

# 힘하중을 받는 스마트 초고강도 섬유보강 콘크리트의 전기역학적 거동 조사

김태욱<sup>1</sup>, 김민경<sup>2</sup>, 김동주<sup>3\*</sup>

## Investigation of the Electromechanical Response of Smart Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concretes Under Flexural

Tae-Uk Kim<sup>1</sup>, Min-Kyoung Kim<sup>2</sup>, Dong-Joo Kim<sup>3\*</sup>

**Abstract:** This study investigated the electromechanical response of smart ultra-high performance fiber reinforced concretes (S-UHPFRCs) under flexural loading to evaluate the self-sensing capacity of S-UHPFRCs in both tension and compression region. The electrical resistivity of S-UHPFRCs under flexural continuously changed even after first cracking due to the deflection-hardening behavior of S-UHPFRCs with the appearance of multiple microcracks. As the equivalent bending stress increased, the electrical resistivity of S-UHPFRCs decreased from 976.57 to 514.05 k $\Omega$ (47.0%) as the equivalent bending stress increased in compression region, and that did from 979.61 to 682.28 k $\Omega$ (30.4%) in tension region. The stress sensitivity coefficient of S-UHPFRCs in compression and tension region was 1.709 and 1.098 %/MPa, respectively. And, the deflection sensitivity coefficient of S-UHPFRCs in compression region(30.06 %/mm) was higher than that in tension region(19.72 %/mm). The initial deflection sensing capacity of S-UHPFRCs was almost 50% of each deflection sensitivity coefficient, and it was confirmed that it has an excellent sensing capacity for the initial deflection. Although both stress- and deflection-sensing capacity of S-UHPFRCs under flexural were higher in compression region than in tension region, S-UHPFRCs are sufficient as a self-sensing material to be applied to the construction field.

**Keywords:** Self-sensing concrete, Smart ultra-high performance concrete, Functional filler, Damage sensing, Stress sensing

### 1. 서 론

최근 토스카나주 교량 붕괴(2020, 이탈리아), 플로리다주 아파트 붕괴(2021, 미국) 등과 같이 콘크리트의 균열, 파손 등으로 인한 구조물 붕괴 사고가 지속적으로 보고되고 있으며, 세계적으로 구조물 노후화의 증가로 인한 위협은 계속해서 커지고 있다(An and Jang, 2017). 콘크리트 구조물 붕괴의 주 원인 중 하나는 균열로, 콘크리트 구조물의 안전성 증대 및 장수명화를 위해 균열에 대한 적절하고 지속적인 유지관리가 필수적으로 이루어져야 한다.

현재, 콘크리트 구조물에 대한 일반적인 손상 및 균열 평가는 육안 관측, 영상 처리 기법(Kim et al., 2017; Choi et al., 2019), 광섬유(Wan and Leung, 2007), 초음파(Wolf et al., 2007; Kim et al., 2020(a)) 등을 사용하여 이루어진다. 하지만, 육안

관측과 영상 처리 기법은 표면상의 균열 폭과 길이만 확인할 수 있고, 접근이 어려운 위치의 균열과 미세균열은 관측이 어렵다는 한계점이 있다. 반면에, 센서 기반의 균열 평가는 센서 자체의 낮은 내구성과 센서 접촉에 따른 균열 검출 능력에 한계가 있으며, 초음파 기반의 균열 평가는 균열 깊이 확인은 가능하나 측정 위치마다 변동성이 크고 균열 진단을 위한 신호 해석이 복잡하다는 단점이 있다(Ahn et al., 2017).

이러한 한계점을 극복하기 위해, 구조체로서의 역할과 응력 혹은 손상을 감지하는 센서 역할을 동시에 수행할 수 있는 자기감지 시멘트 복합재료(self-sensing cementitious composites, SSCCs)에 대한 관심이 증가하고 있다. 그 중에서도 다수의 미세균열을 생성하여 초기 균열 이후에도 높은 인장저항 성능을 가질 뿐만 아니라 자기감지 능력이 손실되지 않는 변형 경화 강섬유 보강 시멘트 복합재료(strain-hardening steel-fiber reinforced cementitious composites, SH-FRCCs)의 전기역학적 거동 조사(Kim et al., 2018; Lee et al., 2018; Le et al., 2021(a))와 건설 분야에 적용하기 위한 연구들(Kang et al., 2018; Bae and Pyo, 2020; Le et al., 2021(b); Yuan et al., 2021)이 다수 수행되었다. 특히, 매우 높은 매트릭스 압축강도(약 180 MPa)를 가지는 초고강도 콘크리트(ultra-high performance concrete, UHPC)를 매트릭스로 사용한 초고강도 강섬유 보강

<sup>1</sup>정회원, 세종대학교, 건설환경공학과, 석박통합과정

<sup>2</sup>정회원, 세종대학교, 건설환경공학과, 선임연구원

<sup>3</sup>정회원, 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 2022년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2022년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

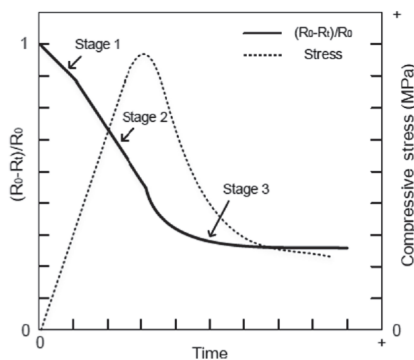
콘크리트(ultra-high performance steel-fiber reinforced concretes, UHPFRCs)는 섬유와 매트릭스 간의 높은 등가 부착강도로 보다 많은 미세균열을 생성함으로써 더 높은 변형 능력과 인장 강도를 가지며(Kim et al., 2010), 초기 균열 이후 변형 경화 구간에서 매우 높은 자기감지 성능을 가진다고 보고되었다(Kim et al., 2018). 또한, Le et al., 2020은 UHPFRCs에 공형상의 재강슬래그 잔골재(fine steel slag aggregates, FSSAs)를 보강한 스마트 초고강도 강섬유 보강 콘크리트(smart ultra-high performance steel-fiber reinforced concretes, S-UHPFRCs)의 향상된 응력, 변형, 그리고 손상 감지 능력을 검증한 바 있다.

이후, 개발된 S-UHPFRCs를 구조물에 적용하기 위하여 케이블의 긴장력을 모니터링 할 수 있는 S-UHPFRCs 기반의 스마트 콘크리트 정착구(Lee et al., 2019; Lee et al., 2021)와 편심 하중 감지 및 기존 구조물에도 적용할 수 있는 스마트 콘크리트 정착관(Kim et al., 2021(c))을 개발하기 위한 연구들이 수행된 바 있다.

본 연구에서는 S-UHPFRCs의 교량 상판 또는 하부구조 적용 가능성을 평가하기 위하여 휨 하중 하에서 S-UHPFRCs의 전기역학적 거동을 조사하고자 한다. 일반적으로 휨 하중을 받는 콘크리트 구조부재는 상면에서 압축력 그리고 하면에서 인장력을 받게 된다. 따라서, 이에 대한 영향을 고려하기 위하여 휨-압축과 휨-인장에 대한 S-UHPFRCs의 전기역학적 거동을 모두 조사할 필요가 있다. 이 연구의 세부 목표는 (1) 휨-압축 그리고 휨-인장 하에서 S-UHPFRCs의 전기역학적 거동 조사와 (2) 휨-압축 그리고 휨-인장 하에서 S-UHPFRCs의 응력과 처짐 감지 능력 평가이다.

## 2. 외부 하중을 받는 SH-FRCCs의 전기역학적 거동

SH-FRCCs의 압축 및 인장 하중 하에서의 전기역학적 거동



(a) Under compression(Kim et al., 2021(c))

은 하중 재하 시간동안 측정된 SH-FRCCs의 전기저항을 기반으로 얻어질 수 있다. 일반적으로 전기저항은 voltage 측정용 전극 간의 거리( $L$ )에 비례하고 단면적( $A$ )에 반비례하므로 시험체의 형상에 따라 달라진다. 전기저항률( $\rho$ )은 재료의 고유한 값으로, 같은 재료는 동일한  $\rho$ 를 가진다. 하지만, 강섬유 보강 시멘트 복합체의 경우 섬유 길이에 따른 전극간의 거리( $L$ )가 충분하지 않을 경우  $\rho$ 가 달라질 수도 있다(Banthia et al., 1992). 본 논문에서의  $L$ 은 강섬유 길이(30 mm)의 3배 이상인 100 mm를 적용하였다. 전기저항률은 측정된 전기저항( $R$ )을 사용하여 식(1)과 같이 계산할 수 있다.

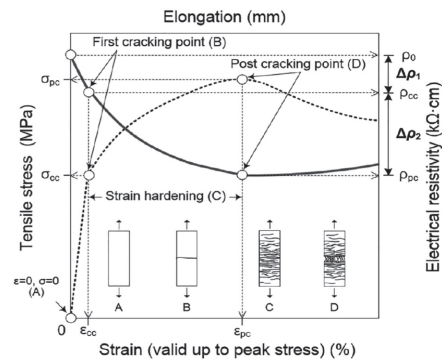
$$\rho = R \times \frac{A}{L} \quad (1)$$

외부 하중 하에서 SH-FRCCs의  $\rho$ 는 Fig. 1과 같이 하중, 변형, 또는 손상이 가해짐에 따라 변화하며, 식(2)를 사용하여  $\rho$ 의 변화율(Fractional change in the electrical resistivity, FCR)을 계산할 수 있다.

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

여기서  $\rho_0$ 는 초기 전기저항률,  $\rho_x$ 는 변형( $\epsilon_x$ ), 응력( $\sigma_x$ )에서의 전기저항률이다.

압축력을 받는 SH-FRCCs의 전기역학적 거동은 Fig. 1(a)와 같이 세 단계로 나눌 수 있다(Kim et al., 2021(c)). Stage 1에서는 탄성 영역 내에서 압축응력이 증가함에 따라 전기저항률은 선형적으로 천천히 감소한다. 그리고 stage 2에서는 비탄성 영역에서 압축응력이 증가함에 따라 전기저항률은 선형적으로 빠르게 감소한다. 마지막으로, stage 3에서는 최대 응력 도달 후 매트릭스의 파괴와 함께 전기저항률이 급격히 감소하며, 이후 거의 변화하지 않는다.



(b) Under direct tension(Kim et al., 2020(b))

Fig. 1 Typical electromechanical response of SH-FRCCs corresponding to different loads

인장력을 받는 SH-FRCCs의 전기저항률 변화 거동은 Fig. 1(b)에 나타내었다. 인장 변형률( $\epsilon$ )과 인장강도( $\sigma$ )가 0에서 초기 균열지점까지  $\epsilon_{cc}$ 와  $\sigma_{cc}$ 까지 증가함에 따라 전기저항률은  $\rho_0$ 에서  $\rho_{cc}$ 까지 약간 감소한다. 초기 균열 이후, 최종 균열 지점까지 다수의 미세균열이 형성되며 인장 변형률과 인장강도는  $\epsilon_{pc}$ 와  $\sigma_{pc}$ 까지 증가하고, 전기저항률은  $\rho_{cc}$ 에서  $\rho_{pc}$ 까지 급격하게 감소한다(Kim et al., 2020(b)).

이러한 특성을 기반으로 SH-FRCCs의 전기저항 측정만을 통해 전기저항 변화를 관찰함으로써 SH-FRCCs에 작용하는 힘을 추정하거나 손상 발생 여부를 판단할 수 있다. 뿐만 아니라, 전기저항 측정 장비 외에 추가적인 장비가 필요하지 않으며, 사람이 접근하기 힘든 장소에 적용하여 전기저항을 실시간으로 수신함으로써 구조물 모니터링을 효율적으로 수행할 수 있다는 장점이 있다.

현재까지 압축과 인장 하중 하에서 S-UHPFRCs의 전기역학적 거동은 이미 수행되었으나, 이를 기반으로 휨 하중 하에서 S-UHPFRCs의 전기역학적 거동을 설명하기에는 한계가 있다. 또한, 실제 구조물의 경우 압축 혹은 인장 하중이 개별적으로 작용하는 경우보다 압축과 인장이 동시에 발생하는 휨 하중을 받는 경우가 많다. 따라서, 휨 하중 하에서 S-UHPFRCs의 자기감지 능력은 필히 조사되어야 한다. 본 연구에서는 휨-압축 그리고 휨-인장 하에서 S-UHPFRCs의 전기역학적 거동을 조사함으로써 S-UHPFRCs의 실제 교량 상판 또는 하부 구조물 적용 가능성을 평가하고자 한다.

### 3. 실험 프로그램

#### 3.1 재료 및 시험체 준비

##### 3.1.1 재료

Table 1에 S-UHPFRCs의 배합표를 나타내었으며, Table 2에는 전도성 기능성 재료(conductive functional filler)로 사용된 FSSAs와 강섬유(steel fiber)의 특성을 나타내었다. 시멘트는 비표면적 3480  $\text{cm}^2/\text{g}$  그리고 밀도 3.15  $\text{g}/\text{cm}^3$ 의 Type 1 시멘트를 사용하였다. 이 연구에서 사용된 silica fume, silica powder, silica sand의 평균 입경은 각각 0.15  $\mu\text{m}$ , 4.2  $\mu\text{m}$ , 그리고 0.2 mm이다. Fig. 2에는 전도성 기능성 재료로 사용된 FSSAs와 강섬유의 사진을 나타내었다. Le et al., 2020은 FSSAs가 모래 중량 대비 50% 치환되었을 때, S-UHPFRCs의 감지성능이 가장 높았다고 보고한 바 있다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 2(a)와 같이 최대 입경 0.39 mm의 공 형상을 가지는 FSSAs를 모래 중량 대비 50% 치환하였다. 사용된 강섬유의 직경과 길이는 각각 0.3 mm와 30 mm로 2.0 vol.% 보강하였다. 고성능 감수제(polycarboxylate-based superplasticizer, SP)는 S-UHPFRCs 매트릭스의 유동성 향상을 위해 사용되었다.

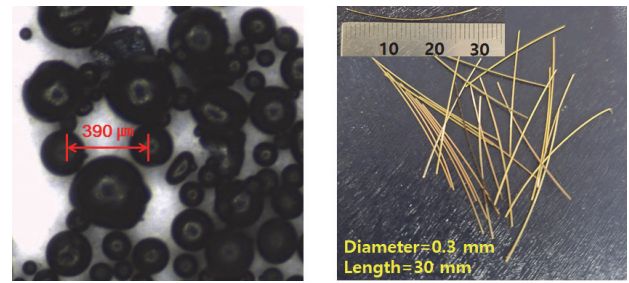
**Table 1** Composition of S-UHPFRCs(by weight ratio)

Cement (Type I)	Silica fume	Silica powder	Silica sand	FSSAs	Water	Steel fiber (vol.%)	SP*
1.0	0.15	0.25	0.50	0.50	0.20	2.0	0.0047

\*SP: Superplasticizer containing 30% solid and 70% water

**Table 2** Properties of conductive functional fillers

Functional fillers	Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Length (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
FSSAs	$\leq 390$	-	-	-
Steel fiber	200	30.0	2447	200



(a) Fine steel slag aggregates

(b) Steel fibers

**Fig. 2** The images of conductive functional fillers

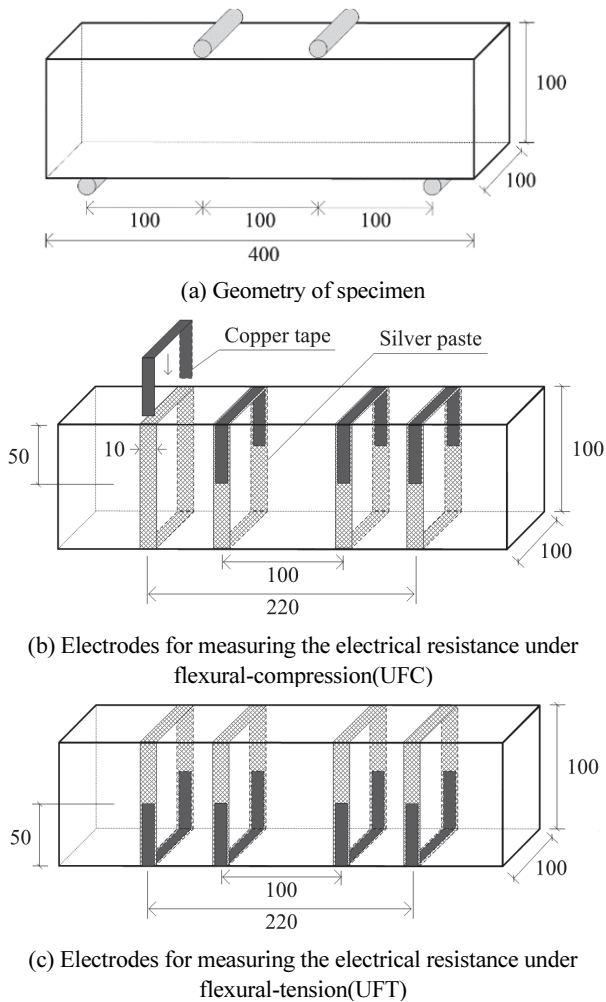
S-UHPFRCs의 매트릭스 강도는 179 MPa이다.

##### 3.1.2 시험체 준비

휨 시험을 위한 시험체는 100×100×400  $\text{mm}^3$ 의 빔 시험체를 사용하였다(Fig. 3(a) 참조). S-UHPFRCs 제작을 위해 먼저 시멘트, silica fume, silica powder를 10분간 건믹스 하였다. 이후 silica sand와 FSSAs를 첨가하고 추가로 10분간 섞은 후 물을 10분 동안 천천히 투입하였다. 이후 SP를 5분간 천천히 첨가하였다. 매트릭스가 적절한 유동성(미니 슬럼프 플로우 240 mm)를 확보하였을 때, 강섬유를 2분간 천천히 혼입하였다.

이후 매트릭스를 약간의 진동(3000 rpm)과 함께 아크릴 몰드에 타설하였다. 모든 시험체는 타설 후 48시간동안 20±2  $^{\circ}\text{C}$  온도에서 플라스틱 시트로 덮어 보관하였으며, 90 $^{\circ}\text{C}$ 의 고온에서 3일간 수중 양생되었다. 양생 후 실험 이전까지 시험체는 상온에서 7일간 보관되었다.

S-UHPFRCs의 전기저항 측정을 위해 구리테이프를 전극으로 사용하였으며, 거친 콘크리트 표면에 대한 구리테이프의 부착성 확보 및 전극과 시험체 사이의 접촉저항 최소화를 위해 시험체 표면에 실버 페이스트를 도포한 후 구리테이프를 부착하였다. 전기저항은 멀티미터(Fluke 8846A, Fluke corporation, USA)를 사용하여 direct current(DC)를 기반으로



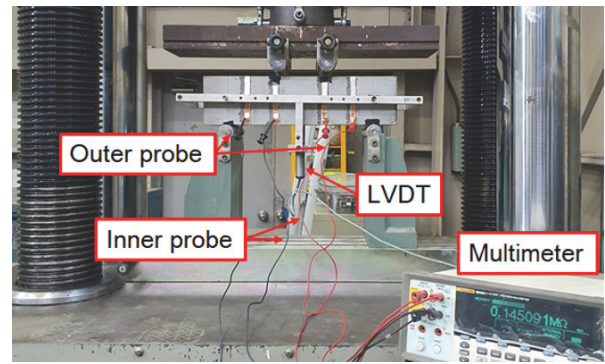
**Fig. 3** Specimen for investigation the electromechanical response under flexural loading

4 탐침 저항법을 이용하여 측정하였다.

본 연구에서는 S-UHPFRCs에 대한 휨-압축과 휨-인장 하에서의 전기역학적 거동 조사를 위해 Fig. 3(b)와 같이 압축 영역에 전극을 부착한 시험체(under flexural-compression, UFC)와 Fig. 3(c)와 같이 인장 영역에 전극을 부착한 시험체(under flexural-tension, UFT)를 사용하였다. 전류를 흘리는 외부 전극과 전압을 측정하는 내부 전극의 거리는 각각 100 mm와 220 mm 이다.

### 3.2 실험 방법

Fig. 4에 휨-압축과 휨-인장에 따른 S-UHPFRCs의 전기역학적 거동 조사를 위한 KS F 2566 「섬유보강 콘크리트의 휨 성능 시험방법」에 따른 4점 굽힘 시험 전경을 나타내었다. 휨 실험은 300 tonf 용량의 만능 재료 시험기(universal testing machine, UTM)을 사용하여 수행되었다. 하중은 1 mm/min 변위 제어를 적용하였으며, 처짐을 측정하기 위해 시험체 하면



**Fig. 4** Test set-up for flexural test

중앙에 Linear Variable Displacement Transducer(LVDT)를 설치하였다. 시험체의 길이는 300 mm이다.

시멘트 복합체에 전류가 흐르게 되면 분극화 현상(polarization effect)이 발생한다. 분극화 현상은 전극과 유전체 사이에 전류가 흐를 때, 원래 흐르던 전류의 반대 방향으로 작용하는 기전력으로 인해 전류 측정 시간동안 시간이 증가함에 따라 전기저항이 증가하는 것을 말한다. 따라서, 분극화 현상이 발생하면 시멘트 복합체의 전기저항은 시간에 따라 점차 증가하며, 일정 시간이 지난 후 안정화된다. 본 연구에서는 분극화 현상에 대한 영향을 최소화하기 위하여 시험체에 전류 인가 후 1시간동안 전기저항의 안정화를 관찰한 뒤 실험을 수행하였다. 실험 수행 시 실험실의 온도와 습도는 각각  $26 \pm 2^\circ\text{C}$ 와  $55 \pm 5\%$ 이다.

## 4. 실험결과

Fig. 5에 휨-압축과 휨-인장 하에서 S-UHPFRCs의 전기역학적 거동을 나타내었으며, Table 3에는 실험결과를 표로 제시하였다. 4점 굽힘 시험에 따른 휨 인장 응력( $f$ )은 측정된 휨 인장 하중( $P$ )과 시험체 형상 및 길이( $L$ )으로 식(3)과 같이 계산된다.

$$f = \frac{PL}{bh^2} \quad (3)$$

여기서  $b$ 는 시험체의 폭,  $h$ 는 시험체의 높이이다.

SH-FRCCs는 휨 하중 하에서 초기균열 이후 생성되는 다수의 균열로 인하여, 초기 균열의 시작점으로 정의되는 선형구간 한계점(Limit of Proportionality, LOP)에서의 휨 하중( $P_{LOP}$ )보다 최대 휨강도 지점(Modulus of Rupture, MOR)에서의 휨 하중( $P_{MOR}$ )이 더 큰 처짐 경화 거동(deflection-hardening behavior)을 보인다(Nguyen et al., 2013).

SH-FRCCs의 한 종류인 S-UHPFRCs(UFC와 UFT)의 초기

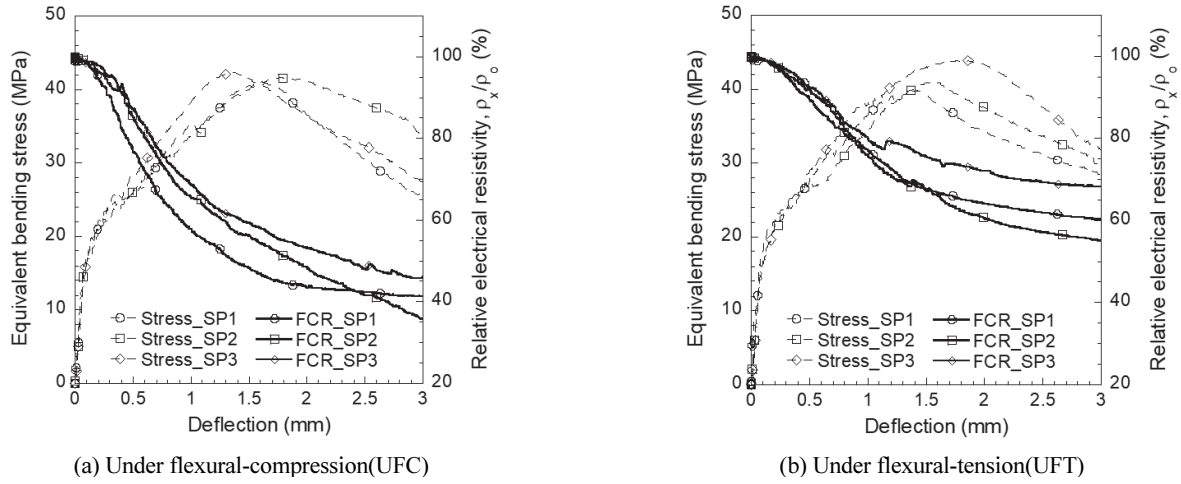


Fig. 5 The electromechanical response of S-UHPFRCs under flexural-compression and flexural-tension

Table 3 Test result of the electromechanical response of S-UHPFRCs under flexural loading

Notation	$f_{LOP}$ (MPa)	$\delta_{LOP}$ (mm)	$f_{MOR}$ (MPa)	$\delta_{MOR}$ (mm)	Electrical resistivity(k $\Omega$ -cm)			Fractional change in the electrical resistivity(%)		
					$\rho_0$	$\rho_{LOP}$	$\rho_{MOR}$	$FCR_{LOP}$	$FCR_{MOR}$	
UFC	SP1	15.77	0.069	40.90	1.642	1051.37	1040.17	487.24	1.07	53.66
	SP2	15.15	0.070	41.73	1.767	973.70	965.09	502.69	0.88	48.37
	SP3	13.45	0.063	42.46	1.378	904.63	894.04	552.23	1.17	38.96
<b>Average</b>	<b>14.79</b>	<b>0.067</b>	<b>41.69</b>	<b>1.596</b>	<b>976.57</b>	<b>966.43</b>	<b>514.05</b>	<b>1.04</b>	<b>47.00</b>	
STDV.	(0.98)	(0.003)	(0.64)	(0.162)	(59.94)	(59.67)	(27.72)	(0.12)	(6.08)	
UFT	SP1	15.13	0.065	39.86	1.421	1047.64	1037.44	715.32	0.97	31.72
	SP2	15.04	0.073	40.95	1.552	905.04	900.28	605.73	0.53	33.07
	SP3	13.29	0.067	43.92	1.758	986.16	981.76	725.79	0.45	26.40
<b>Average</b>	<b>14.49</b>	<b>0.068</b>	<b>41.58</b>	<b>1.577</b>	<b>979.61</b>	<b>973.16</b>	<b>682.28</b>	<b>0.65</b>	<b>30.40</b>	
STDV.	(0.84)	(0.003)	(1.71)	(0.139)	(58.40)	(56.32)	(54.30)	(0.23)	(2.88)	
<b>Average</b>	<b>14.41</b>	<b>0.068</b>	<b>41.64</b>	<b>1.586</b>	<b>978.09</b>					
STDV.	(0.85)	(0.003)	(1.30)	(0.151)	(59.19)					

균열 지점에서의 휨 인장 응력( $f_{LOP}$ )와 최대 휨 인장 응력( $f_{MOR}$ )은 각각 14.41과 41.64 MPa로 일반적인 처짐 경화 거동을 보였다. 이때의 처짐( $\delta_{LOP}$ 와  $\delta_{MOR}$ )은 각각 0.068과 1.586 mm이다.

S-UHPFRCs의 전기저항은 측정 영역에 관계없이 휨 인장 응력이 증가함에 따라 감소하였다. UFC의 전기저항률은 초기 전기저항률( $\rho_0$ ) 976.57 k $\Omega$ -cm부터 초기 균열 시작점에서 966.43 k $\Omega$ -cm( $\rho_{LOP}$ )으로  $\rho_0$  대비 1.04%( $FCR_{LOP}$ ) 감소하였으며, 최대 휨 인장 응력에서의 전기저항률( $\rho_{MOR}$ )은 514.05 k $\Omega$ -cm로 감소하여  $FCR_{MOR}$ 이 47.00%로 확인되었다. UFT의  $\rho_{LOP}$ 는 973.16 k $\Omega$ -cm으로  $\rho_0$  대비 0.65%( $FCR_{LOP}$ ) 감소하였으며,  $\rho_{MOR}$ 은 682.28 k $\Omega$ -cm로  $\rho_0$  대비 30.40%( $FCR_{MOR}$ ) 감소하였다.

## 5. 고찰

Fig. 6에 휨 하중을 받는 S-UHPFRCs의 전기저항 변화 메커니즘에 대한 그림을 나타내었다. S-UHPFRCs의 상면에서는 압축력이 지배적으로 작용하기 때문에 압축력 작용 방향에 따라 압축 변형이 발생한다. S-UHPFRCs에 보강된 전도성 기능성 재료인 FSSAs와 강섬유는 압축 변형으로 인해 매트릭스 내부에서 서로 가까워지게 된다. 따라서, 기존에 형성되어 있는 전도성 네트워크는 압축 변형으로 인해 가까워진 전도성 재료들을 기반으로 부분적 전도성 경로가 연속적인 전도성 경로로 바뀌며 재구축된다. 따라서, 압축 변형이 발생하였을 때, S-UHPFRCs의 전기저항은 감소한다.

반면에, 인장력이 지배적으로 작용하는 하면에서는 균열이 발생하게 되며, 매트릭스 균열 면에서 강섬유가 가교 역할을 한다. 일반적으로 저항은 전압에 비례하고 전류의 크기에 반 비례하여 전류가 줄어들면, 즉 전자가 이동할 수 있는 경로가 줄어들면 저항이 증가한다. 강섬유 보강 시멘트 복합체의 경우 균열 발생 이전 전자가 이동할 수 있는 경로는 균열 발생 이후보다 크다. 하지만, 매트릭스와 강섬유로 이루어진 균열 이전 경로보다 강섬유로만 이루어진 균열 이후 경로의 전기 전도성이 훨씬 높다. 따라서, 경로가 줄어들므로 인한 영향보다 경로 자체의 전기저항 감소로 인한 영향이 더 크게 작용하여 전기저항이 감소하는 것으로 판단된다. Kim et al., 2018는 식 (4)와 같이 미세균열에 따른 SH-FRCCs의 전기역학적 거동에 대한 식을 제시하였다. 인장 영역에서 SH-FRCCs의 전기저항은 균열이 발생하였을 때 균열이 발생한 부위(part F, 강섬유로만 이루어진 부위)와 균열이 발생하지 않은 부위(part C, 복합체 부위)의 전기저항( $R_f, R_c$ )으로 구성된다. 균열 발생 시 전류는 전기전도성이 높은 강섬유만을 통해 흐르게 되므로 미세균열의 수( $n_{cr}$ )의 증가에 따라 SH-FRCCs의 전기저항은 감소하게 된다.

$$\Delta R = R_0 - (R_c + R_f) = \frac{n_{cr} \Delta L_{debond}}{A_c} (\rho_c - \frac{\rho_f}{V_f}) \quad (4)$$

여기서  $R_0$ 는 초기 전기저항률,  $\Delta L_{debond}$ 는 섬유 탈착 길이,  $A_c$

는 복합체의 단면적,  $\rho_c$ 는 복합체의 전기저항,  $\rho_f$ 는 섬유의 전기저항, 그리고  $V_f$ 는 섬유의 보강량이다. 따라서, 강섬유가 보강된 S-UHPFRCs의 전기저항은 인장 영역에서 휨 인장 응력이 증가함에 따라 생성되는 다수의 미세균열로 인하여 감소한다. 하지만, 압축과 인장을 모두 받는 휨의 경우에 식(4)를 적용하기에는 한계가 있으므로, 본 논문에서는 압축 지배를 받는 상면과 인장 지배를 받는 하면을 구분하여 식(4)를 부분적으로 적용하였다.

Table 4에 이전 연구와 본 연구에서 조사된 S-UHPFRCs의 외부 하중에서의 자기감지 능력 조사 결과를 비교하여 나타내었다. 자기감지 능력 비교를 위해 식(5), (6), (7)과 같이 압축 또는 휨 응력( $\sigma$ ), 인장변형률( $\epsilon_t$ ), 그리고 처짐( $\delta$ )에 대한 sensitivity coefficient( $SC_{stress}, SC_{strain}, SC_{deflection}$ )를 계산하였다.

$$SC_{stress} = \frac{FCR}{\sigma} [\%/MPa] \quad (5)$$

$$SC_{strain} = \frac{FCR}{\epsilon_t} [\%/ \%] \quad (6)$$

$$SC_{deflection} = \frac{FCR}{\delta} [\%/mm] \quad (7)$$

기존 문헌에 의하면 압축 하중 하에서 하중 감지 능력은  $SC_{stress}$ 가 0.142 ~ 0.298 %/MPa 그리고 인장 하중 하에서  $SC_{strain}$ 은 34.1 ~ 93.1 %/%로 보고되었다. 본 연구에서 UFC

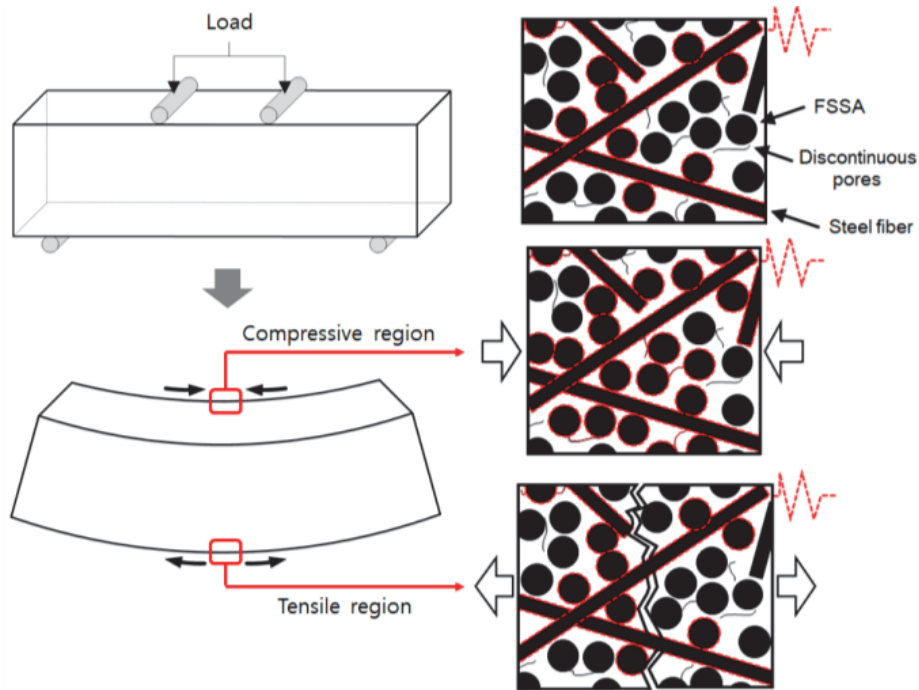


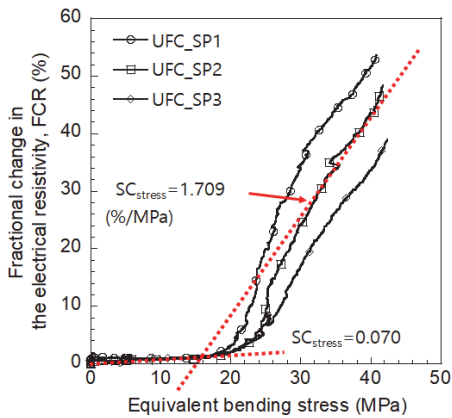
Fig. 6 The conductive path of S-UHPFRCs under flexural

**Table 4** The self-sensing capacity of S-UHPFRCs under compression and tension

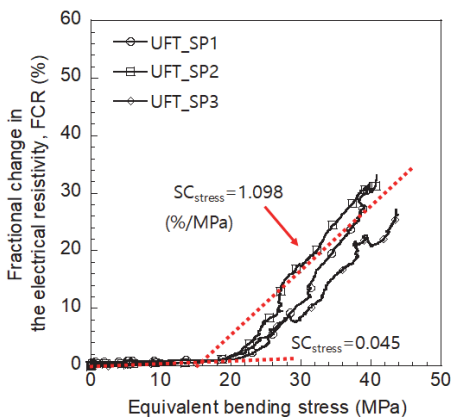
References	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon_t$ (%)	$\delta$ (mm)	FCR (%)	$SC_{stress}$ (%/MPa)	$SC_{strain}$ (%/%)	$SC_{deflection}$ (%/mm)
Le et al., 2020	144.0	-	-	42.90	0.298	-	-
Le et al., 2021(b)	177.1	-	-	25.21	0.142	-	-
Kim et al., 2021(d)	172.0	-	-	47.26	0.275	-	-
Le et al., 2021(b)	-	1.110	-	37.81	-	34.1	-
Kim et al., 2021(d)	-	0.690	-	64.24	-	93.1	-
UFC	before cracking	14.79	-	0.067	1.04	0.070	15.52
	After cracking	26.90	-	1.529	45.96	1.709	30.06
UFT	before cracking	14.49	-	0.068	0.65	0.045	9.56
	After cracking	27.09	-	1.509	29.75	1.098	19.72

는 압축 지배로 휨-압축 응력 및 처짐 그리고 UFT는 인장 지배로 휨-인장 및 처짐에 대한  $SC_{stress}$  와  $SC_{strain}$  을 계산하였다. 휨-압축 및 휨-인장과 상관없이 휨 응력 감지 능력은 UFC와 UFT의  $SC_{stress}$  가 각각 1.709와 1.098 %/MPa로 기존에 보고된 압축 하중에 대한 감지 능력보다 월등히 우수하게 나타

났다(Fig. 7 참조). UFC의 휨 하중 감지 능력은 UFT보다 우수했으며,  $SC_{deflection}$  또한 UFC가 30.06%/mm로 UFT(19.28 %/mm) 보다 높게 나타났다(Fig. 8 참조). 특히 UFC와 UFT 모두  $\delta_{LOP}$ 에서의  $SC_{deflection}$  이  $\delta_{MOR}$ 에서의  $SC_{deflection}$  의 50%로 매우 높은 초기 처짐 감지 능력이 확보되는 것을 확인하였다.

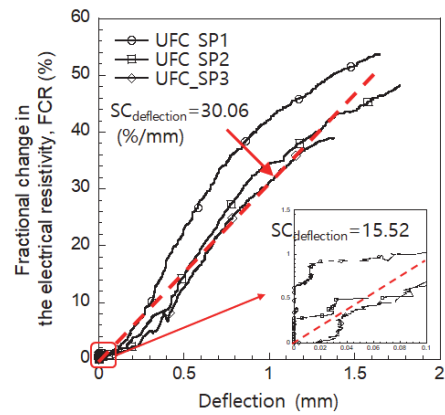


(a) UFC

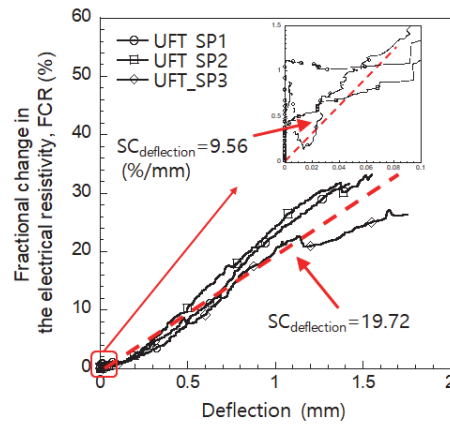


(b) UFT

**Fig. 7** Stress versus FCR of S-UHPFRCs



(a) UFC



(b) UFT

**Fig. 8** Deflection versus FCR of S-UHPFRCs

비록, 휨-압축 하에서의 응력 그리고 처짐 감지 능력이 휨-인장 하에서의 감지 능력보다 우수하게 나타났지만 그 감지 능력이 실제 교량 상판과 하부 구조의 휨 응력과 처짐을 감지하기 위한 스마트 재료로 적용하기에 충분하다.

하지만, S-UHPFRCs의 전기저항 변화만으로는 압축 하중과 인장 하중을 구분할 수 없다는 한계점이 존재한다. 따라서, 추후 연구에서는 압축 부위와 인장 부위를 명확히 구분할 수 있도록 전극을 시험체의 상면(압축) 혹은 하면(인장)에만 배치하여 S-UHPFRCs의 전기역학적 거동을 조사할 필요가 있다. 추가적으로, DC 전류 하에서는 S-UHPFRCs의 전기저항이 압축 하중과 인장 하중에 관계없이 응력이 증가함에 따라 모두 감소하는 거동을 보이지만, AC 전류 하에서의 전기저항은 압축 하중이 증가함에 따라 감소하고, 인장 하중 하에서는 반대로 증가한다고 보고된 바 있다(Kim et al., 2021(d)). 따라서, 추후 연구에서는 DC 전류가 아닌 AC 전류를 기반으로 휨 하중 하에서 S-UHPFRCs의 전기역학적 거동을 조사할 필요가 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 교량 상판 및 하부 구조에 S-UHPFRCs를 적용하기 위한 기초 연구로서 휨-압축과 휨-인장 하에서 S-UHPFRCs의 전기역학적 거동을 조사하였으며, 아래와 같은 결론이 도출되었다.

S-UHPFRCs의 휨 하중 하에서 초기균열 시점에서의 응력( $f_{LOP}$ )은 14.41 MPa 그리고 최대 휨 인장 응력( $f_{MOR}$ )은 41.64 MPa로 처짐 경화 거동을 보였다.

S-UHPFRCs의 전기저항률은 측정영역(휨-압축 그리고 휨-인장)과 관계없이 휨 하중 하에서 휨 인장 응력이 최대 휨 인장 응력까지 증가함에 따라 계속해서 감소하였다.

휨-압축 하에서 휨 응력 감지 능력( $SC_{stress}$ )과 처짐 감지 능력( $SC_{deflection}$ )은 각각 1.709 %/MPa과 30.06 %/mm이며, 휨-인장 하에서는 각각 1.098 %/MPa과 19.28 %/mm로 휨-압축 하에서의 감지 능력이 더 우수하게 나타났다.

특히, 초기 처짐 감지 능력은 휨-압축과 휨-인장 하에서 모두  $SC_{deflection}$ 의 약 50%가 확보되어 초기 처짐에 대한 우수한 감지 능력을 가지는 것을 확인하였다.

S-UHPFRCs의 전기저항을 측정하는 것만으로 구조물의 응력 상태를 판단할 수 있기 때문에 인력 투입이 어려운 장소 혹은 미세 균열과 같이 사람이 판단하기 어려운 균열에 대해 추가적인 장비나 센서 없이 구조물을 진단할 수 있다. 하지만, S-UHPFRCs는 일반적인 콘크리트보다 가격이 비싸므로, 추후 일반 콘크리트에 대한 S-UHPFRCs의 치환 혹은 보강에 따른 역학적 강도 향상과 자기감지 능력에 대해 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## References

1. An, Y. K., and Jang, K. Y. (2017), Hybrid image scanning-based concrete crack evaluation technique. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, 29(6), 36-41.
2. Kim, H. J., Ahn, E. J., Cho, S. J., Shin, M. S., Sim, S. H. (2017) Comparative analysis of image binarization methods for crack identification in concrete structures. *Cement and Concrete Research*, Elsevier Ltd., 99, 53-61.
3. Choi, Y. S., Kim, J. H., Cho, H. C., Lee, C. J. (2019) Asphalt concrete pavement surface crack detection using convolutional neural network. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(6), 38-44.
4. Wan, K. T., and Leung, C. K. Y. (2007) Applications of a distributed fiber optic crack sensor for concrete structures, *Sensors and Actuators, A: Physical*, Elsevier Ltd., 135, 458-464.
5. Wolf, J., Pirskawetz, S., Zang, A. (2015) Detection of crack propagation in concrete with embedded ultrasonic sensors. *Engineering Fracture Mechanics*, Elsevier Ltd., 146, 161-171.
6. Kim, J. H., Hong, J. Y., Kim, R. R., Woo, U. W., Choi, H. J. (2020) Development and application of IoT-based contactless ultrasonic system. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 24(3), 70-79.
7. Ahn, E. J., Kim, H. J., Sim, S. H., Shin, S. W., Shin, M. S. (2017) Principles and applications of ultrasonic-based nondestructive methods for self-healing in cementitious materials. *Materials*, MDPI, 10, 21-25.
8. Kim, M. K., Kim, D. J., An, Y.K. (2018) Electro-mechanical self-sensing response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete in tension. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier Ltd., 134, 254-264.
9. Lee, S. H., Kim, S. H., Yoo, D. Y. (2018) Hybrid effects of steel fiber and carbon nanotube on self-sensing capability of ultra-high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd., 185, 530-544.
10. Le, H. V., Kim, M. K., Kim, S. U., Chung, S. Y., 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.
11. Kang, M. S., Kang, M. S., Lee, H. J., Yim, H. J., An, Y. K. (2018) Crack initiation and temperature variation effects on self-sensing impedance responses of FRCCs. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 22(3), 69-74.
12. Bae, Y. H., Pyo, S. H. (2020) Effect of steel fiber content on structural and electrical properties of ultra high performance concrete (UHPC) sleepers. *Engineering Structures*, 222, 111131.
13. Le, H. V., Kim, T. U., Khan, S., Park, J. Y., Park, J. W., Kim, S. E.,



- Jang, Y., Kim, D. J. (2021) Development of low-cost wireless sensing system for smart ultra-high performance concrete. *Sensors*, MDPI, 21, 6386.
14. Yuan, T. F., Choi, J. S., Kim, S. K., Yoon, Y. S. (2021) Assessment of steel slag and steel fiber to control electromagnetic shielding in high-strength concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(3), 920-930.
  15. Kim, D. J., El-Tawil, S., Naaman, A. E. (2010) Effect of matrix strength on pull-out behavior of high strength deformed steel fibers. *American Concrete Institute Special Publication*, ACI, 272, 135-150.
  16. Le, H. V., Lee, D. H., 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.
  17. Lee, S. Y., Le, H. V., 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, 220, 149-160.
  18. Lee, S. Y., Le, H. V., Kim, M. K., Park, J. W., Kim, D. J. (2021) An innovative smart concrete anchorage with self-stress sensing capacity of prestressing stress of PS tendon. *Sensors*, MDPI, 21, 5251.
  19. Kim, T. U., Le, H. V., Park, J. W., Kim, S. E., Jang, Y., Kim, D. J. (2021) Development of a smart concrete block with an eccentric load sensing capacity. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd., 306, 124881.
  20. Banthia, N., Djeridane, S., Pigeon, M. (1992) Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements, *Cement and Concrete Research*, 22, 804-814.
  21. Kim, M. K., Park, J. W., Kim, D. J. (2020) Characterizing the electro-mechanical response of self-sensing steel-fiber-reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd., 240, 117954.
  22. Nguyen, D. L., Kim, D. J., Ryu, G. S., Koh, K. T. (2013) Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete. *Composites: Part B Engineering*, Elsevier Ltd., 45, 1104-1116.
  23. Kim, M. K., Le, H. V., Kim, D. J. (2021) Electromechanical response of smart ultra-high performance concrete under external loads corresponding to different electrical measurements. *Sensors*, MDPI, 21, 1281.

Received : 08/25/2022

Revised : 09/30/2022

Accepted : 10/17/2022

---

**요 지** : 본 연구에서는 smart ultra-high performance fiber reinforced concretes (S-UHPFRCs)의 자기감지 능력을 검증하기 위해 인장과 압축 영역에서 휨 하중에 따른 S-UHPFRCs의 전기역학적 거동을 조사하였다. 휨 하중 하에서 S-UHPFRCs의 전기저항률은 초기균열 이후 다수의 미세균열을 보이는 변형-경화 거동으로 인해 계속해서 변화된다. 압축 영역에서 S-UHPFRCs의 전기저항률은 등가 휨 응력이 증가함에 따라 976.57에서 514.05 kΩ-cm로 (47.00%) 감소하였으며, 인장 영역에서는 979.61에서 682.28 kΩ-cm로 (30.40%) 감소하였다. S-UHPFRCs의 응력 민감도 계수는 압축 영역과 인장 영역이 각각 1.709와 1.098 %/MPa이다. S-UHPFRCs의 처짐 감지 능력은 압축 영역 (30.06 %/mm)이 인장 영역 (19.72 %/mm)보다 높았다. 초기 처짐 감지 능력은 측정 영역과 관계없이 처짐 감지 능력의 약 50%로 초기 처짐에 대한 우수한 감지 능력을 가지는 것으로 확인되었다. 휨 하중 하에서 S-UHPFRCs의 자기감지 능력은 압축 영역에서 더 높았으나 S-UHPFRCs는 건설 현장에 적용할 자기 감지 재료로 충분하다.

**핵심용어** : 자가센싱 콘크리트, 스마트 초고강도 콘크리트, 전도성 재료, 강섬유 보강 콘크리트, 손상 감지

---