

균열 유도 재령에 따른 결정성장형 자기치유 고상캡슐 활용 시멘트 모르타르의 균열 치유 특성

The Crack Healing Properties of Cement Mortar Materials Using Crystal Growth Type Self-Healing Solid Capsules According to the Crack Induction Age

최연왕¹ · 남은준^{2*} · 김철규³ · 오성록⁴

Yun-Wang Choi¹ · Eun-Joon Nam^{2*} · Cheol-Gyu Kim³ · Sung-Rok Oh⁴

(Received October 20, 2020 / Revised November 18, 2020 / Accepted November 18, 2020)

In this study, three levels of solid capsules were prepared according to the composition ratio of core materials for the crystal growth type self-healing solid capsule, and a cement mortar was prepared with the crystal growth type self-healing solid capsule. The prepared solid capsule was mixed with 3% of the cement mass to evaluate the healing properties according to the crack induction age of the cement mortar. As a result of test, the crack healing properties according to the crack induction age of cement mortar mixed of solid capsules, it was confirmed that the self-healing performance of the cement mortar with the solid capsules was increased self-healing performance of 7 days than 28 days. This is because the unhydrated binder remains.

키워드 : 균열, 결정성장형, 자기치유, 고상캡슐, 시멘트 모르타르

Keywords : Crack, Crystal growth type, Self-healing, Solid capsules, Cement mortar

1. 서론

구조물에 균열이 발생할 경우 균열을 스스로 탐지하여 능동적으로 치유하는 기술인 자기치유 기술(Self-Healing Technology)은 최근 국내외적으로 스마트 건설기술 분야로 대두되고 있는 기술 중 하나이다. 자기치유 성능을 부여한 구조물은 균열이 발생할 경우 균열을 스스로 탐지하여 균열 발생 초기에 치유할 수 있으므로 일반적인 구조물의 유지보수에 따른 시간, 노력 및 비용을 크게 절감할 수 있으며, 특히, 사람이 쉽게 접근하기 어려운 구조물의 경우에도 효과적으로 보수를 수행할 수 있는 장점이 있다 (Schlangen and Sangadji 2013; An and Shin 2014).

자기치유 기능을 구조물에 부여하기 위해서는 여러 가지 개념 중에서 자기치유 성능을 가지는 물질을 캡슐화하여 적용하는 방법

이 있다. 캡슐을 활용한 자기치유 기술은 직접적인 자기치유 소재를 다량 포함할 수 있기 때문에(Nesterova et al. 2012; Hunger et al. 2009) 손상부위 즉, 균열이 발생한 부위에 선택적으로 반응시킬 수 있는 장점이 있으며, 국내 기술의 경우 별도의 촉매제 없이 태양광 또는 수분으로 반응할 수 있는 자기치유 마이크로캡슐을 제조하여 건설 분야 기술에 적용한 사례가 있다(Song et al. 2013). 국외 기술의 경우 자기치유 소재와 촉매제를 마이크로 사이즈로 캡슐화 하여 적용한바 있다(Memon et al. 2014; Kim et al. 2003).

국·내외 대표적인 연구 사례를 검토해 보면 크게 2가지 결론을 얻을 수 있다. 첫째, 자기치유 캡슐의 적용대상이 구조물 표면을 대상으로 하고 있으며, 둘째, 자기치유 성능을 가지는 물질이 유기계 기반 소재의 화학 약품을 적용하고 있다(Wang et al. 2003; Blaszika et al. 2007). 이러한 경우 표면보호를 위한 박막 형태의

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

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

²세명대학교 토목공학과 박사과정 (Department of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon-si, 27136, Korea)

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

⁴㈜뉴저스트 기술연구소 책임연구원 (Responsibility Researcher, Institute of Technology, Newjust Co., Ltd, Gyeonggi-do, 15588, Korea)

코팅재로 활용되기 때문에 자기치유를 위한 캡슐량이 한정적이며, 균열 폭 또는 균열 깊이에 대하여 대응하기에 어렵다는 문제점이 있다. 또한 구조물 모체는 대부분 무기재료를 기반으로 하는 복합 재료로 구성되어 있기 때문에 자기치유를 위한 재료가 열적 특성이 다른 유기재료보다는 동일한 특성을 가지는 무기재료를 활용하는 것이 실제 균열을 자기치유 함에 있어 효율적인 성능을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

적용방법 측면에서 고려할 경우 표면 대상에서 시멘트 복합재료 배합시 직접 혼합할 경우에는 모체 매트릭스의 두께를 적용할 대상에 대응하여 자유롭게 조절이 가능하기 때문에 상대적으로 많은 자기치유 캡슐을 포함할 수 있어 자기치유 성능을 극대화할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 효과를 고려하여 기존에는 시멘트 분말을 입자화시킨 고상 캡슐을 적용한 바 있다(Oh 2017; Oh et al. 2019). 그러나 균열은 균열 폭 및 균열 깊이 만큼의 공간이 발생되기 때문에 시멘트 분말 대신 결정성장형 무기재료를 사용할 경우 팽창효과를 통하여 균열 자기치유 성능이 향상될 것으로 판단된다. 또한 치유성능은 균열 유도 재령에 따라서 치유 성능이 의존한다.

본 논문에서는 결정성장형 자기치유 고상캡슐이 시멘트 모르타르의 균열 치유성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 균열 유도 재령에 따라 균열을 유발시킨 시험편을 제작하였으며, 치유 재령 경과에 따른 투수 감소율을 통하여 균열 치유 특성을 평가하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 결정성장형 자기치유 고상캡슐

결정성장형(Crystal Growth, CG) 자기치유 고상캡슐 제조는 아원계 팽창제(Calcium Sulfoaluminate, CSA) 및 무수석고(Anhydrous Gypsum, CaSO₄)를 Table 1과 같은 조성비에 따라 혼합하여 코어재료를 제조하였으며, 제조된 코어재료는 Fig. 1의 캡슐화 매커니즘에 따라 물리적인 제법에 의하여 제조된다(Oh 2017; Oh et al. 2019; Choi et al. 2017).

결정성장형 무기재료는 응집제와 일정한 비로 혼합하여 적당한 질기를 가지도록 반죽하며, 코어 제조 장비를통하여 입자화한 다음 회전 방식을 통하여 막재료를 분무 도포하여 제조하였다. Fig. 2은 고상캡슐의 제조 장비를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 코어 제조 장비를 나타낸 것이며, Fig. 2(b)는 코어재료의 크기 분류 장비를 나

Table 1. Mixing ratio of crystal growth type inorganic materials

Type	Expansion agent (CSA)	Anhydrous gypsum (CaSO ₄)
CG1	8	2
CG2	7	3
CG3	6	4

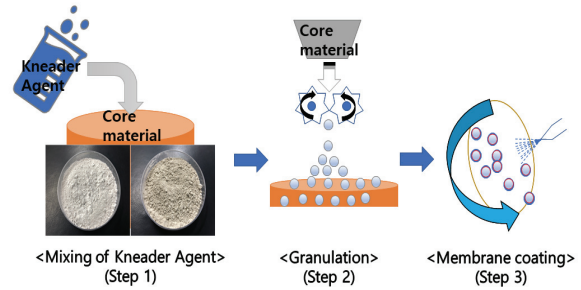


Fig. 1. Encapsulation mechanism



(a) Core manufacturing

(b) Sorting



(c) Membrane coating

(d) Drying

Fig. 2. Equipment of soild capsules

타낸 것이다. Fig. 2(c)는 막 코팅 장비를 나타낸 것이며, Fig. 2(d)는 고상캡슐의 건조 장비를 나타낸 것이다.

Fig. 3은 고상캡슐의 형태 및 크기를 나타낸 것으로 결정성장형 자기치유 고상캡슐의 크기는 약 0.6~2.0mm의 입도를 가지는 것으로 나타났으며, 90% 이상이 0.85~1.18mm 이내의 고상캡슐을 사용하였다. 결정성장형 자기치유 고상캡슐의 크기 범위는 치유효과를 고려하여 결정하였다(Oh 2017; Oh 2019).

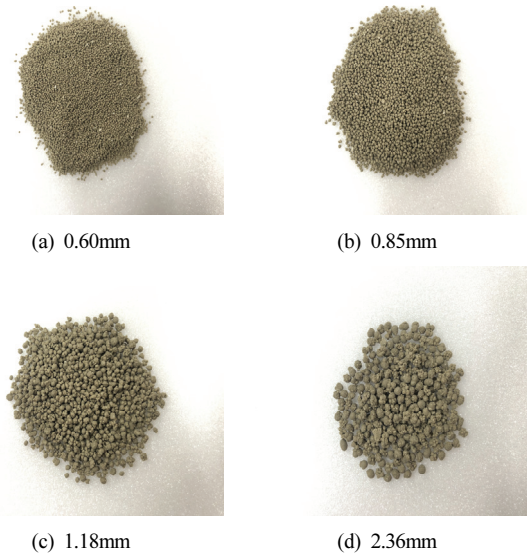


Fig. 3. Size type of solid capsules

2.1.2 시멘트 모르타르

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

2.2 시멘트 모르타르의 균열 치유 특성

2.2.1 배합

배합은 “KS L ISO 679 시멘트의 강도 시험 방법”에 준하여 시멘트 모르타르를 제조하였다. 고상캡슐의 혼합량은 시멘트 질량에 대하여 2수준(0 및 3%)을 혼합하였으며, 고상캡슐의 혼합은 최종 비비기 단계에서 고상캡슐을 투입하였다. Table 2는 배합비를 나타낸 것이다.

Table 2. Mixing ratio of cement mortar

No.	W	OPC	S	Capsules (C×%)	ad (C×%)
Plain	0.4	1	2	0	0.005
CG1				3	0.006
CG2					
CG3					

2.2.2 Water flow test

균열 자기치유 성능평가는 정수위 투수시험(h=300mm)을 통하여 균열이 유도된 시험편의 초기 투수량(ml/min · mm)을 측정하였으며, 치유재령 이후의 투수량 감소수준을 통하여 자기치유 수준을 평가하였다.

정수위 투수시험용 시험편은 $\phi 100 \times 50$ 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 0.2~0.3mm가 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 1분단위로 10분간 측정하여 실시간 투수량을 측정하였다. Fig. 4는 정수위 투수시험용 균열 유도 시험편 및 정수위 투수시험 전경을 나타낸 것이다.

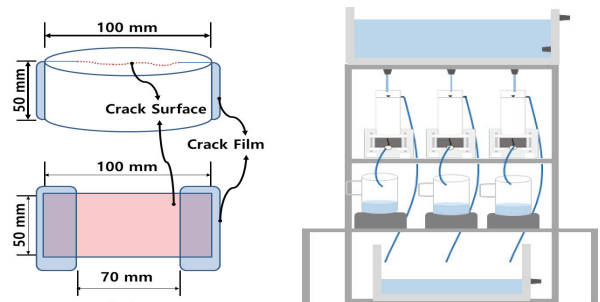


Fig. 4. Crack induction specimen and measuring equipment for water flow test

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열 유도에 따른 자기치유 성능

3.1.1 균열 유도 7일 시험편의 자기치유 성능

Fig. 5, 6, 7 및 8은 균열 유도 7일 시험편의 CG 조성비에 대한 치유재령에 따른 초기 투수량과 치유율의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 5, 6, 7 및 8의 결과 0.2mm 균열폭에 해당하는 초기 투수량 0.5영역에서는 치유재령 28일 경과 Plain은 약 91%, CG1은 경우 약 95%, CG2는 약 99% 및 CG3은 약 93% 치유율이 나타남에

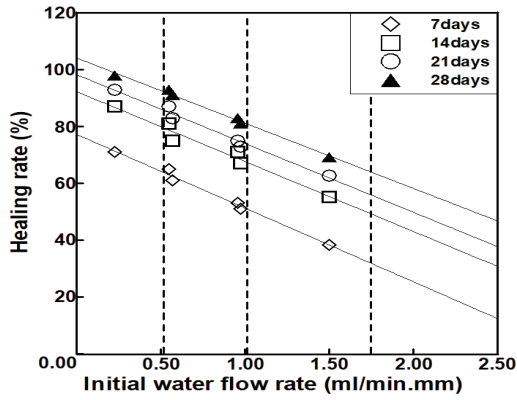


Fig. 5. Experimental results of healing rate at the Initial water flow rate(Plain)

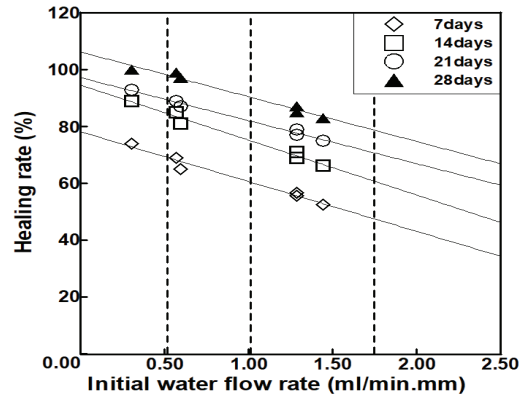


Fig. 7. Experimental results of healing rate at the Initial water flow rate(CG2)

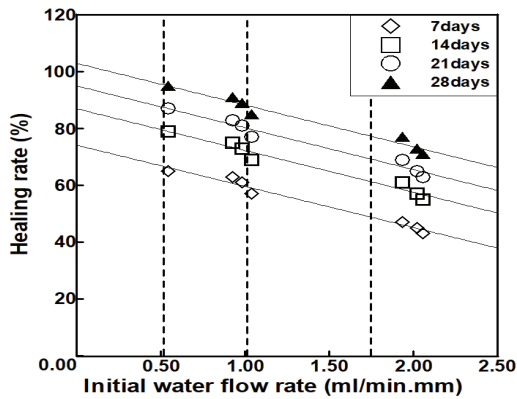


Fig. 6. Experimental results of healing rate at the Initial water flow rate(CG1)

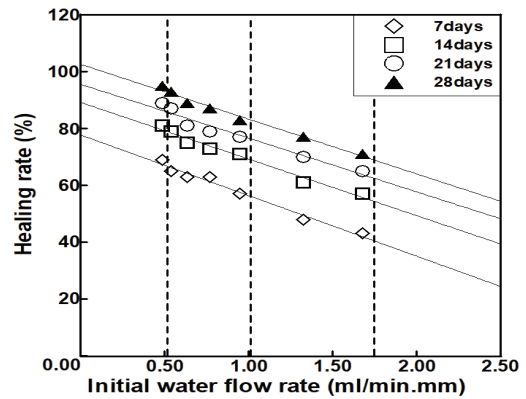


Fig. 8. Experimental results of healing rate at the Initial water flow rate(CG3)

따라 고상캡슐 혼합에 따른 치유효과는 Plain의 자연치유 성능에 대하여 CG1은 약 4%, CG2는 약 8% 및 CG3은 약 2% 향상시키는 것으로 나타났다. 0.25mm 균열폭에 해당하는 초기 투수량 1.0영역에서는 치유재령 28일 경과 후 Plain은 약 82%, CG1은 약 87%, CG2는 약 93% 및 CG3은 약 85% 나타남에 따라 고상캡슐 혼합에 따른 효과는 Plain의 자연치유 성능에 대하여 CG1은 약 5%, CG2는 약 11% 및 CG3은 약 3% 향상시키는 것으로 나타났다. 0.3mm 균열폭에 해당하는 초기 투수량 1.8영역에서는 치유재령 28일 경과 후 Plain은 약 65%, CG1은 약 79%, CG2는 약 83% 및 CG3은 약 73% 나타남에 따라 고상캡슐 혼합에 따른 효과는 Plain의 자연치유 성능에 대하여 CG1은 약 14%, CG2는 약 18% 및 CG3은 약 8% 향상시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Plain의 경우에도 재령 7일인 초기재령에서 재령 28일까지 지속적인 반응을 하기 때문에 자연적인 치유효과가 있는 것으로 판단되며, 균열폭이 증가함에 따라 치유율이 감소하는 경향이 나타나지만 재령 7일 균열 유도 후 치유재령 28일이 경과한 경우에는 0.2mm, 0.25mm 및

0.3mm 균열폭에 대하여 91%, 82% 및 65% 치유되는 것으로 판단 된다.

3.1.2 균열 유도 28일 시험편의 자기치유 성능

Fig. 9, 10, 11 및 12는 균열 유도 28일 시험편의 CG 조성비에 대한 치유재령에 따른 초기 투수량과 치유율의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 9, 10, 11 및 12의 결과 0.2mm 균열폭에 해당하는 초기 투수량 0.5영역에서는 치유재령 28일 경과 후 Plain은 약 77%, CG1은 약 83%, CG2는 약 85% 및 CG3은 약 80% 나타남에 따라 고상캡슐 혼합에 따른 효과는 Plain의 자연치유 성능에 대하여 CG1은 약 6%, CG2는 약 8% 및 CG3은 약 3% 향상시키는 것으로 나타났다. 0.25mm 균열폭에 해당하는 초기 투수량 1.0영역에서는 치유재령 28일 경과 후 Plain은 약 70%, CG1은 약 80%, CG2는 약 82% 및 CG3은 약 77% 나타남에 따라 고상캡슐 혼합에 따른 효과는 Plain의 자연치유 성능에 대하여 CG1은 약 10%, CG2는 약 12% 및 CG3은 약 7% 향상시키는 것으로 나타났다. 0.3mm 균

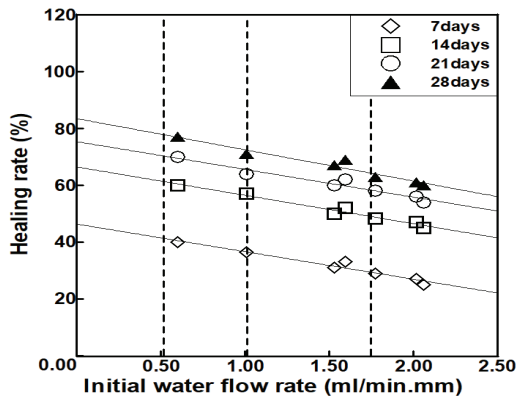


Fig. 9. Experimental results of healing rate at the Initial water flow rate(Plain)

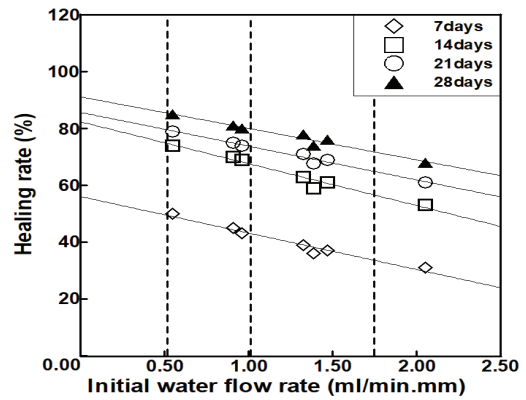


Fig. 11. Experimental results of healing rate at the Initial water flow rate(CG2)

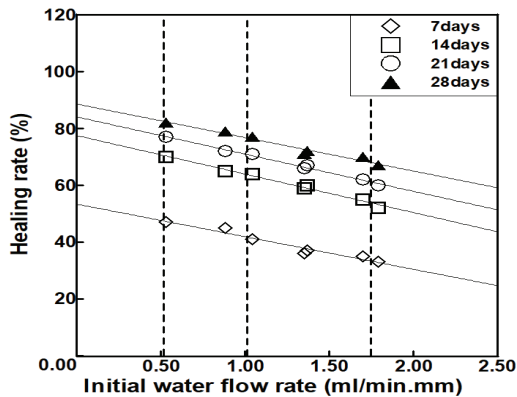


Fig. 10. Experimental results of healing rate at the Initial water flow rate(CG1)

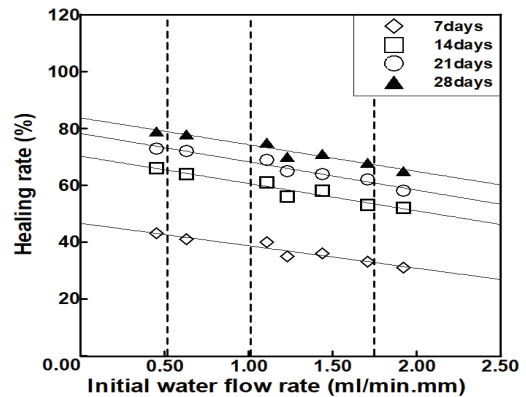


Fig. 12. Experimental results of healing rate at the Initial water flow rate(CG3)

열폭에 해당하는 초기 투수량 1.8영역에서는 치유재령 28일 경과 후 Plain은 약 63%, CG1은 약 71%, CG2는 약 73% 및 CG3은 약 69% 나타남에 따라 고상캡슐 혼합에 따른 효과는 Plain의 자연치유 성능에 대하여 CG1은 약 8%, CG2는 약 10% 및 CG3은 약 6% 향상시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 재령 7일의 자연치유 효과와 비교하여 치유성능이 감소하는 것으로 판단되지만 재령 28일 경과 후에도 내부에 존재하는 미수화 시멘트에 의하여 치유 효과가 있는 것으로 판단된다. CG 조성비에 따른 효과를 고려할 경우에는 균열 유도 7일 시험편과 동일하게 CG1의 치유효율이 CG2 및 CG3과 비교하여 상대적으로 큰 경향이 나타났다. 또한 아원계 팽창제와 무수석고의 최적비가 존재함을 의미하며, 최적비가 조성된 경우에 상대적으로 많은 결정물의 발생 및 반응속도에 따른 최적의 치유효과가 있는 것으로 판단된다.

3.2 균열 유도 재령에 따른 자기치유 성능

Fig. 13 및 14는 균열 유도 재령일에 따른 치유기간과 치유율의 관계를 나타낸 것이다. 일반적으로 시멘트 모르타르의 품질은 재령 28일을 기준으로 한다. 따라서 균열 유도 시점은 재령 28일에 균열을 유도하여 치유기간에 따른 치유율을 보고 있다. 그러나 재령 28일 균열 유도를 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 균열 유도 재령일에 따른 자기치유 성능을 평가하였다.

이러한 방법을 통하여 균열 유도 재령 7일에 치유재령 28일까지 총 35일안에 자기치유 성능을 얻을 수 있는 효과가 있으며, 또한 실제 현장의 구조물은 대부분 건설 초기에 발생 되므로 이에 대한 자기치유 성능도 고려할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 13의

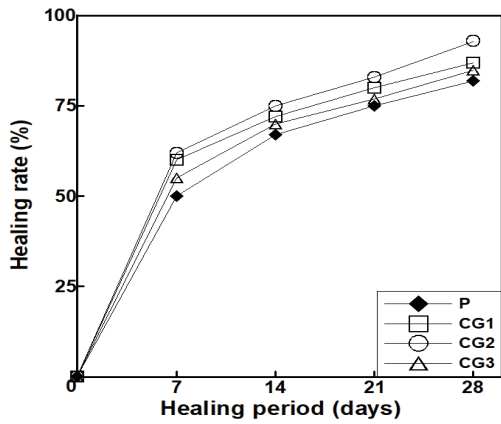


Fig. 13. Experimental results of Healing rate to healing period(7 days crack induction)

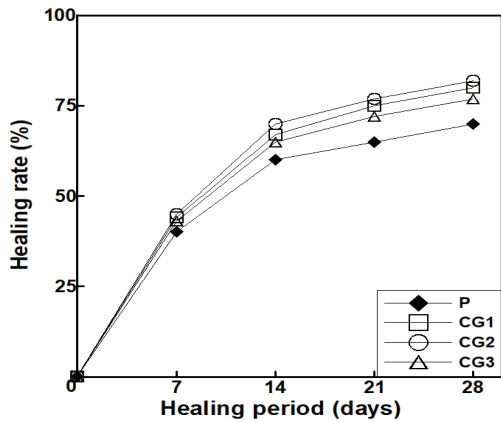


Fig. 14. Experimental results of Healing rate to healing period(28 days crack induction)

결과 균열 유도 7일의 CG 조성비에 따른 치유율은 Plain은 약 82%, CG1은 약 87%, CG2는 약 93% 및 CG3은 약 85% 나타났으며, Fig. 14의 결과 균열 유도 28일의 치유율은 Plain은 약 70%, CG1은 약 80%, CG2는 약 82% 및 CG3은 약 77% 나타나 균열 유도 7일의 치유율이 28일의 치유율 보다 상대적으로 더 증가하는 경향이 나타났다. 균열 유도 7일의 치유율은 균열 유도 28일의 치유율과 비교하여 Plain은 약 12%, CG1은 약 9%, CG2는 약 11% 및 CG3은 약 8% 큰 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 결정성장형 자기치유 고상캡슐이 시멘트 모르타르의 균열 치유성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 결정성장형 무기재료를 사용하여 자기치유 고상캡슐을 제조하였으며, 자기치

유 고상캡슐을 혼합한 시멘트 모르타르의 자기치유 성능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 결정성장형 고상캡슐을 사용한 시멘트 모르타르의 정수위 투수시험에 의한 Water flow 평가 결과, 결정성장형 무기재료의 조성비는 CSA 7 : CaSO₄ 3인 경우 자기치유 성능이 상대적으로 큰 것으로 나타났으며, 0.2-0.3mm 균열폭에 대하여 치유재령 후 투수량이 감소된 것으로 나타남에 따라 자기치유 성능을 검증할 수 있었다.
2. 결정성장형 고상캡슐을 사용한 시멘트 모르타르의 균열 유도에 따른 자기치유 성능을 평가한 결과, 균열 유도 7일의 경우 0.2mm, 0.25mm 및 0.3mm 균열 폭의 투수량은 99%, 93% 및 83% 감소하는 결과가 나타났으며, 균열 유도 28일의 경우 0.2mm, 0.25mm 및 0.3mm 균열 폭의 투수량은 85%, 82% 및 73% 감소하는 결과가 나타남에 따라 캐스팅 후 초기에 발생하는 미세균열의 경우 99% 이상 자기치유 성능을 가지는 것으로 판단되며, 재령 28일 경과 후에도 85% 이상의 치유율을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.
3. 고상캡슐을 혼합하지 않은 시멘트 모르타르의 균열 유도 7일 투수 감소량은 0.2mm, 0.25mm 및 0.3mm 균열 폭의 경우 91%, 82% 및 65%, 균열 유도 28일의 경우 77%, 70% 및 63%로 나타남에 따라 결정성장형 고상캡슐 혼합에 따른 자기치유 성능은 시멘트 모르타르의 자연적인 치유성능에 대하여 균열 유도 7일 약 18%, 균열 유도 28일 약 10% 향상시키는 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여 결정성장형 고상캡슐을 사용하여 치유성능을 평가할 경우 균열 유도 7일 시험편에 반응이 끝나지 않은 미반응성 수화물질이 내부에 남아있어 수화가 진행 중이기 때문에 28일 시험편보다 자기치유 성능이 증가한 것으로 판단되지만 고상캡슐의 치유효과만을 분석하기 위해서는 장기 재령에 따른 치유 효과에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2020년도 국토교통과학기술진흥원 국토교통기술연구개발사업(20SCIP-C159062-01) 지원사업으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

References

- An, E.J., Shin, M.S. (2014). Healing mechanisms and assessment techniques of self-healing concrete, *Proceeding of Korea Concrete Institute*, **26(2)**, 477-479 [in Korean].
- Blaszika, B.J., Sottos, N.R., White, S.R. (2007). Nanocapsules for self-healing materials, *Journal of Composites Science and Technology*, **68(3)**, 978-986.
- 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.
- Choi, Y.W., Oh, S.R., Kim, C.G., Im, H.S. (2018). The experimental study on 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].
- Hunger, M., Entrop, A.G., Mandilaras, I., Brouwers, H.J.H., Founti, M. (2009). The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated phase change materials, *Journal of Cement & Concrete Composites*, **31(10)**, 731-743.
- 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, Semyung University [in Korean].
- Kim, P.S., Jo, C.K., Ju, T.H., Choi, Y.C., 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].
- Li, W., Jiang, Z., 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.
- Memon, S.A., Cui, H.Z., Zhang, H., 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.
- 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].
- Nesterova, T., Johansena, K.D., Pedersen, L.T., Kiil, S. (2012). Microcapsule-based self-healing anticorrosive coatings: capsule size, coating formulation, and exposure testing, *Journal of Organic Coatings*, **75(4)**, 309-318.
- 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, *Journal of Construction and Building Materials*, **214**, 574-580.
- Oh, S.R., Kim, C.G., Nam, E.J., 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.
- Qureshi, T., Kanellopoulos, A., 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.
- Reinhardt, H.W., 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.
- Schlangen, E., 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.
- Song, Y.K., Jo, Y.H., Lim, Y.J., Cho, S.Y., Yu, H.C., Ryu, B.C., Lee, S.I., 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.
- Wang, X., Xing, F., Zhang, M., Han, N., Qian, Z. (2003). Experimental study on cementitious composites embedded with organic microcapsules, *Journal of Materials*, **6(9)**, 4064-4081.

균열 유도 재령에 따른 결정성장형 자기치유 고상캡슐 활용 시멘트 모르타르의 균열 치유 특성

본 연구에서는 결정성장형 자기치유 고상캡슐의 코어조성비에 따라 3수준의 고상캡슐을 제조하였으며, 결정성장형 자기치유 고상캡슐을 혼합하여 시멘트 모르타르를 제조하였다. 제조된 고상캡슐은 시멘트 질량의 3%와 혼합하여 시멘트 모르타르의 균열 유도 재령에 따른 치유 특성을 평가하였다. 결정성장형 자기치유 고상캡슐을 혼합한 시멘트 모르타르의 균열 유도 재령에 따른 균열치유 특성을 평가한 결과, 7일 재령 동안 반응하지 않은 수화물질이 남아있기 때문에 고상캡슐과 혼합된 시멘트 모르타르의 자기치유 성능은 28일 재령 대비 7일 재령이 증가한 것으로 나타났다.