

R&D / 19CTAP-C143065-02

긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 기술 개발 최종보고서

2020.02.17.

주관연구 기관 / 세종대학교 산학협력단

국토교통부
(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

'긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 기술 개발'(연구개발 기간 : 2018. 04. 17.
~ 2019. 12. 31) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2020. 02. 17.

주관연구기관명 : 세종대학교 산학협력단 (대표자) 백 성 옥 (인)



주관연구기관책임자: 김동주
참여연구원: 이선열
참여연구원: Le Huy Viet
참여연구원: 김민경
참여연구원: 노현우
참여연구원: 박준길
참여연구원: 황라환
참여연구원: 최성익
참여연구원: Ngo Tri Thuong
참여연구원: Truong Van Doan
참여연구원: Dang Van Phi
참여연구원: 김준혁
참여연구원: 구대현
참여연구원: 오승영

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C1430 65-02	해당 단계 연구 기간	2018.04.17.- 2019.12.31.	단계구분	1 / 1
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 기술 개발			
연구책임자	김동주	해당단계 참여연구원 수	총: 14 명 내부: 14 명 외부: 0 명	해당단계 연구비	정부: 370,000 천원 민간: 0 천원 정부외: 0 천원 상대국: 0 천원 계: 370,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 14 명 내부: 14 명 외부: 0 명	총 연구비	정부: 370,000 천원 민간: 0 천원 정부외: 0 천원 상대국: 0 천원 계: 370,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	세종대학교 산학협력단 세종대학교 건설환경공학과			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반 (원천기술을 개발하고 이를 타 유사 연구개발 분야의 기반 기술로 제공 가능하 로 연구과제 보안등급의 분류 상 일반과제로 분류하는 것이 합당한 것으로 판단됨)
----------------------	---

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록· 기탁 번호	AS 8:2582-2593 CBM 220:149-160 CBM 240:117954 S 19:3645-3659 KSCE : 675-689	10-2018-0028411 10-2018-0140120									

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

요약

- 강섬유, 제강슬래그, 강섬유와 MWCNT, 그리고 강섬유와 제강슬래그를 사용한 배합(안) 중에서 제강슬래그와 강섬유를 복합적으로 사용한 배합(안)이 압축 하중 하에서 매우 우수한 응력 감지 능력을 보여 스마트 콘크리트 배합(안)으로 최종 결정됨
- 최종 결정된 스마트 콘크리트는 일정한 습도 (50%)에서 온도가 0에서 40 °C까지 증가함에 따라 전기저항률이 최대 5.7배 감소하였으며, 일정한 온도 (20 °C)에서 습도가 35%에서 100%까지 증가함에 따라 전기저항률은 최대 2.2배 감소하였음
- 본 연구에서 최종적으로 제시한 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)은 스마트 콘크리트 용 plug-in형 매립식 전극을 포함하고 있으며, 긴장력 변화에 따른 전기저항률 변화율을 -1.5%로 강연선 긴장력 도입 및 손실 평가가 가능한 것으로 나타남
- 하중 재하 속도는 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 민감도에 미치는 영향성이 미미하여 긴장력 장치의 종류와 상관없이 스마트 콘크리트를 실제 구조물에 적용시킬 수 있을 것으로 판단됨
- 본 연구에서는 실제 PSC 구조물에 스마트 콘크리트 정착구 적용시 발생할 수 있는 전단 파괴 방지 방안을 함께 구축함으로써 스마트 콘크리트 정착구를 상용화시켰을 때 발생할 수 있는 문제점을 고려하여 스마트 콘크리트 정착구를 설계하였음

보고서 면수

24/24

〈 국문 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	연구개발 목표는 “PS 강재 긴장력 모니터링용 스마트 콘크리트 정착구 (Smart concrete anchorage) 기술” 개발을 통하여 혁신적이고 독자적인 PS 강재 정착구를 만드는 것이다. 상기의 “PS 강재 긴장력 모니터링용 스마트 콘크리트 정착구 기술 개발”을 위하여 크게 두 가지 중점 연구 내용을 아래와 같이 수행하였다: 1) 스마트 콘크리트 정착구 개발을 위한 복합적 연구; 2) 실제 적용성 평가를 위한 스마트 콘크리트의 정착구의 전기-역학적 모니터링 성능평가이다. 우선 스마트 콘크리트 정착구 개발을 위한 복합적 연구를 위하여 세부적으로 아래와 같은 상세 연구를 수행하였다. • 전기-역학적 민감도 향상을 위한 스마트 콘크리트 배합 개발 • 온도와 습도 등의 환경 인자가 스마트 콘크리트의 전기적 특성에 미치는 영향 평가 • 스마트 콘크리트의 전기-역학적 성능평가 및 역학적 성능평가 • 스마트 콘크리트 정착구 설계(안) 제시 제시된 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)을 바탕으로 실제 적용성을 위한 스마트 콘크리트 정착구 성능을 평가하였다. 이를 위한 상세연구내용은 아래와 같다. • 스마트 콘크리트 정착구용 Plug-in형 매립식 전극 개발 • 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 성능평가 마지막으로, 개발된 스마트 콘크리트 정착구가 실제 PSC 교량 구조물에 적용 가능한 시공방안과 노후화로 인한 보수보강이 필요한 교량에도 적용 가능한 방안을 도출하였다.				
연구개발성과	<u>PS 강재 긴장력 모니터링용 스마트 콘크리트 정착구</u>: 기존 스마트 콘크리트의 탄성영역에서 미미한 전기적 민감도를 증대시키면서, 긴장력이 도입된 PS 강재의 긴장력 저하 또는 손실이 발생함에 따른 전기-역학적 상관관계를 이용하여 PS 강재의 파단을 방지하고 실시간으로 긴장력을 진단할 수 있는 스마트 콘크리트 정착구 개발				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	제안 기술은 새로 건설되는 PSC 교량 또는 보수보강이 필요한 교량에 적용이 가능하다. 스마트 기술과 일반 건설재료와의 융합으로 독자적인 스마트 콘크리트 정착구를 개발함으로써 콘크리트 부재 자체가 긴장력을 감지하는 기술을 개발함에 따라 구조진단 및 유지관리 분야 기술의 경쟁력 확보를 통하여 관련 기술의 대외 의존도 감소 및 독자적인 기술로 활용도가 높을 것으로 예상된다. 또한, 미래 4차 산업혁명 건설 분야를 주도하기 위한 원천기술 연구로써 스마트 콘크리트 정착구 개발은 미래형 토목 구조물 관리의 기초적인 연구이자, PSC 교량 시설물의 안전 모니터링에 혁신적인 기술이 될 것으로 기대된다.				
핵심어 (5개 이내)	스마트 콘크리트	PS 강재 정착구	모니터링 시스템	섬유	나노재료

< SUMMARY >

Purpose & Contents	The final goal of this research is to build smart infrastructure by developing "Smart concrete anchorage for monitoring pre-stress loss". To achieve the goal above mentioned, two main objectives have been planned in this research as follows: 1) development of self-sensing smart concrete anchorage; and, 2) evaluating the electro-mechanical response of smart concrete anchorage. First, to develop smart concrete anchorage, we have performed the following research steps: 1) develop smart concrete with high electro-mechanical sensitivity by adding nano-functional fillers; 2) investigate the environmental effects on the electro-mechanical characteristics of smart concrete; 3) investigate the mechanical and self sensing capacity of smart concrete; and, 4) design smart concrete anchorage. Second, following research steps are prepared for testing the performance of designed smart concrete anchorage: 1) develop new type electrode for smart concrete anchorage; and, 2) evaluate the performance of smart concrete anchorage. Finally, several application methods should be developed for the designed smart concrete anchorage to PSC structures or other infrastructure.					
Results	<u>Smart concrete anchorage</u>: concrete anchorage block, containing nano-functional filler and electrically conductive fibers, that is capable of measuring electrical resistivity or impedance under pre-stressing stress. Besides, smart concrete anchorage with short fibers would eliminate the required spiral steel reinforcements for preventing burst and spalling cracks in the pre-stressing steel anchorage zone.					
Expected Contribution	The proposed smart concrete anchorage would be applicable to all the pre-stressing concrete structures including bridges, parking building structures, nuclear power plants, and marine concrete structures. The developed smart concrete could be also applied to various concrete structures, instead of attached or embedded sensors, for monitoring the damage or cracks of concrete structures.					
Keywords	Smart concrete	PS steel anchorage	Monitoring system	Fiber	Nano materials	

< Contents >

1. Introduction of the research project	1
2. Present state of development of the research	6
3. Achievement contents and results	8
4. Achievement and contribution to related industry	17
5. Practical use and plan for field application	19
6. Oversea gathering of information and technology	20
7. Security level	20
8. Report of new research instrument	21
9. Performance of safety measures	21
10. Representative research results	22
11. Etc.	23
12. References	23

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	6
3. 연구수행내용 및 성과	8
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	17
5. 연구개발성과의 활용 계획	19
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	20
7. 연구개발성과의 보안등급	20
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	21
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	21
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	22
11. 기타 사항	23
12. 참고 문헌	23

제1장. 연구개발과제의 개요

○ 연구개발 목적

- 프리스트레스 콘크리트 (Pre-stressed concrete, PSC) 구조물에 사용되는 PS 긴장재의 부식 또는 이로 인해 파단이 일어나면 구조부재 공칭강도의 저하로 인하여 구조물의 붕괴를 초래할 수 있음
- 구조물 붕괴사고는 재해·재난으로 이어져 많은 인명피해와 사회적인 영향을 끼침
- 아래의 표와 그림에 긴장재 파단으로 인한 대표적인 PSC 구조물 사고사례와 원인을 나타냄
- 대부분의 사고원인은 긴장재의 부식으로 인한 것임을 알 수 있음

<대표적인 긴장재 파단으로 인한 사고사례 및 원인>

건물명	위치	발생년도	원인
Bickton Meadows bridge	영국	1967	긴장재 부식
Niles channel bridge	미국	1983	긴장재 정착구 부식
Ynys-y-Gwas	영국	1985	긴장재 부식
Melle bridge	벨기에	1992	긴장재 부식
Mid bay bridge	미국	2000	긴장재 정착구 부식
Varina-Enon bridge	미국	2007	긴장재 부식
정릉천 고가도로	대한민국	2016	긴장재 부식

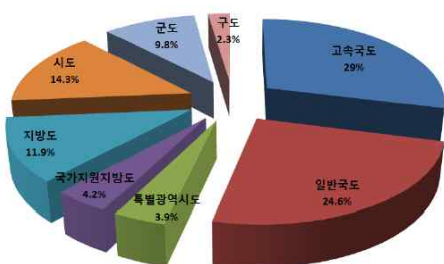


<Niles channel bridge 긴장재 파단 (미국, 1983)> <Ynys-y-Gwas bridge 긴장재 파단 (영국, 1985)>

- 국토교통부가 2017년에 발표한 ‘도로 교량 및 터널 현황조사’에 따르면 우리나라 전체 교량 중 약 25%가 PSC 교량으로 시공됨
- 재해·재난을 야기하는 구조물 붕괴사고를 예방하기 위해서 PS 강재 관리는 필수적인 부분임

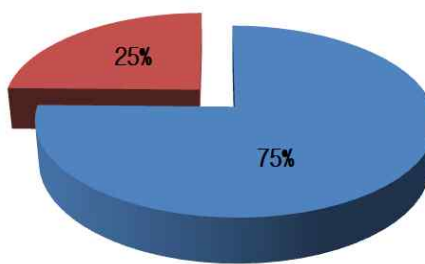
【 도로 종류별 교량 분포 현황 】

전체교량 : 32,325개
총연장 : 3,243,800m



PSC 교량 현황

■ 일반교량 ■ PSC 교량



<국내 교량 분포 및 PSC 교량현황 (국토교통부, 2016.12.31. 기준)>

- 본 연구에서는 “**긴장력 측정용 스마트 콘크리트 정착구 개발**”을 하고자 함
 - 제안된 기술은 PSC 구조물에 사용되는 긴장재의 긴장응력 저하를 감지하는 스마트 콘크리트 정착구를 개발하여 새로운 개념의 PSC 구조물 긴장재의 긴장응력 모니터링 방안을 제시하고자 함
 - PS 강재 긴장응력 관리방안으로 사용되고 있는 진동법과 스마트 강연선의 한계점을 극복하고 효율적인 긴장응력 모니터링이 가능한 스마트 콘크리트 정착구를 개발함으로써 PSC 구조물의 붕괴사고를 방지하고자 함

○ 연구개발의 필요성

정부지원의 필요성:

- 2020년부터 시설물의 고령화 시대에 진입으로 SOC 시설물의 위험 및 사용자의 불안감이 증가될 것으로 예상됨에 따라 구조물의 노후화로 인한 예산 정책의 변화와 구조물의 안전문제는 사회적으로 큰 관심이 집중됨으로써, 이에 대한 정부의 노후화 구조물 관리방법으로써 큰 기여를 할 것으로 예상됨
- 우리나라는 역대로 부실공사 및 안전관리의 부실로 인한 교량의 안전사고가 발생함에 따라 국민의 안전 불감증이 현저히 증대되었고, 산업경계가 고도화됨에 따라 공공의 안전성과 신뢰성 향상을 위한 비파괴검사 기술의 중요성이 부각되고 있음
- 현재 구조물 안전 진단 방법의 실시간 스마트 콘크리트 정착구 개발은 현장 검사자의 안전 및 근무 환경을 개선하고, 대형 PSC 구조물의 긴장재 파단 사고를 미연에 방지함으로써 사회적 비용 절감과 국민의 안정성 보장을 기대할 수 있음
- 본 기술의 가장 큰 수요자는 PSC 교량 구조물의 관리주체인 정부기관으로써, 민간의 개발보다 정부의 지원에 의하여 개발하는 것이 더욱 효과적일 것으로 판단됨
- 또한, 스마트 콘크리트 정착구 개발은 4차 산업혁명을 주도해야하는 현 시대에 있어서 건설기술연구사업의 중점지원 분야에 매우 적합함

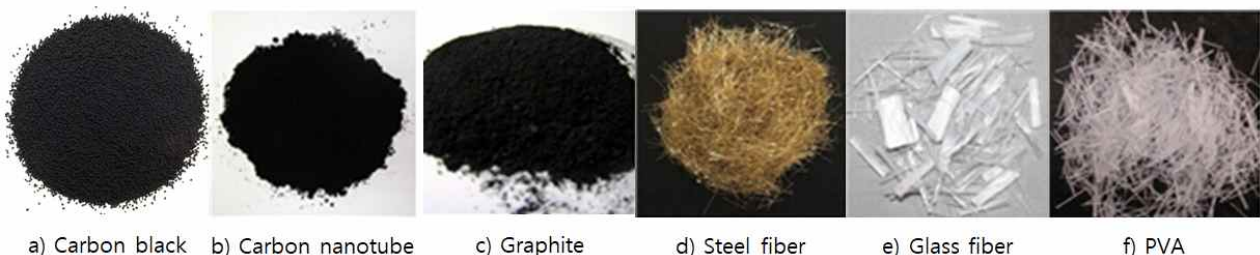
실용화 및 상용화:

- SOC 구조물의 노후화가 증가하면서 사회적인 면에서 구조물의 안정성을 위한 유지관리에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있음
- 또한, 건설재료 자체가 손상을 진단할 수 있는 스마트 건설재료에 대한 연구가 세계적인 이슈로 급부상하고 있으며, 이에 대한 기초 연구가 활발히 진행 중 임
- PSC 교량의 핵심부인 PS 강재 정착구를 실시간 모니터링 할 수 있는 스마트 콘크리트에 대한 연구는 유지보수 및 안전관리 측면에 있어서 지속적으로 발전해 나가야할 기초연구임
- 보편적으로 PSC 교량 긴장재의 관리방법은 직접적인 기계식 방법과 간접적인 센서 기반의 방법이 있지만 효율성이 떨어진다는 점에서 스마트 콘크리트를 이용한 직관적인 관리가 가능한 기술의 개발은 PSC 교량 관리의 새로운 기술 혁신을 이룰 것으로 기대됨
- 뿐만 아니라, 실제 PSC 교량에서의 적용성이 높고, 실무자들이 전문지식 없이도 운영 가능한 스마트 모니터링 기술의 개발은 실용화 및 상용화가 필수적임

○ 연구개발 범위

A1. 전기-역학적 민감도 향상을 위한 스마트 콘크리트 배합 개발

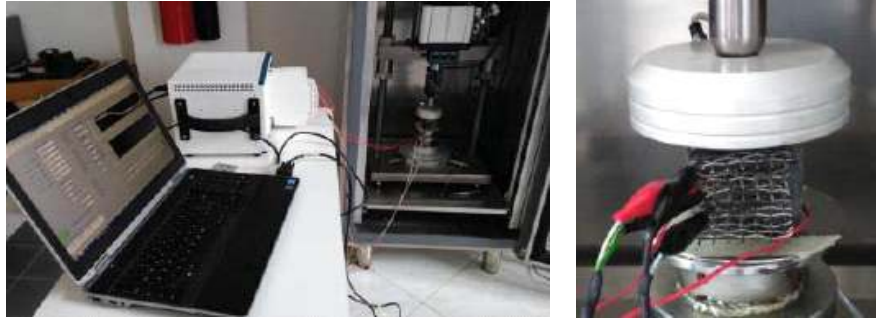
- PS 강재 정착구의 특성에 맞는 높은 압축강도와 균열 저항성 뿐만 아니라, 탄성 구간에서도 높은 전기-역학적 민감도를 가지는 스마트 콘크리트 개발이 필요
- Nano functional filler를 보강하여 스마트 콘크리트의 탄성영역 내의 전기-역학적 민감도를 향상시키고 노이즈를 최소화시킬 수 있는 방안을 도출
 - 하중조건 하에서 탄성영역의 전기-역학적 민감도를 향상시킬 수 있는 전기적 특성을 가진 functional filler 도출
 - 전기적 특성을 가지고 시멘트 복합재료로써 사용 가능성을 지닌 functional filler의 혼합량 도출



<전기-역학적 민감도 향상 및 콘크리트 정착구 보강용 functional filler들과 섬유보강재 종류>

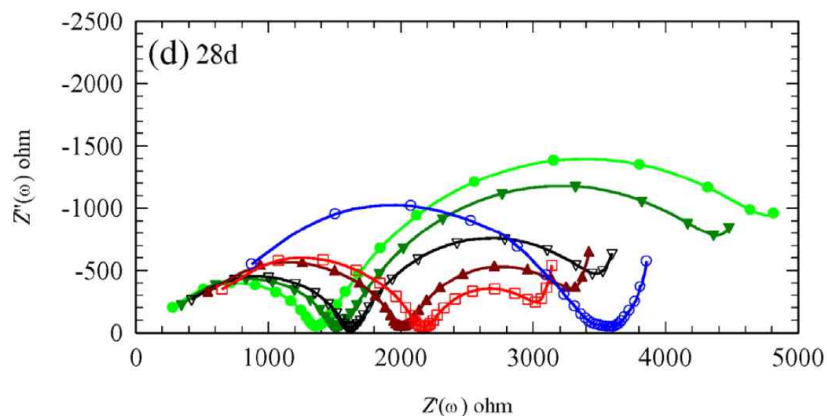
- 전기-역학적 성능평가

- 개발된 스마트 콘크리트의 압축하중에 따른 탄성구간 내에서 전기-역학적 변화를 측정하여 그 상관관계를 분석



<압축하중에 따른 탄성구간 내에서의 시멘트 복합재료의 전기-역학적 성능평가
[Alessandro et al. (2016)]>

- 개발된 스마트 콘크리트의 특성 및 내부에 사용된 filler 또는 섬유보강재의 특성에 따라 AC 전기저항을 측정에 최적 frequency를 Nyquist plot을 이용하여 평가



<Nyquist plot [Suryanto et al. (2016)]>

A2. 온도 및 습도 등의 환경인자가 스마트 콘크리트의 전기적 특성에 미치는 영향 평가

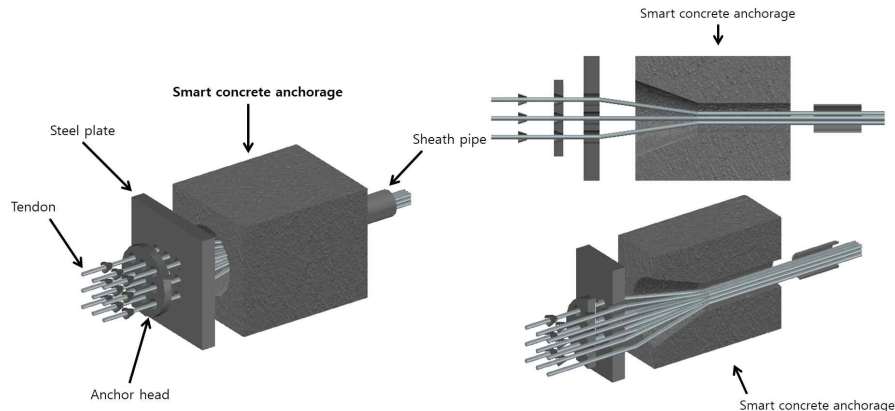
- 개발 기술의 실제 구조물 적용성을 평가하기 위하여 다양한 온·습도에 변화를 주어 온·습도의 변화에 따른 스마트 콘크리트의 전기적 거동 조사
- 온도와 습도 변화에 따른 재료의 전기적 거동을 조사함으로써, 스마트 콘크리트의 온도와 습도 변화에 따른 보정계수를 도출하여 스마트 콘크리트의 전기적 거동 오보를 최소화



<온도와 습도 변화에 따른 전기적 거동 실험 전경>

A3. 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)

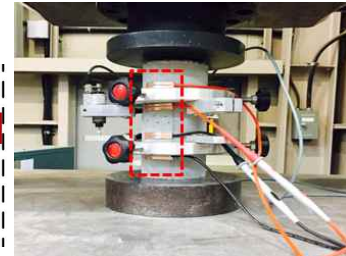
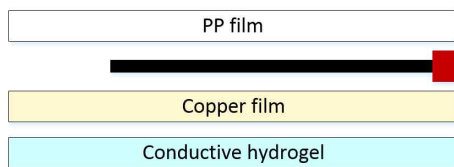
- 역학적 성능평가
 - 스마트 콘크리트 정착구 설계(안) 제시를 위해 다양한 하중조건 하에서 실험을 통하여 스마트 콘크리트 정착구의 역학적 특성을 조사
- 스마트 콘크리트의 전기-역학적 특성을 통한 스마트 콘크리트 정착구의 설계(안) 제시



<스마트 콘크리트 정착구의 설계 구상도 (예시)>

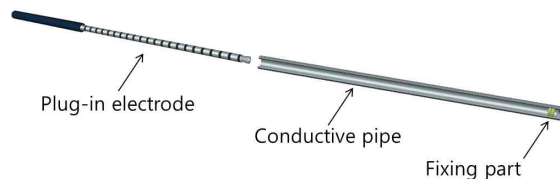
A4. 스마트 콘크리트 정착구용 Plug-in형 매립식 전극개발

- AC 전류를 사용하여 전기저항률을 비롯한 여러 지표를 통한 전기-역학적 민감도를 측정하는 방안 제시
- 전기전도성과 탈·부착력을 가진 하이드로겔을 활용한 탈·부착식 전기저항률 측정용 전극을 사용한 DC 전류 기반의 functional filler가 보강된 시멘트 복합체의 특성에 따른 전기-역학적 성능 평가

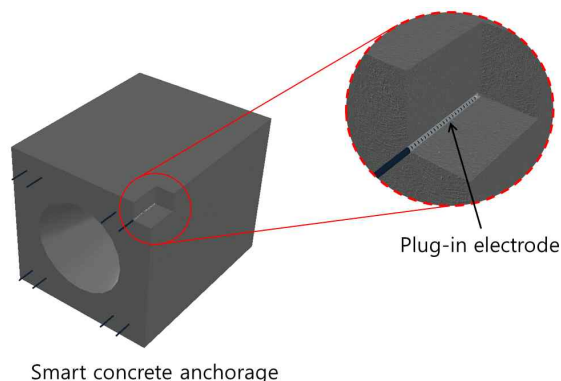


<탈·부착식 하이드로겔 전극의 구성 및 전기-역학적 측정에 적용된 모습>

- 스마트 콘크리트 정착구 내부에 매립되는 Plug-in형 전극에 대한 성능평가와 적용성에 대한 검토



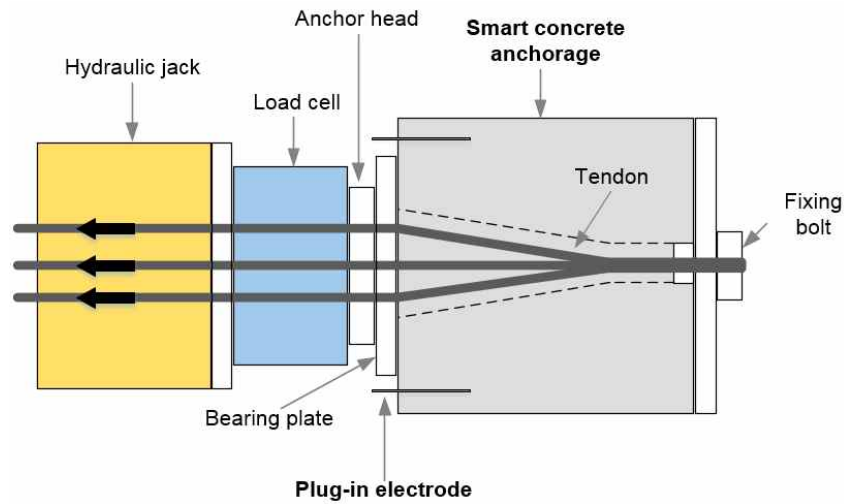
<스마트 콘크리트 정착구 전기-역학적 측정용 Plug-in형 전극 구성 (예시)>



<Plug-in형 전극이 적용된 스마트 콘크리트 정착구 형상 (예시)>

A5. 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 성능 평가

- 개발된 Plug-in형 전극을 적용하여 긴장력 변화에 따른 임피던스 또는 전기저항률 변화 측정
- 스마트 콘크리트 정착구와 주변 콘크리트의 물성 차이로 발생할 수 있는 전단 파괴 방지를 위한 스마트 콘크리트 정착구 설계 방안 수립
- 실제 구조물 적용을 위한 스마트 콘크리트 정착구 제작 매뉴얼 작성
- 실험에 사용될 장치 개요도를 아래의 그림에 도식적으로 나타내었음: 유압잭, 로드셀, 긴장재, 그리고 스마트 콘크리트 정착구로 구성
- 다양한 긴장력 도입 속도에 따른 임피던스 또는 전기저항률 변화를 추가적으로 평가



<스마트 콘크리트 정착구 전기-역학적 성능평가 실험 셋업 (예시)>

제2장. 국내외 기술 개발 현황

○ 국내 현황

- 최근 수행되었거나 수행되고 있는 국내 연구개발과제를 아래의 표에 정리하였음

제목	수행기관	내용
초고성능 콘크리트를 이용한 긴장재 정착블록 및 이를 구비한 프리스트레스트 콘크리트 부재 (2011)	한국건설기술연구원	긴장재 정착블록이 가지는 복잡한 나선형 철근 등의 부재를 생략하면서도 간편하고 견고하게 긴장재를 장착할 수 있는 기술 개발
압전 임피던스 계측 기반 PSC 거더의 텐던 긴장력 손실량 측정 기법 (2013)	성균관대학교	PZT 압전 센서를 정착구에 결합하여 긴장재의 임피던스를 계측하여 텐던의 긴장력을 지속적으로 모니터링 하는 기술 개발
탄성파속도를 이용한 PSC 텐던의 상시 긴장력 추정 (2013)	경남대학교	탄성파 속도를 이용하여 PSC 텐던의 상시 긴장응력을 추정할 수 있는 기술 개발
전기저항식 스트랜드미터를 이용한 PSC거더 강연선의 긴장력 측정에 관한 연구 (2014)	국토교통연구인프라운영원	전기저항식 변형률 센서를 기반으로 강연선 표면에 장착시킬 수 있는 스트랜드미터를 개발하여 이를 정착구에 적용하여 긴장력을 측정하는 기술 개발
회전 와셔를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 긴장력 측정방법 (2015)	한국건설기술연구원	압축응력이 작용하는 긴장재의 정착장치에 회전 와셔를 추가하여 회전에 필요한 토크를 측정함으로써, 긴장재의 긴장력을 측정하는 기술 개발
상태 모니터링이 가능한 프리-스트레스 구조물 및 그 시공방법 (2016)	부경대학교 산학협력단	EM 센서를 정착구와 쉬스관 사이, 또는 쉬스관과 쉬스관 사이에 연결시켜 긴장력을 모니터링하는 기술 개발
케이블 교량 및 PSC 교량의 장력/긴장력 관리를 위한 저전력 EM 센싱 무선 모니터링 시스템 개발 (2017)	재단법인 차세대융합기술연구원	EM 센싱 기반 긴장력 모니터링 알고리즘과 무선 계측 시스템을 개발하여 무선 장력 모니터링 시스템 개발

○ 국외 현황

- 2000년도 이후 수행되었거나 수행되고 있는 연구개발과제 또는 국외 SCI(E)급 논문들을 아래의 표에 정리하였음

제목	수행기관/국가	내용
Measurement of tensile forces in a seven-wire prestressing strand using stress waves (2001)	West Virginia University Morgantown, USA	7연선 강연선의 긴장응력의 크기를 탄성파 기술을 이용하여 측정하는 비파괴 방법에 대하여 조사
Long term stress monitoring on PC beam by using electro-magnetic sensor (2002)	University of Illinois at Chicago, USA	Electro-magnetic 센서를 이용하여 비부착된 외부 긴장재의 응력을 측정
A Pre-stress damage monitoring method based on optical fiber Brillouin full-dimension sensing (2006)	哈尔滨工业大学, China	광섬유를 이용하여 긴장재의 응력변화를 측정

Monitoring of tension force and load transfer of ground anchor by using optical Fiber Bragg Grating (FBG) sensors embedded tendon (2011)	Chonnam National University, Korea	7연선 강연선의 중심에 FBG 센서를 삽입하여 긴장재의 응력변화를 측정
Smart piezoelectric-interface for wireless impedance based prestress-loss monitoring in tendon anchorage connection (2012)	Pukyong National University, Korea	PZT 센서의 임피던스 변화와 무선 센서를 사용하여 긴장재의 응력 변화를 측정
Monitoring of structural prestress loss in RC beams by inner distributed Brillouin and fiber Bragg grating sensors on a single optical fiber (2014)	School of civil engineering, Harbin institute of technology, China	Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA)와 Fiber Bragg Grating (FBG) 센서를 이용하여 긴장재의 응력 변화를 측정
High stress monitoring of prestressing tendons in nuclear concrete vessels using fiber-optic sensors (2014)	Aston University, United Kingdom	광섬유를 이용하여 긴장재의 응력 변화를 측정
Development of embedded EM sensors for estimating tensile forces of PSC girder bridges (2017)	Sungkyunkwan University, Korea	EM 센서(elasto-magnetic sensor)를 이용하여 PSC 거더에 사용된 긴장재의 인장 응력 변화를 측정
Prestress monitoring of a steel strand in an anchorage connection using piezoceramic transducers and time reversal method (2018)	Chang'an University, China	압전 세라믹 재료를 사용하여 강연선의 긴장력의 변화를 측정
EM-based monitoring and probabilistic analysis of prestress loss of bonded tendons in PSC beams (2018)	Southeast University, China	장기 긴장력 손실 모니터링을 위한 EM 센서의 사용 가능성을 조사
Monitoring of long-term prestress losses in prestressed concrete structures using fiber optic sensors (2019)	Princeton University, USA	광섬유 센서를 사용하여 PSC 구조물의 긴장력 손실을 측정할 수 있는 현장 평가 방법을 제시

○ 국내외 연구 동향 분석

- 기존 PS 강재의 긴장응력 모니터링 기술은 추가적인 변형률계 센서를 부착시키거나 내장시켜 긴장력의 손실을 감지하는 기술이 주를 이루고 있지만, 이러한 변형률계 센서는 낮은 내구성으로 장시간 모니터링이 불가하며 손상 시 보수보강이 어려운 한계점이 있음
- 또한, 기존에 국내외에서 수행되고 있는 연구들은 압전 센서, 광섬유 센서, 그리고 PS 강재에 직접적인 응력변화 측정 등의 센서 또는 추가적인 장비를 이용하여 PS 강재의 긴장응력 저하 감지를 유도하고 있으나, 이러한 방법은 센서의 내구성 및 장비의 보수보강에 한계점이 있음
- 대부분의 관련 특허는 PS 강재 내부에 내장되어 긴장응력 저하를 측정하는 기술이 주를 이루지만, 센서의 재료적 특성상 외력에 의한 파손 위험성이 있어 실제 적용성에 대한 연구가 필요한 실정임

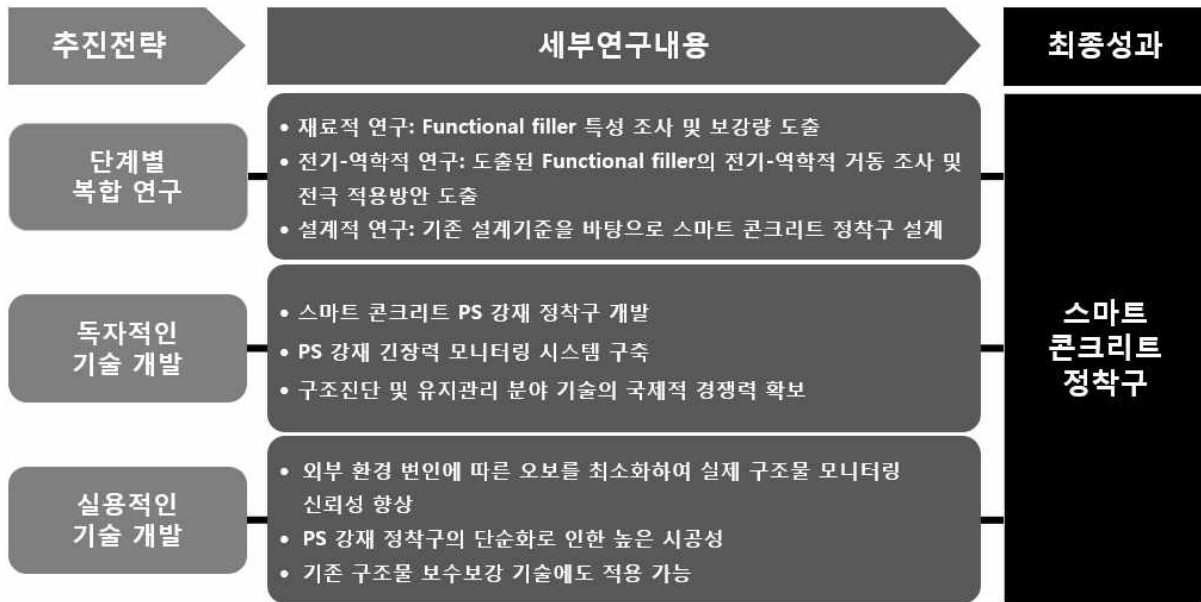
○ 연구개발과제의 차별성

- 스마트 콘크리트 정착구는 우수한 자기응력 감지 능력을 바탕으로, PS 강재의 긴장력 변화를 별도의 센서 부착 혹은 매립 없이 측정할 수 있으며, 높은 내구성을 바탕으로 외부 하중에 대한 손상 없이 장시간 모니터링이 가능함
- PSC 구조물 제작 시의 시공성, 경제성 면에서 상기에 수행된 선행연구에서 다수 제안된 내장형 센서와 달리 긴장재의 구조 변화가 요구되지 않음
- 스마트 콘크리트 정착구는 인장강도와 부착특성이 우수한 섬유보강재를 사용하여 기존 PS 정착부에 사용되는 나선철근을 제거할 수 있음

제3장. 연구수행내용 및 성과

○ 연구개발 추진 전략 및 방법

본 연구과제의 최종 목표인 “PS 강재의 긴장력 측정용 스마트 콘크리트 정착구 기술”을 개발하기 위하여 아래의 그림과 같이 세 가지 추진전략을 바탕으로 연구를 추진함

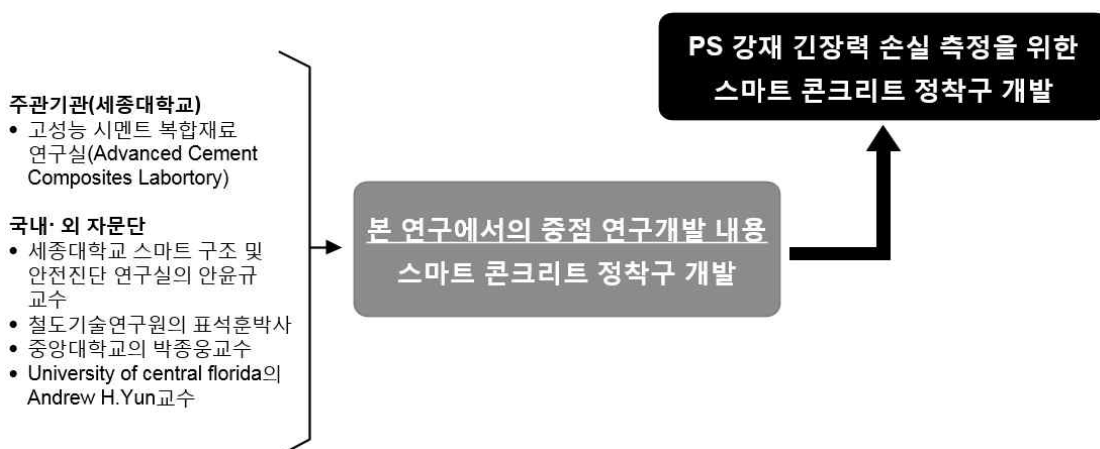


• 추진전략

- **단계별 복합 연구:** 과제에서 제안한 스마트 콘크리트 개발을 위해 아래와 같은 세부연구단계로 1) 스마트 콘크리트의 기본 재료인 시멘트 기반의 매트릭스와 전기적 특성을 가지는 나노 또는 마이크로 단위의 Functional filler에 대한 기초적인 연구 및 보강량 도출; 2) PS 강재 긴장력 도입 시의 전기-역학적 측정을 위한 전극 적용방안 연구와 같은 복합적인 연구; 3) 스마트 콘크리트 정착구 개발에 대한 설계적 연구를 통해 스마트 콘크리트 정착구를 개발함
- **독자적인 기술 개발:** 요소 단위의 연구를 넘어서 PSC 교량의 핵심 구조 부재로써의 역할과 동시에 실시간 모니터링 능력까지 갖춘 PS 강재 정착구의 독자적인 기술을 개발하여 구조진단 및 유지관리 분야 기술의 경쟁력 확보를 통하여 관련 기술의 대외 의존도를 감소시키고 국제적 경쟁력을 가지는 스마트 콘크리트 정착구로 개발함
- **실용적인 기술 개발:** 제안 과제에서는 기술성숙도 TRL 4단계를 목표로 하고 있지만, 실제 구조물에 적용될 스마트 콘크리트 정착구 시스템은 기존 구조물 유지관리 및 보수보강 기술에 적용할 수 있도록 국내·외 관련분야 전문가들로 자문단을 구성하여 실용화를 항상 염두에 두고 개발함

• 추진방법

본 연구의 최종목표를 달성하기 위하여 관련 분야 국내외 전문가들로 자문단을 구성하여 연구를 추진할 계획임 (아래의 그림에 추진방법을 도식적으로 나타내었음)



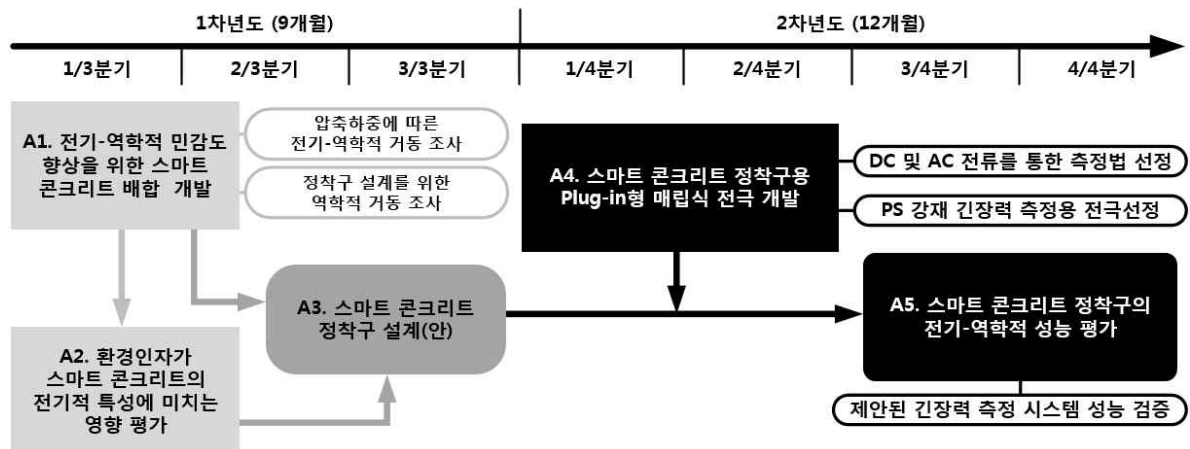
- **스마트 콘크리트 정착구 개발:** 주관기관의 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료 연구실 (Advanced Cement Composite Laboratory, ACCL)의 전문 연구원들과 동대학교의 스마트 구조 및 안전진단 연구실 (Smart Structures & Safety Diagnosis Laboratory, SSSD)의 안윤규 교수, 철도기술연구원의 표석훈 박사, 중앙대학교의 박종웅 교수 등의 국내 전문가들과 미국 University of Central Florida의 Andrew H. Yun 교수 등의 국외 전문가들의 자문을 통해서 개발 과정에서의 오류를 방지하고 문제점을 해결하고자 함

주관연구기관



○ 연구개발 로드맵

- 연구과제의 최종 목표인 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 정착구 기술 개발을 위한 21개월 동안의 연구개발 로드맵을 아래와 같이 나타내었음



○ 연구개발 추진체계

연구개발과제			
과제명	긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 (Smart concrete anchorage) 기술 개발		
기 관 별 참 여 현 황			
구 분	기관수	인원수	총인원 수
산 업 계			14
대 학	1	14	
국공립(연)			
출 연 (연)			
기 타			
주 관 연 구 기 관			
세종대학교 고성능 시멘트 복합재료 연구실 (Advanced Cement Composite Laboratory)			
참 여 연 구 원			
주관연구책임자 김동주 교수 외 13명			
담당연구개발내용			
- 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 (Smart concrete anchorage) 기술 개발			

○ 연구개발 추진일정

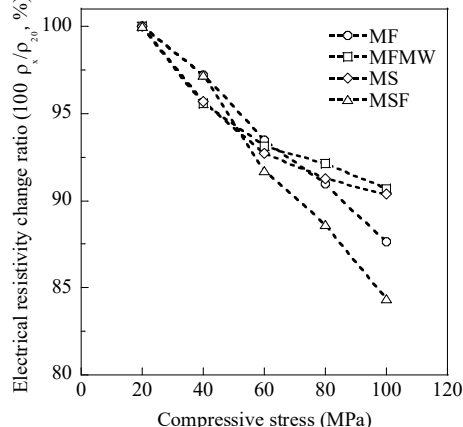
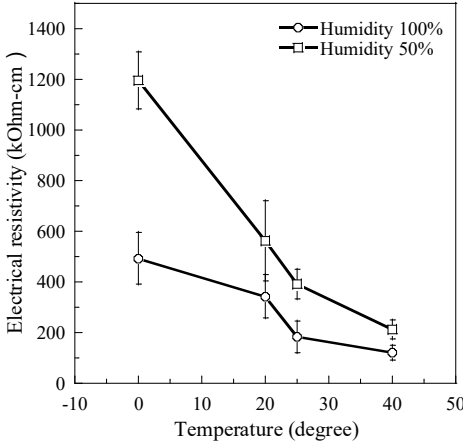
구분	연구과제명 (연구 수행기관)	관련 성과목표/지표			세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	1차년도			2차년도			
		핵심성과	단위성과	질적 성과지표			1/3	2/3	3/3	1/4	2/4	3/4	4/4
주관	세종대학교	A	A1	A1-①	자료 조사								
			A2	A2-①	성능 검증	실험보고서							
			A3	A3-①	성능 검증	실험보고서							
			A3	A3-②	특허 출원	특허출원서							
			A4	A4-①	성능 검증	실험보고서							
			A5	A5-①	성능 검증	실험보고서							

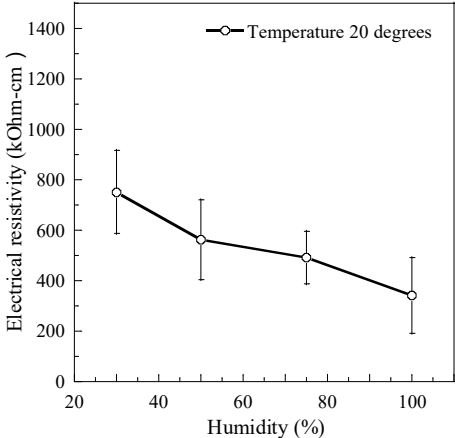
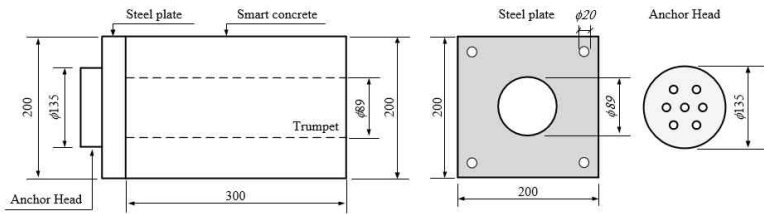
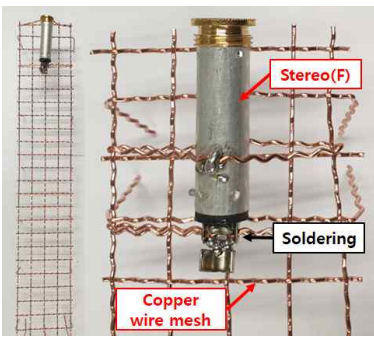
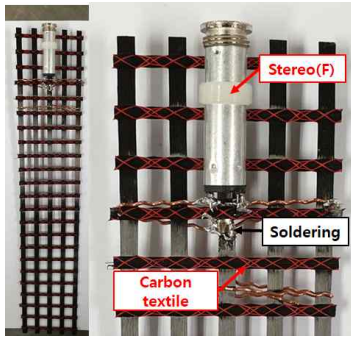
○ 연구개발 성과

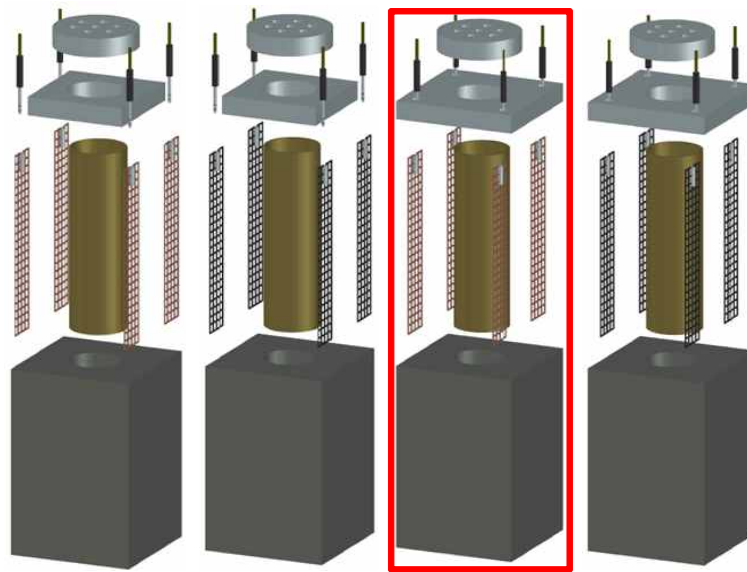
- 본 연구 과제를 수행하는 동안 국외 SCI(E)급 논문게재 4건, 국내 일반학술지 논문게재 1건, 특허출원 2건, 그리고 국외 학술발표대회 논문 발표 2건의 성과를 도출함. 도출된 연구개발성과는 아래와 같음
- 국외 SCI(E)급 논문 (게재 4건)
 - Kang MS, Lee H, Yim H, An YK, and Kim DJ. Multi-channel electrical impedance-based crack localization of fiber-reinforced cementitious composites under bending conditions. *Applied Science*, 2018, 8(12): 2582-2593.
 - Lee SY, Le HY, and Kim DJ. Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress. *Construction and Building Materials*, 2019, 220: 149-160.
 - Noh HW, Kim MK, and Kim DJ. Comparative performance of four electrodes for measuring the electromechanical response of self-damage detecting concrete under tensile load. *Sensors*, 2019, 19(17): 3645-3659.
 - Kim MK, Park J, and Kim DJ. Characterizing the electro-mechanical response of self-sensing steel-fiber-reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*. 2020, 240, 117954.
- 국내 일반학술지 논문 (게재 1건)
 - Le HY and Kim DJ. Effects of matrix strength, fiber type, and fiber content on the electrical resistivity of steel-fiber-reinforced cement composites during fiber pullout. *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, 2019.675-689
- 특허출원 2건
 - 김동주, 노현우, 최성익, 황라환, 이선열. 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 조성물 및 스마트 콘크리트 정착구 시스템. 대한민국 특허청, 10-2018-0028411. (2018.03.12.)
 - 김동주, 레휘비엣, 이선열. 자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물. 대한민국 특허청, 10-2018-0140120. (2018.11.14.)
- 국외 학술발표대회 논문 2건
 - Kim MK and Kim DJ, "Electromechanical response of self-sensing concrete beam under flexure," *The Twenty-Sixth Annual International Conference on COMPOSITES/NANO ENGINEERING (ICCE-26)*, Paris, France, July 15-21, 2018.
 - Lee SY, Kim MK, and Kim DJ, "Self-sensing response of smart ultra-high performance concrete under tension," *Innovative Non-Destructive Testing for Civil Engineers (INDTCE)* 2019, Waikoloa, Hawaii, USA, November 20-23, 2019.

○ 연구 결과

- 2년간의 연구 수행을 통하여 도출한 연구개발결과를 아래의 표에 요약하여 나타냄

연구 목표	주요 연구내용	연구결과	관련 연구 실적																
A. 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 기술 개발	A1. 전기-역학적 민감도 향상을 위한 스마트 콘크리트 배합 개발	- 전기-역학적 민감도가 우수한 스마트 콘크리트는 제강 슬래그 (steel slag)를 사용한 섬유 보강 시멘트 복합재료로써 최적의 배합안을 아래의 표 1과 같이 도출함 표 1. 스마트 콘크리트 정착구 모르타르 배합 <table><tr><td>Cement (Type I)</td><td>Steel slag</td><td>Silica fume</td><td>Silica powder</td><td>Super-plasticizer</td><td>Water</td><td>Flow (mm)</td><td>f'ck (MPa)</td></tr><tr><td>1.00</td><td>1.00</td><td>0.15</td><td>0.25</td><td>0.042</td><td>0.20</td><td>250</td><td>186.4</td></tr></table> - 제강슬래그와 강섬유를 복합적으로 사용한 모르타르 매트릭스 (MSF) 외에 강섬유 (MF), 강섬유와 MWCNT (MFMW), 제강슬래그 (MS)를 각각 사용한 실험 시리즈 중 제강슬래그와 강섬유를 복합적으로 사용한 최종 배합안이 가장 우수한 전기-역학적 거동을 보임  그림 1. 전도성 재료에 따른 스마트 콘크리트의 전기-역학적 거동	Cement (Type I)	Steel slag	Silica fume	Silica powder	Super-plasticizer	Water	Flow (mm)	f'ck (MPa)	1.00	1.00	0.15	0.25	0.042	0.20	250	186.4	- 국외 SCI(E) 논문게재 1건 - 특허출원 1건 - 국외 학술발표 대회 논문 1건
	Cement (Type I)	Steel slag	Silica fume	Silica powder	Super-plasticizer	Water	Flow (mm)	f'ck (MPa)											
1.00	1.00	0.15	0.25	0.042	0.20	250	186.4												
A2. 온도 및 습도 등의 환경 인자가 스마트 콘크리트의 전기적 특성에 미치는 영향 평가	제강 슬래그가 사용된 강섬유 보강 시멘트 복합재료는 일정한 습도 (50,100%)에서 온도 (0 ~ 40℃)의 변화에 따라 최대 5.7 배까지 전기 저항률이 감소하는 경향을 보임  그림 2. 제강 슬래그가 사용된 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 온도 변화에 따른 전기저항률의 변화																		

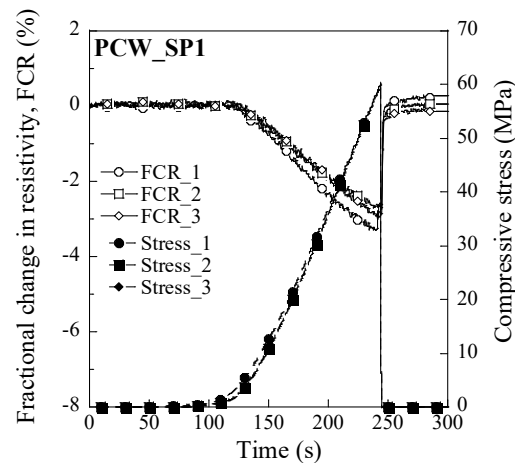
	- 또한, 일정한 온도 (20℃)에서 습도의 변화 (35 ~ 100%)에 따라 전기 저항률이 최대 2.2 배까지 감소하는 경향을 보임  그림 3. 제강 슬래그가 사용된 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 습도 변화에 따른 전기저항률의 변화 - 온도의 변화가 습도의 변화에 비해 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, 이는 온도 및 습도의 증가가 매트릭스 내부 전하의 이온 이동의 활성화에 의한 현상으로 판단됨	
A3. 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)	- 제강 슬래그가 사용된 강섬유 보강 시멘트 복합재료 기반의 스마트 콘크리트 정착구 설계(안) 제시함 7연 강연선을 사용하는 정착구를 기반으로 그림 4와 같이 최적의 설계(안)을 도출함  그림 4. 7연 강연선 7가닥 사용 시 설계(안)	특허출원 1건
A4. 스마트 콘크리트 정착구용 Plug-in형 매립식 전극 개발	- 전극의 종류와 형상에 따른 스마트 콘크리트 정착구용 plug-in형 매립식 전극을 그림 5와 같이 개발함  (a) PCW (copper wire mesh+stereo)  (b) PCT (carbon textile+stereo) 그림 5. Plug-in형 매립식 전극의 구성 - 개발된 plug-in형 매립식 전극을 스마트 콘크리트 정착구에 적용한 매립식 전극 적용(안)을 그림 6과 같이 제시함	국외 SCI(E) 논문게재 2건



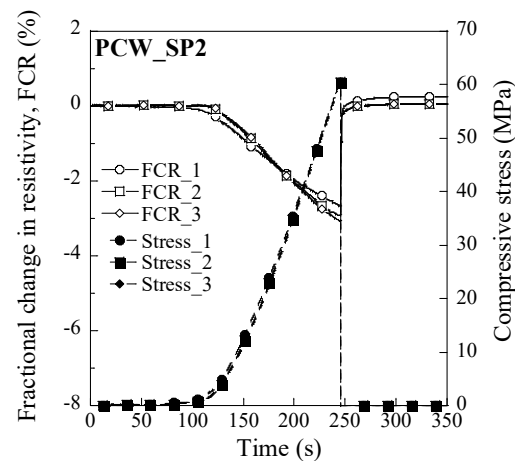
(a) Type1_PCW (b) Type1_PCT (c) Type2_PCW (d) Type2_PCT

그림 6. Plug-in 전극 적용 스마트 콘크리트 정착구

- 압축하중 하에서의 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 성능평가
- 제시한 plug-in형 매립식 전극 적용(안) 중 그림 6(c)의 Type 2_PCW가 그림 7과 같이 가장 우수한 하중 감지 성능을 가짐



(a) SP1



(b) SP2

그림 7. Plug-in형 매립식 전극 적용 스마트 콘크리트 정착구의 압축하중 하에서의 전기-역학적 거동

A5.
스마트
콘크리트
정착구의
전기-역학
적 성능
평가

- 국내
일반
학술지
논문게재
1건
- 국외
SCI(E)
논문게재
1건
- 국외
학술발표
대회
논문 1건

- 강연선 긴장력 상태에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 성능평가
 - Plug-in형 매립식 전극을 적용한 스마트 콘크리트 정착구의 최종 설계(안)과 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 실험 전경을 각각 그림 8과 그림 9에 나타냄

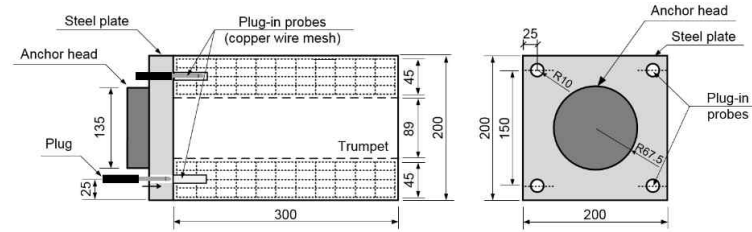


그림 8. Plug-in형 매립식 전극 적용 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)

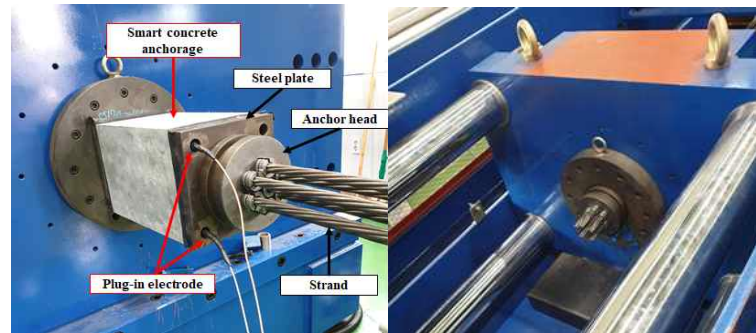


그림 9. 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 실험 전경 [(주)신성피씨]

- 긴장력 변화에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기저항을 변화 거동은 그림 10과 같으며, 최대 전기저항을 변화율이 -1.5%로 강연선 긴장력 도입 및 손실 평가가 가능한 것으로 나타남

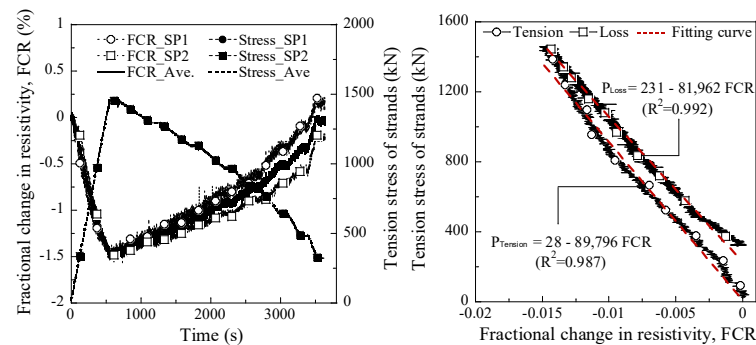
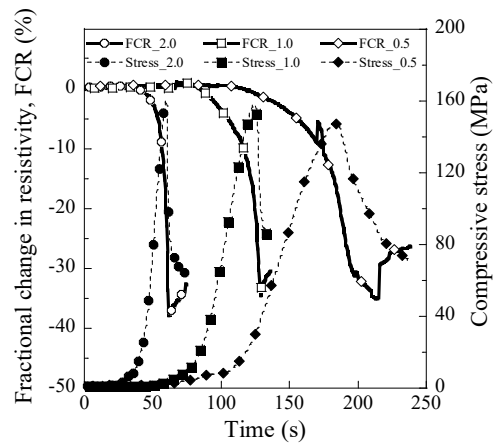
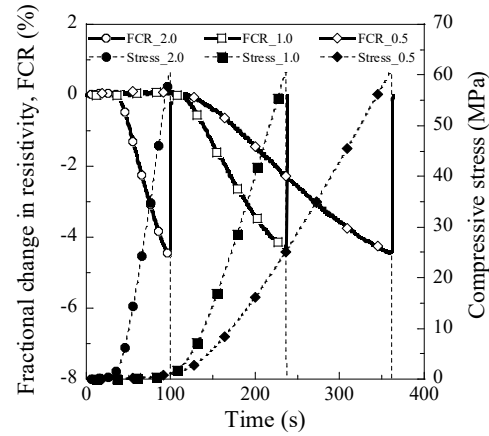


그림 10. 긴장력 변화에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기 저항률 변화 거동

- 압축 하중 속도에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 거동 조사
 - 그림 11과 같이 하중 재하 속도가 스마트 콘크리트와 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 민감도에 미치는 영향성은 미미하여 실제 스마트 콘크리트 정착구 적용 시 긴장 장치의 종류에 상관없이 사용 가능할 것으로 판단됨



(a) Cubic specimens



(b) Smart concrete anchorage

그림 11. 하중 속도에 따른 평균 전기저항률 변화 거동

- 스마트 콘크리트 정착구 주변 콘크리트의 전단 파괴 방지 방안 구축
 - 실제 PSC 구조물의 스마트 콘크리트 정착구 적용 시 스마트 콘크리트와 일반 콘크리트 사이의 물성 차이로 발생할 수 있는 전단 파괴 가능성을 고려하여 그림 12와 같이 스마트 콘크리트 정착구의 최종 설계(안)를 제시함

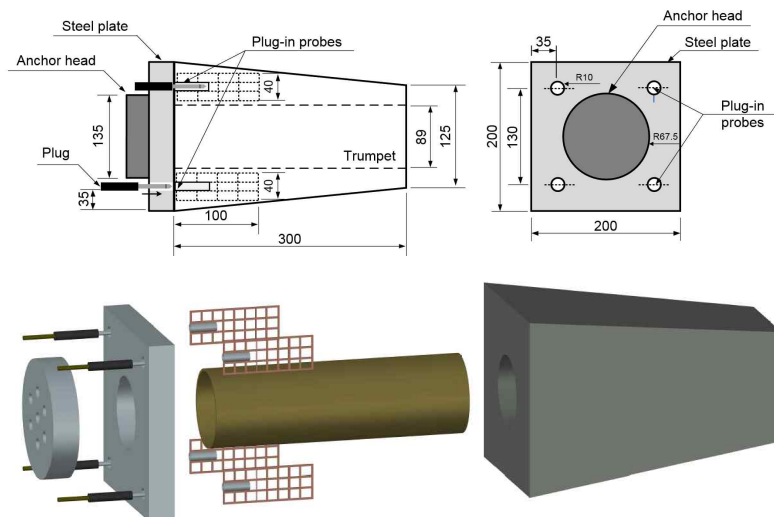


그림 12. 전단 파괴 방지를 위한 스마트 콘크리트 정착구 최종 설계(안)

-
- 주요연구내용에 따른 관련 연구 실적을 아래에 기술함

A1. 전기-역학적 민감도 향상을 위한 스마트 콘크리트 배합 개발

& A2. 온도 및 습도 등의 환경인자가 스마트 콘크리트의 전기적 특성에 미치는 영향 평가

(국외 SCI(E) 논문게재 1건, 국외 학술발표대회 논문 1건, 특허출원 1건)

- Lee SY, Le HY, and Kim DJ. Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress. *Construction and Building Materials*, 2019, 220: 149-160.
- Kim MK and Kim DJ, "Electromechanical response of self-sensing concrete beam under flexure," *The Twenty-Sixth Annual International Conference on COMPOSITES/NANO ENGINEERING (ICCE-26)*, Paris, France, July 15-21, 2018.
- 김동주, 레휘비엣, 이선열. 자기응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물. 대한민국 특허청, 10-2018-0140120. (2018.11.14.)

A3. 스마트 콘크리트 정착구 설계(안) (특허출원 1건)

- 김동주, 노현우, 최성익, 황라환, 이선열. 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 조성물 및 스마트 콘크리트 정착구 시스템. 대한민국 특허청, 10-2018-0028411. (2018.03.12.)

A4. 스마트 콘크리트 정착구용 Plug-in형 매립식 전극개발 (국외 SCI(E) 논문게재 2건)

- Kang MS, Lee H, Yim H, An YK, and Kim DJ. Multi-channel electrical impedance-based crack localization of fiber-reinforced cementitious composites under bending conditions. *Applied Science*, 2018, 8(12): 2582-2593.
- Noh HW, Kim MK, and Kim DJ. Comparative performance of four electrodes for measuring the electromechanical response of self-damage detecting concrete under tensile load. *Sensors*, 2019, 19(17): 3645-3659.

A5. 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 성능 평가

(국내 일반학술지 논문게재 1건, 국외 SCI(E) 논문게재 1건, 국외 학술발표대회 논문 1건)

- Le HY and Kim DJ. Effects of matrix strength, fiber type, and fiber content on the electrical resistivity of steel-fiber-reinforced cement composites during fiber pullout. *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, 2019.675-689
 - Kim MK, Park J, and Kim DJ. Characterizing the electro-mechanical response of self-sensing steel-fiber-reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*. 2020, 240, 117954.
 - Lee SY, Kim MK, and Kim DJ, "Self-sensing response of smart ultra-high performance concrete under tension," *Innovative Non-Destructive Testing for Civil Engineers (INDTCE)* 2019, Waikoloa, Hawaii, USA, November 20-23, 2019.
-

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

○ 목표 달성도

• 성과목표 및 평가방법

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수	
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치		
주관	1	스마트 콘크리트 정착구 설계 및 제작, 성능평가	1-1	전기민감도가 우수한 스마트 콘크리트 개발	①	매트릭스 배합(안) 도출	1	1	건수	결과보고서	15	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
					②	성능평가	1	1	건수	논문	15		
			1-2	스마트 콘크리트 정착구 설계	①	스마트 콘크리트 정착구	1	1	건수	특허출원	20	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
			1-3	스마트 콘크리트 전극 적용방안 제시	①	스마트 콘크리트 정착구에 적합한 전극 제시	1	1	건수	결과보고서	25	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 2건 시제품: 1건 SW: 1건	
			1-4	긴장력 모니터링 시스템	②	실시간 전기- 역학적 측정 시스템 구축	1	1	건수	논문	25	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 2건 시제품: 1건 SW: 1건	
계											100	특허: 출원 2건 등록 1건 논문: 5건 시제품: 1건 SW: 1건	

• 연구개발 내용 및 최종목표 달성도

성과목표	내용	달성도
전기민감도가 우수한 스마트 콘크리트 개발	- 전기민감도가 우수한 스마트 콘크리트 개발을 위한 최적의 배합(안)을 도출함: - 제강슬래그와 강섬유를 복합적으로 사용한 최종 배합안이 가장 우수한 자기 응력 감지 능력을 가짐 - 개발 기술의 실제 구조물 적용성을 평가하기 위하여 온·습도가 스마트 콘크리트에 미치는 영향성을 평가함: - 온도의 변화가 습도의 변화에 비해 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, 이는 온도 및 습도의 증가가 매트릭스 내부 전하의 이온 이동의 활성화에 의한 현상으로 판단됨	30/30 (100%)
스마트 콘크리트 정착구 설계	제강 슬래그가 사용된 강섬유 보강 시멘트 복합재료 기반의 스마트 콘크리트 정착구 설계(안) 제시함: 7연 강연선을 사용하는 정착구를 기반으로 최적의 설계(안)을 제시	20/20 (100%)

스마트 콘크리트 전극 적용방안 제시	스마트 콘크리트 정착구 내부에 매립되는 plug-in형 매립식 전극을 제시함: 전극의 종류 (copper wire mesh 그리고 carbon textile)에 따라 총 2가지 종류의 plug-in형 전극을 제시하였으며, 2가지 종류의 plug-in형 전극을 각각 스마트 콘크리트 정착구에서의 매립 위치 (정착판 내·외부)에 따라 총 4가지의 매립식 전극 적용(안) 제시	25/25 (100%)
긴장력 모니터링 시스템	- 제시된 plug-in형 매립식 전극과 매립식 전극 적용(안)에 대하여 전기-역학적 거동을 평가하여 최종적으로 plug-in형 매립식 전극이 적용된 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)을 선정함 - 선정된 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)을 통하여 강연선 긴장력 상태와 하중 속도에 따른 전기-역학적 거동을 평가하여 실제 구조물에서의 적용성을 검토함 - 추가적으로, 스마트 콘크리트 정착구에서 발생할 수 있는 전단파괴를 방지할 수 있는 방안을 구축하여 실제 PSC 구조물에 개발된 스마트 콘크리트 정착구를 적용할 수 있도록 하였음	25/25 (100%)
합계		100/100 (100%)

○ 관련 분야 기여도

기술적 기여도:

- 4차 산업혁명에 대응하는 구조, 재료, 그리고 전기공학의 다학제 간 융합 연구를 통해 스마트 콘크리트 분야의 세계적인 기술 수준 확보
- 요소 단위의 연구를 넘어 PSC 구조물의 핵심 구조 부재로서의 역할과 동시에 실시간 모니터링 능력까지 갖춘 스마트 정착구 분야의 독자적인 원천 기술 확보
- Plug-in형 전극 개발은 기존 구조물 안전 모니터링에 사용되는 부착식 또는 매립식 전극들의 한계점을 극복하고, 외부 환경 변화에 따른 오보를 최소화하여 신뢰도 측면에서도 높은 신뢰성을 가짐
- 기존 PS 강재 정착구의 나선철근과 제품화된 정착 부분을 스마트 콘크리트 정착구로 대체 가능

경제적·산업적 측면:

- 2016년 정부에서确定的한 19대 『미래성장동력 종합실천계획전략』 산업 중 “재난안전관리 스마트 시스템”의 핵심요소 기술로 활용가능
- 비파괴검사 국내·외 시장이 2014년 48.1억 달러에서 2019년 63.1억 달러로 성장 (연평균 8.96%)할 것으로 전망됨 (한국과학기술정보연구원 [2015])에 따라 스마트 콘크리트 정착구 기술의 개발은 세계적 건설시장에 새로운 패러다임을 가져올 것으로 예상
- 스마트 콘크리트 정착구의 적용 시, 기존 PS 강재 정착부의 유지관리 및 시공성 측면에서 정착부에 요구되는 나선철근은 섬유보강재로 대체되고 외부적인 영향에 의해 파손된 센서의 교체 및 보수가 불필요하며 반영구적으로 사용이 가능하다는 점에서 경제성을 향상시킬 것으로 예상
- 첨단 스마트 건설재료 및 진단 시스템 기술의 확보를 통하여 우리나라의 세계적인 교량 기술 수출에 기여할 것으로 예상

사회적 측면:

- PSC 구조물의 노후화로 인하여 지속적으로 발생하고 있는 재해·재난 사고의 발생 전에 교량의 손상 발생에 대한 경로를 알려 구조물의 보수·보강을 실시함으로써 구조물의 안정성을 향상시켜 사용자의 불안감 해소 가능
- 기존 센서의 설치 및 유지보수 비용을 절감시키고, 실제 적용성을 확보함으로써 사회적 비용 절감
- PSC 구조물의 관리 및 점검 주체에 효과적인 시설물 유지관리 시스템을 제공함으로써 관련 비용의 절감과 Safety Korea 구현에 크게 이바지할 것으로 예상
- 첨단 스마트 건설재료 및 진단 시스템 기술의 확보를 통하여 세계적인 건설 기술 수출에 기여할 수 있을 것으로 예상

○ 목표 미달성 원인(사유)

- 총 2년간의 연구과제 수행을 통하여 국외 SCI(E)급 논문게재 3건, 국내 일반학술지 논문게재 2건, 특허출원 1건을 달성하기로 계획하였으나, 현재 국외 SCI(E)급 논문 4건 게재, 국내 일반학술지 논문게재 1건, 특허출원 2건, 국제학술발표대회 논문 발표 2건을 달성함
- 즉, 최종 성과는 당초 성과 계획대비 국외 SCI(E)급 논문 1건 초과달성, 특허출원 1건 초과달성, 국제학술발표대회 논문 발표 2건 추가달성, 그리고 국내 일반학술지 논문 1건 미달성임
- 미달성된 국내 일반학술지 논문 1건은 연구결과가 매우 우수함에 따라 국외 SCI(E)급 논문 1건으로 대체하였음

제5장. 연구개발성과의 활용계획

○ 최종 성과물의 활용 계획

연구결과물	활용방안
긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 기술	• 건설 시장 진출을 위한 스마트 콘크리트 정착구 기술 개발을 목적으로, 콘크리트 2차 제품 생산 업체와 협력하여 제품 생산 라인 구축 및 동일한 제품 성능 확보를 위한 검토 진행 • 실 구조물 적용을 위해 PSC 제품 생산 업체와 협력하여, 제작되는 PSC 부재에 대하여 스마트 콘크리트 정착구 기술 적용 방안 구축 및 사업화 진행 • 긴장재와 정착 장치를 손상된 콘크리트 교량 외부에 보강하여, 구조물 안전성을 향상시키는 외부강선 보강 공법에 적용 가능한 스마트 콘크리트 정착구 기술을 설계하여, 신규 구조물뿐만 아니라 기존 노후화된 구조물에도 적용 가능한 스마트 콘크리트 정착구 기술 시스템 구축 및 사업화 진행

○ 연구의 한계 및 추가연구 필요성

- 개발된 스마트 콘크리트 정착구는 다중의 강연선 긴장력에 의해 발생하는 압축하중 변화를 바탕으로 긴장력 손실 정도를 평가하는 기술로 다중의 강연선 중 일부분이 손상되었을 때 전체적인 손실은 감지 할 수 있으나, 손상된 강연선 특정화 및 손상 정도 분석에는 어려움이 있어, 이를 해결 할 수 있는 추가 연구가 필요함
- 실제 PSC 구조물 적용 시 온도·습도와 같은 외부환경요인이 스마트 콘크리트 정착구의 전기저항률에 영향을 미치므로, 이러한 온도·습도 영향을 최소화 할 수 있는 추가연구가 필요함
- 무선 전기저항 측정 스마트 센서와 결합되는 스마트 콘크리트 정착구의 개발이 필요함 (기업화)

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

○ 자기감지 시멘트 복합체의 연구:

- 콘크리트의 전기적 거동에 대한 연구는 1960년대부터 꾸준히 이루어져왔으며, 그 이후부터 자기감지 콘크리트 재료 개발을 위한 연구들이 진행되어 왔음
- 최근 2년간 자기 응력 감지 그리고 자기 손상 감지 능력을 제공하기 위하여 보강되는 functional filler를 다양한 재료를 사용함으로써 외부 하중 하에서의 전기-역학적 거동과 자기 감지 능력을 향상시킬 수 있는 방안들에 대한 연구들이 수행되었음

○ Carbon계 재료를 사용한 자기감지 시멘트 복합재료의 해외 과학기술 개발 연구:

- Carbon계 재료는 전기전도성이 매우 우수한 재료로써 자기감지 시멘트 복합재료의 functional filler로 많이 사용되고 있음 [Monteiro et al. (2017), Pisello et al. (2017), Sun et al. (2017)]
- 하지만, 모르타르 매트릭스 내에서 carbon계 재료의 분산도가 매우 낮아 이를 해결하기 위한 연구들이 집중적으로 수행되고 있으나 [D'Alessandro et al. (2016), Hardy et al. (2016), Han et al. (2016), Sasmal et al. (2017), Gupta et al. (2017), Wang et al. (2017)], 여전히 분산도가 낮으며 경제성 또한 매우 낮다는 한계점을 가지고 있음

○ 기타 재료를 사용한 자기감지 시멘트 복합재료의 해외 과학기술 개발 연구:

- Carbon계 재료 외에도 functional filler로써 steel shavings, Nickel powder, Ni nanowire, PVA fiber, 그리고 steel fiber 등을 보강한 시멘트 복합재료의 전기-역학적 거동을 조사하여 자기감지 능력을 평가한 바 있음 [El-Dieb et al. (2018), Xiao et al. (2018), Xu et al. (2018), Fan et al. (2018), Berrocal et al. (2018), Nguyen et al. (2015), Song et al. (2015), Le and Kim (2017), Kim et al. (2018a, 2018b)]
- 그 중 PVA fiber와 steel fiber를 보강한 시멘트 복합재료는 변형연화거동을 가지는 carbon계 시멘트 복합재료와는 다르게 변형경화거동을 가져 매우 높은 연성도와 인장강도를 가지는 매우 우수한 건설재료로 알려져 있음
- 최근, Li and Li (2019)에 의해 보고된 바에 따르면 PVA fiber와 carbon black을 함께 사용한 다기능성 변형경화 시멘트 복합재료의 등가회로모델을 통하여 다기능성 변형경화 시멘트 복합재료의 자기감지 성능을 향상시킬 수 있는 방안을 도출해낼 수 있다고 보고한 바 있음

○ 제강슬래그 (steel slag)를 첨가한 콘크리트의 역학적 거동에 대한 해외 과학기술 개발 연구:

- 제강슬래그를 초고강도 콘크리트 (ultra-high-performance concrete, UHPC)에 첨가한 경우에 제강슬래그를 첨가하지 않은 UHPC에 비해 더 높은 압축강도를 가진다고 보고된 바 있음 [Liu and Guo (2018)]
- 압축강도 뿐만 아니라 쪼갬 인장강도와 휨 인장강도 또한 제강슬래그를 첨가한 콘크리트가 일반 콘크리트에 비해 더 높게 나온다고 보고된 바 있음 [Saravanan and Suganya (2015)]

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		√
결정 사유	○ 원천기술을 개발하고 이를 타 유사 연구개발 분야의 기반 기술로 제공 가능하므로 연구과제 보안등급의 분류 상 일반과제로 분류하는 것이 합당한 것으로 판단됨	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

- 연구에 참여하는 모든 연구원 (연구책임자 및 참여연구원)은 주관연구기관에서 실시하는 정기안전교육을 이수하고, 정기적으로 안전교육을 실시함
- 연구자 및 실험자의 안전을 위하여 실험 장비의 정기적인 점검을 실시하였으며, 보호장구 및 안전 보조 장치를 구매하여 실험실 사용 시 항상 안전장비를 착용하고 실험을 진행함
- 실험실의 정기적인 정밀안전진단의 실시로 연구자 및 실험자의 안전을 확보함

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번 호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Multi-Channel Electrical Impedance-Based Crack Localization of Fiber-Reinforced Cementitious Composites under Bending Conditions	세종대학교 산학협력단	교신	Applied Science	2.217	2018.12.12	단독 사사	SCI(E)
2	논문	Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress	세종대학교 산학협력단	교신	Construction and Building Materials	4.046	2019.06.08	단독 사사	SCI(E) / 2회
3	논문	Comparative performance of four electrodes for measuring the electromechanical response of smart self-sensing concrete	세종대학교 산학협력단	교신	Sensors	3.031	2019.08.21	단독 사사	SCI(E)
4	논문	Characterizing the electro-mechanical response of self-sensing steel-fiber-reinforced cementitious composites	세종대학교 산학협력단	교신	Construction and Building Materials	4.046	2019.12.24	단독 사사	SCI(E)
5	논문	Effects of matrix strength, fiber type, and fiber content on the electrical resistivity of steel-fiber-reinforced cement composites during fiber pullout	세종대학교 산학협력단	교신	Journal of the Korean Society of Civil Engineering	-	2019.10.29	단독 사사	비SCI(E)
6	특허 출원	긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 조성물 및 스마트 콘크리트 정착구 시스템	세종대학교 산학협력단	-	대한민국	-	2018.03.12	단독 사사	-
7	특허 출원	자가 응력 센싱이 가능한 시멘트 복합 재료 조성물	세종대학교 산학협력단	-	대한민국	-	2018.11.14	단독 사사	-

제11장. 기타 사항

○ 후속 연구 수행

- 본 연구에서 개발된 스마트 콘크리트 정착구 기술의 현장 적용 가능성 확보를 위해, PSC 구조물 별 설계 가이드 및 긴장력 손실 감지 시스템 구축이 필수적으로 요구되며, 이를 위해 실제 구조물 적용성 검토를 위한 연구가 필요함
 - PSC 구조물에서 강연선 다발 중 일부분의 강연선이 손상되었을 때, 손상된 강연선 특정화 및 손상 정도를 평가 할 수 있는 최적의 스마트 콘크리트 정착구 전극 개발 및 전극 배치 방안에 대한 추가적인 연구가 필요함
 - 온도·습도 변화와 같은 외부환경요인과 스마트 콘크리트 정착구 전기저항률 사이의 상관관계 분석을 통한 환경 보정 계수 도출, 스마트 콘크리트 정착구 내부 습도 변화 최소화를 위한 표면처리 기술 개발을 위한 추가적인 연구가 필요함
 - 스마트 콘크리트 정착구 시뮬레이션 및 시범 적용을 통해, 차량 및 풍 하중 등과 같이 전기저항 변화에 영향을 주는 외부 환경요인에 대한 영향 분석 및 최소화 방안 도출에 대한 연구가 필요함
 - 실용화 및 제품 생산을 위해, 스마트 콘크리트 정착구의 균질한 감지 성능을 확보 할 수 있는 생산 라인 구축 및 배합 최적화에 대한 연구가 필요함
 - 스마트 콘크리트 정착구 실용화의 최대 수혜자는 PSC 구조물의 관리주체인 정부기관으로써 스마트 콘크리트 정착구 기술의 실용화까지 필요한 추가적인 검증에 대해서는 정부 지원에 의하여 개발되는 것이 더욱 효과적이므로 추가적인 국가연구개발이 필수적으로 이루어져야 함
-

제12장. 참고 문헌

- 국토교통부, (2017), 도로 교량 및 터널 현황조사
 - D'Alessandro A, Ubertini F, and Materazzi AL, "Self-sensing concrete nanocomposites for smart structures," International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, Vol. 10, No. 5, 2016, pp. 576-581.
 - Suryanto B, McCarter WJ, Starrs G, and Ludford-Jones GV, "Electrochemical immittance spectroscopy applied to a hybrid PVA/steel fiber engineered cementitious composites," Materials and Design, Vol. 105, 2016, pp. 179-189.
 - Monteiro AO, Paulo BC, and Pedro MFJC, "Self-sensing piezoresistive cement composite loaded with carbon black particles," Cement and Concrete Composites, Vol. 81, 2017, pp. 59-65.
 - Pisello AL, D'Alessandro A, Sambuco S, Rallini M, Ubertini F, Asdrubali F, Materazzi AL, and Cotana F, "Multipurpose experimental characterization of smart nanocomposite cement-based materials for thermal-energy efficiency and strain-sensing capability," Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 161, 2017, pp. 77-88.
 - Sun S, Han B, Jiang S, Yu X, Wang Y, Li H, and Ou J, "Nano graphite platelets-enabled piezoresistive cementitious composites for structural health monitoring," Construction and Building Materials, Vol. 136, 2017, pp. 314-328.
 - D'Alessandro A, Rallini M, Ubertini F, Materazzi AL, and Kenny JM, "Investigations on scalable fabrication procedures for self-sensing carbon nanotube cement-matrix composites for SHM applications," Cement and Concrete Composites, Vol. 65, 2016, pp. 200-213.
 - Hardy DK, Fadden MF, Khattak MJ, and Khattab A, "Development and characterization of self-sensing CNF HPFRCC," Materials and Structures, Vol. 49, No. 12, 2016, pp. 5327-5342.
 - Han B, Wang Y, Ding S, Yu X, Zhang L, Li Z, and Ou J, "Self-sensing cementitious composites incorporated with botryoid hybrid nano-carbon materials for smart infrastructures,"
-

- Sasmal S, Ravivarman N, and Sindu BS, "Synthesis, characterization and performance of piezo-resistive cementitious nanocomposites," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 75, 2017, pp. 10–21.
 - Gupta S, Gonzalez JG, and Loh KJ, "Self-sensing concrete enabled by nano-engineered cement–aggregate interfaces," *Structural Health Monitoring*, Vol. 16, No. 3, 2017, pp. 309–323.
 - Wang H, Gao X, and Wang R, "The influence of rheological parameters of cement paste on the dispersion of carbon nanofibers and self-sensing performance," *Construction and Building Materials*, Vol. 134, 2017, pp. 673–683.
 - El-Dieb AS, El-Ghareeb MA, Abdel-Rahman MAH, and Nasr ES, "Multifunctional electrically conductive concrete using different fillers," *Journal of Building Engineering*, Vol. 15, 2018, pp. 61–69.
 - Xiao H, Liu M, and Wang G, "Anisotropic electrical and abrasion-sensing properties of cement-based composites containing aligned nickel powder," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 87, 2018, pp. 130–136.
 - Xu J, Cao Y, Jiang L, Feng W, Song Y, and Shan H, "Microstructure and pressure-sensitive properties of cement-based composite with Ni nanowires," *Construction and Building Materials*, Vol. 159, 2018, pp. 46–53.
 - Fan S, Li X, and Li M, "The effects of damage and self-healing on impedance spectroscopy of strain-hardening cementitious composites," *Cement and Concrete Research*, Vol. 106, 2018, pp. 77–90.
 - Berrocal CG, Hornbostel K, Geiker MR, Lofgren I, Lundgren K, and Bekas DG, "Electrical resistivity measurements in steel fibre reinforced cementitious composites," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 89, 2018, pp. 216–229.
 - Nguyen DL, Song J, Manathamsombat C, and Kim DJ, "Comparative electro-mechanical damage-sensing behaviors of six strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites under direct tension," *Composites Part B*, Vol. 69, 2015, pp. 159–168.
 - Song J, Nguyen DL, Manathamsombat C, and Kim DJ, "Effect of fiber volume content on electromechanical behavior of strain-hardening steel-fiber-reinforced cementitious composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 49, No. 29, 2015, pp. 3621–3634.
 - Le HV and Kim DJ, "Effect of matrix cracking on electrical resistivity of high performance fiber reinforced cementitious composites in tension," *Construction and Building Materials*, Vol. 156, 2017, pp. 750–760.
 - Kim MK, Kim DJ, and An Y-K, "Electro-mechanical self-sensing response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete in tension," *Composites Part B*, Vol. 134, 2018, pp. 254–264.
 - Kim Mk and Kim DJ, "Electro-mechanical response of high-performance fiber-reinforced cementitious composites containing milled glass fibers under tension," Vol. 11, 2018, pp. 1115.
 - Li X and Li M, "Multifunctional self-sensing and ductile cementitious materials," *Cement and Concrete Research* Vol. 123, 2019, pp. 05714.
 - Liu J and Guo R, "Applications of steel slag powder and steel slag aggregate in ultra-high performance concrete," *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2018, 2018.
 - Saravanan J and Suganya N, "Mechanical properties of concrete using steel slag aggregate," *International Journal of Engineering Inventions*, Vol. 4, No. 9 2015, pp. 7–16.
-

긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 기술 개발

[실험보고서]

주관연구기관 : 세종대학교 산학협력단
주관연구책임자 : 김동주

총 연구기간 : 2018. 04. 17 - 2019. 12. 31 (21개월)

목 차

A. 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 기술 개발

A1. 전기-역학적 민감도 향상을 위한 스마트 콘크리트 배합 개발	1
A1.1. 스마트 콘크리트 배합 개발을 위한 매트릭스 성능 평가	1
A1.2. 전도성 재료에 사용에 따른 스마트 콘크리트의 역학적 성능 평가	3
A1.2.1. MWCNT를 사용한 스마트 콘크리트의 역학적 성능 평가	3
A1.2.2. 제강 슬래그를 보강한 스마트 콘크리트의 역학적 성능 평가	5
A1.3. 전도성 재료 사용에 따른 스마트 콘크리트의 전기저항률 거동 조사	7
A1.3.1. MWCNT를 사용한 스마트 콘크리트의 전기저항률 거동 조사	7
A1.3.2. 제강슬래그와 강섬유를 사용한 스마트 콘크리트의 전기저항률 거동 조사	9
A1.4. 전기 전도성 재료 사용에 따른 스마트 콘크리트의 전기-역학적 응답 조사	11
A2. 온도 및 습도 등의 환경인자가 스마트 콘크리트의 전기적 특성에 미치는 영향	14
A3. 스마트 콘크리트 정착구 설계(안) 도출	16
A4. 스마트 콘크리트 정착구용 Plug-in 형 매립식 전극 개발	19
A5. 스마트 콘크리트 정착구의 역학적 성능 평가	21
A5.1. 압축 하중 하에서의 스마트 콘크리트 정착구(Type1)의 전기-역학적 성능평가 ·	21
A5.2. 압축 하중 하에서의 스마트 콘크리트 정착구(Type2)의 전기-역학적 성능평가 ·	24
A5.3. 강연선 긴장력 상태에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 거동 조사	28
A5.4. 압축 하중 속도에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 거동 조사	31
A5.5. 스마트 콘크리트 정착구 주변 콘크리트의 전단 파괴	

A. 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 기술 개발

A1. 전기-역학적 민감도 향상을 위한 스마트 콘크리트 배합 개발

A1.1 스마트 콘크리트 배합 개발을 위한 매트릭스 성능 평가

- 실험 목적

90 MPa 이상의 압축강도를 갖는 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 용 스마트 콘크리트 배합(안) 개발을 위해 혼화재와 물-시멘트 비에 따른 매트릭스의 압축 강도를 평가하여, 최적의 매트릭스 배합을 도출하고자 하였다.

- 실험 프로그램

스마트 콘크리트 정착구 배합(안)을 도출하기 위해 표 1-1과 같이 혼화재와 물-시멘트 비에 따른 총 12 가지의 매트릭스를 구성하였다. 실험변수는 물-시멘트 비 (0.35, 0.25, 0.20), silica fume (10, 15, 20 wt.%) 그리고, silica powder (0, 25 wt.%)로 하여 구성된 매트릭스 대한 압축강도를 조사하였다.

표 1-1. 모르타르 매트릭스 배합 구성표

No.	Cement (Type I)	Silica sand*	Silica fume	Silica powder	Super-plasticizer**	Water
W0.35_SF10	1.00	1.00	0.10	-	0.006	0.35
W0.35_SF15			0.15		0.006	
W0.35_SF20			0.20		0.008	
W0.25_SF10			0.10		0.008	0.25
W0.25_SF15			0.15		0.010	
W0.25_SF20			0.20		0.012	
W0.20_SF10			0.10	0.25	0.020	0.20
W0.20_SF15			0.15		0.020	
W0.20_SF20			0.20		0.020	
W0.20P_SF10			0.10		0.040	
W0.20P_SF15			0.15		0.042	
W0.20P_SF20			0.20		0.050	

* Silica sand with average grain diameter of 0.25 mm

** Super-plasticizer contained 30% solid content

- 실험방법

실험에 사용된 압축 시험체는 50*50*50 mm의 큐브형 시험체를 사용하였다. 시험체 중 silica powder를 사용하지 않은 시험체는 28일간 25±2°C에서 수중 양생을 실시하였으며, silica powder를 사용한 시험체는 3일간 90±2°C에서 고온 수중 양생을 실시하였다. 매트릭스 압축강도 조사는 300 ton 용량의 만능재료시험기 (Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 변위제어를 통하여 1 mm/min의 속도에서의 매트릭스 압축강도를 측정하였다.

- 실험결과

제시된 그림 1-1과 표 1-2와 같이 12 가지의 모든 배합에서 매트릭스 압축강도 90 MPa 이상을 보였으며, 모르타르 매트릭스의 압축강도는 물-시멘트에 대한 영향보다 혼화재에 대한 영향성이 더 큰 것으로 나타났다. 특히, 물-시멘트 비 0.2, silica powder 25 wt.%가 사용된 매트릭스에서 silica fume 15 wt.%가 사용되었을 때, 가장 높은 매트릭스 압축강도 (178 MPa)를 보였으며, silica powder가 사용되지 않은 매트릭스와 비교하였을 때 압축강도가 33%까지 증가하는 결과를 보였다.

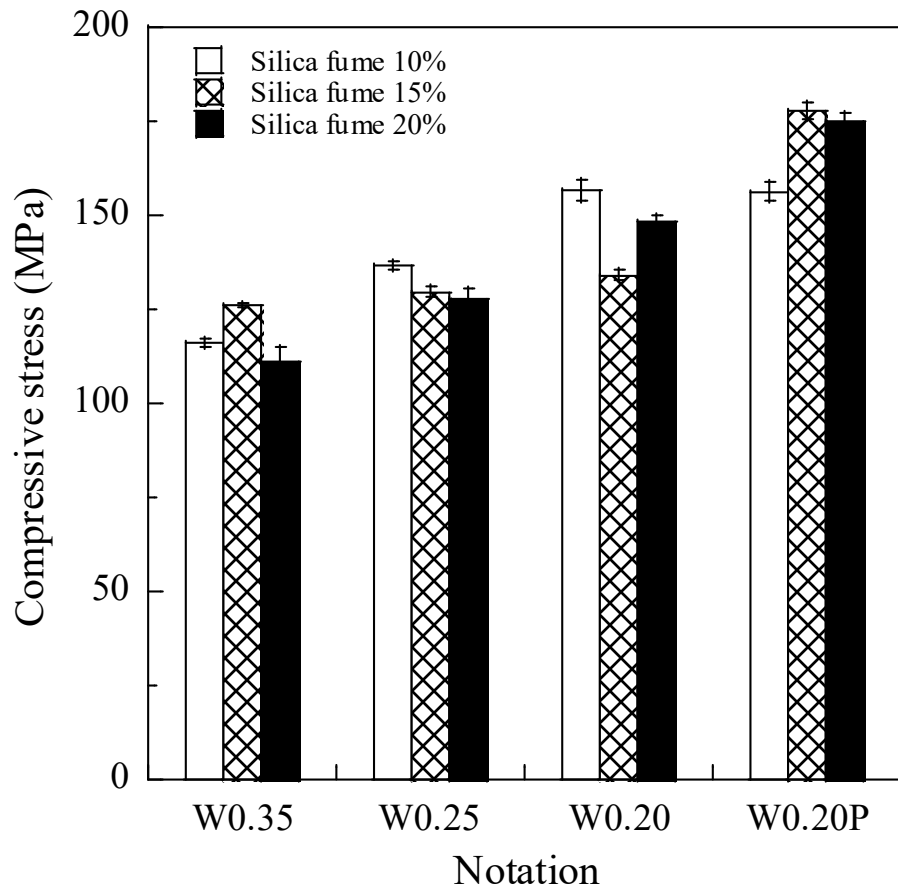


그림 1-1. 모르타르 압축강도 실험 결과

표 1-2. Slump test 및 압축강도 실험 결과

No.	Slump flow (mm)	Compressive Strength (MPa)	STDEV (MPa)
W0.35_SF10	222	116.2	1.0
W0.35_SF15	222	126.0	0.6
W0.35_SF20	258	111.2	3.8
W0.25_SF10	211	136.7	1.2
W0.25_SF15	240	129.6	1.4
W0.25_SF20	227	124.7	3.0
W0.20_SF10	282	156.6	2.8
W0.20_SF15	228	134.0	1.4
W0.20_SF20	207	148.2	2.0
W0.20P_SF10	267	156.3	2.5
W0.20P_SF15	243	178.0	2.3
W0.20P_SF20	229	175.3	1.7

- 결과 분석

구성된 12 가지의 배합(안)에 대하여 모르타르 매트릭스 압축강도 실험을 통해 총 세 가지의 스마트 콘크리트 정착구 배합(안)을 선정하였다.

표 1-3. 스마트 콘크리트 정착구 모르타르 배합

No.	Cement (Type I)	Silica sand	Silica fume	Silica powder	Super-plasticizer	Water	Flow (mm)	f_{ck} (MPa)
W0.35_SF15	1.00	1.00	0.15	-	0.006	0.35	222	126.0
W0.20_SF15				-	0.020	0.20	228	134.0
W0.20P_SF15				0.25	0.042	0.20	243	178.0

스마트 콘크리트 정착구 배합(안)은 가장 높은 압축강도를 나타낸 모르타르를 바탕으로 표 1-3에 나타낸 바와 같이 물-시멘트 비 0.35, silica fume 15 wt.%가 사용된 W0.35_SF15, 물-시멘트 비 0.20, silica fume 15 wt.%가 사용된 W0.20P_SF15, 그리고 물-시멘트 비 0.20, silica fume 15 wt.%, silica powder 15 wt.%가 사용된 W0.20_SF15 배합을 스마트 콘크리트 정착구 모르타르 배합(안)으로 결정하였다.

A1.2 전도성 재료 사용에 따른 스마트 콘크리트의 역학적 성능 조사

A1.2.1 MWCNT를 보강한 스마트 콘크리트의 역학적 성능 평가

- 실험목적

스마트 콘크리트의 전기-역학적 민감도 향상을 위해 스마트 콘크리트 배합(안)에 보강된 다중벽 탄소 나노튜브 (Multi-walled carbon nanotube, MWCNT)가 매트릭스 압축강도에 미치는 영향성을 조사하고자 한다.

- 실험프로그램

선정된 스마트 콘크리트 배합(안)에 대하여 MWCNT 보강이 매트릭스 압축강도에 미치는 영향을 조사하기 위해 표 1-4에 나타낸 바와 같이 선정된 모르타르 매트릭스에 MWCNT 0.5 wt.%와 MWCNT의 분산을 위한 소포제 (tributyl phosphate, defoamer) 0.25 wt.%를 사용하여, MWCNT가 스마트 콘크리트의 역학적 성능에 미치는 영향성을 조사하였다. MWCNT는 직경 5~20 nm, 길이 10 um를 갖는 순도 90% 재료를 사용하였다(Fig. 2 참조).

표 1-4. MWCNT를 사용한 스마트 콘크리트 정착구 배합표

No.	Cement (Type I)	Silica sand	Silica fume	Silica powder	MWCNT (%)	Defoamer (%)	Super-plasticizer	Water
M1MW05	1.00	1.00	0.15	-	0.5	0.25	0.040	0.35
M2MW05				-			0.100	0.20
M3MW05				0.25			0.111	0.20

- 실험방법

실험에 사용된 시험체는 50*50*50 mm의 큐브형 시험체를 사용하였다. MWCNT의 투입 방법은 MWCNT를 감수제와 희석하여 배합수에 넣고 그림 1-3와 같이 초음파 분쇄기 (sonicator)를 사용해 분쇄 조건 amplitude 50%, frequency 20s로 하여 2시간 동안 분산시킨 후 배합에 사용하였다. 배합의 순서는 cement, silica sand 그리고 silica powder를 넣고 10분간 건배합 (A1)을 진행하였다. 건배합 진행 후 A1을 제거하고, 준비된 MWCNT를 silica fume과 함께 투입하여 5분간 배합(A2)을 진행하였다. A2 배합이 완료된 후 먼저 배합해둔 A1을 A2에 투입하여 5분간 배합을 진행하였다. 이후 남은 물과 감수제를 넣어 10분간 배합한 후 소포제를 넣고 5분간 추가 배합하여 시험체를 제작하였다. 제작된 시험체는 silica powder를 사용하지 않은 경우 28일간 25±2°C 수중 양생을 실시하였으며, silica powder를 사용한 시험체는 3일간 90±2°C 고온 수중 양생을 실시하였다. 매트릭스 압축강도는 만능재료 시험기(UTM)을 사용하여 변위제어로 1 mm/min의 하중속도로 압축강도를 측정하였다.

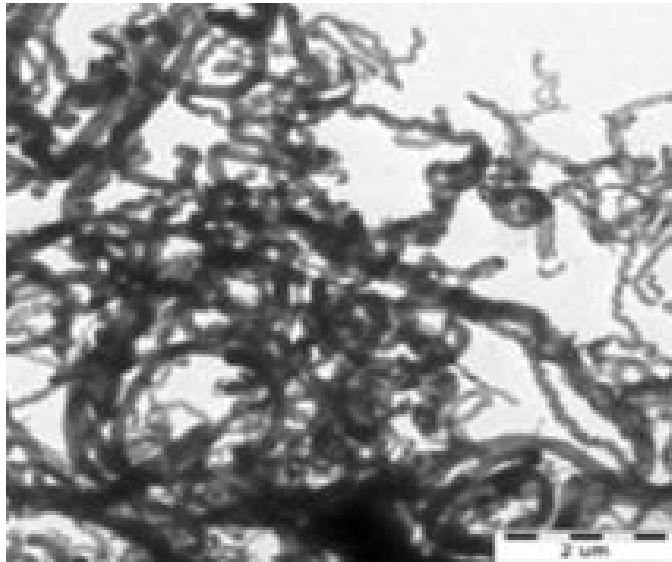


그림 1-2. Multi-walled carbon nanotube (MWCNT)



(a) 분산 전



(b) 분산 후

그림 1-3. 초음파 분쇄기 (sonicator)

- 실험결과

MWCNT를 혼입하였을 때 매트릭스 압축강도가 감소하는 경향을 보였으며, 모르타르 매트릭스의 압축강도가 높을수록 MWCNT 혼입이 압축강도에 미치는 영향이 낮은 것으로 나타났다. 그림 1-4과 표 1-5에 나타난 바와 같이 모르타르 매트릭스 압축강도와 MWCNT가 보강된 매트릭스 압축강도의 변화율 ($\Delta f_{ck}/f_{ck,mortar}$)이 M1MW05 배합의 경우 19.7%로 감소되었으며, M2MW05 배합의 경우 17.3%, M3MW05 배합의 경우 13.8% 감소됨에 따라 M1MW05과 M2MW05을 비해 M3MW05의 경우가 가장 낮은 강도 감소율을 나타냈다. 이를 통해, MWCNT를 보강한 스마트 콘크리트 정착구 배합(안)은 표 1-6과 같이 가장 낮은 압축강도 감소율을 보인 M3MW05 배합으로 선정되었다.

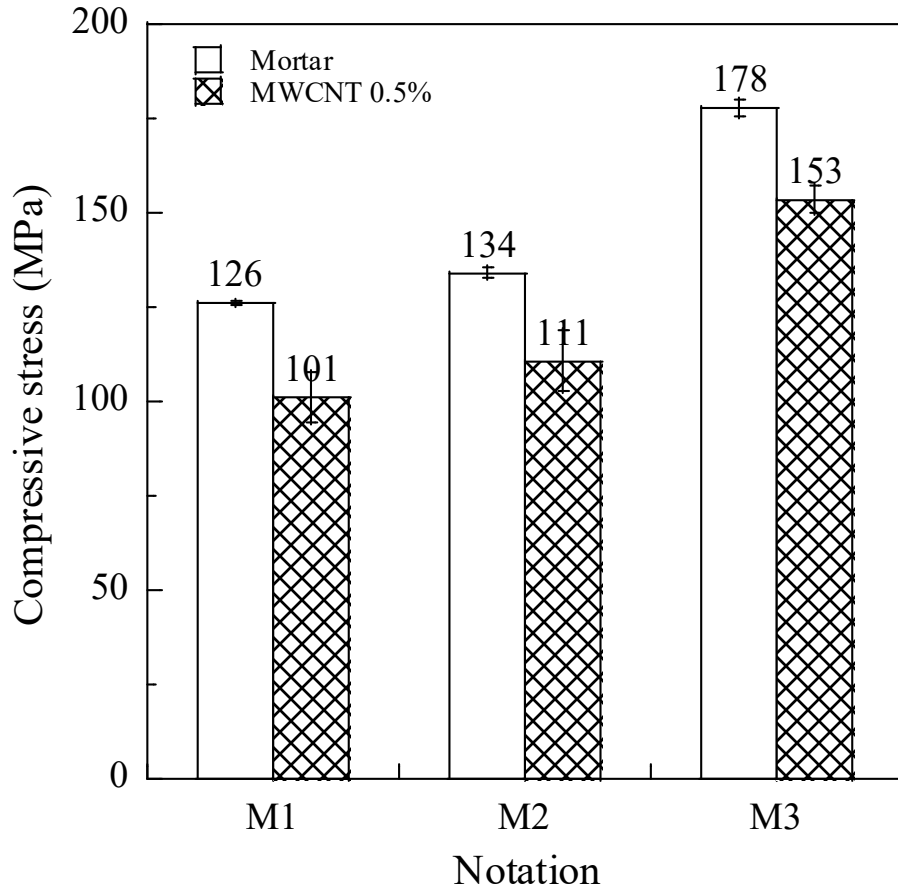


그림 1-4. MWCNT 혼입에 따른 압축강도 실험 결과

표 1-5. 압축강도 실험 결과

No.	Super-plasticizer	Flow (mm)	f_{ck} (MPa)	$f_{ck,mortar}$ (MPa)	Δf_{ck} (MPa)	$\Delta f_{ck}/f_{ck,mortar}$ (%)
M1MW05	0.019	320	101.2	126.0	-24.8	-19.7
M2MW05	0.070	245	110.8	134.0	-23.2	-17.3
M3MW05	0.111	230	153.5	178.0	-24.5	-13.8

표 1-6. MWCNT를 보강한 스마트 콘크리트 정착구 배합(안)

No.	Cement (Type I)	MWCNT (%)	Silica sand	Silica fume	Silica powder	Super-plasticizer	Water
M3MW05	1.00	0.5	1.00	0.15	0.25	0.042	0.20

- 실험목적

전기 전도성을 가지는 제강 슬래그(Steel slag)를 모래입자크기의 가공한 제강슬래그 잔골재 (steel slag aggregate)를 스마트 콘크리트에 사용되는 모래를 대체하여 사용한 스마트 콘크리트의 역학적 성능평가를 통해 스마트 콘크리트 정착구 배합(안)을 도출하고자 한다. 그림 1-5에 나타난 제강슬래그 잔골재는 철강 산업의 부산물을 사용하여 제작한 0.39 mm 직경을 갖는 재료이며, 높은 철 함유량으로 전기 전도성을 가지고 있다.

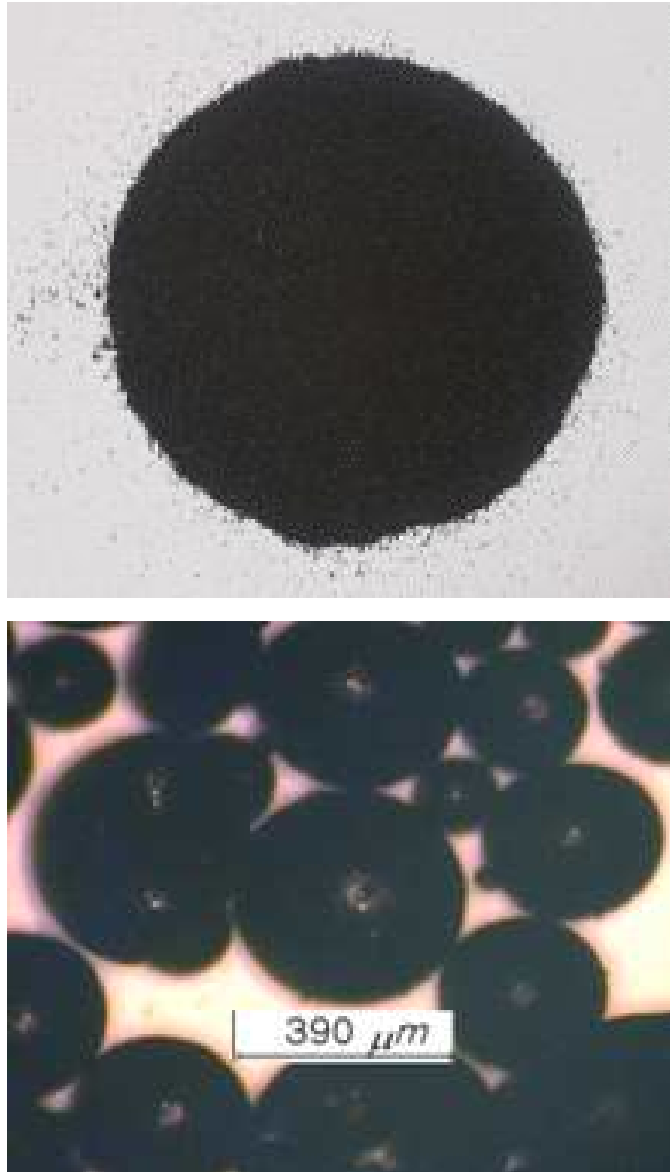


그림 1-5. 제강 슬래그 잔골재(steel slag aggregate)

- 실험프로그램

선정된 스마트 콘크리트 모르타르 배합(안)에서 표 1-7에 나타난 바와 같이 silica sand를 제강 슬래그로 100% 치환하였을 때, 제강 슬래그가 매트릭스 압축강도에 미치는 영향을 조사하여 제강 슬래그를 사용한 스마트 콘크리트 정착구 배합(안)을 도출하고자 한다.

표 1-7. 제강 슬래그가 사용된 모르타르 배합(안)

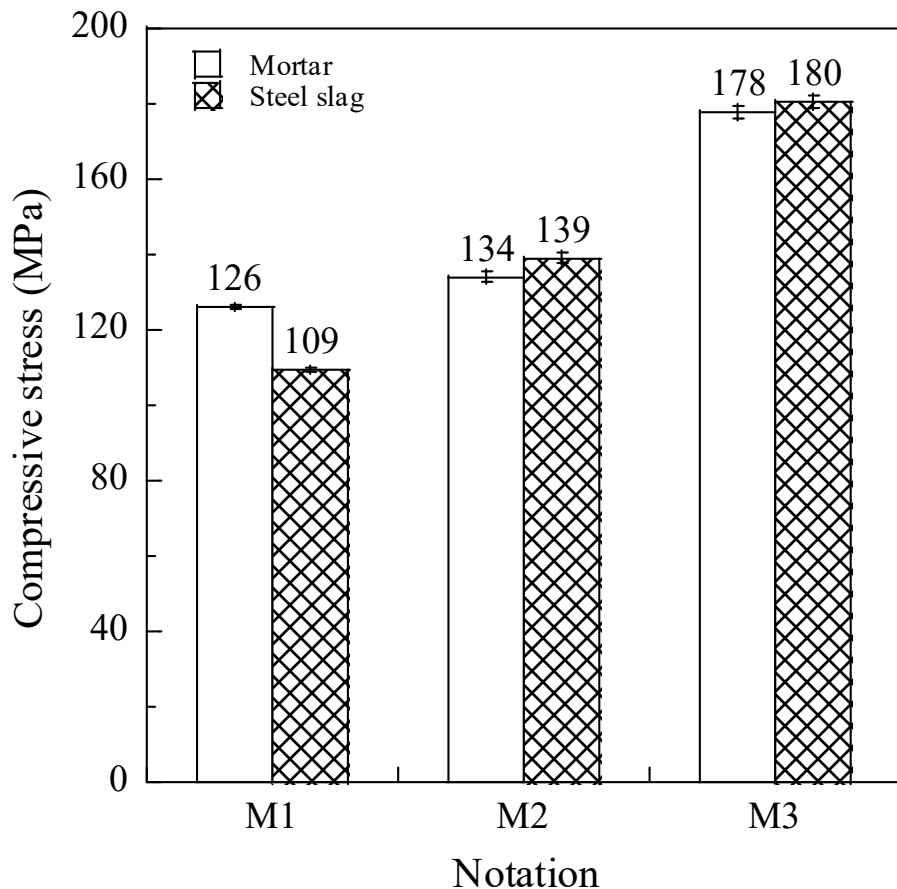
No.	Cement (Type I)	Steel slag	Silica fume	Silica powder	Super-plasticizer	Water
M1S	1.00	1.00	0.15	–	0.009	0.35
M2S	1.00	1.00	0.15	–	0.021	0.20
M3S	1.00	1.00	0.15	0.25	0.044	0.20

- 실험방법

실험에 사용된 시험체는 50*50*50 mm의 큐브형 압축 시험체를 사용하였다. 배합은 물과 감수제를 제외한 cement와 혼화재를 넣고 건배합을 진행하였다. 그리고 물을 재료의 유동성과 재료 분리 방지를 위해 4회에 걸쳐 나누어 투입하고, 감수제를 배합의 상태에 따라 조금씩 나누어 투입하여 시험체를 제작하였다. Silica powder를 사용하지 않은 시험체는 28일간 25±2℃ 수중 양생을 실시하였으며, silica powder를 사용한 시험체는 3일간 90±2℃ 고온 수중 양생을 실시하였다. 이후 UTM을 사용하여 변위제어로 1 mm/min의 하중속도로 매트릭스 압축강도를 측정하였다.

- 실험결과

제강 슬래그의 사용은 매트릭스 압축강도에서는 큰 영향을 주지 않았으나, 그림 1-6에 나타난 바와 같이 slump-flow 값이 증가하여 매트릭스의 유동성에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 또한, 모르타르 매트릭스 압축강도에 비해 제강 슬래그가 보강된 매트릭스 압축강도의 변화율 ($\Delta f_{ck}/f_{ck,mortar}$)이 M1S의 경우 13.3% 감소되고, slump flow는 9.4% 증가하였다. M2S의 경우 압축강도 변화율이 5.1% 증가하였으며, slump flow는 14% 증가하였다. M3S의 경우에는 매트릭스 압축강도 변화율이 1.3 % 증가하였으며, slump flow는 15%로 가장 높은 증가량을 보였다. 따라서, 높은 유동성과 압축강도를 가지는 M3S 배합이 스마트 콘크리트 정착구 배합(안)으로 적합한 것으로 도출되었다.



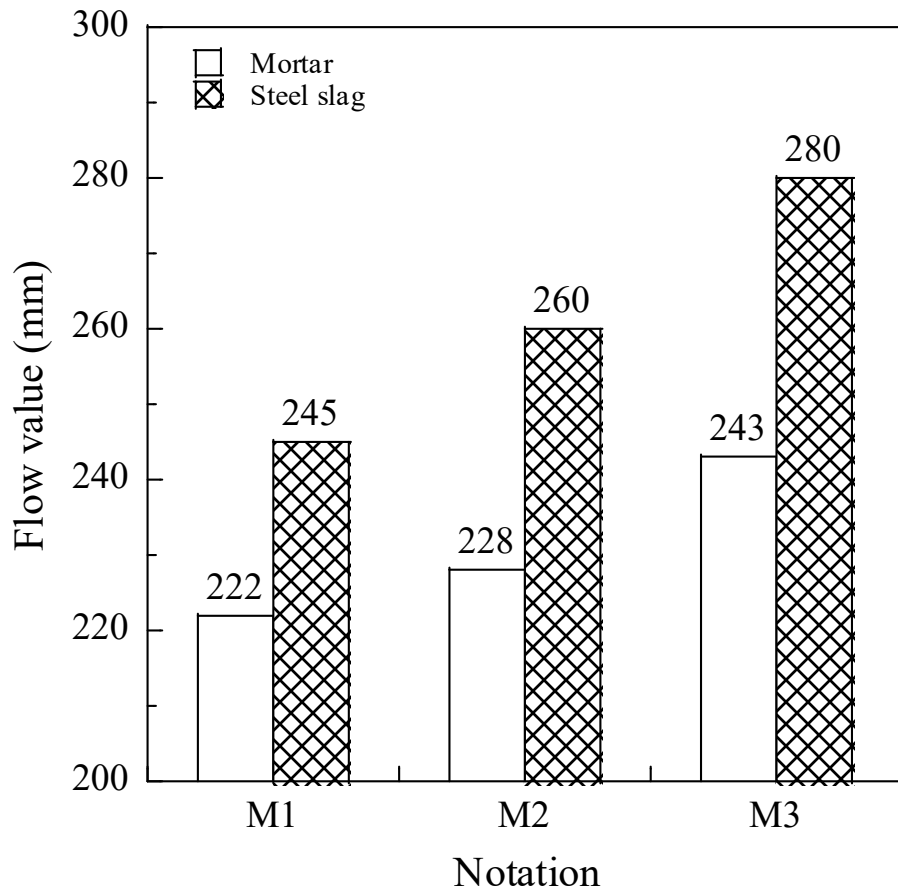


그림 1-6. 제강슬래그 사용에 따른 압축강도 및 flow 변화

표 1-8. 매트릭스 별 압축강도 실험 결과

No.	Super-plasticizer	Flow (mm)	f_{ck} (MPa)	$f_{ck, mortar}$ (MPa)	Δf_{ck} (MPa)	$\Delta f_{ck}/f_{ck, mortar}$ (%)
M1S	0.009	245	109.3	126.0	-16.7	-13.3
M2S	0.021	260	139.1	134.0	5.1	3.8
M3S	0.044	280	180.4	178.0	2.4	1.3

표 1-9. 제강 슬래그가 사용된 스마트 콘크리트 정착구 배합(안)

No.	Cement (Type I)	Steel slag	Silica fume	Silica powder	Super-plasticizer	Water
M3S	1.00	1.00	0.15	0.25	0.042	0.20

A1.3 전기 전도성 재료 사용에 따른 스마트 콘크리트의 전기 저항률 거동 조사

A.1.3.1 MWCNT를 사용한 스마트 콘크리트의 전기 저항률 거동 조사

- 실험목적

MWCNT와 소포제(defoamer)의 보강량에 따른 스마트 콘크리트의 전기 저항률 변화 계측하여, MWCNT와 소포제가 스마트 콘크리트의 전기 저항률에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

- 실험프로그램

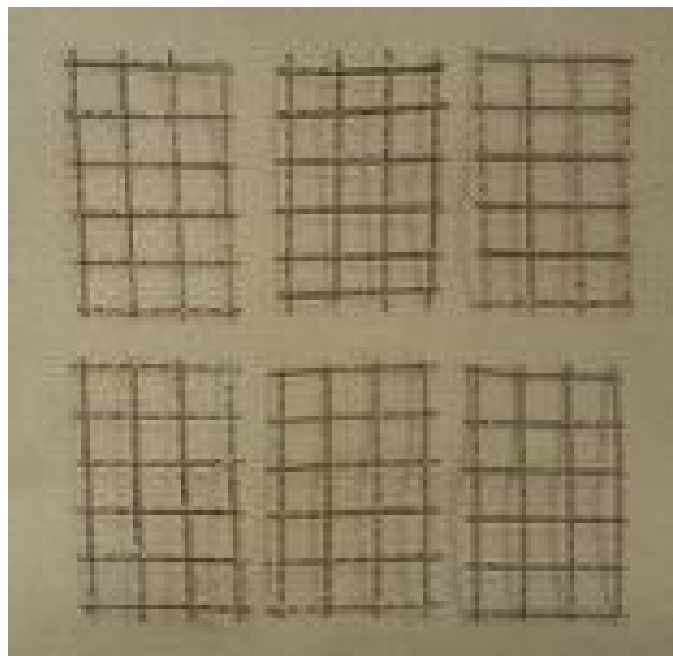
선정된 스마트 콘크리트 모르타르 배합(안)을 바탕으로 표 1-10과 같이 MWCNT를 시멘트 중량 비 0.1, 0.5 wt.% 혼입한 경우와 소포제 (defoamer)를 0.25wt.%를 사용한 경우에 스마트 콘크리트의 전기 저항률을 조사하였다.

표 1-10. MWCNT를 사용한 스마트 콘크리트 정착구 배합표

No.	Cement (Type I)	Silica sand	Silica fume	Silica powder	MW CNT (wt.%)	Defoamer (wt.%)	Super-plasticizer	Water	f_{ck} (MPa)
M	1.00	1.00	0.15	0.25	-	-	0.044	0.20	189.6
MMW01					0.1	-	0.062		154.6
MMW01D					0.1	0.25	0.058		186.0
MMW05					0.5	-	0.111		107.0
MMW05D					0.5	0.25	0.111		153.5

- 실험방법

전기 저항률 측정 실험에 사용된 시험체는 50*50*50 mm의 큐브형 시험체이며, 그림 1-7에 나타난 바와 같이 전기 저항률 측정을 위해 사용된 매립식 전극은 구리 와이어 메쉬(copper wire mesh)를 매립형 전극으로 사용하였으며, 전극은 20 mm 간격으로 시험체 내부에 매립하였다. 시험체는 제작 후 3일간 90±2°C 고온 수중 양생을 실시하였으며, 그림 1-8에 나타난 바와 같이 전기 저항률은 AC 임피던스 분석기 (AC Impedance analyzer)를 사용한 2 탐침 저항 측정방법 (2-probe resistance measurement)으로 측정하였다. 측정에 사용된 AC 임피던스 분석기의 측정 조건으로 1Hz에서 1MHz 주파수 범위에서 10 step/decade로 frequency를 sweep하여 전기 저항률을 측정하였다.



(a) 구리 와이어메쉬



(b) 시험체 형상

그림 1-7. 스마트 콘크리트의 전기저항률 측정을 위한 시험체 제작



그림 1-8. 전기저항률 측정 실험 전경

- 실험결과

MWCNT 혼입량이 증가함에 따라 그림 1-9과 표 1-11와 같이 스마트 콘크리트의 전기 저항률이 감소하는 경향을 보였으며, MWCNT와 소포제를 동시에 사용한 배합에서는 MWCNT만 사용한 경우의 전기 저항률보다 높은 전기저항률을 보였다. 모르타르 매트릭스에 비해 MWCNT와 소포제가 들어간 매트릭스 전기 저항률의 변화율 ($\Delta\rho/\rho_{mortor}$)이 MWCNT 0.1%만 사용된 배합의 경우 7.6%의 감소율을 보였으며, MWCNT 0.1%와 소포제 0.25 wt.%가 사용된 경우 3.2% 감소율을 보였다. MWCNT 0.5%가 사용된 매트릭스의 경우 소포제 0.25%를 함께 사용된 매트릭스가 전기 저항률의 변화율이 67.2%, 소포제가 사용되지 않은 경우 75.2%의 전기 저항률 변화율을 보였다. 각각의 배합에 대하여 압축강도 감소율과 전기 저항률 감소율에 비 ($\Delta\rho/\rho_{mortor})/(\Delta f_{ck}/f_{mortor})$ 가 MWCNT 0.5%와 소포제가 함께 사용된 배합이 압축강도 변화에 따른 전기 저항률 변화율을 가장 높은 것으로 나타났다. 이를 통해 MWCNT 0.5%와 소포제 0.25%가 사용된 MMW05D 배합이 스마트 콘크리트 배합(안)으로 적합한 것으로 확인되었다.

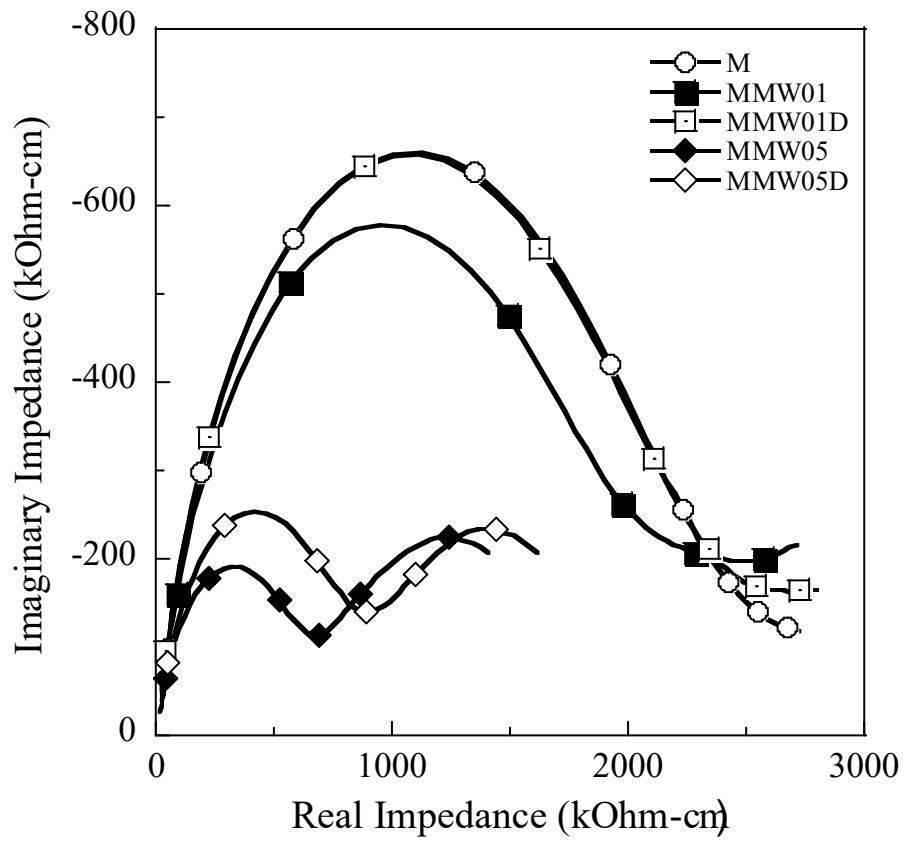


그림 1-9. 매트릭스 별 frequency에 따른 전기 저항률 변화

표 1-11. 사용된 재료가 매트릭스의 전기 저항률에 미치는 영향

No.	f_{ck} (MPa)	Δf_{ck} (MPa)	$\Delta f_{ck}/f_{mortor}$ (%)	ρ (k Ω -cm)	$\Delta \rho$ (k Ω -cm)	$\Delta \rho/\rho_{mortor}$ (%)	$\frac{\Delta \rho/\rho_{mortor}}{\Delta f_{ck}/f_{mortor}}$
M	189.6	—	—	2723.8	—	—	—
MMW01	154.6	35	18.5	2515.8	208.0	7.6	0.41
MMW01D	186.0	3.6	1.9	2635.3	88.5	3.2	1.69
MMW05	107.0	82.6	43.6	674.8	2049.0	75.2	1.73
MMW05D	153.5	36.1	19.0	894.4	1829.4	67.2	3.53

A1.3.2 제강 슬래그와 강섬유를 사용한 스마트 콘크리트의 전기 저항률 거동 조사

- 실험목적

제강 슬래그와 강섬유 사용에 따른 스마트 콘크리트의 전기 저항률을 측정하여 전기 전도성 재료가 스마트 콘크리트 모르타르의 전기 저항률에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

- 실험프로그램

제강 슬래그와 강섬유가 스마트 콘크리트의 전기 저항률에 미치는 영향을 조사하기 위해 표 1-12에 나타난 바와 같이, 규사(silica sand)를 잔골재로 사용한 매트릭스 (M); 제강슬래그 (steel slag)를 잔골재로 사용한 매트릭스 (MS); 규사가 잔골재로 사용되고 강섬유 (short smooth steel fiber)가 2 vol.%를 보강한 (MF); 제강슬래그가 잔골재로 사용되고 강섬유가 2 vol.% 보강된 매트릭스 (MSF)를 제작하여 전도성 재료가 스마트 콘크리트의 전기 저항률에 미치는 영향을 조사하였다.

표 1-12. 제강 슬래그와 강섬유가 사용된 스마트 콘크리트 배합(안)

No.	Cement (Type I)	Silica sand	Steel slag	Silica fume	Silica powder	Super-pla sticizer	Water	Fiber volume content (%)	f_{ck} (MPa)		
M	1.00	1.00	—	0.15	0.25	0.044	0.20	—	189.6		
MF						0.045		2.0	202.2		
MS		—	1.00			0.044		—	180.4		
MSF						0.042		2.0	186.4		

표 1-13. 강섬유의 특성

Fiber type	Diameter (mm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Short smooth	0.2	6	2104	200

- 실험방법

실험에 사용된 시험체는 50*50*50 mm의 큐브형 시험체를 사용하였다. 전기저항률 측정을 위해 구리 와이어메쉬를 매립식 전극으로 사용하였으며, 전극은 20 mm 간격으로 매립하였다 (그림 1-7 참조). 시험체 제작 후 3일간 90±2°C에서 고온 수중 양생을 실시하였다. 전기 저항률 변화 측정은 AC 임피던스 분석기 (AC Impedance analyzer)를 사용하여 2 탐침 저항 측정방법 (2-probe resistance measurement)을 통해 1Hz에서 1MHz 주파수 범위까지 10 step/decade 속도로 frequency를 sweep하여 전기 저항률을 측정하였다.

- 실험결과

스마트 콘크리트에 제강 슬래그와 강섬유의 사용은 전기 저항률을 감소시키는 경향을 보였으며, 그림 1-10와 표 1-14와 같이 제강 슬래그와 강섬유를 동시에 사용하였을 때 가장 낮은 전기 저항률을 보였다. 모르타르 매트릭스와 제강 슬래그와 강섬유가 사용된 매트릭스의 전기 저항률 변화율 ($\Delta\rho/\rho_{mortar}$)에서 제강 슬래그와 강섬유가 함께 사용한 매트릭스가 42.5%의 감소율을 보였으며, 강섬유만 사용된 매트릭스에 비해 약 2 배정도 높은 감소율을 보였다.

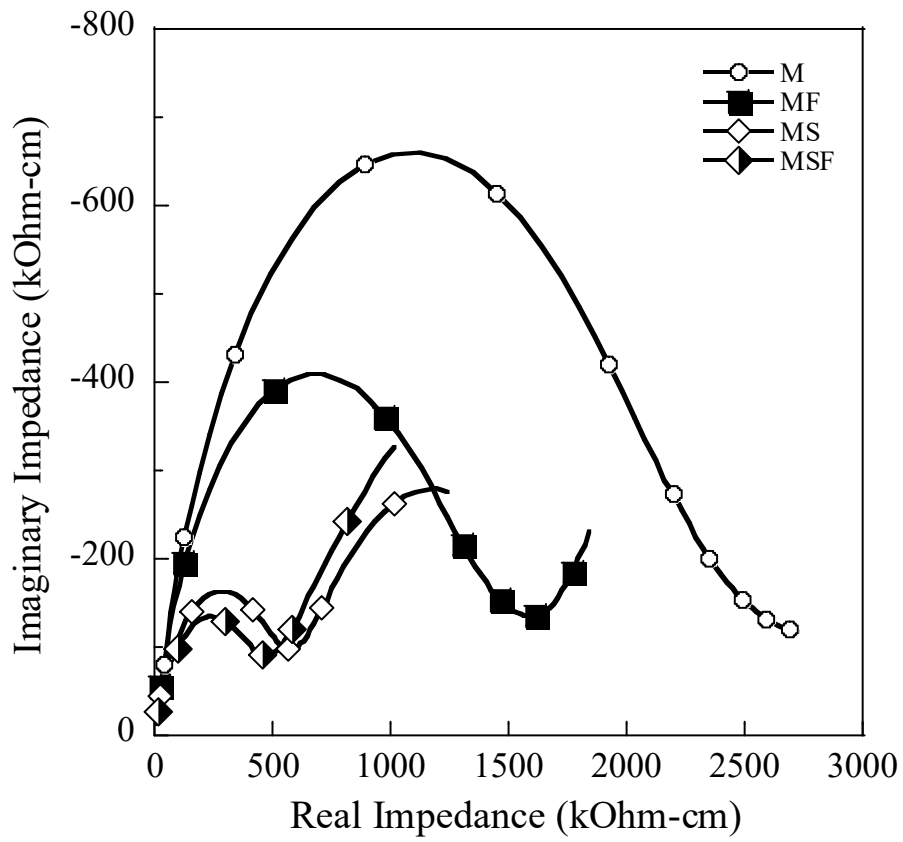


그림 1-10. 제강슬래그와 강섬유 사용에 스마트 콘크리트의 전기 저항률 변화

표 1-14. 제강슬래그와 강섬유 사용이 스마트 콘크리트의 전기 저항률에 미치는 영향

No.	f_{ck} (MPa)	ρ (k Ω -cm)	$\Delta\rho$ (k Ω -cm)	$\Delta\rho/\rho_{mortor}$ (%)
M	189.6	2723.8	—	—
MF	198.8	1565.6	1158.2	42.5
MS	180.4	571.0	2152.8	79.0
MSF	107.0	479.9	2243.9	82.4

A.1.4 전기 전도성 재료 사용에 따른 스마트 콘크리트의 전기-역학적 응답 조사

- 실험목적

MWCNT와 제강 슬래그 그리고 강섬유가 스마트 콘크리트의 변형에 따른 전기-역학적 응답 조사를 통하여 사용된 재료가 스마트 콘크리트의 전기-역학적 응답에 미치는 영향을 조사하는 것이다.

- 실험프로그램

스마트 콘크리트에 사용되는 전기 전도성을 가지는 재료가 스마트 콘크리트의 전기-역학적 응답에 미치는 영향을 조사하기 위해 표 1-15과 같이 전기 전도성 재료가 사용된 스마트 콘크리트 배합을 구성하여 압축 하중 하에서 스마트 콘크리트의 전기-역학적 응답을 조사하였다. 배합의 구성은 총 네 가지로: 1) 강섬유 2 vol.%를 사용한 매트릭스 (MF); 2) MWCNT 0.5%와 강섬유 2 vol.%를 사용한 매트릭스 (MFMW); 3) 제강 슬래그만 사용한 매트릭스 (MS); 그리고, 4) 제강 슬래그와 강섬유 2 vol.%가 사용된 매트릭스 (MSF)로 구성하였다.



그림 1-11. 실험 전경

표 1-15. 전기 전도성 재료가 사용된 스마트 콘크리트 배합 구성 및 압축강도

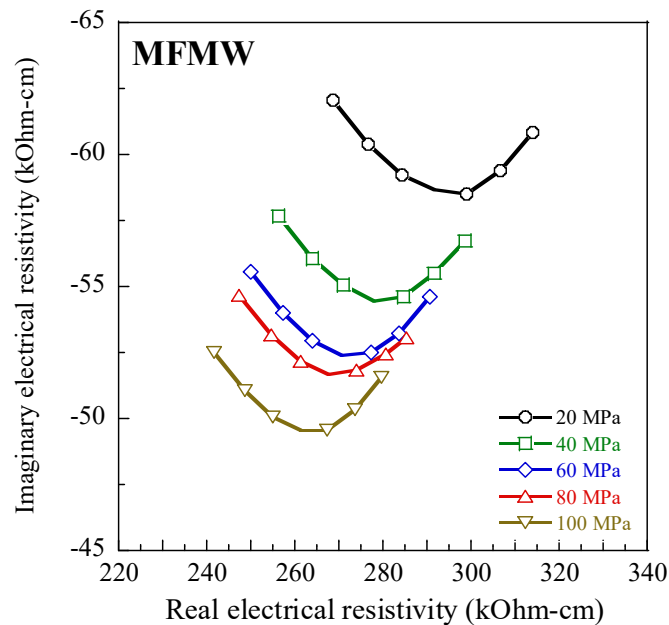
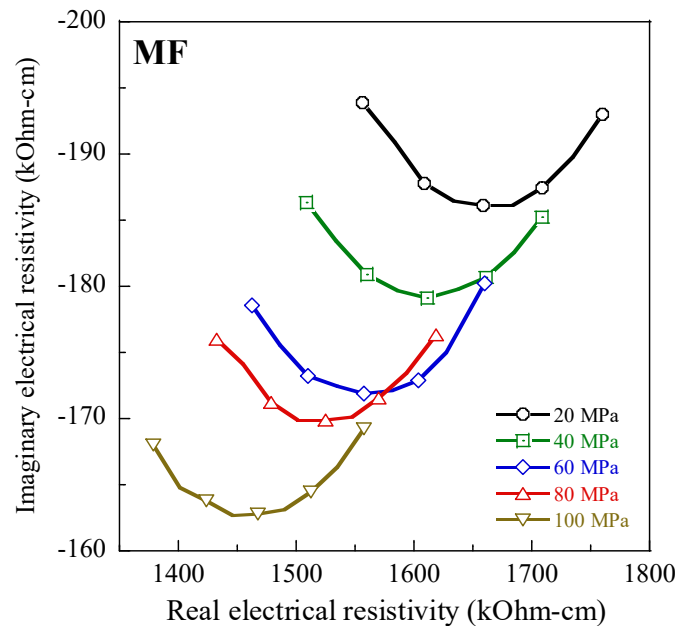
No.	Cement (Type I)	Silica sand	Steel slag	Silica fume	Silica powder	MWCNT (%)	Defoamer (%)	Super- plasticizer	Water	Fiber volume content (%)	f_{ck} (MPa)		
MF	1.00	1.00	–	0.15	0.25	–	–	0.039	0.20	2.0	190.3		
MFMW						0.5	0.25	0.098		2.0	202.2		
MS		–	1.00			–	–	0.044		–	180.4		
MSF						–	–	0.042		2.0	186.4		

- 실험방법

실험에 사용된 시험체는 50*50*50 mm의 큐브형 시험체이며, 전기-역학적 응답 조사를 위해 구리 와이어메쉬를 매립식 전극으로 사용하여 20 mm 간격으로 매립하였다 (그림 1-7 참조). 시험체 제작 후 3일간 $90 \pm 2^\circ\text{C}$ 고온 수중 양생을 실시하였다. 실험은 그림 1-11에 나타난 바와 같이 하중 크기에 따른 전기 저항률 변화를 측정하기 위해 UTM의 실험 조건을 하중 유지 실험으로 20, 40, 60, 80, 그리고 100 MPa의 하중 단계로 구분하여 전기 저항률을 측정하였다. 전기 저항률 측정에 사용된 AC 임피던스 분석기 (AC Impedance analyzer)의 측정 조건으로는 주파수 범위 1Hz에서 1MHz로 설정하여 10 step/decade 간격으로 측정을 수행하였다.

- 실험결과

시험체에 재하되는 압축 하중이 증가함에 따라 스마트 콘크리트의 전기 저항률이 감소하는 경향을 보이며, 제강 슬래그와 강섬유를 함께 사용한 매트릭스 (MSF)에서 우수한 전기-역학적 응답을 보였다.



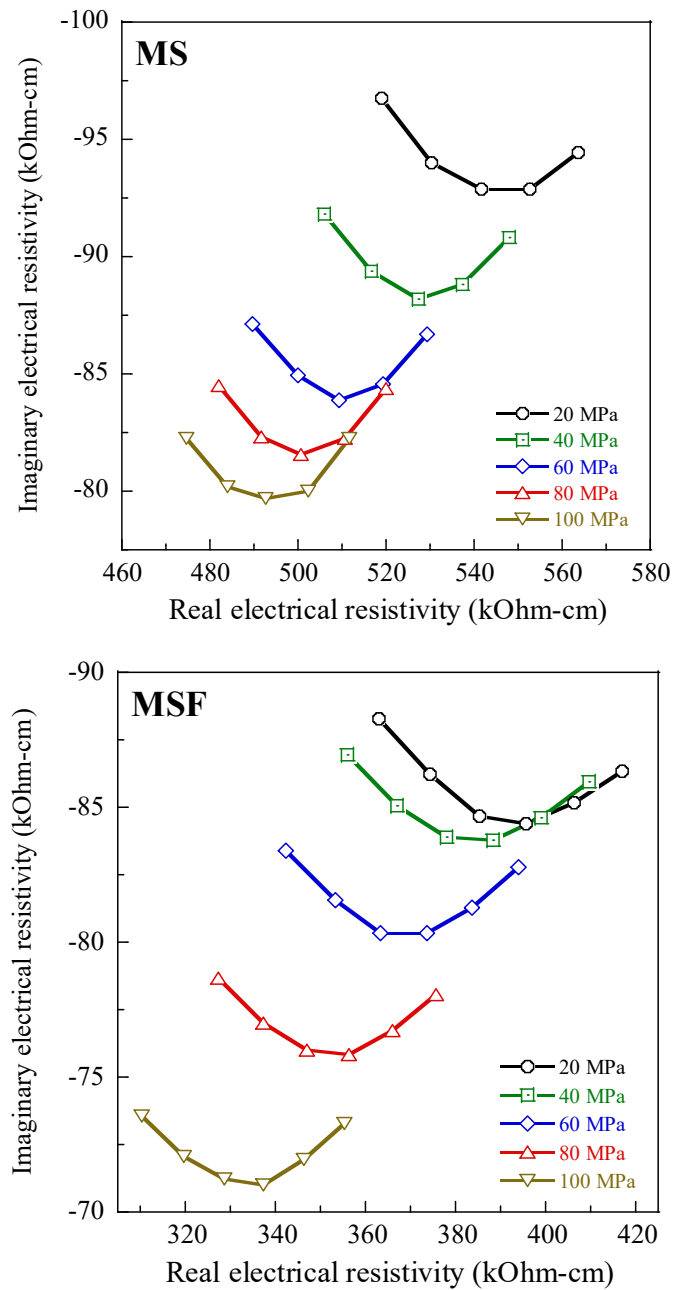


그림 1-12. 압축 하중 하에서 전기 전도성 재료가 스마트 콘크리트의 전기 저항률 변화에 미치는 영향

표 1-16. 압축 하중 하에서 전기 전도성 재료가 스마트 콘크리트의 전기-역학적 응답에 미치는 영향

Load step (MPa)	MF			MFMW			MS			MSF		
	ρ	$\Delta\rho$	$\Delta\rho/\rho_{20}$	ρ	$\Delta\rho$	$\Delta\rho/\rho_{20}$	ρ	$\Delta\rho$	$\Delta\rho/\rho_{20}$	ρ	$\Delta\rho$	$\Delta\rho/\rho_{20}$
	(k Ω -cm)	(%)	(%)	(k Ω -cm)	(%)	(%)	(k Ω -cm)	(%)	(%)	(k Ω -cm)	(%)	(%)
20	1659	—	—	295	—	—	550	—	—	396	—	—
40	1613	46	2.8	281	14	4.7	527	23	4.2	388	8	2.0
60	1552	107	6.5	273	22	7.5	509	41	7.5	366	30	7.6
80	1510	149	9.0	270	25	8.5	501	49	8.9	355	41	10.4
100	1455	204	12.3	266	29	9.8	497	53	9.6	336	60	15.1

측정된 nyquist plot을 통해 표 1-16와 그림 1-12과 같이 스마트 콘크리트 별 frequency에 해당하는 지점의 real electrical resistivity를 확인하여, 하중 크기에 따른 전기 저항률 변화를 나타내었다. 하중 크기 20 MPa 대비 전기 저항률의 변화율 ($\Delta\rho/\rho_{20}$)에서 제강 슬래그와 강섬유를 사용한 배합 (MSF)이 100 MPa에서 15.1%;로 다른 전기 전도성 재료가 사용된 매트릭스에 비해 가장 높은 전기 저항률 변화율을 보였으며, 강섬유 2 vol.%를 사용한 배합 (MF)이 100 MPa에서 12.3%; MWCNT 0.5%와 강섬유 2 vol.%를 사용한 배합 (MFMW)이 100 MPa에서 9.8%; 제강 슬래그만 사용한 배합 (MS)이 100 MPa에서 9.6%의 전기 저항률 변화율을 나타내었다.

- 결론

전도성 재료에 따른 스마트 콘크리트의 전기-역학적 응답을 조사한 결과 그림 1-13과 같이 제강슬래그와 강섬유를 복합적으로 사용한 매트릭스 (MSF)가 가장 우수한 전기-역학적 거동을 나타내는 것으로 확인되었다.

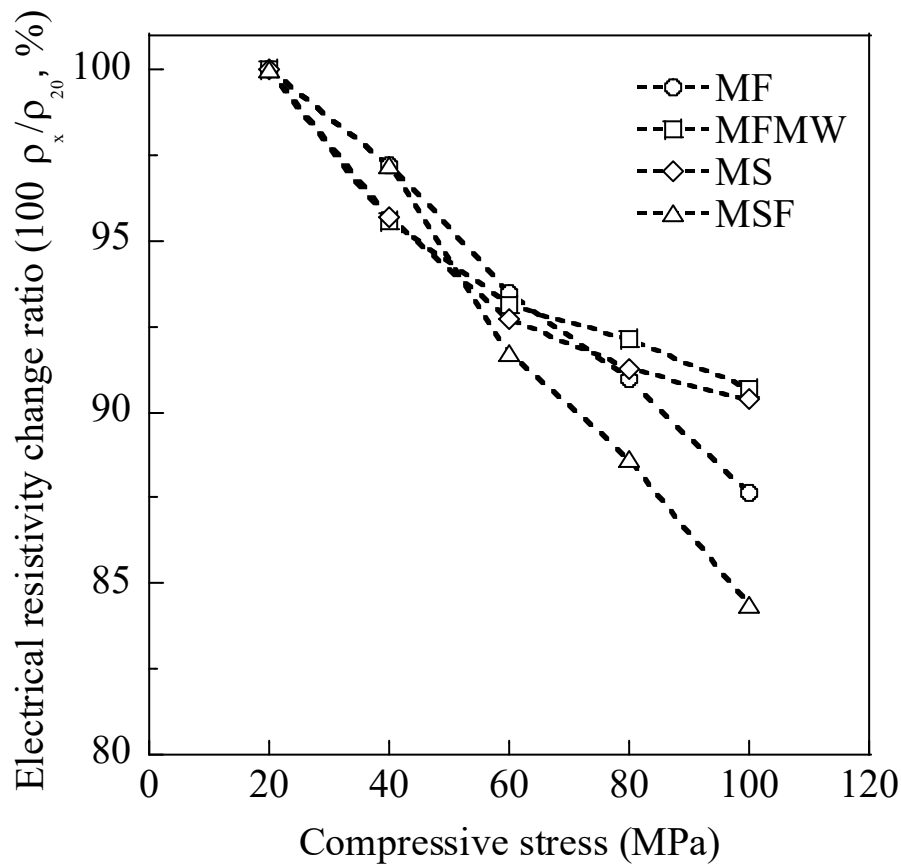


그림 1-13. 전도성 재료에 따른 스마트 콘크리트의 전기-역학적 응답

따라서, 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구에 가장 적합한 스마트 콘크리트 배합은 제강 슬래그와 강섬유가 복합적으로 사용된 매트릭스 (MSF)으로 도출되었으며, 최종 배합 구성 및 압축강도는 표 1-17과 같다.

표 1-17. 스마트 콘크리트 배합 구성

Cement (Type I)	Steel slag	Silica fume	Silica powder	Super- plasticizer	Water	Fiber volume content (%)	f_{ck} (MPa)
1.00	1.00	0.15	0.25	0.042	0.20	2.0	186.4

A2. 온도 및 습도 등의 환경인자가 스마트 콘크리트의 전기적 특성에 미치는 영향

- 실험목적

스마트 콘크리트 정착구 기술 개발을 위해 도출된 매트릭스 배합에 대하여 온도와 습도가 스마트 콘크리트의 전기 저항률에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

- 실험프로그램

온도와 습도 등의 환경인자가 스마트 콘크리트의 전기 저항률에 미치는 영향을 조사하기 위해 항온항습기를 사용하여 습도의 변화 (50, 100%)와 온도의 변화 (0, 20, 25, 그리고 40°C)가 스마트 콘크리트의 전기 저항률에 미치는 영향을 조사하였다.

- 실험방법

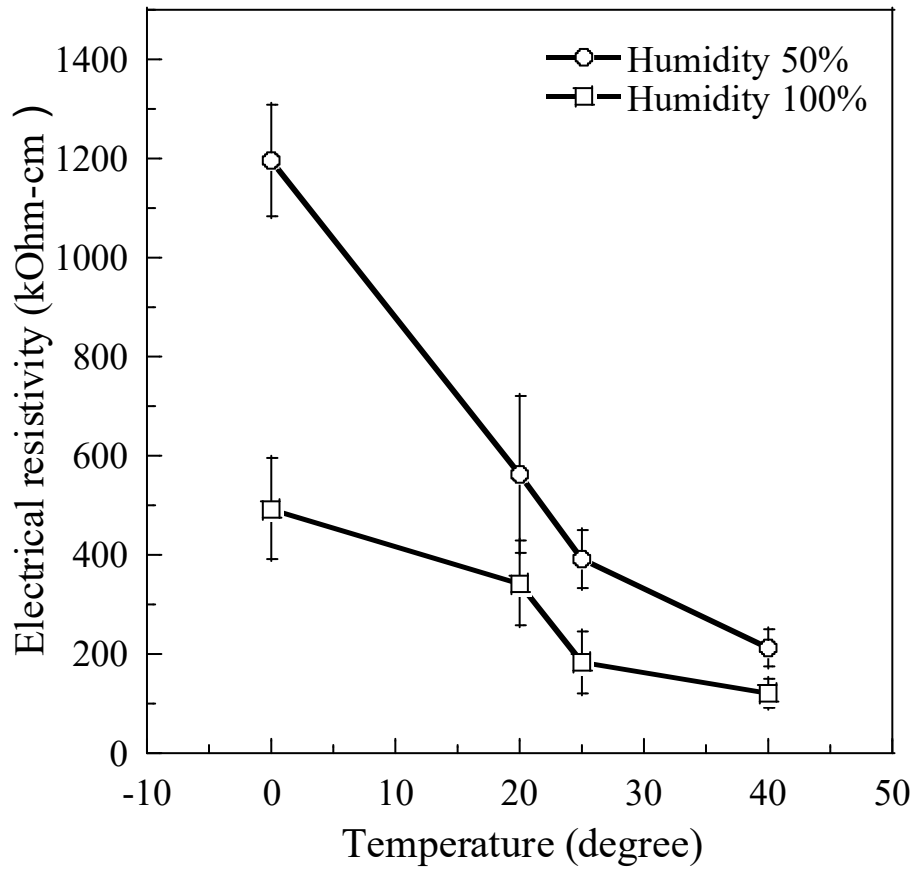
실험에 사용된 시험체는 50*50*50 mm의 큐브형 시험체로 전기 저항률 조사를 위해 사용된 전극은 구리 와이어메쉬(copper wire mesh)로 사용하였으며, 전극은 20 mm 간격으로 매립하였다 (그림 3-1 참조). 시험체는 제작 후 3일간 90±2°C에서 고온 수증 양생을 실시하였으며, 양생이 끝난 시험체는 24 시간동안 자연 건조시킨 뒤 측정하고자 하는 온도 (0, 20, 25, 40°C)와 습도 (50, 100%)를 설정하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 전기 저항률 측정 장비는 AC 임피던스 분석기 (AC Impedance analyzer)로 측정 방법은 2 탐침 저항 측정방법 (2-probe resistance measurement)으로 전기 저항률을 측정을 진행하였다.



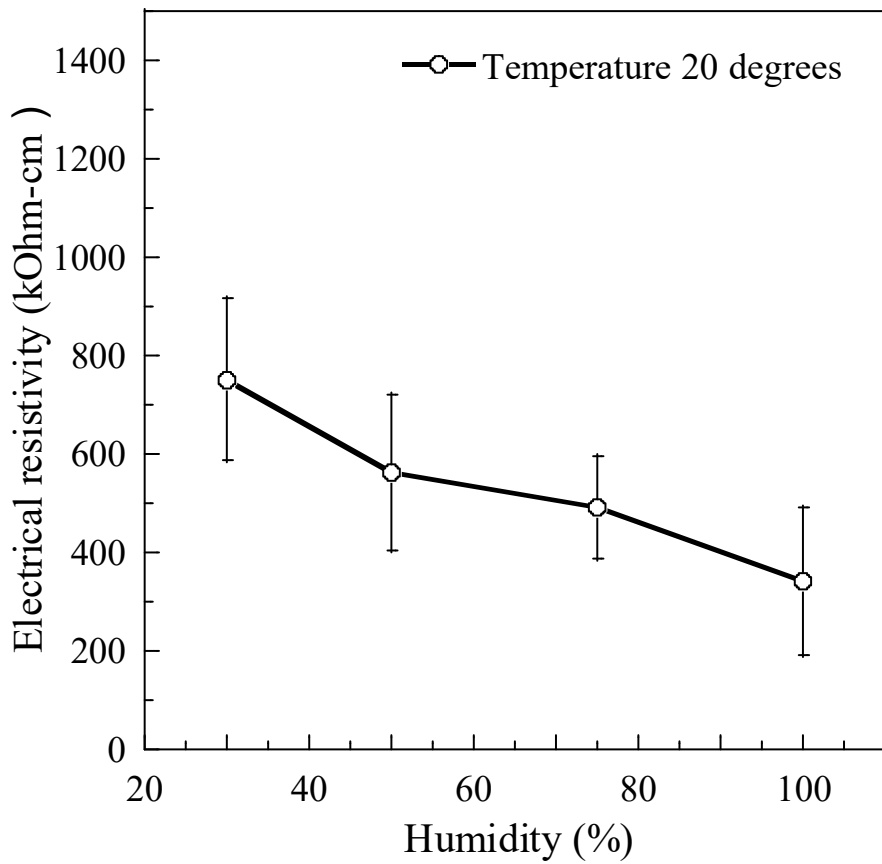
그림 2-1. 온도와 습도 영향성 평가 실험 전경

- 실험결과

온도와 습도의 변화에 따른 스마트 콘크리트의 전기 저항률 측정 실험을 통하여, 온도와 습도가 증가함에 따라 스마트 콘크리트의 전기 저항률이 감소하는 것으로 나타났다. 그림 2-2와 표 2-1 그리고 표 2-2에 나타난 바와 같이 온도의 증가에 따라 스마트 콘크리트의 전기 저항률이 최대 82.3%의 감소율을 보이고, 습도의 경우 습도가 증가함에 따라 최대 54.3%로 나타났다. 따라서, 온도의 변화가 습도의 변화에 비해 큰 영향성을 보이는 것으로 판단된다.



(a) 온도에 따른 전기저항률 변화



(b) 습도에 따른 전기저항률 변화

그림 2-2. 온도와 습도 변화에 따른 스마트 콘크리트 전기 저항률 변화

표 2-1. 온도 변화에 따른 스마트 콘크리트 전기저항률 변화

Temperature	Humidity					
	50 %			100 %		
	ρ	$\Delta\rho$	$\Delta\rho/\rho_0$	ρ	$\Delta\rho$	$\Delta\rho/\rho_0$
(°C)	(k Ω -cm)	(k Ω -cm)	(%)	(k Ω -cm)	(k Ω -cm)	(%)
0	493.2	-	-	1197.3	-	-
20	343.4	149.8	30.4	562.1	635.2	53.1
25	183.9	309.3	62.7	392.2	805.1	67.2
40	119.8	373.4	75.7	212.2	985.1	82.3

표 2-2. 습도 변화에 따른 스마트 콘크리트 전기저항률 변화

Humidity	Temperature (20°C)		
	ρ	$\Delta\rho$	$\Delta\rho/\rho_0$
(%)	(k Ω -cm)	(k Ω -cm)	(k Ω -cm)
30	752.0	-	-
50	562.1	189.9	25.3
75	491.6	260.4	34.6
100	343.4	408.6	54.3

- 결론

본 연구를 통해 온도와 습도 등의 환경인자가 도출된 스마트 콘크리트 배합(안)에 미치는 영향성을 평가하였다. 실험은 온도를 고정시킨 경우와 습도를 고정시킨 경우에서 온도 및 습도의 변화에 따른 스마트 콘크리트의 전기 저항률의 변화를 계측하였다. 상기의 실험결과를 통하여 온도의 변화가 습도의 변화에 비해 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, 이는 온도 및 습도의 증가가 매트릭스 내부 전하의 이온 이동을 활성화시킴에 따라 나타나는 현상으로 판단하였다.

A3. 스마트 콘크리트 정착구 설계(안) 도출

- 실험목적

스마트 콘크리트 정착구 기술의 실제 구조물에 적용 가능성을 조사하기 위해 개발된 전기-역학적 민감도가 우수한 스마트 콘크리트 배합을 바탕으로 긴장재에 긴장력이 도입될 때 정착부에 가해지는 압축하중을 고려하여 이론적인 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)을 제시하고자 한다.

- 실험프로그램

일반적으로 PS 콘크리트 구조물에 사용되는 PC 강연선 중 7연선 강연선 (15.2 mm)을 사용하는 구조물을 대상으로 강연선의 가닥 수 (7 가닥, 12 가닥)에 따른 정착구의 긴장재 정착에 필요한 정착판의 크기, 트럼펫 그리고 전기저항 측정 지점을 고려하여 스마트 콘크리트 정착구의 이론적인 설계(안)을 도출하고자 한다.

- 설계(안) 도출 방법

이론적인 설계(안) 제시를 위해 사용된 스마트 콘크리트 정착구 배합은 제강 슬래그 (Steel slag)가 사용된 강섬유 보강 시멘트 복합재료로써 매트릭스 구성성분 및 압축강도를 표 3-1에 나타내었다.

표 3-1. 제강슬래그가 사용된 스마트 콘크리트 배합(안)

Cement (Type I)	Steel slag	Silica fume	Silica powder	Super-plasticizer	Water	Fiber volume content (%)	f_{ck} (MPa)
1.00	1.00	0.15	0.25	0.042	0.20	2.0	186.4

설계(안)에 사용된 7연선 강연선은 KS D 7002 (PC 강선 및 PC 강연선) 규격에서 제시한 PC 강연선 중 직경 15.2 mm에 해당하는 강연선을 사용하였으며, 강연선 정착에 사용되는 정착판 (steel plate), 앵커 헤드 (anchor head)와 트럼펫의 제원은 교량상부 설계 및 시공 업체인 브이에스엘코리아 (VSL.korea)에서 제시한 강연선의 가닥수에 따른 정착판과 트럼펫의 형상을 고려하였다. 또한, 스마트 콘크리트 정착구의 전기저항률 측정 방법을 고려하여, 계측 부가 정착판 외부에 위치한 경우 (Type 1) 그리고 계측 부가 정착판 내부에 위치한 경우 (Type 2)를 각각 설계하였으며, 스마트 콘크리트 정착구 형상을 그림 3-1과 표 3-2에 나타내었다.

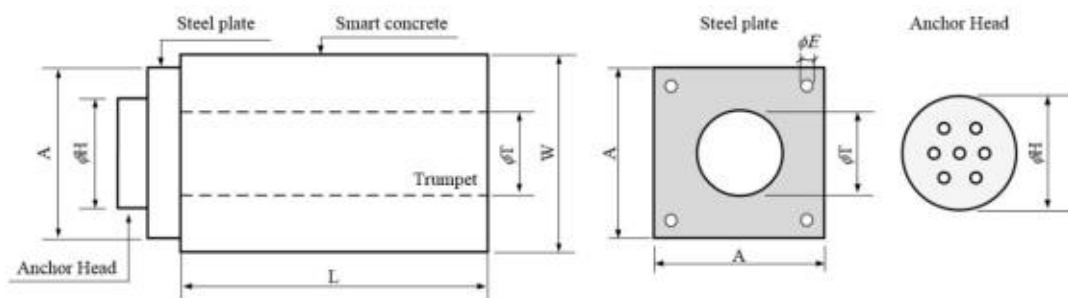


그림 3-1. 스마트 콘크리트 정착구 형상

표 3-2. 강연선의 가닥 수에 따른 스마트 콘크리트 정착구 형상

Notation	The number of strand	Geometry of smart concrete anchorage (mm)							
		Anchor head	Steel plate			Smart concrete		Trumpet	
			$\varnothing H$	A	$\varnothing E$	$\varnothing T$	W	L	$\varnothing T$
Type1(7H)	7	135	160	-	89	200	300	89	300
Type2(7H)			200	20					
Type1(12H)	12	170	210	-	118	275	315	118	315
Type2(12H)			275	20					

- 스마트 콘크리트 정착구 설계(안) 과정

상기의 정착부에 사용되는 정착판과 트럼펫의 형상을 바탕으로 7연선 강연선 7 가닥과 12 가닥에 대한 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)은 다음과 같이 계산되었다.

스마트 콘크리트 정착구에 작용하는 최대 압축 하중은 steel plate와 smart concrete가 접촉하는 지점에서 발생하며, 강연선에 의해 작용하는 최대 압축력 (P_{max})는 식. 1에 의해 계산된다.

$$P_{max} = 0.8 \times f_{pu} \times n_{strand} \times A_{strand} \quad (\text{식. 1})$$

여기서, f_{pu} 는 강연선의 최대 인장 강도; n_{strand} 는 보강된 강연선의 수; A_{strand} 는 강연선의 단면적; 그리고 0.8은 강연선에 가해진 긴장력의 80%만을 고려한 계수이다.

식.1을 바탕으로 7연선 강연선(15.2mm) 7가닥, 12가닥을 사용한 경우에 대한 최대 압축하중은 표 3-3과 같이 계산된다.

표 3-3. 스마트 콘크리트 정착구의 최대 압축 하중

Strand diameter (mm)	A_{strand} (mm ²)	f_{pu} (MPa)	Tensile strength of strand (MPa)	n_{strand} (ea)	P_{max} (KN)
15.2	139.4	2160	1728	7	1678
				12	2889

스마트 콘크리트 정착구가 받는 최대 압축 응력 (σ_{max})는 식.2와 같이 계산된다.

$$\sigma_{max} = \frac{P_{max}}{A_{min}} ; A_{min} = A \times A - \frac{\pi \times (\phi T)^2}{4} - \frac{\pi \times (\phi E)^2}{4} \times n_e \quad (\text{식. 2})$$

여기서, A_{min} 은 steel plate의 단면적; A 는 steel plate의 폭; ϕT 는 강연선을 통과를 위한 중공 단면의 직경; ϕE 는 전기저항 측정을 위한 중공 단면의 직경; n_e 는 전기저항 측정 지점의 개수 이다.

식.2을 바탕으로 계산된 스마트 콘크리트 정착구의 최대 압축 응력은 표 3-4와 같다.

표 3-4. 스마트 콘크리트 정착구의 최대 압축 응력

Notation	P_{max}	A	ϕE	ϕT	n_e	A_{min}	σ_{max}	$(\sigma_{max})/(f_c)$
	(kN)	(mm)	(mm)	(mm)	(ea)	(mm ²)	(MPa)	(%)
Type1(7H)	1678	160	-	89	-	19378.9	86.6	46.6
Type2(7H)	1678	200	20	89	4	32522.2	51.6	27.7
Type1(12H)	2889	210	-	118	-	33164.1	87.1	46.8
Type2(12H)	2889	275	20	118	4	63432.5	45.5	24.5

설계된 4가지 경우의 스마트 콘크리트 정착구에 대하여, 식. 1과 식. 2을 통해 계산된 스마트 콘크리트 정착구의 최대 압축 응력은 본 연구에서 최종적으로 제안한 스마트 콘크리트 배합에 따른 압축강도 186 MPa의 20~50%에 해당하는 선형 탄성 구간 내에 위치한다. 따라서, 제시된 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)은 실제 스마트 콘크리트 정착구로 사용하기 충분 할 것으로 판단되며, 최종적으로 도출된 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)은 그림 3-2와 같다.

A4. 스마트 콘크리트 정착구용 Plug-in 형 매립식 전극 개발

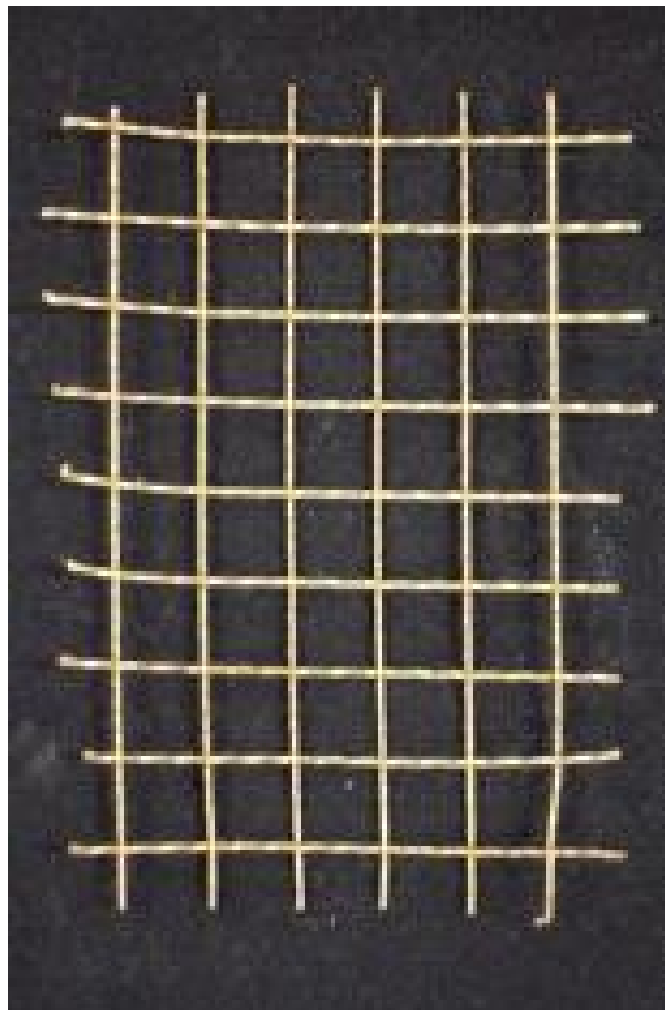
- 실험목적

스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 거동 측정에 필요한 스마트 콘크리트 정착구 용 Plug-in 형 매립식 전극 개발 및 적용방안을 도출하기 위해 전극 형상 및 배치 등을 결정하여, 측정 방법이 간편한 Plug-in 형 매립식 전극을 제작하고자 한다.

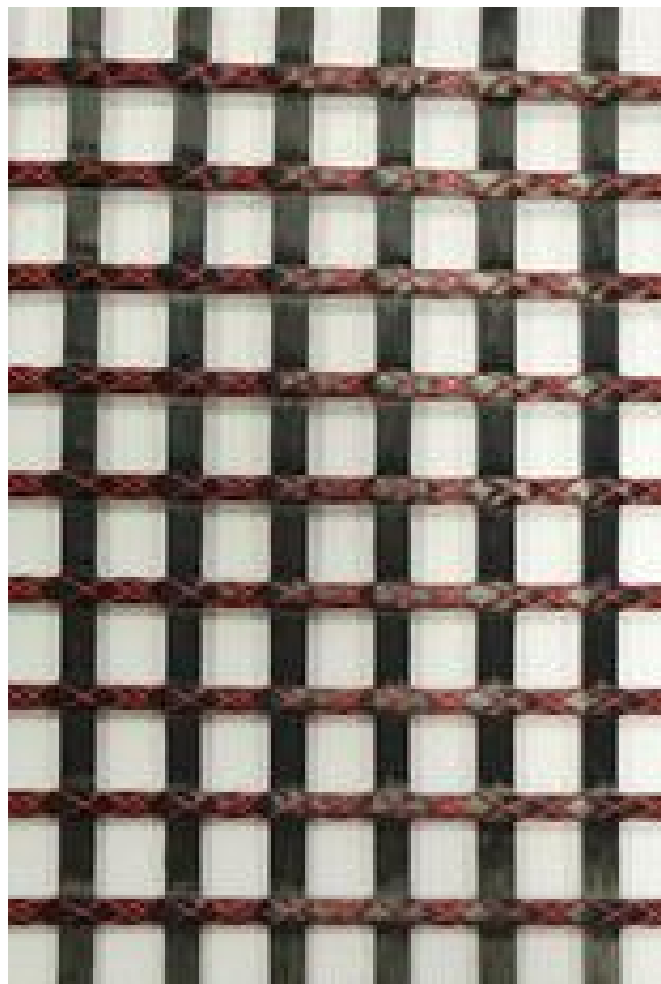
- 실험 프로그램

본 실험은 스마트 콘크리트 정착구의 전기저항을 측정을 위한 최적의 Plug-in 형 매립식 전극을 개발하고자, 높은 전기전도성과 부식 내성을 바탕으로 자기감지 콘크리트 관련되어 매립형 전극으로 우수한 성능을 갖는다고 확인된 구리와이어 메쉬 (copper wire mesh), 최근 매립형 전극 재료로 활용되고 있는 카본 텍스타일 (carbon textile), 그리고 계측 및 데이터 전달 분야에서 회로 접속용으로 사용되는 스테레오 형식의 플러그 (plug)를 활용하여, 스마트 콘크리트 정착구 전기저항 계측용 Plug-in 형 매립식 전극을 개발하고자 한다.

개발하고자 하는 Plug-in 형 매립식 전극은 두가지 부분으로, 1) 스마트 콘크리트 정착구 내부에 매립되어 외부 장치 연결 시 전극 사이에 위치하는 스마트 콘크리트의 전기저항을 계측하는 전극부; 2) 전기저항 측정에 필요한 외부 장치와 스마트 콘크리트 정착구 내부에 매립된 전극부를 연결하는 접속부로 나누어 개발하였다. 스마트 콘크리트 내부에 매립되는 전극부는 매립형 전극은 구리와이어 메쉬, 카본 텍스타일, 그리고 스테레오 (female)를 사용하였으며, 계측 장치와 스마트 콘크리트 정착구를 연결하는 전극부는 스테레오 잭(Male)을 사용하였다. 그림 4-1은 사용된 전극 재료 형상, 표 4-1 사용된 전도성 재료 특성을 나타내었다.



가) 구리와이어 메쉬 (copper wire mesh)



나) 카본 텍스타일 (carbon textile)



다) 6.3 ϕ 스테레오 잭 (Male/Female)

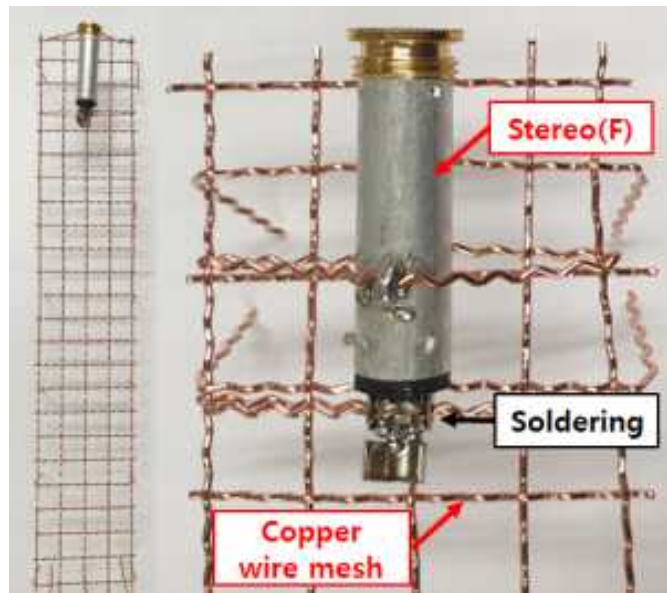
그림 4-1. Plug-in 전극 구성 재료

표 4-1. 전도성 재료 특성

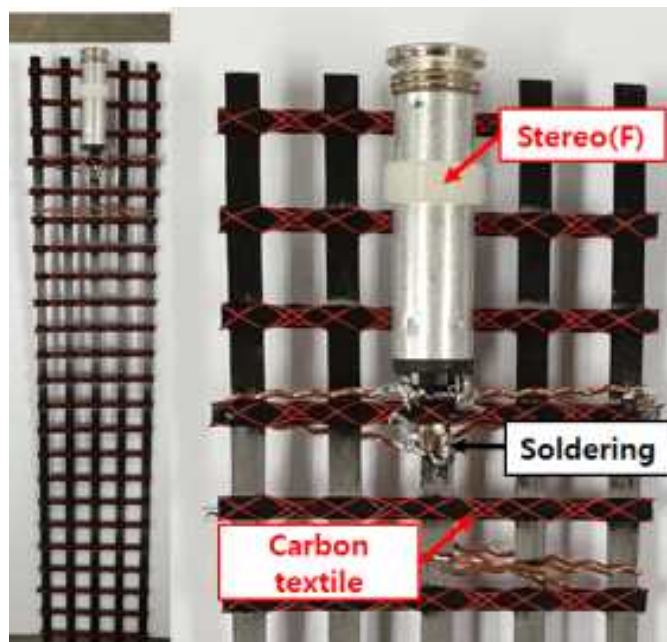
Material type	Cross section (mm ²)	Mesh size (mm)	Electrical conductivity (X10 ⁸ /kΩ-cm)
Copper wire mesh	1.27	11	9.21
Carbon textile	5	10	38.63

- 전극의 형상

스마트 콘크리트 정착구 설계(안)을 바탕으로 전기저항 측정을 위해 선별된 전극 재료를 사용하여, 설계 (안)에 따른 전극부 및 접촉부를 2가지 형태로 구성하였다. 전극 부의 경우 구리와이어 메쉬와 스테레오 (female)로 연결한 PCW (plug-in copper wire mesh)과 카본 텍스타일과 스테레오 (female)을 연결한 PCT (plug-in carbon textile)로 구분하였으며, 접촉부는 스테레오 (male)을 사용하였다. 이를 바탕으로 2가지 형태의 Plug-in 전극 형상은 그림 4-2와 같다.



가) PCW (copper wire mesh+stereo)



나) PCT (carbon textile+stereo)

그림 4-2. Plug-in 전극 구성

- 스마트 콘크리트 정착구 Plug-in 형 매립식 전극을 적용(안)

스마트 콘크리트 정착구 설계(안)을 바탕으로 2가지 종류의 Plug-in 전극 (PCW,PCT)가 각각 적용하였을 때의 스마트 콘크리트 정착구의 전체적인 형상은 그림 4-3과 같다. 그림 4-3에서 Type 1_PCW, Type 1_PCT는 전기저항 측정을 위한 전극부가 정착판 (steel plate) 외부에 위치한 경우이며, Type 2_PCW, Type 2_PCT는 전기저항 측정을 위한 전극부가 정착판 내부에 위치한 경우이다.

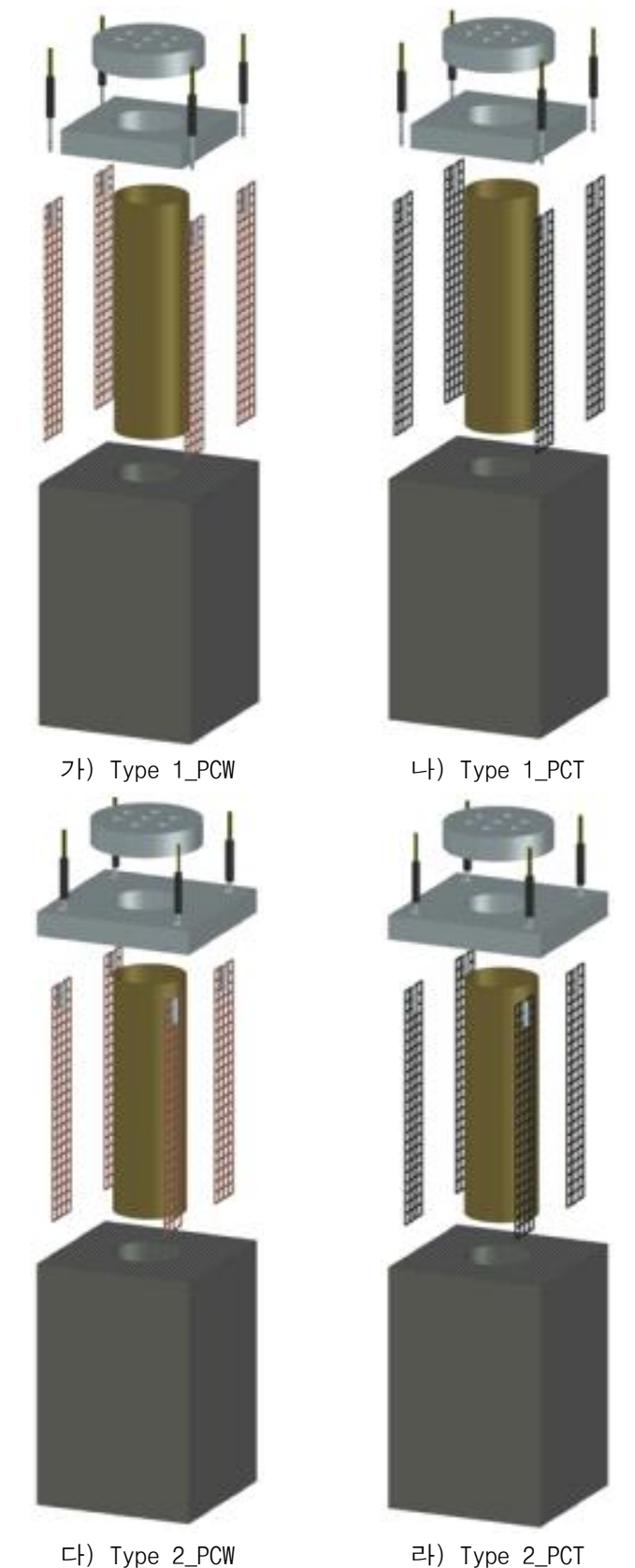


그림 4-3. Plug-in 전극 적용 스마트 콘크리트 정착구

A5. 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 성능 평가

A5.1 압축 하중 하에서의 스마트 콘크리트 정착구(Type 1)의 전기-역학적 성능평가

- 실험목적

설계된 스마트 콘크리트 정착구 Type 1에 대하여, 스마트 콘크리트 정착구의 긴장력 손실 감지 능력 평가를 목적으로 구리와이어 메쉬를 전극으로 사용한 스마트 콘크리트 정착구의 하중감지 성능을 조사하였다.

- 실험 프로그램

실험에 사용된 매트릭스는 우수한 자기응력 감지 성능을 갖는 것으로 확인된 스마트 콘크리트 배합을 사용하였다. 실험은 7연선 강연선 7가닥을 사용한 경우에 대하여 전기저항 계측을 위한 전극부가 정착판 (steel plate) 외부에 위치한 스마트 콘크리트 정착구 설계(안) Type 1을 바탕으로 구리와이어 메쉬를 매립형 전극으로 사용한 폭 200 mm*200 mm, 높이 300 mm 시험체를 사용하였으며, 이에 대한 형상은 그림 5.1 과 같다.

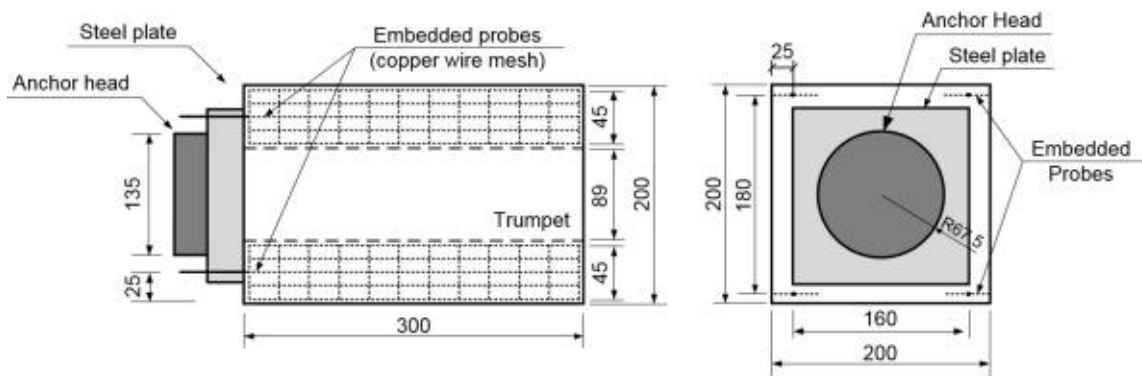
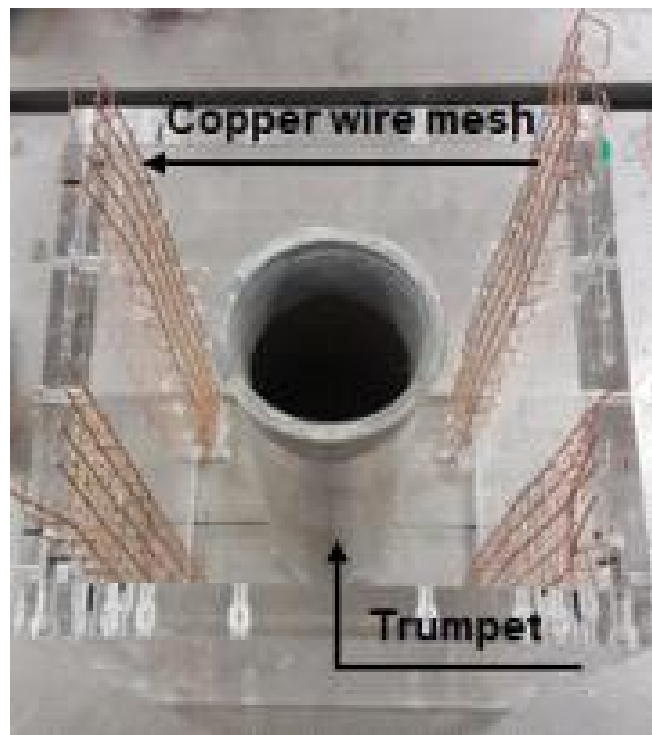


그림 5-1. 스마트 콘크리트 정착구 설계(안) Type 1

○ 실험방법

시험체 제작을 위해 200 mm*200 mm 단면적을 갖는 높이 300 mm 몰드를 사용하였으며, 구리 와이어 메쉬를 전극으로 사용하기 위해 구리와이어 메쉬를 폭 45 mm, 높이 330 mm 크기로 제작 한 후 제작 몰드에 고정하였다. 또한, 시험체 중앙에 강연선 통과를 위한 중공단면을 만들기 위해 외경 Ø89 mm (내경 Ø84 mm)의 원통형 트럼펫을 몰드에 고정 시켰다. 이후 배합된 스마트 콘크리트 모르타르를 4번에 나누어 타설 하였으며, 각 단계에서 충분한 진동을 주어 시험체 내부 공극 최소화하였다. 타설 후 상온에서 2일간 건조 시킨 후 탈형을 진행하였으며, 이후 3일간 $90 \pm 2^\circ\text{C}$ 고온 수중 양생을 실시하였다. 양생이 끝난 스마트 콘크리트 정착구는 상온에서 7일간 충분히 건조시킨 후 실험을 진행하였다.(그림 5.2 참조)



가) 스마트 콘크리트 정착구 제작 몰드



나) 스마트 콘크리트 정착구

그림 5-2. 스마트 콘크리트 정착구 (Type 1)

압축 하중 크기 변화에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기저항률 변화 거동을 평가를 목적으로 압축 하중 재하를 위한 300 ton 급 만능재료시험기(UTM) 그리고 전기저항 측정을 위한 AC 임피던스 분석기를 사용하였다. 압축 하중 재하를 위해 사용한 만능재료 시험기는 변위재하 방식의 1 mm/min 하중속도로 최대 압축 하중이 200 ton까지 상승하도록 설정하였다. 압축 하중 변화에 따른 전기저항률 변화를 측정하기 위해 실험 직전 AC 임피던스 분석기를 사용하여 2 탐침 저항성 방식(2-probe method)를 기법으로 주파수 범위 1Hz에서 1 MHz까지의 AC 전기저항을 10 step/decade 간격으로 주파수를 sweep 후 계측된 데이터를 바탕으로 시험체의 고유주파수를 도출하였다. 도출된 고유 주파수 지점에서의 전기저항에 대하여, 압축 하중이 증가함에 따라 변화하는 AC 전기저항 변화를 0.5 seconds/step 속도로 측정을 수행하였다. 압축 하중 크기에 따른 전기저항률 변화 실험은 동일한 시험체에 대하여 총 3회 반복하여 실험하였다.



그림 5-3. 스마트 콘크리트 정착구 실험 전경

- 실험결과

실험 결과 분석을 위해 계측된 실수부 임피던스 값을 전기저항 값으로 사용하였으며, 전기저항률 변화율(fractional change in resistivity, FCR)을 수식 5-1과 같이 계산하여 나타내었다.(그림 5.3 참조)

$$FCR(\%) = \frac{R - R_0}{R_0} \times 100 = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \times 100 \quad (\text{수식 5-1})$$

스마트 콘크리트 정착구 설계(안) Type 1을 바탕으로 제작된 시험체의 압축 하중 크기에 따른 전기저항률 변화이 초기 실험에서 압축 하중이 증가함에 따라 전기저항률이 증가하는 거동을 보였으나, 반복 실험에서는 전기저항률이 압축하중이 증가함에 따라 감소하는 거동을 나타내었다.(그림5.4 참조)

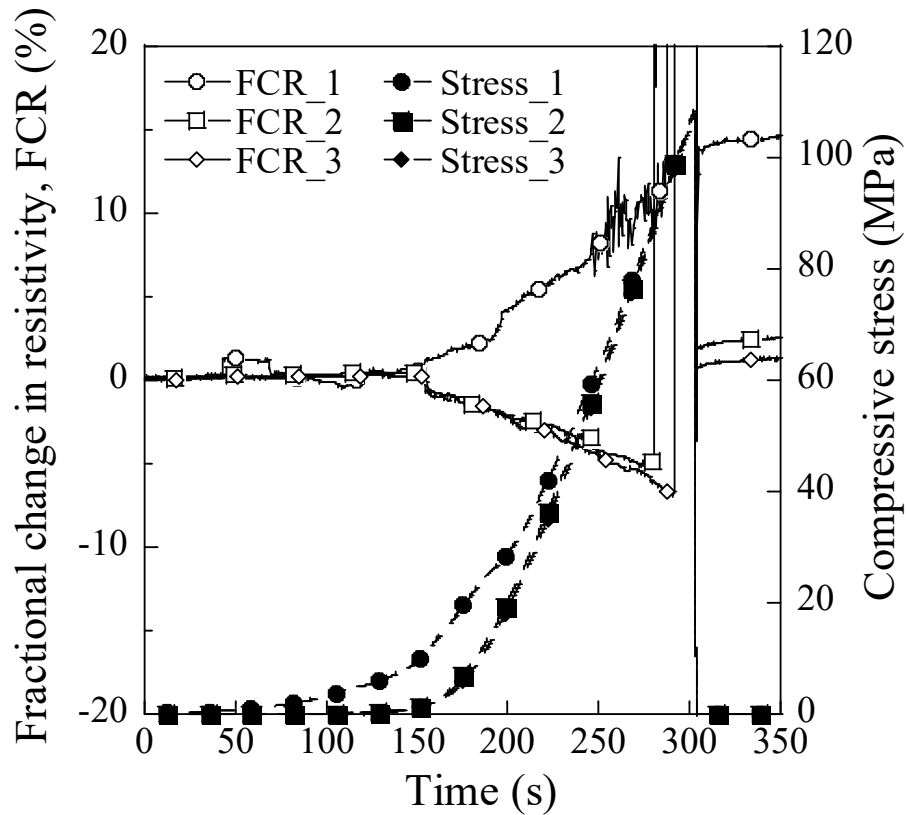


그림 5-4 스마트 콘크리트 정착구 실험 결과

○ 결과 분석

스마트 콘크리트 정착구의 첫 번째 실험에서 압축하중이 증가함에 따라 전기저항률이 증가하는 원인을 조사한 결과, 그림 5.5와 같이 정착판과 스마트 콘크리트 정착구에 접촉면에서 발생한 균열이 초기 실험결과에 영향을 주었을 것으로 판단된다.



그림 5-5 스마트 콘크리트 정착구 상부 균열 형상

스마트 콘크리트 정착구 상부에 발생한 균열은 스마트 콘크리트 정착구 전기저항률 측정에 사용된 구리와이어메쉬가 매립된 방향으로 진전된 것으로 확인되었다. 스마트 콘크리트 정착구 첫 번째 실험 중 발생한 상부 균열이 매립된 구리와이어 메쉬 면을 따라 진전되면서, 스마트 콘크리트와 구리와이어 메쉬 사이의 탈착을 유발하여 전기저항률이 증가한 것으로 보인다. 따라서, 제시된 스마트 콘크리트 정착구 설계(안) Type 1 은 실제 강연선 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구로서 사용하는데 부적합 한 것으로 판단된다.

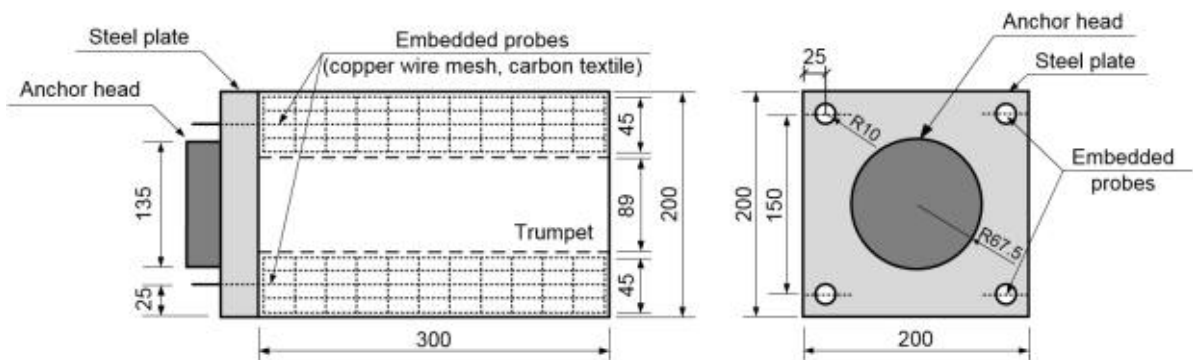
A5.2 압축 하중 하에서의 스마트 콘크리트 정착구(Type 2)의 전기-역학적 성능평가

- 실험목적

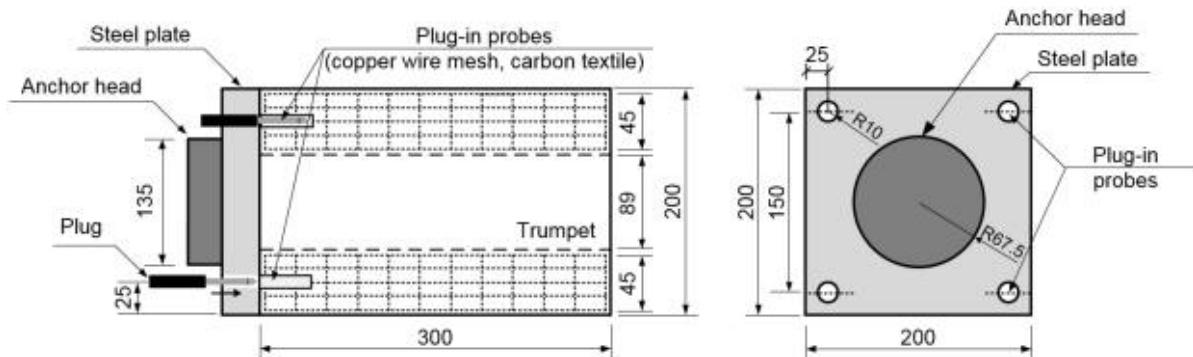
설계된 스마트 콘크리트 정착구 Type 2에 대하여, 스마트 콘크리트 정착구의 긴장력 손실 감지 능력 평가 및 최적의 전극 도출을 목적으로 다양한 전극을 적용한 스마트 콘크리트 정착구의 압축 하중 크기에 따른 전기저항을 변화 거동을 조사하였다.

- 실험 프로그램

실험에 사용된 매트릭스는 우수한 자기응력 감지 성능을 갖는 것으로 확인된 스마트 콘크리트 배합을 사용하였다. 실험은 7연선 강연선 7가닥을 사용한 경우에 대하여 전기저항 계측을 위한 전극부가 정착판 (steel plate) 내부에 위치한 스마트 콘크리트 정착구 설계(안) Type 2을 바탕으로 폭 200 mm*200 mm, 높이 300 mm 시험체를 사용하였으며, 전기저항 측정을 위한 전극은 2가지 종류의 Plug-in 매립형 전극을 적용한 스마트 콘크리트 정착구를 사용하였다. 또한, Plug-in 전극 성능 비교를 위해 구리와이어 메쉬와 카본 텍스타일만을 매립형 전극으로 사용한 스마트 콘크리트 정착구를 사용하였다. (그림 5-6 참조)



가) 매립형 전극 적용 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)



나) Plug-in 매립형 전극 적용 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)

그림 5-6. 스마트 콘크리트 정착구 설계(안) Type 2

○ 실험방법

시험체 제작을 위해 200 mm*200 mm 단면적을 갖는 300 mm 높이의 몰드를 사용하였으며, 구리와이어 메쉬를 전극으로 사용하기 위해 구리와이어 메쉬를 폭 45 mm, 높이 300 mm 크기로 제작 한 후 제작 몰드에 고정하였다. 또한, 시험체 중앙에 강연선 통과를 위한 중공단면을 만들기 위해 외경 Ø89 mm (내경 Ø84 mm)의 원통형 트럼펫을 몰드에 고정 시켰다. 이후 배합된 스마트 콘크리트 모르타르를 4번에 나누어 타설 하였으며, 각 단계에서 충분한 진동을 주어 시험체 내부 공극 최소화하였다. 타설 후 상온에서 2일간 건조 시킨 후 탈형을 진행하였으며, 이후 3일간 $90 \pm 2^\circ\text{C}$ 고온 수증 양생을 실시하였다. 양생이 끝난 스마트 콘크리트 정착구는 상온에서 7일간 충분히 건조시킨 후 실험을 진행하였다.(그림 5-7 참조)

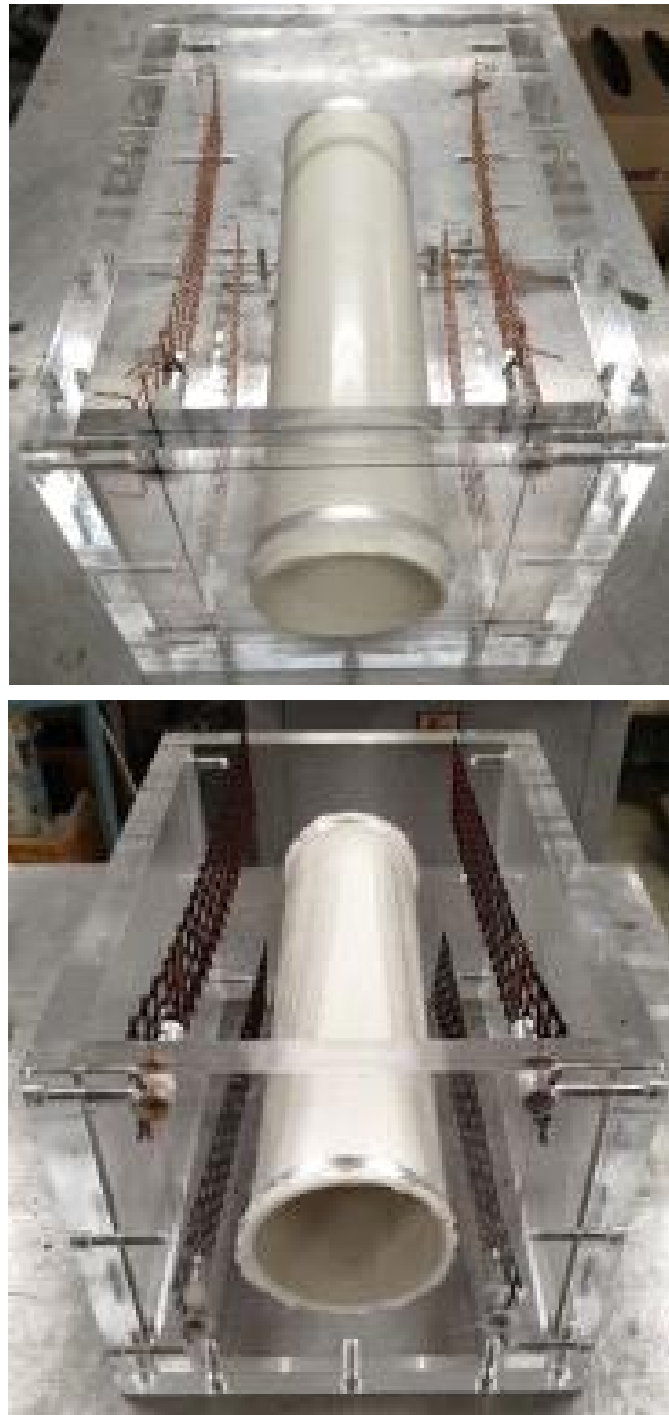


그림 5-8. 스마트 콘크리트 정착구 설계 몰드 형상

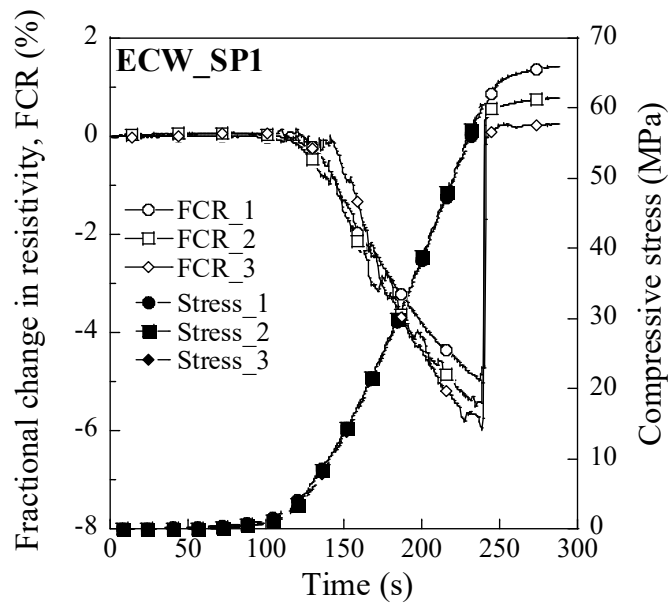
압축 하중 크기 변화에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기저항률 변화 거동을 평가를 목적으로 압축 하중 재하를 위한 300 ton 급 만능재료시험기(UTM) 그리고 전기저항 측정을 위한 AC 임피던스 분석기를 사용하였다. 압축 하중 재하를 위해 사용한 만능재료 시험기는 변위재하 방식의 1 mm/min 하중속도로 최대 압축 하중이 200 ton까지 상승하도록 설정하였다. 압축 하중 변화에 따른 전기저항률 변화를 측정하기 위해 실험 직전 AC 임피던스 분석기를 사용하여 2 탐침 저항성 방식 (2-probe method)를 기법으로 주파수 범위 1Hz에서 1 MHz까지의 AC 전기저항을 10 step/decade 간격으로 주파수를 sweep 후 계측된 데이터를 바탕으로 시험체의 고유주파수를 도출하였다. 도출된 고유 주파수 지점에서의 전기저항에 대하여, 압축 하중이 증가함에 따라 변화하는 AC 전기저항 변화를 0.5 seconds/step 속도로 측정하였으며, 압축 하중 크기에 따른 전기저항률 변화 실험은 동일한 시험체에 대하여 총 3회 반복하여 실험하였다.



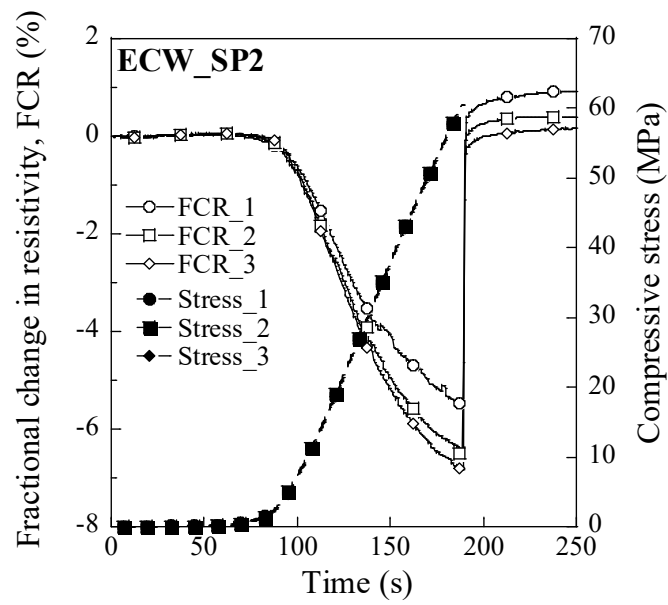
그림 5-9. 스마트 콘크리트 정착구 실험 전경

○ 실험결과

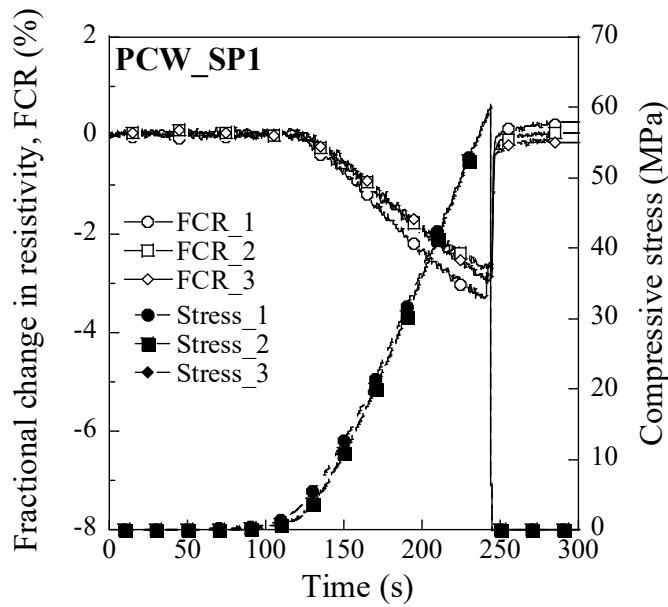
스마트 콘크리트 정착구 설계(안) Type 2를 바탕으로 4가지 종류의 전극을 사용하여 제작된 스마트 콘크리트 정착구의 압축하중 크기에 따른 전기저항률 변화 거동을 그림 5-9와 표 5-1에 나타내었다. 전체 시험체 모두 압축 하중이 증가함에 따라 전기저항률이 감소하는 거동을 보였다. 이때 구리와이어 메쉬를 매립형 전극으로 사용한 ECW가 60 MPa 압축 하중 기준 -5.12%의 전기저항률 감소율로 가장 우수한 전기-역학적 민감도를 나타내었으며, 구리와이어 메쉬와 스테레오를 결합한 Plug-in 전극이 사용된 PCW는 -2.65% 전기저항률 변화율을 나타내는 것으로 확인되었다. 카본 텍스타일을 매립형 전극으로 사용한 ECT와 카본텍스타일과 스테레오를 결합한 Plug-in 매립형 전극이 사용된 PCT의 경우 각각 -1.38%, -0.77%의 전기저항률 변화율로 구리와이어 메쉬가 사용된 경우보다 감지 성능이 낮은 것으로 확인되었다. 또한, 동일한 시험체에 대하여 3회 반복 실험 하였을 때 시험체 모두 전극 매립으로 인해 균열에 취약한 전극부에서 균열이 발생하지 않았으며, 실험 결과 역시 동일한 시험체에 대해서 유사한 전기-역학적 민감도를 갖는 것으로 확인되었다.



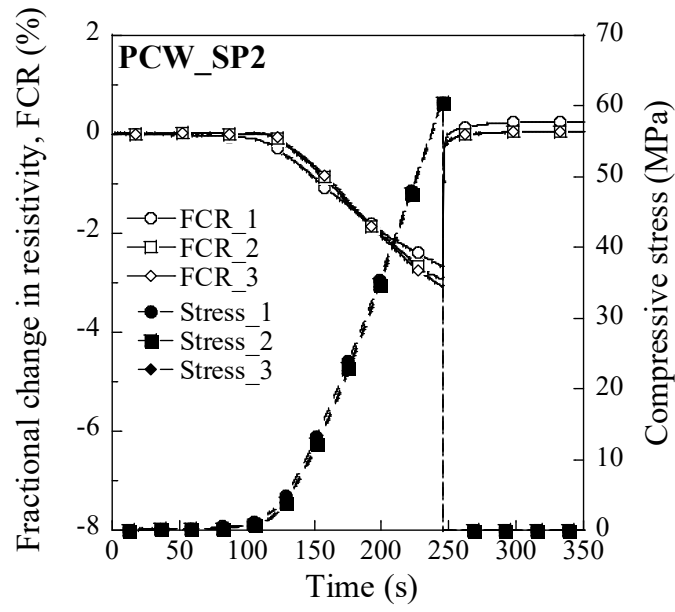
가) ECW_SP1



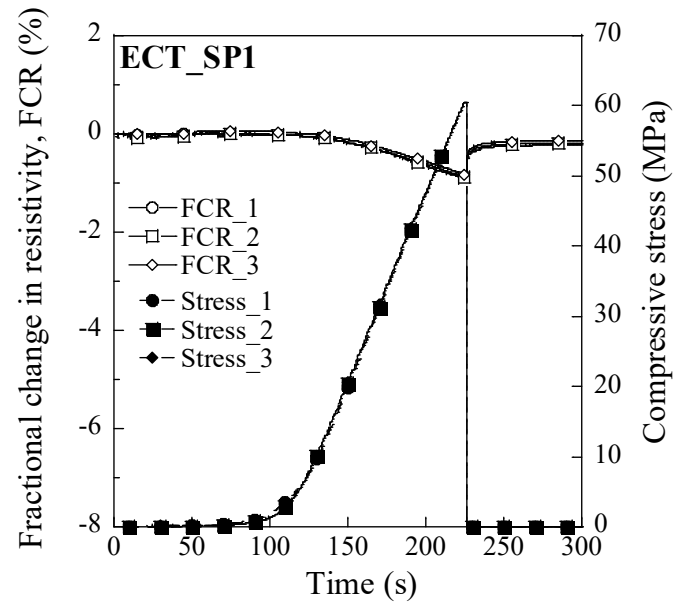
나) ECW_SP2



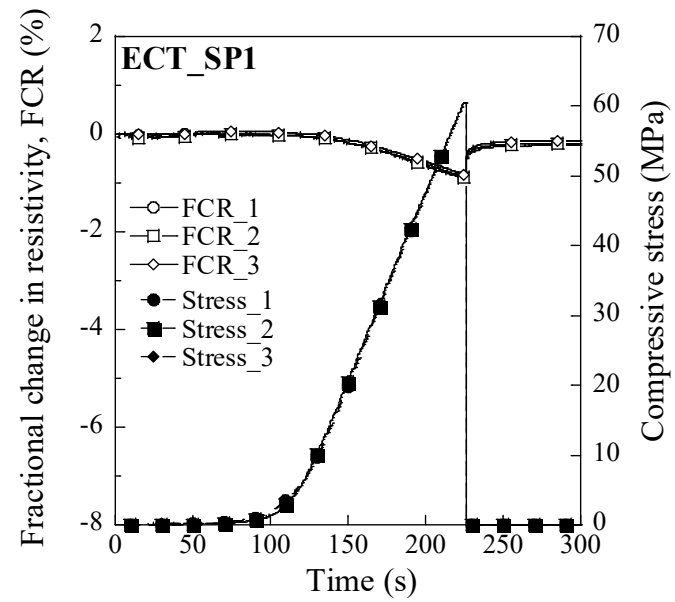
다) PCW_SP1



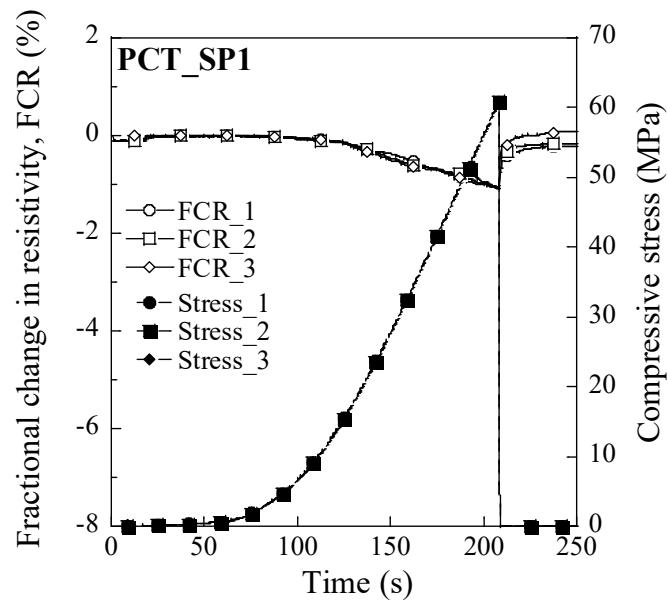
라) PCW_SP2



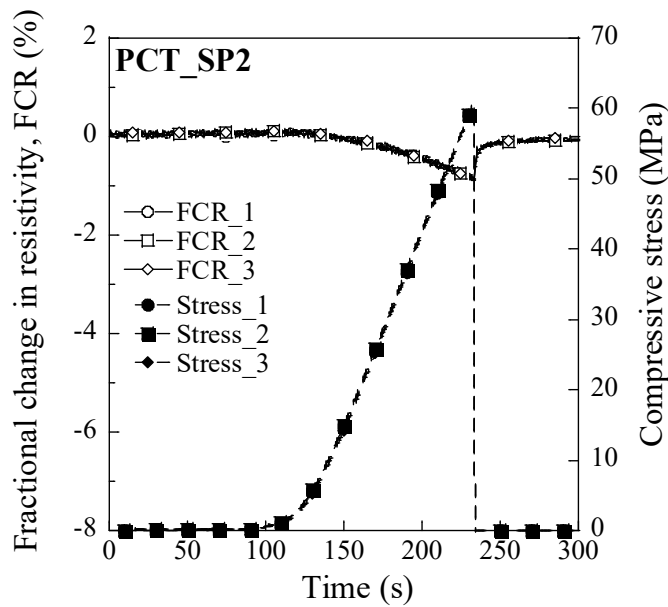
마) ECT_SP1



바) ECT_SP2



사) PCT_SP1



아) PCT_SP2

그림 5-10. 전극 종류에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 시험체 별 전기-역학적 거동

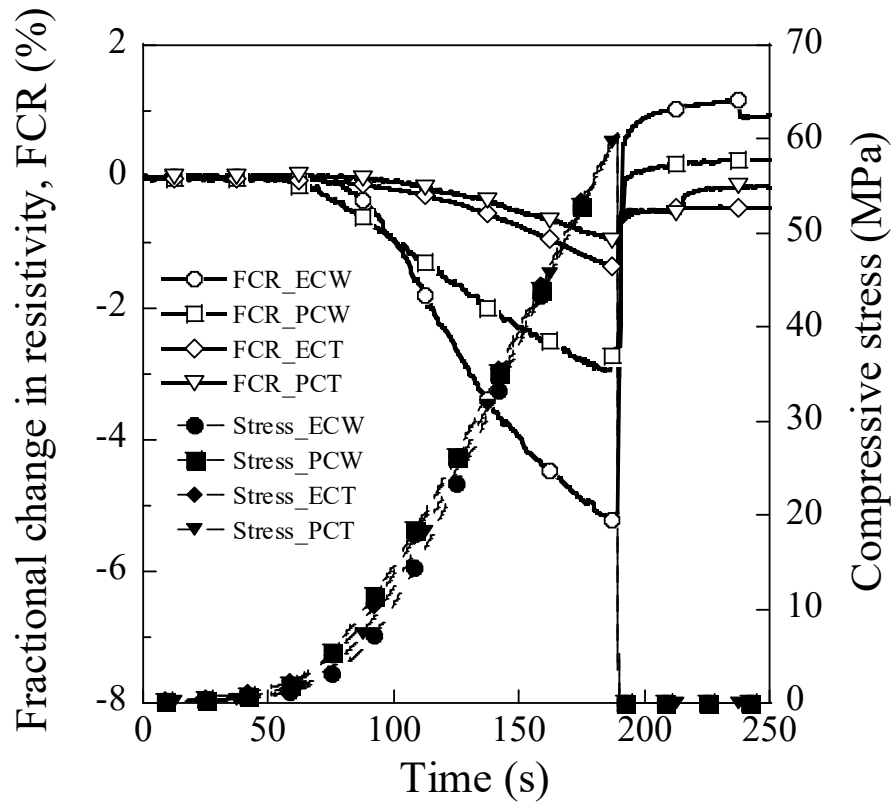


그림 5-11. 전극 종류에 따른 스마트 콘크리트 정착구 (Type 2)의 전기-역학적 거동

표 5-1. 전극 종류에 따른 스마트 콘크리트 정착구 (Type 2)의 전기 저항률 변화

No.	SPC	Electrical resistivity (kΩ-cm)			FCR(%)	
		ρ_0	ρ_{50}	ρ_{60}	$100(\rho_{50} - \rho_0)/\rho_0$	$100(\rho_{60} - \rho_0)/\rho_0$
ECW	SP1	78.48	74.94	74.76	-4.50	-4.74
	SP2	87.67	83.32	82.86	-4.96	-5.49
	Avg.	83.08	79.13	78.81	-4.73	-5.12
PCW	SP1	38.85	37.67	37.83	-3.03	-2.63
	SP2	43.12	42.08	41.97	-2.40	-2.67
	Avg.	40.99	39.88	39.90	-2.72	-2.65
ECT	SP1	72.00	71.49	71.35	-0.71	-0.91
	SP2	78.68	77.57	77.22	-1.41	-1.85
	Avg.	75.34	74.53	74.29	-1.06	-1.38
PCT	SP1	55.60	55.40	55.24	-0.37	-0.65
	SP2	76.74	76.26	76.06	-0.63	-0.89
	Avg.	66.17	65.83	65.65	-0.50	-0.77

○ 결과 분석

스마트 콘크리트 정착구 설계(안) Type 2를 바탕으로 제작된 스마트 콘크리트 정착구의 압축 하중 크기에 따른 전기저항률 변화 거동을 조사한 결과, 하중 성능 감지가 가능한 Type 2 스마트 콘크리트 정착구가 Type 1보다 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 형상으로 적합한 것으로 판단된다. 또한, 전극 종류에 따른 하중 감지 성능을 비교하였을 때 구리와이어 메쉬 만을 매립형 전극으로 사용한 ECW 시험체가 가장 우수한 성능을 보였으나, 구리와이어 메쉬와 스테레오를 결합한 Plug-in 매립형 전극을 사용한 PCW 역시 우수한 전기-역학적 민감도를 보여 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구로 활용 가능한 것으로 판단된다.

A5.3 강연선 긴장력 상태에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 거동 조사

- 실험목적

실제 PSC 구조물에 대한 스마트 콘크리트 정착구의 긴장력 손실 모니터링 적용성을 검토하기 위해 강연선 긴장력 상태에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기저항을 변화 거동을 조사하였다.

- 실험 프로그램

강연선 긴장력 상태에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기저항을 변화 거동을 조사하기 위해, 스마트 콘크리트의 하중 감지 능력 평가 및 압축 하중 상태에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 민감도 평가 실험을 통해 최종적으로 도출된 Plug-in 매립형 전극이 적용된 스마트 콘크리트 정착구를 사용하였다.(그림 5-12 참조)

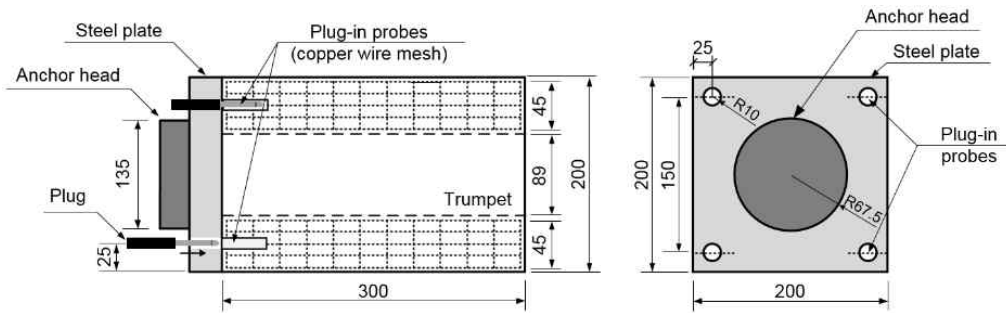


그림 5-12. 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)

실제 강연선 긴장력 상태에 따른 Plug-in 매립형 전극이 적용된 스마트 콘크리트 정착구의 긴장력 손실 감지능력을 평가하고자, 그림 5-00 와 같이 실제 PSC 구조물의 강연선 긴장에 사용되는 강연선, 정착판, 앵커헤드, 및 유압잭으로 구성된 500ton 급 정착구 정하중시험 장치[(주)신성피씨]를 사용하였다. 실험은 KS D 7002 (PC 강선 및 PC 강연선) 규격에서 제시한 PC 강연선 중 직경 15.2 mm에 1860 MPa의 인장강도를 갖는 강연선 7가닥을 사용하였으며, 이때 작용하는 최대 긴장력과 스마트 콘크리트 정착구가 받는 압축 하중은 표 5-2와 같다. 이때 f_{pu} 는 강연선의 인장강도; A_{strand} 는 강연선의 단면적; n_{strand} 는 강연선 개수; P 는 설계 긴장 하중; σ_c 는 스마트 콘크리트 정착구가 받는 압축 하중이다.

표 5-1. 강연선 설계 긴장력 및 스마트 콘크리트 정착구 압축 하중 크기

Strand type	f_{pu} (MPa)	A_{strand} (mm ²)	n_{strand} (ea)	P (kN)	σ_c (MPa)
SWPC7B	1860	138.7	7	1444.7	44.5

실험 시 스마트 콘크리트 정착구의 긴장력 손실 능력을 평가하기 위해 표 5-2와 같이 스마트 콘크리트 정착구가 받는 압축 하중이 45 MPa이 되도록 100 MPa/min 속도로 강연선을 긴장시킨 후 8단계에 걸쳐 하중을 제거해 실제 강연선의 긴장력이 손실 발생 과정과 유사하도록 설정하였다.

표 5-2. 강연선 긴장력 손실 모니터링을 위한 긴장력 감소 단계 구성

Step	P (kN)	σ_c (MPa)
1	1457.2	45
2	1295.3	40
3	1133.4	35
4	971.4	30
5	809.5	25
6	647.6	20
7	485.7	15
8	323.8	10

긴장력은 각 단계별로 2분간 유지하였으며, 긴장력 변화를 0.33 seconds/step 속도로 측정하였다. 전기저항률 측정은 AC 전기저항 측정 장치를 사용하여 시험체 고유주파수 지점에서의 시간에 따른 전기저항률 변화를 0.5 seconds/step 간격으로 측정하였으며, 전체적인 실험 전경은 그림 5-13와 같다. 실험을 위해 시험 장치에 스마트 콘크리트 정착구를 배치 후, 강연선 양 끝단에 정착 장치(정착판, 앵커헤드)를 사용해 강연선을 고정하였으며, 실험 시 후면 정착부와 연결된 유압잭이 후퇴하면서 강연선을 긴장시켜 스마트 콘크리트 정착구에 압축력을 발생시켰다.



그림 5-13. 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구 실험 전경

○ 실험결과

강연선 긴장력 변화에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 응답은 그림 5-14와 같이 나타났으며, 강연선 긴장력 도입 과정에서 긴장력이 증가함에 따라 스마트 콘크리트 정착구의 전기저항률이 선형적으로 감소하였으며, 재하된 긴장력이 손실되었을 때 전기저항률이 감소하는 거동을 나타내었다. 이를 통해 본 연구에서 개발된 스마트 콘크리트 정착구는 실제 PSC 구조물의 강연선 긴장력 손실을 효과적으로 모니터링 할 수 있는 기술인 것으로 확인되었다. 이때 강연선의 긴장력이 설계 긴장력 1457 kN에 도달 하였을 때 -1.5%의 전기저항률 변화율을 나타내었으며, 강연선 긴장 또는 손실 시 강연선 긴장력과 전기저항률 변화율 사이의 관계식은 식 (5-1) 과 식 (5-2)와 같이 나타난다.

$$P_{Tension} = 28 - 89,796 FCR, R^2 = 0.987 \text{ 식 (5-1)}$$

$$P_{Loss} = 231 - 81,962 FCR, R^2 = 0.992 \text{ 식 (5-2)}$$

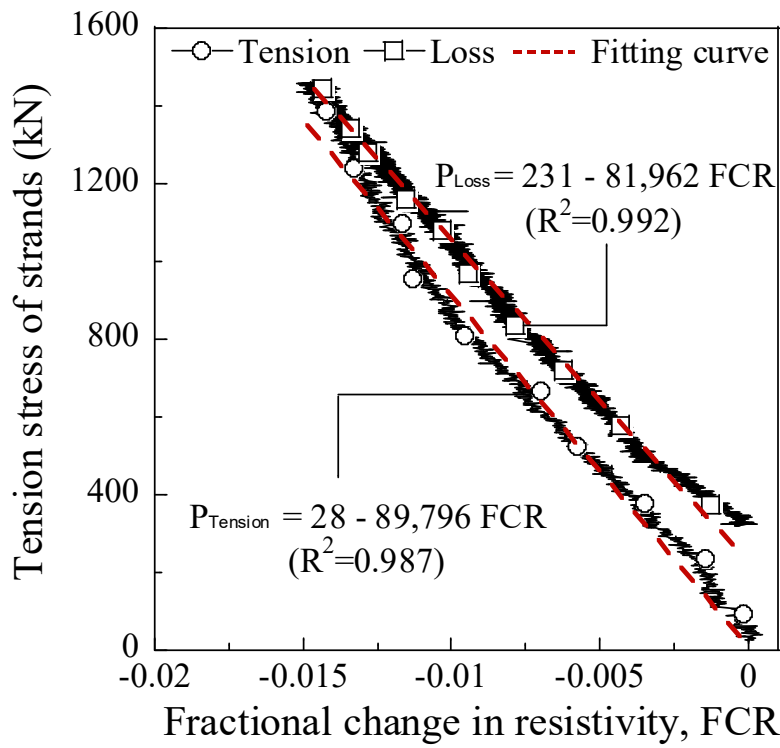
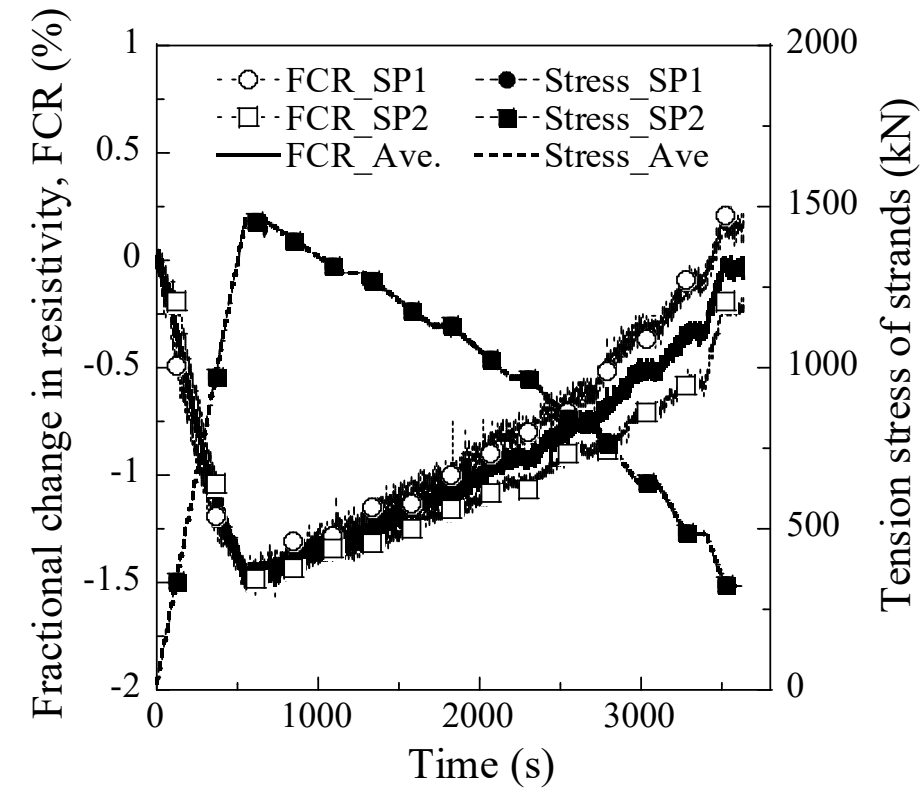


그림 5-14. 긴장력 변화에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기 저항률 변화 거동

표 5-3. 긴장력 변화에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기 저항률 변화

State	Step	SP1			SP2			Ave.	
	P	ρ	$\Delta\rho$	FCR	ρ	$\Delta\rho$	FCR	FCR	GF
	(kN)	(k Ω -cm)		(%)	(k Ω -cm)		(%)	(%)	(kN)
Tension	0	48.95	0.00	0.00	48.23	0.00	0.00	0.00	89,796
	324	48.71	-0.23	-0.48	48.14	-0.09	-0.20	-0.34	
	486	48.63	-0.32	-0.65	48.04	-0.19	-0.40	-0.52	
	648	48.53	-0.42	-0.86	47.94	-0.29	-0.60	-0.73	
	810	48.42	-0.53	-1.08	47.83	-0.40	-0.84	-0.96	
	972	48.36	-0.59	-1.20	47.74	-0.50	-1.03	-1.12	
	1133	48.33	-0.62	-1.27	47.65	-0.59	-1.21	-1.24	
	1295	48.28	-0.67	-1.37	47.60	-0.63	-1.31	-1.34	
	1457	48.20	-0.75	-1.53	47.53	-0.70	-1.46	-1.50	
Loss	1457	48.20	-0.75	-1.53	47.53	-0.70	-1.46	-1.50	81,962
	1295	48.32	-0.63	-1.29	47.58	-0.65	-1.35	-1.32	
	1133	48.42	-0.52	-1.07	47.67	-0.57	-1.18	-1.12	
	972	48.56	-0.39	-0.79	47.73	-0.51	-1.05	-0.92	
	810	48.61	-0.34	-0.69	47.80	-0.43	-0.90	-0.79	
	648	48.78	-0.17	-0.34	47.89	-0.34	-0.71	-0.53	
	486	48.90	-0.05	-0.09	47.96	-0.28	-0.57	-0.33	
	324	49.02	0.07	0.15	48.12	-0.11	-0.23	-0.04	

○ 결과분석

실제 PSC 구조물에 대한 스마트 콘크리트 정착구의 긴장력 손실 모니터링 적용성을 검토하기 위해 강연선 긴장력 변화에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기저항률 변화 거동을 조사한 결과, 강연선 긴장력 도입 및 손실을 본 연구에서 제시한 스마트 콘크리트 정착구로 평가 가능한 것으로 확인되었다. 하지만, 이전 연구단계에서 만능재료 시험기를 사용해 진행한 압축하중 크기에 따른 스마트 콘크리트 정착구 전기저항률 변화 거동 평가 실험 결과와 본 실험 결과와 비교하였을 때, 만능재료시험기를 사용한 경우 45 MPa (1457 kN) 압축 하중 기준 -2.48%의 전기저항률 변화율로 본 실험 결과인 -1.50% 보다 높게 측정된 것으로 확인되었다. 이는 실제 강연선 긴장을 위한 정착장치 구성, 강연선 긴장 속도, 강연선 긴장 시 발생한 편심 하중, 정착부에서의 긴장력 손실 등으로 인해 발생한 것으로 보이며, 이에 대한 영향성 조사를 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

A5.4 압축 하중 속도에 따른 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 거동 조사

- 실험목적

실제 PSC 구조물에 배치된 강연선 긴장 시 강연선의 종류, 길이, 개수 등과 긴장에 사용하는 유압잭 사양에 따라 긴장력 도입 속도가 결정되기 때문에 실제 스마트 콘크리트 정착구 적용성을 검토하고자, 하중 속도에 따른 스마트 콘크리트 및 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 민감도를 조사하고자 한다.

- 실험 프로그램

하중 속도에 따른 스마트 콘크리트 및 스마트 콘크리트 정착구의 전기저항률 변화 거동을 조사하기 위해, 구리와이어 메쉬를 전극으로 사용하여 제작한 50*50*50 mm 큐브형 압축 시험체와 Plug-in 매립형 전극이 적용된 200*200*300 mm 스마트 콘크리트 정착구 시험체를 사용하였으며, 하중 속도에 따른 압축 실험을 위해 만능재료 시험기를 사용하였다(그림 1-11, 그림 5-9 참조). 하중속도에 대한 영향성 평가를 위해 하중속도가 각각 0.5, 1.0, 2.0 mm/s인 경우에 대하여, 시험체 고유주파수 지점에서의 시간에 따른 전기저항률 변화를 계측하여 하중속도에 따른 전기저항률 변화 거동을 조사하였다.

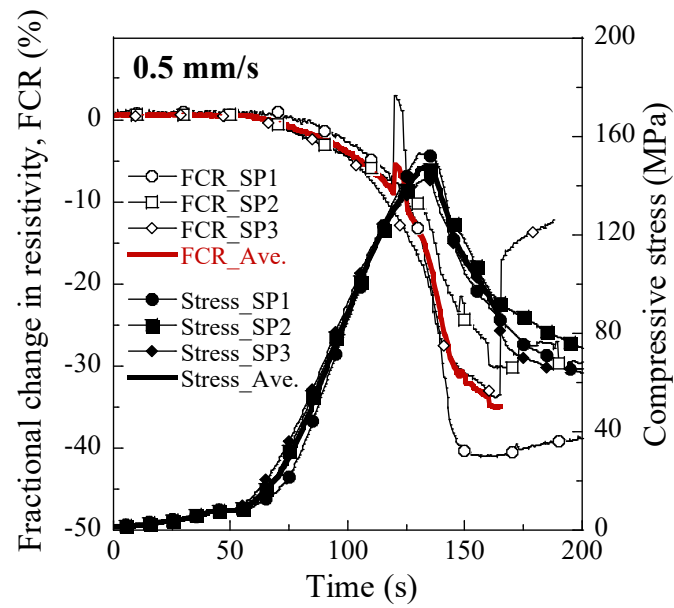
표 5-4. 하중 속도가 전기-역학적 민감도에 미치는 영향 조사를 위한 시험체 구성

Notation	Type	Loading rate (mm/s)
C_0.5	Cube	0.5
C_1.0		1.0
C_2.0		2.0
S_0.5	Smart concrete anchorage	0.5
S_1.0		1.0
S_2.0		2.0

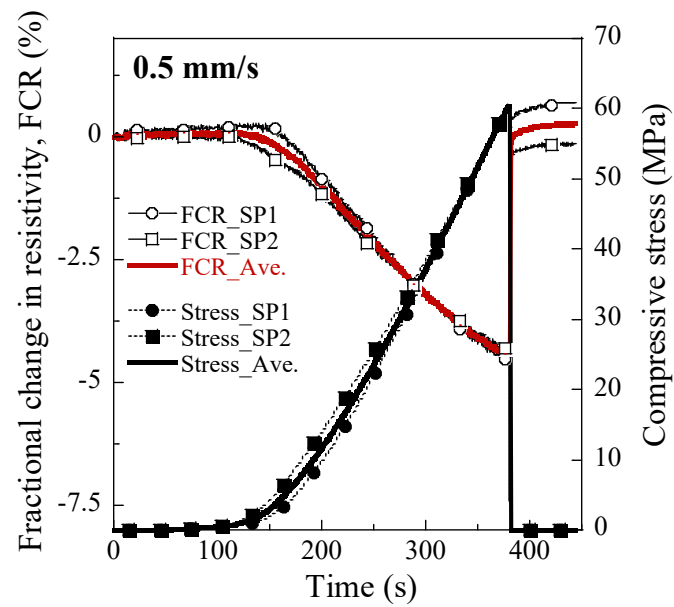
이때, 큐브형 압축 시험체는 파단까지의 전기저항률 변화를 측정하였으며, 스마트 콘크리트 정착구는 동일한 시험체를 바탕으로 60 MPa 압축 하중을 기준으로 하중 속도 변화에 대한 전기저항률 변화를 조사하였다.

- 실험결과

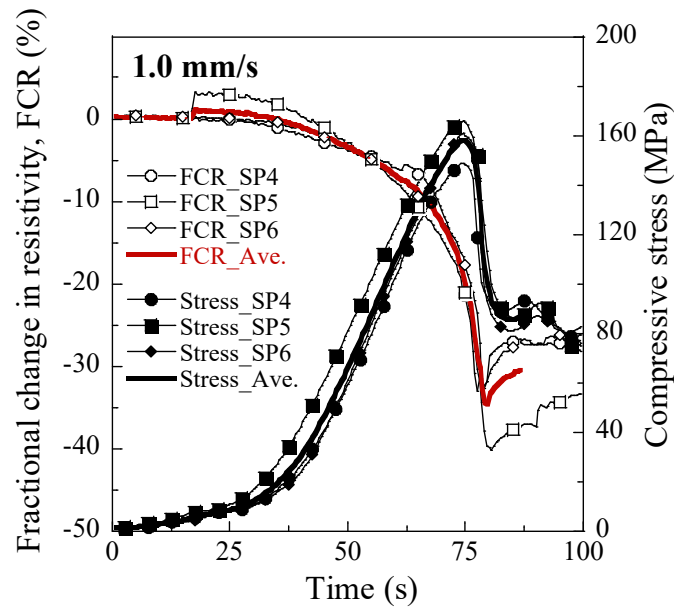
하중 속도에 따른 스마트 콘크리트 및 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 민감도 조사를 목적으로 하중 속도에 따른 시험체 별 전기저항률 변화 거동을 조사한 결과 그림 5-15, 표 5-5 와 같이 나타났다. 스마트 콘크리트와 스마트 콘크리트 정착구 실험 결과를 비교한 결과 0.5~2 mm/s 하중속도 구간에서는 하중 속도에 따른 전기저항률 변화 거동에 대한 영향성은 적은 것으로 확인되었다. 이때 0.5, 1.0, 2.0 mm/s 하중 속도에 따라 측정된 평균 전기저항률 변화 값에 대하여, 1) 큐브형 압축 시험체의 경우 최대 압축 하중 지점에서 각각 -16.07%, -19.14%, -19.77%; 2) 스마트 콘크리트 정착구의 경우 60 MPa 압축 하중 지점에서 각각 -4.43%, -4.32%, -4.49%의 전기저항률 변화율로 유사한 결과를 나타내었다.



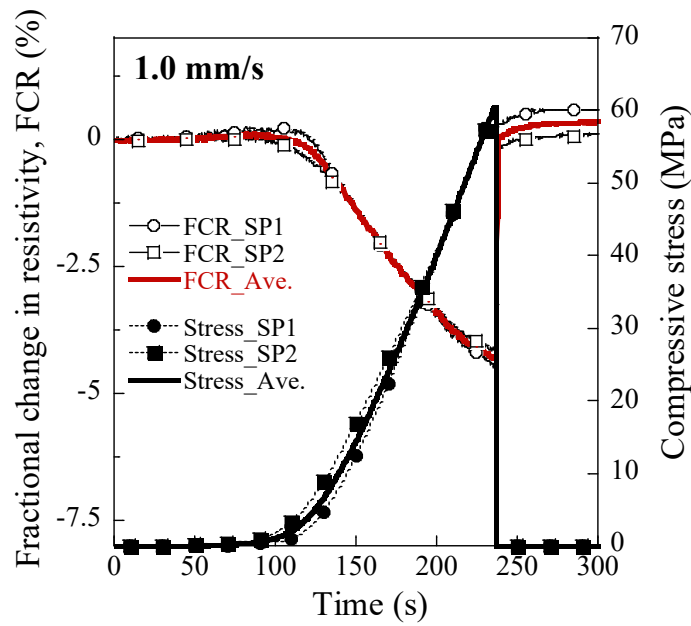
가) Cube_0.5 mm/s (C_0.5)



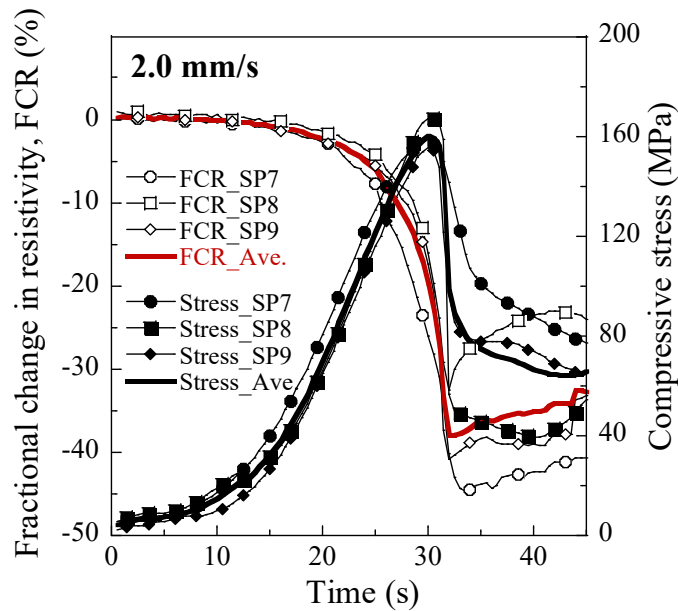
나) Concrete anchorage_0.5 mm/s (S_0.5)



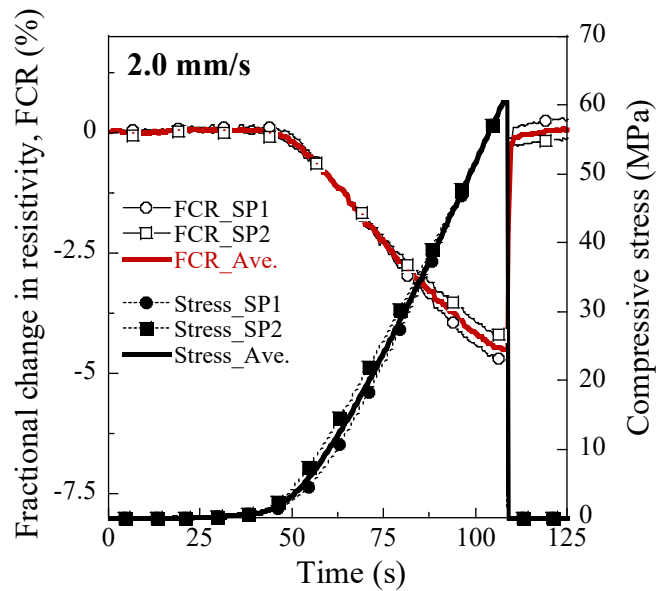
다) Cube_1.0 mm/s (C_1.0)



라) Concrete anchorage_1.0 mm/s (S_1.0)



마) Cube_2.0 mm/s (C_2.0)



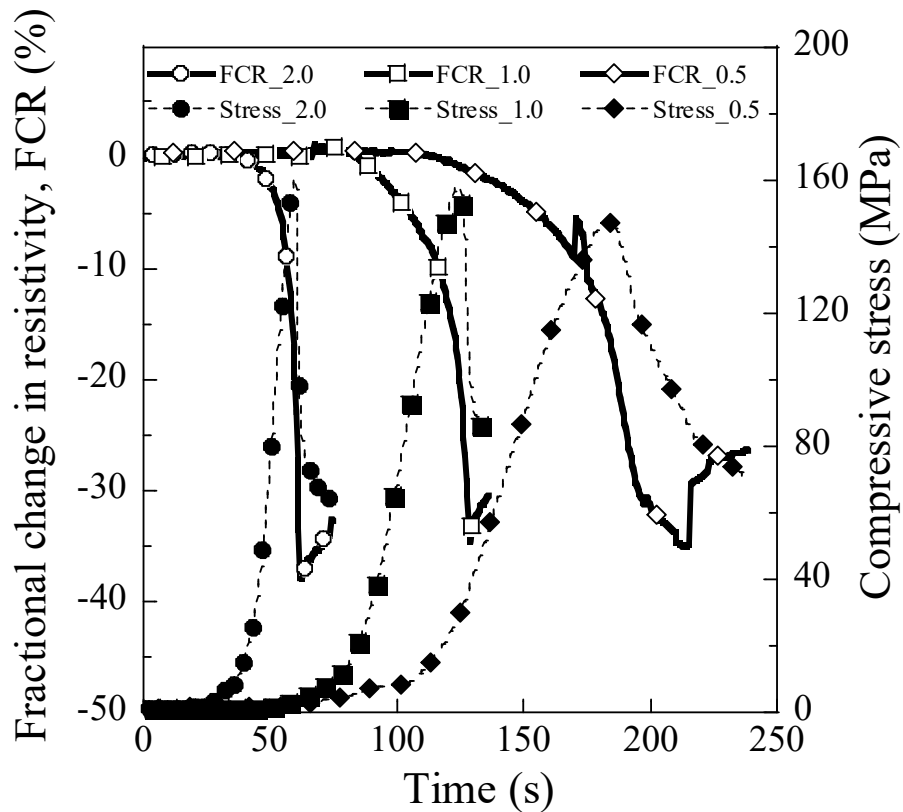
바) Concrete anchorage_2.0 mm/s (S_2.0)

그림 5-15. 하중 속도에 따른 스마트 콘크리트 및 정착구 시험체 별 전기-역학적 변화 거동

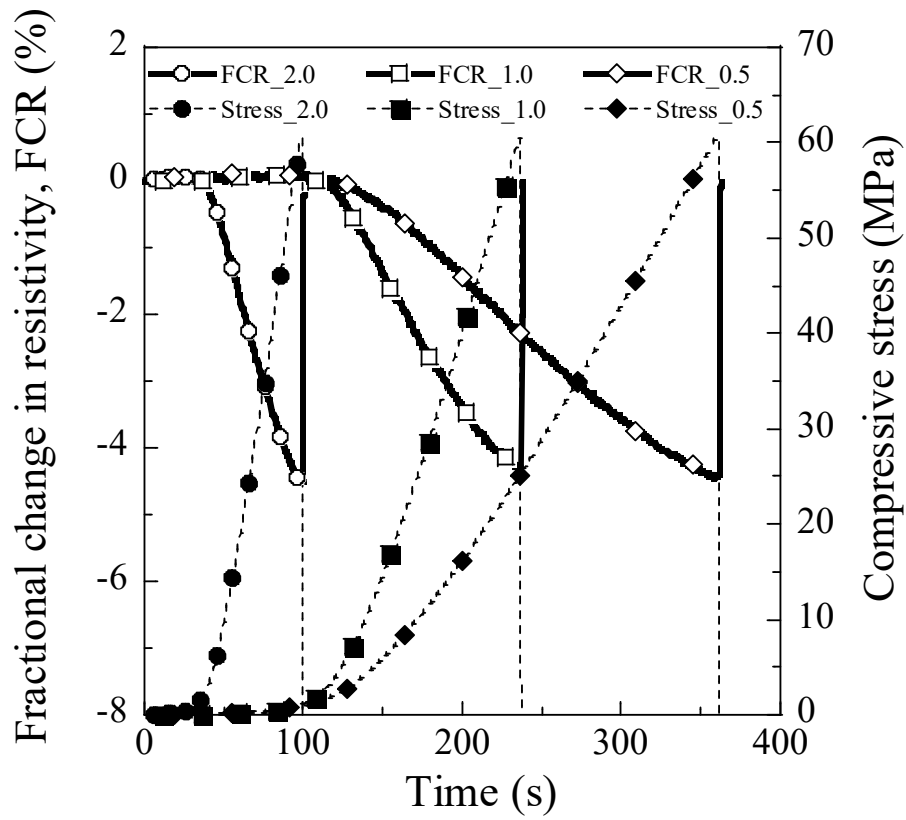
표 5-5. 하중 속도에 따른 스마트 콘크리트 및 정착구의 전기-역학적 변화

No.	Type	Loading rate (mm/s)	SPC	ρ_0	$\rho_{\max}$	$\sigma_{\max}$	FCR
				(k Ω -cm)		(MPa)	(%)
C_0.5	Cube	0.5	SP1	125.05	103.14	152.76	-17.52
			SP2	114.51	101.40	148.71	-11.45
			SP3	80.92	65.35	142.77	-19.24
			<i>Ave.</i>	<i>106.83</i>	<i>89.96</i>	<i>148.08</i>	<i>-16.07</i>
C_1.0		1.0	SP4	79.48	62.84	152.53	-20.93
			SP5	89.41	71.79	148.76	-19.71
			SP6	116.08	96.60	161.17	-16.79
			<i>Ave.</i>	<i>94.99</i>	<i>77.08</i>	<i>154.15</i>	<i>-19.14</i>
C_2.0		2.0	SP7	102.31	75.73	158.64	-25.98
			SP8	107.14	89.98	167.46	-16.02
			SP9	101.67	84.06	155.70	-17.32
			<i>Ave.</i>	<i>103.71</i>	<i>83.26</i>	<i>160.60</i>	<i>-19.77</i>
S_0.5	Smart concrete anchorage	0.5	SP1	64.05	61.14	60	-4.55
			SP2	65.61	62.78		-4.3
			<i>Ave.</i>	<i>64.83</i>	<i>61.96</i>		<i>-4.43</i>
S_1.0		1.0	SP1	62.46	59.66		-4.48
			SP2	65.47	62.75		-4.16
			<i>Ave.</i>	<i>63.97</i>	<i>61.46</i>		<i>-4.32</i>
S_2.0		2.0	SP1	63.1	60.11		-4.73
			SP2	65.56	62.77		-4.25
			<i>Ave.</i>	<i>64.33</i>	<i>61.45</i>		<i>-4.49</i>

○ 결과분석



가) Cube specimens



나) Concrete anchorage specimens

그림 5-15. 하중 속도에 따른 평균 전기-저항률 변화 거동

실제 스마트 콘크리트 정착구 적용성 검토를 위해 하중 속도에 따른 스마트 콘크리트 및 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 민감도를 조사한 결과, 하중 재하 속도가 스마트 콘크리트와 스마트 콘크리트 정착구의 전기-역학적 민감도에 미치는 영향은 적어 실제 구조물에 스마트 콘크리트 정착구 적용 시 긴장 장치에 종류에 상관없이 장비를 사용 할 수 있을 것으로 판단된다.

A5.5 스마트 콘크리트 정착구 주변 콘크리트의 전단 파괴 방지 방안 구축

- 조사 목적

최종적으로 도출된 긴장력 손실 모니터링 능력을 갖는 스마트 콘크리트 정착구를 설계를 바탕으로, 스마트 콘크리트 정착구와 주변 콘크리트의 물성차이로 발생할 수 있는 전단 파괴 거동에 대한 분석 및 전단 파괴 방지에 대한 스마트 콘크리트 정착구 설계 방안을 구축하고자 한다.

- PSC 구조물 정착부 파괴 거동 분석

일반적인 PSC 구조물의 경우 강연선 긴장을 통한 프리스트레스 힘으로 인해 강연선이 정착되는 PSC 구조물 단부의 정착부에 집중 적인 종방향 압축 응력이 발생하며, 종방향 압축 응력에 의해 정착부 위치에서 할렬 파열 파괴와 전단 파괴가 나타난다. 이러한 파괴를 방지하고자 PSC 구조물에는 정착부 지점에 할렬 파괴 방지를 위한 나선 철근과 전단파괴 방지를 위한 전단보강철근을 사용하고 있다. 본 연구에서 제시한 긴장력 손실 모니터링을 위한 스마트 콘크리트 정착구는 180 MPa 이상의 압축강도를 갖는 고강도 섬유 콘크리트를 사용함으로써 우수한 인장 균열 저항능력을 가지고 있어, 실제 PSC 구조물에 적용 시 강연선 정착부에 할렬 파괴 방지 목적으로 사용되는 나선 철근을 대체 할 수 있는 장점이 있다.

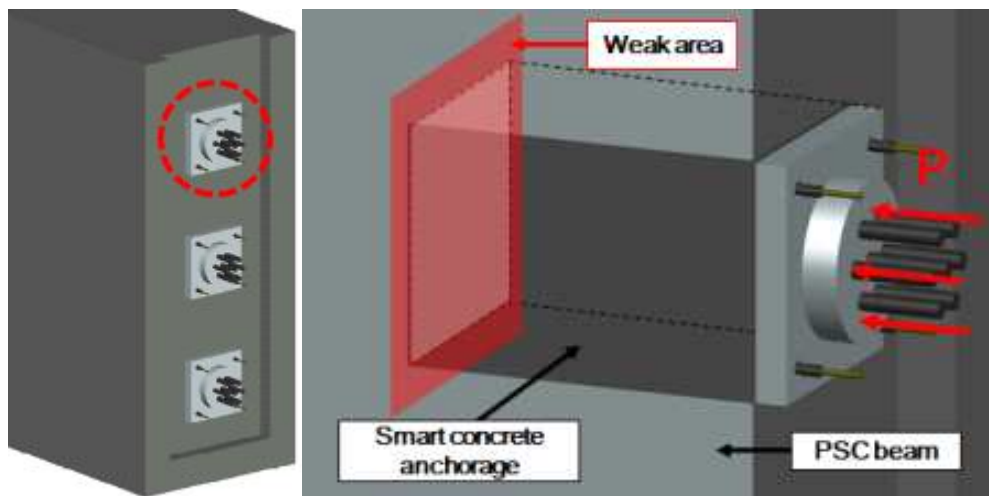


그림 5-16. 스마트 콘크리트 콘크리트 주변 전단파괴 발생 지점

하지만 스마트 콘크리트 정착구에 사용된 고성능 콘크리트에 비해 일반적으로 사용되는 PSC 구조물의 콘크리트는 낮은 인장강도를 가지고 있어, 스마트 콘크리트 정착구와 일반 콘크리트가 접하는 지점에서의 전단 파괴 발생 가능성 검토 및 이를 위한 스마트 콘크리트 정착구 설계 방안 구축이 필요할 것으로 판단된다.

- PSC 구조물 정착부 전단 파괴 방지 방안

본 연구에서 제시한 스마트 콘크리트 정착구는 직육면체 형식으로 PSC 구조물에 적용 시, 강연선 긴장력에 발생한 종방향 압축 응력은 1)스마트 콘크리트 정착구와 일반 콘크리트 사이 부착력에 의해 일반 콘크리트로 일부분의 압축 하중이 전달되며, 대부분의 압축 하중은 2) 스마트 콘크리트 정착구 바닥면과 일반 콘크리트 사이 접촉면을 통해 전달된다. 제시한 스마트 콘크리트 정착구 형상에 대한 PSC 구조물 전단 파괴 방지를 위해서는 1) 스마트 콘크리트 정착구와 일반 콘크리트 사이의 부착력에 의해 일반 콘크리트에서 인장력을 받는 지점, 2)스마트 콘크리트 정착구 바닥면과 일반 콘크리트 사이 집중 하중이 전달되는 지점에 대해서 집중적인 전단철근 보강이 필요하다. 하지만, 본 연구에서는 다양한 PSC 거더 종류에 대하여 각각의 형상에 맞는 스마트 콘크리트 정착구를 위한 전단철근 배치 방안을 제시하는 것 본 스마트 콘크리트 정착구 개발에 부적합 한 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 PSC 거더에 일반적으로 사용되는 보강철근 배치 형식에 적용 가능한 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)을 제시하고자 한다.

- PSC 구조물 정착부 전단 파괴 방지를 위한 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)

스마트 콘크리트 정착구 설계를 바탕으로 전단 파괴 방지를 위해서는 서는 스마트 콘크리트 정착구 바닥면과 일반 콘크리트 사이 접촉면을 통해 전달되는 압축 하중을 분산시킬 수 있는 설계가 필요할 것으로 판단된다. 압축 하중 분산에 가장 효과적인 방법은 스마트 콘크리트 정착구 크기를 향상시켜 콘크리트 정착구 자체가 받는 압축 하중을 감소시키는 방법이 있으나, 해당 방법은 PSC 구조물 단면을 향상시켜야 하는 한계점이 있어 실제 적용이 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 제시한 스마트 콘크리트 정착구 형태를 그림 5-16과 같이 스마트 콘크리트 정착구 단면이 바닥 면으로 갈수록 좁아지는 형태를 갖는 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)을 고안하였다.

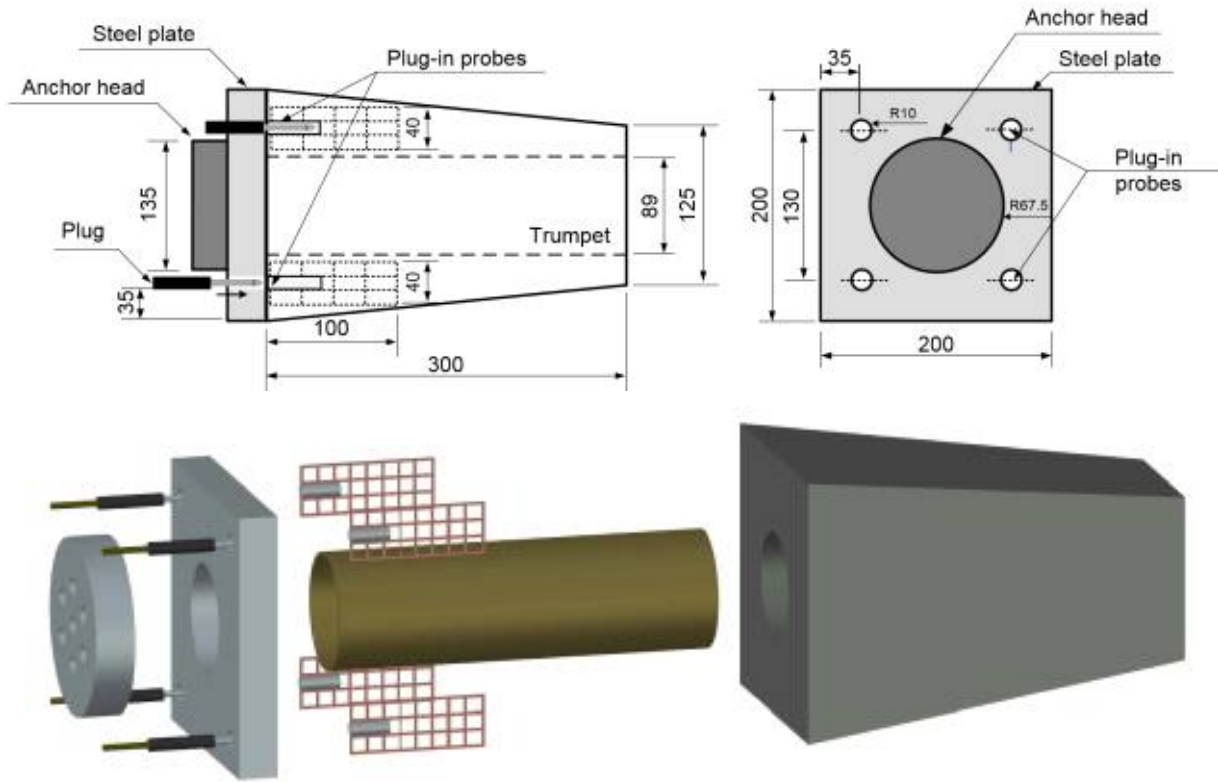


그림 5-16. 전단 파괴 방지를 위한 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)

제시된 스마트 콘크리트 스마트 콘크리트 정착부는 강연선 정착 장치가 위치한 상부 단면에서 일반 콘크리트와 접하는 하부 단면까지 깊이가 길어질수록 단면이 감소하도록 설계되었으며, 해당 설계로 인해 스마트 콘크리트 정착구에 작용하는 종방향 압축 하중이 정착구 측면을 통해 일반 콘크리트로 전달되어 결과적으로 정착구 하부 단면에 집중적으로 작용하는 하중을 분산 될 수 있도록 설계하였다. 또한, 압축력이 스마트 콘크리트 정착구의 측면과 일반 콘크리트 사이의 부착력을 향상시켜 스마트 콘크리트와 일반 콘크리트가 일체 거동 보일 수 있도록 설계하여, 스마트 콘크리트와 일반 콘크리트 사이의 물성차이로 인해 발생 할 수 있는 이상 거동을 최소화 하였다. 이때 전단 파괴 방지를 위한 스마트 콘크리트 정착구 설계(안)은 줄어든 단면을 고려하여 전기저항 측정을 위한 Plug-in 매립형 전극의 크기를 40 mm*100 mm가 되도록 수정하였으며, 이때 전극간 거리는 130 mm가 되도록 설계하였다.

- 결론

실제 PSC 구조물의 스마트 콘크리트 정착구 적용 시 스마트 콘크리트와 일반 콘크리트 사이의 물성차이로 발생 할 수 있는 전단파괴에 가능성을 고려하여, 전단파괴 방지를 위한 스마트 콘크리트 정착구를 설계하였다. 하지만, 실제 PSC 구조물에 스마트 콘크리트 정착구를 적용하기 위해서는, 사용하고자 하는 PSC 구조물 형상 및 전단설계 배치도를 고려하여 이에 맞는 스마트 콘크리트 정착구 설계 과정이 필요할 것으로 판단된다.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.