

연구개발 최종보고서·요약서

I. 인쇄 규격

1. 크기: A4 신판(가로 210mm * 세로 297mm)
2. 제본: 좌철
3. 용지
 - 가. 표지: 백상지(150g/m²)
 - 나. 내용: 백상지(80g/m²)
4. 인쇄 방법
 - 가. 표지: 바탕 백색, 활자 흑색
 - 나. 내용: 흑색 지정 활자

II. 편집 순서

1. 표지
2. 제출문
3. 보고서 요약서
4. 국문 요약문
5. 영문 요약문
6. 영문 목차
7. 본문 목차
8. 뒷면지

III. 참고 사항

전자 조판 인쇄 시에는 이에 준한다.

IV. 편집 순서별 서식

1. 표지

3cm 3cm	18CTAP-C129720-02 극한환경에서 발열양생 및 응설·응빙이 가능한 나노 콘크리트 기술 개발 최종보고서 (견고도 14p) 2019 (견고도 13p) 국토교통과학기술진흥원 (견고도 17p)	4cm 국토교통기술촉진연구사업 최종보고서 (견고도 25p)	보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개() 국토교통기술촉진연구사업 최종보고서 3cm 0.5cm R&D / 18CTAP-C129720-02 2.5cm 9cm (견고도 31p) 5cm 극한환경(-30°C)에서 발열양생 및 응설/응빙(30°C/min)이 가능한 나노 콘크리트 기술 개발 최종보고서 (0.1cm) 2019. 3. 29. 0.15cm (견고도 15p) 주관연구기관 / 경희대학교 산학협력단 협동연구기관 / 한국건설생활환경시험연구원 (견고도 15.5p) 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 (견고도 20p)
-------------------------------	---	---	---

제 출 문

국토교통부장관 귀하

‘극한환경(-30° C)에서 발열양생 및 용설/용빙(30° C/10min)이 가능한 나노 콘크리트 기술 개발’(연구 개발 기간 : 2017. 04.01 ~ 2018. 12.31) 과제의 최종보고서 보완본 1부를 제출합니다.

2019. 3. 29.

주관연구기관명 : 경희대학교 산학협력단 (대표자) 이 범 석 (인)

공동연구기관명 : 한국건설생활환경시험연구원 (대표자) 윤 갑 석 (인)

주관연구기관책임자: 정 원 석

공동연구기관책임자: 오 성 우

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호		해당 단계 연구 기간	2017.04.01 . ~2018.12.31	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	극한환경(-30° C)에서 발열양생 및 응설/응빙(30° C/10min)이 가능한 나노 콘크리트 기술 개발			
연구책임자	정 원 석	해당단계 참여 연구원 수	총: 7명 내부: 7명 외부: 7명	해당단계 연구개발비	정부: 천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 9명 내부: 9명 외부: 9명	총 연구개발비	정부:370,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:370,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	경희대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자: 정 원 석	
요약				보고서 면수 : 96	
▷ 탄소계열 나노소재 활용 발열 콘크리트 배합 기술연구 ▪ 강도 및 발열기능 향상을 위한 최적 탄소계열 나노소재 및 함량 선정 ▪ 나노 콘크리트 제작을 위한 배합기술 개발 ▪ 최적 혼입율을 고려한 경제성 분석 ▷ 발열 콘크리트 초기발열양생 및 강도향상 기술 ▪ 극한환경 모사 기후환경 실험실을 활용한 초기 발열양생 실증시험 및 성능분석 ▪ 최적 발열효율을 위한 전극의 재료 및 위치 연구 ▪ 급격한 발열온도 상승 조절을 위한 균열방지 기술 ▷ 응설 및 응빙을 위한 자기발열 콘크리트 기술 ▪ 극한환경 모사 기후환경 실험실을 활용한 응설 및 응빙 실증시험 및 성능분석 ▪ 다양한 실험체 크기에 따른 자기발열 성능의 크기효과 분석 ▷ 발열 콘크리트 내구성 분석 ▪ 자기발열 콘크리트의 내구성 분석을 위한 공인인증 시험 실시					

〈 요약 문 〉

연구의 목적 및 내용	최근 기후변화로 발생하는 대설, 한파 등의 극한환경에 대응하기 위해 탄소계열 나노소재를 혼입한 발열 콘크리트를 개발하여 초기 콘크리트의 발열 양생기술로 극한환경에서의 상시 시공기술을 확보하고, 굳은 콘크리트의 응설 및 응빙 기술을 확보함. ▷ 탄소계열 나노소재 활용 발열 콘크리트 배합 기술연구 ▪ 강도 및 발열기능 향상을 위한 최적 탄소계열 나노소재 및 함량 선정 ▪ 나노 콘크리트 제작을 위한 배합기술 개발 ▪ 최적 혼입율을 고려한 경제성 분석 ▷ 발열 콘크리트 초기발열양생 및 강도향상 기술 ▪ 극한환경 모사 기후환경 실험실을 활용한 초기 발열양생 실증시험 및 성능분석 ▪ 최적 발열효율을 위한 전극의 재료 및 위치 연구 ▪ 급격한 발열온도 상승 조절을 위한 균열방지 기술 ▷ 응설 및 응빙을 위한 자기발열 콘크리트 기술 ▪ 극한환경 모사 기후환경 실험실을 활용한 응설 및 응빙 실증시험 및 성능분석 ▪ 다양한 실험체 크기에 따른 자기발열 성능의 크기효과 분석 ▷ 발열 콘크리트 내구성 분석 ▪ 자기발열 콘크리트의 내구성 분석을 위한 공인인증 시험 실시				
연구개발성과	▷ 강도 및 발열성능 최적화를 위한 나노 콘크리트 배합기술 ▷ 극한환경(-30° C)에서의 자기발열 콘크리트 초기양생 기술 ▷ 발열성능 30° C/10min인 콘크리트 응설 및 응빙 기술				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	▷ 강도향상 및 발열기능이 가능한 다기능 차세대 건설재료 시장 확보 ▷ 혹한기 콘크리트 상시 시공 및 설계강도 확보 가능 ▷ 제설재 최소화로 환경보호 및 콘크리트 구조물 장수명화 ▷ 신기술간의 융합기술을 실현하여 건설재료 분야의 고부가가치 원천기술과 미래 성장동력을 확보함 ▷ 선진기술의 국산화를 도모하고 관련 국내 전문연구인력을 양성 ▷ 극한환경 건설이라는 기존 건설분야의 한계점을 해결하는 우수사례로 기대				
핵심어 (5개 이내)	탄소계열 나노소재	발열 콘크리트	발열양생	응설/응빙	극한환경

◁ SUMMARY ▷

Purpose & Contents	The main objective of this research is to develop heat curing and snow/ice melting system using nano concrete material under extreme environment. In order to investigate the heat curing and snow/ice melting system using nano concrete material under extreme environment, this research project consists of the following four phases. ▷ In phase 1, concrete mixing method using carbon-based nano material will be investigated to optimize the heat conductivity of concrete. Several carbon-based nano material will be considered and the optimum concentration of nano material will be provided. ▷ In phase 2, self-heating curing technique of nano concrete will be examined under extreme cold weather (−30°C) condition. The compressive strength of nano concrete under extreme condition should be satisfied. In addition, optimum material and position of electrode will be investigated as a part of this research. ▷ In phase 3, snow melting and ice-melting technique for nano concrete will be verified against under extreme cold weather (−30° C) condition. The newly constructed extreme weather laboratory will be used to test the proposed technique. ▷ Finally, the self-heating concrete will be further investigated to ensure the durability.				
Results	▷ Concrete mixing method to improve strength and heat conductivity of concrete using nano-material ▷ Self-heating concrete curing technique under extreme cold weather (−30°C) condition ▷ Concrete snow and ice-melting technique with 30°C/10min rate				
Expected Contribution	▷ Extend the construction market of next-generation concrete material by improving strength enhancement and heat conductivity ▷ Cold weather-free construction ▷ Environment conservation and extension of service life of concrete structures ▷ Extra added value of construction material through multi-disciplinary research ▷ Localization of nano concrete technology and development of relevant workforce program ▷ Problem-solving of extreme construction engineering				
Keywords	Carbon based nano-material	Heating concrete	Heat curing	Snow/Ice melting	Extreme environment

< Contents >

1. Overview of research and development project	8
2. Domestic and international research activities	11
3. Research contents and results	17
4. Research achievement and contribution to related areas	74
5. Future plans of research achievement	76
6. Collected international technical information	79
7. Security grade of research results	81
8. Research facilities and equipment registered in National Science Technology Information System	82
9. Laboratory safety activities	83
10. Representative research achievement	86
11. Others	87
12. References	88

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	8
2. 국내외 기술 개발 현황	11
3. 연구 수행 내용 및 성과	17
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	74
5. 연구개발성과의 활용 계획	76
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	79
7. 연구개발성과의 보안등급	81
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	82
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	83
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	86
11. 기타 사항	87
12. 참고 문헌	88

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 배경

최근 들어 주요 선진국 건설정책 패러다임이 ‘효율’에서 ‘안전’으로 전환됨에 따라 국내에서도 그 중요성이 부각되고 있다. 더욱이, 국내의 경우 지형적 특성상 상당수의 도로가 산간 혹은 천변을 경유하여 건설되어 있어 안개나 강우 등 자연재해에 매우 취약한 구조로 이루어져 있으며 이로 인한 직접적인 사고는 물론 2차 사고의 위험성도 항시 내재하고 있다. 또한 지구 온난화의 영향으로 지난 80년간 겨울철 지속기간이 점점 짧아지고 있으나 국지성 기습강설 빈발 등 이상기후 징후는 계속 늘어나는 추세이다(소방방재청, 2016). 기상청에 의하면 2010년 이후 겨울철 기온이 평년보다 높고, 기온의 변동 폭이 크며, 지형적인 영향으로 국지적인 폭설과 불예측성 기습강설도 자주 내릴 것으로 예상되고 있다.



(a) 폭설에 의한 터널 사고

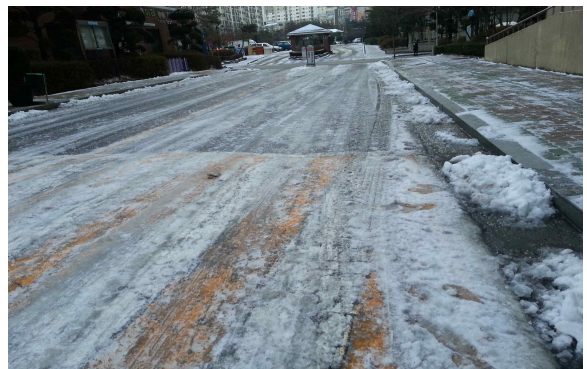


(b) 폭설로 인한 교통마비

그림 1.1.1 폭설 피해 현황



(a) 주택가의 결빙상황



(b) 아파트 단지 내의 결빙현황

그림 1.1.2 결빙 사례

최근 10년간 겨울철 자연재난 발생현황을 분석하면 대설, 풍랑으로 인한 재난이 지속적으로 발생하고 있다. 특히 겨울철에는 강설에 의한 고속도로, 국도, 지방도 등 교통두절과 정체로 인한 피해가 해마다 발생하고 있으며, 짧은 시간에 기습적인 집중폭설이 내릴 경우 고속도로, 국도 등 도로 상에 눈이 쌓여 차량정체, 고립, 블랙아이스 사고 등 교통대란이 발생하고 있다(그림 1, 그림 2). 또한 2010년 이후 강원영서지역의 강설일수가 예년보다 2배가량 증가하고 있으며 이는 엘니뇨 등이 원인으로 추정되고 있다. 또한 영하권의 온도가 지속되면서 대도시 등 교통량이 많은 지역에서는 적은 눈에도 그림 2와 같이 빙판길이 예상되어 강설이 예보되는 날은 수백 대의 제설차량과 인력이 동원되어 제설작업을 살포하는 것이 현실이다. 2010년 이후 서울시의 경우에는 매년 약 1,000여대의 제설차량과 3,000여명의 인력이

동원되고 있는 실정이며, 연간 22만 포대(7000t)의 제설제를 도로 위에 살포하였으나 이미 영하권의 날씨에 의한 도로 결빙으로 교통체증과 크고 작은 사고들을 유발하고 강설 시에 도로안전을 위해 분별한 제설제 살포로 인해 환경문제에 의한 폐해들이 발생하고 구조물이 손상을 받는 등 대규모의 제설대책의 실효성에 의문을 제기되고 있다. 따라서 사후 대응이 아닌 사전 예방적인 도로 융설 및 융빙 대책의 중요성이 대두되고 있다.

비교적 결빙 사례가 많은 북유럽 국가의 경우에는 결빙 시 사고비율이 건조 시에 비해 4배 이상 커지고 있음을 알 수 있으며 치사율이 두 배 이상 증가되고 있다(도로교통안전공단, 2014). 이러한 결빙 시 사고는 비용의 증가와 물류의 지연, 대규모 인명사고로 이어질 수 있으므로 원활한 교통의 소통을 위해서는 적극적인 융설시스템의 적용이 요구된다.

현재까지 개발된 도로의 결빙방지 기술로는 표 1 및 그림 3과 같이 모래살포법, 융설액 분사, 전열선과 열배관 등이 적용되고 있으며, 최근 히트펌프를 이용하는 방법이나 초박형 지열발열체, 발열 콘크리트 등이 시도되고 있다. 그러나 시공 또는 유지관리상에 예상치 못한 여러 문제점이 도출되고 있다. 기존의 결빙방지 기술이 가지고 있는 문제점은 모래에 의한 배수로 막힘이나 해빙 후 환경적 문제 등 2차적인 피해를 들 수 있으며, 특히 융설액은 최근 무해한 재료가 개발되고는 있으나 금속재의 부식 촉진이나 삼투압작용 등 환경적인 문제를 유발하고 있다. 전열선과 열배관 방식은 전기나 기타 에너지를 이용하여 발열하는 방식으로 시스템의 장애발생 시 보수가 효과적으로 이루어지기 어렵고 재시공을 필요로 하는 등 기술적, 경제적으로 문제점이 발생한다. 특히 제설은 이미 눈이 적재된 후에 시작되므로 터널 입출입부나 교량, 대형 교차로 등 블랙아이스 등에 의한 대규모 피해를 유발할 수 있는 지역이나 상가지역 등 도심지의 유동인구가 많거나 고경사 도로지역 등 피해가 심각한 지역은 강설의 시점에서 융설을 통한 통행성의 확보가 어렵다. 따라서 오염을 유발하지 않으며 바람 등에 날리지 않고 시스템의 장애율을 최소화 시킬 수 있으며 보수가 비교적 용이하고 유지관리비를 획기적으로 줄일 수 있는 도로 융설 및 융빙공법의 개발이 매우 절실한 상황이다. 더불어 기존 포장층의 저항력을 극대화 시킬 수 있다면 장애율이 현저하게 감소할 수 있을 것으로 판단되므로 복합적인 기술의 개발이 필수적이다.

표 1.1.1 기존 용설시스템의 원리 및 문제점

종류	용설 원리	문제점
직접 제설법	강설 후 제설차나 삽 등을 동원하여 직접적으로 눈을 치운 후 일정한 장소에 쌓아 놓는 방식	- 막대한 차량과 인력의 확보가 요구 - 제설 후 쌓아놓은 눈의 2차 처리 문제
염화 칼슘 포설법	소금과 염화칼슘 등 조해성이 좋은 물질이 눈 속의 물을 빼앗은 후 자신이 빼앗은 물속에 녹으며 용설하는 방식	- 눈이 녹은 후 공기 중의 수증기를 받아들여 재차 결빙 가능 - 염소이온의 삼투작용으로 식물 성장 억제 및 오염 - 철, 구리 등과 산화하여 부식 촉진
모래 포설법	매끄러운 표면에 다양한 크기를 가진 거친 모래를 뿌려 물체와 표면사이에 마찰이 증가되어 노면과의 마찰계수를 높이는 방법	- 시간 경과에 따라 모래 입자가 눈과 얼음 속에 파묻히면서 효과 감소 - 먼지, 이물질 발생, 배수로 막힘 등 2차 피해와 비용 유발 - 막대한 작업 인력과 장비 필요
용설액 분사법	기상정보와 노면상태를 감지하여 고압분사노즐을 통해 결빙방지 액을 분사하여 결빙을 사전에 방지하는 방식	- 용설액에 따라 재결빙문제와 부식, 환경적인 2차 문제 유발 - 구성설비(탱크, 펌프, 배관)에 대한 꾸준한 유지관리가 필요 - 터널 갭 구비 설치 시 터널 내 유입으로 콘크리트 품질 저하 우려
전열선법	포장체 내부에 온도 감지 센서와 전열선을 설치하고 전원 공급장치를 통해 전기에너지를 발생시킨 발열로 결빙을 방지하는 방식	- 시스템 장애 시 확인이 어려움 - 전력 소모량이 과다하여 비용증가 - 전열선 근처의 국부적인 노화유발 - 유지보수 시 포장부 재시공 필요
열 배관법	외부열원의 공급을 이용하여 포장체 내부에 설치된 배관 내부로 작동 액의 열에너지를 공급하여 발열함으로써 결빙을 방지하는 방식	- 열원의 시공/운영비 과다 - 시스템 장애 시 확인이 어려움 - 유지 보수 시 포장부 재시공 필요 - 열원에서의 거리 증가로 비효율적임



(a) 제설 차량



(b) 용설액 분사장치



(c) 전열선 시스템

그림 1.1.3 기존 용설시스템

최근 건설시공사의 기술력이 향상되어 국내 시장뿐만 아니라 해외 시장에서도 시공 능력을 인정받고 있다. 일부 중앙아시아, 중동 산악지역, 러시아 인근지역의 도로공사에서는 실제로 그림 4와 같이 동절기 평균기온 영하 30℃ 정도의 극한 환경에서 공사를 진행하고 있다.

극한지역으로 판단되는 러시아의 기온 분포를 분석해보면 주요 도시들이 밀집해있는 서부의 도시 별 최근 30년 동안 월 평균기온의 영하 10℃부터 영하 30℃까지임을 알 수 있다(그림 5). 또한 더 한랭한 북극권 한계선에 속하는 영토의 경우 영하 30℃이하 극한 기후가 발생하였다. 이에 따라 향후 극한환경에 대비할 수 있는 기술이 요구 될 것으로 전망되고 있는 실정이다.극한 환경에서의 콘크리트 양생은 국내 한중콘크리트 양생 방법인 보호막과 내부공간을 가열하는 방법으로는 양생효율이 저하되어 초기 동해의 위험이 높아 일정재령에서의 설계압축강도를 확보하기 어려운 상황이다. 따라서 이러한 문제점을 검토하여 극한환경에서 콘크리트를 양생할 시, 초기 동해를 방지하고 설계압축강도를 확보할 수 있는 새로운 양생방법의 개발이 필요하다. 지금까지 극한환경에서 콘크리트를 양생 시 열선을 매립하여 열을 전달하거나 발열거푸집 또는 골재나 물을 가열하여 시공성을 향상시키고자 시도하였으나 이러한 방법은 극한 동절기 환경에서 콘크리트 내부온도를 일정하게 유지하기 어려운 한계점이 있다.



(a) 열선 매입시스템



(b) 발열 거푸집시스템

그림 1.1.4 극저온 극한환경의 콘크리트 양생방안

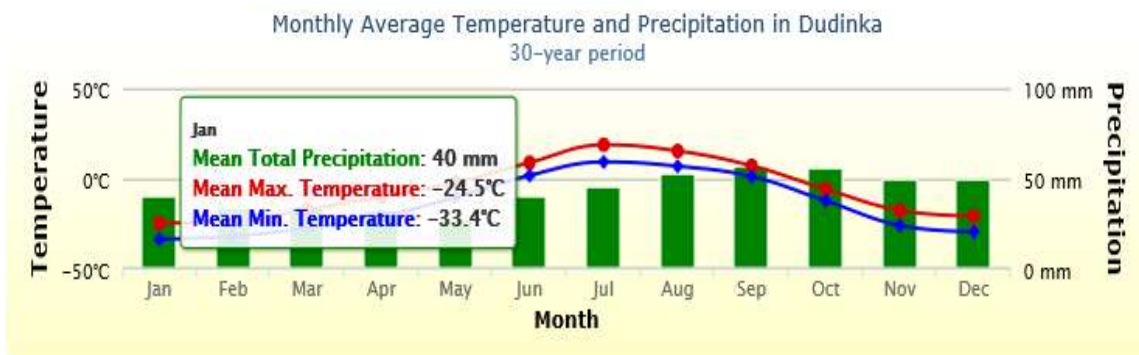


그림 1.1.5 러시아 두딘카 월 평균 기온 분포

최근 건설 선진국에서는 나노기술의 적용으로 건설산업의 패러다임이 전환되고 있으며 관련 산업화가 급진전 되고 있다. 미국과학재단(NSF)은 나노 시장 규모를 2015년 1조 달러로 예상하고 있다 (그림 6). 새로운 기술 변화 흐름에 맞추어 건설 분야의 새로운 성장엔진을 발굴하고 산업구조를 재편하는데 있어 나노기술을 이용하여 역학적으로 탁월하면서 기능적으로 우수한 새로운 분야를 개척하고 있다. 그림 7은 국가별 나노기술의 발전 단계를 나타내고 있으며, 건설 분야에서는 선진국을 중심으로 첨단 나노기술과 건설재료의 융합을 통한 차세대 건설재료의 연구개발이 2000년대 중반부터 시작되고 있다. 그러나 나노재료의 활용이 다양한 분야에서 주목받고 있음에도 불구하고 국내에서는 아직 나노기술을 이용한 건설재료가 시작단계로 해외의 기술수준에 비해 뒤쳐져 있는 실정이다. 특히, 건설 분야에서는 나노기술을 도입하여 기존의 콘크리트와 강재뿐인 건설재료에서 벗어나 새로운 복합체에 대한 연구가 필요한 실정이다.

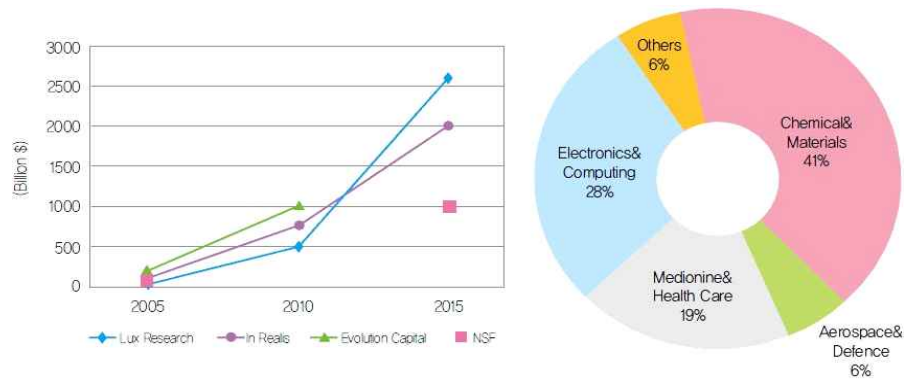


그림 1.1.6 국가별 나노기술 활용도

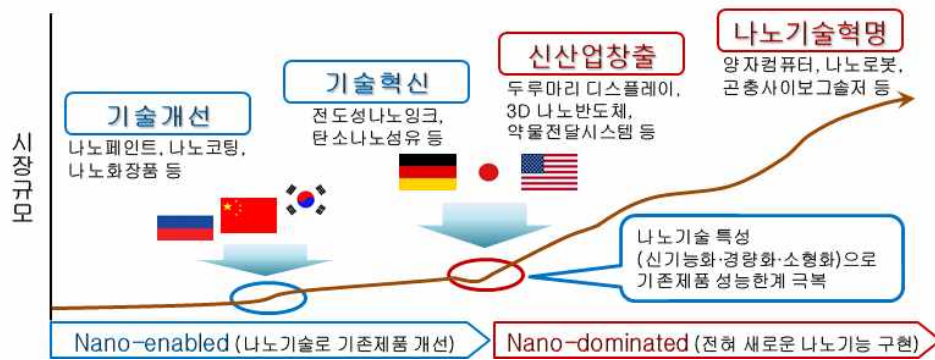


그림 1.1.7 국가별 나노기술의 발전단계

탄소계열 나노재료인 탄소나노튜브와 그래핀은 직경과 구조에 따라 반도체에서 도체까지 전기전도도의 조절이 가능하며 구리보다 약 1,000배 정도 우수한 전기전도도를 가지고 있으며, 열전도도는 구리에 비해 약 10배 정도 우수한 것으로 알려지고 있다. 탄소계열 나노소재는 현재 세계적으로 관련 연구가 초기단계이고 체계적으로 정립된 분야가 아니므로, 국내의 활발한 나노 기초연구와 융합하여 건설 나노 콘크리트 분야의 선도적 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 최근 우수한 물성으로 각광받고 있는 탄소계열 나노소재(Carbon Nanotube, graphene 등)와 콘크리트를 융합하여 극한환경에 대응가능한 다기능 자기발열 콘크리트를 개발하고자 한다.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 현황

국내에서도 나노기술이 전략기술 분야로 선정되었고 다양한 분야에서 연구가 활발하게 진행되고 있다. 정부의 융합기술 개발 추진 동향은 7개 부처(교육과학기술부, 문화체육관광부, 지식경제부, 보건복지가족부, 환경부, 농림수산식품부 그리고 국토해양부)를 중심으로 개별적으로 추진되고 있다. 최근 산업통상자원부와 미래창조과학부는 2012년부터 2020년까지 국비 4322억원, 민간 808억원 등 총 5130억원을 투자하여 ‘나노융합 2020사업’을 계획하였고, 나노융합분야 공공부문의 우수 R&D 성과(특허)를 바탕으로 신산업·신시장 조기 창출을 위한 연구개발 전주기를 완성하는 사업화 연구를 지원하고 있다. 또한 산업통상자원부와 한국산업기술평가관리원은 나노융합, 섬유·의류, 로봇·조선 등 분야의 핵심기술 개발에 253억5000만원을 지원하는 ‘제6차 산업 핵심기술 개발사업’을 지원하고자 하고 있다. 핵심·원천 융합기술의 조기 확보 지원체제와 융합기술 관련 기술, 산업 및 제품의 국제표준화가 마련되어 있지 못한 실정이며 기술 교류 및 정보 공유로 국가적인 경쟁력 확보가 필요하다.

최근 국내에서는 발열 성능을 갖는 포장체에 대한 연구가 일부 업체에서 수행되었다. 전도 발열 콘크리트로는 PPC관 이용하여 바닥 난방용 발열시스템 개발과 도로융설시스템으로는 보도블록의 하부와 상부 사이에 완충판을 설치하고 내부에 열선을 설치한 융설시스템이 연구되고 있으나 차량용 도로에 설치 및 적용에는 한계가 있었다.

국내 탄소계열 나노소재를 활용한 기술은 주로 탄소나노튜브를 시멘트 계열 복합체에 적용하는 내용이 대부분이다(표 2). 탄소나노튜브를 혼입하여 일반 건설재료 대비하여 강도증진, 전기적, 열적 기능부여 분야의 일부 기초연구가 진행되었다. 대부분의 국내 연구는 강도증진을 목적으로 실시되었으며, 일부 연구자들이 탄소나노튜브를 적용하여 모르타르 시편의 전기적, 열적 성질을 활용하는 연구가 실시되었으나 실험실 시편단위의 모르타르를 대상으로 실시되었다. 기존 국외 연구에 의하면 나노소재를 모르타르 제작을 위해 배합하는 기술은 콘크리트로 배합하는 기술과 매우 상이한 것으로 보고되고 있다. 이는 콘크리트의 골재가 나노소재를 빠르게 흡수하여 나노기술의 핵심기술인 분산성이 하락하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 나노소재를 콘크리트에 효율적으로 분산할 수 있는 배합법을 개발하고 실제 극한 환경 하에서 다양한 크기의 콘크리트 실험체의 크기효과를 고려하여 자기발열 및 융설 시스템에 관한 실증 연구를 실시하고자 한다.

표 2.1.1 국내 나노 건설재료의 기능성 적용사례

분야	저자	저널명	연구방법
전기적 성질 활용	임민주 등 (2016)	한국콘크리트학회 학술대회 논문집	포틀랜드 1종 시멘트, 실리카폼, 증류수, 탄소나노튜브 (0.3~0.6%), 초유동화제를 혼입하여 20mm x 20mm x 80mm 크기의 공시체를 제작함. 양생 후 인공적인 균열 발생 전 시편의 전기전도도 측정한 후, 인공적인 균열 발생 후 균열폭 크기에 따른 전기전도도 측정함
	박종만 등 (2010)	비파괴검사 학회지	미세손상 감지용 이중기지 시편 (Dual Matrix Composite, DMC)을 제작하여 전기-미세역학 시험, 음향 방출 시험을 실시함
	김형기 등 (2014)	Composite Structures	포틀랜드 1종, MWCNT(0.15%, 0.3%), 실리카폼을 혼입하여 26mm x 25mm x 150mm 크기의 시편을 제작하고 1일 양생 및 28일 양생 후 구리 판을 삽입한 CNT 모르타르 복합체의 전기저항성을 측정함
열적 성능 활용	허진영 등 (2013)	한국콘크리트학회 학술대회 논문집	시멘트 페이스트와 Powder Type CNT 0.2 ~ 3.2%을 혼입하여 40mm x 40mm x 160mm 크기의 직사각형 실험체를 제작하고, 1 ~ 40W의 전력량을 1800초간 투여하여 1 ~ 30℃까지 온도상승을 확인함
	정원석 등 (2016)	한국콘크리트학회 학술대회 논문집	시멘트 페이스트와 Single-Walled CNT(SWCNT), Multi-Walled CNT(MWCNT)를 혼입하여 50mm x 50mm x 50mm 크기의 모르타르 실험체를 제작하여 50 ~ 100V을 전기를 투여하고 6000초까지 실험을 진행하여 1 ~ 80℃까지 온도 상승을 확인함

2. 국외 현황

건설재료에 탄소나노튜브와 같은 나노소재를 사용하여 성능을 향상시키는 연구는 국외에서 일부 이루어지고 있으며, 이들은 고강도화, 보수·보강, 특수성능 부여 등 여러가지 목적을 가지고 있다. 이중 특히 나노 사이즈의 충전재 등을 이용한 초고강도 재료의 개발이 가장 활발하게 진행 중이다. 미국의 Chung (2004)교수에 의해 탄소나노튜브를 시멘트 매트릭스에 배합한 복합재료의 전자파 차폐 성능에 대한 연구가 수행되었고 캐나다의 Makar (2004)등에 의해 시멘트 분말과 탄소나노튜브의 혼합체에 대한 미세형상 연구 및 일반 건설재료로의 적용가능성이 검토되었다. 스페인의 Ibarra 등(2013)에 의해 시멘트 페이스트 내 탄소나노튜브의 분산성 및 탄성계수와 같은 기초 물성 예측 및 측정에 대한 연구가 수행되었으며, 중국의 Li 등(2007)은 탄소나노튜브 보강 시멘트 복합재료의 하중 시 민감도에 대해 측정하는 연구를 수행하였다.

또한 대부분의 기존 연구는 탄소나노튜브 등이 상호 응집하는 van der Waals 힘을 저하시키기 위한 방법을 다양하게 시도하여 배합하는 방법을 연구하고 있다. 표 3은 본 연구계획서를 준비하면서 정리한 나노기술 적용 건설 시멘트재료 관련 논문 리스트이다. 대부분의 연구가 화학적 처리를 통한 표면처리법과 기계적인 교반을 복합적으로 적용하여 나노소재를 분산하는 기법이 적용되고 있다. 즉, 화학적인 표면처리 방법으로 나노재료의 강한 인력을 저하시키고 초음파 처리(Ultrasonication)를 이용한 물리적인 방법으로 분산시키는 방법이다. 나노소재의 분산 방법은 탄소나노튜브, 그래핀 등의 탄소계열 나노소재 별로 연구가 진행되며 계속 발전하고 있는 상황이므로 시멘트 기반의 재료와의 혼합에 유리한 분산방법 조합을 지속적으로 연구하여 최적의 분산방법을 도출하고 있다. 대부분의 해외 연구는 표 3에서 제시한 바와 같이 다중벽 탄소나노튜브를 나노소재로 채택하여 다양한 분산방법, 물/시멘트 비, 탄소나노튜브 혼입비율 등을 매개변수로 선정하고 있으며 최종적인 연구목표는 강도

증진이 대부분이다.

나노소재의 전기적, 열전도적 성질을 활용한 해외연구는 국내 연구와 마찬가지로 나노소재의 전기적, 열전도적 특성을 활용하여 시멘트 복합체와 복합재료에 발열기능에 대하여 표 4와 같이 연구를 일부 수행하였다. 국외의 나노소재를 이용한 시멘트 복합체 다기능화 연구는 시편단위 실험실 수준까지만 연구되었고 전기적, 열적 특성을 다양한 크기의 실검증 연구는 실시된 사례는 없는 것으로 조사되었다.

표 2.2.1 국외 나노 시멘트 복합체 강도증진 관련연구

저자	나노재료 종류	표면처리방 법	나노 혼입 비율	음파 처리 시간	양생방법	물/시멘트 비율	실험방법
Yu 등 (2009)	MWCNT	산처리	0.1%	-	1일후 탈형 20일간 수중양생 10일간 건조양생	0.45/1	실험체에 압축하중을 가해 강도와 저항변화 측정
		계면활성제					
		일반					
Musso 등 (2009)	MWCNT	일반	0.5%	4hr	1일 증기양생 27일 수중양생	0.4/1	실험체에 압축과 휨 응력을 가하여 결과확인 후 시험체를 잘게 부수어 단면을 분석
		열처리					
		산처리					
Li 등 (2007)	MWCNT	-	0.5%	-	진동다짐 1일후 탈형 26일 수중양생 1일 고온 건조양생	0.4/1	두 시험체에 반복압축하중을 가하여 전기적 저항특성과 감압특성을 측정
		산처리	0.5%			0.4/1	
Chaipanic h 등 (2010)	-	-	0%	10min	수중양생	0.5/1/ 3(모래)	압축실험을 통해 각 시험체의 강도를 비교
			0%				
			0.5%				
			1%				
Han 등 (2010)	MWCNT	NaDDBs	0.1%	2hr	타설 1일후 탈형 180일 습윤양생 14일 수중양생 24시간 건조양생	0.6/1	동일한 시험체들의 건조양생 시간을 조절하여 수분함유량을 다르게 하여 압축실험하에 저항값의 차이를 비교
Han 등 (2012A)	MWCNT	산처리	0.05%	2hr	타설 1일후 탈형 28일 습윤양생 5일 고온건조양생	0.45/1	압축실험을 진행하여 각 시험체의 저항변화를 체크한 후 변수를 통해 비교
			0.1%			0.45/1	
			1%			0.45/1	
			0.1%			0.6/1	
			0.1%			0.6/1	
Han 등 (2012B)	MWCNT	산처리 후 NaDDBs 용액에 혼입	0.1%	3hr	타설 1일후 탈형 28일 습윤양생 60일 건조양생	0.4/1	압축실험을 진행하여 시험체의 전하 정전용량과 저항변화 측정
			0.5%				
Rafiee 등 (2013)	Graphite Oxide	Hummer's method (산처리, 열처리)	0%	6hr		0.33/1	모르타르와 콘크리트의 압축실험을 실시하여 시험체의 강도와 인성 비교
			1%				
Kothiyal 등 (2016)	Graphene Oxide	Hummer's method (산처리, 열처리)	0.125%		7, 14, 28일 수중양생		압축실험을 진행하여 시험체의 강도 비교
			1%				
Mohamm ed 등 (2016)	Graphene Oxide	-	0.01%	-	28일 습윤양생	0.45/1	동결-융해실험, 압축시험으로 시험체의 동결-융해 저항성과 강도 비교
			0.03%				
			0.06%				
Horszcz ruk 등 (2015)	Graphene Oxide	Hummer's method (산처리, 열처리) + 초음파처리	3%		24시간, 7일, 28일 양생	0.6/1	AFM분석, XRD, SEM 촬영으로 시험체의 미세구조 파악 및 탄성계수 비교

표 2.2.2 국외 나노 건설재료의 기능성 적용사례

분류	저자	저널명	연구 방법
전기 적 성능	Loh 등 (20 15)	Journal of Physics: Conferen ce Series	공시체 제작 (50mm x 50mm x 50mm) 모르타르 양측에 전극 설치하고 Type I/II (25 wt%), blast furnace slag, sand-to-cement ratio(2.75:1) w/c 0.52을 고정한 후, 진공 오븐에 1시간, 6시간 동안 양생하였고, cyclic compressive test를 통한 compressive strain과 resistance의 상관관계 분석 함
	Zhan g 등 (20 16)	Journal of The Electroc hemical Society	Graphene 전극 사이의 경화시킨 시멘트 페이스트 시트 (ϕ 10mm x 1mm)를 혼입하고, 매개변수로는 양생일 (3, 5, 7, 10, 14, 21, 28일), W/C (0.3 ~ 0.5/1)로 세 가지의 전극실험 (cyclic voltammetry, galvanostatic charge/discharge and electrochemical impedance spectroscopy)을 실시함
	Loh 등 (20 16)	Structur al Health Monitori ng	휨강도 시편 (150mm x 150mm x 460mm), 원형공시체 시 편 (100mm x 200mm) CNT Thin 필름 (80mm x 80mm x 18mm)을 제작하고, 매개변수로 W/C (0.42 ~ 0.44/1), S/C (2/1), Ag/C (3/1), 혼화제 3.5ml/kg, CNT (2wt%) 수용액을 Sand나 Aggregate에 코팅하였고, 휨 강도 시험, 압축강도 시험 후 SEM 촬영을 통하여 CNT Thin 필름 둘레에 전극을 설치하 고 구멍이 발생할 시 저항의 변화를 감지하여 손상 부위 파악함
	Pisel lo 등 (20 17)	Solar Energy Material s & Solar Cells	MWCNT, Carbon Nanofiber, Graphene Nano Platelets, Carbon black을 혼입한 cement 복합체의 다목적 특성화를 위 한 연구를 위하여 40mm x 40mm x 160mm 시편을 w/c ratio는 0.4, 포틀랜드 시멘트 415g/sample, nano재료 8.3g/sample, 물 166g/sample로 제작하였고, 4가지의 나노 재 료를 혼입해 만든 복합체를 85℃ chamber안에 넣어 열 및 전기 전도성, 하중재하 실험 실시함
열적 성능	Gom is 등 (20 15)	Constru ction and Building Material s	graphite powder (GP), carbon fiber powder (CFP), carbon fiber, carbon nanotubes (CNT)의 구성물질로 판형 실험체 (100mm x 100mm x 10mm)를 제작하여 전기 공급량 (50V~150V)을 매개변수로 6000초 동안 실험을 진행하였다. 실험결과, 시편은 최대 63.2℃까지 발열성능이 발생함
	Zhao 등 (20 11)	Cold Regions Science and Technol ogy	슬래브 (400mm x 200mm x 50mm)를 제작하여 carbon fiber heating wires (CFHWs)를 100mm 간격 배근하고 150 ~ 1000 W/m ² 의 전기를 공급하여 실내(냉동고)에서는 5시간, 실외(폭설 시)에서는 16시간 실험을 진행함. 실험결과는 최대 30℃까지 슬래브가 발열되는 것으로 분석됨
	Chu ng (20 04)	Smart Material s and Structur es	Carbon fiber (1.0 vol%) cement, Graphite particle (37 vol%) cement, Carbon fiber (uncoated) mat, Carbon fiber epoxy-matrix, interlaminar interface를 제작하여 1.8W, 0.27W, 6.5W, 0.59W의 전력을 주입하였고, 실험결과는 최대 134℃ 발열이 발생함
	Zhan g 등 (20 11)	Advance d Smart Material s and Smart Structur es Technol	CNFP & MWCNT(3 wt%) cement를 판형 실험체 (100mm x 100mm)으로 제작하여 전기공급량을 600~1800W/m ² 변경하 여 7500초동안 융빙 실험을 진행함 (-10℃, -20℃, -30℃에 서 실험 시작). 실험결과, 판형 실험체는 최대 20 ~ 33℃ 발열 이 발생함

		ogy	
	Han 등 (2012)	Journal of Composite Materials	큐브형 실험체 (50mm x 50mm x 50mm)에 CNT 0.05%~1%로 전기를 약 750초 간 공급하여 계측함. 모든 시편 5일 동안 50℃에서 건조. CNT 농도에 따른 압전효과 변화 확인함
	Pisello 등 (2017)	Solar Energy Materials and Solar Cells	직사각형 실험체 (40mm x 40mm x 160mm)에 MWCNT, Carbon Nanofiber, Graphene, Nano Platelets, Carbon black을 혼합하여 제작한 후, 600mW, 700mW, 750mW의 전기를 공급하여 40초간 (19℃양생, 85℃의 chamber안) 실험을 진행함

탄소나노튜브와 시멘트 복합체 제조 관련 국외논문은 총 1826편으로 2000년도 중후반부터 최근까지 활발한 연구가 진행되고 있다(연평균 성장률 27%). 국내에서도 2004년부터 2017년까지 13년간 53편의 논문이 발표되었으며 연평균 8%의 성장률로 꾸준한 증가추세를 보여주고 있다. 탄소나노튜브 복합체 관련 국가별 연구의 최상위 그룹은 중국과 미국으로 각각 480편과 741편의 논문을 발표하여 관련연구 분야 허브국가로 유추할 수 있다. 탄소나노튜브와 시멘트 복합체 제조 관련 특허의 출원 동향을 분석하면, 2000년 중반 이후 최근까지 점진적으로 증가하나 논문의 증가세에는 이르지 못하는 것으로 분석되었다. 따라서 선행 연구에 관한 기술연구 수준이 상대적으로 낮음을 예상할 수 있음과 동시에 기술선점을 통해 높은 수준의 특허권 확보를 기대할 수 있다.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 최적 발열성능 확보를 위한 배합기술

가. 최적 탄소계열 나노소재 및 혼입비율 선정

(1) 연구 목적

건설 분야에서 시멘트계 재료는 가장 오랜 기간 동안 널리 사용되어온 재료이다. 하지만 인장에 약하고 압축에 강한 성질 때문에 인장강도 향상을 위하여 철근과 프리스트레스 강재를 활용하여 왔다. 하지만 기후환경의 급변과 고강도 건설재료의 수요로 인해 선진국을 중심으로 철근콘크리트의 다기능화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 건설재료에 혼입하게 되는 주된 나노재료는 주로 탄소나노튜브와 그래핀이 있다. 본 연구에서는 나노 콘크리트 제작을 위해 탄소나노튜브와 산화그래핀의 특징을 비교하였다.

(2) 연구 내용

(가) 나노재료의 특성 비교 및 선정배경

탄소나노튜브는 단일벽 탄소나노튜브(Single-walled carbonnanotube, 이하 SWCNT)와 다중벽 탄소나노튜브(Multi-walled carbob nanotube, 이하 MWCNT)로 구분된다. SWCNT는 MWCNT에 비해 높은 탄성계수, 강도, 열전도도를 가지고 있으나 대량생산이 어려워 산업적으로 사용하기에는 한계가 있다. MWCNT는 SWCNT보다는 다소 재료 성질이 떨어지나 다른 물질과 비교하였을 때는 매우 우수한 나노 재료이며 상대적으로 단가가 낮고 생산하기도 상대적으로 용이하며 분산하기가 쉬우므로 실용적인 면에서 콘크리트로의 적용이 유리한 것으로 알려져 있다.

따라서 대부분의 연구가 MWCNT를 대상으로 적용에 대한 연구가 활발하다. CNT는 직경과 구조에 따라 반도체에서 도체까지 전기 전도도의 조절이 가능하며 구리보다 약 1000배 정도 우수한 전기전도도를 가지고 있으며 열전도도는 구리에 비해 약 10배 정도 우수한 것으로 알려져 있다. 또한 CNT는 변형이 일어났을 경우 전기적 성질의 변화하는 압전효과가 나타나 자체 계측기능을 수행할 수 있는 가능성이 크다.

Graphene은 CNT보다 10여년 뒤인, 2004년에 발견된 탄소 동소체로 그물처럼 연결된 벌집구조로 이루어져 있다. CNT의 산업화 구현에서 발생하는 여러 단점을 극복하고 CNT보다 더 우수한 재료특성을 보유하고 있어 건설 분야 뿐 만 아니라 항공우주 및 기계분야 등에서도 각광을 받고 있다.

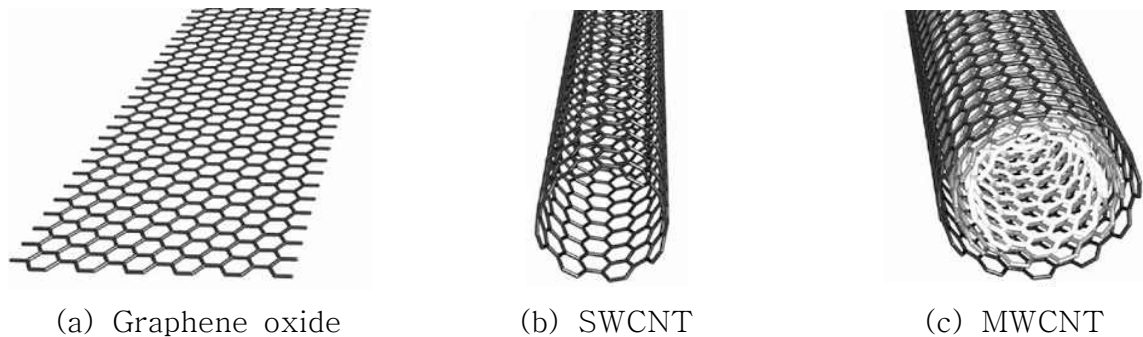


그림 3.1.1 종류별 탄소기반 나노소재의 형상

하지만 그래핀옥사이드를 얻기위해 원재료인 산화흑연을 초음파 분쇄하는 과정에서 그래핀 고유의 물리적, 전기적 특성을 잃어버리게 된다. 따라서 그래핀의 손실된 특성을 복구시키기 위해 환원과정이 필수적이다. 하지만 환원제로 사용되는 하이드라진은 사용시 100~120℃의 고온을 유지해야하고 환원율이 70%로 그 성능이 우수하지 못하다. 또한 그래핀에 질소 불순물이 잔류하게 하는 것이 단점이다. 학계에서는 하이드라진은 현재 발암물질로 분류되어 환경오염과 인체에 악영향을 미칠 수 있다고 보고 있다.

(나) 압축강도 실험결과

기존 연구동향에서 나노시멘트 복합체연구를 통해 MWCNT혼입 시멘트 복합체의 강도가 증진되는 효과를 확인하였다. 시멘트계열 소재의 수화 과정에서 MWCNT의 우수한 기계적 성질이 내부에서 입자간의 결합력을 증진시켜 주는 것으로 분석되었다. 본 연구팀에서는 MWCNT함량을 매개변수로 하여 압축강도 성능시험을 수행하였다. 압축강도 성능시험은 KOLAS인증을 받은 국제공인시험기관에서 KS F 2405 규격을 기준으로 전문가의 입회 하에 엄격히 수행되었다.

표 3.1.1 압축강도 성능시험 매개변수

시편명	MWCNT함량 (wt%)	물/시멘트 비	재령일(일)
Control	0	0.4	28
MW-0.1	0.1		

압축강도 성능시험 결과, MWCNT 0.1wt%를 혼입한 시편(MW-0.1)의 압축강도는 39.4MPa이었다. MWCNT를 혼입하지 않은 시편(Control)의 압축강도는 30.5MPa이었다. 나노콘크리트의 압축강도가 일반콘크리트 대비 약 29.2%증진되는 것을 시험결과를 통해 확인하였다.

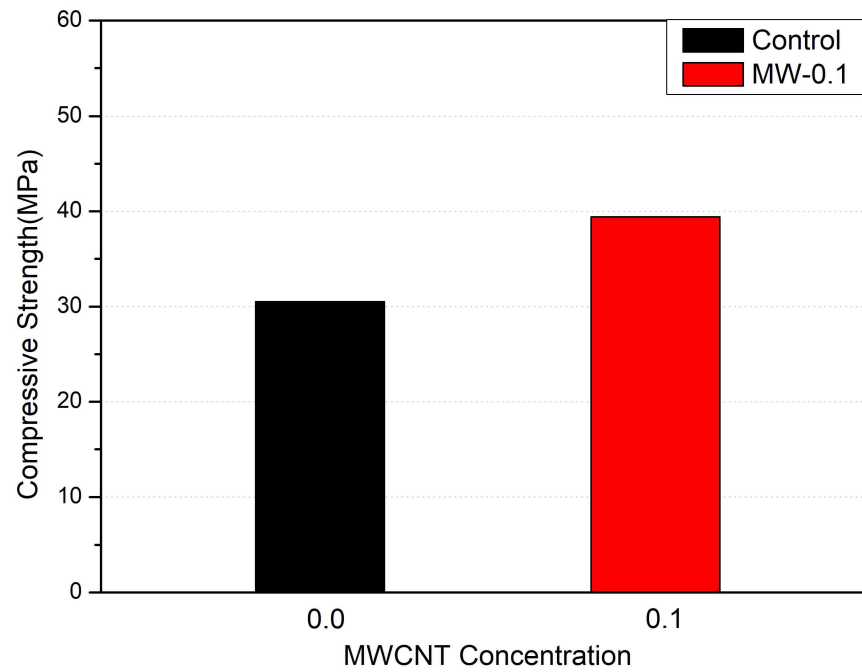


그림 3.1.2 나노콘크리트 압축강도 시험결과 그래프

표 3.1.2 압축강도 성능시험 결과

시편명	MWCNT함량 (wt%)	압축강도 (MPa)	나노콘크리트/ 일반콘크리트 (%)	재령일 (일)
Control	0	30.5	—	28
MW-0.1	0.1	39.4	129.2	

나. 나노 콘크리트 제작을 위한 배합법 도출

(1) 연구 목적

나노 콘크리트 제작 시 MWCNT를 혼합하는 형태에 따라 수용액상태의 MWCNT를 혼합하는 wet mix와 파우더 상태로 혼합하는 dry mix 두 가지 배합법이 있다. 최적의 배합법을 도출하기 위하여 wet mix와 dry mix로 제작한 나노 콘크리트의 발열 및 강도 시험을 수행하여 두 배합법의 나노 콘크리트 성능향상에 효과를 분석하고자 한다. 본 연구의 상세 목적은 다음과 같다.

- MWCNT를 콘크리트에 수용액으로 혼합한 wet mix와 파우더로 혼합한 dry mix 두 방법의 발열 성능시험 결과를 비교 분석하여 상대적으로 효율적인 혼합법을 개발한다.
- MWCNT의 함량에 따른 나노 콘크리트의 발열 특성을 분석한다.

(2) 연구 방법

나노 콘크리트를 배합 형태에 따라 wet mix와 dry mix의 두 그룹으로 나누어 MWCNT함량, 공급전압을 매개변수로 하여 발열 성능 시험을 진행하였다.

(가) 배경 이론

나노 콘크리트 제작을 위하여 MWCNT를 혼합하는 방법은 MWCNT분말을 직접 혼합하는 방법과 MWCNT를 수용액에 용해하여 혼합하는 방법이 있다.

① Wet mix

Wet mix혼합법은 나노 콘크리트 제작에 사용될 물에 MWCNT를 미리 용해시킨 후 혼입하는 방법이다.

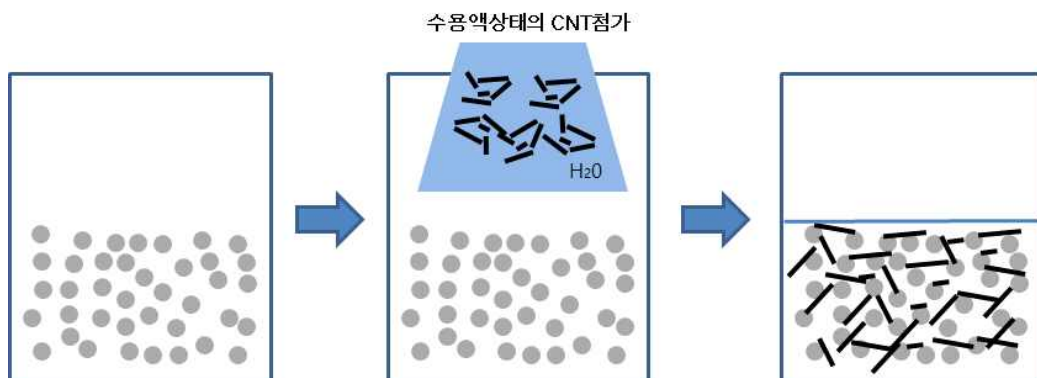
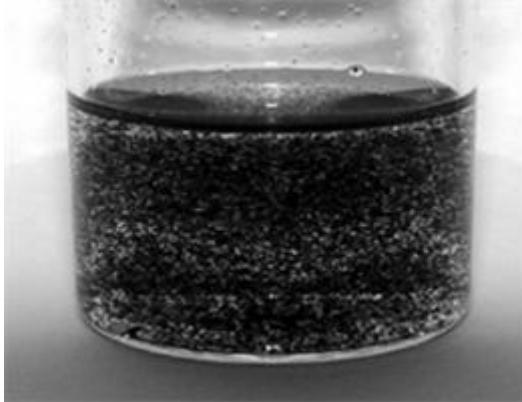
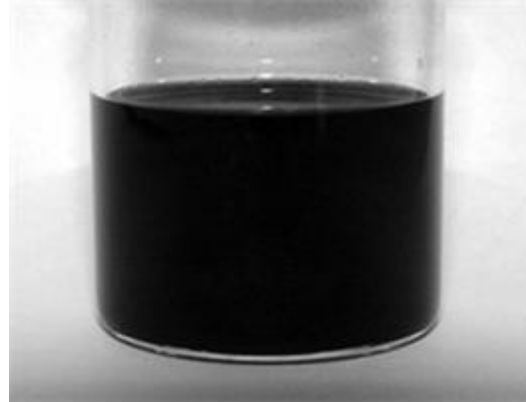


그림 3.1.3 Wet mix의 MWCNT혼합방법

용해 과정에서 MWCNT입자가 물과 혼합하게 되면 반데르발스(Van der waals) 힘에 의한 응집이 발생한다. 응집현상은 MWCNT의 분산성을 저하시켜 발열 성능 저하를 유발한다. 화학적 처리방법(계면활성제)과 물리적 방법(초음파처리)을 혼용하여 MWCNT의 수용액 내 분산성을 확보하게 된다.



(a) 분산되지 않은 CNT
수용액



(b) 분산된 CNT 수용액

그림 3.1.4 MWCNT 수용액의 응집현상

② Dry mix

Dry mix는 나노 콘크리트 제작 시 사용되는 시멘트/모래에 MWCNT를 혼합한 뒤 정제수를 사용하여 배합하는 방법이다.

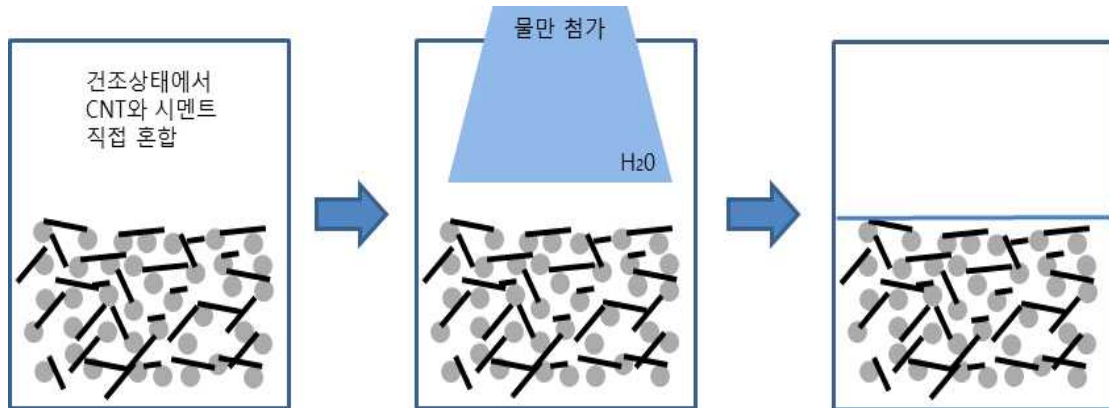


그림 3.1.5 Dry mix의 MWCNT혼합방법

(나) 실험재료

나노 콘크리트 제작을 위하여 포틀랜드 1종 보통시멘트, 주문진 표준사, MWCNT파우더 수용액, 정제수가 사용되었다. MWCNT수용액의 경우 0.2/2.0wt%의 수용액을 사용하여 각각 시멘트 중량대비 0.1/1.0wt%의 나노 콘크리트 제작에 사용되었다. 콘크리트 제작을 위한 배합 재료와 배합 비는 다음의 표 3.1.3과 같다. 또한 MWCNT의 대표적인 물성치는 표 3.1.3과 같다.

표 3.1.3 나노 콘크리트 배합재료와 비율

배합법	시편 명	배합재료 (g)			
		MWCNT	물	시멘트	골재
일반 콘크리트	Control	0	40	80	200
Wet mix	MW-S-0.1	0.1			
	MW-S-1.0	0.8			
Dry mix	MW-P-0.1	0.1			
	MW-P-1.0	0.8			



(a) 시멘트



(b) 주문진 표준사



(c)
정제수



(d) MWCNT
수용액



(e) MWCNT파우더

그림 3.1.6 나노 콘크리트 배합재료

표 3.1.4 MWCNT의 역학적 · 물리적 특성

물성 치	물성 값	비 고
구 조	지름 : 5 nm ~ 100 nm 길이 : 100 nm ~ 1 cm	—
탄성계수	0.3 ~ 0.95 TPa	0.1 ~ 0.14 TPa (Cement mortar)
인장강도	11 ~ 63 GPa	0.002 ~ 0.01 GPa (Cement mortar)
밀 도	1.6 g/cm ³	2.7 g/cm ³ (Al)
전기 전도성	약 6,000 S/cm	5,810 S/cm (Cu)
열 전도성	최대 3,000 W/m · k	3,320 W/m · k (Diamond)

(다) 배합 순서

발열/강도 시험을 위한 나노 콘크리트 시험체 제작 순서는 다음과 같다.

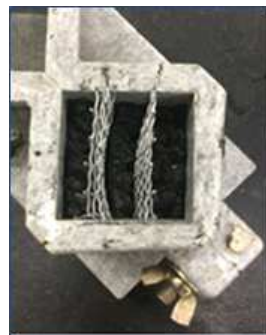
① Wet mix



(a) 시멘트/모래 건비빔 (2분)



(b) MWCNT수용액 혼합 (2분)



(c) 타설 및 Steel 전극 설치



(d) 중앙부 열전대 관입

그림 3.1.7 Mix 나노 콘크리트 제작과정

② Dry mix



(a) 시멘트/모래/실리카흙 MWCNT파우더 건비빔 (2분)



(b) 정제수 혼합 (2분)



(c) 타설 및 Steel 전극 설치

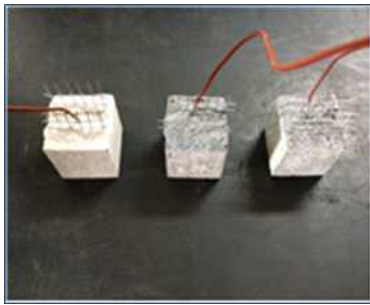


(d) 중앙부 열전대 관입

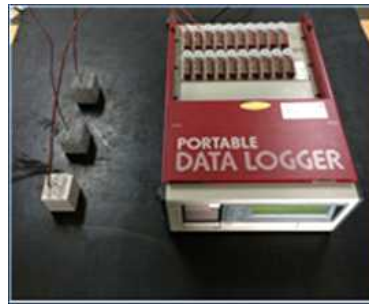
그림 3.1.8 Dry mix 나노 콘크리트 제작과정

(라) 발열 성능 시험

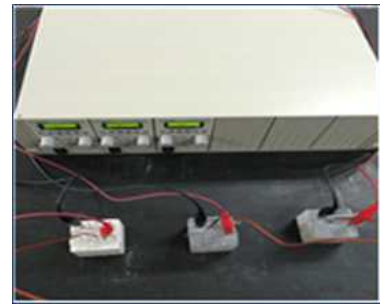
발열 성능 시험에서는 발열 성능 시험체 제작을 위하여 CNT를 수용액, 파우더의 두 가지 형태로 혼입하고 내부에 전극으로 Steel mesh를 이용하여 삽입한 큐빅 형태의 압축 강도 시편(50mm × 50mm × 50mm)을 사용하였다. 시험 도중 안전확보를 위하여 나노 콘크리트를 절연고무판 위에 설치하여 전압을 공급하였다. 각 시편의 온도는 열전대를 정적데이터로거(TDS-303)에 연결하여 6,000초 간의 시편 중심부 온도를 측정하였다. 각 시편은 직류전압장치에 의해 동일 전압을 공급받게 된다. 발열 성능 시험의 과정은 그림 3.1.10과 같다.



(a) 절연판 위 시편설치



(b) 시편과 데이터 로거
연결



(c) 시편과 Power
Supply연결

그림 3.1.9 발열 성능시험 설치 과정

(3) 연구결과

본 연구에서는 MWCNT의 혼합방법, MWCNT의 함량을 매개변수로 하여 나노 콘크리트의 발열 및 기계적 성능을 분석하였다. 발열 성능시험의 경우 각 매개변수 별 시편은 동일 배합비로 3개로 제작하여 평균 온도변화량을 측정하였다. 또한 시편 내 MWCNT입자의 존재 확인을 위하여 SEM촬영을 통해 MWCNT입자를 확인하였다. 본 연구를 위한 매개변수는 표 3.1.5로 정리하였다.

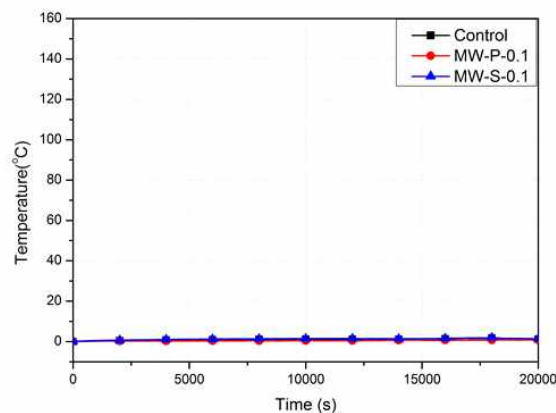
표 3.1.5 MWCNT 혼합 방법에 따른 나노콘크리트 발열실험 매개변수

Test group	CNT type	Specimen name	CNT content (wt%)
Group#1	—	Control	0.0
Group#2	MWCNT Solution	MW-S-0.1	0.1
		MW-S-1.0	1.0
Group#3	MWCNT Powder	MW-P-0.1	0.1
		MW-P-1.0	1.0

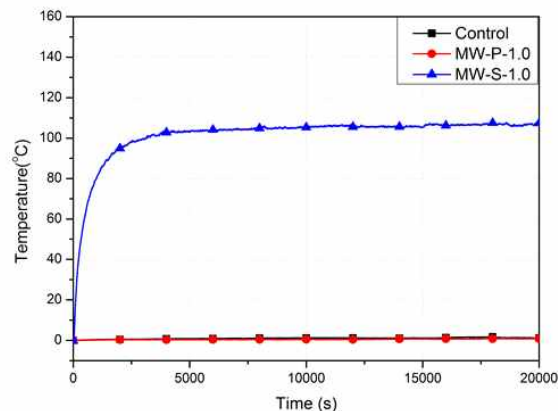
(가) 발열성능실험 결과

MWCNT 시멘트 복합체의 발열성능 실험 결과는 표 3.1.6으로 요약하였다. 그림 3.1.11(a)는 MW-S-0.1와 MW-P-0.1에 50V의 DC 전압을 공급 하였을 때 시간-온도 변화량 그래프이다. 50V전압 공급 시 Control의 온도는 1.1℃가 증가하였다. MW-S-0.1은 1.6℃가 상승하였다. MW-P-0.1은 초기 온도 대비 약 1.1℃가 상승하였다. MWCNT는 혼합 방법 종류에 상관없이 0.1wt%가 혼합된 경우 발열성능 개선 효과가 미비하였다.

그림 3.1.11(b)는 MW-S-1.0과 MW-P-1.0의 시간-온도변화 그래프이다. MW-S-1.0은 초기 온도 대비 108.2℃ 상승하였다. MW-P-1.0은 2.1℃가 상승하였다. MWCNT는 1.0wt% solution type으로 혼합하는 것이 이 powder type에 비해 약 51.5배 최대 온도 변화량이 많았다. 또한 MW-S-1.0은 Control실험체보다 67.6배 발열성능이 우수하였다. MWCNT는 powder type의 혼합 시 시멘트 복합체 내부에서 agglomeration 현상을 유발하여 CNT particle사이의 network형성이 어렵다. CNT solution type이 발열성능이 더 우수한 이유는 초음파와 계면활성처리를 통해 시멘트 복합체 내부에서 고르게 분산되어 있기 때문에 MWCNT particle의 network를 형성하기 유리하기 때문이다.



(a) MW-P-0.1, MW-S-0.1 발열 실험 결과



(b) MW-P-1.0, MW-S-1.0 발열 실험 결과

그림 3.1.10 MWCNT 혼합 방법에 따른 나노콘크리트 발열 실험 결과

표 3.1.6 MWCNT 혼합 방법에 따른 나노콘크리트 발열 실험 결과

시편명	CNT 유형	CNT 함량(%)	온도변화량(℃)
Control	—	—	1.1
MW-S-0.1	MWCNT Solution	0.1	1.6
MW-S-1.0		1.0	108.2
MW-P-0.1	MWCNT Powder	0.1	1.1
MW-P-1.0		1.0	2.1

실험체의 표면온도는 그림 3.1.12와 같이 전압 공급 5,000초 후에 열화상 카메라를 이용하여 촬영하였다. MW-S-0.1은 Control, MW-P-0.1, MW-P-1.0과 유사하게 20~23℃의 온도 분포가 확인되었다. MW-S-1.0은 그림 10(c)와 같이 전극 간의 거리가 가장 가까운 상부를 중심으로 최대 166.7℃가 발생하였고 실험체 전체로 열이 확산되었다.

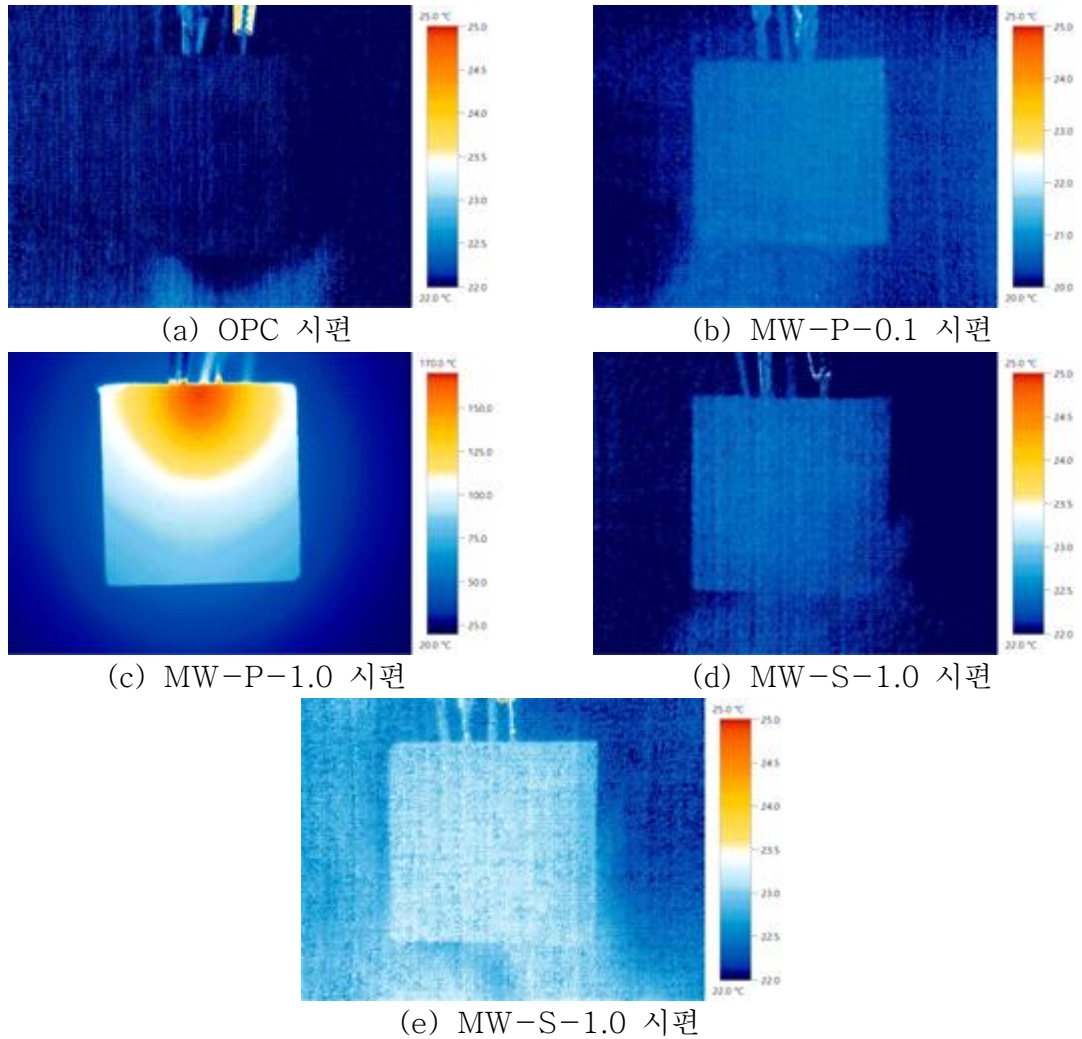
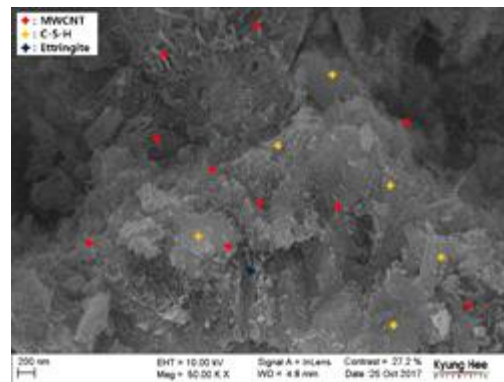


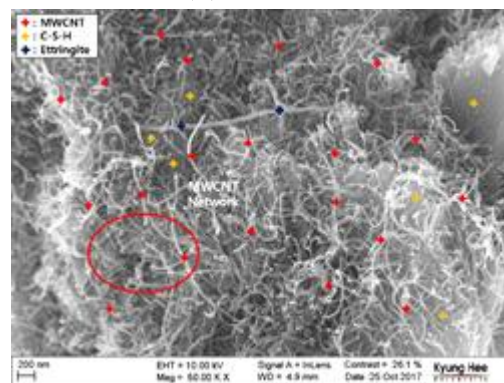
그림 3.1.11 나노 콘크리트 열화상 이미지

본 연구에서는 시멘트 복합체 내부의 MWCNT 분산도와 van Der Waals 현상을 분석하기 위해 FE-SEM 촬영하였다. FE-SEM은 MWCNT, C-S-H, Ettringite의 식별이 가능한 $\times 50,000$ 으로 촬영하였다. FE-SEM 이미지에서 빨간색으로 표시된 부분은 MWCNT입자이고, 노란색 표시는 시멘트 복합체 내 수화 생성물(C-S-H)이다. 파란색 십자가는 시멘트 복합체 내 Ettringite이다.

그림 3.1.13은 MWCNT가 solution type으로 혼합된 시멘트 모르타르의 FE-SEM이미지이다. MWCNT solution 0.1wt% cement mortar은 MWCNT 입자들의 network가 형성되지 못한 것으로 나타났다(그림 3.1.12(a)). MWCNT solution 시멘트 모르타르는 1.0wt%를 혼합한 경우가 0.1wt% 혼합한 경우에 비해 내부에서 MWCNT입자의 전기적 네트워크를 더 많이 형성하는 것으로 관찰되었다(그림 3.1.12(b)). MWCNT 1.0wt% solution 시멘트 모르타르는 0.1wt% solution 시멘트 모르타르에 비해 혼합된 MWCNT 입자의 수가 10배 많다. 그 결과, 더 많은 MWCNT network를 형성하기 때문에 발열성능이 우수한 것으로 판단된다.



(a) 0.1wt%

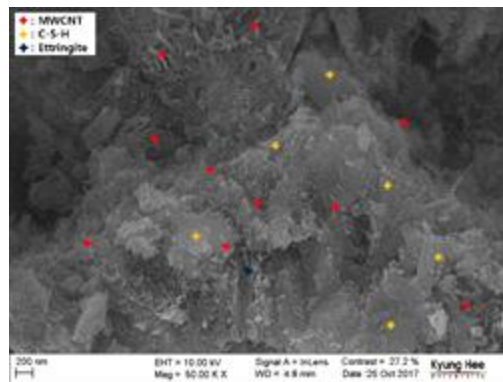


(b) 1.0wt%

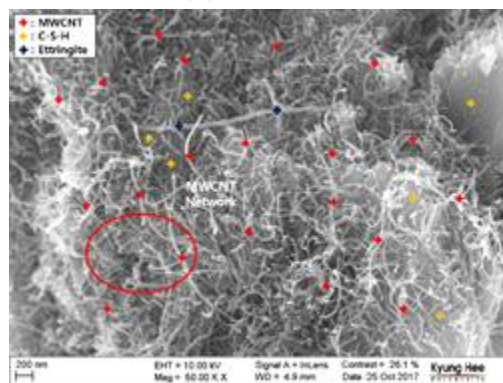
그림 3.1.12 수용액 상태의 MWCNT를 혼합한 나노콘크리트의 SEM 이미지

그림 3.1.13(a)는 MWCNT가 powder type으로 0.1wt% 혼합된 시멘트 모르타르의 FE-SEM이미지이다. 내부에서 MWCNT network형성하지 못하기 때문에 발열성능이 우수하지 못한 것으로 분석된다. Powder type의 MWCNT는 1.0wt%가 혼합되어도 시멘트복합체 내부에서 MWCNT bundle을 형성하기 때문에 전기적 network를 형성하지 못했다(그림 3.1.13(b)).

요약하면, MWCNT 혼합 농도의 관점에서 MWCNT는 1.0wt% 이상이 혼합될 경우 내부에서 MWCNT network 형성이 더 우수하기 때문에 0.1wt% 혼합에 비해 실험체의 발열성능에 더 우수하다. Mixing type은 solution type의 MWCNT는 초음파 분산과 계면활성처리에 의해 Van der waals force를 상쇄시켜 분산성 확보에 유리하고, 결과적으로 MWCNT network형성에 더 유리한 것으로 판단된다. 그러나 Powder type은 시멘트 모르타르 내부에서 CNT 입자 사이의 Van der waals force때문에 MWCNT의 network를 형성이 어렵기 때문에 시멘트 복합체의 발열성능 효과가 우수하지 못한 것으로 판단된다.



(a) 0.1wt%



(b) 1.0wt%

그림 3.1.13 MWCNT Powder를 혼합한 나노콘크리트의 SEM 이미지

(다) 시공 경제성 분석

초기 시공비 비교를 위해 도로 포장방법은 콘크리트 포장에 대해 적용하였다. 나노콘크리트 적용 유무에 따라 초기시공비를 분석하였다. 또한 분석을 위하여 도로 길 어깨 등 부가적인 요소는 배제하고, 포장 층을 구성하게 되는 콘크리트 슬래브 부분에 대하여 공사비를 산출하였다. 시공에 소요되는 노무비 등 기타 요소들은 배제하였다.

초기 시공비 비교를 위한 설계 단면은 그림 과 같으며 콘크리트 포장은 콘크리트 슬래브, 린콘크리트, 동상방지층의 세 개 층으로 구성된다. 초기 시공비 비교를 위하여 한국도로공사 도로설계요령에 따라 다음과 같은 콘크리트 포장 횡단면 구성 예시를 사용하였다. 포장을 위한 배합비는 표 3.1.7과 같다.

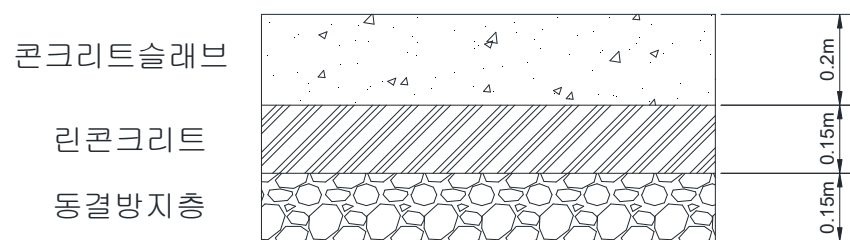


그림 3.1.14 초기 시공비 비교를 위한 콘크리트 포장의 표준단면

표 3.1.7 포장용 콘크리트의 표준 배합비(한국도로공사)

기준강 도 (MPa)	최대골재치 수 (mm)	시멘트 (kg/m ³)	물 (kg/m ³)	세골재 (kg/m ³)	조골재 (kg/m ³)	혼화제 (kg/m ³)	MWCN T (kg/m ³)
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 비교하였으며, 나노콘크리트의 경우 MWCNT 0.1wt%로 시공한 경우를 가정하였다. 시공비 계산을 위한 콘크리트 슬래브 층의 부피는 $0.2 \times 1 \times 1$ m³이다. 사용 재료의 단가는 표 3.1.8와 같다.

초기 시공비 계산 시 제설제의 사용량은 콘크리트 도로 설계 수명인 30년을 기준으로 연 평균 80cm적설량의 제설에 필요한 양으로 산정하였다. 시공비 계산 결과, 일반콘크리트에 염화칼슘을 살포하는 경우 약 2,628,910원, 나노콘크리트의 경우 5,496,150원이 소요되었다. 나노콘크리트 시공비가 일반 콘크리트에 비해 약 2.1배 더 비싼 시공비가 소요되었다.

표 3.1.8 초기 시공비 비교표

제설법	품목	단가 (원/kg)	소요량(kg)	소요금액(원)	계(원)
염화칼슘 제설법	시멘트	125	65.2	8,150	2,628,910
	모래	1,000	138.4	138,400	
	굵은골재	11,000	224.4	2,468,400	
	물	234	29.4	6,880	
	염화칼슘	420	24	10,080	
나노 콘크리트	시멘트	125	65.2	8,150	5,496,150
	모래	1,000	138.4	138,400	
	굵은골재	11,000	224.4	2,468,400	
	MWCNT수용액	98,000	29.4	2,881,200	

나노 콘크리트 시공비에서 50%이상을 차지하는 MWCNT는 최근 가격하락과 적용분야의 확대로 상용화 움직임이 활발하게 나타나고 있다. 실제 산업통상자원부의 발표에 따르면 MWCNT가격은 2005년 사업화 가능 가격이 2억원/톤으로 제시되었으나 2013년을 기준으로 약 0.6억원/톤 수준으로 향후 추가적인 가격 하락이 예상된다.



그림 3.1.15 MWCNT 가격 변동 추이(출처. 산업통상자원부)

2. 초기 발열양생 성능 분석 기술

가. 연구 목적

최근 건설시공사의 기술력이 향상되어 국내 시장뿐만 아니라 해외 시장에서도 시공 능력을 인정받고 있다. 일부 중앙아시아, 중동 산악지역, 러시아 인근지역의 도로공사에서는 극한 환경에서 공사를 진행하고 있다. 극한 환경에서의 콘크리트 양생은 국내 한중콘크리트 양생 방법인 보호막과 내부공간을 가열하는 방법으로는 양생효율이 저하되어 초기 동해의 위험이 높아 일정재령에서의 설계압축강도를 확보하기 어려운 상황이다. 따라서 이러한 문제점을 검토하여 극한환경에서 콘크리트를 양생할 시, 초기 동해를 방지하고 설계압축강도를 확보할 수 있는 새로운 양생방법의 개발이 필요하다. 본 연구를 통해 콘크리트 양생 시 극한환경에서 양생가능 온도를 확보할 수 있는 기초 기술을 개발할 계획이다.

나. 연구 방법

본 연구에서는 소형 항온항습챔버를 활용하여 나노 콘크리트의 초기 발열양생 실험을 진행하였다. 나노 콘크리트의 초기 발열양생 실험체는 MWCNT가 시멘트 중량 대비 1.0wt% 혼입된 발열부 시편을 그림 3.4.1과 같이 설치한 후 발열부 시편 사이에 굳지 않은 상태의 일반 시멘트 모르타르 반죽을 타설하여 제작하였다. 직류 전압공급장치와 정적 데이터로거를 항온항습챔버 외부에 설치하여 50V의 직류전압을 가함과 동시에 나노 콘크리트 실험체의 내부 온도를 측정하였다. 소형 항온항습챔버의 내부온도는 -30°C 로 선정하였고, 발열실험은 총 네 시간동안 진행하였다. 발열 실험 종료 일주일 경과 후 나노 콘크리트의 발열양생을 통한 강도 확보를 분석하기 위해 압축 강도 실험을 진행하였다.

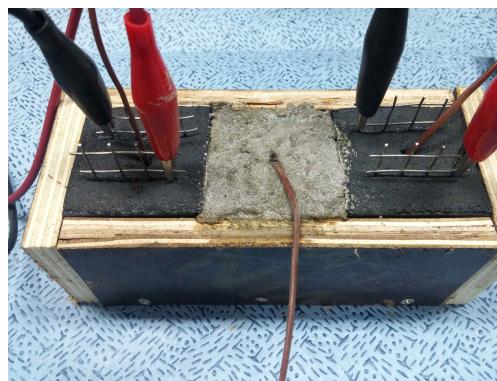
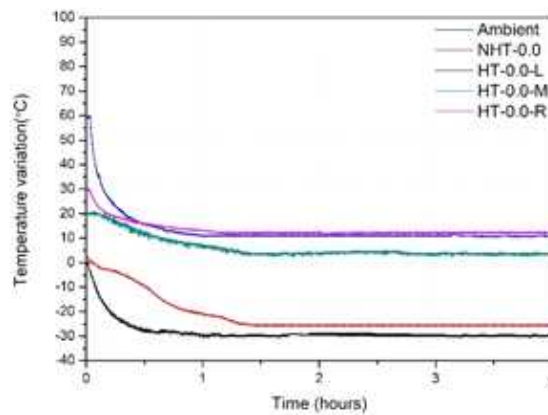


그림 3.4.1 나노 콘크리트 초기 발열성능 실험체

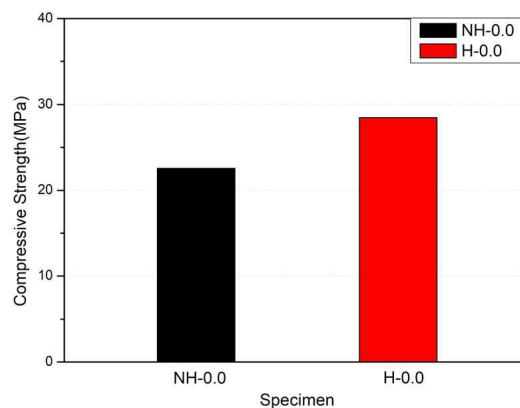
다. 연구 결과

그림 3.4.2(a)는 극한환경(-30°C)에서 나노 콘크리트의 발열양생 실험 결과이다. 실험 결과, 발열양생을 진행하지 않은 일반 모르타르 시편의 내부온도는 -25°C 이었고, 발열양생을 진행한 실험체의 채움 부 내부온도는 3.6°C 이었다. 이는 채움 부 양쪽에 설치된 발열 부 시편의 발열성능이 각각 10.8°C , 12.3°C 로 유지되어 채움 부에 지속적인 열을 가했기 때문으로 분석된다.

그림 3.4.2(b)는 발열양생을 마친 나노 콘크리트 실험체를 발열실험 일주일 경과 후 압축 강도를 측정한 결과이다. 발열 양생을 하지 않은 일반 시멘트 모르타르의 경우 압축 강도는 22.55MPa 이었고, 발열 양생을 실시한 실험체의 경우 28.48MPa 이었다. 발열 양생을 한 실험체의 경우 발열 양생을 하지 않은 실험체 대비 압축 강도가 약 26% 우수하였다. 이는 영하 30°C 의 온도에서 방치된 일반 시멘트 모르타르의 경우 시편 내부에 있는 수분이 얼어 수화반응이 원활하게 이루어지지 않은데 반해, 발열 양생을 실시한 실험체의 경우 한중 콘크리트 타설 온도인 3°C 이상의 온도가 유지되었기 때문에 시편 내부의 수화반응이 원활하게 이루어졌기 때문으로 분석된다.



(a) 발열 실험 결과



(b) 압축강도 실험 결과

3.4.2 극한환경(-30°C)에서 나노 콘크리트 발열 양생 실험 결과

3. 융설 및 융빙 성능 분석 기술

가. -30°C 하에서의 융설 및 융빙 성능 분석

(1) 연구 목적

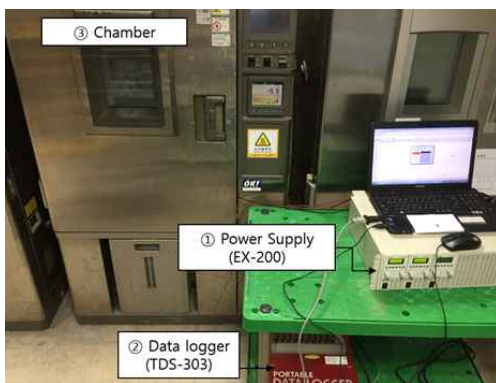
본 연구에서는 나노 콘크리트의 영하환경에서 발열성능을 분석하고, 상온에서의 전극 간격과 전압공급방법을 매개변수로 발열성능실험을 수행하였다. 본 연구의 구체적인 목적은 다음과 같다.

- 극한환경(-30°C)에서의 나노 콘크리트 발열 성능 지속성 확인
- 한중 콘크리트 타설 온도인 3°C 이상의 온도 발열 가능 여부 확인
- 전극 간격이 나노 콘크리트의 발열 성능에 미치는 영향 분석

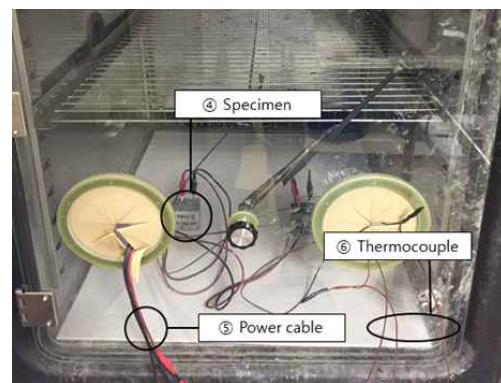
(2) 연구 방법

(가) 영하온도에서의 발열성능 실험

그림 3.3.1은 소형 항온항습챔버를 활용하여 외기온도를 매개변수로 나노 콘크리트의 발열성능실험을 수행하는 과정이다. 직류 전압공급장치와 정적 데이터로거는 항온항습챔버 외부에 설치되어 각각 전선을 통해 나노 콘크리트로 전력을 공급하고 내부온도를 측정한다. 소형 항온항습챔버의 외기온도는 -10°C , -20°C , -30°C 로 설정하였다. 나노 콘크리트는 3,000초 동안 50V의 전압을 공급하여 1초 간격으로 내부온도가 측정되었다.



(a) 소형 항온항습챔버 및 장치 구성



(b) 나노 콘크리트 설치

그림 3.3.1 소형 항온항습챔버 발열성능실험 Setup

표 3.3.1 기초 발열성능실험 매개변수 표

실험체 명	CNT 함량(wt%)	공급전압(V)	전극간격(cm)	외기온도(℃)
Control-10℃	0.0	50	1	-10
MW-0.1-10℃	0.1			
MW-1.0-10℃	1.0			
Control-20℃	0.0			-20
MW-0.1-20℃	0.1			
MW-1.0-20℃	1.0			
Control-30℃	0.0			-30
MW-0.1-30℃	0.1			
MW-1.0-30℃	1.0			

(나) 전극간격 및 전압공급방법에 따른 발열성능 실험

Group #1은 전극간격을 매개변수로 30V의 일정한 전압 공급하여 발열성능실험을 수행하였다. 전극간격은 실험체의 중앙에서 1cm, 3cm 간격으로 설치하였다. Group #2는 전압을 공급하는 방법을 매개변수로 효율적인 전압공급방법을 분석하였다. 그림 3.3.2는 Group #2 실험체의 전압공급방법을 나타낸 것이다. Case1은 15V의 전압을 2개의 전극에 나누어 공급하고, Case2는 30V의 전압을 1개의 전극에 공급한다.

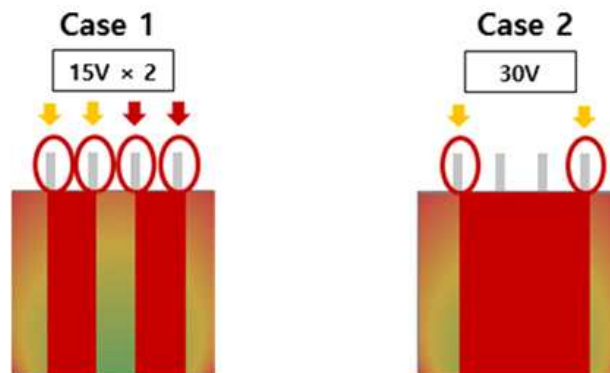


그림 3.3.2 전압공급방법 매개변수 모식도

표 3.3.2 기초 발열성능실험 매개변수 표

그룹	실험체 명	CNT 함량(wt%)	공급전압 (V)	전극간격 (cm)
Group#1	Control-1cm	0.0	30	1
	MW-0.1-1cm	0.1		
	MW-1.0-1cm	1.0		
	Control-3cm	0.0		3
	MW-0.1-3cm	0.1		
	MW-1.0-3cm	1.0		
Group#2	Control-case 1	0.0	2×15	1
	MW-0.1-case 1	0.1		
	MW-1.0-case 1	1.0		
	Control-case 2	0.0	30	3
	MW-0.1-case 2	0.1		
	MW-1.0-case 2	1.0		

(3) 연구 결과

(가) 영하온도에서의 발열성능 실험결과

나노 콘크리트의 발열성능은 외기온도와 반비례하는 것으로 나타났다. 또한 CNT 1.0wt% 시멘트 복합재는 -10℃, -20℃, -30℃의 조건에서 20℃ 이상의 온도를 유지 가능하였다. 일반 시멘트 복합재와 CNT 0.1wt% 시멘트 복합재는 외기온도에 따라 실험체의 온도가 하강하여 발열효과가 없었다.

그림 3.3.3은 -10℃의 외기 온도에서 50V의 전압을 공급하였을 때 나노 콘크리트의 발열성능 실험 결과이다. Control-10℃실험체는 전압 공급시작 1,000초 이 후 온도가 -11.8℃까지 하강하였다. MW-0.1-10℃실험체는 실험체의 온도가 -11.4℃까지 하강하였고, 일반 시멘트 복합재(Control-10℃)에 비해 +0.4℃ 온도가 높았다. Control-10℃와 MW-0.1-10℃는 전기전도성이 개선되지 않아 발열 효과가 없는 것으로 판단된다.

MW-1.0-10℃와 MW-0.1℃는 최대 43.3℃까지 온도가 상승하였고, 외기온도에 비해 53.3℃높았다. CNT 1.0wt% 시멘트 복합재는 -10℃에서 50V전압 공급 시 얼음이 얼기 시작하는 온도인 4℃에 비해 10.8배 온도가 높기 때문에, 융설 효과가 있을 것으로 판단된다.

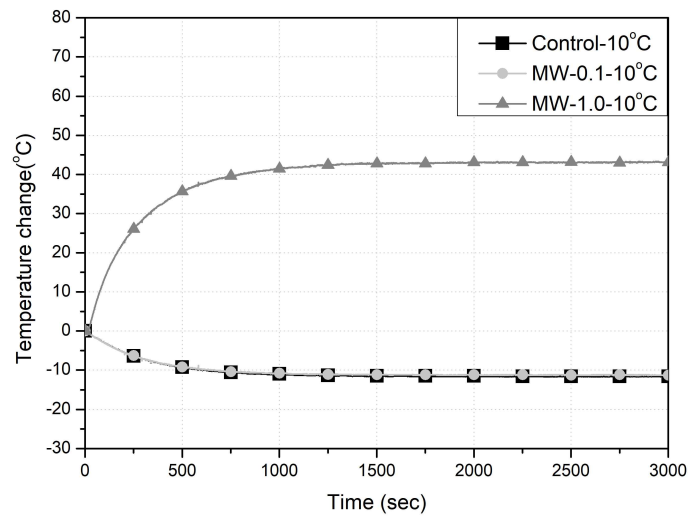


그림 3.3.3 영하 10°C에서 나노 콘크리트의 발열성능

-20°C의 외기 조건에서, 나노 콘크리트의 발열성능 실험결과는 그림 3.3.4이다. 일반 시멘트 복합재(Control-20°C)와 CNT 0.1wt% 시멘트 복합재(MW-0.1-20°C)는 -20°C에서 발열효과가 없는 것으로 분석되었다. Control-20°C는 온도변화량이 -20.4°C였고, MW-0.1-20°C는 -20.2°C이었다. 두 실험체는 발열 효과 없이 -20.0°C의 외기온도와 유사하게 내부 온도가 하강하였다. MW-1.0-20°C는 27.7°C까지 온도가 상승하였고 온도변화량은 외기온도(-20°C)대비 47.7°C 증가하였다.

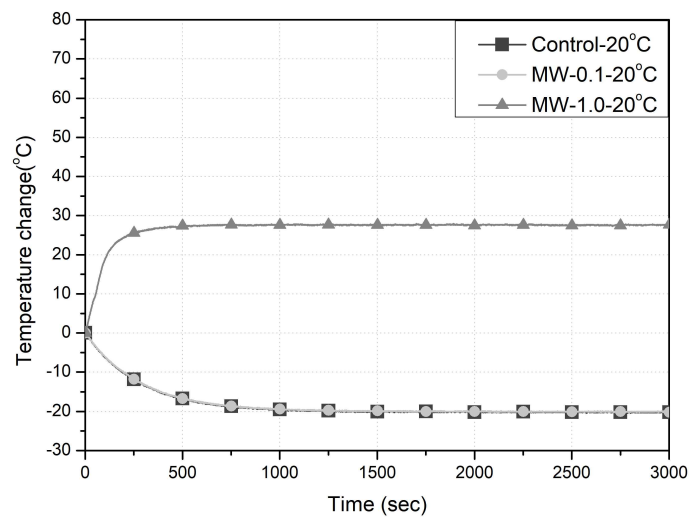


그림 3.3.4 영하 20°C에서 나노 콘크리트의 발열성능

그림 3.3.5에서 CNT 1.0wt% 시멘트 복합재(MW-1.0-30℃)는 -30℃에서 21.7℃까지 상승하여 발열효과가 가장 우수하였다. CNT 0.1wt% 시멘트 복합재(MW-0.1-30℃)는 중심 온도가 -29.9℃까지 하강하였고, 일반 시멘트 복합재(Control-30℃)는 -29.9℃까지 하강하였다. 두 실험체의 온도는 상승하지 못하고 외기온도에 따라 온도가 약 -30℃까지 하강하였다. CNT 1.0wt% 시멘트 복합재는 외기온도(-30℃) 대비 +51.7℃ 상승하였다. 외기온도 대비 온도 변화량은 -10℃일 때 53.3℃가 상승하였고, -20℃일 때 +47.7℃상승하여 $50.5 \pm 2.8^{\circ}\text{C}$ 범위에 있는 것으로 분석되었다. CNT 1.0wt% 시멘트 복합재의 발열온도와 외기온도의 차이가 일정한 이유는 밀폐된 항온, 항습 챔버 내에서 외기온도에 의한 열 에너지와 발열효과에 의한 열 에너지의 합이 일정하게 유지되기 때문으로 분석된다.

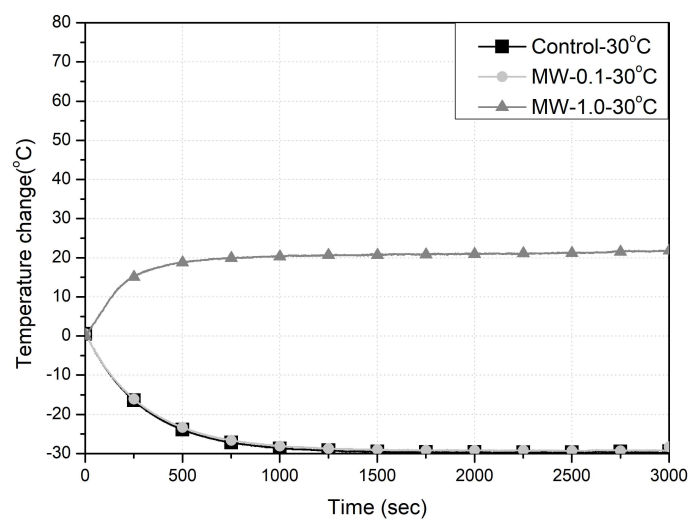


그림 3.3.5 영하 30℃에서 나노 콘크리트의 발열성능

(나) 전극간격 및 전압공급방법에 따른 발열성능 실험 결과

그림 3.3.6은 나노 콘크리트의 전극간격이 1cm, 3cm일 때 30V 전압을 공급한 경우의 최대 온도변화량 그래프이다. 일반 시멘트 복합재는 전극간격이 1cm일 때 (Control-1cm) 약 1.2℃ 상승하였고, 3cm일 때 (Control-3cm) 1.0℃ 상승하였다.

MW-0.1-1cm는 1.7℃, MW-0.1-3cm는 1.3℃가 상승하여 일반 시멘트 복합재에 비해 모두 온도변화량이 많았지만, 전극간격에 따라 발열성능 차이가 뚜렷하지 않았다. CNT 1.0wt% 시멘트 복합재는 전극간격에 의한 발열성능 차이가 뚜렷하였다. 온도변화는 전극간격이 1cm일 때 (MW-1.0-1cm) 46.4℃이고, 3cm일 때 (MW-1.0-3cm) 18.0℃이었다.

실험결과, 최대 온도변화량은 전극간격이 가까울수록 비례하여 증가하는 것으로 분석되었다. 전극간격은 전기저항과 비례하기 때문에 나노 콘크리트의 발열성능이 감소하는 것으로 판단된다.

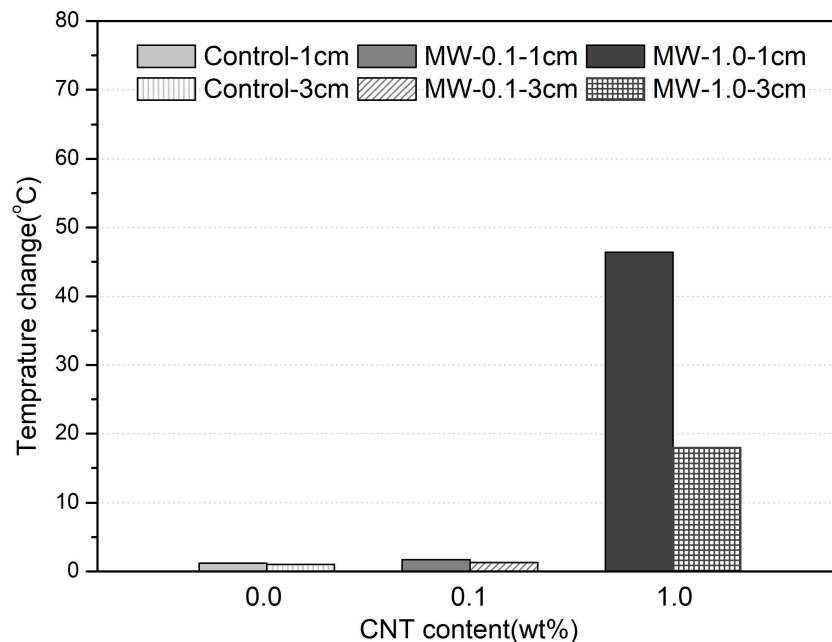
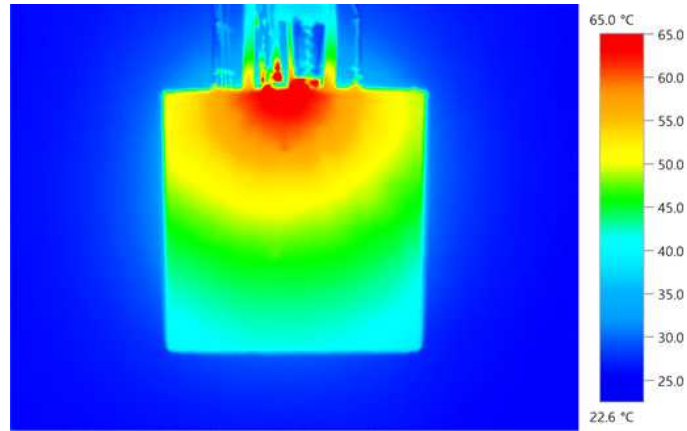
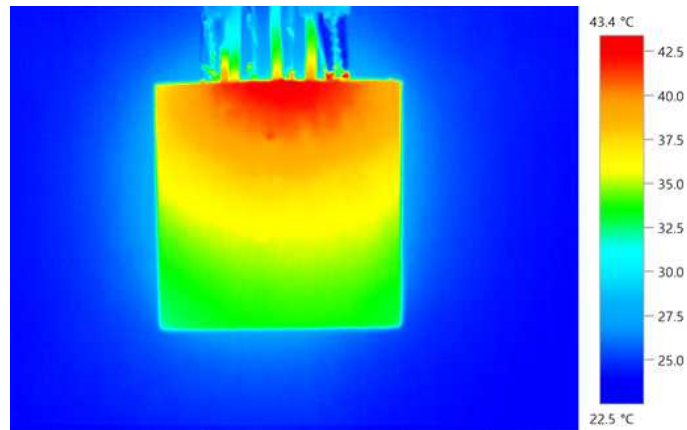


그림 3.3.6 나노 콘크리트의 전극간격 별 온도변화량

그림 3.3.7은 전극간격이 1cm, 3cm인 시멘트 복합재의 열화상이미지이다. 분석결과, 전극간격은 좁을수록 실험체의 표면 온도가 더 높은 것으로 분석되었다. 표면온도는 전극간격이 1cm, 3cm인 두 경우 모두 전극사이에서 각각 65.0℃, 43.4℃로 가장 높은 것으로 측정되었다. MW-1.0-1cm는 고온의 분포범위가 전극사이 1cm구간을 중심으로 분포하였다. MW-1.0-3cm는 전극사이의 3cm구간에서 고온의 분포를 확인할 수 있었다. 고온의 분포는 전극간격이 1cm인 시멘트 복합재(MW-1.0-1cm)가 3cm인 시멘트 복합재(MW-1.0-3cm)보다 더 좁게 분포하였지만 온도는 1.5배 높았다. 나노 콘크리트는 전극사이에서부터 발열이 시작되어 복합재 전체로 온도가 전도되기 때문에 전극간격이 좁을수록 온도가 더 높은 것으로 판단된다.



(a) MW-1.0-1cm



(b) MW-1.0-3cm

그림 3.3.7 MW-1.0 실험체의 전극간격 별 열화상 이미지

그림 3.3.8은 15V 전압을 1cm간격의 2개 전극에서 공급한 경우(Case1)와 30V의 전압을 3cm의 전극간격에 공급한 경우(Case2)의 최대 온도변화량 그래프이다. 일반 시멘트 복합재는 전압공급 방법이 Case1일 때(Control-Case1) 약 1.9℃ 상승하였고, Case2일 때(Control-Case2) 1.8℃ 상승하였다. MW-0.1-Case1은 2.6℃, MW-0.1-Case2는 2.4℃ 상승하였다. CNT가 0.1wt% 시멘트 복합재는 일반 시멘트 복합재에 비해 발열성능이 소폭개선된 것으로 나타났으나, 전압공급방법의 차이에 의한 뚜렷한 발열성능 차이를 판단하기는 어려움이 있다.

CNT 1.0wt% 시멘트 복합재는 총 30V의 전압을 15V씩 1cm 전극 2곳에 나누어 공급한 경우(Case1), 최대 28.6℃가 상승하였다. 30V의 전압을 3cm의 전극에 공급한 경우(Case2)는 18.0℃ 상승하였다. MW-1.0-Case1은 MW-1.0-Case2와 비교하였을 때 1.6배 발열성능이 우수하였다.

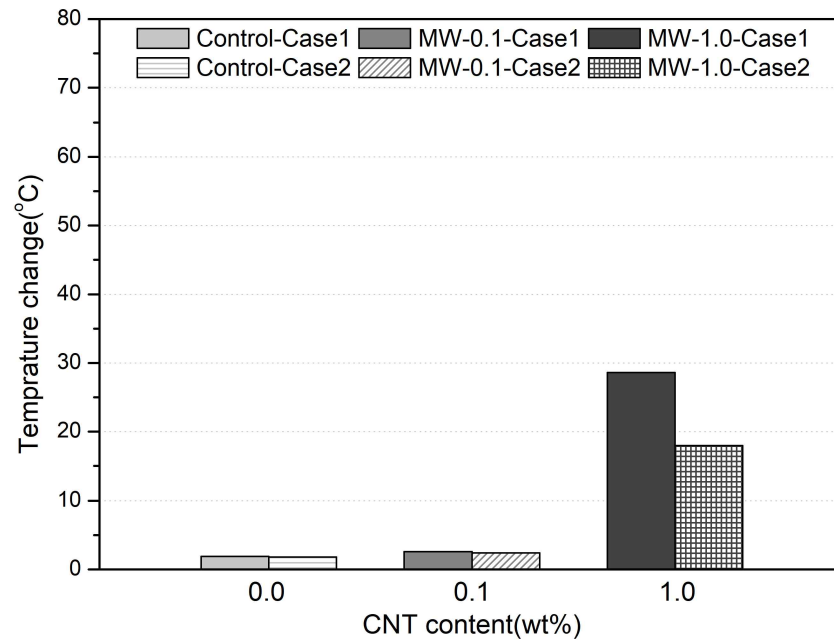
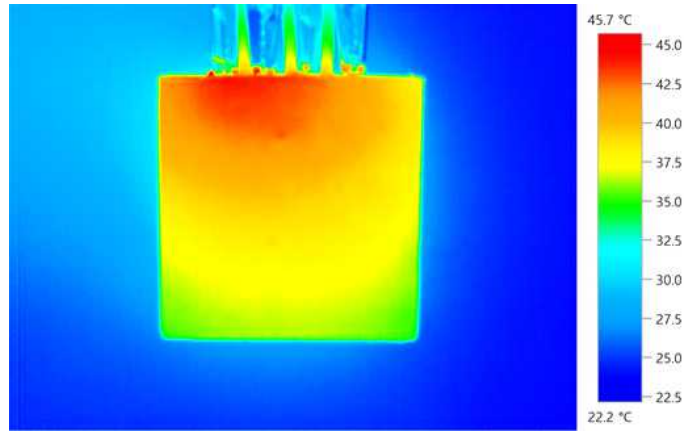


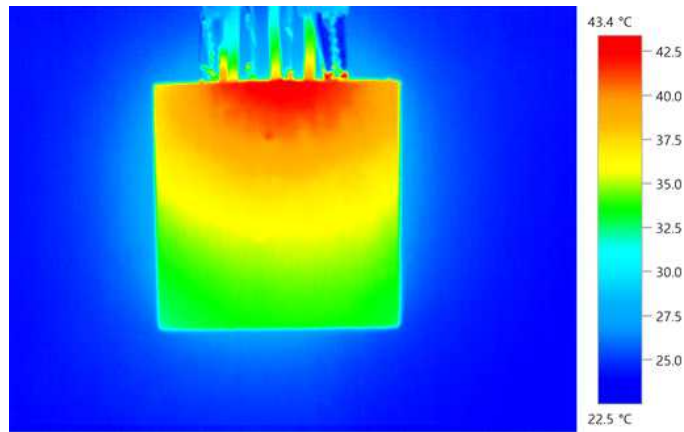
그림 3.3.8 나노 콘크리트의 전압 공급방법 별 온도변화량

그림 3.3.9는 전압공급방법 별 시멘트 복합재의 열화상이미지이다. 그림 3.12(a)는 1cm간격의 2개 전극에 15V전압을 공급한 경우이다(Case1). 그림 3.12(b)는 3cm간격의 1개의 전극에 30V의 전압을 공급한 경우이다(Case2). 최대온도는 45.7℃로 최대온도가 43.4℃인 Case2에 비해 2.4℃높았다.

Case1은 2곳의 전극에서 발생된 열에 의해 실험체가 고르게 가열되었고, Case2는 Case1에 비해 실험체의 온도분포차이가 더 큰 것으로 나타났다. 전압 공급방법은 실험체 전체의 고른 온도분포를 위해 전압을 나누어 공급하는 것이 더 효율적인 것으로 판단된다.



(a) Case1 (30V의 전압을 15V씩 2곳의 전극에 나누어 공급)



(b) Case2 (30V의 전압을 1곳의 전극에 공급)

그림 3.3.9 MW-1.0 실험체의 전압공급방법 별 열화상 이미지

나. 용설 및 용빙 기능의 크기효과 분석

(1) 연구 목적

본 연구는 실험체의 크기에 따른 나노 콘크리트의 발열성능을 분석한다. 일정한 단면에서 나노 콘크리트의 길이를 매개변수로 선정하여 발열성능실험과 열화상이미지 분석을 수행한다.

(2) 연구 방법

표 3.3.3는 크기효과에 의한 발열성능실험 매개변수표이다. 본 발열성능실험의 매개변수는 실험체의 크기이다. 실험체의 크기는 $40 \times 40 \text{mm}^2$ 단면에 길이가 각각 80, 120, 160, 200mm이다. MWCNT는 시멘트 무게 대비 0.1wt%를 혼합하였고, 100V의 전압을 공급하였다.

표 3.3.3 나노 콘크리트 실험체의 크기에 따른 발열성능 실험 매개변수

실험체 명	실험체 크기(mm^3)	MWCNT농도(wt%)
MW-0.1-80	$40 \times 40 \times 80$	0.1
MW-0.1-120	$40 \times 40 \times 120$	
MW-0.1-160	$40 \times 40 \times 160$	
MW-0.1-200	$40 \times 40 \times 200$	

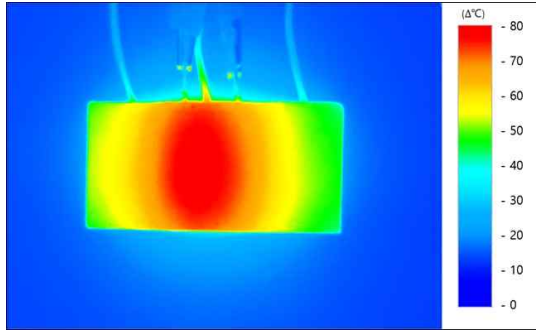
(3) 연구 결과

실험결과, 나노 콘크리트의 발열성능은 실험체의 크기와 반비례하는 것으로 나타났다. 실험체의 온도는 실험체의 크기가 $40 \times 40 \times 80 \text{mm}^3$ 인 경우 79.2°C 가 상승하여 발열성능이 가장 우수하였다. 최대 온도변화량은 동일 단면에서 길이가 120, 160, 200mm인 경우 각각 77.2°C , 71.0°C , 68.3°C 로 실험체의 길이가 증가할수록 감소하였다.

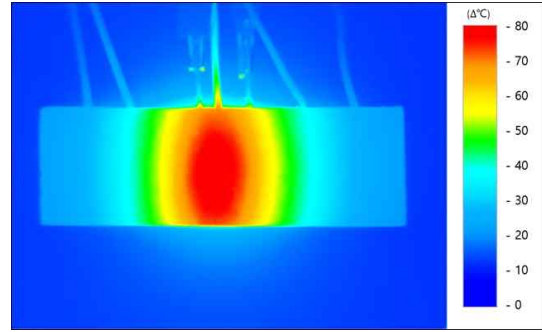
표 3.3.4 나노 콘크리트 실험체의 크기에 따른 발열성능 실험결과

실험체 명	실험체 크기(mm^3)	최대 온도변화량($^\circ\text{C}$)
MW-0.1-80	$40 \times 40 \times 80$	79.2
MW-0.1-120	$40 \times 40 \times 120$	77.2
MW-0.1-160	$40 \times 40 \times 160$	71.0
MW-0.1-200	$40 \times 40 \times 200$	68.3

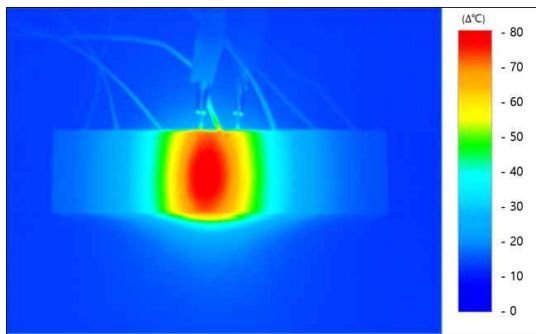
발열성능과 실험체의 크기가 반비례하는 원인은 실험체의 크기가 증가할수록 열이 전도되는 구간이 증가하기 때문으로 분석되었다. 표면온도의 전도는 나노 콘크리트의 열화상이미지를 통해 분석하였다. 그림 3.3.10은 나노 콘크리트의 실험체 크기별 열화상 이미지이다. 온도분포는 전극사이를 중심으로 실험체 전체로 분포하는 것을 확인할 수 있다. 실험체의 크기가 커질수록 전도에 의해 더 많은 열이 손실되고, 중심부의 고온 분포 범위 또한 감소하는 것을 확인하였다. 실험체의 크기는 작을수록 나노 콘크리트의 발열성능 개선에 유리한 것으로 판단된다.



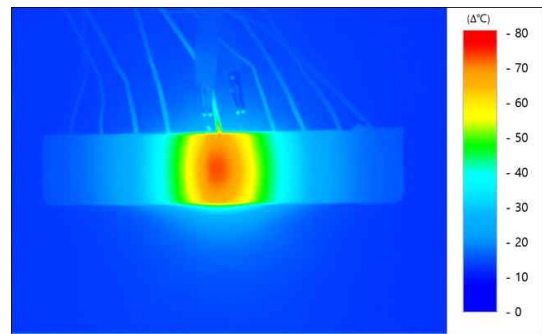
(a) MW-0.1-80



(b) MW-0.1-120



(c) MW-0.1-160



(d) MW-0.1-200

그림 3.3.10 나노 콘크리트의 크기 별 열화상 이미지

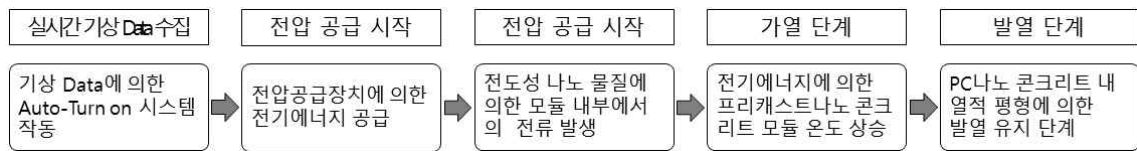


그림 3.3.12 PC나노 콘크리트 발열모듈의 작동원리

(2) PC나노 콘크리트의 구성

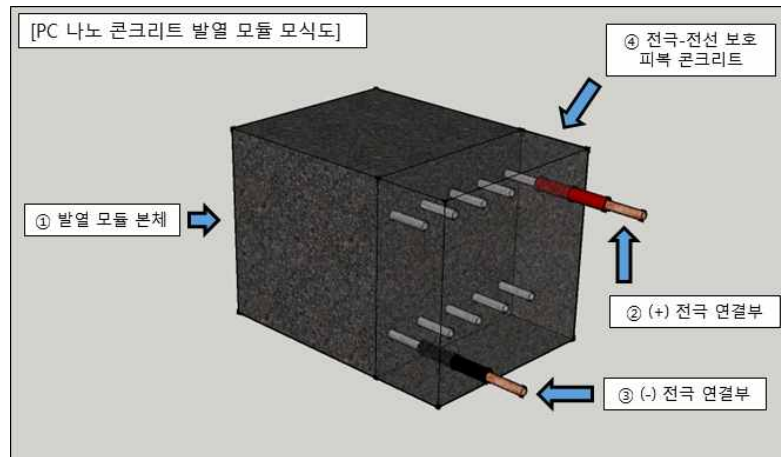


그림 3.3.13 PC나노 콘크리트 발열 모듈의 구성

① : 발열 모듈 본체는 전극이 삽입되어 발열체 역할을 한다. 이때 전극은 전기전도성이 우수한 철, 구리, 금 등의 금속계열 소재가 가능하고, 탄소봉, 필름등의 전도성 물질도 가능하다. 본 발명의 대표 전극은 스테인리스 소재의 스틸매쉬이다.

②, ③ : (+), (-) 전극 연결부는 전압공급을 위해 전선과 전극을 연결, 전압을 공급하는 경로 역할을 한다.

④ : 전극-전선 보호 피복 콘크리트의 경우 전기가 통하지 않는 일반 콘크리트 재료로 제작되며 ②,③의 전극 연결부를 보호한다.

(3) PC나노 콘크리트의 배합비

PC나노 콘크리트는 시멘트 계열 복합재료로써 전기전도성을 지닌 탄소계열 나노재료, 시멘트, 골재로 구성된다. PC나노 콘크리트 제작을 위한 대표적인 배합비의 예시는 표 1과 같다. 이때 나노재료의 혼합 농도는 대상 구조물의 크기에 따른 목표 발열성능에 따라 조정 가능하다. 세부적인 배합비의 경우 적용 대상 구조물의 설계 강도에 따라 골재의 직경 및 굵은 골재의 추가, 혼화재의 첨가 등 배합비 변경이 가능하다.

나노소재의 혼입량은 콘크리트의 주재료인 시멘트 무게대비 1.0wt%이상이다. 예를 들어 물/시멘트비가 0.5일때, 모듈 전체 중량 대비 모래는 62.5% 시멘트는 25% 물은 12.5% (수용액 형태의 나노소재)가 사용된다. 실리카 흙 등의 혼화재를 시멘트 무게대비 10% 이내로 치환하여 사용가능하다. 하지만 PC 나노 콘크리트의 배합비와 골재는 용도에 따라 변경이 가능하고 설계강도 이상을 확보하기 위해 각종 시방서와 설계기준을 준수해야한다.

표 3.3.5 PC나노 콘크리트 발열 모듈의 배합비 예시

재료의 종류	시멘트 무게대비 나노재료의 비율(wt%)	물	시멘트	세골재
혼합 비	1.0	0.5	1	2.5

PC나노 콘크리트의 배합과정은 다음과 같다.

① 시멘트, 세골재와의 건비빔을 실시한다. 건비빔을 실시하지 않고, 시멘트와 물을 바로 배합하게 되면 시멘트와 수분이 반응하여 뭉침현상을 유발할 수 있다. 재료의 균질성 확보를 위해 시멘트와 세골재를 먼저 2~3분간 건비빔한다.

② 건비빔한 재료에 목표 농도의 CNT를 첨가한다. 이때 CNT는 분산성 확보를 위해 초음파처리와 계면활성처리를 거친 수용액의 형태로 혼합된다. CNT는 수용액 형태 외에도 세골재에 사전 코팅, CNT입자의 직접 혼합 등 분산성확보를 위한 전 처리과정을 거쳐 혼합될 수 있다. CNT수용액은 건비빔한 재료와 약 2~3분간 배합한다.

(4) PC 나노 콘크리트 발열 모듈의 전압공급방법

PC나노 콘크리트의 전압공급시스템에 사용되는 전압 공급 방법은 대상 구조물의 조건 및 전기 수급 거리 등 환경에 따라 다양한 방법이 적용 가능하다. 대표적인 전기에너지 공급 방법은 다음과 같다

① DC 파워 서플라이에 의한 전기에너지 공급

: 가장 일반적인 전압 공급 방법으로 전압을 목표치에 맞게 조정하여 PC 나노 콘크리트 발열 모듈에 공급하게 된다.

② 친환경 발전(태양열, 풍력, 압전 등)시 에너지 저장장치(Energy Storage System, ESS)에 의한 전기 에너지 공급

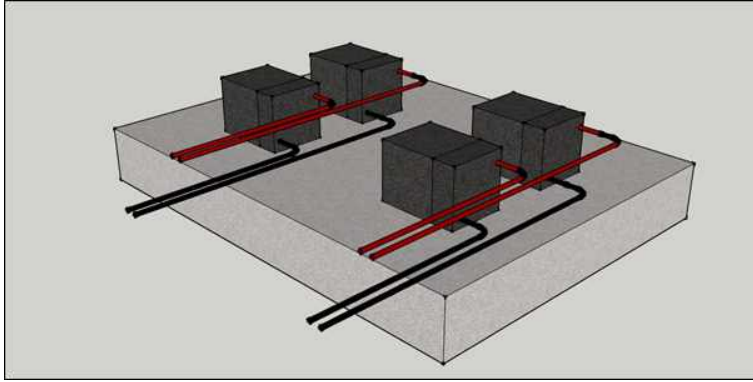
: 태양열, 풍력, 압전등의 친환경 에너지를 이용하는 구간의 경우 전기에너지를 에너지 저장장치에 비축해두었다가 필요 시 전압공급에 활용한다. 전기의 수급이 쉽지 않은 도서 지역이나 비상 상황 발생 시 저장된 전기에너지의 활용이 가능하다.

에너지 저장장치의 경우 대용량 배터리와 유사한 개념으로 주로 리튬-이온 배터리가 주로 사용된다. 그 외 니켈 수소전지와 차세대 배터리인 리튬-폴리머 배터리 등이 적용가능하다.

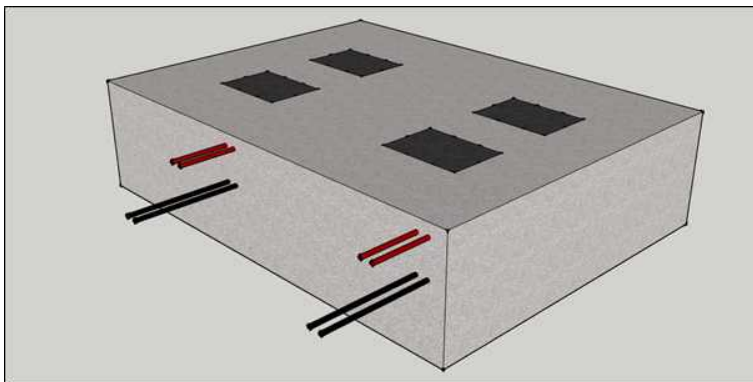
③ AC-DC인버터를 이용한 전기에너지 공급

: 전기에너지 공급망이 잘 정비되어있는 도심지 등에서는 전기에너지 이동시 전력 손실이 적은 직류전압을 전송하여 변전소를 통해 교류 전류로 바꾸어 주게 된다. 변전소를 거친 교류전류를 활용하는 경우 감전의 위험이 크기 때문에 인버터를 통해 직류 전압으로 바꾸어 주어야한다.

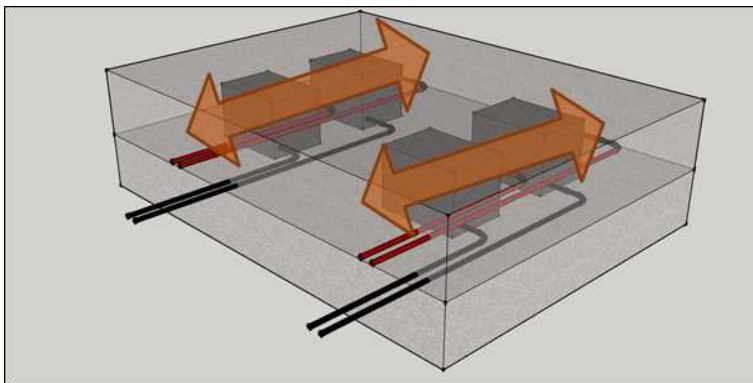
(5) PC나노 콘크리트 현장 시공 과정



(가) 바닥 콘크리트 위 PC나노 콘크리트 발열 모듈을 설치한다. 이때, 설치 위치는 경제성과 발열효율을 고려하여 배치한다.



(나) PC나노 콘크리트 발열 모듈 고정하기 위해 채움 콘크리트를 타설한다.



(다) 노면 콘크리트는 PC나노 콘크리트 발열 모듈에 가해지는 각종 하중 및 마모에 의한 손상을 방지한다.

4. 유사환경 기초 실험기술

가. 유사환경 모사 발열성능 시편 실험

(1) 연구 목적

본 연구에서는 기후환경실험실에서 나노 콘크리트의 극한환경 실증실험을 진행하기 이전에, 소형 항온항습챔버를 통해 극한환경을 모사하여 나노 콘크리트의 발열성능 실험을 진행하였다. 시편의 크기는 $5 \times 5 \times 5 \text{cm}^3$ 로 제작하여 극한환경에서 나노 콘크리트의 발열 성능과 굳지 않은 콘크리트의 발열 양생 가능성을 분석하였다.

(2) 연구 방법

본 연구에서는 외기온도를 매개변수로 하여 소형 항온항습챔버에서 나노 콘크리트의 발열성능실험을 수행하였다. 외기온도는 -10°C , -20°C , -30°C 로 선정하였다. CNT는 시멘트 무게 대비 0.1wt%, 1.0wt% 비율로 혼합하였다. 공급전압은 50V의 전압을 공급하고, 시간에 따른 온도변화량을 그래프로 분석하였다.

(3) 연구 결과

그림 3.4.1은 -10°C 의 외기온도에서 50V의 전압을 공급하였을 때 나노 콘크리트의 발열성능실험 결과이다. Control- -10°C 실험체는 전압 공급시작 1,000초 이후 온도가 -11.8°C 까지 하강하였다. MW-0.1- -10°C 실험체는 실험체의 온도가 -11.4°C 까지 하강하였고, 일반 시멘트 복합재(Control- -10°C)에 비해 $+0.4^\circ\text{C}$ 온도가 높았다. Control- -10°C 와 MW-0.1- -10°C 는 전기전도성이 개선되지 않아 발열 효과가 없는 것으로 판단된다.

MW-1.0- -10°C 는 최대 43.3°C 까지 온도가 상승하였고, 외기온도에 비해 53.3°C 높았다. CNT 1.0wt% 시멘트 복합재는 -10°C 에서 50V전압 공급 시 얼음이 얼기 시작하는 온도인 4°C 에 비해 10.8배 온도가 높기 때문에, 융설 효과가 있을 것으로 판단된다.

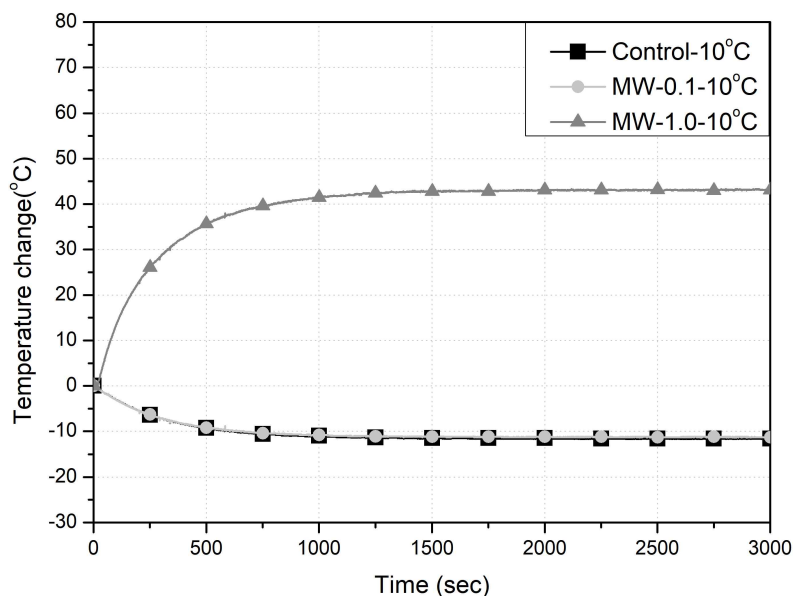


그림 3.4.1 -10°C 에서 나노 콘크리트의 시간-온도 그래프

-20℃의 외기 조건에서, 나노 콘크리트의 발열성능 실험결과는 그림 3.4.2이다. 일반 시멘트 복합재(Control-20℃)와 CNT 0.1wt% 시멘트 복합재(MW-0.1-20℃)는 -20℃에서 발열효과가 없는 것으로 분석되었다. Control-20℃는 온도변화량이 -20.4℃이었고, MW-0.1-20℃는 -20.2℃이었다. 두 실험체는 발열 효과 없이 -20.0℃의 외기온도와 유사하게 내부 온도가 하강하였다. MW-1.0-20℃는 27.7℃까지 온도가 상승하였고 외기온도(-20℃)대비 47.7℃. 온도변화량은 Control에 비해 48.1℃가 많았다.

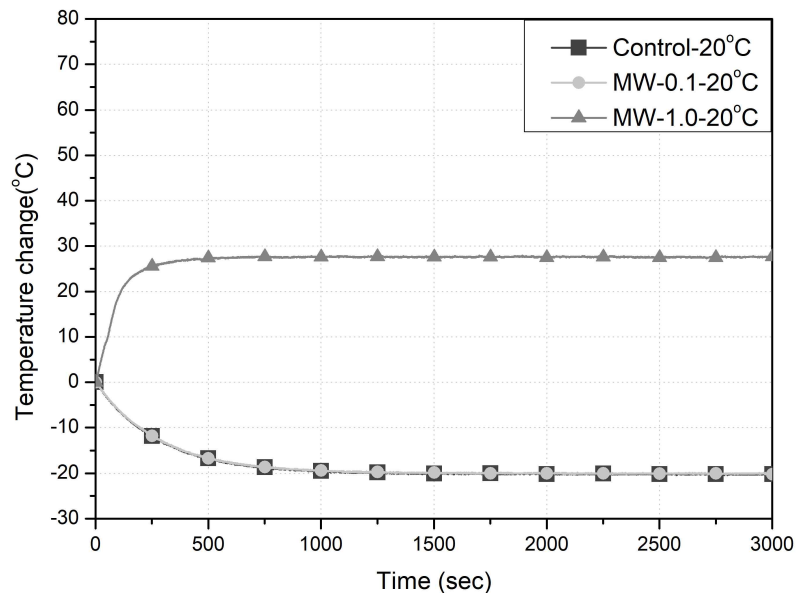


그림 3.4.2 -20℃에서 나노 콘크리트의 시간-온도 그래프

그림 3.4.3에서 CNT 1.0wt% 시멘트 복합재(MW-1.0-30℃)는 -30℃에서 21.7℃가 상승하여 발열효과가 가장 우수하였다. CNT 0.1wt% 시멘트 복합재(MW-0.1-30℃)는 중심 온도가 -29.4℃까지 하강하였고, 일반 시멘트 복합재(Control-30℃)는 -29.9℃까지 하강하였다. 두 실험체의 온도는 상승하지 못하고 외기온도에 따라 온도가 약 -30℃까지 하강하였다. CNT 1.0wt% 시멘트 복합재는 외기온도(-30℃) 대비 +51.7℃ 상승하였다. 외기온도 대비 온도 변화량은 -10℃일 때 53.3℃가 상승하였고, -20℃일 때 +47.7℃상승하여 50.5±2.8℃ 범위에 있는 것으로 분석되었다. CNT 1.0wt% 시멘트 복합재의 발열온도와 외기온도의 차이가 일정한 이유는 밀폐된 항온·항습 챔버 내에서 외기온도에 의한 (-)열 에너지와 발열효과에 의한 (+)열 에너지의 합이 일정하게 유지되기 때문으로 분석된다.

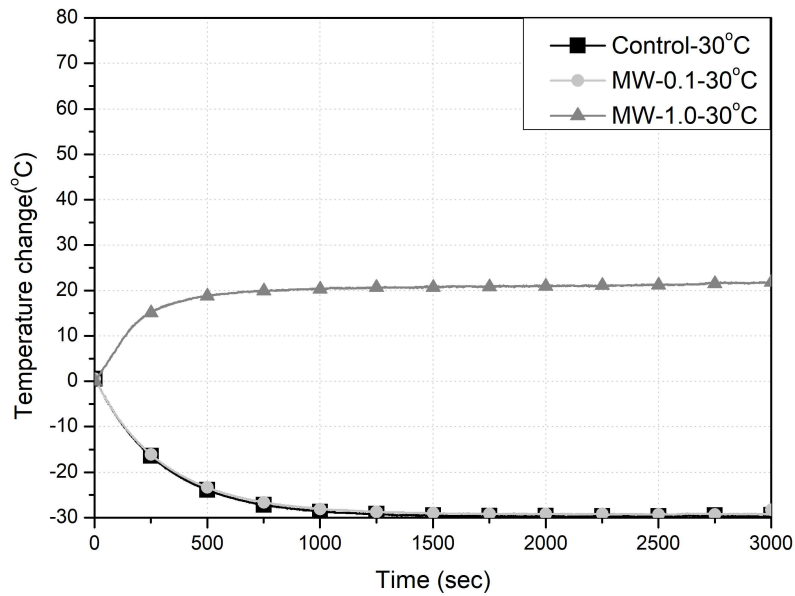


그림 3.4.3 -30°C에서 나노 콘크리트의 시간-온도 그래프

나. 발열 온도구배 조절을 위한 공급전압 별 발열성능 및 전기적 분석

(1) 연구 목적

본 연구에서는 나노 콘크리트 발열 실험 시, 발열 초기 온도구배를 조절하기 위해 나노 콘크리트 시편의 소비전력을 분석하였다.

(2) 연구 방법

본 연구는 CNT 농도와 공급전압을 매개변수로 발열성능실험을 수행하였다. CNT 농도는 시멘트 무게 대비 상대적으로 저농도인 0.1wt%, 고농도인 1.0wt%를 혼합하였다. 공급전압은 10V, 20V, 30V, 40V, 50V의 직류 전압을 공급하였다.

나노 콘크리트의 소비 전력은 다음과 같은 3가지 공식을 바탕으로 분석하였다. 식 4-1은 소비전력을 계산하는 공식으로, 소비전력은 공급전압(V)과 전류(I) 곱으로 계산할 수 있다. 또한 1시간(3,600초) 동안 소비된 전력은 1Wh로 정의가 되고(식 4-2), 소비전력에 3,600을 나누어주면 1시간당 소비전력을 계산할 수 있다(식 4-3).

$$P = VI \quad (W) \quad (4-1)$$

$$3,600 W = 1 Wh \quad (4-2)$$

$$x = \frac{VI}{3,600} \quad (Wh) \quad (4-3)$$

(3) 연구 결과

그림 3.4.4는 일반 시멘트 복합재(Control)의 공급전압별 최대 온도변화량 그래프이다. 실험체의 온도는 10V, 20V, 30V, 40V, 50V 전압 공급 시 각각 1.0℃, 1.1℃, 1.2℃, 1.5℃, 1.9℃가 상승하였다. 가장 높은 전압인 50V를 공급한 경우는 가장 낮은 전압인 10V를 공급한 경우에 비해 약 1.9배 온도변화량이 많았다. 일반 시멘트 복합재의 최대 온도변화량은 전압이 증가함에 따라 비례하여 증가하였으나, 매개변수 별 차이가 0.1~0.4℃로 증가폭이 크지 않았다. 일반 시멘트 복합재는 부도체이기 때문에 전류가 흐르지 않는다. 하지만 실험체 내부에 미소하게 존재하는 수분에 의해 온도가 소폭 상승한 것으로 판단된다.

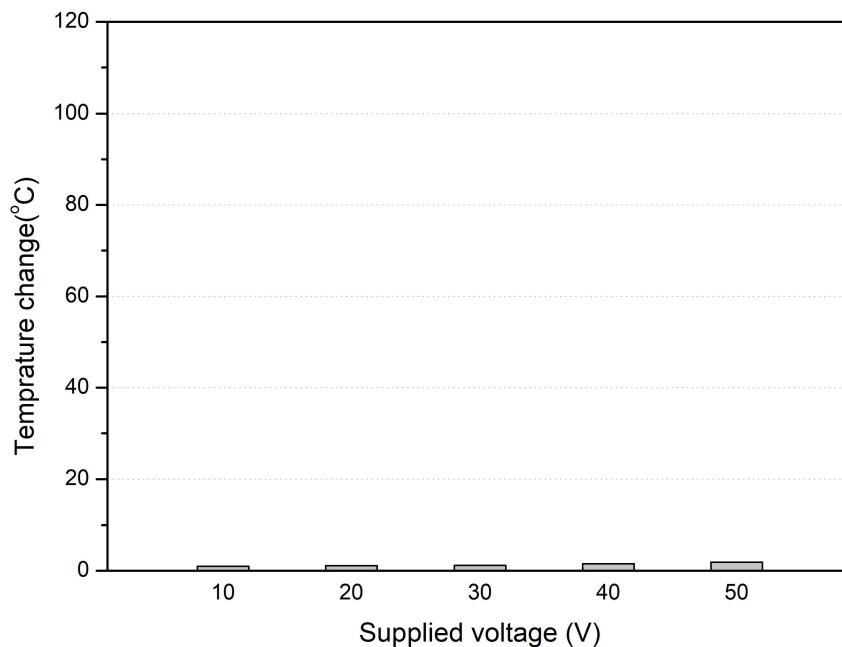


그림 3.4.4 Control 실험체의 공급전압 별 온도변화량

그림 3.4.5는 CNT가 0.1wt% 혼합된 시멘트 복합재의 공급전압에 따른 최대 온도변화량이다. 온도변화량은 매개변수 내 가장 높은 전압인 50V를 공급한 경우 2.1℃ 이었다. 가장 낮은 전압인 10V인 경우는 1.0℃가 상승하였고, 20V일 때 1.2℃, 30V일 때 1.7℃, 40V일 때 2.0℃가 상승하였다. CNT 0.1wt% 시멘트 복합재는 Control 실험체와 비교하여 동일 전압을 공급하였을 때 모든 경우에서 최대온도변화량이 같거나 최대 약 1.4배 많았다. CNT는 0.1wt% 혼합한 경우 시멘트 복합재의 발열성능 개선효과가 뚜렷하지 않은 것으로 판단된다.

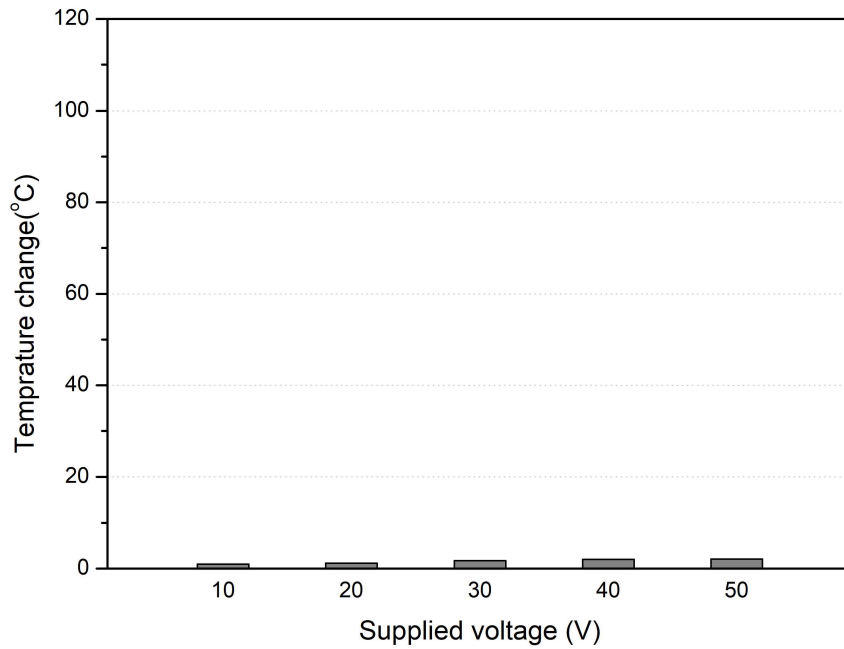
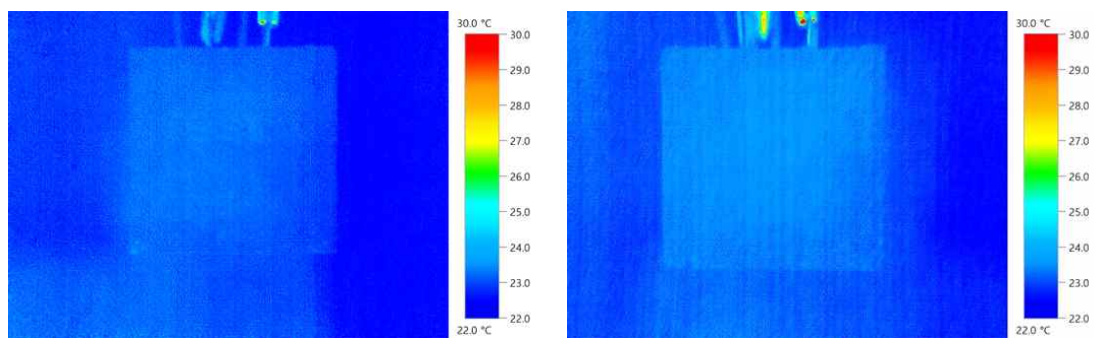


그림 3.4.5 MW-0.1 실험체의 공급전압 별 온도변화량

그림 3.4.6(a)는 Control-50V의 열화상 이미지이고, 그림 3.4.6(b)는 MW-0.1-50V의 열화상 이미지이다. 열화상 이미지는 실험체의 온도가 최대인 시점에 촬영되었다. 표면온도는 외기온도에 비해 상대적으로 고온으로 보이지만, 그 효과가 아주 미비하였다. 일반 시멘트 복합재와 CNT 0.1wt%시멘트 복합재는 매개변수 내에서 가장 높은 전압인 50V를 공급한 경우에도 발열효과를 육안으로는 확인할 수 없었다.



(a) Control-50V

(b) MW-0.1-50V

그림 3.4.6 Control / MW-0.1 실험체의 열화상 이미지

그림 3.4.7은 CNT 1.0wt% 시멘트 복합재의 최대온도변화량 그래프이다. 최대 온도 변화량은 매개변수 내 가장 낮은 전압인 10V를 공급한 경우 6.2°C이었고, 일반시멘트 복합재와 CNT 0.1wt% 시멘트 복합재의 최대 온도변화량보다 많았다. 온도는 20V의 전압을 공급한 경우(MW-1.0-20V) 24.2°C가 상승하였다. 30V전압을 공급한 경우는 온도변

화량이 46.4℃, 40V인 경우는 67.7℃ 이었다. 가장 높은 전압인 50V를 공급한 경우, CNT 1.0wt% 시멘트 복합재(MW-1.0-50V)의 온도는 107.9℃가 상승하였다. Control 실험체(Control-50V)가 1.9℃상승한 것과 비교하여 56.7배 온도변화량이 많았다. CNT는 1.0wt%가 시멘트 복합재에 혼합된 경우 발열성능 개선효과가 우수한 것으로 판단된다.

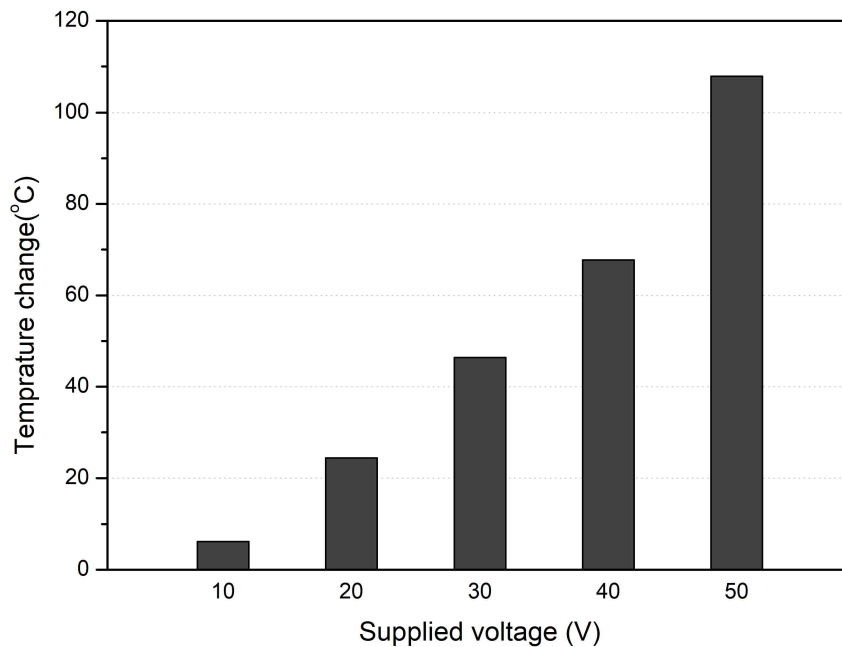
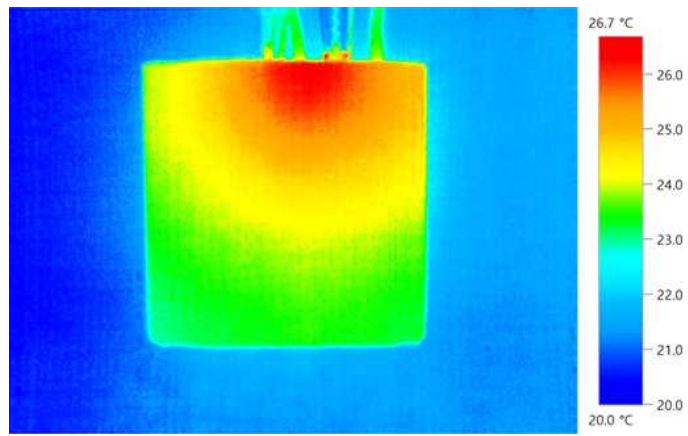
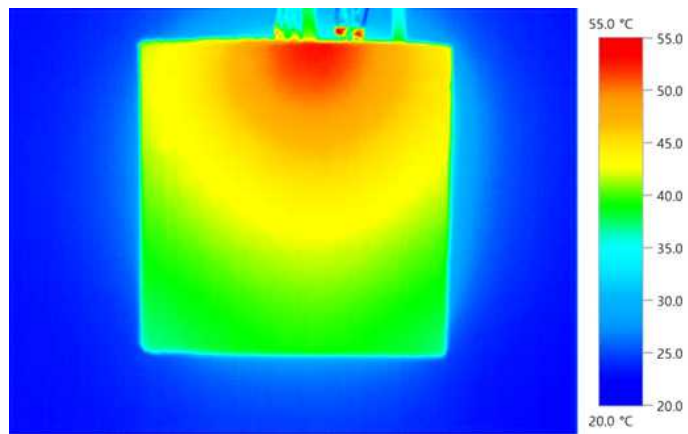


그림 3.4.7 MW-1.0 실험체의 공급전압 별 온도변화량

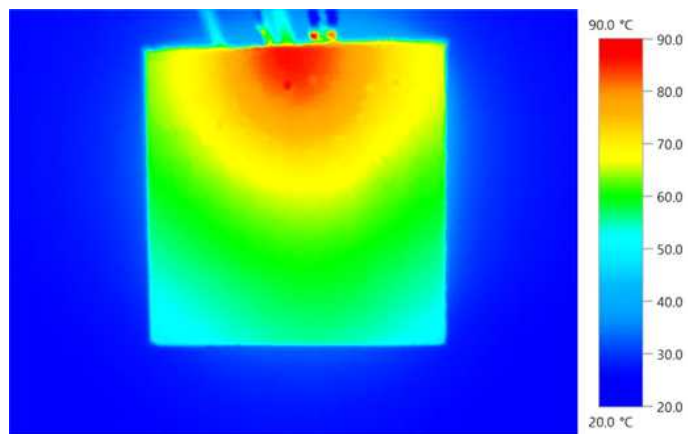
그림 3.4.8은 CNT 1.0wt% 시멘트 복합재의 열화상 이미지이다. MW-1.0-10V는 표면온도가 최대 26.7℃이었고, MW-1.0-50V는 최대 약 170℃이었다. MW-1.0-50V는 실험체의 온도가 외기온도와 가장 뚜렷하게 구분되었다. 표면온도는 전극사이를 중심으로 온도가 가장 높고, 동심원을 그리며 열이 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 발열은 전류가 최단거리로 흐르려는 성질 때문에 나노 콘크리트의 전극 사이에서 집중적으로 발생하는 것으로 판단된다.



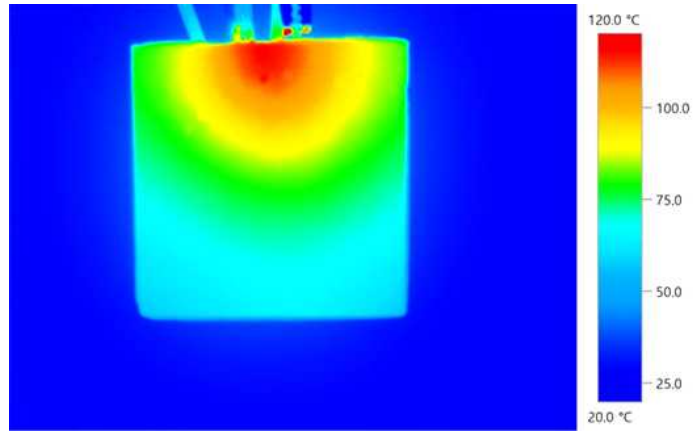
(a) MW-1.0-10V



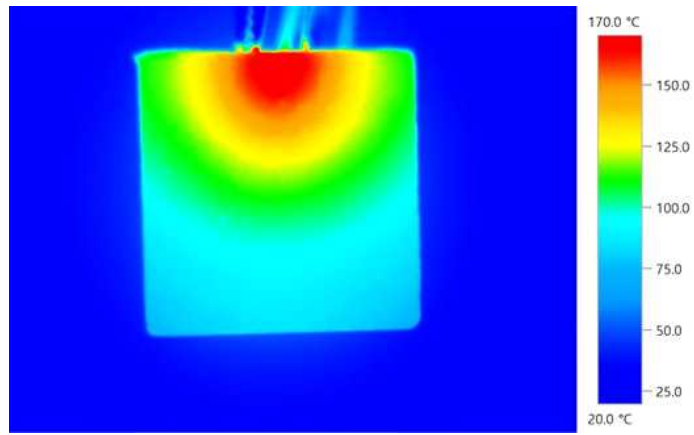
(b) MW-1.0-20V



(c) MW-1.0-30V



(d) MW-1.0-40V



(e) MW-1.0-50V

그림 3.4.8 MW-1.0 실험체의 공급전압 별 열화상 이미지

그림 3.4.9는 CNT 1.0wt% 시멘트 복합재의 공급전압 별 전류 및 소비전력이다. 전류는 공급전압과 선형적으로 비례하는 것으로 분석되었다. MW-1.0-10V 실험체의 전류 값은 0.083A이고, MW-1.0-20V는 약 2배인 0.171A였다. MW-1.0-30V 실험체는 0.252A로 10V일 때에 비해 3배이고, 40V를 공급한 실험체는 0.334A로 4배 이었다. MW-1.0-50V는 0.430A로 전류 값이 0.083A인 MW-1.0-10V에 비해 5.18배 이다.

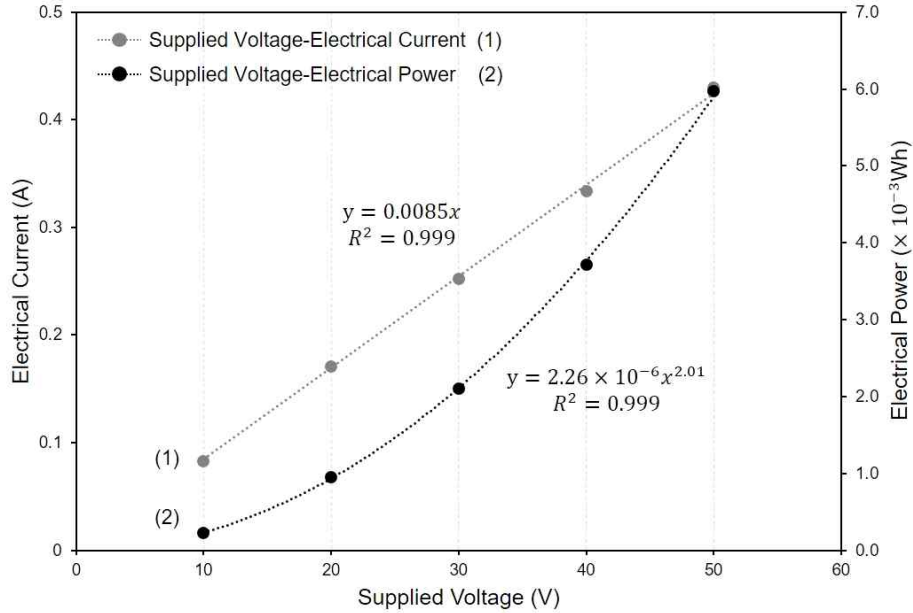


그림 3.4.9 MW-1.0 실험체의 공급전압 별 전류 및 소비전력

CNT 1.0wt% 시멘트 복합재의 전류와 전압은 선형회귀분석을 통해 식 4-4와 같은 1차 함수관계가 있음을 알 수 있다. 함수식의 기울기의 역수는식 4-5에 의해 117.64Ω로 CNT 1.0wt% 시멘트 복합재의 저항 값을 의미한다.

소비전력은 CNT 1.0wt% 시멘트 복합재에 10V 전압 공급 시 2.31×10^{-4} Wh가 소비되었다. 20V 전압은 9.50×10^{-4} Wh, 30V 전압은 2.10×10^{-3} Wh, 40V의 전압은 3.71×10^{-3} Wh의 전력이 소비되어 10V전압 공급 대비 각각 4.1, 9.1, 16.1배 소비전력이 많았다. 매개변수 내 가장 높은 전압인 50V는 5.97×10^{-3} Wh의 전력이 소비되어 10V전압 공급 대비 25.9배 많았다. 소비전력은 공급전압의 제곱과 비례관계에 있는 것으로 분석되었다(식 4-6). 예를 들어, 전압이 2배 증가하면 전류 또한 2배 증가하게 된다. 이때 20V전압 공급 시 소비 전력은 10V전압 공급 대비 약 2^2 배 증가하게 된다. 실험 결과 또한 10V전압 대비 20V전압을 공급했을 때의 소비전력이 약 4.1배 많았다.

$$I = 0.0085 V \quad (4-4)$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{l}{A} \rho \quad (4-5)$$

$$E = 2.26 \times 10^{-6} V^{2.01} \quad (4-6)$$

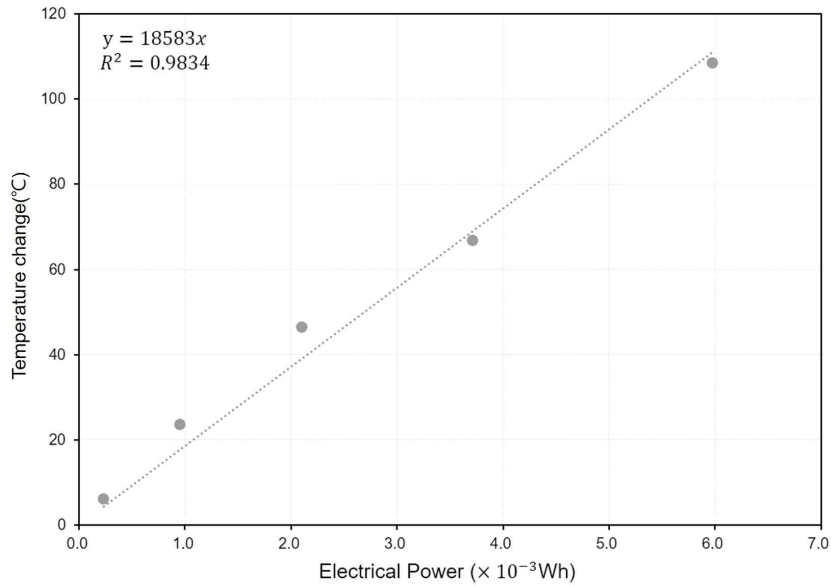


그림 3.4.10 MW-1.0 실험체의 소비전력 별 온도변화량

그림 3.4.10은 소비전력 별 온도변화량 그래프이다. 나노 콘크리트의 소비전력과 발열 온도는 선형회귀분석을 통해 식 4-7과 같은 함수관계가 있음을 알 수 있다. 해당 식은 향후 시멘트복합재의 온도를 조절하는 데 사용될 수 있을 것으로 판단된다. CNT 1.0wt% 시멘트 복합재의 전류, 소비전력, 최대 온도변화량은 표 3.4.1로 정리하였다.

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = 18583E(\text{Wh}) \quad (4-7)$$

표 3.4.1 CNT 1.0wt% 시멘트 복합재의 공급전압 별 전류 및 소비전력

공급전압(V)	전류값(A)	소비 전력 (Wh)	소비전력/10V	최대온도변화량(°C)
10	0.083	2.31×10^{-4}	1	6.1
20	0.171	9.50×10^{-4}	4.1	23.7
30	0.252	2.10×10^{-3}	9.1	46.5
40	0.334	3.71×10^{-3}	16.1	66.9
50	0.430	5.97×10^{-3}	25.9	108.6

5. 극한환경 실험기술

가. 초기콘크리트 물리적 성능 분석 및 발열양생 실험

(1) 연구 목적

굳지 않은 콘크리트의 물리적 성능 분석을 위하여, 콘크리트의 공기량, 슬럼프 및 염화물 함유량 시험을 진행하였다.

(2) 연구 방법

콘크리트 배합은 CNT가 첨가되지 않은 Control 및 MWCNT가 0.1wt% 첨가된 MW-0.1을 사용하였으며, 각각의 시험은 표 3.5.1과 같은 표준에 따라 실시하였다.

표 3.5.1 콘크리트 물리적 성능 분석 표준

시험항목	표준번호	표준명
슬럼프	KS F 2402	콘크리트의 슬럼프 시험 방법
공기량	KS F 2421	압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험 방법
염화물함유량	KS F 2587	염화물 이온 선택 전극법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 염화물 함유량 시험방법

(3) 연구 결과

Control 배합과 MW-0.1 배합 시, 측정된 슬럼프는 KS F 2402에 따라 실시되었으며, 각각 170mm, 165mm로 큰 차이를 보이지 않았으며, CNT의 첨가는 콘크리트 워커빌리티에 큰 영향을 주지 않은 것으로 나타났다.

염화물 함유량 시험은 일반 공사현장에서 사용되는 KS F 2587의 이온 선택 전극법에 의하여 실시하였으며, 시험 결과, Control은 0.217kg/m^3 , MW-0.1은 0.203kg/m^3 으로 나타나서, CNT가 염화물 함유량에는 큰 영향을 끼치지 않은 것으로 나타났다.

공기량 측정은 KS F 2421에 따라 실시되었으며, Control 배합의 공기량은 3.2%, MW-0.1 배합의 공기량은 4.3%로 나타났다. 이는 CNT가 콘크리트 공기량 품질에 영향을 끼치지 않는 것으로 분석된다.

나. 극한환경 실증실험

(1) 연구 목적

본 연구에서는 기후환경실험실에서 나노 콘크리트 발열 성능실험을 위해 -30°C 의 외기 온도를 모사한 극한환경 실증실험을 수행하였다. 극한환경 실증실험은 기후환경실증실험실에서 -30°C 의 외기온도를 모사하여 $60\times 30\times 5\text{cm}^3$ 크기의 나노 콘크리트의 발열성능을 분석하는 것이다. 나노 콘크리트의 극한환경 실증실험을 통해 융설 시스템 적용 가능성과 발열양생 가능성을 분석하고자 한다.

(2) 연구 방법

(가) 기후환경 실험실

극한환경 실증실험은 -30°C 의 외기온도 모사가 가능한 기후환경실험실에서 수행되었다. 기후환경실험실은 그림 3.5.1(a)와 같이 $10(\text{L}) \times 10(\text{W}) \times 4.5(\text{H}) \text{ m}^3$ 크기로 온도, 일사, 습도, 강우, 강설 등의 기후요소의 모사가 가능하다. 온도는 $-30^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ 범위의 온도를 설정하여 실험실 내 기온을 일정하게 유지할 수 있다. 실험실의 온도는 -30°C 로 일정하게 유지하고, 습도는 20~30%의 범위로 설정하였다. 일사는 실험체가 아닌 열원의 열에너지 공급을 방지하기 위해 모사하지 않았다.

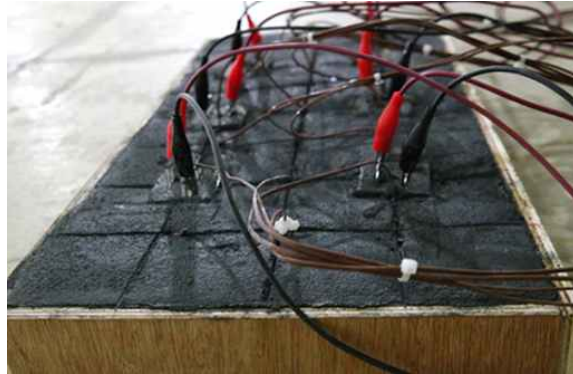
전압 공급 장치와 데이터로거는 기후환경실증실험실 외부에 설치되었다. 실증실험체는 외부의 전압 공급 장치에 연결하기 위해 그림 3.5.1(b)와 같이 전압공급선이 연결되어 80V의 전압이 공급되었다.

표 3.5.2 기후환경실험실의 주요 사항

온도($^{\circ}\text{C}$)	습도(%)	강우(mm/h)	강설(mm/h)	일사(W/m^2)
$-30 \sim +80$	10 ~ 90	~ 150	~ 50	800 ~ 1,200



(a) 기후환경실험실 내부



(b) 실증실험체 전압공급선 연결

그림 3.5.1 극한환경 실증실험을 위한 기후환경실험실

(나) 실험체 제작

극한환경 실증실험체는 효율적인 전압 공급을 위해 전압 공급에 의해 발열효과가 있는 전압 공급부와 전도된 열에 의해 발열효과가 있는 전압 미공급부로 구분하여 제작하였다. 전압 공급부는 CNT 1.0wt% 시멘트 복합재로 $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ 크기로 제작된 6개의 발열 모듈을 제작하여 배치하였다. 기초적 발열 특성 연구결과, CNT는 시멘트 무게 대비 1.0wt%를 혼합하는 것이 발열성능 개선에 효과적이었다.

굳은 콘크리트의 발열성능실험에서 전압 미공급부는 CNT의 혼합여부에 따라 열전도성 개선 효과를 분석하기 위해 일반 시멘트 복합재와 CNT 농도가 0.5wt%인 시멘트 복합재를 타설하여 제작하였다.

굳은 콘크리트의 발열성능실험의 매개변수는 전압 미공급부에 타설한 시멘트 복합재의 CNT 농도를 0.0wt%, 0.5wt%로 선정하였다. 극한환경 실험체의 내부 온도는 15개의 측정점에서 측정하였고, 표면 온도는 열화상이미지를 촬영하여 분석하였다. 굳지 않은 콘크리트의 발열양생실험은 채움부 전압미공급부를 일반 콘크리트로 타설하여 수행되었다.

그림 3.5.2는 실증실험체의 단면도와 내부온도 측정을 위한 Thermocouple설치 위치를 표시한 것이다. Thermocouple은 실험체의 내부온도 측정을 위해 2.5cm 깊이로 3행 5열로 총 15곳에 설치되었다. 측정점은 기하학적으로 행과 열의 번호를 부여하고 측정명을 구분하였다. 3개의 행은 북에서 남쪽으로 차례대로 1, 2, 3의 번호를 부여하였다. 5개의 열은 서에서 동쪽 방향으로 차례대로 1 ~ 5의 번호를 부여하였다. 측정점의 명명법은 첫 번째 문자를 전압 미공급부의 CNT농도, 두 번째 문자를 기하학적 행 번호, 마지막 문자를 기하학적 열 번호로 선정하였다. 예를 들어, 그림 3.5.2의 ① 측정점은 채움재가 CNT 0.5wt% 시멘트 복합재인 경우에 MW0.5-1-1이다.

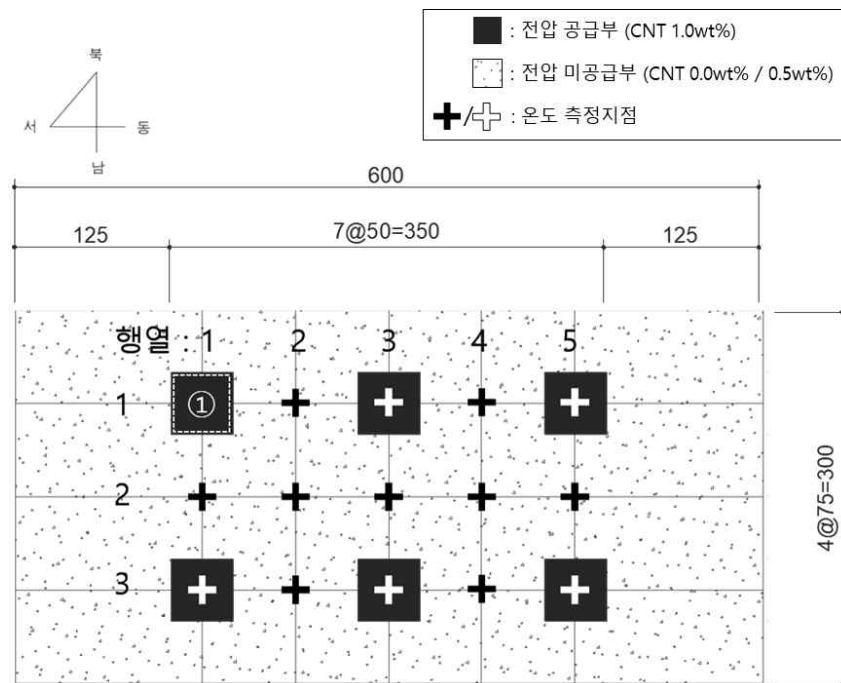


그림 3.5.2 실증실험체의 단면도

(3) 연구 결과

(가) 굳은 콘크리트의 발열성능실험

극한환경 실증실험은 -30℃의 극한환경에서 80V의 전압을 공급하여 수행되었다. 매개 변수는 전압 미공급부의 CNT 농도가 0.0wt%, 0.5wt%이다. 표 3.5.3은 실증실험체의 발열 실험 결과이다. 실험결과, 발열성능은 전압 미공급부가 CNT 0.5wt%로 제작된 실험체(MW-0.5)가 더 우수한 것으로 나타났다.

중심부 온도는 전압 공급부에서 MW-0.5 실험체가 최대 77.4℃까지 상승하여 Control 실험체의 전압공급부에서 최대온도인 60.6℃에 비해 1.27배 발열효과가 우수하였다. 전압 미공급부는 MW-0.5 실험체가 최대 28.4℃까지 상승하였고, Control 실험체는 최대 20.2℃까지 상승하였다. 발열효과는 전압 미공급부에서도 CNT가 혼합된 경우(0.5wt%)가 우수한 것으로 나타났다.

표 3.5.3 극한환경에서의 굳은 콘크리트 실증실험결과

실험체 명	전압 미공급부 CNT 함량(wt%)	시편 명	중심부 온도(℃)				
			1열	2열	3열	4열	5열
Control	0.0	Control-1	57.7	16.2	58.6	14.9	60.6
		Control-2	15.1	14.6	20.2	15.1	18.8
		Control-3	58.2	16.5	58.0	16.4	54.4
MW-0.5	0.5	MW-0.5-1	71.1	24.2	72.4	25.9	69.0
		MW-0.5/Control	1.23	1.49	1.24	1.74	1.14
		MW-0.5-2	21.6	19.0	27.0	24.2	28.4
		MW-0.5/Control	1.43	1.30	1.34	1.60	1.51
		MW-0.5-3	77.4	24.8	70.9	20.3	74.2
		MW-0.5/Control	1.33	1.50	1.22	1.24	1.36

◎ Control : 전압미공급부 일반시멘트 /

MW-0.5 : 전압미공급부 0.5wt% - 행 - 열

Control 실험체와 MW-0.5 실험체의 발열성능은 각 행별로 온도를 비교 분석하였다. 온도는 모든 측정점에서 MW-0.5 실험체가 Control 실험체에 비해 높은 것으로 나타났다. MW-0.5 실험체는 전압 미공급부에서는 최대 1.74배 발열성능이 우수하였고, 전압 공급부에서는 최대 1.44배 발열성능이 우수하였다.

그림 3.5.3은 실증실험체의 1행 측정 별 최대 온도 그래프이다. MW-0.5-1-1은 71.1℃까지 상승하여 Control-1-1 대비 온도가 1.23배 높았다. MW-0.5-1-5는 온도가 69.0℃까지 상승하여 Control 대비 1.14배 발열성능이 우수하였다. 전압 미공급부는 일반 시멘트 복합재로 구성된 Control-1-2가 최대 16.2℃, Control-1-4가 최대 14.9℃까지 상승하였다. 동일측점의 MW-0.5-1-2와 MW-0.5-1-4는 각각 24.2℃, 25.9℃까지 상승하여 Control 실험체의 동일측점보다 최대 1.74배 온도가 더 높았다.

2행의 측정점은 전압 미공급부로 전압공급에 의한 직접적인 발열 효과가 없는 부분이다. MW-0.5-2-5는 최대 28.4℃까지 상승하였고 동일측점에서 18.8℃까지 상승한 Control 실험체보다 1.51배 높았다. 가장 낮은 온도는 MW-0.5-2-2에서 19.0℃이었으나 Control 실험체의 동일측점(14.6℃)보다 1.3배 높았다(그림 3.5.4).

3행의 측정점 별 발열온도 그래프는 그림 3.5.5이다. 온도는 1번 측정점(MW-0.5-3-1)에서 최대 77.4℃까지 상승하여 Control-3-1의 온도보다 1.33배 높았다. 3번 측정점(MW-0.5-3-3)은 70.9℃까지 상승하였고, 5번 측정점은 온도가 74.2℃까지 상승하였다. MW-0.5-3의 전압 공급부는 Control-3의 전압 공급부보다 온도가 최소 1.22배 높았다.

MW-0.5 실험체는 전압 미공급부의 열전도성 개선으로 인해 Control 실험체 보다 온도가 높았다. 온도의 차이는 전압 공급부보다 CNT의 혼합 유무의 차이가 있는 전압 미공급부에서 더 뚜렷하게 나타났다. CNT는 전압 미공급부의 열전도성을 향상시키고, MW-0.5 실험체의 온도가 Control 실험체보다 높은 원인으로 분석된다.

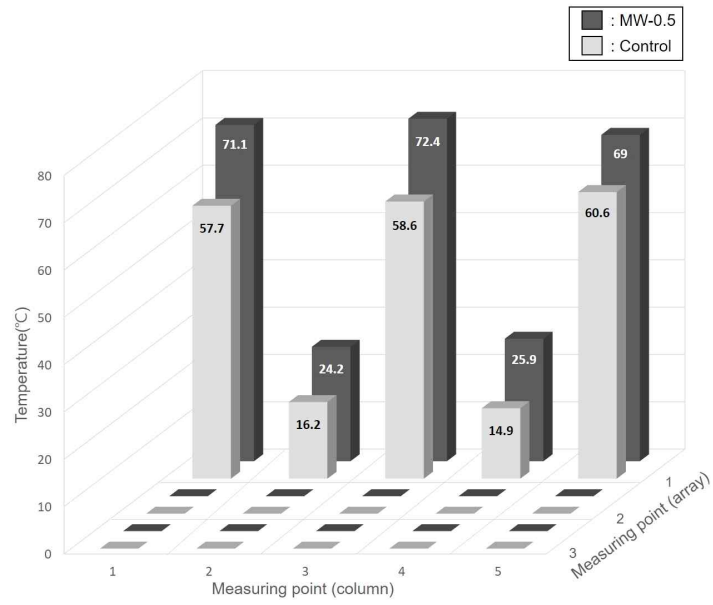
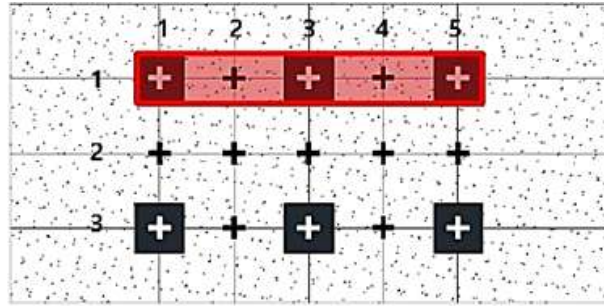


그림 3.5.3 실증실험체의 1행 최대 온도 비교 그래프

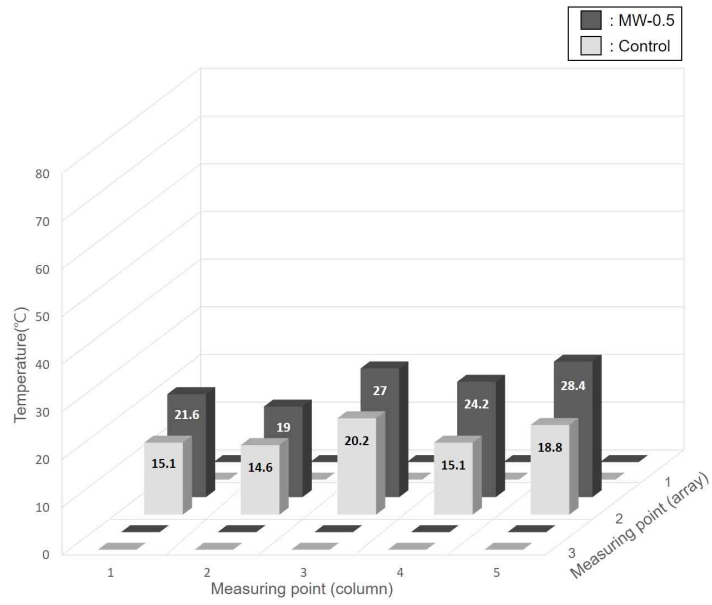
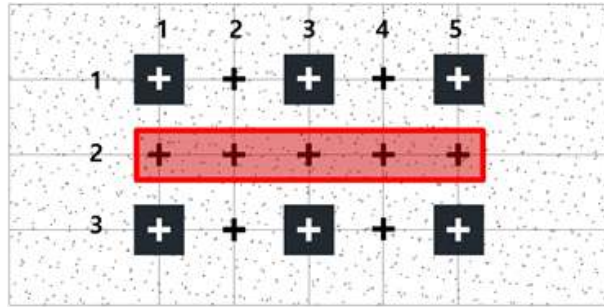


그림 3.5.4 실증실험체의 2행 최대 온도 비교 그래프

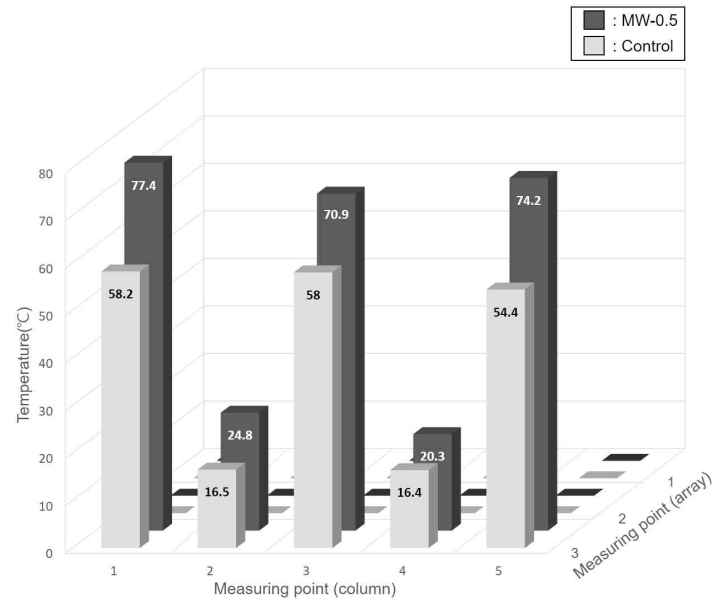
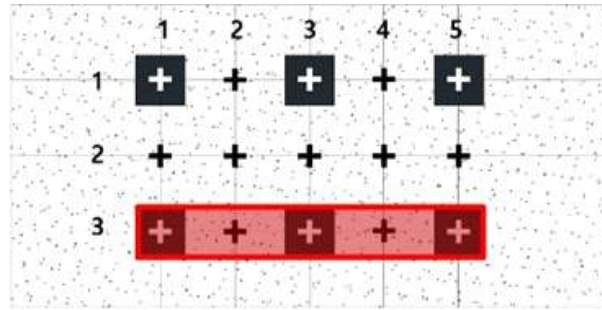


그림 3.5.5 실증실험체의 3행 최대 온도 비교 그래프

실증실험체의 표면온도와 온도 분포는 그림 3.8과 같이 열화상 이미지를 통해 분석되었다. 열화상 이미지는 동일 시점에서의 표면온도를 비교하기 위해 전압 공급 후 600초가 경과한 시점에서 $-30^{\circ}\text{C} \sim +90^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위로 촬영하였다.

그림 3.5.6(a)는 Control 실험체의 열화상 이미지이다. Control 실험체는 표면 온도가 전압 공급부에서 최대 74.8°C 까지 상승하였다. 최저온도는 실험체의 최 외곽에서 -21.8°C 로 측정되었다. Control-2-2는 앞선 중심부 온도 분석에서 최저온도인 14.6°C 였고, 표면 온도 역시 측정 내 최저 온도인 3.2°C 로 측정되었다.

MW-0.5 실험체의 열화상 이미지는 그림 3.5.6(b)이다. 표면온도는 내부온도가 가장 높은 측정점인 MW-0.5-3-1에서 84.1°C 로 측정되었다. 최고 표면온도는 Control 실험체에 비해 1.12배 높았다. 측정 중 내부온도가 가장 낮았던 MW-0.5-2-2는 표면온도가 8.8°C 로 Thermocouple이 설치된 측정점의 표면온도 중 가장 낮았으나, Control 실험체의 동일측점인 Control-2-2와 비교하여 2.75배 높았다. 실험체의 최 외곽 온도는 4.6°C 로 가장 낮았다. MW-0.5 실험체는 전압 공급부에서 열이 확산되어 실험체 전체의 온도가 물이 어는점인 4°C 이상으로 상승 가능한 것으로 분석되었다.

표면온도는 두 실험체에 80V 전압공급 후 동일 시점에서 측정되었지만, 열 전도성이 우수한 MW-0.5실험체의 온도가 Control 실험체 보다 더 높은 것으로 나타났다. 나노 콘크리트는 일반 시멘트 복합재에 비해 열 전도성이 우수하여 실험체의 온도를 더 빠르게 상승시키는 것으로 분석된다.

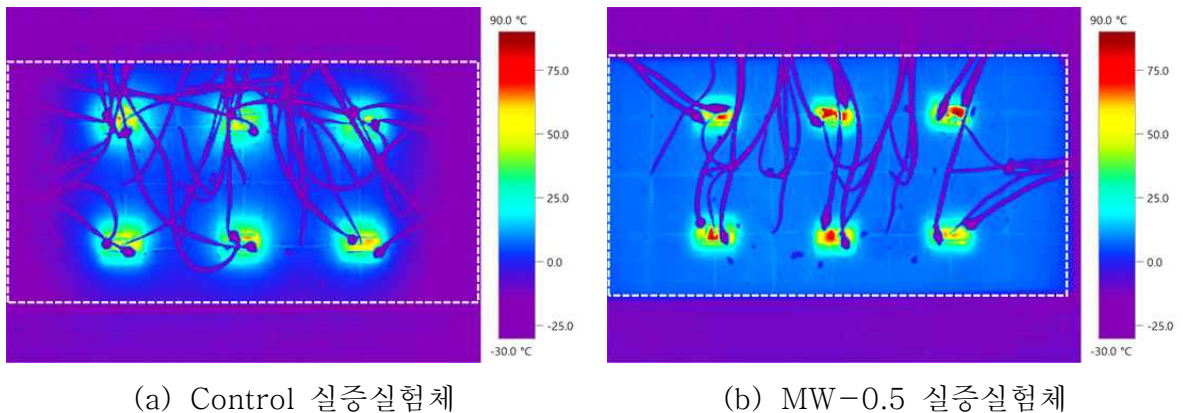


그림 3.5.6 실증실험체의 열화상 이미지

(나) 굳지 않은 콘크리트의 발열양생실험

굳지 않은 콘크리트의 발열양생 실증실험은 CNT 1.0wt%의 나노 콘크리트 전압공급부에 굳지 않은 일반 콘크리트를 타설하여 수행되었다. 외기온도는 -30°C 로 설정하였고, 실험은 80V의 전압을 공급하여 150분간 수행되었다.

그림 3.5.7은 굳지 않은 콘크리트의 1행의 시간-온도 그래프이다. 전압을 공급한 1-1, 1-3, 1-5 측정점의 온도는 각각 64.5°C , 71.1°C , 72.2°C 까지 상승하였다. 전압공급부의 온도는 최대 온도를 기점으로 전압 미공급부(1-2, 1-4)로 열에너지가 전도되어 감소하였다. 1-2, 1-4의 온도는 최대 15.7°C , 13.5°C 까지 상승하였고, 실험의 종료시점에서 10.4°C , 8.6°C 까지 유지 가능하였다. 1행의 온도는 한중콘크리트 타설 가능온도인 3°C 이상 유지하였다.

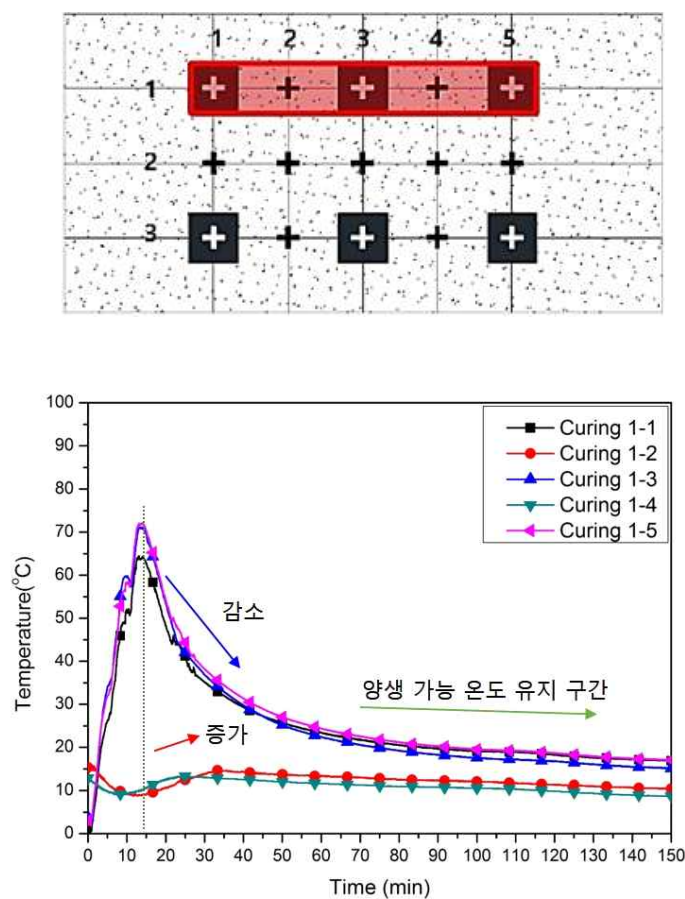


그림 3.5.7 굳지 않은 콘크리트 1행의 시간-온도 그래프

Curing-2(2행)의 온도는 전압 공급부에서 발생한 열에너지의 전도에 의해 상승하여 최대 17℃까지 상승하였고, 실험의 종료시점에서 10℃까지 상승 가능하였다. 온도는 -30℃에서 외기온도의 영향으로 실험 시작 후 10~14분 까지 감소하였고, 약 15분을 기점으로 상승하기 시작하였다. 온도는 상승 후 발열부의 온도감소에 의해 감소하기 시작하였으나, 한중 콘크리트 타설 가능 온도(3℃) 이상으로 유지 가능한 것으로 분석되었다.

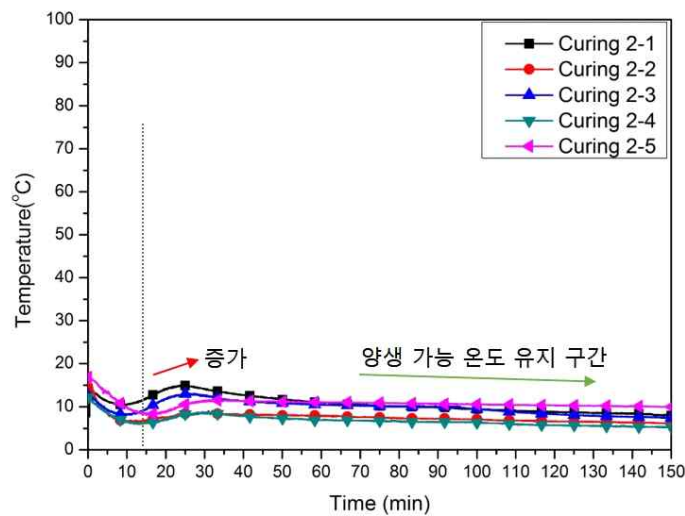
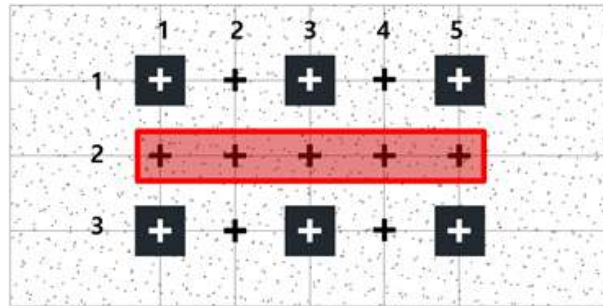


그림 3.5.8 굳지 않은 콘크리트 2행의 시간-온도 그래프

3행(Curing-3)의 온도는 80V의 전압을 공급하여 3-1, 3-3, 3-5에서 69.0℃, 79.2℃, 78.8℃까지 상승 가능하였고, 150분 후 최대 23.4℃, 최소 13.1℃까지 온도가 유지되었다. Curing3-2, 3-4의 온도는 13.1℃, 13.2℃까지 상승하였고, 150분 후 최대 8.7℃, 최소 5.5℃까지 온도가 유지 가능하였다. 모든 측정점에서 3℃이상의 온도를 유지하여 한중콘크리트 타설 가능온도 확보가 가능하여 -30℃에서 콘크리트의 양생이 가능함을 확인하였다. 나노 콘크리트는 현장 적용 시 크기효과와 외기온도를 고려하여 전압을 공급하여야 할 것으로 판단된다. 측정 별 온도는 표 3.5.4로 정리하였다.

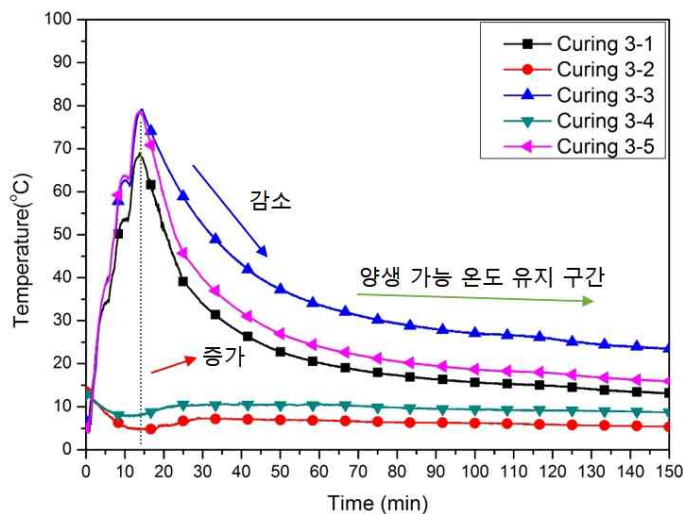
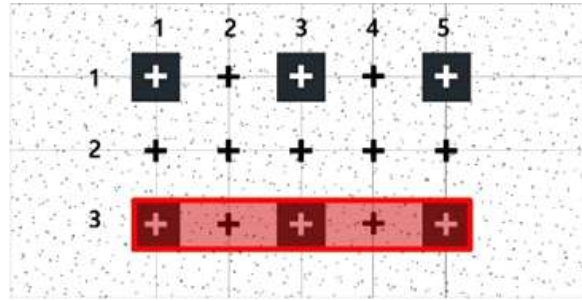


그림 3.5.9 굳지 않은 콘크리트 3행의 시간-온도 그래프

표 3.5.4 극한환경에서의 굳지 않은 콘크리트 실증실험 결과

실험체 명			온도(℃)				
			1	2	3	4	5
Curing	1	최대	64.5	15.7	71.1	13.5	72.2
		중점	16.9	10.4	15.1	8.6	17.0
	2	최대	15.0	14.3	13.1	12.4	17.0
		중점	8.0	6.1	7.3	5.3	10.0
	3	최대	69.0	13.1	79.2	13.2	78.8
		중점	13.1	5.5	23.4	8.7	15.9

6. 내구성 분석기술

가. 경화된 콘크리트의 내구성 및 강도평가

(1) 연구 목적

극한환경에서의 나노소재-시멘트 복합체 강도특성 및 내구특성 분석을 통한 기존 콘크리트 대비 향상된 기술을 개발하고자 하였음.

콘크리트 강도 향상을 위하여, 사전 모르타르 배합을 실시하여 2차년도 콘크리트로 적용을 목표로 하며, MWCNT 0.1% 및 1.0% 첨가를 통한 내구성능 평가를 실시하였다.

(2) 연구 방법

물/시멘트 비와 재령일을 매개변수로 하여 콘크리트의 염화물 내구성 시험과 압축강도 시험을 진행하였다.

(3) 연구 결과

콘크리트 강도 향상을 위하여, 사전 모르타르 배합을 실시하여 2차년도 콘크리트로 적용을 목표로 하며, MWCNT 0.1% 및 1.0% 첨가를 통한 내구성능 평가를 실시하였다. 연구 결과, 모르타르 압축강도는 MWCNT/cement비가 0.2% 이상 첨가됨에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

물/시멘트 35%인 배합의 경우, PC0 및 PC1 배합의 경우 28일 압축강도가 0.4 MPa 차이로, 오차범위 내에 있어 동등 수준의 강도를 발현하는 것으로 확인되었다. PC2 배합의 경우, 기존 OPC 대비 4 MPa 낮은 강도가 나타났다.

물/시멘트 45%인 배합의 경우, PC0에 비해 PC1 및 PC2 배합의 강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 28일 재령에서의 강도저하는 PC0 대비 각각 14.3%, 34.4% 감소하는 결과가 나타났다.

표 6.1.1 나노 콘크리트 압축강도시험 결과

	압축강도 (MPa)	
	7 Days	28 Days
PC0-35	50.9	61.3
PC0-45	33.2	42.1
PC1-35	49.9	60.9
PC1-45	28.2	36.1
PC2-35	43.9	57.3
PC2-45	19.0	27.6

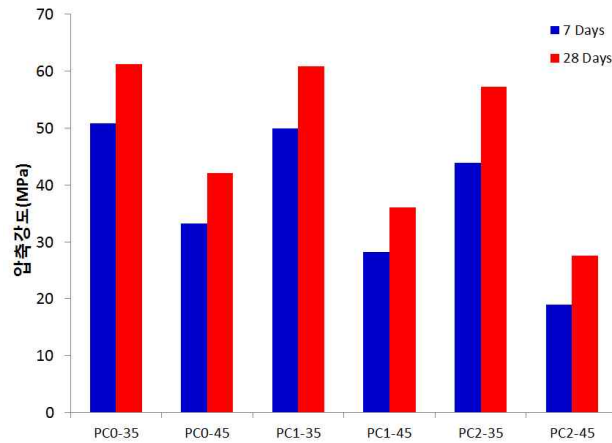


그림 6.1.1 나노 콘크리트 압축강도시험 결과

내구성능 평가결과, 24시간의 시험 후, 각각의 시험체를 절단하여 질산은을 도포한 뒤 측정된 침투깊이는 아래 표와 같이, 18.4 mm, 17.2 mm, 12.9 mm로 MWCNT 첨가량이 많아질수록 침투깊이가 낮아져, 내구성이 향상되는 결과를 확인하였다. 확산계수 계산 결과, Plain 대비 MWCNT 0.1 % 및 1.0 % 첨가 시, 89.1%, 65.6%로 낮아져, 내구성이 향상 된 것을 알 수 있었다.

표 6.1.2 나노 콘크리트 염화물 내구성 시험결과

	평균 침투깊이(mm)	염화물 확산계수(m ² /s)
OPC	18.4	4.42×10^{12}
MWCNT 0.1	17.2	3.94×10^{12}
MWCNT 1.0	12.9	2.90×10^{12}

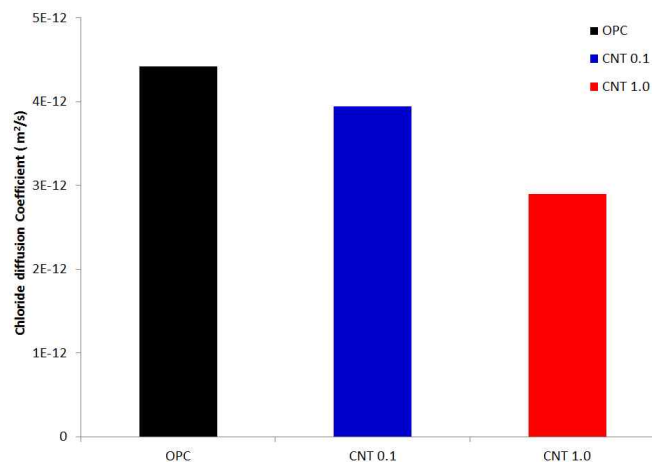


그림 6.1.2 나노 콘크리트 염화물 내구성 시험결과

나. 경화된 콘크리트의 강도평가

(1) 연구 목적

CNT가 첨가된 콘크리트의 장기 압축강도 특성 분석을 위하여 상기 배합이 아닌 골재가 대량 혼입된 콘크리트의 91일 재령 압축강도 시험을 실시하였다.

(2) 연구 방법

W/C가 0.35인 Control 콘크리트와 MW-0.1 콘크리트를 KS F 2405:2010에 따라 실시하였다.

(3) 연구 결과

Control의 경우 42.8MPa, MW-0.1의 경우 49.9MPa로 MWCNT를 혼입했을 때 16% 이상의 강도 증진이 나타났다. 이에, CNT가 첨가된 콘크리트의 압축강도는 Control 배합과 동일하게 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 콘크리트 물성을 저해하거나 크게 증진시키는 효과는 없었다.

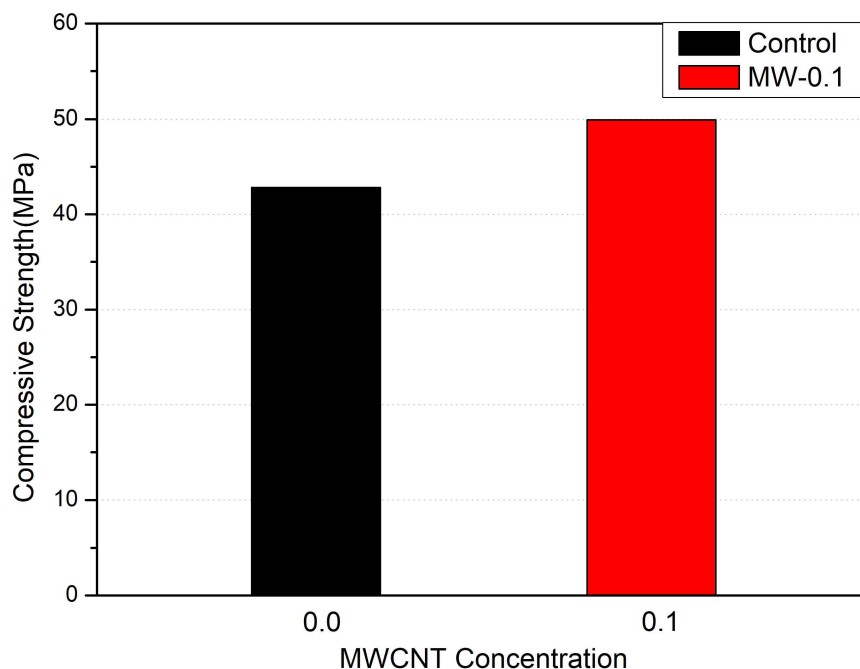


그림 6.1.3 경화된 콘크리트 압축강도 시험결과

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준		달성 여부
				질적 성과지표	검증방법	
1	최적 발열성능 확보를 위한 배합기술	1-1	최적 탄소계열 나노소재 및 혼입 비율 선정	① 일반 콘크리트대비 압 축강도 향상	공인시험 성적서	달성
				② 시편온도 상승	입력전력 대비 30° C 온도상승	
		1-2	나노 콘크리트 제작을 위한 배합법 도출	Dry mix ① 혹은 Wet mix	강도 및 온도 효율 분석	달성
		1-3	시공 경제성 분석	① 비용분석	초기 시공비 비교	달성
2	초기 발열양생 성 능분석 기술	2-1	극한환경 하에서 의 발열양생을 통 한 강도확보	① 나노 콘크리트양생가 능 온도 확보	-30° C에서 양생가능 여부	달성
				② 설계 압축 및 휨강도	목표 압축 및 휨강도 도달여부	
3	융설 및 융빙 성능분석 기술	3-1	-30° C 하에서의 융설 및 융빙성능 분석	① 시험체 온도	30℃/min 달성여부	달성
				② 최적전극위치	전극위치에 따른 발열효율 제시여부	
		3-2	융설 및 융빙기능 의 크기효과 분석	① 온도실험	시험체 크기와 온도 상관관계 분석 여부	달성
		3-3	나노 콘크리트의 현장적용방안제시	① 시방안 제시	시방안 제시여부	
4	유사환경 기초 실험기술	4-1	유사환경 모사 발 열성능 시편실험	① 항온항습챔버 실험	시험결과 제시여부 (30° C 발열 여부)	달성
		4-2	발열 온도구배 조 절	① 항온항습챔버 실험	공급전력-온도 상관관계 제시 여부	달성
5	극한환경 실험기술	5-1	초기콘크리트 물 리적 성능 분석 및 발열양생 실험	① 콘크리트 공기량	증빙보고서	달성
				② 콘크리트 슬럼프	증빙보고서	
				③ 콘크리트 염화물량	증빙보고서	
				④ 기후환경실증 실험	-30° C에서 양생가능 여부	
		5-2	굳은 콘크리트 융 설 및 융빙 실험	① 기후환경실증 실험	시험결과 제시여부	달성
6	내구성 분석기술	6-1	경화된 콘크리트 내구성평가	① 염소이온 확산계수	공인시험 성적서	달성
		6-2	경화된 콘크리트 강도평가	① 일반 콘크리트대비 압 축강도 향상	공인시험 성적서	달성

2. 관련 분야 기여도

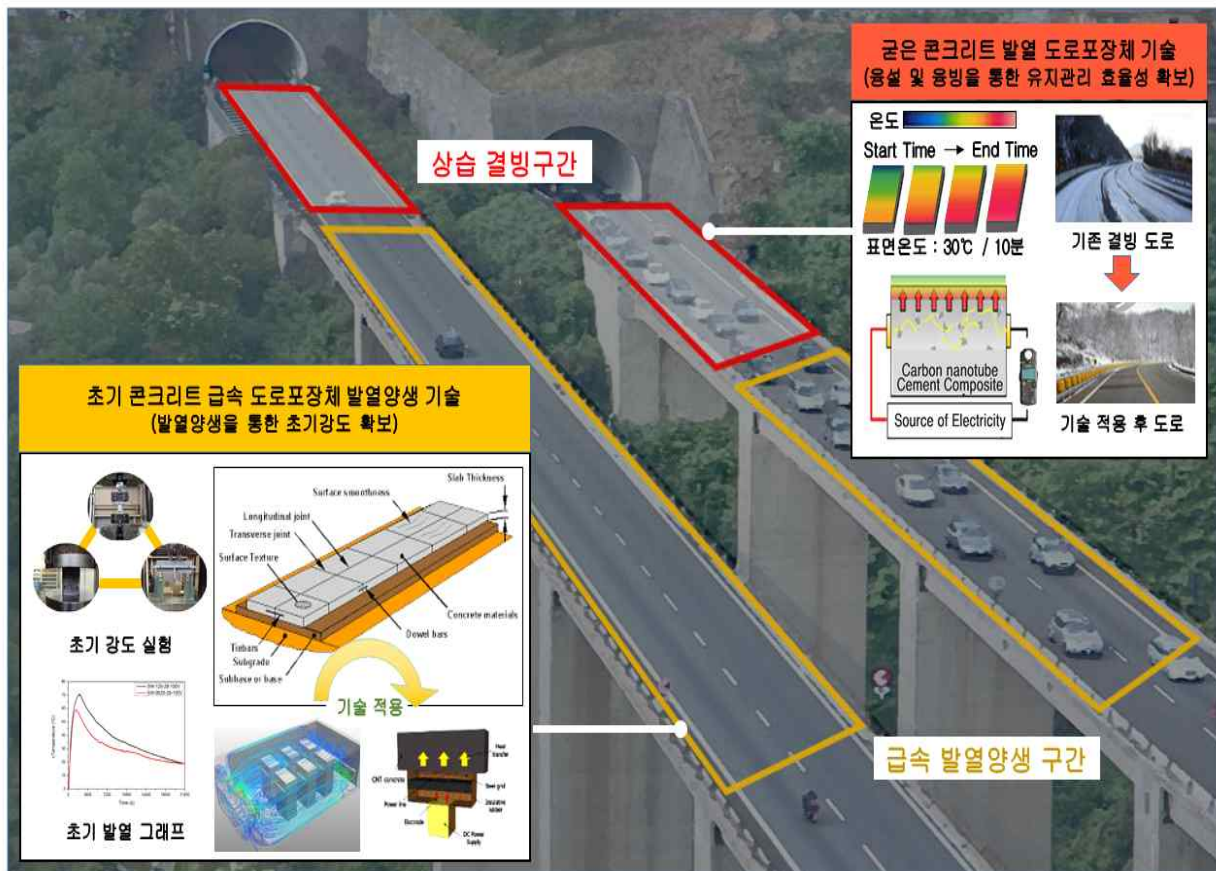
관련 분야 기여도	
기술적 측면	- 극한지 건설시공 산업의 새로운 분야를 도출 - 나노소재 기반 콘크리트 융설시스템의 핵심기술을 확보 - 극저온 등의 환경적인 한계에 의한 시공 및 운영 제한 문제와 같은 한계점을 해결 - 전문역구인력 양성, 탄소나노튜브 기술이외의 전도성과 같은 특수 첨단 신소재의 토목분야 적용 등이 가능하므로 학문의 발전 가능 - 다학제간 연계를 통한 창의적인 연구 아이디어의 창출로 전반적인 융·복합 연구발전에 기여
경제적·산업적 측면	- 나노재료를 기반으로 극한환경에서의 콘크리트 발열양생 기술과 융설 및 융빙 기술을 확보하여 건설과 신기술간의 융합기술 개발을 통해 건설재료 분야의 성장동력을 확보 - 콘크리트 구조물의 강도향상과 효과적인 유지관리가 가능해질 것이며 콘크리트 구조물의 장수명화로 이어짐 - 콘크리트 구조물의 장수명화는 이산화탄소 배출량 감소에 효과
사회적 측면	- 나노기술 기반 다기능 콘크리트 핵심기술 확보를 통해 건설분야의 글로벌 리더에 진입 - 건설신소재 분양 연구의 패러다임을 선진국 추종형에서 창의적이고 도전적인 융합성 선도연구로 전환 - 미래 건설신소재로 세계시장 선점이 가능한 고부가가치의 기능화 된 나노콘크리트 활용 원천기술을 확보 - 관련 차세대 콘크리트 구조물의 유지보수 건설 분야의 해외 의존도를 최소화하며 국내 창조형 체제로 전환

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 연구개발성과의 활용방안

본 연구 과제의 결과물을 활용하면 국내뿐만 아니라 해외건설(중앙아시아 및 중동 산악지역, 러시아 인근지역의 동절기 평균기온 -30°C 정도) 현장의 극한 환경에서 콘크리트 시공을 상시 수행할 수 있을 것이다. 또한 극한 환경에서 별도의 시설을 설치하지 않고 자기발열 콘크리트를 통하여 내부의 온도를 유지시켜 설계 압축강도를 확보하고 시공시간을 단축시켜 간접비용을 줄일 수 있다. 활용 가능한 분야는 콘크리트 도로포장, 철도, 발전시설, 빌딩, 발열 의자 등 콘크리트를 사용하는 건설분야로 다양하게 확장이 가능하다.

터널 입출입부나 교량, 대형 교차로 등 블랙아이스 등에 의한 대규모 피해를 유발할 수 있는 심각한 지역에 발열 도로포장체 기술을 시공하여 기존 융설 및 융빙 시스템의 단점인 환경오염을 유발하지 않고 보다 체계적인 유지관리로 추가적인 비용을 줄일 수 있다. 최종적으로 나노 콘크리트 기술을 개발하여 타 분야와의 융합연구로 지속적인 성장을 주도할 수 있을 것이다.



2. 기대효과

새로운 기술 변화흐름에 맞추어 건설 분야의 새로운 성장엔진을 발굴하고 산업구조를 재편하는 데 있어 나노기술의 활용은 주목받고 있다. 세계적으로 나노기술은 정보기술 및 물기술과 함께 향후 수십년간 과학기술의 핵심적인 분야가 될 것으로 예상되고 있으며, 다른 기술들에 비해 성장세가 매우 가파르다. 특히 나노기술은 융합기술 영역을 확대해 나가고 있는 바, 건설분야에서의 나노기술 활용은 피할 수 없는 미래형 기술이다. 본 연구는 나노 재료를 기반으로 극한환경에서의 콘크리트 발열양생 기술과 융설 및 융빙 기술을 확보하여 건설과 신기술간의 융합기술 개발을 통해 건설재료 분야의 성장동력을 확보하고자 한다. 건설 신소재와 나노기술의 융합연구를 통하여 건설 분야의 새로운 성장엔진을 발굴하고 산업구조를 재편할 수 있을 것이다.

가. 기술적 측면

본 연구는 극한환경에 대응한 콘크리트 자기발열 및 융설시스템을 개발하는 연구로서, 전 세계적으로 유사연구가 수행된 바 없다. 나노기술을 활용한 콘크리트의 기능화로 인한 발열양생을 통해 극한지 건설시공 산업의 새로운 분야를 도출할 것으로 기대된다. 나노소재 기반 콘크리트 융설시스템의 핵심기술을 확보하여 고부가가치의 미래형 건설재료를 창출할 수 있다. 특히, 지금까지 불가능했던 콘크리트 구조물에 발열이 가능하게 되어, 극저온 등의 환경적인 한계에 의한 시공 및 운영 제한 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 혁신적 융합연구를 통해 기존의 건설분야의 한계점을 해결 할 수 있을 것이다. 그 밖에도, NT 융합 건설재료기술에 대한 기술이전 및 활용성 증대를 통한 기술 확산이 가능하다. 또한 전문연구인력 양성, 탄소나노튜브 기술 이외의 전도성 폴리머·나노금속과 같은 특수 첨단 신소재의 토목분야 적용 등이 가능하므로 이에 따른 학문의 발전이 가능하다. 이후 다학제간 연계를 통한 창의적인 연구 아이디어의 창출로 전반적 융복합 연구 발전에 기여할 것으로 기대된다.

나. 경제적·산업적 측면

현재 세계적으로 나노기술 개발투자비를 지속적으로 늘리고 기술 개발 경쟁이 더욱 치열하게 전개되고 있다. 비교적 후발 분야인 건설 분야에서도 나노 산업과의 융합에 의한 영향력이 증가되어 새로운 산업을 선점할 수 있을 것이다.

본 기술 활용 시, 콘크리트 구조물의 강도향상과 효과적인 유지관리가 가능해 질 것이며, 이는 콘크리트 구조물의 장수명화(Service life extension)으로 이어지게 될 것이다. 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 판단된다. 특히, 세계 건설시장은 2007년 기준으로 4,837 조원 규모이며 경기침체에도 불구하고 4.6% 수준의 성장률을 나타는데, 이러한 건설 시장 중 콘크리트가 차지하고 있는 부분을 생각할 때 새로운 건설재료 개발을 통한 시너지 효과는 막대할 것으로 기대된다.

다. 사회적 측면

나노기술 기반 다기능 콘크리트 핵심기술 확보를 통해 건설 분야의 글로벌 리더에 진입하며, 건설신소재 분야 연구의 패러다임을 선진국 추종형에서 창의적이고 도전적인 융합형 선도연구로 전환하여 건설분야의 새로운 미래 성장동력화가 될 것이다. 탄소나노튜브 콘크리트의 다양한 기능화 연구를 통해 미래 건설 신소재로 세계시장 선점이 가능한 고부가가치의 기능화된 나노 콘크리트 활용 원천기술을 확보할 수 있다. 관련 핵심기술의 논문발표 및 국제특허 출원을 통해 지적재산권을 확보하고, 관련 차세대 콘크리트 구조물의 유지보수 건설분야의 해외 의존도를 최소화하며, 국내 창조형 체제 전환에 기여할 것이다. 나노 콘크리트 재료분야의 새로운 융합학문 분야 개척하고, 최근 국가사업 등에 의해 지나치게 왜곡된 ‘콘크리트’라는 부정적인 인식이 전환될 수 있다. 또한 수용액 상태의 MWCNT를 이용하여 호흡기를 통한 흡입노출을 방지하고, 피복 콘크리트의 타설로 피부노출을 방지하여 인체에 직·간접적으로 미치는 영향을 차단함으로써 인체 무해한 나노 건설 융합기술을 확보할 수 있다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

가. 강도증진 과학기술정보

저자	나노재료 종류	표면처리방 법	나노 혼입 비율	음파 처리 시간	양생방법	물/시멘트 비율	실험방법
Yu 등 (2009)	MWCNT	산처리 계면활성제 일반	0.1%	—	1일후 탈형 20일간 수중양생 10일간 건조양생	0.45/1	실험체에 압축하중을 가해 강도와 저항변화 측정
Musso 등 (2009)	MWCNT	일반 열처리 산처리	0.5%	4hr	1일 증기양생 27일 수중양생	0.4/1	실험체에 압축과 휨 응력을 가하여 결과확인 후 시험체를 잘게 부수어 단면을 분석
Li 등 (2007)	MWCNT	— 산처리	0.5% 0.5%	—	진동다짐 1일후 탈형 26일 수중양생 1일 고온 건조양생	0.4/1 0.4/1	두 시험체에 반복압축하중을 가하여 전기적 저항특성과 감압특성을 측정
Chaipanich 등 (2010)	—	—	0% 0% 0.5% 1%	10min	수중양생	0.5/1/ 3(모래)	압축실험을 통해 각 시험체의 강도를 비교
Han 등 (2010)	MWCNT	NaDDBs	0.1%	2hr	타설 1일후 탈형 180일 습윤양생 14일 수중양생 24시간 건조양생	0.6/1	동일한 시험체들의 건조양생 시간을 조절하여 수분함유량을 다르게 하여 압축실험하에 저항값의 차이를 비교
Han 등 (2012A)	MWCNT	산처리	0.05% 0.1% 1% 0.1% 0.1%	2hr	타설 1일후 탈형 28일 습윤양생 5일 고온건조양생	0.45/1 0.45/1 0.45/1 0.6/1 0.6/1	압축실험을 진행하여 각 시험체의 저항변화를 체크한 후 변수를 통해 비교
Han 등 (2012B)	MWCNT	산처리 후 NaDDBs 용액에 혼입	0.1% 0.5%	3hr	타설 1일후 탈형 28일 습윤양생 60일 건조양생	0.4/1	압축실험을 진행하여 시험체의 전하 정전용량과 저항변화 측정
Rafiee 등 (2013)	Graphite Oxide	Hummer's method (산처리, 열처리)	0% 1%	6hr		0.33/1	모르타르와 콘크리트의 압축실험을 실시하여 시험체의 강도와 인성 비교
Kothiyal 등 (2016)	Graphene Oxide	Hummer's method (산처리, 열처리)	0.125% 1%		7, 14, 28일 수중양생		압축실험을 진행하여 시험체의 강도 비교
Mohammed 등 (2016)	Graphene Oxide	—	0.01% 0.03% 0.06%	—	28일 습윤양생	0.45/1	동결-융해실험, 압축시험으로 시험체의 동결-융해 저항성과 강도 비교
Horszczar uk 등 (2015)	Graphene Oxide	Hummer's method (산처리, 열처리) + 초음파처리	3%		24시간, 7일, 28일 양생	0.6/1	AFM분석, XRD, SEM 촬영으로 시험체의 미세구조 파악 및 탄성계수 비교

나. 전기적/열적 성능 관련 과학기술정보

저자	저널명	연구 방법
Loh 등 (2015)	Journal of Physics: Conference Series	공시체 제작 (50mm x 50mm x 50mm) 모르타르 양측에 전극 설치하고 Type I/II (25 wt%), blast furnace slag, sand-to-cement ratio(2.75:1) w/c 0.52을 고정한 후, 진공 오븐에 1시간, 6시간 동안 양생하였고, cyclic compressive test를 통한 compressive strain과 resistance의 상관관계 분석함
Zhang 등 (2016)	Journal of The Electrochemical Society	Graphene 전극 사이의 경화시킨 시멘트 페이스트 시트 (Φ 10mm x 1mm)를 혼입하고, 매개변수로는 양생일 (3, 5, 7, 10, 14, 21, 28일), W/C (0.3 ~ 0.5/1)로 세 가지의 전극실험 (cyclic voltammetry, galvanostatic charge/discharge and electrochemical impedance spectroscopy)을 실시함
Loh 등 (2016)	Structural Health Monitoring	휨강도 시편 (150mm x 150mm x 460mm), 원형공시체 시편 (100mm x 200mm) CNT Thin 필름 (80mm x 80mm x 18mm)을 제작하고, 매개변수로 W/C (0.42 ~ 0.44/1), S/C (2/1), Ag/C (3/1), 혼화제 3.5ml/kg, CNT (2wt%) 수용액을 Sand나 Aggregate에 코팅하였고, 휨 강도 시험, 압축강도 시험 후 SEM 촬영을 통하여 CNT Thin 필름 둘레에 전극을 설치하고 구멍이 발생할 시 저항의 변화를 감지하여 손상 부위 파악함
Pisello 등 (2017)	Solar Energy Materials & Solar Cells	MWCNT, Carbon Nanofiber, Graphene Nano Platelets, Carbon black을 혼입한 cement 복합체의 다목적 특성화를 위한 연구를 위하여 40mm x 40mm x 160mm 시편을 w/c ratio는 0.4, 포틀랜드 시멘트 415g/sample, nano재료 8.3g/sample, 물 166g/sample로 제작하였고, 4가지의 나노 재료를 혼입해 만든 복합체를 85℃ chamber안에 넣어 열 및 전기 전도성, 하중재하 실험 실시함
Gomis 등 (2015)	Construction and Building Materials	graphite powder (GP), carbon fiber powder (CFP), carbon fiber, carbon nanotubes (CNT)의 구성물질로 판형 실험체 (100mm x 100mm x 10mm)를 제작하여 전기 공급량 (50V~150V)을 매개변수로 6000초 동안 실험을 진행하였다. 실험결과, 시편은 최대 63.2℃까지 발열성능이 발생함
Zhao 등 (2011)	Cold Regions Science and Technology	슬래브 (400mm x 200mm x 50mm)를 제작하여 carbon fiber heating wires (CFHWs)를 100mm 간격 배근하고 150 ~ 1000 W/m ² 의 전기를 공급하여 실내(냉동고)에서는 5시간, 실외(폭설 시)에서는 16시간 실험을 진행함. 실험결과를 최대 30℃까지 슬래브가 발열되는 것으로 분석됨
Chung (2004)	Smart Materials and Structures	Carbon fiber (1.0 vol%) cement, Graphite particle (37 vol%) cement, Carbon fiber (uncoated) mat, Carbon fiber epoxy-matrix, interlaminar interface를 제작하여 1.8W, 0.27W, 6.5W, 0.59W의 전력을 주입하였고, 실험결과를 최대 134℃ 발열이 발생함
Zhang 등 (2011)	Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology	CNFP & MWCNT(3 wt%) cement를 판형 실험체 (100mm x 100mm)으로 제작하여 전기공급량을 600~1800W/m ² 변경하여 7500초동안 용빙 실험을 진행함 (-10℃, -20℃, -30℃에서 실험 시작). 실험결과, 판형 실험체는 최대 20 ~ 33℃ 발열이 발생함
Han 등 (2012)	Journal of Composite Materials	큐브형 실험체 (50mm x 50mm x 50mm)에 CNT 0.05%~1%로 전기를 약 750초 간 공급하여 측정함. 모든 시편 5일 동안 50℃에서 건조. CNT 농도에 따른 압전효과 변화 확인함
Pisello 등 (2017)	Solar Energy Materials and Solar Cells	직사각형 실험체 (40mm x 40mm x 160mm)에 MWCNT, Carbon Nanofiber, Graphene, Nano Platelets, Carbon black을 혼입하여 제작한 후, 600mW, 700mW, 750mW의 전기를 공급하여 40초간 (19℃양생, 85℃의 chamber안) 실험을 진행함

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의4제1항에 따라 검토하였을시 보안과제로 지정되지 아니한 과제로 일반 과제로 분류됨.	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

: 해당사항 없음

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책

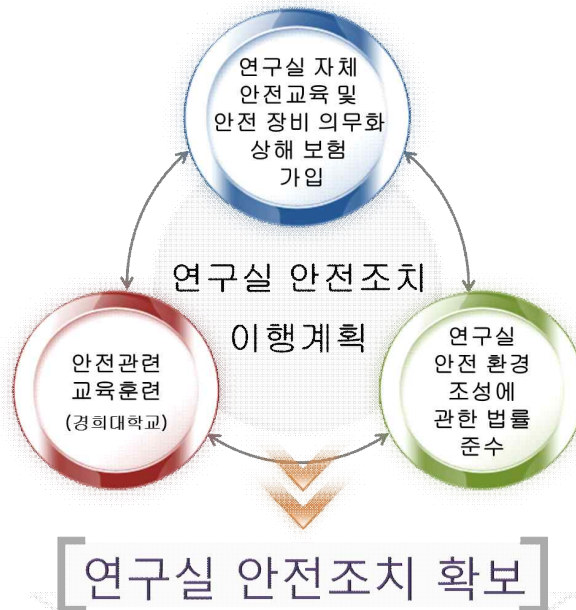
연구과제 수행 시, 연구실 안전환경조성에 관한 법률에 의거하여 실험실의 환경안전교육을 의무화함. 현행 법률에 의하면 이공계열 대학원생 및 관련자 전원을 대상으로 실험실의 안전을 확보하고 종사자의 건강을 보호하여 실험 및 연구활동에 기여할 목적으로 환경안전교육을 의무적으로 수강하도록 규정하고 있으므로 이에 대한 관련 법률을 이행할 것이다. 주관기관에서는 안전교육 이수자에게는 이수증을 발급하여 관리하고 있다.



주관기관인 경희대학교에서는 실험실 안전수칙을 준수하고 이행하는 지에 대한 여부를 주기적(매년 2회)으로 조사하고 있다. 연구과제 참여연구원의 안전관련 교육훈련은 경희대학교의 인적자원센터 및 안전관리과에서 주관하는 교육 참석을 통해 시행할 예정이다. 연구실에서는 연구책임자를 중심으로 참여연구원의 비정기적인 임시교육을 실시할 예정이다.

- ▶ 신입 연구자 대상 사이버 교육 환경안전교육
- ▶ 참여연구원의 실험실 안전가이드 동영상 분기별 시청
- ▶ 실험실 입실 시에 안전장치 착용 의무화
- ▶ 연구환경안전망 등의 홈페이지 자료를 이용한 분기별 사고사례전파 및 유인물 숙지
- ▶ 소화기 사용법 등 소화에 대한 방화교육

주관기관 연구책임자 및 참여 연구원들은 연구실에서 전열기 사용을 금하며 인화성이 강한 물질을 철저히 점검하고 일정한 장소에 소화기를 비치하여 사고를 미리 예방함. 경희대학교 사무처 관리과에서는 예방조치사항을 월 1회 이상 점검하고 미비점이 있으면 이를 시정·조치할 계획이다.



공동 연구기관인 한국건설생활환경시험연구원에서는 “연구실 안전환경 조성에 관한 법률” 및 시행령, 시행규칙에 의거하여 아래의 사항에 대한 안전조치 이행계획을 수립하여 상시적인 관리를 철저히 수행할 것이다.

1. 안전관리조직체계 및 그 직무에 관한 사항
2. 연구실별 안전관리담당자의 지정 및 그 책임과 권한의 부여
3. 주기적 안전교육의 실시에 관한 사항
4. 연구실 안전표식의 설치 또는 부착
5. 연구실사고 또는 중대 연구실사고(이하 "사고"라 한다) 발생 시 긴급대처방안과 행동요령에 관한 사항
6. 사고조사 및 후속대책수립에 관한 사항

본 과제의 참여연구원은 상해보험, 재산종합보험 등의 관련 보험을 의무적으로 가입하도록 할 것이다. 또한 한국건설생활환경시험연구원에서는 연구원 내 화재예방점검을 다음과 같이 수행하고 있다.

시 설 명	점검주기	점검내용	관리업체
전 기	매월1회	배전반, 누전차단기 등	케이에스타(본관) 한국전기안전공사(별관)
무인경비시스템	매월1회	CCTV, 방범시스템 등	에스원
엘리베이터	매월1회	모터, 케이블 등	대광엘리베이터
급, 배기 FAN	매월1회	필터, 벨트, 모터 등	신성크린텍
소방시설	매월1회	경보설비, 피난설비, 소화설비 등	대일소방
방화순찰	매일	1일 2회(주간) 각층 유도등 , 소화기 정 위치, 비상조명등 등 피난기구 정위치 확인	방화관리자
건물순찰	매일	1일 4회 이상 (주간 2회이상, 야간 2회) 건물주변 및 내부순찰	경비원
시설물관리	매일	보일러실, 냉난방기 등	시설관리담당자
※ 스프링 쿨러 : 11층 이상 신축건물 의무 설치(소방법)			
※ 하론 패키지 : 기존 건물에 사용 (설치비:300~400만원/대)			
※ 자체소방훈련 년1회 이상 실시(소방관리법 시행규칙 제15조)			
’ 11년 10월중 계획			
※ 소방서·경찰서·연구원 합동소방훈련(외부훈련)			
: 지역소방서(구로) 요청시 적극 실시			

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

구분 번호 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기 타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허	탄소나노소재를 이용한 압전 콘크리트 포장 시스템	경희대 학교 산학협 력단	발명	대한민국	N/A	2017.07.10	단독 사사
2	특허	PSC 구조물의 그라우트 충전도 평가를 위한 PC그라우트, 평가방법 및 시스템	경희대 학교 산학협 력단	발명	대한민국	N/A	2018.09.19	단독 사사
3	논문	Heating Experiment of CNT Cementitious Composites with Single-Walled and Multiwalled Carbon Nanotubes	경희대 학교 산학협 력단	교신 저자	Journal of Nanomate rials	1.871	2017.05	단독 사사 SCI
4	논문	Feasibility of Using Graphene Oxide Nanoflake (GONF) as Additive of Cement Composite	경희대 학교 산학협 력단	교신 저자	MDPI applied sciences	1.689	2018.03	단독 사사 SCI
5	논문	그래핀 옥사이드 보강 시멘트 복합체의 휨 거동 연구	경희대 학교 산학협 력단	주저 자, 교신 저자	한국방재학 회논문집		2017.10	단독 사사
6	논문	CNT 첨가량에 따른 시멘트의 역학성능 및 미세구조의 영향	한국건 설생활 환경시 험연구 원	주저 자	한국구조물 진단유지관 리공학회 논문집		2017.11	단독 사사
7	논문	도로결빙방지를 위한 발열 나노 시멘트 복합재의 전원 공급 효율에 대한 실험적 연구	경희대 학교 산학협 력단	주저 자, 교신 저자	한국방재학 회논문집		2018.10	단독 사사
8	논문	낮은 물-바인더 비를 갖는 시멘트 복합체의 CNT 첨가량에 따른 수화특성 및 발열특성	한국건 설생활 환경시 험연구 원	주저 자	한국구조물 진단유지관 리공학회 논문집		2018.11	단독 사사

제11장. 기타 사항

: 해당사항 없음.

제12장. 참고 문헌

- ASTM C109. (2016). “Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars(Using 2-in, or [50-mm] cube specimens)” , ASTM International.
- Chang, C., Ho, M., Song, G., Mo, Y. L., & Li, H. (2009). A feasibility study of self-heating concrete utilizing carbon nanofiber heating elements. *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 12, 127001.
- Chu, H., Zhang, Z., Liu, Y., & Leng, J. (2014). Self-heating fiber reinforced polymer composite using mesomacropore carbon nanotube paper and its application in deicing. *Carbon*, Vol. 66, 154–163.
- Chung, D. D. L. (2004). “Self-heating structural materials.” , *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, No. 3, pp. 562–565.
- Gomis, J., Galao, O., Gomis, V., Zornoza, E. and Garcías, P. (2015). “Self-heating and deicing conductive cement. Experimental study and modeling.” , *Construction and Building Materials*, Vol. 75, pp. 442–449.
- Han, B., Yu, X. and Ou, J. (2010). “Effect of water content on the piezoresistivity of MWNT/cement composites.” , *Journal of Materials Science*, Vol. 45, Issue. 14, pp. 3714–3719.
- Han, B., Yu, X., Kwon, E. and Ou, J. (2012). “Effects of CNT concentration level and water/cement ratio on the piezoresistivity of CNT/cement composites.” , *Journal of Composite Materials*, Vol. 46, No. 1, pp. 19–25.
- Kim, G. M., Naeem, F., Kim, H. K., and Lee, H. K. (2016). “Heating and heat-dependent mechanical characteristics of CNT-embedded cementitious composites.” *Composite Structures*, Vol. 136, pp. 162–170.
- KS L 5201. (2016). “Portland cement” , Korean Standards Association.
- KS L ISO679. (2011). “Methods of testing cements–determination of strength” , Korean Standards Association.
- Liu, Y., Lai, Y., & Ma, D. X. (2015). Research of carbon fibre grille reinforced composites in airport pavement snowmelt. *Materials Research Innovations*, Vol. 19, No. 10, pp. 10–49.
- Lee, H., Kang, D., Song, Y. M., & Chung, W. (2017). Heating Experiment of CNT Cementitious Composites with Single-Walled and Multiwalled Carbon Nanotubes. *Journal of Nanomaterials*, 2017.
- Lee, H.Y., Song, Y.M., Loh, K.J. and Chung, W.S. (2018) Thermal Response Characterization and Comparison of Carbon Nanotube-enhanced Cementitious Composites. *Composite Structures*.
- Zhang, Q. and Li, H. (2011). “Experimental investigation on the ice/snow melting performance of CNFP & MWCNT/cement-based deicing system.” , *Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology*, pp. 25–26.
- Zhao, H., Wu, Z., Wang, S., Zheng, J. and Che, G. (2011). “Concrete pavement deicing with carbon fiber heating wires.” , *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 65, Issue. 3, pp. 413–420.
-

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.