

마이크로캡슐을 활용한 자기치유 구체방수제의 제조 및 방수특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Manufacturing and Waterproofing Properties of Self-healing Concrete Waterproofing Agent Using Microcapsules

최연왕¹ · 이재훈^{2*} · 양능원³

Yun-Wang Choi¹ · Jae-Heun Lee^{2*} · Neung-Won Yang³

(Received August 25, 2023 / Revised December 11, 2023 / Accepted December 12, 2023)

In this study, the development of a self-healing concrete waterproofing agent was examined, focusing on its manufacturing and waterproofing properties. The optimal ratio using microcapsules for the concrete waterproofing agent was determined through assessments of flow, compressive strength, and permeability conducted during the mortar stage. These findings aimed to provide fundamental data for evaluating the self-healing properties of the concrete waterproofing agent designed for use in concrete structures. The self-healing concrete waterproofing agent was comprised of three types of inorganic materials commonly used for repair purposes. From experimental results, a composition ratio with a high potassium silicate content, referred to as SIM-2, was found suitable. A surfactant mixing ratio of 0.03 % was identified to enhance the dispersibility of the concrete waterproofing agent, while a mixing ratio of 0.2 % distilled water was deemed suitable for viscosity adjustment. For the magnetic self-healing concrete waterproofing agent's healing agent, using microcapsules in the range of 0.5 % to 0.7 % met the KS F 4949 and KS F 4926 standards.

키워드 : 구체방수제, 마이크로캡슐, 방수특성, 자기치유, 제조특성

Keywords : Concrete waterproofing agent, Microcapsules, Waterproofing properties, Self-healing, Manufacturing properties

1. 서론

현대 사회에서 콘크리트는 공급과 경제성 및 내구성 등 우수한 특징으로 인하여 대부분의 구조물에 활용되지만, 콘크리트 구조물은 다양한 열화의 원인이 되는 환경에 지속적으로 노출되기 때문에(Wittmann 2002) 내구성이 감소하여 공용기간이 감소하게 된다. 콘크리트는 일반적으로 내구성이 우수한 재료로 보고되고 있지만, 콘크리트 제조과정에서 사용되는 재료와 방법에 따라 콘크리트 미세공극 및 모세관 형성에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 미세공극 및 모세관의 형성은 수분 및 화학물질 유입을 허용할 수 있으며, 결과적으로 콘크리트 내부에서 철근부식 등으로 인한 물리·화학적 열화를 촉진한다(Reinhardt and Jooss 2003). 열화가 장

기화 될 경우 콘크리트 내부 및 외부에 균열이 발생하게 되며, 더욱 열화가 촉진될 수 있는 환경이 조성되어 열화가 가속화 되고 수밀성을 잃게 된다(Lee et al. 2016; Choi et al. 2022).

따라서 최근에는 콘크리트 내구성을 증가시키기 위한 다양한 기술이 개발되고 있다. 콘크리트에 있어서 물은 반드시 필요한 재료 중 하나지만, 콘크리트의 물리적-기계적 및 내구특성에 영향을 미치는 주요 열화의 원인 중 하나로 보고되고 있다(Seo and Shin 2003).

이러한 문제점을 개선하고 근본적인 해결을 위하여 방수성능을 가진 화학 혼화제가 소개되고 있으며, 이를 통하여 굳지않은 콘크리트의 초기 수화반응 속도를 향상시켜 콘크리트 내부를 치밀하게 할 수 있는 것으로 보고하고 있다(Muhammad et al. 2015).

* Corresponding author E-mail: ijheun@kict.re.kr

¹세명대학교 건설환경공학과 교수 (Department of Construction and Environmental Engineering, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea)

²한국건설기술연구원 구조연구본부 박사후연구원 (Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea)

³세명대학교 건설공학과 박사과정 (Department of Construction Engineering, Semyung University, Jecheon, 27136, Korea)

콘크리트의 방수성능 및 수밀성능을 향상하는 목적으로 사용하는 화학 혼화제는 일반적으로 구체방수제로 정의하고 있다(Choi 2023). 그러나 구체방수제의 방수 효과는 콘크리트 단면이 건전한 경우에는 콘크리트 내부로 침투하는 수분을 방지 할 수 있지만 균열이 발생한 경우 그 성능은 현저히 낮아지는 단점이 있다. 콘크리트에 있어서 균열은 완전히 제어하기 어렵기 때문에 이러한 문제를 보완하기 위해서는 콘크리트에 균열이 발생할 경우 빠르게 보수하여야 열화가 진전되는 속도를 저감시키고 기존의 방수 성능 확보가 가능하다. 이를 위해서는 상시 모니터링을 통하여 수시 점검이 이루어져야 하지만 최근 균열 발생시 인력의 개입없이 균열을 스스로 치유할 수 있는 자기치유 기술이 대두되고 있다(Oh et al. 2019; Nam 2020; Kim 2021).

자기치유 기술이 적용된 건설재료는 치유소재에 따라 상이하지만 최대 300 μm 이하의 작은 균열에 효과적인 것으로 보고하고 있다(Oh et al. 2019; De Belie et al. 2018). 자기치유 기술 중에서 자율적 치유기술로 정의되는 마이크로캡슐은 균열 발생 시 캡슐이 함께 파괴되어 캡슐 내부의 치유소재가 균열을 수복시키는 기술로써 치유물질의 다양화와 그 양을 조절할 수 있는 장점이 있다. 특히 치유소재는 무기재료를 사용할 수 있어 콘크리트 내구성 증진에도 효과가 있는 것으로 나타나고 있다(Oh et al. 2019; Choi et al. 2022). 따라서 자기치유 성능을 가지는 구체방수제를 제조할 경우 기존의 방수 성능 확보와 함께 균열 발생시 스스로 균열을 치유하여 콘크리트 단면의 방수 성능을 확보할 수 있다는 장점이 있다.

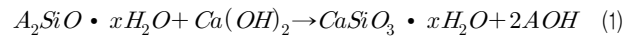
이에 따라 본 연구에서는 자기치유 구체방수제를 개발하기 위한 일환의 연구로써, 마이크로캡슐을 활용한 자기치유 구체방수제를 제조하였으며, 구체방수제의 제조특성 및 방수성능을 평가하고자 한다. 본 논문의 연구결과를 통하여 마이크로캡슐 활용 구체방수제의 최적 조성비를 도출하고, 치유성능 확보를 위한 기반 자료로써 활용하고자 한다.

2. 실험재료 및 계획

2.1 자기치유 구체방수제

2.1.1 구체방수제

자기치유 구체방수제는 구체방수제에 자기치유 소재를 혼합한 것을 말한다. 자기치유 구체방수제의 기준 재료인 구체방수제 주재료는 보수용으로 많이 사용되는 규산염계 무기재료(이하, SIM : Silicate-based Inorganic Materials) 3종인 규산칼륨(이하, PS : Potassium Silicates), 규산나트륨(이하, SS : Sodium Silicates) 및 규산리튬(이하, LS : Lithium Silicates)을 사용하였다.



* A : Alkali ion

식 (1)은 규산염계 무기재료의 반응 메커니즘을 나타낸 것으로, 콘크리트의 유리 알칼리 성분들과 화학반응을 하여 내부를 치밀하게 한다. 이러한 규산염계 무기재료 특성은 내구성, 내수성 및 내열성이 우수하고 콘크리트와 같은 무기재료로써 탄성계수 및 열적 특성이 동일하기 때문에 반영구적인 성능이 나타내는 것으로 보고되고 있다(Ha et al. 2017).

Table 1은 규산염계 무기재료의 성분비를 나타낸 것이다. 또한 구체방수제의 분산성을 높여 내부에 효과적으로 분포하기 위하여 M사에서 제조되는 음이온계 계면활성제(이하, ST : Surfactants)를 사용하였다. 구체방수제의 점도 조절을 위하여 1차 증류수(이하, DW : Distilled Water)를 사용하였다.

2.1.2 자기치유 소재

자기치유 구체방수제 제조를 위하여 최적 비율의 구체방수제 조성비를 선정한 다음 자기치유 소재를 혼합하였다. 자기치유 소재는 선행연구를 통하여 얻어진 최적의 마이크로캡슐을 사용하였다(Kim et al. 2022). 마이크로캡슐의 균열 자기치유 매커니즘은

Table 1. Composition ratio of silicate inorganic materials

Type \ Item	Specific gravity (20 °C)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	Li ₂ O (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Mole fraction	Viscosity (cps, 20 °C)	Solids content (%)
Potassium silicates	1.27-1.29	10.0-11.0	-	-	21.5-22.5	0.05	3.2-3.5	≤20	20-52
Sodium silicates	≥1.38	-	9.0-10.0	-	28.0-30.0	0.03	3.10-3.30	-	30-56
Lithium silicates	1.15-1.20	-	-	1.0-1.5	18.0-22.0	-	7.5-8.5	-	20-25

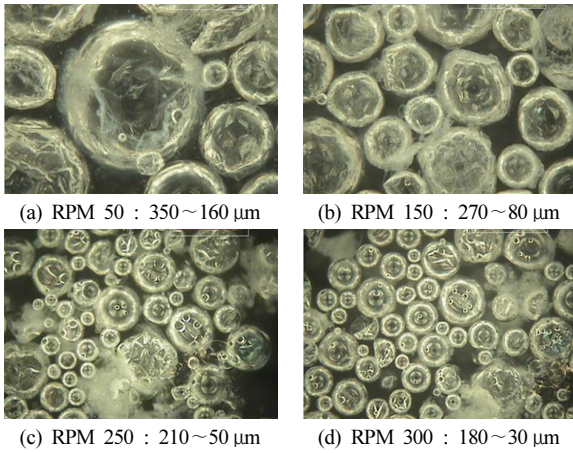


Fig. 1. Microcapsules size of stirring speed

캡슐 파괴시 치유소재가 시멘트 구성성분 중 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과 반응하여, 알칼리 금속이온(K, Na 및 Li)을 결합성화하여 규산칼슘 수화물(CaSiO₃·xH₂O)과 강알칼리 이온을 생성한다. 이러한 반응 메커니즘은 생성된 치유물질이 콘크리트의 균열을 치유하는 효과뿐만 아니라 모체를 더욱 치밀하게 하여 내구성을 높일 수 있는 것으로 보고되고 있다(Choi et al., 2022). 본 논문에서는 마이크로캡슐 혼합에 따른 치유거동 측면보다는 자기치유 구체방수제 제조를 위한 최적비율의 구체방수제 도출과 마이크로캡슐이 혼합된 구체방수제가 방수성능에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다. Fig. 1은 자기치유 구체방수제에 혼합된 마이크로캡슐의 형상을 나타낸 것이다. 마이크로캡슐의 크기는 제조과정에서 합성 속도에 따라 조절이 가능하며, 본 논문에서는 Fig. 1(a) 크기를 가지는 마이크로캡슐을 기준으로 하였다.

2.2 모르타르

모르타르에 사용된 시멘트는 국내 H사의 1종시멘트(이하, OPC : Ordinary Portland Cement)를 사용하였으며, 잔골재로는 주문진 표준사(이하, S : Sand)를 사용하였다. Table 2는 본 연구에서 사용된 재료의 물리적 특성을 요약한 것이다.

Table 2. Mechanical properties of materials

Materials	Properties	
OPC	Surface area (3,540 cm ² /g)	Density (3.10 g/cm ³)
S	Absorption (2.32 %)	Density (2.58 g/cm ³)

2.3 실험계획

2.3.1 구체방수제 제조

자기치유 구체방수제 제조를 위한 구체방수제의 최적 비율 도출을 위하여 4단계로 구분하여 실험을 실시하였다. 구체방수제의 사용량은 OPC 질량에 대하여 1 %를 기준으로 하였다.

구체방수제의 사용량은 적용처 및 제품에 따라 상이하지만 본 연구에서는 구체방수제의 조성비를 얻기위한 연구로 1%로 고정하였다. 실험진행은 총 4단계로 구분하여 바텀업 방식으로 연구를 수행하였다.

1단계에서는 SIM의 조성비에 따른 품질을 평가하였으며, 최적 조성비를 대상으로 2단계를 진행하였다. 2단계에서는 ST 비율을, 3단계에서는 DW에 따른 품질을 평가하였다. 마지막 4단계에서는 마이크로캡슐(이하, SM : Self-Healing Microcapsules, SM) 혼합에 따른 품질을 평가하였다. Table 3~Table 6은 각 단계별 배합표를 나타낸 것이다.

Table 3. Step 1_mortar mix table (by SIM)

Type	W	OPC	S	SIM (C × %)		
				SS	PS	LS
Plain	0.5	1	2.45	-	-	-
SIM-1				2	1	1
SIM-2				1	2	1
SIM-3				1	1	2

Table 4. Step 2_mortar mix table (by ST)

Type	W	OPC	S	SIM	ST
				(C × %)	
Plain	0.5	1	2.45	-	-
ST-1				1	0.03
ST-2					0.05
ST-3					0.1

Table 5. Step 3_mortar mix table (by DW)

Type	W	OPC	S	SIM+ST	DW
				(C × %)	
Plain	0.5	1	2.45	-	-
DW-1				0.9	0.1
DW-2				0.8	0.2
DW-3				0.7	0.3

Table 6. Step 4_mortar mix table (by SM)

Type	W	OPC	S	SIM+ST+DW	SM
				(C × %)	
Plain	0.5	1	2.45	-	
SM-1				0.50	0.50
SM-2				0.25	0.75
SM-3				0.17	0.83

2.3.2 평가방법

모르타르 배합은 KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르 압축강도 시험방법에 따라 혼합하였으며, KS L 5111 시멘트 시험용 플로우 테이블을 사용하여 플로우를 평가하였다.

또한 KS F 4926 콘크리트용 수밀 혼화재에 준하여 내투수성을 평가하였다. 시험편은 $\varnothing 100 \times 30$ mm 공시체로 제작하였으며, KS F 4919에 준하여 실험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 규산염계 무기재료 조성비에 따른 품질특성

Fig. 2는 규산염계 무기재료(SIM) 조성비와 플로우의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 2의 결과, Plain의 플로우를 기준으로 SIM-1, SIM-2 및 SIM-3의 플로는 감소하거나 동등한 경향을 나타내었다. SS 혼합량이 많은 SIM-1의 경우 약 5%의 작업성이 감소하는 결과가 나타났으며, 이러한 결과는 SS가 PS 및 LS 보다 높은 알칼리 농도에 의하여 경화가 촉진되어 플로우가 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 3은 재령에 따른 SIM 조성비와 압축강도의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 3의 결과, Plain의 압축강도와 비교하여 SIM-1, SIM-2 및 SIM-3의 압축강도는 동등하거나 증가되는 경향을 나타내었다. PS 혼합량이 많은 SIM-2의 경우 약 11%의 압축강도 증가를 나타냈으며, 이러한 결과는 PS가 SS 및 LS 보다 높은 몰비로 인하여 용해성이 뛰어나 모르타르 내부를 치밀하게 하여 상대적으로 높은 압축강도를 발현한 것으로 판단하였다. Fig. 4 및 Fig. 5는 Table 7의 결과에 대하여 SIM 조성비에 따른 투수율 및 투수비를 나타낸 것이다. Fig. 4의 결과, SS 함량이 가장 높은 SIM-1의 투수율은 Plain의 투수율과 비교하여 약 22% 감소하였으며, PS 함량이 가장 높은 SIM-2의 투수율은 Plain의 투수율과 비교하여 약

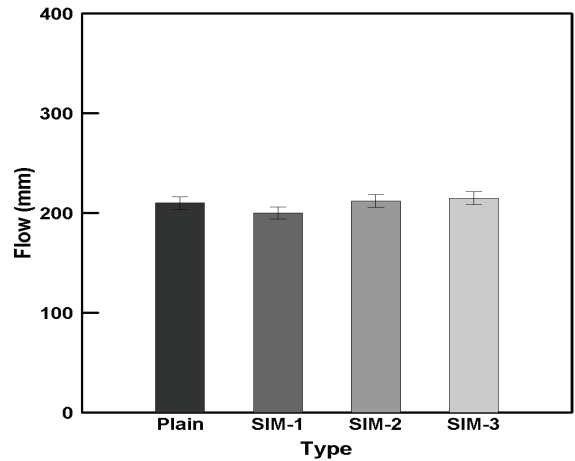


Fig. 2. Silicate-based inorganic material (SIM) composition ratio and flow

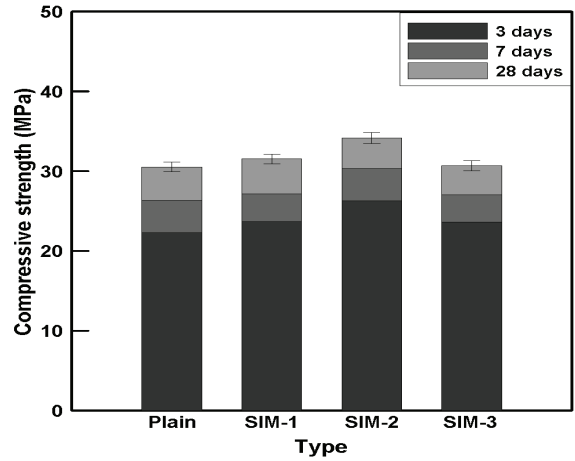


Fig. 3. Silicate-based inorganic material (SIM) composition ratio and compressive strength

37% 감소하였다. 또한 LS 함량이 가장 높은 SIM-3의 투수율은 Plain의 투수율과 비교하여 약 35% 감소하였다. Fig. 5의 결과,

Table 7. Water permeability measurement according to SIM

No.	Sample condition	Weigh (g)				Aver.
		1	2	3	4	
Plain	Dry	462.8	457.6	481.2	473.2	468.7
	Post-test	464.8	459.5	483.3	474.7	470.6
SIM-1	Dry	478.1	466.3	474.8	465.6	471.2
	Post-test	479.4	467.5	476.3	467.2	472.6
SIM-2	Dry	472.1	474.9	468.2	466.2	470.4
	Post-test	473	476	469.2	467.4	471.4
SIM-3	Dry	469.1	477.4	466.2	463.9	469.2
	Post-test	470.2	478.6	467.1	465.3	170.3

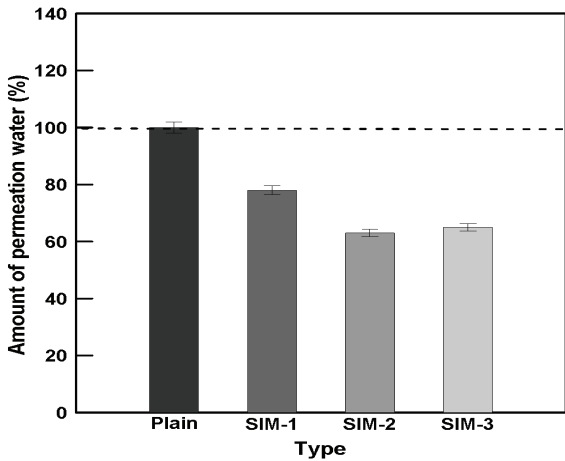


Fig. 4. Silicate-based inorganic material (SIM) composition ratio and water permeability

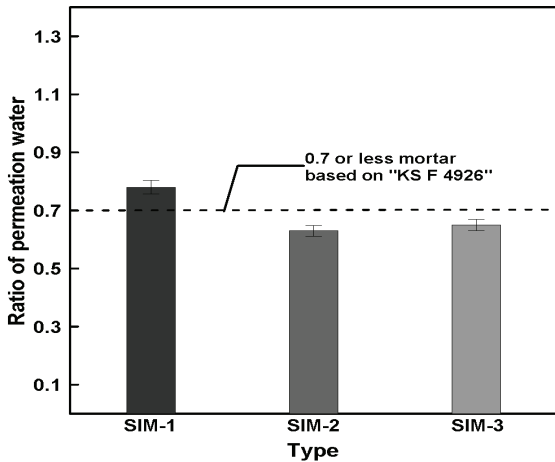


Fig. 5. Silicate-based inorganic material (SIM) composition ratio and ratio of water permeability

“KS F 4926 콘크리트용 수밀 혼화제”에서는 투수비 0.7 이하를 기준으로 하고 있다. SIM-1, SIM-2 및 SIM-3의 투수비는 0.78, 0.63 및 0.65로 나타났으며, SIM-2의 투수비가 가장 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 PS가 SS 및 LS와 비교하여 상대적으로 물에 대한 용해성이 크기 때문에 고르게 분산되어 내부가 치밀해진 것으로 판단되며, 플로우, 압축강도 및 내투수 성능 평가를 종합한 결과, SIM의 최적 조성비는 SIM-2인 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통하여 SIM-2를 기준으로 ST의 최적 혼합률을 결정하기 위한 평가를 실시하였다.

3.2 계면활성제 혼합에 따른 품질특성

Fig. 6은 계면활성제(ST) 혼합률과 플로우의 관계를 나타낸 그

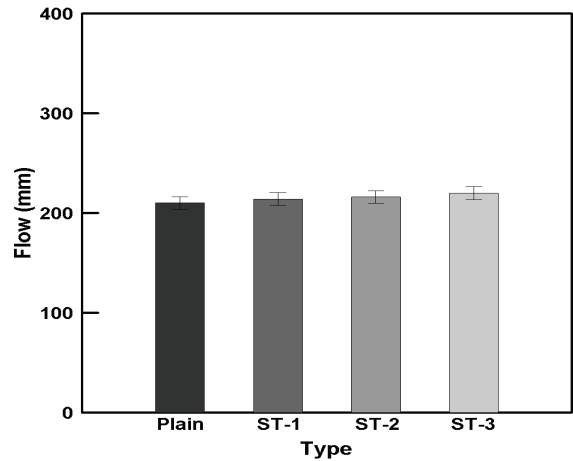


Fig. 6. Surfactant (ST) composition ratio and flow

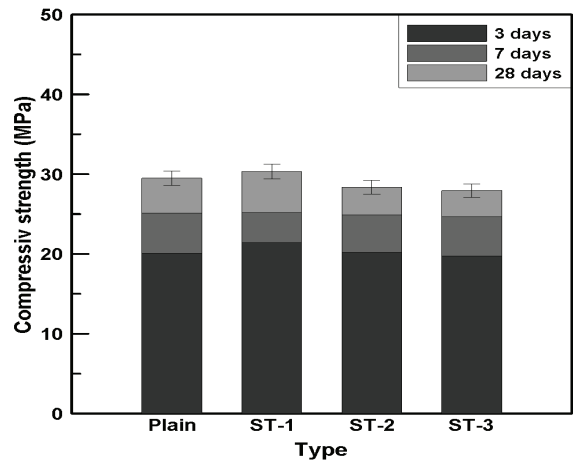


Fig. 7. Surfactant (ST) composition ratio and compressive strength

래프이다. Fig. 6의 결과, Plain의 플로우와 비교하여 ST-1, ST-2 및 ST-3의 플로우는 증가하는 경향을 나타내었다. ST 혼합량이 많은 ST-3의 경우 약 5%의 작업성이 증가하는 결과가 나타났으며, 이는 계면활성제의 분산작용으로 인한 물 분자, SIM 및 시멘트 입자간 장력을 낮게 만들어 나타난 결과에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 재령에 따른 ST 혼합률과 압축강도의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 7의 결과, Plain의 압축강도와 비교하여 ST-1, ST-2 및 ST-3의 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었다. ST 혼합량이 가장 낮은 ST-1의 경우 기준 시편 대비 약 3%의 압축강도 증가를 나타냈으며, 계면활성제 혼합률이 증가할수록 낮아지는 경향이 나타났다.

이러한 결과는 혼합률이 증가함에 따라 모르타르 내부 미소공극의 증가로 치밀하지 못한 구조를 형성하여 감소하는 것으로 판

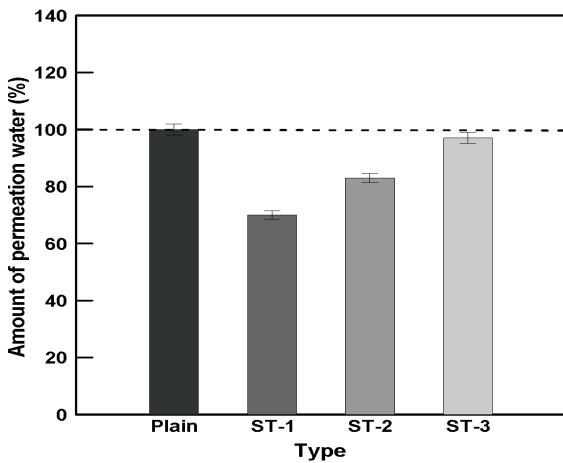


Fig. 8. Surfactant (ST) mixing rate and water permeability

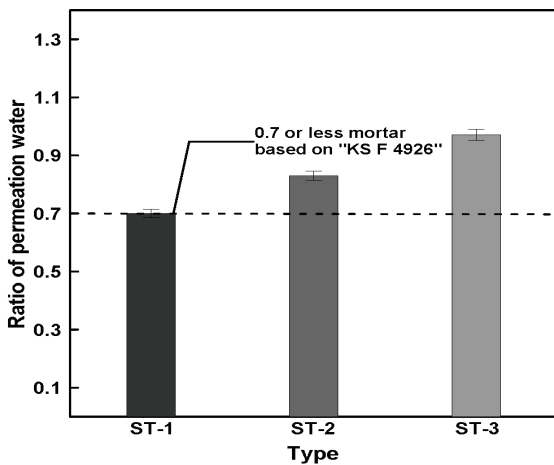


Fig. 9. Surfactant (ST) mixing rate and ratio of water permeability

단하였다.

Fig. 8. 및 Fig. 9는 Table 9의 결과에 대하여 ST 혼합률에 따른

투수율 및 투수비를 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과, ST-1, ST-2 및 ST-3의 투수율은 Plain의 투수율과 비교하여 약 30 %, 17 % 및 3 % 감소하였다. Fig. 9의 결과, ST-1, ST-2 및 ST-3의 투수비는 약 0.7, 0.83 및 0.97로 나타났으며, ST-1이 가장 낮은 투수비로 나타났다. 이러한 결과는 ST의 영향으로 인하여 구체방수제의 성능을 개선할 수 있다는 것으로 나타나며, 최적값이 있음을 알 수 있다. 구체방수제의 성능 개선을 위하여 사용되는 ST는 너무 많은 경우에는 역효과가 나는 것을 확인할 수 있었으며, 적절한 양을 혼합할 경우에는 구체방수제의 성능을 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다. 플로우, 압축강도 및 내투수 성능 평가를 종합한 결과, ST의 최적 혼합량은 ST-1인 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통하여 ST-1을 기준으로 구체방수제의 점도조절을 위한 DW의 최적 혼합률을 결정하고자 하였다.

3.3 증류수에 따른 품질특성

Fig. 10은 증류수(DW) 혼합률과 플로우의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 10의 결과, Plain의 플로우와 비교하여 DW-1, DW-2 및 DW-3의 플로는 증가하는 경향을 나타내었다. DW 혼합률이 많은 DW-3의 경우 약 7 %의 작업성이 증가하는 결과가 나타났으며, 이는 증류수의 증가로 희석률이 높아짐에 따라 점도가 낮아져 작업성이 증가하는 것으로 판단하였다.

Fig. 11은 DW와 압축강도의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 11의 결과, Plain의 압축강도와 비교하여 DW-1, DW-2 및 DW-3의 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었다. DW 혼합률이 가장 낮은 DW-1의 경우 Plain 대비 약 10 %의 압축강도 증가를 나타냈으며, DW가 증가할수록 낮아지는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 DW가 증가함에 따라 모르타르의 절대 수량의 증가로 인한 결과로 판단하였다.

Fig. 12 및 Fig. 13은 Table 9의 결과에 대하여 증류수(DW) 혼합

Table 8. Water permeability measurement according to ST

No.	Sample condition	Weigh (g)				
		1	2	3	4	Aver.
Plain	Dry	482.9	466.4	477.6	457.7	471.2
	Post-test	484.6	467.9	480.1	459.6	473.1
ST-1	Dry	468.9	475.6	460.9	463.8	467.3
	Post-test	470.4	477.1	462.1	465.2	468.7
ST-2	Dry	469.6	470.5	462.5	458	465.2
	Post-test	471.1	472.1	464	459.7	466.7
ST-3	Dry	469.6	470.5	462.5	458	465.2
	Post-test	472.1	472.1	464.2	459.6	467

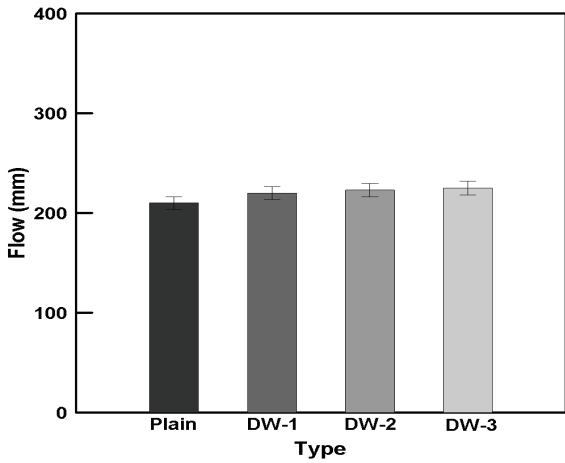


Fig. 10. Distilled water (DW) composition ratio and flow

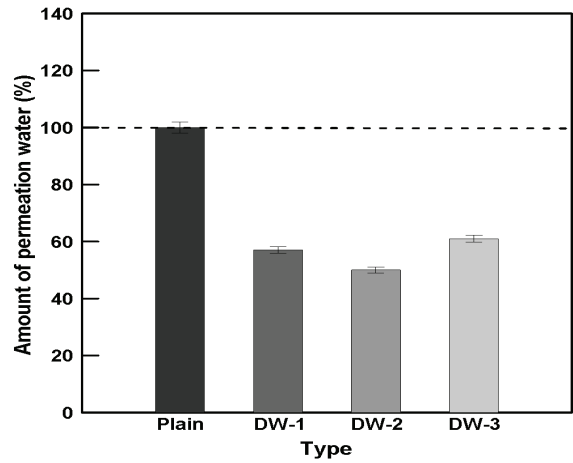


Fig. 12. Distilled water (DW) mixing rate and water permeability

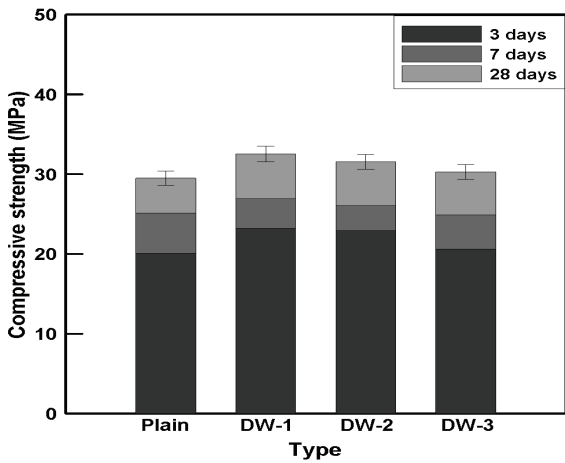


Fig. 11. Distilled water (DW) composition ratio and compressive strength

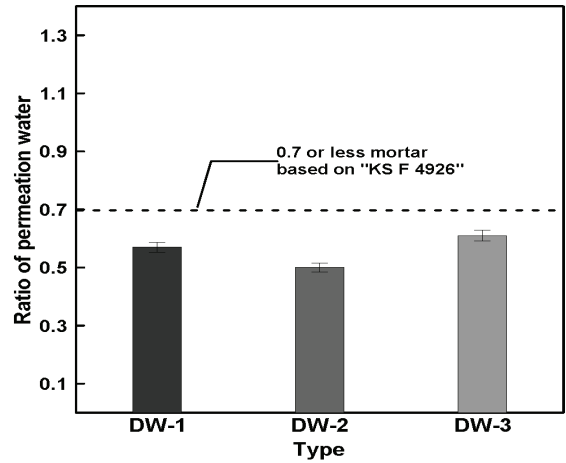


Fig. 13. Distilled water (DW) mixing rate and ratio of water permeability

률에 따른 투수율 및 투수비를 나타낸 것이다. Fig. 12의 결과, DW-1, DW-2 및 DW-3의 투수율은 Plain의 투수율과 비교하여

약 43 %, 50 % 및 39 % 감소하는 경향이 나타났다. 또한 Fig. 13의 결과 DW-1, DW-2 및 DW-3의 투수비는 약 0.57, 0.5 및

Table 9. Water permeability measurement according to DW

No.	Sample condition	Weigh (g)				
		1	2	3	4	Aver.
Plain	Dry	481.1	464.2	468.2	456.3	467.5
	Post-test	482.9	465.8	470.3	458.2	469.3
DW-1	Dry	462.1	466.5	462.8	458.5	462.5
	Post-test	463	467.5	464	459.7	463.6
DW-2	Dry	468.5	474	470.6	469.6	470.7
	Post-test	469.4	475	471.5	470.6	471.6
DW-3	Dry	473.7	473.8	474.9	476.2	474.7
	Post-test	474.9	474.9	475.9	477.5	475.8

0.61로 나타났으며, DW-2가 가장 낮은 투수비로 나타났다.

이러한 결과는 DW로 인하여 구체방수제의 점도를 개선하여 분산성을 향상시키고 성능개선이 가능한 것으로 나타나며, ST의 분석결과와 같이 최적 값이 있는 것으로 판단된다. WA의 성능 개선을 위하여 사용되는 DW는 너무 많을 경우에는 희석수준이 커지기 때문에 오히려 성능이 감소되는 것으로 판단되며, 너무 적을 경우 또한 효과가 적은 것으로 판단된다. 플로우, 압축강도 및 내투수 성능 평가를 종합한 결과 DW의 최적 혼합량은 DW-2인 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여 자기치유 구체방수제 제조를 위한 기반 재료의 최적 비율을 선정하였으며, 이를 기준으로 SM의 최적 혼합량을 결정하기 위한 평가를 실시하였다.

3.4 마이크로캡슐 혼합에 따른 품질특성

Fig. 14는 마이크로캡슐(SM) 혼합률과 플로우의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 14의 결과, Plain과 비교하여 SM-1, SM-2 및 SM-3의 플로는 증가하는 경향을 나타내었다. SM 혼합량이 많은 SM-3의 경우 약 4 %의 작업성이 증가하는 결과가 나타났으며, SM의 입형이 균질하여 볼베어링 효과를 나타낸 것으로 판단하였다. Fig. 15는 재령에 따른 SM 혼합률과 압축강도의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 15의 결과, Plain의 압축강도와 비교하여 SM-1, SM-2 및 SM-3의 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었다.

SM 혼합량이 가장 높은 SM-3의 경우 기준 시편 대비 약 10 %의 압축강도 감소를 나타냈으며, SM 혼합률이 증가할수록 낮아지는 경향이 나타났다. 이는 SM 혼합률이 증가함에 따라 아직 미반응성 물질은 SM이 모르타르 내부에 존재로 수밀하지 못한 구조를 형성한 것으로 판단하였으며, SM-1의 경우 약 1 % 감소로 적정 사용량은 압축강도의 큰 영향이 없을 것으로 판단하였다.

Fig. 16 및 Fig. 17은 Table 10의 결과에 대하여 마이크로캡슐

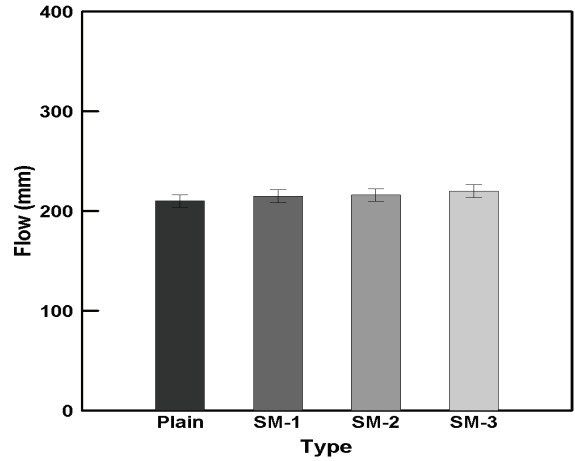


Fig. 14. Self-healing microcapsules (SM) composition ratio and flow

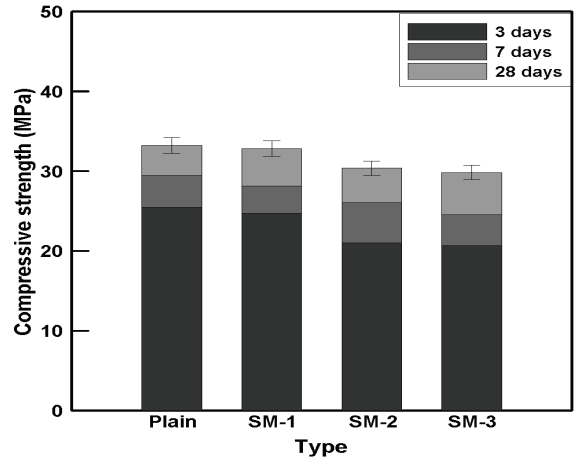


Fig. 15. Self-healing microcapsules (SM) composition ratio and compressive strength

Table 10. Water permeability measurement according to SM

No.	Sample condition	Weigh (g)				
		1	2	3	4	Aver.
Plain	Dry	461.2	489.1	471.5	463.3	471.3
	Post-test	463.1	490.8	473.5	465.2	473.2
SM-1	Dry	469.9	471.1	471.2	467.9	470
	Post-test	471.1	472	472.3	468.8	471.1
SM-2	Dry	474.4	467.1	468.7	474.8	471.3
	Post-test	475.7	468.2	469.6	475.8	472.3
SM-3	Dry	466.3	466.3	455.6	470.9	464.8
	Post-test	467.9	467.5	457.1	472.6	466.3

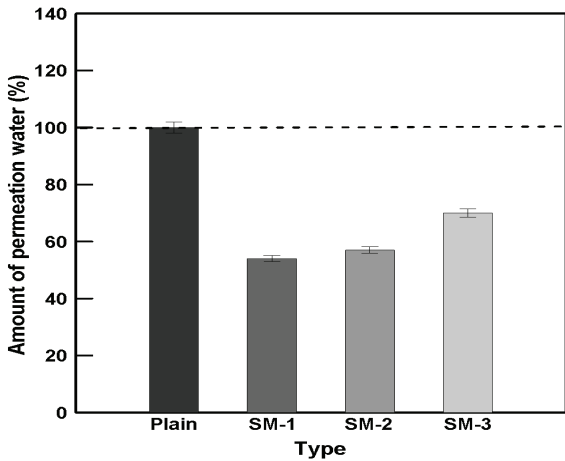


Fig. 16. Self-healing microcapsules (SM) mixing rate and water permeability

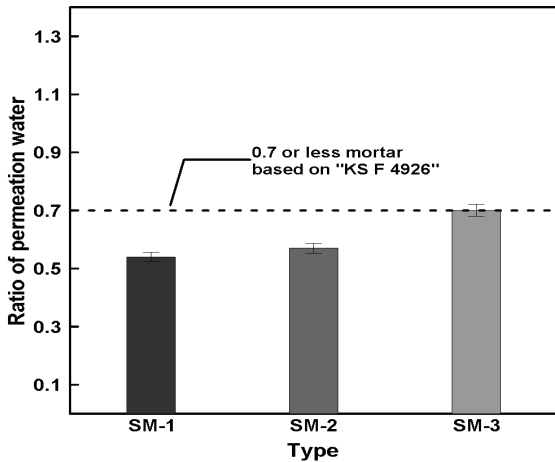


Fig. 17. Self-healing microcapsules (SM) mixing rate and ratio of water permeability

(SM) 혼합률에 따른 투수율 및 투수비를 나타낸 것이다. Fig. 16 및 Fig. 17의 결과, SM-1, SM-2 및 SM-3의 투수율은 Plain의 투수율과 비교하여 약 46 %, 43 % 및 30 % 감소하는 경향이 나타났다. SM 혼합률의 압축강도 결과, SM-1, SM-2 및 SM-3의 투수비는 약 0.54, 0.57 및 0.7로 나타났으며, SM-1이 가장 낮은 투수비로 나타났다.

이러한 결과는 자기치유 성능을 부여하기 위하여 구체방수제 질량 일부의 SM을 대체하였기 때문에 SM 혼합률 증가에 따라 구체방수제의 질량이 감소되어 내투수 성능이 감소하는 것으로 판단된다. 플로우, 압축강도 및 내투수 성능 평가를 종합한 결과 자기치유 구체방수제의 최적 배합비는 SM-1이 최적인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 콘크리트 균열 발생 시 성능저하를 개선할 목적으로 방수성을 가진 균열 자기치유 기술을 적용한 마이크로캡슐 혼입 자기치유 구체방수제를 제조하고자 하였으며, 자기치유 구체방수제를 제조하기 위하여 각 조성비에 따른 품질특성 및 방수특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 자기치유 구체방수제에 적용하기 위한 실리케이이트 화합물 기반 규산염계 무기재료의 최적 조성비는 품질특성 및 방수특성을 평가한 결과, 규산나트륨 : 규산칼륨 : 규산리튬비율은 1:2:10이 적합한 것으로 판단하였다.
2. 또한, 계면활성제의 혼합률은 품질특성 및 방수특성을 평가한 결과, 0.03 %가 적합한 것으로 나타났으며, 점도 조절을 위한 증류수는 규산염계 무기재료 혼합물과 계면활성제 사용량의 20 %가 최적인 것으로 나타났다.
3. 자기치유 구체방수제에 적용하기 위하여 마이크로캡슐을 혼합한 구체방수제의 품질특성 및 방수특성을 평가한 결과, 최적 마이크로캡슐의 혼합량은 구체방수제 질량에 대하여 구체방수제 : 마이크로캡슐 1:30이 최적인 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여, 마이크로캡슐을 혼합한 자기치유 구체방수제를 제조할 수 있었으며, 향후 콘크리트에 적용하여 자기치유 구체방수제 사용에 따른 자기치유 성능을 평가하여 최적 마이크로캡슐 혼합량 도출이 필요할 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

이 논문은 2023학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의한 연구임.

References

Choi, H.J. (2023). A Study on the Quality Properties of Concrete Using Self-Healing Waterproofing Agent Mixed with Microcapsules, Master's Thesis, Semyung University [In Korean].

- Choi, Y.W., Kim, C.G., Nam, E.J., Oh, S.R. (2022). An experimental study on the healing performance of complex capsules using multiphase inorganic materials for crack self-healing of cement mortars, *Materials*, **15(24)**, 8819.
- De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., ... Jonkers, H.M. (2018). A review of self-healing concrete for damage management of structures, *Advanced Materials Interfaces*, **5(17)**, 1–28.
- Ha, S.W., Oh, S.R., Choi, Y.W. (2017). An experimental study on the basic properties of penetrating repair material using silicate-based inorganic materials, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **18(7)**, 39–45 [in Korean].
- Kim, C.G. (2021). A Study on the Development of Sectional Repair System Utilizing Crack Self-Healing Microcapsules, Ph.D Thesis, Semyung University [In Korean].
- Kim, C.G., Choi, Y.W., Choi, S., Oh, S.R. (2022). A study on the healing performance of mortar with microcapsules using silicate-based inorganic materials, *Materials*, **15(24)**, 8907.
- Lee, H.X.D., Wong, H.S., Buenfeld, N.R. (2016). Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers, *Cement and Concrete Research*, **79**, 194–208.
- Muhammad, N.Z., Keyvanfar, A., Muhd, M.Z.A., Shafaghat, A., Mirza, J. (2015). Waterproof performance of concrete: a critical review on implemented approaches, *Construction and Building Materials*, **101**, 80–90.
- 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].
- 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, *Cement and Concrete Research*, **33(7)**, 981–985.
- Seo, C.H., Shin, S.T. (2003). The Impact of Concrete Durability on Structures, *Korean Ready-Mix Concrete Industry Association*, **74**, 25–32 [In Korean].
- Wittmann, F.H. (2002). Crack formation and fracture energy of normal and high strength concrete, *Sadhana*, **27(4)**, 413–423.

마이크로캡슐을 활용한 자기치유 구체방수제의 제조 및 방수특성에 관한 실험적 연구

본 연구에서는 자기치유 구체방수제를 개발하기 위한 일환의 연구로서, 구체방수제의 제조특성 및 방수성능 평가를 수행하였다. 마이크로캡슐 활용 구체방수제의 최적 조성비를 모르타르단계에서 플로우, 압축강도, 투수율 및 투수비 특성 평가로 얻고자 하였으며, 콘크리트용 자기치유 구체방수제의 치유성능 평가를 위한 기반 자료로써 활용하고자 하였다. 자기치유 구체방수제의 기준 재료인 구체방수제 주재료는 보수용도로 많이 사용되는 규산염계 무기재료 3종을 사용하였으며, 실험 결과로 규산 칼륨이 높은 조성비를 가지는 SIM-2가 적합한 것으로 판단하였다. 구체방수제의 분산성을 높이기 위하여 계면활성제 혼합물은 0.03 %가 적합한 것으로 나타났으며, 점도 조절을 위하여 증류수 혼합물은 0.2 %가 적합한 것으로 나타났다. 자기치유 구체방수제의 치유소재로 사용된 마이크로캡슐의 사용량은 0.5 % ~ 0.7 % 범위에서 KS F 4949 시멘트 혼입 폴리머계 방수제에 내투수 성능 및 KS F 4926 콘크리트용 수밀혼화제 시험평가를 만족하는 것으로 나타났다.