

결정성장형 무기재료 조성비에 따른 고상 캡슐의 자기치유 성능에 관한 실험적 연구

남은준¹, 오성록^{2*}, 김철규³, 최연왕⁴

An Experimental Study on the Self-Healing Performance of Solid Capsules According to the Composition Ratio of Crystal Growth Type Inorganic Materials

Eun-Joon Nam¹, Sung-Rok Oh^{2*}, Cheol-Gyu Kim³, Yun-Wang Choi⁴

Abstract: In this paper, a solid capsule was prepared using a crystal growth type inorganic material capable of hydration reaction. The solid capsules were mixed at 3, 5, and 10% according to the composition ratio of 8:2, 7:3, 6:4 based on the cement mass, and the self-healing mortar was mixed. Durable healing properties were evaluated through the water permeability test. As a result of the water level permeability test, the effect of optimally improving the natural healing performance was shown by mixing the solid capsules prepared in a composition ratio of 7:3 of the solid capsules. In the case of a crack width of 0.3mm or less, it is estimated that more than 90% of the self-healing performance can be secured. As a result, it was judged that the self-healing performance of the solid capsule had an effect on the durable healing properties through the water permeability test. It is judged that there is a tendency to improve self-healing performance according to the mixing of solid capsules.

Keywords: Crystal growth type, Inorganic materials, Solid capsules, Self-healing mortar

1. 서 론

자기치유 기술(Self-Healing Technology)은 구조물에 균열이 발생할 경우 균열을 능동적으로 치유할 수 있도록 하는 자기치유 기술이 국내외에 스마트 건설기술로써 대두되고 있다. 자기치유 기술이 적용된 구조물은 균열 발생이 진행됨과 동시에 균열치유가 진행되며, 균열 발생 초기에 균열이 닫히는 효과로 인하여 균열의 진전 및 확장을 저감 및 방지할 수 있어 일반적인 구조물의 유지보수 시간, 노력 및 비용을 크게 절감할 수 있는 효과가 있다. 또한, 인력 동원하기 어려운 구조물의 경우에도 효과적으로 보수를 수행할 수 있으므로(Erik, 2013; An, 2014), 구조물의 보수효과만이 아니라 인력의 동원이 필요하지 않으므로 안전성까지도 확보가 가능하다. 종합적으로 보면 기대효과는 더욱 클 것으로 예상되고 있다.

구조물에 적용할 수 있는 자기치유 기술은 매커니즘에 따라서 다양한 개념이 존재하고 있다(Oh, 2017). 적용 환경 또는 구조물에 따라서 적합한 기술을 고려할 수 있으며, 사회환경

적 측면과 경제성 측면에 따라서 고려하여 적용할 수 있다.

캡슐을 활용한 자기치유 기술은 직접적인 자기치유 소재를 다량 포함할 수 있으므로(Tatyana, 2012; M. Hunger, 2009) 다양한 구조물에 적용 시킬 수 있으며, 균열을 통해 파괴되지 않은 캡슐은 소재의 성능이 잠재되어 있으므로 자기치유 성능이 유효하다(Oh, 2020).

캡슐을 자기치유 기술로써 활용한 연구 동향을 살펴보면 자기치유 소재를 마이크로 크기로 캡슐화하여 적용한 사례가 많이 있다(Shazim, 2014; Kim, 2003). 마이크로 캡슐은 자기치유 소재를 반응시키기 위해서 반응 촉매제(Trigger)가 별도로 요구되므로 반응 촉매제를 별도로 마이크로 캡슐화하여 함께 사용해야 된다는 문제점을 가지고 있으며, 균열을 통해 캡슐이 파괴되어 자기치유 소재가 균열면으로 용출되더라도 반응 촉매제와 결합하지 못하면 반응시킬 수 없다는 문제점을 가지고 있다. 국내에는 이러한 문제점들을 보완하여 별도의 촉매제가 없어도 태양광 또는 수분으로 반응할 수 있는 자기치유 마이크로 캡슐을 제조하였으며, 건설 분야에 기술을 적용한 사례가 있다(Song, 2013). 그러나 자기치유 마이크로 캡슐의 적용대상이 구조물 모체가 아닌 모체 표면만을 대상으로 진행하고 있으므로(Wang, 2003; Blaiszika, 2007) 마이크로 캡슐량이 매우 제한적이며, 모체 내부의 균열 폭 또는 균열 깊이에 대하여 대응하기 매우 어렵다(Oh, 2020). 이러한 문제를 해결하기 위해서는 캡슐을 배합에 직접 혼합하여 모체

¹정희원, 세명대학교 토목공학과 박사과정

²정희원, (주)뉴저스트 기술연구소 책임연구원

³정희원, 세명대학교 토목공학과 공학박사

⁴정희원, 세명대학교 토목공학과 교수

*Corresponding author : cgdb02@nate.com

Institute of Technology, Newjust Co., Ltd, Gyeonggi-do, 15588, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2021년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

내부에 캡슐이 분산되도록 하는 방안을 적용하여야 한다.

모체 내부에 있는 자기치유 소재를 수분에 의하여 반응할 수 있도록 할 경우 적용할 구조물에 대응하여 자유롭게 조절할 수 있으며, 균열면에 위치 해있는 캡슐이 수화반응을 통하여 균열을 치유하므로 종래의 경우보다 치유효율을 증가시킬 수 있다. 본 연구에서는 다양한 자기치유 기술에서 결정성장형 무기재료 자기치유 소재를 응집하여 캡슐화하였으며, 사용하는 기술을 대상으로 배합에 직접 혼합이 가능하도록 자기치유 캡슐을 제조하였다.

대부분의 구조물이 수분은 우천, 지하수 및 습기 등에 노출되어 있어 균열면의 파괴된 캡슐과 반응하기 용이하다(Oh, 2019). 이와 관련된 국내 자기치유 선행연구를 살펴보면 내구성 측면에서 치유성능은 주로 정수위투수시험에 의한 Water flow test를 실시하여 투수량의 감소수준을 평가하고 있다. 이러한 이유는 이 시험을 통하여 균열의 균열폭 감소로 인한 내구적 성능을 증가시키는 자기치유 성능을 평가할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 수화반응이 가능한 결정성장형 무기재료를 사용하여 고상 캡슐을 제조하였으며, 고상 캡슐을 혼합한 자기치유 모르타르를 제조하였다. 본 연구에서는 결정성장형 무기재료를 사용한 고상 캡슐을 조성비를 통해 자기치유 모르타르의 내구적 치유 특성에 대하여 평가를 실시하였으며, 향후 내구적 치유 특성을 고려하여 자기치유 모르타르 기술의 진보화를 위한 기반자료로써 활용하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 결정성장형 무기재료 활용 고상 캡슐 제조

2.1.1 결정성장형 무기재료

결정성장형 무기재료는 수화반응에 의해 에트링가이트(Ettringite) 또는 수산화칼슘 등을 생성하여 팽창시키는 작용이 있는 아원계 팽창제(Calcium Sulfoaluminate, CSA)와 결정성장 촉진 및 육각판상의 결정물을 발생하는 무수석고(CaSO₄)를 선행연구(Oh, 2020)를 통하여 얻어진 적합한 비율에 따라 혼합하여 사용하였다. 이들의 반응 매커니즘은 CaSO₄의 결정을 통하여 균열 영역의 공간충전 효과가 있으며, CSA의 결정을 통하여 썩기효과에 따른 결정물과 반응 생성물의 안정화 효과이다.

Fig. 1은 코어재료인 결정성장형 무기재료의 반응 매커니즘

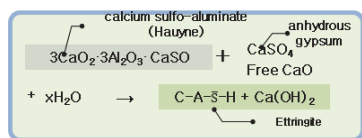


Fig. 1 Self-healing reaction mechanism

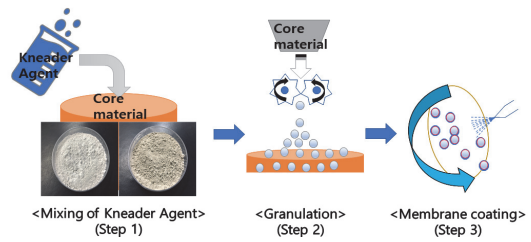


Fig. 2 Encapsulation mechanism

Table 1 Mixing ratio of crystal growth type inorganic materials

Type	Expansion Agent (CSA)	Anhydrous Gypsum (CaSO ₄)
8:2	8	2
7:3	7	3
6:4	6	4

을 나타낸 것이며(Oh, 2017; Oh, 2019; Choi, 2017), Fig. 2는 고상 캡슐의 제조 과정을 나타낸 것을 나타낸 것이다(Nam, 2020).

Table 1에 나타낸 바와 같이 3가지 변수로 정하여 결정성장형 무기재료 코어재료의 조성비 선정하였다. 고상 캡슐의 제조는 결정성장형 무기재료 분체상을 일정 크기로 입자화하기 위한 코어재료 제조 단계와 입자화된 결정성장형 무기재료의 막 재료의 코팅 단계 후 건조 단계를 통하여 제조된다. 코어재료 제조 단계에서는 입자화를 위하여 응집제가 필요하며, 입자화 과정 중에서 사전반응을 방지하기 위하여 수분함량이 최소화된 응집제를 적용하였다. 응집제를 통하여 입자화된 코어재료는 배합에 혼합할 경우 배합수와의 반응을 방지하기 위하여 막재료로써 폴리우레탄을 사용하였다.

2.1.2 고상 캡슐의 제조

결정성장형 무기재료는 응집제와 혼합하여 적당한 질기를 가지는 상태로 만든 다음 Fig. 3(a)의 장비를 통하여 코어 재료

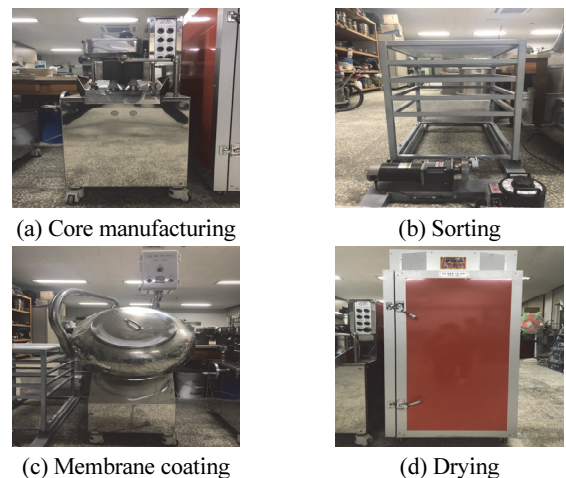


Fig. 3 Equipment of soild capsules

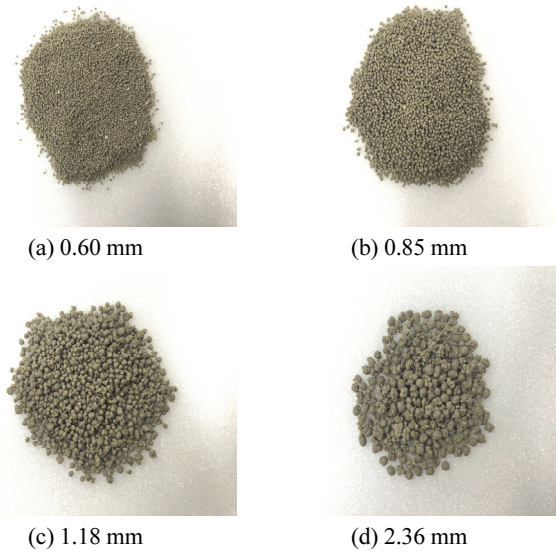


Fig. 4 Size type of solid capsules

를 제조한다. 제조된 코어는 Fig. 3(b)의 장비를 통하여 크기를 분류하며, Fig. 3(c)의 장비를 통하여 막 코팅을 실시한다. 최종적으로 Fig. 3(d)의 장비를 통하여 건조하여 제조된다. Fig. 4은 고상 캡슐의 형태를 나타낸 것으로 고상 캡슐의 크기는 600 ~ 2,360 μm 로 제조되었다. 본 연구에서는 선행연구(Oh, 2017; Oh, 2019)를 통하여 적정크기를 선정하였으며, 850 ~ 1,180 μm 내의 크기만을 선별하여 사용하였다.

2.2 모르타르 제조

2.2.1 사용재료

모르타르에 사용된 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement, C)를 사용하였다. 또한 실험에 사용된 잔골재는 강모래(River Sand, S)를 사용하였으며, 실험에 사용된 화학 혼화제(Chemical admixture, ad)는 고상 캡슐의 분산 및 워커빌리티 확보를 위하여 국내 H사의 폴리칼본산계 고성능 감수제를 사용하였다.

2.2.2 배합

배합은 “KS L ISO 679 시멘트의 강도 시험 방법”에 준하여 모르타르를 제조하여 Water flow test에 적합한 형태로 시편을 제작하였다. 고상 캡슐(Solid Capsules, SC)의 혼합량은 C 질량의 3, 5 및 10 %를 혼합하였으며, Table 2는 배합비를 나타낸 것이다.

2.3 평가방법

2.3.1 자기치유 특성

균열 자기치유 성능은 Water flow test를 통하여 평가하였

Table 2 Mixing ratio of cement mortar

Type	W	C	S	Capsules (C×%)	ad (C×%)
Plain				0	0.005
8:2	0.4	1	2	3	
7:3				5	0.006
6:4				10	

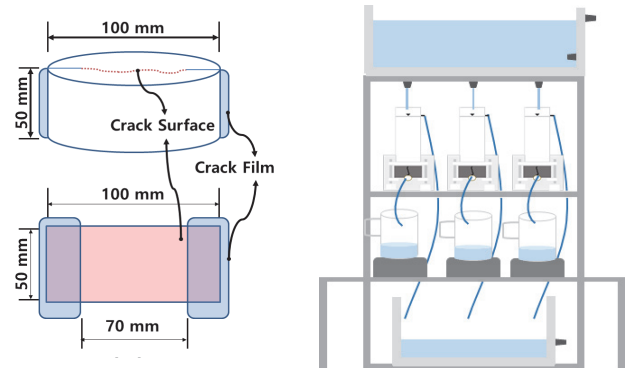


Fig. 5 Crack induction specimen and measuring equipment for water flow test

다. Water flow test는 정수위 투수시험($h=300 \text{ mm}$)을 통하여 균열이 유도된 시험편의 초기 투수량($\text{ml}/\text{min}\cdot\text{mm}$)을 측정하였으며, 치유재령 이후의 투수량 감소수준을 통하여 자기치유 수준을 평가하였다.

정수위 투수시험용 시험편은 $\phi 100 \times 50 \text{ mm}$ 크기의 시험편을 제작하여 온도(20 ± 3) $^{\circ}\text{C}$ 및 습도(50 ± 10)% 조건에서 수증양생을 실시하였다. 균열 유도 재령은 재령 7 및 28일이 경과되었을 때 균열을 각각 유도하였으며, 실제 구조물에서 발생하는 미세균열폭과 동일하게 0.25 mm가 되도록 균열 유도 필름을 삽입하여 균열을 제어하였다. 또한 균열폭 유지를 위하여 시험편의 측면부를 호스밴드로 고정하였다.

균열이 유도된 시험편은 치유재령 7, 14, 21 및 28일에 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 10분간 측정하여 실시간 투수량을 측정하였다. Fig. 4는 정수위 투수시험용 균열 유도 시험편 및 정수위 투수시험 전경을 나타낸 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 조성비에 따른 자기치유 성능

Fig. 6, 7 및 8은 고상캡슐 혼합율에 대한 SC 조성비에 따른

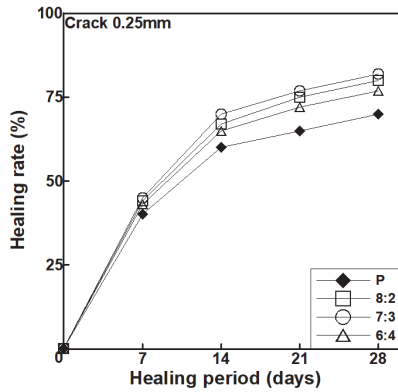


Fig. 6 조성비에 따른 치유기간과 치유율의 관계(혼합률 3%)

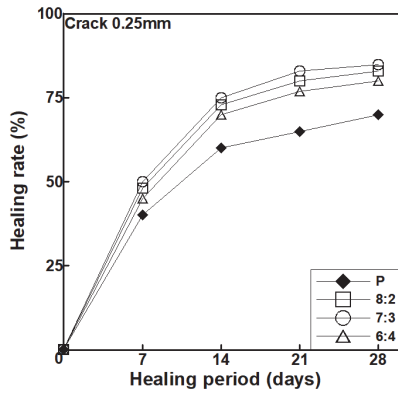


Fig. 7 조성비에 따른 치유기간과 치유율의 관계(혼합률 5%)

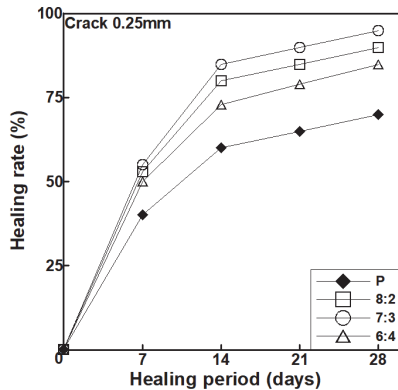


Fig. 8 조성비에 따른 치유기간과 치유율의 관계(혼합률 10%)

치유기간과 치유율의 관계를 나타낸 것이다. 균열폭은 0.25 mm를 대표적으로 분석을 실시하였다. Fig. 6의 결과 고상캡슐을 3% 혼합한 경우 치유재령 28일의 치유율은 Plain의 경우 약 70%, 8:2의 경우 약 80%, 7:3의 경우 약 82% 및 6:4의 경우 약 77%로 나타났다. Fig. 7의 결과 고상캡슐을 5% 혼합한 경우 치유기간 28일의 치유율은 Plain의 경우 약 70%, 8:2의 경우 약 83%, 7:3의 경우 약 85% 및 6:4의 경우 약 80% 나타났다. Fig. 8의 결과 고상캡슐을 10% 혼합한 경우 치유기간 28일

의 치유율은 Plain의 경우 약 70%, 8:2의 경우 약 90%, 7:3의 경우 약 95% 및 6:4의 경우 약 85% 나타났다. 이러한 결과는 SC의 조성비에 따라 치유속도 및 치유 물질의 생성량이 달라지는 것으로 판단되며, 동일한 고상캡슐 혼합율 측면에서 고려할 경우 고상캡슐 혼합율 3%, 5% 및 10%의 각각의 치유율은 공통적으로 SC의 조성비 7:3이 가장 치유율이 큰 것으로 판단된다. 7:3의 치유율은 고상캡슐 혼합율 10%는 다소 차이가 있지만 8:2 및 6:4의 치유율과 비교하여 약 5% 및 10% 치유 효과가 커지는 것으로 나타났다.

이러한 결과를 통하여 최적의 SC의 조성비는 7:3인 것으로 나타남에 따라 이후의 실험은 7:3만을 기준으로 평가를 수행하였다.

3.2 혼합율에 따른 자기치유 성능

Fig. 9는 고상캡슐을 혼합율에 따른 초기 투수량과 치유율의 관계를 나타낸 것이며, Fig 10은 균열폭과 치유율의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 9 및 10의 결과 균열폭 0.2 mm에 해당하는 초기 투수량 0.5 범위의 치유율은 Plain의 경우 약 77%, 3%의 경우 약 86%, 5%의 경우 약 91% 및 10%의 경우 약 99% 나타남에 따라 고상캡슐의 혼합에 따른 치유효과는 Plain의 자연 치유성능에 대하여 3%의 경우 약 9%, 5%의 경우 약 14% 및 10%의 경우 약 23% 향상시키는 것으로 나타났다.

균열폭 0.25 mm에 해당하는 초기 투수량 1.0 범위의 치유율은 Plain의 경우 약 70%, 3%의 경우 약 82%, 5%의 경우 약 85% 및 10%의 경우 약 95% 나타남에 따라 고상캡슐의 혼합에 따른 치유효과는 Plain의 자연 치유성능에 대하여 3%의 경우 약 12%, 5%의 경우 약 15% 및 10%의 경우 약 25% 향상시키는 것으로 나타났다.

균열폭 0.3 mm에 해당하는 초기 투수량 1.8 범위의 치유율은 Plain의 경우 약 67%, 3%의 경우 약 75%, 5%의 경우 약 77% 및 10%의 경우 약 90% 나타남에 따라 고상캡슐 혼합에 따른 치유효과는 Plain의 자연 치유성능에 대하여 3%의 경우 약 8%, 5%의 경우 약 10% 및 10%의 경우 약 16% 향상시키는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 초기 투수량과 균열폭이 상관관계가 있음을 의미하며, 시험편의 균열은 일정하지 않기 때문에 등가 균열폭 개념을 도입하여 초기 투수량을 통하여 균열폭을 예측할 수 있다. 이러한 결과를 통하여 SC의 조성비 7:3으로 제조된 고상캡슐을 혼합함에 따라 자연 치유성능을 향상시키는 효과가 있는 것으로 판단되며, 혼합율 10%를 기준으로 치유재령 28일 경과 시 0.2 mm 균열폭의 경우 약 99%, 0.25 mm 균열폭의 경우 약 95% 및 0.3 mm 균열폭의 경우 약 90% 치유되는 것으로 나타났다.

그러나 최적 혼합율은 다른 관점에서 고려하여야 한다. 큰

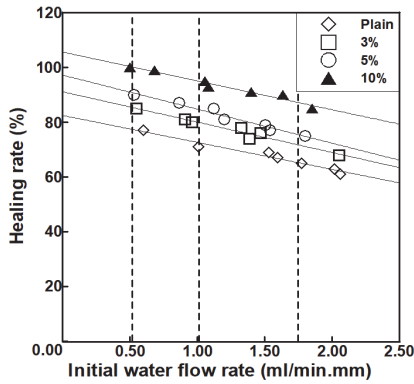


Fig. 9 캡슐 혼합율에 따른 초기 투수량과 치유율의 관계(7:3)

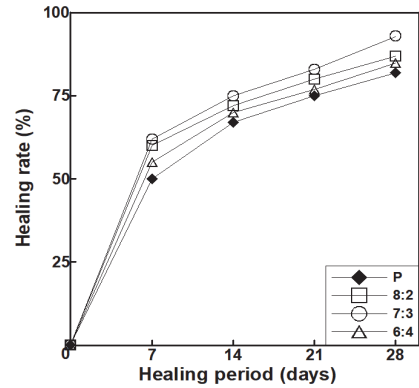


Fig. 11 치유 기간과 치유율의 관계(균열유도 7일)

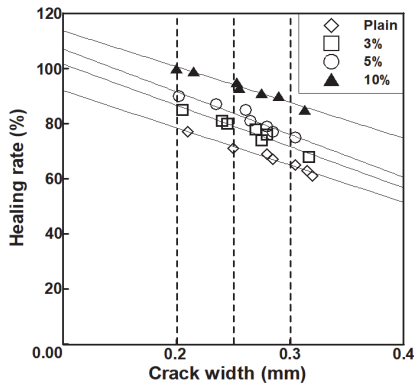


Fig. 10 캡슐 혼합율에 따른 균열폭과 치유율의 관계(7:3)

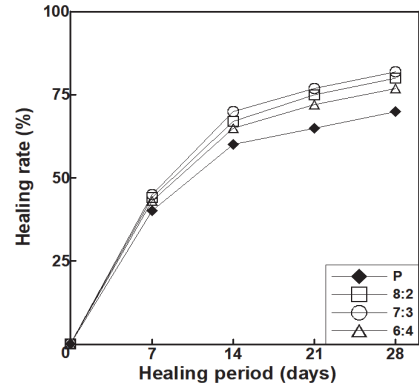


Fig. 12 치유 기간과 치유율의 관계(균열유도 28일)

균열폭을 치유하기 위하여 다량의 캡슐을 혼합할 경우 강도가 저하하게 되며, 고상캡슐의 비용이 증가하기 때문에 비효율적일 수 있다. 일반적으로 균열은 초기에 미세한 균열이 형성되어 점점 확장하는 개념이기 때문에 혼합율을 작게 하더라도 발생 즉시 캡슐이 반응하여 치유작용이 이루어질 경우 치유율은 더욱 커질 것으로 판단된다.

3.3 재령일에 따른 자기치유 성능

Fig. 11 및 12는 균열유도 재령일에 따른 치유기간과 치유율의 관계를 나타낸 것이다. 일반적으로 시멘트 복합재료의 품질은 재령 28일을 기준으로 한다. 따라서 균열유도 시점은 재령 28일에 균열을 유도하여 치유기간에 따른 치유율을 보고 있다. 그러나 재령 28일 균열유도를 하는 경우 치유재령 28일까지 고려하는데 드는 시간이 56일로 장기간의 시간이 요구된다. 이에 따라 본 연구에서는 재령 7일에 균열을 유도한 시험편과 재령 28일에 균열을 유도한 시험편의 치유율의 관계를 평가하여 재령 7일의 시험만으로 재령 28일의 치유율을 예측할 수 있는 DB를 확보하기 위한 일환으로 균열유도 재령

일에 따른 자기치유 성능을 평가하였다.

이러한 방법을 통하여 균열유도 재령 7일에 치유재령 28일까지 총 35일안에 자기치유 성능을 얻을 수 있는 효과가 있으며, 또한 실제 현장의 구조물은 대부분 건설 초기에 발생되므로 이에 대한 자기치유 성능도 고려할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 11의 결과 균열유도 7일의 SC의 조성비에 따른 치유율은 Plain은 약 82%, 8:2는 약 87%, 7:3은 약 93% 및 6:4는 약 85% 나타났으며, Fig. 12의 결과 균열유도 28일의 치유율은 Plain은 약 70%, 8:2는 약 80%, 7:3은 약 82% 및 6:4는 약 77% 나타나 균열유도 7일의 치유율이 28일의 치유율 보다 상대적으로 더 증가하는 경향이 나타났다. 균열유도 7일의 치유율은 균열유도 28일의 치유율과 비교하여 Plain은 약 12%, 8:2는 약 9%, 7:3은 약 11% 및 6:4는 약 8% 큰 것으로 나타나 SC에 관계없이 약 10% 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 균열유도 7일 시험편에 반응이 끝나지 않은 미반응성 수화물 질이 내부에 남아있어 수화가 진행 중이기 때문에 28일 시험편보다 자기치유 성능이 증가한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 수화반응이 가능한 결정성장형 무기재료를 사용하여 조성비에 따른 고상 캡슐을 제조 및 모르타르 배합을 진행 하였으며, 고상 캡슐 혼합에 따른 정수위투수시험을 통하여 내구적 치유 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 고상 캡슐을 혼합한 자기치유 모르타르의 조성비에 따른 자기치유 성능을 평가한 결과, 균열폭은 0.25 mm를 대표적으로 진행 하였으며, 고상캡슐을 3% 혼합한 경우 치유율은 Plain 대비 8:2, 7:3 및 6:4의 경우 각각 약 10%, 12% 및 7%로경향이 나타났으며, 고상캡슐을 5% 혼합한 경우 Plain 대비 8:2, 7:3 및 6:4의 경우 각각 약 13%, 15% 및 10% 나타났다. 또한, 고상캡슐을 10% 혼합한 경우 치유율은 Plain 대비 8:2, 7:3 및 6:4의 경우 각각 약 20%, 25% 및 15% 나타났다.
2. 고상 캡슐을 혼합한 자기치유 모르타르의 혼합율에 따른 자기치유 성능을 평가한 결과, 균열폭 0.2 mm에서 Plain의 자연 치유성능에 대하여 3%, 5% 및 10%의 경우 각각 약 9%, 14% 및 23% 향상시키는 것으로 나타났으며, 균열폭 0.25 mm에서 Plain의 자연 치유성능에 대하여 3%, 5% 및 10%의 경우 각각 약 12%, 15% 및 25% 향상시키는 것으로 나타났다. 또한, 균열폭 0.3 mm에서 Plain의 자연 치유성능에 대하여 3%, 5% 및 10%의 경우 각각 약 8%, 10% 및 16% 향상시키는 것으로 나타났다. SC의 조성비 7:3으로 제조된 고상캡슐을 혼합함에 따라 자연 치유성능을 향상시키는 효과가 있는 것으로 판단된다.
3. 고상 캡슐을 혼합한 자기치유 모르타르의 재령일에 따른 자기치유 성능을 평가한 결과, 균열유도 7일의 SC의 조성비에 따른 치유율은 Plain 대비 8:2, 7:3 및 6:4의 경우 각각 약 5%, 11% 및 3% 나타났으며, 균열유도 28일의 치유율은 Plain 대비 8:2, 7:3 및 6:4의 경우 각각 약 10%, 12% 및 7% 나타나 균열유도 7일의 치유율이 28일의 치유율 보다 상대적으로 더 증가하는 경향이 나타났다.

이러한 결과를 통하여 고상 캡슐을 혼합한 모르타르의 투수시험에 의한 내구적 특성 자기치유 성능 평가 결과, 고상 캡슐의 조성비는 7:3이 최적인 것으로 나타났다. 0.3 mm 이하 균열폭의 경우 약 90% 이상 자기치유 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단되며, 고상 캡슐의 혼합량 증가함에 따라 강도가 감소하는 경향이 있으므로 이를 보완한다면 고상 캡슐의 치유효과에 의하여 내구년한 증대에 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2021년 국토교통과학기술진흥원 국토교통기술 연구개발사업(21SCIP-C159062-02) 지원사업으로 이루어졌으며, 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. Blaiszika, B. J., Sottos, N. R., and White, S. R. (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., and 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, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 6(4), 236-243 (in Korean).
5. Choi, Y. W., Oh, S. R., and 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.
6. Feiteira, J., Gruyaert, E., and De Belie, N. (2016), Self-Healing of Moving Cracks in Concrete by Means of Encapsulated Polymer Precursors, *Journal of Construction and Building Materials*, 102, 671-678.
7. Hunger, M., Entrop, A. G., Mandilaras, I., Brouwers, H. J. H., and Founti, M. (2009), The Behavior of Self-Compacting Concrete Containing Micro-Encapsulated Phase Change Materials, *Journal of Cement & Concrete Composites*, 31(10), 731-743.
8. Huang, Y., Guan, Y., Wang, L., Zhou, J., Ge, Z., and Hou, Y. (2018), Characterization of Mortar Fracture Based on Three Point Bending Test and XFEM. International, *Journal of Pavement Research and Technology*, 11, 339-344.
9. Jun, H. W., Jeong, B. Y., Cheon, J. M., Hwang, J. W., Lee, W. K., and Chun, J. H. (2020), Synthesis and Properties of Self-healing Microcapsules Using Natural Gums as Surfactants, *Polym*, 44(3), 325-333 (in Korean).
10. Kim, C. G. (2017), A Study on the Crack Self Healing Properties of Cement Mortar Utilizing Micro Capsules with Liquid-type Inorganic materials, Master's Thesis, *Master's Thesis, Semyung University* (in Korean).
11. 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).
12. Li, W., Jiang, Z., and Yang, Z. (2017), Acoustic Characterization of Damage and Healing of Microencapsulation-Based Self-Healing Cement Matrices, *Journal of Cement and Concrete Composites*, 84, 48-61.

13. Memon, S. A., Cui, H. Z., Zhang, H., and Xing, F. (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. 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 Korea).
15. Nesterova, T., Johansena, K. D., Pedersen, L. T., and Kiil, S. (2012), Microcapsule-based Self-Healing Anticorrosive Coatings: Capsule Size, Coating Formulation, and Exposure Testing, *Journal of Organic Coatings*, 75(4), 309-318.
16. 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).
17. Oh, S. R., Choi, Y. W., and 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.
18. Oh, S. R., Kim, C. G., Nam, E. J., and Choi, Y. W. (2020), An Experimental Study on the Quality and Crack Healing Properties of Self-Healing Mortar Containing Solid Capsules using Crystal Growth Type Inorganic Materials, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, 8(1), 120-128.
19. 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.
20. Schlangen, E., and Sangadji, S. (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.
21. Shin, J. W., Her, S. W., Park, J. Y., and Bae, S. C. (2020), Evaluation of The Self-Healing Performance of Repair Mortar Incorporating Inorganic Admixtures, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 40(2), 549-550 (in Korean).
22. 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.
23. Qureshi, T., Kanellopoulos, A., and Al-Tabbaa, A. (2018), Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-I: Impact in early age crack healing, *Journal of Construction and Building Materials*, 192, 768-784.
24. Wang, X., Xing, F., Zhang, M., Han, N., and Qian, Z. (2003), Experimental Study on Cementitious Composites Embedded with Organic Microcapsules, *Journal of Materials*, 6(9), 4064-4081.

Received : 11/05/2020
 Revised : 12/11/2020
 Accepted : 02/09/2021

요 지 : 본 논문에서는 수화반응이 가능한 결정성장형 무기재료를 사용하여 고상 캡슐을 제조하였다. 고상 캡슐을 시멘트 질량 기준으로 8:2, 7:3, 및 6:4의 조성비에 따라 3, 5 및 10% 혼합하여 자기치유 모르타르 배합을 진행 하였으며, 정수위투수시험을 통해 내구적 치유 특성을 평가하였다. 정수위투수시험 실험결과, 고상 캡슐의 조성비 7:3으로 제조된 고상 캡슐을 혼합함에 따라 자연 치유성능을 최적으로 향상시키는 효과가 나타났다. 0.3 mm 이하 균열폭의 경우 약 90% 이상 자기치유 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 결과, 고상 캡슐의 자기치유 성능은 정수위투수시험을 통하여 내구적 치유 특성에 영향이 있는 것으로 판단되며, 고상 캡슐의 혼합에 따라서 자기치유 성능을 향상시키는 경향이 있다고 판단된다.

핵심용어 : 결정성장형, 무기 재료, 고상 캡슐, 자기 치유 모르타르
