

자기치유형 무기계 혼합재를 사용한 모르타르의 압축강도 및 치유성능

Compressive Strength and Healing Performance of Mortar Using Self-healing Inorganic Materials

김형석¹ · 이웅종² · 최 성^{3*} · 이광명⁴Hyung-Suk Kim¹ · Woong-Jong Lee² · Sung Choi^{3*} · Kwang-Myong Lee⁴

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

In this study, the characteristics of self-healing mortars produced using an inorganic self-healing material consisting of ground granulated blast furnace slag, expansion agent, and anhydrite, were investigated. For three types of self-healing mortars with different amounts of the inorganic healing material, compressive strength was measured and the self-healing performance was evaluated through the constant water head permeability test. The healing rate and equivalent crack width according to crack-induced aging were used as indices of healing performance evaluation. Considering the development of compressive strength of the self-healing mortars, the change in the healing rate with healing periods, and the economic feasibility, the optimal amount of inorganic self-healing materials was suggested as 20 % of the mass of cement.

키워드 : 자기치유 재료, 자기치유 성능평가 방법, 정수위 투수시험, 균열유도재령

Keywords : Self-healing materials, Evaluation method of self-healing performance, Constant water head permeability test, Crack inducing age

1. 서론

콘크리트는 수축, 수화열 및 외력 등에 의해 균열이 발생하는데, 이를 통해 유입되는 수분 및 유해 이온에 의해 콘크리트의 내구성 이 저하된다. 이러한 균열을 스스로 치유시키기 위해 유·무기계 재료, 박테리아, 캡슐 등 다양한 소재를 사용한 자기치유 기술이 개발되고 있다. 그 중 혼화재, 팽창재 등 무기계 재료를 활용하는 자기치유 기술의 경우 수화과정에서 치유소재 일부가 소진되지만, 장기적으로 수화반응에 의해 치유성능이 향상되는 특징을 나타낸다(Park et al. 2020).

무기계 재료 활용 자기치유 기술에서 치유소재로 고로슬래그

미분말 또는 플라이애시를 사용할 경우 미반응 상태의 입자들이 남아있어 균열발생 시 재수화 반응에 의해 지속적으로 치유성능이 향상되고, CSA계 팽창재 및 결정축진제 등을 사용하면 균열부위로 유입된 물에 의해 결정질의 치유물질이 생성 및 침전되어 균열을 충전하게 된다(Van Tittelboom and De Belie 2013; Ahn and Kishi 2010). 또한, 자기치유 콘크리트는 사용재료뿐만 아니라 균열발생 시기가 치유성능에 영향을 미치는데, 치유성능평가 시 초기 재령에서 균열을 유도할 경우 균열 충전 및 자기치유 효과가 향상되는 것으로 나타났다(Jaroenratanapirom and Sahamitmongkol 2010).

본 연구에서는 무기계 혼합재를 사용한 자기치유 모르타르의 압축강도 및 정수위 투수시험을 통해 무기계 혼합재의 최적 사용

* Corresponding author E-mail: csomy1113@naver.com

¹성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (Department of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Sunwon, 16419, Korea)

²한국콘크리트학회 공학연구소 책임연구원 (Research Center, Korea Concrete Institute, Seoul, 06130, Korea)

³성균관대학교 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 책임연구원 (Self-healing green concrete research center, Sungkyunkwan University, Sunwon, 16419, Korea)

⁴성균관대학교 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

량을 제시하였다. 모르타르 시편의 균열유도를 재령 14일, 28일 및 56일에 실시하여 균열유도재령에 따른 치유율과 치유된 균열 폭의 차이를 알아보았다.

2. 실험 연구

2.1 사용재료 및 배합

자기치유 모르타르는 비중 3.15의 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 밀도 2.71 g/cm³, 조립율 2.6인 부순 잔골재를 사용하여 제조하였다. 모르타르의 배합비율은 Table 1과 같으며, 무기계 혼합재의 사용량에 따라 SH10, SH20, SH30으로 구분하였다. 무기계 혼합재는 고로슬래그 미분말, 팽창재 및 무수석고가 3 : 2 : 1의 비율로 혼합된 것을 사용하였다.

Table 1. Mixing ratio of mortars and physical properties of used materials

	Mixing ratio				Physical property	
	W	C	SHm*	Sand	Density (g/cm ³)	Blain (cm ² /g)
OPC	0.4	1.0	-	2.0	3.15	3,240
SH10	0.4	0.9	0.1	2.0	2.83	4,430
SH20	0.4	0.8	0.2	2.0	E.A.*	3,680
SH30	0.4	0.7	0.3	2.0	Anhydrite	3,190

E.A.* : Expansion agent

2.2 균열시편 제작

정수위 투수시험에 사용한 균열시편의 제작 및 균열측정은 한국콘크리트학회 제규격인 KCI-CT114 ‘모르타르의 자기치유 성능평가를 위한 정수위 투수시험방법’ (Korea Concrete Institute 2021)에 준하여 수행하였다. 시편의 균열유도재령은 14일, 28일 및 56일이었고, 목표균열폭은 0.20~0.30 mm를 만족하도록 균열시편을 제작하였다(Lee et al, 2021a).

2.3 시험방법

2.3.1 압축강도

자기치유 모르타르의 압축강도를 측정하기 위하여 KS L ISO 679에 따라 40 * 40 * 160 mm의 각주형 시험체를 제작하여 20 ± 1 °C에 수중양생하였으며, 재령 3, 7, 14, 28, 56, 91일에 압축강도를 측정하였다.

2.3.2 정수위 투수시험

정수위 투수시험은 KCI-CT114에 준하여 치유재령(Healing period, HP) 0, 7, 14, 21, 및 28일에 수행하였다. 치유재령 0일의 단위유출수량과 균열폭의 관계를 나타내는 식 (1)에 의해 상수 α 값을 도출하였다. 정수위 투수시험에 의한 치유율은 치유재령에 따른 단위유출수량의 감소율로 식 (2)에 의해 구하였으며, 여기서 단위유출수량은 분당 유출수량을 균열길이로 나눈 값을 사용하였다(Lee et al, 2021b).

$$q = \alpha w^3 \tag{1}$$

$$SH_q = \left[1 - \frac{q_t}{q_0} \right] \times 100 \tag{2}$$

여기서, SH_q는 치유율(%), q₀는 치유재령 0일의 단위유출수량(ml/(min*mm)), q_t는 치유재령 t일의 단위유출수량(ml/(min*mm))이다.

균열시편은 치유재령이 경과함에 따라 균열부위에 치유물질이 생성되어 균열폭이 점차 감소되는데, 이때 가상균열폭인 등가균열폭은 식 (1)의 단위유출수량과 상수 α를 이용하여 식 (3)에 의해 산출할 수 있다. 또한, 치유재령 t일에서 치유된 균열폭은 식 (4)에 의해 치유재령 0일과 t일의 등가균열폭의 차이로 얻어진다.

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

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

여기서, $\bar{w}_{h,(t)}$ 는 치유재령 t일에서 치유된 균열폭(mm), \bar{w}_0 는 치유재령 0일의 등가균열폭(mm), $\bar{w}_{(t)}$ 는 치유재령 t일의 등가균열폭(mm)이다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 압축강도

자기치유 모르타르의 재령별 압축강도 측정결과를 Table 2에 나타내었다. 무기계 혼합재를 사용한 배합의 3일 압축강도는 OPC 대비 약 0.5~2.2 MPa 작았으나, 재령 7일 이후 역전되어 재령 28일에서는 8.6~12.8 %, 재령 56일에서는 19.6~24.1 % 증가하였

Table 2. Test results of compressive strength

Type	Compressive strength (MPa)					
	3d	7d	14d	28d	56d	91d
OPC	33.7	37.3	43.1	49.8	54.9	57.9
SH10	33.2	39.2	47.5	56.2	63.8	69.2
SH20	32.6	38.8	46.7	55.0	63.9	70.5
SH30	31.5	37.7	45.4	54.1	64.3	71.8

다. SH30의 28일 압축강도는 SH10과 비교하여 2.1 MPa 낮았지만, 재령 56일 및 91일의 압축강도는 각각 0.5 MPa, 2.6 MPa 큰 결과를 나타냈다.

Fig. 1은 재령 28일의 압축강도를 기준으로 각 재령별 강도발현율을 나타낸 것이다. 재령 91일에서 강도발현율은 OPC의 경우 116.1%이며, 무기계 혼합재를 사용한 배합은 OPC 대비 약 6.9~16.6 %pt 높은 것으로 나타났다.

일반적으로 고로슬래그 콘크리트는 고로슬래그 미분말의 잠재수경성에 의해 일반 콘크리트와 비교하여 초기강도 발현율이 낮고, 장기강도 발현율이 우수하다고 보고된 바 있다 (Architectural Institute of Japan 1996). 또한, 고로슬래그 미분말의 자극제로 사용된 무수석고는 반응성이 낮아 재령이 경과하여도 지속적으로 에트린자이트가 생성됨에 따라 미세조직이 치밀해져 장기재령에서 압축강도가 향상되는 것으로 판단된다 (Moon et al, 2014).

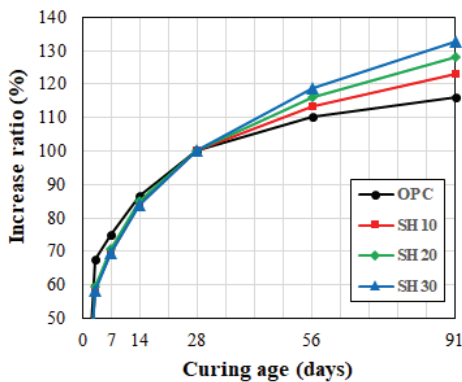


Fig. 1. Development of compressive strength with curing age

3.2 정수위 투수시험 결과

3.2.1 균열폭과 단위유출수량의 관계

Fig. 2에 4종류 모르타르 시편을 대상으로 치유재령 0일에서 측정된 균열폭과 단위유출수량의 관계를 나타내었다. 식 (1)과 같

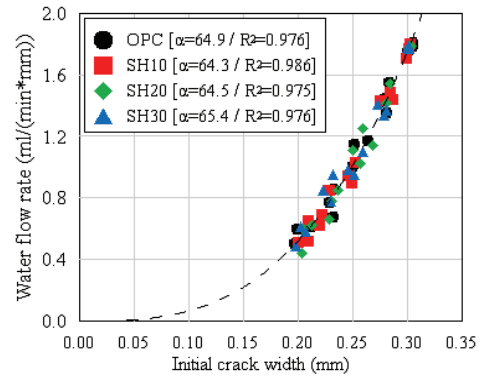


Fig. 2. Relationship of crack width and water flow rate

이 단위유출수량은 균열폭의 세제곱에 비례하는 경향을 나타냈으며, 이때 신뢰도 지수 R^2 는 0.975 이상으로 높은 상관관계를 보였다. 상수 α 는 OPC의 경우 64.90이었으며, SH10, SH20, SH30은 각각 64.3, 64.5, 65.4로 치유소재 사용 유무에 관계없이 유사한 경향을 나타냈다.

이는 일반적으로 균열 표면의 조도계수가 커질수록 상수 α 와 단위유출수량은 증가하게 되는데 본 실험에서 사용한 무기계 혼합재는 OPC와 같은 분말 형태로서 사용량이 증가하더라도 조도계수에 거의 영향을 미치지 않았기 때문에 판단된다.

3.2.2 치유소재 사용량과 균열유도재령에 따른 치유율

Fig. 3은 OPC와 3종류의 자기치유 모르타르의 치유율을 나타낸 것으로, 균열유도재령 14일, 28일 및 56일의 균열폭 0.30 mm에 해당하는 실험결과를 비교하였다.

Fig. 3(b)는 균열유도재령 28일의 정수위 투수시험 결과로서 OPC의 치유율은 52.0%인 반면, SH10, SH20 및 SH30의 치유율은 각각 88.3, 93.3, 98.3%로 OPC의 치유율 대비 약 36.3~46.3 %pt 향상되었음을 알 수 있다. 또한, 치유율은 치유재령 14일 이전에 90% 이상 발현되는 것으로 나타났다.

OPC와 비교하여 자기치유 모르타르의 치유율이 높은 요인은 균열이 발생되었을 때 무기계 혼합재에서 사용한 팽창제가 반응하여 에트린자이트를 생성하고, 무수석고에 의해 결정성장이 촉진되어 육간판상의 수산화칼슘 결정을 생성함과 동시에(Choi et al, 2022), 미반응 상태의 고로슬래그 미분말이 높은 pH환경에서 수분공급에 의한 재수화 반응 등 세가지 현상에 의하여 자기치유 모르타르의 치유율이 향상된 것으로 판단된다(Huang et al, 2014).

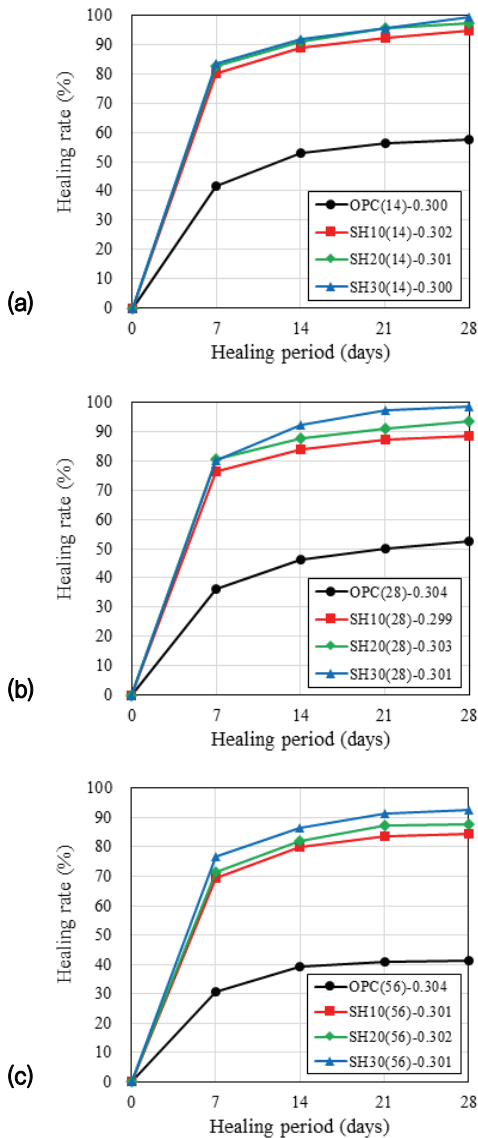


Fig. 3. Healing period vs. healing rate of selected specimens at cracking age (a) 14 days, (b) 28 days, (c) 56 days

균열유도재령이 14일, 28일 및 56일로 증가할수록 치유재령 28일의 치유율은 감소하는 경향을 나타냈다. OPC의 경우 균열유도 재령이 14일에서 56일로 늦어짐에 따라 치유재령 28일의 치유율은 16.4 %pt 감소한 반면, SH10과 SH30은 동일한 기준에서 각각 10.2 %pt와 6.7 %pt 감소하였다. 균열유도재령이 늦어짐에 따라서 치유율이 감소되는 이유는 조기 재령에 균열유도 시 장기재령과 비교하여 모르타르 매트릭스 내에 미반응성 물질이 더 많이 존재하기 때문에 균열로부터 유입되는 물에 의해 미반응상태의 시멘트와 팽창재 등이 추가적인 수화반응을 일으켜 치유물질의 생성량이 증가하므로, 균열유도재령 14일의 경우 56일과 비교하여 치유율

이 더 높게 나타나는 것으로 판단된다(Choi et al, 2020).

3.2.3 초기균열폭과 치유된 균열폭의 관계

Fig. 4에 균열유도재령이 56일인 경우, SH10과 SH30 균열시편을 광학현미경으로 촬영한 치유 전·후의 균열사진을 비교하여 나타내었다. Fig. 4(b)는 SH10의 치유된 균열사진으로 균열의 경계면에 치유물질이 결정화되어있을 뿐 완전히 채워지지 않았지만, Fig. 4(d)의 SH30의 경우 치유물질에 의해 균열부위가 완전히 채워진 것이 관찰되었다. 치유재령이 경과할수록 균열부위에 치유물질이 생성됨에 따라 균열폭은 점차 감소하는데 이를 정량적으로 평가하기 위하여 Table 3에 균열폭 0.20과 0.30 mm의 단위유출수량, 치유율 및 등가균열폭을 나타내었다. 치유재령 0일에서 식 (3)에 의해 구한 등가균열폭은 실제 측정된 균열폭과 비교하여 -0.3~1.1 %의 범위로 매우 유사한 결과를 얻었다.

균열유도재령이 증가할수록 치유재령 28일의 등가균열폭은 증가하는 경향을 보였는데, 이는 식 (4)에 의해 치유재령 0일과 28일의 등가균열폭 감소량인 치유된 균열폭이 감소하는 것을 의미한다. 균열유도재령 28일에서 초기균열폭이 0.20 mm와 0.30 mm일 때 치유된 균열폭은 OPC의 경우 약 0.058 mm, 0.067 mm이었으며, SH30은 0.148 mm, 0.224 mm로 OPC의 치유된 균열폭 대비 약 2.5~3.3배 향상되는 것으로 나타났다. 이를 통해 초기균열폭이 클수록 치유된 균열폭이 감소함을 확인하였으며, 시험한 모든 시편을 대상으로 균열유도재령에 따른 초기균열폭과 치유된 균열폭의 관

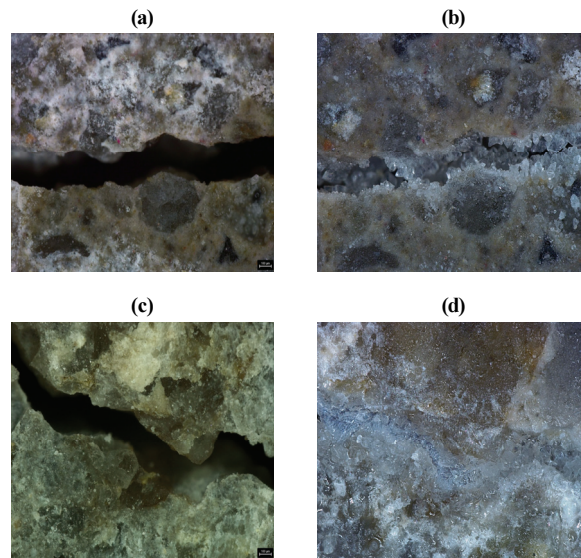


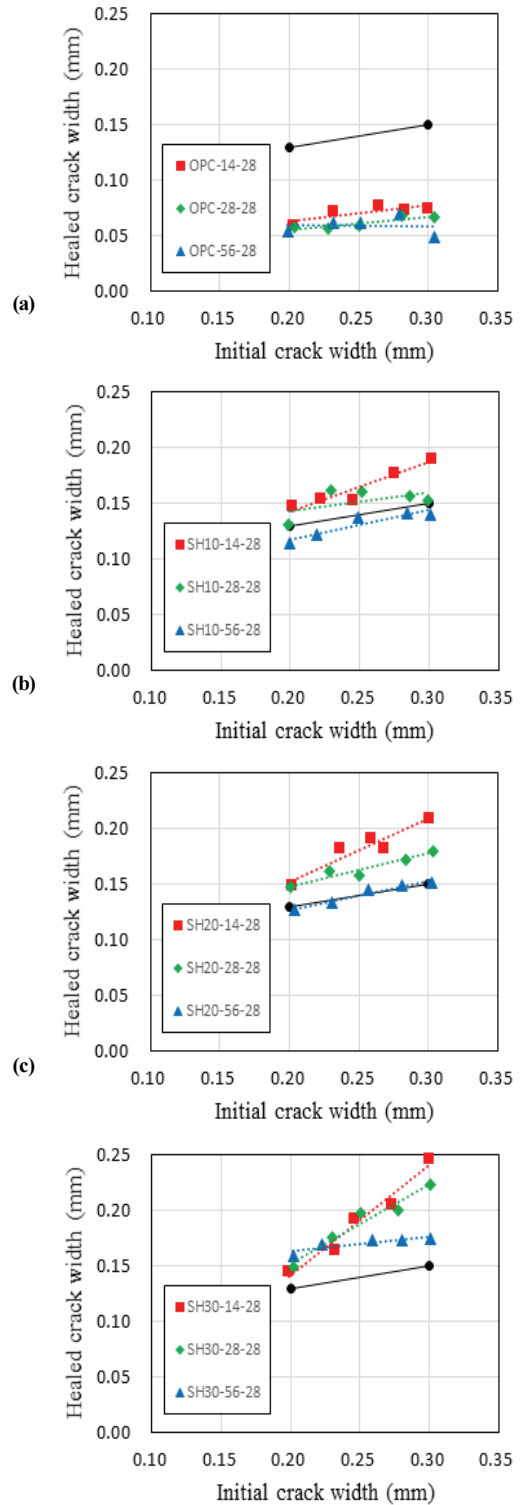
Fig. 4. Comparison before and after healing of surface cracks at cracking age 56 days (a) SH10-HP 0d (b) SH10-HP 28d, (c) SH30-HP 0d, (d) SH30-HP 28d

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

Classification			q (ml/(min*mm)) Eq. (1)		SH _q (%) Eq. (2)		\bar{w} (mm) Eq. (3)	
Cracking age	Type	Width (mm)	HP 0d	HP 28d	HP 14d	HP 28d	HP 0d	HP 28d
14d	OPC	0.203	0.54	0.19	59.1	64.7	0.203	0.143
		0.300	1.75	0.74	53.1	57.7	0.301	0.225
	SH10	0.201	0.52	0.01	90.5	98.1	0.201	0.054
		0.302	1.80	0.09	88.9	94.9	0.303	0.112
	SH20	0.202	0.53	0.01	90.6	98.1	0.202	0.054
		0.298	1.77	0.05	91.0	97.2	0.301	0.092
	SH30	0.199	0.51	0.01	94.1	98.0	0.199	0.054
		0.300	1.78	0.01	92.1	99.4	0.302	0.054
28d	OPC	0.204	0.55	0.20	54.9	63.1	0.204	0.146
		0.304	1.79	0.86	45.8	52.4	0.303	0.237
	SH10	0.199	0.51	0.02	90.2	96.1	0.199	0.068
		0.299	1.71	0.20	83.6	88.4	0.298	0.146
	SH20	0.201	0.53	0.01	94.3	98.1	0.201	0.054
		0.303	1.79	0.12	87.7	93.3	0.302	0.123
	SH30	0.202	0.53	0.01	96.3	98.1	0.202	0.054
		0.301	1.77	0.03	92.1	98.3	0.301	0.077
56d	OPC	0.199	0.51	0.19	53.1	61.6	0.199	0.145
		0.304	1.81	1.06	39.2	41.4	0.304	0.255
	SH10	0.200	0.52	0.04	82.6	92.2	0.200	0.085
		0.299	1.77	0.27	80.2	84.7	0.302	0.161
	SH20	0.204	0.55	0.03	90.9	94.5	0.204	0.077
		0.302	1.82	0.22	82.1	87.7	0.304	0.151
	SH30	0.202	0.53	0.01	88.8	99.1	0.202	0.043
		0.301	1.79	0.13	86.6	92.7	0.302	0.126

계를 Fig. 5에 나타내었다. 이때 초기균열폭이 0.20 mm 및 0.30 mm인 경우 각각 0.13 mm와 0.15 mm를 치유재령 28일의 치유된 균열폭의 목표치로 가정하여 검은색 선으로 나타내었다.

Fig. 5(a)에 따르면, OPC의 치유된 균열폭은 초기균열폭과 균열유도재령에 관계없이 0.10 mm 미만으로 목표치에 도달하지 못하는 것으로 나타났다. 반면에 치유소재가 혼합된 SH10, SH20 및 SH30은 균열유도재령 14일에서는 목표 치유된 균열폭에 도달하였으나 균열유도재령이 56일로 증가함에 따라 SH10은 초기균열 폭 0.20 mm와 0.30 mm에 대하여 0.115 mm와 0.140 mm로 목표치에 도달하지 못하였다. 하지만 SH20과 SH30은 균열유도재령 56 일에서도 목표치에 도달하였는데, 그 중 SH30은 균열유도재령 56 일에서 초기균열폭 0.30 mm의 경우 0.175 mm로 목표치 대비 0.025 mm 초과하였다. 자기치유 모르타르에서 무기계 혼합재의 사용량이 증가할수록 치유된 균열폭 또한 증가하였는데, 이는 균



(d) Fig. 5. Initial crack width vs. healed crack width for four mixtures (a) OPC, (b) SH10, (c) SH20, (d) SH30

열면에 존재하는 미수화 상태의 무기계 혼합재가 재수화 반응을 통해 생성한 장섬유의 에트린자이트와 상대적으로 부피가 큰 수산 화칼슘의 생성에 의한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 치유소재 사용량과 균열유도재령에 따른 자기치유 모르타르의 압축강도 및 치유성능 평가시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 무기계 자기치유 소재 사용 시 고로슬래그 미분말의 잠재수경성과 무수석고의 느린 반응성에 의해 재령 28일 이후에서도 압축강도가 지속적으로 발현되는 것으로 나타났다.
2. 정수위 투수시험 결과 균열유도재령이 증가할수록 치유율은 감소되었지만, SH30의 경우 균열재령 56일에서도 균열부에 미반응 상태로 존재하는 무기계 혼합재의 재수화반응에 의해 치유율이 90 % 이상으로 크게 나타났다.
3. 자기치유 모르타르의 압축강도와 균열유도재령에 따른 치유율 및 경제성을 고려하여 무기계 혼합재의 최적 사용량을 시멘트 질량대비 20 %로 제안하였다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(22SCIP-160254-03)에 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.

Architectural Institute of Japan. (1996). Recommendation for practice of concrete make use of ground granulation blast

furnace slag, Architectural Institute of Japan, 25-52.

Choi, Y.W., Nam, E.J., Kim, C.G., Oh, S.R. (2020). The crack healing properties of cement mortar materials using crystal growth type self-healing solid capsules according to the crack induction age, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **8(4)**, 475-482 [in Korean].

Choi, Y.W., Nam, E.J., Kim, C.G., Oh, S.R. (2022). An experimental study on crack self-healing and mechanical recovery performance of cement composites materials using encapsulated expandable inorganic materials based solid healing materials, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **10(1)**, 92-100 [in Korean].

Huang, H., Ye, G., Damidot, D. (2014). Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, **60**, 68-82.

Jaroenratanapirom, D., Sahamitmongkol, R. (2010). Effects of different mineral additives and cracking ages on self-healing performance of mortar, *Proceedings of the 6th Annual Concrete Conference*, 551-556.

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. (2021a). 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. (2021b). 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].

Moon, G.D., Kim, J.H., Cho, Y.K., Choi, Y.C. (2014). Effect of anhydrite on the mechanical and durability properties of high volume slag concrete, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **2(3)**, 239-246 [in Korean].

Park, B.S., Choi, S.C., Hong, G.T., Kwon, H. (2020). Technology and practical application of self-healing concrete incorporating organic/inorganic materials, *Magazine of Korea Concrete institute*, **32(5)**, 10-14 [In Korean].

Van Tittelboom, K., De Belie, N. (2013). Self-healing in cementitious materials - A review, *Materials*, **6(6)**, 2182-2217.

자기치유형 무기계 혼합재를 사용한 모르타르의 압축강도 및 치유성능

본 연구에서는 고로슬래그 미분말, 팽창재 및 무수석고로 이루어진 무기계 자기치유 소재를 사용하여 제조한 자기치유 모르타르의 특성을 조사하였다. 무기계 치유재료의 사용량이 다른 3종류의 자기치유 모르타르를 대상으로 압축강도를 측정하고 정수위 투수시험을 통하여 치유성능을 평가하였다. 치유성능 평가지표로 균열유도재령에 따른 치유율과 등기균열폭을 활용하였다. 자기치유 모르타르의 압축강도 발현, 치유재령에 따른 치유율 변화와 경제성을 고려하여 무기계 혼합재의 최적 사용량을 시멘트 질량 대비 20 %로 제안하였다.