

하이브리드 자기치유 소재를 혼입한 콘크리트의 치유성능

Healing Performance of Concrete Containing Hybrid Self-healing Materials

황민호¹ · 권혁² · 김형석^{3*} · 최성⁴ · 이광명⁵

Mih-ho Hwang¹ · Hyuk Kwon² · Hyung-Suk Kim^{3*} · Sung Choi⁴ · Kwang-Myong Lee⁵

(Received November 18, 2022 / Revised December 15, 2022 / Accepted December 15, 2022)

In this study, the healing performance of hybrid self-healing concrete was investigated by mixing bacterial pellets(BP) and solid phase capsules(SC), respectively, based on organic-inorganic self-healing material(MC). Constant water head permeability test was applied as a method of evaluating the healing performance, and the healing rate and the healed crack width calculated by the equivalent crack width were used as evaluation indices. As a result of the water permeability test, when the initial crack width was 0.3 mm, the healing rates of MC-BP and MC-SC were 2.1~3.0 %pt higher than that of MC, and the healed crack width of hybrid concrete increased by 0.017 ~0.018 mm. In conclusion, it was found that the self-healing performance was not significantly improved even if the two types of healing materials are used together.

키워드 : 자기치유소재, 유·무기 혼화재, 박테리아, 고상캡슐, 하이브리드 자기치유 콘크리트, 정수위 투수시험

Keywords : Self-healing materials, Organic-inorganic combined materials, Bacteria, Solid capsule, Hybrid self-healing concrete, Constant water head permeability test

1. 서론

자기치유(Self-Healing) 콘크리트 기술은 콘크리트에 발생하는 균열을 스스로 치유하여 외부로부터 유입되는 열화인자를 차단하여 구조물의 수명을 연장할 수 있는 기술이다. 국내외에서 치유물질의 발생 메커니즘에 따라 대표적으로 무기계 소재, 마이크로 캡슐, 박테리아를 활용한 자기치유소재의 연구개발이 이루어지고 있으며, 그 밖에도 섬유, 형상기억 합금 등을 자기치유 기술에 활용한 연구가 진행되고 있다(Liu et al, 2022).

무기계 소재를 활용한 자기치유소재의 주요 원료는 혼화재, 팽

창재 및 팽윤재이기 때문에 콘크리트는 균열을 치유함은 물론, 초기균열을 억제하고, 콘크리트 모체의 내구성을 향상시키는 효과를 기대할 수 있어 다양한 환경조건에서 활용이 가능하다는 장점이 있다. 박테리아 및 캡슐을 활용한 자기치유소재는 콘크리트 모체의 성능을 개선하는 효과는 없지만 균열 발생 시기까지 치유 생성물의 매개체가 보호되고, 장기적으로 치유 효과 발현이 가능하다는 특징이 있다(Pang et al, 2016; Oh et al, 2021). 이러한 자기치유소재는 복합적으로 사용하였을 때 자기치유소재의 특징을 서로 보완하는 역할을 할 수 있다. 하지만, 자기치유 연구는 개별적인 소재의 치유 성능에 집중되어 있어, 두 가지 이상의 자기치유소재를 활용한 하이

* Corresponding author E-mail: kimhs775@nate.com

¹성균관대학교 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 연구원 (Self-healing green concrete research center, Sungkyunkwan University, Sunwon, 16419, Korea)

²(주)워드엠텍 기술연구소 부장 (WITH M-TECH Co., Ltd., Suwon, 16229, Korea)

³성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (Department of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Sunwon, 16419, Korea)

⁴성균관대학교 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 책임연구원 (Self-healing green concrete research center, Sungkyunkwan University, Sunwon, 16419, Korea)

⁵성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수 (Department of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Sunwon, 16419, 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

브리드 자기치유소재의 치유 특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 자기치유소재 중 유·무기 혼화재를 기반으로 하여 박테리아와 고상캡슐을 혼입한 하이브리드 자기치유 콘크리트의 기초물성을 확인하고, 정수위 투수시험을 통해 치유성능을 평가하여 실용화 가능성을 검토하고자 한다.

2. 실험 연구

2.1 자기치유소재

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 자기치유소재인 유·무기 혼화재, 박테리아 펠렛, 고상캡슐을 나타낸다. 유·무기 혼화재(organic-inorganic combined materials, MCm)의 주요 구성물질은 마그카본(MgO-C)을 포함하는 팽창재, 탄산염축진제 및 무기염 첨가제이며, 이를 4 : 1 : 1의 비율로 혼합하여 기계·화학적(Mechano chemical) 처리에 의한 소재의 활성화 및 개질화 반응을 통해 제조하였다(Park et al. 2021).

생체광물형성 박테리아인 *L. boronito lerans* YS11과 *B. miscanthi* AK13를 복합 배양하여 포자화하였으며, 박테리아의 영양소로 이스트 추출물 및 젖산 칼슘 5수화물을 사용하였다. 박테리아 펠렛(Bacteria pellet)은 메틸 셀룰로오스와 폴리비닐아세이트를 기반으로 제조하였으며, 지름 2 mm로 압출된 펠렛을 건조시킨 후에 콘크리트에 혼입할 수 있도록 절단하였다(Jang et al. 2020).

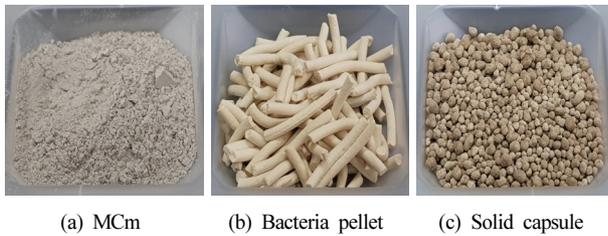


Fig. 1. Self-healing materials

Table 1. Mix proportions of concrete

Type	W/B (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit weight (kg/m ³)							
				Water	Cement	Self healing material			Fine aggregate	Coarse aggregate	S.P. (%C)
						MCm	Bacteria pellet	Solid capsule			
OPC	40	48	4.5	160	400	-	-	-	836.4	916.5	0.70
MC				160	400	20	-	-	817.7	916.5	0.74
BP				160	400	-	20	-	803.8	916.5	0.74
SC				160	400	-	-	20	814.6	916.5	0.74
MC-BP				160	400	20	8	-	804.7	916.5	0.75
MC-SC				160	400	20	-	8	809.0	916.5	0.75

고상캡슐(Solid capsule)은 아연계 팽창재와 무수석고를 7 : 3의 비율로 혼합한 후에 우레탄 응집제를 통해 혼합하여 코어소재를 만들고, 폴리우레탄과 톨루엔을 희석시킨 용액으로 코팅하여 캡슐화하였다. 또한 치유성능을 높이기 위해 850~1,000 μm의 크기인 고상캡슐만을 선별하여 사용하였다(Choi et al. 2020).

2.2 사용재료 및 콘크리트 배합

콘크리트에 사용된 결합재는 KS L 5201을 만족하는 비중 3.15인 1종 보통 포틀랜드 시멘트이다. 잔골재는 밀도가 2.61 g/cm³, 조립율이 2.94인 쇄사를, 굵은 골재는 밀도 및 조립율이 2.64 g/cm³, 6.63인 화강암질 쇄석을 사용하였다.

Table 1은 배합강도가 28 MPa인 콘크리트 배합표이다. 각각의 자기치유소재별 치유 특성을 평가하기 위해 OPC 배합을 기준으로 3종류의 치유소재(MC, BP, SC)를 시멘트 질량의 5%를 사용하였으며, 하이브리드 자기치유소재의 치유성능을 평가하기 위해 MC 배합을 기반으로 박테리아 펠렛(MC-BP)과 고상캡슐(MC-SC)을 각각 시멘트 질량의 2%를 추가로 사용하였다. 자기치유 콘크리트의 배합에서 자기치유소재는 잔골재율에 영향을 미치지 않도록 잔골재 부피비로 치환하였다. 또한 콘크리트의 목표 슬럼프 180 ± 25 mm를 만족하기 위해 폴리카본산계 고성능 감수제를 사용하였다.

2.3 시편 제작

KS F 2403에 준하여 원주형 공시체를 제작하였으며 압축강도 측정 재령까지 20 ± 1 °C의 온도에서 수중 양생하였다. 정수위 투수시험에 사용되는 균열시편을 제작하기 위하여 콘크리트 배합 후 5 mm 표준체로 굵은 골재를 제거한 모르타르로 Ø100 × 200 mm의 원주형 공시체를 제작하였다. 이 공시체는 20 ± 1 °C의 온도에서 수중양생하였으며, 재령 14일에 Ø100 × 50 mm의 디스크형 시편으로 절단하였다. 이후 균열유도장치로 할렬하여 반원의

형상으로 분할한 뒤 실리콘시트와 클램프를 이용하여 균열시편을 제작하였다. 균열시편의 제작 시 목표균열폭은 0.3 mm로 편차가 ± 0.05 mm의 범위를 벗어나지 않도록 제어하였고, 균열폭과 균열 길이는 광학현미경을 이용하여 측정하였다(Korea Concrete Institute 2021).

2.4 시험방법

2.4.1 유동성 및 압축강도

일반 콘크리트 및 자기치유 콘크리트의 유동성을 평가하기 위해 KS F 2402에 따라 배합 직후 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프를 측정하였고, 압축강도는 KS L 2405에 따라 재령 7일과 28일에 측정하였다.

2.4.2 정수위 투수시험

치유성능의 평가를 위한 정수위 투수시험 방법은 한국콘크리트 학회 제규격인 KCI-CT114 ‘모르타르의 자기치유 성능평가를 위한 정수위 투수시험 방법’에 따라 실시하였다(Korea Concrete Institute 2021). 균열을 유도한 이후 치유재령(Healing period, HP) 0, 7, 14, 28일에 치유성능평가를 위한 정수위 투수시험을 실시하였다. 균열시편의 관통균열을 통과한 분당 유출수량을 균열 길이로 나누어 단위유출수량을 산출하였으며, 치유재령 0일에서의 균열폭과 단위유출수량의 관계를 나타내는 식 (1)에 의해 상수 α 값을 도출하였다.

균열시편의 치유율은 치유재령에 따른 단위유출수량의 감소율로 식 (2)에 의해 산출하였으며 기준시편 대비 치유율의 증감은 %pt로 표현하였다. 식 (1)의 관계에서 임의의 치유재령에 대한 단위유출수량을 식 (3)과 같이 역산하면 등가균열폭을 구할 수 있으며, 식 (4)와 같이 치유재령 0일을 기준으로 t일의 등가균열폭의 차이로 치유된 균열폭을 산출할 수 있다(Lee et al. 2021).

$$q = \alpha w^3 \quad (1)$$

$$SH_q = \left[1 - \frac{q(t)}{q_0} \right] \times 100 \quad (2)$$

여기서, SH_q 는 치유율(%), q_0 는 치유재령 0일의 단위유출수량($\text{ml}/(\text{min} \cdot \text{mm})$), $q(t)$ 는 치유재령 t일의 단위유출수량($\text{ml}/(\text{min} \cdot \text{mm})$)이다.

$$\bar{w}_{(t)} = (q(t)/\alpha)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$\bar{w}_{h(t)} = \bar{w}_0 - \bar{w}_{(t)} \quad (4)$$

여기서, $\bar{w}_{(t)}$ 는 치유재령 t일의 등가균열폭(mm), $\bar{w}_{h(t)}$ 는 치유재령 t일에서 치유된 균열폭(mm)이다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 슬럼프 및 압축강도

Table 2는 콘크리트의 슬럼프 및 압축강도 측정 결과를 나타낸다. 콘크리트의 슬럼프는 170~180 mm 범위로 목표 슬럼프를 만족하였다. 이때 고성능 감수제의 사용량은 일반 콘크리트와 비교하여 자기치유소재를 단독으로 사용한 경우 0.04 %, 하이브리드 자기치유소재를 사용하는 경우 0.05 % 증가하였다.

자기치유 콘크리트의 압축강도는 치유소재로 유·무기 혼화재와 고상캡슐을 사용할 경우 증가하였으나, 박테리아 펠렛을 사용한 경우에는 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 하이브리드 자기치유소재를 사용한 경우에서도 동일하게 나타나는 것을 알 수 있다. 유·무기 혼화재와 고상캡슐의 주요 재료는 팽창성 물질로서, 콘크리트 배합 과정에서 일부 반응하였기 때문에 압축강도가 증진된 것으로 판단되며, 골재에 비하여 강도가 낮은 박테리아 펠렛 사용 시에 콘크리트의 강도가 저하된 것으로 사료된다(Jang et al. 2020).

Table 2. Test results of slump and compressive strength

Type	Slump (mm)	Compressive strength (MPa)	
		7d	28d
OPC	170	25.9	28.7
MC	175	26.1	28.8
BP	175	23.5	27.0
SC	180	26.0	28.9
MC-BP	170	23.6	27.1
MC-SC	175	26.3	29.2

3.2 정수위 투수시험에 의한 치유성능 평가

3.2.1 자기치유소재 사용에 따른 균열 상수 α

치유재령 0일에서 측정된 균열폭과 단위유출수량의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. α 는 균열면의 조도 등을 고려한 상수값으로 α 가 높으면 균열폭에 따라 유출수량의 증가율이 높아짐을 의미한다. Fig. 2의 실험결과와 회귀분석결과 OPC를 포함한 6 종류의

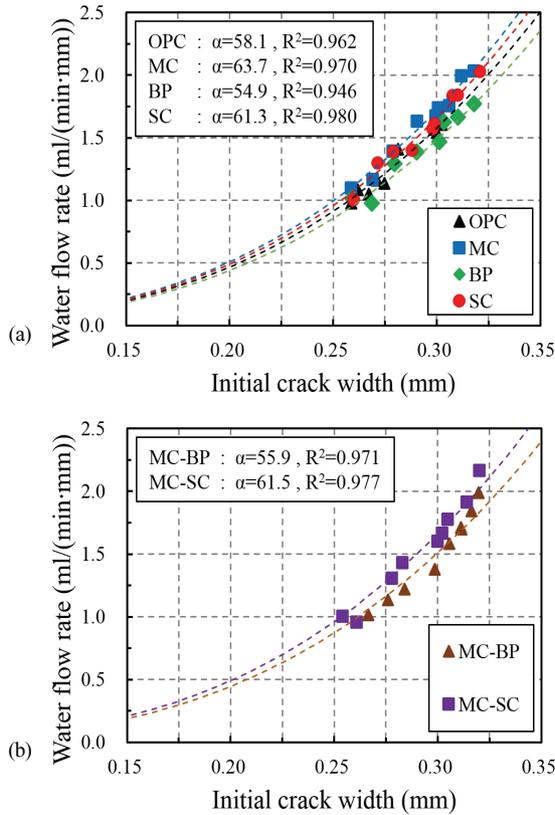


Fig. 2. Initial crack width vs. water flow rate : (a) individual use, (b) hybrid use

배합에서 상수 α 의 결정계수(R^2)는 약 0.946~0.970으로 상관도가 높은 것으로 나타났다. 상수 α 는 OPC의 경우 58.1이었으며, 자기치유소재만을 사용한 MC, BP, SC는 각각 63.7, 54.9, 61.3으로 박테리아 펠렛을 사용할 경우 α 는 감소하였으며, 유·무기 혼화재와 고상캡슐 사용 시에는 α 가 증가하는 경향을 보였다. 또한, 두 종류 자기치유소재를 사용한 MC-BP와 MC-SC의 α 는 각각 55.9와 61.5로 자기치유소재를 단독으로 사용한 경우와 유사한 경향으로 나타났다. 상수 α 는 균열면의 특성을 반영한 것으로 균열면에서 물의 흐름에 대한 마찰이 증가하면 상수 α 가 감소하게 되는데, 유·무기 혼화재를 기반으로 하더라도 중성의 물에 접하면 팽윤하는 특징이 있는 박테리아 펠렛을 혼입한 경우 상수 α 가 낮아진 것으로 판단된다(Jang et al., 2020).

3.2.2 자기치유소재에 따른 치유성능

Fig. 3은 균열폭 0.3 ± 0.05 mm 범위 내에서 OPC와 자기치유소재를 단독으로 사용한 MC, BP, SC의 치유재령에 따른 치유율을 정리한 그래프이다. 치유재령 28일의 치유율은 OPC의 경우 균열

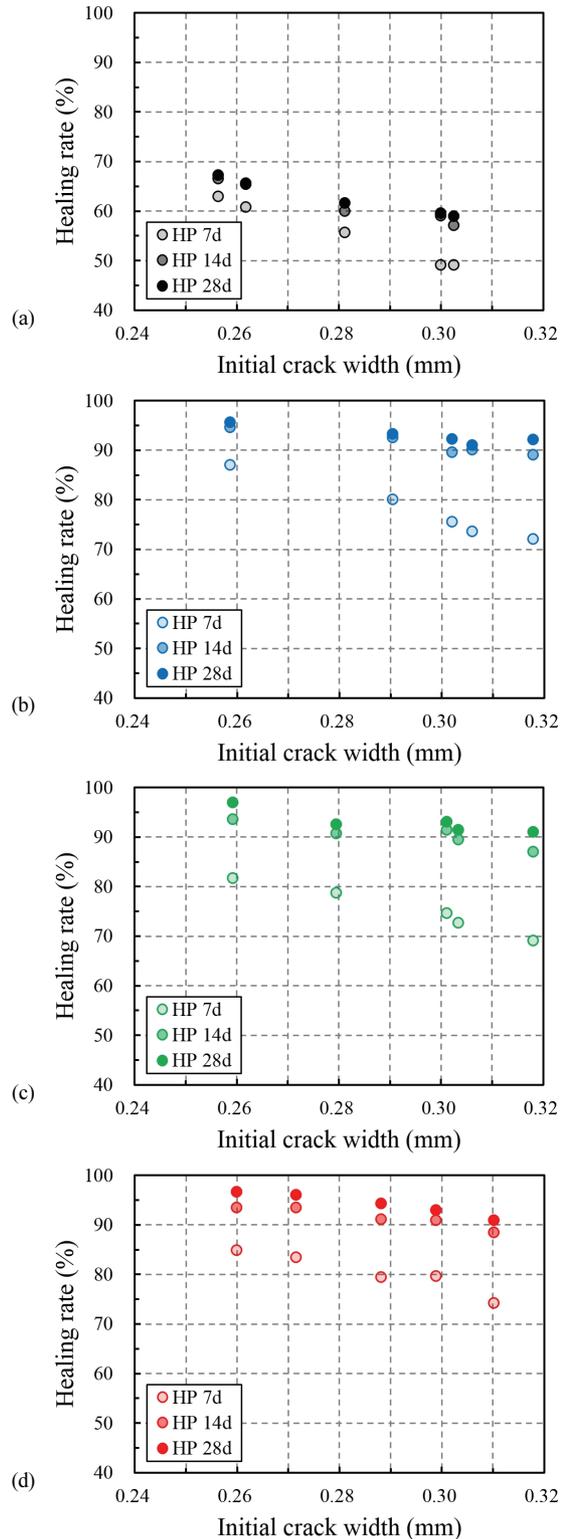


Fig. 3. Initial crack width vs. healing rate for four mixtures : (a) OPC, (b) MC, (c) BP, (d) SC

폭에 관계없이 67 % 이하인 반면, 자기치유소재를 사용한 경우 90 % 이상으로 높게 나타났다.

자기치유 콘크리트의 치유성능 평가결과 치유재령 7일에서 균열폭 0.26 mm인 경우 치유율인 81.7~87.0 % 대비 균열폭 0.32 mm인 경우 치유율이 72.7~79.5 % 수준으로 평균 8.6 %pt 감소한 결과를 나타냈다. 하지만, 치유재령 28일에서는 균열폭 0.26~0.32 mm 범위에서 91.4 % 이상 치유율을 나타내며 균열폭에 따른 치유율의 차이는 평균 4.2 %pt로 치유재령 7일 대비 4.4 %pt 감소하였다.

Table 3에 균열폭이 0.26 mm, 0.30 mm인 균열시편의 자기치유소재별 단위유출수량, 치유율, 등가균열폭이 정리되어 있다. 식 (4)의 치유된 균열폭은 치유재령 0일 대비 28일의 등가균열폭 감소량($\bar{w}_h(28d)$)을 의미한다. 콘크리트구조 사용성 설계기준(KDS 14 20 30)의 4.1.2절 허용균열폭에 따르면 수처리 구조물에서 내구성과 누수방지를 위한 허용균열폭은 0.15 mm이며(KDS 2021), 정수위 투수시험에서 초기 균열폭이 0.3 mm인 경우 허용균열폭을 만족하기 위한 치유율은 식 (2)와 식 (3)에 의하면 87.5 % 이상이어야 한다.

하지만 OPC의 치유율은 59.5 %로 허용균열폭 0.15 mm를 만족하지 못한 것으로 나타났다. 그러나 자기치유소재를 단독으로 혼입한 경우 자기치유소재 종류에 관계없이 치유재령 28일의 치유율이 90 % 이상으로 0.3 mm 균열시편의 치유된 균열폭은 0.15 mm 이상인 것을 알 수 있다. 또한, 0.26 mm 균열시편의 치유율은 95 % 이상으로 치유된 균열폭은 0.16 mm 이상이기 때문에 수처리 구조물의 누수방지를 위한 허용균열폭 이하로 낮아지는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 0.3 mm 수준의 균열시편의 치유재령에 따른 치유율을 도식화한 것이다. 자기치유소재 종류에 따른 치유율은 SC > MC > BP 순으로 나타났는데, 치유재령 7일에는 자기치유소재별로 치유율의 차이가 뚜렷하게 나타났지만, 14일 이후에는 자기치유소재에 따른 영향이 크지 않았다.

유·무기 혼화재와 고상캡슐은 팽창성 물질로 균열발생 시 수화반응이 빠르게 진행되어 치유물질이 초기에 생성될 수 있는 반면, 박테리아 펠렛은 펠렛 내부의 박테리아가 초기 유도기(Lag phase)에서 대수기(Exponential phase)에 이르는 기간 동안 활동성이 낮기 때문에 치유재령 초기의 치유율에 영향을 미치는 것으로 사료된다(Maddala et al. 2019).

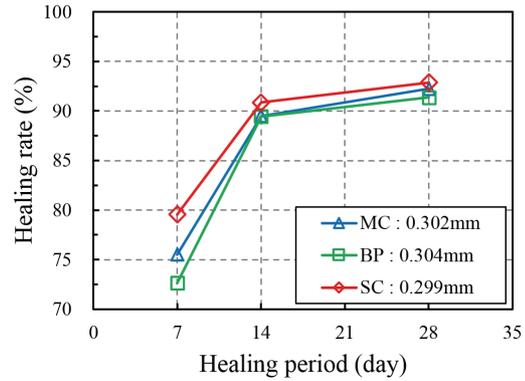


Fig. 4. Healing period vs. healing rate for specimens with a crack width of 0.3 mm

Table 3. Constant water head permeability test results for selected specimens

Type	Crack width (mm)	q (ml/(min*mm)) Eq. (1)			SH_q (%) Eq. (2)		\bar{w} (mm) Eq. (3)		$\bar{w}_h(28d)$ (mm) Eq. (4)
		0d	7d	28d	7d	28d	0d	28d	
OPC	0.262	1.08	0.43	0.37	60.8	65.6	0.265	0.186	0.079
	0.300	1.54	0.79	0.62	49.0	59.5	0.298	0.221	0.078
MC	0.259	1.10	0.14	0.05	87.0	95.6	0.258	0.091	0.167
	0.302	1.69	0.41	0.13	75.5	92.2	0.298	0.127	0.171
BP	0.259	1.02	0.19	0.03	81.7	96.9	0.265	0.083	0.181
	0.304	1.63	0.45	0.14	72.7	91.4	0.309	0.137	0.173
SC	0.260	1.00	0.15	0.03	84.8	96.5	0.254	0.083	0.171
	0.299	1.61	0.33	0.11	79.5	92.9	0.297	0.123	0.174
WM-BP	0.260	1.14	0.15	0.02	86.9	98.4	0.273	0.069	0.204
	0.306	1.58	0.37	0.09	76.7	94.3	0.305	0.117	0.188
WM-SC	0.261	1.05	0.11	0.01	89.9	98.9	0.258	0.057	0.201
	0.300	1.60	0.28	0.08	82.6	95.2	0.296	0.107	0.189

3.2.3 하이브리드 자기치유소재의 치유성능

Fig. 5는 균열폭의 범위가 0.3 ± 0.05 mm인 하이브리드 자기치유 콘크리트의 치유재령에 따른 치유율을 나타낸 것이다. 유·무기 혼화재의 사용량이 동일한 MC와 비교하였을 때, MC-BP는 초기 균열폭이 0.26 mm인 경우 치유재령 7일의 치유율은 차이가 없지만 치유재령 28일에서 2.0 %pt 이상 향상되었으며 초기 균열폭이 0.32 mm인 경우에는 치유재령 7일에서 4.5 %pt, 28일에서 1.0 %pt 이상 향상되었다. MC-SC는 MC와 비교하여 초기 균열폭이 0.26 mm일 때 치유재령 7일에서 1.5 %pt 이상, 치유재령 28일에서 2.5 %pt 이상 향상되었으며 초기 균열폭이 0.32 mm인 경우 치유재령 7일에서 9.5 %pt 이상, 치유재령 28일에서 0.4 %pt 향상

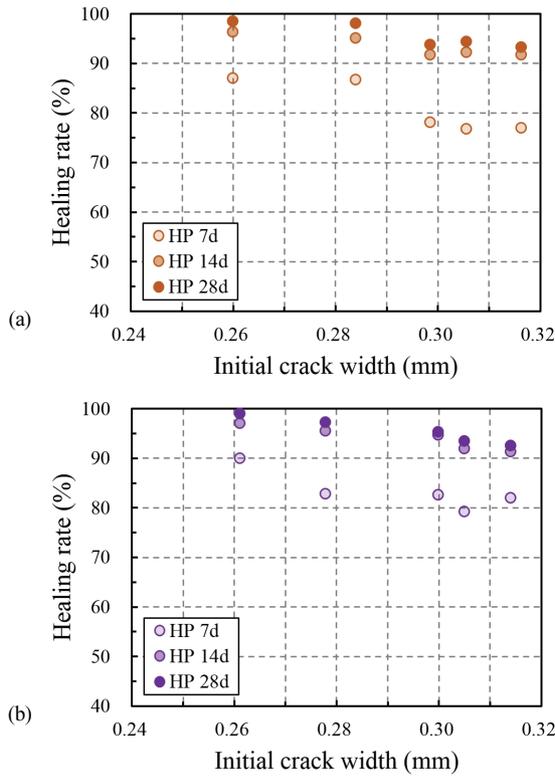


Fig. 5. Initial crack width vs. healing rate for two types of hybrid self-healing mixtures : (a) MC-BP, (b) MC-SC

된 결과를 보였다. MC-BP와 MC-SC의 균열폭에 따른 치유율은 평균 2.0 %pt 이상 향상되었으며, 치유된 균열폭은 상대적으로 큰 균열폭에서 치유재령 초기에 높게 나타났다.

Table 3에 나타난 바와 같이 28일에서 초기 균열폭이 0.26 mm, 0.30 mm일 때 MC-BP의 경우 등가균열폭은 각각 0.069 mm, 0.117 mm이며, MC-SC는 0.057 mm, 0.107 mm로 허용균열폭 0.15 mm를 모두 만족하였다. MC-BP와 MC-SC의 경우 초기 균열폭이 0.30 mm일 때 치유재령 28일에서 치유된 균열폭은 각각 0.188 mm와 0.189 mm로 MC와 비교하여 0.017 mm와 0.018 mm 증가하였다.

Fig. 6은 하이브리드 자기치유소재를 사용한 균열시편의 균열 부를 광학현미경으로 촬영한 것이다. 치유재령 28일에서 MC-BP, MC-BP의 등가균열폭은 각각 0.117, 0.107 mm이지만 사진에서 균열부에 전체적으로 치유생성물질의 결정이 생성된 것을 확인할 수 있다. 이는 균열의 표면에서 결정 생성이 촉진되며 균열 전단면에 걸쳐 치유생성물질이 균일하게 생성되는 것이 아님을 의미한다고 판단된다.

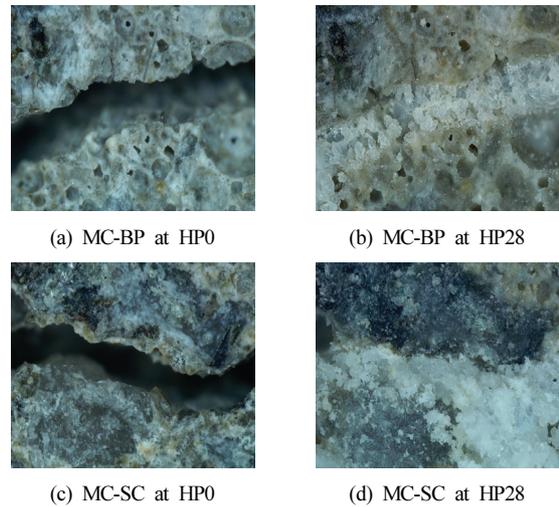


Fig. 6. Healing products on a surface crack

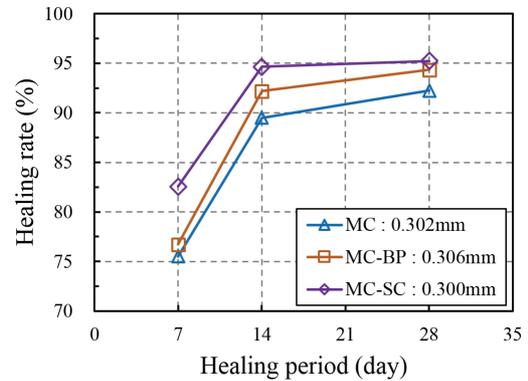


Fig. 7. Healing period vs. healing rate for specimens with a crack width of 0.3 mm

MC-BP, MC-SC에서 0.3 mm 수준 균열시편의 치유재령에 따른 치유율은 Fig. 7과 같다. 박테리아 펠렛이 혼합된 MC-BP의 치유율은 MC 대비 치유재령 7일에 1.2 %pt, 28일에 2.1 %pt 증가하였으며 고상캡슐이 혼합된 MC-SC의 치유율은 MC 대비 치유재령 7일에서 7.1 %pt, 28일에서 3.0 %pt 증가하였다.

이는 자기치유소재를 단독 사용하였을 때와 유사한 경향으로 박테리아 펠렛을 사용한 MC-BP의 경우 치유재령이 경과함에 따라서 지속적으로 치유율이 향상되는 반면, 고상캡슐을 사용한 MC-SC의 경우 초기 치유재령부터 치유율이 향상되어 치유재령 28일에 가장 높은 치유성능을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 자기치유소재가 복합 사용된 하이브리드 자기치유 콘크리트의 치유성능을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 콘크리트 유동성 측정결과 모든 배합에서 목표슬럼프를 만족하였으며, 박테리아 펠릿을 사용한 콘크리트 배합의 압축강도가 유·무기 혼화재와 고상캡슐을 사용한 배합에 비하여 다소 저하하였다.
2. 자기치유 콘크리트 3종류의 치유율은 초기 균열폭이 0.3 mm일 때 치유재령 28일에서 90 % 이상으로 허용균열폭 0.15 mm를 만족하여, 고내구성과 누수방지가 요구되는 지하구조물, 해양 구조물 및 수리구조물 등에 사용이 가능할 것으로 판단된다.
3. 유·무기 혼화재 기반 하이브리드 자기치유 콘크리트의 치유율은 치유재령 28일 기준 0.3 mm 균열에서 94 % 이상으로 OPC 대비 34 %pt 이상 증가하였지만, 유·무기 혼화재를 단독으로 혼입한 콘크리트 대비 2.1~3.0 %pt 정도 증가하여 치유소재를 복합 사용하는 경우 치유성능 향상에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.
4. 하이브리드 자기치유 콘크리트를 제조하여 실용화하기 위해서는 자기치유소재의 혼합 비율 및 균열유도시기, 장기적인 치유성능평가에 대한 후속 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구산업의 연구비 지원(22SCIP-C158976-03)에 의해 수행되었습니다.

References

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 Korean Recycled Construction Resources Institute, **8(4)**, 581–589 [in Korean].
- Jang, I., Son, D., Ryu, Y.U., Park, W., Yi, C. (2020). Strength and healing performance of the mortar using bacterial pellet as a self-healing material, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **8(1)**, 112–119 [in Korean].
- KDS (2021). Concrete Structure Design of Korean Design Standard, KDS 14 20 00 [in Korean].
- Korea Concrete Institute (2021). Constant Water Head Permeability Test Method for the Evaluation of Self-Healing Performance of Mortar, KCI-CT114 [In Korean].
- Lee, K.M., Kim, H.S., Lee, D.K., Shin, K.J. (2021). Self-healing performance evaluation of concrete incorporating inorganic materials based on a water permeability test, Materials, **14(12)**, 1–17.
- Lee, W.J., Kim, H.S., Choi, S., Park, B.S., Lee, K.M. (2021). Evaluation method of healing performance of self-healing materials based on equivalent crack width, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **9(3)**, 383–388 [in Korean].
- Liu, Y., Zhuge, Y., Fan, W., Duan, W., Wang, L. (2022). Recycling industrial wastes into self-healing concrete: a review, Environmental Research, **214(4)**, 113975.
- Maddela, N.R., Sheng, B., Yuan, S., Zhou, Z., Villamar-Torres, R., Meng, F. (2019). Roles of quorum sensing in biological wastewater treatment: a critical review, Chemosphere, **221**, 616–629.
- Oh, S.R., Nam, E.J., Kang, S.T., Choi, Y.W. (2021). Quality and long-term aged healing properties of self-healing surface protection materials using solid capsules, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **9(3)**, 397–404 [in Korean].
- Pang, B., Zhou, Z., Hou, P., Du, P., Zhang, L., Xu, H. (2016). Autogenous and engineered healing mechanisms of carbonated steel slag aggregate in concrete, Construction and Building Materials, **107**, 191–202.
- Park, D.C., Kwon, H., Lee, J.W., Hwang, M.Y., Kim, T.H. (2021). Performance evaluation of mortar containing mechanochemical treated self-healing admixtures, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **9(3)**, 367–374 [in Korean].

하이브리드 자기치유 소재를 혼입한 콘크리트의 치유성능

본 연구에서는 유·무기계 자기치유재료를 기반으로 박테리아 펠렛과 고상캡슐을 각각 혼입하여 사용한 하이브리드 자기치유 콘크리트의 치유성능을 조사하였다. 치유성능 평가방법으로 정수위 투수시험을 적용하였으며, 평가지표로 치유율과 등가균열 폭에 의해 산출된 치유된 균열폭을 활용하였다. 정수위 투수시험 결과 초기 균열폭이 0.3 mm일 때 MC-BP와 MC-SC의 치유율은 MC와 비교하여 2.1~3.0 %pt 높았으며, 하이브리드 콘크리트의 치유된 균열폭은 0.017~0.018 mm 증가하였다. 결론적으로, 두 가지 치유소재를 함께 사용하더라도 자기치유 성능은 크게 향상되지 않은 것으로 나타났다.