

자기치유 마이크로캡슐이 시멘트 복합재료의 품질 및 치유특성에 미치는 영향

The Effect of the Self-Healing Microcapsules on the Quality and Healing Properties of Cement Composites

김철규¹ · 오성록² · 김지훈³ · 최연왕^{4*}Cheol-Gyu Kim^{1*} · Sung-Rok Oh² · Ji-Hun Kim³ · Yun-Wang Choi^{4*}

(Received August 25, 2021 / Revised September 15, 2021 / Accepted September 16, 2021)

In this paper, it was evaluated that the effect of self-healing microcapsules on the quality and healing properties of cement composites. In the mixing of microcapsules, the plastic viscosity and yield stress of the cement composites decreased due to the particle properties of the microcapsules, and decreased in proportion to the mixing ratio. The table flow showed a tendency to decrease as the core material acted as a stimulant due to the loss of microcapsules, and the compressive strength could be supplemented through unit quantity correction. As a result of evaluating the effect of microcapsule mixing on the healing properties of cement composites, it was found that the unit water flow rate decreased by the healing reaction immediately after crack initiation. When more than 3% of microcapsules were mixed, it was found that there was a healing rate of more than 95% at 7 days of healing age.

키워드 : 자기치유, 마이크로캡슐, 시멘트 복합재료, 치유특성**Keywords :** Self-healing, Microcapsules, Cement composites, Healing properties

1. 서 론

최근 균열 저감을 위한 개발 기술 중 하나로써 균열을 치유할 수 있는 물질을 마이크로캡슐화하여 균열 발생시 능동적으로 치유할 수 있는 자기치유 기술이 대두되고 있다. 마이크로캡슐 활용 균열 자기치유 기술은 콘크리트 구조물의 배합에 자기치유 소재를 혼합할 수 있기 때문에 균열의 치유효과를 극대화 할 수 있으며, 균열이 발생한 콘크리트 매트릭스 자체에 신속하게 균열 치유 반응을 제어 할 수 있어 균열에 적극적인 대처가 가능하다. 이와 관련된 주요 연구는 국외의 경우 2001년 일리노이 대학의 White교수 연구팀이 폴리머를 마이크로캡슐화 하여 균열 자기치유를 위한 연구를 수행하였으며(Blaszika et al. 2008), 국내의 경우 2011년 연세대학교 연구팀에서 촉매제 없이 태양광(UV)만으로 자기치유 할 수 있는 마이크로캡슐에 대하여 연구를 수행하고 있다(Song et al. 2013).

그러나 종래의 마이크로캡슐 활용 자기치유 기술은 치유물질인 코어재료가 에폭시 등과 같은 유기계 재료를 대부분 활용하고 있다. 유기계 재료는 단 기간에 효과를 얻을 수 있지만 무기계 재료인 콘크리트의 특성상 유기계 재료와 탄성계수 차이에 의하여 일체화 될 수 없으며, 이로 인하여 균열 치유면의 장기적인 내구성을 확보하기 어렵다. 따라서 코어재료로 무기계 재료를 사용할 경우 콘크리트와 같은 동종재료이기 때문에 모체와 일체화할 수 있어 균열 치유면의 내구성 향상 및 치유효율을 극대화 할 수 있다는 장점이 있다. 이와 유사한 연구사례는 국외의 경우 2015년 펜실베이니아 주립대 연구팀이 무기계 재료인 물유리를 마이크로캡슐화 하였으며 이를 콘크리트에 혼합하여 치유성능을 평가하는 연구가 진행되었지만 새로운 추가연구가 수행되고 있지 않으며(Mostavi et al. 2015), 국내의 경우 관련 연구사례를 찾아보기 어려운 실정이다. 구조물 표면코팅재에 마이크로캡슐을 혼합하여 표면 보수 용도로

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

¹세명대학교 토목공학과 외부연구원 (Department of Civil Engineering, Semyung University, Chungcheongbuk-do, 27136, Korea)²(주)뉴저스트 기술연구소 책임연구원 (Research & Development Team, Newjust Co., Ltd., Gyeonggi-do, 14348, Korea)³세명대학교 건설공학과 박사과정 (Department of Construction Engineering, Semyung University, Chungcheongbuk-do, 27136, Korea)⁴세명대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Semyung University, Chungcheongbuk-do, 27136, Korea)

Copyright © 2021 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

활용되는 수준으로 치유 범위가 외부 표면 미세균열 손상 정도의 치유 범위에 국한된다는 단점이 있다(Choi et al. 2017 ; Oh et al. 2019). 노후화 및 열화된 콘크리트 재료의 치유 범위를 확대하기 위해서는 마이크로캡슐을 표면코팅재 대신에 시멘트 복합재료에 직접 적용하여야 한다. 이러한 경우 균열 자기치유가 가능한 마이크로캡슐이 구조물 표면에서 구조물 내부에 분산되어 있으므로 대응할 수 있는 균열 폭 및 깊이를 향상시킬 수 있어 치유 범위 확대가 가능하다. 이와 관련된 선행연구에서는(Choi et al. 2018 ; Kim 2021) 마이크로캡슐 혼합에 따라 역학적 성능이 크게 감소하는 것으로 나타났지만 이를 개선하기 위한 연구를 추가적으로 수행하였다. 따라서 본 논문에서는 자기치유 마이크로캡슐이 시멘트 복합재료의 품질 및 치유특성에 미치는 영향을 다양한 평가를 통하여 검토하였다.

2. 실험 개요

2.1 사용재료

2.1.1 자기치유 마이크로캡슐

자기치유 마이크로 캡슐(Self-healing microcapsules, MC)은 선행연구를 통하여(Kim 2021) 치유재료로서 규산염계 무기재료 혼합물을 사용하였으며, In-situ 중합법을 적용하여 Water/Oil/Water상에서 캡슐화를 실시하였다.

Fig. 1은 자기치유 마이크로캡슐의 치유 매커니즘을 나타낸 것이며, Fig. 2는 캡슐화 모식도를 나타낸 것이다. Fig. 3 및 Fig. 4는 캡슐화 과정 및 캡슐 제조장비를 나타낸 것이다.

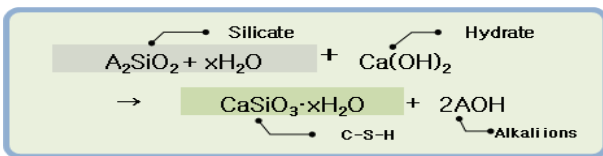


Fig. 1. Healing mechanism

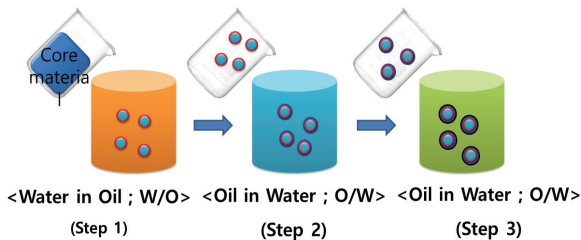


Fig. 2. Encapsulation mechanism

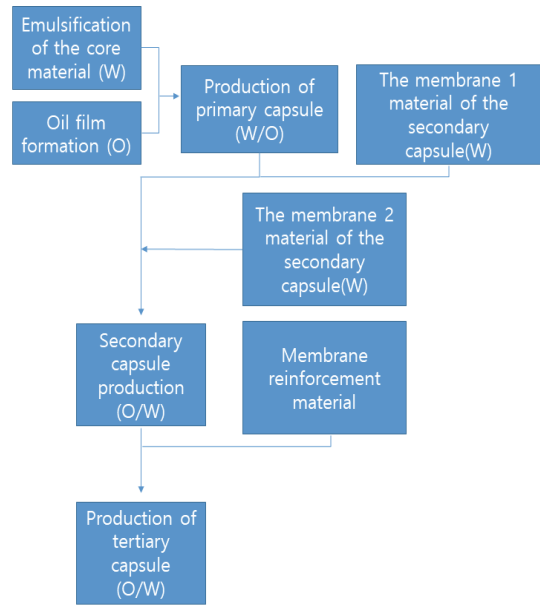


Fig. 3. Encapsulation process

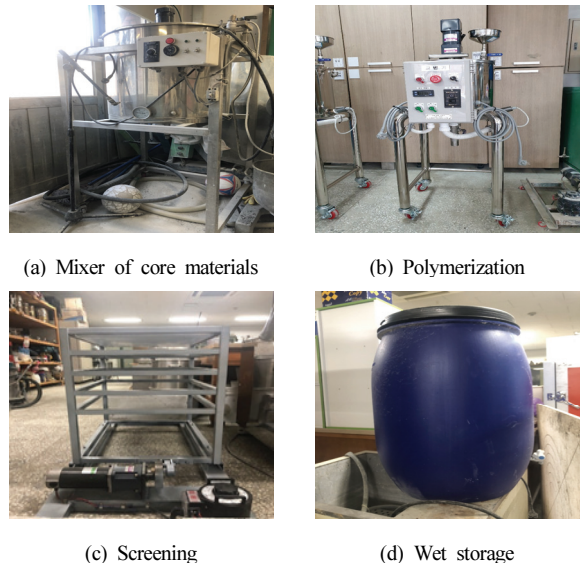


Fig. 4. Manufacturing device of microcapsules(MC)

제조단계는 크게 3가지로 구분할 수 있으며, 1차 및 2차 캡슐화 단계 및 3차 캡슐 강화 단계를 거쳐 캡슐을 합성 및 강화를 수행하였다.

2.1.2 시멘트 복합재료

실험에 사용된 시멘트는 1종보통 포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC)를 사용하였으며, 잔골재는 ISO 표준사(S)

를 사용하였다. 또한 목표 플로우 확보 및 캡슐의 손실량 저감 및 분산을 원활하게 하기 위하여 국내 H사의 폴리칼본산계 고성능 감수제(ad.)를 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 소성점도 및 항복응력

소성점도 및 항복응력을 측정하기 위하여 Brookfield사의 페이스트 점도계 DV-III Ultra 모델의 챔버 크기를 변형한 모르타르 점도계를 사용하였으며, 전단속도(Shear rate)의 변화에 따른 전단응력(Shear stress)의 변화량을 측정하였다. 측정시 Hysteresis loop area에 의한 측정값의 이력현상을 피하기 위하여 전단속도를 하강계단식으로 설정하여 측정하였으며, 측정된 전단응력의 직선 회귀분석을 통하여 Bingham 모델로 해석하였다.

2.2.2 테이블 플로우

테이블 플로우는 KS L 5105(2017)에 준하여 15초 동안 25회, 12.7mm의 높이에서 낙하를 시킨 후 테이블 플로를 측정하였다.

2.2.3 공기량

공기량은 KS L 3136(2015)에 준하여 안지름 $76 \pm 1.5\text{mm}$, 깊이 88mm의 원통형으로 23°C에서 400±1mL의 물을 담을 수 있는 용기를 사용하여 공기량을 측정하였다.

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

여기서, w : 모르타르 400mL의 질량(g)

P : 사용하는 시멘트를 기준으로 한 혼합수양(%)

2.2.4 압축강도

압축강도는 KS L ISO 679(2016)에 준하여 40×40×160mm의 공시체 시험편을 성형하여 수중 양생을 실시하였다. 이후 재령에 따라 만능시험기(Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 압축강도를 측정하였다.

2.2.5 힘강도

힘강도는 압축강도와 동일한 조건으로 제조 및 양생하여 힘강도를 측정하였다.

2.2.6 Water Flow

Water Flow test는 자기치유 성능을 평가하기 위하여 균열이

유도된 시험편의 투수량(ml/min·mm)을 측정하였다. 시험편은 $\phi 50 \times 5\text{mm}$ 크기의 시험편을 제작하여 온도(20 ± 3)°C 조건에서 수중양생을 28일간 실시하였다. 재령 28일에 시험편을 건조시킨 다음 인위적인 관통 균열을 유도하였으며, 균열폭 0.15~0.3mm가 되도록 균열 유도 필름을 삽입하여 균열을 제어하였다. 이후 균열폭 유지 및 변동방지를 위하여 시험편의 측면부를 철프레임으로 고정하였다. 균열이 유도된 시험편은 온도 20 ± 3 °C 및 습도 70 ± 10 % 조건의 습기함에서 치유양생을 실시하였다. 치유 시험은 습기함에서 치유양생 중인 시험편에 대하여 치유재령 1일 후 초기 투수량을 측정하였으며, 이후 치유재령 3일, 7일 및 14일에 꺼내어 각 치유재령에 따른 투수 감소율을 비교하였다.

시험 조건은 함수상태를 동일하게 하기 위하여 시험편의 최초 5분간의 투수량은 버리고 이후 전자저울에 기록된 데이터를 컴퓨터에 연동하여 실시간 투수량을 측정할 수 있도록 하였으며, 1초 단위로 10분간 측정하여 실시간 투수량을 측정하였다. Fig. 5는 Water flow 시험편 나타낸 것이며, Fig. 6은 시험 전경을 나타낸 것이다. 정수위 투수시험을 통하여 측정된 단위투수량(Water flow rate) Plain시험편의 단위 투수량(P_0)에 대한 치유재령 t 에서의 MC의 혼합률에 다른 시험편의 단위투수량($MC_0(t)$)과 감소율을 치유율(H_q)로 하였다.

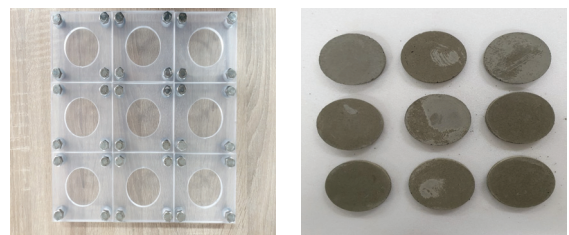


Fig. 5. Crack induction specimen

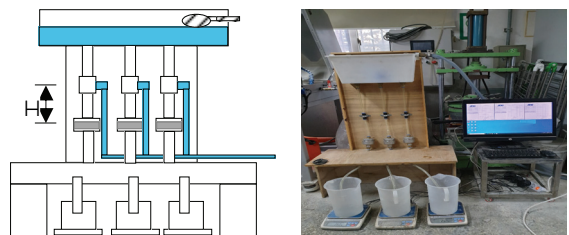


Fig. 6. Water flow test

$$H_q = \left[1 - \frac{MC_0(t)}{P_0} \right] \times 100 \quad \text{식 (2)}$$

여기서, H_q : 치유율(%)

P_0 : Plain 시험편의 단위 투수량(g)

$MC_0(t)$: 치유재령 t의 MC 시험편의 단위 투수량(g)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 소성점도 및 항복응력

Fig. 7은 MC 혼합에 따른 시멘트 복합재료의 레올로지 곡선을 나타낸 것이며, Fig. 8 및 Fig. 9는 MC 혼합에 따른 시멘트 복합재료의 소성점도 및 항복응력 변화율을 나타낸 것이다. Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9의 결과 MC 혼합율이 증가함에 따라 레올로지 곡선의 기울기가 감소하였으며, 항복값이 감소하는 경향이 나타났다. MC 1%의 소성점도는 큰 변화가 없었지만 MC 2% 증가에 따라 소성점도는 약 12% 감소하였다. MC 1%의 항복응력은 소성점도와는 다르게 약 25% 감소하였지만 이후 혼합율이 증가함에 따라 다소 증가하였다. 이러한 결과는 MC 입형이 둥근 형태인 구형이기 때문에 볼베어링 효과에 따라 점도가 감소되는 것으로 판단되며, 혼합율 증가에 따라 소성점도가 비례적으로 감소한 것으로 판단된다. 또한 이러한 결과는 점성이 감소되어 작업성이 증가효과가 있을 것으로 판단된다. 항복응력은 MC 혼합에 따라 감소되는 것으로 나타났지만 혼합율이 증가에 따라서는 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

3.2 테이블 플로우

Fig. 10은 MC 혼합에 따른 시멘트 복합재료의 테이블 플로우 평가결과를 나타낸 것이다. Fig. 10의 결과, MC의 혼합율이 증가함에 따라 테이블 플로우가 감소하는 경향이 나타났으며, MC 1%, 3% 및 5%의 경우, 0%와 비교하여 약 4%, 7% 및 10% 감소하였다. 또한, MC 1% 이후 혼합율이 2% 증가함에 따라 테이블 플로우가 약 3% 감소하였다. 이러한 결과는 레올로지 분석결과와 같이 MC 입자 특성에 기인하여 테이블 플로우가 동등수준 또는 다소 증가하는 것으로 판단되지만, 분석결과와 상반되는 테이블 플로우가 감소원인은 선행연구에 따르면(Kim 2021) 배합 중 MC의 손실량이 약 10%가 있기 때문에 MC가 파괴되어 내부 코어재료가 유출하며, 이에 따라 배합내에서 알칼리자극제 역할을 함에 따라 테이블 플로우가 감소되는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 MC의 입자특성에 의한 영향보다는 MC가 파괴되어 발생하는 손실이 품질에 미치는 영향이 지배적인 것으로 판단된다. 따라서 혼합율이 증가할수록 더욱 플로우가 감소되는 것으로 판단된다.

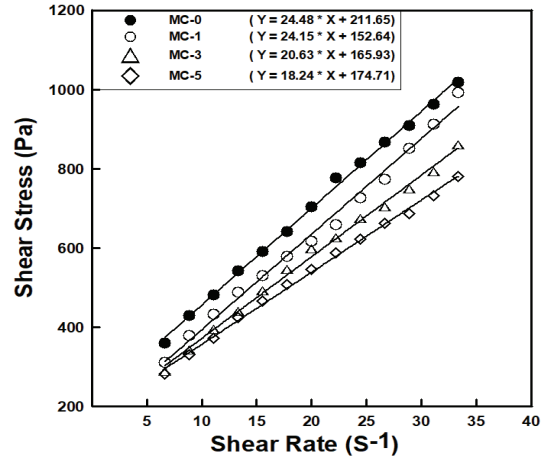


Fig. 7. Rheological curves by the Bingham model

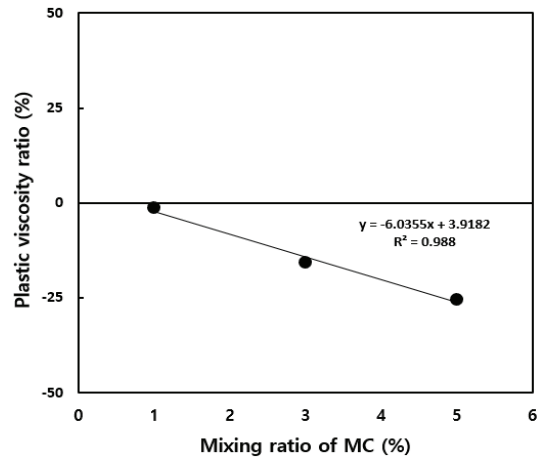


Fig. 8. Plastic viscosity obtained by rheological curve

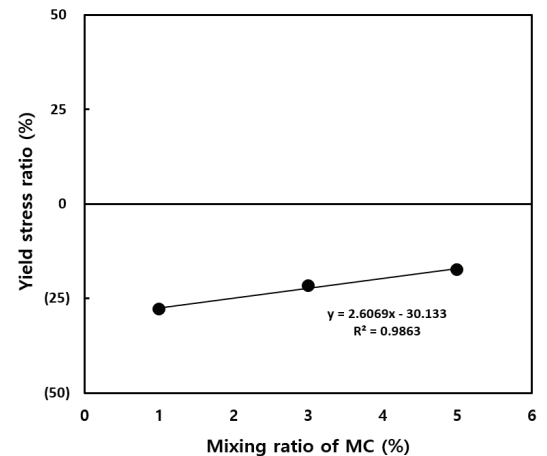


Fig. 9. Yield stress obtained by rheological curve

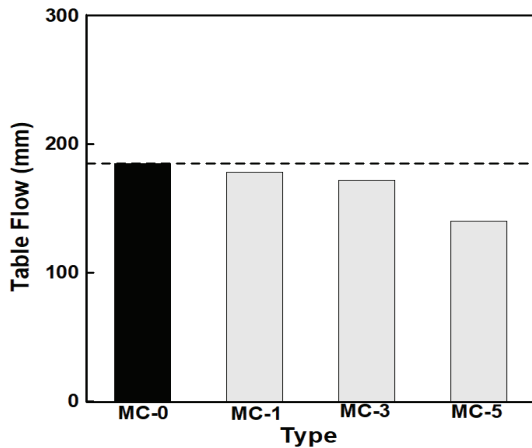


Fig. 10. Effect of MC on table flow

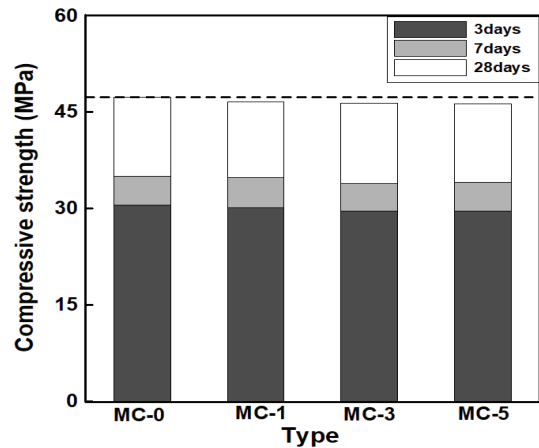


Fig. 12. Evaluation result of compressive strength according to MC

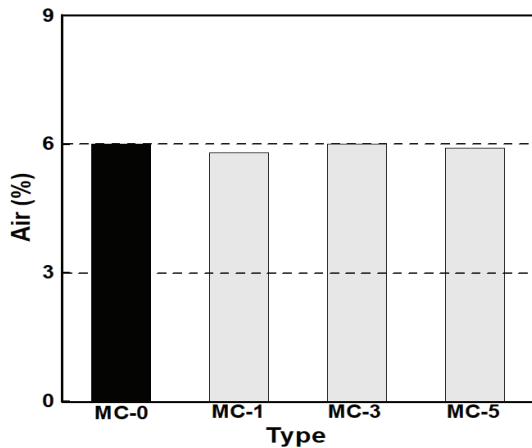


Fig. 11. Effect of MC on air contents

3.3 공기량

Fig. 11은 MC 혼합에 따른 시멘트 복합재료의 공기량 평가 결과를 나타낸 것이다. Fig. 11의 결과, MC 0%의 공기량은 약 6%로 나타났으며, MC 1%, MC 3% 및 MC 5%의 경우 혼합율에 관계없이 동등수준인 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통하여 MC가 시멘트 복합재료의 공기량에 미치는 영향은 공기량 오차범위 $\pm 1.5\%$ 이내에서 크지 않은 것으로 판단된다.

3.4 압축강도

Fig. 12는 MC 혼합에 따른 시멘트 복합재료의 압축강도 평가결과를 나타낸 것이다. Fig. 12의 결과, MC 0%의 압축강도는 재령 3, 7, 28일에 약 31MPa, 35MPa 및 47MPa로 나타났으며, MC가 혼합된 배합의 압축강도는 MC 0%의 압축강도와 비교하여 약 1~2%

감소하였지만 오차율을 고려할 경우 동등수준인 것으로 판단된다.

선행연구에 따르면(Kim 2021) MC 혼합율이 증가함에 따라 비례적으로 감소하는 경향이 나타나고 있으며, 그 원인은 액상의 코어재료를 가지는 캡슐이 시멘트 복합재료 내부에 분포되어 있기 때문에 MC가 존재하는 영역은 하중을 받을 수 없는 취약부위가 됨에 따라 강도가 감소하게 되며, MC의 혼합율이 증가함에 따라 취약부위 증가 및 페이스트 부피 감소로 압축강도가 감소하는 경향이 있는 것으로 분석하고 있다. 그러나 MC 혼합율에 대한 원인 외에도 순수 MC만을 계량하여 사용이 불가하기 때문에 물에 분산시켜 화학혼화제와 같은 형태로 사용하게 될 경우 선행연구에서는(Kim 2021) 이때 추가되는 물의 영향을 전혀 고려하지 않아 주된 압축강도 감소원인을 MC 혼합 및 혼합율에 따른 영향으로 분석하고 있다. 본 연구에서는 MC에 포함된 물의 양만큼 배합수에서 보정하였으며, 이에 따라 압축강도가 감소하는 경향이 없는 것으로 나타남에 따라 MC에 포함된 물의 영향이 MC 혼합 및 혼합율에 따른 영향보다 지배적인 것으로 판단된다.

3.5 휨강도

Fig. 13은 MC 혼합에 따른 시멘트 복합재료의 휨강도 평가결과를 나타낸 것이다. Fig. 13의 결과 MC 0%의 휨강도는 재령 28일에 약 9.6MPa 수준으로 나타났으며, MC 1%, 3% 및 5%의 재령 28일 휨강도는 약 9.3MPa, 9.2MPa 및 9.1MPa로 평균 약 4% 감소하는 경향이 나타났지만 1MPa 이내의 결과로 감소 수준은 크지 않은 것으로 판단되며, MC 혼합에 관계없이 휨강도에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

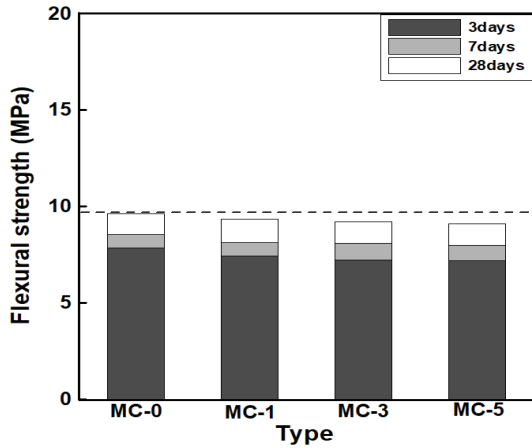


Fig. 13. Evaluation result of flexural strength according to MC

3.6 Water Flow

Fig. 14~18은 MC 혼합에 따른 시멘트 복합재료의 Water Flow 평가결과를 나타낸 것이다. Fig. 14는 치유재령 1일의 단위투수량 측정결과를 나타낸 것으로 MC를 혼합하지 않은 MC 0%의 경우와 비교하여 MC를 혼합한 시험편의 단위투수량은 모두 80% 이상 감소하는 경향이 나타났다. 또한 MC 혼합률 증가에 따라 단위투수량이 감소하는 결과가 나타났으며, MC 1%의 투수량과 비교하여 MC 3% 및 MC 5%의 단위투수량은 2배 이상 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 15는 치유재령 3일의 단위투수량 측정결과를 나타낸 것으로 MC 0%의 단위투수량과 비교하여 MC를 혼합한 시험편의 단위투수량은 모두 감소하는 경향이 나타났다. 또한 MC 혼합률 증가에 따라 투수량이 감소하는 결과가 나타났으며, MC 1%의 단위투수량과 비교하여 MC 3% 및 MC 5%의 단위투수량은 약 30% 및 80% 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 16은 치유재령 7일의 단위투수량 측정결과를 나타낸 것으로 MC 0%의 단위투수량과 비교하여 MC를 혼합한 시험편의 단위투수량은 모두 50~97% 감소하였다. 또한 MC의 혼합률 증가에 따라 단위투수량이 감소하는 결과가 나타났으며, MC 1%의 투수량과 비교하여 MC 3% 및 MC 5%의 투수량은 약 97% 이상 감소하였다.

Fig. 17은 각 치유재령에 따른 결과인 Fig. 14, Fig. 15 및 Fig. 16의 데이터를 치유재령과 투수량의 상관관계를 나타낸 것이며, Fig. 18은 치유재령과 치유율의 상관관계를 나타낸 것이다. Fig. 17 및 Fig. 18의 결과, MC 0%의 초기 단위투수량 대비 치유재령 7일 후 약 54% 감소하였으며, 치유재령 14일 후 약 76% 감소하는 결과가 나타났다. MC 0%의 단위투수량과 비교하여 MC를 혼합한 시험편의 단위투수량은 약 40~97% 이상 감소하는 경향이 나타났

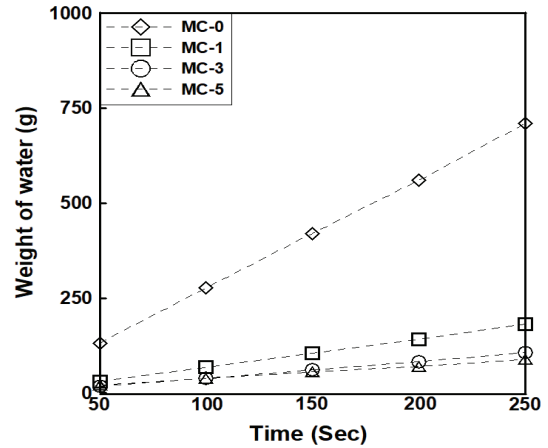


Fig. 14. Water flow in 1 day of healing age

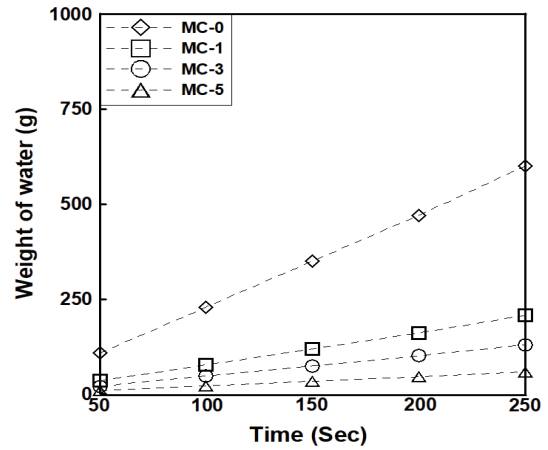


Fig. 15. Water flow in 3 days of healing age

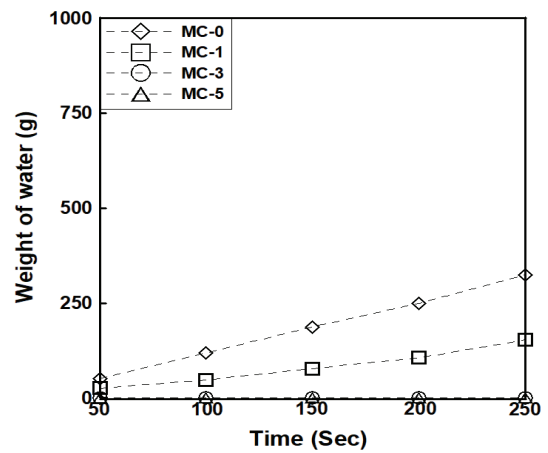


Fig. 16. Water flow in 7 days of healing age

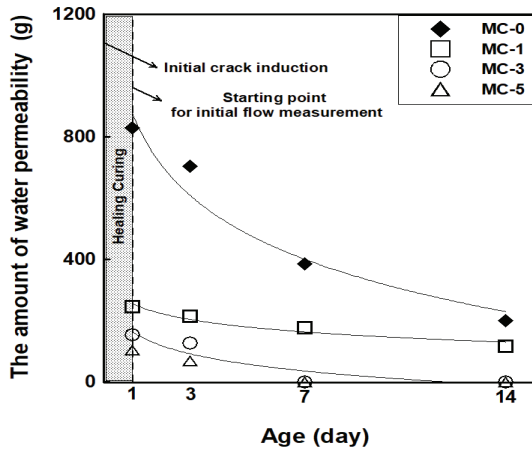


Fig. 17. Correlation between healing age and water flow according to MC mixing rate

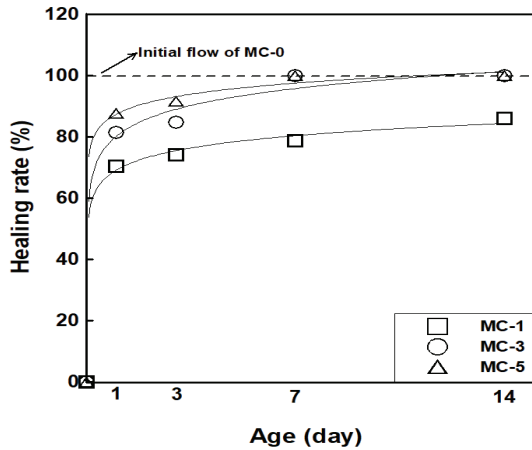


Fig. 18. Correlation between healing age and rate

으며, MC 혼합을 증가에 따라 각 치유재령에 따른 단위투수량이 감소하였으며, MC 1%의 단위투수량과 비교하여 MC 3% 및 MC 5%의 단위투수량은 약 97% 이상 감소하는 것으로 나타났다.

이러한 결과를 통하여 MC를 혼합한 경우 치유재령이 증가함에 따라 투수량이 감소하는 경향이 나타났으며, MC의 혼합율이 증가할수록 비례적으로 감소하는 결과가 나타남에 따라 MC의 혼합율이 증가할수록 치유효율이 큰 것으로 판단된다.

그러나 최적 혼합율은 다른 관점에서 고려하여야 한다. 큰 균열 폭을 치유하기 위하여 다량의 캡슐을 혼합할 경우 초기 비용이 증가하기 때문에 치유효율 대비 비효율적일 수 있다. 일반적으로 자연 균열은 초기에 미세한 균열이 형성되어 점차 확장하는 개념이기 때문에 혼합율을 작게 하더라도 발생 즉시 캡슐이 반응하여

치유작용이 이루어질 경우 치유시간 및 치유율은 더욱 커질 것으로 판단되며, 균열개시 이후 즉시 치유반응에 의하여 단위투수량이 감소되는 결과에 따라 균열 진전 방지 및 치유가 가능한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 자기치유 마이크로캡슐이 시멘트 복합재료의 품질 및 치유특성에 미치는 영향을 고찰하고자 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 마이크로캡슐 혼합이 시멘트 복합재료의 유연학적 특성에 미치는 영향은 분석한 결과, 마이크로캡슐의 입자 특성에 의하여 소성점도 및 항복응력이 감소하였으며, 혼합율에 비례하여 감소되는 결과가 나타났다. 그러나 손실량에 의한 코어 재료가 자극제 역할을 함에 따라 테이블 플로우가 감소하는 경향이 나타나 입자 특성에 의한 영향보다는 손실에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다.
- 2) 마이크로캡슐 혼합이 시멘트 복합재료의 역학적 특성에 미치는 영향을 평가한 결과, 마이크로캡슐에 함수율을 고려하여 배합수를 보정할 경우 강도보완이 가능한 것으로 나타났으며, 이러한 결과를 통하여 마이크로캡슐에 포함된 함수율의 영향이 마이크로캡슐의 혼합 및 혼합율에 따른 영향보다 지배적인 것으로 판단된다.
- 3) 마이크로캡슐 혼합이 시멘트 복합재료의 치유 특성에 미치는 영향을 평가한 결과, 균열개시 이후 즉시 치유반응에 의하여 단위투수량이 감소되는 결과가 나타났으며, 마이크로캡슐 3% 이상 혼합할 경우 치유재령 7일에 95% 이상의 치유율이 있는 것으로 나타났다.

이러한 결과를 통하여, 마이크로캡슐의 최적 혼합율은 더욱 큰 균열을 치유하기 위하여 다량 혼합할 수는 있지만 치유효율 대비 비효율적이므로 균열초기에 미세한 균열을 제어하여 균열의 진전 방지 및 치유반응을 유도하여야 하며, 자연 균열 측면에서 고려할 경우 보다 적은 마이크로캡슐을 활용하더라도 치유효율은 커질 것으로 판단되므로 이에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2021년 국토교통과학기술진흥원 국토교통기술연구 개발사업(21SCIP-C159051-02) 지원사업으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

References

Blaiszik, B.J., Sottos, N.R., White, S.R. (2008). Nanocapsules for self-healing materials, *Composites Science and Technology*, **68(3-4)**, 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 [in Korean].

Choi, Y.W., Oh, S.R., Kim, C.G., Lim, 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)**, 236-244 [in Korean].

Feiteira, J., Gruyaert, E., 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.

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 and Concrete Composites*, **31(10)**, 731-743.

Kim, C.G., (2021). A Study on the Development of Sectional Repair System Utilizing Crack Self-Healing Microcapsules, Ph. D Thesis, Semyung University [in Korean].

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.

Nesterova, T., Kim, D., Pedersen, L.T., Kiiil, 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., 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.

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.

자기치유 마이크로캡슐이 시멘트 복합재료의 품질 및 치유특성에 미치는 영향

본 논문에서는 자기치유 마이크로캡슐이 시멘트 복합재료의 품질 및 치유특성에 미치는 영향을 평가하였다. 마이크로캡슐의 혼합은 마이크로캡슐의 입자 특성에 의하여 시멘트 복합재료의 소성점도 및 항복응력이 감소하며, 혼합율에 비례하여 감소하였다. 테이블 플로우는 손실량에 의한 코어재료가 자극제 역할을 함에 따라 감소하는 경향이 나타났으며, 압축강도는 배합수 보정을 통하여 강도보완이 가능하였다. 마이크로캡슐 혼합이 시멘트 복합재료의 치유 특성에 미치는 영향을 평가한 결과, 균열개시 이후 즉시 치유반응에 의하여 단위투수량이 감소되는 결과가 나타났으며, 마이크로캡슐 3% 이상 혼합할 경우 치유재령 7일에 95% 이상의 치유율이 있는 것으로 나타났다.