

결정성 염을 포함한 유·무기계 자기치유 소재의 결정 생성 효과에 따른 치유 특성 연구

A Study on the Self-healing Properties of Inorganic-organic Additives with Recycling Sodium Acetate

박동철¹ · 권혁^{2*} · 황무연³ · 김태형⁴ · 이강범⁵

Dong Cheol Park¹ · Hyuk Kwon^{2*} · Moo Yeon Hwang³ · Tea Hyung Kim⁴ · Kang Bum Lee⁵

(Received November 18, 2022 / Revised December 7, 2022 / Accepted December 7, 2022)

In this paper, a study was conducted to improve self-healing and strength properties using sodium acetate. The developed inorganic-organic self-healing materials and recycled sodium acetate were manufactured to evaluate self-healing and permeability reduction properties. As a result of the experiment with recycled sodium acetate, the compressive strength of the material prepared with anhydrous and trihydrate at a ratio of 7:4 was higher than that of the mixture using anhydrous. It was confirmed that the compressive strength was improved by 3~7 %. In addition, the maximum permeability reduction rate was 92.6 %, which satisfied the self-healing properties.

키워드 : 자기치유, 결정성, 치유율, 재생 아세트산나트륨(RSA)

Keywords : Self-healing, Crystallinity, Healing-rate, Recycling sodium acetate

1. 서론

콘크리트의 공극 및 투수성 저감을 위한 방수성과 내구성 향상은 물과 기타 화학 물질로 인하여 콘크리트의 손상 및 열화를 방지할 수 있는 중요한 기술로 선행 연구가 꾸준히 진행되고 있으며, 그중 결정성 염(salt)에 의해 만들어지는 불용성 결정체는 콘크리트의 모세관, 미세 균열 및 기타 공극을 채워 막음으로써 방수성과 내구성을 향상시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Kushartomo and Prabowo 2019).

콘크리트 구조물에 구체방수산화제로서 사용되고 있는 아세트산나트륨(SA)은 친환경 특성과 저가의 재료라는 장점으로 일반적으로 사용되고 있는 결정성 염 중 하나이며, 이러한 SA의 특성을 자기치유 콘크리트에 적용하여 콘크리트의 고성능화를 위한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다(Kushartomo and

Prabowo 2019; Sisomphon et al. 2012; Roig-Flores et al. 2016; Al-Otoom et al. 2007). 하지만 SA를 다량으로 사용할 경우 노출된 시멘트 페이스트를 용해시키고 규산칼슘 수화물을 용해시켜 중량감소 결과를 야기하고 그로 인해 콘크리트의 동결융해 저항 특성을 현저히 저하시키는 문제를 발생시키게 되어 이는 콘크리트 압축강도의 성능이 저하되어 사용에 각별한 주의가 필요하므로 활용성 확대를 위해서는 개선 연구가 필요한 실정이다. 이러한 이유로 자기치유 연구에 활용되었던 재료는 팽창제, 팽윤제, 촉진제 등의 재료를 첨가하여 연구된 내용이 주를 이루고 있다.

일반적으로 콘크리트 첨가제로 사용되는 SA는 공극과 투수율을 줄여서 효과적으로 콘크리트의 방수성을 높이고 내구성을 확보하는 첨가제이며, 결정성 염 중 하나이다. SA는 일반적으로 무수화물과 삼수화물로 나뉘는데, 무수화물의 결정구조는 반응성이 크고 물 용해도(20 °C)가 삼수화물의 약 3배에 달하는 것으로

* Corresponding author E-mail: Kwon80@withmtech.com

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

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

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

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

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

알려져 있으며, 결정화는 발열반응을 수반하여 시멘트 수화반응에서 조기 강도를 향상시킬 수 있으며, SA 무수화물의 특성들을 기반으로 SA 무수화물과 삼수화물을 혼합 제조하여 콘크리트의 자기치유 성능 향상과 압축강도가 감소하는 문제를 개선할 수 있을 것으로 보여진다(Hsu and Nordman 1983; Cameron et al. 1976).

자기치유 소재는 팽창, 축진, 방수, 결정성장 등의 특성을 고려하여 선정하게 되며, 이와 더불어 자기치유 소재의 혼입량, 배합설계, 전처리 등 다양한 공정 변수를 활용하여 치유성능을 향상 시킬수 있으며, 치유성능 극대화를 위한 방안으로 전처리 시 분쇄에너지를 소재 활성화에너지로 전환하는 메카노케미칼(Mechanochemical, 이하 MC공정) 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. 기계·화학적 공정기술을 자기치유 혼화재에 적용하여 기계·화학 에너지의 전환 과정을 통해 소재의 활성화 및 개질 반응을 유도하여 치유성능 향상이 가능할 것으로 판단하였고, 기계·화학적 공정기술을 자기치유 혼화재 제조기술로 활용하여 기계·화학적 처리가 자기치유 혼화재에 미치는 영향을 평가하여 (주)위드엠텍에서 유·무기 자기치유 핵심소재(WH)를 개발하였다(Park et al. 2021).

본 연구는 결정성을 갖는 SA를 개발된 유·무기 자기치유 핵심소재와 복합화하여 치유성능 및 압축강도 성능 향상이 가능한 자기치유 콘크리트의 특성평가를 진행하였다.

2. 실험 방법 및 내용

2.1 실험계획

본 연구는 MC 공정을 적용한 유·무기계 자기치유 핵심소재(WH)를 일반 아세트산나트륨과 재생 아세트산나트륨(RSA)으로 일부 치환하여 치유소재로 사용하였다.

재생 아세트산나트륨(RSA)은 OO업체에서 사용 후 배출되는 아세트산 45 %~55 %의 폐기물을 공급하여, 무수화물과 삼수화물로 가공하여 재사용하였다.

RSA는 결정성과 콘크리트 강도에 미치는 영향을 고려하여 무수화물과 삼수화물의 비율을 7:3으로 고정하여 직접 제조하여 사용하였으며, X-ray Diffraction 분석을 통해 무수화물과 삼수화물의 결정구조를 확인하였다(Fig. 1). 치유 핵심소재로 제조한 WH와

RSA를 Table 1과 같이 자기치유 혼화재를 각각 제조하여 일반 아세트산나트륨을 사용한 WSA와 재생 아세트산나트륨을 사용한 WRSA로 나누어 배합 하였으며, Table 2와 같이 일반 포틀랜드시멘트(OPC)와 강모래(sand)를 사용하여 개발된 WH의 함량인 5.0 %를 기준으로 모르타르 배합에서 전체 결합재 대비 5.0 %를 외비로 첨가하였으며, 모르타르의 기초 특성을 확인하기 위해 플로우, 압축강도, 치유성능을 확인하였다.

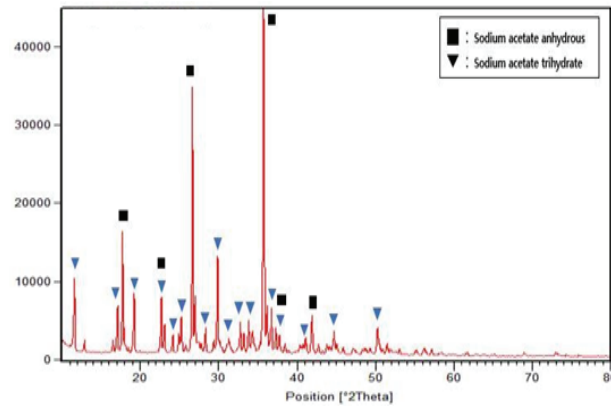


Fig. 1. Recycling sodium acetate (RSA) XRD

Table 1. Manufacture of core materials for self-healing

Type	Self healing materials
WH	Self healing material by mc process 100 %
WSA(A)	WH 60 % + sodium acetate anhydrous (SA) 40 %
WSA(B)	WH 70 % + sodium acetate anhydrous (SA) 30 %
WRSA(A)	WH 60 % + recycling sodium acetate (RSA) 40 %
WRSA(B)	WH 70 % + recycling sodium acetate (RSA) 30 %

Table 2. Mix proportion of mortar mixtures

Type	W/C (kg)	OPC (kg)	Sand (kg)	SH* (kg)
Plain	42	100	200	0.0
WH				5.0
WSA(A)				5.0
WSA(B)				5.0
WRSA(A)				5.0
WRSA(B)				5.0

*SH : Self-healing additive

앞서 실시한 모르타르 실험을 통해 SA 무수화물과 삼수화물이 혼합된 자기치유 모르타르의 특성을 확인하였으며, 이를 통해 콘크리트의 배합실험을 실시하였다. 콘크리트 배합은 Table 3에 나타난 바와 같이 27 MPa급 콘크리트 배합을 대상으로 실시하였으며, 콘크리트의 특성은 슬럼프, 공기량, 압축강도, 길이변화의 특성을 확인하고자 하였다. 이때 사용된 자기치유 혼화제는 모르타르 실험과 동일하게 전체 결합재 대비 5.0 %를 혼입하였으며, 감수제는 폴리카르본산계 1.0 %를 사용하였다.

Table 3. Mix proportion of concrete mixtures

Type	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				SH* (B × %)	AD (B × %)
			W	OPC	S	G		
Plain	48.0	48.2	168	350	839	922	-	1.0
WH	48.0	48.2	168	350	839	922	5.0	1.0
WSA	48.0	48.2	168	350	839	922	5.0	1.0
WRSA	48.0	48.2	168	350	839	922	5.0	1.0

*SH : Self-healing additive

2.2 사용재료

본 연구의 모르타르 배합에서 사용한 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트(밀도 3.15 g/cm³, 분말도 3,457 cm²/g), 골재는 잔골재(S) 조립률(F.M.) 2.79, 밀도 2.62 g/cm³의 강모래를 사용하였다.

콘크리트 배합은 Table 4에 나타난 바와 같이 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트(밀도 3.15 g/cm³, 분말도 3,457 cm²/g), 굵은 골재는 최대치수 25 mm인 부순자갈을 사용하였으며, 잔골재는 바다모래를 사용하였으며, 자기치유 혼화제를 제조를 위한 사용재료는 Table 5와 같이 SA는 무수화물을 사용하였으며, RSA는 무수화물과 삼수화물이 7:3비율로 구성된 것으로 무수화물과 삼수화물의 수용액을 균질 혼합 후 저온처리 방법을 통해 결정화하고 60~80 °C 범위에서 5hr 이상 건조 처리하여 제조하였다. 혼화제는 밀도 1.10, 고형분량 23 ± 1 % PC계 고성능 감수제(Polycarboxylate-based superplasticizer)를 사용하였다.

Table 4. Physical properties of raw materials

Type	Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Absorption (%)
OPC	3.15	3,457	-
Fine aggregate	2.58	-	0.72
Coarse aggregate	2.62	-	0.82

Table 5. Physical properties of self healing materials

Type	Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Chemical component (%)		
			Na	C	O
WH	2.24	4,105	-	-	-
SA	1.52	-	>25	>25	>45
RSA	1.50	-	>25	>23	>47

2.3 시험체의 제작 및 시험방법

본 연구는 결정성 염(salt)의 종류에 따른 모르타르의 특성과 시험체의 치유성능을 확인하고 모르타르 실험으로 선별된 자기치유 혼화제를 27 MPa급 콘크리트 배합에 첨가하여 콘크리트의 특성과 길이 변화를 확인하였다. 모르타르의 혼합 및 성형은 KS L ISO 679 「시멘트의 강도 시험 방법」에 의거하여 실시하였으며, 시험체는 50 × 50 × 50 mm 황동제 큐빅 몰드로 제작하여 계획한 재령까지 수중양생(20 ± 2 °C)을 실시하여 재령 1, 3, 7, 28일에 압축강도를 측정하였으며, 모르타르의 유동성을 확인하기 위한 Flow 측정 방법은 KS L 5111 「시멘트 시험용 플로 테이블」에 의거하여 플로 테이블 위에 원형틀을 놓고 모르타르를 채워 수직으로 들어 올린 후 상·하로 25회를 타격하여 모르타르의 퍼짐 정도를 측정하였다.

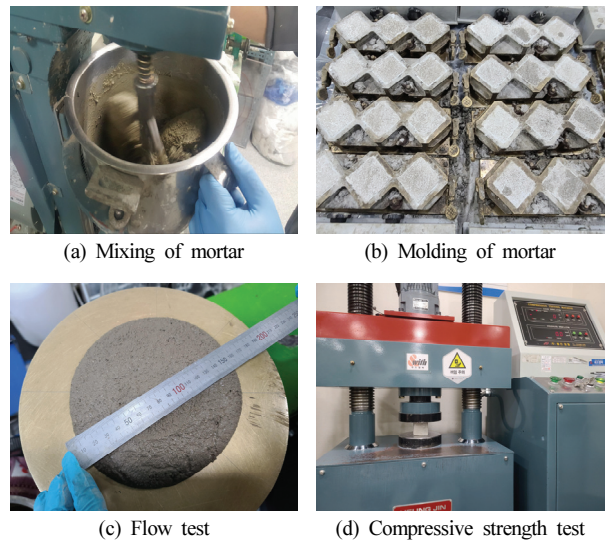


Fig. 2. Mortar test method

자기치유 치유성능을 확인하기 위한 시험체 제작은 Fig. 3과 같이 Ø100 * 200 mm 원주형 몰드에 모르타르로 성형하여 공시체를 제작하였으며, 재령 14일까지 수중양생(20 ± 2 °C)을 실시하고

시험체 두께가 50 ± 2 mm가 되도록 절단하고 유도 균열을 발생시킨 후 0.30 mm 실리콘 시트를 사용하여 균열폭 0.30 ± 0.05 mm 가 되도록 시험체를 제작하여 치유 재령 0일, 7일, 14일에 KCI-CT114 「모르타르의 자기치유 성능평가를 위한 정수위 투수 시험 방법」에 의거하여 모르타르의 단위유출수량을 산출하고 치유율을 확인하였다.

굳지 않은 콘크리트의 실험방법은 Fig. 4와 같이 KS F 2594 「굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 플로 시험방법」과 KS F 2421 「압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법」에 의거하여 시험을 실시하였으며, 경화한 콘크리트의 시험방법으로 압축강

도 시험은 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」에 준해 $\Phi 100 \times 200$ mm 의 원주 공시체를 제작하고 계획된 재령까지 수중양생(20 ± 2 °C)을 실시하여 재령 1, 3, 7, 28일에서 강도를 측정하였다.

콘크리트의 길이변화 시험은 $100 \times 100 \times 400$ mm 의 각주형 몰드로 성형을 실시하였으며, 재령 1일 양생을 실시한 시험체의 중앙지점에 부착형 스트레인게이지를 게이지용 본드를 이용하여 접착하고 데이터로거(TOKOTO SOKKI KENKYUJO CO., LTD. TDS-540)에 센서를 체결하여 양생실(온도 22 ± 2 °C, 상대습도 50 ± 10 %)에 28일간 스캔 데이터를 확보하였다.

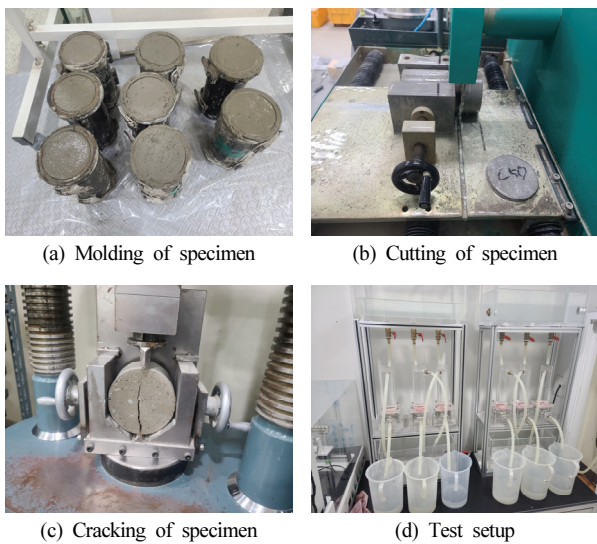


Fig. 3. Self-healing test method



Fig. 4. Concrete test method

3. 실험결과 및 고찰

3.1 모르타르의 기초 물성 평가

3.1.1 모르타르의 유동성

모르타르의 유동성을 확인을 위하여 플로우 실험을 실시한 결과 Fig. 5와 같이 기존 최적 조성으로 도출된 자기치유 혼화재(WH)는 Plain 대비 유동성이 감소하였으나, 결정성 염(salt)을 혼입한 WSA(A), WSA(B), RWSA(A), RWSA(B) 모두 Plain 대비 유동성이 증가하는 경향을 확인하였으며, 이는 염(salt)이 물에 용해되어 시멘트와 골재의 혼합을 원활하게 하여 유동성이 증가한 것으로 보인다.

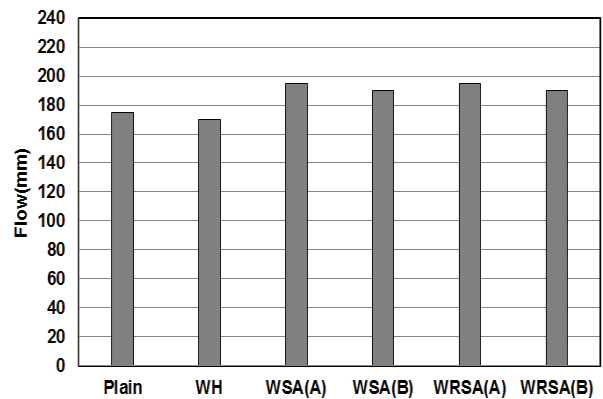


Fig. 5. Result of mortar flow

3.1.2 모르타르의 압축강도

자기치유 혼화재(WH)와 아세트산나트륨(SA, RSA)을 첨가한 모르타르 압축강도 측정결과와 Table 6과 Fig. 6에 나타내었다. MC 공정으로 제조한 자기치유 혼화재가 첨가된 WH, WSA, RWSA

배합 모두 Plain에 비해서 1, 3, 7, 28일 모두 압축강도 성능이 향상 되는 것을 확인하였다. 또한, WH와 재생 아세트산나트륨(RSA)을 혼합하여 제조한 WRSA(A), WRSA(B) 배합 모두 Plain, WH, WSA 배합에 비해서 압축강도 향상 효과가 높은 것으로 확인되었다. RSA 첨가량을 따른 강도 변화 결과 WRSA(B)가 가장 높은 결과를 나타내었으며, WRSA(A)와 비교하여도 대비 약 5.0 % 이상 상승하는 결과를 나타내었다. 이는 RSA 첨가량이 증가하여 모르타르의 내부공극을 더욱 밀실하게 채워주는 작용뿐만 아니라 3-D network 결정성을 갖는 삼수화물의 첨가량이 WRSA(A)에 비해 상대적으로 많은 WRSA(B) 첨가 모르타르의 강도 상승을 견인한 것으로 판단된다. 제조된 RSA 배합을 제외하면 Plain과 강도값은 크게 영향을 받지 않는 결과를 나타내었다.

Table 6. Compressive strength of mortar

Type	Compressive strength (MPa)			
	1d	3d	7d	28d
Plain	27.1	34.1	41.8	51.2
WH	28.9	36.3	44.9	53.7
WSA(A)	28.5	35.8	42.7	52.5
WSA(B)	26.9	35.1	44.5	52.8
WRSA(A)	30.7	38.7	43.4	54.6
WRSA(B)	30.5	41.6	46.5	56.5

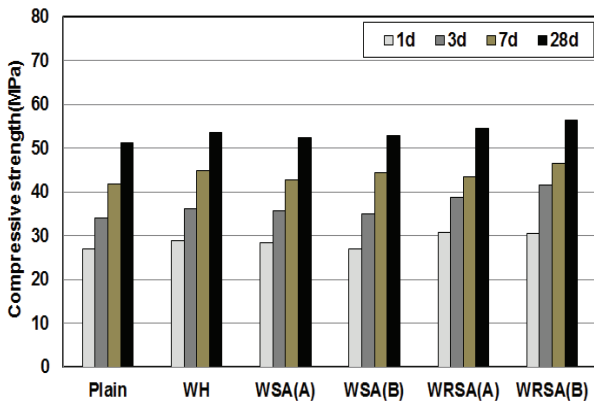


Fig. 6. Result of mortar compressive strength

3.2 모르타르의 치유성능

Table 7은 모르타르 시험체의 치유율을 확인하기 위하여 광학 현미경으로 각각의 모르타르 시험체의 균열폭과 치유재령 0일의 단위유출수량(mL/min*mm)을 측정하고 재령 7, 14일에 단위유출 수량을 산출한 결과를 나타내었다.

단위유출수량 0일을 기준으로 감소율을 확인한 결과 Plain은 7일에 2.12배, 14일에 2.73배 이며, WH는 7일에 3.87배, 14일에 22.74배 이고, WSA(A)는 7일에 3.18배, 14일에 10.32배 이며, WSA(B)는 7일에 2.55배, 14일에 7.77배 이며, WRSA(A)는 7일에 4.16배, 14일에 13.44배 이며, WRSA(B)는 7일에 3.98배, 14일에 8.57배 로 단위유출수량이 감소한 결과를 확인하였다. MC 공정을 통해 얻어진 WH가 28일에 22.7배로 가장 적은 유출수량을 확인하였다.

Table 8은 앞서 확인된 단위유출수량을 기준하여 모르타르의 치유율(Healing rate (%))을 계산한 결과를 나타내었으며, 자기치유 모르타르의 치유율을 산정하기 위한 계산식은 아래 식 (1)과 같이 나타내었다.

$$HR_q = (1 - \frac{q(t)}{q_0}) \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서 HR_q : 치유율(Healing Rate, (%))

q₀ : 치유재령 0일의 단위유출수량(mL/min*mm)

q(t) : 치유재령 t일에서의 단위유출수량(mL/min*mm)

자기치유 모르타르 시험체의 치유율을 확인한 결과 Plain은 7일에 52.9 %, 14일에 63.3 % 이며, WH는 7일에 74.1 %, 14일에 95.6 % 이고, 자기치유 혼화재(WH) + 아세트산나트륨(SA)을 혼합하여 첨가한 WSA(A)는 7일에 68.6 %, 14일에 90.3 % 이며, WSA(B)는 7일에 60.7 % 이며, 14일에 87.1%로 WSA(B)는 재령 14일에 치유율 90 % 이상을 만족하지 못하였으며, 자기치유 혼화재(WH) + 재생 아세트산나트륨(RSA)을 혼합하여 첨가한 WRSA(A)는 7일에 75.9 %, 14일에 92.6 % 이며, WRSA(B)는 7일에 74.9 %, 14일에 88.3 % 으로 WSA(B)와 마찬가지로 재령 14일에 치유율 90 % 이상 확보하지 못하였다. 하지만 WSA(A), WRSA(A) 배합은 재령 14일에 치유율 90 % 이상을 만족하였으며, 이러한 결과는 SA, RSA 첨가량이 증가하여 결정성 염의 증가가 모르타르의 투수감소 효과가 있음을 확인하였다. 하지만 압축강도 결과에서는 결정성 증가가 강도의 증가로 반드시 이어지는 것은 아니며, 생성 결정의 결정성이 중요한 변수가 될 수 있으며, 이를 위한 추가 연구의 필요성을 확인시켜주었다.

3.3 콘크리트의 기초 물성 평가

3.3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

자기치유 혼화재(WH)와 아세트산나트륨(SA, RSA)을 첨가한 콘크리트의 슬럼프와 공기량 시험결과는 Fig. 8과 Fig. 9에 나타나

Table 7. Summary of water flow rate

Mix	Crack width (mm)	Water flow rate (mL/min*mm)		
		0day	7day	14day
Plain	0.298	1.841	0.881	0.684
	0.295	1.913	0.868	0.671
	0.302	1.924	0.924	0.726
avg.	0.298	1.893	0.891	0.694
WH	0.304	1.838	0.452	0.085
	0.302	1.823	0.488	0.072
	0.311	1.910	0.501	0.088
avg.	0.306	1.857	0.480	0.082
WSA(A)	0.305	1.852	0.614	0.207
	0.287	1.797	0.547	0.135
	0.297	1.822	0.557	0.188
avg.	0.296	1.824	0.573	0.177
WSA(B)	0.297	1.917	0.791	0.267
	0.291	1.871	0.767	0.247
	0.302	1.955	0.698	0.225
avg.	0.297	1.914	0.752	0.246
WRSA(A)	0.303	1.923	0.458	0.139
	0.312	1.834	0.453	0.157
	0.306	1.931	0.457	0.121
avg.	0.307	1.896	0.456	0.139
WRSA(B)	0.294	1.923	0.478	0.209
	0.305	1.834	0.483	0.234
	0.299	1.931	0.467	0.221
avg.	0.299	1.896	0.476	0.221

었다.

공기량과 슬럼프 시험은 콘크리트의 경시를 확인하기 위해 0분, 30분에 측정하였으며, 0분에 공기량 측정 결과는 Plain은 5.7%이며, WH는 5.3%, WSA는 5.3%, WRSA는 5.5%로 측정되었으며, 30분 공기량 측정 결과는 Plain은 4.9%, WH는 4.3%, WSA는 4.5%, WRSA는 4.5%로 Plain보다 다소 감소하는 경향을 보였으나, 콘크리트 기준 공기량 $4.5 \pm 1.5\%$ 에 모두 만족하는 결과를 확인하였다.

콘크리트 슬럼프 시험 결과는 0분에 Plain은 195 mm이며, WH는 185 mm, WSA는 200 mm, WRSA는 195 mm로 측정되었으며, 30분 슬럼프 측정 결과는 Plain은 175 mm, WH는 165 mm, WSA는 185 mm, WRSA는 180 mm으로 0분에 자기치유 혼화재 WH를 제외한 아세트산나트륨(SA, RSA)을 혼입한 배합 모두 Plain보다 높은 유동성을 보였으나, 경시 30분에 WRSA 배합은 초기 슬럼프 측정결과보다 다소 감소하는 측정결과로 현장 적용 시 시공성에

Table 8. Self-healing test result

Mix	Crack width (mm)	Healing rate (%)	
		7day	14day
Plain	0.298	52.1	62.8
	0.295	54.6	64.9
	0.302	52.0	62.3
avg.	0.298	52.9	63.3
WH	0.304	75.4	95.4
	0.302	73.2	96.1
	0.311	73.8	95.4
avg.	0.306	74.1	95.6
WSA(A)	0.305	66.8	88.8
	0.287	69.6	92.5
	0.297	69.4	89.7
avg.	0.296	68.6	90.3
WSA(B)	0.297	58.7	86.1
	0.291	59.0	86.8
	0.302	64.3	88.5
avg.	0.297	60.7	87.1
WRSA(A)	0.303	76.2	92.8
	0.312	75.3	91.4
	0.306	76.3	93.7
avg.	0.307	75.9	92.6
WRSA(B)	0.294	75.1	89.1
	0.305	73.7	87.2
	0.299	75.8	88.6

대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

3.3.2 콘크리트의 압축강도

콘크리트의 압축강도 측정결과는 Table 9와 Fig. 10에 나타난 바와 같이 Plain의 경우 재령 1일 강도는 7.31 MPa 수준으로 확인되었으며, 자기치유 혼화재(WH)와 재생 아세트산나트륨(SA, RSA)을 혼입하여 첨가한 WH, WSA, WRSA 배합과 Plain을 비교한 결과 WH, WRSA 배합 모두 재령 1, 3, 7, 28일 모두 Plain에 비해서 압축강도가 향상되었으며, WRSA 첨가 배합 역시 약 5.0%로 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 WSA 첨가 배합은 Plain 대비 재령 1, 3, 7, 28일 모두 압축강도 성능 감소가 확인되었으며, 재령 28일 압축강도는 Plain 대비 약 8.0%의 감소율을 나타내었다. 이는 모르타르 압축강도 결과에서 언급한 바와 같이 결정 생성 자체가 콘크리트 압축강도에 직접적인 영향을 주지는 않으나 상대적으로 3-D network 구조를 갖는 삼수화물 결정이 많은 WRSA의 배합이 강도

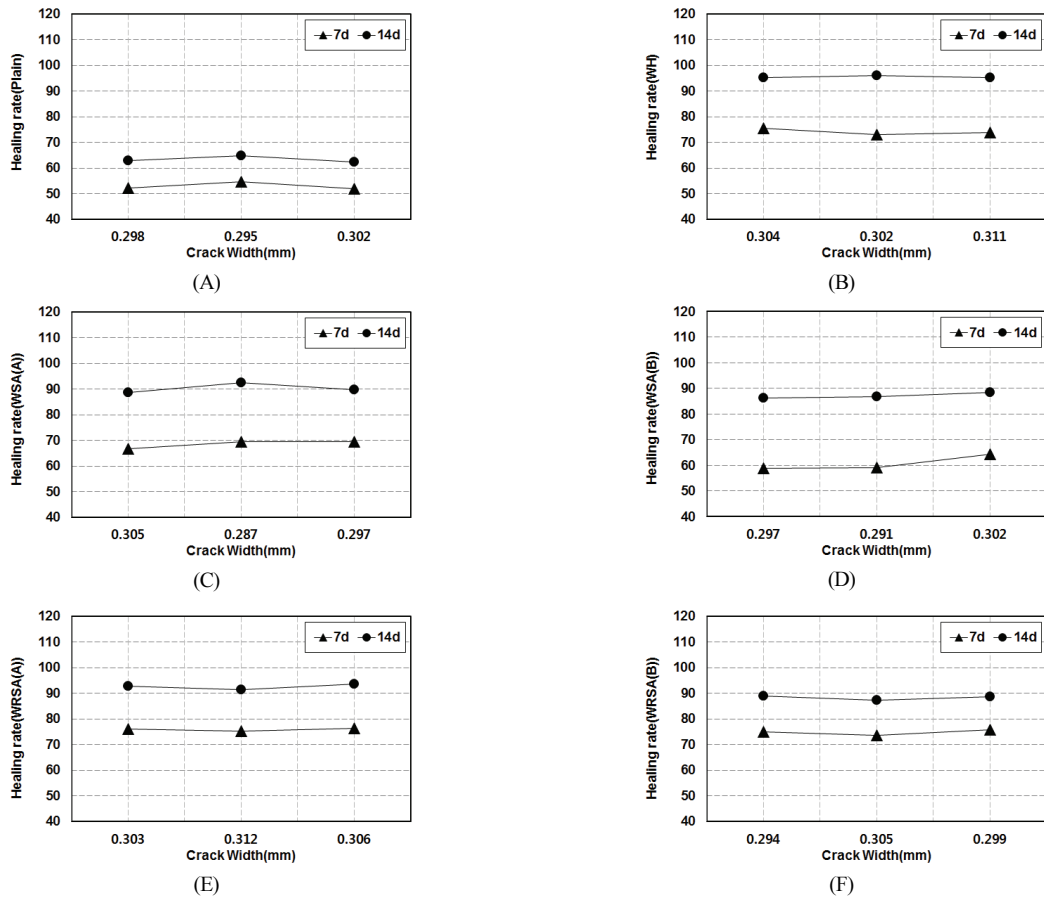


Fig. 7. Healing rate according to crack width : (A)Plain, (B)WH, (C)WSA(A), (D)WSA(B), (E)WRSA(A), (F)WRSA(B)

개선에 효과적이었던 것으로 판단된다. 선행연구(Kushartomo and Prabowo 2019)에서는 50 MPa 급 고강도 콘크리트에서의 SA 첨가가 강도 저하의 원인이 되는 것으로 주장하였으나, 해당 연구결과 27 MPa 급 콘크리트 배합 실험에서도 SA 첨가가 압축강

도 저하를 일으킬 수 있는 것으로 확인되었다. 기존의 치유핵심 소재를 치환하여 혼합 사용한 결과인 것을 감안하여 SA와 콘크리트 강도 저하의 상관관계 규명을 위한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

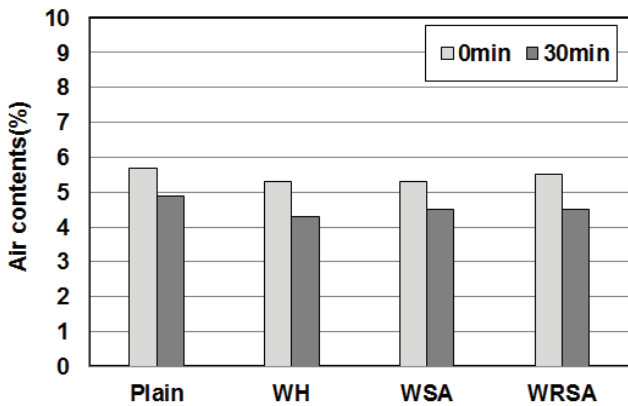


Fig. 8. Result of Concrete air contents

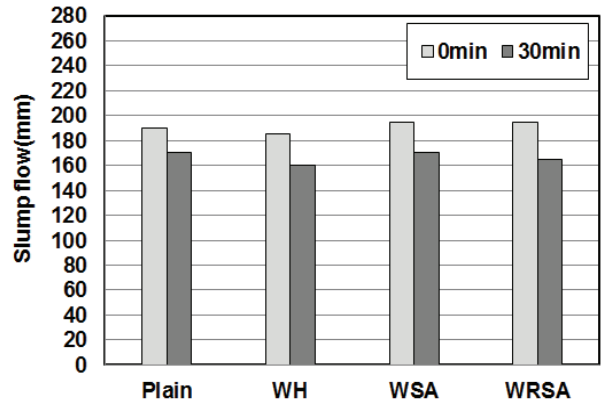


Fig. 9. Result of Concrete slump flow

Table 9. Compressive strength of concrete

Type	Compressive strength (MPa)				
	1d	3d	7d	28d	
27 MPa	Plain	7.31	23.15	31.64	38.47
	WH	7.45	24.89	33.55	39.26
	WSA	5.68	20.31	26.87	35.39
	WRSA	8.46	24.21	35.87	41.94

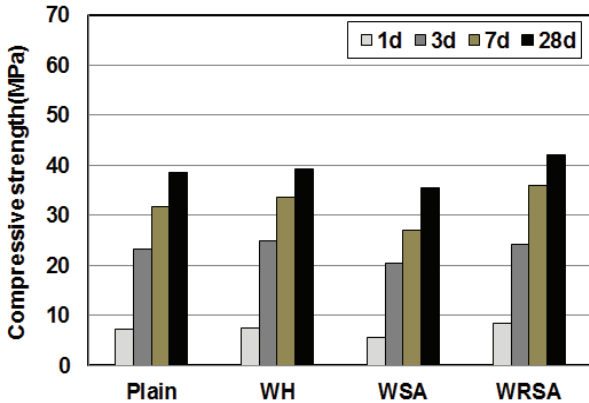


Fig. 10. Result of Concrete compressive strength

3.4 콘크리트의 길이변화

자기치유 혼화재를 첨가한 27 MPa급 콘크리트의 길이변화 측정결과를 Fig. 11에 나타내었다.

콘크리트 길이변화 측정결과 재령 28일에 Plain은 -657×10^{-6} , WH는 -497×10^{-6} , WSA는 -421×10^{-6} , WRSA는 -467×10^{-6} 으로 Plain < WH < WRSA < WSA 순서로 길이변화를 확인할 수 있었다. 유기계 자기치유 핵심소재의 기본적인 치유 메커니즘은 팽창에 의한 초기 균열 억제 및 결정성장으로 균열 부위를 채우는

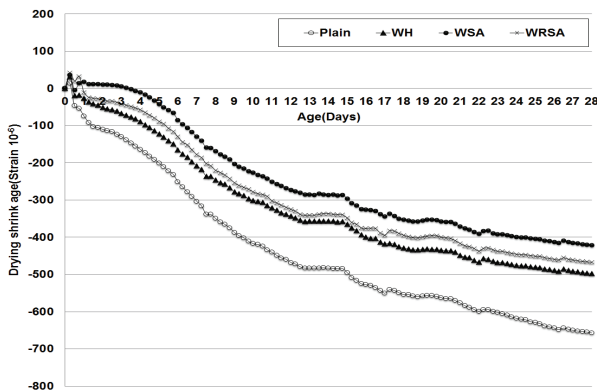


Fig. 11. Result of dry concrete shrinkage (27 MPa)

것으로 해당 실험에서 치환 사용된 SA, RSA 역시 결정 생성에 의한 치유 과정은 기존 WH와 유사하다고 볼 수 있다. 이에 따라 길이변화 결과도 WH, WSA, WRSA 가 유사한 수치를 나타내었으며, 상대적으로 WSA가 다소 높은 결과를 나타낸 원인은 무수화물의 반응성과 결정성이 다른 첨가 재료에 비해 높은 결과라고 판단된다.

4. 결론

본 연구는 치유 소재의 결정 생성 및 결정성장이 시멘트 구조물의 치유 성능에 어떠한 영향이 있는가를 확인하고자 실험을 진행하였다.

1. 선행연구를 통해 검증된 SA의 결정성을 치유 소재에 적용하여 시멘트 모르타르, 콘크리트에 미치는 영향을 확인한 결과 무수화물을 단독으로 사용하는 것 보다 무수화물과 삼수화물을 적절히 혼합한 소재를 사용한 결과에서 치유 성능 및 강도 성능이 향상되는 것을 확인하였다.
2. 반응성과 결정성이 높은 무수화물을 단독으로 사용한 배합에 비해 삼수화물과 함께 구성된 RSA를 첨가한 조건에서 더 우수한 결과를 보였다.
3. 무수화물의 반응성이 삼수화물에 비해 높고 결정생성 효과도 높을 것으로 예상하여 모르타르 및 콘크리트의 투수저감 성능도 향상될 것으로 예상하였으나 삼수화물을 혼합한 배합의 투수감소율이 높은 결과를 나타내었다. 이는 무수화물과 삼수화물의 결정성 차이로 판단하였으며, 2차원의 라멜라 층을 갖는 무수화물에 비해 3-D network 결정구조를 갖는 삼수화물의 결합력을 통해 투수 저감 효과가 더 좋게 나온 것으로 판단된다.
4. RSA의 첨가가 압축강도에 미치는 영향을 확인한 결과 역시 결정성의 차이에 의한 강도개선 효과는 무수화물에 비해 삼수화물이 좋은 것으로 확인되었으며, 무수화물 첨가에 따른 콘크리트 강도 저하 원인은 추가 실험을 통해 원인을 확인하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.
5. 또한, 결정성을 갖는 SA를 유·무기 자기치유 핵심소재와 복합화하여 치유 성능 및 콘크리트 강도 성능을 향상시키고 유지보수 저감 자기치유 콘크리트 개발을 위해 MC(메카노케미칼) 공정 적용을 통한 추가 개선 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비 지원 (22SCIP-C159059-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- Al-Kheetan, M.J., Rahman, M.M. (2019). Integration of anhydrous sodium acetate(ASAc) into concrete pavement for protection against harmful impact of deicing salt, *JOM*, **71(12)**, 4899–4909.
- Al-Otoom, A., Al-Khlaifa, A., Shawaqfeh, A. (2007). Crystallization technology for reducing water permeability into concrete, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **46(16)**, 5463–5467.
- Cameron, T.S., Mannan, K.M., Rahman, M.O. (1976). The crystal structure of sodium acetate trihydrate, *Acta Crystallographica Section B: Structural Crystallography and Crystal Chemistry*, **32(1)**, 87–90.
- Hsu, L.Y., Nordman, C.E. (1983). Structures of two forms of sodium acetate, Na^+ , $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-$, *Acta Crystallographica Section C: Crystal Structure Communications*, **39(6)**, 690–694.
- Kushartomo, W., Prabowo, A. (2019). The application of sodium acetate as concrete permeability-reducing admixtures, *IOP conference series: Materials Science and Engineering*, **508(1)**, 012009.
- Lv, Z., Chen, D. (2014). Overview of recent work on self-healing in cementitious materials, *Materiales de Construcción*, **64(316)**, e034–e034.
- Macanovskis, A., Krasnikovs, A., Spruge, I., Sahmenko, G., Lukasenka, R. (2016). Mechanical properties and self-healing effect of concrete containing capillary hydro insulation admixture, *Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti*, **18**, 17.
- 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].
- Roig-Flores, M., Pirritano, F., Serna, P., Ferrara, L. (2016). Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests, *Construction and Building Materials*, **114**, 447–457.
- Sisomphon, K., Copuroglu, O., Koenders, E.A.B. (2012). Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive, *Cement and Concrete Composites*, **34(4)**, 566–574.
- Yang, W.H., Ryu, D.W., Kim, W.J., Park, D.C., Seo, C.H. (2013). An experimental study on early strength and drying shrinkage of high strength concrete using high volumes of ground granulated blast-furnace slag(GGBS), *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **13(4)**, 391–399 [in Korean].

결정성 염을 포함한 유·무기계 자기치유 소재의 결정 생성 효과에 따른 치유 특성 연구

본 논문에서는 구체방수 혼화제로 사용되는 아세트산나트륨을 활용하여 자기치유 성능 향상 및 강도 성능 개선을 위한 연구를 진행하였다. 선행연구로 개발된 유·무기계 자기치유 핵심소재와 재생 아세트산나트륨을 혼합 제조하여 자기치유 모르타르, 콘크리트의 기초성능 및 투수 저감 성능을 평가하였다. 재생 아세트산나트륨을 첨가 실험결과 무수화물 단독으로 사용한 배합에 비해 무수화물과 삼수화물을 7:4 비율로 혼합한 소재의 압축강도 개선 효과가 3~7 %로 확인되었다. 또한, 최대 투수감 소율은 92.6 %로 자기치유 특성을 만족하는 결과를 확인하였다.