

제강 슬래그 잔골재가 혼입된 초속경 시멘트 기반 스마트 보수재료의 전기역학적 특성

김태욱¹, 김민경², 김동주^{3*}

Electromechanical Properties of Smart Repair Materials based on Rapid Setting Cement Including Fine Steel Slag Aggregates

Tae-Uk Kim¹, Min-Kyoung Kim², Dong-Joo Kim^{3*}

Abstract: This study investigated the electromechanical properties of cement based smart repair materials (SRMs) according to the different amounts of fine steel slag aggregates (FSSAs). SRMs can self-diagnose the quality of repairing and self-sense the damage of repaired zone. The replacement ratios of FSSAs to sand for SRMs were 0% (FSSA00), 25% (FSSA25), and 50% (FSSA50) by sand weight. The electrical resistivity of SRMs generally decreased as the compressive stress of SRMs increased: the electrical resistivity of FSSA25 at the age of 7 hours decreased from 78.16 to 63.68 kΩ-cm as the compressive stress increased from 0 to 22.37 MPa. As the replacement ratio of FSSAs by weight of sand increased from 0% to 25%, the stress sensitivity coefficient (SSC) of SRM at the age of 7 h increased from 0.471 to 0.828 %/MPa owing to the increased number of partially conductive paths in the SRMs. However, as the replacement ratio of FSSAs further increased up to 50%, the SSC decreased from 0.828 to 0.649 %/MPa because some of the partially conductive paths changed to continued conductive ones. SRMs are expected to self-sense the quality and future damage of repaired zone only by measuring the electrical resistivity of the repaired zone in addition to fast recovery in the mechanical resistance of structures.

Keywords: Self-sensing concrete, Rapid repair material, Conductive functional filler, Damage sensing, Stress sensing

1. 서론

콘크리트의 조기 노후화로 인한 많은 사회기반시설물 또는 건물들의 갑작스러운 붕괴는 심각한 인명피해와 사회적 손실을 지속적으로 발생시키고 있다(2018년 이탈리아 제노바 모란디교 붕괴 그리고 2023년 분당 정자교 보행로 구간 붕괴 등). 콘크리트 구조물 붕괴의 주요 원인들 중 하나는 바로 콘크리트의 균열이며, 균열은 구조물의 역학적 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 철근의 부식, 누수 등을 야기하여 구조물의 내구성을 저하시킨다(Wang et al., 2022; Al-Gburi et al., 2022). 이러한 콘크리트 균열을 보수하는 가장 대표적인 방법은 시멘트계 재료 혹은 수지계 재료 등을 사용하여 균열을 채워서 보수하는 것이다. 하지만, 균열 보수 후 보수 상태를 진단하는 것은 보수 성능을 검증하고 구조물의 장수명화를 위해 필수적으로 이루어져야 한다.

현재, 균열을 보수하기 위한 보수재료로는 에폭시수지(Pang et al., 2018; Kan et al., 2021)와 같은 유기질계와 폴리머 시멘트(Asaad, 2018), 초속경 시멘트(Kwon et al., 2013), 초미립자 시멘트(Wang et al., 2018)와 같은 시멘트계 재료가 사용되고 있다. 유기질계 재료는 부착성능이 우수하고 탄성능력이 좋아 구조물의 거동에 유동적으로 대응할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 균열 내부에 습기가 있을 경우 제대로 부착되지 않거나, 열팽창 계수와 같은 재료 특성이 콘크리트와 다르기 때문에 부착면에서의 파괴가 쉽게 발생할 수 있다(Ann et al., 2016). 또한, 저온에서는 경화불량이 발생할 수 있고, 내화성이 낮으며, 시간이 경과함에 따라 자외선 혹은 누수로 인한 열화가 발생할 수 있다는 한계점이 있다(Jumaat et al., 2006). 반면에, 시멘트계 재료는 유기질계 재료보다 낮은 탄성능력으로 인해 균열 거동 시 유동적이지 않을 수 있으나 내구성이 높고, 부착성이 좋으며, 기존 콘크리트와 재료 특성이 유사하여 구조물의 내구성을 효율적으로 향상시킬 수 있다(Ann et al., 2016; Wang et al., 2018).

균열 보수 후 보수 상태에 대한 점검은 보수의 적절성을 확인하고 추가 작업의 필요성을 판단하기 위해 필수적으로 수행되어야 한다. 하지만, 보수 부위에 대한 자세한 점검은 이루어지지 않고 있어 점검자가 보수 상태를 명확히 판단하기 어렵다. 현재 균열 혹은 균열 보수 상태를 진단하기 위해 사용되

¹정회원, 세종대학교 건설환경공학과 석박통합과정

²정회원, 세종대학교 건설환경공학과 선임연구원

³정회원, 세종대학교 건설환경공학과 철도인프라연구소 교수, 교신저자

*Corresponding author: djkim75@sejong.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, 209, Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05006, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2023년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

는 기술로는 탄성파(Hashimoto et al., 2019), 초음파(Kee, 2015), 충격반향법(Garbacz et al., 2017), smart aggregates (Zhang et al., 2022), 그리고 PZT sensor(Kim et al., 2019) 등이 있다. 하지만, 탄성파와 초음파의 경우 측정방법은 간편하지만 측정 결과가 주파수에 따라 달라지며 신호해석이 복잡할 수 있다. 충격반향법은 계측 결과가 표면의 상태에 영향을 받는다. Smart aggregates는 구조물 내에 센서가 매립되어야 하고, PZT sensor는 계측 결과가 주파수에 민감하며 센서 자체의 내구성이 낮다는 한계점이 있다.

따라서 본 연구에서는 균열 보수 후 전기저항 측정만으로 보수 상태를 직관적으로 확인할 수 있는 스마트 보수재료 (smart repair materials, SRMs)를 개발하고자 한다. SRMs는 전도성 재료인 제강 슬래그 잔골재(fine steel slag aggregates, FSSAs)가 혼입된 시멘트 기반 보수재료이다. 기존 보수재료는 보수재료 자체가 균열 충전도를 평가하거나 보수 부위의 손상을 평가할 수 없지만, 개발하고자 하는 보수재료는 재료 자체가 보수재료로써의 기능뿐만 아니라 균열 충전도 및 보수 부위 손상 정도를 보수재료가 스스로 평가할 수 있는 재료로써 스마트 재료인 자기감지 콘크리트의 일종으로 스마트 보수재료라고 할 수 있다.

균열 충전도, 손상 및 응력 상태는 균열 상태와 전기저항 사이의 상관관계를 기반으로 추정될 수 있다. 균열이 발생하지 않은 경우, 전류는 콘크리트 내에서 원활하게 흐를 수 있지만, 균열이 발생하게 되면 균열이 발생한 영역으로는 전류가 흐르지 못해 전기저항이 증가한다. 하지만, 균열이 보수되면 전류가 원활히 흐를 수 있어 전기저항이 감소하며, 균열이 완전히 보수될수록 전기저항이 더 많이 감소한다. 따라서, 이러한 메커니즘을 기반으로 균열 부위 전기저항 측정만으로 균열 충전도를 파악할 수 있다. 또한, 보수 이후 전기저항이 급격히 증가할 경우 재손상이 발생한 것으로 판단할 수 있다.

SRMs는 보수재료의 성능과 자기감지 성능을 모두 확보해야 한다. 본 연구에서는 보수재료로서 SRMs의 압축강도가 KS F 4042 「콘크리트 구조물 보수용 폴리머 시멘트 모르타르」에서 제시하는 압축강도 품질기준(20 MPa 이상)을 만족하고 자기감지 재료로서 SRMs의 외부 하중에 따른 전기저항 변화율(fractional change in the electrical resistivity, FCR)을 10% 이상 확보하는 것을 목표로 한다. 또한, SRMs의 자기감지 능력 확보를 위한 전도성 재료는 그 크기와 경제성을 고려하여 제강 슬래그 잔골재(FSSAs)를 사용하였다.

이 연구는 SRMs를 사용한 보수 상태 평가 기술 개발을 위해 충전도 확인이 가능한 재료를 개발하고자 하며, 재료 개발의 기초단계로써 압축강도, 슬럼프 플로, 응결시간, 그리고 재료 자체의 자기감지 능력을 우선적으로 평가하고자 한다. FSSAs는 모래를 대체하여 혼입됨으로써 시멘트 복합체의 유

동성, 압축강도, 그리고 자기감지 능력을 향상시킬 수 있으며 (Le et al., 2020), steel fiber, multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs), nickel 등의 전도성 재료의 가격이 10,000 원/kg 이상인 것에 비해 FSSAs는 190 원/kg으로 매우 저렴하다는 장점을 가지고 있다(Le et al., 2021). 또한, FSSAs가 혼입된 시멘트 복합재료가 재령 1년 이후에도 안정적인 자기감지 성능을 가진다고 보고된 바 있다(Kim et al., 2023). 하지만, 일정량 이상의 FSSAs는 오히려 시멘트 복합체의 자기감지 성능을 감소시키기 때문에 실험을 통해 적절한 혼입량을 도출할 필요가 있다.

연구목표는 재령 24시간 이내에 FCR 10% 이상의 자기감지 성능을 가지는 SRMs를 개발하는 것이다. 이에 따른 세부 목표들은 (1) FSSAs 혼입량이 SRMs의 재료 특성 (슬럼프 플로, 응결시간)에 미치는 영향조사, (2) FSSAs 혼입량에 따른 SRMs의 전기역학적 응답 조사, 그리고 (3) 초기 SRMs의 재령변화가 전기역학적 응답에 미치는 영향 조사이다.

2. 자기감지 콘크리트의 전기역학적 거동

시멘트 복합재료의 자기감지 능력은 외부에서 가해지는 힘으로 인한 응력, 손상, 변형에 따른 재료의 전기저항 변화에 기인한다(Han et al, 2014). 자기감지 콘크리트의 전기저항률은 일반적으로 압축 응력이 증가함에 따라 전도성 재료의 사이 거리가 감소하고, 이에 따라 매트릭스 내부의 전도성 네트워크가 향상되어 감소한다. 이후, 압축 응력이 최대 지점에 도달하면 균열의 확장으로 인해 전도성 네트워크가 파괴되어 전기저항률이 증가한다(Han et al, 2014).

Kim et al.(2021a)은 압축하중 하에서 자기감지 능력을 가지는 스마트 초고강도 콘크리트(smart ultra-high performance concretes, S-UHPCs)의 전기역학적 거동을 Fig. 1과 같이 세 단계로 구분하여 제시하였다(Han et al., 2014): stage 1(탄성

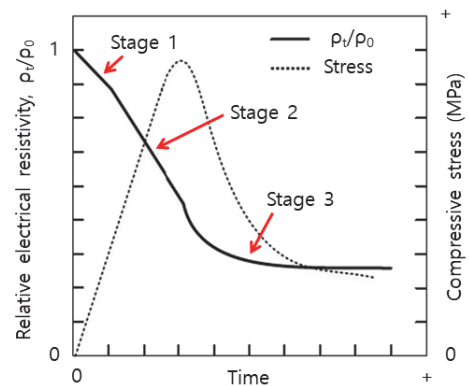


Fig. 1 Typical electromechanical response of S-UHPCs under compression (Kim et al., 2021a)

구간)에서는 전기저항률이 선형적으로 천천히 감소하고, stage 2(비탄성구간)에서는 전기저항률이 선형적으로 빠르게 감소하며, stage 3(파괴 후)에서는 전기저항률이 급격히 감소한 후 거의 변하지 않는다. S-UHPCs는 일반적인 시멘트 복합체와는 다르게 최대 응력 지점 도달 후 균열이 확장되더라도 혼입된 강섬유의 가교 효과에 의해 전기저항률이 크게 변하지 않는다.

자가감지 콘크리트의 자가감지 성능은 하중이 재하되는 동안 측정된 전기저항 R을 기반으로 식 (1)과 같이 전기저항률 ρ 을 계산하고, 식 (2)와 같이 FCR을 계산하여 평가할 수 있다.

$$\rho = R \times \frac{A}{L} \quad (1)$$

$$FCR(\%) = \frac{\rho_0 - \rho_t}{\rho_0} \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서 A는 시험체의 단면적, L은 전극 간 거리, ρ_0 는 초기 전기저항률, ρ_t 는 시간 (t)에서의 전기저항률이다.

현재까지 많은 연구자들이 시멘트 복합체의 자가감지 성능을 향상시키기 위해 carbon black (Nalon et al., 2020), MWCNT (Lee et al., 2019), graphene (Sevim et al., 2022), FSSAs (Le et al., 2020), nickel (Le et al., 2021), steel fiber (Kim et al., 2021b; Kim et al., 2022) 등의 전도성 재료들을 사용하여왔으며, 자기감지 성능 조사 결과를 Table 1에 나타내

Table 1 The self-sensing capacity of smart concrete corresponding to different functional fillers

References	Functional fillers		FCR (%)	σ (MPa)	SSC (%/MPa)
	Type	Contents			
Lee et al. (2019)	MWCNT	0.5 wt.%	9.3	100	0.093
Wang et al. (2019)	Carbon nano fiber	3 vol.%	4	10	0.400
Le et al. (2020)	FSSAs	50 wt.%	42.9	144	0.298
Nalon et al. (2020)	Carbon black	8 wt.%	4.5	13.1	0.305
Kim et al. (2021b)	Steel fiber	2 vol.%	47.9	145	0.330
Le et al. (2021)	Copper	10 wt.%	17.1	134	0.128
	Nickel	5 wt.%	27.5	145	0.190
Suo et al. (2022)	Graphene	0.05 wt.%	4.28	15	0.285
Wang et al. (2023)	Carbon fiber	0.2 vol.%	39.2	30	1.307
Average					0.371

었다. 응력 민감도(stress sensitivity coefficient, SSC)는 압축 응력이 1 MPa 증가함에 따른 FCR의 변화 정도를 의미하며, 압축 응력 (σ)을 얼마나 민감하게 감지하는지에 대한 지표로 활용하기 위해 식 (3)과 같이 계산되었다.

$$SSC(\%/MPa) = \frac{FCR(\%)}{\sigma(MPa)} \quad (3)$$

SSC는 기능성 재료의 종류와 혼입량 등에 따라 다르게 나타났다. 특히, Wang et al.(2023)이 보고한 carbon fiber 보강 시멘트 복합체의 SSC는 1.307 %/MPa로 가장 높았다. 조사된 SSC의 평균은 0.371 %/MPa로 확인되었으며, 본 연구에서는 SRMs의 자가감지 성능 확보를 위해 FCR을 10% 이상 확보할 뿐만 아니라 SSC를 평균 이상으로 확보하고자 한다.

3. 실험 프로그램

3.1 재료 및 시험체 준비

Table 2에는 전도성 재료에 따른 SRMs의 배합구성을 나타내었다. 시멘트는 ㈜쌍용양회의 초속경 시멘트(rapid setting cement)를 사용하였으며, 모래는 입경 0.3 mm 이하인 KS L 5100 「시멘트 강도시험용 표준사」를 사용하였다. 전도성 재료는 Fig. 2와 같이 최대 입경 크기가 0.39 μ m이며 구 형상을 가지는 FSSAs를 사용하였으며, ㈜에코마이스터에서 제공 받

Table 2 Composition of SRMs (by weight ratio)

Notation	Rapid setting cement	Water	Sand*	SP**	Setting retarder	FSSAs
FSSA00			3.0	0.003		-
FSSA25	1.0	0.6	2.25	0.003	0.004	0.75
FSSA50			1.5	-		1.5

*Sand: 입경 0.3 mm 이하 (KS L 5100 standard)

**SP: Super-plasticizer containing 25% solid and 75% water

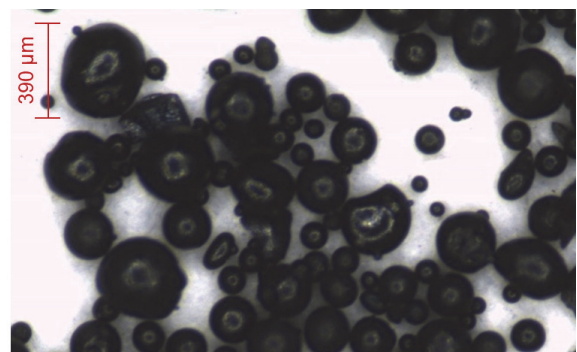


Fig. 2 Image of FSSAs

Table 3 Components of FSSAs

Chemical composition	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	f-CaO	Others
Component ratio (%)	24.1	38.3	13.1	6.31	3.68	0.1-0.3	14.01

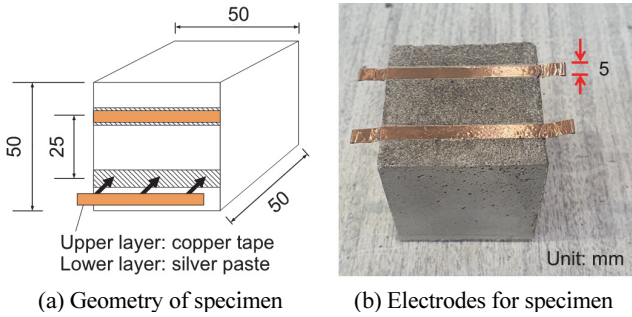


Fig. 3 Geometry of SRMs for investigating the electromechanical response under compressive load

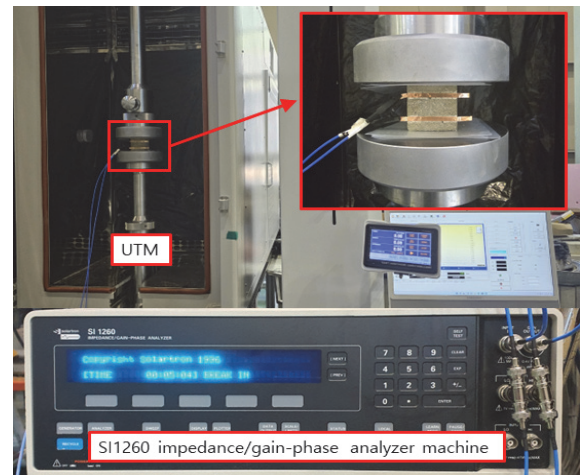
은 FSSAs의 화학 구성을 Table 3에 제시하였다. FSSAs는 SRMs에 모래 중량 대비 0%(FSSA00), 25%(FSSA25), 그리고 50%(FSSA50) 만큼 치환되어 혼합되었다. 응결지연제는 함수구연산을 사용하였으며, 모든 시리즈에 대해 시멘트 중량 대비 0.4%로 동일한 양을 사용하였다. 폴리카본산계 감수제 (super-plasticizer, SP)는 SRM의 유동성을 확보하기 위해 사용되었다. 물/시멘트 비는 0.5이다.

FSSAs가 혼합된 SRMs의 전기역학적 거동 조사를 위한 시험체는 50×50×50 mm³의 큐빅형 시험체를 사용하였다(Fig. 3a 참조). SRMs 제작을 위해 초속경 시멘트, 모래, 그리고 FSSAs를 5분간 건믹스하였다. 건믹스 이후 물을 3분 동안 투입하여 섞었으며 SP는 물이 모두 첨가된 이후 첨가되었다. 섞인 재료는 금형 몰드에 3000 rpm의 진동과 함께 타설되었다. 타설이 완료된 시험체는 플라스틱 시트로 덮어 2시간동안 20±2°C에서 기건 양생되었다.

SRMs의 전기저항 측정을 위한 전극은 구리 테이프를 사용하였으며, 구리테이프의 부착성 확보 및 접촉저항 최소화를 위해 구리테이프를 부착하기 전에 실버 페이스트를 시험체 표면에 도포하였다. 또한, 실버 페이스트의 효율을 향상시키기 위해 실버 페이스트를 도포하기 전에 그라인더를 사용하여 시험체 표면을 부드럽게 연마하였다. 전극 간 거리는 25 mm이며, 실제 환경에서는 벽체, 바닥 등 연속된 면에 대해 측정이 이루어지므로, 이를 묘사하기 위해 전극은 시험체의 한쪽 면에만 부착되었다(Fig. 3 참조).

3.2 실험 방법

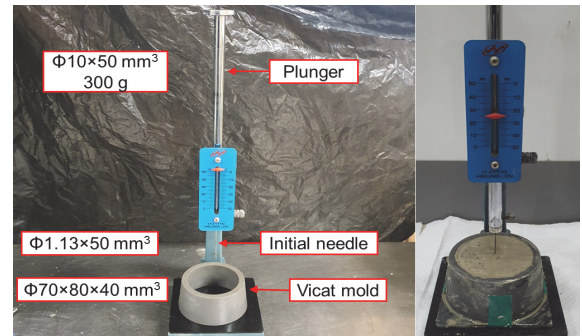
Fig. 4a에 압축 하중에 따른 SRMs의 전기역학적 거동 조사



(a) Investigating the electromechanical response



(b) Mini slump flow test



(c) Setting time

Fig. 4 Test setup

를 위한 실험 전경을 나타내었다. 압축 실험은 300 kN 용량의 만능재료시험기(universal testing machine, UTM)를 사용하여 수행되었으며, 하중은 1 mm/min의 변위 제어를 통해 적용되었다. 전도성 재료에 따른 SRMs의 유동성 조사를 위해 Fig. 4b와 같이 미니 슬럼프 플로 테스트를 수행하였다. 슬럼프 플로는 가장 긴축과 그에 수직이 되는 축의 길이를 평균하였다. SRMs의 응결시간은 KS L 5108 「비카트 침에 의한 수경성 시멘트의 응결시간 시험 방법」에 따라 측정하였다(Fig. 4c 참조). 실험 수행 시 실험실의 온도와 습도는 각각 22±2°C와 60±5%였다.

SRMs의 전기저항은 alternative current (AC) 기반의 SI1260 impedance/gain-phase analyzer machine (Solatron, 1260 A)을 사용하여 측정하였다. 인가된 전류의 진폭은 0.25 V_{rms}이며, 고정 주파수 결정을 위해 적용한 주파수의 범위는 0.1 Hz ~ 10

MHz이다. SRMs의 전기역학적 거동은 재령 3시간, 7시간, 그리고 24시간에서 조사되었으며, 각 시리즈 시편 3개의 실험 결과에 대하여 평균과 분산을 계산하였다.

4. 실험결과

4.1 슬럼프 플로 및 응결시간

Table 4에 FSSAs 치환율에 따른 슬럼프 플로와 응결시간 조사 결과를 나타내었다. 슬럼프 플로는 FSSAs의 치환율이 0%에서 25% 그리고 50%로 증가함에 따라 100에서 175, 그리고 240 mm로 증가하였다. 응결시간은 FSSAs의 치환율이 0%에서 50%로 증가함에 따라 초결(Initial) 시간의 경우 17분에서 40분, 종결(Final)시간은 25분에서 50분으로 증가하였다.

4.2 전기역학적 거동

Fig. 5에 FSSAs 치환율 및 재령에 따른 SRMs의 전기역학적 거동을 나타내었으며, Table 5에는 FSSAs 치환율 및 재령에 따라 조사된 SRMs의 전기역학적 특성들을 나타내었다. SRMs의 초기 전기저항률(ρ_0)은 재령이 증가함에 따라 증가하였다. 특히, FSSA50의 ρ_0 는 재령이 3시간에서 24시간으로 증가함에 따라 15.50에서 104.94 k Ω -cm로 577% 증가하였다. 하지만, 24시간 기준 ρ_0 는 FSSAs의 치환율이 0%(FSSA00)에서 25%(FSSA25)로 증가함에 따라 95.45에서 211.09 k Ω -cm로 121% 증가하고, FSSAs의 치환율이 50%(FSSA50)로 증가

함에 따라 211.09에서 104.94 k Ω -cm로 50.3% 감소하였다.

재령 및 치환율과 상관없이, SRMs의 전기저항률은 압축 응력이 증가함에 따라 감소하고 최대 압축 응력 지점 도달 후 급격히 증가하였다. 하지만, FCR은 재령과 FSSAs의 치환율에 따라 차이가 있었다. 특히, 재령 7시간 기준 FSSA25의 전기저항률은 압축 응력(σ)이 증가함에 따라 78.16에서 최대 응력 지점에서의 전기저항률(ρ_c)까지 63.68 k Ω -cm로 감소하여 FCR이 18.52% 그리고 SSC는 0.828 %/MPa로 자기감지 성능이 가장 높았다. 반면에, FSSA00의 3시간 기준 전기저항률은

Table 5 The electromechanical properties of SRMs corresponding to different contents of functional filler and ages

Notation	σ (MPa)	ρ_0 (k Ω -cm)	ρ_c (k Ω -cm)	$\Delta\rho$ (k Ω -cm)	FCR (%)	SSC (%/MPa)	
FSSA00	3H	17.35 (0.77)	16.72 (1.84)	15.71 (1.86)	1.01 (0.11)	6.12 (1.03)	0.354 (0.063)
	7H	21.25 (0.53)	46.49 (3.72)	41.79 (2.93)	4.70 (0.97)	10.03 (1.51)	0.471 (0.064)
	24H	26.21 (0.40)	95.45 (14.68)	84.71 (13.08)	10.74 (1.62)	11.26 (0.23)	0.430 (0.008)
FSSA25	3H	17.52 (0.17)	36.68 (2.04)	32.81 (1.73)	3.87 (0.32)	10.53 (0.32)	0.601 (0.015)
	7H	22.37 (0.15)	78.16 (1.69)	63.68 (1.12)	14.48 (0.63)	18.52 (0.44)	0.828 (0.020)
	24H	28.35 (0.90)	211.09 (20.23)	175.30 (15.95)	35.79 (4.29)	16.92 (0.40)	0.597 (0.009)
FSSA50	3H	19.13 (0.47)	15.50 (0.18)	14.30 (0.19)	1.21 (0.03)	7.79 (0.23)	0.407 (0.005)
	7H	28.00 (0.69)	61.82 (1.32)	50.60 (1.38)	11.23 (0.22)	18.17 (0.58)	0.649 (0.007)
	24H	37.06 (0.70)	104.94 (7.22)	90.30 (6.45)	14.64 (0.93)	13.97 (0.54)	0.377 (0.012)

Table 4 Slump flow and setting time of SRMs

Notation	Slump flow (mm)	Setting time (min)	
		Initial	Final
FSSA00	100	17	25
FSSA25	175	23	32
FSSA50	240	40	50

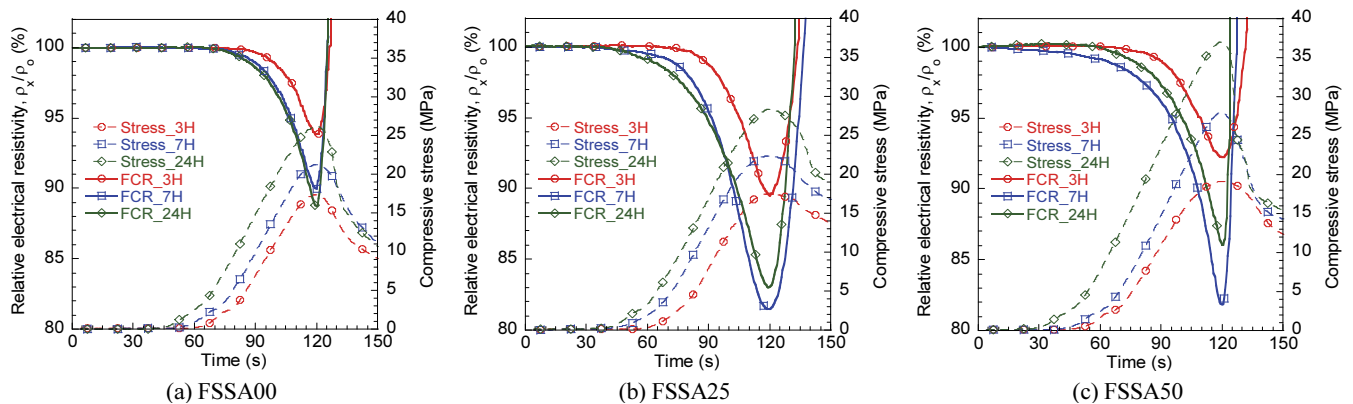


Fig. 5 Electromechanical responses of SRMs corresponding to FSSAs replacement ratio and age

압축 응력이 증가함에 따라 16.72에서 15.71 k Ω -cm로 감소하여 FCR이 6.12% 그리고 SSC는 0.354 %/MPa로 자기감지 성능이 가장 낮았다.

5. 고찰

5.1 슬럼프 플로 및 응결시간

SRMs의 슬럼프 플로는 FSSAs 치환율이 0%(FSSA00)에서 25%(FSSA25)로 증가함에 따라 100에서 175 mm로 75% 증가하고, 치환율이 50%(FSSA50)로 증가함에 따라 175에서 240 mm로 37.1% 증가하였다. FSSAs은 Fig. 2와 같이 구와 같은 형상을 가짐에 따라 각진 형태의 모래와 치환되었을 때 SRMs의 유동성을 급격히 증가시킬 수 있다. Le et al.(2020) 또한 FSSAs를 모래 중량 대비 50% 그리고 100% 치환하였을 때 자기감지 콘크리트의 슬럼프 플로우가 240에서 275, 그리고 290 mm로 증가하였다고 보고하였다.

SRMs의 응결시간은 모두 60분 이내로 확인되었다. 특히, F0의 초결시간과 종결시간은 각각 17분과 25분으로 응결시간이 가장 짧았다. 하지만, FSSAs 치환율이 50%(FSSA50)로 증가함에 따라 초결시간은 17분에서 40분으로 135% 증가하고 종결시간은 25분에서 50분으로 100% 증가하였다. 이는 FSSAs가 모래 대신 혼입됨에 따라 수화반응이 지연되었기 때문이다. Zhuang and Wang(2021)은 FSSAs를 시멘트 중량 대비 30% 대체한 시멘트 페이스트의 수화반응 지연 현상에 대해 조사하였으며, FSSAs 첨가에 따라 응결시간은 2.43~2.84배 증가하였다고 보고하였다. FSSAs는 공극 용액의 pH를 감소시켜 CH의 침전을 억제하고, 공극 용액의 Ca 농도를 높이지게 하여 ettringite 형성을 억제함에 따라 수화반응이 지연되고, 따라서 응결시간이 증가한다(Zhuang and Wang, 2021). 응결시간이 너무 빠르면 작업 시간이 부족함에 따라 사용이 제한될 수 있으나, 응결시간은 응결 조절제를 사용하여 조절이 가능하다.

따라서, FSSAs를 혼입한 SRMs (FSSA25와 FSSA50)은 높은 유동성과 속경성 특성을 기반으로 콘크리트 균열 보수를 위한 급속 보수재료로 사용되기에 충분하다.

5.2 전기역학적 거동

Fig. 6에는 FSSAs의 치환율에 따른 SRMs의 SSC를 나타내었다. SSC는 SRMs의 재령과 상관없이 FSSAs의 치환율이 0%(FSSA00)에서 25%(FSSA25)로 증가함에 따라 증가하고, 치환율이 50%(FSSA50)로 증가하면 오히려 감소하였다. 예를 들어, 재령 7시간에서의 SSC는 FSSAs의 치환율이 0%(FSSA00)에서 25%(FSSA25)로 증가함에 따라 0.601에서 0.828 %/MPa로 37.8% 증가하여 자기감지 능력이 가장 높게 나타났으나, FSSAs의 치환율이 50%(FSSA50)로 증가함에

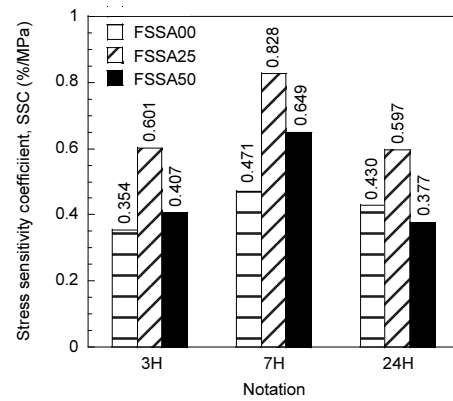


Fig. 6 SSCs of SRMs

따라 SSC는 0.828에서 0.597 %/MPa로 27.9% 감소하였다.

FSSAs의 치환율이 0%에서 25%로 증가하면 매트릭스내 부분적인 전도성 경로의 수가 더 많아짐에 따라 외부 하중에 의해 부분적인 전도성 경로들이 연속적인 전도성 경로로 더 쉽게 변하게 된다. 하지만, FSSAs의 치환율이 50%로 증가하게 되면 부분적인 전도성 경로들의 일부가 연속적인 전도성 경로로 변화하게 된다. 따라서, FSSA50의 부분적인 전도성 경로는 FSSA25보다 적어지고, 연속적인 전도성 경로의 수는 FSSA25보다 많아져 외부하중에 대한 민감도가 감소(SSC가 감소)하게 된다. Le et al.(2020) 또한 FSSAs 혼입량에 따른 S-UHPC의 자기감지 능력에 대해 조사하였으며, FSSAs의 모래 중량 대비 치환율이 0%에서 50%로 증가하면 FCR이 23.5%에서 42.9%로 82.6% 증가하지만, FSSAs 치환율이 100% 그리고 200%로 증가함에 따라 FCR은 34.4% 그리고 20%로 오히려 감소한다고 보고한 바 있다.

FSSAs의 치환율에 관계없이 SSC는 재령이 3시간에서 7시간으로 증가함에 따라 증가하고, 재령이 24시간으로 증가함에 따라 감소하였다. 특히, FSSA25의 SSC는 재령이 3시간에서 7시간으로 증가함에 따라 0.601에서 0.828 %/MPa로 37.8% 증가하였으나, 재령이 24시간으로 증가함에 따라 오히려 0.597 %/MPa로 27.9% 감소하였다. 재령이 3시간일 때, 매트릭스 내에는 수화반응을 일으키지 않은 물의 함량이 많아 물과 FSSAs로 이루어진 연속적인 전도성 경로의 수가 많다. 따라서, 전도성 네트워크는 안정적인 상태이기 때문에 외부 하중에 의한 변화가 적어 SSC가 낮다. 하지만, 재령이 7시간으로 증가하면 수화반응에 따른 매트릭스 내의 물의 감소로 인해 연속적인 전도성 경로의 일부가 부분적인 전도성 경로로 바뀌게 되어 SSC가 급격히 상승한다. 마지막으로, 재령이 24시간으로 증가하면 수화반응으로 인해 압축 강도는 상승하고 물의 함량이 더욱 낮아짐에 따라 부분적인 전도성 경로의 수는 줄어들어 SSC가 급격히 감소하게 된다.

SRMs의 압축강도는 FSSAs의 치환율에 관계없이, 재령 7

시간 이후 20 MPa 이상으로 KS F 4042의 압축강도 품질 기준을 만족하였다. 또한, FSSA00과 FSSA50의 채령 3시간에서의 FCR을 제외하고 모든 시리즈가 10% 이상의 FCR을 나타내었다. FSSA25의 SSC는 0.828 %/MPa로 Table 1에서 Wang et al.(2023)이 보고한 carbon fiber 보강 시멘트 복합체를 제외하고 가장 높았다. 따라서, SRMs를 사용하여 보수 품질을 진단하고 보수 부위의 손상 및 응력을 감지하기 위해서는 FSSA25를 사용하는 것이 가장 유리하다.

6. 결론

본 연구에서는 콘크리트 균열 보수 후 보수 부위의 전기저항률 측정만으로 보수 품질을 진단하고 보수 부위의 손상 및 응력 상태 파악이 가능한 스마트 보수재료(smart repair materials, SRMs) 개발을 위해 재강 슬래그 잔골재(fine steel slag aggregates, FSSAs)를 혼입한 초속경 시멘트 모르타르의 재료 특성과 초기 채령(3시간, 7시간, 24시간)에서의 자가감지 능력을 조사하였으며, 아래와 같은 결론이 도출되었다.

1. FSSAs의 모래 중량 대비 치환율이 0%(FSSA00)에서 50%(FSSA50)로 증가하면 FSSAs가 구 모양의 형상을 가짐에 따라 슬럼프 플로가 100에서 230 mm로 증가하며, FSSAs의 수화 지연 효과로 인해 초결 시간은 17분에서 40분, 종결 시간은 25분에서 50분으로 증가하였다.
2. 채령 7시간에서의 SSC는 FSSAs의 모래 중량 대비 치환율이 0%(FSSA00)에서 25%(FSSA25)로 증가함에 따라 매트릭스 내의 부분적인 전도성 경로 수가 증가하여 0.601에서 0.828 %/MPa로 37.8% 증가하며 가장 높은 SSC를 가지는 것으로 확인되었다.
3. 채령에 관계없이 FSSA50의 SSC(7시간 기준 0.597 %/MPa)는 FSSA25의 SSC(7시간 기준 0.828 %/MPa)보다 낮았으며, 이는 전도성 재료가 더 많이 첨가됨에 따라 부분적인 전도성 경로들의 일부가 연속적인 전도성 경로로 바뀌어 외부 하중 하에서의 전도성 네트워크 변화가 감소하였기 때문이다.
4. SRMs의 SSC는 FSSAs의 치환율과 관계없이 채령이 3시간에서 7시간으로 증가함에 따라 수화반응에 따른 매트릭스 내 물의 감소로 인한 부분적인 전도성 네트워크 수의 증가로 인해 증가하고, 채령이 24시간으로 증가함에 따라 지속되는 수화반응으로 인한 압축강도 증가와 부분적인 네트워크 수의 감소로 인해 감소하였다.
5. SRMs는 보수재료로서의 성능 및 자가감지 재료로서의 성능을 모두 확보하였으며, 균열 보수 후 보수 품질 진단 및 손상·응력 상태 점검에는 자가감지 성능이 가장 높은 FSSA25를 사용하는 것이 적합하다.

SRMs는 혼입되는 재료의 크기를 고려하여 0.5 mm 이상의 균열 혹은 대단면 보수재료로 사용될 수 있다. 하지만, 추후 SRMs의 부착강도, 내구성 등에 대한 추가적인 조사가 필요하며, 보수 품질을 명확히 진단하기 위해서는 균열 보수 상태(완전 충전, 불완전 충전)에 따른 전기저항률 변화를 조사하여 전기저항률을 기반으로 균열 내 보수재료의 충전도를 직관적으로 파악할 수 있는 기술의 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2022-00142566).

References

1. Al-Gburi, M., Jonasson, J. E., and Nilsson, M. (2022), Reducing thermal crack risks caused by restraint in young concrete - a case study on walls of water tanks, *Nordic Concrete Research*, Sciendo, 66(1), 41-54.
2. Ann, T. H., Bang, S. Y., and Kim, K. M. (2016), Development of convenient repair materials for the surface treatment method of cracked concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(1), 44-50 (in Korean).
3. Assaad, J. J. (2018), Development and use of polymer-modified cement for adhesive and repair applications, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd., 163, 139-148.
4. Garbacz, A., Piotrowski, T., Courard, L., and Kwaśniewski, L. (2017), On the evaluation of interface quality in concrete repair system by means of impact-echo signal analysis, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd., 134, 311-323.
5. Han, B., Yu, X., and Ou, J. (2014), Self-sensing concrete in smart structures, *Butterworth Heinemann*, Elsevier, Kidlington.
6. Hashimoto, K., Shiotani, T., Nishida, T., and Okude, N. (2019), Repair inspection technique based on elastic-wave tomography applied for deteriorated concrete structures, *Elasticity of Materials - Basic Principles and Design of Structures*, IntechOpen.
7. Jumaat, Z., Rosalia, V., and Hilario, J. (2006), A review of the repair of reinforced concrete beams, *Journal of Applied Science Research*, Academia, 2(6), 317-326.
8. Kan, Y. C., Lee, M. G., and Lee, H. W. (2021), Experimental investigation of mode-I fracture toughness of real-cracked concrete repaired by epoxy, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd., 293, 123490.
9. Kee, S. H. (2015), Evaluating the depth of a surface-opening crack in concrete slabs using surface wave measurements, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(3), 104-112 (in Korean, with English abstract).
10. Kim, H. J., Liu, X., Ahn, E. J., Shin, M. S., Shin, S. W., and Sim, S. H. (2019), Performance assessment method for crack repair in concrete using PZT-based electromechanical impedance technique, *NDT and E International*, Elsevier Ltd., 104, 90-97.
11. Kim, M. K., Le, H. V., and Kim, D. J. (2021), Electromechanical response of smart ultra-high performance concrete under external

- loads corresponding to different electrical measurements, *Sensors*, MDPI, 21, 1281.
12. Kim, T. U., Kim, M. K., and Kim, D. J. (2022), Investigation of the electromechanical response of smart ultra-high performance fiber reinforced concretes under flexural, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 26(5), 57-65 (in Korean, with English abstract).
 13. Kim, T. U., Kim, M. K., Park, J. W., and Kim, D. J. (2023), Effects of temperature and humidity on self-stress sensing capacity of smart concrete blocks, *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd., 69, 106227.
 14. Kim, T. U., Le, H. V., Park, J. W., Kim, S. E., Jang, Y., and Kim, D. J. (2021), Development of a smart concrete block with an eccentric load sensing capacity, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd., 306, 124881.
 15. Kwon, C. W., Kong, T. W., Lee, S. H., and Lee, H. B. (2013), Cement mortar strength properties of using high early strength cement and blast furnace slag powder, *Proceedings of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection Conference*, 487-488 (in Korean, with English abstract).
 16. Le, H. V., Kim, M. K., Kim, S. E., Chung, S. Y., and Kim, D. J. (2021), Enhancing self-stress sensing ability of smart ultra-high performance concretes under compression by using nano functional fillers, *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd., 44, 102717.
 17. Le, H. V., Lee, D. H., and Kim, D. J. (2020), Effects of steel slag aggregate size and content on piezoresistive responses of smart ultra-high-performance fiber-reinforced concretes, *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier Ltd., 305, 111925.
 18. Lee, S. Y., Le, H. V., and Kim, D. J. (2019), Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd., 220, 149-160.
 19. Nalon, H. G., Ribeiro, J. C. L., Araújo, E. N. D., Pedroti, L. G., Carvalho, J. M. F., Santos, R. F., and Aparecido-ferreira, A. (2020), Effects of different kinds of carbon black nanoparticles on the piezoresistive and mechanical properties of cement-based composites, *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd., 32, 101724.
 20. Pang, B., Zhang, Y., and Liu, G. (2018), Study on the effect of waterborne epoxy resins on the performance and microstructure of cement paste, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd., 167, 831-845.
 21. Sevim, O., Jiang, Z., and Ozbulut, O. E. (2022), Effects of graphene nanoplatelets type on self-sensing properties of cement mortar composites, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd., 359, 129488.
 22. Suo, Y., Xia, H., Guo, R., and Yang, Y. (2022), Study on self-sensing capabilities of smart cements filled with graphene oxide under dynamic cyclic loading, *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd., 58, 104775.
 23. Wang, C., Xie, J., Shen, Y., and Jiang, J. (2022), Research on the mechanical behavior of a steel-concrete composite link slab on a simply supported girder bridge, *Metals*, MDPI, 12,1410.
 24. Wang, H., Shen, J., Liu, J., Lu, S., and He, G. (2019), Influence of carbon nanofiber content and sodium chloride solution on the stability of resistance and the following self-sensing performance of carbon nanofiber cement paste, *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier Ltd., 11, e00247.
 25. Wang, L., Zhang, Y., Du, H., Feng, G., and Qi, T. (2023), Health monitoring of C60 smart concrete based on self-sensing, *Materials Today Communications*, Elsevier Ltd., 35, 105834.
 26. Wang, X., Yao, J., Li, X., Guo, Y., Shen, A., and Pu, H. (2018), Mechanical properties improvement mechanism of silica fume-modified ultrafine cement used to repair pavement microcracks, *Advances in Materials Science and Engineering*, Hindawi, 2018, 4898230.
 27. Zhang, H., Li, J., Kang, F., and Zhang, J. (2022), Monitoring and evaluation of the repair quality of concrete cracks using piezoelectric smart aggregates, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd., 317, 125775.
 28. Zhuang, S., and Wang, Q. (2021), Inhibition mechanisms of steel slag on the early-age hydration of cement, *Cement and Concrete Research*, Elsevier Ltd., 140, 106283.

Received : 07/10/2023

Revised : 07/31/2023

Accepted : 07/31/2023

요 지 : 본 연구에서는 제강 슬래그 (fine steel slag aggregates, FSSAs) 혼입량에 따른 스마트 보수재료 (smart repair materials, SRMs)의 전기역학적 거동을 조사하였다. SRMs는 보수 품질을 스스로 진단하고 보수 부위의 손상을 자체적으로 감지할 수 있다. FSSAs는 SRMs에 모래 중량 대비 0% (FSSA00), 25% (FSSA25), 그리고 50% (FSSA50) 치환되어 혼입되었다. SRMs의 전기저항률은 일반적으로 압축 응력이 증가함에 따라 감소하였다. 재령 7시간 기준 FSSA25의 전기저항률은 압축 응력이 0에서 22.57 MPa로 증가함에 따라 78.16에서 63.68 kΩ-cm으로 감소하였다. FSSAs의 모래 중량 대비 치환율이 0%에서 25%로 증가함에 따라 재령 7시간 기준 응력 민감도 (stress sensitivity coefficient, SSC)는 매트릭스 내 부분적인 전도성 경로 수의 증가로 인해 0.471에서 0.828 %/MPa로 증가하였다. 하지만, 치환율이 50%까지 증가함에 따라 부분적인 전도성 경로들의 일부가 연속적인 전도성 경로로 변화하여 SSC는 0.828에서 0.649 %/MPa로 감소하였다. SRMs는 보수 부위의 전기저항률만을 측정하는 것으로 보수 품질을 진단하고 보수 부위의 추가 손상을 스스로 감지할 수 있을 뿐만 아니라 구조물의 역학적 성능을 빠르게 회복시킬 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어 : 자가감지 콘크리트, 급속 보수재료, 전도성 기능성 재료, 손상 감지, 응력 감지