

캡슐화된 팽창성 무기재료 기반 고상 치유재 활용 시멘트 복합재료의 균열 자기치유 및 역학적 회복성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Crack Self-Healing and Mechanical Recovery Performance of Cement Composites Materials Using Encapsulated Expandable Inorganic Materials based Solid Healing Materials

최연왕^{1*} · 남은준² · 김철규³ · 오성록³

Yun-Wang Choi^{1*} · Eun-Joon Nam² · Cheol-Gyu Kim³ · Sung-Rok Oh³

(Received March 1, 2022 / Revised March 25, 2022 / Accepted March 25, 2022)

In this paper, to evaluate the effect of SC on the crack self-healing performance and mechanical recovery performance of cement composites, encapsulated intumescent inorganic material-based solid healing materials were prepared. SC was mixed with cement composite materials to evaluate the basic properties, permeability test, and load reload test. SC slightly improved the flow of cement composites, and the compressive strength decreased by about 10 %. Also, the flexural strength decreased by about 30 %. It was found that when SC was mixed with the cement composite material by 5 %, the crack self-healing rate of Plain was improved by about $\Delta 10$ %. As a result of the load reload test, it was found that the mechanical recovery rate of Plain was improved by about $\Delta 20$ %. In addition, as a result of analyzing the correlation between the crack self-healing rate and the mechanical recovery rate by the load reload test, it is judged that the healing area of the Plain can be increased due to SC.

키워드 : 캡슐화, 팽창성 무기재료, 고상 치유재, 균열 자기치유, 역학적 회복성능

Keywords : Encapsulation, Expandable inorganic materials, Solid healing materials, Crack self-healing, Mechanical recovery performance

1. 서론

최근 전 세계적으로 건설산업에 스마트 자기치유 소재가 등장하고 있다. 균열은 수축 및 기계적 하중과 같은 다양한 원인으로 인해 대부분의 콘크리트 구조물에서 발생하며, 이는 기능을 저하시키고 열화를 가속화시켜 구조물의 수명과 지속 가능성을 감소시킨다(De Belie et al. 2018). 자기치유 재료가 혼합된 콘크리트 구조물의 균열은 균열 초기에 치유될 수 있어 일반적인 유지관리에 소요되는 시간, 노력 및 비용을 크게 줄일 수 있다. 특히 자기치유 기술은 접근이 어려운 구조물에서도 콘크리트 구조물의 기계적 손상 및 균열을 효과적으로 복구할 수 있는 장점이 있다(De Rooij

and Schlangen 2011; Ferrara et al. 2018; Mihashi and Nishiwaki 2012). 예를 들어, 기존 지하철 터널에 균열로 인한 누수를 막기 위한 자기치유 보수공법을 적용한 사례들이 보고되고 있다(Murakami et al. 2015).

자기치유 재료는 크게 유·무기 광물질(Ahn and Kishi 2010), 박테리아(Van Tittelboom et al. 2010; Jonkers et al. 2010), 고희수성수지(SAP)(Lee et al. 2016) 및 마이크로캡슐(Alghamri et al. 2016; Nesterova et al. 2012) 등이 활용되고 있다. 유·무기 광물질은 미수화 시멘트(Huang et al. 2013)의 수화 및 Ca^{2+} 의 탄산화 반응을 통한 탄산칼슘의 생성(Van Tittelboom et al. 2012), 플라이애시 또는 플라이애시의 포졸란 반응을 통한 CSH 생성(Van

* Corresponding author E-mail: crete77@semyung.ac.kr

¹세명대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon, Chungbuk, 27136, Korea)

²세명대학교 건설공학과 박사과정 (Department of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon, Chungbuk, 27136, Korea)

³세명대학교 건설공학과 공학박사 (Department of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon, Chungbuk, 27136, Korea)

Tittelboom et al. 2012) 등을 통하여 시멘트 기반 재료의 자기치유 능력을 향상시킨다. 고로 슬래그(Van Tittelboom and De Belie 2009) 등의 지반재료를 사용한 콘크리트의 자기치유는 주로 팽창 및 재결정화를 통하여 자기치유 능력을 향상시킨다(Ahn and Kishi 2010). 또한, SAP의 경우 균열을 통해 들어오는 물을 흡수하여 급속히 팽창하며, 이를 통하여 균열을 물리적으로 차단한다(Lee et al. 2016). 박테리아는 박테리아의 대사 활동에 의하여 생성된 CO₂가 경화된 시멘트 페이스트에서 Ca(OH)₂와 반응하여 CaCO₃ 결정을 형성하여 균열을 치유한다(Van Tittelboom et al. 2010; Jonkers et al. 2010).

자기치유 물질을 다량 함유할 수 있는 캡슐을 이용한 자기치유 기술은 균열에 대하여 선택적으로 반응하는 장점이 있다. 자기치유 캡슐은 분말상 물질을 응집시켜 막으로 코팅된 고상 캡슐(SC) 과(Choi et al. 2017 ; Oh et al. 2019) 화학적 방법으로 캡슐화한 마이크로캡슐 또는 매크로캡슐로 분류할 수 있다(Nesterova et al. 2012 ; Qureshi et al. 2016). 캡슐은 대상에 따라 다른 반응 메커니즘을 적용하여 자기치유 성능을 제공할 수 있으며, 적절한 코어 물질 상을 선택할 수 있다(Mostavi et al. 2015). 또한, 마이크로캡슐 또는 중공관을 적절한 치유재로 매립하여 콘크리트 균열을 자율적으로 치유하기 위한 많은 시스템 및 기술이 제안되고 있다. 균열이 발생할 경우 캡슐의 막이나 튜브의 막이 파괴되어 내부의 치유재가 균열부로 방출하게 되며 균열 면에서 반응하여 균열을 봉인하거나 균열면을 함께 결합하여 균열을 치유한다(Li and Herbert 2012).

한편 시멘트 기반 복합재료 분야에서 자기치유 위하여 유·무기광물 혼합물을 사용하는 것은 광범위하게 연구되어 왔으며, 그 효과가 검증되고 있다. 그러나 유·무기광물 혼합물은 시멘트 보합재료 모재에 직접 첨가할 경우 혼합 즉시 반응하여 시멘트 복합재료의 유동 및 역학적 특성에 추가적인 부작용이 있으며, 이로 인하여 자기치유 효율이 감소할 수 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 여러 가지 방법이 제안되었다.

Choi et al.(2017)는 시멘트 분말로 캡슐화된 균열 자기치유 고체 캡슐을 제조하였으며, Kishi et al.(2015)의 경우 포졸란 재료, 시멘트 및 일부 특정 혼합물을 과립화하였다. 과립화 하기 위한 재료는 반응성 산화마그네슘(MgO), 실리카흙 및 벤토나이트 혼합물을 사용하였다. 이후 과립제의 초기 반응 지연을 위하여 폴리비닐 알코올(PVA) 기반 필름 코팅으로 캡슐화하였다(Alghamri et al. 2018; Feng et al. 2020). 또다른 방법은 경량골재에 액상의 자기치유재를 함침시킨 후 고분자 코팅을 통하여 캡슐화하는 것을 제안하였다(Alghamri et al. 2016).

본 연구에서는 분말형 무기재료인 팽창제 및 무수석고 혼합물을 캡슐화하는 핵심 생산공정과 입자의 표면을 보호하는 코팅공정을 결합하여 팽창성 무기재료 기반 고상 치유재(SC)를 제조하였다. 균열이 발생하기 전 SC의 막을 통한 수분 차단 성능을 유지하여 SC의 수화를 지연시킬 수 있어 장기간 경과 후에도 치유성능을 유지할 수 있다. 시멘트 복합재료와 혼합된 SC는 시멘트 복합재료 내부의 수분과 수화반응을 일으켜 수화 생성물을 통한 균열 치유 반응을 유도할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 SC가 시멘트 복합재료의 균열 자기치유 성능을 평가하고자 하며, 역학적 회복성능에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 또한, SC에 의한 균열 자기치유 성능은 역학적 회복성능과의 관계를 고찰하고자 하였다.

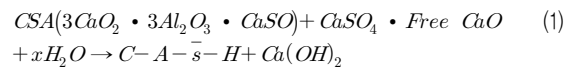
2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 팽창성 무기재료 기반 고상 치유재

팽창성 무기재료 기반 고상 치유재(SC)에 사용된 치유 물질은 수화 반응에 의하여 반응하는 팽창성 무기재료 혼합물이다. SC 제조에 사용된 팽창성 무기재료 혼합물은 칼슘 설포알루미네이트(CSA, Denka Co., Ltd., Tokyo, Japan)인 아원계 팽창제와 일반 무수석고(CaSO₄)를 혼합하여 제조하였다.

식 (1)은 SC의 반응 메커니즘을 나타낸 것이다. CSA는 팽창을 유도하는 수화반응에 의하여 에트링가이트를 생성하며, CaSO₄는 결정성장을 촉진하여 육각판상의 수산화칼슘 결정을 생성한다. 따라서 주요 치료제는 에트링가이트(C-S-H) 및 수산화칼슘(Ca(OH)₂) 결정에 의하여 균열을 치유한다.



SC의 제조 공정은 치유재료의 혼합(Fig. 1(a)), 치유재료의 입자화(Fig. 1(b)) 및 SC 코팅 및 건조(Fig. 1(c))의 세 단계로 구성된다. CSA 및 CaSO₄의 혼합비는 선행연구(Oh et al. 2019)에 따라 결정되었으며, 0.85~1.2 mm 범위의 SC를 사용하여 시멘트 복합재료(Choi et al. 2017; Oh et al. 2019)를 제조하였다. SC의 표면은 반응을 지연시키기 위해 폴리우레탄을 분사하여 코팅되었으며, 균일한 코팅을 위하여 툴루엔에 30 % 희석하여 사용하였다.

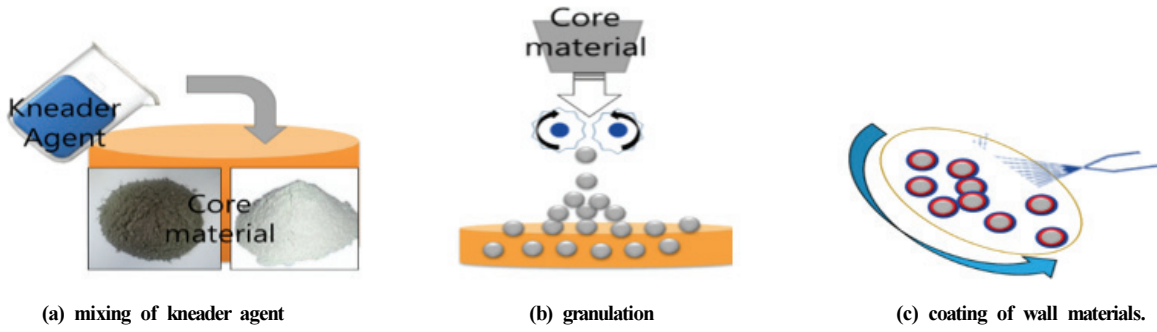


Fig. 1. Manufacturing process of SC

Table 1. Mixing ratio of cement composites

No.	W	OPC	S	SC(C×%)	ad(C×%)
Plain	0.4	1	2	0	0.006
SC5	0.4	1	2	5	

로 하였다. Table 1은 시멘트 복합재료의 배합비를 나타낸 것으로 표준 배합비는 W:OPC:S=0.4:1:2를 적용하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 SC를 나타낸 것이다.

2.3 평가방법

2.3.1 압축강도 및 휨강도

시멘트 복합재료의 압축강도는 “KS L ISO 679 시멘트의 강도 시험 방법”에 준하여 40 × 40 × 160 mm의 공시체 시험편을 성형하여 온도 20 °C 및 상대습도 60 %에서 재령 1일간 기건양생을 실시하였으며, 탈형 후 모든 시험편은 20 °C의 수조에서 수중 양생을 실시하였다. 이후 재령 3, 7, 28일에 따라 만능시험기(Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 압축강도를 측정하였다.

또한 휨강도는 “KS L ISO 679 시멘트의 강도 시험 방법”에 준하여 40 × 40 × 160 mm의 공시체 시험편을 성형하여 수중 양생을 실시하였다. 이후 재령 3, 7, 28일에 따라 만능시험기(Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 휨강도를 측정하였다. 강도측정에 사용된 시험편은 재령에 따라 총 6개의 시험편에 대해 각 강도를 측정하였으며, 최대값과 최소값을 제외한 4개의 측정값을 평균하여 측정값으로 사용하였다.

2.3.2 균열 자기치유 성능

본 연구에서는 시멘트 복합재료의 균열 자기치유 성능을 평가하기 위하여 투수 시험을 실시하였다. 균열로 인한 시험편의 유속을 측정하고 시멘트 복합재료의 자기치유 성능을 평가하기 위하여 정수위 투수시험(water flow test)에 의하여 평가를 실시하였다 (Lee et al, 2021). 투수 시험을 위한 균열 시험편은 Fig. 3(a)와 같이 모르타르 실린더(Ø100 × 200 mm)를 제조하여 24시간 후 탈형하였으며, 균열 유도 재령에 도달할 때까지 20 °C의 수조에서 양생을 실시하였다. 균열 유도 재령에 도달하면 실린더를 3개의 디스크

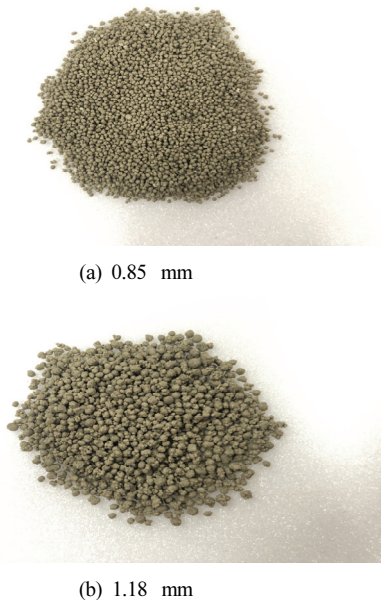


Fig. 2. Size of SC

2.1.2 시멘트 복합재료

본 논문에서 사용한 시멘트는 H사의 1종보통 포틀랜드시멘트 (Ordinary Portland Cement, OPC)를 사용하였으며, 잔골재는 주 문진 표준사(S)를 사용하였다.

2.2 실험계획

SC의 혼합은 시멘트의 질량 기준 각각 0%(Plain) 및 5%(SC5)

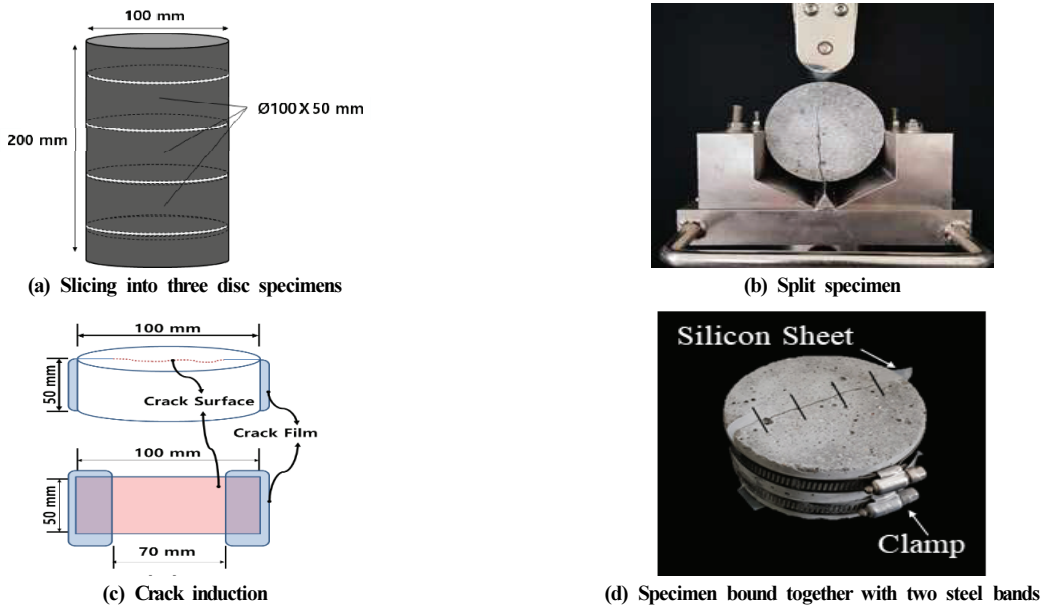


Fig. 3. Preparation of cracked specimens



Fig. 4. Water permeability test

시편(Ø100 × 50 mm)으로 절단한다음 Fig. 3(b)와 같이 중앙부를 할렬하여 2개의 시편을 제조하였다. 그 다음 Fig. 3(c)와 같이 두께가 다른 유연한 실리콘 고무 시트를 균열 부분의 양 끝에 부착하여 균열 폭을 제어하였다. 양 끝의 실리콘 고무 시트를 제외한 균열 길이는 약 70 mm 수준이며, 분할된 시편은 Fig. 3(d)와 같이 균열 폭 유지를 위하여 스테인리스 스틸 밴드를 사용하여 재조립하였다. 본 연구에서는 재령 28일에 균열을 유도하였으며, 균열 폭은 0.25-0.30 mm 수준으로 제어하였다. 균열의 폭 및 길이는 현미경(EGVM-35M, EG Tech)을 이용하여 측정하였다.

이 후 균열 시편은 치유 기간 동안 20 °C의 수조에서 치유 양생을 실시하였다(Lee et al. 2021). 투수 시험은 재령 28일 균열유도 후 치유 0, 7, 14, 21 및 28일에 투수 시험을 수행하였다.

Fig. 4(a)는 투수 시험의 시험 개략도를 나타내며, Fig. 4(b)는

투수 시험장비를 나타낸 것이다. 투수 시험을 통한 배출수량은 수두와 유속이 안정화된 후 7분간 시험장비에서 나오는 물의 양을 측정하였다. 이 배출수량은 시험시간(min)과 균열길이(mm)로 나누어 물의 유량(mL/(mm · min))을 구하였다.

균열 시편의 자기치유 성능은 식 (2)와 같이 배출 수량 감소율을 이용하여 치유지수 SH_q를 계산하였다.

$$SH_q = \left[1 - \frac{q(t)}{q_0} \right] \times 100(\%), \quad (2)$$

여기서 SH_q는 치유지수를 나타내며, q₀는 치유 효과가 없는 균열 직후 초기 투수량, q(t)는 치유 기간 t 이후의 투수량을 의미한다.

2.3.3 역학적 회복성능

시멘트 복합재료의 역학적 회복성능은 “KS L ISO 679 시멘트의 강도 시험 방법”에 준하여 40 × 40 × 160 mm의 시험편을 성형하여 수중 양생을 실시하였으며, 재령 28일 강도를 기준으로 기존 강도대비 탄성영역에서 파괴영역 까지 4수준(0 %, 30 %, 60 % 및 80 %)으로 사전하중을 각 시험편에 가하였다. 사전하중을 받은 시험편에 대하여 치유 재령 후 하중을 재부하하여 치유 수준을 평가하였다. 사전하중을 받은 시험편은 수중에서 치유양생을 실시하였으며, 치유 재령 7일 및 28일에 각 재하중을 주어 강도발현 수준을 측정하였다. 역학적 회복성능은 압축 및 휨하중을 가하여 재부하 시험을 실시하였다. Fig. 5는 사전하중을 받은 휨 시험편의 하중 재부하 시험 전경을 나타낸 것이다.

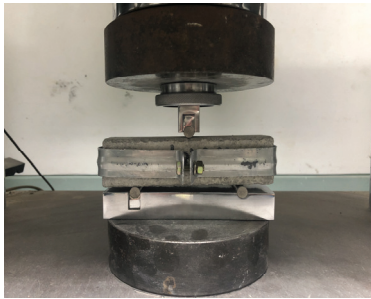


Fig. 5. Reloading test

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기초특성

Table 2는 시멘트 복합재료의 기초특성을 나타낸 것이다. 기초 특성은 플로우, 플로우 로스, 압축강도 및 휨강도를 측정하였다. Table 2의 결과 SC를 혼합한 시멘트 복합재료의 플로우는 다소 증가하는 경향이 있는 것으로 나타났으며, Plain의 플로우와 비교하여 약 6 % 증가하였다. 이러한 결과는 SC가 둥근 형태의 볼 형태

Table 2. Fundamental properties

Type		Plain	SC5
Flow (mm)		187	198
Flow loss (%)	30 min	10.7	15.7
	60 min	26.7	21.7
Compressive strength (MPa)	7 days	30.7	28.9
	28 days	50.1	45.7
Flexural strength (MPa)	7 days	7.5	5.6
	28 days	10.5	7.4

를 띠고 있으며, 입자 크기가 0.85~1.18 mm이기 때문에 볼베이어 링 효과 및 입도보충 효과에 의한 것으로 판단된다. 또한 30분 간격으로 60분까지 플로우 로스를 평가한 결과 SC에 관계없이 동등 수준인 것으로 나타났다.

SC5의 압축강도는 Plain과 비교하여 감소하는 경향이 나타났으며, 재령 28일 기준 약 9 % 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 SC의 경우 강도가 약한 입자이기 때문에 매트릭스내 SC 증가에 따라 감소한 것으로 판단된다.

또한 SC5의 휨강도는 압축강도와 동일하게 Plain의 휨강도와 비교하여 약 30 % 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 SC는 미반응성 입자이기 때문에 시멘트 복합재료 배합 내 입자 계면 영역이 상대적으로 증가하여 압축강도와는 다르게 휨강도에서는 빈입자 보충효과 보다는 계면의 증가로써 휨강도가 감소하는 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여 SC5의 강도는 감소하는 경향이 나타나므로 목표 강도를 만족하기 위해서는 감수제 사용에 의한 W/B 감소 또는 결합재의 사용량 조절 등의 배합비 보완이 필요할 것으로 판단된다.

3.2 균열 자기치유 성능

Fig. 6 및 Fig. 7은 Plain 및 SC5의 치유재령에 따른 초기 투수량과 치유율의 관계를 나타낸 것이며, Fig. 8은 치유기간과 치유율의 상관관계를 나타낸 것이다. Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8의 결과, 0.2 mm 균열폭에 해당하는 초기 투수량 0.5 영역에서는 치유재령 28 일 경과 후 Plain은 약 77 %, SC5는 약 85 %로 나타남에 따라 SC에 따른 효과는 Plain의 치유 성능을 약 18 % 향상시키는 것

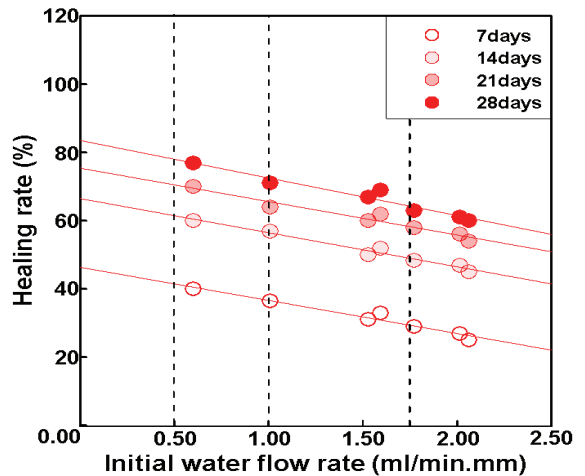


Fig. 6. Correlation between initial flow and healing rate according to healing age (plain)

로 나타났으며, 0.25 mm 균열폭에 해당하는 초기 투수량 1.0 영역에서는 치유재령 28일 경과 후 Plain은 약 70 %, 및 SC5는 약 82 %로 나타남에 따라 SC에 따른 효과는 Plain의 치유 성능을 약 12 % 향상시켰다.

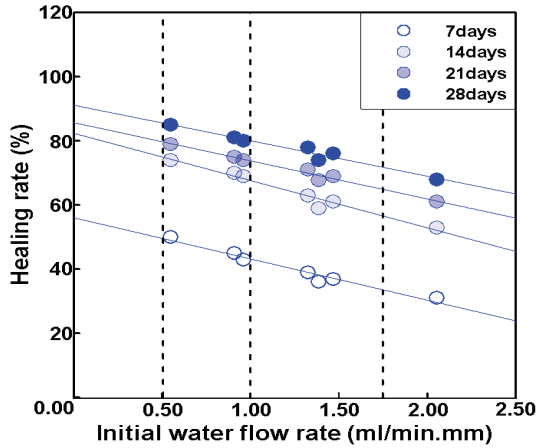


Fig. 7. Correlation between initial flow and healing rate according to healing age (SC5)

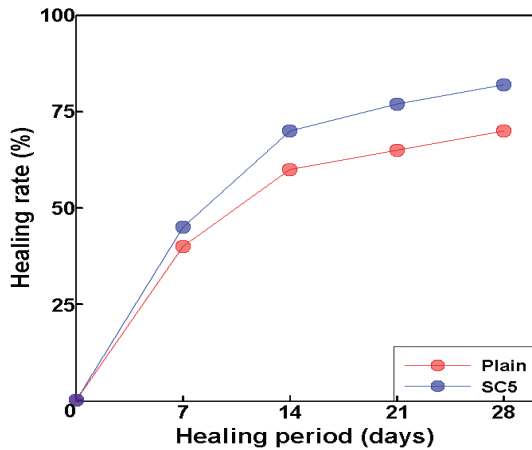


Fig. 8. Correlation between healing period and healing rate of Plain and SC5

또한 0.3 mm 균열폭에 해당하는 초기 투수량 1.8 영역에서는 치유재령 28일 경과 후 Plain은 약 63 % 및 SC5는 약 73 %로 나타남에 따라 SC에 따른 효과는 Plain의 치유 성능을 약 10 % 향상시켰다.

이러한 결과는 재령 28일 경과 후에도 내부에 존재하는 미수화 시멘트에 의하여 Plain의 경우에도 치유효과가 있는 것으로 판단되며, SC로 인하여 치유 성능을 평균 약 10 % 향상시키는 효과가 있는 것으로 판단된다.

3.3 역학적 회복성능

Fig. 9는 사전 휨하중을 0, 30, 60 및 80 % 받은 Plain 및 SC5의 치유재령 7일 하중 재부하 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 9의 결과 치유재령 7일에는 사전하중을 받지않은 Plain 0 %의 경우 약 11 MPa 이 나타났지만 사전하중을 받은 30 % 및 60 %의 경우 0%와 비교하여 약 50 % 및 48 % 치유된 것으로 나타났다. 그러나 사전하중을 80 % 받은 시험편은 측정 불가능한 것으로 나타났다. 또한 SC5-0 %의 경우 약 8 MPa이 나타났지만 사전하중을 받은 30 %, 60 % 및 80 %의 경우 0%와 비교하여 약 79 %, 73 % 및 30 % 치유된 것으로 나타났다. Fig. 10은 치유재령 28일 하중 재부하 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 10의 결과 치유재령 28일에는 Plain의 경우 사전하중을 받은 30 % 및 60 %은 0%와 비교하여 약 69 % 및 66 %치유된 것으로 나타났지만 80 % 받은 시험편은 치유재령 7일의 결과와 동일하게 측정 불가능한 것으로 나타났다. 그러나 SC5의 경우 약

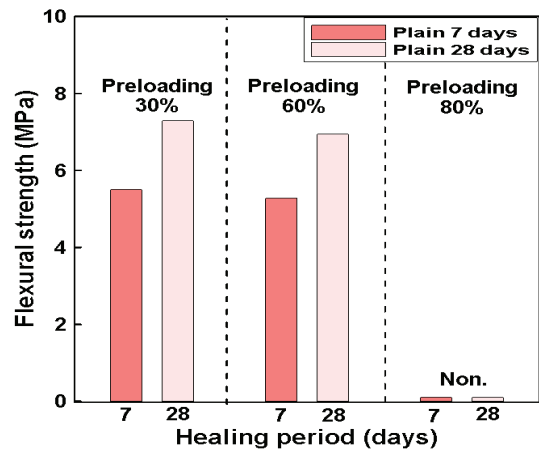


Fig. 9. Reloading test result of flexural load of Plain

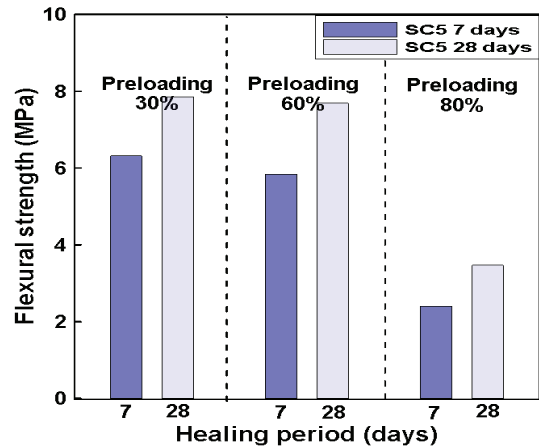


Fig. 10. Reloading test result of flexural load of SC5

98 %, 95 % 및 50 % 치유된 것으로 나타났다. Fig. 11은 Plain 및 SC5의 사전하중을 받지 않은 0 %를 기준으로 치유율을 나타낸 것이다. 치유재령 7일을 기준으로 SC 혼합에 따른 치유효과는 Plain의 자연 치유 성능에 대하여 30 %의 사전하중을 받은 경우 약 29 %, 60 %의 사전하중을 받은 경우 약 25 % 및 80 %의 사전하중을 받은 경우 약 30 % 향상시키는 결과가 나타났으며, 치유재령 28일을 기준으로 SC 혼합에 따른 치유효과는 Plain의 자연 치유 성능에 대하여 30 %의 사전하중을 받은 경우 약 28 %, 60 %의 사전하중을 받은 경우 약 29 % 및 80 %의 사전하중을 받은 경우 약 50 % 향상시키는 결과가 나타났다.

Fig. 12는 Plain 및 SC5의 치유재령에 따른 치유율을 나타낸 것이다. Fig. 12의 결과 탄성범위 이내의 하중을 받은 Plain-30 %의 경우 치유재령 7일에 약 50 %의 치유율이 나타났으며, 치유재령 28일 후 약 79 %의 치유율이 나타나 약 29 % 증가하는 경향이 나타났다.

그러나 SC5-30 %의 경우 치유재령 7일에 약 69 %의 치유율이

나타났으며, 치유재령 28일 후 약 98 %의 치유율이 나타나 약 29 % 증가하는 경향이 나타났다. 또한 파괴영역에 속하는 Plain-80 %의 치유율은 치유재령 7일의 치유율이 0 %에서 치유재령 28일 후 약 30 %로 약 30 % 증가하는 결과가 나타났지만 SC5-80 %의 치유율은 치유재령 7일의 치유율이 Plain-80 %와 동일하게 0 %에서 치유재령 28일 후 약 50 %로 나타남에 따라 약 50 %로 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 결과를 통하여 SC의 치유효과는 압축강도의 결과보다 상대적으로 큰 영향이 있는 것으로 판단되며, 특히 파괴영역에 해당하는 80 %의 경우에도 20 % 이상 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여 SC의 혼합은 종래에 주로 평가되고 있는 투수시험을 통한 치유 특성 평가 외에도 하중 재부하시험 결과를 통하여 내구적 치유 성능 뿐만 아니라 역학적 치유 성능도 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 균열 자기치유 및 역학적 회복 성능의 관계

Fig. 13은 정수위 투수시험에 의한 균열 자기치유율과 하중 재부하 시험에 의한 역학적 회복율의 상관관계를 나타낸 것이다. 균열 자기치유율 및 역학적 회복율은 치유재령 7일 및 28일 데이터를 근거로 각 치유재령에 대한 하중 재부하 시험 3수준(30 %, 60 % 및 80 %)의 데이터와의 상관관계를 분석하였다.

Fig. 13의 결과, 균열 자기치유율과 역학적 회복 성능의 관계를 통하여 Plain과 SC5의 치유영역을 가시적으로 쉽게 확인할 수 있었으며, SC5의 치유 가능면적이 Plain의 치유 가능면적이 큰 것으로 나타남에 따라 SC가 Plain의 치유 성능을 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다. 또한 균열 자기치유율을 통하여 역학적 치유 성능

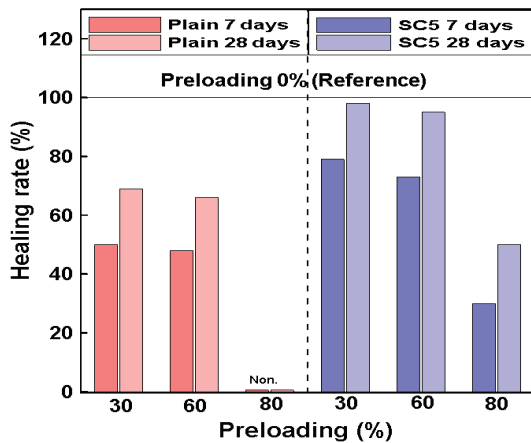


Fig. 11. Healing rate according to preload

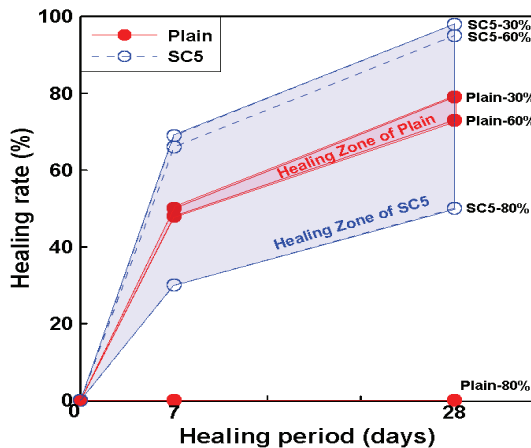


Fig. 12. Healing rate according to healing period

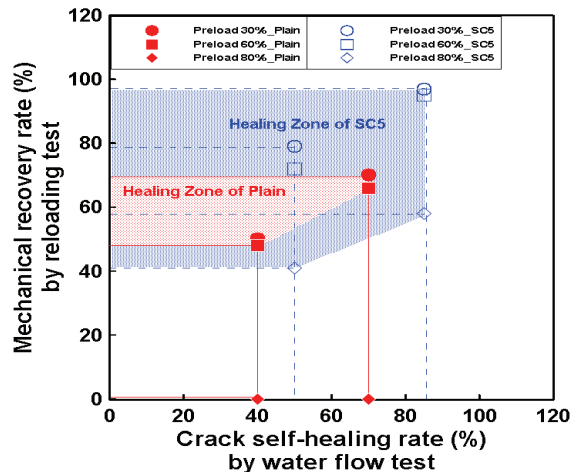


Fig. 13. Correlation between crack self-healing rate and mechanical recovery rate

예측이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 SC가 시멘트 복합재료의 균열 자기치유 성능 및 역학적 회복성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 캡슐화된 팽창성 무기재료 기반 고상 치유재를 제조하였으며, 시멘트 복합 재료에 혼합하여 기초특성, 투수시험 및 하중 재부하 시험을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 캡슐화된 팽창성 무기재료 기반 고상 치유재(SC)는 시멘트 복합재료의 플로우를 다소 향상시키는 것으로 나타났으며, 압축강도는 약 9 % 감소하는 경향이 나타났다. 또한 휨강도의 경우 약 30 % 감소하는 경향이 나타남에 따라 목표 강도를 선정할 경우 캡슐 혼합에 따른 강도 감소에 맞춰서 강도를 만족하기 위한 방안이 필요하다고 판단된다.
2. 캡슐화된 팽창성 무기재료 기반 고상 치유재(SC)는 시멘트 복합재료에 5 % 혼합할 경우, 투수시험 결과, Plain의 균열 자기치유율이 약 10 % 수준을 향상시키는 효과가 있는 것으로 나타났으며, 하중 재부하 시험 결과, Plain의 역학적 회복율을 약 120 % 수준을 향상시키는 것으로 나타났다. 또한 탄성범위의 경우 치유재령 7일에 약 69 % 및 치유재령 28일에 98 %의 치유율이 나타났다.
3. 정수의 투수시험에 의한 균열 자기치유율과 하중 재부하 시험에 의한 역학적 회복율의 상관관계를 분석한 결과, 팽창제가 혼합된 SC가 시멘트의 미수화 반응과 만나 침상형의 에트리נג가이드와 판상형의 수산화칼슘을 생산하여 치유성능에 영향을 줬을 것으로 판단된다. 따라서 Plain의 치유면적을 증대하는 결과가 나타났으며, 균열 자기치유율을 통하여 역학적 치유성능 예측이 가능한 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여 SC의 치유효과는 투수시험에 의한 내구적 특성 외에도 강도와 같은 역학적 치유 특성에도 영향이 있는 것으로 판단되며, SC 혼합에 의하여 시멘트 복합재료 자체의 치유성능을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

이 저작물은 2020학년도 세명대학교 연구년 지원에 의한 연구입니다.

References

- Ahn, T.H., Kishi, T. (2010). Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **8(2)**, 171–186.
- Alghamri, R., Kanellopoulos, A., Al-Tabbaa, A. (2016). Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete, *Construction and Building Materials*, **124**, 910–921.
- Alghamri, R., Kanellopoulos, A., Litina, C., Al-Tabbaa, A. (2018). Preparation and polymeric encapsulation of powder mineral pellets for self-healing cement based materials, *Construction and Building Materials*, **186**, 247–262.
- An, E.J., Kim, H.J., Gwon, S.W., Oh, S.R., Kim, C.G., Sim, S.H., Shin, M.S. (2012). Monitoring of self-healing in concrete with micro-capsules using a combination of air-coupled surface wave and computer-vision techniques, *Structural Health Monitoring*, 1–17.
- Choi, Y.W., Oh, S.R., Choi, B.K. (2017). A study on the manufacturing properties of crack self-healing capsules using cement powder for addition to cement composites, *Advances in Materials Science and Engineering*, 1–8.
- De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., ... Jonkers, H.M. (2018). A review of self-healing concrete for damage management of structures, *Advanced materials interfaces*, **5(17)**, 1800074.
- De Rooij, M.R., Schlangen, E. (2011). Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC; Springer: Cham, Switzerland.
- Feiteira, J., Gruyaert, E., De Belie, N. (2016). Self-healing of moving cracks in concrete by means of encapsulated polymer precursors, *Construction and Building Materials*, **102**, 671–678.
- Feng, J., Dong, H., Wang, R., Su, Y. (2020). A novel capsule by poly(ethylene glycol) granulation for self-healing concrete, *Cement and Concrete Research*, **133**, 106053.
- Ferrara, L., Van Mullen, T., Alonso, M.C., Antonaci, P., Borg, R.P., Quenca, E., ..., De Belie, N. (2018). Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance: a state of the art report by COST Action SARCOS WG2, *Construction and Building Materials*, **167**, 115–142.
- Gruyaert, E., Debbaut, B., Snoeck, D., Díaz, P., Arizo, A., Tziviloglou, E., Schlangen, E., De Belie, N. (2016). Self-healing mortar with pH-sensitive superabsorbent polymers: Testing of the sealing efficiency by water flow tests, *Smart Materials and Structures*, **25**, 084007.
- Huang, H., Ye, G., Daridot, D. (2013). Characterization and quantification

- of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste, *Cement and Concrete Research*, **52**, 71–81.
- Jonkers, H.M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete, *Ecological engineering*, **36(2)**, 230–235.
- Kim, Y.J., Choi, Y.W. (2012). Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement, *Construction and building materials*, **30**, 500–504.
- Kishi, T., Koide, T., Ahn, T.H. (2015). Effect of granules on the workability and the recovery of water tightness of crack self-healing concrete, *Journal of Ceramic Processing Research*, **16**, 63–73.
- Lee, H.X.D., Wong, H.S., Buenfeld, N.R. (2016). Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers, *Cement and Concrete Research*, **79**, 194–208.
- Lee, K.M., Kim, H.S., Lee, D.K., Shin, K.J. (2021). Self-healing performance evaluation of concrete incorporating inorganic materials based on a water permeability test, *Materials*, **14(12)**, 3202.
- Li, V.C., Herbert, E. (2012). Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **10(6)**, 207–218.
- Mihashi, H., Nishiwaki, T. (2012). Development of engineered self-healing and self-repairing concrete—state-of-the-art report, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **10(5)**, 170–184.
- Mostavi, E., Asadi, S., Hassan, M.M., Alansari, M. (2015). Evaluation of self-healing mechanisms in concrete with double-walled sodium silicate microcapsules, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **27(12)**, 04015035.
- Murakami, T., Ahn, T.H., Hashimoto, T., Ogura, N., Kishi, T. (2015). A study on the new water repair method for subway tunnels using crack self-healing repair materials, In *Proceedings of the Fifth International Conference on Self-Healing Materials*, Durham, NC, USA, 22–24.
- Nesterova, T., Dam-Johansen, K., Pedersen, L.T., Kiil, S. (2012). Microcapsule-based self-healing anticorrosive coatings: Capsule size, coating formulation, and exposure testing, *Progress in Organic Coatings*, **75(4)**, 309–318.
- 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.
- Park, S., Lee, E., Ko, J., Yoo, J., Kim, Y. (2018). Rheological properties of concrete using dune sand, *Construction and Building Materials*, **172**, 685–695.
- Qureshi, T.S., Kanellopoulos, A., Al-Tabbaa, A. (2016). Encapsulation of expansive powder minerals within a concentric glass capsule system for self-healing concrete, *Construction and Building Materials*, **121**, 629–643.
- Roig-Flores, M., Moscato, S., Serna, P., Ferrara, L. (2015). Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments, *Construction and Building Materials*, **86**, 1–11.
- Van Tittelboom, K., De Belie, N. (2009). Autogenous healing of cracks in cementitious materials with varying mix compositions, In *Proceedings of the 2nd International Conference on Self-Healing Materials*, Chicago, IL, USA.
- Van Tittelboom, K., De Belie, N., De Muyneck, W., Verstraete, W. (2010). Use of bacteria to repair cracks in concrete, *Cement and Concrete Research*, **40(1)**, 157–166.
- Van Tittelboom, K., Gruyaert, E., Rahier, H., De Belie, N. (2012). Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation, *Construction and Building Materials*, **37**, 349–359.

캡슐화된 팽창성 무기재료 기반 고상 치유재 활용 시멘트 복합재료의 균열 자기치유 및 역학적 회복성능에 관한 실험적 연구

본 논문에서는 SC가 시멘트 복합재료의 균열 자기치유 성능 및 역학적 회복성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 캡슐화된 팽창성 무기재료 기반 고상 치유재를 제조하였다. SC는 시멘트 복합재료에 혼합하여 기초특성, 투수시험, 하중 재부하 시험을 평가하였다. SC는 시멘트 복합재료의 플로우를 다소 향상되었으며, 압축강도는 약 10 % 감소하였다. 또한 휨강도의 경우 약 30 % 감소하였다. SC를 시멘트 복합재료에 5 % 혼합할 경우, Plain의 균열 자기치유율이 약 110 % 수준을 향상시키는 효과가 있는 것으로 나타났으며, 하중 재부하 시험 결과, Plain의 역학적 회복율을 약 120 % 수준을 향상시키는 것으로 나타났다. 균열 자기치유율과 하중 재부하 시험에 의한 역학적 회복율의 상관관계를 분석한 결과, SC로 인하여 Plain의 치유면적을 증대시킬 수 있는 것으로 판단된다.