

최종보고서(일반과제용)										보안등급	
										일반[✓], 보안[]	
중앙행정기관명	국토교통부					사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업		
전문기관명	국토교통과학기술진흥원					내역사업명			국토교통기술혁신연구		
공고번호	공고-제05호					총괄연구개발 식별번호			-		
						연구개발과제번호			21CTAP-C157167-02		
국가과학기술 표준분류	자연재해 저감기술	25%	나노응용 기술	15%	도료/코팅제	10%	달리 분류되지 않는 측정분석장비/장치	25%	S/W 솔루션	25%	
총괄연구개발명	국문	탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 개발									
	영문	Black ice free transport road coating system									
연구개발과제명	국문	블랙아이스 탐지 및 제거가 가능한 탄소나노튜브 도로 코팅제 개발									
	영문	Black ice free transport road coating system									
주관연구기관	기관명	한양대학교 에리카 산학협력단				사업자등록번호	134-82-10205				
	주소	(우)15588 경기도 안산시 상록구 한양대 학로 55(사동, 한양대학교내 학연 산클러스터지원센터 212호)				법인등록번호	131471-0017977				
주관연구책임자	성명	장 승 환				직위	조교수				
	연락처	직장전화	031-400-5183			휴대전화	010-2266-6496				
		전자우편	sj2527@hanyang.ac.kr			국가연구자번호	11026934				
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (1년 9개월)									
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31 (9개월)									
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31 (1년)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	370,000	9,250	83,250	-	-	-	-	379,250	83,250	462,500	-
1년차	160,000	4,000	36,000	-	-	-	-	164,000	36,000	200,000	-
2년차	210,000	5,250	47,250	-	-	-	-	215,250	47,250	262,500	-
3년차				-	-	-	-				-
m년차				-	-	-	-				-
n년차				-	-	-	-				-
공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고			
								역할		기관유형	
공동연구기관	(주)이엔지소프트	남상혁	대표	010-4272-4807		shnam@engsoft.kr		공동		중소기업	
위탁연구기관	-	-	-	-		-		-		-	
연구기관 외 기관	-	-	-	-		-		-		-	
연구개발담당자	성명	이승준				직위	학생연구원				
실무담당자	연락처	직장전화	-			휴대전화	010-7120-5523				
		전자우편	sj5523@hanyang.ac.kr			국가연구자번호	11337364				

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

2022 년 03 월 30 일

주관연구책임자 :

장 승 환

주관연구기관의 장 : 한양대학교에리카 산학협력단 박 태 준

국토교통과학기술진흥원장 귀하



< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성

사업명	국토교통기술촉진연구 사업	총괄연구개발 식별번호	-			
내역사업명	국토교통기술혁신연구	연구개발과제번호	21CTAP-C157167-02			
국가과학기술 표준분류	자연재해 저감기술	25%	나노응용 기술	15%	도로/코팅제	10%
총괄연구개발명	탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 개발					
연구개발과제명	블랙아이스 탐지 및 제거가 가능한 탄소나노튜브 도로 코팅제 개발					
전체 연구개발기간	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (1년 9개월)					
총 연구개발비	총 462,500 천원 (정부지원연구개발비 : 370,000 천원, 기관부담연구개발비 : 92,500 천원, 지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)					
연구개발단계	기초[] 응용[☒] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도		착수시점 기준(3) 종료시점 목표(5)	
연구개발과제 유형	지정공모 [] 자유공모 [☒]					
연구개발과제 특성	-					
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표		탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 개발			
	전체 내용		1. 블랙아이스 탐지 및 제거가 가능한 탄소나노튜브 도로 코팅제 개발 2. 사물인터넷 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 개발			
	1년차	목표	1. 탄소나노튜브 기반 도로 코팅제 개발 및 성능평가를 통한 재료 최적화 2. IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 설계			
		내용	1. 탄소나노튜브 도로 코팅제 개발 2. 탄소나노튜브 기반 도로 코팅제의 성능평가 3. 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 기능 요구사항 수집 및 분석 4. IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 하드웨어 설계 5. IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 소프트웨어 설계			
	2년차	목표	1. 시험실 수준 블랙아이스 조성 및 블랙아이스 탐지 및 제거 성능 평가 2. IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 개발 및 시험적용			
		내용	1. 도로 코팅제와 시스템의 인터페이스 구성 2. 시험실 환경 하 블랙아이스 탐지 및 발열 평가 3. 시스템 개발 5. 시험운영 및 고도화			
연구개발성과		○ 탄소나노튜브 도로 코팅제 개발 - 분산제에 따른 탄소나노튜브 분산에 대한 최적화 - 탄소나노튜브 함량에 따른 코팅제의 점성에 대한 최적화 - 온도에 따른 시험체의 전기전도도의 변화 분석 - 외부전압에 의한 시험체의 발열 특성 최적화 - 도로 코팅제와 시스템의 인터페이스 구성 - 시험실 환경 하 블랙아이스 탐지 및 발열 평가 ○ IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 개발 - 기능 요구사항 분석을 통한 시스템 기본 구성요소 및 성능기준 도출 - 센서부, 전원부, 인터페이스부 등 시스템 하드웨어 구성 및 설계 - 모바일 앱 기능 정의 및 정보 가시화 항목 결정 - 시스템 하드웨어 기능 구현을 위한 소프트웨어 개발 - 시스템 기능 요구사항을 기반으로 웹 관리 시스템 소프트웨어 개발				

	○ 정량적 성과는 당초 계획 대비 100% 이상 달성 - 논문 게재(SCIE): 100% (2건/2건) - 학술발표논문(비 SCIE): 300% (6건/2건) - 특허 출원: 200% (4건/2건) - 특허 등록: (1건/0건) - 소프트웨어 등록: 100% (2건/2건) - 일자리 창출: (1명/0명)											
연구개발성과 활용방안 및 기대효과	본 연구에서 개발되는 탄소나노튜브 기반 도로 코팅제 및 이와 연계된 사물인터넷 기반 시스템은 기존의 도로 결빙 및 블랙아이스 제거를 위한 전통적인 방법의 문제점을 제거하고 가장 효율적인 방법으로 사용될 수 있다. 기존의 블랙아이스 탐지 및 제거방법은 수많은 인력과 비용이 발생되고 저효율적인 방법이었다. 본 연구에서는 기존 도로 코팅제를 탄소나노튜브를 사용하여 전도성 물질로 성능을 변화시켜 극한 온도를 탐지 할 수 있는 온도 센서의 기능과 줄히팅을 이용한 코팅 자체 발열 기능을 가진 다기능성 도로 코팅제를 개발한다. 또한, 사물인터넷 기술을 고도화시켜 블랙아이스 탐지의 데이터 축적과 탐지 동시에 코팅제의 발열 기능으로 즉시 제거 할 수 있는 시스템을 구성한다. 따라서, 본 연구의 결과물은 겨울철 도로 결빙 및 블랙아이스 문제를 쉽고 고효율적으로 운영할 수 있을 것으로 판단된다.											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음											
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	2	4				2						
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설· 장비명		규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)		ZEUS 등록번호	
국문핵심어 (5개 이내)	블랙아이스			탄소나노튜브		도로 코팅제		자체 발열		사물인터넷 시스템		
영문핵심어 (5개 이내)	Black ice			Carbon nanotube		Transport road coating		Joule heating		IoT system		

< 목 차 >

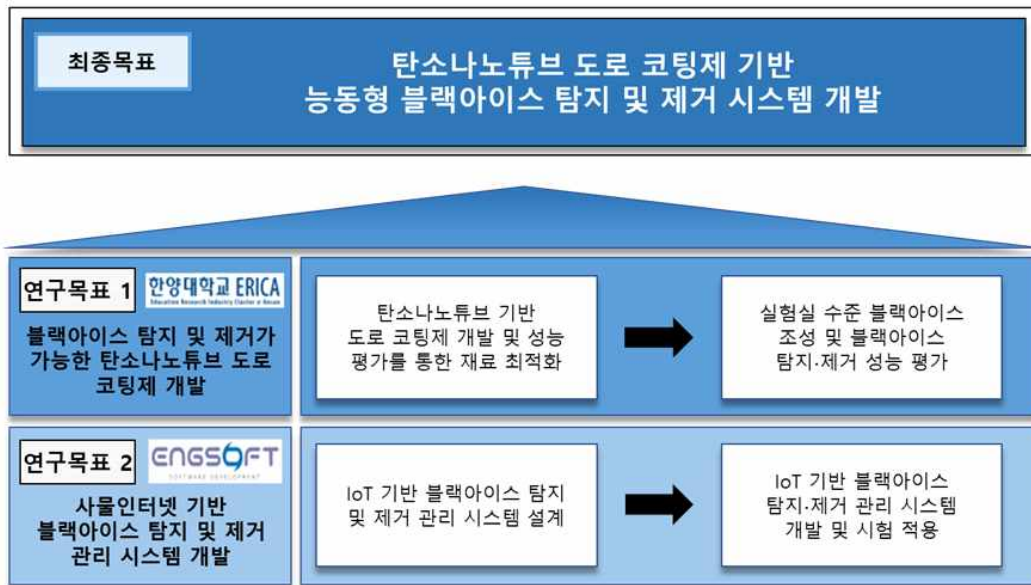
1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	3
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	58
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	61
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	61
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	62
7. 참고 문헌	62

별첨자료

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

- 탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 개발
 - 목표 1: 블랙아이스 탐지 및 제거가 가능한 탄소나노튜브 도로 코팅제 개발
 - 목표 2: 사물인터넷 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 개발



2) 연구개발과제의 년차별 목표

- 주관 연구 기관(한양대학교ERICA 산학협력단)
 - 1차년도 : 탄소나노튜브 기반 도로 코팅제 개발 및 성능평가를 통한 재료 최적화
 - 2차년도 : 실험실 수준 블랙아이스 조성 및 블랙아이스 탐지 및 제거 성능 평가
- 공동 연구 기관(이엔지 소프트)
 - 1차년도 : IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 설계
 - 2차년도 : IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 개발 및 시험적용

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2020)	탄소나노튜브 기반 도로 코팅제 개발 및 성능평가를 통한 재료 최적화	탄소나노튜브 도로 코팅제 개발	(도로 주변 대기온도 측정으로 통한 예측)	$\pm 3.0^{\circ}\text{C}$	블랙아이스 탐지를 위한 표면온도 정 확성 측정	5
			(제설제 또는 도로 하부 삽입형)	20분 (10 $^{\circ}\text{C}$ 상승시간)	블랙아이스 제거를 위한 발열 성능 측 정	15
	IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 설계	시스템 하드웨어 및 소프트웨어 설계	-	설계문서 작성		10
2년차 (2021)	실험실 수준 블랙아이스 조성 및 블랙아이스 탐지 및 제거 성능 평가	탄소나노튜브 도로 코팅제 성능평가	(도로 주변 대기온도 측정으로 통한 예측)	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$	블랙아이스 탐지를 위한 표면온도 정 확성 측정	5
			(제설제 또는 도로 하부 삽입형)	10분 (10 $^{\circ}\text{C}$ 상승시간)	블랙아이스 제거를 위한 발열 성능 측 정	15
			-	마모에 따른 열적성질 확인	블랙아이스 코팅제 의 내구성 분석	10
	IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 개발 및 시험 적용	블랙아이스 탐지 및 제거 능동형 관리 시스템	-	데이터 정합성 95% 이상	서버DB와 관리 시 스템 간 데이터 정 합성 측정	20
			-	시스템 미오류율 5% 이내	UI 시험항목 선정 하여 반복 수행 후 오류율 측정	20

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

○ 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

■ 주관연구기관(한양대학교에리카 산학협력단)

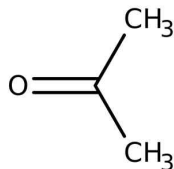
1. 탄소나노튜브 도로 코팅제 개발

1.1. 연구개요

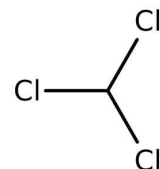
- 탄소나노튜브(Carbon Nanotube; CNT) 는 수 nm에서 수십 nm의 직경과 수 μm 의 길이를 가지는 탄소로 이루어진 나노소재 중의 하나로서 기존의 입자에 비해 강도 및 탄성계수 등의 기계적 성질이 우수함
- 또한 탄소나노튜브는 높은 전기전도도 및 열전도도 등의 우수한 물리적 특성을 가진 물질로 기존의 폴리머 소재를 혼합할 경우 기존의 소재에서 찾아볼 수 없는 다능기성 복합재료 개발이 가능할 것으로 전망됨
- 그러나 탄소나노튜브는 나노미터 수준의 크기와 긴 장대비로 인하여 매우 강한 반데르발스 힘 (van der Waals interaction)을 가지기 때문에 서로 강한 응집성을 가지게 되고, 이러한 강한 응집성은 복합체 제작 시 탄소나노튜브의 분산에 영향을 미치고 결국 전체 재료의 재료적 특성의 저하로 이어지게 됨
- 본 연구에서는 분산제 및 분산력에 따른 탄소나노튜브의 분산 최적화 기법에 대한 연구를 수행함

1.2. 실험

- 본 연구에서는 순도 85%의 수준의 상업용 탄소나노튜브를 사용하였고, 향후 현장 적용을 고려하여 개량형 탄소나노튜브가 아닌 저순도 저비용의 탄소나노튜브를 사용
- 분산제는 Acetone과 Chloroform를 실험 시 사용하고, 분산제 없는 경우와 비교하였으며, 분산 기기로는 미국 Qsonica사의 초음파 분산기를 사용



Acetone ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$)

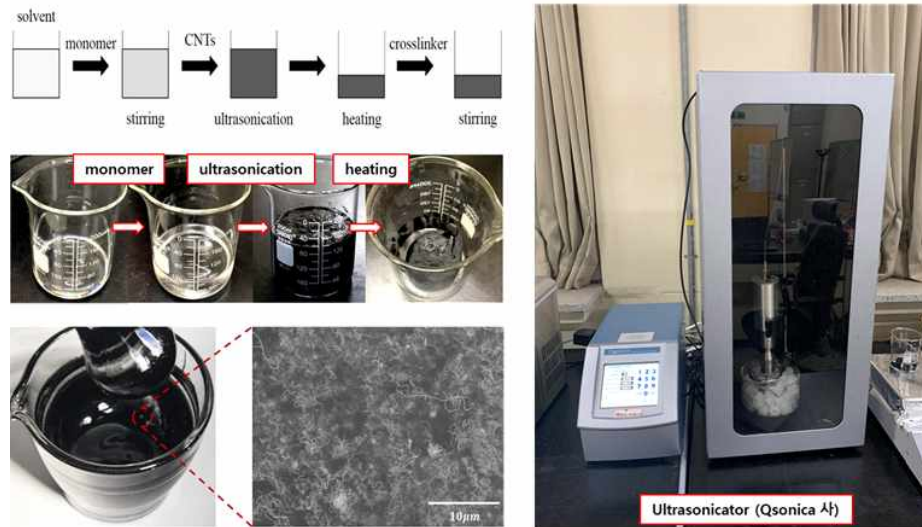


Chloroform (CHCl_3)

<실험에 사용된 분산제 (아세톤, 클로로포름)>

○ 탄소나노튜브 복합체 제작

- 1) 100ml 비커에 폴리우레탄 Part A 10g과 아세톤 등 분산제 50g를 넣고 균질하게 저어준 뒤 탄소나노튜브를 전자정밀저울을 이용하여 계량한 뒤 넣음
- 2) Qsonica사의 초음파분산기를 사용하여 용액에 든 탄소나노튜브를 분산시키고, 이 때, 초음파분산기는 90% 출력과 15초 작동/15초 미작동의 조건 하에서 분산함
- 3) 분산된 용액은 핫플레이트에 옮긴 뒤 60°C 에서 24시간 동안 분산제를 증발시킴
- 4) 그 후 폴리우레탄 Part B 10g을 넣고 균질하게 저어준 뒤 유리판에 옮긴 후 코팅기기를 통해 두께를 조절하여 동일한 두께의 샘플을 제조



<탄소나노튜브 복합체 제작>

- 탄소나노튜브 분산정도는 분산기법에 따른 샘플의 전기전도도를 통하여 확인하고, 전기전도도는 디지털 멀티미터를 통해 샘플의 저항을 측정한 뒤 식을 통해 전기전도도를 계산함
- 측정 시 측정 프로브와 샘플 사이의 접촉저항을 최소화하기 위해 샘플 양 극단에 전도성 실버 페인트를 도포한 후에 저항을 측정하였으며, 평균 저항 값을 측정하기 위해 샘플 5개를 측정 한 뒤 평균값을 산정

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

<실험조건>

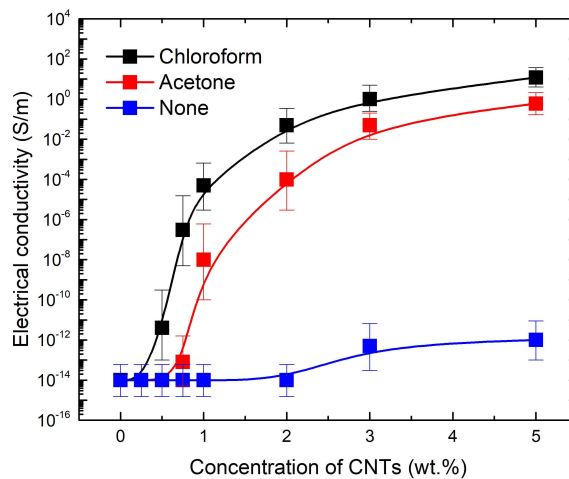
샘플명	CNTs (g)	분산제		폴리우레탄 (g)
		Chloroform (g)	Acetone (g)	
CPC0.00	0.00	50	0	10
CPC0.25	0.25			
CPC0.50	0.50			
CPC0.75	0.75			
CPC1.00	1.00			
CPC2.00	2.00			
CPC3.00	3.00			
CPC5.00	5.00			
CPA0.00	0.00	0	50	
CPA0.25	0.25			
CPA0.50	0.50			
CPA0.75	0.75			
CPA1.00	1.00			
CPA2.00	2.00			
CPA3.00	3.00			
CPA5.00	5.00			

1.3. 실험결과 및 분석

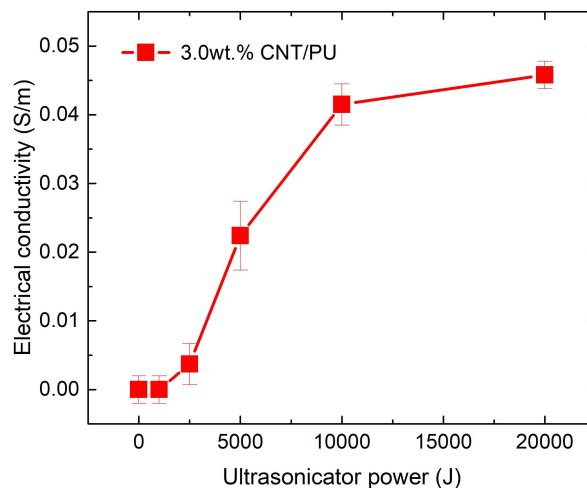
- 본 연구에서는 Acetone과 Chloroform을 분산제로 사용하였고 분산제가 없는 경우와 비교
- 분산제 종류에 따른 탄소나노튜브 복합체의 전기전도도를 확인 결과, 분산제 미사용 시 복합체의 전기전도도는 매우 낮은 경향을 나타냄
- 이는 분산제 미사용으로 인하여 탄소나노튜브가 제대로 분산되지 못하여 매트릭스 내의 네트워크를 구성하지 못하여 전기적 이동이 힘든 것으로 판단됨
- Acetone과 Chloroform을 분산제로 사용하였을 경우에는 각각 0.75wt.%와 0.50wt.%에서 전기

전도도의 상승이 관찰되었으며, 분산제 미사용으로 제작된 복합체에 비해 매우 높은 전기전도도를 나타냄

- 적절한 분산제 사용은 적은 양의 탄소나노튜브를 사용하여 전도성 복합체를 제작 하는데 도움이 되는 것으로 판단됨
- 탄소나노튜브를 이용한 전도성 복합체 제작에 있어서 클로로포름이 아세톤에 비해 높은 전기전도도 향상을 보였으나, 클로로포름의 경우 오래 전부터 전신 마취제와 방부제로 쓰이는 것으로 독성이 아세톤 및 다른 화학제품에 비해 더 심한 것으로 나타나 제작 시 인체에 해로울 것으로 판단됨
- 따라서, 본 연구에서는 클로로포름의 인체 유해성을 고려하여 아세톤을 활용하여 전도성 복합체를 제작함
- 초음파분산기 출력에 따른 탄소나노튜브 복합체의 전기전도도를 확인하였으며, 출력량에 따라 전기전도도가 증가하는 현상을 보임
- 본 연구에서는 약 10,000J 이상의 총 출력이 가해졌을 경우에는 전기전도도의 변화가 크게 없음을 확인함



<분산제 종류에 따른 탄소나노튜브 복합체의 전기전도도>



<초음파분산기의 출력에 따른 탄소나노튜브 복합체의 전기전도도>



<초음파분산기의 출력에 따른 탄소나노튜브 분산정도>

1.4. 결론

- 탄소나노튜브 복합체의 효율적인 제작을 위해 분산제 및 분산력에 따른 탄소나노튜브 분산정도에 대한 실험을 수행한 결과, 아세톤 및 클로로오폴을 분산제로 이용한 경우와 10,000J의 초음파분산기의 출력을 이용한 경우가 가장 효율적인 분산효과를 나타냄

2. 탄소나노튜브 기반 도로 코팅제의 성능평가

2.1. 연구 개요

- 도로의 블랙아이스 방지 코팅제 개발을 위해 극한 온도를 탐지 할 수 있는 온도 센서의 기능과 줄 히팅을 이용한 코팅 자체 발열 기능을 가지는 탄소나노튜브 코팅제를 제작
- 온도에 따른 코팅제의 전기전도도의 변화 분석 및 외부전압에 의한 코팅제의 발열 특성 최적화

2.2. 연구 범위

- 탄소나노튜브와 에폭시로 구성된 전도성 코팅재료 제작

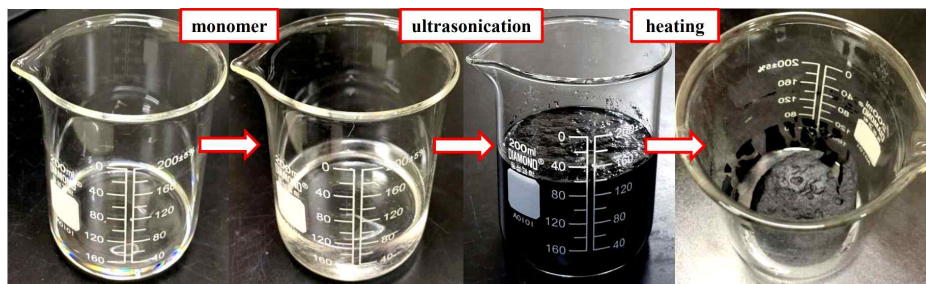
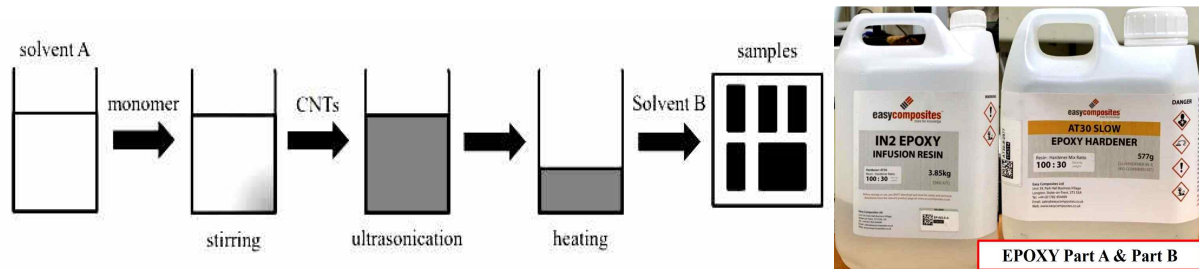
2.3. 코팅제 제작

○ 제작 과정

- 1). 100ml 비커에 에폭시 Part A 20g을 넣음
- 2). 분산제 (아세톤) 50g를 넣고 균질하게 섞음
- 3). 카본나노튜브를 전자정밀저울로 계량한 뒤 넣음
- 4). 분산기기로 용액을 분산시키며, 분산기기는 90%, 15초 작동/15초 미작동의 조건으로 진행함
- 5). 분산된 용액은 핫플레이트 올려놓은 후 60도에서 24시간 분산제를 증발시킴
- 6). 용액에 에폭시 Part B 6g을 넣고 균질하게 섞음
- 7). 실험조건에 따라 용액을 사전 제작한 틀에 맞춰 도포
- 8). 용액을 상온에서 24시간 경화시킴

<실험조건>

샘플명	에폭시 (g)	분산제	두께(mm)	너비(mm)	길이(mm)	CNTs (wt.%)
		Acetone (g)				
EC0.63	20	50	0.87	30	50	0.63
EC1.25						1.25
EC2.50						2.50
EC5.00						5.00
ECW5			0.87	5	50	5.00
ECW20				20		
ECW30				30		
ECW40				40		
ECW50				50		
ECT60			0.60	10	50	5.00
ECT87			0.87			
ECT176			1.76			
ECT448			4.48			
ECT629			6.29			
ECL0.15			4.48	40	150	5.00
ECL1.00					1000	



<탄소나노튜브-에폭시 코팅제 제작과정>



<탄소나노튜브-에폭시 코팅제 샘플>

2.4. 실험 방법

2.4.1 저항 측정

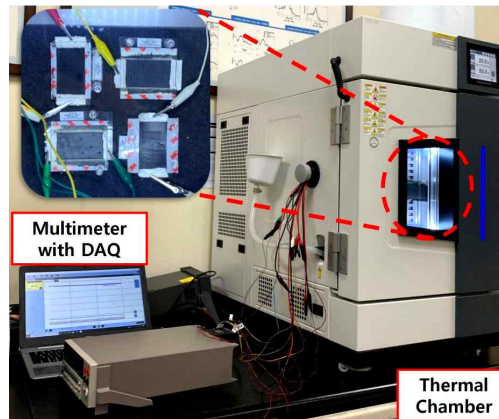
- 디지털 멀티미터를 통해 저항을 측정한 후 샘플의 크기를 고려하여 전기전도도를 계산
- 측정 프로브와 샘플 사이의 접촉저항을 최소화하기 위해 샘플의 양 극단에 전도성 실버페인트 도포처리

2.4.2 전기적 특성 측정

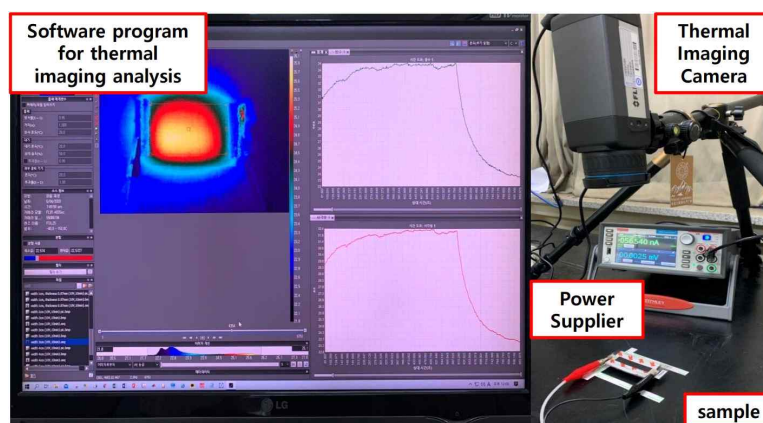
- 샘플 양 끝단에 크립을 이용하여 전극 고정
- 항온항습기를 이용하여 영상 20도에서 영하 20도를 거쳐 영상 20도까지 160m/div 조건으로 실시
- 샘플 주위 대기의 온도변화 중 전기적 저항을 디지털 멀티미터와 데이터 수집장치를 통해 실시간 측정

2.4.3 온도에 따른 재료적 특성 측정

- 샘플에 외부전압을 가하기 위해 항온항습기 내부에 샘플을 고정
- 샘플 양 끝단에 크립을 이용하여 전극 고정
- 발열에 의한 온도변화 관찰을 위해 열화상카메라 설치
- 항온항습기를 이용하여 영하 20도의 조건으로 측정 실시
- 극한 온도에서 특정 전압에 따른 발열 효과를 열화상카메라를 통해 수집



<전기적 특성 측정 실험장치>



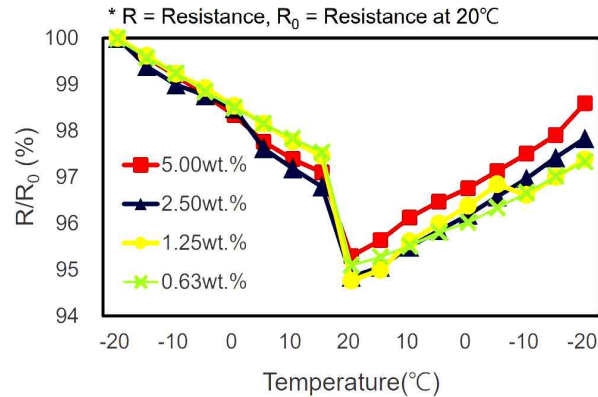
<온도 특성 측정 실험장치>

2.5. 결과

2.5.1 탄소나노튜브-에폭시 코팅제의 저항변화를

- 대기 온도 영하 20도에서 영상 20도의 변화 속에서 탄소나노튜브 함량 증가에 따라 평균 저항이 감소
- 대기온도에 대하여 탄소나노튜브 함량만을 달리한 샘플의 저항변화를 평균은 3% 이내로 측정되었으나, 실제 저항 변화 값은 크지 않음

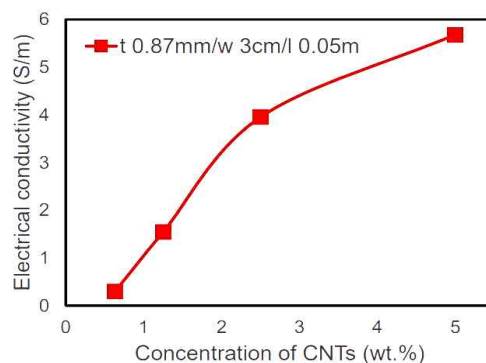
- 탄소나노튜브-에폭시 코팅제 샘플의 저항변화가 40도의 대기온도 변화 속에서 측정된 것을 고려하면 평균 일교차가 10도 이내인 우리나라의 실제 환경 조건에서 사용이 가능하다고 판단됨



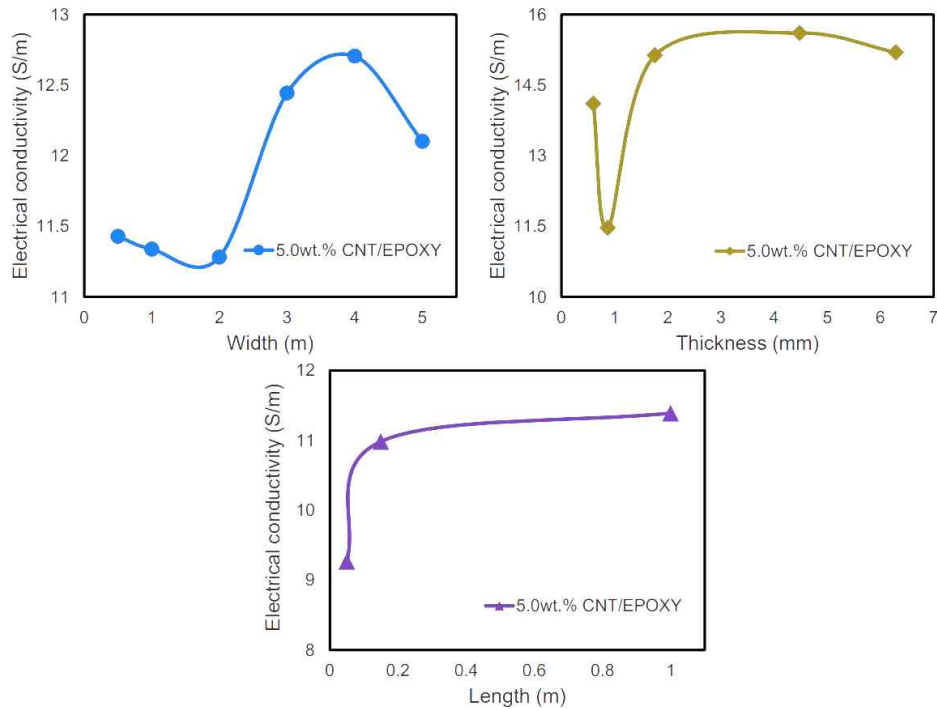
<대기 온도 변화에 따른 탄소나노튜브 코팅제의 저항 변화>

2.5.2 전기전도도

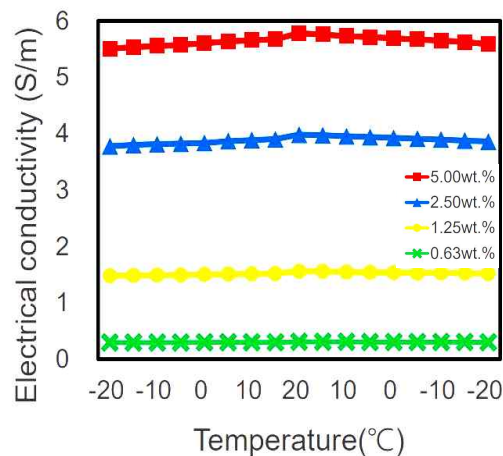
- 탄소나노튜브 함량에 따른 탄소나노튜브-에폭시 코팅제의 전기전도도를 비교함
- 일정한 크기의 샘플에서 탄소나노튜브 함량이 낮을수록 코팅제의 전기전도도는 매우 낮은 경향을 보임
- 이는 적은 탄소나노튜브 함량으로 인하여 탄소나노튜브가 적게 분산되어 매트릭스 내의 네트워크를 충분히 구성하지 못하여 전기적 이동이 적은 것으로 판단됨
- 5.00 wt.%의 탄소나노튜브 함량을 가지며 샘플 규격 조건을 달리한 CNT 코팅제 샘플의 전기전도도를 비교
- 너비를 달리한 경우에 전기전도도는 너비가 넓어질수록 감소하는 경향이 있으나 너비 2 cm에서 전기전도도가 크게 상승하고 4 cm부근의 피크 값을 지난 후 다시 감소하는 형태를 보임
- 두께의 경우, 전기전도도는 두께가 두꺼워질수록 처음에는 감소하나 두께 0.87mm에서 급상승하여 4.48 mm 부근에서 피크 값을 보인 후 다시 감소하는 경향을 보임
- 이러한 결과를 통해 높은 전기전도도를 나타내는 너비와 두께를 확인하였으며 샘플의 길이 비교를 위한 적절한 너비와 두께를 선정함
- 길이에 따라 CNT 코팅제 샘플의 전기전도도는 지속적으로 상승하는 형태를 보이며, 적절한 너비와 두께를 갖는 코팅제 샘플의 길이가 실제 도로의 차로 폭만큼 1 m이상 제작되어도 전기전도도의 상승이 나타날 수 있을 것으로 판단됨
- 대기 온도 변화에 따른 전기전도도는 가장 높을 때 샘플의 전기전도도가 가장 높게 나타남
- 겨울철 최저 온도일 때의 전기전도도가 의심될 수 있는 양상이나, 실제 최고온도와 최저온도의 전기전도도 차가 작은 편이므로 실제 성능에는 영향이 미미한 것으로 판단
- 적절한 탄소나노튜브 함량을 갖는 모든 탄소나노튜브-에폭시 코팅제는 다양한 온도의 실제 환경에 적용 가능함



<탄소나노튜브 함량에 따른 전기전도도>



<샘플 크기에 따른 CNT-에폭시 코팅제의 전기전도도>

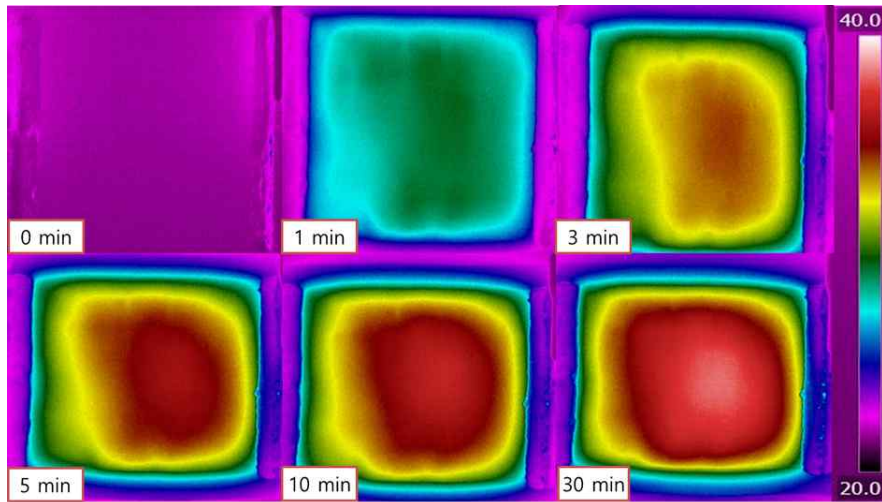


<대기 온도 변화에 따른 전기전도도>

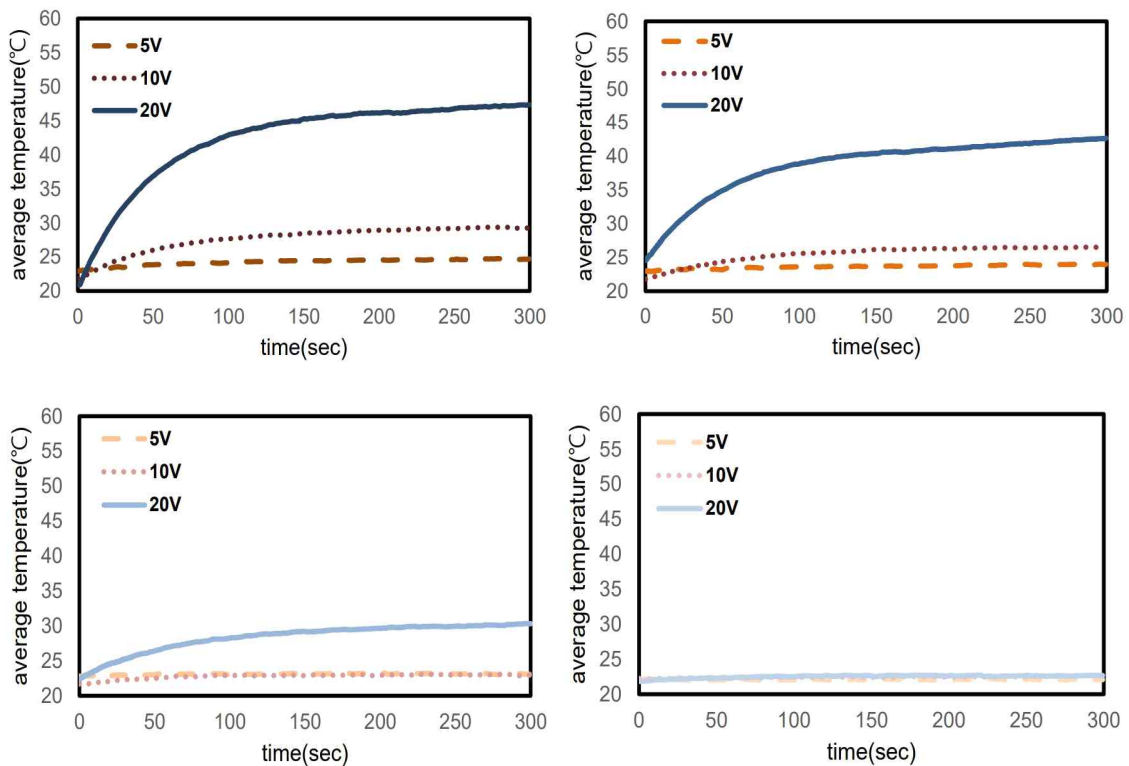
2.5.3 온도 특성

- 본 연구에서 개발된 전도성을 가진 탄소나노튜브-에폭시 코팅제는 외부 전압이 가해지면 자체적으로 열을 발생시키는 특징을 보이며, 전압을 가한 시간과 샘플 평균온도의 관계를 통해 외부 전압에 의한 샘플 자체발열 특성을 간접적으로 확인할 수 있음
- 본 실험에서는 영상 20도의 상온에서 서로 다른 탄소나노튜브 함량을 갖는 샘플에 외부 전압을 가하여 측정한 샘플의 온도 변화를 분석
- 0.63 wt.%의 탄소나노튜브로 제작된 코팅제의 온도 상승은 거의 나타나지 않았으나, 5.00 wt.%의 탄소나노튜브로 제작된 코팅제는 동일한 조건에서 큰 온도 상승을 나타냄
- 코팅제의 효과적인 발열을 위해서는 탄소나노튜브 함량이 높은 코팅제를 제작 및 사용하는 것이 성능적인 측면에서 유리하다고 판단됨
- 또한, 영하 20도에서 전압의 세기에 따른 5.00 wt.%의 탄소나노튜브로 제작된 코팅제의 온도 변화를 나타냈으며, 상온에서와 유사한 양상으로 진행되는 온도 상승을 통해 코팅제의 발열특성은 대기온도에 의해 영향을 거의 받지 않는 것을 확인
- 본 실험에 대한 결과는 샘플에 가해주는 외부 전압 세기에 따른 온도 변화를 나타내었으며, 이를 통해 외부 전압 세기가 클수록 코팅제 샘플의 발열이 커지는 것을 확인

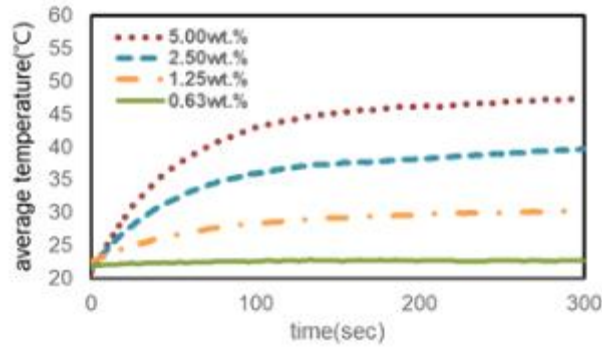
- 전도성을 가진 CNT-에폭시 코팅제는 외부 전압에 의한 온도 변화를 통하여 기존의 센서를 대체 할 수 있을 것으로 판단되며, 기존의 센서와 달리 자체적으로 열을 발생시키는 장점을 가지고 있고 또한 구조물 전체에 적용할 수 있는 대면적 적용이 가능함.
- 본 연구에서 수행한 전기전도도 및 물리적 성질을 통하여 기존 콘크리트구조물에 직접 적용이 가능할 것이라 판단됨



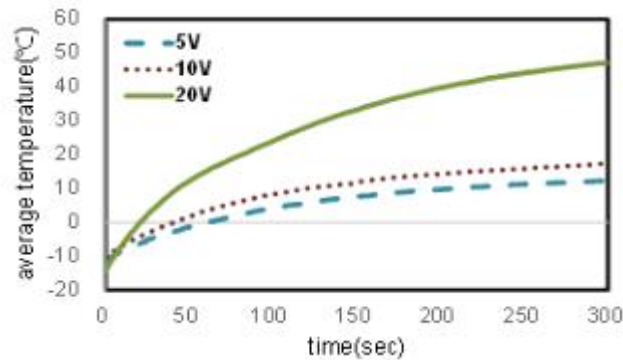
<상온에서 10V 외부전압에 따른 CNT-에폭시 코팅제의 온도 변화(5.00 wt.%)>



<상온에서 전압 세기에 따른 CNT-에폭시 코팅제의 온도 변화>



<탄소나노튜브 함량에 따른 코팅제의 온도 변화>



<영하 20도에서 전 에 따른 5.00 wt.% CNT-에폭시 코팅제의 온도 변화>

2.6 결론

- 본 연구에서는 코팅제 샘플의 규격을 최적화 하여 개발된 전도성을 가진 탄소나노튜브-에폭시 코팅제의 전기적 특성과 온도 변화를 통해 도로 코팅제로서의 가능성을 확인
- 대기 온도의 변화로 인한 저항변화율이 존재하지만 실제 대기 환경의 콘크리트구조물에 적용하기에는 충분히 낮은 최고·저의 차이를 나타내며, 전기전도도 역시 낮은 차이를 보이며 탄소나노튜브 함량이 가장 큰 경우 전기전도도가 가장 높게 나타남
- 그러나 이러한 경우 탄소나노튜브 용량이 매우 증가함에 따라 비용적 문제가 생길 것으로 판단됨
- 외부 전압 20V에 대한 탄소나노튜브 함량에 따른 온도 특성을 통해 탄소나노튜브 함량이 가장 큰 코팅제 샘플에서 충분히 효과적인 발열 현상이 나타남
- 이를 이용하여 영하 20도에서 외부 전압에 따른 5.00 wt.%의 코팅제 샘플의 온도 특성을 측정한 결과, 전압이 클수록 온도 변화가 커지는 것을 확인
- 기존 현장에서 사용되고 있는 상업화된 단순 코팅제와 비교한다면 본 연구에서 개발된 탄소나노튜브 코팅제는 자체 발열을 통해 낮은 전압으로도 짧은 시간에 영상 이상의 온도로 도달 가능하다는 측면에서 향후 콘크리트 도로의 블랙아이스를 제거하는데 매우 적합한 미래 소재라고 판단됨

3. 도로 코팅제와 시스템 인터페이스 구성

3.1 연구개요

- 도로 코팅제 시험체 사이즈와 전극 위치에 따른 시스템 구성 최적화
- 도로 코팅제 구성에 따른 발열 성능 분석

3.2 연구범위

- 코팅제 형태 및 규격에 따른 발열성능 분석을 통해 최적의 형태를 도출
- 선정 된 코팅 샘플을 개발 된 온도 감지 및 발열 시스템과 연결을 통해 센싱 및 발열 성능평가

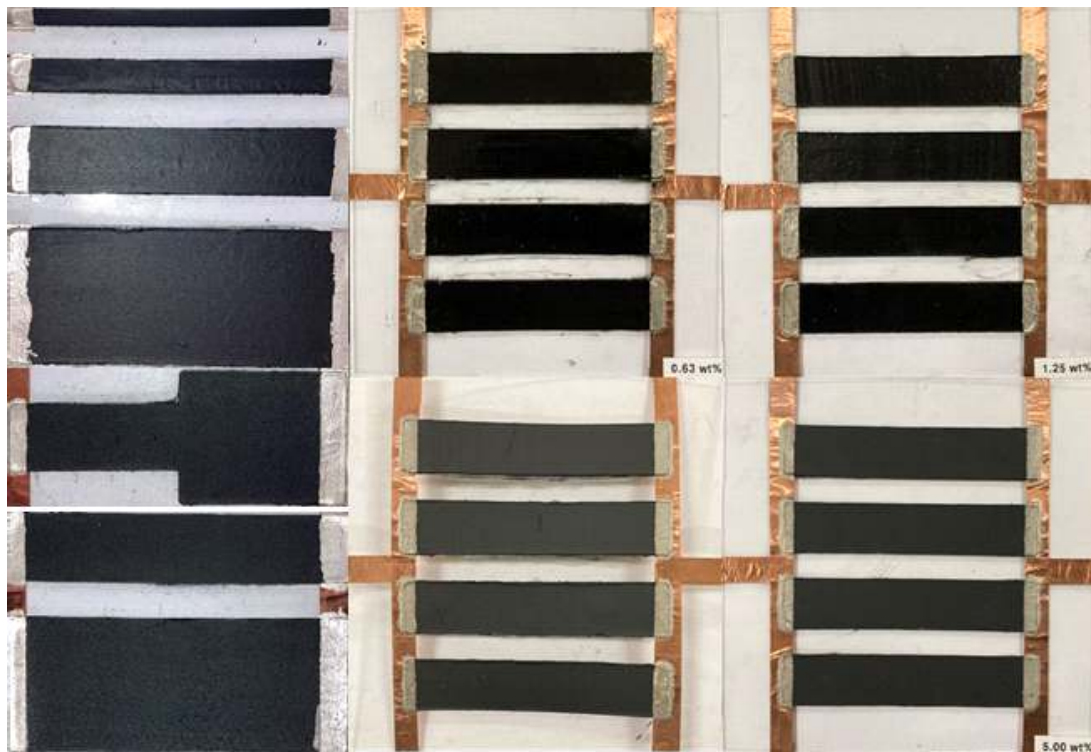
3.3 실험 조건

<실험조건>

샘플명	연결 형태	두께(mm)	너비(mm)	길이(mm)	CNTs (wt.%)
EC0.63	병렬	1.2	20	10	0.63
EC1.25					1.25
EC2.50					2.50
EC5.00					5.00
ECW5	직렬	1.2	5		5.00
ECW10			10		
ECW20			20		
ECW40			40		
ECD40	직렬	1.2	20-40		5.00
ECP40	병렬	1.2	20/40		5.00

3.4 샘플 제작

- 실험조건에 따라 코팅제 샘플 제작
- 제작 과정은 앞선 코팅제 제작 과정과 동일



<탄소나노튜브-에폭시 코팅제 제작 샘플>

3.5 실험 방법

3.5.1 규격 및 형식에 따른 발열 성능 분석

- 코팅제 샘플 및 온도 측정을 위한 열화상 카메라 설치
- 샘플에 외부전압을 가하기 위해 파워 서플라이를 코팅제 샘플과 연결
- 샘플 양 끝단에 크립을 이용하여 전극 고정
- 인가전압에 따른 코팅제의 발열 온도 데이터를 열화상카메라를 통해 수집

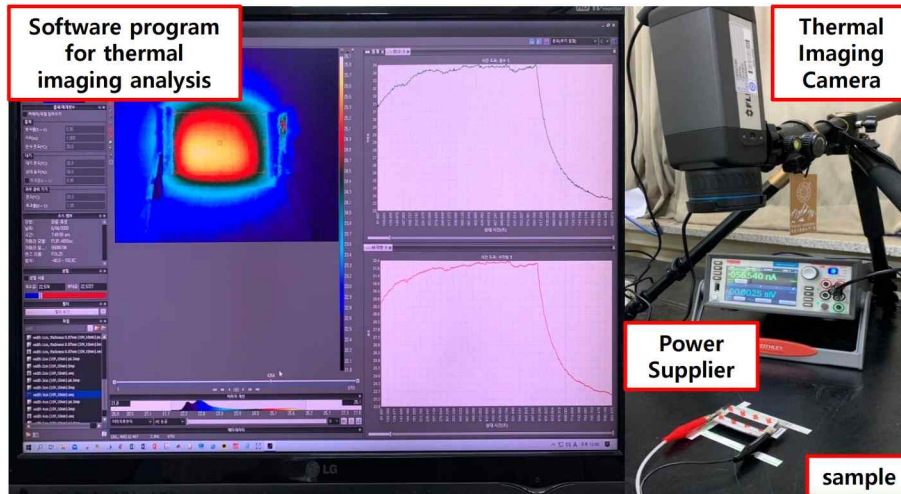
3.5.2 블랙아이스 코팅제 센싱 평가

- 샘플에 온도 센싱 성능 분석을 위해 항온항습기 내부에 샘플을 설치

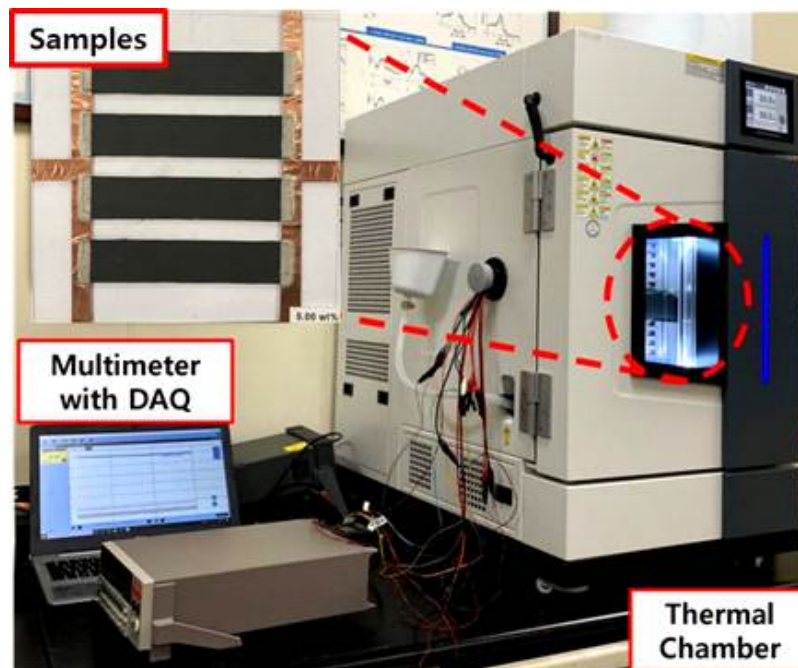
- 샘플 양 끝단에 크립을 이용하여 전극 고정.
- 항온항습기 내 환경 온도를 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 4시간 주기로 변화
- 디지털 멀티미터를 이용하여 코팅제 샘플의 저항을 측정
- 측정 된 저항데이터를 통해 온도 환산 식을 도출하고 실제 온도와의 오차를 계산 및 평가

3.5.3 선정된 샘플과 개발 된 시스템 구성을 통한 동작 실험

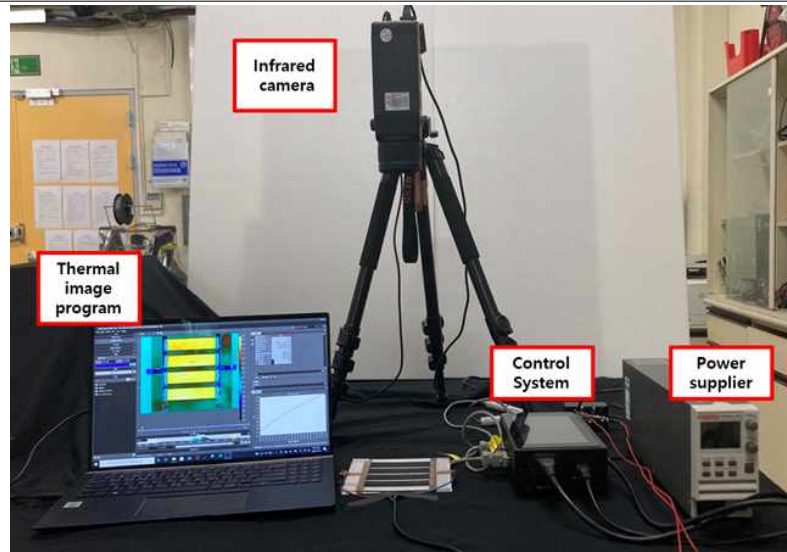
- 하드웨어 시스템에 외부의 전원을 연결한 후 하드웨어 시스템으로부터 출력되는 전원을 블랙아이스 코팅제 발열 장치와 연결
- 하드웨어 시스템의 자체적인 발열 동작 제어를 통해 전압을 인가
- 인가전압에 따른 코팅제의 발열 온도 데이터를 열화상카메라를 통해 수집



<샘플의 발열 성능 실험장치>



<블랙아이스 코팅제 센싱 성능 평가 실험>

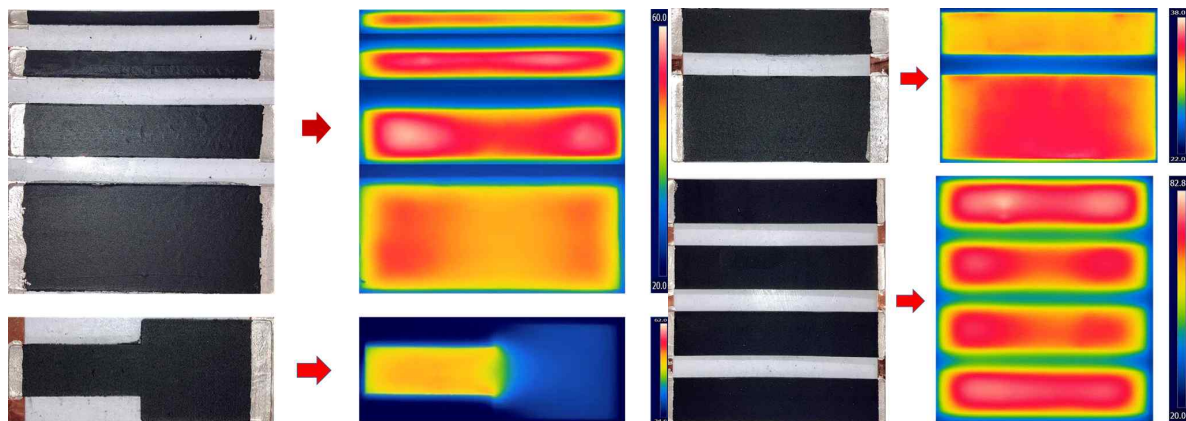


<블랙아이스 코팅제와 시스템 인터페이스 구성 및 발열 성능 평가 실험>

3.6 결과

3.6.1 규격 및 형식에 따른 발열 성능 분석

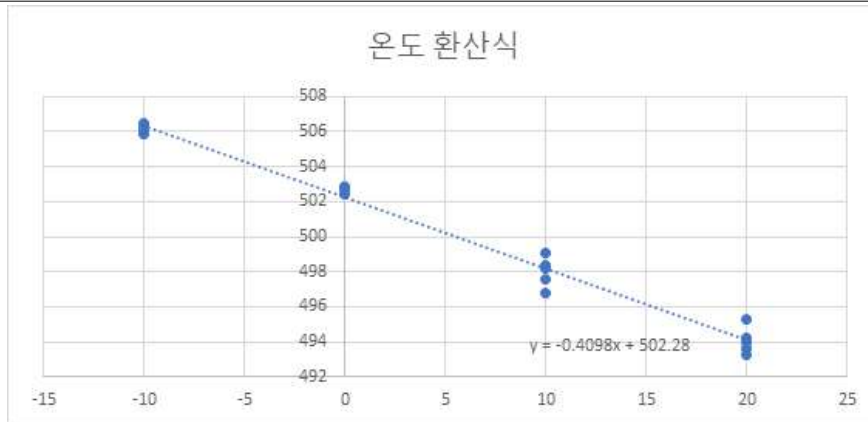
- 인가전압에 따른 코팅제의 발열 온도 데이터를 열화상카메라를 통해 수집한 결과 샘플 규격에 따른 발열 성능 시험 결과 폭이 너무 좁거나(5 mm) 너무 넓으면(40 mm) 고르지 않은 온도 상승 나타내며, 적절한 두께 선정이 필요하다고 판단됨
- 직렬연결 샘플 중 넓이가 변경되는 경우에 저항 변화로 인한 발열이 달라져 실제 적용에는 곤란함
- 병렬연결 방식의 샘플의 경우 각각의 샘플들이 고르게 발열하는 결과를 나타냈으며, 다양한 평가실험을 위해 직렬보다 병렬연결 방식이 유리한 결과를 확인
- 위의 결과를 종합하여 블랙아이스 코팅제의 실험실 규모 극한온도에서 발열 성능 평가 및 센싱 성능 측정을 위해 병렬 형식의 20 mm 폭이 가장 적합하다고 선정



<코팅제 구조에 따른 발열 실험 결과>

3.6.2 블랙아이스 코팅제 센싱 평가

- 항온항습기 내 환경 온도를 -10°C ~ 20°C 로 4시간 주기로 변화하는 동안 코팅제의 저항 값들은 측정하였으며, 계측 된 저항 값들을 기준으로 저항-온도 환산 식을 산정
- 추가로 측정 된 최신 저항데이터를 저항-온도 환산 식을 통해 온도를 도출하고 실제 온도와 오차를 평가함
- 평가 결과 최대오차 1.4°C 정도로 비교적 높은 정확도를 나타 내었으며, 코팅제 구성 최적화 및 고도화 등 추가 연구를 통해 실제 센서의 기능을 충분히 수행 할 수 있다고 판단됨



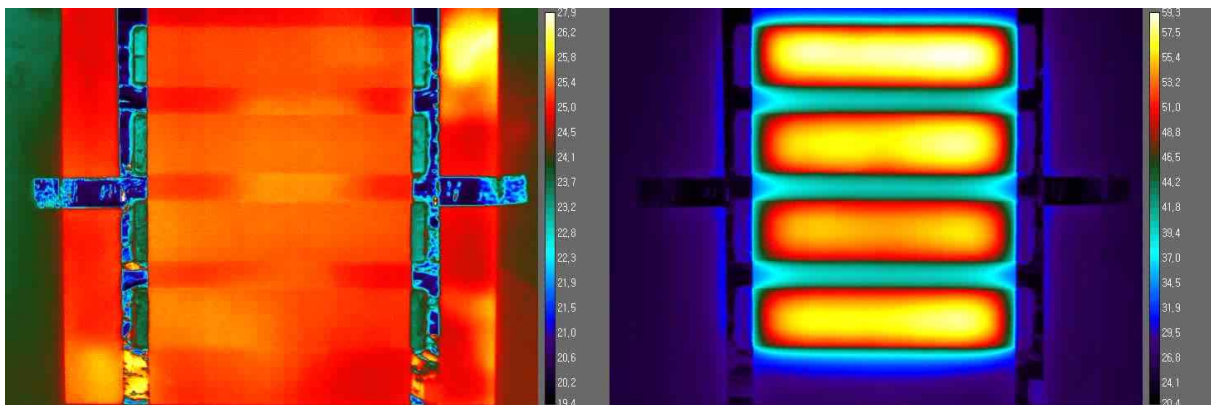
<코팅제 온도 변화에 따른 저항 값을 통한 환산 식 산정>

<코팅제 온도 센싱 성능 평가 결과>

실제 온도(°C)	계측 저항(Ω)	환산 온도(°C)	오차(°C)
20	493.50	21.42	-1.4
10	497.74	11.08	-1.1
0	501.81	1.14	-1.1
-10	505.79	-8.59	-1.4

3.6.3 선정된 샘플과 개발된 시스템 구성을 통한 동작 실험

- 실험 결과 IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템은 웹 환경을 통해서도 개발된 하드웨어를 통해 제어하고 발열 동작에 대해 블랙아이스 도로 코팅제가 원활하게 작동하는 것을 확인함
- 추후 실제 현장에 적용하기 위해서는 적용현장의 특성에 따라 코팅제와 시스템의 고도화 및 최적화가 필요할 것으로 판단됨



<발열을 통한 코팅제 표면 온도>

3.7 결론

- 본 연구에서는 블랙아이스 코팅제의 규격을 최적화 하여 개발된 전도성을 가진 탄소나노튜브-에폭시 코팅제의 온도 센싱 및 발열 성능 평가를 수행하였고, 제어 시스템을 통해 시험 작동을 확인함
- 선정된 코팅제의 온도 센싱 및 발열 성능 평가 실험 결과 정확도 및 성능 측면에서 우수한 결과를 도출하였고, 수행한 실험 결과를 한국건설생활환경시험연구원(KCL)의 시험검증을 통해 타당성을 확보함
- 이를 통해 본 연구의 블랙아이스 코팅제가 실용화 단계 진입을 위한 기반이 될 수 있다고 판단됨

4. 실험실 온도챔버 실험환경 묘사

4.1 연구 목표

- 온도챔버를 이용하여 겨울철 블랙아이스 환경 묘사
- 블랙아이스 생성에 따른 시스템 탐지 및 제거 능력 평가
- 아스팔트도로 위 탄소나노튜브 기반 코팅제 도포 및 시스템 설치

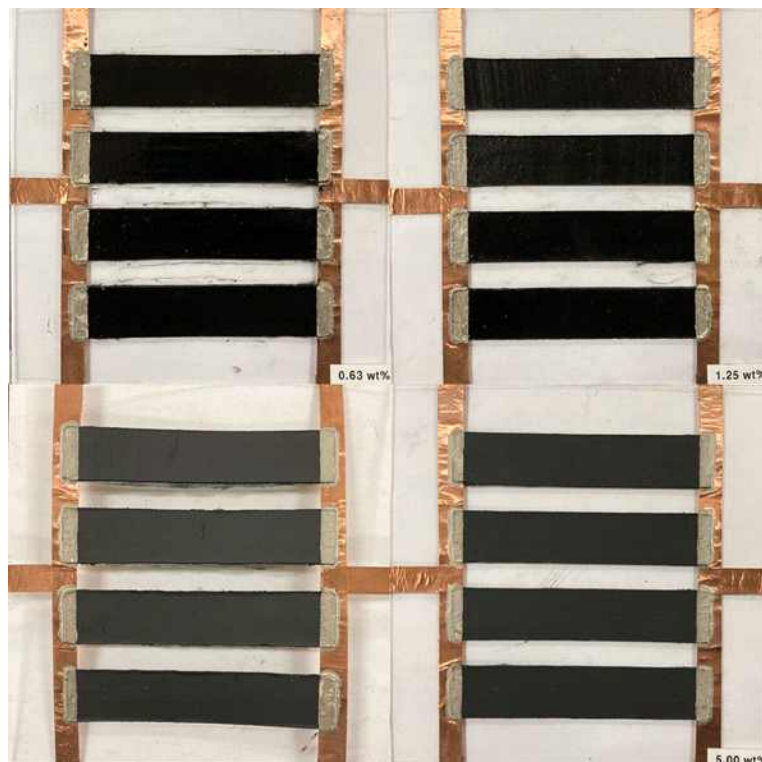
4.2 실험 조건

<실험조건>

샘플명	에폭시 (g)	분산제	두께(mm)	너비(mm)	길이(mm)	CNTs (wt.%)
		Acetone (g)				
EC0.63	20	50	1.2	20	100	0.63
EC1.25						1.25
EC2.50						2.50
EC5.00						5.00

4.3 샘플 제작

- 사이즈 : 표에 제공된 실험조건으로 제작
- 배합 : 표에 제공된 실험조건으로 제작



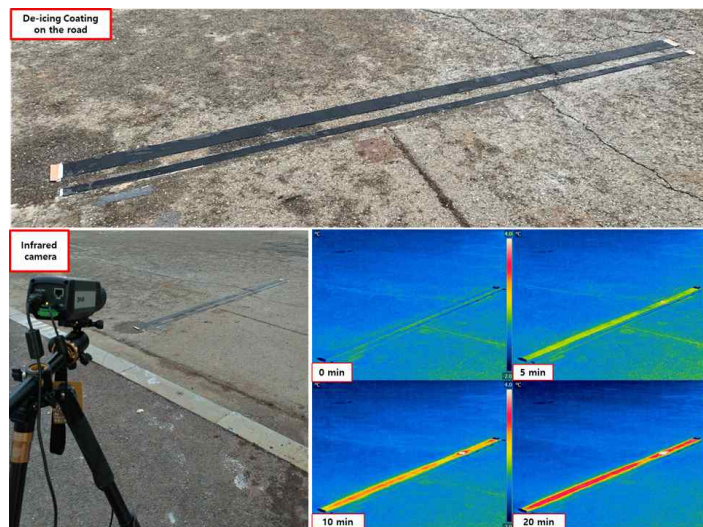
<탄소나노튜브-에폭시 코팅제 제작 샘플>

4.4 실험 방법

- 환경 챔버 내에 코팅 샘플 및 온도 측정을 위한 열화상 카메라 설치
- 샘플에 외부전압을 가하기 위해 파워 서플라이를 외부에 설치하고 내부의 코팅제 샘플과 연결
- 샘플 양 끝단에 크립을 이용하여 전극 고정
- 환경 챔버를 이용하여 0도, -10도, -20도의 대기 온도 설정
- 환경 온도에서 인가 전압에 따른 코팅제의 발열 온도 데이터를 각각 30분 씩 열화상카메라를 통해 수집



<발열 특성 측정 실험장치>

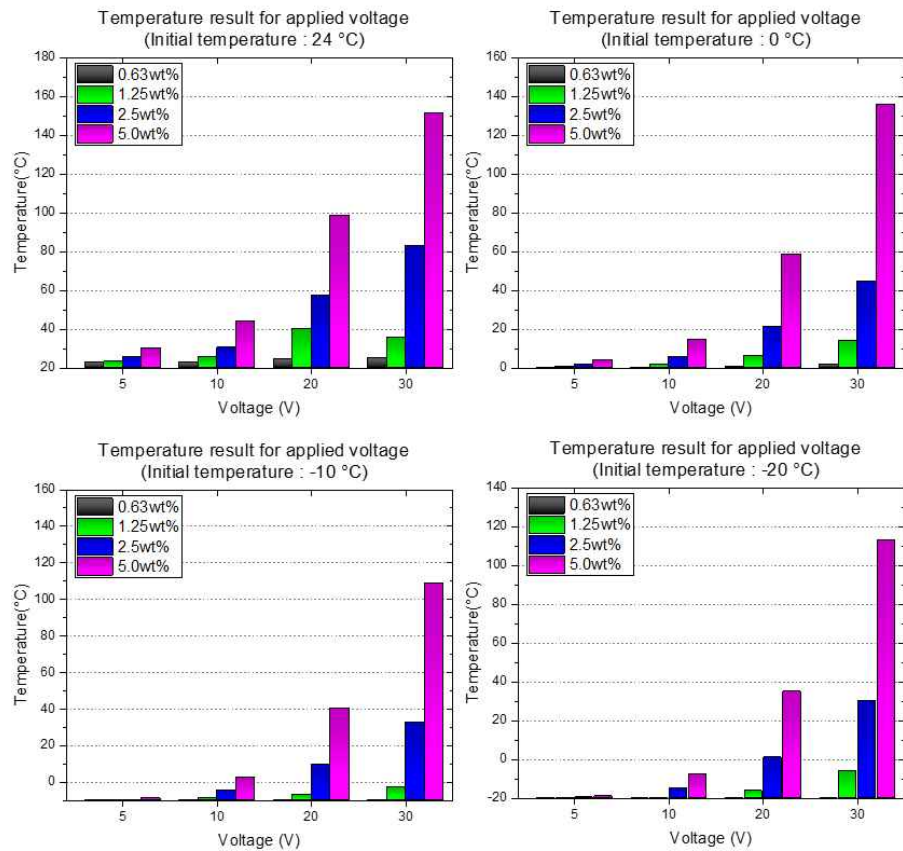


<도로 위 탄소나노튜브 코팅제 도포 및 발열성능 평가>

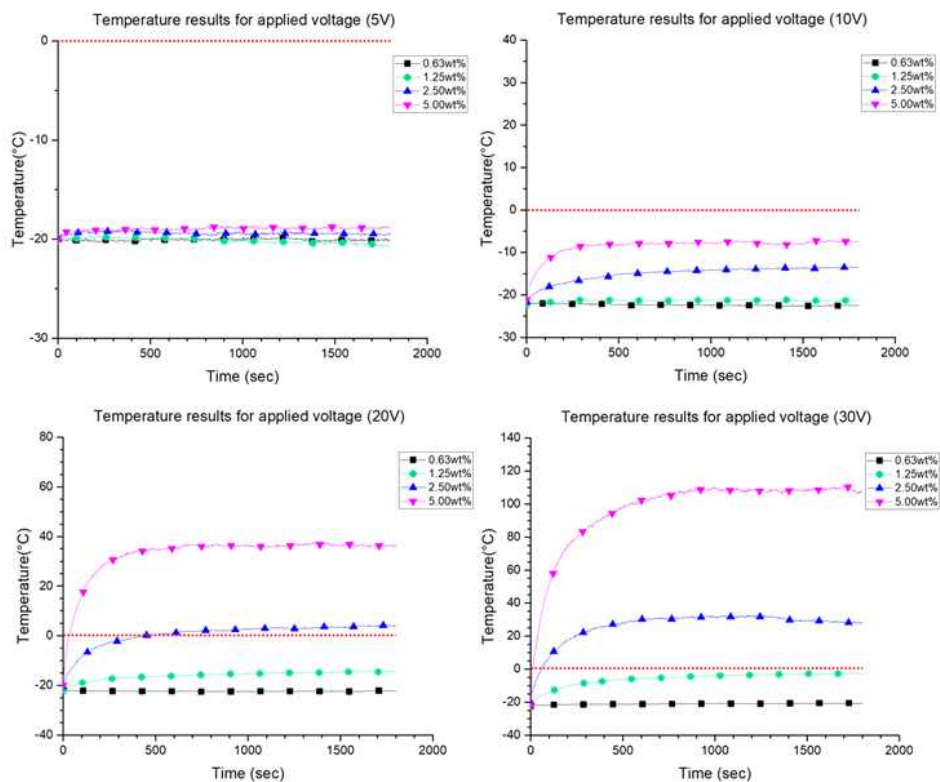
4.5 결과

- 상온, 0 °C, -10 °C, -20 °C에서 탄소나노튜브 함량 증가에 따라, 인가전압의 증가에 따라 코팅제의 발열 온도가 증가
- 코팅제 샘플 기준 10 V 이하의 인가전압은 영하 온도에서 충분한 발열 성능을 나타내지 않았으며, 이는 코팅제의 표면 온도를 상온까지 도달시키기 위해 일정이상의 전압이 필요하다는 것을 의미함
- 탄소나노튜브 함량 1.25 wt.% 이하의 코팅제 샘플은 영하 온도에서 영상온도까지 발열하지 못했으며, 이러한 문제를 해결하기 위해 더 높은 전압이 필요하다고 판단됨
- 영하 20 °C도에서 상온에 도달하기 위해서 본 코팅제 샘플 기준 2.5 wt.%이상의 탄소나노튜브 함량과 20 V 이상의 인가전압이 필요함
- 또한 상온까지의 도달 속도로 효율적인 블랙아이스 제거를 위해 실용화 단계에서 적절한 지점에 대한 추가연구가 필요하다고 판단됨

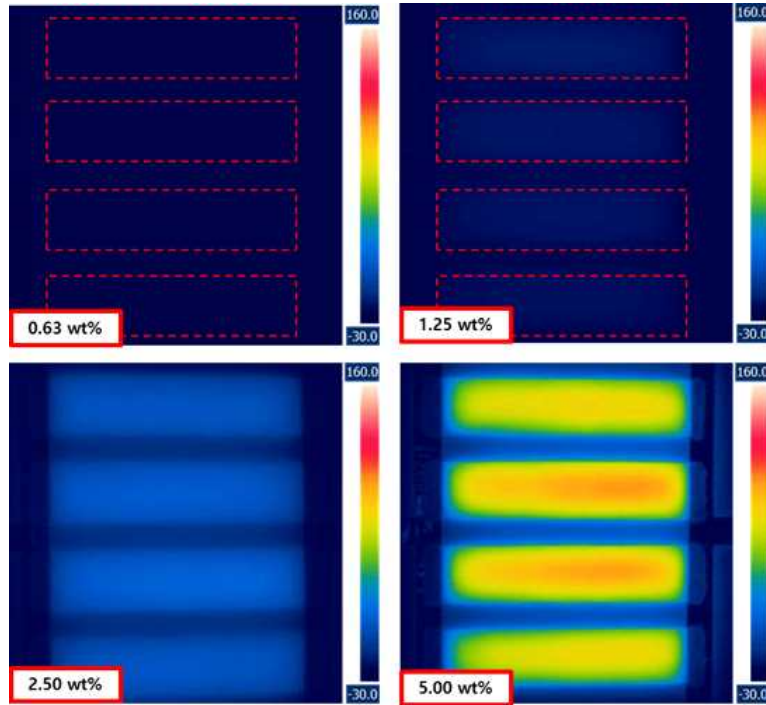
- 블랙아이스 코팅제 샘플이 -20°C 의 대기온도 속에서 나타난 발열 성능 결과를 고려하면 겨울 철 온도가 영하 10°C 내외인 우리나라의 실제 환경 조건에서 사용이 가능하다고 판단됨



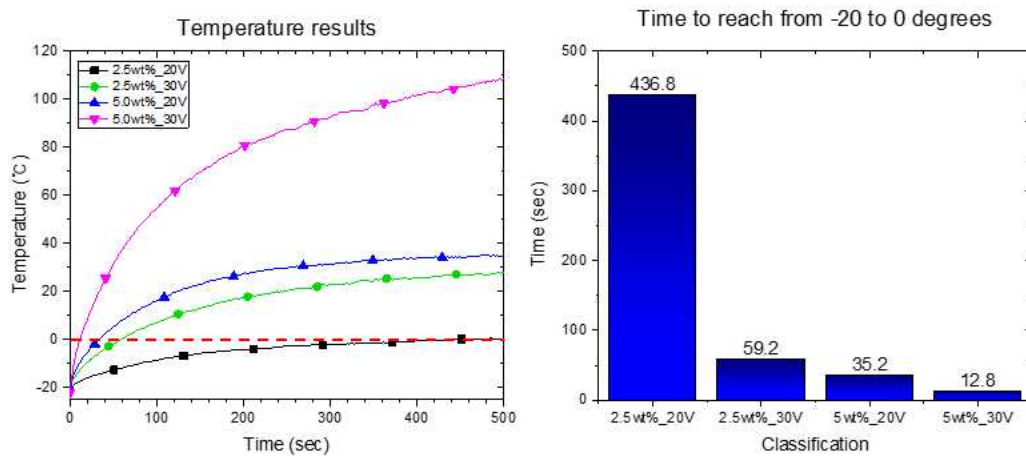
<환경 온도에 대한 코팅제의 발열 결과>



<영하 온도(-20°C)에서 탄소나노튜브 함량에 따른 인가전압에 대한 코팅제의 온도 변화>



<영하 온도(-20 °C)에서 탄소나노튜브 함량에 따른 블랙아이스 코팅제의 표면 온도>



<극한 온도(-20 °C)에서 인가전압에 대한 코팅제의 상온까지 발열 속도>

4.6 결론

- 본 연구에서는 블랙아이스 코팅제 샘플의 규격을 최적화하여 개발된 전도성을 가진 탄소나노튜브-에폭시 코팅제의 환경온도에 따른 발열특성 분석을 통해 도로 코팅제로서의 가능성에 대해 평가함
- 대기 온도, 탄소나노튜브의 함량, 인가전압에 대해 발열 결과가 차이가 발생하지만 일정량 이상의 탄소나노튜브 함량과 인가전압을 통해 영하 20도와 같은 극한 대기 환경에서 코팅제가 영상까지 발열하는 결과를 확인 할 수 있었으며, 이를 통해 실제 도로에 적용이 가능하다고 판단됨
- 일정 이하의 탄소나노튜브 함량의 경우 다소 높은 전압을 요구하며, 또한 너무 많은 탄소나노튜브 함량의 코팅제의 경우 탄소나노튜브 용량이 매우 증가함에 따라 비용적 문제가 생길 것으로, 실제 도로 코팅에 적용시 적절한 비율 도출에 관한 추가연구가 요구됨
- 본 실험의 인가전압과 탄소나노튜브 함량에 따른 발열 결과를 통해 블랙아이스 코팅제가 극한 온도에서 충분히 효과적인 발열 현상이 나타나는 것을 파악되었으며, 기존 현장에서 사용되고 있는 상업화된 단순 코팅제와 비교한다면 본 연구에서 개발된 탄소나노튜브-에폭시 코팅제는 자체 발열을 통해 낮은 전압으로도 짧은 시간에 영상 이상의 온도로 도달가능하다는 측면에서 향후 도로의 블랙아이스를 제거하는데 매우 적합한 미래 소재라고 판단됨

5. 블랙아이스 코팅제의 내구성능 평가

5.1 연구개요

- 도로의 블랙아이스 방지 코팅제 개발을 위해 극한 온도를 탐지 할 수 있는 온도 센서의 기능과 줄 히팅을 이용한 코팅 자체 발열 기능을 가지는 탄소나노튜브 코팅제를 제작
- 정밀한 블랙아이스 코팅제의 내마모성 성능 평가를 위해 블랙아이스 코팅의 샘플을 제작하여 실험실 수준 마모시험을 통해 블랙아이스 코팅제 내구성을 분석
- 코팅제를 시험 도로에 설치할 하여 차량 이동에 대한 코팅제의 마모에 따른 저항변화를 측정을 통해 적용성을 분석
- 도로 적용성 평가를 위해 열팽창실험을 통해 코팅제의 온도에 따른 변형특성을 분석



<탄소나노튜브 코팅제 도로 시험 적용>

5.2 연구 범위

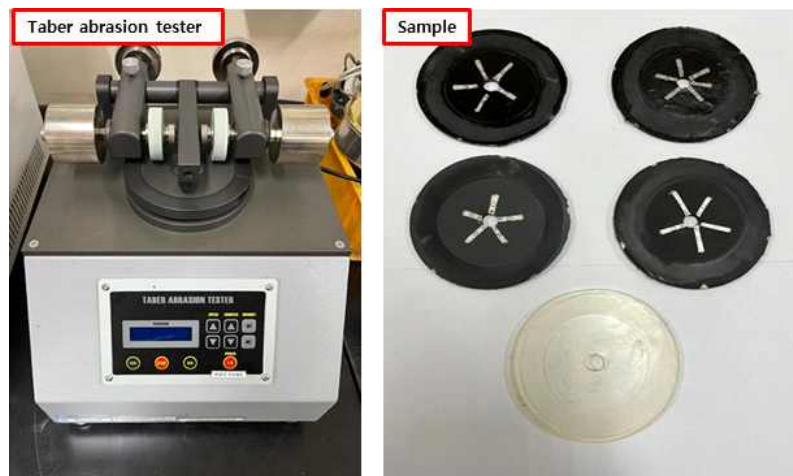
- 탄소나노튜브와 에폭시로 구성된 전도성 코팅재료 제작
- 제작된 샘플을 taber 마모시험을 통해 내마모성 평가
- 도로에 설치 된 블랙아이스 코팅제의 저항 변화 분석
- 열팽창실험을 통한 온도변화에 따른 블랙아이스 코팅제의 변형특성 분석

5.3 코팅제 제작

<실험조건>

샘플명	에폭시 (g)	분산제	두께(mm)	지름(mm)	CNTs (wt.%)
		Acetone (g)			
AEP0	20	50	10	100	0
AEC0.63					0.63
AEC1.25					1.25
AEC2.50					2.50
AEC5.00					5.00

- 사이즈 : 표에 제공된 실험조건으로 제작
- 배합 : 표에 제공된 실험조건으로 제작



<내구성 평가를 위한 블랙아이스 코팅제의 마모성능 시험>

5.4 코팅제 제작

5.4.1 저항 측정

- 디지털 멀티미터를 통해 샘플의 초기 저항을 측정
- 측정 프로브와 샘플 사이의 접촉저항을 최소화하기 위해 샘플의 양 극단에 전도성 실버페인트 도포처리

5.4.2 샘플의 마모 특성 측정

- 각 샘플의 초기 무게를 측정
- Taber 마모 시험기를 이용하여 샘플의 마모 시험을 수행
- 그라인더 휠(CS-17)을 통해 샘플을 마모시키고 2,000회(총 10,000회)마다 샘플의 무게 및 저항을 측정 실시

5.4.3 시험 설치된 블랙아이스 코팅제의 저항 변화

- 도로 위에 코팅제 설치 후 초기 저항 측정
- 측정 시간에 따른 이동 차량 측정 후 산출 기간 경과 후 저항 측정을 통해 차량이동, 기상, 온도변화에 따른 블랙아이스 코팅제의 저항 변화 분석

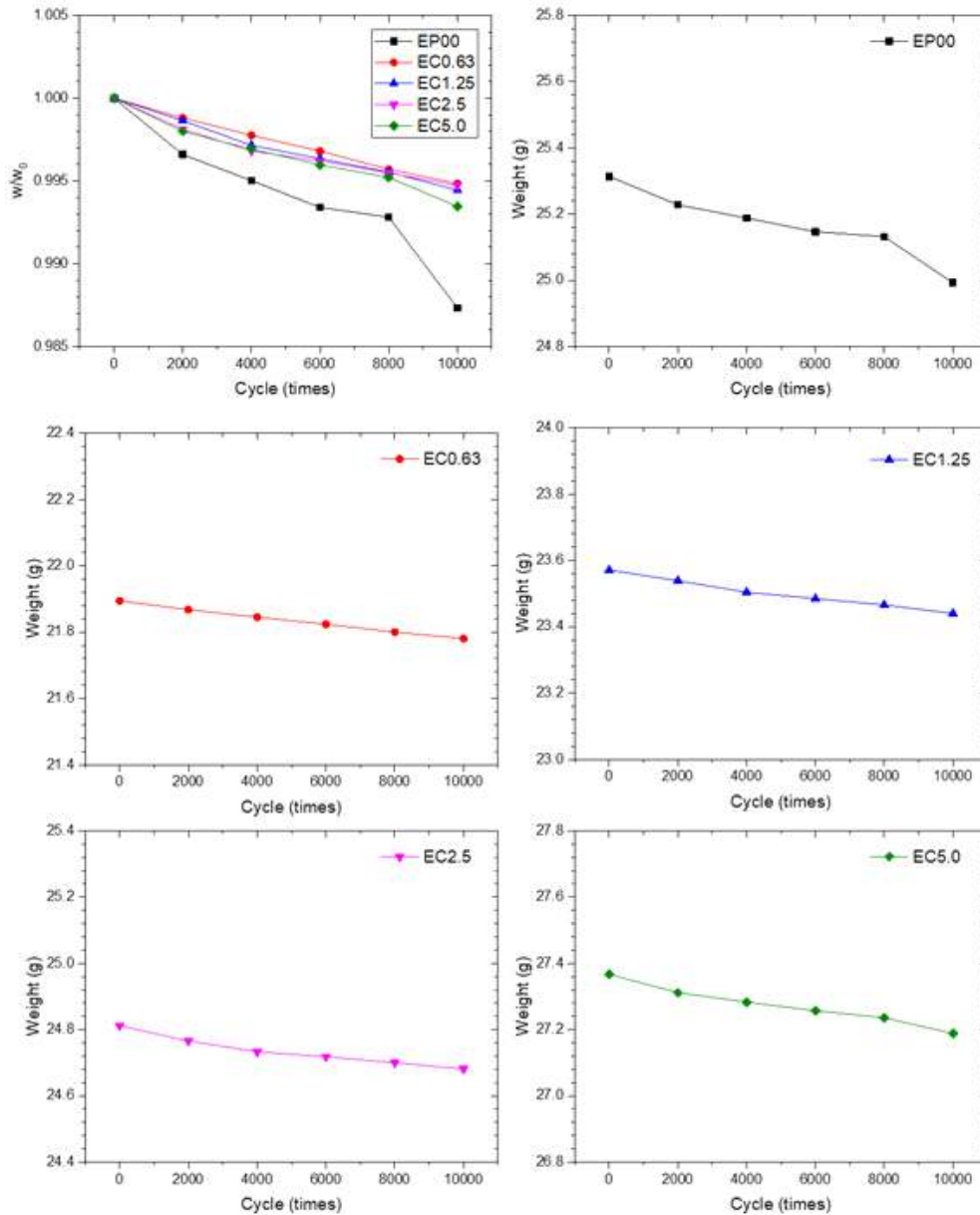
5.4.4 열팽창실험을 통한 온도변화에 따른 블랙아이스 코팅제의 변형특성 분석

- 개발 된 코팅제 샘플 제작
- 초기 샘플의 규격 측정
- 열팽창 시험기(NETZSCH TMA 402F3)를 통해 -10 °C ~ 100 °C 온도 변화에 따른 변형 정도를 측정

5.5 결과

5.5.1 마모 시험에 따른 탄소나노튜브-에폭시 복합체의 무게 변화

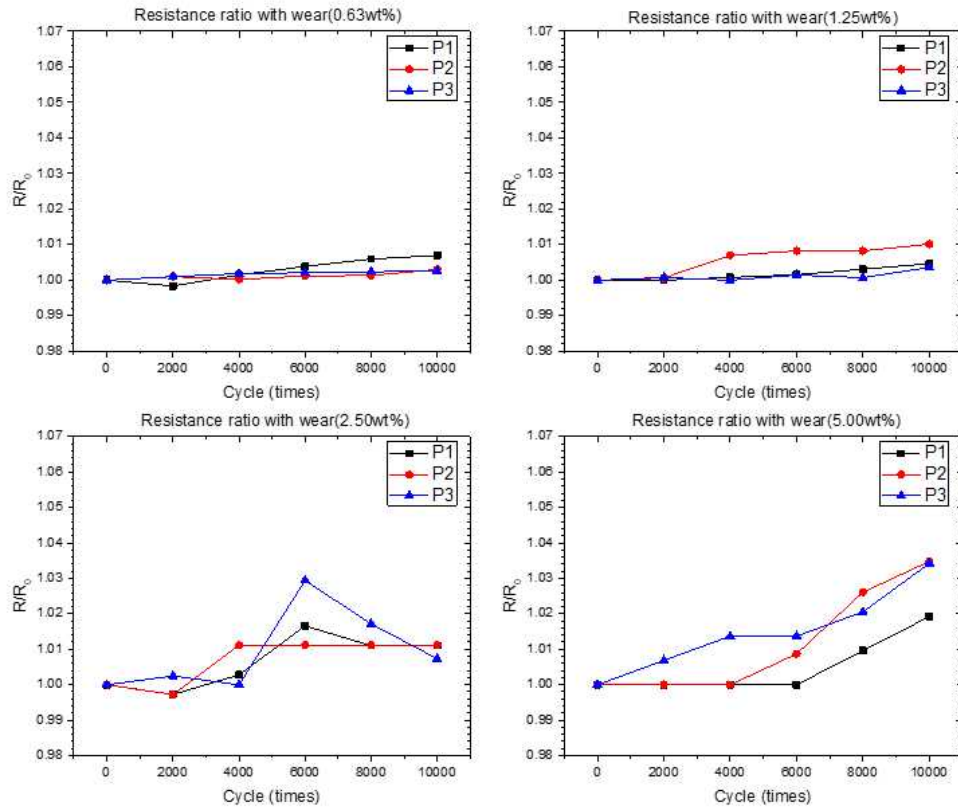
- 2,000회씩 총 10,000회 마모까지 블랙아이스 코팅제의 무게가 지속적으로 감소
- 탄소나노튜브가 포함되지 않은 순수 에폭시에 비해 탄소나노튜브가 포함된 샘플의 무게 감소량이 적음
- 탄소나노튜브-에폭시 복합체 샘플의 무게 감소율이 10,000회 기준 0.5% 이내로 이것은 우리나라의 실제 도로 조건에서 충분히 적용이 가능하다고 판단됨



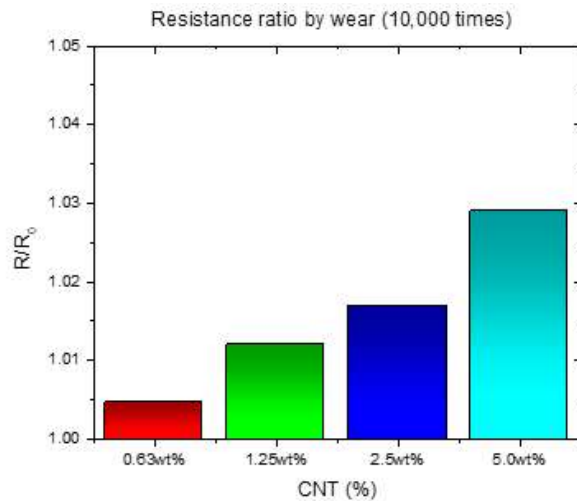
<마모 횟수에 따른 블랙아이스 코팅제 마모 특성>

5.5.2 마모에 따른 탄소나노튜브-에폭시 복합체의 저항변화율

- 본 연구에서는 탄소나노튜브 함량과 샘플의 규격을 달리한 경우를 비교
- 탄소나노튜브 함량에 따른 탄소나노튜브-에폭시 복합체 샘플 지정된 포인트에서의 저항 변화율 결과, 전체적으로 마모에 따른 저항 변화가 매우 작으며 함량이 높아질수록 미세한 차이로 저항 변화율이 큼
- 가장 저항 변화가 심한 샘플은 5.0 wt%의 샘플이었으며, 10000회 마모시험 기준 초기 저항 대비 약 3%정도 상승
- 이는 0.63 wt% 대비 약 2% 이상 중량 감소에 따른 저항 변화이며, 앞선 실험 결과에서 확인 가능 하듯이 실제 블랙아이스 코팅제로 적용이 가능한 탄소나노튜브의 함량은 약 1.25 wt%이상으로 적절한 탄소나노튜브 함량을 갖는 모든 블랙아이스 코팅제는 내마모성이 높아 실제 환경에 적용 가능함



<마모 횟수에 따른 블랙아이스 코팅제 저항 변화>



<중량 감소에 대한 블랙아이스 코팅제 저항 변화율>

5.5.3 시험 설치된 블랙아이스 코팅제의 저항 변화

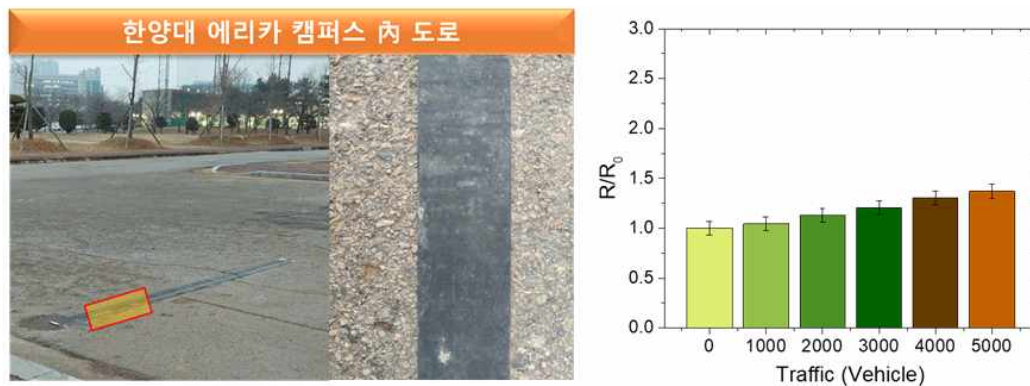


<도로 위 제작 된 시험 코팅제>

<코팅제 규격 및 저항 변화 결과>

샘플명	두께 (mm)	폭 (mm)	길이 (mm)	CNTs (wt.%)	초기 저항 (Ω)	기온 변화에 따른 저항 (Ω)
EC01	0.87	40	3000	5.00	1946.1	1984.9
EC02	0.87	80	3000	5.00	973.3	983.0

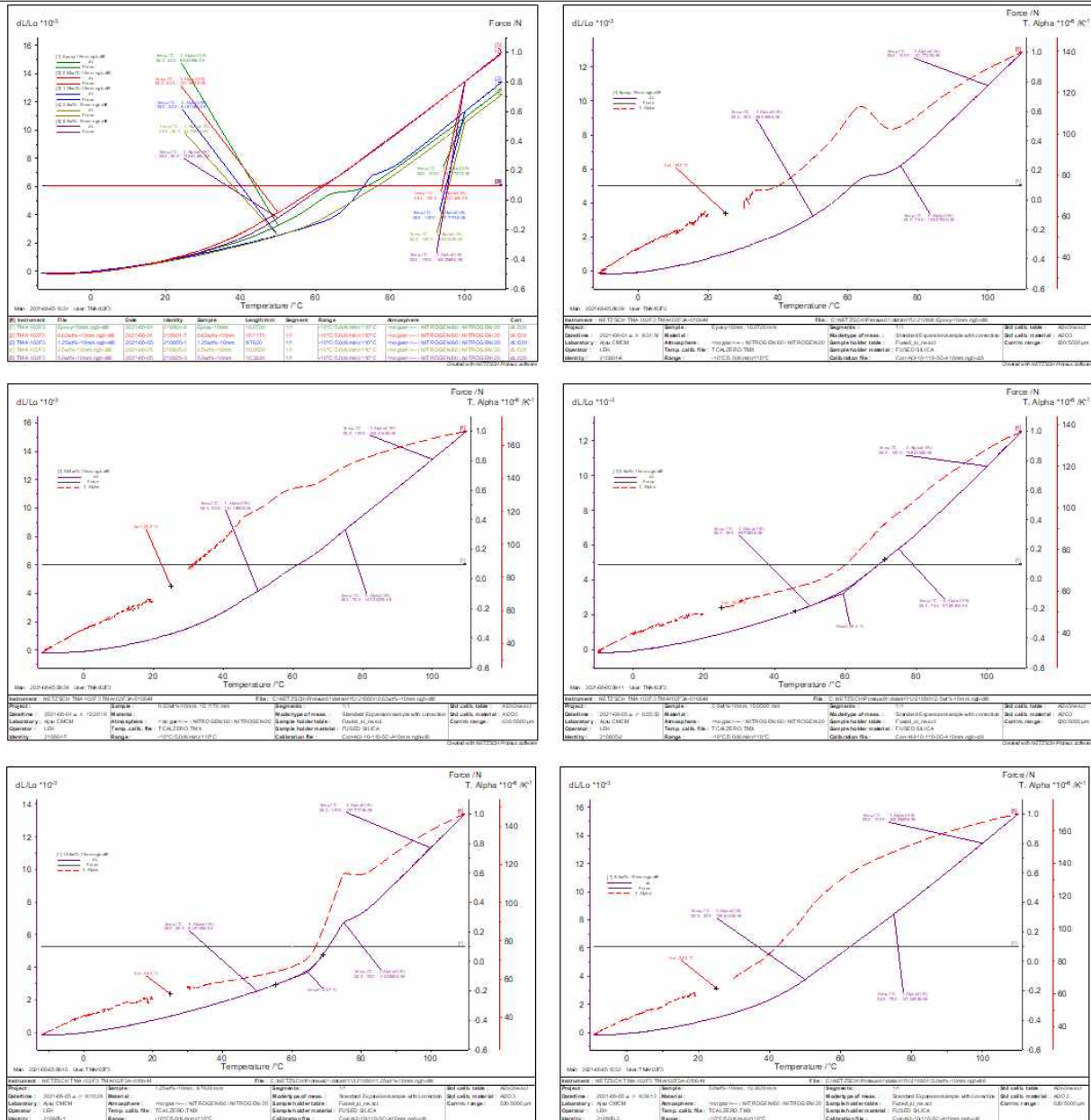
- 본 연구에서는 도로에 탄소나노튜브의 규격을 달리한 시험 샘플의 시간의 경과에 따른 저항 변화를 비교
- 기상, 온도에 따른 저항 변화는 두 샘플 모두 증가하였고, 크기는 약 1% 정도로 나타남
- 차량 이동에 따른 저항은 모두 증가하였고, 최대 약 42 % 정도로 나타남
- 이는 실험실 규모의 실험 결과 보다 크게 나타났으며, 고도화를 통해 실제 도로 코팅제로서 적용이 가능할 것으로 판단됨



<블랙아이스 제거 코팅제의 차량 이동에 따른 내구성 평가>

5.5.4 열팽창실험을 통한 온도변화에 따른 블랙아이스 코팅제의 변형특성 분석

- 본 연구에서는 열팽창실험을 통한 온도변화에 따른 블랙아이스 코팅제의 변형특성을 분석
- 탄소나노튜브의 함량에 따른 시편을 제작하여 열팽창 시험기(NETZSCH TMA 402F3)를 통해 $-10^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 온도 변화에 따른 변형 정도를 측정
- 블랙아이스 코팅제 열팽창실험 결과 코팅제의 열팽창계수는 $0.13 \times 10^{-5} (1/\text{K}) \sim 0.16 \times 10^{-5} (1/\text{K})$ 로, 도로 주재료인 콘크리트 $1.0 \times 10^{-5} (1/\text{K})$ 보다는 다소 낮으나 아스팔트 $52.4 \times 10^{-6} (1/\text{K})$ 보다는 높게 나타남



<-10℃~100℃ 온도 변화에 따른 코팅제 변형 및 열팽창 계수>

5.6 결론

- 본 연구에서는 복합체 샘플의 함량을 최적화 하여 개발된 전도성을 가진 탄소나노튜브-에폭시 복합체의 내마모성 특성을 통해 도로 코팅제로서의 가능성에 대해 확인
- 마모에 대한 무게 변화로 인한 저항변화율이 존재하지만 실제 환경에 적용하기에는 충분히 낮은 최고·저의 차이를 나타내며 마모도 역시 낮은 차이를 나타냄
- 탄소나노튜브의 함량이 높을수록 저항 변화가 높았으며, 이는 마모시험에 따른 코팅제의 내의 탄소나노튜브가 농도가 높을수록 손상에 대한 절대손실이 커지기 때문이며, 이러한 경우 탄소나노튜브 용량이 매우 증가함에 따라 비용적 문제가 생길 것으로 판단됨
- 온도변화에 따른 블랙아이스 코팅제의 변형특성을 분석을 통해 실제로 적용에 대한 가능성을 확인하였고, 적용성 및 기술의 고도화를 통해 실제로 적용이 충분이 가능하다고 판단됨
- 기존 현장에서 사용되고 있는 상업화된 단순 코팅제와 비교한다면 본 연구에서 개발된 블랙아이스 코팅제는 자체발열을 통해 낮은 전압으로도 짧은 시간에 영상 이상의 온도로 도달가능하며, 내구성 측면으로도 우수하여 향후 콘크리트 도로의 블랙아이스를 제거하는데 매우 적합한 미래 소재임
- 추가적으로 전문가 자문 평가를 통해 차량이동에 따른 시험체 내구성능 및 열팽창특성평가 시험의 적정성 및 결과의 타당성을 확보함

■ IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 설계

1. 능동형 블랙아이스탐지 및 제거 시스템 요구사항 도출

1.1 업무 개요

1.1.1 요구 사항 개요

- 탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템은 탄소나노튜브 복합체를 이용하여 블랙아이스 탐지 및 제거를 목적으로 하는 시스템이며, 이를 위한 주요 개발 범위는 다음과 같음
- 1) 『탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템』을 위한 핵심기능 요구사항 도출
- 2) 『탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템』을 위한 사용자 기능요구사항 정의
- 3) 『탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템』을 위한 사용자 요구사항 정의
- 본 단계에서는 기능 요구사항의 개념을 반영하여 사용자 요구사항을 취합하여 요구사항별로 상세하게 기술을 함을 목적으로 작성함
- 요구사항 기술서는 프로그램의 기능 요구 사항 별로 기능을 상세하게 기술하여 효율적으로 개발을 수행하는 것을 지원하는 문서이며, “요구사항 분석서”는 일차적으로는 실제 구축을 위한 설계 및 구축 가능성/난이도를 염두에 두지는 않고 작성하며, 체계 설계 및 구현 단계에서 보여지는 산출물의 구체적인 모습은 이후의 문서에서 구체화하였음
- 요구사항은 CFR과 UFR로 나누어서 기술하며, CFR과 UFR을 종합하여 요구사항으로 정리하는 절차로 수행됨
- 본 문서는 『탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템』을 효율적으로 개발하기 위하여 기능 요구사항의 개념을 반영하여 핵심기능, 사용자 기능, 사용자 요구사항 별로 상세하게 기술하기 위하여 작성됨
- 상세하게 기술된 본 문서를 기반으로 『탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템』을 설계함

1.2 핵심 기능 요구사항 (CFR: Critical Functional Requirement) 모음

1.2.1 CFR 정의

- 작성 목적

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

- 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 반영하여 작성한다.
- 4) 설계 WBS: 해당된다고 여겨지는 설계 WBS의 Activity를 찾아서 넣는다. 단, WBS에 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

<CFR ID 정의>

ID	요구사항명	내용	시스템
CFR-001	외부대기 환경의 온도 및 습도측정	외부 대기의 기상온도 및 습도를 외부 센서를 통해 측정	센서노드
CFR-002	도로노면(표면)의 온도 측정	도로 노면(표면)의 저항값을 환경알고리즘을 통해 온도값으로 측정	센서노드
CFR-003	CNT 제어(제어보드-> 릴레이모듈)	도로 노면의 탄소나노튜브발열체를 제어보드를 통해 릴레이모듈로 제어	제어보드
CFR-004	데이터전송(센서노드->데이터로거)	외부 대기의 온·습도 및 도로노면(표면)의 온도 등 센서노드에서 측정하거나 계산된 정보를 데이터로거에 전송함	제어보드
CFR-005	데이터연결(센서노드->스마트폰 App/ Web)	센서노드에서 측정 및 계산된 정보를 스마트폰 또는 웹으로 전송한다.	데이터로거
CFR-006	데이터전송(데이터로거->SHM DB)	데이터로거에서 수신된 정보를 WIFI 또는 무선데이터를 통해 DB에 전송함	데이터로거
CFR-101	스마트폰 App 사용자관리	사용자 로그인 및 사용자정보관리	스마트폰 App
CFR-102	Dash 보드 (스마트폰 App)	전체 계측현황 및 현재 동작 상황을 기사화할 수 있는 대시보드	스마트폰 App
CFR-103	센서데이터현황(스마트폰 App)	스마트폰 App에서 온·습도데이터 현황을 기사화	스마트폰 App
CFR-104	CNT 발열체 제어설정 (스마트폰 App)	탄소나노튜브발열체 제어용 온도 설정	스마트폰 App
CFR-105	사용자관리 (Web)	사용자 로그인 및 사용자정보관리	Web 기반
CFR-106	Dash 보드 (Web)	전체 계측현황 및 현재 동작 상황을 기사화할 수 있는 대시 보드	Web 기반
CFR-107	CNT 발열체 제어설정 및 알림 (Web)	탄소나노튜브 발열체 제어 설정 및 알림	Web 기반
CFR-108	과거데이터조회(Web)	과거 계측데이터 조회	Web 기반

-
- 1) 외부 대기의 온·습도 계측을 위해 매핑된 위치에 측정센서를 설치함
 - 2) DC 12V 전원을 인가하여 상시전원을 공급하도록 함
 - 3) 전원 On버튼을 눌러 시스템이 동작하며 Off버튼을 눌러 시스템을 정지함
 - 4) 제품이 동작하면서 주변환경정보를 센싱한 후 해당위치 대기온도, 습도값을 획득함
 - 5) 획득된 정보를 시리얼통신으로 데이터로거에 전송하여 데이터를 수집함

- 노면센서

- 1) 도로 노면의 표면 온도 계측을 위해 매핑된 위치에 탄소나노튜브를 도포함
- 2) DC 220V 전원을 연결하여 외부의 상시전원을 공급함
- 3) 센서로드에 연결하여 제품이 동작하면서 측정된 도로노면(표면)의 저항값을 획득하고 이를 환경알고리즘을 통해 도로노면(표면)의 온도값으로 변환하여 이를 저장함
- 4) 계산된 온도값 데이터를 데이터로거에 시리얼통신을 통해 전송함

- 데이터로거

- 1) 센서노드와 시리얼 통신을 고려하여 적합한 지점에 설치함
- 2) 데이터로거 작동 전원인 5V 전원을 연결하여 상시전원을 공급함
- 3) 전원버튼(On)을 눌러 시스템이 동작하도록 Off버튼을 눌러 시스템을 정지 (또는 리셋)함
- 4) 센서노드에서 전송된 환경 온습도 센싱 데이터값을 취합하여 센서노드 메모리에 일시 저장된 데이터 값을 시리얼 통신으로 이를 데이터로거의 메모리에 전송함
- 5) Wi-Fi 또는 데이터 통신으로 연결된 SHM DB에 데이터를 전송함

- CNT 조정

- 1) 기상청의 기상 예보 데이터와 센서 노드(외부 환경센서, 도로노면의 센서)로 부터 데이터를 취합하여 블랙아이스 생성조건이 충족되면 탄소나노튜브 발열체 제어 여부를 결정함
- 2) DC 220V외부전원을 연결하여 상시전원을 공급함
- 3) 데이터로거에 제어보드가 연결되고 제어보드에는 릴레이 모듈과 탄소나노튜브 발열체를 전원선(+)으로 연결함
- 4) 블랙아이스 생성 조건이 되면 데이터로거의 제어 신호가 제어보드를 통해 릴레이 모듈을 거쳐 탄소나노튜브발열체에 전원을 인가하여 일정시간 동안 발열하도록 함
- 5) 적정온도에 도달한 상태가 되면 도로 노면(표면)의 온도 센서를 통해 제어보드를 거쳐 데이터로거에 센싱값이 전달되며 전달된 데이터를 분석하여 연결된 제어보드를 통해 릴레이 모듈의 전원을 차단하여 더 이상 탄소나노튜브발열체가 발열되지 않도록 함

2.2.3 하드웨어 설계

- 정의

- ✓ 본 문서는 요구사항분석서를 통해 도출 및 정제된 『 탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 』 중 하드웨어 상세설계에 대한 기능구현을 위한 것임
- ✓ 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 함

<하드웨어 구성>

ID	요구사항 명	내용
CFR-001	외부 대기 환경의 온도 및 습도 측정	외부 대기 환경의 온도 및 습도를 측정
CFR-002	도로노면(표면)의 저항 측정	도로 노면(표면)의 저항값을 측정
CFR-003	변형률 계산	도로 노면(표면)의 측정된 환경저항 값으로 변형률을 통해 온도 계산
CFR-004	데이터전송(센서노드->데이터로거)	센서노드에서 측정 및 계산된 정보를 데이터로거에 전송함
CFR-005	CNT 제어(제어보드-> 릴레이모듈 -> CNT)	데이터로거의 데이터를 받아 제어보드를 통해 릴레이모듈에서 탄소나노튜브발열체를 제어함
CFR-006	데이터전송(데이터로거<->SHM DB)	센서노드에서 수신된 정보를 WiFi 또는 데이터통신을 통해 SHM DB에 전송하거나 외부의 기상정보 데이터를 받고 이를 App 또는 Web에서 전송

- 작성 목적

- ✓ 기능요구사항을 사용자가 활용할 수 있도록 상세설계하여 개발품목에 대한 개발자의 이해를 돕고 효율적으로 프로그램을 개발할 수 있는 환경을 제공함

- 작성 방법

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

3. 소프트웨어 설계

3.1 업무 개요

- 『 탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 』 탄소나노튜브 복합체를 이용하여 블랙아이스 탐지 및 제거를 목적으로 하는 시스템이며, 이를 위한 주요 개발 범위는 다음과 같음
 - 1) 『 탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템』을 위한 핵심기능 요구사항 도출
 - 2) 『 탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템』을 위한 사용자 기능요구사항 정의
 - 3) 『 탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템』을 위한 사용자 요구사항 정의
- 본 단계에서는 기능 요구사항의 개념을 반영하여 사용자 요구사항을 취합하여 요구 사항 별로 상세하게 기술을 함을 목적으로 작성
- 요구사항 기술서는 프로그램의 기능 요구 사항 별로 기능을 상세하게 기술하여 효율적으로 개발을 수행하는 것을 지원하는 문서이고, “요구사항 분석서”는 일차적으로는 실제 구축을 위한 설계 및 구축 가능성/난이도를 염두에 두지는 않고 작성하며, 체계 설계 및 구현 단계에서 보여지는 산출물의 구체적인 모습은 이후의 문서에서 구체화함
- 요구사항은 CFR과 UFR로 나누어서 기술하며, CFR과 UFR을 종합하여 요구사항으로 정리하는

절차로 수행됨

- 본 문서는 『 탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 』을 효율적으로 개발하기 위하여 기능 요구사항의 개념을 반영하여 핵심기능, 사용자 기능, 사용자 요구사항 별로 상세하게 기술하기 위하여 작성되었음
- 상세하게 기술된 본 문서를 기반으로 『 탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 』을 설계함

3.2 상세설계

3.2.1 상세설계 정의

- 본 문서는 요구사항분석서를 통해 도출 및 정제된 『 탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 』 중 소프트웨어(안드로이드 및 Web)개발에 대해 구현되는 기능을 기술
- 본 문서에서 명시되지 않은 항목이나 보완 및 추가가 요구되는 항목은 개발자와 기획자의 논의를 거쳐 개발여부를 결정하여야 하며, 소프트웨어의 개발과 동시에 관련 문서의 보완 또한 수행되어야 함

<소프트웨어 요구사항>

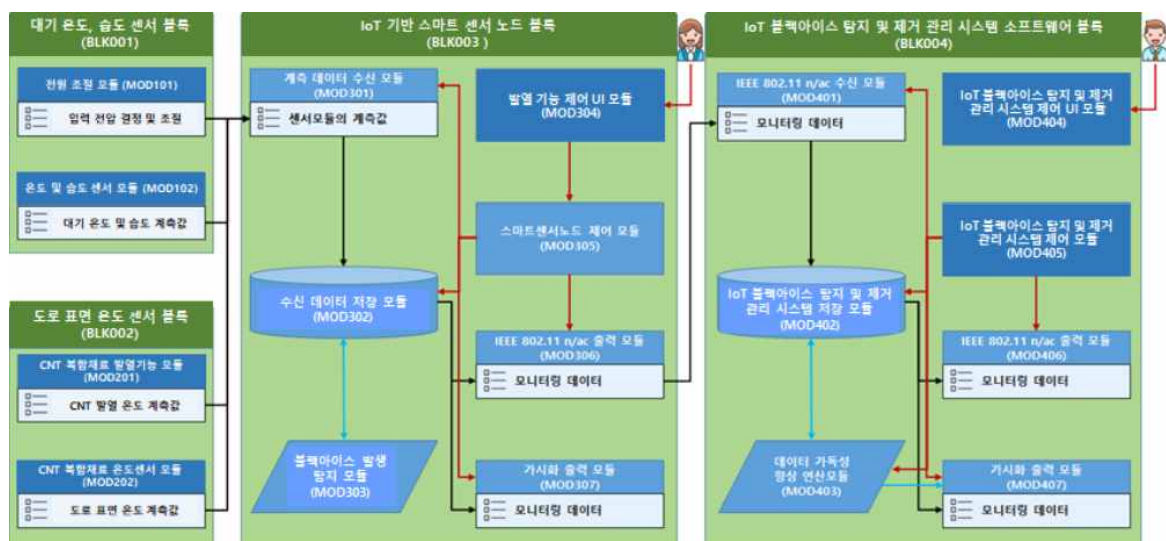
ID	요구사항명	내용
CFR-101	스마트폰 App 사용자관리	사용자 로그인 및 사용자정보관리
CFR-102	Dash 보드 (스마트폰 App)	전체 계측현황 및 현재 동작 상황을 기사화할 수 있는 Dash 보드
CFR-103	센서데이터현황 (스마트폰 App)	스마트폰 App 에서 온·습도데이터 현황을 가시화
CFR-104	CNT 발열체 제어설정 (스마트폰 App)	탄소나노튜브발열체 제어용 온도 설정
CFR-105	사용자관리 (Web)	사용자 로그인 및 사용자정보관리
CFR-106	Dash 보드 (Web)	전체 계측현황 및 현재 동작 상황을 기사화할 수 있는 Dash 보드
CFR-107	CNT 발열체 제어 설정 및 알림 (Web)	CNT 발열체 제어 설정 및 알림
CFR-108	과거데이터조회 (Web)	과거 계측데이터 조회
CFR-109	데이터로거관리기능 (Web)	데이터로거관리기능

3.2.2 상세설계 작성

- 기능요구사항을 사용자가 활용할 수 있도록 상세설계하여 개발품목에 대한 개발자의 이해를 돕고 효율적으로 프로그램을 개발할 수 있는 환경을 제공함
- 작성 방법
 - 1) 구체화된 내용을 기반으로 개발 및 연구 실무자들과 협의하여 지속적인 수정·보완이 수행되어야 함
 - 2) 그림과 문자를 기반으로 User Interface를 구체화하고 그에 대한 설명을 문장으로 기술함
 - 3) 구체화를 위해 사용된 화면의 구성이나 이미지는 User Interface를 효율적으로 설명하기 위한 것으로 보다 가독성 높은 화면구성이나 이미지로 교체할 수 있음
 - 4) 기능을 통해 제공되는 보고서의 양식(형태, 구성요소)은 변경될 수 있으므로 본 설계문서에서는 정의하지 않음
 - 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 가능함

3.2.3 시스템 구성도

- 전체 시스템은 대기온도 습도 센서 블록, 도로표면온도 센서 블록, 스마트 센서노드 블록, 블랙아이스 탐지 및 제거 블록, CNT폴리머발열체, 데이터로거, 스마트폰App및 WEB으로 구성됨
- 대기 온도 습도 센서블록: 외부 주변 대기의 온도, 습도를 온습도 센서를 통해 측정
- 도로표면온도센서 블록: 일반적으로 탄소나노폴리머로 구성되어 양측의 전극 단자로부터 전원이 연결되어 측정된 저항값을 환경변수 알고리즘을 통해 온도값으로 변형하여 계산된 값은 센서노드의 메모리에 일시적으로 저장
- 스마트센서노드 블록: 대기온습도 센서 블록에서 측정된 온습도 데이터값과 도로표면온도센서로부터 측정된 온도값이 저장된 메모리에서 저장값을 불러들여 일시적으로 메모리에 저장하고 시리얼통신을 통해 데이터로거로 실시간 전송
- 블랙아이스 탐지 및 제거 블록: 스마트센서노드로부터 측정된 계측값과 기상청의 날씨 정보를 바탕으로 판단하여 CNT발열체를 제어(ON/OFF)
- 데이터로거: 다수의 센서노드로부터 수신된 데이터를 SHM 서버로 전송하는 역할을 수행함
- SHM 데이터베이스: My-SQL DB와 윈도우 서버를 사용하는 SHM운영서버
- 스마트폰 App: 데이터로거와 Wi-Fi통신 또는 데이터 통신을 통해 데이터를 전송하며, 센서 측정에 필요한 설정 값을 전달하고 CNT 발열체를 제어하거나 SHM DB에서 수신된 계측정보를 App에서 가시화함
- Web 관리프로그램: SHM DB와 송수신을 통해 계측센서의 계측상황, CNT 발열체 동작상황을 대쉬보드에 표현하고 전체시스템을 제어함



<소프트웨어 구성도>

4. IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 개발

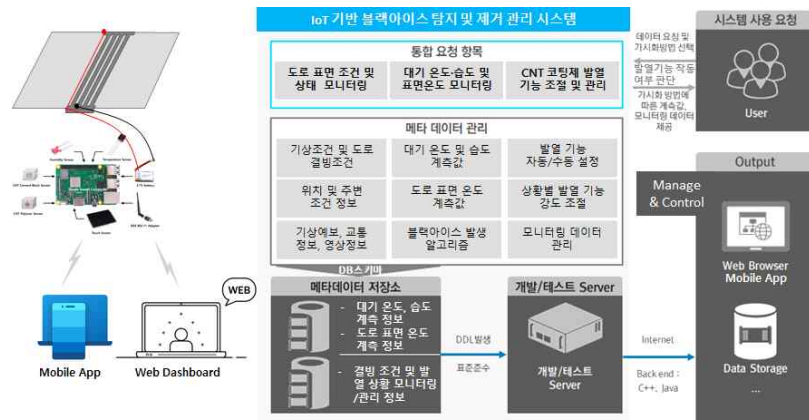
4.1 IoT 기반의 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 개요

- 본 연구에서는 탄소나노튜브 도로 코팅제 기반의 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 개발 및 운영방안에 관해 기술하고자 함
- 시스템의 기능 요구사항을 도출하고 이에 따른 시스템 하드웨어 구성 요소 및 블랙아이스 제어 시스템 전반에 대해 다루며, 개발된 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템의 시험 운용 결과를 담고 있음

4.2 연구 배경

- IoT 기반의 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템은 겨울철 급격한 기후 변화로 도로 위에 발생할 수 있는 블랙아이스를 탐지하고 이를 제거하는 것을 목적으로 하는 시스템을 의미함
- 블랙아이스라는 이름과 같이 아스팔트 노면에 검은색으로 발생하는 얼음층은 운전자가 주행 중 맨눈으로 발견하기 어려워 이에 따른 대형 사고가 빈번히 발생하고 있음
- 본 연구에서는 블랙아이스 발생 취약한 구간에 설치된 시스템을 통해 블랙아이스가 발생 여부를

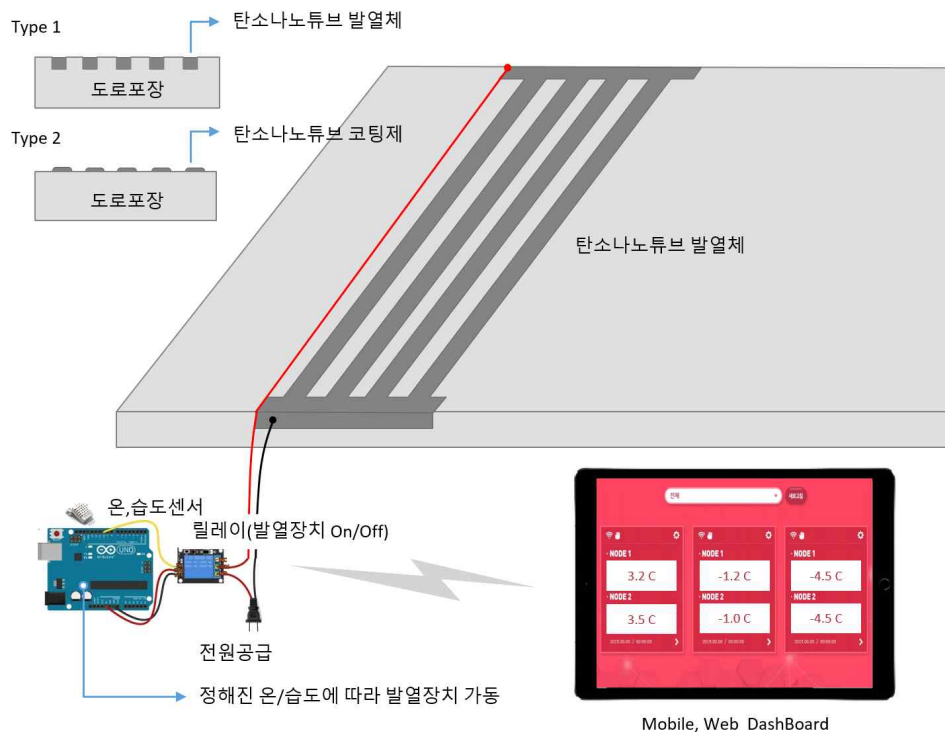
탐지하고, 블랙아이스가 생성되는 조건에서 CNT 도로 코팅제를 발열시켜 제거하는 시스템을 개발함



<IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 구성도>

4.3 시스템 개발 목표 및 내용

- IoT 기반의 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템은 블랙아이스를 실시간으로 탐지하고 설정된 블랙아이스 생성 조건이 만족하는 경우 자동 또는 수동으로 CNT 도로 코팅제를 발열시켜 블랙아이스를 제거하는 시스템임
- 본 시스템 개발은 블랙아이스를 감지 및 CNT 도로 코팅제를 발열할 수 있는 하드웨어와 하드웨어 구동용 및 웹에서 감지 또는 제어가 가능한 모니터링 시스템용 소프트웨어로 나누어지고, 시스템 개발에 앞서 하드웨어 및 소프트웨어의 기능적 요구사항과 비기능적 요구사항을 도출하고 하드웨어의 설계 방안을 마련하여 개발하였음
- 소프트웨어도 마찬가지로 요구사항 설계서를 바탕으로 시스템을 개발하였음



<IoT 기반의 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 개요>

4.4 블랙아이스 생성 조건

- 삼성교통안전문화연구소에 따르면 최근 5년간 (2014년 1월~2018년 12월) 발생한 사고와 기상관측자료를 분석한 결과, 최저기온이 영하이면서 일교차가 9℃를 초과하는 일수가 1일 증가할 때마다 하루 평균 약 59건의 사고가 증가한다는 연구 결과가 있음
- 또한, '어는 비' 현상으로 도로 표면에 빗방울이나 새벽이슬 등이 도로 표면에 과냉각되어 발생하기도 하며, 물방울이 기상 조건에 의해 서서히 얼면서 내려오는 게 아니고 도로 표면에

달자마자 바로 얼어붙기 때문에 도로 표면 위에 유리면처럼 코팅된 모습을 보임

- 일정량 이상의 습도 조건에서 노면 온도가 영하인 경우 도로 표면에 수막이 발생하며 수막 두께에 따라 블랙아이스가 되기도 하며, 습도는 안개가 끼는 97% 이상만 되어도 도로 표면의 수막을 생성할 수 있다는 연구가 있으나, 명확한 결론이 없어 상황에 따라 사용자가 설정 가능하도록 함



<도로 표면 위 유리막처럼 코팅된 블랙아이스>

4.5 시스템 개발 방향

- 블랙아이스 발생 조건에 대한 다양한 연구가 있었으나, 정량적인 수치로 명확히 정의된 바 없으나, 대기 중 습도와 노면 온도는 블랙아이스 발생에 가장 큰 요인으로 여겨짐
- 따라서 대기 온도 및 습도와 노면 온도 조건을 설정하여 해당 조건이 만족하는 경우 발열 시스템이 가동되도록 개발하였음
- 시스템 개발은 크게 하드웨어와 소프트웨어 개발로 나뉘며, 핵심 기능 필요사항 및 사용자 기능 요구사항을 정의하여 이를 바탕으로 개발함
- 우선, 하드웨어는 센서부, 전원부, 제어부 등으로 나뉘어 구성하는 설계안을 도출하였고 이를 기반으로 하드웨어를 개발하였음
- 소프트웨어는 하드웨어를 구동하고 제어하기 위한 내부 구동용 소프트웨어와 웹 환경에 적합한 관리 시스템 소프트웨어를 개발하였고, 시스템 개발 이후 실험실 수준 시험을 통해 기능 개선을 하고 실제 환경과 유사한 환경에서의 시험 운영을 통해 시스템을 보완하였음

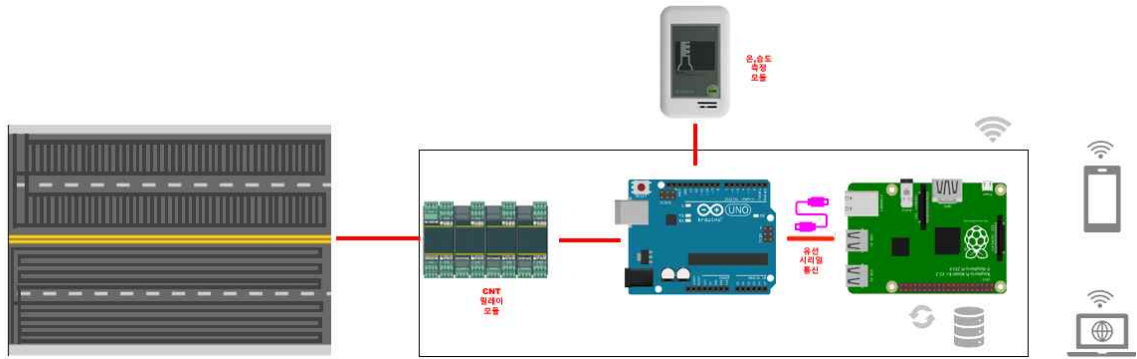
5. IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 하드웨어 개발

5.1 개발 개요

- 시스템 개발을 위해 하드웨어 구성 요소를 도출하고 이를 기반으로 기능적 요소를 다음과 같이 정의하였다.
 - 1) CNT 코팅 발열장치를 제어
 - 2) 대기 온·습도 및 노면 온도 측정
 - 3) 측정된 데이터를 서버 DB로 전송

5.2 프로토타입 개발 방향

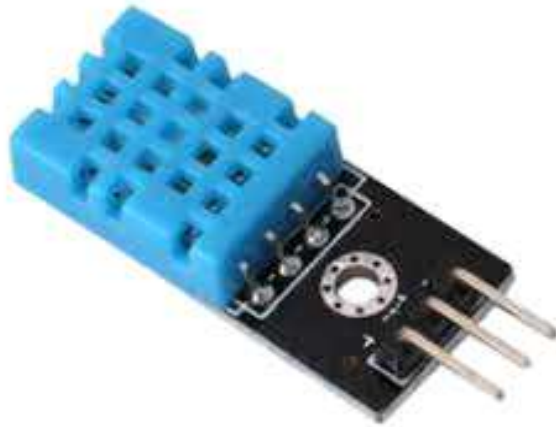
- 시스템 개발 초기에는 ARM Cortex-M3를 채용한 아두이노 보드와 Cortex-A72 CPU 기반 BCM2711 SoC을 채용한 라즈베리 파이와 같은 MCU를 이용하여 하드웨어를 개발하였다. ARM Cortex-M3를 채용한 이유는 시스템 규모가 작고 간단한 제어 및 용도에 맞게 사양을 세분화하고 이를 최적화가 가능하기에 이를 선정하였으며 Cortex-A72 CPU는 리눅스 기반으로 1.5GHz의 쿼드코어 64-bit ARM이기에 빠른 제어가 가능하며 다양한 형태의 개발언어를 사용할 수 있기 때문이다. 하드웨어는 아두이노 보드에 연결된 온·습도 센서를 통해 실시간으로 온·습도를 실시간 계측하고 수집된 데이터는 라즈베리 파이의 모듈을 통해 데이터를 외부로 전송하는 기능을 갖는다.



<초기 하드웨어 컨셉>

5.2.1 센서부

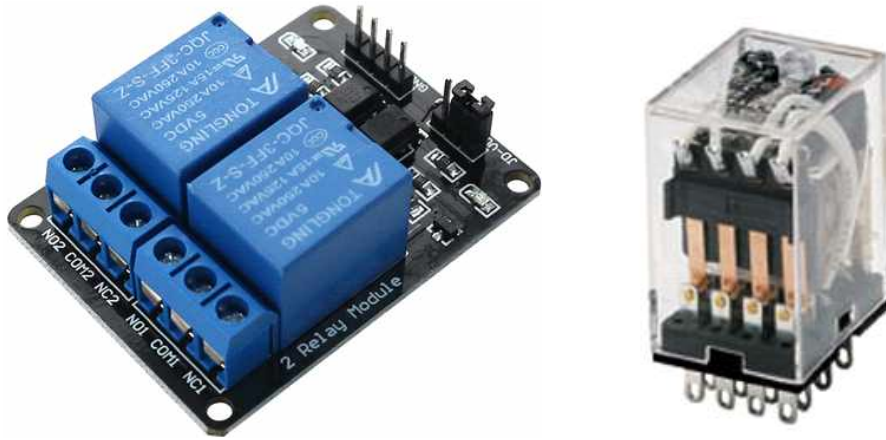
- 블랙아이스 생성 가능성 또는 여부를 확인하기 위해 외부 대기환경 및 도로 표면의 온·습도 데이터가 요구된다. 대기 온·습도 및 노면 온도를 다음과 같은 온·습도 센서를 아두이노 보드에 연결하여 계측할 수 있도록 하였다. 아두이노에서 주로 사용되는 DHT 11 및 DHT 22 센서는 물론 정밀한 측정이 가능한 다양한 산업용 온·습도 센서까지 지원하도록 설계하였으며, 아날로그 및 디지털 방식의 연결 방식을 지원하도록 설계하였다.



<아두이노 전용 및 산업체에서 사용되고 있는 온·습도 센서>

5.2.2 제어부

- 제어부에서는 CNT 도로 코팅제 발열을 위해서 전원을 인가하여 일정 온도에 도달하고 일정한 온도 유지를 위해 전원을 반복적으로 ON/OFF 해야 한다. 일정 온도를 유지하기 위해 릴레이 모듈을 채용했으며 릴레이 모듈을 사용하는 이유는 다음과 같다.
 - (1) 낮은 전압 및 전류로도 높은 전압 및 전류 제어 가능
 - (2) 전기적인 신호로 스위치 제어 가능
 - (3) CNT 도로 코팅제와 회로에 인가되는 전원을 각각 분리 가능
- 또한, 발열체의 수를 다수로 늘릴 때 다수의 제어가 가능한 릴레이 모듈로 변경한다면 이를 제어할 수 있게 만들어 준다.

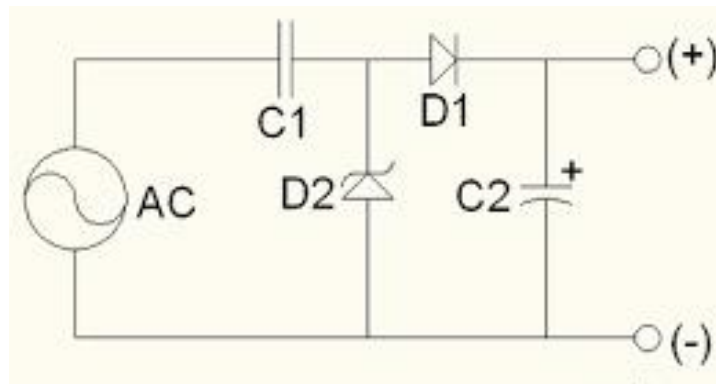


<전원 제어가 가능한 릴레이 모듈>

- 실시간으로 측정된 온·습도 센서를 통해 얻은 데이터를 아두이노 내부 DB에 데이터를 저장하고 이를 외부의 serial 통신을 통해 라즈베리 파이 모듈로 데이터를 전송한다. 전송된 데이터는 라즈베리 파이의 내부 DB에 저장되고 이를 TCP/IP 프로토콜을 통해 데이터를 외부 DB에 정하는 기능을 갖는다.

5.2.3 전원부

- 초기 전원부 구상은 CNT 도로 코팅제에 220V 이상의 전원을 인가하고 전압강하를 통해 제어부 모듈에 전원을 인가하는 방식이었다. CNT 도로 코팅제는 220V 이상의 전원을 인가하여 원활하게 발열이 되도록 하였으며 CNT 도로 코팅제를 제어하기 위한 제어부는 전압강하를 통해 12V의 전원을 인가받아 충분히 제어되도록 설계하였다.



<전압강하 회로 예>

5.3 프로토타입 설계 개선사항 도출 및 개발

- 프로토타입 설계를 기반으로 개발된 시스템의 실험실 수준의 테스트를 통해 사용자 요구사항 및 기본 기능 구현이 가능한지 검토를 하고 구현할 수 있는 부분과 개선이 필요한 부분을 나뉘어 시스템을 개발하였다. 센서부, 제어부 및 전원부 각각의 개선사항을 도출하고 개선된 사항을 바탕으로 하드웨어 시스템을 최종 개발하였다.

5.3.1 센서부 개선사항

- 초기 센서부는 아두이노를 바탕으로 아두이노의 전용 온·습도 센서인 DHT 11을 채용하여 개발하였다. DHT 11의 측정범위는 표 1과 같다. 온도는 상온만 측정되어 겨울철 블랙아이스 탐지 및 제어 시스템에 적용하기에 부족하다고 판단되어 다른 산업용 센서를 채용하였다.

<아두이노 전용 온·습도센서(DHT 11) 제원>

항목	내용
온도 측정범위	0 ~ 50°C
온도 측정 오차	± 2°C
습도 측정 범위	20~95%
습도 측정 오차	± 5%
동작 전압	3.3 ~ 5V

- 동작 전압은 같고 정밀한 온·습도 측정이 가능한 센서가 요구되었으며, 이를 위해 다양한 산업에서 많이 사용되고 있는 CM2105 온·습도 센서를 채용하였다.

<산업용 온·습도센서(CM2105) 제원>

항목	내용
온도 측정범위	-40 ~ 80°C
온도 측정 오차	± 0.5 °C
습도 측정 범위	0~99.9%
습도 측정 오차	± 3%
작동 전압	3.3 ~ 5V

- 상기 센서는 디지털 방식으로 다양한 프로세서와 연결할 수 있는 특징이 있다. 측정 성능은 영하 -40°C까지 측정할 수 있으며 습도는 최대 99.9%까지 측정 가능하여 상기 센서를 채용하는 것으로 하였다.



<산업용 온·습도센서(CM2105)>

5.3.2 제어부 시스템 개선사항

- 제어부는 ARM Cortex-M3의 프로세서를 가지고 있는 아두이노 보드로 시스템 구성을 하고자 하였으나 상기 시스템을 채용할 시에는 GPIO 확장 모듈이 요구되며 CNT 도로 코팅제를 제어하기 위해 릴레이 모듈이 필요하다. 아두이노에 다양한 모듈을 연결하여 제어하기에 한계가 있을 것으로 보이며, CNT 도로 코팅제를 다수 연결 시 제어가 어려울 것으로 판단되었다. CNT 도로 코팅제 발열을 제어할 수 있는 시스템 구성을 위해 제어 가능한 프로세서를 채용하였다. ATMEGA328P-AU는 8 Bit MCU로, ATmega328 Microcontroller 계열로 저전력으로 동작할 수 있다. 1 KBytes EEPROM과 2KBytes Internal SRAM 가지고 있어 빠른 제어가 가능하여 이를 이용하여 시스템 제어부를 구성하였다.

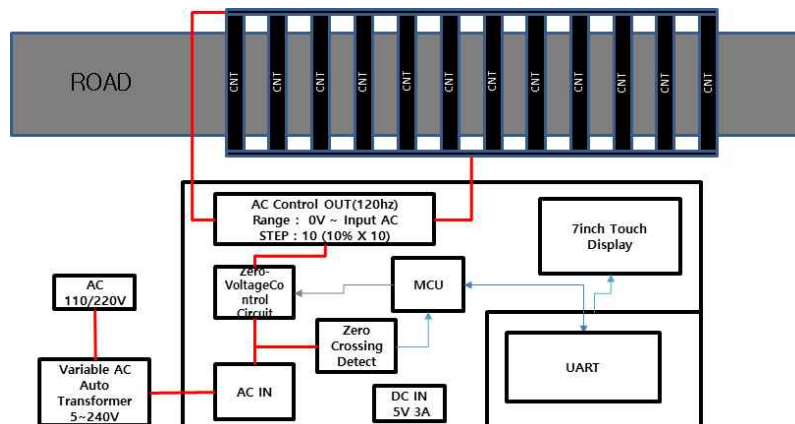


<ATMEGA328P 프로세서>

- 기존의 릴레이 모듈로 온도 제어하는 경우 릴레이 내부의 스위치가 동작 시 순간적으로 접점이 붙었다가 떨어지며 아크가 발생할 여지가 있다. 이와 같은 아크로 인해 스위치 전환속도, 접점의 상태 또는 접점의 재질이 변화와 같은 현상이 발생하여 스위치 작동이 되지 않거나, 접점이 녹아 들러붙어 떨어지지 않는 경우도 발생할 수 있다. 이러한 릴레이 내부에서 발생 가능한 문제를 방지하기 위해 온도 조절 방식을 위상제어 방식과 전력제어방식으로 검토를 하였다. 위상제어방식은 노이즈는 많지만, 회로가 간단하다. 하지만 노이즈가 많은 단점을 가지고 있어 온도 조절 방식으로는 많이 사용하지는 않는 방식이다. 전력제어방식은 제로 볼트 전력제어 방식으로 노이즈가 없고 동작 전원부가 없어 회로 구성이 간단하다. 운전 시 누설전류 및 절연 내력과 습도 처리에 강인하게 하도록 입력은 3구 접지 전원선을 사용하고 출력은 2구 무 접지 전원으로 사용하였다.

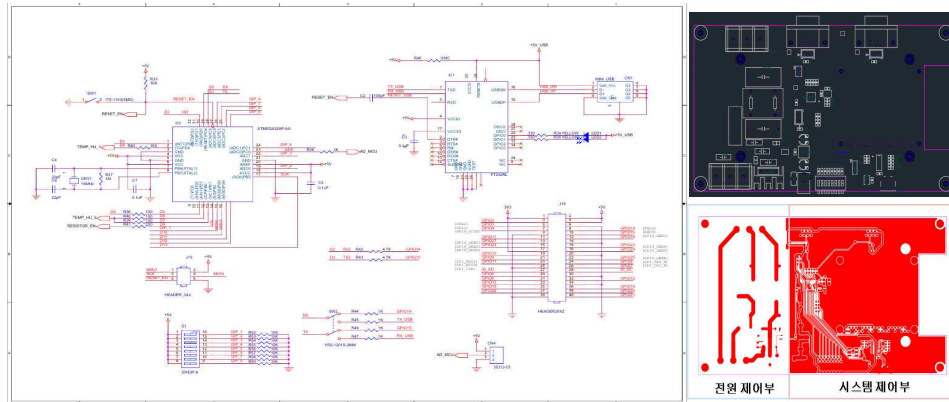
5.3.3 전원부 개선사항

- CNT 도로 코팅제 크기나 함량 등에 따라 요구 전압이 다양할 것으로 보이며 이를 위해 인가되는 전원을 220V로 고정하지 않고 5V~220V까지 전원 스펙트럼을 넓게 설정하도록 하였다. 이러한 넓은 전원 스펙트럼을 가지는 전원을 인가를 위해 CNT 도로 코팅제와 하드웨어 시스템 회로에 인가되는 전원을 구분하여 따로 구성하였다.
- 상기한 개선사항을 바탕으로 IoT 기반의 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 하드웨어를 개발하였다. 외부에서 다수의 CNT 도로 코팅제에 전원을 직접 인가할 수 있으며 시스템 내부에서 전력제어 방식으로 CNT 도로 코팅제의 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 대기 온·습도 및 노면 온도를 계측하고 이를 내부 시스템 DB에 저장할 수 TCP/IP 프로토콜을 통해 외부의 DB에 데이터를 저장한다. 또한, CNT 도로 코팅제를 제어하기 위해 MQTT 프로토콜을 사용하여 전원을 제어할 수 있도록 하였다. 시스템을 직접 제어할 수 있도록 Display 장치를 연결하였다. 특정 단자에 전압이 인가되지 않는 상태를 방지하기 위해 제로 크로싱 디렉터 회로를 넣어 AC 교류를 제어할 수 있도록 하였다.



<IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 블록도>

- 상기 시스템 블록도를 기반으로 설계 회로를 구성하였다. 설계된 회로는 CNT 도로 코팅제를 제어할 수 있도록 하는 전원제어부와 전원제어부를 제어하고 온·습도를 계측하고 데이터를 송신할 수 있는 시스템 제어부로 나누었고 이를 기반으로 PCB를 제작하였다.



<IoT 기반 도로살얼음 탐지 및 제거 시스템 회로도>



<IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 제작된 시스템>

5.4 구동용 내부 소프트웨어 개발

- IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템의 회로도와 PCB를 개발하였고 이를 제어하고 연결된 온·습도 센서를 통해 계측하여 제어부에 데이터 전송을 위한 소프트웨어가 요구된다. 해당 소프트웨어 개발 언어는 Python이며, 주요 코드는 다음과 같다.

5.4.1 센서 연결 확인

- 상기 제어 소프트웨어는 serial을 통해 센서가 연결되었는지 확인하는 것으로 센서가 연결되지 않을 때 이를 'false'로 연결이 되었을 때는 'true'로 출력하도록 하였다. 상기 제어 소프트웨어 역할은 센서의 유무 및 센서의 동작 현황을 알려주어 시스템에서 시각화할 때 사용한다.

```
def setOperate(isOn, isAuto):
    # 시리얼 ON / OFF
    global HW_ID
    insertStatusLog(HW_ID, isAuto, isOn)
    publishMqtt("BI/lastInfo", HW_ID)

def checkConditions(datas, conditions):
    isRT = True
    isOT = True
    isOH = True
```

<센서 연결 확인>

5.4.2 서버 DB 연결 확인

- 해당 내용은 서버의 DB에 연결하고 내부 DB에 있는 데이터를 송신할 때 어떤 데이터를 송신할지에 대한 것과 외부 DB 연결이 불가할 때 예외 처리하며, 이를 통해 서버 DB와 시스템 간 지속적인 연결을 유지하고 서버 DB 연결이 지연되거나 접속 불가 상황 시 마지막으로 제어된 내용을 가지도록 시스템에 반영하였다.

```
# ===== DATABASE
def dbSetting():
    global dbConnection
    global cursor

    DB_SERVER = "59.15.16.51:9567"
    DB_USER = "USER_BLACKICE"
    DB_PASSWORD = "eng@soft9567!"
    DB_NAME = "Blackice"

    dbConnection = pymysql.connect(DB_SERVER, DB_USER, DB_PASSWORD, DB_NAME)
    cursor = dbConnection.cursor(as_dict=True)

def insertSensorData(roadTemperature, outsideTemperature, outsideHumidity, id):

def conditionSetting(id):

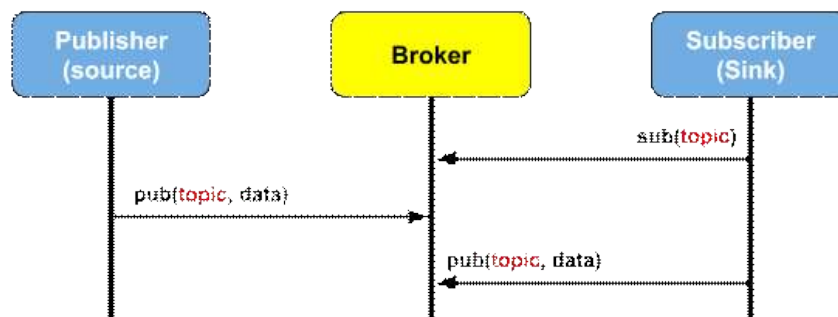
def updateEquipment(field, value, id):

def insertStatusLog(id, isAuto, isOn):
```

<외부 DB 연결 및 시스템 연결>

5.4.3 시스템 제어를 위한 통신

- 하드웨어를 원격으로 제어하기 위해 MQTT를 사용하였다. MQTT란(Message Queuing Telemetry Transport)로 M2M, IoT를 위한 프로토콜로써, 최소한의 전력과 패킷량으로 통신하는 프로토콜이다. 이는 IoT와 모바일 애플리케이션 등의 통신에 매우 적합한 프로토콜로 HTTP, TCP 등의 통신과 같이 클라이언트-서버 구조로 이루어지는 것이 아닌, Broker, Publisher, Subscriber 구조로 이루어진다. 시스템 제어에 있어 메시지 전달 후 이를 추적하여 해당 메시지가 실행되지 않을 경우 이를 다시 확인하고 메시지를 다시 보내기에 유리하여 MQTT 프로토콜을 사용하였다.



<MQTT 구조>

- 이러한 특징으로 시스템 외부에서 제어하고자 할 때 상기 제어 메시지를 보냈을 경우 이를 확인하고 시스템 내에서 미작동 시 다시 자동으로 보내기 때문에 사용자는 하드웨어 미작동 시 메시지를 반복해서 보낼 필요가 없다. 만약 통신 중 연결이 끊어지면 다시 재접속하여 메시지를 보낼 수 있으며 다수의 시스템을 제어하기에도 유리하다.

```
# ===== MQTT
def mqttSetting():
    global mqttClient

    MQTT_URL = "engsoft.iptime.org"
    MQTT_PORT = 31883
    MQTT_KEEP_ALIVE = 60

    mqttClient = mqtt.Client()
    mqttClient.on_connect = on_connect
    mqttClient.on_disconnect = on_disconnect
    mqttClient.on_message = on_message

    mqttClient.connect(MQTT_URL, MQTT_PORT, MQTT_KEEP_ALIVE)

def publishMqtt(topic, data):
    mqttClient.loop_start()
    mqttClient.publish(topic, json.dumps(data), 1)
    mqttClient.loop_stop()

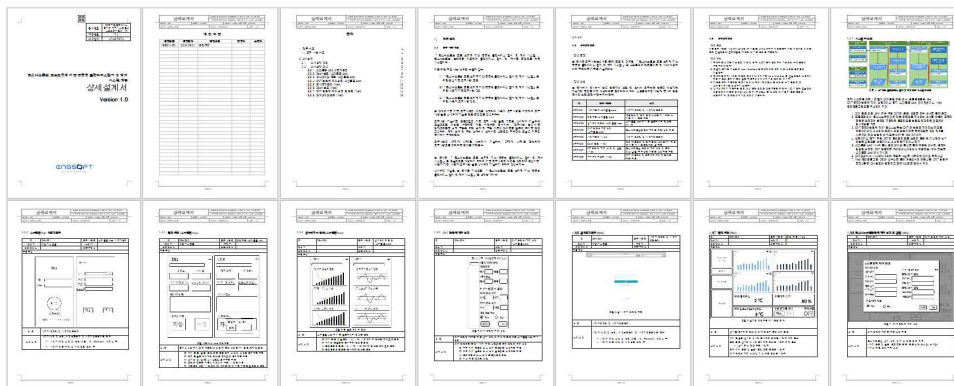
def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    print("Connected with result code " + str(rc))
    client.subscribe("BI/#")
```

<외부 시스템에서 하드웨어를 제어하기 위한 통신>

6. IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 소프트웨어 개발

6.1 요구사항 분석 및 설계

- 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 원격 관리 및 제어 소프트웨어 대한 요구사항은 다음과 같음
 - 1) 하드웨어를 통한 CNT 도로 코팅제 발열 제어
 - 2) 하드웨어에서 계측된 온·습도 데이터 시각화
 - 3) 블랙아이스 생성 조건 입력 기능
 - 4) 블랙아이스 생성 조건 충족 시 자동으로 하드웨어를 통한 CNT 도로 코팅제 발열
 - 5) 시스템 설치 장소의 기상정보 제공
 - 6) 사용자가 수동으로 시스템 제어 가능
 - 7) 시스템의 작동상태 및 작동 이력 확인 가능
- PC 또는 모바일 환경 등 플랫폼에 구애받지 않기 위해 웹 환경을 기반으로 개발을 수행



<시스템 개발을 위한 상세 설계서>

6.2 설계 기반 웹 페이지 개발

- IoT 기반의 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템을 개발을 위해 기존의 응설 시스템 분석
- 현재 적용되는 응설 시스템은 제어부와 원격모니터링 관리부 및 기상 센서 관리부로 나누어지며, 현재 상태를 확인할 수 있는 감시화면과 온·습도 측정 현황, 응설 시스템의 작동 현황, 시스템 설정에 관련된 부분으로 구성되어 있기에 이러한 내용을 기반으로 시스템 시각화 화면을 구성함



<도로응설 시스템의 일반적인 시스템 구성>



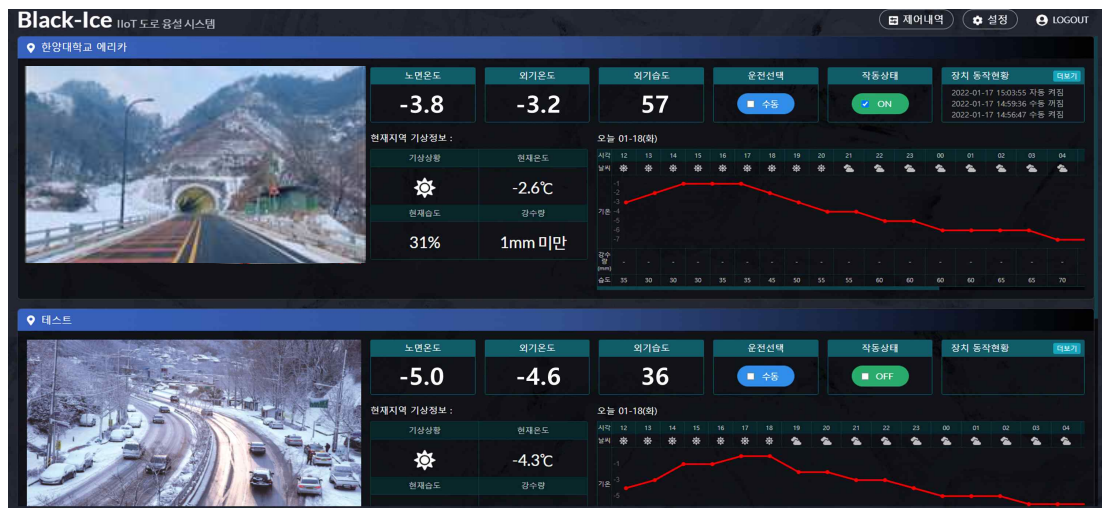
<기존 블랙아이스 응설 시스템 화면>

- 기존 도로 응설 시스템의 기본적인 구성 분석을 통해 대시보드 형태로 계측된 데이터 및 기상 데이터와 시스템 작동 여부, 제어 버튼 위주로 표출하는 것이 한눈에 현재 상황을 파악하기 유리할 것으로 판단됨
- 초기 개발화면은 메인화면에서 현황 내용을 표출하며 제어 내역, 장비 세팅을 위한 메뉴를 갖는다. 현황 내용은, 각 장치의 동작 상황과 지역 날씨 현황으로 구성



<시스템 초기 설계 화면>

- 초기 개발화면은 측정되는 온·습도가 화면에서 큰 영역을 차지하고 기상 상황 또한 많은 부분을 차지하고 있으며, 하드웨어 동작 제어 방식과 버튼이 직관적이지 않은 초기 버전의 문제를 개선하기 위해 전반적인 UI를 수정
- 시스템 설치 지역의 향후 기상정보 확인을 위해 중기 예보 화면을 추가하였으며, 중기 예보는 현재 시점을 기준으로 3일 치 기상정보를 예측하는 기상청에서 제공하는 데이터로 사용자가 3일간의 기온 추이를 확인하여 사용자가 대응 및 대비가 가능할 것으로 판단됨
- 기상청의 데이터를 반영하고 제어에 대한 부분을 직관적으로 개선한 내용을 바탕으로 시스템 화면을 개발



<개선된 시스템의 메인 화면>

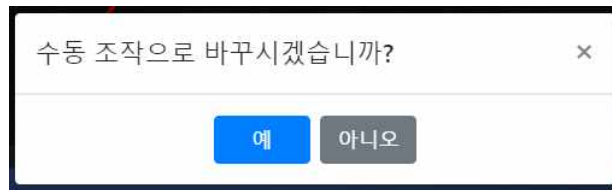
6.2.1 하드웨어 제어를 위한 자동 및 수동 전환

- IoT 기반의 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 하드웨어를 제어하기 위해 시스템 내 ‘운전 선택’ 및 ‘작동 상태’ 항목으로 이를 제어
- 평상시 자동으로 선택되어 있으며 미리 설정된 시스템 작동 조건과 센서에서 계측되는 온·습도 정보를 기반으로 자동으로 동작하고, 이 때의 작동 상태를 표출
- 자동으로 동작이 되었다면 이는 동작 현황에 어느 시점에 동작이 되었는지에 대해 해당 내용이 DB에 저장되며, 이때 저장되는 데이터는 설치구간, 동작상태, 작동 시각(년, 월, 일, 시, 분, 초), 멈춤 시각과 동작이 지속시간이 저장됨



<운전 선택이 자동으로 되었을 때 작동상태 화면>

- 사용자가 하드웨어를 수동으로 조작하기 위해서는 '운전 선택'의 자동 부분을 선택하면 수동조작을 바꾸기 위한 안내 메시지가 나오며 수동으로 조작이 되도록 제어가능

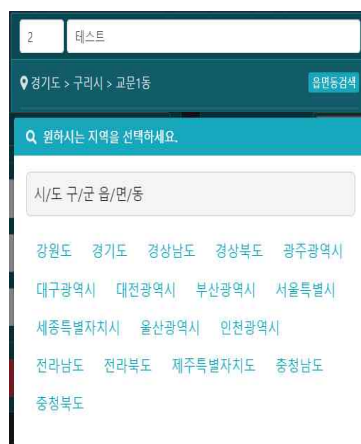


<운전 선택 화면과 수동조작 안내 메시지 화면>

- 수동조작 선택 시 작동상태는 자동조작 시 작동상태를 반영하며, 사용자가 발열된 시스템을 끄고자 할 때는 작동상태를 선택하여 수동조작 시 작동상태를 'OFF'를 변경을 위한 안내 메시지가 나오고 이를 선택하였을 시 수동조작은 'OFF'가 됨
- 이후 운전 선택화면을 '자동'으로 변경 시 안내 메시지를 표출하며 동작 조건을 반영하여 작동상태는 변경됨

6.2.2 자동 동작을 위한 센서 설정

- 시스템을 자동으로 동작시키기 위해 설정 항목에서 이를 입력하도록 하였으며, 설정 항목에는 블랙아이스 탐지 및 제거하기 위한 하드웨어를 설치하는 지역을 읍, 면, 동 단위까지 선택하여 검색 가능하도록 설정
- 이러한 검색 기능을 통해 해당 지역의 중기 예보를 검색하여 해당 지역의 기상정보를 시각적으로 나타냄



<기상정보 검색을 위한 화면 지역 선택>

- 외부의 계측되는 센서를 통해 자동으로 작동되는 조건을 생성하기 위해 외부의 센서를 통해 계측되는 외기온·습도, 노면에서 계측되는 센서 정보를 바탕으로 동작하도록 하였으며, 사용자가 원하는 센서 정보를 선택하면 선택되는 항목에 따라 해당 조건 만족 시 자동으로 작동함

☐	외기온도	20	이하
☐	외기습도	40	이상
☒	노면온도	40	이하

<계측되는 센서 항목에 따라 자동 조건 생성>

- 이 외에는 실제 하드웨어가 동작하는 현황에 관한 모니터링 내역을 저장하고 이를 보여주는 화면을 구현하여 하드웨어 동작 상황을 알 수 있도록 나타냄

시스템 설계구분	동작상태	제동시간	정중시간	지속시간
한양대학교 세라카	수동	2022-01-17(월) 15:03:55	2022-01-17(월) 14:59:36	-259초
한양대학교 세라카	수동	2022-01-17(월) 14:56:47	2022-01-17(월) 14:34:18	-1348초
한양대학교 세라카	수동	2022-01-17(월) 14:04:37	2022-01-17(월) 14:04:33	-4초
한양대학교 세라카	수동	2022-01-17(월) 14:04:23	2022-01-17(월) 14:03:43	-40초
한양대학교 세라카	자동	2022-01-17(월) 13:51:38	2022-01-17(월) 16:41:20	-508218초
한양대학교 세라카	자동	2022-01-11(월) 16:38:44	2022-01-11(월) 16:29:58	-526초
한양대학교 세라카	수동	2022-01-11(월) 16:29:54	2022-01-11(월) 16:28:12	-42초
한양대학교 세라카	자동	2022-01-11(월) 16:28:49	2022-01-11(월) 16:24:48	-241초
한양대학교 세라카	자동	2021-12-23(목) 09:28:07	2021-12-23(목) 09:27:00	-67초
한양대학교 세라카	자동	2021-12-23(목) 09:26:56	2021-12-13(월) 09:46:49	-862807초
한양대학교 세라카	자동	2021-12-13(월) 09:45:59	2021-12-13(월) 09:44:51	-68초
한양대학교 세라카	수동	2021-12-13(월) 09:38:59	2021-12-13(월) 09:38:56	-3초
한양대학교 세라카	자동	2021-12-13(월) 09:36:59	2021-12-13(월) 09:32:45	-254초
한양대학교 세라카	자동	2021-12-13(월) 09:32:13	2021-12-13(월) 09:25:48	-385초
한양대학교 세라카	자동	2021-12-10(금) 16:35:25	2021-12-10(금) 16:29:54	-331초
한양대학교 세라카	자동	2021-12-10(금) 16:28:24	2021-12-10(금) 16:28:10	-14초

<하드웨어 제어 내역을 볼 수 있는 화면>

6.2 소프트웨어 성능인증

- 본 연구의 주요 성능평가 항목 및 개발 목표치는 아래 표와 같으며 개발 목표치 달성 확인은 위해 공인시험기관인 한국화학융합시험연구원(KTR)에 각각의 항목에 대한 시험을 의뢰함

<주요 성능평가 항목 및 개발 목표치(협약시 연구개발계획서)>

평가 항목 (주요성능 Spec1))	단위	전체 항목 에서 차지하는 비중 2) (%)	세계최고 수준 보유국/ 보유기업 (/)	연구개발 전 국내수준	개발 목표치		평가 방법 3)
				성능수준	1 차년도 (2020 년)	2 차년도 (2021 년)	
4.데이터 정합성	%	20	-	-	-	95% 이상	공인기관 검증
5.시스템 UI 오류율	%	20	-	-	-	5% 이내	공인기관 검증

- 소프트웨어 성능 인증시험 결과보고서는 아래 그림과 같다.



BEYOND ASIAN HUB, TOWARD GLOBAL WORLD

TEST REPORT

성적서 번호 : EST-2021-000112

신청자 : O 회사명 : 주식회사 이연지소프트
O 주소 : 서울특별시 강서구 양천로 551-17, 4층 404호(가림동, 한화비즈메트로1차)
O 대표자명 : 김성근

시험성적서의 용도 : 제출용

제품명 : 한소나노뷰브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 프로그램 Ver 1.0

시험기간 : 2021년 12월 07일 ~ 2021년 12월 29일

시험방법 : 소프트웨어 의뢰시험 의뢰자 제시기준/규격

시험결과 : 시험결과 참조

비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로써 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 진위확인용 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인 가능합니다.
2. 이 성적서는 홍보, 신청, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(제발행 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/복합본은 결과치 효력이 없습니다.

김태기

작성자 : 김태기
Tel : 02-2092-4065

조성호

기술책임자 : 조성호
Tel : 1577-0091

2021년 12월 29일

KTR 한국과학기술시험연구원

KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE



위변조 확인용 QR 코드

KTR-QI-Y10053-F27(00) A4(210 X 297)

성적서 번호 : EST-2021-000112

시 험 결 과

1. 시험개요

1.1 시험기준 및 방법

- 의뢰자 제시 기준/규격
- 제출일 : 2021. 10. 25.
- 제출문서 명 : 소프트웨어 의뢰시험 의뢰자 제시 기준/규격서

1.2 시험장소

- 서울시 강서구 (주식회사 이연지소프트 회의실)

2. 시험대상

2.1 시험대상 개요

- 제품명 : 한소나노뷰브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 프로그램 Ver 1.0
- 제조사 : 주식회사 이연지소프트
- 용 도 : 도로 위의 센서를 통해 블랙아이스를 탐지하고 도로 위 한소나노뷰브 코팅 발열을 통해 블랙아이스를 제거하는 시스템

2.2 시험대상 구성

- '한소나노뷰브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 프로그램 Ver 1.0'은 단일소프트웨어로 구성

Page : 2 of 9

A4(210 X 297)

성적서 번호 : EST-2021-000112

시 험 결 과

3. 시험도구

No.	도구 명	용도
1	Chrome 96.0	웹페이지에 출력된 데이터 확인
2	SQL Server Management Studio V18.6	DBMS(Microsoft SQL Server)에 저장된 데이터 확인

4. 시험구성 및 시험환경

4.1 시험구성

1) 시험구성 1



시험용 PC

웹서버

시험 대상

한소나노뷰브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 프로그램 Ver 1.0

'한소나노뷰브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 프로그램 Ver 1.0'은 웹 서버에 설치되어 네트워크로 연결된 시험용 PC와 TCP/IP 통신을 수행한다.

Page : 3 of 9

A4(210 X 297)

성적서 번호 : EST-2021-000112

시 험 결 과

4.2 시험환경

1) 웹서버 (한소나노뷰브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 프로그램 Ver 1.0)

사양	
CPU	Intel(R) Xeon(R) ES-2609 CPU @ 1.70GHz
RAM	32 GB
HDD	500 GB
NIC	10 / 100 / 1000 BASE-T Ethernet 1 Port
OS	Microsoft Windows Server 2016 Standard
웹 브라우저	해당 없음
기타 S/W	Microsoft SQL Server 2017
네트워크 통신	TCP/IP

2) 시험용 PC

사양	
CPU	Intel(R) Core(TM) i5-1035G4 @ 1.10 GHz
RAM	16 GB
HDD	250 GB
NIC	10 / 100 / 1000 BASE-T Ethernet 1 Port
OS	Microsoft Windows Pro 10 64 bit
웹 브라우저	Chrome 96.0
기타 S/W	해당 없음
네트워크 통신	TCP/IP

Page : 4 of 9

A4(210 X 297)

시 험 결 과

5. 종합 시험 결과

시험항목 명	시험결과	적합 / 부적합 (세부시험결과 참조)
UI오류율	Web UI에 대한 TestCase 수행 후 확인된 UI 오류율이 5 % 이하임 - UI 오류율 : 0 %	적합 (시험항목 1)
데이터 정합성	데이터 정합성에 대한 TestCase 수행 후 확인된 데이터의 정합성이 95 % 이상임 - 데이터 정합성 : 100 %	적합 (시험항목 2)

※ 자세한 시험결과는 '세부시험결과'를 참조

시 험 결 과

시험항목 1	UI 오류율								
1. 시험기준 : Web UI에 대한 TestCase 수행 후 확인된 UI 오류율이 5 % 이하 ※ 아래 TestCase 수행결과와 예상결과가 일치하지 않을 경우 오류로 판단함									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TestCase</th><th>시험항목</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TC-001</td><td>제어내역 화면 전환</td></tr> <tr> <td>TC-002</td><td>장치 추가 및 삭제</td></tr> <tr> <td>TC-003</td><td>주소 검색 팝업창 출력</td></tr> </tbody> </table>	TestCase	시험항목	TC-001	제어내역 화면 전환	TC-002	장치 추가 및 삭제	TC-003	주소 검색 팝업창 출력	
TestCase	시험항목								
TC-001	제어내역 화면 전환								
TC-002	장치 추가 및 삭제								
TC-003	주소 검색 팝업창 출력								
※ 시험결과에 대한 데이터의 정합성은 고려하지 않음 ※ UI 오류율 (%) = (오류 발생 TestCase 수) / (전체 TestCase 수) x 100 ※ TestCase에 대한 세부 수행결과 및 예상결과는 별첨 문서 참조 (BI(Web) UI 오류율 검증 시험 가이드.pdf)									
2. 시험구성 : 시험구성 1									
3. 시험도구 : 해당 없음									
4. 사전조건 : 로그인을 수행하기 위한 계정이 등록되어 있어야 함 - ID : admin - PW : 9567									
5. 시험데이터 : 해당 없음									
6. 시험절차 및 방법 : 1) 사용자 PC에서 웹브라우저를 실행하여 제품에 로그인을 수행한다. ※ 접속 URL : http://engsoft.uptime.org:10114/ 2) 각 Web UI에 대한 TestCase를 수행한다. ※ TestCase에 대한 세부 수행결과 및 예상결과는 별첨 문서 참조 (BI(Web) UI 오류율 검증 시험 가이드.pdf) 3) TestCase 예상결과와 실제 수행결과를 비교한다. ※ TestCase에 대한 세부 수행결과 및 예상결과는 별첨 문서 참조 (BI(Web) UI 오류율 검증 시험 가이드.pdf)									

시 험 결 과

7. 시험결과 : Web UI에 대한 TestCase 수행 후 확인된 UI 오류율이 5 % 이하임 - 전체 TestCase 수 : 3 개 x 20 회(반복 수행 횟수) = 60 개 - 오류 발생 TestCase 수 : 0 개 ※ UI 오류율 (%) = (오류 발생 TestCase 수) / (전체 TestCase 수) x 100 = 0 / 60 * 100 = 0 %
--

시 험 결 과

시험항목 2	데이터 정합성								
1. 시험기준 : 데이터 정합성에 대한 TestCase 수행 후 확인된 데이터의 정합성이 95 % 이상 ※ 데이터의 정합성 (%) = (정합 TestCase 수) / (전체 TestCase 수) x 100 ※ 아래의 TestCase 수행결과와 예상결과가 일치할 경우 정합으로 판단함									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Test ID</th><th>시험항목</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TD-001</td><td>수집 데이터 정합성 테스트</td></tr> <tr> <td>TD-002</td><td>시스템 동작 현황 데이터 정합성 테스트</td></tr> <tr> <td>TD-003</td><td>화면 데이터 정합성 테스트</td></tr> </tbody> </table>	Test ID	시험항목	TD-001	수집 데이터 정합성 테스트	TD-002	시스템 동작 현황 데이터 정합성 테스트	TD-003	화면 데이터 정합성 테스트	
Test ID	시험항목								
TD-001	수집 데이터 정합성 테스트								
TD-002	시스템 동작 현황 데이터 정합성 테스트								
TD-003	화면 데이터 정합성 테스트								
※ TestCase에 대한 세부 수행결과 및 예상결과는 별첨 문서 참조 (BI(Web) 데이터 정합성 확보를 검증 시험 가이드.pdf)									
2. 시험구성 : 시험구성 1									
3. 시험도구 : 시험도구 1, 시험도구 2									
4. 사전조건 : 도로 위 센서로부터 수집된 데이터가 DBMS에 저장되어 있어야 함									
5. 시험데이터 : 수집데이터 파일 (이름 - BI 시험데이터.xlsx, 크기 - 1.13 MB, 형식 - .xlsx)									
6. 시험절차 및 방법 : 1) 사용자 PC에서 웹브라우저를 실행하여 제품에 로그인을 수행한다. ※ 접속 URL : http://engsoft.uptime.org:10114/ 2) 데이터 정합성에 대한 TestCase를 수행하고, TestCase 수행결과와 예상결과를 비교한다. ※ TestCase에 대한 세부 수행결과 및 예상결과는 별첨 문서 참조 (BI(Web) 데이터 정합성 확보를 검증 시험 가이드.pdf)									
7. 시험결과 : 웹페이지에 출력되는 데이터와 DBMS에 저장된 데이터의 정합성이 95 % 이상임 - 전체 TestCase 수 : 3 개 - 정합 TestCase 수 : 3 개 ※ 데이터 정합성 (%) = (정합 TestCase 수) / (전체 TestCase 수) x 100 = 3 / 3 * 100 = 100 %									

7. IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 시험 운영

7.1 시스템 동작 테스트

- IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템을 개발하여 해당 시스템으로 CNT 코팅제 발열장치를 제어하고 시스템의 동작 테스트를 거쳐 운영방안을 마련하고자 개발된 하드웨어의 동작 테스트를 수행함
- 개발된 하드웨어의 주요한 기능의 동작 테스트를 위해 온·습도 측정 센서를 연결하고 하드웨어에서 계측되는 값과 시스템에서 보여지는 값, DB에 저장되는 값을 비교하여 센서 계측이 원활하게 동작이 되는지를 실험
- 하드웨어에서 계측된 값과 외부 DB에 저장된 값 그리고 시스템 화면에 시각화되어 표출된 값이 서로 동일하게 나올 것으로 예상하며 상온에서 동작하여 해당 값이 정확한지 확인

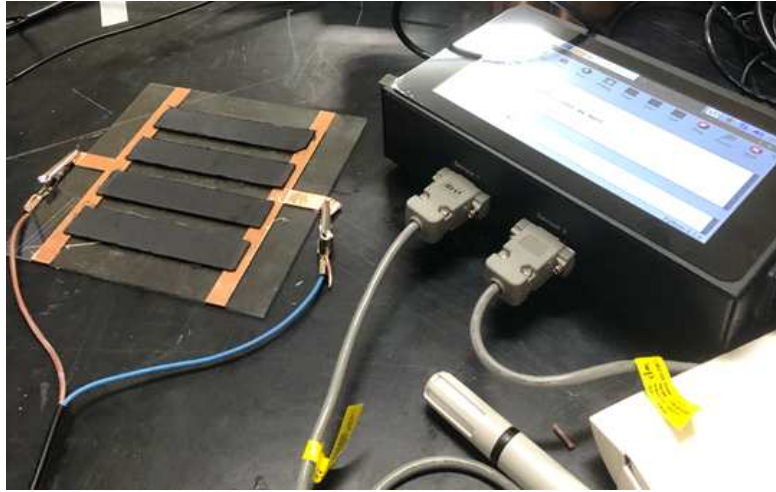


<센서를 통해 계측되는 온·습도 값 비교(하드웨어와 시스템)>

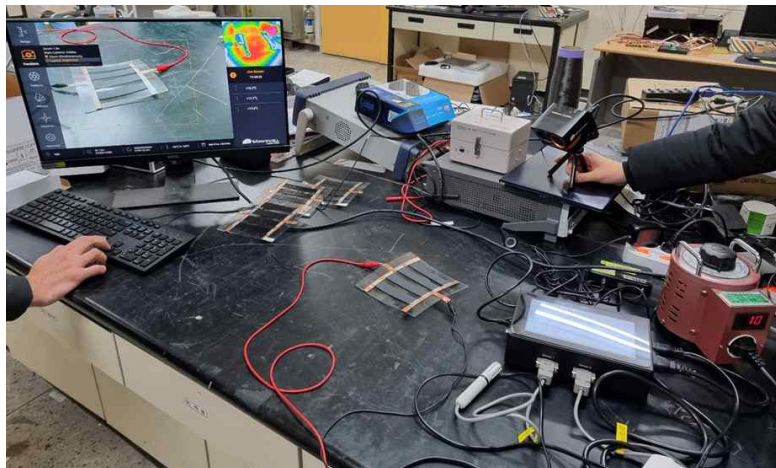
- 화면에서 보이는 것과 같이 하드웨어에서 센서 연결 상태를 확인하고 실시간으로 센서를 계측하여 이를 외부 DB에 송신하는 것까지 확인이 되었으며 시스템에 해당 값이 시각화되어 표출되는 것까지 확인함
- 데이터는 노면 온도와 외기 온·습도를 나타냄

7.2 발열 동작 테스트

- 개발된 시스템을 CNT 코팅제 발열장치와 연결하여 발열 성능을 제어할 수 있는지 등의 작동 테스트를 수행
- 하드웨어 시스템에 외부의 전원을 인가 후 하드웨어 시스템으로부터 출력되는 전원을 CNT 코팅제 발열장치와 연결하고, 이를 통해 하드웨어 시스템의 자체적인 발열 동작 제어 여부를 확인
- CNT 코팅제 발열장치 특성에 맞게 우선 10V를 인가 후 작동 시간에 따른 온도를 측정



<CNT 도로 코팅제와 연결된 하드웨어 시스템>



<CNT 도로 코팅제 발열 테스트>

- CNT 도로 코팅제를 초기 상온에서 측정하였을 때는 결과는 표와 같으며 각 시점의 CNT 도로 코팅제의 열 분포 형상은 그림과 같음
- 본 시험을 통해 개발된 시스템의 하드웨어의 정상 작동을 확인함

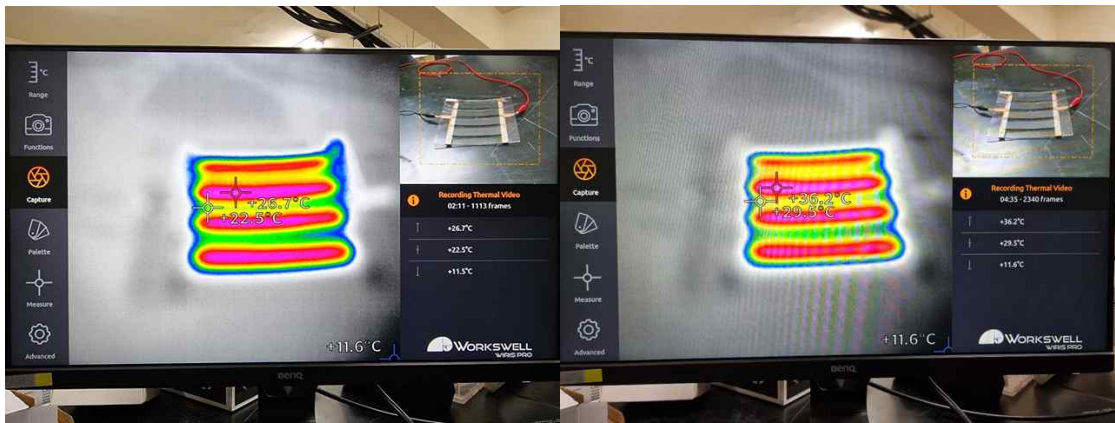
<CNT 도로 코팅제 작동 시간에 따른 온도 테스트 결과>

작동 시간	온도(℃)	작동 시간	온도(℃)
0s (초기)	17.0	4분 35초	36.2
1분 20초	22.2	6분 38초	40.5
2분 11초	26.7	-	-



(a) 0초 (시험 시작 시)

(b) 1분 20초 경과



(c) 2분 11초 경과

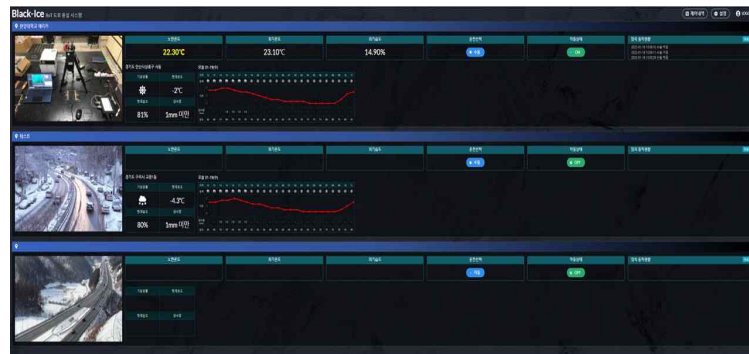
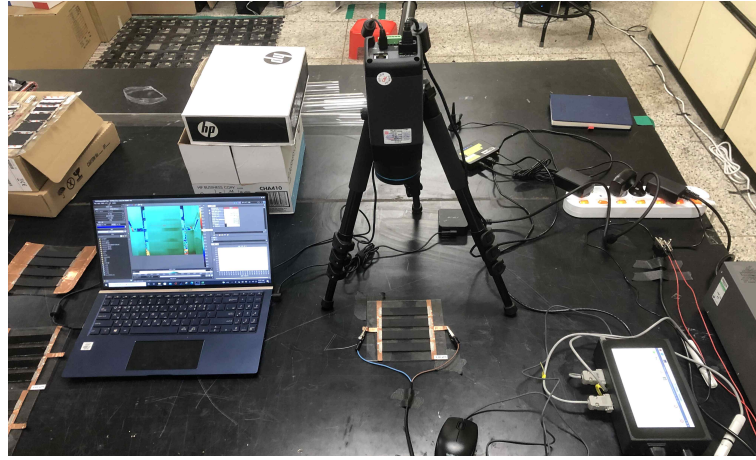
(d) 4분 35초 경과



(e) 6분 38초 경과

<CNT 코팅제 발열 테스트 결과>

- 이와 같은 작동 테스트를 통해 하드웨어의 CNT 코팅제의 발열 제어 기능을 확인하였으며, 이에 원격 관리 및 제어 시스템과 하드웨어를 연계하여 CNT 도로 코팅제를 웹에서 원격 제어가 원활히 작동하는 확인을 위한 통합 테스트를 다음과 같이 수행함
- 1) 하드웨어에 CNT 코팅제 발열장치를 연결하고 시스템의 인터넷 환경을 확인 후 웹 환경에서 시스템에 접속하여 메인 화면에서 센서의 계측되는 정보가 실시간으로 표출되는지 확인
- 2) 설정화면에서 CNT 코팅제 발열을 위해 자동으로 작동될 수 있는 설정값을 입력한 후 설정된 값을 기반으로 자동 작동 여부 확인
- 3) 웹 화면에서 수동으로 전환하여 발열체를 직접 제어 여부 확인



<IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 테스트>

- 테스트 결과 IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템은 웹 환경을 통해서도 개발된 하드웨어를 통해 CNT 도로 코팅제를 원활하게 제어하고 발열 동작을 시키는 것으로 확인

7.3 IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 운영 방안

- 시험 운영을 통해 본 연구에서 개발된 IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템이 정상적으로 원활히 작동함을 확인하였으며, 향후 본 시스템을 제품화하여 블랙아이스를 제거하는 시스템으로 다음과 같이 활용할 수 있음

7.3.1 블랙아이스 상습 발생 도로 적용

- IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템을 제품화하여 주요 도로 시설 또는 교각, 터널의 출입구, 주차장 등에 설치하여 활용 가능
- 기존 열선을 이용한 용설 시스템의 설치 방법은 도로 포장 일부를 제거하고 열선을 매입한 후 콘크리트 또는 아스팔트를 채우는 방식이며, 본 연구에서 개발된 CNT 코팅제 발열장치를 이용한 블랙아이스 용설 시스템은 도로 위에 도포하는 방식으로 시공이 빠르고 도로에 손상을 주지 않는 장점을 가짐



<기존 용설 시스템 시공 예시>

- 시공이 완료된 시스템은 주변의 통신망을 통해 도로시설공단 또는 주변의 지방자치단체 등 제어센터에서 이를 관리할 수 있도록 할 수 있음
- 제어센터는 해당 지역의 기상정보와 실시간으로 계속되는 센서 정보를 바탕으로 시스템이 블랙아이스 예보 표시판을 통해 운전자에게 주의를 시키고 제어 시스템은 CNT 도로 코팅제를 자동으로 발열을 하거나 사용자가 임의로 수동 조작하여 블랙아이스를 제거하도록 할 수 있음



<블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 운영방안 예>

7.3.2 기타 시설물 적용

- IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템은 자동차용 도로 이외 경사면, 주택 입구, 계단 등에도 설치가 가능함
- 자동차용 도로 뿐 만 아니라 인도에서도 눈이 내린 후 얼어 붙거나 아침/저녁으로 낮은 기온으로 인해 살얼음이 발생하는 경우가 빈번하며, 이에 이면도로의 경사로나 노인 및 장애인 시설, 의료시설 등 겨울철 도로 결빙에 의한 안전사고가 빈번히 발생하는 곳에 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템을 설치하고 관리하게 되면 관련 안전사고를 현저히 감소시킬 수 있을 것으로 예상



<기타 시설물 운영방안>

○ 연구결과 성과물 고찰

- 탄소나노튜브 기반 도로 코팅제의 성능평가

- 개발된 블랙아이스 제거 시스템은 도로의 표면에 직접 도포하여 설치 가능한 CNT/에폭시 코팅제로 도로 살얼음 발생 및 도로 위에 결빙이 발생 시 또는 도로 위에 적설 상태를 확인하여 발열을 통해 제거할 수 있는 기술임. 본 연구의 IoT 기반 관리 시스템은 도로의 블랙아이스 발생 시 도로 코팅제의 자체 발열 기능을 통해 결빙구간을 제거할 수 있을 뿐만 아니라 블랙아이스의 발생을 실시간으로 운전자 및 관리자에게 제공할 수도 있어 겨울철 블랙아이스에 대응할 수 있는 매우 적극적이고 능동적인 역할을 수행 할 수 있음
- 개발된 도로 코팅제가 표면 온도 측정이 가능함과 열적 성능의 우수성을 확인하였고, 공인인증시험을 통해 그 성능을 검증하였음. 특히, 표면 온도가 1분 내외로 상온에 도달하는 수준의 매우 빠른 발열 속도를 가지며 이에 따른 유지 시간 감소와 전력량 감소가 예상됨
- 도로 코팅제의 내구성 평가를 위해서 실험실 규모의 내마모성 테스트와 대학부지 내부에 설치된 코팅제를 차량 이동량에 대한 내구성 실험을 수행하였음. 차량 이동량은 시간당 이동 차량수를 측정하여, 기간 동안 도로 코팅제의 마모로 인한 저항변화량으로 내구성을 분석함. 평가결과, 도로 코팅제의 실용화 및 상용화 가능성을 확인하였으며, 내구성능 고도화를 위한 추가 연구를 통해 실제 도로 적용이 가능하다고 판단됨
- IoT 기반의 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템을 개발하기 위한 시스템 하드웨어 및 시스템 소프트웨어에 대한 상세 설계함. IoT 기반의 센싱 데이터 모니터링 시스템을 구축하고 고도화하여 실험을 통한 시스템 시험 운영을 실시하였고, 공인인증시험을 통해 시스템을 검증하였음

- 개발된 블랙아이스 제거 시스템의 한계 및 고도화 방안

1. 실용화를 위한 도로 코팅제 시스템 제한사항 및 조건

- 본 연구는 도로 코팅제의 구성에 따라 발열 성능을 최적화 하는 연구를 수행하였으며, 블랙아이스 탐지 및 제거 성능 평가를 통해 개발된 코팅제의 우수성을 확인함
- 블랙아이스 탐지 및 제거를 위한 탄소나노튜브 기반 도로 코팅제의 기초 개발 단계의 연구로 개발된 기술의 실용화 또는 현장 적용을 위해 다음과 같은 조건 및 추가 연구 등이 필요함
 - 도로 현장 적용이 가능한 수준의 발열 코팅제의 전원 공급 및 제어용 하드웨어
 - 설치 현장 확인을 위한 CCTV를 지원하며 하드웨어 제어 및 모니터링 시스템
 - 대형 발열 코팅제 및 시스템 설치기법 개발
 - 실용화를 위한 탄소나노튜브 코팅제 대량생산 시스템 최적화

→ 외부전압에 의한 시제품의 발열 특성 최적화

- 연구실 규모의 탄소나노튜브 발열 코팅제를 실제 도로에 적용 가능한 크기로의 확대 및 설치 방식 개발과 개량된 코팅제에 대응하는 기존 제어 및 관리 시스템의 개선으로 현장 적용이 가능한 실용화 단계까지 도달할 수 있다고 판단됨

2. 발열 유지 지속과 시스템 전력 공급

- 본 연구의 결과물인 블랙아이스 감지 및 제거 시스템은 외부 온도 감지를 통해 코팅제의 발열 제어가 가능한 시스템으로 다양한 노면 상태 및 기후조건에 능동적으로 대응할 수 있도록 제작됨. 설치된 구역의 노면 및 대기 온도와 기상 상태를 고려하여 자동 또는 수동으로 발열 유지 시간 및 강도 제어가 가능하기 때문에 다양한 환경에 효과적으로 적용이 용이함
- 개발된 감지 및 발열 시스템의 전력 공급을 위해 기존의 신호등, 가로등 등을 위해 구비되어있는 전원공급 체계를 활용하는 방안과 태양광과 같은 신재생 에너지 시스템과 연동을 통해 원활한 전원 공급이 가능하며, 향후 실용화를 위한 추가적인 실증 연구를 통해 전력공급 시스템 구축 및 상용화가 가능할 것으로 판단됨

3. CNT 흡입으로 인체에 발생하는 유해성

- 본 연구의 결과물인 블랙아이스 감지 및 제거 도로 코팅제는 탄소나노튜브를 기반으로 하며, 이와 같은 나노 물질이 인체에 미치는 영향에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔음
- 독일의 Bayer 등의 연구에 따르면 OECD 기준에 따라 독성 테스트 실시하여 실제 CNT 노출 수준에서 실험한 결과 인체 유해성과는 상관관계가 없음을 밝힌 바 있음
- 본 연구에서 도로 코팅제의 내구성 및 내마모성 성능분석을 통해 도로코팅제의 마모 및 손상 발생은 확인하였으나 발생량은 많지 않으며, 정확한 분진 발생 계측과 인체에 미치는 영향 분석을 위해 향후 이와 관련된 추가 연구가 요구됨

4. 상용화를 위한 코팅제 제작 방법 고도화

- 본 연구의 도로 코팅제는 분말 형태의 CNT와 에폭시 수지를 혼입하여 제작되었으며, 이러한 형태는 고성능의 코팅제 제작이 가능하지만, 현재 상용화를 위한 대량생산 측면에서는 제한적임. 이에 대한 해결방안으로 액상형 CNT를 활용하는 방안 등이 고려되고 있으며, 분말 형태의 CNT와 더불어 추가적인 상용화 방안에 관한 연구가 필요함
- 본 연구에서 수행된 분산제에 따른 성능 연구(아세톤, 클로로포름)뿐만 아니라 다양한 분산제에 따른 성능 분석을 통해 제품의 고도화가 가능하다고 판단되며, 향후 제품 상용화에 고려할 필요가 있음

○ 연구개발 추진 전략 및 방법

- 본 연구의 최종 목표인 블랙아이스 탐지/제거를 위한 다기능성 재료 및 이와 연계된 시스템을 개발하기 위하여 본 연구팀에서 연구책임자가 2017년부터 영국 Department for Transport에서 수행했던 선행 연구결과를 바탕으로 탄소나노튜브 도로 코팅제 개발과 ㈜이엔지소프트와 연계한 사물인터넷 기반의 블랙아이스 탐지/제거 관리 시스템을 개발하고, 이를 기반으로 블랙아이스 탐지와 제거가 가능한 인텔리전트 도로 코팅 시스템을 개발에 대한 연구를 수행함
- 주관기관 연구책임자는 2015년 미국 컬럼비아대학에서 다기능성 구조재료를 전공한 공학박사로서 이후 미국 카네기멜론대학교 로봇공학과, 네덜란드 델프트공대 우주항공공학과, 그리고 영국 폴리머스대학교 토목공학과에서 탄소나노튜브 기반의 다양한 기능이 탑재된 구조재료에 대한 연구를 수행함. 특히, 나노 물질 분산 및 탄소나노튜브 폴리머 코팅제의 제작과 특성 분석에 다년간의 연구 경험 및 최신 분산 및 측정 관련 장비를 통해 원활하고 신속한 연구성과를 도출함
- 주관연구책임자가 사전에 형성하고 있는 국내외의 전문가(미국 컬럼비아대학교 Huiming Yin 교수 등) 그룹을 적극적으로 활용한 빈번한 연구자문 및 협력을 통하여 단기 문제 해결 및 기술의 고도화를

- 공동연구기관인 (주)이엔지소프트는 스마트 건설 관련 융합기술 적용을 위한 소프트웨어 및 시스템 개발과 관련된 연구 및 개발에 특화된 기관으로써 다양한 관련 연구 개발 경험을 바탕으로 웹 및 앱 개발을 통해 본 연구의 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템을 구축함

연구개발과제		총 참여 연구원
(총괄)과제명	탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 능동형 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 개발	주관연구책임자 (장승환)외 총 11명

기관별 참여 현황		
구 분	연구기관수	참여연구원수
대 기 업		
중견기업		
중소기업	1	9
대 학	1	3
국공립(연)		
출 연 (연)		
기 타		

한양대학교에리카 산학협력단
블랙아이스 탐지 및 제거가 가능한 탄소나노튜브 도로 코팅제 개발
연구책임자명 (장승환)외 2명
담당기술개발내용
탄소나노튜브 기반 도로 코팅제 개발 및 블랙아이스 탐지/제거 성능 평가

(주)이엔지소프트
사물인터넷 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 개발
연구책임자명 (남상혁)외 8명
담당기술개발내용
탄소나노튜브 도로 코팅제를 이용한 블랙아이스 탐지 및 제거를 위한 사물인터넷 기반의 통합 시스템 설계, 개발 및 적용평가

○ 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	계획수립 및 자료조사													5,000	한양대학교 에리카 산학협력단
2	시험체 제작													35,000	한양대학교 에리카 산학협력단
3	결빙온도에 따른 블랙아이스 탐지 성능 평가													15,000	한양대학교 에리카 산학협력단
4	자체 발열 성능 평가													25,000	한양대학교 에리카 산학협력단
5	시스템 기능 요구사항 분석													20,000	이엔지 소프트
6	시스템 하드웨어 설계													40,000	이엔지 소프트
7	웹 관리 시스템 소프트웨어 설계													40,000	이엔지 소프트
8	모바일 앱 기능 정의 및 설계													20,000	이엔지 소프트
2차년도															
1	시험체 제작													45,000	한양대학교 에리카 산학협력단
2	코팅제와 시스템 결합													20,000	한양대학교 에리카 산학협력단
3	실험실 환경 하 성능평가 모의실험													35,000	한양대학교 에리카 산학협력단
4	시스템 하드웨어 구축													40,000	이엔지 소프트
5	시스템 소프트웨어 개발													40,000	이엔지 소프트
6	모바일 앱 개발													40,000	이엔지 소프트
7	시스템 시험 운영 및 고도화													42,500	이엔지 소프트

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

○ 탄소나노튜브 도로 코팅제 개발

- 분산제에 따른 탄소나노튜브 분산에 대한 최적화
- 탄소나노튜브 함량에 따른 코팅제의 점성에 대한 최적화
- 온도에 따른 시험체의 전기전도도의 변화 분석
- 외부전압에 의한 시험체의 발열 특성 최적화
- 도로 코팅제와 시스템의 인터페이스 구성
- 실험실 환경 하 블랙아이스 탐지 및 발열 성능 평가

○ 사물인터넷 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 개발

- CNT 도로 코팅제 발열 제어 및 온·습도 데이터 수집이 가능한 소프트웨어 및 하드웨어 설계 문서 도출
 - 하드웨어 및 소프트웨어 설계문서 기반 프로토타입 개발
 - 디지털 온·습도 센서를 사용 가능하며 CNT 도로 코팅제에 안정적인 전원 인가 가능한 하드웨어 개발
 - 개량된 하드웨어에 대응하고 하드웨어에서 수집된 온·습도 데이터 및 기상 상태 가시화 방법 개발
 - 플랫폼에 제약 없이 하드웨어 원격제어 및 모니터링 가능한 모니터링 시스템 개발
 - 시험 운용을 통해 개발된 시스템 검증
 - 향후 개선 및 적용 방안 도출
-

(2) 정량적 연구개발성과

○ 정량적 성과는 당초 계획 대비 100% 이상 달성

- 논문 게재(SCIE): 100% (2건/2건) (달성)
 - 학술발표 논문: 300% (6건/2건) (초과달성)
 - 특허 출원: 200% (4건/2건) (초과달성)
 - 특허 등록: (1건/0건) (초과달성)
 - 소프트웨어 등록: 100% (2건/2건) (달성)
 - 일자리 창출: (1명/0명) (초과달성)
-

(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	Toward multi-functional road surface design with the nanocomposite coating of carbon nanotube modified polyurethane: lab-scale experiments	Nanomaterials	Sang-Guk Yum	10	스위스	MDPI	SCIE	2020.09.24	2079-4991	80
2	Multistage Mechanical Activation of Multilayer Carbon Nanotubes in Creation of Electric Heaters with Self-Regulating Temperature	Materials	Shchegolkov, Alexandr Viktorovich	14(16)	스위스	MDPI	SCIE	2021.12.08	1996-1944	50

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	KSCE 2020 CONVENTION CONFERENCE & CIVIL EXPO	블랙아이스 방지를 위한 탄소나노튜브 기반 도로 코팅제 개발	권우리	2020.10.21	제주도	한국
2	KSCE 2020 CONVENTION CONFERENCE & CIVIL EXPO	딥 러닝을 활용한 구조물 계측 데이터 예측 모델 성능 분석	이승준	2020.10.21	제주도	한국
3	한국구조물진단유지관리공학회 봄학술발표대회	유전 알고리즘을 활용한 교량 유한요소 모델 업데이트	이승준	2021.06.03	부산	한국
4	한국복합재료학회 춘계학술대회	탄소나노튜브 복합체를 활용한 구조물 및 기계의 열 요소 측정	이승준	2021.06.24	대전	한국
5	한국방재학회 학술발표대회	구조물 및 기계의 열 요소 측정을 위한 탄소나노튜브 복합체의 온도 센싱 성능분석	이승준	2021.09.10	온라인	한국
6	한국방재학회 학술발표대회	탄소나노튜브 코팅제 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리시스템	남상혁	2021.09.10.	온라인	한국

[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 코팅제를 이용한 표면 온도 측정 장치 및 이를 이용한 온도 측정 방법	한국	한양대학교 에리카 산학협력단	2020.11.12.	10-2020-0151144	-	-	-	100	-
2	특허	탄소 나노튜브를 이용한 도로 결빙 방지 장치 및 그 도로 결빙 방지 장치의 설치 방법	한국	한양대학교 에리카 산학협력단	2021.05.10.	10-2021-0059690	-	-	-	100	-
3	특허	블랙아이스 제거를 위한 탄소나노튜브 발열장치가 구비된 지능형 IoT 도로 융설 시스템	한국	(주)이엔지 소프트	2020.10.14.	10-2020-0132462	(주)이엔지 소프트	2021.04.05.	10-2238341	100	-
4	특허	도로 살얼음 제거를 위한 지능형 IoT 도로 융설 시스템	한국	(주)이엔지 소프트	2021.11.23.	10-2021-0161868	-	-	-	100	-

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타
1	√									√	
2	√									√	
3	√									√	
4	√									√	

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템	2021.12.03.	주식회사 이엔지소프트	2021.12.14.	C-2021-054922	주식회사 이엔지소프트	100
2	블랙아이스 탐지 및 제거 관리를 위한 모니터링 프로그램	2021.12.03.	주식회사 이엔지소프트	2021.12.14.	C-2021-054923	주식회사 이엔지소프트	100

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성)

- 과제 제안 시 계획되지 않았으나 공동연구기관(이엔지소프트)에서는 본 연구에서 개발하는 블랙아이스 감지 및 제거 시스템 개발에 관련된 일자리 창출 1명 달성 및 관련 특허 등록 1건 추가 달성

2) 목표 달성 수준

연구 개발 목표	달 성 내 용	달성도(%)
○ 블랙아이스 탐지 및 제거가 가능한 탄소나노튜브 도로 코팅제 개발 - 탄소나노튜브 기반 도로 코팅제 개발 및 성능평가를 통한 재료 최적화 - 실험실 수준 블랙아이스 조성 및 블랙아이스 탐지 및 제거 성능 평가	○ 탄소나노튜브 도로 코팅제 개발 - 분산제에 따른 탄소나노튜브 분산에 대한 최적화 - 탄소나노튜브 함량에 따른 코팅제의 점성에 대한 최적화 및 시험 보고서 작성 ○ 탄소나노튜브 기반 도로 코팅제의 성능평가 - 온도에 따른 시험체의 전기전도도의 변화 분석 - 외부전압에 의한 시험체의 발열 특성 최적화 및 시험 보고서 작성 ○ 시험체와 시스템 인터페이스 구성 - 시험체 사이즈와 전극 위치에 따른 시스템 구성 최적화 및 시험 보고서 작성 ○ 실험실 온도챔버 실험환경 묘사 - 아스팔트도로 위 탄소나노튜브 기반 코팅제 도포 및 시스템 설치 - 온도챔버를 이용하여 겨울철 블랙아이스 환경 묘사 - 블랙아이스 생성에 따른 시스템 탐지 및 제거 능력 평가 및 시험 보고서 작성 ○ 시스템의 내구성능 평가 - 차량 이동 묘사에 따른 시험체의 마모 성능 및 열적 성능 평가 및 시험 보고서 작성	100
○ 사물인터넷 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 개발 - IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 설계 - IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 관리 시스템 개발 및 시험 적용	- 하드웨어/소프트웨어 요구사항 분석서 및 상세 설계서 작성 - 하드웨어/소프트웨어 개발 및 시험운용을 통한 시스템 검증	100

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

※ 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% 이상 달성하였음
- 첨단 나노소재를 활용하여 블랙아이스를 조기에 감지 및 제거 할 수 있는 기술적 기반을 마련하였음

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

- 탄소나노튜브 도로 코팅제 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템은 겨울철 도로의 블랙아이스 발생시 자체 발열 기능을 통해 결빙구간을 즉시 제거할 수 있을 뿐 만 아니라 블랙아이스의 발생을 실시간으로 운전자 및 관리자에게 제공할 수도 있어 겨울철 블랙아이스에 대응할 수 있는 매우 적극적이고 능동적인 역할을 수행 할 수 있음
- 향후 실제 현장에 적용하기 위해서는 적용 현장의 특성에 따라 하드웨어의 고도화 및 최적화가 필요
- 도로 위치별 블랙아이스의 장소, 시간 등의 모든 데이터를 축적함으로써 정부 기관 및 지자체에 다양한 분석 또는 빅데이터의 제품으로 상용화 되는 등 정부 주요 사업인 스마트 시티 구축의 기반이 되는 요소기술로 적용 될 수 있음
- 기존 도로 표면에 포설 및 코팅 형식으로 적용됨으로써 기존의 도로를 손상시키지 않고 짧은 공사기간 및 인원으로 설치가 가능하기 때문에 설치비용이 감소될 것으로 예상됨에 따라 고속도로 뿐 만 아니라 지방도로 등 블랙아이스 위험이 있는 모든 도로에 저비용으로 설치되어 모든 국민이 혜택을 받을 수 있을 것으로 기대됨
- IoT 기반 블랙아이스 탐지 및 제거 시스템 운영을 통해 발열장치의 작동 상황에 대한 다양한 데이터를 수집하여 빅데이터화 하고 이를 분석하여 블랙아이스 발생조건 및 사고발생 형태 등에 대해 파악할 수 있게 된다면 보다 실용적이고 신뢰성 있는 시스템으로 널리 활용 가능
- 본 연구를 통해 도출되는 지식재산권 (특허 및 소프트웨어)의 소유권은 지식재산권을 제출하는 각 기관이 갖는 것을 기본으로 하며, 최종 연구성과물의 소유권은 공헌도에 따라 공유하거나 공동연구기관으로의 기술 이전을 통해 사업화로 연결될 수 있도록 할 것임
- 추가적인 연구개발을 통한 요소 기술 개선과 사업화 기반 마련이 필요하며, 겨울철 도로 결빙에 의한 안전사고를 획기적으로 감소시켜 이로 인한 인명 및 재산 보호에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대됨
- 본 연구에서 도출된 연구결과 및 시제품 등을 바탕으로 향후 국제공동기술개발사업에 미국 및 러시아 소재의 기업/대학과 함께 첨단형 블랙아이스 탐지 및 제거기술을 추진할 계획에 있음

7. 참고 문헌

- Webb, C. "Infrared: faster; smaller; cheaper", Control and Instrumentation 29.4 (1997): 44-5.
- L. Guadagno, B. De Vivo, A. Di Bartolomeo, P. Lamberti, A. Sorrentino, V. Tucci, L. Vertuccio and V. Vittoria, "Effect of functionalization on the thermo-mechanical and electrical behavior of multi-wall

- Wolfgang Bauhofer and Josef Z. Kovacs. "A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites", *Composites science and technology* 69.10 (2009): 1486–1498.
- Liberata Guadagno, Luigi Vertuccio, Carlo Naddeo, Elisa Calabrese, Giuseppina Barra, Marialuigia Raimondo, Andrea Sorrentino, Wolfgang H. Binder, Philipp Michael and Sravendra Rana. "Reversible self-healing carbon-based nanocomposites for structural applications", *Polymers* 11.5 (2019): 903.
- Florian H. Gojny and Karl Schulte. "Functionalisation effect on the thermo-mechanical behaviour of multi-wall carbon nanotube/epoxy-composites", *Composites science and technology* 64(15): (2004) p. 2303–2308.
- Sung-Hwan Jang and Huiming Yin. "Characterization and modeling of the effective electrical conductivity of a carbon nanotube/polymer composite containing chain-structured ferromagnetic particles." *Journal of Composite Materials* 51.2 (2017): 171–178.
- Sung-Hwan Jang and Huiming Yin. "Effect of aligned ferromagnetic particles on strain sensitivity of multi-walled carbon nanotube/polydimethylsiloxane sensors." *Applied Physics Letters* 106.14 (2015): 141903.
- Sung-Hwan Jang, Yong-Lae Park. "Carbon nanotube-reinforced smart composites for sensing freezing temperature and deicing by self-heating." *Nanomaterials and Nanotechnology* 8 (2018): 1847980418776473.
- Sung-Hwan Jang, Donghak Kim and Yong-Lae Park. "Accelerated curing and enhanced material properties of conductive polymer nanocomposites by joule heating." *Materials* 11.9 (2018): 1775.
- Jang-Kyo Kim, Yiu-Wing Mai eds. "Engineered interfaces in fiber reinforced composites", Elsevier, 1998.
- L. Vertuccioa, L. Guadagnoa, G. Spinellib, P. Lambertib, M. Zarrellic, S. Russod, G. Iannuzzod. "Smart coatings of epoxy based CNTs designed to meet practical expectations in aeronautics", *Composites Part B: Engineering* 147 (2018): 42–46.
- Kausar, Ayesha, Irum Rafique, and Bakhtiar Muhammad. "Aerospace application of polymer nanocomposite with carbon nanotube, graphite, graphene oxide, and nanoclay." *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 56.13 (2017): 1438–1456.
- Fan-Long Jin, Xiang Li, Soo-Jin Park. "Synthesis and application of epoxy resins: A review", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 29 (2015): 1–11.
- Abdulkadir Sanli, Abderrahmane Benchirouf, Christian Müller, Olfa Kanoun. "Piezoresistive performance characterization of strain sensitive multi-walled carbon nanotube-epoxy nanocomposites." *Sensors and Actuators A: Physical* 254 (2017): 61–68.
- G. Gkikas, N.-M. Barkoula, A.S. Paipetis. "Effect of dispersion conditions on the thermo-mechanical and toughness properties of multi walled carbon nanotubes-reinforced epoxy." *Composites Part B:*

- Laura Fay and Xianming Shi. "Environmental impacts of chemicals for snow and ice control: state of the knowledge." *Water, Air, & Soil Pollution* 223.5 (2012): 2751–2770.
 - L. Maurin, J. Boussoir, S. Rougeault, M. Bugaud, P. Ferdinand, A.G. Landrot, Y.–H. Grunevald, T. Chauvin. "FBG-based smart composite bogies for railway applications." 2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002 (Cat. No. 02EX533). IEEE, 2002.
 - Catalina Farcas, Oscar Galao, Luigi Vertuccio, Liberata Guadagno, M. Dolores Romero-Sánchez, Iluminada Rodríguez-Pastor and Pedro Garcés. "Ice-Prevention and De-Icing Capacity of Epoxy Resin Filled with Hybrid Carbon-Nanostructured Forms: Self-Heating by Joule Effect." *Nanomaterials* 11.9 (2021): 2427.
 - Sung-Hwan Jang and Long-Yuan Li. "Self-sensing carbon nanotube composites exposed to glass transition temperature." *Materials* 13.2 (2020): 259.
 - Baoguo Han, Xun Yu and Eil Kwon. "A self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring." *Nanotechnology* 20.44 (2009): 445501.
 - Sung-Hwan Jang and Huiming Yin. "Effective electrical conductivity of carbon nanotube-polymer composites: a simplified model and its validation." *Materials Research Express* 2.4 (2015): 045602.
 - Kenneth K. S. Lau, Jose´ Bico, Kenneth B. K. Teo, Manish Chhowalla, Gehan A. J. Amaratunga, William I. Milne, Gareth H. McKinley and Karen K. Gleason. "Superhydrophobic carbon nanotube forests." *Nano letters* 3.12 (2003): 1701–1705.
 - Beate Krause, Petra Potschke, Evgeniy Ilin and Mikhail Predtechenskiy. "Melt mixed SWCNT-polypropylene composites with very low electrical percolation." *Polymer* 98 (2016): 45–50.
 - Zhi-Dong Xiang, Tao Chen, Zhong-Ming Li and Xiang-Cheng Bian. "Negative temperature coefficient of resistivity in lightweight conductive carbon nanotube/polymer composites." *Macromolecular Materials and Engineering* 294.2 (2009): 91–95.
 - An-Ting Chien, Sangbeom Cho, Yogendra Joshi and Satish Kumar. "Electrical conductivity and Joule heating of polyacrylonitrile/carbon nanotube composite fibers." *Polymer* 55.26 (2014): 6896–6905.
 - Sithiprumnea Dul, Alessandro Pegoretti and Luca Fambri. "Effects of the nanofillers on physical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene nanocomposites: Comparison of graphene nanoplatelets and multiwall carbon nanotubes." *Nanomaterials* 8.9 (2018): 674.
 - Lorenzo Massimo Polgar, Francesco Criscitiello, Machiel van Essen, Rodrigo Araya-Hermosilla, Nicola Migliore, Mattia Lenti, Patrizio Raffa, Francesco Picchioni and Andrea Pucci. "Thermoreversibly cross-linked EPM rubber nanocomposites with carbon nanotubes." *Nanomaterials* 8.2 (2018): 58.
-

< 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.