC Column, Master's Thesis, Korea National University of Transportation [In Korean].
- Park, J.H. (2021). A Study on the Crack Self-Healing Properties of Cement Mortar Using Hybrid Capsules, Master's Thesis, Semyung University [In Korean].
- Schlangen, E., Sangadji, S. (2013). Addressing infrastructure durability and sustainability by self healing mechanisms-Recent advances in self healing concrete and asphalt, *Procedia Engineering*, **54**, 39-57.

스마트 시티 구현을 위한 요소기술로서 균열 자기치유 캡슐 활용 프리캐스트 콘크리트의 품질특성 평가에 관한 실험적 연구

본 논문은 스마트 시티 구축을 위한 핵심 기술로서 자기치유 기술을 적용한 프리캐스트 콘크리트의 품질 특성과 치유 성능을 평가하는 것을 목표로 하였다. 연구 결과는 하이브리드 캡슐을 혼합한 프리캐스트 콘크리트가 슬럼프와 공기량에서 감소하는 경향을 보이며, 이는 품질 특성에 일정한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 슬럼프는 최대 14 %, 공기량은 최대 9 % 감소하였다. 또한, 하이브리드 캡슐을 혼합한 콘크리트는 압축강도와 휨강도에서 각각 최대 16 %와 18 % 감소하는 결과를 보였다. 그러나 하이브리드 캡슐을 혼합함으로써 균열 치유 성능이 증진되는 결과를 얻었다. 정수위 투수 시험을 통한 평가에서, 치유기간 28일 후 0.3 mm 균열 폭의 치유율은 혼합률이 증가함에 따라 향상되었으며, 하이브리드 캡슐의 혼합률 1 %, 3 %, 5 %에서 각각 약 16 %, 25 %, 32 %의 치유율 향상이 확인되었다.