

최종보고서(일반과제용)										보안등급	
										일반[✓], 보안[]	
중앙행정기관명	국토교통부				사업명		사업명		국토교통기술촉진 연구사업		
전문기관명	국토교통과학기술진흥원				내역사업명						
공고번호	공고-제05호				총괄연구개발 식별번호		-				
					연구개발과제번호		21CTAP-C157602-02				
국가과학기술 표준분류	1순위 소분류 코드명 건설구조재료 EI0406	50%	2순위 소분류 코드명 자연재해 저감기술 EI1105	30%	3순위 소분류 코드명 토목시공기술 EI0401	20%					
총괄연구개발명	국문	-									
	영문	-									
연구개발과제명	국문	블랙아이스 방지(표면온도 5℃ 유지)를 위한 나노 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속 포장기술 개발									
	영문	Development of Rapid Paving Technology using Nano Heating Module Embedded Concrete Panel for Prevention of Black Ice									
주관연구기관	기관명	경희대학교 산학협력단				사업자등록번호		135-82-10789			
	주소	(우)17104 경기도 용인시 기흥구 덕영대로1732 경희대학교 산학협력단 (중앙도서관 3층)				법인등록번호		-			
주관연구책임자	성명	정원석				직위		교수			
	연락처	직장전화	031-201-2550				휴대전화		010-9557-5359		
		전자우편	wschung@khu.ac.kr				국가연구자번호		1005 7155		
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 8.6개월)									
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31(8.6개월)									
	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	22,000	110,000	-	-	-	-	392,000	110,000	502,000	-
1년차	160,000	10,000	45,000	-	-	-	-	170,000	45,000	215,000	-
2년차	210,000	12,000	65,000	-	-	-	-	222,000	65,000	287,000	-
공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고			
								역할		기관유형	
공동연구기관	조선대학교 산학협력단	이희영	조교수	010-7111-2147		heeyoung0908@chosun.ac.kr					
	(주)동일기술공사	안승주	전 무	010-3204-0253		badasajada@naver.com					
연구기관 외 기관	(주)유창이엔씨	추재명	부 장	010-6267-8437		jjkenc@naver.com					
	(주)신우디엔씨	한건수	상 무	010-5344-3224		hangs1265@naver.com					
연구개발담당자 실무담당자	성명	박소현				직위		석사과정			
	연락처	직장전화	031-201-3897				휴대전화		010-8970-3937		
		전자우편	sohynpark@khu.ac.kr				국가연구자번호		1266 1508		

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

2022 년 01 월 21 일

주관연구책임자 : 정원석 (직인)

주관연구기관의 장 : 김윤혁 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요약 문 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업			총괄연구개발 식별번호		-	
내역사업명					연구개발과제번호		21CTAP-C157602-02	
국가과학기술 표준분류		1순위 소분류 코드명 건설구조재료 EI0406	50%	2순위 소분류 코드명 자연재해 저감기술 EI1105	30%	3순위 소분류 코드명 토목시공기술 EI0401	20%	
총괄연구개발명		-						
연구개발과제명		블랙아이스 방지(표면온도 5℃ 유지)를 위한 나노 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속 포장기술 개발						
전체 연구개발기간		2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 8.6개월)						
총 연구개발비		총 502,000 천원 (정부지원연구개발비 : 370,000 천원, 기관부담연구개발비 : 132,000 천원)						
연구개발단계		기초[] 응용[✓] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]			기술성숙도		착수시점 기준(TRL4) 종료시점 목표(TRL8)	
연구개발과제 유형		지정공모 [] 자유공모 [✓]						
연구개발과제 특성		실용화						
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표		최근 겨울철 대형 교통사고의 주요 원인인 블랙아이스를 예방하기 위한 탄소 나노소재 발열모듈 임베디드 콘크리트 포장기술 개발과 포장기술의 현장적용 시험을 통한 시공지침 개발 및 실용화 추진					
	전체 내용		- 나노 발열모듈 콘크리트 재료의 최적 배합기술 개발 - 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 현장적용 시험 발열 성능 분석 - 임베디드 발열모듈의 개념 설계 및 내부구조 분석 - 임베디드 발열모듈의 최적화 방안 연구 - 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 설계 및 제작기술 개발 - 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 유지관리 및 경제성(B/C)검토 - 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 설치기술 및 시공지침 개발					
	1년차	목표	- 주관연구기관(경희대학교): 나노 발열모듈 콘크리트 포장 재료의 최적 배합기술 개발 - 공동연구기관(조선대학교): 임베디드 발열모듈의 개념 설계 및 내부구조 분석 - 공동연구기관(㈜동일기술공사): 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 설계 및 제작기술 개발, 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 설치조건 및 설치방안 검토					
		내용	- 주관연구기관(경희대학교): ▪ 탄소나노튜브(CNT), 그래핀옥사이드(GO), 카본섬유(CF) 등의 탄소나노소재 특성을 반영한 시멘트 복합재료의 발열 성능 및 적합성 검토 ▪ 나노소재(CNT, 그래핀 등)의 모듈을 이용한 발열 콘크리트 배합기술 연구 ▪ 강도 및 발열 기능 향상을 위한 최적 나노 재료 및 함량 선정 ▪ 나노소재 콘크리트 혼입을 위한 wet mix 및 dry mix 혼합기술연구 - 공동연구기관(조선대학교): ▪ 항온항습챔버를 활용한 발열모듈의 온도성능시험 ▪ 콘크리트 균열 방지를 위한 발열모듈의 온도 구배 제어 연구 ▪ 미세구조 조직/공극구조 분석(SEM, XRD, TG/DTA) ▪ 제안기술의 시공단계별 개념 설계 및 시공단계별 디지털 Mock-up - 공동연구기관(㈜동일기술공사): ▪ 콘크리트 패널 형태에 따른 임베디드 발열모듈 적용방안 검토 ▪ 콘크리트 패널 모듈화에 따른 요소별 형상설계 ▪ 시험체 제작 및 설치단계 검증을 위한 BIM기반 3D객체 모델링 ▪ 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장 경제성 분석 ▪ 제안기술 적용가능 구간 분석(하향 경사구간, 터널 및 교량 적용)					

			▪ 제안기술의 실용화 타당성 조사 및 현장시공을 위한 대상선정 ▪ 제안기술의 콘크리트 패널 급속포장 설치방안 상세도출											
	2년차	목표	- 주관연구기관(경희대학교): 발열모듈 임베디드 프리캐스트 콘크리트 포장의 현장적용 시험 - 공동연구기관(조선대학교): 임베디드 발열모듈의 최적화 방안 연구 - 공동연구기관(㈜동일기술공사): 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 설계 및 제작 유지관리 가이드라인 개발, 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 시험설치 및 실용화 추진											
		내용	- 주관연구기관(경희대학교): ▪ 발열 콘크리트 포장의 나노 모듈 시제품 제작 ▪ 나노 모듈 콘크리트 포장의 현장 계측 및 분석 ▪ 현장적용 발열모듈 임베디드 콘크리트 포장의 발열성능 분석 ▪ 발열모듈 임베디드 프리캐스트 콘크리트 포장의 발열온도 제어 - 공동연구기관(조선대학교): ▪ 최적 발열 효율을 위한 전극 재료 및 모듈 위치 연구 ▪ 기후조건을 반영한 최적 나노 모듈 방안(재료, 농도, 공급전압) 제시 - 공동연구기관(㈜동일기술공사): ▪ 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 제작 및 설치 구조 안전성 검토 ▪ 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 제작 및 설치 표준도 작성 ▪ 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 형태별 2-TYPE 제작 (차륜형태에 따른 전단면과 반단면) ▪ 제안기술의 설계/ 제작 유지관리 가이드라인 연구 ▪ 제안기술의 발열 성능 검증을 위한 시험체 형태별 2-TYPE 제작 (차륜형태에 따른 전단면과 반단면) 현장설치 ▪ 현장조건별 급속교체 설치에 따른 시공기술 및 시공지침서 개발 ▪ 제안 기술의 실용화 및 사업화 추진 활성화를 위한 참여기업과의 실시계약 체결											
연구개발성과			- 발열성능 최적화를 위한 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장 재료의 최적 배합기술 - 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 설계/ 제작 가이드라인 - 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 타입별 제작 및 현장설치 - 급속교체 설치에 따른 설치기술 및 설치지침서 개발 - 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장 모듈 실용화 및 사업화											
연구개발성과 활용방안 및 기대효과			- 강도향상 및 발열기능이 가능한 다기능 차세대 건설재료 시장 확보 - 내구성이 확보된 모듈화 콘크리트 패널로 급속포장 및 장수명화 가능 - 제설재 최소화로 내구성 향상 및 환경보호 - 신기술간의 융합기술을 실현하여 건설재료 분야의 고부가가치 원천기술 개발과 미래 성장 동력을 확보 - 선진기술의 국산화를 도모하고 관련 국내 전문연구인력을 양성											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유			해당없음											
연구개발성과의 등록·기탁 건수			논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화학물	신 품종	
										생명 정보	생물 자원		정보	실물
			4건	4건	2건		2건						시제품 2건, 성과홍보 1건	
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			탄소 나노소재		발열모듈		콘크리트포장		응설/응빙		
영문핵심어 (5개 이내)			Black ice			Carbon nano-material		Heating module		Concrete pavement		Snow/Ice melting		

< 목 차 >

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

별첨자료(참고문헌 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

○ 기존 용빙 시스템의 문제 및 블랙아이스의 위험성

사회기반 시설물 중 하나인 도로는 겨울철 급격한 기온 저하로 인하여 결빙 문제가 빈번히 발생하며, 겨울철 차량 안전에 심각한 위협이 된다. 그림 1.1은 도로상 블랙아이스로 비가시적이기에 운전자가 인지하기 어렵다. 따라서 겨울철에는 폭설로 인하여 도로의 급경사 구간이나 주차장 입출구 등에서 블랙아이스로 인한 사고가 빈번하게 발생하므로 차세대 용빙 시스템의 도입이 필요한 실정이다. 용빙 시스템은 도로 포장체의 표면에 결빙이 발생할 시 포장면의 온도를 결빙점 이상으로 유지하는 시스템이다. 이러한 용빙 시스템은 포장면 위의 수분이나 잔설이 블랙아이스로 전환되는 것을 방지한다.



그림 1.1 도로상에 발생한 블랙아이스

최근에는 이러한 겨울철 결빙 문제를 해결하기 위하여 다양한 해결 방안이 제시되었다. 제설제 살포 및 열선 설치는 근래에 가장 많이 적용된 용빙 시스템이다. 하지만 제설제를 살포하는 방식은 교량과 같은 구조물에 부식을 유발한다. 열선을 설치하는 방식은 많은 전력이 소비되며, 차량 하중으로 인하여 파손이 빈번히 발생한다. 이러한 기존 용빙 시스템은 높은 유지보수비용으로 인하여 현장에서의 적용이 중단된 사례도 발생하였다.

제설제를 살포하여 결빙 문제를 해결하는 용빙 시스템은 사용이 간편하고 초기 비용이 저렴하기에 과거부터 겨울철 결빙 발생지역에 사용되었다. Seo et al. (2016)에 따르면 제설제는 CaCl_2 와 NaCl 을 혼합하여 사용하고 있으며, 2000년부터 습염살포방식을 선택하여 적용하고 있다. 그림 1.2는 제설제를 살포하여 도로상 결빙 문제를 해결하는 모습이다. CaCl_2 는 물을 흡수하며 발열반응이 발생하는 조해성을 가지고 있고, NaCl 은 물의 어는점을 낮추는 효과가 있다. 따라서 제설 시에는 이러한 염화물계 제설제를 사용한 용빙 시스템을 주로 적용한다. 그림 1.3은 제설제로 인하여 파손이 발생한 도로 포장면이다. 염화물계 제설제는 다량 살포 시 차량, 콘크리트 및 철근 등에 심각한 부식을 유발하고, 환경을 훼손한다. 또한 제설제는 강도 저하를 유발하고 구조물을 손상시켜 수명을 단축한다.



그림 1.2 제설제를 살포하는 모습



그림 1.3 제설제로 인해 발생한 도로 파손

친환경 제설제는 염화물계 제설제의 문제를 극복하기 위해서 도입되었으나, 염화물계 제설제에 비하여 가격이 높고 융설 효과도 저조하다. 이러한 이유로 최근에는 제설제 없이 눈을 녹이는 기법이 다양하게 시도되고 있다. Kim et al. (2012)에 따르면 전열선 매립에 의한 도로 융빙 시스템은 노면 발열 효과가 우수하여 터널 진출입부, 교량 상부 등에 적용할 수 있다. 그림 1.4는 도로 열선을 설치하는 모습이다. 그러나 열선을 활용한 융빙 시스템은 운영 시 막대한 비용이 소모되고, 열선과 포장체의 높은 온도 차이로 인하여 포장면 균열을 발생시킨다. 또한 Kim et al. (2010)은 열선 설치 시 중차량 주행으로 인하여 단선 가능성이 존재하며, 유지보수에 어려움이 있는 것으로 확인되었다. 이러한 이유로 최근에는 염화물계 제설제와 열선으로 인한 문제를 해결할 수 있는 차세대 융빙 시스템이 필요성이 대두되고 있다.



그림 1.4 도로 열선을 설치하는 모습

본 연구는 염화물계 제설제와 열선으로 인한 문제점을 보완하면서 나노기술을 적용하여 블랙아이스 문제를 해결할 수 있는 차세대 융빙 시스템을 구현하고자 한다. 탄소계열 나노소재는 전기전도성과 열전도성이 우수한 것으로 확인되었다. 탄소계열 나노소재를 건설재료에 적용하는 연구는 세계적으로 초기 단계이고 체계적으로 정립된 분야가 아니므로, 나노 분야와 건설 분야를 융합하는 선도적 연구가 필요하다. 이에 본 연구는 최근 우수한 다기능성으로 주목받고 있는 탄소계열 나노소재 (Carbon Nanotube, Graphene Nanoplate 등)와 콘크리트를 융합하여 블랙아이스 문제를 해결할 수 있는 발열 콘크리트를 개발하고자 한다. 이를 기반으로 본 연구의 목표는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

- 블랙아이스 예방이 가능한 나노 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장 기술 사업화
 - 반복적으로 발생하는 겨울철 블랙아이스로 인한 대형 교통사고를 방지하며, 포장체의 내구성을 확보할 수 있는 시스템을 개발하기 위하여 다음과 같은 목표를 설정함.
 - ① 낮은 소모전력으로 높은(표면온도 5°C 유지) 융설 및 융빙
 - ② 공장제조를 통한 모듈화로 설치시간 최소화
 - ③ 콘크리트 패널로 내구성이 확보된 다기능 나노 모듈 콘크리트 최적 배합기술 개발
 - ④ 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 제작 및 급속 설치기술 실용화

○ 세부 목표

- 나노 모듈 콘크리트의 최적 배합기술 개발
- 나노 모듈 발열 콘크리트 개념 설계 및 내부구조 분석
- 나노 모듈 콘크리트의 제작기술 개발
- 나노 모듈 콘크리트의 현장적용 시험 발열 성능 분석
- 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널의 최적화 연구
- 발열모듈 임베디드 콘크리트의 패널 설치 및 유지관리 가이드라인 개발



발열모듈 임베디드 포장체



콘크리트 패널 제작기술



콘크리트 패널 급속시공

그림 1.5 발열모듈 임베디드 콘크리트 포장체 제작 및 시공과정

2) 연구개발과제의 년차별 목표

○ 1차년도

- 주관연구기관(경희대학교):

최근 탄소계열 나노소재는 건설 분야에서 블랙아이스를 해결하기 위한 대안으로 주목받고 있다. 하지만 다양한 탄소계열 나노소재 중에서 시멘트계 재료에 혼입할 시 우수한 발열성능을 확보할 수 있는 최적의 나노소재에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 시멘트계 재료에 혼입할 시 가장 우수한 발열성능이 발현되는 탄소계열 나노소재를 분석하고자 한다. 이러한 이유로 본 연구는 탄소나노튜브(CNT), 그래핀나노플레이트(GNP), 카본블랙(CB) 등의 탄소계열 나노소재를 혼입한 시멘트 복합재료의 발열 성능을 분석하고, 적합한 탄소계열 나노소재를 선정하고자 한다. 발열 성능은 탄소계열 나노소재를 혼입한 나노 발열모듈의 전기전도성과 열전도성을 분석하여 파악하고, 탄소계열 나노소재 중에서 가장 우수한 발열 성능이 발현되는 재료를 선정하여 발열 콘크리트 개발을 위한 최적의 함량과 배합기술을 연구하는 것을 목표로 한다.

- 탄소나노튜브(CNT), 그래핀옥사이드(GO), 카본섬유(CF) 등의 탄소 나노소재 특성을 반영한 시멘트 복합재료의 발열 성능 및 적합성 검토
- 나노소재(CNT, 그래핀 등)의 모듈을 이용한 발열 콘크리트 배합기술 연구
- 강도 및 발열 기능 향상을 위한 최적 나노 재료 및 함량 선정
- 나노소재 콘크리트 혼입을 위한 wet mix 및 dry mix 혼합기술연구

- 공동연구기관(조선대학교):

탄소계열 나노소재 중에서 가장 우수한 발열 성능이 발현되는 재료를 선정하여 발열 콘크리트 개발을 진행하고자 한다. 설계한 발열 콘크리트를 이용하여 콘크리트 포장 슬래브에 임베디드하여 설치하기에 최적의 발열모듈을 제작한다. 본 연구는 발열모듈의 온도성능시험을 위해 항온항습챔버를 이용하고, 콘크리트 내부구조를 분석하여 미세구조 파악 및 균열 방지를 위한 온도 구배 제어 연구를 수행하고자 한다.

- 항온항습챔버를 활용한 발열모듈의 온도성능시험
- 콘크리트 균열 방지를 위한 발열모듈의 온도 구배 제어 연구
- 미세구조 조직/공극구조 분석(SEM, XRD, TG/DTA)
- 제안기술의 시공단계별 개념 설계 및 시공단계별 디지털 Mock-up

- 공동연구기관((주)동일기술공사):

발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장 설계 및 제작기술 개발 그리고 콘크리트 패널 급속포장 설치조건 및 설치방안 검토를 목표로 한다. 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장 설계 및 제작기술 개발의 세부적 목표로는 아래 네 가지를 선정하고자 한다.

- 콘크리트 패널 형태에 따른 임베디드 발열모듈 적용방안 검토
- 콘크리트 패널 모듈화에 따른 요소별 형상설계
- 시험체 제작 및 설치단계 검증을 위한 BIM기반 3D객체 모델링
- 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장 경제성 분석

콘크리트 패널 급속포장 설치조건 및 설치방안 검토의 세부적 목표로는 세 가지를 선정하고자 한다.

-
- 제안기술 적용가능 구간 분석(하향 경사구간, 터널 및 교량 적용)
 - 제안기술의 실용화 타당성 조사 및 현장시공을 위한 대상선정
 - 제안기술의 콘크리트 패널 급속포장 설치방안 상세도출

○ 2차년도

- 주관연구기관(경희대학교):

본 연구는 발열모듈 임베디드 프리캐스트 콘크리트 포장의 현장적용 시험 및 발열 성능분석을 총 4단계로 구분하여 수행하고자 한다. 첫 번째 단계에서는 발열 콘크리트 포장에 사용될 발열모듈을 설계하고 시제품을 제작한다. 해당 단계에서는 발열모듈의 최적 크기를 선정한다. 최적 크기가 정해진 후에는 설계한 발열모듈이 현장 적용하기에 적합한 발열 성능을 가졌는지 발열 성능을 분석한다. 세 번째 단계로는 현장적용 발열모듈 콘크리트 포장의 발열 제어성능을 분석한다. 마지막으로 발열 성능 검토를 마친 발열모듈을 이용하여 프리캐스트 콘크리트 포장에 삽입하여 타설한 후 발열 실험을 진행한다. 본 연구는 앞서 언급한 4단계를 수행하여 도출한 발열 실험 결과를 바탕으로 공급전압-온도상관관계를 분석하고자 한다.

- 발열 콘크리트 포장의 나노 모듈 시제품 제작
- 나노 모듈 콘크리트 포장의 현장 계측 및 분석
- 현장적용 발열모듈 임베디드 콘크리트 포장의 발열성능 분석
- 발열모듈 임베디드 프리캐스트 콘크리트 포장의 발열온도 제어

- 공동연구기관(조선대학교):

본 연구는 1차년도에서 진행한 탄소계열 나노소재를 이용한 발열 콘크리트 개발을 바탕으로 임베디드 발열모듈의 최적화 방안 연구를 수행하고자 한다. 최적 발열 효율을 위한 전극 재료 및 모듈 위치 연구를 진행하고, 이를 바탕으로 기후조건을 반영한 연구를 수행한다. 기후조건은 일반 기후조건과 극한기후조건으로 구분하여 나노 모듈에 사용되는 재료, 농도, 공급전압에 따른 최적 나노 모듈 방안을 제시하고자 한다.

- 최적 발열 효율을 위한 전극 재료 및 모듈 위치 연구
- 기후조건을 반영한 최적 나노 모듈 방안(재료, 농도, 공급전압) 제시

- 공동연구기관(주)동일기술공사):

발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 제작 표준화와 유지관리 지침서 작성 그리고 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 시험설치 및 실용화 추진을 목표로 한다. 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 제작 표준화와 유지관리 지침서 작성의 세부적 목표로는 아래 네 가지를 선정하고자 한다.

- 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 제작 및 설치 구조 안전성 검토
 - 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 제작 및 설치 표준도 작성
 - 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 형태별 2-TYPE 제작(차륜형태에 따른 전단면과 반단면)
 - 제안기술의 설계/ 제작 유지관리 가이드라인 연구
-

발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 시험설치 및 실용화 추진의 세부적 목표로는 아래 세 가지를 선정하고자 한다.

- 제안기술의 발열 성능 검증을 위한 시험체 형태별 2-TYPE 제작 및 현장설치
- 현장조건별 급속교체 설치에 따른 시공기술 및 시공지침서 개발
- 제안 기술의 실용화 및 사업화 추진 활성화를 위한 참여기업과의 실시계약 체결

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2020)	시편 전기전도성	전기전도성 실험 및 분석	[국내] 기술개발 [국외] 기술개발	5배 이상	시편 전기전도성 실험을 통한 목표 설정	1.5
	시편 열전도성	열전도성 실험 및 분석	[국내] 기술개발 [국외] 기술개발	5배 이상	시편 열전도성 실험을 통한 목표 설정	1.5
	부착강도	공인시험 성적서 (KS F 2762)	[국내] 기술개발 [국외] 기술개발	10% 향상	자체 선정	1.5
	압축강도	공인시험 성적서 (KS F 2405)	[국내] 기술개발 [국외] 기술개발	10% 향상	자체 선정	1.5
	휨강도	공인시험 성적서 (KS F 2408)	[국내] 기술개발 [국외] 기술개발	10% 향상	자체 선정	1.5
	최적 나노 재료 및 함량	최적 나노 재료 확인 및 함량 선정	[국내] 기술도입 [국외] 기술개발	1건	최적 나노 재료 확인 실험을 통한 목표 설정	3.5
	혼입기술	혼입기술 개발	[국내] 기술도입 [국외] 기술개발	1건	혼입기술 실험을 통한 목표 설정	2.3
	기공률	Mercury Intrusion Porosimetry 자체평가	[국내] 기술도입 [국외] 기술개발	30%	자체 선정	1.5
	BIM기반 모델링	BIM기반 모델링	[국내] 기술도입 [국외] 기술개발	1건	자체 선정	6.0
	경제성 분석	경제성 분석	[국내] 기술도입 [국외] 기술개발	Plain 대비 생애주기비용 10% 절감	자체 선정	5.0
	발열성능	발열성능 분석	[국내] 기술도입 [국외] 기술개발	40°C 이상	국내 최저 기온 통계 참고 (2014~2018)	7.6
	발열온도 제어성능	발열온도 제어성능 실험 및 분석	[국내] 기술도입 [국외] 기술개발	30 °C/10 min	발열양생 온도구배 제한 기준을 따름	9.7
2년차 (2021)	공급전압-온도 상관관계 분석	공급전압-온도 상관관계 분석	[국내] 기술개발 [국외] 기술개발	1건	자체 선정	3.0
	최적 모듈 크기	최적 모듈 크기 선정	[국내] 기술개발 [국외] 기술개발	1건	자체 선정	4.0
	최적 모듈 위치	최적 모듈 위치 선정	[국내] 기술개발 [국외] 기술개발	1건	자체 선정	5.0
	상황별 최적 나노모듈 방안	상황별 최적 나노모듈 방안 분석	[국내] 기술개발 [국외] 기술개발	1건	자체 선정	7.5
	발열성능	발열성능 분석	[국내] 기술도입 [국외] 기술개발	30 °C 이상	국내 최저 기온 통계 참고 (2014~2018)	7.6
	발열온도 제어성능	발열온도 제어성능 실험 및 분석	[국내] 기술도입 [국외] 기술개발	10 °C/10 min	발열양생 온도구배 제한 기준을 따름	9.7
	가이드라인	가이드라인 자체보고서 작성	[국내] 기술도입 [국외] 기술개발	3건	자체 선정	26.9
	기술 실용화	기술 실용화 자체 보고서 작성	[국내] 기술도입 [국외] 기술개발	1건	자체 선정	10.5

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

[주관 (경희대학교)]

1) 나노 발열모듈 콘크리트 포장 재료의 최적 배합기술 개발

1.1) 탄소계열 나노소재 특성을 반영한 시멘트 복합재료의 발열 성능 및 적합성 검토

최근 탄소계열 나노소재는 다기능성으로 인하여 건설 분야에서 주목받고 있는 재료이다. 하지만 다양한 탄소계열 나노소재 중에서 시멘트계 재료에 혼입할 시 우수한 발열성능을 확보할 수 있는 최적의 나노소재에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 시멘트계 재료에 혼입할 시 가장 우수한 발열성능이 발현되는 탄소계열 나노소재를 분석하고자 한다. 이에 다중벽 탄소나노튜브 (Multi-walled carbon nanotube, MWCNT), 그래핀나노플레이트(Graphene nanoplatelet, GNP), 전도성 카본블랙(Conductive carbon black, CB) 등의 탄소계열 나노소재를 혼입한 시멘트 복합재료의 발열 성능을 분석하고, 적합한 탄소계열 나노소재를 선정하였다. 발열 성능은 탄소계열 나노소재를 혼입한 나노 발열모듈의 전기전도성과 열전도성을 분석하여 파악하였고, 탄소계열 나노소재 중에서 가장 우수한 발열 성능이 발현되는 재료를 선정하였다.

본 연구는 탄소계열 나노소재를 혼입한 나노 발열모듈의 전기적 및 발열 성능을 파악하기 위하여 모듈의 전기전도성과 열전도성을 분석하였다. 전기적 및 발열 성능분석을 위한 탄소계열 나노소재는 다수의 참고문헌을 참조하여 MWCNT, GNP, CB로 선정하였다. 나노 발열모듈은 앞서 선정된 3종류의 탄소계열 나노소재를 혼입하여 제작하였다. 매개변수는 탄소계열 나노소재의 종류 및 농도로 설정하였으며, 시편은 매개변수에 따라 총 12개를 제작하였다 (표 1.1.1). 나노 발열모듈의 전기전도성은 전기저항 측정 실험을 통하여 측정하였다 (그림 1.1.1). 전기저항 측정 실험은 Keithley integra series 2701 모델을 이용하여 수행하였으며, 실험 셋업은 그림 1.1.2와 같다. 발열 성능 실험은 시편 중심부에 설치된 thermocouple를 정적 데이터 로거 (Static Data Logger, TDS-303)에 연결하여 발열량을 측정하며, 그림 1.1.3과 같다. 시편의 발열량을 측정하는 실험 셋업은 그림 1.1.4와 같다. 양생일은 선행연구 Song et al. (2016)에 따라 7일 양생 후 실험을 진행했을 때 문제가 없음을 확인하였기에 7일로 설정하였다. 혼입농도를 설정한 근거는 참고문헌 Kim et al. (2020)를 참고하였을 때 MWCNT 혼입농도가 시멘트 중량대비 1.0wt%일 때 가장 우수하였기 때문에 본 연구에서도 MWCNT 혼입농도를 시멘트 중량대비 1.0wt%를 최대 혼입농도로 설정하였다. 각 시편의 전기적 및 발열 성능은 전기 저항과 발열량을 분석하여 검토하였다.

표 1.1.1 발열 성능 실험 매개변수

시편명	나노 재료 함량 (wt%)	나노 재료 종류	전압 (V)	양생일 (일)
Control	0.0	-	60	7
MW-0.25	0.25	MWCNT		
MW-0.5	0.5			
MW-1.0	1.0			
CB-0.25	0.25	Carbon Black		
CB-0.5	0.5			
CB-1.0	1.0			
GNP-0.25	0.25	Graphene Nanoplatelets		
GNP-0.5	0.5			
GNP-1.0	1.0			

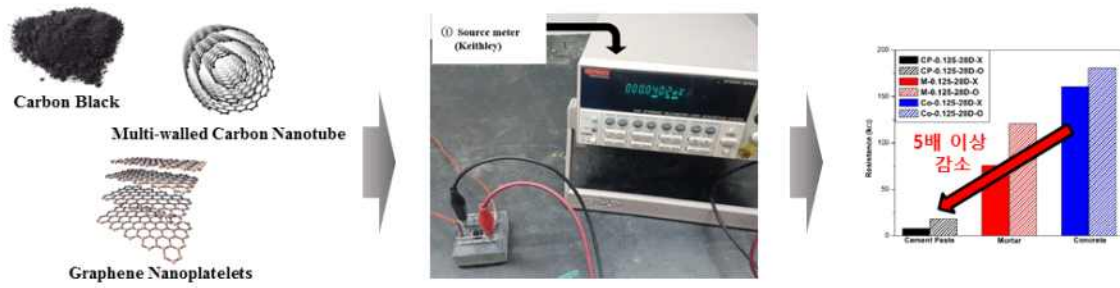


그림 1.1.1 전기저항 실험 개요



그림 1.1.2 전기저항 실험 셋업

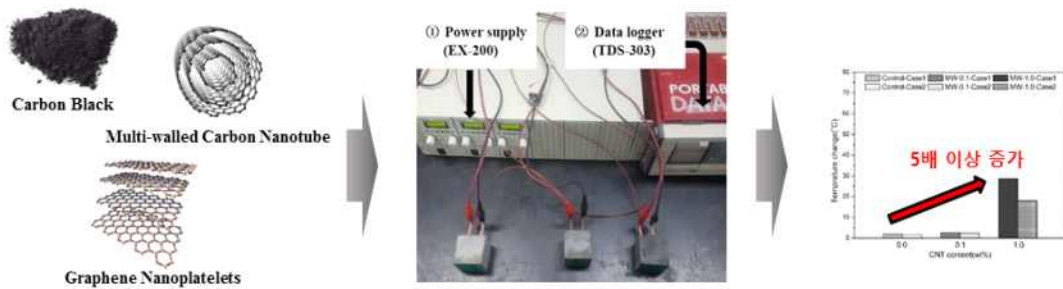


그림 1.1.3 발열 성능 실험 개요



그림 1.1.4 발열 성능 실험 셋업

1.2) 최적 나노 재료를 혼입한 발열 콘크리트 배합기술 연구

본 연구는 탄소계열 나노소재 중에서 선정된 최적 나노소재인 MWCNT를 이용하여 발열 콘크리트 제작에 필요한 배합기술을 분석하고자 한다. 선정된 나노소재는 함량에 따른 배합 비율과 방법에 따라 차이를 파악하기 위하여 부착강도, 압축강도, 인장강도 등을 측정하고 결과를 비교 분석하였다.

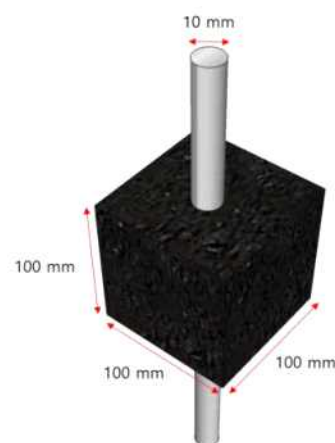
따라서 본 연구는 최적 배합기술의 성능을 검증하기 위해 부착강도, 압축강도 및 인장강도 시험을 수행하였다. 매개변수인 MWCNT의 혼입량은 선행연구 Kim et al. (2020)을 참고하여 시멘트 중량대비 0.0wt%, 0.5wt%, 1.0wt%로 설정하였다 (표 1.2.1). 부착강도 시험은 KS 규정이 별도로 명시되어 있지 않기에 Japan Society of Civil Engineers에서 제시한 Commentary on The Test Method for Bond Strength of Continuous Fiber Reinforcing Materials by Pull-Out Testing (JSCE-E539, 1995)에 근거하여 실험을 수행하였다 (그림 1.2.1). 압축강도 시험은 KS F 2405에 근거하여 진행하였으며, 실험 셋업과 시험의 개요는 그림 1.2.2와 같다. 시편은 원주 100 mm, 높이 200 mm로 제작하였다. 휨인장강도 시험은 KS F 2408에 근거하여 4점 재하법으로 실험을 진행하였다. 그림 1.2.3은 실험 셋업과 시편의 모식도이며, 시편은 가로 100 mm, 세로 100 mm, 길이 400 mm인 직육면체로 제작하였다. 시편 양생일은 강도 측정 시 표준양생일로 설정된 28일로 고정하였다. 시편은 매개변수별로 3개씩 총 9개를 제작하였고, 제작한 각 시편에 대한 강도시험을 수행하였다. MWCNT의 혼입량에 따른 강도는 부착강도, 압축강도 및 인장강도 시험 결과를 바탕으로 분석하였고, 이를 기반으로 최적의 MWCNT 혼입량을 도출하였다.

표 1.2.1 부착강도 성능시험 매개변수

시편명	MWCNT함량 (wt%)	물/시멘트 비	양생일 (일)
Control	0	0.5	28
MWCNT-0.5	0.5		
MWCNT-1.0	1.0		



(a) 시험 set-up

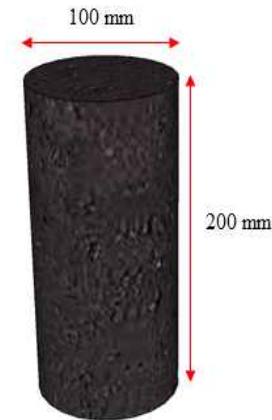


(b) 시편 모식도

그림 1.2.1 부착강도 시험 개요



(a) 시험 set up

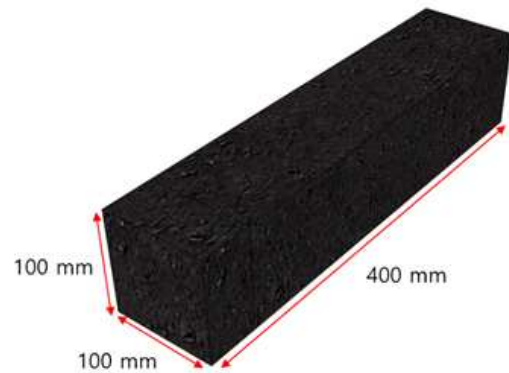


(b) 시편 모식도

그림 1.2.2 압축강도 시험 개요



(a) 휨인장강도 시험 set-up



(b) 시편 모식도

그림 1.2.3 휨인장강도 시험 개요

1.3) 나노소재 콘크리트 혼입을 위한 wet mix 및 dry mix 혼합기술 연구

본 연구는 선정된 나노 재료를 콘크리트에 혼입할 시 어떤 형태의 나노 재료가 가장 적합한지를 확인하고 적합한 나노 재료를 선정하여 해당 재료에 적합한 혼합기술을 분석하였다. 나노 재료 혼합 방법은 wet mix와 dry mix로 구분하여 연구를 수행하였다.

Wet mix 분산법은 나노 재료를 이용한 콘크리트 제작 시 사용되는 혼입 기술 중 하나이며, 분산된 MWCNT 수용액을 시멘트 복합체에 혼합하는 방법이다. Dry mix 분산법은 분말 상태의 MWCNT를 시멘트 복합체에 혼합하는 방법이다 (그림 1.3.1). 매개변수는 분산 방법, MWCNT 함량, 그리고 공급전압으로 설정 (표 1.3.1)하였고, 발열 성능 실험과 압축강도 시험을 수행하였다. 본 연구는 시편을 제작한 후 발열 성능 및 압축 강도시험을 수행하였다. 발열 성능 실험은 50 V의 전압을 60분 동안 공급하여 진행하였고, 공급전압은 선행연구 Park et al. (2018)을 참고하여 50 V로 선정하였다. 압축강도 시험은 KS F 2405에 근거하여 수행하였다. 본 연구는 각 시편의 발열량과 압축강도 결과를 비교하여 최적 혼합기술을 도출하였다.

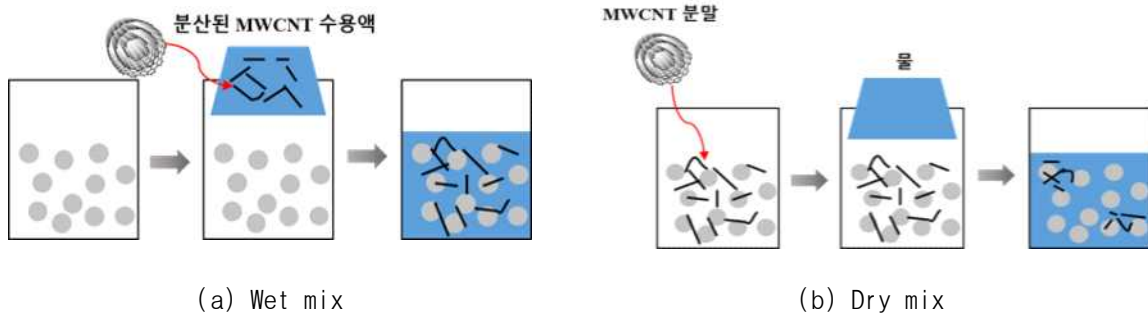


그림 1.3.1 Wet mix 및 Dry mix 개요

표 1.3.1 분산 방법 선정 실험 매개변수

수행 실험	시편명	나노 재료 함량 (wt%)	분산 방법	전압 (V)	양생일 (일)
발열 성능	Control	0.0	-	50	28
	W-C0.5	0.5	Wet mix		
	W-C1.0	1.0			
	D-C0.5	0.5	Dry mix		
	D-C1.0	1.0			
압축강도	Control	0.0	-	-	
	MWCNT-W-1.0	1.0	Wet mix		
	MWCNT-D-1.0		Dry mix		

2) 발열모듈 임베디드 프리캐스트 콘크리트 포장의 현장적용 시험 및 발열 성능분석

2.1) 발열 콘크리트 포장의 나노 모듈 시제품 제작

발열모듈 임베디드 프리캐스트 콘크리트 포장의 현장적용 시험 및 발열 성능분석은 총 4단계로 구분하여 수행되었다. 첫 번째 단계에서는 발열모듈을 설계하고 시제품을 제작한다. 해당 단계에서는 발열모듈의 최적 크기를 선정한다. 발열모듈의 최적 크기가 정해진 후에는 발열 성능 실험을 수행하여 발열모듈의 현장 적합성을 분석한다. 세 번째 단계로는 현장 적용 발열모듈 콘크리트 포장의 발열 제어성능을 분석한다. 마지막으로 발열모듈을 프리캐스트 콘크리트 포장에 삽입하여 타설한 후 발열 실험을 진행하고, 공급전압-온도 상관관계를 분석한다.

발열모듈 설계 및 시제품을 제작하는 첫 번째 단계에서는 나노 모듈의 형태를 두 종류로 나누어 제작하였고, 각각의 모듈을 큐브형과 큐보이드형으로 명명하였다 (그림 2.1.1). 큐브형은 길이가 50 mm인 정육면체 형태로 제작하였다. 발열 실험을 위한 발열모듈 시편의 규격은 별도로 명시되어 있지 않기에 ASTM C 109를 참고하여 제작하였다. 큐보이드형은 각 변의 길이가 100 mm, 300 mm, 60 mm으로 이루어진 직육면체 형태로 제작하였다. 발열모듈은 제작 완료한 후 최적 크기를 선정하기 위하여

모듈 크기에 따른 발열 효율을 분석하였다. 공급전압에 따른 발열량, mesh 개수에 따른 발열 면적, 실제 시공성 등을 고려하여 발열 효율을 확인하였다. 매개변수는 발열체의 크기, 양생일, 공급전압으로 선정하였다. 본 연구는 전기전도성 실험 결과를 통해 모듈의 크기를 설정하고 모듈 크기에 따른 발열 효율을 파악하여 현장에 적용 가능한 최적 발열모듈을 선정하고자 한다.

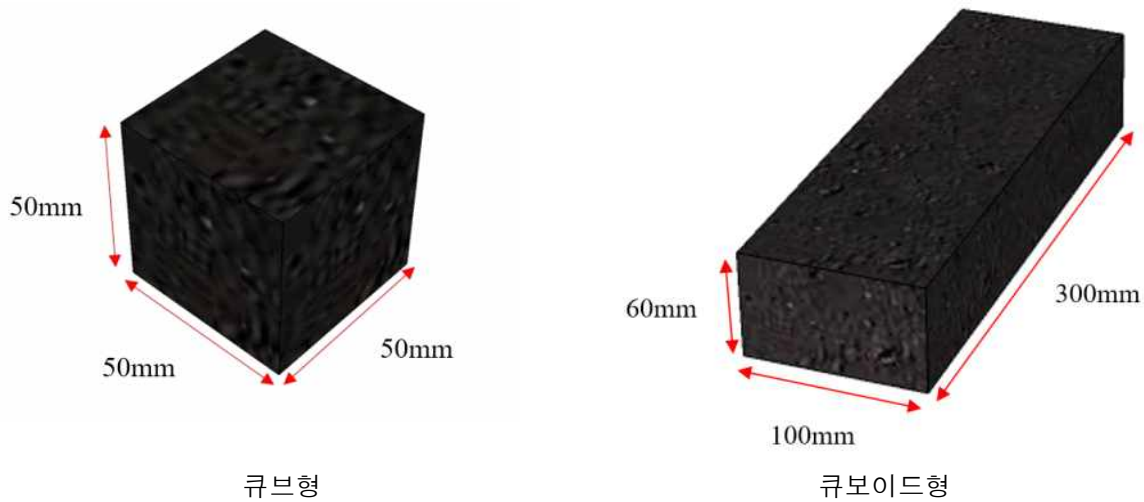


그림 2.1.1 발열모듈 모식도

표 2.1.1 발열모듈 선정을 위한 발열 실험 매개변수

시편명	시편 종류	양생일 (일)	전압 (V)
Cube-7D-10V	Cube	7	10
Cube-7D-20V			20
Cube-7D-30V			30
Cube-7D-40V			40
Cube-28D-10V		28	10
Cube-28D-20V			20
Cube-28D-30V			30
Cube-28D-40V			40
Cuboid-7D-30V	Cuboid	7	30
Cuboid-7D-50V			50
Cuboid-7D-100V			100
Cuboid-7D-150V			150
Cuboid-7D-200V			200
Cuboid-28D-30V		28	30
Cuboid-28D-50V			50
Cuboid-28D-100V			100
Cuboid-28D-150V			150
Cuboid-28D-200V			200

2.2) 나노 모듈 콘크리트 포장의 현장 계측 및 분석

본 연구는 앞서 선정된 큐브형 및 큐보이드형 발열모듈 중에서 현장 적합성이 우수한 발열모듈을 선정하기 위한 발열 실험을 수행하였다. 또한, 큐브형과 큐보이드형에서 공급한 전압과 발열 온도 간의 상관관계는 추세선 형태로 분석하였다. 본 연구는 현장에 적용하는 발열모듈의 발열 성능을 분석하기 위하여 반단면 패널이라고 명명한 현장적용 발열모듈 콘크리트 포장을 제작하였다 (그림 2.2.1). 제작한 현장 실험 포장체의 매개변수는 발열모듈 사이 간격과 공급전압으로 선정하여 발열 성능 실험을 수행하였다. 공급전압은 선행연구 Park et al. (2018)을 참고하여 30 V, 50 V로 선정하였고, 각 전압당 1시간씩 공급하였다. 반단면 패널은 6,000 mm 길이, 1,590 mm, 두께 250 mm의 패널 형태로 2개를 제작하였다. 한 패널은 8개의 구획으로 나누어져 그림 2.2.1과 같이 배치한다. 발열모듈이 삽입된 패널 실험체는 발열모듈 사이 간격에 따라 구분한다. 제작한 패널 실험체 명은 Heating Module의 앞 글자를 따서 HM을 첫 번째 글자로 명시하였고, 두 번째 글자에는 발열모듈 사이 간격을 나타냈다. 마지막 글자에는 패널 주변부 콘크리트에 혼입된 MWCNT 농도를 표현하였다. 명명법은 아래의 표 2.2.1에 정리하였다.

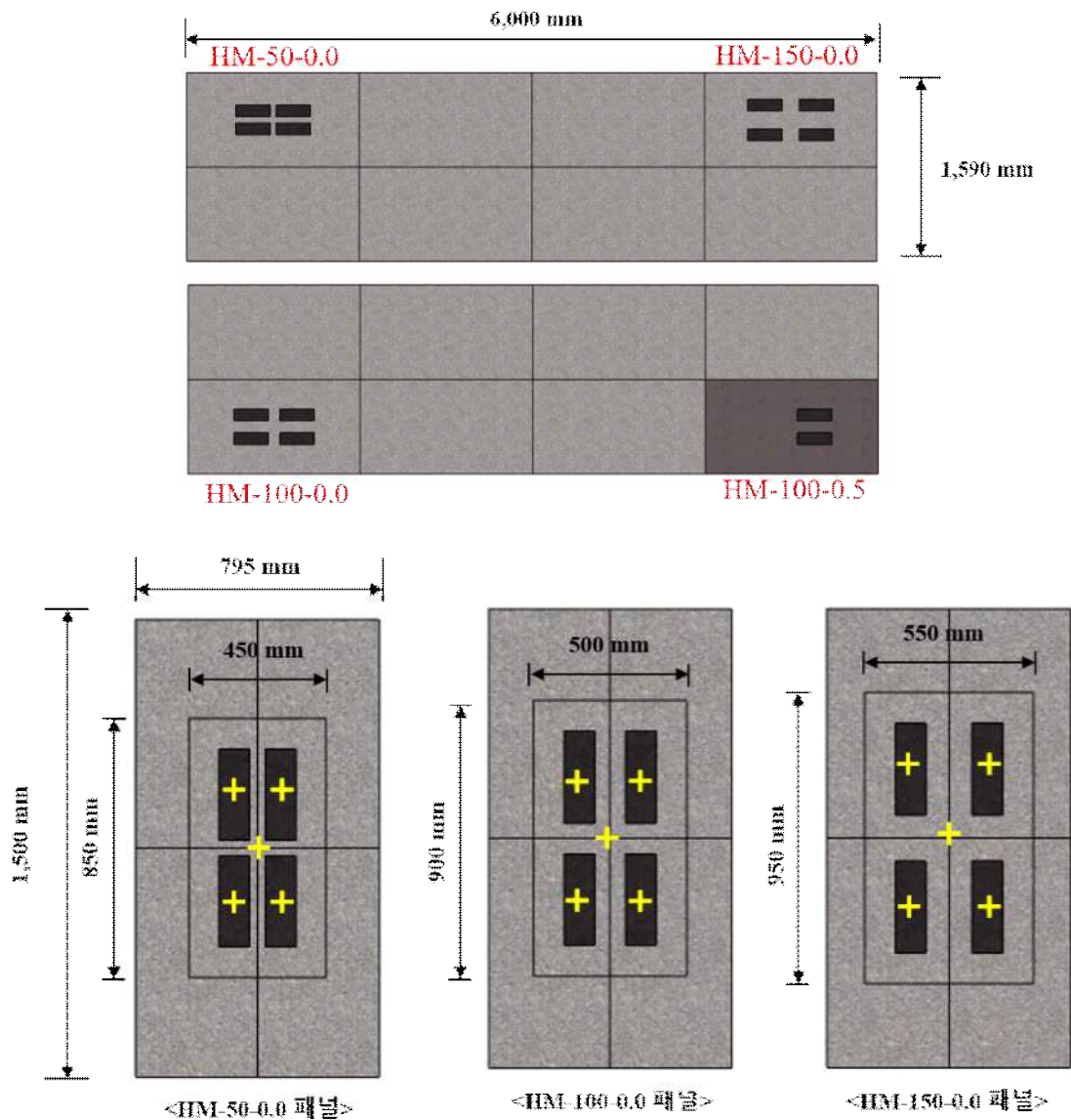


그림 2.2.1 반단면 패널의 모식도

표 2.2.1 매개변수

시편명	간격 (mm)	주변부 MWCNT 혼입농도 (wt%)	발열체의 종류
HM-50-0.0	50	0.0	HM (Heating Module)
HM-100-0.0	100		
HM-150-0.0	150		
HM-100-0.5	100	0.5	

2.3) 현장적용 발열모듈 임베디드 콘크리트 포장의 발열성능 분석

현장적용 발열모듈 임베디드 콘크리트 포장의 발열성능은 발열 실험을 수행하여 분석하였다. 매개변수는 주변부 MWCNT 혼입 농도로 선정하였다. 그림 2.3.1은 발열모듈이 삽입된 패널의 모식도이다. 본 연구는 주변부 MWCNT 혼입 농도에 따른 발열량을 계측하여 주변부 콘크리트의 MWCNT 혼입 유무에 따른 발열성능을 분석하였다.

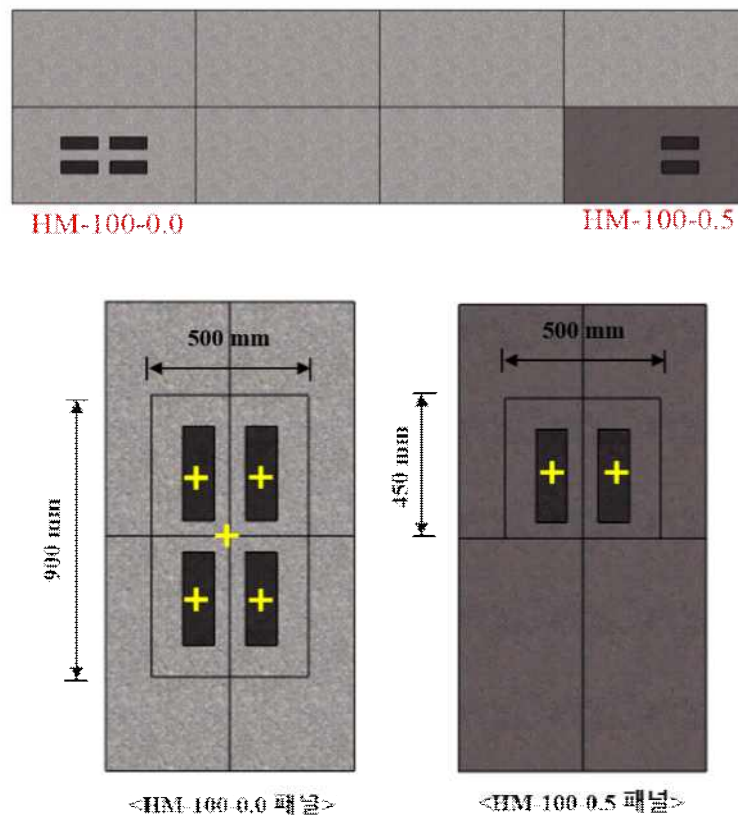


그림 2.3.1 반단면 패널의 모식도

표 2.3.1 매개변수

시편명	간격 (mm)	주변부 MWCNT 혼입농도 (wt%)	발열체의 종류
HM-100-0.0	100	0.0	HM (Heating Module)
HM-100-0.5	100	0.5	

2.4) 발열모듈 임베디드 프리캐스트 콘크리트 포장의 발열온도 제어

본 연구는 콘크리트 패널에 적용된 발열모듈의 온도 제어성능 분석을 위해 발열 실험을 수행하였다. 실험을 위해 제작한 실험체 형태는 그림 2.4.1과 같다. 공급전압은 30 V, 70 V, 100 V로 선정하였고 각 전압당 약 10분씩 실험을 수행하였다. 전압 공급 시간은 초기 온도 상승량을 파악하기 위하여 10분으로 설정하였다. 매개변수는 아래의 표 2.4.1에 정리하였다. 전단면 패널의 제작은 현장에서 실시간으로 나노소재가 혼입된 시멘트를 타설하여 제작하였다. 나노소재가 혼입된 전단면 패널은 6,000 × 3,200 mm² 크기의 프리캐스트 콘크리트 중간에 가로 1,000 mm, 세로 600 mm, 두께 50 mm 크기로 제작하였다. 이때 나노소재가 혼입된 전단면 패널은 Heating Panel이라 명명하였고, 주변부 콘크리트에는 나노 재료를 혼입하지 않았기 때문에 주변부 콘크리트의 MWCNT 혼입농도를 None이라고 표기하였다 (표 2.4.1).

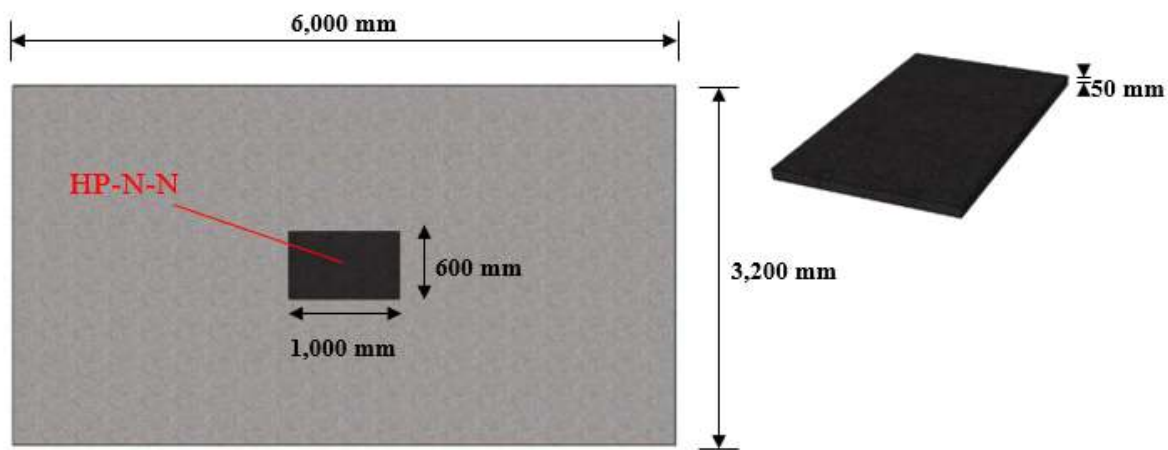


그림 2.4.1 전단면 패널의 모식도

표 2.4.1 매개변수

실험체명	공급전압 (V)	주변부 MWCNT 혼입농도 (wt%)	발열체의 종류
HP-N-N	30	0.0	HP (Heating Panel)
	70		
	100		

[공동 (조선대학교)]

1) 임베디드 발열모듈의 개념 설계 및 내부구조 분석

1.1) 항온항습챔버를 활용한 발열모듈의 온도성능시험

본 연구는 임베디드 발열모듈 개발을 목표로 4단계에 거쳐 발열모듈의 개념을 설계하고 내부구조를 분석하였다. 첫 번째 단계로는 임베디드 발열모듈을 제작하고 항온항습챔버를 활용하여 발열모듈의 온도성능시험을 진행하였다. 다음 단계로는 제작한 발열모듈의 콘크리트 균열 방지를 위해 온도구배 제어에 관한 연구를 수행하였고, 세 번째 단계로는 발열모듈의 미세구조 조직과 공극구조 분석을 위해 SEM, XRD, TG/DTA를 이용하여 분석하였다. 마지막으로 임베디드 발열모듈의 시공단계별 개념 설계 및 시공단계별 디지털 Mock-up을 위해 프로그램을 이용하여 연구하였다.

설계한 임베디드 발열모듈의 온도성능시험은 항온항습챔버를 활용하여 수행하였다. 설계된 발열모듈은 MWCNT를 시멘트 중량 대비 1.0wt% 혼입하여 50×50×50 mm³ 크기로 제작하였다. 이후 발열 성능시험은 항온항습챔버를 활용하였고, 발열모듈은 91일간 양생한 후 발열 성능시험을 수행하였다. 표 1.1.1은 매개변수 표이다. 나노 재료 함량은 0.0wt%와 1.0wt%로 선정하여 나노 재료가 투입되지 않은 발열모듈은 Control 시편으로, 농도 1.0wt%를 혼입한 발열모듈은 MW1.0 시편으로 명명하였다. 발열모듈의 양생일은 Seong et al. (2020)을 참고하여 모두 91일로 통일하였다. 항온항습챔버의 외기온도는 0 °C, -10 °C, -20 °C로 설정하였다. 공급전압은 선행연구 Park et al. (2018)을 참고하여 50 V로 통일하여 4시간 동안 공급하였다.

표 1.1.1 항온항습챔버 발열 성능 실험 매개변수

시편명	나노 재료 함량 (wt%)	외기 온도(°C)	전압 (V)	양생일 (일)
Control-0	0.0	0	50	91
Control-10		-10		
Control-20		-20		
MW1.0-0	1.0	0		
MW1.0-10		-10		
MW1.0-20		-20		

1.2) 콘크리트 균열 방지를 위한 나노 발열모듈의 온도구배 제어 연구

온도구배 제어 연구는 임베디드 발열모듈을 제작하여 발열실험을 진행했을 시 제작한 발열모듈의 콘크리트 균열 방지를 위하여 수행되었다. 매개변수는 발열모듈의 공급전압과 나노소재의 혼입 농도로 설정하여 나노 발열모듈의 발열 성능 실험을 통해 시간에 따른 온도변화량을 측정하였다 (표 1.2.1). 공급전압 선정기준은 선행연구 Park et al. (2018)을 참고하였으며 전압의 종류는 10 V, 20 V, 30 V, 60 V으로 선정하였다. 나노 재료 혼입 농도는 선행연구 Kim et al. (2020)을 참고하여 선정된 탄소계열 나노소재 MWCNT로, 0.0wt%, 0.5wt%, 1.0wt%로 설정하였다. 실험은 앞서 선정한 매개변수 조건에서 진행하였으며 실험 결과를 토대로 시간-발열량 그래프를 작성하여 10분에 10 °C이상 발열이 가능한 공급전압 및 나노소재 혼입 농도를 확인하였다.

표 1.2.1 공급전압에 따른 발열 성능 실험 매개변수

시편명	나노 재료 함량(wt%)	전압 (V)	양생일 (일)
Control	0.0	10, 20, 30, 60	7
MW-0.5	0.5		
MW-1.0	1.0		

1.3) 미세구조 조직/공극구조 분석(SEM, XRD, TG/DTA)

본 연구에서는 나노소재를 혼입한 발열모듈의 미세조직 및 공극구조 분석을 위해 발열 성능 실험 후 시편의 파편을 시료로 SEM, XRD, TG/DTA를 이용하여 분석하였다. FE-SEM은 전계 방출형 주사 현미경을 의미하며 Field Emission Scanning Electron Microscope의 약자이다. 그림 1.3.1은 FE-SEM의 분석방법이며 표본에 주사된 전자들은 표본의 원자들과 상호반응하여 검출 가능한 다양한 신호들을 생성한다. 전자빔은 일반적으로 래스터 주사 양식으로 주사하며 빔의 위치를 검출된 신호와 결합하여 상을 만들어내어 나노소재 분산성을 확인할 수 있다. XRD는 X선 회절분석법을 뜻하며 X-ray Diffraction의 약자이다. XRD는 입사각(θ)과 반사각(θ)을 고려하여 X선이 회절 되는 정도를 분석하는 방법이며 나노 발열모듈의 구성성분을 분석하기 위해 수행하였다 (그림 1.3.2). 본 연구는 일반 시멘트 모르타르와 나노 발열모듈의 구성성분을 파악하여 MWCNT의 혼입이 시멘트 모르타르의 수화반응 중에 발생하는 수화생성물에 영향을 끼치는지 분석하였다. TG/DTA는 시차열 중량분석을 뜻하며 Thermal Gravity Differential Temperature Analyzer의 약자이다. TGA는 가열 중에 재료 안에 일어나는 무게 변화를 측정하며 나노 발열모듈의 미세조직 분석을 위해 수행하였다 (그림 1.3.3). 본 연구에서는 일반 시멘트 모르타르와 나노 발열모듈의 열 중량 차이를 분석하여 MWCNT의 열분해 온도를 측정하였다. 또한 MWCNT 혼입 시멘트 복합체의 기공률 측정은 수은압입법 (MIP)을 통해 MWCNT의 혼입 농도를 매개변수로 기공률 측정을 수행하였다 (그림 1.3.4, 표 1.3.1).

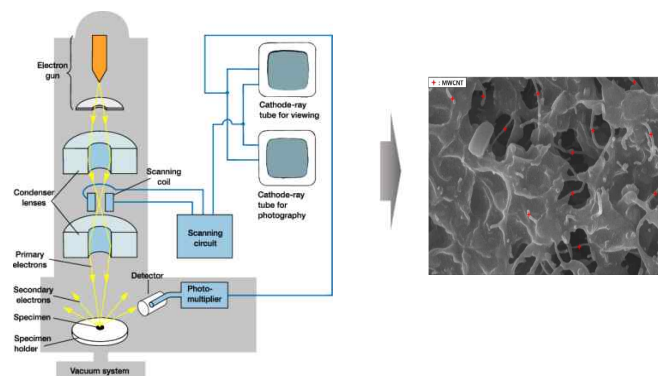


그림 1.3.1 FE-SEM 분석 방법

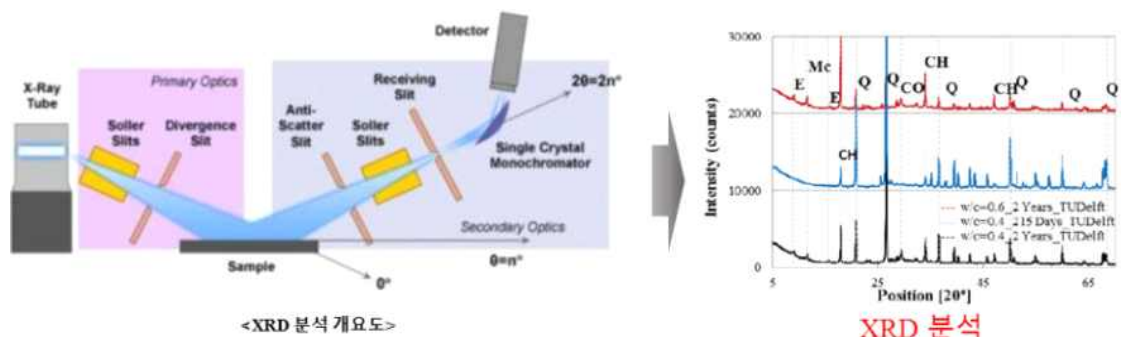


그림 1.3.2 XRD 분석 방법

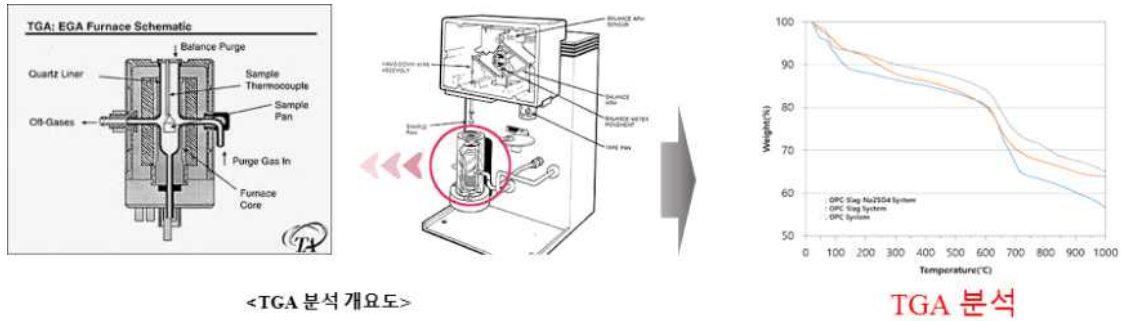


그림 1.3.3 TGA 분석 방법

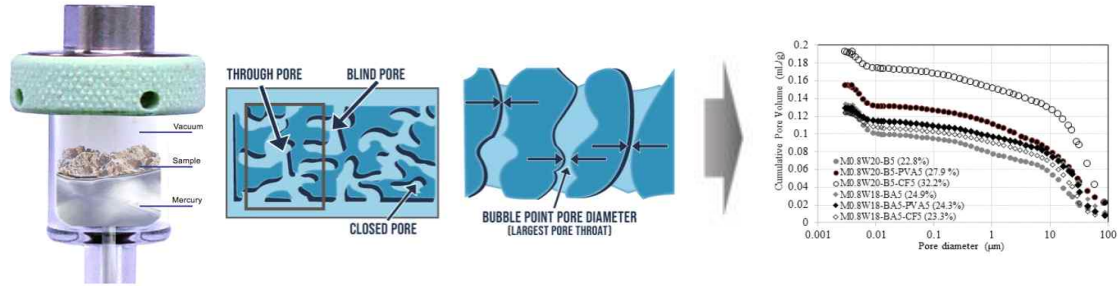


그림 1.3.4 MIP 분석 방법

표 1.3.1 기공률 측정 실험 매개변수

시편명	나노 재료 함량 (wt%)	양생일 (일)
Control	0.0	28
MW-0.5	0.5	
MW-1.0	1.0	

1.4) 제안기술의 시공단계별 개념 설계 및 시공단계별 디지털 Mock-up

1차년도 마지막 연구로는 임베디드 발열모듈의 시공단계별 개념 설계 및 시공단계별 디지털 Mock-up을 연구하였다. 기본적으로 임베디드 발열모듈을 디지털 형태로 설계하였으며, 대표적으로 정육면체 형태의 발열모듈과 직육면체 형태의 발열모듈을 설계하였다. 정육면체 형태의 발열모듈은 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ 으로 압축강도 측정을 위한 공시체 제작 시 주로 사용하는 규격으로 설계하였다. 직육면체 형태의 발열모듈은 $100 \times 400 \times 80 \text{ mm}^3$ 으로 휨강도 측정을 위한 공시체 제작 시 주로 사용하는 규격으로 설계하였다.

2) 임베디드 발열모듈의 최적화 방안 연구

2.1) 최적 발열 효율을 위한 전극 재료 및 모듈 위치 연구

앞선 1차년도에서는 임베디드 발열모듈의 개념을 설계하고 내부구조 분석을 통하여 임베디드 발열모듈에 대한 연구를 수행하였다. 2차년도에서는 앞선 연구를 바탕으로 임베디드 발열모듈의 최적화 방안을 모색하였다. 본 연구는 임베디드 발열모듈의 최적 발열 효율을 위한 전극 재료를 먼저 선정하였다. 다음 단계로는 선정한 전극 재료를 바탕으로 발열모듈을 제작 시 최적화된 모듈 위치를 선

정하였다. 제작한 발열모듈을 실제 포장 시공에 적용할 시 외부 환경에 대한 적응성은 기후조건을 반영한 최적 나노 모듈 방안에 대한 연구를 통해 파악하였다. 기후조건에 따른 최적 나노 발열모듈 연구는 나노소재의 종류와 나노소재의 농도 그리고 공급전압을 조절하며 수행하였다.

본 연구는 임베디드 발열모듈의 최적 발열 효율을 위한 전극 재료를 선정하였다. 전극 재료의 종류는 stainless steel mesh와 copper plate로 구분하여 비교하였으며, 그림 2.1.1은 실험 모식도이다. 발열 실험을 위해 제작한 실험용 시편은 MWCNT 농도 0.125wt%를 혼입하여 정육면체 형태의 큐브형($50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$)으로 제작하였고, 양생일은 7일로 선정하였다. MWCNT 혼입농도와 양생일을 선정한 기준은 선행연구 Song et al. (2016)을 참고하였다.

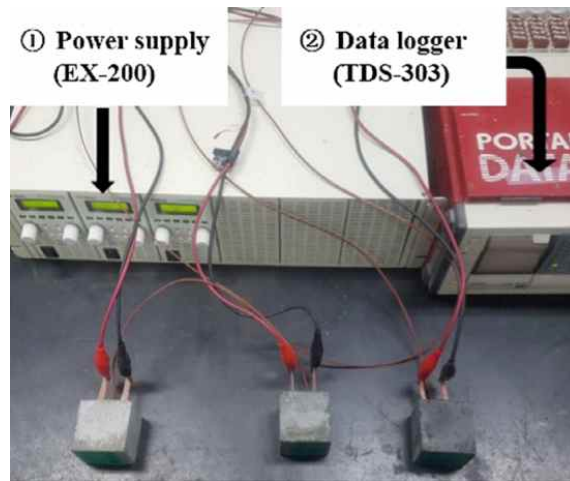


그림 2.1.1 전극 재료에 따른 실험 셋업

본 연구는 임베디드 나노 발열모듈의 최적 간격을 선정하기 위하여 전압 공급부의 위치에 따른 실험을 수행하였다. 시편 제작은 가로 400 mm, 세로 100 mm, 높이 50 mm의 콘크리트 시편 제작 시 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ 크기의 정육면체 전압공급 모듈 두 개를 설치하였으며, 두 전압공급 모듈의 중심 간 거리를 100 mm~350 mm 까지 50 mm 간격으로 조정하며 제작하였다 (그림 2.1.2). 매개변수는 주변부 콘크리트에 혼입하는 MWCNT 농도와 모듈 중심부 사이 간격으로 선정하였다 (표 2.1.1). 주변부 콘크리트에 혼입하는 MWCNT 농도는 0.0wt%, 0.05wt%, 0.1wt%, 0.2wt%로 선정하였고, 모듈 중심부 사이 간격은 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 350 mm로 선정하여 총 24개의 시편을 제작하였다 (그림 2.1.3). 양생일은 선행연구 Song et al. (2015)을 참고하여 7일로 통일하였고 전압은 60 V를 60분 동안 공급하여 발열량을 확인하였다. 시편 양생과 전압공급 시 외기온도는 23 °C로 고정하였다. 거리-온도 경향성은 발열 실험을 통해 측정된 온도를 분석하여 파악하였고, 모듈 간의 최적 간격은 주변부 콘크리트의 발열 성능 기준치를 만족하도록 산정하였다. 현장실험은 산정된 최적 간격을 바탕으로 선정된 최대 간격과 주변부 콘크리트의 MWCNT 농도를 매개변수로 설정하였다.

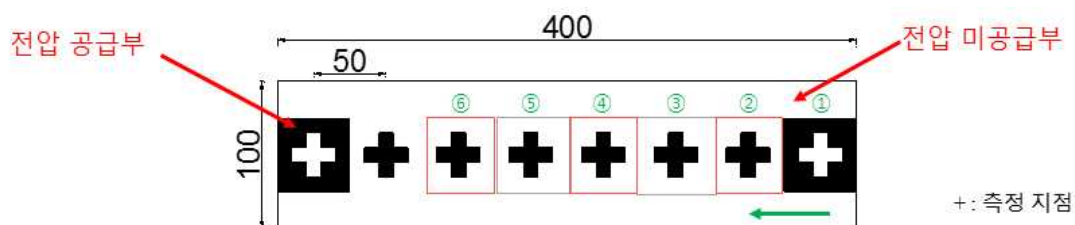


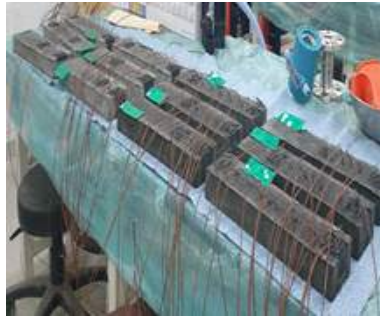
그림 2.1.2 최적 간격 실험 모식도



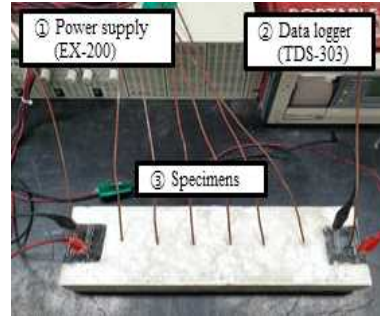
(a) 정육면체 발열모듈 제작



(b) 콘크리트 플레이트 시편 제작



(c) 콘크리트 플레이트 시편 양생



(d) 발열 실험 진행

그림 2.1.3 최적간격 선정 시편 제작과정

표 2.1.1 매개변수

주변부 MWCNT 농도 (wt%)	모듈 간격 (mm)	시편 명
0.0 (C0.0)	100 (D100)	C0.0-D100
	150 (D150)	C0.0-D150
	200 (D200)	C0.0-D200
	250 (D250)	C0.0-D250
	300 (D300)	C0.0-D300
	350 (D350)	C0.0-D350
0.05 (C0.5)	100 (D100)	C0.05-D100
	150 (D150)	C0.05-D150
	200 (D200)	C0.05-D200
	250 (D250)	C0.05-D250
	300 (D300)	C0.05-D300
	350 (D350)	C0.05-D350
0.1 (C0.1)	100 (D100)	C0.1-D100
	150 (D150)	C0.1-D150
	200 (D200)	C0.1-D200
	250 (D250)	C0.1-D250
	300 (D300)	C0.1-D300
	350 (D350)	C0.1-D350
0.2 (C0.2)	100 (D100)	C0.2-D100
	150 (D150)	C0.2-D150
	200 (D200)	C0.2-D200
	250 (D250)	C0.2-D250
	300 (D300)	C0.2-D300
	350 (D350)	C0.2-D350

2.2) 기후조건을 반영한 최적 나노 모듈 방안(재료, 농도, 공급전압) 제시

본 연구는 발열모듈을 실제 포장 시공에 적용 시 외부환경에 대한 적용성을 파악하기 위해 기후조건에 따라 실험을 수행하였다. 최적 나노 발열모듈 연구는 나노소재의 종류와 나노소재의 농도 그리고 공급전압에 따라 실시하였다. 기후조건은 일반 기후조건과 극한 기후조건으로 구분하였다.

일반 기후조건에서는 매개변수를 발열모듈 주변부 콘크리트의 MWCNT 혼입농도, 공급전압으로 선정하였고 이에 따른 내용은 표 2.2.1에 정리하였다. 주변부 콘크리트의 MWCNT 혼입농도 종류는 선행연

구 Park et al. (2018)을 참고하여 시멘트 중량대비 0.0wt%, 0.5wt%로 선정하였고, 발열모듈 사이 거리는 100 mm로 고정하였다. 공급전압은 30 V와 50 V로 선정하였다. 일반 기후조건에서의 실험 모식도는 그림 2.2.1과 같다. 발열 성능 분석은 주변부 콘크리트의 MWCNT를 혼입 여부에 따라 비교 분석하였다.



그림 2.2.1 일반 기후조건 실험을 위한 패널 모식도

표 2.2.1 매개변수

실험체명	간격 (mm)	공급전압 (V)	주변부 MWCNT 혼입농도 (wt%)	발열체의 종류
HM-100-0.0	100	30, 50	0.0	HM (Heating Module)
HM-100-0.5			0.5	

일반 기후조건에서는 상온에서 현장 실험이 진행되었기에, 영하에서의 실제 적용성을 확인하기 위해 극한 기후조건을 고려한 실험을 수행하였다. 극한 기후조건에서는 항온항습챔버에 시편을 설치하여 발열 양생 시 일반 시멘트 모르타르 및 CNT 시멘트 복합체의 내부 온도를 파악하였다. 항온항습 챔버 내부에는 실제 콘크리트 타설 환경을 모사하기 위해 단열 박스를 시편 위에 덮어 진행하였다 (그림 2.2.2). 시편은 발열부와 타설부로 구분하였으며, 발열부는 MWCNT를 시멘트 중량 대비 1.0wt%로 혼입하여 제작하였고, 타설부는 MWCNT 혼입 농도를 0.0wt%, 0.1wt%, 1.0wt%으로 구분하여 제작하였다. 챔버의 온도는 0 ℃ (일반 기후조건)와 -20 ℃ (극한 기후조건)로 설정하여 극한 환경을 모사하였다.

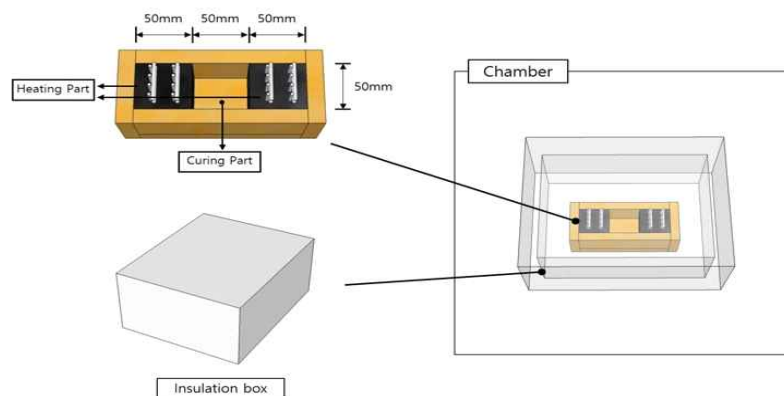


그림 2.2.2 극한 기후조건 실험을 위한 챔버를 이용한 기후조건에 따른 실험 셋업

표 1.3.1 극한 기후조건 실험 매개변수

시편명	나노 재료 함량 (wt%)	온도 (℃)	양생일 (일)
Heating part-0	0.0	0, -20	91
Curing part-0PC-0			
Curing part-MW-0.1-0	0.1		
Curing part-MW-1.0-0	1.0		

[공동 ((주)동일기술공사)]

1) 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장 설계 및 제작기술 개발

1.1) 콘크리트 패널 형태에 따른 임베디드 발열모듈 적용방안 검토

도로포장에서 프리캐스트 패널이 적용될 경우 도로의 등급 및 차선의 형태에 따라 구분됨으로 적용될 도로 기준의 검토가 이루어져야 한다.

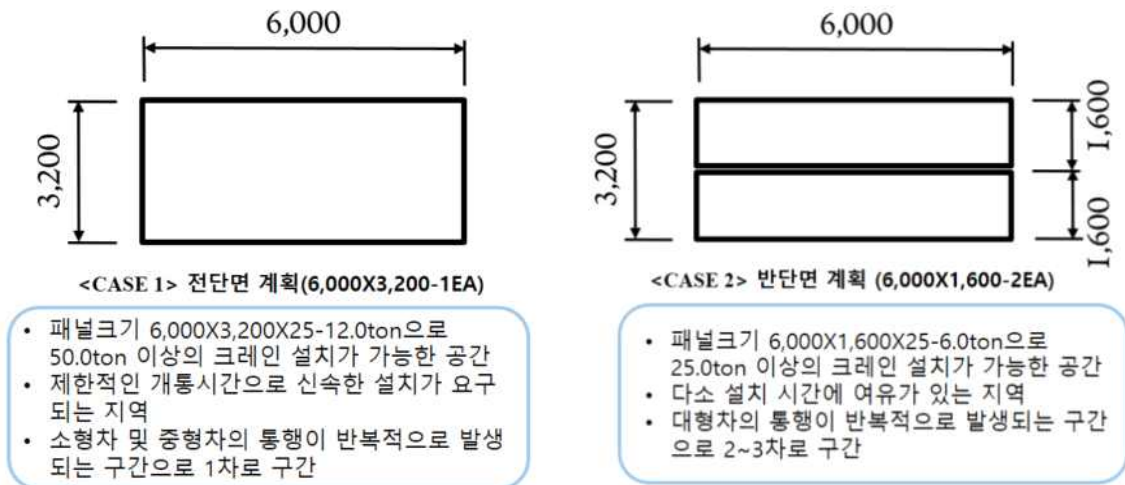
프리캐스트 콘크리트 패널의 포장은 일반적인 콘크리트 도로포장과는 차별성을 두어야 하며, 국내 도로 상황에 대한 검토가 우선되어야 한다. 도로설계기준 (국토교통부, 2016)에 따르면 지역 및 설계속도에 따른 도로 폭의 차이가 존재하며 제시하고 있는 도로의 폭원은 고속도로 3.50 m, 국도 및 지방도로 3.25 m, 도심지 도로 3.00 m~3.25 m이다. 프리캐스트 패널의 두께는 도로 종류 (고속도로/국도/ 도심지 도로) 및 지역별, 차량 통행량에 따라 변화가 되며 설치 위치 및 목적에 따른 패널 두께에 대한 고려하였다.

표 1.1.1 도로설계기준 中 (국토교통부, 2016)

도로의 구분	차로의 최소 폭 (m)			
	지방지역		도시지역	소형차도로
고속도로	3.50		3.50	3.25
일반도로	설계속도 (km/h)	80이상	3.50	3.25
		70이상	3.25	3.00
		60이상	3.00	3.00
		60미만	3.00	3.00

적용될 도로 구간 (경사)의 연장과 폭, 패널의 사이즈를 고려하였을 때, 패널 전단면에 대하여 발열 성능을 갖도록 하는 것은 블랙아이스 방지에 우수한 효과를 가져올 수 없으므로 차륜이 작용되는 위치만을 반영할 필요가 있으며, 차륜을 고려할 경우 경제성을 고려하여 전단면 패널과 반단면 패널의 설치에 대한 연구를 수행할 필요성이 있다.

따라서 본 연구과제에서는 이에 대한 최적 적용방안을 선정하기 위한 고려를 하였으며, 패널의 크기는 일반도로 설계속도 70 이상을 고려하여 3.25 m를 반영하였으며, 고속도로 및 일반 콘크리트 포장에 적용되고 있는 줄눈간격 6.0 m를 반영하여 패널의 크기는 3.20 m X 6.00 m를 검토하였다. 또한 차륜을 고려한 반단면의 경우는 1.60 m X 6.00 m를 검토하였다.



(a) 전단면 계획

(b) 반단면 계획

그림 1.1.1 프리캐스트 콘크리트 패널 단면검토

1.2) 콘크리트 패널 모듈화에 따른 요소별 형상설계

프리캐스트 콘크리트 패널에 발열모듈을 적용하기 위해서는 기존에 사용되던 패널의 형상에 대한 설계 변경이 필요하다. 본 연구를 수행하는 과정에서 발열모듈은 차륜구간 위주로 설치를 하는 것이 적합하다는 결론을 얻었으며, 차륜구간에 발열모듈을 적용하기 위해서는 패널의 제작 및 시공성을 고려하여 패널의 크기, 패널 간 연결부 (개선 다웰바 및 타이바) 등에 대한 새로운 설계가 필요하다. 발열모듈을 패널에 적용함에 있어 제작 및 전압 공급의 과정에 대한 고려가 필요하며, 최적의 방안을 찾기 위해 현장실험을 통한 결론을 도출하고자 하였다. 프리캐스트 콘크리트 패널 제작방법에 있어 발열모듈을 일체 타설을 하는 방법 “1” 과 발열모듈을 설치할 공간을 남겨두고 패널을 제작 후 제작된 패널에 발열모듈을 설치하는 방법 “2” 에 대한 패널의 설계를 계획하였다.

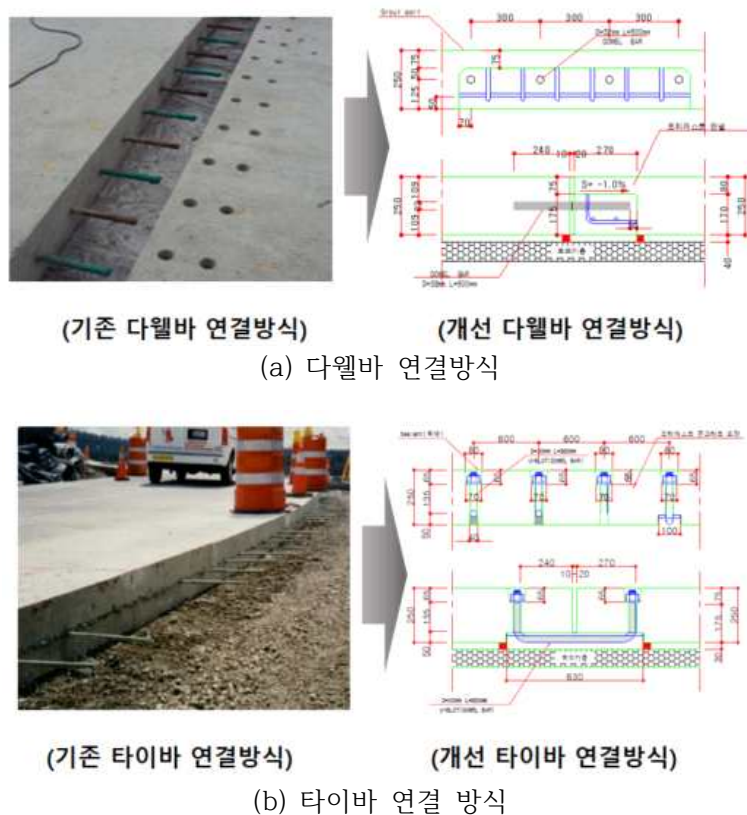


그림 1.2.1 기존 콘크리트 및 프리캐스트 패널 연결방법

1.3) 시험체 제작 및 설치단계 검증을 위한 BIM기반 3D객체 모델링

발열모듈이 적용된 프리캐스트 패널의 제작 및 실제 현장적용 전 적용가능성 검증이 필요하며, 제작단계에서는 발열모듈의 패널 내 적용에 있어 철근과의 간섭여부 등을 고려하여 최적 설계를 하기 위한 발열모듈의 크기 및 위치를 산출이 필요하다. 따라서 BIM (Building Information Modeling)을 통한 3D 모델링을 통해 설계 검증을 수행하고자 하였다. 발열모듈의 크기 및 위치를 변경하여 반복적으로 3D 모델링을 수행하면서 최적의 크기 및 위치를 산정하기 위한 연구를 수행하였다. 또한, 현장적용 단계에서의 패널 간 연결에 대해서 사전에 3D 모델링을 통해 문제 발생여부를 판단하여 연결방법을 검토하였다.

패널 내부에 임베디드 되는 발열모듈에 대하여는 모듈설계를 고려하여 철근과의 간섭 및 기타시설물과의 간섭을 고려하여 세부 설계를 진행하였다.

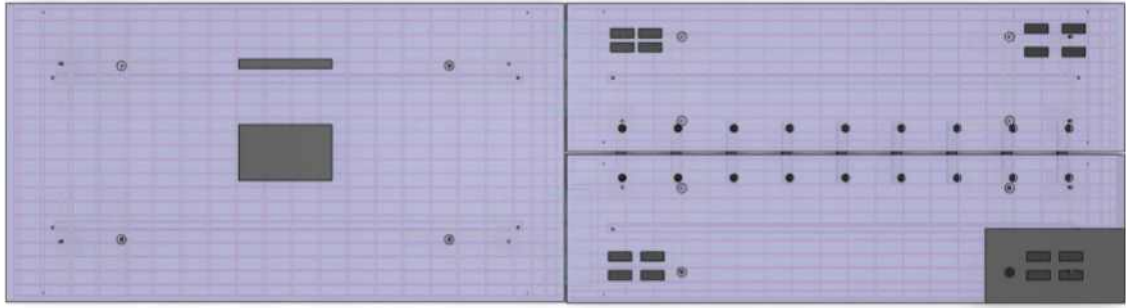


그림 1.3.1 발열모듈 BIM 모델링 전체도

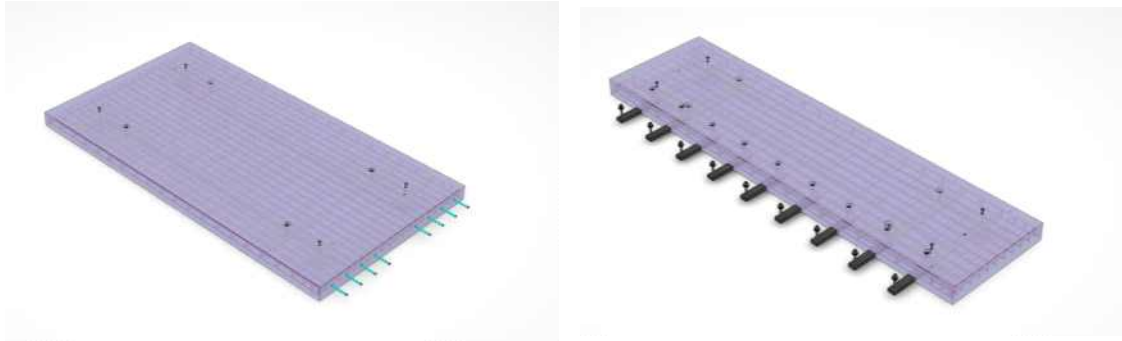


그림 1.3.2 발열모듈 BIM 전단면 및 반단면 모델링

1.4) 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장 경제성 분석

나노 발열모듈 적용 유, 무에 따라 콘크리트 패널의 초기시공비 분석이 필요하다. 또한 상대 비교 분석을 위하여 도로 건설 시 부가적인 요소는 배제하고, 포장 층 구성에 포함되는 콘크리트 슬래브 부분에 대하여 공사비를 산출하였으며 시공 시 소요되는 노무비 등 기타 요소들은 배제하였다.

초기 시공비 비교를 위한 설계 단면은 그림1.4.1과 같으며 콘크리트 포장은 콘크리트 슬래브, 린 콘크리트, 동결방지층의 세 개 층으로 구성된다. 한국도로공사 도로설계요령에 따라 다음과 같은 콘크리트 포장 횡단면 구성 예시를 사용하였으며 포장을 위한 배합비는 표 1.4.1과 같다.

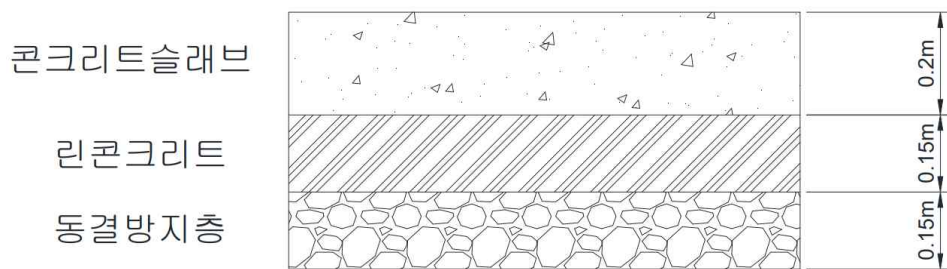


그림 1.4.1 초기 시공비 비교를 위한 콘크리트 포장의 표준단면

표 1.4.1 포장용 콘크리트의 표준 배합비(한국도로공사)

기준강도 (MPa)	최대골재치수 (mm)	시멘트 (kg/m³)	물 (kg/m³)	세골재 (kg/m³)	조골재 (kg/m³)	혼화제 (kg/m³)	MWCNT (kg/m³)
4.5	32	326	147	692	1122	0.963	0.326

비교 대상으로는 타 제설법과의 비교를 위해 각 지자체에서 가장 보편적으로 사용되는 염화칼슘 제설제 사용 시와 비교하였다. 나노 발열모듈 임베디드 콘크리트의 경우 MWCNT 1.0wt%로 시공한 경우를 가정하였으며 시공비 계산을 위한 콘크리트 슬래브 층의 부피는 0.2x1.0x1.0 m³로 가정하여 비교를 수행하였다.

2) 콘크리트 패널 급속포장 설치조건 및 설치방안 검토

2.1) 제안기술 적용가능 구간 분석 (하향 경사구간, 터널 및 교량 적용)

본 연구의 제안기술을 적용하기 위한 지역에 대한 조사를 수행하였다. 대상지 조사는 블랙아이스 발생 가능성이 높은 구간을 위주로 하였다. 블랙아이스 발생 가능 구간 관리지역의 경우 고속도로는 214개소, 국도 및 지방도로의 경우는 189개소로 관리하고 있으며, 모든 구간을 조사하기에는 한계가 있어 국도 및 지방도로 중 블랙아이스 발생 빈도가 높은 “부산지방 국토관리청” 관리구역을 선정하여 조사하였다. 국도 및 지방도로의 경우 모두 아스팔트 포장구간으로 내구성이 부족 (포트홀 및 소성변형)하여 강성포장인 프리캐스트 패널 포장이 적합한 것으로 판단하였으며, 부산청에서 관리하는 결빙 취약구간 38개소 111.65 km (2010.10 기준)에 대한 조사를 수행하였다. 국도 및 도심지 도로의 경우 지속적인 차량 통행량이 존재하므로 급속포장의 필요성이 있으나, 지방도의 경우 통행량이 적어 현장타설 콘크리트 포장이 가능하다고 검토하였다.

해당 구역을 중점으로 조사를 수행하였으며, 경남소재 장흥교차로를 적용가능 구간으로 적절하다는 결론을 도출하였다. 해당 지역은 하향 경사구간이며, 고가터널과 마주치는 교차로가 경사구간 맞은편에 위치하고 있다. 본 연구과제의 성공적인 결과를 기초로 현장 적용 위치로는 타당하다고 검토되었다.

신설 도로공사를 계획한 구간에 대하여는 도로의 하향 경사구간 및 터널의 입출구부 교량 상부에는 블랙아이스 방지를 위한 별도의 시설이 검토가 필요하다.



관리기관	국도 노선번호	길이(km)	위치명	포장형식	차로구성	경사여부	커브여부
부산청	30	7	덕산재	아스팔트	왕복 4차로	경사구간	곡선구간
	30	12	가랫재	아스팔트	왕복 2차로	-	곡선구간
	26	4	육십령	아스팔트	왕복 2차로	경사구간	곡선구간
	2	4.5	발산고개	아스팔트	왕복 4차로	-	직선구간
	3	0.1	산청교차로	아스팔트	왕복 4차로	-	직선구간
	24	0.1	금양교차로	아스팔트	왕복 2차로	경사구간	곡선구간
	33	0.2	장흥교차로	아스팔트	왕복 2차로	경사구간	곡선구간
	31	5	삼자현재	아스팔트	왕복 2차로	경사구간	곡선구간
	20	16	방리재	아스팔트	왕복 2차로	경사구간	곡선구간
	21	11	가지산	아스팔트	왕복 2차로	경사구간	곡선구간

그림 2.1.1 제안기술 가능구간 조사 (부산지방 국토관리청 : 결빙취약구간 현황 참고)

2.2) 제안기술의 실용화 타당성 조사 및 현장시공을 위한 대상선정

본 연구에서 개발한 발열모듈이 적용된 프리캐스트 패널 포장의 실적용 시 성능을 평가를 위한 현장 test bed를 설치할 수 있는 적합한 대상지 조사를 수행하였다. Test 단계의 패널은 실제 도로 적용이 불가하며, 일반 사유지를 대상으로 하였고, 겨울철 그늘진 곳으로 블랙아이스가 발생할 수 있으며, 중차량의 통행이 있는 곳을 고려하여 대상지로 검토하였다. 본 연구과제에서 사용되는 프리

캐스트 패널 제작 공장인 “충청북도 괴산군 불정면 앵천리” 소재 “베스트 피씨엠(주)”를 현장시공 대상지로 선정하고 검토하였다.



그림 2.2.1 패널 현장설치 Test Bed 후보 대상지

2.3) 제안기술의 콘크리트 패널 급속포장 설치방안 상세도출

일반적인 도심지 도로와 국도에 적용할 경우를 고려하여 공장 제작 프리캐스트 콘크리트 패널로 계획하였으며, 패널 내부에 발열모듈이 임베디드 되어 현장설치 시 공사 기간을 최소화하여, 야간에 급속 설치하는 것으로 계획하였다.

이를 위하여는 사전에 서울시 버스전용차로에서 적용되고 있는 프리캐스트 패널을 이용한 급속포장 형식으로 시공되어야 한다. 또한, 현장 시험시공을 위하여는 사전에 부지선정 단계부터 급속포장이 요구되는 지역으로 고려하였으며, 공장 출입 부로 차량의 통행이 빈번한 위치를 시험시공 부지로 검토하였다.

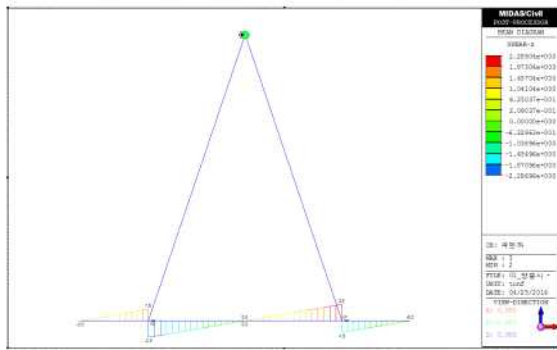
설치 시 운반은 공장 작업장에서 설치까지의 거리는 약 50.0 m로 24.0 TON 트럭 크레인을 사용하였으며, 시공 중 설치시간을 최소화할 수 있도록 사전 (1일 전) 토공 작업을 실시하여 설치 면을 정리하였고, 익일 10시부터 설치하도록 하였다.

프리캐스트 패널 설치 시 크레인 중량은 패널의 하중 (12.0 TON)을 고려하여 25.0 TON 크레인을 사용하는 것으로 계획하였다

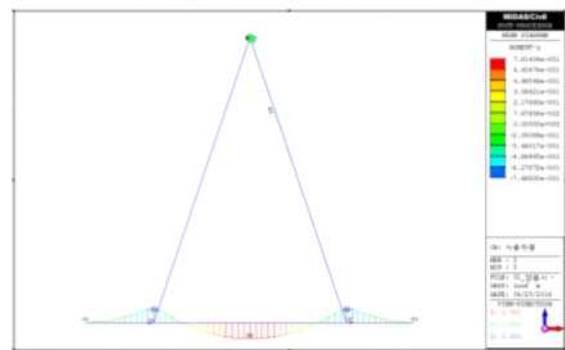
3) 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 제작 표준화와 유지관리 지침서

3.1) 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 제작 및 설치 구조 안전성 검토

프리캐스트 패널 시공 시 인양 하중에 대한 안전성이 가장 중요하므로 발열모듈이 적용된 프리캐스트 콘크리트 패널의 제작 및 설치 과정에 대하여 구조 안전성 검토를 계획하였다. 패널의 사이즈, 단면, 기타 요소 등을 고려한 안전성 검토가 필요하다고 판단하였으며, 패널 설치 시 인양과정에서의 안전성 검토, 패널 설치 후 통행 하중에 대한 안전성 검토를 수행하였다. 패널의 형상 및 사용방법을 고려하여 전단면 구조와 반단면 구조에 대하여 구조 검토를 계획하였으며, 보다 명확한 결과를 위하여 구조해석 상용 프로그램인 Midas Civil을 이용한 구조 안전성 검토를 계획하였다.



(a) 전단력도

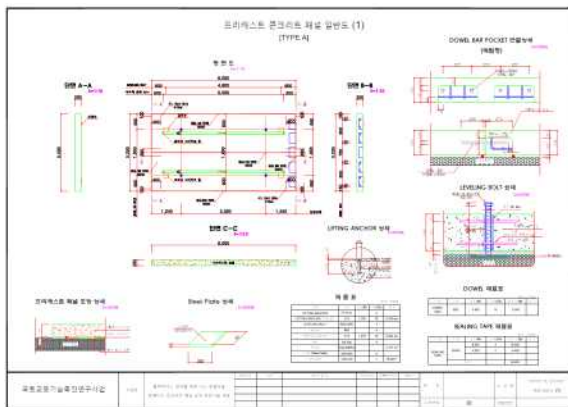


(b) 모멘트도

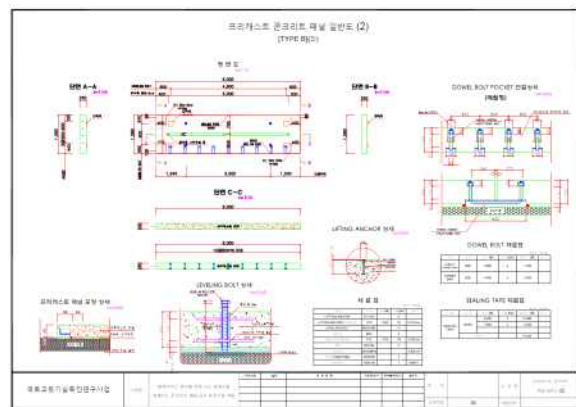
그림 3.1.1 상용 프로그램인 Midas Civil을 이용한 구조 안전성 검토

3.2) 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 제작 및 설치 표준도 작성

프리캐스트 콘크리트의 제작에 우선적으로 강제 거푸집을 제작하여야 하므로 1차년도에는 계획된 전단면 및 반단면 도면작업에 대하여 검토를 하였다.



(a) 전단면 도면작업



(b) 반단면 도면작업

그림 3.2.1 프리캐스트 패널 일반도

3.3) 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 형태별 2-TYPE 제작

연구과제 초기에는 기존 현장에서 시공되는 패널과 같은 규격인 6,000x3,200의 면적을 갖는 패널 제작을 계획하였다. 기존에 사용하던 일반적인 패널에 발열모듈을 적용하는 것이 실용화를 고려할 때 효율적이라고 판단되었다. 그러나 연구과제를 수행하고 발열모듈 임베디드 패널의 실 제작 및 현장 시험시공을 계획하면서 제작 및 설치에 대하여 어려움이 있을 것으로 판단되었다. 차륜 구간에 발열모듈을 배치하는 것으로 계획하였기 때문에 패널의 인양 위치 선정에 어려움이 있었으며, 실제로 도로에 적용한다고 하였을 때, 전단면 패널의 설치가 불가능한 현장 조건일 경우를 고려하였다. 차량이 주행 중인 도로에 설치하는 것이기 때문에 교통통제가 불가피하지만, 최소 작업면적으로 교통통제 최소화할 수 있도록 패널의 형상을 고려하였다. 따라서 패널의 형상은 일반적인 6,000x3,200의 전단면 패널타입과 6,000x1,600의 반단면 패널타입, 2-type으로 설계 및 거푸집제작을 하였으며, 시험시공의 상세적용 방안을 계획하였다.



(a) 강제 거푸집제작(1)



(b) 강제 거푸집제작(2)



(c) 강제 거푸집제작(3)



(d) 강제 거푸집제작(4)

그림 3.3.1 프리캐스트 패널 강제거푸집 제작도

3.4) 제안기술의 설계/ 제작 유지관리 가이드라인 연구

본 연구과제를 통해 개발된 “발열모듈 임베디드 콘크리트 패널” 기술의 실적용 및 상용화를 위해서는 제작 및 설치/유지관리 가이드라인의 작성이 필요하다. 1차년도 및 2차년도 연구과제를 수행하면서 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 포장에 관한 내용의 작성 및 수정·보완을 계획하였다. 연구과제 1차년도에는 초기 기획 및 설계에 관한 내용을 포함하여 작성하고, 2차년도에 패널 제작단계 및 시공단계에 대한 내용작성을 계획하였다. 기존의 일반 패널의 내용을 참고하여 초안을 작성하였으며, 연구과제를 통해 개발한 내용, 발열모듈의 적용에 대한 상세, 시험시공의 경험으로 패널 적용에 대한 상세를 추가 및 수정 보완하여 제안기술의 설계/ 제작과 관련된 설치 가이드라인과 유지관리 및 보수에 관한 내용을 포함하는 유지관리 가이드라인 작성하였다.

4) 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 시험설치 및 실용화 추진

4.1) 제안기술의 발열 성능 검증을 위한 시험체 형태별 2-TYPE 제작 및 현장설치

발열모듈이 적용된 프리캐스트 콘크리트 패널에 대한 검증을 수행하기 위해 현장 실험을 수행하는 것으로 하였으며, Test Bed 위치는 “충청북도 괴산군 불정면 앵천리”에 위치한 “베스트피씨엠” 공장부지 중 제작동 옆으로 검토하였다.

현장 급속 설치와 발열성능 실험을 위하여 패널은 2-Type으로 제작되었으며, 전단면 패널과 반단면 패널은 서로 다른 방법으로 발열모듈을 적용하도록 하였다. 전단면 패널의 경우는 시공의 신속성을 반단면의 경우는 장비 효율성과 발열모듈에 대한 성능향상을 위하여 제작하였다. 전단면 패널은 패널 중앙에 발열모듈이 위치하며, 이를 수행하기 위해서 별도의 거푸집을 제작하여 전단면 패널 내부에 별도의 거푸집을 설치하며, 레미콘 타설과 발열체 (CNT 혼합 레미콘)를 동시에 타설하는 방법

으로 일체 타설을 실시하였고, 반단면 패널의 경우는, 발열모듈이 삽입될 위치를 고려하여 블록아웃 시켜서 타설을 하였고, 콘크리트가 완전히 굳은 후 블록형태로 사전 제작된 CNT 블록을 위치시키고 몰탈 및 CNT를 혼입한 몰탈을 이용하여 블록 아웃된 위치에 타설하는 것으로 계획하였다.



(a) 전단면 패널 철근조립

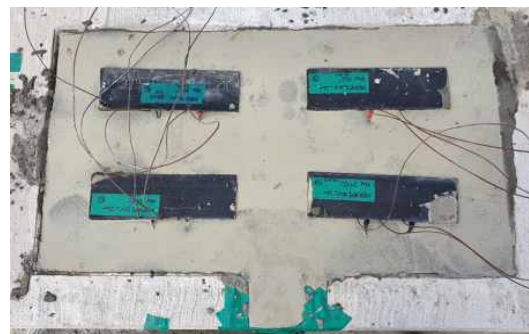


(b) 전단면 패널 콘크리트 타설

그림 4.1.1 전단면 패널 제작



(a) 반단면 패널 블록아웃



(b) 반단면 패널 발열모듈 타설

그림 4.1.2 반단면 패널 제작

4.2) 현장조건별 급속교체 설치에 따른 시공기술 및 시공지침서 개발

본 연구과제를 통해 발열모듈이 적용된 프리캐스트 패널을 개발하였다. 그리고 패널의 도로적용을 위해서는 새롭게 개발된 패널의 설치 기술 확보와 시공방법에 대한 시공지침서가 필요하다. 따라서 개발기술의 시공에 관한 연구를 수행하였으며, 상세 내용은 현장 조건에 따른 프리캐스트 패널의 설치방법, 교통통행량이 적은 시간 (22:00~06:00) 동안 최소한의 교통통제로 프리캐스트 패널을 설치하는 급속 설치 공법, 발열모듈이 적용된 패널의 시공 및 전압 공급에 대한 방법을 포함하도록 작성하였다. 또한, 기획부터 설계, 제작, 시험시공의 과정을 거치면서 고려했던 사항, 개선해야 할 사항들을 작성하였다.

4.3) 제안기술의 실용화 및 사업화 추진 활성화를 위한 참여기업과의 실시계약 체결

본 연구과제의 제안기술 실용화 및 사업화 추진 활성화 방안의 수립이 필요하다. 본 연구를 수행하여 공장 제작을 통한 모듈화로 중차량에 대한 내구성 및 안전성이 확보되고, 시스템 장애율이 최소화되어 유지관리 비용을 획기적으로 줄일 수 있으며, 교통 통제시간을 최소화하고, 급속 설치가 가능한 융설 및 융빙 공법을 개발하고 사업화를 하는 것이 최종 목표이다. 구상 중인 사업화 방안으로는 현재 운영 중인 서울시 중앙버스전용차로 정차대 콘크리트 패널 설치 시 적용을 검토 중에 있다. 또한, 참여기업과의 기술 실시협약을 체결하기 위한 협의가 수행되었다.

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

[주관 (경희대학교)]

1) 나노 발열모듈 콘크리트 포장 재료의 최적 배합기술 개발

1.1) 탄소계열 나노소재 특성을 반영한 시멘트 복합재료의 발열 성능 및 적합성 검토

탄소계열 나노소재를 이용한 시멘트 복합재료의 발열 성능은 세 종류의 나노소재인 다중벽 탄소나노튜브 (MWCNT), 그래핀나노플레이트 (GNP), 전도성 카본블랙 (CB)를 혼입하여 시멘트 복합재료를 제작하여 적합성을 분석하였다. 본 연구는 발열성능을 분석하기 위하여 전기전도성 실험을 수행하였고, 다음과 같은 결과가 도출되었다. CB를 혼입한 시편의 전기저항은 Control 대비 2.3배 감소하였고, GNP를 혼입한 시편의 전기저항은 Control 대비 2.0배 감소하였다. 반면 MWCNT를 혼입한 시편의 전기저항은 Control 대비 133.0배 감소하여 세 종류의 탄소계열 나노소재 중에서 가장 많이 감소하였다. 전기전도성은 저항과 반비례 관계에 있으므로, 본 연구는 저항의 감소량을 목표치로 설정하였다. 세 종류의 탄소계열 나노소재로 저항 실험을 수행한 결과, MWCNT를 혼입한 시편은 전기전도성이 Control 대비 5배 이상 증가하였다 (그림 1.1.1, 표 1.1.1). 하지만, CB 및 GNP를 혼입한 시편은 전기전도성이 기준치에 도달하지 못한 것으로 분석되었다. 본 연구는 양생과정에서 탄소계열 나노소재가 상호 네트워크를 형성하는 것으로 분석되었고, 전기전도성이 뛰어난 MWCNT는 시멘트 복합체 내부에서 가장 우수한 전기 네트워크를 형성하는 것으로 예측되었다. 따라서 탄소계열 나노소재 중 MWCNT는 절연체인 시멘트 복합체에 우수한 전기전도성을 부여하는 것으로 판단된다.

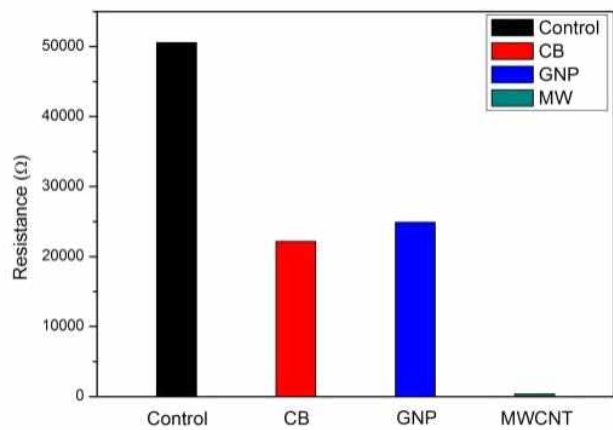


그림 1.1.1 전기 저항 실험 결과

표 1.1.1 저항 실험 결과

시편명	저항 (KΩ)	Control 대비 증가량 (배)
Control	50.55	-
CB	22.16	2.3
GNP	24.92	2.0
MWCNT	0.38	133.0

발열 성능 연구는 탄소계열 나노소재인 다중벽 탄소나노튜브 (MWCNT), 그래핀나노플레이트 (GNP), 전도성 카본블랙 (CB)의 농도를 매개변수로 나노 발열모듈을 제작하여 수행되었다. 최적 나노 재료 및 함량은 각 시편의 발열량을 측정하여 분석하였다. 발열량은 모든 혼입 농도에서 MWCNT를 혼입한 시편이 가장 우수하였고, CB를 혼입한 시편이 두 번째로 발열량이 많게 발생하였다. GNP를 혼입한 시편은 가장 낮은 발열량이 계측되었다. 또한 탄소계열 나노소재를 혼입한 시멘트 복합체는 모든 경우에서 나노소재의 혼입 농도가 증가할수록 발열량이 상승하였다. 본 연구는 MWCNT가 탄소계열 나노소재 중에서 발열 성능이 가장 우수하였기에, MWCNT가 최적의 나노소재인 것으로 분석되었다 (그림 1.1.2, 표 1.1.2).

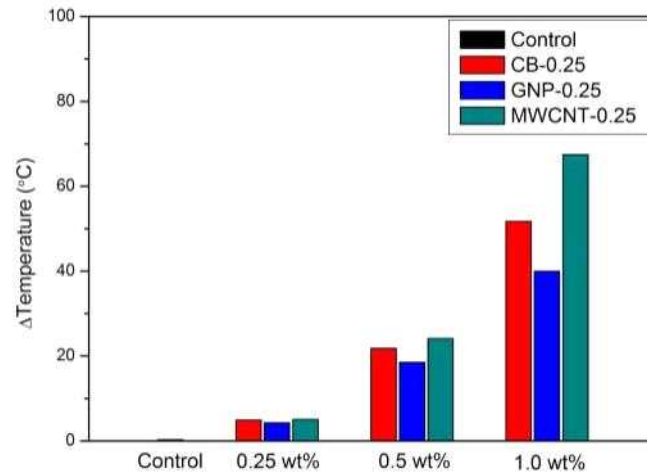


그림 1.1.2 발열 성능 실험 결과

표 1.1.2 발열 성능 실험 결과

나노 재료 종류	ΔT (°C)		
	0.25 wt%	0.5 wt%	1.0 wt%
Control	0.3	0.3	0.3
CB	4.9	21.8	51.7
GNP	4.3	18.5	40.0
MWCNT	5.1	24.1	67.5

1.2) 최적 나노 재료를 혼입한 발열 콘크리트 배합기술 연구

본 연구는 가장 우수한 성능이 발현되는 MWCNT를 이용하여 발열 콘크리트를 제작할 시 최적 배합 기술을 분석하였다. MWCNT를 시멘트계 재료와 혼합할 경우에는 나노소재의 함량과 배합 방법에 따라 부착강도, 압축강도 및 인장강도의 측정 결과에 차이가 발생하였다.

그림 1.2.1은 나노소재가 혼입된 시멘트 복합체의 나노소재 농도에 따른 부착강도다. 선정된 탄소계열 나노소재인 MWCNT를 배합한 시편의 부착강도는 Control 대비 최대 16.9% 더 우수하였다. 최대 부착강도는 MWCNT를 시멘트 중량대비 1.0wt% 혼입한 시편에서 발생하였다 (표 1.2.1). 이러한 이유로 본 연구는 MWCNT의 함량이 높을수록 부착강도가 증가한 것으로 분석되었다. 본 연구는 콘크리트에 설치된 전극의 부착거동을 검토하기 위하여 옥외환경에 노출된 상태에서 장기간 실험을 수행하고자 한다. 전극의 부식성은 옥외환경에 노출된 실험체를 정기적으로 분석하여 검토하고자 한다. 부착강도 시험은 KS 규정에 명시되지 않았기에 공인시험성적서 대신 국제 공인시험기관에서 발급한 시험

성적서로 대체하여 증빙서류 부록에 첨부하였다.

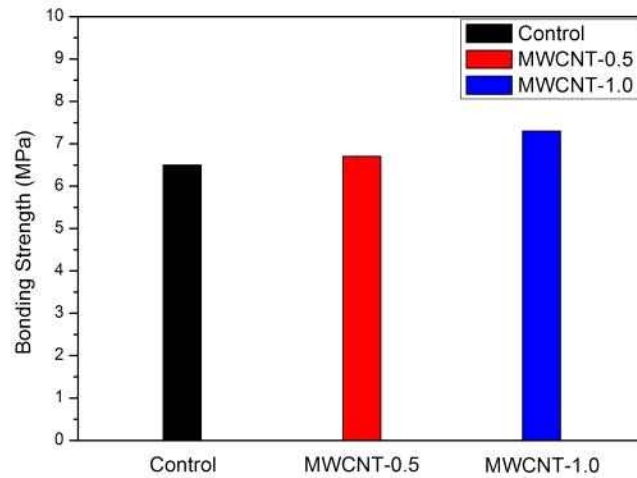


그림 1.2.1 부착강도 시험 결과

표 1.2.1 부착강도 시험 결과

시편명	부착강도 (MPa)
Control	20.4
MWCNT-0.5	20.95
MWCNT-1.0	23.85

탄소계열 나노소재를 배합한 시멘트 복합체의 압축강도는 Control 시편 대비 최대 20.6% 상승한 것으로 분석되었다. 최대 압축강도는 MWCNT를 시멘트 중량대비 0.5wt% 혼입한 시편에서 발생하였다 (그림 1.2.2, 표 1.2.2). 압축강도는 MWCNT가 포함되지 않았을 때보다 포함되었을 때 증가하였으나, 혼입 농도가 0.5wt%를 초과하는 경우에는 압축강도 보강량이 감소하는 것으로 분석되었다. 압축강도 시험은 KS F 2405에 따라 공인시험성적서를 발급받아 증빙서류 부록에 첨부하였다.

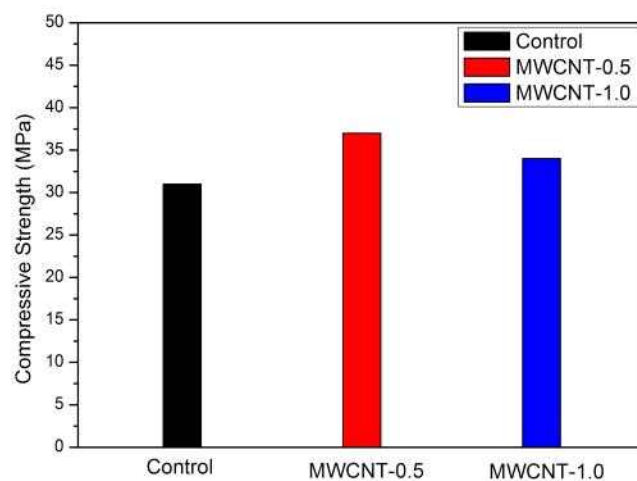


그림 1.2.2 압축강도 시험 결과

표 1.2.2 압축강도 시험 결과

시편명	압축강도 (MPa)
Control	31.1
MWCNT-0.5	37.5
MWCNT-1.0	34.7

나노 시멘트 복합체의 혼입 농도에 따른 휨인장강도는 그림 1.2.3과 같다. 휨인장강도는 탄소계열 나노소재의 농도가 시멘트 중량대비 1.0wt%일 경우 4.95 MPa로 가장 높은 것으로 분석되었다 (표 1.2.3). 휨인장강도는 MWCNT의 함량이 높을수록 우수한 네트워크가 형성되었기 때문인 것으로 판단된다. 휨인장강도 시험은 KS F 2408에 따라 공인시험성적서를 발급받아 증빙서류 부록에 첨부하였다.

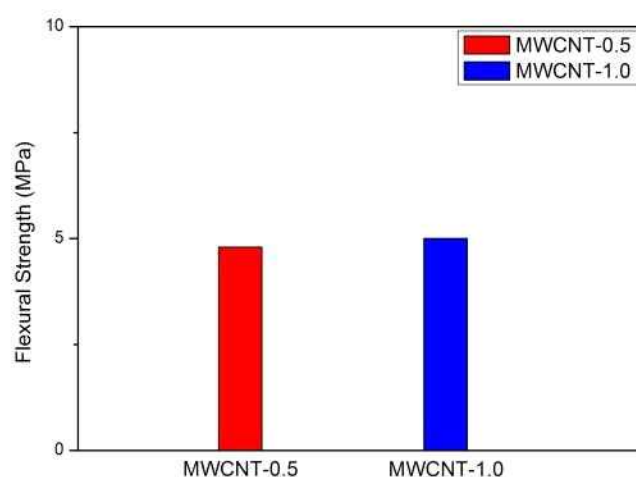


그림 1.2.3 휨인장강도 시험 결과

표 1.2.3 휨인장강도 시험 결과

시편명	휨인장강도 (MPa)
MWCNT-0.5	4.61
MWCNT-1.0	4.95

1.3) 나노소재 콘크리트 혼입을 위한 wet mix 및 dry mix 혼합기술연구

본 연구에서는 최적 나노 재료인 MWCNT의 분산성에 따른 혼합기술을 분석하였다. 혼합기술은 wet mix와 dry mix로 구분되며, 본 연구는 MWCNT의 분산성을 확인하기 위해 혼합기술에 따른 발열 실험을 수행하였다.

Wet mix와 dry mix에 따라 분산된 MWCNT 수용액은 그림 1.3.1과 같다. Wet mix의 경우에는 화학적 방법 (계면활성제 사용)과 물리적 방법 (초음파 처리)을 활용하여 MWCNT의 분산성을 확보하였다. Dry mix의 경우에는 분산 과정에서 MWCNT 입자가 물과 혼합하게 되면 반데르발스 힘에 의하여 응집 현상 및 층분리가 발생하는 것을 확인되었다. 따라서 dry mix를 적용한 MWCNT 수용액은 wet mix를 적용한 MWCNT 수용액보다 분산성이 현저하게 저하된 것으로 판단되었다.



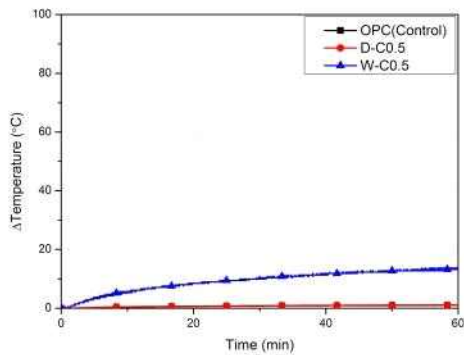
(a) Wet mix



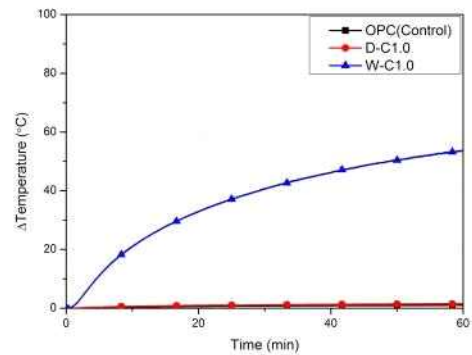
(b) Dry mix

그림 1.3.1 MWCNT 수용액의 분산 결과

그림 1.3.2는 분산 방법에 따른 발열 실험 결과이다. Dry mix 방법으로 제작한 시편은 대조군으로 설정한 Control과 비슷한 수준의 발열량을 발생하였다. 반면, Wet mix 방법으로 제작한 시편은 발열량이 대조군 대비 약 5,000% 증가하였다 (표 1.3.1). 이러한 이유로 본 연구는 Wet mix 방법이 MWCNT를 효과적으로 분산시켜 발열 성능을 향상하게 하는 것으로 분석되었다.



(a) W-C0.5, D-C0.5



(b) W-C1.0, D-C1.0

그림 1.3.2 분산 방법에 따른 발열 성능 실험 결과

표 1.3.1 분산 방법 선정을 위한 발열 성능 실험 결과

시편명	ΔT (°C)	Control 대비 증가량 (%)
Control	1.1	-
W-C0.5	14.2	1,190.9
W-C1.0	55.3	4,927.3
D-C0.5	1.2	9.1
D-C1.0	1.6	45.5

그림 1.3.3은 분산 방법에 따른 압축강도 시험 결과이다. Wet mix 방법으로 제작한 시편의 압축강도는 대조군보다 11.6% 증가하였고, Dry mix 방법으로 제작한 시편의 압축강도는 대조군보다 5.1% 감소하였다 (표 1.3.2). 따라서 본 연구는 발열 성능 및 강도를 분석하였을 시 Wet mix 방법이 가장 적합한 것으로 판단되었다.

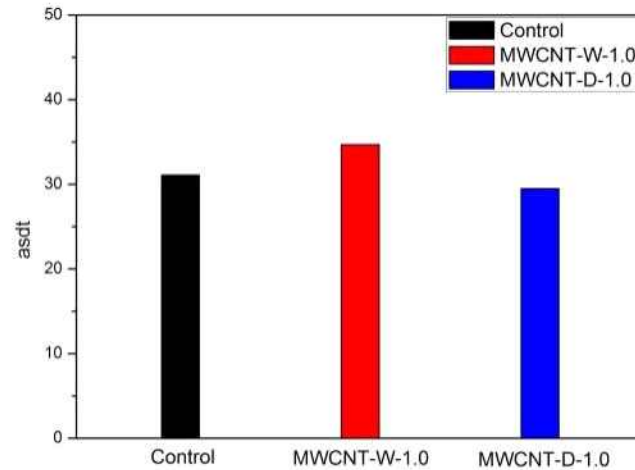


그림 1.3.3 분산 방법에 따른 압축강도 시험 결과

표 1.3.2 분산 방법 선정을 위한 압축강도 시험 결과

시편명	압축강도 (MPa)	Control 대비 증가량 (%)
Control	31.1	-
MWCNT-W-1.0	34.7	11.6
MWCNT-D-1.0	29.5	-5.1

2) 발열모듈 임베디드 프리캐스트 콘크리트 포장의 현장적용 시험 및 발열 성능분석

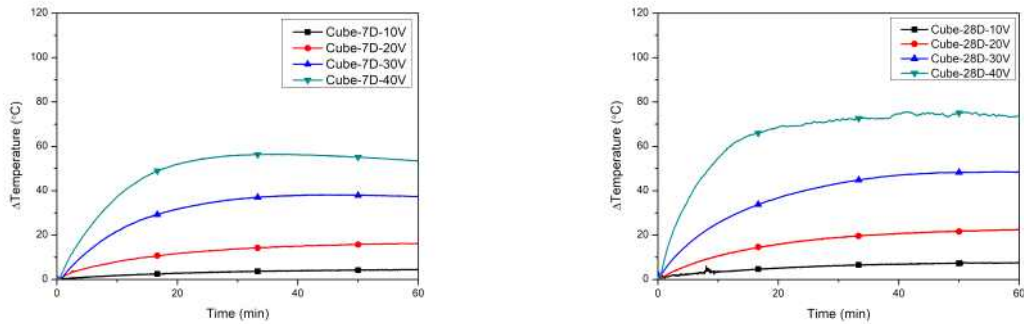
2.1) 발열 콘크리트 포장의 나노 모듈 시제품 제작

본 연구는 발열 콘크리트 포장에 설치할 최적의 발열모듈을 분석하기 위하여 모듈 형상에 따른 발열 성능을 분석하였다. 발열모듈은 큐브형 ($50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$)과 큐보이드형 ($100 \times 300 \times 60 \text{ mm}^3$)으로 구분하였으며, 매개변수는 발열체 형상, 양생일, 공급전압이다. 발열 콘크리트 포장의 발열모듈의 매개변수에 따른 실험 결과는 아래와 같다.

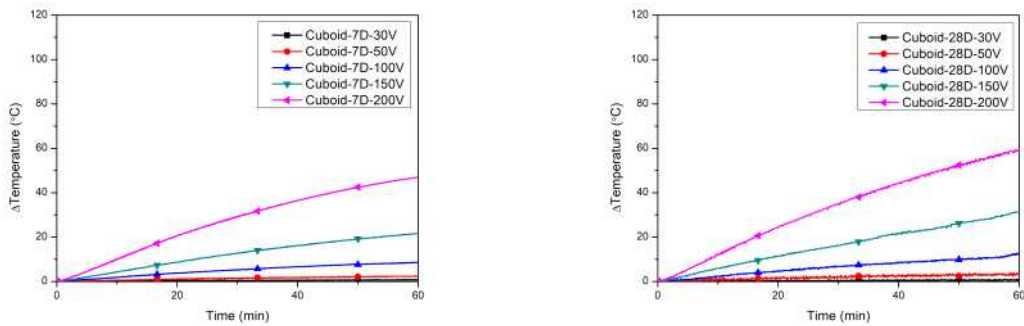
그림 2.1.1과 표 2.1.1은 발열모듈 형상에 따른 발열 실험 결과이다. 큐브형에서 10 V와 20 V를 공급하는 경우에는 균열이 발생하지 않고 안정적으로 온도가 유지되었다. 30 V를 공급했을 경우에는 온도구배가 상승하였고, 약 40분부터는 큐브형 발열체에 균열이 발생하였다. 40 V를 공급했을 경우에는 약 35분부터 균열이 발생하였다. 양생일이 7일인 큐브형은 30 V와 40 V를 공급할 시 내부 수분의 팽창으로 인하여 균열이 발생하였기에 발열 성능이 저하된 것으로 판단된다. 28일 양생된 큐브형은

모든 공급 전압에서 발열 성능이 안정적으로 유지되는 것으로 분석되었다. 결과적으로 큐브형 발열 모듈에서는 공급전압이 증가함에 따라 발열량이 최대 75.7 °C 발생하였다 (그림 2.1.1 (a)). 큐보이

드형은 시편 크기가 큐브형보다 크기에, 보다 높은 공급 전압을 필요로 하였다. 따라서 큐보이드형은 최소 30 V의 공급하여야 유의미한 발열량이 측정되었다. 7일 양생 시 큐보이드형은 200 V를 공급하여야 약 50 ℃의 발열량이 측정되고, 28일 양생한 경우에는 약 60 ℃가 발생하였다. 큐보이드형은 큐브형과 마찬가지로, 7일 양생한 발열체보다 28일 양생한 발열체의 발열 성능이 더 뛰어난 것으로 분석되었다 (그림 2.1.1 (b)).



(a) Cube



(b) Cuboid

그림 2.1.1 시간이력에 따른 발열실험 결과

표 2.1.1. 최적 모듈 크기 선정을 위한 발열 실험 결과

시편명	시편 종류	양생일 (일)	공급전압 (V)	ΔT (℃)
Cube-7D-10V	Cube	7	10	5.6
Cube-7D-20V			20	16.9
Cube-7D-30V			30	38.2
Cube-7D-40V			40	56.5
Cube-28D-10V		28	10	11.2
Cube-28D-20V			20	24.2
Cube-28D-30V			30	48.6
Cube-28D-40V			40	75.7
Cuboid-7D-30V	Cuboid	7	30	1.2
Cuboid-7D-50V			50	3.2
Cuboid-7D-100V			100	12.3
Cuboid-7D-150V			150	31.9
Cuboid-7D-200V			200	53.6
Cuboid-28D-30V		28	30	1.1
Cuboid-28D-50V			50	3.8
Cuboid-28D-100V			100	12.7
Cuboid-28D-150V			150	32.2
Cuboid-28D-200V			200	59.8

2.2) 나노 모듈 콘크리트 포장의 현장 계측 및 분석

본 연구는 앞서 분석한 발열모듈에 따른 발열 성능을 바탕으로 현장 적용성이 우수한 발열모듈을 선정하기 위하여 공급전압-온도 상관관계를 분석하였다. 그림 2.2.1은 큐브형과 큐보이드형에서 공급한 전압과 발열 온도 간의 상관관계를 분석하여 추세선 형태로 나타낸 그래프이다. 28일 양생 후 발열실험 결과, 두 시편 모두 R^2 값이 0.99 이상으로 확인되어 온도변화량과 공급전압 사이의 상관관계를 정립할 수 있는 것으로 분석되었다. 본 연구는 공급전압-온도 상관관계를 분석하였을 시 큐브형과 큐보이드형 모두 우수한 발열 성능이 발현되는 것으로 분석되었다. 하지만, 큐브형의 경우에는 크기가 작기에 시공성이 떨어지고, 다수의 모듈을 적용함에 따라 전선 처리가 복잡해질 것으로 예측되었다. 이러한 이유로 본 연구는 큐보이드형 발열모듈이 큐브형보다 현장 적용성이 더 우수한 것으로 판단되었다.

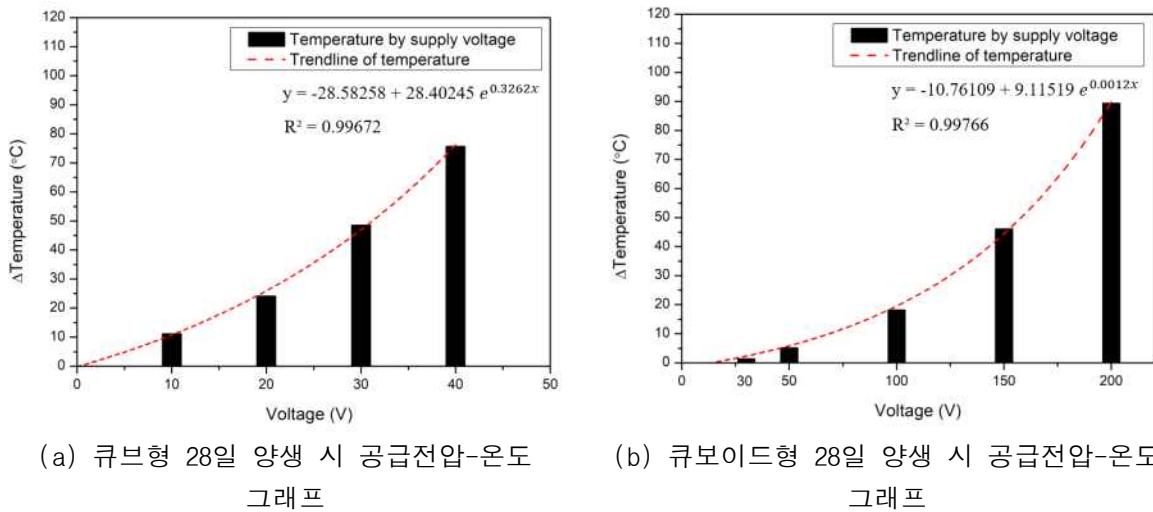


그림 2.2.1 공급전압-온도 간의 상관관계를 나타내는 추세선 그래프

본 연구는 공급전압-온도 상관관계 분석을 통하여 큐보이드형을 현장적용 나노 모듈로 선정하였다. 그림 2.2.2는 큐보이드형 발열모듈을 적용하여 제작한 패널의 발열모듈 간격에 따른 발열 성능 결과이다. 분석결과, 발열모듈이 적용된 패널은 공급전압이 50 V이고 모듈 간격이 50 mm인 경우에 발열량 46.8 °C로 발열 성능이 가장 우수하였다 (표 2.2.1). 그림 2.2.3은 시간이력에 따른 패널의 발열 성능과 최대 발열량 발생 시 열화상 이미지이다. 큐보이드형 발열모듈은 공급전압에 따른 발열 성능이 일정하게 유지되었다. 열화상 이미지에서는 발열모듈 간격이 증가함에 따라 열이 더 넓은 영역으로 분산되는 것으로 분석되었다.

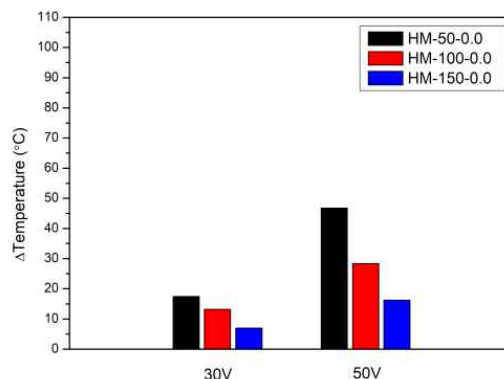
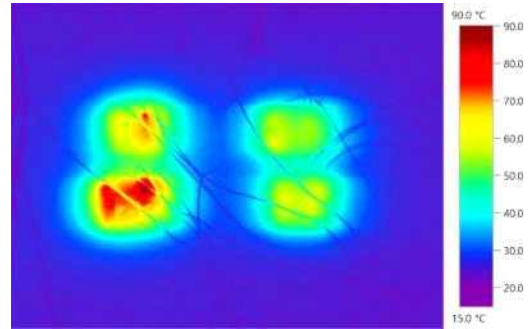
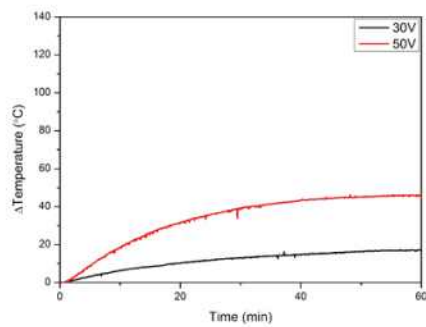


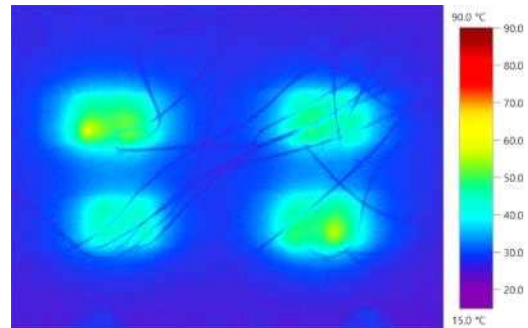
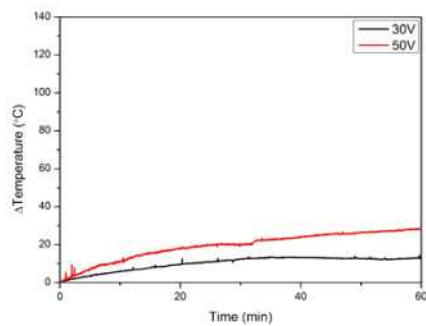
그림 2.2.2 모듈 간격에 따른 발열 성능

표 2.2.1 모듈 간격에 따른 발열 성능 측정 결과

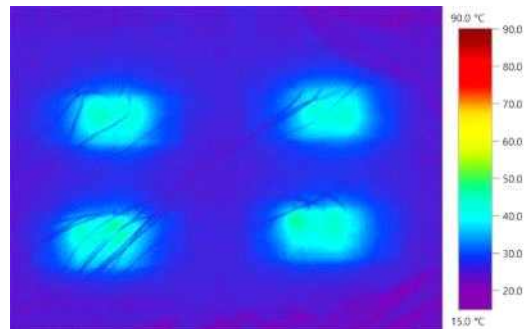
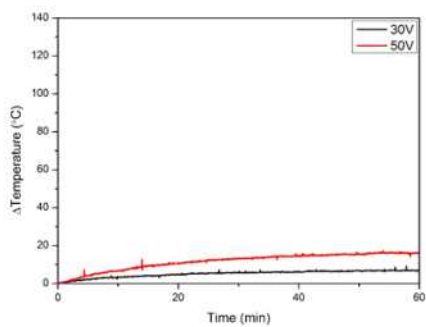
시편명	$\Delta T/10\text{min}$		ΔT (°C)	
	30 V	50 V	30 V	50 V
HM-50-0.0	6.4	18.72	17.4	46.8
HM-100-0.0	5.9	11.37	13.2	28.33
HM-150-0.0	3.2	6.6	7	16.18



(a) HM-50-0.0



(b) HM-100-0.0



(c) HM-150-0.0

그림 2.2.3 모듈 간격에 따른 패널 발열 성능 분석 결과

2.3) 현장적용 발열모듈 임베디드 콘크리트 포장의 발열성능 분석

본 연구는 발열모듈 주변부 콘크리트의 MWCNT 혼입여부에 따른 발열성능을 분석하였다 (그림 2.3.1). 매개변수는 주변부 MWCNT 혼입 농도로만 선정하였고, 실험결과는 HM-100-0.0 (주변부 0wt%) 과 HM-100-0.5 (주변부 0.5wt%)을 비교 분석하였다. HM-100-0.0 패널은 주변부에 MWCNT의 혼입이 이루어지지 않은 대신 더 많은 개수의 발열모듈이 설치되었고, HM-100-0.5는 주변부에 MWCNT의 혼입이 이루어졌고 대신 더 적은 개수의 발열모듈이 설치되었다. 분석 결과, 발열모듈이 설치된 패널은 모

돌 개수를 증가시키는 것 보다 주변부 콘크리트에 낮은 농도의 MWCNT를 혼입하였을 시 더 높은 발열 성능이 발현되는 것으로 나타났다 (표 2.3.1, 그림 2.3.2). 따라서 본 연구는 적정 발열모듈 개수를 유지한 상태에서 주변부 콘크리트에 MWCNT를 혼입한 경우에 더욱 우수한 발열성능을 확보할 수 있는 것으로 판단되었다.

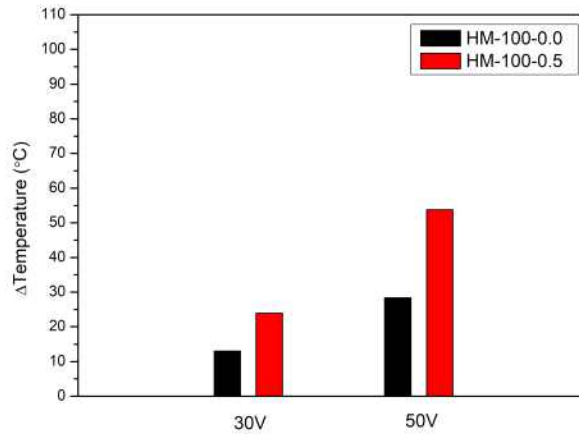


그림 2.3.1 주변부 MWCNT 혼입 여부에 따른 발열 성능

표 2.3.1 주변부 MWCNT 혼입 여부에 따른 발열 성능 측정 결과

시편명	ΔT/10min		ΔT (°C)	
	30 V	50 V	30 V	50 V
HM-100-0.0	5.9	11.37	13.2	28.33
HM-100-0.5	9.2	30.48	23.9	53.76

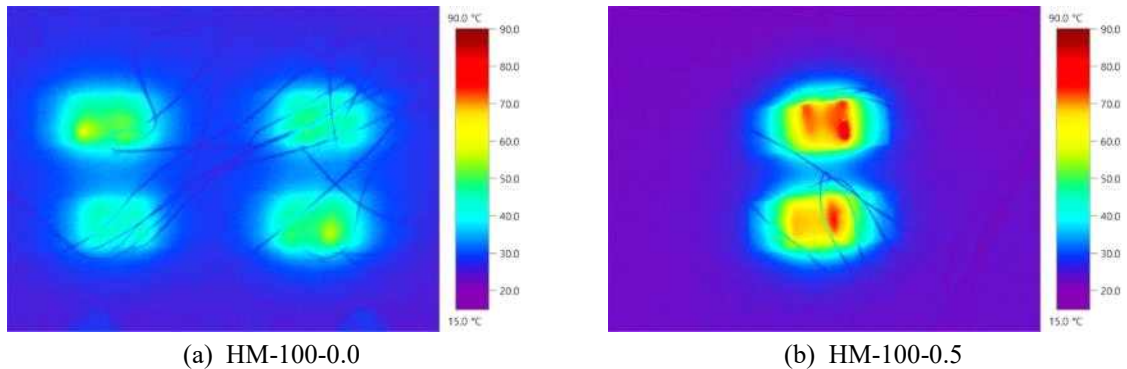
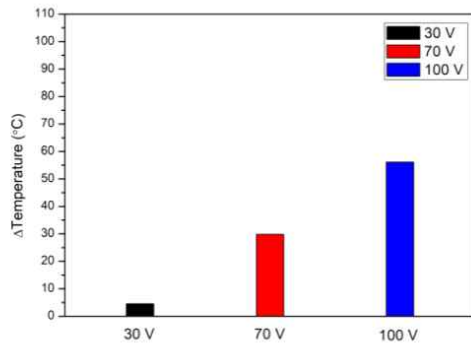


그림 2.3.2 HM 패널의 열화상 사진

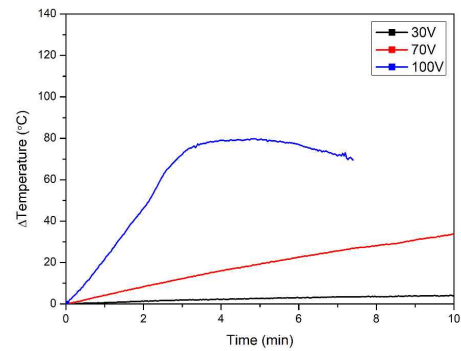
2.4) 발열모듈 임베디드 프리캐스트 콘크리트 포장의 발열온도 제어

그림 2.4.1은 HP-N-N 실험체의 전압에 따른 발열 성능이다. 처음 30 V의 전압을 공급했을 시에는 10분에 상승하는 온도변화량이 2.8 °C로 미미하였다. 70 V의 전압을 공급했을 시에는 10분에 상승하는 온도변화량이 22 °C를 기록하였으며, 100 V의 전압을 공급했을 시에는 10분에 상승하는 온도변화량이 56.1 °C를 기록하여 가파른 상승세를 보였다. 100 V의 전압을 공급했을 시에는 전압 공급 직후 초기에 30 °C이상의 온도 상승이 측정되었다. HP-N-N 실험체는 현장타설공법으로 제작하여 시공성을 높였고, 콘크리트 포장의 발열온도 제어성능을 분석했을 경우에도 우수한 발열이 확인되었다. 본 연구는 현장에서 나노소재가 혼입된 시멘트 복합체를 타설하여도 충분한 발열 성능이 확보되는 것으로

분석되었다. 본 연구는 제안된 발열 모듈의 최대 온도변화량을 감안하여 적절한 전압을 공급할 시 현장에서 효과적으로 사용할 수 있는 것으로 사료된다. 또한, 본 연구는 온도 및 전력제어기를 활용할 시 지속적인 온도상승을 제어하고 불필요한 전력 소비를 감소시킬 수 있을 것으로 기대되며, 향후 사업화 진행 시 활용하기에 적절할 것으로 예측되었다.



(a) 최대 온도 변화량

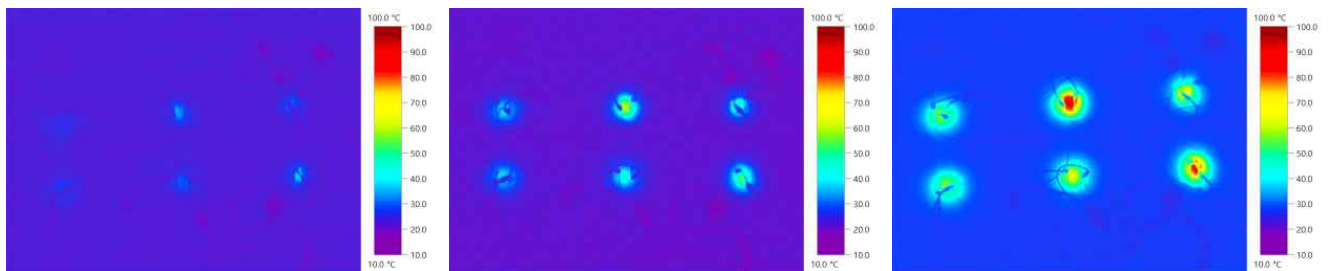


(b) 시간이력에 따른 온도 변화량

그림 2.4.1 HP-N-N 실험체 전압별 발열 성능

표 2.4.1 HP-N-N 실험체의 발열 성능 측정 결과

공급 전압 (V)	$\Delta T/10\text{min}$	ΔT (°C)
30V	2.8	4.57
70V	22	29.8
100V	56.1	56.1



(a) 30V

(b) 70V

(c) 100V

그림 2.4.2 HP-N-N 패널의 열화상 사진

[공동 (조선대학교)]

1) 임베디드 발열모듈의 개념 설계 및 내부구조 분석

1.1) 항온항습챔버를 활용한 발열모듈의 온도성능시험

본 연구는 임베디드 발열모듈을 설계하고 제작하여 항온항습챔버를 활용한 발열모듈의 온도성능시험을 실시하였다. 발열모듈은 MWCNT를 시멘트 중량 대비 1.0wt% 혼입하여 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ 크기로 제작하였고, 매개변수는 나노소재 함량과 외기온도로 설정하였다. 발열모듈의 발열 성능은 외기온도가 낮아짐에 따라 감소하였다 (그림 1.1.1). 대조군인 Control은 발열량이 거의 없는 것으로 분석되었으며, 발열모듈의 발열량은 외기온도가 0°C , -10°C , -20°C 일 때 각각 53.2°C , 30.0°C , 20.1°C 로 블랙아이스 방지 효과가 우수한 것으로 판단되었다 (표 1.1.1).

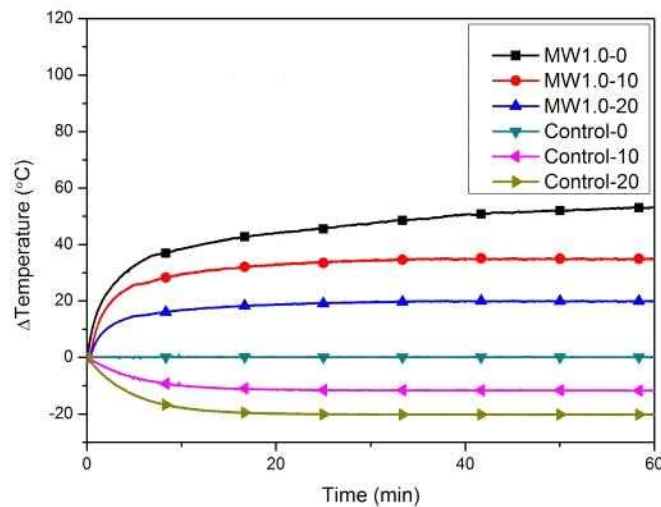


그림 1.1.1 항온항습챔버 발열 성능 실험 결과

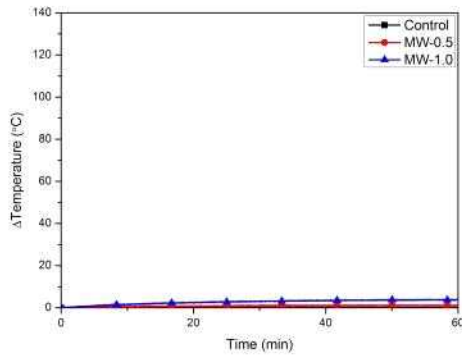
표 1.1.1 항온항습챔버 발열 성능 실험 결과

시편명	ΔT (°C)
Control-0	0.1
Control-10	-11.7
Control-20	-20.3
MW1.0-0	53.2
MW1.0-10	30.0
MW1.0-20	20.1

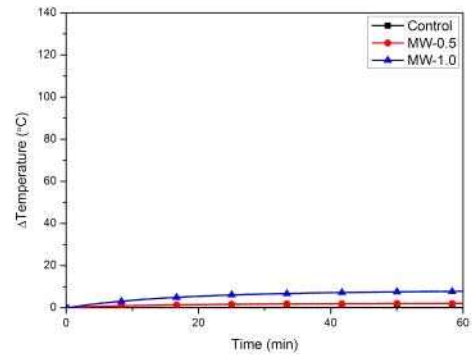
1.2) 콘크리트 균열 방지를 위한 발열모듈의 온도구배 제어 연구

본 연구는 콘크리트 균열 방지를 위해 발열모듈의 온도구배 제어에 관한 발열 성능 실험을 수행하였다. 매개변수는 발열모듈의 공급전압과 나노소재 혼입 농도로 설정하였고, 실험 결과를 토대로 시간-발열량 그래프를 작성하여 10분에 30°C 이상 발열이 가능한 공급전압 및 나노소재 혼입 농도를

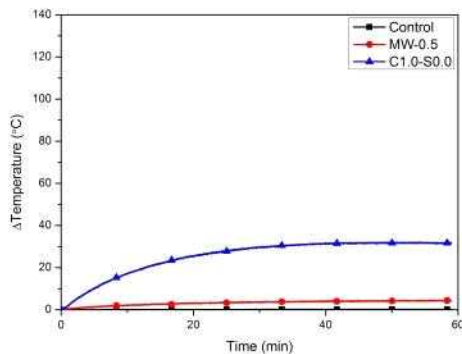
파악하였다. 최대 발열효율은 MWCNT 혼입 농도가 1.0wt% 이고, 공급전압을 60 V로 설정할 시 54.8 °C/10 min로 분석되었다 (그림 1.2.1, 표 1.2.1). MW-1.0 시편에 60 V의 전압을 공급하는 경우에는 온도의 하강이 없어 균열이 발생하지 않았다. 해당 조건에서는 60 V 전압공급 시 목표한 발열 효율을 가지면서도 균열은 발생하지 않는 적절한 전압공급 기준임을 확인하였다.



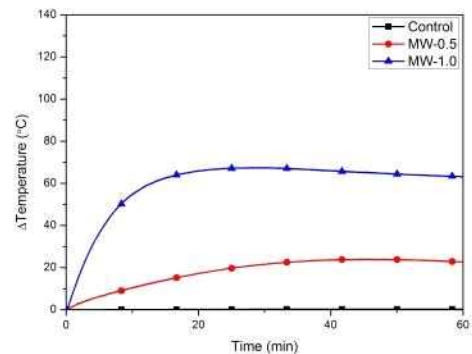
(a) 10V



(b) 20V



(c) 30V



(d) 60V

그림 1.2.1 공급전압별 발열 성능 실험 결과

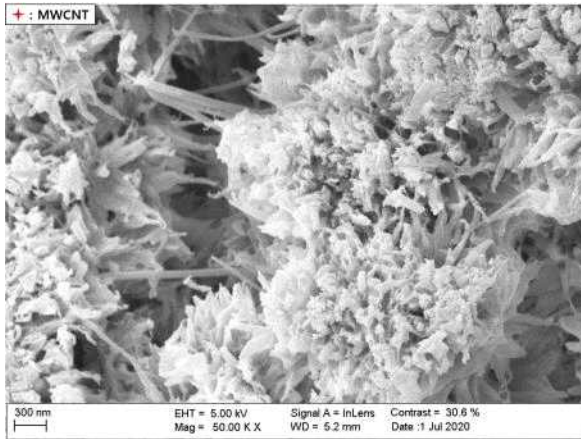
표 1.2.1 공급전압별 발열 성능 실험 결과

시편명	ΔT/10 min (°C/min)			
	10V	20V	30V	60V
Control	0.0	0.0	0.1	0.1
MW-0.5	0.5	0.9	2.2	10.4
MW-1.0	1.7	3.5	17.0	54.8

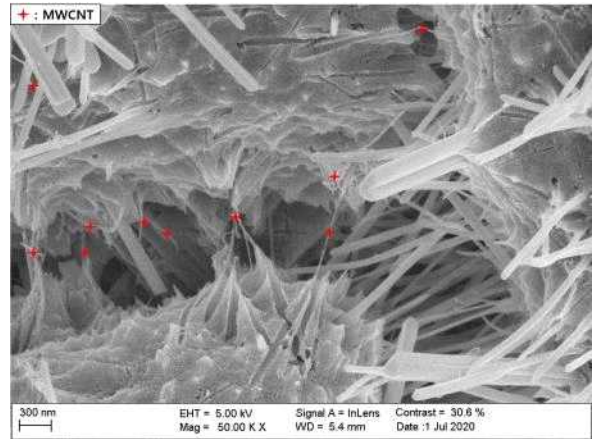
1.3) 미세구조 조직/공극구조 분석(SEM, XRD, TG/DTA)

본 연구는 나노 재료를 혼입한 발열모듈의 미세조직 및 공극구조 분석을 위해 발열 성능 실험 후 시편의 파편을 시료로 SEM, XRD, TG/DTA를 수행하였다. FE-SEM에서는 일반 시멘트 모르타르와 달리 MWCNT가 혼입된 시멘트 모르타르에서 수화물 사이에 MWCNT 네트워크가 형성된 것을 확인하였다 (그

림 1.3.1). XRD 분석 결과, MWCNT의 경우에는 $2\theta = 26^\circ \sim 27^\circ$ 에서 회절각이 발생함을 확인하였다 (그림 1.3.2). 또한 일반 시멘트 모르타르와 MWCNT를 혼입한 시멘트 모르타르의 XRD 결과값을 비교하였을 경우에는 수화반응이 동일하게 발생하는 것으로 분석되었다. TGA 분석 결과, 400~450 $^\circ\text{C}$ 에서는 수산화칼슘, 550~700 $^\circ\text{C}$ 에서는 MWCNT, 750~850 $^\circ\text{C}$ 에서는 탄산칼슘이 열 분해되는 것으로 확인되었다 (그림 1.3.3). 기공률은 MIP 수은압입법을 통해 측정하였으며, MWCNT를 0.5wt% 혼입한 시편의 기공률 감소효과가 가장 우수하였고, MWCNT를 1.0wt% 혼입한 경우에도 기공률 감소효과가 존재하는 것으로 분석되었다 (그림 1.3.4, 표 1.3.1).



(a) 일반 시멘트 모르타르



(b) MWCNT 혼입 시멘트 모르타르

그림 1.3.1 FE-SEM 촬영 결과

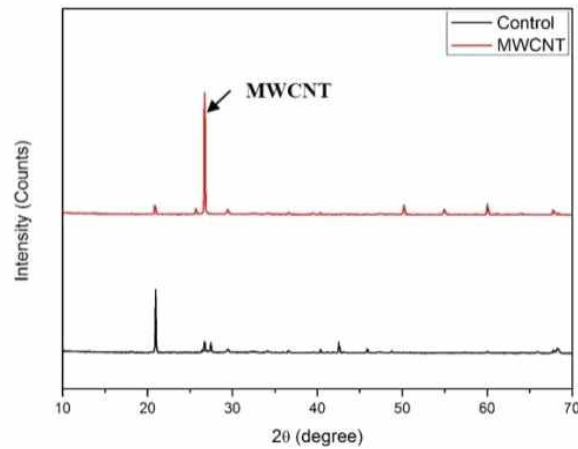


그림 1.3.2 XRD 분석 결과

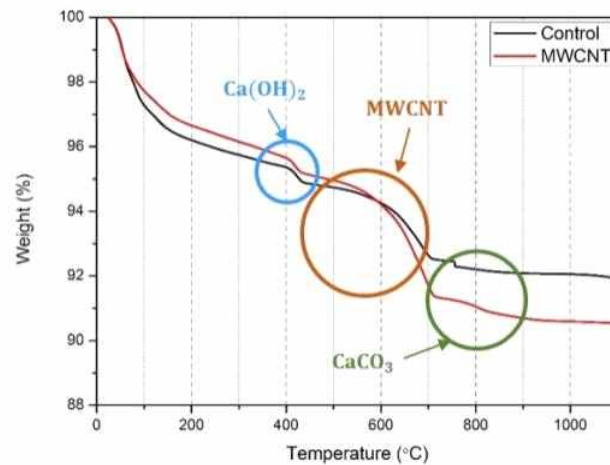


그림 1.3.3 TGA 분석 결과

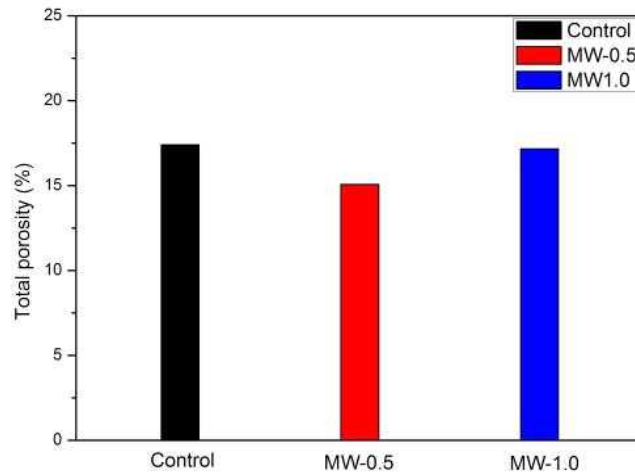


그림 1.3.4 기공률 측정 결과

표 1.3.1 기공률 측정 결과

시편명	기공률 (%)	Control 대비 감소율 (%)
Control	17.40	-
MW-0.5	15.07	13.36
MW-1.0	17.16	1.43

1.4) 제안기술의 시공단계별 개념 설계 및 시공단계별 디지털 Mock-up

본 연구는 임베디드 발열모듈의 시공단계별 개념 설계 및 시공단계별 디지털 Mock-up을 수행하였고, 다음과 같은 발열모듈 설계도면을 도출하였다. 정육면체 형태의 발열모듈은 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ 으로 압축강도 측정을 위한 공시체 제작 시 주로 사용하는 규격으로 설계하였다 (그림 1.4.1). 직육면체 형태의 발열모듈은 $100 \times 400 \times 80 \text{ mm}^3$ 으로 휨강도 측정을 위한 공시체 제작 시 주로 사용하는 규격으로 설계하였다 (그림 1.4.2).

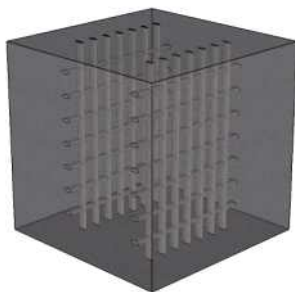


그림 1.4.1 정육면체 형태의 발열모듈 설계



그림 1.4.2 직육면체 형태의 발열모듈 설계

2) 임베디드 발열모듈의 최적화 방안 연구

2.1) 최적 발열 효율을 위한 전극 재료 및 모듈 위치 연구

본 연구는 최적 발열 효율을 위한 전극 재료 및 모듈 위치 검토한 후 최적 전극 재료 선정에 위한 실험을 수행하였다. 전극 재료는 stainless steel mesh와 copper plate로 구분한 뒤, 발열 실험 및 전기저항 실험을 수행하여 최적의 재료를 분석하였다. 발열 실험 결과, steel mesh를 사용한 시편의 최대 발열량은 26.6℃였고, copper plate를 사용한 시편의 최대 발열량은 7.7℃였다. 전기저항 측정 결과, copper plate의 전기저항값이 최대 2배 크게 측정되는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구는 발열 성능과 저항 측면에서 stainless steel mesh의 성능이 더 우수한 것으로 분석되었다. 재료에 따른 발열 성능과 저항성은 Kim et al. (2013)을 참고하였을 때 copper plate와 stainless steel mesh의 표면이 가지는 요철이 열 접촉면적과 관련이 있고 표면의 거칠기가 균일하고 접촉면적이 넓어질수록 열 접촉저항은 값이 작아지므로 copper plate의 전기저항값이 더 크게 나타난 것으로 분석되었다.

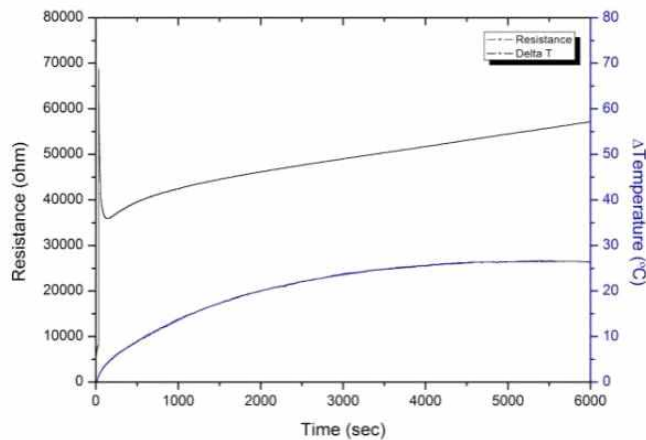


그림 2.1.1 Stainless Steel Mesh를 이용한 발열 실험 결과

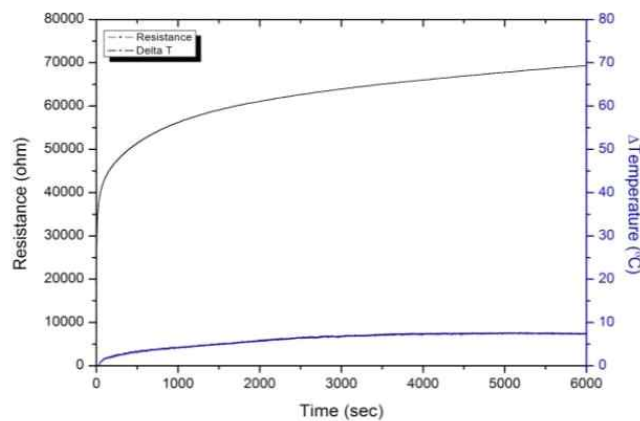


그림 2.1.2 Copper Plate를 이용한 발열 실험 결과

최적 발열 효율을 위한 최적 모듈 위치는 모듈 간격에 따라 분석하였다. 결정계수 R^2 는 1에 가까울수록 그래프의 오차가 작고 신뢰도가 높다는 뜻이므로, 본 실험 결과의 신뢰도가 높은 것으로 확인되었다. 본 연구는 발열 실험을 수행하였을 시 모듈 사이의 간격이 150 mm 이하로 배치되어야 발열 효율이 20% 이상 발현되는 것으로 분석되었다 (그림 2.1.3, 그림 2.1.4). 따라서 본 연구는 모듈 사이 간격이 150 mm를 초과하는 경우 발열 성능이 35 °C 이하로 내려갈 수 있는 것으로 판단되었다. 이는 발열체 간 거리가 증가함에 따라 주변으로 분산되는 열의 양이 증가하기에 발열 성능이 감소하는 것으로 분석되었다.

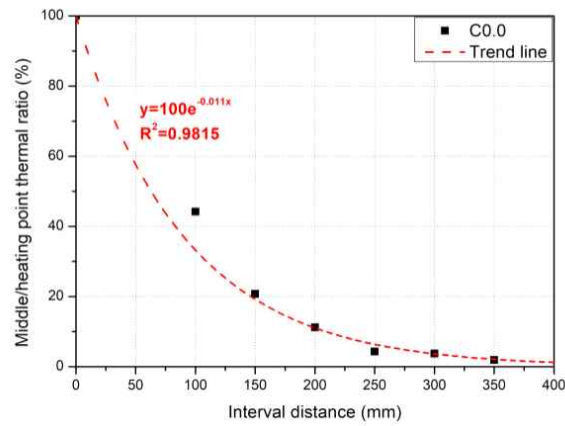


그림 2.1.3 모듈 사이 거리에 따른 발열 중심부로부터의 열 전달율과 추세선 그래프 (농도 0.0wt%)

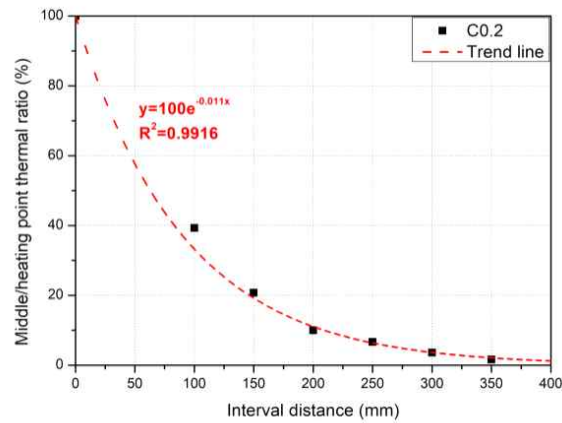


그림 2.1.4 모듈 사이 거리에 따른 발열 중심부로부터의 열 전달율과 추세선 그래프 (농도 0.2wt%)

2.2) 기후조건을 반영한 최적 나노 모듈 방안 (재료, 농도, 공급전압) 제시

본 연구는 발열모듈을 포장 시공에 적용할 시 외부환경에 따른 발열 성능을 분석하기 위하여 일반 기후조건에서의 최적 나노 모듈 방안을 분석하였다. 일반 기후조건에서 실험을 수행한 결과, 발열모듈 주변부 콘크리트에 시멘트 무게 대비 1.0wt%의 MWCNT를 혼입한 패널이 최대 1.9배 뛰어난 발열 성능을 보였다. 또한 발열성능은 공급전압을 30 V에서 50 V로 증가시켜 공급했을 시 최대 1.4배까지 향상되는 것으로 분석되었다.

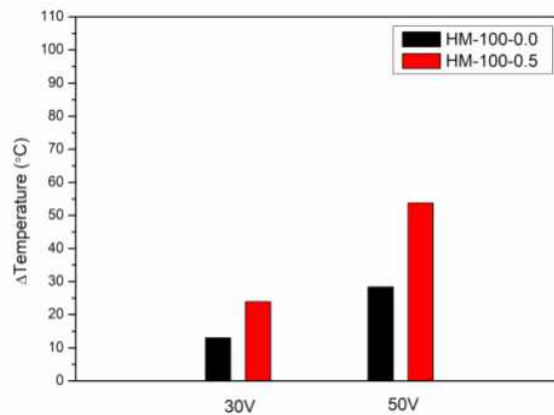


그림 2.2.1 일반 기후조건에서 주변부 콘크리트 MWCNT혼입 여부에 따른 발열 성능 차이 비교

표 2.2.1 일반 기후조건에서 전압 공급 시 발열 성능 측정 결과

시편명	$\Delta T/10\text{min}$		ΔT (°C)	
	30 V	50 V	30 V	50 V
HM-100-0.0	4.3	10.8	10.7	23.5
HM-100-0.5	6.4	20.6	18.6	44.7

본 연구는 일반 기후조건에서의 현장적용 실험을 수행하여 발열 성능을 도출하였다. 하지만 실제 현장에서는 겨울철에 극한 기후조건이 나타나기에, 극한 기후환경에서의 발열 성능을 검토하기 위한 발열 실험을 수행하였다. 실험결과, 발열부를 설치한 경우에는 양생부 콘크리트의 온도를 영상온도로 유지하는 것으로 분석되었다. 주변부 콘크리트에 MWCNT가 혼입되지 않은 경우에는 온도변화량이 낮았고, MWCNT 혼입량이 증가할수록 발열 성능이 증가하였다. 따라서 본 연구는 MWCNT를 혼입한 발열체를 적용한 경우에는 극한 기후조건에서도 우수한 발열 성능이 발현되는 것으로 판단되었다.

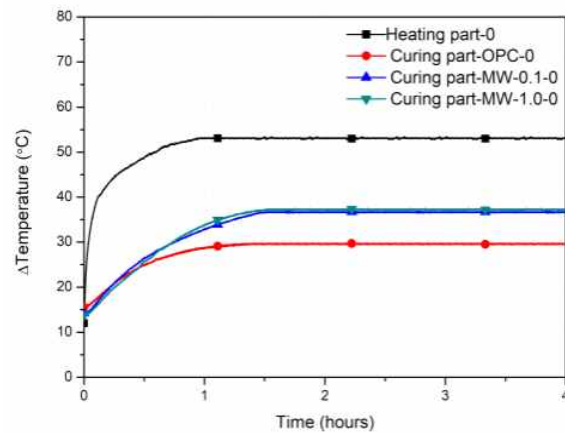


그림 2.2.2 극한 기후조건에서 Chamber를 이용한 발열 양생 실험 시 시편 온도 변화량 (챔버 온도 0 °C)

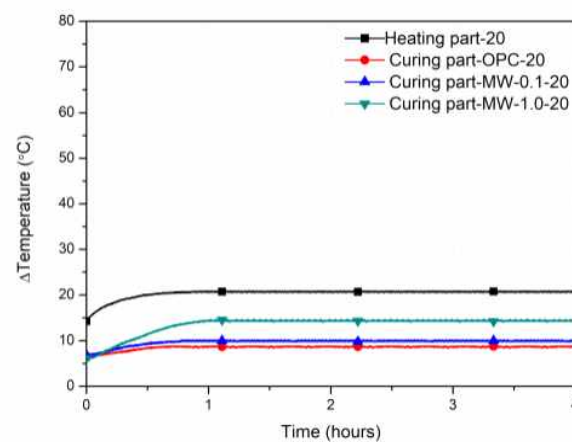


그림 2.2.3 극한 기후조건에서 Chamber를 이용한 발열 양생 실험 시 시편 온도 변화량 (챔버 온도 -20 °C)

[공동 ((주)동일기술공사)]

1) 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장 설계 및 제작기술 개발

1.1) 콘크리트 패널 형태에 따른 임베디드 발열모듈 적용방안 검토

국내 도로 설계 상황에 따른 발열모듈이 적용된 프리캐스트 콘크리트 패널의 검토를 수행하였다. 도로설계기준 (국토교통부, 2016), 도시지역 설계 지침 (국토교통부훈령 제 1266호, 2019.12.24 제정), 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 (국토교통부령 제 706호, 2020.03.06 일부개정)을 참고하여 발열모듈을 적용하기 위한 패널의 크기를 산정하였다. 지역, 설계속도 및 도로의 종류에 따라 차별적용을 하고 있으며 범용적으로 적용할 수 있도록 크기를 산정하였다. 조사에 따르면 도로의 폭원은 고속도로 3.50 m, 국도 및 지방도로 3.25 m, 도심지 도로 3.00 m~3.25 m이며, 이에 본 연구과제에서는 줄눈 0.005 m를 고려하여 패널의 폭은 3.20 m로 설정하였다.

표 1.1.1 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 ① 설계속도 (국토교통부령 제706호, 2020. 3. 6., 일부개정)

도로의 기능별 구분		설계속도 (킬로미터/시간)			
		지방지역			도시지역
		평지	구릉지	산지	
주간선도로	고속국도	120	110	100	100
	그 밖의 도로	80	70	60	80
보조간선도로		70	60	50	60
집산도로		60	50	40	50
국지도로		50	40	40	40

표 1.1.2 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 ② 차로 (국토교통부령 제706호, 2020. 3. 6., 일부개정)

설계속도 (킬로미터/시간)	차로의 최소 폭 (미터)		
	지방지역	도시지역	소형차도로
100 이상	3.50	3.50	3.25
80 이상	3.50	3.25	3.25
70 이상	3.25	3.25	3.00
60 이상	3.25	3.00	3.00
60 미만	3.00	3.00	3.00

패널의 두께는 통행 차량의 종류 및 차량 통행량에 따라 차이가 존재하며, 중앙버스 전용차로에 설치되는 프리캐스트 패널과 같은 0.25 m로 설정하였다. 최종적으로 패널은 3,200 mm의 폭원을 가지며, 25 mm의 높이를 갖는 것으로 결정하였으며, 적용되는 도로 상황에 따라 패널 규격의 변경 또한

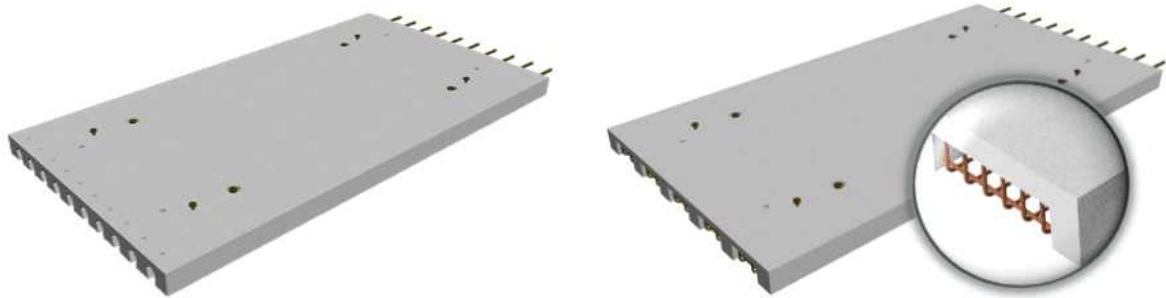
가능하다. 발열모듈의 적용은 발열성능의 최대화를 위해 패널 상부 표면에 노출되도록 적용하였으며, 블랙아이스 방지를 위해서는 패널 전단면에 대하여 발열성능을 갖도록 하는 것이 효과적일 수 있지만, 경제성을 고려하여 패널의 차륜구간에 대해서 발열모듈을 적용하는 것이 합당하다는 결론을 도출하였다. 차륜구간에 대하여 적용할 발열모듈의 타설 방법을 두 가지로 하였으며 현장실험 결과 설정된 패널의 사이즈 및 발열모듈의 적용방법이 해당 실험에서는 적합한 것으로 판단되었다.

1.2) 콘크리트 패널 모듈화에 따른 요소별 형상설계

발열모듈 적용 프리캐스트 패널의 모듈화에 따라 패널의 형상 및 각 요소에 관해서 개선하는 연구를 수행하였다. 패널의 사이즈는 차량의 종류와 통행량, 도로개통 요구시간과 같은 현장의 특이성을 고려하여 폭원 3,200 mm의 전단면 패널을 설치하는 방법 1과 폭원 1,600 mm의 반단면 패널을 연결하

여 설치하는 방법2로 현장 실험에 적용하였다. 방법 1의 패널은 50.0 t 이상의 크레인 설치가 가능하도록 공간적 여유가 있으며, 제한적인 개통시간으로 신속한 설치가 요구되는 지역에 설치하기 위해 계획하였다. 방법 2의 패널은 25.0 t 이상의 크레인 설치가 가능한 제한적인 공간이거나 설치시간에 여유가 있는 지역에 적용하기 위해 계획하였다. 패널의 크기를 결정 후, 제작된 패널 현장시공 시 패널 간 연결부, 패널의 인양 및 배치를 위한 패널 인양부, 하부 바닥면 상태에 따라 단차없이 시공하기 위한 패널 높이 조절부에 대해서 적용되는 발열모듈과의 간섭을 고려하여 요소별 최적 형상설계에 관한 연구를 수행하였다.

프리캐스트 패널간 연결부에 대해서는 종방향 및 횡방향 연결형태에 대한 검토를 수행하였다. 기존 종방향 연결부는 포켓 타입으로 그라우트 충진을 위한 에어홀이 있고, 에어홀 부분에 균열이 발생한다. 균열의 발생은 프리캐스트 패널의 내구성에 대하여 마이너스 요소로 작용하며, 이에 대한 보완을 하기 위해 에어홀이 없는 1/2후프 타입을 검토하였으며, 내구성 및 시공성에 유리한 1/2후프 타입을 적용하였다.



(a) 포켓 타입 연결방법

(c) 1/2 후프 타입 연결방법

그림 1.2.1 패널 연결부 상세

2차선 이상으로 설치할 경우를 고려하여, 차선을 따라 종방향 연결을 하는 것이 아닌 패널 간 횡방향 연결에 대한 검토를 수행하였다. 50.0 t 이상 크레인의 설치가 불가능하거나, 1차선일 때와 다르게 2차선 이상으로 패널을 설치하게 될 경우, 차선변경과 같이 프리캐스트 패널 연결부에 작용하는 통행하중의 하중분배를 고려하여 최적 연결방법에 관한 연구를 수행하였으며, 횡방향 연결부에 D32 0.600 m U형 볼트타입 타이바를 적용하는 것으로 최종 선정하였다.



(a) 개선 U형 타이바



(b) 개선 U형 타이바 상세도

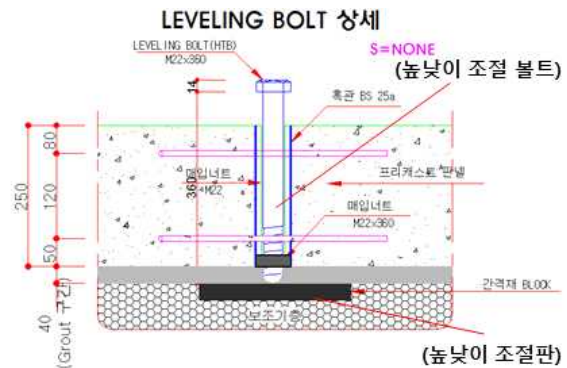
그림 1.2.2 개선된 타이바 상세

프리캐스트 패널 설치를 위한 기존 포장면 제거 시, 하부 바닥면 쇄석기초 노출되며 불규칙한 바닥면으로 높이조절에 어려움이 발생한다. 패널의 시공에서 기존 도로와 패널 간 단차가 없게 공사를 수행하기 위해서는 해당 문제를 해결하여야 한다. 기존에는 패널 하부에 설치될 패널의 높이에 맞게 철판 등을 쌓아놓는 방법으로 공사를 수행하였지만, 시공성과 정확성이 떨어진다. 이러한 문제를 해

결하기 위하여 패널을 제작할 때 높낮이 조절장치가 포함되도록 패널을 설계하였다. 높낮이 조절 볼트 및 높낮이조절판을 통해서 패널의 높이를 일정하게 조절할 수 있으며 평탄성을 확보할 수 있게 되었다. 패널 내 삽입된 나사선의 길이를 100 mm로 별도 가공 제작하여 시공 시 현장에서 발생할 수 있는 변수에 대하여 대처할 수 있게 하였다.



(a) 높낮이 조절 볼트

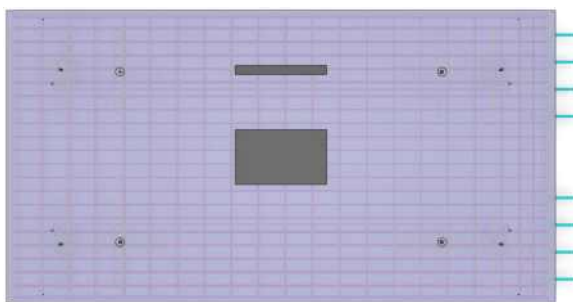


(b) 높낮이 조절장치 상세도

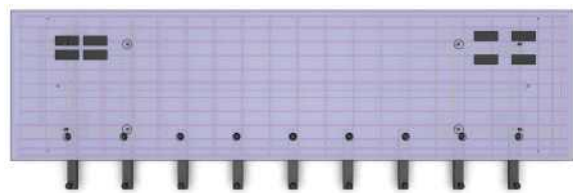
그림 1.2.3 개선된 타이바 상세

1.3) 시험체 제작 및 설치단계 검증을 위한 BIM기반 3D객체 모델링

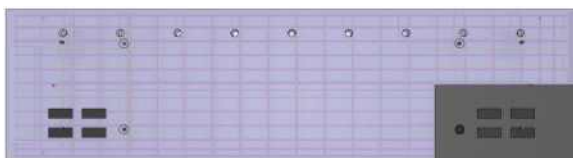
발열모듈이 적용된 프리캐스트 패널을 제작하기 위한 설계를 수행하였으며, 실제 제작 및 현장 적용 전 적용 가능성에 대한 검토가 필요하였다. 제작단계에서는 차륜구간에 적용되는 발열모듈과 프리캐스트 패널의 기본 요소 (철근 등) 및 시공에 필요한 요소 (패널 연결부 등) 간의 간섭 여부를 고려한 설계를 수행하였다. 설계의 검증은 BIM을 통한 3D 모델링을 통해 수행하였으며, 모델링된 패널을 통해 발열모듈과 요소 간의 간섭사항을 검토하고 수정하였다. CNT 블록의 위치 및 배치 간격의 계획을 토대로 모델링하여 검토를 수행하였으며, 초기 모델링 결과는 다음 그림 1.3.1과 같다.



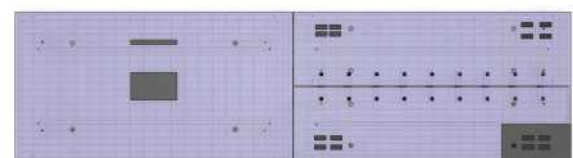
(a) 패널 Type-A



(b) 패널 Type-B



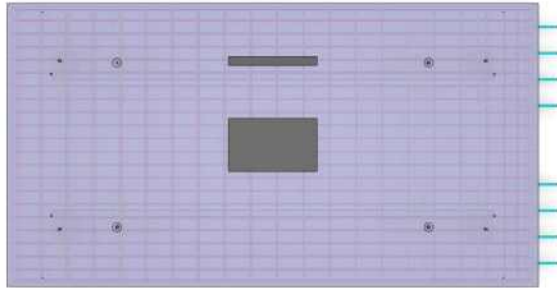
(c) 패널 Type-C



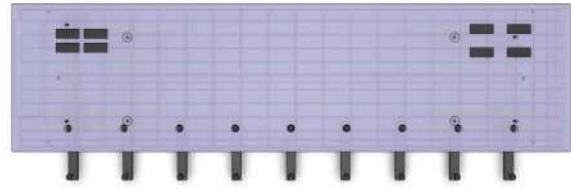
(d) 패널 연결도

그림 1.3.1 초기 높낮이 볼트 간섭 BIM 모델링 결과

총 3가지 타입의 프리캐스트 콘크리트 패널에 대하여 BIM 3D 모델링 및 이를 통한 간섭 여부를 확인하였으며, 분석결과 철근과의 간섭은 발견되지 않았지만 높낮이 조절 볼트가 위치한 곳에 CNT 블록이 위치하여 간섭이 발생하였다. 차륜구간에 배치된 CNT 블록의 위치를 재설정하는 것보다 구조적 요소가 아닌 높낮이 볼트의 위치를 변경하는 것이 Test Bed로서 적합하다는 판단을 하였으며 수정된 내용은 그림 1.3.2와 그림 1.3.3과 같다. 시공 요소인 높낮이 조절 볼트의 경우 시공 후 제거하여 그라우팅 작업을 하기 때문에 패널 바깥쪽에 위치하도록 수정 반영하였다.



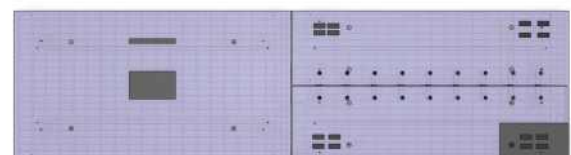
(a) 패널 Type-A (수정)



(b) 패널 Type-B (수정)

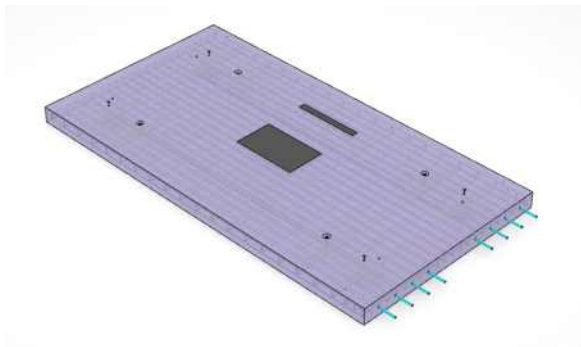


(c) 패널 Type-C (수정)

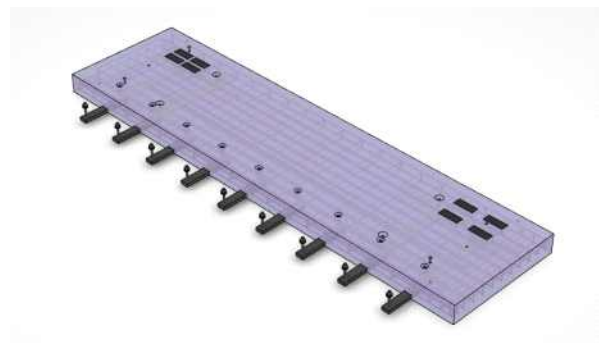


(d) 패널 연결도 (수정)

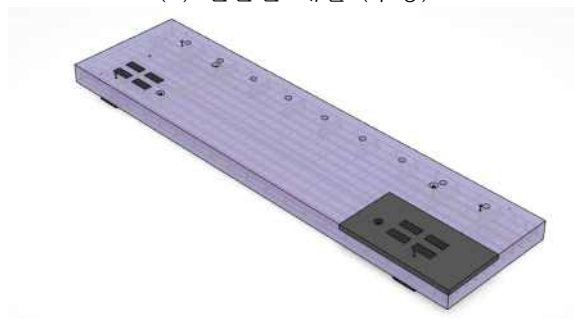
그림 1.3.2 높낮이 볼트 간섭 수정 BIM 모델링 결과



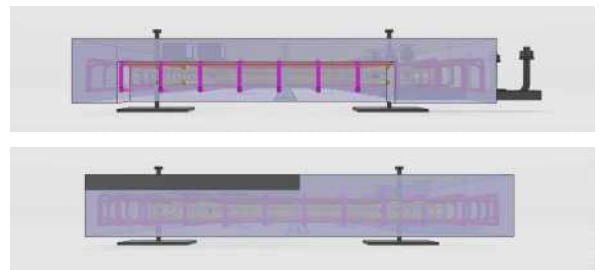
(a) 전단면 패널 (수정)



(b) 반단면 패널 (수정)



(c) 반단면 패널 (수정)



(d) 패널 단면도 (수정)

그림 1.3.3 BIM 모델링 최종 수정 투시도

본 연구과제에서 Test Bed 수행을 통해 얻은 결과를 바탕으로 블랙아이스 방지 프리캐스트 콘크리트 패널에 대한 최종안을 선정하였다. Test Bed에서 사용되었던 두 가지 타입의 패널 중 기본적으로는 반단면 패널을 기반으로 공사를 수행하는 것을 계획하였으며, 현장의 특성에 따라 전단면 패널이 적합하다고 판단될 경우에 예외적으로 전단면 패널을 적용할 수 있도록 하였다. 발열모듈의 경우에는 차륜구간에 블록형태의 발열모듈을 적용하기로 하였으며, 연구 수행 결과를 통해 가장 우수한 발열성능을 보였던 블록 간격 50 mm의 케이스를 선정하였다. 50 mm 간격의 블록은 반단면 패널을 4등분하였을 때 중앙부에 위치하도록 하였다. 패널의 종방향 및 횡방향 연결은 연구과제를 통해 개선된 다웰바와 U볼트를 적용하여 연결하도록 하였다. 선정된 최종안은 AUTO CAD를 통해 2D 기반의 도면으로 작성되었으며, BIM 3D 모델링을 통해 철근 및 요소 간섭을 확인하였다. 2D 기반으로 작성된 도면은 그림 1.3.4와 같다.

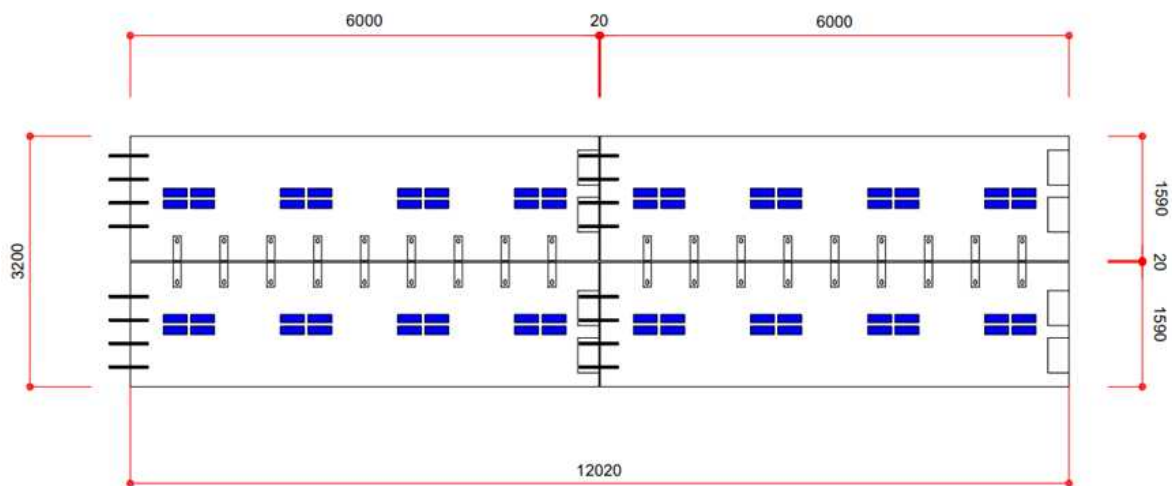
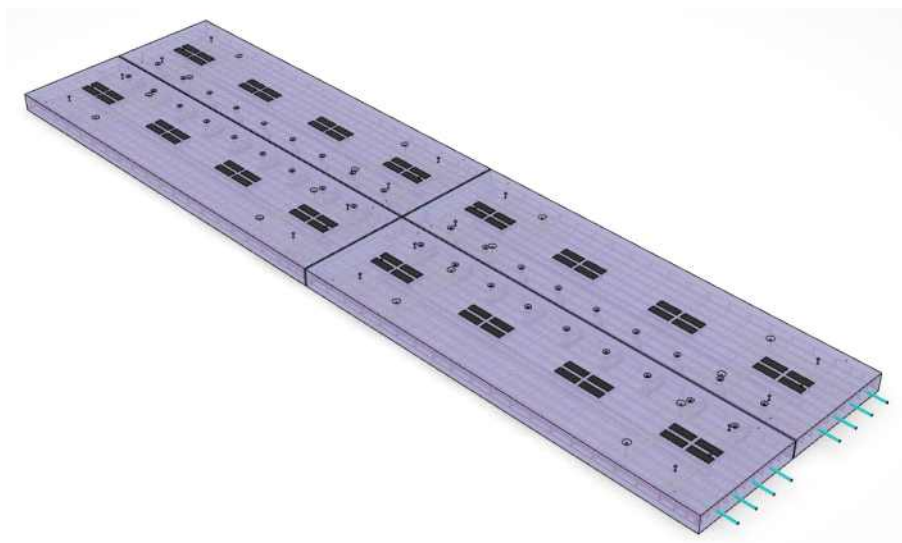
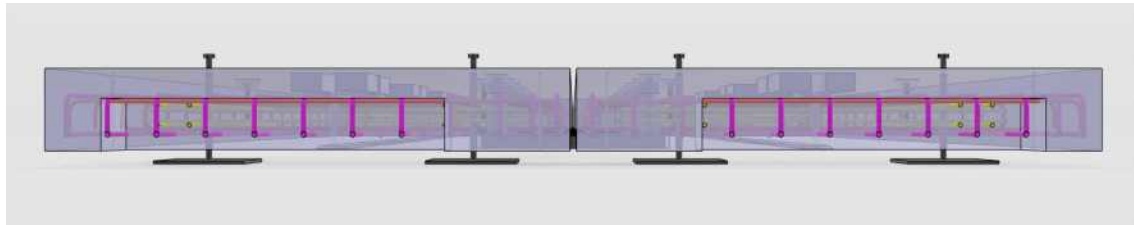


그림 1.3.4 블랙아이스 방지 프리캐스트 콘크리트 패널 최종안 평면도

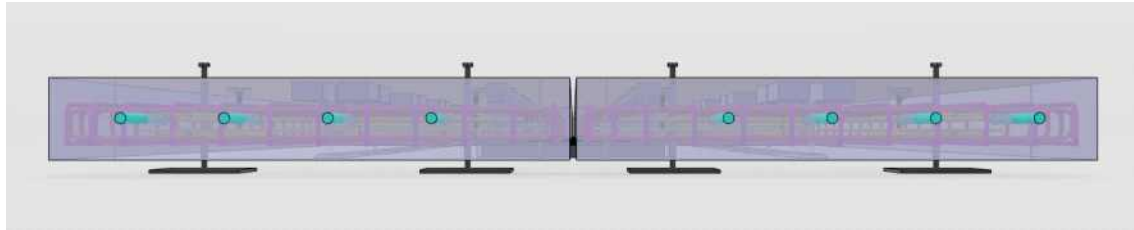
최종 선정된 블랙아이스 방지 프리캐스트 콘크리트 패널에 대하여 BIM을 이용한 3D 모델링을 통해 철근 및 요소의 간섭을 확인하였으며, 모델링 결과는 그림 1.3.5와 같다. Test Bed와 달리 최종안은 전 패널이 반단면 패널로 구성되어 있어 연결부에 대한 재검토가 필요하며, 발열모듈의 배치를 반단면 패널 중앙부로 옮기면서 변동된 사항에 대한 간섭 여부를 재검토하였다. 3D 모델링 검토를 통해 블랙아이스 방지 프리캐스트 콘크리트 패널의 철근 및 요소 간의 간섭이 없는 것을 확인하였다.



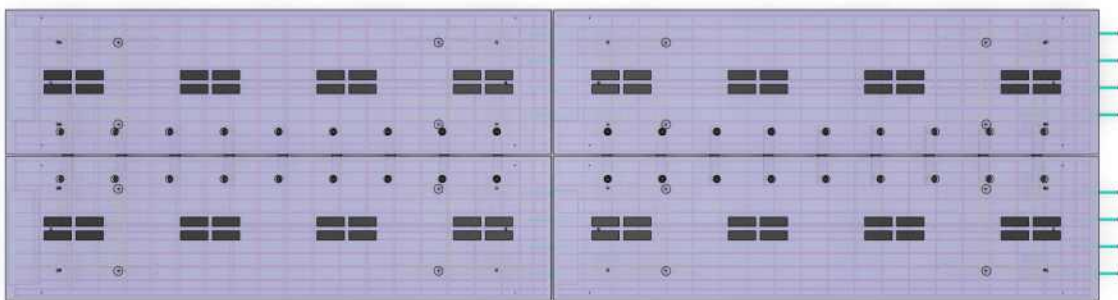
(a) Standard view



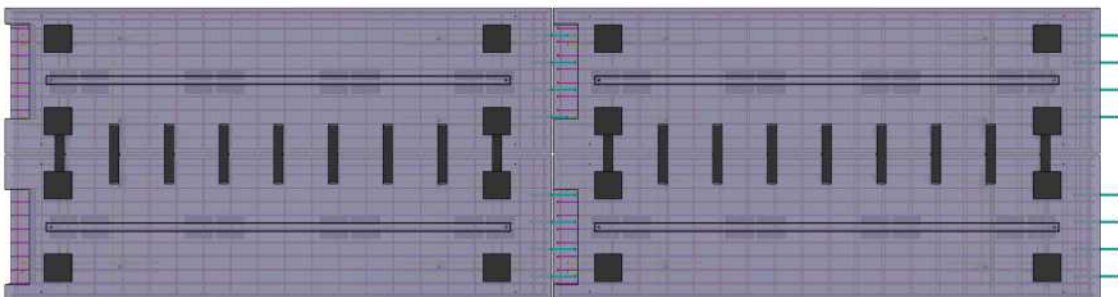
(b) Left view ($\frac{1}{2}$ 후프타입 연결부)



(c) Right view (다웰바 연결부)



(d) Top view



(e) Bottom view

그림 1.3.5 블랙아이스 방지 프리캐스트 콘크리트 패널 최종안 3D 모델링

1.4) 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장 경제성 분석

나노 발열모듈 적용 유, 무에 따라 콘크리트 패널의 초기시공비 분석이 필요하며 본 연구에서는 이에 대한 경제성 분석을 수행하였다. 도로 건설 시 부가적인 요소는 배제하고, 포장 층 구성에 포함되는 콘크리트 슬래브 부분에 대하여 공사비를 산출하였으며 시공 시 소요되는 노무비 등 기타 요소들은 배제하여 비교 분석을 수행하였다.

비교 대상으로는 타 제설법과의 비교를 위해 각 지자체에서 가장 보편적으로 사용되는 염화칼슘 제설제 사용 시와 비교하였으며, 나노 발열모듈 임베디드 콘크리트의 경우 MWCNT 1.0wt%로 시공한 발열모듈 10개를 삽입한 경우를 가정하였다. 시공비 계산을 위한 콘크리트 슬래브 층의 부피는 $0.2 \times 1.0 \times 1.0 \text{ m}^3$ 이며, 사용 재료의 단가는 표 1.4.1과 같다. 일반도로의 경우 염화칼슘에 의한 차량 및 도로의 부식으로 인한 2차적인 피해가 발생한다. 염화칼슘에 의한 도로포장의 결합력 약화 현상은 포트홀을 발생시키는 원인이며, 포트홀은 주행성을 크게 저하시키는 것은 물론 운전자의 안전을

위험하며, 대형사고를 유발한다. 또한, 염화칼슘 제설법의 경우 즉각적인 대응이 어려워 상습 결빙구간의 블랙아이스를 초기 제거하는 것에 어려움이 있다.

초기시공비 계산 시 제설제의 사용량은 콘크리트 도로 설계 수명인 30년을 기준으로 연평균 80cm 적설량의 제설에 필요한 양으로 산정하였다. 시공비 계산 결과 일반 콘크리트에 염화칼슘을 살포하는 경우 약 2,628,910원, 나노 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널의 경우 2,627,810원이 소요된다. 향후 전기사용료가 추가될 수 있으나 현재 연구 중인 나노 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 시스템은 낮은 전압 (약 30 V)로 높은 효율이 가능하다.

표 1.4.1 초기 시공비 비교표

제설법	품목	단가 (원/kg)	소요량 (kg)	소요 금액 (원)	계 (원)
염화칼슘 제설법	시멘트	125	65.20	8,150	2,628,910
	모래	1,000	138.40	138,400	
	굵은골재	11,000	224.40	2,468,400	
	물	234	29.40	6,880	
	염화칼슘	420	24.00	10,080	
나노 콘크리트	시멘트	125	65.20	8,150	2,627,810
	모래	1,000	138.40	138,400	
	굵은골재	11,000	224.40	2,468,400	
	MWCNT 수용액	98,000	0.07	6,860	
	전압공급장치	6,000	1.00	6,000	

향후 MWCNT는 가격하락과 적용 분야의 확대로 상용화 움직임이 활발하게 나타나고 있다. MWCNT 가격은 2005년 사업화 가능 가격이 2억원/톤으로 제시되었으나 2013년을 기준으로 약 0.6억원/톤 수준으로 향후 추가적인 급격한 가격하락이 예상되며, 본 보고서에는 분산 비용은 별도로 금액을 산정하였다. 최종적으로 나노 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 시스템은 염화칼슘 제설법보다 생애주기비용 분석 시 더 저렴한 수준의 시공 경제성을 가질 것으로 판단된다.

2) 콘크리트 패널 급속포장 설치조건 및 설치방안 검토

2.1) 제안기술 적용 가능 구간 분석 (하향 경사 구간, 터널 및 교량 적용)

국도 및 지방도로의 경우 모두 아스팔트 포장구간으로 내구성이 부족하여 콘크리트 포장과 같은 강성포장이 필요하며, 국도 및 지방도로 중 블랙아이스 발생 빈도가 높은 “부산지방 국토관리청” 관리구역을 선정하여 조사하였다. 부산지방 국토관리청은 결빙 취약구간으로 총 54개소 (166.35 km) 구간을 관리하고 있고, 그 중 38개소 (111.65 km)는 부산청에서, 나머지 16개소 (54.7 km)는 지자체에서 관리하고 있으며, 그 외 민자도로 5개소가 있다.

해당 구역을 중점으로 조사를 수행하였으며, 경남 소재 육십령을 적용 가능 구간으로 적절하다는 결론을 도출하였다. 해당 지역은 하향 경사 구간이며, 터널을 통과 후 그늘 구간으로 블랙아이스로 인한 교통사고 발생 빈도가 매우 높은 곳으로 현장적용 시 큰 효과를 기대할 수 있다.



그림 2.1.1 경남 육십령

2.2) 제안기술의 실용화 타당성 조사 및 현장시공을 위한 대상선정

본 연구에서 개발한 발열모듈이 적용된 프리캐스트 패널 포장의 실적용 시 성능을 평가를 위한 현장 test bed를 설치할 수 있는 적합한 대상지 조사를 수행한 결과, Test 단계의 패널은 실제 도로적용이 어려워, 일반 사유지를 대상으로 하였고, 겨울철 그늘진 곳으로 블랙아이스가 발생할 수 있으며, 중차량의 통행이 있는 곳을 대상으로 선정하였다

본 연구에서 개발한 발열모듈이 적용된 프리캐스트 콘크리트 패널의 Test Bed의 위치는 충청북도 괴산군에 위치한 “베스트피씨엠 (주)”에 공장 용지로 결정하였으며, 약 15,000평의 공장부지에서 패널 설치에 적합한 위치를 선정하기 위한 조사를 수행하였다. 패널이 제작되어 공장 외로 반출하는 차량의 통행구간을 조사하였으며, 조사결과, 공장 출입구, 강제 거꾸집 제작동 측면, 주차장등 3개소가 Test Bed를 설치하기에 적합한 지역으로 검토되었다.

표 2.2.1 Test Bed 위치선정

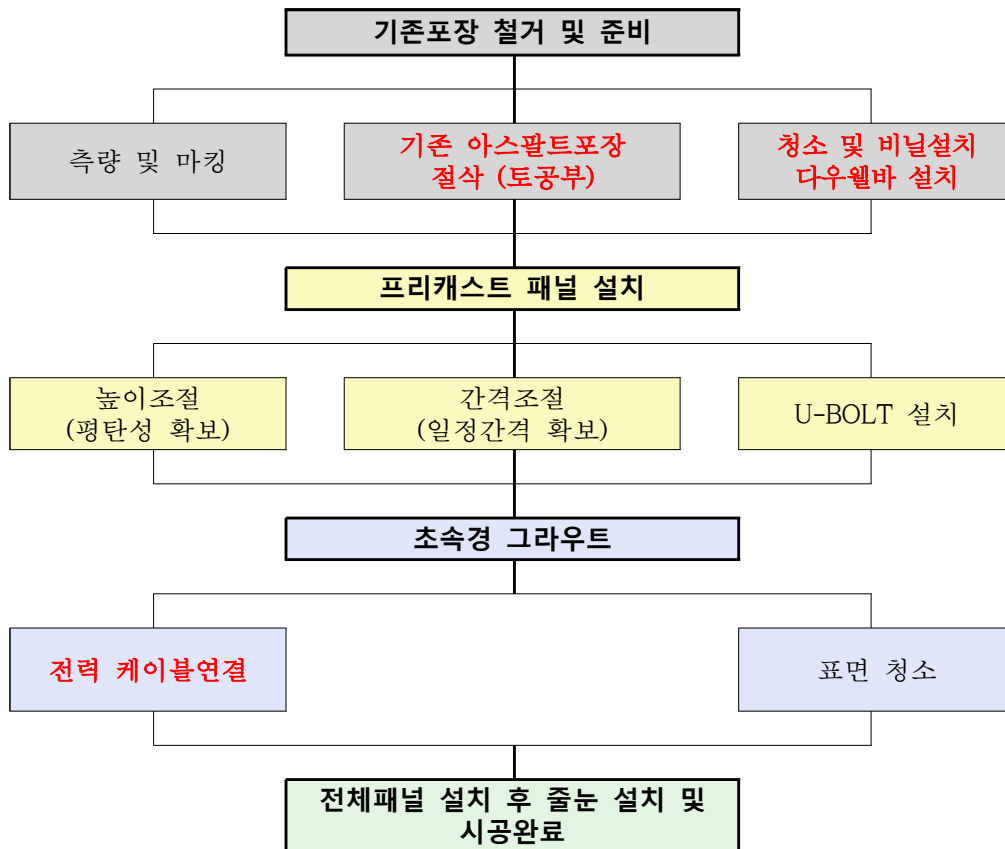
구분	설치위치 A	설치위치 B	설치위치 C
위치	공장 출입구	주차장	강제 거꾸집 제작동
전경도			
특징	- 평탄한 지형 - 남서쪽에 언덕이 형성되어 겨울철 오후 그늘 발생 - 콘크리트 포장	- 넓은 작업공간 확보가능 - 그늘진 구간 없음 - 콘크리트 포장	- 남서쪽에 제작동이 있어 일부 그늘진 구간 발생 - 비포장 구간
최종 대상지			○

공장 부지 내 3개소 중, 강제거꾸집 제작동 옆, 설치위치 C구간을 최종 현장 실험 대상지로 선정하였으며, 대상지는 출입구에서 내려오는 경사 구간 옆에 있으며, 제작동 건물로 인해 그늘진 구간이 발생하고 있다. 또한, 비포장 구간으로 시공을 하기에 적합하다고 판단하여 해당 위치를 Test Bed 구간으로 최종 선정하였다.

2.3) 제안기술의 콘크리트 패널 급속포장 설치방안 상세도출

발열모듈이 적용된 프리캐스트 콘크리트 패널의 급속포장 설치와 관련 시험시공뿐만 아니라 실제 도로에서의 설치공사를 고려하여 작성하였으며, 해당 내용을 일부 수정하여 추후에 바로 적용할 수 있도록, 각 공정에 대하여 상세하게 작성하였다. 시공의 과정을 3단계로 나누어 구분하였으며, 각

단계는 기존 포장제거 및 평탄화 단계의 1단계, 프리캐스트 패널 설치의 2단계, 그라우트 및 부대공의 3단계로 구분하였다.



시간 공종		소 요 시 간 (4시간)										비 고		
		0분	30분	60분	90분	120분	150분	180분	210 분	240 분				
교통 통제	운반트럭 차선통제													부분통제 (2시간)
25.0ton 크레인 운영시간														1~2시간 예정
기존 토공작업	작업준비 (사전커팅)													패널설치 1일 전 작업
	기존포장 제거 및 상차													
	패널 설치면 롤러 다짐 (면 정리)													
프리 캐스트 패널 공장 시험설치	패널높이 확인측량 및 마킹													
	높낮이 판 및 비닐포설													크레인 셋팅
	프리캐스트 패널 (3) 설치													크레인 셋팅 1회 실시
	그라우팅 1차													측면 그라우팅 포함
	그라우팅 2차													
	전력 케이블 연결 및 실험													2~3시간 시험

각 단계별로 수행과정을 작성하였으며, 해당 작업에 요구되는 시공 장비, 공사 재료, 인력 등에 대하여 작성하였다. 또한, 공사시간에 대한 계획을 수립하였으며, 공사시간은 차량 통행 통제를 최소화하기 위하여 차량 통행이 적은 야간에 공사를 8시간 (22:00~06:00) 동안 시공 완료하는 것을 계획하였다. 패널 인양 및 설치에 필요한 크레인을 사용함에 따라, 도로점용 시간 최소화를 위하여 중량물 사용 계획을 작성하였으며, 현장 조건을 고려한 패널 설치 상세도를 작성한다.

3) 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 제작 표준화와 유지관리 지침서

3.1) 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 제작 및 설치 구조 안전성 검토

프리캐스트 패널의 운반 및 시공 시 패널을 인양하기 위한 패널 인양부 위치설정에 대한 검토를 수행하였다. 패널 인양 시, 패널에 부모멘트와 정모멘트가 발생하기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 인양고리의 설치는 프리캐스트 패널을 1차원 보로 가정하고 인양 시 패널에 발생하는 부모멘트와 정모멘트가 일치하는 거리를 산정하여 인양 위치를 결정하였다. 미국의 PCI (prestressed Concrete Institute, 1985)의 규정을 적용하였으며, 기준에서 제시하는 슬래브 길이의 0.207에 해당하는 위치로 종방향 0.620 m와 횡방향 0.650 m에 근접하여 선정하였다. 인양고리의 간격과 볼트 간격에 대하여 지점을 결정하였고, 별도의 구조 검토를 수행하였다.

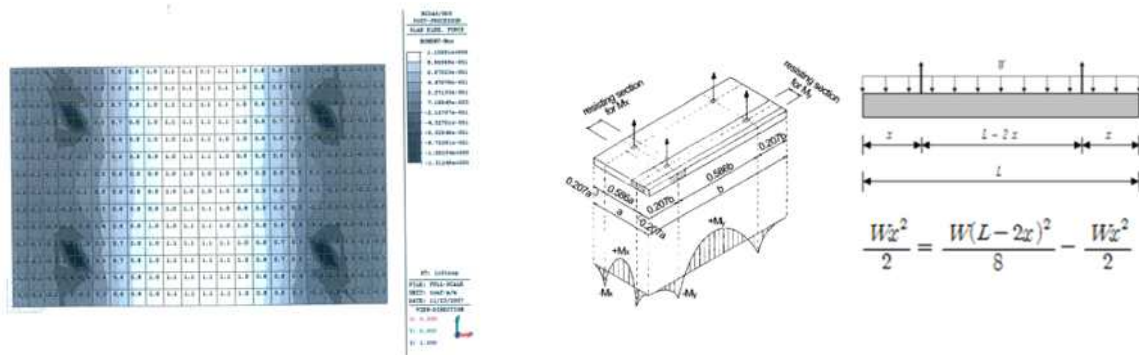
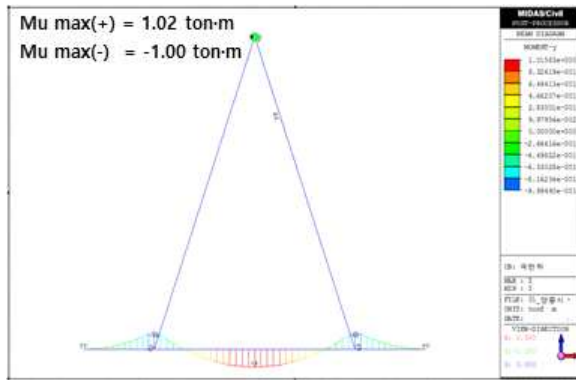


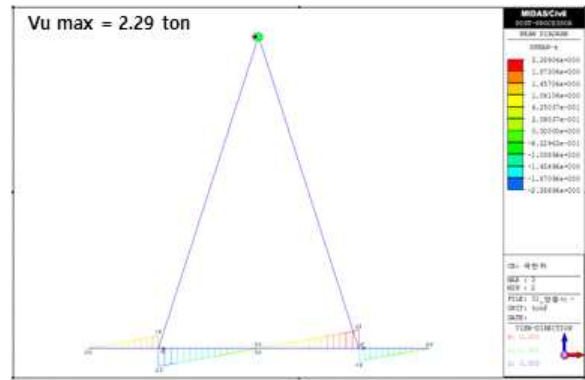
그림 3.1.1 인양부 위치 선정 상세

구조물의 적용에 있어 안전성은 반드시 고려되어야 할 사항이며 따라서, 구조안전성 검토를 수행하였다. 계획 설계된 패널의 사이즈, 단면, 인양 등을 고려하여 구조안전성 검토를 수행하였으며, 발열모듈이 적용된 프리캐스트 콘크리트 패널의 설치 과정 및 사용 과정에서 발생하는 구조적 문제에 대한 검토를 수행하였다. 구조계산서 작성 및 Midas Civil을 이용한 설계 검증으로 두 가지 과정을 통해 구조안전성 검토를 수행하였다.

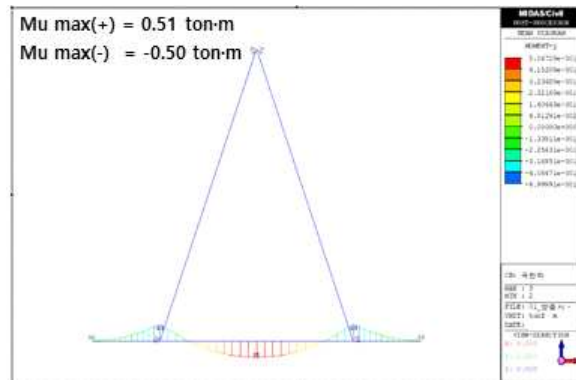
프리캐스트 패널의 인양 시 단면력 산정을 하였으며, 패널의 자중을 계산하여 등분포 하중으로 치환하여 패널에 작용하도록 하였다. 전단면패널에 작용하는 계수모멘트 및 계수전단력을 구하였으며, 이는 각각 전단면 패널에서 1.02 ton·m와 2.29 ton, 반단면 패널에서는 0.51 ton·m 와 1.14 ton으로 계산되었다. 계산된 단면력은 그림 3.1.2와 같다.



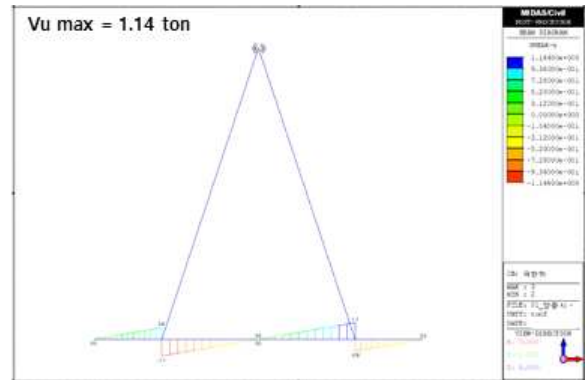
(a) 전단면 패널 모멘트 검토 (극한하중)



(b) 전단면 패널 전단력 검토 (극한하중)



(c) 반단면 패널 모멘트 검토 (극한하중)



(d) 반단면 패널 전단력 검토 (극한하중)

그림 3.1.2 패널 인양 시 작용하중에 따른 패널의 단면력 산정

계산된 단면력으로 프리캐스트 패널 양중 시 단면안전성을 검토하였으며, 단면안전성 검토 시 적용된 프리캐스트 패널의 설계기준강도는 8시간 증기양생 후, 탈형 시 예상되는 강도로서 60%의 강도로 적용하였다. 단면안전성 검토 결과는 전단면 패널 및 반단면 패널 모두 안전성을 만족하였으며, 결과는 다음과 같다. 구조검토 결과 주철근 (종방향)은 C.T.C 150 MM 간격에 H 16 MM를 적용하였다 인양고리 주변에는 D13 MM를 1.0 M 길이로 인양고리를 기준으로 격자 모양으로 8개를 배치하여 인발에 대한 안전성을 확보하였다.

① 전단면 패널

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi f_y A_s (D - a/2) = 269,404,000 \text{ N-mm} \\ &= 269.404 \text{ KN}\cdot\text{m} \geq M_u = 10.200 \text{ KN}\cdot\text{m} \dots \therefore \text{O.K}\end{aligned}$$

$$p_{req} = [M_u / \{ \phi f_y (D - a/2) \}] / (B - D) = 0.00023 \Rightarrow 4/3 p_{req} = 0.00031$$

$$\therefore \text{필요철근량 } A_{s,req} = p_{req} \times (B - D) = 150.346 \text{ mm}^2 \leq \text{사용철근량} \dots \therefore \text{O.K}$$

$$\text{철근비검토 : } p_{min} \leq p \dots \therefore \text{O.K}$$

$$\phi V_c = \phi v \cdot 1/6 \cdot v_{fck} \cdot B \cdot d / 1000 = 418.046 \text{ KN}$$

$$\phi V_c = 418.046 \text{ KN} > V_u = 22.900 \text{ KN} \dots \therefore \text{O.K}$$

$$s = \text{Min} [375 \cdot (210/f_{st}) - 2.5 C_c, 300 \cdot (210/f_{st})] = 6247.26 \text{ mm}$$

$$\dots \text{여기서..} C_c = d_{c_min} - \text{주철근 직경}/2 = 42.00 \text{ mm}$$

$$\text{최외단철근 평균배근간격} = 150.00 \text{ mm} \leq 6247.26 \text{ mm} \dots \therefore \text{O.K}$$

② 반단면 패널

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi f_y A_s (D - a/2) = 134,702,000 \text{ N}\cdot\text{mm} \\ &= 134.702 \text{ KN}\cdot\text{m} \geq M_u = 5.100 \text{ KN}\cdot\text{m} \dots \therefore \text{O.K}\end{aligned}$$

$$p_{req} = [M_u / \{ \phi f_y (D - a/2) \}] / (B \cdot D) = 0.00023 \Rightarrow 4/3 p_{req} = 0.00031$$

$$\therefore \text{필요철근량 } A_{s,req} = p_{req} \times (B \cdot D) = 75.173 \text{ mm}^2 \leq \text{사용철근량} \dots \therefore \text{O.K}$$

$$\text{철근비검토 : } p_{min} \leq p \dots \therefore \text{O.K}$$

$$\phi V_c = \phi V_1 / 6 \cdot \sqrt{f_{ck}} B \cdot d / 1000 = 209.023 \text{ KN}$$

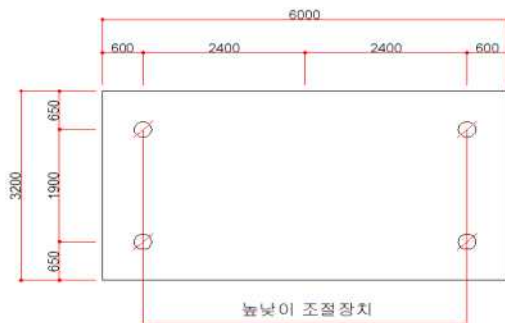
$$\phi V_c = 209.023 \text{ KN} > V_u = 11.400 \text{ KN} \dots \therefore \text{O.K}$$

$$s = \text{Min} [375 \cdot (210/f_{st}) - 2.5C_c , 300 \cdot (210/f_{st})] = 6247.26 \text{ mm}$$

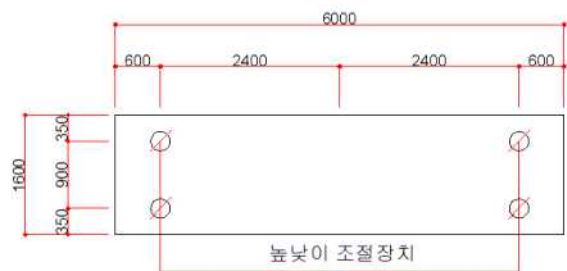
$$\dots \text{여기서.. } C_c = d_{c_min} - \text{주철근 직경}/2 = 42.00 \text{ mm}$$

$$\text{최외단철근 평균배근간격} = 150.00 \text{ mm} \leq 6247.26 \text{ mm} \dots \therefore \text{O.K}$$

패널공사에서 그라우팅 주입전 프리캐스트 콘크리트 패널을 지반면 위에 거치 시 높낮이 조절장치 (4Point)가 단순지지 할 때, 프리캐스트 패널의 단면안전성을 검토하였다. 높낮이조절 볼트의 위치는 그림 3.1.3과 같다. MIDAS구조해석 프로그램을 이용하여 패널에 작용하는 단면력을 산정하였으며, 패널자중을 등분포하중으로 치환하여 패널에 작용하게 하였다. 전단면패널에 작용하는 계수모멘트 및 계수전단력을 구하였으며, 이는 각각 전단면 패널에서 4.07 ton·m와 3.62 ton, 반단면 패널에서는 2.03 ton·m 와 1.80 ton으로 계산되었다. 계산된 단면력은 그림 3.1.4와 같다.

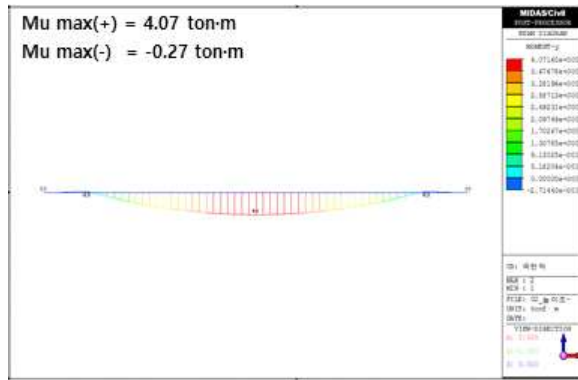


(a) 전단면 패널

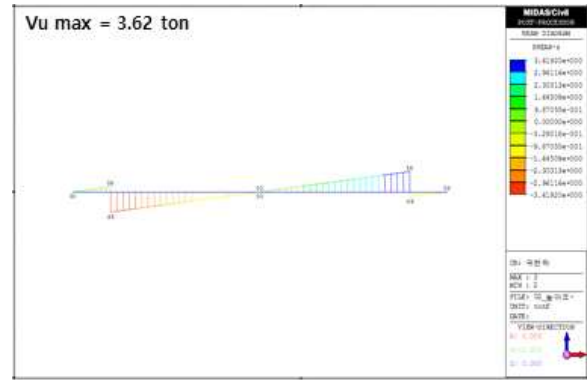


(b) 반단면 패널

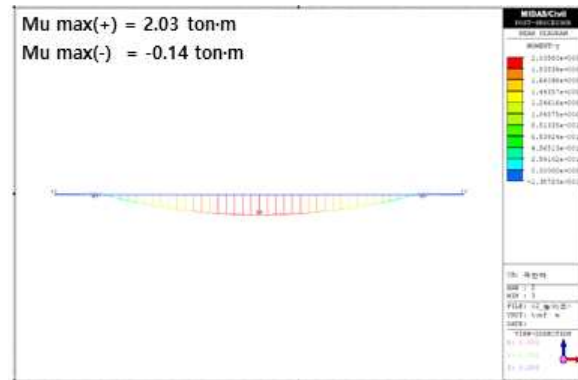
그림 3.1.3 높낮이 조절 볼트 위치



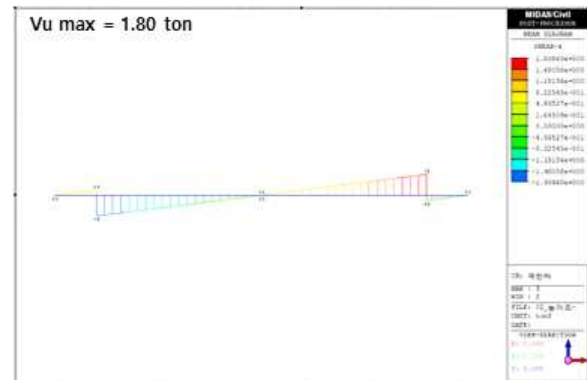
(a) 전단면 패널 모멘트 검토 (극한하중)



(b) 전단면 패널 전단력 검토 (극한하중)



(c) 반단면 패널 모멘트 검토 (극한하중)



(d) 반단면 패널 전단력 검토 (극한하중)

그림 3.1.4 높낮이 볼트 지지안전성 단면력 산정

산정된 단면력을 가지고 프리캐스트 패널 높낮이 조절볼트 지지안전성 검토를 수행하였다. 프리캐스트 패널 거치 시 증기양생 후 15일간 양생시켜 거치하기 때문에 균열안전성 검토 시 패널의 설계 기준강도는 100%로 적용하여 검토하였다. 단면안전성 검토 결과는 전단면 패널 및 반단면 패널 모두 안전성을 만족하였으며 결과는 다음과 같다. 인양 시 단면력 검토 결과와 높낮이조절볼트의 지지안전성 검토 결과를 통해 인양고리의 간격 (3.60 m)과 볼트간 간격 (4.80 m)에 대하여 지점으로 결정하였다.

① 전단면 패널

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi f_y A_s (D - a/2) = 276,883,300 \text{ N-mm} \\ &= 276.883 \text{ KN}\cdot\text{m} \geq M_u = 40.700 \text{ KN}\cdot\text{m} \dots \therefore \text{O.K}\end{aligned}$$

$$p_{req} = [M_u / \{ \phi f_y (D - a/2) \}] / (B - D) = 0.00094 \Rightarrow 4/3 p_{req} = 0.00125$$

$$\therefore \text{필요철근량 } A_{s,req} = p_{req} \times (B - D) = 601.859 \text{ mm}^2 \leq \text{사용철근량} \dots \therefore \text{O.K}$$

$$\text{철근비검토 : } p_{min} \leq p \dots \therefore \text{O.K}$$

$$\phi V_c = \phi v \cdot 1/6 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot B \cdot d / 1000 = 539.695 \text{ KN}$$

$$\phi V_c = 539.695 \text{ KN} > V_u = 36.200 \text{ KN} \dots \therefore \text{O.K}$$

$$s = \text{Min} [375 \cdot (210 / f_{st}) - 2.5 C_c, 300 \cdot (210 / f_{st})] = 1566.31 \text{ mm}$$

$$\dots \text{여기서..} C_c = d_{c_min} - \text{주철근 직경} / 2 = 42.00 \text{ mm}$$

$$\text{최외단철근 평균배근간격} = 150.00 \text{ mm} \leq 1566.31 \text{ mm} \dots \therefore \text{O.K}$$

② 반단면 패널

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi f_y A_s (D - a/2) = 138,441,700 \text{ N}\cdot\text{mm} \\ &= 138.442 \text{ KN}\cdot\text{m} \geq M_u = 20.300 \text{ KN}\cdot\text{m} \dots \therefore \text{O.K}\end{aligned}$$

$$p_{req} = [M_u / \{ \phi f_y (D - a/2) \}] / (B \cdot D) = 0.00094 \Rightarrow 4/3 p_{req} = 0.00125$$

$$\therefore \text{필요철근량 } A_{s,req} = p_{req} \times (B \cdot D) = 300.186 \text{ mm}^2 \leq \text{사용철근량} \dots \therefore \text{O.K}$$

$$\text{철근비검토 : } p_{min} \leq \rho \dots \therefore \text{O.K}$$

$$\phi V_c = \phi V_1 / 6 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot B \cdot d / 1000 = 269.848 \text{ KN}$$

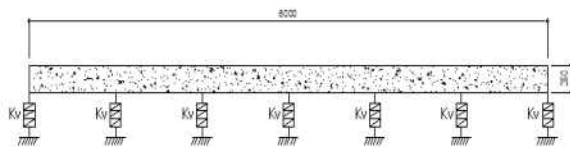
$$\phi V_c = 269.848 \text{ KN} > V_u = 18.000 \text{ KN} \dots \therefore \text{O.K}$$

$$s = \text{Min} [375 \cdot (210/f_{st}) - 2.5 C_c , 300 \cdot (210/f_{st})] = 1571.33 \text{ mm}$$

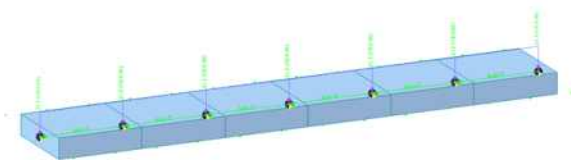
$$\dots \text{여기서.. } C_c = d_{c_min} - \text{주철근 직경}/2 = 42.00 \text{ mm}$$

$$\text{최외단철근 평균배근간격} = 150.00 \text{ mm} \leq 1571.33 \text{ mm} \dots \therefore \text{O.K}$$

프리캐스트 패널 시공완료 후, 차로에 실제 적용되었을 경우를 고려하여 구조검토를 수행하였으며 공용 중 버스하중 DB-24 및 DL-24에 대해서 구조검토를 수행하였다. 패널과 패널 사이 줄눈부마다 다웰바 설치로 휨모멘트가 발생되지 않기 때문에 1개 패널에 대한 모델링 및 구조해석을 실시하였으며, 이때 지반스프링 계수 지반조건은 N=15로 하였다.



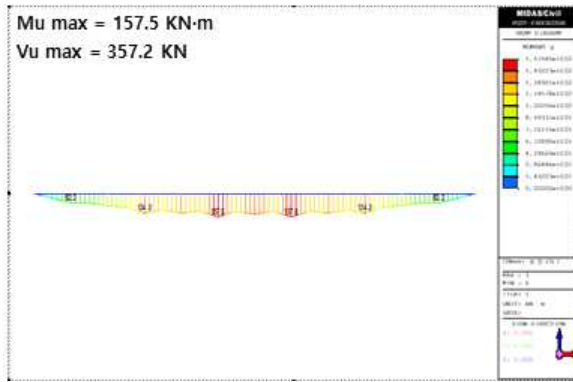
(a) 지반스프링 계수 지반조건



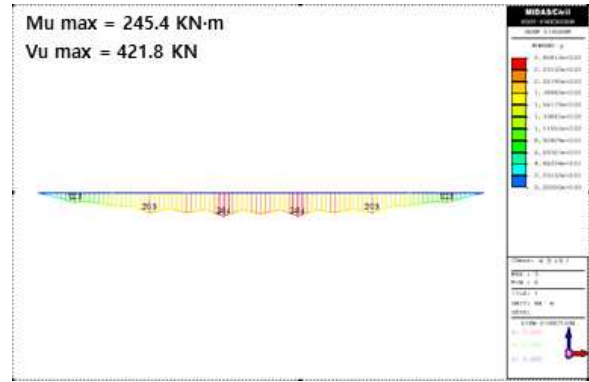
(b) 패널 구조 모델링

그림 3.1.5 프리캐스트 패널 공용 중 구조해석 모델링

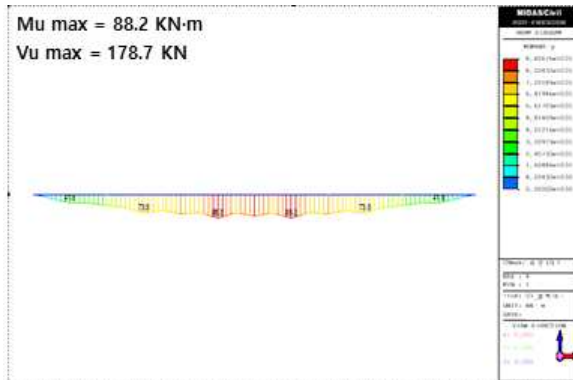
MIDAS구조해석을 통해 DB-24 및 DL-24에 대해서 작용하는 사용하중 및 극한하중을 검토하였으며, 검토결과 사용하중 및 극한하중에서 작용하는 전단력계수와 모멘트계수가 더 큰 DB-24를 적용하여 계산하기로 하였다.



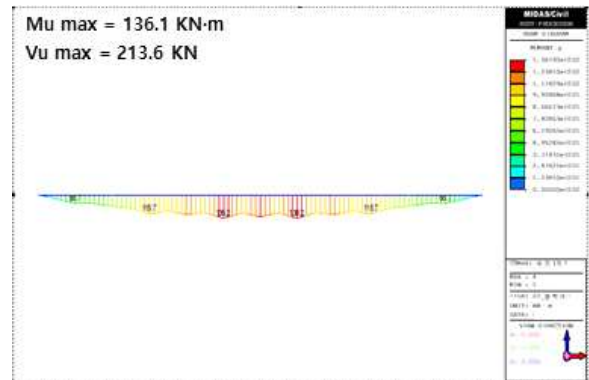
(a) 전단면 패널 극한하중 검토 (DL-24)



(b) 전단면 패널 극한하중 검토 (DB-24)



(c) 반단면 패널 극한하중 검토 (DL-24)



(d) 반단면 패널 극한하중 검토 (DB-24)

그림 3.1.6 프리캐스트 패널 공용 중 단면력 산정

산정된 단면력을 가지고 프리캐스트 패널 공용 중 안전성 검토를 수행하였다. 단면안전성 검토 결과는 전단면 패널 및 반단면 패널 모두 안전성을 만족하였으며, 결과는 다음과 같다.

① 전단면 패널

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi f_y A_s (D - a/2) = 276,883,300 \text{ N-mm} \\ &= 276.883 \text{ KN-m} \geq M_u = 245.400 \text{ KN-m} \dots \therefore \text{O.K}\end{aligned}$$

$$p_{req} = [M_u / (\phi f_y (D - a/2))] / (B \cdot D) = 0.00584 \Rightarrow 4/3 p_{req} = 0.00779$$

$$\therefore \text{필요철근량 } A_{s,req} = p_{req} \times (B \cdot D) = 3737.193 \text{ mm}^2 \leq \text{사용철근량} \dots \therefore \text{O.K}$$

$$\text{철근비검토 : } p_{min} \leq p \dots \therefore \text{O.K}$$

$$\phi V_c = \phi v \cdot 1/6 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot B \cdot d / 1000 = 539.695 \text{ KN}$$

$$\phi V_c = 539.695 \text{ KN} > V_u = 421.800 \text{ KN} \dots \therefore \text{O.K}$$

$$s = \text{Min} [375 \cdot (210/f_{st}) - 2.5 C_c, 300 \cdot (210/f_{st})] = 427.80 \text{ mm}$$

$$\dots \text{여기서 } C_c = d_{c_min} - \text{주철근 직경}/2 = 42.00 \text{ mm}$$

$$\text{최외단철근 평균배근간격} = 150.00 \text{ mm} \leq 427.80 \text{ mm} \dots \therefore \text{O.K}$$

② 반단면 패널

$$\begin{aligned}\phi M_n &= \phi f_y A_s (D - a/2) = 138,441,700 \text{ N-mm} \\ &= 138.442 \text{ KN-m} \geq M_u = 136.110 \text{ KN-m} \dots \therefore \text{O.K}\end{aligned}$$

$$p_{req} = [M_u / \{ \phi f_y (D-a/2) \}] / (B-D) = 0.00650 \Rightarrow 4/3 p_{req} = 0.00867$$

$$\therefore \text{필요철근량 } A_{s,req} = p_{req} \times (B-D) = 1897.036 \text{ mm}^2 \leq \text{사용철근량} \dots \therefore \text{O.K}$$

$$\text{철근비검토} : \rho_{min} \leq \rho \dots \therefore \text{O.K}$$

$$\phi V_c = \phi V_1 / 6 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot B \cdot d / 1000 = 269.848 \text{ KN}$$

$$\phi V_c = 269.848 \text{ KN} > V_u = 213.600 \text{ KN} \dots \therefore \text{O.K}$$

$$s = \text{Min} [375 \cdot (210/f_{st}) - 2.5C_c, 300 \cdot (210/f_{st})] = 420.46 \text{ mm}$$

$$\dots \text{여기서} \dots C_c = d_{c_min} - \text{주철근 직경} / 2 = 42.00 \text{ mm}$$

$$\text{최외단철근 평균배근간격} = 150.00 \text{ mm} \leq 420.46 \text{ mm} \dots \therefore \text{O.K}$$

구조검토를 통해 전단면 패널 및 반단면 패널 모두에서 인양 시 안전성, 높낮이 조절 볼트 거치 시 안전성, 공용 중 구조 안전성을 모두 만족하는 것을 확인하였으며, 이를 통해 프리캐스트 콘크리트 패널의 시공 및 사용에 있어 안전한 것으로 판단되었다.

3.2) 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 제작 및 설치 표준도 작성

본 연구과제에서 블랙 아이스 발생에 대한 포장 특성을 조사 반영하며, 차륜특성이 반영된 반단면 패널 제작을 위하여 BIM으로 세부 설계를 수행하였으며, AUTO CAD를 활용하여 2D기반의 도면작업을 수행하였다. 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널의 현장 적용을 위하여 Test Bed를 통한 검증을 수행하였다. 연구과제를 수행하면서 고려하고 개선했던 사항들을 Test Bed에 사용될 패널의 제작 및 설치계획에 반영하였으며, 이에 대한 상세를 작성하였다.

발열모듈과 기타 요소들의 간섭을 고려하여 철근의 배근도를 작성하였으며, 다우웰바 및 타이바를 이용한 개선된 연결공법에 대하여도 상세하게 작성하였다.

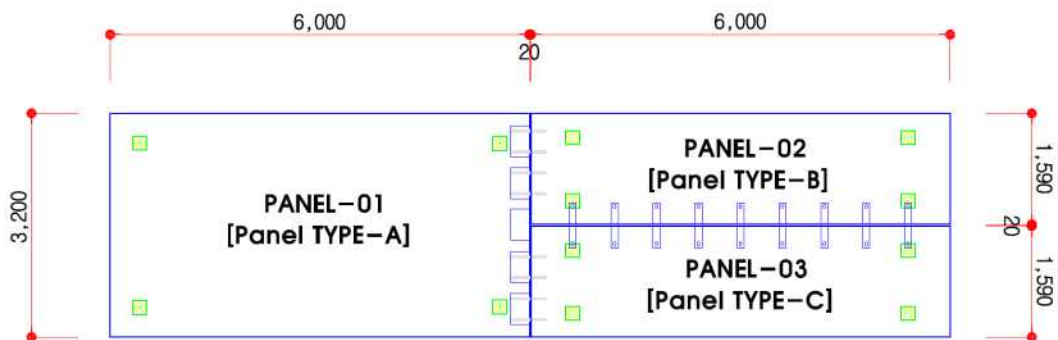
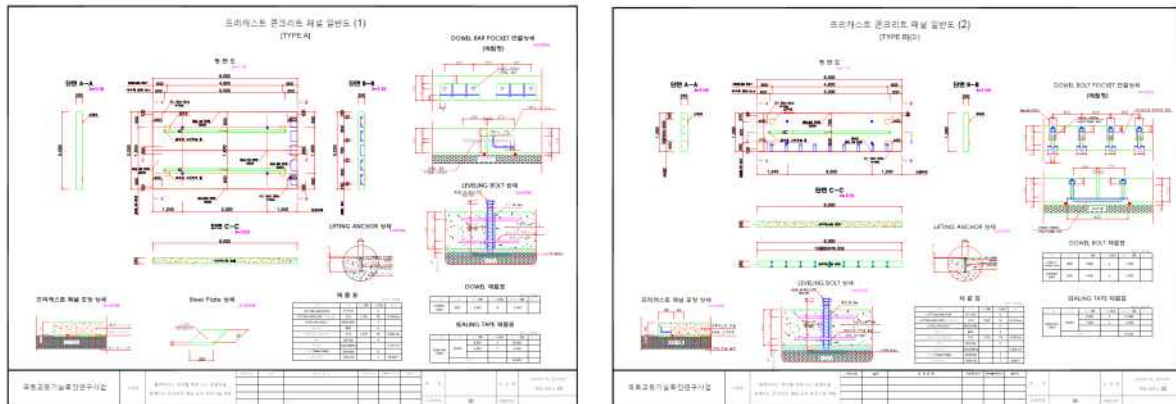


그림 3.2.1 Test Bed 패널 최종 평면도

3.3) 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 형태별 2-TYPE 제작

연구계획 초기 단계에는 3.2 mX6.0 m의 패널 타입 한가지로 제작 및 설치를 계획하였으나, 설치에 대한 장비조합 및 경제성을 고려하여 반단면 형태로 두 가지 타입으로 설정하였다. 패널의 형태는 차량의 종류와 통행량, 도로개통 요구시간, 작업조건등과 같이 현장의 특이성을 고려하여 폭원은 3.2 m의 전단면 패널을 설치하는 방법 “1” 과 폭원 1.6 m의 반단면 패널을 U-BOLT 타이바로 연결하

는 방법” 2 “로 현장실험에 적용하였다. 방법 ” 1 “의 패널은 50.0t 이상의 크레인 설치가 가능하도록 공간적 여유가 있으며, 제한적인 개통시간으로 신속한 설치가 요구되는 지역에 설치하기 위해 계획하였다. 방법” 2 “의 패널은 25.0 t 이상의 크레인 설치가 가능한 제한적인 공간이거나 설치시간에 여유가 있는 지역에 적용하기 위해 계획하였다.



(a) 전단면 프리캐스트 패널 일반도

(b) 반단면 프리캐스트 패널 일반도

그림 3.3.1 프리캐스트 패널 시공 일반도

반단면 패널로 계획된 Type-B 과 Type-C 패널의 연결방법에 대한 검토를 수행하였으며, 차선을 따라 종방향 연결이 아닌 횡방향으로 연결하였으며, 양쪽 차륜부에 작용하는 통행하중을 고려하여 U-BOLT 타이바 연결방식을 적용하였다.

3.4) 제안기술의 설계/ 제작 유지관리 가이드라인 연구

본 연구과제를 수행하면서 개발된 “발열모듈 임베디드 콘크리트 패널” 기술의 제작 및 시공, 유지관리에 대한 가이드라인을 작성하였다. 연구과제 1차년도에는 초기 기획 및 설계를 수행하면서 요구되는 사항들에 대하여 작성하였으며, 2차년도에 패널 제작 및 현장 Test Bed를 수행 후, 제작 및 시공에 대한 내용을 작성하였다. 내용은 설치 가이드라인과 유지관리 지침서로 분류하여 작성하였으며, 대상지 선정부터, 재료의 선정, 패널 제작, 시공했던 사항들을 작성하였다.

유지관리 및 제작과 관련된 프리캐스트 패널의 상세한 내용은 별첨 자료인 “블랙아이스 방지를 위한 나노 발열모듈 임베디드 콘크리트 포장기술 (프리캐스트)” <설치 가이드라인 및 시공지침서> 와 <유지관리 지침서>로 각각 구분하여 작성하였다.

4) 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속포장의 시험설치 및 실용화 추진

4.1) 제안기술의 발열 성능 검증을 위한 시험체 형태별 2-TYPE 제작 및 현장설치

제작된 패널을 이용해 현장 시험설치를 수행하였으며, 시험시공의 과정은 그림 4.1.1과 같다. 시공순서는 기존 포장면 제거, 비닐 포설, 높낮이조절판 설치, 반단면 패널 인양 및 연결, 전단면 패널 인양 및 연결, 높낮이조절, 그라우팅의 순서로 수행하였다. 백호우를 이용하여 기존 포장면을 제거하였다. 기존포장을 제거 후 바닥면 다짐 및 평탄화 작업을 수행하였으며, 비닐을 포설하여 패널을 설치할 준비를 완료하였다.

포설된 비닐위에 높낮이조절판을 위치별로 배치하였으며, 준비된 25.0 t 크레인으로 패널제작 시 설치된 인양고리를 이용하여 패널을 인양 및 배치하였다. 반단면 패널 1개를 배치 후, 다른 반단면 패널을 설치하였으며, 이때 새롭게 적용된 U-BOLT 타이바를 이용하여 반단면 패널을 연결하였다. 그

후 전단면 패널을 인양하여 연결된 반단면 패널과 종방향 연결을 수행하였으며, 새롭게 적용된 포켓타입으로 패널간 연결을 수행하였다.

패널의 설치 및 연결을 완료한 후 높낮이조절 볼트를 이용하여 설치된 패널의 높낮이를 조절하였으며, 그라우트 홀을 통해 패널 하부 그라우팅 작업을 수행하였다. 마무리 작업인 볼트 연결부 및 인양부에 대해서도 그라우팅 작업을 수행하였으며, 패널의 설치작업을 완료하였다.



(a) 기존 포장면 제거



(b) 비닐포설 및 높낮이조절판 설치



(c) 반단면 패널 인양



(d) 반단면 패널 설치



(e) 반단면 패널 연결



(f) 전단면 패널 인양



(g) 전단면 패널 설치



(h) 높낮이 조절



(i) 그라우팅



(j) 볼트연결부 그라우팅



(k) 패널설치 완료



(l) 케이블 연결 및 데이터 분석

그림 4.1.1 발열모듈이 적용된 프리캐스트 패널 시험시공 과정

4.2) 현장조건별 급속교체 설치에 따른 시공기술 및 시공지침서 개발

본 연구과제를 수행하는 과정에서 발생했던 시행오차, 고려했던 사항들, 개선 사항 등을 포함하는 시공지침서를 작성하였다. 시공지침서에는 시공의 시작부터 종료 시까지의 필요한 내용을 작성하였다. 시공적합성 판단을 위한 대상지 현장조사와 고려사항, 그에 맞는 시공방법, 시공순서 등을 작성하였으며, 패널 제작 재료의 선정과 재료시험에 관한 내용을 포함한다. 또한, 발열모듈의 외부 전기 인입에 관한 내용 및 패널 품질관리에 관한 내용을 포함하여 작성하였다. 작성된 내용에 대하여 미흡한 부분은 시험시공을 통해서 수정보완을 하였으며, 세부사항이 포함된 최종작성 자료는 성과물로 제출한 <설치가이드라인 및 시공지침서>를 통해 제시하였다.

4.3) 제안기술의 실용화 및 사업화 추진 활성화를 위한 참여기업과의 실시계약 체결

최근 교통량의 증가와 차량의 중량 증가로 인하여 블랙아이스로 인한 사고 발생 시 대형사고로 번지며, 그 발생 건수 또한 증가하고 있다. 현재까지 개발된 발열관련 도로의 결빙방지 기술로는 전열 선법과 열 배관법 등이 적용되고 있으나, 시공 또는 유지관리상에 예상치 못한 여러 문제점이 도출되고 있다. 따라서 본 연구과제에서는 공장제작을 통한 모듈화로 중차량에 대한 내구성 및 안전성이 확보되고, 시공 중 교통 통제시간을 최소화하여, 급속 설치가 가능한 블랙아이스 방지공법 개발을 수행하였다.

본 연구는 연구과정에서 검토된 블랙아이스로 인한 사고 발생 빈도가 높은 지역 외, 전국적으로 프리캐스트 패널을 이용한 도로포장이 요구되는 장소를 추가로 조사하였다. 조사 결과, 서울시 중앙버스 전용차로 외 고양시, 대전시, 부산시에서 운영중인 것으로 확인되었다.

고양시의 “권율대로 중앙버스 전용차로” 경우에는 39개소의 정차대가 있으며, 본 연구를 바탕으로 적용할 수 있는 경사진 구간이 없어 바로 적용하기에는 어려움이 예상된다.

대전시의 경우는 “도안로 중앙버스 전용차로” 8개소와 “도안동로 중앙버스 전용차로” 16개소로 총 66개의 중앙버스 전용차로 정거장이 있으나, 평지로 “대전광역시 건설사업본부 도로과”와 협의한 결과 예산의 부족으로 어려움을 제시하였다.

부산시의 경우는 2019년부터 “내성 ~ 올릭픽” 및 “내성 ~ 서면” 중앙버스 전용차로 정거장이 운영중에 있으나, 겨울철 높은 기온으로 블랙아이스 및 적설에 대한 우려가 적어 적용하는 데는 문제점이 있다.

서울시에서는 현재 2022년 3월 중앙버스 전용차로 정차대를 388개를 운영중에 있으며, 2016년부터 적극적으로 정차대 28개소에 대하여 프리캐스트 패널로 교체 시공하고 있고, 2022년에는 6개 도로사업소(강서, 남부, 서부, 동부, 북부, 성동)에서 32개소 중앙버스 전용차로 정거장에 대하여 프리캐스트 패널로 교체하고자 계획하고 있다. 본 연구는 발열모듈이 적용된 프리캐스트 패널을 적용할 수 경사진 장소 또는 고층건물로 인하여 그늘진 장소 등을 조사하고 건의하고자 노력중에 있다.

표 4.3.1 서울시 2022년도 중앙버스 전용차로 정거장 프리캐스트 패널 공사계획

도로사업소	개 소	구 간	연 장 (m)	추정금액 (백만원)	비 고
계	32	- 정류장 29개소 - 교차로 3개소	2,424	6,400	
동부	5	- 송파대로 정류장 3개소 - 송파대로 교차로 2개소	408	1,000	
서부	4	- 신촌로 정류장 1개소 - 한강대로 정류장 3개소	318	800	
남부	9	- 강남대로 정류장 5개소 - 신반포로 정류장 3개소 - 신반포로 교차로 1개소	774	1,800	
북부	7	- 도봉로 정류장 3개소 - 동소문로 정류장 4개소	450	1,400	
성동	4	- 망우로 정류장 2개소 - 천호대로 정류장 2개소	252	800	
강서	3	- 경인로 정류장 2개소 - 공항대로 정류장 1개소	222	600	

2021년도 10월20일부터 22일까지 진행된 “2021 CIVIL EXP0”에 참여 본 기술을 홍보를 수행하였다. 주요 홍보내용은 모형 제작과 공법 설명서를 전시하였으며, 그림 4.3.1과 같이 홍보 리플릿을 제작하여 배포하였다. 현장적용을 위하여 지속적인 기술홍보를 수행할 예정이다.



(a) 전시회 전경



(b) 리플릿 제작 및 배포

그림 4.3.1 2021 KSCE CIVIL EXPO 기술홍보

참여기업과의 기술 실시협약에 대한 협의가 수행되었으며, 본 연구과제를 통해 등록된 특허 건에 대하여 참여기업인 (주)유창이엔씨와 2021년 10월 31일 기술 실시협약을 수행하였으며 해당 기술의 사업화를 위한 상세 계획을 수립할 예정이다.

기술 실시 협약서

- 과제번호 : 21CTAP-C157602-02
○ 예산연도 : 2021
○ 연구개발 과제명 : 플렉시리스 방지(표면온도 5°C 유지)를 위한 나노 발열모듈
임베디드 콘크리트 패널 급속 포장기술 개발
○ 기술실시 계약명 : 발열모듈 임베디드 프리캐스트 콘크리트 패널 제작 및 시공기술
○ 실시권의 종류 : 통상실시(기술료는 사업비에 따라 별도 협의)
○ 계약기간 : 특허 존속기간까지 (2021.09.02~2040.11.10)
○ 계약당사자
연구개발결과물 소유기관 : ㈜유창이엔씨 (대표이사 : 황 주 환)
실시기업 : ㈜유창이엔씨 (대표이사 : 김 윤 희)
- 연구개발결과물 소유기관과 실시기업(주)유창이엔씨는 연구개발결과물 소유기관이 국토교통부 "국토교통기술육성연구사업"으로 개발한 기술을 실시기업이 실시함에 있어 다음과 같이 협약을 체결한다.
- 제1조 (정의) 본 계약서에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다.
1. "기술"이라 함은 연구개발결과로 획득된 "발열모듈이 내장되는 프리캐스트 콘크리트 패널 및 이를 이용한 플렉시리스 배양 도로 포장 방법"(특허 등록번호 제10-2299784호)을 말한다.
 2. "실시"라 함은 이권기술"을 이용하여 물건을 생산·사용·양도·대여 또는 수입하거나 그 물건의 양도 또는 대여의 청약을 하는 행위 또는 본 기술 방법을 사용하는 행위를 말한다.
 3. "기술료"라 함은 기술을 실시하는 권리(실시권)를 획득하는 대가로 실시기업이 연구개발 결과물 소유기관에게 지급하는 금액을 말한다.
- 제2조 (실시권의 내용)
- ① 연구개발 결과물 소유기관은 실시기업이 본 계약의 조건에 따라 대한민국 내에서 "실기 기술"(특허가 발명하는 경우 특허권 포함)을 실시하는 데 동의하여 "실시기업"에게 실시권을 설정한다. 단, 국외실시의 경우에는 제3조에 따른다.
 - ② 실시기업은 연구개발 결과물 소유기관의 사전 서면동의 없이 제3자에게 동 실시권을 제공하거나 양도할 수 없다.
 - ③ 연구개발 결과물 소유기관은 실시기업에게 기술을 실시함에 있어서 계약체결일로부터 12개월까지 실시기업에게 기술지도권 실시하여 기술지도 기간 동안의 기술지도비는 무상지도를 원칙으로 한다. 다만, 연구개발 결과물 소유기관은 실시권자의 기술지도에 대한 수

당 결과물 소유기관은 계약 기술에 관한 특허 등의 등록 및 유지에 필요한 비용을 부담한다.

제18조 (해지)

- ① 본 계약에 정지되지 아니하거나 본 계약상의 채적상 이의가 있는 사항에 대해서는 양방의 합의에 의하여 결정한다.
- ② 본 계약서는 2통을 작성하여 서명 날인하고, 연구개발결과물 소유기관과 실시기업이 각각 1통씩 보관한다.

2021년 10월 31일

(연구개발 결과물 소유기관) (실시기업)
법 인 명 : ㈜유창이엔씨 (111241-0002284) 법 인 명 : ㈜유창이엔씨 (284111-0155967)
주 소 : 서울특별시 용인시 용인로 302 7 주 소 : 경기도 남양주시 군하로 288, 1층 1314호
대표이사 : 황 주 환 대표이사 : 김 윤 희

그림 4.3.2 참여기업과의 실시협약서

(2) 정량적 연구개발성과

○ 1차년도 정량적 연구성과 목표 및 달성도

구분			목표	달성도 (%)	비고
국외 논문 게재	SCI		-	-	-
	비SCI		-	-	-
	계		-	-	-
국내 논문 게재	SCI		-	-	-
	비SCI		1편	100	12월호 게재 완료
	계		1편		
특허 출원	국내		1건	100	출원 완료
	국외		-	-	-
	계		1건		
특허 등록	국내		-	-	-
	국외		-	-	-
	계		-	-	-
인력 양성	석사		2명	50	2020년 8월 석사졸업 1명
	박사		0	-	-
	계		2명		
기술 이전	계약 건수		-	-	-
	계약액		-	-	-
	징수액		-	-	-
국제 표준화	기고서 제출		-	-	-
	기고서 채택		-	-	-
	표준안 채택		-	-	-
국내 표준화	기고서 제출		-	-	-
	기고서 채택		-	-	-
	표준안 채택		-	-	-
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문		1건	1건	중간보고서 제출 완료
	연구시설·장비		-	-	-
	기술요약정보		1건	1건	기술요약정보를 포함하여 중간보고서 제출 완료
	생명자원	생명정보	-	-	-
		생물자원	-	-	-
		신품종	-	-	-
	소프트웨어		-	-	-
화학물		-	-	-	
기타	시제품		1건	1건	패널 거푸집 시제품 제작을 바탕으로 설치 가이드라인 보고서 작 성 완료
	성과 홍보		-	-	-
	일자리 창출		-	-	-

- 성과 목표에 대한 자체 평가

성과 목표	자체 평가
나노 모듈을 이용한 발열 콘크리트 배합기술 연구	○ 발열성능 및 강도를 고려하여 나노소재의 종류, 배합법 등 나노 모듈 콘크리트를 제작하고 상용화할 수 있는 최적 배합기술을 확보하였음.
발열 성능 및 적합성 검토	○ 내부구조 분석을 통해 나노소재를 시멘트 모르타르에 혼입 하여도 일반 건설재료를 대체할 수 있다는 근거를 마련함.
강도 및 발열 기능 향상을 위한 최적 나노 재료 및 함량 선정	○ 최적 나노소재의 종류와 최적 혼입량을 선정함으로써 나노 발열모듈 배합의 원천 기술을 확보하였음.
나노소재 콘크리트 혼입을 위한 wet mix 및 dry mix 혼합기술연구	○ 나노소재 분산방법에 따른 발열성능실험을 수행하여 최적 의 나노소재 분산방법을 도출하였음.
향온습습챔버를 활용한 나노 모듈의 발열 성능시험	○ 겨울철 영하 환경에서 발열성능실험을 수행함으로써 제안 된 기술의 타당성을 입증함.
콘크리트 균열 방지를 위한 발열모듈의 온도구배 제어 연구	○ 공급전압과 발열성능의 상관관계를 분석하여 실제작 단계 에서 활용 가능할 것으로 기대됨.
미세조직/공극구조 분석	○ 실험 결과를 과학적으로 분석하였으며, 연구결과와 적용에 대한 타당한 근거가 될 것으로 기대됨.
모듈 콘크리트 설치 가이드라인 제시	○ 모듈 설치에 관한 가이드라인 제작을 완료하였으며, 추후 프리캐스트 콘크리트 패널 제작에 활용 가능할 것으로 기 대됨.
BIM기반 3D 모델링 검증	○ 2D기반의 프리캐스트 패널 상세도를 활용하여 3D기반의 BIM 모델링을 완료하였고, 유지관리 계획에 반영함.
시공 경제성 분석	○ 기존 도로에 적용된 융설/융빙 시스템과 나노 발열모듈 적 용 융설/융빙 시스템의 초기 시공비 비교를 통한 경제성 분석을 수행하였음.

○ 2차년도 정량적 연구성과 목표 및 달성도

구분		목표	달성도 (%)	비고	
국외 논문 게재	SCI	2편	100	6월호 게재 완료 11월호 게재 완료	
	비SCI	-	-	-	
	계	2편			
국내 논문 게재	SCI	-	-	-	
	비SCI	1편	100	10월호 게재 완료	
	계	1편			
특허 출원	국내	2건	100	2건 출원 완료	
	국외	-	-	-	
	계	2건			
특허 등록	국내	1건	100	출원 및 등록 완료	
	국외	-	-	-	
	계	1건			
인력 양성	석사	1명	200	2021년 2월 석사졸업 1명 2021년 8월 석사졸업 1명	
	박사	1명	100	2021년 2월 박사졸업 1명	
	계	2명			
기술 이전	계약 건수	-	-	-	
	계약액	-	-	-	
	징수액	-	-	-	
국제 표준화	기고서 제출	-	-	-	
	기고서 채택	-	-	-	
	표준안 채택	-	-	-	
국내 표준화	기고서 제출	-	-	-	
	기고서 채택	-	-	-	
	표준안 채택	-	-	-	
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문		1건	1건	최종보고서 제출
	연구시설·장비		-	-	-
	기술요약정보		1건	1건	기술요약정보를 포함하여 최종보고서 제출
	생명자원	생명정보	-	-	-
		생물자원	-	-	-
		신품종	-	-	-
	소프트웨어		-	-	-
화학물		-	-	-	
기타	시제품		1건	1건	발열모듈 임베디드 콘크 리트 패널 제작 완료
	성과 홍보		1건	1건	KSCE 2021 Civil Expo 참가 및 홍보
	일자리 창출		-	-	-

- 성과 목표에 대한 자체 평가

성과 목표	자체 평가
발열 콘크리트 포장의 나노 모듈 시제품 제작	○ 발열 콘크리트 포장에 적용할 나노 발열모듈의 최적의 모듈 크기 선정을 위해 시제품 제작을 완료함.
현장적용 나노 모듈 콘크리트 포장의 발열 성능 분석	○ 나노 발열모듈을 설치한 콘크리트 포장의 발열성능 검토를 위해 제작한 시제품의 발열 성능 실험을 수행하였음.
현장적용 나노 모듈 콘크리트 포장의 발열 제어성능 분석	○ 나노 발열모듈을 설치한 콘크리트 포장의 발열제어 성능 분석을 위해 제작한 시제품의 발열 성능 실험을 수행하고 단위시간당 온도상승률을 분석하였음.
나노 모듈 콘크리트의 공급전압-온도 상관관계 연구	○ 나노 발열모듈의 발열실험 결과를 분석하여 공급전압에 따른 온도상승 추세를 파악하고 상관관계를 분석하였음.
최적 발열 효율을 위한 전극 재료 및 모듈 위치 연구	○ 발열 콘크리트 포장에 적용할 나노 발열모듈의 모듈 설치 간격 및 위치 선정을 위해 최적 간격선정 연구를 수행함.
기후조건을 반영한 최적 나노 모듈 방안 (재료, 농도, 공급전압) 제시	○ 기후조건을 반영하여 일반기후와 극한기후에서 모두 발열 성능을 확보하기 위해 나노 재료와 농도 그리고 공급전압을 고려하여 발열모듈 제작하는 연구를 수행함.
현장 조건별 시공지침서 제시	○ 패널 제작 및 현장 시험시공을 통해 발열모듈이 적용된 프리캐스트 콘크리트 패널의 시공 및 전기 인입에 관한 내용을 작성하였으며, 추후 블랙아이스 방지 프리캐스트 콘크리트 패널 포장공사에서 활용 가능할 것으로 기대됨.
유지관리 가이드라인 제시	○ 발열모듈이 적용된 프리캐스트 콘크리트 패널의 유지관리에 대한 전반적인 내용을 작성하였으며, 발열모듈 및 전력 케이블의 성능 측정 및 유지보수에 대한 내용을 포함하여, 추후 블랙아이스 방지 프리캐스트 콘크리트 패널 포장공사의 유지관리에 활용 가능할 것으로 기대됨.
모듈 콘크리트 패널 급속포장 기술 실용화	○ 본 연구를 통해 개발된 블랙아이스 방지 프리캐스트 콘크리트 패널 포장 기술을 활용, 현장 상황에 따라 적합한 패널을 제작 및 시공할 수 있는 기술을 갖추었으며, 추후 도심지, 버스전용차로, 국도 등 블랙아이스 사고 발생 취약 지역에 활용 가능할 것으로 판단됨.

(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	탄소 나노 재료를 혼입한 나노 보도블럭의 발열성능	한국방재학 회논문집	이희영	12월 호	대한 민국	한국방재학회	비SCIE	2020.9	1738-2424 (Print) 2287-6723 (Online)	100
2	Effect of curing time on thermal response characterization of carbon-nano cementitious composites	Composite Structures	이희영	6월 호	네덜란드	Elsevier	SCIE	2021.6	0263-8223	100
3	Correlation Analysis of Heat Curing and Compressive Strength of Carbon Nanotube- Cement Mortar Composites at Sub-zero Temperatures	Crystals	이희영	9월 호	스위스	MDPI	SCIE	2021.11	2073-4352	100
4	MWCNT를 혼입한 발열체의 크기에 따른 발열 효율 분석	한국방재학 회논문집	박소현	10월 호	대한 민국	한국방재학회	비SCIE	2021.10	1738-2424 (Print) 2287-6723 (Online)	100

☐ 국내 및 국제 학술회의 발표

- 해당없음

☐ 기술 요약 정보

- 해당없음

☐ 보고서 원문

- 해당없음

☐ 생명자원 (생물자원, 생명정보)/화합물

- 해당없음

[기술적 성과]

☐ 지식재산권 (특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	1차년도 특허 출원 및 2차년도 특허 등록	발열모듈이 매립되는 프리캐스트 콘크리트 패널 및 이를 이용한 블랙아이스 예방 도로 포장 방법	대한민국	(주)동일기 술 공사	2020. 11.10	10-2020- 0149683	(주)동일기 술 공사	2021. 09.02	제10-229 9784호	40/30/30	
2	2차년도 특허 출원	발열부 일체형 프리캐스트 콘크리트 패널 제조 방법 및 블랙아이스 예방 도로 포장 방법	대한민국	조선대학 교 산학협력 단	2021. 11.16	10-2021- 0157969	-	-	-	50	
3	2차년도 특허 출원	MWCNT 발열 콘크리트 모듈을 이용한 블랙아이스 예방 도로 포장용 프리캐스트 콘크리트 패널	대한민국	경희대학 교 산학협력 단	2021. 12.23	10-2021- 0186417	-	-	-	50	

○ 지식재산권 활용 유형

- 해당없음

□ 저작권 (소프트웨어, 서적 등)

- 해당없음

□ 신기술 지정

- 해당없음

□ 기술 및 제품 인증

- 해당없음

□ 표준화

- 해당없음

○ 국제표준

- 해당없음

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	발열모듈 임베디드 프리캐스트 콘크리트 패널 거푸집 제작	2020.12	베스트피씨엠(주)	베스트피씨엠(주)	프리캐스트 콘크리트 패널 생산			
2	발열모듈 임베디드 프리캐스트 콘크리트 패널 제작	2021.04	베스트피씨엠(주)	베스트피씨엠(주)	프리캐스트 콘크리트 패널 설치			

□ 현장적용

- 해당없음

□ 기술 실시 (이전)

- 해당없음

□ 사업화 투자실적

- 해당없음

□ 사업화 현황

- 해당없음

□ 매출 실적 (누적)

- 해당없음

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

- 해당없음

□ 고용 창출

- 해당없음

☐ 고용 효과

- 해당없음

☐ 비용 절감 (누적)

- 해당없음

☐ 경제적 파급 효과

- 해당없음

☐ 산업 지원 (기술지도)

- 해당없음

☐ 기술 무역

- 해당없음

[사회적 성과]

☐ 법령 반영

- 해당없음

☐ 정책활용 내용

- 해당없음

☐ 설계 기준/설명서 (시방서)/지침/안내서에 반영

- 해당없음

☐ 신진연구자 채용

- 해당없음

☐ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	석사	2020.08		1			1					1	
2	석사	2021.02		1			1		1				
3	박사	2021.02	1				1					1	
4	석사	2021.08		1			1		1				

☐ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	학회 전시회에서의 기술홍보	KSCE 2021 Civil Expo 참가	발열모듈 임베디드 프리캐스트 패널에 대하여 판넬 및 리플릿을 제작하여 홍보 실시	2021.10.21.~22

☐ 산업 기술 인력 양성

- 해당없음

☐ 다른 국가연구개발사업에의 활용

- 해당없음

☐ 국제화 협력성과

- 해당없음

☐ 홍보 실적

- 해당없음

☐ 포상 및 수상 실적

- 해당없음

[인프라 성과]

☐ 연구시설 · 장비

- 해당없음

2) 목표 달성 수준

연구 개발 목표	달 성 내 용	달성도 (%)
○ 나노 발열모듈 콘크리트 재료의 최적 배합기술 개발 및 시공	○ 발열 성능 및 적합성 검토 - 다양한 탄소계열 나노소재 중에서 시멘트계 재료에 혼입할 시 우수한 발열성능을 확보할 수 있는 최적의 나노소재 선정 - 탄소계열 나노소재 종류 : 탄소나노튜브, 그래핀나노플레이트, 카본블랙 - 발열성능 분석을 위한 전기전도성과 열전도성 분석 ○ 강도 및 발열 기능 향상을 위한 최적 나노 재료 및 함량 선정 - 강도 및 발열 기능 향상을 위한 최적 나노 재료를 선정하고, 해당하는 나노 재료에 대한 함량을 설정 - 탄소계열 나노소재 종류와 농도를 변수로 설정 : 탄소나노튜브, 그래핀나노플레이트, 카본블랙 - 나노소재 농도 : 시멘트 중량대비 0.25wt%, 0.5wt%, 1.0wt% ○ 나노 모듈을 이용한 발열 콘크리트 배합기술 연구 - 나노 재료의 함량에 따른 배합 비율과 방법에 따라 부착강도, 압축강도, 인장강도 확인 ○ 나노소재 콘크리트 혼입을 위한 wet mix 및 dry mix 혼입기술연구 - 가장 적합한 형태의 혼합 기술 분석 완료 (wet mix)	100
○ 나노 발열모듈 콘크리트의 현장적용 시험 및 발열 성능 분석	○ 발열 콘크리트 포장의 나노 모듈 시제품 제작 - 나노 재료가 포함된 발열모듈을 설계 후 시제품 제작 : 큐브형, 큐보이드형 ○ 현장적용 나노 모듈 콘크리트 포장의 발열 성능 분석 - 현장적용 발열모듈 임베디드 콘크리트 포장의 발열성능 분석을 위해 발열 실험을 수행 - 전압 공급 시간 60분 동안 발열모듈 자체의 온도가 30℃ 이상 상승하는지에 대한 여부로 선정 ○ 현장적용 나노 모듈 콘크리트 포장의 발열 제어성능 분석 - 현장적용 발열모듈 임베디드 콘크리트 포장의 발열온도 제어성능 분석을 위해 발열 실험을 수행 - 전압 공급 직후 초기 10분 동안 발열모듈 자체의 온도가 10℃ 이상 상승하는지에 대한 여부로 선정 ○ 나노 모듈 콘크리트의 공급전압-온도 상관관계 연구 - 큐브형과 큐보이드형에서 공급한 전압과 발열 온도 간의 상관관계를 정립 : 추세선 그래프 형태 분석	100
○ 나노 모듈 발열 콘크리트 개념 설계 및 내부구조 분석	○ 항온항습챔버를 활용한 나노 모듈의 발열 성능시험 - 설계한 임베디드 발열모듈의 온도성능시험을 위해 항온항습챔버를 활용하여 실험을 수행 : 매개변수는 나노소재 함량과 외기온도로 선정 ○ 콘크리트 균열 방지를 위한 발열모듈의 온도구배 제어 연구 - 제작한 발열모듈의 발열 실험 시 콘크리트 균열 방지	100

	를 위한 온도구배 제어 능력에 관한 연구를 수행 - 나노 발열모듈의 발열 성능 실험을 통해 시간에 따른 온도변화량을 측정 : 매개변수는 공급전압과 나노소재 혼입 농도로 선정 ○ 미세조직/공극구조 분석 - 나노 재료를 혼입한 발열모듈의 미세조직 및 공극구조 분석을 위해 발열 성능 실험 후 시편의 파편을 시료로 SEM, XRD, TG/DTA, MIP 분석 완료	
○ 임베디드 발열모듈의 최적화 연구	○ 최적 발열 효율을 위한 전극 재료 및 모듈 위치 연구 - 임베디드 발열모듈의 최적 발열 효율을 위한 전극 재료를 선정 : 전극 재료 종류는 Stainless Steel Mesh와 Copper Plate를 비교 - 최적화된 모듈 위치 선정을 위해 발열모듈 중심 간 거리를 조정해가며 실험 완료 ○ 기후조건을 반영한 최적 나노 모듈 방안 (재료, 농도, 공급전압) 제시 - 일반 기후조건과 극한 기후조건을 나누어 연구를 수행 - 일반 기후조건에서는 발열모듈 주변부 콘크리트의 MWCNT 혼입농도와 공급전압에 따른 발열 양상을 확인 - 극한 기후조건에서는 항온항습챔버에 시편을 설치하여 극한 기후 상황에서 발열 양생 시 매개변수에 따른 발열 양상을 확인	100
○ 나노 모듈 콘크리트의 제작기술 개발 및 설치방안 검토	○ 모듈 콘크리트 설치 가이드라인 제시 - 모듈 콘크리트의 설치 및 발열모듈의 전기인입 케이블 설치에 대한 내용을 작성 ○ BIM기반 3D 모델링 검증 - 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널에 대하여 BIM을 이용한 3D 모델링을 통해 설계 검증을 수행 - 인양고리, 높낮이 조절볼트와 같은 패널의 요소와 발열모듈의 간섭여부에 대한 검토 ○ 시공 경제성 분석 - 일반 패널과 CNT를 이용한 발열모듈이 적용된 패널의 소요 비용을 비교한 경제성 분석 수행	100
○ 나노 모듈 콘크리트의 포장 상세 설계 도출 및 유지관리 가이드라인 개발	○ 현장 조건별 시공지침서 제시 - 현장조사, 재료 품질, 패널제작 및 시공, 품질관리에 대한 내용을 작성 - 공사 현장의 상황에 따른 패널의 제작 및 설치, 시공 방법에 대한 내용을 작성 ○ 유지관리 가이드라인 제시 - 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널의 유지관리에 대한 유지관리지침서를 작성 - 유지관리 항목, 유지관리 주기, 유지관리 방법에 대한 내용 작성 ○ 모듈 콘크리트 패널 급속포장 기술 실용화 - 실제 현장에 적용가능도록 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 제작 및 설치 기술을 확보 - 현장 적용을 위한 발열모듈 임베디드 콘크리트의 시공 가이드라인 및 유지관리지침서를 작성	100

4. 목표 미달 시 원인분석 (해당 시 작성)

- 해당없음

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 프리캐스트 제작으로 인한 교통통제 최소화

- 공장 제작 현장설치로 교통 (운항) 통행량이 많은 고속도로 및 공항, 종단경사 하향 도심지 도로에 긴급포장으로 시공이 간편하고, 교통 개방 가능 시간을 줄여 새로운 도로의 포장뿐만 아니라 기존 도로의 포장 보수 공사등에 적용하여 교통통제에 따르는 민원을 최소화 할 수 있음.
- 현장에서의 공사기간을 줄임으로써 신속한 교통 개방이 가능하고, 기존 유지보수공법에 비해 시공성이 우수하며 외부환경 조건에 따른 영향을 크게 줄여 일률적인 포장품질 관리가 쉽고 전단면 보수가 가능해 포장수명을 늘릴 수 있음.

○ 블랙아이스 예방을 통한 교통사고 발생 가능성 감소

- 겨울철 교통사고의 주요원인으로 떠오르고 있는 블랙아이스에 대한 예방이 가능하고, 이로 인한 악천후 교통사고 감소 효과도 뛰어날 것으로 예상됨.

○ 나노 재료를 이용한 발열모듈이 삽입된 콘크리트 포장체 개발

- 블랙아이스 방지를 위한 프리캐스트 형식으로 제작하여 나노 발열모듈이 삽입된 콘크리트 포장체를 개발하는 연구로서, 전 세계적으로 유사연구가 수행된 바 없음.
- 또한 전문연구인력 양성, 탄소나노튜브 기술 이외의 전도성 폴리머·나노금속과 같은 특수 첨단 신소재의 토목분야 적용 등이 가능하므로 이에 따른 학문의 발전이 가능함.
- 이후 다학제간 연계를 통한 창의적인 연구 아이디어의 창출로 전반적 융복합 연구 발전에 기여할 것으로 기대됨.

○ 콘크리트 구조물의 효과적인 유지관리 및 환경 보호 효과 기대

- 본 기술 활용 시, 콘크리트 구조물의 효과적인 유지관리가 가능해 질 것이며, 이는 콘크리트 구조물의 장수명화 (Service life extension)으로 이어지게 될 것임.
- 전체 산업중 이산화탄소 배출량 순위 중, 2위가 시멘트, 4위가 철강산업이며, 전 세계 이산화탄소 발생량중 약 6~8%가 철근콘크리트 구조물 건설에 관련된 점을 감안할 때, 콘크리트 구조물의 장수명화는 이산화탄소 배출량 감소에 효과가 있을 것으로 판단됨.

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

○ 강도향상 및 발열기능이 가능한 다기능 차세대 건설재료 시장 확보

- 건설재료의 강도적 특성 확보를 통해 다기능화 실현
- 건설재료의 발열성능 확보를 통해 다기능화 실현
- 나노소재와 건설재료를 복합하여 건설재료의 성능을 향상시키고 기능을 부여

○ 내구성이 확보된 모듈화 콘크리트 패널로 급속포장 및 장수명화 가능

- 공장 제작 현장설치로 교통 (운항) 통행량이 많은 고속도로 및 공항, 종단경사 하향 도심지 도로에 긴 급포장으로 시공이 간편하고 교통 개방 가능 시간을 줄임
- 새로운 포장뿐만 아니라 기존 도로의 포장 보수 공사 등에 적용 시 교통통제에 따르는 민원을 최소화
- 콘크리트 구조물의 장수명화는 이산화탄소 배출량 감소에 효과가 있을 것으로 기대

○ 제설제 최소화로 내구성 향상 및 환경보호

- 기존 제설제 사용으로 인한 도로포장 파손을 최소화를 위해 나노소재를 혼입한 발열모듈이 삽입된 프리캐스트 콘크리트 패널을 제작하여 도로에 적용
- 도로포장 파손으로 인한 잦은 유지관리는 과도한 비용 소비 초래 및 폐기물 양 증가로 인한 환경오염을 초래하기에 내구성 저하를 최소화하여 환경을 보호

○ 신기술간의 융합기술을 실현하여 건설재료 분야의 고부가가치 원천기술 개발과 미래 성장동력을 확보

- 나노기술 기반 다기능 콘크리트 핵심기술 확보를 통해 건설 분야의 글로벌 리더에 진입
- 건설신소재 분야 연구의 패러다임을 선진국 추종형에서 창의적이고 도전적인 융합형 선도연구로 전환
- 건설분야의 새로운 미래 성장동력으로 활용
- 관련 핵심기술의 논문발표 및 국제특허 출원을 통해 지적재산권을 확보
- 차세대 콘크리트 구조물의 유지보수 건설 분야의 해외 의존도를 최소화, 국내 창조형 체제 전환에 기여

○ 선진기술의 국산화를 도모하고 관련 국내 전문연구인력을 양성

- 전문연구인력 양성, 탄소나노튜브 기술 이외의 전도성 폴리머·나노금속과 같은 특수 첨단 신소재의 토목분야 적용 등이 가능하므로 이에 따른 학문의 발전이 가능
 - 다학제간 연계를 통한 창의적인 연구 아이디어의 창출로 전반적 융복합 연구 발전에 기여할 것을 기대
-

< 별첨 >

별첨 자료

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

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘블랙아이스 방지 표면온도 5°C 유지)를 위한 나노 발열모듈 임베디드 콘크리트 패널 급속 포장 기술 개발’ 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.