

기계·화학 처리 자기치유 혼화재가 포함된 모르타르의 성능평가

Performance Evaluation of Mortar Containing Mechanochemical Treated Self-Healing Admixtures

박동철¹ · 권혁^{2*} · 이정우³ · 황무연⁴ · 김태형⁵

Dong-Cheol Park¹ · Hyuk Kwon^{2*} · Jung-Woo Lee³ · Moo-Yeon Hwang⁴ · Tae-Hyung Kim⁵

(Received August 18, 2021 / Revised September 9, 2021 / Accepted September 9, 2021)

In this study, the applicability of mechanochemical process for the manufacture of self-healing admixtures and the effect of mechanochemical process on the self-healing performance were evaluated. The self-healing admixtures were adopted as a highly reactive materials(expansive agent, swelling material and crystal growth agent) for mechanochemical processes.

The self-healing admixtures for the mechanochemical process application were evaluated by X-Ray Diffraction and Fourier Transform Infrared Spectroscopy analysis, water permeability performance was used to evaluate self-healing performance of mortar. As a result of the evaluation, the self-healing performance of the WM(With-Mortar)₃ sample to which mechanochemical process increased by 4.1% compared to the WM₁ sample that was not treated, and the average healing index was 94.3%.

키워드 : 기계·화학, 자기치유, 치유율, 단위유출수량

Keywords : Mechanochemical, Self-healing, Healing-index, Water flow rate

1. 서론

자기치유 콘크리트(Self-healing concrete)는 콘크리트 구조물에 혼합된 자기치유 소재가 균열을 스스로 치유하여 장기적으로 구조물의 내구성을 유지하게 하며, 초기균열 발생을 억제함과 동시에 지속적인 콘크리트의 균열 완화 성능을 갖는 새로운 개념의 미래형 건설재료로 알려져 있다(Lee and Park 2019). 자기치유 소재는 콘크리트 제작 시 첨가하여 사용하며 시멘트 수화 반응 및 양생 과정에서 지속적으로 치유성능을 발휘하여 구조물의 내구성을 증가시킴으로써 유지보수 효과가 뛰어난 재료로 인식되고 있다(Ahn and Kishi 2010).

자기치유 소재는 팽창, 축진, 방수, 결정성장 등의 특성을 고려하여 선정하게 되며, 이와 더불어 치유 소재의 혼합량, 배합설계, 전처리 등 다양한 공정 변수를 활용하여 치유성능이 향상될 수

있으며 특히 치유성능 극대화를 위한 방안으로 효과적인 전처리 기술을 생각해 볼 수 있다(Balaz 2008). 이러한 전처리 방법 가운데 하나로 분쇄에너지를 소재 활성 에너지로 전환하는 기술이 활발히 연구되고 있다(Ryu 1997).

메카노케미칼(Mechanochemical, MC 이하, 기계·화학적으로 약함) 공정기술은 기계적 외력에 의해 물질을 미세화하는 과정으로 분쇄 입도 감소, 비표 면적 증가에 따른 분쇄에너지 효율을 높이기 위한 전처리 기술로 투입에너지 중 분쇄에 관여하는 에너지는 전체 투입에너지의 1%에 지나지 않는 것으로 받아들여지고 있다(Zhang and Saito 2012). 또한, 이렇게 소비되는 분쇄 공정 에너지를 활용하여 재료의 입도뿐만 아니라 결정구조와 계면 상태 및 주변 물질과의 화학반응 등에 영향을 주어 개질이 가능하다는 연구가 꾸준히 진행되면서 메카노케미스트리(Mechanochemistry)라는 신개념 기술이 개발되었다(Heinicke 1984).

* Corresponding author E-mail: kwon80@withmtech.com

¹㈜위드엠텍 대표이사 (WITH M-TECH Co., Ltd., Suwon, 16229, Korea)

²㈜위드엠텍 기술연구소 차장 (WITH M-TECH Co., Ltd., Suwon, 16229, Korea)

³㈜위드엠텍 기술연구소 부장 (WITH M-TECH Co., Ltd., Suwon, 16229, Korea)

⁴㈜위드엠텍 기술연구소 차장 (WITH M-TECH Co., Ltd., Suwon, 16229, Korea)

⁵㈜위드엠텍 기술연구소 과장 (WITH M-TECH Co., Ltd., Suwon, 16229, 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

본 논문에서는 기계·화학적 공정기술을 자기치유 혼화재에 적용하여 기계·화학 에너지의 전환 과정을 통해 소재의 활성화 및 개질 반응을 유도하여 치유 성능 향상이 가능할 것으로 판단하였다. 따라서 기계·화학적 공정기술을 자기치유 혼화재 제조기술로 활용하여 기계·화학적 처리가 자기치유 혼화재에 미치는 영향을 평가하고 이를 적용한 자기치유 모르타르의 치유 성능을 검토하고자 한다.

2. 실험 방법 및 내용

2.1 실험 개요

본 연구에서는 자기치유 혼화재(Self-Healing Admixtures 이하, SHA로 약함)의 기초 선행연구를 바탕으로 기계·화학처리 시간에 따른 자기치유 혼화재의 기초분석 및 자기치유 성능평가를 진행하였다.

기계·화학적 처리 전 자기치유 혼합물의 기초 선행실험(Fig. 1)을 통해 자기치유 성능이 우수한 마그카본(MgO-C)을 자기치유 혼화재의 주요 구성물로 선정하여 최적 배합을 결정한 후 공정시간에 따른 치유 성능 변화를 확인하였다. 또한, 공정처리가 자기치유 혼화재에 미치는 영향을 평가하기 위한 기초분석은 X선 회절(XRD) 및 적외선 분광법(FT-IR)을 활용하였으며, 자기치유 성능평

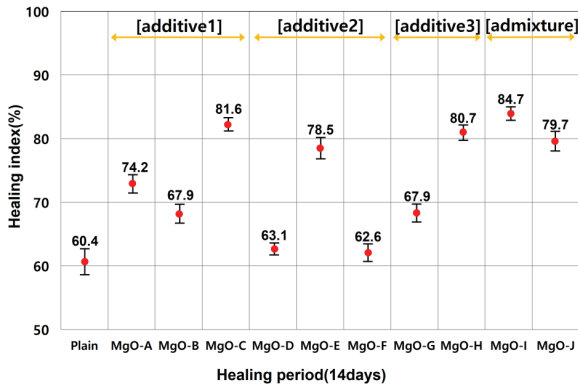


Fig. 1. MgO-C based healing index

Table 1. Mechanochemical process conditions

Type	Mechanochemical process time(min)	SHA (kg)	Media (SHA×vol%)
MC0	0	2.5	30
MC120	120		
MC360	360		

가는 Table 1과 같이 제조된 자기치유 혼화재를 모르타르 배합하여 투수감소율을 통한 치유 성능을 평가하였다.

2.2 메카노케미칼 처리 자기치유 혼화재

자기치유 혼화재(Fig. 2)는 초기균열 억제 기능의 재료들로 구성되어 있으며, 마그카본을 포함하는 팽창/팽윤제, 탄산염축진제 및 무기염 첨가제를 4:1:1의 비율로 혼합하여 사용하였다. 혼화재의 배합은 초기균열 저감 및 결정성장 축진을 유도하기 위해 팽창/팽윤제를 주요 구성물로 혼입하고 탄산염축진제와 무기염첨가제를 기타 첨가제로 혼입하여 기계·화학적 처리에 의한 소재의 활성화도 및 개질화 반응을 유도했다.

기계·화학적 처리는 세라믹 포트에 자기치유 혼화재와 세라믹 볼(Ceramic media)을 투입하여 처리하였으며, 기계·화학적 처리 공정을 진행하지 않는 자기치유 혼화재 MC0 와 각각 120분, 360분 공정을 진행한 시료를 MC120, MC360로 구분하였다.



Fig. 2. Mechanochemical treated self-healing admixture

기계·화학적 처리공정 시간은 소재의 응집 및 입자 내부의 응력 완화작용으로 발생하는 분쇄평형 현상(Tanaka 1954)을 기준으로 하였으며, 해당 현상은 소재가 기계적 힘에 의해 분쇄될 때, 미세화된 입자가 응집 등에 의해 더 이상 입자 미세화가 되지 않는 상태를 말하는 것으로 기계·화학적 처리공정이 자기치유 혼화재에 미치는 영향을 직관적으로 비교분석 할 수 있는 MC120 과 MC360으로 제조하여 시험하였다.

$$\frac{dS}{dE} = k(S_{\infty} - S) \quad (1)$$

여기서, $\frac{dS}{dE}$ 는 분쇄에너지 효율을 나타낸 값으로 투입에너지 변화량(dE)에 대한 비표면적 변화량(dS)이며, S_{∞} 는 분쇄한계에

도달했을 때의 비표면적, s 는 분쇄한계에 도달하기 전의 비표면적, k 는 분쇄 대상물의 성질 및 분쇄조건에 의해 정해지는 상수이다.

식 (1)에서 ($s_{\infty} - s$)의 값이 작아질수록 분쇄한계에 근접한 것이며, 분쇄에너지 효율은 작아진다. 또한, s_{∞} 값이 s 값과 같아질 때 분쇄에너지 효율은 제로이므로 이후에 가해진 에너지는 입자의 운동과 마찰, 결정화 및 열함량 변화 등에 소비되어 분쇄 자체가 진행되지 않는다는 것을 나타낸다(Shin 2000).

Fig. 3에 도식화된 기계·화학적 처리과정 1단계는 자기치유 소재의 입도 미세화 및 활성도가 증가하는 단계로 2단계 공정에서의 치유 소재 반응성을 증가시켜 자기치유 혼화제의 신규반응생성물 제조가 이루어진다. 또한, 선별/분급 3단계공정을 통해 미반응 혼화제의 추가 반응 유도과 치유성능이 최적화된 기계·화학 처리과정 자기치유 혼화제 (Mechano-Chemical Admixtures 이하, MCA으로 약함)를 제조할 수 있다.

2.3 자기치유 모르타르 시편 제작

자기치유 모르타르는 시멘트 중량의 5%를 자기치유 혼화제로 치환하여 사용하였으며 밀도 3.06g/cm³, 분말도 3,880cm²/g 및 0.5%의 강열감량을 갖는 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement, 이하 C로 약함)를 사용하였다(Table 2). 잔골재(S)는 조립률(F.M.) 2.79, 밀도 2.62g/cm³의 강모래를 사용하였으며(Table 3), 혼합수(W/C)는 시멘트 질량 대비 45%를 사용하였다.

기계·화학적 처리공정 시간에 따른 자기치유 혼화제의 치유성능 변화를 확인하기 위해 Table 4와 같이 모르타르 공시체를 제작하여 정수위 투수시험을 실시하였으며, 자기치유 혼화제를 사용하지 않은 Plain과 기계·화학 처리공정을 하지 않은 자기치유 혼화제 첨가 모르타르 WM1, 각각 120분, 360분 공정 진행한 자기치유 혼화제 첨가 모르타르를 WM2, WM3로 구분하여 제조하였다.

Table 2. Physical properties of cement

Type	L.O.I (%)	Surface area (cm ² /g)	Density (g/cm ³)
C	0.03	3,880	3.06

Table 3. Physical properties of fine aggregate

Type	F.M	Density (g/cm ³)	Absorption (%)
S	2.79	2.62	2.33

Table 4. Mix proportion of mortar mixtures

Type	W/C	C	S	MCA
Plain	0.45	1	2	0
WM1				0.05
WM2				
WM3				

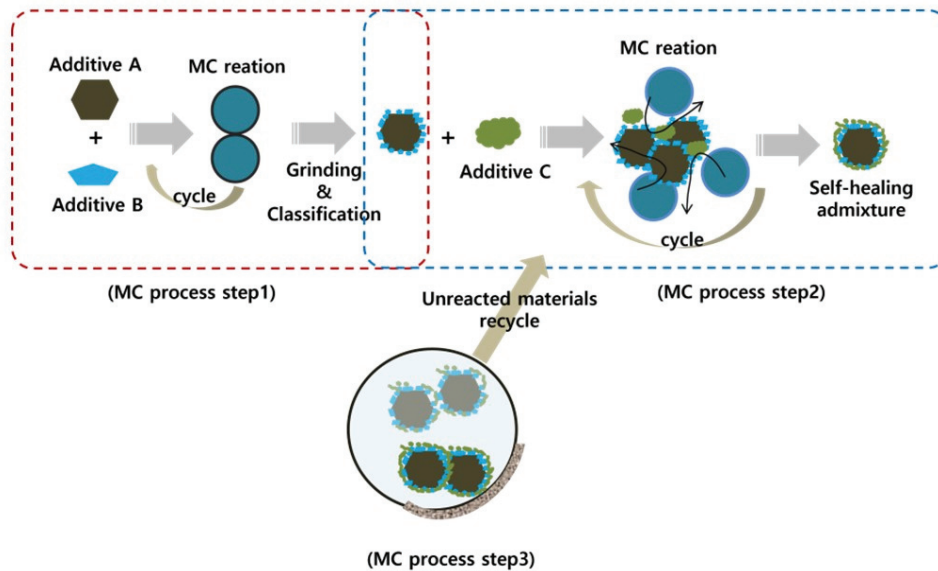


Fig. 3. Mechanochemical process for self-healing admixtures

2.4 시험방법

자기치유 모르타르의 치유성능 평가를 위해 시험체는 $\varnothing 100 \times 200 \text{mm}$ 원주형 공시체로 제작하고, 온도($20 \pm 3^\circ\text{C}$), 습도($60 \pm 5\%$) 조건의 항온항습기에서 24시간 양생한 후 공시체를 탈형하였다. 이후 치유 시작 재령일까지 습윤양생 후 두께 $50 \pm 2 \text{mm}$ 가 되도록 절단하여 디스크형 시험체를 제작하고 Fig. 4와 같이 유도 균열(a)을 발생시킨 후 균열폭을 $0.30 \pm 0.05 \text{mm}$ 가 되도록 균열 시험체를 제작(b)하여 치유 재령 0일, 7일, 14일에 정수위 투수시험(c)을 통해 치유성능을 평가하였다.

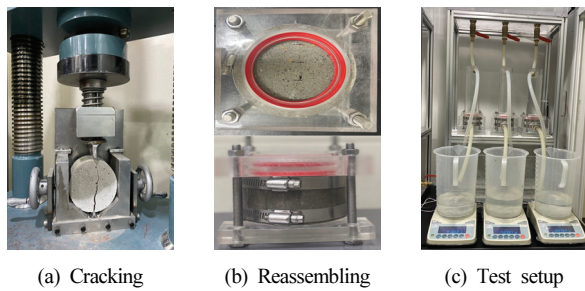


Fig. 4. Self-healing test process

자기치유율은 자기치유 혼화재가 첨가된 모르타르의 치유재령 0일을 기준으로 치유재령 t 일의 단위유출수량 감소율로 식 (2)과 같이 치유율을 계산할 수 있다.

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

여기서, SH_q 는 치유율, q_0 는 치유재령 0일의 단위 유출수량, $q(t)$ 는 치유재령 t 일의 단위 유출수량이다. 이때 단위 유출수량 ($\text{ml}/\text{min} \cdot \text{mm}$)은 균열시편의 분당 유출수량을 균열길이(mm)로 나눈 값이다(Lee et al. 2020).

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기계·화학 처리 자기치유 혼화재 특성

3.1.1 XRD 분석시험

기계·화학적 처리공정에 따른 치유 소재의 활성화 및 개질에 의한 결정구조 변화를 검토하기 위해 주요 구성물로 사용되는 마그네시아(MgO) 결정을 특정하여 X선 회절 변화를 분석하였다(Fig. 5). 자기치유 혼화재의 구성물로 사용한 마그카본과 탄산염

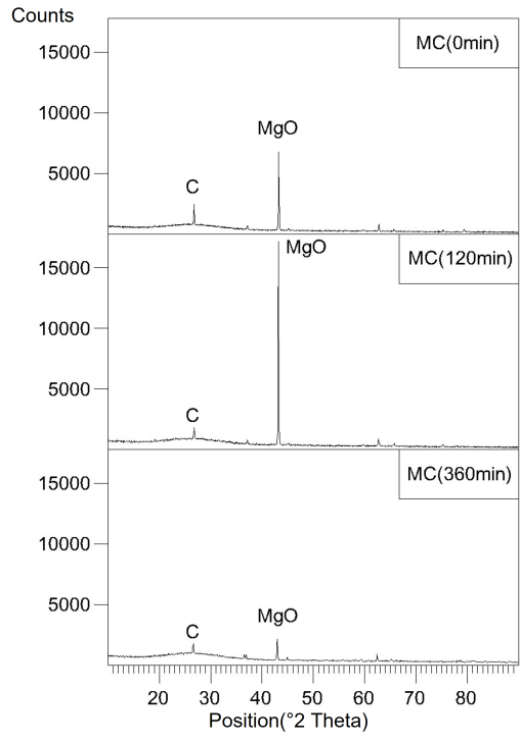


Fig. 5. X-ray diffraction pattern of MCA samples

촉진제와의 상호 결정성장 촉진(Di Lorenzo et al. 2017)에 따른 소재의 구조 변화와 기계·화학적 처리에 의해 발생하는 기계적 에너지가 화학적 에너지로 전환되면서 자기치유 혼화재 개질화 반응을 일으켜 피크(Peak) 강도 변화를 발생시키므로 이를 분석하여 기계·화학적 처리공정의 영향성을 검토하고자 하였다.

XRD 피크 강도의 변화패턴 분석결과 자기치유 혼화재의 주요 구성물로 사용한 마그카본의 변화가 뚜렷하게 발생하는 것을 확인하였다. 기계·화학 처리공정으로 자기치유 혼화재의 에너지 전환 반응이 발생하여 초기(MC0min) 마그네시아 피크 강도가 6,500(counts)에서 MC120min 시료에서는 17,500(counts)으로 2 배 이상 증가하였으며, 이후 MC360min 시료에서는 마그네시아 피크 강도가 2,500(counts)으로 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 기계·화학적 처리공정으로 인해 발생하는 에너지 전환에 의해 자기치유 혼화재의 활성화 반응이 유도되고 주요 구성물인 마그카본과 기타 첨가제와의 연속적인 기계·화학적 반응으로 마그네시아-카본의 분해, 혼합물의 화학적 반응 및 신규반응생성물로의 개질화 등이 상호 복합적으로 발생하여 MC120min 까지 활성화 및 개질화 반응이 활발히 발생하여 피크 강도가 상승하고 MC360min에서는 치유 소재가 분쇄평형 상태로 진입하면서 피크 강도가 급격하게 줄어든 것이다.

3.1.2 FT-IR 분석시험

자기치유 혼화재의 기계·화학 처리 시간에 따른 FT-IR 확인결과 Fig. 6에서 나타난 것과 같이 $2,396\text{cm}^{-1}$ 에서의 C=O 밴드(bands) 변화와 $1,452\text{cm}^{-1}$ 부근의 C-H 밴드(bands) 변화를 확인하였다(Durgalakshmi, D. 2019, Kaminski, P. 2017).

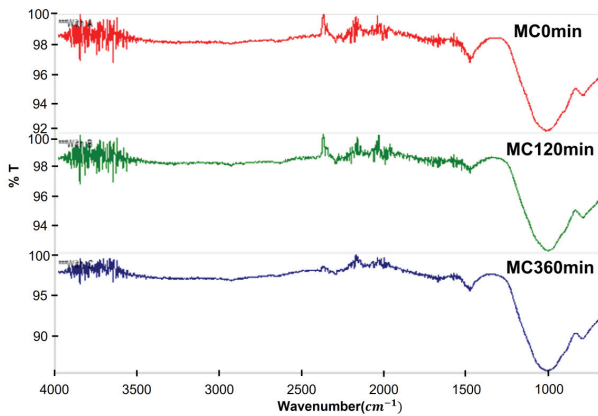


Fig. 6. FT-IR spectra of MCA samples

XRD 분석결과를 통해 확인된 마그카본의 기계·화학적 에너지 전환 반응으로 인해 마그네시아와 카본의 분해가 이루어지고 상호 복합적으로 발생하는 기타 첨가제와의 화학적 반응 결과 기계·화학적 처리공정 시간(MC0min, MC120, MC360min)에 따른 밴드(bands) 변화가 나타나는 것을 확인하였다. 기계·화학적 처리공정으로 인해 발생된 C=O, C-H 결합(bond)이 $2,396\text{cm}^{-1}$, $1,452\text{cm}^{-1}$ 밴드에서 확인되었으며, MC360min 시료에서의 밴드값 감소는 분쇄에너지가 MC0min 및 MC120min에 비해 상대적으로 낮아져 반응 활성도가 줄어들었기 때문이다. 또한, C=O, C-H 결합으로 생성된 신규반응생성물에 의해 자기치유 혼화재의 치유성능에 영향을 주는 것으로 확인되었다.

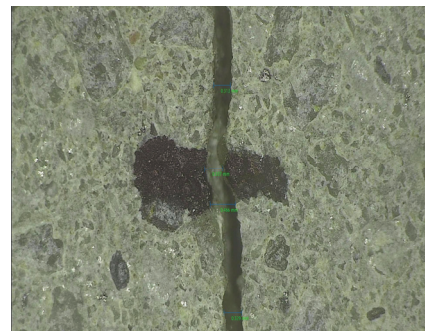
3.2 자기치유 모르타르 성능평가

기계·화학 처리 시간에 따른 자기치유 혼화재의 치유성능 평가를 위해 제시되고 있는 투수시험 시험방법 중 시간에 따른 유출수량을 기준으로 치유성능을 직관적으로 확인할 수 있는 정수위 투수시험방법을 적용하여 치유성능을 평가하였다(Choi et al. 2017). 정수위 투수시험에 의한 자기치유 혼화재의 치유성능 평가를 위해 재령 14일에 목표 균열폭 $0,30\pm 0,05\text{mm}$ 가 되도록 균열 시험체를 제작하고 Table 5와 같이 치유 재령일 0일, 7일, 14일에 단위유출수량(Water flow rate(ml/min*mm))을 측정하여 평균하였다.

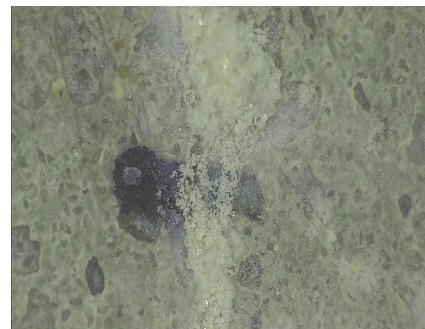
Table 6은 단위유출수량 감소율로 식 (2)를 기준하여 치유재령 7일, 14일에서의 치유율(Healing index)을 계산하여 평균하였다. Fig. 7은 치유재령 14일에서의 자기치유 모르타르의 치유생성물에 의한 균열치유 현상을 나타낸 것이다.

치유재령 0일의 단위유출수량을 기준으로 14일 단위유출수량 감소율을 확인한 결과 Plain 2.8배, WM1 10.4배, WM2 11.5배, WM3 17배 감소된 것으로 확인되었으며, 자기치유 혼화재의 기계·화학 처리공정 시간이 360분일 때 최대 투수감소량을 나타내었다.

Table 6은 계산된 단위유출수량 감소율을 기준하여 모르타르의 치유율(Healing index)을 확인한 결과로 자기치유 혼화재가 첨가된 모르타르의 14일 평균 치유율은 0,922로 Plain의 평균 치유율 대비 44.7%가 증가하였다. 또한, 본 연구 목적인 기계·화학 처리공정이 자기치유 혼화재에 미치는 영향을 확인한 결과 치유재령 14일의 치유율은 공정을 진행하지 않은 자기치유 모르타르(WM1) 기준 WM2(MC120min)는 1.1%, WM3(MC360min)는 4.1%로 각각 치유율 상승 결과가 확인되었다. 또한, 처리공정 시간에 따른 치유율 영향을 WM3(MC360min)이 WM2에 비해 3.7배 치유율 상승을 보였다.



(a) 0 days



(b) 14 days

Fig. 7. Process of crack self-healing for SHA

Table 5. Summary of water flow rate

Mix	Crack width (mm)	Water flow rate(ml/min*mm)		
		0day	7day	14day
Plain	0.308	1.38	0.61	0.51
	0.305	1.48	0.63	0.55
	0.304	1.55	0.67	0.54
avg.	0.306	1.47	0.64	0.53
WM1	0.309	1.25	0.25	0.11
	0.306	1.35	0.26	0.13
	0.305	1.45	0.27	0.14
avg.	0.307	1.35	0.26	0.13
WM2	0.305	1.37	0.25	0.11
	0.303	1.46	0.25	0.12
	0.307	1.63	0.24	0.15
avg.	0.305	1.49	0.25	0.13
WM3	0.304	1.40	0.21	0.07
	0.302	1.51	0.19	0.07
	0.308	1.69	0.30	0.12
avg.	0.305	1.53	0.23	0.09

Table 6. Self-healing test result

Mix	Crack width (mm)	Healing index	
		7day	14day
Plain	0.308	0.556	0.631
	0.305	0.577	0.631
	0.304	0.571	0.650
avg.	0.306	0.568	0.637
WM1	0.309	0.797	0.910
	0.306	0.810	0.907
	0.305	0.811	0.902
avg.	0.307	0.806	0.906
WM2	0.305	0.821	0.921
	0.303	0.832	0.921
	0.307	0.798	0.905
avg.	0.305	0.817	0.916
WM3	0.304	0.851	0.948
	0.302	0.872	0.952
	0.308	0.822	0.928
avg.	0.305	0.848	0.943

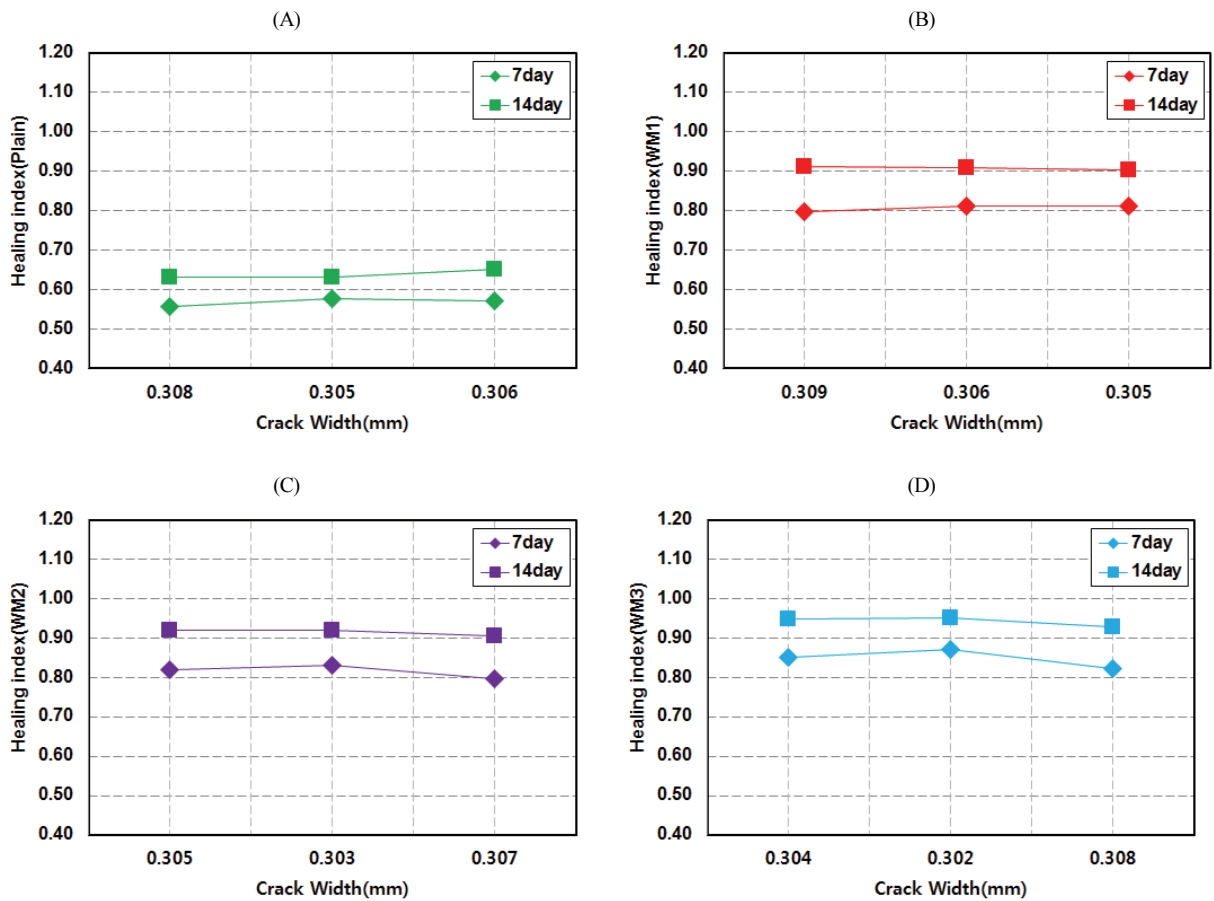


Fig. 8. Healing index vs. crack width of selected specimens: (A) Plain, (B) WM1, (C) WM2, (D) WM3

Fig. 8은 Plain, WM1, WM2, WM3의 자기치유 모르타르의 치유 성능을 나타낸 것으로 자기치유 소재의 기계·화학 처리가 치유율 향상에 미치는 영향을 직관적으로 확인할 수 있다. 기계·화학 공정을 120분 진행한 WM2의 자기치유 혼화재(MC120min)에 비하여 상대적으로 공정시간을 길게 진행한 WM3의 혼화재(MC360min)가 기계·화학적 에너지 전환이 많이 발생하고, 그로 인한 혼화재의 활성화 및 개질화 반응이 증가하여 신규반응생성물의 증가로 이어지고 치유율이 향상되는 결과를 가져온 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 기계·화학 처리공정이 자기치유 혼화재의 치유 성능에 미치는 영향을 확인하기 위한 기초분석과 정수위 투수시험을 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 자기치유 혼화재는 치유성능이 시멘트 모르타르 내에서 팽창/팽윤, 초기균열 억제, 치유생성물의 촉진 및 지속적인 생성 유도가 가능한 소재를 선정하고 이에 더불어 치유성능 향상을 위해 기계·화학적 공정기술을 접목하여 소재의 기본 특성이 유지되면서 치유성능 극대화할 수 있는 자기치유 혼화재를 제조함으로써 자기치유 혼화재 제조를 위한 기계·화학 처리공정 기술의 적용 가능성이 확인되었다.
- 2) 기계·화학 처리공정으로 제조된 자기치유 모르타르 치유성능을 정수위 투수시험으로 확인한 결과 WM3 시료의 치유율이 가장 높았으며, 기계·화학 처리공정을 진행하지 않은 WM1 시료와 120분간 공정을 진행한 WM2 시료 대비 치유율이 각각 4.1% 2.9% 높은 것으로 확인되었다.
- 3) 기계·화학 처리공정이 자기치유 혼화재에 미치는 영향을 확인하기 위해 진행한 기초분석 결과, X선 회절선 변화는 기계·화학적 에너지 전환에 따라 자기치유 혼화재의 활성화도 증가 및 신규반응생성물의 개질화 반응을 피크 강도 변화로 확인하였다. 또한, FT-IR 분석을 통해 기계·화학 처리공정 시간이 증가함에 따라 $2,396\text{cm}^{-1}$, $1,452\text{cm}^{-1}$ 밴드 결합 에너지가 감소하는 현상을 확인하였으며 이는 분쇄평형 상태에 가까워지면서 자기치유 혼화재의 반응 활성화도가 줄어든 영향으로 확인되었다.
- 4) 또한, 본 연구에서 검토하였던 기계·화학 처리공정 시간이 자기치유 혼화재의 미치는 영향 평가와 더불어 공정 처리속도, 공정단계, 배합비 등 공정 변수를 최적화하여 자기치유 소재의 활성화도를 증가시켜 치유성능을 추가적으로 향상시킬 수 있는 것으로 판단하였다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비 지원(21SCIP-C159059-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, T.H., Kishi, T. (2010). Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures, *Journal of Concrete Technology*, **8(2)**, 171-186.
- 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].
- Balaz, P. (2008). *Mechanochemistry in Nanoscience and Minerals Engineering*, Chapter 5, 257-292.
- 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)**, 267-273 [in Korean].
- De Rooij, M., Van Tittelboom, K., De Belie, N., Schlangen, E. (2011). *Self Healing Phenomena in Cement Based Materials*, Draft of State of the Art Report of RILEM Technical Committee, 217-240.
- Durgalakshmi, D., Ajay Rakesh, R., Syed Kamil. (2019). Rapid dilapidation of alcohol using magnesium oxide and magnesium aspartate based nanostructures: a raman spectroscopic and molecular simulation approach, *Journal of inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, **29(4)**, 1390-1399.
- Heinicke, G. (1984). *Tribochemistry*, *Crystal Research and Technology*, **19(11)**, 1424-1424.
- Ryu, H.J. (1997). A study on the mechanochemical effects of dickite, *Korea Journal of Materials Research*, **7(2)**, 152-156 [in Korean].
- Kaminski, P. (2020). The application of FTIR in situ spectroscopy combined with methanol adsorption to the study of mesoporous sieve SBA-15 with cerium-zirconium oxides modified with gold and copper species, *Arabian Journal of chemistry*, **13(1)**, 851-862.
- Putniscu, C.V. (2016). Effect of ferrous iron on the nucleation and

- growth of CaCO_3 in slightly basic aqueous solutions, *CrystEngComm*, **19(3)**, 447–460.
- Lee, K.M., Park, B.S. (2019). State of the art of self healing concrete, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, **31(2)**, 10–14 [in Korean].
- Lee, K.M., Kim, H.S., Min, K.S., Choi, S. (2020). Evaluation method of self-healing performance of cement composites, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **8(1)**, 134–142 [in Korean].
- Shin, H.Y. (2000). A Study on the Mechanochemical Characteristics of the Fine Quartz Product after Planetary Milling, Ph.D Thesis, Geoenvironmental System Engineering of Hanyang University, 7–34 [in Korean].
- 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.
- Simon, S., Wasinton, S., Rudy, S., Agus, R. (2017). Effect of MgO-SiO_2 ratio on the forsterite(Mg_2SiO_4) precursors characteristics derived from amorphous rice husk silica, *Oriental Journal of Chemistry*, **33(4)**, 1828–1836.
- Tanaka, T. (1954). A new concept applying a final fineness value to grinding mechanism, *Chemistry*, **18(4)**, 160–171.
- Xing, F., Zhuo, N., Jiaoning, T., Xu, D. (2013). State of the art of self healing concrete, *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, **30(5)**, 486–494.
- Zhang, Q., Saito, F. (2012). A review on mechanochemical syntheses of functional materials, *Advanced Powder Technology*, **23(5)**, 523–531.

기계 · 화학 처리 자기치유 혼화재가 포함된 모르타르의 성능평가

본 연구는 기계 · 화학적 에너지를 활용하는 메카노케미칼 공정기술을 자기치유 혼화재에 적용하기 위한 목적으로 진행되었다. 기계 · 화학적 공정기술을 자기치유 혼화재 제조 공정에 적용하여 치유 소재의 활성화 에너지를 증가시켜 치유성능에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 자기치유 모르타르에 사용한 자기치유 소재는 팽창/팽윤제를 주요 구성물로 선정하고 탄산염 촉진제와 무기염 첨가제를 기타 첨가제로 혼입하였으며, 기계 · 화학 처리공정 적용에 의한 치유 소재의 활성화도 및 개질화 반응이 가능한 재료로 선택하였다. 기계 · 화학 처리공정에 대한 자기치유 혼화재의 기초평가는 XRD, FT-IR 분석으로 확인하였으며, 자기치유 모르타르의 치유 성능평가는 정수위 투수시험을 이용하여 치유율을 확인하였다. 치유성능 확인결과 기계 · 화학 처리 공정을 적용한 WM3 시료(MC360min)가 공정처리 하지 않은 WM1 시료에 대비 치유성능이 4.1% 증가하였으며, 자기치유율은 평균 94.3%로 확인되었다.