

최종보고서(일반과제용)							보안등급					
							일반[✓], 보안[]					
중앙행정기관명	국토교통부			사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업					
전문기관명	국토교통과학기술진흥원				내역사업명		글로벌 기술협력					
공고번호	2019년 공고-제2호			연구개발과제번호		21CTAP-C151808-03						
국가과학기술 표준분류	시설물점검/진단기술	25%	나노 응용기술		20%	달리 분류되지 않는 측정분 석장비/장치		15%				
연구주제	(대분류) 초연결 도시 구현 기술 개발 (중분류) 스마트 시티					(소분류) 저전력·초소형 지능형 센서						
연구개발과제명	국문	스마트시티 구현을 위한 셀프센싱 건설재료와 사물인터넷 기반 콘크리트 구조물 건전성 모니터링 시스템 개발										
	영문	Development of IoT structural health monitoring system integrated with self-sensing concrete structures for smart cities										
주관연구개발기관	기관명	(주)이엔지소프트			사업자등록번호		130-86-61938					
	주소	(우)07532 서울특별시 강서구 양천로 551-17 한화비즈메트로 1차 404호			법인등록번호		121111-0220368					
연구책임자	성명	남 상 혁			직위		대 표					
	연락처	직장전화	02-839-8714			휴대전화		010-4272-4807				
		전자우편	shnam@engsoft.kr			국가연구자번호		10133925				
연구개발기간	전체	2019. 04. 05 - 2021. 12. 31(2년 9개월)										
	1년차	2019. 04. 05 - 2019. 12. 31(1년 9개월)										
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31(1년 1개월)										
	3년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(1년 1개월)										
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그외기관 등의 지원금 지방자치단체 기타()				합계		연구개발비 외 지원금		
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물		합계	
	총계	542,000	18,200	273,800	-	-	-	-	560,200		273,800	834,000
	1년차	140,000	4,800	73,200	-	-	-	-	144,800		73,200	218,000
	2년차	201,000	6,700	100,300	-	-	-	-	207,700		100,300	308,000
3년차	201,000	6,700	100,300	-	-	-	-	207,700	100,300	308,000		
공동연구개발기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고				
								역할	기관유형			
공동연구개발기관	성균관대학교 산학협력단	박승희	교수	010-3585-0825		shparkpc @gmail.com		공동	대학			
	University of Plymouth	Long-yuan Li	Professor	+44(0)1752- 586180		long-yuan.li@ plymouth.ac.uk		공동	대학			
연구개발담당자 실무담당자	성명	박혜인			직위		과장					
	연락처	직장전화	02-893-8714			휴대전화		010-3231-9232				
		전자우편	hipark@engsoft.kr			국가연구자번호		12477241				

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재
처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022년 03월 16일

연구책임자 :

남 상 혁

주관연구개발기관의 장 :

(주)이엔지소프트 김 성 곤

공동연구개발기관의 장 :

성균관대학교 산학협력단 박 선 규

공동연구개발기관의 장 :

University of Plymouth Kevin Jones

< 요약 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업				연구개발과제번호			21CTAP-C151808-03			
내역사업명		글로벌 기술협력										
국가과학기술표준분류		시설물점검/진단기술	25%	나노응용기술	20%	달리 분류되지 않는 측정 분석장비/장치	15%	S/W 솔루션	20%	원격 모니터링 기술	20%	
연구주제		(대분류) 초연결 도시 구현 기술 개발			(중분류) 스마트 시티			(소분류) 저전력·초소형 지능형 센서				
연구개발과제명		스마트시티 구현을 위한 셀프센싱 건설재료와 사물인터넷 기반 콘크리트 구조물 건전성 모니터링 시스템 개발										
전체 연구개발기간		2019. 04. 05 - 2021. 12. 31(2년 9개월)										
총 연구개발비		총 817,250천원 (정부지원연구개발비 : 542,000천원, 기관부담연구개발비 : 275,250천원)										
연구개발단계		기초[] 응용[✓] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]				기술성숙도		착수시점 기준(3) 종료시점 목표(6)				
연구개발과제 유형		지정공모 [] 자유공모 [✓]										
연구개발과제 특성		-										
연구개발목표 및 내용	최종 목표		스마트시티 구현을 위한 셀프센싱 건설재료와 사물인터넷 기반 콘크리트 구조물 건전성 모니터링 시스템 개발									
	전체 내용		1. 사물인터넷 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 개발 2. CNT 셀프센싱 콘크리트 구조물 건전성 모니터링을 위한 전기저항 임피던스 기법 개발 3. 셀프센싱 CNT 폴리머 코팅 제작 및 센싱 인터페이스 개발									
	1년차	목표	1. IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 설계 2. CNT Cement Block Sensor Module을 이용한 SHM 기술 개발 3. 셀프센싱을 위한 CNT 폴리머 코팅 제작									
		내용	1.1 IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 하드웨어 설계 1.2 IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 소프트웨어 설계 2.1 전기저항 임피던스 계측을 위한 전극 위치 및 형태 최적화 2.2 CNT Cement Block Sensor Module를 이용한 전기저항 임피던스 계측기법 개발 3.1 분산제 및 분산력 변화에 따른 CNT 분산 최적화 3.2 CNT 함유량에 따른 전기전도도 측정									
	2년차	목표	1. IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 프로토타입 개발 2. CNT/Cement-PZT 복합 센서 모듈을 이용한 SHM 기법 개발 3. 물리적 하중 및 환경적 변화에 따른 CNT 폴리머 코팅의 전기적 변화 특성 분석									
		내용	1.1 IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 하드웨어 개발 1.2 IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 소프트웨어 개발 2.1 CNT/Cement-PZT 복합 센서 모듈을 이용한 센서화 기법 개발 2.2 CNT/Cement-PZT 복합 센서 모듈을 이용한 콘크리트 SHM 기법 개발 3.1 CNT 폴리머 코팅의 하중 변화에 따른 저항 변화량 확인 3.2 CNT 폴리머 코팅의 온도 및 습도 변화에 따른 저항 변화량 확인									
	3년차	목표	1. IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 시험운영 및 고도화 2. 실험을 통한 전기저항 임피던스 기반 SHM기술 검증 및 보완 3. CNT 폴리머 복합체와 IoT 시스템 연계 기법 개발									
		내용	1.1 계측 및 모니터링 알고리즘 시스템에 적용 1.2 IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 시험운영 1.3 IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 고도화 방안 도출 2.1 압축/휨응력 실험을 통한 콘크리트 SHM 기법 검증 2.2 전기저항 임피던스의 온습도 보상 기법 개발 3.1 CNT 폴리머 코팅과 아두이노 기반 소프트웨어 연계 확인 3.2 IoT 시스템 인터페이스 개발									

연구개발성과	○ IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 개발 - CNT 폴리머 코팅의 저항 측정이 가능한 하드웨어 및 소프트웨어 설계문서 도출 - 하드웨어 및 소프트웨어 설계문서 기반 프로토타입 개발 - CNT 폴리머 코팅 센서 16채널을 동시에 측정할 수 있도록 하드웨어 개량 - 개량된 하드웨어에 대응하고 CNT-PZT 복합센서 데이터 모니터링 시스템 및 가시화 방법 개발 - CNT 폴리머 코팅 센서 및 CNT-PZT 복합센서 통합시험 모니터링 시스템 시험운영 및 고도화 방안 도출 ○ CNT 셀프센싱 콘크리트 SHM을 위한 전기저항 임피던스 기법 개발 - 전기저항 임피던스 측정을 위한 전극 위치 및 형태 최적화 설계 - CNT/Cement-PZT 복합센서 모듈을 이용한 SHM 기법 - 측정 기법의 신뢰성 증가를 위한 환경 조건 영향 보상 알고리즘 개발 - CNT/Cement-PZT 복합센서 데이터 수집 장치 제작 - 실험을 통한 CNT-PZT 복합센서를 적용한 콘크리트 압축강도 예측 및 손상감지 성능 확인 ○ 셀프센싱 CNT 폴리머 복합체 및 IoT센싱 인터페이스 개발 - 분산제와 분산력에 따른 CNT 분산 기법 개발 - CNT 함유량에 따른 전기전도도 비교 - 온·습도와 재하 하중에 따른 CNT 폴리머 코팅의 저항 변화 특성 분석 - 아두이노 기반 소프트웨어를 활용한 CNT 폴리머 코팅 변형 감지 시스템 개발 - IoT 모니터링 시스템과의 연동을 통한 균열 감지 성능 확인 ○ 정량적 성과는 당초 계획 대비 100% 이상 달성 - 논문 게재(SCIE): 200% (8건/4건) - 학술발표: 100% (6건/6건) - 특허 출원: 100% (3건/3건) - 소프트웨어 등록: 100% (5건/5건) - 시제품 제작: 200% (2건/1건) - 신규 고용(청년의무): 100% (1건/1건) - 사업화: 1건 (2020년 매출실적: 61,700천원)												
연구개발성과 활용방안 및 기대효과	본 연구에서 개발된 셀프센싱 나노 복합재료 및 이와 연계된 사물인터넷 기반 구조물 건전성 모니터링 시스템은 기존의 수많은 외부적인 센서들의 부착없이 구조물 자체가 스스로 건전성을 판단할 수 있도록 하는 스마트시티 구현을 위한 도구로 사용 될 수 있다. 특히 스마트시티 구현의 위한 3대 주요 기술인 센싱 기술, 통신 및 네트워크 인프라 기술, 서비스 인터페이스 기술을 본 연구 성과를 통해 새로운 솔루션을 제시할 수 있을 것이다. 개발된 기술은 기존의 설치된 모든 건설구조물 및 새로운 건설구조물에 적용될 수 있을 것이며, 추가적인 연구개발을 통해 센서 및 센싱기법의 고도화, 스마트 모니터링 시스템의 기능 및 적용 범위 확대 등을 통해 보다 다양한 분야에서 다양한 목적으로 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.												
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음												
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종		
	생명 정보	생물 자원	정보	실물									
	8	3				5							
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호				
국문핵심어 (5개 이내)	스마트시티		셀프센싱		사물인터넷		탄소나노튜브		구조물 건전성 모니터링				
영문핵심어 (5개 이내)	smart city		self-sensing		IoT		carbon nanotube		structural health monitoring				

< 목 차 >

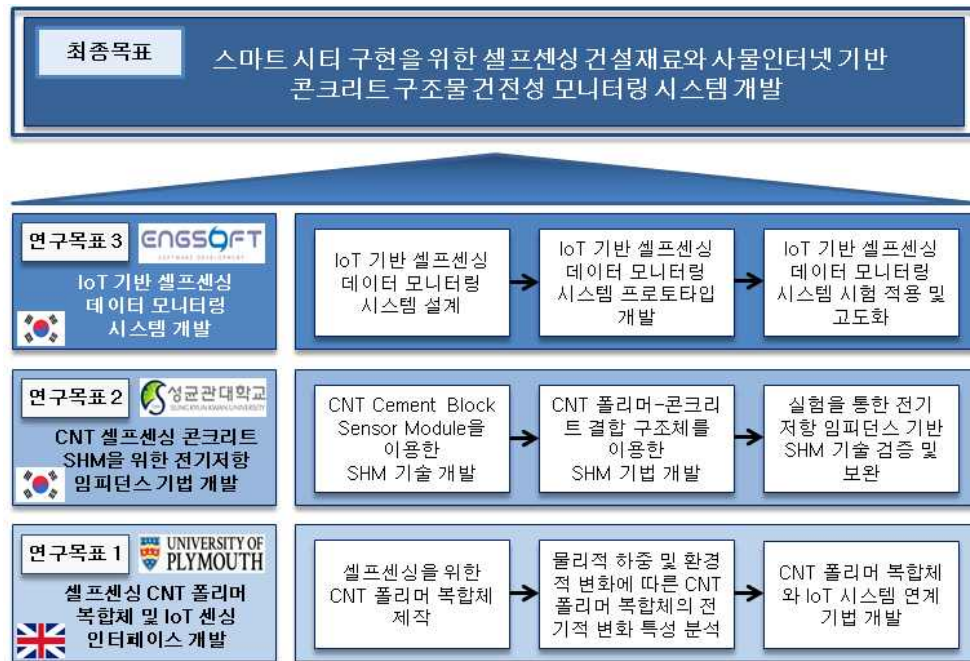
1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	3
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	66
4. 목표 미달 시 원인분석	71
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	71
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	71
7. 참고 문헌	72

별첨자료(성과 증빙자료 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

- 스마트시티 구현을 위한 셀프센싱 건설재료와 사물인터넷 기반 콘크리트 구조물 건전성 모니터링 시스템 개발
 - 목표 1 : 셀프센싱 CNT 폴리머 복합체 및 IoT 센싱 인터페이스 개발
 - 목표 2 : CNT 셀프센싱 콘크리트 SHM을 위한 전기저항 임피던스 기법 개발
 - 목표 3 : IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 개발



2) 연구개발과제의 연차별 목표

- 주관연구기관(이엔지소프트)
 - 1차년도 : IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 설계
 - 2차년도 : IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 프로토타입 개발
 - 3차년도 : IoT 기반 셀프센싱 모니터링 시스템 시험운영 및 고도화
- 공동연구기관(성균관대학교 산학협력단)
 - 1차년도 : CNT Cement Block Sensor Module을 이용한 구조물 건전성 모니터링 기술 개발
 - 2차년도 : CNT/Cement-PZT 복합 센서 모듈을 이용한 SHM 기법 개발
 - 3차년도 : 실험을 통한 전기저항 임피던스 기반 SHM기술 검증 및 보완
- 공동연구기관(University of Plymouth)
 - 1차년도 : CNT 분산 최적화 기술을 통한 셀프센싱 폴리머 코팅 재료 최적화 기법 개발
 - 2차년도 : 물리적 하중 및 환경적 변화에 따른 CNT 폴리머 코팅의 전기적 변화 특성 분석
 - 3차년도 : CNT 폴리머 복합체와 IoT 시스템 연계 기법 개발

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2019)	IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 설계	IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 하드웨어 및 소프트웨어 설계서	-	시스템 하드웨어 및 소프트웨어 설계 문서 작성	IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 개발을 위한 설계 문서	38
	CNT Cement Block Sensor Module을 이용한 SHM 기술 개발	CNT Cement Block Sensor Module 및 전기저항 임피던스 계측기법	강도에측오차율 13% 이하 (영국/Q-see man International)	강도에측 오차율 20% 이하	압축강도 실험값과의 비교를 통한 오차율	26
			손상탐지가능거리 PZT 기준 300mm (한국/성균관대학교)	손상탐지 가능거리 100mm 이상	센서 위치에서 손상지점까지의 거리	
	셀프센싱을 위한 CNT 폴리머 코팅 제작	셀프센싱 CNT 폴리머 코팅 재료 최적화	최소 CNT량 1.5wt. % (영국/University of Plymouth)	최소 CNT량 1.5wt.%	Percolation threshold 도달 시의 최소 CNT량	36
			탐지가능균열폭 5mm (영국/University of Plymouth)	탐지가능 균열폭 5mm 이하	균열발생 감지 가능 최소 균열폭	
2년차 (2020)	IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 프로토타입 개발	IoT 기반 모니터링 시스템 하드웨어 및 소프트웨어 프로토타입	시스템 UI 오류율	10% 이하	UI 중 시험항목 선정하여 20회 반복 수행 후 오류율 산정	44
	CNT/Cement-PZT 복합센서 모듈을 이용한 SHM 기법 개발	CNT/Cement-PZT 복합센서 모듈 및 센싱 기법	강도계측오차율 13% 이하 (영국/Q-see man International)	강도계측 오차율 15% 이하	압축강도 실험값과의 비교를 통한 오차율	22
			손상탐지가능거리 PZT 기준 300mm (한국/성균관대학교)	손상탐지 가능거리 200mm 이상	센서 위치에서 손상지점까지의 거리	
	물리적 하중 및 환경적 변화에 따른 CNT 폴리머 복합체의 전기적 변화 특성 분석	CNT 폴리머 코팅을 통한 셀프센싱 기법	최소 CNT량 1.5wt. % (영국/University of Plymouth)	최소 CNT량 1.0wt.%	Percolation threshold 도달 시의 최소 CNT량	34
			탐지가능균열폭 5mm (영국/University of Plymouth)	탐지가능 균열폭 2.5mm 이하	균열발생 감지 가능 최소 균열폭	
3년차 (2021)	IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 시험운영 및 고도화	IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템	시스템 UI 오류율	5% 이내	UI 중 시험항목 선정하여 20회 반복 수행 후 오류율 산정	42
	실험을 통한 전기저항 임피던스 기반 SHM기술 검증 및 보완	전기저항 임피던스 기반 SHM기술	강도계측오차율 13% 이하 (영국/Q-see man International)	강도계측 오차율 10% 이하	압축강도 실험값과의 비교를 통한 오차율	24
			손상탐지가능거리 PZT 기준 300mm (한국/성균관대학교)	손상탐지 가능거리 300mm 이상	센서 위치에서 손상지점까지의 거리	
	CNT 폴리머 복합체와 IoT 시스템 연계 기법 개발	CNT 폴리머 코팅의 셀프센싱 알고리즘 및 센싱 인터페이스	탐지가능균열폭 5mm (영국/University of Plymouth)	탐지가능 균열폭 1mm 이하	균열발생 감지 가능 최소 균열폭	34

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

○ 연구 수행 과정 및 수행 내용

- 주관연구기관(이엔지소프트)

■ IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 설계

모니터링 시스템 요구사항 도출

1. 업무 개요

1.1. 요구 사항 개요

『IoT 기반 SHM 모니터링시스템』은 탄소나노튜브 복합체를 이용한 임피던스 계측장비에서 계측된 데이터를 이용하여 구조물의 건전성을 평가할 수 있는 시스템이다.

이를 위한 주요 개발 범위는 다음과 같다.

- (1) 『IoT 기반 SHM 모니터링시스템』을 위한 핵심기능 요구사항 도출
- (2) 『IoT 기반 SHM 모니터링시스템』을 위한 사용자 기능요구사항 정의
- (3) 『IoT 기반 SHM 모니터링시스템』을 위한 사용자 요구사항 정의

본 단계에서는 기능 요구사항의 개념을 반영하여 사용자 요구사항을 취합하여 요구 사항 별로 상세하게 기술을 함을 목적으로 작성하였다.

요구사항 기술서는 프로그램의 기능 요구 사항 별로 기능을 상세하게 기술하여 효율적으로 개발을 수행하는 것을 지원하는 문서이다. "요구사항 분석서"는 일차적으로는 실제 구축을 위한 설계 및 구축 가능성/난이도를 염두에 두지는 않고 작성하며, 체계 설계 및 구현 단계에서 보여질 산출물의 구체적인 모습은 이후의 문서에서 구체화 한다.

요구사항은 CFR 과 UFR 로 나누어서 기술하며, CFR 과 UFR 을 종합하여 요구사항으로 정리하는 절차로 수행된다.

본 문서는 『IoT 기반 SHM 모니터링시스템』을 효율적으로 개발하기 위하여 기능 요구사항의 개념을 반영하여 핵심기능, 사용자 기능, 사용자 요구사항 별로 상세하게 기술하기 위하여 작성되었다.

상세하게 기술된 본 문서를 기반으로 『IoT 기반 SHM 모니터링시스템』을 설계할 것이다.

2. 핵심 기능 요구 사항 (CFR: Critical Functional Requirement) 모음

2.1. CFR 정의

* 작성 목적

본 CFR 정의는 본 체계의 가장 근간이 되는 핵심 기능 요구사항을 인식하고 정의하기 위함이다.

* 작성 방법 :

- (1) 요구 사항 항목 인식: 핵심 기능요구사항을 정리한다. 요구사항의 각 항목을 설명하고 뒤 절에서 기술할 CFR 상세 기술 부분에서 각 요구사항 별로 상세 기술한다.
- (2) 이름은 기술적인 제목을 부여한다.
예) 관련자료 연계, 검색 기능, 미리보기 기능. 이력 관리
- (3) 설명: 요구 사항 내용을 반영 하여 작성한다.
- (4) 설계 WBS: 해당된다고 여겨지는 설계 WBS 의 Activity 를 찾아서 넣는다. 단, WBS 에 해당하지 않거나 명확하지 않을 경우는 미팅을 통해서 정한다.
- (5) 유형: 기능, 비기능으로 구별한다. 유형은 기능적인 것과 개발 품질 등에 관한 것으로 구별할 수 있으므로 기능적으로 개발할 것이 아닌 것은 비기능으로 작성한다.
- (6) 요구사항 분석 개념:
요구 사항을 분석하는 것은 사용자가 원하는 기능 요구사항을 모으는 것이다.
이를 위해서는 사용자가 해야 할 일, 제공해야 할 정보 및 데이터와 시스템이 해야 할 일, 제공해야 할 데이터를 정의함으로써 구체화된다. 이를 위해서 필요한 문서 및 자료를 모으는 작업을 병행해야 한다.

***CFR ID 부여 방식**

(1) CFR(Critical Functional Requirement)

(2) ###(ID 부여 개수)

예. CFR-001

ID	요구사항명	내용	시스템
CFR-001	저항센서정보 측정	저항 센서값을 측정	센서노드
CFR-002	온도 및 습도센서 측정	온도 및 습도센서값을 측정	센서노드
CFR-003	변형을 계산	측정된 저항값 및 온도, 습도를 이용한 변형을 계산	센서노드
CFR-004	데이터전송(센서노드->데이터 로거)	센서노드에서 측정 및 계산된 정보를 데이터로거에 전송함	센서노드
CFR-005	데이터연결(센서노드->스마트 폰 App)	센서노드에서 측정 및 계산된 정보를 스마트폰으로 전송한다.	센서노드
CFR-006	데이터전송(데이터로거->SH M DB)	센서노드에서 수신된 정보를 WiFi 를 통해 SHM DB 에 전송함	데이터로거
CFR-101	스마트폰 App 사용자관리	사용자 로그인 및 사용자정보관리	스마트폰 App
CFR-102	디바이스등록 (스마트폰 App)	디바이스 등록기능	스마트폰 App
CFR-103	Dash 보드 (스마트폰 App)	전체 데이터로거현황을 조회할 수 있는 Dash 보드	스마트폰 App
CFR-104	센서노드관리 (스마트폰 App)	센서노드 정보 및 설정값을 스마트폰 App 에서 입력한다.	스마트폰 App
CFR-105	사용자관리 (Web)	사용자 로그인 및 사용자정보관리	Web 기반
CFR-106	Dash 보드 (Web)	전체 데이터로거현황을 조회할 수 있는 Dash 보드	Web 기반
CFR-107	센서설정 및 알림 (Web)	계측센서별 설정 및 이상알림	Web 기반
CFR-108	과거데이터조회 (Web)	과거 계측데이터 조회	Web 기반
CFR-109	센서노드관리기능 (Web)	센서노드관리	Web 기반

2.2. CFR 상세 기술 (하드웨어)

*** 작성 목적**

앞 절에서 정의한 CFR 항목을 구체화 시키기 위함이다. 이를 통해서 개발기관이 CFR 의 각 항목을 명확하게 정의하고 이해하기 위하여 작성한다.

*** 작성 방법**

- (1) 일차적으로 요구 사항의 구체적인 내용을 인식하며, 연구개발계획서를 기반으로 도출된 내용을 근간으로 일차적으로 기술한다.
- (2) 일차적으로 기술된 내용을 바탕으로 개발 실무자들과 협의하여 내용을 정제한다. 실무자들과의 협의 또는 논의를 통해 상세한 요구사항이 도출되며, 또한 그 과정에서 AS-IS 설명과 TO-BE 이미지가 개념적으로 도출 될 수 있다. 이때, AS-IS 와 TO-BE 의 Process Chain 을 그릴수 있고 이때 Process Chain 은 Process, Data, 지원 System 을 표현하여야 한다.
- (3) 기술은 도표의 내용을 작성함과 동시에 상세한 내용을 문장 형식으로 기술한다.
- (4) 기본 (Default) 사항으로 요구사항을 도표 또는 그림으로 표현하도록 하여야 한다. 도표나 그림은 기존의 제안서, 타 자료를 활용하여 작성할 수 있다.
- (5) 정확한 이해를 돕기 위해서 Flow Chart, IDEF Diagram, 시스템 구성도, Flow Chart, Data Flow Diagram, UML Diagram, ER Diagram 등과 같은 diagram 을 통해 개념을 제시할 수 있다.
- (6) 요구사항을 정제할 필요가 있거나 분리할 필요가 있을 시 이를 정제하여 요약한다.

* 용어정의

- (1) 센서값 : 센서로부터 측정된 가공되지 않은 정보
- (2) 계측정보 : 수신된 센서정보를 이용하여 가공 및 분석된 정보
- (3) 센서노드 : 아누이노기반의 센서정보를 수집하는 하드웨어
- (4) 데이터로거 : 다수의 노드에서 수집된 센서정보를 BLE 통신을 통해 센서값을 수신하는 하드웨어(라즈베리파이기반)
- (5) 데이터베이스 : 개발사의 서버에 설치된 데이터베이스

스마트 센서노드 하드웨어 설계

1. 업무 개요

1.1. 요구 사항 개요

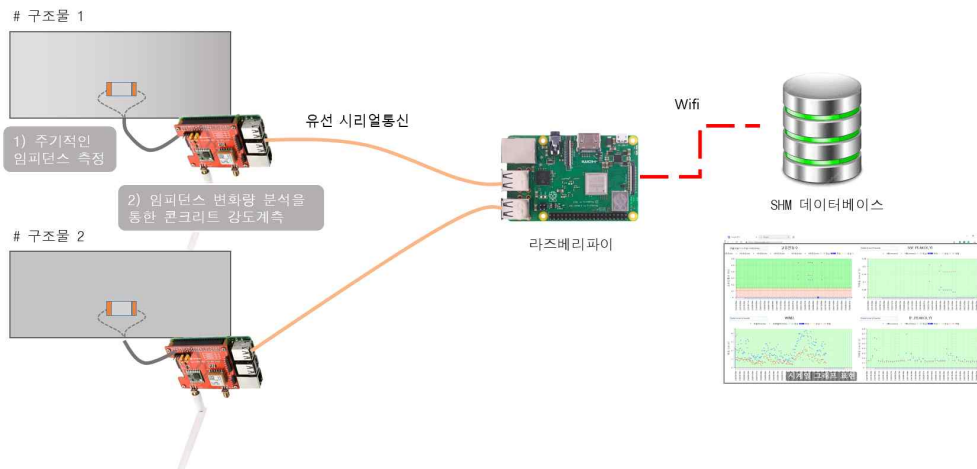
『IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템』은 탄소나노튜브 복합체를 이용한 임피던스 계측장비에서 계측된 데이터를 취득하여 모니터링할 수 있는 시스템이다.

본 문서는 『IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템』의 하드웨어를 효율적으로 개발하기 위한 요구사항 분석서와 상세설계서이다.

2. 상세설계

2.1. 하드웨어 동작

항목	동작
센서노드	1. 변형을 계측이 필요한 곳에 CNT 복합체 센서를 설치한다. 2. 센서는 2 축으로 구성하여 설치하며 2 축센싱정보가 센서노드에 연결된다. 3. 해당 계측위치의 온도, 습도를 측정하여 센서노드에 저장한다.. 4. 유선통신기술을 통해 센서의 센싱값과 계산된 변형율값을 주기적으로 데이터로거로 송신함
데이터로거	1. 센서노드의 센싱정보를 주기적으로 수신 2. 복수의 센서노드에서 수신된 계측정보를 SHM DB 서버로 송신함 3. Wifi 신호세기를 측정하여 통신품질을 확인함



<하드웨어 구성도>

2.2. 하드웨어 기능

2.2.1. 센서

* 주요기능

- (1) 구조물 변형을 계측을 위해 매핑된 위치에 센서 설치함
- (2) DC 5V 3A 어댑터를 연결하여 상시전원을 공급함
- (3) 전원버튼을 눌러 시스템이 동작함, Off 버튼을 눌러 시스템을 정지함
- (4) 제품이 동작하면서 주변환경정보를 센싱한 후 해당위치의 온도, 습도값 및 센서에서 측정된 전기저항값을 획득함
- (5) 획득된 정보를 이용하여 변형을 계산알고리즘을 통해 변형율을 계산함
- (6) 계산된 변형율을 시리얼통신을 통해 데이터로거(라즈베리파이)에 전송함

2.2.2. 데이터로거

* 주요기능

- (1) 복수의 센서노드와 Wifi 무선통신을 고려하여 적합한 지점에 설치함
- (2) DC 5V 3A 어댑터를 연결하여 상시전원을 공급함
- (3) 전원버튼을 눌러 시스템이 동작하고 Off 버튼을 눌러 시스템을 정지함
- (4) 센서노드에서 전송된 변형율값을 송신하여 메모리에 저장함
- (5) 연결된 SHM DB에 sql 구문을 통해 데이터를 전송함

2.3. 하드웨어 설계

2.3.1. 정의

* 작성 목적

본 문서는 요구사항분석서를 통해 도출 및 정제된 『 IoT 기반 SHM 모니터링시스템 』 중 하드웨어 상세설계에 대한 기능구현을 위한 것이다.

* 작성 방법

본 문서에서 명시되지 않은 항목이나 보완 및 추가가 요구되는 항목은 개발자와 기획자의 논의를 거쳐 개발여부를 결정하여야 하며, 하드웨어 개발과 동시에 관련 문서의 보완 또한 수행되어야 한다.

ID	요구사항명	내용
CFR-001	저항센서정보 측정	저항 센서값을 측정
CFR-002	온도 및 습도센서 측정	온도 및 습도센서값을 측정
CFR-003	변형율 계산	측정된 저항값 및 온도, 습도를 이용한 변형율 계산
CFR-004	데이터전송(센서노드->데이터로거)	센서노드에서 측정 및 계산된 정보를 데이터로거에 전송함
CFR-005	데이터연결(센서노드->스마트폰 App)	센서노드에서 측정 및 계산된 정보를 스마트폰으로 전송한다.
CFR-006	데이터전송(데이터로거->SHM DB)	센서노드에서 수신된 정보를 WiFi를 통해 SHM DB에 전송함

2.3.2. 설계 작성

* 작성 목적

기능요구사항을 사용자가 활용할 수 있도록 상세설계하여 개발품목에 대한 개발자의 이해를 돕고 효율적으로 프로그램을 개발할 수 있는 환경을 제공한다.

* 작성 방법

- (1) 구체화된 내용을 기반으로 개발 및 연구 실무자들과 협의하여 지속적인 수정·보완이 수행되어야 한다.
- (2) 그림과 문자를 기반으로 User Interface를 구체화하고 그에 대한 설명을 문장으로 기술한다.
- (3) 구체화를 위해 사용된 화면의 구성이나 이미지는 User Interface를 효율적으로 설명하기 위한 것으로 보다 가독성 높은 화면구성이나 이미지로 교체할 수 있다.
- (4) 기능을 통해 제공되는 보고서의 양식(형태, 구성요소)은 변경될 수 있으므로 본 설계문서에서는 정의

하지 않는다.

- (5) 상세설계에서 제공하는 표의 양식 또한 적절한 정보제공을 위한 예시로서 보다 효율적인 정보전달이 가능한 형태로 양식(형태, 구성요소)를 변경할 수 있으며 표를 도표로 변환하거나, 적합한 이미지로 변경이 가능하다.

스마트 센서노드 소프트웨어 설계

1. 업무 개요

1.1. 요구 사항 개요

『IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템』은 탄소나노튜브를 이용한 임피던스 계측장비에서 계측된 데이터를 이용하여 구조물의 건전성을 평가할 수 있는 시스템이다.

본 문서는 『IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템의 소프트웨어』를 효율적으로 개발하기 위하여 요구사항분석서를 기반으로 구현되는 기능과 해당 기능에 대한 상세한 인터페이스 예제를 개발자에게 제공한다.

2. 상세설계

2.1. 상세설계 정의

* 작성 목적

본 문서는 요구사항분석서를 통해 도출 및 정제된 『IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템』중 소프트웨어(안드로이드 및 Web)개발에 대해 구현되는 기능을 기술하였다.

* 작성 방법

본 문서에서 명시되지 않은 항목이나 보완 및 추가가 요구되는 항목은 개발자와 기획자의 논의를 거쳐 개발여부를 결정하여야 하며, 소프트웨어의 개발과 동시에 관련 문서의보완 또한 수행되어야 한다.

ID	요구사항명	내용
CFR-001	스마트폰 App 사용자관리	사용자 로그인 및 사용자정보관리
CFR-002	센서노드등록 (스마트폰 App)	센서노드 등록기능
CFR-003	Dash 보드 (스마트폰 App)	전체 데이터로거현황을 조회할 수 있는 Dash 보드
CFR-004	센서노드관리 (스마트폰 App)	센서노드 정보 및 설정값을 스마트폰 App 에서 입력한다.
CFR-005	사용자관리 (Web)	사용자 로그인 및 사용자정보관리
CFR-006	Dash 보드 (Web)	전체 데이터로거현황을 조회할 수 있는 Dash 보드
CFR-007	센서설정 및 알람 (Web)	계측센서별 설정 및 이상알림
CFR-008	과거데이터조회 (Web)	과거 계측데이터 조회
CFR-009	데이터로거관리기능 (Web)	데이터로거관리기능

2.2. 상세설계 작성

* 작성 목적

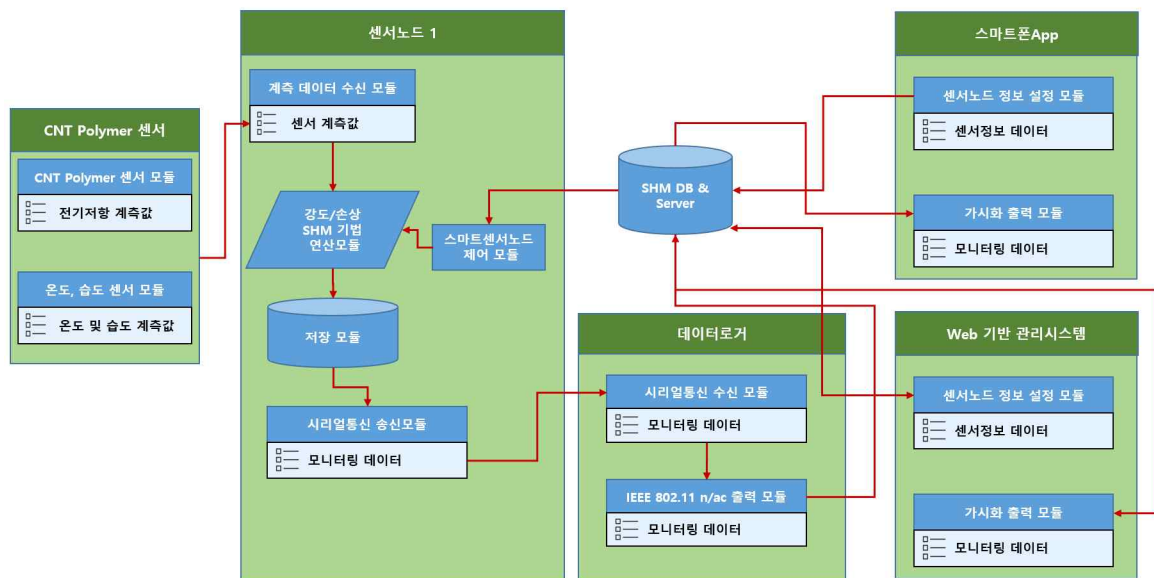
기능요구사항을 사용자가 활용할 수 있도록 상세설계하여 개발품목에 대한 개발자의 이해를 돕고 효율적으로 프로그램을 개발할 수 있는 환경을 제공한다.

* 작성 방법

- (1) 구체화된 내용을 기반으로 개발 및 연구 실무자들과 협의하여 지속적인 수정·보완이 수행되어야 한다.
- (2) 그림과 문자를 기반으로 User Interface 를 구체화하고 그에 대한 설명을 문장으로 기술한다.

- (3) 구체화를 위해 사용된 화면의 구성이나 이미지는 User Interface 를 효율적으로 설명하기 위한 것으로 보다 가독성 높은 화면구성이나 이미지로 교체할 수 있다.
- (4) 기능을 통해 제공되는 보고서의 양식(형태, 구성요소)은 변경될 수 있으므로 본 설계문서에서는 정의하지 않는다.
- (5) 상세설계에서 제공하는 표의 양식 또한 적절한 정보제공을 위한 예시로서 보다 효율적인 정보전달이 가능한 형태로 양식(형태, 구성요소)를 변경할 수 있으며 표를 도표로 변환하거나, 적합한 이미지로 변경이 가능하다.

2.2.1. 시스템 구성도

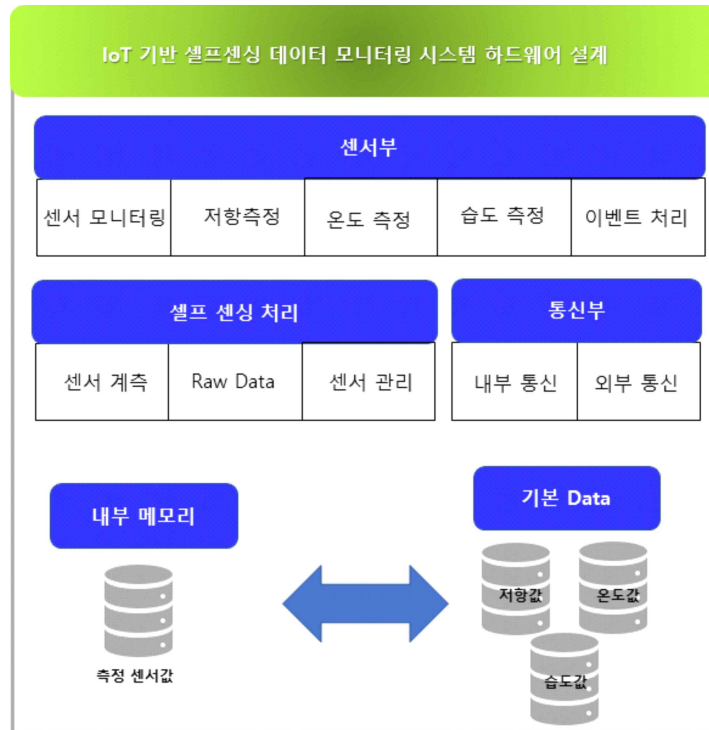


전체 시스템은 CNT 폴리머센서, 복수의 센서노드, 데이터로거, 스마트폰 App 으로 구성되어 있다.

- (1) CNT 폴리머 센서 : 탄소나노튜브 복합체의 전기저항값과 주변 온도 및 습도를 측정함
- (2) 센서노드: 일반적으로 2 축(X,Y)의 센서로부터 수신된 저항값, 온도, 습도값을 이용하여 강도, 손상을 계산한다. 계산된 값은 센서노드의 메모리에 일시적으로 저장되며 시리얼통신을 통해 데이터로거로 실시간 전송됨
- (3) 데이터로거 : 복수의 센서노드로부터 수신된 데이터를 SHM 서버로 전송하는 역할을 수행함. Wifi 통신을 통해 데이터를 전송한다.
- (4) SHM 데이터베이스 : My-SQL DB 와 윈도우 서버를 사용하는 SHM 운영서버
- (5) 스마트폰 App : 센서노드와 블루투스 연결을 통해 데이터 측정에 필요한 설정값을 전달하고 SHM DB 에서 수신된 계측정보를 이용하여 App 에서 가시화한다.
- (6) Web 관리프로그램 : SHM DB 와 송수신을 통해 센서노드의 계측상황을 데스크보드에 표현하고 전체 시스템을 제어한다.

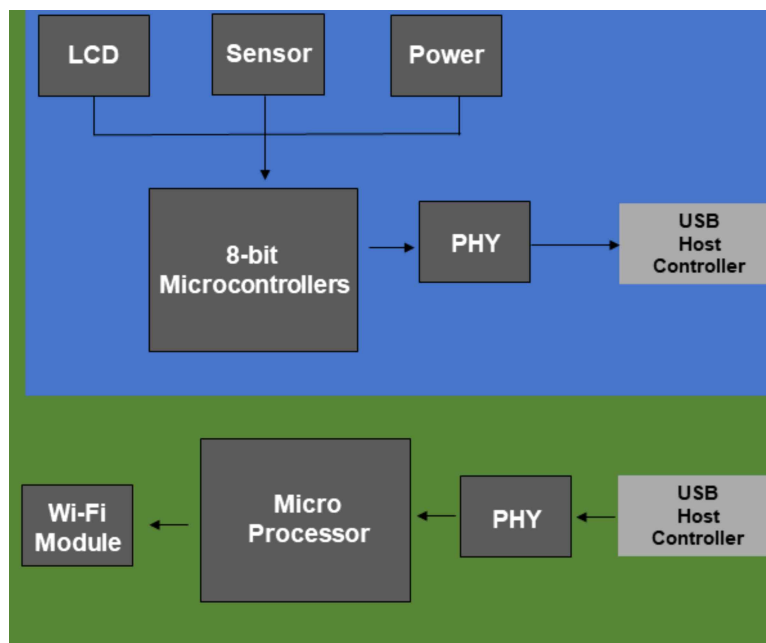
개발 목표

- (1) 『IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템』은 탄소나노튜브 복합체를 이용한 임피던스 계측장비에서 계측된 데이터를 취득하여 모니터링할 수 있는 시스템으로 시스템 개발을 통해 모니터링이 가능한 하드웨어 프로토타입 개발을 목표함
- (2) 콘크리트 구조물의 변형, 강도 및 손상에 대한 정보를 CNT, PZT 센서를 통해 실시간으로 데이터를 취득하기 위해 ‘시스템 내 저항값 측정’, ‘센서의 초기값 세팅, 센싱, 데이터 송수신 알고리즘’과 ‘콘크리트 변형값 계산 알고리즘’과 ‘경고값 이벤트 처리 알고리즘’ ‘실시간 센싱값 처리 시각화’ 등을 설계하여 개발을 목표함



<개발기술 기본 개념도>

- (3) 센서부, 셀프센서처리, 통신부 등 IoT 기반의 셀프센싱을 위한 시스템 하드웨어 구현 블록을 나뉘고 이에 대한 각 블록별 시스템 설계 및 하드웨어 등을 설계하여 개발

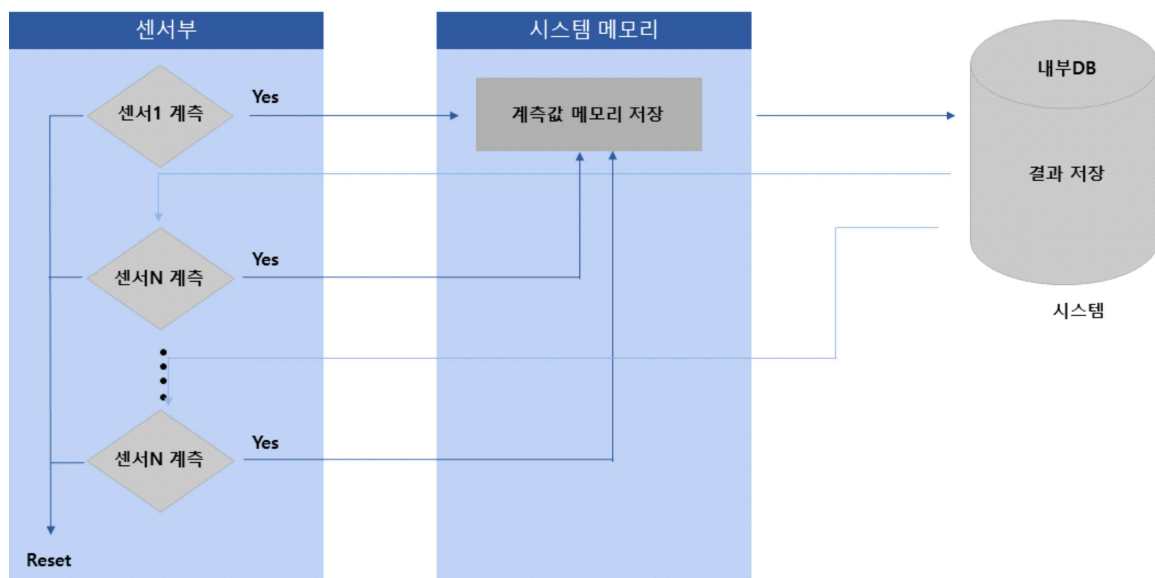


<IoT 기반 셀프센싱 모니터링 H/W 시스템 블록도>

1. 하드웨어 시스템 개발 내용

1.1. CNT 센서 계측모형 개발

- (1) CNT 기반의 센서 계측모형은 콘크리트 내 저항성을 측정하고 이를 기반으로 변형률을 계산하는 기능 모형 개발
- (2) 단순 계측이 아닌 2-Ch 이상의 다수 채널로 실시간 계측이 가능하고 이를 반영하는 계측모형 개발
- (3) 셀프 센싱에 있어 초 단위로 계측할 수 있도록 하고 센싱의 저항값을 $\Omega \sim k\Omega$ 단위까지 측정할 수 있도록 선택폭을 가지는 모형 개발
- (4) 측정되는 계측은 CNT 저항뿐만 아니라 주변의 온도, 습도 값을 실시간으로 계측하여 온, 습도 변화에 따라 CNT 저항 변화를 감지하는 모형 개발
- (5) 측정되는 센서는 1 초 단위로 다음 단계로 순차적으로 넘어가면서 측정함
(이는 초 단위를 더 단축하면 측정 데이터의 양이 상당하여 1 초로 함)

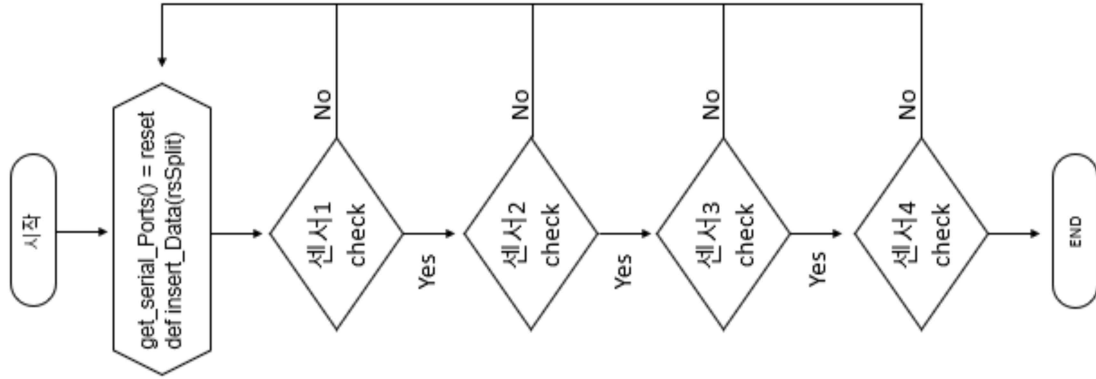


<CNT 센서 계측 프로세스 개요>



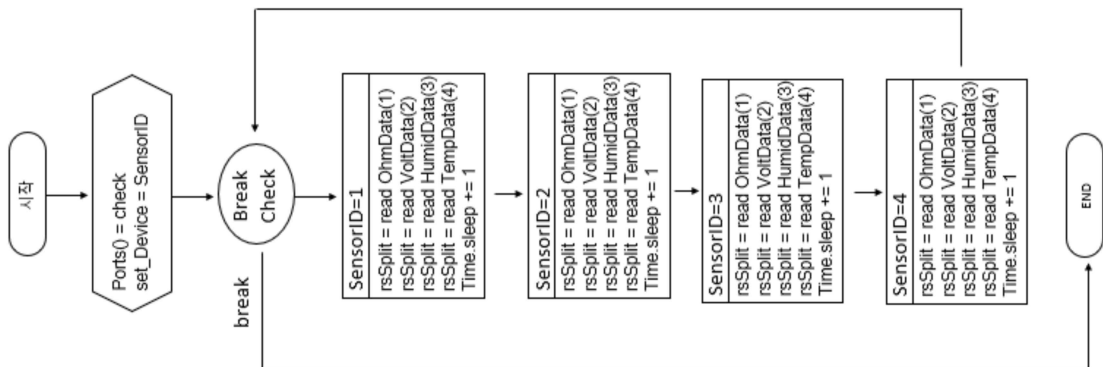
<센서 계측 절차 프로세스>

1.1.1. 센서 초기화 동작 흐름도



- (1) 시스템보드 IPO 에 각 Port 별로 할당된 ID 를 체크
- (2) 해당 IPO 와 연결된 센서에 데이터를 넣어 되돌아오는 값으로 체크
- (3) 체크된 값이 '1'이면 다음 센서로 체크, '0'이라면 센서 없음 또는 오동작으로 메시지 출력

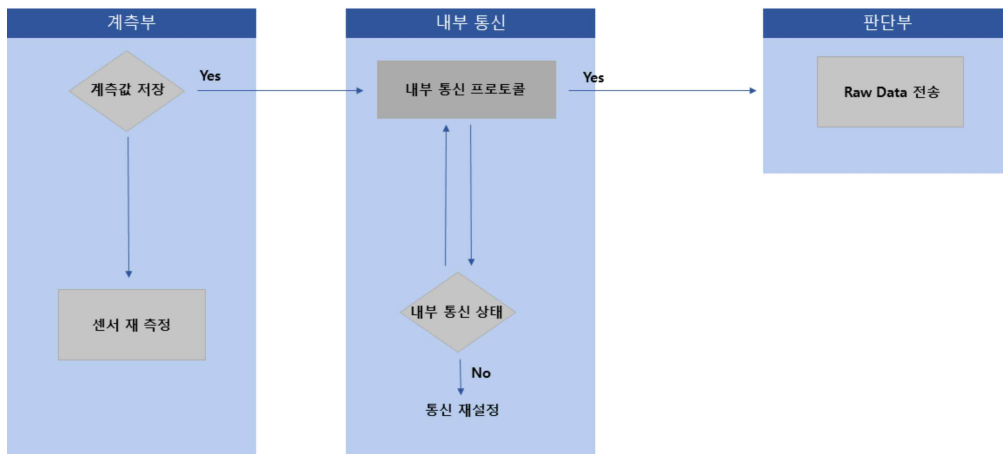
1.1.2. 센서별 센싱 기능 동작 흐름도 (저항, 온도, 습도)



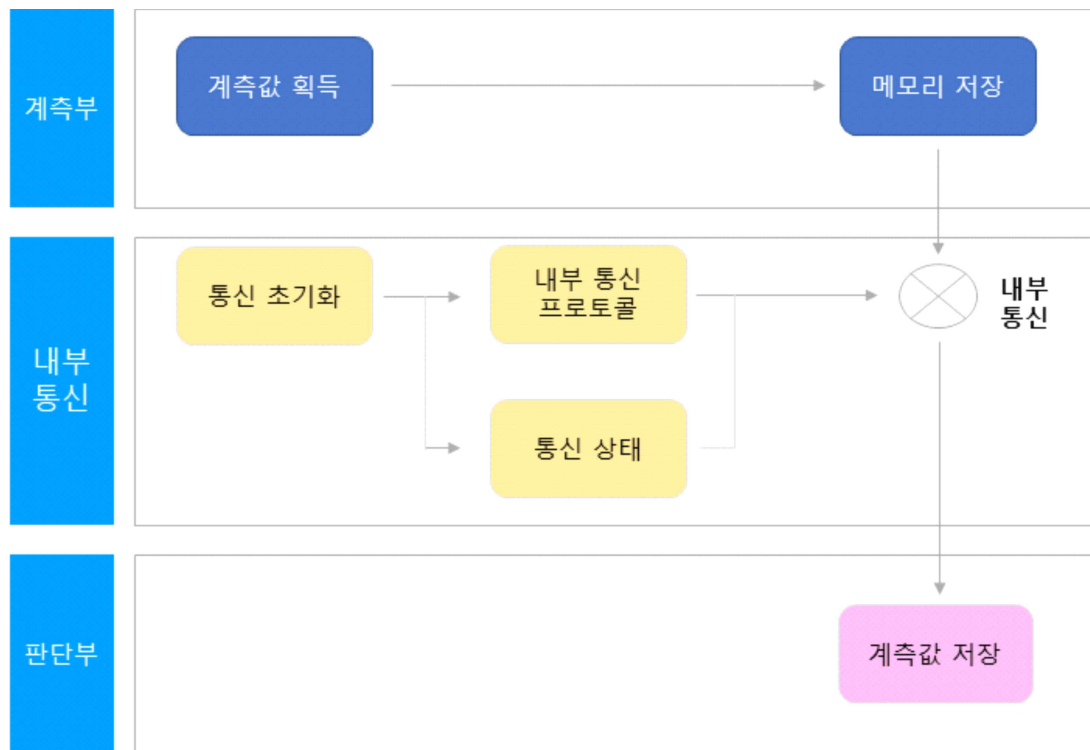
- (1) 시스템 보드의 IPO 체크 후 센서 디바이스 셋업
- (2) 센서 1 번부터 저항값, 전압값, 온도값, 습도값을 센싱 후 2 번 센서 체크 (1 초 소요)
- (3) 센서 2 번부터 순번대로 4 번까지 체크를 하고 다시 센서 1 번으로 가시 센싱함
- (4) 센서 1~4 번까지 1 Cycle 은 약 4 초 소요

1.2. 시스템 내부 통신 모형 개발

- (1) 시스템 내부 통신부는 센서부에서 측정된 계측값을 내부 메모리에 일시 저장을 한 후 판단부로 데이터를 전송하는 기능
- (2) 내부 통신의 프로토콜에 의해 판단부로 Raw Data 를 전송하는 기능 및 원활하게 접속하는 프로토콜 개발



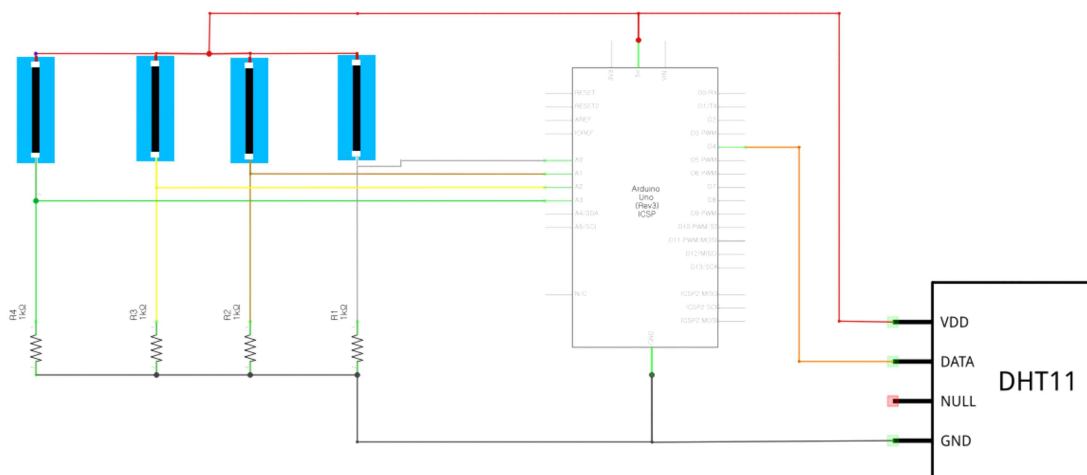
<내부 통신 계측 프로세스 개요>



<내부 통신 송수신 프로세스>

1.3. IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 프로토타입 하드웨어 개발

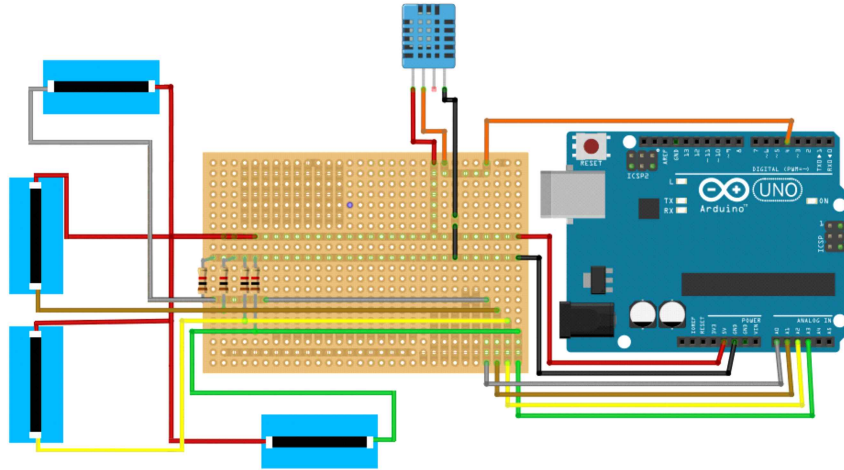
- (1) IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템은 내부는 센서부, 계측부, 판단부, 통신부로 나뉘고 이를 기반으로 하드웨어 시스템 구성
- (2) 센서부는 CNT 센서, 온습도 측정 센서 등을 다채널로 구성하고 센서를 통해 저항, 온도, 습도 등을 계측함
- (3) 계측부는 센서부에서 측정되는 센서값을 순차적으로 계측하고 이를 분석하여 외부 시리얼 통신을 통해 데이터를 판단부에 전달
- (4) 판단부는 계측부에서 들어오는 Raw Data 인 계측 데이터를 분석하고 이를 통신부로 데이터 전달
- (5) 통신부는 판단부에 전달받은 데이터를 외부의 DB에 접속하여 실시간으로 송수신하여 데이터 전송



<IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템의 센서-계측부 회로도 구성>

1.4. IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 센서부 하드웨어 시스템 개발

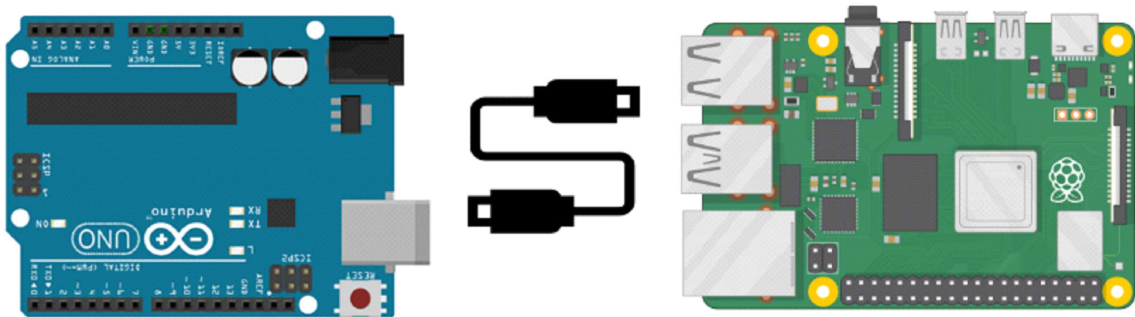
(1) IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템의 센서부 프로토타입 구성은 다음과 같이 구성하였음



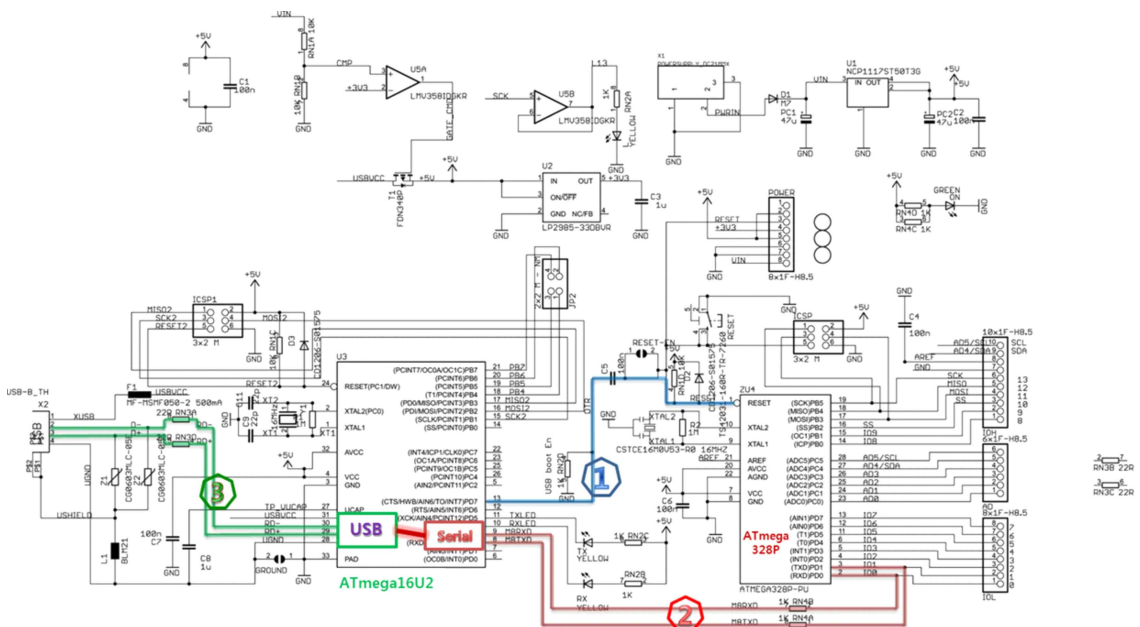
<IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템의 센서-계측부 H/W 구성>

(2) 시스템의 데이터 통신을 위해 계측부와 분석부를 연결하고 이를 내부 시리얼 통신을 통해 데이터 전송

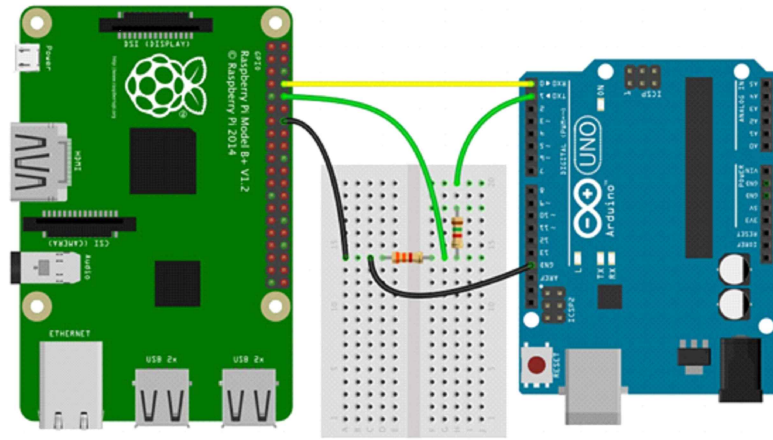
(3) 계측부는 센서의 데이터를 통합하고 빠른 Raw Data를 전송을 위해 USB 시리얼 방식 또는 내부 Port를 통해 전달하는 방식의 시스템 구성



<USB 시리얼 통신을 구현하는 시스템 구성>



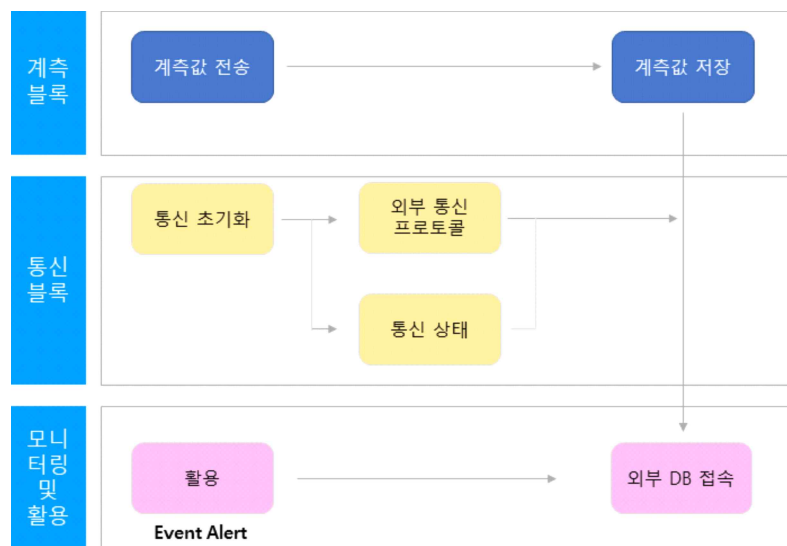
<내부 통신을 위한 회로도 구성>



<내부 Port를 통한 시리얼 통신을 구현한 시스템 구성>

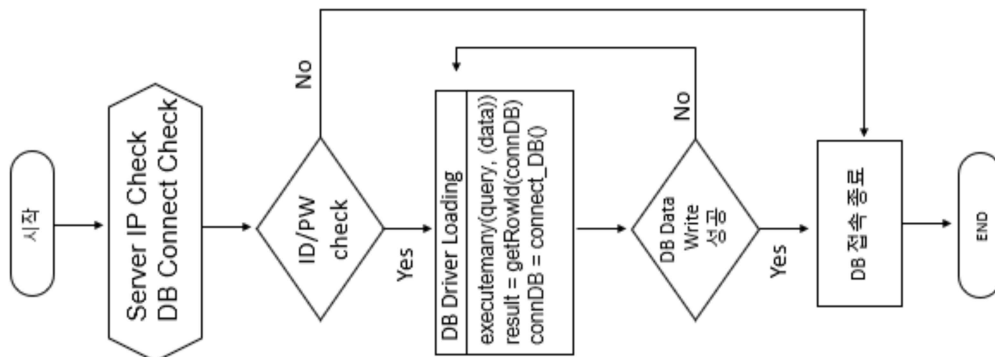
1.5. IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 통신부 개발

- IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템의 통신부는 측정된 계측값 전송을 위해 내부 메모리에 일시 저장한 후 외부 DB에 접속하여 데이터 전송
- 내부 DB에 저장된 계측값을 외부의 DB에 접속하여 데이터를 전송하는 기능 및 외부 DB에 통신 상태를 체크하고 접속하는 프로토콜 개발



<외부 DB 접속 통신 프로세스>

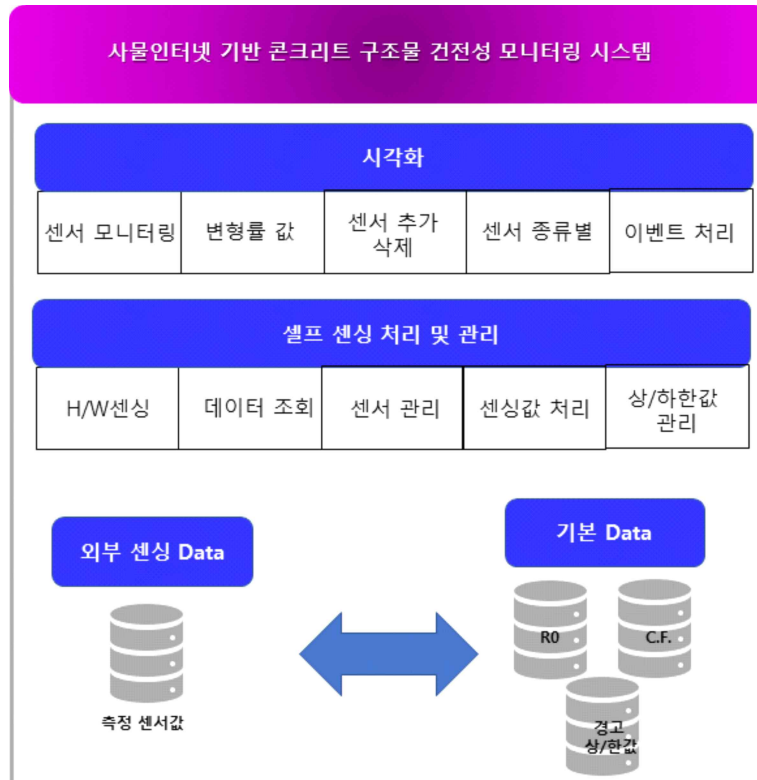
1.5.1 시스템 외부 통신 기능 동작 흐름도



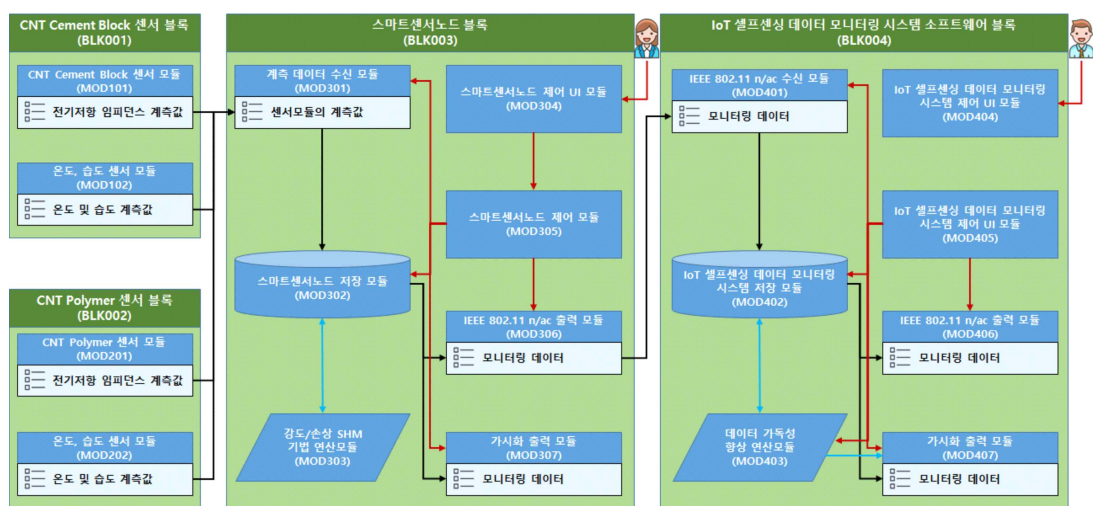
- (1) 데이터베이스의 통신 상태 체크
- (2) 로그인 후 DB 드라이버를 로딩한 후 센서로부터 얻어진 데이터들을 데이터베이스에 입력
- (3) 입력 성공 후 또는 ID/PW 체크가 안 될 시 DB 접속이 종료

1. 개발 목표

- (1) 『IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템』은 탄소나노튜브 복합체를 이용한 임피던스 계측장비에서 계측된 데이터를 취득하여 모니터링할 수 있는 시스템으로 시스템 개발을 통해 모니터링이 가능한 소프트웨어 프로토타입 개발을 목표로함
- (2) 콘크리트 구조물의 변형, 강도 및 손상에 대한 정보를 CNT, PZT 센서를 통해 실시간으로 취득된 데이터를 기반으로 ‘시스템 내 변형률값 측정’, ‘시스템 내 콘크리트 강도값 측정, 손상값 측정, 센서 센싱, 데이터 송수신 알고리즘’과 ‘경고값 이벤트 처리 알고리즘’ ‘실시간 처리 시각화’ 등을 설계하여 개발을 목표로함
- (3) CNT 센서, 스마트 센서, IoT 기반의 셀프센싱을 위한 시스템 소프트웨어 블록을 나뉘고 이에 대한 각 블록별 시스템 설계 및 소프트웨어 등을 설계하여 개발



<개발기술 기본 개념도>



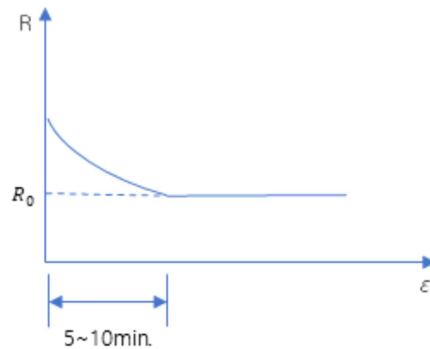
<IoT 기반 셀프센싱 모니터링 시스템 구성도>

2. 시스템 소프트웨어 개발 내용

2.1. IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 센서 알고리즘 적용

- (1) 콘크리트 구조물 건전성 모니터링 시스템의 센서 계측을 위한 계측모형은 콘크리트 내 저항을 측정하고 이를 기반으로 변형률을 계산하는 알고리즘 모형임
- (2) 저항값을 기반으로 하는 변형률 알고리즘을 적용하여 게이지 factor 를 정의하고 그 결과를 적용하는 모형 개발
- (3) 게이지 변형률과 저항 변화율의 관계를 이용하여 게이지 factor 의 초기 저항 및 저항 변화량, 게이지 factor 등을 이용하여 변형률 계산 모형 개발
- (4) 초기저항(R_0) 값은 게이지 연결 이후 일정 시간이 지난 후(안정화, 5~10 분)의 저항값으로 적용

$$G.F. = \frac{\frac{R - R_0}{R_0}}{\epsilon} \Rightarrow \epsilon = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{G.F.}$$



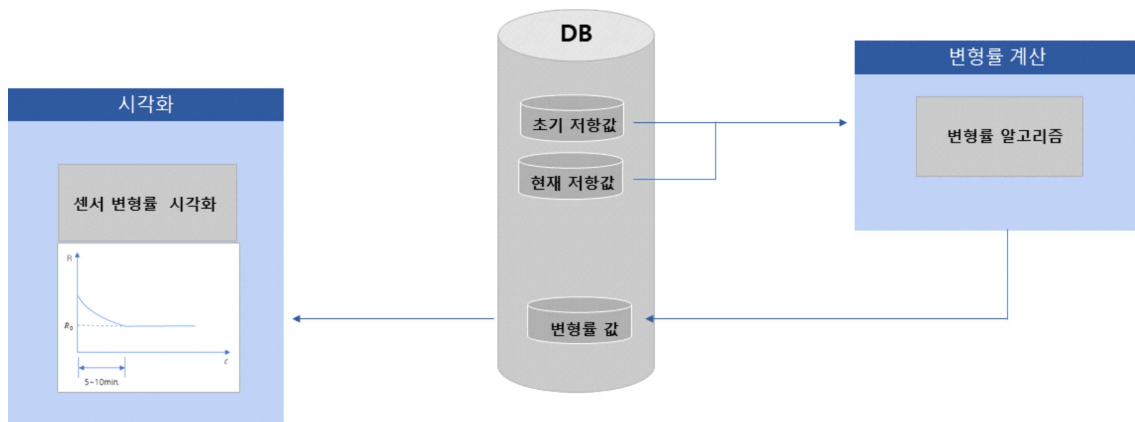
<초기 안정화 이후 저항 변화량>

- (5) 탄소나노튜브 함량에 따라 달라지는 게이지 factor 를 사용자가 직접 입력하여 적용하는 방안 및 게이지 factor 를 센서 개별로 각 입력하도록 하는 방안 마련
- (6) 기존의 개발 시스템은 제조사별 자체 프레임워크로 개발되는 경향이 많았으나, 이는 유관 시스템과의 연계나 확장성에 부정적 영향을 끼쳐왔던 것을 고려해 볼 때, Java 표준 프레임워크 기반하에 개발함으로써 확산의 용이성과 레거시 시스템과의 유연한 연계성을 확보

2.2. IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 소프트웨어 개발

2.2.1. 변형률 계산

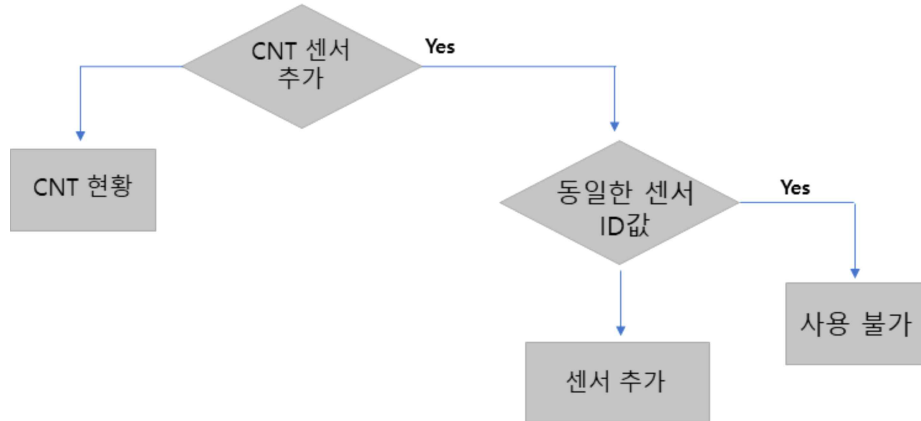
- IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템의 변형률 계산은 초기 저항값(안정화 이전)과 현재 저항값(안정화 이후)을 기반으로 하는 계산 알고리즘을 통해 변형률 값을 DB에 저장
- 초기 변형률 값 시각화를 위해서는 계산된 알고리즘을 DB에 저장하고 이를 시스템에서 시각화 표출
- 현재 계측된 저항값과 이전(바로 전 단계의) 저항값을 기반으로 변형률을 계산하고 이를 DB에 저장
- 저장된 계산 값을 DB에서 Load 하고 이를 시스템 내부에서 시각화 표출(그래프 표출)



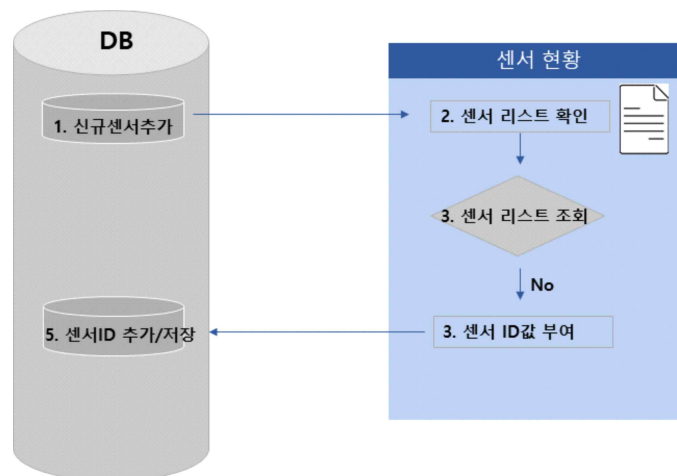
<CNT 센서 변형률 시각화 처리 프로세스>

2.2.2. 센서 추가

- IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템의 센서 추가는 하드웨어 추가 이외 소프트웨어에서도 센서를 추가해 주어야 함
- 센서 추가 시 가장 중요한 것은 센서 ID 로 동일한 값이 있는지를 체크를 하고 동일한 값이 있을 경우에는 해당 ID 사용 불가를 해야 함
- 동일한 센서 ID 값이 없을 경우에는 선택된 자원 ID 값을 사용할 수 있도록 하고 사용된 ID 값은 다른 ID 값이 사용할 수 없도록 해야 함

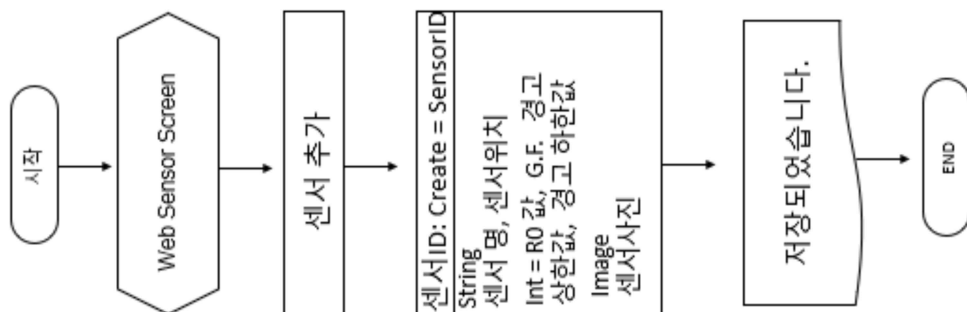


<시스템 센서 추가 처리 개요>



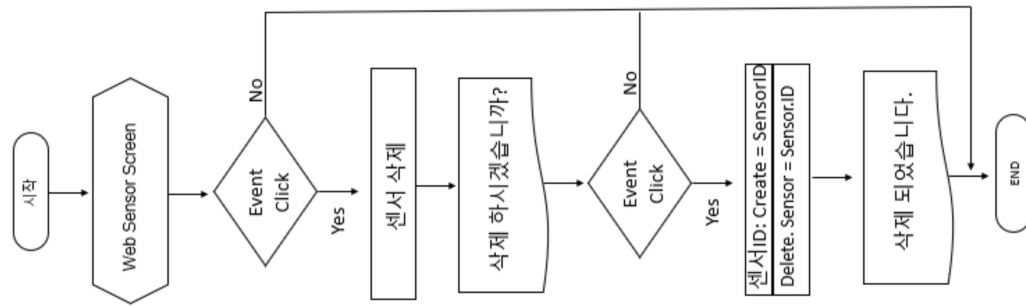
<시스템 센서 추가 처리 프로세스>

2.2.2.1. 센서 추가 동작 흐름도



- (1) 센서 추가 시 센서명, 사진, ID 값, Ro, G.F.경고 상한값을 입력
- (2) 센서명과 센서 위치는 String 으로 처리
- (3) Ro, G.F. 경고 상, 하한값은 integer 값으로 처리
- (4) 사진은 image 로 처리
- (5) 다 처리가 완료되면 '저장되었습니다'라는 text 출력 후 종료

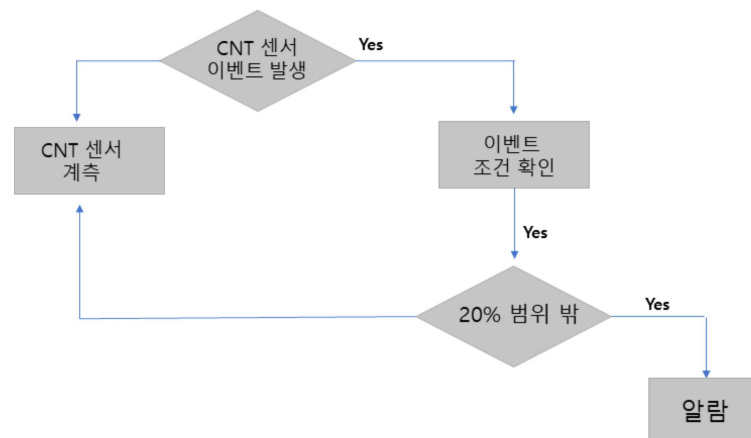
2.2.2.2. 센서 삭제 동작 흐름도



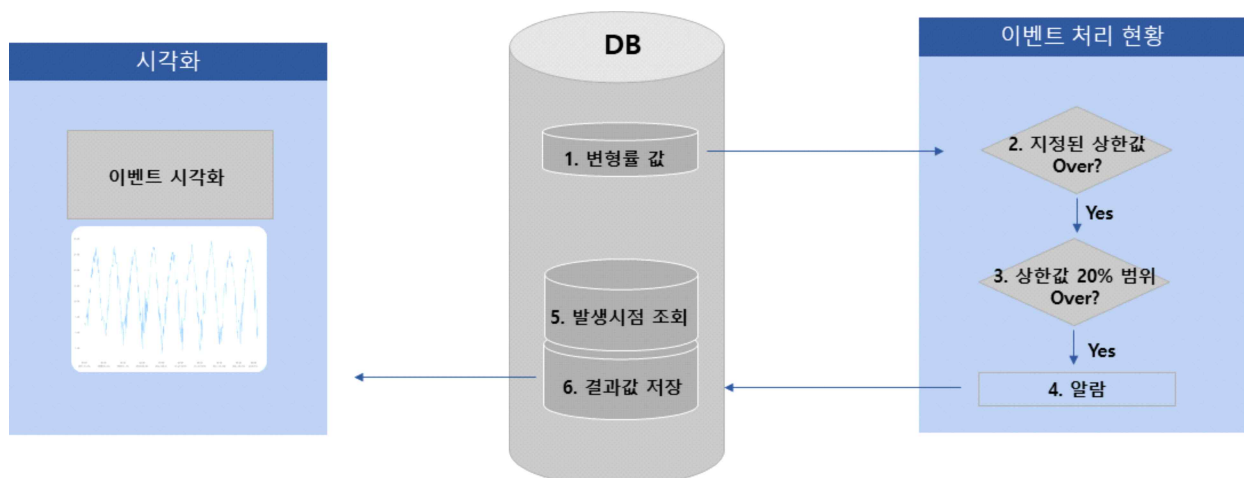
- (1) 센서 삭제의 기능으로 선세를 삭제하려면 해당 기능을 선택
- (2) 해당 기능 선택 시 '삭제하시겠습니까?'라는 메시지 출력
- (3) '삭제' 기능 선택 시 해당 센서를 DB에서 삭제
- (4) 삭제 후에는 '삭제되었습니다.'라는 메시지 출력 후 종료
- (5) '취소' 기능 선택 시 종료

2.2.3. 이벤트 처리

- IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템의 이벤트 처리는 변형률 값을 기준으로 센서에서 이벤트 발생이 되었을 때(이벤트 조건 만족 시) 확인함
- 이벤트 조건은 지정된 상한선 값을 벗어났다고 판단된 경우이며 벗어났을 때는 다음 조건이 만족 되는지를 확인함
- 상한값 중 상한 범위 20%를 넘게 되면 이벤트로 규정하고 발생 시점을 기준으로 앞뒤 4 초 간격, 3분 범위 내 모든 이벤트값을 저장함

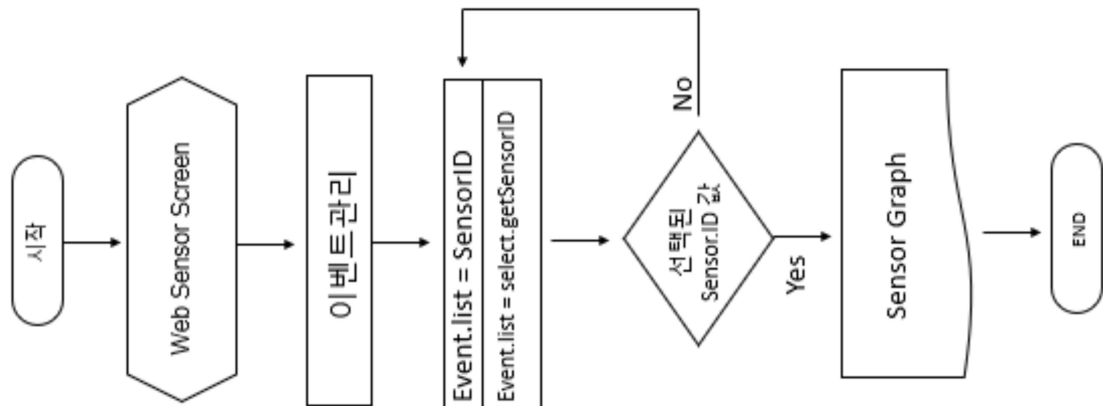


<시스템 이벤트 처리 개요>



<시스템 이벤트 처리 프로세스>

2.2.3.1. 이벤트 관리 동작 흐름도



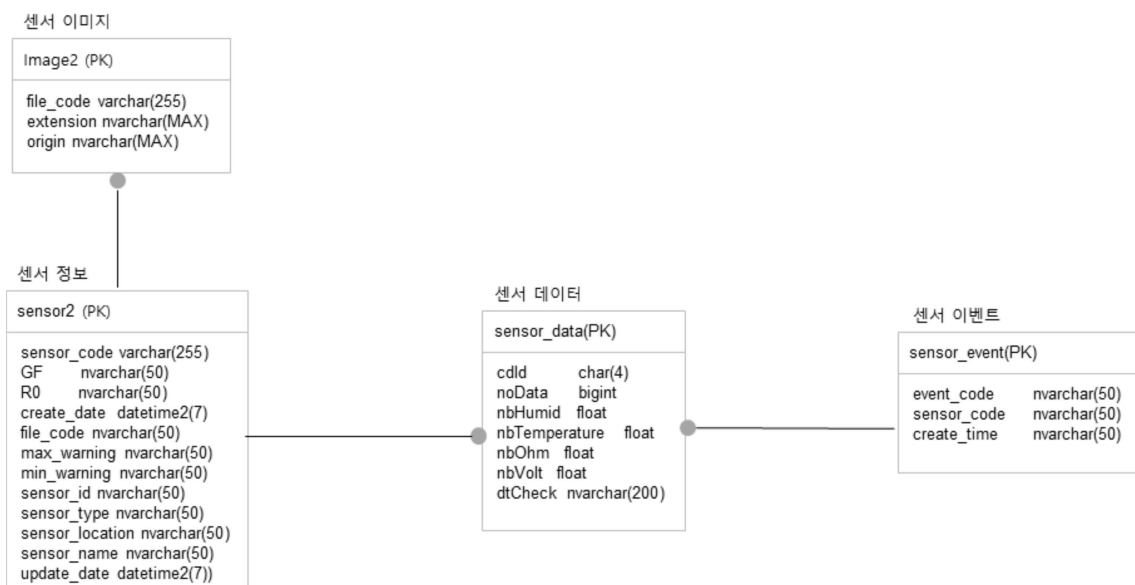
- (1) 이벤트 관리는 경고 상, 하한값 설정 시 해당 범위의 20%를 넘겼을 때 생성되는 이벤트로 이벤트 테이블에 따로 자료를 보관
- (2) 해당 이벤트 선택 시 선택된 이벤트 테이블을 호출하고 이를 그래프와 데이터 리스트 출력
- (3) 해당 이벤트 선택이 없으면 이벤트 리스트 페이지 출력

2.3. IIoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 관련 데이터베이스 설계

- IIoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 관련하여 센서 정보, 센서 데이터 정보, 이벤트 정보에 관련된 데이터베이스 설계 및 관련 테이블 설계

<데이터베이스 테이블 목록>

NO	테이블 명	테이블 설명
1	image 2	센서 이미지 정보 테이블
2	sensor 2	센서 정보 테이블
3	sensor_data	센서 데이터 정보 테이블
4	sensor_event	센서 이벤트 정보 테이블



<시스템의 Physical 설계 화면>

테이블정의서		Database					
		Schema	db-0			생성일	2020.06
테이블명	image2						
COMMENT	CNT 시스템 DB						
col #	Column Name	Data Type	Key	Null?	Identity	Default	Comments
1	file_code	varchar(255)		Y			사진 파일명
2	extension	nvarchar(MAX)		Y			
3	origin	nvarchar(MAX)		Y			

테이블정의서		Database					
		Schema	db-1		생성일	2020.06	
테이블명	sensor2						
COMMENT	CNT 시스템 DB						
col #	Column Name	Data Type	Key	Null?	Identilty	Default	Comments
1	sensor_code	varchar(255)		Y			센서 Code
2	GF	nvarchar(50)		Y			게이지 벡터
3	R0	nvarchar(50)		Y			Ro 값
4	create_date	datetime2(7)		Y			생성일
5	file_code	nvarchar(50)		Y			파일명
6	max_warning	nvarchar(50)		Y			상한값
7	min_warning	nvarchar(50)		Y			하한값
8	sensor_id	nvarchar(50)		Y			센서 ID
9	sensor_type	nvarchar(50)		Y			센서 형태
10	sensor_location	nvarchar(50)		Y			센서 위치
11	sensor_name	nvarchar(50)		Y			센서 이름
12	update_date	datetime2(7)		Y			갱신 날짜

테이블정의서		Database					
		Schema	db-2			생성일	2020.06
테이블명	sensor_data						
COMMENT	CNT 시스템 DB						
col #	Column Name	Data Type	Key	Null?	Identity	Default	Comments
1	cdId	char(4)		Y			
2	noData	bigint		Y			
3	nbHumid	float		Y			습도
4	nbTemperature	float		Y			온도
5	nbOhm	float		Y			저항
6	nbVolt	float		Y			전압
7	dtCheck	nvarchar(200)		Y			

테이블정의서		Database					
		Schema	db-2			생성일	2020.06
테이블명	sensor_event						
COMMENT	CNT 시스템 DB						
col #	Column Name	Data Type	Key	Null?	Identilty	Default	Comments
1	event_code	nvarchar(50)		Y			이벤트처리
2	sensor_code	nvarchar(50)		Y			센서처리
3	create_time	nvarchar(50)		Y			시간생성

<시스템의 데이터베이스 테이블 명세서>

(1) 센서 현황은 각 센서의 Raw 데이터값을 읽어 이를 시각화된 그래프로 표출

(2) 센서 현황 화면에서 이벤트가 발생 시 해당 페이지로 이동

- 이벤트 관리 화면에서는 콘크리트 내 이벤트 발생 시 화면으로 이벤트 발생 현황을 알 수 있으며 해당 이벤트 선택 시에는 자세한 이벤트 확인이 가능

모니터링 센서관리 이벤트관리						
						전체보기
센서 ID	센서 형태	센서명	센서위치	상한값	하한값	발생 시간
0002	CNT	두번째 센서	사무실	1	-1	2020-10-14 11:46:09
0002	CNT	두번째 센서	사무실	1	-1	2020-10-14 11:46:05
0002	CNT	두번째 센서	사무실	1	-1	2020-10-14 11:46:01
0002	CNT	두번째 센서	사무실	1	-1	2020-10-14 11:45:56
0002	CNT	두번째 센서	사무실	1	-1	2020-10-14 11:45:52

<시스템 센서 이벤트 관리 화면>

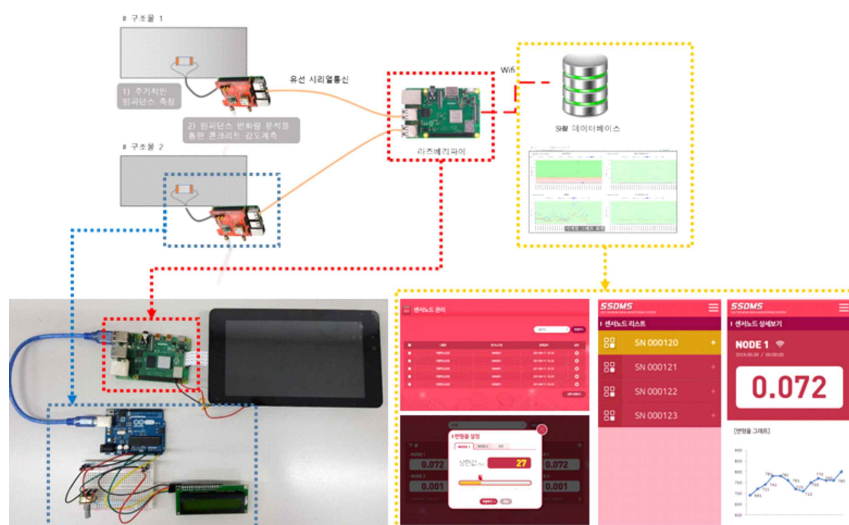


<시스템 센서 이벤트 발생 시 상세화면>

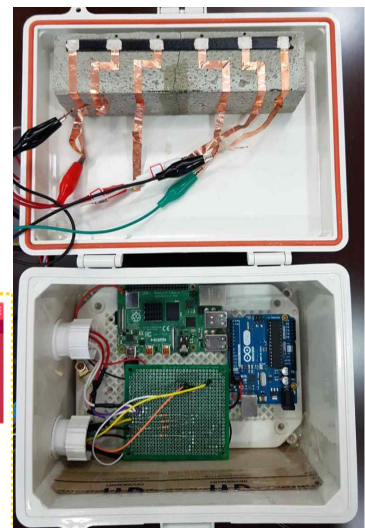
2.5. IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 프로토타입 개발

2.5.1. IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 프로토타입 개발

- IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템의 H/W 시스템 구성하고 각 파트별 동작 구현(센서, 제어, 통신부 등)
- IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템의 S/W 는 시스템 H/W 동작 구현 및 PC 웹 또는 모바일에서 실시간 모니터링 가능하도록 개발



<IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 프로토타입 버전>



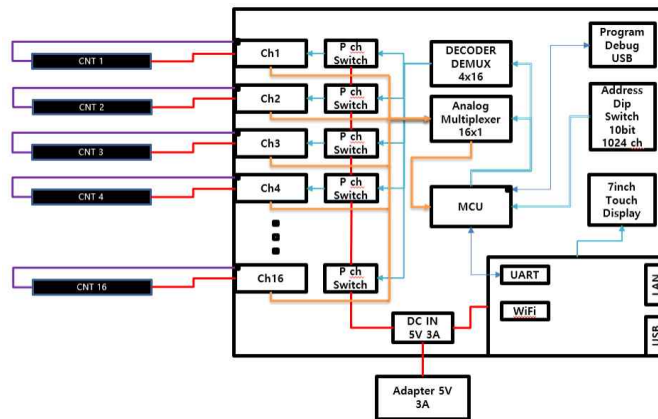
<하드웨어 프로토타입 형상>

1. 스마트 센서노드 하드웨어 개선

- 초기 스마트 센서노드는 측정되는 저항의 범위가 작으며, 동시에 최대 4 개의 센서만 계측할 수 있는 한계를 가졌다. 이를 개선하기 위한 시스템 개선사항을 도출
- (1) 스마트 센서노드에서 처리할 수 있는 채널 수를 확장하되 하나의 스마트 센서노드에서 동시에 처리할 수 있는 채널의 수는 최대 16-Ch로 하고 저항 측정 시 일정하게 전원을 인가하도록 하여야 할 것
- (2) 저항을 측정하는 동안에는 다른 채널에 대해 신호적인 간섭이 없어야 하며, 측정되는 저항의 범위는 최대 10 kΩ으로 할 것
- (3) 웹 환경이 원활하게 되지 않는 환경을 고려하여 스마트 센서노드는 외부 Display를 통해 직접 제어 가능해야 하며, 저항과 변형률을 표시 가능할 것
- (4) 스마트 센서노드에서 외부 서버에 접속이 되지 않는 경우 실시간으로 계측된 데이터를 하드웨어 내부 DB에 보관하였다가 서버에 접속이 되면 이를 즉시 반영하도록 할 것
- (5) 스마트 센서노드에서 센서 초기 저항(R0) 및 GF(Gauge Factor)를 입력할 수 있도록 할 것

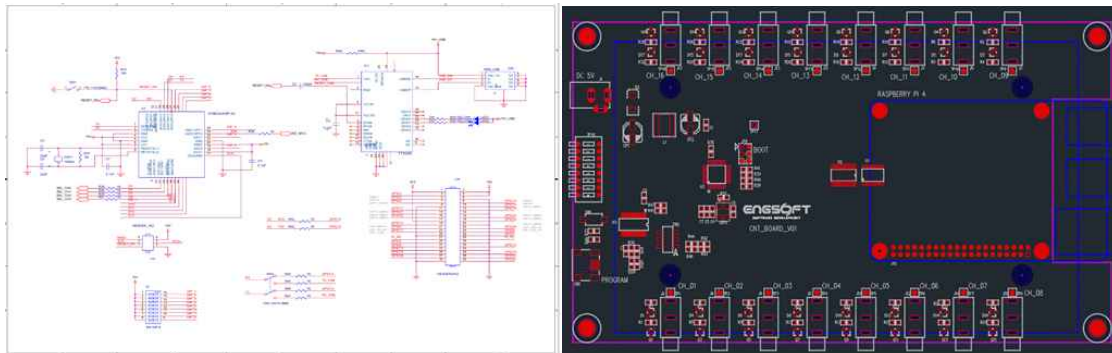
1.1. 반영된 하드웨어 개선사항

- (1) 개선사항을 반영하는 스마트 센서노드 개발을 위해 Atmel MEGA 328P-AU ARM Core를 채용
→ 8bit AVR RISC를 기초로 둔 Micro-controller로 32kb ISP Flash Memory를 가짐
→ 16MHz로 동작하는 칩셋으로 빠른 신호 처리가 가능
- (2) 최대 16-Ch까지 저항 측정할 수 있도록 확장
- (3) 스마트 센서노드(하드웨어)에 LCD 화면용 GUI 환경 개발
- (4) 실제 계측되는 저항과 변형률 알고리즘을 통해 획득된 변형률을 시각화 처리
- (5) 인터넷 연결이 원활하지 않을 때 스마트 센서노드 내부 DB에 이를 저장하고 인터넷 재연결 시 서버에 데이터를 갱신 기능 탑재
- (6) 계측 시작 시 또는 필요시 전체 센서 초기화 기능을 추가
→ 현재 측정되는 센서별 저항을 각각의 센서 초기 저항으로 저장



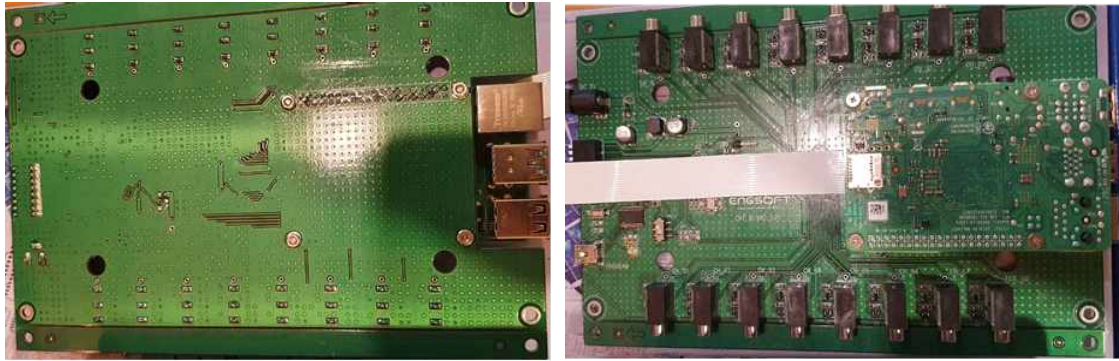
<개선된 스마트 센서노드 블록도>

- (7) 전원 인가 후 시간이 지남에 따라 저항이 감소하며 안정기에 도달하는 CNT 폴리머 센서 특성을 고려하여 센서 연결 후 지속적으로 전원을 인가하면서 저항을 계측하는 방식으로 구성



<선된 스마트 센서 회로도 및 도면>

(8) 작성된 회로도와 도면을 바탕으로 PCB(Printed Circuit Board)를 제작



<개선된 스마트 센서 PCB>

(1) 개선된 스마트 센서노드를 가지고 동작 테스트를 시행하였고, 관련 기능이 정상적으로 동작함을 확인하여 이를 구조물 시험 테스트와 같이 테스트를 시행



<개선된 스마트 센서노드의 하드웨어 시스템>

2. IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 개선

- IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템은 초기 개발된 스마트 센서노드에 맞춰 개발되어 4-Ch 까지 지원하였다. 스마트 센서노드의 개선에 따라 모니터링 시스템도 다음의 시스템 개선사항을 도출
 - (1) IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템에서 스마트 센서노드가 개선됨에 따라 동시에 처리할 수 있는 센서의 수가 확장되어 최소 16-Ch 이상을 표현해야 하며 추후 스마트 센서노드가 추가될 때마다 추가된 센서들을 화면에 보여줄 것
 - (2) 메인 화면에서는 모니터링 기능을 수행할 수 있도록 대시보드 형태로 시각화하여야 하며, 외부의 CNT-PZT 센서로부터 들어오는 데이터를 강도 예측 알고리즘 및 손상 감지 알고리즘을 통해 강도값 및 손상 감지를 시각화 처리해야 할 것
 - (3) 스마트 센서노드에서 전체 센서 초기화를 대시보드에서 조작하도록 하여야 하며 대시보드를 통해 스마트 센서노드를 제어할 수 있도록 할 것
 - (4) 인터넷 환경이 원활하게 되지 않는 환경에 의해 데이터가 주기적으로 들어오지 않을 시에는 나중에 연결된 스마트 센서노드의 마지막 데이터를 가져오는 기능을 가질 것
 - (5) 현재 계속되는 값들에 대해 시각화는 물론 과거의 데이터 조회가 가능하게 할 것
 - (6) 수집되는 값을 그래프로 시각화하고 데이터가 설정된 한계치를 벗어나는 경우 전후 1 분 단위로 데이터 저장하여 이벤트 처리할 것

- CNT

자능항센서 계측 및 모니터링 시스템

로그아웃

센서관리

○ CNT ● PZT(관도) ○ PZT(순삭)

센서인원

이벤트 현황

센서인원

이벤트 현황

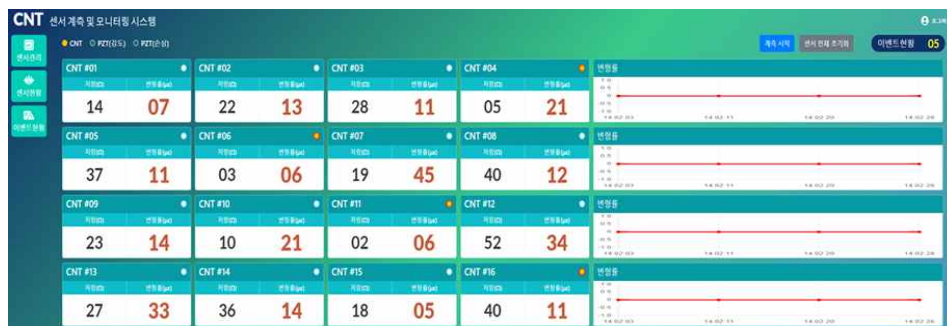
PZT 6023_4

2021-10-20 18:31

PZT 6023_2

2021-10-20 18:31

- 개선된 스마트 센서노드 하드웨어에 대응하여 16 개 센서를 화면에 볼 수 있도록 대시보드 형태로 화면을 디자인하였으며, 각 센서에는 현재 센서의 상태, 예측되는 저항, 변형률 값 표출
- 변형률 값 숫자 이외 그래프로 시각화하여 현재 어떻게 변화가 되고 있는지를 알 수 있게 함



- 시스템에서 계측 시작 시 또는 센서 초기화 버튼을 배치하여 대시보드에서 스마트 센서노드를 직접 제어할 수 있도록 하였으며 인터넷 환경만 구축되어 있다면 언제든지 스마트 센서노드 상태 및 기기의 데이터를 확인 가능
- 개별의 센서 특성은 대시보드 페이지와 스마트 센서노드 양쪽에서 직접 입력할 수 있도록 하였으며, 이때의 하드웨어와 서버간 동기화를 통해 일관성이 유지되게 하였고, IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템이 우선권을 가지도록 함
- 시스템에서 사용자가 한계치를 입력하면 모니터링 시 한계치가 넘어간 시점을 기준으로 한계치를 넘기 전후 1분 데이터를 저장하고 이를 관리 가능

CNT 센서 계속 및 모니터링 시스템									
이벤트 현황									
번호	센서명	센서위치	센서종류	센서위치	상기값	하위값	최대값	발생시간	
0001	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0002	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0003	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0004	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0005	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0006	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0007	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0008	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0009	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0010	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0011	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0012	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0013	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0014	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0015	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0016	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	
0017	CNT	CNT	계량	0.02	-	-	-	2020-11-09 14:45:43	

- 25 -

■ CNT Cement Block Sensor Module을 이용한 구조물 건전성 모니터링 기술 개발

1. CNT/Cement 블록 센서 모듈 설계 과정

- 소형 센서 모듈을 위한 배합으로써 기존 콘크리트 배합과는 달리 굵은 골재를 사용하지 않음.
- CNT 분말의 효과적인 분산을 위하여 Super Plasticizer 를 소량 첨가하였음.
- CNT/Cement 복합체의 강도 증가 및 투수성 감소를 위하여 시멘트 대비 10%의 실리카폼을 첨가하였음.
- CNT/Cement 복합체 자체의 균열에 따른 전기전도도의 변화 양상과 이를 몰탈 빔에 매설하여 압축 실험을 진행하여 균열과 전기전도도 사이의 관계를 측정하였음.
- CNT 의 함량이 Cement 의 0.6%wt. 일 때 정상적인 계측이 가능하므로 최종 배합비는 아래와 같이 산정함

CNT/Cement 블록 센서 모듈 배합비

Cement	Water	Sand	CNT	Silica Fume	Super plasticizer
1	0.4	1	0.006	0.1	0.01



계량



혼합



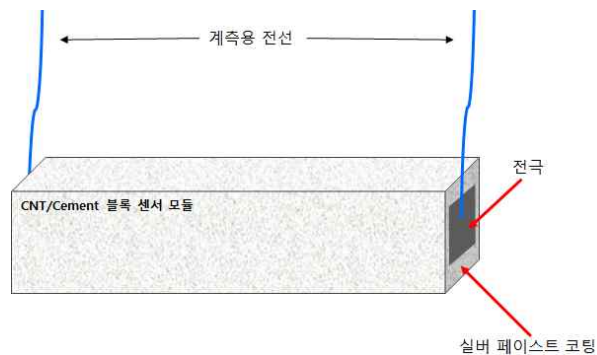
양생 전 CNT/Cement 복합체



제작한 양생 틀에 양생 진행

<센서 제작 과정>

- 센서 모듈 제작 후 양 끝단에 전극을 부착하여 +극과 -극을 형성시켰음.
- 이후 각 전극에서의 원활한 전류의 흐름을 위하여 소량의 실버 페이스트를 이용하여 코팅하였음.
- 실버 페이스트 코팅 후 계측 장비와의 연결을 위하여 전선을 부착하였음.
- 모듈은 총 6 개를 제작하였음.
- 3 개는 센서 모듈 자체의 정적 저항을 측정하는 용도이며 나머지 3 개는 구조물과의 동적 응답(EMI)을 측정하기 위한 용도로 제작하였음.



CNT/Cement 블록 센서 모듈 모식도

2. CNT/Cement 블록 센서 모듈의 분산성 및 전도성 확인

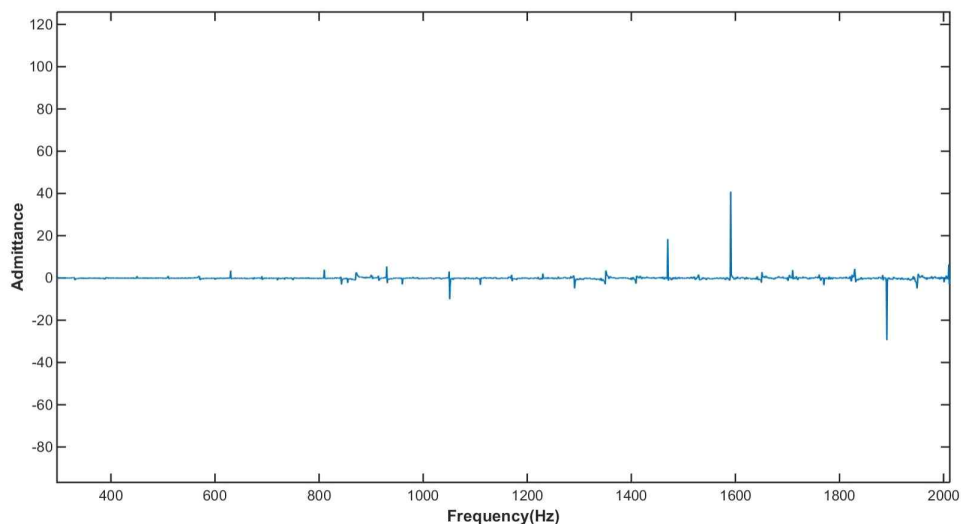
- 제작된 CNT/Cement 블록 센서 모듈의 분산성 및 전도성을 확인하기 위하여 모듈 별 저항 측정을 실시하였음.
- 센서 모듈을 제작할 당시, CNT 분말이 효과적으로 분산되지 않았다면 측정 단계 마다 저항이 높은 속도로 상승하게 됨.
- 또한 전도성이 낮을 경우, 저항의 측정 자체가 어렵기 때문에 간단한 기초 실험을 통하여 모듈의 신뢰성을 판단하고자 함.
- 실험 결과는 표 2 와 같으며, 저항 값은 거의 일정하게 정상적으로 측정되었음을 알 수 있음.
- 따라서 설계 및 제작 과정에서의 문제는 없었음을 확인할 수 있음.

<모듈 별 저항 측정 결과>

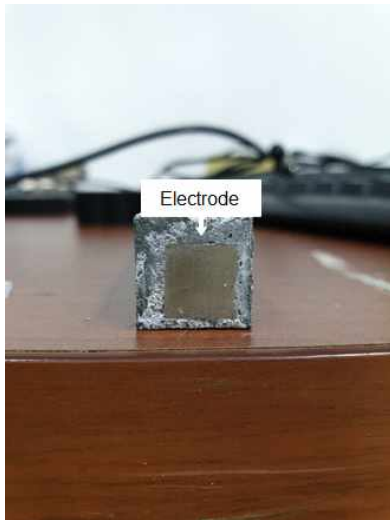
구 분		모듈 1	모듈 2	모듈 3
저항 값 (Ω)	1 회	1766	3166	1970
	2 회	1766	3165	1971
	3 회	1766	3165	1973
	4 회	1766	3166	1973
	5 회	1765	3165	1973
	6 회	1766	3166	1974
	7 회	1766	3166	1974
	8 회	1765	3165	1975
	9 회	1765	3166	1975
	10 회	1765	3166	1975
평균 저항 값 (Ω)		1765.6	3166.4	1973.3

3. CNT/Cement 블록 센서 모듈의 자체 EMI 측정

- CNT/Cement 블록 자체 임피던스 계측 결과를 통하여 약간의 노이즈는 발생하나, 신호를 입력한 뒤 그에 따른 응답은 받을 수 있는 것으로 확인하였음.



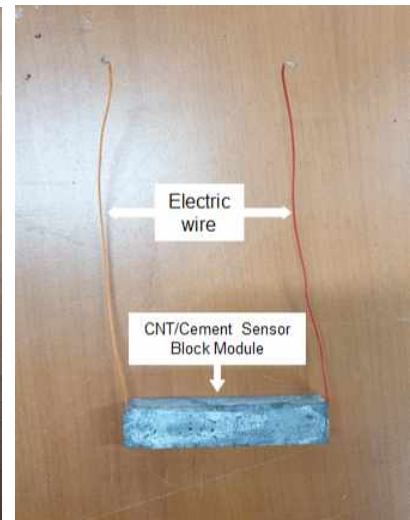
<CNT/Cement 블록 센서 모듈 자체 임피던스 계측 결과>



측면
(실버 페이스트 코팅 전)



측면
(실버 페이스트 코팅 후)

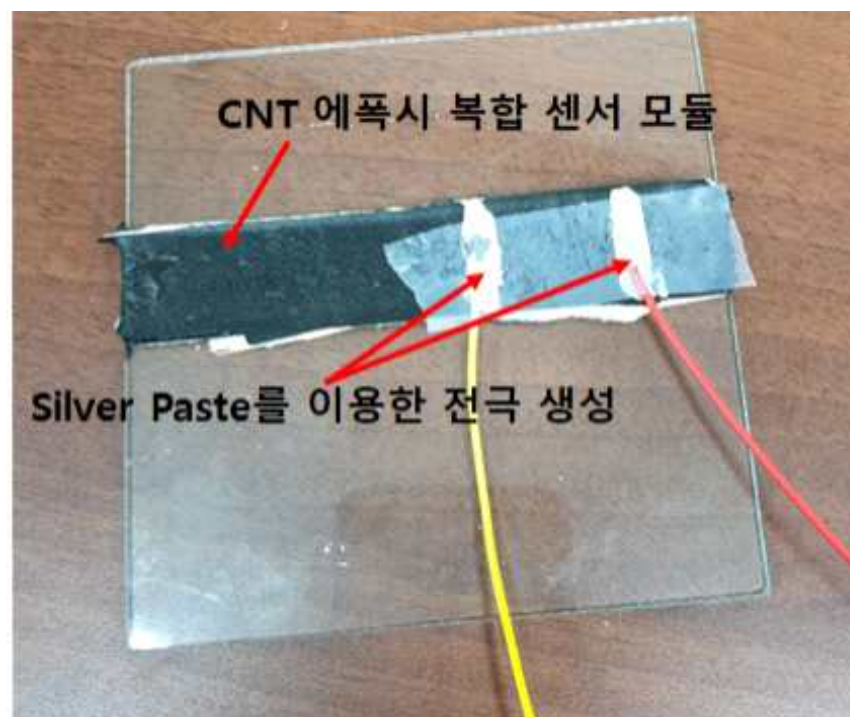


전면
(전선 부착 후)

<CNT/Cement 블록 센서 모듈>

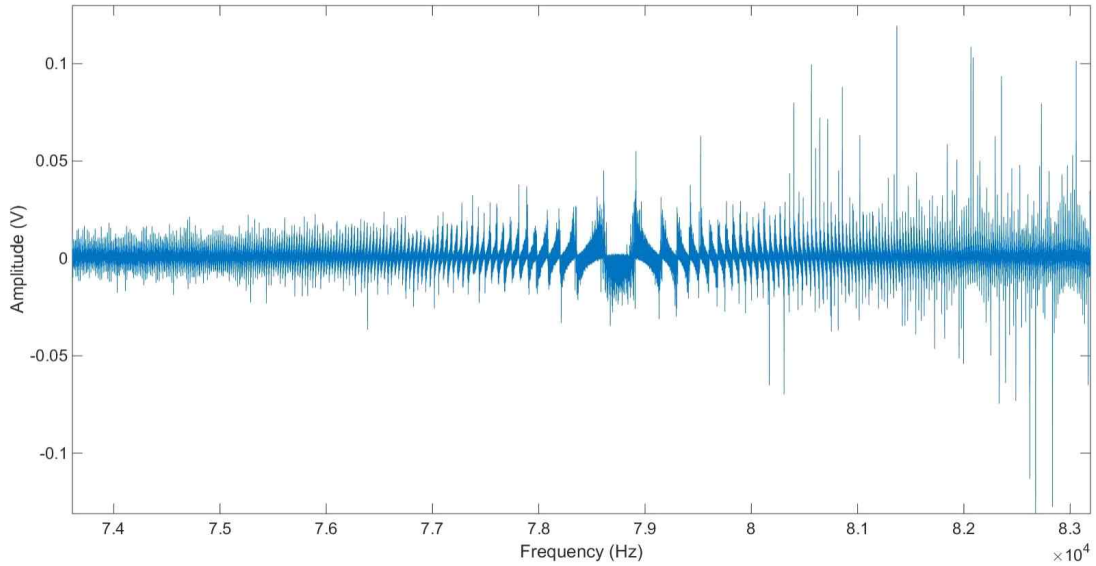
4. NT 에폭시 복합 센서 모듈 설계

- CNT 와 에폭시를 결합하여 전도성을 가진 센서 모듈을 설계하였음.
- 앞선 CNT/Cement 블록 센서 모듈에서는 CNT 의 효율적인 분산 및 시멘트와의 효과적인 결합을 위하여 고성능 감수제 등을 첨가하였으나 본 센서 모듈은 CNT 의 분산에 관련된 우려 요소는 없었으므로 추가적인 재료를 첨가하지 않았음.
- 또한 임의로 전극을 생성하기 위하여 Silver Paste 를 일정 간격을 두고 도포하고, 그 위에 전선을 연결하여 NI DAQ 장비와의 연결성을 확보하였음.
- 콘크리트 구조물을 대상으로 실험하기 전, 전기 전도도를 확인하기 위하여 유리판 위에 시험 제작하여 기초 실험을 진행하였음.
- 완성된 센서 모듈 및 임피던스 계측 결과는 아래 그림과 같음.



<CNT 에폭시 복합 센서 모듈>

- 임피던스를 계측한 결과, 앞선 CNT/Cement 블록 센서 모듈보다 더욱 큰 노이즈가 발생하였으나 신호의 입력에 대한 응답은 확인



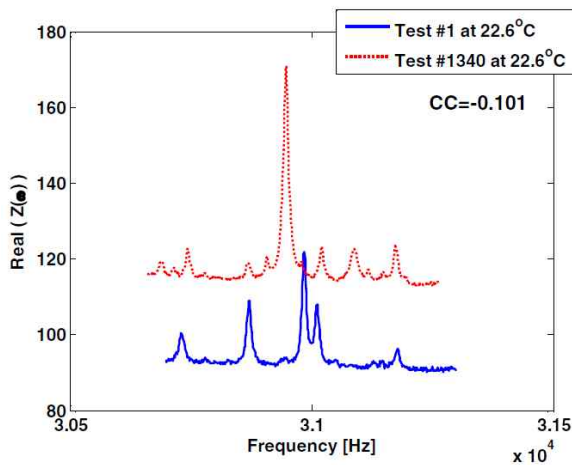
<CNT 에폭시 복합 센서 모듈 자체 임피던스 계측 결과>

5. 계측 기법의 신뢰성 증가를 위한 환경 조건 영향 보상 알고리즘 개발

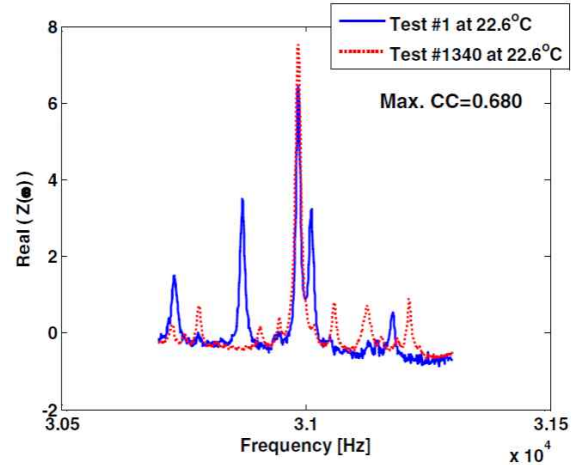
- 온도 변화는 특히 임피던스 신호의 좌우 이동을 유발하므로 이 영향을 보상하기 위한 알고리즘이 필요함.
- 식과 같이 상관계수를 이용한 Effective Frequency Shift (EFS) 기반 온도 변화 및 하중 조건 변화 등의 외부 환경 조건 영향 보상 알고리즘을 개발하였음.

$$\max CC = \max \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x(\omega_i) - \bar{x})(y_i(\omega_i - \bar{\omega}) - \bar{y}) \right\} / \sigma_X \sigma_Y$$

- 손상에 의한 임피던스 신호의 Major Peak의 변화는 그림에서와 같이 온도 변화에 의해서도 그 특성을 유지하므로 온도 영향을 보상하더라도 손상 진단 알고리즘이 유효함.



(a) 온도 보상 전의 임피던스 신호



(b) 온도 보상 후의 임피던스 신호

<온도 영향 보상>

6. 소결

- 실험을 통하여 전기-역학적 임피던스의 계측을 통한 손상 탐지 및 온도 보상이 가능함을 확인하였음.
- 위의 기법들을 CNT/Cement 블록 센서 모듈에 적용하여 손상 탐지 가능 여부를 판단가능함.

1. CNT/Cement 블록의 분산성 및 전도성 확인

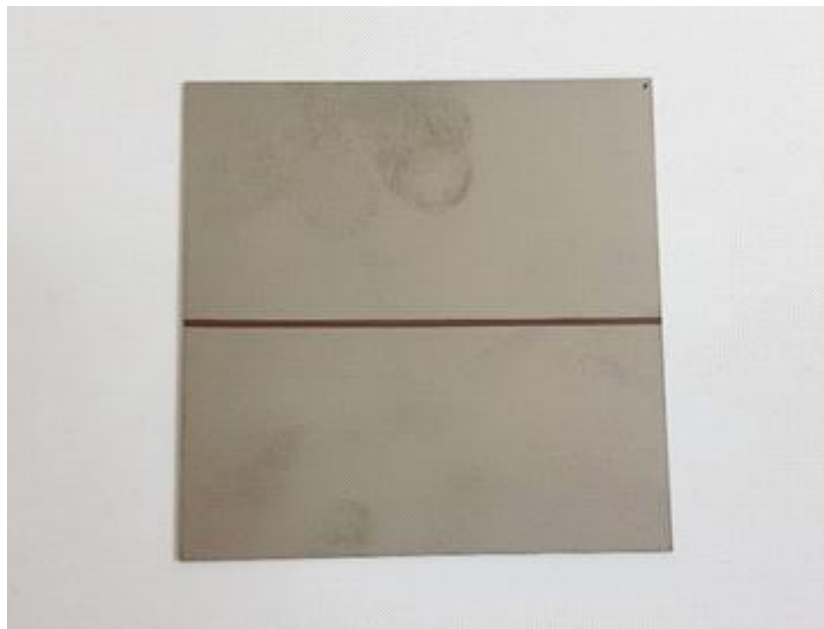
- 제작된 CNT/Cement 블록의 분산성 및 전도성을 확인하기 위하여 모듈별 저항 측정을 실시하였음.
- 센서 모듈을 제작할 당시, CNT 분말이 효과적으로 분산되지 않았다면 측정 단계 마다 저항이 높은 속도로 상승하게 됨.
- 또한 전도성이 낮을 경우, 저항의 측정 자체가 어렵기 때문에 간단한 기초 실험을 통하여 모듈의 신뢰성을 판단하고자 함.
- 실험 결과는 표 2 와 같으며, 저항 값은 일정하게 정상적으로 측정되었음을 알 수 있음.
- 따라서 설계 및 제작 과정에서의 문제는 없었음을 확인할 수 있음.

<블록 별 저항 측정 결과>

		블록 1	블록 2	블록 3	블록 4
저항 값 (Ω)	1 회	2016	3302	1919	2028
	2 회	2016	3302	1919	2028
	3 회	2016	3302	1919	2028
	4 회	2016	3302	1919	2028
	5 회	2016	3302	1919	2028
	6 회	2016	3302	1919	2028
	7 회	2016	3302	1919	2028
	8 회	2016	3302	1919	2028
	9 회	2016	3302	1919	2028
	10 회	2016	3302	1919	2028
평균 저항 값 (Ω)		2016	3302	1919	2028

2. CNT/Cement-PZT 복합 센서 제작 과정

- CNT/Cement 블록에 부착하기 위한 PZT 센서는 APC International 사의 Navy II type APC 850 PZT 를 사용하였으며 아래에 상세 제원과 사진을 나타내었음.

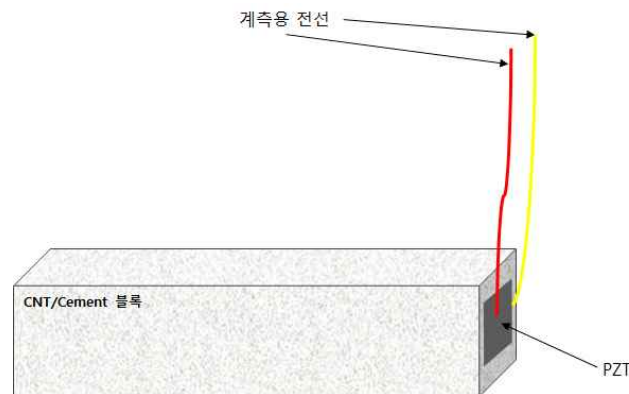


<Navy II type APC 850 PZT>

<PZT 센서 상세 제원>

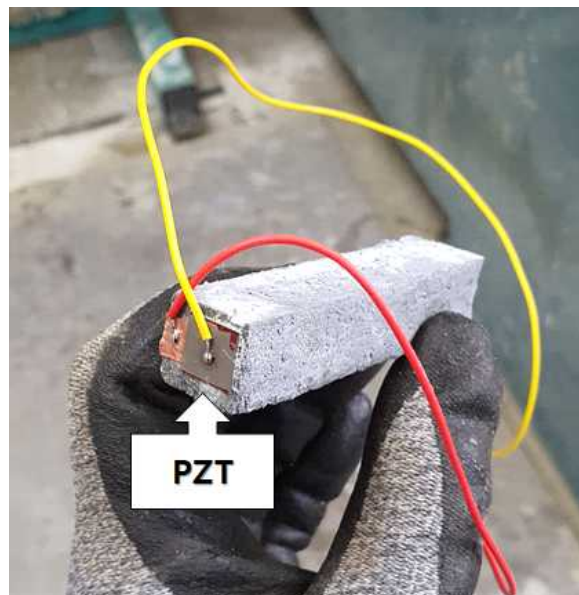
Size (mm)			Electro-mechanical Coupling Factor		Piezoelectric Charge Constant(10-12m/V)	
width	height	thickness	κ_{31}	κ_{33}	d31	d33
10.00	10.00	0.508	0.36	0.72	-175	400

- CNT/Cement 블록에 부착하기 위한 PZT 센서는 10×10mm 의 크기로 절단되어 사용되었으며 블록의 한 쪽 끝단에 PZT 센서를 부착한 뒤, 납땜으로 전선을 연결하였으며 아래 그림에 그 모식도를 나타내었음.



CNT/Cement-PZT 복합 센서 모식도

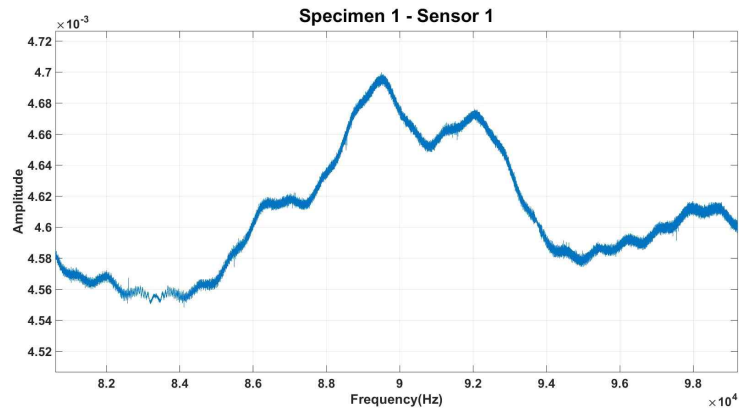
- 부착된 PZT 는 콘크리트 양생 중 CNT/Cement 블록의 동적응답 (전기-역학적 임피던스)을 계측하여 물성 변화를 탐지하는 역할을 하며, 이를 통해 CNT/Cement 블록의 사용성을 검증할 수 있음.
- 실험에 사용된 배합이 총 2 종류이고 한 개의 배합 당 2 개의 센서를 매립하기 위하여 센서는 총 4 개를 제작하였음.
- 제작된 센서를 아래 사진에 나타내었음.



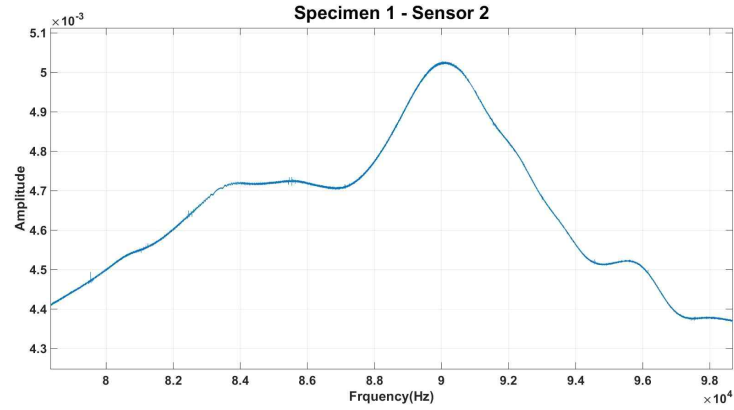
CNT/Cement-PZT 복합 센서

3. CNT/Cement-PZT 복합 센서의 자체 EMI 측정

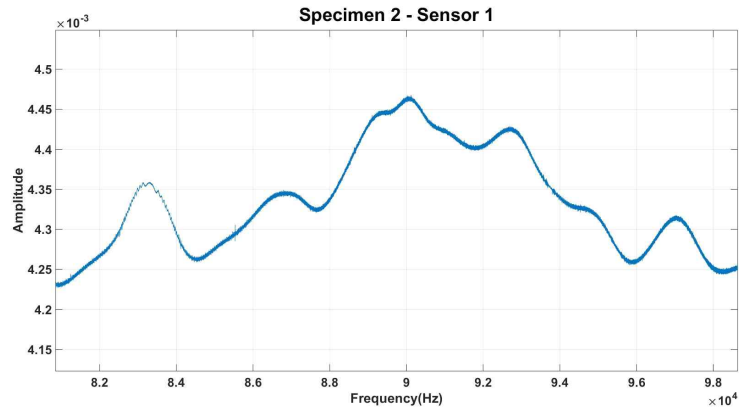
- 복합 센서 자체의 임피던스를 계측한 결과는 아래와 같음.
- 실험에 사용된 4 개의 센서를 이용하여 콘크리트에 매립하기 전에 자체 임피던스를 계측한 결과임
- 임피던스의 분석을 위해 필요한 Major Peak 은 4 개의 센서에서 모두 관찰이 가능하였으며, 관찰된 Major Peak 의 주파수 대역은 약 90kHz 의 범위로 거의 일치하였음



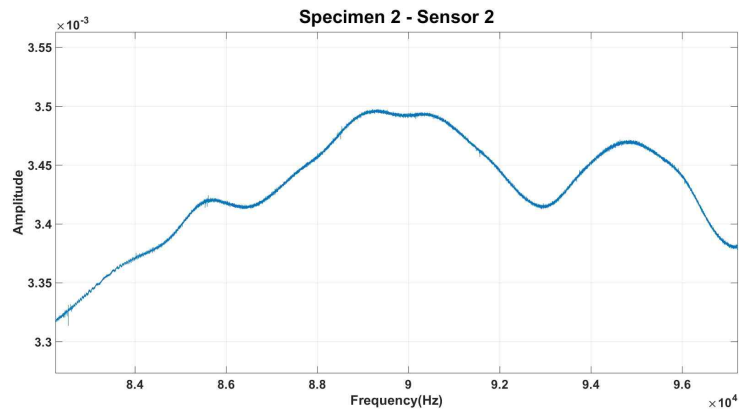
배합 1 - 1번 센서



배합 1 - 2번 센서



배합 2 - 1번 센서



배합 2 - 2번 센서

<CNT/Cement-PZT 복합센서 임피던스 계측 결과>

1. 구조물 공진주파수 계측을 통한 강도 및 손상 모니터링 기법

- 구조물을 단일 질량(m), 단일 감쇠(c), 단일 강성(k)을 가진 단일 자유도(Single Degree of Freedom) 시스템으로 가정하면 그 구조물은 하나의 공진주파수를 가지게 되며 이때 구조물의 공진주파수(ω)는 다음과 같음

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- 따라서 구조물의 강도 증가에 의한 강성 변화 그리고 구조물 손상에 의한 강성 및 질량의 변화를 공진주파수 변화를 통해 모니터링 할 수 있음
- 본 실험은 압전센서를 부착한 CNT/Cement 모듈의 전기역학적 임피던스계측을 통하여 구조물의 공진주파수를 측정하고 측정된 공진주파수의 변화를 통하여 구조물의 강도 및 손상 여부를 모니터링 하는데 있음.

2. 전기역학적 임피던스의 측정 방법

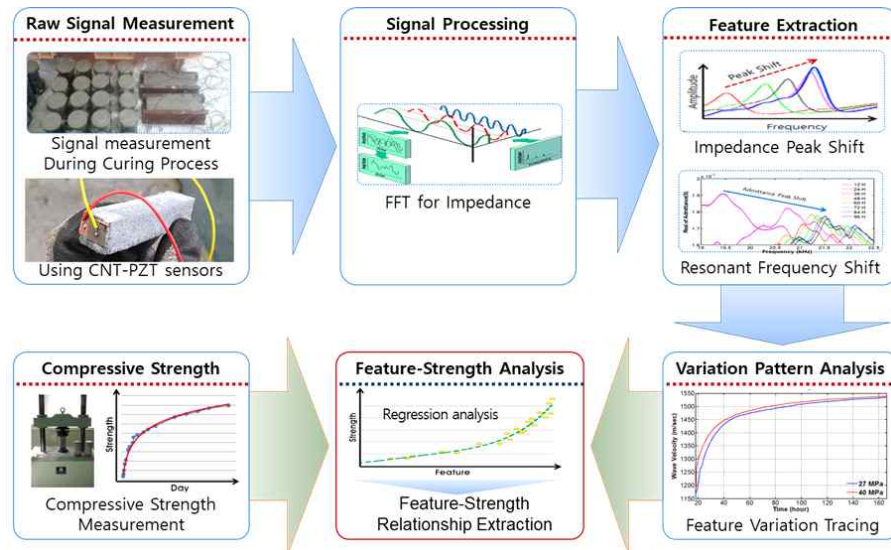
- 전기/역학적 임피던스 기반의 구조물 평가는 구조물에 부착된 PZT 및 MFC 와 같은 작은 압전센서를 통해 고주파영역에서 구조물에 진동을 전달하고 동시에 그 구조물의 응답을 전기/역학적 임피던스의 변화로 관찰하며 임피던스 공진주파수는 주파수에 따른 임피던스가 최고점을 나타내는 위치의 주파수 값임.
- 임피던스를 이용한 계측에는 저비용으로 높은 신뢰도를 보여주는 커패시터를 이용한 셀프센싱 기법을 이용
- 셀프센싱 기법은 하나의 압전센서가 초음파의 발신기와 센.서의 역할을 동시에 수행하고 하나의 간단한 커패시터만을 사용하여 기존 임피던스 계측 시스템에 비해 저비용임
- 압전센서의 한 면은 대상 구조물과 부착되고 나머지 한 면은 임의 파형 생성기에서 생성된 입력 전압 $v_i(t)$ 와 연결된다. 그리고 바닥면은 셀프센싱을 위한 커패시터 회로와 연결되고 셀프센싱 회로로 부터의 출력전압 $v_o(t)$ 는 디지털타이저(Digitizer)에서 계측됨.

$$Z(\omega) = \left[i\omega C_r \frac{V_o(\omega)}{V_i(\omega) - V_o(\omega)} \right]^{-1}$$

- 여기서 C_p 는 하중이 없는 상태에서의 압전센서 커패시턴스 값을, V_o 는 출력전압, V_i 는 입력전압을 각각 나타냄

3. CNT/Cement 센서 모듈의 물성 변화를 이용한 계측 방법

- CNT/Cement 블록을 양생 중인 콘크리트 블록 내부에 넣을 경우, 콘크리트가 경화함에 따라 발생하는 시멘트의 수화반응에 의해 CNT/Cement 블록에도 그 영향을 줌
- 이 때 블록에 부착한 PZT 센서를 이용하여 그 변화를 탐지하는 것이 본 연구의 목적임
- CNT/Cement 블록 자체도 전기전도도가 존재하므로 자기 정렬 과정을 통해 양 끝단에 극을 형성한 후 그 자체로 압전센서의 대체하는 방법이 가장 이상적이나, 현재 해당 방법과 관련된 기술 개발이 진행 중에 있으므로 당장 적용하는 것은 어려움
- 본 연구를 통해 매립된 CNT/Cement 블록의 콘크리트 경화에 따른 변화를 추출하여 분석한 후, 본 결과를 이용하여 추후 CNT/Cement 블록의 사용성을 확대할 예정임.



<콘크리트 강도 추정 프로세스>

4. 센서 성능 평가 및 강도 추정을 위한 실험체 제작 및 계측 실시

- 콘크리트 강도 추정식 제안을 위한 센서 성능 평가를 위하여 총 2 종류의 콘크리트를 배합하였으며 1 개의 배합 당 총 2 개씩의 센서를 매립함

<콘크리트 배합표>

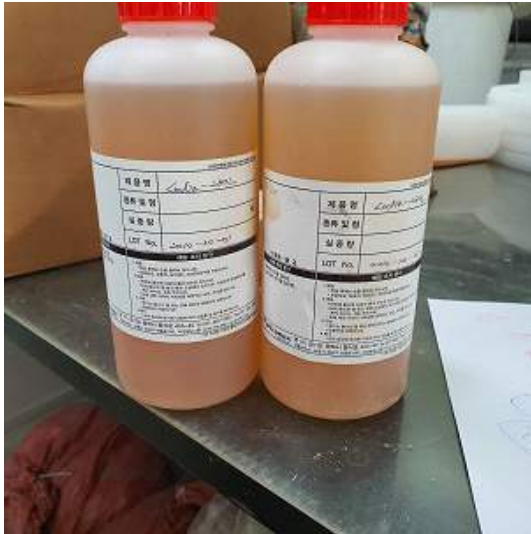
배합	물-시멘트비 (%)	단위 중량 (kg/m ³)				고성능감수제 (%)	AE 제 (%)
		물	시멘트	잔골재	굵은 골재		
1	56	185	330	873	916	0	0
2	34	135	328	717	723	0.6	0.8



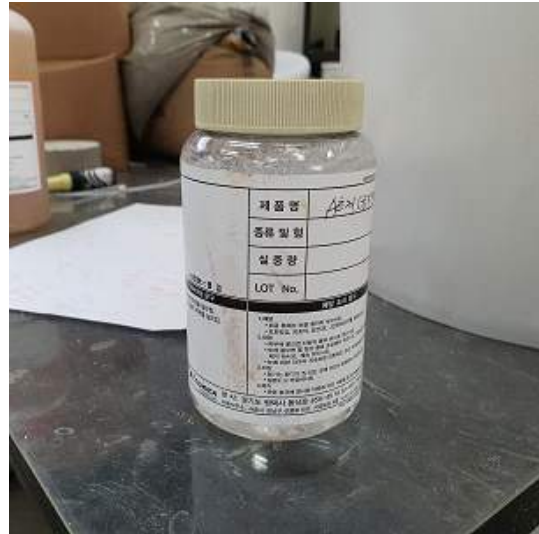
(a) 시멘트 및 골재 계량



(b) 콘크리트 믹싱



(c) 고성능 감수제



(d) AE제



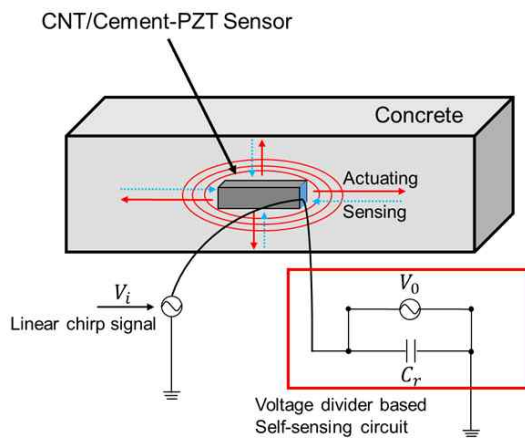
(e) 공시체 제작



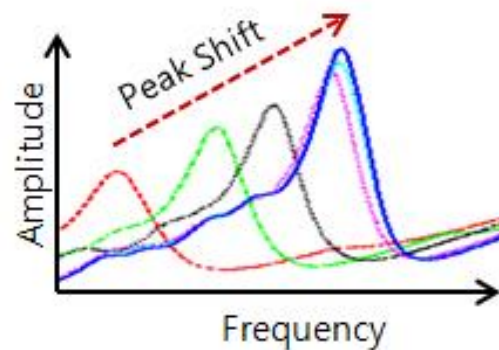
(f) 센서 매립

<콘크리트 배합 및 실험체 제작>

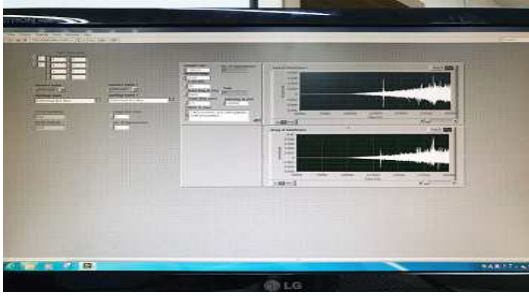
- CNT/Cement-PZT 복합 센서의 성능평가 및 콘크리트의 강도 추정을 위해 전기-역학적 임피던스의 계측 실험 수행
- 양생 중인 콘크리트의 경화가 진행됨에 따라 물성치가 변화하게 되고, 이 때 콘크리트 내부에 매립된 CNT/Cement 블록 역시도 그 영향을 받아 물성치가 변화하게 되므로 블록에 부착된 PZT 센서를 이용한 임피던스의 계측이 가능
- 임피던스는 NI-PXI DAQ 장비 내 Labview 기반 임피던스 계측 알고리즘을 바탕으로 계측되었으며, 현장에서의 효율적인 적용을 위해 셀프 센싱 회로를 적용함



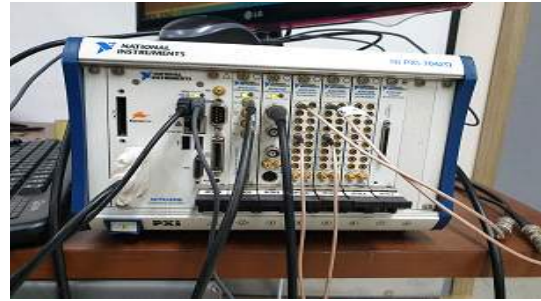
(a) 셀프 센싱 회로



(b) 강도 추정을 위한 특성 추출



(c) Labview 기반 임피던스 계측 알고리즘



(d) NI-PXI DAQ



(e) CNT/Cement-PZT 복합 센서



(f) 센서 계측

<계측 실시>

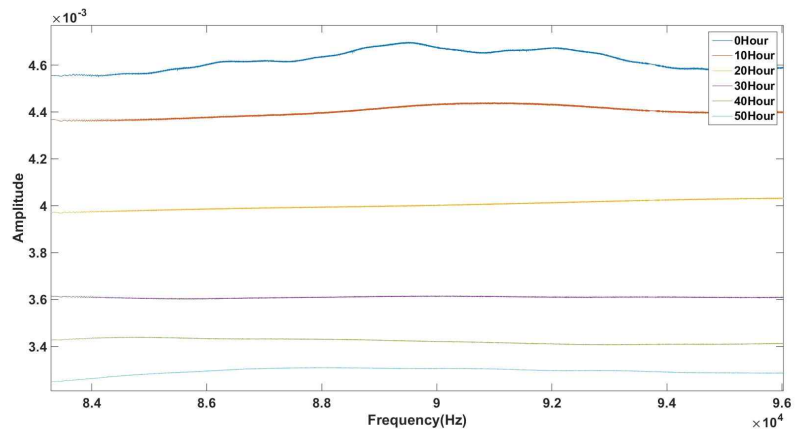
- 배합 1의 경우 재령 2일차에 일정 상태 이상 경화가 진행되어 UTM(Universal Testing Machine)을 이용한 압축강도 측정이 가능하였으나, 배합 2의 경우 초결이 완료되지 않아, 압축강도의 측정이 불가능하였음
- 재령 3일차부터 두 배합 콘크리트 모두 압축강도의 측정이 가능하였으며 그 결과는 아래 표에 나타내었다.

<실험체 압축 강도 측정 결과>

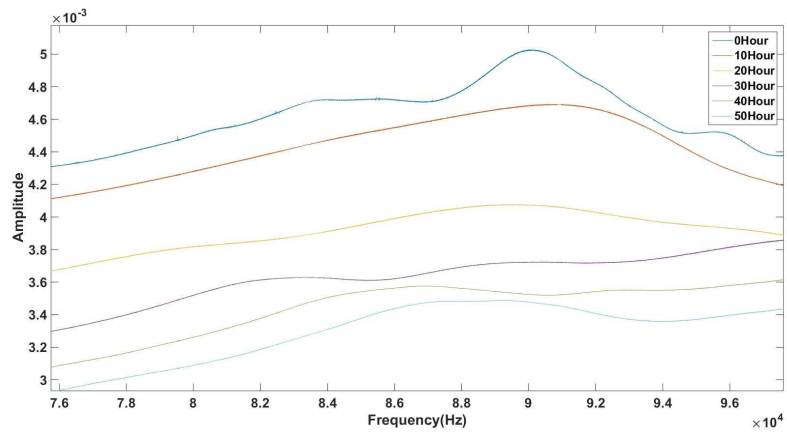
재령 (일)	배합 1 (MPa)	배합 2 (MPa)
1	-	-
2	6.75	-
3	11.0	6.5
7	13.2	10.1

5. 계측 결과

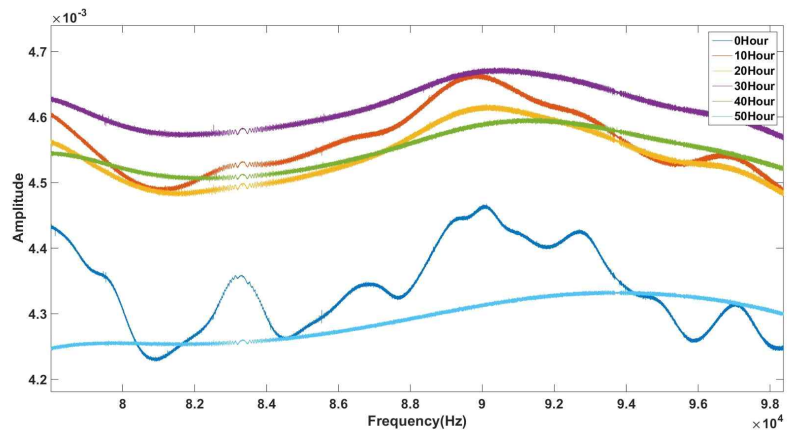
- 전기/역학적 임피던스는 NI-PXI DAQ 시스템을 사용하여 유선으로 계측됨
- 초기 강도 발현을 탐지해내는 것이 매우 중요하므로 콘크리트 타설 직후 계측을 시작하였고, 아래에 각 센서에서의 임피던스 계측 결과를 나타냄
- 각 센서에서의 임피던스 계측 값은 육안으로 구별 가능한 공진주파수 최고점이 형성되어 있으며, 또한 시간이 지남에 따라 그 기울기가 줄어들고 있음을 확인함
- 임피던스는 콘크리트가 경화함에 따라 최고점으로 이어지는 기울기가 감소함
- PZT는 CNT/Cement 블록에 부착된 상태로 계측이 진행되었고, 임피던스는 부착된 구조물의 물성 변화에 반응하여 그 계측 형태가 변화하기 때문에 이를 통해 콘크리트의 경화가 CNT/Cement 블록에 영향을 주는 것을 알 수 있으며, 연구에서 제안한 CNT/Cement-PZT 복합 센서의 사용성을 검증함



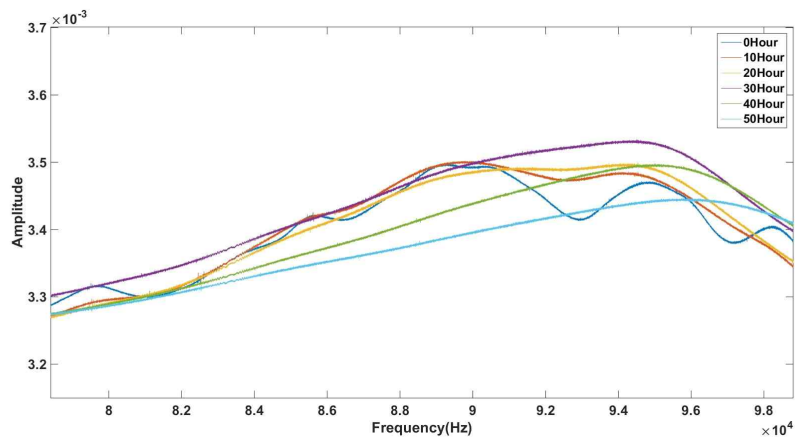
(a) 배합1 센서 1번



(b) 배합1 센서 2번



(c) 배합2 센서 1번



(d) 배합2 센서 2번
<임피던스 계측 결과>

6. 신호 분석 기법

6.1. 신호 상관 계수 지수(1-CC)

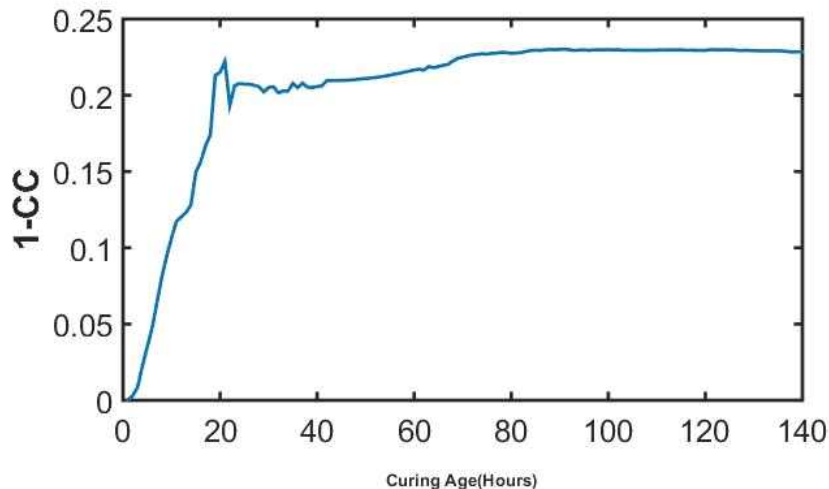
- 임피던스 신호 변동에 대한 정량적 정보를 제공하기 위해 신호 상관 계수 지수(1-CC)를 계산한다. 1-CC는 아래의 방정식을 통해 계산됨

$$1 - CC = 1 - \frac{1}{N-1} \frac{\sum_{i=1}^N (Re(Z_0) - Re(\overline{Z_0}))(Re(Z_i) - Re(\overline{Z_i}))}{\sigma_{Z_0} \sigma_{Z_i}}$$

- 여기서 $Re(Z_0)$ 은 초기 임피던스 계측값이며, $Re(Z_i)$ 는 시간 별 측정 데이터에서 i번째 시간의 임피던스 계측값을 의미한다. $Re(\overline{Z_0})$ 과 $Re(\overline{Z_i})$ 는 각 데이터의 평균값을 의미하며, σ_{Z_0} 와 σ_{Z_i} 는 각 데이터의 표준편차를 의미하고, N은 총 데이터 세트 수를 의미한다. 위의 상관계수 방정식을 통해 구해진 1-CC 값을 통해 취득된 임피던스 신호를 이용하여 콘크리트의 강도 추정이 가능함

6.2. 1-CC를 이용한 임피던스 분석 결과

- 1-CC를 이용한 임피던스 분석 결과를 아래 그림에 나타내었으며, 그래프는 양생 3일차까지의 데이터를 이용한 임피던스 분석 결과 및 이후 변화 추정을 나타낸 그래프이다. 본 기법을 이용하여 추정된 강도 발현식은 아래 식과 같음



<1-CC를 이용한 배합 2번 임피던스 분석 결과>

$$S(MPa) = 189.47 \times (1 - CC) - 33.48$$

- 위의 식을 통해 추정된 7일 강도는 9.86MPa이며, UTM을 이용하여 3개의 공시체를 압축강도 시험을 통해 측정한 콘크리트 시편의 압축강도 평균은 10.1MPa임
- 7일 강도에 대해 압축강도 시험 결과와 임피던스 계측을 통한 압축강도 추정값 사이의 오차율은 2.37%임

7. 소결

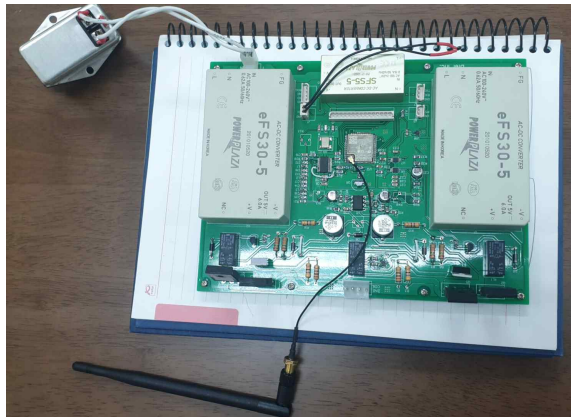
- CNT의 압전 저항 특성을 활용하여 재료가 시편 내부의 응력/균열을 감지할 수 있음
- 그 자체로 전기전도도를 가지고 있어, 전선을 연결할 경우 또한 CNT는 콘크리트의 강도와 인성을 향상시키는 보강 요소로도 작용할 수 있음
- CNT/Cement 블록을 센서로 이용하는 것의 의미는 작게는 콘크리트 내부에 매립되어 콘크리트 구조물의 건전성 모니터링을 수행하는 것에 있으며, 크게는 콘크리트 구조물에 CNT를 첨가하여 구조물 자체를 센서화하는 것임
- CNT/Cement-PZT 복합 센서를 활용하여 콘크리트 양생 과정 중 내부에 매립된 CNT/Cement 블록의 물성 변화를 PZT 센서를 이용하여 찾아내고 이를 통해 콘크리트 압축강도를 예측 가능함.

1. CNT-PZT 복합센서 데이터 수집 장치 제작

- CNT-PZT 복합센서를 이용하여 계측된 데이터의 원격 송신을 위한 데이터 수집 장치를 제작함

항목	규격
CPU	32Bits @ 240MHz
Battery	Li-Ion 10,000mAh, 충전없이 최대 60 일 측정
측정주기	매 1 시간마다 픽을 측정하여 서버로 전송
센서 개수	총 4 개, $\pm 0.08\%$
강도측정을 위한 주파수범위	5KHz ~ 250KHz, 122Hz step
계측기 동작전압	3.3V ~ 5V
계측기 동작온도	-10°C ~ 70°C
무선통신	무선 LTE Network
충전기	5V, 1A

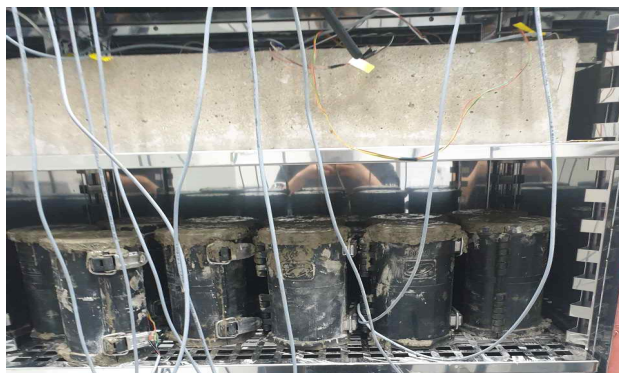
- 계측된 임피던스 데이터의 픽을 선별해내어 분석할 수 있는 코드를 python 기반의 코드로 변경하여 서버 내에서 즉각적인 분석이 가능하며, 배터리로 구동됨



<제작된 CNT-PZT 복합센서 데이터 수집 장치>

2. CNT-PZT 복합센서를 적용한 콘크리트 압축강도 예측 실험

- 콘크리트 시험체에 매립된 CNT-PZT 복합센서로부터 계측되는 공진주파수의 변화를 관찰함으로써 콘크리트의 재령일 별 압축강도를 예측함
- 강도 계측용 각주형 시험체를 2 개 제작하여 CNT-PZT 복합센서를 매립하고 시험체 타설 후, 항온/항습 챔버에 넣고 압축강도 모니터링 시작
- 강도 계측용 각주형 시험체 제작과 동시에 같은 배합의 압축강도 시험용 원주형 표준 공시체 12 개를 제작하였다. 3 일, 7 일, 14 일, 28 일 별 3 개씩 제작하여 콘크리트 강도 측정을 공인인증시험기관(건설품질기술 연구원)에 의뢰하였고 3 일 압축강도(13.1MPa, 13.5MPa, 13.5MPa→평균 13.4MPa)를 전달받아 이 값을 기준으로 압축강도 예측을 진행함

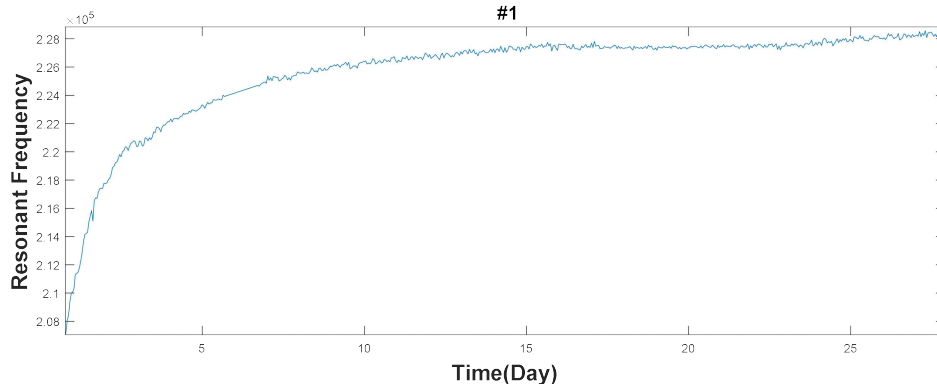


압축강도 시험용 원주형 공시체 제작

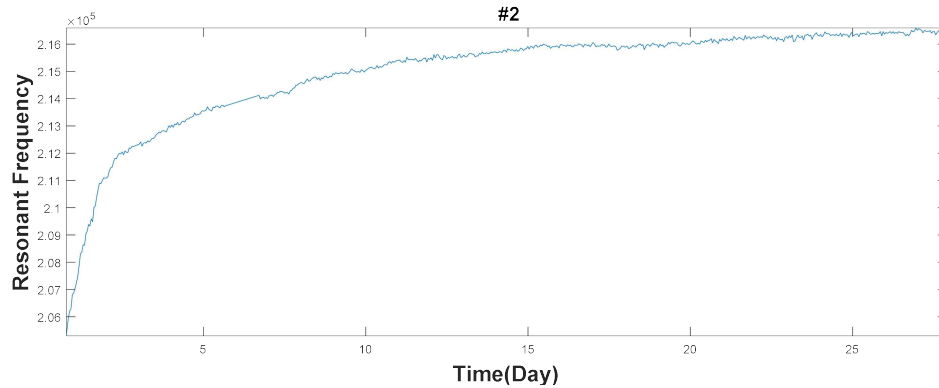
- 양단 지점부와 중앙부에 설치된 CNT-PZT 복합센서를 이용하여 재령기간 동안 15분에 1회씩 계측함
- 측정된 공진주파수는 온도의 영향을 받기 때문에 다음 식으로 온도 영향을 보상함

$$F_{modi} = F + (T - T_{ini,average}) \times \alpha$$

- F 는 측정된 공진주파수, T 는 측정된 온도이며 $T_{ini,average}$ 는 초기 1일 평균 온도, α 는 센서 크기가 적용된 실험 계수이며 해당 보상식을 적용한 결과 온도 변화에 따른 영향이 해소된 것을 확인함



<온도보상을 적용한 시험체1의 공진주파수 그래프>

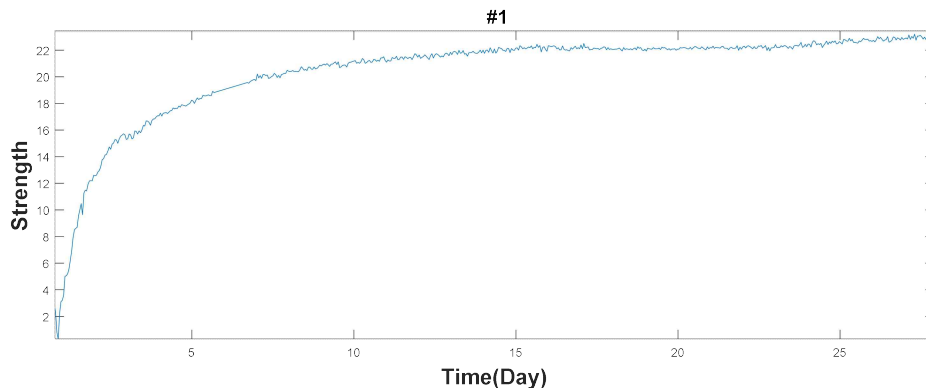


<온도보상을 적용한 시험체2의 공진주파수 그래프>

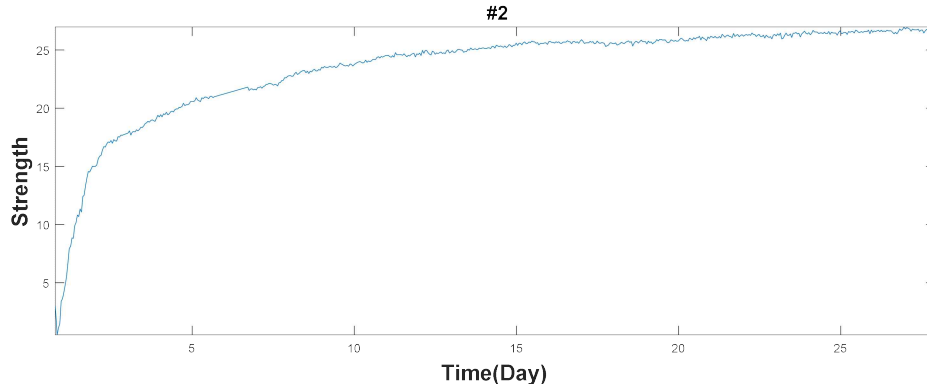
- 측정된 공진주파수를 다음 강도 예측 식을 적용하여 콘크리트 재령일 별 강도를 예측함

$$\text{Strength} = \frac{F_{modi} - F_{1day,average}}{|F_{modi} - F_{1day,average}|} \left(\frac{|F_{modi} - F_{1day,average}|}{F_{1day,average}} \right)^{0.8} \times \beta$$

- F_{modi} 는 위의 온도보상이 적용된 공진주파수이며 $F_{1day,average}$ 는 초기 1일 공진주파수의 평균이고 β 는 실험계수임



<강도 추정식을 적용한 시험체1의 예측 강도 그래프>



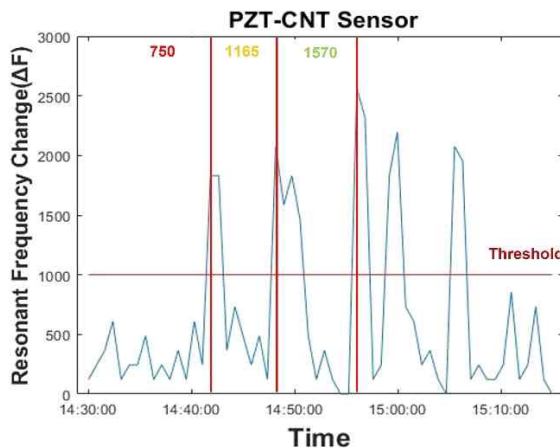
<강도 추정식을 적용한 시험체2의 예측 강도 그래프>

- 건설품질기술연구원에서 수행한 재령 7 일, 14 일, 28 일 콘크리트 압축강도시험 측정값과 본 연구를 통해 얻어진 콘크리트 압축강도 예측값을 비교하여 오차율은 10% 이내임을 확인함

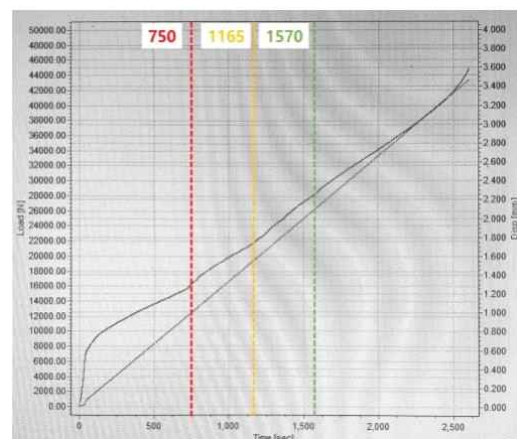
	7 일	14 일	28 일
압축강도 시험결과 평균 (MPa)	21.6	24.0	25.1
시험체 1 예측 압축강도 (MPa)	20.21	21.76	23.18
시험체 1 오차율 (%)	6.4	9.3	7.8
시험체 2 예측 압축강도 (MPa)	21.77	25.12	26.76
시험체 2 오차율 (%)	0.8	4.7	6.5

3. CNT-PZT 복합센서를 적용한 콘크리트 손상 감지 거리

- 콘크리트 시험체에 매립된 CNT-PZT 복합센서로 계측되는 공진주파수의 변화를 통해 콘크리트에 발생한 균열을 감지 가능함
- 휨 시험용 각주형 시험체에 CNT-PZT 복합센서를 매립 후 시험체를 타설함
- 휨 시험 중 CNT-PZT 복합센서의 계측을 수행하여 이상 신호 감지 시 균열 발생을 확인하고, 이상 신호가 감지된 해당 센서와 균열 위치와의 거리를 측정함
- CNT-PZT 센서에 측정된 공진주파수를 모니터링하고 UTM 데이터에서 발견된 균열정보와 비교하고, 균열 발생 시점 특정을 위해 시험체 중앙부 아래에 카메라를 설치하여 균열 발생 과정 녹화함
- 균열 발생 시 줄자를 사용하여 시험체 균열과 센서 간의 거리를 측정함
- 콘크리트 시험체에서 손상 또는 균열이 발생하는 시점을 센서에서 측정된 신호의 피크로 판단이 가능하며, UTM 데이터와 CNT-PZT 복합센서에서 측정된 손상 감지 시점 정보가 일치함을 확인함



<휨 시험용 시험체의 공진주파수 변화량 그래프>



<UTM에서 측정된 균열 정보 데이터>

- CNT-PZT 복합센서를 통한 손상 모니터링을 통해 센서가 감지한 손상(균열) 발생위치까지의 거리는 약 310mm 인 것으로 확인되어 성능목표 기준 300mm 이상을 달성함

■ 셀프센싱을 위한 CNT 폴리머 복합체 제작

1. CNT 분산 기법 개발

1.1. 개요

- 탄소나노튜브는 나노미터 수준의 크기와 긴 장대비로 인하여 매우 강한 반데르발스 힘 (van der Waals interaction)을 가지기 때문에 서로 강한 응집성을 가지게 되고, 이러한 강한 응집성은 복합체 제작시 탄소나노튜브의 분산에 영향을 미치고 결국 전체 재료의 재료적 특성의 저하를 유발함
- 본 연구에서는 분산제 및 분산력에 따른 탄소나노튜브의 분산 최적화 기법에 대한 연구를 수행함

1.2. 실험

- 순도 85%의 수준의 상업용 탄소나노튜브를 사용하였고, 개량형 탄소나노튜브는 고려하지 않음
- 실험 시 분산제는 Acetone 과 Chloroform 를 사용하고, 분산제를 사용하지 않는 경우와 비교하였으며, 분산 기기로는 미국 Qsonica 사의 초음파분산기를 사용함

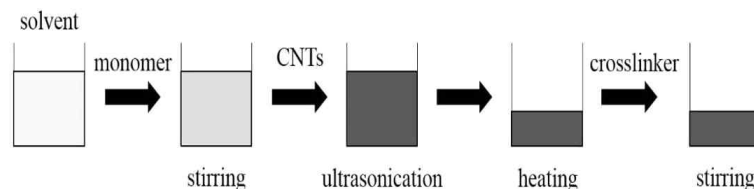
- 실험방법

- (1) 먼저 100ml 비커에 폴리우레탄 Part A 10g 과 아세톤 등 분산제 50g 를 넣고 균질하게 저어준 뒤 탄소나노튜브를 정밀 전자저울을 이용하여 계량한 뒤 넣어준다.
- (2) Qsonica 사의 초음파분산기를 사용하여 용액에 든 탄소나노튜브를 분산시킨다. 이 때, 초음파분산기는 90% 출력과 15 초 작동/15 초 미작동의 조건 하에서 분산한다.
- (3) 분산된 용액은 핫플레이트에 옮긴 뒤 60°C 에서 24 시간 동안 분산제를 증발시킨다.
- (4) 그 후 폴리우레탄 Part B 10g 을 넣고 균질하게 저어준 뒤 유리판에 옮긴 후 코팅기기를 통해 두께를 조절하여 동일한 두께의 샘플을 제조한다.

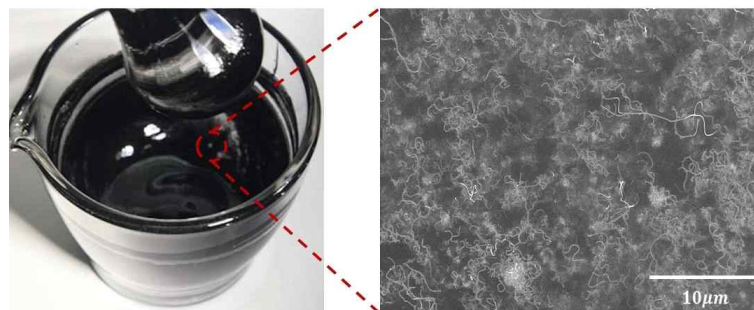
- 탄소나노튜브 분산정도는 분산기법에 따른 샘플의 전기전도도를 통하여 파악함
- 전기전도도는 디지털 멀티미터를 통해 샘플의 저항을 측정한 뒤 아래 식을 통해 전기전도도를 계산

$$\sigma = \frac{L}{AR}$$

- A 와 L 은 시편의 절단면과 전극의 간격이 되고 R 은 측정된 저항 값
- 저항 측정 시 측정 프로브와 샘플 사이의 접촉저항을 최소화하기 위해 샘플 양 극단에 전도성 실버 페인트를 도포한 후에 저항을 측정함
- 샘플 5 개의 평균 저항값을 사용하여 검토함



탄소나노튜브-폴리머 복합체 제작과정



탄소나노튜브-폴리머 코팅제

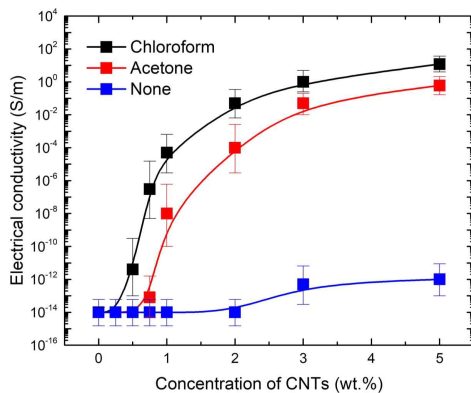
<탄소나노튜브-폴리머 복합체 제작과정>

<실험조건>

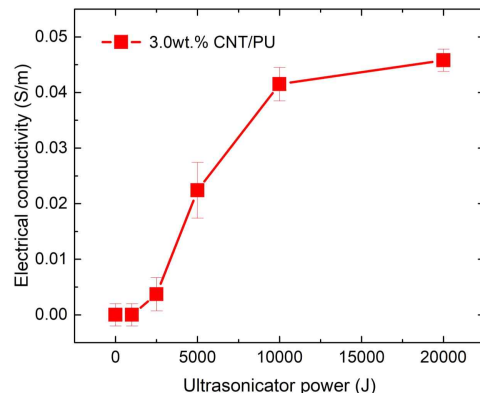
샘플명	폴리우레탄 (g)	분산제		CNTs (g)
		Chloroform (g)	Acetone (g)	
PC0.00	10	50	0	0.00
PC0.25				0.25
PC0.50				0.50
PC0.75				0.75
PC1.00				1.00
PC2.00				2.00
PC3.00				3.00
PC5.00				5.00
PA0.00		0	50	0.00
PA0.25				0.25
PA0.50				0.50
PA0.75				0.75
PA1.00				1.00
PA2.00				2.00
PA3.00				3.00
PA5.00				5.00

1.3. 실험결과 및 분석

- Acetone 과 Chloroform 을 분산제로 사용하여 분산제를 사용하지 않은 시편과의 비교를 수행함
- 분산제 종류에 따른 CNT 복합체의 전기전도도 측정 결과 분산제 미사용시 복합체의 전기전도도는 매우 낮은 경향을 보이는데, 이는 분산제 미사용으로 인하여 탄소나노튜브가 제대로 분산되지 못하여 매트릭스 내의 네트워크를 구성하지 못하여 전기적 이동이 어려운 것으로 보임
- Acetone 과 Chloroform 을 분산제로 사용하였을 경우에는 각각 0.75wt.%와 0.50wt.%에서 전기전도도의 상승이 관찰되었으며, 분산제 미사용으로 제작된 복합체에 비해 매우 높은 전기전도도를 보여주고 있음
- 적절한 분산제 사용은 적은 양의 탄소나노튜브를 사용한 전도성 복합체를 제작이 가능함
- 탄소나노튜브를 이용한 전도성 복합체 제작에 있어서 클로로포름이 아세톤에 비해 높은 전기전도도 향상을 보이나, 클로로포름은 오래 전부터 전신 마취제와 방부제로 쓰이는 것으로 독성이 아세톤 및 다른 화학제품에 비해 더 심하여 복합체 제작시 인체에 해로울 것으로 판단되어 향후 연구에서는 클로로포름의 인체 유해성을 고려하여 아세톤을 활용하여 전도성 복합체를 제작함
- 초음파분산기 출력에 따른 CNT-폴리머 복합체의 전기전도도 측정결과 출력량에 따라 전기전도도가 증가하는 현상을 보이며 본 연구에서는 약 10,000J 이상의 총 출력이 가해졌을 경우 전기전도도의 증가폭이 감소하는 경향을 보임.



<분산제 종류에 따른 전기전도도>



<초음파분산기의 출력에 따른 전기전도도>



<초음파분산기의 출력에 따른 분산정도>

2. CNT 함유량에 따른 전기전도도 비교

2.1. 샘플 배합

<실험조건>

샘플명	폴리우레탄 (g)	분산제		CNTs (g)
		Chloroform (g)	Acetone (g)	
PC0.00	10	50	0	0.00
PC0.25				0.25
PC0.50				0.50
PC0.75				0.75
PC1.00				1.00
PC2.00				2.00
PC3.00				3.00
PC5.00				5.00
PA0.00		0	50	0.00
PA0.25				0.25
PA0.50				0.50
PA0.75				0.75
PA1.00				1.00
PA2.00				2.00
PA3.00				3.00
PA5.00				5.00

2.2. 샘플 제작

- 사이즈 : W: 50mm × H: 0.5mm × L: 100mm
- 배합 : 표 1 에 제공된 실험조건으로 제작
- 제작 과정
 - (1) 100ml 비커에 폴리우레탄 Part A 10g 을 넣는다.
 - (2) 분산제 (크로로폼 또는 아세톤) 50g 을 넣고 균질하게 저어준다.
 - (3) 카본나노튜브를 전자정밀저울로 계량한 뒤 넣어준다.
 - (4) 분산기기로 용액을 분산시킨다. 분산기기는 90%, 15 초 작동/15 초 미작동의 조건으로 분산하였다.
 - (5) 분산된 용액은 핫플레이트 올려놓은 후 60 도에서 24 시간 분산제를 증발시킨다.
 - (6) 용액에 폴리우레탄 Part B 10g 을 넣고 균질하게 저어준다.
 - (7) 용액을 유리판에 옮긴 뒤 코팅기기를 통해 두께 1mm 로 유지시킨다.
 - (8) 용액을 핫플레이트 올려놓은 후 60 도에서 24 시간 경화시킨다.

2.3. 실험 방법

2.3.1. 저항 측정

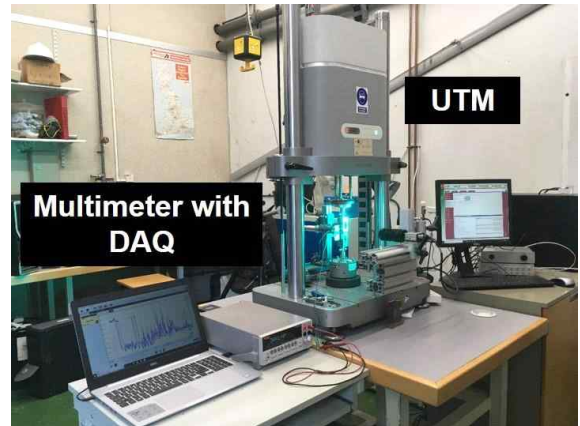
- 디지털 멀티미터를 통해 저항을 측정 후 샘플의 크기를 고려하여 전기전도도를 계산한다.
- 측정 프로브와 샘플 사이의 접촉저항을 최소화하기 위해 샘플의 양 극단에 전도성 실버페인트를 도포처리한다.
- 평균 저항값 측정을 위해 샘플 5개 측정 뒤 평균값을 산정한다.

2.3.2. 전기-기계적 특성 측정

- 샘플의 인장변형률을 가하기 위해 만능시험기에 샘플을 고정한다.
- 샘플 양 끝단에 크립을 이용하여 전극 고정한다.
- 인장변형률 1mm/분 조건으로 인장시험을 실시한다.
- 인장변형 중 전기적 저항을 디지털 멀티미터와 데이터수집장치를 통해 실시간 측정한다.



<인장률 측정 실험장치>

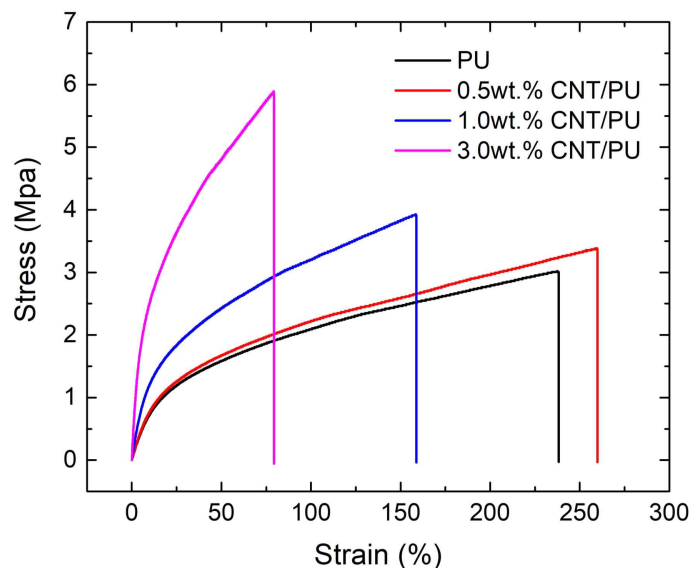


<전기-기계적 특성 실험장치>

2.4. 결과 및 토론

2.4.1. 탄소나노튜브-폴리머 복합체의 인장변형률

- 탄소나노튜브 함량 증가에 따라 인장력은 증가하나 인장율은 감소함
- 콘크리트의 파괴 시 변형률이 대략 0.35%임을 고려하면 탄소나노튜브-폴리머 복합체 샘플은 그 변형률 범위를 모두 포함하기 때문에 콘크리트 외벽에 부착할 수 있는 재료로 사용이 가능함

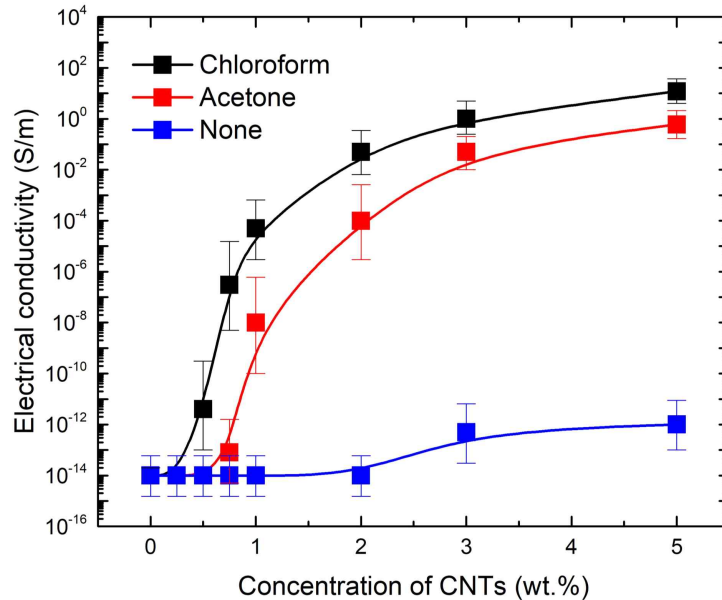


<CNT-폴리머 복합체의 인장력과 인장률>

2.4.2. 전기전도도

- 분산제 미사용시 샘플의 전기전도도는 분산제 사용된 경우에 비해 극히 낮으며 적절한 분산제 사용이 필수적임
- Chloroform 에서 분산된 샘플의 전기전도도가 아세톤에서 분산된 샘플의 전기전도도보다 전반적으로 높게

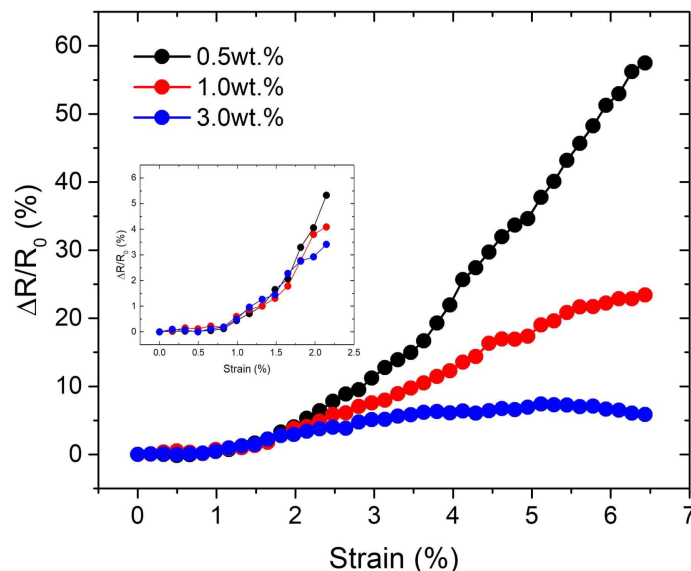
- 나타나, 탄소나노튜브-폴레우레탄 복합체 제작에 있어서는 최적의 분산제로 판단되나 Chloroform 의 경우에는 아세톤에 비해 독성이 강하여 제작시 인체의 유해하여 향후 실험과정에서는 아세톤으로 제작함
- Percolation threshold 이후의 모든 탄소나노튜브-폴레우레탄 복합체는 센서로 사용될 수 있을 것이나, 변형률에 따른 민감도는 다를것으로 판단됨



분산제 종류에 따른 CNT-폴리머 복합체의 전기전도도

2.4.3. 전기-기계적 특성

- 본 연구에서 개발된 전도성을 가진 탄소나노튜브-폴리머 복합체는 기존의 센서에 비해 고인장 고감도의 특징을 가짐
- 인장에 따른 저항 변화가 뚜렷하게 보이고 인장과 저항 변화율의 관계를 통해 콘크리트 구조물 파괴를 간접적으로 확인가능함
- 저인장 구간에서는 탄소나노튜브 함량과 관계없이 비슷한 저항 변화율을 나타낸다. 이를 통해 저인장 변화를 관찰하기 위해서는 탄소나노튜브 함량이 낮은 복합체를 제작 및 사용하는 것이 경제적인 측면에서 유리하다고 판단됨
- 0.5wt.%의 탄소나노튜브로 제작된 복합체는 6%의 인장률에서 약 60% 이상의 저항 변화율을 보이는 반면, 3.0wt.%의 탄소나노튜브로 제작된 복합체는 같은 인장률에서 약 5%의 저항 변화율을 나타내어 고인장 구간에서는 카본나노튜브 함량이 증가할수록 저항 변화가 작아지는 경향을 확인함
- 기존의 센서에 비해 향상된 변형율을 나타내는 장점을 가지고 있고, 또한 구조물 전체에 적용할 수 있는 대면적 적용이 가능함



인장률에 따른 전기-기계적 특성

1. 저항 변화 확인 목적

- 콘크리트 구조물에 부착된 CNT 폴리머 코팅의 하중 변화에 따른 저항 변화를 분석함으로써 CNT 폴리머의 민감도와 균열에 대한 전기적 특성을 확인함

2. 시작품 범위

- 분산제는 아세톤을 사용하며, CNT와 폴리우레탄으로 구성된 전도성 코팅재료 제작

3. 샘플 배합

<인장강도 실험조건>

샘플명	폴리우레탄 (g)	분산제	CNTs (g)
		Acetone (g)	
PA2.00	20	50	0.4
PA3.00			0.6
PA6.00			1.2

<0.3mm/min 조건에서의 3점 휨강도 실험조건>

샘플명	폴리우레탄 (g)	분산제	CNTs (g)
		Acetone (g)	
PA3.00	20	50	0.6
PA6.00			1.2

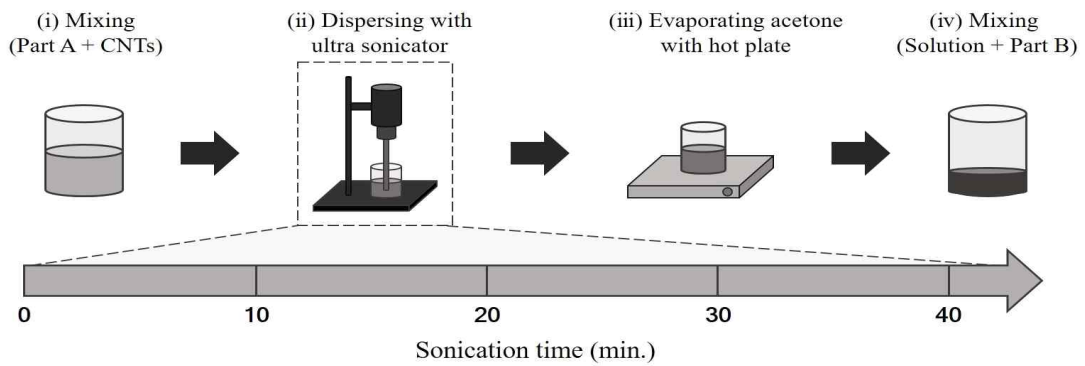
0.2mm/min 조건에서의 3점 휨강도 실험조건

샘플명	폴리우레탄 (g)	분산제	CNTs (g)
		Acetone (g)	
PA3.00	20	50	0.6

4. 샘플 제작

4.1. 인장 강도 시험

- 사이즈 : W: 10mm × H: 0.7mm × L: 70mm
- 배합 : 표 1에 제공된 실험조건으로 제작
- 제작 과정
 - (1) 200ml 비커에 폴리우레탄 Part A 10g을 넣는다.
 - (2) 분산제 (아세톤) 50g을 넣고 균질하게 저어준다.
 - (3) CNT를 전자정밀저울로 계량한 뒤 넣어준다.
 - (4) 분산기기로 용액을 분산시킨다. 분산기기는 90J, 15초 작동/15초 미작동의 조건으로 작동/40분 동안 분산하였다.
 - (5) 분산된 용액은 핫플레이트 올려놓은 후 60도에서 24시간동안 분산제를 증발시킨다.
 - (6) 용액에 폴리우레탄 Part B 10g을 넣고 균질하게 저어준다.
 - (7) 용액을 유리판에 옮긴 뒤 코팅기기를 통해 두께 0.7mm로 유지시킨다.
 - (8) 용액을 핫플레이트 올려놓은 후 60도에서 24시간 경화시킨다.



<CNT 폴리머 복합체 제작과정>

4.2. 3 점 휨강도 시험

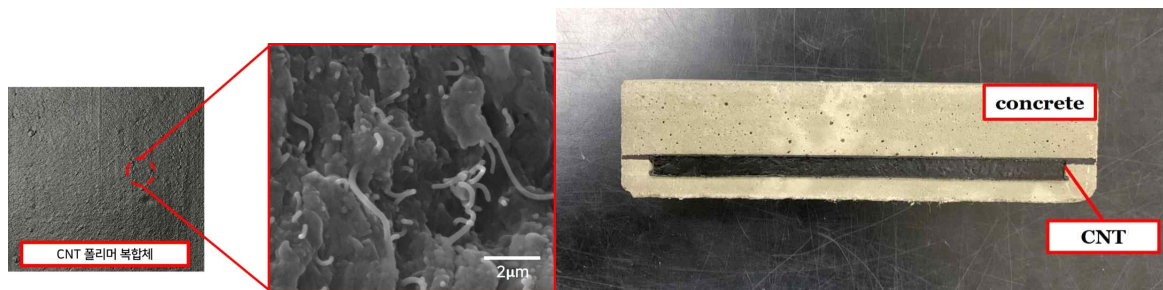
- 사이즈 : W: 7mm × H: 0.7mm × L: 140mm
- 배합 : 표 2에 제공된 실험조건으로 제작
- 제작 과정
 - (1) 200ml 비커에 폴리우레탄 Part A 10g 을 넣는다.
 - (2) 분산제 (아세톤) 50g 을 넣고 균질하게 저어준다.
 - (3) CNT 를 전자정밀저울로 계량한 뒤 넣어준다.
 - (4) 분산기기로 용액을 분산시킨다. 분산기기는 90J, 15 초 작동/15 초 미작동의 조건으로 작동/40 분 동안 분산하였다.
 - (5) 분산된 용액은 핫플레이트 올려놓은 후 60 도에서 24 시간동안 분산제를 증발시킨다.
 - (6) 용액에 폴리우레탄 Part B 10g 을 넣고 균질하게 저어준다.
 - (7) 용액을 콘크리트 공시체에 옮긴 뒤 코팅기기를 통해 두께 0.7mm 로 유지시킨다.
 - (8) 용액을 실온에서 24 시간 경화시킨다.



<폴리우레탄 part A, part B>



<초음파 분산기(sonicator)>



<CNT 폴리머 복합체(SEM)>

<CNT 폴리머 복합체 제작 샘플>

5. 실험 방법

5.1. 인장 강도 시험

5.1.1. 저항 측정

- (1) 측정 프로브와 샘플 사이의 접촉저항을 최소화하기 위해 샘플의 양 극단에 구리테이프를 연결한 후 전도성 실버페인트 도포처리한다.
- (2) 구리테이프에 전극을 연결한 후, 디지털 멀티미터를 이용하여 저항을 측정한다.

5.1.2. 전기-기계적 특성 측정

- (1) 샘플의 인장변형률을 가하기 위해 Sil-Poxy 를 이용하여 만능시험기에 샘플을 고정한다.
- (2) 샘플에 신율계를 이용하여 전극 연결 하고 정밀한 측정을 위해 실편을 이용하여 고정시킨다.
- (3) 인장변형 1mm/min 조건으로 인장시험을 실시한다.
- (4) 인장변형 중 전기적 저항을 디지털 멀티미터와 데이터 수집장치를 통해 실시간 측정한다.

5.2. 0.3mm/min 조건에서의 3 점 휨강도 시험

5.2.1. 저항 측정

- (1) 정밀한 균열 측정을 위해 샘플을 5 구간으로 나눈다.
- (2) 측정 프로브와 샘플 사이의 접촉저항을 최소화하기 위해 샘플의 양 극단에 전도성 실버페인트를 도포처리한 후 구리테이프를 연결한다.
- (3) 구리테이프에 전극을 연결한 후, 디지털 멀티미터를 이용하여 저항을 측정한다.

5.2.2. 전기-기계적 특성 측정

- (4) 콘크리트 균열 모니터링을 위해 콘크리트 공시체에 3 점 휨강도 시험을 0.3mm/min 조건에서 실시한다.
- (5) 3 점 휨강도 시험 중 전기적 저항을 디지털 멀티미터와 데이터 수집장치를 통해 실시간 측정한다.

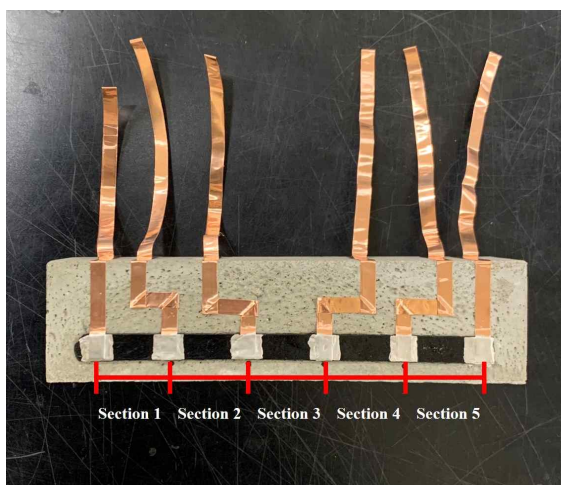
5.3. 0.2mm/min (작동 5min/미작동 5min) 조건에서의 3 점 휨강도 시험

5.3.1. 저항 측정

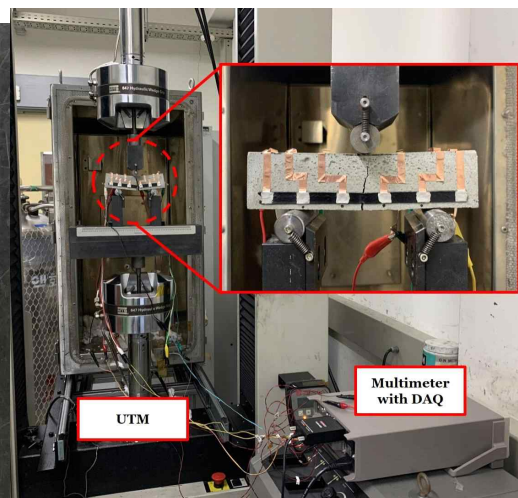
- (1) 정밀한 균열 측정을 위해 샘플을 5 구간으로 나눈다.
- (2) 측정 프로브와 샘플 사이의 접촉저항을 최소화하기 위해 샘플의 양 극단에 전도성 실버페인트를 도포처리한 후 구리테이프를 연결한다.
- (3) 구리테이프에 전극을 연결한 후, 디지털 멀티미터를 이용하여 저항을 측정한다.

5.3.2. 전기-기계적 특성 측정

- (1) 콘크리트 균열에 따른 정밀한 저항 변화 확인을 위해 콘크리트 공시체에 3 점 휨강도 시험을 0.2 mm/min (작동 5min/미작동 5min)의 조건으로 실시한다.
- (2) 3 점 휨강도 시험 중 전기적 저항을 디지털 멀티미터와 데이터 수집장치를 통해 실시간 측정한다.



<저항 변화 측정 실험 샘플>



<저항 변화 측정 실험 장치>

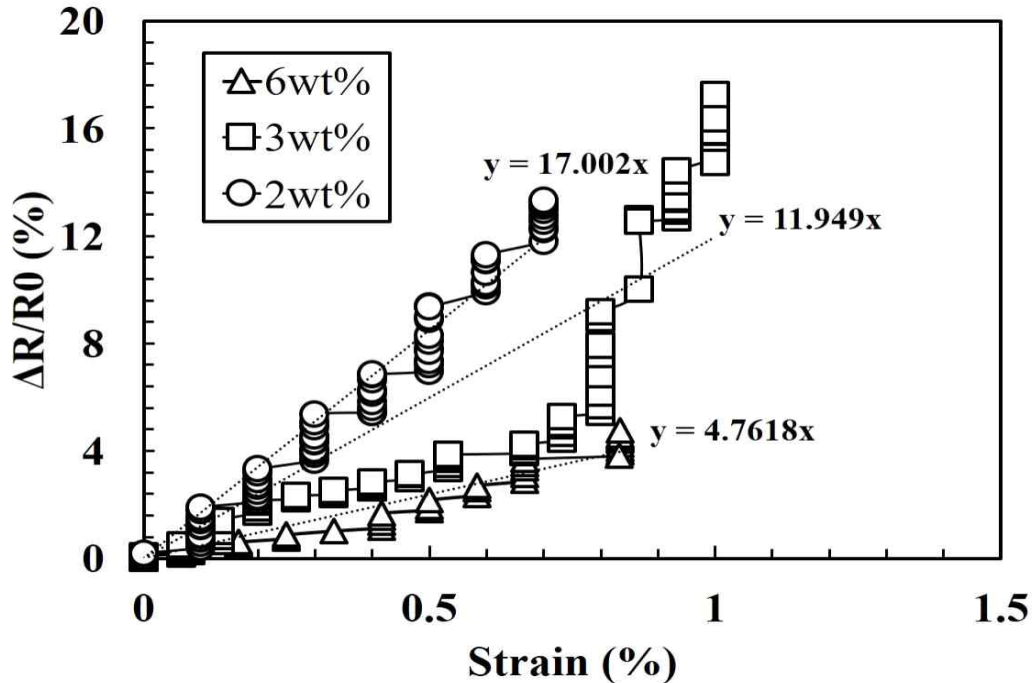
6. 결과 및 토론

6.1. 인장 강도 시험

6.1.1. 전기-기계적 특성

- 전도성을 가진 CNT 폴리머 복합체는 인장변형률이 증가함에 따라 저항변화율도 증가함
- 콘크리트의 파괴시 변형률이 대략 0.35%임을 고려하면 CNT 폴리머 복합체는 콘크리트 파괴시 변형률 범위를 모두 포함하기 때문에 콘크리트 구조물에 부착할 수 있는 재료로 사용이 가능함
- 인장변형률에 따른 저항변화율은 CNT 폴리머 복합체의 민감도(gauge factor)이며, 이는 표시된 각각의 샘플의 변형률 vs. 저항변화율 그래프의 기울기임
- 탄소나노튜브 함량이 증가함에 따라 민감도는 감소함을 확인함

$$(\text{민감도}) = G_F (\text{gauge factor}) = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta L/L_0}$$

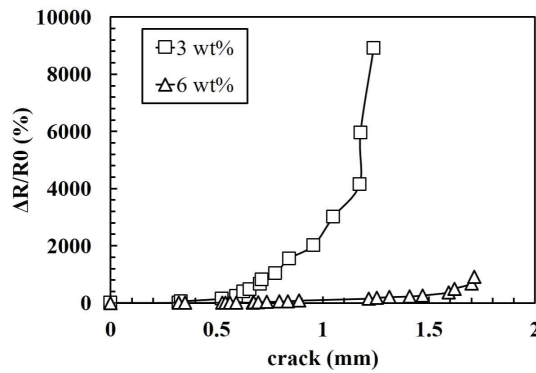


<인장 강도에 따른 전기-기계적 특성>

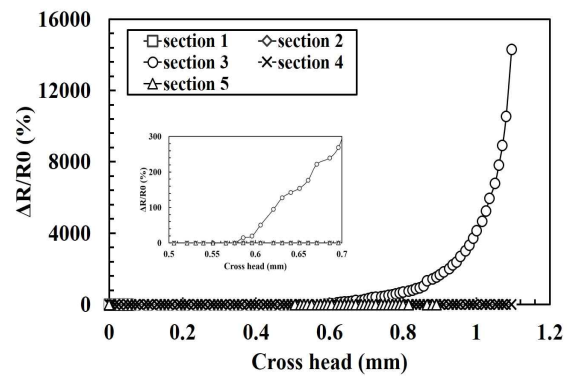
6.2. 0.3mm/min 조건에서의 3 점 휨강도 시험

6.2.1. 전기-기계적 특성

- CNT 폴리머 복합체는 점성이 있어 콘크리트 공시체에 도포가 가능하나, 함량이 증가함에 따라 상대적으로 점성이 증가하여 콘크리트 구조물에 원활한 도포가 어려움
- 0.3mm/min 조건의 3 점 휨강도 시험에서 구간별 crosshead의 변위에 따른 저항변화율을 나타낸 그래프에서 콘크리트 공시체의 균열은 구간 3에서 발생하였으며, 균열 발생시 구간 3을 제외한 나머지 구간에선 저항변화가 나타나지 않은 것으로 확인됨
- 0.3mm/min 조건의 3 점 휨강도 시험에서 콘크리트 구조물의 균열에 따른 저항변화율을 나타낸 그래프에서 CNT 폴리머 복합체는 콘크리트 공시체의 균열이 커질수록 저항변화율이 증가하며, 끊어지기 전 급격하게 저항변화율이 증가하는 것을 확인함
- CNT 함량이 3 wt%인 경우와 6 wt%를 비교하였을 때, 3 wt%가 6 wt%보다 균열에 따른 저항 변화율이 뚜렷하게 나타났으며, 경제적인 측면에서도 콘크리트 구조물의 균열을 관찰하기 위해서는 CNT 함량이 낮은 복합체를 사용하는 것이 경제적인 측면에서 유리하다고 판단됨



<CNT 함량별 균열 발생에 따른 저항변화율>

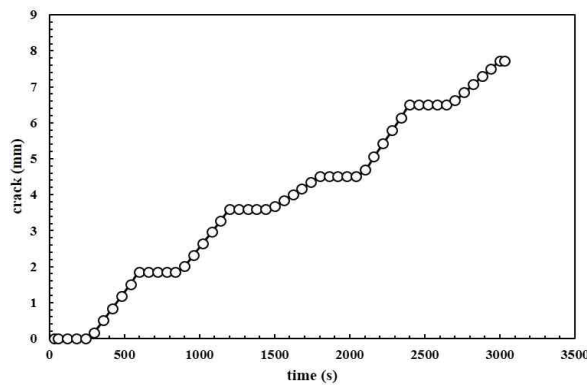


<콘크리트 공시체의 균열에 따른 구간별 저항변화율>

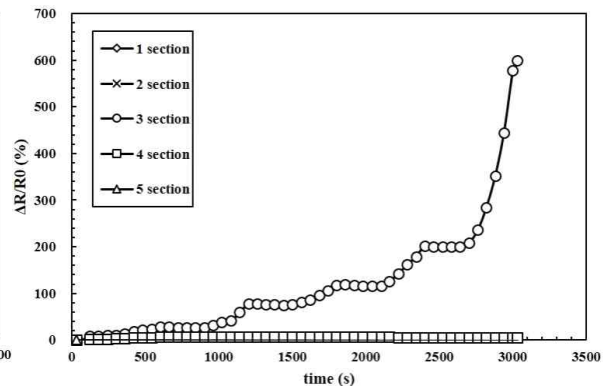
6.3. 0.2mm/min (작동 5min/미작동 5min) 조건에서의 3 점 휨강도 시험

6.3.1. 전기-기계적 특성

- 개발된 CNT 폴리머 복합체는 휨강도가 증가함에 따라 콘크리트 표면에 균열이 발생하면서 CNT 폴리머 복합체의 저항이 다소 증가하는 경향을 보임
- 콘크리트 공시체의 균열 폭이 클수록 CNT 폴리머 복합체의 저항은 더욱 증가함
- 시간에 따른 콘크리트 공시체의 균열 그래프는 최대 약 7mm 까지 균열이 일어날 때까지 실험을 진행하였고 이 경우에서 CNT 폴리머 복합체는 끊어지지 않았음을 보임
- 균열에 따른 저항변화율 그래프는 시험체의 구간별 균열 발생에 따른 저항변화율을 나타낸 그래프로 콘크리트 공시체의 균열은 구간 3에서 발생하였으며, 균열 발생 시 구간 3을 제외한 나머지 구간에서 저항변화율이 나타나지 않은 것으로 확인됨
- 개발된 CNT 폴리머 복합체는 균열에 따른 전기적 변화를 통하여 기존의 센서를 대체할 수 있을 것으로 판단됨



<하중 재하 시간에 따른 균열>



<콘크리트 공시체의 균열에 따른 저항변화율>

- 전체연구기관 (공동 통합 시험)

■ CNT-PU 및 CNT/PZT 복합소재 센서와 모니터링 시스템 실증을 위한 통합시험

1. 통합시험 개요

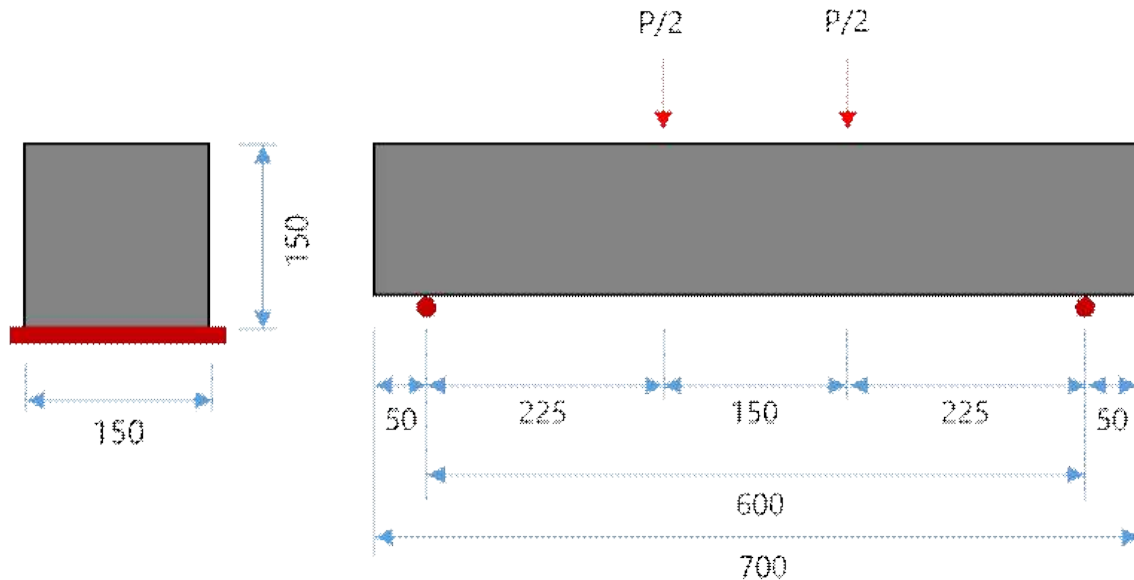
- 공동 연구기관에서 본 사업을 통해 개발한 CNT 폴리머 코팅 센서 및 CNT-PZT 복합센서의 성능 검증을 위한 통합시험을 수행함
- 이때, 주관기관에서 개발된 IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템을 활용하여 계측 및 모니터링을 수행

1.1. 시험 목적

- 통합시험의 목적은 CNT 폴리머 코팅 센서 및 CNT-PZT 복합센서의 성능 검증
- 본 사업의 성능목표인 CNT-PZT 복합센서의 콘크리트 압축강도 예측 및 300mm 이상 이격거리에서의 손상 감지와 CNT 폴리머 코팅 센서의 균열폭 1.0mm 이하의 균열 발생 감지를 시험 목표 항목으로 함

1.2. 시험체 제원 및 하중 재하조건

- 본 시험에서 사용된 시험체는 2종으로 콘크리트 압축강도 기준값 측정을 위한 원주형 표준 공시체와 휨시험용 각주형 시험체임
- 원주형 공시체는 지름 100mm x 높이 200mm의 제원을 가지며(KS F 2403) 콘크리트의 압축강도 시험방법(KS F 2405)을 따라 시험함
- 센서의 성능 검증을 위한 통합시험은 4점 휨시험으로 수행하였으며 휨시험용 각주형 시험체의 형상, 제원 및 하중 재하 방식은 아래 그림과 같음

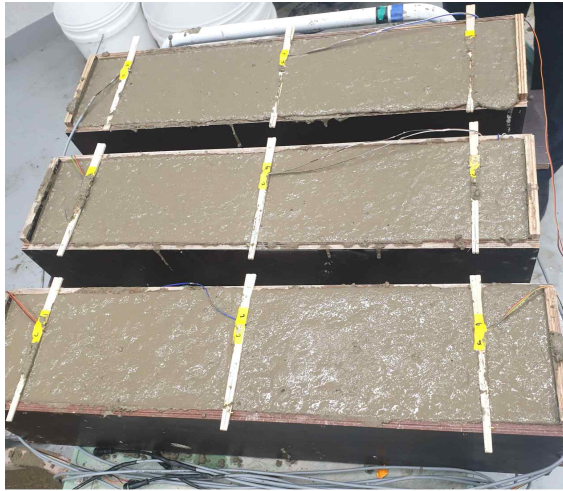


<각주형 공시체 형상, 제원 및 하중 재하 (단위: mm)>

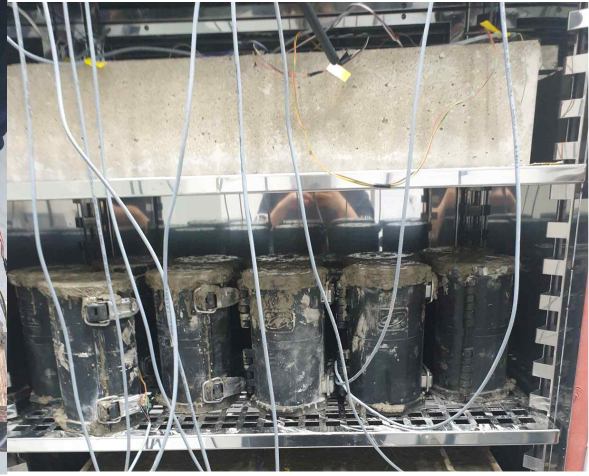
2. CNT-PZT 복합센서 압축강도 예측

2.1. 시험 절차

- 휨시험용 각주형 시험체 타설 시 지점부 및 중앙부 상단에 CNT-PZT 복합센서를 매립
- 동일 배합의 압축강도 시험용 원주형 표준 공시체 12ea를 제작
- 제작된 시험체는 항온·항습 챔버에 넣고 모니터링을 시작
- 공인인증시험기관에서 재령일 별 3, 7, 14, 28 일 각 3ea씩 압축강도 시험을 수행하여 기준 강도 값을 도출하고 이때, 3 일 압축강도를 연구기관에 제공
- 공동연구기관(성균관대학교 산학협력단)에서는 매립된 CNT-PZT 복합센서에서 측정되는 주파수 신호 변화를 모니터링하면서 제공받은 3 일 강도 예측값을 활용하여 재령에 따른 압축강도 발현 예측 기법을 도출
- 7 일, 14 일, 28 일 강도 예측값을 공인인증시험기관에 제공하고, 시험기관에서는 실제 압축강도시험 결과값과 비교하여 CNT-PZT 복합센서에 의한 압축강도 예측 오차율을 제시



<시험체 타설 전경>



<항온·항습 챔버 전경>

2.2. 모니터링 환경

- 타설 후 재령 28 일까지 15 분마다 매립된 CNT-PZT 복합센서에서 계측되는 공진주파수를 DB 에 저장함
- 재령 3 일 압축강도시험을 통해 측정된 콘크리트 압축강도를 통해 콘크리트 강도 예측식을 도출한 이후 이를 적용한 재령 기간에 따른 콘크리트 압축강도를 IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템의 대시보드에서 가시화하여 표출함

2.3. 시험 결과

- 공동연구기관(성균관대학교 산학협력단)에서 정의한 압축강도 예측식을 적용한 IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템을 통해 도출한 재령일 별 콘크리트 압축강도와 공인인증시험기관에서 수행한 원주형 표준 공시체의 콘크리트 압축강도 시험 결과를 비교한 결과, 전체 비교 대상군(재령 7, 14, 28 일)에 대해 CNT-PZT 복합센서 강도 예측 성능 목표인 오차율 10% 이내로 나타남

<CNT-PZT 강도 예측 시험 결과>

구 분	단위	7 일	14 일	28 일
압축강도 시험결과 평균	MPa	21.6	24.0	25.1
예측 압축강도 #1	MPa	20.21	21.76	23.18
오차율 #1	%	6.4	9.3	7.8
예측 압축강도 #2	MPa	21.77	25.12	26.76
오차율 #2	%	0.8	4.7	6.5



<CNT-PZT 강도 예측 모니터링 최종(재령 28일) 결과 화면>

3. CNT-PZT 복합센서 손상 감지

3.1. 시험 절차

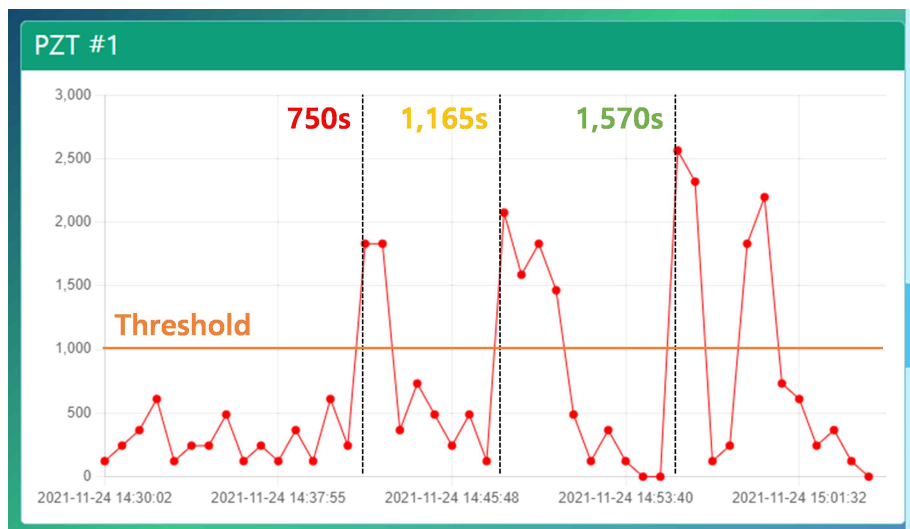
- 휨시험용 각주형 시험체 타설 시 지점부에 매립한 CNT-PZT 센서와 IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템을 활용하여 휨시험 중 센서에서 계측되는 공진주파수의 변화 추이를 모니터링함
- CNT-PZT 센서 모니터링 중 이상 신호 감지 시 균열 발생 여부 및 위치를 확인하고, 신호를 감지한 센서와 균열 발생 위치 사이 거리를 측정하여 목표치 이상인지 여부를 확인

3.2. 모니터링 환경

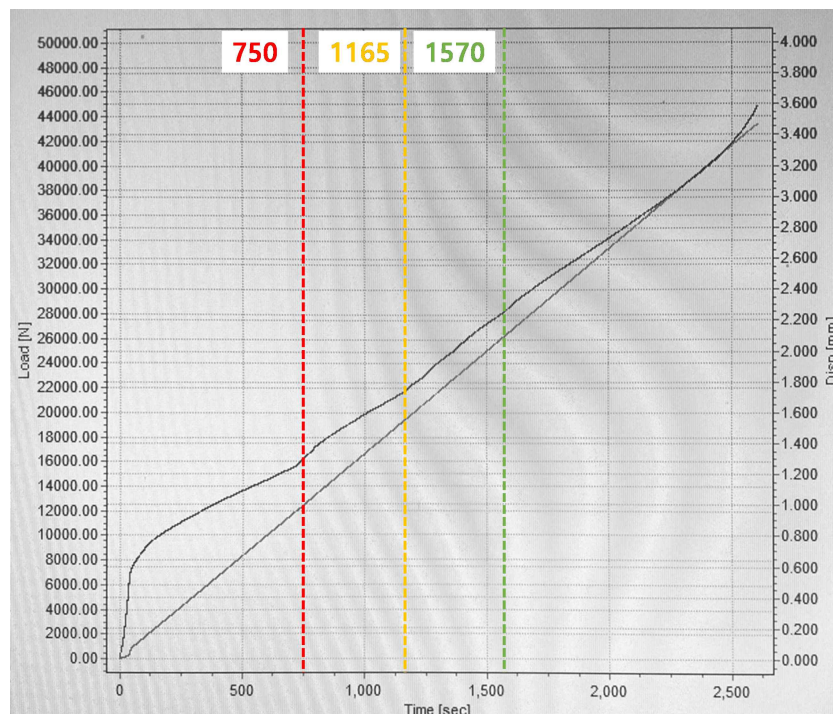
- 휨시험 시작과 동시에 모니터링을 시작하여 계측되는 공진주파수를 DB에 저장하고 IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템의 PZT 손상 페이지의 대시보드에서 실시간으로 공진주파수 변화량을 표출

3.3. 시험 결과

- 모니터링 결과 공진주파수 변화량이 일정수준(1,000Hz) 이상 급격히 변화하는 시점이 시험 시작 후 약 700, 1165, 1570 초가 경과된 시점에서 크게 발생함

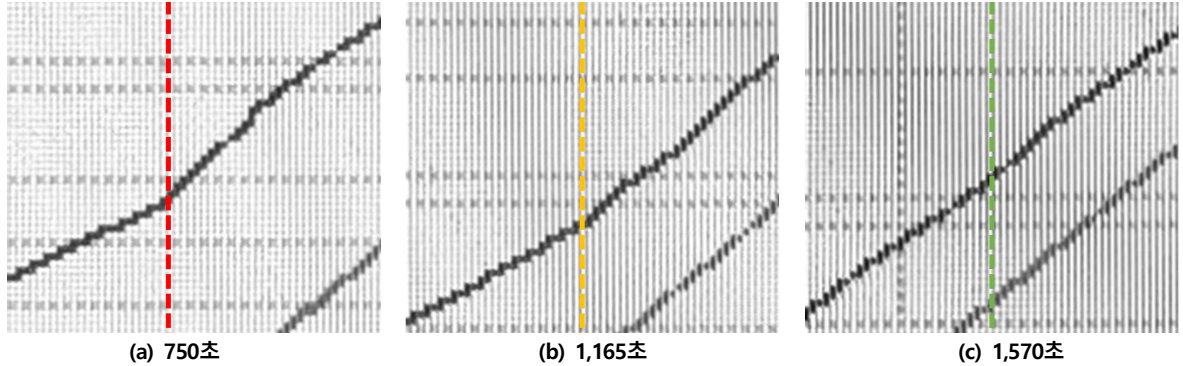


<CNT-PZT 센서 손상 모니터링 결과 & 이상신호 발생 시점>



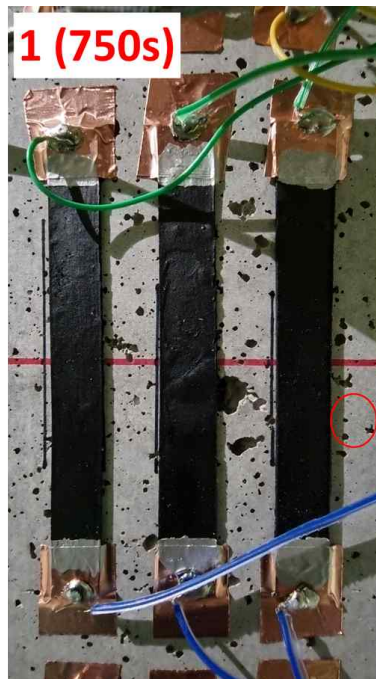
<UTM 하중-시간 곡선 & CNT-PZT 센서 이상 신호 감지 시점>

- IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템에서 감지한 균열 발생 시점의 UTM 하중-시간 곡선 확대 화면으로 750, 1,165 초 각각의 시점에 곡선 기울기가 급격히 변하는 특이점이 발생한 것을 확인할 수 있다. 다만 1,570 초에는 하중-시간 곡선 그래프의 급격한 변화를 초래하지 않았는데, 이는 이미 다양한 위치에서 균열이 발생하여 진전되고 있는 상황에서 미세 균열 발생 영향이 하중에 미치는 영향이 적기 때문으로 보임



CNT-PZT 복합센서 이상 신호 감지 시점 UTM 하중-시간 곡선 확대 화면

- CNT-PZT 복합센서의 최초 이상 신호 감지 시점인 시험 시작으로부터 750 초 후 시험체 하단에 초미세 균열이 육안으로 확인되었고 발생위치는 시험체 정중앙부에서 약 10mm 가량 떨어진 지점으로 관측됨
- 해당 위치와 CNT-PZT 복합센서 매립 위치의 거리를 측정한 결과 310mm 로 계측되어 성능 목표인 300mm 이상 떨어진 지점의 균열을 탐지했음을 검증함



(a) 균열 발생 표면 형상



(b) 균열거리 측정 방식



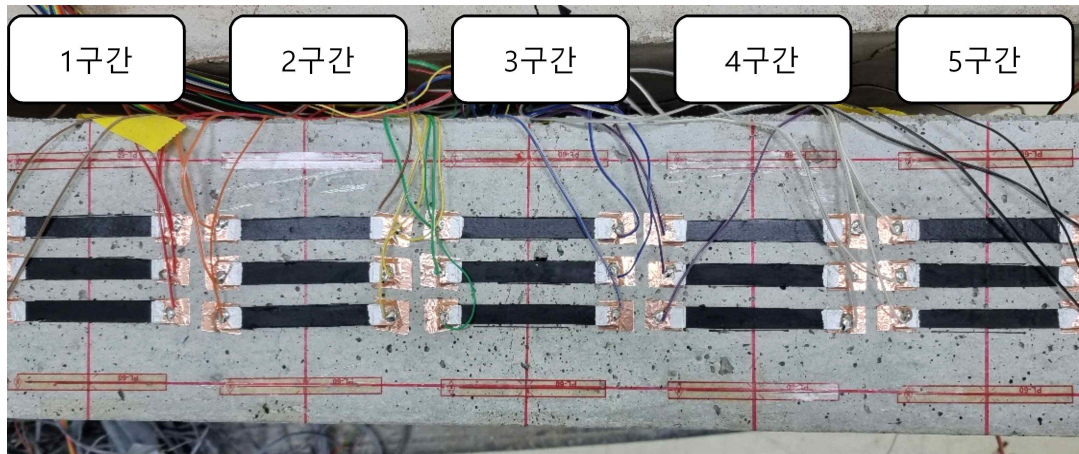
(c) 균열 탐지 거리 약 310mm

균열 발생 표면 형상 및 균열 거리 측정

4. CNT/PU 코팅 센서 균열 감지

4.1. 시험 절차

- 휨시험용 각주형 시험체 하부에 CNT 폴리머 코팅제를 도포하고 구리테이프와 은 나노 잉크를 도포하여 전극을 형성한 후 전선을 납땜하여 센서를 설치함
- 균열 발생 위치 특정을 위해 아래 그림과 같이 5 구간으로 나누어 설치함



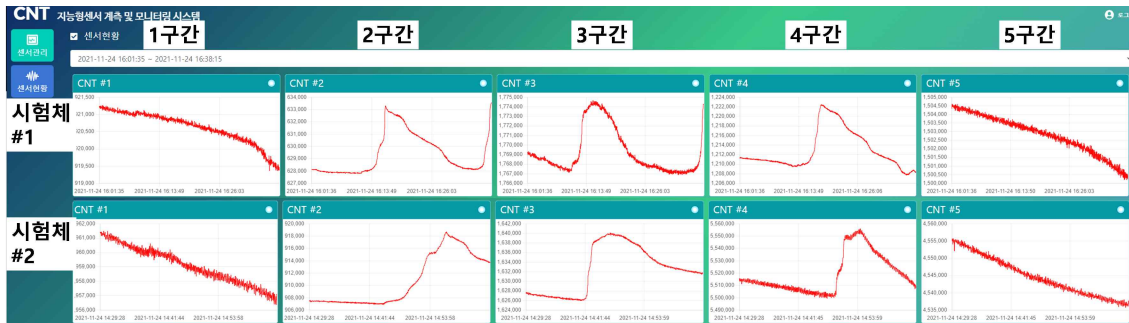
<CNT/PU 코팅체 센서 및 Strain gauge 설치 전경>

- 균열이 최초 발생할 것으로 예상되는 시험체 하부 중앙부에 카메라를 설치하여 영상 촬영을 통해 균열 발생 시점 및 위치를 특정하는데 활용함
- IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템에서 휨시험 수행 중 각각의 CNT 폴리머 코팅 센서에서 수집되는 저항값을 모니터링하여 이상 신호 감지 시 균열 발생 시점으로 판단하고, 시험체 하부의 카메라 영상, UTM 하중-시간 곡선 및 나란히 설치된 strain gauge 데이터를 복합적으로 활용하여 CNT/PU 코팅체 센서의 균열 감지 성능을 검증함

4.2. 모니터링 환경

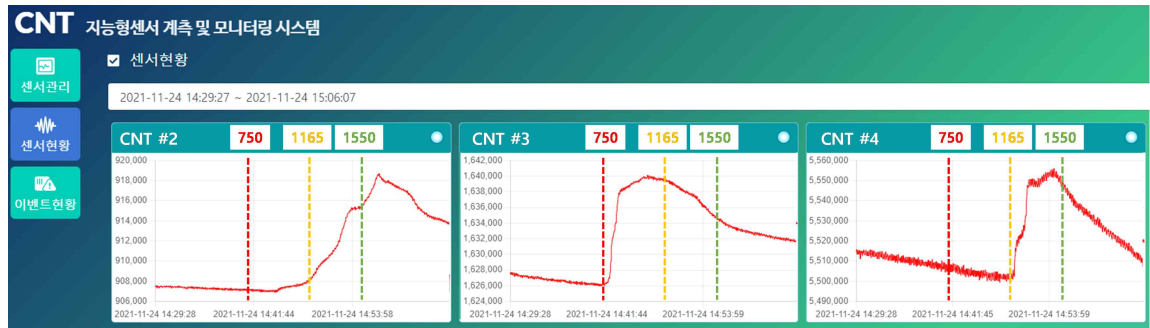
- 휨시험 시작과 동시에 모니터링을 시작하여 약 2~3 초 간격으로 계속되는 저항값을 DB에 저장하고 IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템의 CNT 센서 대시보드에서 실시간으로 저항값을 표출함

4.3. 시험 결과

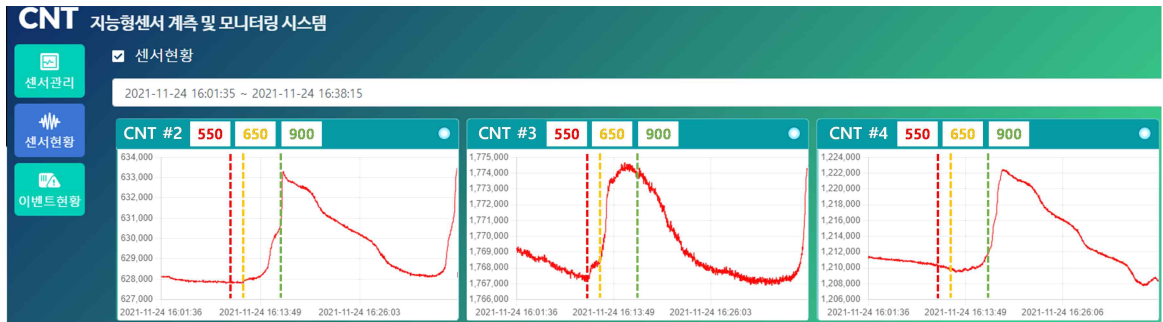


<CNT/PU 코팅체 센서 시험 결과>

- 일반적으로 알려진 바로는 CNT 폴리머 코팅 센서 길이가 변화함에 따라 저항이 비례하는 거동을 보이게 되나 시험 결과에서 볼 수 있듯이 전체 구간에서 하중이 작은 시험 초기에는 하중이 증가하여 변형이 증가함에도 불구하고 저항이 감소하는 거동을 보였으며, 1구간과 5구간의 경우 거의 지점부에 가까이 위치하여 휨변형이 매우 작아 지속적으로 저항이 감소하는 것으로 예측됨
- 이는 CNT 소재가 전원 인가 후 자기 재정렬 과정이 필수적이고 이 과정에서 시간에 따라 저항이 감소하며, 일정 값으로 수렴하는 특성을 갖기 때문임
- 전원 인가 후 약 10여분 정도의 자기 재정렬 시간을 가진 후 시험을 실시하였으나, 이와같은 현상에서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 보임
- 저항의 변화는 거의 없는 1, 5구간을 제외하고 2~4구간에 대해 모니터링 결과를 분석함



(a) 시험체 1



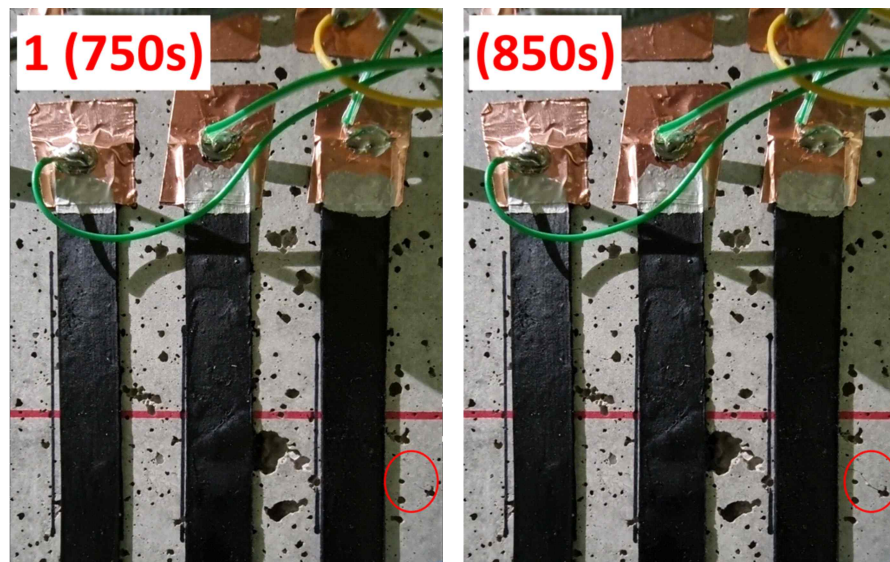
(b) 시험체 2

<CNT 폴리머 코팅 센서 시험 결과>

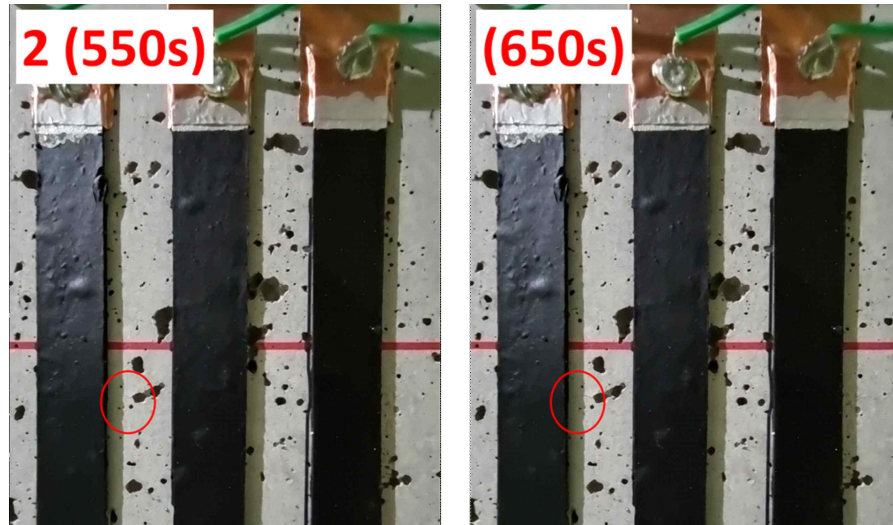
<CNT/PU 센서 별 균열 감지 시점>

구간	2	3	4
시험체 1 (초)	1570	750	1165
시험체 2 (초)	900	550	650

- CNT 폴리머 코팅 센서에서 3 구간 최초 균열 발생 시점에는 초미세 균열로 육안으로 확인하기 어려워 균열 발생 시점에서 100 초 지난 시점에서 다시 확인하면 매우 미세한 균열이 발생했음을 확인할 수 있음



(a) 시험체 1



(b) 시험체 2
균열 발생 시점 촬영 영상 (구간3)

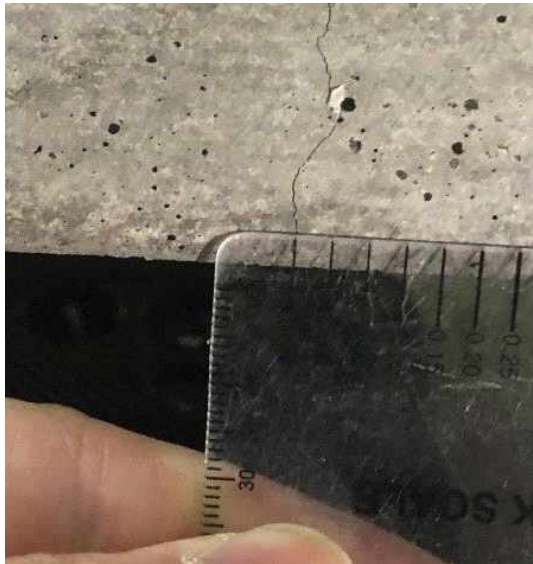
- CNT 폴리머 코팅 센서가 감지한 최초 균열 발생 시점에서 100 초 지난 시점에 그림 13과 같이 시험체 측 하부에서 균열폭을 균열자를 이용하여 시험체 하부 균열을 측정한 결과 0.04mm 이하의 균열폭으로 확인됨



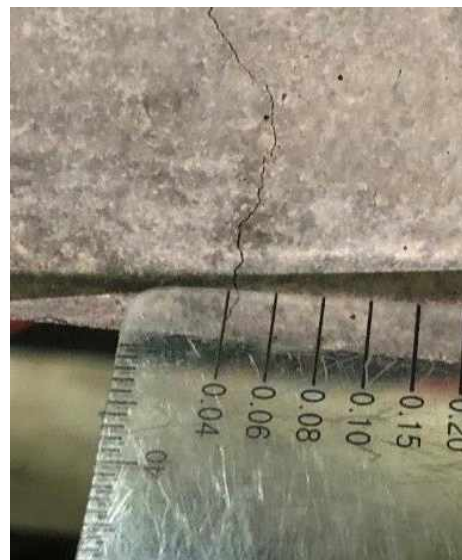
<균열 측정 전경>



<균열자>

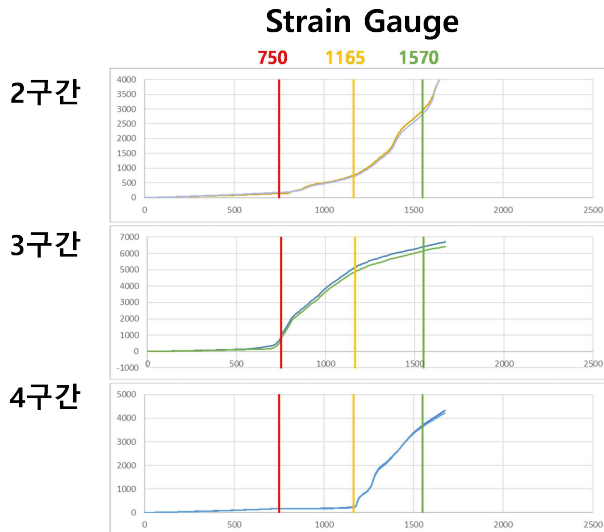


<시험체 1 측하면 균열폭>

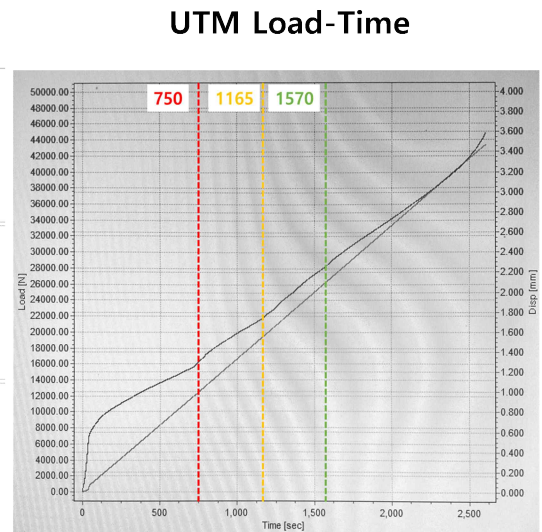


<시험체 2 측하면 균열폭>

- IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템과 CNT 폴리머 코팅 센서를 활용해 감지한 균열 발생 시점을 추가적으로 부착한 strain gauge와 UTM의 하중-시간 곡선에 표시한 결과, CNT 폴리머 코팅 센서가 감지한 이상 신호 발생 시점에 두 시험체 모두 strain gauge와 UTM 하중-시간 곡선 또한 특이점이 발생함을 볼 수 있으며 이는 균열 발생시점을 정확히 감지한 결과라고 볼 수 있음

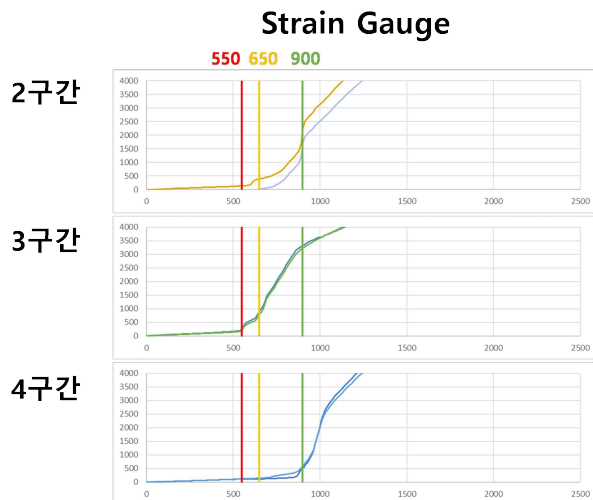


(a) Strain Gauge 변형률-시간 곡선

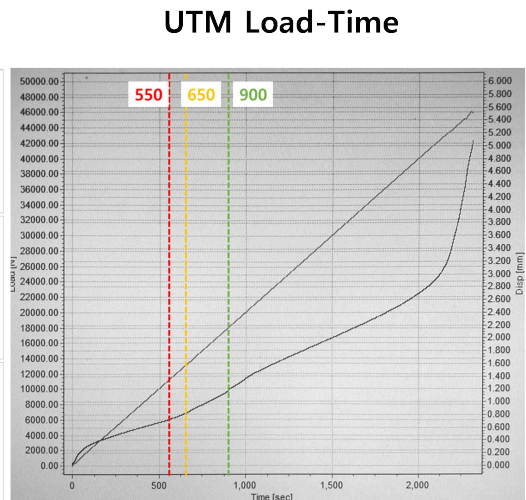


(b) UTM 하중-시간 곡선

<균열 발생 시점 분석 (시험체 1)>



(a) Strain Gauge 변형률-시간 곡선



(b) UTM 하중-시간 곡선

<균열 발생 시점 분석 (시험체 2)>

5. 소결

- 본 연구를 통해 개발된 CNT 폴리머 코팅 센서와 CNT-PZT 복합센서의 검증을 위해 수행된 통합시험을 통해 각 공동연구기관의 성능 목표 달성을 확인하였고, 본 연구에서 개발한 IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템을 시험 운영하며 데이터 수집 및 모니터링을 수행하여 본 IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템의 동작 및 UI 정확성들을 검증함
- 다만 CNT 폴리머 코팅 센서를 변형률 게이지로 사용하기에는 소재 특성인 자기 재정렬 과정에 대한 연구가 추가적으로 요구되며, 초기 저항 감소 현상에 대한 안정화 기술 또는 해당 영향 보상 기술 등에 대한 연구가 필요할 것으로 판단됨
- 최대 측정 범위가 비교적 작은 편으로 지속적으로 증가하는 strain gauge의 계측 결과와 달리 일정 이상 변형이 발생하면 저항이 급감하는 거동을 보였는데, 이는 센서에 necking 현상이 발생하며 발생한 것으로 판단됨
- 본 연구에서 도출된 CNT 폴리머 코팅 센서 한계는 배합, 형상 등에 대한 영향과 센서 안정화 기법 등을 고려함으로써 해결될 수 있을 것으로 생각됨

○ 연구결과 성과물 고찰

- 개발된 센서 및 모니터링 시스템의 우수성

- 기존 상용 스트레인게이지와의 비교 실험을 통하여 CNT 폴리머 코팅 센서가 외력에 의한 구조물 거동 변화의 특이점을 정확하게 계측할 수 있음을 확인하였으며, CNT 폴리머 코팅제의 배합을 통해 센서의 민감도 조절이 가능하여 구조물의 미세균열을 조기에 감지할 수 있을 뿐 만 아니라 구조물의 장기거동을 계측할 수 있는 센서로도 활용할 수 있는 우수성이 있음
- CNT 폴리머 코팅 센서가 기존의 스트레인게이지의 파단 이후의 거동 영역에서도 계측이 가능하여 구조물의 넓은 거동 범위에 대해 다양한 목적의 계측이 가능하다는 것을 확인하였음. 다만 CNT 폴리머 코팅 센서의 형태에 따라 전기적 특성이 달라질 수 있어 다양한 조건하에서의 실험을 통해 추가적인 데이터 확보 및 신뢰성 검토가 필요함
- 기본적으로 무선연결을 지원하며, 플랫폼의 제약이 적은 웹기반의 가시화 소프트웨어를 포함하는 본 시스템은 기존 유선 기반 복잡하고 비효율적이며 고비용의 계측 시스템과 대비되어 저렴한 “스마트 센서 노드(하드웨어)”를 통해 무선연결을 바탕으로 간편하게 설치 가능하며, 시간과 장소에 관계없이 어디서든 모니터링이 가능한 시스템임
- 기존 계측 시스템은 유선 기반 연결로 인해 장기 모니터링 시 데이터로거 및 전선의 내구성이 문제가 되나 본 연구에서 개발된 스마트 모니터링 시스템은 소형화된 데이터로거와 무선연결 기반으로 비교적 간단한 구성으로 설치되기 때문에 기존의 계측 시스템에서 나타나는 문제들을 해결 가능한 기술이어서 실제 현장 적용 시 경제적인 구조물 유지관리에 충분한 역할을 할 수 있음

- 개발된 센서 및 모니터링 시스템의 한계 및 고도화 방안

1. CNT 폴리머 코팅 센서

- 콘크리트 구조물의 표면에 직접 도포하여 설치 가능한 CNT 폴리머 코팅 센서는 저항 변화를 바탕으로 구조물의 균열을 감지할 수 있는 기술임
- 코팅제의 길이 변화에 따라 저항이 변화하는 성질에 대한 연구를 수행하였으며, 일정 변형률 이내의 범위에서는 코팅제 센서의 변형률과 저항 변화율이 선형적인 관계를 갖음을 확인함
- 낮은 하중 단계의 초기 변형상태에서 하중의 증가에 따라 저항이 일정하게 증가하지 못하고 미세하게 감소하는 거동을 보이거나 이는 CNT 폴리머 코팅 센서의 형태, 배합 등의 조정에 따른 센서 안정화 작업을 통해 해결 가능할 것으로 판단됨
- 일정 이상의 변형 발생 이후 CNT 폴리머 코팅 센서의 전기적 배열 변화에 따른 저항 형태가 달라져 변형률 계측을 계속할 수 없는 경우가 발생하였으나, 이는 균열 발생 또는 일정 이상의 변형이 발생한 이후에도 지속적으로 일정한 전기적 특성을 발휘할 수 있도록 CNT 폴리머 코팅제의 배합 또는 형상 등을 조절하는 추가 연구를 통해 해결 가능할 것으로 보임
- 추가 연구를 통한 CNT 폴리머 코팅제의 고도화를 통해 기존 변형률 게이지의 특성상 복잡한 표면을 갖는 구조물에 부착이 어려운 단점을 해결할 수 있을 것이고, 부재의 국소변형 뿐만 아니라 구조물의 전체적인 거동 분석도 가능한 다양한 목적에 맞게 적용할 수 있는 신개념의 센서로 그 역할을 충분히 할 수 있을 것으로 판단되며, 추후 다양한 계측 데이터 축적을 통해 신뢰성 확보가 요구됨

2. CNT/PZT 복합센서

- CNT가 함유된 모르타르 블록에 PZT 센서를 부착하여 콘크리트 타설시 매립하는 형식으로 설치되며, 양생 중 콘크리트 압축강도를 예측하고 사용중 균열 발생 등에 따른 콘크리트의 손상을 감지할 수 있는 기술임
- 콘크리트 양생 중 발생하는 수화열 및 현장 온도 변화에 따라 센서 계측 결과에 영향을 받기 때문에 온도 보상 알고리즘을 개발하였고, 이를 통해 온도영향을 줄인 콘크리트 압축강도 예측 결과를 도출함
- 현재 전용 하드웨어를 활용하여 임피던스 피크값을 추출하여 서버로 송신하는 방식으로 계측되는데 최대 15 분/회의 속도로 계측이 가능하다는 한계가 있음

- 15 분/회의 계측 속도는 콘크리트 압축강도 예측의 경우 큰 문제가 없으나, 손상 감지 용도로 사용 중 해당 속도는 균열 발생 시점 도출이 어렵고 노이즈와 계측값의 분별이 어려워 균열 감지 정확도가 떨어진다는 단점이 있음
- 향후 계측 속도를 단축할 수 있는 알고리즘 개발 및 하드웨어 개발이 요구되며, 압축강도 예측 및 손상감지 정확도를 좀 더 높일 수 있는 연구가 필요함

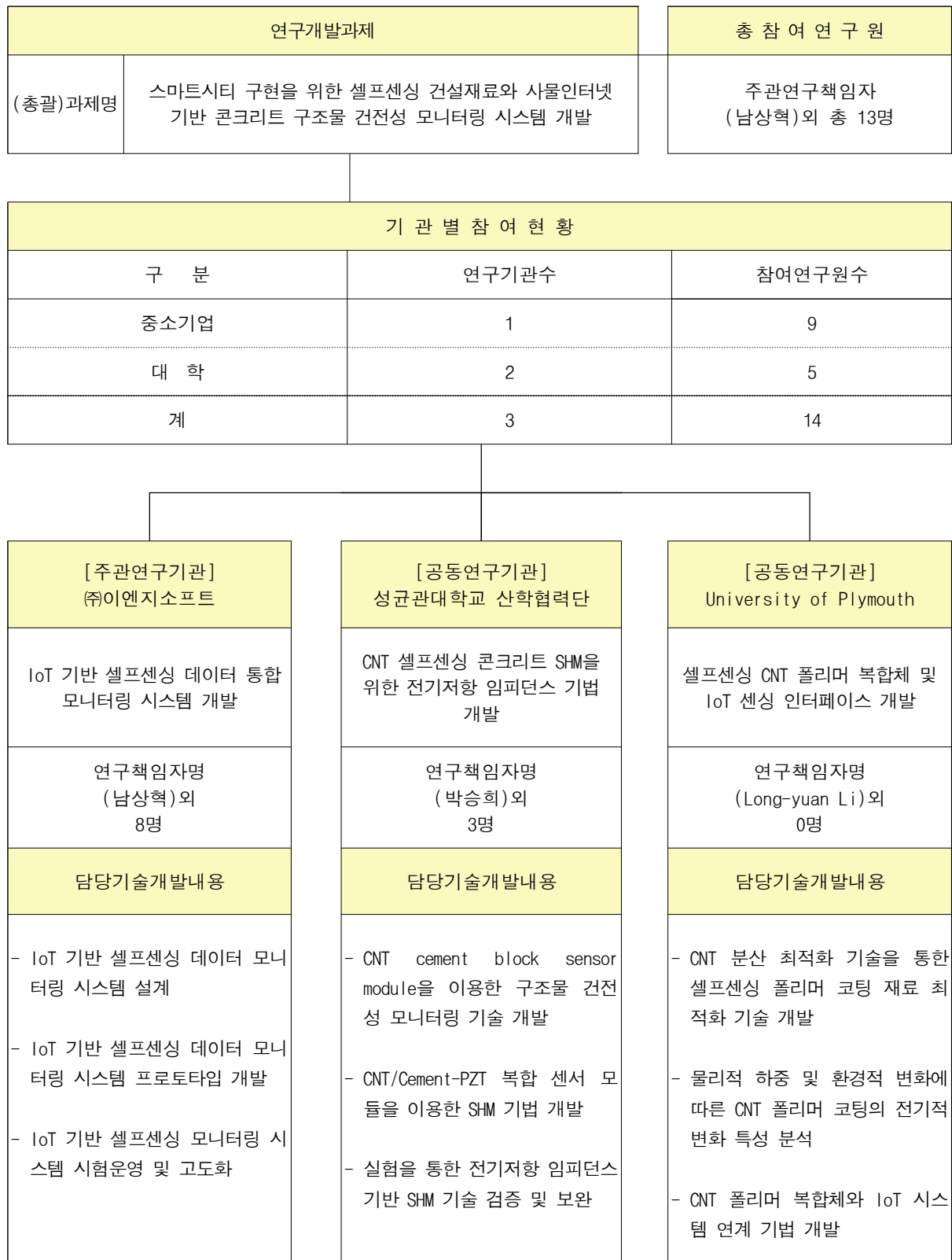
3. IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템

- CNT 폴리머 소재의 저항을 측정하여 무선으로 서버에 계측값을 전송할 수 있는 데이터로거와 전송된 데이터를 사용자가 쉽게 확인할 수 있는 가시화 소프트웨어를 포함하는 기술이며, CNT 폴리머 코팅 센서의 저항을 계측하고 이를 수치화하는 시스템은 본 연구에서 개발된 기술이 최초임
- 본 연구에서 개발한 시스템 하드웨어는 기존 시중의 다양한 센서 및 변형률 게이지를 지원하지 못하는 한계가 있지만, 이는 기존 변형률 게이지 대비 CNT 폴리머 센서의 전기적 성질이 매우 다르기 때문이므로 향후 하드웨어 개선을 통해 기존 센서에도 활용할 수 있도록 한다면 기존 데이터로거에 비해 소형화되고 저가로 공급 가능한 본 기술의 적용 범위를 실제 현장으로 확대할 수 있을 것임
- 또한, 저항 측정 시 다양한 원인으로 발생하는 노이즈 제거 기능이 없다는 한계를 가지므로 실제 구조물 적용을 위해서는 향후 연구를 통해 채널별 센서에서 발생하는 노이즈를 제거하는 기술을 적용할 필요성이 있다고 보여짐

○ 연구개발 추진 전략 및 방법

- 본 연구의 최종 목표를 달성하기 위하여 본 연구팀에서 수행한 선행 연구를 바탕으로 CNT 셀프센싱 기법 및 셀프센싱 폴리머 복합체 개발, CNT 셀프센싱 콘크리트 SHM을 위한 전기저항 임피던스 기법 개발 및 IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템을 개발하고 이를 기반으로 탄소나노튜브 셀프센싱 기법을 활용한 콘크리트 구조물 상시 모니터링 시스템 개발에 대한 연구를 수행함
- 이에 본 연구팀은 셀프센싱 CNT 폴리머 복합체 및 센싱 인터페이스 개발팀, CNT 폴리머 복합체 셀프센싱 기술팀, CNT 셀프센싱 콘크리트 계측 기술팀, IoT 기반의 건전성 모니터링 시스템 개발팀으로 컨소시엄을 구성하였으며, 특히 국제공동연구로서 영국 University of Plymouth에서 보유하고 있는 탄소나노튜브 활용 기술을 국내에 도입하여 스마트 건설로 향하는 기반 기술의 초석을 다짐
- 이를 위해 영국 University of Plymouth에서 보유하고 있는 고급 인력과 장비 등을 최대한 활용하고, 그들이 보유하고 있는 CNT 활용 기술 및 재료의 셀프센싱 기법 등에 대한 다양한 정보와 기술들을 국내로 흡수하였음
- 영국의 CNT 활용 셀프센싱 기술을 도입하고, 첨단센서 및 센싱 분야에서 많은 연구 실적이 있는 성균관대학교 연구팀에서 콘크리트 부재로부터 실제 셀프센싱 데이터를 받아 이를 분석함으로써 구조물의 건전성을 파악할 수 있도록 하는 연구를 진행하였으며, 또한 이를 시스템 분석 및 개발 분야에서 탁월한 기술을 보유하고 있는 주관기관에서 IoT 기반의 셀프센싱 데이터 통합 모니터링 시스템을 개발하여 스마트 셀프 센싱기술과 IoT 기반의 첨단 모니터링 기술을 융합하는 연구를 수행함
- 영국의 University of Plymouth 나 성균관대학교에는 본 연구수행을 위한 기본적인 실험장비들이 구축되어 있어 이를 활용한 다양한 실험을 통해 좋은 연구 성과를 도출함

○ 연구개발 추진 체계



○ 연구개발 추진 일정

1차년도															
일련 번호	연구내용	추진 일정												연구 개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속 기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 하드웨어 설계													51,000	남상혁 (이엔지 소프트)
2	IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 소프트웨어 설계													51,000	남상혁 (이엔지 소프트)
3	전기저항 임피던스 계측을 위한 전극 위치 및 형태 최적화													15,000	박승희 (성균관 대학교 산학협 력단)
4	CNT Cement Block Sensor Module을 이용한 전기저항 임피던스 계측기법 개발													15,000	박승희 (성균관 대학교 산학협 력단)
5	CNT Cement Block Sensor Module을 이용한 강도/손상 등 SHM 계측 기법 개발													20,000	박승희 (성균관 대학교 산학협 력단)
6	분산제 변화에 따른 CNT 분산 최적화													30,000	장승환 (플리머 스대학)
7	분산력에 따른 CNT 분산 최적화													20,000	장승환 (플리머 스대학)
8	CNT 함유량에 따른 전기전도도 측정													20,000	장승환 (플리머 스대학)

2차년도															
일련 번호	연구내용	추진 일정												연구 개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속 기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 하드웨어 개발													84,000	남상혁 (이엔지 소프트)
2	IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 소프트웨어 개발													74,000	남상혁 (이엔지 소프트)
3	CNT/Cement-PZT 복합 센서 모듈 개발													15,000	박승희 (성균관 대학교 산학협 력단)
4	CNT/Cement-PZT 복합 센서 모듈을 이용한 전기-역학적 임피던스 계측 기법 개발													15,000	박승희 (성균관 대학교 산학협 력단)
5	CNT/Cement-PZT 복합 센서 모듈을 이용한 콘크리트 SHM 기법 개발													30,000	박승희 (성균관 대학교 산학협 력단)
6	CNT 폴리머 복합체의 하중 변화에 따른 저항 변화량 확인													30,000	Long-y uan Li (폴리머 스대학)
7	CNT 폴리머 복합체의 습도 변화에 따른 저항 변화량 확인													30,000	Long-y uan Li (폴리머 스대학)
8	CNT 폴리머 복합체의 온도 변화에 따른 저항 변화량 확인													30,000	Long-y uan Li (폴리머 스대학)

3차년도																
일련 번호	연구내용	추진 일정												연구 개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속 기관)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	계측 및 모니터링 알고리즘 시스템에 적용													60,000	남상혁 (이엔지 소프트)	
2	IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 시험운영													80,000	남상혁 (이엔지 소프트)	
3	IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 고도화 방안 도출													28,000	남상혁 (이엔지 소프트)	
4	압축/휨응력 실험을 통한 콘크리트 SHM 기법 검증													15,000	박승희 (성균관 대학교 산학협 력단)	
5	전기저항 임피던스의 온도도 보상 기법 개발													15,000	박승희 (성균관 대학교 산학협 력단)	
6	시스템 보완을 통한 CNT 셀프센싱 콘크리트 SHM 기법 완성													20,000	박승희 (성균관 대학교 산학협 력단)	
7	아두이노 기반 소프트웨어 개발													30,000	Long-y uan Li (폴리머 스대학)	
8	CNT 폴리머 복합체와 프로그램의 결합 확인													30,000	Long-y uan Li (폴리머 스대학)	
9	사용자 중심의 IoT 시스템 인터페이스 개발													30,000	Long-y uan Li (폴리머 스대학)	

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

- IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 개발
 - CNT 폴리머 코팅의 저항 계측이 가능한 하드웨어 및 소프트웨어 설계문서 도출
 - 하드웨어 및 소프트웨어 설계문서 기반 프로토타입 개발
 - CNT 폴리머 코팅 센서 16채널을 동시에 계측할 수 있도록 하드웨어 개량
 - 개량된 하드웨어에 대응하고 CNT-PZT 복합센서 데이터 모니터링 시스템 및 가시화 방법 개발
 - CNT 폴리머 코팅 센서 및 CNT-PZT 복합센서 통합시험 모니터링 시스템 시험운영 및 고도화 방안 도출
(공인시험성적서 발급 - 압축강도 예측 오차율, 손상감지 거리, 감지 균열폭, 시스템 UI 오류율)
 - CNT Cement Block Sensor Module을 이용한 SHM 기술
 - 전기저항 임피던스 계측을 위한 전극 위치 및 형태 최적화 설계
 - CNT 폴리머-콘크리트 결합 구조체를 이용한 SHM 기법
 - 계측 기법의 신뢰성 증가를 위한 환경 조건 영향 보상 알고리즘 개발
 - CNT/Cement-PZT 복합센서 데이터 수집 장치 제작
 - 실험을 통한 CNT-PZT 복합센서를 적용한 콘크리트 압축강도 예측 및 손상감지 성능 확인
 - 셀프센싱 CNT 폴리머 복합체 및 IoT센싱 인터페이스 개발
 - 분산제와 분산력에 따른 CNT 분산 기법 개발
 - CNT 함유량에 따른 전기전도도 비교
 - 온·습도와 재하 하중에 따른 CNT 폴리머 코팅의 저항 변화 특성 분석
 - 아두이노 기반 소프트웨어를 활용한 CNT 폴리머 코팅 변형 감지 시스템 개발
 - IoT 모니터링 시스템과의 연동을 통한 균열 감지 성능 확인
-

(2) 정량적 연구개발성과

- 당초 계획 대비 100% 이상 달성
 - 논문 게재(SCIE): 200% (8건/4건)
 - 학술발표: 100% (6건/6건)
 - 특허 출원: 100% (3건/3건)
 - 소프트웨어 등록: 100% (5건/5건)
 - 시제품 제작: 200% (2건/1건)
 - 신규 고용(청년의무): 100% (1건/1건)
 - 사업화: 1건 (2020년 매출실적: 61,700천원)
-

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Comparative Analysis and Strength Estimation of Fresh Concrete Based on Ultrasonic Wave Propagation and Maturity Using Smart Temperature and PZT Sensors	Micromachines	Najeebullah Tareen	10	스위스	MDPI	SCIE	2019.08.23.	2072-666X	25%
2	Self-Sensing Carbon Nanotube Composites Exposed to Glass Transition Temperature	Materials	Sung-Hwan Jang	13	스위스	MDPI	SCIE	2020.01.07.	1996-1944	100%
3	Calculation of electrical conductivity of self-sensing carbon nanotube composites	Composites Part B	Long-Yuan Li	199	미국	Elsevier	SCIE	2020.07.28.	1359-8368	100%
4	Fuzzy Logic-based Nondestructive Concrete Strength Evaluation using Modified Carbon Nanotubes as a Hybrid PZT-CNT Sensor	Materials	Najeebullah Tareen	14	스위스	MDPI	SCIE	2021.05.05	1996-1944	100%
5	Piezoresistive Modelling of CNT's Reinforced Composites under Mechanical Loadings	Composites Science and Technology	Long-Yuan Li	208	미국	Elsevier	SCIE	2021.05.26	0266-3538	100%
6	Heat Transfer Modelling of Carbon Nanotube Reinforced Composites	Composites Part B	Long-Yuan Li	225	미국	Elsevier	SCIE	2021.11.15	1359-8368	50%
7	Dynamic Stability of CNTs-reinforced Non-uniform Composite Beams under Axial Excitation Loading	Computational Materials Science	Long-Yuan Li	In Press	미국	Elsevier	SCIE	2021.11.24	0927-0256	100%
8	Percolation Threshold and Effective Properties of CNTs-reinforced Two-phase Composite Materials	Materials Today Communications	Long-Yuan Li	29	미국	Elsevier	SCIE	2021.12.01	2352-4928	25%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	International Conference on Smart Cities	Smart Transport Roads Designed By Nanocomposite Coating of Polyurethane and Carbon Nanotubes	Sung-Hwan Jang	2019.07.16	Seoul Dragon City Convention Center	Korea
2	5th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil structures	Self-Sensing Carbon Nanotube Reinforced Composites for Smart Cities	Sung-Hwan Jang	2019.08.27	Dorint Sanssouci Berlin-Potsdam	Germany
3	대한토목학회 학술발표회	셀프센싱 탄소나노튜브 복합체를 활용한 IoT 기반 구조물 건전성 모니터링 기술 개발	남상혁	2019.10.17	평창 알펜시아 컨벤션센터	대한민국
4	한국구조물진단유지관리공학회 학술발표회	탄소나노튜브 센서 데이터 모니터링을 위한 스마트 IoT 시스템 설계	남상혁	2020.07.07	제주도 라마다플라자	대한민국
5	한국구조물진단유지관리공학회 학술발표회	CNT 센서를 이용한 IoT 기반 구조물 건전성 모니터링 시스템 개발	남상혁	2021.06.03	부산 파라다이스호텔	대한민국
6	한국방재안전학회	Hybrid PZT-CNTs 센서 기반 비파괴검사법 개발을 통한 콘크리트 압축강도 추정	고동영	2021.12.22	온라인	대한민국

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	탄소나노튜브 센서를 활용한 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 및 그 방법	대한민국	(주)이엔지소프트	2019. 11.27.	10-2019- 0154449				100%	
2	특허	압전 센서 복합체, 콘크리트 조기 강도 추정 장치 및 콘크리트 조기 강도 추정 방법	대한민국	성균관대학교 산학협력단 스마트인사이드	2021. 01.20	10-2021- 0008025				100%	
3	특허	지능형 센서 계측 IoT 시스템 시각화 장치 및 방법	대한민국	(주)이엔지소프트	2021. 11.26	10-2021- 0165254				100%	

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타
1										√	
2										√	
3										√	

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템	2020.10.21	(주)이엔지소프트	2020.10.23.	C-2020-037307	(주)이엔지소프트	100%
2	IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 프로그램	2020.10.21	(주)이엔지소프트	2020.10.23.	C-2020-037308	(주)이엔지소프트	100%
3	웹기반 구조물 건전성 계측 및 모니터링 시스템	2021.11.25	(주)이엔지소프트	2021.12.06	C-2021-053068	(주)이엔지소프트	100%
4	CNT 폴리머 센싱을 위한 아두이노 기반의 인터페이스 프로그램	2021.11.25	(주)이엔지소프트	2021.12.06	C-2021-053069	(주)이엔지소프트	100%
5	CNT(탄소나노튜브)-PZ T(압전소자) 복합센서 강도계측 프로그램	2021.12.06	성균관대학교 산학협력단	2021.12.27	C-2021-058088	성균관대학교 산학협력단	100%

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	CNT 셀프센싱 코팅재료	2019.10.15.	Univ. of Plymouth	(주)이엔지소프트	콘크리트 구조물의 초기 균열 감지용			
2	균열 감지가 가능한 탄소나노튜브 기반 코팅제	2021.09.01.	이노베이트어스 주식회사	(주)이엔지소프트	콘크리트 구조물의 초기 균열 감지용			
3	CNT 센서 계측을 위한 스마트 센서노드	2021.09.10	더퓨처 클래식스	(주)이엔지소프트	CNT 센서를 통한 계측 데이터 수집, 분석 및 데이터 통신			

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		
1	자기 실시	기존공정 개선	국내	사물인터넷 기술을 활용한 현장 모니터링 기술	사물인터넷 기술을 활용하여 세종-포천고속도로 안성-구리(제14공구) 현장정보를 360 카메라로 촬영·기록 및 관리하는 기술에 대해 현대건설(주)와 용역 계약(계약기간 : 2020년 7월 21일 부터 2020년 11월 30일)	현대건설 (주)	61,700		2020	

□ 매출 실적(누적)

번호	사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
			국내(천원)	국외(달러)		
1	사물인터넷 기술을 활용한 현장 모니터링 기술	2020	61,700		61,700	매출액(부가세 별도)
합계			61,700		61,700	

□ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)			합계(명)
			2019년	2020년	2021년	
1	사물인터넷 기술을 활용한 현장 모니터링 기술	(주)이엔지소프트	1	0	0	1
합계			1	0	0	1

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항

- 과제 제안시 계획되지 않았으나 주관연구기관(이엔지소프트)에서는 본 연구에서 개발하는 IoT 셀프센싱 모니터링 시스템과 관련된 IoT 모니터링 시스템 사업화 1건과 시제품 제작 1건 달성
 - 2020년 사업화를 통한 매출 실적: 61,700 천원
 - 시제품 제작 : CNT 센서 계측을 위한 스마트 센서노드 (2021.09.10)

2) 목표 달성 수준

연구 개발 목표	달 성 내 용	달성도(%)
○ IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 개발 - IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 설계 - IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 프로토타입 개발 - IoT 기반 셀프센싱 모니터링 시스템 시험운영 및 고도화	- IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 하드웨어 및 소프트웨어 설계 문서 도출 - IoT 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템 프로토타입 하드웨어 구축 및 소프트웨어 등록 - 프로토타입 시스템 개선을 통한 하드웨어 시제품 개발 및 소프트웨어 등록과 통합시험 수행중 시스템 시험운영을 통해 시스템 검증 및 고도화 방안 도출	100%
○ CNT 셀프센싱 콘크리트 SHM을 위한 전기저항 임피던스 기법 개발 - CNT Cement Block Sensor Module을 이용한 구조물 건전성 모니터링 기술 개발 - CNT/Cement-PZT 복합센서 모듈을 이용한 SHM 기법 개발 - 실험을 통한 전기저항 임피던스 기반 SHM 기술 검증 및 보완	- CNT cement block sensor module을 이용한 전기저항 임피던스 계측기법 개발 및 전극 위치 및 형태 최적화 설계 보고서 도출 - CNT/Cement-PZT 복합 센서 모듈의 센서화 기법 설계 및 이를 이용한 콘크리트 SHM 기법 관련 논문 작성 및 특허 출원 - 압축/휨응력 실험을 통한 콘크리트 SHM 기법 검증 및 전기저항 임피던스의 온습도 보상 기법 개발	100%
○ 셀프센싱 CNT 폴리머 복합체 및 IoT 센싱 인터페이스 개발 - CNT 분산 최적화 기술을 통한 셀프센싱 폴리머 코팅 재료 최적화 기법 개발 - 물리적 하중 및 환경적 변화에 따른 CNT 폴리머 코팅의 전기적 변화 특성 분석 - CNT 폴리머 복합체와 IoT 시스템 연계 기법 개발	- CNT 함유량에 따른 전기전도도 분석 결과 및 분산제와 분산력에 따른 CNT 분산 기법 개발 보고서 도출 - 하중 변화, 온도 및 습도 변화에 따른 CNT 폴리머 코팅의 저항 변화 확인 보고서 및 논문 작성 - IoT 기반의 모니터링 시스템 연동을 위한 CNT 폴리머 코팅의 셀프센싱 알고리즘 및 센싱 인터페이스 개발	100%

4. 목표 미달 시 원인분석

※ 해당사항 없음

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 본 사업의 최초 협약 시 제출한 성능목표는 개발 목표치를 당시 세계최고 수준 이상으로 작성되었으며, 본 연구개발을 통해 당초 계획한 성능목표를 100% 달성하였음
 - 첨단 나노소재를 활용하여 콘크리트 구조물 손상을 조기에 감지할 수 있는 기술적 기반을 마련했음
-

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

- 본 연구에서 도출된 지적재산 및 노하우 등을 활용한 사업화 가능하며 향후 추가 연구를 통한 공동연구 기관에서 개발한 센서를 활용한 구조물 변형 정도 수치화 기법 및 가시화 기법 개발과 같은 IoT 셀프센싱 모니터링 시스템을 고도화할 것임
 - 균열 발생 또는 일정 이상의 변형이 발생한 이후에도 길이 변화에 따른 저항변화율이 지속적으로 일정한 특성을 발휘할 수 있도록 CNT 폴리머 코팅제의 배합 또는 형상 등에 대한 연구를 수행할 예정임
 - 기존 변형률 센서 및 다양한 센서를 지원하는 통합 하드웨어 개발을 통해 기존 데이터로거에 비해 소형화되고 저가로 공급가능한 본 기술을 적용하여 경제적인 모니터링 시스템으로 고도화 할 것임
 - IoT 기반 셀프센싱 데이터 모니터링 시스템은 웹표준을 준수하므로 최소한의 자원 투입을 통해 각종 Smart-Device로 제품군 확장 가능
 - 장기적으로 수집된 모니터링 데이터를 축적함으로서 다양한 분석이 가능하고, 방대한 데이터를 활용한 빅데이터 기술이 적용된 제품으로 상용화 가능
 - 구조물 유지관리 기업으로 기술이전을 통해 콘크리트 구조물 안전진단 및 유지관리 사업 실용화 가능
 - 콘크리트 안전진단 산업, CNT 셀프센싱 콘크리트 제조 산업 등 신산업 창출
 - 본 연구에서 도출되는 셀프센싱 구조물의 IoT 기반 건전성 모니터링 시스템의 개념은 다양한 분야에서 유용하게 응용되어 활용될 수 있음. 향후 사회기반시설들이 자기감지 기능을 통해 상호간에 연결이 되어 인간과 시설물, 장비나 장치들이 상호 통신하는 획기적인 세상이 오게 될 것임. 이를 위해 셀프센싱 재료 개발이나 사물인터넷 등을 통한 스마트 관리시스템을 위해서는 관련 요소 기술들에 대한 추가적인 연구개발이 필요함
-

7. 참고 문헌

- Inman D.J, Engineering Vibration 2nd Ed., Prentice hall, 2004
 - Liang C., Sun F.P. and Rogers C.A., "Coupled electro- mechanical analysis of adaptive material systems- determination of the actuator power consumption and system energy transfer", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, No. 1, 1994, pp.12-20.
 - Lee S.J., and Sohn H., "Active self-sensing scheme development for structural health monitoring", Smart Materials and Structures, Vol. 15, 2006, pp. 1734-46
 - Jang, Sung-Hwan, and Huiming Yin., "Effective electrical conductivity of carbon nanotube-polymer composites: a simplified model and its validation.", Materials Research Express, Vol. 2, No. 4, 2015, pp.1-11
 - Ning Hu, Yoshifumi Karube, Masahiro Arai, Tomonori Watanabe, Cheng Yan, Yuan Li, Yaolu Liu, Hisao Fukunaga, "Investigation on sensitivity of a polymer/carbon nanotube composite strain sensor", Carbon, Vol. 48, 2010, pp 680-687
 - J. J. Ku-Herrera, F. Avilés and G. D. Seidel, "Self-sensing of elastic strain, matrix yielding and plasticity in multiwall carbon nanotube/vinyl ester composites", Smart Materials and Structures Vol. 22, 2013, pp.1-7
-

< 별첨 >

별첨 자료

- | |
|--|
| 1. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료 |
| 2. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외) |
-

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘국토교통기술촉진연구사업’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.