

17RTRP-
C137546-
01

일반 과제(✓)/공개(✓)/발간등록번호(11-B551201-000129-01)
철도기술연구사업 2019연도 최종보고서

R&D / 17RTRP-C137546-01

능동형 냉각시스템 요소기술 개발
PCM 나노복합소재 기반

최종보고서

2019

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

PCM 나노복합소재 기반 능동형 냉각시스템 요소기술 개발 최종보고서

2019. 09. 30.

주관연구기관 / 한국철도기술연구원
공동연구기관 / 테크젠정공(주)
위탁연구기관 / 한양대학교

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘PCM 나노복합소재 기반 능동형 냉각시스템 요소기술 개발’(연구개발 기간 : 2017. 10. ~ 2019. 07.)
과제의 최종보고서 5 부를 제출합니다.

2019. 09. 30.

주관연구기관명 : 한국철도기술연구원 (대표자) 나 희 승
공동연구기관명 : 테크젠정공(주) (대표자) 양 남 준
위탁연구기관명 : 한양대학교 산학협력단 (대표자) 이 수 재

주관연구기관책임자: 목 진 용
공동연구기관책임자: 양 남 준
위탁연구기관책임자: 김 동 립

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라
최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17RTRP-C137546-01	해당 단계 연구 기간	2017.12.23. ~ 2019.07.22.	단계구분	1 / 1
연구사업명	중사업명	-			
	세부사업명	철도기술연구사업			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	PCM 나노복합소재 기반 능동형 냉각시스템 요소기술 개발			
연구책임자	목진용	해당단계 참여연구원 수	총: 20명 내부: 11명 외부: 9명	해당단계 연구비	정부: 574,000천원 민간: 192,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 766,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 20명 내부: 11명 외부: 9명	총 연구비	정부: 574,000천원 민간: 192,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 766,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국철도기술연구원			스마트전기신호본부	
공동연구	테크젠정공(주)			연구책임자: 양남준	
위탁연구	한양대학교			연구책임자: 김동립	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	
-------------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	2 (게제) 2 (심사중)	4 (출원)		1	1						

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

보고서 면수: 94

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 철도 차량에 적용된 기존 냉각시스템을 보완하고, 높은 냉각 효율(시스템 공간 차지 대비 냉각 성능)을 가지는 PCM(Phase Change Material) 복합 소재를 적용한 철도차량용 냉각장치의 요소기술 개발 - PCM 나노복합소재 적용 냉각장치 적용기술 개발 - 개발 냉각장치 성능 평가기술 개발 - PCM 나노복합소재 합성 공정기술 개발				
연구개발성과	○ 철도차량용 급속·고발열 전장품의 열환경 분석기법 정립과 국내 최초로 시도된 PCM기반 복합소재를 적용한 능동냉각시스템의 설계기술 정립 ○ 철도 현장에서 효용성, 효과성이 있는 능동냉각 기술을 적용하기 위한 PCM 기반 복합소재 냉각장치의 요소기술 개발 및 성능평가 기술 개발 ○ 밀폐구조 내 급속·고발열 특성을 가진 전장품 냉각 시 열성능지수 20% 이상 향상, 설치공간 10% 축소 가능한 PCM 적용 냉각장치 요소기술 개발 ○ PCM 기반 복합소재 요소기술을 급속·고발열 전장품 냉각장치에 적용 및 성능 확인을 통해 실제 현장 적용이 가능한 냉각모델(시작품 포함) 개발 ○ 다품종 소량생산 특성 상 해외 전장품 제조공급사의 설계에 의존해온 철도차량용 히트싱크 장치의 독자적 핵심 설계기술 개발 및 경험 축적				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	【철도차량 및 철도 전력설비용 냉각장치 기술 분야】 ○ 장착공간/중량 제약을 받고 충격적 열로 인한 열 소손, 성능저하 방지가 필수로 요구되는 급속·고발열 전장품의 가혹환경 냉각장치 설계에 활용 ○ 급속·충격 발열(Impact Heat)로 고가·고기능 전장품의 열 소손, 기능 저하 방지가 필수인 철도 전력설비의 급속 열충격 완화냉각장치 설계에 활용 【철도 관련산업 또는 타 산업계의 냉각장치 기술 분야】 ○ ESS(Energy Storage System ; 에너지 저장장치) Stack 등 밀폐구조 내에 급속·과발열형 전장품 충격열의 완화 또는 발화를 막을 냉각장치에 활용 ○ 수소 철도차량, 수소 전기자동차의 밀폐공간 탑재조건을 가진 고발열 전장품·배터리 등 급속·충격열 완충이 요구되는 능동냉각장치에 활용 ○ 산업용 터보 블로워 인버터, 태양광발전 시스템 인버터 및 UPS 무정전 전원 시스템, 인버터 전력변환형 엘리베이터, 대형 변압기용 냉각장치에 활용				
국문핵심어 (5개 이내)	상변화물질	나노소재	능동형 냉각시스템	에너지 순환	철도차량
영문핵심어 (5개 이내)	Phase change material	Nano material	active cooling system	energy circulation	train

〈 목 차 〉

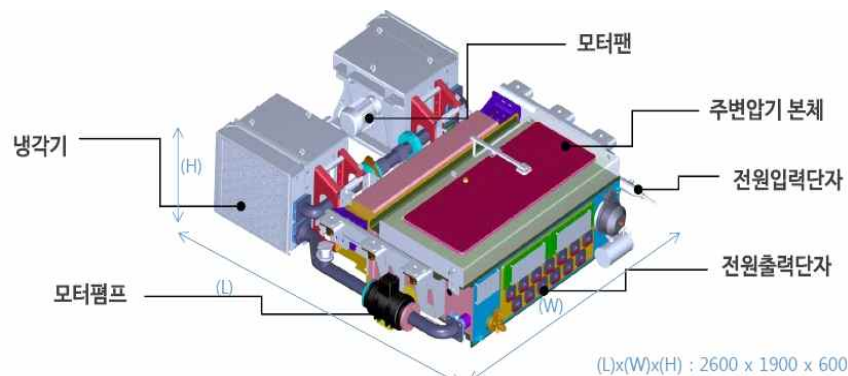
1. 연구개발과제의 개요	5
가. 연구개발의 필요성	5
나. 연구개발 대상의 국내·외 현황	6
다. 연구개발의 중요성	13
라. 선행 연구 내용 및 결과	15
마. 연구개발의 목표 및 내용	18
2. 연구수행내용 및 성과	22
가. 수요처(철도운영기관/철도차량제작사) 요구사항 조사 및 분석	22
나. 철도차량 주요 발열부 열환경 분석 및 적용방안 도출	24
다. PCM 나노복합소재 기반 냉각장치 설계 및 제작	33
라. 냉각 성능 평가	54
마. 상용화를 위한 시스템 보완 방안	74
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	81
가. 연구 목표	81
나. 목표 달성여부	82
다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후 대책(후속연구의 필요성)	88
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	89
가. 성과활용을 위한 추가 연구의 필요성	89
나. 성과활용·제품화 대비 기술 기준 및 KS 국가 산업표준 규격 제정 검토	91
붙임. 참고 문헌	93

<별첨> 주관연구기관의 자체 평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발의 필요성

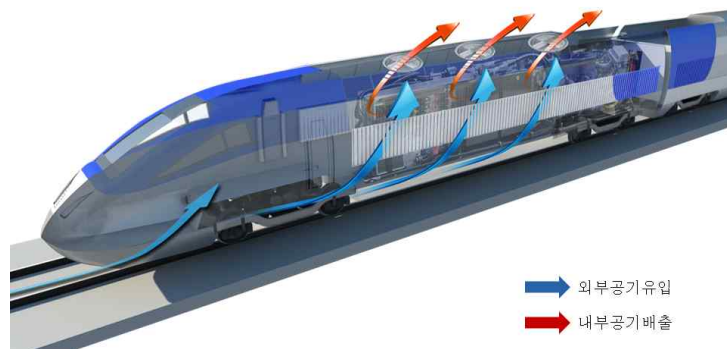
- 경량화 및 지능화를 위해서 새롭게 개발되고 있는 집적화된 추진 시스템 및 고도화된 시스템이 도입됨에 따라 더욱 많은 에너지 소요가 발생되고 있으며, 특히 시스템의 에너지 변환효율을 높임과 동시에 작동온도에 대한 제한사항을 유지하고 시스템의 온도 균일성을 보장하는 것은 시스템의 안정적인 운영에 필수적임
 - 대형 승객운송수단인 철도차량의 운행 중에 추진시스템의 고장(예: 전력반도체(IGBT) 냉각실패)으로 차량이 정지할 경우, 승객의 안전이 위협할 수 있으며 대중교통으로의 신뢰도도 손상됨
 - 기존 강제냉각(공냉 또는 수냉) 방식의 경우, 열교환 매체(공기 및 냉각수)의 강제순환에 따른 에너지 소모 및 그에 따른 추가설비(Fan, Pump 및 Duct)의 설치에 따른 철도차량 내 공간 제약 문제 발생
 - 철도 차량 주변압기의 냉각을 위한 부수장치(냉각기, 냉각팬, 오일펌프 등)의 체적은 전체의 약 30% 정도를 차지
 - 철도차량용 냉각기술의 경우, 제한된 철도차량수요 및 냉각관련 해석기술의 부재로 대부분을 국외기술에 의존하고 있어 새로운 냉각시스템 기술개발을 통한 국외기술 대체 및 국내·외 시장 선점이 필요함
- ※ 일부 일반철도차량에 국내기술(Oil Pump) 적용사례 있음



<그림 1-1-1> Oil-Pump 기반 철도차량용 주변압기 냉각기술 예시

- 철도차량의 주요 전장품 내 반도체 소자 및 전자기기의 손상 방지를 위해 공냉식 냉각 기술이 사용되고 있으나 냉각효율이 낮음. 냉각시스템의 고장(예: 전력 반도체의 냉각 실패)은 시스템의 동작을 일시에 정지시켜 사용자의 안전을 위협할 수 있으며, 특히 고열환경에서의 시스템의 운영은 시스템의 열적 피로(Thermal Fatigue)를 주기적으로 일으켜 시스템의 수명을 단축하게 함

- 철도차량의 주전력 변환장치에서 발생하는 열을 제어하는 냉각장치 설계기술은 미흡한 상태이며, 특히 IGBT(Insulated Gate Bipolar mode Transistor)는 전장품의 핵심요소로서 신뢰성 및 안전성 보장을 위해 냉각 기술이 필수적임
 - ※ 철도차량 추진장치용 IGBT(전력반도체)의 경우, 약 88.6℃ 이상의 온도에서 열응력 및 피로에 의한 고장 또는 손상 가능성이 매우 높음
- 기존의 팬-핀(fan-fin) 방식의 냉각방식은 고열 유속(예: 1000 W/m²)의 냉각에 활용되기에 제한적임
- 동력집중식 고속철도차량(예: KTX-산천)의 동력차 부분에는 냉각을 위한 환기(Fan) 시스템 및 덕트(duct)가 부착되어 있으며, 이는 열차의 공기역학적 저항을 증가시키는 요인이므로 차량의 냉각성능을 향상시킨다면 고속열차의 성능을 높일 수 있음



<그림 1-1-2> 동력 집중식 고속철도 차량의 강제대류 냉각 개념 예시

나. 연구개발 대상의 국내 · 외 현황

(1) 철도 차량 적용 기술

(가) 냉각 방식

- 철도차량의 냉각방식은 크게 공냉(air cooling: 자연대류냉각, 강제대류냉각), 수/ 유냉(liquid cooling), 상변환(phase change: 비등냉각 및 히트파이프(Heat Pipe)냉각) 등으로 나뉘지며, 발열체의 열부하(thermal loads)에 따라 선택되어 적용됨. 최근에는 전기에너지 공급을 이용한 열전방식의 소규모 냉각기술도 현재 상용화되어 있음
- 자연대류방식
 - 주전력변환장치의 반도체소자에서 발생하는 열을 제어하기 위해, 주전력변환장치 케이스(case)에 핀(fin)을 설치하고, 핀으로 전달되는 열을 공기 중으로 자연 방사하는 형태의 냉각 방식임
- 강제대류방식
 - 강제대류방식의 경우, 자연대류 방식을 통한 냉각방식에 냉각 효율을 높이기 위해 부수 장치인 냉각팬을 장착하여 공기를 강제로 주입하여 냉각하는 형태를 말함

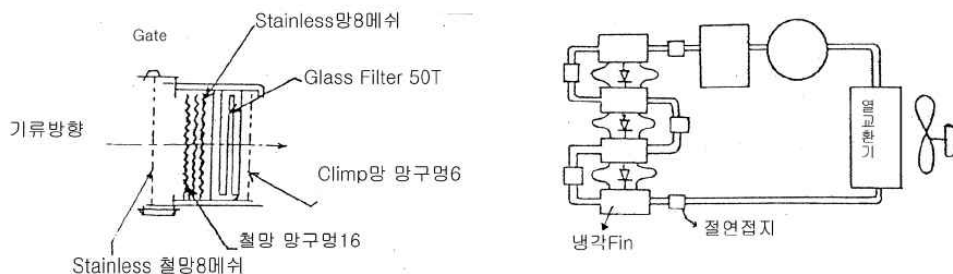
- 강제대류방식은 냉각 반응에 대한 신속성이 우수하고, 구조가 비교적 간단한 장점을 지니며, 외부로부터 유입되는 공기에 포함되는 불순물 제거를 위한 에어필터(air filter)가 추가로 장착되어야 함. 정기적인 에어필터 교체 및 관리가 필요함



<그림 1-2-1> 열부하(Thermal Loads)에 따른 냉각방식 적용 예시

○ 수냉각방식

- 수냉각방식은 공기를 이용한 강제대류방식과 구조는 유사하나, 냉매로 물을 사용함. 반도체 소자에서 발생하는 열이 냉각핀으로 전달되면, 냉각핀 내부로 물이 나감으로써 냉각을 하는 방식이며, 냉각핀을 지난 물은 열 교환기를 통해 다시 차가워짐
- 물은 공기보다 높은 열량으로 적은 양으로 효과적인 열 제어가 가능하며, 이를 통해 냉각 핀 및 부수 장치의 소형화를 할 수 있는 장점을 가짐. 공기를 이용한 강제대류방식 보다 높은 기밀성을 요하며, 물은 절연성을 띄지 않으므로 별도의 절연품을 사용하여 제작해야 함. 현재는 순수 물을 사용하지 않고, 글리콜과 혼합하여 상용하는 형태임



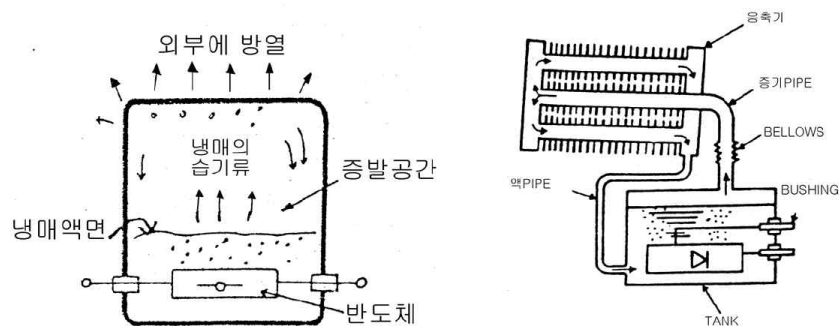
<그림 1-2-2> 강제대류 및 수냉각 방식 개념도 예시

○ 유냉각방식

- 유냉각방식의 경우, 반도체 소자 냉각에 필요한 냉매로 절연유를 사용하며, 절연유를 담은 탱크(tank)를 부속으로 두고 있음. 유냉각방식은 공기를 이용한 냉각방식과 유사하게 자연유냉각방식과 강제유냉각방식으로 나눌 수 있음
 - 자연유냉각방식 : 주전력변환장치 내 반도체 소자(thyristor, GTO 등)를 절연유를 담고 있는 탱크에 침식시켜 냉각하는 방식이며, 절연유의 누수 방지를 위한 케이스의 높은 기밀성 유지가 필요함
 - 강제유냉각방식 : 자연유냉방식의 기본 구조로 탱크에 보관되어 있는 절연유를 펌프를 이용해 강제로 순환시켜 냉각하는 방식으로, 자연유냉각방식에 비해 높은 냉각효율을 가지나 구조가 복잡하고, 장치가 대형화되는 단점이 있어 현재 활발한 사용은 되지 않고 있음

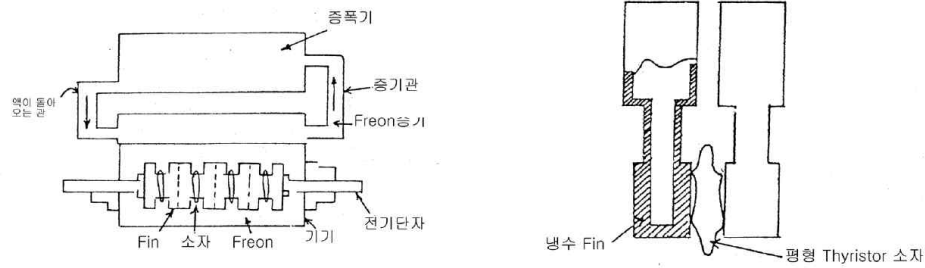
○ 비등냉각방식

- 비등냉각방식은 반도체 소자로부터 발생하는 열에 의해 냉매의 상변화 과정 시 발생하는 잠열을 이용해 냉각하는 방식으로 냉매는 프레온(freon) R133을 사용함. 공기, 물 및 절연유를 이용한 냉각 방식의 한계를 극복하기 위한 냉각 방식으로 착안되었으며, 높은 열전도성을 통해 냉각장치의 소형화가 장점임. 비등냉각방식에는 탱크침적냉각방식과 개별비등냉각방식으로 나눌 수 있음



<그림 1-2-3> 비등냉각방식 원리 및 구조 예시

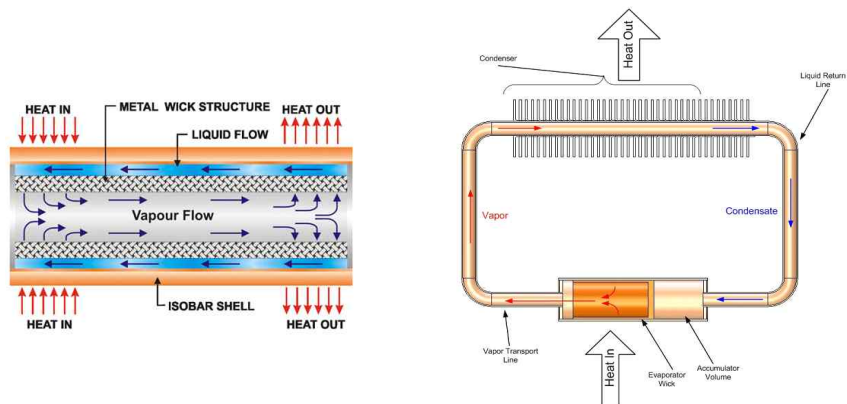
- 탱크비등냉각방식 : 초퍼(chopper) 냉각을 위해 1970년 후반에 탱크비등냉각방식이 실용화 되었으며, 자연유냉각방식과 동일하게, 냉매를 보관하는 탱크에 반도체소자를 침식시키고, 반도체소자에서 발생하는 열에 의해 냉매가 증발하며, 기화열을 통해 반도체소자를 냉각시키는 원리임. 탱크비등냉각방식은 구조상 대량의 냉매를 필요로 하며, 무겁고 대형화되어 있음
- 개별비등냉각방식 : 탱크비등냉각방식에 비해 냉매 용량은 비교적 적으나 반도체소자 각각에 대한 개별 냉각방식임



〈그림 1-2-4〉 탱크(Tank)/ 개별 비등냉각방식 예시

○ 히트파이프(heat pipe)냉각방식

- 열차 열원부의 주위를 감싸는 파이프 내부에 작동 유체가 흘러가면서, 온도 변화에 따른 상변화 과정을 통해 반도체 소자를 냉각시키는 방식임. 비등냉각방식과 유사한 방식이나, 밀폐된 용기에 국한되지 않아 압력 강하에 따른 용기의 한계 규정을 두지 않음. 열수송 능력이 크고 소형으로 구축할 수 있어 신뢰성이 높은 냉각시스템을 구성할 수 있음



〈그림 1-2-5〉 히트파이프냉각방식 원리 및 구조 예시

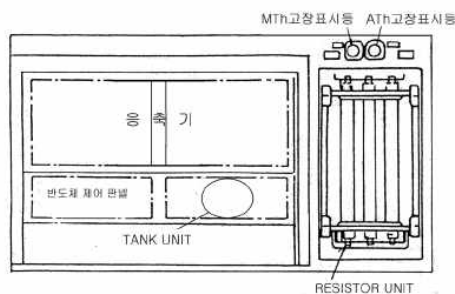
- 상변화물질(PCM)의 경우, 기존 냉각시스템의 냉매(공기, 물, 프레온가스 등)를 대체하는 기술로 활발한 연구가 진행되고 있음
 - 상변화물질은 유기계와 무기계로 구분할 수 있으며, 장기 신뢰성 및 안전성의 장점을 지닌 유기계 물질인 파라핀을 이용한 냉각 효율 증대 연구가 활발히 이루어짐
- PCM을 이용한 냉각기술은 항공, 전기자동차, 군사분야 등을 중심으로 활발히 연구 중이나, PCM을 이용한 냉각시스템의 철도 적용사례는 없음
 - 일본의 Nikko석유화학은 건물의 내장재 및 단열재, 기능성침구, 디지털기기의 방열재, 스키복 등에 적용하고 있음
 - 국내기업 써모아트는 PCM 소재를 마이크로캡슐화하지 않고 직접 적용할 수 있는 응용 기술을 세계 최초로 개발하였음

(나) 국내 철도차량 적용 기술 동향

① 도시철도차량

○ 주로 자연대류냉각 및 비등냉각 방식이 적용되어 운영 중임

- 서울메트로 2호선에 운영 중인 현대로템사에서 개발한 전동차의 경우 프레온 냉매를 이용한 탱크 비등냉각방식을 사용하고 있음
- 서울메트로 2,3호선에 운영 중인 대우사에서 생산한 전동차는 열차 하단에 알루미늄 냉각핀을 이용한 자연대류 냉각방식을 채택하고 있음



<그림 1-2-6> 비등냉각방식의 철도적용 사례

- 도시철도차량의 주변환장치에서 발생하는 열을 제어하기 위해 대흥기업에서 제작하는 히트파이프(heat pipe)를 이용한 냉각 방식을 채택하고 있으며, 보조전원장치의 경우, 대흥기업, 제이엔엠메카텍 및 테크젠정공에서 제작하는 히트싱크(heat sink)를 이용한 자연냉각 방식을 사용하고 있음
- 서울교통공사 1~8호선에 사용되는 추진제어장치의 경우, 냉매(프레온) 사용 비침전식, 히트파이프 및 공랭식 냉각장치가 사용되고 있으며, 국내 업체로는 대흥기업(히트파이프 생산)과 해외 업체인 미쓰비시, 알스톰, ABB, 도시바 등에서 제작 및 납품하고 있음
- 보조전원장치의 경우, SIV(Static InVerter)에서 발생하는 열을 냉각하기 위한 장치는 히트싱크(heat sink)와 히트파이프(heat pipe)를 주로 사용하고 있으며, 부하열에 따라 자연대류 방식과 강제대류 방식을 혼용하여 사용하고 있음

② 고속철도차량

○ 도시철도보다 높은 열부하에 대응하기 위한 고기능성 냉각장치가 요구됨

- KTX의 경우 주전력변환장치와 보조전원장치의 사이리스터(thyristor) 냉각을 위해 침적식(프레온냉각형) 냉각방식을 사용하고 있으며, 프레온 가스의 상변화를 통해 발생하는 잠열을 이용해 주전력 변환장치를 냉각하는 구조임
- KTX-산천의 경우 주전력변환장치와 보조전원장치의 IGBT(Insulated Gate Bipolar mode Transistor) 소자의 냉각을 위해 히트파이프 기반 강제대류 냉각방식이 적용되고 있음

(다) 국외 철도차량 적용 기술 동향

- (프랑스) 알스톰(Alstom)의 TGV-A(2세대 고속철도차량)의 동기전동기 구동을 위한 전류형 인버터의 냉각방식은 프레온가스를 냉매로 하는 비등냉각방법을 채택하고 있음. 또한 유도전동기가 사용된 TMST(TGV-Trans Manche Super Train)의 경우 주전력변환장치 반도체 소자의 GTO(Gate Turn-off Thyristor) 구동 시 발생하는 열 제어를 위해 GTO 설치부에 냉각유를 통과시켜 냉각시키는 강제오일 순환 냉각방식을 사용하고 있음
 - 특히, TGV-NG(New Generation)의 경우, TMST의 주전력변환장치의 경량화 및 소형화를 위해 반도체 소자를 GTO를 IGBT로 교체하였으며, 냉각방식은 프레온 가스의 환경 유해성 등의 이유로 수냉식으로 교체하여 운영 중에 있음
- (독일) 지멘스(Siemens)에서 개발한 ICE1(Inter-City Express1) 고속전철은 동기전동기 구동 방식이 아닌 유도전동기 구동방식을 사용하고 있으며, GTO 소자의 냉각을 위해 비등냉각 방식을 사용하고 있음. ICE3의 경우, ICE1 및 2와는 다르게 냉각 장치의 소형화와 구조의 단순화를 위해 주전력변환장치의 냉각방식을 수냉식으로 교체하였으며, 열차 하단부에 탈부착이 용이하도록 설계되어 있음
- (일본) 신간선 300계의 경우 동력분산식 추진방식을 사용하고 있으며, 신간선 200계와 동일하게 주전력변환장치의 냉각을 비등냉각방식을 채택하고 있음. 냉각장치는 MC(Motor Car)하부에 설치되어 있음
 - JR 동일본(JR East)에서 개발한 952,953계 고속시험선의 경우, 인버터 스위칭 소자인 GTO 냉각을 위해 히트파이프 냉각 방식을 사용하였음

(2) 국내 · 외 철도차량 냉각시스템 기술 동향

(가) 국내 산업계 기술 동향

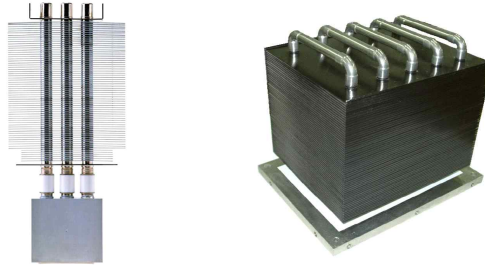
- (선우테크)
 - 선우테크의 경우, 전기기관차용(8200호대) 전력변환장치의 반도체 소자인 GTO를 IGBT로 교체함에 따라 IGBT를 적용한 전력변환장치의 냉각시스템을 개발하였음. 8200호대 전력변환 장치에 설치된 냉각장치의 경우, 강제 수냉식으로 설계 되었으며, 전력변환장치의 열 환경 분석을 통한 수로 설계 최적화를 통해 수냉각 스택을 개발하였음



〈그림 1-2-7〉 전기기관차용 수냉각 스택 예시

○ (대흥기업)

- 대흥기업은 1995년 한국형 고속전철차량용 히트파이프(heat pipe)식 냉각시스템의 국산화 연구를 진행하였으며, KTX-산천에 설치되는 전력변환장치용 강제대류 Heat Pipe식 냉각시스템을 개발하였음



<그림 1-2-8> 대흥기업 냉각장치 예시

○ (테크젠정공)

- 테크젠정공은 처로차량 전장품에 사용되는 히트싱크(heat sink) 제작하는 기업으로, 전장품의 부하별 다양한 히트싱크(heat sink)를 생산하고 있으며, 핀(fin) 표면에 나노소재를 적용한 고효율 방열 히트싱크(heat sink)를 연구/ 개발하였음

(나) 국외 산업계 기술 동향

○ (HAUGG)

- 독일 HAUGG는 국내 전동열차 및 고속철도에 설치되는 주변압기의 냉각시스템을 제작하는 업체임. 주변압기 냉각시스템 중 냉각팬 모듈을 제작하며, 현재 국내에서는 납품량 및 해석기술 부재로 인해 외산에 의존하고 있으며, 특히 냉각팬의 경우, HAUGG사의 제품을 많은 부분을 수입하고 있음

○ (TOSHIBA)

- 일본 도시바(Toshiba)는 주전동기용 전동 송풍기 제거를 위해 자기통풍 냉각방식의 영구자석 동기전동기를 사용하여 냉각시스템을 구성함. 자기통풍식 냉각방식을 통해 구조의 간소화와 소음 절감을 도모함

○ (HITACHI)

- 일본 히타치(Hitachi)의 경우, 철도차량의 주전력변환장치의 냉각을 수냉과 자연풍을 통한 자연냉각 방식으로 전동송풍기를 제거하는 냉각시스템 제작. 냉매(물) 순환부의 라디에이터(radiator)외 장치는 밀봉 구조로 유지· 보수 측면에서의 장점을 지니며, 고속 주행 시 주행풍 흡입에 대한 소음 발생 억제를 위한 흡입구 형상 개발 및 흡음재를 배치함

○ (ALSTOM)

- 프랑스 알스톰(Alstom)은 도시철도 차량의(서울 4,7 및 8호선) 추진제어장치에 사용되는 비침전식 냉각장치를 제작/ 납품하고 있으며, 비침전식 냉각장치의 경우 프레온(freon) 가스를 냉매로 이용하는 냉각방식임

○ (ROSENBERG / ETRI)

- 독일 ROSENBERG 및 프랑스 ETRI 사는 도시철도차량의 주변압기에 사용되는 유냉각방식의 냉각장치에서 사용되는 냉각팬(cooling fan)을 제작하고 있으며, 현재 도시철도차량에 적용되고 있음

다. 연구개발의 중요성

(1) 연구개발의 시급성 및 중요도

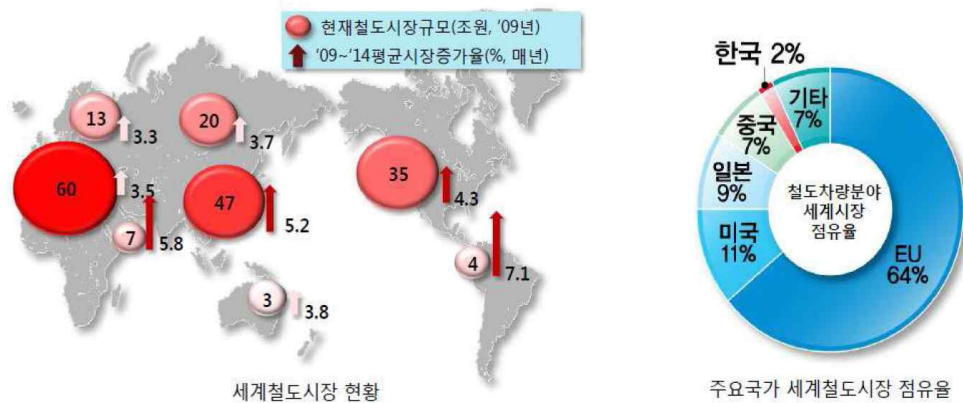
- 국내 철도 차량의 부품 개발에 대한 기술수준은 해외 대비 기술 격차가 수년으로 뒤쳐져 있으며, 원천 기술 보유 부재 및 납품량의 문제로 고비용으로 해외 부품을 많이 수입하거나 부품 수급의 한계가 있음. 현재 전량 수입에 의존하는 철도 차량용 냉각시스템의 국산화 및 원천 기술 확보를 위해 신기술을 이용한 냉각시스템 기술 개발이 시급함
- 국외 철도차량 부품 제작사의 부품 생산 중단 및 물량 축소로 운영비용이 증가하게 되며, 열차의 안전 운행을 위해 지속적인 부품 수급을 위한 방안이 시급함
- 철도차량용 냉각장치 부품의 경우, 대부분 수입에 의존하고 있는 상태이며, 불량 및 교체 시 소량 주문으로 인해 단가가 높고, 부품 수급의 어려움 및 장시간 운송 등으로 국산화가 시급함
- 철도차량용 냉각시스템의 경우, 국외 소수의 기업이 세계 시장을 독점하고 있어 진입 장벽이 높으며, 철도차량용 냉각시스템 시장의 선점 및 해외 시장 진출 기반 마련을 위한 기술 개발이 절실함



<그림 1-3-1> 부품 가격 상승률 및 단종가능 부품 수(KTX-산천)

- 철도 차량 시스템의 집적화로 인해 과도한 열이 발생하게 되며, 열 제어를 위해 현재 상용화되어 있는 자연/강제 냉각시스템은 대형화가 되어야 하며, 고에너지를 사용함에 따라 에너지 소비 효율 측면에서 단점을 지니게 됨. 따라서 철도의 제한된 공간에서 최적의 냉각 효율을 가지는 냉각시스템을 개발이 시급함
- 냉각 효율 향상을 위한 국내 설계 기술 수준은 해외 대비 약 75% 정도로 기술 격차가 크며, 일반철도 차량 및 고속 철도 차량에 국내 기업의 제품이 사용되고는 있으나 대부분을 외산에 의존하고 있으며, 냉각시스템의 원천 기술 확보가 절실함

- 기존의 철도차량용 냉각시스템 대비 소형화, 에너지 소비 효율 감소 및 냉각 효율을 증대시키는 새로운 냉각시스템을 개발함으로써 철도차량 냉각시스템 시장 및 기술 선점을 통해 세계 기술 시장의 방향을 제시하고 이끌어 갈 수 있는 계기가 될 수 있음

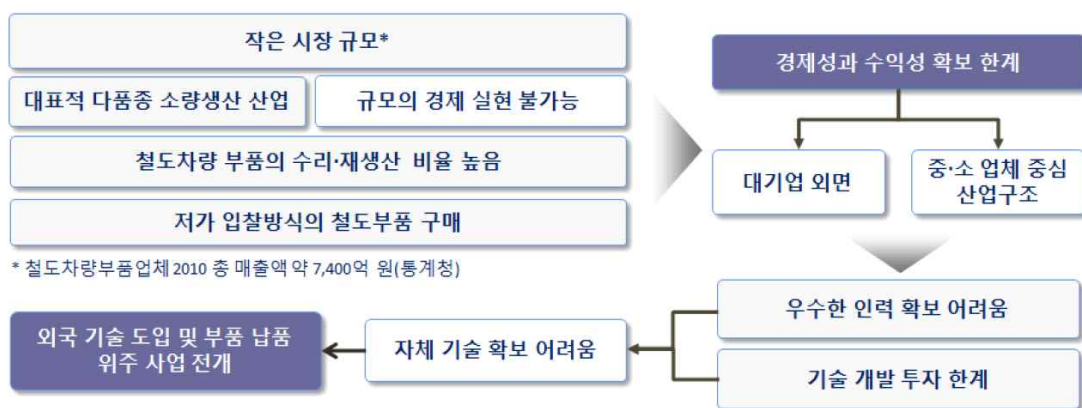


*출처:The worldwide market for railway technology, SCI('10) 및 제2차 철도산업발전기본계획(11.5)

<그림 1-3-2> 국가별 철도시장 점유율

(2) 정부지원의 필요성

- 세계적으로 자국 기술의 보호에 대한 강화 정책을 펴고 있으며, 국내 철도 부품 산업의 경우 중소기업 중심으로 시장의 소규모로 인한 소량 생산으로 경제성에 한계를 보이고 있으므로, 정부의 적극적 기술개발 투자를 통해 기술 경쟁력 확보로 세계 기술 수준의 경쟁 우위 측면에서 정부의 지원이 필요함



<그림 1-3-3> 국내 철도 부품산업 현황

라. 선행 연구 내용 및 결과

구분	선행과제명	시행연구기관	연구연도	주요 연구내용
1	철도차량용 능동형 냉각-열전소자 융합시스템 개발을 통한 에너지 효율 증대에 관한 연구	한국철도기술연구원 한양대학교	2016.07. ~ 2016.11.	• 다계층 PCM을 이용한 능동형 냉각시스템 개념 설계 및 성능 평가 • 폐열 흡수 및 재사용을 통한 에너지 소비 효율 증대 시스템 설계 • 특허 출원 1건 • 국제 논문 발표 1건
2	PCM의 열전도도 향상과 과냉각 방지를 위한 3-D Metal-Graphene PCM 복합소재 개발에 관한 연구	한양대학교	2016.05. ~ 2017.05.	• PCM 소재와 나노물질과의 금속 네트워크 형성을 통한 고성능 PCM 개발 • PCM 나노 복합소재 개발을 통한 열전도율 향상(4.7배) 및 소재 과냉각 방지 • 특허 출원 1건 • 국제 논문 게재 1건

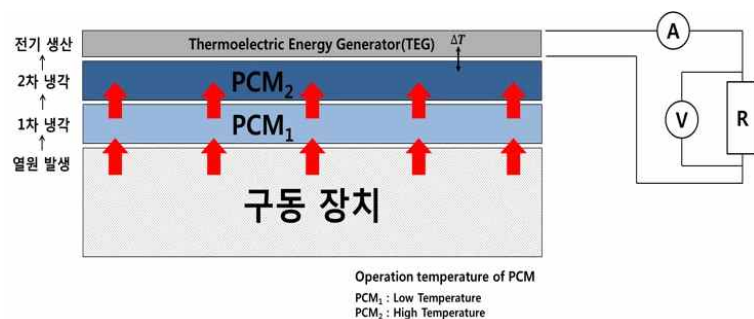
(1) 철도차량용 능동형 냉각-열전소자 융합시스템 개발을 통한 에너지 효율 증대에 관한 연구

○ PCM을 이용한 능동형 냉각장치 개발

- 기존 냉각유체를 순환하는 방식에서 열에너지가 자연적으로 순환되는 방식으로 개선함에 따라 냉각을 위한 에너지 사용을 획기적으로 줄일 수 있음
- 주요 동력전달시스템을 냉각하기 위한 부가적인 장비를 최소화하고, PCM을 이용한 능동형 냉각 장치 개발을 통해 냉각 장치의 소형화 및 열차 공간 활용의 효율성 증대를 이룰 수 있음
- 아래 그림과 같이 열원에 인접한 PCM₁에서 열에너지를 흡수하며, 열원의 지속적인 구동으로 PCM₁의 온도가 상승하여 냉각 효율이 저하될 시 PCM₁의 상변화 온도 범위에서 잠열을 흡수하는 PCM₂를 통해 PCM₁을 냉각시켜 줌으로써 계속된 열 발생에도 냉각 성능을 발휘할 수 있는 능동형 냉각장치 개발

○ PCM과 열전소자를 결합한 능동형 냉각-열전소자 융합시스템

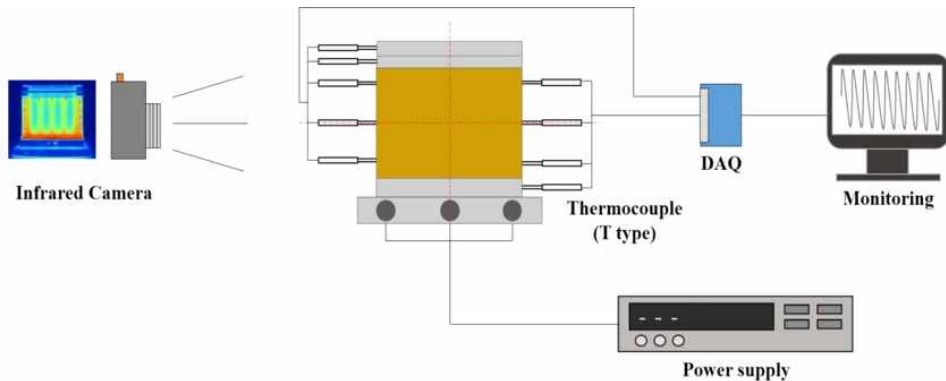
- TEG(Thermoelectric Energy Generator)를 이용해 폐열 흡수하여, 재생에너지를 생산하며, 재생에너지 생산을 통한 에너지 절약 및 환경 개선
- 온도가 상승한 PCM에 부착되어 있는 TEG와 주변 공기와의 온도차를 이용해 전기를 생산하는 열전 시스템을 개발함



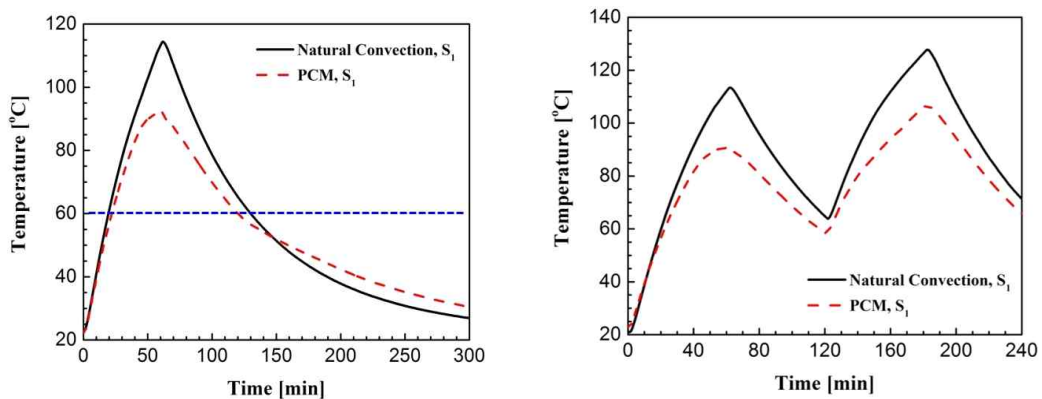
<그림 1-4-1> 능동형 냉각-열전소자 융합시스템 개념도

○ 능동형 냉각시스템 성능 평가 및 결과

- PCM을 이용한 냉각 시 핀에서의 온도는 92℃로 PCM에 의해 냉각 효율이 약 18.6% 향상
- PCM에 의한 냉각 성능은 자연대류 냉각 방식과 PCM을 이용한 냉각 방식이 60℃까지 떨어질 때까지의 시간으로 비교 분석하였으며, 이 결과 자연대류에 의한 냉각 대비 약 8.6% 정도 향상
- 주기적으로 열이 공급되는 상황에 대해 PCM에 의한 냉각 성능 확인과 PCM의 낮은 열전도도 특성에 의한 열축적 현상이 냉각 성능에 미치는 영향에 대한 평가 실시
- 냉각 효율의 경우, 1회 가동 시 냉각 효율은 PCM을 이용한 냉각 방식이 18.6% 향상된 결과를 보였으며, 2회 가동 시에는 초기 조건보다 20.6% 효율 향상
- 냉각 성능의 경우, 초기 열 공급에서의 PCM에 의한 냉각 성능은 8.6% 정도 향상된 결과를 보였으나, 2회 반복적인 열 공급에 의한 냉각 성능은 자연대류 냉각 방식 대비 약 4.2% 정도 향상된 결과를 보임



<그림 1-4-2> 냉각 성능 시험 개요도



<그림 1-4-3> 냉각 성능 평가 결과

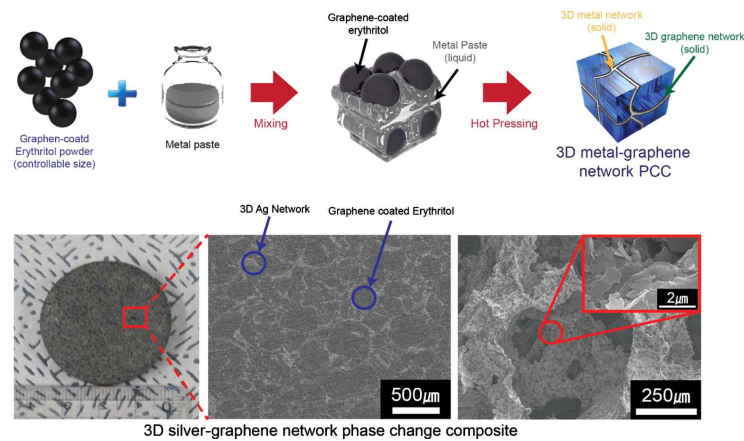
(2) PCM의 열전도도 향상과 과냉각 방지를 위한 3-D Metal-Graphene PCM 복합소재 개발에 관한 연구

○ 3-D metal-graphene PCM 복합소재 개발

- PCM의 낮은 열전도도 향상과 과냉각 방지를 위한 PCM 소재내 나노물질과 금속간 3-D 네트워크(network) 형성을 통한 고성능 PCM 복합소재 개발

○ PCM 소재내 나노 물질과 금속의 네트워크 형성을 통한 고성능 PCM 제작

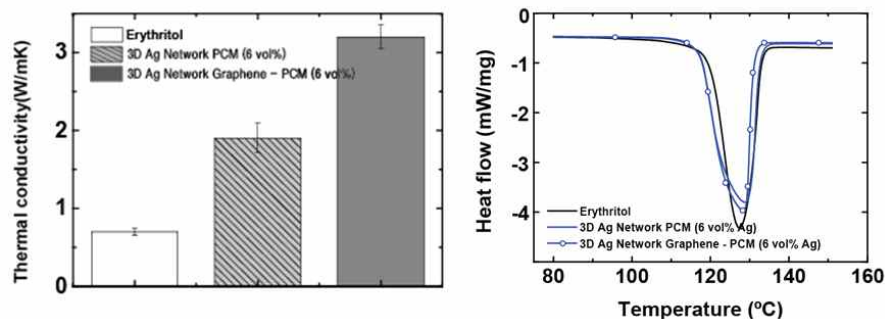
- PCM을 일차적으로 열전도성이 좋은 나노소재(그래핀)으로 코팅 후, 이차적으로 은(silver) 페이스트와 혼합함. 그 후, 간단한 가열가압 공정을 거쳐 최종적으로 고성능 PCM 복합 소재를 개발함



<그림 1-4-4> 3-D metal-Graphen PCM 제작 과정 및 제작

○ PCM 복합 소재 열적 성능 분석

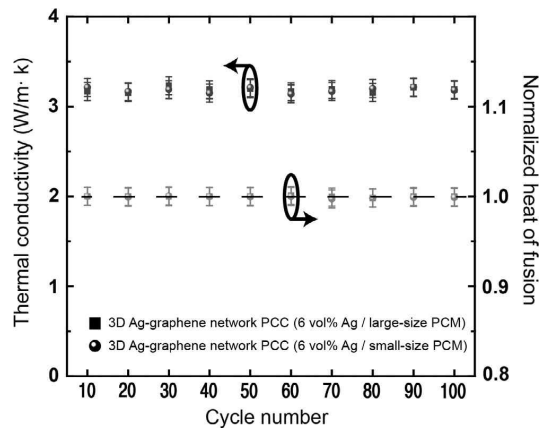
- 열전도도 측정 결과 순수 PCM, 은 페이스트(silver paste) 6 vol%를 함유한 PCM 복합소재, 은(silver) 6 vol%를 함유하고 나노 소재를 코팅한 PCM 복합소재 각각 0.7 W/mK, 1.9 W/mK, 3.2 W/mK으로 측정됨. 최종적으로, 순수 PCM 대비 약 4.7배 향상된 열전도가 향상됨
- DSC 측정 결과 순수 PCM, 은 페이스트(silver paste) 6 vol%를 함유한 PCM 복합소재, 은(silver) 6vol%를 함유하고 나노 소재를 코팅한 PCM 복합소재 각각 330 J/g, 304 J/g, 302 J/g으로 측정됨. 각각의 복합소재의 잠열량은 순수 PCM 대비 약 94%이상 수준을 나타냄
- 은 페이스트의 박막형태의 네트워크 형성을 통해 부피 분율(volume fraction)을 최소화 시킴으로써, PCM의 부피 함량을 최대로 향상시킬 수 있으며, 상변화 시 PCM의 높은 잠열량을 함유하는 PCM 복합소재 개발



<그림 1-4-5> PCM 복합소재 열적 성능 평가 결과

○ PCM 복합 소재 안정성 분석

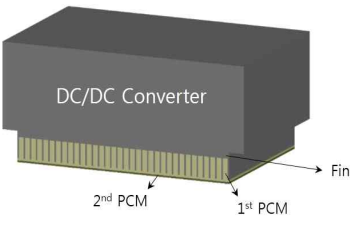
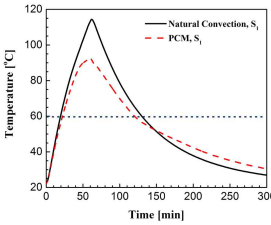
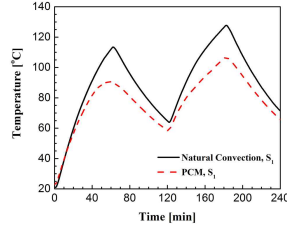
- 100회의 열 사이클(cycle) 반복 실험을 통해 제작한 PCM 복합 소재의 안정성을 검증함
- PCM 복합소재의 안정성을 검증하는 결과로 열전도도 및 잠열량 반복 측정 결과 초기 값 대비 1 % 미만의 변동폭을 나타냄. 은 페이스트(silver paste)의 네트워크(network) 및 나노 소재의 네트워크가 PCM의 반복적인 상변화 과정 시 PCM의 장기 신뢰성을 향상시킴



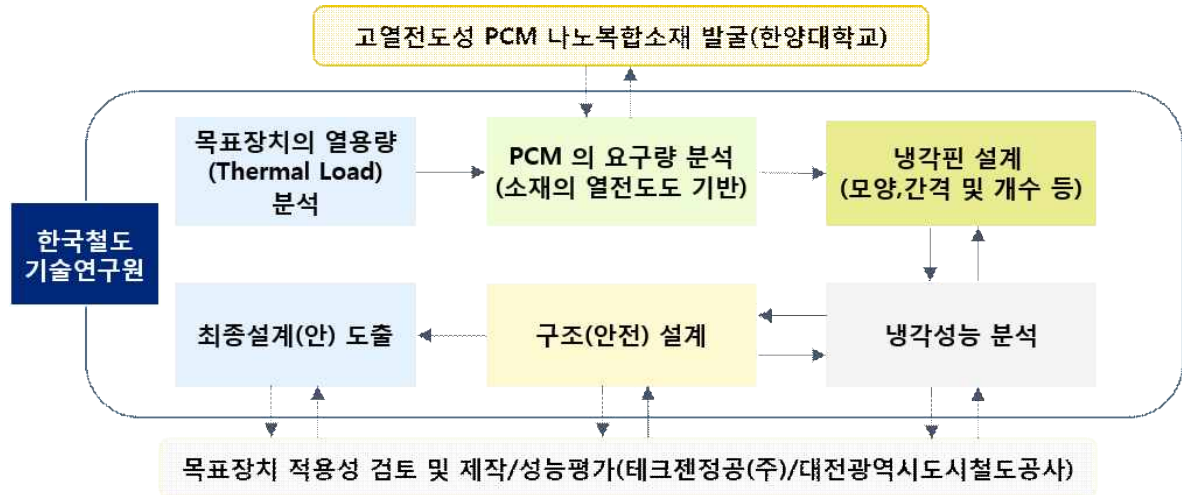
<그림 1-4-6> PCM 복합소재 안정성 평가 결과

마. 연구개발의 목표 및 내용

(1) 연구개발의 최종 목표

구분	내용
최종 목표	○ 철도 차량에 적용된 기존 냉각시스템을 대체하고, 높은 냉각 효율 (시스템 공간 차지 대비 냉각 성능)을 가지는 PCM(Phase Change Material)* 나노 복합 소재를 이용한 철도 차량용 능동형 냉각시스템 요소 기술에 대한 개발 - 기존 수동형(공냉 및 수냉) 냉각방식 대비 냉각효율 약 20% 증가, 에너지 변환효율 약 7% 향상, 공간 약 10% 이상 절약    <그림 1-5-1> 전력변환장치의 PCM적용 사례 및 선행연구 결과
세부 목표	- PCM 나노복합소재 적용 능동형 냉각시스템 적용기술 개발 - 능동형 냉각모듈 성능 평가기술 개발 - PCM 나노복합소재 합성 공정기술 개발

(2) 연구개발 추진체계



<그림 1-5-2> 연구개발 추진체계

(2) 기관별 연구개발 세부 목표 및 내용

(가) 기관별 연구개발 세부 목표

① 주관연구기관 (한국철도기술연구원)

- 수요처(철도운영기관/철도차량제작사) 요구사항(성능기준 등) 조사 및 분석
- 철도차량 적용을 위한 주요 발열부(전장품) 열환경 분석 및 적용방안 도출
- 에너지0형 능동형 에너지 순환을 위한 PCM 복합소재의 다계층 적층기술 개발
- 장기운용 신뢰성 향상을 위한 패키징(packaging) 및 최적 적용방법 도출
- 실차 적용을 통한 실제 운영환경에서의 성능평가

② 공동연구기관 (테크젠정공(주))

- PCM 나노복합소재 기반 능동형 냉각시스템 시제품 제작 및 성능평가
- PCM 나노복합소재 기반 능동형 냉각시스템 적용에 따른 기기 유지·보수 방안 설계

③ 위탁연구기관 (한양대학교)

- PCM과 나노물질의 합성 및 열 기초물성(비열, 열전도도 등) 평가
- 장기적 열·물리적 특성변화 방지기술 및 PCM 복합소재의 대량 합성공정 개발

(나) 기관별 연구개발 내용 및 범위

① 주관연구기관 (한국철도기술연구원)

- 수요처(철도운영기관/철도차량제작사) 요구사항(성능기준 등) 조사 및 분석
 - 3P(특허, 논문, 제품) 분석 및 회피기술 적용
- 철도차량 적용을 위한 주요 발열부(전장품) 열환경 분석 및 적용방안 도출
 - 도시/고속철도별 전력변환장치의 열환경 분석 및 적용(안) 도출
- 에너지0형 능동형 에너지 순환을 위한 PCM 복합소재의 다계층 적층기술 개발
 - 순차적 에너지 전달을 위한 이중 PCM 소재 간 접합방법 도출 및 열순환 특성 분석
- 장기운용 신뢰성 향상을 위한 패키징(Packaging) 및 최적 적용방법 도출
- 실차 적용을 통한 실제 운영환경에서의 성능평가

② 공동연구기관 (테크젠정공(주))

- IGBT 소자를 사용한 전력변환장치 개조
 - PCM 나노복합소재 기반 냉각시스템 적용을 위한 전력변환장치 개조 및 시험·평가
- PCM 나노복합소재 기반 능동형 냉각시스템 시제품 제작 및 성능평가
 - 실험실 수준의 열차운행(고속/도시철도) 모사 환경에서의 냉각모듈 단품시험
 - 단품시험 결과 반영 및 수요처 요구사항에 따른 실차용 시제품 제작
- PCM 나노복합소재 기반 능동형 냉각시스템 적용에 따른 기기 유지·보수 방안 설계

③ 위탁연구기관 (한양대학교)

- PCM과 나노물질의 합성 및 열 기초물성(비열, 열전도도 등) 평가
 - 능동형 냉각시스템을 적용을 위한 PCM 상변화 온도 영역 설정 및 후보군 도출
 - 철도차량 열환경 분석 결과를 통한 PCM과 나노물질의 합성 및 열 물성(비열, 열전도도 등) 평가
- 장기적 열·물리적 특성변화 방지기술 및 PCM 복합소재의 대량 합성공정 개발
 - PCM 열적 성능 향상을 위한 나노복합소재 구조(다공성 네트워크, 적층 구조 등) 제작
 - 열 물성 평가(축열 용량, 열전도도 등)를 바탕으로 융해열 손실을 최소화하면서 빠른 축·방열이 가능한 PCM 나노복합소재 성능 향상 최적화 연구
 - 반복구동 시 냉각시스템 안정성 증대를 위한 PCM encapsulation 마이크로스케일 구조체 제작을 통한 마이크로스케일 소재 패키징(packaging) 기술 개발

(3) 연구개발 성과 및 평가 방법

핵심성과 (level1)	단위성과 (level2)	성과점검기준					해당 기관	예산 (백만원)	양적성과목표
		질적 성과지표	목 표 치	측정 방법	검증 방법	가중치 (%)			
A	PCM 나노복합소재 적용 능동형 냉각시스템 적용 기술	① 기존 수동형 냉각방식 대비 냉각효율 증대 (Max.Temp: 110℃)	1건 1건	약 20% 증가 (Max.Temp: 88℃) 이하 PCM 복합소재 다계층 적층 기술 설계 (안)	보고서 결과 제시 설계서 작성 여부	30 30	철 도 연	324	논문(SCI(E)) : 2 건 특허(출원) : 2 건
	PCM 나노복합소재 능동형 냉각시스템 요소기술	① 능동형 냉각모듈 성능 평가기술	1건 3건	기존 냉각시스템 공간 차지 대비 10% 이상 절약 (V _{slv} : 39.0×10 ³ cm ³) 이하 모사환경 성능평가용 냉각모듈 시제품 2건 / 현차시험용 시제품 1건	보고서 결과 제시 개발 여부	15 5	테 크 젠 정 공 (주)	150	시제품 : 3 건
	PCM 나노복합 소재합성 공정기술	① 기준(순수) PCM 대비 열전도도 향상 (Paraffin: 0.21W/mk)	1건	열전도율 2배 이상 향상 (Nanomaterial-based PCM Composite: 0.42W/mk) 이상	보고서 결과 제시	20	한 양 대	100	논문(SCI(E)) : 2 건
						100		574	특허(출원) : 2 건 논문(SCI(E)) : 4 건 시제품 : 3 건

2. 연구수행내용 및 성과

가. 수요처(철도운영기관/철도차량제작사) 요구사항 조사 및 분석

(1) 철도차량 냉각장치 성능 기준 조사

- 도시철도용 전동차는 추진장치 및 보조전원장치에 사용되는 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), GTO(Gate Turn-Off thyristor) 등 전력 반도체 소자를 이용하여 교류 유도 전동기의 속도 및 토크를 제어하거나 전동차의 객실서비스 전원 및 제어전원을 공급함
- 고속 스위칭이 가능한 IGBT 소자를 주로 사용하고 있으나, 스위칭에 따른 열을 발생하고 있음. 이러한 전력용 반도체 스위치 소자는 정선(junction) 온도가 125~150 ℃ 한계를 가지고 있어 정선온도 및 안전 영역의 일정 온도를 유지하기 위하여 고성능 히트싱크가 필요함
- 철도차량의 냉각성능 기준은 전력변환장치(IGBT, GTO 등)의 발열 손실량에 대한 계산 결과 설계 시 온도 상승량에 대하여 열 저항 계수 이하의 히트싱크를 사용함. 이는 전력변환 소자에 최대 정선온도를 고려하여 온도상승에 안정도를 고려하여 설계하게 됨
- 철도차량 냉각장치 성능 기준
 - 고속철도 차량의 경우, 인버터를 입력 DC 670 V, 정격부하 52 kVA 상태에서 각 부분의 온도가 포화될 때까지 운전하여 각 부의 온도 상승을 측정하며 그 온도 상승 값이 정해진 범위를 만족하는지 확인함

〈표 2-1-1〉 보조전원장치 온도상승시험(고속철도)

측정위치	기준치	측정치
주위 온도	$-35 \leq T \leq 40$ (℃)	T : ℃
제어기	$\Delta T \leq 40$ (℃)	ΔT : ℃
히트싱크	$\Delta T \leq 65$ (℃)	ΔT : ℃

- 전기동차(KORAIL)의 경우, 정격전압, 정격부하로 포화될 때까지 운전하여 각 부분의 온도 상승한도가 아래 표 기준에 적합하여야 함

〈표 2-1-2〉 보조전원장치 온도상승시험(전기동차)

구 분 (히트싱크)	온도상승 한도(deg)		
	A type	B type	C type
GTO, IGBT	60	70	60
BDU	110	110	110
Rfd	110	85	85

- 도시철도의 경우, 정격전압, 전격 부하를 인가한 상태에서 시험을 실시하고 각 측정 요소에 대하여 온도 상승 조건은 아래 표 기준에 적합하여야 함. 실제 주위 상온 기준은 -25 ~ 45 ℃로 하고 주위 온도를 기준으로 순수 온도 상승량을 측정함

〈표 2-1-3〉 보조전원장치 온도상승시험(도시철도)

측정위치	기준치	측정치
제어기	$\Delta T \leq 35$ (℃)	ΔT : ℃
히트싱크	$\Delta T \leq 65$ (℃)	ΔT : ℃

- 한국철도표준규격의 경우, KSR 9156의 온도상승 시험(온도상승 시험은 전가기기를 되도록 실제 사용 상태에 가까운 상태로 하여 통전 상태에서 온도 상승이 없어질 때까지 방치한 후 각 부의 온도를 측정) 을 실시함

(2) 냉각장치 수요처 요구사항 조사

(가) 운영기관

- 도시철도 차량용 방열판의 경우, 전장품에 사용되는 반도체 크기에 의해 평면 크기의 축소는 불가능하나, 정해진 적재 공간에 반도체 수량, 발열 증가 등으로 현재 냉각방식의 방열판 형상보다 공기흐름, 유지보수성 등을 감안하여 방열판 형상 변경 및 체적 축소가 요구됨
- 철도차량 전장품의 고사양화에 따라 현재 적용하고 있는 강제 냉각 방식에서 고방열 성능 및 냉각장치의 추가 구성품 등으로 인한 공간 활용도 단점을 보완할 수 있는 콤팩트(compact)한 냉각장치가 개발이 요구됨

(가) 제작사

- 철도차량의 소비 에너지 절감을 위해 차량의 경량화가 이슈(issue) 됨에 따라 전장품에 대한 경량화에 대한 요구 조건이 늘어나고 있으며, 이를 전장품 및 냉각장치의 체적 축소에 대한 요구가 증가하고 있음
 - 추진장치의 경우, 장치의 크기를 결정하는 것은 냉각장치의 크기와 밀접한 연관이 있으며, 고효율 냉각장치를 적용함에 따라 제한된 공간에서의 체적 축소 및 경량화가 가능해짐
 - 강제 냉각방식의 경우, 유지보수를 위한 정비 단계가 추가적으로 필요하기 때문에 유지보수성이 용이한 고효율의 자연 냉각방식의 냉각장치의 개발이 요구됨

나. 철도차량 주요 발열부 열환경 분석 및 적용방안 도출

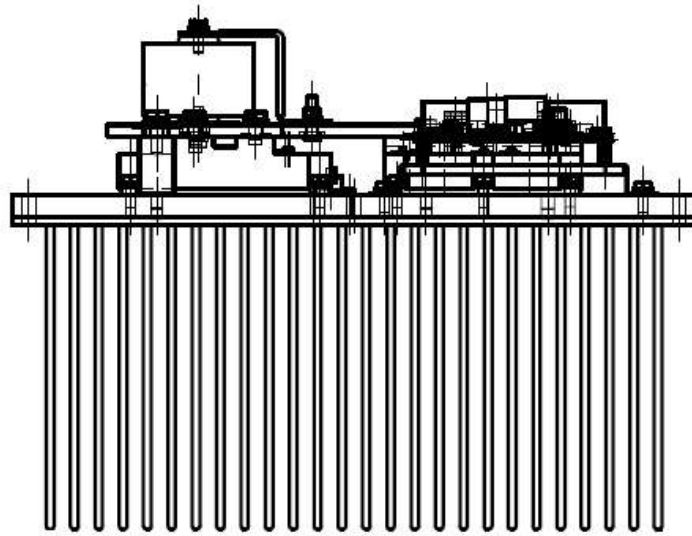
(1) 전력변환장치 열환경 분석

- 대전도시철도 1호선에 적용된 보조전원장치(SIV, Satic InVerter)는 전동차내 냉난방장치, 공기압축기, 표시기장치, 조명기기 및 제어장치 등에 안전한 전력을 공급하는 장치임
- SIV장치는 최신의 전력용 반도체 소자인 IGBT를 적용한 6상 구조이며 히트싱크를 이용한 자연냉각 방식을 채택하여 제품의 안정성 및 신뢰성을 극대화 함. 또한 저소음·소형 경량화·고효율·고신뢰성·유지보수의 편의성이 고려된 최적설계를 실현하였음
- 제어부는 32bit DSP를 사용한 디지털 제어기를 사용하였고 고장 Trace-Memory 기능을 갖으며, 이동식 시험기와의 Interface를 통해 고장 Trace-Date를 검수자에게 제공하여 유지보수를 용이하게 하며, SIV 주요 사양은 다음과 같음

<표 2-2-1> 대전도시철도 1호선 SIV 주요 사양

구 분	사 양
주회로 방식	2 Level IGBT inverter (6상구조)
제어방식	인버터 정전압 제어방식
냉각방식	히트싱크를 이용한 자연냉각방식
정격전압	DC 1,500V
정격용량	150 KVA
주위온도	- 25℃ ~ + 45℃

- SIV 스택 구성은 차측면에 3개의 유닛(unit)으로 구성되어 있고 알루미늄 냉각 블록(block) 부분은 IGBT 모듈, 게이트 드라이버, IGBT Bus plate 위에 스너버 커패시터가 고정되어 있음. IGBT TYPE은 FZ800R33KF2C(Infineon 社) 제품으로 Heat sink면과 IGBT방열판면이 직접 접촉 하도록 나사로 고정되어져 방열효율을 최대화 하였으며, 히트싱크의 냉각핀은 반개방 자연냉각 방식으로 정지 시에도 최대로 방열할 수 있도록 구성하였음. 또한 IGBT 소자는 밀폐된 실내에 취부 하는 구성으로 제작되어져 있음
- 냉각방식은 자연냉각방식으로 그림과 같은 형태로 주재료는 알루미늄으로 구성이 되어있고 발열면적을 확장하기 위해서 일정한 간격으로 방열 핀(fin)을 배열한 구조임



〈그림 2-2-1〉 보조전원장치(SIV) 히트싱크

- 대전도시철도 1호선 보조전원장치에 취부되어 있는 히트싱크의 발열량 계산을 위해서 아래 표와 같이 히트싱크에 취부되어 있는 발열소자(IGBT, DIODE)의 손실량은 다음과 같이 계산되었음

〈표 2-2-2〉 IGBT 소자의 손실계산

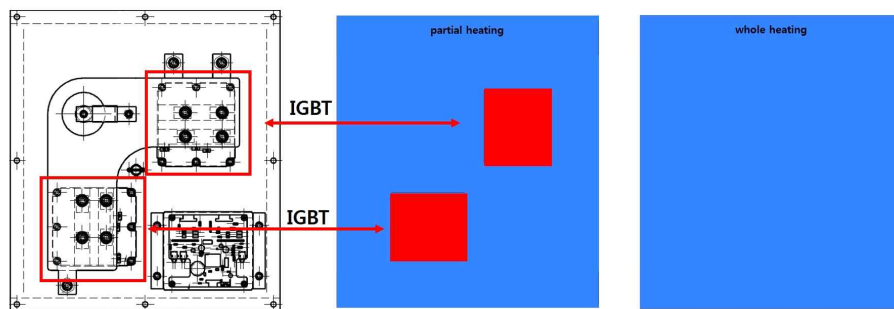
구 분		손 실 량 (W)
IGBT	도통 손실	80.23
	스위칭 손실	180.71
DIODE	도통 손실	14.63
	역 회복 손실	51.78
IGBT 1개의 손실		327.35
INVERTER MODULE 손실		654.7

- 현재 취부되어 있는 히트싱크의 용량은 발열소자(IGBT, DIODE)의 손실량 계산 결과를 바탕으로 대전 도시철도 1호선용 IGBT SIV의 모듈에 IGBT 2개를 취부하고, 주위온도의 최고치인 45℃를 기준으로 설계시 인버터모듈 부분의 온도 상승량을 65℃ 이하로 설계하므로 열 저항 계수가 65℃/655W=0.0992 [℃/W] 이하인 히트 싱크를 사용하여 자연 냉각됨. 이러한 설계를 통하여 IGBT 소자의 최대 정선 온도인 125℃보다 15℃ 이상의 마진을 고려하여 제품의 신뢰성을 보장함

(2) 전력변환장치 열환경 수치 해석

○ 철도차량 SIV 냉각용 히트싱크의 열 환경을 수치해석을 이용해 분석하고, 수치해석적 연구 방법을 정량화하기 위해 열부하 공급 방식에 대한 수치해석을 진행함

- partial heating type : SIV 스택에 설치된 2 개의 IGBT와 수치해석 상 열 부하 공급 위치를 동일하게 함으로써, 실제 열부하 조건 및 환경에 따른 모사가 가능할 것으로 예상함
- whole heating type : 열부하 위치와 조건을 단순화하여, 수치해석을 실시한 결과가 partial heating type에서의 온도 경향성과 유사할 시 수치해석의 모델링 단순화가 가능할 것으로 예상함



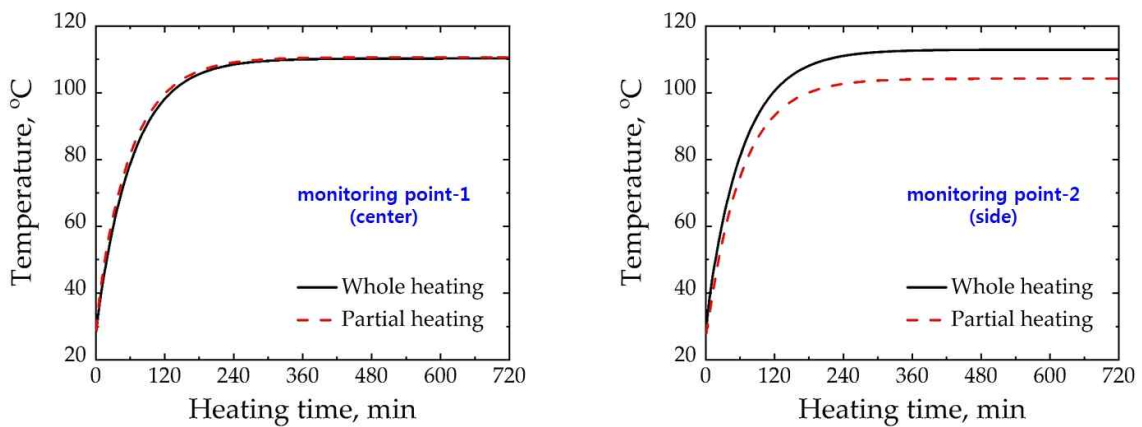
〈그림 2-2-2〉 보조전원장치(SIV) 히트싱크 수치해석 모델링

- 철도차량 SIV 냉각용 히트싱크의 열 환경 분석과 수치해석적 연구 방법을 정량화하기 위해 열부하 공급 방식에 대한 수치해석을 진행함
- SIV 냉각용 히트싱크와 동일한 외형으로 모델링을 하고, SIV 스택의 한계 운영 조건에서 발생하는 손실 열부하(327.35 W/1 IGBT)가 발생했을 때를 가정함
- 히트싱크의 외부 온도는 철도차량 운영 조건을 참조하여, 318.15 K(45 °C)로 설정하였으며, 상용 프로그램인 Fluent v14.5를 다음 표와 같이 수치해석을 수행함

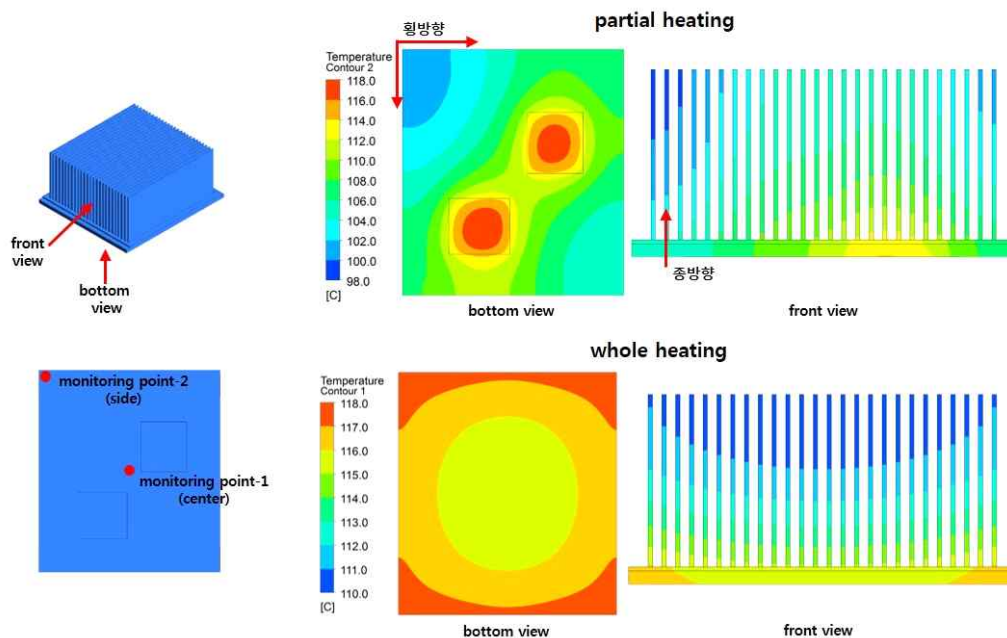
〈표 2-2-3〉 전력변환장치 열환경 수치해석 방법

boundary condition	Heat loss, W/1IGBT	327.35
	Heat flux, W/m ²	23,157.2
	Convective heat transfer coefficient, W/m ² -K	2.16
	Free stream temperature, K	318.15 (45°C)
Methods	Scheme	SIMPLE
	Gradient	Least Squares Cell Based
	Pressure	PRESTO!
	Momentum/ Energy	Second order upwind
Calculations	Type	Transient
	Time step	60 sec
	Number of time step	720 (total time: 12hour)

- Partial heating type과 whole heating type에 대해 SIV 히트싱크의 한계 운영 조건에서 발생하는 부하 공급 상황에 대한 수치해석을 수행한 결과 기저부(base plate)의 중간 영역에서의 온도 경향성은 유사하나, 횡 방향으로 최대 6 °C 및 종 방향으로 최대 20 °C의 온도 차이를 보임
- Whole heating type은 base plate에서 최대 온도는 partial heating type과 유사하나, SIV 히트싱크에 비대칭적으로 설치된 IGBT에서 발생하는 국소적인 열적 특성을 모사하지 못하고, 기저부에서 편으로 열 전달되는 특성을 정확하게 고려되지 않는 것으로 분석함
- 본 연구개발을 통해 제작하는 시작품의 열적 특성 및 냉각 성능에 대한 수치 해석적 분석 시 whole heating type보다는 partial heating type이 적절하다고 판단함



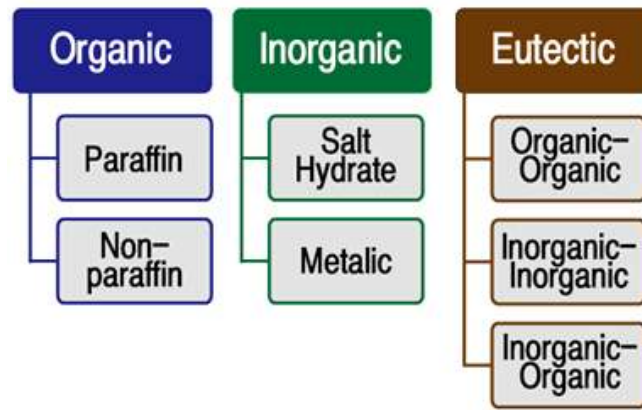
〈그림 2-2-3〉 히트싱크 부하 방법에 따른 온도 변화



〈그림 2-2-4〉 히트싱크 부하 방법에 따른 온도 분포

(3) 철도차량 운영 특성에 부합하는 PCM 소재 도출

(가) PCM (Phase Change Material) 종류 및 분류



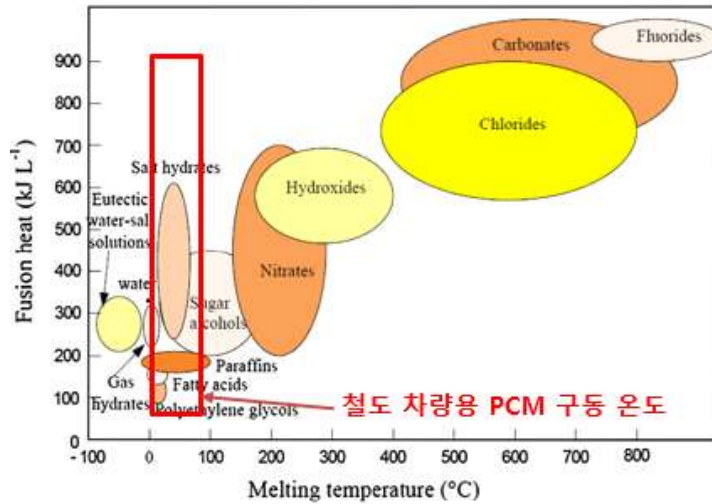
<그림 2-2-5> 상변화물질 분류

- PCM(Phase Chnage Material)이란 고체에서 액체, 액체에서 기체 등 상변화 과정에서 열을 축적하거나 방출하는 물질을 말함. 상변화 시 축적되거나 방출되는 열을 잠열 (Latent heat)이라 부르며, 이러한 잠열량이 큰 물질들을 열저장 매체에 사용 시 많은 양의 에너지를 저장 및 방출할 수 있기 때문에, 그에 따른 효율적인 에너지 관리가 가능함
- PCM의 종류는 매우 다양하며 크게 유기(organic), 무기(inorganic), 공융(Eetetic)으로 나눌 수 있음. 유기계 PCM은 파라핀 계열과 비 파라핀 계열로 나누어짐. 이러한 유기계 PCM은 매우 큰 잠열량을 가지며, 동시에 상변화시 상분리 현상이 적고 넓은 용융 온도 범위를 갖고 있음
- 또한, 화학적, 물리적 안정성도 매우 뛰어난 특성을 가짐. 따라서 PCM을 이용한 많은 열저장 매체에서 유기계 PCM을 많이 사용하고 있으며, 대표적인 예로 파라핀이 있음

(나) PCM(Phase Change Material) 상변화 온도 및 잠열량

- 다양한 PCM 후보군에 대한 다음 그림과 같이 용해 온도 및 그에 따른 잠열량을 나타낼 수 있음. 일반적으로 상변화 온도와 잠열량은 선형적으로 증가함. 따라서 잠열량만을 고려 시 높은 온도 영역대의 PCM을 사용할 때 가장 효율적인 에너지 저장 매체로서 역할을 수행함. 하지만, 철도 차량 운행 시 발열부의 온도 영역 (0 ~ 100 ℃)이 비교적 제한적이기 때문에, PCM을 이용한 냉각 시스템을 구성 시 상변화 온도에 대한 고려가 필수적임
- 철도차량 구동조건에서 상변화 온도를 갖는 대표적인 물질로 파라핀, 염수화물(salt hydrate), 당알코올(sugar alcohols), 지방산(fatty acids) 등이 있음. 일반적으로 염수화물은 낮은 상변화 온도에 대비하여 높은 체적당 잠열량을 지님. 하지만 부식이나 과냉각으로 인해 상변화 성질에 영향을 받을 수 있다는 단점을 지님. 당알코올도 비교적 높은 체적당 잠열량을 갖지만, 상변화 온도 영역이 비교적 제한적이며, 습기 등에 취약한 성질을 지님

- 파라핀 등 유기계 PCM은 염수화물 및 당알코올과 비교하여 비교적 낮은 체적당 잠열량을 갖지만, 철도 차량 운행 조건 내에서 탄소수를 조절하여 다양한 상변화 온도의 조정이 가능함. 또한, 상분리가 잘 일어나지 않고 화학적으로 매우 안정하기 때문에 열 사이클(cycle)이 반복되는 상황에서 안전한 구동이 가능하여, 건축 내장재 등에 이미 상용화 되어 널리 사용되고 있음. 따라서 본 연구에서는 1차적으로 유기계 PCM 후보군 중 가장 대표적인 파라핀에 대해 분석을 수행하였음



〈그림 2-2-6〉 다양한 PCM 후보군에 대한 상변화 영역 및 잠열량

(다) 파라핀(paraffin) 세부 열적 특성

- 파라핀은 유기계 PCM의 대표적인 재료이며 비교적 높은 잠열량 특성을 지님(160~260 J/g). 또한 아래 표에 보이는 바와 같이 용해 및 응고 온도는 재료 내 탄소 원소의 체인 개수에 따라 달라지기 때문에, 원하는 상변화 온도를 얻기 용이함. 탄소 원소의 체인 개수에 따른 상변화 온도 조절 영역은 약 0 ~ 100 °C 이며, 이는 철도 차량 구동 조건의 모든 영역대의 온도를 넘어서는 영역이며, 이는 파라핀을 철도 차량 내 열에너지 저장 매체로 사용하기에 적합하다고 판단할 수 있음

〈표 2-2-4〉 파라핀(paraffin) 탄소 함유량에 따른 특성

Type	Name	Molecular Formula	Melting Point, °C	Melting Enthalpy, kJ/Kg	Thermal conductivity, W/m · k	Density, kg/m ³
Parffin	n-Tetradecane	C ₁₄ H ₃₀	6	230	0.21	760
	n-Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	10	212	0.21	770
	n-Octadecane	C ₁₈ H ₃₈	28	240	0.21	776
	n-Eicosane	C ₂₀ H ₄₂	38	200	0.21	775
	n-Triacontane	C ₃₀ H ₆₂	66	283	0.21	779
	n-Tetracontane	C ₄₀ H ₈₂	82	230	0.21	779
	n-Pentacontanee	C ₅₀ H ₁₀₂	95	242	0.21	779
	Polyethylene	-	110	200	0.21	870

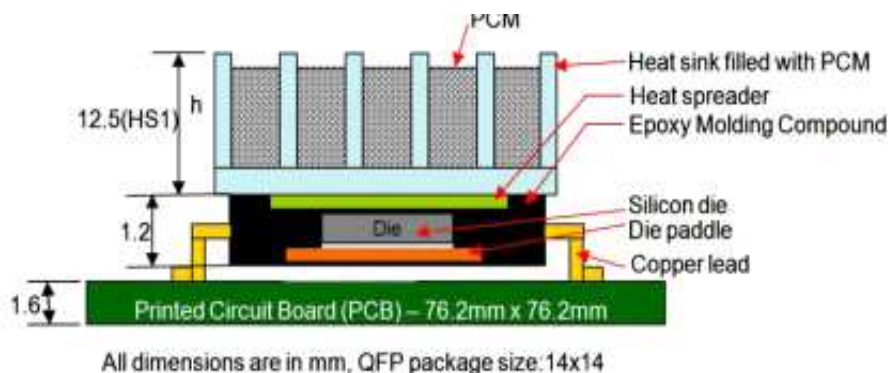
- 파라핀은 표에 보이는 바와 같이 열전도율이 약 0.21 W/m-K으로 알루미늄 (230 W/m-K), 구리 (402 W/m-K) 등의 금속류 물질보다 매우 낮음. 이러한 낮은 열전도도는 파라핀을 열저장 매체로 사용했을 시 열의 흐름을 방해하기 때문에, 발열부의 과열 현상을 유발함. 또한, 열의 균일한 확산을 방해하기 때문에, 파라핀 전체 체적에 온도 구배가 크게 발생하며, 이는 파라핀의 고른 상변화를 억제할 수 있음
- 파라핀 등 유기계 PCM은 화학적으로 매우 안정한 물질이며, 내부식성 및 방습성이 뛰어나기 때문에 다양한 외부 환경에 노출되어도 안전하게 사용 가능함. 또한, 반복 열 사이클(cycle) 시 상변화 온도 및 잠열량이 비교적 균일하게 유지되기 때문에 장기적인 관점에서 매우 우수한 장점을 지님
- PCM 나노복합소재에 사용된 파라핀은 기본적으로 내열성이 우수한 소재이며, 일반적인 금속등과 비교하여 연성이 우수함

<표 2-2-5> 파라핀(paraffin) 물리적 특성

	Paraffin
Density, g/cm ³	0.9
Compressive strength, MPa	3.01
Tensile stress, MPa	0.77
Young' s modulus, MPa	61.4
Elongation at break, %	12

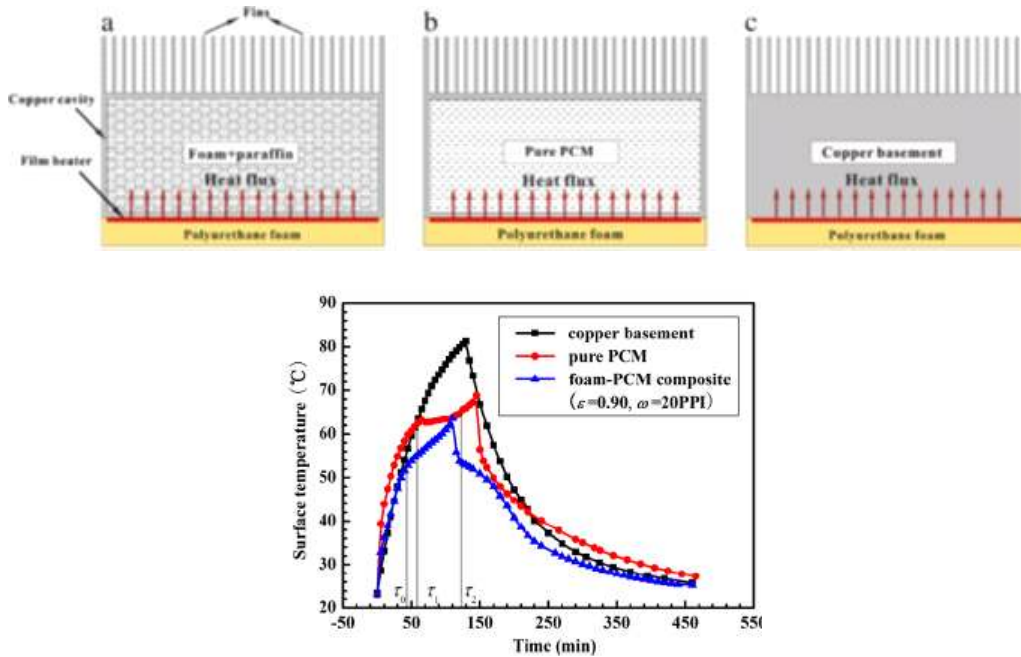
(라) 파라핀을 이용한 냉각 성능 사례

- 싱가포르 National University of Singapore의 Arun S. Mujumdar 교수는 히트싱크 핀 내부에 파라핀을 주입하여 발열부 온도 구배 관측을 통해 파라핀의 냉각 성능을 분석하였음. 단순 히트싱크 대비 히트싱크 핀 내 파라핀을 주입한 경우 파라핀의 상변화에 의해 히트싱크 핀 온도 상승이 억제되며, 이는 최종적으로 발열부의 온도 저감 효과로 나타남을 확인함



<그림 2-2-7> 히트싱크 내부 PCM 주입을 통한 냉각성능 향상 사례

- 중국 Xi'an Jiaotong University의 Z.G. Qu 교수는 히트싱크 핀과 발열부 사이 파라핀과 금속 폼(metal foam)을 주입하여 발열부의 온도 구배를 측정하여 파라핀의 냉각 성능을 검증함. 비교적 높은 발열 조건에서 상변화가 모두 이루어지는 단시간 동안 파라핀의 냉각 성능은 매우 우수하였으며, 이는 전자 장비 등 구동 시간이 비교적 짧은 발열 환경에서 파라핀이 열저장 매체로 유용하게 사용될 수 있음을 검증하였음



<그림 2-2-8> 히트싱크 내부 금속 박스 제작을 통한 냉각 성능 향상 사례

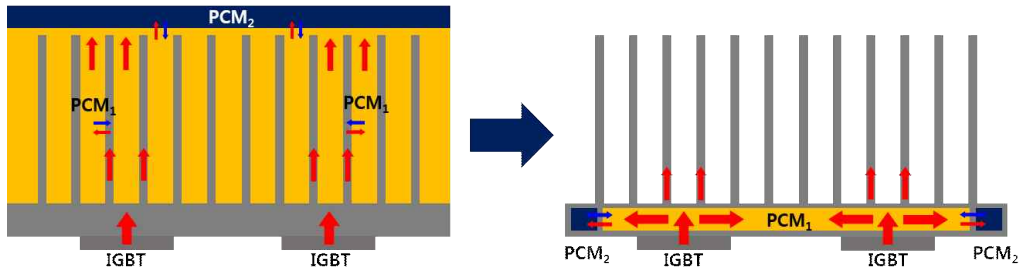
(마) PCM 후보군 선정

- 파라핀은 상변화 온도 조절이 용이하기 때문에 도시 철도의 발열부 온도 조건인 30~60 °C 내에서 상변화가 가능함. 또한, 이러한 상변화 온도 영역대를 갖는 PCM 후보군 중 매우 우수한 잠열량 (160 ~ 260 J/g)을 갖고 있음. 비록 열전도도가 매우 떨어지는 단점을 갖고 있지만, 나노 소재 등의 복합재 제작을 통해 일정수준 이상의 열전도도 향상이 가능하다고 판단하였으며, 최종적으로 파라핀을 이용한 철도차량용 PCM 기반 냉각장치 개발을 수행하였음

(3) PCM 기반 냉각장치 적용 방안 도출

- “철도차량용 능동형 냉각-열전소자 융합시스템 개발을 통한 에너지 효율 증대”에 관한 사전 연구를 통해 PCM 기반 냉각장치의 냉각 성능 향상에 대한 여부를 검토하였으며, PCM 기반 냉각장치의 개선점을 보완하여 적용 방안을 도출하고자 함
- 사전 연구에서 고안한 PCM 기반 히트싱크의 경우, 상변화물질이 히트싱크 외부에 적층이 되어 있는 구조로써 상변화물질의 주입량은 히트싱크 체적에서 최대화할 수 있음
- 유기계 상변화물질 중 파라핀(paraffin)의 밀도는 약 800 kg/m³으로 히트싱크의 주 재료로 사용되는 알루미늄 밀도(2,700 kg/m³)의 약 1/3 수준임

- 핀(fin) 외부를 감싸는 방식으로 상변화물질을 주입할 경우, 철도 차량 SIV 냉각용 히트싱크를 기준으로 PCM 기반 히트싱크의 체적은 기존 히트싱크와 유사하나 무게가 약 30 kg 정도 증가하게 됨
- 상변화물질을 히트싱크 내부에 설치함으로써, 상변화물질 주입 시 무게 증가를 최소화하고, 기존 히트싱크의 체적변화 또한 최소화할 수 있는 방안을 도출함



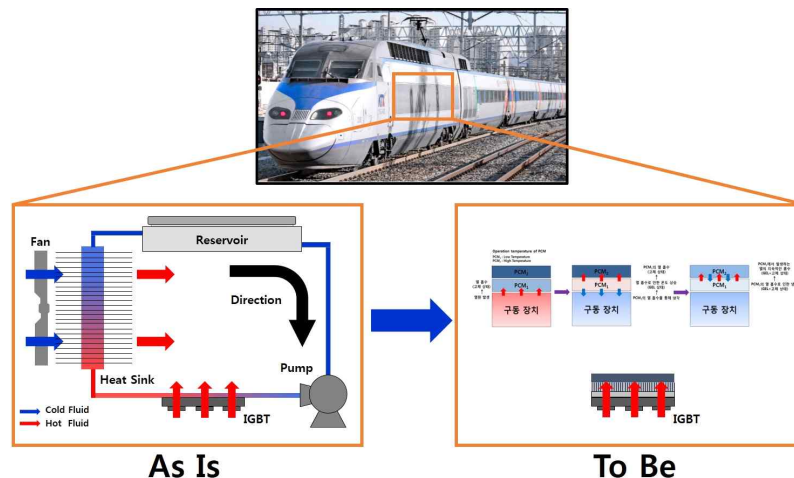
〈그림 2-2-9〉 PCM 기반 철도차량용 냉각장치 적용 방안

○ (As Is)

- 국내 철도 차량 냉각장치 산업은 다품종 소량 생산의 한계로, 거의 대부분을 국외 제품에 의존
- 철도 차량 부품 국산화에 대한 기술 개발 미흡
- 국외 대비 기술 수준의 격차로 인해 해외 시장 진입 장벽이 높음
- 기술의 고성능화 및 집적화(시스템 발열 문제가 대두)로 대체 냉각시스템이 필요함

○ (To Be)

- 국내 냉각시스템 산업 분야의 저변 확대 및 부품 국산화 기술 축적
- 에너지 0형 냉각시스템 개발을 통한 냉각시스템 세계 기술 시장 방향 제시
- 원천 기술 선점을 통한 해외 시장 진출 모색 및 실용화 사업을 통한 일자리 창출
- 에너지 소비 저감 냉각시스템 개발로 녹색 성장에 기여
- 냉각시스템 소형화를 통한 제한된 철도 차량의 공간 활동도 증대

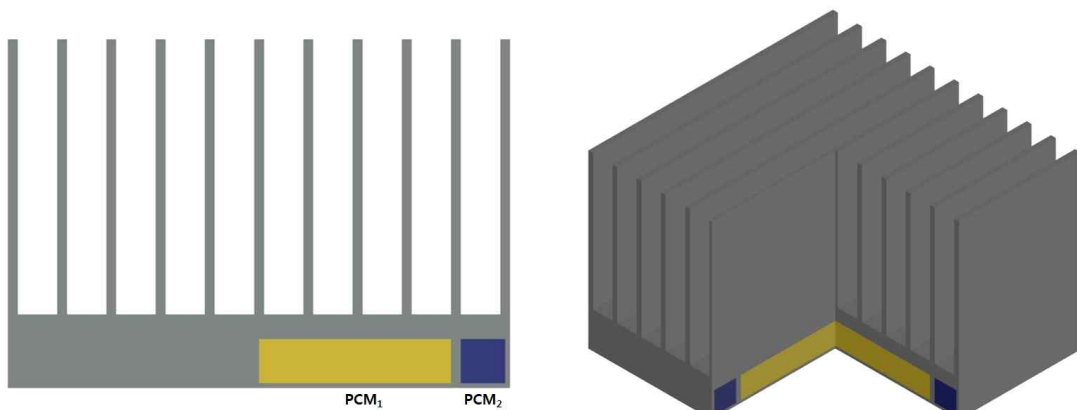


〈그림 2-2-10〉 As Is - To Be

다. PCM 나노복합소재 기반 냉각장치 설계 및 제작

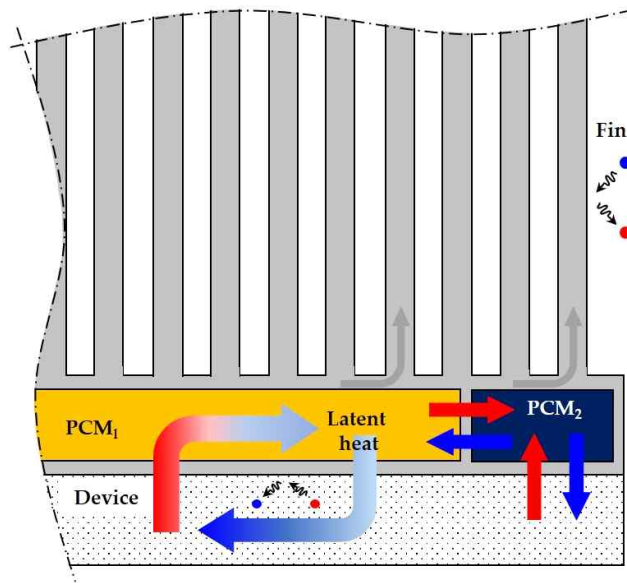
(1) PCM 적층 설계

- 히트싱크 내부에 상변화물질(PCM, Phase Change Material)이 설치되며, 아래 그림과 같이 두 개의 상변화물질이 기저부(base plate)의 중심과 가장자리에 각각 설치가 됨
- 과부하(overload(또는 thermal shock)) 발생 시 히트싱크의 한계 운영 온도를 제어할 수 있도록, 상변화 온도를 변화시킬 수 있으며, 두 개의 상변화물질은 상변화 온도 영역대가 상이하고, 각각 상변화물질의 특성은 아래와 같음
- PCM₁ (thermal shock absorber)
 - 전력변환장치에서 overload(또는 thermal shock) 발생 시 상변화물질의 상이 변하면서 (고체 → 액체) 많은 열(잠열)을 흡수함
- PCM₂ (damper)
 - PCM₁의 낮은 열전도율(순수 파라핀의 경우, 약 0.2 W/m-K)에 의해 승온 속도 증가 시 PCM₁보다 낮은 상변화 온도 영역에서 상이 변하면서, 전력변환장치에서 발생하는 열을 흡수함에 따라 승온 속도 증가율을 저감시키는 역할을 수행함
- 히트싱크 내부에 상변화물질이 설치됨에 따라 기존 히트싱크 대비 동일한 체적에서, 효율적인 냉각 성능을 발휘할 수 있으나, 기존의 히트싱크 소재로 사용하는 알루미늄의 열전도율 (211 W/m-K)보다 상변화물질의 열전도율(i.e. 파라핀: 0.2 W/m-K)이 낮아 소재 간 열 저항(thermal resistance)이 발생할 수 있음
- 순수 상변화물질(bare phase change material)과 나노 소재(nano-material)를 합성한 PCM 기반 나노복합소재(PCM based nano-material)를 사용함으로써, 상변화물질의 낮은 열전도율에 의한 열 저항을 최소화하고, 상변화(phase change)에 의한 열(latent heat) 흡수를 통한 냉각 성능을 발휘할 수 있는 소재를 적용함



<그림 2-3-1> PCM 적층 설계(안)

(가) PCM 적층에 따른 에너지 순환 특성 분석



<그림 2-3-2> PCM 적층에 따른 에너지 순환 특성

- 히트싱크(heat sink) 디바이스(device)에 설치된 전력변환장치(i.e. IGBT)에서 열이 발생 시 PCM₁으로 열이 전달되고, 고체의 PCM₁은 기존 히트싱크 소재보다 높은 비열(i.e. Al: 900 J/kg-K, paraffin: 2,000 J/kg-K)에 의해 열을 흡수하게 됨
- 상변화물질은 금속 소재보다 비열(specific heat capacity)과 잠열량(latent heat capacity)이 우수한 특성을 지니고 있으나, 상대적으로 낮은 열전도율(i.e. Al: 211 W/m-K, paraffin: 0.2 W/m-K)에 의해 열전달 측면에서 보완이 필요함
- PCM₂의 상변화에 의한 전력변환장치의 승온율을 제어함과 동시에 PCM₂보다 상대적으로 많은 양(PCM₂ 대비 약 10배)이 배치되어 있고, 높은 온도 영역에서 상이 변하는 PCM₁이 많은 양의 열을 흡수함으로써 디바이스(device)에서 발생하는 열을 효과적으로 제어함
- PCM₂가 PCM₁보다 낮은 상변화 온도 영역에서 먼저 상(phase)이 변하면서, 전력변환장치에서 발생하는 열을 흡수함으로써 PCM₁이 상이 변하기 전에 발생할 수 있는 열 저항에 의한 전력 변환장치의 승온율(heating rate)을 저하시키는 역할을 함
- PCM₁이 hot spot(i.e. IGBT)에서 발생하는 열을 효과적으로 흡수하고, PCM₂는 PCM₁에서의 열을 순차적으로 뺏어 열을 흡수함
- 상변화물질이 열 흡수에 의해 온도 증가 시 순수 상변화물질보다 높은 열전도율 특성을 가지는 나노복합소재 기반 상변화물질을 사용함으로써, 핀(fin)으로의 빠른 열전달을 통해 대기(atmosphere)로의 대류에 의한 냉각 효과 특성을 가질 수 있음

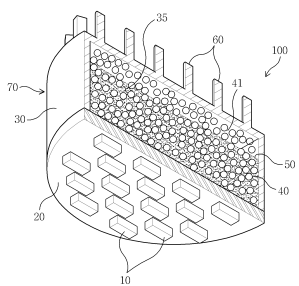
(나) PCM 적층 방식에 대한 3P 분석

① PCM 다계층 적층 기술에 대한 특허 분석

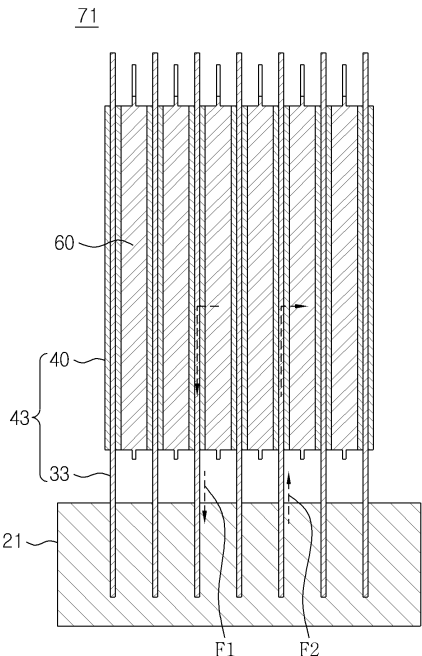
○ 검색 조건

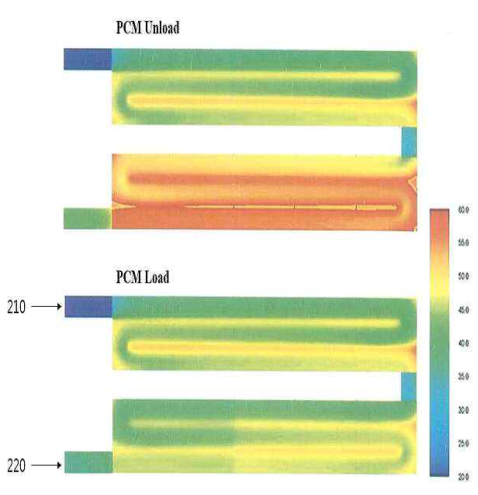
검 색 조 건			
사용 DB	1. 한국특허(WIPS,KIPRIS) 2. 미국특허(WIPS,USPTO) 3. 일본특허(WIPS, JPO) 4. 유럽특허 (WIPS, EPO)		
검 색 식	한국	((히트 열 히트 방열) near (판 플레이트 싱크 썬크 핀 흰)) and ((상 near 변화) PCM)	294건
	일본	((히트 열 히트 방열) near (판 플레이트 싱크 썬크 핀 흰)) and ((상 near 변화) PCM)	249건
	미국	(heat near sink*) and ((phase near chang*) PCM) and (space storage stor* sav* pore porous gap reserv*)	415건
	유럽	(heat near sink*) and ((phase near chang*) PCM) and (space storage stor* sav* pore porous gap reserv*)	121건
IPC	H01*, F21*, F25*, G06* 등		

○ 검색 결과

인 용 문 헌 1					
공개문헌번호	10-1270578	출원인	전자부품연구원	출원일자	2011.05.13.
발명명칭	LED 조명 장치 및 그의 냉각 장치				
관련부분 및 내용					
본 참조는 발광다이오드(Light Emitting Diode; LED) 조명 장치 및 그의 냉각 장치에 관한 것으로, LED에서 발생하는 열을 유체의 상변화 현상을 이용하여 효과적으로 외부로 방출시킬 수 있는 LED 조명 장치 및 그의 냉각장치를 제공하기 위한 것이다. 본 참조에 따른 LED 조명 장치의 냉각 장치는 방열 케이스, 파우더, 상변화 유체 및 히트 싱크를 포함한다. 파우더는 방열 케이스의 내부 공간에 전체적으로 채워진다. 상변화 유체는 방열 케이스의 내부 공간에 주입되어 파우더의 공극 사이에 분포되고, LED에서 발생하는 열에 의해 기화된다. 그리고 히트 싱크는 방열 케이스의 기판이 형성된 면과 반대쪽 외부 면에 형성되며, 방열 케이스에서 전달받은 열을 외부로 방출한다.					
[도면] 		[의견] 본 참조의 경우, 상변화유체가 적용되는 냉각 장치에 관한 것으로, 상변화유체(50)는 별도의 저장부(35)에 저장되는 것을 특징으로 하며, 히트 싱크의 핀(60)까지 확장되는 것은 개시하지 못하는 것으로 판단됩니다. 즉, 본 참조의 경우, 상변화유체가 적용된 히트 싱크에 관한 것으로 상변화유체가 저장되는 베이스 공간을 개시하지만, 상변화유체가 핀까지 확장되는 구성 및 복수의 성질을 가지는 상변화유체가 적층되는 구조에 대해 기존 특허 대비 독창성이 있는 것으로 판단합니다.			

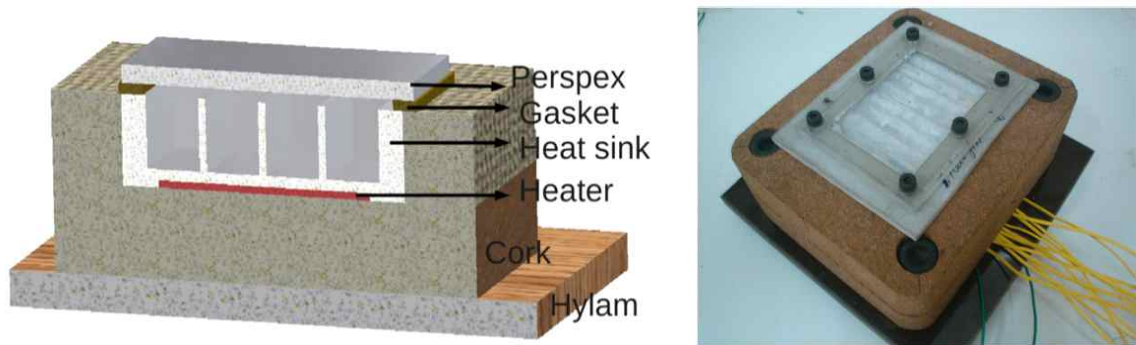
인 용 문 헌 2					
등록 문헌번호	10-1680587	출원인	위너스라이팅	출원일자	2015.02.25.
발명명칭	상변화 냉각 장치				
관련부분 및 내용					
본 참조는 상변화 냉각 장치에 관한 것으로서, 작동 유체를 밀폐 수용하는 원통형 실린더; 상기 실린더의 중심부에 배치되며 상기 작동 유체를 수용하는 제1 다공체; 및 상기 실린더의 내측면에 배치되며 응축되는 상기 작동유체를 수용하는 제2 다공체를 포함하는 상변화 냉각 장치를 제공하는 것을 특징으로 한다. 또한, 본 참조는 상기 실린더의 바닥면을 중심으로부터 상기 실린더의 상측면 중심으로 연장하여 배치되는 중심봉을 더 포함하며, 상기 제1 다공체는 상기 중심봉을 둘러싸는 형태를 가지고, 상기 실린더가 삽입 고정되고, 두 겹의 반사갯 형태로, 상기 두 겹 중 외측 부분에 반사갯에서 가열된 공기의 배출을 위한 공기구가 형성된 방열판을 구성상의 특징으로 한다.					
[도면]			[의견] 본 참조의 경우, 하부의 작동유체가 중심봉의 측부에 형성된 다공체를 따라 흡착되어 확장되는 구조를 가지는 상변화 냉각 장치, 즉 방열판 구조를 개시하고 있습니다. 본 발명의 경우, 핀의 중앙의 공간을 따라 확장되는 것으로, 중심봉의 측부의 다공체를 따라 확장되는 본 참조와는 차별성을 보이며, 복수의PCM을 사용하여 서로 구별된 공간에 저장하는 추가적인 특징을 가지는 본 발명품의 경우, 참신성이 있다고 판단됩니다.		

인 용 문 헌 3					
등록 문헌번호	10-1777335	출원인	엘지화학	출원일자	2015.04.01.
발명명칭	전지 모듈				
관련부분 및 내용					
본 참증은 잠열 저장체의 점유 면적 내에 열 전달체들과 전지 셀들을 교호적으로 배열시키고 전지 셀들의 반복적인 충전 및 방전 동안에 발생된 열을 상변화 물질에 저장시켜서 전지 셀들의 열관리를 적절하게 유지시키는데 적합한 전지 모듈을 개시한다. 본 참증에 따르는 전지 모듈은, 물질의 상태 변화에 따라 열의 출입을 가지는 잠열 저장체; 잠열 저장체의 점유 영역 내에 순차적으로 배열되는 열 전달체들; 및 열 전달체들 사이에서 열 전달체들과 교호적으로 배열되는 적어도 하나의 전지 셀을 포함하고, 열 전달체는 일부를 통해 잠열 저장체에 삽입되고 나머지를 통해 전지 셀에 부착되는 것을 특징으로 한다. 특히, 하기 도면에서와 같이, 본 참증에서는 히트 파이프(33)가 잠열 저장체(21)로 확장 연결되어 열 전달 및 열 냉각이 수행되는 구조를 특징으로 합니다.					
[도면] 			[의견] 본 참증의 경우, 히트 싱크 상에 핀이 잠열 저장체까지 확장되는 구조 및 잠열 저장체가 별도의 공간에 저장되는 것을 특징을 가지고 있습니다. 본 발명에서는 핀의 내부로 상변화 물질이 확장하는 구성에 대해 특징점을 가지고 있으며, 나아가 복수의 상변화 물질들이 적층 또는 서로 다른 공간에서 저장되는 구성도에 대한 독창성이 있으므로, 참증과 충분한 차별성이 있다고 보여집니다.		

인 용 문 헌 4					
등록 문헌번호	2018-0080905	출원인	엘지화학	출원일자	2017.01.05.
발명명칭	상변화물질 캡슐을 적용한 배터리 냉각용 히트 싱크				
관련부분 및 내용					
본 참증은 배터리 냉각용 히트싱크의 냉각유체 온도가 일정하지 않은 문제점을 PCM을 적용하여 배터리 모듈내를 유동하는 냉각유체의 온도를 균일하게 조절하는 것을 특징으로 하는 PCM 캡슐을 적용한 배터리 냉각용 히트싱크 및 이를 포함하는 배터리 모듈에 관한 것으로 배터리 모듈에 형성된 히트싱크의 냉각유체의 온도차를 최소화할 수 있는 효과 및 냉각유체가 배출되는 유출구쪽의 온도가 높아지는 것을 방지하는 효과가 있다. 본 참증의 경우, 히트싱크는 냉각유체의 유입 또는 유출을 위한 개구 및 유로가 형성되어, PCM 유닛은 냉각 유체의 온도가 상승하는 경우 상기 히트 싱크를 통해 유입되어 냉각을 수행하는 것을 특징으로 한다.					
[도면] 			[의견] 본 참증의 경우, PCM이 히트 싱크의 내측으로 유입 및 유출되어 냉각을 수행하는 구조입니다. PCM 순환 형태의 유로를 형성하는 것으로, 본원 발명에서와 같이 핀의 내측에 공간이 형성되어 확장 및 수축되는 구조와는 차이가 있으며, 특히 본원 발명의 저장 공간의 적층, 또는 서로 구획되는 저장 공간의 구조적 특징이 본 참증과는 충분한 차별성을 가지고 있습니다.		

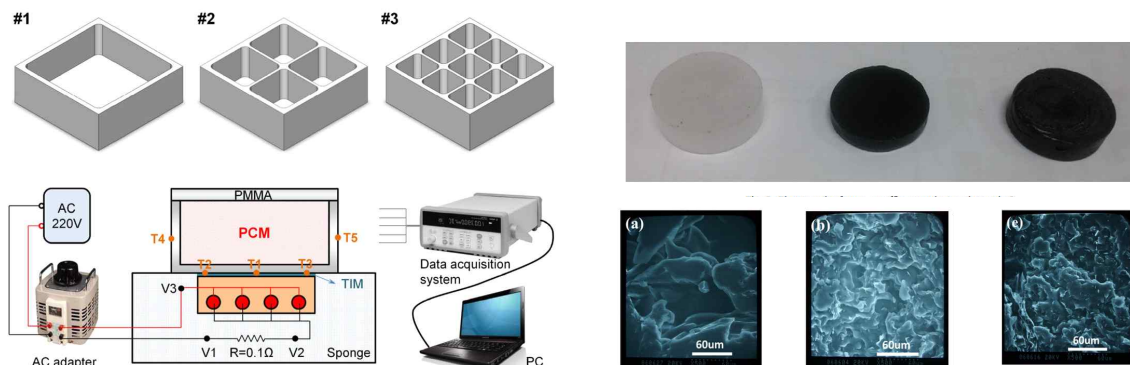
② PCM 적용 히트싱크 및 PCM 다계층 적층 기술에 대한 논문 분석

- PCM(Phase Change Material)을 이용한 냉각장치의 냉각 성능 증대에 관한 연구는 현재 활발한 연구가 진행되고 있으며, 특히 히트싱크(heat sink)에 PCM을 적용한 다양한 연구가 있음
- PCM의 경우, 많은 잠열량(latent heat capacity) 특성을 이용하여, 히트싱크 핀(fin)외부에 PCM을 도포하거나, 함침(dipping) 시키는 방식의 PCM 적용 히트싱크에 대한 많은 연구가 진행되고 있음



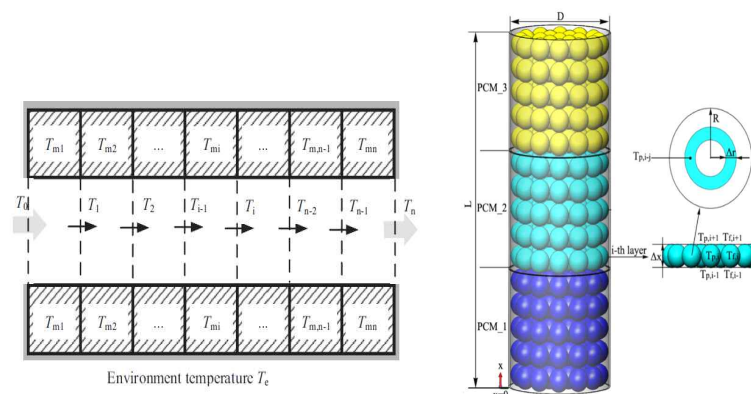
〈그림 2-3-3〉 PCM 적용 heat sink 연구 사례

- PCM 적용 히트싱크에 대한 냉각 성능 증대에 대한 연구를 통해 적용성을 검토하고, PCM 소재의 단점인 낮은 열전도율을 보완하여, 향상된 냉각 성능을 가지는 냉각장치 개발을 위한 연구도 진행되고 있음
- PCM의 낮은 열전도율 보완을 위해 히트싱크의 설계 변경을 통한 단면적 증가에 따른 열 전달량 증대 또는 PCM에 나노복합소재를 적용함으로써, 기존 PCM의 열전도율을 증대시키는 연구가 진행되고 있음



〈그림 2-3-4〉 PCM 히트싱크의 냉각성능 증대를 위한 연구 사례

- PCM 다계층 적층 기술의 경우, 열에너지 저장 장치의 에너지 저장 성능 증대를 위한 연구가 진행되었으며, 열 용량 증대를 위해 상변화물질의 다단 설계를 제안하였음
- 열에너지 전달 매개체인 유체의 경로와 동일한 방향으로 PCM을 적층하였으며, 이를 통해 유체 경로에 따른 상이한 온도 영역대의 상변화물질을 적용함으로써 열용량 증대에 관한 연구를 진행하였음
- 선행 연구의 경우, 매개체(유체)와 상변화물질간의 열의 이동은 본 연구와 유사하나 적층된 상변화물질의 구조가 상이하며, 상변화물질 간의 열에너지 이동이 없어 적층된 상변화물질의 에너지 순환에 의한 열에너지 회수(또는 방열)에 관한 메커니즘(mechanism)이 다르므로 본 과제를 통해 도출한 PCM 다계층 적층 기술은 독창성이 있는 것으로 분석함



<그림 2-3-5> PCM 다계층 적층 기술 연구 사례

③ PCM 적용 냉각장치에 대한 제품 분석

- PCM(Phase Change Material)은 온도 변화에 따라 상(고체→액체 또는 액체→기체)이 변하는 물질을 말하며, PCM을 적용한 냉각장치 중 대표적인 사례로는 히트파이프(heat pipe) 냉각장치임
- 히트파이프(heat pipe)를 이용한 냉각방식의 경우, 물질의 상은 액체에서 기체로 변하며, 기체로 변환 냉매의 이동을 위해 유로가 필요함. 고체에서 액체로 상이 변하는 상변화물질을 적용한 냉각장치의 경우, 미국의 NCT 사가 개발하였으나 상용화 단계는 아님
- PCM(고체→액체 상변화)을 적용한 냉각장치는 히트파이프를 제외하고, 아직 상용 제품이 거의 없으며 특히 다계층 적층 기술을 이용한 PCM 냉각장치는 독창성과 원천기술을 보유하고 있음

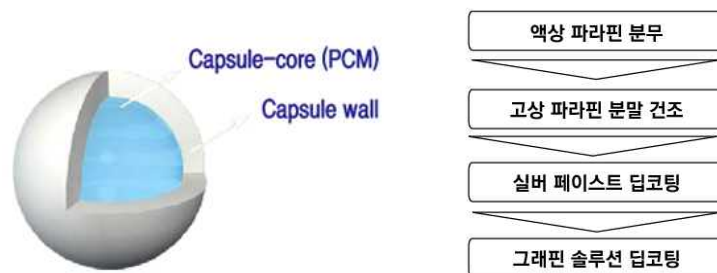


<그림 2-3-6> PCM 적용 냉각장치 제품 사례

(2) 냉각장치에 적용되는 나노복합소재 제작 및 평가

(가) Encapsulation PCM 제작

- Encapsulation PCM 나노 복합소재는 PCM 입자 외부 고열전도 소재의 core-shell 구조 형성을 통해 PCM 상변화 시 누수 방지를 통한 안정성 향상 및 고열전도 소재 코팅을 통한 복합소재의 열전도도 향상이 가능함
- Encapsulation PCM 나노 복합소재의 제작 방법은 다음 같음
 - 파라핀의 원형 형상 제작을 위해 고형 파라핀 (M.P. 52~54 ℃)을 액상으로 녹인 후 낮은 온도 (20 ℃)의 물에 분무시킴
 - 분무시킨 파라핀은 물과 만나 원형 형태의 고상 파라핀으로 바뀜. 이는 파라핀이 유기체 물질이기 때문에 물과 섞이지 않음과 동시에 상변화 온도보다 낮은 온도인 물과 접촉함으로써 응고가 진행되기 때문임
 - 위와 같은 방법으로 제작한 고상 파라핀 분말을 건져낸 후 건조오븐에서 약 45 ℃, 2 시간 가열하여 물기를 제거
 - 액상의 실버 페이스트(Ag paste)에 고상 파라핀 분말을 딥코팅 (dip-coating)
 - 실버 페이스트(silver paste)가 코팅된 파라핀 분말을 건조 오븐에서 약 45 ℃, 3 일간 가열하여 실버 페이스트를 건조시킴
 - 실버 페이스트가 모두 건조되면 파라핀 분말을 그래핀 솔루션 (graphene solution, 23 wt%)에 딥코팅
 - 그래핀 솔루션이 코팅된 파라핀 분말을 건조 오븐에서 약 40℃, 1시간 가열하여 최종적으로 encapsulation PCM 나노 복합 소재를 제작



<그림 2-3-7> encapsulation PCM 모식도 및 제작 공정



(a) 파라핀 고상 분말



(b) 실버 페이스트 코팅

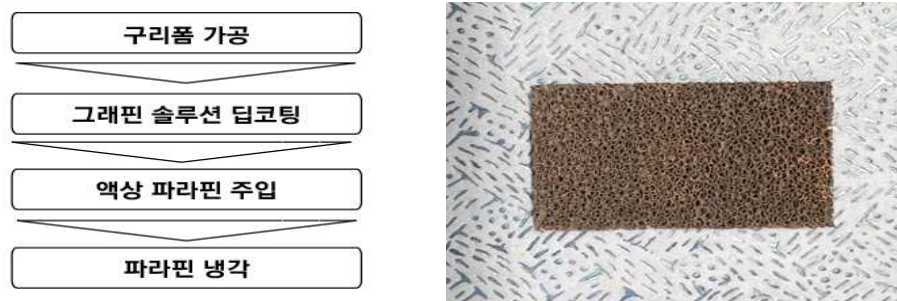


(c) 그래핀 코팅

<그림 2-3-8> encapsulation PCM 제작 공정에 따른 PCM 형태

(나) 고열전도도 소재 네트워크 PCM 나노복합소재 제작

- 고열전도도 소재 네트워크 PCM 나노 복합소재는 PCM 내부 고열전도도 소재의 네트워크 형성을 통해 PCM 나노 복합소재의 열전도도의 비약적 향상이 가능함
- 아래 공정과 같이 고열전도도 소재 네트워크 PCM 나노복합소재의 제작함
 - 75 PPI(Pore Per Inch) 공극을 갖는 구리 폼(foam)을 형상에 맞게 절단
 - 액상의 그래핀 솔루션(graphene solution, 23 wt%)에 구리 폼(foam)을 딥코팅(dip-coating)
 - 그래핀 솔루션이 코팅된 구리폼을 건조 오븐에서 약 40℃ , 1시간 가열
 - 그래핀이 모두 건조 되면 고형 파라핀 (M.P 52~54 ℃)을 핫플레이트에서 100℃로 가열하여 액상으로 녹인 후, 그래핀이 코팅된 구리폼 내부에 액상 파라핀을 부어 공극 내부에 침투시킴
 - 공극 내부까지 파라핀이 모두 침투되면 상온에서 파라핀을 냉각시켜 최종적으로 고열전도도 소재 네트워크 PCM 나노복합소재를 제작

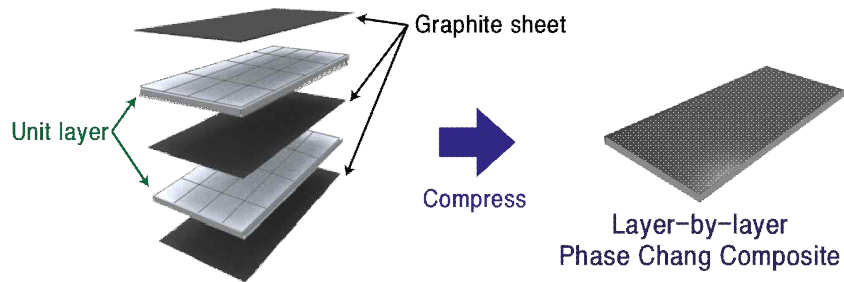


〈그림 2-3-9〉 고열전도도 소재 네트워크 나노복합소재 공정 및 제작

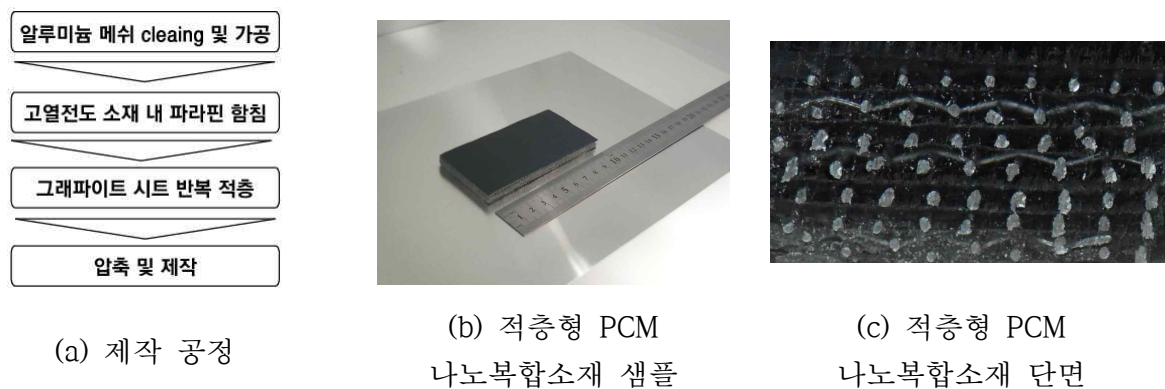
(다) 적층형 PCM 나노복합소재 제작

- 적층형 PCM 나노복합소재는 고열전도도 소재와 파라핀의 반복적인 적층을 통해 PCM 나노복합소재의 열적 성능의 비약적인 향상이 가능하며, PCM 상변화 시 누수 방지 효과도 얻을 수 있음
- 적층형 PCM 나노복합소재의 제작 방법은 다음과 같음
 - 알루미늄 메쉬(mesh)를 샘플 크기에 맞게 가공
 - 고형 파라핀 (M.P 52~54 ℃)을 핫플레이트에서 100℃로 가열하여 액상으로 녹인 후, 가공된 알루미늄 메쉬(mesh) 내에 주입
 - 주입된 파라핀을 상온에서 냉각시켜 고상의 파라핀으로 제작
 - 알루미늄 메쉬 내 파라핀이 주입된 플레이트 다수를 반복적으로 제작
 - 특정 형상의 몰드 내에 앞서 제작한 알루미늄 메쉬(mesh) 내 파라핀이 주입된 플레이트 (plate)와 그래파이트 시트 (graphite sheet, $k=1200 \text{ W/mK}$)을 반복적으로 적층 후, 20 Mpa의 압력을 상온에서 가하여 최종적인 적층형 PCM 나노복합소재를 제작
- 적층형 네트워크 PCM 나노 복합소재를 시작품에 적용하기 위해서는 알루미늄 메쉬 내 파라핀이 함침되어 있는 1차 플레이트(plate)의 대면적화가 필수적임

- 또한, 대면적화된 1차 플레이트와 그래파이트 시트와의 반복 적층 및 접착을 위해 시작품 내 PCM 투입 공간과 동일한 크기의 압축 플레이트 제작이 필수적이며, 앞서 개발한 적층형 네트워크 PCM 나노복합 소재는 소형 제작은 매우 간단하고, 열적 성능도 우수하지만, 대면적화된 샘플 및 정형화된 크기에 대한 제작에는 한계가 있음. 따라서 본 연구에서는 적층형 네트워크 PCM 나노복합 소재를 실제 시작품에 적용하지 않고, 실험실 단위의 소형 샘플에 대한 열적 특성만을 분석하였음



〈그림 2-3-10〉 적층형 PCM 나노복합소재 모식도



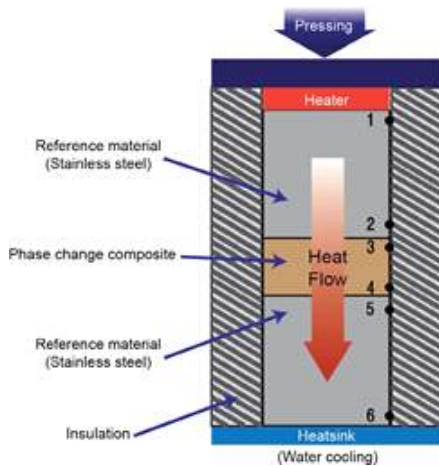
〈그림 2-3-11〉 적층형 PCM 나노복합소재 제작 공정 및 제작

(라) 나노복합소재 합성 및 열 물성 평가

① PCM 나노복합소재 열전도도 분석

- 앞서 개발한 3가지 타입 (Encapsulation PCM, 고열전도 네트워크 PCM 나노복합소재, 적층형 PCM 나노복합소재)의 PCM 나노복합소재에 대한 열전도도 측정을 수행하였음. 각 샘플에 대한 열전도도 측정은 1방향 정상 상태 측정법을 통해 측정하였으며 (ASTM-D5470), 측정장비 모식도는 다음 그림과 같음
- 레퍼런스 금속으로는 스테인레스 스틸 ($k=16.3 \text{ W/mK}$)을 사용했으며, 필름 히터를 통해 샘플 상단에서 열구배를 형성하였으며, 샘플 하단에서 물을 통해 냉각을 시켜 온도를 제어하였음. 또한 레퍼런스 금속과 샘플은 모두 폴리에틸렌 폼 ($K=0.036 \text{ W/mK}$)을 이용하여 단열시킴. 1~6 지점에 T-type 열전대를 설치하여 시간에 따른 온도값을 측정하였고, 다음 수식을 통해 샘플의 열전도값을 계산하였음

- 여기서 k 는 샘플의 열전도도 (W/mK)이며, q 는 측정된 열유속을 나타냄. 또한, T 는 각 지점의 온도를 나타내며, d 는 온도 측정 지점을 나타냄



$$k = 0.5 \times (q_U'' + q_L'') \times |d_3 - d_4| / |T_3 - T_4|$$

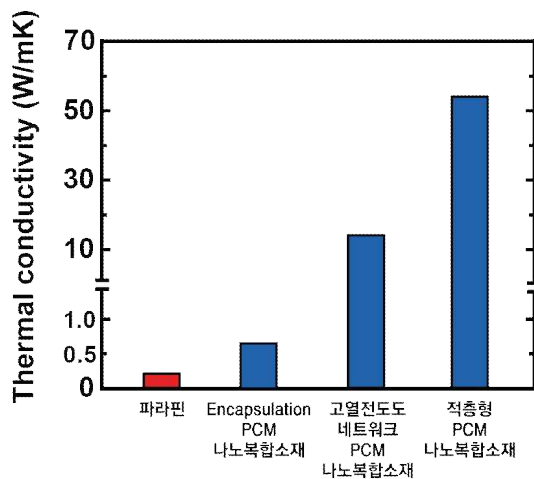
$$q_U'' = k_s \times |T_1 - T_2| / |d_1 - d_2|$$

$$q_L'' = k_s \times |T_5 - T_6| / |d_5 - d_6|$$

<그림 2-3-12> 열전도 측정 장비 모식도

<그림 2-3-13> 열전도 계산 예

- 본 연구를 통해 제작한 나노복합소재의 열전도율의 경우, 아래 그림과 표를 통해 확인할 수 있듯이 순수 상변화물질(bare phase change material)인 파라핀(paraffin)의 열전도율 (0.2 W/m-K) 보다 향상된 열전도율 특성을 보이며, 최대 57 W/m-K의 열전도율 특성을 보임



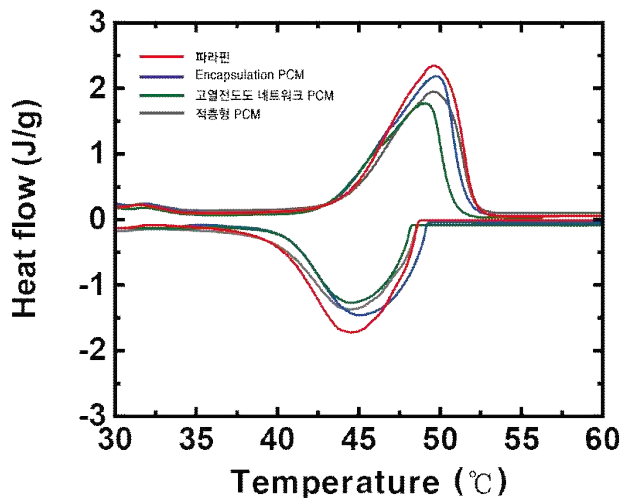
<그림 2-3-14> 열전도도 측정 결과

Type Name	Thermal Conductivity (W/m · k)
파라핀 (paraffin)	0.2
Encapsulation PCM 나노복합소재	0.57
고열전도도 네트워크 PCM 나노복합소재	15.1
적층형 PCM 나노복합소재	57 (x-y axis) / 2.4 (z axis)

<표 2-3-1> 제작 PCM에 대한 열전도도 측정 결과

② PCM 나노복합소재 잠열량 분석

- 앞서 개발한 3가지 타입 (Encapsulation PCM, 고열전도 네트워크 PCM 나노복합소재, 적층형 PCM 나노복합소재)의 PCM 나노복합소재에 대한 잠열량 측정을 수행하였음. 각 샘플에 대한 잠열량은 시차주사 열량계 (DSC, Differential Scanning Calorimeter)를 통해 측정하였음. 시차주사 열량계 측정시 샘플은 질소 환경 (50 ml/min)에서 수행하였으며, 가열 및 냉각 속도는 5 K/min으로 고정하였음



<그림 2-3-15> DSC 분석

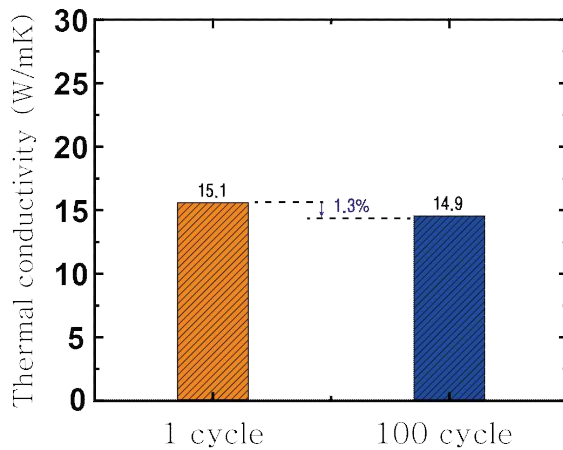
Type Name	Latent Heat, J/g
파라핀 (paraffin)	157
Encapsulation PCM 나노복합소재	128.5
고열전도도 네트워크 PCM 나노복합소재	102.3
적층형 PCM 나노복합소재	112.1

<표 2-3-2> 제작 PCM에 대한 잠열량 측정결과

③ PCM 나노복합소재 내구성에 대한 소재 안정성 분석

○ 열전도도 변화량 분석

- Compact type PCM 히트싱크 시작품의 반복되는 축방열 사이클에 대한 안정성 분석을 위해 고열전도도 소재 네트워크 PCM의 소재 단위의 안정성 분석을 수행함
- 100회의 축방열 사이클 이후 고열전도도 소재 네트워크 PCM의 열전도도 측정을 수행함
- 열전도도 측정 방법은 앞서 언급한 1방향 정상상태 측정법을 통해 분석함
- 초기 고열전도도 소재 네트워크 PCM의 열전도도는 15.1 W/mK이며, 100회의 용해 응고 과정 이후 고열전도도 소재 네트워크 PCM의 열전도도는 14.9 W/mK으로 측정됨
- 100회의 축방열 사이클 이후에도 고열전도도 소재 네트워크 PCM의 열전도도는 약 1.3% 정도의 차이를 보였고, 이는 나노 복합소재의 우수한 안정성을 보여주고 있음



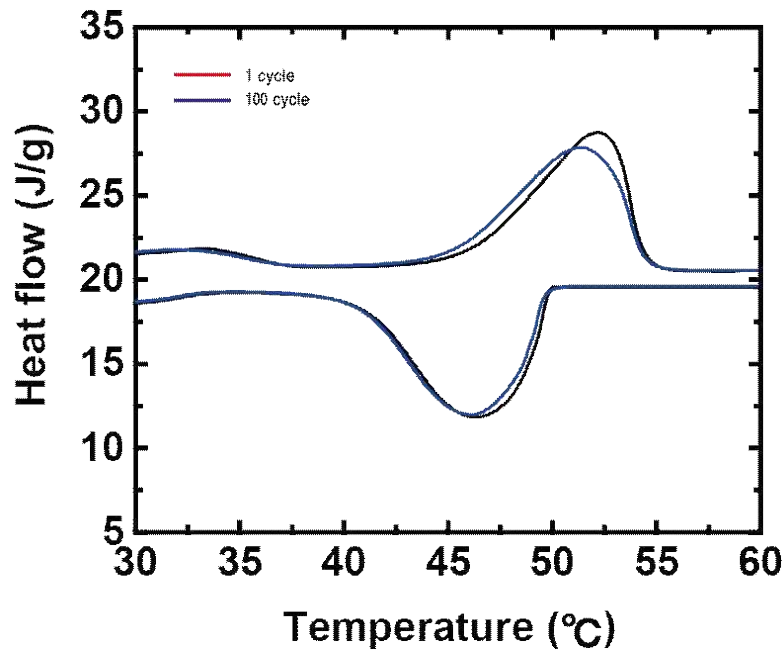
<그림 2-3-16> 반복 축방열 사이클 열전도도 분석

Type Name	Thermal conductivity (W/mK)
1 회 반복 시험	15.1
100회 반복 시험	14.9

<표 2-3-3> 고열전도도 네트워크 PCM 열전도도 반복시험

○ 잠열량 변화량 분석

- 열전도도 안정성 분석과 동일하게 고열전도도 소재 네트워크 PCM의 소재 단위의 잠열량 변화량 분석을 수행함
- 100회의 축방열 사이클 이후 고열전도도 소재 네트워크 PCM의 잠열량 측정을 수행함
- 잠열량 측정 방법은 앞서 언급한 시차주사 열량계(DSC)을 통해 측정함
- 초기 고열전도도 소재 네트워크 PCM의 잠열량은 102.3 J/g이며, 100회의 용해 응고 과정 이후 고열전도도 소재 네트워크 PCM의 잠열량은 101.7 J/g으로 측정됨
- 100회의 축방열 사이클 이후에도 고열전도도 소재 네트워크 PCM의 잠열량 감소량은 약 0.6%이며, 이는 PCM 나노 복합소재가 특별한 반응 또는 손실에 의한 잠열량 손실이 없음을 의미하며, 반복 축방열 사이클에서도 우수한 안정성을 검증함



<그림 2-3-17> 반복 축방열 사이클 DSC 분석

<표 2-3-4> 제작 PCM 소재에 대한 잠열량 반복 측정 결과

Type Name	Heat of fusion (J/g)
고열전도도 네트워크 PCM 나노복합소재 (1 cycle)	102.3
고열전도도 네트워크 PCM 나노복합소재 (100 cycle)	101.7

(3) 연구 단계별 시작품 설계 및 제작

〈표 2-3-5〉 연구 단계별 시작품 특징

Type	시작품 명	특 징
1	호환성 확인용 시작품	- 기존 SIV 냉각용 히트싱크와의 호환성 확인을 위한 시작품 설계 및 제작 - PCM 주입 공간 확보 및 제작 방법과 형상이 수정됨에 따라 기존 히트싱크 대비 동일 체적에서 핀(fin)의 개수 및 형상이 상이하기 때문에 호환성 확인을 위해 제작 - 기존 SIV 냉각용 히트싱크와 호환성 확인용 시작품에 대해 실험실 단위 기초 시험 및 실차 적용 기초 시험을 통해 호환성 검증
2	PCM 히트싱크 초도 시작품	- PCM 다계층 적층 기술 및 나노복합소재를 적용한 초도 시작품 설계 및 제작 - 초도 시작품 제작을 통해 기존 SIV 냉각용 히트싱크와의 열적 특성을 분석하고, 최종 시작품 제작에 있어 보완 및 개선 사항을 분석함
3	Compact type PCM 히트싱크 시작품	- Effective thermal conductivity 증대를 통한 소재의 열전도율을 보완하고, PCM의 장기 신뢰성 향상(PCM 유실에 의한 장치 손상)을 위한 시작품 설계 및 제작
-	Compact type PCM 히트싱크 heat control 시작품	- Hot spot(i.e. IGBT)에서 발생하는 열의 이동에 대한 열 전달 채널을 만들고, PCM의 열 흡수 경로를 다양하게 튜닝(tuning)한 시작품으로서, compact type PCM 히트싱크 시작품과 성능을 비교 분석할 목적으로 추가 개발함

(가) 호환성 확인용 시작품 설계 및 제작

- 본 연구에 필요한 시작품을 제작하기 위해 기존 대전도시철도공사에서 사용하고 있는 방열판 사양을 검토하였으며, 그 결과를 기초로 하여 다음과 같이 설계주안점을 설정하였음

① 설계주안점

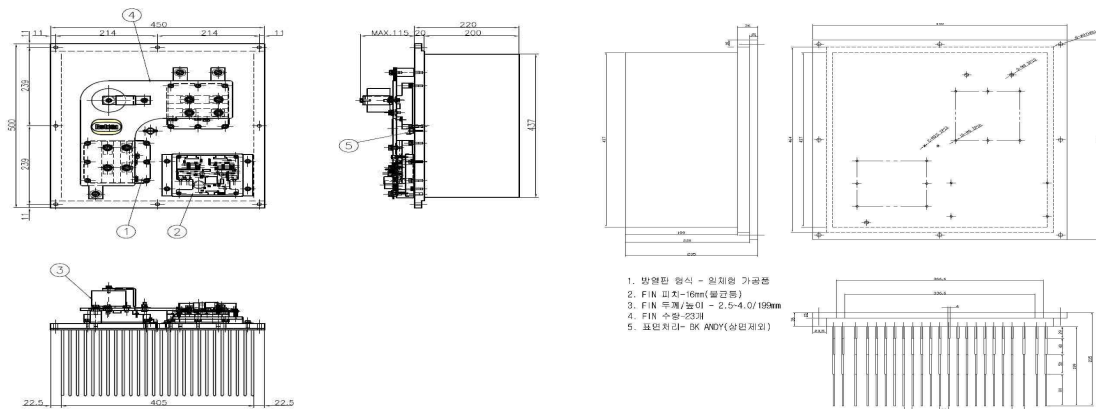
- 시작품에 대한 안정적인 성능 검증을 위해 대전도시철도공사에서 사용하고 있는 기존 방열판의 성능을 유지하고, 기존 사용 방열판의 외형 치수는 동일할 것
- 향후 여러 형태의 방열판 제작을 고려하여 최대한 가공이 쉬운 형태로 할 것
- FIN 가공 시 발생하는 열(자재 휨 원인) 배출 방법
- 본 연구에서 가장 중요한 소재인 PCM의 성능을 최대한 발휘할 수 있을 뿐 아니라 최종 목표인 방열성능이 증가된 새로운 형태의 방열판 제작이 용이할 것

② 호환성 확인용 시작품 설계

- 상기 설계 주안점을 기본으로 하여 아래 그림과 같이 도면을 작성한 후 Machining Center를 이용하여 가공하기 전 단계로 TOP SOLID라는 3D 전환용 프로그램을 이용하여 CAD 도면을 3D 전환하였고 최종적으로 MCT 가공용 CODE를 완성하였음

〈표 2-3-6〉 히트싱크 사양 비교

구분	대전도시철도공사 히트싱크	호환성 확인용 히트싱크
형 식	압입형	일체형 가공
규 격	450W × 500L × 220H	450W × 500L × 235H
Fin 수량	26 개	23 개
특이사항	-	상부 Plate를 2단으로 분리 Fin 수량 감소 및 피치 증가



〈그림 2-3-18〉 대전도시철도공사 히트싱크 및 호환성 확인용 히트싱크 외형도

③ 호환성 확인용 시작품 제작

- 설계에서 생성된 가공용 Code를 이용하여 다음과 같은 순서로 MCT를 통해 호환성 확인용 시작품을 제작하였음



〈그림 2-3-19〉 호환성 확인용 히트싱크 가공 공정

○ 1차 제작

- 설계에서 생성된 가공용 코드(code)를 이용해 23개의 핀(fin) 80 mm 깊이로 가공 시 발생 하는 열에 의해 야기될 수 있는 자재 휨 문제를 해결하기 위해 1 개의 핀 가공 후 다음

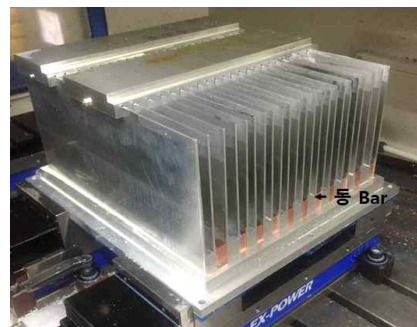
핀을 가공하지 않고, 순번을 교차하여 가공을 실시하였으나, 핀의 깊이를 초기 80 mm로 가공 후 130 mm로 가공 시 다수의 핀에서 소재 변형(휨 현상)으로 인해 더 이상 가공을 진행하지 못하는 제작·가공 공정에서 시행 착오가 발생하였음



〈그림 2-3-20〉 호환성 확인용 시작품 1차 제작 결과

〈개선안 도출〉

- 1안 : 핀(fin) 간격에 맞는 지그를 제작하여 상부에 설치함으로 강제적으로 핀 사이 간격을 유지함(가공 시 공구가 원활히 가공을 진행 가능)과 동시에 핀의 가공구역을 3구역으로 분할해서 가공(가공 시 발생하는 열에 의한 변형 최대한 방지)
- 2안 : 핀과 핀 사이에 열전도도가 뛰어난 동(Cu) 재질의 사각 형태의 Bar를 설치(핀 사이의 간격 유지 및 가공 시 발생하는 열의 방출 도모)
- 3안 : 가공 시 공구의 스핀들과 피드 속도를 증가시키고 1회 가공하는 깊이를 최소화(가공 시 발생하는 열에 의한 변형 최대한 방지)
- 호환성 확인용 시작품 제작을 위한 가공 시 상기 검토한 방안의 적용은 3가지 방안을 모두 적용하는 것으로 결정한 후 가공을 실시



〈그림 2-3-21〉 호환성 확인용 시작품 2차 가공 방법



〈그림 2-3-22〉 호환성 확인용 히트싱크 제작 완료

(나) PCM 히트싱크 초도 시작품 설계 및 제작

- 초도 시작품의 경우 기 제작한 호환성 확인용 시작품의 상부 알루미늄 기저부(plate) 내부에 상변화 물질인 PCM₁과 PCM₂를 투입하여 호환성 확인용 히트싱크의 방열판보다 방열성능이 뛰어난 제품을 제작하기 위해 고안되었음

① 설계주안점

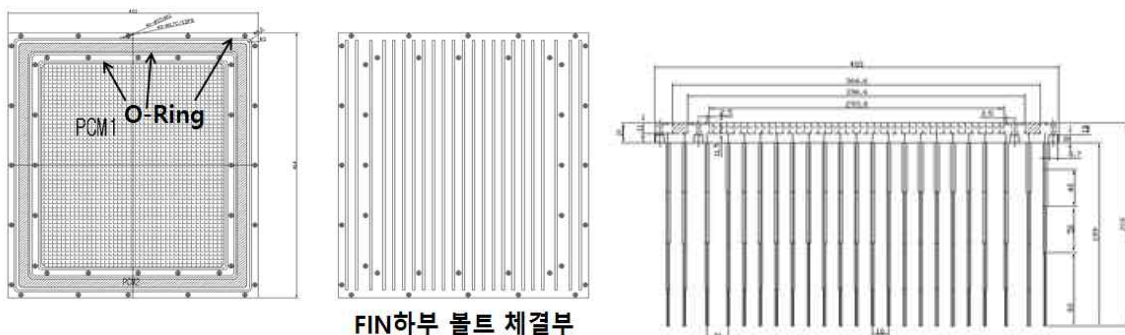
- 호환성 확인용 히트싱크를 기본으로 하고 PCM 물질의 혼합 방지 방법
- PCM 물질의 외부 유실 방지를 위한 기밀 유지 방법
- 열원으로부터의 열전달(열방출)이 원활히 될 수 있는 방법

② PCM 히트싱크 초도 시작품 설계

- PCM 물질의 혼합 방지 방법 : 알루미늄 기저부 내부에 외측으로는 PCM₂ 물질을 내측으로는 PCM₁ 물질을 투입하여야 하는 초도 시작품의 특성상 PCM₁과 PCM₂ 사이의 공간에 O-Ring을 설치하여 물질 간 혼합 방지함
- PCM 물질의 외부 유실 방지를 위한 기밀 유지 방법 : 상부 알루미늄 Plate와 fin을 포함하고 있는 하부 본체에 PCM₂ 물질 외부로 O-Ring 설치를 하여 PCM₂의 외부 유출로 인한 방열성능 저하 문제를 해결
- 열원으로부터의 열전달(열방출)이 원활히 될 수 있는 방법 : 상부 알루미늄 Plate와 FIN을 포함하고 있는 하부 본체의 완벽한 접촉을 위해 볼트를 이용하여 상부 알루미늄 Plate와 fin을 포함하고 있는 하부 본체와 공간이 없도록 체결

〈표 2-3-7〉 호환성 확인용 시작품 및 PCM 히트싱크 초도 시작품 사양 비교

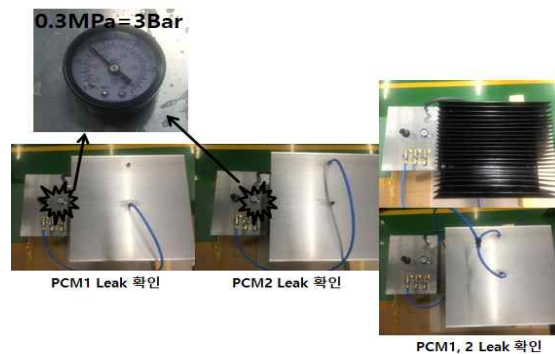
구분	호환성 확인용 시작품	PCM 히트싱크 초도 시작품
형 식	일체형 가공	일체형 가공
규 격	450W × 500L × 235H	450W × 500L × 235H
Fin 수량	23 개	23 개
특이사항	• 상부 Plate를 2단으로 분리 • fin 수량 감소 및 피치 증가	• 하부 본체 내측에 PCM₁ 및 외측에 PCM₂ 충전 • O-Ring 설치



〈그림 2-3-23〉 PCM 히트싱크 초도 시작품 설계도

③ leak test (PCM 소재의 누설 기밀 성능 시험)

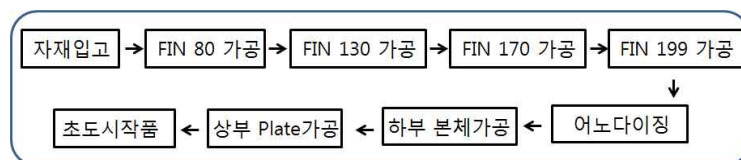
- PCM₁과 PCM₂가 누설이 되어 내부에서 혼합이 되는 것을 방지하기 위해 설치한 O-Ring이 제 기능을 발휘할 수 있는 확인하기 위해 다음과 같은 Leak Test기를 이용하여 압력 3 bar에서 누수가 발생 여부를 다음과 같은 방법으로 확인함
- 하부 본체에 O-Ring 설치 → 상부 시험용 plate와 하부 본체 볼트 결합 → leak test기에 공기배관 연결 → 압축공기 주입 후 압력 3 bar 유지 여부 확인
- 아래 표기한 장치를 이용한 PCM 물질 leak test 결과에 내측의 PCM₁, 외측의 PCM₂ 물질의 경우 압력 3 bar에서도 누수가 발생하지 않는 것으로 나타나 O-Ring을 통해 PCM 물질의 혼입 및 외부 누수 발생 가능성에 대하여는 운영 조건에서 없을 것으로 판단하였음



<그림 2-3-24> o-ring을 이용한 PCM 히트싱크 초도 시작품 leak test

④ 초도 시작품 제작

- 설계에서 생성된 가공용 Code를 이용하여 다음과 같은 순서로 MCT를 통해 최종 제품인 초도 시작품을 제작함



<그림 2-3-25> PCM 히트싱크 초도 시작품 제작 공정



<그림 2-3-26> PCM 히트싱크 초도 시작품 제작 완료

(다) Compact type PCM 히트싱크 시작품 설계 및 제작

- 기 제작한 초도 시작품의 사양에서 방열성능은 유지하고, 초도 시작품의 방열성능 실험에서 나타난 개선점들을 보완하기 위해 아래 그림과 같은 다공성 형태로 하부 본체 내부(PCM₁ 충전 부분)를 가공하는 것으로 계획함

① 설계 주안점

- 초도 시작품 사양에서 방열성능은 유지하면서 방열판 크기를 감소시킬 수 있는 방법
- 본체 내부의 PCM물질의 상변화시 발생할 수 있는 내부 공극을 최소화 시킬 수 있는 방법

② Compact type PCM 히트싱크 시작품 설계

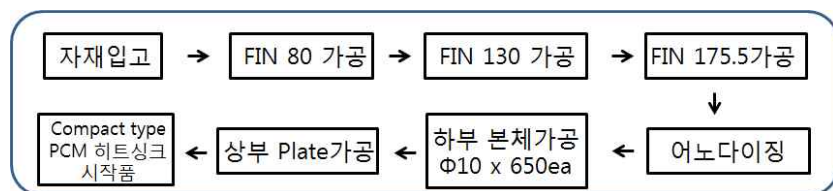
- 히트싱크 체적 축소 방법 : 초도 시작품의 사양에서 상부 plate 크기는 동일하게 하고 하부 본체의 fin 부분의 길이를 10 % 축소하여 전체 히트싱크 부피 10 % 절약 달성
- PCM 물질의 상변화시 발생할 수 있는 내부 공극을 최소화 시킬 수 있는 방법 : 하부 본체 내부에 3 mm 간격으로 $\phi 10 \times 650\text{ea}$ hole을 타공하여, PCM₁ 물질 충진을 통해 상변화 시 공극 발생 최소화 뿐 만아니라 3 mm의 알루미늄 소재의 열전달 성능 활용도 가능하여 방열성능 증대 기대

<표 2-3-8> PCM 히트싱크 초도 시작품 및 compact type PCM 히트싱크 시작품 사양 비교

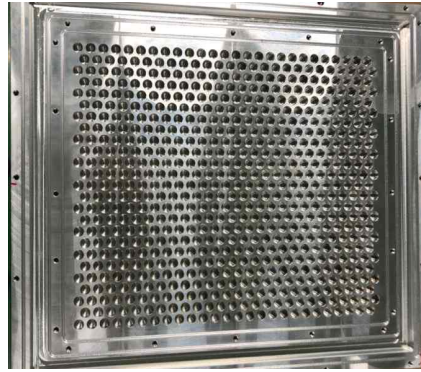
구분	PCM 히트싱크 초도 시작품	Compact type PCM 히트싱크 시작품
형 식	일체형 가공	일체형 가공
규 격	450W × 500L × 235H	450W × 500L × 211H
Fin 수량	23 개	23 개
특이 사항	●하부 본체 내측에 PCM₁ 및 외측에 PCM₂ 충전 ●PCM₁ 과 PCM₂ 혼합방지를 위해 사이에 O-Ring 설치	●하부 본체 내측에 PCM₁ 및 외측에 PCM₂ 충전 ●O-Ring 설치 ●본체 내부 PCM₁ 주입부의 구조를 타공 구조로 개선하여, PCM₁ 상변화시 공극 발생 최소화 ●시작품 크기(체적) 10 % 축소

③ compact type PCM 히트싱크 시작품 제작

- 설계에서 생성된 가공용 Code를 이용하여 다음과 같은 순서로 MCT를 통해 최종 제작품인 시작품 제작(공정수정 편높이 수치)



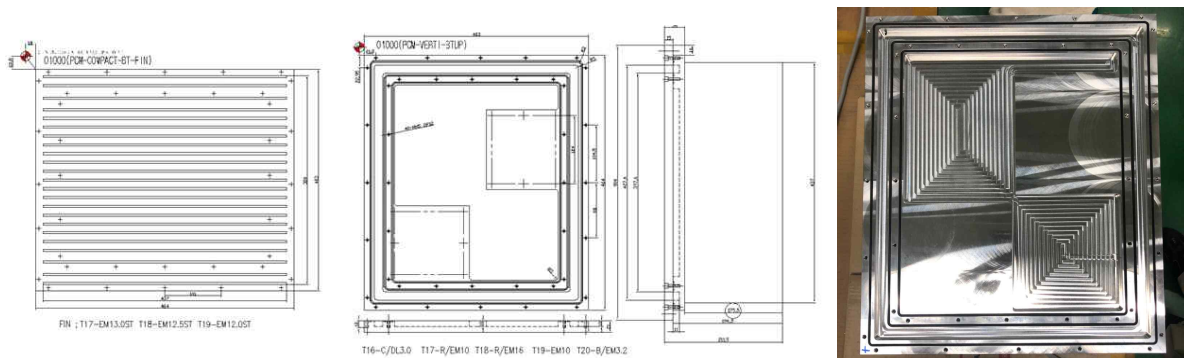
<그림 2-3-27> compact type PCM 히트싱크 시작품 가공 공정



〈그림 2-3-28〉 compact type PCM 히트싱크 시작품 제작 완료

(라) Compact type PCM 히트싱크 control 시작품 제작

- Compact type PCM 히트싱크 control 시작품의 경우, 상변화물질이 주입되는 공간을 세분화하여 PCM을 단위 면적으로 구분하여, 상변화물질의 부피증가에 대한 공극을 최소화함과 동시에 graphite sheet를 이용해 PCM의 유실을 방지함
- Compact type PCM 히트싱크 control 시작품은 compact type PCM 히트싱크 시작품과 단위 면적의 유효 열전도도(effective thermal conductivity) 동일하게 적용하고, 국소적으로 발생하는 주요 열을 핀으로의 열전달을 용이하게 하는 설계를 하였으며, 현재 시작품을 제작하였음



〈그림 2-3-29〉 Compact type PCM 히트싱크 control 시작품 설계도 및 제작사진

라. 냉각 성능 평가

(1) 실험실 단위 시험 평가 방법

(가) 시험실 단위 시험을 위한 장치 설계 및 제작

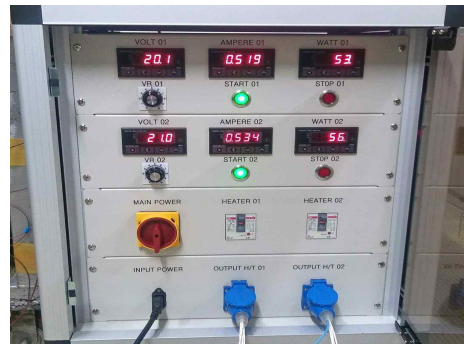
- 실험실 단위 시험을 진행하기 위해 시험장치 제작을 검토하여 다음과 같이 시험 장치를 제작하였음

① 설계주안점

- 히터 등의 발열체 사용으로 인한 안전사고 원인 제거
- 방열판 거치대의 경우 중량물인 방열판의 무게를 견딜 수 있고 실험을 안정적으로 진행할 수 있는 형태 검토
- 거치대는 여러 크기의 방열판을 대상으로 실험을 할 수 있도록 내부 Guide 가변형으로 검토
- 부하조건 변경을 할 수 있도록 실험용 제어장치 구성

② 장치 설계

- 거치대
 - 규격 : 1,060W × 850L × 790H
 - 재질 : 알루미늄
- 성능 시험 Control 장치
 - 규격 : 600W × 600L × 700H
 - 전원 : 220V 단상
 - 채널 수 : 2채널
 - 지시계 : 전력, 전압, 전류
 - IGBT 모사체 : FZ800R33KF2C 외형기준
 - 히터 : 최대 500w × 2ea/IGBT
 - 온도센서 : K-Type(Omega Mini connector, 표면접촉식)



<그림 2-4-1> 실험실 단위 시험 장치 및 제어 장치

(나) 실험실 단위 시험 방법

○ 시험장치 구성 : 방열성능시험장치, Control 장치 및 온도 기록계(FW1012, 요코가와)

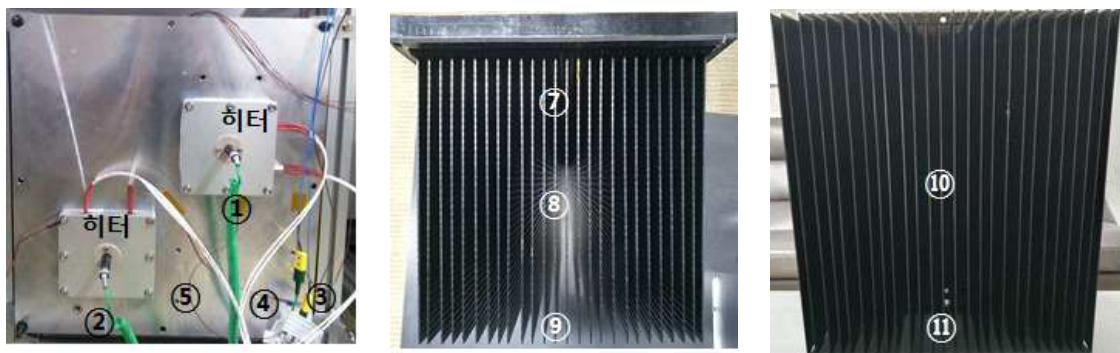
○ 시험 방법

- 방열판 거치대에 실험용 방열판 설치
- IGBT 설치 위치에 Heating Block 결합(히터 포함)
- 방열판 및 FIN에 온도측정 센서 부착
- Control 장치 메인 전원 연결
- Control 장치 히터 전원 연결
- 메인전원 스위치 On
- Heater 전원 On
- Start 스위치 Button On
- 부하조절 밸브 조정을 통해 원하는 부하 설정
- 온도기록계 전원 ON 후 온도 기록 저장



<그림 2-4-2> 실험실 단위 시험 장치 구성

○ 온도 측정은 아래 그림과 같이 11개소를 측정하였음



<그림 2-4-3> 온도 측정 위치

(2) 실차 적용 시험 방법

(가) 실차 적용 시험 준비

- 도시철도 차량용 보조전원장치(SIV) 히트싱크에 대하여 실차에 적용하여 시험하고 결과를 도출을 위한 시험 준비는 다음과 같음
 - 대전도시철도1호선 전동차 보조전원장치에 철도기술연구원에서 제작한 시제품에 대하여 1개 편성 1개 차호에 적용하고 시험을 실시함
 - 시험 장소는 대전도시철도 판암차량기지에서 수행하여 기존 SIV 히트싱크와 본 연구를 통해 히트 싱크의 실차 비교 시험을 위하여 전동차 및 예비 보조전원장치 SET를 구비
 - 실차 시험은 시험 절차서에 의해서 시험환경과 조건의해서 시행함

(나) 시험 항목

- 실차 적용 보조전원장치 구동상태 확인 시험을 검증하기 위해서 시험항목을 정의함
 - 보조전원장치 구동상태 확인 시험
 - 정특성 온도 시험
 - 부하별 온도 측정 시험 (냉/난방, 형광등, 기타 전원 부하시험)
 - 부하변동 시험

(다) 시험 방법

- 시험 전동차 1개 편성 판암차량기지 검사고 내 유치함. 시험 전동차는 정비가 완료된 정상 차량으로 시험 대상차량은 3~4일 기지에 유치
- 대전도시철도 전동차운영에 대한 예비율을 감안하여 전동차 시험은 토, 일요일이 포함된 날로 진행하는데 필요시 시험 요일을 조정하여 수행
- 시험 적용은 아래 그림과 같이 1호차(또는 0호차)의 보조전원장치 1SET에 설치



<그림 2-4-4> 대전도시철도 1호선 전동차

- 아래 그림과 같이 보조전원장치내 2개상(V, W상)에 대하여 교체하고 기존 히트싱크 1 SET 및 개선 히트싱크 2 SET에 적용하여 동일 조건 부하시험을 수행



〈그림 2-4-5〉 대전도시철도 1호선 보조전원장치 내부

- 개선 히트싱크 취부에 따른 동작 시험을 수행하고 시험절차서에 따른 시험 수행 완료 후 전동차 운행을 위해 원상 복귀함. 이때, 취부 시 동작 및 외관시험은 아래 표와 같이 수행하고 특이사항이 없어야 함

〈표 2-4-1〉 차량 상태확인 (장치 취부)

구 분	방 법	판 정
외관시험	장치 취부 시험	이상 없을 것
	차량 취부 시험	이상 없을 것
동작 시험	보조전원장치(SIV) 동작	특이사항 없을 것

- 동작 및 외관 시험 완료에 따라 히트싱크 전단면에 온도센서를 설치하며, 이때 온도센서는 다음 그림과 같이 온도 측정 점에 설치하고 시험을 수행함



〈그림 2-4-6〉 보조전원장치 온도 측정 위치

구분	외 형	사 양
온도센서		k type
계측기		Graphtec GL220

〈표 4-4-2〉 온도 측정 장비 사양

○ 외관 및 기본 동작 확인 시험

- 전동차 보조전원장치 적용 차량에 대하여 기지구내로 이동
- 전동차의 전원을 완전 차단하고 방전상태 및 작업 전 안전 상태를 확인
- 개발된 보조전원장치 히트싱크와 대전도시철도공사 예비품 1 SET에 대하여 시험할 수 있도록 부속장치를 분해 및 조립하여 외관 상태를 확인
- 시험 전동차 1개 편성 1개소 보조전원장치에 개발용 히트싱크를 1상(W상)에 장착
- 시험용 보조전원장치 완착에 대하여 보조전원장치 무가압 기동시험을 통해 동작 및 안정성을 확보 후 가선(DC 1,500V)을 가압 후 동작 상태를 확인
- 최종 보조전원장치 상태를 확인하여 이상이 없을 시 동적시험을 시험 절차서에 준용하여 수행

○ 정특성 부하변동 시험

- 보조전원장치의 상태에서 부하 변화에 따른 온도 변화 측정 및 분석시험을 수행함. 부하는 계절별 수용 부하가 달라서 본 과업 목적 달성에 효과적인 부하를 선택하여 단계별 부하량 변화를 통해 시험 진행
- 전동차의 상시부하에 대하여 냉방부하 및 난방부하에 대하여 부하시험을 수행하였으나 과업 수행기간 기온조건에 대하여 난방부하(1/3, 2/3, 전난방)에 대하여 수행

※ 난방/냉방부하 변화에 따른 온도 변화 시험 진행

- 본 과업에서는 온도조건에 따라 동절기(난방부하)에 대해서 실험을 시행함
- 부하량 : 상시부하 + 난방부하(1/3부하, 2/3부하, 전난방부하)

① 【상시부하】 전동차 DC부하 : 5.17 [kW]

차량구성	편성당 DC 부하[W]	정상운전시 SIV 대당 DC 부하[W]	
4량 1편성 TC ₁ +M ₁ (또는 M ₂ +TC ₂)	10,340	5,170	5,325 TC ₁ +M ₁
			5,015 M ₂ +TC ₂

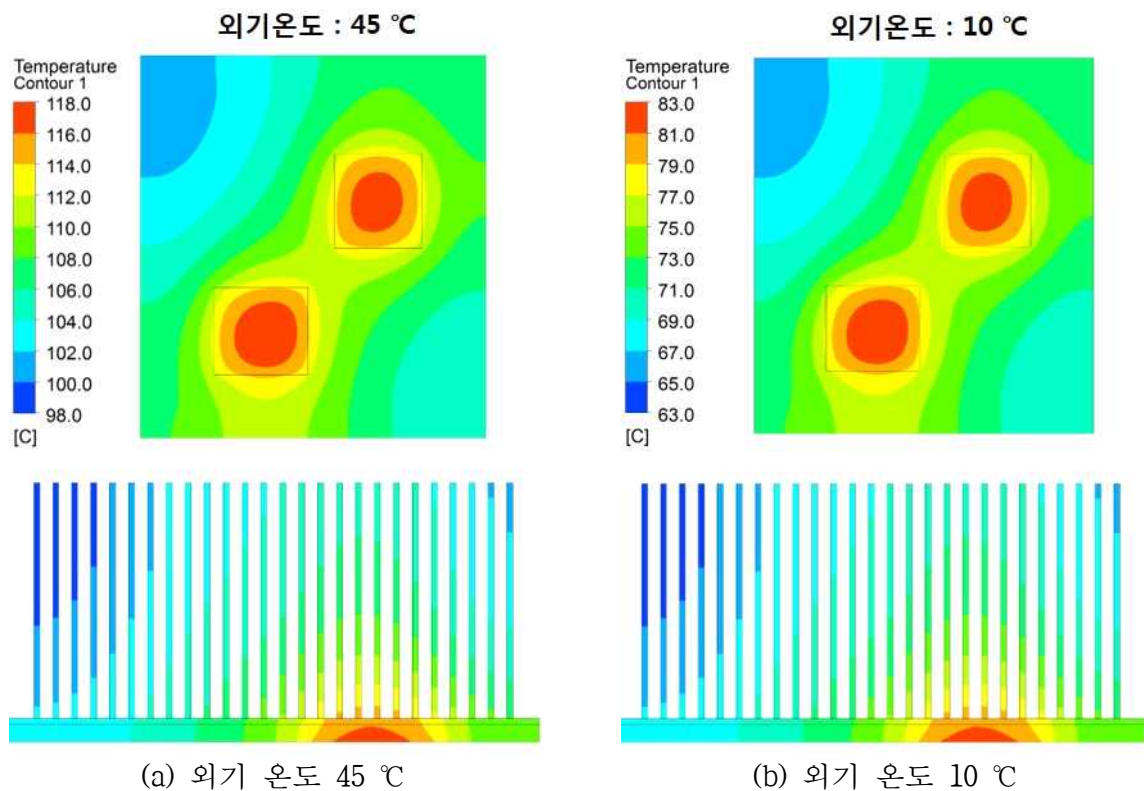
② 【가변부하 1-동절기】 전동차 AC부하 : 40.87 [kW]

차량구성	편성당 AC 기본 부하[kW]	난방부하		전 부하 [kW]
		조건	난방부하[kW]	
4량 1편성 TC ₁ +M ₁ (또는 M ₂ +TC ₂)	11.47	1/3	9.8	21.27
		2/3	19.6	31.07
		3/3	29.4	40.87

※ 동절기 난방부하 종류 : 난방기, 객실등, 표시기, 계기판류, 충전기 등 일체

(3) 호환성 확인용 시작품 기초 성능 평가

- 상변화물질 주입을 위해 기저부의 두께와 핀의 개수가 수정됨에 따라 실차 적용 시험을 위해 철도차량에 설치 시 기존 히트싱크 대비 높은 온도를 보일 시 철도차량 시스템의 안전에 문제를 야기 시킬 수 있으므로, 호환성 확인용 시작품에 대한 기초 성능 평가를 실시함
- 기존 SIV 냉각용 히트싱크의 경우, 외기 환경 조건이 45 ℃일 때 한계 부하 조건에서 최고 온도인 110 ℃를 초과하지 않는 히트싱크를 제작하였기 때문에, 본 연구를 통해 제작한 시작품을 이용한 실차 적용 시험 시 외기 환경과 부하 조건이 상이하므로, 성능 평가 전 수치해석을 통해 외기 환경에 따른 히트싱크의 온도 경향성을 분석함
- 기존 SIV 냉각용 히트싱크 설계 시 적용된 외기 환경 조건에서의 최대 운영 조건으로 수치 해석을 수행한 결과, 최고 온도는 118 ℃임
- 본 연구에서 실시하는 실차 적용 시험 시 외기 온도가 10 ℃로 가정하였을 때, 히트싱크의 최고 온도는 약 83 ℃로 한계 운용 온도인 118 ℃보다 약 35 ℃ 낮아, 실차 적용 시험 시 한계 운용 온도를 넘지 않을 것으로 분석함
- 또한, 상변화물질은 히트싱크에서 overload (또는 thermal shock) 발생 시 잠열(latent heat)을 흡수하여, 히트싱크의 한계 운용 온도를 초과하지 않도록 하는 역할을 수행하나, 실차 적용 시험 시 철도차량 시스템 안전을 고려하여, 한계 운용 조건에 대한 시험의 한계가 있으므로 최대 운영 조건에서 상변화에 의한 냉각 성능 효과를 분석해야 할 것으로 판단함

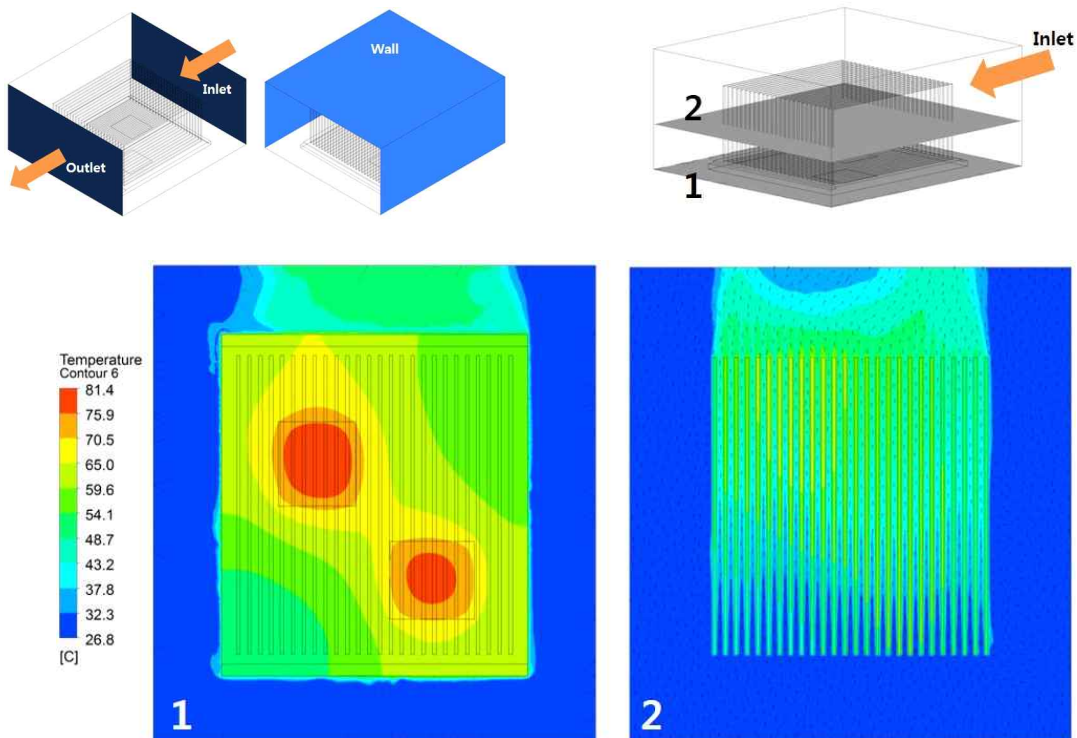


<그림 2-4-7> 한계 운영 조건에서의 외기 환경 변화에 따른 온도 분포

- 철도 차량이 주행 시 외기에서 SIV 스택(stack)으로 유입되는 공기의 속도는 약 0.7 m/s로 주행 시 한계 운용 조건에서의 히트싱크의 온도 분포를 수치해석을 이용해 분석함
- 외기의 공기가 유입 시 히트싱크는 자연대류 조건일 때보다 더 낮은 온도 특성을 보이며, 실차 적용 시험 시 한계 운용 조건 시험의 한계와 외기 환경이 상이하고 열차 운행 시 온도 영역이 감소하므로 실차 적용 시험은 동적 시험을 통한 냉각 성능 평가 계획을 정립함

〈표 2-4-3〉 외기 유입에 대한 수치해석 방법

boundary condition	Heat loss, W/IIGBT	327.35
	Heat flux, W/m ²	23,157.2
model	Turbulent	SST k- ω
Methods	Scheme	SIMPLE
	Gradient	Least Squares Cell Based
	Pressure	PRESTO!
	Momentum/ Energy	Second order upwind
Calculations	Type	Steady



〈그림 2-4-8〉 외기 유입 시 한계 운용 조건에서의 히트싱크 온도 분포

- 호환성 확인용 시작품 제작에 따른 기초 성능 평가 실시를 위해 아래 그림과 같이, 제작된 시작품에 철도차량에서 사용 중인 IGBT를 설치함
- IGBT 설치 후 철도 차량의 SIV 스택(stack)에 설치되어 있는 3 개의 SIV 냉각용 히트싱크 중 하나를 본 시작품과 교체하여 설치하여, 기초 호환성 시험을 실시함



(a) 호환성 확인용 시작품



(b) IGBT stack 설치



(c) IGBT stack 설치 완료



(d) 시작품 실차 설치



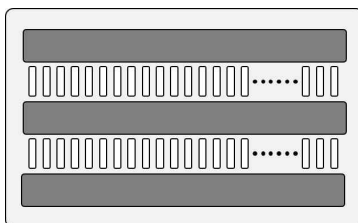
(e) 기본 동작 시험



(f) 기초 성능 평가 실시

<그림 2-4-9> 호환성 확인용 시작품 기초 성능 평가 절차

- 실차 적용 시험 시 외기 환경 변화에 따른 냉각 성능 시험을 위해 아래 그림과 같이 SIV 스택 하부에 외부 공기 유입구를 차폐시킴
- 유입구를 차폐시킴으로써 외기 환경 변화에 따른 철도차량의 극한 운영 환경 조건을 모사할 수 있음



(a) 3/5 close



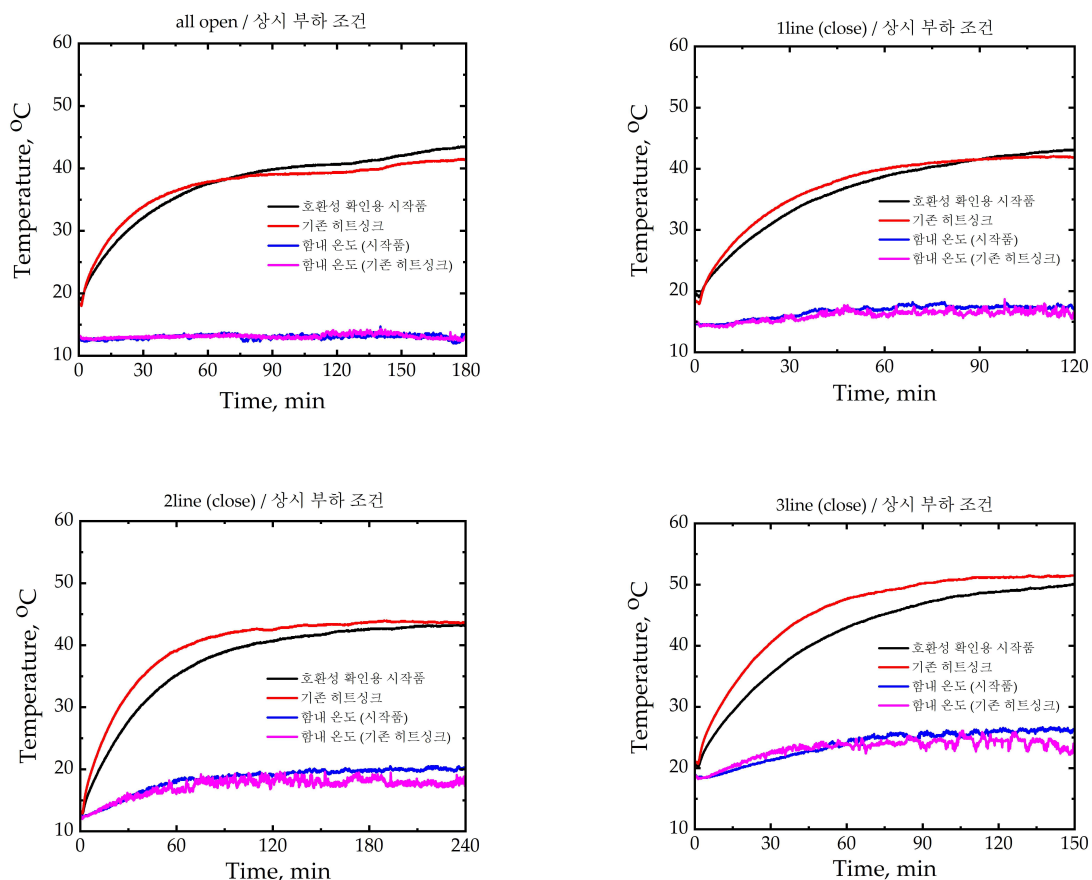
(b) 5/5 close



(c) 외기환경 조절 방법

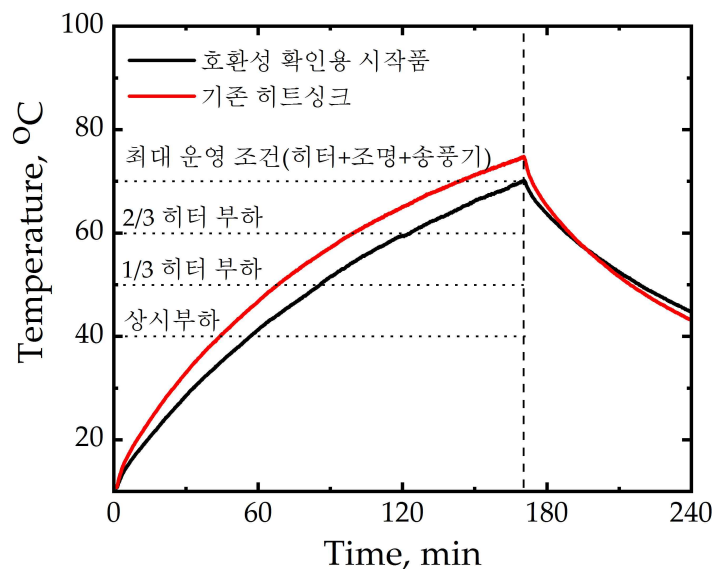
<그림 2-4-10> 외기 환경 조성 방법 및 실차 적용

- 호환성 확인용 시작품을 철도 차량에 설치 후 SIV 스택(stack) 내부의 환경 변화를 위해 위 그림과 같이 스택의 하부 홀(hole)로 유입되는 공기를 차례대로 차단함
- 외부에서 유입되는 공기를 차단함으로써, 실차 적용 시험 시 한계 운영 조건 공급에 대한 한계를 보완하여 냉각 특성을 분석할 수 있는 온도 영역으로 히트싱크의 온도를 증가시키는 역할을 기대할 수 있음
- 또한 대류에 의한 냉각이 용이하지 않는 환경(i.e. 가혹환경)에서는 히트싱크의 냉각 성능은 급격히 저하됨에 따라 가혹환경에서 overload 발생 시 한계 운용 온도(i.e. 125 ℃)를 초과하여 시스템의 신뢰성 저하 및 안전에 문제를 야기 시킬 수 있으므로, 본 연구를 통해 개발한 PCM 적용 히트싱크를 통해 가혹환경에서의 냉각 특성에 대해 분석하고자 함
- SIV 스택(stack) 내부의 환경 변화에 따라 각 조건별 최고 온도를 파악하기 위해 정상상태 도달까지의 실차 적용 기초 시험을 수행하였으며, 그 결과 상시 부하 조건에서의 온도는 유입구를 3개 차단했을 때 최대 55 ℃ 이하이므로, PCM의 상변화 온도 영역이 최대 60 ℃ 이하인 소재를 적용해야 할 것으로 판단함
- 아래 그림의 경우, 실차 적용 시험 시 공급할 수 있는 최저 부하 조건(상시 부하 조건) 이므로, 실차 적용 시험에서 공급 가능한 여러 부하조건에 대한 온도 특성을 분석할 필요가 있음



<그림 2-4-11> SIV stack 내부 환경 변화에 따른 실차 적용 시험 결과

- 아래 그림의 경우, 실차 운영 조건 변화에 따른 히트싱크의 온도 특성 결과를 보여주고 있으며, 실차 적용 시험에서의 최대 가혹 환경인 모든 유입구를 차단한 환경에서 실험을 실시함
- 실차 적용 시험에서 공급 가능한 부하 조건은 ① 상시부하조건, ② 1/3 히터 공급 부하 조건, ③ 2/3 히터 공급 부하 조건, ④ 최대 운영 조건(3/3 히터 공급 부하+조명+송풍기)이며, 최대 운영 조건은 실차 적용 시험 조건에서 최대로 공급이 가능한 조건을 말함
- 부하 조건 변화에 따른 실차 시험 결과, 각 부하별 승온율은 유사하였으며, 이는 SIV 냉각용 히트싱크의 냉각 용량이 최대 150 kVA이므로, 실차 적용 시험에서 공급 가능한 최대 부하량이 DC 부하로 변환 시 46.04 kW로 최대 용량의 31 % 수준이기 때문에, 각 부하별 승온율이 유사한 것으로 분석함



<그림 2-4-12> 실차 운영 부하 조건별 실차 적용 시험 결과

- 가혹 환경에서 최대 운영 조건으로 시험 시 시간 경과에 따라 온도는 steady state가 되지 않았으며, 실차 시험 시 시스템 안전을 고려하여 시험 시 최대 온도가 80 °C를 초과하지 않는 범위에서 실차 적용 시험을 진행하는 것으로 결정함
- PCM이 적용된 히트싱크의 냉각 특성 분석을 위한 PCM의 상변화 온도 영역은 최소 40 °C 이상 최대 60 °C 이하에서 상이 변하는 소재를 적용하고자 함
- PCM 소재는 상변화 온도에서 상이 변하지만, 히트싱크 기저부에 설치된 위치에 따라 온도가 상이하야, 상변화 하는 시간이 달라질 수 있음. 따라서 상변화 온도 영역보다 넓은 온도 영역 구간에서 상변화에 의한 열흡수 효과가 나타나게 됨으로, 시험 허용 온도 80 °C의 중간 온도 영역에서 상변화하는 물질을 적용하는 것이 PCM에 의한 냉각 특성 분석이 용이할 것으로 판단함
- 수치해석적 분석과 설계 변경된 핀(fin) 디자인에 대한 타당성을 확보하여, 시작품 설계 제작 시 본 결과를 반영하였고, 실차 시험 결과를 통해 안전성도 확보함

(4) PCM 히트싱크 초도 시작품 성능 평가

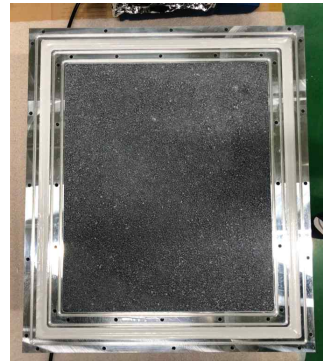
- PCM 히트싱크 초도 시작품에 주입하기 위해 Encapsulation PCM 나노 복합소재를 샘플 제작
- 충전율을 향상시키기 위해 히트싱크 내부에 주입 시 지속적인 압축을 가하였으며, PCM 1/2를 모두 충전시킨 후 베이스 플레이트 체결을 통해 초도 시작품 제작



(a) 초도 시작품



(b) encapsulation PCM

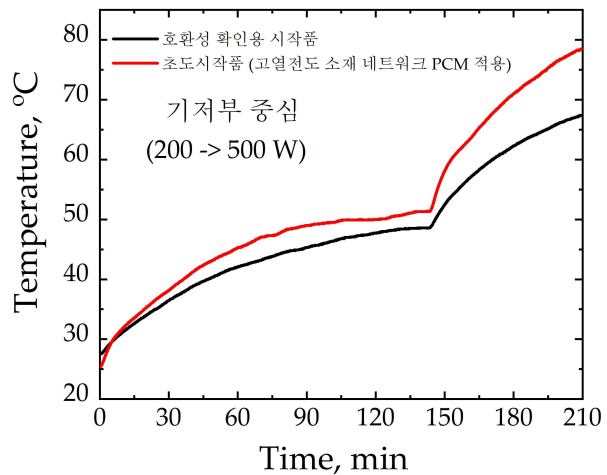
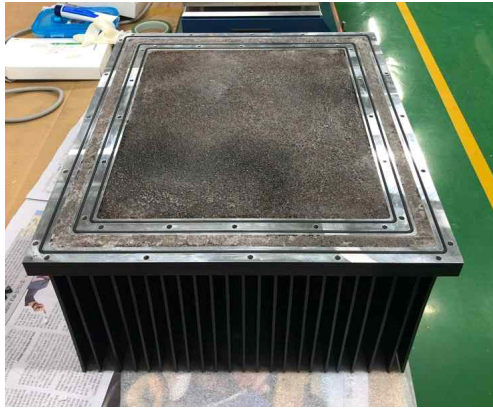


(c) encapsulation PCM 적용

<그림 2-4-13> 초도 시작품 실험실 단위 시험을 위한 encapsulation PCM 적용

- 제작된 Encapsulation PCM 나노 복합소재를 SIV 히트싱크의 장점은 PCM 분말을 실버 페이스트와 그래핀 솔루션으로 코팅하기 때문에 상변화시 누수를 방지할 수 있음
- 하지만, 다수의 열 사이클(cycle) 수행 시 PCM 분말 외벽을 둘러싸고 있던 실버 페이스트(silver paste) 및 그래핀(graphene) 코팅(coating)이 균열이 일어나면서 encapsulation 구조가 깨지기 시작하여, 아래 그림과 같이 계속된 균열로 인해 최종적으로 PCM과 고열전도 소재간의 상 분리 현상이 발생함
- 한상분리 현상은 반복 구동이 필수적인 철도 차량에서 냉각 성능 저하로 작용될 수 있으며, 누수에 의한 문제도 야기할 수 있음
- encapsulation PCM이 적용된 초도 시작품에 대한 실험실 단위 시험 평가를 실시한 결과, 온도가 호환성 확인용 시작품 대비 약 25 °C 정도 높게 나왔으며, 이는 encapsulation PCM의 상 분리에 의한 공기층이 발생하여, 공기층에 의한 소재간 열 저항이 증가한 것으로 분석함
- encapsulation PCM의 기본 물질인 파라핀(paraffin)의 경우, 상(phase)이 변하면서 부피가 평균 20 % 증가한다고 알려져 있음
- 본 연구에 사용된 파라핀을 측정한 결과 25 %의 부피가 증가하고, 부피 증가를 대비해 여분의 공간 확보가 필요함. 따라서 여분의 공간에 생긴 공기층에 의해 소재간 열저항이 증가한 것으로 분석함
- PCM 주입 공간에 공기층 생성 정도를 최소화하기 위해, 초도 시작품 적용 소재를 보완함
- 최종 시작품(compact type PCM 히트싱크) 제작 전 초도 시작품에 대한 실험실 단위 시험 평가를 통해 PCM 소재 적용성을 검토함과 동시에, 공기층 문제 해결을 위해 열전도도 소재 네트워크 PCM을 제작하여 적용함

- 고열전도 소재 네트워크 PCM 제작 방법은 초도 시작품 내부에 PCM 1/2가 충전되는 공간 내 그래핀(graphene)이 코팅된 구리판을 설치하고, PCM₁ 주입 공간에 파라핀 (melting point: 52~54 °C) 주입
- PCM₂ 주입 공간에 파라핀(melting point: 46~48 °C)을 액상으로 주입
- 액상으로 주입한 각각의 파라핀(paraffin)을 상온에서 냉각 시킨 후, 표면 폴리싱(polishing) 후, 고열전도 소재 네트워크 PCM 나노복합소재가 적용된 초도 시작품 제작



(a) 고열전도 소재 네트워크 PCM 적용

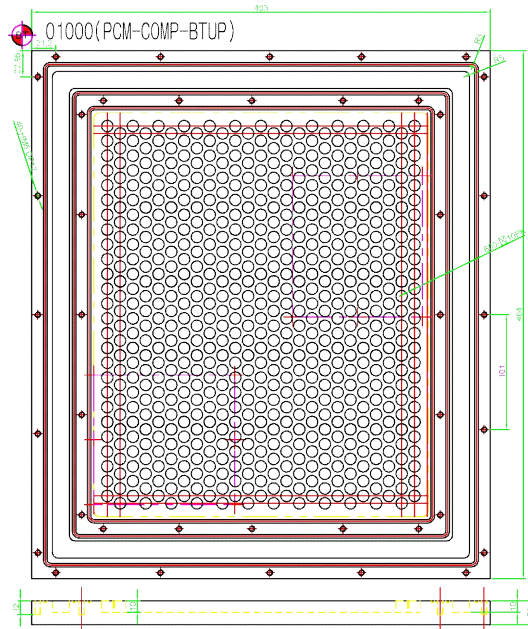
(b) 실험실 단위 시험 결과

<그림 2-4-14> PCM 적용 소재 보완 초도 시작품 실험실 단위 시험 결과

- 고열전도 소재 네트워크 PCM이 적용된 초도 시작품에 대한 실험실 단위 시험을 실시한 결과, 온도 환경/ 대류 조건이 본 연구를 통해 규명하고자 하는 PCM 나노복합소재 적용 히트싱크 (heat sink)의 특성을 명확히 보여주지 못하는 것으로 판단함
- 초도 시작품 제작 및 PCM 기반 나노복합소재의 적용을 통한 실험실 단위 시험 결과를 분석하고, PCM 주입 방식을 보완한 시작품 제작에 반영하였음

(5) Compact type PCM 히트싱크 시작품 성능 평가

- 3가지 타입 (Encapsulation PCM, 고열전도 네트워크 PCM 나노복합소재, 적층형 PCM 나노복합소재)의 PCM 나노복합소재에 대한 열적 성능, 안정성 등 다양한 성능에 대한 분석을 수행하였음
- 열전도도는 적층형 방식에서 가장 높게 측정되었지만, 대면적화 제작에 한계가 발생하였고, encapsulation PCM 나노복합소재는 반복된 열 사이클(cycle)에서 상분리 현상이 발생하여 안정성에서 문제가 발생하였음
- 최종적으로 본 연구에서는 SiV IGBT 히트싱크 내 고열전도 네트워크 기반 PCM 나노복합소재를 적용함
- 하지만, 적층형 PCM 나노복합소재 대비 고열전도 네트워크 PCM 나노복합소재는 열전도도가 매우 떨어짐
- 낮은 열전도도를 극복할 고열전도 매개체가 필요하며, 본 연구에서는 타공판 형태의 알루미늄 블록을 제작하여 낮은 열전도도 문제를 보완함



〈그림 2-4-15〉 타공판 상세 설계 도면

- 고열전도 네트워크 기반 PCM 나노 복합소재 제작 방안과 동일하게 나노복합소재를 제작하였음
- 아래와 같이 높이 1cm, 지름 1cm의 원기둥 형상의 구리폼을 타공판 개수와 동일하게 가공하였으며, 타공판 공극 내부에 가공한 구리폼(copper foam)을 채워 넣은 후 액상의 파라핀을 주입하여 PCM 복합소재를 제작함
- 파라핀 주입시 구리폼 공극에 의한 내부 기공 발생을 억제하기 위해 충분한 시간동안 타공판을 가열하면서 구리폼과 파라핀 사이의 기공을 제거함
- 기공을 모두 제거한 후 파라핀을 상온에서 냉각시켜 고상으로 만든 후 표면을 간단한 폴리싱 과정을 통해 평탄화 작업 진행
- 타공판 위에 그래파이트 시트를 부착시킨 후 베이스 플레이트와 체결을 통해 고열전도 네트워크 기반 PCM 나노복합소재 SIV IGBT 히트싱크를 제작함



(a) copper foam 가공 (b) copper foam 설치 (b) 파라핀 주입

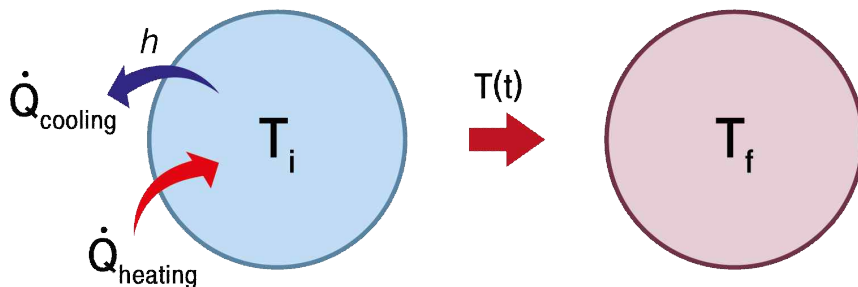
〈그림 2-4-16〉 Compact type PCM 히트싱크 시작품 제작을 위한 복합소재 제작 공정



〈그림 2-4-17〉 Compact type PCM 히트싱크

(가) 냉각 성능 평가 방안 도출

- 고열전도 네트워크 기반 PCM 나노 복합소재를 적용한 compact type PCM 히트싱크 시작품에 대한 실험실 단위 시험과 실차 적용 시험을 수행함
- Compact type PCM 히트싱크에 주입된 소재에 의한 냉각과 대류에 의한 냉각을 통한 전체 냉각 성능을 분석하기 위해 아래 그림과 같이 lumped 모델을 기반으로 하는 냉각성능지수를 도출하고 분석함
- 실험실 단위 시험과 실차 적용 시험 결과에 대해 기존 SIV 냉각용 히트싱크와 compact type PCM 히트싱크의 냉각성능을 비교 분석함



〈그림 2-4-18〉 Lumped 모델을 분석 관련 기하학 및 매개변수

- Compact type PCM 히트싱크 시작품과 기존 히트싱크의 성능 비교를 위해 각각의 히트싱크를 lumped 모델로 가정하여 동일 발열 조건에서 열전달에 의한 냉각 성능 분석을 수행함
- 본 연구의 시스템은 각각의 히트싱크에 대해 동일 발열($Q_{heating}$)이 가해지는 상황에서 초기 T_i 의 히트싱크 중심부 온도가 T_f 까지 가열되는 상황을 고려하였으며, 특정 시간(t)에서 도달하는 히트싱크의 온도를 $T(t)$ 로 표기함
- PCM을 이용한 냉각 성능 분석은 상이 변하면서 승온 속도가 줄어들어 따라 냉각 특성이 나타나므로 시간 경과에 따른 온도 변화 추이를 분석해야함

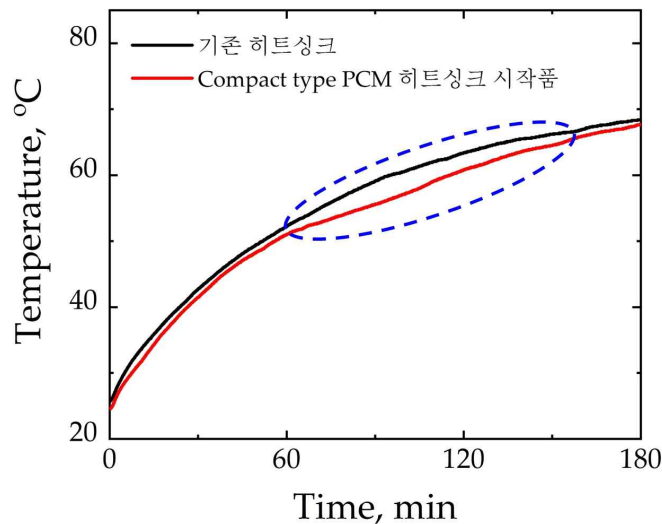
- 따라서 본 연구에서는 시간 상수(constant temperature)를 이용하여 시간 변화에 따른 온도 변화량을 정의하고, 시간 상수의 역수를 냉각 성능지수(cooling capacity index)으로 정의하였으며, 본 연구의 개발 장치 성능은 냉각 성능 지수를 이용하여 분석하였음
- 냉각성능지수 관련 수식은 아래와 같음

$$\frac{T(t) - T_f}{T_i - T_f} = e^{-bt}$$

$$\text{냉각성능지수 (cooling capacity index, } \tau) = \frac{1}{b}$$

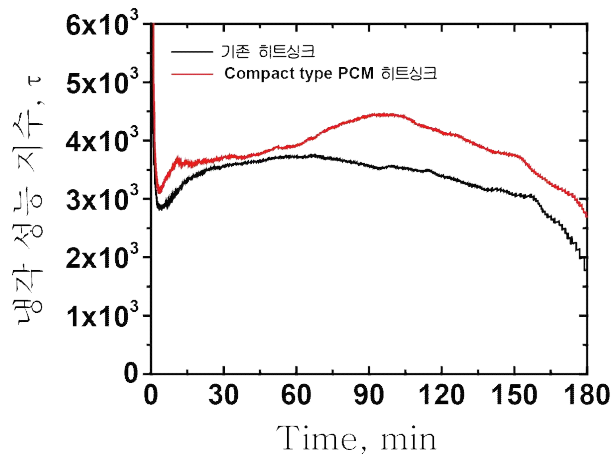
(나) 실험실 단위 냉각성능 평가

- 실차 발열 조건을 모사하여 실험실 단위 시험을 수행하였으며, 동일 발열 조건에서 기존 히트싱크와 compact type PCM 히트싱크 시작품에 대한 냉각 성능을 분석함
- 180분 동안 부하 공급 시 기존 히트싱크와 compact type PCM 히트싱크 시작품의 중앙부 온도를 측정하여 냉각 성능을 분석하였으며, 결과는 아래 그림과 같음
- 기존 히트싱크 대비 compact type PCM 히트싱크 시작품은 모든 실험 시간 영역 내에서 낮은 온도 특성을 보이는 것을 확인하였으며, 특히 PCM의 상변화 구간(56 ~ 58 °C)에서 상변화에 따른 잠열량을 흡수하여 승온률(heating rate)이 낮아짐

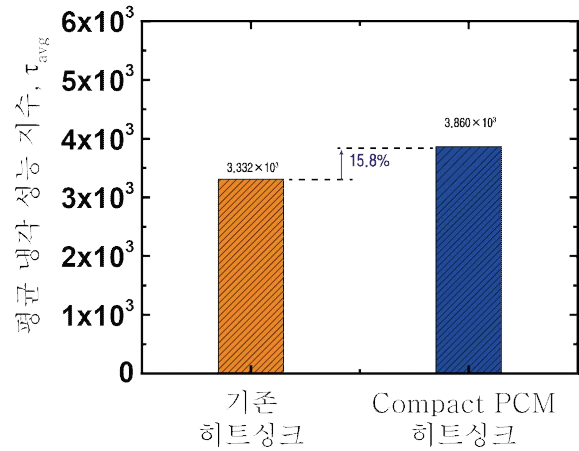


<그림 2-4-19> Compac type PCM 히트싱크 실험실 단위 시험 결과

- 특정 시간차(1 min) 동안에 냉각성능지수 변화량은 아래의 그림과 같으며, compact type PCM 히트싱크 시작품이 기존 히트싱크보다 모든 시간 영역에 걸쳐 큰 값을 갖는 것을 확인할 수 있음
- 이는 히트싱크 내부에 주입된 PCM의 높은 비열과 잠열량에 의해 기존 히트싱크 대비 높은 냉각 성능을 보유하기 때문이며 관련 자료는 다음 그림과 같음



<그림 2-4-20> 냉각성능지수 변화량

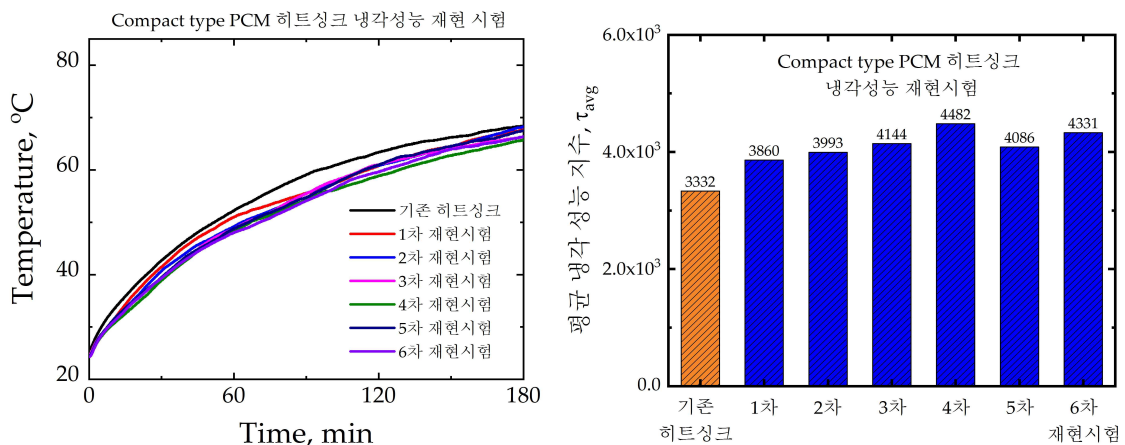


<그림 2-4-21> 평균 냉각성능지수

- 180분 동안 열 부하 공급 시 기존 SIV 냉각용 히트싱크의 냉각성능지수는 약 3.332×10^3 이며, Compact PCM 히트싱크 시작품은 약 3.860×10^3 임
- Compact type PCM 히트싱크는 기존 SIV 냉각용 히트싱크 대비 약 15.8% 냉각성능지수가 증대되었으며, 이는 히트싱크 내 주입된 PCM의 우수한 냉각 성능을 검증함

(다) 냉각 성능 재현 시험 평가

- Compact type PCM 히트싱크에 대해 실험실 단위 시험에서 기존 철도차량에 적용되는 히트싱크 (heat sink)와 성능 비교 시험을 실시하고, 반복적인 구동에 의한 본 연구 개발 장치의 성능 신뢰성 검증을 위해 재현 실험을 실시함
- 재현 시험의 경우, 초기 실험실 단위 시험을 포함하여 5회 반복 시험을 실시하여 총 6회 재현시험 결과를 비교하였으며, 기존 히트싱크(heat sink) 대비 compact type PCM 히트싱크의 냉각 성능 지수는 평균 4,139로 기존 히트싱크 대비 약 24.2 % 향상되었음
- 재현 시험의 결과, 약 5.6 % 정도의 오차로 반복 구동 시에도 냉각 성능은 유지되는 것으로 분석함



<그림 2-4-22> Compact type PCM 히트싱크 냉각성능 재현 시험 결과

(라) 실차 적용 냉각 성능 평가

- 기존 히트싱크와 compact type PCM 히트싱크 시작품을 실제 도시철도 차량에 부착하여 최대 운영 조건(3/3 전난방+전등+송풍)에서 냉각 성능 분석을 수행함
- Compact type PCM 히트싱크 시작품 내 설치된 PCM 기반 나노복합소재는 고열전도도 네트워크 구조를 이용하였으며, 액상의 파라핀을 구리폼(copper foam)에 함침시키는 방법을 이용하여 제작하였음
- Compact type PCM 히트싱크 내 설치된 소재의 열저도율은 약 15.1 W/m-K이며, effective thermal conductivity는 약 120 W/m-K로 분석함
- 현차시험은 2019.04 ~ 06.까지 대전도시철도공사 관암기지 내 차고지에서 총 6차례 현차 시험 (정특성 시험)을 진행하였으며, 외기 온도는 약 20~23 °C로 측정되었음
- 가혹 환경(냉각이 잘 이루어지지 않는 상황)을 설정하고, 히트싱크 기저부(plate) 중간 지점의 온도를 측정하여 각각의 히트싱크에 대한 냉각 성능 분석을 수행함
- Compact type PCM 히트싱크 시작품의 실차적용 시험 결과 raw data를 아래와 같이 표기하였으며, 1초 단위 측정/취득 data를 1분 단위 data로 요약하여 표기함

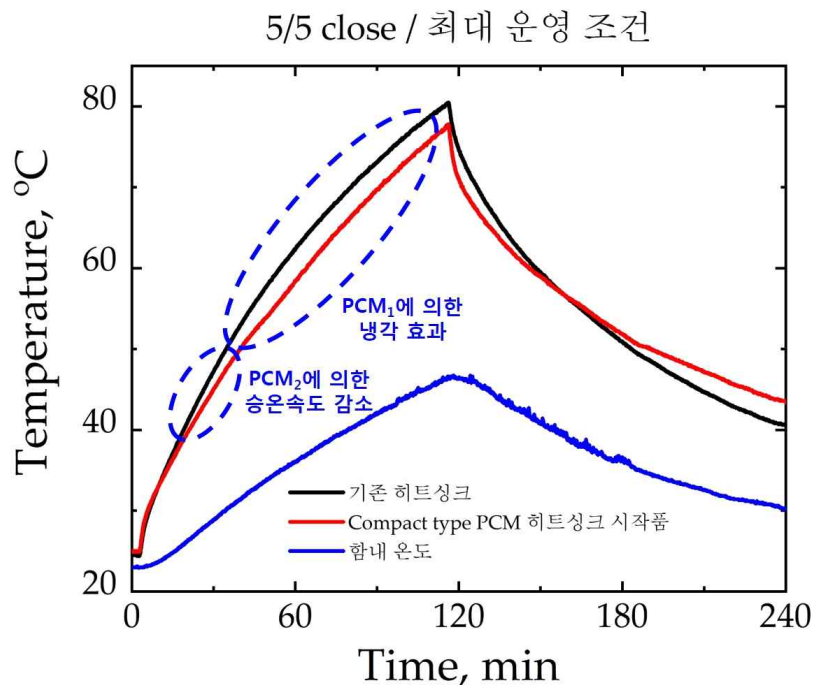
Time (min)	siv heat sink (°C)	compact type heat sink (°C)	ambient (°C)
1	24.5	25	23
2	24.5	24.9	23.1
3	24.6	25.2	23
4	26.8	27.7	23
5	28.5	29.2	23.1
6	29.7	30.2	23.2
7	30.6	31	23.3
8	31.5	31.8	23.4
9	32.3	32.5	23.5
10	33.1	33.2	23.7
11	34	33.8	23.9
12	34.8	34.4	24.2
13	35.5	35.1	24.4
14	36.3	35.7	24.6
15	37.1	36.4	24.8
16	37.8	36.9	25
17	38.5	37.5	25.3
18	39.3	38.2	25.6
19	40	38.8	25.9
20	40.7	39.4	26.1
21	41.4	40	26.4
22	42.1	40.6	26.7
23	42.7	41.1	26.9
24	43.4	41.6	27.2
25	44.1	42.2	27.5
26	44.7	42.9	27.8
27	45.3	43.3	28.1
28	46	43.9	28.3
29	46.5	44.4	28.6
30	47.2	45	28.9
31	47.8	45.5	29.1
32	48.4	46	29.4
33	49.1	46.5	29.7
34	49.6	47.1	29.9
35	50.2	47.8	30.2
36	50.8	48.1	30.5
37	51.4	48.7	30.7
38	51.9	49.2	31
39	52.4	49.6	31.2
40	53	50.1	31.5

Time (min)	siv heat sink (°C)	compact type heat sink (°C)	ambient (°C)
41	53.6	50.5	31.7
42	54.1	51.1	32
43	54.6	51.4	32.2
44	55.1	51.8	32.6
45	55.6	52.2	32.7
46	56.1	52.6	32.9
47	56.6	53.1	33.2
48	57.1	53.3	33.5
49	57.6	53.8	33.7
50	58	54.2	33.9
51	58.5	54.5	34.1
52	59	55	34.4
53	59.4	55.4	34.6
54	59.8	55.8	34.8
55	60.2	56.1	35
56	60.7	56.6	35.3
57	61.1	57.1	35.4
58	61.5	57.5	35.7
59	61.9	57.8	35.8
60	62.4	58.4	36.1
61	62.8	58.7	36.2
62	63.1	59.3	36.5
63	63.6	59.6	36.7
64	64	59.9	36.8
65	64.5	60.4	37.1
66	64.8	60.8	37.4
67	65.2	61.2	37.5
68	65.6	61.7	37.7
69	65.9	62.1	38
70	66.3	62.5	38.2
71	66.7	62.9	38.4
72	67.1	63.2	38.6
73	67.4	63.6	38.8
74	67.8	64.1	39
75	68.1	64.4	39.3
76	68.5	64.7	39.4
77	68.9	65.1	39.5
78	69.2	65.4	39.8
79	69.5	65.8	39.9
80	69.9	66.2	40.2

Time (min)	siv heat sink (°C)	compact type heat sink (°C)	ambient (°C)
81	70.2	66.5	40.3
82	70.5	67	40.4
83	70.9	67.2	40.7
84	71.2	67.7	40.9
85	71.5	67.9	41.1
86	71.8	68.3	41.2
87	72.2	68.6	41.4
88	72.5	69	41.6
89	72.8	69.3	41.8
90	73.1	69.7	42
91	73.5	70	42.1
92	73.7	70.3	42.3
93	74.1	70.7	42.6
94	74.3	70.9	42.7
95	74.7	71.3	42.9
96	75.1	71.6	42.9
97	75.3	72	43.1
98	75.6	72.3	43.6
99	75.9	72.7	43.6
100	76.2	72.9	43.9
101	76.5	73.2	44
102	76.8	73.5	44.3
103	77.1	73.9	44.4
104	77.4	74.2	44.4
105	77.7	74.5	45
106	77.9	74.7	45
107	78.1	75	45
108	78.4	75.4	45.1
109	78.6	75.7	45.3
110	78.8	76	45.4
111	79.1	76.1	45.7
112	79.3	76.5	45.7
113	79.7	76.8	46
114	79.9	77.1	46
115	80.1	77.4	46.3
116	80.3	77.5	46.5
117	80.8	77.6	46.6
118	77	73.4	46.7
119	75.6	71.9	46.5
120	74.7	71	46.3

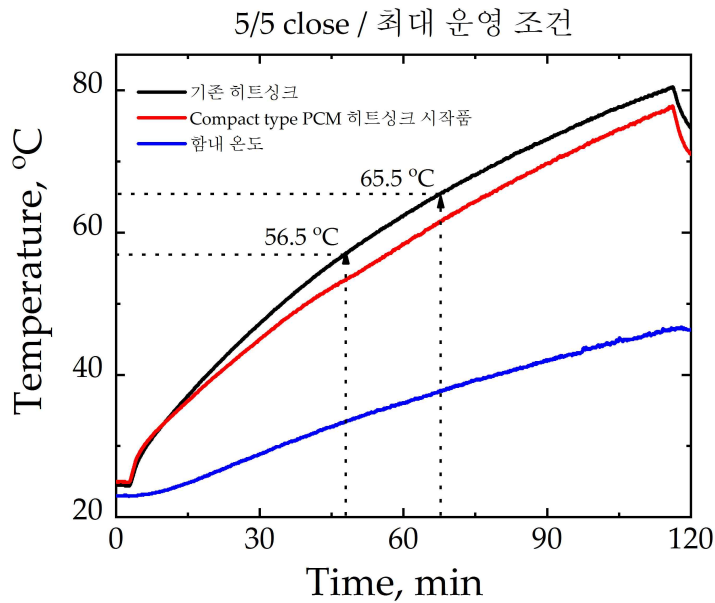
<그림 2-4-23> Compact type PCM 히트싱크 실차 적용 시험 결과 raw data

- 아래의 그림은 기존 히트싱크가 최종 온도(80 ℃)까지 도달할 때 각각의 히트싱크에 대한 발열 조건에서 온도 구배를 나타내며, 최종 온도 도달 후 자연 대류 냉각 시 각각의 히트싱크에 대한 냉각 조건에서 온도 구배를 나타냄
- 온도 구배 그래프에서 알 수 있듯이 발열 초기 PCM₂에 의해 PCM₂가 상변화 하면서 잠열을 흡수하여 전체 히트싱크의 초기 승온 속도(heating rate)를 감소시키며, 발열 중반부터 PCM₁의 상변화가 이루어지면서 전체 히트싱크의 온도를 감소시킴
- PCM의 상변화에 의한 냉각 성능 향상은 직접적으로 전체 히트싱크의 온도 저감으로 이루어지며, 동일 발열 조건에서 기존 히트싱크 대비 최종 온도 도달까지 시간을 증가시킴



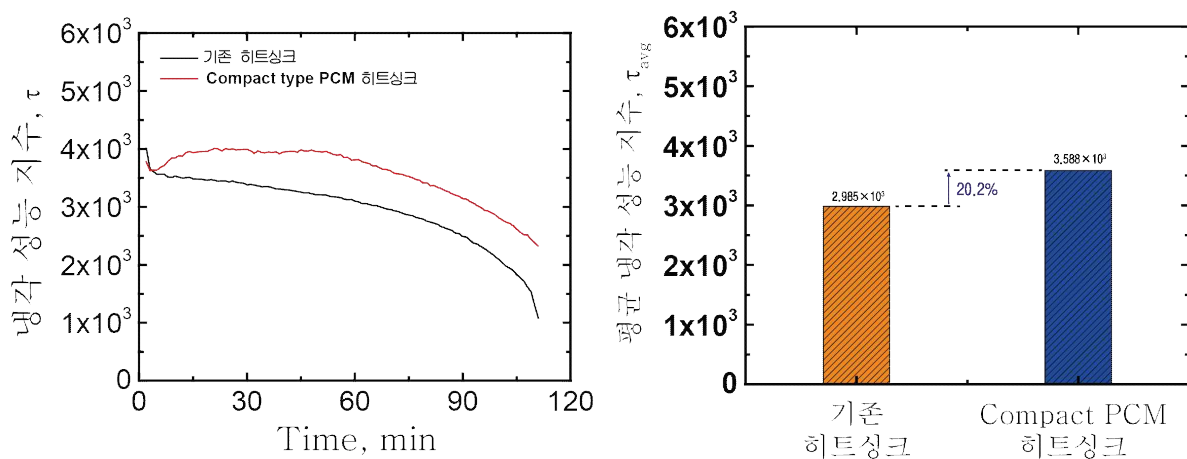
<그림 2-4-24> Compact type PCM 히트싱크 시작품 실차 적용 시험 결과

- 실차 시험 시 공급 가능한 최대 운영 조건으로 열 부하 공급 시 예서의 기존 SIV 냉각용 히트싱크와 compact type PCM 히트싱크 시작품의 온도 차이는 최대 4.0 ~ 4.1 ℃이며, 이는 PCM의 상변화에 의한 온도 저감 효과에 의한 것으로 분석함
- 이러한 기존 SIV 냉각용 히트싱크 대비 compact type PCM 히트싱크 시작품의 온도 저감 효과는 PCM₁의 상변화 온도 영역에서 주요하게 관측되며, 이는 PCM₁의 상(phase)이 변하면서 잠열량(latent heat capacity)을 흡수에 의한 것으로 판단함



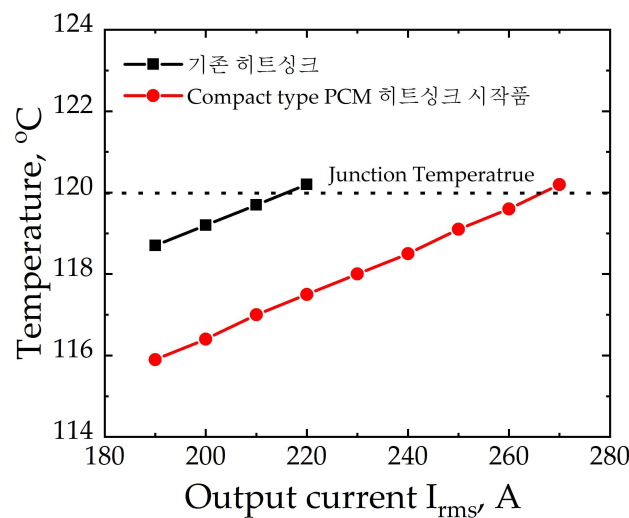
<그림 2-4-25> PCM 나노복합소재에 의한 냉각 성능 향상 분석

- 특정 시간차(1 min) 동안 냉각성능지수 변화량은 아래의 그래프와 같으며, compact type PCM 히트싱크 시작품이 기존 히트싱크보다 모든 시간 영역에 걸쳐 큰 값을 갖는 것을 확인할 수 있음
- 이는 히트싱크 내부에 주입된 PCM의 높은 비열과 잠열량에 의해 기존 히트싱크 대비 높은 냉각 성능을 보유하기 때문임
- 전체 열 부하 공급 동안 기존 SIV 냉각용 히트싱크의 냉각성능지수는 약 2.985×10^3 이며, Compact PCM 히트싱크 시작품은 약 3.588×10^3 임
- Compact type PCM 히트싱크는 기존 히트싱크 대비 약 20.2% 냉각성능이 상승되었으며, 이는 히트싱크 내 주입된 PCM의 우수한 냉각 성능을 검증함



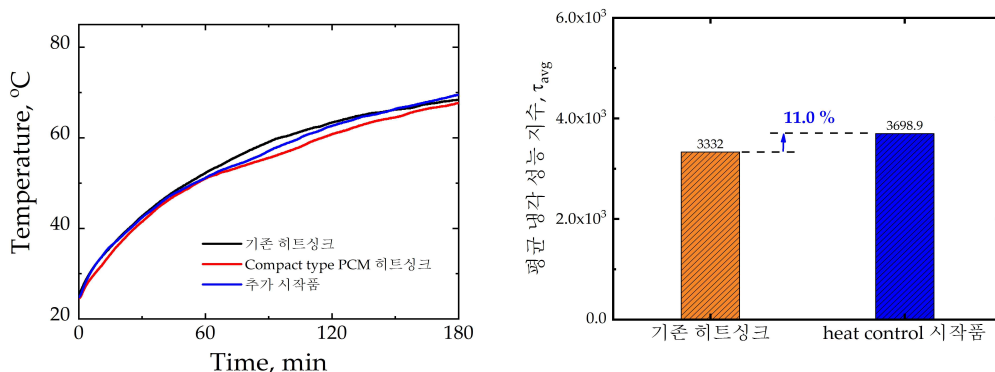
<그림 2-4-26> Compact type 히트싱크 실차적용 냉각성능 분석 결과

- 기존 히트싱크 대비 compact type PCM 히트싱크의 경우, PCM에 의한 냉각성능 증대로, 열부하 공급이 진행될수록, 상변화가 종료되었더라도 약 2.7 °C 정도 낮은 온도를 유지하고 있음
- 본 연구에서 개발한 시작품의 경우, 기존 냉각장치보다 낮은 온도 영역대에서 운영 조건을 가지므로, IGBT가 정선 온도(junction temperature)까지 도달할 동안 더 많은 전력을 변환할 수 있음
- 전력변환장치 모듈을 조사 후 모듈 작동 시 운영 환경 변화에 따른 전력 변화량을 분석함
- SIV에 장착된 IGBT 제조사(Infineon)에서 무료로 제공하는 해석 프로그램(IPOSIM)을 이용해 히트싱크의 냉각 성능에 따른 에너지 변환효율을 분석한 결과 약 22 % 정도 향상되었음
- 히트싱크의 효율적인 냉각을 통해 모듈의 동일 작동 조건에서 IGBT의 온도가 2.7 °C 낮을 시 약 40 A 정도 더 변환할 수 있는 조건이 형성되는 것으로 분석함



〈그림 2-4-27〉 에너지 변환 효율 분석

- compact type 히트싱크 시작품과 유사한 effective thermal conductivity를 가지나 PCM의 설치 방법이 상이한 시작품(compact type 히트싱크 heat control 시작품)에 대한 실험실 단위 시험을 진행함
- 실험실 단위 시험 결과, 기존 히트싱크보다 약 11 % 정도 냉각성능이 향상되었으나, effective thermal conductivity가 유사하다라도 PCM의 설치 형태가 일정하게 분포하는 것이 냉각성능을 증대시킨다고 볼 수 있음



〈그림 2-4-28〉 Compact type PCM 히트싱크 heat control 시작품 냉각 성능 평가 결과

마. 상용화를 위한 시스템 보완 방안

(1) 장기운용 신뢰성 향상을 위한 패키징 설계

- 본 연구과제에서는 철도차량용 전장품 냉각장치에 적용 가능한 PCM 복합소재의 요소기술을 개발하는 단계(TRL 4~5단계) 연구를 수행하였고, 이러한 연구수행 과정에서 적용 가능성이 있는 PCM 단위소재 후보군의 종류별 제조공정 기술과 열 해석 연구를 통해 선정한 PCM 복합소재의 냉각 특성과 주입방안을 해석, 예측한 결과를 3종류의 PCM 복합소재 주입방식 능동 냉각장치 시작품의 설계·제작에 적용하여 시작품을 제작하였음
- 이러한 3종의 시작품에 대하여 실험실 단위의 기초 특성시험과 가혹 환경을 구현한 실제 운용중인 차량에 시작품을 탑재한 냉각성능 시험과 특성 비교 분석을 통해 PCM 복합소재 적용 냉각장치 요소기술이 가혹환경에서 나타내는 급격한 국부 발열 특성을 가지는 전장품의 급속 발열을 완화하는 냉각 특성의 적용 가능성을 분석, 적용 기술을 개발하여 의미 있는 결과를 도출하였음
- 그러나, 본 연구과제에서 개발한 PCM 복합소재 적용 능동냉각방식 요소기술은 국내 최초로 철도차량용 전장품을 PCM 복합소재 주입형 냉각장치의 시험 대상으로 찾아, 처음 시도해 본 요소기술 개발단계 연구로서, 시작품의 설계, 제작 및 PCM 복합소재 주입과정을 포함한 냉각장치의 조립 공정의 효율성 측면, 시작품의 신뢰성 측면으로 볼 때 상용화 단계의 장기운용 신뢰성과 조립 공정의 복잡성은 다소 보완 필요성이 있는 수준으로 판단됨
- 따라서, 본 연구과제에서 개발한 PCM 복합소재 적용기술의 실용화와 상용화를 위해서 다음과 같은 신뢰성 향상 방안과 패키징 설계 보완 방안이 필요할 것으로 판단됨

(가) 고발열 전장품 냉각용 PCM소재 선정 및 장기 신뢰성 보완 : 온도/통풍 조건별 소재선정 최적화

- 본 연구에서 적용한 PCM 소재는 후보군의 여러 PCM 소재 중에서 제조 공정과 열적 특성이 본 연구과제 시작품에 가장 적합한 상변화 대역 온도 특성을 가진 PCM 소재를 선정하였으나, 본 과제의 적용분야 뿐 아니라, 운용 환경에 대응 가능한, 더 다양한 상변화 대역 온도특성을 가지는 PCM 소재의 종류별 특성을 운용 온도환경 (상변화), 주입량 면에서 적용 카테고리별 특성을 고려한 최적의 PCM선정 모델(Model)을 개발하여 다른 운용환경의 여타 장치에 적용할 PCM의 종류 및 주입량 선정 과정에서 객관성과 반복성을 향상시킬 모델 정립이 필요할 것으로 사료됨
- PCM 복합소재 적용을 위해서는 철도 차량 운행 조건을 고려한 내구성 및 안정성 확보가 필수적임
- PCM 복합소재의 내구연한 측정을 위해 실제 철도차량이 운행 시 발열부의 온도 범위를 측정하여, 반복 싸이클 온도를 선정함. 선정한 싸이클 온도범위 내에서 PCM 복합소재의 반복 용해/응고 싸이클을 약 300~500회 수행 후 잠열량 및 열전도도 분석이 필요함
- 반복 열싸이클 후 측정된 잠열량 및 열전도도값을 그래프화 시킨 후 추세선 분석을 통해 열물성치 저감 경향을 파악하고, 추세선 분석을 통해 신뢰성 확보가 가능함
- 부식에 대한 장기내구성은 PCM 복합소재의 FTIR(Fourier transform infrared spectroscopy) 분석을 통해 검증할 수 있으며, 열전도도에 대한 신뢰성 확보 방안 역시 PCM 복합소재의 LFA(laser flash analysis) 또는 1D method 방식을 통한 열전도도 측정을 통해 검증할 수 있음

(나) PCM 복합소재 적용 냉각장치 구조 : PCM 소재 주입방식 및 장치 조립 공정의 단순화, 보완

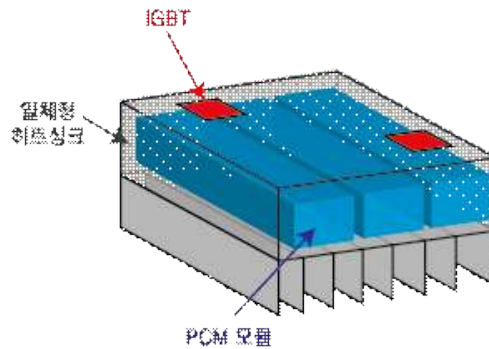
- 본 연구에서 구현한 PCM 소재 냉각장치 시작품은 장치를 구성하는 기본 프레임 가공·제작 공정은 CAD-CAM 설계-가공 일괄 공정을 통해 제작되므로 반복 제작 시에도 신뢰성과 정확도를 유지할 수 있으나, 전체 장치의 제품화·상업화 모델의 신뢰성을 고려할 경우, 현재 시작품에 적용된 PCM 주입 방식보다 주입 공정을 1시간/장치당 이내로 줄일 수 있도록 단순화하고 PCM 주입량의 정확도 면에서 일관성을 유지할 수 있도록 액상 PCM 주입 방법과 PCM 주입부+기본프레임 조립공정도 현재 시작품 조립공정 대비 조립 방식과 공정별 소요 시간을 단순화·간소화할 수 있는 구조로 설계 개선방안이 필요할 것으로 판단됨

(다) PCM 소재 적용 냉각장치의 패키징 구조 : 이중 PCM 소재 간 기밀·패키징 방법 보완

- 본 연구에서 개발한 3종류 PCM 소재 냉각장치 연구 시작품은 저온 영역에서 상변화 특성을 가지는 PCM 소재와 특정 온도 대역의 상변화 특성을 갖는 서로 다른 PCM 소재를 동일 평면에 배치하여 주입하므로 격리·패키징은 3줄의 LOOP 형태를 갖는 O-RING으로 누설을 방지하는 방법을 적용하였음
- 그러나 현재 같은 평면 배치형 시작품 구조에서는 이중 PCM 소재 사이의 기밀·패키징 방법은 장치 조립과정에 LOOP형 O-RING의 역할로서 격리하는 방법 외에 특별한 개선 방안은 제시하기 어려움
- 향후 실용화 단계 기술로 완성, 보완하는 연구개발 과정에서 PCM 소재를 동일 평면에 배치, 주입하는 구조가 아닌, 수직 또는 3차원 방향으로 PCM 소재를 배치하는 다양한 구조의 PCM 소재 냉각장치 설계(안)이 개발되는 단계에서는 이중 PCM 소재 간의 기밀·패키징 방법도 LOOP형 O-RING 구조를 대체할 만큼 열전도성이 우수한 합금형 고탄성 Engineering Plastic을 이용하는 접합부위의 기밀유지 방법이나, 기본 프레임 내부 액상 PCM 주입부 공간에 액상 PCM을 주입 후에 주입구를 밀봉 처리하는 방안 등 다양한 기밀성 구조로 패키징 설계(안)을 검토하고 해석을 통해 검증하고 설계에 반영하여, 다양한 운용 온도 대역에서 이중 PCM 소재 간 기밀 유지의 정확성과 반복적 견고성을 향상시키는 보완 설계 또한 본 연구과제 개발기술의 실용화 단계에서 장기 운용 신뢰성 향상을 위해 필요한 과제가 될 것으로 판단됨

(라) PCM 소재 제작 모듈화 : 이중 PCM 과 히트싱크 간 기밀 및 제작 공정 단순화, 보완

- 본 연구에서 개발한 PCM 기반 히트싱크는 베이스(base) 플레이트(plate)와 PCM 및 알루미늄 핀(fin)이 분리되어있는 형태로 이러한 구조는 발열부와 냉각부의 열저항을 증가시킴. 또한, PCM 주입 시 히트싱크 핀(fin)부와 PCM 주입부가 결합되어있기 때문에 제작 및 가공상 효율 및 생산성이 떨어지는 단점이 존재함
- PCM 주입부와 베이스 플레이트를 일체형을 제작하고 PCM을 모듈화하여 제작하면 히트싱크의 전체적인 열저항이 감소함과 동시에 효율적이고 고성능의 PCM 모듈(module) 제작이 가능함
- 또한, PCM 모듈화를 적용하면 좀 더 다양한 구조 및 형상의 PCM 이중 복합 소재를 제작할 수 있으며, 그에 따른 냉각 성능 향상 효과가 기대됨



<그림 2-5-1> PCM 모듈화 히트싱크 예시

(2) 개발 장치의 유지·보수 방안 설계

- 철도차량에 적용되는 고전력 IGBT 전장품의 경우, IGBT 소자의 방열 면과 이에 조립되는 Heat sink 접촉면이 면 접촉 형태로 직접 조립되도록 여러 개의 체결 나사로 고정되어 지므로 방열 및 열전달 효율을 최대화 할 수 있는 구조로 설계 되어 있으며, 히트싱크의 냉각핀은 일부 위치에 설치된 통풍구를 통해 반 개방, 자연냉각 방식으로 정지 시에도 주변 공기의 대류를 통해 전달된 열을 최대한 방열할 수 있는 구조로 설치되어 있음.
- 본 장치는 정지형으로 설계된 장치이므로, 특별히 주기적인 분해조립 점검은 필요 없지만, 특별한 필요에 의해 기기를 분해하거나, 재 조립하는 유지보수 정비 작업이 필요한 경우, 다음과 같은 절차를 따라 유지보수를 시행하도록 설계하였으며, 유지보수 절차 시행 과정에서 점검이 필요한 항목은 다음과 같이 설계되어 있음
 - 전장품 즉, 인버터 스택 상부의 게이트 드라이브 유닛과 연결, 접속 되어 있는 각종 제어선과 광신호 케이블 등을 일련 번호를 표시하여 Marking한 후 순서대로 분리함
 - IGBT 스택에 접속 되어 있는 주회로의 전선 및 Bus plate의 체결 나사류를 분리함
 - 전장품 탑재용 Housing과 IGBT 인버터 스택을 조립하고 있는 체결 볼트를 풀어 해체함.
(인버터 스택 플레이트 조립체가 해체 과정에서 앞 쪽으로 넘어지지 않도록, 스택 플레이트 조립품의 하부를 고임장치 등을 이용하여 받쳐 지지함.)
 - 2인의 작업자가 협업 방식으로 인버터 스택 플레이트 조립품의 좌우 끝단부를 잡아서 전장품 탑재용 Housing의 앞쪽으로 인버터 스택 플레이트 조립체를 인출해 탈거함
(인버터 스택 플레이트 조립체에 장착되어 있는 구성 전장품과 제어용 보드들에 무리한 힘이나 충격이 가해져 파손되지 않도록 인출작업 과정에 주의가 필요함)
 - 인버터 스택 플레이트 및 히트싱크 조립체를 인출, 탈거한 후에는 반드시 히트싱크 조립체의 냉각핀 부 방향이 아래로 향하도록 평평한 면에 내려놓음.
(히트싱크 조립체가 외부 충격을 받지 않도록 주위에 불안정한 중량물이 없는지 확인함)
 - 개발 장치(히트싱크)의 유지보수 절차에 확인이 필요한 점검 항목
 - 방열판 (Fin 포함) 표면에 Scrach/균열 발생 여부 및 표면 후처리 상태 훼손 여부
 - 히트싱크 조립체의 볼트 체결 상태 (필요시 Torque 확인)
 - 히트싱크 조립체 외부에 PCM 물질의 누설 흔적 여부 등

(3) 개발 장치 경쟁력 향상 방안

(가) 철도차량용 PCM 능동냉각장치의 경제성 및 비용 경쟁력 분석

- 본 연구과제에서 개발한 PCM 능동냉각 기술을 상용·제품화하기 위한 제품으로서 경쟁력은 장치의 제작비용 경쟁력과 기술 활용이 가능한 장래 시장규모 예측이 주요 분석 인자가 됨
- 본 과제 개발성과인 PCM 능동냉각 시작품의 제작비용을 자체 분석한 결과, 아래와 같은 비용구조로 구성된 것으로 산출되었음

No	구성 비목	단 가 (원)	비 고
1	① 재료비 - 본체/Fin-용 Al 소재 (Al-6063) - Copper Foam / PCM 등 주입용 소재	512,000	
2	② 가공·제작 및 조립비 - 본체/Fin 가공비 (M/C) - PCM 주입 / O-ring 체결 및 총조립 / 포장	323,000	
3	③ 공정 관리비 등 - (①+②)항 x 11%	91,850	
4	④ 이윤 - (①+②)항 x 10%	83,500	
제작비용 총계		1,010,350	

- PCM 냉각장치의 제품 비용은 101만원/Set 수준이며, 현재 적용중인 기존의 전장품용 냉각장치 1 Set당 가격이 약 65만원~70만원 수준인 점을 고려하면, 기존 제품 대비 약 44% 가격상승 요인이 있는 것으로 분석됨
- 그러나, 위에 산출된 비용은 초기 기술개발 단계의 시작품 제작비를 기초로 산출한 비용임을 고려할 때, 향후 실용화 단계를 통해 기술 완성도를 높이고 주입되는 PCM을 모듈화 조립하는 등 제품화를 위한 비용 절감, 제작 공정 단순화를 추구할 경우, 초기 제작 비용 대비 약 10% 이상 절감이 예상되며, 기존 제품 대비 약 28% 상승한 가격으로 최적화 할 수 있을 것으로 예상됨
- 이러한 조건에서 본 과제의 기술을 상용·제품화한 PCM 능동냉각장치는 기존제품 대비 20% 이상 냉각효율 향상과 설치공간 10% 축소가 가능한 기술적 장점을 가지므로 경제성 측면과 기술발전 측면에서 볼 때 충분한 경제적·기술적 경쟁력을 갖춘 것으로 판단됨
- 본 연구를 통해 개발된 장치의 20% 이상 냉각효율 향상과 설치공간 10% 축소된 냉각장치의 설치 시 IGBT의 집적화를 통해 SIV stack 체적 또한 축소가 가능하여 공간활용도가 증대됨
- IGBT의 용량 증대 시 증가되는 발열량에 대한 열제어를 위해 냉각방식의 교체(자연 냉각 방식→ 강제 냉각 방식) 및 히트싱크 용량 증가에 의한 추가적인 예산이 필요하나 본 개발장치는 축소된 체적에서 더 큰 냉각 용량을 가지므로 가격 경쟁력을 가지는 것으로 판단됨

(나) 국내 철도차량 시장 규모와 PCM 냉각장치 시장의 성장성 분석

- 국내 철도차량 편성은 동력차와 부수차 6~8량으로 구성되며, 6량 1편성 기준 시 1편성 당 2 Set의 보조전원장치가 배치되므로 1편성 당 총 6 Set(3 Set/보조전원장치)의 냉각장치가 탑재됨
- 이를 기초로 2019년 발주된 국내 철도차량 물량은 아래 표에 보인 것과 같이 총 1,070량 (178편성) 규모이므로 국내 철도차량용 냉각장치의 시장 규모는 총 1,070 Set/년 규모이므로, 이를 가격으로 환산 시 총 11억원 규모의 시장이 될 것이며, 향후 PCM 냉각장치의 상용화, 실용화 단계에 시장규모와 매출규모는 더욱 성장이 예상됨
- 해외 수출용 철도차량 냉각장치 수요까지 추가로 고려할 경우, 본 과제에서 개발된 고성능 PCM 냉각장치의 수요와 경제적 효과는 더욱 확대되고 시장규모 역시 매년 성장할 것으로 분석됨

No	차 종	량 수	No	차 종	량 수
1	서울 2호선	24	7	서울 9호선	56
2	서울 3호선	150	8	과천안산선	90
3	부산 1호선	48	9	경인 1호선	40
4	대곡소사선	40	10	경원선 차량	18
5	서울 5,7호선	336	11	인천 2호선	12
6	1차 EMU-150 차량	108	12	2차 EMU-150 차량	150
총 계			1,072량		

(4) PCM 냉각기술의 성능인증 및 공인시험성적서 발급/획득 방안

(가) PCM 냉각기술의 성능인증을 위한 공인시험성적서 발급/획득 절차 검토

① 국내 산업용 제품의 성능 인증 및 공인시험성적서 발급/획득 절차

- 본 연구과제의 개발성과인 PCM 냉각기술을 상용·제품화하는데 필요한 성능인증은 공인 시험기관의 공인시험성적서를 획득하는 방안이 있으며 현행 공인시험 절차는 아래와 같음
- 일반적으로, 공인시험성적서는 국가가 지정한 KOLAS 공인시험 분야/항목에 대해 국가의 인정시스템에서 자격을 인정받은 KOLAS 공인시험기관이 공산품(제품)을 대상으로 대상 제품이 해당 항목에 정해진 성능의 만족 여부를 규정된 시험절차서에 따라 시험하고 그 시험 결과를 성적서에 명기하여 공식 인증해 주는 증빙서류임
- 그러나 공인시험성적서는 우선 KOLAS 공인시험항목에 지정된 분야/항목에 해당하는 제품 또는 서비스를 대상으로만 공인시험과 성적서 발행이 가능함
- 본 연구과제에서 개발한 PCM 냉각기술의 경우 아직 KOLAS 공인시험 항목으로 지정되지 않은 단계로서, 공인시험기관의 공인시험성적서를 발급받으려면 우선 PCM 냉각기술의 성능 시험 기준 및 시험절차 등을 KOLAS 공인시험 항목으로 지정 받은 후에, 해당 공인시험 항목을 수행할 측정불확도 등 시험 역량을 인정받은 공인시험기관에 공인시험을 신청하여 성적서를 발급받을 수 있으며, 현재 운영중인 KOLAS 공인시험제도의 분야/항목은 다음과 같음

분야	시험항목	시험기관	시험항목	시험기관
전기전자	1.001.001 전기전자시험	1.001.001 전기전자시험	1.001.001 전기전자시험	1.001.001 전기전자시험
기계	1.002.001 기계시험	1.002.001 기계시험	1.002.001 기계시험	1.002.001 기계시험
화학	1.003.001 화학시험	1.003.001 화학시험	1.003.001 화학시험	1.003.001 화학시험
환경	1.004.001 환경시험	1.004.001 환경시험	1.004.001 환경시험	1.004.001 환경시험
소재	1.005.001 소재시험	1.005.001 소재시험	1.005.001 소재시험	1.005.001 소재시험
의료	1.006.001 의료시험	1.006.001 의료시험	1.006.001 의료시험	1.006.001 의료시험
소프트웨어	1.007.001 소프트웨어시험	1.007.001 소프트웨어시험	1.007.001 소프트웨어시험	1.007.001 소프트웨어시험

〈그림 2-5-2〉 KOLAS 공인시험 분야 및 항목 예시

- 현재 국내 공인시험의 분야/항목과 이를 수행하는 여러 공인시험기관 중 한국산업기술시험원(KTL)의 사업 범위와 공인시험 항목은 아래와 같으며, 해당 시험기관에도 PCM 냉각기술에 대하여 공인시험성적서를 발급할 수 있는 시험분야/항목이 없으므로 현재는 공인시험성적서 발급이 어려움을 확인하였음

분야	시험항목	시험기관	시험항목	시험기관
전기전자	1.001.001 전기전자시험	1.001.001 전기전자시험	1.001.001 전기전자시험	1.001.001 전기전자시험
기계	1.002.001 기계시험	1.002.001 기계시험	1.002.001 기계시험	1.002.001 기계시험
화학	1.003.001 화학시험	1.003.001 화학시험	1.003.001 화학시험	1.003.001 화학시험
환경	1.004.001 환경시험	1.004.001 환경시험	1.004.001 환경시험	1.004.001 환경시험
소재	1.005.001 소재시험	1.005.001 소재시험	1.005.001 소재시험	1.005.001 소재시험
의료	1.006.001 의료시험	1.006.001 의료시험	1.006.001 의료시험	1.006.001 의료시험
소프트웨어	1.007.001 소프트웨어시험	1.007.001 소프트웨어시험	1.007.001 소프트웨어시험	1.007.001 소프트웨어시험

〈그림 2-5-3〉 공인시험 해당 분야 및 시험항목 예시

- 즉, PCM 냉각기술의 공인시험성적서를 발급 받으려면 해당 시험항목이 우선 지정되어 있어야 하는데 현재 요소기술 개발 완료단계에서 공인시험성적서를 발급받는 것은 절차상 어려운 바, 향후 기술실용화 단계에서 PCM 냉각기술을 KOLAS 공인시험 항목으로 지정받는 절차가 먼저 선행되어야 함
- 따라서 이에 대비하여, 본 연구에서는 향후 PCM 냉각기술을 KOLAS 공인시험 항목에 추가 지정받아 공인시험성적서를 발급받는데 필요한 PCM 냉각장치 시험절차서의 내용, 시험절차서(초안)을 연구하여 그 결과를 아래와 같이 제시하였음

(나) PCM 냉각장치 시험절차서

① 시험 조건

- 본 개발품의 냉각성능 시험 평가를 위한 적용 차량 및 적용 전장품에 대한 정의 도출
- 냉각 성능 평가를 위한 시험 항목 및 시험 범위를 구체화

② 시험 절차

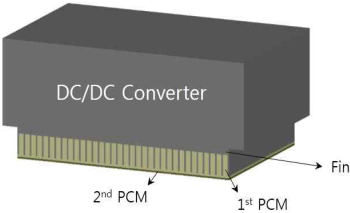
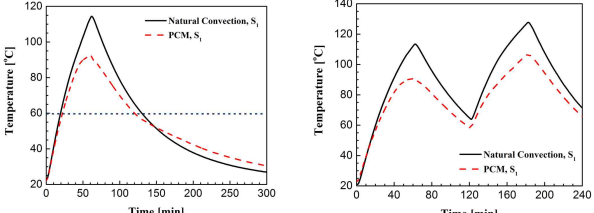
- 개발품의 실차 적용 냉각성능 평가를 위한 철도차량 및 적용 전장품의 상태에 대한 확인 사항 도출
 - 대전도시철도1호선 전동차 보조전원장치에 철도기술연구원에서 제작한 시제품에 대하여 1개 편성 1개 차호에 적용하고 시험을 실시함
 - 시험 장소는 대전도시철도 판암차량기지에서 수행하여 기존 SIV 히트싱크와 본 연구를 통해 히트 싱크의 실차 비교 시험을 위하여 전동차 및 예비 보조전원장치 SET를 구비
 - 실차 시험은 시험 절차서에 의해서 시험환경과 조건의해서 시행함
- 실차 적용 냉각성능 평가를 위한 시험 준비 항목 정의
 - 보조전원장치 구동상태 확인 시험
 - 정특성 온도 시험
 - 부하별 온도 측정 시험 (냉/난방, 형광등, 기타 전원 부하시험)
 - 부하변동 시험
- 시험 전장품에 대한 단계별 분리 및 조립 절차 정의
 - 전동차 보조전원장치 적용 차량에 대하여 기지구내로 이동
 - 전동차의 전원을 완전 차단하고 방전상태 및 작업 전 안전 상태를 확인
 - 개발된 보조전원장치 히트싱크와 대전도시철도공사 예비품 1 SET에 대하여 시험할 수 있도록 부속장치를 분해 및 조립하여 외관 상태를 확인
 - 시험 전동차 1개 편성 1개소 보조전원장치에 개발용 히트싱크를 1상(W상)에 장착
 - 시험용 보조전원장치 완착에 대하여 보조전원장치 무가압 기동시험을 통해 동작 및 안정성을 확보 후 가선(DC 1,500V)을 가압 후 동작 상태를 확인
 - 최종 보조전원장치 상태를 확인하여 이상이 없을 시 동적시험을 시험 절차서에 준용하여 수행

③ 실차적용 냉각성능 평가

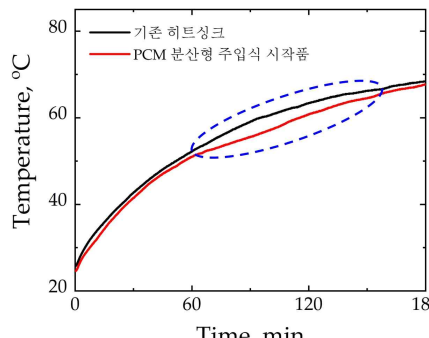
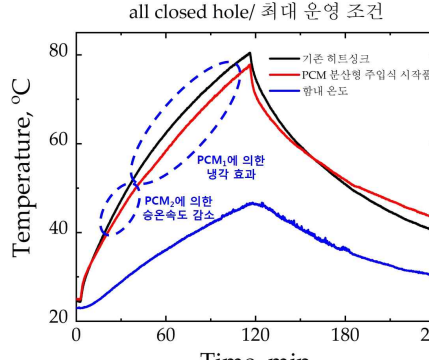
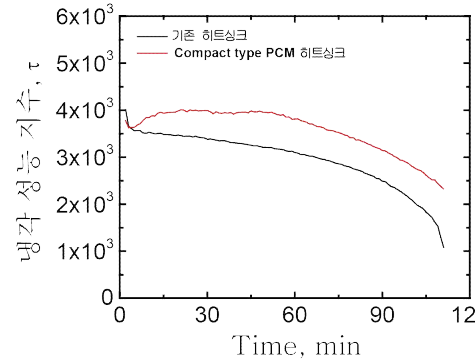
- 본 개발품의 냉각 성능 시험 및 분석을 위한 시험 방법 및 범위 설정
 - 보조전원장치의 상태에서 부하 변화에 따른 온도 변화 측정 및 분석시험을 수행함. 부하는 계절별 수용 부하가 달라서 본 과업 목적 달성에 효과적인 부하를 선택하여 단계별 부하량 변화를 통해 시험 진행
 - 전동차의 상시부하에 대하여 냉방부하 및 난방부하에 대하여 부하시험을 수행하였으나 과업 수행기간 기온조건에 대하여 난방부하(1/3, 2/3, 전난방)에 대하여 수행
- 철도차량의 다양한 외부 환경 조건에 따른 시험 방법 설정
 - 본 과업에서는 온도조건에 따라 동절기(난방부하)에 대해서 실험을 시행함
 - 부하량 : 상시부하 + 난방부하(1/3부하, 2/3부하, 전난방부하)

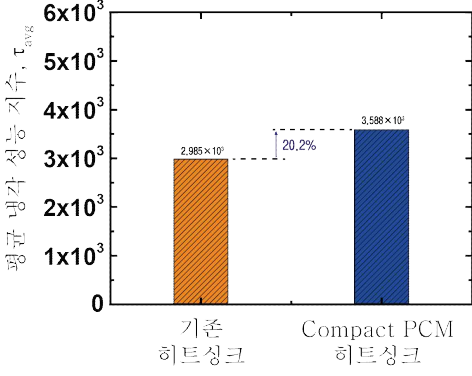
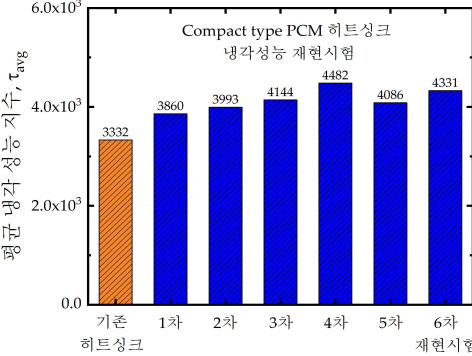
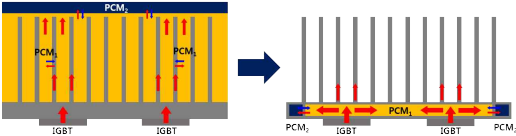
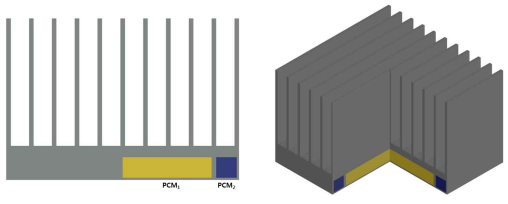
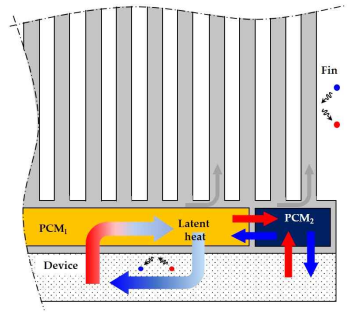
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 연구 목표

구분	내용
최종 목표	○ 철도 차량에 적용된 기존 냉각시스템을 대체하고, 높은 냉각 효율 (시스템 공간 차지 대비 냉각 성능)을 가지는 PCM(Phase Change Material)* 나노 복합 소재를 이용한 철도 차량용 능동형 냉각시스템 요소 기술에 대한 개발 - 기존 수동형(공냉 및 수냉) 냉각방식 대비 냉각효율 약 20% 증가, 에너지 변환효율 약 7% 향상, 공간 약 10% 이상 절약   <그림 3-1-1> 전력변환장치의 PCM적용 사례 및 선행연구 결과
세부 목표	- PCM 나노복합소재 적용 능동형 냉각시스템 적용기술 개발 - 능동형 냉각모듈 성능 평가기술 개발 - PCM 나노복합소재 합성 공정기술 개발

나. 목표 달성여부

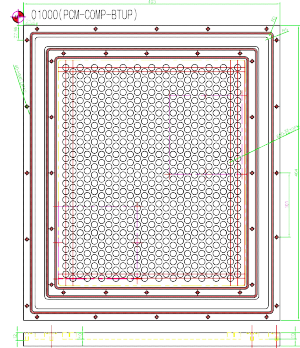
성과목표	성과지표	추진실적	달성율
PCM 나노복합소재 적용 능동형 냉각시스템 적용 기술	기존 냉각 방식 대비 냉각 효율 20 % 증대	- PCM 적용 히트싱크 개발을 통한 실험실 단위 시험 평가  - 실험실 단위 시험 평가 결과를 바탕으로 실차 적용 시험 평가 실시  - 기존 히트싱크 대비 냉각 성능 20.2 % 향상 	100%

		 평균 냉각 성능 지수, τ_{avg} 기존 히트싱크 Compact PCM 히트싱크 20.2% 2.985 × 10³ 3.588 × 10³	
	PCM 복합소재 다계층 적층 기술 설계	- 냉각 성능 재현 시험 평가  Compact type PCM 히트싱크 냉각성능 재현시험 평균 냉각 성능 지수, τ_{avg} 기존 히트싱크 1차 2차 3차 4차 5차 6차 재현시험 3332 3860 3993 4144 4482 4086 4331 - PCM 기반 철도차량용 냉각장치 적용 방안 도출  - PCM 적층 설계(안) 도출  100% - PCM 적층에 따른 에너지 순환 특성 분석 	

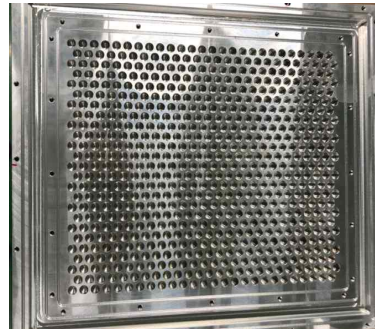
능동형 냉각모듈
성능 평가 기술

- 기존 냉각장치 대비 10 % 이상 체적 축소

- 기존 냉각장치 대비 체적이 10 % 축소된 시작품(분산형 PCM 주입방식) 설계



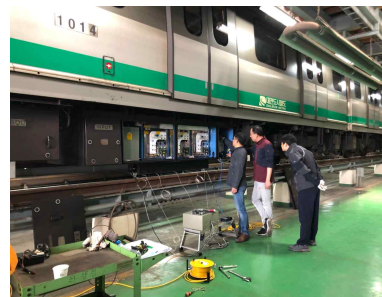
- 10 % 체적 축소된 시작품 제작 완료



- 체적 축소 시작품을 이용한 실험실 단위 시험 및 실차적용 시험 평가 실시

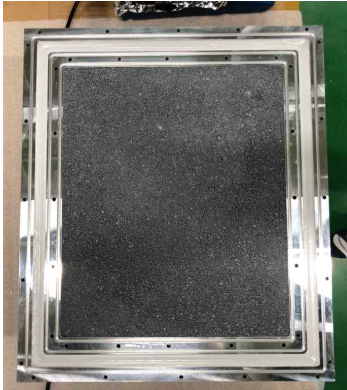
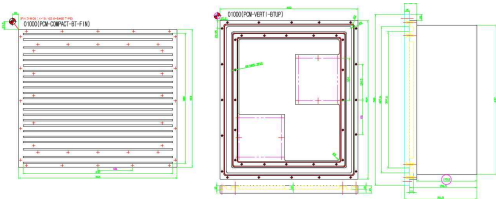


<실험실 단위 시험 평가>



<실차 적용 시험 평가>

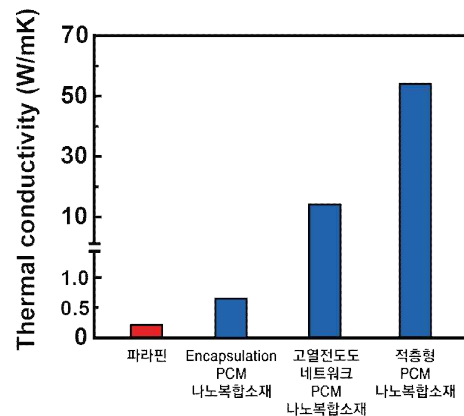
100%

	• 실험실 단위 시험 평가를 위한 냉각모듈 시작품 2건 제작 및 현차 시험용 시작품 1건 제작	• 실험실 단위 시험을 위한 시작품 제작 – 기존 SIV 냉각용 히트싱크와의 호환성 확인을 위한 실험실 단위 시험 및 실차 적용 시험용 시작품 제작 완료  – encapsulation PCM이 적용된 PCM 히트싱크 초도 시작품 제작 완료  – Compact type PCM 히트싱크 heat control 시작품  • 실차 적용 시험을 위한 시작품 제작 – Compact type PCM 히트싱크 시작품 제작 완료 	100%
--	--	--	-------------

PCM
나노복합소재
합성 공정 기술

- 기준(순수) PCM 대비 열전도도 2배 이상 향상

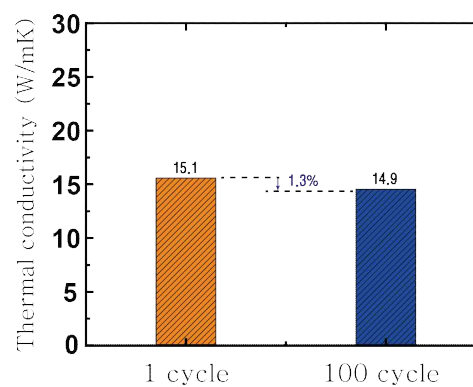
- 기준 PCM(paraffin)의 열전도도 ($0.2\text{W/m}\cdot\text{K}$) 대비 최대 285배($57\text{W/m}\cdot\text{K}$) 열전도도가 개선된 PCM 나노복합소재 개발



Type Name	Thermal Conductivity ($\text{W/m} \cdot \text{k}$)
파라핀	0.2
Encapsulation PCM 나노복합소재	0.57
고열전도도 네트워크 PCM 나노복합소재	15.1
적층형 PCM 나노복합소재	57 (x-y axis) / 2.4 (z axis)

100%

<PCM 나노복합소재별 열전도도 측정 결과>



<반복 축방열 사이클 열전도도 분석>

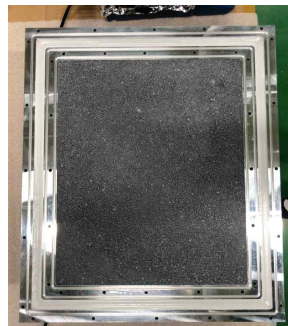
<열전도도 반복 측정 결과>

Type Name	Thermal Conductivity (W/mK)
고열전도도 네트워크 PCM 나노복합소재 (1 cycle)	15.1
고열전도도 네트워크 PCM 나노복합소재 (100 cycle)	14.9

- encapsulation PCM 제작 및 적용



<encapsulation PCM 제작>



<초도 시작품에 encapsulation PCM 적용>

*기준 PCM(paraffin)의 열전도율($0.2\text{W/m}\cdot\text{K}$)

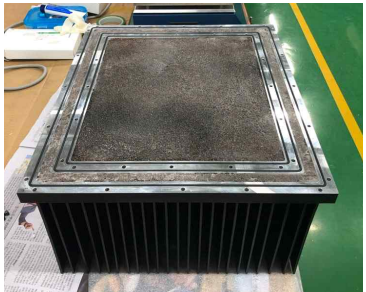
대비 최대 2.8배($0.57\text{W/m}\cdot\text{K}$) 열전도도가 개선

* PCM 복합소재 내 순수 PCM(paraffin)은 약 90 vol% 확보

- 고열전도 소재 네트워크 나노복합소재 제작 및 적용



<고열전도성 소재 네트워크 나노복합소재 제작>

		 <고열전도성 소재 네트워크 나노복합소재 적용> * 기준 PCM(paraffin)의 열전도율 (0.2W/m-K) 대비 최대 75배 (15.1W/m-K) 열전도도가 개선 * PCM 복합소재 내 순수 PCM(paraffin)은 약 93 vol% 확보 • copper foam을 이용한 복합소재 제작 및 적용  <copper foam 제작>  <copper foam 복합소재 적용>	
--	--	--	--

다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후 대책(후속연구의 필요성)
 - 해당사항 없음

4. 연구개발 성과의 활용 계획 등

가. 성과활용을 위한 성능 최적화 및 제품화·실용화 관련 추가 연구의 필요성

- 본 연구과제에서는 PCM 소재의 제조공정 기술과 해열식 연구를 통해 개발한 PCM 복합소재의 냉각 특성을 해석, 예측한 후 3종류의 PCM 복합소재 주입방식 능동냉각장치의 시작품을 설계·제작함
- 제작된 시작품으로 실험실 단위의 특성시험과 가혹 환경의 현차 탑재 냉각특성 시험을 통해 PCM 복합소재 적용 냉각장치 요소기술의 적용 가능성을 연구하였음
- 본 연구과제를 통해 개발한 PCM 복합소재 적용 능동냉각장치 요소기술을 활용할 경우 기술의 활용 효과가 기대되는 분야는 다음과 같음

(1) 철도차량 및 철도 전력설비용 고발열 전장품 냉각장치 설계 및 운영 분야

- 철도차량에서 전장품(장치)의 탑재할 수 있는 가능한 공간이 극히 협소하게 제약을 받으면서, 전장품의 급격한 발열을 냉각시켜줄 냉각장치의 중량이 기존 자연냉각 방식 히트싱크에 비해 동등 수준까지 중량의 최소화가 필요한 고발열 전장품의 냉각장치 설계 분야
- 전장품의 발생 열을 자연적 대류를 통해 냉각하기에 필요한 충분한 냉각장치 주변의 통풍 및 덕트 구조가 설계상 공간 제약 또는 최소화가 요구되는 준 밀폐 공간에 장착이 필요한 고발열 전장품의 냉각장치를 가지는 철도차량의 설계·제작 및 운영 분야
- 급속·충격적 고발열(Impact Heat) 발생으로 인한 고가·고기능 전장품의 열 소손 또는 기능 저하를 사전에 예방할 필요가 있는 철도차량용 전장품 또는 철도용 전력설비, 변압기 등 급격한 열충격의 완화가 필요한 냉각장치 설계 분야에 활용이 가능할 것으로 판단됨
- 따라서 본 과제에서 개발한 PCM 복합소재 능동냉각 요소기술은 향후에 위에서 분석된 가혹한 사용 환경 즉, 탑재공간 및 중량제한 조건, 통풍구조 설계 제약 조건, 그리고 가혹 환경에서 고발열 전장품의 급속·충격 발생열의 냉각이 요구되는 강제냉각방식과 동등한 수준의 냉각 특성을 발휘할 수 있는 PCM 복합소재 주입식 냉각장치 기술의 사업화/제품화를 위한 패키징 및 공정 최적화를 목표로 하는 실용화 및 성능 최적화 관련 후속 연구가 추가로 필요한 것으로 사료됨

(2) 히트싱크 구조를 가지는 철도 관련 타 산업 분야 (ESS 장치, 수소 전기차, 수소 철도차량 등)

- 본 과제에서 개발된 PCM 복합소재 능동냉각 기술은 후속되는 최적화·실용화 응용연구로 발전시킬 경우, 철도 분야 외에 아래와 같은 친환경 대체에너지 방식 교통수단 관련 산업 분야의 신기술 냉각장치에 활용이 가능할 것으로 예상됨

○ 본 과제에서 개발한 PCM 복합소재 능동냉각 요소기술은 후속 최적화·실용화 연구를 통해 활용기술을 응용·발전시킬 경우,

- 최근 빈번히 발생하는 배터리 급속·과발열이 원인으로 추정되는 *ESS(Energy Storage System ; 에너지 저장장치) 화재사고에 대해 해결책을 제시할 수 있는 밀폐형 공간에서 급격한 발열의 흡수·완충이 필요한 전장품·배터리 부위의 급속 발열을 완충시키는 냉각장치 등에 본 개발기술의 활용이 가능함

연말뉴스 최신기사 정치 북한 산업/경제 금융/증권 의료학 사회 전국 국제 문화 스포츠

업계 "급속온전 열제도 똑같이 지원해야"...정부 "여의 정책진 배 없다"



방단 화재에 방화 전 ESS-연계 화재 확산 (C6)
[연합뉴스TV 제공]

연말뉴스 최신기사 정치 북한 산업/경제 금융/증권 의료학 사회 전국 국제 문화 스포츠

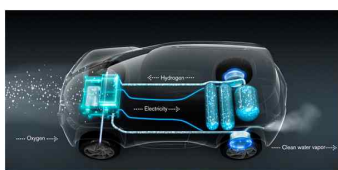


에너지저장장치(ESS) 가동 현황 (C6)
[연합뉴스TV 제공]



에너지의 저장 시스템, ESS에서 불이 난 겁니다.
최근 잇따른 'ESS 화재' 22건 발생

- 전장품의 미래 친환경 에너지 교통수단으로 주목 받으면서 최근 들어 활발한 연구개발이 확산되는 수소에너지 철도차량 또는 수소 연료전지 방식 전기자동차 등 밀폐된 공간에서 탑재 공간의 제약 조건을 가지는 고발열 전장품·배터리 부위의 급속·충격 발생열을 완충, 냉각시키며 정상기능 작동온도의 영역을 넓혀주며 정상 가동온도 유지시간을 연장하여 시스템의 안정성을 향상시켜 줄 수 있는 냉각기술로 활용이 가능하며, 이러한 분야의 후속 실용화 연구를 통해 최적화된 기술을 적용할 경우, PCM 복합소재 능동냉각 기술의 산업계 활용·보급 단계에 기술적 경제적 파급효과가 클 것으로 예상됨



수소연료전지 원리



수소자동차 개념도



2040년 수소차 620만대
(산업통상자원부)



수소 철도차량 개발정책
(국회 산자/환경(위) 정책토론회)

- 급속 고발열 전장품의 냉각과정에서 회수된 열 에너지의 재활용 순환시스템 기술에 본 과제에서 개발한 PCM 복합소재 능동냉각 요소기술은 1)발열 전장품과 냉각장치의

탑재 공간이 극히 협소하고 체적·중량의 최소화가 필요한 전장품, 2) 발생 열의 대류 냉각에 필요한 충분한 통풍구조 설계가 제약을 받는 밀폐 공간 장착용 고발열 전장품, 3) 급속·충격 고발열(Impact Heat) 발생으로 인한 고가·고기능 전장품의 소손 또는 기능 저하를 방지해야 할 열충격 완충 냉각장치로서 활용할 경우, 냉각과정에서 흡수된 발생열의 열순환 사이클과 연계시켜 회수된 열 에너지를 재활용하는 냉각열 회수 및 재활용(Energy Harvesting) 기술 분야에도 활용이 가능할 것으로 판단함

(3) 기타 타 산업 분야

- 전 세계적인 에너지 소비의 지속적인 증가로 인한 자원의 고갈 및 환경 문제가 주요 이슈로 부상되고 있으며, 이에 따른 에너지 절감 및 에너지 사용의 효율성을 향상시키기 위한 방안으로 인버터의 수요는 계속 높아지고 있고 인버터의 Hardware 부품 중 가장 중요한 반도체 소자인 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)는 반도체 기술의 발전에 의해 성능 및 Size의 축소가 더욱 진행되고 있음
- 전자기기의 여러 가지 고장 원인 중 온도에 의해서 발생하는 비중이 55%를 차지한다고 알려져 있어 방열판의 역할이 중요시 되고 있음. 따라서 산업용 인버터내 IGBT의 방열 최적화를 위해 여러 가지 연구들이 진행되고 있으며 본 연구를 통해 개발된 PCM 물질을 이용한 방열판의 경우도 그에 해당한다고 할 수 있으며 그 활용처로는 산업용 터보블로워 인버터, 태양광발전시스템 인버터 및 ESS(Energy Storage System) STACK, UPS 무정전 전원 시스템, 주파수 변환 장비, 엘리베이터 장비, 대형 변압기, 대형 변전소 등의 분야에도 적용이 가능할 것으로 판단됨.
- 본 과제에서 개발된 PCM 복합소재 능동냉각 기술은 후속되는 최적화·실용화 응용연구로 발전시킬 경우, 철도 분야 외에 아래와 같은 친환경 대체에너지 방식 교통수단 관련 산업 분야의 신기술 냉각장치에 활용이 가능할 것으로 예상됨

나. 성과 활용·제품화 대비 기술 기준 및 KS 국가 산업표준 규격 제정 검토

(1) 철도차량·용품 기술기준(철도안전법) 제정 방안 검토

- 본 연구과제에서 개발한 PCM 냉각기술 성과의 활용·제품화를 위한 전략으로 철도안전법에 정한 철도차량·용품 기술기준으로 제정하는 방안과 KSR(KS 국가표준-철도) 품목으로 추가 지정받는 방안이 있음
- 철도안전법의 철도차량·용품 기술기준에 추가 제정 받으려면 아래와 같이 철도안전법에서 정하는 절차에 따라 철도차량·용품 기술기준 대상품목에 추가되도록 기술기준을 제정 신청하고 심의를 거쳐 추가 대상품목 및 추가 기술기준으로서 확정 받는 과정이 필요함
- 다만 현행 철도안전법에서 정하는 철도차량·용품 기술기준 대상품목은 철도 운영자가 승객 안전과 직접 관련성이 큰 철도 부품/장치를 우선 대상품목으로 지정되어야 하고, 대상 품목으로 지정된 후에 해당 품목에 대한 기술기준을 제·개정하는 절차가 후속됨

(철도안전법) 철도 기술기준 제·개정 처리 절차

(2) 국가 KS 산업표준규격 제정 방안 검토

○ 다만, 국가 KS 표준으로 추가 제정하려는 대상 품목은 일반 공산품의 부품, 장치가 주요 표준규격화 대상임을 고려할 때, 일반 공산품(제품)으로서 공급규모, 시장성 등이 일정 매출규모 이상이어야 하고, 표준화·규격화의 필요성이 인정되어야 하므로, 본 개발기술을 국가 KS표준으로 신청하여 제정하는 방안은 향후 실용화연구 단계에서 더 깊이 있는 경제성 분석과 시장규모 분석을 수행한 후에 국가 KS표준으로 필요성을 인정받을 수 있는 근거를 준비한 후에 KS규격으로 제정을 추진하는 것이 바람직할 것으로 판단됨

〈그림 4-2-1〉 KS 표준 제정 절차 예시

– 92 –

붙임 . 참고문헌

- [1] 철도 부품산업 생태계 발전 방안 도출을 위한 기업 간담회, 한국철도기술연구원, 2017.
- [2] A. V. Varnai, Find IGBT degradation through power cycling, EDN network, 2015.
- [3] 김주태, 손영진, 도시철도 전동차용 전력반도체 냉각장치에 대한 연구, 한국철도학회 2010 추계학술대회 (2010) 1562-1568..
- [4] www.1-act.com
- [5] www.techzen.co.kr
- [6] 윤차중 등, 전기기관차(8200호대) 추진시스템 성능향상 기술개발, 철도기술연구사업 보고서, 2015.
- [7] www.heatpipe.co.kr
- [8] 정연일 등, 철도 주요시스템 및 부품 국산화 기술개발 기획, 미래철도기술개발사업 보고서, 2013.
- [9] The worldwide market for raylway technology, SCI(' 10) 및 제2차 철도산업발전기본계획(11.5)
- [10] Jinfeng Wang, Steven J. Severtson, Andreas Stein, Significant and concurrent enhancement of stiffness, strength, and toughness for paraffin wax through organoclay addition, Advanced Materials, 18 (2006), 1585-1588
- [11] R. Kandasamy, X-Q. Wing, A. S. Mujumdar., Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-based heat sinks, Applied Thermal Engineering, 28 (2008) 1047-1057.
- [12] H. E. Ahmed, B. H. Salman, A. Sh. Kherbeet, M. I. Ahmed, Optimization of thermal design of heat sinks: A review, International Journal of Heat and Mass Transfer, 118 (2018) 129-153.
- [13] R. Baby, et. al., Experimental investigations on phase change material based finned heat sinks for electronic equipment cooling, International Journal of Heat and Mass Trnasfer, 55 (2012) 1642-1649.
- [14] X. H. Yang. et. al., Experimental and numerical investigation of low melting point metal based PCM heat sink with internal fins, International Communication in Heat and Mass Transfer, 87 (2017) 118-124.
- [15] T. C. Chang, et. al., PCM based heat sinks of paraffin/nanoplatelet graphite composite ofr thermal management of IGBT, Applied Thermal Engineering, 112 (2017) 1129-1136.
- [16] H. J. Xu, et. al. Thermal performance of cascaded thermal storage with phase-change material (PCMs). part 1 :steady cases, International Journal of Heat and Mass Transfer, 106 (2017) 932-944.
- [17] X. Cheng, et. al. Thermal performance analysis and optimization of a cascaded packed bed cool thermal energy storage unit using multiple phase change materials, Applied Energy, 215 (2018) 566-576.
- [18] www.bgr.in

- [19] 서용곤 외 2명, LED 조명 장치 및 그의 냉각 장치, 전자부품연구원, 10-2012-0017300, 2012.
- [20] 김동수, 상변화 냉각장치, (주)위너스라이팅, 10-2016-0103832, 2016.
- [21] 고요한, 남진무, 전지 모듈, (주)엘지화학, 10-2016-0118061, 2016.
- [22] 손상일 외 2명, 상변화물질 캡슐을 적용한 배터리 냉각용 히트 싱크, WO-2018-128306, 2018.
- [23] 한국철도기술연구원 시험인증센터 “2019년도 신규 철도차량 발주물량”
- [24] www.knab.go.kr/kolas/
- [25] www.ktl.re.kr
- [26] www.ksc.re.kr (FLUENT v14.5)
- [27] www.yna.co.kr
- [28] www.imbc.com
- [29] www.seriuswheels.com
- [30] www.seedaily.com
- [31] 2019년 친환경 자동차 보급정책 설명회, 산업통상자원부, 2019.
- [32] 수소열차 개발과 활성화방안 모색을 위한 토론회, 국토교통부, 2019.
- [33] www.molit.go.kr
- [34] [//standard.go.kr](http://standard.go.kr)

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.