

자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료 개발 최종보고서

2015. 01.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 세 종 대 학 교
산 학 협 력 단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 "자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료 개발"
과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2015. 01. 22

주관연구기관명 : 세종대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 김동주

연 구 원 : NGUYEN Duy Liem

연 구 원 : MANATHAMSOMBAT Chatchai

연 구 원 : 김민경

연 구 원 : 박준길

보고서 요약서

과제고유번호	12CCTI-C063938-01	해 당 단 계 연 구 기 간	2012-11-19 - 2014-11-18	단 계 구 분	1차년도/ 1차년도
연구사업명	건설기술혁신사업				
연구과제명	최 상 위 과 제 명	자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료의 개발			
	단위과제명				
연구책임자	김동주	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 5 명 내부 : 5 명 외부 : 명	총연구비	정부 : 50,000 천원 기업 : 0 천원 계 : 50,000 천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	세종대학교 산학협력단 세종대학교 건설환경공학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약				보고서면수	107
■ 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 보강 섬유의 종류별 전기 저항률의 변화와 인장거동을 조사한 결과, 비틀림 섬유를 보강할 경우, 자기감지 능력이 우수한 것으로 판명됨 ■ 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 섬유보강 부피비가 증가할수록 전기 저항률의 변화와 인장거동은 우수한 것으로 판명됨. 부피비로 1.5%의 섬유 보강한 경우 자기감지 능력이 우수했으며, 부피비로 2.0%의 섬유 보강한 경우 인장 저항성이 가장 우수함 ■ 자기감지능력을 극대화하기 위해 carbon black과 고로슬래그를 치환하여 그 영향을 조사한 결과 고로슬래그를 치환하였을 경우, 인장 저항성을 감소시키지 않으면서 자기감지 능력을 다소 향상시킴 ■ 강섬유에 carbon 섬유를 혼입하였을 경우, 한 종류의 강섬유를 사용했을 때 보다 자기감지 능력이 다소 향상됨 ■ 온도의 증가로 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 감소하였으며, 또한 상대습도의 증가할 경우 역시 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률이 감소함					
색 인 어	한 글	균열, 자기감지, 섬유보강, 변형경화, 보수보강			
	영 어	Crack, Self-sensing, HPFRCC, Strain hardening, Maintenance			

요 약 문

본 연구의 최종목표는 자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료의 개발이다. 최근 사회기반 시설물의 조기 노화와 기후 변화로 인한 여러 자연재해와 테러에 의한 시설물의 붕괴는 시설물의 보수 또는 교체를 유발하여, 막대한 경제적 손실을 초래할 뿐만 아니라 심지어 인명피해를 야기하고 있다. 따라서, 노후화된 사회기반 시설물에 대한 정기적인 안전진단 및 보수보강이 매우 중요하다. 하지만 현재 많이 사용되는 안전진단에 사용하는 부착식 또는 매립식의 센서들의 경우, 그 수명이 매우 짧은 뿐만 아니라, 특히 매립식 센서들의 경우 구조물의 성능을 저하시키는 단점을 가지고 있다. 또한, 센서들이 부착된 위치에서만 구조물의 손상을 확인할 수 있다는 단점도 가지고 있다.

본 연구에서는 자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료 (High performance fiber reinforced cementitious composites with self damage sensing capability) 를 개발하여 상기의 단점들을 보완하고자 하였다. 세부연구 목표들로서, 1) 섬유종류 및 보강량이 자기감지능력에 미치는 영향을 조사하였고, 2) 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 자기감지 능력 극대화 방안을 모색하였으며, 그리고 3) 외부환경이 자기감지 능력에 미치는 영향을 조사하였다.

고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 보강 섬유별 전기 저항률의 변화와 인장거동을 조사한 결과, 조사된 섬유들 중에서, 비틀림 강 섬유를 혼입한 경우 다수의 미세균열을 동반하는 인장 변형경화 거동을 높은 변형능력 까지 나타냄으로써, 가장 우수한 자기 균열 감지 성능을 나타내었다. 이러한 자기 균열 감지 성능을 정량적으로 평가하기 위하여 단위 변형률의 변화당 전기 저항률의 변화를 나타내는 gauge factor를 산정하여 비교 평가 하였다. 섬유의 보강량이 증가할수록 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률 변화와 인장저항능력이 향상되었다: 부피비로 1.5%의 섬유를 보강한 경우 가장 높은 gauge factor 를 나타냄으로써 가장 우수한 자기 균열 감지 능력을 나타낸 반면에, 부피비로 2.0% 섬유를 보강한 경우 가장 높은 인장강도를 나타내었다.

한편, 자기 균열 감지 성능을 향상시키기 위해, 모르타르 계열의 매트릭스에 전기전도성이 우수한 carbon black과 고로슬래그로 시멘트의 일부를 치환한 경우, 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 인장저항성을 감소시키지 않으면서, gauge factor를 다소 증대할 수 있었다. 또한, 자기 균열 감지 성능을 향상시키기 위해 길이와 재질이 다른 두 가지 섬유를 혼입하여, 즉 전기전도성이 우수한 carbon 섬유와 강섬유의 혼입을 통해, 자기 균열 감지 능력을 향상시킬 수 있었다.

마지막으로, 온도가 증가함에 따라, 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항은 감소하였으며 상대습도가 증가함에 따라서도 전기 저항이 감소하는 경향을 나타내었다.

본 연구과제의 수행을 통하여, 1건의 국내 특허를 출원하였으며, 1개의 SCI 논문을 상위 10% 이내의 저널인 Composites: part B에 게재, 그리고 2건의 국내 학술발표 논문을 게재하였다.

수행된 연구로 인하여, 기술적으로는 1) 자기 균열 감지 능력을 가지는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료를 이용한 구조물의 경우 별도의 센서 부착없이 구조물 자체가 그 거동 및 손상을 평가할 수 있게 되며, 2) 높은 인장 강도와 연성도의 확보를 통하여 구조물의 내구성 향상에 기여할 수 있다. 경제적으로는 1) 구조물의 수명동안 영구적으로 사용할 수 있어 구조물의 진단에 사용되는 많은 비용과 시간을 절감하며, 2) 유지보수 및 진단 기능을 가진 재료의 국산화로 국내 사업 및 수출 사업의 육성가능, 3) 일체화된 보수보강 재료에 의한 시설물의 이상유무 판정을 통해 효율적인 유지관리 및 보수·보강 계획을 수립할 수 있으므로, 사회간접자본의 수명 연장에 따른 경제성 제고, 그리고 4) 진단과 보수보강이 가능한 일체화형 보수보강 재료를 활용한 유지보수 시장 개척할 수 있다. 정책적으로는 1) 현 정부의 정책 초점인 ‘창조경제’에 기여할 수 있으며, 2) 안전한 사회기반 시설물을 통해 사회적 불안감을 해소할 것으로 판단된다.

자기 균열 감지 능력을 가지는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료는 반영구적 센서 기능을 가진 건설재료로서 사회기반 시설물 또는 빌딩의 모니터링에 활용, 사회기반 시설물의 내구성 향상에 기여, 그리고 보수·보강 재료로도 활용될 수 있다.

본 연구에서는 인장 하중을 받는 작은 크기의 시험편에 대한 자기 균열 감지 능력을 확인하였으며, 추후 연구를 통해 압축과 휨 또는 전단 하중을 받는 경우의 시험편 뿐만 아니라 큰 크기의 구조부재에 적용하여 그 성능에 대한 평가가 요구된다.

SUMMARY

The goal of this research is to develop high performance fiber reinforced cementitious composites [HPFRCCs] with self crack (or damage) sensing capacity for the repair or reinforcement of current civil infrastructure. The early deterioration and severe damage of civil infrastructure under climate change and extreme loads such as earthquakes, impacts and blasts has generated considerable cost and even human death. Thus, it is important to have periodic inspections for the infrastructure and provide suitable remedy within a reasonable time. Current monitoring systems are able to provide the information about the current loading carrying capacity of various structural systems in civil infrastructure. However, the attached and/or embedded sensors in the monitoring system are still suffering their limited service life, less than a few years, which is much shorter than the service life of civil infrastructure. The embedded sensors could even generate unfavorable effects in the durability of the infrastructure.

In this study, in order to overcome the limitations of current monitoring system as above mentioned, we investigated the self damage sensing capacity of HPFRCCs. Detailed objectives are 1) to investigate the effect of fiber type and volume contents on the self damage sensing capacity of HPFRCCs, 2) to find the way to enhance the self sensing capacity of HPFRCCs, and 3) to investigate the effects of different temperature and relative humidity on the electrical resistivity of HPFRCCs.

Based on the experimental results, among the fibers investigated in this study, the HPFRCCs with twisted steel fibers produced the best self damage sensing capacity during the tensile strain hardening region accompanied with multiple micro-cracks. The gauge factors, i.e., the change of electrical resistivity per unit strain, of HPFRCCs were estimated for quantitative comparison: the HPFRCCs with 1.5% steel fibers produced the highest gauge factor while those with 2.0% steel fibers showed the highest tensile strength.

Beside, as one of ways for enhancing the self damage sensing capacity of HPFRCCs, carbon black (CB) and ground granulated blast furnace slag (GGBS) were added in the mortar matrix. The addition of CB and GGBS in the matrix of HPFRCCs could increase the self damage sensing capacity of HPFRCCs without reducing the tensile resistance of them. In addition, the blending macro steel fibers and micro carbon fibers in the HPFRCCs also could further increase their self damage sensing capacity.

Finally, the effects of temperature and humidity on the electrical resistivity of HPFRCCs were investigated. As the temperature increased or the relative humidity increased, the electrical resistance clearly decreased.

Consequently, this research project produced one domestic patent application, one SCI journal paper published in the journal of Composite: part B, and two conference proceedings.

Based on the research in this project, the HPFRCCs with self damage sensing capacity can be used as a construction material for monitoring the behavior or damage of civil infrastructure. In addition, the application of HPFRCCs into infrastructure is expected to enhance the durability of civil infrastructure. And, the application can reduce the cost for monitoring, repair and maintenance by lengthening the service life of civil infrastructure. Finally, the HPFRCCs with self damage sensing capacity is expected to increase the safety of human society.

As future research, for the practical application of HPFRCCs with self damage sensing capacity, the sensing ability of HPFRCCs under compression and bending load should be understood. In addition, the self sensing capacity of large sized structural members with HPFRCCs should be understood.

CONTENTS

Chapter I INTRODUCTION	11
1.1 Problem statement	11
1.2 Goal and objectives	12
1. Goal	12
2. Objectives	12
1.3 Background information	14
Chapter II RESEARCH PROGRAM	15
2.1 Strategy and methodology	15
1. Strategy	15
2. Methodology	16
2.2 Results	18
1. Summary of results	18
2. Detailed findings	19
Chapter III RESEARCH OUTCOMES	46
3.1 Representative outcomes	46
1. Summary	46
2. Detailed information	46
3. Verification	47
Chapter IV EVALUATION	51
4.1 Achievement of goal	51
4.2 Effects of research outcomes	52
1. Technical aspect	52
2. Economic aspect	52
3. Political aspect	53
Chapter V APPLICATIONS AND FUTURE WORKS	54
5.1 Applications	54
5.2 Future works	54

REFERENCES	55
-------------------------	-----------

APPENDICES	59
-------------------------	-----------

1. Research result evidence	59
2. Appendix	111
Appendix 1. Application plan	111
Attachment 1. Summary	119
Attachment 2. SMK (Sales Material Kit)	125
Appendix 2. Main outcomes	127
Appendix 3. Table of research summary	129
Appendix 4. Pamphlet	130

목 차

제1장. 연구개발과제 개요	11
1.1절 연구개발의 목적 및 필요성	11
1.2절 연구개발 목표	12
1. 연구개발의 정의	12
2. 연구개발의 범위	12
1.3절 국내외 기술개발 현황	14
제2장 연구개발 수행 내용 및 결과	15
2.1절 연구수행 전략 및 방법론	15
1. 연구수행 전략	15
2. 연구수행 방법	16
2.2절 연구수행 내용 및 결과	18
1. 연구개발결과 요약	18
2. 연구개발 주요내용	19
제3장 최종 연구성과 및 적용실적	46
3.1절 최종 연구성과	46
1. 정량적 연구성과	46
2. 개별 연구성과	46
3. 개별 연구성과 검증	47
제4장 연구목표 달성 및 효과	51
4.1절 연구개발 최종목표 달성도	51
4.2절 연구개발 성과의 효과 분석	52
1. 기술적 효과분석	52
2. 경제적 효과분석	52
3. 정책적 효과분석	53
제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	54
5.1절 최종성과물의 활용방안	54
5.2절 추가연구의 필요성	54

참고문헌	55
------------	----

부록	59
----------	----

1. 연구성과	59
2. 별첨	111
별첨 1. 활용계획서	111
붙임 1. 성과총람	119
붙임 2. 기술소개자료(SMK : Sales Material Kit)	125
별첨 2. 핵심성과 요약	127
별첨 3. 최종성과물 일람	129
별첨 4. 성과물 홍보자료	130

제1장 연구개발과제 개요

1.1절 연구개발의 목적 및 필요성

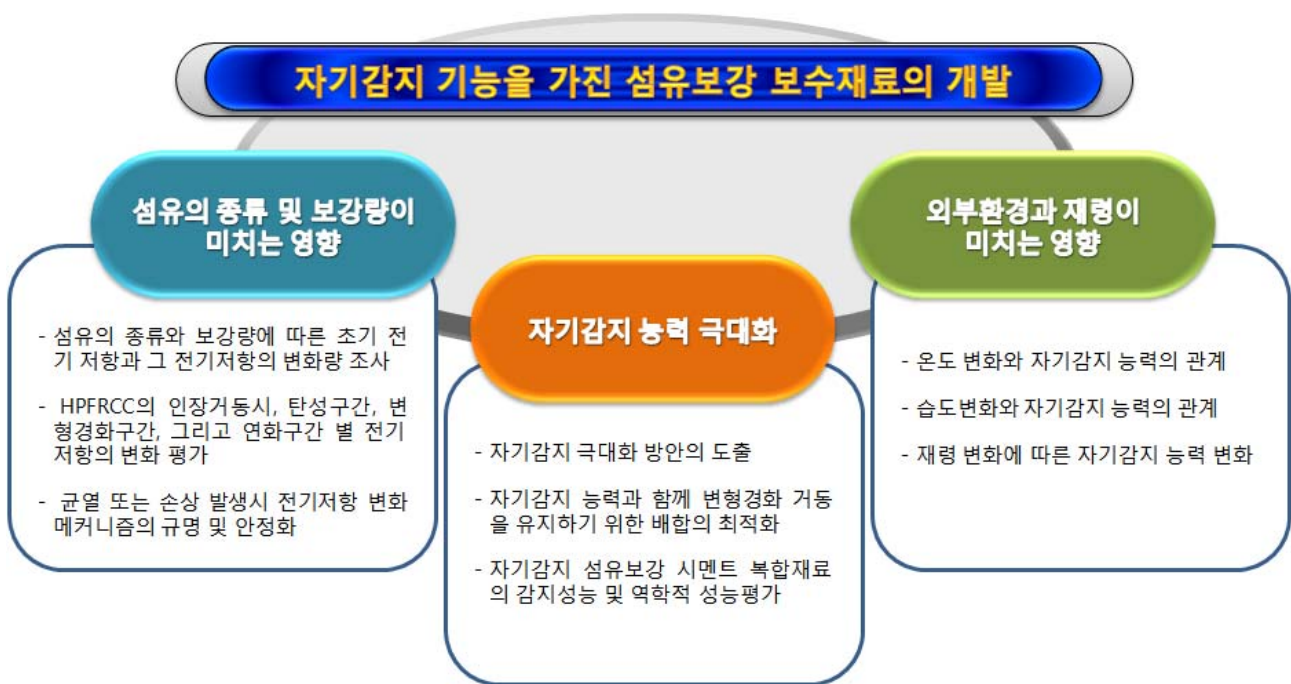
- 최근 기후 변화로 인한 여러 자연재해 그리고 테러에 의한 충격 및 폭발 등의 극한하중으로 인해 시설물의 노화가 촉진되고 있음
- 콘크리트 사회기반 시설물의 조기 노화의 주요원인은 콘크리트 재료 자체의 취성적인 거동에 기인함. 콘크리트 균열은 철근 부식을 가속화 하여 구조물의 수명을 단축함
- 사회기반 시설물의 붕괴는 인명피해 뿐만 아니라 시설물의 교체와 보수 및 그로 인해 발생하는 경제적 손실 등 장기간에 걸쳐 사회와 경제에 막대한 손실을 가져옴
- 사회기반 시설물의 유지관리를 위해 정기적인 점검과 안전진단을 수행 중이나, 점검자의 주관적인 경험에 근거한 판단으로 점검자에 따라 다른 진단결과 도출의 문제점이 있음
- 또한, 매립식 또는 접촉식 센서들을 이용한 모니터링의 경우, 구조물의 거동을 센서가 부착된 위치에서만 파악가능하고, 센서의 수명이 구조물과 비교하여 매우 짧아서 영속적인 모니터링이 불가능한 단점이 있음
- 센서의 교체가 필요없이 영속적으로 사용할 수 있으며, 시설물의 구조적 성능에 악영향을 미치지 않고, 구조물의 손상 정도를 전체적으로 파악할 수 있는 “자기 감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료의 개발”을 하고자 함

1.2절 연구개발 목표

1. 연구개발의 정의

- 본 연구의 최종목표는 “자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료 개발”
- 전기 저항률의 변화와 균열 또는 손상과의 관계를 규명함으로써, 자기 균열 또는 손상 감지 기능을 가지는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료를 개발하여 구조물 및 보수보강 재료 자체가 자기감지 기능을 가질 수 있도록 함

2. 연구개발의 범위



- 자기감지 기능을 가지는 섬유보강 보수보강 재료의 개발을 위하여 총 2년 동안 섬유의 종류 및 외부환경이 미치는 영향과 자기감지 능력의 극대화 시키는 과정이 진행되었으며, 그 세부적 목표는 다음과 같음: 1) 섬유의 종류 및 보강량이 미치는 영향평가, 2) 자기감지 능력 극대화 방안 도출 그리고 3) 외부환경과 재령이 미치는 영향을 조사함

■ 섬유의 종류 및 보강량이 미치는 영향

- 섬유의 종류와 보강량에 따른 초기 전기저항과 그 전기저항의 변화량 조사
- 탄성구간, 변형경화구간, 그리고 연화구간 별 전기저항의 변화평가
- 균열 또는 손상 발생시 전기저항 변화 메커니즘의 규명 및 안정화

■ 자기감지 능력의 극대화방안 도출

- 자기감지 능력 극대화를 위한 복합재료의 배합최적화
- 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료의 감지 성능 및 역학적 성능평가
- 시멘트 복합재료에 두 가지 섬유를 혼입하여, 자기감지 성능 및 역학적 성능평가

■ 외부환경과 재령이 미치는 영향

- 온도의 변화와 자기감지 능력의 관계 도출
- 습도변화와 자기감지 능력의 관계 도출
- 재령의 변화에 따른 자기감지 능력 변화

1.3절 국내외 기술개발 현황

1. 사회기반 시설물의 안전진단 및 모니터링 현황

- 일반적으로 변형률 게이지, 처짐기 및 가속도계를 이용한 안전진단 또는 모니터링의 수행
- 최근 국외에서는 센서와 데이터 수집장치 사이 연결이 따로 필요 없는 무선센서의 개발연구가 활발함 (The University of Michigan)
- 국내에서도 압전소자를 이용한 매립형 센서 또는 초음파를 활용한 비접촉식 센서 개발에 관한 연구가 진행 중

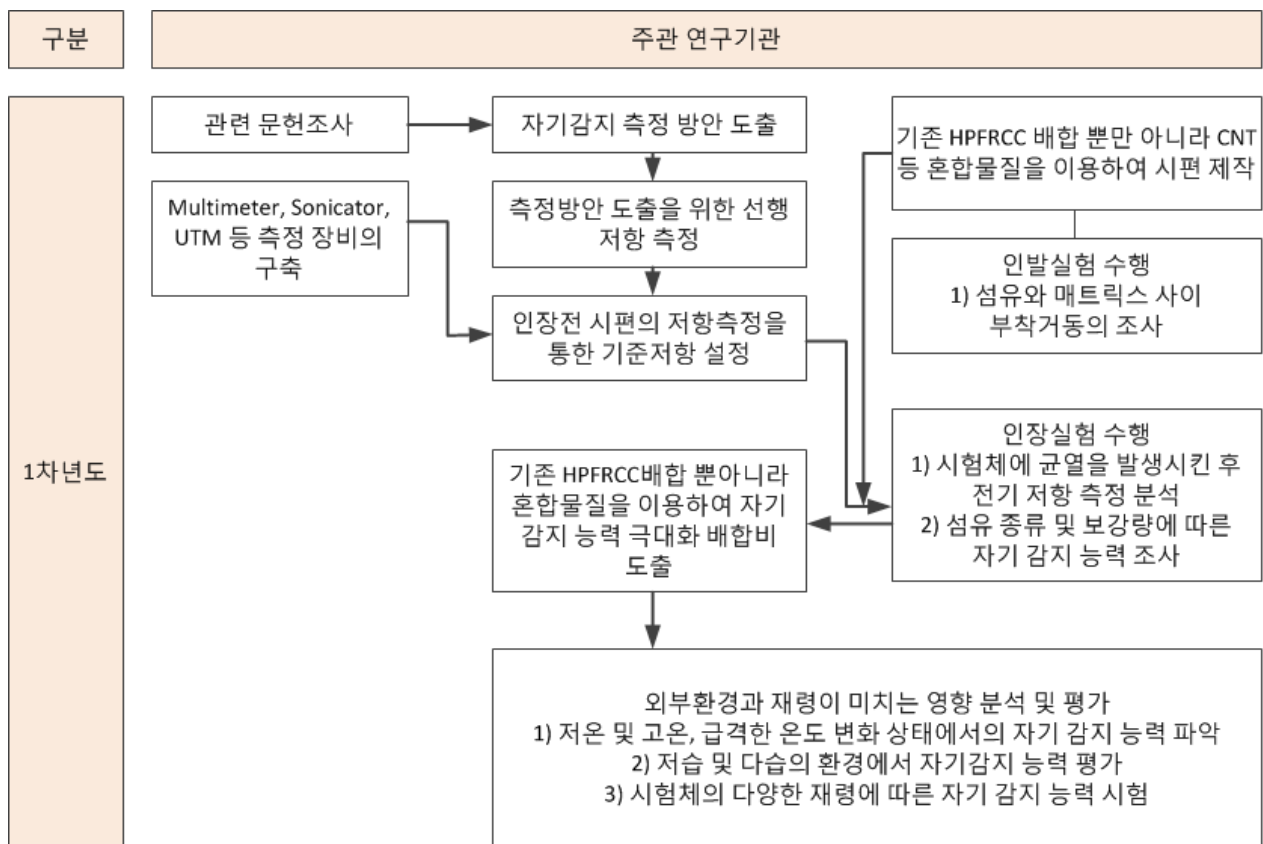
2. 일반 콘크리트 또는 변형연화 섬유보강 시멘트 복합재료의 자기감지 기능개발

- 미국 The State University of New York의 Composite Materials Research Laboratory에서는 탄소섬유 또는 탄소나노튜브를 사용한 자기감지 기능을 가지는 시멘트 복합재료 개발과 그 적용에 관한 연구가 활발함
- 미국 ACE-MRL에서는 PVA섬유를 사용한 Engineered Cementitious Composites (ECC)의 자기감지 기능에 대한 연구가 시작단계에 있음
- 국내에서는 CFGFRP 보강근 및 CF 보강시트를 사용한 자기감지 기능을 가지는 콘크리트 개발과 그 적용에 관한 연구가 이루어짐
- 세종대학교에서 변형된 고강도 강섬유를 활용한 변형 경화 섬유보강 시멘트 복합 재료의 개발 및 충격거동에 관한 연구, 그리고 자기감지 기능 평가에 관한 기초연구가 이루어짐

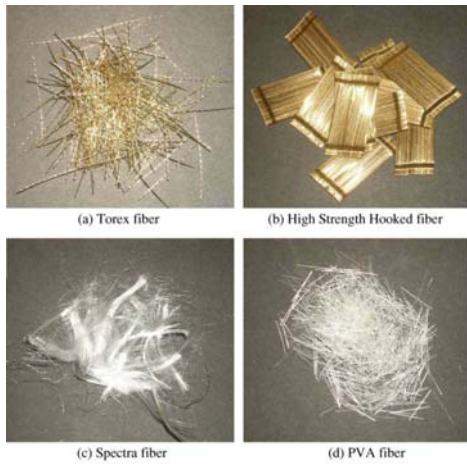
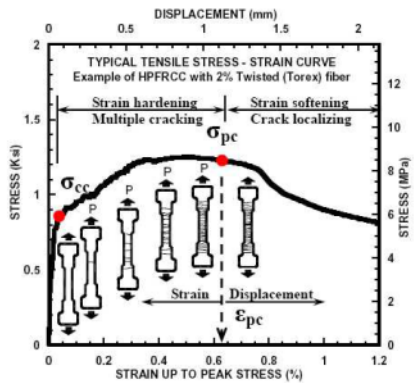
제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

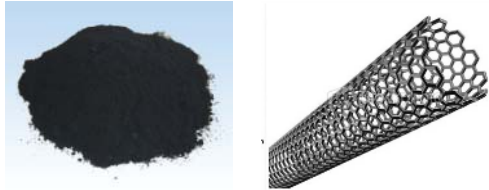
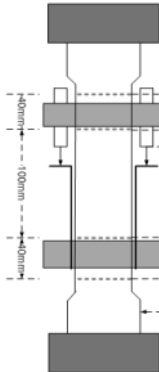
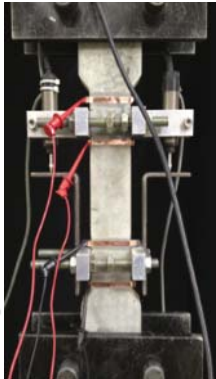
2.1절 연구수행 전략 및 방법론

1. 연구수행 전략



2. 연구수행 방법

연구 목표	주요 연구내용	수행방법
섬유 의 종류 및 보강 량이 미치 는 영향	- 섬유의 종류 및 보강량에 따른 초기 전기저항과 전기저항의 변화량 조사 - 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료 인장거동 시에 탄성구간, 변형경화 구간, 그리고 변형연화 구간 별 전기저항의 변화 평가	- 다양한 종류의 섬유와 보강량을 매트릭스에 적용한 시험체 제작  (a) Torex fiber (b) High Strength Hooked fiber (c) Spectra fiber (d) PVA fiber - 직접 인장 시험을 통해 구간별 전기저항의 평가
	균열 또는 손상 발생 시, 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기저항 변화에 대한 메커니즘의 규명 및 안정화	직접 인장 시험을 통해 시험체에 균열을 발생시킨 후 전기저항 측정 및 분석 

연구 목표	주요 연구내용	수행방법
자기 감지 능력 극대 화	■ 자기감지 극대화 방안의 도출 ■ 자기감지 능력과 함께 변형경화 거동을 유지하기 위한 배합의 최적화	■ 기존의 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료 배합뿐만 아니라 CNT 및 Carbon black 등 혼합물질을 이용하여 직접 인장시험을 통한 자기감지 능력 극대화하는 배합비 도출 
	■ 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료의 감지성능 및 역학적 성능평가	■ 변형경화 거동을 유지하는 최적화된 배합 및 섬유를 이용하여 시험체 제작 자기감지 시험과 직접 인장시험 수행   
외부 환경 이 미치 는 영향	■ 온도 변화와 자기감지 능력의 관계 ■ 습도 변화와 자기감지 능력의 관계	■ 저온 및 고온, 급격한 온도 변화 상태에서의 자기감지 능력 파악 ■ 저습 및 다습의 환경에서 자기감지 능력 시험을 통해 습도의 영향 파악

2.2절 연구수행 내용 및 결과

1. 연구개발결과 요약

연구 목표	연구내용	연구결과
시멘트 복합재 료의 전기 저항률 측정방 법	- 문헌조사를 통한 시멘트 복합재료에 적합한 전기 저항률 측정방법 결정 - 측정방법을 시험체에 적용하기 위한 방안 도출	- 조사결과 정확한 전기저항을 측정할 수 있고 간편한 4탐침 저항측정 방법을 결정 - 시험체와 전도체와의 전도성의 향상을 위해 실버 페이스트를 도포 - 시험체의 내부전극의 거리 : 100 mm - 시험체의 외부전극의 거리 : 180 mm
섬유의 종류가 미치는 영향	- 섬유의 종류에 따른 초기 전기저항과 전기저항의 변화량 조사 - 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 섬유종류에 따른 인장거동 시, 탄성구간, 변형경화 구간, 그리고 변형연화 구간 별 전기저항의 변화 평가 - 균열 또는 손상 발생 시, 전기저항 변화에 대한 메커니즘의 규명 및 안정화	- 섬유의 길이가 짧을수록 높은 전기 전도성을 보임 - 인장 하중 시, 전기 저항률의 변화는 다음 순으로 크게 나타남 - 비틀림섬유 > 직선형섬유 > 흑크드섬유 - 균열개수의 증가는 전기 저항률을 감소시킴
섬유의 보강량 이 미치는 영향	- 섬유의 보강량에 따른 초기 전기저항과 그 전기저항의 변화량 조사 - 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 인장거동 시, 섬유 보강량으로 인한 탄성구간, 변형경화 구간, 그리고 변형연화 구간 별 전기저항의 변화 평가	- 섬유보강 부피비 1.0%이상일 경우 GF의 값이 150이상으로 높은 자기감지 능력을 확보함. - 섬유보강 부피비가 증가할수록 인장 저항능력과 자기감지 능력이 향상됨
자기감 지 능력 극대화	- 자기감지 극대화 방안의 도출 - 자기감지 능력과 함께 변형경화 거동을 유지하기 위한 배합의 최적화 - 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료의 감지성능 및 역학적 성능평가	- Carbon black과 고로슬래그는 시멘트보다 전기 전도성이 높아 전기 시멘트 복합재료의 저항률을 낮춤 - 고로슬래그를 치환한 경우 가장 높은 자기감지 능력을 보임 - Carbon black와 고로슬래그의 치환은 인장거동에 큰 영향을 미치지 않고 자기감지 능력을 향상시킴
외부환 경이 미치는 영향	- 온도 변화와 자기감지 능력의 관계 적립 - 습도 변화와 자기감지 능력의 관계 적립	- 온도가 증가할 경우, 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 감소하는 경향을 보임 - 습도가 증가할 경우, 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 감소하는 경향을 보임

2. 연구개발 주요내용

가. 시멘트 복합재료의 전기 저항률 측정방법

(1) 콘크리트의 전기 저항률의 원리

콘크리트 전기 저항률은 콘크리트 재료의 품질을 나타내는 중요 지표들 중의 하나로 콘크리트 전기 저항률을 측정하는 기술은 철근의 부식 정도에 대한 정보를 비교적 간단하고 빠르게 저렴하게 현장에서 조사 가능하다.

콘크리트의 전기저항은 이온이 콘크리트를 통해 양극과 음극 위치를 이동할 때, 그 용의성에 따라 좌우되며, 따라서 철근에 부식이 있는 경우 저항률에 영향을 미치게 된다. 전기 저항률은 단위 부피당 재료의 전기저항을 의미하며 $\Omega \times m$ 의 단위로 나타냄. 면적 A 와 길이 L 을 가지는 전도체의 저항 R 은 식[2.1]과 같이 전기 저항률(ρ)과 관계가 있다.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad [2.1]$$

콘크리트 전기 저항률을 측정하는 데는 2가지 방법이 존재한다. 첫 번째 방법은 4탐침 저항률 측정법(four-probe resistivity measurement)으로 Wenner (1915)가 설명한 4전극 시스템에 기반을 두고 있으며, 양의 전기 저항률을 측정하는 표준 시험 방법 ASTM G57 (미국재료시험학회, 2006)으로 채택되었다. 4탐침 저항률 측정법은 그림 2.1처럼 직류/교류 전원을 연결하는 2개의 외부 전극과 전압계에 연결하는 2개의 내부 전극으로 구성된다.

두 번째 방법은 2탐침 저항률 측정법으로, 식[2.2]과 같이 저항은 전압을 전류로 나눈 값과 동일하다는 옴의 법칙에 기반을 둔다.

$$R = \frac{V}{I} \quad [2.2]$$

시험체의 저항은 시험체를 통과하는 전류와, 전압의 하강을 측정해서 구할 수 있다. 2탐침 저항률 측정법은 그림 2.2에 나타난 바와 같이 전류계와 전압계에 연결하는 전극 2개로 구성되어 있다. 그리고 이들 전선으로 전류와 전압 하강을 측정했다. 다시 말하자면 전압을 측정하는 전압계에도 전류가 흐르고, 이로 인해 전체 전압의 크기가 하락할 수도 있고 측정되는 저항 값에도 영향을 줄 수 있다. 반면 4탐침 저항률 측정법의 경우, 전류와 전압을 별도로 측정하고 있다. 그림 2.3에 나타난 바와 같이 외부의 2전선은 전류를 통과시키기

위해 연결하고, 내부의 2개의 전선은 전압을 측정하기 위해 연결한다. 따라서 전류를 통과시키는 전선에는 전압의 하락이 없다. 2탐침 저항률 측정법으로 측정한 재료의 저항률은 4탐침 저항률 측정으로 구한 저항률과 비교하여 그 정확도가 떨어진다. 그 이유는 측정한 저항에 접촉 저항을 포함하지 않기 때문이다 (Wen & Chung, 2001b).

보통 전기 접촉을 개선하기 위해 2탐침 방식을 이용해 저항률을 측정할 때는 탐침을 콘크리트의 드릴 구멍에 삽입하여야 한다. 반면 4탐침 저항률 시험은 탐침을 콘크리트 표면에 대고 전류가 콘크리트를 통과하기를 기다리는 방식으로 시행한다. 그 후 저항률 값은 계량기에서 읽을 수 있었다. 따라서 4탐침 저항률 기법은 전기 저항률을 측정하는데 있어 2탐침 저항률 기법보다 더 편리하고 작업성이 우수하다.

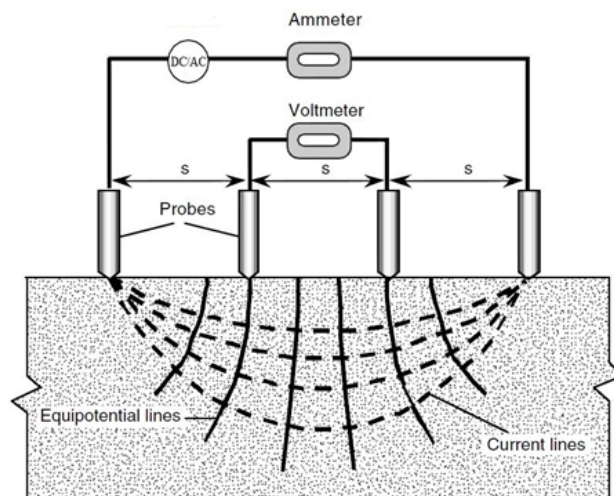


그림 2.1 - 4탐침 저항률 측정법 (Malhotra & Carino, 2004)

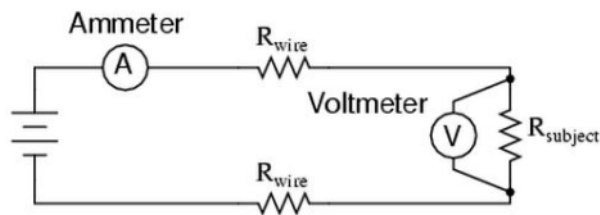


그림 2.2 - 2탐침 저항 시스템 (www.allaboutcircuits.com)

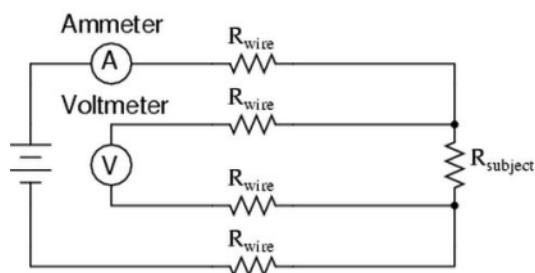


그림 2.3 - 4탐침 저항 시스템 (www.allaboutcircuits.com)

(2) 시멘트 복합재료의 전기 저항률 측정을 위한 시험체 준비

그림 2.4에 시험체의 형상 및 상세 치수를 나타내었다. 시험체에 사용되는 모르타르 혼합물을 준비할 때에 호바트형 소형 혼합기를 사용하였으며, 시멘트와 플라이 애쉬, 실리카 폼 등의 첨가제, 그리고 모래를 5분 동안 건식 혼합했다. 그리고 물을 첨가한 후 3분간 혼합하고, 그 후 고성능 감수제를 서서히 첨가하여 추가로 5 - 10분간 혼합했다. 섬유가 가라앉는 것을 방지하여 시험체 내 섬유의 균질한 분포를 위해 적정량의 감수제를 사용한다. 모르타르 혼합물의 점도가 적절해 보일 때, 고강도 강섬유를 손으로 혼합물에 첨가한다. 그리고 5분간 추가로 혼합한 후, 섬유를 첨가한 모르타르 혼합물을 몰드에 채운후, 시험체 내부의 공극을 최소화하기 위해 시험체에 3분간 약하게 진동을 가해주었다.

그 후 시험체를 담은 몰드를 비닐로 덮고 실험실에서 24시간 동안 상온에서 보관한 뒤에, 시험체를 몰드에서 제거한 후 수조에 넣고 수중 양생하였다. 양생을 마친 후에 시험체를 수조에서 꺼내 공기 중에 1일 동안 건조시켰다. 시험체의 표면이 완전히 건조된 후에 폴리우레탄을 시험체의 표면에 얇게 분사하고 1일 동안 추가 건조시켰다. 그리고 그림 2.5에 나타낸 바와 같이 시험체 표면과 전도성 구리 테이프를 빈틈없이 접촉시키기 위해 시험체의 표면을 사포로 연마한 후 전기 저항률을 측정하기 위해 실버 페이스트와 구리 테이프를 부착하였다. 구리 테이프와 시험체간의 전기 전도성을 높이기 위해 전도성 실버 페이스트를 시험체 표면에 1개 층으로 도포하도록 한다. 그 후에 전도성 구리 테이프를 부착했다.

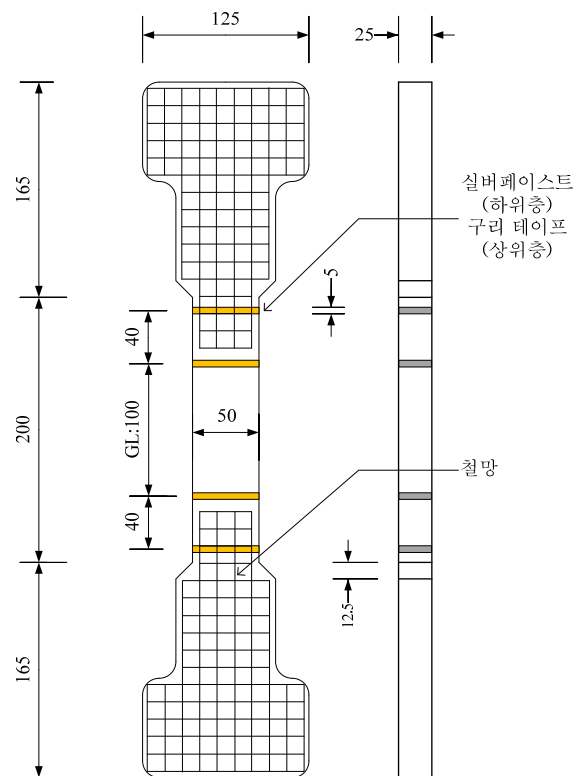
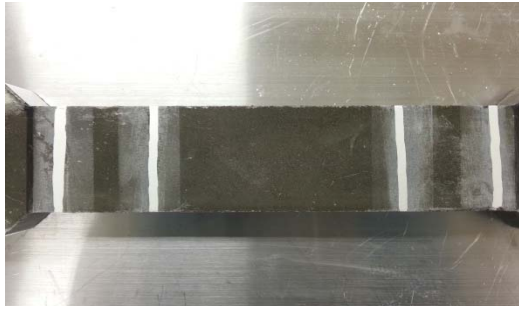
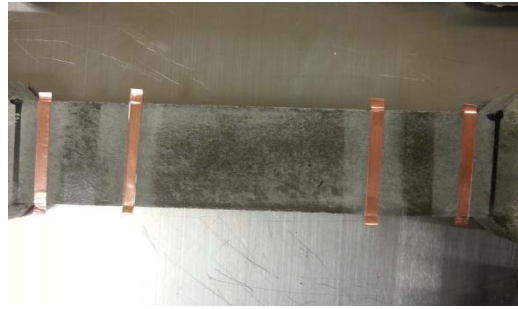


그림 2.4 - 시험체 상세 (단위 : mm)



a) 전도성 실버 페이스트 도포



b) 전도성 구리 테이프 부착

그림 2.5 - 저항률 측정을 위해 시험체 준비

(3) 시멘트 복합재료의 인장실험 및 전기 저항률 측정 방법

시험체의 전기 저항률을 측정하기 위해 4탐침 저항 시험(4 probe method)을 이용하였다. 표점 거리 이내의 시험체 단면적은 50×25 mm이고, 표점 거리는 100 mm 이다. 외부 전극 2개 사이의 거리는 180 mm 로 하며, 전압을 측정하는 내부 전극 2개는 그림 2.6 에서 나타낸 대로 전류용 전극에서 안쪽으로 40 mm 거리에 위치하도록 하였다. 4개의 전선을 시험체에 연결한 후, 챔버에 보관하는 동안 온도와 상대습도 상태를 제어하면서, 멀티미터의 전류원을 $10 \mu A$ 로 해서 각 시험체의 전기 분극 저항률이 안정될 때까지 측정한 후 시험체를 챔버에서 꺼내서 범용 만능 재료 시험기 (UTM)에 설치하여 각 시험체의 전기 저항률을 안정될 때까지 다시 측정하였다. 전기 저항률 측정이 끝난 후, 범용 만능 재료 시험기(UTM)를 이용해 직접 인장 시험을 진행했다. 변위제어 속도는 $0.1 \sim 1.0$ mm/min 로 설정하여, 시험체 일축 인장 변위는 시험체의 측면에 부착한 변위계 2개로 측정하여 좌우 변위계로부터 얻어진 값을 평균하여 사용했다. 동시에, 인장 하중으로 인한 시험체의 전기 저항을 측정하였다.

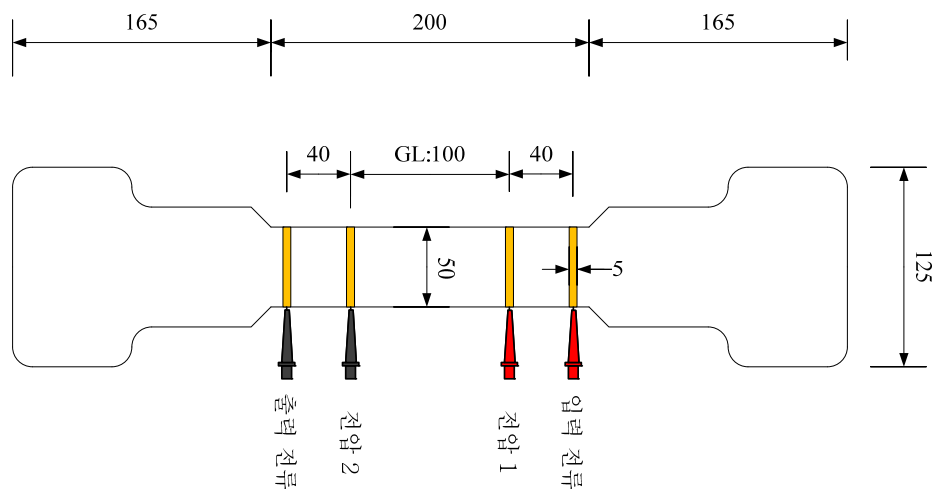


그림 2.6 - 전기 저항률 측정을 위한 전극 연결

나. 섬유종류가 섬유보강 시멘트 복합재료의 자기감지 능력에 미치는 영향

(1) 개요

자기감지 능력에 대한 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료(HPFRCC)를 개발하기 위해 아래와 같은 두 가지 분류의 실험을 수행하였다. 우선 하중재하가 없는 상태에서 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료에 사용되는 섬유의 종류가 전기 저항률에 미치는 영향을 평가하였고, 그 후에 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 자기감지 능력을 평가하기 위하여 인장하중 하에서 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률을 측정하였다.

실험과정은 섬유종류가 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률에 미치는 영향과 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동에 미치는 영향을 조사하기 위해 구성되었다. 강섬유는 길이가 긴 비틀림(T30/0.3), 길이가 긴 무변형(S30/0.3), 길이가 긴 후크드(H30/0.375), 길이가 중간인 비틀림(T20/0.2), 길이가 중간인 무변형(S19/0.2), 길이가 짧은 무변형(S13/0.2)으로 6가지의 형태의 섬유를 사용하였고 섬유보강 부피비는 1.5% 이다.

표 2.1 - 강섬유의 재료와 전기 특성

Notation	Fiber type	Diameter (mm)	Length (mm)	Aspect ratio (L/D)	Density (g/cc)	Tensile Strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Electrical resistivity ρ_f ($k\Omega\text{-cm}$)
T30/0.3	Long twisted	0.3	30	100	7.9	2428	200	1.94×10^{-8}
S30/0.3	Long smooth	0.3	30	100	7.9	2580	200	2.06×10^{-8}
H30/0.375	Long hooked	0.375	30	80	7.9	2311	200	1.94×10^{-8}
T20/0.2	Medium twisted	0.2	20	100	7.9	2676	200	1.94×10^{-8}
S19/0.2	Medium smooth	0.2	19	95	7.9	2788	200	2.06×10^{-8}
S13/0.2	Short smooth	0.2	13	65	7.9	2788	200	2.06×10^{-8}

표 2.2 - 무게비로 나타낸 매트릭스의 배합비와 압축강도

Cement (Type III)	Silica fume	Silica sand	Fly ash	Super-plasticizer	Water	f'_c (MPa)
0.80	0.07	1.00	0.20	0.04	0.26	90

(2) 실험결과

6개의 시리즈의 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료는 다수의 미세균열을 동반한 변형경화 거동을 보여주었다. 그러나, 전기 저항률과 전기역학 거동은 섬유의 종류에 따라 그림 2.7과 2.6과 같이 다른 양상을 보여주었다. 인장응력과 전기 저항률을 나타내는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동은 그림 2.8과 같이 변형률 2%까지 조사되었다. 6개의 시리즈는 3개의 그룹으로 아래와 같이 분류할 수 있다.

- 길이가 긴 섬유 그룹: T30/0.3, S30/0.3 그리고 H30/0.375
- 길이가 중간인 섬유 그룹: T20/0.2 그리고 S19/0.2
- 길이가 짧은 섬유 그룹: S13/0.2

전기 저항률은 측정된 전기저항과 시험체의 형상에 의해 식[2.3]과 같이 계산된다.

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad [2.3]$$

ρ : 전기 저항률, R : 전기저항, A : 시험체의 단면적,
 L : 시험체의 측정길이 또는 내부 전압전극간 거리

전기저항은 시험체의 측정길이 및 단면적에 영향을 받지만, 전기 저항률은 형상과는 무관한 재료의 특성이다.

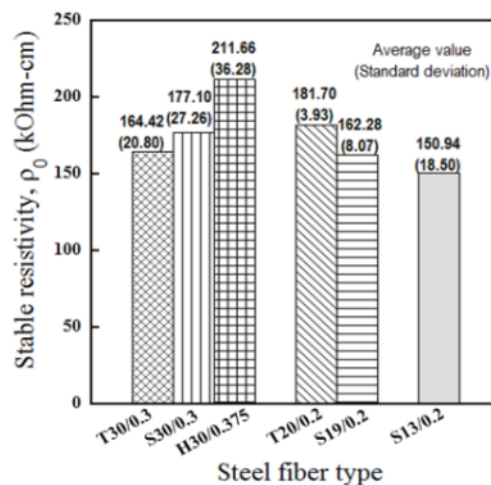
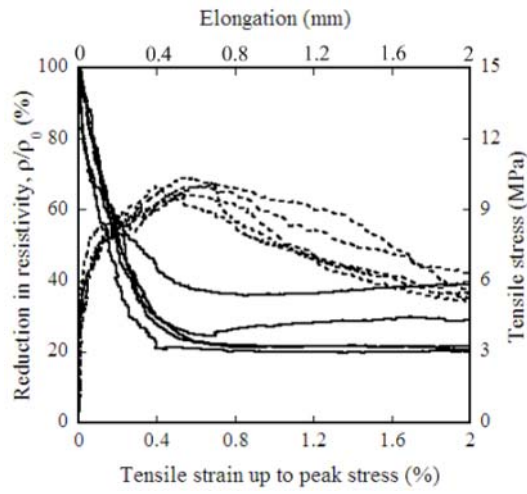
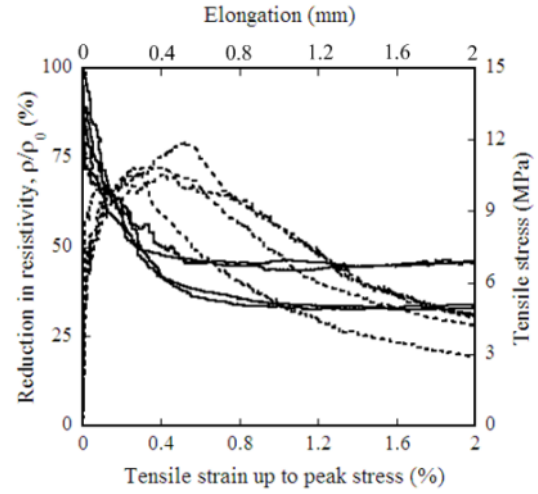


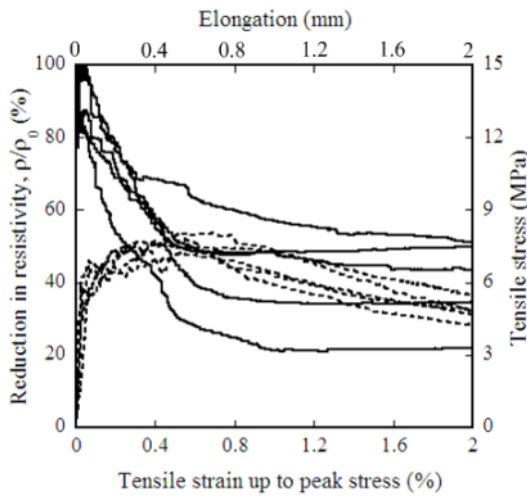
그림 2.7 - 섬유종류에 따른 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률의 영향



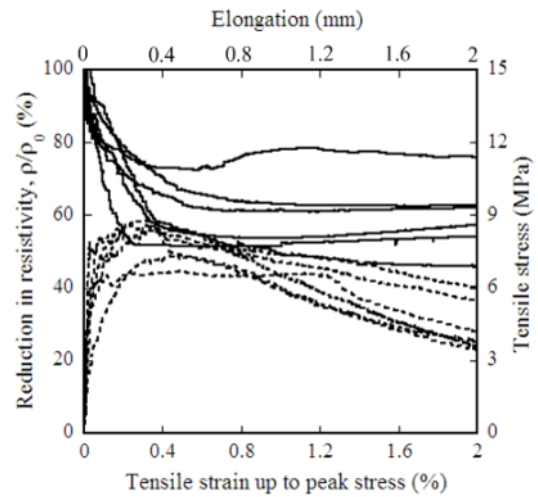
(a) T30/0.3



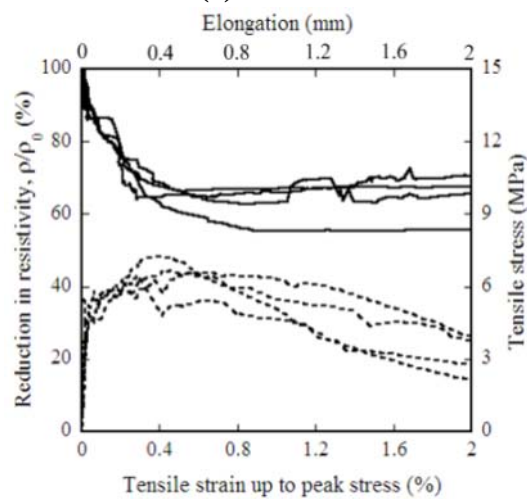
(d) T20/0.2



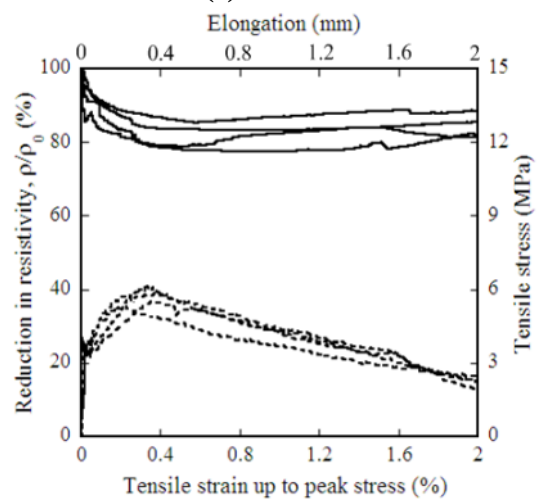
(b) S30/0.3



(e) S19/0.2



(c) H30/0.375



(f) S13/0.2

그림 2.8 - 섬유 종류에 따른 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 인장거동(점선)과 전기 저항률의 역학적 거동(실선)

Gauge factor는 단위 변형률에 대한 전기 저항률의 변화로 정의되며, 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 자기감지 능력을 평가하기 위한 지표이다. 변형경화거동을 보이는 시멘트 복합재료의 경우, gauge factor는 하중재하와 최종균열시점 사이의 전기 저항률의 차이에 기초하여 평가된다. 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 인장 변형률의 변화 (0부터 최종균열변형률: ε_{pc} 까지) 에 따른 gauge factor를 계산하기 위해 식[2.4]를 적용하였다.

$$Gauge\ factor(GF_{pc}) = \frac{\Delta R/R_o}{\Delta \varepsilon} = \frac{(R_o - R_{pc})/R_o}{(\varepsilon_{pc} - 0)} = \frac{(R_o - R_{pc})}{R_o \cdot \varepsilon_{pc}} = \frac{(\rho_o - \rho_{pc})}{\rho_o \cdot \varepsilon_{pc}} \quad [2.4]$$

R_o or ρ_o : 하중재하 시점의 전기 저항 또는 저항률

R_{pc} or ρ_{pc} : 최종균열시점의 전기 저항 또는 저항률

(가) 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 전도성

강섬유 종류에 대한 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 초기 저항률 (ρ_i)과 전기 분극 후 안정된 저항률 (ρ_o)를 조사하였다. 각 시리즈의 평균 전기 저항률은 표 2.3와 그림 2.8에 나타냈다. 6개의 시리즈의 ρ_o 는 150.94에서 211.66 $k\Omega\cdot cm$ 로 나타났고, ρ_i 는 62.44에서 106.49 $k\Omega\cdot cm$ 의 범위로 나타났다.

S13/0.2섬유로 보강된 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료는 가장 높은 전기 전도성을 나타냈고, H30/0.375섬유로 보강된 복합재료는 가장 낮은 전기 전도성을 보여주었다. 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 전도성은 복합재료내의 강섬유 배치에 의해 결정 된다 (Banthia et al., 1992). 모르타르 매트릭스의 매우 낮은 전기 전도성은 높은 전도성을 가진 강섬유의 보강으로 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 전도성을 향상시킨다. 길이가 짧은 섬유 (S13/0.2) 는 섬유와 모르타르 계면의 가장 큰 접촉면을 가진다. 게다가, 짧은 섬유의 분산은 길이가 긴 섬유들 보다 우수하다. 이러한 이유가 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 전도성의 차이를 가져왔다.

표 2.3 - 섬유의 종류에 따른 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률

Series	T30/0.3	S30/0.3	H30/0.375	T20/0.2	S19/0.2	S13/0.2
Initial resistivity, ρ_i ($k\Omega\cdot cm$)	62.44	76.28	106.49	84.72	79.75	92.56
Stable resistivity, ρ_o ($k\Omega\cdot cm$)	164.42	177.10	211.66	181.70	162.28	150.94

(나) 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 자기감지 능력과 인장 저항

인장하중 하에서 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률과 변형률의 응답은 그림 2.8의 실선과 같이 그려진다. 6개의 시리즈 모두 인장변형률이 증가하면서 전기 저항률은 최종균열시점까지 상당히 감소하는 경향을 보여주었다. Gauge factor (GF_{pc}), 미세균열개수 (N_{pc}), 최종균열강도 (σ_{pc}), 최종균열변형률 (ε_{pc}) 와 같은 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 4가지 지표는 전기역학 거동 특성을 평가하기 위해 표 2.4와 같이 조사되었다. 균열의 개수는 시험체의 측정 길이 범위내의 앞, 뒷면의 균열개수를 세어 평균 내었다.

각 시리즈의 GF_{pc} 는 표 2.4에 나타내었다. GF_{pc} 값이 큰 것은 자기감지능력이 우수하다는 것을 의미한다. 그림 2.9 (a)는 6개 시리즈의 섬유 종류에 대한 평균 GF_{pc} 의 영향을 보여준다. 일정한 길이에서 비틀림 강섬유가 가장 높은 GF_{pc} 를 가졌고, 흑크드 강섬유가 가장 낮은 GF_{pc} 를 보여주었다.

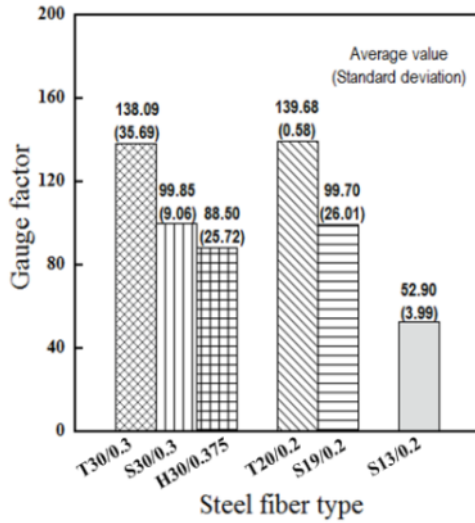
강섬유 종류에 따른 미세균열의 평균개수는 표 2.4에 나타내었다. 그림 2.9 (b)는 강섬유 종류에 따른 미세균열의 평균개수 (N_{pc})의 영향을 보여준다. 미세균열의 평균개수는 16.40, 10.20, 5.67, 12.50, 15.33, 그리고 3.50으로 T30/0.3, S30/0.3, H30/0.375, T20/0.2, S19/0.2, 그리고 S13/0.2 순서로 나타났다. 이는 미세균열의 개수가 증가할수록 높은 GF_{pc} 를 가진다는 것을 보여준다.

고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 인장응력-변형률 선도는 섬유 종류 별로 그림 2.8에 점선으로 나타내었다. 6개의 시리즈 모두 변형경화거동을 보여주었지만, 섬유 종류 별로 인장거동은 다른 양상을 보여 주었다. 섬유 종류에 따른 인장거동 지표인 σ_{pc} 와 ε_{pc} 의 영향을 그림 2.9 (c), (d)에 나타내었다. σ_{pc} 와 ε_{pc} 의 평균값은 표 2.4에 나타내었다.

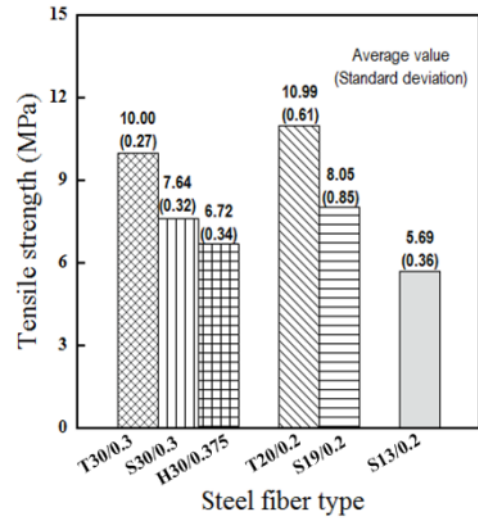
GF_{pc} 의 결과와 비슷하게, 길이가 긴 섬유와 중간인 섬유 시리즈들이 길이가 짧은 섬유보다 N_{pc} , σ_{pc} 가 높게 나타났다. 섬유의 길이가 긴 시리즈의 ε_{pc} 는 길이가 중간인 섬유 시리즈보다 크게 나타났다.

표 2.4 - 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동 지표

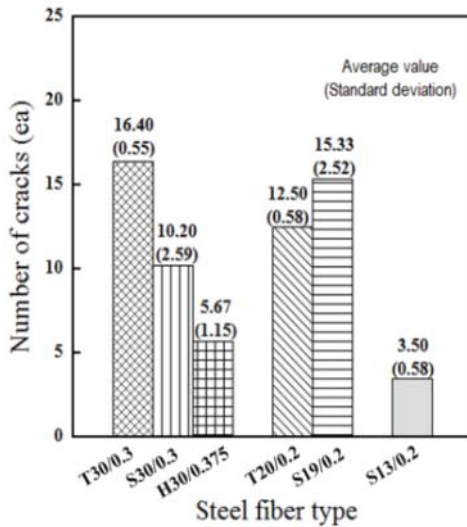
Fiber	Strain, ε_{pc} (%)	Stress, σ_{pc} (MPa)	Average number of crack, N_{pc}	Resistivity, ρ_{pc} ($k\Omega\text{-cm}$)	Resistivity at start of loading, ρ_o ($k\Omega\text{-cm}$)	Gauge factor, GF_{pc}
T30/0.3	0.55	10.00	16.40	55.54	210.64	-138.09
S30/0.3	0.53	7.64	10.20	109.06	234.84	-99.85
H30/0.375	0.42	6.72	5.67	175.03	269.87	-88.50
T20/0.2	0.41	10.99	12.50	113.58	252.51	-139.68
S19/0.2	0.38	8.05	15.30	352.11	562.57	-99.70
S13/0.2	0.33	5.69	3.50	628.97	764.10	-52.90



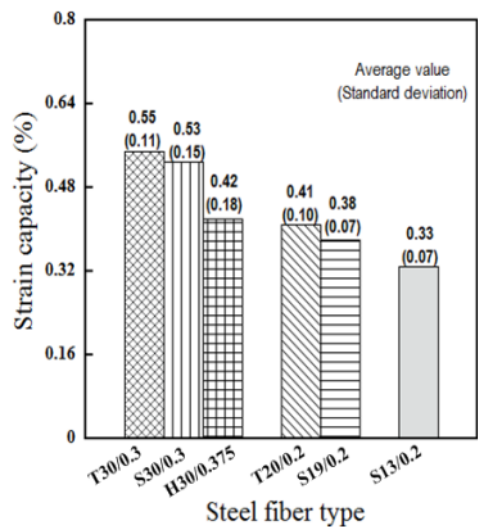
(a) Gauge factor, GF_{pc}



(c) 최종균열강도, σ_{pc}



(b) 미세균열의 개수, N_{pc}



(d) 변형능력, ε_{pc}

그림 2.9 - 섬유종류가 전기역학 거동 지표에 미치는 영향

(다) Gauge factor (GF_{pc}) 와 균열개수 (N_{pc}) 의 관계

GF_{pc} 는 N_{pc} 와 강한 연관이 있는 것이 발견되었다. 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 최종균열시점까지 N_{pc} 의 증가할수록 급격하게 감소하였다. 최종균열시점 이후로, 전기 저항률은 더 이상 균열이 생성되지 않으므로 거의 일정하였다. Song (2013) 이 제안한 해석적 모델은 변형경화 거동 중에 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률이 감소하는 원인을 설명해준다. 그림 2.10에 보이는 것과 같이 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 총 전기저항은 균열이 발생하지 않은 구역 (A구역) 과 균열이 발생한 구역 (B구역) 에 나타나는 전기저항의 합이다. B구역의 경우 미세균열은 강섬유의 가교로 인해 부분적인 분리가 되었다고 볼 수 있다. 그러므로 B구역의 전류는 강섬유에 의해서만 흐르게 된다. 미세 균열의 개수가 증가함으로, A구역의 전기저항 (R_A) 은 A구역의 길이의 감소로

감소하게 된다. 반면에, B구역의 전기저항 (R_B) 은 B구역의 길이 증가로 증가하게 된다. B구역의 전기 저항률이 A구역의 전기 저항률에 비해 매우 작기 때문에, 시험체 전체의 전기 저항률은 미세 균열개수의 증가로 인해 감소하게 된다. 게다가, B구역의 강섬유는 섬유주변에 매트릭스가 없기 때문에 서로 접촉될 수 있게 된다. 최종균열시점의 인장응력은 미세구조의 접촉과 재료의 전기 저항률에 영향을 미치게 된다.

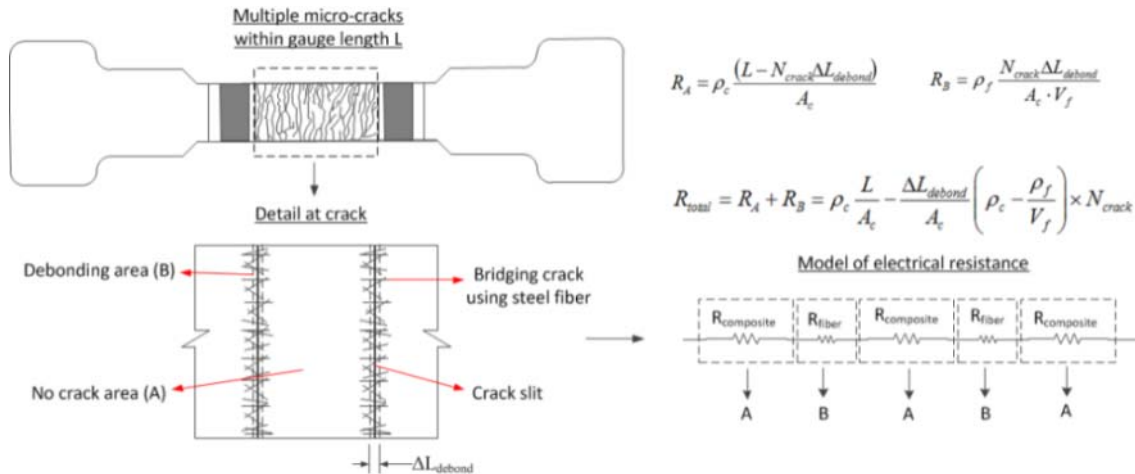


그림 2.10 - 다수의 미세 균열을 가지는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기저항 모델 (Song, 2013)

(3) 결론

- 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기전도성은 강섬유의 길이와 직경에 분명한 영향을 받았다. 길이가 짧은 섬유를 보강한 경우 길이가 긴 섬유를 보강하였을 경우보다 높은 전기 전도성을 보여주었다. 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료에 짧은 무변형 강섬유 (S13/0.2) 를 보강하였을 경우 가장 낮은 전기 저항률 ($150.94k\Omega\text{-cm}$) 가졌고, 길이가 긴 흑크드 강섬유 (H30/0.375) 를 보강하였을 경우 가장 높은 전기 저항률 ($211.66k\Omega\text{-cm}$) 을 가졌다.
- 이 연구에서 조사한 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료들은 50에서 140사이의 GF_{pc} 를 보여 주었으며, GF_{pc} 값은 강재를 포함한 일반적인 재료의 GF 값 보다 매우 높았다. 이것은 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료가 우수한 자기감지 능력을 가졌음을 나타낸다.
- 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 최종균열시점까지 인장 변형률이 증가하였을 때, 전기 저항률이 급격하게 감소하였다. 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률 감소는 미세 균열의 개수의 증가와 밀접한 관계를 가지고 있었다.
- 비틀림 섬유가 보강 되었을 때, GF_{pc} 는 약 140으로 가장 높았고 최종균열강도 $10MPa$ 으로 가장 크게 나타났다. 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 자기감지 능력과 역학적 저항의 측면에서 성능의 순서는 다음과 같다. 비틀림 강섬유 > 무변형 강섬유 > 흑크드 강섬유

다. 섬유의 보강량이 미치는 영향

(1) 개요

섬유 보강량이 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동에 미치는 영향에 대해 조사하기 위하여, 직접 인장하중 하에서 전기 저항률의 변화를 측정하였다.

강섬유의 보강량의 영향을 조사하기 위하여 0.0% 에서 2.0% 사이로 변화를 주어 전기 저항률과 전기역학 거동을 조사하였다.

(2) 실험 결과

표 2.5 - 무게비로 나타낸 매트릭스의 배합비, 압축강도 그리고 전기 저항률

Cement (Type III)	Silica fume	Silica sand	Fly ash	Super- plasticizer	Water	f'_c (MPa)	ρ_m ($k\Omega\text{-cm}$)
0.80	0.07	1.00	0.20	0.04	0.26	89	168.11

(가) 섬유 보강량이 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기전도성에 미치는 영향

고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 섬유 부피비에 따른 안정된 전기 저항률을 그림 2.11에 나타냈다. 그리고 표 2.6과 표 2.8에 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 섬유 부피비에 따른 안정된 전기 저항률의 값을 나타냈다. 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 168.10, 135.35, 104.85, 105.26 그리고 $89.66 k\Omega\text{-cm}$ 로 각각 섬유보강 부피비 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%일 때 나타났다.

고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 전도성은 강섬유의 분포에 영향을 받는다. 섬유보강 부피비가 증가하게 되면, 시험체 내에 섬유의 양이 증가하고 결과적으로 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 전도성은 향상된다. 그림 2.11에서 보이는 것 같이 섬유보강 부피비가 0.0에서 2.0%로 증가할 때, 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 감소하였다.

복합재료의 전기 저항률은 (ρ_c) 은 Fan (1995)에 개발된 식 [2.5]으로 산출할 수 있다. 이 식은 입자의 형상, 분포도, 부피비의 영향을 고려하므로, 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 이 식을 사용하여 결정할 수 있다. 이 연구에서 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료 (c) 모르타르 매트릭스 (m) 그리고 섬유 (f) 로 구분지어 식을 사용하였다.

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{(V_m)^i}{\rho_m} + \frac{(V_f)^j}{\rho_f} + \frac{1 - (V_m)^i - (V_f)^j}{\rho_m V_m + \rho_f V_f} \quad [2.5]$$

V_m : 매트릭스의 부피비

V_f : 섬유부의 부피비

ρ_m : 매트릭스의 전기 저항률

ρ_f : 섬유부의 전기 저항률

i, j : 관련된 형태의 연속성에 관한 미세구조 배열의 계수

i 는 모르타르 매트릭스의 조밀도에 대한 계수이고, j 는 섬유의 상호연결의 정도를 나타내는 계수이다. 그러므로 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 j 의 변화에 더욱 민감하다 (Wen & Chung, 2003). 섬유의 분포형태를 포함한 섬유보강 부피의 영향을 조사하기 위해서, 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 초기 전기 저항률의 측정값과 식 [2.7]로 얻어진 전기 저항률을 비교하여 j 값을 결정하였다. 표 2.6와 같이 i 값의 변화가 j 값의 변화에 큰 영향을 미치지 않으므로 i 값을 1로 가정하였다. 표 2.6과 그림 2.12에서 나타난 것과 같이, 섬유보강 부피비가 0.5에서 2%로 증가하면서 j 값은 4.53에서 5.80으로 증가하였다. 그림 2.10은 섬유보강 부피비에 대한 j 의 상한과 하한을 나타냈다. j 값이 크다는 것은 섬유의 상호연결을 나타내므로, 섬유 보강량의 증가는 섬유간 상호연결의 증가를 가져왔다.

표 2.6 - 섬유보강 부피비가 계수 j 에 미치는 영향

V_f (%)	Estimated coefficient, j	
	$i = 1$	$i = 2$
0.5	4.53633 (0.10 [†])	4.53622 (0.10 [†])
1.0	5.00985 (0.10 [†])	5.00976 (0.10 [†])
1.5	5.49637 (0.15 [†])	5.49622 (0.15 [†])
2.0	5.79474 (0.09 [†])	5.79461 (0.09 [†])

[†](표준편차)

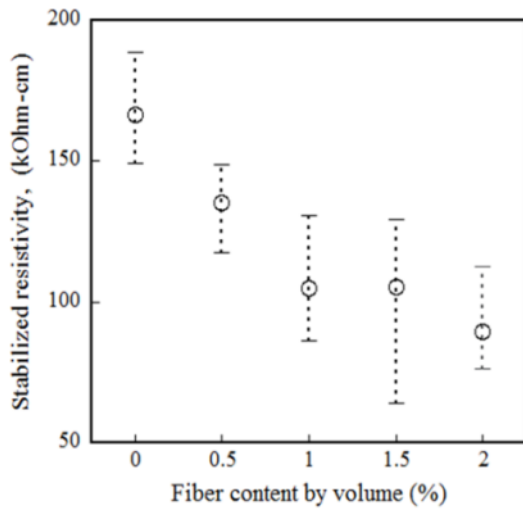


그림 2.11 섬유보강 부피비가 안정된 전기 저항률에 미치는 영향

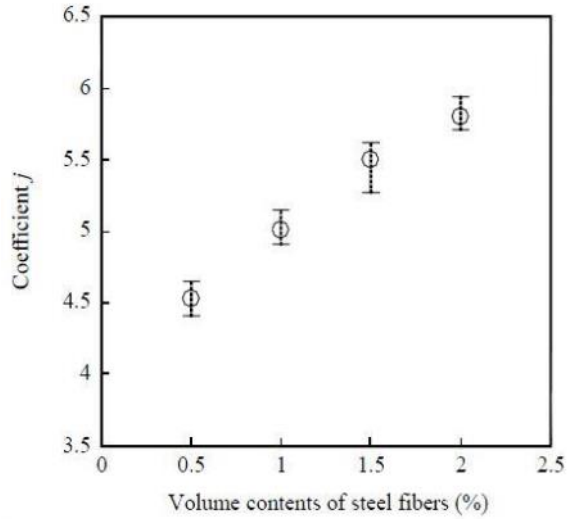


그림 2.12 섬유 부피비가 계수 j 에 미치는 영향

표 2.7 - 섬유 보강량에 따른 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동 특성

Fiber volume content, $V_f(\%)$	Specimen	Tensile resistance		Electrical resistivity		Gauge factor, GF_{pc}	Number of micro-cracks, N_{pc}
		ε_{pc} (%)	σ_{pc} (MPa)	ρ_o ($k\Omega\text{-cm}$)	ρ_{pc} ($k\Omega\text{-cm}$)		
0.5	SP1	0.28	4.28	139.50	97.58	-108.75	2
	SP2	0.36	4.68	149.00	114.78	-64.26	3
	SP3	0.20	5.63	117.55	96.21	-88.78	1
	AVG	0.28	4.86	135.35	102.86	-87.26	2.00
	STD	0.077	0.69	16.13	10.35	22.28	1.00
1.0	SP1	0.42	7.74	86.44	17.77	-190.14	6
	SP2	0.58	8.10	97.24	16.02	-144.84	8
	SP3	0.58	6.60	130.88	30.51	-132.99	8
	AVG	0.52	7.48	104.85	21.43	-155.99	7.33
	STD	0.092	0.78	23.18	7.91	30.16	1.15
1.5	SP1	0.54	10.47	129.36	7.29	-176.31	9
	SP2	0.48	8.60	122.53	25.42	-166.53	12
	SP3	0.47	10.90	63.90	18.68	-149.88	11
	AVG	0.49	9.99	105.26	17.13	-164.24	10.67
	STD	0.035	1.22	35.98	9.16	13.37	1.53
2.0	SP1	0.57	12.60	112.77	10.93	-158.95	14
	SP2	0.54	12.14	80.08	6.73	-168.59	19
	SP3	0.55	12.84	76.14	16.53	-142.07	17
	AVG	0.55	12.53	89.66	11.39	-156.54	16.67
	STD	0.013	0.36	20.11	4.92	13.43	2.52

AVG: Average value STD: Standard deviation

(나) 섬유보강 부피비가 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동에 미치는 영향

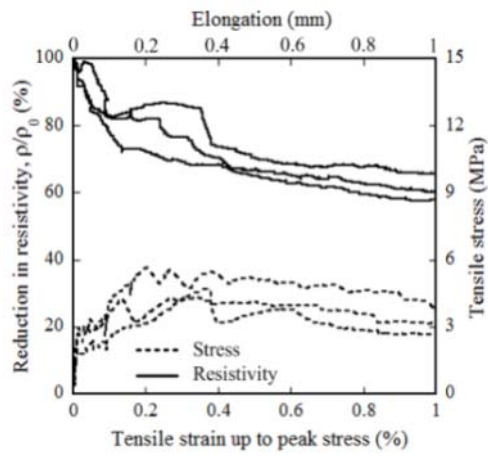
그림 2.13과 그림 2.14를 보면 섬유보강 부피비는 인장 하중 하에서 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동에 영향을 크게 미친것을 알 수 있다. 표 2.7은 최종균열강도 (σ_{pc}), 변형능력 (ϵ_{pc}), gauge factor (GF_{pc}) 그리고 미세균열개수 (N_{pc})를 섬유보강 부피비 따라 정리하였다. 그림 2.13은 인장응력-변형률 선도 (점선) 와 전기 저항률-변형률 선도 (실선) 를 보여준다. 모든 시험체는 다수의 미세 균열을 동반한 변형경화 거동을 보여주었다. 인장응력은 최종균열시점까지 증가했고, 최종균열시점 이후 감소하였다. 반면에, 전기 저항률은 최종균열시점 이전까지 급격히 감소하였고, 최종균열시점 이후에는 일정하였다. 섬유보강 부피비가 증가할수록 인장응력은 높은 값을 보여주었고, 전기 저항률의 변화는 더욱 커졌다.

고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동 지표가 섬유보강 부피비의 증가로 향상되었지만, 향상의 경향은 다르게 나타났다. 그림 2.14 (b) 와 2.14 (c) 를 보면, σ_{pc} 와 N_{pc} 는 섬유보강 부피비가 0.5~2.0%로 증가할 때 상당히 증가하였다. 반면에 ϵ_{pc} 는 그림 2.14 (d) 와 같이 0.5~1.0% 증가 시에 크게 증가하였지만, 1.0~2.0% 로 증가할 경우 그 증가폭이 작아졌다. GF_{pc} 의 절대값은 그림 2.14 (a)와 같이 섬유보강 부피비가 증가할수록 증가하였다.

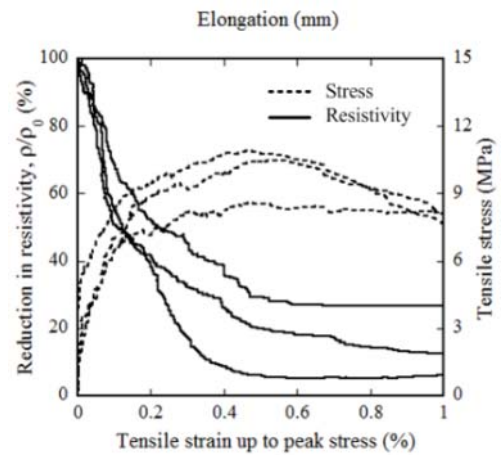
고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 인장거동과 미세균열 거동특성은 섬유보강 부피비에 연관되어있다 (Park et al., 2012, Wille et al., 2011). 섬유보강 부피비의 증가로 시험체의 단위 면적당 섬유개수는 증가하게 된다. 만약 섬유와 매트릭스 계면의 부착강도가 일정하다면, 단위 면적당 섬유개수의 증가는 균열 가교력 증가를 가져오고 인장강도, 변형능력 그리고 미세균열개수의 증가를 이끌어 낸다.

고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 균열과 매우 밀접하다. 그리고 시멘트 모르타르와는 다른 양상을 보여준다. 시멘트 모르타르의 전기 저항률은 균열로 인해 모르타르 매트릭스의 전류의 흐름이 지연되어 균열 후에 급격히 높은 값을 가지게 된다. 그러나 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 균열 후에 강섬유를 통하여 전류가 흐르게 되어 눈에 띄게 줄어들게 된다. 최종균열시점 이후에 더 이상 균열의 개수가 증가하지 않고 하나의 균열이 진전되어 전기 저항률은 일정한 값을 가지게 된다.

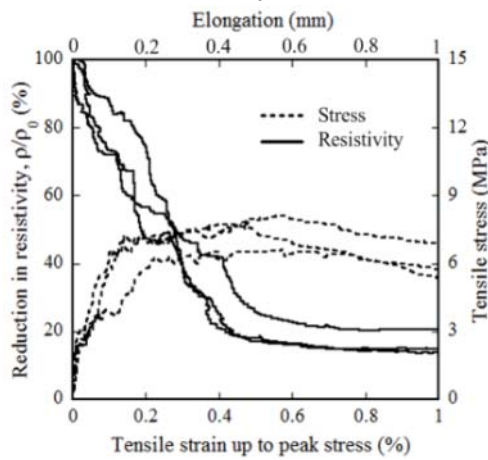
고성능 섬유보강 시멘트 복합재료가 미세균열의 증가로 인해 전기 저항률이 감소하는 것은 앞서의 섬유종류에 따른 변화에 대한 연구의 그림 2.12로 설명된다.



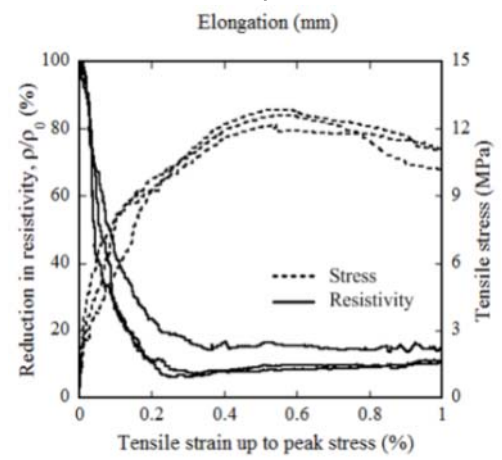
(a) M1 $V_f = 0.5\%$



(c) M1 $V_f = 1.5\%$

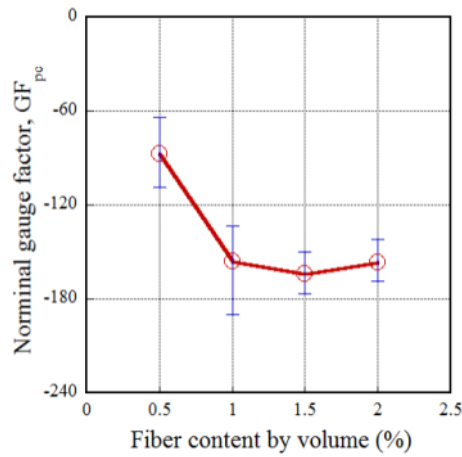


(b) M1 $V_f = 1.0\%$

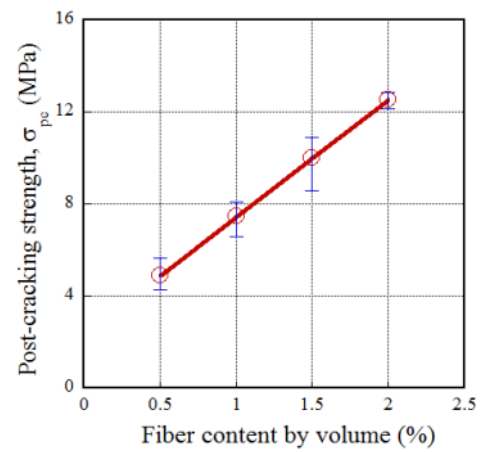


(d) M1 $V_f = 2.0\%$

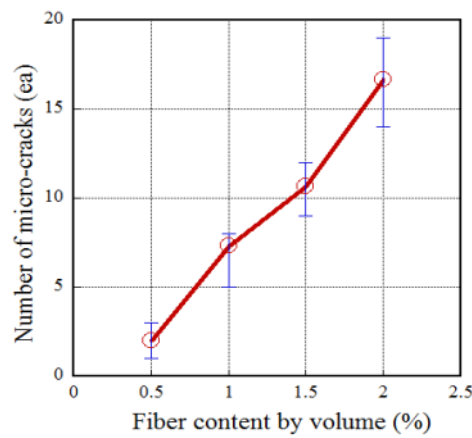
그림 2.13 - 섬유보강 부피비에 따른 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동



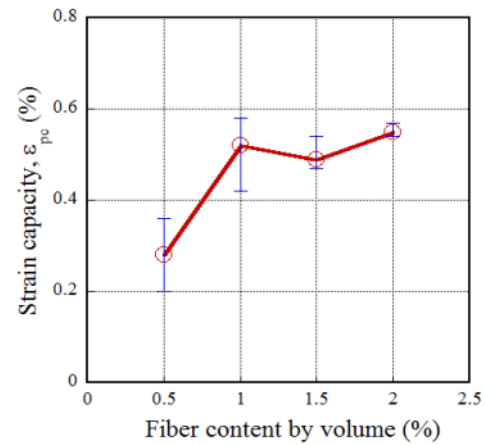
(a) Gauge factor, GF_{pc}



(c) Post-cracking, σ_{pc}



(b) 섬유보강 부피비에 대한
미세균열개수 (N_{pc})



(d) Strain capacity, ε_{pc}

그림 2.14 - 섬유보강 부피비에 따른 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동 지표

(3) 결론

- 1.0% 이상의 비틀림 강섬유가 보강되면 GF_{pc} 의 절대값이 150보다 크게 되어 높은 자기감지 능력을 보여 주었다. 최종균열시점까지 인장하중이 증가할수록 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 급격히 감소하였고, 이것은 변형경화 거동 중에 다수의 미세균열의 생성과 관련이 있었다.
- 섬유보강 부피비가 0.5%에서 2%로 증가로 인해, 인장 저항능력과 자기감지 능력은 향상되었다.
- 섬유보강 부피비가 1.5%일 경우 GF_{pc} 의 절대값이 164.24로 가장 큰 전기 저항률의 변화를 보여 주었으며, 그러므로 자기감지능력이 가장 우수하였다.

라. 자기감지 능력의 극대화

(1) 개요

매트릭스에 carbon black(CB) 또는 고로슬래그(GGBS)를 치환하여 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률과 자기감지 능력에 변화를 조사하였다. 또한 두가지 종류의 섬유를 혼입하여 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률과 자기감지 능력에 변화를 조사하였다.

매트릭스에 CB의 첨가와 GGBS의 첨가로 인한 전기 저항률과 전기역학 거동을 조사하였다. 표 2.8에 나타난 것처럼 CB와 GGBS를 첨가하지 않은 매트릭스를 M1, CB를 첨가한 매트릭스를 M2, GGBS를 첨가한 매트릭스를 M3라 명명하였다. CB는 시멘트를 무게비로 1% 치환하였고, GGBS는 시멘트를 무게비로 25% 치환하였다. 시멘트의 치환으로 시멘트와 첨가제의 총 무게비는 일정하게 하였다.

표 2.8 - 매트릭스의 배합비, 압축강도 그리고 전기 저항률

	Cement (Type III)	Silica fume	Silica sand	Fly ash	Super plasticizer	Carbon black	GGBS	Water	f'_c (MPa)	$\rho_{o,m}$ ($k\Omega\text{-cm}$)
M1	0.80	0.07	1.00	0.20	0.04	-	-	0.26	89	168.11
M2	0.792	0.07	1.00	0.20	0.04	0.008	-	0.26	92	150.30
M3	0.640	0.07	1.00	0.20	0.04	-	0.16	0.26	109	155.94

CB와 GGBS가 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기적 연학 거동에 미치는 영향은 섬유보강 부피비 2%에서 조사되었다. 섬유는 고강도의 비틀림 섬유를 사용하였다. 섬유종류에 대한 연구를 통해 자기감지 능력이 우수한 것이 증명된 표 2.1의 T30/0.3를 이용하였다.

두가지 종류의 섬유 혼입은 길이가 긴 무변형 섬유와 carbon섬유를 이용하였다. 길이가 긴 무변형 섬유는 표 2.1의 S30/0.3을 이용하였고, carbon섬유는 길이 12mm에 직경 7.2 μm 를 사용했다. 각각의 섬유보강 부피비는 길이가 긴 무변형 섬유 1.0%를 고정하고 carbon 섬유의 부피비를 0.0~0.5%로 변화하여 그 효과를 조사하였다.

표 2.9 - 섬유의 재료와 전기 특성

Fiber type	Diameter (mm)	Length (mm)	Aspect ratio (L/D)	Density (g/cc)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Electrical resistivity, ρ_{pc} ($k\Omega\text{-cm}$)
Long smooth (Steel)	0.3	30	100	7.9	2580	200	2.06×10^{-8}
Carbon	0.0072	12	1667	1.81	4137	240	1.55×10^{-6}

(2) 실험 결과

(가) Carbon black과 고로슬래그 치환이 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동에 미치는 영향

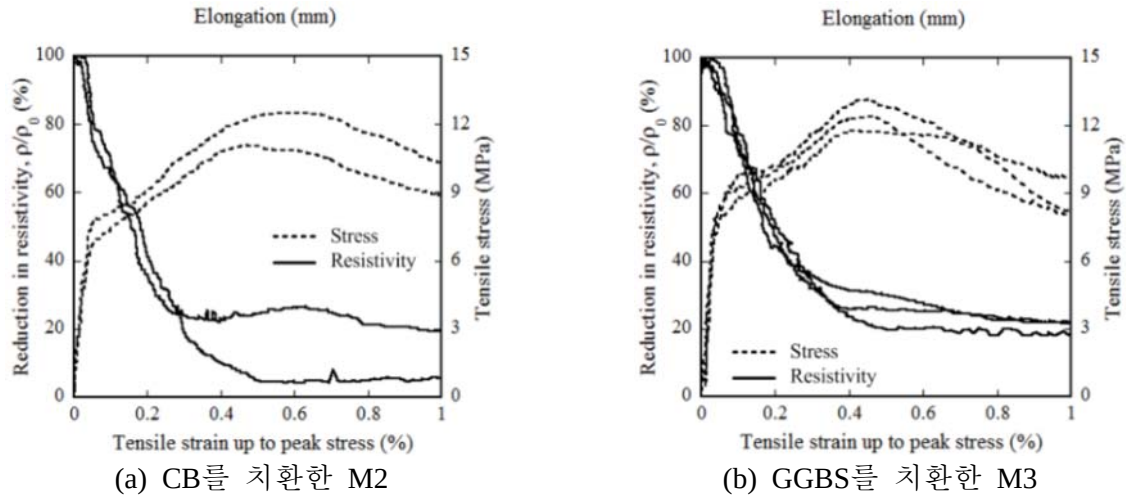
섬유가 없을 경우, 표 2.8과 같이 CB를 치환한 M2의 경우 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 안정된 전기 저항률은 $150.3 k\Omega\text{-cm}$ 로 측정되었고, GGBS를 치환한 M3의 경우 $155.9 k\Omega\text{-cm}$ 로 측정되었다. 평범한 시멘트 모르타르인 M1의 경우는 $168.1 k\Omega\text{-cm}$ 로 측정되었다. CB와 GGBS의 치환은 안정된 전기 저항률을 각각 10.6%와 7.3%의 감소시켰다. 이것은 CB와 GGBS가 시멘트보다 높은 전기 전도성을 가지기 때문이다 (Li et al., 2008).

부피비로 2%의 비틀림 강섬유를 보강한 경우, 그림 2.15과 표 2.9에 나타난 것과 같이 CB의 치환은 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 안정된 전기 저항률을 39% 감소시켰다. GGBS의 치환은 안정된 전기 저항률을 25% 감소시켰다. GF_{pc} 의 경우, M1은 -156.54, M2는 -161.44, M3는 -167.46으로 측정되었다. 이것은 CB와 GGBS의 치환이 자기감지 능력을 향상시킨 것을 의미한다. 결과적으로 GGBS를 치환한 M3가 가장 우수한 자기감지 능력을 보여주었다.

또한 CB와 GGBS의 치환은 σ_{pc} , ε_{pc} 그리고 N_{pc} 에 별다른 영향을 미치지 않았다. 그러므로 CB와 GGBS의 치환은 인장 거동의 영향을 거의 주지 않고 전기 전도성과 자기감지 능력을 향상시켰다.

표 2.10 - 첨가제에 따른 2%의 비틀림 섬유를 보강한 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동 지표

Matrix	Tensile resistance		Electrical resistivity		Gauge factor, GF_{pc}	Number of micro-cracks, N_{pc}
	ε_{pc} (%)	σ_{pc} (MPa)	ρ_o ($k\Omega\text{-cm}$)	ρ_{pc} ($k\Omega\text{-cm}$)		
M1 (Control)	0.55	12.53	89.66	11.39	-156.54	16.67
M2 (CB)	0.53	11.79	54.49	7.87	-161.44	16.00
M3 (GGBS)	0.44	12.44	67.28	17.90	-167.46	17.33



(a) CB를 치환한 M2

(b) GGBS를 치환한 M3

그림 2.15 - 첨가제에 따른 2%의 비틀림 섬유를 보강한 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동

(나) Carbon 섬유의 혼입이 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동에 미치는 영향

그림 2.16은 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 변형경화 거동 중 전기 저항률의 변화를 보여준다. 두 그래프는 1.5%의 길이가 긴 무변형 강섬유를 보강한 시험체와 1.0%의 길이가 긴 무변형 강섬유에 길이가 짧은 carbon섬유 0.5%를 혼입한 시험체의 전기역학 거동이다. 표 2.11은 전기역학 거동의 지표를 나타낸 것이다. Carbon섬유의 혼입은 한 가지 섬유를 사용했을 경우보다 인장 변형률이 증가할 때, 전기 저항률의 변화가 더욱 크게 나타났다. 이는 GF_{pc} 절대값이 더 크다는 것을 의미하며, 즉 자기감지 능력이 우수하다는 것을 말해준다. 하지만, 짧은 carbon섬유의 첨가는 길이가 긴 무변형 강섬유만을 사용했을 경우보다 전기 저항률이 크게 나타났다. 이는 표 2.9에 나타낸 것과 같이 carbon섬유의 전기 저항률이 길이가 긴 무변형 강섬유보다 크기 때문이다.

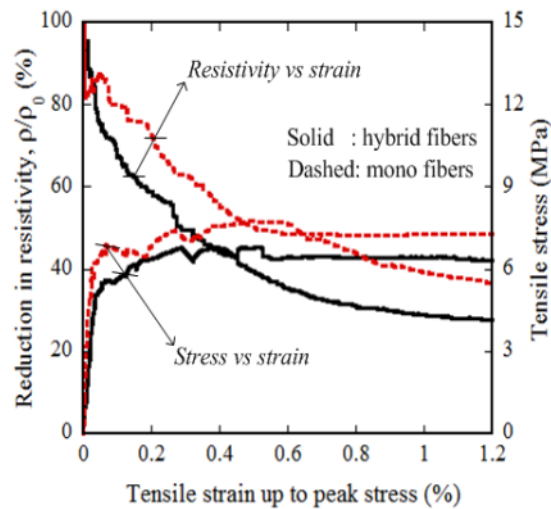


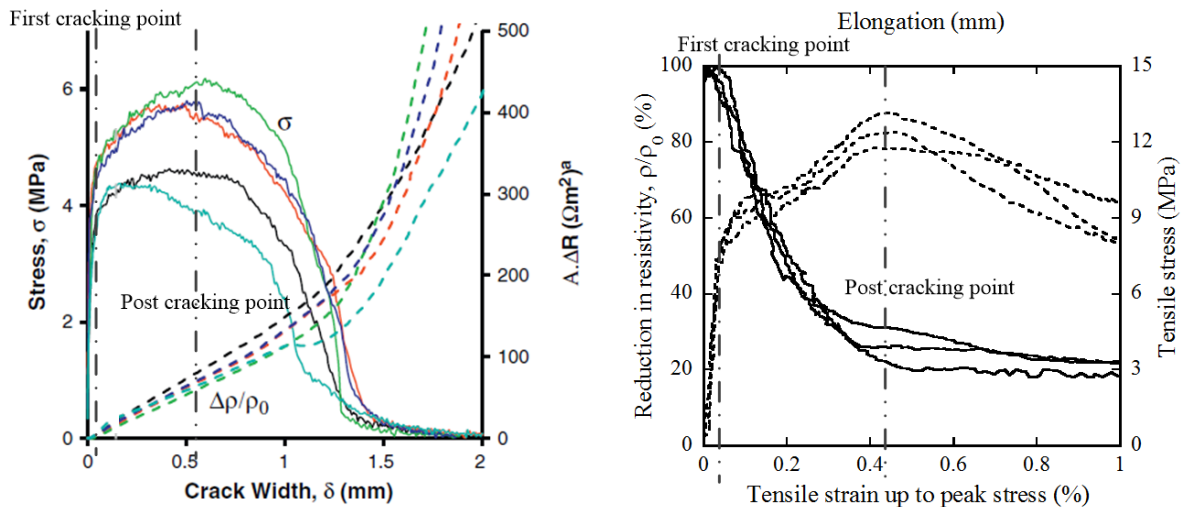
그림 2.16 - Carbon 섬유 0.5%의 혼입이 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동에 미치는 영향

표 2.11 - Carbon 섬유 0.5% 혼합 시 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학 거동 지표

Fiber	Strain, ε_{pc} (%)	Stress, σ_{pc} (MPa)	Average number of crack, N_{pc}	Gauge factor, GF_{pc}	Controlled stable resistivity, ρ_o ($k\Omega\cdot cm$)
Mono fibers (Long smooth)	0.53	7.64	10	-99.85	177
Hybrid fibers (Long smooth+Carbon)	0.49	6.81	7	-122.27	184

(3) 선진 기술과의 비교

기존 미국에서 연구 진행된, 전기전도성이 없는 PVA섬유와 전기 전도성이 우수한 카본블랙을 혼합한 시멘트 복합재료의 직접인장하중 시 전기 저항률에 대해 보고하였다(Li et al., 2012). 그리고 최근에 연구 진행된 PVA 섬유보강 시멘트 복합재료(Ranade et al., 2014)와 본 연구의 강섬유보강 시멘트 복합재료간의 직접인장시의 인장응력과 변형률 그리고 전기 저항률의 변화를 아래 그림 2.17에 나타내었다.



(a) PVA 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학적 거동 (Ranade et al., 2014)

(b) 강섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학적 거동

그림 2.17 - PVA 섬유보강 시멘트 복합재료와 강섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학적 거동 비교

그림 2.17 (a)는 PVA 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기역학적 특성을 보여주는 선도이며 (Ranade et al., 2014), 그림에서 나타난 바와 같이 최대 인장강도는 4 ~ 6 MPa 이며 전기 저항률이 초기 균열이후에 계속해서 같은 양상으로 증가하는 것을 볼 수 있으며, 전기 저항률의 기울기의 변화는 완전히 파괴된 이후 발생한다. 반면, 그림 2.17 (b)에 나타난 강섬유를

보강한 시멘트 복합재료는 인장강도는 8 MPa 이상으로 최소 75% 높으며, 초기 균열이 발생한 이후 전기 저항률이 급격히 감소하여 최종균열시점 이후에는 전기 저항률이 일정수치에 수렴하여 시멘트 복합재료의 초기균열시점과 최종균열시점을 기존 PVA 섬유보강 시멘트 복합재료와 비교하여 보다 명확하게 측정할 수 있다.

국외의 선진기술 개발수준은 PVA 섬유보강 시멘트 복합재료의 경우 균열의 정도에 따른 인장 시편 수준의 전기 저항률의 수치를 예측하는 이론적 모델을 제시하여 본 과제 보다 진행 수준이 한 단계 앞서있다. 그러나 강섬유보강 시멘트 복합재료의 경우 전기 저항률의 절대적 수치 뿐 아니라 전기 저항률의 변화 양상으로 시멘트 복합재료의 초기균열시점과 최종강도시점에 대한 정보를 명확히 제공함으로써, 건설재료자체가 센서로서의 기능을 할 수 있다는 가능성을 제시하였다. 또한, 강섬유보강 시멘트 복합재료의 높은 인장강도는 균열에 대한 높은 저항력을 나타낸다. 그러므로 구조물에 적용하였을 때 높은 균열 제어능력과 내구성의 향상을 기대할 수 있어 교량 및 건물에 보수보강재로 활용할 경우, 전기 저항률 측정으로 구조물의 균열생성정도 또는 손상정도를 파악 할 수 있는 센서로써 활용 가능할 것으로 판단된다.

(4) 결론

- 시멘트 모르타르 매트릭스에 CB와 GGBS의 치환은 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 인장 저항성에는 별다른 영향을 주지 않고도 전기 저항률을 감소시켰으며, 자기감지 능력을 향상시켰다.
- GGBS를 치환한 경우, 가장 높은 자기감지 능력을 보였다.
- Carbon섬유를 0.5% 혼합했을 경우 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 자기감지 능력은 향상되었지만, 전기 저항률은 다소 증가하였다.
- 강섬유보강 시멘트 복합재료는 PVA섬유보강 시멘트 복합재료보다 전기 저항률의 변화를 통해 시멘트복합재료의 초기균열시점과 최종균열시점을 보다 명확하게 측정하여 건설재료자체가 센서로써의 기능을 할 수 있다는 가능성보였으며, 인장강도가 최소 75% 높아 뛰어난 균열 제어능력 및 내구성의 향상을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

마. 외부환경이 미치는 영향

(1) 개요

재료의 전기 저항률은 항상 일정하지 않고 온도와 습도와 같은 환경조건에 의존적이다. 이러한 상황은 온도와 상대습도가 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률에 미치는 영향을 조사하기 위한 실험적 연구를 실시하였다.

사용된 섬유는 표 2.13에 나타난 무변형 직선 강섬유와 carbon섬유를 사용하였다. 섬유의 보강량은 부피비로 각각 1.0% 씩, 총 2.0%의 섬유가 보강되었다.

표 2.12 - 무게비로 나타난 매트릭스의 배합비와 압축강도

Cement (TypeⅢ)	Silica fume	Silica sand	Fly ash	Super- plasticizer	Water	f'_c (MPa)
0.80	0.07	1.00	0.20	0.04	0.26	90

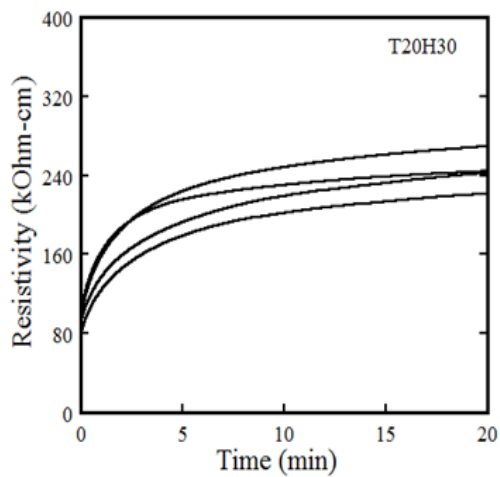
표 2.13 - 강섬유와 carbon섬유의 특성

Fiber type	Diameter (mm)	Length (mm)	Density (g/cc ³)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Carbon micro fiber	0.005~0.01	10-17	1.81	4137	240
Steel macro fiber	0.25~0.45	25~45	7.9	2580	200

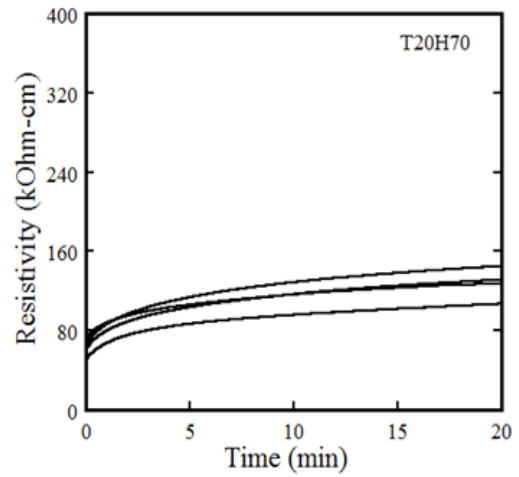
(2) 실험 결과

그림 2.18는 온도와 상대습도가 다른 상황에서 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기분극 거동을 보여준다. 모든 그래프는 동일한 형상을 나타내었다. 초기 전기 저항률 (time = 0 min) 과 안정된 전기 저항률 (time = 20 min) 의 값을 비교하였다.

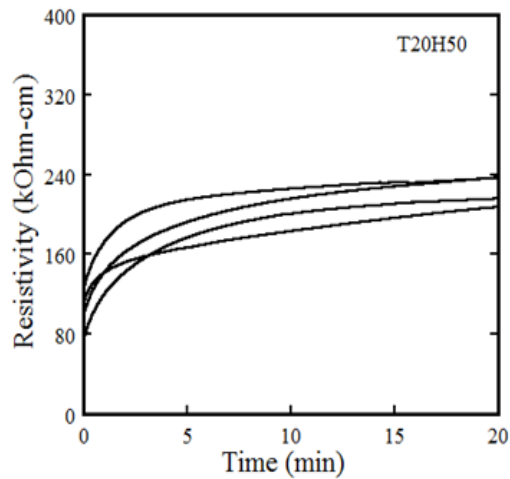
그림 2.19는 20 ℃의 기온에서 전기 저항률의 상대습도 영향을 보여준다. 그림 2.20은 상대습도가 50%경우의 전기 저항률의 온도영향을 보여준다. 그림 2.19에서 보이듯이 상대습도가 30%에서 70%로 증가하면 초기 전기 저항률 및 안정된 전기 저항률은 상당히 감소하는 경향을 보여주었으며, 상대습도가 50%이상일 경우, 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 더욱 급격하게 감소하였다. 상대습도의 영향과 유사하게, 온도가 20 ℃에서 40 ℃로 증가하면서 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 감소하였다. 그림 2.19과 그림 2.20에서 초기 전기 저항률은 안정된 전기 저항률 보다 상대습도와 기온의 변화에 덜 민감한 반응을 보여주었다.



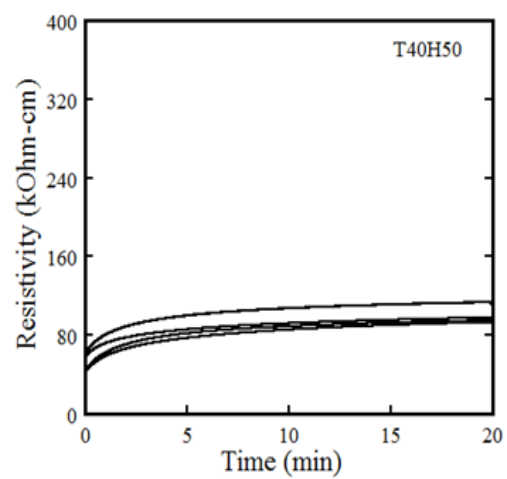
(a) 온도 20℃에 상대습도 30%



(c) 온도 20℃에 상대습도 70%



(b) 온도 20℃에 상대습도 50%



(d) 온도 40℃에 상대습도 50%

그림 2.18 - 온도와 상대습도의 변화에 대한 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기분극 현상

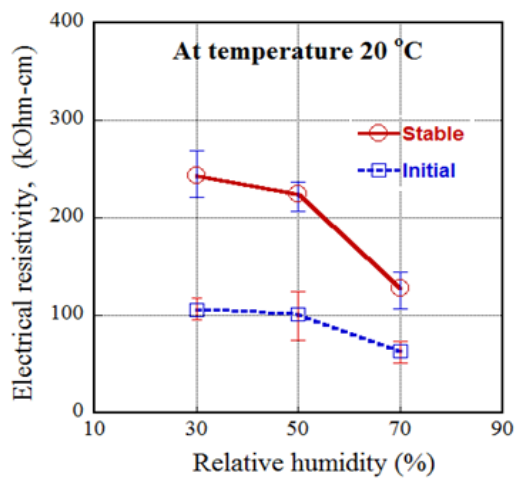


그림 2.19 - 상대습도가 전기 저항률에 미치는 영향

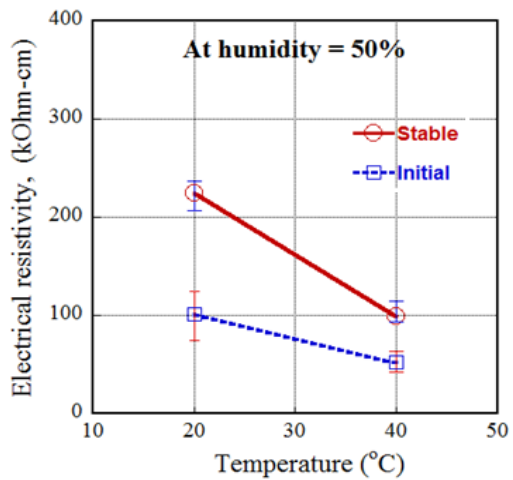


그림 2.20 - 온도가 전기 저항률에 미치는 영향

(3) 결론

- 온도 20℃에 유지되었을 때, 습도가 30%에서 70%로 증가할 경우, 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 상당히 감소하였다.
- 습도가 50%로 유지되었을 때, 온도 20℃에서 40℃로 증가할 경우, 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 감소하였다.
- 온도와 상대습도의 변화로 전기 저항률의 값은 변화하나 강섬유보강 시멘트 복합재료는 균열의 상태에 따라 전기 저항률의 변화양상이 달라 외부환경과 상관없이 자기감지능력을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

마. 종합결론

- 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 보강 섬유의 종류별 전기 저항률의 변화와 인장거동을 조사한 결과, 비틀림 섬유를 보강할 경우, 자기감지 능력이 가장 우수한 것으로 판명되었으며, 길이 20mm의 비틀림 섬유 전기 저항률의 변화인 gauge factor값이 가장 큰 반면에 길이 30mm의 비틀림 섬유를 사용한 경우 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 인장거동 지표가 더 우수한 결과를 보여주었다.
- 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 섬유보강 파괴비가 증가할수록 전기 저항률의 변화와 인장거동은 우수하였다. 파괴비로 1.5%의 섬유를 보강한 경우 gauge factor의 결과가 가장 크게 나타나 자기감지 능력이 우수했으며, 파괴비로 2.0%의 섬유보강한 경우 인장 저항성이 가장 우수한 결과를 보여주었다.
- 자기감지능력을 극대화하기 위해 carbon black과 고로슬래그를 치환하여 그 영향을 조사한 결과 고로슬래그를 치환하였을 경우, 인장 저항성을 감소시키지 않으면서 자기감지 능력을 나타내는 gauge factor를 다소 증대시켰다.
- 길이와 재질이 다른 두 가지 섬유를 혼입하여 자기감지 능력의 영향을 조사하였을 때 carbon 섬유의 혼입은 한 종류의 강섬유를 사용했을 때 보다 gauge factor는 크게 나타났으나, 전기 저항률은 다소 증가하는 경향을 보여주었다.
- 해외 PVA 섬유보강 시멘트 복합재료와 비교하였을 때, 전기 저항률을 통해 초기균열시점 및 최종균열시점을 명확히 판단할 수 있어 균열상태 파악 또는 손상 파악을 통해 건설재료자체가 센서로서의 기능을 가지는 것을 확인하였으며 인장강도는 최소 75% 이상으로 높은 강성을 통해 구조물의 취약부의 보수와 보강에 적용하여 균열 진전 및 파괴를 억제하여 구조물의 내구성 증진을 기대할 수 있다.
- 온도의 증가로 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 감소하였으며, 또한 상대습도의 증가할 경우 역시 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률이 감소하였다. 그러나 강섬유보강 시멘트 복합재료는 균열의 상태에 따라 전기 저항률의 변화양상이 달라 외부환경과 상관없이 자기감지능력을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.
- 본 연구를 통하여 개발된 재료의 자기감지능력 평가는 어디까지나 실험실 규모의 직접인장 시험의 결과를 통해 재료의 균열에 대한 자기손상감지 능력을 평가하였다. 추후 압축, 휨, 그리고 전단과 같은 하중조건에서의 자기감지능력을 검증해야하며, 실제 구조물 적용을 위한 시험체의 크기와 측정길이의 변화에 대한 연구가 필요하다. 또한 이러한 실험실 규모의 실험검증을 끝으로 실 구조물에 적용하기 위한 계측 방안에 대한 연구진행이 필요하다.

제3장 최종 연구성과

3.1절 최종연구성과

1. 정량적 연구성과

구분	항목	단위	목표	실적	검증방법
특허	국내 특허출원	건	1	1	특허출원증
학술	SCI 논문게재	건	1	1 (온라인 게재)	게재사본
	국내 학술발표	건	2	2	게재사본

2. 개별 연구성과

가. 특허출원 성과

출원 연도	특허명	출원인	출원국	출원번호
2014	균열 및 손상 자기감지 하이브리드 섬유보강 시멘트 복합재료의 자기 감지 방법 및 자기 감지 장치	세종대학교 산학협력단	대한 민국	10-2014- 0116958

나. 논문게재 성과

게재 연도	논문명	저자		학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분
		주저자	공동저자			
2015	Comparative electromechanical damage-sensing behaviors of six strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites under direct tension	NGUYEN Duy Liem	SONG Jiandong, MANATHAMSO MBAT Chatchai, 김동주	Composites Part B: Engineering	Vol. 69	국외 논문

다. 국내발표

게재 연도	논문명	저자		학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분
		주저자	교신저자			
2013	강섬유의 종류가 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기저항에 미치는 영향	Manathamsombat Chatchai	김동주	한국구조물진 단유지관리공 학회 2013년도 정기학술대회	Vol. 17 (NO. 1)	국내 발표
2014	섬유 종류가 변형 경화 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 자기 손상 감지 능력에 미치는 영향	Nguyen Duy Liem	김동주	한국구조물진 단유지관리공 학회 2014년도 정기학술대회	Vol. 18 (NO. 1)	국내 발표

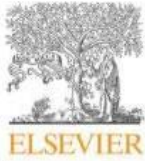
3. 개별 연구성과 검증

2014-09-03

【서지사항】

【서류명】	특허출원서
【참조번호】	P2014236
【출원구분】	특허출원
【출원인】	
【명칭】	세종대학교산학협력단
【출원인코드】	2-2005-011470-2
【대리인】	
【명칭】	특허법인(유)화우
【대리인코드】	9-2006-100002-2
【지정된변리사】	김성규, 신재열
【발명의 국문명칭】	균열 및 손상 자기감지 하이브리드 섬유보강 시멘트 복합재 료의 자기 감지 방법 및 자기 감지 장치
【발명의 영문명칭】	Self-detecting method for crack and damage with self-detecting hybrid fiber reinforced cement composite and self detecting system thereof
【발명자】	
【성명】	김동주
【성명의 영문표기】	KIM, Dong Joo
【주민등록번호】	750220-1XXXXXX
【우편번호】	472-910
【주소】	경기도 남양주시 도농동 부영애시앙 902동 403호
【국적】	KR

38-1



Comparative electromechanical damage-sensing behaviors of six strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites under direct tension

Duy Liem Nguyen, Jiandong Song, Chatchai Manathamsombat, Dong Joo Kim *

Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, 98 Gunja-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-747, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 April 2014

Received in revised form 31 August 2014

Accepted 29 September 2014

Keywords:

A. Fibers

B. Fiber/matrix bond

B. Electrical properties

B. Mechanical properties

ABSTRACT

This research investigates the electromechanical damage-sensing behavior of strain-hardening steel fiber-reinforced cement composites (SH-SFRCs) with six types of steel fibers (1.5% volume fraction content) within an identical mortar matrix (90 MPa). The six types of steel fibers studied are long twisted (T30/0.3), long smooth (S30/0.3), long hooked (H30/0.375), medium twisted (T20/0.2), medium smooth (S19/0.2), and short smooth (S13/0.2) steel fibers. The damage-sensing behavior was evaluated by measuring the changes in the electrical resistance during direct tensile tests. The electrical resistivity of the SH-SFRCs clearly decreased as the tensile strain increased until the post-cracking point, owing to the generation of multiple micro-cracks during strain-hardening. All the SH-SFRCs investigated had nominal gauge factors ranging between 50 and 140; these values are much higher than the commercially conventional gauge factor, which involves metal and is around 2. Both T30/0.3 and T20/0.2 produced the highest gauge factor, i.e., the best damage-sensing capacity, whereas S13/0.2 produced the highest electrical conductivity.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Structural health monitoring (SHM) refers to the implementation of damage detection strategies for engineering structures, such as changes to their material and/or geometric properties, which adversely affect the structures' performances. Numerous researches have been performed on SHM to detect damage to civil infrastructure due to rapid deterioration, as well as to evaluate the current ability of the infrastructure to perform its intended functions over a long term. Further, the techniques for monitoring structural health have rapidly developed. Nevertheless, the sensors used in the system have the disadvantages of high cost and low durability; moreover, the use of sensors leads to the degradation of the load-carrying capacity of the structural members embedding them [1].

To overcome these limitations, cement-based strain sensors were developed, and their sensing abilities were successfully improved by incorporating electrically conductive fibers [2–7], conductive nano particles [8–14], and conductive metals [15] or their combinations [16–20]. Self damage-sensing construction

materials are currently classified as multifunctional or smart materials [21].

A few researchers have also reported the self-sensing behavior of steel-fiber reinforced concrete. Chung [16] and Wen and Chung [17] investigated the piezoresistivity of cement-based materials containing steel fibers and reported the self-sensing capacity of steel fiber-reinforced cementitious composites (SFRCs). However, their results were limited in the elastic region because the SFRCs they studied could not exhibit tensile strain-hardening behavior that requires some conditions for reinforcing fibers [22,23]. Nevertheless, their results led to considerable interest in the self-sensing capacity of cement-based materials containing steel fibers. Strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites (SH-SFRCs) are characterized by tensile strain-hardening behavior accompanied with multiple micro-cracks. Further, they have demonstrated much higher load carrying and energy absorption capacities than normal concrete [24,25]. If SH-SFRCs could exhibit self damage-sensing behavior as well, they would be more attractive to civil engineers as multifunctional materials for the development of robust, tough, and durable civil infrastructure.

However, there is very little information regarding the factors that influence the electromechanical behavior of SH-SFRCs. Among the influential factors, the type of fiber is expected to significantly

* Corresponding author.

E-mail address: djkim75@sejong.ac.kr (D.J. Kim).

강섬유의 종류가 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기저항에 미치는 영향

The effect of steel fiber type on the electrical resistivity of high performance fiber reinforced cementitious composites

마나담솜바트 잣자이*
Manathamsoibat, Chatchai

김동주**
Kim, Dong Joo

Abstract

In this study, the electrical resistivity of high performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC) with four different types of steel fiber were investigated namely as twisted fiber, hooked fiber, smooth fiber (0.2 mm) and smooth fiber (0.3 mm). Experimental results indicate that the electrical resistivity of HPFRCC changes with type and diameter of steel fiber.

1. Introduction

The electrical conductivity of HPFRCC is relevant to the use of these composites for self-sensing composites, which can be used for structural health monitoring (SHM). To improve the electrical conductivity of HPFRCC, steel fiber was used due to good mechanical properties and electrical conductivity with low price. The aim of this study is to investigate the electrical resistivity of HPFRCC with different fiber diameter and types of steel fiber.

2. Experimental program and results

The composition of matrices is provided in Table 1. Four different types of steel fiber were used in an amount of 2% by volume composite namely as twisted fiber ($\varnothing$ 0.3 mm), hooked fiber ($\varnothing$ 0.375 mm), smooth fiber ($\varnothing$ 0.2 mm) and smooth fiber ($\varnothing$ 0.3 mm). After demolding, all the specimens were placed in a water tank for 14 days. Then, the specimens were removed from the water tank and dried in air for 45 days. To measure the electrical resistivity of the specimen, the silver paste and the copper tape were used. A layer of silver conductive paste was applied to the surface of specimen for the better electrical conductivity between the copper tape and the specimen. After that, the electrical resistivity and tensile strength of the specimen were measured at room temperature.

* 마나담솜바트 잣자이, 세종대학교 콘크리트구조연구실 박사과정

** 교신저자, 세종대학교 콘크리트구조연구실 교수 (djkim75@sejong.ac.kr)

섬유 종류가 변형 경화 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 자기 손상 감지 능력에 미치는 영향

Effect of fiber type on damage-sensing capacity of strain-hardening steel-fiber-reinforced cementitious composites

윤 위 림 *
Nguyen, Duy Liem

김 동 주 **
Kim, Dong Joo

Abstract

The effect of steel fiber types on the self-sensing capacity of strain-hardening fiber-reinforced cementitious composites (SH-SFRCs) was investigated. Three types of fiber, including twisted, smooth and hooked fibers, were used with a volume content of 1.5% in a mortar matrix. Although all the SH-SFRCs exhibited self damage-sensing capacity, the gauge factor, representing for damage-sensing ability, was different according to the types of fiber as follows: twisted (138.09) > smooth (99.85) > hooked (88.50). The SH-SFRC with twisted fiber produced the highest gauge factor which is very favorable for development of self damage-sensor.

1. Introduction

SH-SFRCs is characterized by high tensile strength, high ductility and toughness owing to their unique tensile strain hardening behavior accompanied with multiple micro-cracks. In addition to high mechanical resistance, SH-SFRCs are expected to generate self damage-sensing capacity owing to the high electrical conductivity of steel fibers [1]. However, there is still little information about the effects of different steel fibers on their self damage-sensing capacity. Thus, this research is aimed to discover the effect of fiber types on the electro-mechanical response of SH-SFRCs. This research is expected to provide useful information for development of self-sensing SH-SFRCs in detection of damage or cracks.

2. Experimental program

Three series of SH-SFRCs were prepared by adding 1.5% fiber content by volume. The series 1, 2, 3 of SH-SFRC specimens contained twisted ($d=0.3$ mm, $L=30$ mm), smooth ($d=0.3$ mm, $L=30$ mm) and hooked fibers ($d=0.3$ mm, $L=30$ mm), respectively. Four specimens were prepared per each series. A universal testing machine (UTM) with displacement control was used for the direct tensile tests while a fluke 8846 A multimeter was used for measuring electrical resistance by four-probe method under direct tension. The displacement speed of UTM was maintained as 1.0 mm/min and

* Nguyen, Duy Liem, 세종대학교, 건설환경공학과, 박사과정

** Kim, Dong Joo, 세종대학교, 건설환경공학과, 부교수 - 교신저자 (dikim@sejong.ac.kr)

제4장 연구목표 달성 및 효과

4.1절 연구개발 최종목표 달성도

성과목표	달성도	내용
자기감지 능력을 가지기위한 섬유 보강량 최소화	100%	■ 섬유 보강량의 최소화를 위한 섬유의 종류별 전기저항의 변화가 뚜렷하며 인장거동성능이 우수한 섬유결정 : - 비틀림 강섬유 ($L_f = 30mm$, $d_f = 0.3mm$) ■ 섬유 보강량 변화가 전기저항에 미치는 영향 평가하여 최소 섬유보강 부피비를 1.5%로 산정
변형경화 거동과 자기감지 기능을 동시에 가지는 배합제시	100%	■ Carbon black 및 고로슬래그를 첨가제로 활용하여 전기 전도성의 변화와 인장거동성능 파악 ■ 고로슬래그를 첨가제로 사용할 경우 인장거동의 변화가 거의 없고 자기감지 능력이 향상됨 ■ 1.5%의 비틀림 섬유를 보강했을 경우 전기 저항률은 $105.26k\Omega\cdot cm$이지만, 고로슬래그를 치환하게 되면 $100k\Omega\cdot cm$이하로 감소될 수 있음 ■ Carbon 섬유와 무변형강섬유를 혼입한 경우, 자기감지 능력이 향상되었으나, 약간 인장강도가 감소함
외부환경의 변화와 자기감지 능력과의 관계	100%	■ 온도의 증가함에 따라, 전기 저항률은 감소함 ■ 상대습도의 증가함에 따라 전기 저항률은 감소함

4.2절 연구개발 성과의 효과분석

1. 기술적 효과분석

- 자기 균열 감지 능력을 가지는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료를 이용해 구조물의 경우 별도의 센서 부착없이 구조물 자체가 그 거동 및 손상을 평가 가능함
- 높은 인장 저항능력과 자기감지 능력을 가져 기존 구조물의 보수·보강 재료로 사용할 수 있을 뿐 아니라, 구조물의 상태를 파악할 수 있음
- 최근 국외의 연구(Ranade et al. 2014)의 PVA 섬유보강 시멘트 복합재료와 비교하였을 때 PVA 섬유보강 시멘트 복합재료와 다르게 전기 저항률의 변화가 초기균열시점과 최종균열시점에서 그 양상이 달라져 더욱 명확한 측정이 가능하여 건설재료자체가 센서로써의 기능을 할 수 있다는 가능성을 제시하였으며, 최소 75% 이상의 높은 인장강도를 지녀 높은 균열 제어능력과 내구성을 향상시켜 보수보강 및 건설재료로써 더욱 효과적일 것으로 기대됨
- 추후연구를 통하여 다양한 하중조건에서의 전기 저항률의 변화검증과 현장적용에 용이한 측정방안을 고안하여 구조물에서의 실 측정이 필요함

2. 경제적 효과분석

- 본 연구는 자기감지 기능을 가지는 섬유보강 시멘트 복합재료에 대한 기초연구로써 경제성에 대한 분석이 명확히 이루어지지 않았으나, 다음사항들에 대한 효과가 기대됨
- 일체화된 보수보강 재료에 의한 시설물의 이상 유무판정을 통해 효율적인 유지관리 및 보수·보강 계획을 수립하여 점검비용이 감소할 것으로 기대
- 구조물의 수명동안 사용할 수 있는 자기감지 능력을 가진 재료의 개발로 구조물 진단에 사용되는 유지보수비용 및 시간의 절감가능
- 강섬유보강 시멘트 복합재료의 높은 균열제어 능력과 내구성 향상으로 인한 사회간접자본의 수명 연장에 따른 경제성 제고
- 강섬유보강 1% 시멘트 복합재료의 재료비용은 섬유보강이 없는 경우보다 약 200% 증가하지만, 전체 공사비 기준으로 약 120~130% 증가
- 기존 교량의 유지관리/보수보강에 소요되는 비용은 공용사용기간인 30~50년간 초기 투자비용 대비 30% 정도로 이에 대한 비용 절감효과 기대
- 유지보수 및 진단 기능을 가진 재료의 국산화로 국내 사업 및 수출 사업의 육성가능

3. 정책적 효과분석

- 현 정부의 정책 초점인 ‘창조경제’에 기여할 수 있음
 - 본 과제를 통해 자기감지 능력을 갖는 재료 분야에서 글로벌 시장의 우위를 점할 수 있는 개기가 되었으며, 본 연구를 시작으로 재료개발을 통한 새로운 시장의 창출 가능성을 보여줌
- ‘창조경제 실현을 위한 국토교통 R&D 중장기 전략’을 보면, 현재 국토교통 분야의 정책의 메가 트렌드는 ‘국민안전’으로 나타남
 - 본 과제를 통해 개발된 재료는 기존의 구조물뿐 아니라 새로 건설될 구조물에 적용하여 지속적인 모니터링이 가능하며, 구조물의 선제적 안전관리를 가능케 함

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

5.1절 최종 성과물의 활용방안

연구결과물	활용방안
자기감지 기능을 가지는 변형경화 섬유보강 시멘트 복합재료	- 반영구적 센서의 기능을 가진 건설재료로 사회기반 시설물 또는 빌딩의 모니터링에 활용 - 변형경화 거동에 기인한 사회기반 시설물의 내구성 향상에 기여 - 사회기반 시설물 또는 빌딩의 보수·보강 재료로 활용 - 인장하중 받는 부재에 조립식 패널형식으로 보강재 활용가능 - 터널의 라이닝부에 강섬유보강 시멘트 복합재료를 슛크리트 뿔철형식으로 보수·보강에 활용가능 - 현장적용 시 계측부위에 전류전원을 설치하여 모니터링계획 (추후연구를 통해 검증예정) - 추후 압축 및 휨 등의 하중에서의 전기역학적 거동특성 확인 후 각 부재에 적용가능

5.2절 연구의 한계 및 추가연구 필요성

- 본 연구는 자기감지 기능을 가지는 섬유보강 시멘트 복합재료에 대한 기초연구로써, 경제성에 대한 분석이 명확히 이루어지지 않았음
- 또한, 연구기간과 연구비의 제한으로 재료의 직접인장 하중 하에서의 자기감지 기능이 평가되어 시험체수준의 검증만이 이루어져 현장적용 시 문제점 및 적용방안의 고려가 충분히 이루어지지 않음
- 본 과제를 통해 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 인장거동에 대한 자기감지 능력을 확인하였고, 추후 압축, 휨, 그리고 전단과 같은 거동에 대한 전기 저항률의 변화의 조사가 필요함
- 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료는 시험체의 크기 및 측정길이의 변화로 거동특성에 변화를 갖는 것으로 알려져 있으므로, 시험체의 크기가 증가하였을 때 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 자기 균열 감지 능력 변화에 대한 조사가 필요함
- 본 과제는 재료의 자기감지 능력을 파악하여 자기감지 능력을 발휘할 수 있는 재료의 개발로, 개발된 재료를 통한 구조물 적용방법 및 철근 또는 PS강선이 적용되었을 때의 전기 저항률 및 자기 균열 감지 능력에 대한 연구가 필요함
- 구조물의 안전 진단에 개발된 재료를 활용하여 실제 반응을 측정하고, 패널보강 및 뿔철보강 적용 시 측정이 용이한 측정장비 구축과 구조물의 각 거동에 따른 반응을 객관화한 구조성능평가의 지표 설정이 필요

참고문헌

국토교통과학기술진흥원, (2014), 창조경제 실현을 위한 국토교통 R&D 중장기 전략.
한국시설물안전공단, (2010), LCC예측모델을 활용한 도로시설물 유지관리계획 수립 방안

Azhari, F., Banthia, N. (2012), "Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing", *Cement and Concrete Composites*, Vol.34, No.7, pp.866-873.

Banthia, N., Djeridane, S., Pigeon, M. (1992), "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. (2002), "Effect of strain rate on cement mortar under compression, studied by electrical resistivity measurement", *Cement and Concrete Research*, Vol.32, No.5, pp.817-819.

Cao, J., Chung, D. D. L. (2004), "Electric polarization and depolarization in cement-based materials, studied by apparent electrical resistance measurement", *Cement and Concrete Research*, Vol.34, No.3, pp.481-485.

Chen, P. W., Chung, D. D. L. (1993), "Carbon fiber reinforced concrete as a smart material capable of non-destructive flaw detection", *Smart Materials and Structures*, Vol.2, No.1, pp.22-30.

Chen, B., Liu, J. Y., Wu, K. (2005), "Electrical responses of carbon fiber reinforced cementitious composites to monotonic and cyclic loading", *Cement and Concrete Research*, Vol.35, No.11, pp.2183-2191.

Chung, D. D. L. (1998), "Self-monitoring structural materials", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol.22, No.2, pp.57-78.

Chung, D. D. L. (2002), "Piezoresistivity cement-based materials for strain sensing", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.13, No.9, pp.599-609.

Chung, D. D. L. (2004), "Electrically conductive cement-based materials", *Advances in cement research*, Vol.16, No.4, pp.167-176.

Chung, D. D. L. (2005), "Dispersion of short fibers in cement", *Journal of materials in civil engineering*, Vol.17, No.4, pp.379-383.

Fan, Z. Y. (1995), "A new approach to the electrical resistivity of two-phase composites", *Acta metallurgica et materialia*, Vol.43, No.1, pp.43-49.

Goak, J. C., Lee, S. H., Jang, S. H., Kim, K. B., Seo, Y. H., Seo, Y. S., Lee, N. S. (2001), "Spectroscopic studies and electrical properties of transparent conductive films fabricated by using surfactant-stabilized single-walled carbon nanotube suspensions", *Carbon*, Vol.49, No.13, pp.4301-4313.

Han, B. G., Yu, X., Kwon, E. (2009), "A self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring", *Nanotechnology*, Vol.20, No.44, pp.445-501.

Han, B. G., Yu, X., Qu, J. P. (2010), "Effect of water content on the piezoresistivity of MWNT/cement composites", *Journal of materials science*, Vol.45, No.14, pp.3714-3719.

- Han, B., Yu, X., Ou, J. (2011), "Multifunctional and Smart Carbon Nanotube Reinforced Cement-based Materials", *Nanotechnology in Civil Infrastructure* (edit by K.Gopalakrishnan et al.), pp. 1-47.
- Han, B., Zhang, K., Yu, X., Kwon, E., Ou, J. (2012), "Electrical characteristics and pressure-sensitive response measurements of carboxyl MWNT/cement composites", *Cement and Concrete Composites*, Vol.34, No.6, pp.794-800.
- Kim, D. J., Naaman, A. E., El-Tawil, S. (2008), "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. (2004), "A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nano-phase materials", *Cement and Concrete Research*, Vol.34, No.3, pp.435-438.
- Li, H., Xiao, H. G., Ou, J. P. (2008), "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, pp.2114-2119.
- Li, M., Lin, V., Lynch, J., Li, V. C. (2012), "Multifunctional carbon black engineered cementitious composites for the protection of critical infrastructure", *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6*, Springer, Netherlands, pp.99-106.
- McCarter, W. J., Garvin, S. (1989), "Dependence of electrical impedance of cement-based materials on their moisture condition", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.22, No.11, pp.1773-1776.
- McCarter, W. J. (1995), "Effects of temperature on conduction and polarization in portland cement mortar", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.78, No.2, pp.411-415.
- Meehan, D. G., Wang, S. K., Chung, D. D. L. (2010), "Electrical resistance based sensing of impact in carbon fiber reinforced cement based materials", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.21, No.1, pp.83-105.
- Naaman, A. E., Reinhardt, H. W. (1996), "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, pp.1-24.
- Naaman, A. E., Reinhardt, H. W. (2006), "Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response", *Materials and Structures*, Vol.39, No.5, pp.547-555.
- Naaman, A. E., (2007) "Tensile strain-hardening FRC composites: historical evolution since the 1960", *Advances in Construction Materials*, (Part II) pp.181-202.
- Nguyen, D. L., Kim, D. J. (2014), "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, pp.248-249.
- Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., Koh, K. T. (2012), "Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol.34, No.2, pp.172-184.

- Pramanik, P. K., Khastgir, D., De, S. K., Saha, T. N. (1990), "Pressure-sensitive electrically conductive nitrilerubber composites filled with particulate carbon black and short carbon fibre", *Journal of Materials Science*, Vol.25, No.9, pp.3848-3853.
- Ranade, R., Zhang, J., Lynch, J., Li, V. C. (2014), "Influence of micro-cracking on the composite resistivity of Engineered Cementitious Composites", *Cement and Concrete Research*, Vol.58, pp.1-12.
- Shi, Z. Q., Chung, D. D. L. (1999), "Carbon fiber reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion" *Cement and Concrete Research*, Vol.29, No.3, pp.435-9.
- Song G., Mo, Y. L., Otero, K., Gu, H. (2006), "Health monitoring and rehabilitation of a concrete structure using intelligent materials", *Smart Materials and Structures*, Vol.15, No.2, pp.309-314.
- Sun, M. Q., Liu, Q. P., Li, Z. Q., Wang, E. (2002), "Electrical emission in mortar under low compressive loading", *Cement and Concrete Research*, Vol.32, No.1, pp.47-50.
- Wang, X., Fu, X., Chung, D. D. L. (1999), "Strain sensing using carbon fiber", *Journal of materials research*, Vol.14, No.3, pp.790-802.
- Wang, D. J., Chung, D. D. L. (2006), "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, pp.1332-1344.
- Wen, S. H., Chung, D. D. L. (1999), "Piezo-resistivity in continuous carbon fiber-cement matrix composite", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, No.3, pp.445-459.
- Wen, S. H., Chung, D. D. L. (2001), "Carbon fiber-reinforced cement as a strain-sensing coating", *Cement and Concrete Research*, Vol.31, No.4, pp.665-667.
- Wen, S., Chung, D. D. L. (2001), "Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement", *Cement and Concrete Research*, Vol.31, No.1, pp.141-147.
- Wen, S. H., Chung, D. D. L. (2003), "A comparative study of steel- and carbon-fiber cement as piezoresistive strain sensors", *Advances in cement research*, Vol.15, No.3, pp.119-128.
- Wen, S. H., Chung, D. D. L. (2005), "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. (2007), "Partial replacement of carbon fiber by carbon black in multifunctional cement-matrix composites", *Carbon*, Vol.45, No.3, pp.505-513.
- Wenner, F. (1915), "A method of measuring earth resistivity", *Bulletin of the Bureau of Standards*, Vol.12, No.4, pp.469-478.
- Wille, K., Kim, D. J., Naaman, A. E. (2011), "Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents", *Materials and Structures*, Vol.44, No.3, pp.583-598.
- Wittmann, F. H. (1973), "Observation of an electromechanical effect of hardened cement paste", *Cement and Concrete Research*, Vol.3, No.5, pp.601-605.
- Yu, X., Kwon, E. (2009), "A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties", *Smart Materials and Structures*, Vol.18, No.5.

Malhotra, V. M., Carino, N. J. (2004), Handbook on nondestructive testing of concrete (2 ed.), Boca Raton: CRC Press.

Song, J. (2013), The change of electrical resistivity of high performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC) in tension, Master thesis, Sejong University, Korea.

[부록]

1. 연구 성과

가. 특허출원증

2014-09-03

【서지사항】

【서류명】	특허출원서
【참조번호】	P2014236
【출원구분】	특허출원
【출원인】	
【명칭】	세종대학교산학협력단
【출원인코드】	2-2005-011470-2
【대리인】	
【명칭】	특허법인(유)화우
【대리인코드】	9-2006-100002-2
【지정된변리사】	김성규, 신재열
【발명의 국문명칭】	균열 및 손상 자기감지 하이브리드 섬유보강 시멘트 복합재 료의 자기 감지 방법 및 자기 감지 장치
【발명의 영문명칭】	Self-detecting method for crack and damage with self-detecting hybrid fiber reinforced cement composite and self detecting system thereof
【발명자】	
【성명】	김동주
【성명의 영문표기】	KIM, Dong Joo
【주민등록번호】	750220-1XXXXXX
【우편번호】	472-910
【주소】	경기도 남양주시 도농동 부영애시앙 902동 403호
【국적】	KR

38-1

2014-09-03

【발명자】

【성명】 운위림

【성명의 영문표기】 NGUYEN, DUY LIEM

【주소】 서울시 광진구 능동로 209, 세종대학교 광개토관 1111호

【국적】 VN

【심사청구】 청구

【이 발명을 지원한 국가연구개발사업】

【과제고유번호】 1615005714

【부처명】 국토해양부

【연구관리 전문기관】 한국건설교통기술평가원

【연구사업명】 건설기술혁신사업

【연구과제명】 자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료 개발

【기여율】 1/1

【주관기관】 세종대학교산학협력단

【연구기간】 2012.11.19 ~ 2014.11.18

【취지】 위와 같이 특허청장에게 제출합니다.

대리인 특허법인(유)화우 (서명 또는 인)

【수수료】

【출원료】 0 면 46,000 원

【가산출원료】 37 면 0 원

38-2

2014-09-03

【우선권주장료】	0 건	0 원
【심사청구료】	10 항	583,000 원
【합계】	629,000 원	
【감면사유】	전담조직[1]	
【감면후 수수료】	314,500 원	
【첨부서류】	1.기타첨부서류_1통	

【명세서】

【발명의 명칭】

균열 및 손상 자기감지 하이브리드 섬유보강 시멘트 복합재료의 자기 감지 방법 및 자기 감지 장치{Self-detecting method for crack and damage with self-detecting hybrid fiber reinforced cement composite and self detecting system thereof}

【기술분야】

【0001】 본 발명은 두 가지 섬유를 함께 혼합하여 사용한 균열 및 손상 자기 감지 하이브리드 섬유보강 시멘트 복합재료의 균열 또는 손상의 자기 감지 방법 및 자기 감지 장치에 관한 것으로, 하이브리드 섬유보강 시멘트 복합재료를 사용한 구조물의 내부에 전도성 섬유인 강섬유(steel fiber)와 탄소섬유(carbon fiber)를 함께 보강하여 직접인장 하중 하에서 변형 경화(strain hardening) 현상을 유도함과 동시에 전류를 흘려 비저항을 측정함으로써, 구조물의 균열 또는 손상을 별도의 변형률센서(strain gage)를 사용하지 않고도, 감지할 수 있는 자기 감지(self-detecting) 방법과 장치를 제공한다.

【0002】 좀 더 상세히 설명하면, 균열 또는 손상이 예상되는 콘크리트 구조물의 취약 부위를, 강섬유(steel fiber)와 탄소섬유(carbon fiber)를 포함하는 하이브리드 섬유가 전체 조성물을 기준으로 1.25 ~ 2.0 vol%의 범위로 포함되는 콘크리트 조성물을 사용하여 형성하고, 이러한 취약 부위에 대해 비저항의 변화를 측정

함으로써, 실시간 또는 사전에 콘크리트 건물의 균열 또는 손상을 관찰 또는 예측하는 방법 및 이러한 방법에 적용되는 장치에 관한 발명이다.

【발명의 배경이 되는 기술】

【0003】 시멘트와 골재 등의 복합재료를 통해 제조되는 콘크리트 구조물은 도시 건축물 및 사회기반시설 건립에 가장 폭넓게 이용되고 있는 건축 구조물로서, 오랜 기간 동안 안전하고 견고하게 유지될 수 있도록 상기 콘크리트 구조물의 균열 및 손상으로 인한 붕괴 등의 위험을 실시간 혹은 사전에 감지하거나 예측할 수 있는 시스템에 관한 요구가 증가하고 있다.

【0004】 기존의 콘크리트 구조물의 손상을 감지하는 시스템에는 다양한 종류의 변형률 또는 변위 측정장치들을 추가적으로 설치하여 실시간 측정하여 구조물의 손상 및 건전도를 측정하는 모니터링 시스템 및 안전진단 등이 있다. 또한 다양한 전기화학적 방법들이 적용될 수 있는데, 그중에서도 전기 비저항법은 콘크리트 구조물에 전류를 흘려 비저항을 측정하여 손상 또는 균열 등을 확인할 수 있는 비파괴 부식진단법의 대표적인 예에 해당한다.

【0005】 공개특허 제2011-0010853호에는 콘크리트 및 철근과 관련한 전기비저항을 철근 상부에서 직접 추정하여 철근의 부식 환경 및 그 상태를 평가할 수 있는 비파괴 부식진단시스템이 제시되어 있으며, 철근 직상부의 콘크리트 표면 외측에 두 개의 전류전극과, 내측에 두 개의 전압전극을 동일한 간격으로 철근 길이방향과 평행하게 설치하여 전류원에 의해 발생한 응답전압을 측정하여, 철근의 부식

환경을 나타내는 콘크리트의 층간 및 평균 비저항과, 철근의 직접적인 부식상태를 나타내는 철근의 표면비저항을 추정하도록 함으로써 콘크리트 구조물의 철근부식 및 내구성에 관한 정기검사 및 상시 모니터링을 진행하는 것을 특징으로 하고 있다.

【0006】 하지만, 이러한 콘크리트 구조물의 철근부식 및 내구성 상시 모니터링 방법은 단순히 콘크리트 내부에 형성된 전기 전도성 재질인 철근의 부식 정도만을 측정할 수 있는 한계가 있고, 전체적인 콘크리트 구조물의 크랙이나 균열과 같은 손상이나 변형에 관한 정보를 제공할 수 없다는 문제점이 존재한다. 또한 별도의 변형률 또는 변위를 측정하는 센서를 구조물에 별도로 부착 또는 매립하는 현재의 모니터링 시스템들은 구조물의 수명과 비교하여 매우 짧은 센서의 내구수명으로 인해 구조물의 전체 수명 동안 계속하여 사용될 수 없다는 문제점이 있다.

【0007】 또한 공개특허 제2005-0018744호에는, 시멘트 페이스트 또는 모르타르에 폴리에틸렌(PE)섬유나 폴리비닐알콜(PVA)섬유 또는 폴리프로필렌(PP)섬유를 마이크로 섬유로, 강섬유(SF)나 스틸코드(SC) 또는 폴리비닐알콜(PVA)섬유를 매크로 섬유로 사용하여 제조된 고인성 시멘트 복합체가 제시되어 있으며, 이러한 고인성 시멘트 복합체는 휨 및 인장하중 작용하에서 변형 경화특성과 멀티플 크랙 특성을 갖고 있어 높은 휨 및 인장강도, 변형능력 및 에너지 흡수능력을 발휘할 수 있을 뿐만 아니라 균열폭을 제어함으로써 각종 열화인자의 침투를 억제할 수 있는 장점이 제시되어 있다.

【0008】 최근 폴리비닐알콜(PVA) 섬유를 사용한 고인성 시멘트 복합체에 전도성이 우수한 카본블랙(carbon black)을 혼입하여 균열 및 손상을 감지하는 결과를 발표한 바 있다. 하지만 폴리비닐알콜 섬유의 낮은 전기전도성으로 인해 균열이 발생함에 따라 전기저항이 오히려 증가하는 결과를 보고하였다. 따라서 매우 낮은 전기전도성을 측정할 수 있는 전기저항 측정장치가 필요하다.

【0009】 기존의 변형률 또는 변위를 측정하는 센서들의 경우 단위 변형당 비저항 변화의 비율로 정의되는 GF(gauge factor)값이 약 2 정도로 낮고, 그 센서들의 내구수명이 매우 짧은 단점이 있고, 폴리비닐알콜 섬유를 사용한 고인성 시멘트 복합체의 경우 균열이 발생함에 따라 전기전도성이 매우 낮아지는 문제점이 여전히 존재한다. 또한 강섬유를 보강한 변형 경화형 시멘트 복합재료의 인장강도 수치는 8-15 MPa인 것에 비해, 폴리비닐알콜 섬유를 사용한 고인성 시멘트 복합체의 경우 인장강도 수치는 4-5 MPa 정도로 더 낮다. 따라서 적은 크기의 외부 하중에도 균열이 발생하는 문제점이 있다.

【0010】 따라서 본 발명에서는 섬유의 직경과 길이가 큰 매크로 강섬유(steel fiber)와 섬유의 직경과 길이는 작지만 전기전도성이 우수한 탄소 섬유(carbon fiber)를 함께 보강한 하이브리드 섬유를 보강한 변형 경화특성과 멀티플 크랙 특성을 갖는 고인성 시멘트 복합재료를 콘크리트 구조물의 취약 부위에 시공하여 시간 변화에 따른 비저항 변화를 상시 측정함으로써, 콘크리트 구조물의 안전성을 보다 손쉽게 진단 및 모니터링할 수 있는 방법을 제공하고자 한다.

【0011】 또한, 상기 고인성 콘크리트 조성물에 사용되는 하이브리드 섬유 보강재의 종류와 조성을 최적화함으로써, 단위 변형당 비저항 변화의 비율로 정의되는 GF 값을 향상시켜 콘크리트 구조물의 미세 구조 변화를 보다 정확하게 감지 또는 모니터링할 수 있는 방법과 장치를 제공하고자 하며, 우수한 자기 감지 및 인장 저항 거동을 갖는 하이브리드 섬유 보강재의 조성을 제공하고자 한다.

【선행기술문헌】

【특허문헌】

【0012】 (특허문헌 0001) 공개특허 제2011-0010853호

(특허문헌 0002) 공개특허 제2005-0018744호

【비특허문헌】

【0013】 (비특허문헌 0001) M. Li, V. Lin, J. Lynch and V.C. Li.(2012). Multifunctional carbon black engineered cementitious composites for the protection of critical infrastructure. RILEM. pp. 99 ~ 106.

【발명의 내용】

【해결하고자 하는 과제】

【0014】 본 발명은 앞서 언급한 바와 같이 종래의 기술이 갖는 문제점들을 해소하고, 균열 또는 손상이 예상되는 콘크리트 구조물의 취약 부위의 손상 및 균

열과 같은 미세구조 변화를 보다 정확하고 민감하게 확인하거나 모니터링 하기 위해 전기전도성이 우수한 두 가지 종류의 하이브리드 섬유보강 시멘트 복합재료를 사용한 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 방법 및 장치를 제공하기 위한 것이다.

【0015】 좀 더 구체적으로는, 직접인장 하중 하에서 변형 경화 거동을 유도하기 위한 매크로 강섬유(macro steel fiber)와 탄소마이크로 섬유(micro carbon fiber)를 사용하고, 이 두 가지 종류의 섬유들이 보강 또는 혼입되는 시멘트 계 매트릭스의 최적 배합비율을 도출함으로써, 단위 변형당 비저항 변화의 비율로 정의되는 GF 값을 현저하게 향상시킬 뿐만 아니라 다수의 미세 균열을 동반하는 변형 경화 거동을 함께 발현하는 것을 발명의 목적으로 하고 있다.

【0016】 또한, 콘크리트 구조물의 취약 부위에 본 발명의 조성을 갖는 하이브리드 섬유보강 고인성 시멘트 복합재료를 사용하여 시공함으로써, 콘크리트 구조물의 자기 손상 정도를 손쉽게 진단 또는 모니터링 함으로써, 경제적인 비용으로 건물, 교량, 댐 등의 콘크리트 구조물의 손상, 파괴 또는 붕괴를 사전에 방지하고 대책을 수립할 수 있게 해주는 것을 목적으로 한다.

【과제의 해결 수단】

【0017】 앞서 서술한 종래 기술의 문제점과 본 발명의 목적을 달성하기 위해, 본 발명에서 제시하는 하이브리드 섬유 보강 시멘트 복합재료의 균열 또는 손상 자기 감지 방법은, 균열 또는 손상이 예상되는 상기 콘크리트 구조물의 취약

부위를, 강섬유(steel fiber)와 탄소섬유(carbon fiber)를 포함하는 하이브리드 섬유가 전체 조성물을 기준으로 1.25 ~ 2.0 vol%의 범위로 포함된 콘크리트 조성물을 사용하여 형성하는 제 1 단계; 상기 섬유보강 시멘트 복합재료를 사용한 콘크리트 구조물의 취약 부위에 전극을 형성하는 제 2 단계; 및 상기 전극에 전류를 공급하여 시간 변화에 따른 콘크리트 구조물의 취약 부위의 비저항 변화를 측정하는 제 3 단계;를 포함한다.

【0018】 상기 콘크리트 조성물에는 강섬유가 1.0 ~ 1.5 vol% 포함되고, 탄소섬유는 0.25 ~ 0.5 vol%의 범위로 포함되며, 이때 사용되는 매크로 섬유인 강섬유는 지름이 0.25~0.45 mm, 길이는 25~45 mm이고, 마이크로 섬유인 탄소섬유의 지름은 0.005~0.01 mm, 길이는 10~17 mm인 것이 바람직하다.

【0019】 본 발명에서 콘크리트 구조물의 취약 부위의 시공에 사용되는 상기 시멘트 복합재료의 조성물은, 규사 100 중량부에 대하여 시멘트는 75~85 중량부, 열분해 실리카는 5~10 중량부, 플라이 애시는 15~25 중량부, 혼화제는 1~10 중량부, 물은 20~30 중량부가 포함되는 것이 바람직하며, 강섬유와 탄소섬유가 함께 혼합된다.

【0020】 또한, 상기 플라이 애시는 분말도가 3000~4000 $\mu\text{m/g}$ 이고, 상기 열분해 실리카는 평균직경이 0.01~1 μm 이며, 상기 규사는 평균직경이 0.01~0.5 mm인 것이 바람직하다.

【0021】 본 발명의 다른 실시 형태로는 콘크리트 구조물의 자기 손상 감지 장치를 들 수 있는데, 강섬유와 탄소섬유를 함께 포함하는 조성물을 기준으로 1.25 ~ 2.0 vol%의 범위로 포함된 콘크리트 조성물로 형성된, 균열 또는 손상이 예상되는 콘크리트 구조물의 취약 부위; 상기 취약 부위를 외부 전원과 전기적으로 연결하는 전극부; 상기 전극부를 통해 전류를 공급하여 상기 콘크리트 구조물의 취약 부위의 시간에 따른 전기 비저항의 변화를 기록하는 제어부; 및 상기 전극부와 상기 제어부를 전기적으로 연결하는 연결부;를 포함한다.

【발명의 효과】

【0022】 본 발명의 하이브리드 섬유로 보강된 고인성 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 방법은, 특별한 관리 또는 주의가 요구되는 콘크리트 구조물의 취약 부위만을 도전성을 갖는 하이브리드 섬유 보강 시멘트 복합재료로 마감하거나 시공한 후, 일정한 시간 간격 또는 원하는 점검 시점에 간단히 설치된 전극을 통해 전류를 흘려주어 비저항을 모니터링 함으로써, 콘크리트 구조물의 균열 정도 또는 손상 상태를 효과적이면서도 경제적으로 간단히 진단할 수 있는 효과가 있다.

【0023】 또한, 기존의 콘크리트 구조물 내부에서 주의 관찰이 요구되는 취약 부위만을 선택적으로 본 발명의 하이브리드 섬유보강 시멘트 복합재료를 사용하여 부분 시공함으로써, 간단한 전기저항 측정을 통해 손상 등을 진단할 수 있게 해줌으로써 변형 경화 거동을 통해 높은 내구성을 부여함과 동시에 광범위한 영역에 대

해서 경제적인 콘크리트 구조물의 손상 감지 방법을 제공할 수 있다.

【0024】 본 발명에서는 매크로 섬유인 강섬유와 마이크로 섬유인 탄소섬유를 혼합하여 사용함으로써, 콘크리트 구조물이 휨 및 인장력 작용 하에서 초기균열이 발생한 이후에도 마이크로 및 매크로 섬유의 가교(Bridging)작용에 의해 응력의 저하 없이 변형의 증가와 함께 응력이 증가하는 변형 경화(Strain hardening)특성과 다수의 미세균열이 콘크리트 구조물 전반에 걸쳐 발생하는 멀티플크랙(Multiple crack)특성을 유도할 수 있으며, 단위 변형당 비저항의 비율인 GF(gauge factor)값을 50 이상으로 높게 유지시켜 높은 균열 또는 손상 감지 능력을 제공할 수 있는 효과가 있다. 또한 전기전도성이 우수한 섬유의 보강을 통하여 균열의 발생 후에 전기전도성이 더욱 향상되어 단위 변형당 비저항이 급격히 저하됨으로써 초기 균열 발생 시점을 명확히 알 수 있고, 자기감지 능력을 향상시킬 수 있다.

【0025】 따라서 본 발명의 하이브리드 섬유를 통해 보강된 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 방법과 장치는 콘크리트 구조물의 내부 상태를 정확 하면서도 효과적으로 모니터링하고 균열 등의 위험을 사전에 감지하는 데에 활용될 수 있으며 바람직하게는 아래와 같은 구조물에 적용될 수 있다.

【0026】 첫째, 물 또는 액체의 저장탱크는 항상 수압에 의하여 높은 인장하중을 견뎌야 하는데, 이러한 구조물의 기둥 역시 항상 인장하중을 받고 있으므로, 본 발명의 적용이 효과적이다.

【0027】 둘째, 얇은 막 구조로서 항상 인장하중을 받는 지붕 등의 구조에 본 발명을 도입할 경우, 시공의 편리함 및 유지 보수 등에 효과적이다.

【0028】 셋째, 케이블 구조로 된 다리의 꼭대기 타워는 항상 진동에 노출되어 있어, 본 발명의 하이브리드 섬유를 통해 보강된 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 방법 또는 장치를 적용할 경우, 진동의 변위를 조정할 수 있고 인장 응력 및 변형을 탐지하는 데에 효과적이다.

【도면의 간단한 설명】

【0029】 도 1은 강섬유 보강된 자기 콘크리트 구조물의 비저항 변화 거동을 나타내며, 도 1(a)는 인장 변형(tensile strain)이 없는 경우이고, 도 1(b)는 인장 변형(tensile strain)의 증가에 따른 비저항과 인장 강도(tensile stress)의 변화를 도시한 그림이다.

도 2는 일반적인 변형경화형 섬유보강 시멘트 복합재료의 인장 변형 경화 거동을 도식적으로 나타낸 그림이다.

도 3은 본 발명에서 사용된 강섬유(a)와 탄소섬유(b)의 사진이다.

도 4는 강섬유 단독 또는 강섬유와 탄소섬유의 혼합물인 하이브리드 섬유가 사용된 콘크리트 구조물의 전기-기계적(electromechanical) 거동을 관찰한 결과이다.

도 5는 1.0 vol%의 강섬유가 포함된 콘크리트 구조물에 대해서, 추가되는 탄소섬유의 양에 따른 전기-기계적(electromechanical) 거동 변화를 측정한 결과이다.

(도 5a: 탄소섬유 0 vol%, 도 5b: 탄소섬유 0.5 vol%, 도 5c: 탄소섬유 1.0 vol%, 도 5d: 탄소섬유 1.5 vol%).

도 6은 1.0 vol%의 강섬유가 포함된 콘크리트 구조물에 대해서, 탄소섬유의 양을 변화시켜 측정한 GF(gauge factor)값이다.

도 7은 1.5 vol%의 강섬유가 포함된 콘크리트 구조물에 대해서, 추가되는 탄소섬유의 양에 따른 전기-기계적(electromechanical) 거동 변화를 측정한 결과이다 (도 7a: 탄소섬유 0 vol%, 도 7b: 탄소섬유 0.25 vol%, 도 7c: 탄소섬유 0.5 vol%).

도 8(a)는 1.5 vol%의 강섬유가 포함된 콘크리트 구조물에 대해서, 탄소섬유의 양을 변화시켜 측정한 GF(gauge factor)값이고, 도 8(b)는 탄소섬유의 양의 변화에 따른 인장 강도(tensile stress) 값의 변화를 측정한 결과이다.

【발명을 실시하기 위한 구체적인 내용】

【0030】 이하에서는 본 발명의 기술적 특징을 구체적으로 살펴보기 위해 실시예와 도면을 참조하여 설명하고자 한다. 그러나 이는 본 발명의 가장 바람직한 일 실시예에 불과할 뿐이고 본 발명의 기술적 사상을 모두 대변하는 것은 아니므로, 본 발명의 출원 시점에 있어서 이들을 대체할 수 있는 다양한 균등물과 변형 예들이 있을 수 있음을 이해하여야 한다.

【0031】 일반적으로 콘크리트로 대표되는 시멘트계 복합체는 휨 및 인장하중 작용하에 있어서 초기균열이 발생한 이후 응력이 급격히 저하하는 취성적 성질을

가지고 있으며, 압축강도가 높지만 휨 및 인장강도가 낮아 공용중 균열이 발생하기 쉽고, 이러한 균열로부터 외부 열화인자가 침투하여 내부 철근의 발청을 유발하는 등 콘크리트구조물의 내구성 및 인성에 대한 문제점이 지적되어왔다.

【0032】 이러한 문제점을 해결하기 위하여 콘크리트에 강섬유(steel fiber)를 혼입하여 일반 콘크리트에 비하여 휨강도 및 인성을 증가시킨 강섬유보강 콘크리트가 사용되어 왔으나, 휨 및 인장하중 작용하에서 초기균열이 발생한 이후 변형의 증가와 함께 응력이 서서히 저하되는 준취성적 성질을 갖고 있으며, 휨 및 인장 파괴에 도달할 때까지 1~2개의 균열만이 발생할 뿐 균열이 국소화 되어 변형 능력의 향상 및 균열폭 제어가 곤란한 문제점이 존재하므로, 균열과 같은 미세 구조의 변화에 따른 전기 비저항의 변화 폭이 작은 문제점이 존재한다.

【0033】 한편, 최근 섬유보강 콘크리트보다 휨 및 인장성능, 균열제어성능 및 변형성능 등이 우수한 단섬유보강 시멘트 복합체의 제조기술이 연구되고 있으나 이 경우 폴리에틸렌(PE)섬유나 폴리비닐알콜(PVA) 섬유와 같은 마이크로 섬유만을 단독으로 사용하고 있어 최대응력 이후 연화구간에서 응력이 급격히 저하하거나 균열의 국소화가 급격히 진행되는 단점이 존재하고 있다.

【0034】 본 발명에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해, 매크로 섬유인 강섬유와 탄소섬유를 동시에 콘크리트 구조물에 적용하고, 최적화된 배합비를 실험적으로 확인함으로써, 콘크리트 구조물의 변형 경화(Strain hardening) 특성을 극대화하고, 전기 전도도를 향상시켜, 콘크리트 구조물의 균열과 같은 미세 변화를 보다 경제적이면서도 정확하게 관찰할 수 있는 방법과 장치를 제공하고자 한다.

【0035】일반적으로 인장변형이 없는 상태에서는 도1a와 같이 강섬유 보강된 콘크리트 구조물은 전기분극 현상에 기인하여 전기 비저항이 초기에는 증가하다가 시간이 흐름에 따라 안정화된 값을 갖게 된다.

【0036】하지만, 강섬유 보강된 콘크리트 구조물에 인장 변형(tensile strain)이 가해질 경우에는, 도1b의 그래프와 같이 인장 변형이 증가함에 따라 인장 응력(tensile stress) 역시 비례하여 증가하고, 전기 비저항(resistivity)은 감소하게 된다. 하지만, 최종균열강도(post cracking strength) 이상으로 인장 변형이 증가할 경우에는 인장 응력은 오히려 감소하게 되고, 전기 비저항은 더 이상 변화하지 않는 인장 응력이 감소하더라도 더 이상 변하지 않는다.

【0037】전기 비저항은 아래 식(1)과 같이 전기 저항(R)을 측정하고, 측정 단면적(A)과 측정되는 내부 전극 사이의 거리(L)로부터 계산될 수 있다.

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

【0038】

【0039】여기서 ρ 는 전기 비저항, R은 전기저항, A는 단면적, L은 두 개의 내부 전극 사이의 거리, 표본의 시점거리를 의미한다.

【0040】일반적으로 전기 비저항(resistivity)은 시료의 형상이나 구조에는 영향을 받지 않는 시료의 고유 물성에 해당하지만, 전기 저항(resistance)은 단면적과 내부 전극 사이의 길이와 같은 구조적 변수에 영향을 받게 되므로, 전기 저항

을 측정하여 전기 비저항으로 환산할 필요가 있다.

【0041】 변형 경화(strain hardening) 현상이 발생하는 콘크리트 구조물의 전기 비저항 측정을 통한 자기 손상 감지 능력을 평가하기 위하여, 단위 변형 당 저항 변화의 비율인 GF(gauge factor) 값을 사용하게 된다. 이러한 GF 값은 다음의 식 (2)와 같이, 인장 변형(tensile strain) 시점부터 균열 발생점(post cracking point)까지의 평균으로 계산될 수 있는데, 다음의 식 (2)에서는 도 1b의 0에서 ε_{pc} 까지의 인장 변형에 따른 전기 비저항(또는 전기 저항) 값의 변화율의 비를 측정하여 계산될 수 있다.

$$\text{【0042】} \quad GF = \frac{\Delta R / R_0}{\Delta \varepsilon}$$

$$\text{【0043】} \quad \rho = R \cdot \frac{A}{L}$$

$$\text{【0044】} \quad GF = \frac{\Delta \rho / \rho_0}{\Delta \varepsilon}$$

$$\text{【0045】} \quad GF_{pc} = \left| \frac{\Delta \rho_{pc} / \rho_0}{\Delta \varepsilon_{pc}} \right| = \frac{(\rho_0 - \rho_{pc}) \cdot 100}{\rho_0 \cdot \varepsilon_{pc}} \quad (2)$$

【0046】 여기서, ΔR 은 전기저항의 변화량, R_0 는 인장하중이 시작될 때의 전기저항값, $\Delta \varepsilon$ 은 인장변형의 변화량, ε_{pc} 는 균열 발생점에서의 인장변형값, $\Delta \rho$

는 전기 비저항값의 변화량, ρ_0 는 인장하중이 시작될 때의 전기 비저항값, $\Delta \rho_{pc}$ 는 균열 발생점에서의 전기 비저항값의 변화량, ρ_{pc} 는 균열 발생점에서의 전기 비저항값을 나타낸다.

【0047】

【0048】 도 2는 인장 변형의 증가에 따른 강섬유로 강화된 콘크리트 구조체의 일반적인 인장 변형 거동을 도식적으로 나타낸 것으로, 변형(strain) 초기에는 탄성 영역(I 영역)을 나타내다가, 변형이 증가할수록 응력이 증가하여 멀티플 크랙이 발생하는 인장 경화 거동(II 영역)을 나타낸 후, 더욱 변형이 증가함에 따라 크랙이 다수 발생하여 성장함으로써 오히려 응력이 감소하는 인장 연화(strain softening) 거동(III 영역)을 나타낸다. 인장 경화 현상이 발생하는 초기 균열시점에서의 인장 응력과 인장 변형은 각각 σ_{cc} 와 ε_{cc} 로 나타내며, 더 이상 인장 경화 거동을 보이지 않게 되는 최종 균열시점에서의 인장 응력과 인장 변형은 각각 σ_{pc} 와 ε_{pc} 로 나타낸다.

【0049】 통상적인 강화 콘크리트 구조체의 변형 경화 거동은 σ_{pc} 가 σ_{cc} 보다 높은 경우에 나타나게 되며, 변형 경화 거동 영역에서 콘크리트 구조체의 균열이나 미세 구조 변화를 감지하거나 모니터링 함으로써, 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 할 수 있다.

【0050】 본 발명에서 사용되는 변형 경화 거동을 갖는 콘크리트 구조물에는, 강섬유와 탄소섬유를 포함하는 하이브리드 섬유가 사용되었다. 탄소섬유와 강섬유가 혼합된 하이브리드 섬유를 소량으로 콘크리트 혼합물에 적용함으로써, 이러한 콘크리트 혼합물로 시공된 콘크리트 구조물의 인장 강도(tensile strength)와 연성(ductility)을 동시에 향상시킬 수 있는데, 매크로 섬유인 강섬유는 연성을 증가시키며 마이크로 섬유인 탄소섬유는 인장강도를 향상시키는데 효과적으로 기여하기 때문이다.

【0051】 하지만, 이러한 콘크리트 혼합물에 배합되는 보강 섬유의 사용량은 작업성(workability)으로 인해 제한되는데, 매크로 섬유의 경우 최대 2 vol%까지 사용 가능하고, 마이크로 섬유의 경우 최대 6 vol%까지 사용되는 것이 일반적이다.

【0052】 또한, 본 발명에서 마이크로 섬유로 사용되는 탄소섬유는 일반 금속 보강재에 비해 콘크리트 구조물 내부에 효과적으로 분포될 수 있을 뿐만 아니라 내부식성, 강도 등이 우수하며, 매우 작은 지름과 높은 종횡비(aspect ratio > 1500)를 갖고 있어, 콘크리트 구조물 내부에서 매크로 섬유인 강섬유와 콘크리트 사이의 계면에 분포하여 전지 전도도를 향상시키는데 효과적으로 기여할 수 있어, 콘크리트 구조물의 전기 비저항 변화 측정을 통한 본 발명의 자기 손상 감지 방법과 장치의 민감도를 높일 수 있다.

【0053】 이러한 하이브리드 보강재로 보강된 콘크리트 구조물의 자기 손상 감지 방법은, 강섬유(steel fiber)와 탄소섬유(carbon fiber)를 포함하는 하이브리드 섬유가 전체 조성물을 기준으로 1.25 ~ 2.0 vol%의 범위로 포함되도록 콘크리트

조성물에 배합한 후, 콘크리트 구조물을 제조하고, 상기 콘크리트 구조물에 전기를 흘려줄 수 있는 전극을 형성하고, 상기 전극에 전류를 공급하여 시간 변화에 따른 콘크리트 구조물의 비저항 변화를 측정하는 단계를 포함하는데, 상기 시간 변화에 따른 비저항 변화 측정은 콘크리트 구조물의 내구성 검사 주기, 또는 지진과 같은 특정한 사건이 발생한 직후 등 사용자가 필요한 시기를 직접 선택하여 결정하는 것도 또한 가능하다.

【0054】 이때 사용되는 콘크리트 조성물에는 콘크리트 조성물에는 강섬유가 1.0~1.5 vol%의 범위로 포함되고, 탄소섬유는 0.25~0.5 vol%의 범위로 포함되는 것이 바람직하며, 강섬유의 지름은 0.25~0.45 mm, 길이는 25~45 mm이고, 상기 탄소섬유의 지름은 0.005~0.01 mm, 길이는 10~17 mm인 것이 바람직한데, 이러한 조성물을 사용하여 콘크리트 구조물 전체에 걸쳐 시공할 수도 있지만, 균열 또는 손상이 예상되는 콘크리트 구조물의 특정 취약 부위에 대해서만 일부 시공하는 것도 가능하다.

【0055】 또한, 기존 콘크리트 건물에 대해서도 특정 취약 부위에 대해서만 보수 공사 형태로 본 발명의 하이브리드 섬유 보강재가 사용된 콘크리트 구조물을 일부분만 선택적으로 설치하는 것도 가능하며, 필요에 따라 전극의 위치와 수량을 다양하게 변화시키는 것도 또한 가능하다.

【0056】 본 발명의 다른 실시 형태인 콘크리트 구조물의 자기 손상 감지 장치, 강섬유(steel fiber)와 탄소섬유(carbon fiber)를 포함하는 하이브리드 섬유가 전체 조성물을 기준으로 1.25 ~ 2.0 vol%의 범위로 포함된 콘크리트 조성물로

형성된 콘크리트 구조물과 상기 콘크리트 구조물과 외부 전원을 전기적으로 연결하는 전극, 상기 전극부를 통해 전류를 공급하여 상기 콘크리트 구조물의 취약 부위의 시간에 따른 전기 비저항의 변화를 기록하는 제어부 및 상기 전극부와 상기 제어부를 전기적으로 연결하는 연결부를 포함한다.

【0057】 본 발명에서 콘크리트 구조물을 제조하는데 사용되는 콘크리트 조성물은, 규사 100 중량부에 대하여 시멘트는 75~85 중량부, 열분해 실리카는 5~10 중량부, 플라이 애시는 15~25 중량부, 고강도 혼화제는 1~10 중량부, 물은 20~30 중량부를 혼합하여 제조되며, 이때 사용되는 플라이 애시는 분말도가 3000~4000 cm^2/g 이고, 상기 열분해 실리카는 평균직경이 0.01~1 μm 이며, 상기 규사는 평균직경이 0.01~0.5 mm인 것이 바람직하다.

【0058】

【0059】 [실시예 1]

【0060】 본 발명에 사용되는 하이브리드 섬유로 보강된 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 성능을 살펴보기 위해서, 강섬유만을 보강재료로 사용한 콘크리트 구조물과 강섬유 및 탄소섬유를 포함하는 하이브리드 섬유를 보강재료로 사용한 콘크리트 조성물을 사용하여 각각 시편을 제작하고 이들의 GF 값을 측정하여 비교하였다.

【0061】 본 실시예에서 사용된 강섬유와 탄소섬유는 표 1의 재질을 사용하였으며, 이들의 사진은 도 3에 나타내었다. 강섬유만을 보강재료로 사용한 경우에는 전

체 콘크리트 조성물에서 강섬유가 1.5 vol%가 되도록 콘크리트 혼합물에 배합하였으며, 하이브리드 섬유를 사용하여 보강한 경우에는 강섬유가 1.0 vol%, 탄소섬유가 0.5 vol% 포함되도록 콘크리트 조성물에 혼합하였다.

【0062】 【표 1】

섬유의 종류	직경 [mm]	길이 [mm]	밀도[g/cc]	인장 강도[MPa]	탄성계수[GPa]
탄소섬유	0.005-0.01	10-17	1.81	4137	240
강섬유	0.25-0.45	25-45	7.9	2580	200

【0063】 상기 콘크리트 조성물을 사용하여 변형 경화된 콘크리트 구조물을 형성하는 구체적인 단계는 다음과 같다.

【0064】 시멘트, 플라이 애시(fly ash), 실리카 흙(silica fume), 규사(silica sand), 탄소섬유를 5분간 건조 혼합하는 제 1단계; 상기 제 1단계의 혼합물에 물을 부가한 후 3분간 혼합하는 제 2단계; 상기 제 2단계의 혼합물에 혼화제(plasticizer)를 부가한 후 5-10분간 혼합하는 제 3단계; 상기 제 3 단계의 혼합물에 강섬유를 부가한 후 다시 5분간 혼합하는 제 4단계; 상기 제 4단계의 혼합물을 몰드에 타설하고 미세한 진동을 주는 제 5단계; 상기 제 5단계의 혼합물을 플라스틱 시트로 덮어 상온에서 2일간 보관하는 제 6단계; 상기 제 6단계의 성형체를 몰드에서 꺼내고 14일간 습윤 양생하는 제 7단계; 상기 제 7단계의 성형체를 12~36시간 고온에서 말리는 제 8단계; 및 상기 제 8단계의 성형체에 대해 2~3층의 폴리우레탄을 뿌리는 제 9단계;를 거쳐 제조된다.

【0065】 이때 사용되는 플라이 애시는 분말도가 3000~4000 cm^2/g 이고, 상기 실리카 흡는 평균직경이 0.01~1 μm 이며, 상기 규사는 평균직경이 0.01~0.5 mm의 범위를 갖는다. 또한 상기 규사 100 중량부에 대하여 상기 시멘트는 75~85 중량부, 상기 실리카 흡은 5~10 중량부, 상기 플라이 애시는 15~25 중량부, 상기 혼화제는 1~10 중량부, 상기 물은 20~30 중량부의 범위로 혼합하였다.

【0066】 강섬유만을 보강재로 사용한 경우에는 상기 제 1단계에서 탄소섬유를 제외하고는 동일한 방법으로 콘크리트 시편을 제조하였다. 이렇게 제조된 각각의 콘크리트 시편에 은 페이스트(silver paste)를 전체로 감싸 준 후 동박 테이프(copper tape)를 붙여 콘크리트와 테이프 사이에 전기 전도성을 높여준 후, 상기 콘크리트 시편에 인장 하중을 가하면서 전기 저항의 변화를 측정하였으며, 각각의 시편에 대한 실험 결과를 정리하면 다음의 표 2 및 도 4와 같다.

【0067】 【표 2】

	인장 변형 $\epsilon_{pc}(\%)$	인장 응력 $\sigma_{pc}(\text{MPa})$	평균 균열 수 Npc	GF 값
강섬유	0.53	7.64	10	99.85
하이브리드 섬유	0.49	6.81	7	208.23

【0068】 상기 표 2의 결과와 도 4의 기계-전기적(mechanical electrical) 응답 거동(response behavior)을 살펴보면, 강섬유만을 보강재로 사용한 콘크리트 시편과 강섬유와 탄소섬유를 모두 포함한 하이브리드 섬유를 보강재로 사용한 콘크리트 시편 모두 전형적인 변형 경화 거동을 나타내었지만, 강섬유만을 사용한 경우에

비해 하이브리드 섬유가 사용된 콘크리트 시편이 인장 변형과 인장 응력면에서는 약간 감소되었다.

【0069】 하지만, 단위 인장 변형에 따른 비저항의 변화를 나타내는 GF값이 2 배 이상으로 높아짐을 확인할 수 있었으며, 본 발명에서 해결하고자 하는 콘크리트 구조물의 자기 손상 감지에 더욱 유리함을 확인할 수 있었다.

【0070】 [실시예 2]

【0071】 앞서 [실시예 1]와 동일한 방법으로 하이브리드 섬유를 사용하여 콘크리트 시편을 제조하였으며, 이때 사용되는 강섬유의 양은, 콘크리트 조성물의 총 배합량의 1.0 vol%로 고정하고, 탄소섬유의 양을 총배합량의 0 vol%, 0.5 vol%, 1.0 vol% 및 1.5 vol%로 변화시켜 콘크리트 시편을 제작한 후, 동일한 방법으로 기계-전기적 응답 거동을 관찰하였으며, 그 결과는 도 5a 내지 5d에 나타내었다.

【0072】 도 5a는 탄소섬유가 사용되지 아니하고 강섬유만이 1 vol% 사용된 콘크리트 시편의 기계-전기적 응답 거동을 의미하며, 도 5b는 내지 도 5d는 각각 강섬유 1vol%에 탄소섬유 0.5, 1 및 1.5 vol%가 포함된 하이브리드 섬유를 사용하여 제조된 콘크리트 시편에 대한 기계-전기적 응답 거동을 나타낸다.

【0073】 강섬유만이 1.0 vol%포함된 경우와 강섬유 1.0 vol% 및 탄소섬유 0.5 vol%를 포함하는 경우만이 전형적인 변형 경화(strain hardening) 거동을 나타내었으며, 탄소섬유의 사용량이 증가되어 1.0 또는 1.5 vol% 포함된 경우에는 변형

연화(strain softening) 거동을 나타내어, 본 발명에서 해결하고자 하는 콘크리트 구조물의 자기 손상 감지에 적절하지 않음을 알 수 있었다.

【0074】 초기균열이 발생한 이후 인장변형이 증가함에 따라 그 인장저항능력이 감소하게 되면, 다수의 미세 균열이 생성되는 것이 아니라, 하나의 균열이 점점 그 폭이 증가하게 된다. 따라서 구조물의 내구수명을 단축 시킬 뿐만 아니라, 하중 저항능력도 저하되게 된다.

【0075】 상기 결과를 토대로 각각의 경우에 대한 GF 값을 계산하여 비교한 결과를 도 6에 나타내었으며, 강섬유가 1.0 vol%, 탄소섬유가 0.5 vol%의 양으로 혼합된 콘크리트 시편의 GF 값이 가장 높은 값을 가짐을 확인할 수 있었다.

【0076】 [실시예 3]

【0077】 앞서 [실시예 2]와 동일한 방법으로 하이브리드 섬유를 사용하여 콘크리트 시편을 제조하였으며, 이때 사용되는 강섬유의 양은, 콘크리트 조성물의 총 배합량의 1.5 vol%로 고정하고, 탄소섬유의 양을 각각 총배합량의 0 vol%, 0.25 vol% 및 0.5 vol%로 변화시켜 콘크리트 시편을 제작한 후, 동일한 방법으로 기계-전기적 응답 거동을 관찰하였으며, 그 결과는 도 7a 내지 7c에 나타내었다.

【0078】 도 7a는 탄소섬유가 사용되지 아니하고 강섬유만이 1.5 vol% 사용된 콘크리트 시편의 기계-전기적 응답 거동을 의미하며, 도 7b와 도 7c는 각각 강섬유 1.5vol%에 탄소섬유 0.25 및 1.0 vol%가 포함된 하이브리드 섬유를 사용하여 제조

된 콘크리트 시편에 대한 기계-전기적 응답 거동을 나타낸다.

【0079】 강섬유만이 1.5 vol%포함된 경우와 강섬유 1.5 vol% 및 탄소섬유 0.25 vol% 또는 0.50 vol%를 포함하는 경우만이 전형적인 변형 경화(strain hardening) 거동을 나타내었으며, 탄소섬유의 사용량이 증가되어 1.0 vol% 포함된 경우에는 앞서 실시예 2에서 확인한 바와 같이 변형 연화(strain softening) 거동을 나타내어, 본 발명에서 해결하고자 하는 콘크리트 구조물의 자기 손상 감지에 적절하지 않았다.

【0080】 상기 결과를 토대로 각각의 경우에 대한 GF 값을 계산하여 비교한 결과와 인장 강도의 측정결과를 각각 도 8a와 도 8b에 나타내었으며, 강섬유가 1.5 vol%, 탄소섬유가 0.5 vol%의 양으로 혼합된 콘크리트 시편의 GF 값이 가장 높은 값을 가짐을 확인할 수 있었으며, 인장 강도(tensile stress)의 변화 역시 탄소 섬유의 양이 0.5 vol%까지 증가함에 따라 크게 변화하지 않고 유지되고 있음을 확인할 수 있었다.

【특허청구범위】

【청구항 1】

콘크리트 구조물의 자기 손상 감지 방법에 있어서,

균열 또는 손상이 예상되는 상기 콘크리트 구조물의 취약 부위를, 강섬유 (steel fiber)와 탄소섬유(carbon fiber)를 포함하는 하이브리드 섬유가 전체 조성 물을 기준으로 1.25 ~ 2.0 vol%의 범위로 포함된 콘크리트 조성물을 사용하여 형성 하는 제 1 단계;

상기 콘크리트 조성물을 사용하여 형성된 상기 콘크리트 구조물의 취약 부위 에 전극을 형성하는 제 2 단계; 및

상기 전극에 전류를 공급하여 시간 변화에 따른 콘크리트 구조물의 취약 부 위의 비저항 변화를 측정하는 제 3 단계;를 포함하는 하이브리드 섬유를 통해 보강 된 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 방법.

【청구항 2】

제1항에 있어서,

상기 콘크리트 조성물에는 강섬유가 1.0 ~ 1.5 vol% 포함되고, 탄소섬유는 0.25 ~ 0.5 vol%의 범위로 포함되는 것을 특징으로 하는, 하이브리드 섬유를 통해 보강된 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 방법.

【청구항 3】

제1항에 있어서,

상기 강섬유의 지름은 0.25 ~ 0.45 mm, 길이는 25 ~ 45 mm이고, 상기 탄소섬유의 지름은 0.005 ~ 0.01 mm, 길이는 10 ~ 17 mm인 것을 특징으로 하는, 하이브리드 섬유를 통해 보강된 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 방법.

【청구항 4】

제1항에 있어서,

상기 콘크리트 조성물에는, 규사 100 중량부에 대하여 시멘트는 75 ~ 85 중량부, 열분해 실리카는 5 ~ 10 중량부, 플라이 애시는 15 ~ 25 중량부, 고강도 혼화제는 1 ~ 10 중량부, 물은 20 ~ 30 중량부가 포함되는 것을 특징으로 하는, 하이브리드 섬유를 통해 보강된 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 방법.

【청구항 5】

제4항에 있어서,

상기 플라이 애시는 분말도가 3000 ~ 4000 $\mu\text{m}^2/\text{g}$ 이고, 상기 열분해 실리카는 평균직경이 0.01 ~ 1 μm 이며, 상기 규사는 평균직경이 0.01 ~ 0.5 mm인 것을 특징으로 하는, 하이브리드 섬유를 통해 보강된 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 방법.

【청구항 6】

콘크리트 구조물의 자기 손상 감지 장치에 있어서,

강섬유(steel fiber)와 탄소섬유(carbon fiber)를 포함하는 하이브리드 섬유가 전체 조성물을 기준으로 1.25 ~ 2.0 vol%의 범위로 포함된 콘크리트 조성물로

형성된, 균열 또는 손상이 예상되는 콘크리트 구조물의 취약 부위;

상기 취약 부위를 외부 전원과 전기적으로 연결하는 전극부;

상기 전극부를 통해 전류를 공급하여 상기 콘크리트 구조물의 취약 부위의 시간에 따른 전기 비저항의 변화를 기록하는 제어부; 및

상기 전극부와 상기 제어부를 전기적으로 연결하는 연결부;를 포함하는 하이브리드 섬유를 통해 보강된 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 장치.

【청구항 7】

제6항에 있어서,

상기 콘크리트 조성물에는 강섬유가 1.0 ~ 1.5 vol%포함되고, 탄소섬유는 0.25 ~ 0.5 vol%의 범위로 포함되는 것을 특징으로 하는, 하이브리드 섬유를 통해 보강된 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 장치.

【청구항 8】

제6항에 있어서,

상기 강섬유의 지름은 0.25 ~ 0.45 mm, 길이는 25 ~ 45 mm이고, 상기 탄소섬유의 지름은 0.005 ~ 0.01 mm, 길이는 10 ~ 17 mm인 것을 특징으로 하는, 하이브리드 섬유를 통해 보강된 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 장치.

【청구항 9】

제6항에 있어서,

상기 콘크리트 조성물에는, 규사 100 중량부에 대하여 시멘트는 75 ~ 85 중

량부, 열분해 실리카는 5 ~ 10 중량부, 플라이 애시는 15 ~ 25 중량부, 고강도 혼화제는 1 ~ 10 중량부, 물은 20 ~ 30 중량부가 포함되는 것을 특징으로 하는, 하이브리드 섬유를 통해 보강된 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 장치.

【청구항 10】

제9항에 있어서,

상기 플라이 애시는 분말도가 3000 ~ 4000 cm^2/g 이고, 상기 열분해 실리카는 평균직경이 0.01 ~ 1 μm 이며, 상기 규사는 평균직경이 0.01 ~ 0.5 mm인 것을 특징으로 하는, 하이브리드 섬유를 통해 보강된 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 장치.

【요약서】

【요약】

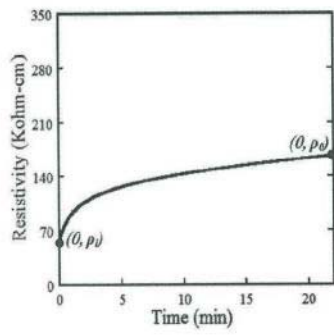
본 발명은 균열 또는 손상이 예상되는 콘크리트 구조물의 취약 부위의 균열과 크랙과 같은 미세구조 변화를 보다 정확하고 민감하게 확인하거나 모니터링 하기 위한 하이브리드 섬유가 배합된 콘크리트 구조물의 균열 또는 손상 자기 감지 방법 및 장치에 관한 것으로, 탄소섬유와 강섬유를 포함하는 하이브리드 섬유를 보강재로 사용하여 콘크리트 구조물이 변형 경화 거동을 나타내도록 함과 동시에 비저항 측정을 통해 손상을 감지할 수 있는 시스템을 제공할 수 있으며, 기존의 강섬유만을 단독으로 사용한 경우에 비해 높은 GF값을 갖는 장점이 있고, 특별한 관리 또는 주의가 요구되는 콘크리트 구조물의 취약 부위만을 도전성을 갖는 하이브리드 섬유가 보강된 고인성 콘크리트 조성물로 마감하거나 시공한 후, 일정한 시간 간격 또는 원하는 점검 시점에 간단히 설치된 전극을 통해 전류를 흘려주어 비저항을 모니터링 함으로써, 콘크리트 구조물의 균열 정도 또는 손상 상태를 효과적이면서도 경제적으로 간단히 진단할 수 있는 효과가 있다.

【대표도】

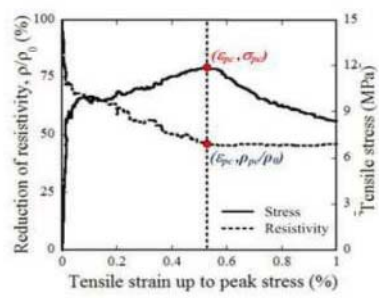
도 6

【도면】

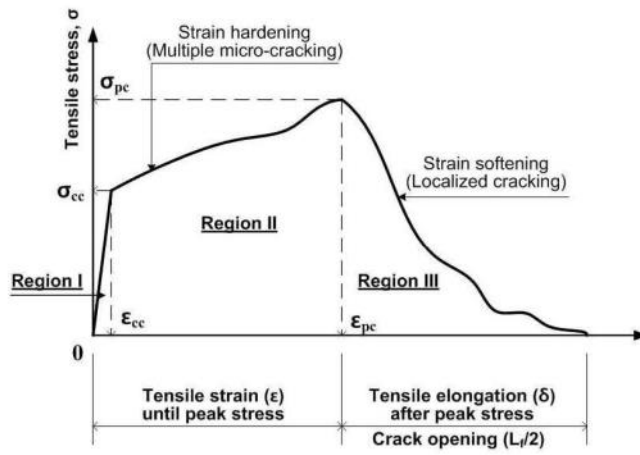
【도 1a】



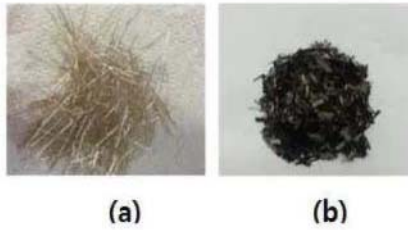
【도 1b】



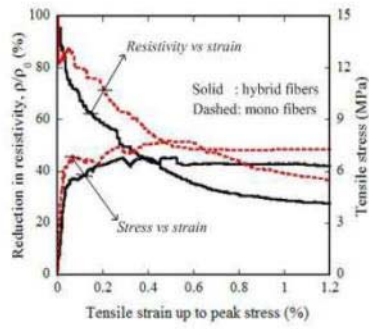
【도 2】



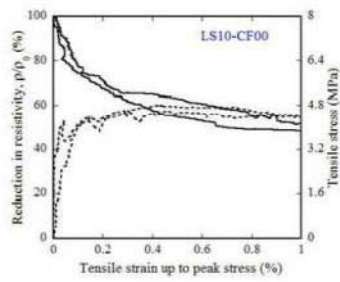
【도 3】



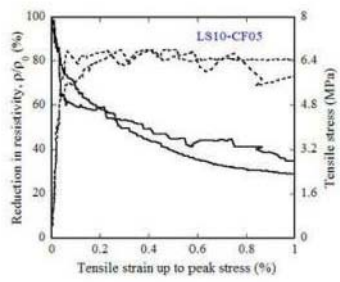
【도 4】



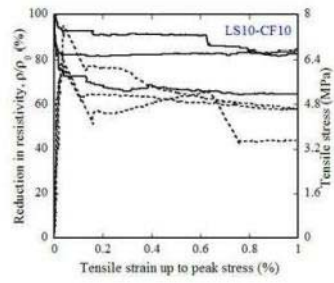
【도 5a】



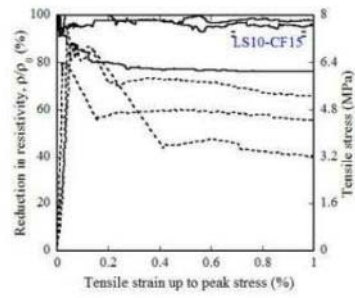
【도 5b】



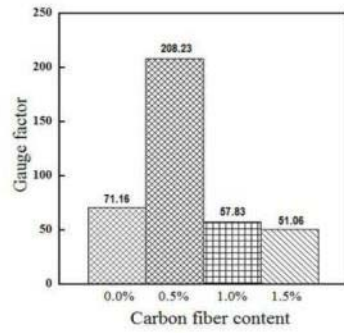
【도 5c】



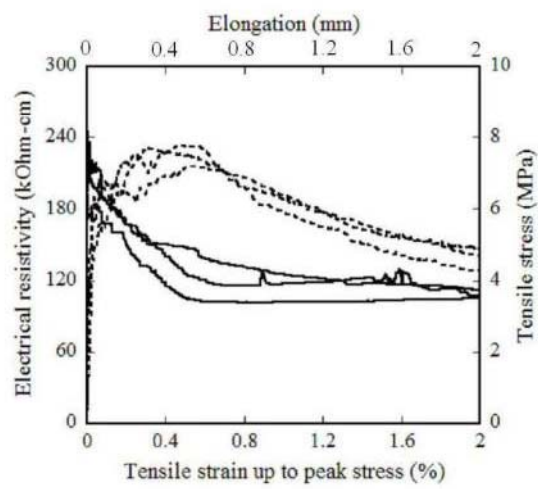
【도 5d】



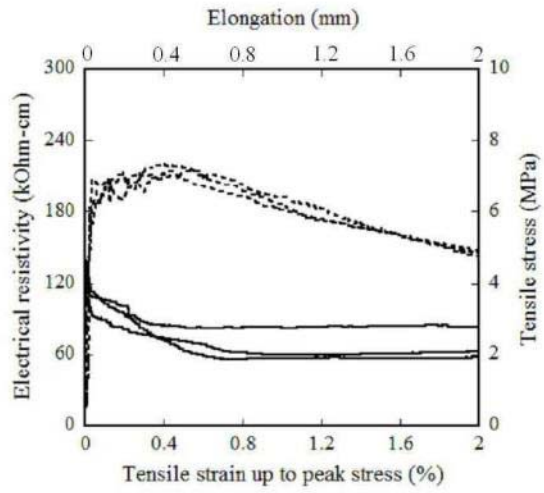
【도 6】



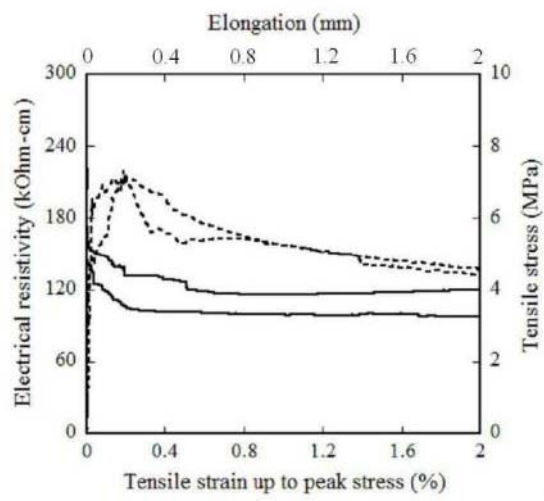
【도 7a】



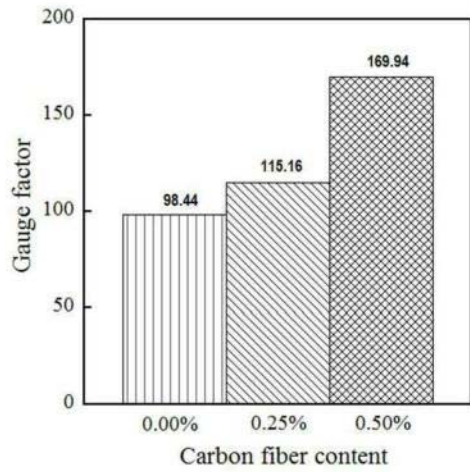
【도 7b】



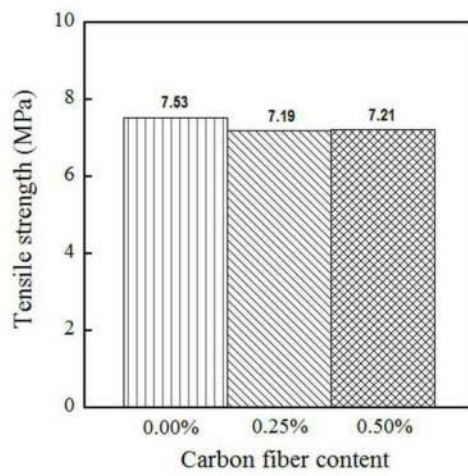
【도 7c】



【도 8a】



【도 8b】





Comparative electromechanical damage-sensing behaviors of six strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites under direct tension

Duy Liem Nguyen, Jiandong Song, Chatchai Manathsombat, Dong Joo Kim*

Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, 98 Gunja-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-747, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 April 2014

Received in revised form 31 August 2014

Accepted 29 September 2014

Keywords:

A. Fibers

B. Fiber/matrix bond

B. Electrical properties

B. Mechanical properties

ABSTRACT

This research investigates the electromechanical damage-sensing behavior of strain-hardening steel fiber-reinforced cement composites (SH-SFRCs) with six types of steel fibers (1.5% volume fraction content) within an identical mortar matrix (90 MPa). The six types of steel fibers studied are long twisted (T30/0.3), long smooth (S30/0.3), long hooked (H30/0.375), medium twisted (T20/0.2), medium smooth (S19/0.2), and short smooth (S13/0.2) steel fibers. The damage-sensing behavior was evaluated by measuring the changes in the electrical resistance during direct tensile tests. The electrical resistivity of the SH-SFRCs clearly decreased as the tensile strain increased until the post-cracking point, owing to the generation of multiple micro-cracks during strain-hardening. All the SH-SFRCs investigated had nominal gauge factors ranging between 50 and 140; these values are much higher than the commercially conventional gauge factor, which involves metal and is around 2. Both T30/0.3 and T20/0.2 produced the highest gauge factor, i.e., the best damage-sensing capacity, whereas S13/0.2 produced the highest electrical conductivity.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Structural health monitoring (SHM) refers to the implementation of damage detection strategies for engineering structures, such as changes to their material and/or geometric properties, which adversely affect the structures' performances. Numerous researches have been performed on SHM to detect damage to civil infrastructure due to rapid deterioration, as well as to evaluate the current ability of the infrastructure to perform its intended functions over a long term. Further, the techniques for monitoring structural health have rapidly developed. Nevertheless, the sensors used in the system have the disadvantages of high cost and low durability; moreover, the use of sensors leads to the degradation of the load-carrying capacity of the structural members embedding them [1].

To overcome these limitations, cement-based strain sensors were developed, and their sensing abilities were successfully improved by incorporating electrically conductive fibers [2–7], conductive nano particles [8–14], and conductive metals [15] or their combinations [16–20]. Self damage-sensing construction

materials are currently classified as multifunctional or smart materials [21].

A few researchers have also reported the self-sensing behavior of steel-fiber reinforced concrete. Chung [16] and Wen and Chung [17] investigated the piezoresistivity of cement-based materials containing steel fibers and reported the self-sensing capacity of steel fiber-reinforced cementitious composites (SFRCs). However, their results were limited in the elastic region because the SFRCs they studied could not exhibit tensile strain-hardening behavior that requires some conditions for reinforcing fibers [22,23]. Nevertheless, their results led to considerable interest in the self-sensing capacity of cement-based materials containing steel fibers. Strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites (SH-SFRCs) are characterized by tensile strain-hardening behavior accompanied with multiple micro-cracks. Further, they have demonstrated much higher load carrying and energy absorption capacities than normal concrete [24,25]. If SH-SFRCs could exhibit self damage-sensing behavior as well, they would be more attractive to civil engineers as multifunctional materials for the development of robust, tough, and durable civil infrastructure.

However, there is very little information regarding the factors that influence the electromechanical behavior of SH-SFRCs. Among the influential factors, the type of fiber is expected to significantly

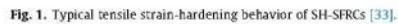
* Corresponding author.

E-mail address: djkim75@sejong.ac.kr (D.J. Kim).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.09.037>
1359-8368/© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

The change of electrical resistivity of SH-SFRCs under direct tensile load is shown in Fig. 2: Fig. 2a shows the typical change in the electrical resistivity of SH-SFRCs owing to electrical polarization before applying tensile load whereas Fig. 2b shows the typical change in the electrical resistivity of SH-SFRCs under direct tension. As shown in Fig. 2a, under electric current without tensile load, the electrical resistivity rapidly increased for the first 10 min owing to the electrical polarization and became stable after 20 min. Dielectric materials including cement-based composites generally produced the electrical polarization under an applied DC electrical field: when the polarization-induced electrical field and the applied DC electrical field are opposite in direction, the polarization increased the electrical resistivity with time [30,36]. Many researchers have reported about the electrical polarization

An experimental procedure was conducted to investigate the effects of fiber types on the electrical conductivity and electromechanical behavior of SH-SFRCS under direct tension. The following six types of steel fibers were investigated: long twisted (T30/0.3), long smooth (S30/0.3), long hooked (H30/0.375), medium twisted (T20/0.2), medium smooth (S19/0.2), and short smooth (S13/0.2) steel fibers. The content of the steel fibers was 1.5% by volume in all the specimens.



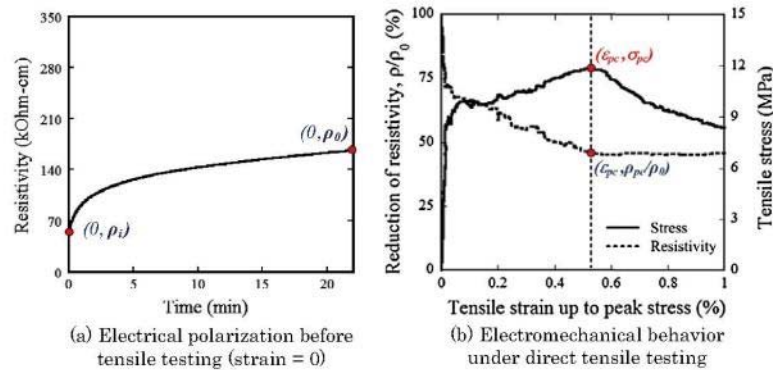


Fig. 2. Typical electromechanical behavior of strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites (SH-SFRCs).

3.1. Materials and specimen preparation

The material and electrical properties of the six steel fiber types investigated in the experiments are summarized in Table 1 while the composition and compressive strength of the mortar matrix are given in Table 2. Both long (T30/0.3) and medium (T20/0.2) twisted fibers had a triangular section and three ribs within the fiber length. A Hobart type laboratory mixer with a capacity of 20 L was used for mixing. Cement, silica fume, fly ash, and sand were first dry-mixed for 10 min. Water was then added and mixed for 5 min. A polycarbonate-based superplasticizer was also gradually added and further mixed for approximately 5 min. When the mortar mixture showed the appropriate workability and viscosity for achieving uniform fiber distribution, the steel fibers were carefully added into the mortar mixture manually and mixed again for 5 min. And, the mortar mixture with the fibers was poured into molds from one end of the specimen to the other end using a wide scoop. The specimens were slightly vibrated to minimize the air bubbles present inside them. The specimens' casts were then covered in plastic sheets and placed in a laboratory at room temperature for 2 days prior to demolding. After demolding, the specimens were cured in a water tank at 25 °C for 14 days. After curing, the specimens were removed from the water tank. Subsequently, they were dried at 70 °C in a drying oven for at least 12 h. All the specimens were tested at the age of 18 days. To measure the electrical resistivity of the specimens, a layer of silver paste was first applied onto the surfaces of the specimens to enhance the electrical conductivity between the copper tapes and specimens; subsequently, the copper tapes were attached on the silver-paste layer, as shown in Fig. 3. Besides, steel wire meshes were used to reinforce both

ends of specimens for preventing failure of the specimens outside of the gauge length as well as cracks at the electrode locations. The electrical resistivity of the steel fiber was measured to be between 1.94×10^{-8} and 2.06×10^{-8} kΩ-cm (Table 1).

3.2. Test setup and procedure

All the specimens were placed in a chamber with constant temperature (at 20 °C) and relative humidity (at 70%). Then the electrical resistivities of all the specimens were measured under no tension to investigate the effect of fiber type on the electrical resistivity of SH-SFRCs. Under direct tension, the setup for the measurement of the electromechanical behavior of SH-SFRCs was illustrated in Fig. 3: the geometry of tensile specimen is shown in Fig. 3a, while the system for measuring the elongation and electrical resistivity of the specimen under tension is shown in Fig. 3b. The electrical resistivity was measured using a multimeter (Fluke 8846A). As shown in Fig. 3b, the specimen was subjected to direct tension using a universal testing machine (UTM) with displacement control. The applied speed of the machine displacement was 1.0 mm/min. The data acquisition frequency was 1 Hz. To maintain pure tensile conditions, both ends of the specimen were designed to connect with hinge systems. During the testing, the load history was obtained from the load cell (5-tonf capacity) attached to the top of the specimen while the elongation history of the specimen was measured using two linear variable transformers (LVDTs), as shown in Fig. 3b. Prior to applying the load, the specimen was carefully aligned to minimize the effects of eccentricity on the measured tensile response. The direct tensile tests were carried out at temperatures between 3 and 10 °C and

Table 1
Material and electrical properties of the investigated steel fibers.

Notation	Fiber type	Diameter (mm)	Length (mm)	Aspect ratio (L/D)	Density (g/cc)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Electrical resistivity, ρ_f (kΩ-cm)
T30/0.3	Long twisted	0.3 ^a	30	100	7.9	2428 ^b	200	1.94×10^{-8}
S30/0.3	Long smooth	0.3	30	100	7.9	2580	200	2.06×10^{-8}
H30/0.375	Long hooked	0.375	30	80	7.9	2311	200	1.94×10^{-8}
T20/0.2	Medium twisted	0.2 ^a	20	100	7.9	2676 ^b	200	1.94×10^{-8}
S19/0.2	Medium smooth	0.2	19	95	7.9	2788	200	2.06×10^{-8}
S13/0.2	Short smooth	0.2	13	65	7.9	2788	200	2.06×10^{-8}

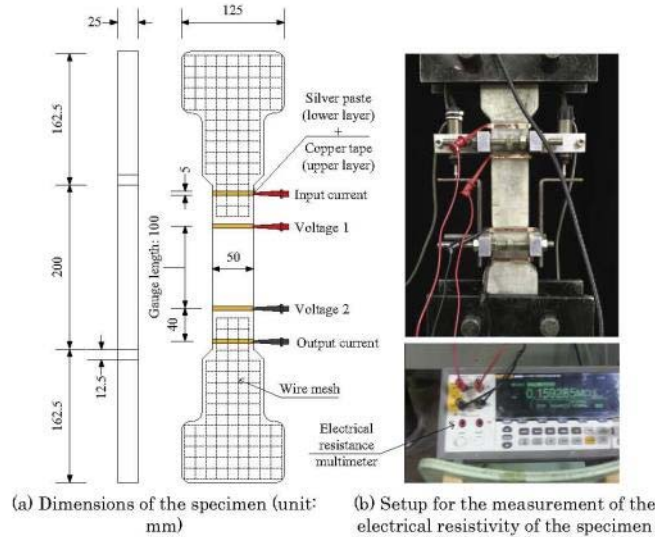
^a Equivalent diameter.

^b Tensile strength of fiber after twisting.

Table 2

Composition of the mortar matrix mixture by weight ratio, and their compressive strength.

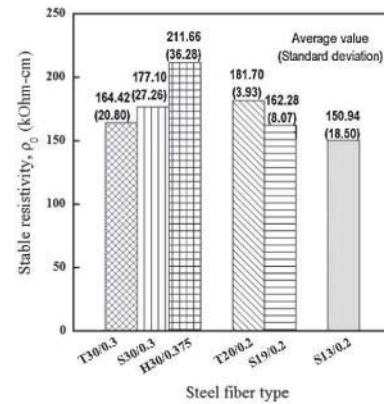
Cement (Type III)	Silica fume	Silica sand	Fly ash	Super-plasticizer	Water	f'_c (MPa)
0.80	0.07	1.00	0.20	0.04	0.26	90

**Fig. 3.** Test setup for the measurement of the electrical resistance of the specimen under direct tension.

relative humidity values between 40% and 60%. The electrical resistance was simultaneously measured during the tests by using the four-probe method. The tensile load was applied after stabilizing the electrical resistivity for 20 min, and subsequently, the tensile load, elongation, and corresponding electrical resistance were recorded.

4. Results and discussion

All six series of SH-SFRCs exhibited tensile strain-hardening behavior accompanied with multiple micro-cracks. However, their electrical resistivity and electromechanical performances were quite different according to the type of fibers applied as shown in Figs. 4 and 5. The multiple cracking behavior of all the series can be found in Fig. 6. The electromechanical behavior, tensile stress and electrical resistivity, of SH-SFRCs were investigated as the tensile strain increased from zero to of 2% strain (2 mm elongation) as shown in Fig. 5. Although the curves for the reduction of resistivity versus strain responses in Fig. 5b are more scattered than the others shown in Fig. 5, the results are generally acceptable. The six series of SH-SFRCs can be classified into three groups according to the length of the fibers: long-fiber group (T30/0.3, S30/0.3, and H30/0.375), medium-fiber group (T20/0.2 and S19/0.2), and short-fiber group (S13/0.2). The electrical conductivity, self damage-sensing capacity, and tensile resistance of the SH-SFRCs will be discussed in the subsequent sections.

**Fig. 4.** Effects of fiber type on the electrical resistivity of SH-SFRCs.

4.1. Electrical conductivity of SH-SFRCs

The effects of various steel fibers on the electrical resistivity of SH-SFRCs were evaluated by investigating the initial resistivity (ρ_i).

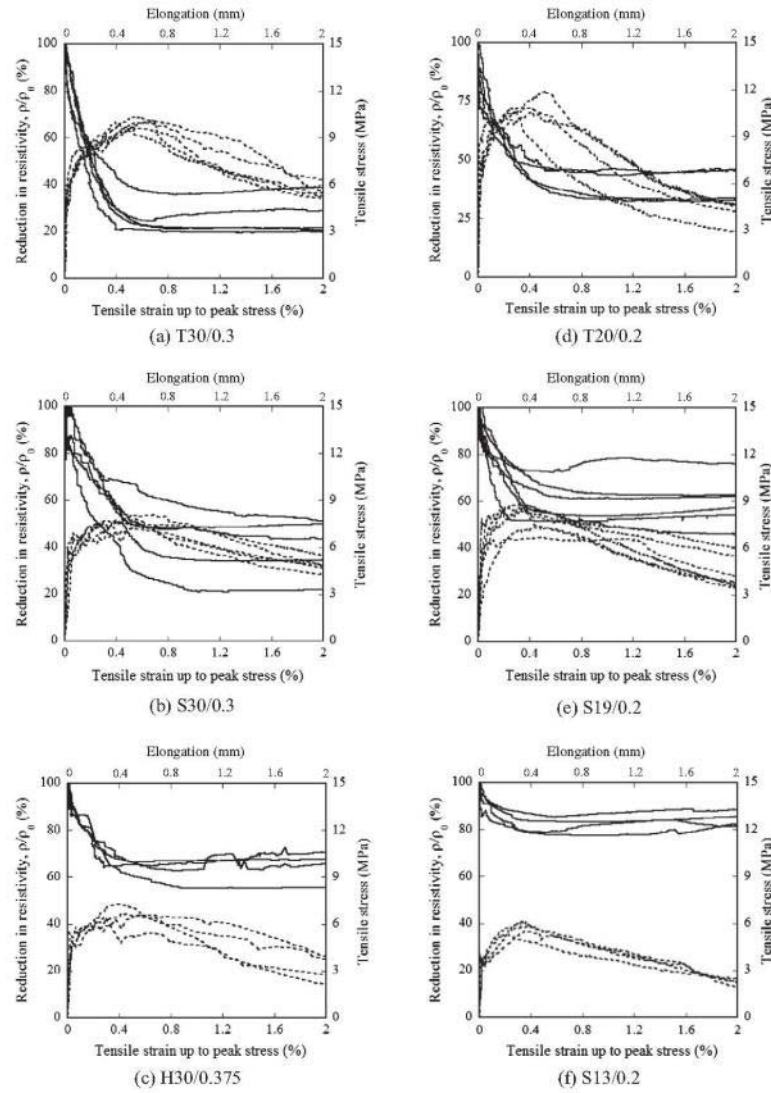


Fig. 5. Effects of fiber type on the tensile responses (dashed curves) and piezoresistivity responses (solid curves) of SH-SFRCs.

and the stable resistivity after the electric polarization (ρ_o). The electrical resistance of SH-SFRCs was measured under a constant temperature of 20 °C and relative humidity of 70%. The electrical resistance was then converted into electrical resistivity using equation [1]. The averaged electrical resistivity of each series is presented in Table 3 and Fig. 4. The ρ_o of all six series varied between 150.94 and 211.66 k Ω -cm and was greater than the ρ_i of them that ranged between 62.44 and 106.49 k Ω -cm. The ρ_o

was 164.42, 177.10, 211.66, 181.70, 162.28, and 150.94 k Ω -cm for SH-SFRC containing T30/0.3, S30/0.3, H30/0.375, T20/0.2, S19/0.2, and S13/0.2, respectively.

The SH-SFRCs with S13/0.2 fibers exhibited the highest electrical conductivity, whereas those with H30/0.375 fibers exhibited the lowest electrical conductivity. The electrical conductivity of the SH-SFRCs mostly depends on the network of conductive steel fibers in the composite [34]. The mortar matrix itself has very

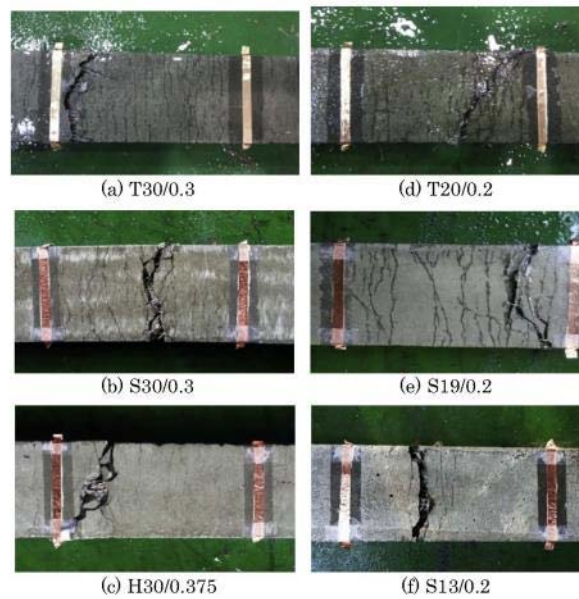


Fig. 6. Effects of fiber type on the multiple micro-cracking behavior of SH-SFRCs under direct tension.

Table 3

Electrical resistivity of strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites (SH-SFRCs) at the temperature of 20 °C and relative humidity of 70%.

Series	T30/0.3	S30/0.3	H30/0.375	T20/0.2	S19/0.2	S13/0.2
Initial resistivity, ρ_i (k Ω -cm)	62.44 (12.34)	76.28 (16.70)	106.49 (27.87)	84.72 (8.21)	79.75 (2.73)	92.56 (17.68)
Stable resistivity, ρ_0 (k Ω -cm)	164.42 (20.80)	177.10 (27.26)	211.66 (36.28)	181.70 (3.93)	162.28 (8.07)	150.94 (18.50)

Table 4

Effects of fiber types on electro-tensile parameters of SH-SFRCs.

Fiber	Strain, ϵ_{pc} (%)	Stress, σ_{pc} (MPa)	Average number of crack, N_{pc}	Resistivity, ρ_{pc} (k Ω -cm)	Resistivity at start of loading, ρ_0 (k Ω -cm)	Gauge factor, GF
T30/0.3	0.55 (0.11)	10.00 (0.27)	16.40 (0.55)	55.54 (21.24)	210.64 (41.64)	138.09 (35.69)
S30/0.3	0.53 (0.15)	7.64 (0.32)	10.20 (2.59)	109.06 (31.78)	234.84 (18.64)	99.85 (9.06)
H30/0.375	0.42 (0.18)	6.72 (0.34)	5.67 (1.15)	175.03 (12.40)	269.87 (13.52)	88.50 (25.72)
T20/0.2	0.41 (0.10)	10.99 (0.61)	12.50 (0.58)	113.58 (34.00)	252.51 (58.54)	139.68 (28.27)
S19/0.2	0.38 (0.07)	8.05 (0.85)	15.3 (2.52)	352.11 (54.59)	562.57 (71.29)	99.70 (26.01)
S13/0.2	0.33 (0.07)	5.69 (0.36)	3.50 (0.58)	628.97 (33.02)	764.10 (73.72)	52.90 (3.99)

The standard deviations are provided in brackets. ρ_{pc} and ρ_0 were measured under room temperature and humidity.

low electrical conductivity; hence, the addition of steel fibers, which are highly conductive, much enhances the electrical conductivity. The short smooth (S13/0.2) fibers have the largest contact area between the fibers and surrounding mortar. In addition, the distribution of shorter fibers within the matrix is generally better

than that of longer fibers. These reasons result the different electrical conductivities of SH-SFRCs.

The enhanced electrical conductivity of the SH-SFRCs due to the addition of electrically conductive steel fibers in mortar matrices has various applications such as electrical grounding, lighting

protection, resistance heating, static charge dissipation, electromagnetic interference shielding, thermoelectric energy generation, and cathodic protection [21]. The electrical conductivities of the SH-SFRCs observed in this study, which differed with the type of steel fiber, provide useful information for the development of SH-SFRCs with high electrical conductivities as a non-structural function, in addition to their superior mechanical resistance.

4.2. Self damage-sensing capacity and tensile resistance of SH-SFRCs

The change in electrical resistivity versus strain responses of the SH-SFRCs under direct tension are plotted in Fig. 5 using solid curves. For all six series, as the tensile strain increased, the electrical resistivity significantly decreased prior to the post-cracking point. Four parameters – the nominal gauge factor (GF), number of micro-cracks (N_{pc}), tensile strength (σ_{pc}), and strain capacity (ϵ_{pc}) – of the SH-SFRCs were investigated to evaluate the electromechanical behavior of SH-SFRCs; they are listed in Table 4. The

number of cracks was counted at both front and back side within the gauge length of specimens and then averaged.

The reduction in the electrical resistivity per unit tensile strain was calculated as GF using equation [2]. Even though all six series showed identical tendency in their electromechanical responses under tension, the GF differed with the type of steel fiber. The GF s of each series – averaged from at least four specimens – are presented in Table 4; the larger the GF , the higher the self damage-sensing capacity. Fig. 7a shows a graphical comparison of the effects of the fiber type on the averaged GF s of all six series. The GF s of the long-fiber group were obtained as 138.09, 99.85, and 88.50 for SH-SFRC containing T30/0.3, S30/0.3, and H30/0.375, respectively. The GF s of the medium-fiber group were measured as 139.68 and 99.70 for SH-SFRC containing T20/0.2 and S19/0.2, respectively. Finally, the GF of the short-fiber group was 52.90 for SH-SFRC containing S13/0.2. In general, the GF s of SH-SFRCs were much higher than the commercially conventional GF , which involves metal and is around 2 [1]. Moreover, the twisted fibers had the highest GF s, whereas the hooked fibers had the lowest ones.

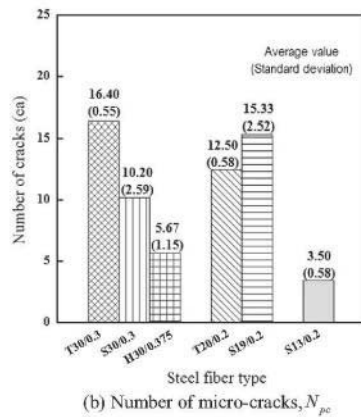
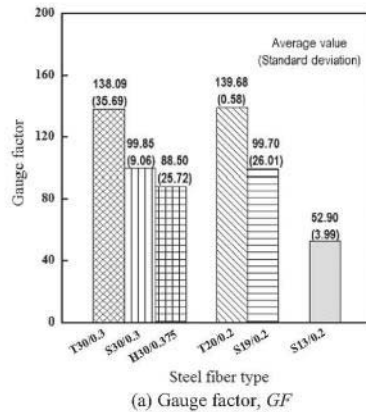


Fig. 7. Effects of fiber type on the nominal gauge factor and number of micro-cracks.

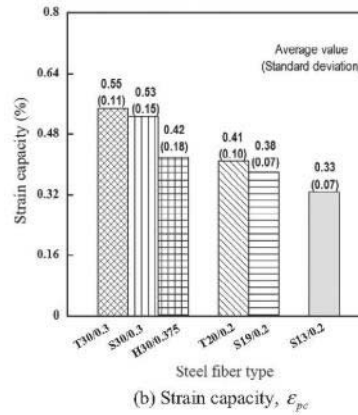
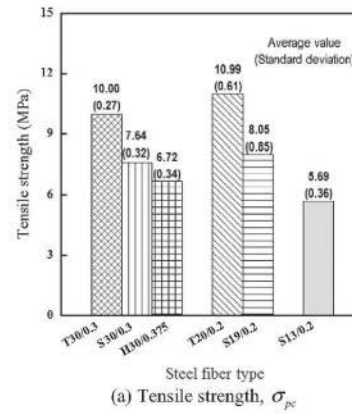


Fig. 8. Effects of fiber type on tensile parameters.

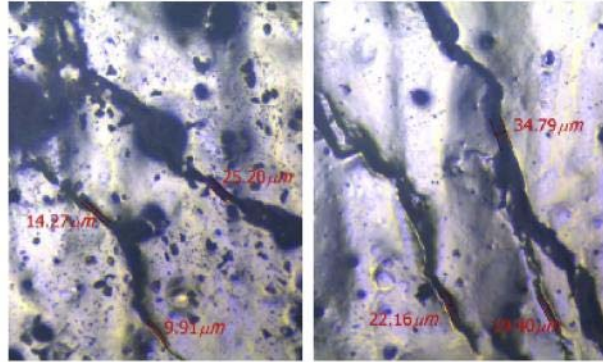


Fig. 9. Typical image of micro-cracks under microscope.

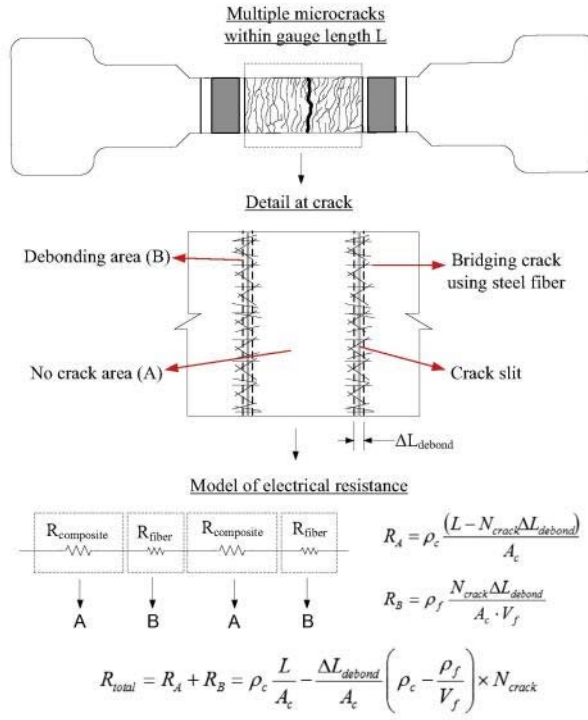


Fig. 10. Proposed model describing the electrical resistivity of SH-SFRCs with multiple micro-cracks [35].

The averaged number of multiple micro-cracks, according to the type of steel fiber, is presented in Table 4. As mentioned previously, Fig. 7a shows the effects of the fiber type on the GFs according to

the fiber type, whereas Fig. 7b shows the effects of the fiber type on the number of multiple micro-cracks (N_{pc}). The average number of multiple micro-cracks was 16.40, 10.20, 5.67, 12.50, 15.33, and

3.50 for SH-SFRC containing T30/0.3, S30/0.3, H30/0.375, T20/0.2, S19/0.2, and S13/0.2, respectively. Generally, SH-SFRCs with higher values of N_{pc} had higher values of GF.

The tensile stress versus strain responses of the SH-SFRCs are plotted in Fig. 5 using dashed curves, according to the fiber type. Although all six series showed tensile strain-hardening behavior, their tensile responses were quite different and depended on the fiber type. The effects of the fiber type on the tensile parameters including σ_{pc} and ϵ_{pc} are compared in Fig. 8. The average σ_{pc} and ϵ_{pc} values taken from at least four specimens are listed in Table 4. The average σ_{pc} values were 10.00, 7.64, 6.72, 10.99, 8.05, and 5.69 MPa for SH-SFRC containing T30/0.3, S30/0.3, H30/0.375, T20/0.2, S19/0.2, and S13/0.2, respectively, while the average ϵ_{pc} values were 0.55%, 0.53%, 0.42%, 0.41%, 0.38%, and 0.33% for SH-SFRC containing T30/0.3, S30/0.3, H30/0.375, T20/0.2, S19/0.2, and S13/0.2, respectively. Similar to the results for GF, the long- and medium-fiber groups generally had higher N_{pc} and σ_{pc} values than the short-fiber group. The long-fiber group had slightly higher ϵ_{pc} than the medium-fiber group. And, the width of those micro-cracks counted within the gauge length was between 10 and 40 μm , after unloading as shown in the photos taken by using a digital microscope (Fig. 9).

4.3. Correlation between GF and N_{pc} of SH-SFRCs

The GF was found to be strongly correlated with N_{pc} : the electrical resistivity of the SH-SFRCs noticeably decreased as the number of multiple micro-cracks increased in the strain-hardening region prior to the post-cracking point. Beyond the post-cracking point, the electrical resistivity was almost constant at the minimum value since there was no further cracking. This observation is consistent with that of Wang et al. [2] for single carbon fiber in epoxy and for polymer-matrix composites containing continuous conductive carbon fibers. A different tendency had been observed in the case of strain-hardening engineered cementitious composites (ECCs) including polyvinyl alcohol (PVA) fibers [7,18]. Ranade et al. [7] and Li et al. [18] reported that the electrical resistivity of ECCs increased after the first cracking with the tensile strain, unlike the SH-SFRCs in this research. The different tendencies in these cases of electrical resistivity are due to the different electrical conductivity values of the fibers: the conductivity of carbon and/or steel fiber is generally very high, whereas that of PVA fiber is low.

An analytical model was proposed by Song [35], one of coauthors, to explain the reduction in the electrical resistance of the SH-SFRCs during the strain-hardening, which is accompanied by the formation of multiple micro-cracks. The total electrical resistance of the SH-SFRCs can be attributed to the two parts labeled A (the un-cracked region) and B (the cracked region) in the series model shown in Fig. 10. At the part B, steel fibers bridging the micro-crack are assumed to be partially debonded and thus the electrical current flows through the debonded steel fibers only. As the number of micro-cracks increased, R_A , the total resistance of part A, would decrease since the total length of the part A was reduced whereas, R_B , the total resistance of part B would increase due to the increase of the total length of part B. Because the resistivity of part B is much lower than that of part A, the total resistivity of the specimen consequently decreased as the number of multiple micro-cracks increased. In addition, the steel fibers at the part B can be connected because the steel fibers at this part are not fixed by surrounding matrix. The increase of tensile stress within the post-cracking point would also affect the contact of microstructures and thus the electrical resistivity of material. All of the reasons above mentioned might contribute to the change of electrical resistivity of the SH-SFRCs investigated. However, the reduction in the resistivity of SH-SFRCs within tensile strain-hardening region is newly observed and an interesting

phenomenon; and, it requires further investigation for thoroughly understanding. Based on the experimental results reported in this paper, the addition of electrically conductive fibers with higher interfacial bond strength would be favorable for reducing the electrical resistivity of SH-SFRCs during strain-hardening.

5. Conclusions

The effects of six types of high-strength steel fibers on the electromechanical behavior of SH-SFRCs under direct tension were investigated. The six types of steel fiber were long twisted (T30/0.3), long smooth (S30/0.3), long hooked (H30/0.375), medium twisted (T20/0.2), medium smooth (S19/0.2), and short smooth (S13/0.2) steel fibers. The volume content of the steel fibers was 1.5% for all six series. The different types of steel fibers produced clear differences in the electrical conductivity and electromechanical behaviors of the SH-SFRCs under tension. Based on the test results, the following conclusions could be drawn:

- The electrical conductivity of the SH-SFRCs is clearly influenced by the size of steel fibers: the addition of smaller steel fibers led to higher electrical conductivity than that of larger steel fibers. The SH-SFRC with short smooth (S13/0.2) fibers showed the lowest resistivity (150.94 k Ω -cm), whereas that with long hooked (H30/0.375) fibers showed the highest resistivity (211.66 k Ω -cm) under the constant temperature of 20 °C and relative humidity of 70%.
- All the SH-SFRCs investigated in this research had GFs ranging between 50 and 140 and their GF values were much higher than that of the commercially conventional gauge factor involving metal (approximately 2), i.e., the SH-SFRCs exhibited high self damage-sensing capacities.
- As the tensile strain of the SH-SFRCs increased, the electrical resistivity significantly decreased until the post-cracking point. The reduction in the electrical resistivity of the SH-SFRCs was strongly correlated with the increase in the number of multiple micro-cracks during strain-hardening.
- Both the long and medium twisted fibers showed the highest GFs of about 140 and the highest post-cracking tensile strength more than 10 MPa. The order of performance in terms of damage-sensing capacity (GF) and mechanical resistance of SH-SFRCs is as follows: twisted fibers > smooth fibers > hooked fibers.

In this manner, our results can lead to the development and usage of SH-SFRCs as multifunctional materials in civil infrastructure.

Acknowledgments

This research was supported by a grant (12CCTI-C063938-01) awarded by the Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) of the Korean government and the Korea Institute of Construction & Transportation Technology Evaluation and Planning (KICTEP). The authors are grateful for the financial support. The opinions expressed in this paper are those of the authors and do not necessarily reflect the views of the sponsors.

References

- [1] Chung DDL. Self-monitoring structural materials. *Mater Sci Eng: R: Reports* 1998;22(2):57–78.
- [2] Wang X, Fu X, Chung DDL. Strain sensing using carbon fiber. *J Mater Sci* 1999;14(3):790–802.
- [3] Shi ZQ, Chung DDL. Carbon fiber reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion. *Cem Concr Res* 1999;29:435–9.

- [4] Wen SH, Chung DDL. Piezo-resistivity in continuous carbon fiber-cement matrix composite. *Cem Concr Res* 1999;29:445–9.
- [5] Chen B, Liu JY, Wu K. Electrical responses of carbon fiber reinforced cementitious composites to monotonic and cyclic loading. *Cem Concr Res* 2005;35:2183–91.
- [6] Azhan F, Bantia N. Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing. *Cem Concr Compos* 2012;34(7):866–73.
- [7] Ranade R, Zhang J, Lynch J, Li VC. Influence of micro-cracking on the composite resistivity of engineered cementitious composites. *Cem Concr Res* 2014;58(2014):1–12.
- [8] Han B, Yu X, Ou J. Multifunctional and smart carbon nanotube reinforced cement-based materials. In: Gopalakrishnan K, editor. *Nanotechnology in Civil Infrastructure*; 2011. p. 1–47.
- [9] Han B, Zhang K, Yu X, Kwon E, Ou J. Electrical characteristics and pressure-sensitive response measurements of carboxyl MWNT/cement composites. *Cem Concr Compos* 2012;34(2012):794–800.
- [10] Han BG, Yu X, Qu JP. Effect of water content on the piezoresistivity of MWNT/cement composites. *J Mater Sci* 2010;45:3714–9.
- [11] Han BG, Yu X, Kwon E. A self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring. *Nanotechnology* 2009;20(44):445–501.
- [12] Li H, Xiao HG, Ou JP. A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nano-phase materials. *Cem Concr Res* 2004;34:435–8.
- [13] Goak JC, Lee SH, Jang SH, Kim KB, Seo YH, Seo YS, et al. Spectroscopic studies and electrical properties of transparent conductive films fabricated by using surfactant-stabilized single-walled carbon nanotube suspensions. *Carbon* 2001;49:4301–13.
- [14] Yu X, Kwon E. A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties. *Smart Mater Struct* 2009;18(5).
- [15] Song G, Mo YL, Otero K, Gu H. Health monitoring and rehabilitation of a concrete structure using intelligent materials. *Smart Mater Struct* 2006;15(2):309–14.
- [16] Chung DDL. Piezoresistivity cement-based materials for strain sensing. *J Intell Mater Syst Struct* 2002;13(9):599–609.
- [17] Wen SH, Chung DDL. A comparative study of steel- and carbon-fiber cement as piezoresistive strain sensors. *Adv Cem Res* 2003;15(3):119–28.
- [18] Li M, Lin V, Lynch J, Li VC. Multifunctional carbon black engineered cementitious composites for the protection of critical infrastructure. High performance fiber reinforced cementitious composites, vol. 2, *Proc Int Workshop (HPRCC)*; 2012. p. 99–106.
- [19] Pramanik PK, Khastgir D, De SK, Saha TN. Pressure-sensitive electrically conductive nitrile rubber composites filled with particulate carbon black and short carbon fibre. *J Mater Sci* 1990;25:3848–53.
- [20] Wen SH, Chung DDL. Partial replacement of carbon fiber by carbon black in multifunctional cement-matrix composites. *Carbon* 2007;45:505–13.
- [21] Chung DDL. Electrically conductive cement-based materials. *Adv Cem Res* 2004;16(4):167–76.
- [22] Park SH, Kim DJ, Ryu GS, Koh KT. Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete. *Cem Concr Compos* 2012;34:172–84.
- [23] Wille K, Kim DJ, Naaman AE. Strain hardening UHP-FRC with low fiber contents. *Mater Struct* 2011;44:583–98.
- [24] Naaman AE, Reinhardt HW. Proposed classification of HPRC composites based on their tensile response. *Mater Struct* 2006;39:547–55.
- [25] Naaman AE. Tensile strain-hardening FRC composites: historical evolution since the 1960. *Adv Constr Mater (Part II)* 2007:181–202.
- [26] Kim DJ, Naaman AE, El-Tawil S. Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cem Concr Compos* 2008;30:917–28.
- [27] Wittmann FH. Observation of an electromechanical effect of hardened cement paste. *Cem Concr Res* 1973;3:601–5.
- [28] Wen SH, Chung DDL. Carbon fiber-reinforced cement as a strain-sensing coating. *Cem Concr Res* 2001;31:665–7.
- [29] Cao J, Chung DDL. Effect of strain rate on cement mortar under compression, studied by electrical resistivity measurement. *Cem Concr Res* 2002;32(5):817–9.
- [30] Cao J, Chung DDL. Electric polarization and depolarization in cement-based materials, studied by apparent electrical resistance measurement. *Cem Concr Res* 2004;34(3):481–5.
- [31] McCarter WJ. Effects of temperature on conduction and polarization in Portland cement mortar. *J Am Cer Soc* 1995;78:411–5.
- [32] McCarter WJ, Garvin S. Dependence of electrical impedance of cement-based materials on their moisture condition. *J Phys D Appl Phys* 1989;22(11):1773–6.
- [33] Naaman AE, Reinhardt HW. Characterization of high performance fiber reinforced cement composites. In: Naaman AE, Reinhardt HW, editors. *High performance fiber reinforced cement composites: HPRCC 2*, Proceedings of 2nd international workshop on HPRCC, Chapter 41, RILEM, No. 31. London: E. & FN Spon; 1996. p. 1–24.
- [34] Bantia N, Djeridane S, Pigeon M. Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements. *Cem Concr Res* 1992;22:804–14.
- [35] Song J. The change of electrical resistivity of high performance fiber reinforced cementitious composites (HPRCC) in tension. Master thesis, Sejong University, Korea; 2013. p. 88.
- [36] Wen S, Chung DDL. Electric polarization in carbon fiber-reinforced cement. *Cem Concr Res* 2001;31:141–7.

강섬유의 종류가 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기저항에 미치는 영향

The effect of steel fiber type on the electrical resistivity of high performance fiber reinforced cementitious composites

마나담솜바트 찻자이*
Manathamsombat, Chatchai

김동주**
Kim, Dong Joo

Abstract

In this study, the electrical resistivity of high performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC) with four different types of steel fiber were investigated namely as twisted fiber, hooked fiber, smooth fiber (0.2 mm) and smooth fiber (0.3 mm). Experimental results indicate that the electrical resistivity of HPFRCC changes with type and diameter of steel fiber.

1. Introduction

The electrical conductivity of HPFRCC is relevant to the use of these composites for self-sensing composites, which can be used for structural health monitoring (SHM). To improve the electrical conductivity of HPFRCC, steel fiber was used due to good mechanical properties and electrical conductivity with low price. The aim of this study is to investigate the electrical resistivity of HPFRCC with different fiber diameter and types of steel fiber.

2. Experimental program and results

The composition of matrices is provided in Table 1. Four different types of steel fiber were used in an amount of 2% by volume composite namely as twisted fiber ($\varnothing$ 0.3 mm), hooked fiber ($\varnothing$ 0.375 mm), smooth fiber ($\varnothing$ 0.2 mm) and smooth fiber ($\varnothing$ 0.3 mm). After demolding, all the specimens were placed in a water tank for 14 days. Then, the specimens were removed from the water tank and dried in air for 45 days. To measure the electrical resistivity of the specimen, the silver paste and the copper tape were used. A layer of silver conductive paste was applied to the surface of specimen for the better electrical conductivity between the copper tape and the specimen. After that, the electrical resistivity and tensile strength of the specimen were measured at room temperature.

* 마나담솜바트 찻자이, 세종대학교 콘크리트구조연구실 박사과정

** 교신저자, 세종대학교 콘크리트구조연구실 교수 (djkim75@sejong.ac.kr)

Table 1. Composition of matrices by weight ratio

Cement (Type III)	Silica fume	Silica sand	Fly ash	Super plasticizer	Water
0.80	0.07	1.00	0.20	0.04	0.26

3. Discussion and conclusion

From the results of electrical resistivity and tensile tests, it can be observed that the electrical resistivity of HPRCC with 2% smooth fiber ($\varnothing$ 0.2 mm) was highest. This is because of the fiber diameter of smooth steel fiber ($\varnothing$ 0.2 mm) was smaller than hooked steel fiber ($\varnothing$ 0.375 mm), smooth steel fiber ($\varnothing$ 0.3 mm) and twisted steel ($\varnothing$ 0.3 mm) fiber. Furthermore, the electrical resistivity of twisted fiber and hooked fiber were not significantly different due to the slightly different size of fiber diameter. However, the electrical resistivity of smooth fiber ($\varnothing$ 0.3 mm) was slightly lower than twisted and hooked steel fiber. This is possibly due to better dispersion ability of smooth fiber which results in more conductive matrix. Moreover, the highest tensile stress to lowest tensile stress was twisted steel fiber, smooth steel fiber ($\varnothing$ 0.3 mm), smooth steel fiber ($\varnothing$ 0.2 mm) and hooked steel fiber, respectively. The highest tensile stress of twisted steel fiber specimen is due to their shape that can better bridging crack than smooth and hooked steel fiber. In addition, the lowest tensile stress was hooked steel fiber. This is possibly due to their shape that difficult to disperse in the cement matrix and results in void inside specimen.

Acknowledgement

This research was supported by a grant (12CCTI-C063938-01) from Construction Technology Innovation Program funded by Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) of Korea government and Korea Institute of Construction & Transportation technology Evaluation and Planning (KICTEP). Authors also acknowledge a grant from the Human Resources Development of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Knowledge Economy (No. 20104010100520).

섬유 종류가 변형 경화 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 자기 손상 감지 능력에 미치는 영향

Effect of fiber type on damage-sensing capacity of strain-hardening steel-fiber-reinforced cementitious composites

윤 위 림 *
Nguyen, Duy Liem

김 동 주 **
Kim, Dong Joo

Abstract

The effect of steel fiber types on the self-sensing capacity of strain-hardening fiber-reinforced cementitious composites (SH-SFRCs) was investigated. Three types of fiber, including twisted, smooth and hooked fibers, were used with a volume content of 1.5% in a mortar matrix. Although all the SH-SFRCs exhibited self damage-sensing capacity, the gauge factor, representing for damage-sensing ability, was different according to the types of fiber as follows: twisted (138.09) > smooth (99.85) > hooked (88.50). The SH-SFRC with twisted fiber produced the highest gauge factor which is very favorable for development of self damage-sensor.

1. Introduction

SH-SFRCs is characterized by high tensile strength, high ductility and toughness owing to their unique tensile strain hardening behavior accompanied with multiple micro-cracks. In addition to high mechanical resistance, SH-SFRCs are expected to generate self damage-sensing capacity owing to the high electrical conductivity of steel fibers [1]. However, there is still little information about the effects of different steel fibers on their self damage-sensing capacity. Thus, this research is aimed to discover the effect of fiber types on the electro-mechanical response of SH-SFRCs. This research is expected to provide useful information for development of self-sensing SH-SFRCs in detection of damage or cracks.

2. Experimental program

Three series of SH-SFRCs were prepared by adding 1.5% fiber content by volume. The series 1, 2, 3 of SH-SFRC specimens contained twisted ($d=0.3$ mm, $L=30$ mm), smooth ($d=0.3$ mm, $L=30$ mm) and hooked fibers ($d=0.3$ mm, $L=30$ mm), respectively. Four specimens were prepared per each series. A universal testing machine (UTM) with displacement control was used for the direct tensile tests while a fluke 8846 A multimeter was used for measuring electrical resistance by four-probe method under direct tension. The displacement speed of UTM was maintained as 1.0 mm/min and

* Nguyen, Duy Liem, 세종대학교, 건설환경공학과, 박사과정

** Kim, Dong Joo, 세종대학교, 건설환경공학과, 부교수 - 교신저자 (dikim@sejong.ac.kr)

the data acquisition frequency was 1 Hz. The electrical current was first added to the specimen before the direct tensile tests. After about 20 min for stabilizing the electric polarization, the tensile load was applied. Under tensile load, the electrical resistance of the tested SH-SFRC specimens was simultaneously measured. Finally, these data acquisition were translated and described under stress versus strain and resistivity versus strain curves.

3. Test result and discussion

The self-sensing capacity of SH-SFRCs was appraised by means of gauge factor (GF). Although all series showed strain-hardening and multiple cracking behavior, their performances on piezoresistive behavior were different. Series 1, 2 and 3 produced the gauge factor of 138.09, 99.85, and 88.50, respectively, while their average crack numbers within gauge length were counted as follows: 16.4, 10.20 and 5.67, respectively. The couples of post-cracking strength and strain capacity of each series were also observed as follows: 10.00 MPa and 0.55% for series 1; 7.64 Mpa and 0.53% for series 2; 6.72 MPa and 0.42% for series 3. Generally, all the studied parameters had same tendency with order of performance as follows: twisted > smooth > hooked fiber. The interfacial bond resistance between fiber and matrix was the key factor resulting both tensile and cracking resistance, while gauge factor highly correlated with number of cracks [2]. The gauge factor of SH-SFRCs, more than 88, were much higher than values around 2 for conventional gauge factors [3]. It meant SH-SFRCs can favorably serve as a self damage-sensor.

4. Conclusions

The following observations and conclusions can be drawn from this experimental study:

- The investigated SH-SFRCs exhibited high self-sensing capacity with gauge factor in the range of from 88 to 140.
- The ranking in terms of gauge factor, tensile strength, strain capacity and crack number, regarding the steel fiber types, was as follows: twisted > smooth > hooked fiber.

Acknowledgement

This research was supported by a grant (12CCTI-C063938-01) awarded by the Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) of the Korean government and the Korea Institute of Construction & Transportation Technology Evaluation and Planning (KICTEP). The authors are grateful for the financial support.

Reference

1. Wen SH, Chung DDL 2003. A comparative study of steel- and carbon-fiber cement as piezoresistive strain sensors. *Adv Cem Res.* 15(3) 119-28.
2. Song C, Manathamsoombat C, Nguyen DL, Kim DJ 2014. Electro-mechanical damage sensing capacity of SH-SFRCs. *Constr Build Mater* (Submitted).
3. Chung DDL 1998. Self-monitoring structural materials. *Mater Sci Eng: R:Reports* 22(2) 57-78.

연구개발결과 활용계획서

A. 과제 일반정보

사 업 명	건설기술혁신사업		과학기술표준분류	
과 제 유 형	☐ 기초 ☐ 응용 ☒ 개발		실용화대상여부	☒ 실용화 ☐ 비실용화
연구과제명	자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료 개발		과 제 구 분	☒ 일 반 ☐ 연구단 ☐ 사업단
주관연구기관	세종대학교 산학협력단		연구책임자	김 동 주
세 부 과 제 명				
협동연구기관			연구책임자	
총 연구기간	2012년 11월 19일 - 2014년 11월 18일 (24개월)			
총 연구개발비 (단위 : 천원)	정부출연금	민간부담금	합계	
	50,000		50,000	
공동연구기관				
참 여 기 업				
구 분	성과활용책임자		성과활용실무자	
성 명				
소속기관/부서				
E-mail				
연락처				

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제35조(연구개발결과의 보고) 제2항에 의
거 연구개발결과 활용계획서를 제출합니다.

붙임 1. 성과총람 원고 1부.

2. 기술소개자료 각 1부(기술별).

2015년 01월 28일

주관(협동) 연구기관장 :

이 내 성 (직인)

B. 요소기술 정보

□ 요소기술 총괄

과제명 (세부과제명)	해당 기관명	핵심연구성과	요소기술*	정부출연금 (백만원)	기술실시계약 대상여부**	비고
자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료개발	주관 : 세종대 대학교 산학협 력단	자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료	자기감지능력을 갖는 섬유보강 시멘트 복합재료	50	대상	
소 계				50		
합 계				50		

구 분	1-가
요소기술명	자기감지능력을 갖는 섬유보강 시멘트 복합재료
기술개요	전기 전도성이 우수한 강섬유 또는 탄소섬유 등을 사용하여 시멘트 기반의 재료에 균열 발생으로 인한 전기 저항률의 차이를 확인하여 자기 손상을 감지할 수 있는 재료
관련 키워드	자기감지재료, 손상감지재료, 보수보강재료
기술 분류	대분류: 건설/교통, 중분류: 시설물 안전 및 유지관리 기술, 소분류: 구조물 보수/보강 기술
결과물 유형*	☐ 공법/기법 ☐ 장비/장치 ☒ 재료/자재 ☐ SW ☐ 시스템 ☐ 기준/지침 ☐ 기타
기술수명주기**	☒ 기술도입기 ☐ 기술성장기 ☐ 기술성숙기 ☐ 기술쇠퇴기

C. 성과활용 네트워크 정보

요소기술 구분	1-가	요소기술명	자기감지능력을 갖는 섬유보강 시멘트 복합재료
구 분		주체명	
연구개발결과 시험·검증기관		건설기술연구원 또는 건자재 시험 연구원	
연구개발결과 수요기업		시공회사 또는 유지관리 및 보수보강 업체들	
연구개발결과 현장적용기관·업체		한국도로공사, 철도기술공사 등	
연구개발결과 추가 R&D(사업비) 투자·자문 기관			

D. 성과 정보

1. 특허등록

No.	요소기술 구분	특허명칭	등록번호	등록일	출원인 (등록권리자)
A-1	1-가	균열 및 손상 자기감지 하이브리드 섬유보강 시멘트 복합재료의 자기 감지 방법 및 자기 감지 장치(출원)	10-2014-011695 8 (출원번호)	20140903 (출원)	세종대학교 산학협력단

2. 학술지 게재

No.	요소기술 구분	SCI/ 일반	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이 지	게재 일자
B-1	1-가	SCI	Comparative electromechanical damage-sensing behaviors of six strain-hardening steel fiber-reinforced composites under direct tension	Composites: Part B	1359-83 68	D.L. Nguyen	69	159	168	2015. 02
B-2	1-가	국내 발표	강섬유의 종류가 고성능 섬유보강 시멘트 복합재 료의 전기저항에 미치는 영향	한국구조물진단 유지관리공학회 2013년도 정기학술대회		C. Manatham sombat	Vol. 17 (NO. 1)	397	398	2013
B-3	1-가	국내 발표	섬유 종류가 변형 경화 강섬유 보강 시멘트 복합 재료의 자기 손상 감지 능력에 미치는 영향	한국구조물진단 유지관리공학회 2014년도 정기학술대회		D.L. Nguyen	Vol. 18 (NO. 1)	409	410	2014

E. 성과활용 정보

구분	1-가	요소기술명	자기감지능력을 갖는 섬유보강 시멘트 복합재료																			
※ 본 보고서에서 사용하는 “성과의 활용”이란 용어는 아래와 같은 의미를 가지고 있습니다. “국토교통 R&D 성과의 활용”이란? 국토교통 R&D 성과가 산업적 활용을 통해 부가가치를 창출하거나 공공적 활용을 통해 공익에 기여하는 경우에 대해 <활용되었다>고 판단합니다. 본 조사에서는 사업화/기업화에 의한 제품의 매출발생, 입찰 및 발주 절차를 거친 공법 등의 실제 공사 현장적용을 성과 활용으로 분류하고 있습니다. 다만 R&D의 목적이 법/기준/지침 마련인 경우, 법/기준/지침의 반영을 성과 활용으로 분류합니다.																						
1. 위 내용을 고려하였을 때 현재시점(R&D 종료)에서 귀 기관의 R&D 결과물은 그 성과가 활용되었습니까? (2) 1. 예, 활용되었습니다. 2. 아니오, 활용되지 않았습니다.																						
2. 귀 기관이 수행한 건설교통 R&D 사업의 종료 후, 결과물이 활용되기까지 거쳐야 하는 프로세스를 <보기>와 같은 단계로 정의하였습니다. 귀 기관의 R&D 결과물의 활용프로세스 상 현재 단계를 표시하여 주십시오. <보기> R&D사업 종료 후 성과 활용에 이르는 단계 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">단계</th><th style="width: 30%;">단 계 명(R&D 종료시점)</th><th style="width: 60%;">단 계 정 의</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;">I</td><td>기술 개발 단계</td><td rowspan="2" style="text-align: center;">국가 R&D 사업을 통해 연구개발이 완료된 단계</td></tr> <tr> <td>☒완료</td></tr> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;">II</td><td>기술 검증·보완 단계</td><td rowspan="2" style="text-align: center;">시제품 제작, 현장시험적용 등을 통해 기술을 검증하고 보완하여 기술적 완성도를 높이는 단계</td></tr> <tr> <td>☐준비 ☐진행중 ☐완료</td></tr> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;">III</td><td>실용화 추진 단계(마케팅)</td><td rowspan="2" style="text-align: center;">제품판매 및 공사수주를 위한 마케팅(제안·홍보·입찰 등) 단계</td></tr> <tr> <td>☐준비 ☐진행중</td></tr> <tr> <td rowspan="2" style="text-align: center;">IV</td><td>시장수용 단계</td><td rowspan="2" style="text-align: center;">제품 판매나 공사 수주를 통해 실제 매출이 발생하는 단계</td></tr> <tr> <td>☐초기발생 ☐지속발생</td></tr> </tbody> </table>				단계	단 계 명(R&D 종료시점)	단 계 정 의	I	기술 개발 단계	국가 R&D 사업을 통해 연구개발이 완료된 단계	☒ 완료	II	기술 검증·보완 단계	시제품 제작, 현장시험적용 등을 통해 기술을 검증하고 보완하여 기술적 완성도를 높이는 단계	☐ 준비 ☐ 진행중 ☐ 완료	III	실용화 추진 단계(마케팅)	제품판매 및 공사수주를 위한 마케팅(제안·홍보·입찰 등) 단계	☐ 준비 ☐ 진행중	IV	시장수용 단계	제품 판매나 공사 수주를 통해 실제 매출이 발생하는 단계	☐ 초기발생 ☐ 지속발생
단계	단 계 명(R&D 종료시점)	단 계 정 의																				
I	기술 개발 단계	국가 R&D 사업을 통해 연구개발이 완료된 단계																				
	☒ 완료																					
II	기술 검증·보완 단계	시제품 제작, 현장시험적용 등을 통해 기술을 검증하고 보완하여 기술적 완성도를 높이는 단계																				
	☐ 준비 ☐ 진행중 ☐ 완료																					
III	실용화 추진 단계(마케팅)	제품판매 및 공사수주를 위한 마케팅(제안·홍보·입찰 등) 단계																				
	☐ 준비 ☐ 진행중																					
IV	시장수용 단계	제품 판매나 공사 수주를 통해 실제 매출이 발생하는 단계																				
	☐ 초기발생 ☐ 지속발생																					
3. 위 2에서 I~III단계라고 응답한 경우, R&D 결과물을 활용하기 위해 지속적인 활동을 진행하실 예정입니까?(1) 1. 예, 계속 활용을 추진할 예정입니다. 2. 아니오, 활용추진을 중단하였습니다.																						
4. 귀 기관이 위 2번에서 응답한 단계까지 수행한 주요 활동내용을 구체적으로 설명해 주십시오. ※ 만약 귀 기관이 위 2번에서 III단계라고 응답한 경우, I 단계, II 단계, III 단계의 주요 활동내용(주체, 시기, 산출물이나 공사명 등을 구체적으로 기입)을 작성해 주십시오. ※ 수행한 주요 활동내용을 기재하시고 B. 성과 및 활용정보에서 기재한 활용성과 번호를 함께 기재해 주십시오.																						

단계	단계명	주요 활동내용
I	기술 개발 단계	연구개발 목표 달성 (A-1, B-1, B-2, B-3) 자기감지 기능을 갖는 재료개발을 위해 하이브리드 섬유보강 시멘트복합재료의 자기감지 방법 및 자기감지장치에 관한 특허를 출원 (A-1)하였으며, 다양한 종류의 강섬유를 보강한 시멘트 복합재료의 전기 역학적 거동분석을 통한 자기손상 감지 능력에 관해 SCI 논문 1건을 게재함(B-1). 또한 강섬유의 종류에 따른 시멘트 복합재료의 전기저항 특성분석으로 한국구조물진단학회에 2013년 학술대회에서 발표(B-2)하였고, 강섬유의 종류가 자기손상 감지능력에 미치는 영향을 분석하여 2014년 한국구조물진단학회에서 발표함(B-3). 강섬유보강 시멘트 복합재료의 섬유종류 및 섬유의 보강량이 전기저항률 및 자기감지능력에 미치는 영향을 규명하였고, 전기저항률을 낮추고 자기감지능력을 높이는 방안을 모색하여 GGBS를 첨가하였다. 또한 탄소섬유를 함께 보강하는 하이브리드 방식의 섬유보강을 시도하여 하이브리드 방식의 섬유보강이 전기저항률 및 자기감지능력에 미치는 영향을 판별하였으며, 외부환경의 영향의 판별을 위해 초기 전기저항률의 변화가 온도차 20℃와 상대습도 40%의 변화 내에서 변화 양상을 조사하여 온도와 상대습도가 전기저항률에 미치는 영향을 파악하였다.
II	기술 검증·보완 단계	
III	실용화 추진 단계	
IV	시장 수용 단계	

F. 성과활용 계획

- 귀 기관의 성과활용 계획에 대한 자료 수집을 위한 것입니다.
- 요소기술이 1개 이상인 경우, 해당 양식을 추가하여 작성해 주십시오.(요소기술 수만큼 기재)

구분	1-가	요소기술명	자기감지능력을 갖는 섬유보강 시멘트 복합재료		
1. 동 연구개발결과의 향후 5년간(활용보고서 제출 기간) 성과활용 목표·계획을 표기해 주십시오.					
단 계	종료 후 1년	종료 후 2년	종료 후 3년	종료 후 4년	종료 후 5년
I	기술 개발 단계	기술 개발 단계	기술 개발 단계	기술 개발 단계	기술 개발 단계
	☒ 완료	☐ 완료	☐ 완료	☐ 완료	☐ 완료
II	기술 검증보완 단계	기술 검증보완 단계	기술 검증보완 단계	기술 검증보완 단계	기술 검증보완 단계
	☒ 준비 ☐ 진행중 ☐ 완료	☒ 준비 ☐ 진행중 ☐ 완료	☐ 준비 ☒ 진행중 ☐ 완료	☐ 준비 ☒ 진행중 ☐ 완료	☐ 준비 ☒ 진행중 ☐ 완료
	실용화 추진 단계 (마케팅)	실용화 추진 단계 (마케팅)	실용화 추진 단계 (마케팅)	실용화 추진 단계 (마케팅)	실용화 추진 단계 (마케팅)
III	☐ 준비 ☐ 진행중	☐ 준비 ☐ 진행중	☐ 준비 ☐ 진행중	☐ 준비 ☐ 진행중	☐ 준비 ☐ 진행중
	시장수용 단계	시장수용 단계	시장수용 단계	시장수용 단계	시장수용 단계
IV	☐ 초기발생 ☐ 지속발생	☐ 초기발생 ☐ 지속발생	☐ 초기발생 ☐ 지속발생	☐ 초기발생 ☐ 지속발생	☐ 초기발생 ☐ 지속발생
2. 귀 기관이 위 1번에서 응답한 활용계획의 주요 활동내용(예정/기획)을 구체적으로 설명해 주십시오.					
단 계	단계명	주요 활동내용			
		주체*	성과물**/개수	시기	내용
I	기술 개발 단계		-	R&D종료시점	R&D 기간 내 완료 (자기감지 능력을 갖는 섬유보강 시멘트 복합재료 개발 및 직접인장시험을 통한 검증)
II	기술 검증보완 단계	-	-	종료 후 5년	직접 인장시험 뿐 아닌 휨 인장시험 및 압축시험에 적용하여 실험실 규모에서의 자기감지능력 검증 및 보완 후 시험체 크기에 대한 영향 조사를 통해 구조물 적용 전 실험실 규모의 재료검증 이후 이미 강섬유가 적용된 구조물에 계측할 방법을 고안하여 구조물 모니터링하여 계측방법 검증 후 패널 보강형식의 보강방법 검토
III	실용화 추진 단계	-	-		
IV	시장 수용 단계	-	-		

* 주체: 연구주관기관(연구책임자)과 함께 Co-Work을 진행하는 기업/기관명
 ** 성과물: 각 단계별 성과활용 과정에서 발생한 성과물(예: 시험적용, 시제품, 현장적용 등)

3. 귀 기관의 R&D 결과물을 활용하기 위해서는 기준이나 지침의 제·개정이 필요합니까? (1)
 1. 예, 필요합니다. 2. 아니오, 필요하지 않습니다.

4. 위 3에서 1번이라고 응답한 경우, 향후 기준/지침 채택을 위한 세부적인 활동 계획을 설명해 주십시오.
 없음

구 분 (설계기준/시방서/지침)	활용구분 (신규/개선)	내용
시방서	신규	개발된 재료의 성능평가 기준 및 적용기준 마련 필요

국토교통연구개발사업 성과총람 원고

주관연구기관명	세종대학교
연구책임자명	김 동 주

I. 과제 기본정보

사업명	건설기술혁신사업	
최상위과제명	자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료의 개발	
(핵심·세부) 과제명		
연구책임자 정보	(성 명) 김 동 주 (전 화) 02)3408-3820 (이메일) djkim75@sejong.ac.kr (소 속) 세종대학교 건설환경공학과	

II. 연구개발 배경 및 목표

1. 연구배경

- 최근 기후 변화로 인한 여러 자연재해 그리고 테러에 의한 충격 및 폭발 등의 극한하중으로 인해 시설물의 노화가 촉진되고 있음
- 콘크리트 사회기반 시설물의 조기 노화의 주요원인은 콘크리트 재료 자체의 취성적인 거동에 기인함. 콘크리트 균열은 철근 부식을 가속화 하여 구조물의 수명을 단축함
- 사회기반 시설물의 붕괴는 인명피해 뿐만 아니라 시설물의 교체와 보수 및 그로 인해 발생하는 경제적 손실 등 장기간에 걸쳐 사회와 경제에 막대한 손실을 가져옴
- 사회기반 시설물의 유지관리를 위해 비파괴시험을 이용한 정기적인 점검과 안전진단을 수행 중이나, 검사장비의 해외의존도가 높으며 점검자의 주관적인 경험에 근거한 판단으로 점검자에 따라 다른 진단결과 도출의 문제점이 있음
- 또한, 매립식 또는 접촉식 센서들을 이용한 모니터링의 경우, 구조물의 거동을 센서가 부착된 위치에서만 파악가능하고, 센서의 수명이 구조물과 비교하여 매우 짧아서 연속적인 모니터링이 불가능한 단점이 있음
- 센서의 교체가 필요없이 연속적으로 사용할 수 있으며, 시설물의 구조적 성능에 악영향을 미치지 않고, 구조물의 손상 정도를 전체적으로 파악할 수 있는 “자기 감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료의 개발”을 하고자 함

2. 연구목표

- 본 연구의 최종목표는 “자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료 개발”임
- 전기 저항률의 변화와 균열 또는 손상과의 관계를 규명함으로써, 자기 균열 또는 손상 감지 기능을 가지는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료를 개발하여 구조물 및 보수보강 재료 자체가 자기감지 기능을 가질 수 있도록 함

Ⅲ. 연구개발 내용 및 결과물

1. 주요 연구내용

(1) 시멘트복합재료의 전기저항률 측정방법조사

- 문헌조사를 통한 시멘트 복합재료에 적합한 전기 저항률 측정방법 결정
- 측정방법을 시험체에 적용하기 위한 방안 도출

(2) 섬유의 종류가 미치는 영향평가

- 섬유의 종류에 따른 초기 전기저항과 전기저항의 변화량 조사
- 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 섬유종류에 따른 인장거동 시, 탄성구간, 변형경화 구간, 그리고 변형연화 구간 별 전기저항의 변화 평가
- 균열 또는 손상 발생 시, 전기저항 변화에 대한 메커니즘의 규명 및 안정화

(3) 섬유의 보강량이 미치는 영향평가

- 섬유의 보강량에 따른 초기 전기저항과 그 전기저항의 변화량 조사
- 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 인장거동 시, 섬유 보강량으로 인한 탄성구간, 변형경화 구간, 그리고 변형연화 구간 별 전기저항의 변화 평가

(4) 자기감지 능력의 극대화방안 도출

- 자기감지 능력 극대화를 위한 복합재료의 배합최적화
- 자기감지 섬유보강 시멘트 복합재료의 감지성능 및 역학적 성능평가
- 시멘트 복합재료에 두 가지 섬유를 혼입하여, 자기감지 성능 및 역학적 성능평가

(5) 외부환경이 미치는 영향 조사

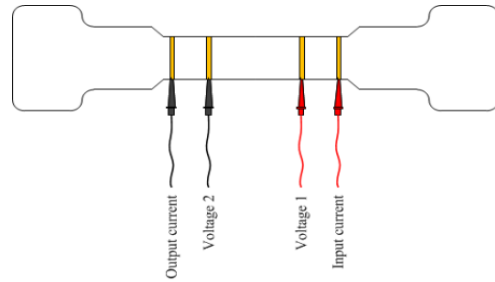
- 온도의 변화와 자기감지 능력의 관계 도출
- 습도변화와 자기감지 능력의 관계 도출

2. 연구개발 결과

※ 관련사진을 반드시 첨부하고, 캡션으로 설명

(1) 시멘트복합재료의 전기저항률 측정방법조사

- 조사결과 정확한 전기저항률 측정할 수 있고 측정이 간편한 4탐침 저항측정 방법을 결정
- 시험체와 전도체와의 전도성의 향상을 위해 실버 페이스트를 도포
 - 시험체의 내부전극의 거리 : 100mm
 - 시험체의 외부전극의 거리 : 180mm



<시멘트 복합재료의 4탐침 측정법>

(2) 섬유 종류가 미치는 영향

- 작은 크기의 강섬유를 보강시 큰 크기의 강섬유 보강시와 비교하여 높은 전기 전도성을 나타냄
- 인장 하중 시, 전기 저항률의 변화는 다음 순으로 크게 나타남: 비틀림섬유 > 직선형섬유 > 흑크드섬유
- 균열개수의 증가는 전기 저항률을 감소시킴
- 그러므로, 섬유종류 중 전기 저항률의 변화가 가장크고 균열개수가 가장 많은 비틀림섬유가 높은 인장강도를 가지면서 가장 우수한 자기감지기능을 가짐

(3) 섬유 보강량이 미치는 영향

- 섬유보강 부피비 1.0%이상일 경우 GF 의 값이 150이상으로 높은 자기감지 능력을 확보함
- 섬유보강 부피비가 증가할수록 인장 저항능력과 자기감지 능력이 향상됨
- 섬유보강부피비 1.5%일 경우 변형경화거동을 지니면서 자기감지기능이 가장 뛰어난 것으로 확인

(4) 자기감지능력 극대화

- Carbon black과 고로슬래그는 시멘트보다 전기 전도성이 높아 전기 시멘트 복합재료의 저항률을 낮춤
- 고로슬래그를 치환한 경우 가장 높은 자기감지 능력을 보임
- Carbon black과 고로슬래그의 치환은 인장거동에 큰 영향을 미치지 않고 자기감지 능력을 향상시킴
- 전기전도성이 높은 첨가제를 사용하여 전기저항률을 $100\text{k}\Omega\text{cm}$ 으로 낮추어 높은전기 전도성을 확보하여 자기감지능력 측정에 용이성을 확보

(5) 외부환경이 미치는 영향

- 온도가 증가할 경우, 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 감소하는 경향을 보이나 자기감지 측정에 큰 영향을 주지 않음
- 습도가 증가할 경우, 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률은 감소하는 경향을 보이나 자기감지 측정에 큰 영향을 주지 않음

3. 연구개발 성과

(1) 공공적 성과

- 현 정부의 정책 초점인 ‘창조경제’에 기여할 수 있음: 본 과제를 통해 자기감지 능력을 갖는 재료 분야에서 글로벌 시장의 우위를 점할 수 있는 계기가 되었으며, 본 연구를 시작으로 재료개발을 통한 새로운 시장의 창출 가능성을 보여줌
- ‘창조경제 실현을 위한 국토교통 R&D 중장기 전략’을 보면, 현재 국토교통 분야의 정책의 메가 트렌드는 ‘국민안전’으로 나타남: 본 과제를 통해 개발된 재료는 기존의 구조물뿐 아니라 새로 건설될 구조물에 적용하여 지속적인 모니터링이 가능하며, 구조물의 선제적 안전관리를 가능케 함

(2) 기술적 성과

- 자기 균열 감지 능력을 가지는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료를 이용해 구조물의 경우 별도의 센서 부착없이 구조물 자체가 그 거동 및 손상을 평가 가능함
- 높은 인장 저항능력과 자기감지 능력을 가져 기존 구조물의 보수·보강 재료로 사용할 수 있을 뿐 아니라, 구조물의 상태를 파악할 수 있음

(3) 학술적 성과

- 상위 10% 이내에 해당하는 SCI급 국제 저널인 Composite Part B에 게재
- 변형경화 거동과 자기감지 거동을 함께 보이는 섬유보강 시멘트 복합재료 관련 기초연구결과를 제시함으로써 추후 많은 관련 연구들이 진행될 수 있을 것으로 기대

(4) 경제적 성과

- 수행된 연구는 자기감지 기능을 가지는 섬유보강 시멘트 복합재료에 대한 기초연구로써, 경제성에 대한 분석이 명확히 이루어지지 않았음
- 일체화된 보수보강 재료에 의한 시설물의 이상 유무판정을 통해 효율적인 유지관리 및 보수·보강 계획을 수립할 수 있으므로, 사회간접자본의 수명 연장에 따른 경제성 제고
- 구조물의 수명동안 사용할 수 있는 자기감지 능력을 가진 재료의 개발로 구조물 진단에 사용되는 유지 보수비용 및 시간의 절감
- 강섬유보강 시멘트 복합재료의 높은 균열제어 능력과 내구성 향상으로 인한 사회간접자본의 수명 연장에 따른 경제성 제고
- 기존 교량의 유지관리/보수보강에 소요되는 비용은 공용사용기간인 30~50년간 초기 투자비용 대비 30% 정도로 이에 대한 비용 절감효과 기대
- 유지보수 및 진단 기능을 가진 재료의 개발로 국내 사업 및 수출 사업의 육성이 가능하며 유지보수 및 진단 기능을 가진 재료 시장을 개척

(5) 기타 성과

- 강섬유와 카본 섬유를 함께 사용하여 자기감지 능력을 향상시키는 섬유보강 시멘트 복합재료 관련 특허 출원을 통하여 원천기술 확보

IV. 활용계획 및 기대효과

1. 활용계획

- 반영구적 센서의 기능을 가진 건설재료로 사회기반 시설물 또는 빌딩의 모니터링에 활용
- 변형경화 거동에 기인한 사회기반 시설물의 내구성 향상에 기여
- 사회기반 시설물 또는 빌딩의 보수·보강 재료로 활용

2. 기대효과

- 시설물의 상태평가 및 구조적 건전성을 파악하는 획기적인 시스템 제공
- 자기감지 기능을 가지는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 개발을 통해 관련분야의 세계적인 기술 수준 향상
- 자기감지 스마트 재료의 기초연구 수행을 통해 이 분야의 연구 저변 확대
- 미래 건설 산업 첨단기술 개발 및 이와 관련한 연구 인력의 육성에 기여
- 국제 저명 학술지에 게재를 통해 국가 위상 제고
- 국내 전기, 계측 및 건설재료 연구 시너지 효과
- 진단과 보수보강이 가능한 일체화형 보수보강 재료를 활용한 유지보수 시장 개척

3. 선진 기술수준과의 기술격차 해소

※ 구체적인 수치로 설명(예:년,%)

- 현재 해외 선진국들에서도 자기감지형 섬유보강 시멘트 복합재료는 아직 기초연구단계에 있음
- 해외 선진국들의 자기 감지형 건설재료 분야 연구는 대부분이 고가의 탄소나노 튜브를 사용한 시멘트 몰탈에 국한되어 있음. 하지만, 아직까지 탄소나노 튜브를 사용한 시멘트 몰탈의 경우 재료의 탄성적인 거동 구간에서만 자기 감지 효과가 보고되어 있음
- 기존 PVA 섬유와 카본 블랙을 사용한 PVA-ECC 의 인장강도가 4-6 MPa에 불과한 반면에, 본 연구에서의 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 인장강도는 8 MPa 이상을 확보하여 최소 75%의 향상을 가져옴.
- 또한, 다수 균열을 동반하는 변형경화 구간에서 강섬유 보강 시멘트 복합재료의 전기저항률은 감소하는 반면에 기존 PVA-ECC의 경우는 증가하는 반대의 경향을 나타내 자기감지 측정능력을 향상시킴
- 본 연구에서는 탄소나노 튜브등 보다 일반적이고 경제적인 강섬유와 카본섬유를 함께 사용한 하이브리드 섬유보강 시멘트 복합재료의 비탄성 구간에서의 자기 손상감지 성능을 보고하고 있어, 기존 기술수준과의 우수성이 확보됨

기술소개자료 (SMK : Sales Material Kit)

자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료

□ 기술개요

전기 전도성이 우수한 강섬유 또는 카본섬유를 시멘트 기반의 매트릭스에 보강함으로써 직접 인장 하중 하에서 다수의 미세균열을 동반하는 변형경화 거동을 보임과 동시에 전기 저항률의 변화를 측정함으로써, 별도의 센서를 사용하지 않고도, 균열 및 손상을 스스로 감지할 수 있는 스마트 건설재료의 하나임

□ 기존 기술의 문제점

- ① 현재 안전진단에서 사용하는 부착식 또는 매립식 센서들의 경우 수명이 매우 짧음
- ② 매립식 센서들의 경우 구조물의 성능을 저하시키는 단점을 가지고 있음
- ③ 센서들이 부착된 위치에서만 구조물 손상을 확인할 수 있는 단점을 가지고 있음

□ 기술의 차별성 및 효과

차별성

자기 균열 감지 능력을 가지는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료는 반영구적 센서 기능을 가진 건설재료로서 사회기반 시설물 또는 빌딩의 모니터링에 활용, 사회기반 시설물의 내구성 향상에 기여, 그리고 보수·보강 재료로 활용

기술적 효과

- 별도의 센서들을 사용하지 않고도 사회기반 시설물의 손상을 영구적으로 감지할 수 있음
- 균열제어 능력과 인장강도의 향상으로 구조물의 내구성 향상
- 높은 gauge factor 값 (150이상)을 확보함으로써 높은 자기감지 능력을 확보

기존 부착 또는 매립식 센서는 내구수명이 2-3년에 불과하여 자주 교체가 필요기 때문에 상시 모니터링에 어려움이 존재하나 재료에서 직접 손상을 감지하여 구조물의 안전성을 더욱 향상시킴

기존 폴리머 계열의 섬유보강 시멘트 복합체는 인장강도가 4-5 MPa 인데 반해, 강섬유 보강 변형경화형 시멘트 복합재료의 인장강도는 8-15 MPa 에 달함

- 현재 유통되는 재료들의 GF값은 약 2인데 비해 150이상의 GF를 확보함으로써 손상 감지 능력을 향상시킴

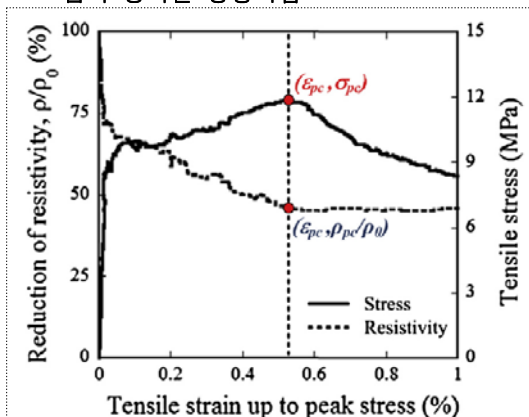
경제적 효과

- 별도의 부착 또는 매립식 센서 사용이 필요 없음
- 구조물의 사용 수명의 연장
- 경제적인 실시간 상시 모니터링 시스템의 구축 가능

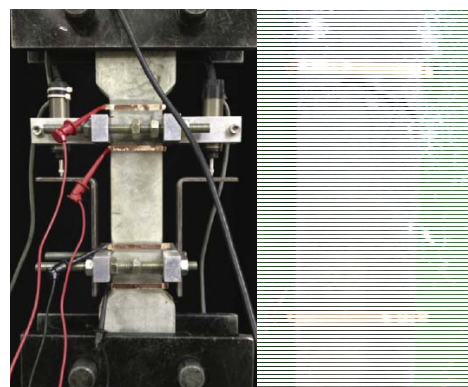
- 구조물의 수명동안 영구적으로 사용 할 수 있어 구조물의 진단에 사용되는 많은 비용과 시간 절감

일체화된 보수보강 재료에 의한 시설물의 이상유무 판정을 통해 효율적인 유지관리 및 보수·보강 계획을 수립할 수 있으며, 높은 인장강도로 인해, 사회간접자본의 수명 연장에 따른 경제성 제고

- 진단과 보수보강이 가능한 일체화형 보수보강 재료를 활용한 유지보수 시장 개척

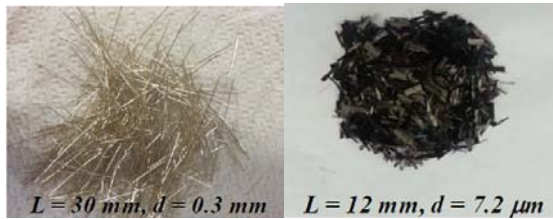


<Typical electro-mechanical behavior of SH-SFRCs>



<Typical multiple cracking behavior of SH-SFRCs>

□ 기술내용



강섬유 카본섬유
<전기전도성이 우수한 섬유 보강재>

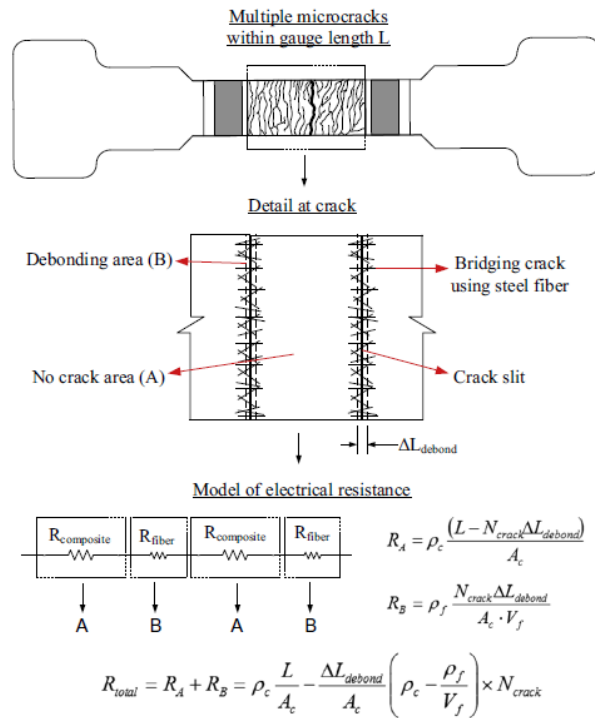


카본블랙 고로슬래그
<전기전도성이 우수한 배합재료>

본 연구에서의 제시하는 자기감지 성능을 가지는 섬유보강 시멘트 복합재료는 직접 인장하중 하에서 다수의 미세균열 발생을 동반하는 변형경화 거동을 보임과 동시에 그 변형경화 구간에서의 전기저항률이 크게 변화하는 재료적인 특성을 이용하여 재료 자체의 자기 손상 감지 능력을 사용하는 것을 제안함

시멘트 기반의 매트릭스는 일반적으로 매우 낮은 전기 전도성을 가지고 있는 반면에, 매트릭스의 취성적인 거동을 보완하기 위해 사용하는 강섬유 또는 카본섬유의 전기전도성이 매우 우수한 특성을 활용하여 자기감지 성능을 가지는 섬유보강 시멘트 복합재료를 개발함

전기전도성을 높이기 위한 방안으로는 상기의 사진들에 나타난 바와 같이 전기전도성이 우수한 섬유보강재를 사용하거나, 전기전도성이 우수한 배합재료를 추가하는 방안들을 생각할 수 있고, 본 연구 결과 섬유보강재를 활용한 방안이 더욱 높은 자기 감지 능력을 유발함



□ 수요처 및 권리현황

수요처

수요처	적용처
▪ 도로공사	▪ 도로 시설물
▪ 시설안전관리공단	▪ 철도, 지하철 시설물
▪ 유지보수업체	▪ 건축물

권리현황

- 국내특허 1건

특허명	특허번호	비고
균열 및 손상 자기감지 하이브리드 섬유보강 시멘트 복합재료의 자기감지 방법 및 자기감지 장치	10-2014-0116958	출원

□ 추가기술정보

기술분류

기술수준

- 기술개념확립
- 연구실환경검증
- 시제품제작
- 실제환경검증
- 신뢰성평가
- 상용품제작
- 사업화

□ 문 의

관리자	- 국토교통과학기술진흥원 성과활용실(031-389-6000) - techbiz@kaia.re.kr
연구자	- 세종대학교 건설환경공학과 - 김동주 - 02) 3408-3820 - djkim75@sejong.ac.kr

연구개발 핵심성과 요약

작성일 : 2015. 1. 28 작성자 : 김동주

1. 연구개발과제 개요

사 업 명	건설기술혁신사업		과 제 번 호	12CCTI-C063938-01
연구개발단계	☒ 기초연구 ☒ 실험 ☐ 시작품 ☐ 실용화 ☐ 사업화	최 종 성 과 유 형		☐ 공법,기법 ☒ 재료,자재 ☐ 소프트웨어 ☐ 장비,장비 ☐ 시스템 ☐ 정책,제도 ☐ 기타
연구과제명	자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료 개발		과제구분	☒ 일반 ☐ 연구단 ☐ 사업단
주 관 연 구 기 관	세종대학교 산학협력단		연구책임자	김동주
총 연 구 기 간 및 연구개발비 (단위 : 천원)	2012년 11월 19일 ~ 2014년 11월 18일 (2년)			
	정부출연금	민간부담금	정부외 출연금	합계
	50,000			50,000
당 해 년 도 연구기간 및 연구개발비 (단위 : 천원)	2012년 11월 19일 ~ 2014년 11월 18일 (2년)			
	정부출연금	민간부담금	정부외 출연금	합계
	50,000			50,000

2. 연구개발 핵심성과 (연구개발계획서 기 제출 핵심성과 활용)

☐ 핵심성과

연번	세부	핵심성과	최종 성과유형	핵심성과 달성을 위한 전체기간 중 주요실적
1		자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료 개발	자기감지 기능이 극대화된 섬유보강 시멘트 복합재료	국내특허출원 1건 SCI 급 국제저널 1편 게재, 국내 학술대회 2편 발표.

3. 핵심성과별 세부 설명

1) 핵심성과명 : 자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료

관련 그림 / 사진		Reduction of resistivity, ρ/ρ_0 (%) Tensile strain up to peak stress (%) — Stress ····· Resistivity ($\epsilon_{pc}, \sigma_{pc}$) ($\epsilon_{pc}, \rho_{pc}/\rho_0$) Tensile stress (MPa)						
정의		자기균열 또는 손상 감지 기능을 가지는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료를 개발하여 구조물 및 보수보강 재료 자체가 자기감지 기능을 가질 수 있도록 함						
목적		센서의 교체가 필요 없이 연속적으로 사용 할 수 있으며, 시설물의 구조적 성능에 악영향을 미치지 않고, 구조물의 손상 정도를 전체적으로 파악할 수 있는 “자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료의 개발”을 하고자 함						
성능목표		(기존기술 수준) ■ CNT 또는 카본섬유만을 보강한 기존 스마트 건설재료 콘크리트의 경우 탄성구간 내에서는 자기감지기능을 가지나, 취성적 파괴로 인해 소성구간의 자기감지기능은 없음 ■ 전기전도성이 낮은 폴리머 계열 PVA 섬유를 사용한 섬유보강 시멘트 복합재료의 경우 초기균열 발생이후 전기전도성이 저감되는 현상을 보이고 인장강도가 4~5 MPa임 (개발기술 수준) ■ 탄성구간 뿐만 아니라 소성구간에서도 자기손상 감지 기능을 가지도록 하여 균열파악 가능하게 하고, 일반 변형률 센서의 경우 2, 그리고 카본섬유보강 시멘트 복합재료는 30~50인 Gauge factor를 자기감지능력 향상을 위해 150 이상의 달성하고자 함 ■ 기존 일반 콘크리트 및 PVA 섬유보강 시멘트 복합재료와 비교해 높은 인장강도 (8~15 MPa)를 지니며 초기균열 발생이후 전기전도성을 오히려 향상시켜 자기감지성능 향상						
성과달성 책임자 (소속기관)		김 동 주 (세종대학교)						
소요기간		2012. 11. 19 ~ 2014. 11. 18 (2년, 1년차)						
핵심성과	달성 확인방법	1차년도	직접인장시험을 수행하면서 전기 저항률을 측정하여 재료의 인장거동과 전기 저항률의 상관관계를 검토하여 자기감지능력을 평가함					
	양적성과	1차년도	특허 출원	특허 등록	SCI 논문	비SCI논문	S/W	기타
			1		국외 1			국내 학술발표 2건
질적성과	1차년도	■ 상위 10% 이내에 드는 국제 SCI급 저널인 Composite Part: B에 논문 게재 ■ 국내 특허 출원						
성과 활용계획		■ 변형경화를 보이는 재료로써 사회기반 시설물의 내구성 향상 뿐 아니라 실시간 모니터링 재료로 활용하기 위한 기초연구 자료의 제공 ■ 향후 추가 후속 연구를 통하여, 기존 구조물에 보수 / 보강 재료로 사용 또는 신규 구조물의 중요부재에 적용하여 센서의 부착 및 매립 없이도 구조물의 안전성 검토 및 모니터링 시스템에 활용할 수 있는 연구결과의 제공						

‘자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료의 개발’과제 최종성과물 일람

□ 세종대학교 산학협력단 (김동주)

구분	과제명	최종 성과명 (핵심 성과명)	최종 성과물형 태 (성과 유형)	기술수준		경제성		성과 우수성		성과물 발생 시기 (개발완 료시점)	최종 수요처	활용방안 (미발생시)	기대효과	기술실 시계약	비고
				연구 전 (’12)	연구 후 (’14)	연구 전 (’12)	연구 후 (’14)	기존 기술과의 차별성	정량적 성과						
세종대 학교	자기감지 기능을 갖는 보수 보강용 섬유보강 시멘트 복합재료의 개발	자기감지 능력을 갖는 섬유보강 시멘트 복합재료	재료/자재	-국외기술 PVA 섬유를 카본블랙과 함께 사용한 PVA섬유 보강 시멘트 복합재료의 직접인장 하에서 전기 저항을 변화 측정을 통해, 자기감지 능력의 가능성을 작은 인장 시편 수준에서 제시한바 있음 -국내기술 세종대학교에 서 강섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률에 대한 기초연구를 수행한바 있음	-국외기술 PVA 섬유보강 시멘트 복합재료의 전기 저항률 변화에 대한 이론적 모델 개발에 대한 연구 진행 중 -국내기술 전기 전도성이 우수한 강섬유 또는 카본섬유를 사용하여 시편수준에서 직접인장 하중 하에서 초기균열 발생 시점과 최종균열시점 을 명확하게 파악할 수 있는 전기역학적 거동을 규명하였음	모니터링을 위한 기존 센서들의 낮은 내구수명으로 인한 계속적인 비용 발생	수행된 연구는 자기감지 기능을 가지는 섬유보강 시멘트 복합재료에 대한 기초연구로써, 경제성에 대한 분석이 명확히 이루어지지 않았음. 하지만, 강섬유를 보강할 경우, 총공사비가 약 120~130% 증가하지만, 구조물의 내구성향상으 로 인한 수명연장이 기대되어 콘크리트 구조물의 공용수명인 30~50년 동안 발생되는 유지 보수비용(초기 투자비용 대비 30% 정도) 절감효과가 기대됨	기존 PVA 섬유보강 복합재료와 비교하면 전기전도성이 우수한 섬유를 사용하여 시멘트 복합재료에 균열이 발생할 경우 전기 저항률이 급격히 저하하는 경향을 뚜렷하게 확인할 수 있음. 또한, 최소 75% 높은 인장강도를 가져 균열제어능력이 향상되어 보수·보강재료로 사용 시 구조물의 내구성 향상에 더욱 큰 효과를 기대할 수 있음	SCI급 논문 1건 (상위 10% 이내), 국내 특허 출원 1건, 국내 학술대회 발표 2건	2014년 11월 18일	- 도로공사 - 시설물 안전관리공단 - 철도 및 지하철 시설물	- 향후 후속과제를 통해 보완연구 및 실용화 방안을 도출한다면 사회기반시설의 신규 및 보수보강에 활용가능할 것으로 예상	- 자기감지형 건설재료 개발을 위한 후속연구 발굴에 기초자료로서 활용 - 관련 원천기술 개발에 중요 참고자료로 활용	미체결	

홍보자료

자기감지 기능을 갖는 보수보강용
섬유보강 시멘트 복합재료 개발

2012.11.19 – 2014.11.18

세종대학교
건설환경공학과
Advanced Cement Composite Laboratory

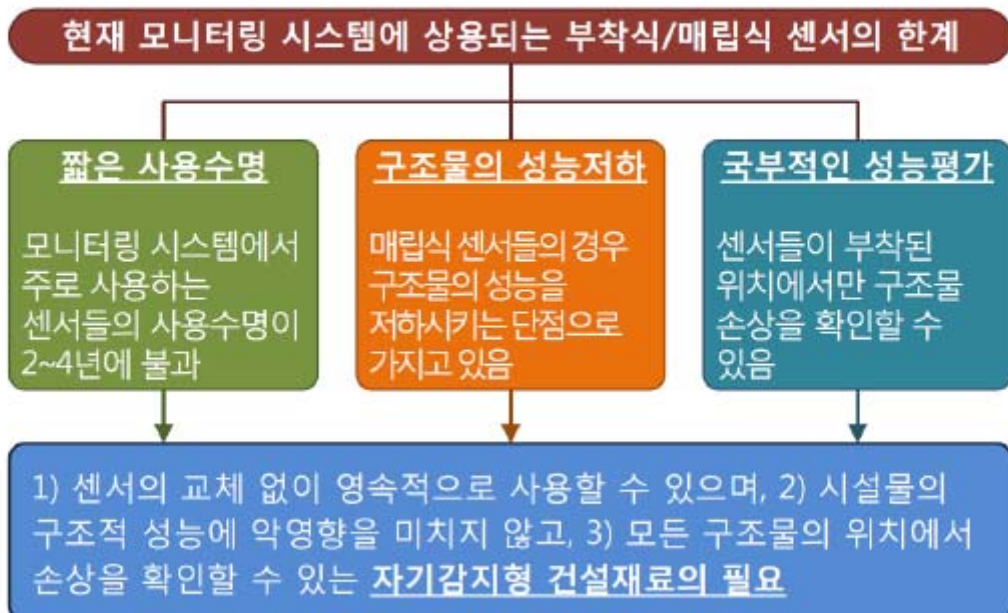
부교수 김 동 주

1. 연구 개발 필요성

■ 사회기반 시설물의 붕괴와 유지 관리의 중요성



■ 사회기반 시설물의 붕괴와 유지 관리의 문제점



2. 연구 개발 소개

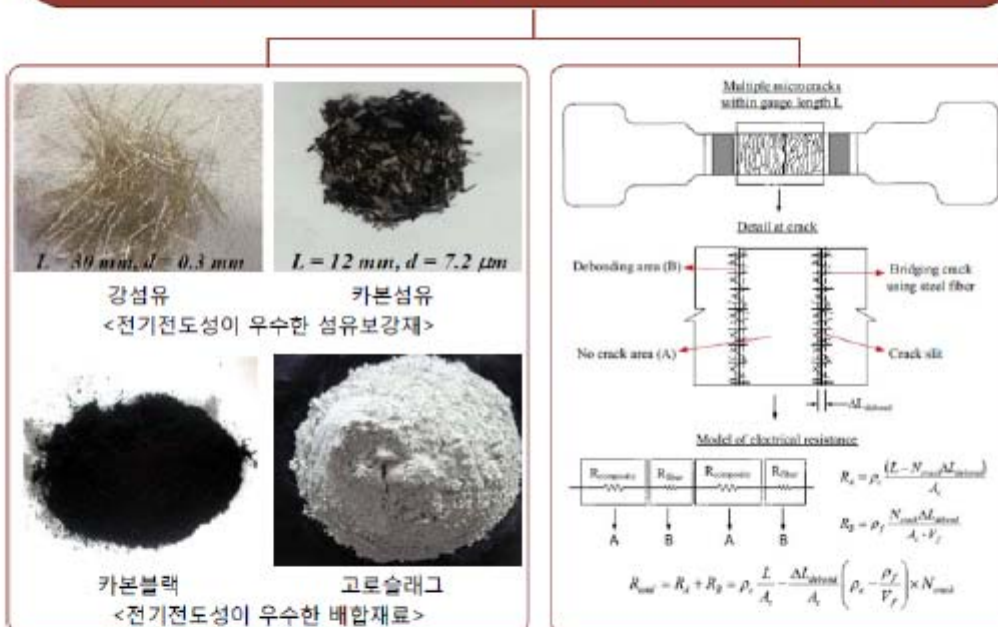
■ 연구목표

“자기감지 기능을 갖는 보수보강용 섬유보강 시멘트 복합재료 개발”

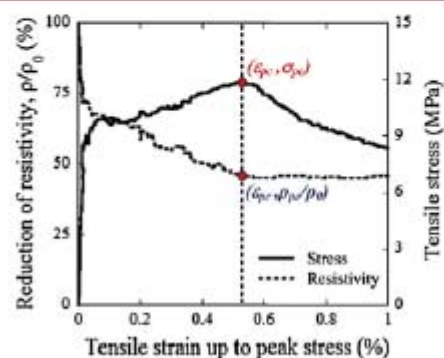
전기 저항률의 변화와 균열 및 손상과의 관계를 규명함으로써, 자기균열/손상 감지 기능을 가지는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료를 개발하여 구조물 및 보수보강 재료 자체가 자기감지 기능을 가질 수 있도록 함

■ 연구내용

전기전도성이 우수한 재료의 이용을 통한 변화경화구간에서의 자기 손상 감지능력 사용

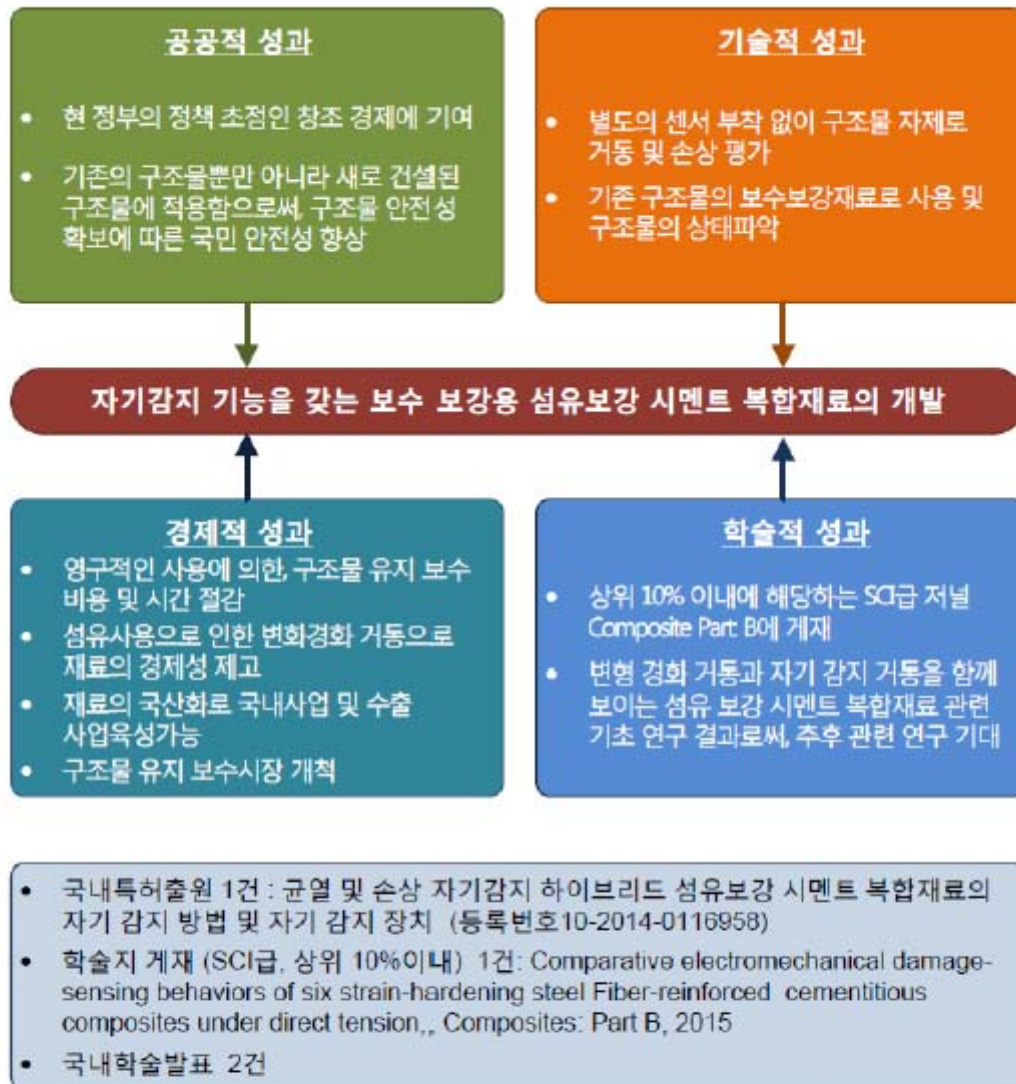


- 강섬유의 종류 및 크기에 따른 자기감지 능력의 변화: 매크로 강섬유가 변형능력의 향상에 유리한 반면에 마이크로 강섬유가 전기전도성 향상에 유리, 비틀림 강섬유의 보강시 자기감지 능력이 가장 우수
- 섬유 보강량을 부피비로 1-1.5% 만 보강시에도 150 이상의 높은 gauge factor를 확보함
- 시멘트 기반의 매트릭스에 카본블랙과 고로슬래그 등의 치환으로 전기전도성 및 gauge factor 향상
- 온도와 습도의 증가시 시멘트 복합재료의 전기 전도성이 일반적으로 증대하여 자기감지 능력을 유지



<Typical electro-mechanical behavior of SH-SFRCs>

3. 연구 개발 성과



4. 연구의 보완점 및 후속 연구

- 개발된 재료의 구조물 적용 방안 도출
- 철근 또는 PS 강선이 함께 사용되었을 경우의 전기 저항률 및 자기 균열 감지 능력에 대한 검증 필요
- 구조물의 각 거동에 따른 반응을 객관화한 구조 성능 평가의 지표 설정이 필요
- 추후, 시험체의 크기가 증가하였을 때의 자기 균열 감지 능력 변화에 대한 조사와 압축, 휨, 그리고 전단과 같은 거동에 대한 전기 저항률의 변화를 조사할 예정

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술연구개발사업의 최종보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.