

고상캡슐을 활용한 자기치유 표면보호재의 품질 및 장기재령 치유특성

Quality and Long-term Aged Healing Properties of Self-healing Surface Protection Materials Using Solid Capsules

오성록¹ · 남은준² · 강신태³ · 최연왕^{4*}

Sung-Rok Oh¹ · Eun-Joon Nam² · Shin-Taeg Kang³ · Yun-Wang Choi^{4*}

(Received August 25, 2021 / Revised September 14, 2021 / Accepted September 23, 2021)

In this study, it was reviewed that the effect of solid capsules on the quality of surface repair materials and the healing properties of long-term aging, as part of a study to utilize self-healing surface repair materials using solid capsules as repair materials. As a result of evaluation of the rheological properties of self-healing surface repair materials according to the mixing of solid capsules, plastic viscosity, yield stress, and table flow tended to decrease. In the case of compressive strength, 1MPa per 1% of the solid capsule decreased proportionally. As a result of evaluating the long-term healing properties, when 10% of solid capsules were mixed, a healing rate of 90% was shown at 28 days of healing, because the solid capsule was preserved even after 91 days of age had elapsed. after 91 days of healing, even in the case of 5% of solid capsules, a healing rate of 90% was shown.

키워드 : 고상캡슐, 자기치유, 표면보호재, 품질특성, 치유특성

Keywords : Solid capsules, Self-healing, Surface protection materials, Quality properties, Healing properties

1. 서론

구조물에 균열이 발생할 경우 균열을 스스로 탐지하여 능동적으로 치유하는 자기치유(Self-Healing) 기술은 최근 국내외적으로 스마트 건설기술 분야로 대두되고 있는 기술 중 하나이다 (Schlangen and Sangadji 2013). 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(An and Shin 2014; Choi et al. 2018). 구조물에 자기치유 성능을 부여하기 위해서는 유무기 혼합재, 박테리아 및 캡슐의 활용 등 다양한 방법이 있다(Nesterova et al. 2012; Kim 2017). 그 중에서도 캡슐을 활용한 자기치유 기술은 직접적인 자기치유

소재를 다량 포함할 수 있기 때문에(Nesterova et al. 2012) 균열이 발생한 부위에 선택적으로 반응시킬 수 있는 장점이 있으며 (Hunger et al. 2009; Oh et al. 2019), 캡슐이 막으로 보호되기 때문에 균열에 의하여 파괴되기 전에는 반영구적인 치유에너지 저장이 가능하다(Oh 2017). 캡슐을 활용한 자기치유 기술은 캡슐화되는 치유소재인 코어재료의 상에 따라 크게 2가지로 분류할 수 있으며(Oh 2017), 반응매커니즘을 달리 적용할 수 있다(Kim 2017). 자기치유 캡슐 기술은 분체상 재료를 일정한 입도를 가지도록 물리적 방법에 의하여 응집시켜 막을 코팅한 고상캡슐과 액체상 재료를 화학적 방법에 의하여 캡슐화된 액상캡슐로 분류할 수 있다. 특히, 액상캡슐의 경우 대부분 마이크로 사이즈로 제조되기 때문에 마이크로캡슐이라 하며(Wang 2003), 기술의 발달로 인하여 나노 사이즈인 나노캡슐도 여러분야에서 활용되고 있다(Oh 2017). 캡슐 활용 기술은 반응 매커니즘을 달리 설계가 가능하기

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

¹(주)뉴저스트 기술연구소 책임연구원 (Research & Development Team, Newjust Co., Ltd., Gyeonggi-do, 14348, Korea)

²세명대학교 건설공학과 박사과정 (Department of Construction Engineering, Semyung University, Chungcheongbuk-do, 27136, Korea)

³세명대학교 건설공학과 박사수로 (Department of Construction Engineering, Semyung University, Chungcheongbuk-do, 27136, Korea)

⁴세명대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Semyung University, Chungcheongbuk-do, 27136, Korea)

때문에 자기치유 성능을 부여하고자 하는 대상에 따라 제어가 가능하며, 그에 맞는 코어재료의 상의 선택이 가능하다(Kim 2017).

본 논문에서는 다양한 대상 구조물 중 수처리 구조물의 보수를 위한 표면보호재에 자기치유 성능을 부여하기 위하여 수분에 상시 노출되는 수처리 구조물의 특성을 고려하여 수화반응이 가능한 분체상 무기재료를 코어재료로 사용한 고상캡슐을 적용하고자 하였다. 표면보호재에 활용된 고상캡슐은 보수이후, 재균열시 내부의 캡슐이 파괴되어 주변 수분에 의하여 수화반응을 하게 되며, 수화 생성물을 통하여 균열 치유반응을 유도할 수 있다(Oh 2017; Kim 2017; Nam 2020).

따라서 본 연구에서는 고상캡슐을 활용한 자기치유 표면보호재를 보수재료로 활용하기 위한 일환의 연구로서 고상캡슐이 표면보호재의 품질에 미치는 영향 및 장기재령의 치유 특성을 검토하고자 하였다.

2. 실험 개요

2.1 사용재료

2.1.1 고상캡슐

고상캡슐(Solid Capsules, SC)에 사용된 무기재료는 수화반응에 의해 에트링가이트(ettringite) 또는 수산화칼슘 등을 생성하여 팽창시키는 작용이 있는 아원계 팽창재(CSA)와 결정성장 촉진 및 육각판상의 결정물을 발생하는 무수석고(CaSO₄)를 일정한 비로 혼합하여 사용하였다. 무기재료의 최적비율 및 사이즈는 선행연구를 통하여 얻어진 최적 비를 적용하였다(Oh 2017; Nam 2020).

Fig. 1은 고상캡슐의 치유 매커니즘을 나타낸 것이며, 분말 상태인 무기재료는 우레탄계 응집제를 사용하여 조립화를 통한 코어재료를 제조하며, 코어재료의 보호를 위하여 폴리우레탄을 이용하여 막을 코팅한 다음 적합한 사이즈로 선별하였다. Fig. 2는 고상캡슐 제조에 사용된 장비를 나타낸 것이며, Fig. 3은 제조된 고상캡슐의 예를 나타낸 것이다.

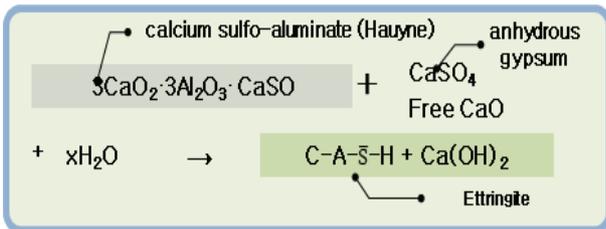


Fig. 1. Healing mechanism



Fig. 2. Manufacturing device of solid capsules(SC)

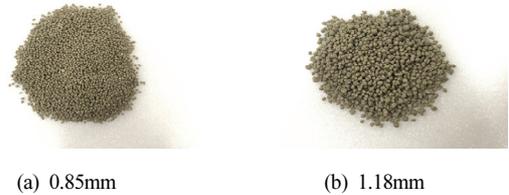


Fig. 3. Manufacturing device of solid capsules(SC)

2.1.2 표면보호재

표면보호재의 배합비는 W:B:S=0.4:1.0:1.50이며, 결합재(B)는 시멘트와 기능성 분체를 혼합 사용하였으며, 잔골재(S)는 규사(#6, #7 및 #8의 혼합사용)를 사용하였다. 또한 폴리머 단섬유를 모르타르 총 부피의 0.1% 사용하여 설계강도 40MPa의 표면보호재를 제조하였다. 고상캡슐은 표면보호재의 결합재 대비 3수준(0, 5, 10%)을 혼합하였다.

2.2 표면보호재의 품질특성

2.2.1 레올로지

레올로지는 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. 또한 Fig. 4와 같이 Hysteresis loop area에 의한 측정값의 이력현상을 피하기 위하여 전단속도를 하강계단식으로 설정하여 측정하였으며, 측정된 전단응력의 직선회귀분석을 통하여 Bingham 모델로 해석하였다.

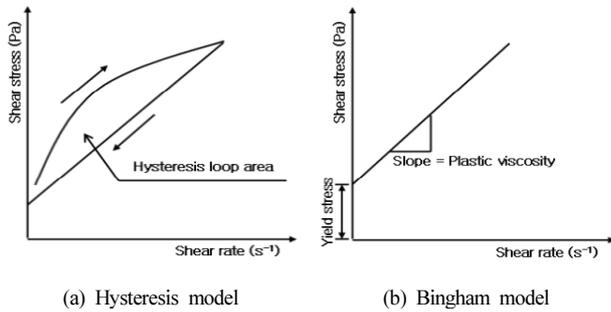


Fig. 4. Rheological analysis model

2.2.2 테이블 플로우

테이블 플로우는 KS L 5111에 규정된 플로우 테이블 및 플로우 콘을 이용하여 KS L 5105에 준하여 테이블 플로우를 측정하였다.

2.2.3 압축강도

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

2.3 표면보호재의 치유특성

2.3.1 Water Flow

Water Flow test는 자기치유 성능을 평가하기 위하여 균열이 유도된 시험편의 투수량(ml/min · mm)을 측정하였다. Water Flow 용 시험편은 Fig. 5와 같이 ϕ 100×50mm 크기의 시험편을 제작하여 온도(20±3°C) 조건에서 수중 양생을 실시하였다. 균열 유도기간은 재령 28일이 경과되었을 때 균열을 유도하였으며, 균열폭 0.15~0.3mm가 되도록 균열 유도 필름을 삽입하여 균열을 제어하였다. 또한 균열폭 유지를 위하여 시험편의 측면부를 호스밴드로 고정하였다. 균열이 유도된 시험편은 치유재령 7, 14, 21 및 28일에 Water Flow test를 실시하여 투수량의 변화를 평가하였다. Water Flow test 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. 6은 Water Flow test 전경을 나타낸 것이다. 또한, 장기재령의 치유 특성을 검토하기 위하여 재령 91일에 균열을 유도하였으며, 동일한 시험방법에 의하여 평가를 실시하였다.

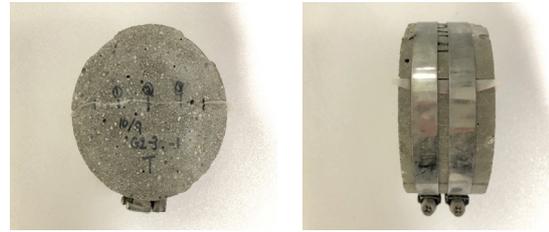


Fig. 5. Crack induction specimen

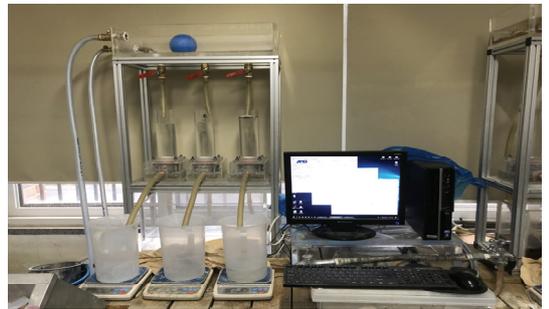


Fig. 6. Water flow test



Fig. 7. Crack closing test

2.3.2 Crack closing

Crack closing은 Water Flow 시험편과 동일한 시험편에 대하여 ×100의 배율로 면시편을 관찰하여 반응생성물에 의한 균열면의 Crack closing 수준을 치유재령에 따라 관찰하였다. Fig. 7은 Crack closing 측정전경을 나타낸 것이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 레올로지

Fig. 8은 빙햄 모델로 해석된 레올로지 평가결과를 나타낸 것이며, Fig. 9는 해석된 레올로지 평가결과로부터 도출된 소성점도

및 항복응력을 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과 Plain 대비 SC 혼합에 따라 레올로지 곡선이 감소하는 경향이 나타났다. Fig. 9의 결과, Plain 대비 SC의 혼합에 따라 소성점도 및 항복응력이 비례적으로 감소하는 경향이 나타났으며, SC 5% 증가함에 따라 소성점도는 약 10% 감소하였으며, 항복응력은 약 15% 감소하였다. 이러한 결과는 SC의 입형이 다소 둥근형태를 띠고 있으며, 특히, SC의 보호를 위한 코팅막이 수분이 차단하기 때문에 수화반응을 위한 총 결합재의 부피감소로 소성점도 및 항복응력이 감소하는 것으로 판단되며, 이에 따라 점성감소로 인한 작업성이 증가할 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통하여 SC의 혼합은 표면보호재의 레올로지 특성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.2 테이블 플로우

Fig. 10은 SC 혼합에 따른 표면보호재의 테이블 플로우 및 플로우 로스 평가결과를 나타낸 것이다. Fig. 10의 결과, 테이블 플로우는 초기에는 SC 혼합에 관계없이 오차범위 이내에서 동등수준이 것으로 나타났다. 그러나 시간이 경과함에 따라 플로우 로스가 커져 테이블 플로우가 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 레올로지 분석결과와 같이 SC의 특징에 의하여 소성점도 및 항복응력 감소에 따른 플로우 증가가 예상되지만 레올로지 분석결과와 상반된 결과가 나타난 원인은 선행연구에 따르면(Nam 2020), SC가 배합과정에서 혼합기 블레이드 및 구성재료의 마찰로 인한 손실, 코팅 불량으로 인하여 일부 SC가 약 10% 손실되어 SC에 포함된 일부급결성분 반응에 의하여 플로우 로스가 커지는 것으로 판단되며, Plain 대비 60분 경화 이후 SC 5%는 약 6%, SC 10%는 약 12% 감소하는 결과가 나타났다.

3.3 압축강도

Fig. 11은 SC 혼합에 따른 표면보호재의 압축강도 평가결과를 나타낸 것이다. Fig. 11의 결과, 압축강도는 SC 혼합이 증가함에 따라 비례적으로 감소하는 경향이 나타났으며, 재령이 경과함에 따라 감소수준은 동등수준으로 나타났다. 이러한 원인은 SC의 미반응성 입자이기 때문에 SC가 존재하는 영역은 하중을 받을 수 없는 취약부위가 됨에 따라 강도가 감소하게 되며, SC의 혼합율이 증가함에 따라 취약부위가 증가되어 강도를 발현하는 페이스트의 부피감소로 압축강도가 감소하는 것으로 판단된다(Oh 2017).

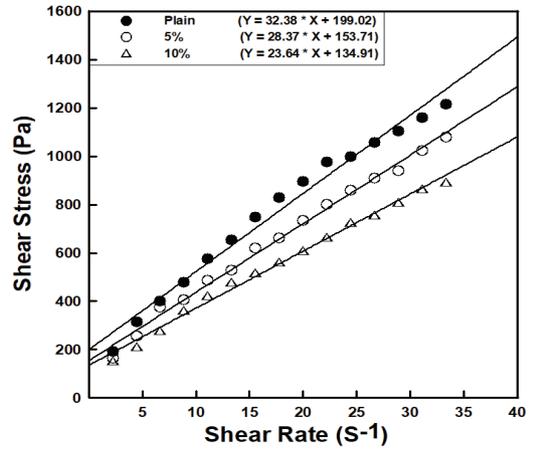


Fig. 8. Rheology evaluation results according to the Bingham model

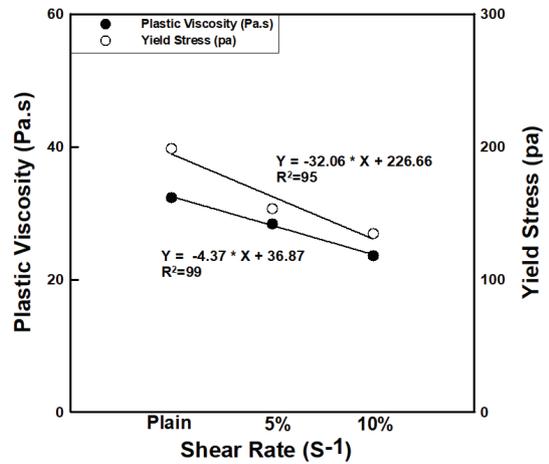


Fig. 9. Plastic viscosity and yield stress according to shear rate

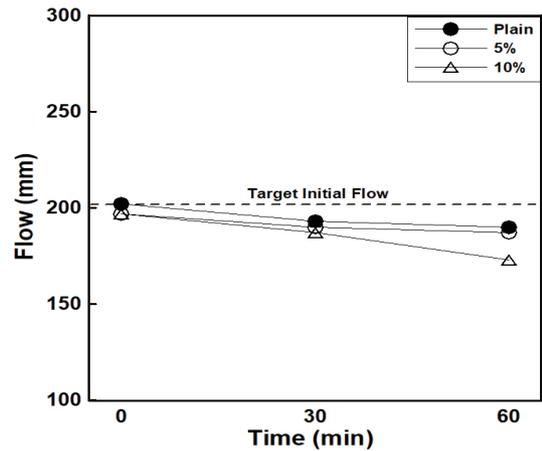


Fig. 10. Experimental results of table flow and flow loss

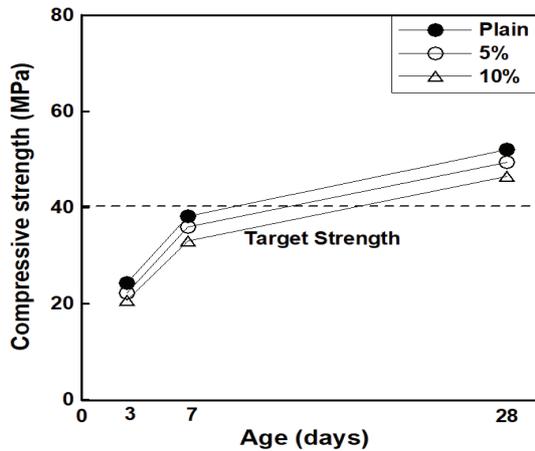


Fig. 11. Experimental result of compressive strength according to age

또한, SC 혼합에 따른 압축강도 감소수준은 SC 5% 증가함에 따라 Plain 기준의 압축강도 대비 5% 감소하는 경향이 나타났으며, 10% 혼합 시 최대 10% 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 목표 강도 보다 10~15% 크기 때문에 적용 측면에서 문제되지 않지만 목표 강도가 클 경우에는 최대 10%의 강도 감소를 고려하여 배합비 조절, 추가 결합재의 혼합 등을 통하여 압축강도를 확보할 수 있을 것으로 판단되며, 자기치유 성능 대비 강도의 효율을 고려가 필요할 것으로 판단된다.

3.4 Water Flow

Fig. 12는 SC 혼합에 따른 표면보호재의 Water flow 평가결과를 나타낸 것으로 초기 투수율과 치유율의 관계를 나타낸 것이다. 선행연구에 따르면(Choi et al. 2017a), 투수율(ml/min · mm)은 단위 시간(min) 및 단위 균열길이(mm)당 투수량(ml)을 나타낸 것으로 초기 투수율이 $0.5 \pm \alpha$ 인 경우 초기 균열폭 0.2mm, $1.0 \pm \alpha$ 인 경우 0.25mm, $1.8 \pm \alpha$ 인 경우 0.3mm인 수준인 것으로 초기 투수율과 균열폭과의 관계분석을 통하여 초기 투수율의 균열폭을 예측할 수 있는 모델을 제시하고 있다(Choi et al. 2017b). 이를 통하여 SC가 혼합된 표면보호재의 초기 투수율에 따른 치유율은 Fig. 13과 같이 분석할 수 있다. Fig. 12 및 Fig. 13의 결과, 재령 28일에 균열이 유도된 시험편의 균열폭이 0.25mm인 시편에서 Plain의 치유율은 75%이지만, SC 5% 및 SC 10%의 치유율은 90% 및 95%로 치유율이 나타나 Plain의 치유율에 대하여 SC 5%의 경우 10%, SC 10%의 경우 15%p.를 향상시키는 것으로 나타났다. 균열폭이 0.3mm인 시편의 경우 SC 5% 및 SC 10%의 치유율이 80% 및 90%로

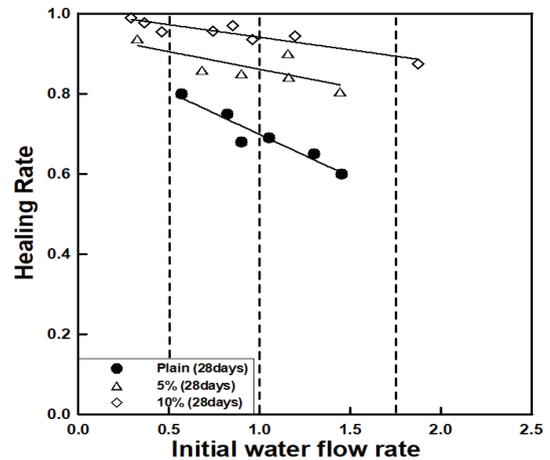


Fig. 12. Relationship between initial water flow rate and healing rate(healing period 28 days)

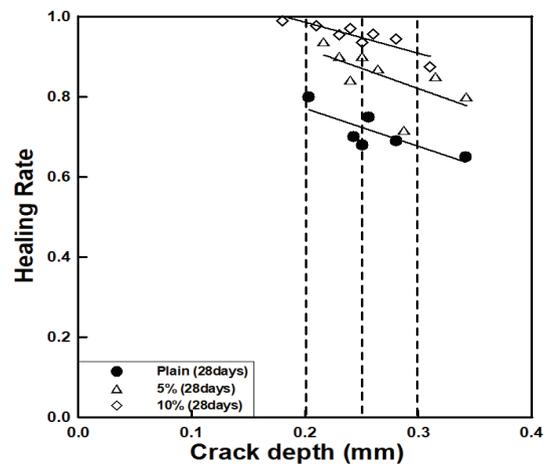


Fig. 13. Relationship between crack depth and healing rate(healing period 28 days)

나타나 65%의 치유율을 보이는 Plain의 치유율에 대하여 SC 5%의 경우 15%p., SC 10%의 경우 25%p.를 향상시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 균열폭이 커짐에 따라 SC의 효율이 더욱 커짐을 의미하며, 균열폭이 0.2mm 이하의 경우 99% 이상 치유될 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통하여 SC를 혼합하지 않은 Plain의 경우 SC를 혼합하지 않더라도 사용된 결합재의 자연적인 치유성능에 의하여 치유율을 가지는 것으로 판단되며, SC의 혼합을 통하여 자연적인 치유성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되지만, SC의 품질개선 및 강도보강이 이루어 질 수 있을 경우 SC의 치유효율을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

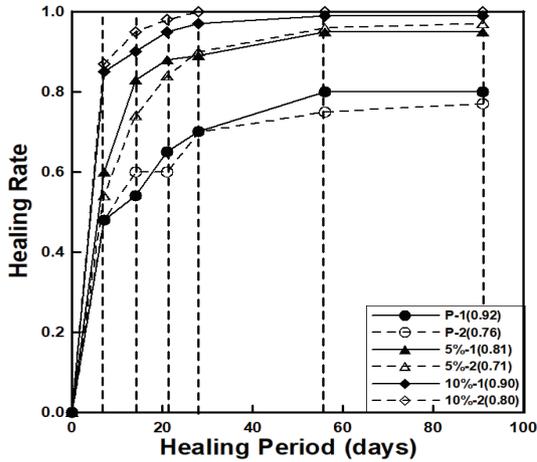


Fig. 14. Relationship between healing period and healing rate(28 days of crack induction)

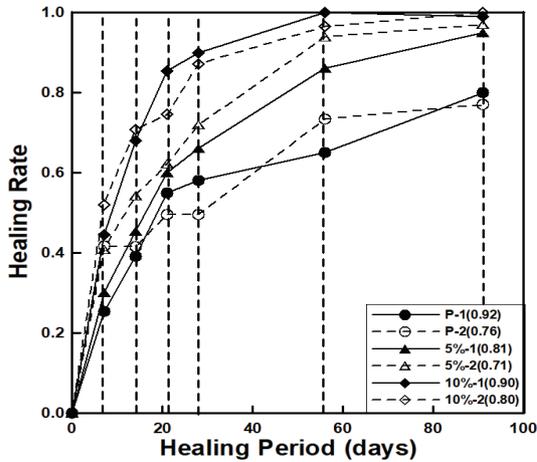


Fig. 15. Relationship between healing period and healing rate(91 days of crack induction)

Fig. 14 및 Fig. 15는 장기재령 치유특성을 평가하기 위하여 재령 28일 및 재령 91일에 균열이 유도된 시험편의 혼합량과 유출량에 따른 치유기간과 치유율의 관계를 Water flow 평가결과로 나타낸 것으로 균열폭 $0.25 \pm \alpha$ mm에 해당하는 대표적인 시험편을 선정하여 치유기간에 따른 치유율을 평가한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 14 및 Fig. 15의 결과, 재령 28일에 균열이 유도된 경우 재령 91일에 균열이 유도된 경우와 비교하여 치유재령 7일에 급격하게 치유율이 증가하는 경향이 나타났지만 재령 91일에 균열이 유도된 경우 서서히 치유율이 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 초기에 급격한 치유율이 나타나는 재령 28일 시험편의 경우 재령 91일 시험편과 비교하여 수화가 지속되고 있으며, 수화 가능한 결합재가 상대적으로 많기 때문에 초기 치유율의 경향이

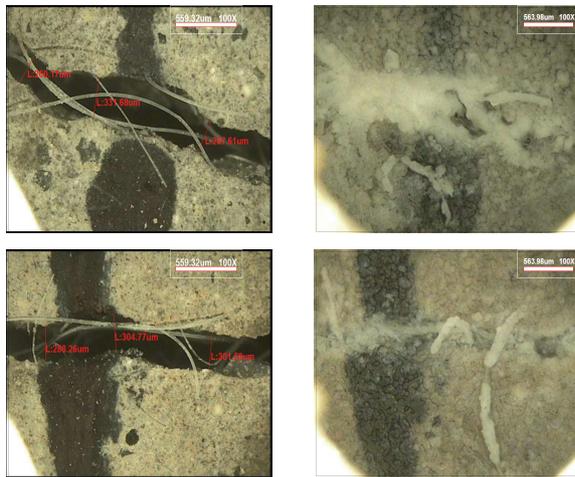
달라지는 것으로 판단되며, 재령 91일의 치유속도가 늦어지는 것으로 판단된다. 또한, 치유재령 28일까지는 재령 28일에 균열이 유도된 시험편(Fig. 14)의 경우와 달리 재령 91일에 균열이 유도된 시험편(Fig. 15)의 경우 상대적으로 치유율이 낮은 것으로 나타났다. 이러한 원인은 초기 치유속도가 빨라진 원인에 기인하여 수화 종료로 인한 자연적인 치유성능이 감소하여 치유율이 감소되는 것으로 판단된다. 그러나 치유기간이 91일 경과하였을 경우 SC가 혼합되지 않은 Plain의 치유율은 최종적으로 약 80% 수준을 내외하는 것으로 나타나 치유속도만 늦어질 뿐 치유율은 크게 달라지지 않는 결과가 나타났다.

SC가 혼합된 경우에는 재령이 91일이 경과하더라도 동등수준의 치유율이 나타났으며, 균열유도기간 재령 28일(Fig. 14)의 치유기간 28일을 기준으로 Plain의 치유율은 약 70.1%이지만, SC 5% 및 SC 10%의 치유율은 89.5% 및 98.3%로 Plain의 치유율 대비 19.4%p. 및 28.2%p. 향상된 것으로 나타났다. 또한 균열유도기간 91일(Fig. 15)의 치유기간 28일을 기준으로 Plain의 치유율은 약 53.8%로 대폭 감소하였지만, SC 5% 및 SC 10%의 치유율은 76.9% 및 91.3%로 Plain의 치유율 대비 23.4%p. 및 37.5%p. 향상되는 것으로 나타났다. 또한 치유기간 91일 기준으로 Plain의 치유율은 약 78.5%이지만, SC 5% 및 SC 10%의 치유율은 90.0% 및 95.3% 치유율이 나타나 Plain의 치유율 대비 11.5%p. 및 16.8%p. 향상된 것으로 나타났다.

이러한 결과를 통하여 SC는 장기재령이 경과한 후에도 캡슐 막에 의하여 보호되고 있기 때문에 균열이 발생되기 전에는 치유성능을 확보할 수 있을 것으로 판단되며, 장기재령에 따른 자연적인 치유성능 감소는 SC의 치유성능을 통하여 보완될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 향후 SC의 개선을 통하여 품질이 개량될 경우 치유속도 및 치유율의 효과를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.5 Crack closing

Fig. 16은 SC를 혼합에 따른 균열면 모니터링 결과를 나타낸 것이다. Fig. 16의 결과 약 0.25~0.3mm 균열폭을 가지는 시험편을 기준으로 균열면 모니터링 결과, 치유기간 이후 표면에 반응 생성물이 나타나 대부분의 균열이 치유되는 것으로 확인할 수 있었으며, 혼합율에 따라서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 SC의 주요 치유 매커니즘이 수화반응에 의하여 에트링가이트와 수산화칼슘 등이 생성하여 팽창하는 팽창재와 결정성장 촉진 및 육각판상의 결정물을 발생하는 무수석고 반응물에 의하여 치유된 것으로 판단된다.



(a) Before healing (b) After healing
 Fig. 16. Results of crack monitoring(healing period 28 days)

4. 결론

본 연구에서는 고상캡슐을 활용한 자기치유 표면보호재를 보수 재료로 활용하기 위한 일환의 연구로서 고상캡슐이 표면보호재의 품질에 미치는 영향 및 장기재령의 치유 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고상캡슐 혼합에 따른 자기치유 표면보호재의 유변학적 특성 평가결과, 빙햄모델 이론에 따른 소성점도 및 항복응력은 고상캡슐 혼합율이 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타나 작업성의 증가를 기대할 수 있었지만 고상캡슐 손실량에 기인하여 플로우가 감소되는 상반되는 결과를 얻었다.
- 2) 고상캡슐 혼합에 따른 자기치유 표면보호재의 압축강도 평가결과, 고상캡슐 혼합율에 따라 압축강도가 감소하는 경향이 나타났으며, 고상캡슐 1%당 1MPa이 비례적으로 감소하였지만 표면보호재의 설계기준이상을 만족하는 것으로 나타났다.
- 3) 고상캡슐 혼합에 따른 자기치유 표면보호재의 장기재령 치유특성을 평가한 결과, 재령 91일이 경과된 경우에도 고상캡슐이 보존되어 10% 혼합한 경우 치유재령 28일에 90% 수준의 치유율이 나타났으며, 치유재령 91일 경과후에는 고상캡슐 5%의 경우에도 90% 수준의 치유율이 나타났다.

이러한 결과를 통하여 고상캡슐은 장기재령이 경과한 후에도 캡슐 막에 의하여 보호되고 있기 때문에 균열이 발생되기 전에는 치유성능을 확보할 수 있을 것으로 판단되며, 장기재령에 따른 자

연적인 치유성능 감소는 고상캡슐의 치유성능을 통하여 보완될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 향후 고상캡슐의 개선을 통하여 품질이 개량될 경우 치유속도 및 치유율의 효과를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며, 압축강도 측면에서 고려할 경우, 목표 강도가 커질 경우에는 최대 10%의 강도 감소를 고려하여 배합비 조절, 추가 결합재의 혼합 등을 통하여 압축강도 보완이 필요할 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2021년도 국토교통과학기술진흥원 국토교통기술연구개발사업(21SCIP-C159062-02) 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].

Blaiszik, B.J., Sottos, N.R., White, S.R. (2007). Nanocapsules for self-healing materials, *Journal of Composites Science and Technology*, **68(3-4)**, 978-986.

Choi, S.W., Bae, W.H., Lee, K.M., Shin, K.J. (2017a). 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., Choi, B.K. (2017b). A study on the manufacturing properties of crack self-healing capsules using cement powder for addition to cement composites, *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-8.

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., (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].
- Memon, S.A., Cui, H.Z., Zhang, H., Xing, F. (2015). Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete, *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., Kim, D., Pedersen, L.T., Kill, 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, *Construction and Building Materials*, **214**, 574–580.
- 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, *Procedia Engineering*, **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, *ACS Applied Materials & 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, *Materials*, **6(9)**, 4064–4081

고상캡슐을 활용한 자기치유 표면보호재의 품질 및 장기재령 치유특성

본 연구에서는 고상캡슐을 활용한 자기치유 표면보호재를 보수재료로 활용하기 위한 일환의 연구로서 고상캡슐이 표면보호재의 품질에 미치는 영향 및 장기재령의 치유 특성을 검토하였다. 고상캡슐 혼합에 따른 자기치유 표면보호재의 유변학적 특성 평가결과, 소성점도 및 항복응력, 테이블 플로우는 감소하는 경향이 나타났으며, 압축강도의 경우 고상캡슐 1%당 1 MPa이 비례적으로 감소하였다. 장기재령 치유특성을 평가한 결과, 재령 91일이 경과된 경우에도 고상캡슐이 보존되어 10% 혼합한 경우 치유재령 28일에 90% 수준의 치유율이 나타났으며, 치유재령 91일 경과후에는 고상캡슐 5%의 경우에도 90% 수준의 치유율이 나타났다.