

결정성장형 자기치유 고상캡슐을 혼합한 보수 모르타르의 품질 및 균열 치유 특성에 관한 실험적 연구

오성록¹, 김철규², 남은준³, 최연왕^{4*}

An Experimental Study on the Quality and Crack Healing Characteristics of Repair Mortar Containing Self-Healing Solid Capsules of Crystal Growth Type

Sung-Rok Oh¹, Cheol-Gyu Kim², Eun-Joon Nam³, Yun-Wang Choi^{4*}

Abstract: In this study, self-healing solid capsules of crystal growth type which can be mixed directly with repair mortar were prepared, and the quality and crack healing performance of repair mortar with self-healing solid capsules were evaluated. The table flow and the air flow rate of the repair mortar material mixed with self-healing solid capsules were found to have no significant influence on table flow and air volume regardless of mixing ratio. Compressive strength tended to decrease with increasing capsule mixing ratio. As a result of evaluation of crack healing properties according to constant water head permeability test, initial water permeability decreased, and reaction products were generated over time and cracks were healed.

Keywords: Healing Characteristics, Self-Healing, Solid Capsule, Crystal Growth Type

1. 서론

구조물에 있어서 자기치유 기술(Self-Healing Technology)은 균열이 발생할 경우 균열을 스스로 탐지하여 능동적으로 치유하는 기술로써 최근 국내외적으로 스마트 건설기술 분야로 대두되고 있는 기술 중 하나이다. 자기치유 기술이 부여된 구조물은 균열 발생 즉시 균열치유가 진행되며, 균열 발생 초기에 균열 closing 효과로 인하여 균열의 진전 및 확장을 저감 및 방지할 수 있어 일반적인 구조물의 유지보수 시간, 노력 및 비용을 크게 절감할 수 있는 기대효과가 있다. 특히, 인력이 쉽게 접근하기 어려운 구조물의 경우에도 효과적으로 보수를 수행할 수 있기 때문에(Erik, 2013 ; An, 2014), 구조물의 보수 효과뿐만 아니라 작업인력의 안전성도 확보가 가능하여 종합적인 기대효과는 더욱 클 것으로 예상되고 있다. 구조물에 적용가능한 자기치유 기술은 매커니즘에 따라 다양한 개념이 존재하고 있으며(Oh, 2017), 적용 환경 및 구조물에 따라 적합

한 기술을 사회환경적 측면과 경제성 측면을 고려하여 적용할 수 있다.

본 연구에서는 구조물에 적용 가능한 다양한 자기치유 기술 중 자기치유 소재를 캡슐화하여 사용하는 기술을 대상으로 배합에 직접 혼합가능한 자기치유 캡슐을 제조하고자 하였다. 캡슐을 활용한 자기치유 기술은 직접적인 자기치유 소재를 다량 포함할 수 있기 때문에(Tatyana, 2012 ; M. Hunger, 2009) 손상부위 즉, 균열이 발생한 부위에만 파괴되어 선택적으로 반응시킬 수 있다는 장점이 있어 파괴되지 않은 캡슐은 지속적으로 자기치유 소재의 성능이 유효하다. 캡슐을 활용한 자기치유 기술의 동향을 살펴보면 자기치유 소재를 마이크로 사이즈로 캡슐화하여 적용한 바 있다. (Shazim, 2014 ; Kim, 2003). 그러나 자기치유 소재를 반응시키기 위해서는 반응 촉매제(Trigger)가 별도로 요구되기 때문에 반응 촉매제도 별도로 마이크로 캡슐화하여 함께 사용해야 된다는 문제점이 있으며, 캡슐이 파괴되어 자기치유 소재가 균열면으로 유출되더라도 반응 촉매제를 만나지 못하면 반응시킬 수 없다는 문제점이 있다. 국내의 경우 이러한 문제점이 보완되어 별도의 촉매제 없이 태양광 또는 수분으로 반응할 수 있는 자기치유 마이크로 캡슐을 제조하여 건설 분야 기술에 적용한 사례가 있다(Song, 2013). 그러나 공통적으로 자기치유 캡슐의 적용대상이 구조물 모체가 아니라 모체 표면을 대상으로 하고 있으며, 자기치유 소재를 유기체 기반의 액상형 화학 약품으로

¹정희원, 세명대학교 외부연구원 공학박사

²정희원, 세명대학교 건설공학과 박사과정

³정희원, 세명대학교 건설공학과 석사과정

⁴정희원, 세명대학교 토목공학과 교수

*Corresponding author: cgdbs02@nate.com

Department of Civil Engineering, Semyoung University, Jecheon 27136, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

적용하고 있다(Wang, 2003 ; Blaiszika, 2007). 이러한 경우 모체 표면을 대상으로 하고 있기 때문에 박막 형태의 코팅재에 포함되는 자기치유 캡슐량이 매우 제한적이며, 균열 폭 또는 균열 깊이에 대하여 대응하기에 어렵다는 단점이 있다. 또한, 구조물 모체는 대부분 무기계 기반 재료로 구성되어 있기 때문에 유기계 기반 자기치유 소재는 열적 특성이 달라 장기적인 측면에서 내구성이 떨어질 우려가 있다(Oh, 2017). 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 자기치유 캡슐을 배합에 직접 혼합하여 적용할 경우에는 모체의 두께를 적용할 대상에 대응하여 자유롭게 조절이 가능하기 때문에 상대적으로 많은 자기치유 캡슐을 균열면에 확보할 수 있으며, 표면에 적용한 경우와 비교하여 균열폭 및 깊이에 대응하여 자기치유 효과를 확장시킬 수 있다(Oh, 2019). 또한 자기치유 소재에 대하여 유기계 기반 치유 소재 대신에 무기계 기반 치유 소재를 활용할 경우 자기치유된 균열면의 내구성을 증대시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 자기치유 소재로써 결정성장형 무기계 분체를 활용한 자기치유 고상캡슐(Self-Healing Solid Capsules)을 제조하였다. 결정성장형 자기치유 고상캡슐을 혼합하기 위한 표준배합은 구조물 보수시 실제 활용되는 보수 모르타르 기준으로 자기치유 고상캡슐 혼합에 따른 보수 모르타르의 품질을 평가하였으며, 균열 자기치유 특성을 평가하였다. 자기치유 고상캡슐은 레미콘, 프리캐스트 부재의 배합에도 적용 가능 하지만 본 연구에서는 보수 모르타르에 적용하여 대단면 보수 이후에 또다시 2차 균열이 발생할 경우 자기치유가 가능하도록 자기치유 보수 모르타르에 적용을 실시하였다. 본 연구결과를 통하여 자기치유 성능을 가지는 보수 모르타르의 제조기술 확보를 위한 기반자료로써 활용하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 결정성장형 자기치유 고상캡슐의 제조

2.1.1 결정성장형 자기치유 소재

결정성장형 자기치유 고상캡슐(Self-Healing Solid Capsules, 이하 SHSC로 약함)은 수화반응을 하는 무기계 기반 분체를 사용하였다. 사용된 분체는 침상형 결정이 발생하는 아원계 팽창제(Calcium Sulfoaluminate, 이하 CSA로 약함)와 육각판상의 결정이 발생하는 무수석고(Anhydrous Gypsum(CaSO₄), 이하 AG로 약함)를 적절하게 혼합하여 사용하였다. 이들의 반응 매커니즘은 AG의 결정을 통하여 균열 영역의 공간충전 효과가 있으며, CSA의 결정을 통하여 췌기효과에 따른 결정물과 반응 생성물의 안정화 효과이다. CSA 및 AG의 혼합비는 예비실험을 통하여 표준 혼합비를 7:3으로 혼합하여 사용하였다. Fig. 1은 자기치유

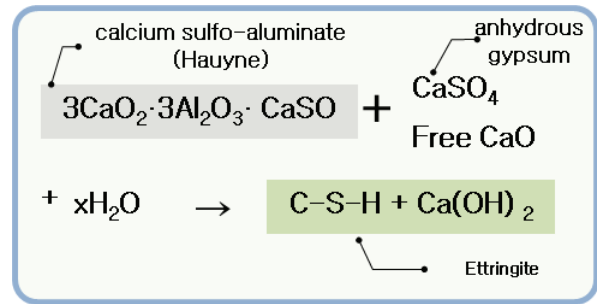


Fig. 1 Self-healing reaction mechanism of SHSC

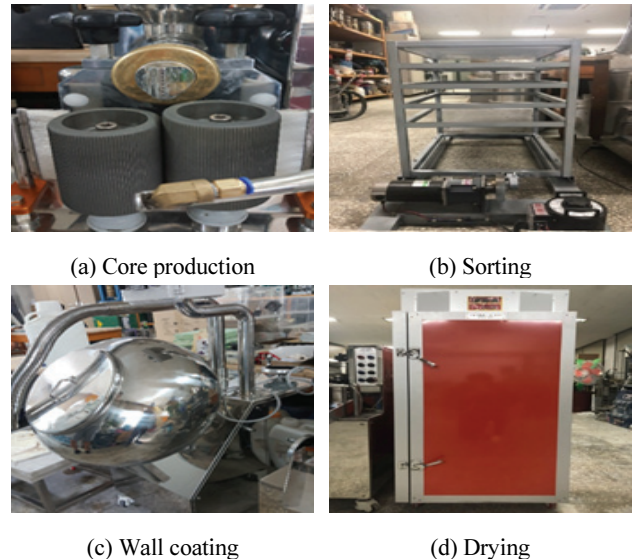
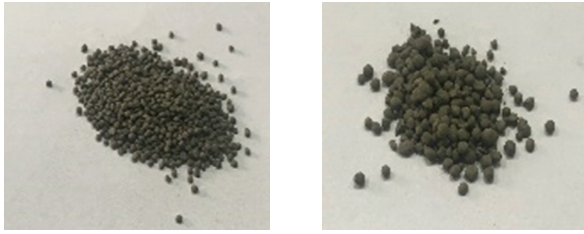


Fig. 2 Manufacturing device of SHSC

소재의 반응 매커니즘을 나타낸 것이며, Fig. 2는 SHSC의 제조장비를 나타낸 것이다.

2.1.2 고상캡슐의 제조

고상캡슐의 제조를 위해서는 결정성장형 자기치유 소재(이하 Core로 약함)를 분체상에서 일정 크기로 입자화(조립화)하기 위하여 응집제가 필요하다. 응집제는 Core가 입자화 과정 중 반응을 방지하기 위하여 수분함량이 최소화된 응집제를 적용하여야 하며(Oh, 2017), 또한 입자화하기 위하여 일정한 점성을 가져야 하기 때문에 우레탄계 응집제를 적용하였다. 응집제를 통하여 입자화된 Core는 배합에 혼합시 배합수와의 반응을 방지하기 위하여 막재료(이하 wall로 약함)로써 액상고무(Liquid type Rubber, 이하 LR로 약함)를 이용하여 Core 표면을 코팅하였다. SHSC의 제조는 Fig. 2의 제조장비를 통하여 물리적인 제법에 의하여 제조된다(Oh, 2017 ; Oh, 2019 ; Choi, 2017). 결정성장형 자기치유 소재는 응집제와 혼합하여 적당한 질기를 가지는 상태로 만든 다음 Fig. 2(a)의 장비를 통하여



(a) 850 μm

(b) 1,000 μm

Fig. 3 Size of SHSC

Table 1 Mixing ratio of main materials of repair mortar

Type	W	B	S	Fiber
40 MPa	0.4	1	1.5	0.1

Table 2 Experimental variables and mix no.

Mixing ratio of SHSC	0 %	5 %	10 %
Mix No.	HRM-P	HRM-5	HRM-10

코어재료를 생산한다. 생산된 코어는 (b)의 장비를 통하여 크기를 분류하며, (c)의 장비를 통하여 wall 코팅을 실시한다. 최종적으로 (d)의 장비를 통하여 건조하여 제조된다. Fig. 3은 SHSC의 형태를 나타낸 것으로 SHSC의 크기는 850~1,000μm 내의 크기로 제조하였다. SHSC의 적정크기는 치유효과를 고려하여 결정하였다(Oh, 2017 ; Oh, 2019).

2.2 보수 모르타르의 제조

실험에 사용된 보수 모르타르(이하 HRM으로 약함)는 국내 H사의 설계강도 40 MPa 수준의 배합을 대상으로 하여 SHSC 혼합에 따른 품질 및 균열 자기치유 특성을 평가하고자 하였다. Table. 1은 보수 모르타르의 주요 재료 혼합비를 나타낸 것이다. W/B는 40%이며, 결합재(B)는 시멘트와 기능성 분체가 일정비율로 혼합되어 있으며, 잔골재는 규사를 사용하였다. 섬유는 폴리머 단섬유가 사용되었다. 본 연구에서는 기준 배합으로 HRM을 대상으로 SHSC 혼합에 따른 품질의 영향 및 자기치유 성능 효과를 평가하고자 하였다. SHSC의 혼합량은 B의 질량에 대하여 5% 및 10% 혼합하였다. Table 2는 실험변수 및 배합을 나타낸 것이다.

2.3 평가방법

2.3.1 테이블 플로우

테이블 플로우는 “KS L 5111 시멘트 시험용 플로우 테이블”에 규정된 플로 테이블 및 플로우콘을 이용하여 “KS L 5105 플로의 결정 방법”에 준하여 15초 동안 25회, 12.7 mm의

높이로 낙하시키는 방법으로 테이블 플로를 측정하였으며, 낙하 후 퍼짐이 멈추었을 때 중심을 지나는 대각선 3방향의 지름을 측정하여 그 평균값을 테이블 플로우로 하였다.

2.3.2 공기량

공기량은 “KS L 3136 수경성 시멘트 모르타르의 공기량 측정 방법”에 준하여 안지름 76±1.5 mm, 깊이 88 mm의 원통형으로 23℃에서 400±1 mL의 물을 담을 수 있는 용기를 사용하여 공기량을 측정하였다.

$$\text{공기량 (\%)} = 100 - w \left(\frac{182.7 + P}{2000 + 4P} \right) \quad (1)$$

여기서,

w : 모르타르 400 mL의 질량(g)

P : 시멘트 기준 혼합수의 %

2.3.3 압축강도

압축강도는 “KS L 5105 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법”에 준하여 50×50×50 mm의 큐브형 시험편을 성형하여 기건 양생을 실시하였다. 이후 재령에 따라 만능시험기 (Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 압축강도를 측정하였다.

2.3.4 길이변화

길이변화는 40×40×160 mm 각주형 몰드 내부에 전기식 매립형 스트레인 게이지를 설치하여 시험편을 제작한 다음 타설 후 24시간에 탈형하여 정치하면서 Data logger를 이용하여 길이변화량을 측정하였다.

2.3.5 정수위 투수시험

SHSC의 자기치유 성능은 정수위 투수시험(h=300 mm)을 통하여 균열이 유도된 시험편의 초기 투수량(Water Flow)을 측정하였으며, 치유재령 이후의 투수량 감소수준을 통하여 자기치유 수준을 평가하였다. 투수시험 시험편은 φ 100×50 mm 크기의 시험편을 제작하여 온도(20±3)℃ 및 습도(50±10)% 조건에서 수중양생을 실시하였다. 균열 유도기간은 재령 28일이 경과되었을 때 균열을 유도하였으며, 균열폭 0.1~0.3 mm가 되도록 균열 유발 필름(실리콘 시트)을 삽입하여 균열폭을 제어하였다. 또한 시험편의 균열폭 유지를 위하여 시험편의 측면부를 고정하였다. 균열이 유도된 시험편은 치유재령 7일, 14일, 21일 및 28일간의 치유 양생기간을 거친 다음 각 재령일에 투수량을 평가하였다. 정수위 투수시험은 Fig. 5와 같이 균열 폭을 측정하고 Fig. 6의 정수위 투수시험

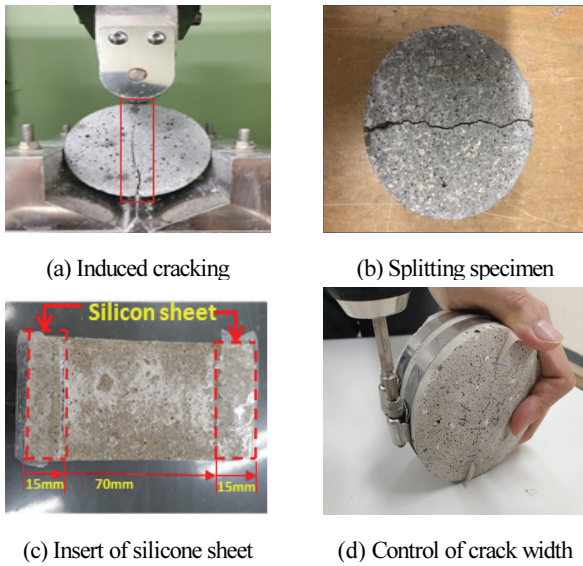


Fig. 4 Induction process of crack

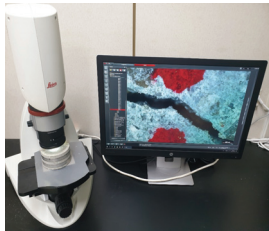


Fig. 5 Measurement of crack width

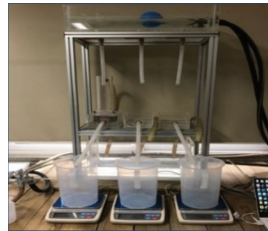


Fig. 6 Constant Water Head Permeability Test

장비를 통하여 투수량을 평가하였다. 정수위 투수시험은 전자저울을 컴퓨터에 연결하여 실시간 투수량을 측정할 수 있도록 하였으며, 시험편의 함수상태를 동일하게 하기 위하여 최초 2분간의 투수량은 버리고 이후 60초단위로 10분간 측정하여 실시간 투수량(Water flow, ml/min.mm)을 측정하였다. 자기치유 성능의 평가는 초기 균열의 투수량(Initial flow)에 대하여 치유재령에 따른 투수량의 감소수준을 통하여 치유율을 평가하였다(Choi, 2017).

2.3.6 균열면 관찰

균열면 관찰은 정수위 투수시험을 수행하는 과정에서 초기 균열과 치유재령 이후의 균열을 관찰하여 $\times 100$ 의 배율로 균열면을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 SHSC 혼합 자기치유 HRM의 품질특성 평가

3.1.1 테이블 플로우 및 공기량

Fig. 7은 SHSC 혼합에 따른 자기치유 HRM의 테이블 플로우 평가결과를 나타낸 것이다. Fig. 7의 결과 SHSC의 혼합을 증가에 따라 테이블 플로우가 다소 감소하는 경향이 나타났지만 미소한 수준이므로 SHSC의 혼합에 따른 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 30분 간격으로 60분까지 플로우 로스를 평가한 결과 SHSC 혼합율에 관계없이 모두 플로우가 감소하는 경향이 나타났으며, SHSC 10%의 경우 상대적으로 더 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 SHSC의 혼합에 따라서는 큰 영향이 없는 것으로 판단되지만 배합과정에서 일부 손실된 SHSC가 사전반응함(Oh, 2017)에 따라 감소폭이 다소 증가한 것으로 판단된다. Fig. 8은 SHSC 혼합에 따른 자기치유 HRM의 공기량 평가결과를 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과

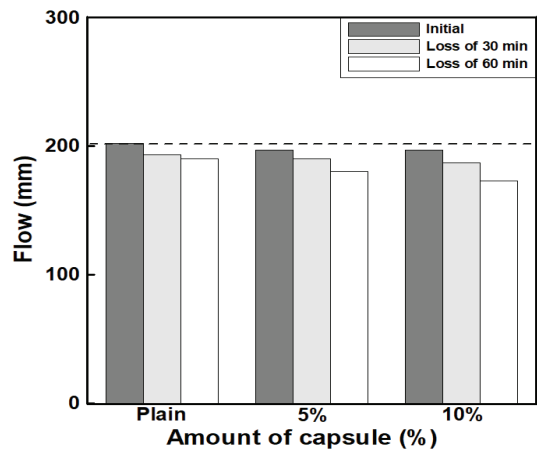


Fig. 7 Evaluation result of flow by mixing SHSC

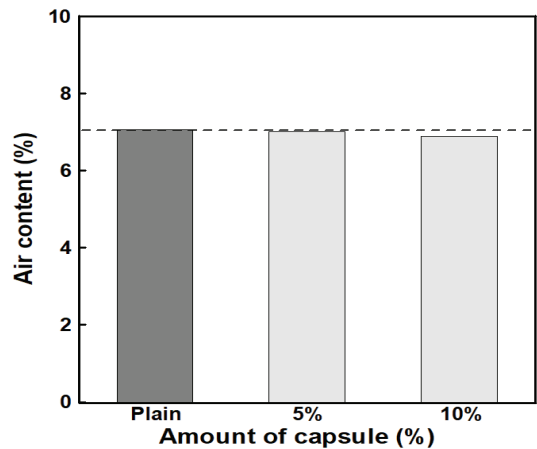


Fig. 8 Evaluation result of air content by mixing SHSC

SHSC의 혼합에 관계 없이 공기량은 큰 변화가 없는 것으로 나타났으며, 혼합율에 따라서도 오차범위내에서 동등수준인 것으로 판단된다.

3.1.2 압축강도

Fig. 9는 SHSC 혼합에 따른 자기치유 HRM의 재령 3일, 7일 및 28일 압축강도 평가결과를 나타낸 것이다. Fig. 9의 결과 SHSC의 혼합을 증가에 따라 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 SHSC가 파괴되지 전에는 반응하지 못하는 입자이기 때문에 SHSC의 혼합에 따라 압축강도가 감소하는 경향이 나타나는 것으로 판단되며, 혼합율이 증가할수록 미반응성 입자가 증가하기 때문에 골재와 비교하여 상대적으로 강도가 약한 입자의 증가에 기인한 것으로 판단된다. SHSC 혼합에 따른 압축강도 감소수준은 SHSC 혼합율 5% 증가에 따라 약 5% 감소하는 경향이 나타났으며, SHSC 10%의 경우 최대 10% 감소하는 결과가 나타났다. 재령에 따른 압축강도의 경

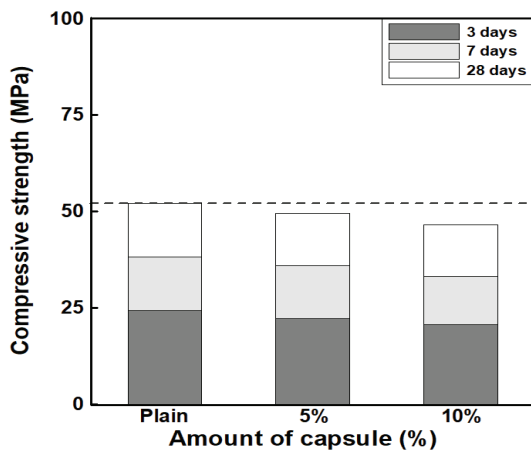


Fig. 9 Evaluation result of compressive strength by mixing SHSC

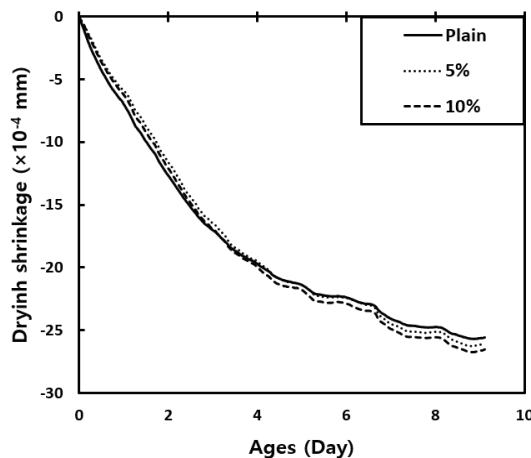


Fig. 10 Evaluation result of variation of length by mixing SHSC

우에는 SHSC의 혼합에 관계없이 일정하게 강도가 발현되는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통하여 SHSC 혼합에 따라 압축강도 감소가 발생하므로 목표 압축강도를 만족하기 위해서는 감수제 사용에 의한 W/B 감소 또는 결합재의 사용량 조절 등의 배합비 보완이 요구될 것으로 판단된다.

3.1.3 길이변화

Fig. 10은 SHSC 혼합에 따른 자기치유 HRM의 길이변화 평가결과를 나타낸 것이다. Fig. 10의 결과 SHSC 혼합 및 혼합율에 따라 다소 차이가 있는 것으로 나타났지만 변동수준이 미소한 수준으로 나타남에 따라 SHSC 혼합이 길이변화에 직접적인 영향을 미치는 않는 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통하여 HRM의 경우 길이변화에 따른 요구조건이 존재하기 때문에 주요 평가요소로 작용하지만 SHSC의 혼합에 따른 품질변화는 없는 것으로 판단된다.

3.2 SHSC 혼합 자기치유 HRM의 자기치유 성능 평가

3.2.1 정수위 투수시험

Fig. 11 및 Fig. 12는 SHSC 혼합에 따른 자기치유 HRM의 정수위 투수시험 측정결과를 나타낸 것이다. Fig. 11은 균열 폭과 초기 투수율의 관계를 나타낸 것이다. SHSC 혼합에 따른 자기치유 성능은 초기 투수율에 대한 치유재령 이후의 감소율을 통하여 치유율을 평가하기 때문에 치유되는 과정에서 균열 폭 측정이 어렵다(Choi, 2017). 따라서 일반적으로 재령에 따른 투수량을 초기 투수량에 대한 비로 상대적 평가를 하게 되는데, 이때 치유성능은 초기 균열폭에 큰 영향을 받으므로 시편의 초기 균열폭 측정값의 정확도가 매우 중요하다(Reinhardt, 2003). 이에 따라 초기 투수율의 수준에 대하여 균열 폭이 어느 수준인지 예측하기 위하여 초기 투수율과 균열 폭을 대조하여 관계를 분석하였다. Fig. 11의 결과 균열폭 0.20 mm는 초기 투수율 0.5~0.7 수준으로 나타났으며, 0.25 mm는 초기 투수율 0.7~1.0 수준으로 나타났다. 0.3mm의 경우 1.0~1.8 수준인 것으로 나타났다. Fig. 12는 초기 투수율에 대한 치유재령 28일후 투수율을 나타낸 것이다. 분석은 Fig. 11의 결과로부터 균열폭 0.2 mm, 0.25 mm 및 0.3 mm에 대한 초기 투수율 범위를 기준으로 SHSC 혼합에 따른 치유율을 평가하였다. Fig. 12의 결과 균열폭 0.20 mm에 해당하는 초기 투수율 0.5~0.7 영역에서는 SHSC가 혼합되지 않은 Plain의 경우 약 80% 투수율이 감소하는 것으로 나타났지만 SHSC 5% 혼합한 경우에는 약 90% 투수율이 감소하는 것으로 나타났다. SHSC 10% 혼합한 경우에는 약 99% 감소하는 것으로 나타났다. SHSC가 혼합하지 않은 Plain의 경우 약 80%의 치유율이 나타난 원인은 일반적인 배합의 경우에도 미수화 시멘트 입자 등이 반응하여 자연적인 치유성능이 있는 것으로

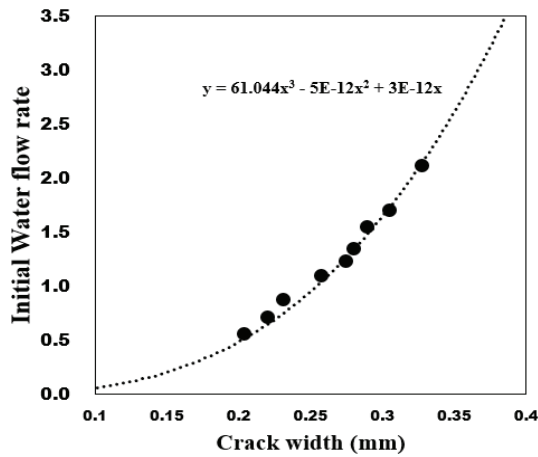


Fig. 11 Relationship between initial water flow rate and crack width

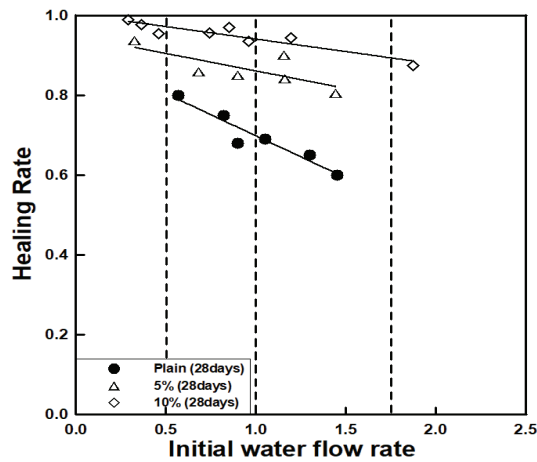
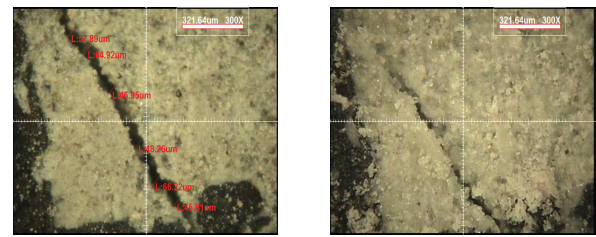


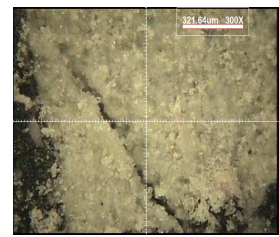
Fig. 12 Healing rate according to initial water flow rate

보고되고 있기 때문에(Oh, 2017), Plain의 치유효과가 나타난 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통하여 균열폭 0.2 mm의 경우에는 SHSC 5% 혼합할 경우에는 Plain의 치유성능을 약 10%, SHSC 10% 혼합할 경우에는 Plain의 치유성능을 약 19% 향상시키는 것으로 판단된다.

균열폭 0.25 mm에 해당하는 초기 투수율 0.7~1.0 영역에서는 SHSC가 혼합되지 않은 Plain의 경우 약 75% 투수율이 감소하는 것으로 나타났지만 SHSC 5% 혼합할 경우에는 약 85% 투수율이 감소하는 것으로 나타났다. SHSC 10% 혼합할 경우에는 약 95% 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통하여 균열폭 0.25 mm의 경우에는 SHSC 5% 혼합할 경우 Plain의 치유성능을 약 10%, SHSC 10% 혼합할 경우 Plain의 치유성능을 약 20% 향상시키는 것으로 판단된다. 균열폭 0.25~0.3 mm에 해당하는 초기 투수율 1.0~1.8 영역에서는 SHSC가 혼합하지 않은 Plain의 경우 최대 60% 치유된 것으로 나타났지만 SHSC 5% 혼합할 경우에는 약 80%, SHSC

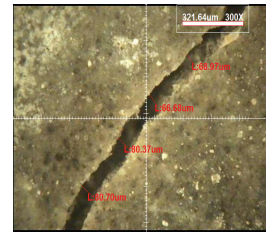


(a) Initial crack

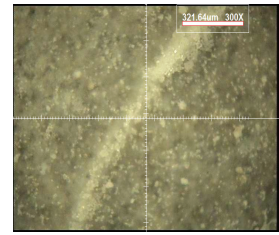


(b) After self-healing

Fig. 13 Observation result of crack surface (Plain)



(a) Initial crack



(b) After self-healing

Fig. 14 Observation result of crack surface (SHSC)

10% 혼합할 경우에는 약 90% 치유된 것으로 나타남에 따라 균열폭 0.3mm의 경우에는 SHSC 5% 혼합할 경우 Plain의 치유성능을 약 20%, SHSC 10% 혼합할 경우 Plain의 치유성능을 약 30% 향상시키는 것으로 판단된다.

또한 SHSC 혼합율에 따른 치유율은 혼합율 5%가 증가함에 따라 균열폭 0.20 mm의 경우 약 9%, 균열폭 0.25mm의 경우 약 10%, 균열폭 0.3 mm의 경우 10%의 치유율이 증가하는 것으로 나타남에 따라 SHSC 5% 및 SHSC 10%의 성능은 일률적으로 약 10%의 효과차이가 있는 것으로 나타났다.

3.2.2 균열면 관찰

Fig. 13 및 Fig. 14는 Plain 및 SHSC를 혼합한 시험편의 균열 초기 및 자기치유 이후의 균열면 관찰 결과를 나타낸 것이다. Fig. 13 및 Fig. 14의 결과 초기 균열면에 대한 치유 후 균열면 관찰결과 Plain의 경우 치유재령 28일 후 일부 구간에서 반응생성물을 관찰할 수 있었지만 캡슐이 혼합된 경우와 비교하여 상대적으로 적게 관찰되었으며, SHSC를 혼합한 경우 대부분의 균열면이 반응 생성물에 의하여 수복된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 Plain의 경우 미수화 결합재의 지속적인 수화(further hydration) 및 추가 수화 효과에 의하여 반응생성물이 균열면에 발생된 것으로 판단되며, SHSC의 효과는 자기치유 소재로써 AG의 결정물인 육각판상의 결정과 CSA의 침상형 결정들에 의하여 Plain의 치유효과를 향상시켜 Crack closing 효과가 커지는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문은 자기치유 소재로써 결정성장형 무기계 분체를 활용한 자기치유 고상캡슐(Self-Healing Solid Capsules)을 제조하였으며, 자기치유 고상캡슐을 혼합한 보수 모르타르의 품질특성 및 균열 자기치유 성능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 결정성장형 자기치유 고상캡슐을 혼합한 보수 모르타르의 테이블 플로우 및 공기량 평가결과 고상캡슐 혼합을 증가에 따라 테이블 플로우 및 공기량이 다소 감소하는 경향이 나타났지만 품질변동이 크지 않으므로 고상캡슐이 미치는 영향은 고려할 필요가 없는 것으로 판단된다.
2. 결정성장형 자기치유 고상캡슐을 혼합한 보수 모르타르의 압축강도 평가결과 고상캡슐 혼합을 증가에 따라 최대 10% 감소하는 경향이 나타남에 따라 목표 강도를 만족하기 위해서는 감수제 사용에 의한 W/B 감소 또는 결합재의 사용량 조절 등의 배합비 보완이 필요한 것으로 판단된다.
3. 결정성장형 자기치유 고상캡슐을 혼합한 보수 모르타르의 자기치유 성능 평가결과 자기치유 고상캡슐 혼합에 의하여 자연적인 치유성능에 대하여 혼합률 5%의 경우 약 10%, 혼합률 10%의 경우 약 20~30% 향상시키는 효과가 나타났으며, 결정성장형 결정에 의하여 Crack closing 효과가 커지는 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여 결정성장형 자기치유 고상캡슐은 자연적인 치유성능을 향상시키는 효과가 나타남에 따라 이를 혼합한 보수 모르타르를 활용하여 대단면 보수를 수행할 경우 2차적인 균열에 대하여 치유효과를 기대할 수 있을 것으로 판단되며, 허용균열폭 이내에서 추가적인 유지보수의 감소효과에 따라 경제적인 측면에서 얻을 수 있는 효과는 더욱 클 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술연구개발사업의 연구비 지원(19SCIP-B103706-05)에 의하여 수행되었습니다. 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. An, E., J. and Shin, M., S., (2014). Healing Mechanisms and Assessment Techniques of Self-healing Concrete, Proceeding of Korea Concrete Institute, 26(2), 477-479 (in Korean).
2. B.J. Blaiszika, N.R. Sottos and S.R. White, (2007). Nanocapsules for self-healing materials, Journal of Composites Science and Technology, 68(3), 978-986.
3. Choi, S. W., Bae, W. H., Lee, K. M., Shin, K. J., (2017). Correlation between Crack Width and Water Flow of Cracked Mortar Specimens Measured by Constant Water Head Permeability Test, Journal of the Korea Concrete Institute, 29(3), 264-273.
4. Choi, Y. W., Oh, S. R., Kim, C. G. and Im, H. S., (2018). Preparation Characteristics of Self-healing Microcapsules for Mixing Cement Composites Utilizing Liquid Inorganic Materials, 6(4), 236-243 (in Korean).
5. Erik Schlangen and Senot Sangadji, (2013). Addressing Infrastructure Durability and Sustainability by Self Healing Mechanisms - Recent Advances in Self Healing Concrete and Asphalt, Journal of Procedia Engineering, The 2nd International Conference, 54, 39-57.
6. Tatyana Nesterova, Kim Dam-Johansena, Lars Thorslund Pedersen and Søren Kiil, (2012). Microcapsule-based Self-Healing Anticorrosive Coatings: Capsule Size, Coating Formulation, and Exposure Testing, Journal of Organic Coatings, 75(4), 309-318.
7. Kim, C. G., (2017). A Study on the Crack Self Healing Properties of Cement Mortar Utilizing Micro Capsules with Liquid-type Inorganic materials, Master Thesis, Semyung University (in Korean).
8. Kim, P. S., Jo, C. K., Ju, T. H., Choi, Y. C., and Lee, J. K., (2003). Preparation and Thermal Characteristics of Microencapsulated PCM for None Supercooling Phenomenon, proceeding of The Korean Society for Energy, 225-228 (in Korean).
9. M. Hunger, A.G. Entrop, I. Mandilaras, H.J.H. Brouwers and M. Founti, (2009). The Behavior of Self-Compacting Concrete Containing Micro-Encapsulated Phase Change Materials, Journal of Cement & Concrete Composites, 31(10), 731-743.
10. 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).
11. Oh, S. R., Choi, Y. W., Kim, Y. J., (2019). Effect of Cement Powder Based Self-healing Solid Capsule on the Quality of Mortar, Journal of Construction and Building Materials, 214, 574-580.
12. Reinhardt, H. W., and Jooss, M., (2003). Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width, Journal of Cement and Concrete Research, 33(7), 981-985.
13. Shazim Ali Memon, H.Z. Cui, Hang Zhang and Feng Xing, (2014). Utilization of Macro Encapsulated Phase Change Materials for the Development of Thermal Energy Storage and Structural Lightweight Aggregate Concrete, Journal of Applied Energy, 139, 43-55.
14. Song, Y. K., Jo, Y. H., Lim, Y. J., Cho, S. Y., Yu, H. C., Ryu, B. C., Lee, S. I., and Chung C. M. (2013) Sunlight-induced self-healing

of a microcapsule-type protective coating, Journal of ACS Applied Materials and Interfaces, 5(4), 1378-1384.

15. Xianfeng Wang, Feng Xing, Ming Zhang, Ningxu Han and Zhiwei Qian, (2003). Experimental Study on Cementitious Composites Embedded with Organic Microcapsules, Journal of Materials, 6(9), 4064-4081.
16. 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, Journal of Advances in Materials Science and Engineering, 1-8.

Received : 12/01/2019

Revised : 01/07/2020

Accepted : 01/21/2020

요 지 : 본 연구에서는 보수 모르타르와 직접 혼합 가능한 결정성장형 자기치유 고상캡슐을 제조하였으며, 자기치유 고상캡슐이 혼합된 보수 모르타르의 품질 및 균열 치유 성능 특성을 평가하였다. 자기치유 고상캡슐을 혼합한 보수 모르타르의 테이블 플로우 및 공기량 평가 결과 혼합율에 관계없이 테이블 플로우 및 공기량은 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 압축강도는 캡슐 혼합율이 증가할수록 강도가 감소하는 경향이 나타났다. 정수위 투수시험에 따른 균열 치유 특성 평가 결과 초기 투수량이 감소하는 결과가 나타났으며, 시간 경과에 따라 반응 생성물 발생하여 균열이 치유되는 것을 확인 할 수 있었다.

핵심용어 : 치유특성, 보수 모르타르, 자기치유, 고상캡슐, 결정성장형
