

# 하중 속도가 Smart UHPC의 자가 응력 감지 성능에 미치는 영향

이선열, 김민경, 김동주\*  
세종대학교 건설환경공학과

## Effect of Loading Rate on Self-stress Sensing Capacity of the Smart UHPC

Seon Yeol Lee, Min Kyoung Kim, Dong Joo Kim\*  
Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University

**요약** 최근 지진 빈도 증가로 구조물 건전도 모니터링 (SHM: Structural Health Monitoring, 이하 SHM) 시스템에 대한 관심이 증가하고 있다. Smart concrete는 전기-역학적 거동을 바탕으로 구조물 상태를 분석할 수 있는 기술이다. 하지만 콘크리트 구조물은 지진 시 정적 변형을 또는 하중 속도 보다 10배 이상 빠른 하중 속도가 작용하나 기존 연구 대부분은 정적 하중 속도에서의 감지 능력을 주로 조사하고 있다. 본 연구는 지진과 같이 높은 하중 속도에서 자가 응력 감지 능력을 평가하기 위해 만능재료시험기 (UTM: Universal Testing Machine, 이하 UTM)를 사용하여 3가지 하중 재하 속도 (1, 4, 8 mm/min) 하에서 Smart Ultra High Performance Concrete (S-UHPC)의 전기-역학적 거동을 측정하였다. S-UHPC의 최대 압축 하중에서 Stress sensitive Coefficient (SC)는 1 mm/min 하중 속도 기준 -0.140 %/MPa로 측정되었으나, 하중 속도가 각각 4, 8 mm/min으로 증가함에 따라 42.8 %, 72.7% 감소하였다. 전도성 재료의 변형 감소, 미세균열 증가로 인하여 S-UHPC의 감지능력이 하중속도 증가에 따라 감소하였지만, 그럼에도 불구하고 높은 하중 속도 하에서도 우수한 감지 성능을 보여 구조물 지진 하중 감지를 위한 SHM 시스템에 활용 가능성을 확인하였다.

**Abstract** Structural health monitoring (SHM) systems have attracted considerable interest owing to the frequent earthquakes over the last decade. Smart concrete is a technology that can analyze the state of structures based on their electro-mechanical behavior. On the other hand, most research on the self-sensing response of smart concrete generally investigated the electro-mechanical behavior of smart concrete under a static loading rate, even though the loading rate under an earthquake would be much faster than the static rate. Thus, this study evaluated the electro-mechanical behavior of smart ultra-high-performance concrete (S-UHPC) at three different loading rates (1, 4, and 8 mm/min) using a Universal Testing Machine (UTM). The stress-sensitive coefficient (SC) at the maximum compressive strength of S-UHPC was -0.140 %/MPa based on a loading rate of 1 mm/min but decreased by 42.8% and 72.7% as the loading rate was increased to 4 and 8 mm/min, respectively. Although the sensing capability of S-UHPC decreased with increased load speed due to the reduced deformation of conductive materials and increased microcrack, it was available for SHM systems for earthquake detection in structures.

**Keywords** : Earthquakes, Self-stress Sensing, Ultra-High-Performance-Concrete (UHPC), Loading Rate, Steel Slag Fine Aggregate (SSFA), Steel Fiber

이 논문은 행정안전부장관의 지진방재내진분야 전문인력 양성사업으로 지원되었습니다.

\*Corresponding Author : Dong-Joo Kim(Sejong Univ.)

email: djkim75@sejong.ac.kr

Received January 29, 2021

Revised March 23, 2021

Accepted May 7, 2021

Published May 31, 2021

## 1. 서론

최근 국내 지진 발생 빈도가 증가함에 따라 콘크리트 구조물의 응력 및 손상 상태를 감지 할 수 있는 SHM 시스템에 대한 관심이 증가하고 있다[1]. 기존 SHM 시스템은 구조물의 손상을 감지하기 위해 변형률 게이지 (strain gauge), 광섬유 (optic fiber sensor) 센서 등을 사용한 표면 부착식 센서[2], 매립식 센서[3]가 사용되고 있다. 하지만, 이러한 센서는 낮은 내구성과 높은 유지 관리 비용으로 낮은 경제성을 가지고 있으며, 측정 가능한 감지 범위가 제한적인 한계점이 있다[4,5].

이에 많은 연구자들은 별도의 센서 없이 콘크리트 자체가 응력 및 손상 상태를 감지 할 수 있는 자가 응력 감지 smart concrete 개발을 위한 연구를 수행하고 있다. Smart concrete는 제강슬래그 잔골재 (SSFA: Steel Slag Fine Aggregate, 이하 SSFA)[4,5], 강섬유 (steel fiber)[5,6], 카본 섬유 (carbon fiber)[9], 다중벽 탄소 나노 튜브 (MWCNTs: Multi-Wall Carbon Nano Tubes, 이하 MWCNTs)[10] 등 높은 전기전도도를 갖는 전기전도성 재료가 보강된 콘크리트로, 하중 및 손상 상태에 따른 콘크리트의 전기저항 변화를 측정하여 콘크리트 구조물의 응력 및 손상을 감지 할 수 있는 기술이다 [1]. 이러한 smart concrete는 건설재료로써 콘크리트 기둥, 교량 받침대, 정착구 등 다양한 형태로 콘크리트 구조물 내부에 적용되어 차량 하중, 지진 등에 의해 콘크리트 구조물에 나타나는 응력 및 손상 상태를 모니터링 할 수 있다[4].

하지만 지진 시 발생하는 콘크리트 구조물은 정적 변형률 속도 또는 하중 속도 보다 10배 이상 빠른 하중 속도가 작용하나, 기존에 연구된 대부분의 smart concrete는 정적 하중 속도에서의 자가 응력 감지 성능을 주로 조사하고 있다[1]. Han et al. (2011)과 Zhang et al. (2018)은 4 MPa 반복 압축 실험을 통해 각각 0.5 - 3 mm/min 하중 속도에 따른 카본 나노 튜브 (CNT: Carbon Nano Fiber, 이하 CNT) 보강 smart concrete, 0.2 - 0.8 mm/min 정적 하중 속도에 따른 CNT 및 카본 블랙 (nano carbon black) 보강 smart concrete의 응력 감지 능력에 대해 조사한바 있다[11, 12]. 마찬가지로, Sun et al. (2017)는 20 MPa 반복 압축 실험을 통해 0.8 - 40 mm/min 하중 속도에 따른 nano graphite platelets (NGPs) 보강 smart concrete의 응력 감지 능력을 조사하였다[13]. 이와 같이 몇몇 연구자들에 의해 하중 속도가 smart concrete의 응력 감지 성능에 미치

는 영향에 대해 조사된바 있으나, 대부분이 20 MPa 이하의 압축 탄성 구간 내 거동으로 한정되어 있다. 하지만 실제 지진은 높은 하중 속도 뿐 만아니라 구조물을 손상시킬 수 있는 높은 하중이 발생 할 수 있다. 따라서 지진 시 구조물 안전성 확보 및 효과적인 상태 모니터링을 위해서는 우수한 역학적 성능과 동시에 극한 상태에서도 전기저항 변화 감지 능력을 갖는 smart concrete 개발 및 하중 속도가 자가 응력 감지 성능에 미치는 영향 조사가 필요하다.

LEE et al. (2019)는 우수한 역학적 성능을 갖는 초고 성능 콘크리트 (UHPC: Ultra High Performance Concrete, 이하 UHPC)에 높은 전기전도성과 재료 분산성을 갖는 SSFA와 짧은 강섬유 (short steel fiber)를 보강하여 100 MPa의 높은 압축 응력에도 우수한 감지 성능을 갖는 S-UHPC를 제시하였다[4]. 마찬가지로 LE et al. (2020)은 SSFA의 입경 및 구성비와 강섬유 보강량이 S-UHPC의 자가 응력 감지 성능에 미치는 영향을 조사하여, 자가 응력 감지 성능이 극대화된 최적의 S-UHPC를 개발하였다[5]. 이때 S-UHPC는 우수한 역학적 성능과 자가 응력 감지 성능으로 지진 발생 시 나타나는 콘크리트 구조물의 응력 및 손상 상태를 효과적으로 모니터링 할 수 있을 것으로 판단되나, 기존 연구 모두 정적 변형률 속도 또는 하중 속도에 따른 감지 성능만을 평가하여 실제 지진 하중 감지를 위한 SHM 시스템으로 적용하기 어려운 한계점이 있다.

따라서 본 연구에서는 우수한 역학적 성능과 감지능력을 갖는 S-UHPC에 대하여 지진 하중 감지를 위한 SHM 시스템 적용 가능성 평가를 위해 3가지 하중 속도 (1, 4, 8 mm/min) 하에서 최대 압축 하중까지 나타나는 전기-역학적 거동을 평가하고, 하중 속도 영향성 및 원인을 분석하였다.

## 2. 본론

### 2.1 S-UHPC의 자가응력 감지 성능

S-UHPC의 응력 감지 능력은 콘크리트 내부 전기적 네트워크 변화로부터 발생하는 압전 효과 (piezoelectric response)를 통해 얻어진다. S-UHPC는 Fig. 1과 같이 압축 하중이 증가함에 따라 압전 효과에 의해 전기저항률이 감소하는 거동을 갖는다.

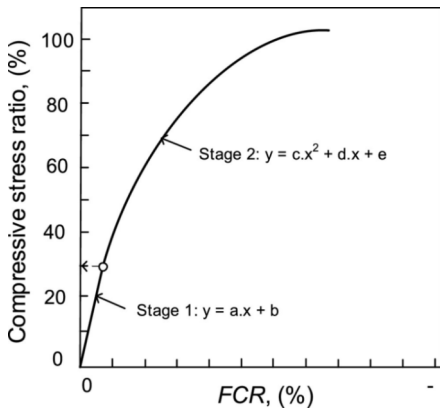


Fig. 1. Electro-mechanical behavior of the S-UHPC [3]

이때 전기저항률 ( $\rho$ : resistivity, 이하  $\rho$ )은 Eq. (1)과 같이 계산되며, fractional change resistivity (이하, FCR)은 Eq. (2)과 같이 계산된다[1].

$$\rho = R \times \frac{A}{L} \tag{1}$$

$$FCR_x [\%] = 100 \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = 100 \frac{\rho_x - \rho_0}{\rho_0} \tag{2}$$

Where, R is the resistance, A is the cross-sectional area, L is the gauge length between the two electrodes,  $\rho_0$  and  $\rho_x$  are the initial electrical resistivity and electrical resistivity at the each compressive stress.

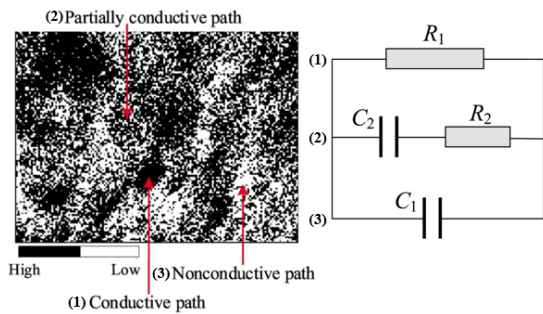


Fig. 2. Electrical network and equivalent circuit model of the Smart concrete [14]

S-UHPC는 보강된 전도성 재료로 인해 콘크리트 내부에 전기적 네트워크가 형성된다. 전기적 네트워크는 전도성 재료 간 직접적인 접촉으로 연결된 (1) conductive path, 떨어져 있는 두 전도성 재료 사이에 quantum tunneling effect로 연결된 (2) partially

conductive path, 그리고 전류가 흐르지 않는 (3) nonconductive path로 구성되며, Fig. 2는 Carbon black이 보강된 smart concrete에 대한 전기적 네트워크와 이에 대한 등가회로 모델을 나타낸다[14].

이때 quantum tunneling effect는 Fig. 3과 같이 떨어져 있는 두 전도성 재료 사이에서 발생하는 전류 흐름으로, 전도성 재료 간격이 가까울수록 높은 전기전도성 또는 낮은 전기저항을 갖는다[15]. S-UHPC의 자가 응력 감지 능력은 압축 변형률로 인한 전도성 재료 사이 간격 감소로부터 quantum tunneling effect가 향상되어, 압축 하중이 증가함에 따라 전기저항이 감소하는 거동을 나타낸다.

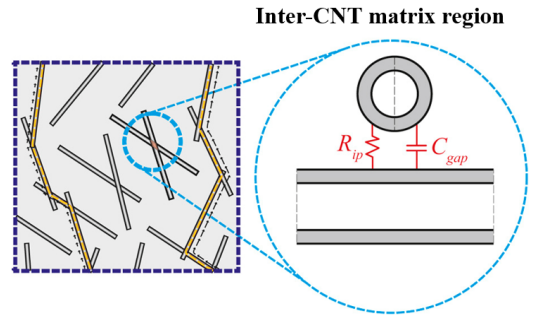


Fig. 3. Quantum tunneling effect [15]

본 연구에서 사용된 S-UHPC는 자가 응력 감지 성능 극대화를 위해 우수한 전도성과 분산성을 갖는 SSFA와 짧은 강섬유를 사용하여 partially conductive path 형성을 향상시킨 재료로, 높은 압축 하중에서도 우수한 감지 성능을 갖는 재료이다. 하지만 S-UHPC에 대한 연구는 대부분 정적 변형률 속도 또는 하중 속도에서의 자가 응력 감지 성능에 대해 연구되었을 뿐, 지진과 같이 높은 하중 속도 하에서의 감지 능력에 대한 연구는 수행된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 하중 속도에 따른 S-UHPC의 전기-역학적 거동을 조사하고, 실제 SHM 시스템 적용 가능성을 검토하였다.

## 2.2 실험프로그램

### 2.2.1 재료 및 시험체 준비

본 연구에서는 하중 속도가 S-UHPC의 자가 응력 감지 성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 Table 1과 같이 LEE et al. (2019)이 제시한 S-UHPC 배합을 사용하여 하중 속도 (1, 4, 8 mm/min)에 따른 S-UHPC의 전기-역학적 거동 평가 실험을 수행하였다. 하중 속도에 따른

S-UHPC의 전기-역학적 거동 평가 실험을 위한 시험체는 50×50×50 mm 크기의 압축 공시체를 사용하였으며, 전기저항 측정을 위해 Fig. 4와 같이 전극 간격이 20 mm가 되도록 전극을 매립하였다. 이때 전극은 2 탐침 저항성 방식 (2-probe method)을 적용하였으며, 와이어 직경과 메쉬 크기가 각각 1 mm, 11 mm인 구리와 와이어 메쉬 (copper wire mesh)를 사용하였다[1].

Table 1. Composition (by weight ratio) and compressive stress of the S-UHPC

Cement	Silica fume	Silica powder	SS	SSFA	Water	SP	SF (vol.%)	$f_c$ (MPa)
1.0	0.15	0.25	0.5	0.5	0.2	0.051	2	186

SS: Silica sand; SSFA: Steel slag fine aggregate; SP: Super-plasticizer containing 30% solid and 70 % water; SF: Steel fiber;  $f_c$ : Compressive strength

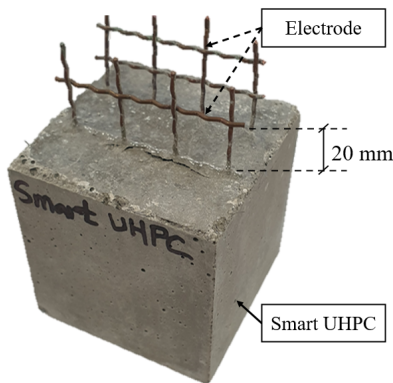


Fig. 4. The specimen shape for evaluation for electro-mechanical behavior

S-UHPC 배합 시, 시멘트는 S사의 1종 보통포틀랜드 시멘트, 실리카 폼 (silica fume)은 E사의 940U (평균 직경 0.15  $\mu\text{m}$ ), 실리카 파우더 (silica powder)와 규사 (silica sand)는 각각 S사의 S-sil10 (평균 직경 4.2 $\mu\text{m}$ )와 잔골재 (평균 직경 0.22 mm), SSFA는 E사 PS ball (최대 직경 0.39 mm)를 사용하였다. 이때 강섬유는 길이와 직경이 각각 6 mm, 0.2 mm인 S사 short steel fiber를 사용하였다.

배합은 20 L 용량의 호바트 타입 믹서를 사용하여 시멘트, 실리카폼, 실리카 파우더, 규사, SSFA를 투입 후 10 분간 건배합을 진행하였다. 이후 재료 분리 방식을 위해 배합수를 3분 간격으로 4회에 걸쳐 나누어 투입하고, 감수제를 배합의 상태에 따라 조금씩 나누어 투입하였

다. 유동성과 점도가 확보된 시점에서 강섬유를 소량씩 나눠 투입하여 섬유 간 뭉침 현상이 발생하지 않도록 하였다. 섬유 투입 이후 5분간 배합 후, 배합이 끝난 매트릭스는 구리와 와이어 메쉬를 20 mm 간격으로 배치한 50×50×50 mm 압축 시험체 제작용 금형 몰드에 3번에 나누어 타설하였다. 이때 각 타설 단계에서 미세공극 발생 최소화를 위해 진동 테이블을 사용하여 다짐하였다. 타설이 끝난 시험체는 플라스틱 시트로 덮어 48시간 동안 상온 20 °C에서 경화시킨 뒤 탈형 하였으며, 경화를 촉진하기 위해 90 °C 온도에서 3일간 수증 양생을 실시하였다. 양생 종료 후, 상온 20 °C에서 14 일간 충분히 건조 시킨 후 실험을 진행하였다.

### 2.2.2 실험 방법

하중 속도에 따른 S-UHPC의 전기-역학적 거동 평가를 위해 Fig. 5와 같이 300 ton 급 만능재료시험기와 멀티미터 (fluke 8846A)를 사용하였다. UTM은 변위제하 방식 (displacement control)으로 압축 하중 재하 속도를 달리하여 3가지 하중 속도 (1, 4, 8 mm/min)에 대해서 압축 실험을 수행하였다.

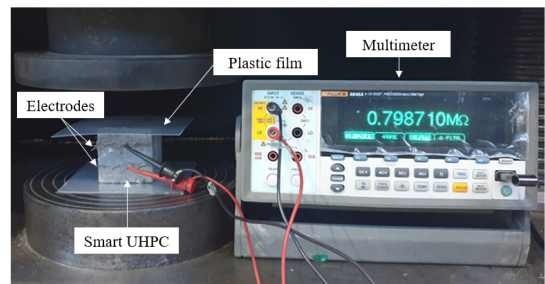


Fig. 5. Test setup for evaluation for electro-mechanical behavior

압축 하중 변화에 따른 S-UHPC의 전기저항 변화를 측정하기 위해 매립된 두 전극에 멀티미터를 연결하여 직류 전기저항 (DC: Direct current, 이하 DC)을 측정하였다. DC 전기저항 측정 방식은 저항 측정 시 시간이 증가함에 따라 전기저항이 증가하는 분극화 현상 (polarization effect)이 발생하며, 본 실험에서는 분극화 현상이 S-UHPC의 전기-역학적 거동에 미치는 영향을 최소화하기 위해 시험체 마다 50분 동안 안정화 시간을 두었다. 이때 분극화 현상은 전하 이동으로 발생한 자기장의 반대 방향으로 전하를 이동시키려 하는 분극 유도 자기장 때문에 시간이 지남에 따라 전기저항이 증가

하는 거동으로 콘크리트와 같이 비균질 물질로 구성되어 있는 유전체에서 발생하는 특징이다[1,8]. 또한, 실험 시 UTM에 흐르는 미세한 전류가 S-UHPC 전기저항 측정에 영향을 미치지 않도록 시험체 압축 면에 비 전도성 플라스틱 시트를 배치 후 실험을 수행하였다.

### 2.2.3 실험 결과

하중 속도가 S-UHPC의 자가응력 감지 성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 3가지 하중 속도 (1, 4, 8 mm/min)에 따른 S-UHPC의 전기-역학적 거동을 조사하였다. 각 하중 속도에 따른 전기-역학적 거동은 Fig. 6 과 같으며, 초기 전기 저항률 ( $\rho_0$ : initial electrical resistivity, 이하  $\rho_0$ ), 최대 압축 하중 ( $\sigma_p$ : peak compressive stress, 이하  $\sigma_p$ ), 탄성구간 내 최대 압축 하중 ( $\sigma_{pe}$ : peak compressive stress of the elastic range, 이하  $\sigma_{pe}$ )과 각 압축 하중 별 FCR과 stress sensing coefficient ( $sc$ )는 Table 2와 같다. 이때  $\sigma_{pe}$  는 Eq. (3),  $sc$ 는 Eq. (4)와 같이 계산된다[5].

$$\sigma_{pe} [MPa] = 0.3 \times \sigma_p \quad (3)$$

$$SC_x [\%/MPa] = \frac{FCR_x}{\sigma_x} \quad (4)$$

Where,  $\sigma_p$  is the peak compressive stress,  $\sigma_x$  and  $FCR_x$  are the compressive stress and fractional change electrical resistivity.

S-UHPC는 압축 하중이 증가함에 따라  $\rho$ 가 감소하는 거동을 보였으며, 하중 속도가 증가함에 따라  $SC$ 의 절대값이 감소하는 경향이 확인되었다. 하중 속도 증가에 따른 감지 능력 저하는 S-UHPC의 탄성구간 및 소성 구간에서 동시에 확인되었으며, 하중 속도 1, 4, 8 mm/min에 대해서  $\sigma_{pe}$  지점에 해당하는  $SC_{pe}$ 는 각각 -0.031, -0.016, -0.004 %/MPa,  $\sigma_p$  지점에 해당하는  $SC_p$ 는 각각 -0.140, -0.080, -0.038 %/MPa로 측정되었다.

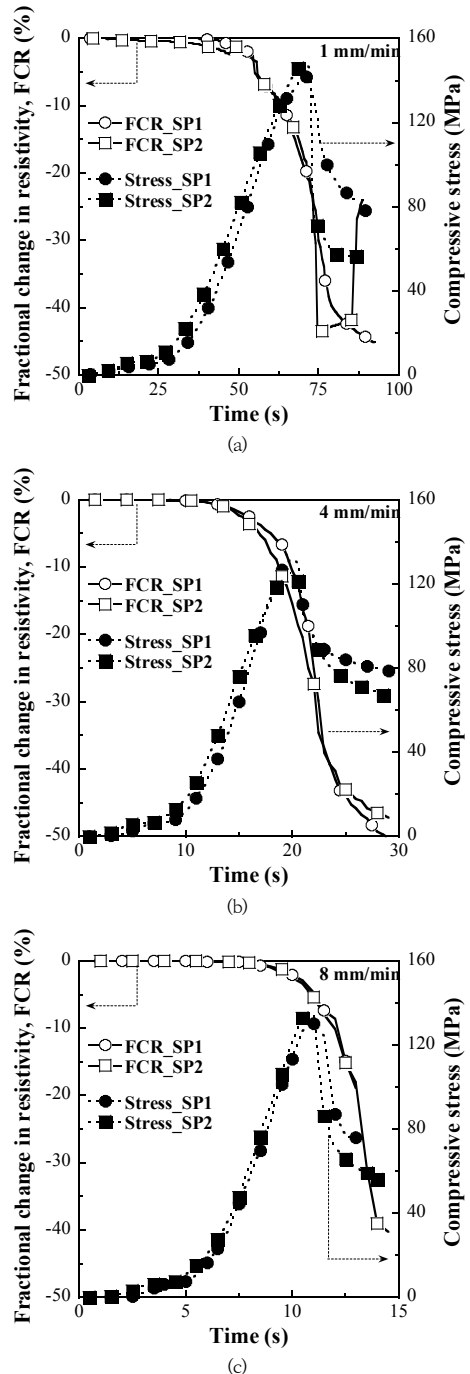


Fig. 6. Electro-mechanical behavior of S-UHPCs under loading rate (a) 1 mm/min, (b) 4 mm/min, (c) 8 mm/min

Table 2. Parameters of S-UHPCs about electro-mechanical behavior

Loading rate (mm/min)	Spec.	$\rho_0$ (k $\Omega$ -cm)	$\sigma_p$ (MPa)	$\sigma_{pe}$ (MPa)	$\rho_{pe}$ (k $\Omega$ -cm)	$FCR_{pe}$ (%)	$SC_{pe}$ (%/MPa)	$\rho_p$ (k $\Omega$ -cm)	$FCR_p$ (%)	$SC_p$ (%/MPa)
1	SP1	5873.95	134.38	40.31	5798.14	-1.29	-0.032	4646.76	-20.89	-0.155
	SP2	6416.79	148.62	44.59	6332.60	-1.31	-0.029	5236.67	-18.39	-0.124
	<b>Ave.</b>	<b>6145.37</b>	<b>141.50</b>	<b>42.45</b>	<b>6065.37</b>	<b>-1.30</b>	<b>-0.031</b>	<b>4941.72</b>	<b>-19.64</b>	<b>-0.140</b>
	<i>Std.</i>	<i>383.85</i>	<i>10.07</i>	<i>3.02</i>	<i>377.92</i>	<i>0.02</i>	<i>0.002</i>	<i>417.13</i>	<i>1.77</i>	<i>0.022</i>
4	SP1	4834.45	136.79	41.04	4809.86	-0.51	-0.012	4304.03	-10.97	-0.080
	SP2	4899.89	132.61	39.78	4860.32	-0.81	-0.020	4383.44	-10.54	-0.079
	<b>Ave.</b>	<b>4867.17</b>	<b>134.70</b>	<b>40.41</b>	<b>4835.09</b>	<b>-0.66</b>	<b>-0.016</b>	<b>4343.74</b>	<b>-10.76</b>	<b>-0.080</b>
	<i>Std.</i>	<i>46.27</i>	<i>2.96</i>	<i>0.89</i>	<i>35.69</i>	<i>0.21</i>	<i>0.006</i>	<i>56.15</i>	<i>0.31</i>	<i>0.001</i>
8	SP1	3775.93	130.43	39.13	3768.72	-0.19	-0.005	3600.17	-4.65	-0.036
	SP2	4252.21	134.14	40.24	4247.43	-0.11	-0.003	4021.08	-5.44	-0.041
	<b>Ave.</b>	<b>4014.07</b>	<b>132.29</b>	<b>39.69</b>	<b>4008.07</b>	<b>-0.15</b>	<b>-0.004</b>	<b>3810.62</b>	<b>-5.05</b>	<b>-0.038</b>
	<i>Std.</i>	<i>336.78</i>	<i>2.62</i>	<i>0.79</i>	<i>338.50</i>	<i>0.06</i>	<i>0.001</i>	<i>297.63</i>	<i>0.55</i>	<i>0.003</i>

1 mm/min 하중 속도에 대한  $SC_{pe}$ 를 기준으로 하중 속도가 4, 8배로 각각 증가함에 따라  $SC_{pe}$ 의 절대값은 각각 46.8 %, 87.5% 감소하였다. 마찬가지로 1 mm/min 하중 속도에 대한  $SC_p$ 를 기준으로 하중 속도가 4, 8배로 각각 증가함에 따라  $SC_p$ 의 절대값은 각각 42.8 %, 72.7% 감소하였다.

### 2.2.4 고찰

하중 속도는 S-UHPC의 자가 응력 감지 성능에 높은 영향을 미치며, Fig. 7과 같이 하중 속도가 S1 (1 mm/min)에서 S4 (4 mm/min), S8 (8 mm/min)로 증가함에 따라 감지 성능이 감소하는 것으로 확인되었다. 하중 속도에 따른 감지 능력의 저하는 탄성구간( $0 \sim \sigma_{pe}$ ) 보다 소성구간( $\sigma_{pe} \sim \sigma_p$ )에서 동시에 확인되었으며, 각각의 종류 시점  $\sigma_{pe}$ ,  $\sigma_p$ 에서의  $sc$ 는 Fig. 8과 같다. 이는 하중 속도에 따른 탄성 구간 내 전도성 재료 변형 거동과, 소성 구간 내 미세균열 (microcrack) 발생 메커니즘이 S-UHPC의 전기적 네트워크 변화 거동에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

Zhang et al. (2018)은 CNT와 NCB가 보강된 smart concrete의 경우 탄성영역 (~4 MPa) 내에서 하중 속도가 0.2 - 0.8 mm/min 으로 증가함에 인발 및 삽입되는 전도성 재료의 양이 감소하여 응력 감지 성능이 감소한다고 제시하였다[12]. 탄성영역 내 전도성 재료의 인발 및 삽입 거동은 매트릭스와 전도성 재료 사이의 부착강도와 밀접한 관련이 있으며, Park et al. (2019)은 하중 속도가 증가함에 따라 강섬유와 매트릭스 사이의 계면 부착강도가 증가한다고 설명하였다[16]. 따라서,

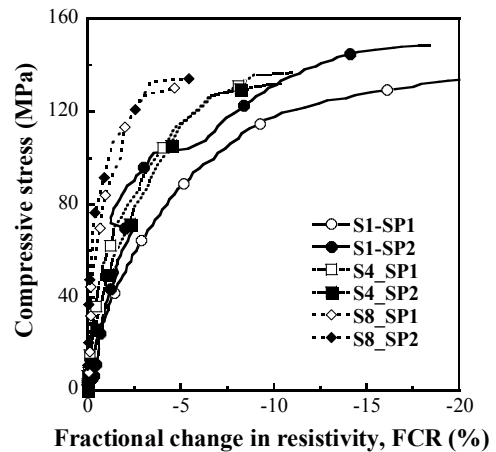


Fig. 7. Effect of electro-mechanical behaviors of S-UHPCs under loading rate

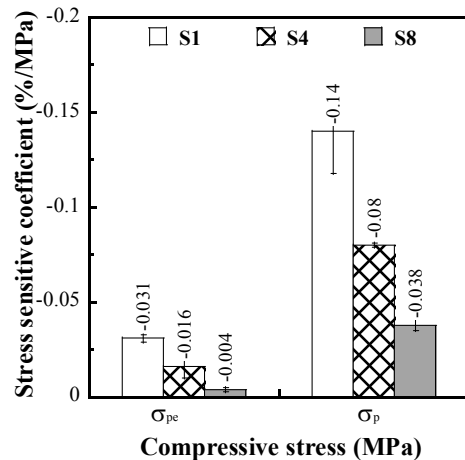


Fig. 8. Stress sensitive coefficient of S-UHPCs in elastic and plastic area

높은 하중 속도에서는 계면 부착강도 증가로 전도성 재료로 보강된 강섬유의 인발 및 삽입 거동을 제한하여, Fig. 8과 같이 partially conductive path 내 quantum tunneling effect 변화가 줄어들어 탄성 구간 내 감지 성능이 감소하는 것으로 판단된다.

Wu et al. (2017)은 정적 및 고속 변형률 속도에 따른 UHPC의 압축 거동에 대해 조사하였으며, 변형률 속도 (즉 하중 속도)가 증가할수록 콘크리트 내부에 다수의 미세균열이 발생함을 제시하였다[17]. 해당 논문에 따르면 낮은 변형률 속도에서는 콘크리트 내부에 발생한 미세균열이 macro crack으로 서서히 발전하여 압축 파괴 될 충분한 시간이 있으나 높은 변형률 속도에서는 짧은 압축 시간으로 macro crack으로 발전하기 전에 다수의 미세균열이 발생한다고 설명하였다[16]. 또한, 하중 속도가 증가함에 따라 강섬유와 매트릭스 사이 계면전이구역 (interfacial transition zone)에 다수의 미세균열이 발생한다고 보고된바 있으며, Park et al. (2016)는 낮은 인발 하중 속도에서는 강섬유가 서서히 인발되어 균열에 가장 취약한 강섬유 표면에서 균열이 발생하나 높은 하중 속도에서는 짧은 인발 시간으로 강섬유 표면을 통한 균열이 아닌 계면에 다수의 미세균열과 함께 복잡한 균열 발생 경로를 갖는다고 설명하였다[16]. 따라서 Fig. 8 과 같이 높은 압축 하중 속도를 받는 S-UHPC의 경우 소성 구간 내에서 내부에 발생한 다수의 미세균열이 전기 저항을 증가 시켜 압전 효과에 따른 전기저항을 감소폭을 감소시킨 것으로 판단된다.

### 3. 결론

본 연구에서는 S-UHPC에 대하여 지진 하중 감지를 위한 SHM 시스템 적용 가능성 평가를 위해 3가지 하중 속도 (1, 4, 8 mm/min) 하에서 최대 압축 하중까지 나타나는 전기-역학적 거동을 조사하였으며 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) S-UHPC는 하중 속도가 증가함에 따라 감지 성능이 감소하는 경향을 보였으나, 높은 하중 속도 하에서도 우수한 감지 성능을 보여 지진 하중 감지를 위한 SHM 시스템에 활용 가능성을 확인하였다.
- 2) S-UHPC의 최대 압축 하중에서 Stress-sensing Coefficient (SC)는 1 mm/min 하중 속도 기준 -0.140 %/MPa로 측정되었으며, 하중 속도가 4, 8 mm/min 로 증가함에 따라 각각 42.8 %,

72.7% 감소하였다.

- 3) 하중 속도에 따른 S-UHPC의 자가 응력 감지 성능의 저하는 탄성 구간 내 전도성 재료의 변형 감소, 소성 구간 내 미세균열 발생 증가로 발생하였다.

### References

- [1] B. Han, X.Yu, J. Ou, Self-Sensing Concrete in Smart Structures, p.385, Butterworth-Heinemann, Kidlington, 2014, pp. 189-230. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-14456-X>
- [2] S. Biswal, A. Ramaswamy, "Measurement of existing prestressing force in concrete structures through an embedded vibrating beam strain gauge", *Measurement*, Vol.83, pp.10-19, Apr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.01.031>
- [3] S.C. Huang, W.W. Lin, M.T. Tsai, M.H. Chen, "Fiber optic in-line distributed sensor for detection and localization of the pipeline leaks", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.135, No.2, pp. 570-579, Apr. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.10.010>
- [4] S.Y. Lee, H.V. Le, D.J. Kim, "Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress", *Construction and Building Materials*, Vol.220, pp.149-160, Sep. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.197>
- [5] H.V. Le, D.H. Lee, D.J. Kim, "Effects of steel slag aggregate size and content on piezoresistive responses of smart ultra-high-performance fiber-reinforced concretes". *Sensors and Actuators A*, Vol.305, pp.111925, Apr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111925>
- [6] M.K. Kim, D.J. Kim. "Electro-mechanical response of high-performance fiber-reinforced cementitious composites containing milled glass fibers under tension". *Materials*, Vol.11, No.7, pp.115, Jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11071115>
- [7] H.V. Le, D.J. Kim, "Detecting crack and damage location in self-sensing fiber reinforced cementitious composites", *Construction and Building Materials*, Vol.240, pp.117973, Apr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117973>
- [8] H.W. Noh, M.K. Kim, D.J. Kim, "Comparative performance of four electrodes for measuring the electro-mechanical response of self-damage detecting concrete under tensile load", *Sensors*, Vol.19, No.17, pp.3645, Jul. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19173645>
- [9] A. Kovalovs, S. Rucevskis, V. Kulakov, A. Aniskevich, "Delamination detection in carbon fibre reinforced

composites using electrical resistance measurement”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol.111, pp.012010, 2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/111/1/012010>

- [10] M.S. Konsta-gdoutos, C.A Aza, “Self sensing carbon nanotube (CNT) and nanofiber (CNF) cementitious composites for real time damage assessment in smart structures”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.53, pp.162-169, Oct. 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.003>
- [11] B. Han, X. Yu, K. Zhang, E. Kwon, J. Ou, “Sensing properties of CNT-filled cement-based stress sensors”, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Vol.1, pp. 17-24, Jun. 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s13349-010-0001-5>
- [12] L. Zhang, S. Ding, L. Li, S. Dong, D. Wang, X. Yu, B. Han, “Effect of characteristics of assembly unit of CNT/NCB composite fillers on properties of smart cement-based materials”, *Composites Part A*, Vol.109, pp.303-320, Jun. 2018.  
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.03.020>
- [13] S. Sun, B. Han, S. Jiang, X. Yu, Y. Wang, H. Li, J. Ou, “Nano graphite platelets-enabled piezoresistive cementitious composites for structural health monitoring”, *Construction and Building Materials*, Vol.136, pp.314-328, Apr. 2017  
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.006>
- [14] X. Li, M. Li, “Multifunctional self-sensing and ductile cementitious materials”, *Cement and Concrete Research*, Vol.123, pp.105714, Sep. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.008>
- [15] E. García-Macías, A. Downey, A. D’Alessandro, R. Castro-Triguero, S. Laflamme, F. Ubertini. “Enhanced lumped circuit model for smart nanocomposite cement-based sensors under dynamic compressive loading conditions”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.260, pp.45-57, Jun. 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.04.004>
- [16] J.K. Park, T.T Ngo, D.J. Kim, “Interfacial bond characteristics of steel fibers embedded in cementitious composites at high rates”, *Cement and Concrete Research*, Vol.123, pp.105802, Sep. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105802>
- [17] Z. Wu, C. Shi, W. He, D. Wang, “Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements”, *Cement and Concrete Composites* Vol.79, pp.148-157, May 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.010>

이 선 열(Seon Yeol Lee)

[정회원]



- 2018년 2월 ~ 2020년 2월 : 세종대학교 일반대학원 건설환경공학과 (석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 세종대학교 일반대학원 건설환경공학과 (박사과정)

<관심분야>

토목/건축, 콘크리트

김 민 경(Min Kyoung Kim)

[정회원]



- 2019년 8월 : 세종대학교 일반대학원 건설환경공학과 (박사)
- 2019년 9월 ~ 2021년 2월 : 세종대학교 박사후연구원
- 2021년 2월 ~ 현재 : 세종대학교 건설환경공학과 교수

<관심분야>

토목/건축, 콘크리트

김 동 주(Dong Joo Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 ~ 1999년 2월 : 한양대학교 일반대학원 토목공학과 (석사)
- 2004년 9월 ~ 2009년 5월 : The University of Michigan, Ann Arbor, Dept. of Civil and Environmental Eng. (박사)
- 2009년 9월 ~ 현재 : 세종대학교 건설환경공학과 교수

<관심분야>

토목/건축, 콘크리트