

## 균열 자기치유 하이브리드캡슐 조성비에 따른 시멘트 복합재료의 치유특성에 미치는 영향

# The Effect of Crack Self-Healing Hybrid Capsules Composition Ratio on the Healing Properties of Cement Composites

최연왕<sup>1</sup> · 남은준<sup>2</sup> · 박준호<sup>3</sup> · 오성록<sup>4\*</sup>

Yun-Wang Choi<sup>1</sup> · Eun-Joon Nam<sup>2</sup> · Jun-Ho Park<sup>3</sup> · Sung-Rok Oh<sup>4\*</sup>

(Received September 19, 2022 / Revised September 23, 2022 / Accepted September 26, 2022)

In this study, self-healing hybrid capsules were prepared by mixing self-healing solid capsules and self-healing microcapsules using inorganic materials as core materials. Self-healing hybrid capsules were mixed with 3 % according to the composition ratio of 3:7, 5:5, and 7:3 based on the mass of the cement to prepare a self-healing cement composite material. The healing properties of crack self-healing hybrid capsules were evaluated through hydrostatic water permeability test and surface crack monitoring. It was found that the self-healing hybrid capsules prepared by mixing the composition ratio of the self-healing solid capsules and the self-healing microcapsules at 7:3 has a great effect on improving the crack self-healing performance.

**키워드** : 무기재료, 시멘트 복합재료, 자기치유, 치유특성, 하이브리드캡슐

**Keywords** : Inorganic materials, Cement composites, Self-healing, Healing properties, Hybrid capsules

## 1. 서론

자기치유 건설기술은 균열을 자가 또는 자율적으로 수리하도록 설계된 혁신적인 기술이다. 자기치유 효과는 사람이 쉽게 접근하기 어려운 구조물의 경우에도 효과적으로 보수를 수행할 수 있는 장점이 있으며, 균열 발생 초기 별도의 조치 없이도 스스로 균열을 치유할 수 있어 일반적인 구조물의 유지보수에 따른 비용 및 노력, 시간 등을 크게 절감할 수 있다(Sangadji and Schlangen 2013; An and Shin 2014).

또한 유지보수의 필요성을 줄이고 콘크리트 구조물의 수명을 늘려 환경 및 경제적 이점을 가져올 수 있다. 자기치유 기술은 전 세계적으로 관심을 가지고 상당한 양의 연구가 수행되고 있으며, 광물 혼합물, 박테리아 기반 기술 및 시멘트 복합재 기술 등 서로

다른 환경 조건 및 서로 다른 반응 메커니즘을 통해서 다양한 자기치유 기술이 소개되고 있다(Liu et al. 2022).

선진국의 경우 건설산업에서 균열 자기치유 기술과의 융합은 구조물의 균열 저감 및 복구에 있어서 매우 효과적인 기술로 평가하고 있으며, 이러한 기술은 크게 2가지로 구분할 수 있다. 첫째, 콘크리트의 모체가 아닌 모체 표면 보호를 위한 코팅재 및 단면복구재로 사용하는 방법과 둘째, 콘크리트 모체에 직접 자기치유 물질을 혼합하여 모체 자체가 자기치유 성능을 가지는 경우로 분류할 수 있다. 이와 같은 균열 자기치유 기술은 영국(Alghamri and Al-Tabbaa 2018) 및 일본(Ahn and Kishi 2010) 등의 선진국들이 선행연구를 수행하였으며, 또한 한국(Choi et al. 2017a; Choi et al. 2017b; Choi et al. 2017c), 인도(Sharma et al. 2021) 및 중국(Wan et al. 2021; Bao et al. 2020) 등 다른 후발주자인 국가들

\* Corresponding author E-mail: [cgdb02@nate.com](mailto:cgdb02@nate.com)

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

<sup>2</sup>세명대학교 건설공학과 박사과정 (Department of Construction Engineering, Semyung University, Jecheon, Chungbuk, 27136, Korea)

<sup>3</sup>세명대학교 건설공학과 박사과정 (Department of Construction Engineering, Semyung University, Jecheon, Chungbuk, 27136, Korea)

<sup>4</sup>(주)넥트 대표이사 (CEO, Nect Co., Ltd., Jecheon, Chungbuk, 27199, Korea)

Copyright © 2022 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

또한 꾸준히 연구성과가 보고 되고 있다. 또한 최근 선행연구들을 기반으로 균열 자기치유 기술은 국내외로 고도화가 이루어지고 있다(Nam 2020). 콘크리트 모체 자체에 직접 자기치유 물질을 혼합하기 위한 방법으로 캡슐 활용 기술이 있다. 캡슐 활용 기술은 사용재료의 상(Phase)에 따라 2가지로 구분할 수 있으며, 분체상 무기재료를 사용한 고상캡슐과 액체상 무기재료를 사용한 마이크로캡슐로 구분할 수 있다(Oh 2017). 국외의 경우 중국(Wan et al. 2021) 및 일본(Ikoma et al. 2015)에서 코어재료를 과립화한 고상캡슐을 개발하였으며, 말레이시아(Mehta et al. 2022) 및 중국(Bao et al. 2020)에서 코어재료를 마이크로캡슐화한 마이크로캡슐을 개발하였다.

국내의 경우 물에 노출된 수처리 구조물에 적합한 시멘트계 재료를 입자화시킨 고상캡슐을 시멘트 모르타르에 적용한 사례가 있으며, 물에 상시 노출되지 않은 일반 구조물에 적합한 규산염계 재료를 마이크로캡슐화하여 시멘트 모르타르에 적용한 사례가 있다. 그러나 고상캡슐 및 마이크로캡슐 등 캡슐을 동시에 사용하여 상호보완 할 수 있도록 하는 하이브리드캡슐을 적용한 사례는 국내외에서 찾아보기 어려운 실정이다. 고상캡슐과 마이크로캡슐은 캡슐입자의 범위가 다르기 때문에 동시에 활용할 경우 균열면에 존재하는 각 캡슐의 보충효과로 인하여 치유효율을 더욱 향상시키고 촉진이 가능할 것으로 분석되고 있다. 따라서 본 논문에서는 고상캡슐 및 마이크로 캡슐을 혼합한 하이브리드캡슐을 제조하기 위하여 조성비에 따른 치유특성에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 자기치유 하이브리드캡슐

본 논문에서 사용한 자기치유 하이브리드캡슐(Hybrid Capsules, HC)은 선행연구를 통해 얻어진 자기치유 고상캡슐(Self-Healing Solid Capsules, SC) 및 자기치유 마이크로캡슐(Self-Healing Microcapsules, MC)을 혼합한 것이다(Nam 2020; Kim et al. 2021). SC의 코어재로는 자기치유 수화반응을 하는 무기계 재료를 사용하였다. 사용된 무기계 재료는 팽창재(Calcium Sulfoaluminate, CSA) 및 무수석고(Anhydrous Gypsum, CaSO<sub>4</sub>)를 일정 비율로 응집제와 반죽하여 코어재료로 제조하였으며, 무기재료의 최적비율 및 사이즈는 선행연구를 통하여 얻어진 최적비를 사용하였다(Oh 2017; Nam 2020). 선행연구를 통하여 얻어진 MC는 코어재료로 규산염계 무기재료 혼합물을 사용하였으며, In-situ 중합법을 적용하여 Water/Oil/Water 상에서 캡슐화를 하여 사용하였다(Kim

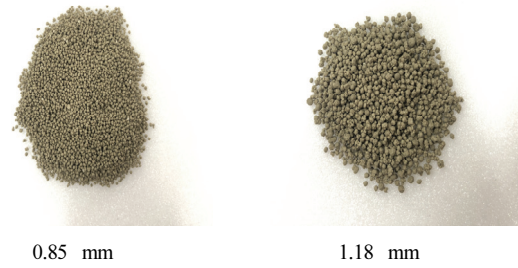
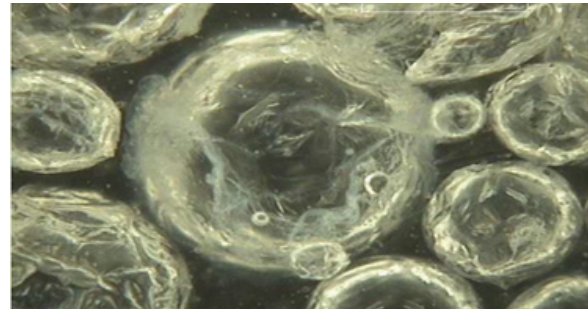


Fig. 1. Size of SC



350~160 μm

Fig. 2. Size of MC

et al. 2021). Fig. 1은 SC의 사이즈를 나타낸 것이며, Fig. 2는 MC의 사이즈를 나타낸 것이다.

#### 2.1.2 시멘트 복합재료

시멘트 복합재료에 사용한 시멘트는 1종 보통 포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement, C)를 사용하였다. 시멘트 복합재료에 사용된 잔골재는 강모래(S)를 사용하였다. 또한 화학 혼화제(Cheical admixture, ad)는 자기치유 하이브리드캡슐의 분산시키기 위하여 국내 폴리칼본산계 고성능 감수제를 사용하였다.

### 2.2 실험계획

본 논문에서는 자기치유 하이브리드캡슐을 활용한 시멘트 복합재료의 캡슐 최적 조성비의 치유성능을 검토하기 위하여 캡슐을 시멘트 질량 대비 3 %를 혼합하여 제조하였다. 또한 캡슐 최적 조성비는 자기치유 고상캡슐(Self-Healing Solid Capsules, SC) 및 자기치유 액상캡슐(Self-Healing Micro Capsules, MC)을 4수준(Plain, HC37, HC55 및 HC73)을 제조하였으며, Table 1은 자기치유 하이브리드캡슐을 혼합한 시멘트 복합재료의 배합비를 나타낸 것이다.

Table 1. Mixing ratio of cement composites

No.	W	C	S	HC (C×3 %)		ad (C×%)
				SC	MC	
Plain	0.4	1	2	0	0	0.005~0.006
HC37	0.4	1	2	3	7	
HC55	0.4	1	2	5	5	
HC73	0.4	1	2	7	3	

## 2.3 평가방법

### 2.3.1 정수위 투수시험

균열 자기치유 성능은 정수위 투수시험을 통하여 평가하였다. 정수위 투수시험(h=300 mm)을 위하여 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( $20 \pm 3$ ) $^{\circ}\text{C}$  및 습도( $50 \pm 10$ )% 조건에서 수중양생을 실시하였다. Fig. 3은 균열 유도 시험편을 나타낸 것이다. 균열 유도는 재령

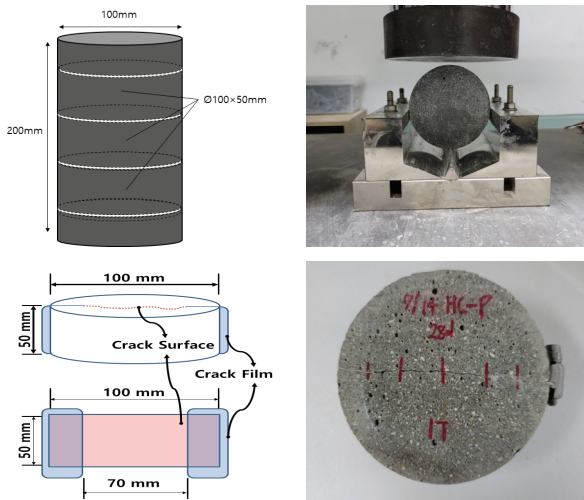


Fig. 3. Crack Induction test specimens

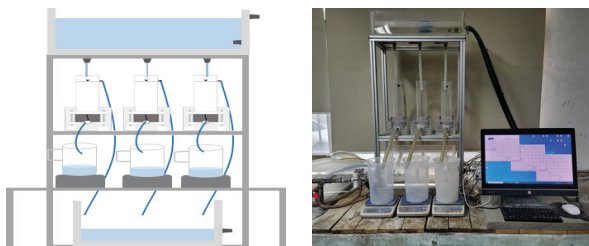


Fig. 4. water permeability test

7일 및 28일이 경과되었을 때 균열을 각각 유도하였으며, 균열폭이 0.3 mm가 되도록 실리콘 시트를 입하여 균열을 제어하였다. 또한 균열폭 유지를 위하여 시험편의 측면부를 호스밴드로 고정하였다. 균열이 유도된 시험편은 치유재령 1, 3, 7, 14 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 버린 이후 1분 단위로 5분간 측정하여 실시간 투수량을 측정하였다. Fig. 4는 정수위 투수시험을 나타낸 것이다.

### 2.3.2 표면균열 모니터링시험

표면균열 모니터링은 균열측정에 대한 정확한 기준 및 측정방법이 제시되어 있지 않아 균열의 길이와 폭을 현미경을 이용하여 균열의 정량적 평가를 하였다(Choi et al. 2017a). 시험편의 표면균열을 분석하여 반응 생성물에 의한 표면균열 수복 수준을 평가하였다. Fig. 5는 표면균열 모니터링 시험 측정 장비를 나타낸 것이다. 표면균열의 모니터링 방법은 현미경을 이용하여 균열 시편 양 끝단의 실리콘 시트를 제외한 표면균열 길이를 측정하였으며, 동일한 방법으로 상·하면에서 측정된 균열 길이의 평균값을 사용하였다. 표면균열폭 측정방법을 나타낸 것으로 표면균열 길이를 3개의 구간으로 나누어 각 구간별로 현미경을 이용하여 2곳의 표면균열을 측정하였으며, 동일한 방법으로 상·하면에서 측정된 총 12개 표면균열의 평균값을 사용하였다.

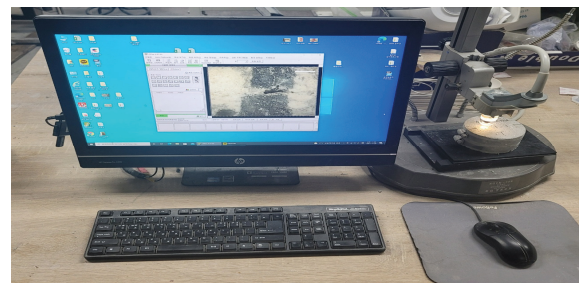
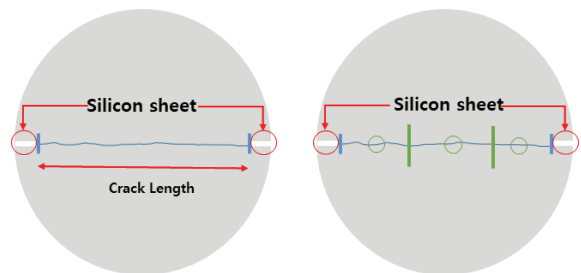


Fig. 5. Surface crack monitoring

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 균열유도에 따른 정수위 투수시험 결과

##### 3.1.1 균열유도 7일 시험편의 치유성능

Fig. 6, 7, 8 및 9는 균열유도 7일 시험편의 HC 조성비에 대한 치유재령에 따른 초기 투수량과 치유율의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 6, 7, 8 및 9의 결과 0.3 mm 균열폭에 해당하는 초기 투수량 1.0~1.8영역에서는 치유재령 14일 경과 후 Plain은 약 54 %, HC37은 약 63 %, HC55는 약 72 % 및 HC73은 약 76 % 나타남에 따라 HC 혼합에 따른 효과는 Plain의 자연치유 성능에 대하여 HC37은 약 9 %, HC55는 약 18 % 및 HC73은 약 22 % 향상시키는 것으로 나타났다. 치유재령 28일 경과 후 Plain은 약 69 %, HC37은 약 73 %, HC55는 약 82 % 및 HC73은 약 87 % 나타남에 따라 HC

혼합에 따른 효과는 Plain의 자연치유 성능에 대하여 HC37은 약 4 %, HC55는 약 13 % 및 HC73은 약 18 % 향상시키는 것으로 나타났다. 또한 Plain의 경우에도 균열유도 7일인 시험편의 치유재령 초기에서부터 치유재령 28일까지 지속적인 반응을 하기 때문에 자연적인 치유효과가 있는 것으로 판단되며, 균열폭이 증가함에 따라 치유율이 감소하는 경향이 나타나지만 균열유도 7일 치유재령 28일이 경과한 경우에는 약 0.3 mm 균열폭에 대하여 69 % 치유되는 것으로 판단된다.

이러한 결과 HC 조성비에 따른 효과를 고려할 경우에는 모든 균열폭에 대하여 HC73의 치유효율이 큰 경향이 나타났으며, 약 0.3 mm 균열폭 기준 Plain의 자연치유 성능에 대하여 HC73이 18 % 향상되었다. 또한 HC73의 치유성능은 0.3 mm 균열의 경우 87 %의 치유효과가 있는 것으로 판단된다.

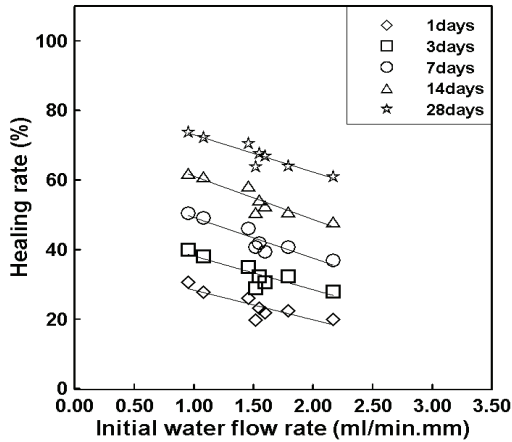


Fig. 6. Relationship between initial water flow rate and healing rate according to healing age of 7 days (plain)

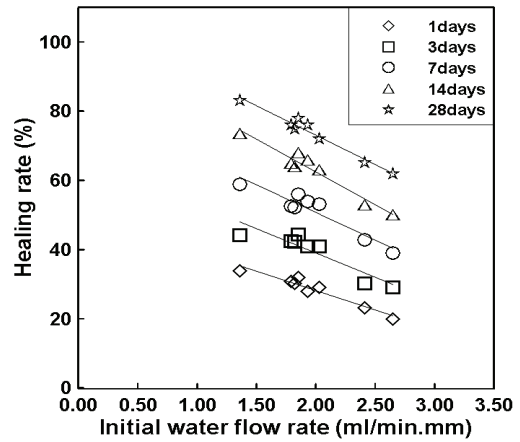


Fig. 8. Relationship between initial water flow rate and healing rate according to healing age of 7 days (HC55)

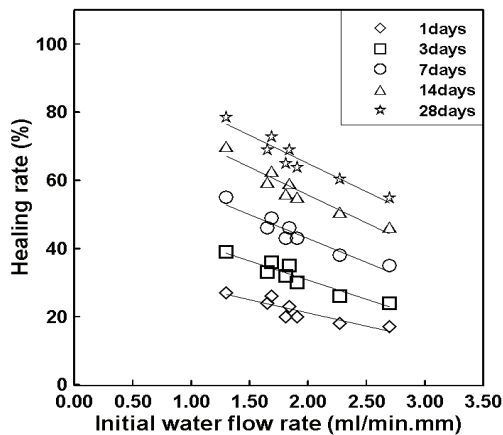


Fig. 7. Relationship between initial water flow rate and healing rate according to healing age of 7 days (HC37)

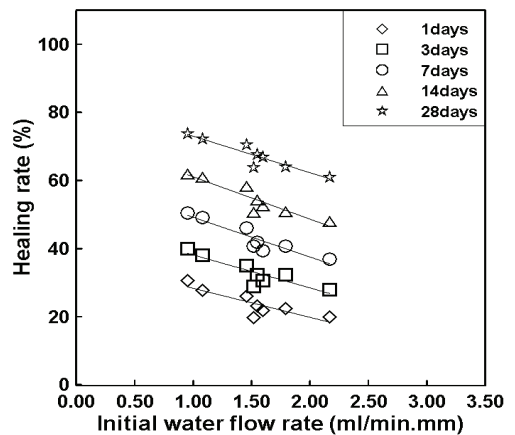


Fig. 9. Relationship between initial water flow rate and healing rate according to healing age of 7 days (HC73)

### 3.1.2 균열유도 28일 시험편의 치유성능

Fig. 10, 11, 12 및 13은 균열유도 28일 시험편의 HC 조성비에 대한 치유재령에 따른 초기 투수량과 치유율의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 10, 11, 12 및 13의 결과 0.3 mm 균열폭에 해당하는 초기 투수량 1.0~1.8영역에서는 치유재령 14일 경과 후 Plain은 약 50 %, HC37은 약 55 %, HC55는 약 57 % 및 HC73은 약 62 % 나타남에 따라 HC 혼합에 따른 효과는 Plain의 자연치유 성능에 대하여 HC37은 약 5 %, HC55는 약 7 % 및 HC73은 약 12 % 향상시키는 것으로 나타났다. 치유재령 28일 경과 후 Plain은 약 60 %, HC37은 약 67 %, HC55는 약 73 % 및 HC73은 약 79 % 나타남에 따라 HC 혼합에 따른 효과는 Plain의 자연치유 성능에 대하여 HC37은 약 7 %, HC55는 약 13 % 및 HC73은 약 19 % 향상시키는 것으로 나타났다.

또한 균열유도 7일의 시험편의 자연치유 효과와 비교하여 치유 성능이 감소하는 것으로 판단되지만 균열유도 28일 시험편의 치유재령 경과 후에도 내부에 존재하는 미수화 시멘트에 의하여 자연치유 효과가 있는 것으로 판단된다. HC 조성비에 따른 효과를 고려할 경우에는 균열유도 7일 시험편과 동일하게 HC73의 치유효율이 HC37 및 HC55와 비교하여 상대적으로 큰 경향이 나타났다.

이러한 결과는 SC와 MC의 최적비가 존재함을 의미하며, 최적비가 조성된 경우에 상대적으로 많은 결정물의 발생 및 반응속도에 따른 최적의 치유효과가 있는 것으로 판단된다. 균열폭 0.3 mm를 기준으로 Plain의 자연치유 성능에 대하여 HC73이 19 % 향상시키는 것으로 판단되며, HC73이 0.3 mm 균열폭에 대하여 79 %의 치유효과가 있는 것으로 판단된다.

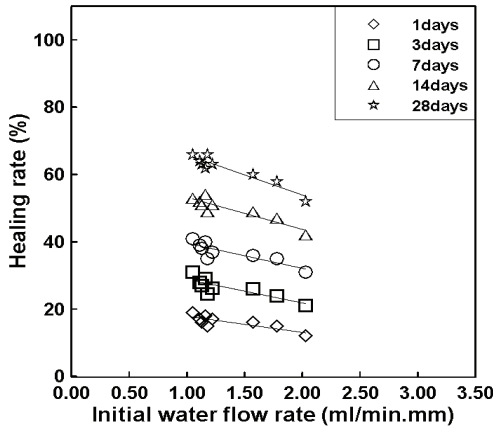


Fig. 10. Relationship between initial water flow rate and healing rate according to healing age of 28 days (HC73)

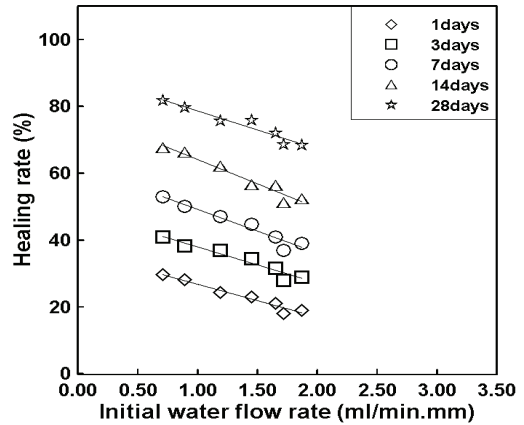


Fig. 12. Relationship between initial water flow rate and healing rate according to healing age of 28 days (HC55)

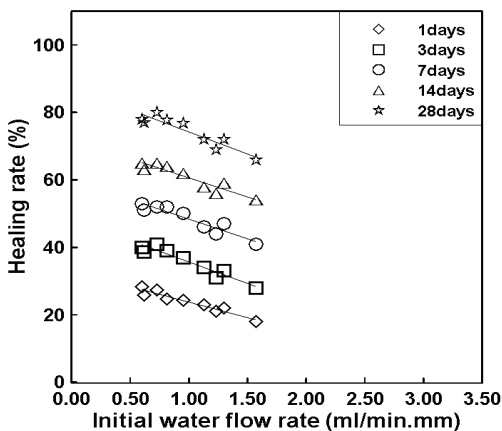


Fig. 11. Relationship between initial water flow rate and healing rate according to healing age of 28 days (HC37)

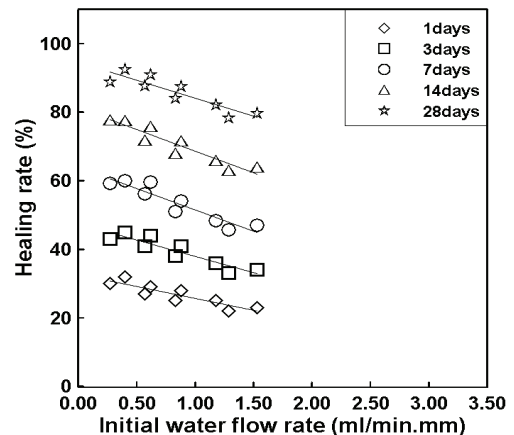


Fig. 13. Relationship between initial water flow rate and healing rate according to healing age of 28 days (HC73)



### 3.2 표면균열 모니터링 결과

Fig. 14, 15, 16 및 17은 HC 활용 고상캡슐 및 마이크로캡슐을 혼합한 시멘트 모르타르의 균열유도 28일된 시험편의 치유재령 28일 후 표면균열 모니터링 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 14, 15, 16 및 17의 결과 균열폭은 약 0.3 mm 기준으로 Plain의 경우 미수화 시멘트의 반응에 따른 추가 수화에 자연치유 효과 의하여 반응생성물이 표면에 생성된 것으로 나타났지만 치유 수준은 하이브리드캡슐을 혼합한 경우보다 상대적으로 적은 경향

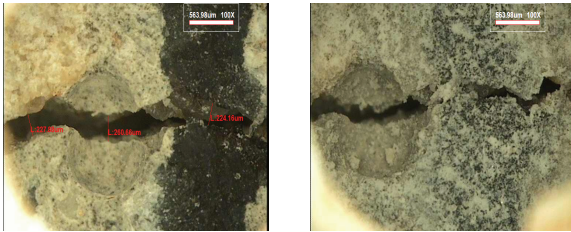


Fig. 14. Before and after surface crack monitoring (plain)

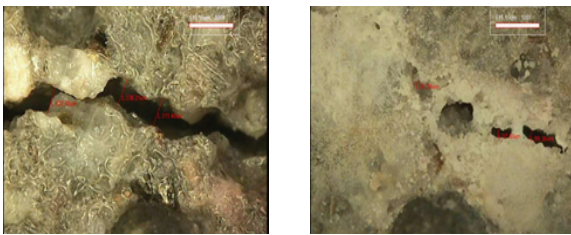


Fig. 15. Before and after surface crack monitoring (HC37)

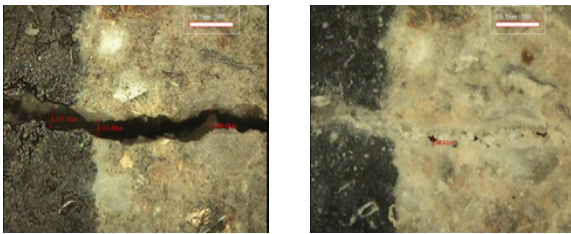


Fig. 16. Before and after surface crack monitoring (HC55)

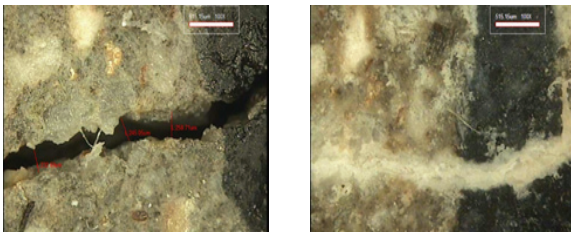


Fig. 17. Before and after surface crack monitoring (HC73)

이 있었다. 표면에 생성된 반응생성물은 HC의 조성비에 관계없이 유사한 경향이 나타났지만 정수위 투수를 통하여 HC73이 가장 치유능력이 좋은 것으로 나타난 결과는 HC의 조성비에 따라 표면이 아닌 균열 내부에 생성되는 생성물의 차이로 인하여 치유능력이 달라진 것으로 판단된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 균열 자기치유 하이브리드캡슐 조성비에 따른 시멘트 복합재료의 치유특성에 미치는 영향을 평가하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 자기치유 하이브리드캡슐을 혼합한 시멘트 복합재료의 균열 자기치유 특성을 평가하기 위하여 정수위투수 실험 결과, 균열유도 7일의 자기치유 하이브리드캡슐의 조성비에 따른 치유율은 Plain 대비 HC37, HC55 및 HC73의 경우 4 %, 13 % 및 18 % 나타났으며, 균열유도 7일의 경우에는 치유재령 초기에서부터 치유재령 28일까지 수화반응이 계속 진행중이기 때문에 하이브리드캡슐의 치유효과 뿐만 아니라 자연적인 치유효과가 있는 것으로 판단된다.
2. 자기치유 하이브리드캡슐을 혼합한 시멘트 복합재료의 균열 자기치유 특성을 평가하기 위하여 정수위투수 실험 결과, 균열유도 28일의 HC의 조성비에 따른 치유율은 Plain 대비 HC37, HC55 및 HC73의 경우 7 %, 13 % 및 19 % 나타나 균열유도 28일의 치유율이 균열유도 7일의 치유율보다 상대적으로 더 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 균열유도 28일의 경우에는 수화반응이 감소하여 자연치유능력이 약 8 % 정도 감소시키는 것으로 판단된다.
3. 자기치유 하이브리드캡슐을 혼합한 시멘트 복합재료의 표면균열 모니터링 결과, 고상캡슐 및 마이크로캡슐의 혼합비에 따른 치유 생성물은 균열폭 약 0.3 mm 기준으로 대부분 수복된 것으로 나타났으며, 큰 차이는 없는 것으로 판단된다. 조성비에 관계없이 표면균열은 자기치유 하이브리드캡슐에 의하여 모두 수복되는 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여 균열 자기치유 하이브리드캡슐 조성비에 따른 시멘트 복합재료의 치유특성 평가결과, 자기치유 고상캡슐 및 자기치유 마이크로캡슐의 조성비는 7:3으로 제조된 하이브리드캡슐이 균열 치유능력을 향상시키는 효과가 큰 것으로 나타났으며, 하이브리드캡슐의 최적 조성비는 7:3인 것으로 판단된다.

## Conflicts of interest

None.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(과제번호 : 22SCIP-C159062-03)지원에 의해 수행되었습니다.

## 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., Al-Tabbaa, A. (2018). Self-healing of cracks in mortars using novel PVA-coated pellets of different expansive agents, *Journal of Construction and Building Materials*, **254**, 119254.
- 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.
- Bao, S., Liu, Q., Rao, W., Yu, X., Zhang, L. (2020). Synthesis and characterization of calcium alginate-attapulgite composite capsules for long term asphalt self-healing, *Journal of Construction and Building Materials*, **265**, 120779.
- Choi, S.W., Bae, W.H., Lee, G.M., Shin, G.J. (2017a). Correlation between crack width and water flow of cracked mortar specimens measured by constant water head permeability test, *Proceeding of Korea Concrete Institute*, **29(3)**, 267–273.
- Choi, Y.W., Oh, S.R., Choi, B.G., Kim, C.G. (2017b). A fundamental study on the influence of performance of cementitious composites of inorganic core material for self-healing capsule of cracks, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **21(1)**, 74–82.
- Choi, Y.W., Oh, S.R., Choi, B.G. (2017c). 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*, **10**, 1–10.
- Choi, Y.W., Nam, E.J., Oh, S.R., Lee, K.M. (2020). An experimental study on the mechanical healing properties of self-healing mortar with solid capsules using crystal growth type inorganic materials, *Journal of the Korea Recycled Construction Resources Institute*, **8(4)**, 581–589.
- 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.
- Ikoma, H., Kishi, T., Sakai, Y., Kayondo, M. (2015). Elucidation of rapid reduction of water flow through concrete crack regarded as self-healing phenomenon, *Journal of Ceramic Processing Research*, **16**, 22–27.
- Kanellopoulos, A., Qureshi, T.S., Al-Tabbaa, A. (2015). Glass encapsulated minerals for self-healing in cement based composites, *Construction and Building Materials*, **98**, 780–791.
- 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, Korea [In Korean].
- Kim, C.G., Oh, S.R., Kim, J.H., Choi, Y.W. (2021). The effect of the self-healing microcapsules on the quality and healing properties of cement composites, *Journal of the Korea Recycled Construction Resources Institute*, **9(3)**, 386–396.
- Liu, Y., Zhuge, Y., Fan, W., Duan, W., Wang, L. (2022). Recycling industrial wastes into self-healing concrete: a review, *Journal of Environmental Research*, **214(4)**, 113975.
- Lee, D.K., Shin, K.J. (2020). Performance evaluation method of self-healing concrete using gas diffusion experiment, *Journal of the Korea Recycled Construction Resources Institute*, **8(1)**, 74–82.
- Lee, J.S. (2021). Research on the Self-Healing Performance Improvement of the Cracks by the Encapsulation of Organic-Inorganic Mixtures, Ph.D. Thesis, Hanyang University, Korea [In Korean].
- Ma, H., Qian, S., Zhang, Z. (2014). Effect of self-healing on water permeability and mechanical property of medium-early-strength engineered cementitious composites, *Journal of Construction and Building Materials*, **68**, 92–101.
- Mehta, N., Kumar, P., Verma, A.K., Umaraw, P., Kumar, Y., Malav, O.P., Sazili, A.Q., Dom nguez, R., Lorenzo, J.M. (2022). Microencapsulation as a noble technique for the application of bioactive compounds in the food industry: a comprehensive review, *Journal of Applied Sciences*, **12(3)**, 1424.
- 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.
- 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, Korea [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, Korea [in Korean].
- Panesar, D.K. (2013). Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents, *Journal of Construction and Building Materials*, **44**, 575–584.
- Qureshi, T.S., Kanellopoulos, A., Al-Tabbaa, A. (2016). Encapsulation of expansive powder minerals within a concentric glass capsule system for self-healing concrete, *Journal of Construction and Building Materials*, **121**, 629–643.
- Qureshi, T., Kanellopoulos, A., Al-Tabbaa, A. (2019). Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-II: Impact of age and the role of optimised expansive minerals in healing performance, *Construction and Building Materials*, **194**, 266–275.
- Sangadji, S., Schlangen, E. (2013). Mimicking bone healing process to self repair concrete structure novel approach using porous network concrete, *Procedia Engineering*, **54**, 315–326.
- Sharma, N., Sharma, S., Sharma, S.K., Mehta, R. (2020). Evaluation of corrosion inhibition and self healing capabilities of nanoclay and tung oil microencapsulated epoxy coatings on rebars in concrete, *Construction and Building Materials*, **259**, 120278.
- Song, Y.K., Jo, Y.H., Lim, Y.J., Cho, S.Y., Yu, H.C., Ryu, B.C., Chung, C.M. (2013). Sunlight-induced self-healing of a microcapsule – type protective coating, *ACS Applied Materials & Interfaces*, **5(4)**, 1378–1384.
- Wan, P., Liu, Q., Wu, S., Zhao, Z., Chen, S., Zou, Y., Rao, W., Yu, X. (2021). A novel microwave induced oil release pattern of calcium alginate/nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composite capsules for asphalt self-healing, *Journal of Cleaner Production*, 297, 126721.
- White, S.R., Sottos, N.R., Geubelle, P.H., Moore, J.S. (2001). Autonomic healing of polymer composites, *Journal of Nature*, **409(6822)**, 794.
- Yang, Z., Hollar, J., He, X., Shi, X. (2011). A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules, *Journal of Cement and Concrete Composites*, **33(4)**, 506–512.

### 균열 자기치유 하이브리드캡슐 조성비에 따른 시멘트 복합재료의 치유특성에 미치는 영향

본 연구에서는 무기재료를 코어재료로 사용한 자기치유 고상캡슐 및 자기치유 마이크로캡슐을 혼합하여 자기치유 하이브리드 캡슐을 제조하였다. 자기치유 하이브리드캡슐을 시멘트 질량 기준으로 3:7, 5:5 및 7:3의 조성비에 따라 3 % 혼합하여 자기치유 시멘트 복합재료 배합을 진행하였으며, 정수위 투수시험 및 표면균열 모니터링을 통해 균열 자기치유 하이브리드캡슐의 치유 특성을 평가하였다. 실험 결과, 자기치유 고상캡슐 및 자기치유 마이크로캡슐의 조성비가 7:3으로 제조된 자기치유 하이브리드 캡슐을 혼합함에 따라 균열 자기치유 성능을 향상시키는 효과가 큰 것으로 나타났다.