

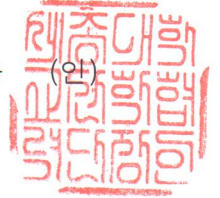
제 출 문

국토교통부 장관 귀하

‘SOC 시설물 재해·재난 방지를 위한 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 스마트 모니터링 시스템’(연구개발 기간 : 2016. 06. 22 ~ 2018. 06. 21) 과제의 최종보고서 보완본 1부를 제출합니다.

2018. 09. 11.

주관연구기관명 : 세종대학교 산학협력단 (대표자) 백 성 욱 (인)



주관연구기관책임자: 김동주

연구원: 안윤규

연구원: 김민경

연구원: 박준길

연구원: Ngo Tri Thuong

연구원: Le Huy Viet

연구원: 노현우

연구원: 최성익

연구원: 강만성

연구원: 장근영

연구원: 강명수

연구원: 김동욱

연구원: 이동준

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C114934-02	해당 단계 연구 기간	2016.06.22. ~ 2018.06.21.	단계구분	1/1 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	SOC 시설물 재해·재난 방지를 위한 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 스마트 모니터링 시스템			
	세부과제명				
연구책임자	김동주	해당단계 참여 연구원 수	총: 12 명 내부: 11 명 외부: 1 명	해당단계 연구개발비	정부:400,000 천원 기업: 0 천원 계:400,000 천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 12 명 내부: 11 명 외부: 1 명	총 연구개발비	정부:400,000 천원 기업: 0 천원 계:400,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	세종대학교 산학협력단 세종대학교 건설환경공학과			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
요약				보고서 면수	94
■ 섬유보강 시멘트 복합재료의 손상 또는 변형에 따른 자기감지 능력을 극대화하기 위하여 전기-역학적 민감도가 가장 높은 filler의 보강량을 조사한 결과 매트릭스 압축강도 별 초단유리섬유(milled-glass fiber, MGF)의 보강량이 시멘트 중량 비 5% 치환한 매트릭스에서 초단유리섬유를 치환하지 않은 매트릭스 보다 낮게는 1.7배, 높게는 4.6배까지 전기-역학적 변화량을 보임 ■ 비균질 물질인 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료로부터 실시간 전기-역학적 응답 계측을 위한 하드웨어 및 알고리즘 개발을 위해 AC 신호를 사용하여 다양한 주파수에 따른 임피던스 값을 계측하기 위해서 Frequency sweeping이 가능하도록 하드웨어를 구성함 ■ 전기-역학적 응답 민감도가 극대화된 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료의 실제 적용성 검토를 위하여 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료를 전체 적용하거나 일부분 코팅한 철근 콘크리트 빔을 제작하여 휨 인장 하에서의 전기-역학적 거동을 조사한 결과, 변위에 따른 전기저항률 감소량이 약 30-40 kΩ-cm로 두 경우 모두 자기감지 성능을 가짐을 확인함 ■ 따라서, 본 연구에서 개발한 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 스마트 모니터링 시스템은 신규 구조물과 기존 구조물 모두에 적용 가능한 스마트 재료라 할 수 있음					
색인어	한글	자가센싱, 스마트 건설재료, 모니터링, 실시간 알람, 재해재난			
	영어	Self-sensing, Smart construction material, Monitoring, Real-time alarm, Disaster			

< 국문 요약문 >

연구의 목적 및 내용	연구개발 목표는 “자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료 (Self-Sensing Fiber Reinforced Cementitious Composites, SS-FRCCs) 기반의 스마트 구조물 건전도 모니터링 시스템 개발” 을 통하여 궁극적으로 강건하고 내구성이 우수한 SOC 시설물을 만드는 것이다.
연구개발성과	1) 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료 (SS-FRCCs): 인장 하중 하에서 섬유보강 시멘트 복합재료의 특성인 변형경화 거동을 유지하면서, 손상 또는 균열이 발생함에 따른 전기저항 변화를 극대화시켜 전기-역학적 상관관계를 조사하여 손상 또는 균열의 발생정도를 진단할 수 있는 SS-FRCCs를 개발하고자 하였다. 자가센싱 성능이 우수한 SS-FRCCs의 개발에는 매트릭스의 전기-역학적 특성을 극대화시키기 위한 functional filler로 초단유리섬유(milled-glass fiber, MGF)가 도출되었으며, 도출된 초단유리섬유의 보강량을 선정하고 매트릭스 배합(안)을 개발하였다. 또한, 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료에 사용될 섬유보강재 선정 및 개발된 배합(안)에 따른 SS-FRCCs의 전기-역학적 성능평가가 이루어졌으며 최종적으로 SS-FRCCs의 실제 구조물에 적용성 검토를 위하여 실 구조물 크기의 철근 콘크리트 빔을 제작하고 그 전기-역학적 성능평가를 수행함으로써 SS-FRCCs의 적용방안을 도출하였다. 2) 실시간 전기 역학적 응답 계측 시스템 및 손상진단 알고리즘: 개발된 SS-FRCCs의 전기-역학적 응답을 실시간으로 계측 할 수 있는 하드웨어 및 손상 진단 알고리즘을 포함한 스마트 구조물 건전도 모니터링 시스템을 개발하고자 하였다. 실시간 전기-역학적 응답 계측 하드웨어와 개발된 시스템을 이용하여 SS-FRCCs의 균열을 검출하기 위하여 균열 검출 알고리즘을 개발하였으며, 개발된 시스템과 알고리즘을 이용하여 다양한 환경 요인인 온도와 습도에 따른 전기 임피던스 변화 양상을 관찰하였다. 이러한 환경 요인을 필터링한 후 SS-FRCCs의 균열을 성공적으로 검출할 수 있는 기술이 개발되었다. 또한, 추가적으로 멀티채널 데이터 취득을 통한 환경요인에 무관한 손상 진단이 가능한 다채널 전기 임피던스 계측 시스템을 개발하였으며, 이에 따라 추가적으로 균열의 위치도 파악 할 수 있는 기술을 개발하였다.
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	개발 기술은 새로 건설되는 SOC 시설물 (교량, 원자력 발전소 그리고 초고층 빌딩)의 재해 및 재난 방지를 위해 적용이 가능할 뿐 만 아니라, 기존 구조물의 보수/보강 시에도 적용이 가능하다. 그리고, 첨단 스마트 건설재료 기술 분야의 발전에 크게 기여할 것으로 기대되며, 관련 분야의 전문인력 양성의 발판이 될 것이다. 궁극적으로 강건하고 내구성이 우수한 SOC 시설물의 건설을 통하여 사회적 안정성을 제고하는 효과가 기대된다.
핵심어 (5개 이내)	자가센싱 스마트 건설재료 모니터링 실시간 알람 재해 재난

< SUMMARY >

Purpose & Contents	The final goal of this project is to build robust, tough and durable civil infrastructure by developing "smart monitoring system for preventing catastrophic failure of civil infrastructure by using self-sensing fiber-reinforced cementitious composites (SS-FRCCs)".				
Development Results	1) Self-sensing fiber-reinforced cement composites (SS-FRCCs): The crack-sensitive SS-FRCCs were developed by investigating the correlation between electro-mechanical responses and cracks, while retaining the strain hardening behavior, which is characteristic of fiber reinforced cement composites, under tensile loads. To optimize SS-FRCCs' self-sensing performance, a milled-glass fiber (MGF) was adapted as a functional filler to maximize the electro-mechanical properties of the matrix, and the corresponding mixing criteria were also developed. According to the mixing criteria, the electro-mechanical performance of SS-FRCCs was experimentally investigated, and the corresponding real-scale reinforced concrete beam was manufactured and thoroughly tested for establishing the application plan to real structures. 2) Real-time electrical impedance data acquisition system and damage diagnosis algorithm: The instantaneous electrical impedance data acquisition system was developed to detect the cracks of the developed SS-FRCCs. Then, the environmental effect-free crack diagnosis algorithm was developed to detect the cracks of SS-FRCCs using the collected data in real-time. The performance of the developed system and algorithm were successfully investigated under varying temperature and loading conditions. Furthermore, the crack localization system and algorithm are additionally developed using the multiplexing system, making it possible to minimize false alarm caused by environmental effects as well as localize the crack.				
Expected Contribution	The developed technology can be applied to brand new civil infrastructures, e.g., bridge, nuclear power plant and high-rise building, to prevent their catastrophic failure. In addition, it can be used as repairing process for existing infrastructures. Moreover, it is expected that the developed technology can help cultivate human resources in the area of smart construction materials. Furthermore, the developed research would secure safety of our society by building robust, tough and durable infrastructures.				
Keywords	Self-sensing	Smart construction material	Structural health monitoring	Real time alarming	Disasters

< CONTENTS >

1. INTRODUCTION	7
2. BACKGROUND INFORMATION	9
3. RESEARCH PROGRAM	10
4. CONTRIBUTION OF PROJECT IN RESEARCH AREA	82
5. APPLICATIONS	85
6. INTERNATIONAL LITERATURE REVIEW	86
7. SECURITY OF RESEARCH OUTCOMES	88
8. REGISTERED FACILITIES AND EQUIPMENT	88
9. LABORATORY SAFETY	88
10. MAIN OBJECTIVES	89
11. FUTURE WORKS	90
12. REFERENCES	91

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	7
2. 국내외 기술 개발 현황	9
3. 연구 수행 내용 및 성과	10
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	82
5. 연구개발성과의 활용 계획	85
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	86
7. 연구개발성과의 보안등급	88
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	88
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	88
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	89
11. 기타 사항	90
12. 참고 문헌	91

제1장. 연구개발과제의 개요

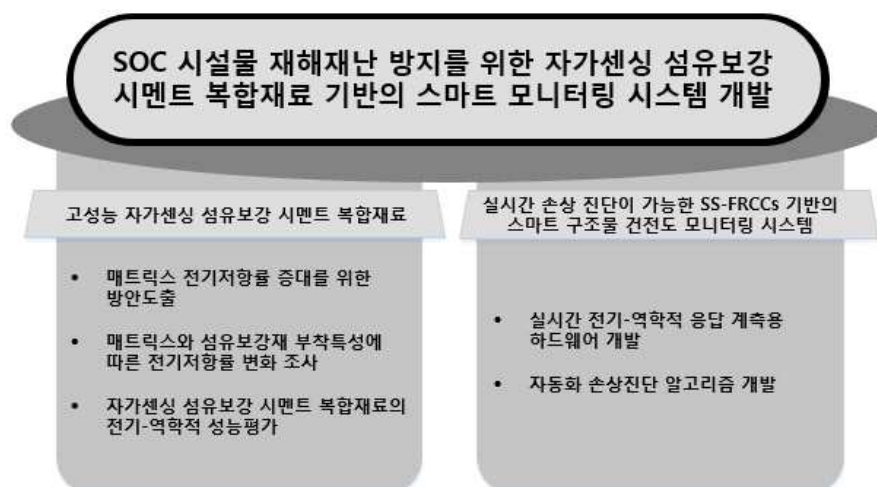
1.1절 연구개발 목적

- 사회기반 시설물의 유지관리를 위하여 정기적인 점검과 안전진단을 실시하고 있으나, 점검자의 주관적인 경험에 근거한 판단에 의한 진단으로 진단결과의 신뢰도에 한계가 있음
- 또한, 기존에 사용되고 있는 매립식 또는 부착식 센서들을 이용한 구조물 안전 모니터링의 경우에는 센서가 부착된 국부적인 위치에서만 구조물의 거동 측정이 가능하고, 센서의 수명이 구조물에 비해 매우 짧기 때문에 영구적인 모니터링이 불가능한 단점이 있음
- 뿐만 아니라, 센서와 구조물 사이의 호환성이 낮아 센서의 매립 또는 부착이 오히려 구조물의 내구성을 저하시킬 수 있음
- 본 연구에서 개발한 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료 (self-sensing fiber-reinforced cementitious composites, SS-FRCCs) 기반의 스마트 모니터링 시스템은 별도의 센서를 필요로 하지 않아 센서의 교체 없이도 영구적으로 사용할 수 있으며, 구조물 전체의 손상 정도를 파악할 수 있을 뿐만 아니라 시설물의 구조적 성능에 불리한 영향을 미치지 않는 구조물 안전 모니터링 시스템임

1.2절 연구개발의 필요성

- 최근 지진·태풍 등과 같은 자연재해와 구조물의 노후화로 인한 사회기반 시설물들의 붕괴가 인명 및 재산 피해로 이어져 사회적 불안감을 촉진시키고 있음
- 콘크리트 사회기반 시설물의 노후화의 주된 원인은 콘크리트 재료 자체의 취성적인 거동에 기인하고 있으며, 콘크리트 균열은 철근 부식을 가속화하여 구조물의 수명을 단축시킴
- 사회기반 시설물의 붕괴로 인한 시설물의 교체와 보수/보강 및 이로 인해 발생하는 경제적 손실 등은 장기간에 걸쳐 사회와 경제에 막대한 손실을 가져옴

1.3절 연구개발 범위



-
- “SOC 시설물 재해·재난 방지를 위한 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 스마트 모니터링 시스템 개발”을 위하여 총 2년 동안 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 거동을 조사하여 손상에 따른 자기감지 민감도를 극대화시키고, 실시간 손상 진단이 가능한 모니터링 시스템을 구축하였으며, 연구의 세부목표는 다음과 같음: 1) 전기-역학적 응답 민감도가 극대화된 고성능 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료 (SS-FRCCs) 개발, 2) SS-FRCCs으로부터 실시간 전기-역학적 응답을 계측 및 분석하기 위한 하드웨어 및 알고리즘 개발

1) 전기-역학적 응답 민감도가 극대화된 고성능 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료 (SS-FRCCs) 개발

- 균열 이전에 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기저항성을 증대시킴으로써, 균열 이후의 전기저항률 감소량을 극대화시키기 위하여 매트릭스의 전기저항을 증가시키는 방안 (물-시멘트 감소, 전기저항성이 높은 powder 첨가)을 도출함
- 균열 이후 전기저항률 감소량을 극대화시키기 위하여 균열 후에 균열 사이에서 전류가 흐르는 섬유보강재의 전기전도성 향상방안 도출함
- 매트릭스 내에 보강되는 섬유보강재와 모르타르 매트릭스 사이의 부착특성에 따른 전기-역학적 거동의 명확한 메커니즘 이해를 위하여 다섬유 인발 실험을 통한 전기-역학적 거동 조사함
- 도출된 배합에 따라 제작된 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료의 손상 또는 변형에 따른 전기저항률 변화를 조사하기 위하여 다양한 하중 하에서의 전기-역학적 성능과 온도 및 습도의 환경 영향성을 평가함
- SS-FRCCs의 실제 구조물에서 구조부재, 그리고 코팅식 센서로써의 적용성을 검토하기 위하여 철근 콘크리트 빔을 제작하여 휨 인장하중 하에서의 전기-역학적 거동을 조사함
- 뿐만 아니라, SS-FRCCs의 손상 또는 변형에 따른 전기저항률 응답 민감도를 향상시킬 수 있는 최적의 전극 개발을 위하여 다양한 재료를 사용한 부착식 전극을 개발하고자 함

2) 실시간 전기-역학적 응답을 계측 및 분석하기 위한 하드웨어 및 알고리즘 개발

- SS-FRCCs가 타설된 구조물의 상태를 평가하기 위하여, 실시간으로 임피던스 신호 계측이 가능한 하드웨어 시스템을 개발하여 모니터링 할 수 있는 시스템을 구축하고자 함
 - SS-FRCCs의 실시간 상태 평가 모니터링을 위해 필수적인 균열 검출 알고리즘을 추가로 개발한 후 인장 및 압축하중 하의 SS-FRCCs의 전기저항률 분석을 통해 초기 균열 발생 시의 감지능력 및 파괴 거동 시 전기-역학적 응답의 변화를 분석함
 - 임피던스 신호는 구조물의 상태변화뿐만 아니라 환경요인에 따라 신호의 변화에 영향성이 있다. 그렇기 때문에 개발된 시스템의 환경 변화로 인한 오보를 최소화하기 위하여 온·습도 조절이 가능한 항온항습기 및 만능재료시험기(Universal Test Machine, UTM) 등을 활용하여 다양한 온도 및 습도 그리고 하중 하에서의 임피던스 신호 변화를 분석함으로써 실제 환경 영향성을 평가함
-

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 사회기반 시설물의 안전진단 및 모니터링을 위한 국내외 기술 개발 수행 현황

- 부착식 또는 매립식 센서를 이용한 구조물 모니터링: 일반적으로 변형률 게이지, 압전 센서 등과 같은 부착식 또는 매립식 센서에 이용하여 구조물 안전 모니터링을 하고 있으며, 기존 센서의 한계를 극복하기 위하여 국내·외에서는 구조부재로써의 역할뿐만 아니라 구조물 상태를 감지할 수 있는 시멘트 재료 기반의 자기감지 시멘트 복합재료에 대한 연구 개발이 활발히 수행 중임
- Carbon계 재료를 사용한 self-strain sensing materials: 전기전도성이 우수한 carbon계 재료를 보강한 functional filler로써 보강한 시멘트 복합재료의 손상 또는 균열에 따른 전기-역학적 거동 조사를 통한 자기감지 능력 조사에 대한 연구가 지속적으로 진행 중임
- 기타 functional filler를 이용한 자기감지 성능 평가: 자기감지 시멘트 복합재료에 사용되는 functional filler로써 PVA 섬유, 강섬유, nickel powder 등의 보강재를 사용한 시멘트 복합재료에 대한 자기감지 능력 평가에 대한 연구들도 활발히 진행되고 있음
- 전기적 측정방법을 이용한 구조물 모니터링:
 - 자기감지 시멘트 복합체의 전기-역학적 거동은 기본적으로 직류 (Direct Current, DC)에 대해서 조사되어왔지만 실시간 모니터링을 위해 polarization time을 최소화할 수 있는 교류 (Alternative Current, AC) 측정법에 대하여 활발히 조사되고 있음
 - North Carolina State University 등 많은 해외 연구소에서 전도성 페인트를 콘크리트 표면에 코팅하여 콘크리트 표면에서 발생하는 균열과 손상을 감지하는 “Sensing skin” 기술을 수행하고 있음. 뿐만 아니라, The University of Michigan에서는 센서와 데이터 수집장치 사이 연결이 따로 필요 없는 무선센서 개발을 위한 연구가 진행되고 있음
 - 국내에서도 압전소자를 이용한 매립형 센서 또는 초음파를 활용한 비접촉식 센서 개발에 관한 연구가 진행 중임

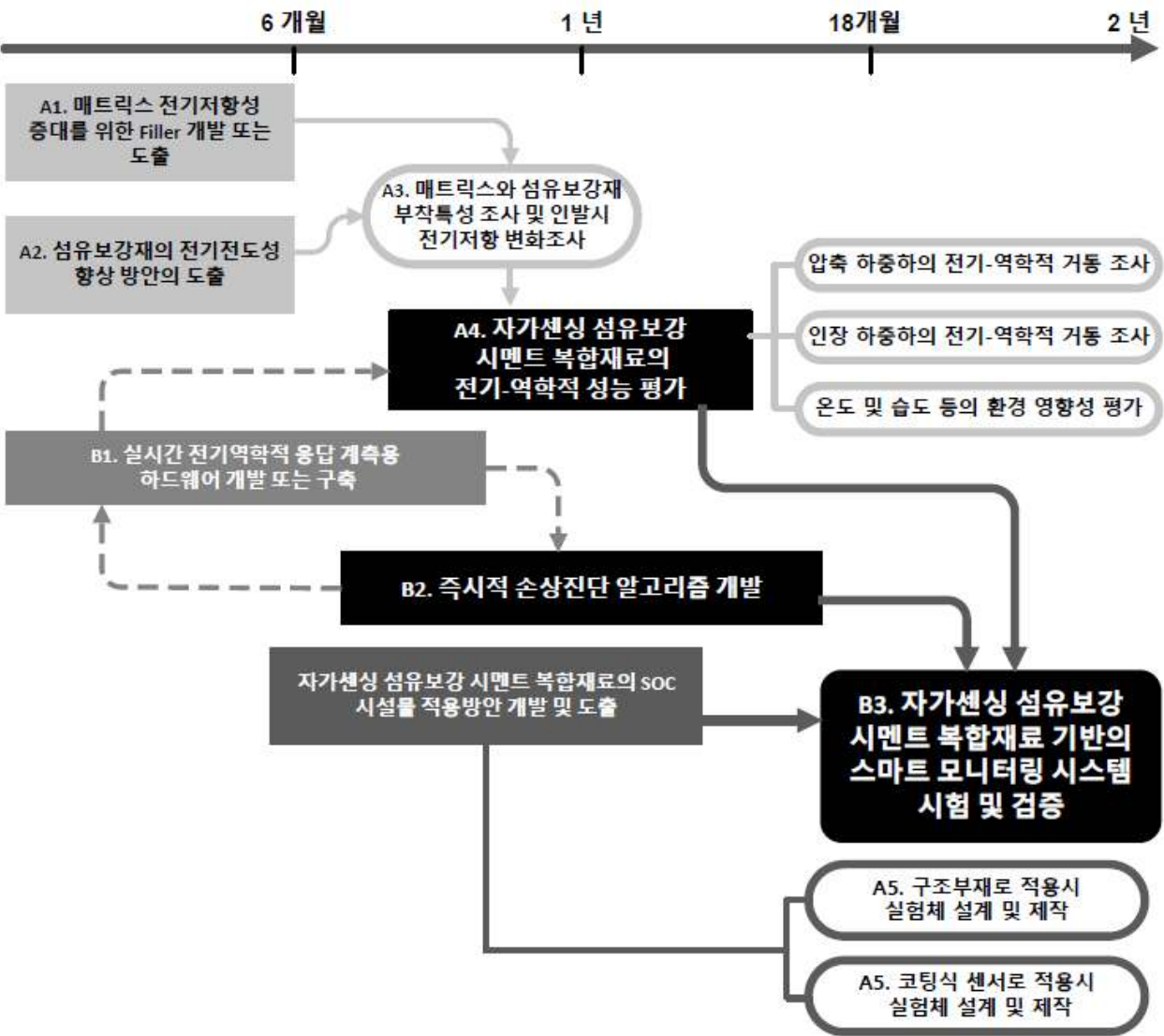
2. 현재 국·내외 구조물 모니터링에 사용되고 있는 기술 개발 분석 결과

- 자기감지 시멘트 복합체의 손상 또는 변형에 따른 성능을 평가하기 위해 전극개발에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 기존의 부착식 또는 매립식의 형태가 아닌 비접촉식 센서 개발에 대한 연구도 지속적으로 수행되고 있음
- 자기감지 시멘트 복합체 개발을 위한 functional filler의 사용과 연구개발이 광범위하게 진행되고 있으며, 자기감지 시멘트 복합재료로써 전기-역학적 특성을 가진 functional filler에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있음
- 자기감지 시멘트 복합체의 실 구조물 적용 가능성을 기반으로 하여 전기-역학적 신호계측에 대한 상용성을 가진 기술 개발에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있으나, 아직 실질적으로 구조물에 적용된 기술은 없는 실정임

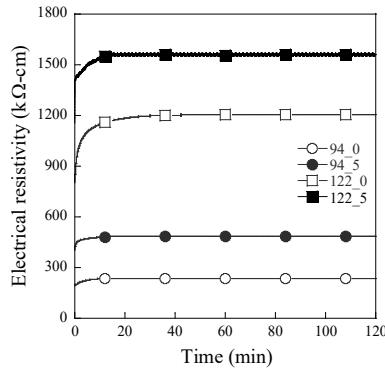
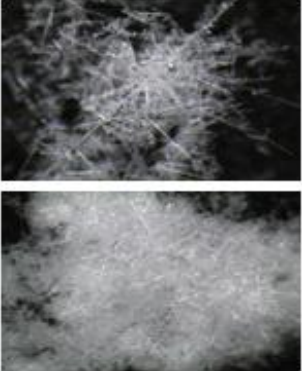
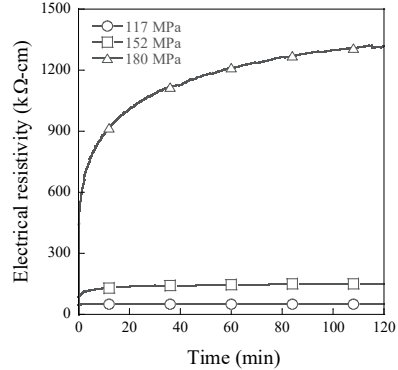
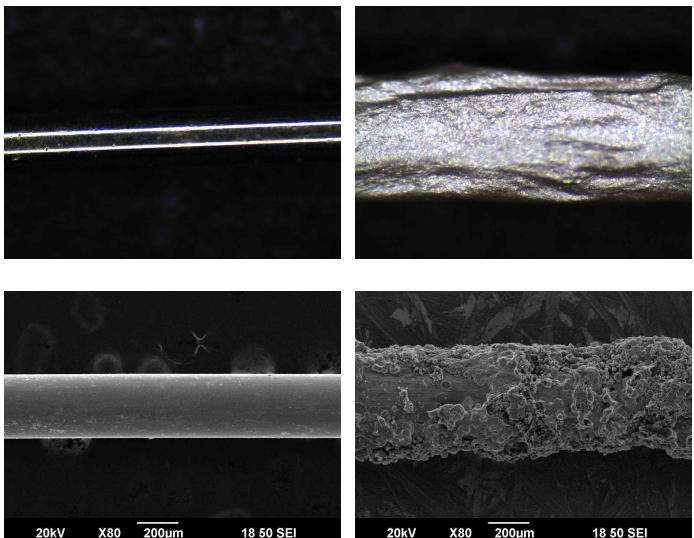
제3장. 연구 수행 내용 및 성과

3.1절 연구수행 전략 및 방법론

1. 연구수행 전략

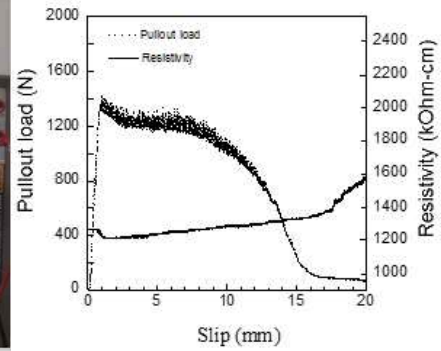


2. 연구수행 방법

연구 목표	주요 연구내용	수행방법
A. 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료 (SS-FRC Cs)	A1. 매트릭스 전기저항성 증대를 위한 filler 개발 및 도출	- 전기저항이 높은 <u>초단유리섬유를 치환한 SS-FRCCs</u>의 전기저항률 측정   <초단유리섬유를 치환한 SS-FRCCs의 전기적 거동> - 다양한 매트릭스 압축강도에 따른 SS-FRCCs의 전기저항률 측정  <매트릭스 압축강도에 따른 SS-FRCCs의 전기적 거동>
	A2. 섬유보강재의 전기전도성 향상 방안의 도출	섬유보강재로 사용된 강섬유의 표면에 전기전도성이 우수한 재료 (silver paste 또는 carbon nanotube)를 코팅하여 전기전도성 향상 정도 평가 

A3. 매트릭스와
섬유보강재
부착특성 조사
및 인발 시
전기저항 변화
조사

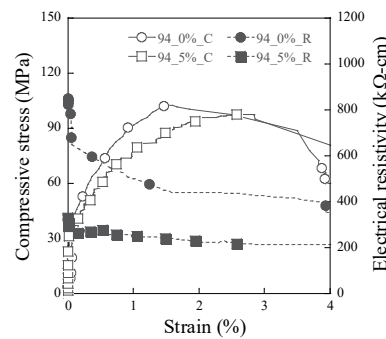
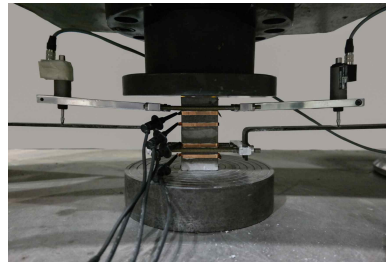
- 다섬유 인발 실험을 통하여 매트릭스와 섬유보강재 사이의 부착특성에 따른 전기-역학적 거동 조사



<SS-SFRCs의 인발 하중 하에서의 전기-역학적 거동>

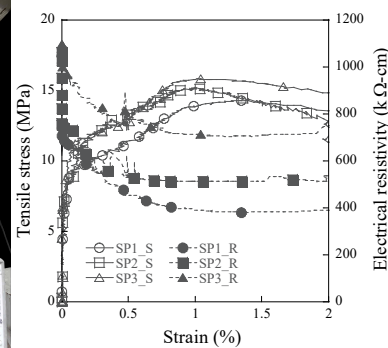
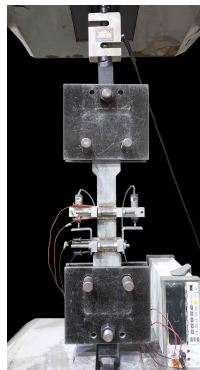
A4. 자가센싱
섬유보강 시멘트
복합재료의
전기-역학적
성능 평가

- 압축 하중 하에서의 전기-역학적 거동 조사

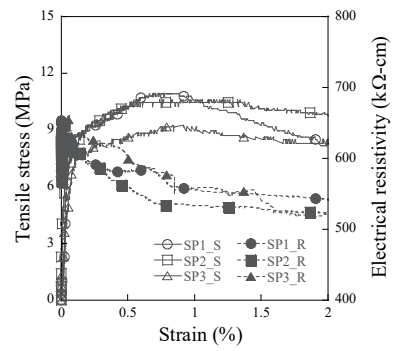


<고강도 콘크리트를 사용한 SS-SFRCs의 압축 하중 하에서의 전기-역학적 거동>

- 인장 하중 하에서의 전기-역학적 거동 조사

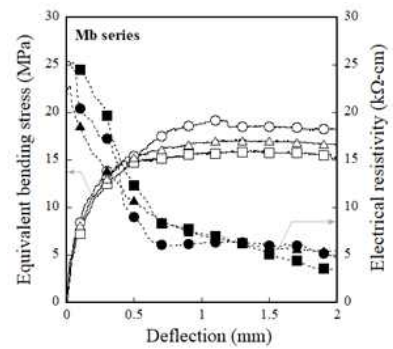


<고강도 콘크리트를 사용한 SS-SFRCs의 인장 하중 하에서의 전기-역학적 거동>



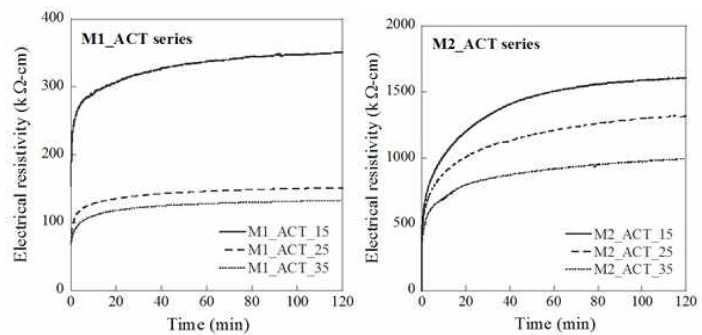
<초단유리섬유를 치환한 SS-SFRCs의 인장 하중 하에서의 전기-역학적 거동>

- 휨 인장 하중하의 전기-역학적 거동 조사



<초단유리섬유를 치환한 SS-SFRCs의 휨 인장 하중 하에서의 전기-역학적 거동>

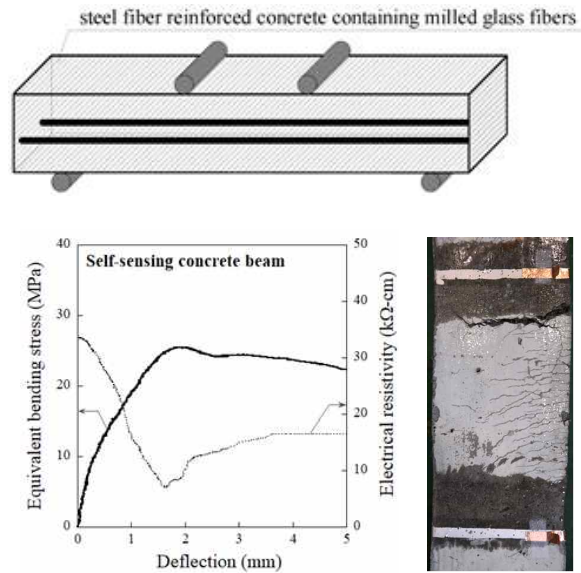
- 환경 변화 요인이 SS-FRCCs의 전기저항률에 미치는 영향성 평가



<초단유리섬유를 치환한 SS-SFRCs의 환경 변화 요인에 따른 전기적 거동>

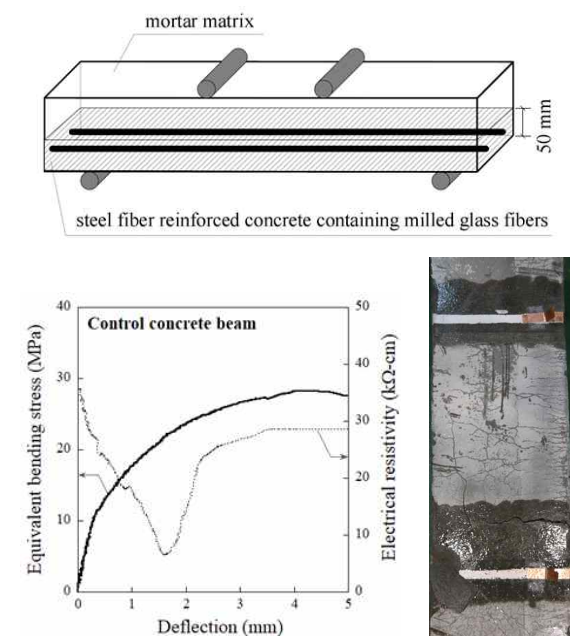
A5. 구조부재로
적용 시 실험체
설계 및 제작

- 구조부재로 적용시 실험체 설계 및 제작 : SS-FRCCs를 구조부재로써 실제 SOC 시설물에 적용 가능성 평가를 위해 SS-FRCCs를 전체적으로 철근콘크리트 빔에 타설하여 휨 인장 하중 하에서의 전기-역학적 거동 조사

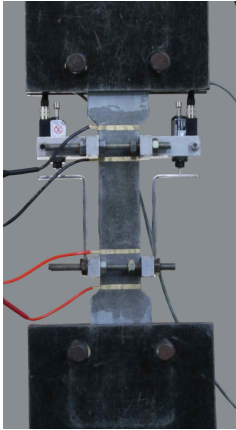
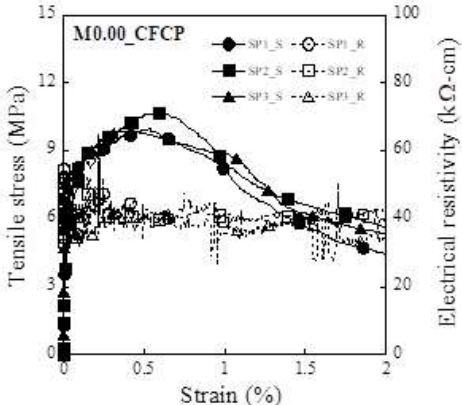
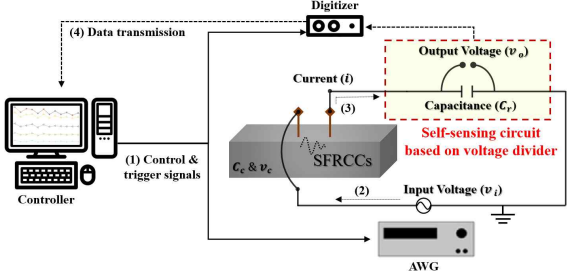
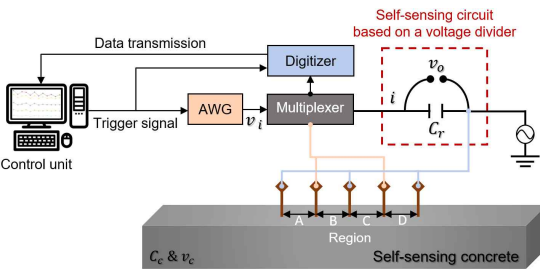


< 전체적으로 SS-FRCCs를 타설한 철근콘크리트 빔의 휨 인장 하중 하의 전기-역학적 거동 >

- 코팅식 센서로 적용 시 실험체 설계 및 제작 : SS-FRCCs를 코팅식 센서로써 실제 SOC 시설물에 적용 가능성 평가를 위해 SS-FRCCs를 인장 측에 부분적으로 철근콘크리트 빔에 타설하여 휨 인장 하중 하에서의 전기-역학적 거동 조사

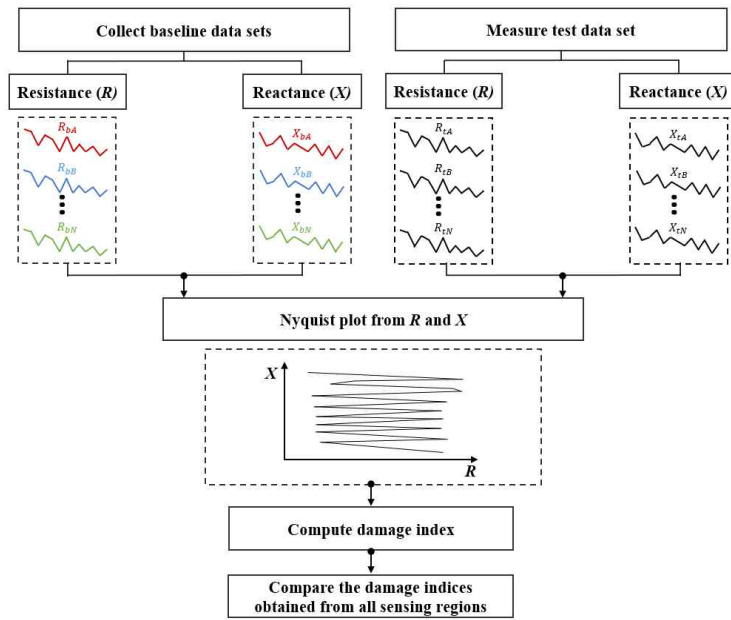


< 부분적으로 SS-FRCCs를 타설한 철근콘크리트 빔의 휨 인장 하중 하의 전기-역학적 거동 >

	A5. 코팅식 센서로 적용 시 실험체 설계 및 제작	전기-역학적 신호 계측을 위하여 전기전도성이 뛰어난 carbon tape와 copper film을 이용하여 부착식 전극을 개발하고자 전극을 제작하여 인장 하중 하에서의 전기-역학적 거동을 조사   < Copper film > < Carbon tape >   < 개발된 전극의 인장 하중 하에서의 손상 감지 성능 평가 >
B. 실시간 손상 진단이 가능한 SS-FRCC s 기반의 스마트 구조물 건전도 모니터링 시스템	B1. 실시간 전기-역학적 응답 계측용 하드웨어 개발 또는 구축	- 실시간 전기-역학적 다채널 응답 계측용 하드웨어 개발  < 실시간 임피던스 신호 계측용 하드웨어 구성 > - 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 즉각적인 다채널 전기-역학적 응답 계측용 하드웨어 개발  < 다채널 전기 임피던스 신호 계측을 위한 자가센싱 회로 구성 >

B2. 즉시적
손상진단
알고리즘 개발

- 측정된 전기 신호를 통해 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 손상 확인을 위한 진단 알고리즘 개발



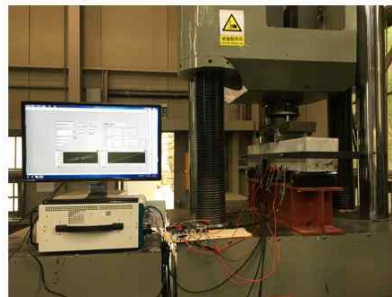
< 손상 검출을 위한 알고리즘 순서도 >

B3. 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 스마트 모니터링 시스템 시험 및 검증

- 개발된 전기-역학적 응답 계측 시스템과 손상 검출을 위한 알고리즘 성능 검증을 위한 실험실 규모와 real-scale 실험 진행



< 실험실 규모의 휨 실험 과정 >



< Real-scale 휨 실험 과정 >

3.2절 연구수행 내용 및 결과

1. 연구개발결과 요약

연구 목표	주요 연구내용	연구결과
A.자가감지 성능이 우수한 SS-FRCCs의 개발	A1. 매트릭스 전기저항성 증대를 위한 filler 개발 및 도출	- 초단유리섬유 치환율에 따른 전기저항률을 조사한 결과, 초단유리섬유를 5% 치환한 경우에 초단유리섬유를 치환하지 않은 경우보다 높은 전기저항률을 가졌으며, 이는 본 연구에서 도출하고자 하는 목적에 적합한 재료임을 확인함 - 높은 매트릭스 압축강도를 가지는 초고강도 콘크리트를 사용한 SS-FRCCs는 낮은 물-시멘트 비로 인하여 높은 전기저항률을 가짐
	A2. 섬유보강재의 전기전도성 향상 방안의 도출	- Silver paste의 코팅은 2회 코팅까지 전기전도성이 증가하다가 다시 전기전도성이 감소하는 거동을 보였지만, 표면코팅을 하지 않은 강섬유에 비해 모두 높은 전기전도성을 가짐 - 반면에, CNT를 코팅한 경우에는 3회 코팅까지 오히려 전기전도성이 감소하였으며, 4회 코팅부터 전기전도성이 증가하기 시작하여 5회 코팅에서 가장 높은 전기전도성을 보임
	A3. 매트릭스와 섬유보강재 부착특성 조사 및 인발시 전기저항 변화 조사	- 다섬유 인발 실험을 위한 시험체는 <u>모르타르 매트릭스에 49개의 강섬유를 보강하여 제작되었으며, 확정 균열은 1개, 2개, 그리고 자유균열로 총 3가지에 대하여 균열 개수가 증가함에 따라 전기저항 감소량이 증가하는 경향을 보임</u> - 섬유와 매트릭스 사이의 탈착이 일어나기 전에는 전기저항률이 거의 일정한 값을 가졌으며, 탈착이 진행되는 동안에는 전기저항률이 크게 감소하였고, 탈착이 완전히 일어난 이후에는 섬유가 인발되어 매트릭스의 공극의 증가로 인해 전기저항률이 점진적으로 증가함
	A4. 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 성능 평가	- SS-FRCCs는 인장, 휨인장, 그리고 압축 하중 하에서 균열이 발생함에 따라 전기저항이 감소하는 거동을 보였으며, 초기균열 발생 이전 (탄성구간) 뿐만 아니라 초기균열 발생 이후 (소성구간)에서도 균열 감지 능력을 보이는 것을 확인함 - 물-시멘트 비 감소에 따라 매트릭스 압축강도가 증가할수록 전기저항률이 증가하였으며, 매트릭스의 압축강도가 증가할수록 SS-FRCCs의 손상 또는 변형에 따른 전기저항률 감소량 또한 증가함 - 뿐만 아니라, 초단유리섬유를 치환한 SS-FRCCs 역시 손상 또는 변형에 따른 전기저항률 감소량 증가로 자기감지 능력이 향상되는 것을 확인함

	A5. 실제 SOC 시설물에 SS-FRCCs의 적용방안 도출	- 전체적으로 SS-FRCCs를 타설한 철근콘크리트 빔은 휨 인장 하중 하에서 손상 또는 변형에 따라 명확한 전기저항률의 변화를 보여줌으로써, 구재 부재로써의 역할뿐만 아니라, 구조물 모니터링을 위한 자기감지 재료로써의 역할 수행이 가능함을 확인함 - 인장 측에 부분적으로 SS-FRCCs를 타설한 철근콘크리트 빔 역시 휨 인장 하중 하에서 변형 또는 손상에 따른 전기저항률의 변화 거동이 명확하게 나타났으며, 코팅식 센서로써의 역할이 가능함을 보여줌
	A5. SS-FRCCs의 손상 또는 변형에 따른 전기저항률 응답 민감도를 향상시킬 수 있는 전극 개발	- 선정된 재료로 전극부의 copper film과 접촉부의 carbon tape로 부착식 전극을 개발됨 - 기존에 사용된 부착식 전극으로 전극부의 copper tape와 접촉부의 silver paste와 비교하였을 때, 초기 균열에서부터 최종 균열이후의 전기-역학적 거동에 민감한 기존에 사용한 copper tape의 부착식 방법과는 달리 탄성영역 부터 최종균열 이전까지의 미세 다수 균열에 의한 전기-역학적 민감도 높은 것으로 나타남
B. 실시간 손상 진단이 가능한 SS-FRCCs 기반의 스마트 구조물 건전도 모니터링 시스템	B1. 실시간 전기-역학적 응답 계측 하드웨어 개발	- 실시간 전기-역학적 응답 계측이 가능한 하드웨어 시스템을 구축하였으며, 구축에 사용된 장비는 Control unit, arbitrary waveform generator, digitizer, self-sensing circuit으로 구성함 - 구축된 시스템을 advance하여 다채널로 전기 임피던스를 계측가능하게 만들었으며, 그로 인해 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료의 손상 위치를 검출 가능성을 보임
	B2. 자동화 손상진단 알고리즘 개발	- 개발된 단채널, 다채널 전기 임피던스 계측 시스템을 이용하여 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 임피던스 신호 계측 후, 손상을 판별하기 위한 알고리즘 개발함 - 온도 및 습도 변화와 같은 환경변화에 따른 전기 임피던스 변화에 영향을 최대한 배제하기 위한 손상진단 알고리즘 개발함
	B3. 전문가 개입없이 환경 변인에 민감하지 않은 즉시적 자동화 손상 진단	즉각적인 전기-역학적 응답 계측 하드웨어 및 자동화 손상진단 알고리즘 검증을 위해 실험실 규모의 검증 실험 실시해 균열을 검출함 - 온도 및 습도와 같은 환경 영향에 의해 변하는 전기 임피던스 변화 경향성 파악을 위한 실험 실시했으며, 온도에 의한 전기 임피던스 값의 변화가 지배적이라는 것을 확인함 다채널 전기 임피던스 계측 시스템 개발 및 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 시험체에 균열 위치를 파악하기 위한 실험 실시해 균열의 위치를 검출함

2. 연구개발 주요내용

A.전기-역학적 응답 민감도가 극대화된 고성능 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합 재료 (Self-Sensing Fiber-Reinforced Cementitious Composites, SS-FRCCs) 개발

A1. 매트릭스의 전기저항 증대를 위한 방안도출

A1.1 매트릭스 압축강도에 따른 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기저항

- 실험 목적

매트릭스의 전기저항성을 향상시키는 방안으로 매트릭스의 압축강도에 따른 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기저항성 평가를 통해 최적의 매트릭스 배합을 도출하고자 하였다.

- 실험 프로그램

매트릭스 압축강도에 따른 강섬유 보강 콘크리트의 전기적 거동을 평가하기 위하여 총 3 가지 (117,152, 그리고 180 MPa)의 다른 압축강도를 가지는 매트릭스를 사용하였다 (Table 1 참조). 강섬유 보강은 모든 시험체에 대하여 long smooth 강섬유 1 vol.%와 medium smooth 강섬유 1 vol.%를 혼합하여 총 2 vol.%를 보강하였다. Long smooth 강섬유의 직경은 0.3 mm, 길이는 30 mm이며, medium smooth 강섬유의 직경은 0.2 mm, 길이는 19 mm이다 (Table 2 참조).

Table 1 - 매트릭스의 구성요소 및 배합비와 압축강도

Cement (Type)	Silica fume	Silica sand*	Silica powder	Fly ash	Super-plasticizer	Water	Compressive strength, f_{ck} (MPa)
1.0 (III)	-	1.00	-	0.15	0.009 ^a	0.35	117
0.8 (III)	0.07	1.00	-	0.20	0.040 ^a	0.26	152
1.0 (I)	0.25	1.10	0.30	-	0.067 ^b	0.20	180

a Type A: Superplasticizer contained 25% solid content

b Type B: Superplasticizer contained 30% solid content

* Silica sand with average grain diameter of 0.22 mm

Table 2 - 강섬유의 특성

Fiber type	Diameter (mm)	Length (mm)	Density (g/cc)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Electrical resistivity, ρ_f (k Ω -cm)
Long smooth	0.3	30	7.90	2000	200	2.06×10^{-8}
Medium smooth	0.2	19	7.90	2788	200	2.06×10^{-8}

시험체는 폭 50 mm, 두께 25 mm의 덩벨형 시험체를 사용하였다. 일반 모르타르 매트릭스인 117과 152 MPa의 시험체는 14일간 24°C에서 습윤 양생을 실시하였으며, 180 MPa의 높은 압축강도를 가지는 고강도 모르타르를 사용한 시험체는 3일간 90°C에서 고온 양생을 실시하였다. 전기저항 변화를 측정하는 방법은 4 탐침 저항성 방식 (4-probe method)를 이용하

였으며, 외부 전극 2개 사이의 거리는 110 mm, 전압을 측정하는 내부 전극 2개는 전류용 전극에서 안쪽으로 30 mm 거리에 위치하도록 하였다. 시험체가 완전히 건조된 후에 시험체 표면에 실버페이스트를 바르고, 그 위에 구리테이프를 부착하였다 (Fig. 1 참조).

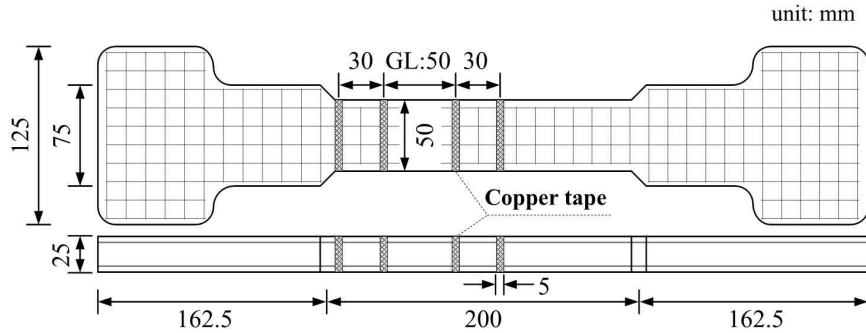


Fig. 1 - 시험체 형상

준비된 시험체에 4개의 전선을 연결한 후에 멀티미터 (Fluke 8846)의 전류원을 10 μ A로 하여 각 시험체의 전기저항을 측정하였다. 동일한 온·습도에서의 전기저항을 측정하기 위하여 시험체를 챔버에 보관하여 전기저항을 측정하였으며, 상대습도는 60%, 온도는 25°C로 유지하였다 (Fig. 2 참조). 전기저항의 측정은 전기분극화 현상으로 인한 거동을 함께 평가하기 위하여 120분동안 측정하였다.



Fig. 2 - 실험 전경

- 실험결과

강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기저항률은 매트릭스 압축강도에 큰 영향을 받는다 (Fig. 3와 Table 3 참조). 매트릭스 압축강도가 117 MPa에서 180 MPa로 증가할수록, 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기저항률은 증가하였다. 초기 전기저항률 (ρ_i)의 경우에는 46.52 k Ω -cm에서 389.08 k Ω -cm으로 약 736% 증가하였으며, 최종 전기저항률 ($\rho_{0,120}$)의 경우에는 50.83 k Ω -cm에서 1316.09 k Ω -cm으로 약 2489% 증가하였다. 120분동안의 전기저항률 변화 거동 또한 매트릭스 압축강도에 따라 상이한 결과를 보였다. 매트릭스 압축강도 117 MPa의 경우에는 전기저항 측정 후 30분에서의 전기저항률 ($\rho_{0,30}$)이 50.16 k Ω -cm, 60분에서의 전기저항률 ($\rho_{0,60}$)이 50.32 k Ω -cm로 $\rho_{0,30}$ 와 $\rho_{0,120}$ 사이의 전기저항률 차이가 약 0.67 k Ω -cm로

전기저항 측정 시작 30분 이후부터 전기저항 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 반면에, 매트릭스 압축강도 180 MPa의 경우에는 $\rho_{0,30}$ 이 1086.03 k Ω -cm, 그리고 $\rho_{0,120}$ 이 1316.09 k Ω -cm로 측정시간 120분 이후에도 여전히 전기저항이 여전히 증가하고 있음을 확인하였다.

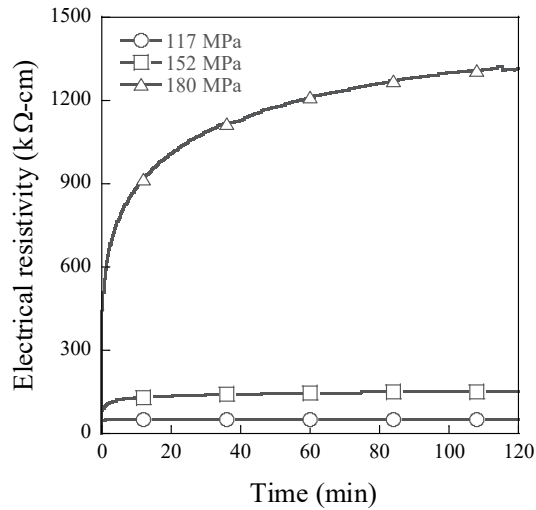


Fig. 3 - 매트릭스 압축강도에 따른 전기저항률 변화 거동

Table 3 - 매트릭스 압축강도가 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기저항률에 미치는 영향

Series	Electrical resistivity (k Ω -cm)					$\bar{\rho}$ (%)
	ρ_i	$\rho_{0,30}$	$\rho_{0,60}$	$\rho_{0,120}$	$\Delta\rho$	
117	46.52	50.16	50.32	50.83	4.31	9.25
152	74.47	139.75	146.33	151.61	77.15	103.59
180	389.08	1086.03	1211.00	1316.09	927.01	238.26

정확한 전기분극화로 인한 안정화 시간을 확인하기 위하여 실험결과를 이용하여 Matlab을 통해 안정화시간을 계산하였다. 그 결과, 매트릭스 압축강도 117, 152, 그리고 180 MPa에서의 안정화시간은 각각 8.24, 98.4, 그리고 120분으로 나타났다. 이를 통하여, 매트릭스의 압축강도가 낮을수록 전기저항률이 안정화되는 시간이 짧으며, 전기저항률의 안정화 시간과 전기저항률의 변화율 ($\bar{\rho}$)는 밀접한 연관이 있음을 확인할 수 있었다. $\bar{\rho}$ 가 클수록 안정화 시간이 길며, 매트릭스 압축강도가 높을수록 전기저항률이 안정화 시간이 길게 나타났다 (Fig. 4 참조).

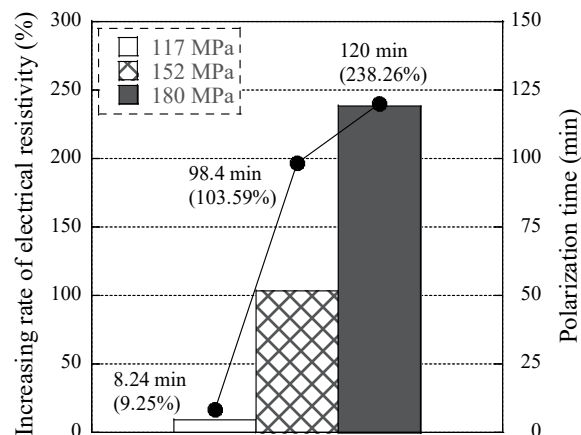


Fig. 4 - 전기저항률 변화율과 polarization time의 상관관계

- 결과분석

시멘트 복합재료의 전기저항률에 매우 큰 영향을 미친다고 알려진 물-시멘트비에 따른 전기저항률의 조사를 통하여 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기저항률을 향상시킬 수 있는 방안을 모색하고자 하였다. 물-시멘트비가 감소할수록 전기저항률은 증가하였으며, 뿐만 아니라 매트릭스의 압축강도가 증가함으로 고강도 콘크리트를 자기감지 강섬유 보강 시멘트 복합재료에 사용할 경우, 구조부재의 내구성 향상뿐만 아니라 자기감지 능력의 극대화까지 이끌어낼 수 있다.

A1.2 초단유리섬유 (Milled-glass fiber, MGF)의 치환이 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기저항에 미치는 영향

- 실험목적

고강도 모르타르 매트릭스가 아닌 일반 모르타르 매트릭스에서도 강섬유 보강 시멘트 복합재료가 높은 전기저항을 가질 수 있도록 하기 위하여 전기저항성이 높은 초단유리섬유를 시멘트 중량 대비 치환하여 초단유리섬유의 영향성을 평가하고자 하였다.

- 실험 프로그램

일반 모르타르 매트릭스 (95 그리고 122 MPa)에 대하여 초단유리섬유를 각각 시멘트 중량 대비 5%씩 치환하여 초단유리섬유를 치환하지 않은 경우의 강섬유 보강 시멘트 복합재료와 비교하였다 (Table 4 참조). 강섬유 보강은 모든 시험체에 대해서 이전과 동일하게 보강하였다 (Table 2 참조). 초단유리섬유는 평균 직경 0.0135 mm, 평균 길이 0.3 mm를 가지는 분말 형태의 유리섬유이다 (Fig. 5 참조).

Table 4 - 매트릭스의 구성요소 및 배합비와 압축강도

Cement (Type III)	Milled glass fiber	Silica fume	Silica sand*	Fly ash	Super-plasticizer	Water	Compressive strength, f_{ck} (MPa)
1.0	-	-	1.00	0.15	0.009	0.35	95
0.95	0.05	-	1.00	0.15	0.009	0.35	89
0.8	-	0.07	1.00	0.20	0.040	0.26	122
0.76	0.04	0.07	1.00	0.20	0.040	0.26	97

* Silica sand with average grain diameter of 0.43 mm

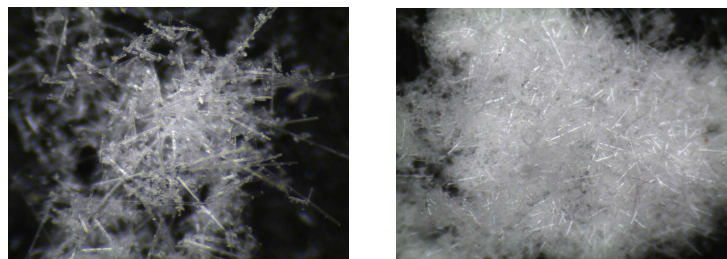


Fig. 5 - 초단유리섬유의 전자현미경 사진

시험체는 폭 50 mm, 두께 50 mm, 높이 100 mm의 직육면체 형상을 사용하였으며, 시험체가 경화된 후 14일간 24°C에서 습윤 양생을 실시하였다. 전기저항 변화를 측정하는 방법은 4탐침 저항성 방식 (4-probe method)를 이용하였으며, 외부 전극 2개 사이의 거리는 55 mm, 전압을 측정하는 내부 전극 2개는 전류용 전극에서 안쪽으로 15 mm 거리에 위치하도록 하

였다. 시험체가 완전히 건조된 후에 시험체 표면에 실버페이스트를 바르고, 그 위에 구리테이프를 부착하였다 (Fig. 6 참조).

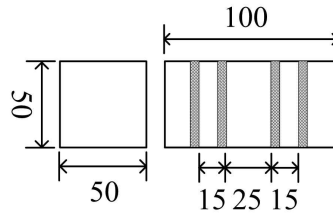


Fig. 6 - 시험체 형상

준비된 시험체에 4개의 전선을 연결한 후에 멀티미터 (Keysight 3458A)의 전류원을 5 μ A로 하여 각 시험체의 전기저항을 측정하였다. 동일한 온·습도에서의 전기저항을 측정하기 위하여 시험체를 챔버에 보관하여 전기저항을 측정하였으며, 상대습도는 60%, 온도는 25°C로 유지하였다 (Fig. 7 참조). 전기저항의 측정은 전기분극화 현상으로 인한 거동을 함께 평가하기 위하여 120분동안 측정하였다.

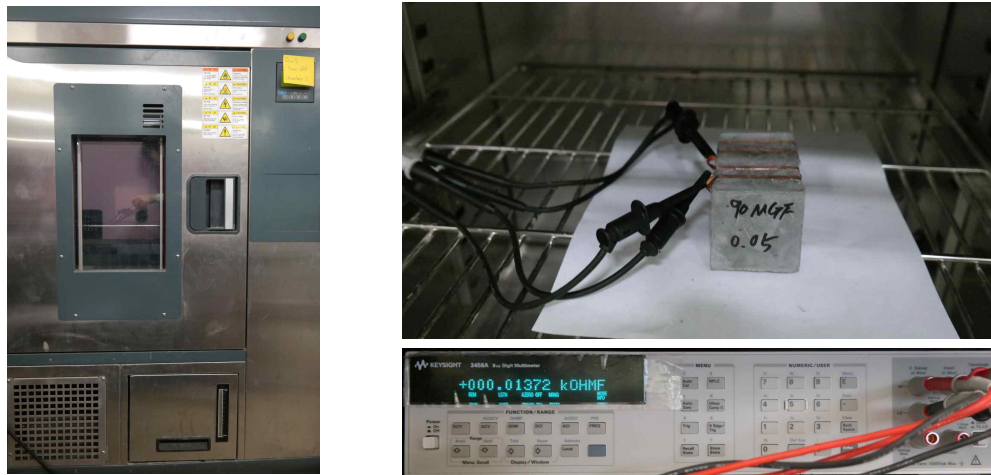


Fig. 7 - 실험 전경

시멘트 중량 대비 초단유리섬유의 치환은 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기저항률에 큰 영향을 미친다 (Fig. 8과 Table 5 참조). 94 MPa의 매트릭스 압축강도를 가지는 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 경우, 초단유리섬유를 치환하지 않을 경우에는 초기 전기저항률 (ρ_i)이 190.04 k Ω -cm, 최종 전기저항률 ($\rho_{0,120}$)이 236.44 k Ω -cm로 나타났다. 반면에, 초단유리섬유를 치환한 경우에는 ρ_i 와 $\rho_{0,120}$ 이 각각 400.49, 483.87 k Ω -cm으로 측정되었다. 94 MPa의 매트릭스 압축강도를 가지는 강섬유 보강 시멘트 복합재료는 초단유리섬유를 치환함에 따라 ρ_i 와 $\rho_{0,120}$ 가 각각 110.74%, 104.65% 향상되었으며, 122 MPa의 매트릭스 압축강도를 가지는 강섬유 보강 시멘트 복합재료는 44.11%, 29.81% 향상되었다.

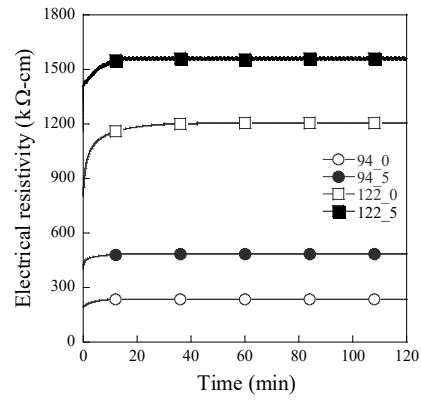


Fig. 8 - 초단유리섬유 치환 유무에 따른 전기저항률 변화 거동

Table 5 - 초단유리섬유의 치환이 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기저항률에 미치는 영향

Series	Electrical resistivity (kΩ-cm)					$\bar{\rho}$ (%)
	ρ_i	$\rho_{0,30}$	$\rho_{0,60}$	$\rho_{0,120}$	$\Delta\rho$	
94_0	190.04	236.41	236.43	236.44	46.40	24.42
94_5	400.49	483.84	483.82	483.87	83.38	20.82
122_0	800.27	1197.36	1203.29	1203.30	403.03	50.36
122_5	1153.28	1559.28	1556.94	1562.03	408.75	35.44

- 결과분석

SS-FRCCs의 모르타르 매트릭스에 전기저항이 높은 재료인 초단유리섬유의 치환은 모르타르 매트릭스 자체의 전기저항을 증가시켜 SS-FRCCs의 전기저항 또한 향상시킴을 확인하였다. 균열 이전의 SS-FRCCs의 전기저항 향상을 통하여 균열 후의 SS-FRCCs의 전기저항률 감소량을 극대화시키고자 하였으며, 균열에 따른 SS-FRCCs의 전기저항률 변화 거동은 section A4.에서 다룬다.

A2. 섬유보강재의 전기전도성 향상 방안 도출

- 실험목적

강섬유 보강 시멘트 복합재료의 균열 이후 전기저항률 감소량을 극대화시키기 위하여 강섬유의 전기전도성 향상을 위한 방안을 도출하고자 하였다.

- 실험 프로그램

강섬유의 전기전도성을 향상시키기 위하여 강섬유 표면 코팅재료로써 전기전도성이 높은 silver paste 또는 CNT (carbon nanotube)를 사용하였다 (Fig. 9 참조). Silver paste의 경우에는 강섬유 표면에 도포 후 1시간 건조시켰으며 총 5번 도포하였다. CNT 코팅의 경우에는 초음파 파쇄기 (sonicator)를 사용하여 CNT를 물의 5%만큼 물에 희석시킨 후, 강섬유를 CNT를 희석시킨 물에 1시간동안 담구어 두었다 (Fig. 10-a 참조). 그 후에 실온에서 1시간 동안 건조시켰으며, 이러한 과정을 총 5번 수행하였다. Silver paste와 CNT는 각각 총 5번씩 강섬유 표면에 코팅되었으며, 1번 코팅 시 마다 silver paste 또는 CNT를 코팅한 강섬유의 전기저항을 측정하여 최적의 강섬유 코팅 방법을 도출하고자하였다. Silver paste 또는 CNT 코팅에 따른 강섬유의 표면 검사는 실체현미경 (stereoscopic microscope)를 사용하였으며, CNT를 코팅한 경우의 강섬유는 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscope, SEM, JSEM-6390)을 통하여 표면 이미지를 추가적으로 촬영하였다 (Fig. 10-b, c 참조).



(a) Silver paste (b) Carbon nanotube (CNT)

Fig. 9 - 강섬유 표면 코팅 재료



(a) Sonicator (b) Stereoscopic microscope (c) SEM

Fig. 10 - 실험에 사용된 실험 장비

- 실험결과

강섬유의 표면에 silver paste 또는 CNT를 코팅한 경우의 전기전도성을 측정하고 최적의 코팅방법 도출을 위해 총 5회 코팅할 동안의 각 1회 당 표면검사와 전기전도성을 측정하여 전기전도율을 계산하였다 (Fig. 11-13 참조). Silver paste를 강섬유의 표면에 코팅할 경우, 각

5회 모두 코팅하지 않은 강섬유에 비해 높은 전기전도성을 보였으며, 2회 코팅에서 가장 높은 전기전도성을 가지는 것을 확인하였다. 반면에, CNT를 강섬유의 표면에 코팅할 경우에는 3회 코팅까지 전기전도성이 오히려 감소하였으며, 4회 코팅 이후부터 다시 증가하는 것을 확인하였고, 5회 코팅에서 가장 높은 전기전도성을 보였다.

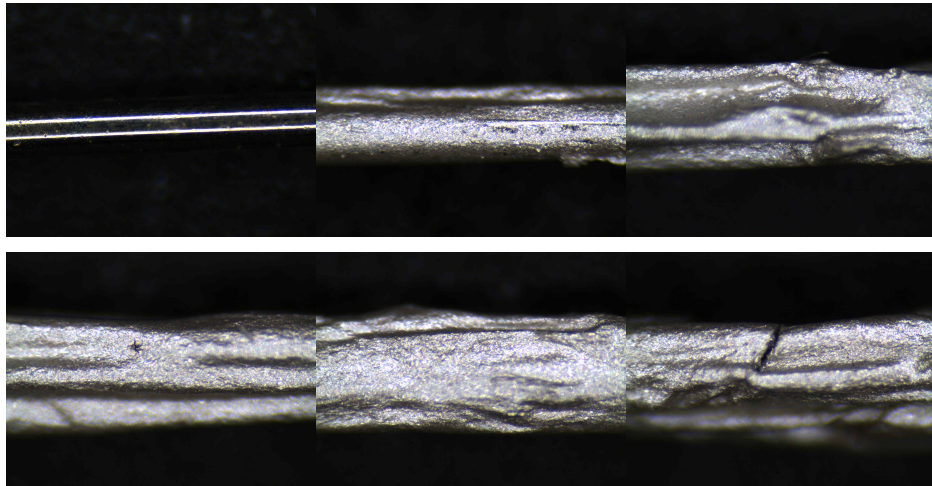
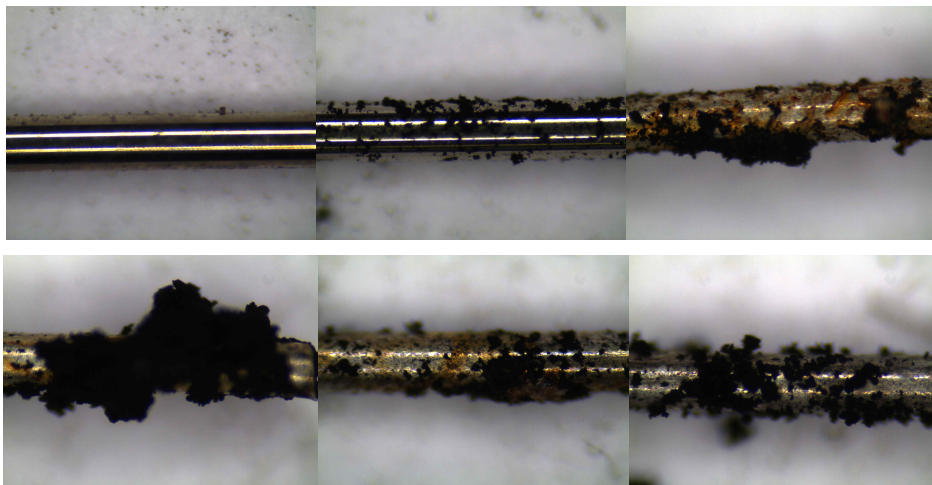
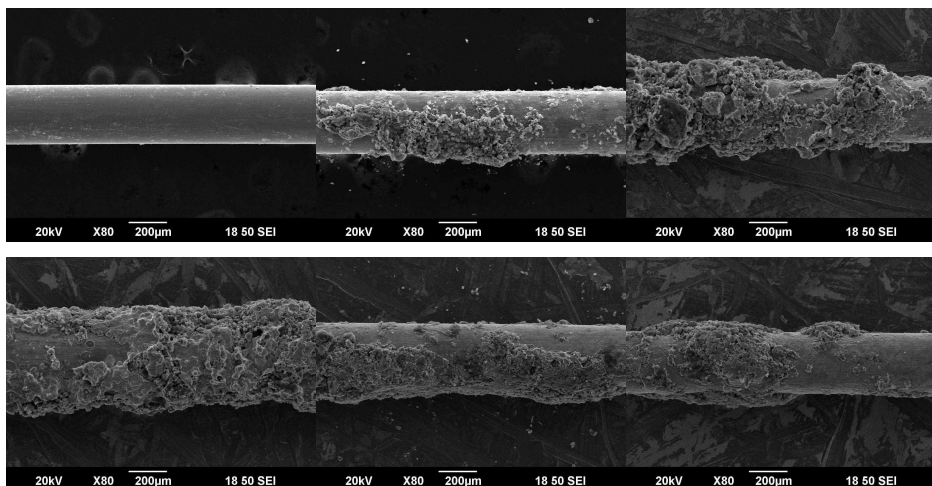


Fig. 11 - Silver paste를 코팅한 강섬유의 실체현미경 사진



(a) 실체현미경



(b) SEM

Fig. 12 - CNT를 코팅한 강섬유의 실체현미경 및 SEM 촬영 사진

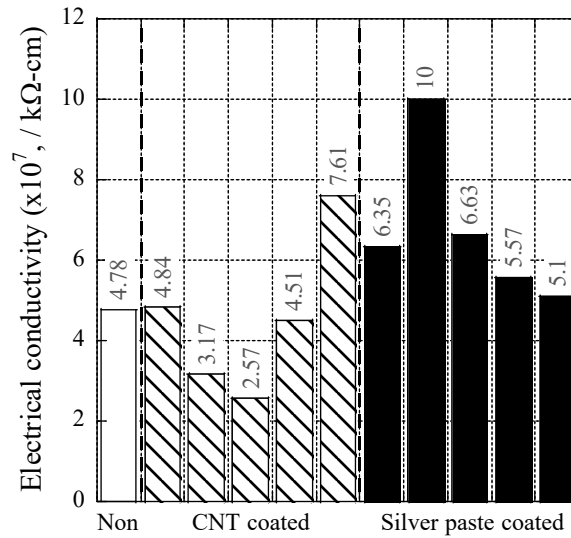


Fig. 13 - 강섬유의 표면 처리가 강섬유의 전기전도성에 미치는 영향

- 결과분석

강섬유의 표면에 CNT를 코팅한 경우의 코팅 횟수에 따른 전기전도성 변화는 CNT 자체의 전기전도성이 강섬유의 전기전도성보다는 낮으며 CNT의 코팅 과정 중에 강섬유가 부식되어 부식된 표면 위로 CNT가 코팅되면서 3회 이후부터 전기전도성이 다시 증가하는 것이라고 판단된다. 뿐만 아니라, silver paste를 2회 이상 코팅한 경우의 전기전도성 감소 또한 오히려 전기전도성을 떨어트리므로 기존에 사용하던 강섬유가 이미 우수한 전기전도성을 지니는 재료임을 감안하여 강섬유의 표면에 추가적인 코팅없이 사용하는 것이 가장 적합할 것으로 판단된다.

A3. 매트릭스와 섬유보강재 부착특성 조사 및 인발 시 전기저항 변화 조사

- 실험목적

다섬유 인발실험을 통하여 모르타르 매트릭스 내에 보강되는 섬유보강재 (강섬유)와 모르타르 매트릭스 사이에 부착특성에 따른 전기-역학적 거동을 조사하고자 하였다.

- 실험프로그램

실험에 사용된 매트릭스는 180 MPa의 압축강도를 가지는 고강도 모르타르 매트릭스이며 (Table 6 참조), 인발 실험 시에 gage length 부분인 확정균열 이외에 다른 부분에서 시험체가 파괴되지 않게 하기 위하여 시험체에 short smooth 강섬유를 2 vol.% 혼합하여 보강하였다. 확정 균열을 만들기 위하여 매트릭스를 두 번으로 나누어 타설하였다. 두 번에 나누어 타설한 매트릭스를 이어주기 위하여 시험체 중간에 매립되어 들어가는 long smooth 강섬유의 경우 1차 단면의 1 vol.% (49개)의 강섬유를 매립하였으며, foam sheet로 고정시켜 강섬유마다 일정한 간격을 가지도록 하였다 (Fig. 14 참조). Long smooth 강섬유의 직경은 0.3 mm, 길이는 30 mm이며, short smooth 강섬유의 직경은 0.2 mm, 길이는 6 mm이다 (Table 7 참조).

Table 6 - 매트릭스의 구성비 및 압축강도

Cement (Type I)	Silica fume	Silica sand*	Silica powder	Super-plasticizer	Water	Compressive strength, f_{ck} (MPa)	Fiber volume content ^a (%)
1.0	0.25	1.10	0.30	0.067	0.20	180	2.0

* Silica sand with diameter grain diameter of 0.22 mm

^a short smooth, steel fiber with 6 mm in length

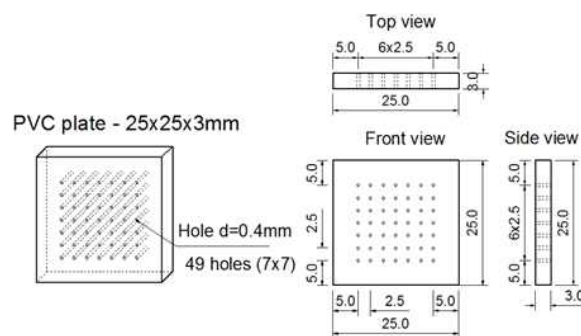
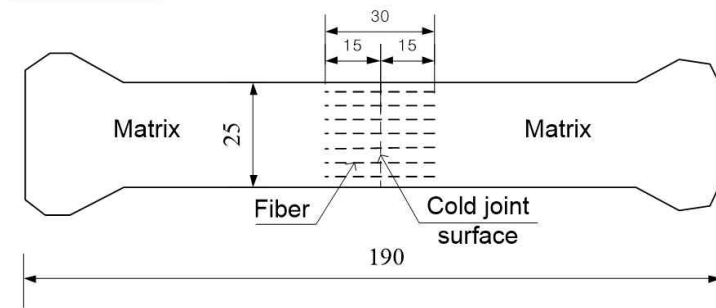


Fig. 14 - 섬유 배분을 위한 PVC plate

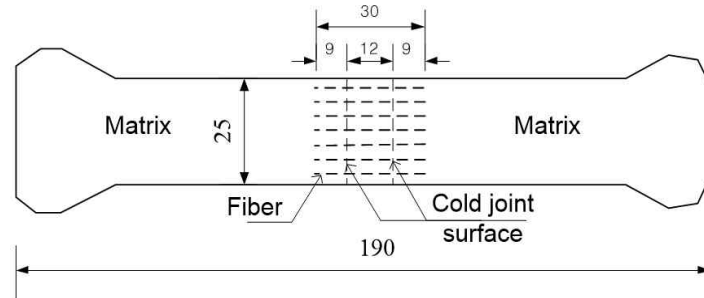
Table 7 - 강섬유의 특성

Fiber type	Diameter (mm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Long smooth	0.3	30	2428	200
Short smooth	0.2	6	2104	200

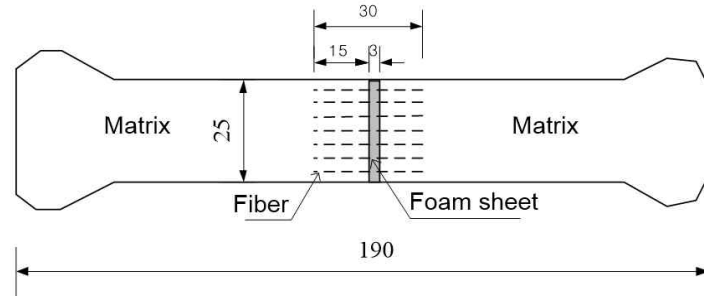
균열이 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기저항률 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 총 3가지의 다른 확정균열을 가지는 인발 시험체를 제작 하였다. 확정균열은 one cold joint (1CJ), two cold joint (2CJ), 그리고 pre-cracked (PRE)으로 구성하였다. one cold joint의 경우 매립되는 강섬유의 길이는 15 mm이고 two cold joint는 9 mm, pre-cracked 시험체의 경우 사전균열을 위해 시험체 중간에 3 mm의 Foam sheet가 들어갔다. (Fig. 15 참조)



a) Specimens with one cold joint (1CJ)



b) Specimens with two cold joints (2CJ)



c) Pre-cracked specimens (PRE)

Fig. 15 - 인발 시험체 형상

시험체가 경화된 후 3일간 90°C에서 고온양생을 실시하였다. 전기저항을 측정하는 방법은 4탐침 저항성 방식 (4-probe method)을 사용하였으며, 외부 전극 2개 사이의 거리는 50 mm, 전압을 측정하는 내부 전극 2개는 전류용 전극에서 안쪽으로 10 mm 거리에 위치하도록 하였다. 시험체가 완전히 건조된 후에 시험체 표면에 실버페이스트를 바르고, 그 위에 구리테이프를 부착하였다. 준비된 시험체에 4개의 전선을 연결한 후 멀티미터 (Fluke 8846)로 각 시험체의 전기저항을 측정하였다. 동일한 인발속도에서의 전기저항을 측정하기 위하여 인발 속도는 1.0 mm/min 으로 측정하였다. 섬유는 linear variable differential transformer (LVDT)로 측정하였으며 하중은 그림부분에 붙어 있는 load cell로부터 측정하였다 (Fig. 16 참조).

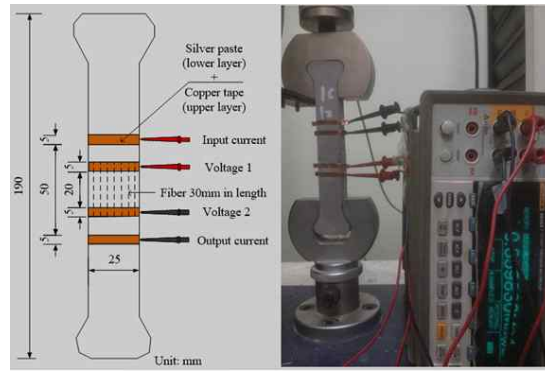
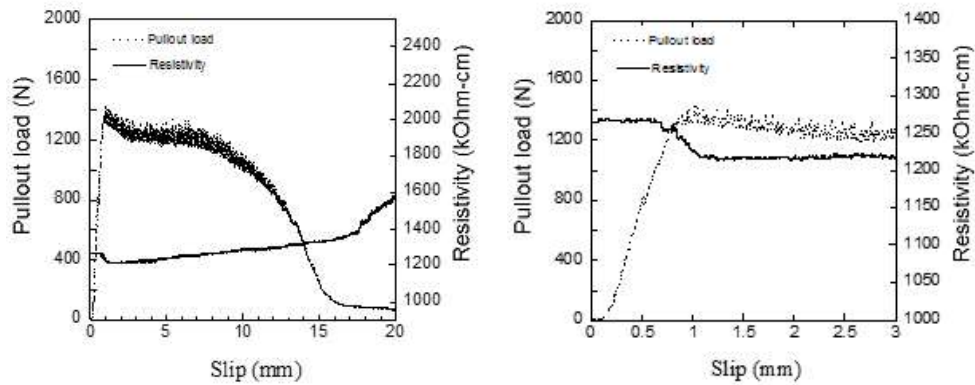


Fig. 16 - 인발 실험 전경

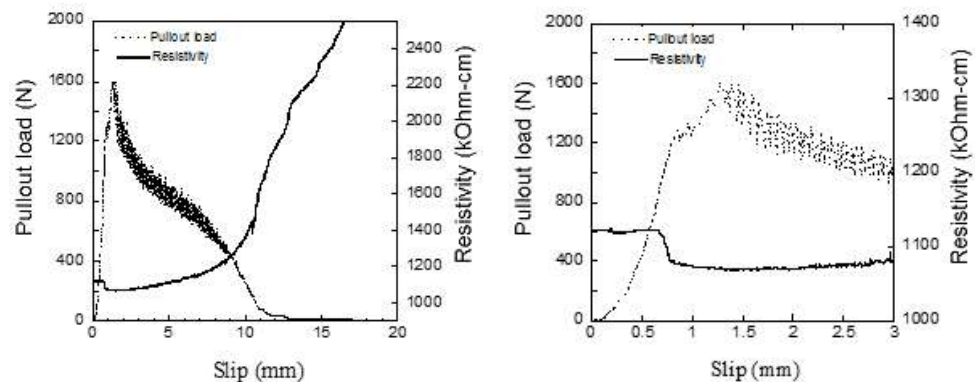
- 실험결과

인발 실험에서 전기저항은 거의 일정한 구간, 전기저항이 떨어지며 최소전기저항 값을 가지는 구간, 최소전기저항 값 이후 증가하는 구간, 총 3가지의 구간을 가진다 (Fig 17-19 참조). 각 매트릭스 1CJ, 2CJ, 그리고 PRE의 첫번째 구간 평균 전기저항은(Average ρ_0) 1268.5, 1075.9, 그리고 1530.3 K Ω -cm이다. PRE의 시험체가 가장 높은 값을 가지는데 시험체 중간에 들어가 있는 3 mm의 Foam sheet로 인해 높은 저항값을 가지게 된다. 두번째 구간에서의 시험체 1CJ, 2CJ, 그리고 PRE의 전기저항은 1230.1, 1033.0, 그리고 1491.7 K Ω -cm로 감소하게 되며 감소한 평균값은 각각 38.4, 42.9, 그리고 38.9 K Ω -cm이다. 전기저항의 감소는 매트릭스와 섬유간의 탈착이 이루어지며 또한 매트릭스의 균열로 발생한다 (Table 8 참조).

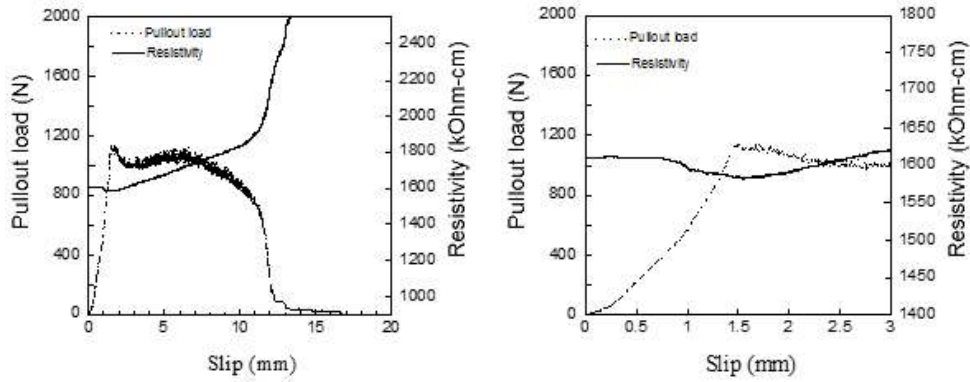
인발 저항 시편의 최대 전기적 저항 감소는 약 40 k Ω -cm이며, 최대 저항 비 감소율은 2.63 ~ 3.99%이다. 인발 하중과 전기저항률 또는 미끄럼의 값은 인발하중-전기적 저항, 인발 하중-미끄럼 곡선을 사용하여 쉽게 결정할 수 있다. 인발 시편의 평균 탈착점과 완전한 탈착점의 평균 미끄럼은 각각 0.44에서 0.71 mm, 1.35에서 1.45 mm였다.



(a) 1CJ-SP2



(c) 2CJ-SP2



(c) PRE-SP3

Fig. 17 - The pullout load (or electrical resistivity) versus slip curves of multi-fiber pullout specimens

Table 8 - 인발 실험 결과

Notation	No.	Maximum pullout load (N)	Unit maximum pullout load (N)	Pullout work (N-mm)	Electrical resistivity (k Ω -cm)			$\Delta \rho_{\max} / \rho_0$ (%)
					ρ_0	$\rho_{\min}$	$\Delta \rho_{\max} = \rho_0 - \rho_{\min}$	
1CJ	SP1	1370.5	28.0	14604.3	1267.2	1243.6	23.5	1.9
	SP2	1441.6	29.4	15907.5	1264.6	1212.5	52.1	4.1
	SP3	1728.9	35.3	15577.2	1284.6	1256.9	27.7	2.2
	SP4	1694.5	34.6	18138.3	1257.7	1207.3	50.4	4.0
	Average	1558.9	31.8	16056.8	1268.5	1230.1	38.4	3.0
2CJ	SP1	1511.3	30.8	8152.4	1155.8	1099.3	56.5	4.9
	SP2	1600.9	32.7	8275.2	1118.4	1066.5	51.9	4.6
	SP3	1521.3	31.1	8049.4	1001.9	974.0	27.9	2.8
	SP4	1913.5	39.1	8603.8	1027.6	992.2	35.4	3.4
	Average	1636.7	33.4	8270.2	1075.9	1033.0	42.9	4.0
PRE	SP1	1119.6	22.9	7927.1	1429.9	1349.8	80.1	5.6
	SP2	1053.5	21.5	6904.2	1550.8	1542.7	8.1	0.5
	SP3	1139.0	23.2	9614.7	1610.9	1582.6	28.4	1.8
	Average	1104.0	22.5	8148.7	1530.5	1491.7	38.9	2.6

- 결과분석

섬유와 매트릭스 사이의 탈착이 일어나기 전 (탄성구간)에서의 전기저항률은 거의 일정한 값을 가졌다. 반면에, 매트릭스와 섬유간의 탈착이 일어나는 동안에는 탈착이 일어나는 순간부터 완전한 탈착이 일어나는 순간까지 전기저항률이 확연하게 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, 완전히 탈착이 일어난 후의 전기저항률은 섬유가 인발되면서 매트릭스의 공극이 증가하게 되어 점진적으로 증가하게 된다. 이러한 거동은 직접 인장 하중 하에서 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 거동에서 손상 또는 변형에 따라 전기저항률이 감소하는 거동과 매우 밀접한 연관이 있다.

A4. 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 성능평가

A4.1 압축 하중 하에서의 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 성능평가

- 실험목적

압축 하중 하에서의 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 성능을 평가하여 압축 하중 하에서 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 자가센싱 능력을 확인하고, 매트릭스 압축강도와 초단유리섬유 치환 여부를 달리하여 그에 따른 영향성을 평가하고자 하였다.

- 실험프로그램

실험에 사용된 매트릭스는 95와 122 MPa의 압축강도를 가지는 일반 모르타르 매트릭스이며, 각 매트릭스에 초단유리섬유를 0%와 5% 치환하여 총 4가지의 모르타르 매트릭스에 대하여 평가하였다 (Table 4 참조). 강섬유 보강은 모든 시험체에 대해서 이전과 동일하게 보강하였다 (Table 2 참조). 시멘트 대비 치환된 초단유리섬유는 평균 직경 0.0135 mm, 평균 길이 0.3 mm를 가지는 분말형의 유리섬유이다 (Fig. 5 참조).

시험체는 폭 50 mm, 두께 50 mm, 높이 100 mm의 직육면체 형상을 사용하였으며, 시험체가 경화된 후 14일간 24°C에서 습윤 양생을 실시하였다. 전기저항 변화를 측정하는 방법은 4탐침 저항성 방식 (4-probe method)를 이용하였으며, 외부 전극 2개 사이의 거리는 55 mm, 전압을 측정하는 내부 전극 2개는 전류용 전극에서 안쪽으로 15 mm 거리에 위치하도록 하였다. 시험체가 완전히 건조된 후에 시험체 표면에 실버페이스트를 바르고, 그 위에 구리테이프를 부착하였다 (Fig. 6 참조). 압축 속도는 1.0 mm/min으로 제어하였으며, 압축실험은 Fig. 18와 같이 수행하였다.

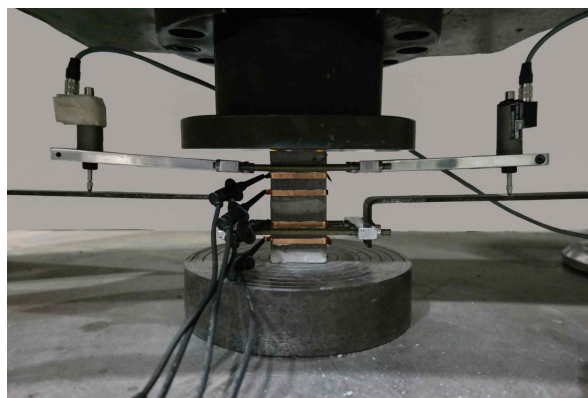


Fig. 18 - 압축 실험 전경

- 실험결과

매트릭스 압축강도 (95, 122 MPa)와 초단유리섬유의 치환이 압축 하중 하에서의 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 거동에 미치는 영향을 Fig. 19과 Table 9에 나타내었다. 본 실험을 통하여 압축 하중 하에서 강섬유 보강 시멘트 복합재료는 균열이 발생함에 따라 전기저항률이 감소하는 거동을 보이는 것을 확인하였다.

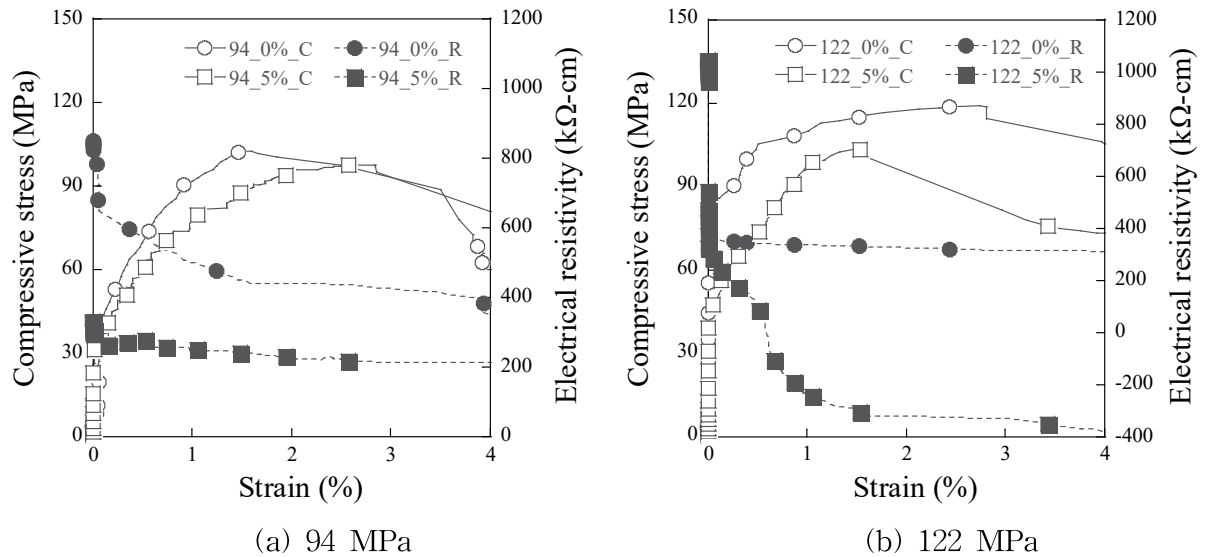


Fig. 19 - 매트릭스 압축강도와 초단유리섬유 치환에 따른 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 압축 하중 하의 전기-역학적 거동

Table 9 - 매트릭스 압축강도와 초단유리섬유가 압축 하중 하에서의 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 거동에 미치는 영향

Series	Strain (%)		Compressive stress (MPa)		Electrical resistivity (kΩ-cm)			Change in the electrical resistivity (kΩ-cm)		
	ϵ_{cr}	ϵ_y	σ_{cr}	σ_y	ρ_0	ρ_{cr}	ρ_y	$\Delta\rho$	$\Delta\rho_1$	$\Delta\rho_2$
94_0	0.004	1.54	5.77	102.5	850.2	849.9	440.8	409.4	0.33	409.0
94_5	0.008	2.84	26.1	97.6	330.7	306.3	218.9	111.7	24.4	87.4
112_0	0.006	2.78	81.7	119.5	494.8	365.0	319.2	175.6	129.8	45.8
112_5	0.006	1.48	44.3	103.7	1045.8	298.2	-294.0	1339.8	747.6	592.2

- 결과분석

압축 하중 발생 시 시험체의 파단 형상이 전극으로 사용되는 구리테이프가 부착되어있는 곳으로 가로질러 발생하게 되어 시리즈 별 정확한 감소량을 파악하기 어렵다. 이에, 압축 하중 하에서의 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 거동은 기존에 사용되고 있는 압축 공시체를 이용하고, 균열 발생 시의 전기저항률을 보다 정확하게 파악할 수 있는 방안을 고안하여 수행되어야 할 것으로 판단된다.

A4.2 직접 인장 하중 하에서의 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 성능평가

- 실험목적

강섬유 보강 시멘트 복합재료의 자가센싱 능력을 향상시킬 수 있는 최적화 배합비를 도출하기 위하여 직접 인장 하중 하에서 매트릭스 압축강도가 인장 변형에 따른 전기저항률 변화에 미치는 영향을 평가하고, 자가센싱 능력을 극대화시킬 수 있는 방안을 도출하고자 한다.

- 실험 프로그램

매트릭스 압축강도에 따른 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기적 거동을 평가하기 위하여 총 3가지 (117, 152, 그리고 180 MPa)의 다른 압축강도를 가지는 매트릭스를 사용하였다 (Table 1 참조). 강섬유의 보강은 이전 실험과 동일하게 보강하였다 (Table 2 참조). 시험체

는 폭 50 mm, 두께 25 mm의 덤벨형 시험체를 사용하였다. 시험체의 신장량 측정을 위하여 변위 측정범위는 50 mm로 제한하였으며, 측정 범위 외에서의 손상 및 균열을 방지하기 위하여 강재 와이어 매쉬를 인장 시험체의 양단부에 보강하였다. 일반 모르타르 매트릭스인 117과 152 MPa의 시험체는 14일간 24°C에서 습윤 양생을 실시하였으며, 180 MPa의 높은 압축강도를 가지는 고강도 모르타르를 사용한 시험체는 3일간 90°C에서 고온양생을 실시하였다. 전기저항 변화를 측정하는 방법은 4 탐침 저항성 방식 (4-probe method)를 이용하였으며, 외부 전극 2개 사이의 거리는 110 mm, 전압을 측정하는 내부 전극 2개는 전류용 전극에서 안쪽으로 30 mm 거리에 위치하도록 하였다. 시험체가 완전히 건조된 후에 표면 위에 실버페이스트를 바르고 구리테이프를 부착하였다 (Fig. 1 참조).

준비된 시험체에 4개의 전선을 연결한 후에 멀티미터 (Fluke 8846)의 전류원을 10 μ A로 하여 각 시험체의 전기저항률이 안정화될 수 있도록 인장 실험 전 20분간 전류를 흘려주었으며, 300 ton 용량의 만능재료시험기 (Universal testing machine, UTM)을 이용하여 Fig. 20과 같이 정적 인장 실험을 수행하였다. 인장 속도는 1.0 mm/min으로 제어하였으며, 시험체의 경계조건은 힌지-힌지 조건으로 실험을 진행하였다.

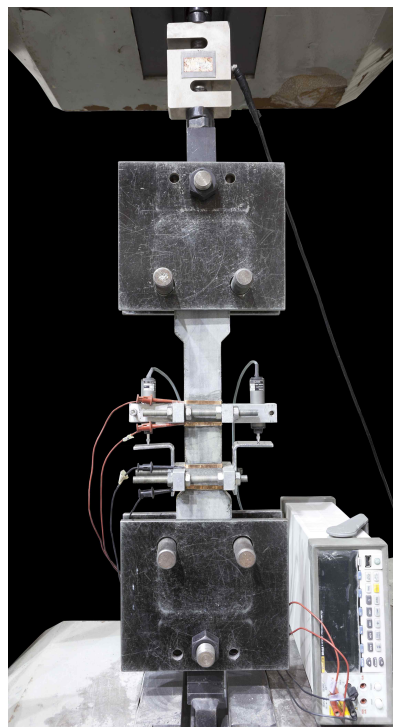


Fig. 20 - 정적 인장 실험 전경

- 실험결과

매트릭스 압축강도에 따라 인장 하중 하에서의 전기-역학적 거동은 상이한 결과를 보였다 (Fig. 21와 Table 10 참조). 매트릭스 압축강도가 증가함에 따라 변형능력 (ϵ_{pc})과 인장강도 (σ_{pc})가 0.43%에서 1.13%, 7.0 k Ω -cm에서 15.1 k Ω -cm로 향상되는 것을 알 수 있었다. 뿐만 아니라, 초기 전기저항률 (ρ_0)도 53 k Ω -cm에서 1055 k Ω -cm로 향상되었고, 동시에 최종 균열 지점까지 감소되는 전기저항률 ($\Delta\rho$) 또한 13.7 k Ω -cm에서 518.7 k Ω -cm로 월등히 향상되는 것을 확인하였다.

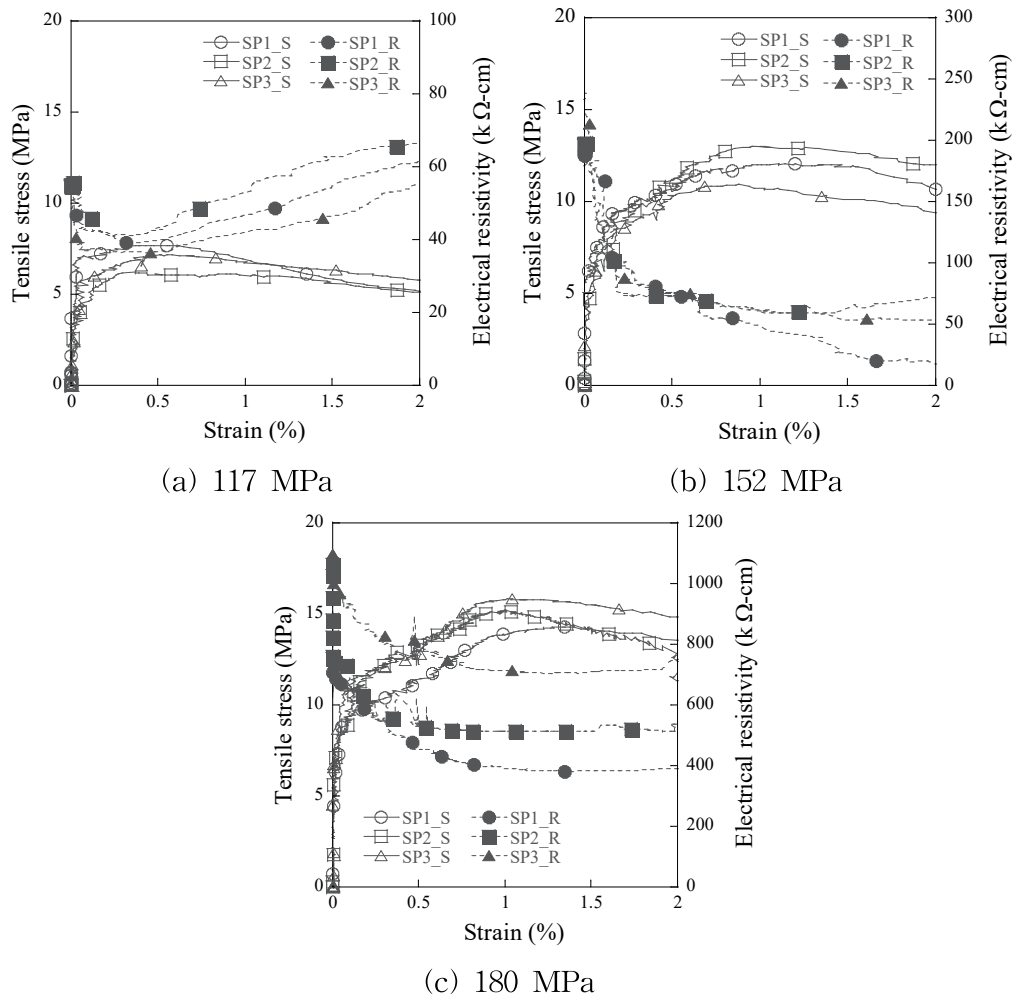


Fig. 21 - 직접 인장 하중 하에서의 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 거동

Table 10 - 매트릭스의 압축강도가 정적 인장 하중 하의 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 거동에 미치는 영향

Series	No.	Tensile strain (%)		Tensile stress (MPa)		Electrical resistivity (kΩ-cm)			Change in the electrical resistivity (kΩ-cm)			n_{cr}
		ϵ_{cc}	ϵ_{pc}	σ_{cc}	σ_{pc}	ρ_0	ρ_{cc}	ρ_{pc}	$\Delta\rho$	$\Delta\rho_1$	$\Delta\rho_2$	
117	SP1	0.03	0.42	5.3	7.7	53	48	40	13.8	5.7	8.1	4.9
	SP2	0.04	0.37	4.0	6.2	54	49	41	13.1	5.2	8.0	4.9
	SP3	0.03	0.50	4.3	7.2	51	42	37	14.1	8.9	5.2	5.2
	Aver.	0.03	0.43	4.5	7.0	53	46	39	13.7	6.6	7.1	5.0
152	SP1	0.03	1.19	6.5	12.1	190	184	42	148.7	6.1	142.6	6.8
	SP2	0.03	0.95	4.5	14.1	197	183	62	118.3	14.0	120.3	5.7
	SP3	0.03	0.88	4.0	10.9	227	214	63	179.1	13.7	150.7	7.1
	Aver.	0.03	1.01	5.0	12.4	205	194	56	148.7	11.3	137.9	6.5
180	SP1	0.05	1.35	8.3	14.3	1036	670	384	652.1	365.7	286.4	16.8
	SP2	0.06	1.00	8.4	15.2	1075	743	513	562.0	332.4	229.6	15.4
	SP3	0.04	1.04	8.9	15.9	1055	879	713	342.1	175.6	166.5	14.8
	Aver.	0.05	1.13	8.5	15.1	1055	764	537	518.7	291.2	227.5	15.7

초기 균열 발생 지점까지의 전기저항률 감소량 ($\Delta\rho_1$)에 비해 초기 균열 발생 이후부터 최종 균열 발생지점까지의 전기저항률 감소량 ($\Delta\rho_2$)이 현저히 높게 나타났으며, 이는 강섬유 보강 시멘트 복합재료가 탄성구간 뿐아니라 소성구간에서도 우수한 손상 감지능력을 가진다는 것을 의미한다. 또한, 매트릭스 압축강도에 따른 미세균열 수 (n_{cr})와 미세균열 하나 당 전기저항률 감소량 ($\Delta\rho/n_{cr}$)을 계산하여 Fig. 22에 나타내었다. 매트릭스 압축강도가 증가할

수록 n_{cr} 또한 증가하였으며, $\Delta\rho/n_{cr}$ 도 2.74 k Ω -cm에서 33.04 k Ω -cm로 향상하는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 20 참조).

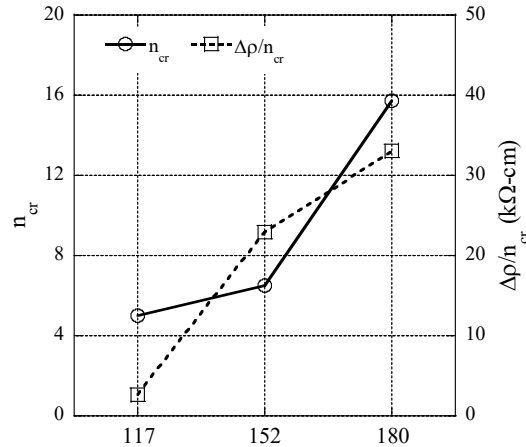


Fig. 22 - 매트릭스 압축강도에 따른 미세균열 하나 당 전기저항률 감소량

- 결과분석

매트릭스의 압축강도가 증가할수록 SS-FRCCs의 균열 이전 전기저항률이 향상되는 것을 확인한 바 있다. 이에 따라, 매트릭스 압축강도에 따른 정적 인장 하중 하에서의 SS-FRCCs의 전기-역학적 거동을 조사한 결과 매트릭스 압축강도가 증가할수록 변형 또는 손상에 따른 전기저항률 감소량 또한 증가하는 것을 확인하였다. 다수 미세균열의 수 또한 증가하였으며, 미세균열 수 하나당 전기저항률 감소량도 증가하여 고강도 콘크리트를 사용할 시에 SS-FRCCs의 자기감지 능력이 향상됨을 확인하였다. SS-FRCCs에 고강도 콘크리트의 사용은 높은 압축강도로 구조물의 내구성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 높은 자기감지 능력으로 손상 또는 변형의 감지가 우수할 것으로 판단된다.

A4.3 초단유리섬유 치환 여부에 따른 인장 하중 하에서의 전기-역학적 성능평가

- 실험목적

고강도 매트릭스가 아닌 일반 모르타르 매트릭스에서도 인장 변형에 따른 전기저항률의 변화량을 나타낼 수 있도록 하기 위하여 전기저항성이 높은 초단유리섬유를 시멘트 중량 대비로 치환하여 일반 모르타르 매트릭스를 사용한 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 손상에 따른 감지능력을 향상시키고자 하였다.

- 실험프로그램

일반 모르타르 매트릭스 (95 그리고 122 MPa)에 대하여 초단유리섬유를 각각 5%씩 치환하여 초단유리섬유를 치환하지 않은 경우의 강섬유 보강 시멘트 복합재료와 비교하였다 (Table 4 참조). 강섬유 보강은 모든 시험체에 대해서 이전과 동일하게 보강하였다 (Table 2 참조). 시멘트 대비 치환된 초단유리섬유는 평균 직경 0.0135 mm, 평균 길이 0.3 mm를 가지는 분말형의 유리섬유이다 (Fig. 5 참조).

시험체는 폭 50 mm, 두께 50 mm의 덩벨형 시험체를 사용하였으며, 시험체가 경화된 후 14일간 24°C에서 습윤 양생을 실시하였다. 전기저항 변화를 측정하는 방법은 4 탐침 저항성 방식 (4-probe method)를 이용하였으며, 외부 전극 2개 사이의 거리는 110 mm, 전압을 측정하는 내부 전극 2개는 전류용 전극에서 안쪽으로 30 mm 거리에 위치하도록 하였다. 시험체가 완전히 건조된 후에 시험체 표면 위에 실버페이스트를 바른 후 그 위에 구리테이프를 부

작하였다 (Fig. 23 참조).

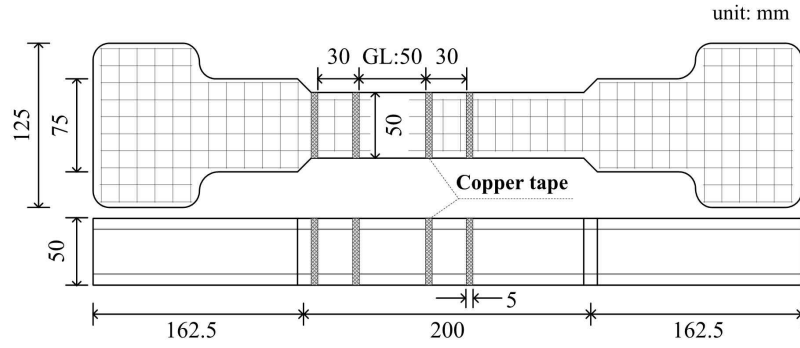


Fig. 23 - 시험체 형상

준비된 시험체에 4개의 전선을 연결한 후에 멀티미터 (Keysight 3458A)의 전류원을 5μ A로 하여 각 시험체의 전기저항률이 안정화될 수 있도록 20분간 전류를 흘려주었으며, 20분 후에 300 ton 용량의 만능재료시험기 (Universal testing machine, UTM)을 이용하여 Fig. 24과 같이 정적 인장 실험을 수행하였다. 인장 속도는 1.0 mm/min 으로 제어하였으며, 시험체의 경계조건은 힌지-힌지 조건으로 실험을 진행하였다.

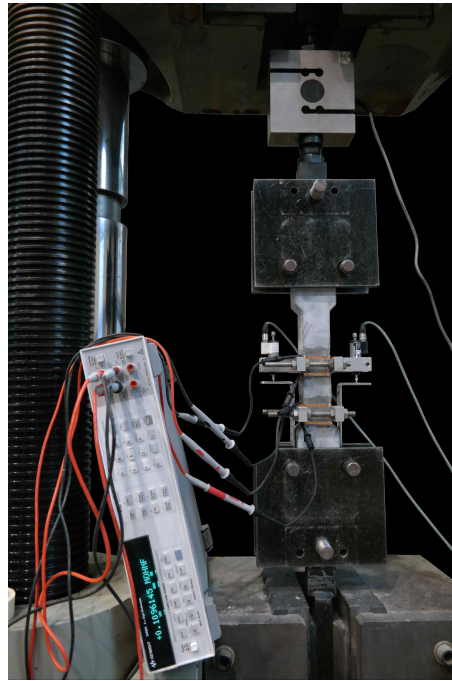


Fig. 24 - 정적 인장 실험 전경

- 실험결과

매트릭스 압축강도 95와 122 MPa 모두 초단유리섬유를 5% 치환할 경우의 tensile strain (ϵ_{cc} , ϵ_{pc}), tensile stress (σ_{cc} , σ_{pc}), 그리고 초기 전기저항률 (ρ_0)는 초단유리섬유를 치환하지 않은 경우와 비교하여 큰 차이가 없다 (Fig. 25과 Table 11 참조). 하지만, 초단유리섬유를 5% 치환한 경우에 전기저항률 감소량 ($\Delta\rho$, $\Delta\rho_1$, $\Delta\rho_2$)에 초단유리섬유의 치환으로 인한 감소량의 차이는 매트릭스의 압축강도가 더 낮을수록 더 큰 차이를 보였다. 95 MPa 시험체에서 $\Delta\rho$ 는 초단유리섬유를 치환하지 않은 경우 $17.0 \text{ k}\Omega\text{-cm}$, 초단유리섬유를 5% 치환한 경우에는 $78.8 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ 로 363%(4.6배) 크게 나타났으며, 122 MPa 시험체에서는 $184.0 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ 와 $307.4 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ 으로 67% (1.7배)로 나타났다.

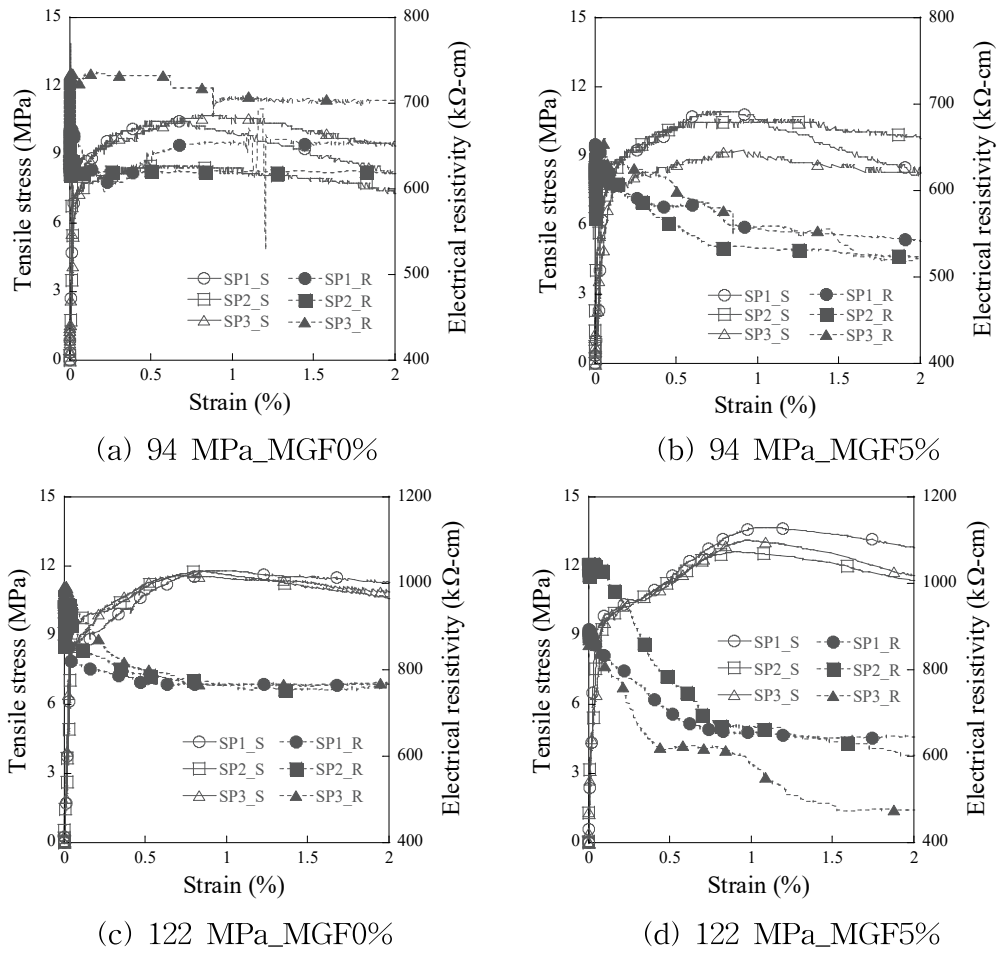


Fig. 25 - 초단유리섬유를 치환한 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 거동

Table 11 - 초단유리섬유가 정적 인장 하중 하에서의 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 거동에 미치는 영향

Series	No.	Tensile strain (%)		Tensile stress (MPa)		Electrical resistivity (kΩ-cm)			Change in the electrical resistivity (kΩ-cm)			n_{cr}
		ϵ_{cc}	ϵ_{pc}	σ_{cc}	σ_{pc}	ρ_0	ρ_{cc}	ρ_{pc}	$\Delta\rho$	$\Delta\rho_1$	$\Delta\rho_2$	
94_0	SP1	0.02	0.63	6.8	10.6	669	665	647	21.7	4.2	17.6	3.4
	SP2	0.02	0.58	5.6	8.5	632	629	619	12.8	3.3	9.4	1.3
	SP3	0.02	0.63	5.4	10.6	735	731	718	16.6	3.8	12.9	2.7
	Aver.	0.02	0.61	5.9	10.0	678	675	661	17.0	3.8	13.3	2.5
94_5	SP1	0.03	0.82	4.0	9.3	649	647	576	73.0	2.2	70.8	3.0
	SP2	0.03	0.74	6.2	10.6	630	627	535	94.3	2.8	91.5	4.0
	SP3	0.03	0.66	5.4	10.9	654	652	585	68.9	1.4	67.5	2.7
	Aver.	0.03	0.74	5.2	10.3	644	642	565	78.8	2.2	76.6	3.2
112_0	SP1	0.04	1.00	7.4	11.8	920	881	766	153.5	38.7	114.8	5.5
	SP2	0.05	0.83	8.6	11.8	952	908	776	176.1	43.8	132.3	8.5
	SP3	0.03	0.72	8.2	11.6	996	973	773	222.3	22.4	199.9	9.4
	Aver.	0.04	0.85	8.1	11.7	956	921	772	184.0	35.0	149.0	7.8
112_5	SP1	0.04	1.06	8.9	13.7	894	856	894	238.2	38.0	200.2	3.3
	SP2	0.03	0.89	6.0	12.6	1047	1035	669	376.9	10.5	366.4	6.4
	SP3	0.03	0.98	5.6	13.1	895	865	588	307.2	30.5	276.6	5.0
	Aver.	0.04	0.98	6.8	13.1	945	638	638	307.4	20.6	281.1	4.9

95 MPa에서는 초단유리섬유를 치환할 경우에 미세균열의 수 (n_{cr})이 증가하지만, 122 MPa에서는 오히려 n_{cr} 이 감소하는 경향을 보였다. 하지만, n_{cr} 이 감소하더라도 미세균열 하나 당 전기저항률 감소량 ($\Delta\rho/n_{cr}$)은 초단유리섬유 치환에 따라 모두 증가하는 것으로 나타났다. 초단유리섬유 치환 유무에 따른 미세균열 하나 당 전기저항률 감소량은 95 MPa에서 각각 6.8 k Ω -cm, 24.6 k Ω -cm으로 5%를 치환한 경우의 미세균열 하나당 전기저항률 감소량이 122 MPa의 초단유리섬유를 치환하지 않은 경우의 미세균열 하나당 전기저항률 감소량 (23.60k Ω -cm)과 비슷하게 나타났다 (Fig. 26 참조).

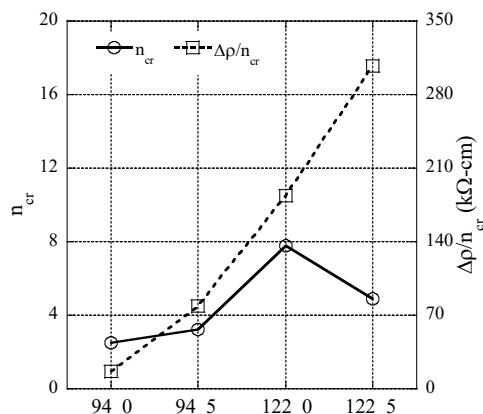


Fig. 26 - 초단유리섬유 치환 유무에 따른 미세균열 하나 당 전기저항률 감소량

- 결과분석

95 MPa에서는 초단유리섬유가 공극을 메꾸어주는 역할을 동시에 하여 미세균열의 수 (n_{cr})이 증가하지만, 122 MPa에서는 이미 silica fume이 공극을 메꾸어주는 역할을 하여 오히려 n_{cr} 이 감소하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 따라서, 높은 물-시멘트비 (낮은 압축강도)에서 자기감지 능력의 향상을 위해서 치환한 초단유리섬유는 95 MPa에서 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

A4.4 [추가실험] 휨인장 하중 하에서의 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 성능평가

- 실험목적

휨 인장 하중 하에서의 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 성능을 평가하여 자기감지 능력을 확인하고자 하였다. 직접 인장 실험을 통하여 낮은 압축강도의 모르타르 매트릭스에서 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 거동에 초단유리섬유가 미치는 영향성이 더 크다는 것을 확인하였다. 이에, 휨 인장 하중실험은 낮은 매트릭스 압축강도를 가지는 강섬유 보강 시멘트 복합재료에 초단유리섬유의 치환이 미치는 영향에 대하여 평가하였다.

- 실험프로그램

실험에 사용된 매트릭스 모르타르의 압축강도는 95 MPa이며, 초단유리섬유를 0%와 5% 치환하여 총 2가지의 모르타르 매트릭스에 대하여 평가하였다 (Table 12 참조). 강섬유 보강은 모든 시험체에 대하여 이전과 동일하게 보강하였다 (Table 2 참조). 시멘트 대비 치환된 초단유리섬유는 평균 직경 0.0135 mm, 평균 길이 0.3 mm를 가지는 분말형의 유리섬유이다 (Fig. 5 참조).

Table 12 - 매트릭스의 구성요소 및 배합비와 압축강도

Cement (Type III)	Milled glass fiber	Silica sand*	Fly ash	Super-plasticizer	Water	Compressive strength, f_{ck} (MPa)
1.0	-	1.00	0.15	0.009	0.35	95
0.95	0.05	1.00	0.15	0.009	0.35	89

* Silica sand with average grain diameter of 0.43 mm

시험체는 단면 100*100 mm, 길이 300 mm의 직육면체 시험체를 사용하였으며, 시험체가 경화된 후 14일간 24°C에서 습윤 양생을 실시하였다. 전기저항 변화를 측정하는 방법은 4 탐침 저항성 방식 (4-probe method)를 이용하였으며, 외부 전극 2개 사이의 거리는 220 mm, 전압을 측정하는 내부 전극 2개는 전류용 전극에서 안쪽으로 60 mm 거리에 위치하도록 하였다. 시험체가 완전히 건조된 후 표면 위에 실버페이스트를 바른 후 시험체 하면 (하중재하 반대면)에 구리테이프를 부착하였다 (Fig. 27 참조).

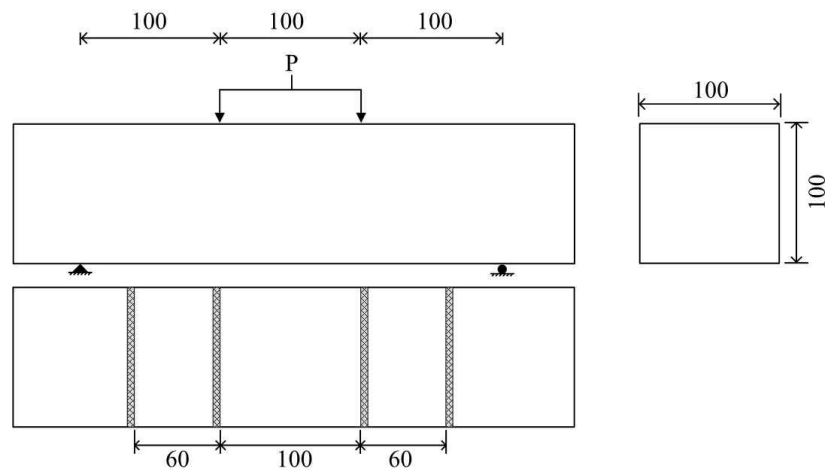


Fig. 27 - 시험체의 형상

준비된 시험체에 4개의 전선을 연결한 후에 멀티미터 (Keysight 3458A)의 전류원을 5 μ A로 하여 각 시험체의 전기저항률이 안정화될 수 있도록 20분간 전류를 흘려주었으며, 20분 후에 300 ton 용량의 만능재료시험기 (Universal testing machine, UTM)을 이용하여 Fig. 28과 같이 3등분점 휨 인장 실험을 수행하였다. 3등분점의 간격은 100 mm로 하였으며, 휨 인장 속도는 1.0 mm/min으로 제어하였다.

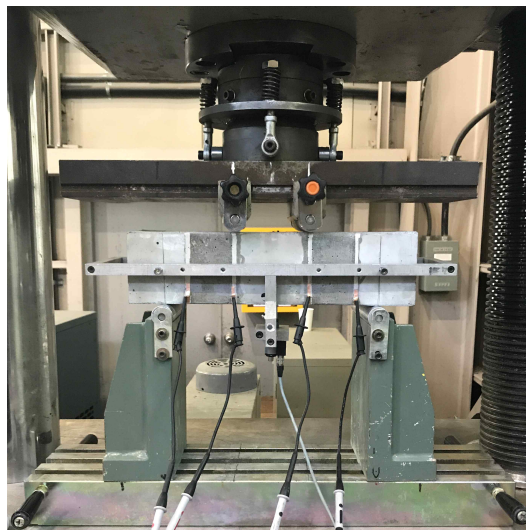


Fig. 28 - 휨 인장 실험 전경

- 실험결과

초단유리섬유의 치환이 휨 인장 하중 하에서의 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 거동에 미치는 영향을 Fig. 29와 Table 13에 나타내었다. 우선, 초단유리섬유의 치환은 휨 인장 하중 하에서의 역학적 거동에도 영향을 미쳤다. δ_{LOP} 와 f_{LOP} 는 각각 0.066 mm에서 0.041 mm, 9.0 MPa에서 4.9 MPa로 감소하였으며, 반면에 δ_{MOR} 과 f_{MOR} 은 각각 1.64 mm에서 1.18 mm, 25.6 MPa에서 17.5 MPa로 감소하는 경향을 보였다. 초단유리섬유의 치환은 휨 인장 하중 하에서 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 역학적 거동을 감소시켰지만, 전기-역학적 거동은 초단유리섬유를 치환한 경우 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 모든 지점에서의 전기저항률 (ρ_0 , ρ_{LOP} , ρ_{MOR})은 초단유리섬유를 치환하지 않은 경우보다 높게 나타났다. 휨 인장 하중 하에서의 δ_{pc} 와 f_{pc} 는 전기저항률의 변곡점에서의 변위와 휨 인장 강도이며, 직접 인장 하중 하에서의 최종 변형률 (ϵ_{pc})과 최종 인장강도 (σ_{pc})와 동일하게 나타났다. 전기저항률의 변곡점이 MOR 지점 이전에 나타나는 것은 매트릭스에 발생한 주균열의 폭이 증가하기 시작한 지점이 MOR 지점 이전이기 때문이다.

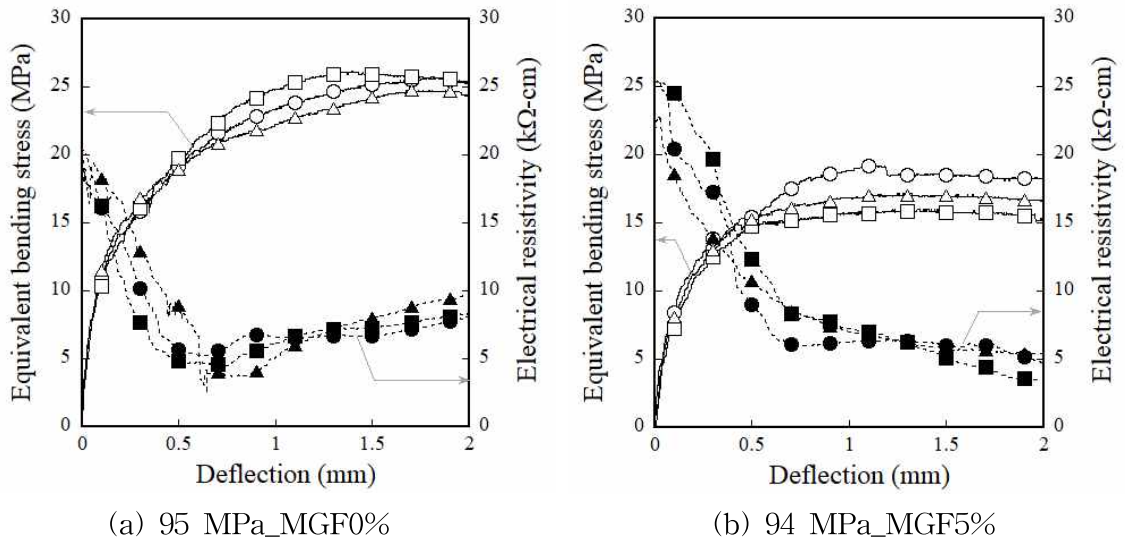


Fig. 29 - 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 휨 인장 하중 하의 전기-역학적 거동

Table 13 - 초단유리섬유의 치환이 휨 인장 하중 하에서의 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 거동에 미치는 영향

Series	No.	Deflection (mm)			Equivalent bending stress (MPa)			Electrical resistivity (kΩ-cm)				n_{cr}
		δ_{LOP}	δ_{pc}	δ_{MOR}	f_{LOP}	f_{pc}	f_{MOR}	ρ_0	ρ_{LOP}	ρ_{pc}	ρ_{MOR}	
95_0	SP1	0.064	0.62	1.77	9.0	20.6	25.7	19.6	16.6	5.2	7.4	8.0
	SP2	0.066	0.74	1.39	8.8	22.9	26.2	20.4	17.9	4.5	7.3	10.1
	SP3	0.068	0.64	1.74	9.3	20.5	24.8	19.9	19.0	2.5	7.9	12.8
	Aver.	0.066	0.67	1.64	9.0	21.3	25.6	20.0	17.8	4.1	7.9	10.3
95_5	SP1	0.042	0.72	1.08	5.1	17.8	19.2	25.3	24.7	5.9	6.3	5.9
	SP2	0.039	0.73	1.22	4.6	15.3	16.0	25.4	25.3	8.1	6.5	4.9
	SP3	0.043	0.69	1.25	5.1	16.1	17.2	21.1	20.7	8.6	6.4	4.5
	Aver.	0.041	0.71	1.18	4.9	16.4	17.5	23.9	23.5	7.5	6.4	5.1

- 결과분석

전기저항률 변곡점이 MOR 지점 이전에 나타나는 것을 통해 전기저항률 변곡점은 모르타르 매트릭스와 강섬유 사이의 탈착에 의한 것임을 명확하게 확인하였다. 초단유리섬유의 치환은 모르타르 매트릭스의 압축강도를 감소시켰으며, 직접 인장 하중 하에서는 매트릭스의 압축강도보다 모르타르 매트릭스와 강섬유 사이의 부착강도가 더 큰 역할을 했으나, 휨 인장 하중 하에서는 매트릭스의 압축강도가 더 큰 역할을 하여 미세균열의 수가 감소하고 이에 따라 최종 휨 인장 강도가 감소한 것으로 보인다.

A5. 실제 SOC 시설물에 SS-FRCCs의 적용방안 도출

- 실험목적

SS-FRCCs를 구조부재 또는 코팅식 센서로 적용시 SS-FRCCs의 SOC 시설물 적용 가능성 평가를 하고자 휨 인장 하중 하에서의 SS-FRCCs를 타설한 철근콘크리트 빔의 전기-역학적 거동을 조사하였다.

- 실험프로그램

시험체 제작에 사용된 일반콘크리트 (normal concrete, NC)는 압축강도 95 MPa의 모르타르 매트릭스이며, 자기감지 콘크리트 (steel-fiber-reinforced concrete, SFRC)는 강섬유 보강 콘크리트의 자기감지 능력을 향상시키기 위하여 초단유리섬유를 5% 치환시킨 초단유리섬유 보강 콘크리트 (milled glass fiber reinforced concrete, MGFRC)를 사용하였다 (Table 4). SFRC에 보강된 강섬유는 long smooth 강섬유 (L=30 mm, D=0.3 mm)와 medium smooth 강섬유 (L=19.5 mm, D=0.2 mm)로 각각 1 vol.%씩 총 2 vol.% 보강되었다. 또한, 초단유리섬유는 길이 0.3 mm, 직경 0.0135mm로 보강된 강섬유와 초단유리섬유의 형상과 특성을 Fig. 5에 나타내었다.

철근 콘크리트 빔 제작에 사용된 철근은 항복강도 546 MPa을 가지는 SD500로 직경 12.7 mm의 D-13을 사용하였다 (Table 14 참조).

Table 14 - 철근의 특성

Type	Diameter (mm)	Cross-sectional area (mm ²)	Tensile strength (MPa)		Elongation (%)
			fy	fu	
SD500 (D-13)	12.7	126.7	546	693	17.6

철근은 콘크리트 빔의 인장 측에 설계되었으며, 파괴 시 인장철근이 항복하도록 하여 철근 2개를 보강하였다. 콘크리트 빔은 150 X 250 mm의 단면적을 가지는 빔으로 KS F 2408 (콘크리트의 휨 강도 시험 방법)에 따라 지간을 공시체 높이의 3배 (750 mm)로 하였으며, 시험체의 총 길이는 지간 거리에 최소 75 mm 길게 제작한다는 KS 규격에 따라 시험체의 총 길이를 900 mm으로 제작하였다 (Fig. 30 참조).

전기저항 변화는 4 탐침 저항성 방식 (4-probe method)으로 전기저항의 측정을 통해 조사되었으며, 외부 전극 2개 사이의 거리는 550 mm, 전압을 측정하는 내부 전극 2개는 전류용 전극에서 안쪽으로 250 mm 거리에 위치하도록 하였다 (Fig. 30 참조).

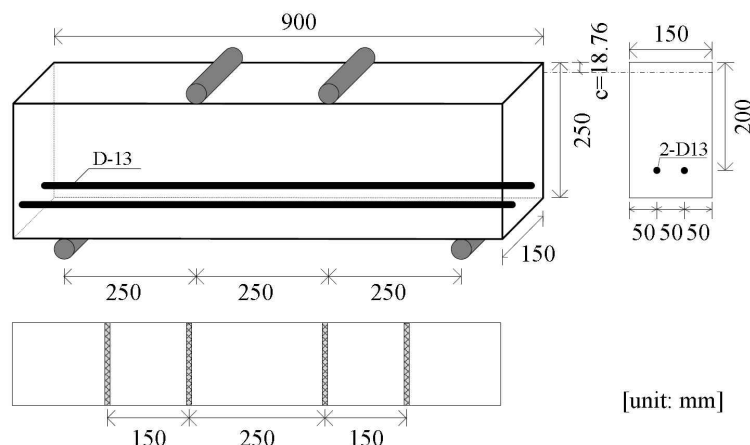


Fig. 30 - 철근콘크리트 빔의 기본 설계

결정된 단면적에 따른 철근의 인장 축 설계와 그 적정성을 아래와 같이 계산하였다.

(가정사항) $d=200$ mm (피복두께=50 mm) : 규정에 의한 최소피복 두께=40 mm

① 철근 (SD500/2*D-13)의 적정성 검토: $f_y = 546$ MPa, $A_s = 253.4$ mm², $l = 900$ mm

$$\rho_b = 0.85\beta_1 \frac{f_{ck}}{f_y} \frac{0.03}{0.003 + \epsilon_y} = 0.85 \times 0.65 \times \frac{89}{546} \times \frac{0.003}{0.003 + 0.0027} = 0.0474$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.007(f_{ck} - 28) = 0.85 - [0.007 \times (89 - 28)] = 0.423 \geq 0.65 \quad \therefore \beta_1 = 0.65$$

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{546}{200000} = 0.0027$$

$$\rho_{\min} = \frac{A_{s,\min}}{b_w d} = \frac{129.59}{150 \times 200} = 0.0043$$

$$A_{s,\min} = \frac{0.25 \sqrt{f_{ck}}}{f_y} b_w d = \frac{0.25 \times \sqrt{89}}{546} \times 150 \times 200 = 129.59 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,\min} = \frac{1.4}{f_y} b_w d = \frac{1.4}{549} \times 150 \times 200 = 76.92 \text{ mm}^2 \quad \therefore A_{s,\min} = 129.59 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{\max} = \frac{0.003 + \epsilon_y}{0.007} \rho_b = \frac{0.003 + 0.0027}{0.007} \times 0.0474 = 0.0386$$

$$\rho = \frac{A_s}{b_w d} = \frac{253.4}{150 \times 200} = 0.00845$$

$$\rho = 0.00845 \leq \rho_b = 0.0474 \text{ (저보강보: 철근의 항복으로 인하여 인장 축 파괴)}$$

$$\rho_{\min} = 0.0043 \leq \rho = 0.00845 \leq \rho_{\max} = 0.0386 \text{ (적합)}$$

② 중립축

$$C = T$$

$$0.85 f_{ck} a b = 0.85 f_{ck} (\beta_1 c) b = A_s f_y$$

$$0.85 \times 89 \times (0.65 \times c) \times 150 = 253.4 \times 546$$

$$c = \frac{253.4 \times 546}{0.85 \times 89 \times 0.65 \times 150} = 18.76 \text{ mm}$$

$$C = 0.85 f_{ck} a b = 0.85 \times 89 \times (0.65 \times 18.76) \times 150 = 138371.145 \text{ N} = 138.37 \text{ kN}$$

$$T = A_s f_y = 253.4 \times 546 = 138356.4 \text{ N} = 138.36 \text{ kN}$$

$$\frac{\epsilon_s}{d - c} = \frac{\epsilon_c}{c}$$

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_c}{c} (d - c) = \frac{0.003}{18.76} \times (200 - 18.76) = 0.02898 \geq \epsilon_y = 0.0027 \text{ (인장철근 항복)}$$

③ 철근의 정착길이 검토

$$\text{기본 정착길이 : } l_{ab} = \frac{0.60 f_y d_b}{\sqrt{f_{ck}}} = \frac{0.6 \times 546 \times 12.7}{\sqrt{89}} = 441.01 \text{ mm}$$

보정계수

$$\text{: 철근순간격 } 50 - 12.7 = 37.3 \text{ mm} \geq 2d_b = 2 \times 12.7 = 25.4 \text{ mm}$$

$$\text{: 피복두께 } 50 - \frac{d_b}{2} = 50 - \frac{12.7}{2} = 43.65 \text{ mm} \geq d_b = 12.7 \text{ mm}$$

$$\therefore \alpha \beta \gamma = 1.3 \times 1.0 \times 1.0 = 1.3$$

정착길이 $l_{ab}(\alpha\beta\gamma) = l = 441.01 \times 1.3 = 573.3 \text{ mm} \leq 900 \text{ mm}$ (정착길이 확보)

④ 설계휨강도

$$M_n = T \times \left(d - \frac{a}{2} \right) = 138.36 \times \left(200 - \frac{0.65 \times 18.76}{2} \right) = 26828.41 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

설계 결과를 통한 시험체는 Fig. 31과 같이 제작되었으며, 제작된 시험체는 타설 후 상온에서 이틀간 건조시킨 후, 14일 동안 24°C에서 습윤양생 되었다.

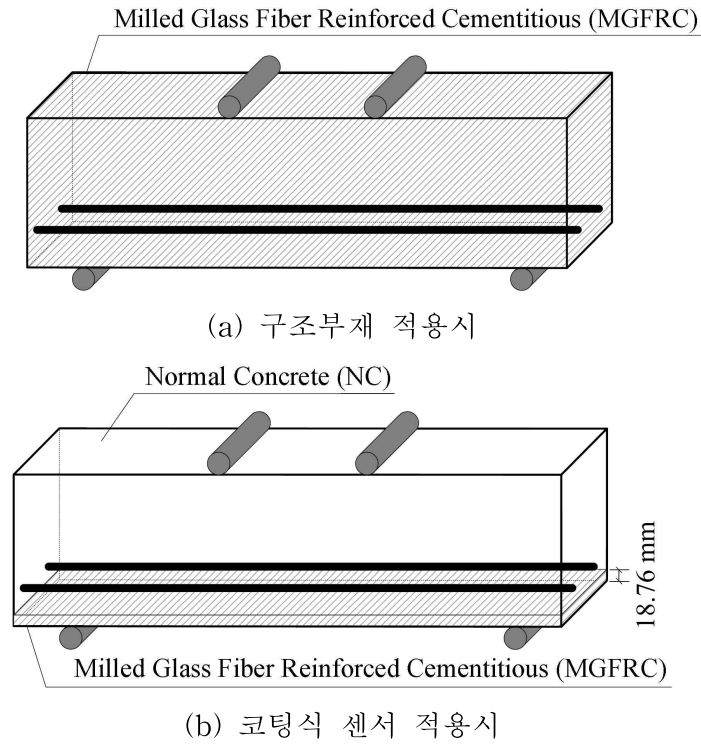


Fig. 31 - 시험체 제작 형상

4점 재하 휨 실험의 전경을 Fig. 32에 나타내었다. 4점 재하 휨 실험은 만능재료시험기 (Universal Testing Machine, UTM)을 사용하여 변위제어 1.0 mm/min의 속도로 수행하였다. Data frequency는 1 Hz이며, linear variable differential transformers (LVDTs)를 사용하여 시험체 하면에서의 처짐을 측정하였다. 준비된 시험체에 4개의 전선을 연결한 후에 멀티미터 (Keysight 3458A)의 전류원을 50 μA 로 하여 각 시험체의 전기저항을 측정하였다. 실험 수행 이전에 polarization effect를 최소화하기 위하여 전기저항 안정화 시간을 20분으로 설정한 후 실험을 수행하였다.



Fig. 32 - 실험 전경

A5.1 구조부재로 적용시 실험체 설계 및 제작

- 실험결과

전체적으로 자기감지 섬유보강 콘크리트를 타설한 철근 콘크리트 빔은 구재 부재로써의 역할뿐만 아니라, 구조물 모니터링을 위한 자기감지 재료로써의 역할이 우수한 것을 확인하였다 (Fig. 33, 34, 그리고 Table 15 참조). 휨 인장 하중 하에서 NRC의 전기저항률 변화 거동은 처짐이 증가함에 따라 전기저항률이 감소하는 거동을 보였다. 정적 인장 실험과 비교하여 보았을 때, 전기저항률이 감소하는 거동은 유사하지만, 전기저항률이 급격하게 감소하는 구간들이 보이는 것을 NRC의 특유 거동이다. 또한, 초기균열 이후 전기저항률이 계속해서 감소하다가 일정 구간에서 다시 증가하는 거동을 보이지만 전기저항률이 증가하면서도 미세 균열 발생 시 계속하여 전기저항률이 급격하게 감소하는 구간이 발생하는 것을 알 수 있다.

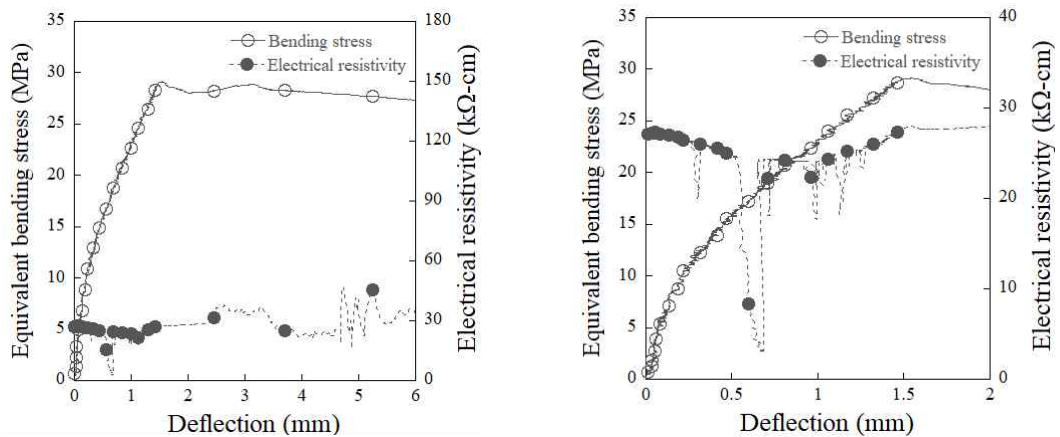


Fig. 33 - 휨 인장 하중 하에서 강섬유 보강 시멘트 복합재료 전체 타설 철근 콘크리트 빔의 전기-역학적 거동

Table 15 - 휨 인장 하중 하에서 강섬유 보강 시멘트 복합재료 전체 타설 철근 콘크리트 빔의 전기-역학적 parameters

Deflection (mm)		Equivalent bending stress (MPa)		Electrical resistivity (kΩ-cm)			Number of micro-cracks
δ_{LOP}	δ_{MOR}	f_{LOP}	f_{MOR}	ρ_0	ρ_{cr}	ρ_y	n_{cr}
0.138	1.536	7.02	29.13	27.31	27.05	27.95	39.58



Fig. 34 - 자기감지 섬유보강 콘크리트를 타설한 철근콘크리트 빔의 미세균열 거동

A5.2 코팅식 센서로 적용 시 실험체 설계 및 제작

- 실험결과

부분적인 자기감지 섬유보강 콘크리트를 타설한 철근 콘크리트 빔의 휨 인장 하중 하에서의 전기-역학적 거동은 Fig. 35, 36과 Table 16에 나타내었다. 인장 측 파괴를 유도하여 설계된 철근 콘크리트 빔의 하부에만 인장 저항 성능이 높은 SFRC를 보강하게 되면서 압축 측 파괴가 발생하여 최종 휨 강도 이후에 하중이 감소하는 거동을 보인다.

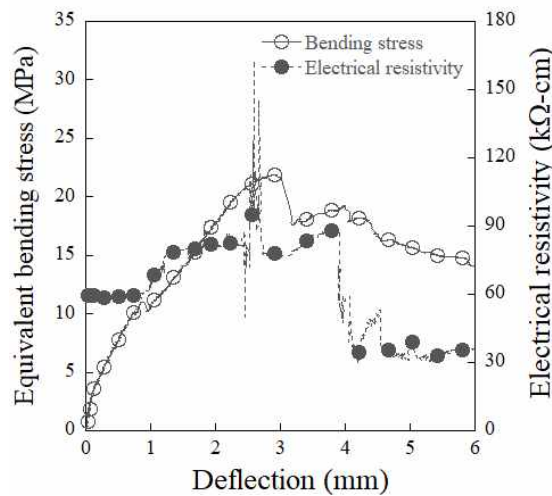


Fig. 35 - 휨 인장 하중 하에서 강섬유 보강 시멘트 복합재료 부분 타설 철근 콘크리트 빔의 전기-역학적 거동

Table 16 - 휨 인장 하중 하에서 강섬유 보강 시멘트 복합재료 부분 타설 철근 콘크리트 빔의 전기-역학적 거동 parameters

Deflection (mm)		Equivalent bending stress (MPa)		Electrical resistivity (kΩ-cm)			Number of micro-cracks
δ_{LOP}	δ_{MOR}	f_{LOP}	f_{MOR}	ρ_0	ρ_{cr}	ρ_y	n_{cr}
0.112	2.868	3.36	21.87	59.48	59.37	77.01	23.48

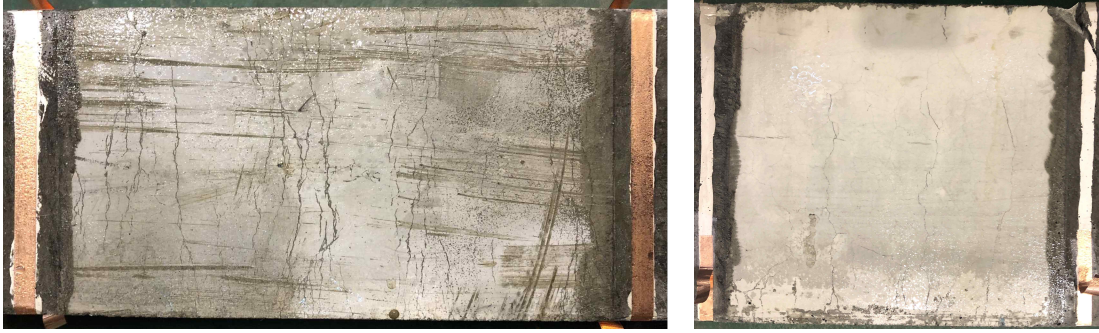


Fig. 36 - 자기감지 섬유보강 콘크리트를 타설한 철근콘크리트 빔의 미세균열 거동

강섬유 보강 시멘트 복합재료의 부분 타설 철근 콘크리트 빔의 전단파괴 양상을 Fig. 37에 나타내었다. 현재 설계안으로써의 부분적으로 강섬유 보강 시멘트 복합재료를 타설한 철근콘크리트 빔은 기존 구조물에 적용 시 높은 인장 저항 성능을 가지는 SFRC와 전단철근 배근의 생략으로 인하여 안전파괴 (인장 측 파괴)가 아닌 전단파괴를 유도할 수 있으므로, 하부에 타설된 MGFRC의 두께를 감소시킴으로써 인장 측 파괴를 유도시켜 그 때의 전기-역학적 거동을 다시 평가해야할 필요가 있다.



Fig. 37 - 자기감지 섬유보강 콘크리트의 휨 인장 하중 하에서의 전단 파괴 형상

- 실험목적

실제 구조물 (신규건설 구조물, 기존 구조물)에 대한 적용성 검토를 위하여 1) 철근콘크리트 빔 전체를 자기감지 섬유보강 콘크리트로 타설하여 신규건설 구조물에 대한 자기감지 능력을 평가하였으며, 2) 부분적으로 자기감지 섬유보강 콘크리트를 타설하여 기존 구조물에 대한 자기감지 능력을 평가하였다. 또한, 이전 실험을 통하여 얻은 실험 결과를 통하여 시험체의 단면적과 철근의 종류를 변경하여 재실험을 수행하였다.

- 실험프로그램

시험체 제작에 사용된 일반콘크리트 (normal concrete, NC)는 압축강도 95 MPa의 모르타르 매트릭스이며, 자기감지 콘크리트 (steel-fiber-reinforced concrete, SFRC)는 강섬유보강 콘크리트의 자기감지 능력을 향상시키기 위하여 초단유리섬유를 5% 치환시킨 초단유리섬유 보강 콘크리트 (milled glass fiber reinforced concrete, MGFRC)를 사용하였다 (Table 4).

SFRC에 보강된 강섬유는 long smooth 강섬유 (L=30 mm, D=0.3 mm)와 medium smooth 강섬유 (L=19.5 mm, D=0.2 mm)로 각각 1 vol.%씩 총 2 vol.% 보강되었다. 또한, 초단유리섬유는 길이 0.3 mm, 직경 0.0135mm로 보강된 강섬유와 초단유리섬유의 형상을 Fig. 5에 나타내었다. 철근 콘크리트 빔 제작에 사용된 철근은 이전 실험에서 사용된 D-13 (Table 14)에서 항복강도 400 MPa을 가지는 SD400으로 직경 9.53 mm의 D-10으로 변경하여 사용하였다 (Table 17 참조). 철근은 콘크리트 빔의 인장 측에 설계되었으며, 파괴 시 인장철근이 항복하도록 하여 철근 2개를 보강하였다. 콘크리트 빔은 150 X 250 mm의 단면적에서 150 X 150 mm을 가지는 빔으로 변경하여 지간은 이전 실험과 동일하게 750 mm로 하였으며, 시험체의 총 길이는 지간 거리에 최소 75 mm 길게 제작한다는 KS 규격에 따라 시험체의 총 길이를 900 mm으로 제작하였다 (Fig. 38 참조).

전기저항 변화는 4 탐침 저항성 방식 (4-probe method)으로 전기저항의 측정을 통해 조사되었으며, 외부 전극 2개 사이의 거리는 550 mm, 전압을 측정하는 내부 전극 2개는 전류용 전극에서 안쪽으로 250 mm 거리에 위치하도록 하였다 (Fig. 38 참조).

Table 17 - 철근의 특성

Type	Diameter (mm)	Cross-sectional area (mm ²)	Tensile strength (MPa)
			f_y
SD400 (D-10)	9.53	142.6	400

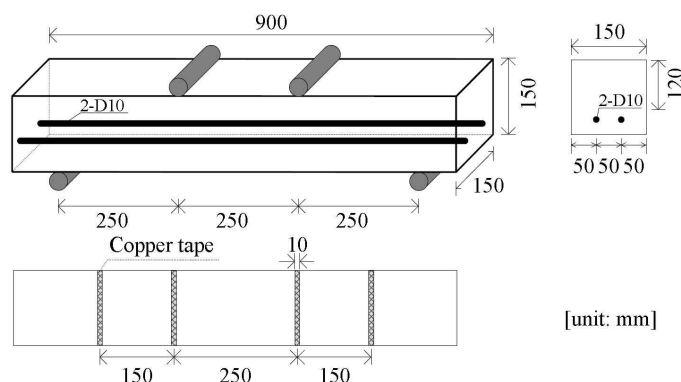


Fig. 38 - 철근콘크리트 빔의 기본 설계 (재설계)

결정된 단면적에 따른 철근의 인장 축 설계와 그 적정성을 아래와 같이 계산하였다.

(가정사항) $d=120\text{ mm}$ (피복두께= 30 mm)

① 철근 (SD400/2*D-10)의 적정성 검토: $f_y = 400\text{ MPa}$, $A_s = 142.6\text{ mm}^2$, $l = 900\text{ mm}$

$$\rho_b = 0.85\beta_1 \frac{f_{ck}}{f_y} \frac{0.03}{0.003 + \epsilon_y} = 0.85 \times 0.65 \times \frac{89}{400} \times \frac{0.003}{0.003 + 0.0027} = 0.0738$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.007(f_{ck} - 28) = 0.85 - [0.007 \times (89 - 28)] = 0.423 \geq 0.65 \quad \therefore \beta_1 = 0.65$$

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{400}{200000} = 0.002$$

$$\rho_{\min} = \frac{A_{s,\min}}{b_w d} = \frac{106.13}{150 \times 120} = 0.0059$$

$$A_{s,\min} = \frac{0.25 \sqrt{f_{ck}}}{f_y} b_w d = \frac{0.25 \times \sqrt{89}}{400} \times 150 \times 150 = 106.13\text{ mm}^2$$

$$A_{s,\min} = \frac{1.4}{f_y} b_w d = \frac{1.4}{400} \times 150 \times 150 = 63\text{ mm}^2 \quad \therefore A_{s,\min} = 106.13\text{ mm}^2$$

$$\rho_{\max} = \frac{0.003 + \epsilon_y}{0.007} \rho_b = \frac{0.003 + 0.002}{0.007} \times 0.0738 = 0.0527$$

$$\rho = \frac{A_s}{b_w d} = \frac{142.6}{150 \times 120} = 0.0079$$

$$\rho = 0.0079 \leq \rho_b = 0.0738 \text{ (저보강보: 철근의 항복으로 인하여 인장 축 파괴)}$$

$$\rho_{\min} = 0.0059 \leq \rho = 0.0079 \leq \rho_{\max} = 0.0527 \text{ (적합)}$$

② 중립축

$$C = T$$

$$0.85f_{ck}ab = 0.85f_{ck}(\beta_1 c)b = A_s f_y$$

$$0.85 \times 89 \times (0.65 \times c) \times 150 = 142.6 \times 400$$

$$c = \frac{142.6 \times 400}{0.85 \times 89 \times 0.65 \times 150} = 7.73\text{ mm}$$

$$C = 0.85f_{ck}ab = 0.85 \times 89 \times (0.65 \times 7.73) \times 150 = 57015.51\text{ N} = 57.02\text{ kN}$$

$$T = A_s f_y = 142.6 \times 400 = 57040\text{ N} = 57.04\text{ kN}$$

$$\frac{\epsilon_s}{d-c} = \frac{\epsilon_c}{c}$$

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_c}{c}(d-c) = \frac{0.003}{7.73} \times (120 - 7.73) = 0.0436 \geq \epsilon_y = 0.002 \text{ (인장철근 항복)}$$

③ 철근의 정착길이 검토

$$\text{기본 정착길이} : l_{ab} = \frac{0.60f_y d_b}{\sqrt{f_{ck}}} = \frac{0.6 \times 400 \times 9.53}{\sqrt{89}} = 242.44\text{ mm}$$

보정계수

$$: \text{철근순간격 } 50 - 9.53 = 140.47\text{ mm} \geq 2d_b = 2 \times 9.53 = 19.06\text{ mm}$$

$$: \text{피복두께 } 30 - \frac{d_b}{2} = 30 - \frac{9.53}{2} = 25.235\text{ mm} \geq d_b = 9.53\text{ mm}$$

$$\therefore \alpha\beta\gamma = 1.3 \times 1.0 \times 1.0 = 1.3$$

$$\text{정착길이 } l_{ab}(\alpha\beta\gamma) = l = 242.44 \times 1.3 = 315.17\text{ mm} \leq 900\text{ mm} \text{ (정착길이 확보)}$$

④ 설계휨강도

$$M_n = T \times (d - \frac{a}{2}) = 57.04 \times (120 - \frac{0.65 \times 7.73}{2}) = 6701.50 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

강섬유 보강 시멘트 복합재료의 부분 타설은 철근콘크리트 빔의 인장 측에 하면에서부터 50 mm만큼 타설하였다 (Fig. 39 참조). 제작된 시험체는 타설 후 상온에서 이틀간 건조시킨 후, 14일 동안 24°C에서 습윤양생 되었다.

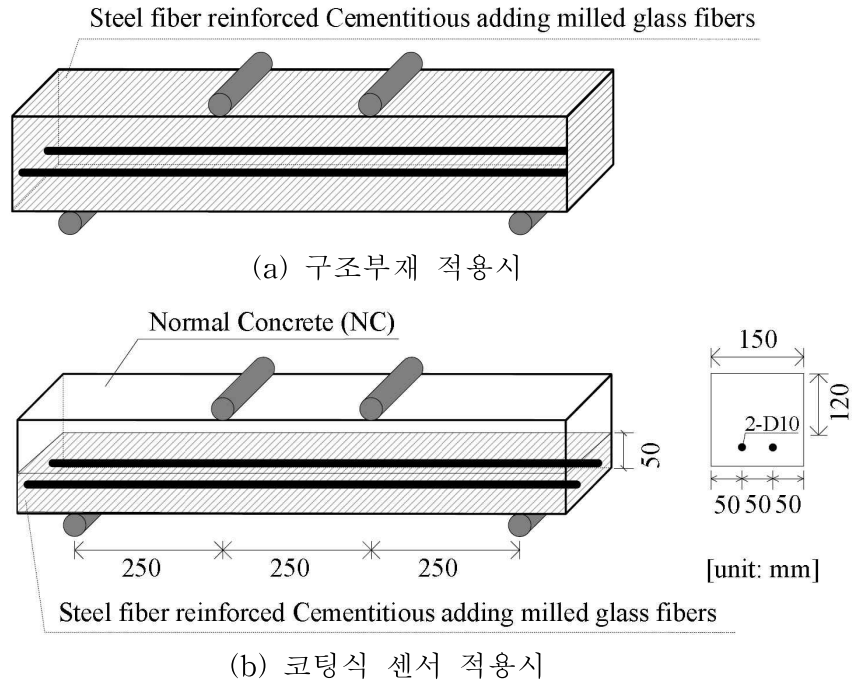


Fig. 39 - 시험체 제작 형상 (재설계)

4점 재하 휨 실험의 전경을 Fig. 40에 나타내었다. 4점 재하 휨 실험은 만능재료시험기 (Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 변위제어 1.0 mm/min의 속도로 수행하였다. Data frequency는 1 Hz이며, linear variable differential transformers (LVDTs)를 사용하여 시험체 하면에서의 처짐을 측정하였다. 준비된 시험체에 4개의 전선을 연결한 후에 멀티미터 (Keysight 3458A)의 전류원을 50 μ A로 하여 각 시험체의 전기저항을 측정하였다. 실험 수행 이전에 polarization effect를 최소화하기 위하여 전기저항 안정화 시간을 20분으로 설정한 후 실험을 수행하였다.



Fig. 40 - 실험 전경

A5-(2.1) 구조부재로 적용시 시험체 설계 및 제작

- 실험결과

전체적으로 강섬유 보강 시멘트 복합재료를 타설한 철근 콘크리트 빔은 손상 또는 변형에 따라 명확한 전기저항률 감소 거동을 보였다 (Fig. 41 참조). 재설계된 철근 콘크리트 빔은 인장 측 파괴로 유도되어 파괴되었으며 다수미세균열을 보이는 변형 경화거동 또한 나타내었다 (Fig. 42 참조).

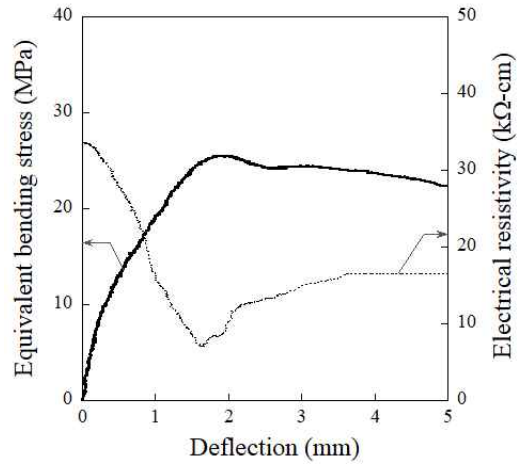


Fig. 41 - 강섬유 보강 시멘트 복합재료를 전체 타설한 철근 콘크리트 빔의 휨 인장 하중 하에서의 전기-역학적 거동



Fig. 42 - 강섬유 보강 시멘트 복합재료를 전체 타설한 철근 콘크리트 빔의 휨 인장 하중 하에서의 미세균열 거동

A5-(2.2) 코팅식 센서로 적용 시 실험체 설계 및 제작

- 실험결과

철근 콘크리트 빔의 인장 측에 부분적으로 강섬유 보강 시멘트 복합재료를 타설한 철근 콘크리트 빔 또한 재설계를 통하여 인장 측 파괴를 유도할 수 있었다. 또한, 인장 측 하부에 코팅식으로 강섬유 보강 시멘트 복합재료를 부분적으로 타설하는 것만으로도 손상 또는 변형 감지가 가능한 것을 확인하였다 (Fig. 43 참조). 부분적으로 강섬유 보강 시멘트 복합재료를 타설한 철근 콘크리트 빔의 미세균열은 강섬유 보강 시멘트 복합재료를 타설한 하면 50 mm에서 발생하였다 (Fig. 44 참조).

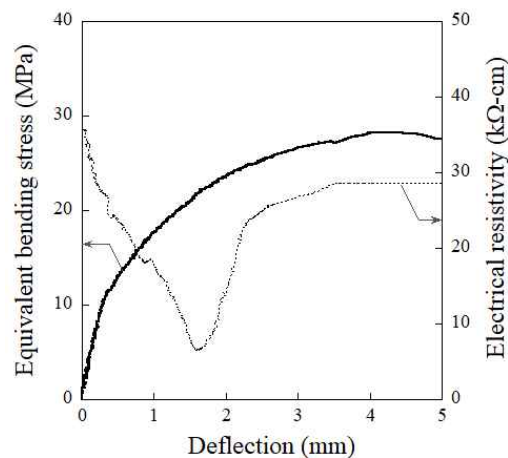


Fig. 43 - 강섬유 보강 시멘트 복합재료를 부분 타설한 철근 콘크리트 빔의 휨 인장 하중 하에서의 전기-역학적 거동



Fig. 44 - 강섬유 보강 시멘트 복합재료를 부분 타설한 철근 콘크리트 빔의 휨 인장 하중 하에서의 미세균열 거동

- 결과분석

구조 부재로써 또는 코팅식 센서로써 강섬유 보강 시멘트 복합재료는 자기감지 재료로 충분한 가능성이 있음을 확인하였다. 하지만 실제 부재에 적용하기 위해서는 실험실 규모의 철근 콘크리트 빔이 아닌 실제 부재로 사용되는 크기의 철근 콘크리트 빔으로 자기감지 능력을 평가해야할 필요가 있다.

A5. 코팅 또는 매립식 적용 시 SS-FRCCs의 SOC 시설물에서의 전극 적용방안 개발 및 도출

- 실험목적

구조물에 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료를 코팅 또는 매립식으로 적용할 수 있는 적용방안을 도출하기 위하여 전극의 설치형상 등을 결정하고, 센서를 제작하고자 함.

- 실험 프로그램

본 실험은 콘크리트 구조물의 사후 서비스(보수보강, 유지관리 등)를 제공하기 위한 기초적인 연구의 일부로써 기존 시멘트 복합체의 전기저항률 측정방법에 사용되는 부착식 전극을 “시멘트 복합체의 자기감지를 위한 전극 조건”을 바탕으로 개발하여 기존 부착식 전극 방식을 보완 또는 대체할 수 있는 전극을 개발하는 것이다. Han et al. (2007)이 보고한 바에 의하면 시멘트 복합체의 전기저항률 변화를 측정하기 위한 전극의 조건은 아래와 같다.

- 1) 전극 재료 자체의 전기 전도성이 뛰어나 전극의 전기저항에 영향을 받지 않아야 함
- 2) 시멘트 복합재료의 역학적 및 전기적 특성에 미칠 수 있는 영향이 적어야 함
- 3) 시멘트 복합체의 부식에 내성이 있어야 하며, 내구성이 양호해야 함

상기의 “시멘트 복합체의 자기감지를 위한 전극 조건”에 따라 개발하려는 전극은 두가지 부분으로, 1) 시멘트 복합체의 전기저항률 측정을 위한 전극부 (Probe part); 2) 전류를 시멘트 복합체 내부로 흘려보내는 접촉부(Adhesive part)로 나뉘어 개발되었다. 실험에 사용된 전극부의 재료는 시멘트 복합체의 자기감지를 위한 전극 조건에 따라 기존에 자주 사용되는 copper tape과 새롭게 개발하려는 전극의 재료로 copper film이 사용되었고, 접촉부에는 기존 방법에 사용되는 silver paste와 비교 군으로 부착형 carbon tape를 사용하였다. Fig. 45과 Table 18에 사용된 재료의 형상과 특성을 나타내었다.

- 전극부(Probe part)의 전도성 재료



< Copper tape, CT>



< Copper film, CF >

- 접촉부(Adhesive part)의 전도성 재료



< Silver paste, SP>



< Carbon tape, CBT>

Fig. 45 - 접촉부와 전극부에 사용되는 전도성 재료

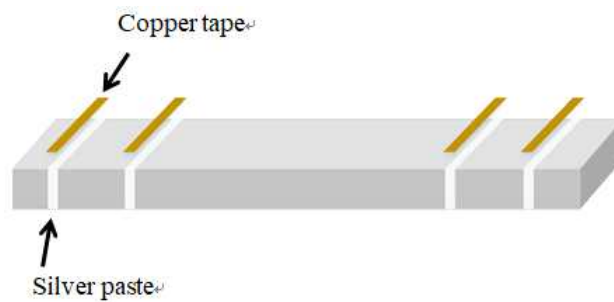
Table 18 - 전도성 재료의 특성

Electrode material	Thickness (mm)	Length (mm)	Electrical conductivity (/kΩ-cm)
Copper tape	0.04	50	5.55×10^7
Copper film	0.3	50	31.5×10^7
Carbon tape	0.012	50	12.5×10^7

- 전극의 종류

전극 개발을 위한 재료적 성능 평가를 위하여 선별된 재료를 사용 또는 융합하여 전극부와 접촉부로 구분하여 전극을 총 3가지로 구성하였다.(Fig. 46 참조) 1) 전극부에 Copper tape와 접촉부에 Silver paste가 사용된 CT+SP 2) 전극부에 Copper film과 Copper line을 결합한 Copper line probe 접촉부에 Carbon tape가 사용된 CF+CL+CBT; 3) 전극부에 Copper film과 접촉부에 Carbon tape를 사용한 CBT+CF로 구분 하였다. Fig. 47에 전극의 종류를 나타내었다.

1) Silver paste가 사용된 전극의 형태



2) Carbon tape 가 사용된 전극의 형태

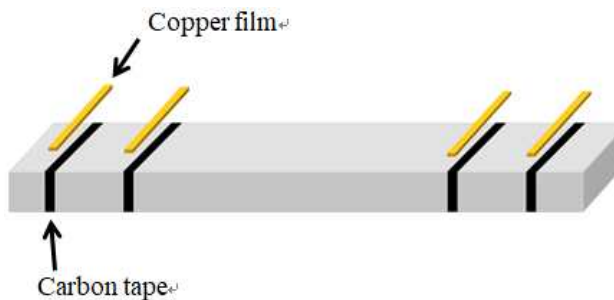


Fig. 46 전극별 적용 형상

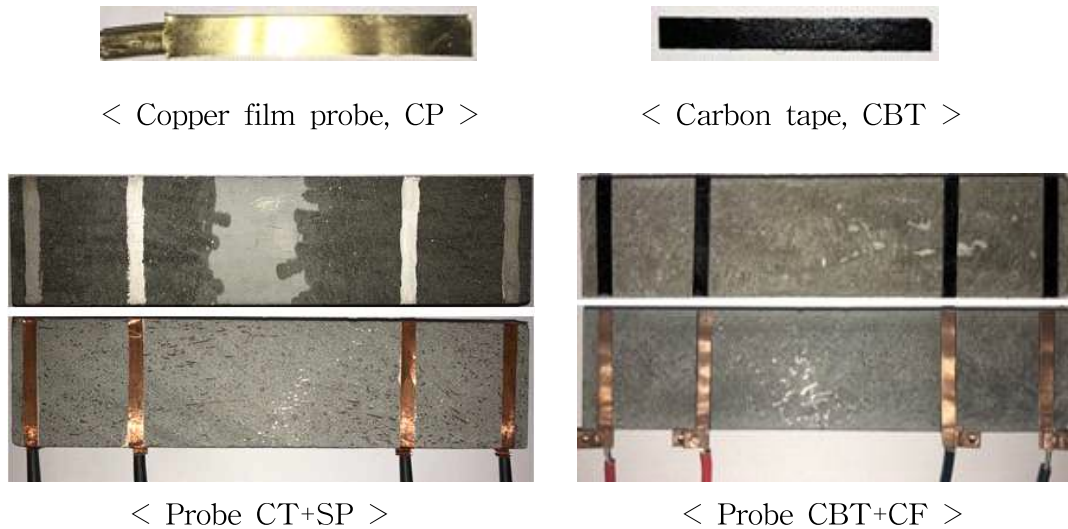


Fig. 47 - 전극의 종류와 형상

- Polarization time 측정 실험

전극 개발을 위한 전극의 성능 평가를 위하여 DC 전류를 사용하여 시멘트 복합체의 전기 저항률 측정 시 발생하는 polarization effect 발생 유무를 통하여 전극의 사용 가능성 및 성능을 평가하였다. 실험에 사용된 시험체는 빔 형태의 50*25*200 mm이고 압축강도 95 MPa의 강섬유 보강 콘크리트이다. 매트릭스의 구성요소 및 압축강도를 Table 19에 나타내었다.

Table 19 - 매트릭스 구성성분 및 압축강도

Cement (Type III)	Silica sand (#40)	Fly ash	Super-plasticizer	water	f_{ck} (MPa)
1.0	1.0	0.15	0.0055	0.35	95

보강된 강섬유는 long smooth steel fiber (L=30 mm, D=0.3 mm)와 medium smooth steel fiber (L=19.5 mm, D=0.2 mm)로 각각 1 vol.%씩 총 2 vol.% 보강하였다. 보강된 강섬유의 특성을 Table 20에 나타내었다.

Table 20 - 강섬유의 특성

Fiber type	Diameter (mm)	Length (mm)	Density (g/cc)	Tensile Strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Electrical resistivity (k Ω -cm)	Volume contents (%)
Long smooth	0.3	30	7.90	2942	200	2.06*10 ⁻⁸	1.0
Medium smooth	0.2	19.5	7.90	2447	200	2.06*10 ⁻⁸	1.0

Polarization time 실험은 모든 시험체에 대하여 동일한 조건하에서 실험을 진행하기 위하여 항온항습기의 온도 25°C, 습도 60%로 하고 멀티미터 전류원 5 로 120분 동안 측정하였다.



Fig. 48 - 분극화 실험 전경

- Polarization time 측정 결과

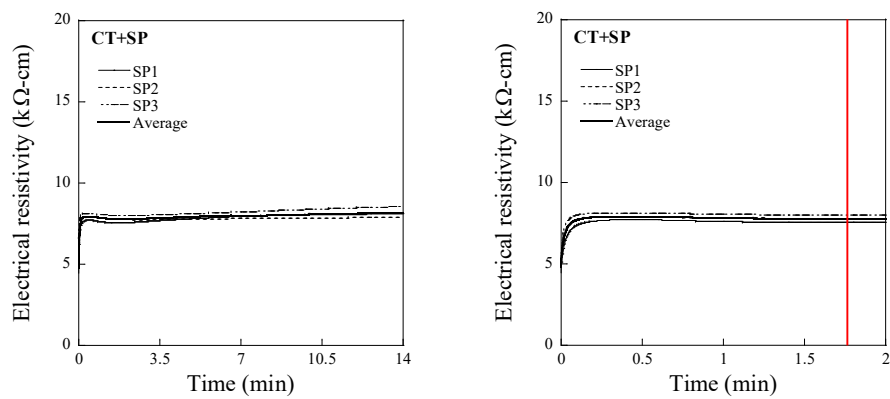


Fig. 49 - CT+SP 전극의 전기적 거동

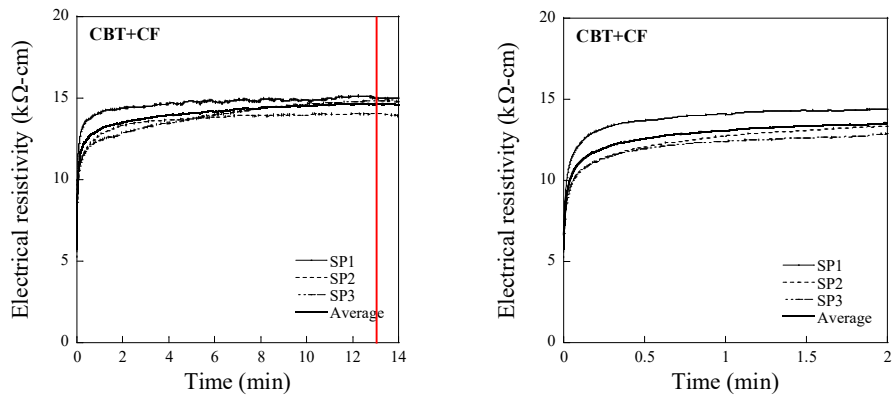


Fig. 50 - CBT+CF 전극의 전기적 거동

Table 21 - 개발된 전극의 polarization time 측정 실험의 parameter

Series		Electrical resistivity (kΩ-cm)				Change in the electrical resistivity (kΩ-cm)	Polarization time (min)
		ρ_0	ρ_3	ρ_7	ρ_{14}	$\Delta\rho$	
CT+SP	SP1	4.43	7.65	7.94	8.11	3.68	1.71
	SP2	4.87	7.75	7.81	7.88	3.01	1.83
	SP3	5.09	8.03	8.22	8.57	3.48	1.73
	Avg.	4.79	7.81	7.99	8.19	3.39	1.76
CBT+CF	SP1	6.55	14.49	14.89	15.04	8.49	12.87
	SP2	5.66	13.58	13.93	13.92	8.26	12.97
	SP3	5.06	13.23	14.19	14.77	9.71	12.84
	Avg.	5.75	13.77	14.34	14.58	8.82	12.89

CT+SP 전극과 CBT+CF 전극의 전기저항률 변화와 polarization time의 경우 CT+SP 전극의 경우 평균 1.76분의 polarization time을 보였고, CBT+CF의 경우 12.89분의 polarization time을 보였다(Fig. 50과 Table 21 참조). 이는 전극의 접촉부와 전극부에 쓰이는 재료적인 측면에 차이를 보인 것으로 판단된다.

-정적 인장 하중 하에서의 전극별 전기-역학적 성능평가

전기-역학적 성능평가를 위해 사용된 시험체는 폭 50 mm, 두께 25 mm 덤벨형 인장 시험체이며, 매트릭스 구성성분은 상기의 polarization time 실험에 사용된 시험체와 동일한 매트릭스이다. 준비된 시험체에 4개의 각각의 전극을 연결한 후에 멀티미터의 전류원을 5 μ A 로 하여 각 시험체의 전기저항률 안정화 시간을 가지고, 300 ton 용량의 만능 재료 시험기 (Universal testing machine, UTM)을 이용하여 Fig. 51와 같이 정적 인장 시험을 수행하였다. 인장 속도는 1.0 mm/min으로 제어하였다.

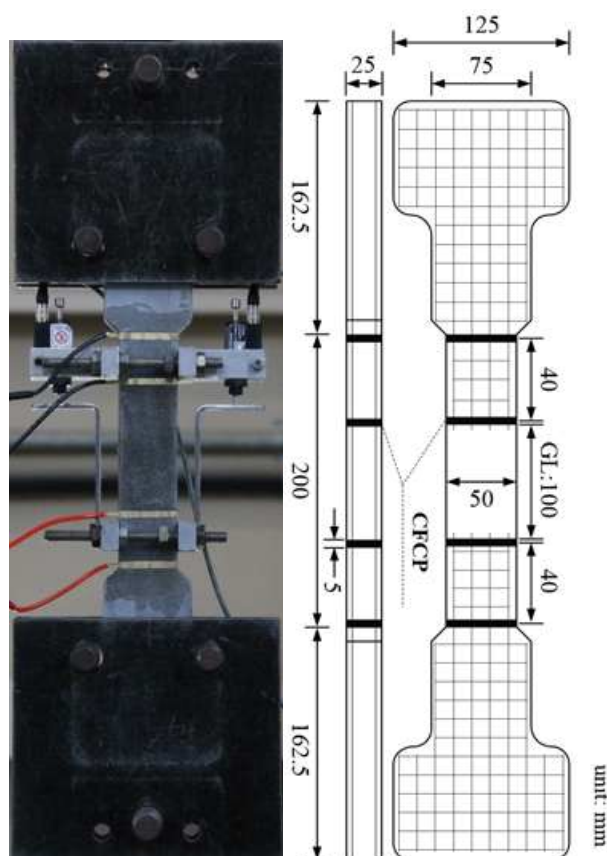
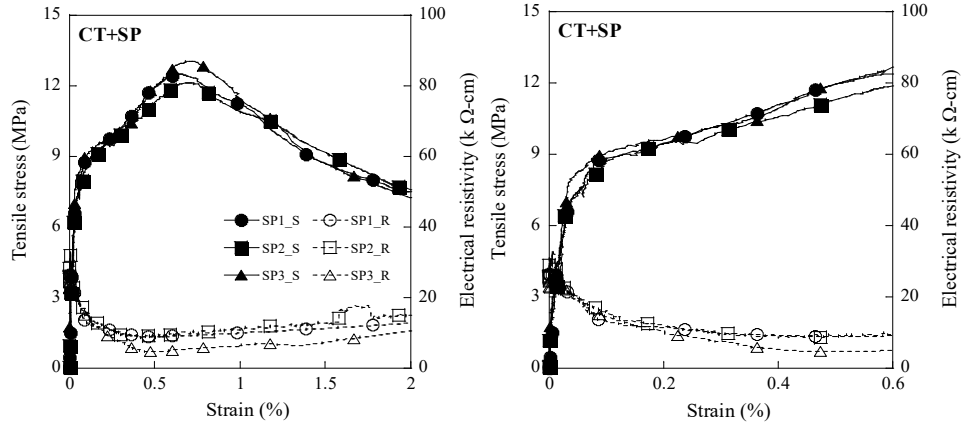


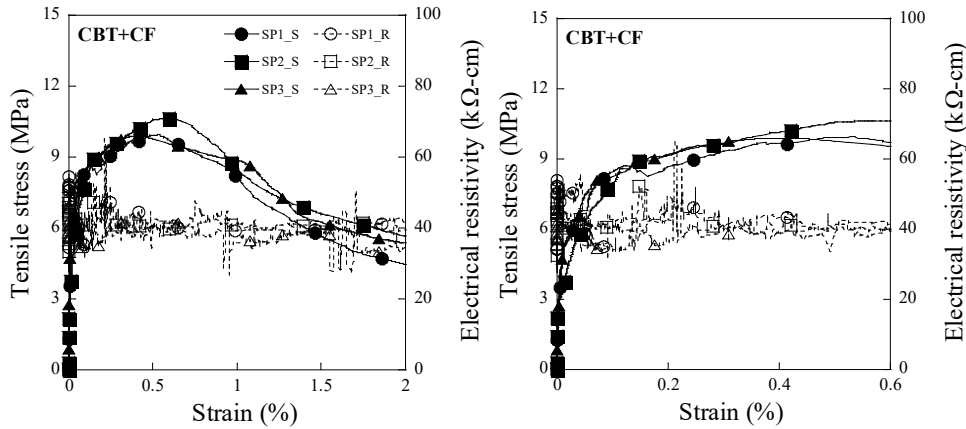
Fig. 51 - 개발된 전극의 전기-역학적 성능평가를 위한 실험 전경 및 전극 배치도

- 실험결과

전극에 따른 정적 인장 하중 하에서 전기-역학적 거동을 Fig. 52와 Table 22에 나타내었다. 기존에 사용되는 CT+SP 전극의 경우 초기 균열부터 최종균열까지 전기저항률이 급격하게 감소하는 경향을 보였지만, CBT+CF 전극의 경우 감소하거나 증가하는 거동을 보이지 않고 탄성영역에서부터 변형 경화 구간 사이에서 심한 노이즈가 발생한 것으로 나타났다. 이는 최종균열 전까지의 다수 미세균열 발생에 의한 전기적 거동을 보인 것으로 판단된다(Fig. 53 참조).



(a) CT+SP 전극의 전기-역학적 거동



(b) CBT+CF 전극의 전기-역학적 거동

Fig. 52 - CT+SP 전극과 CBT+CF 전극의 전기-역학적 거동

Table 22 - 전극별 전기-역학적 거동 조사의 parameter

Series	No.	Tensile strain (%)		Tensile stress (MPa)		Electrical resistivity (kΩ-cm)			Change in the electrical resistivity (kΩ-cm)			n_{cr}
		ϵ_{cc}	ϵ_{pc}	σ_{cc}	σ_{pc}	ρ_0	ρ_{cc}	ρ_{pc}	$\Delta\rho$	$\Delta\rho_1$	$\Delta\rho_2$	
CT+SP	SP1	0.02	0.64	5.6	12.5	26.25	24.13	9.12	17.13	2.12	15.01	17.7
	SP2	0.02	0.70	5.6	12.1	26.30	23.72	9.83	16.47	2.59	13.89	17.3
	SP3	0.02	0.70	5.5	12.1	23.67	22.08	5.47	18.20	1.58	16.61	18.2
	Aver.	0.02	0.68	5.6	12.3	25.41	23.31	8.14	17.27	2.10	15.17	17.7
CBT+CF	SP1	0.02	0.53	5.5	9.9	32.42	50.02	39.58	7.16	17.60	10.44	18.4
	SP2	0.02	0.58	4.7	10.6	38.96	41.30	39.97	1.01	2.34	1.33	14.1
	SP3	0.01	0.41	5.4	9.9	31.94	43.18	44.55	12.61	11.24	1.37	16.3
	Aver.	0.02	0.51	5.2	10.1	34.44	44.83	41.37	6.93	10.39	4.38	16.3



(a) CT+SP 전극이 적용된 시험체의 표면 미세균열



(b) CBT+CF 전극이 적용된 시험체의 표면 미세균열

Fig. 54 - 전극에 따른 SS-SFRCs의 정적 인장 하중 하 미세균열 거동

- 결과분석

손상에 따른 전기-역학적 변화 거동은 기존의 사용되는 CT+SP 전극이 CBT+CF 전극보다 우수한 결과를 보였다. 전극에 사용된 재료 중 접촉부 부분에서의 CBT+CF 전극의 경우 Silver paste와 같은 액체 형태가 아닌 부착식의 tape이기 때문에 매트릭스 표면과의 접촉에서 다소 성능이 저하되는 원인이 될 수 있다고 판단된다. 하지만, 접촉부가 부착식인 CBT+CF의 경우 미세균열에 대한 응답도가 높은 것으로 판단된다.

B. 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 실시간 전기-역학적 응답을 계측 및 분석하기 위한 시스템 및 손상 검출 알고리즘 개발

B1. 실시간 전기-역학적 응답 계측용 하드웨어 개발

B1.1 전기-역학적 응답 계측용 하드웨어

- 개발 목적

Structural Health Monitoring (SHM) 목적에 맞는 실시간 구조물 임피던스 신호 계측을 통해서 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료가 타설된 구조물의 위험구역에 상태를 평가하기 위한 목적.

- 하드웨어 구성 요소

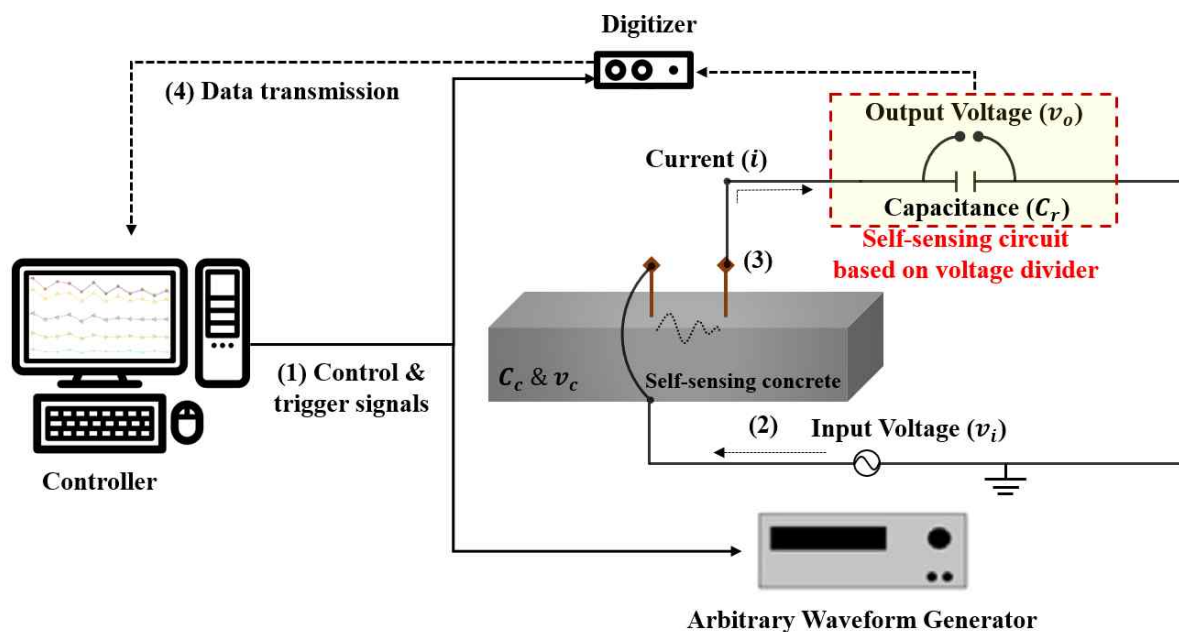


Fig. 55 - 실시간 임피던스 신호 계측용 하드웨어 구성

실험에 사용될 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체 기반 시험체의 실시간 전기 임피던스 신호를 계측하기 위한 하드웨어 구성은 위의 Fig. 55와 같다. 전기 임피던스 신호 계측을 위한 전기회로는 다음의 장비들로 구성되어 있다. 디자인된 신호를 생성하기 위한 Arbitrary waveform generator (AWG), 그리고 비 균질 물질인 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체를 통해서 회로로 들어오는 작은 양의 전기 임피던스 신호를 계측하기 위한 자가센싱 회로 및 임피던스 신호를 계측하기 위한 디지털라이저 (Digitizer), 마지막으로 이 장비들을 컨트롤하기 위한 컨트롤러 (Controller)로 구성되어 있다. 각각의 장비는 아래의 Fig. 56과 같다.

입력 전압으로는 AC 신호를 사용했으며, 다양한 주파수에 따른 전기 임피던스 값을 계측하기 위해서 Frequency sweeping이 가능하도록 하드웨어를 구성했다. 구성된 하드웨어를 통해서 계측되는 신호는 다양한 노이즈 성분을 포함하므로 이러한 노이즈 성분을 최소화하기 위해서 일정 횟수 이상의 측정을 통해서 평균화된 신호를 사용한다.

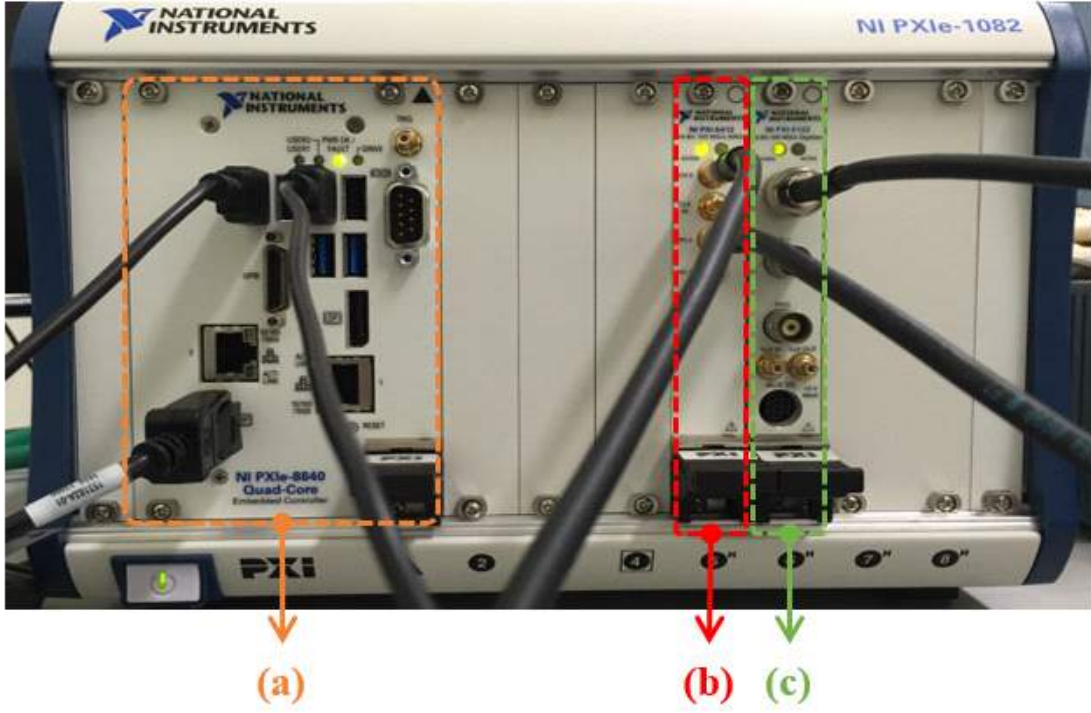


Fig. 56 - 실시간 전기 임피던스 신호 계측의 구성 장비 (a) 컨트롤러, (b) AWG, (c) 디지털타이저

전기-역학적 측정을 위해서 임의의 디자인된 파형을 통해 임피던스 신호를 계측하는 과정은 다음의 수식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 i(\tau) &= C_c [\dot{v}_i(\tau) + \dot{v}_c(\tau) - \dot{v}_o(\tau)] = C_r \dot{v}_o(\tau) \\
 C_c \int_0^t (\dot{v}_i(\tau) + \dot{v}_c(\tau) - \dot{v}_o(\tau)) d\tau &= C_r \int_0^t \dot{v}_o(\tau) d\tau \\
 v_o(t) &= \frac{C_c}{C_c + C_r} (v_i(t) + v_c(t)) \simeq \frac{C_c}{C_c + C_r} v_i(t) \\
 SF &= \frac{\sum_0^{m-1} \tilde{v}_o[k] \cdot \sin(wk\Delta t)}{\sum_0^{m-1} \tilde{v}_i[k] \cdot \sin(wk\Delta t)}
 \end{aligned} \tag{1}$$

수식의 기호는 Fig. 55에 명시된 것처럼 $C_c, v_c, v_i, v_o, i, C_r$ 은 각각 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 정전용량, 전압, Input 전압, Output 전압, Output 전류, Reference의 정전용량을 나타낸다. 그리고 τ 는 Short time term을 의미한다. $\dot{v}, \tilde{v}, w$ 는 전압의 미분 값과 교류 전압, 각속도를 나타낸다. 수식 (1)을 통해서 구한 Scaling factor (SF)로 Input 파형을 사용해 전기 임피던스를 수식 (2)를 사용해 계측한다.

$$\begin{aligned}
 v_o(k) &= SF \cdot (v_i(k) + v_c(k)) \\
 \Rightarrow v_c(k) &= \frac{1}{SF} v_o(k) - v_i(k)
 \end{aligned} \tag{2}$$

위에서 구성한 하드웨어를 이용하여 실시간 전기 임피던스 신호를 계측하기 위해 코딩한 소프트웨어는 LabVIEW 프로그램을 사용했으며, 구성은 아래의 Fig. 57과 같다. Front panel에서 설정할 수 있는 변수들은 입력 Start frequency, End frequency를 조절할 수 있으며, Sampling rate, 평균하고자 하는 횟수, 사용된 Reference 정전용량의 크기를 입력할 수 있다. 그리고 사용되는 전원은 Broadband의 Frequency sweeping을 설정할 수 있고, Chirp 신호 등 다양한 전원을 설정할 수 있도록 코딩되어 있다. 또한 추가적인 장비가 구비된다면 Multi channel로 신호를 취득할 수 있다. 아래의 Front panel을 구성하기위한 Block diagram은 아래의 Fig. 58과 같다.

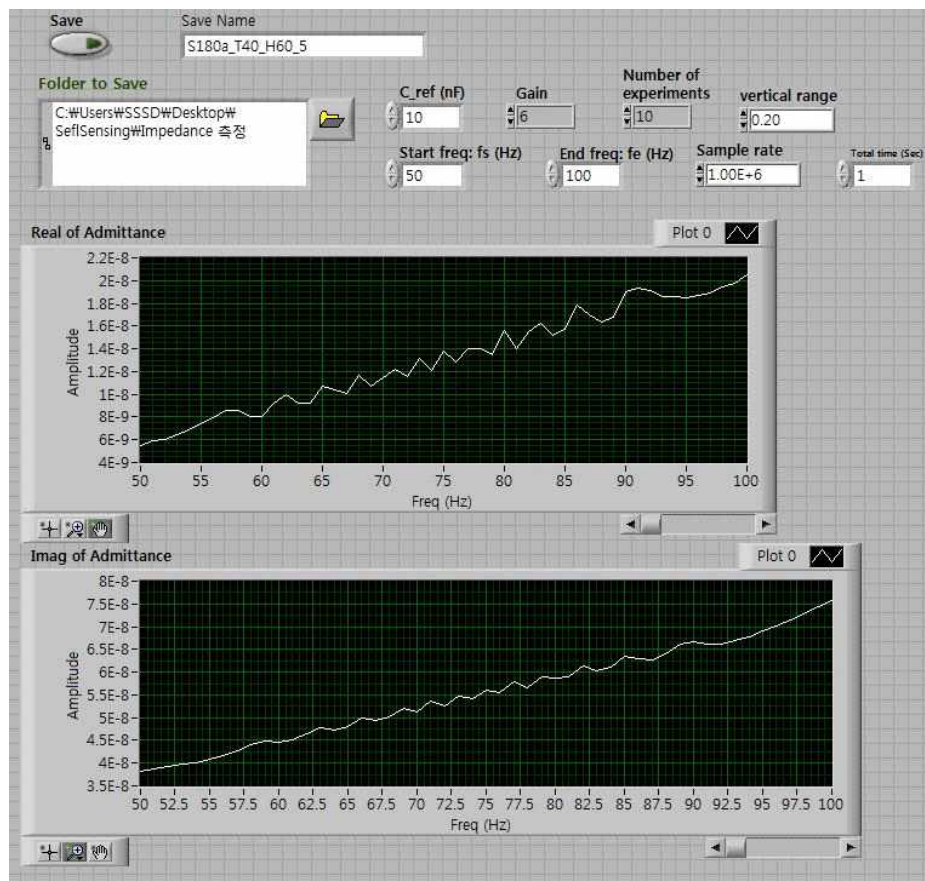


Fig. 57 - 실시간 전기 임피던스 계측 시스템 사용 소프트웨어 Front Panel

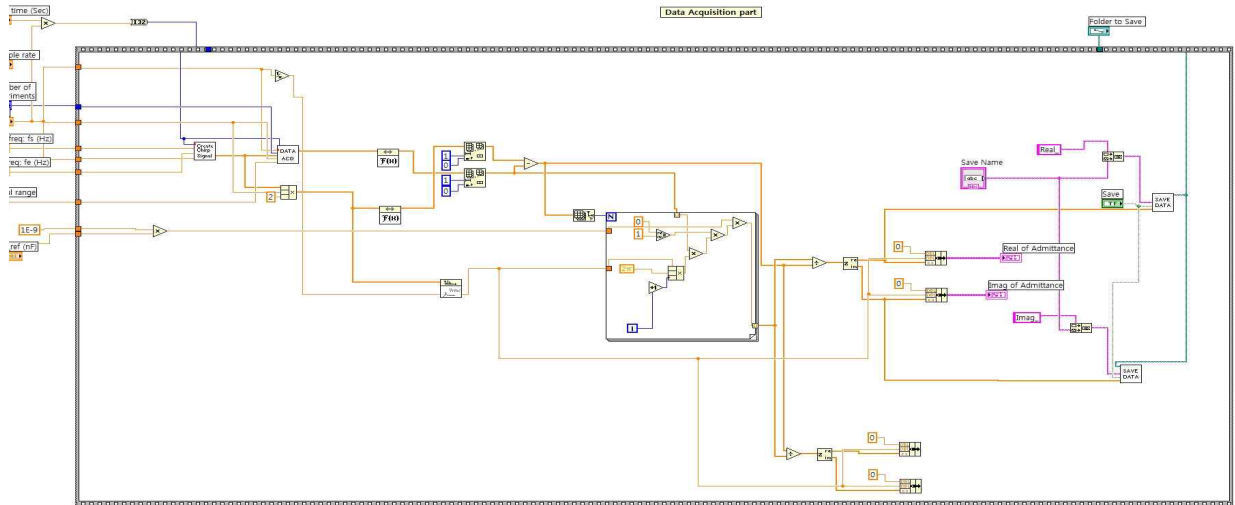


Fig. 58 - 실시간 전기 임피던스 계측 시스템 사용 소프트웨어 Block diagram

B1.3 온습도 변화에 따른 전기 임피던스 신호 변화 실험

- 실험 목적

실시간 전기 임피던스 신호 계측 시스템을 통해서 계측한 전기 임피던스 신호는 상태변화뿐만이 아닌 온도, 습도 및 자연환경에 따라서도 임피던스 신호가 변화하므로 이러한 온도, 습도에 따른 전기 임피던스 신호는 필터링이 필수적이다. 그렇기에 온도 및 습도의 변화에 따라서 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 온도에 따른 전기 임피던스 값이 어떤 특징을 가지고 변화하는지 파악하기 위한 실험이 필요하다.

- 실험 프로그램

온도, 습도변화에 따른 전기 임피던스 값의 변화를 계측하기 위한 온도, 습도 실험 조건은 아래의 Table 23에 명시되어 있다. 온도 실험은 60 %의 상대습도에서 -10 °C, 0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C 온도를 측정했고, 습도 실험은 20 °C의 온도에서 상대습도 40 %, 60 %, 80 %를 측정했다. 측정에 사용된 장비로는 앞에서 구성한 장비와 온습도 챔버를 사용했다 (Fig. 59 참조)

Table 23 - 온습도 변화 실험 조건

온도 실험		습도 실험	
온도 (°C)	상대습도 (%)	온도 (°C)	상대습도 (%)
-10	0	20	40
0	0	20	60
10	0	20	80
20	60		
30	60		
40	60		

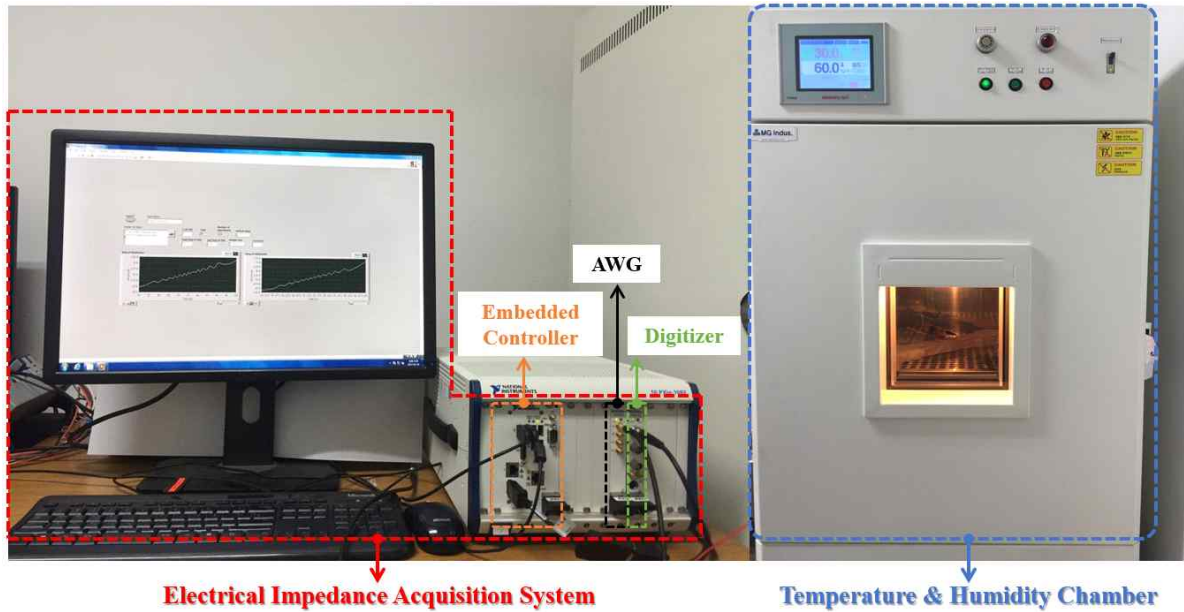


Fig. 59 - 온습도 실험 셋업

온도, 습도에 따른 전기 임피던스 값을 측정하기 위해서 사용된 파형은 65~85 Hz의 주파수를 가지는 교류신호를 사용했으며, 디지털라이저의 Sampling rate은 1 MHz 그리고 자기 감지 회로의 Reference capacitance의 용량은 10 nF을 사용했다. 또한 노이즈 성분을 제거하기 위해서 시간 영역에서 10 회 평균한 신호를 사용했다.

- 실험 결과

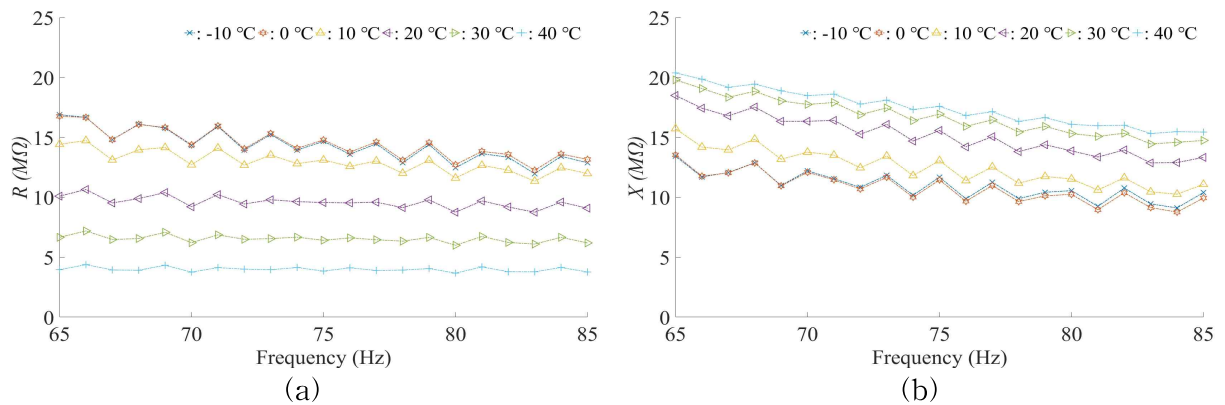


Fig. 60 - 온도 실험 결과 (a) 저항, (b) 리액턴스

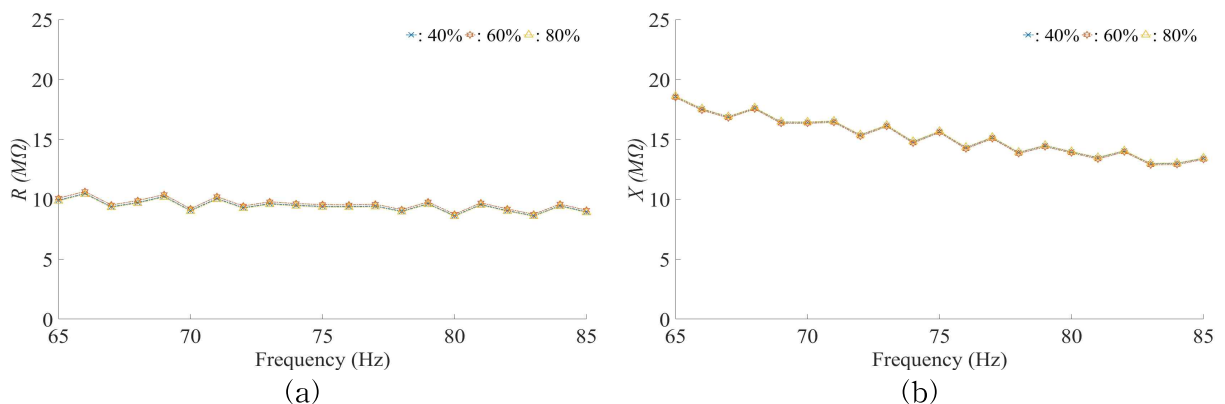


Fig. 61 - 습도 실험 결과 (a) 저항, (b) 리액턴스

전기 임피던스는 실수부인 저항 (R)값과 허수부인 리액턴스 (X)값으로 구성이 되어있다. 온도 실험 결과에서 볼 수 있듯이, 각각의 주파수에 따라서 전기 임피던스 값이 변화하는 것을 확인 할 수 있었고, 그리고 온도가 증가함에 따라서 저항 값은 감소하고 리액턴스 값은 증가하는 반대의 경향을 확인 할 수 있었다. 또한, 0 °C 이하의 온도에서는 전기 임피던스 값의 변화가 다른 온도에서의 변화보다 상대적으로 적은 것을 확인했다. 습도 실험결과 습도 변화에 따른 전기 임피던스 값의 변화는 온도 변화에 따른 전기 임피던스 값의 변화보다 상대적으로 미세한 것을 확인할 수 있었다.

B1.4 상태 변화에 따른 전기 임피던스 신호 변화 실험

- 실험 목적

개발된 실시간 전기-역학적 하드웨어 시스템을 통해서 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 상태 변화에 따른 전기 임피던스 값의 계측, 상태 변화에 따른 전기 임피던스 신호의 변화와 온도 및 습도에 따른 전기 임피던스 값의 변화 패턴을 파악하기 위한 실험 진행

- 실험 프로그램

상태 변화에 따른 전기 임피던스 신호를 계측하기 위한 실험 셋업은 아래의 Fig. 62와 같다. 계측에 필요한 개발된 실시간 전기-역학적 하드웨어 시스템과 UTM (Universal testing machine) 그리고 UTM 컨트롤러로 구성되어 있다. 휨 실험은 3-points 휨 실험으로 진행했고, 실험당시 실험실의 온도는 7 °C 그리고 상대습도는 30 %이다.



Fig. 62 - 상태 변화에 따른 전기 임피던스 신호 변화 실험 셋업

균열 발생 매커니즘에 따른 순차적인 전기 임피던스 신호를 계측하기 위한 실험 방식으로는 일정 변위를 주고 멈춘 상태에서 신호를 계측하고, 또 일정 변위를 주고 멈춘 상태에서 신호를 계측하는 방식으로 진행했다. 휨 실험의 변위 단계는 하중이 없을 때와, 0.5, 1, 2, 3, 4 mm로 실험을 진행했다. 휨 실험이 진행되는 동안 실시간으로 UTM을 통해서 측정된 힘-변위 그래프는 아래 Fig. 63과 같다. 순차적인 실험에 따른 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 인장면 균열발생 매커니즘은 아래 Fig. 64와 같다.

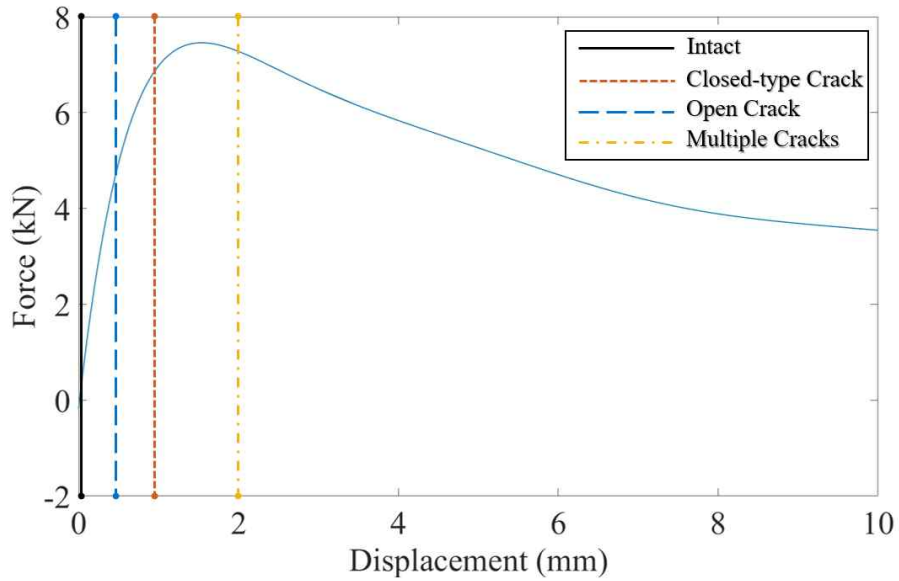


Fig. 63 힘-변위 그래프

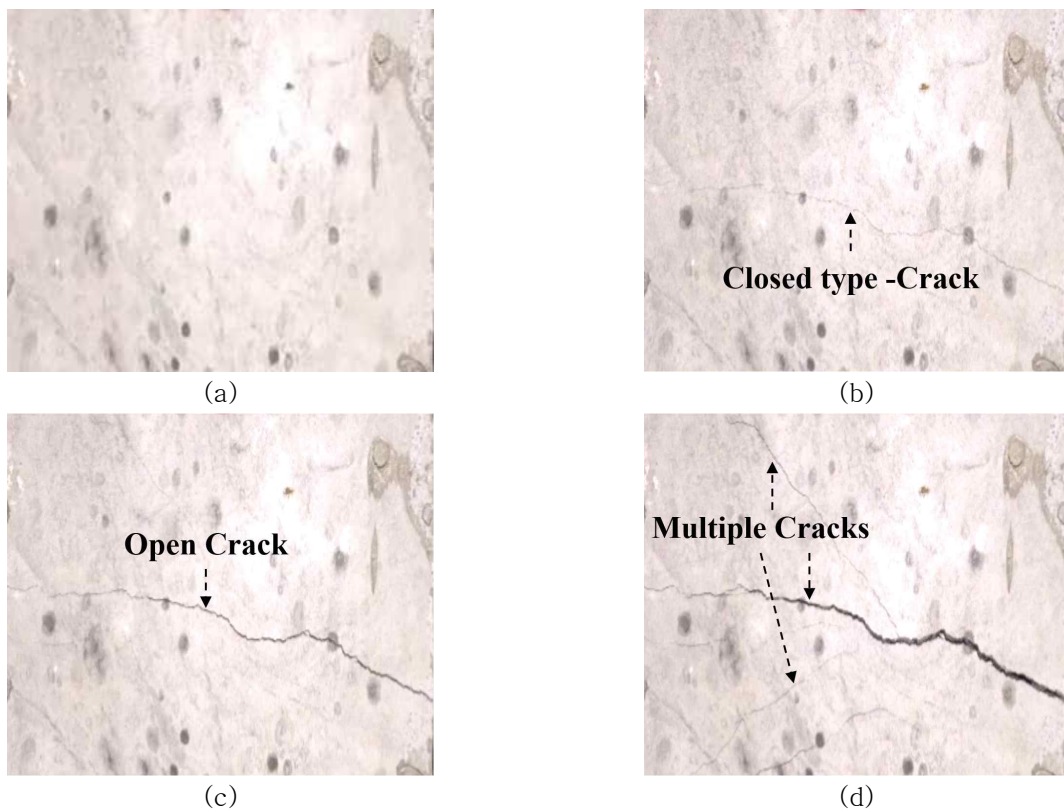


Fig. 64 - 균열 발생 메커니즘에 따른 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 표면 상태 (a) No load, (b) Closed-type crack, (c) Open crack, (d) Multiple cracks

우선 하중이 없을 때의 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 바닥면의 상태는 Fig. 64(a)와 같다. 그 후에 변위가 0.5 mm 진행했을 때 바닥면에는 Closed-type crack을 Fig. 64(b)에서 확인 할 수 있다. 그 후에 변위를 더 주었을 때의 Open crack과 Multiple cracks 발생은 Fig. 64(c), (d)와 같다. Closed-type crack은 탄성 구간에서 발생하므로 이러한 균열은 하중이 제거되면 원 상태로 거의 복구가 가능하다고 판단된다.

힘 실험에서 측정된 전기 임피던스 값도 온도, 습도 실험에서와 마찬가지로 저항 값과 리액턴스 값으로 측정이 가능하며, 측정 결과는 아래의 Fig. 65와 같다. 균열 발생 이후 저항 값과 리액턴스 값은 조금의 변화가 있는 것을 확인할 수 있었다. 처음 Closed-type crack이 발생했을 경우, 저항 값은 감소했다. 그리고 그 이후 계속해서 균열이 발생할 경우 저항은

반대로 다시 증가하는 것을 확인했다. 이러한 경향은 Fig. 65(a)에서 확인할 수 있다. 저항 값의 이러한 변동은 Closed-type crack이 발생했을 경우 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체 안에서의 섬유들이 전기가 이동하는 연결통로로써의 역할을 하기 때문에 저항 값이 감소했다고 할 수 있다. 그러나 균열이 더 발생 할수록 전기의 연결통로로써 작용을 하던 섬유들이 분리되거나 끊어지게 되면서 저항 값이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 리액턴스 값의 변화는 저항 값의 변화와 반대의 경향인 것을 확인할 수 있다.

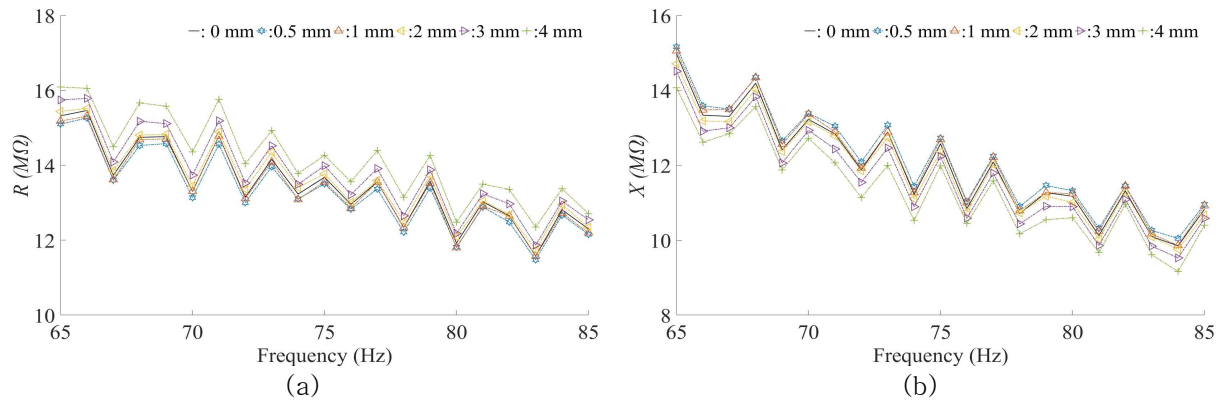


Fig. 65 휨 실험 결과 (a) 저항 값 (b) 리액턴스 값

B2. 자동화 손상진단 알고리즘 개발

- 손상진단의 목적

온도, 습도 변화에 따른 전기 임피던스 변화가 아닌, 균열 및 손상에 대한 전기 임피던스 값의 변화 특성을 추출하기 위한 손상진단 목적

- 손상진단 과정

온도 및 습도 그리고 휨 실험에 따른 전기 임피던스 값의 변화는 앞선 실험에서 확인한 결과, 전기 임피던스 값의 변화 패턴은 균열에 의한 변화와 온도 및 습도에 의한 영향이 유사한 것을 확인했다. 그러므로 균열에 의한 전기 임피던스 값의 변화를 추출하기 위한 정확도를 높이기 위해선, 손상이 없는 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 다양한 온도, 습도의 변화에 따른 전기 임피던스 값의 변화 데이터를 필요로 한다. 균열에 의한 전기 임피던스 값의 변화를 추출하기 위한 과정은 다음과 같다.

손상정보를 판단하기 위해선 판단의 기준 값이 되는 전기 임피던스 값의 재구축 과정이 필요하다. 재구축에 필요한 신호는 온도 신호가 습도 신호에 비해 지배적인 영향을 가지므로 온도 정보만을 고려하였으며 재구축 과정은 다음과 같다. 우선, 온, 습도 변화에 따른 전기 임피던스 신호 값 그리고 온도 정보를 계측한다. 여기서 계측된 전기 임피던스 값은 손상이 없는 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 전기 임피던스 값이 된다. 온도, 습도 변화에 따른 전기 임피던스 신호를 계측한 후에 실험 데이터를 측정한다. 측정된 실험 데이터의 온도 (T_t), 습도 정보를 통해서 실험 데이터와 가장 가까운 2개의 온도 신호 (T_a, T_b)를 미리 계측된 전기 임피던스 신호에서 선택한다. 온도 변화에 따른 전기 임피던스 값의 변화는 특정 온도를 제외하고는 선형적인 양상을 지니므로, 선택된 가장 가까운 2개의 온도에서 비례식을 사용해 신호를 재구축 한다. 재구축 하는 과정은 다음의 수식 (3)과 같다.

$$T_r = T_a \times \left| \frac{T_t - T_b}{T_a - T_b} \right| + T_b \times \left| \frac{T_t - T_a}{T_a - T_b} \right| \quad (3)$$

T_r 은 재구축된 신호를 의미한다. 재구축 과정에서 온도 영향만을 고려했지만, 재구축 이후 온도 및 습도 변화에 따른 전기 임피던스 값의 변화와 균열에 의한 전기 임피던스 값의 변화를 모두 관측하기 위해서 저항 값과 임피던스 값으로 측정된 전기 임피던스 값을 저항 값과 리액턴스 값의 영향을 모두 포함한 Phase 신호로 변환한다. 변환 과정은 아래의 수식 (4)와 같다.

$$\Phi = \tan^{-1} \frac{X}{R} \quad (4)$$

손상 정보를 판단하기 위한 지표로는 Damage index (DI)와 Threshold (TR)가 필요하다. DI를 계산하는 과정은 다음의 수식 (5)와 같다.

$$DI = \sqrt{\frac{\int_{sf}^{ef} (\Phi_t - \Phi_r)^2 df}{\int_{sf}^{ef} (\Phi_r)^2 df}} \quad (5)$$

수식 (5)에 명시되어 있는 Φ_t, Φ_r 는 각각 실험 데이터의 Phase와 재구축된 Phase 신호이다. 그리고 sf, ef 는 주파수별로 측정된 신호의 시작 주파수와, 종료 주파수를 의미한다. 측정된

온도 데이터를 활용하여 재구축된 신호와 측정 신호와의 차이는 재구축 및 측정과정 중 발생한 오류 값으로 해석이 가능하며, 이 부분을 임계치로 설정한다. 본 임계치는 구조물의 상태에 따라 업데이트되므로 현장 적용에 용이하다.

B3. 전문가 개입 없이 환경변인에 민감하지 않은 즉시적 자동화 손상 진단

- 개발된 전기 임피던스 계측 하드웨어와 손상진단 알고리즘 실험 검증 결과

개발된 전기 임피던스 계측 하드웨어와 손상진단 알고리즘을 활용해서 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 균열을 검출하기 위해 진행된 실험 결과는 아래의 Fig. 66과 같다.

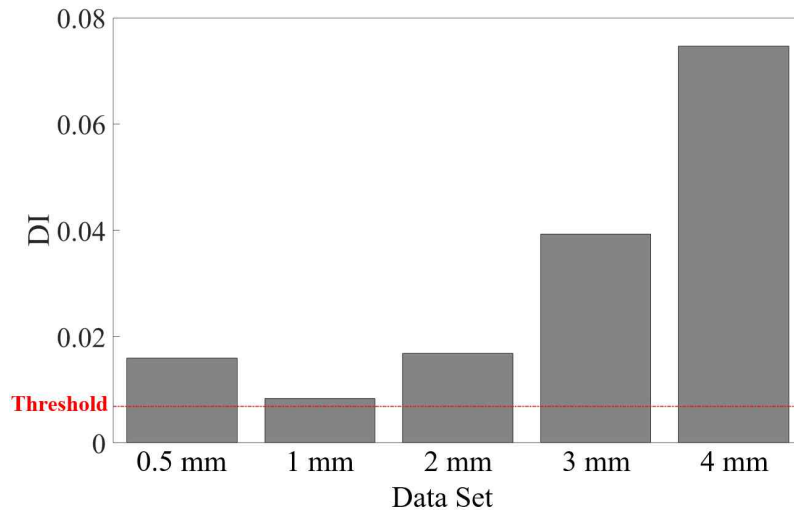


Fig. 66 휨 실험 결과에 따른 균열 특성 추출 결과

Fig. 66에 Data 1은 Closed-type crack과 재구축된 신호의 DI 값을 계산한 결과로, TR 값을 넘어 균열이 발생했음을 알 수 있다. 마찬가지로 Data 2, Open crack일 경우에도 TR 값을 넘는 것을 확인 할 수 있었다. Data 3, 4, 5는 Multiple cracks의 변위 각각 2, 3, 4 mm 일 때의 DI 값을 계산한 결과이다. DI 에서도 확인할 수 있듯이, 앞서 설명한 균열 발생 매커니즘에 따른 저항 값의 변화인 처음 균열 발생이후 저항 값이 내려가고, 점점 균열이 발생함에 따라서 저항값이 증가하는 양상이 손상 정보를 판단하기 위한 지표인 DI 값에도 영향이 미치는 것을 확인 할 수 있었다. 그렇지만 초기 균열 및 연속적으로 생기는 균열에 대해서 검출이 가능한 것을 확인 했다.

B3. [추가연구수행] 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 균열 위치 검출을 위한 다채널 전기 임피던스 계측 시스템 및 알고리즘 개발

B3.1 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 다채널 전기 임피던스 계측 시스템 개발

- 개발 배경 및 목적

본 연구실에서 1차년도에 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 전기 임피던스 계측 시스템을 개발 하였으며, 다양한 온도, 습도 환경에서의 임피던스 변화 측정 실험과 휨 인장강도 변화에 따른 전기 임피던스 변화 측정 실험을 진행하였다. 전기-역학적 응답 민감도가 극대화된 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 개발 덕분에, 구조물의 위험 구간에 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체를 타설해 별도의 센서 설치 없이 전기 임피던스 신호 계측이 가능하며 구조물의 상태 진단이 가능함을 확인하였다. 그러나 실제 구조물은 큰 규모를 가지므로, 구조물의 상태를 효과적으로 진단하기 위해선 손상 위치를 파악한 후 효율적인 유지관리를 실시하는 것은 중요하다. 본 연구실에서는 연구개발계획서상 목표인 환경영향에 무관한 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 구조물 손상 진단 시스템을 개발하였으며, 더 나아가 구조물의 손상 위치를 파악하기 위한 다채널 전기 임피던스 계측 시스템의 추가적인 개발을 목표로 한다.

- 개발 구성

자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 균열 위치를 검출하기 위하여 시험체에 여러 개의 구리 전극을 매립하였고, 이를 이용해 전극 간 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 임피던스 값을 다채널로 계측할 수 있게 하였다. 즉각적인 전기 임피던스 신호 계측을 위하여 아래의 Fig. 67과 같은 다채널 전기 임피던스 계측 자기감지 회로를 구성하였다. Fig. 67의 C_c 와 v_c 는 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 전기용량 및 전압을 나타내며 v_i, i, v_o 와 C_r 는 입력전압, 출력전류 및 전압 그리고 참조 전기용량을 의미한다.

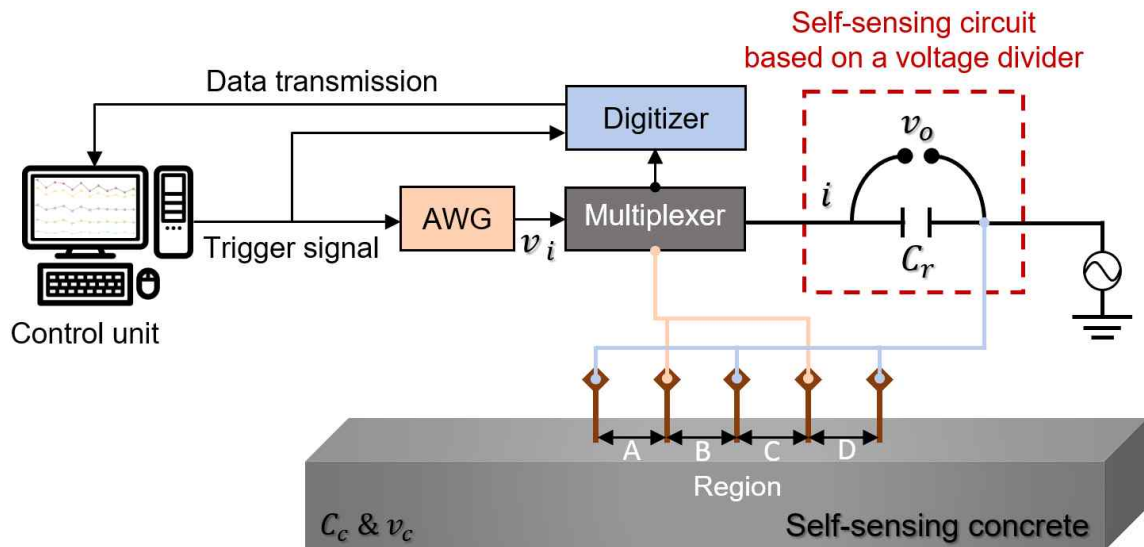


Fig. 67 - 다채널 전기 임피던스 신호 계측을 위한 자기감지 회로 구성

개발된 다채널 전기 임피던스 계측 시스템은 LabVIEW 프로그램을 이용하여 제작하였으며, 임피던스 신호를 계측하기 위한 절차는 4 단계로 나뉜다. 우선 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 상태 평가가 필요한 순간에 제어 장치(Control unit)에서 AWG 및 디지털저에 트리거 신호를 보낸다. 그 후 AWG는 디자인된 100~150 Hz 대역의 Chirp signal을 사

용하여 교류 전기신호를 생성하고 해당 전기신호는 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체를 따라 전파된다. 전달된 교류 전기신호는 자기감지 회로를 거쳐 디지털타이저에 신호가 계측되고 이를 제어 장치로 전송한다. 마지막으로 앞 설명 단계의 과정을 Multiplexer를 사용하여 계측하고자 하는 채널의 수만큼 반복 측정한다.

B3.2 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 휨 변화에 따른 다채널 전기 임피던스 계측 실험

- 개발 목적

다채널 전기 임피던스 계측 시스템을 이용하여 측정된 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 임피던스 값을 이용하여 균열의 위치를 검출하기 위해선 추가적인 알고리즘이 필요하다. 교류 신호를 이용한 전기 임피던스 신호는 실수부인 저항 값과 허수부인 리액턴스 값으로 구성되어있다. 이 두 신호의 변화를 동시에 확인하여 균열의 위치를 검출하기 위하여 Nyquist plot을 적용하였다.

- 균열 위치 검출 알고리즘

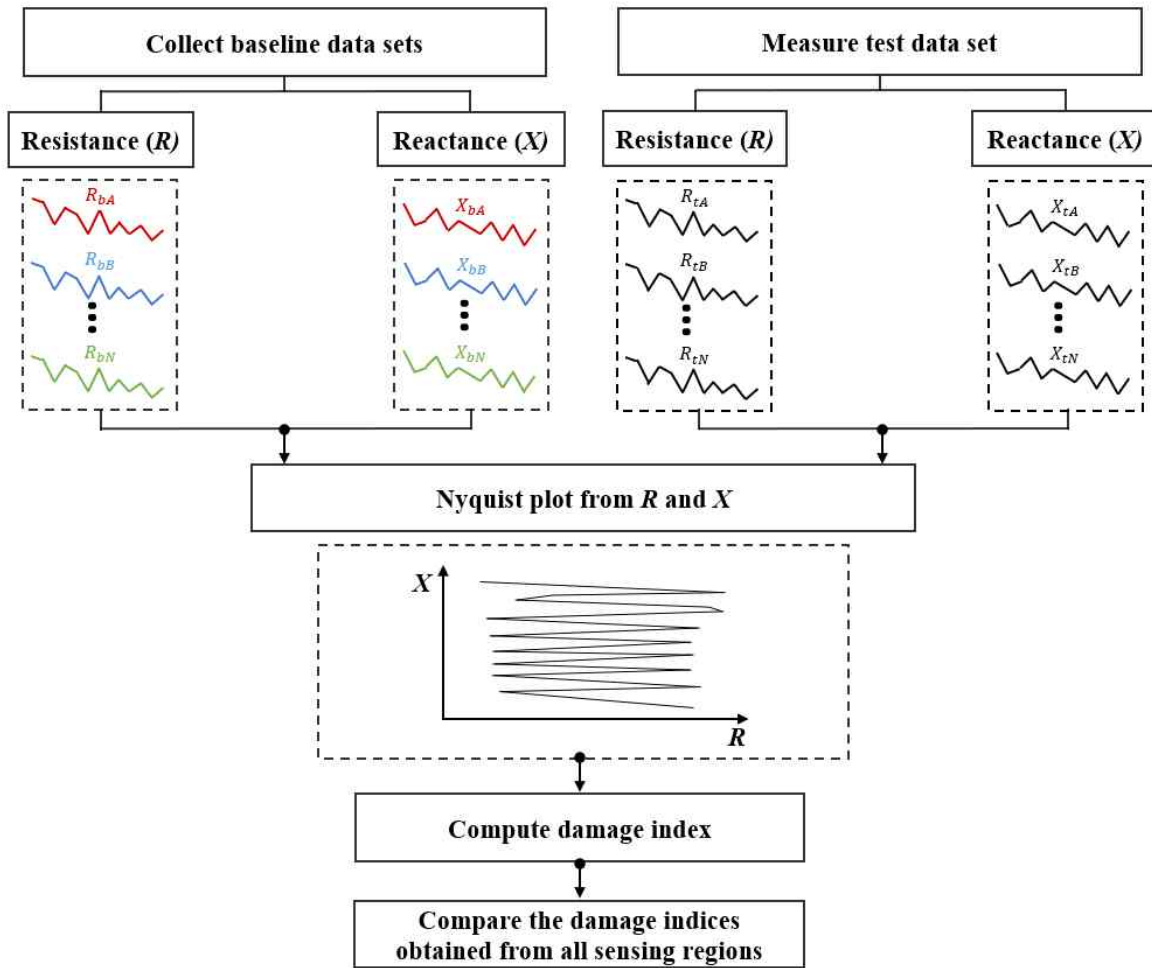


Fig. 68 - 균열 위치 검출 알고리즘 순서도

균열 위치 검출 알고리즘의 순서도는 Fig. 68과 같다. 우선 모든 측정 구간에서 다채널 전기 임피던스 계측 시스템을 이용하여 Baseline 데이터인 저항 값 (R_{bN})과 리액턴스 값 (X_{bN})을 확보 한다. 확보된 데이터는 균열을 검출하기 위한 비교 데이터로 이용이 가능하다. 그 후, 휨 실험 단계에 따른 모든 테스트 구간에서 저항 값 (R_{tN})과 리액턴스 값 (X_{tN})을 측

정한다. 아래의 기입된 b, t 그리고 N 은 각각 Baseline, Test 그리고 측정 구간을 의미한다. 측정된 저항과 리액턴스 두 종류의 값을 동시에 확인하기 위하여 Nyquist plot을 사용하여 신호를 표시하였으며, 마지막으로 모든 테스트 구간에서 Baseline 데이터와 테스트 데이터 사이의 유클리디안 (Euclidean) 거리 값을 계산하여 균열 위치를 검출한다. 각 신호의 유클리디안 거리 값은 Damage Index (DI)로 사용되며, 계산식은 아래의 수식 (6)과 같다.

$$DI = \sum_{f_s}^{f_e} \sqrt{(x_n^i - x_0^i)^2 + (y_n^i - y_0^i)^2} \quad (6)$$

x_n^i 와 y_n^i 는 각각 n 번째 휨 단계에서 i Hz의 주파수를 가진 저항 값과 리액턴스 값을 의미한다. 그리고 아래에 기입한 0 는 Baseline 상태를 의미하며, f_s 와 f_e 는 측정 교류 신호의 시작 주파수와 종료 주파수를 의미한다.

B3.3 균열 위치 검출 알고리즘

- 실험 목적

1차년도에 자연 환경적인 영향을 배제한 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 손상을 검출하였다. 더 나아가, 2차년도에 추가적으로 개발된 다채널 전기 임피던스 계측 시스템과 균열 위치 검출 알고리즘의 성능을 검증 및 보완하기 위해 실험실 규모에서의 실험을 진행하였으며, 또한 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 실제 현장 적용 가능성을 파악하기 위해 추가로 Real-scale 실험도 함께 진행하였다.

- 실험 구성

우선, 개발된 다채널 전기 임피던스 계측 시스템과 균열 위치 검출 알고리즘의 성능 검증을 위해 실험실 규모의 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체를 Fig. 69와 같이 두 종류의 시험체를 준비했다. 시험체는 50x40x400 (WxHxL, mm)의 크기로 휨 실험 시 상태 변화에 따른 전기 임피던스 신호 계측에 적합한 크기로 제작하였으며, 시험체에 5 개의 구리전극을 50 mm 간격으로 배치하였다. 시험체는 물-시멘트비 45 %,시멘트 중량 대비 잔골재 ‘1’인 비율의 모르타르로써, 유동화제 (Poly naphthalene sulfonate)를 0.2 % 첨가하였으며, 섬유의 고른 분포를 위해 바이브레이터를 사용하였다. 시험체의 양생은 온습도 챔버로 온도 20 °C, 습도 80 %의 상태에서 24시간 양생 과정을 거친 후 탈형하였으며 그 후 7 일 동안 수중양생을 실시하였다. 첨가된 섬유의 양에 따라 Type 1과 Type 2로 구분하였으며 계측 및 데이터 취득은 개발된 다채널 전기 임피던스 계측 시스템을 사용하였다. 균열은 Fig. 70과 같이 UTM을 사용하여 유도하였다. 입력전압은 100 ~ 150 Hz 의 주파수를 가지는 교류 전기 신호로 Chirp signal을 디자인하여 사용하였고, 안정적인 신호 취득을 위해 5 회 측정 후 평균한 신호를 1 MHz의 Sampling rate으로 취득하였다. 균열이 발생함에 따른 전기 임피던스 신호의 변화를 계측하기 위해 3 point 휨 실험을 진행하였고, 각 단계는 Intact부터 파단까지 휨 변형률 0.004씩 조절하여 7단계로 측정하였다.

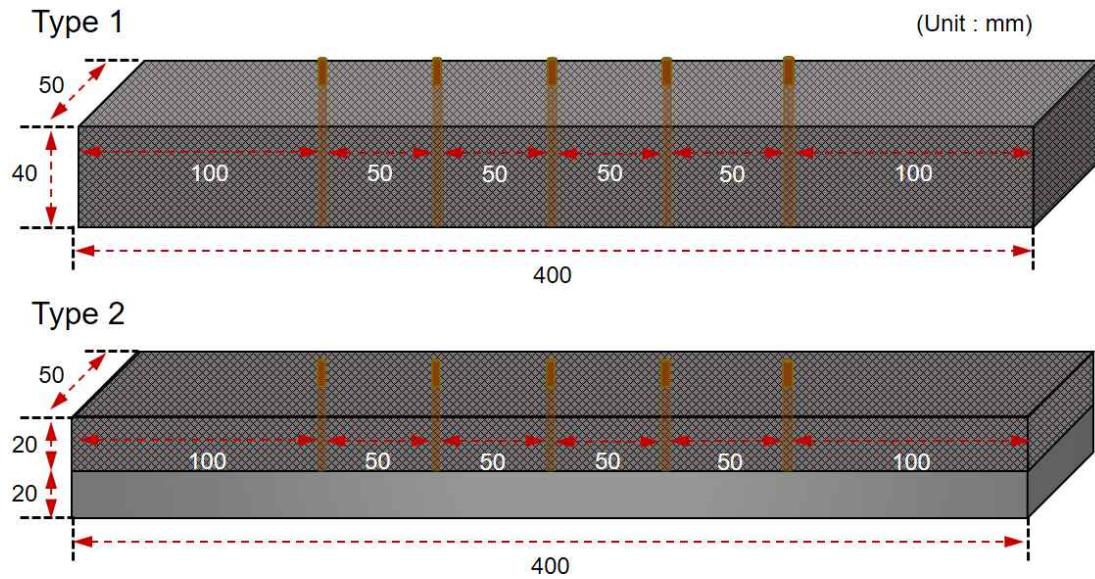


Fig. 69 실험실 규모의 실험체 규격



Fig. 70 실험실 규모의 휨 실험 과정

Real-scale 실험에서는 150x150x900(WxHxL, mm) 규격의 시험체를 사용하였다. 실제 현장에서 사용하는 보의 거동 모사 및 콘크리트의 급작스런 취성 파괴로 인해 신호를 계측함에 있어 제한적인 사항을 사전에 방지하기 위하여 하단 30 mm 위치에 D10 철근 2 개를 삽입하여 인장파괴를 유도하였고, 다채널 전기 임피던스 신호 계측에 사용될 구리 전극은 Fig. 71과 같이 정밀한 계측을 위하여 하단 10 mm, 20 mm 에 2 개의 Layer로 나누어 삽입하였다. Layer 1은 100 mm 간격으로 5 개, Layer 2도 동일한 100 mm 간격으로 6 개의 구리전극을 배치하였다. Real-scale 시험체의 Type은 실험실 규모의 시험체와 유사한 방식으로 시험체의 모든 부분에 섬유를 첨가한 Type 1과 철근 아래까지 섬유를 채운 Type 2로 나누었으며 계측 및 데이터 취득과 균열 유도는 실험실 규모의 실험과 동일하게 Fig. 72와 같이 진행하였다.

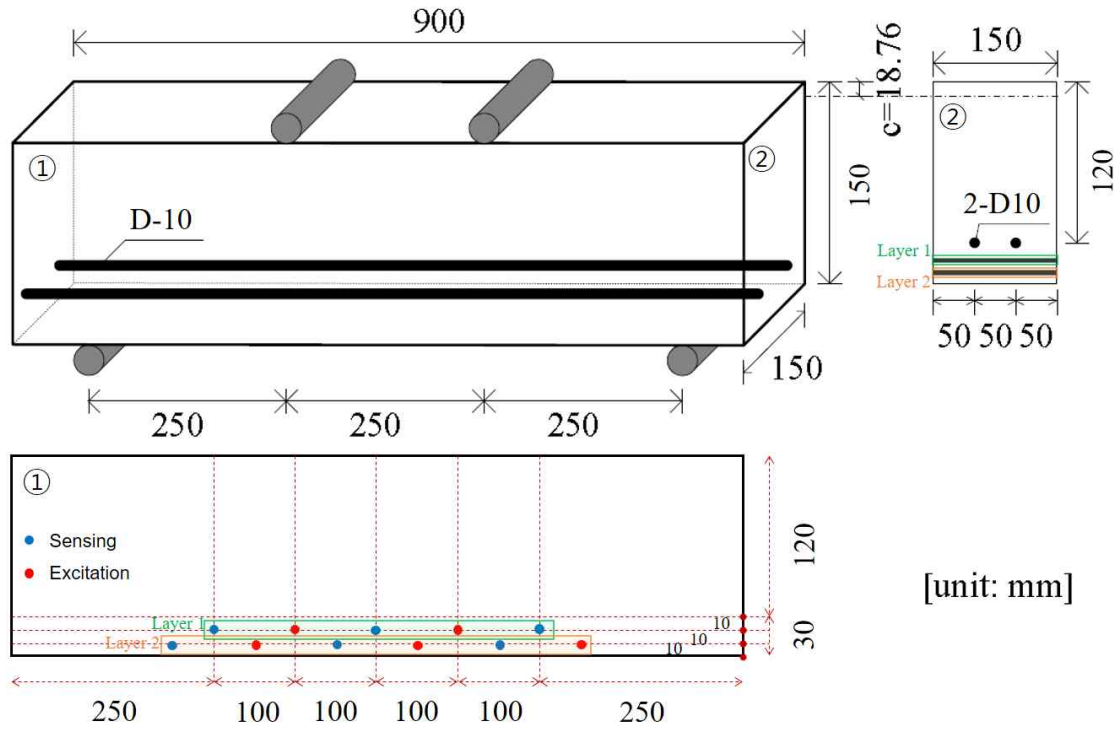


Fig. 71 Real-scale 시험체 규격



Fig. 72 Real-scale 휨 실험 과정

- 실험 결과

1) 실험실 규모의 검증 실험

다채널 전기 임피던스 측정 시스템을 이용하여 측정된 전기 임피던스 신호 값은 복소수 형태를 가지며, 각 실험 단계에 따른 실수부인 저항 값과 허수부인 리액턴스 값의 변화를 취득하였고 두 가지 값의 변화를 모두 확인할 수 있도록 측정 주파수에 따른 Nyquist plot을 사용하여 DI 값을 계산하였다. 측정 신호인 저항 값과 리액턴스 값의 결과는 Fig. 73과 74에서 볼 수 있듯이 4 개의 실험 구간 (A,B,C,D) 중 균열과 가장 가까운 C, D 구간에서 휨이 점점 커짐에 따라서 저항 값이 감소한 후 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 리액턴스 값에서는 변화가 저항 값의 변화에 비해 미비한 것을 확인하였다. 그리고 Type 1과 Type 2 모두 동일한 실험 결과를 보였다. 각 Type 별로 2 개 씩 총 4 개의 시험체로 실험을 수행하였고 그 중 대표적인 Type 1 시험체의 결과는 다음과 같다.

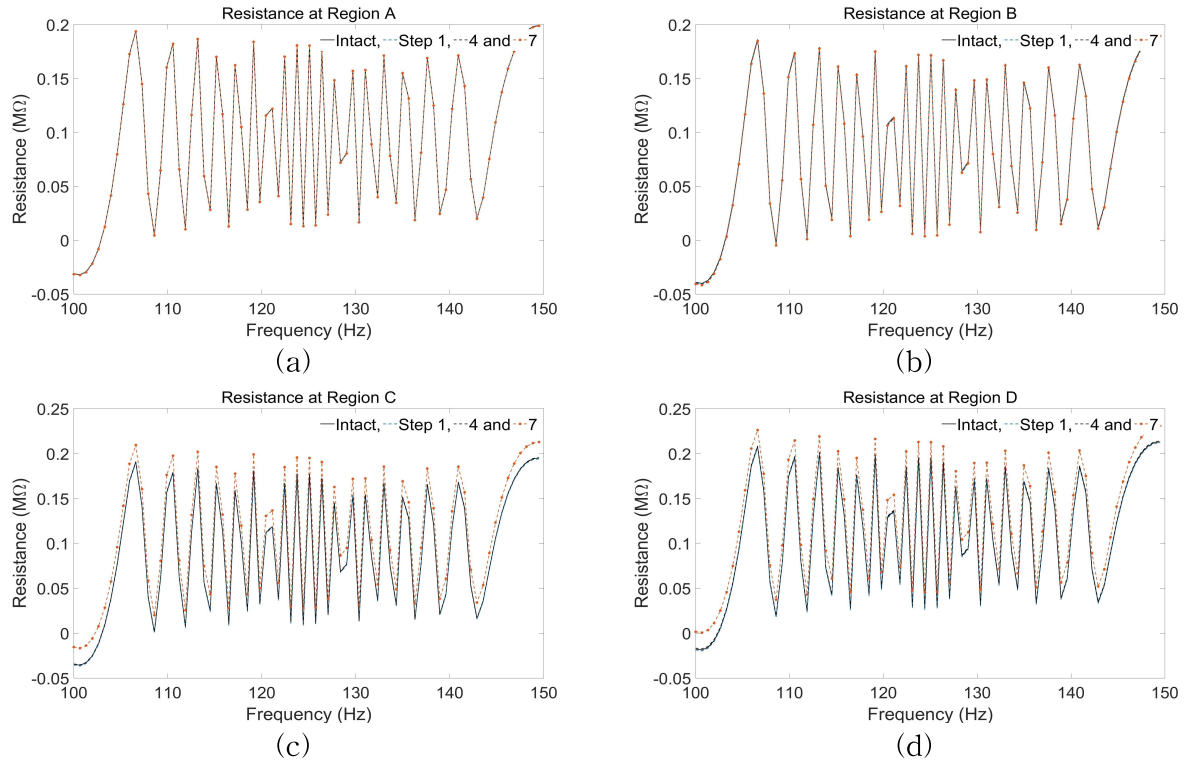


Fig. 73 실험실 규모의 Type 1 시험체 각 구간 별 저항 값의 변화

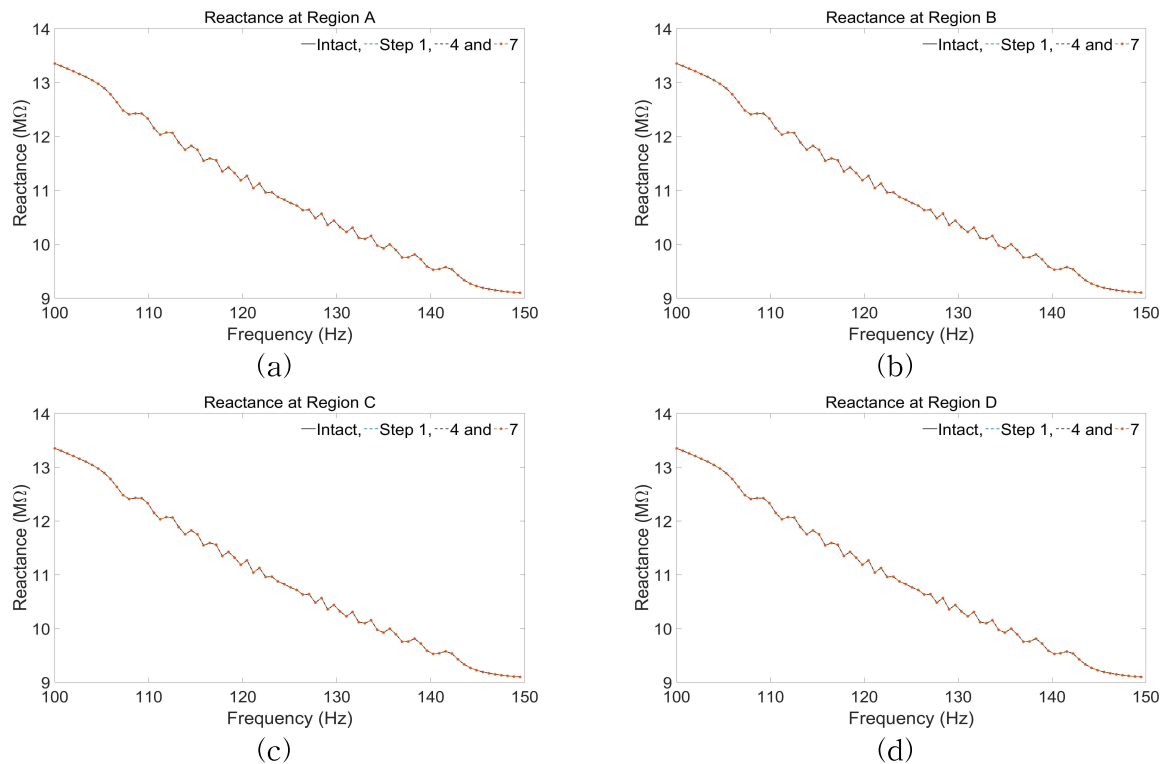


Fig. 74 실험실 규모의 Type 1 시험체 각 구간 별 리액턴스 값의 변화

휨 실험이 진행됨에 따라 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체 인장면에서 균열이 발생하는 부분 및 측정된 저항과 리액턴스의 변화 모드를 확인하기 위하여 Nyquist plot을 적용한 대표적인 결과를 Fig. 75에서 확인할 수 있다. 저항 값이 변화하는 이유는 1차년도에서의 결과와 동일한 원인인 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체에 휨이 가해지면서 시험체 내의 섬유 간 배열이 변화하는 원인으로 볼 수 있다. 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체 내의 섬유 분포 및 방향에 따라 시험체 자체의 전도성에 영향을 받으며 전기 응답 신호 측정 시 저항 값이

변화하는 것을 알 수 있다. 균열의 위치를 검출하기 위해 시험체의 실험 구간에서 각 실험 단계별 취득된 전기 임피던스 신호 차이를 비교하였다. 전기 임피던스 신호의 차이는 측정 신호의 시작 주파수 f_s 와 끝 주파수 f_e 까지의 Nyquist plot과 Intact 신호의 Nyquist plot 사이의 유클리디안 거리 값을 모두 더한 결과 값이 각 단계에서의 DI 이며, 그 결과를 Fig. 76에 나타내었다.

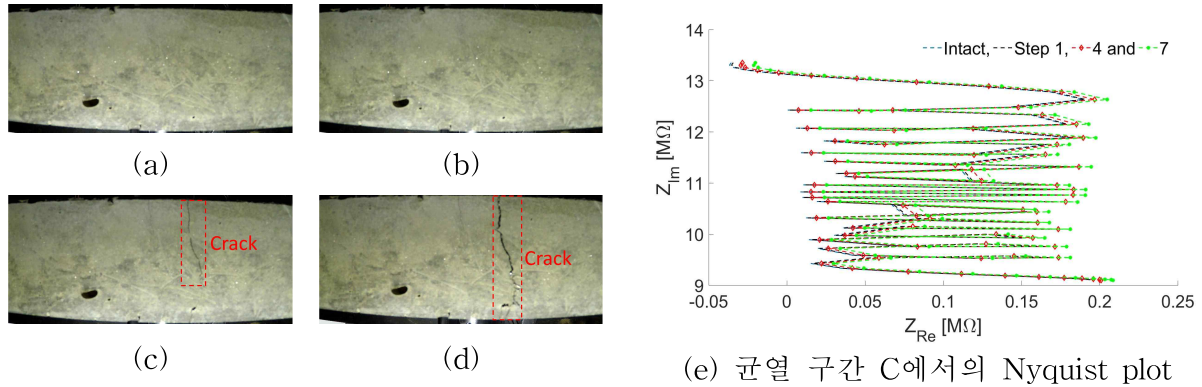


Fig. 75 휨 실험 단계에 따른 인장면 하부 상태 및 그에 따른 Nyquist plot

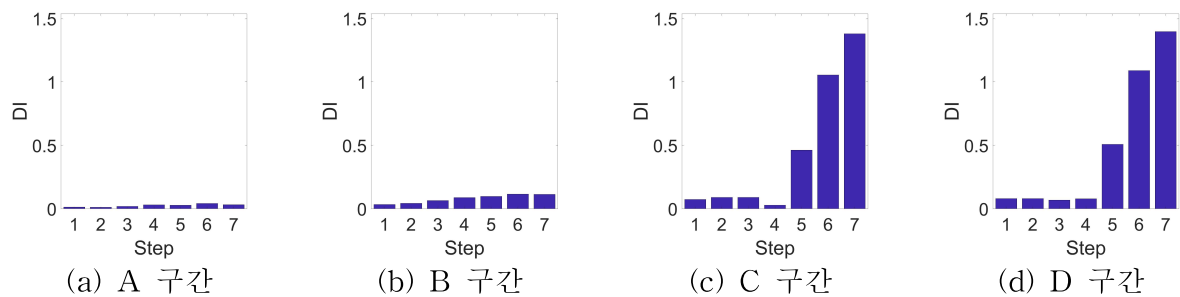


Fig. 76 Type 1 첫 번째 시험체 각 구간별 균열 검출 결과

실제 균열은 C와 D 구간의 중앙에서 4번째 실험 단계인 Fig. 76(c)와 같이 발생하였다. 균열이 발생하지 않은 A, B 구간 중 균열과 가장 거리가 먼 A 구간 균열 단계에서 DI 값이 0.03 으로 Intact 과의 신호 차이가 작은 것을 확인 할 수 있고, B 구간에서는 균열이 발생한 C, D 구간에 비해선 휨 변형에 영향을 덜 받지만 하중이 가해짐에 따라 DI 값이 0.1로 A 구간 보단 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 실제 균열이 발생한 C, D 구간의 초반 저항 값이 미세하게 감소함에 따라 DI 값의 크기가 작아진다. 이는 힘이 가해져 시험체의 변형이 생김에 따라 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체 내부 강섬유 간의 접촉이 발생하는 Bridge effect 현상으로 해석이 가능하다. Bridge effect 이후 5번째 실험 단계에서는 저항 값이 급격하게 증가함에 따라서 DI 값은 각각 0.46 과 0.51 값을 가져 균열이 발생하지 않은 구간보다 더 큰 차이를 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 균열 이후 저항 값이 급격하게 증가하는 이유는 강 섬유간의 Bridge가 끊어져 저항 값이 급격하게 상승한다고 볼 수 있다. Type 1의 다른 시험체는 B와 C 구간에 균열이 발생하였으며 구간별 균열 검출 결과는 Fig. 77과 같다. 두 번째 시험체의 결과 균열 발생 부분인 3번째 단계에서 모든 구간에서 DI 값의 변화가 발생하는 것을 확인 할 수 있었고, 실험이 더 진행됨에 따라 균열이 발생한 구간인 B, C 구간에서 DI 값이 눈에 띄게 증가함을 확인 하였다.

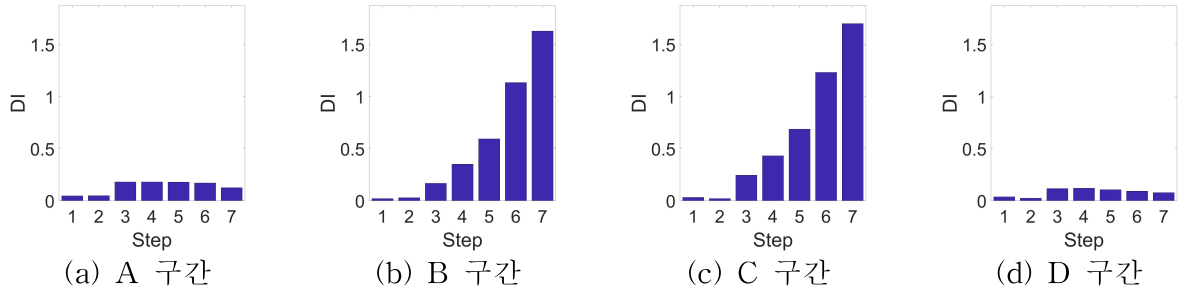


Fig. 77 Type 1 두 번째 시험체 각 구간별 균열 검출 결과

Type 2의 첫 번째 시험체는 구간 B, C에서 균열이 발생했고, 두 번째 시험체는 구간 C와 D에서 발생함을 확인할 수 있었다. 두 시험체 모두 Type 1과 동일한 양상의 결과를 확인하였다. 각 시험체의 구간별 DI 값의 결과는 Fig. 78과 79에 나타내었다.

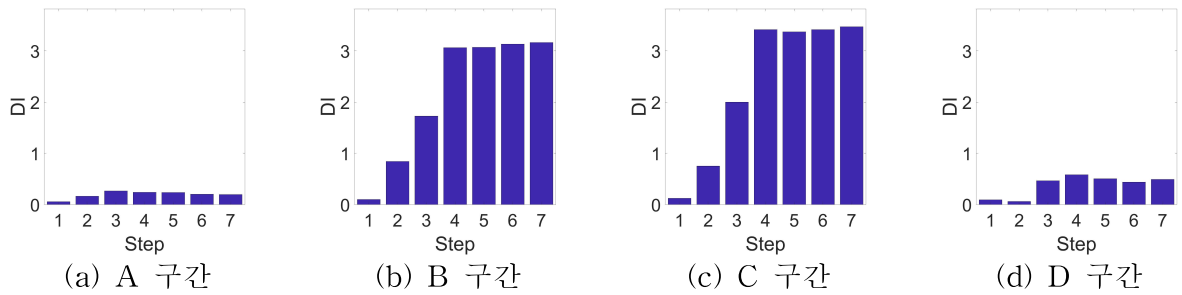


Fig. 78 Type 2 첫 번째 시험체 각 구간별 균열 검출 결과

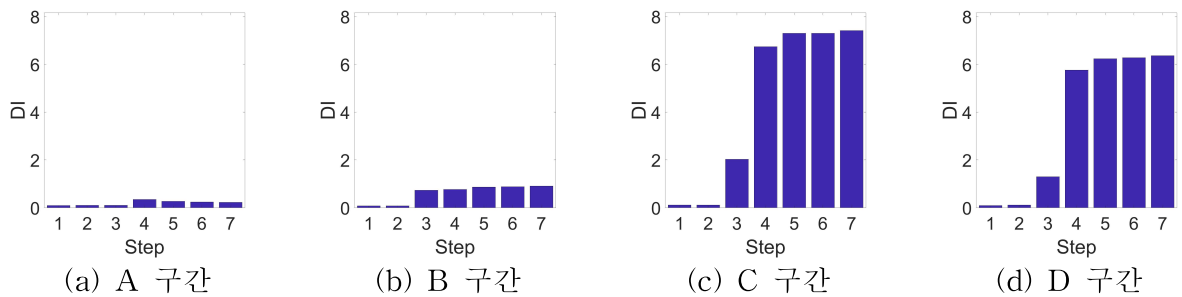


Fig. 79 Type 2 두 번째 시험체 각 구간별 균열 검출 결과

2) Real-scale 실험

Real-scale 실험은 실험실 규모의 실험과 동일하게 진행되었으며, 시험체의 크기를 고려해 구간을 세분화하여 저항 값과 리액턴스 값을 측정하였다. 실험 결과 작은 시험체에서 볼 수 없었던 넓은 면적에 걸쳐 미세 균열이 발생하였고 그로 인해 모든 구간에서 신호 변화가 나타났다. 일관되지 않은 경향성은 Nyquist plot과 유클리디안 거리 값을 이용하는 균열 검출 알고리즘의 신뢰도를 하락시키므로 저항 값과 리액턴스 값만을 분석하였고 Type 1과 Type 2 각각 하나의 시험체를 실험하였다. Type 1의 결과는 Fig. 80과 81에 나타내었다.

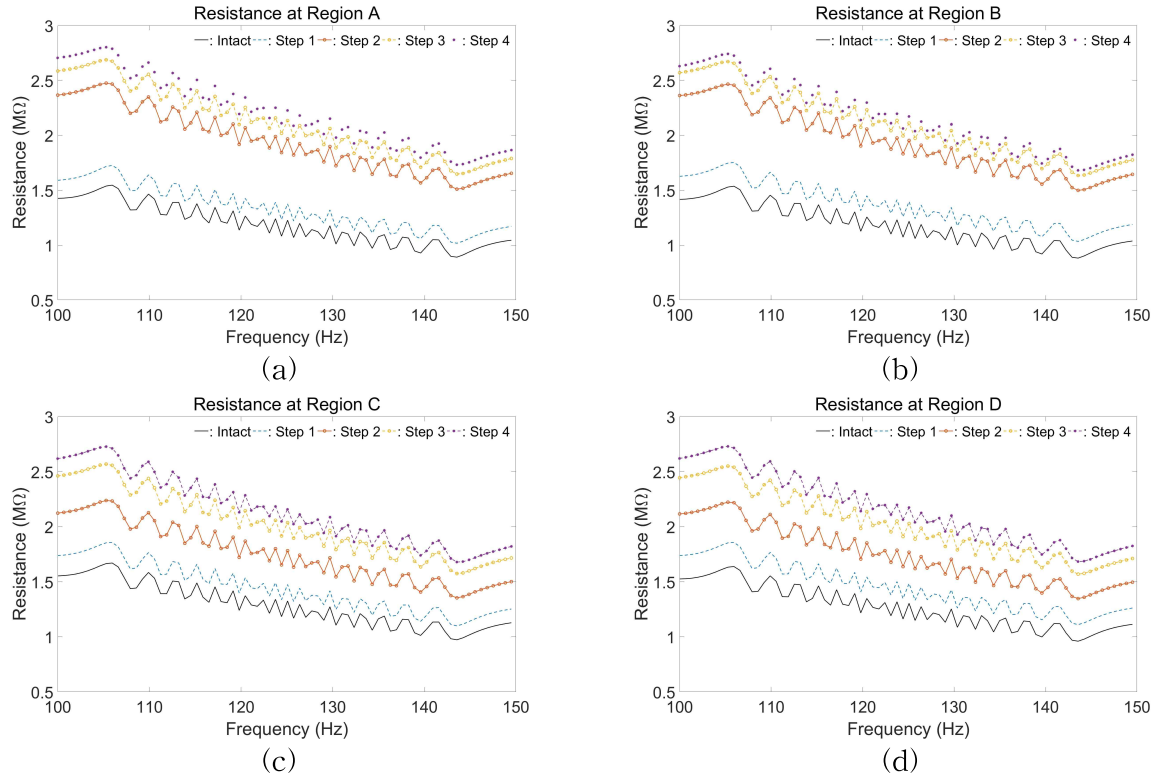


Fig. 80 Real scale Type 1 시험체 각 구간 별 저항 값의 변화

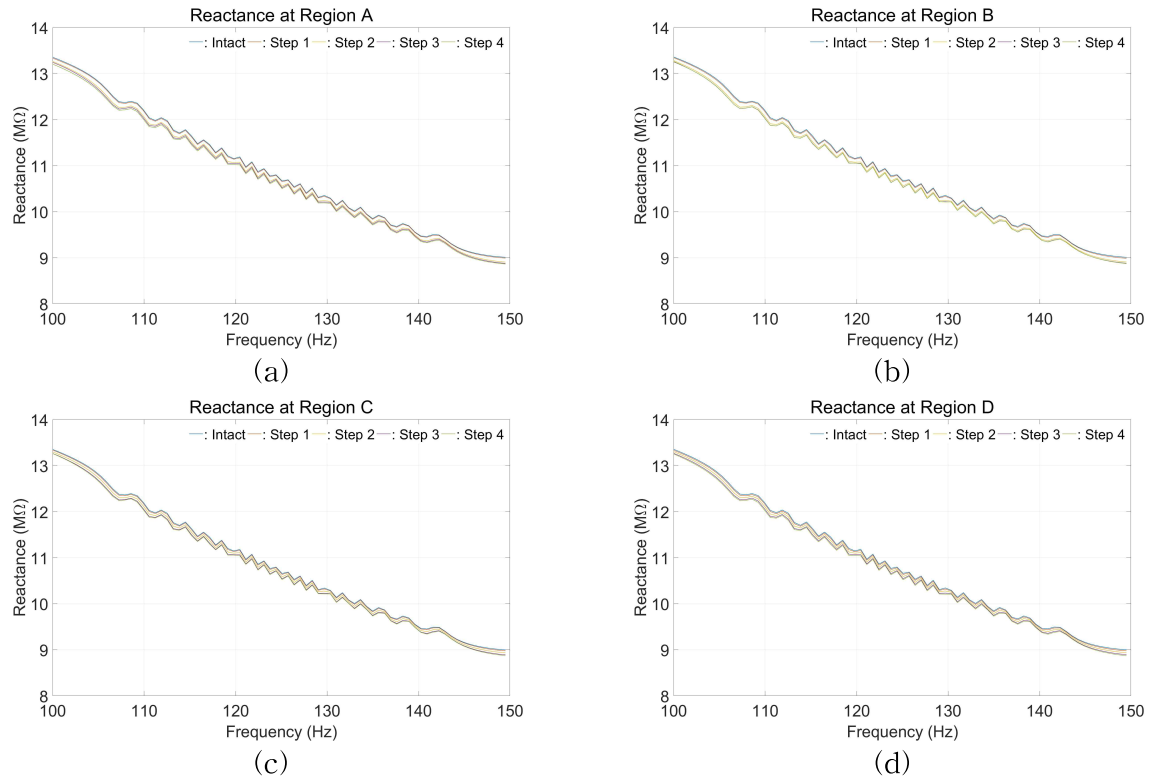


Fig. 81 Real scale Type 1 시험체 각 구간 별 리액턴스 값의 변화

Type 2의 저항 값과 리액턴스 값의 변화 또한 Type 1과 같이 모든 구간에서 신호 변화가 발생함을 확인 하였다. Type 2의 저항 값 및 리액턴스 값의 변화는 Fig. 82와 83에 나타내었다.

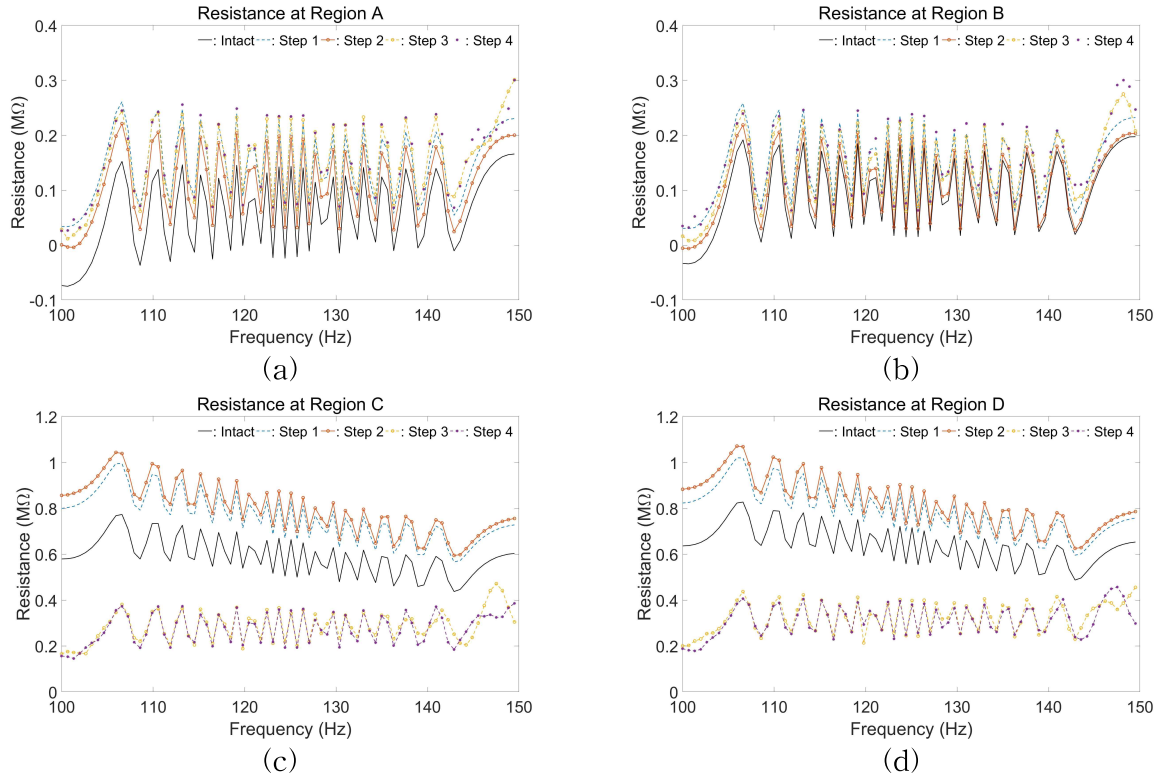


Fig. 82 Real scale Type 2 시험체 각 구간 별 저항 값의 변화

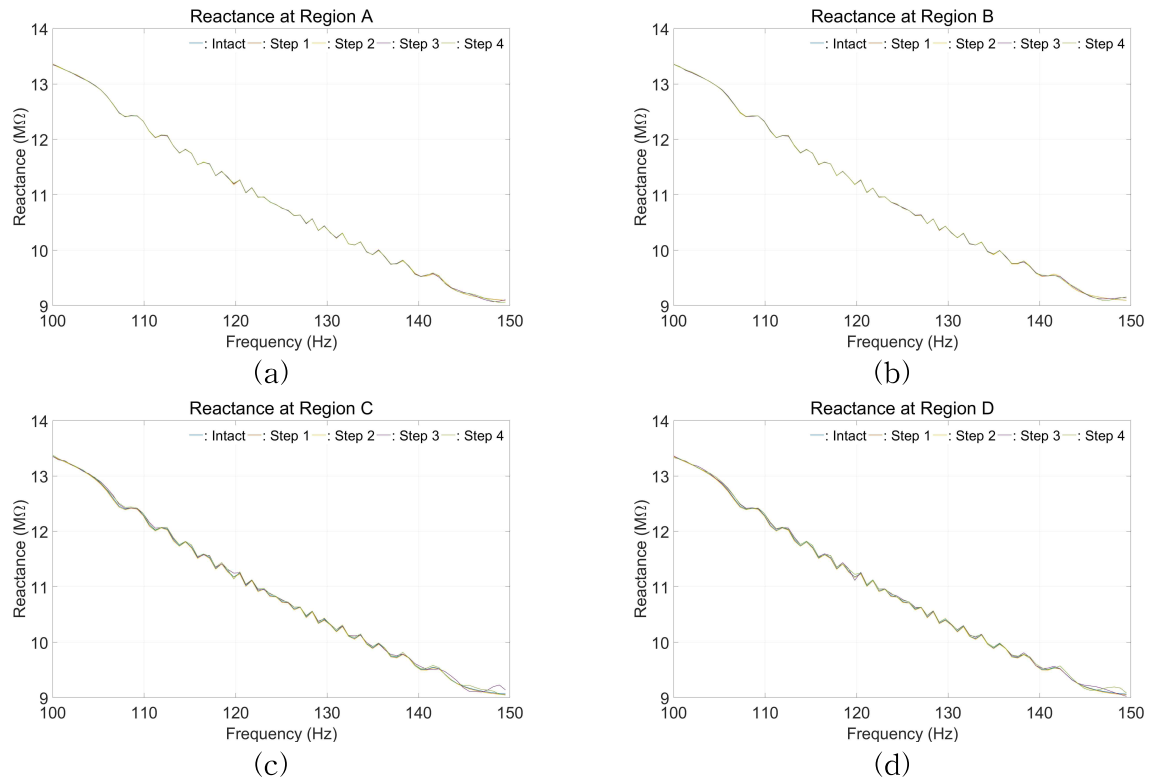


Fig. 83 Real scale Type 2 시험체 각 구간 별 리액턴스 값의 변화

Real-scale 실험결과 Type 1은 A구간에서, Type 2는 B 구간에서 주 균열이 발생하였으나 그와 상관없이 전 구간에서 일정하지 않은 전기 임피던스 신호의 변화를 나타내었다. 이러한 원인으로서는 Real-scale 실험 당시 짧은 시간에 강한 힘이 시험체에 가해지면서 특정 구간으로 균열을 유발시키지 못해 모든 구간에 미세 균열이 발생함을 들 수 있다. 모든 구간에서 미세 균열이 발생하고 그로 인해 시험체 전 구간에서 전기 임피던스 신호의 변화가 발생

하여, 균열 위치 검출 알고리즘을 적용하지 못하였다.

- 결론

본 연구에선 자기감지 섬유보강 시멘트 복합체의 균열 위치를 검출하기 위하여 다채널 전기 임피던스 계측 시스템을 개발 하였고, 균열 위치를 검출하기 위한 검증 실험을 진행하였다. 먼저 실험실 규모의 실험에서는 개발된 시스템을 이용하여 전기 응답 신호를 계측하였고, 균열이 발생하지 않은 구간보다 균열 구간에서 전기 임피던스 신호의 변화가 지배적인 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 향후 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료의 Structural health monitoring (SHM) 목적을 위한 전기 임피던스 기반 균열 검출에 있어 크게 기여할 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 각 시험체의 DI 값의 절대 값이 다를 수 있었는데, 이러한 결과는 시험체 별로 내부의 섬유 정도와 분포도 그리고 방향성에 따라서 각기 다른 전도성을 가진다는 것을 알 수 있다. 반면 Real-scale 실험에서는 일관적이지 않은 전기 임피던스 신호의 변화를 보였는데 이는 Real-scale의 시험체에서는 주 균열뿐만이 아닌 모든 구간에서 미세 균열이 발생하고 또한 부재의 면적에 비해 하중 작용 면적이 훨씬 작고, 시험체가 완벽한 평행인 상태에서 하중을 받을 수 없는 등의 이유로 전단파괴가 일어난 부분이 변수로 작용했을 것이다. 그 결과 시험체 전 구간에서 신호의 변화를 확인하였다. 그러나 개발된 시스템이 미세균열까지 검출이 가능함을 Real-scale과 실험실 규모의 실험을 통해서 검증되었으며, 즉 개발된 시스템은 높은 민감도를 가진다는 것을 알 수 있다. 또한 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 임피던스 계측에 있어 내부 섬유의 방향성과 분포도에 따라 영향을 받으므로 SHM 목적에 부합하는 섬유의 분포도 및 방향성을 최적화하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

4.1절 연구개발 최종목표 달성도

성과목표	달성도	내용
자가감지 성능이 우수한 SS-FRCCs의 개발	100%	■ 전기 저항성을 증대시켜 전기저항률 변화 폭을 향상시키는 방안을 조사하여 자기감지 성능이 우수한 매트릭스 배합(안)을 도출함: - Functional filler로써 전기저항이 높은 초단유리 섬유보강 (적정 보강량: 시멘트 중량 비 5%) - 낮은 물-시멘트 비의 초고강도콘크리트 사용 ■ 균열 이후 전기전도성의 증가 폭을 향상시키기 위하여 고전도성 재료 코팅 횟수에 따른 섬유보강재의 전기전도성을 조사하여 Silver paste 2회 코팅에서 가장 높은 전기전도성이 나타남 ■ 균열이 강섬유 보강 시멘트 복합체의 전기저항률 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 균열 개수에 따른 전기-역학적 거동을 조사했을 때, 균열 개수가 증가함에 따라 전기저항률의 변화량이 증가함 ■ SS-FRCCs의 압축, 인장, 휨 하중과 같은 다양한 하중 하에서 손상에 따른 전기저항률이 감소함을 보임으로써 SS-FRCCs의 성능을 검증함
SS-FRCCs의 적용방안 도출	100%	■ SS-FRCCs의 실 구조물 적용성 검토를 위하여 철근콘크리트 빔에 SS-FRCCs를 타설하여 휨 인장 하중 하에서의 손상에 따른 자기감지 성능이 확인됨 ■ 철근콘크리트 빔의 인장 측에 SS-FRCCs를 코팅하여 휨 인장 하중 하에서의 전기-역학적 거동 조사를 통하여 기존 구조물에 적용 가능성을 확인함 ■ SS-FRCCs의 자가 손상감지 능력 측정에 사용되는 전극을 전도성이 뛰어난 재료를 기반으로 전극을 도출함

SS-FRCCs 기반의 실시간 전기-역학적 응답 계측 시스템 및 자동화 손상진단 알고리즘	100%	■ 구조물의 건전도 모니터링을 위한 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 즉각적인 전기-역학적 응답 계측 시스템 개발함 ■ 구조물의 상태를 바로 평가하기 위하여 안정화 시간이 필요하지 않은 교류 신호를 이용한 전기 임피던스 계측이 가능함 ■ 균열과 같은 상태변화에 따라 변화하는 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료 전기 임피던스 변화 조사하여 손상에 따른 진단 알고리즘을 구성함
환경 변인에 민감하지 않은 손상진단 알고리즘 개발 및 검증	100%	■ 전기 임피던스 값의 변화는 균열과 같은 구조물의 상태 변화 뿐만이 아닌 온도와 습도 등 다양한 환경변화의 영향을 받으므로, 그로인한 오보를 줄이기 위한 전기 임피던스 값의 변화 조사함 ■ 온·습도 챔버 및 UTM을 활용한 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 임피던스 값의 변화 조사를 통하여 실제 환경 영향성을 평가함 ■ 환경변화에 따른 전기 임피던스 값의 변화를 제외한 균열과 같은 상태 변화에 따른 전기 임피던스 값의 변화만을 검출하기 위한 손상진단 알고리즘 개발 및 검증이 이루어짐

4.2절 관련 분야 기여도

1. 기술적 기여도

- 균열 이후 소성 구간에서 측정이 가능하여 지진, 피로파괴, 충격과 같은 극도의 하중에 대한 정보가 가능하며, 잔류강도에 의한 붕괴의 예측이 가능함
- 요소 단위의 연구를 넘어서 콘크리트 구조물의 취약부인 인장 측에 구조 부재로서의 역할을 함과 동시에 손상 및 변형 감지 능력까지 갖춘 현장 맞춤형 모니터링 시스템으로써 실제 구조물에 적용 가능한 안전 유지 기술 확보임
- 독자적인 고성능 SS-FRCCs의 개발은 건설재료 자체가 손상 및 균열을 감지하여 기존 센서의 낮은 내구성, 높은 비용, 낮은 민감성, 국부적 감지 능력 등을 보완하여 새로운 개념의 부재식 센서의 원천기술을 개발함
- 외부 환경 변인에 따른 오보를 최소화할 수 있는 독창적인 임피던스 신호 분석 기법은 실제 구조물에 적용성을 극대화시키는 물론 모니터링 신뢰성 향상에 기여함

2. 경제적 기여도

- SS-FRCCs를 실제 구조물에 적용 시에 SS-FRCCs는 구조부재로써의 역할 뿐만 아니라 손상을 감지할 수 있는 센서로써의 역할을 동시에 하여 구조물의 보수 및 보강에도 적용 가능할 것으로 판단되어 건설시장에서의 시장성이 매우 높음
- 하지만, SS-FRCCs의 재료비와 모니터링시스템 구축비로 인해 시공비의 증가가 예상되나, 기존 구조물의 보수보강 재료로 시설물의 이상 유무판정을 통해 효율적인 유지관리 및 보수보강 계획을 수립하여 점검비용을 감소할 것으로 기대됨
- 비록 국내의 강섬유 보강 시멘트 복합재료를 생산 가능한 시설 및 시공경험이 적어 기술 도입 초기의 시공성 악화에 따른 시공비 측면에서의 단점을 지니고 있으나, 추후 생산 및 시공성이 안정화 되면 강섬유보강 시멘트 복합재료의 높은 균열제어 능력과 내구성 향상 그리고 손상에 따른 자기감지 능력으로 인한 사회간접자본의 수명 연장에 따른 경제성이 제고됨
- SS-FRCCs 시스템 기술은 구조물 진단, 유지관리 분야 기술의 경쟁력을 확보하고 관련 기술의 대외 의존도를 감소시킬뿐만 아니라 국내 사업 및 수출 사업의 육성이 가능함

3. 사회적 기여도

- 2016년 정부에서确定的한 19대 <미래성장동력 종합실천계획전략> 산업 중 “재난안전관리 스마트 시스템”의 핵심요소 기술로 활용이 가능함
- 구조물의 노후화로 인하여 지속적으로 발생하고 있는 재해재난 사고의 발생 전에 구조물의 손상 발생에 대한 경고를 알려 사전에 방지함으로써 구조물의 안정성을 향상시켜 사용자의 불안감을 해소시킴
- 비파괴검사 국내외 시장이 2014년 48.1억 달러에서 2019년 63.1억 달러로 성장(연평균 8.96%)할 것으로 전망됨 (한국과학기술정보연구원 [2015])에 따라 SS-FRCCs 모니터링

시스템 기술은 세계적 건설시장에 새로운 패러다임을 가져올 것으로 예상됨

- 첨단 스마트 건설재료 및 진단 시스템 기술의 확보를 통하여 우리나라의 세계적인 건설 기술 수출에 기여할 것으로 예상됨

제5장. 연구개발성과의 활용계획

5.1절 최종 성과물의 활용계획

연구결과물	활용방안
SOC 시설물 재해·재난 방지를 위한 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료 기반의 스마트 모니터링 시스템	■ 섬유보강재의 사용으로 사회기반 시설물의 내구성뿐 만 아니라 인장력에 매우 취약한 콘크리트 구조물의 인장 저항 성능 향상에 기여 ■ 구조물의 건전도를 실시간으로 모니터링 할 수 있으며 센서의 교체가 필요 없는 반영구적 센서의 기능을 가진 건설재료로써 사회기반 시설물 또는 토목 구조물에 활용 ■ 사회기반 시설물의 노후화로 인한 보수/보강 재료로 활용 - 인장하중을 받는 부재 설계 시에 인장지배단면에 타설 가능 - 보수/보강 재료로 진단보수유지에 적극적 활용 가능 - 지진, 피로파괴 등으로 인한 균열 발생 이후 잔류강도에 의한 붕괴 예측이 가능 - 자기감지가 가능한 스마트 건설재료와 데이터 처리 기술을 함께 사용하여 구조물의 상태에 대한 높은 신뢰도를 가지는 정보를 실시간으로 제공함

5.2절 연구의 한계 및 추가연구 필요성

- 본 연구는 자기감지 성능을 가지는 섬유보강 시멘트 복합재료에 대한 기초연구로써 현장 적용 시 발생하는 경제성에 대한 명확한 분석이 추가로 필요함
- 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기-역학적 계측을 위한 부착식 또는 매립식의 전극개발이 좀 더 상세한 연구와 실용적인 조사가 필요함
- 또한, 연구기간과 연구비의 제한으로 재료의 자가센싱 성능에 대한 조사가 연구실 단위의 실험적 검증에 국한되어있어 현장 타설 시 발생할 수 있는 문제점에 대한 조사와 적합한 해결방안에 대한 조사가 필요함
- 본 연구를 통해 자가센싱 섬유보강 시멘트 복합재료의 실시간 모니터링 시스템에 대한 성능을 평가하였고, 구조물 진단 측면에서 추후 현장 적용 시 시스템 구축 적용방안을 모색해야함
- 구조물의 실시간 건전도 모니터링에 있어서 실제 현장 적용 시 구조물 안전 진단 관리자 및 사용자가 전문적인 지식 없이도 사용이 편리하도록 하는 시스템 개발이 보완되어야함

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

■ 자기감지 시멘트 복합체의 연구:

- 콘크리트의 전기적 거동에 대한 연구는 1960년대부터 이루어져왔으며, 그 이후부터 자기 감지 콘크리트 재료 개발을 위한 연구가 꾸준히 진행되어왔음
- 최근 2년간 콘크리트의 자기감지 능력을 제공하기 위하여 보강되는 functional filler로써 다양한 재료를 사용하여 다양한 하중 하에서의 전기-역학적 거동과 자기감지 능력을 향상시킬 수 있는 방안들에 대한 연구들이 수행되었음
- Functional filler의 첨가량에 따른 전기적 거동과 전기-역학적 거동을 조사하여 자기감지 능력이 가장 우수한 functional filler의 첨가량을 도출하는 연구들이 기본적으로 많이 수행되어 왔지만, 최근에는 근본적으로 functional filler를 모르타르 매트릭스 내에 효율적으로 분산시킬 수 있는 방안을 도출하는 연구들이 주로 수행됨

■ Carbon계 재료를 사용한 자가센싱 시멘트 복합재료의 해외 과학기술 개발 연구:

- 전기전도성이 매우 우수한 carbon계 재료가 보강된 섬유보강 콘크리트의 자기감지 능력은 매우 우수하다고 보고되고 있지만, 모르타르 매트릭스 내에 carbon계 재료가 균일하게 분산되지 않는다는 한계점이 지속적으로 지적되고 있어 이를 보완하기 위한 연구가 집중적으로 수행되고 있음
- 대다수의 연구자들은 여러가지 carbon계 재료 (carbon nanotube, graphene nanoplatelets, carbon black, carbon fiber, carbon nanofiber, carbon fiber 등)의 다양한 하중 하에서의 전기-역학적 응답 민감도에 대한 연구를 수행함 [Monteiro et al. (2017), Pisello et al. (2017), Sun et al. (2017)]
- Yildirim et al. (2018)은 4점 휨 실험을 통하여 carbon계 재료 중에서 carbon nanotube보다 carbon fiber의 사용이 비용과 혼합 방법을 고려하였을 때 보다 효율적이라고 보고한 바 있음
- D'Alessandro et al. (2016)은 콘크리트, 모르타르, 그리고 페이스트에 효과적인 분산이 가능한 multi-walled carbon nanotube의 첨가량을 도출하였음
- Al-Dahawi et al. (2016)은 silica fume, nano-silica, nano-calcite, 그리고 methylcellulose를 분산제로 사용하였으며, Wang et al. (2017) 또한 silica fume, granulated blast-furnace slag, 그리고 carboxymethylcellulose sodium을 분산제로 사용하여 모르타르 매트릭스 내에 carbon계 재료의 고른 분산을 유도할 수 있는 혼합 방법을 제안한 바 있음
- Al-Dahawi et al. (2016)은 silica fume, nano-silica, nano-calcite, 그리고 methylcellulose를 분산제로 사용하였으며, Wang et al. (2017) 또한 silica fume, granulated blast-furnace slag, 그리고 carboxymethylcellulose sodium을 분산제로 사용하여 모르타르 매트릭스 내에 carbon계 재료의 고른 분산을 유도할 수 있는 혼합 방법을 제안한 바 있음

-
- 뿐만 아니라, 몇몇 연구자들은 sonicator 사용, 초음파 교반 등의 기계적인 방법을 통하여 carbon계 재료의 고른 분산을 유도하여 시멘트 복합재료의 전기-역학적 응답 민감도를 향상시킴 [Hardy et al. (2016), Han et al. (2016), D'Alessandro et al. (2016), Sasmal et al. (2017)]
 - Gupta et al. (2017)은 재료의 추가 또는 기계적 분산 과정 필요 없이 모르타르 매트릭스 제작 과정에서 모르타르의 구성성분인 모래에 carbon nanotube를 코팅시켜 시멘트 복합재료를 제작하여 전기 임피던스 측정을 통한 콘크리트 빔의 손상 위치와 손상 정도를 확인한 바 있음

■ 기타 자기감지 시멘트 복합체의 기술 개발 연구:

- 콘크리트의 전기저항은 내·외부적인 물의 함량에 큰 영향을 받는다고 이미 보고된 바 있으며, 최근 함수량이 자기감지 시멘트 복합재료의 자기감지 능력에 미치는 영향에 대한 명확한 메커니즘 분석을 위한 조사들이 수행되었음
- Teomete (2016)은 함수량이 섬유-섬유 접촉과 섬유-매트릭스 접촉을 증가시켜 micro void 내의 물은 전해질로 작용하여 전기-역학적 응답 민감도에 직접적인 영향을 미친다는 것을 확인한 바 있으며, Jang et al. (2017) 또한 carbon nanotube 보강 시멘트 복합재료의 carbon nanotube 첨가량에 따른 함수량 영향성을 조사하였음
- Carbon계 재료 외에도 functional로써 steel shavings, Ni nanowire, nickel powder 등을 보강한 시멘트 복합재료의 전기적 거동 및 전기-역학적 거동이 조사된 바 있음 [El-야두 et al. (2018), Xu et al. (2018), Xiao et al. (2018)].

■ 자기감지 시멘트 복합체의 손상 모니터링 기술 개발 연구:

- 구조물 안전 모니터링 (Structural Health Monitoring, SHM)이 실제 구조물에 적용되기 위해서는 여러 구간에서 손상 또는 변형을 감지할 수 있는 다중 섹션 모니터링이 가능하여야 함
 - Downey et al. (2017)은 자기 감지 구조 재료의 다중 섹션 모니터링을 위하여 carbon계 시멘트 복합재료의 전기-역학적 거동을 다중 채널을 통해 측정함으로써 실시간 구조물 안정 모니터링의 가능성을 평가한 바 있음
-

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

- 주관연구기관에서 실시하는 정기안전교육을 이수하고, 정기적으로 안전교육을 실시함
- 연구자 및 실험자의 안전을 위한 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	Effect of matrix cracking on electrical resistivity of high performance fiber reinforced cementitious composites in tension	세종대학교 산학협력단	연구원	Construction and Building Materials	3.169	2017.12.15	단독	SCI(E) /1회
3	논문	Electro-mechanical self-sensing response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete in tension	세종대학교 산학협력단	연구원	Composites Part B	4.920	2018.02.01	단독	SCI(E)
3	논문	Electromechanical response of high-performance fiber-reinforced cementitious composites containing milled glass fibers under tension	세종대학교 산학협력단	연구원	Materials	2.467	2018.06.29	단독	SCI(E)
4	논문	Electrical Impedance-based Crack Detection of SFRC under varying Environmental Conditions	세종대학교 산학협력단	연구원	Smart Structures and Systems	1.382	Accepted (18.05.24)	단독	SCI(E)
5	특허 출원	초단유리섬유가 혼입한 균열 자기감지 강섬유 보강 시멘트 복합재료 및 이의 제조 방법	세종대학교 산학협력단		한국	-	2017.04.27	단독	-
6	특허 출원	자가센싱 콘크리트에 기반하여 구축된 구조물의 손상 모니터링을 위한 전기 임피던스 장치 및 방법	세종대학교 산학협력단		한국	-	2017.05.15	단독	-

제11장. 기타 사항

1. 후속 연구 수행

- 실 구조물 부재 적용성이 검증되었기 때문에 검증된 연구 결과를 통하여 적용 가능한 구조물을 조사하여 자가센싱 섬유보강 콘크리트의 성능을 검증할 예정
 - 본 주관연구기관은 2018년 국토교통과학기술진흥원 국토교통기술촉진연구사업 창의도전연구분야에 선정되어 연구를 수행 중에 있으며, 자가센싱 섬유보강 콘크리트 연구 결과를 바탕으로 PSC 구조물의 정착구에 자가센싱 섬유보강 콘크리트를 적용하여 성능을 검증할 예정
-

제12장. 참고 문헌

- 국가과학기술심의회, (2016), 2016년도 미래성장동력 종합실천계획(안)
- 산업정보분석실, (2015), 비파괴검사 장비 및 서비스: 다양한 분야에서의 응용으로 시장 성장 기대
- Azhari, F., Banthia, N., "Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, No. 7, 2012, pp. 866-873
- Al-Dahawi, A., Ozturk, O., Emami, F., Yildirim, G., Sahmaran, M., "Effect of mixing methods on the electrical properties of cementitious composites incorporating different carbon-based materials," *Construction and Building Materials*, Vol. 104, 2016, pp. 160-168
- Banthia, N., Djeridane, S., Pigeon, M., "Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements," *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, No. 5, pp. 804-814
- Cao, J., Chung, D. D. L., "Effect of strain rate on cement mortar under compression, studied by electrical resistivity measurement," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 5, 2002, pp. 817-819
- Cao, J., Chung, D. D. L., "Electric polarization and depolarization in cement-based materials, studied by apparent electrical resistance measurement," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 3, 2004, pp. 481-485
- Chen, P. W., Chung, D. D. L., "Carbon fiber reinforced concrete as a smart material capable of non-destructive flaw detection," *Smart Materials and Structures*, Vol. 2, No. 1, 1993, pp. 22-30
- Chen, B., Liu, J. Y., Wu, K., "Electrical response of carbon fiber reinforced cementitious composites to monotonic and cyclic loading," *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 11, 2005, pp. 2183-2191
- Chung, D. D. L., "Self-monitoring structural materials," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 22, No. 2, 1998, pp. 57-78
- Chung, D. D. L., "Piezoresistivity cement-based materials for strain sensing," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 13, No. 9, 2002, pp. 599-609
- Chung, D. D. L., "Electrically conductive cement-based materials," *Advances in cement research*, Vol. 16, No. 4, 2004, pp. 167-176
- Chung, D. D. L., "Dispersion of short fibers in cement," *Journal of materials in civil engineering*, Vol. 17, No. 4, 2005, pp. 379-383
- D'Alessandro, A., Rallini, M., Ubertini, F., Materazzi, A. L., Kenny, J. M., "Investigation 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
- Downey, A., D'Alessandro, A., Baquera, M., Garcia-Macias, M., Rolfes, D., Ubertini, F., Laflamme, S., Castro-Triguero, R., "Damage detection, localization and quantification in conductive smart concrete structures using a resistor mesh model," *Engineering Structures*, Vol. 148, 2017, pp. 924-935
- Fan, Z. Y., "A new approach to the electrical resistivity of two-phase composites," *Acta metallurgica et materialia*, Vol. 43, No. 1, 1995, pp. 43-49
- Goak, J. C., Lee, S. H., Jang, S. H., Kim, K. B., Seo, Y. H., Seo, Y. S., Lee, N. S., "Spectroscopic studies and electrical properties of transparent conductive films fabricated by using surfactant-stabilized single-walled carbon nanotube suspensions," *Carbon*, Vol. 49, No. 13, 2001, pp. 4301-4313
- Han, B. G., Yu, X., Kwon, E., "A self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring," *Nanotechnology*, Vol. 20, No. 44, 2009, pp. 445-501
- Han, B. G., Yu, X., Qu, J. P., "Effect of water content on the piezoresistivity of MWNT/cement composites," *Journal of materials science*, Vol. 45, No. 14, 2010, pp. 3714-3719

-
- Han, B. G., Guan, X., Ou, J., "Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors," *Sensors and Actuators A*, Vol. 135, 2007, pp. 360-369
 - Han, B. G., Yu, X., Ou, J., "Multifunctional and Smart Carbon Nanotube Reinforced Cement-based Materials," *Nanotechnology in Civil Infrastructure* (edit by K.Gopalakrishnan et al.), pp. 1-47
 - Han, B. G., Zhang, K., Yu, X., Kwon, E., Ou, J., "Electrical characteristics and pressure-sensitive response measurements of carboxyl MWNT/cement composites," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, No. 6, 2012, pp. 794-800
 - Hardy, J. G., "Chapter 4: Organic electronic materials for gene delivery," *Engineering of Nanobiomaterials*, 2016, pp. 119-144
 - Jang, S. H., Hochstein, D. P., Kawashima, S., Yin, H., "Experiments and micromechanical modeling of electrical conductivity of carbon nanotube/cement composites with moisture," *Cement and Concrete composites*, Vol. 77, 2017, pp. 49-59
 - Kim, D. J., Naaman, A. E., El-Tawil, S., "Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, No. 10, pp. 917-928
 - Li, H., Xiao, H. G., Ou, J. P., "A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nano-phase materials," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 3, 2004, pp. 435-438
 - Li H., Xiao, H. G., Ou, J. P., "Electrical property of cement-based composites filled with carbon black under long-term wet and loading condition," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 9, 2008, pp. 2114-2119
 - Li, M., Lin, V., Lynch, J., Li, V. C., "Multifunctional carbon black engineered cementitious composites for the protection of critical infrastructure," *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6*, Springer, Netherlands, 2012, pp. 99-106
 - McCarter, W. J., Garvin, S., "Dependence of electrical impedance of cement-based materials on their moisture condition," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 22, No. 11, 1989, pp. 1773-1776
 - McCarter, W. J., "Effects of temperature on conduction and polarization in portland cement mortar," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 78, No. 2, 1995, pp. 411-415
 - Meehan, D. G., Wang, S. K., Chung, D. D. L., "Electrical resistance based sensing of impact in carbon fiber reinforced cement based materials," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, No. 1, 2010, pp. 83-105
 - Naaman, A. E., Reinhardt, H. W., "Characterization of high performance fiber reinforced cement composites," In A. E. Naaman, H.W. Reinhardt (Eds.), *High performance fiber reinforced cement composites: HPFRCC 2*, Proceedings of 2nd international workshop on HPFRCC, Chapter 41, RILEM, No. 31, E.& FNSpon, London, 1996, pp. 1-24
 - Naaman, A. E., Reinhardt, H. W., "Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response," *Materials and Structures*, Vol. 39, No. 5, 2006, pp. 547-555
 - Naaman, A. E., "Tensile strain-hardening FRC composites: historical evolution since the 1960," *Advances in Construction Materials*, (Part II), 2007, pp. 181-202
 - Nguyen, D. L., Kim, D. J., "Effect of fiber type on damage-sensing capacity of strain-hardening steel-fiber-reinforced cementitious composites," *Conference of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Daegu-Korea, 2014, pp. 248-249
 - Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., Koh, K. T., "Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, No. 2, 2012, pp. 172-184
-

-
- Pramanik, P. K., Khastgir, D., De, S. K., Saha, T. N., "Pressure-sensitive electrically conductive nitrilerubber composites filled with particulate carbon black and short carbon fibre," *Journal of Materials Science*, Vol. 25, No. 9, 1990, pp. 3848-3853
 - Pisello, A. L., D'Alessandro, A., Sambuco, S., Rallini, M., Ubertini, F., Asdrubali, F., Materazzi, A. L., 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
 - Ranade. R., Zhang, J., Lynch, J., Li, V. C., "Influence of micro-cracking on the composites resistivity of Engineered Cementitious Composites," *Cement and Concrete Research*, Vol. 58, 2014, pp. 1-12
 - Shi, Z. Q., Chung, D. D. L., "Carbon fiber reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 3, 1999, pp. 435-439
 - Song, G., Mo, Y. L., Otero, K., Gu, H., "Health monitoring and rehabilitation of a concrete structure using intelligent materials," *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 2, 2006, pp. 309-314
 - Sun, M. Q., Liu, Q. P., Li, Z. Q., Wang, E., "Electrical emission in mortar under low compressive loading," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 1, 2002, pp. 47-50
 - Wang, X., Fu, X., Chung, D. D. L., "Strain sensing using carbon fiber," *Journal of materials research*, Vol. 14, No. 3, 1999, pp. 790-802
 - Wang, D. J., Chung, D. D. L., "Comparative evaluation of the electrical configurations for the two-dimensional electric potential method of damage monitoring in carbon fiber polymer-matrix composites," *Smart materials and structures*, Vol. 15, No. 5, 2006, pp. 1332-1344
 - Wang, H., Gao, X., 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
 - Wen, S. H., Chung, D. D. L., "Piezo-resistivity in continuous carbon fiber-cement matrix composite," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 3, 1999, pp. 445-459
 - Wen, S. H., Chung, D. D. L., "Carbon fiber-reinforced cement as a strain-sensing coating," *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 4, 2001, pp. 665-667
 - Wen, S., Chung, D. D. L., "Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement," *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 1, 2001, pp. 141-147
 - Wen, S. H., Chung, D. D. L., "A comparative study of steel- and carbon-fiber cement as piezoresistive strain sensors," *Advances in cement research*, Vol. 15, No. 3, 2003, pp. 119-128
 - Wen, S. H., Chung, D. D. L., "Strain sensing characteristics of carbon fiber reinforced cement," *ACI materials journal*, Vol. 102, No. 4, pp. 244-248
 - Wen, S. H., Chung, D. D. L., "Partial replacement of carbon fiber by carbon black in multifunctional cement-matrix composites," *Carbon*, Vol. 45, No. 3, 2007, pp. 505-513
 - Wenner, F., "A method of measuring earth resistivity," *Bulletin of the Bureau of Standards*, Vol. 12, No. 4, 1915, pp. 469-478
 - Wille, K., Kim, D. J., Naaman, A. E., "Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents," *Materials and Structures*, Vol. 44, No. 3, 2011, pp. 583-598
 - Wittmann, F. H., "Observation of an electromechanical effect of hardened cement paste," *Cement and Concrete Research*, Vol. 3, No. 5, 1973, pp. 601-605
 - Xu, J., Cao, Y., Jiang, L., Feng, W., Song, Y., Shan, H., "Microstructure and pressure-sensitive properties of cement-based composite with Ni nanowires," *Construction and Building Materials*, Vol. 159, 2018, pp. 46-53
 - Xiao, H., Liu, M., 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

- Yu, X., Kwon, E., “A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties,” *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 5, 2009
 - Yildirim, G., Sarqary, M. H., Al-Dahawi, A., Ozturk, O., Anil, O., Sahmaran, M., “Piezoresistive behavior of CF- and CNT-based reinforced concrete beams subjected to static flexural loading: Shear failure investigation,” *Construction and Building Materials*, Vol. 168, 2018, pp. 266-279
 - Malhotra, V. M., Carino, N. J., *Handbook on nondestructive testing of concrete (2nd.)*, Boca Raton: CRC Press
 - Monteiro A.O., Paulo, B. C., Pedro, M. F. J. C., “Self-sensing piezoresistive cement composite loaded with carbon black particles,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 81, 2017, pp. 59-65
 - Sasnal, S., Ravivarman, N., Sindu, B.S., Vignesh, K., “Electrical conductivity and piezo-resistive characteristic of CNT and CNF incorporated cementitious nanocomposites under static and dynamic loading,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 100, 2017, pp. 227-243
 - Song, J., “The change of electrical resistivity of high performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC) in tension, Master thesis, Sejong University, Korea
 - Teomete, E., “The effect of temperature and moisture on electrical resistance, strain sensitivity and crack sensitivity of steel fiber reinforced smart cement composite,” *Smart Materials Structure*, Vol. 25, 2016, pp. 1-10
-