

2. 제출문

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'도시열섬현상 저감을 위한 PCM(Phase Change Material) Cool Roof System의 적용기술 개발'(연구개발 기간 : 2014. 07. ~ 2017. 07.) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

주관연구기관명 : 중앙대학교 산학협력단 (대표자)
참여기관명 : (주) 구성이앤드씨 (대표자)

주관연구기관책임자 : 박 진 철
참여기관책임자 : 윤 석 구



2017. 09. 21.

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

3. 보고서 요약서

보고서 요약서

과제 고유 번호	16CTAP-C07801 4-03	해당 단계 연구 기간	2016. 07 ~ 2017. 07	단계구분	(3차 연도)/ (3차 연도)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명	도시열섬현상 저감을 위한 PCM(Phase Change Material) Cool Roof System의 적용기술개발			
	세부과제명	도시열섬현상 저감을 위한 PCM(Phase Change Material) Cool Roof System의 적용기술개발			
연구책임자	박진철	해당단계 참여 연구원 수	총: 11명 내부: 9명 외부: 3명	해당단계 연구개발비	정부:250,000천원 기업: 84,000천원 정부 외: 천원 계:334,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 23명 내부: 21명 외부: 5명	총 연구개발비	정부:750,000천원 기업:252,000천원 정부 외: 천원 계:1,002,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	중앙대학교 산학협력단			참여기업명 (주) 구성이엔드씨	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: 송실대학교 산학협력단			연구책임자: 김수민	
요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)				보고서 면수 199	

4. 국문 요약문

연구의 목적 및 내용	PCM을 플레이트 형식의 “Cool Roof System” 제품을 개발하여 건물옥상에 적용시켜 도시열섬현상 저하 효과 그리고 궁극적으로 온실가스 저감효과 도모				
연구개발성과	1차 연도	▪ PCM Cool Roof System의 개념 및 개발현황 조사 ▪ 옥상 마감유형별 표면온도 실태조사 ▪ 시스템 적용 및 성능 평가를 위한 기존 도시의 현황분석 ▪ 축열 플레이트 설계 및 축소모형 실험 ▪ PCM Cool Roof System의 경제성 평가 ▪ 최적의 상안정 PCM type 개발기술 확립 ▪ PCM 적용 연구사례 조사 및 열적 성능 분석 ▪ 도시의 적용 범위 및 적용가능성 분석 ▪ 시뮬레이션분석을 통한 도심열섬저감 효과 분석 ▪ 축열 플레이트의 축열성능 향상에 따른 냉방에너지 저감 분석			
	2차 연도	▪ 상안정 PCM의 열적 거동 분석 ▪ PCM축열 플레이트 설계 및 축소모형 실험 ▪ 축열성능 향상 방안 연구 ▪ PCM축열 플레이트 설계 및 축소모형 실험 - 상안정 PCM이 들어간 축열 플레이트 설계 - 축소모형 실험을 통한 축열 플레이트의 열적 거동 분석 ▪ Cool Roof System 변동에 따른 열적 거동 분석 - 데이터 로거 및 열류량 측정을 통한 축열 플레이트의 열적 거동 분석 실시			

	3차 연도	▪ 도시표면 마감재에 따른 태양열 반사율 및 표면온도 측정실험 및 미기후 분석 시뮬레이션 실시 ▪ Test-bed 선정 및 현장적용 실물모형 실험을 통한 PCM Cool Roof System의 성능검증 ▪ PCM Cool Roof System의 열성능 시뮬레이션 분석 ▪ CFD시뮬레이션 분석을 통한 PCM Cool Roof System의 도시열섬효과 저감 검증 ▪ 선행연구 및 본 연구에 대한 결론 분석 및 이론적 고찰을 바탕으로 설계기준안 개발 ▪ PCM Cool Roof System 적용시의 난방에너지부하 변화 시뮬레이션 분석 ▪ 미기후 분석시뮬레이션 프로그램을 활용한 최적의 PCM 적용 방안 고찰		
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	가. 상안정 PCM 축열 플레이트 개발 ▪ 최종 PCM 축열 플레이트의 형태는 지붕에만 적용가능한 것이 아니라, 야외 테라스, 목재 데크 등이 사용되는 곳에 적용하여 도시 전체의 온도를 낮추는데 큰 영향을 줄 수 있을 것으로 기대한다. 또한 PCM의 종류에 따라 다양한 상변화온도를 갖는 MPPCM의 제조가 가능하기 때문에 건축분야 뿐만 아니라 다양한 산업 분야에 적용될 가능성이 있음 ▪ 더 나아가 MPPCM을 WPC 중공층에 넣는 형태가 아닌 알루미늄 패널 등을 이용하여 PCM을 대용량으로 적용한 단일화 제품으로 개발할 수 있고, 이를 실내에 적용하여 도시열섬현상 저감 효과 뿐만 아니라, 실내 온열쾌적감 증가 및 건물 냉난방에너지 감소 효과 기대			
	나. PCM Cool Roof System 성능평가 및 열섬현상 저감 효과 분석 ▪ PCM Cool Roof System을 플레이트의 형태로 기존건물 및 신축건물 옥상에 적용이 용이 하도록 설계하여 성능평가를 실시하고 궁극적으로 열섬효과 저감 효과 확인 ▪ 경량이면서 고강도의 마감재로 제작하여 하중의 영향을 감소시키고 구조적 안정성을 확보하였으며 이는 다양한 용도의 건축물에 적용 가능성을 보여주며 시스템 유지관리·보수의 어려움을 감소시켜 현 시점 대비 향후 PCM Cool Roof 적용성 확대 기대 ▪ 개발기술의 열 성능평가 및 온실가스 저감 효과 분석을 위해 실시한 실험 결과를 바탕으로 PCM을 활용한 건축자재 및 관련분야의 다양하고 심도 높은 연구에 기초자료로 활용될 수 있고 관련 산업의 활성화에 기여 예상 ▪ 시제품 개발 시 합리적인 성능 발현이 가능하도록 성능지침으로서 활용 할 수 있을 것이며 궁극적으로 건물에너지절감과 온실 가스 저감 효과로 인한 열섬현상 저감 기대			
	다. PCM Cool Roof System 설계 기준(안) ▪ 현재 기존 건축물의 지붕 외피에 상변화물질(PCM)적용이 가능한 설계 방법 및 기준은 전무한 상태이며, 본 개발 기술 적용 시 설계 및 시공뿐만 아니라 지속적 유지관리를 위한 가이드라인으로 본 설계 기준(안) 작성을 통하여 기존건축물 전반에 걸쳐 적용 가능한 PCM Cool Roof System 적용 설계 기준안을 작성하여 본 기술의 보급 및 확산 유도 ▪ 실무자뿐 아니라 관심을 갖는 일반인이 본 설계 기준(안)에 따라 PCM Cool Roof System의 기본개념·성능·시공방안·유지관리 및 보수·전문용어에 대한 이해를 도울 수 있는 자료로 활용 가능			
	핵심어 (5개 이내)	도시열섬현상	상변화물질	PCM플레이트

< SUMMARY >

Purpose & Contents	Reduction Effect of urban heat island and greenhouse gas by applying “Cool Roof System” which was developed by PCM plate to roof of the building	
Results	1 st year	▪ Analysis of concept and present condition of PCM Cool Roof System ▪ Analysis of surface temperature by roof finishing materials ▪ Analysis of current situation of existing city for system application and performance test ▪ Design of heat storage plate and scale model test ▪ Economic evaluation of PCM Cool Roof System ▪ Development of optimal state-stable-PCM type ▪ Case study of PCM application and analysis of thermal performance ▪ Analysis of a range of application and applicability to city ▪ Analysis of reduction Effect of urban heat island by simulation ▪ Analysis of reduction of cooling energy by improving thermal performance of heat storage plate
	2 nd year	▪ Analysis of thermal behavior of state-stable-PCM ▪ Research of improving heat storage performance ▪ Design of heat storage plate and scale model test - Design of heat storage plate with state-stable-PCM - Analysis of thermal behavior of heat storage plate by scale model test ▪ Analysis of thermal behavior by change of Cool Roof System - nalysis of thermal behavior of state-stable-PCM through measuring heat flow by data-logger
	3 rd year	▪ Measurement of albedo and surface temperature by finishing of building and analysis of microclimate ▪ Performance test of PCM Cool Roof System by selecting Test-bed and mock-up test ▪ Thermal simulation of PCM Cool Roof System ▪ Reduction of urban heat island effect by PCM Cool Roof System through CFD simulation ▪ Development of standard of design by preceding research analysis and theory consideration ▪ Study on heating energy of PCM Cool Roof System by energy simulation ▪ Consideration of application methods for optimal PCM by microclimate simulation
Expected Contribution	가. Development of state-stable-PCM heat storage plate ▪ Ultimate form of PCM heat storage plate can be applied to roof, as well as, terraces, wood deck, etc. so that it is expected to have effects on reducing temperature of whole city. It is possible to apply PCM plate to various industry fields as well as architectural field, as MPPCM which have various phase change temperature could be produced by type of PCM. ▪ Furthermore, a single-product with large amount of PCM could be developed by aluminum panel and it could reduce not only urban heat island also building energy	

	ㄱ. Performance test of PCM Cool Roof System and analysis of reduction of urban heat island phenomenon ▪ Designing PCM plate for application to existing building and newly-built building and verifying reduction of urban heat island ▪ Reducing the effect of load and improving structural safety by light weight & high strength finishing, it could be applied to various type of building and reduce the difficulties of maintenance ▪ Utilization as basic data for PCM research of materials and related fields and it is expected to contribute to vitalization of related industry ㄴ. Design criteria of PCM Cool Roof System ▪ There are no methods and standards of PCM application to roof of building, therefore, one of the results of this study is to make guideline of design criteria of PCM Cool Roof System and maintenance management ▪ it is expected to be utilized as base data of understanding concept, performance, construction method, maintenance and technical terms of PCM Cool Roof System for the public as well as experts			
Keywords	Urban heat Island	Phase Change Material	PCM plate	Cooling&Heating peak load mitigation

6. 영문 목차

1. Research and development overview	1
2. Domestic and international current state of technologies	7
3. Contents and results of research	10
4. Achievement and contribution to related fields	169
5. Application plan of research	179
6. International information obtained by research	182
7. Security level of research	189
8. Research facility · equipment registered to KISTI	189
9. Performance results of safety measures by process of research	190
10. Representative results of research	193
11. Etc	194
12. Reference	195

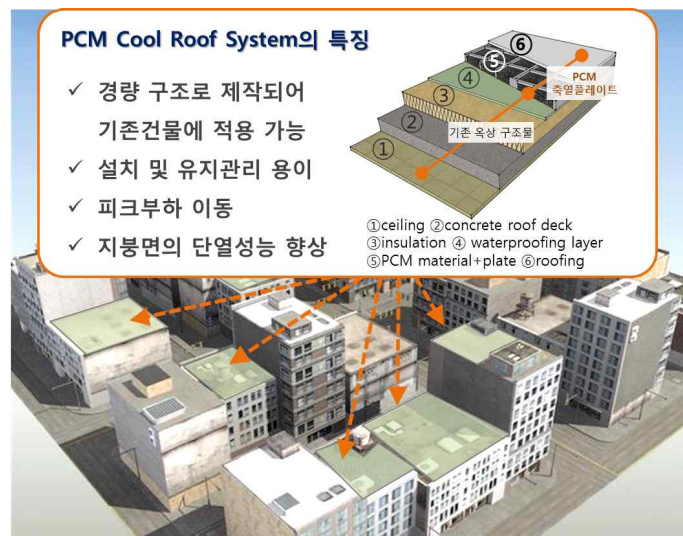
〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	7
3. 연구 수행 내용 및 성과	10
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	169
5. 연구개발성과의 활용 계획	179
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	182
7. 연구개발성과의 보안등급	189
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	189
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	190
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	193
11. 기타 사항	194
12. 참고 문헌	195

제1장. 연구개발과제의 개요

1.1 연구개발 목적

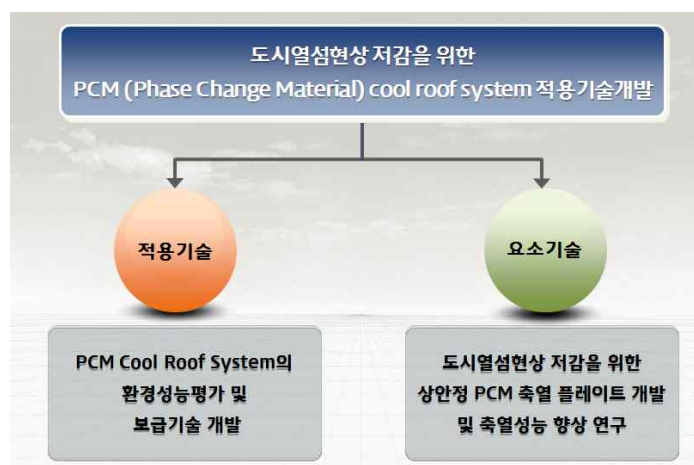
- 최근 온실가스 증가에 따른 도시 지역의 열섬현상 및 승온현상 발생
 - 거주자의 질적 저하 현상을 가져옴
 - 저감방안
 - ① 옥상녹화방안 : 옥상녹화는 하중에 대한 문제, 배수 및 방수에 의한 문제
 - ② Cool Roof : 높은 반사율(알베도)에 따른 난방부하 대응에 취약
- 따라서, 본 연구과제는 PCM을 플레이트 형식의 “PCM Cool Roof System”을 개발하여 기존 건물옥상에 적용시켜, 도시열섬현상저하 효과 및 냉방부하 저감을 통해 궁극적으로 온실가스저감 효과를 얻고자 함



(그림 1.1) PCM Cool Roof System의 특징

가. 도시의 열섬현상 저감 효과를 가지는 ‘PCM Cool Roof System’ 개발

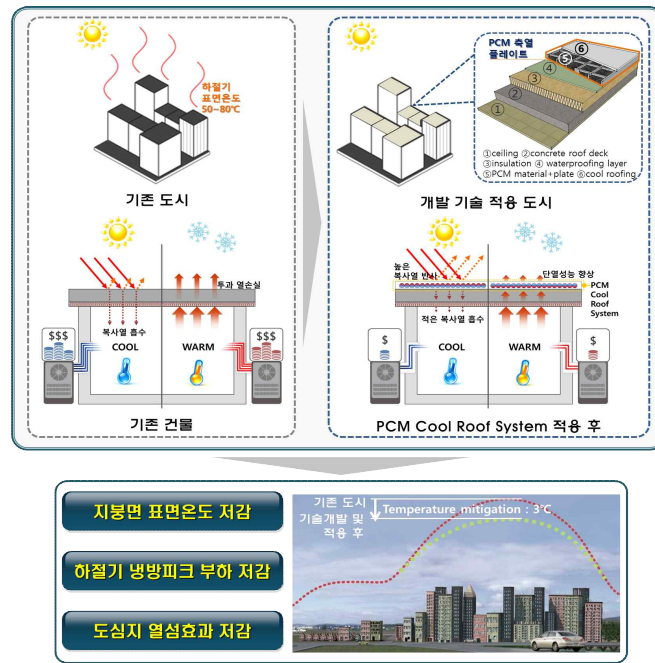
- (1) 상안정 PCM이 들어간 축열 플레이트 개발
- (2) ‘PCM Cool Roof System’ 설계 기준(안) 작성



(그림 1.2) 연구개발의 최종 목표

나. 온실가스절감이라는 정책적 목표 달성

- (1) 'PCM Cool Roof System' 적용으로 인한 지붕면 표면온도 저감
- (2) 지붕 표면 온도 저감에 따른 하절기 냉방피크 부하 저감

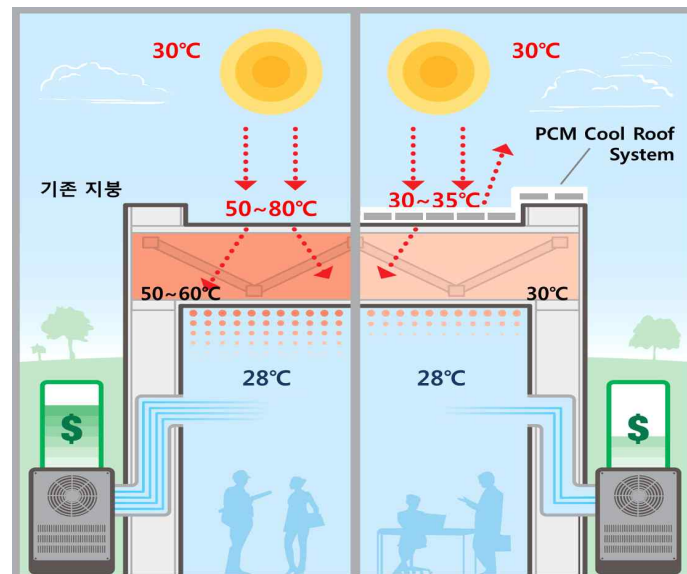


(그림 1.3) 연구 개발의 내용 및 기대효과

1.2 연구개발의 필요성

가. 연구개발의 설명

- 최근 신축되는 건축물은 에너지 절약 설계 기법 적용된 녹색 건축물로 지어지는 경우가 크게 증가
- 하지만, 최근 3년 이내 신축된 건축물이 전체 건축물에서 차지하는 비율은 2.6%에 불과함
- 효과적인 열섬현상 조절을 위해 기존 건축물에 적용 가능한 방법으로 접근하는 것이 필요



(그림 1.4) 기존 지붕과의 차별점

- 따라서, 본 연구는 국가적인 건물에너지절약 정책에 부응하여 도시의 열섬현상 증대라는 사회적 이슈를 해결하기 위한 방안으로서 “도심열섬현상 저감을 위한 PCM 축열성능을 활용한 PCM Cool Roof System”을 개발하고, 이를 기존 건축물에 적용하기 위한 PCM Cool Roof System을 축열 플레이트의 형태로 개발하고자 함

▪ PCM Cool Roof System의 주요 특징

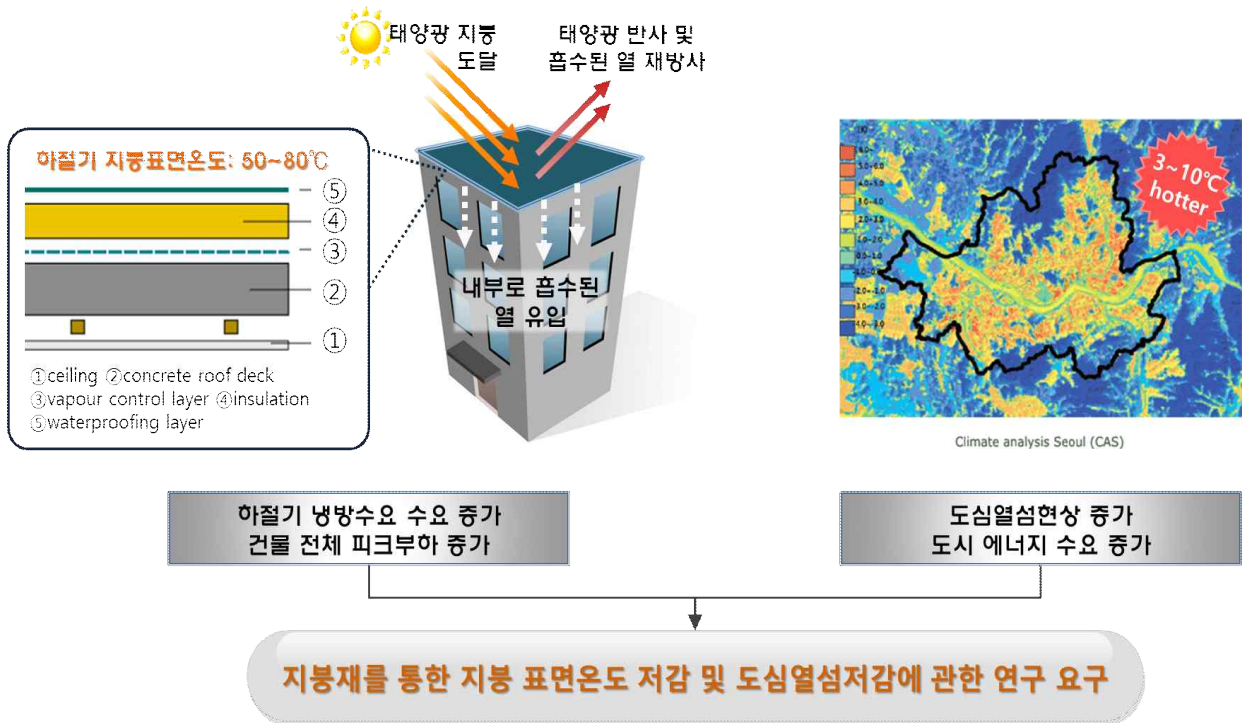
- (1) 옥상녹화와 달리, 경량 구조로 제작되어 기존 건축물에도 적용이 가능하고 많은 건물에 시공 가능하므로 열섬제어 대응에 유리
- (2) 축열 플레이트는 현장에서 조립하여 사용할 수 있도록 사전에 제작된 형태로 설치 및 시공이 용이하도록 제작되며, 보수 시 일부분만 떼어 교체할 수 있게 제작하여 유지관리가 용이
- (3) 하절기 건물의 피크부하 시간을 조절하여 전력수요의 급증으로 인한 블랙아웃(black out) 위험에 대응
- (4) PCM의 잠열을 흡수 방사하는 특성을 이용하여 건물의 내부 온도 변화의 폭을 줄임으로 건물의 냉난방에너지 소비를 줄임



(그림 1.5) 연구의 개요

나. 연구개발의 중요성

- 일반적인 주택의 경우 지붕(roof)은 전체 냉방부하의 약 14%정도를 담당
- 지붕을 통한 냉방부하는 대부분 일사(solar radiation)에 의한 복사열 흡수로 발생
- 지붕표면은 외기온도에 비해 최대 50℃ 이상 상승
 - 높은 지붕표면온도는 건물의 냉방부하 증가
 - 여름철 도심의 열섬현상(Heat Island Effect)발생의 주요원인
 - 실내온도를 상승시켜 재실자의 쾌적감을 크게 저하 및 에너지 수요 증가



(그림 1.6) 연구의 필요성

- 옥상녹화의 문제점 대두
 - 토양의 적재 하중 이내에서 소생태계를 조성하기 위한 계획 및 설계와 식재계획과 유지관리계획에 대한 다양한 문제점들로 인하여 기존 건축물에 대해 옥상녹화 시스템을 쉽게 적용하지 못하고 있음
 - 따라서, 열섬현상에 대한 영향을 감소시키면서 기존의 건축물에 적용이 가능한 시스템 구축이 필요

(1) 기술적 측면

- PCM Cool Roof system 활용 시 장점
 - 지붕 표면온도 저감 및 피크부하 시간 지연을 통해 도시 열섬현상 완화 가능
 - 제로에너지 건축물로의 패러다임 전환을 위한 에너지 절약 및 에너지 수요관리 정책에 부응

(2) 경제·산업적 측면

- 기후변화협약의 이행, 유가변동 등에 따른 그린빌딩, 그린홈 보급 확대와 함께 2030년까지 세계건축시장에서 최대 60%까지 비중이 확대될 것으로 예상(McGraw Hill, 2008)

- 국내 녹색건축 시장에 대한 전망 역시 2007년 3%에서 2030년까지 최대 32%까지 비중이 확대될 것으로 예상

<표 1.1> 국내 건설시장 전망치

(단위: 백만달러)

연도		2007	2012	2020	2030
국내 건설수주액		86,864	102,669	134,154	187,417
	주택	47,975	56,704	74,094	103,511
	토지조성	3,997	4,724	6,173	8,624
	도로 및 교량	7,245	8,563	11,189	15,631
	상하수도	1,190	1,407	1,838	2,568
녹색건설		3,020	41,823	52,558	69,950
	녹색 주택	2,399	33,208	41,741	55,555
	생태적 토지조성	200	2,767	3,478	4,628
	생태 도로	362	5,015	6,304	8,389
	생태적 물순환	60	824	1,036	1,378

*출처:한국과학기술기획평가원, 저탄소 녹색성장의 실현을 위한 제로카본 그린빌딩 동향(2010)

- 본 연구의 최종목표인 PCM Cool Roof System의 적용을 통해 도시의 평균온도 저하 및 하절기 전력피크 부하의 이동을 통해 전력 예비율을 향상시키고, 에너지 수급안정화를 이룰 수 있을 것으로 판단 됨

(3) 사회문화적 측면

- 본 연구를 통한 도시 온도 저감 방안과 에너지 수요 조절은 정부차원에서 장려하는 기후변화에 대응하기 위한 녹색기술의 하나로 국가의 에너지 절약 및 환경보호 측면에서 기여할 수 있을 것으로 기대

(4) 정부지원의 필요성

- 국내 정책은 건축물의 에너지 효율 향상을 통한 도시의 에너지 절감을 목표로 각종 정책이 추진되고 있으며, 신축 건물뿐만 아니라 기존 건물의 에너지 효율 향상이 중시되고 있는 추세
- 따라서, 기후변화에 적응 가능한 건물로 계획 및 개선 필요

다. 타 산업 연계 및 국제협력 가능성

- PCM Cool Roof System은 신재생에너지 산업 중 태양열, 지열 등 열 에너지를 활용한 시스템의 열에너지 보존을 위해 PCM Cool Roof System의 요소기술을 활용할 수 있을 것으로 예상
- 유사한 연구를 수행하고 있는 기관과의 연계연구를 통하여 Cool Roof 설계 규정을 위한 교류에 주도적 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대

1.3 연구개발 범위

가. 건물 및 도시 환경에 따른 열섬 강도 및 저감 방안 분석

- 건물 외피 재료 및 도로 포장재료에 대한 환경성능 측정실험
- 미기후 분석 프로그램인 ENVI-met을 활용한 도시표면 마감재에 따른 태양열 반사율 및 표면 온도 시뮬레이션

나. PCM Cool Roof System의 성능검증

- 실물모형 실험
- 열성능 시뮬레이션 분석
- CFD 시뮬레이션 분석

다. PCM Cool Roof System의 설계기준안 개발

- 선행연구 및 본 연구에 대한 결론 분석 및 이론적 고찰을 바탕으로 설계기준(안) 개발

라. 도시의 전력부하 저감 분석

- Designbuilder와 Energyplus를 활용한 도시의 냉방부하 변화 시뮬레이션 분석

제2장. 국내외 기술 개발 현황

2.1 Cool Roof System의 연구 동향

가. Cool Roof System의 특징

- (1) 쿨루프(Cool Roof)란 일반 지붕마감재에 비하여 표면의 온도가 낮은 것을 의미
- (2) 지붕 표면의 온도를 낮추기 위해서 지붕재료 표면의 높은 반사율(Solar reflectance)과 방사율(Thermal emittance)을 요구
- (3) 쿨루프의 성능을 나타내는 또 다른 지표는 Solar Reflectance Index(SRI)
 - SRI는 반사율과 방사율을 하나의 지표로 나타낸 것으로 ASTM E1980-11에 명시된 방법에 따라 표준 흑체(반사율 0.05, 방사율 0.9)와 표준 백색 표면(반사율 0.8, 방사율 0.9)의 평평한 표면의 온도를 측정 구함
- (4) 쿨루프 적용 시 개별건물의 미치는 영향
 - 에너지 절약가능성, 비용절감, 지붕재의 내용연수 연장, 경제성, 쾌적성 향상
 - 지붕의 열반사율을 높임으로써 연간 냉방에너지 소비량 감소 효과
 - (사례1) 미국 캘리포니아 지역에 상점, 학교, 창고 지붕의 알베도를 0.04~0.30에서 0.60~0.82로 변화시킴으로 여름철 냉방에너지 소비량을 상점 52%, 학교 17~18%, 창고 3~4% 절약할 수 있었음
- (5) 쿨루프 특징
 - 쿨루프는 지붕재의 표면온도 변화를 줄여서 온도 변화에 따른 화학적 변화와 재료의 수축·팽창으로 인한 물리적 변화로 인한 지붕재의 수명을 연장 가능
 - 쿨루프는 일반적으로 초기투자비용이 낮아 에너지 비용 절감으로 인한 초기투자비 회수기간이 짧으며, 개보수 공사 기간 재실자들의 이용 편의성에 영향을 주지 않음
 - 상업용 건물의 에너지 절감 비용은 \$0.36/m²로 난방 에너지 증가를 포함하더라도 이득
 - 공조를 하지 않는 중간기에 지붕으로부터의 열 획득을 감소시켜 내부 온도를 낮춰 열적 쾌적성을 향상 가능
- (6) 쿨루프의 적용은 건물 구조체의 열 축적을 막음으로 인해 냉방부하 저감 및 도시 열섬 저감의 효과가 높은 것으로 분석되었으나, 이는 난방기에는 표면의 열 축적을 막아 오히려 난방부하 증가의 가능성이 높은 단점이 있음 특히, 겨울철 난방부하가 큰 우리나라와 같은 계절에서는 쿨루프 적용 시 신중해야함

나. Cool Roof 제품 개발 현황

(1) 흰색 도료

흰색은 가장 빛을 잘 반사하는 색상으로 이 특성을 활용한 재료로 흰색 아크릴 페인트가 있다. 흰색 아크릴 페인트는 일반적인 것으로, 투명 고분자 바인더에 이산화티타늄(titanium dioxide)안료를 원료로 사용한다. 이 도료는 안료의 입자 크기를 조절하여 가시광선 영역에서의 반사율을 높일 수 있도록 제조되었다. 최적의 사이즈는 직경 200nm로 이때 반사율은 0.9이며 입자의 크기가 260nm로 커지면 반사율이 0.83으로 낮아지고 근적외선 영역에서의 반사율이 향상된다.

(2) 알루미늄 안료를 사용한 도료

알루미늄 안료는 검정 아스팔트 수지에 알루미늄 금속 입자를 안료로 사용하는 것으로, 알루미늄 안료의 농도에 따라 반사율과 방사율이 영향을 받는다. 알루미늄 안료의 농도가 높으면 반사율은 높지만 방사율을 낮아지는 특성을 나타낸다. 알루미늄 안료를 추가할 경우, 흰색 재료에 비해 반사율은 낮지만, 기후에 의한 풍화작용이나 노후화에 대한 저항성은 우수하다.



(그림 2.1) 알루미늄 안료를 사용한 도료

(3) 유색재료

흰색이 성능은 가장 우수하지만, 건물에 적용하기에는 한계가 있다. 옅은 색상을 활용하는 방안으로는 반사성의 타일, 금속 지붕, 옅은 색상의 대리석이나 모자이크, 콘크리트와 백색골재를 혼합한 일반적인 아스팔트 등이 가능하다. 유색의 재료는 크게 코팅제와 타일제로 나뉜다. 흰색의 재료의 분광곡선은 일반적으로 가시광선 영역에서 반사율이 높고 근적외선 영역에서의 반사율은 상대적으로 낮게 나타난다. 그러나 유색의 제품들은 유색 안료의 사용으로 인해 가시광선 영역에서 흡수율이 높고 근적외선 영역에서 흡수율이 낮게 나타난다. 유색 안료로는 이산화티타늄(titanium dioxide), 흑색 산화철(iron oxide black)과 같은 무기질 염색제, 다이옥사진(dioxazine)과 같은 선택적 유기체(selective organics) 등이 있다. 유색 페인트는 산화철(iron oxide)의 옅은 막이나 산화규소(silicon oxide)에 산화철로 된 두 개의 막으로 코팅된 알루미늄 입자를 혼합하여 얻을 수 있다.

53.9°C black	53.3°C blue	48.9°C gray	50.0°C terracotta	49.4°C green	49.4°C chocolate
68.3°C	55.6°C	53.9°C	54.4°C	56.1°C	56.1°C

(그림 2.2) 유색재료 마감재 (출처: Levinson, 2007)

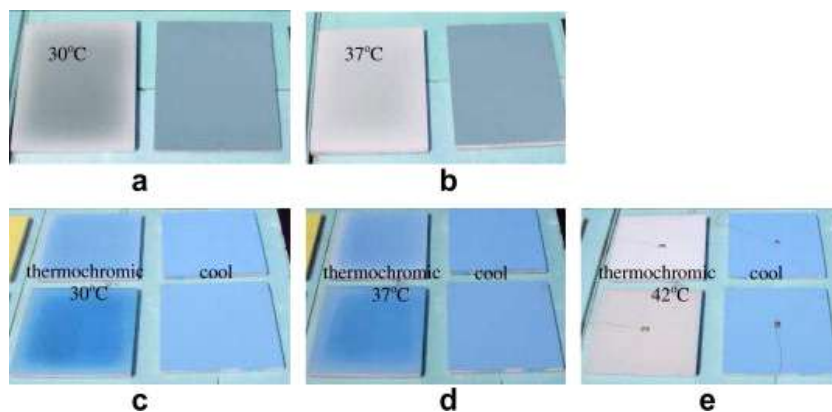
라. 기타 지붕재

single-ply membrane은 지붕 구조체에 적용하기 위해 신축성있는 시트의 형태로 제작된 것으로 흰색 멤브레인은 반사율이 0.75~0.85이다. 제조단계에서 미리 코팅된 멤브레인이 있다. 이는 현장 시공 시 품질의 정확성을 높이기 위해 공장에서 미리 코팅된 멤브레인을 사용하는 것이다. 아스팔트 싱글은 아스팔트에 코팅된 암석 입자를 가압하여 생산한다. 생산의 한계로 인해 반사율은 일반적으로 0.2 정도이다.



(그림 2.3) Single-ply membrane

감온변색물질(thermochromic materials)은 주변 환경에 반응하는 것으로 온도 변화에 따라 색상이 변화하여 광학적 성질이 변화된다. 이러한 변화는 재료의 색상의 변화를 결정하는 안료의 분자구조에 의해 발생한다. 발색제, 현상제, 용제로 구성되는 건염연료(leuco-dye) 혼합물 의해 색상변화가 발생하는데 이 혼합물은 5 μ m이하의 마이크로캡슐형태로 되어 있다. 일정한 색을 띄고 있다가 설정온도가 되면 반사되는 가시광선의 색이 변하게 되어 재료의 광학적 성질 역시 변하게 된다. 그러나 이 재료는 아직 개발단계로, 내구성과 지속성에 취약하다.



(그림 2.4) 감온변색물질 (출처: Karlessi, 2009)

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

3.1 연구개발결과 요약

가. 1차 년도

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용
1차 연도 (2015)	▪ 도시 적용을 위한 프로토타입 설계	• 국내외 연구동향 및 관련 제품 개발 현황조사	• 문헌 고찰을 통한 적용 사례 분석 • 관련 제품 시장조사
	▪ 상안정 PCM 적용 축열 플레이트 개발	• 최적의 상안정 PCM(Shape stabilized PCM, SSPCM) type 개발기술 확립	• DSC를 통한 축열성능 분석 • 화학적 결합 분석을 통한 호환성 평가
	▪ 도시 적용을 위한 프로토타입 설계	• 옥상 마감유형 실태 조사 및 표면온도 측정 실험	• 인공환경 실험동 구축 및 표면온도 측정 • 외부 환경에서의 표면온도 측정 • 마감유형 종류별 반사율 측정
		• PCM Cool Roof System 성능실험 및 설계	• 온도측정을 통한 PCM Packing의 열적성능 확인 실험
		• PCM Cool Roof System의 경제성 평가	• 기존 연구를 통한 편익 항목 분석 • Energy Plus 시뮬레이션 수행

나. 2차 년도

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용
2차 연도 (2016)	▪ PCM Cool Roof System 적용에 따른 건물 및 도시의 환경성능 분석	• 지붕재 변화에 따른 도시열섬저감 효과 분석	• 서울열섬강도 현황분석
			• 외피 종류별 반사율 실측
			• 미기후 분석 프로그램인 ENVI-met을 활용하여 반사율에 따른 온도저감 효과 분석
	▪ PCM 축열 플레이트의 열적 성능평가 및 시제품 제작	• PCM Cool Roof 축열 플레이트 열성능 분석	• 마감재별 PCM Cool Roof System 열성능 실험
			• WPC(Wood Plastic Composite)의 열적 거동 실험
			• WPC를 적용한 PCM Cool Roof System 열성능 실험
			• PCM Cool Roof System의 마감색상별 열성능 실험
			• 인공기후 실험동을 통한 PCM Cool Roof System 열적 거동 실험
			• 박공 지붕 열성능 실험
		• 건물 시뮬레이션 냉방에너지 성능 분석	• 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 실험적 접근
	▪ 상안정 PCM 분석을 통한 축열 플레이트 설계 및 성능 향상 연구	• 상안정 PCM의 열적 거동 분석	• 패킹형 상안정 PCM 제조
		• PCM축열 플레이트 설계 및 축소모형 실험	• 전열해석 장비 구축 및 실험
			• 패킹형 PCM과 WPC를 결합한 축열 플레이트 설계 및 열적 성능 분석
		• 축열성능 향상 방안 연구	• PCM 종류에 따른 열적 거동 분석
			Double-layer PCM의 열적 성능 평가
			• 혼합 PCM 제조

다. 3차 년도

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용
3차 연도 (2017)	건물 및 도시 환경에 따른 열섬 강도 저감 방안 분석	PCM Cool Roof System 성능검증	동절기, 중간기, 하절기 Test-bed를 활용한 PCM의 열적 성능 검증
			열성능 시뮬레이션을 통한 냉·난방부하 저감 성능 검증
			기류분석 시뮬레이션을 통한 열섬현상 저감 효과 검증
	시뮬레이션 프로그램을 통한 PCM 적용 방안 고찰	PCM Cool roof system 활용을 위한 PCM 최적 적용 방안 분석 및 제안	Energyplus 및 Designbuilder 활용을 통한 시뮬레이션 분석
	PCM Cool Roof System 설계기준(안) 개발	PCM Cool roof system의 보급 및 활성화를 위한 설계기준(안) 작성	- 선행연구 및 본 연구의 결과 분석 및 이론적 고찰 - PCM Cool Roof System 가이드라인 제시

3.2 연차별 연구수행 내용 및 결과

가. 1차 년도

(1) 연구 범위 및 연구 수행 방법

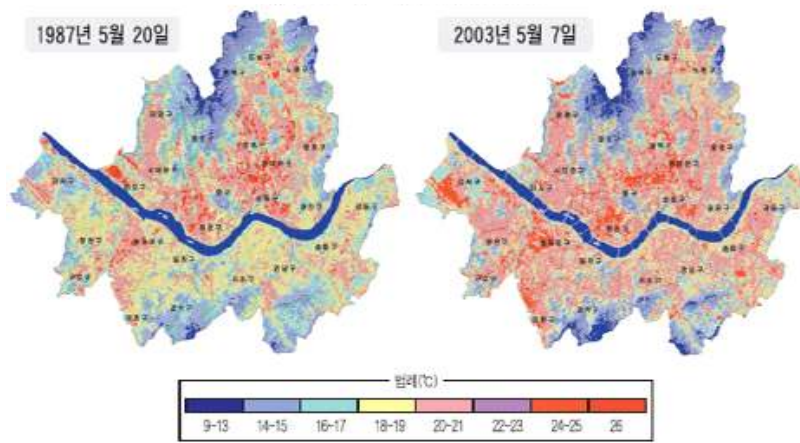
연구 범위	연구 수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
국내외 연구동향 및 관련 제품 개발 현황조사	- 문헌 고찰을 통한 적용 사례 분석 - 관련 제품 시장조사	- 국내 열섬현상 발생현황 및 에너지 소비 - PCM의 건물 적용 연구 동향 - PCM Cool Roof System의 개념 및 개발현황 - 원천 기술 확보 방안 및 국산화 전략
최적의 상안정 PCM(Shape stabilized PCM, SSPCM) type 개발기술 확립	- DSC를 통한 축열성능 분석 - 화학적 결합 분석을 통한 호환성 평가	- 상안정 PCM(Shape stabilized PCM, SSPCM)type과 Cool Roof System간의 호환성 분석 - Cool Roof System적용을 위한 SSPCM(Shape stabilized PCM) 제조
옥상 마감유형 실태 조사 및 표면온도 측정 실험	- 인공환경 실험동 구축 및 표면온도 측정 - 외부 환경에서의 표면온도 측정 - 마감유형 종류별 반사율 측정	- 국내 지붕재 유형 및 특징 조사 - 인공환경 실험동을 구축하여 온도 측정 실험 수행
PCM Cool Roof System 성능실험 및 설계	온도측정을 통한 PCM Packing의 열적성능 확인실험	- PCM Cool Roof System 성능실험 및 설계 - PCM Cool Roof System 적용을 위한 기존 도시의 현황분석
PCM Cool Roof System의 경제성 평가	- 기존 연구를 통한 편익 항목 분석 - Energy Plus 시뮬레이션 수행	PCM Cool Roof System을 적용한 오피스 빌딩의 연간 에너지 사용량과 면적 당 에너지 사용량의 저감량 분석

(2) 연구수행 내용

(가) 국내외 연구동향 및 관련 제품 개발 현황조사

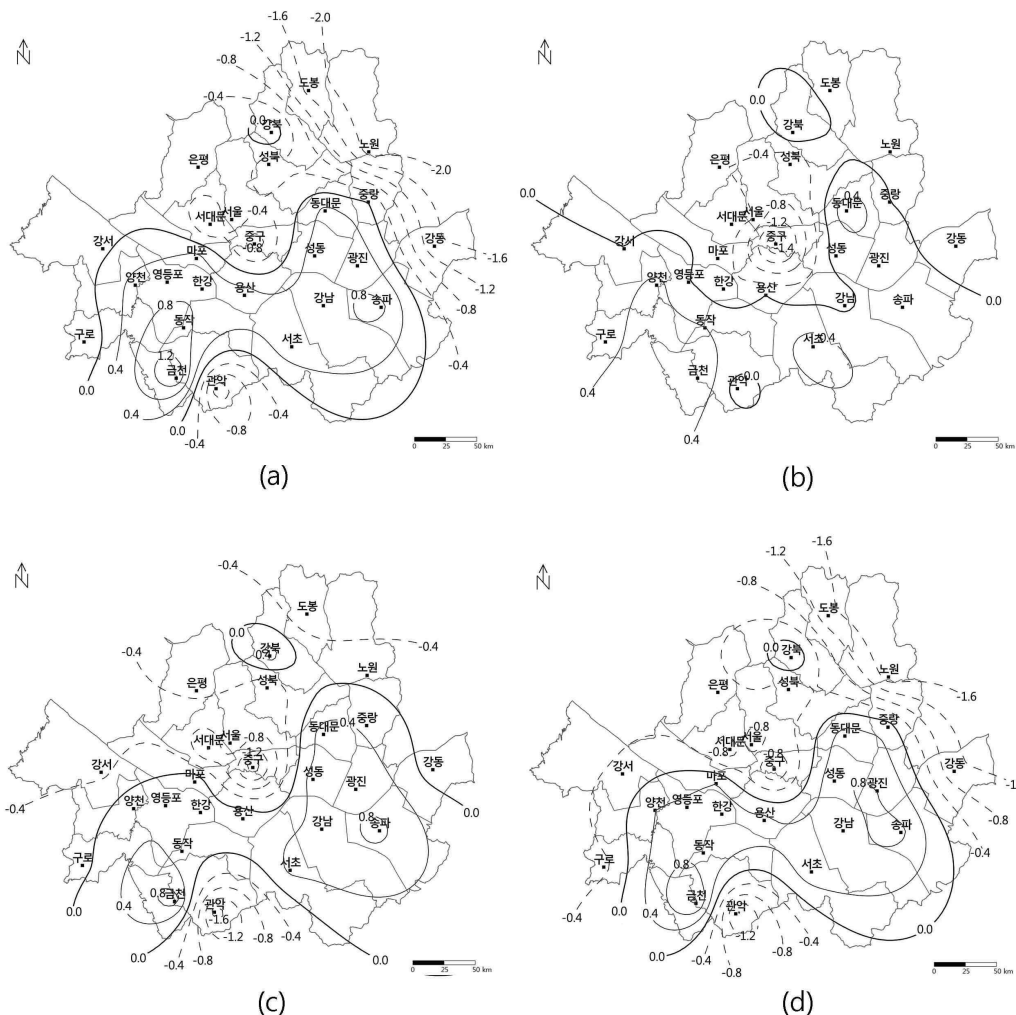
1) 국내 열섬현상 발생현황 및 에너지 소비

- 최근 기후변화에 따른 기온 상승 및 도시화와 인구집중으로 인한 도시의 열수지 변화로 인해 도심지에서의 열섬현상 발생이 증가하고 있고 도시 열섬현상의 발생강도는 도시의 지형적 특성, 기상상태, 도시의 밀도, 인공배기열, 도심지 피복의 열적, 광학적 특성, 도시의 형태와 용도에 의해 영향을 받는다.
- 도시 열섬현상은 냉방기 침투부하와 냉방부하 증가, 대기권 오존 및 대기오염 농도 증가, 건강문제 유발, 도시의 생태발자국 (Ecological Footprint) 증가 등을 야기한다.
- 서울은 면적에 비해 많은 인구가 집중되어 열섬현상으로 인한 다양한 문제가 발생하고 있으며 (그림 3.1)은 서울지역의 열섬 발생현황을 나타낸 것으로 외곽보다는 도심지역이 온도가 더 높게 나타났고 특히, 1987년보다 2003년이 도시화로 더 높은 온도분포를 보이고 있다.



(그림 3.1) 서울의 온도 분포

- 일반적으로 도시의 열섬강도는 계절별로 여름철보다 가을과 겨울에 뚜렷하게 나타나는데 여름은 다른 계절에 비해 대기가 불안정하여 공기 대류현상이 활발히 일어나기 때문에 열섬 발생강도가 낮게 나타났다.
- 또한, 서울지역의 시간별 열섬분포를 살펴보면 주거지 면적 비율이 높은 지역에서는 일출 전에 고온역이 형성되고 있으며, 상업 및 업무 시설과 교통시설의 면적 비율이 높은 곳에서는 일출 이후인 12시경에 고온핵이 형성된다.
- 도시 내 열섬 현상은 일출전인 06시에 가장 뚜렷하며, 주간인 12시에 가장 약하게 나타나고 지표 냉각이 일어나며 다시 열섬 분포가 뚜렷해진다.



(그림 3.2) 서울의 겨울철 시간별 열섬 분포. (a)0600 LST, (b)1200 LST, (c)1800(LST), (d)2400(LS) (출처: 김유진, 2012)

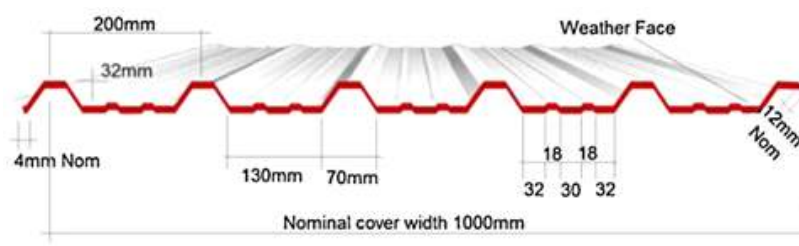
- Santamouris(2001)의 연구에 따르면, 열섬강도가 증가하면 여름철 냉방부하 및 전력피크부하가 증가되는 것으로 나타났으며, 겨울철 난방부하는 감소했다.
- 우리나라의 경우, 현재 건물분야는 국가 총 에너지소비의 약 21%를 차지하고 있으며, 산업 분야가 56%, 교통 분야가 23%를 차지한다.
- 한편, 건축자재의 생산과 운반 및 건설과정에서 소비되는 내재에너지 등을 모두 포함시킬 경우 건물분야의 에너지소비 비중은 30% 이상으로 크게 증가했다.
- 건물에서의 에너지소비는 건물의 외벽, 창기 및 환기, 지붕과 바닥 등의 외피를 통한 열의 이동과 재실자들의 활동을 통한 냉방부하와 난방부하에 의해 발생하는데, 냉방부하의 증가는 에너지소비의 증가와 함께 하절기 전력피크부하를 증가시킴으로써 국가 경제와 에너지 안보에 커다란 부담으로 작용한다.
- 건물의 외피 중에서 지붕(roof)은 일반적인 주택의 경우 전체 냉방부하의 약 14%정도를 담당하고 있다. 지붕을 통한 냉방부하는 대부분 일사(solar radiation)에 의한 복사열 흡수로 발생하게 되는데, 지붕은 대부분 흡수율이 높고 반사율이 낮은 재료로 구성되어 있기 때문에 지붕표면의 온도는 외기온에 비해 최대 50℃ 이상 상승한다.
- 80℃ 이상 되는 높은 지붕표면온도는 건물의 냉방부하를 크게 증가시킬 뿐만 아니라 도심의 열섬현상(Heat Island Effect)발생의 주요원인이 되므로 건물 구조체를 통한 축열현상을 저감하여 도심의 열섬현상 저감하는 것이 필요하다.

2) PCM의 건물 적용 연구 동향

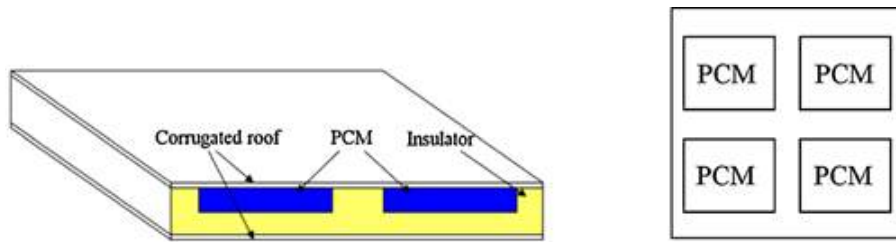
가) 문헌고찰을 통한 열섬현상 저감 관련 PCM 적용 사례 분석

(1) 국외 선행연구 사례

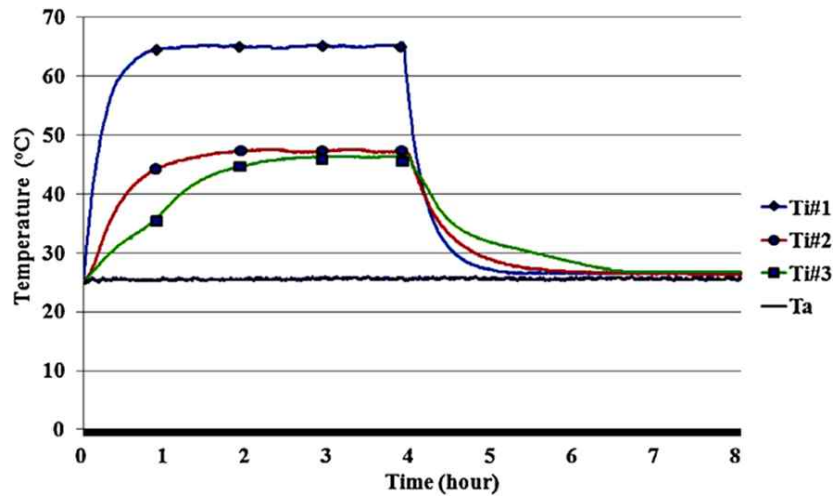
- Chou et al.은 일반적인 물결모양 지붕(그림 3.3)과 단열재가 적용된 지붕, 단열재와 PCM이 추가된 지붕(그림 3.4)에 대해 열적 성능을 평가하였다. 지붕층 위쪽 표면온도와 아래쪽 표면온도를 측정하고, 실내온도를 측정하는 것으로 진행했다. 실내온도 분석 결과, 단열재와 PCM이 같이 적용된 지붕에서 가장 낮은 피크 온도를 보였고, 단열재가 추가되지 않은 일반적인 물결모양 지붕의 경우에는 실내온도가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. PCM이 들어간 단열 지붕이 약 52.7%의 에너지 저감율을 보였고, 단열재만 적용된 지붕은 약 43.1%의 에너지 저감율을 보였다. 결과적으로 PCM을 적용하는 것이 지붕에서의 에너지 저감효과를 가져올 수 있고 지붕층에 다양한 형태로 PCM을 적용하여 열적 성능을 높일 수 있음을 보여주었다.



(그림 3.3) 일반적인 물결모양 지붕



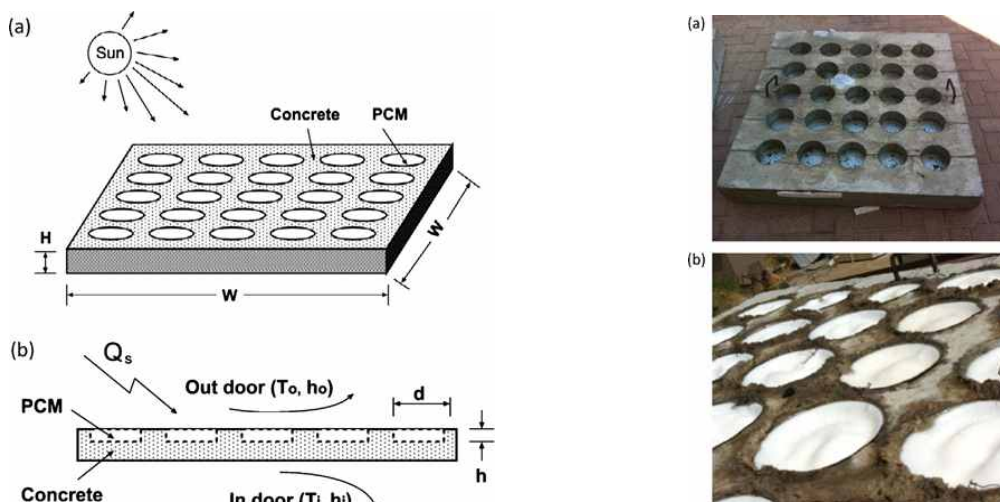
(그림 3.4) PCM이 들어간 단열 지붕



#1 = 일반적인 물결모양 지붕 single layer (단열 X)
 #2 = #1 + PU 15mm layer (단열 O)
 #3 = #1 + PU 15mm + PCM layer (단열 O)

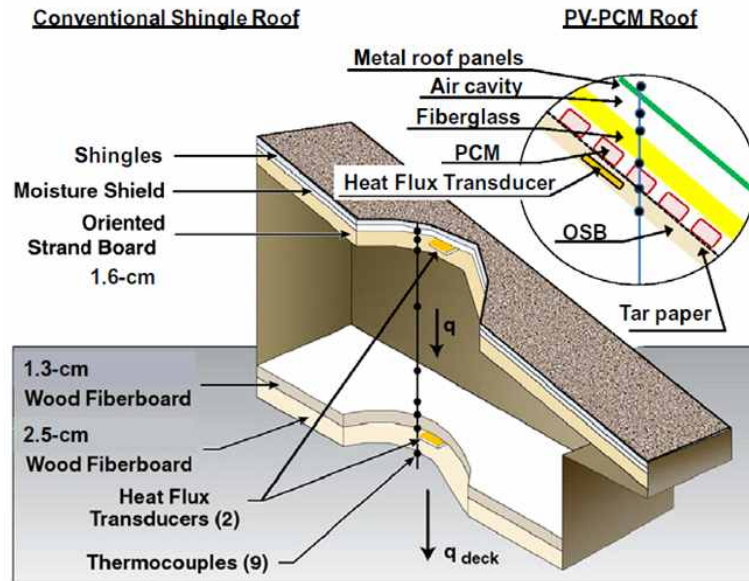
(그림 3.5) 지붕층에 따른 실내온도 분석결과

- Alawadhi et al.은 지붕층에 적용되는 콘크리트 구조내에 원기둥 및 원뿔 형태로 PCM을 적용하여 PCM의 고체-액체로의 가역적인 반응에 있어 열적 효율을 최대로 끌어올리기 위한 최적안을 도출하였다. PCM은 n-eicosane을 사용하였다. 결과적으로 지붕층 콘크리트에 PCM을 적용하여 총 열류량의 39%를 저장하는 연구 성과를 도출했다. 아래의 (그림 3.6)는 실험에 사용된 콘크리트 구조의 모식도 및 실제로 제작한 콘크리트 구조물을 보여준다.

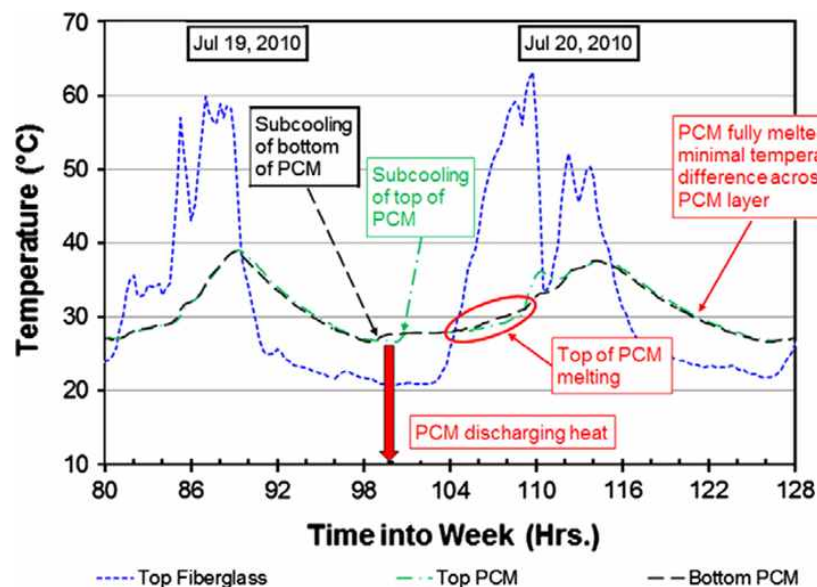


(그림 3.6) PCM 적용을 위한 지붕층 콘크리트 구조물의 모식도 및 Mock-up 이미지

- Kośny et al.은 Bio PCM을 적용하여 경사진 지붕층에 축열층을 구성하여 건물 내 냉난방 부하저감을 위한 연구를 수행하였다. 특히, PCM은 경사 지붕층의 태양광 패널이 들어가는 곳에 적용되었다. 결과적으로 PCM이 들어간 지붕층의 열류량이 90%정도 저감되었다. PCM이 들어간 경사진 지붕층의 모식도(그림 3.7)와 냉방시즌의 지붕층의 온도변화에 대한 결과는 (그림 3.8)에 나타내었다.



(그림 3.7) PCM이 들어간 경사 지붕 레이어 모식도



(그림 3.8) 냉방시즌 기준 지붕층의 온도변화

나) 적용 가능한 PCM 선정과 열적 성능 분석

(1) 상변화물질(PCM)

- PCM은 온도의 변화에 따라 상이 변하는 물질로, 물질이 고체에서 액체, 혹은 액체에서 고체로 상이 변할 때 잠열의 형태로 열에너지를 축적하는 특성을 지니는 물질을 말한다.
- 최근 PCM의 축열성능을 이용한 연구가 국내외에서 활발하게 이루어지고 있는 실정이며, 본 연구에서는 건물외피에 적용 가능한 도료 및 판상재 형태로서 도시열섬현상을 저감하기

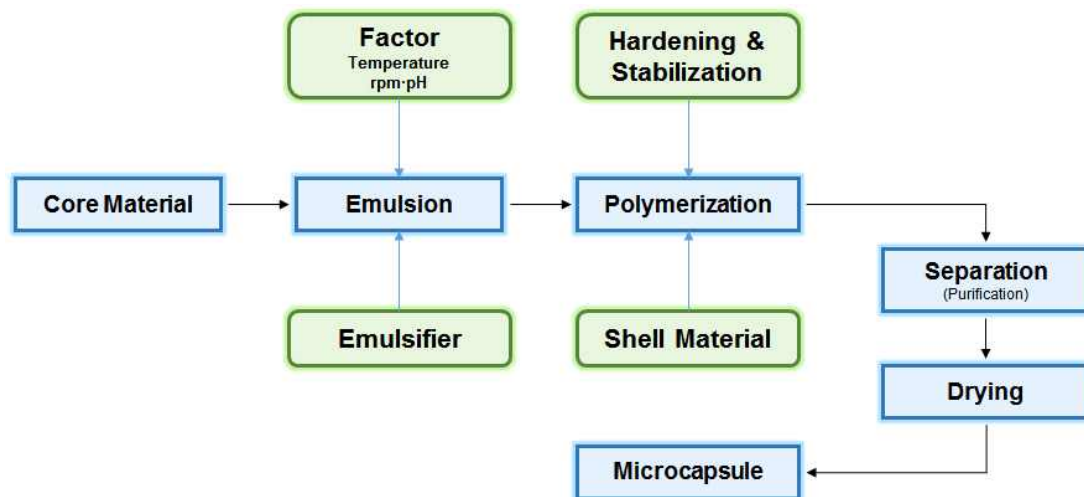
위한 연구를 수행하였다.

- 적용된 PCM은 상누출을 방지하기 위하여 MPCM(Microencapsulated PCM; 캡슐화 PCM)을 사용하였다.

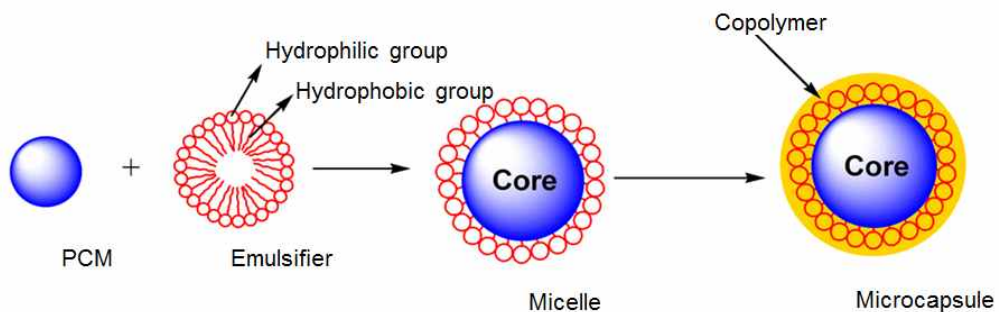
(2) MPCM(Microencapsulated PCM; 캡슐화 PCM)

■ MPCM 제조과정 분석

- 일반적으로 MPCM은 Core material과 Shell material로 구성되어 있는데, MPCM은 Core material에 유화제를 혼합한 후에 온도 조건과 pH 조건을 맞추어 에멀전화 시킨 상태에서 Shell material을 넣어 polymerization을 한 뒤 분산시켜 MPCM을 제조한다.
- PCM의 마이크로 캡슐화 과정에서 PCM과 유화제가 혼합되는데, 이 과정에서 구형의 입자를 띄며 이를 Micelle이라고 한다. Micelle에 다시 shell material이 달라붙어 캡슐레이션을 통한 MPCM이 제조된다.
- MPCM을 제조하는 방법은 이 외에도 Coacervation 및 Solgel 합성법 등 다양한 방법으로 제조가 가능하다. (그림 3.9)는 일반적인 MPCM 제조방법에 대한 모식도를 보여준다.



(그림 3.9) Microcapsulated PCM 제조과정 모식도



(그림 3.10) Microcapsulation과정에 따른 MPCM 형성과정 모식도

■ MPCM(Microencapsulated PCM) 재료 분석

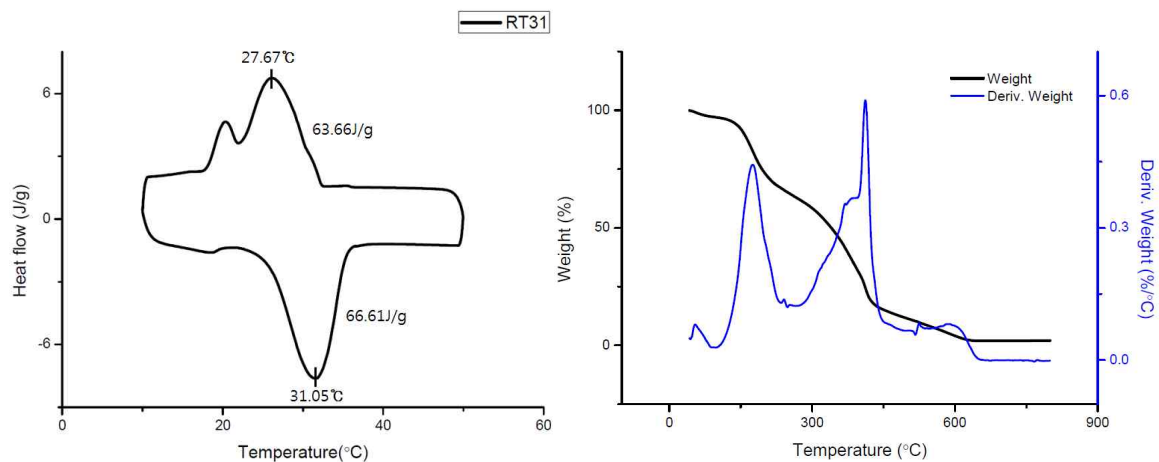
- 본 연구에서 사용된 PCM은 RT31이라는 물질로서 Rubitherm사에서 제조된 것을 사용하였다. MPCM은 심물질을 RT31, 벽물질을 멜라민으로 하는 캡슐형태의 것을 사용하였다. 순수한 RT31은 29℃에서 상변화를 일으키며, 169kJ/kg의 잠열량을 가지는데

캡슐화 과정에서 외부 물질과 혼합하게 되면서 전체 질량대비 잠열량은 떨어진다. 본 연구에서 사용한 MPCM은 최종적으로 66.61kJ/kg의 잠열량을 가지는 것을 사용하였다. (그림 3.11)는 MPCM의 실제 모습과 주사전자현미경(SEM; Scanning electron microscopy) 이미지 분석을 통한 미세구조를 보여준다.



(그림 3.11) MPCM의 형태와 SEM 분석 결과

- MPCM(Microencapsulated PCM)의 형태와 SEM 분석결과 MPCM은 백색 파우더의 형태로서 마이크로 단위의 캡슐입자로 되어있었다. 즉, 작은 캡슐모양의 형태로 인하여 MPCM은 순수한 PCM이 가지고 있는 leakage 현상이 발생하지 않고 다양한 분야에 적용이 가능한 장점을 지닌 것으로 확인하였다.



(그림 3.12) MPCM의 DSC 분석 및 TGA 분석 결과

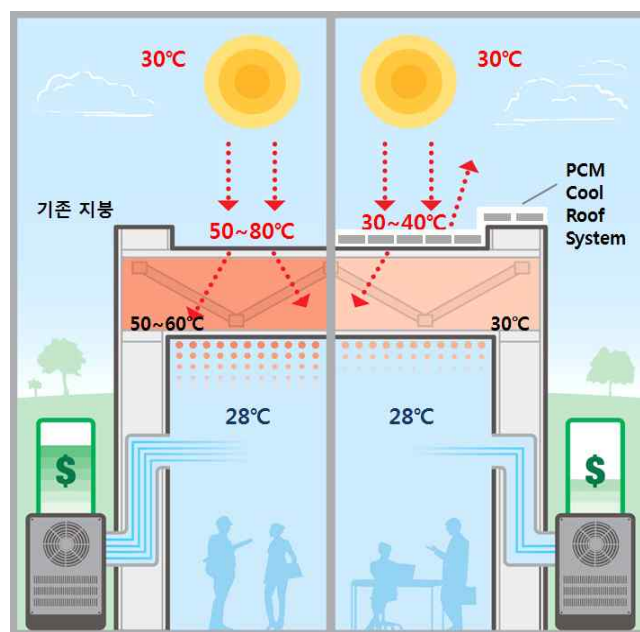
- MPCM의 열적 성능에 대한 분석은 시차주사열량계(DSC; Differential scanning calorimetry)를 통하여 확인할 수 있으며, DSC 분석은 PCM이 가지고 있는 축열 성능과 상변화 온도에 대한 다각적이 분석이 가능한 장비이다. 분석결과 70℃까지 승온 시 31.05℃에서 고체-액체의 상변화가 일어났으며 이때의 잠열량은 66.61J/g을 나타내었고, 다시 10℃까지 냉각시키는 과정에서 27.67℃에서 액체-고체의 상변화가 일어나며, 이때의 잠열량은 66.61J/g을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.
- RT31을 심물질로 하고 있기 때문에 RT31과 동일하게 27-32℃에서 상변화가 일어나고 있음을 그래프를 통해 확인할 수 있었다.

- 열중량 분석(TGA; Thermogravimetric analysis)을 PCM의 열적 내구성에 대한 분석을 실시할 수 있는데 그림을 보면 2번에 걸쳐 그래프가 급속하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 RT31과 멜라민이 열로 인하여 산화되는 구간이기 때문에 2군데에 걸쳐 각각 그래프의 기울기가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, RT31보다 멜라민이 들어간 MPCM이 열적으로도 안정성이 높은 것을 확인할 수 있다.

3) PCM Cool Roof System의 개념 및 개발현황

가) PCM Cool Roof System의 개념

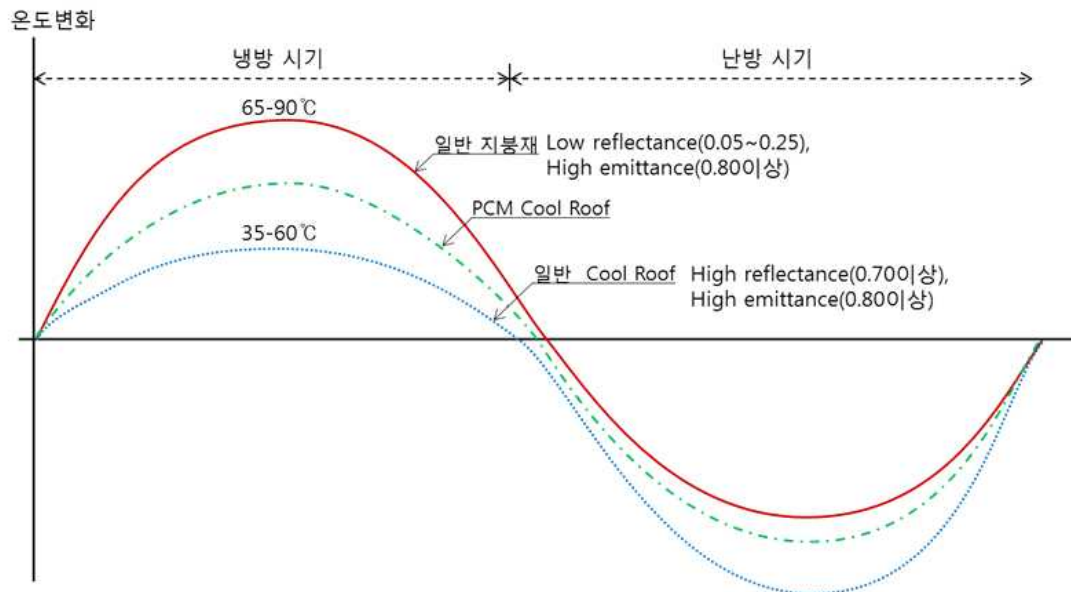
- PCM Cool Roof System은 PCM의 상변화 특성을 이용하여 지붕재의 여름철 과열을 막고 단열성능 증가를 통해 겨울철 난방부하의 증가를 막고자 하는 것이다. PCM의 온도가 상변화 온도에 도달하게 되면 열을 잠열의 형태로 축적하여 지붕 표면의 열이 현열의 형태로 저장하는 기존 지붕재와는 달리 일정한 온도를 유지시킴으로써, 도시가 과열되는 것을 막고자 하는 것이다. (그림 3.13)과 같이 기존 지붕의 온도가 50~80℃까지 상승하는 것과 대조적으로 표면의 온도를 30~40℃로 유지하여 지붕의 과열을 방지하는 것이 목적이다.



(그림 3.13) PCM Cool Roof System의 개념

- 도시 열섬현상의 저감을 위해서는 신축 건물뿐만 아니라 기존 건물에도 적용이 가능해야하므로 PCM Cool Roof System은 기존 지붕에 적용이 가능하도록 경량의 플레이트 형태로 개발한다.
- 표면 마감은 반사율과 방사율이 높은 재료로 마감하여 내부로의 열전달이 최소화되도록 계획한다. 표면 마감 처리 후 내부 중공층에 PCM을 삽입하여 내부 엔탈피 증가에 의한 상변화가 이뤄지게 되고, 구조체로의 열전달을 최소화하도록 한다.
- 도시 열섬현상 저감 방안으로 제시되는 쿨루프가 제시되고 있으나, 쿨루프는 하절기 냉방기에는 지붕을 통한 열획득을 최소화함으로써 냉방에 효과적이지만, 난방부하가 큰 우리나라와 같은 기후에서는 동절기 난방부하 증가를 일으킬 수 있으므로 연간 에너지 소비 측면에서는 에너지 소비 증가를 일으킬 수 있는 한계점이 있다.

이와 같이 PCM Cool Roof System은 쿨루프의 장점은 살리고, 단점을 보완하기 위해 개발된 것으로 쿨루프 보다는 표면온도 저감 성능이 다소 떨어지나, 건물 내부 온도의 변화 폭이 줄어들어 재실자의 쾌적성 측면에서는 쿨루프 보다 우수하고, 냉방과 난방 에너지를 절감함으로써 에너지 절약을 실현하는 것이 PCM Cool Roof System의 목표가 된다. 따라서, PCM Cool Roof System의 반사율은 PCM의 상변화를 위한 에너지 축적을 위해 Cool Roof에서 규정하는 것보다는 낮아질 수 있으나, 기존 지붕재의 반사율보다는 개선하여 개발하도록 한다.



(그림 3.14) PCM Cool Roof System의 온도변화 특성

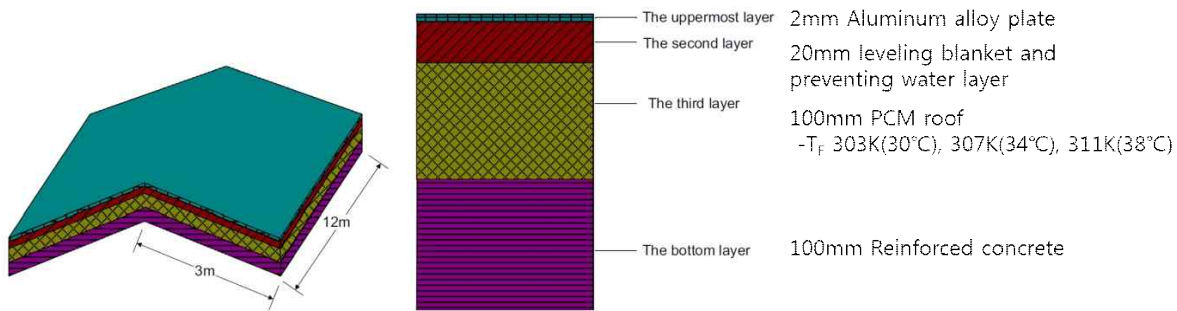
나) PCM Cool Roof System 관련 연구 동향

- PCM을 내장재가 아닌 외장재로 활용한 사례를 조사하였다.
- Karlessi. et. al는 PCM의 잠열 저장 성능을 이용하여 타일에 PCM이 포함된 도료를 도포하여 코팅하여 표면온도를 저감하는 연구를 수행하였다. 총 6가지 색상의 타일에 상변화 온도를 각기 달리하여 이에 따른 PCM의 축열성능을 이용한 표면온도 저감을 분석한 결과 PCM을 도포하였을 경우 색상에 따라 3~7°C 표면온도 저감 성능이 있는 것으로 조사되었다.

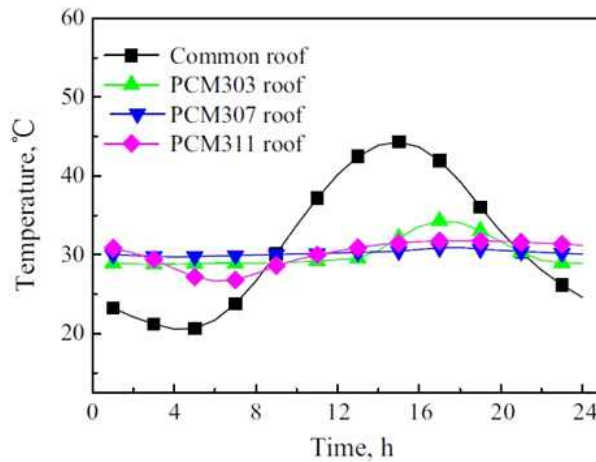


(그림 3.15) Tested tiles coated with common, cool and PCM coatings
(Source: Karlessi, 2011)

- Dong et. al.은 지붕 레이어에 PCM을 삽입하여 PCM의 변화에 따른 표면온도를 분석하였다. PCM은 지붕층의 콘크리트 상부에 위치하며 100mm두께로 상변화온도 30°C, 34°C, 38°C를 적용하였다. 기존 지붕마감재의 온도가 최대 45°C까지 상승하는 것과 비교하여 PCM을 삽입한 경우 지붕층의 표면온도가 30°C 내외로 안정적인 분포를 나타내는 것으로 조사되었다. PCM의 양이 많아 모든 PCM이 상변화를 일으키지 않아 안정적인 온도를 나타낼 수 있었던 것으로 분석되었다.

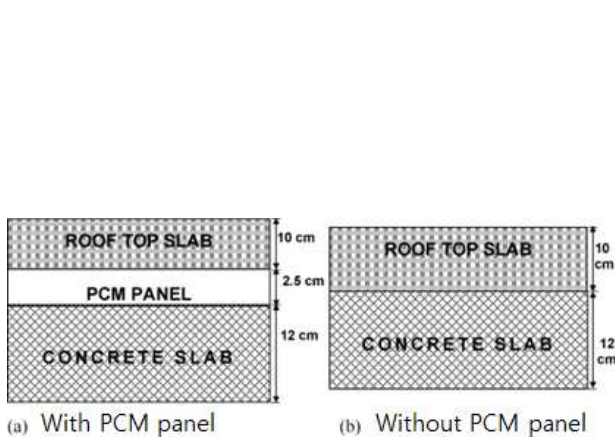


(그림 3.16) 지붕레이어 구성

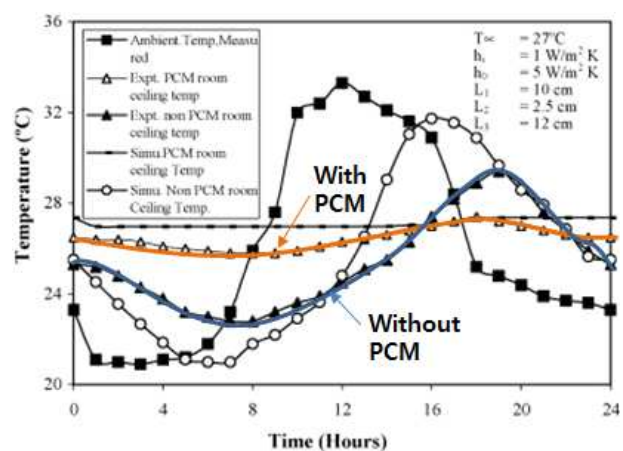


(그림 3.17) 분석 결과 지붕층의 온도 분포

- Pasupathy et. al.은 1.22×1.22×2.44m의 실험실 규모에서 지붕층에 PCM패널을 설치하여 천장면의 온도 변화를 실측하였다. PCM패널은 2.5cm두께로 삽입되었으며 열전달을 위하여 스테인리스강으로 제작, 상변화온도 26~28°C의 PCM을 적용하였다. 측정지역은 인도로 측정일 1~2월 중 평균온도 27°C인 날을 선정하여 비교분석을 실시하였다. PCM패널이 들어가지 않은 경우, 실내 천장면의 온도가 23~30°C의 분포를 보인 반면 PCM패널이 들어간 경우 실내 온도가 27~28°C로 비교적 일정한 온도 분포를 나타내는 것으로 나타났다.



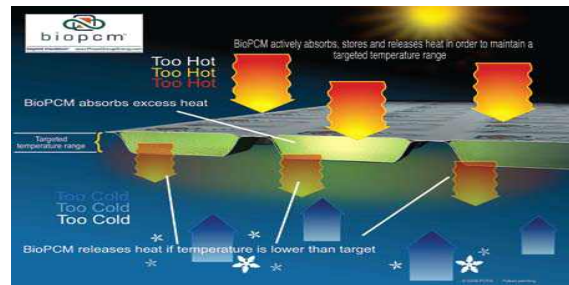
(그림 3.18)지붕 패널의 구성



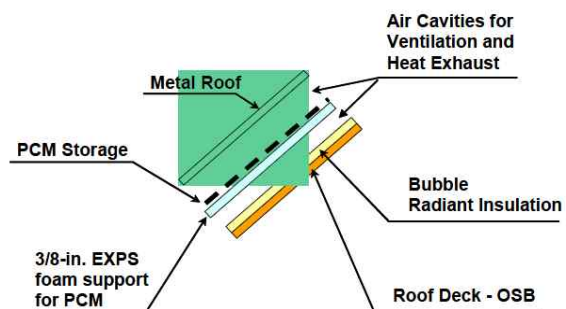
(그림 3.19) 분석결과-천장면 온도 분포

- PCM을 지붕마감재로 상용화한 사례는 미국의 Phase change energy solutions사에서 개발한 'BioPCMat™'이 대표적이다. PCM의 상변화 온도는 23°C, 25°C, 27°C 등 3종류가 있으며, 지붕과 벽체의 마감재로 일체화된 제품이다. 주거용 건물의 지붕층에 적용한 결과 여름철 지붕 중공층에서의 일반적인 열획득량의 90%를 줄일 수 있었으며 쿨루프와 함께 시공한 경우

열성능이 향상된 것으로 측정되었다. 제품을 적용 결과 기후에 따라 차이가 있지만 대략적으로 전체 에너지의 30%가량 절약할 수 있는 것으로 나타났다. 대략적인 PCM 패키지의 비용은 \$5/ft²(60,000원/m²)이 소요되었다. Mock-up 실험 결과 외기온이 25℃일 때 PCM roof는 38℃로 기존 마감재보다 18℃낮게 측정되었다.



(그림 3.20) BioPCMatTM의 모습 및 특징



(그림 3.21) BioPCMatTM의 적용 사례

4) 원천 기술 확보 방안 및 국산화 전략

- 쿨루프의 경우 하절기 일사를 반사시켜 냉방부하 절감에는 효과적이거나, 동절기 열획득 요소가 되는 일사를 반사시킴으로 인해 난방 패널티가 발생할 수 있는 단점이 있다.
- 난방부하의 비중이 높은 우리나라와 같은 기후조건에서 쿨루프의 적용이 제한되어 있었다. 본 연구에서는 하절기 냉방부하 저감 및 겨울철 난방 패널티 증가를 막기 위하여 PCM의 상변화를 활용하고자 한다.
- 국외 연구 사례조사 결과 지붕 마감재 내 PCM의 용량이 지붕 두께에 비해 많은 것으로 조사되었다. 국내에 유통될 때 적은 용량의 PCM을 통해 동일한 효과를 얻는 것이 중요하며 국내 기후 조건 및 건축자재 시장 현황에 적합한 제품 개발이 요구된다.
- 국내에서 생산 가능한 지붕마감재와 패키징된 PCM을 활용하여 PCM과 쿨루프의 효과를 얻고자 한다. 표면 마감 조건은 기존 마감재의 반사율보다는 높은 0.3~0.5를 유지할 수 있는 마감 형태를 조성하고 내부에 패키징된 PCM을 삽입함으로써 국내에서 생산 가능한 지붕 마감 기술을 활용하여 PCM Cool Roof System을 제작할 수 있을 것으로 예상된다.
- PCM Cool Roof System는 국외에서 거의 시도되지 않은 기술로서 우리나라의 기후 조건과 유사한 외국의 건축자재 시장에 보급이 가능할 것으로 판단된다.

(나) 최적의 상안정PCM(Shape stabilized PCM, SSPCM) type 개발기술 확립

1) 상안정 PCM(Shape stabilized PCM, SSPCM)type과 Cool Roof System간의 호환성 분석

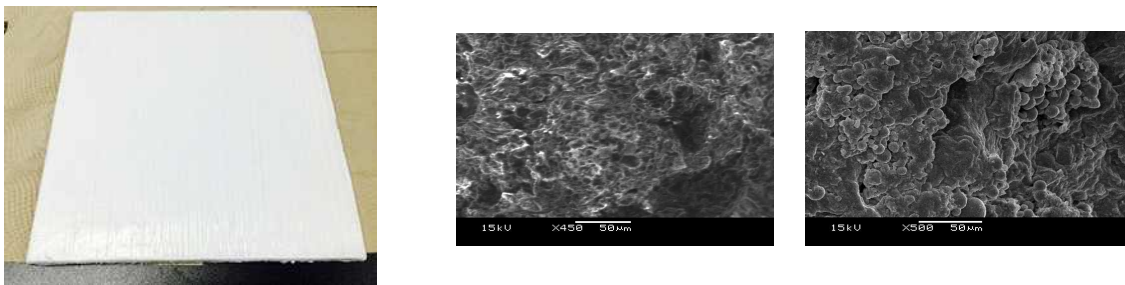
가) MPCM(Microencapsulated PCM) 기반 축열 도료 마감재 개발

■ 재료

- 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 외벽용 수성 도료와 옥상 방수용 도료(유성도료)에 MPCM을 혼합하여 축열 도료를 제조하고 이를 이용하여 타일에 적용하여 최종적으로 피크 온도를 저감시키는 것을 목적으로 수행하였다.
- 외벽용 수성 도료는 아크릴에멀전 수지와 고성능 실리콘 발수제를 주성분으로 하는 것을 사용하였으며, 옥상 방수용 도료는 아크릴계 우레탄 수지와 이소시아네이트를 주성분으로 하는 우레탄방수코트를 사용하였다.

■ 축열도료 제조 방법

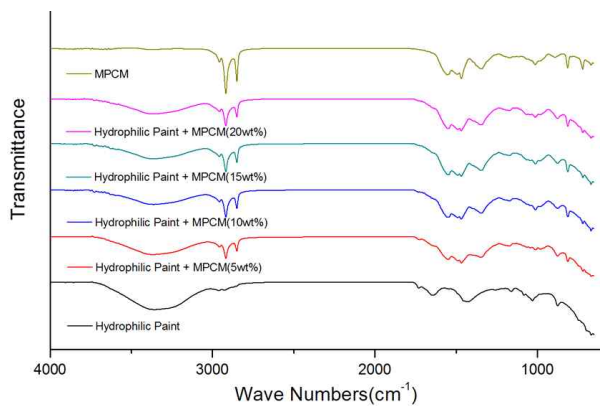
- 수성도료 60g에 물 5wt%(3g)을 희석한 후 MPCM을 수성도료의 질량비에 맞게 각각 5wt%(3g), 10wt%(6g), 15wt%(9g), 20wt%(12g) 첨가한 후, 500RPM의 속도로 5분동안 교반을 실시한다. 유성도료 45g에 경화제 15g을 혼합한 후 MPCM을 앞서 말한 혼합물의 질량비에 맞게 각각 10wt%(6g), 30wt%(18g), 50wt%(30g) 첨가하고 500RPM 속도로 5분간 교반을 실시하였다.



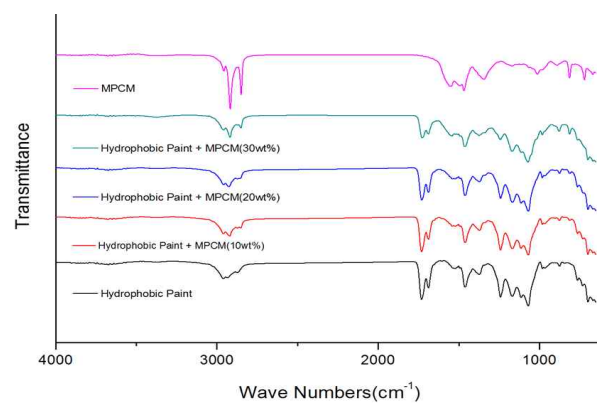
(그림 3.22) 축열타일의 이미지 및 SEM 이미지; 축열유성도료(좌)와 축열수성도료(우)>

■ MPCM과 도료의 화학적 결합 분석을 통한 호환성 평가

- MPCM과 도료의 호환성을 알아보기 위하여 MPCM 혼합물의 구조 간 화학적 결합을 푸리에변환 적외선 분광법(FTIR; Fourier transform infrared spectroscopy) 분석을 통해서 알아보았다. FTIR 피크에서, MPCM의 대표적인 피크점은 2926, 2855, 2872, 2962, 1379 그리고 725cm⁻¹에 나타나고 이는 CH₃, CH₂를 분자결합으로 갖는 물질임을 보여준다. 본 연구에서는 이를 통하여 MPCM의 심물질이 파라핀과 같은 알칸계열의 물질로 이루어져있음을 확인하였다.
- 또한, 수성도료 및 유성도료에 MPCM을 혼합한 샘플의 FTIR 분석결과를 보면, 수성도료와 혼합된 MPCM의 경우 혼합이후에도 MPCM이 가지고 있는 PCM 피크, 즉 2900cm⁻¹대의 FTIR 피크가 존재하는 것을 확인하였다. 반면에 MPCM을 유성도료에 혼합한 경우, PCM의 성질을 나타내는 피크가 변형 및 사라졌다. 이는 MPCM이 유성도료와 혼합하는 과정에서 PCM의 성질이 변형되거나 사라졌기 때문인데, 결과적으로 유성도료보다는 수성도료에 MPCM을 혼합하는 것이 MPCM의 성능발현에 유리함을 알 수 있다.



(그림 3.23) MPCM + hydrophilic paint의 FTIR 분석



(그림 3.24) MPCM + hydrophobic paint의 FTIR 분석

■ DSC를 통한 축열성능 분석

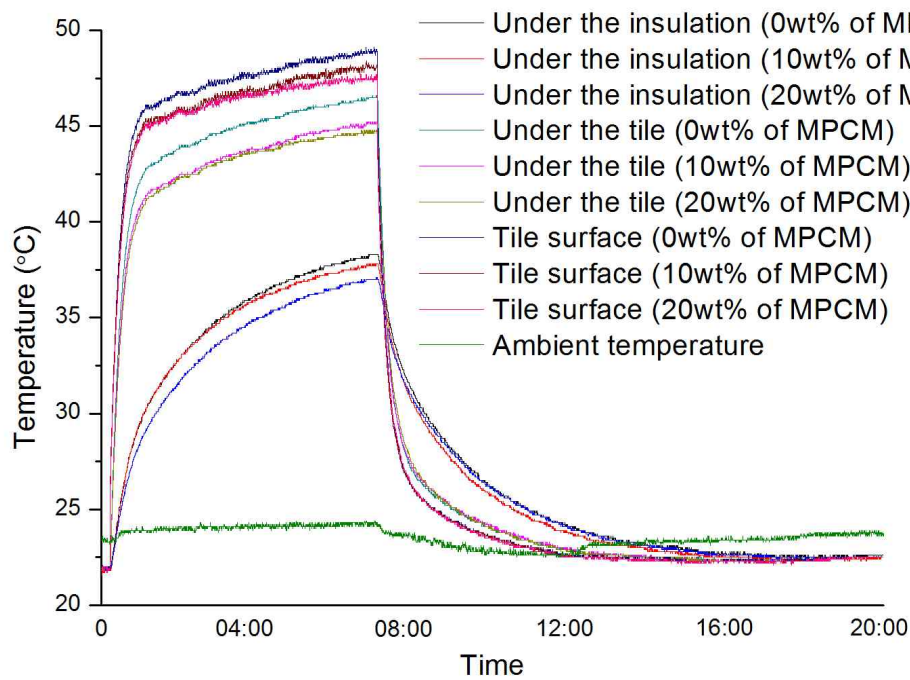
- DSC분석을 통해 MPCM 혼합도료의 녹는점, 냉각점, 잠열량 등의 열적 성능을 평가하였다. MPCM 혼합물의 녹는점은 질량비와 상관없이 MPCM의 녹는점과 비슷하게 나타나는 것으로 확인하였다. 하지만 냉각 시 상변화가 MPCM보다 더 낮은 온도에서 일어나는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 MPCM이 도료와 혼합함에 따라 과냉각현상이 더 심해졌기 때문이다. 또한 MPCM의 질량비가 증가함에 따라 수성 도료와 MPCM 혼합물의 잠열량이 비례적으로 증가함을 확인하였다.

<표 3.1> DSC analysis of MPCM/paint(Hydrophilic, Hydrophobic) composites

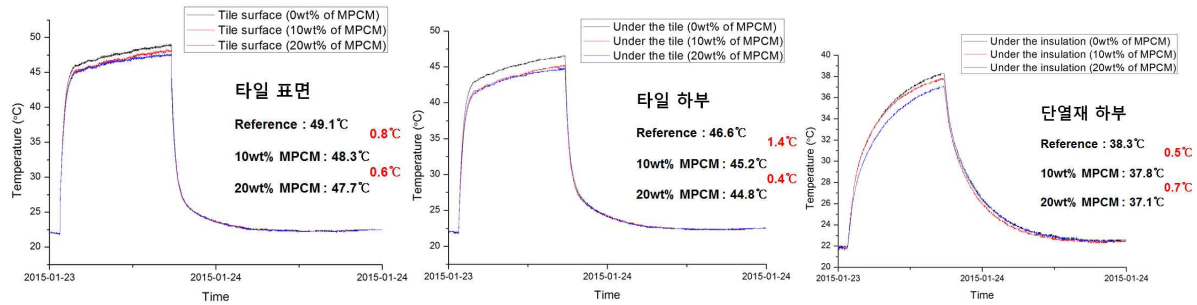
Sample	Melting point (°C)	Latent heat capacity (J/g)	Freezing point (°C)	Latent heat capacity (J/g)
MPCM	31.46	80.37	32.05	80.11
Hydrophilic paint + MPCM 5wt%	29.70	3.823	26.77	3.676
Hydrophilic paint + MPCM 10wt%	29.68	6.854	26.81	6.384
Hydrophilic paint + MPCM 15wt%	29.73	9.547	26.72	9.629
Hydrophobic paint + MPCM 10wt%	31.63	4.826	25.27	3.935
Hydrophobic paint + MPCM 30wt%	31.51	4.922	26.08	3.956
Hydrophobic paint + MPCM 50wt%	32.76	15.97	25.79	10.51

■ 축열 도료가 적용된 타일의 전열 해석 분석

- MPCM과 도료를 혼합하여 제조된 축열도료를 도포한 축열타일의 전열해석을 실시하였다. 전열해석 실험을 위해 200mm × 200mm × 7mm (l × w × t) 크기를 갖는 타일에 수성 축열도료 10g을 도포하여 축열 타일을 제조하였다. 제조된 축열타일은 5mm 두께의 단열재 위에 설치하였으며, 열원을 공급하기 위하여 50W의 할로젠램프를 470mm 떨어진 곳에 위치시킨 후 램프를 조사하여 열원을 공급하였다.
- 결과적으로, 타일 표면의 피크온도를 살펴보면 MPCM이 0, 10 그리고 20wt%가 들어갈 때 각각 49.1, 48.3 그리고 47.7°C임을 보였다. 타일 하부에서는 각각 온도가 46.6, 45.2 그리고 44.8°C로 나타남을 확인하였고 최종적으로 단열재 하부에서는 38.3, 37.8 그리고 37.1°C임을 확인하였다.
- 또한 MPCM이 20wt% 들어간 경우, MPCM이 혼합되지 않은 경우보다 평균 1-2°C 정도의 온도저감 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.



(그림 3.25) MPCM 기반 축열 타일의 동적 열전달 해석

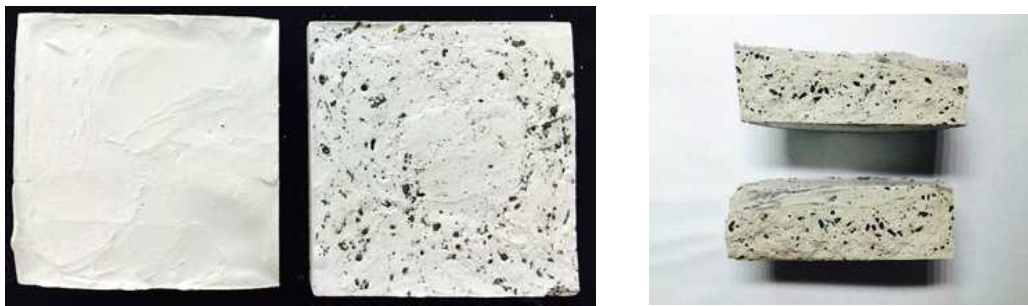


(그림 3.26) 각 부위에 대한 MPCM 기반 축열 타일의 동적 열전달 해석

2) Cool Roof System 적용을 위한 SSPCM(Shape stabilized PCM, SSPCM) 제조

가) SSPCM(Shape stabilized PCM; 상안정 PCM) 적용을 통한 축열 석고보드 마감재 개발

- 기 연구를 통해 제조된 SSPCM은 자체적으로 표면장력 및 모세관 현상으로 인하여 leakage 현상이 없는 것을 확인하였다. 최종적으로 제조된 SSPCM은 함침율 55.9%에 잠열량이 110.9J/g인 것으로 확인하였으며, 상변화 온도는 n-octadecane과 동일한 것으로 분석하였다.
- 이러한 고열효율을 가지고 있는 SSPCM의 건축물 적용 가능성을 높이기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 SSPCM을 석고 파우더에 적용하여 축열 석고보드를 개발하였다. 현재는 SSPCM과 석고의 호환성을 검토하는 선에서 연구가 수행되고 있다. 개발하고 있는 축열 석고보드 이미지는 (그림 3.27)에 나타내었다.



(그림 3.27) 제조된 축열 석고보드와 축열 석고보드의 단면 이미지

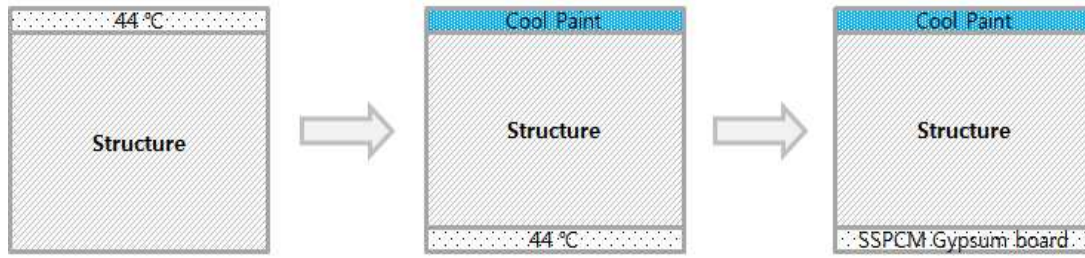
나) Packing type PCM 적용을 통한 열섬현상 저감 성능 분석

- PCM의 축열성능을 극대화하기 위하여 대용량의 PCM을 나일론 소재의 투명팩을 주입시켜 Packing type PCM을 제조하였다. Packing type PCM은 그 자체로 leakage에 대한 염려가 없고 상당한 양의 PCM을 주입시킬 수 있기 때문에 추후 개발될 cool roof system 적용에 있어 긍정적인 영향을 발휘할 것으로 기대한다.
- PCM을 지붕층에 적용하는 것을 고려하여 기존 건축물에 적용하기 적당한 28~31℃보다 melting point가 높은 Eicosane (35 ℃)과 Docosane(44 ℃)을 셀시우스 코리아에서 수급하여 제작하였다. 크기는 30cm x 30cm 사이즈의 팩을 네 구간으로 나누어 각각 0.8g의 순수한 PCM을 투여하였다.



(그림 3.28) Packing Type PCM 모식도 및 이미지

- 추후에 Packing Type PCM을 실내측에 적용과 동시에 가장 외측면에는 여름철 열섬현상 저감 효과가 우수한 쿨페인트를 적용하여 여름철과 겨울철 모두 효율적인 Cool Roof System을 설계할 계획에 있다.



(그림 3.29) Packing Type PCM 적용 위치 고려 및 고축열 건축 내장재 적용 안

(다) 옥상 마감유형 실태 조사 및 표면온도 측정 실험

1) 국내 지붕재 유형 및 특징 조사

- <표 3.2>은 건물에서 적용되는 지붕재의 유형 및 특징을 정리한 것이다.
- 본 연구에서는 실태조사에 해당하는 지붕의 형태는 평지붕으로 한정하였으며, 몰탈 마감과 우레탄 마감을 모두 대상으로 선정하였다.

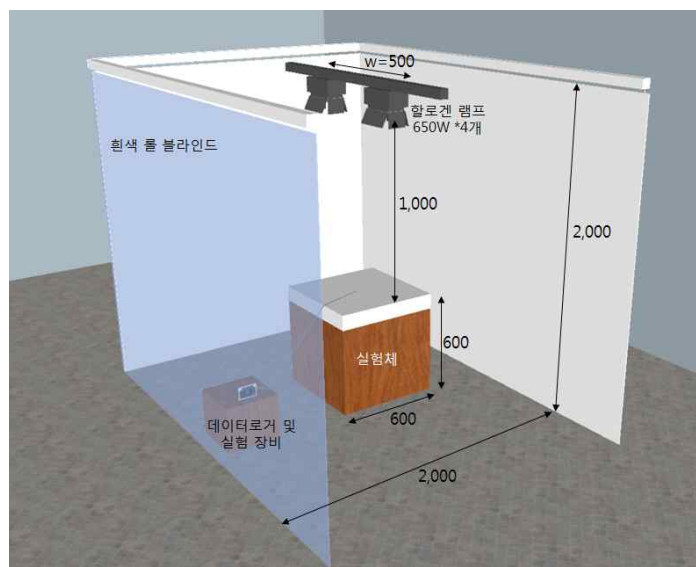
<표 3.2> 국내 지붕재 유형 및 특징

구분	지붕재료	분류	특징	건물 용도	적용사례
경사 지붕	기와	점토기와	점토를 원료로 고온소성하여 만든 오지기와와 표면에 오지물(유약)을 칠하여 소성한 유약기	주택	
		적삼목기와	낙엽송, 가문비, 전나무, 참나무 등을 다듬은 널판으로 상하 겹침은 보통 3겹으로 시공	주택	
		시멘트기와	시멘트와 모래를 갠 모르타르를 틀에 채우고 표면을 매끈하게 하기 위해 시멘트가루를 뿌린 뒤 양생하여 만든 기와	주택	
	금속	도장강판 (컬러강판)	열연강판(초기절판) 표면에 있는 불순물을 염산이나 황산으로 제거한 후 롤과 롤 사이를 통과시키면서 압력을 가해 원하는 두께로 조절한 후 열처리하여 알루미늄, 아연을 도금하고 특수도료를 코팅해서 가공한 것	아파트, 단독주택, 대형공장	
		스테인리스강판	저탄소강에 대량의 크롬 또는 크롬과 니켈을 가한 것	대형건축물(공항, 고속철도, 터미널) 미술관, 극장, 체육관 등	
		징크(ZINC)	전기분해한 아연에 소량의 티타늄과 구리를 첨가한 합금제품알루미늄과 아연합금으로 도금된 갈바늄 (아연도금강판)	주택	

구분	지붕재료	분류	특징	건물 용도	적용사례
			Galvalume) 강판을 이용, 연속되는 전후면 코팅과 프레스 기술, 스톤칩 코팅에 의해 구성된 지붕재.		
		금속기와	알루미늄과 아연이 합금도금된 갈바늄강판을 사용한 기와	신축아파트, 빌라, 콘도, 리조트시설	
	아스팔트 청글	아스팔트 청글	양면에 아스팔트를 침투시킨 아스팔트 펠트에 무기질 유리섬유를 특수 용화해 번식이 없는 안료와 활석 또는 운모가루 등의 돌입자를 처리한 섬유판	전원주택의 경량지붕재	
	슬레이트	천연 슬레이트	얇게 갈라지는 점토질 수성암의 일종인 점판암(粘板岩)을 판 모양으로 박리 가공한 것	주택	
		인조 슬레이트	포틀랜드 시멘트와 석면을 86:14의 중량비로 하여, 시멘트에 적당량의 돌가루·안료(顔料) 기타를 혼입하여 압착성형(壓搾成形)한 얇은 판	발암물질이 함유된 석면 슬레이트 지붕은 철거 진행 중	
평지붕	슬래브	방수보호층 노출	누름 콘크리트 또는 보호몰탈노출, 자갈채움노출	주택, 상업용 건물 등	
		방수층 노출	노출 우레탄 방수		

2) 인공환경 실험동 구축

- 열섬현상과 관련하여 지붕의 변화에 따른 성능평가는 외기환경에서 축소모형 실험 및 Mock-up실험을 통해 진행되어 왔다. 그러나 외부환경에서의 실험은 특정 계절에만 실험이 가능하여 실험의 진행에 제한이 있다. 따라서, 본 연구에서는 지속적인 실험과 동일한 환경에서 실험이 가능하도록 (그림 3.30)와 같이 인공환경 실험동을 구축하였다.



(그림 3.30) 인공환경 실험동 모형도

- 즉, 인공환경 실험동은 크기 2m×2m×2m의 공간에 태양과 흡사한 발열을 내는 할로겐램프조명을 활용하여 외기온을 약 30℃인 하절기 조건을 모사하였다. 따라서, 인공환경 실험동에서 일출부터 일몰까지 총 4단계로 시간에 따른 일사량의 변화량을 측정하였다.

<표 3.3> 표준일 설정 및 실험일의 일사량 비교

Time		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Total																																				
표준 기상 데이 터	Maximum day (W/m ²)	316	475	669	788	875	897	833	783	669	488	266	7,059																																				
	Typical day (W/m ²)	255	383	511	641	586	658	575	569	464	188	208	5,038																																				
	Average day (W/m ²)	61	222	347	538	438	597	519	338	272	250	127	3,709																																				
실험 데이 터	Control day (W/m ²)	191	354	528	528	634	634	634	528	528	354	191	5,104																																				
	solar a source of light control	1 (50%)	2 (100%)	3 (150%)	3 (150%)	4 (200%)	4 (200%)	4 (200%)	3 (150%)	3 (150%)	2 (100%)	1 (100%)	-																																				
표준일과 실험일의 일사량 비교		Typical dayControlled day <table><caption>표준일과 실험일의 일사량 비교 (단위: W/m²)</caption><thead><tr><th>시간 (Hour)</th><th>Typical day</th><th>Controlled day</th></tr></thead><tbody><tr><td>8</td><td>255</td><td>191</td></tr><tr><td>9</td><td>383</td><td>354</td></tr><tr><td>10</td><td>511</td><td>528</td></tr><tr><td>11</td><td>641</td><td>528</td></tr><tr><td>12</td><td>586</td><td>634</td></tr><tr><td>13</td><td>658</td><td>634</td></tr><tr><td>14</td><td>575</td><td>634</td></tr><tr><td>15</td><td>569</td><td>528</td></tr><tr><td>16</td><td>464</td><td>528</td></tr><tr><td>17</td><td>188</td><td>354</td></tr><tr><td>18</td><td>208</td><td>191</td></tr></tbody></table>												시간 (Hour)	Typical day	Controlled day	8	255	191	9	383	354	10	511	528	11	641	528	12	586	634	13	658	634	14	575	634	15	569	528	16	464	528	17	188	354	18	208	191
시간 (Hour)	Typical day	Controlled day																																															
8	255	191																																															
9	383	354																																															
10	511	528																																															
11	641	528																																															
12	586	634																																															
13	658	634																																															
14	575	634																																															
15	569	528																																															
16	464	528																																															
17	188	354																																															
18	208	191																																															

3) 표면온도 측정 개요

- 인공환경 실험동에서의 실험은 (그림 3.31)와 같은 절차로 진행되었다. 즉, 본 연구목적에서 언급한 바와 같이 도심건물의 온실가스 저감을 위하여 지붕슬래브를 대상으로 하였다.



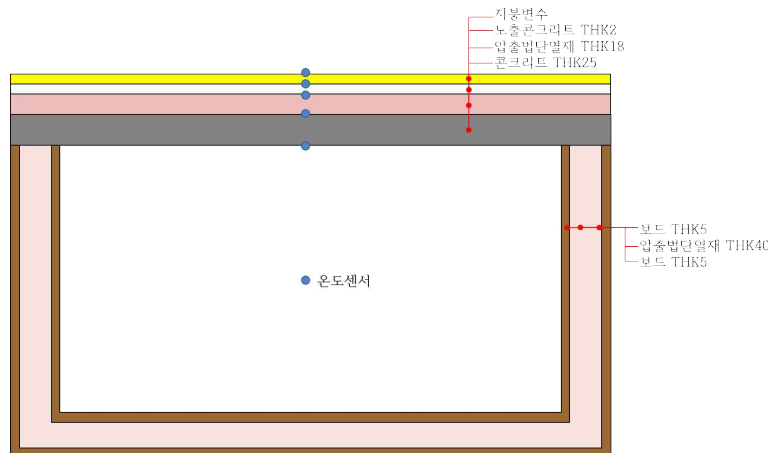
(그림 3.31) 실험 진행 개요

- 기존에 일반적으로 사용되는 지붕슬래브 재료를 기준으로 지붕마감 재료를 변경함에 따른 표면온도를 측정하고자 하였다.
- 이때, 모델크기는 일반 사무소건물의 약 1/10 스케일로 축소하여 600mm×600mm×600mm로 지붕을 제외한 벽체 및 바닥은 열 획득 및 손실을 최소화하기 위하여 40mm단열재로 구성하였다.
- 지붕마감재료의 종류는 우레탄방수(녹색/회색),쿨페인트, PCM 타일로 선정하였다. PCM타일은 기존 석재타일에 캡슐화 된 파우더 형태의 PCM을 수성페인트에 도포하여 제작하였다. 이때 사용된 PCM은 상변화 온도가 28℃의 제품이다.

<표 3.4> 기존 지붕 및 축소모형의 지붕 구성

기존 지붕재료 구성	비교대상 지붕재료의 구성

- 따라서, 본 연구에서 제작된 지붕재료의 구성도는 표 3.4와 같고 각 측정지점은 (그림 3.32)과 같이 지붕재료 각 층에 온도센서를 매입하여 일사량에 따른 표면온도와 각 재료층 온도 및 실내온도 등을 측정하였다.



(그림 3.32) 축소모형의 구성도 및 측정 온도센서 위치도

4) 반사율 측정

가) 측정 개요

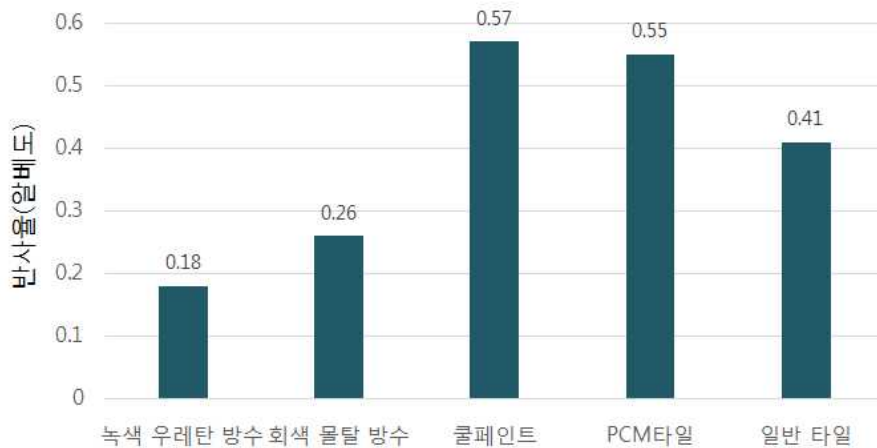
- 반사율 측정은 ASTM E1918을 참조하여 측정하였다.(표 3.5 참조).

<표 3.5> Measurement Standard & Method

ASTM E1918 측정방법	실험 시 실외 측정 방법
• 측정시간: 맑은 날 10am~2pm사이 • 측정포인트: 최소 3번 이상 측정하여 평균 냄 • 측정면과의 거리: 0.5m (측정면의 길이: 지름 4m 이상) • 측정시간: 최소 10초 단위로, 3분씩 3번 평균	• 측정일정: 2015년 1월 21일 2pm • 측정면과의 거리: 25cm • 측정면의 길이: 지름 60cm 이상 • 측정시간: 최소 10초 단위로, 10분 평균

나) 측정 결과

- 지붕재료의 반사율 측정결과 녹색우레탄방수마감은 0.18, 회색우레탄방수마감은 0.26, 쿨페인트는 0.57, PCM타일은 0.55, 일반타일은 0.41 로 각각 나타났다(그림 3.33 참조).
- 즉, 쿨페인트가 가장 높았고 PCM이 도포된 타일이 그 다음순으로 높게 나타났다. PCM을 도포하기 전 일반 타일의 반사율이 0.41인 것과 비교하면 도료에 PCM을 혼합하여 마감 색상이 흰색으로 변화하였기 때문이다.



(그림 3.33) 지붕재료의 반사율 측정값

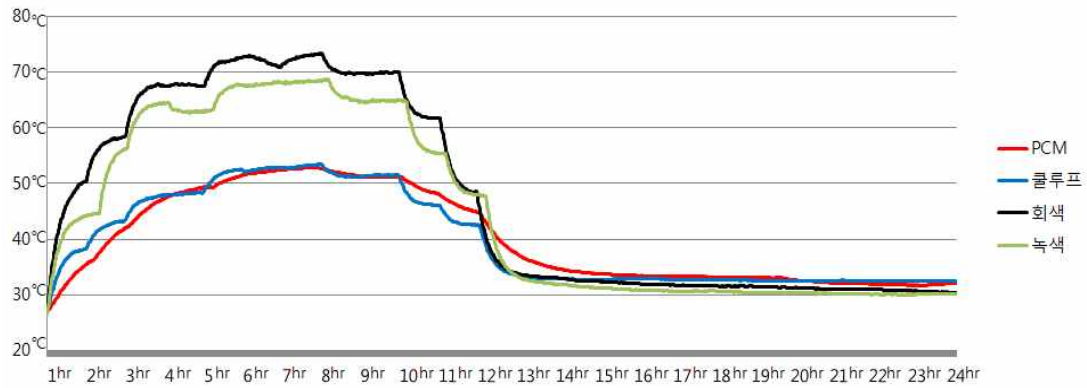
5) 인공환경 실험동의 표면온도 측정

- 인공환경 실험동에서의 지붕재료별 표면온도측정은 (그림 3.34)과 같다.



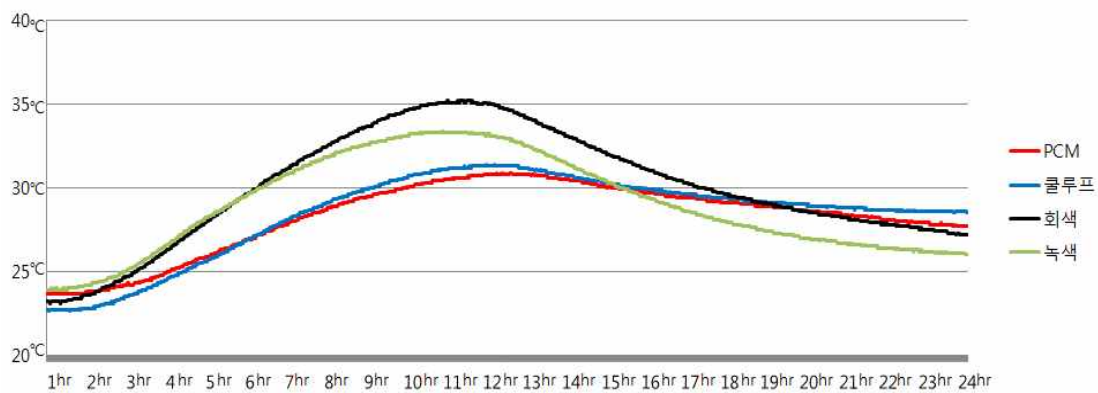
(그림 3.34) 실험 측정 모습

- 즉, 태양광과 흡사한 할로겐램프에 의해 외기온 25~26℃ 일 때 표면온도측정결과 기존 회색 및 녹색우레탄방수의 경우 최대 70℃이상, PCM타일 및 Cool 페인트는 최대 53℃로 약 17℃ 이상의 차이를 나타내고 있었다(그림 3.35).



(그림 3.35) Surface Temperature of Variable

- 각 재료별 표면온도에 따른 실내내부온도도 비슷하게 나타났는데 축열성능을 갖고 있는 PCM타일이 Cool 페인트보다 온도편차가 적게 나타나고 있음을 확인하였다(그림 3.36).



(그림 3.36) Room Air Temperature of Variable

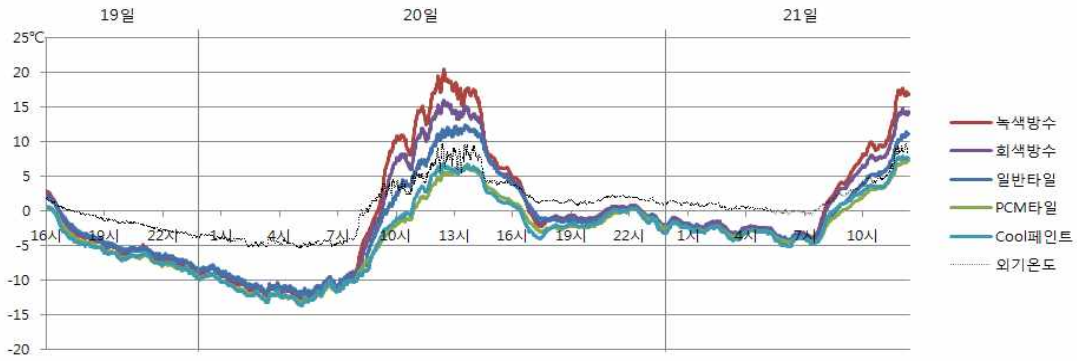
6) 동절기 외부 환경에서의 표면온도 측정

- 동절기인 2015년 1월 19일부터 2월 4일까지 지붕재료별 온도변화를 측정하였다. 이때, 운량, 강설량, 외기온 등을 동시에 분석하였다(그림 3.37).



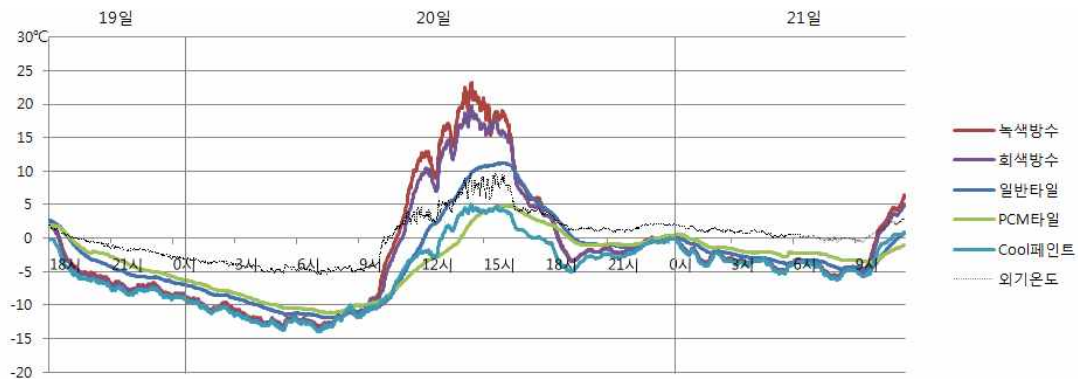
(그림 3.37) 동절기 측정

- 동절기 측정결과 지붕표면온도는 녹색방수우레탄이 20℃, 회색방수우레탄 15℃, 일반타일 12℃ 그리고 Cool 페인트와 PCM타일은 두 재료가 비슷하게 약 5℃로 각각 측정되었다(그림 3.38).

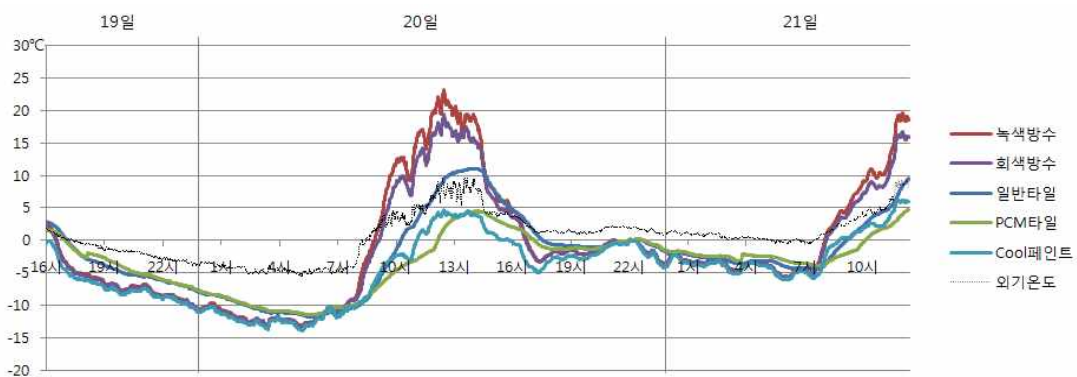


(그림 3.38) 동절기 표면온도 분포도

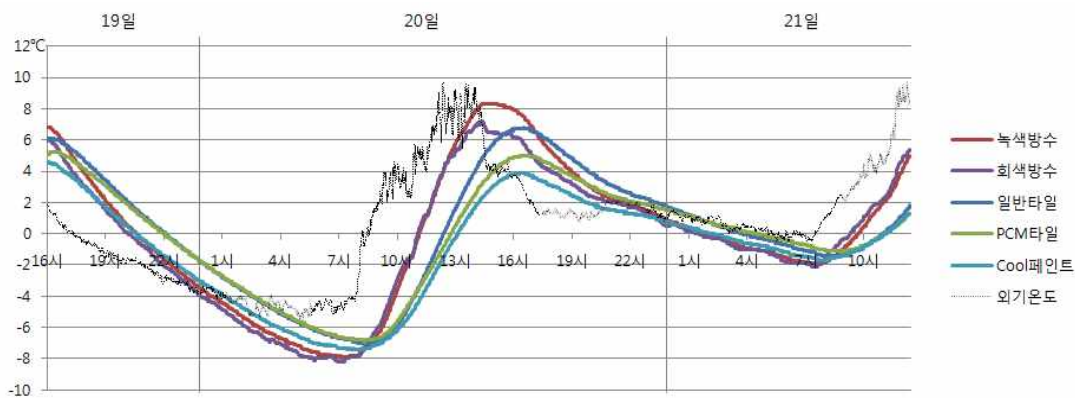
- 또한, 지붕재료의 각 층별 온도분포는 (그림 3.39~3.42)과 같다.
- 단열재 상부까지의 표면온도변화는 외기에 따라서 영향을 많이 받고 있었지만 내부구조체의 온도변화는 Cool 페인트와 PCM타일이 가장 적게 나타났는데 특히, 주간 야간 온도차이의 경우 PCM타일이 가장 적은 것으로 나타났다. 실내온도에서는 PCM타일이 Cool 페인트와 비교하여 약 0.4℃ 높은 것으로 나타났는데 이는 PCM타일의 축열효과라고 판단할 수 있다.



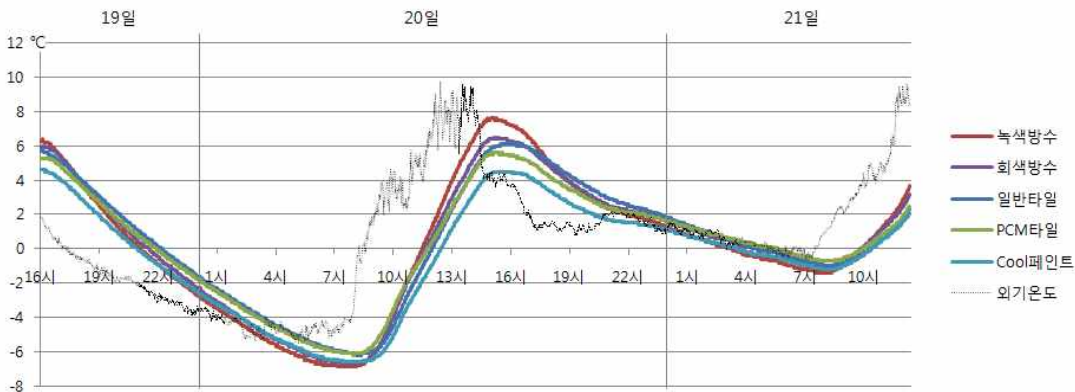
(그림 3.39) 몰탈상부 온도(동절기)



(그림 3.40) 단열재 상부 온도(동절기)



(그림 3.41) 콘크리트표면온도(동절기)



(그림 3.42) 챔버 내부 온도(동절기)

(라) PCM Cool Roof System 성능실험 및 설계

1) PCM Cool Roof System 성능실험

가) 실험 개요

- 본 연구의 최종목표인 PCM Cool Roof System을 설계하기 위하여 먼저 지붕 마감재료의 성능실험을 실시하였다.
- 성능실험은 마감재료의 적정 상변화온도에 따라 PCM에 흰색페인트의 도포유무 그리고 PCM에 일반타일, 목재, 알루미늄판의 조합으로 하였다. 특히, PCM인 경우 Melting Point를 지붕표면온도를 고려하여 44℃, 35℃의 두 가지를 선정하였다. 성능실험 마감재는 PCM Packing과 Cool페인트, 녹색과 회색 우레탄 방수이며 측정항목은 옥상마감재의 표면온도 및 기상 데이터, 실내 천장 열류량이다. 측정일은 2015년 5월 11일부터 6월 6일까지 진행하였다.
- 성능실험 내용은 다음과 같다.
 - ① PCM Packing의 열적성능 확인실험(1차, 흰색페인트(무))
 - ② PCM Packing의 열적성능 확인실험(2차, 흰색페인트(유))
 - ③ PCM Packing의 마감재료에 따른 열적 성능 확인실험(3차, 일반타일, 목재, 알루미늄)

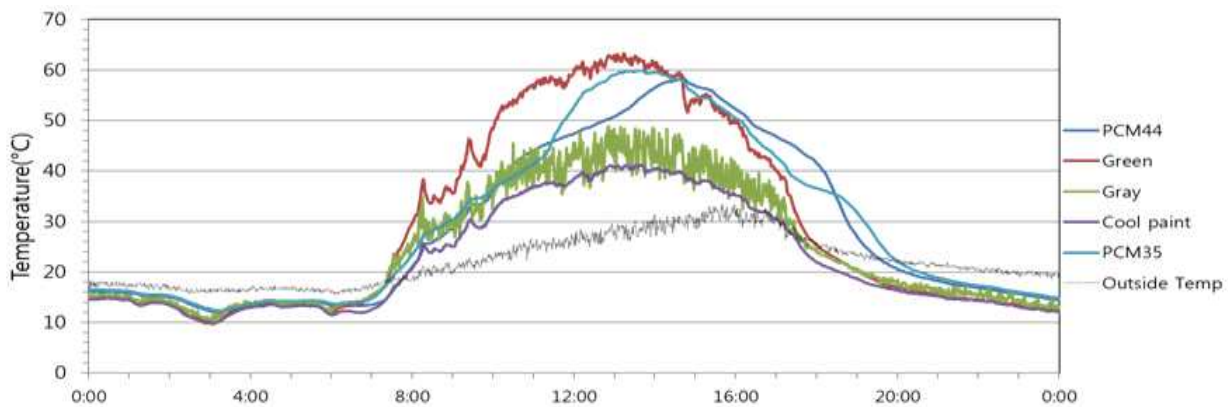


(그림 3.43) 목재, 알루미늄, 일반타일 실험체

나) 실험 결과

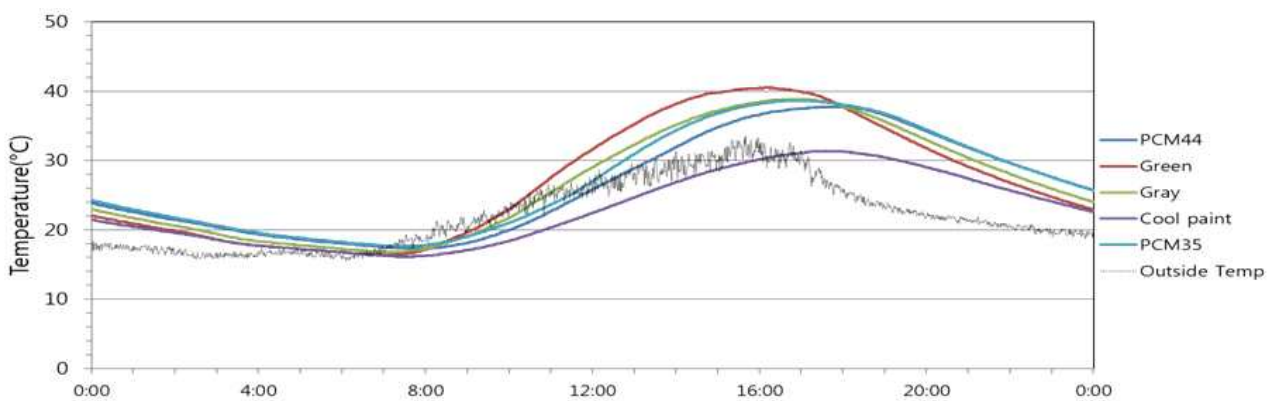
① PCM Packing의 열적성능 확인실험(1차, 흰색페인트(무))

- PCM Packing 시 흰색페인트가 도포 안 된 경우 몰탈상부온도는 기존지붕재료(녹색우레탄방수)와 비교해 차이가 없었다(그림 3.44). 한편, 흰색페인트 도포가 안 된 경우 PCM Melting Point 44℃, 35℃는 차이가 없는 것으로 나타났다.

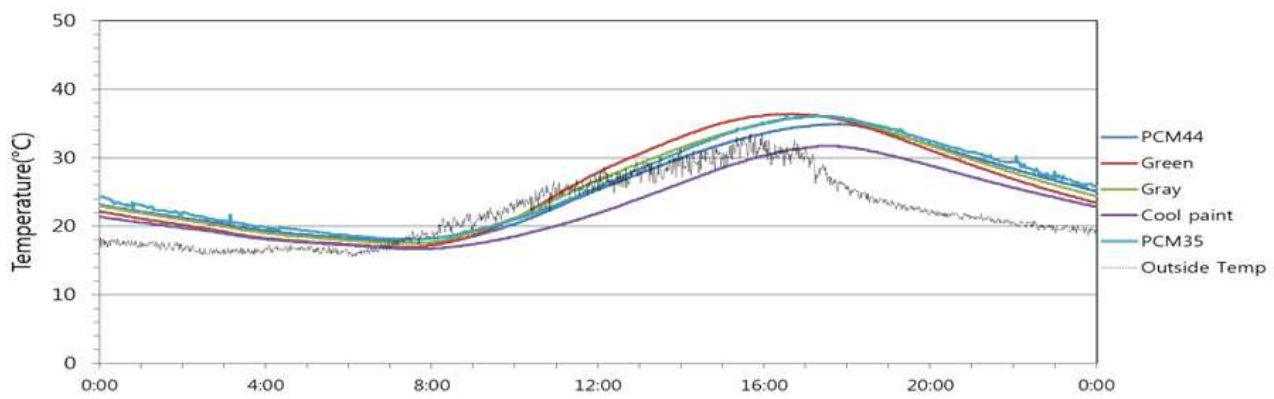


(그림 3.44) PCM하부(몰탈상부) 온도(1차-흰색페인트 무)

- 실내 천장면 온도(그림 3.45)와 실내온도(그림 3.46)의 경우 흰색페인트가 도포 안된 경우라도 PCM 자체의 축열 효과로 인하여 온도차가 발생하고 있었다.



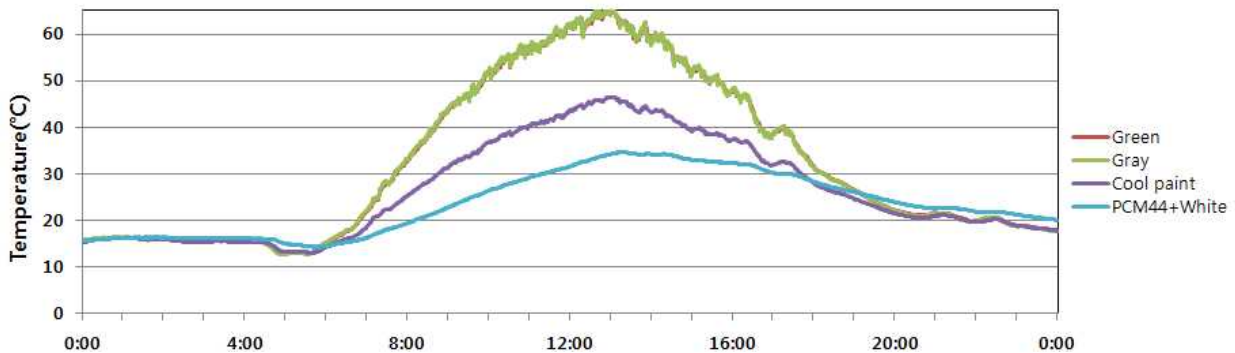
(그림 3.45) Room Ceiling Temperature(1차-흰색페인트 무)



(그림 3.46) Room Air Temperature(1차-흰색페인트 무)

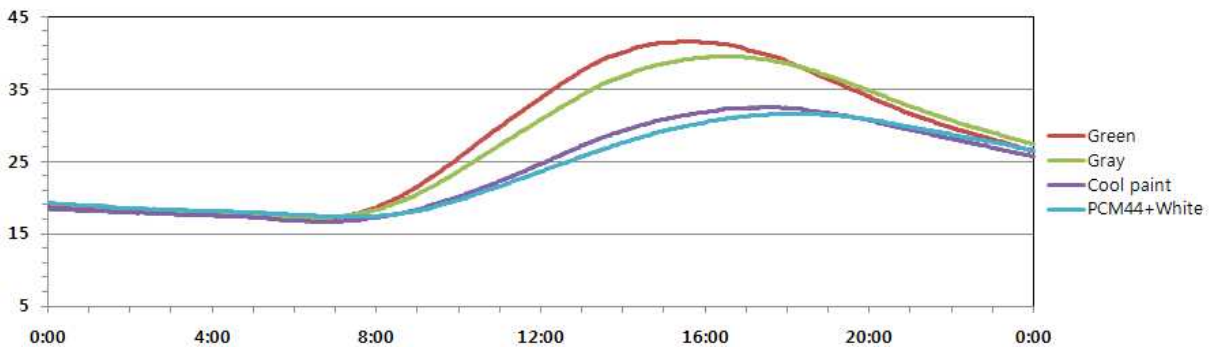
② PCM Packing 에 따른 열적성능(2차, 흰색페인트(유))

- PCM Packing에 흰색페인트를 마감할 경우 (그림3.47)과 같이 표면온도차가 크게 나타났다. 기존 지붕재료(녹색 및 회색우레탄 방수)와 비교하여 쿨페인트가 20℃, PCM 은 30℃ 이상의 온도차가 나타남을 확인하였다. 특히, 마찬가지로 PCM Melting Point 44℃, 35℃는 차이가 없는 것으로 나타나 PCM Melting Point 44℃를 대상으로 실험하였다.

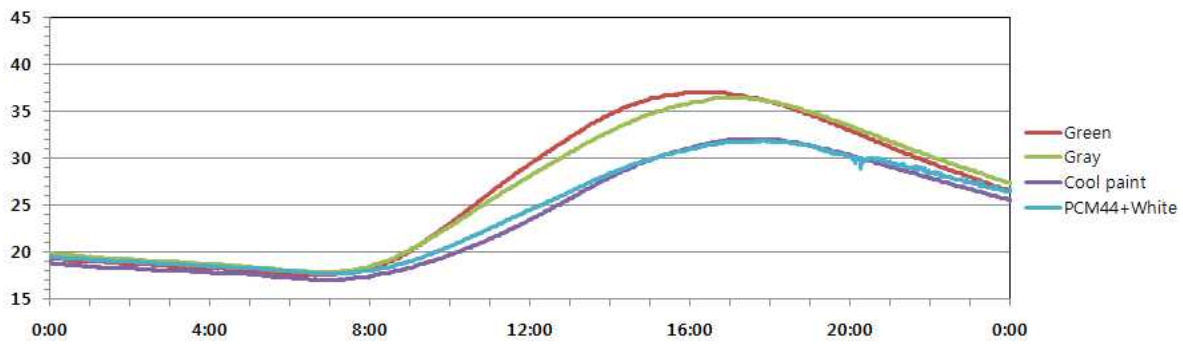


(그림 3.47) PCM 하부(물탈상부)(2차-흰색페인트 도포)

실내 천장면의 온도분포(그림 3.48)와 실내 내부온도 분포(그림 3.49)도 PCM과 쿨페인트가 약 15℃ 정도 낮은 분포를 보였다.

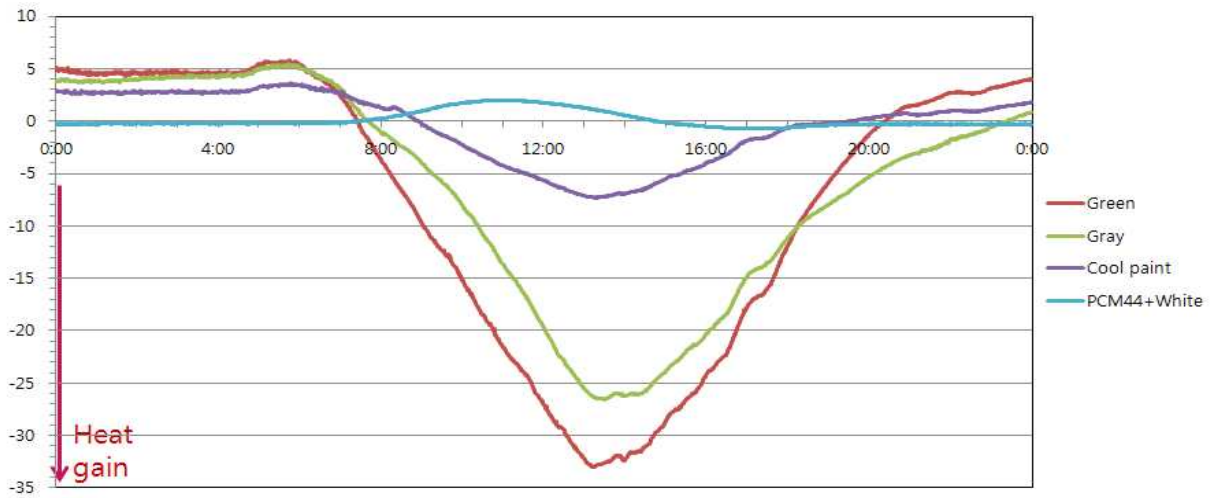


(그림 3.48) Room Ceiling Temperature(2차-흰색페인트 도포)



(그림 3.49) Room Air Temperature(2차-흰색페인트 도포)

- 또한, Heat Flux에 의한 열류량 분석 결과(그림 3.50)에서 쿨페인트를 포함하여 기존 마감재의 경우 천장면의 온도가 실내 온도보다 높게 유지되어 실내로의 열획득이 발생하는 것으로 분석되었다. 그러나, PCM을 사용한 경우 천장면의 온도가 실내 온도보다 낮게 유지되어 실내의 열손실 요소로 작용하여 여름철 냉방효과를 유도할 수 있는 것으로 나타났다.

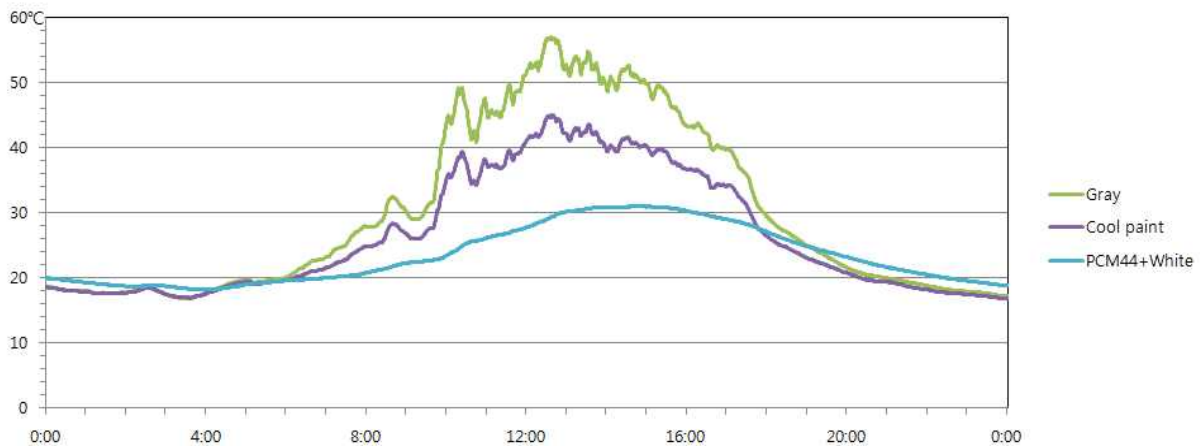


(그림 3.50) Room Ceiling Heat Flux

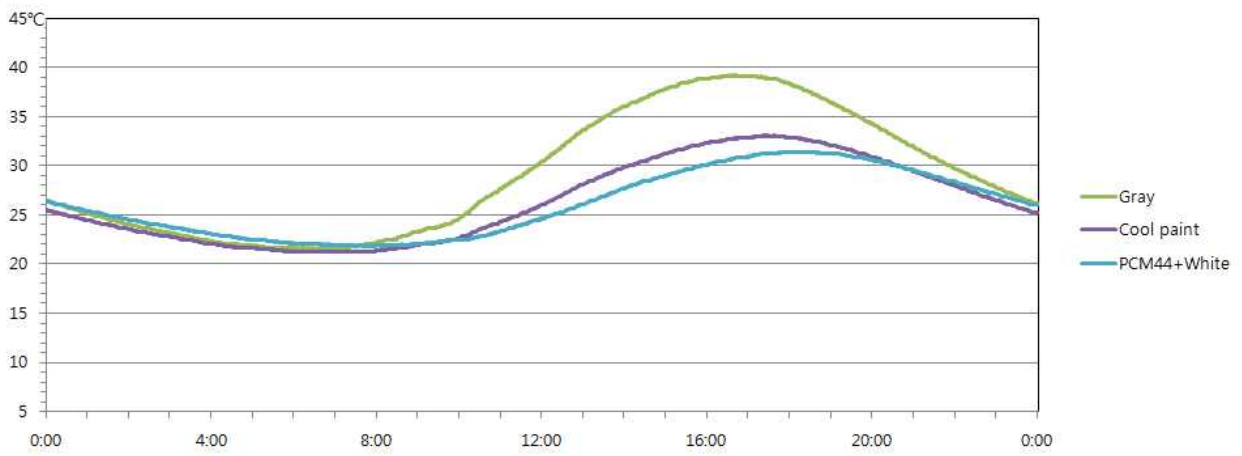
③ PCM Packing 마감재료에 따른 열적 성능 확인실험 (3차, 일반타일, 목재, 알루미늄)

㉔ 일반타일 마감

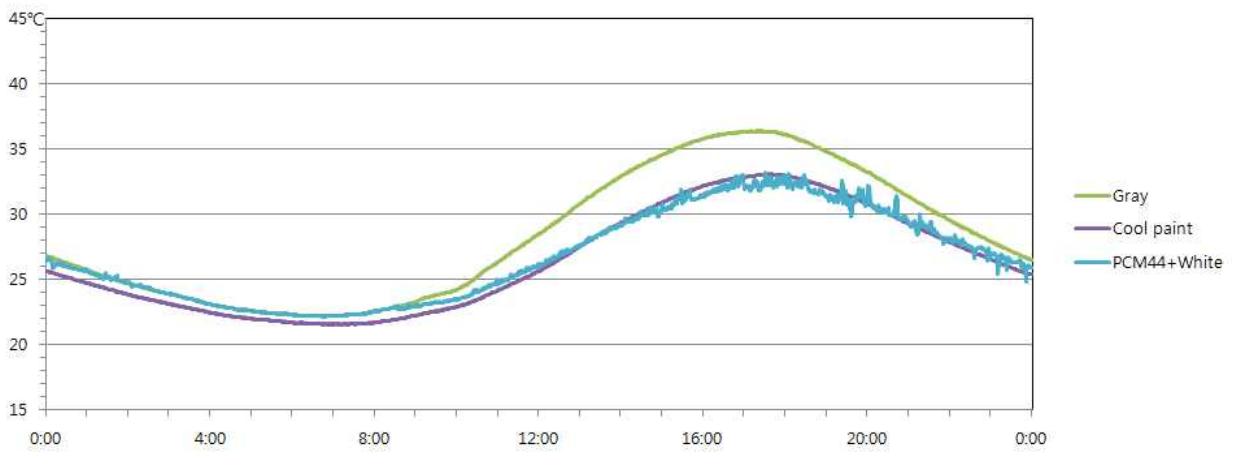
- PCM Packing 위에 일반타일을 마감한 경우 녹색우레탄과는 최대 약 25°C 쿨페인트와 약 13°C 정도 낮게 나타나고 있었다(그림 3.51).



(그림 3.51) Mortar(Under PCM) Temperature (Tile)(3차)



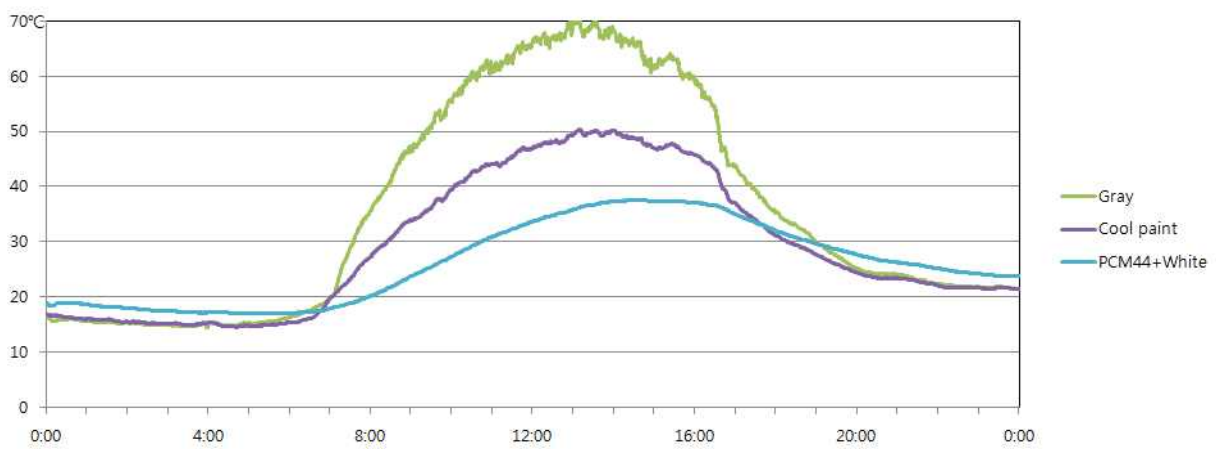
(그림 3.52) Room Ceiling Temperature (Tile)(3차)



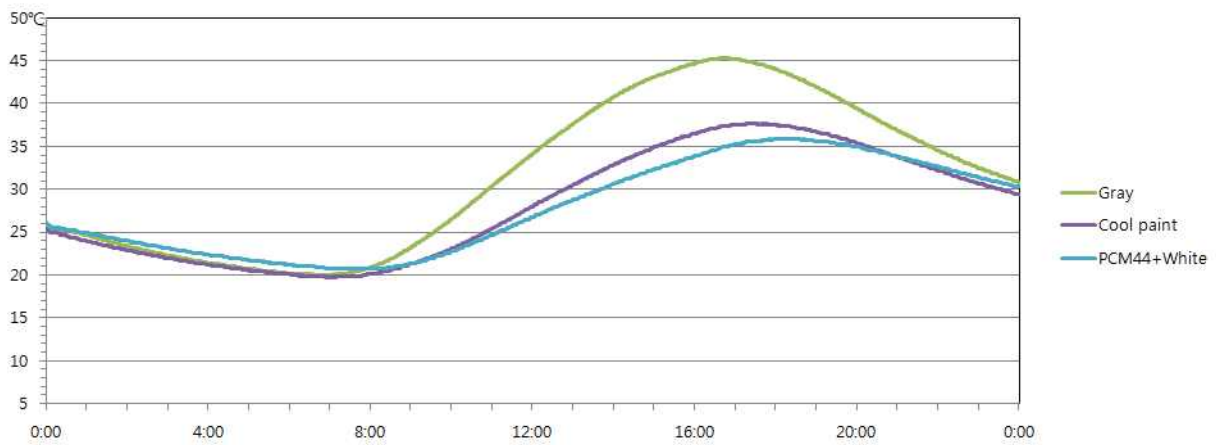
(그림 3.53) Room Air Temperature (Tile)

㉔ 목재 마감

- PCM Packing위에 목재를 마감한 경우 녹색우레탄과는 최대 약 30°C 쿨페인트와 비교시 약 10°C 정도 낮게 나타나고 있었다.



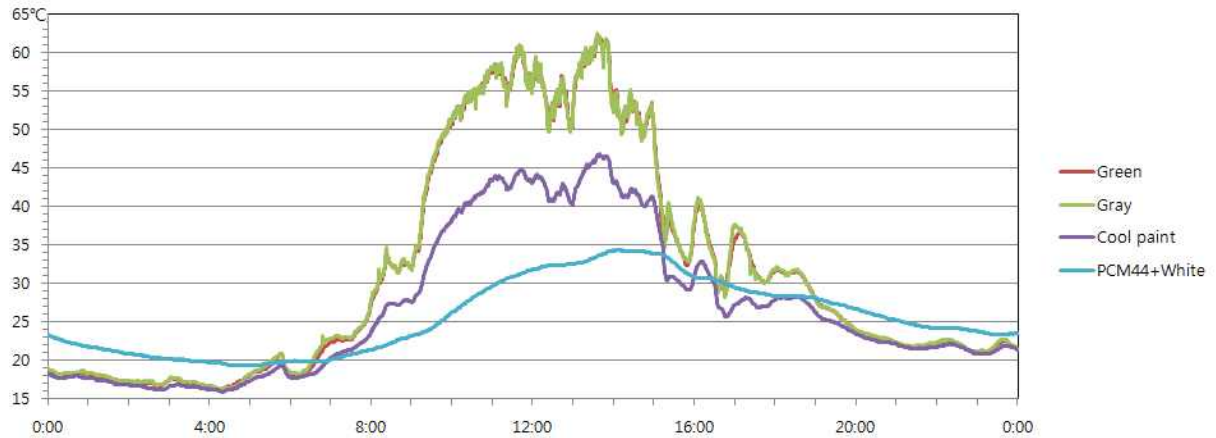
(그림 3.54) Mortar(Under PCM) Temperature (Wood)



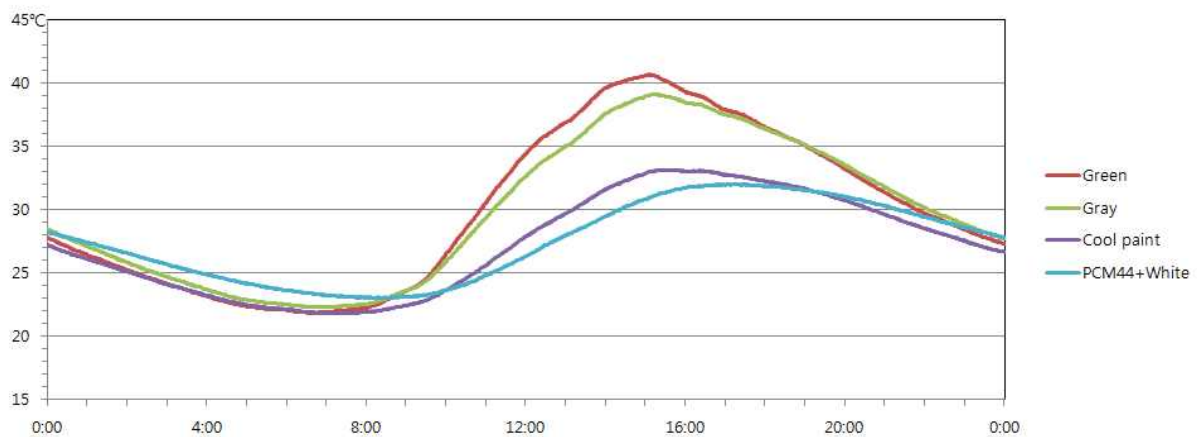
(그림 3.55) Room Ceiling Temperature (Wood)(3차)

㉔ 금속재(알루미늄) 마감

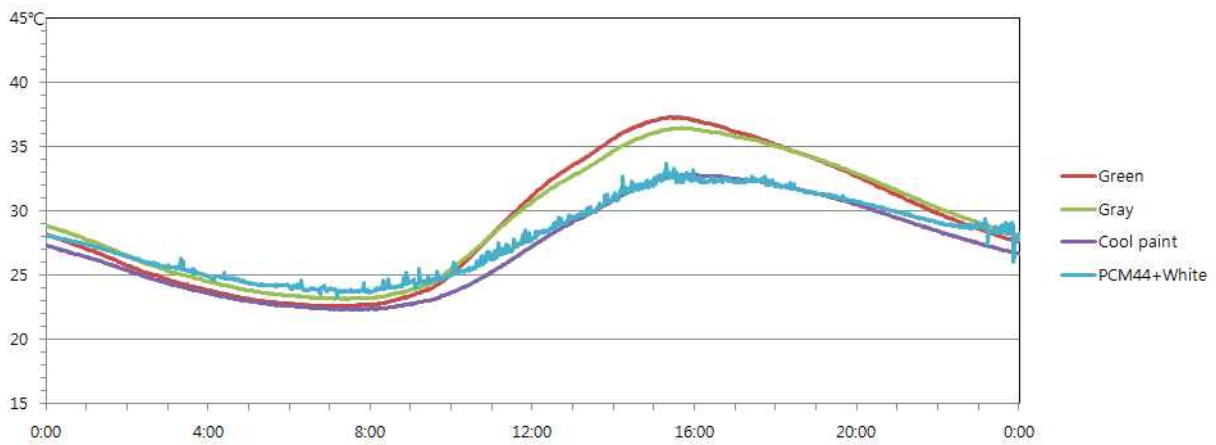
- PCM Packing 위에 알루미늄 마감한 경우 녹색우레탄과는 최대 약 25°C 쿨포인트와 약 10°C 정도 낮게 나타나고 있었다(그림 3.56)
- 한편, 알루미늄 마감재는 낮은 방사율로 재료로, 높은 반사율로 인해 주간 표면온도가 낮게 유지되었음에도 불구하고 야간에는 PCM Packing 재의 표면온도가 높게 나타나고 있었다.



(그림 3.56) Mortar (Under PCM) Temperature (Aluminum)(3차)



(그림 3.57) Room Ceiling Temperature (Aluminum)(3차)



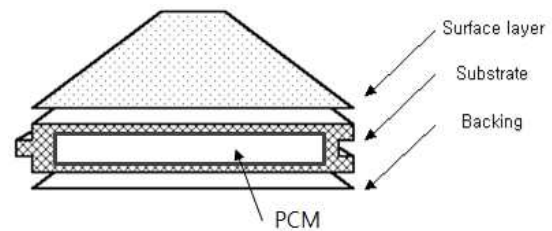
(그림 3.58) Room Air Temperature (Aluminum)(3차)

2) PCM Cool Roof System 설계

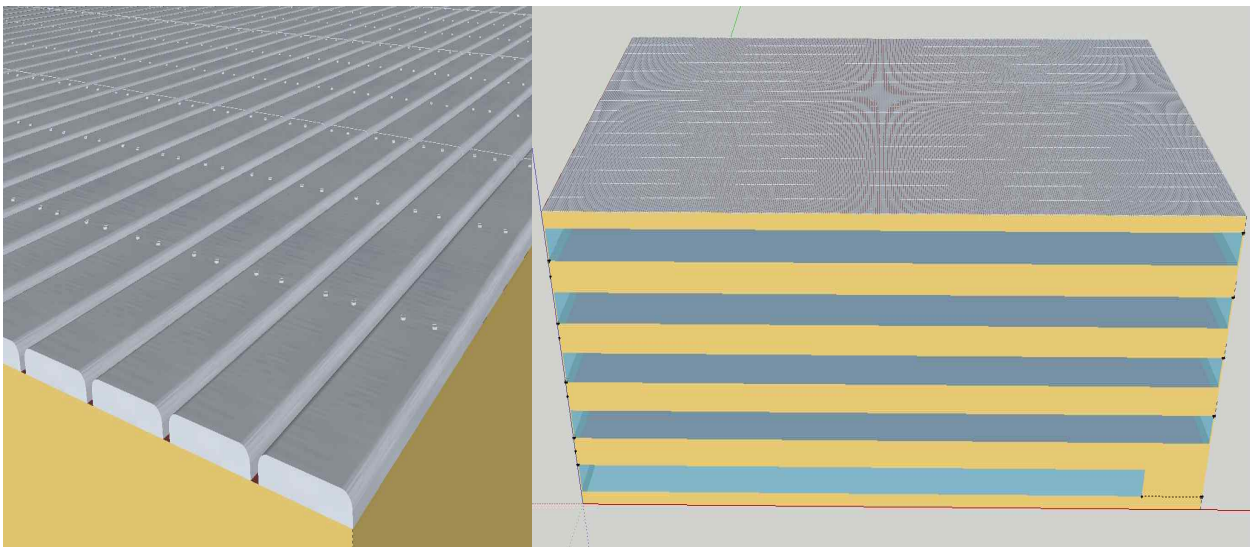
- 본 연구의 최종목표인 PCM Cool Roof System 설계는 플레이트의 형태로 기존건물 옥상에도 적용 가능하도록 계획하였다. 열섬현상 저감을 위해서는 신축건물뿐만 아니라 기존 건물에 적용 가능해야 그 파급효과를 높일 수 있다. 특히, 기존 건물에 적용 가능하기 위해서는 경량으로 건물의 하중에 영향을 주지 않는 반면 일정 강도 이상의 구조적 안전성을 확보해야한다.
- 특히, 앞장의 성능실험결과에 의하여 알루미늄, 타일, 목재 마감재에 따른 표면온도 분포에 관한 자료를 분석하여 플레이트의 재료를 선정하였다. PCM Cool Roof System 플레이트의 구성은 아래 그림과 같다(그림 3.59~3.60).



(그림 3.59) Pilot 플레이트



(그림 3.60) Pilot 플레이트 단면



(그림 3.61) PCM Plate 적용 옥상 모형

- 즉, (그림 3.61)과 같이 플레이트는 하부바닥판, 내부 PCM 중공층, 상부 표면의 덮개로

구성하였다. 이때, 덮개표면 부분은 반사율이 높은 표면 마감을 실시하여 표면온도 상승을 억제하도록 한다.

- 또한, 내부에 삽입되는 PCM은 건물 외부용으로 건물 내부에 사용되는 상변화 온도보다 높은 44℃등의 고온의 상변화온도를 갖는 PCM을 선정하도록 하였다.
- 특히, 플레이트는 모듈화하여 다양한 면적에 적용가능 하도록 제작하였다.

3) PCM Cool Roof System 적용을 위한 기존 도시의 현황분석

가) 개요

- PCM Cool Roof System 적용을 위하여 기존 도시 및 건물의 현황을 분석하였다. 먼저 PCM Cool Roof System의 적용 가능 면적을 산출하고, 도로면과 건물 등의 구성 비율 등을 조사 분석하였다.
- 분석대상 지역은 서울시를 선정하고 ‘국토계획 및 이용에 관한 법률’에서 제시한 용도지역 구분에 의해 도시 및 건물의 실태 조사를 실시하였다.

<표 3.6> 조사 지역 및 개요

단지유형	샘플 지역	조사면적	용도지역 종세분화	조사항목
저층주거 단지	성북구 성북동, 서대문구 연희동, 강남구 역삼동, 용산구 이태원동, 종로구 평창동	150 × 150	제1종 전용주거지역	▪ 대지면적 ▪ 건축면적 ▪ 건물층수 ▪ 대지 내 공지면적 ▪ 옥상구조물 ▪ 지붕형태
중·저층 주거단지	서대문구 홍은동, 강서구 등촌동, 강북구 번동, 강서구 화곡동, 성동구 송정동		제1종 일반주거지역, 제2종 일반주거지역	
공동주택 단지	동작구 대방동, 중랑구 신내동 6단지, 용산구 이촌동, 노원구 중계동 10단지, 노원구 중계1동	단지전체	제3종 일반주거지역	
업무단지	영등포구 여의도동, 강남구 역삼동, 서초구 서초동, 영등포구 여의도동, 중구 다동	250 × 250	중심상업지역 일반상업지역	

나) 기존 도시의 현황 조사 결과

(1) 저층주거단지

- 저층주거 단지는 건폐율이 낮아 대지 내 공지면적이 넓고 건물 간의 이격거리가 넓게 나타났다. 구성건물의 층수는 최소 1층, 최대 4층이며 80% 이상의 건물이 2층으로 높이편차가 매우 적었다. 저층저밀의 형태적 특성을 갖는 유형으로, 건물 간의 넓은 이격거리를 나타내어 건물 간 기류를 통해 도시 내 축적된 열을 배출할 수 있을 것으로 예상된다.

<표 3.7> 저층 주거단지의 샘플지역 조사 결과

샘플 도시	총건 물수	평균대지 면적(㎡)	평균 건축면적 (㎡)	평균 층수	공지 면적 (㎡)	옥상구조물		지붕형태	
						면적 (㎡)	비율 (%)	평지붕 (%)	경사 지붕(%)
연희동	58	332.4	188.5	2.0	188.5	10.7	11	91	9
성북동	39	579.2	211.0	1.9	373.3	13.8	9	41	59
역삼동	45	348.4	157.8	1.9	190.6	21.0	14	62	38
이태원동	24	685.5	239.9	2.2	445.5	21.7	17	95	5
평창동	39	469.6	184.9	1.9	287.2	35.9	23	49	51
평균	41	483.0	196.4	2.0	297.0	20.6	15	68	32

(2) 중·저층주거단지

- 대표 건물 유형으로는 다세대·다가구 주택, 공동주택 등으로 주거건물이 매우 밀집된 지역이다. 단독주택에 비해 대지 면적이 작고 건폐율 및 용적률이 큰 특징을 가지며, 건물 간의 이격거리가 매우 좁다. 또한 저층고밀의 형태적 특성을 가지며, 대지 내 공지면적이 적고 주변 건물 간의 영향을 크게 받으므로 기류나 대지의 녹화보다는 지붕면을 통한 축열을 제어하는 것이 효과적일 것으로 예상된다.

<표 3.8> 중저층 주거단지의 샘플지역 조사 결과

샘플 도시	총건 물수	평균대지 면적(㎡)	평균 건축면적 (㎡)	평균 층수	공지 면적 (㎡)	옥상구조물		지붕형태	
						면적 (㎡)	비율 (%)	평지붕 (%)	경사 지붕(%)
홍은동	79	239.8	127.3	2.4	112.5	-	-	100	0
등촌동	95	190.0	98.9	2.4	91.1	11.5	12	93	7
번동	89	207.4	104.7	2.3	102.7	13.5	15	92	8
화곡동	77	208.1	121.7	2.7	86.4	11.9	12	94	6
송정동	99	174.4	100.7	2.2	73.7	7.8	20	67	32
평균	88	203.9	110.7	2.4	93.3	11.2	15	88	12

(3) 공동주택단지

- 공동주택단지는 단지의 계획이 개별건물이 아닌 단지 단위로 계획되므로 단지 단위로 조사를 실시하였다. 공동주택 단지는 건폐율이 매우 낮고 구성건물의 층수가 높아 용적률이 높은 밀도특성을 가지며, 대지 내 옥외 공간 중 불투수성 포장 면적이 다른 단지 유형에 비해 넓은 편이다. 건물간의 간격이 다른 건물에 비해 넓으므로 기류를 통한 열섬저감이 가능할 것으로 예상된다.

<표 3.9> 공동주택단지의 샘플지역 조사 결과

샘플 도시	주동 수 (부대 시설)	총 단지면적 (㎡)	평균 건축면적 (1개동, ㎡)	평균 층수	공지 면적 (㎡)	옥상구조물		지붕형태
						면적 (㎡)	비율 (%)	
신내동	16(3)	57,572	676.5	11.3 (2.0)	45,142	0	0	경사지붕
이촌동	17(3)	57,016	646.2	21.8 (3.0)	43,396	0	0	경사지붕
중계동1	21(4)	88,939	694.3	14.7 (2.3)	78,176	0	0	평지붕
중계동2	17(3)	57,100	702.7	14.8 (2.3)	46,063	0	0	평지붕
대방동	14(4)	70,957	806.1	18.9 (2.3)	57,154	0	0	평지붕
평균	17(3)	66,317	587.8	16.3 (2.4)	53,986	0	0	-

(4) 업무단지

- 업무단지는 구성건물 규모가 큰 편으로 샘플지역 내 구성건물 수가 적고 대지 면적이 넓고, 용적률이 매우 높은 특성을 나타낸다. 단지 유형 중, 가장 높은 높이편차를 나타내어 구성건물 간의 규모 편차가 큰 것을 알 수 있었다. 업무단지는 고층으로 구성된 단지과 다양한 층수의 건물로 구성된 단지로 나뉜다. 개별건물의 규모가 매우 크기 때문에 높이편차가 클수록 구성건물 간의 영향을 크게 받으며, 도심지의 고층고밀이 형태적 특성을 대표하는 유형이라 할 수 있다.

<표 3.10> 업무단지의 샘플지역 조사 결과

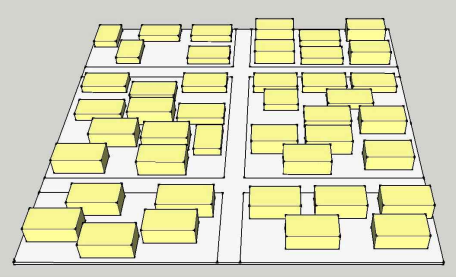
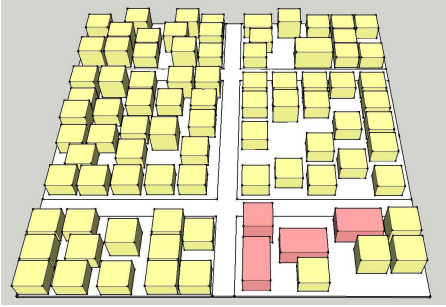
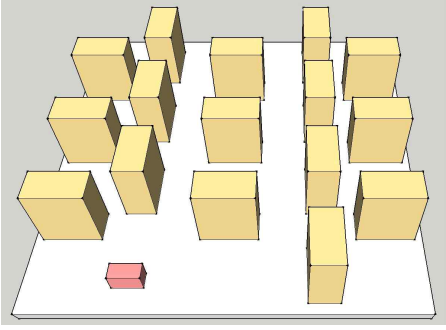
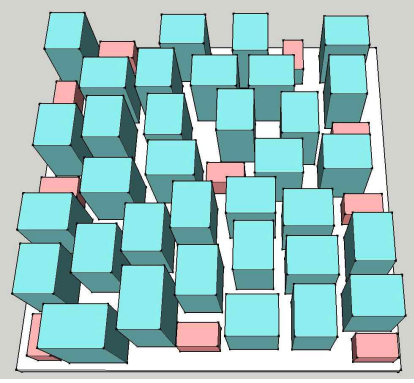
샘플 도시	총건 물수	평균대지 면적(㎡)	평균 건축면적 (㎡)	평균 층수	공지 면적 (㎡)	옥상구조물		지붕형태
						면적 (㎡)	비율 (%)	
여의도동1	42	1,406.1	697.7	10.8	708.4	112.5	29	평지붕
역삼동	55	1,170.8	525.8	11.3	645.0	93.0	17	평지붕
여의도동2	29	2,073.8	960.7	11.8	1113.1	167.6	32	평지붕
서초동	68	1,330.0	712.4	10.3	617.6	50.1	19	평지붕
다동	24	1,614.9	686.7	12.0	928.3	83.9	16	평지붕
평균	44	1,519.1	716.7	11.3	802.5	101.4	23	평지붕

다) 표준도시 및 건물 설정

- 실제도시의 특성을 반영한 기준모델 도출을 위해, 건물대지면적 분포를 기준으로 가장 많은 분포를 나타내는 범위를 설정하여 해당되는 건물들을 단지의 표본 값으로 선정하였다. 구성 건물의 특성이 다양한 경우, 구성 건물의 특성에 따라 대표 건물을 규모별 혹은 종류별로 분류하였다.
- 저층주거단지의 경우 건물의 유형은 단독주택으로 구성되었으며, 200-400㎡, 400-600㎡ 범위의 건물군을 대상으로 표본 값을 산출하여 각각의 대표건물 유형을 설정하였다.
- 중저층주거단지는 다세대·다가구 주택과 단독주택을 대표 유형으로 설정하였다. 다세대·다가구 주택의 범위는 100-250㎡ 범위를 설정하였다. 이중 150-200㎡, 200-250㎡ 범위의 건물의 비율이 가장 높았으며, 평균 층수는 2층으로 설정하였다.
- 공동주택단지는 600-800㎡ 범위의 공동주택 주동 건물과 일부 부대시설이 함께 있는 것으로 계획하였다. 해당 범위의 건물의 평균 장단변비를 산출하여 건물 형태적 특성으로 반영하였으며, 건폐율은 단지의 평균값이 20%를 적용하였다.

- 업무단지는 업무시설과 상업시설로 구성되어 있으며, 업무시설은 1,000㎡의 18층 건물을 대표건물 유형으로 설정하였으며, 상업시설은 250㎡의 5층 규모를 대표 건물로 설정하였다.

<표 3.11> 표준도시 설정

단지유형	해당 단지 특성		단지 모델링
저층주거 단지	단지 면적	22,500㎡	
	총 대지 면적	19,803㎡	
	공지 면적(도로 등)	2,697㎡	
	총 건축면적	7,920㎡	
	총 건물 연면적	12,474㎡	
	건물 용도	단독주택	
	건물 수	41개	
	기준 층수	2층	
중저층 주거단지	단지 면적	22,500㎡	
	총 대지 면적	17,864㎡	
	공지 면적(도로 등)	4,636㎡	
	총 건축면적	단독주택: 9,334㎡ 상업시설: 491㎡	
	총 건물 연면적	단독주택: 21,043㎡ 상업시설: 1,108㎡	
	건물 용도	단독주택 및 상업시설	
	건물 수	단독주택 84개, 상업시설 4개	
	기준 층수	3층	
공동주택 단지	단지 면적	62,500㎡	
	총 건축면적	공동주택 12,280㎡, 상업시설 200㎡	
	총 건물 연면적	공동주택 155,650㎡ 상업시설 600㎡	
	건물 용도	공동주택 및 상업시설	
	건물 수	공동주택 16개, 상업시설 1개	
	기준 층수	공동주택 13층, 상업시설 3층	
업무단지	단지 면적	62,500㎡	
	총 대지 면적	58,652㎡	
	공지 면적(도로 등)	3,848㎡	
	총 건축면적	업무시설: 27,156㎡ 상업시설: 3,930㎡	
	총 건물 연면적	업무시설: 331,907㎡ 상업시설: 19,650㎡	
	건물 용도	업무시설 및 상업시설	
	건물 수	업무시설: 34개 상업시설: 10개	
	기준 층수	업무시설: 12층 상업시설: 5층	

(마) PCM Cool Roof System의 경제성 평가

1) 개요

- 국내 PCM 도료의 대부분은 외국제품의 수입에 의존하여 시장 점유율이 그리 크지 않은 상황이지만, 에너지 저감에 대한 인식이 증대되고 추후 고유가 시대를 맞아, 점차 시장이 확대될 것으로 기대된다.
- 먼저 선행 연구를 바탕으로 열섬현상 저감에 따른 편익 항목들을 분석한 후, 계량화 및 가치화가 가능한 항목들을 도출하였다. 또한 에너지 평가 시뮬레이션 프로그램인 Energy Plus를 통해 PCM Roof를 적용한 오피스 빌딩의 연간 에너지 사용량과 면적 당 에너지 사용량의 저감량을 확인하였다.

2) 기존 연구를 통한 편익 항목 분석

- 옥상 마감재에 관한 국내 기존 연구를 통해 PCM Cool Roof를 사용하여 열섬효과 저감에 영향을 미치는 요소들을 도출하였다.
- 김수봉·장준근(2010)은 열섬현상 저감을 위하여 옥상녹화를 통해 발생할 수 있는 환경적 효과인 기온 저감과 에너지 절약 효과에 대해 경제적 분석을 실시하였다.
- 이희범·이현우(2010)는 옥상녹화를 통해 에너지절감 및 건물 임대 수수료 증가에 따른 경제성을 분석하였다.
- 김흥순(2014)은 옥상녹화 사업의 종류에 따른 직접편익 및 간접 편익을 추정함으로써 비용편익분석을 통한 옥상녹화의 경제성을 분석하였다.
- 국외 논문으로는 Carter&Keeler(2008)은 일반 옥상과 경량형 옥상녹화를 적용한 옥상의 생애주기 비용·편익분석을 통해 옥상녹화의 경제성에 대해 분석하였으며, Doshi and Peck(2013)는 가상으로 설정된 도시에서 옥상녹화로 발생할 수 있는 경제적 편익을 추정하였다.
- 기존 연구들을 분석한 결과 국내에는 현재 옥상녹화에 대한 경제성 평가만 실시되어 있다. 열섬현상 저감을 위해 옥상녹화사업에 대한 경제성 연구를 살펴봄으로써 PCM Cool Roof System의 경제성 분석에 적용 가능한 열섬현상 저감 편익 항목을 선별하였다.

<표 3.12> 편익 항목

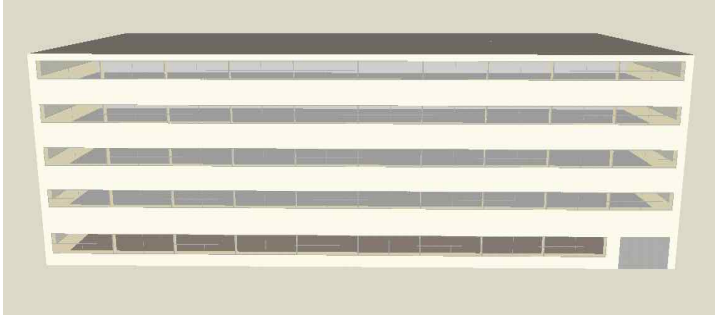
연구자 분석항목	김수봉 (2010)	이희범 (2010)	김흥순 (2014)	Carter (2008)	Doshi (2013)	본 연구
도시미관향상			○			
대기질 개선				○	○	
이산화탄소 저감			○		○	○
정기적 옥상관리 절감 비용		○	○			○
주택가치상승		○				
에너지비용절감	○		○	○		○
냉난방 에너지 절감	○	○	○			
고용창출효과					○	

- 편익 비용을 추정하기 앞서 PCM플레이트의 경제적인 효과를 분석하기 위해 2.6.3에서 설정한 표준 도시 중 50m × 250m의 상업 및 업무단지 프로토타입을 설정하였다. 단지 내 총 대지면적은 구성 건물 수와 대지면적을 활용하여 총 대지면적을 산출하였으며, 그 외는 도로 등 공지로 설정하였다. 단지 내 모든 건물은 평지붕으로 가정하였으며, 전체 공사면적은 옥상 구조물 비율(23%)을 제외하여 약 23,936.22㎡로 설정하였다.

3) 표준건물의 에너지 해석

- 시뮬레이션 대상은 서울에 위치한 총 높이 14m의 5층 일반 사무용 건물이다. 건물은 정남향이며 창면적비는 약 42%로 외기에 면하는 창은 Thermal Brake가 적용된 알루미늄 프레임을 사용하였다. PCM을 적용하기 위한 총 지붕 면적은 1007.19m²이고 건물의 총면적은 4,507.22m²이다. 위에서 언급한 내용을 요약하면 다음 <표 3.13>와 같다.
- 사무소 건물에 적용한 설비 시스템은 기본적인 Fan Coil Unit System이며 난방 시 천연가스 사용과 냉방 시 전기사용을 가정하였다. Constructions Data에서 Flat Roof를 제외한 모든 부분은 구성이 동일하며 Flat Roof의 구성은 (그림 3.62)과 같다.

<표 3.13> Building Information

구 분	내 용	시뮬레이션 모델
높이	14m	
층수	5층	
향	정남향	
창면적비	41.72%	
층고	2.8m	
지붕 총 면적	1,007.19m ²	
건축면적	901.44m ²	
총 면적	4,507.22m ²	

80mm Asbestos Related Materials – Cement Sheet	80mm Asbestos Related Materials – Cement Sheet
140mm Glass Fibre/Wool – Fibre Slab	100mm PCM Plate Layer
190mm Cast Concrete	140mm Glass Fibre/Wool – Fibre Slab
10mm Plasterboard	190mm Cast Concrete
	10mm Plasterboard

(그림 3.62) Flat Roof Layer Detail (Normal / PCM Plate)

- 에너지 소비량 분석은 결과는 아래의 <표 3.14>와 같다. 에너지 소비량은 옥상의 영향을 가장 크게 받는 최상층을 분석하였으며, PCM 플레이트를 적용한 옥상의 경우 일반 옥상과 비교 시 Total Site Energy와 단위면적당 에너지는 약 2.8%의 절감효과를 확인 할 수 있었다. 총 에너지 소비량은 조명 및 기기부하를 포함한 것으로 지붕을 통한 에너지 절감량은 자지하는 비율이 적지만, 최상층의 부분별 부하 중 냉방에너지는 2.6%, 난방에너지는 7.2%의 에너지절감효과를 보였고, 총 냉·난방에너지 절감율은 3.38%로 나타났다.

<표 3.14> Total Energy Comparison Between Normal Type Roof System and PCM Roof System

Total Site Energy	Normal Roof System	PCM Roof System	Variation
Total Energy [kWh]	239,916	234,305.04	2.8% ↓
Energy Per Total Building Area [kWh/m ²]	133.07	129.96	2.8% ↓
Heating Energy [kWh]	12,051.65	11,183.97	7.2% ↓
Cooling Energy [kWh]	56,278.76	54,834.71	2.6% ↓

4) 이산화탄소 저감

- 환경부는 2015년 1월부터 온실가스 배출권 거래제를 시행해 기업들은 정부로부터 온실가스 배출허용량을 부여받고, 그 범위 내에서 온실가스를 감축하되 판매가 가능한 정책을 제안하였다. 온실가스 저감평가를 위해 설정된 단지 내에 PCM플레이트를 적용하여 발생하는 이산화탄소 배출 저감 효과를 확인하였다.
- 아래 표와 같이 PCM플레이트 적용으로 인한 m^2 당 연간 소비전력 절감량과 전체공사면적의 곱을 통해 전력 절감량을 산출하였으며, 이와 탄소배출계수와 곱으로 탄소배출저감량을 산정하였다. 저감량에 최근 이산화탄소 1톤당 배출거래금액을 곱함으로써 이산화탄소 발생 저감량의 금액을 산정하였다.
- 설정 단지 내 PCM플레이트 적용 시 냉·난방에너지의 이산화탄소 저감은 각각 16톤과 4톤 정도 저감되어 금액으로 환산하면 약 21만원으로 나타났다. 기존 건물 대비 PCM플레이트 적용 시 온실가스 배출 비용 절감율은 냉방 2.56%, 난방 7.2%정도 감소되었다.

• PCM플레이트 적용으로 인한 냉방에너지 절감량 $= \text{m}^2\text{당 연간 냉방에너지 절감량} \times \text{전체공사면적}(\text{m}^2)$ $= 1.6\text{kWh}/\text{m}^2 \times 23,936.22\text{m}^2 = 38,344.31\text{kWh}$ • 냉방에너지의 탄소배출저감량 $= \text{PCM 플레이트로 인한 냉방에너지 절감량}(\text{kWh})$ $\times \text{탄소배출계수}$ $= (38,344.31\text{kWh} \times 0.424\text{kg}/\text{kWh})$ $= 16,257.99 \text{ kg}$ • CO₂ 발생 저감량의 금액 $= \text{탄소배출량 저감량}(\text{ton}) \times \text{CO}_2 \text{ 1ton당 거래금액}$ $= 16.258(\text{t}) \times 10,550(\text{원}) = 171,521.79(\text{원})$	• PCM플레이트 적용으로 인한 난방에너지 절감량 $= \text{m}^2\text{당 연간 난방에너지 절감량} \times \text{전체공사면적}(\text{m}^2)$ $= 0.96\text{kWh}/\text{m}^2 \times 23,936.22\text{m}^2 = 23,039.78\text{kWh}$ • 난방에너지의 탄소배출저감량 $= \text{PCM 플레이트로 인한 난방에너지 절감량}(\text{kWh})$ $\times \text{탄소배출계수}$ $= (23,039.78\text{kWh} \times 2.24\text{kg}/\text{m}^2 \times 0.082\text{m}^2/\text{kWh})$ $= 4,231.95 \text{ kg}$ • CO₂ 발생 저감량의 금액 $= \text{탄소배출량 저감량}(\text{ton}) \times \text{CO}_2 \text{ 1ton당 거래금액}$ $= 4.232(\text{t}) \times 10,550(\text{원}) = 44,647.04(\text{원})$
--	---

5) 에너지 비용 절감

- 기존의 옥상방수를 사용하는 것에 비해 PCM플레이트 적용 시 부하저감으로 인한 에너지 비용이 저감된다. 시뮬레이션을 통한 PCM플레이트 적용/비적용으로 인한 에너지 저감량을 계산하여 에너지 단가를 곱해 절감되는 비용에 대한 편익을 추정하였다.
- PCM플레이트 적용 시 연간 냉·난방에너지 절감 금액은 각각 354만원, 153만원 정도로 나타났으며, 총 절감 금액은 약 507만원으로 나타났다. 기존 건물 대비 PCM플레이트 적용 시 에너지비용 절감율은 각각 냉방 에너지 2.56%, 난방에너지 7.2%정도 감소되었다.

• PCM플레이트 적용으로 인한 냉방에너지 절감량 $= \text{m}^2\text{당 연간 냉방에너지 절감량} \times \text{전체공사면적}(\text{m}^2)$ $= 1.6\text{kWh}/\text{m}^2 \times 23,936.22\text{m}^2 = 38,344.31\text{kWh}$ • 냉방 에너지 절감 비용 $= \text{PCM 플레이트 적용으로 인한 에너지 저감량}(\text{kWh})$ $\times \text{에너지단가}$ $= 38,344.31\text{kWh} \times 92.3(\text{원}/\text{kWh})$ $= 3,539,179.8\text{원}$	• PCM플레이트 적용으로 인한 난방에너지 절감량 $= \text{m}^2\text{당 연간 난방에너지 절감량} \times \text{전체공사면적}(\text{m}^2)$ $= 0.96\text{kWh}/\text{m}^2 \times 23,936.22\text{m}^2 = 23,039.78\text{kWh}$ • 난방 에너지 절감 비용 $= \text{PCM 플레이트 적용으로 인한 에너지 저감량}(\text{kWh})$ $\times \text{에너지단가}$ $= 23,039.78\text{kWh} \times 810.6(\text{원}/\text{m}^2) \times 0.082(\text{m}^2/\text{kWh})$ $= 1,531,435.74\text{원}$
---	--

6) 정기적 옥상 관리 저감 비용

- 기존의 옥상을 관리하는 비용에 비해 PCM 플레이트 사용 시 옥상의 관리비용이 저감됨에 따라 옥상관리 저감에 따른 비용을 산정하였다. 정기적 옥상 방수 공사의 경우, 사용되는 페인트의 종류 및 업체에 따라 관리 비용이 상이하지만, 기존 연구에 따르면 단위면적당 평균 300원정도 소요되었다. 이를 기준으로 사업면적(㎡)을 곱하여 PCM플레이트 사용에 따른 정기적 옥상 관리 저감 비용을 추정하였을 때 옥상 관리 저감 비용은 약 718만원으로 나타났다.

· 정기적 옥상 관리 저감 비용

$$= \text{단위면적당 연간 옥상방수 공사비용(원)} \times \text{공사면적(㎡)}$$

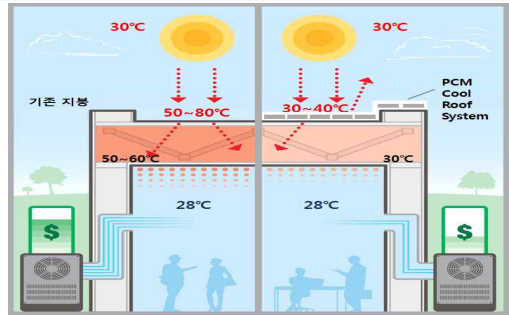
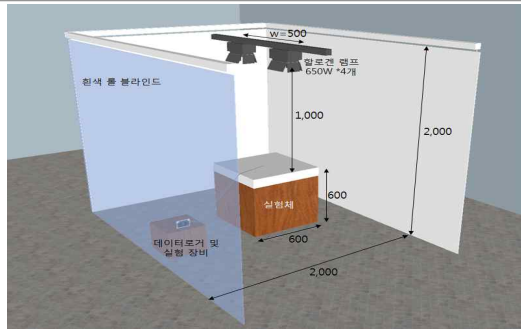
$$= 300(\text{원/㎡}) \times 23,936.22 \text{㎡} = 7,180,866 \text{원}$$

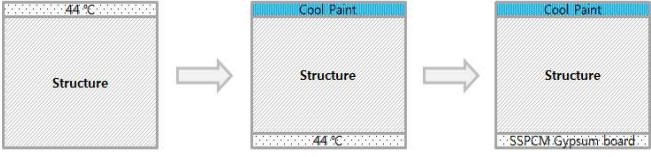
7) 총 절감 비용

- 기존 연구를 통해 PCM플레이트의 편익 항목으로 이산화탄소 저감, 에너지 비용 저감, 정기적 옥상관리 비용 저감을 산출하였다. 산출 결과는 다음과 같다. 상업 및 업무단지의 이산화탄소 저감 비용은 연간 216,169원, 에너지 저감 비용은 5,070,615원, 정기적 옥상관리 절감 비용은 7,180,866원으로 나타났으며, 총 합계는 약 12,467,650원으로 나타났다.
- 이를 전체 공사면적으로 나눠 PCM플레이트 설치 시 단위면적당 편익 비용을 산출하면 연간 약 521(원/㎡)으로 나타났다.

(바) 연구수행 결과

- 본 연구는 최근 사회적 이슈가 되고 있는 도심지역에서의 열섬현상을 줄이기 위한 것으로서 PCM Cool Roof System의 개념을 도입하여 제품을 개발하고 건물에 적용하기 위한 설계지침을 제시하는 것으로 1차 년도 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

연구 기관	연구 범위	연구 수행 방법	구체적인 내용
KIO 한라대	PCM Cool Roof system 개념정립 및 인공환경 실험동 구축을 통한 성능실험	국내외 연구동향 및 관련 제품 개발 현황조사	 - 문헌 고찰을 통한 적용 사례 분석 - 관련 제품 시장조사
		옥상 마감유형 실태 조사 및 표면온도 측정 실험	 - 인공환경 실험동 구축 및 표면온도 측정 - PCM타일이 Cool Paint 보다 온도편차가 적게 나타남

연구 기관	연구 범위	연구 수행 방법	구체적인 내용																		
			- 회색 및 녹색우레탄 방수와 PCM타일 및 Cool Paint는 최대 17℃ 이상의 온도 차이를 보임 • 외부 환경에서의 표면온도 측정 - 녹색방수우레탄 20℃, 회색방수우레탄 15℃, 일반타일 12℃, PCM타일 5℃로 측정 • 마감유형 종류별 반사율 측정																		
		• PCM Cool Roof System 성능실험 및 설계	• PCM Packing시 흰색 페인트가 도포 안 된 경우 기존 지붕재료와 온도차이 없음을 확인																		
		• PCM Cool Roof System의 경제성 평가	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Total Site Energy</th><th>Normal Roof System</th><th>PCM Roof System</th><th>Variation</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Total Energy [kWh]</td><td>239,916</td><td>234,306.04</td><td>2.6% ↓</td></tr> <tr> <td>Energy Per Total Building Area [kWh/m²]</td><td>133.07</td><td>129.96</td><td>2.6% ↓</td></tr> <tr> <td>Heating Energy [kWh]</td><td>12,061.65</td><td>11,183.97</td><td>7.2% ↓</td></tr> <tr> <td>Cooling Energy [kWh]</td><td>56,278.76</td><td>54,834.71</td><td>2.6% ↓</td></tr> </tbody> </table> • Energy Plus 시뮬레이션 수행 • 연구를 통한 총 절감 비용 분석 - 상업 및 업무단지 이산화탄소 연간 에너지 저감 비용 216,169원 - 에너지 저감 비용 5,070,615원 - 정기적 옥상관리 절감 비용 7,180,866원 - 총 합계 약 12,467,650원 비용 절감	Total Site Energy	Normal Roof System	PCM Roof System	Variation	Total Energy [kWh]	239,916	234,306.04	2.6% ↓	Energy Per Total Building Area [kWh/m²]	133.07	129.96	2.6% ↓	Heating Energy [kWh]	12,061.65	11,183.97	7.2% ↓	Cooling Energy [kWh]	56,278.76
Total Site Energy	Normal Roof System	PCM Roof System	Variation																		
Total Energy [kWh]	239,916	234,306.04	2.6% ↓																		
Energy Per Total Building Area [kWh/m²]	133.07	129.96	2.6% ↓																		
Heating Energy [kWh]	12,061.65	11,183.97	7.2% ↓																		
Cooling Energy [kWh]	56,278.76	54,834.71	2.6% ↓																		
송실대학교	PCM Cool Roof System의 원천 기술 확보 및 국산화 개발 시도	• 최적의 상안정 PCM(Shape stabilized PCM, SSPCM) type 개발기술 확립	 • DSC를 통한 축열성능 분석 • 화학적 결합 분석을 통한 호환성 평가																		

1) 도심지역의 열섬현상 심화

- 기존 대부분의 지붕재가 흡수율이 높고 반사율이 낮은 재료로 구성되어 지붕표면의 온도는 외기온에 비해 최대 50℃이상 상승하게 됨으로써 지붕표면온도 저감을 통하여 도심의 열섬현상 저감 대책이 매우 시급한 상황이다.

2) PCM Cool Roof System의 적용현황 및 개념정립

- 본 연구에서 개발하고자 하는 PCM Cool Roof System은 PCM의 상변화 특성을 이용하여 Cool Roof 단점을 보완함으로써 여름철 과열과 겨울철 난방부하를 동시에 해결하고자 한 것이다.
- 최근 선진외국에서는 소형의 캡슐화된 MPCM(Microencapsulated PCM)이 개발되어 건물에 적용되고 있으나 대부분 내부용이고 외부용으로는 매우 미미한 실정이다.

3) PCM Cool Roof System의 원천 기술 확보 및 국산화 개발

가) MPCM(Microencapsulated PCM) 기반 축열 도료 마감재 개발

- 본 연구팀은 일반적으로 사용되는 외벽용 수성 도료와 옥상 방수용 도료(유성도료)에 MPCM을 혼합하여 축열 도료를 제조하고 이를 이용하여 타일에 적용시킴으로써 유성도료보다는 수성도료에 MPCM을 혼합하는 것이 MPCM의 성능발현에 유리함을 밝혀내었다.

- 또한, MPCM과 도료를 혼합하여 제조된 축열도료를 도포한 축열타일의 전열해석을 실시하여 MPCM이 20wt% 들어간 경우, MPCM이 혼합되지 않은 경우보다 평균 1-2℃ 정도의 온도저감 효과가 있는 것을 확인하였다.

나) PCM Cool Roof System 적용을 위한 최적 상안정PCM(Shape stabilized PCM, SSPCM)개발

- 진공함침법을 통하여 n-octadecane과 탄소나노소재를 혼합한 형태의 SSPCM을 개발하고 성능을 테스트하였다. 최종적으로 제조된 SSPCM(함침율 55.9%, 잠열량 110.9J/g, 상변화 온도 28℃)을 건축물에 적용시키기 위하여 축열석고보드(1:0.7의 물과 석고 파우더 비율)를 개발하였다.

다) Packing type PCM 개발

- PCM의 축열성능을 극대화하기 위하여 대용량의 PCM을 나일론 소재의 투명팩을 주입시켜 Packing type PCM을 개발하였다.
- 특히 PCM을 지붕층에 적용하는 것을 고려하여 melting point를 기존(28~31℃)보다 높여 Eicosane (35℃)과 Docosane(44℃)을 수급하여 제작하였다(크기 0.3m x 0.3m).

4) 옥상 마감유형 실태 조사 및 지붕표면온도 측정

가) 옥상 마감유형 실태 조사

- 건물에서 적용되는 지붕재의 유형 및 특징을 경사지붕과 평지붕으로 구분하고 지붕재료로 가장 일반적으로 사용되는 몰탈 및 우레탄 마감, 페인트와 알루미늄 등을 선정하였다.

나) 인공환경 실험동 구축

- 지붕 성능평가를 위한 실험은 대부분 외부환경 조건에 따라 특정계절에 실시되는 한계점을 극복하고자 지속적인 실험과 동일한 환경에서 실험이 가능하도록 인공환경 실험동을 구축하였다.
- 크기는 2m×2m×2m의 공간에 태양과 흡사한 발열을 내는 할로젠램프조명을 활용하여 외기온을 약 30℃인 하절기 조건을 모사하였다.
- 특히, 실험실조건을 하절기(6월~8월) 표준기상데이터에 의한 일 평균일사량과 최대 일사량을 비교한 결과 서로 비슷한 값을 보임으로써 인공환경 실험동의 조건을 검증하였다.

다) 지붕재 실험모델 제작

- 지붕재 실험모델은 크기 600mm×600mm×600mm로 일반 사무소건물의 약 1/10 스케일로 축소하여 제작하였다. 이때, 지붕을 제외한 벽체 및 바닥은 열출입을 최소화하기 위하여 50mm단열재로 구성하였다.
- 특히, 지붕마감재료의 종류는 일반적으로 많이 사용되는 우레탄방수(녹색)와 몰탈마감(회색) 그리고 본 연구에서 중점을 두고 있는 쿨페인트와 PCM 타일을 선정하였다.
- 지붕재료 각 층에 온도센서를 매입하여 일사량에 따른 표면온도와 지붕구조를 통과하는 각 재료층 및 실내온도를 분석하였다.

라) 지붕 재료 반사율 측정

- 지붕 재료반사율 측정은 ASTM E1918 측정방법에 의하여 실시하였다. 그 결과 녹색 우레탄방수마감은 0.18, 회색몰탈방수마감은 0.26, 쿨페인트는 0.57, PCM타일은 0.55,

일반타일은 0.41로 쿨페인트가 가장 높게 그리고 PCM이 도포된 타일이 그 다음순으로 반사율이 높은 값을 보이고 있었다.

마) 인공환경 실험동의 지붕재료별 표면온도 측정

- 인공 외기온 25~26℃ 일 때 지붕재료의 표면온도측정결과 기존 회색 및 녹색우레탄방수는 최대 70℃이상, PCM타일 및 쿨페인트 지붕재는 최대 53℃의 온도분포로 약 17℃ 이상의 차이를 나타내고 있었다. 이때 실내온도인 경우 축열성능을 갖고 있는 PCM타일이 쿨페인트보다 온도편차가 적게 나타나고 있음을 확인하였다.

바) 동절기 외기조건에서의 지붕재료별 표면온도 측정

- 동절기(2015년 1월 19일부터 2월 4일까지)에 외기조건에서 지붕재료별 표면온도변화를 측정한 결과 녹색방수우레탄이 20℃, 회색방수우레탄 15℃, 일반타일 12℃ 그리고 쿨페인트와 PCM타일은 두 재료가 비슷하게 약 5℃로 각각 나타났다. 주야간 온도차이의 경우 PCM타일이 가장 적은 것으로 나타났고 실내온도인 경우 PCM타일이 쿨페인트와 비교하여 약 0.4℃ 높은 것으로 나타났는데 이는 PCM타일의 축열효과에 의한 것으로 판단할 수 있다.

5) PCM Cool Roof System 성능실험

- 지붕 마감재료의 성능실험을 실시하였다. 성능실험은 마감재료의 적정 상변화온도에 따라 PCM에 흰색 페인트의 도포유무 그리고 PCM(Melting Point 44℃, 35℃)에 일반타일, 목재, 알루미늄판의 조합으로 하였고 측정일은 2015년 5월 11일부터 6월 6일까지 측정항목은 옥상마감재의 표면온도 및 기상 데이터, 실내 천장 열류량으로 하였다.

가) PCM Packing의 열적성능 확인실험(1차, 흰색페인트(무))

- PCM Packing시 흰색페인트가 도포되지 않은 경우 몰탈상부온도는 기존지붕재료(녹색우레탄방수)와 비교해 차이가 없었다. 또한, PCM Melting Point 44℃, 35℃도 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나, 실내 천장면 온도와 실내온도는 PCM 자체의 축열 효과로 인하여 온도차가 발생하고 있었다.

나) PCM Packing 에 따른 열적성능(2차, 흰색페인트(유))

- PCM Packing에 흰색페인트를 마감할 경우의 표면온도차는 기존지붕재료(녹색 및 회색우레탄 방수)와 비교하여 쿨페인트가 20℃, PCM 은 30℃ 이상의 온도차가 나타남을 확인하였다. 또한, 마찬가지로 PCM Melting Point 44℃, 35℃도 차이가 없는 것으로 나타났다. 특히, 실내천장면과 내부온도 분포에서도 PCM과 쿨페인트가 일반재료에 비교하여 약 15℃ 정도 낮은 분포를 보였다.

다) PCM Packing 마감재료에 따른 열적성능(3차, 일반타일, 목재, 알루미늄)

- 일반타일 마감: PCM Packing 위에 일반타일을 마감한 경우 녹색우레탄과는 최대 약 25℃ 쿨페인트와는 약 13℃ 정도 낮게 나타나고 있었다.
- 목재 마감: PCM Packing위에 목재를 마감한 경우 녹색우레탄과는 최대 약 30℃ 쿨페인트와는 약 10℃ 정도 낮게 나타나고 있었다.
- 금속재(알루미늄) 마감 : PCM Packing 위에 알루미늄 마감한 경우 녹색우레탄과는 최대 약 25℃ 쿨페인트와 약 10℃ 정도 낮게 나타나고 있었다. 한편, 알루미늄 마감재는 낮은 방사율로 인해 야간에 PCM Packing재의 표면온도가 높게 나타나고 있었다.

6) PCM Cool Roof System 설계

- 기존건물 옥상에도 적용 가능하도록 계획하고 경량으로 건물의 하중에 영향을 주지 않도록 하였다. 설계된 플레이트 구조는 하부바닥판, 내부 PCM 중공층, 상부 표면의 덮개로 구성하였고 표면부분은 반사율이 높아 표면온도 상승을 억제하도록 하였고 특히, 건물 외부용으로 건물 내부에 사용되는 상변화 온도보다 높은 44℃등의 고온의 상변화온도를 갖도록 하였다. 또한, 플레이트는 모듈화하여 다양한 면적에 적용 가능하도록 하였다.

7) PCM Cool Roof System 적용을 위한 기존 도시의 현황분석 및 표준도시 건물 설정

- PCM Cool Roof System 적용을 위하여 서울지역을 중심으로 저층주거단지, 중저층주거단지, 공동주택단지, 업무단지로 분류하여 대지면적, 건물면적, 건물 층수, 지붕의 형태, 옥상구조물의 면적, 대지 내 공지 면적 등의 요소를 분석하였다.
- ① 저층주거단지: 건물 간의 넓은 이격 거리를 나타내어 건물 간 기류를 통해 도시 내 축적된 열을 배출할 수 있을 것으로 예상된다.
- ② 중·저층주거단지 : 다세대·다가구 주택, 공동주택 등으로 주거건물이 매우 밀집된 지역. 대지 내 공지면적이 적고 주변 건물 간의 영향을 크게 받으므로 기류나 대지의 녹화보다는 지붕면을 통한 축열을 제어하는 것이 효과적일 것으로 예상된다.
- ③ 공동주택단지: 대지 내 옥외 공간 중 불투수성 포장 면적이 다른 단지 유형에 비해 넓은 편이다. 건물간의 간격이 다른 건물에 비해 넓으므로 기류를 통한 열섬저감이 가능할 것으로 예상된다.
- ④ 업무단지: 업무단지는 구성건물 규모가 커 지역 내 구성건물 수가 적고 대지 면적이 넓고, 용적률이 매우 높은 특성을 나타낸다. 개별건물의 규모가 매우 크기 때문에 높이편차가 클수록 구성건물 간의 영향을 크게 받으며, 도심지의 고층고밀이 형태적 특성을 대표하는 유형이다. 따라서, 실제도시의 특성을 반영한 기준모델 도출을 위해, 건물대지면적 분포를 기준으로 가장 많은 분포를 나타내는 범위를 설정하여 해당되는 건물들을 단지의 표본 값으로 선정하였다.

8) PCM Cool Roof System의 경제성 평가

- PCM Cool Roof의 경제성은 열섬현상 저감에 따른 편익항목들을 도출하여 분석하였다. 특히, 에너지평가프로그램(EnergyPlus™)을 이용하여 PCM Cool Roof 적용 오피스 빌딩의 연간 에너지 사용량과 면적 당 에너지 사용량의 저감량을 확인하였다. 대상 건물은 서울에 위치한 높이 14m의 5층 일반 사무용 건물로 PCM Cool Roof 적용 시 난방 7.2%, 냉방 2.6%의 에너지절감효과를 나타냈다.

나. 2차 년도

(1) 연구 범위 및 연구 수행 방법

연구 범위	연구 수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
지붕재 변화에 따른 도시열섬저감 효과 분석	• 서울열섬강도 현황분석	• 자동기상관측시스템(AWS) 자료를 활용한 온도데이터 분석 - 서울시의 28개소 관측지점의 AWS 자료 가운데 온도데이터를 활용하여 서울시의 하절기, 동절기 열섬강도 현황 분석
	• 외피 종류별 반사율 실측	• 외피 종류별 재료 특성에 대한 조사와 반사율 실측
	• 미기후 분석 프로그램인 ENVI-met을 활용하여 반사율에 따른 온도저감 효과 분석	• 중저층주거단지, 고층주거단지, 상업지역으로 유형을 나누고, 대상지 및 범위를 설정 • ENVI-met을 통해 대상지의 하절기, 동절기의 반사율에 따른 온도저감효과 분석
PCM Cool Roof 축열 플레이트 열성능 분석	• 마감재별 PCM Cool Roof System 열성능 실험	• Packing type PCM을 적용한 축소모형 실험 • 기존 옥상 마감과 석재, 목재, 알루미늄과의 열성능 비교 실험
	• WPC(Wood Plastic Composite)의 열적 거동 실험	• TCI분석을 통한 WPC와 목재의 열전도율 측정 - 중공층 포함시, 비포함 비교측정
	• WPC를 적용한 PCM Cool Roof System 열성능 실험	• 축소모형실험을 통한 WPC 열성능 비교 실험 - PCM 포함, 비포함
	• PCM Cool Roof System의 마감색상별 열성능 실험	• 반사율에 따른 열성능 차이 분석 - 흰색, 갈색 비교 실험
	• 인공기후 실험동 이용 PCM Cool Roof System 열적 거동 실험	• 마감색상별, Melting point별 비교 실험 - 흰색, 회색, 갈색 비교 실험 - Bio 25, 30, 34, RT 44 비교 실험
	• 박공 지붕 열성능 실험	• 박공 지붕과 일반 평지붕과의 비교 실험
건물 시뮬레이션 냉방에너지 성능 분석	• 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 실험적 접근	• 개별 건물의 냉방에너지 성능 평가를 위해 에너지 시뮬레이션 프로그램인 'Energy Plus Ver.8-5' 분석 실시 - PCM 적용 시 에너지 절감 성능 평가 • 분석결과 - 옥상에 PCM을 적용한 경우 총 에너지 소비량의 절감량은 약 0.57%로 미미한 효과를 보였지만, 최상층의 냉·난방 부하의 절감량은 약 1~2%로 나타남

연구 범위	연구 수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
상안정 PCM의 열적 거동 분석	- 패킹형 상안정 PCM 제조 - 전열해석 장비 구축 및 실험	1차 년도에서 진행했던 SSPCM, MPCM의 경우에는 PCM의 함량이 매우 낮기 때문에 PCM의 열적 성능을 높이기 위하여 Macro-packed PCM (MPPCM)을 제조 - 제조된 MPPCM의 열적 성능 분석을 위해 적외선 조사장치를 이용한 전열해석 장비를 구축
PCM축열 플레이트 설계 및 축소모형 실험	패킹형 PCM과 WPC를 결합한 축열 플레이트 설계 및 열적 성능 분석	- MPPCM의 형태는 자유자재로 변형이 가능하며, 막대형으로 제작하여 WPC의 중공층에 MPPCM을 적용하여 축열 플레이트를 설계 - MPPCM과 WPC의 열전도율 측정 및 열적 성능 분석
축열성능 향상 방안 연구	- PCM 종류에 따른 열적 거동 분석 Double-layer PCM의 열적 성능 평가 - 혼합 PCM 제조	- 잠열량과 상변화 온도가 다른 여러 PCM이 적용된 MPPCM의 열적 성능 분석 - 여름철과 겨울철을 동시에 고려하기 위하여 두 겹으로 구성된 MPPCM의 열적 성능을 분석. 또한 혼합 PCM을 제조하여 최적의 PCM 적용 방안 고찰

(2) 연구수행 내용

(가) 지붕재 변화에 따른 도시열섬저감 효과 분석

1) 서울열섬강도 현황 분석

가) 지역 및 조건

- 자동기상관측시스템(AWS)을 활용하여 서울시 28개소 관측지점 대상으로 2012~2015년[3개년] 중 6월~8월(하절기), 12~2월(동절기)의 데이터를 분석하였으며, 주변지역인 경기지역의 51개소 관측지점도 함께 조사하여 외곽지역과의 열섬강도를 비교·분석 하였다.

<표 3.15> 서울지역의 AWS 관측지점

연번	위치	주소	구분
1	강남	서울특별시 강남구 봉은사로63길22 서울상릉초등학교	제2종 일반 주거지역
2	서초	서울특별시 서초구 우면로96 서울교육대학교	제2종 일반 주거지역
3	강동	서울특별시 강동구 고덕로183 서울종합직업전문학교	제2종 일반 주거지역

연번	위치	주소	구분
4	송파	서울특별시 송파구 올림픽로240 롯데월드	일반상업지역
5	강서	서울특별시 강서구 우장산로10길112 한국폴리텍1대학	제1종 일반 주거지역
6	양천	서울특별시 양천구 목동동로298 목동주차장	자연녹지지역
7	도봉	서울특별시 도봉구 시루봉로173 신방학초등학교	제1종 일반주거지역
8	노원	서울특별시 노원구 공릉동	제2종+3종 일반주거지역
9	동대문	서울특별시 동대문구 서울시립대로163 서울시립대학교	제2종 일반 주거지역
10	중랑	서울특별시 중랑구 면목로57길32 면동초등학교	제2종 일반 주거지역
11	기상청	서울특별시 동작구 여의대방로16길61 기상청	제2종 일반 주거지역
12	마포	서울특별시 마포구 창전동	제1종 일반주거지역
13	서대문	서울특별시 서대문구 연세로50 연세대학교	제2종 일반 주거지역
14	광진	서울특별시 광진구 자양2동	제2종 일반 주거지역
15	성북	서울특별시 성북구 정릉로77 국민대학교과학관	제1종 일반주거지역
16	용산	서울특별시 용산구 이촌로255 신용산초등학교	제2종 일반 주거지역
17	은평	서울특별시 은평구 진관동	대부분 자연녹지지역
18	금천	서울특별시 금천구 시흥대로104길31 독산초등학교	제2종 일반 주거지역
19	한강	서울특별시 영등포구 여의동로280 여의도세모유람선	자연녹지지역
20	중구	서울특별시 중구 소파로83 남산케이볼카	제1종 일반주거지역
21	성동	서울특별시 성동구 서울숲길18 성수중학교	제2종 일반 주거지역
22	북악산	서울특별시 종로구 북악산로267	자연녹지지역
23	구로	서울특별시 구로구 부일로893 온수초등학교	제2종 일반 주거지역
24	강북	서울특별시 강북구 도봉로89길13 강북구청	준주거지역
25	남현	서울특별시 관악구 남현동	대부분 자연녹지지역
26	관악	서울특별시 관악구 관악로1 서울대학교대기환경관측소	자연녹지지역
27	영등포	서울특별시 영등포 구국회대로53길20 서울영등초등학교	준주거지역
28	현충원	서울특별시 동작구 현충로210 국립서울현충원	자연녹지지역

나) 대표일 및 분석 시간대 선정

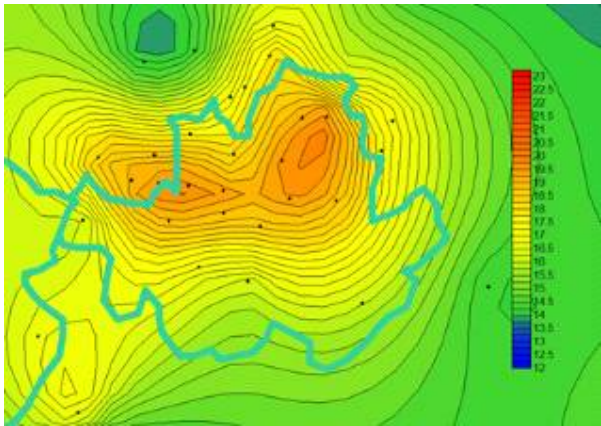
- 하절기, 동절기 일별 데이터 중 운량이 3미만이며, 월평균 기온과의 온도차가 가장 적은 날을 월의 대표일로 선정하고<표 3.16>, 대표일별 06시, 12시, 18시, 24시에 높은 온도가 나타나는 지역을 파악하였다.
- 상위 5개의 온도가 나타나는 지역의 빈도수를 살펴 본 결과 06시의 경우 ‘영등포’, 12시에는 ‘서초’, 18시, 24시에는 ‘광진’이 주변지역에 비해 높은 빈도를 나타내는 것으로 나타났다.

<표 3.16> 2012~2015년 월별 대표일 선정

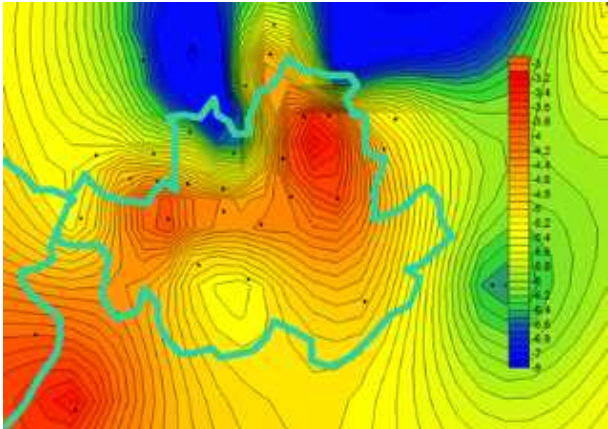
하절기					동절기				
기간	월평균 기온	운량3미만			기간	월평균 기온	운량3미만		
		날짜	기온	온도차			날짜	기온	온도차
2012년 06월	24.1	06월 03일	23.3	-0.8	2012년 12월	-4.1	12월 20일	-3.4	0.7
2012년 07월	25.4	07월 25일	25.8	0.4	2013년 01월	-0.9	01월 14일	-2.1	-1.2
2012년 08월	27.1	08월 02일	26.7	-0.4	2013년 02월	-1.2	02월 15일	-1.2	0
2013년 06월	24.4	06월 05일	24.8	0.4	2013년 12월	-0.2	12월 10일	0.3	0.5
2013년 07월	25.5	07월 26일	26.5	1.0	2014년 01월	-0.7	01월 17일	-0.1	0.6
2013년 08월	27.7	08월 20일	27.4	-0.3	2014년 02월	1.9	02월 22일	2.2	0.3
2014년 06월	23.1	06월 06일	24.4	1.3	2014년 12월	-2.9	12월 25일	-2.6	0.3
2014년 07월	26.1	07월 07일	27.1	1.0	2015년 01월	-0.9	01월 11일	-0.4	0.5
2014년 08월	25.2	08월 28일	25.1	-0.1	2015년 02월	1.0	02월 06일	0.4	-0.6

<표 3.17> 상위 5개의 온도가 나타나는 관측지점(서울특별시)

	06시	12시	18시	24시
1	영등포	서초	광진	광진
2	서초	양천	송파	강남
3	송파	기상청(동작)	강남	송파
4	양천	서대문	종량	서초
5	성동	강동	성동	종량



(그림 3.63) 2012.06.03.(06시) 온도분포

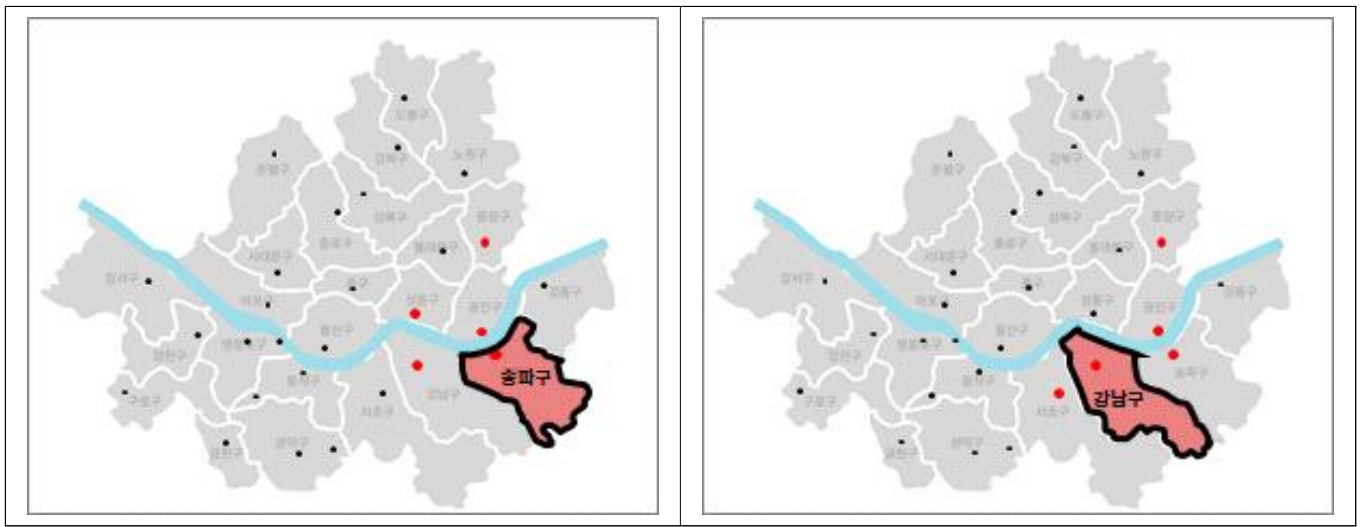


(그림 3.64) 2012.02.15.(24시) 온도분포

- 시간대별 서울특별시와 경기도와의 평균 온도와의 차이를 살펴보면, 06시 ‘영등포’의 온도가 경기도보다 약 4℃ 높은 온도를 나타냈으며, 12시에는 ‘서초’가 경기도보다 약 1.3℃ 높게 나타났다. 18시에는 ‘송파’의 온도가 1.9℃, 24시에는 ‘강남’에서 4.1℃ 높은 온도가 나타나 주간 시간대보다는 야간과 심야 시간대에 경기도와의 온도 차이가 더 크게 나타났다.

<표 3.18> 시간대별 상위온도 관측지점 및 경기도와의 온도차

06시 - 영등포 (경기도 평균 온도와의 차이 : 4℃)	12시 - 서초구 (경기도 평균 온도와의 차이 : 1.3℃)
18시 - 송파구 (경기도 평균 온도와의 차이 : 1.9℃)	24시 - 강남구 (경기도 평균 온도와의 차이 : 4.1℃)



2) 외피 종류별 반사율 실측

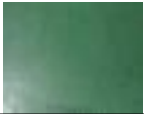
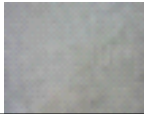
가) 외피 종류별 반사율 실측 개요

- 지붕재의 표피 마감 형태에 따른 도시열섬저감 효과를 분석하기 위해 재료별 특성을 조사하고, 반사율을 실측하였다.
- 지붕의 마감형태는 크게 3가지로 나뉘 수 있다. 방수층 시공을 위해서는 녹색 우레탄 방수코팅과 회색 몰탈 방수 2종류가 대표적으로 적용되고 있었다.
- 이 외에 옥상 공간을 활용하여 휴식처 제공을 위해 우드테크를 시공한 사례도 있었다.

나) 실측 결과

- 녹색 우레탄 방수코팅과 회색 몰탈 방수는 건물을 2개소 이상 선정하여 실측한 값으로 녹색 우레탄 방수코팅은 0.26, 0.27이며, 회색 몰탈 방수는 0.31, 0.27로 녹색 우레탄 방수코팅에 비해 높게 나타났다.
- 우드 테크의 경우 알베도가 0.11으로 기존 지붕보다 알베도가 낮아 태양복사 에너지의 유입 및 유출이 많을 수도 있으나, 열전도율이 매우 낮아 축열되는 복사에너지가 적어 표면온도 상승으로 인한 온도 상승은 적을 것으로 판단된다.
- 도로의 경우 아스팔트 도로는 반사율이 0.10으로 매우 낮았으며, 보도의 경우 마감 형태 및 색상에 따라 0.11 ~ 0.21까지 다양하였다. 보도블럭의 경우 색상이 밝더라도 마감 표면의 거칠기가 거칠어 반사율이 지붕 마감재료에 비해서는 낮게 측정된 것으로 판단된다.
- 녹지를 대표하는 잔디의 동절기 반사율을 0.29로 다른 마감 재료에 비해 비교적 높게 나타났다. 이는 계절적인 요인을 반영한 것으로 하절기 반사율과는 다소 차이가 있을 것으로 예상된다.<표 3.19>

<표 3.19> 외피 종류별 반사율

건물	분류	녹색 우레탄방수-1 	회색 몰탈-1 	나무데크 	녹색 우레탄방수-2 	회색 몰탈-2 
	반사율	0.26	0.31	0.11	0.27	0.27
도로	분류	아스팔트 	포장도로 (판돌) 	보도1 	보도2 	화산석 
	반사율	0.10	0.21	0.20	0.15	0.11
녹지	분류	잔디(동절기) 				
	반사율	0.29				

3) 미기후 분석 프로그램인 ENVI-met을 활용하여 반사율에 따른 온도저감 효과 분석

가) 분석개요

- 선정일자는 열섬현상 현황과약을 통해 설정한 월별 대표일 중 하절기는 8월을, 동절기는 1월을 대표월로 선정하여 분석하였다.
- 시뮬레이션에 사용된 자료는 시간대별 AWS자료와 1981년~2010년(30년) 평년값자료를 활용하였다. 지역별 기온은 AWS 시간 데이터를 활용하였으며, 평균 풍속 및 풍향, 습도의 자료는 평년값자료를 활용하였다. 기후 평년값(30년)에 따르면 월평균 풍속은 1월 2.4m/s, 8월 2.1m/s이며, 평균 습도는 1월 59.8%, 8월 75.6%이다. 건물 내부의 온도는 계절별 실내적정온도인 8월(하절기) 26℃, 1월(동절기) 18℃로 설정하였다.
- 분석 시간대는 12:00~12:30으로 낮시간대를 설정하였다. 도시열섬현상의 경우 낮 시간대보다는 저녁과 새벽시간대에 더욱 빈번하게 나타나지만, 이 연구에서는 열섬현상뿐만 아니라 에너지사용 저감을 위한 피크부하 저감에 초점을 두어 낮 시간대를 분석하였다. <표 3.20>

<표 3.20> 시뮬레이션 설정조건

분류		하절기	동절기
시뮬레이션 일자		2014/08/28	2015/01/11
시뮬레이션 시작 시간		12:00	12:00
총 시뮬레이션 시간(h)		0.5	0.5
풍속 (m/s)		2.1	2.4
풍향(0:N..90:E..180:S..270:W)		70	290
온도	광진	27	0.8
	서초	27.6	0.3
	송파	29.7	1.6
상대습도(%)		75.6	59.8
내부온도		26	18

나) 시뮬레이션 변수 설정

- 지붕재의 변화에 따른 도시열섬저감 현황을 분석하기 위해 실측된 지붕재의 반사율을 바탕으로 지붕의 알베도를 0.2, 0.4, 0.6으로 변화시켜 시뮬레이션을 실시하다.
- 측정 높이는 지면높이 2m와 캐노피 높이(최고높이+3m)로 설정하여 측정지점 별 공기온도를 비교하였다<표3.21~3.22>.

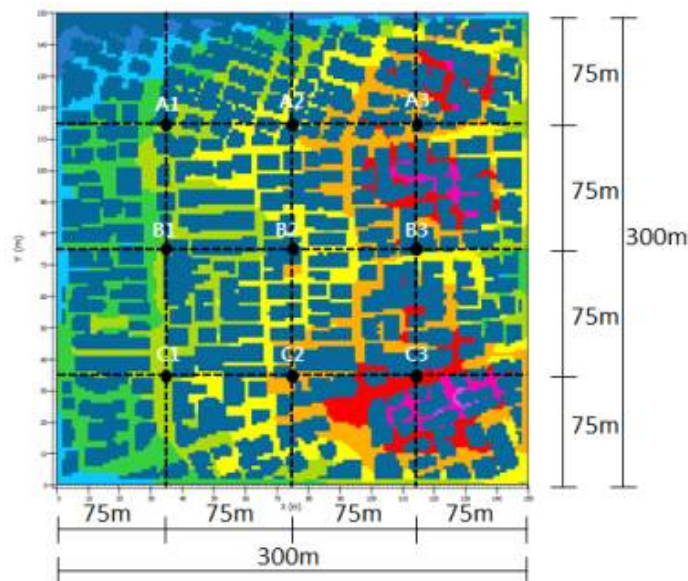
<표 3.21> 표면마감에 따른 측정 반사율과 분석 설정 변수

표면마감	측정 반사율	분석 변수
기존 녹색 우레탄방수 마감	0.18	0.2, 0.4, 0.6 총 3개로 분류
회색 몰탈방수	0.26	
쿨페인트 마감	0.57	
WPC 기본 갈색	0.17	
WPC 흰색페인트 마감	0.47	

<표 3.22> 대상지역의 높이 현황 및 측정 높이

높이 변수		중저층주거지역 (광진)	고층주거지역 (송파)	상업지역 (서초)
현황	평균높이	12.3m	43.8m	20.3m
	최고높이	22m	53m	52m
측정 높이	지면	2m	2m	2m
	건물높이	25m	56m	56m

- 이를 통해 나온 결과 값은 (그림3.65)과 같이 총 9개 지점(A1~C3)의 공기온도를 분석하여 평균 온도를 비교하였다.



(그림 3.65) 시뮬레이션 측정 지점 위치

다) 유형별 대표지역 선정

- 서울지역의 관측지점의 위치를 ‘토지이용계획’에 따라 유형을 구분하였으며, 도시 열섬현상의 발생빈도가 높은 상업지역과 주거지역을 대표유형으로 선정하고 상위온도를 나타내는 지역을 선택하였다.

- 상업지역은 서초구, 주거지역 가운데 고층 아파트 지역이 많은 송파는 고층주거지역으로, 저층 주택지역이 많은 광진구는 중저층 주거지역으로 구분하여 분석을 실시하였다.
- 관측지점의 유형은 다음의 <표 3.23>와 같다.

<표 3.23> 관측지점의 토지이용계획에 따른 유형 구분

대부분 자연녹지지역	자연녹지지역	일반상업지역	제1종 일반 주거지역	제2종 일반 주거지역	제2종+3종 일반주거지역	준주거지역
은평	양천	서초	강서	광진	노원	강북
남현	한강		도봉	송파		영등포
	북악산		마포	강동		
	관악		성북	동대문		
	현충원		중구	종량		
				기상청		
				서대문		
				강남		
				용산		
				금천		
				성동		
				구로		

라) 대표지역 범위 설정

- 대표지역은 기상 관측소 인근의 지역 중 해당 용도 지역을 대표할 수 있는 지역 300m×300m 범위를 설정하였으며, 선정된 지역은 다음의 <표 3.24>와 같다.

<표 3.24> 대표지역의 범위 설정 및 요소별 비율

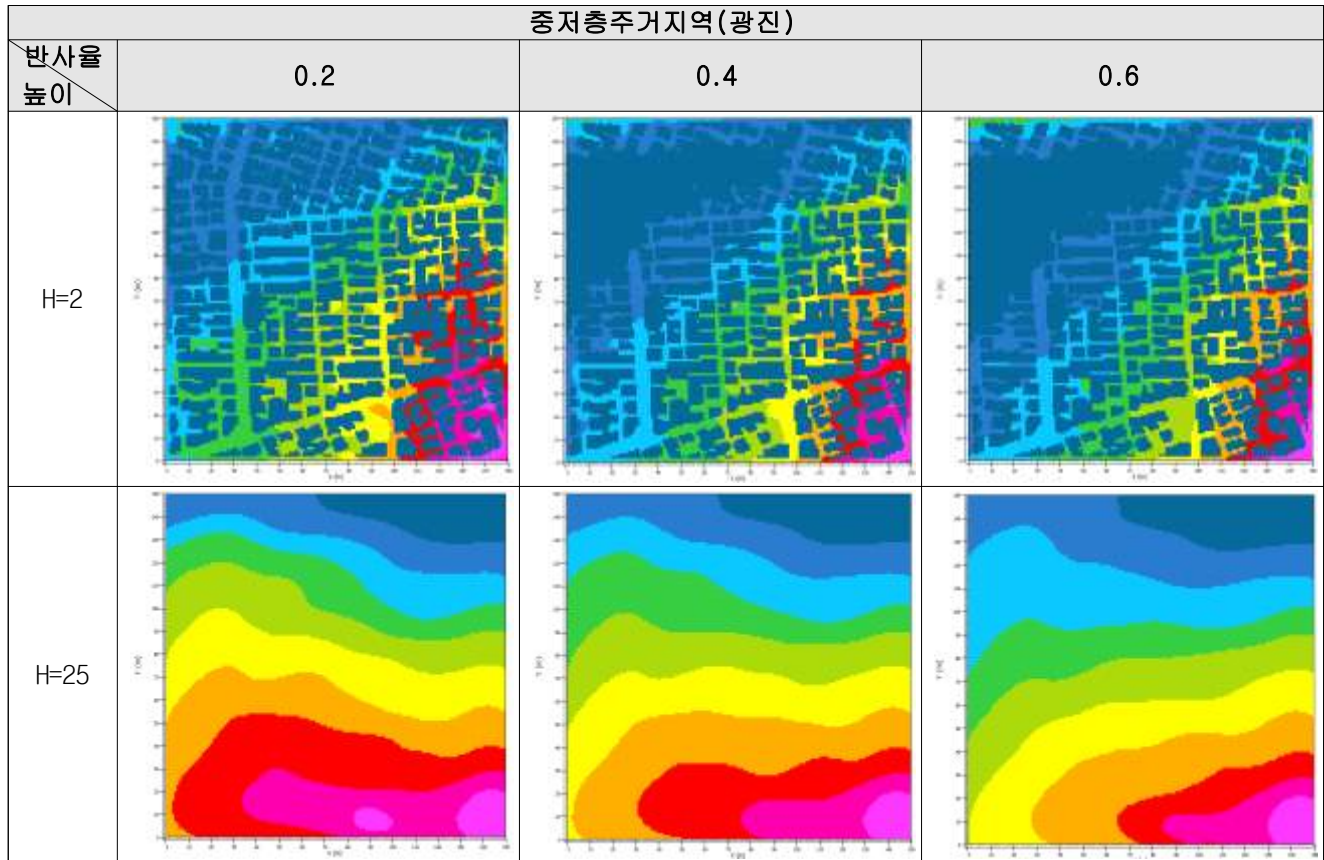
구분	중저층주거지역		고층 주거지역		상업지역	
지역	광진		송파		서초	
항공 사진						
	건물	50	14		30	
	도로	50	26		70	
	녹지	0	60		0	

마) 분석결과

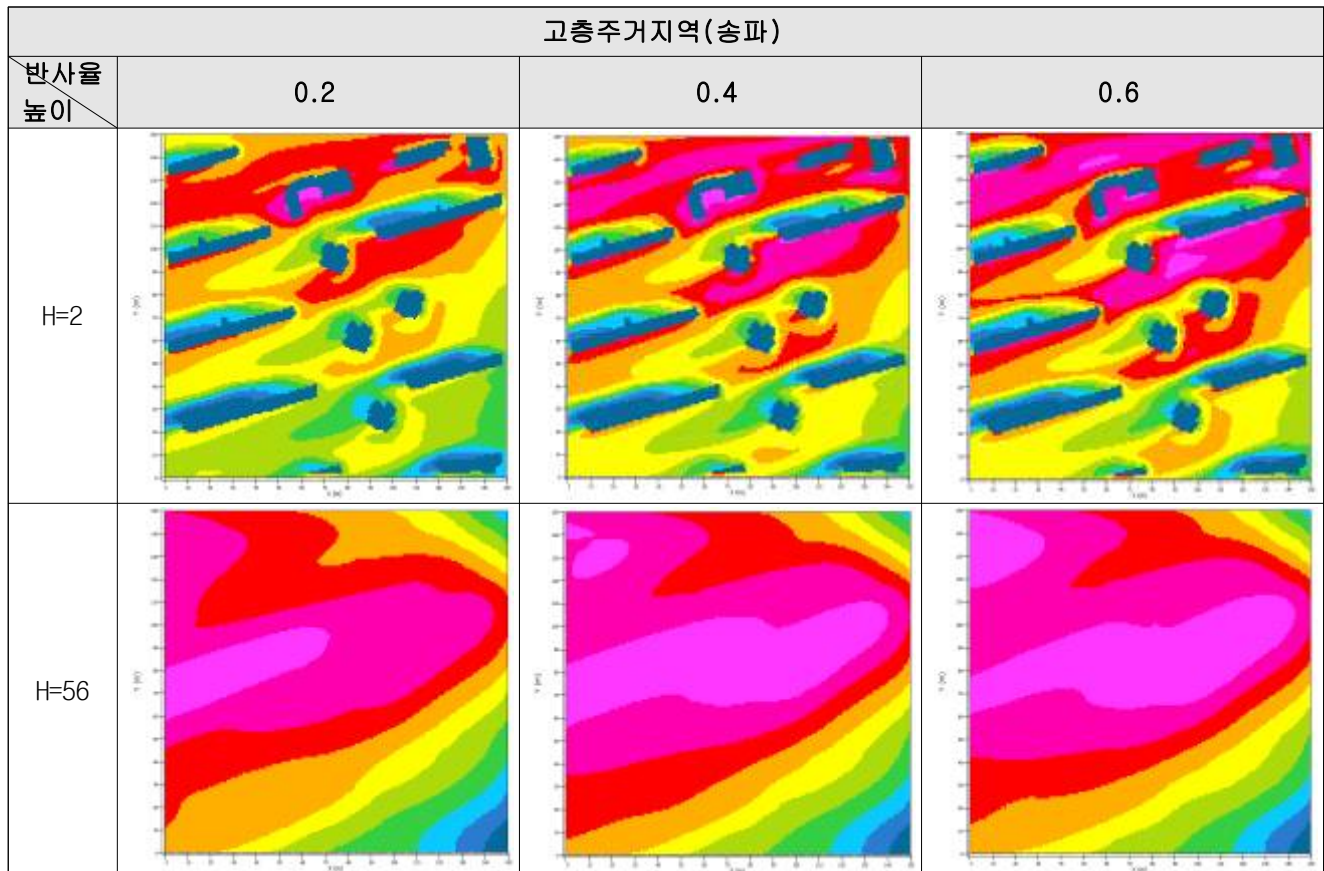
- 하절기<표 3.25~3.28>
- 반사율을 0.2(기준)에서 0.4로 변경할 경우 2m높이에서는 평균 0.22℃, 캐노피 높이에서는 평균 0.04℃가량 낮은 온도를 나타냈으며, 0.6으로 변경할 경우에는 2m높이에서 평균 0.37℃, 캐노피 높이에서 평균 0.08℃의 낮은 온도를 나타냈다.

- 건물 지붕의 반사율만을 조정하였기 때문에, 건물의 비율이 비교적 높게 나타난 중저층주거단지(광진)과 상업단지(서초)의 온도저감 효과가 크게 나타났으며, 건물 및 지붕층의 비율이 낮은 고층주거단지(송파)지역의 경우에는 온도차이가 크게 나타나지 않았다.
- 캐노피 높이의 온도보다 2m위에서 측정한 온도가 더 크게 저감되는 것으로 나타났다.

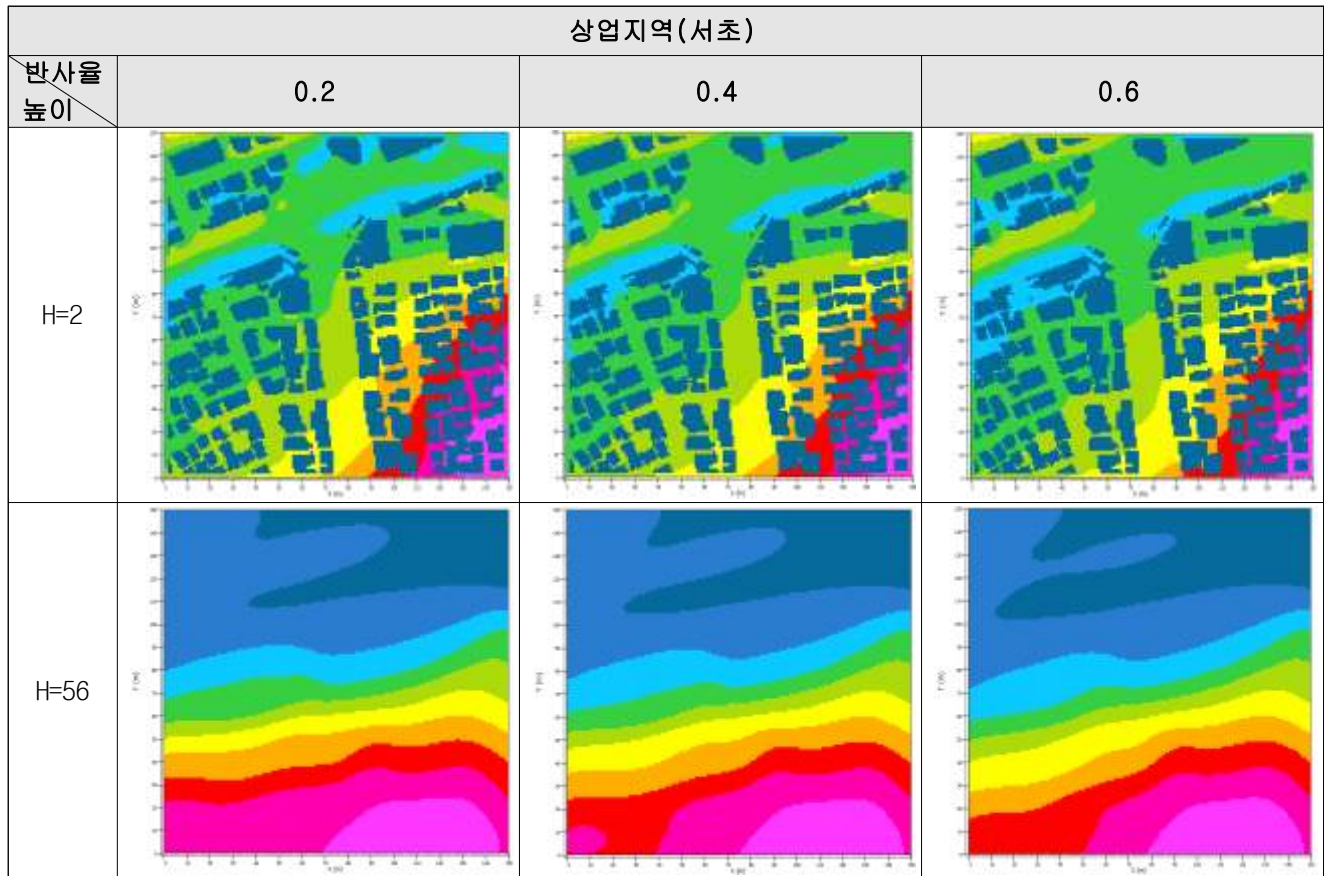
<표 3.25> 반사율 변화에 따른 중저층주거지역(광진)의 시뮬레이션 결과(하절기)



<표 3.26> 반사율 변화에 따른 고층주거지역(송파)의 시뮬레이션 결과(하절기)



<표 3.27> 반사율 변화에 따른 상업지역(송파)의 시뮬레이션 결과(하절기)



<표 3.28> 단지유형별 지붕 반사율변화에 따른 온도변화(하절기)

단지유형	측정 높이	온도	지붕면 반사율		
			0.2	0.4	0.6
중저층주거단지 (광진)	2m	평균온도	27.39	27.12	26.83
		편차	-	▼0.27	▼0.56
	건물높이(25m)	평균온도	26.07	25.96	25.85
		편차	-	▼0.11	▼0.22
고층주거단지 (송파)	2m	평균온도	29.41	29.40	29.36
		편차	-	▼0.01	▼0.05
	건물높이(56m)	평균온도	28.57	28.57	28.56
		편차	-	0.00	▼0.01
상업단지 (서초)	2m	평균온도	31.27	30.90	30.76
		편차	-	▼0.37	▼0.51
	건물높이(56m)	평균온도	29.15	29.15	29.15
		편차	-	0.00	0.00

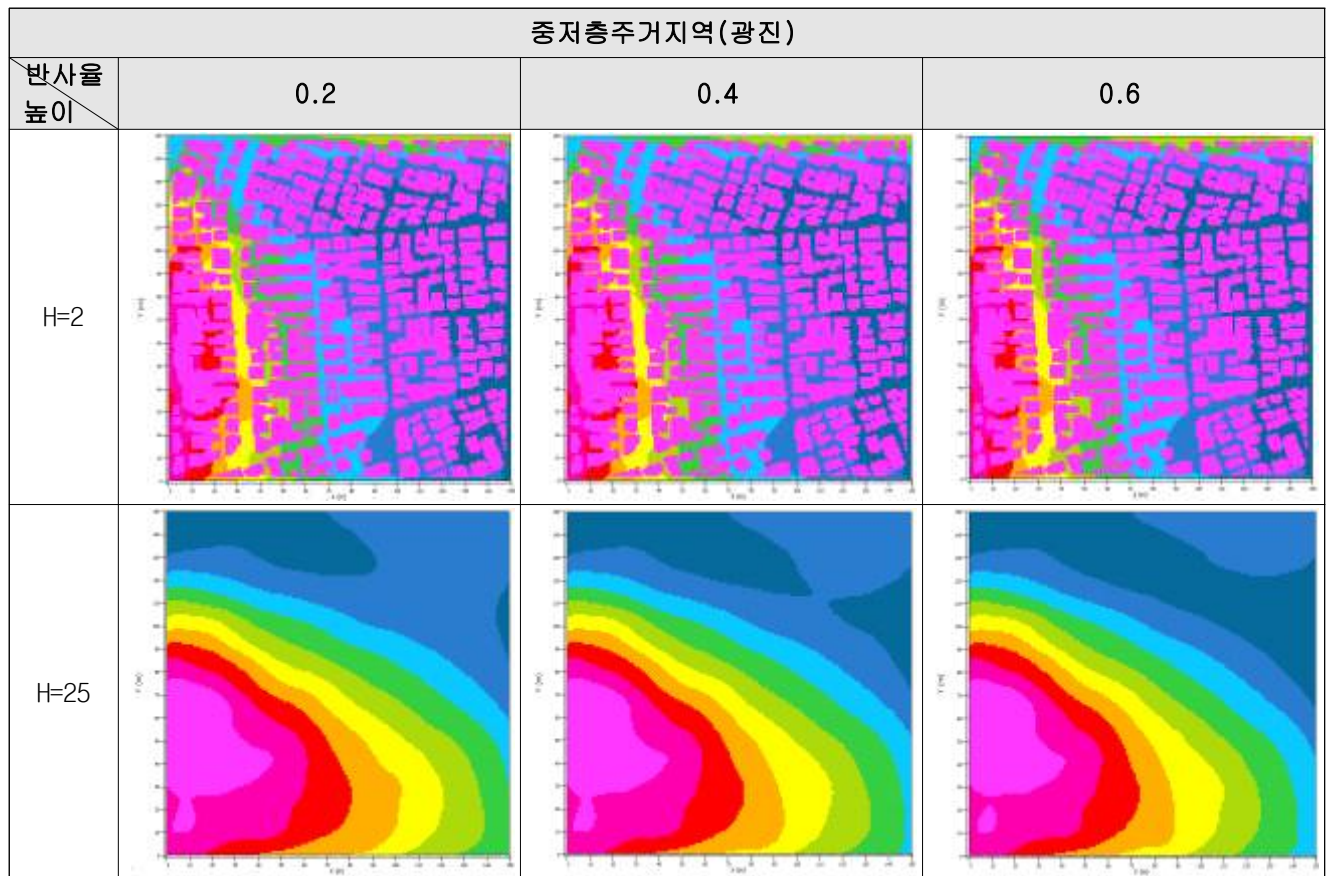
• 동절기<표 3.29~3.32>

-하절기와 마찬가지로 반사율이 높일수록 온도가 저감되는 것을 확인 할 수 있었다.

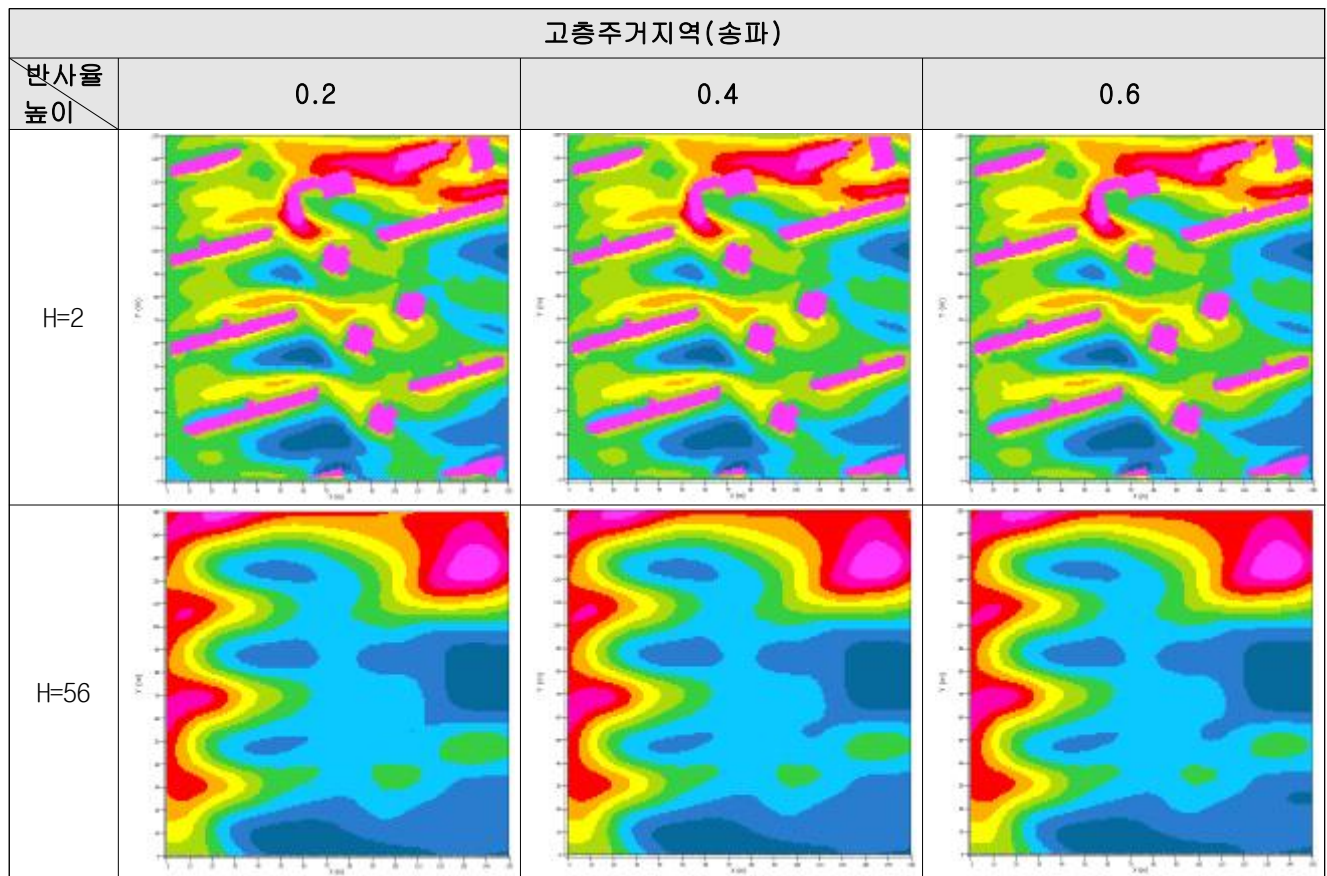
-반사율을 0.2(기준)에서 0.4로 변경할 경우 2m높이에서는 평균 0.06℃, 캐노피 높이에서는 평균 0.01℃가량 온도가 낮은 온도를 나타냈으며, 0.6으로 변경할 경우에는 2m 높이에서는 평균 0.12℃, 캐노피 높이에서는 평균 0.03℃의 낮은 온도를 나타냈다.

-하절기와 마찬가지로 캐노피 온도보다는 지상 2m의 높이에서 온도변화가 더 크게 나타났으며, 하절기 결과와 비교해 동절기의 온도변화가 적게 나타났다.

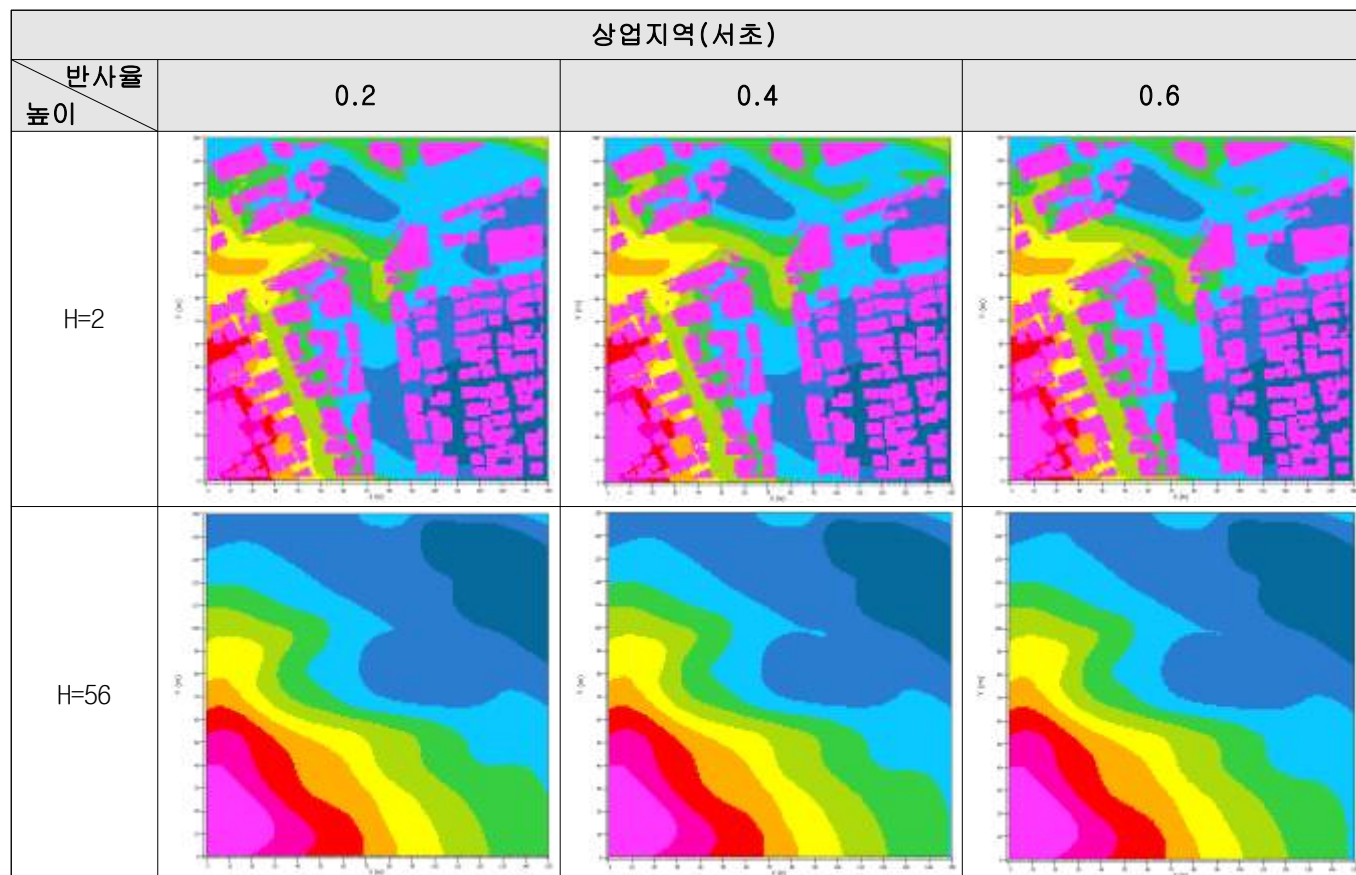
<표 3.29> 반사율 변화에 따른 중저층주거지역(광진)의 시뮬레이션 결과(동절기)



<표 3.30> 반사율 변화에 따른 고층주거지역(송파)의 시뮬레이션 결과(동절기)



<표 3.31> 반사율 변화에 따른 상업지역(서초)의 시뮬레이션 결과(동절기)



<표 3.32> 단지유형별 지붕 반사율변화에 따른 온도변화(동절기)

단지유형	측정 높이	온도	지붕면 반사율		
			0.2	0.4	0.6
중저층주거단지 (광진)	2m	평균온도	10.67	10.57	10.47
		편차	-	▼0.10	▼0.20
	건물높이(25m)	평균온도	9.43	9.39	9.36
		편차	-	▼0.04	▼0.07
고층주거단지 (송파)	2m	평균온도	10.44	10.40	10.39
		편차	-	▼0.04	▼0.05
	건물높이(56m)	평균온도	8.22	8.22	8.22
		편차	-	0.00	0.00
상업단지 (서초)	2m	평균온도	11.37	11.30	11.26
		편차	-	▼0.07	▼0.11
	건물높이(56m)	평균온도	7.84	7.84	7.83
		편차	-	0.00	▼0.01

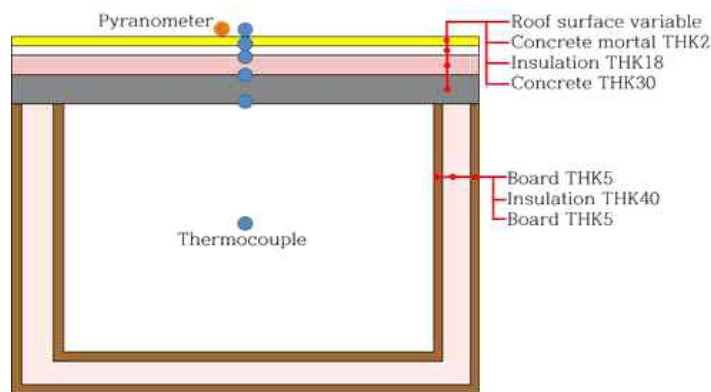
(나) PCM Cool Roof System 축열플레이트 열성능 분석

1) 마감재별 PCM Cool Roof System 열성능 실험

가) PCM Cool Roof System 실험체 제작

① 축소모형 실험체 제작

- 일반적인 슬래브 지붕의 단면구성을 참조하여 1/10 스케일인 600×600×600mm 크기로 축소모형을 제작하였다.
- 지붕을 제외한 벽체 및 바닥의 열출입을 막기 위하여 40mm의 단열재를 삽입하였으며, 지붕층의 기본구조는 (그림 3.66)와 같이 하부부터 콘크리트, 단열재, 누름 물탈의 순서로 제작하였다.



(그림 3.66) 축소모형의 구조 단면도

② Packing type PCM 제작

- PCM은 Melting point가 44℃인 RUBITHERM®사의 n-Docosane계열 PCM을 사용하였다.
- 크기는 (그림 3.67)와 같이 나일론필름에 PCM을 균일한 양과 간격으로 넓게 퍼지도록 제작하였다.

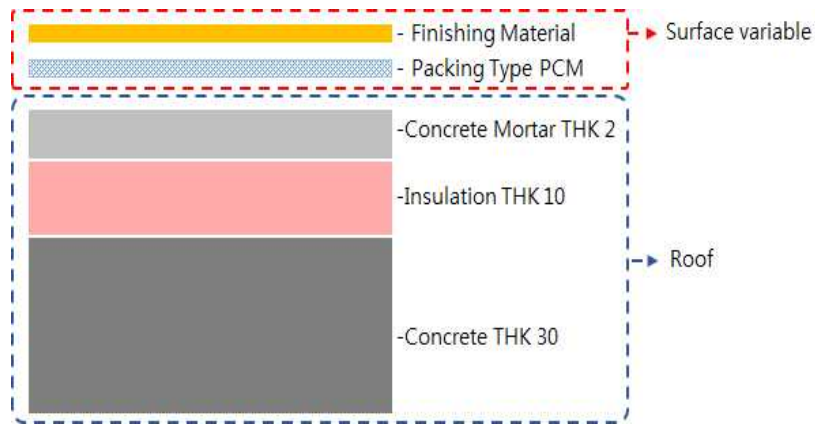


(그림 3.67) Packing type PCM 제작

나) PCM Cool Roof System 실험 변수 설정

① 지붕층 마감 변수 선정

- 국내에서 주로 사용되는 옥상 마감 종류인 석재(타일류), 목재(데크), 알루미늄(슬레이트)를 지붕층 상부의 마감변수로 선정하였다.
- (그림 3.68)과 같이 마감변수의 하부에 Packing type의 PCM을 삽입하여 표면온도 변화를 측정하였다.



(그림 3.68) PCM Cool Roof System 구조 단면도

② 비교 실험군

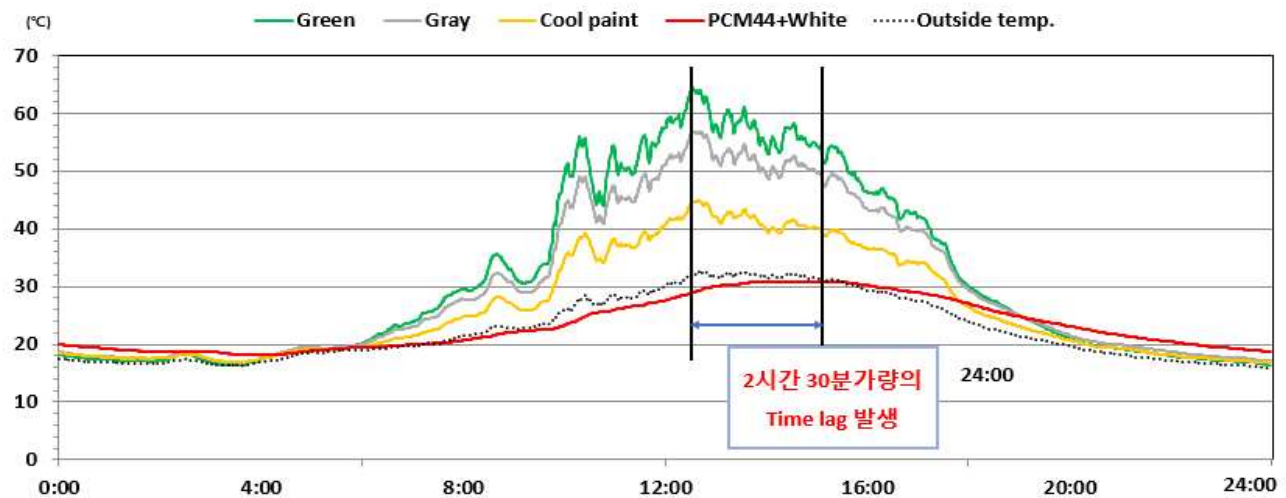
- 일반적으로 지붕층 마감재로 사용되는 녹색 및 회색우레탄 방수와 Cool Paint마감을 비교 실험군으로 한다. <표 3.33 참조>.
- Case별 마감재료의 표면온도와 외기온을 1분 간격으로 측정하였다.

<표 3.33> Case별 실험체의 구성

	Case 1	Case 2	Case 3
실험군	PCM+석재타일	PCM+목재	PCM+알루미늄
대조군	녹색우레탄방수 / 회색우레탄방수 / Cool paint		

다) 실험결과

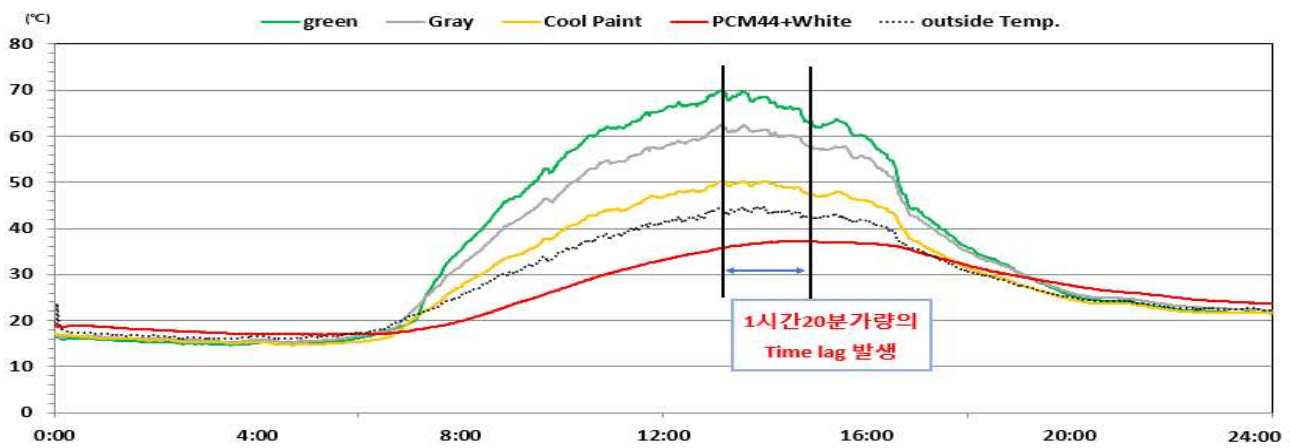
② Case 1. 석재타일(석재류) 마감



(그림 3.69) 석재타일 마감 표면온도 그래프

- 녹색우레탄 재료 표면온도 64.5℃, 회색우레탄 56.9℃, Cool Paint 44.9℃일 때, PCM적용한 석재타일(석재류) 온도는 30.9℃로 나타났다(온도차:33.6℃, 26.0℃, 14.0℃).(그림 3.69)
- 최고 외기온은 32.7℃였으며, PCM으로 인한 Time lag은 약 2시간 30분으로 나타났다.

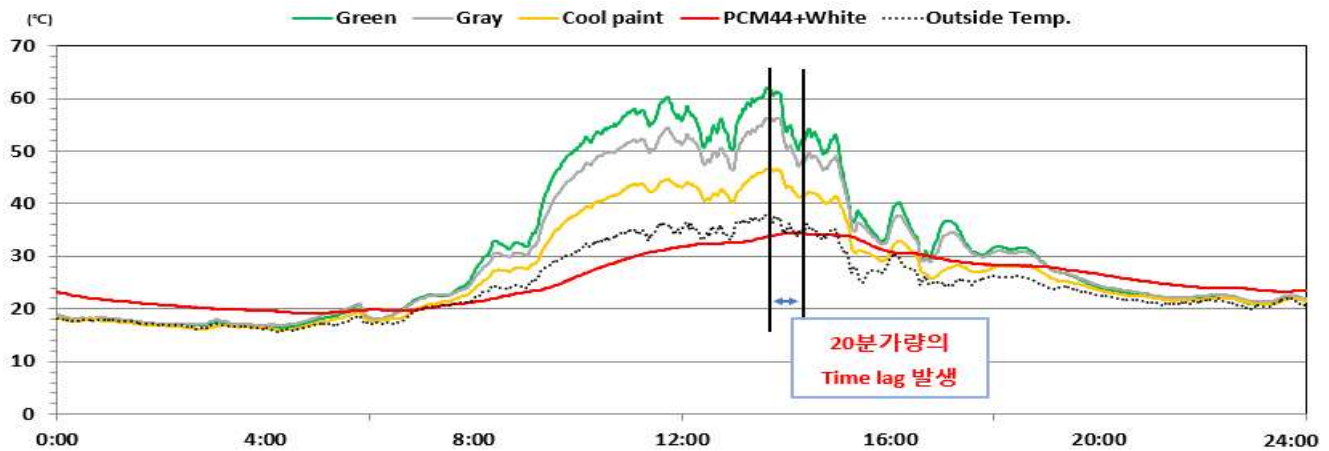
② Case 2. 목재(데크) 마감



(그림 3.70) 목재 마감 표면온도 그래프

- 녹색우레탄 재료의 표면온도 70.1℃, 회색우레탄 62.4℃, Cool Paint 50.3℃일 때, PCM을 적용한 목재(데크)의 온도는 37.2℃로 나타났다(온도차:32.9℃, 25.2℃, 13.1℃). (그림 3.70)
- 최고 외기온은 44.5℃였으며, PCM으로 인한 Time lag은 약 1시간 20분으로 나타났다.

③ Case 3. 알루미늄(슬레이트) 마감



(그림 3.71) 알루미늄 마감 표면온도 그래프

- 녹색우레탄 재료의 표면온도 62.0℃, 회색우레탄 56.4℃, Cool Paint 46.7℃일 때, PCM을 적용한 알루미늄(슬레이트)의 온도는 34.4℃로 나타났다(온도차:27.6℃, 22.0℃, 12.3℃). (그림 3.71)
- 최고 외기온은 38.0℃였으며, PCM으로 인한 Time lag은 약 20분으로 나타났다.

④ Case별 재료의 표면 최고 온도 측정결과

<표 3.34> Case별 재료의 표면 최고 온도 측정결과

(단위:℃)

		녹색 우레탄	회색 우레탄	Cool paint	PCM
case1	온도	64.5	56.9	44.9	석재타일
	PCM과의 온도차	33.6	26.0	14.0	30.9
case2	온도	70.1	62.4	50.3	목재
	PCM과의 온도차	32.9	25.2	13.1	37.2
case3	온도	62.0	56.4	46.7	알루미늄
	PCM과의 온도차	27.6	22.0	12.3	34.4

- 석재타일에 PCM을 삽입한 실험 결과, 석재타일의 표면 최고온도는 30.9℃로 녹색 우레탄, 회색 우레탄, Cool paint와 비교 할 경우 33.6℃, 26.0℃, 14.0℃ 더 낮은 온도를 나타냈다.
- 목재에 PCM을 삽입한 실험 결과, 목재의 표면 최고온도는 37.2℃로 녹색 우레탄, 회색 우레탄 Cool paint와 비교 할 경우 32.9℃, 25.2℃, 13.1℃ 더 낮은 온도를 나타냈다.
- 알루미늄에 PCM을 삽입하여 실험한 결과, 알루미늄의 표면 최고온도는 34.4℃로 녹색 우레탄, 회색 우레탄 Cool paint와 비교 할 경우 27.6℃, 22.0℃, 12.3℃ 더 낮은 온도를 나타냈다.

라) 소결

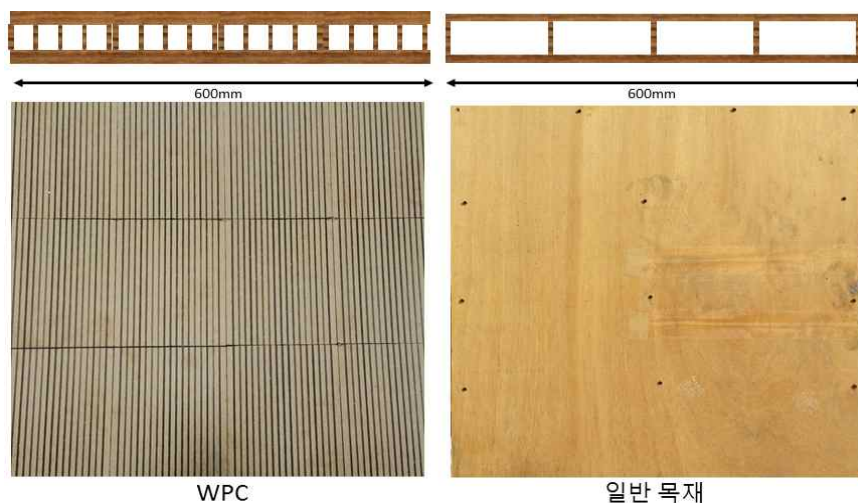
본 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 기존 옥상마감재료(녹색우레탄), 회색우레탄, Cool paint 그리고 PCM을 적용한 석재타일, 목재, 알루미늄의 온도 차이를 분석한 결과 석재타일과 목재가 알루미늄보다 약 3.6℃ 크게 나타났다.
- PCM 적용 재료의 경우 적게는 20분에서 많게는 2시간 30분가량의 Time-lag현상을 보이고 있었다. 이 같은 결과는 PCM의 축열성능으로 인한 결과로 판단되며 특히, 이러한 현상을 잘 이용하면 하절기 표면온도 및 냉방부하 저감효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.
- 마감 재료에 따른 표면온도측정결과 녹색 및 회색우레탄방수마감이 56℃~70℃의 높은 분포를 보였고, Cool paint는 평균 47.3℃의 분포를 나타냈다. 그러나 PCM재료는 평균 34.2℃로 녹색 및 회색우레탄방수재료보다 평균 27.9℃ 낮게, Cool paint보다도 13.1℃ 낮게 나타났다.

2) WPC(Wood Plastic Composite)의 열적 거동 실험

가) WPC 및 일반 목재 플레이트 열전도율 측정

- WPC와 일반목재 모두 600mmX600mm 으로 마감재 플레이트를 제작하여 열적 거동을 확인하였다(그림 3.72), <표 3.35>.
- 열전도율 측정결과 다음의 <표 3.35>과 같이 일반적인 콘크리트 보다 WPC와 목재가 각각 5배, 12배의 적은 열전도율을 갖는 것을 확인하였다.



(그림 3.72) WPC, 일반목재 모형제작

<표 3.35> 재료별 열전도율 측정값

Material	Thermal conductivity(W/m° C)
WPC	0.35
경질목재	0.15
연질목재	0.13
보통콘크리트	1.83

- WPC 플레이트는 TCi 분석을 통하여 열전도율을 측정하였고, 10회의 측정값의 평균을 통하여 중공층 포함시와 비포함시 0.55 W/m·K, 0.53 W/m·K의 열전도율을 측정하였다.
- 누름물탈은 일반적인 시멘트배합(1:3)의 몰탈로 열전도율은 1.4 W/m·K를 가지고 있다. 사용된 단열재는 압출법 보온판 1호로 0.028 W/m·K의 열전도율을 갖고 있다.
- 하부 콘크리트는 일반 배합비 (1:2:4)로 1.6 W/m·K의 열전도율을 가지고 있다<표 3.36~3.37>.

<표 3.36> 중공층 포함 WPC 열전도율 측정 결과

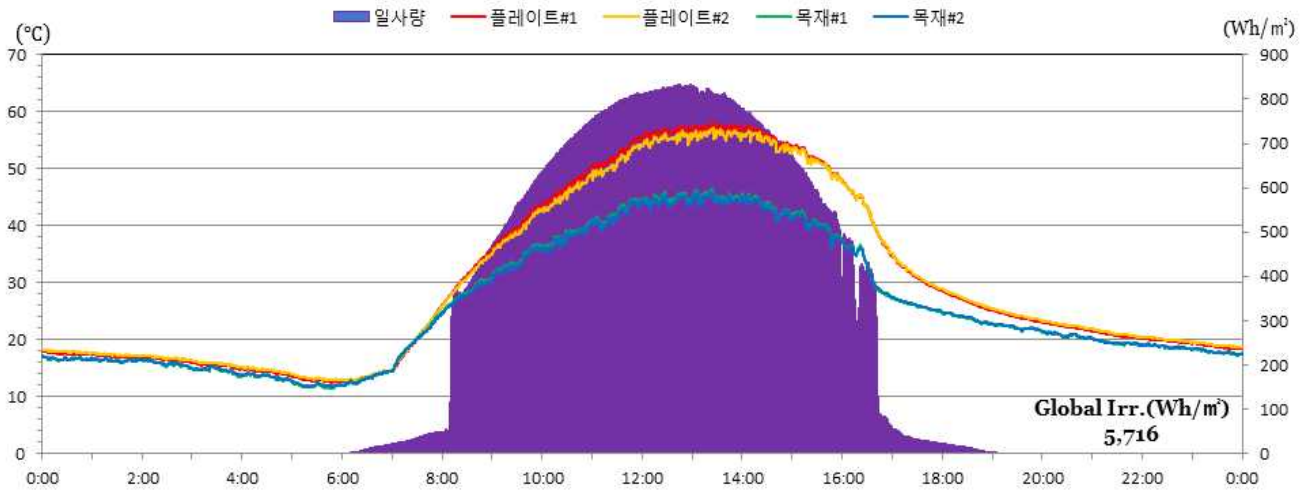
측정회차	Effusivity (Ws ² / m ² K)	k (W/mK)	1/m
1	887.9944	0.529941	96.88897
2	888.5313	0.530477	97.07762
3	889.8055	0.53175	96.99586
4	894.8415	0.536787	97.38058
5	890.3037	0.532248	97.11777
6	889.1223	0.531067	97.03074
7	893.0003	0.534945	97.3482
8	891.1271	0.533071	97.23239
9	894.2066	0.536152	97.3451
10	888.4203	0.530366	97.01608
	평균	0.53268	

<표 3.37> 중공층 미포함 WPC 열전도율 측정 결과

측정회차	Effusivity (Ws ² / m ² K)	k (W/mK)	1/m
1	899.1821117	0.541137	97.54179
2	906.0743065	0.548058	97.94915
3	913.4769912	0.555512	98.53692
4	906.1098626	0.548094	98.03331
5	908.2804648	0.550277	98.16699
6	911.3248005	0.553343	98.3449
7	915.3820019	0.557433	98.6515
8	911.1074731	0.553124	98.40718
9	911.2035677	0.553221	98.41604
10	913.5568462	0.555592	98.39406
	평균	0.551579	

나) 실험결과

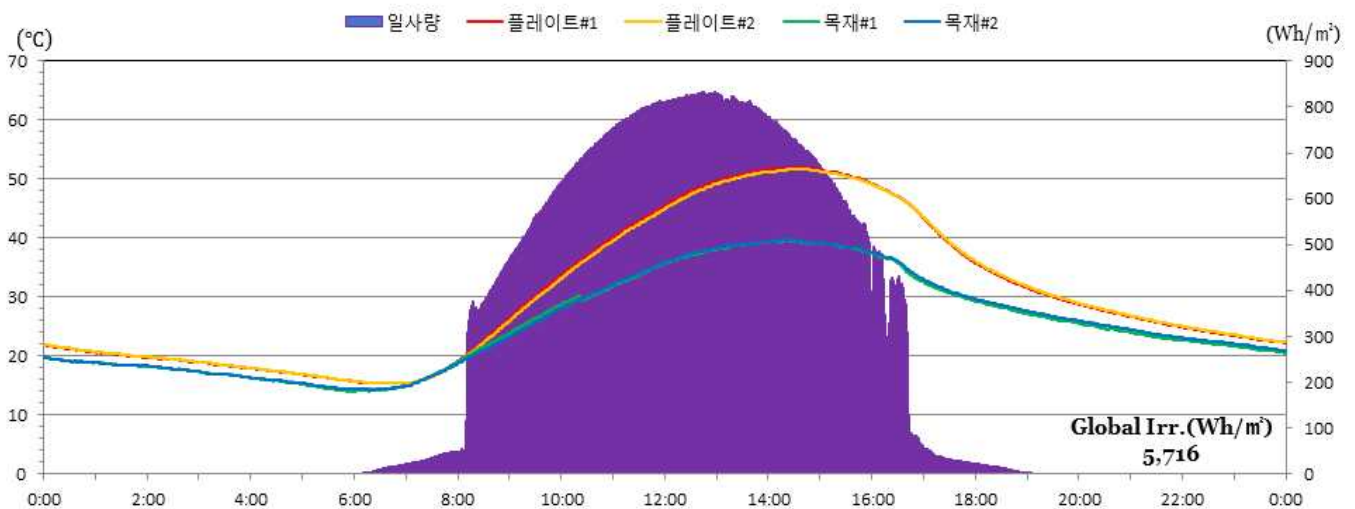
① 마감재 표면온도



(그림 3.73) 마감재 표면온도 그래프

- 마감재의 표면온도 측정결과 마감재 표면의 최고온도는 WPC가 58.0℃, 목재가 46.4℃로 나타났으며, 평균온도는 WPC가 30.1℃, 목재가 25.7℃로 나타났고, 최저온도는 WPC가 12.5℃, 목재가 11.3℃이다.

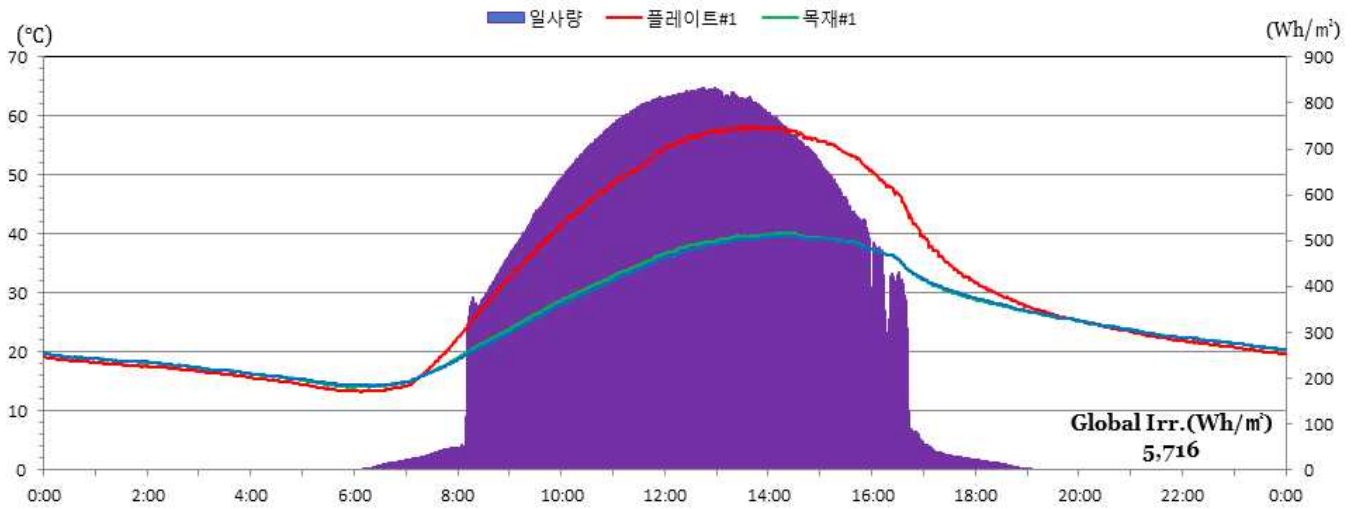
② 마감재 내부온도



(그림 3.74) 마감재 내부온도 그래프

- 마감재 내부온도 측정결과 마감재 표면의 최고온도는 WPC가 51.9℃, 목재가 39.8℃로 나타났으며, 평균온도는 WPC가 30.3℃, 목재가 25.5℃로 나타났고, 최저온도는 WPC가 15.3℃, 목재가 14.2℃이다.

③ 마감재 하부온도



(그림 3.75) 마감재 하부온도 그래프

- 마감재 하부온도 측정결과 마감재 표면의 최고온도는 WPC가 58.2℃, 목재가 40.2℃로 나타났으며, 평균온도는 WPC가 30.9℃, 목재가 25.5℃로 나타났고, 최저온도는 WPC가 13.2℃, 목재가 14.0℃이다. 다음의 <표 3.38>는 각 레이어별 온도를 나타낸다.

<표 3.38> 각 레이어별 온도

(단위:℃)

		WPC	목재	온도차
마감재 표면	최고온도	58.0	46.4	11.6
	평균온도	30.1	25.7	4.4
	최저온도	12.5	11.3	1.2
마감재 내부	최고온도	51.9	39.8	12.1
	평균온도	30.3	25.5	4.8
	최저온도	15.3	14.2	1.1
마감재 하부	최고온도	58.2	40.2	18.0
	평균온도	30.9	25.5	5.4
	최저온도	13.2	14.0	-0.8

다) 소결

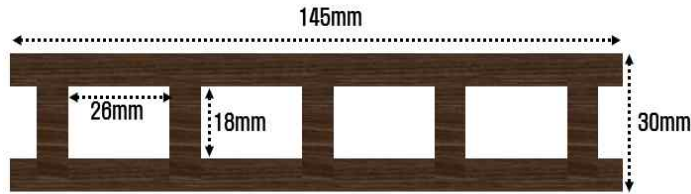
본 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- WPC와 목재의 측정결과 콘크리트보다 열전도율이 낮은 것을 확인하였으며, WPC와 목재의 열전도율 비교에서는 0.2(W/m℃)로 목재가 낮게 나타났다. 이러한 열전도율의 차이로 인하여, 축소모형 실험에서 목재의 표면, 내부 및 하부의 온도결과가 낮게 나타나고 있었다.
- 최고온도는 WPC가 58.0℃, 목재가 46.4℃로 11.6℃의 차이를 보였고, 평균온도 차이는 4.4℃, 최저온도는 1.2℃의 차이를 보였다. 이와 같이 WPC보다 목재가 더 낮은 온도가 나타나는 결과는 마감재의 내부와 하부에서도 동일하게 나타나고 있음을 확인하였다.
- 실험결과 목재가 WPC에 비하여 낮은 온도를 나타내고 있었지만, 일반 목재의 경우내구성과 강도가 상대적으로 부족하여 PCM Cool Roof System의 마감재로 사용하기에는 더 세부적인 고려가 요구되었다.

3) WPC를 적용한 PCM Cool Roof System 열성능 실험

가) WPC 및 Packing type PCM 제작

- 실험에 사용 된 WPC는 Packing type PCM을 적용 적용할 수 있는 중공층이 있는 기성제품을 선정하였다(그림 3.76).



(그림 3.76) WPC 구조 단면도

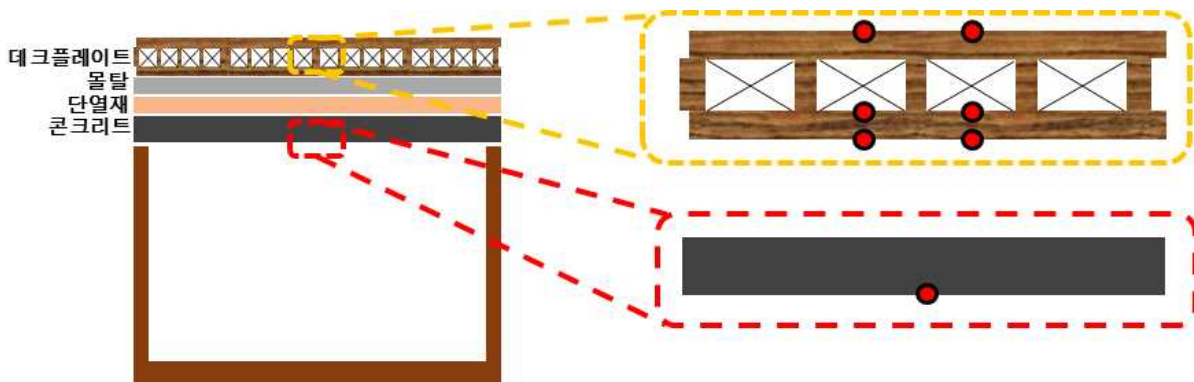
- WPC의 중공층에 삽입 될 Packing type PCM은 다음의 (그림 3.77)과 같이 35g/pack으로 제작하였다.



(그림 3.77) Packing type PCM 제작

나) 축소모형 실험체 제작

- 축소모형 실험체는 일반적인 슬래브 지붕의 단면구성을 참조하여 1/10 스케일, 600×600×600mm 크기로 제작하였고, 지붕을 제외한 벽체 및 바닥의 열출입을 막기 위하여 40mm의 단열재를 삽입하였다.
- 지붕층의 기본구조는 다음의 (그림 3.78)과 같이 하단부에서부터 콘크리트, 단열재, 누름 몰탈의 순서로 제작하였다. 온도측정 위치는 플레이트의 상부, 플레이트 내부, 플레이트하부, 실내측 콘크리트 하부에서 측정하였다.



(그림 3.78) 축소모형의 구조 단면도 및 온도측정 위치

다) 변수선정

- PCM이 적용되지 않은 단일 WPC 플레이트
- RT 44 PCM(44℃)이 적용된 WPC
- Bio-PCM(26℃)이 적용된 WPC

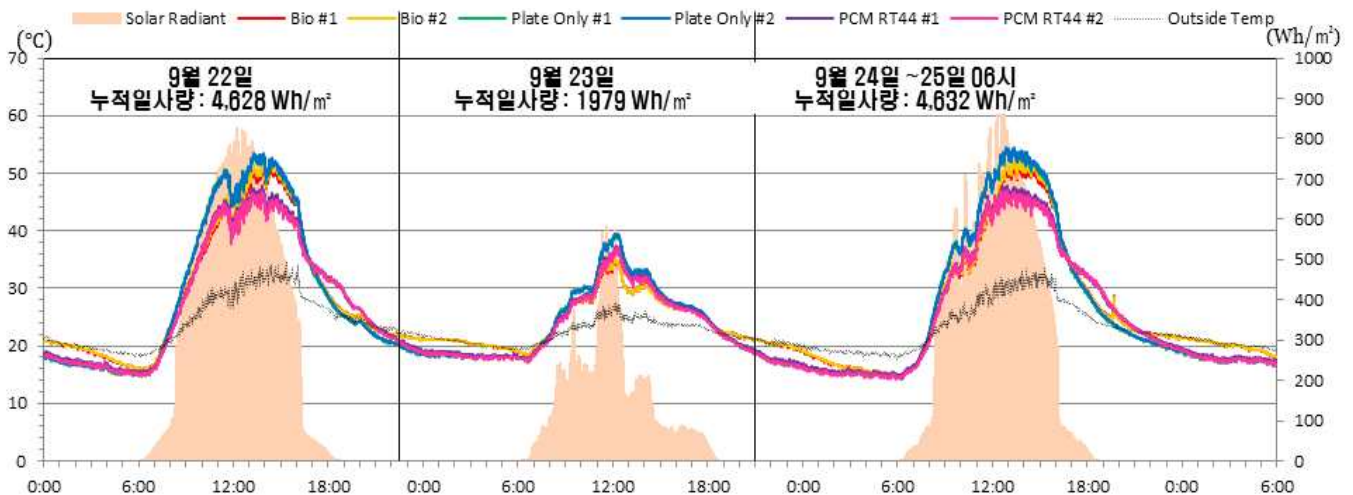
<표 3.39> 적용된 PCM (Bio PCM, RT 44 PCM)

구 분	Bio PCM	RT 44 PCM (n-Paraffins)	
상변화온도	23 ~ 26℃	44℃	
주요재료	식물성	파라핀계	
1팩 당 무게 (잠열량)	34.77g (~200J/g)	36.18g (241J/ g)	
사진			 

라) 실험결과

① 실험개요

- 실험은 2015년 9월 22일부터 9월 24일까지 서울특별시 동작구 흑석동에 위치한 중앙대학교의 208관 건물옥상에서 장애물로 인한 일사의 방해가 없는 실험환경을 조성하여 측정을 실시하였다.
- 다음의 실험결과(그림 3.79)은 측정 3일간의 데이터이며, 상세한 데이터 분석을 위하여 9월 24일 데이터를 활용하였다(그림 3.80~83).
- 9월24일의 평균기온은 23.4℃, 평균운량은 3.0, 평균풍속은 1.9m/s이다.

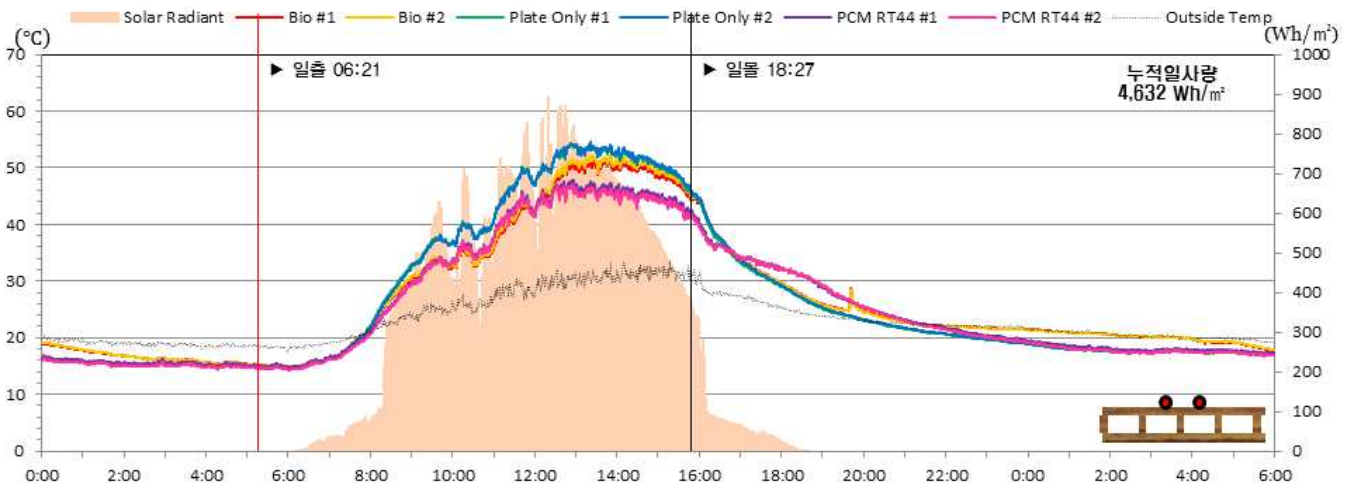


(그림 3.79) 측정결과 (9월22~24일)

② 실험내용

■ 플레이트 표면온도

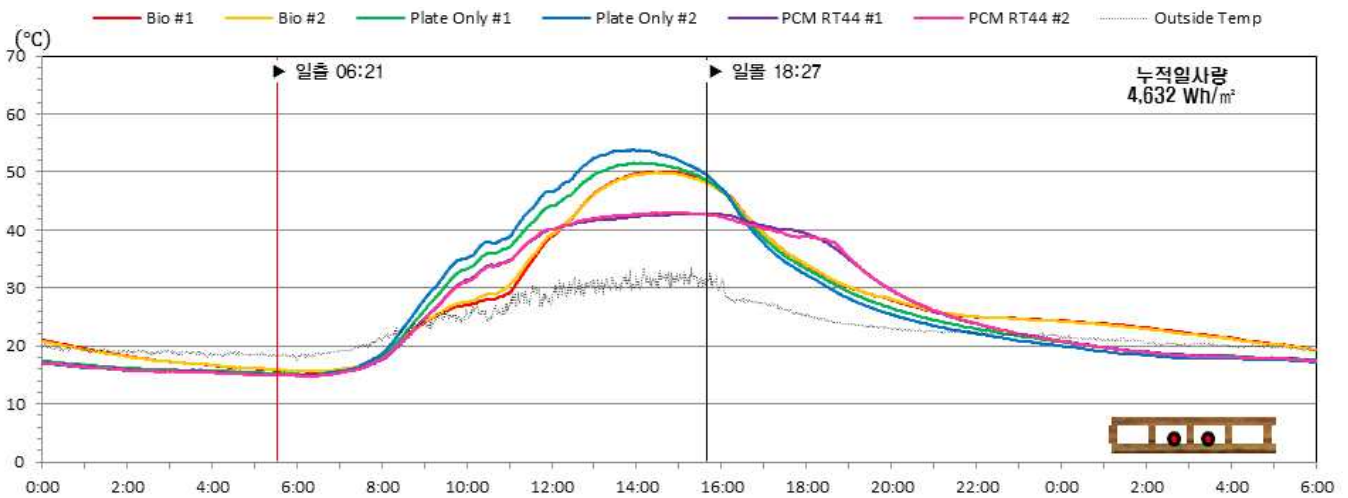
- 플레이트 표면온도 측정결과 최고온도는 단일 플레이트가 54.5℃, Bio PCM이 52.2℃, RT 44 PCM은 47.7로 나타났으며, PCM이 들어있지 않은 단일 플레이트의 온도가 가장 높았으며, RT 44 PCM과 비교 시 최대 6.8℃의 차이가 나타났다.



(그림 3.80) 플레이트 표면온도 그래프

■ 플레이트 내부온도

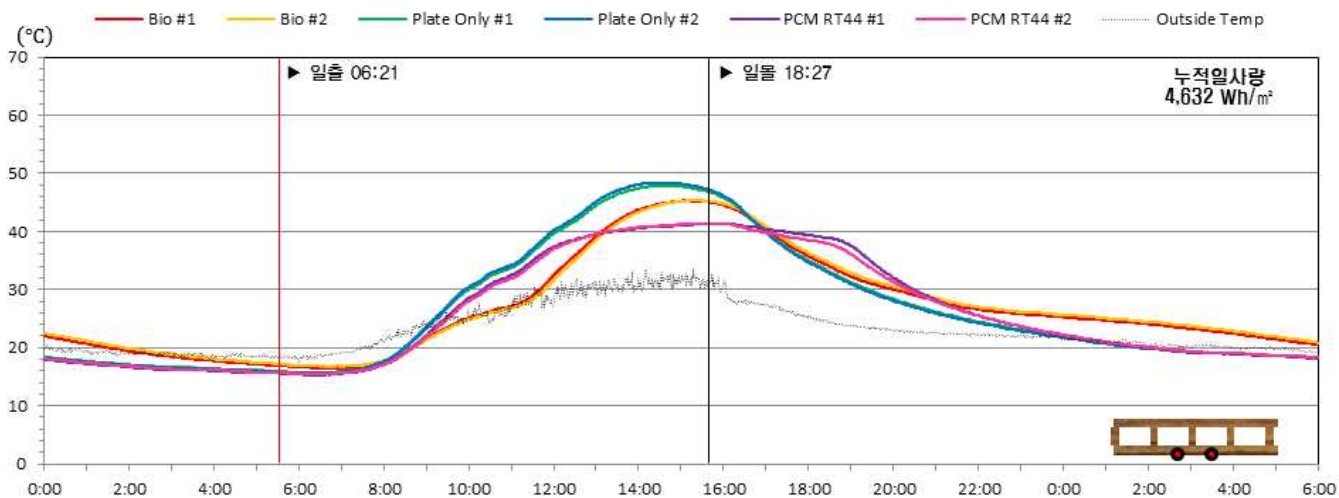
- 플레이트 내부온도 측정결과 플레이트 내부온도도 최고온도가 단일 플레이트, BIO-PCM, RT 44 PCM 순으로 나타났다. 마감재 내부의 경우 PCM과 접해있기 때문에 각 PCM의 상변화 온도와 구간에서 Time lag 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있었는데, Bio-PCM의 경우 약 2시간 30분 일정한 온도(24~27°C)를 유지하였고, n-docosane-PCM 의 경우 약 6시간 일정한 온도(43°C 내외)를 유지되는 것을 확인하였다.



(그림 3.81) 플레이트 내부온도 그래프

■ 플레이트 하부온도

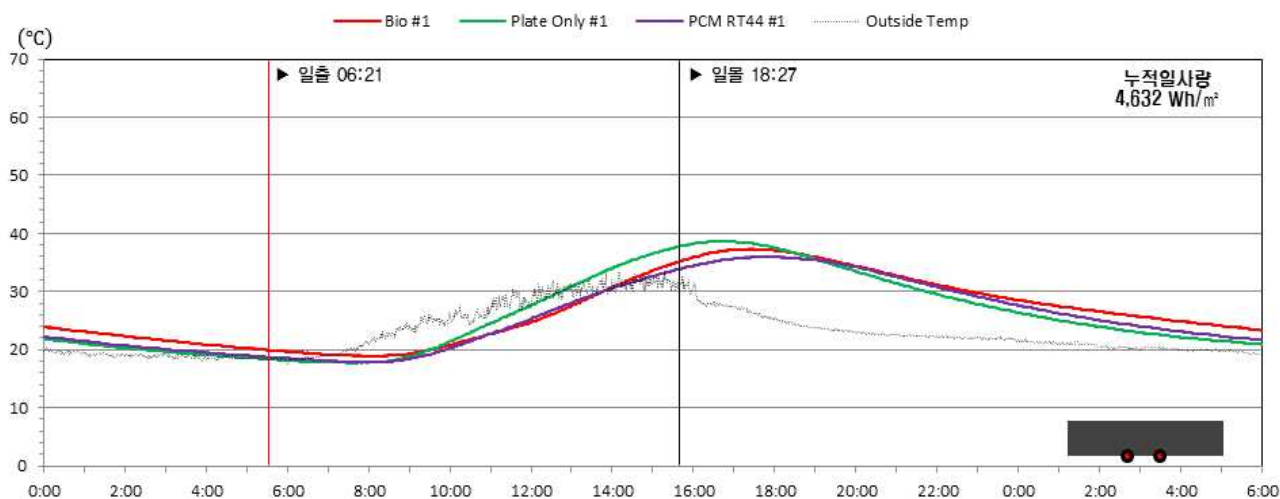
- 플레이트 하부온도 측정결과 플레이트 하부온도 역시 플레이트 표면 및 플레이트 내부와 동일한 경향을 보였으며, 오전 중 온도는 플레이트 내부와 비교 시 낮았고 야간 냉각 시 온도는 약 1~2°C 높게 나타났는데, 이는 하부의 콘크리트층의 영향으로 인한 것으로 사료된다.



(그림 3.82) 플레이트 하부온도 그래프

■ 실내 천장온도

- 실내측 천장온도 측정결과 실내 천장면의 최고 온도 도달 시간은 단일 플레이트 16시 40분, Bio PCM 17시 20분, RT 44 PCM 17시 31분 순서로 나타났다. Bio PCM의 경우 일몰 이후 냉각 시 다른 실험체에 비하여 온도의 냉각 속도가 느린 것을 확인하였다. 이에 따라 일몰 이후 실내 최저 온도는 Bio PCM 23.3℃, RT 44 PCM 21.7℃, 단일 플레이트 20.9℃ 순으로 나타났다.



(그림 3.83) 실내 천장온도 그래프

마) 소결

본 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- WPC에 PCM을 적용하지 않은 단일 플레이트에 비하여 PCM을 적용한 플레이트가 표면 온도가 더 낮게 나타났다.
- PCM의 melting point 온도차별 비교에서는 Bio-PCM보다 RT 44 PCM의 표면온도가 더 낮게 나타났다. 이는 내부 PCM의 열획득으로 인한 표면 열 손실에 의한 것으로 판단되며, 상대적으로 상변화 온도가 높은 RT 44 PCM의 경우 상변화 온도 범위에서 최고점을 유지하는 경향을 확인하였다.
- 따라서, WPC+PCM 혼합재료를 지붕마감재에 적용할 경우, 일반 건축재료 보다 표면온도가 낮게 나타나고 있음을 확인하였다.
- 특히, Melting Point 44℃인 RT 44 PCM이 Bio PCM 26℃ 보다 온도 저감에 적절한 것으로 나타났다.

4) PCM Cool Roof System의 마감색상별 열성능 실험

가) Brown, White색상의 PCM Cool Roof System 축소실험 모형제작

- Packing type PCM과 WPC를 마감색상별 열성능 실험을 위해 Brown, White 색상의 두 제품을 제작하였다.
- 기성제품인 WPC의 경우 갈색(Brown)으로 출시되어 선정하였고, 흰색(White)의 경우 Cool Roof 마감색상으로 주로 사용되기 때문에 WPC에 페인트를 도포하여 제작하였다.
- 색상 및 적용 PCM의 변수는 다음의 <표 3.40>과 같으며, 축소모형을 사용하여 실험을 실시하였다(그림 3.84~85).



(그림 3.84) PCM Cool Roof System의 제작



(그림 3.85) 축소모형 실험

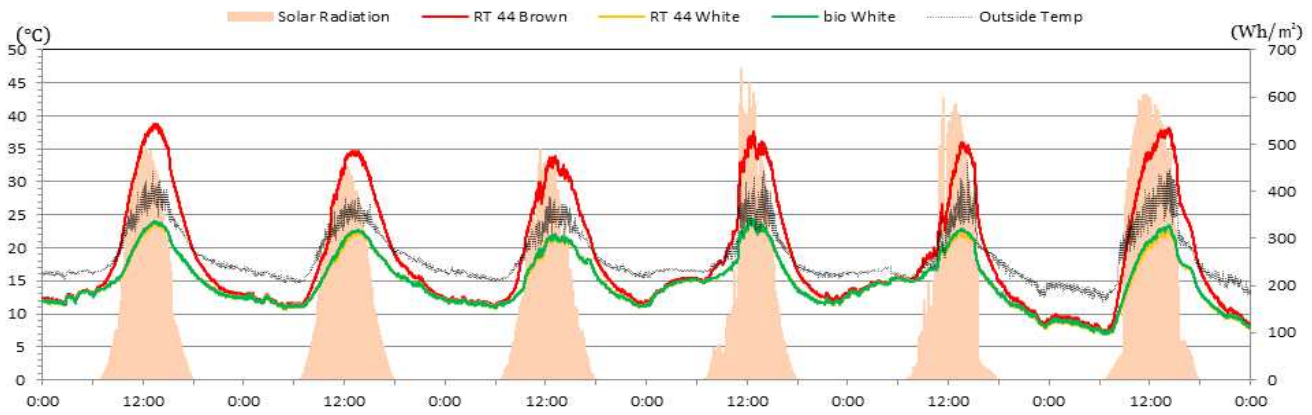
<표 3.40> 변수선정

	비교실험 1				비교실험 2			
	PCM종류	색상	PCM종류	색상	PCM종류	색상	PCM종류	색상
실험군	RT 44 PCM	White	RT 44 PCM	Brown	Bio 25 PCM	White	Bio PCM	White
	색 - White, Brown				PCM 종류 - RT 44 PCM, Bio PCM			

나) 실험결과

① 실험개요

- 실험은 2015년 10월 20일부터 10월 25일까지 서울특별시 동작구 흑석동에 위치한 중앙대학교 208관 건물 옥상에서 장애물로 인한 일사의 방해가 없는 실험환경을 조성하여 측정을 실시하였다.
- 다음의 실험결과(그림 3.86)는 측정한 6일의 데이터를 나타내며, 보다 상세한 데이터 분석을 위하여 10월 20일 데이터를 분석하였다(그림 3.87~90). 10월 20일의 평균기온은 16.6℃, 평균운량은 2.9, 평균풍속은 1.6m/s이다.

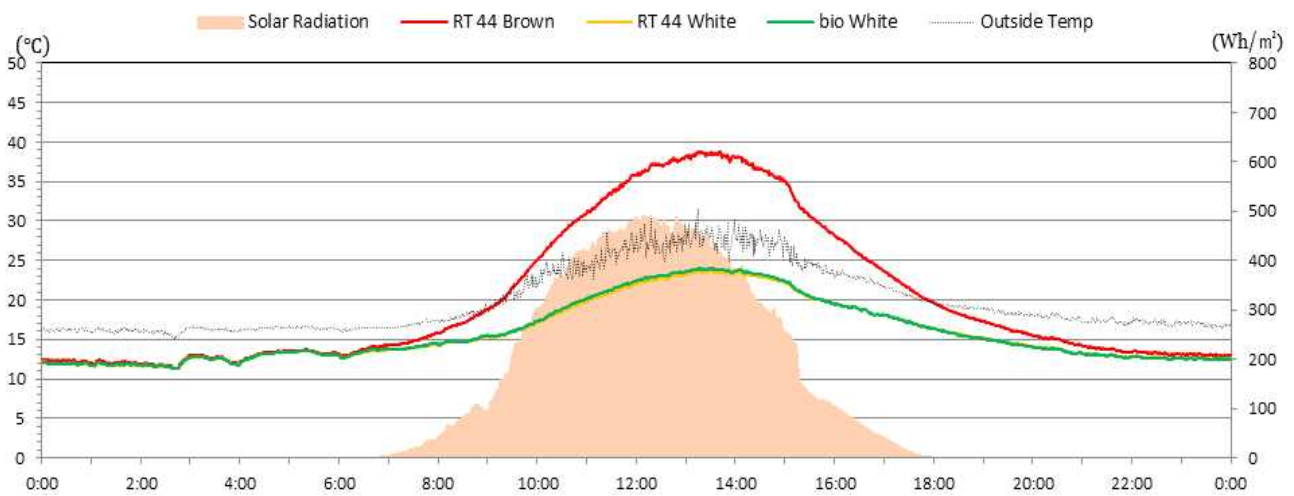


(그림 3.86) 측정결과 (10월 20~25일)

② 실험내용

■ 플레이트 표면온도

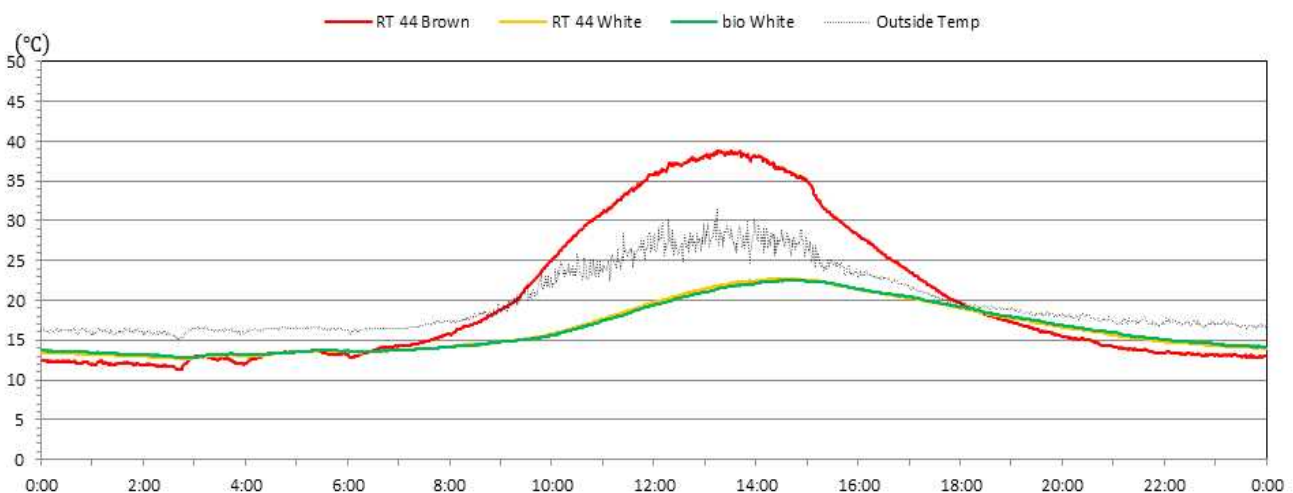
- 플레이트 표면온도 측정결과 표면색에 따른 열성능은 플레이트가 Brown일 때 최고온도가 39°C일 때, White는 24°C내외로 약 15°C의 차이가 나타났다. 그러나, PCM 종류에 따른 열성능은 표면온도에서는 PCM 종류에 따른 차이가 없는 것으로 나타났다.



(그림 3.87) 플레이트 표면온도 그래프

■ 플레이트 내부온도

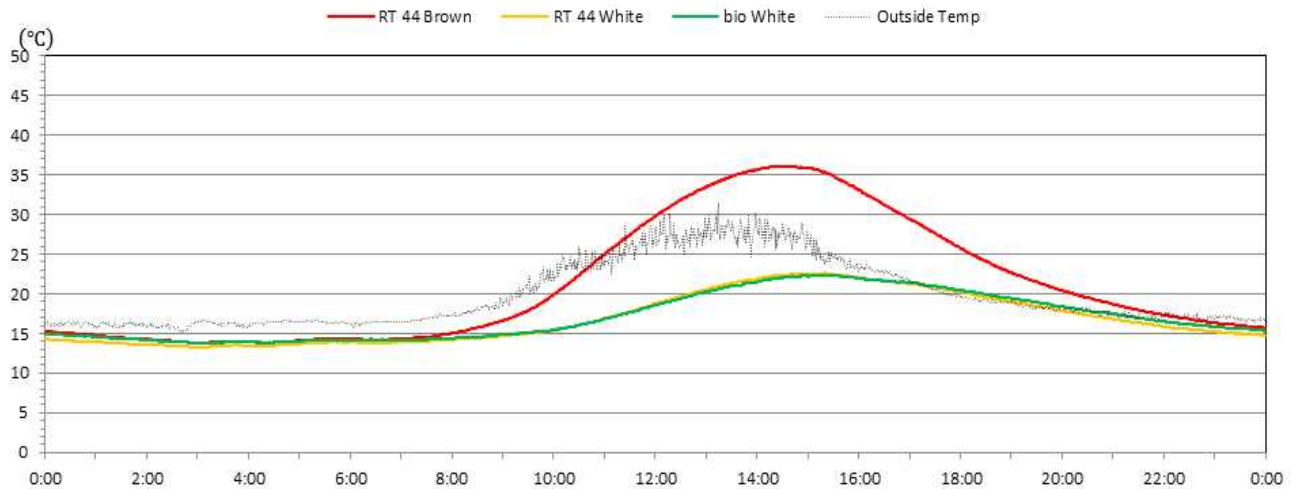
- 플레이트 내부온도 측정결과 표면색에 따른 열성능은 표면온도에서 나타난 차이와 크게 다르지 않았다. PCM 종류에 따른 열성능 또한 표면온도에서와 같이 PCM 종류에 따른 차이가 없는 것으로 나타났다.



(그림 3.88) 플레이트 내부온도 그래프

■ 플레이트 하부온도

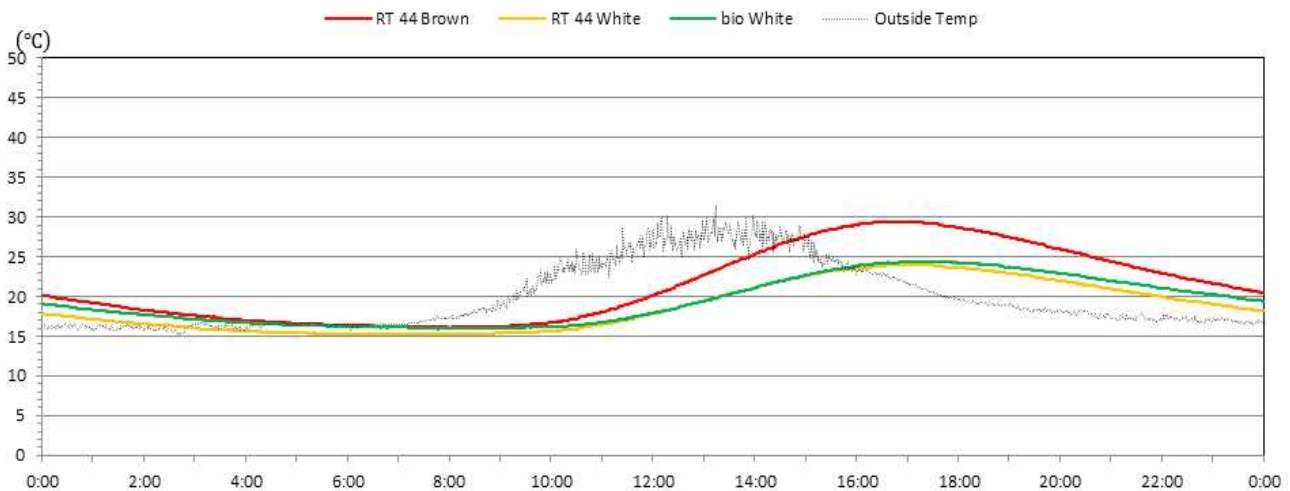
- 플레이트 하부온도 측정결과 표면색에 따른 열성능은 플레이트가 Brown일 때 최고온도가 36℃, White는 22℃로 White가 약 14℃의 낮게 나타났다. PCM 종류에 따른 열성능 또한 표면온도에서와 같이 PCM 종류에 따른 차이가 없는 것으로 나타났다.



(그림 3.89) 플레이트 하부온도 그래프

■ 실내 천장온도

- 실내 천장면 측정결과 표면색에 따른 열성능은 플레이트가 Brown일 때 최고온도가 30℃일 때, White는 24℃내외로 약 6℃의 차이가 나타났다. PCM 종류에 따른 열성능 또한 표면온도에서와 같이 PCM 종류에 따른 차이가 없는 것으로 나타났다.



(그림 3.90) 실내 천장온도 그래프

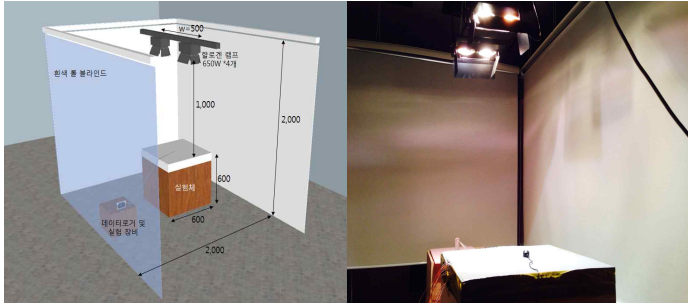
다) 소결

- 표면온도는 Brown이 38.9℃, White는 23.7℃로 15.2℃의 차이를 보였다.
- 플레이트 내부온도는 Brown이 38.9℃, White는 22.8℃로 16.1℃ 차이내고, 플레이트 하부온도는 Brown이 36.1℃, White는 22.6℃로 13.5℃, 실내 천장면온도는 Brown이 29.4℃, White는 24.0℃로 5.4℃의 차이를 보였다.
- PCM 종류에 따른 열성능 측정결과 주간동안에는 차이가 거의 없었고, 야간 냉각 시 Bio-PCM이 0.5℃ 높게 나타났다.

5) 인공기후 실험동을 이용한 PCM Cool Roof System 열적 거동 실험

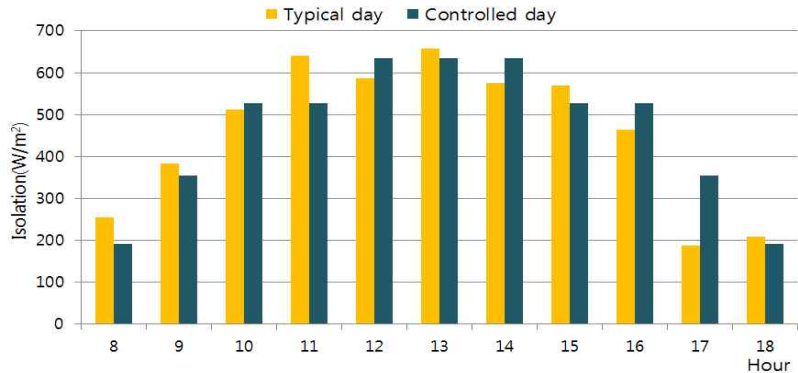
가) 인공기후 실험동 구축

- 인공기후실험동의 규모는 8m³으로 할로겐램프를 조절하여 국내 하절기의 평균 일사량과 유사한 환경을 조성하여 실내 온도는 약 30℃를 유지한다.
- 다음의 (그림 3.91)은 실험동의 상세 조감도 및 할로겐램프설치 모습을 나타낸다.
- 인공기후 실험동은 할로겐 램프 650W 2개 2세트로 구성된 광원과 일사와 같은 환경 조성을 위하여 내부 4방위 전체에 반사 가림막으로 구성되어 있다.
- 외부 환경의 영향을 최소화하기 위하여 인공기후 실험동 벽체에 내부단열을 실시하였다.
- 광원의 종류는 FBE 및 DWE로 통칭되는 사진 촬영용 램프로 선정하였다.



(그림 3.91) 인공기후 실험동

- 할로겐램프의 일사량 선정은 하절기(6월~8월) 표준기상데이터에 의한 일 평균일사량과 최대 일사량을 비교하여 선정하였다 <표 3.41>.
- 일출부터 일몰까지 총 4단계로 시간에 따라 일사량 변화를 주어 측정하였다(그림 3.92).



(그림 3.92) 일반적인 하절기 일사량과 실험 대푯값 일사량 비교

<표 3.41> 일사량 조절 단계와 표준기상데이터 비교

시간		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Total
표준 기상 데이 터	최대값 (W/m²)	316	475	669	788	875	897	833	783	669	488	266	7,059
	대표값 (W/m²)	255	383	511	641	586	658	575	569	464	188	208	5,038
	평균값 (W/m²)	61	222	347	538	438	597	519	338	272	250	127	3,709
실험 데이 터	조절값 (W/m²)	191	354	528	528	634	634	634	528	528	354	191	5,104
	조절 단계	1 (50%)	2 (100%)	3 (150%)	3 (150%)	4 (200%)	4 (200%)	4 (200%)	3 (150%)	3 (150%)	2 (100%)	1 (100%)	-

- 일사량 조절은 디밍 제어를 통하여 제어를 하였으며, 각 단계별 일사량 측정기를 통하여 일사량 조절량을 확인하였다.
- 실험 시 일사량은 실험 대포깁을 기준으로 조절하여 평균적으로 5,100 W/m² 내외를 만족하여 인공기후 실험동의 타당도를 확보하였다.

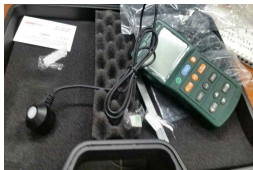
나) 축소모형 실험체 제작 및 측정 장비

- WPC 데크 플레이트 표면에 실험에 사용 된 세 가지 마감색상수성 도료를 도포하였다.
- 반사율은 각각 흰색:0.47, 회색:0.22, 갈색:0.17이다.
- 실험에 사용 된 PCM은 25℃(Bio 25), 30℃(Bio 30), 34℃(Bio 34), 44℃(RT 44) 네 가지를 적용하였다<표 3.42>.
- 실험을 위한 측정 장비는 일사계, 디지털 온습도계 알베도미터, 데이터로거를 사용하였으며, 상세 장비 현황은 다음의 <표 3.43>과 같다.

<표 3.42> 변수선정

플레이트 마감 색상				PCM Melting point				
마감색상	흰색	회색	갈색	PCM종류	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
반사율	0.47	0.22	0.17	Melting point	25℃	30℃	34℃	44℃
비 고				비 고				

<표 3.43> 측정 기자재

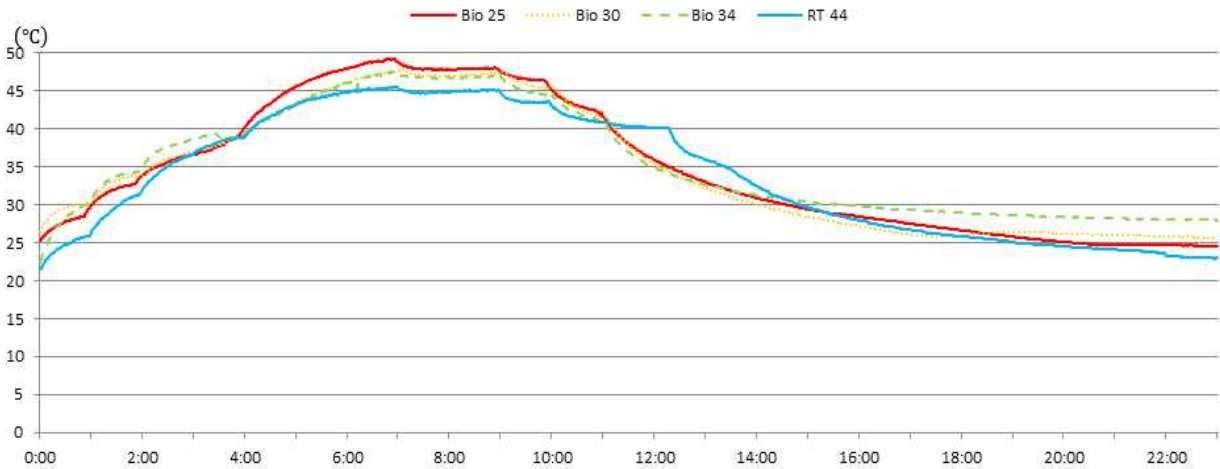
	일사계	디지털 온습도계	알베도미터 및 일사계	데이터로거
제품명	TES 132	SK-L200TH II α	LP PYRA 10	midi LOGGER GL800
측정 범위	2000W/ m ²	-15℃~65℃	-40℃~80℃	-
오차 범위	±5%	±0.1℃	±0.8%	±3%
비 고				

다) 실험 결과 및 분석

① 흰색마감(반사율 : 흰색 0.47)

■ 흰색마감 플레이트 표면온도 측정결과

- 표면이 흰색 마감(반사율 0.47)의 경우 표면온도의 최대값은 Bio 25(상변화 온도 25℃)가 49.3℃로 가장 높았고, Bio 30, Bio 34(상변화 온도 30℃, 34℃)인 경우가 약 1.4℃ 낮은 47.9℃의 온도를 나타내었다. RT 44(상변화 온도 44℃)는 45.5℃를 나타내었다.



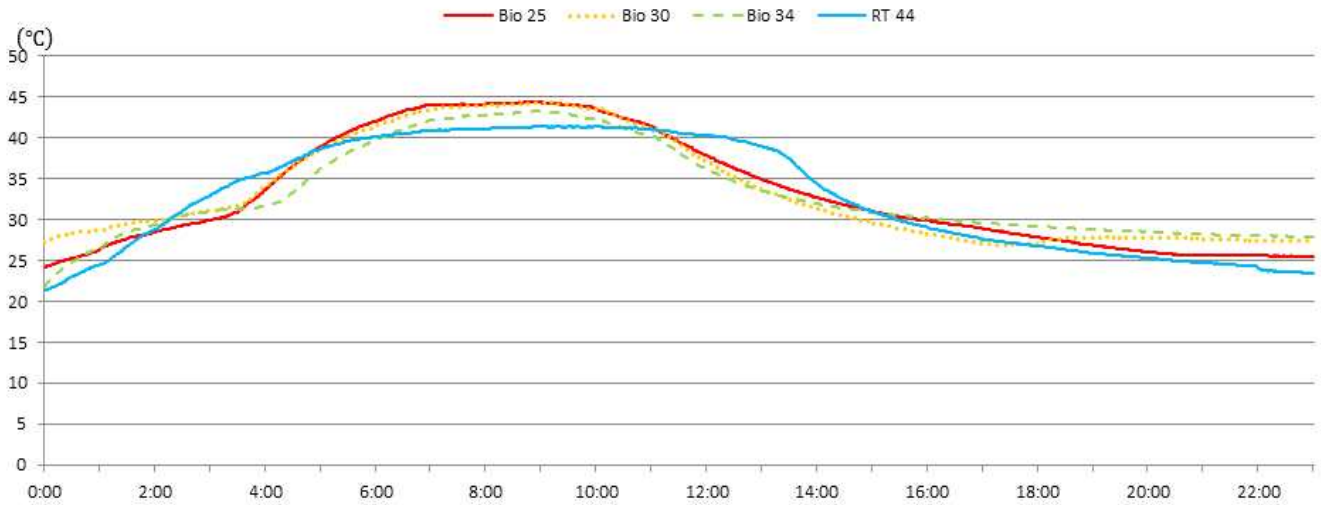
(그림 3.93) 흰색마감 플레이트 표면온도 그래프

<표 3.44> 흰색마감 표면온도 측정결과

주간 (0시간~11시간)	플레이트 표면 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	49.25	47.90	47.65	45.50
평균	41.60	41.18	41.06	39.36
최저	25.35	26.40	22.50	21.50
야간 (11시간~24시간)	플레이트 표면 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	41.60	41.65	41.05	40.80
평균	28.71	28.59	30.36	28.98
최저	24.55	25.65	27.85	22.90
전체 (0시간~24시간)	플레이트 표면 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	49.25	47.90	47.65	45.50
평균	34.87	34.61	35.47	33.94
최저	24.55	25.65	22.50	21.50

■ 흰색마감 플레이트 내부온도 측정결과

- 플레이트 내부 측정결과 표면 흰색(반사율 0.47) 플레이트 내부의 온도는 표면온도의 영향으로 인해 같은 양상을 보인다. 최고온도는 Bio 25와 Bio 30이 44.5℃로 가장 높았고 Bio 34가 43.4℃, RT 44가 41.4℃를 나타내었다.



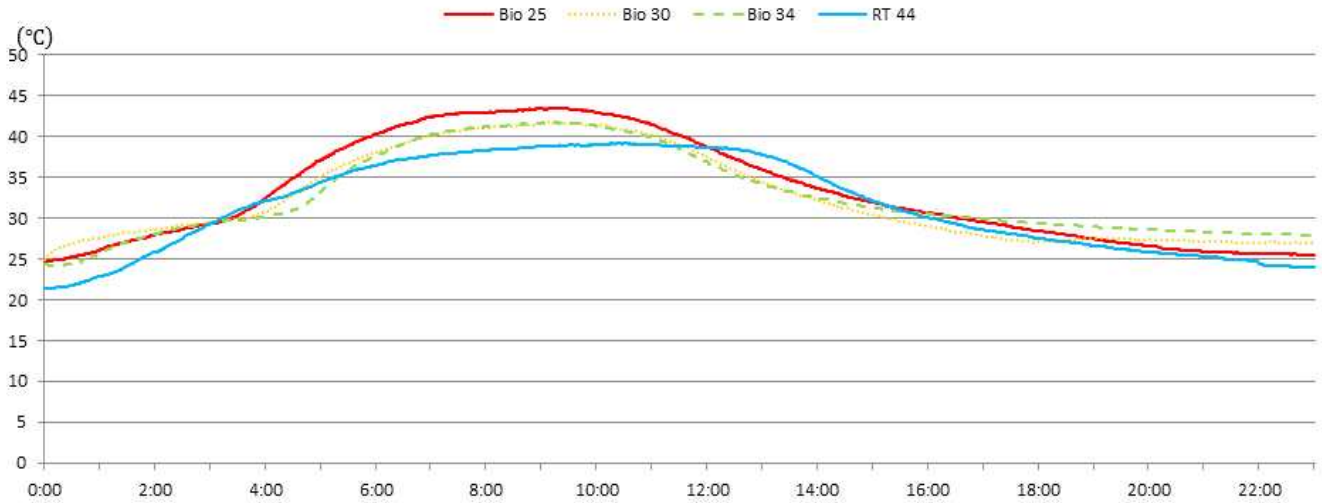
(그림 3.94) 흰색마감 플레이트 내부온도 그래프

<표 3.45> 흰색마감 플레이트 내부온도 측정결과

주간 (0시간~11시간)	플레이트 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	44.50	44.50	43.35	41.40
평균	37.14	37.61	36.08	36.11
최저	24.25	27.25	21.80	21.30
야간 (11시간~24시간)	플레이트 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	41.45	41.20	40.25	41.00
평균	30.04	29.97	30.75	30.05
최저	25.45	26.80	27.85	23.50
전체 (0시간~24시간)	플레이트 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	44.50	44.50	43.35	41.40
평균	33.43	33.62	33.29	32.94
최저	25.45	26.80	27.85	23.50

■ 흰색마감 플레이트 하부온도 측정결과

- 플레이트 내부 측정결과 표면 흰색(반사율 0.47) 플레이트 내부의 온도는 표면온도의 영향으로 인해 같은 양상을 보인다. 최고온도는 Bio 25와 Bio 30이 44.5℃로 가장 높았고 Bio 34가 43.4℃, RT 44가 41.4℃를 나타내었다. 플레이트 하부 측정결과 (그림 3.94)와 같이 표면 흰색(반사율 0.47) 플레이트 하부온도는 플레이트 내부와 비슷한 경향을 보이고 있으며, 최고온도는 Bio 25가 43.4℃로 가장 높았고, Bio 30과 Bio 34가 거의 유사한 41.8℃, RT 44가 39.2℃ 순서로 나타났다.



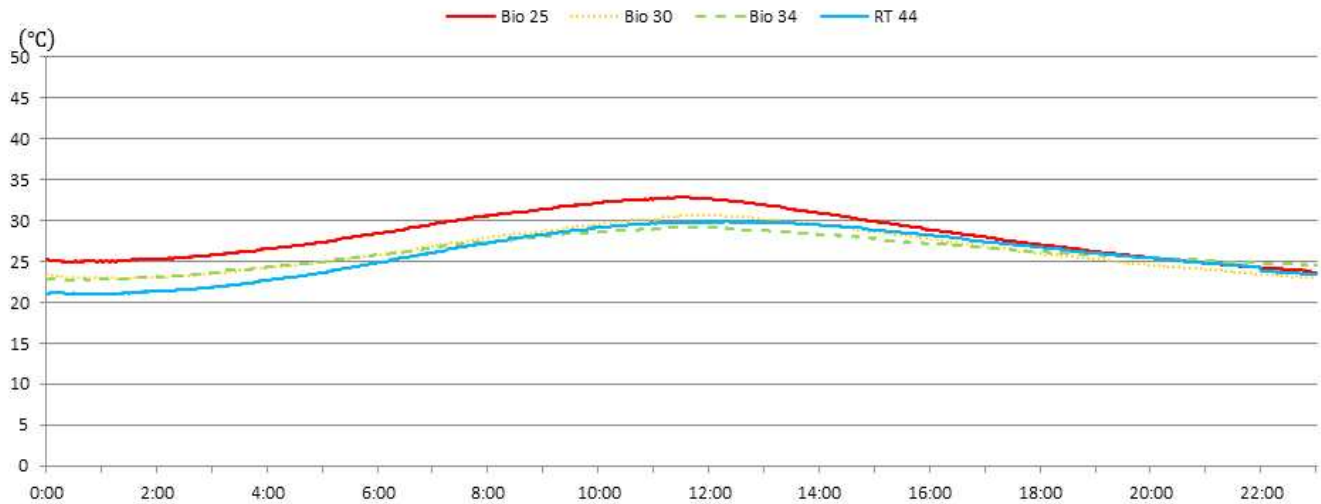
(그림 3.95) 흰색마감 플레이트 하부온도 그래프

<표 3.46> 흰색마감 플레이트 하부온도 측정결과

주간 (0시간~11시간)	플레이트 하부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	43.40	41.75	41.80	39.20
평균	36.21	35.21	34.62	33.18
최저	24.80	24.95	24.15	21.30
야간 (11시간~24시간)	플레이트 하부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	41.50	40.20	39.85	39.00
평균	30.65	30.09	31.03	30.32
최저	25.50	26.95	27.90	23.90
전체 (0시간~24시간)	플레이트 하부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	43.40	41.75	41.80	39.20
평균	33.30	32.54	32.74	31.68
최저	24.80	24.95	24.15	21.30

■ 흰색마감 축소모형 내부공기 온도 측정결과

- 실험체 내부 측정결과 표면 흰색(반사율 0.47) 실험체 내부의 온도는 주간이 아닌 상부 축열 효과로 인하여 야간에 나타난다. 내부 최고온도는 Bio 25가 32.9℃로 가장 높았고, Bio 30이 30.7℃ RT 44가 29.9℃ Bio 34가 29.1℃ 순서로 나타났다.



(그림 3.96) 흰색마감 축소모형 내부공기 온도 그래프

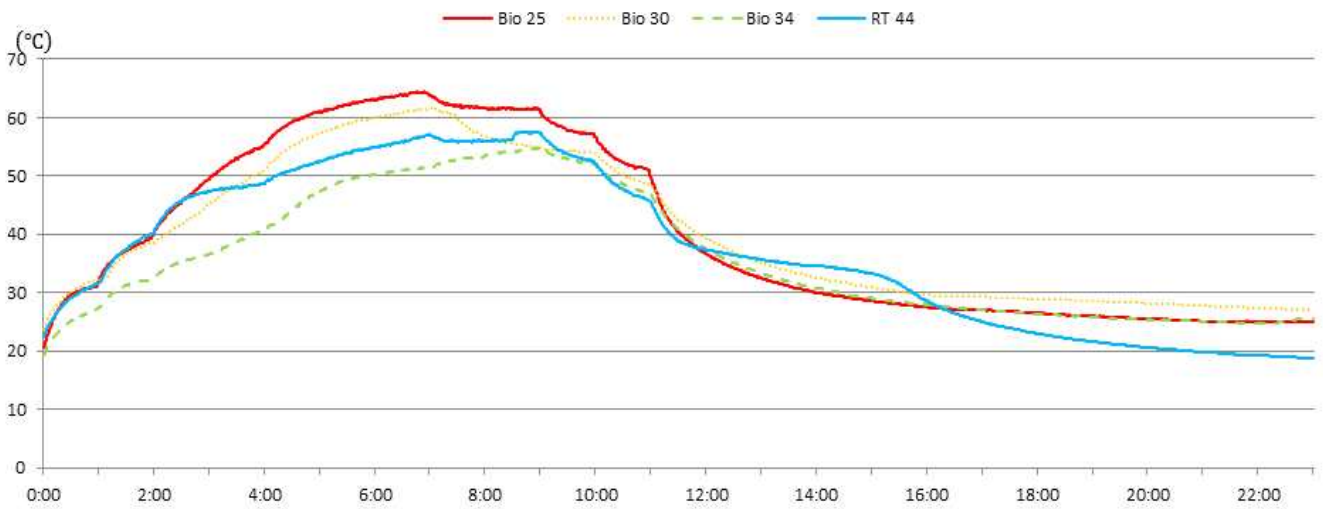
<표 3.47> 흰색마감 축소모형 내부공기온도 측정결과

주간 (0시간~11시간)	실험체 내부 공기 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	32.70	30.20	29.00	29.70
평균	28.28	25.86	25.58	24.70
최저	25.00	22.90	22.70	21.10
야간 (11시간~24시간)	실험체 내부 공기 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	32.90	30.70	29.10	29.90
평균	28.20	26.97	26.84	27.27
최저	23.70	22.90	24.60	23.40
전체 (0시간~24시간)	실험체 내부 공기 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	32.90	30.70	29.10	29.90
평균	28.24	26.44	26.23	26.04
최저	23.70	22.90	22.70	21.10

② 회색마감(반사율 : 회색 0.22)

■ 회색마감 플레이트 표면온도 측정결과

- 플레이트 표면 측정결과 표면이 회색 마감(반사율 0.22)의 경우 표면온도의 최댓값은 Bio 25(상변화 온도 25℃)가 64.5℃로 가장 높았고, Bio 30, RT 44, Bio 34(상변화 온도 30℃, 44℃, 34℃)인 경우가 61.7℃, 57.6℃ 54.8℃의 순서로 나타났다.



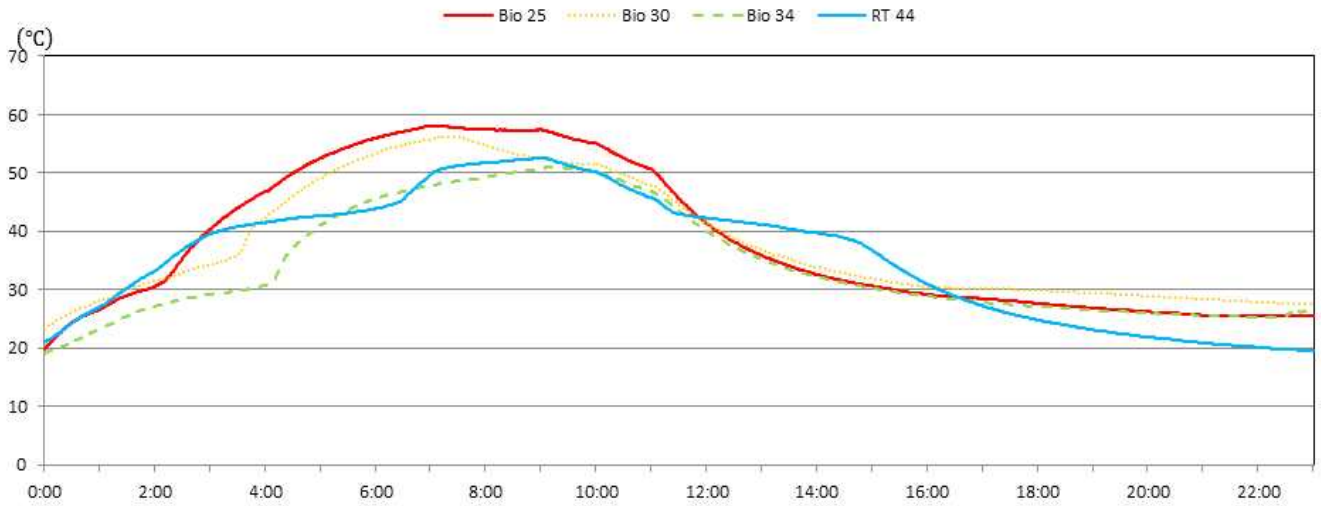
(그림 3.97) 회색마감 플레이트 표면온도 그래프

<표 3.48> 회색마감 시 플레이트 표면온도 측정결과

주간 (0시간~11시간)	플레이트 표면 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	64.50	61.65	54.80	57.55
평균	52.98	49.98	43.81	48.57
최저	20.70	23.70	19.25	22.35
야간 (11시간~24시간)	플레이트 표면 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	49.80	48.45	46.80	45.50
평균	28.80	31.21	28.99	27.43
최저	24.95	27.05	24.75	18.75
전체 (0시간~24시간)	플레이트 표면 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	64.50	61.65	54.80	57.55
평균	40.36	40.18	36.07	37.54
최저	20.70	23.70	19.25	18.75

■ 회색마감 플레이트 내부온도 측정결과

- 플레이트 내부 측정결과 회색 마감 시 PCM의 온도 분포는 흰색 마감과 유사하였으나, 표면 반사율의 감소로 인하여 표면 온도가 높아 Bio 34 및 44의 경우 상변화가 끝난 뒤 현열로 인한 온도 증가가 뚜렷하게 나타나는 특징을 보였다.



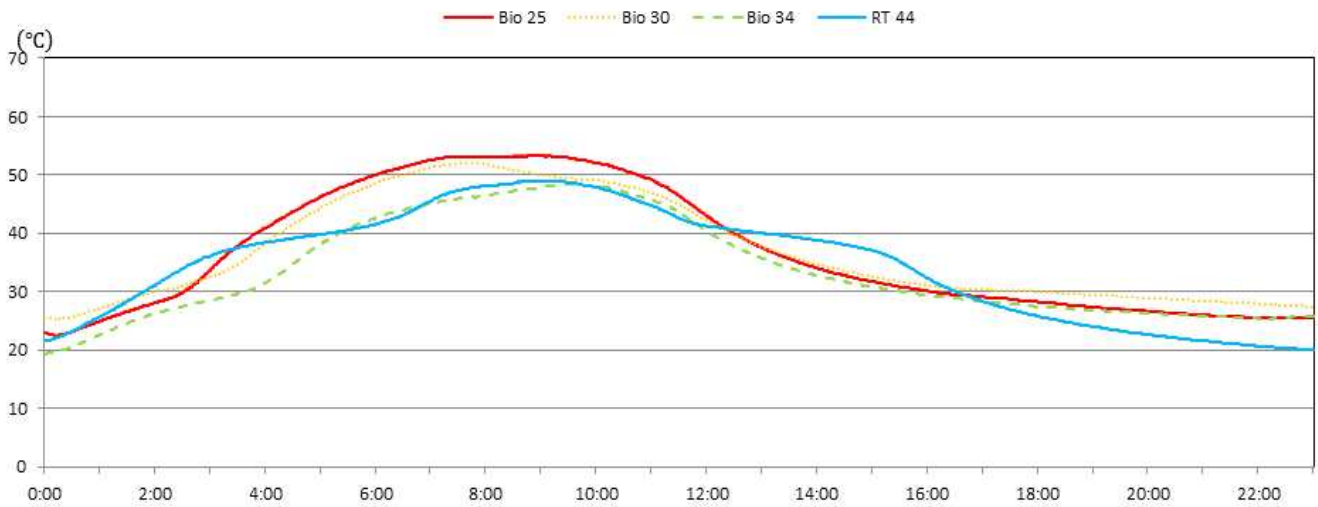
(그림 3.98) 회색마감 플레이트 내부온도 그래프

<표 3.49> 회색마감 시 플레이트 내부온도 측정결과

주간 (0시간~11시간)	플레이트 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	58.10	56.20	51.00	52.50
평균	46.99	44.44	39.01	42.31
최저	19.90	23.30	19.15	21.10
야간 (11시간~24시간)	플레이트 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	50.65	47.90	46.90	45.70
평균	30.60	32.22	30.10	30.07
최저	25.40	27.45	25.20	19.50
전체 (0시간~24시간)	플레이트 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	58.10	56.20	51.00	52.50
평균	38.43	38.06	34.35	35.92
최저	25.40	27.45	25.20	19.50

■ 회색마감 플레이트 하부온도 측정결과

- 플레이트 하부 측정결과 표면이 회색 마감(반사율 0.22)의 경우 플레이트 하부의 온도는 Bio 25가 58.1℃ Bio 30이 56.2℃ RT44가 52.5℃ Bio 34가 51℃의 순서로 높게 나타났다.



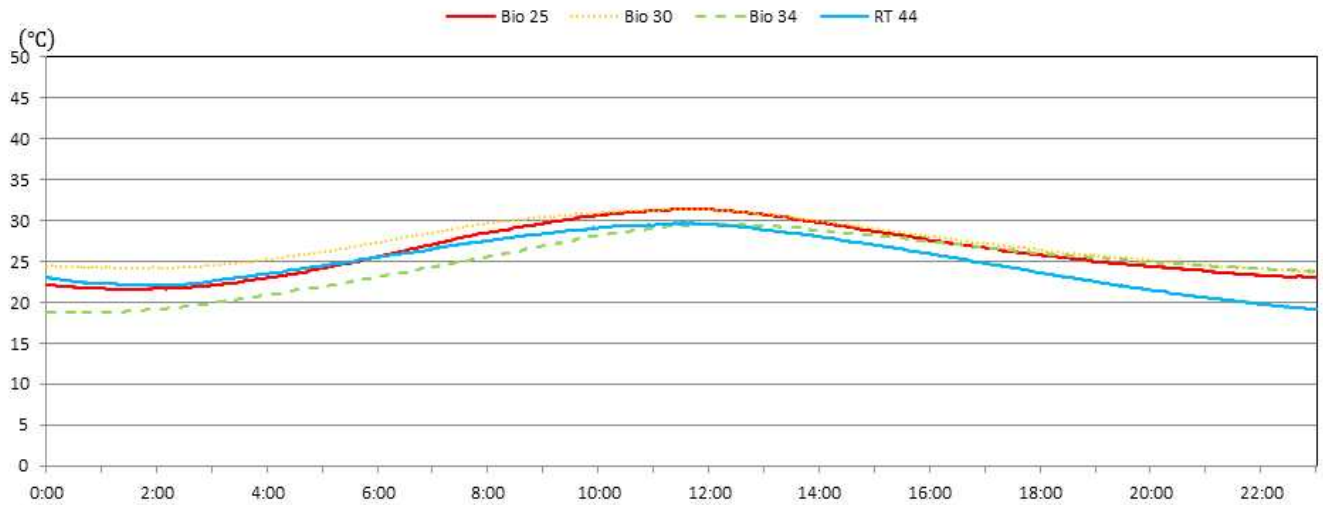
(그림 3.99) 회색마감 플레이트 하부온도 그래프

<표 3.50> 회색마감 플레이트 하부온도 측정결과

주간 (0시간~11시간)	플레이트 하부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	43.40	41.75	41.80	39.20
평균	36.21	35.21	34.62	33.18
최저	24.80	24.95	24.15	21.30
야간 (11시간~24시간)	플레이트 하부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	41.50	40.20	39.85	39.00
평균	30.65	30.09	31.03	30.32
최저	25.50	26.95	27.90	23.90
전체 (0시간~24시간)	플레이트 하부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	43.40	41.75	41.80	39.20
평균	33.30	32.54	32.74	31.68
최저	24.80	24.95	24.15	21.30

■ 회색마감 축소모형 내부공기 온도 측정결과

- 실험체 내부 측정결과 표면이 회색 마감(반사율 0.22)의 경우 실험체 내부 온도는 Bio 25와 Bio 30이 31.3℃로 가장 높았고 RT 44가 29.5℃ Bio 34가 29.1℃ 순으로 나타났다.



(그림 3.100) 회색마감 축소모형 내부 공기온도 그래프

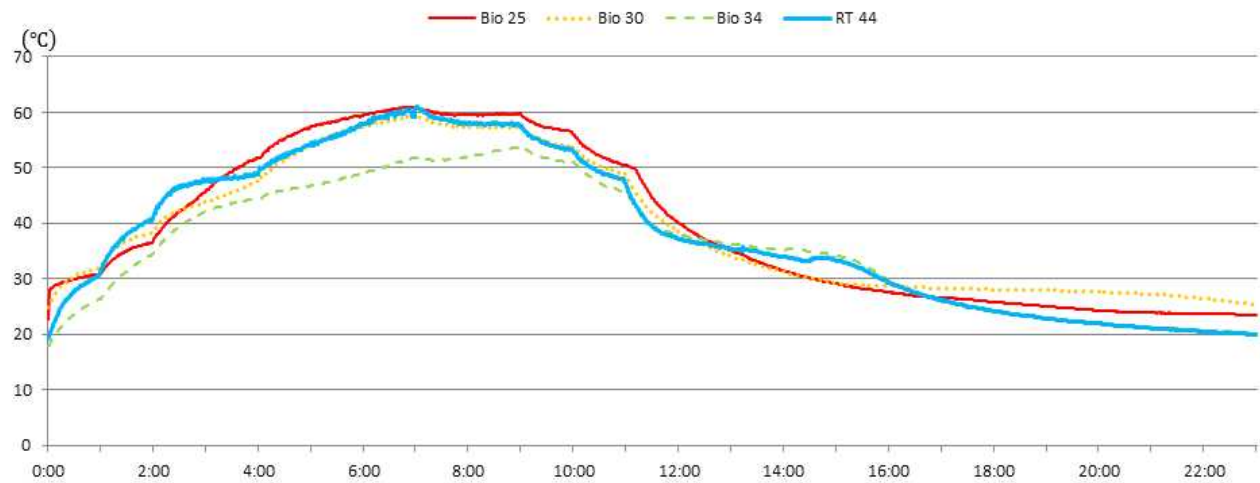
<표 3.51> 회색마감 축소모형 공기온도 측정결과

주간 (0시간~11시간)	실험체 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	31.30	31.30	29.10	29.50
평균	25.52	27.21	22.97	25.30
최저	21.50	24.20	18.60	22.10
야간 (11시간~24시간)	실험체 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	31.50	31.50	29.60	29.70
평균	27.03	27.50	26.80	24.71
최저	23.00	23.70	23.80	19.10
전체 (0시간~24시간)	실험체 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	31.50	31.50	29.60	29.70
평균	26.30	27.36	24.96	24.99
최저	21.50	23.70	18.60	19.10

③ 갈색마감(반사율 : 갈색 0.17)

■ 갈색마감 플레이트 표면온도 측정결과

- 플레이트 표면 측정결과 표면이 갈색 마감(반사율 0.17)의 경우 표면온도는 RT 44가 61.1℃로 가장 높았으며, Bio 25가 61.0℃, Bio 30이 59.6℃, Bio 34가 53.8℃로 나타났다.



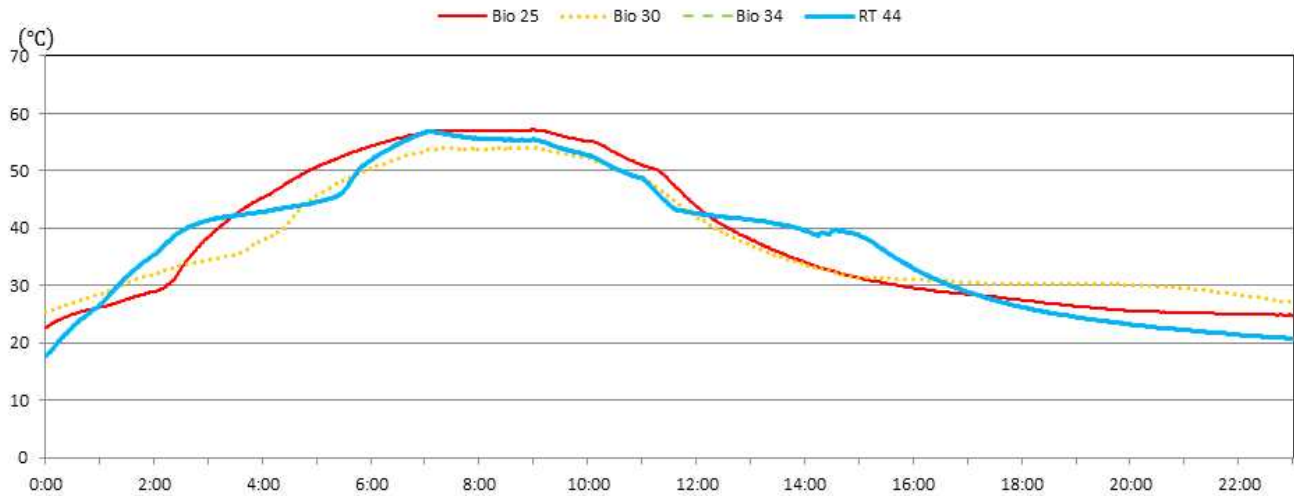
(그림 3.101) 갈색마감 플레이트 표면온도 그래프

<표 3.52> 갈색마감 플레이트 표면온도 측정결과

주간 (0시간~11시간)	플레이트 표면 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	61.00	59.60	53.80	61.10
평균	50.78	49.12	44.07	49.68
최저	22.60	24.90	17.90	19.10
야간 (11시간~24시간)	플레이트 표면 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	50.40	48.85	45.55	46.70
평균	29.07	30.25	28.50	28.14
최저	23.50	25.30	20.20	19.90
전체 (0시간~24시간)	플레이트 표면 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	61.00	59.60	53.80	61.10
평균	39.45	39.27	35.94	38.44
최저	22.60	24.90	17.90	19.10

■ 갈색마감 플레이트 내부온도 측정결과

- 플레이트 내부 측정결과 표면이 갈색 마감(반사율 0.17)의 경우 플레이트 내부의 온도는 Bio 25가 57.15℃로 가장 높았으며, RT 44는 56.9℃, Bio 30은 54.0℃, Bio 34는 53.8℃로 나타났다.



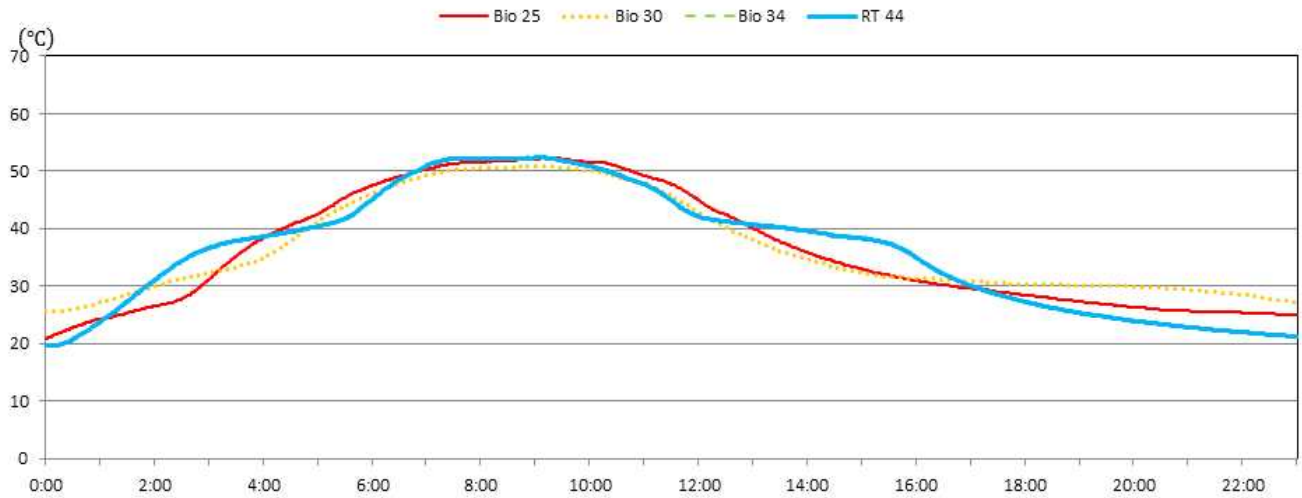
(그림 3.102) 갈색마감 상변화 내부온도 그래프

<표 3.53> 갈색마감 플레이트 내부온도 측정결과

주간 (0시간~11시간)	플레이트 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	57.15	54.00	53.80	56.90
평균	46.10	43.61	44.07	45.16
최저	22.60	25.50	17.90	17.65
야간 (11시간~24시간)	플레이트 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	50.95	48.75	45.55	48.70
평균	31.07	32.68	28.50	31.29
최저	24.80	26.95	20.20	20.75
전체 (0시간~24시간)	플레이트 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	57.15	54.00	53.80	56.90
평균	38.25	37.90	35.94	37.92
최저	24.80	26.95	20.20	20.75

■ 갈색마감 플레이트 하부온도 측정결과

- 플레이트 하부 측정결과 플레이트 하부의 온도의 경우 Bio 34가 47℃로 가장 낮은 온도를 보였다. 상변화 구간은 Bio 25를 제외한 3가지 종류 상변화 물질 모두 나타났으며, RT 44의 경우 가장 뚜렷한 상변화 구간이 4시간가량 나타났다.



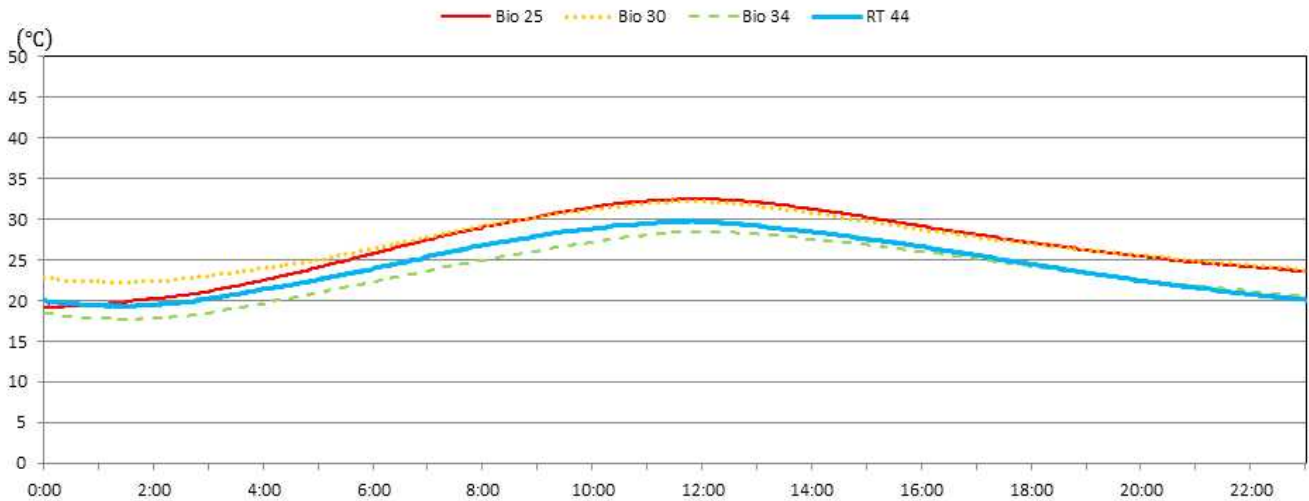
(그림 3.103) 갈색마감 플레이트 하부온도 그래프

<표 3.54> 갈색마감 플레이트 하부온도 측정결과

주간 (0시간~11시간)	플레이트 하부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	52.20	50.85	47.00	52.35
평균	41.07	40.84	37.12	41.41
최저	20.90	25.60	18.85	19.60
야간 (11시간~24시간)	플레이트 하부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	49.20	47.70	44.35	47.75
평균	32.04	32.98	30.90	31.78
최저	25.10	27.10	21.20	21.20
전체 (0시간~24시간)	플레이트 하부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	52.20	50.85	47.00	52.35
평균	36.35	36.73	33.87	36.38
최저	20.90	25.60	18.85	19.60

■ 갈색마감 축소모형 내부 공기온도 측정결과

- 실험체 내부 측정결과 표면이 갈색 마감(반사율 0.17)의 경우 실험체 내부의 온도는 Bio 25가 32.6℃로 가장 높았고 Bio 30이 32.2℃, RT 44가 29.8, Bio 34가 28.5℃ 순서로 나타났다.



(그림 3.104) 갈색마감 축소모형 공기온도 그래프

<표 3.55> 갈색마감 축소모형 공기온도 측정결과

주간 (0시간~11시간)	실험체 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	32.30	31.90	28.00	29.50
평균	25.22	26.27	22.02	23.70
최저	19.20	22.20	17.70	19.30
야간 (11시간~24시간)	실험체 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	32.60	32.20	28.50	29.80
평균	28.25	28.08	24.97	25.39
최저	23.60	23.80	20.50	20.00
전체 (0시간~24시간)	실험체 내부 온도			
	Bio 25	Bio 30	Bio 34	RT 44
최고	32.60	32.20	28.50	29.80
평균	26.80	27.21	23.56	24.58
최저	19.20	22.20	17.70	19.30

라) 소결

WPC 데크 플레이트 표면에 수성도료를 도포한 PCM 25℃(Bio 25), 30℃(Bio 30), 34℃(Bio 34), 44℃(RT 44) 네 가지를 적용한 인공기후 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

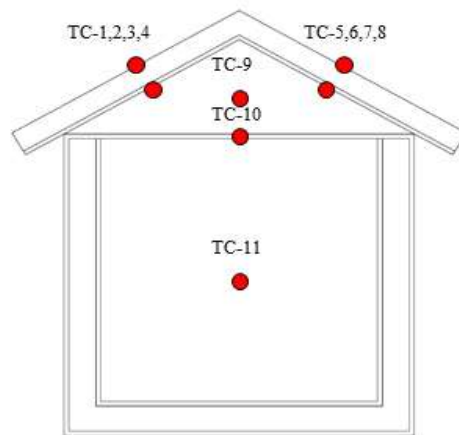
- RT 44 PCM 적용 시, 플레이트 내부최고온도는 각각 갈색(56.9℃), 회색(52.5℃), 흰색(41.4℃)순으로 나타났다. 마감색상의 반사율 차이로 인한 온도차이가 크게 나타났다.
- WPC 플레이트 내부의 최고온도 도달 시간을 보면, 갈색은 7시간 08분, 회색 8시간 51분으로 흰색이 갈색보다 약 1시간 43분 늦게 도달하였다. 이러한 결과를 토대로 마감색상의 반사율 변화만으로도 난방피크부하의 시간을 피할 수 있는 효과가 있을 것으로 사료된다.
- 따라서, 본 실험의 결과를 분석해 볼 때 PCM Cool Roof System의 최적안은 내구성과 강도가 좋은 WPC를 적용하되, 마감색상으로는 반사율을 고려한 흰색을 선택하고 Melting point가 44인 RT 44를 사용하는 것이 가장 적정하다고 판단된다.

6) 박공(경사)지붕 PCM 열성능 실험

본 연구에서는 평지붕 외에 박공지붕과의 비교실험을 통하여 PCM의 적용 가능성을 검토하고자 다음과 같이 실시하였다.

가) 박공지붕 축소모형 실험체 제작

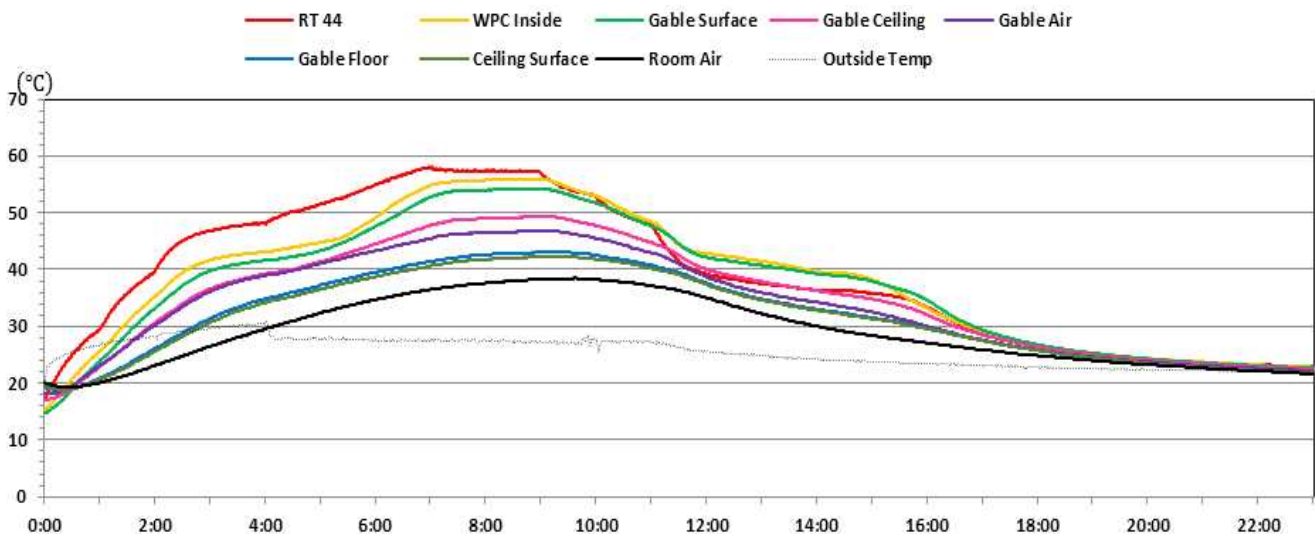
- 일반적인 박공지붕의 단면구성을 참조하여 1/10 스케일, 600×600×600mm 크기로 제작하였고, 지붕의 경사면은 44°로 제작하였다.
- 지붕을 제외한 벽체 및 바닥의 열출입을 막기 위하여 40mm의 단열재를 삽입하였다.
- 온도측정 위치는 플레이트의 상부, 플레이트하부, 실험체 내부에서 측정하였다. (그림 3.105)
- 갈색 WPC에 삽입된 PCM은 Melting Point가 다른 RT 44 PCM(44℃)과 Bio-PCM(30℃)을 적용하여 비교 실험하였다.
- 실험 장소는 인공기후 실험동과 외기 두 가지 조건으로 구분하여 실시하였다.



(그림 3.105) 박공(경사)지붕 제작 및 온도측정지점

나) 인공기후 실험동 실험결과

- 박공 지붕 측정결과 (그림 3.106)와 같이 갈색WPC 플레이트에 PCM을 적용한 경우 플레이트 표면의 최대온도는 58.1℃, 평지붕은 61.1℃로 3℃의 차이가 나타났다.
- 플레이트 내부온도의 최대온도는 박공지붕이 56℃, 평지붕이 56.9℃로 0.9℃의 차이가 나타났다. 다음의 <표 3.56>은 박공지붕의 온도 측정 결과를 나타낸다.



(그림 3.106) 박공 지붕 실내 실험 그래프

<표 3.56> 박공 지붕 레이어별 온도 측정결과

		플레이트 표면온도	플레이트 내부온도	플레이트 하부온도	실험체 내부 천장온도	실험체 내부온도
최고	박공지붕	58.1	56.0	54.2	42.3	34.2
	평지붕	61.1	56.9	52.4	-	29.8
평균	박공지붕	39.0	38.0	37.2	31.5	27.3
	평지붕	38.4	37.9	36.4	-	24.6
최저	박공지붕	17.0	15.3	14.7	18.8	18.9
	평지붕	19.1	20.7	19.6	-	19.3

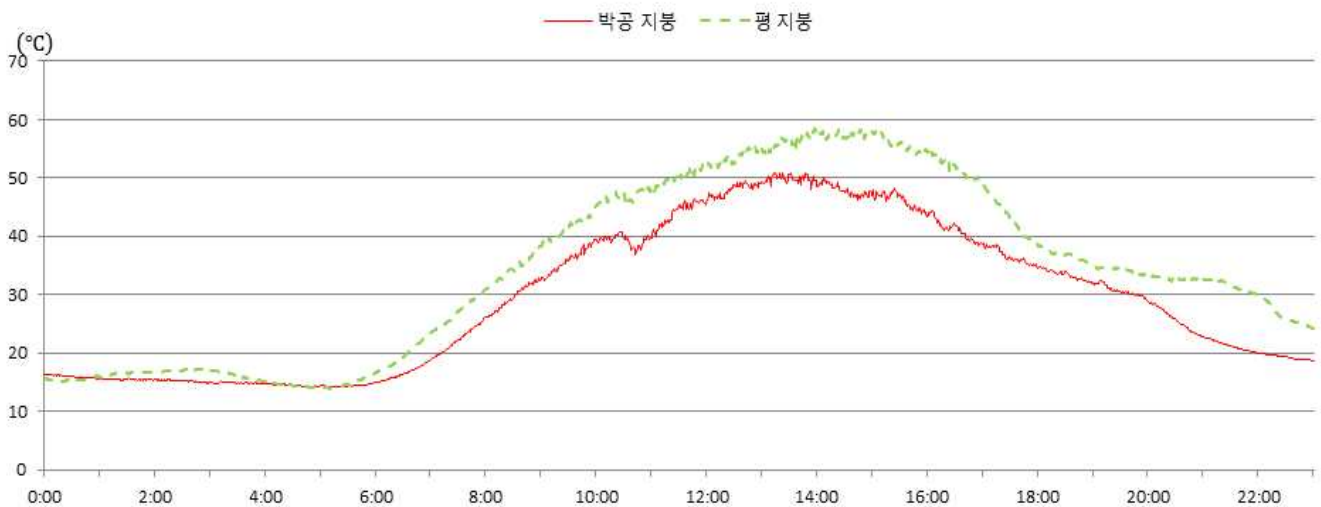
다) 옥상 외기실험 결과

■ 실험 조건

- 실험은 서울특별시 동작구 흑석동에 위치한 중앙대학교의 건물 옥상에서 장애물로 인한 일사의 방해가 없는 실험환경을 조성하여 측정을 실시하였다.
- 실험 날짜는 박공지붕이 2016년 05월 31일, 평지붕이 06월 05일이다.
- 05월 31일의 평균기온은 21.6℃, 평균운량은 2.9이고, 06월 05일의 평균기온은 24.7℃, 평균운량은 3.5이다.

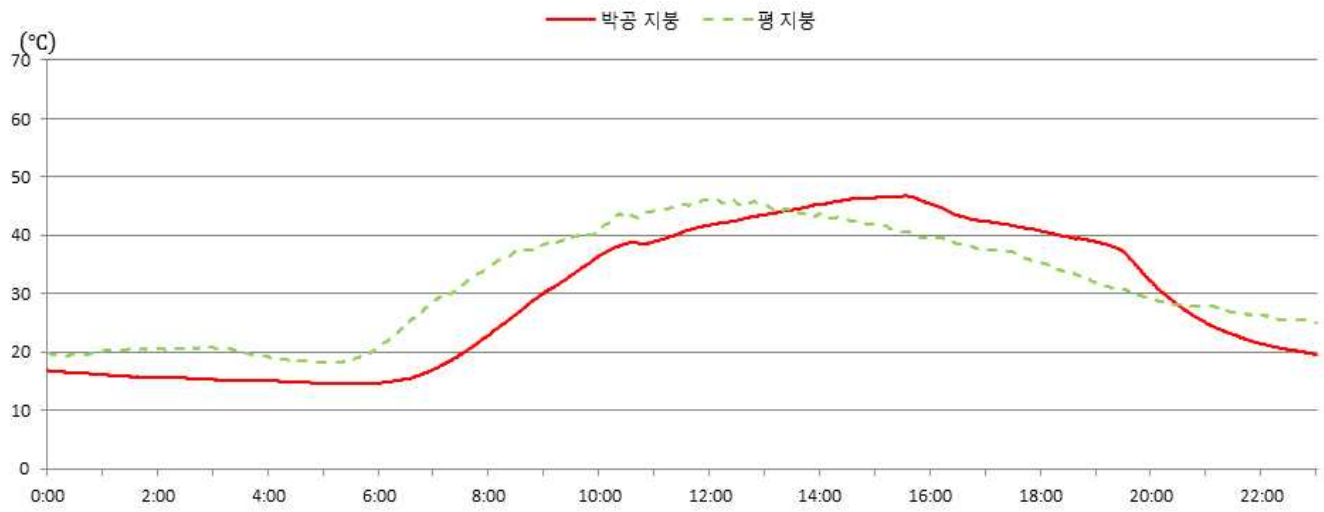
■ 실험결과

- 박공지붕, 평지붕 플레이트 표면 측정결과 (그림 3.107)와 같이 평지붕의 플레이트 표면의 최대온도는 58.55℃, 박공지붕은 50.90℃로 나타났다.
- 최고온도 도달 시간은 평지붕이 13시 58분, 박공지붕이 13시 48분으로 10분의 차이를 나타냈다.



(그림 3.107) 박공 지붕, 평지붕 옥상 외기실험 플레이트 표면온도 그래프

- 박공 지붕, 평지붕 플레이트 내부 측정결과 (그림 3.108)와 같이 평지붕의 플레이트 내부의 최대온도는 46.20℃, 박공 지붕은 46.80℃로 나타났으며, 최고온도 도달 시간은 평지붕이 12시 08분, 박공 지붕이 15시 34분으로 3시간 26분의 차이를 나타내었다.
- 다음의 <표 3.57>은 박공 지붕의 온도 측정 결과를 나타낸다.



(그림 3.108) 박공지붕, 평지붕 옥상 외기실험 플레이트 내부온도 그래프

<표 3.57> 박공 지붕 레이어별 온도 측정결과

		플레이트 표면온도	플레이트 내부온도
최고	박공지붕	50.9	46.8
	평지붕	58.5	46.2
평균	박공지붕	29.4	29.4
	평지붕	34.5	31.8
최저	박공지붕	14.1	19.6
	평지붕	13.9	25.0

라) 소결

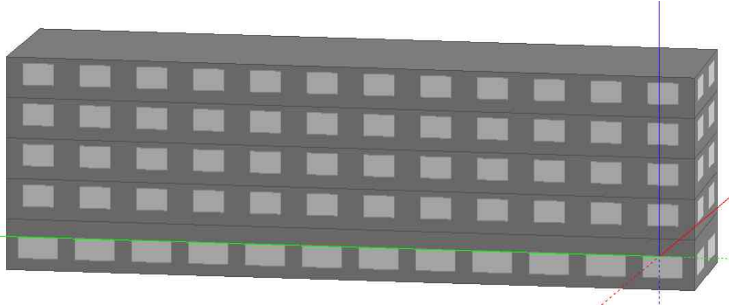
- 동일면적의 평지붕과 박공지붕에 PCM RT 44를 적용하여 온도를 측정한 결과 플레이트 표면온도의 차이는 평균 5.1℃, 플레이트 내부온도는 평균 2.4℃ 박공지붕이 낮게 측정되었다.

(다) 건물 시뮬레이션 냉방에너지 성능 분석

1) 건물 설정 및 개요

- 본 연구에서는 개별 건물의 냉방에너지 성능 평가를 위해 미국 에너지국(Department of Energy, DOE)에서 개발된 에너지 시뮬레이션 프로그램인 'Energy Plus Ver.8-5'를 사용하여 분석하였다. 개별 건물 모델링은 'Design Builder'라는 프로그램으로 실시하였으며, 서울에 위치한 총 높이 14m의 5층 일반 사무용 건물로 서울시의 기상 데이터를 적용하였다. 건물의 향은 정남향이며 PCM을 적용하기 위한 총 지붕 면적은 947.5㎡이고 건물의 연면적은 4,515.7㎡이다. 위에서 언급한 내용을 요약하면 <표 3.58>와 같다.

<표 3.58> 건물 개요 및 모델링

구분	내용	시뮬레이션 모델
높이	14m	
층수	5층	
향	정남향	
층고	2.8m	
지붕 면적	947.5㎡	
연면적	4,515.7㎡	

2) 외벽 설정 조건

- 건물의 외벽은 Asbestos Related Materials:Cement Sheet(외부), Glass fibre/wool-fibre slab, Cast Concrete, PlasterBoard(내부)로 총 4종류 재질로 구성되어 있으며, 각각의 두께와 열전도율은 다음의 <표 3.59>와 같다.

<표 3.59> 외벽 설정 조건 및 단면도

구성	두께	열전도율	단면도
Asbestos Related Materials : Cement Sheet	0.08m	0.36W/m-K	
Glass fibre/wool - fibre slab	0.14m	0.035W/m-K	
Cast Concrete	0.19m	1.13W/m-K	
PlasterBoard	0.01m	0.25W/m-K	

3) 창문 설정 조건

- 전체 건물의 창면적비는 30%이며 창호는 열전도율(W/m-K)이 0.9인 3mm 두께의 투명 유리로 13mm의 중공층을 갖는다. 총 일사 투과율, 직달 일사 투과율, 가시광선 투과율은 각각 0.687, 0.624, 0.744이며, 전체 창호의 열관류율(U-Value)은 1.978W/㎡·K이다.

4) 지붕 설정 조건

- PCM Roof System의 성능 평가를 위해 일반 사무용 건물의 Roof System과 PCM Roof System을 비교하였다. 일반 사무용 건물의 Roof System은 평지붕이며 Asbestos Related Materials:Cement Sheet(외부), Glass fibre/wool-fibre slab, Cast Concrete, PlasterBoard(내부)로 구성되었다. PCM Roof System은 Asbestos Related Materials:Cement Sheet과 Glass fibre/wool-fibre slab 사이에 두께 100mm의 RT44 PCM을 삽입한 구조를 사용하였다. RT44 PCM의 Melting Point는 44℃이며, 열 전도율은 0.2W/m-K, Heat Storage Capacity는 241KJ/kg로 설정하였다. 위에서 언급한 내용을 요약하면 <표 3.60>과 같다.

<표 3.60> 지붕 설정 조건 및 단면도

구 성	두 개	열 전도율	단 면 도
Asbestos Related Materials : Cement Sheet	0.08m	0.36W/m-K	
RT 44 PCM	0.1m	0.2W/m-K	
Glass fibre/wool - fibre slab	0.14m	0.035W/m-K	
Cast Concrete	0.19m	1.13W/m-K	
PlasterBoard	0.01m	0.25W/m-K	

5) 공조시스템 설정 조건

- 일반 사무용 건물에 적용한 설비 시스템은 기본적인 FCU(Fan Coil Unit)과 공랭식 냉동기(Air Cooled Chiller) 시스템으로 설정하였으며 난방 시 천연가스 사용과 냉방 시 전기사용을 가정하였다. 스케줄 조건은 ASHRAE 90.1-2007의 Building Area Method_Office Building을 참고하여 건물의 운영 및 조명 스케줄을 적용하였다. Heating System의 COP는 0.85이며 공급온도는 35℃로 설정하였고, Cooling System의 COP계수는 1.8이며 공급온도는 12℃로 설정하였다.

6) 에너지 소비량 시뮬레이션 분석 결과

- 에너지 소비량 분석 결과는 아래의 <표 3.61>과 같다. 건물에서 발생하는 에너지 소비는 크게 냉방 에너지, 난방 에너지, 내부 발열(조명, 인체, 기기) 등으로 구성되며, 기존 지붕 마감재를 PCM 플레이트로 대체함으로써 최상층의 냉방 에너지와 난방에너지가 가장 큰 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 기존 지붕 마감재와 PCM Roof System 최상층의 냉·난방 에너지 및 피크부하를 비교·분석 하였다. PCM Roof System 적용 시 총 에너지량은 3.2% 감소하였고, 냉방 에너지와 난방에너지는 각각 3.32%, 2.67% 감소하였다. 또한 냉방 피크부하는 4.1% 감소하였으며 난방 피크부하는 1.31% 감소하였다.

<표 3.61> 기존 건물 옥상과 PCM Roof System의 에너지 소비량 비교

항 목	기존 지붕 마감재	PCM Roof System	절감율
5F 총 에너지 양 [kWh]	67,398.82	65,254.81	3.2% ↓
5F 냉방 에너지 [kWh]	53,125.46	51,361.44	3.32% ↓
5F 난방 에너지 [kWh]	14,273.36	13,893.37	2.67% ↓
5F 냉방 피크부하 [W]	76,042.76	72,955.17	4.1% ↓
5F 난방 피크부하 [W]	57,574.3	56,814.6	1.31% ↓

7) 축열 플레이트의 축열성능 향상에 따른 냉방에너지 절감 분석

- 축열성능 향상에 따른 에너지 소비량 분석 결과는 아래의 <표 3.62>와 같다. PCM 플레이트의 축열성능 향상에 따른 에너지 절감효과를 분석하기 위해 시뮬레이션 내 설정 조건에서 상변화시 엔탈피 값을 2배로 늘려 RT44 PCM의 축열성능을 향상시켰다.
- 축열성능이 향상된 PCM 플레이트 적용 시 총 에너지 소비량은 기존 지붕 마감재에 비해 5.93% 감소되었고, 기존 PCM 플레이트에 비해 2.83% 감소되었다. 또한 냉방 에너지 및 냉방 피크부하의 경우 기존 옥상에 비해 약 5% 감소되었고, 기존 PCM 플레이트에 비해 약 1~2% 감소된 반면, 난방 에너지 및 난방 피크부하의 경우 기존 옥상 대비 약 8~9% 감소되었고, PCM 플레이트 대비 6~7% 감소된 것으로 나타났다. PCM의 축열성능을 향상 시킨 결과, 냉방에너지 감소율에 비해 난방에너지 감소율이 더욱 큰 것으로 나타났다.

<표 3.62> PCM Roof System의 축열성능 향상에 따른 에너지 소비량 비교

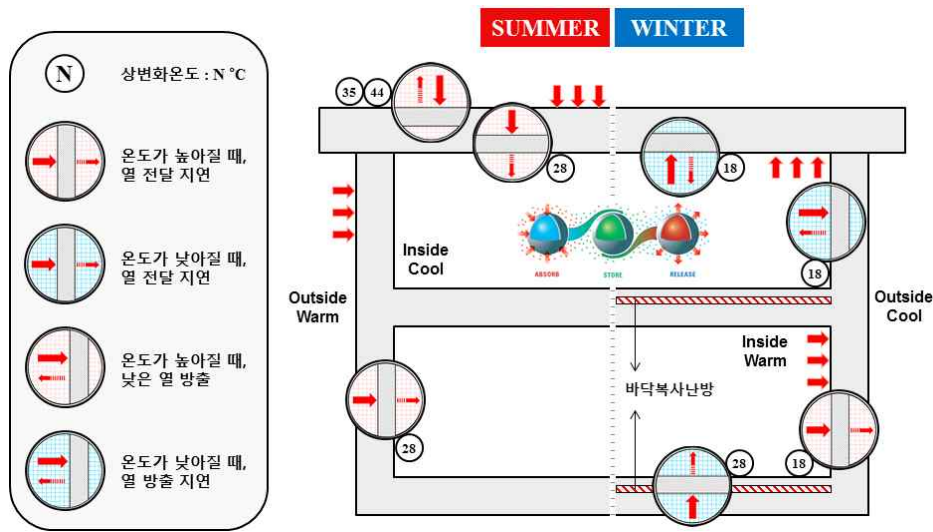
항 목	기존 지붕 마감재	PCM Roof System	Improved PCM Roof System	기존 옥상 대비 절감율
5F 총 에너지 양[kWh]	67,398.82	65,254.81	63,405.04	5.93% ↓
5F 냉방 에너지 [kWh]	53,125.46	51,361.44	50,483.16	4.97% ↓
5F 난방 에너지 [kWh]	14,273.36	13,893.37	12,921.88	9.47% ↓
5F 냉방 피크부하 [W]	76,042.76	72,955.17	72,355.89	4.85% ↓
5F 난방 피크부하 [W]	57,574.3	56,814.6	52,997.1	7.9% ↓

(라) 상안정 PCM의 열적 거동 분석

1) 열분석 장비를 통한 상안정 PCM의 열적 물리적 성능평가

가) PCM 적용 부위별 요구 성능에 대한 고찰

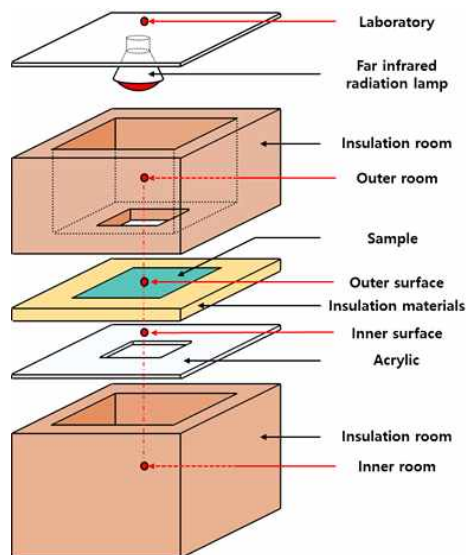
- PCM을 열적 성능에 따라 구분을 지으면 ‘상변화온도’와 ‘잠열량’을 기준으로 구분을 지을 수 있다. 일반적으로 잠열량이 높은 PCM의 열적 성능이 우수하다고 판단하여 잠열량을 개선시키는 방안과 잠열량이 높은 PCM을 건물에 적용하는 방안에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다.
- 그러나 건물에서 PCM의 요구 성능은 적용 부위에 따라 다양하며, 이에 따라 부위별 적용되는 PCM의 적절한 선택이 필요하다(그림 3.109). 실내마감재나 바닥마감재에 PCM이 적용되기 위해서는 그 부위에서 요구되는 PCM의 성능을 정확하게 이해할 필요가 있다.
- 본 연구에서는 지붕에서의 PCM의 요구 성능을 고찰하여, 여름철의 태양열 저장 및 겨울철의 태양열 유입을 동시에 고려한 PCM의 적용에 대한 연구를 진행하였다.



(그림 3.109) PCM 적용 부위별 요구 성능

나) 전열해석 장비 구축

- 상안정 PCM의 열적 물리적 성능을 분석하기 위하여 전열해석 장비를 구축하였으며, 다음의 (그림 3.110)는 전열해석 장비의 모식도이다.
- 전열해석 장비는 외기를 모사한 상부룸과 실내를 모사한 하부 단열룸으로 구성되었다.
- 열원 조사장치를 이용해 상부 룸에 열원을 공급하고, 그 열원이 건축자재에 의해 하부 단열룸에 미치는 영향을 분석하는 것이 목적으로 전열해석 장비를 이용하여 제작된 대량 패킹형 PCM의 열적 성능에 대한 분석을 실시했다.



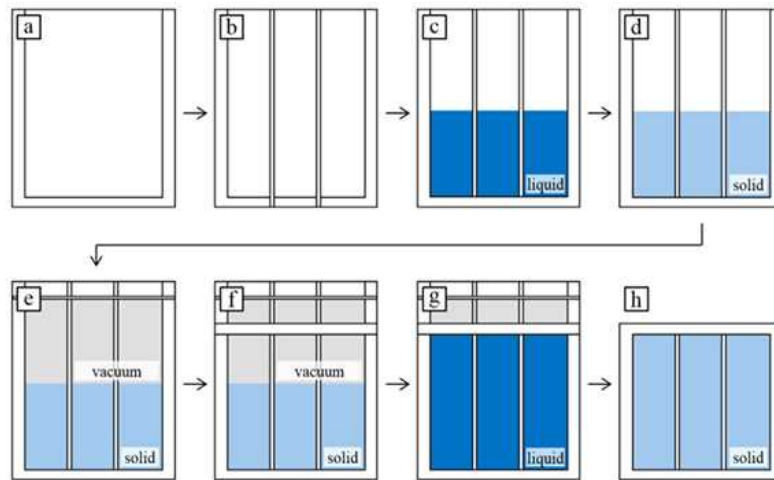
(그림 3.110) 전열해석 장비 모식도

2) Cool Roof System과 상안정 PCM의 호환성 향상

가) 대량 패킹형 PCM (Macro-packed PCM : MPPCM) 제조

- 1차 년도에 본 연구를 통해 SSPCM(Shape-stabilized PCM) 및 MPCM (Micro-encapsulated PCM)을 제조하여 기본 열적 성능을 평가하였으나 실제로 적용되는 PCM의 함량이 매우 적어 그 성능이 확인하지 못한 것을 확인했다.

- PCM의 함량을 극대화하여 적용된 Macro-packed PCM (MPPPCM)을 제조했다.
- MPPPCM의 제조방법은 (그림 3.111)에 나타내었으며 그 방법은 상온에서 고체인 PCM을 건조기를 통해 고온에서 녹인 후, 패키징 백에 넣고 주입된 PCM을 상온에서 응고시킨 후 진공패킹장치를 이용하여 1차 패키징을 하고, 열접착기를 이용하여 최종 패키징을 하여 제조하였다.
- 본 연구에서 사용된 PCM의 종류는 유기계 PCM의 종류인 파라핀계열의 n-octadecane, n-eicosane, n-docosane을 사용. 패키징 백은 나일론 재질로 가로, 세로 20cm이고 총 3개의 파티션으로 나뉘어 있으며 한 파티션 당 60g의 PCM을 주입하여 MPPPCM을 제조하였다(그림 3.111).



(그림 3.111) Macro-packed PCM (MPPPCM)의 제조 과정

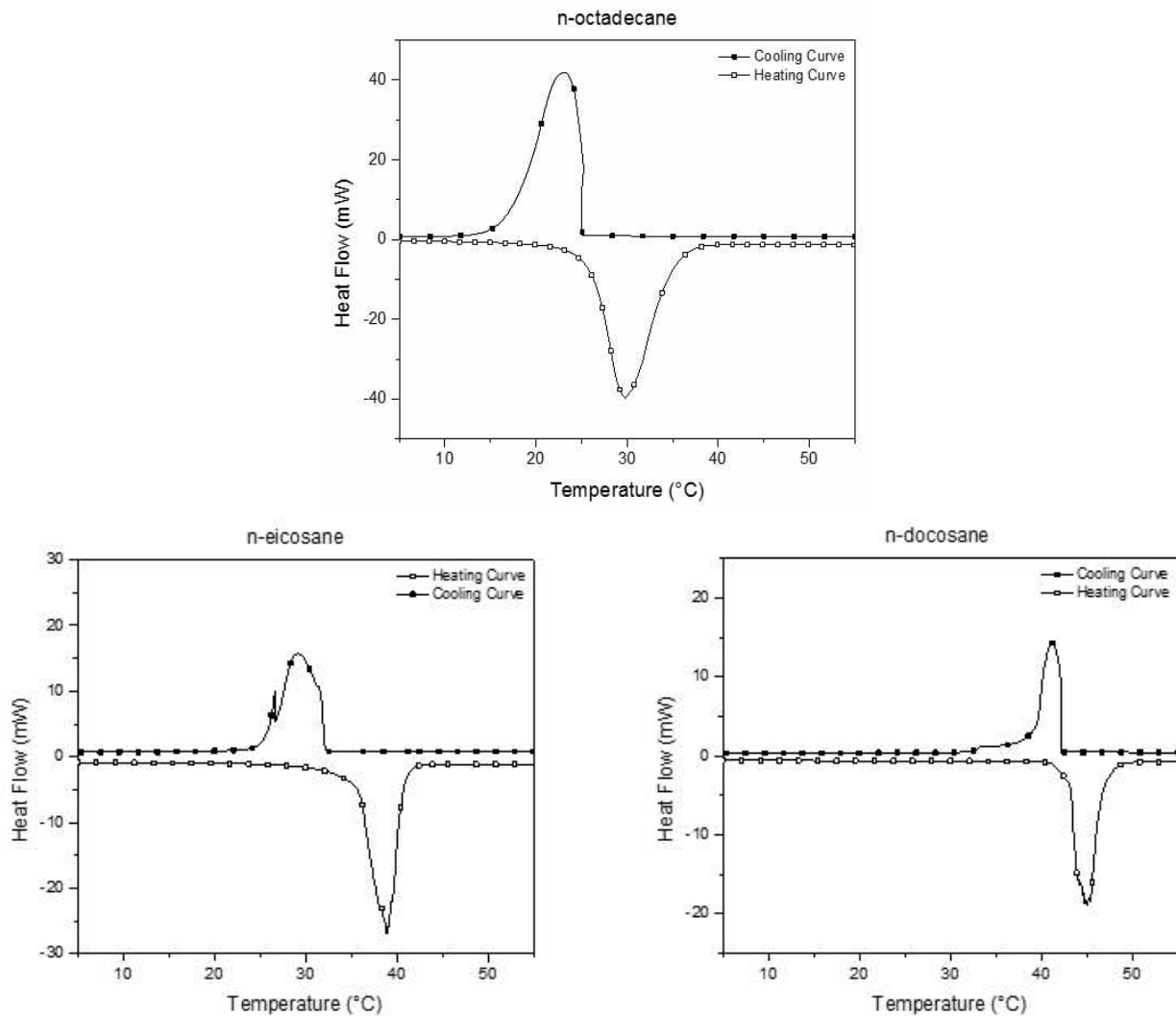
- 본 연구에서는 넓은 판 형태의 MPPPCM과 긴 스틱형태의 MPPPCM을 제조하였으며, 넓은 판 형태의 MPPPCM으로 전열해석을 분석하고 스틱형태의 MPPPCM은 합성목재(WPC) 중공층에 삽입하여 Cool roof system의 형태를 갖춘다.

(마) PCM축열 플레이트 설계 및 축소모형 실험

1) PCM이 적용된 축열 플레이트 설계

가) MPPPCM의 열적 물성 측정

- MPPPCM의 제조에 파라핀계 PCM인 n-octadecane, n-eicosane, docosane이 사용 되었다. DSC 분석을 통해서 세 종류의 PCM의 잠열량, 엔탈피, 상변화온도를 분석하였으며, MPPPCM 제조 전후의 열전도율을 측정하여 열적 성능에 대한 개선 여부를 확인하였다.
- DSC분석은 5 °C/min 속도로 가열과 냉각을 하며 PCM의 열적 물성에 대해 분석하였고, (그림 3.112)은 세 종류의 PCM의 DSC 분석 결과를 나타낸다.
- (그림 3.113)의 하부 그래프는 가열 시 Heat Flow의 변화이며 상부 그래프는 냉각 시 Heat Flow의 변화를 나타낸다.
- n-octadecane의 경우, 가열 시에는 23-37 °C 사이에서 상변화가 일어났고 냉각 시에는 17-25 °C 사이에서 상변화가 일어났으며, 그 때의 잠열량은 256.5 J/g이었다. 그 외의 PCM의 상변화온도와 잠열량은 <표 3.63>과 같고, 세 종류의 파라핀계 PCM 중에서 n-octadecane의 잠열량이 가장 높고, 상변화 온도는 n-docosane이 가장 높은 것을 확인할 수 있다.

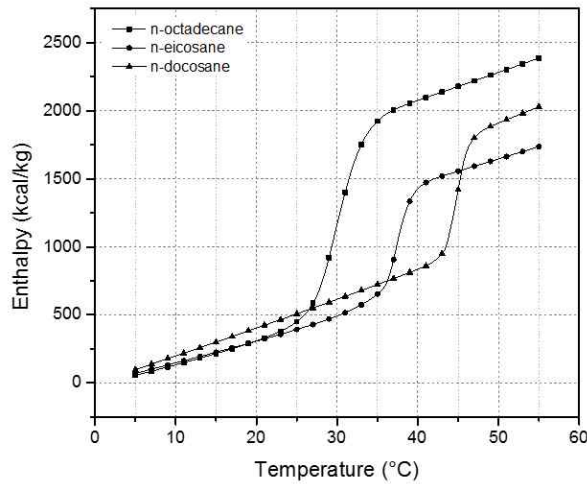


(그림 3.112) DSC 분석 결과

<표 3.63> 세 종류의 파라핀계 PCM의 상변화 온도 구간 및 잠열량

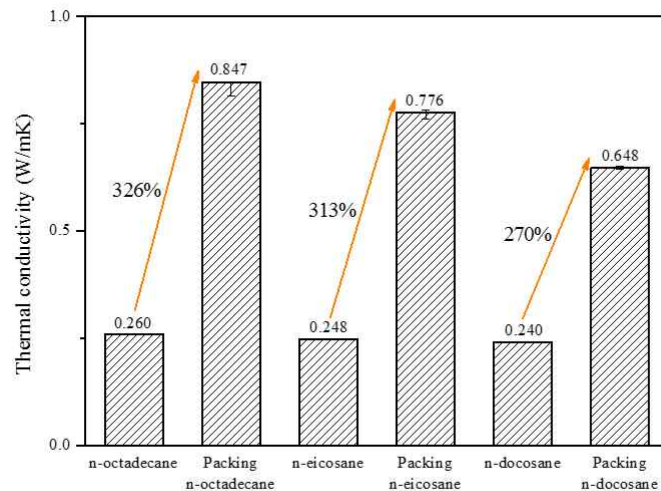
Phase change materials	Melting temperature range	Freezing temperature range	Latent heat
n-octadecane	23 - 37 ° C	17 - 25 ° C	256.5 J/g
n-eicosane	32 - 43 ° C	24 - 32 ° C	189.0 J/g
n-docosane	41 - 48 ° C	38 - 43 ° C	241.3 J/g

- (그림 3.112)는 세 종류의 PCM의 엔탈피 분석 결과를 나타낸다. 엔탈피의 기울기는 비열의 변화율을 나타내며 각 PCM의 상변화구간에서 엔탈피의 기울기가 급증하는 것을 알 수 있다.
- 변화한 폭은 n-octadecane의 경우가 가장 컸으며, 이러한 변화의 이유는 n-octadecane의 잠열량이 가장 큰 것에 기인한다. 엔탈피 분석 결과는 단순히 잠열량에 대한 비교에만 사용되는 것이 아니며, 3차 년도에 예정되어 있는 건물에너지 분석에 필요한 input data로 사용할 수 있다.



(그림 3.113) 엔탈피 분석 결과

- TCi 열전도율 분석기를 통해 세 종류의 순수한 PCM의 열전도율과 MPPPCM으로 제조 후의 열전도율을 측정하였다(그림 3.114). MPPPCM으로 제조 후의 열전도율은 각각 0.847 W/mK, 0.776 W/mK, 0.648 W/mK으로 약 300%의 증가율을 보였다.
- 전체적인 열전도율이 증가한 이유는 나일론 패키징 백의 열전도율이 1.424 W/mK으로 상대적으로 높은 열전도율을 갖고 있기 때문이다. 일반적으로 건축자재의 경우에는 열전도율이 증가하는 것이 단점일 수 있으나, PCM의 측면에서는 PCM의 잠열 성능이 더 빠르고 원활하게 발현되기 위해서 열전도율이 증가하는 것은 장점이다.



(그림 3.114) 패키징 전/후의 열전도율 비교 분석

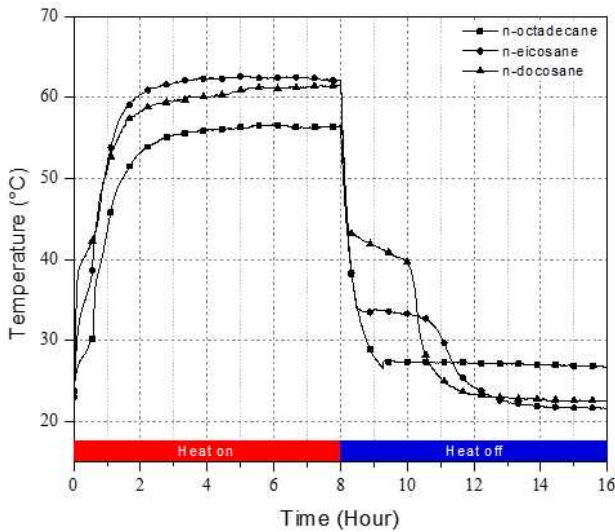
2) 축소모형 실험을 통한 축열 플레이트의 열적 거동 분석

가) 전열해석 장비를 이용한 MPPPCM의 열적 거동 분석

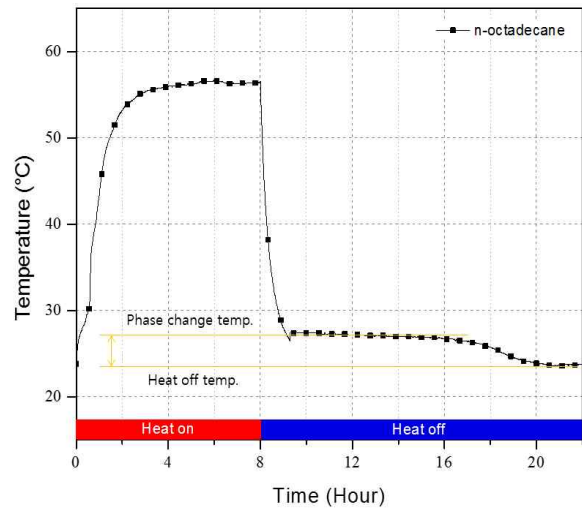
- (그림 3.115)은 세 종류의 MPPPCM의 전열해석 결과를 나타내며, 전열해석 장비의 온도 센서 중에 샘플 하부에 부착된 온도 센서의 온도 변화를 나타내었다.
- Heat on/off는 각각 8시간동안 진행하였으며, 각 PCM의 상변화 온도 구간에서 온도변화가 지연되는 것을 확인하였다. 또한, 이러한 수치는 1차년도 연구에서 진행되었던 축열 도료의 성능보다 우수한 것을 확인할 수 있었다.
- Heat off시에 n-octadecane이 적용된 MPPPCM의 경우 28 °C의 온도가 지속적으로 유지되고

있는 것을 확인할 수 있다. 이는 아직 상변화가 진행 중인 것을 나타내며, 상변화가 진행 중이라는 것은 Heat on시에 저장하였던 열의 방출이 끝나지 않았음을 알 수 있다.

- 이에 대한 분석을 정확하게 하고자 Heat off 시간을 더 늘려서 재 실험을 실시하였다. 그 결과를 (그림 3.116)에 나타내었으며, 상변화가 끝난 후 발열반응이 완전히 끝나기 까지 약 10시간의 시간이 소요되었다.
- 열의 방출이 최대한 오래 유지되는 것은 PCM의 성능을 극대화 시킬 수 있는 중요한 요소로 작용된다.



(그림 3.115) 샘플 하부의 온도변화



(그림 3.116) n-octadecane의 전열해석 분석 결과

나) 축열 플레이트에 적합한 PCM 선정에 대한 고찰

- 건축 재료에서의 열에너지 이동은 재료의 열용량, 면적, 두께 그리고 양쪽 표면의 온도차의 곱을 통해 계산할 수 있다. 이러한 건축 물리학을 바탕으로 n-octadecane이 적용된 MPPCM의 전열해석을 분석하면, PCM의 상변화 온도와 Heat off시 주변 공기의 온도의 차이가 크지 않기 때문에 열에너지를 천천히 오랫동안 이동시킬 수 있었다.
- 이러한 결론은 앞으로 도시열섬현상을 저감하기 위한 최적의 PCM을 선정함에 있어서 큰 지침이 될 수 있다.
- 두 가지의 목적을 갖는 PCM을 적용하기 위해서는 상변화 온도 구간이 다른 두 종류의 PCM을 개별 또는 혼합하여 적용하여야 한다. 따라서 이어지는 연구에서 축열성능 향상과 더불어 두 종류의 PCM을 적용하는 방안에 대한 연구를 진행하였다.



(그림 3.117) n-octadecane이 적용된 MPPCM (총 180g)



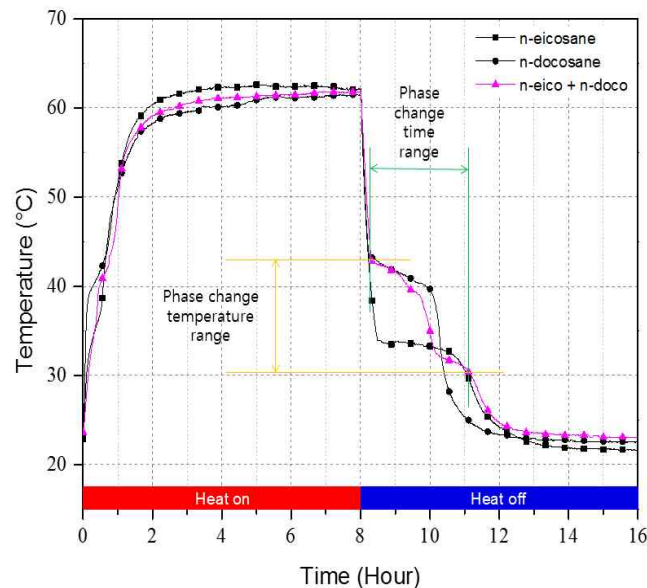
(그림 3.118) WPC : Wood Polymer Composite

(바) 축열성능 향상 방안 연구

1) 구성요소 변동에 따른 MPPPCM의 열적 거동 분석

가) Double-layer MPPPCM의 전열 해석

- MPPPCM을 이중으로 겹쳐 전열 해석을 실시하였다. 이중으로 적용된 MPPPCM은 기존의 실험과 비교하기 위하여 90g(기존의 절반)을 적용하여 제조하였으며, PCM은 n-eicosane과 n-docosane을 사용하였다.
- (그림 3.119)은 n-eicosane과 n-docosane이 적용된 double-layer MPPPCM의 전열 해석 결과로 두 검은색 그래프는 기존의 180g이 적용된 one-layer MPPPCM의 전열 해석 결과이며, 자주색 그래프는 각각 90g 씩 적용된 double-layer MPPPCM의 전열 해석 결과를 나타낸다.
- 그 결과 원하는 두 종류의 PCM이 적용된 MPPPCM을 지붕에 적용하여서 여름철과 겨울철의 요구 성능을 모두 만족하는 축열 플레이트가 설계가 가능하다.
- double-layer MPPPCM의 결과는 one-layer MPPPCM의 결과보다 더 긴 상변화 시간과 더 큰 상변화 구간을 나타냄으로써 열적 성능이 더 우수해진다.
- WPC 중공층 내부에 MPPPCM을 적용할 때, 모든 중공층에 얇은 두 겹의 MPPPCM을 적용하거나 중공층에 두 종류의 MPPPCM을 번갈아가면서 적용하여 (그림 3.119)와 같은 더블피크를 유도해야 한다.

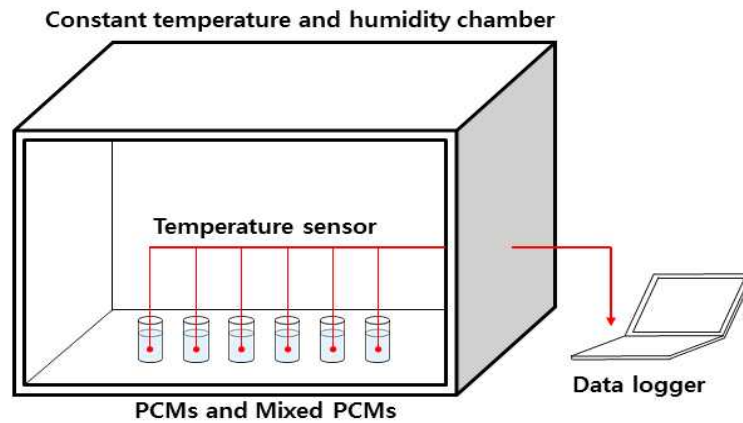


(그림 3.119) Double-layer MPPPCM의
전열 해석 결과

2) 축열성능 향상을 위한 혼합 PCM 제조 및 열적 성능 분석

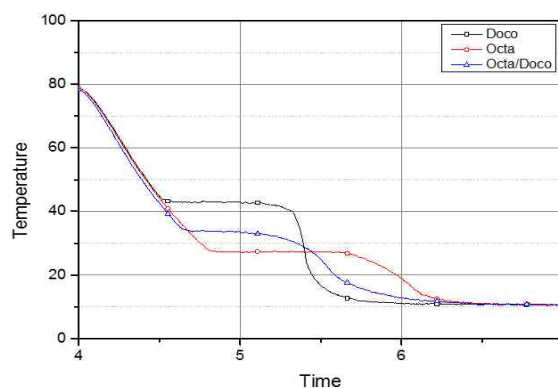
가) 혼합 PCM 제조 및 열적 분석 결과

- double-layer MPPPCM을 이용하여 두 번의 상변화를 갖는 방안뿐만 아니라 PCM 자체를 혼합하여 하나의 패킹 안에 저장하는 혼합 PCM에 대한 연구를 진행하였다.
- 총 6개의 유리병을 항온항습기에 넣어 80 °C에서 Heating 4시간과 10 °C에서 Cooling 4시간을 실시하였다. PCM 및 혼합 PCM의 온도 변화는 유리병 안에 온도 센서를 부착하여 측정하였으며, 데이터로거를 통해 데이터를 수집하였다(그림 3.120).

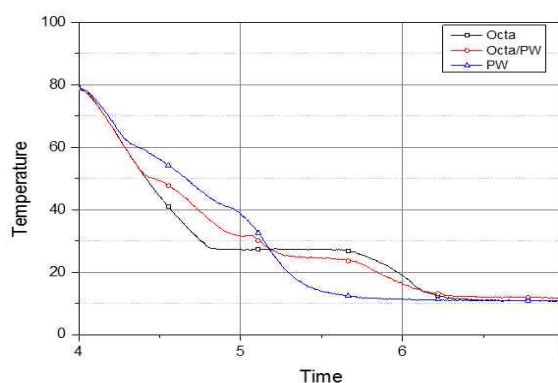


(그림 3.120) PCM 및 혼합 PCM의 열적 성능 간이실험 장비

- n-octadecane과 n-docosane이 각각 20g씩 섞인 유리병과 n-octadecane과 n-docosane이 1:1로 혼합된 20g의 유리병의 온도변화는 다음의 (그림 3.121)과 같다. (그림 3.122)는 가열 후 10℃로 챔버 온도를 변화시킨 이 후의 온도변화를 나타낸다. 두 파라핀계 PCM이 1:1로 섞인 그래프의 경우(Blue line) 두 PCM의 상변화 온도와는 전혀 무관한 약 35℃부근에서 상변화가 일어났다.
- 파라핀계 PCM은 C와 H의 결합으로만 이루어져있는 물질로써, 같은 종류의 파라핀계 PCM이 혼합되면서 화학결합이 일어나 화학적 변화가 일어났고 그로 인해 상변화 온도가 변화한 것을 알 수 있다.
- 본 연구에서는 여름철과 겨울철을 동시에 고려하고자하기 때문에 같은 계열의 PCM을 혼합하는 것은 적합하지 않음을 판단하였다.



(그림 3.121) n-octadecane, n-docosane 및 혼합 PCM의 상변화 온도 구간 분석



(그림 3.122) n-octadecane, Palm Wax 및 혼합 PCM의 상변화 온도 구간 분석

- (그림 3.122)는 파라핀계 PCM인 n-octadecane과 지방산 PCM인 Palm Wax(PW) 및 이 두 종류의 PCM을 혼합한 혼합 PCM의 상변화 온도 구간 분석 결과이다.

- n-octadecane(Black line)의 경우에는 (그림 3.121)의 데이터와 동일하며, 상변화 온도인 28℃에서 뚜렷한 상변화를 보여준다. 지방산 PCM인 PW(Blue line)는 60℃ 부근에서 한 번, 40℃ 부근에서 한 번의 상변화가 일어나는 것을 볼 수 있다. PW가 뚜렷한 상변화를 보이지 않는 것은 지방산 PCM 자체가 약간의 불순물들이 포함되어 있기 때문이다.
- 파라핀계 PCM과 지방산 PCM을 혼합한 혼합 PCM의 경우(Red line)에는 총 3번의 상변화가 일어났음을 볼 수 있다. 이는 파라핀계 PCM끼리 혼합하였던 실험 결과와 다른 양상을 보였다. 상변화 온도가 다른 두 파라핀계 PCM을 섞은 경우에는 화학결합으로 인하여 단일 피크의 새로운 PCM이 생성되었지만, 다른 계열의 PCM을 섞은 경우에는 화학결합이 일어나지 않고 혼합만 되기 때문에 각각의 PCM의 상변화가 유지되게 된다.
- 따라서 본 혼합 PCM의 실험 결과, 여름철과 겨울철을 동시에 고려하기 위하여 두 종류의 PCM의 적용을 목적으로 할 때, 같은 계열의 PCM의 혼합으로는 여러 구간의 상변화 온도 구간을 보이기 어렵고 다른 계열의 PCM을 혼합하여야 함을 알 수 있다.
- 본 실험에서는 Palm Wax라는 단편적인 지방산계 PCM이 사용되었지만 추후 연구에서 다양한 혼합 PCM을 제조하여 평가할 계획에 있다. 뿐만 아니라 같은 계열의 PCM의 혼합으로 새로운 상변화 온도 구간을 갖는 PCM을 제조하여 도시열섬 현상을 저감시키기에 적합한 최적의 PCM을 만들 수 있음을 확인하였다.

(사) PCM Cool Roof System의 설계요소 도출

- PCM Cool Roof System 축열 플레이트 열성능 분석결과를 바탕으로 제품개발을 위한 설계요소를 도출하였다. 요소는 크게 상변화온도를 설정하는 부분과 플레이트 설계를 위한 고려요소로 나누어 분석을 실시하였다.

1) 상변화온도 및 PCM

- 열성능 실험을 통한 분석 결과 저온의 상변화 온도 물질은 주간의 상변화 구간이 짧게 나타나지만, 야간에는 상변화 구간이 길게 나타났다. 야간에는 상변화 온도가 야간 외기온도와 비슷하여 열교환이 느리게 일어나 상변화구간이 길게 나타났다<표 3.64>.
- 고온의 상변화 온도 물질은 저온 상변화온도의 물질과 비교해 주간의 상변화 구간이 길게 나타나는 특징을 가지고 있으며, 상변화온도가 피크온도 시간대로 나타났다. 또한 높은 상변화 온도를 갖기 때문에 상변화 물질의 수량과 표면 반사율 조절을 통해 상변화 구간을 피크 시간대로 설정하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 반대로 야간시간대에는 외기온도와 상변화온도와의 차이로 인해 열교환이 빨라 상변화하는 구간이 주간에 비해 짧게 나타났다.
- 이에 따라 사용되는 지역의 특성에 맞는 PCM 상변화온도를 선정하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

<표 3.64> 상변화온도별 주간/야간의 상변화 특성

구 분	주 간	야 간
저온 상변화 온도 물질	• 상변화 구간이 짧다 - 외기 및 표면과의 온도차이 • 상변화 구간이 피크 시간이 아님	• 상변화 구간이 길다 - 상변화 온도가 야간 외기 온도와 비슷하여 열교환이 느리게 일어나 구간이 길게 일어남
고온 상변화 온도 물질	• 상변화 구간이 길다 - 상변화 온도가 피크온도 시간대 • 상변화 구간을 피크 시간대로 설정 가능 - 상변화 물질 수량, 표면 반사율 조절	• 상변화 구간이 짧다 - 일몰 후 외기온도와 상변화 온도와의 차이로 인하여 열교환이 빨라 구간이 짧음

2) 설계고려요소

- 플레이트의 표면을 구성하는 구조체의 모양 및 재질 그리고 반사율에 따라서 상변화 물질 및 하부 구조체에 전달되는 열의 차이가 발생하기 때문에 설계를 위해 이를 고려하는 것이 필요하다.
- PCM의 적용을 위해 WPC(Wood Plastic Composite) 재질의 중공층 구조 데크 플레이트를 선정하였다. 또한 PCM 수량(두께)에 따라서 외부 열 유입을 지연 시킬 수 있는 시간(time-lag) 변화시킬 수 있어 지역에 따른 사용 수량을 결정하는 것이 필요하며, 상변화온도(Melting Point)에 따라 주간 및 야간의 상변화 시간이 결정되기 때문에 사용되는 지역별 PCM의 Melting point를 고려하는 것 또한 필수요소라고 할 수 있다<표 3.65>.

<표 3.65> PCM Cool Roof System의 설계고려 요소 및 분석결과

고려 요소	영 향 평 가	분 석 결 과
표면 구조체 모양	• 표면을 구성하는 구조체의 모양 및 재질 그리고 반사율에 따라서 상변화 물질 Layer 및 하부 구조체에 전달되는 열의 차이 발생	• WPC 데크 플레이트 - Wood Plastic Composite (WPC) 재질의 중공층(Hollow) 구조 데크 플레이트
표면 구조체 재질		
PCM 수량	• PCM의 수량(두께)에 따라서 외부 열 유입을 지연 시킬 수 있는 시간(Time-lag) 변화	• 상변화 온도 구간 확인 후 결정
Melting Point	• 주간표면 온도에 따라 상변화의 시간을 결정	• n-docosane파라핀계PCM사용 • 기후대(외기온도) 및 적용 부위를 고려34℃ 이상
기후대, 적용 부위	• 여름철 표면온도 및 피크부하 저감 Focus • 건물 옥상 데크 플레이트 형태 표면 구조체 마감	

- 여름철의 표면온도 및 피크 부하 저감과 기존 건물에도 적용 가능한 건물 옥상 데크 플레이트 형태의 표면 구조체 마감재 개발로 목표를 설정한다.
- 기후대(외기온도) 및 적용부위를 고려 할 경우 34℃이상의 Melting point를 갖는 상변화 물질을 적용하는 것이 적합하다 판단된다.

(아) PCM제품 단가 및 제작비 산정을 통한 경제성 분석

- 경제성 분석이란 사업의 비용과 편익을 추정하고 이에 따른 재무적 수익률(financial rate of return)을 계산하여 사업을 평가하는 것이다. 투자 및 비용회수에 관한 불확실성으로 인하여 경제적 손실이 발생할 수 있어 경제성 분석은 계획 단계에서부터 실시하는 것이 필요하다.
- 현재 국내의 PCM도료 공급의 대부분은 수입에 의존하기 때문에 가격 경쟁력 및 시장 점유율이 낮은 상황이지만, 향후 건물에너지 절감의 필요성 인식 증가와 사회·정책적 저감 목표에 따라 온실가스 배출을 저감 할 수 있는 PCM의 수요증가에 따라 해당 시장 확대를 기대할 수 있다. 따라서, 본 장에서는 열섬현상 저감에 대한 편익 항목 분석과 2차년도 연구를 통해 산정된 PCM Cool Roof System의 비용단가를 활용하여 경제성 분석을 실시하였다.

1) 비용산정

- 산정된 PCM Cool Roof System의 단가는 1㎡당 금액이며, 실험에 적용한 plate type의 PCM Cool Roof system의 구조를 바탕으로 비용단가를 산정하였다.
- 현재 PCM n-Octadecane, n-Docosane의 1kg당 가격은 약 30,000원이며, 31*146*2400mm 크기의 WPC 가격은 약 15,000원이다. 이를 1㎡ 면적으로 단가를 계산하면 PCM은 186,000원/㎡, WPC는 42,800원/㎡으로 총 228,800원㎡의 비용이 들어간다<표 3.66>.

<표 3.66> 1㎡ 당 비용 단가

	PCM	WPC	total
제품 가격	n-Octadecane, n-Docosane : 30,000원/kg	31*146*2400mm : 15,000원	-
PCM Cool Roof System 1㎡당 단가	1㎡ 당 PCM 사용량 : (35g×4ea×16set)/0.36㎡≒6.2kg/㎡ ∴ 1㎡ 당 PCM 사용가격 : 6.2kg×30,000원=186,000원/㎡	42,800원/㎡	228,800원/㎡

2) 편익산정

가) 탄소 배출 저감

- 환경부는 2015년 1월부터 온실가스 배출권 거래제를 시행해 기업들은 정부로부터 온실가스 배출허용량을 부여받고, 그 범위 내에서 온실가스를 감축하되 판매가 가능한 정책을 제안하였다. 이미 유럽연합(EU)은 자체적으로 탄소 배출권 거래제(ETS, Emission Trading Scheme)를 만들어 진행해왔다.
- 다음의 <표 3.67>과 같이 PCM플레이트 적용으로 인한 ㎡당 연간 소비 에너지 저감량과 전체 면적의 곱을 통해 전력 저감량을 산출하였으며, 이와 탄소배출계수와 곱으로 탄소 배출 저감량을 산정하였다.
- 저감량에 최근 이산화탄소 1톤당 배출거래금액을 곱함으로써 이산화탄소 발생 저감량의 금액을 산정하였다. 이산화탄소 1톤의 금액은 유럽연합(EU)기준 10유로(1만원대)~30유로(3만8000원)에 거래되며, 우리나라에서는 온실가스(이산화탄소) t당 17,600원으로 거래된다(한국거래소 2016년 05월 기준).
- 설정 단지 내 PCM플레이트 적용 시 이산화탄소 저감은 약 0.99톤 정도 저감되어 금액으로 환산하면 약 17,424원으로 나타나며, 이산화탄소 저감률은 기존 건물 대비 PCM플레이트 적용 시 약 2.5% 감소된다.

<표 3.67> PCM 플레이트 적용으로 인한 이산화탄소 저감량 금액

항 목	산 출 식
PCM 플레이트 적용으로 인한 총 에너지 저감량	= (㎡당 연간 소비 전력 저감량 + 가스 저감량) × 공사면적(㎡) = (3.32 + 2.67)kWh/㎡ × 947.5㎡ = 3145.7kWh+2529.8kWh = 5675.5kWh
탄소 배출 저감량	= PCM 플레이트로 인한 에너지 저감량(kWh) × 탄소배출계수(전력용/가스용) = (3145.7kWh×0.4691kg/kWh)+(2529.8kWh×1.1kg/kWh) = 4258.43kg
CO ₂ 발생 저감량의 금액	= 탄소배출량 저감량(ton) × CO ₂ 1ton당 거래금액 = 4.26(t) × 17,600(원) = 74,976(원)

나) 에너지 저감

- 기존의 옥상방수를 사용하는 것에 비해 PCM플레이트 적용 시 냉·난방 부하의 감소로 인한 에너지 비용이 절감된다. 시뮬레이션을 통한 PCM플레이트 적용/비적용으로 인한 에너지 절감량을 계산하여 에너지 단가를 곱해 절감되는 비용에 대한 편익을 추정하였다.
- 단위면적당 소비전력 및 가스 저감량은 시뮬레이션 결과를 바탕으로 ㎡당 각각 연간 3.32kWh/㎡과 2.67kWh/㎡로 산출되었다. 도시가스 단가는 서울 도시가스에서 2016년 5월에

발표한 14.545(원/MJ)으로 가정하였으며, 전력 단가는 한국전력공사의 2014년 에너지 단가지수를 이용하여 산출한 결과 일반전력은 92.3원[kW/h]이며 도시가스는 52.3(원/kWh)으로 나타났다. 따라서 PCM플레이트 적용 시 절감 금액은 약 5,323만원으로 나타났으며, 에너지 비용 저감율은 기존 건물 대비 PCM플레이트 적용 시 약 9.8%정도 감소되었다<표 3.68>.

<표 3.68> PCM 플레이트 적용으로 인한 에너지 절감량 금액

항 목	산 출 식
PCM 플레이트 적용으로 인한 총 에너지 절감량	$= (\text{㎡당 연간 소비 전력 저감량} + \text{가스 저감량}) \times \text{공사면적}(\text{㎡})$ $= (3.32 + 2.67)\text{kWh}/\text{㎡} \times 947.5\text{㎡} = 3145.7\text{kWh} + 2529.8\text{kWh} = 5675.5\text{kWh}$
에너지 절감 비용	$= \text{PCM 플레이트 적용으로 인한 에너지 절감량(kWh)} \times \text{에너지단가}$ $= [3145.7\text{kWh} \times 92.3(\text{원}) + 2529.8\text{kWh} \times 52.3(\text{원/kWh})]$ $= 422,656.65(\text{원})$

다) 유지·관리 비용 절감

- 기존의 옥상을 관리하는 비용에 비해 PCM 플레이트 사용 시 옥상 관리비 저감에 따른 편익을 산정하였다. 정기적 옥상 방수 공사의 경우, 사용되는 페인트의 종류 및 업체에 따라 관리 비용이 상이하지만, 기존 연구에 따르면 단위면적당 평균 300원정도 소요되었다. 따라서 이를 창호기준으로 옥상면적(㎡)을 곱하여 PCM플레이트 사용에 따른 정기적 옥상 관리 저감 비용을 추정하였다. 따라서 PCM플레이트 적용 시 정기적 옥상 관리 저감 비용은 약 284,250원으로 나타났다.

<표 3.69> 정기적 옥상 관리 저감 비용

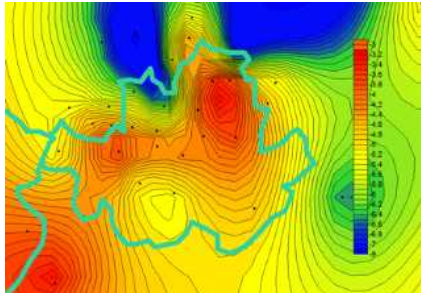
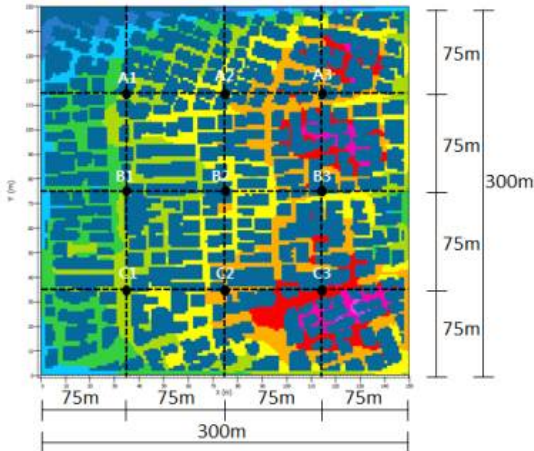
항 목	산 출 식
정기적 옥상관리 저감 비용	$= \text{단위면적당 연간 옥상방수 공사비용(원)} \times \text{옥상면적}(\text{㎡})$ $= 300(\text{원}/\text{㎡}) \times 947.5(\text{㎡}) = 284,250(\text{원})$

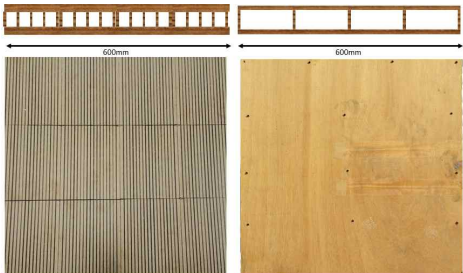
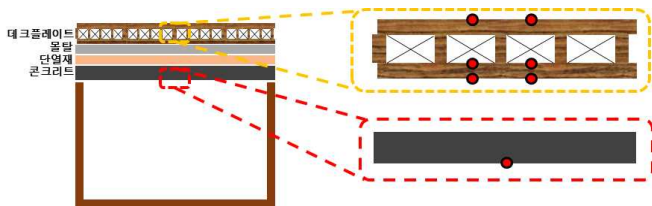
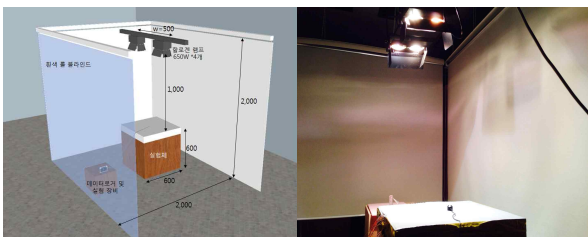
라) PCM 플레이트 적용 시 편익 비용

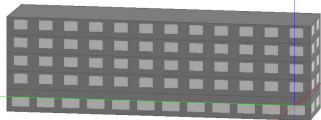
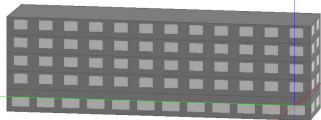
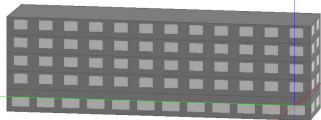
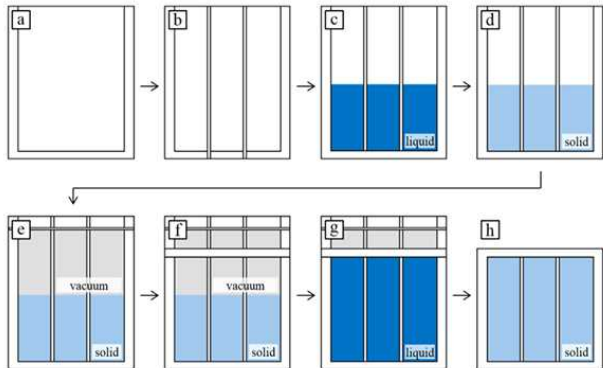
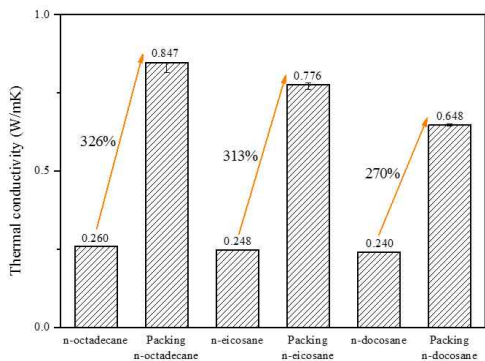
- 기존의 오피스 건물 옥상에 PCM플레이트 적용 시 편익 항목으로는 크게 1)탄소 배출 저감, 2)에너지 저감, 3)유지·관리 비용 절감으로 꼽을 수 있으며, 각 항목 별 연간 발생 금액은 74,976원, 422,656.65원, 284,250원이다. 따라서 종합적으로 연간 781,882.65원 정도의 편익이 발생하며, 이를 단위면적으로 나누게 되면 1㎡당 약 825원의 편익이 발생하는 것으로 나타났다.

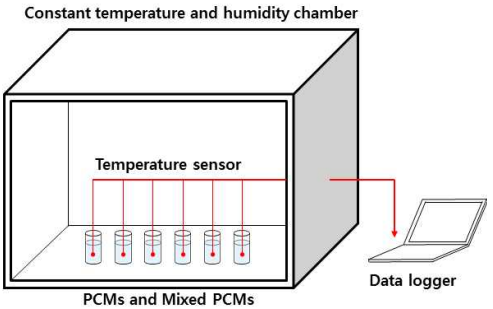
(3) 연구수행 결과

- 본 연구의 최종목표는 PCM Cool Roof System의 개발을 통하여, 최근 문제가 되고 있는 도심열섬현상을 저감하는 것으로서, 당해 연도에는 크게 두 가지로 ‘Cool Roof System 적용에 따른 건물 및 도시의 환경성능 분석’과 ‘PCM 축열 플레이트의 열적 성능평가 및 시제품 제작’ 나누어 실시하였다. 당해 연도의 연구 결과는 다음과 같다.

연구 기관	연구 범위	연구 수행 방법	구체적인 내용																																							
중앙대학교	지붕재 변화에 따른 도시열섬 저감 효과 분석	서울열섬강도 현황분석	 - 자동기상관측시스템(AWS) 자료를 활용한 온도데이터 분석 - 서울시 28개소 관측지점의 온도데이터를 이용하여 서울시의 하절기, 동절기 열섬강도 현황 분석																																							
		외피 종류별 반사율 실측	<table><tr><td rowspan="2">건물</td><td>분류</td><td>녹색 우레탄 방수-1</td><td>회색 몰탈-1</td><td>나무데크</td><td>녹색 우레탄 방수-2</td><td>회색 몰탈-2</td></tr><tr><td>반사율</td><td>0.26</td><td>0.31</td><td>0.11</td><td>0.27</td><td>0.27</td></tr><tr><td rowspan="2">도로</td><td>분류</td><td>아스팔트</td><td>포장도로 (판돌)</td><td>보도1</td><td>보도2</td><td>화산석</td></tr><tr><td>반사율</td><td>0.10</td><td>0.21</td><td>0.20</td><td>0.15</td><td>0.11</td></tr><tr><td rowspan="2">녹지</td><td>분류</td><td>잔디 (동절기)</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>반사율</td><td>0.29</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table> 외피 종류별 재료 특성에 대한 조사와 반사율 실측	건물	분류	녹색 우레탄 방수-1	회색 몰탈-1	나무데크	녹색 우레탄 방수-2	회색 몰탈-2	반사율	0.26	0.31	0.11	0.27	0.27	도로	분류	아스팔트	포장도로 (판돌)	보도1	보도2	화산석	반사율	0.10	0.21	0.20	0.15	0.11	녹지	분류	잔디 (동절기)					반사율	0.29				
		건물	분류		녹색 우레탄 방수-1	회색 몰탈-1	나무데크	녹색 우레탄 방수-2	회색 몰탈-2																																	
			반사율	0.26	0.31	0.11	0.27	0.27																																		
도로	분류	아스팔트	포장도로 (판돌)	보도1	보도2	화산석																																				
	반사율	0.10	0.21	0.20	0.15	0.11																																				
녹지	분류	잔디 (동절기)																																								
	반사율	0.29																																								
미기후 분석 프로그램인 ENVI-met을 활용하여 반사율에 따른 온도저감 효과 분석	 - 중저층주거단지, 고층주거단지, 상업지역으로 유형을 나누고, 대상지 및 범위를 설정 - ENVI-met을 통해 대상지의 하절기, 동절기의 반사율에 따른 온도저감효과 분석																																									

연구 기관	연구 범위	연구 수행 방법	구체적인 내용												
PCM Cool Roof 축열플레이트 열성능 분석	• 마감재별 PCM Cool Roof System 열성능 실험		<table border="1"><thead><tr><th></th><th>Case 1</th><th>Case 2</th><th>Case 3</th></tr></thead><tbody><tr><td>실험군</td><td>PCM+석재타일</td><td>PCM+목재</td><td>PCM+알루미늄</td></tr><tr><td>대조군</td><td colspan="3">녹색우레탄방수 / 회색우레탄방수 / Cool paint</td></tr></tbody></table> • Packing type PCM을 적용한 축소모형 실험 • 기존 옥상 마감과 석재, 목재, 알루미늄과의 열성능 비교 실험		Case 1	Case 2	Case 3	실험군	PCM+석재타일	PCM+목재	PCM+알루미늄	대조군	녹색우레탄방수 / 회색우레탄방수 / Cool paint		
		Case 1	Case 2	Case 3											
	실험군	PCM+석재타일	PCM+목재	PCM+알루미늄											
	대조군	녹색우레탄방수 / 회색우레탄방수 / Cool paint													
	• WPC(Wood Plastic Composite)의 열적 거동 실험	 WPC 일반 목재 • TCi 분석을 통한 WPC와 목재의 열전도율 측정 - 중공층 포함 시, 비포함 비교측정													
	• WPC를 적용한 PCM Cool Roof System 열성능 실험	 • 축소모형실험을 통한 WPC 열성능 비교 실험 - PCM 포함, 비포함													
• PCM Cool Roof System의 마감색상별 열성능 실험	• 반사율에 따른 열성능 차이 분석 - 흰색, 갈색 비교 실험														
• 인공기후 실험	 • 마감색상별, Melting point별 비교 실험 - 흰색, 회색, 갈색 비교 실험 - Bio 25, 30, 34, RT 44 비교 실험														
• 박공지붕 열성능 실험	 • 박공지붕과 일반 평지붕과의 비교 실험														

연구 기관	연구 범위	연구 수행 방법	구체적인 내용																											
송 실 대 학 교	개별 건물의 냉방에너지 성능 분석	컴퓨터 시뮬레이션을 통한 실험적 접근	<table><tr><th>구 분</th><th>내 용</th><th>시뮬레이션 모델</th></tr><tr><td>높이</td><td>14m</td><td rowspan="6"></td></tr><tr><td>층수</td><td>5층</td></tr><tr><td>향</td><td>정남향</td></tr><tr><td>층고</td><td>2.8m</td></tr><tr><td>지붕 면적</td><td>947.5㎡</td></tr><tr><td>연면적</td><td>4,515.7㎡</td></tr></table> - 개별 건물의 냉방에너지 성능 평가를 위해 에너지 시뮬레이션 프로그램인 ‘Energy Plus Ver.8-5’ 분석 실시 - PCM 적용 시 에너지 절감 성능 평가 - 분석결과 - 옥상에 PCM을 적용한 경우 총 에너지 소비량의 절감량은 약 0.57%로 미미한 효과를 보였지만, 최상층의 냉·난방 부하의 절감량은 약 1~2%로 나타남	구 분	내 용	시뮬레이션 모델	높이	14m		층수	5층	향	정남향	층고	2.8m	지붕 면적	947.5㎡	연면적	4,515.7㎡											
	구 분	내 용	시뮬레이션 모델																											
높이	14m																													
층수	5층																													
향	정남향																													
층고	2.8m																													
지붕 면적	947.5㎡																													
연면적	4,515.7㎡																													
상안정 PCM의 열적 거동 분석	- 패킹형 상안정 PCM 제조 - 전열해석 장비 구축 및 실험	 - PCM의 열적 성능을 높이기 위하여 Macro-packed PCM (MPPCM)을 제조 - 제조된 MPPCM의 열적 성능 분석을 위해 적외선 조사장치를 이용한 전열해석 장비를 구축																												
PCM축열 플레이트 설계 및 축소모형 실험	패킹형 PCM과 WPC를 결합한 축열 플레이트 설계 및 열적 성능 분석	 <table><tr><th>Material</th><th>State</th><th>Thermal conductivity (W/mK)</th><th>Improvement (%)</th></tr><tr><td>n-octadecane</td><td>Pure</td><td>0.260</td><td>-</td></tr><tr><td>n-octadecane</td><td>Packing</td><td>0.847</td><td>326%</td></tr><tr><td>n-eicosane</td><td>Pure</td><td>0.248</td><td>-</td></tr><tr><td>n-eicosane</td><td>Packing</td><td>0.776</td><td>313%</td></tr><tr><td>n-docosane</td><td>Pure</td><td>0.240</td><td>-</td></tr><tr><td>n-docosane</td><td>Packing</td><td>0.648</td><td>270%</td></tr></table> - MPPCM의 형태는 자유자재로 변형이 가능하며, 막대형으로 제작하여 WPC의 중공층에 MPPCM을 적용하여 축열 플레이트를 설계 - MPPCM과 WPC의 열전도율 측정 및 열적 성능 분석	Material	State	Thermal conductivity (W/mK)	Improvement (%)	n-octadecane	Pure	0.260	-	n-octadecane	Packing	0.847	326%	n-eicosane	Pure	0.248	-	n-eicosane	Packing	0.776	313%	n-docosane	Pure	0.240	-	n-docosane	Packing	0.648	270%
Material	State	Thermal conductivity (W/mK)	Improvement (%)																											
n-octadecane	Pure	0.260	-																											
n-octadecane	Packing	0.847	326%																											
n-eicosane	Pure	0.248	-																											
n-eicosane	Packing	0.776	313%																											
n-docosane	Pure	0.240	-																											
n-docosane	Packing	0.648	270%																											

연구 기관	연구 범위	연구 수행 방법	구체적인 내용
	축열 성능 향상 방안 연구	- PCM 종류에 따른 열적 거동 분석 Double-layer PCM의 열적 성능 평가 - 혼합 PCM 제조	 - 잠열량과 상변화 온도가 다른 여러 PCM이 적용된 MPPCM의 열적 성능 분석 - 여름철과 겨울철을 동시에 고려하기 위하여 두 겹으로 구성된 MPPCM의 열적 성능을 분석. 또한 혼합 PCM을 제조하여 최적의 PCM 적용 방안 고찰

1) Cool Roof System 적용에 따른 건물 및 도시의 환경성능 예측

- Cool Roof System의 적용에 따른 환경 변화를 알아보기 위하여 기상청에서 제공하는 자동기상관측시스템(AWS:Automatic Weather System)의 자료를 활용하여 서울시의 열섬강도 현황분석을 한 결과 주간 시간대보다는 야간 시간대에 열섬 강도가 높게 나타나는 것을 확인하였다.
- 녹색 우레탄 방수코팅과 회색 몰탈 방수 건물을 2개소 이상 선정하여 반사율 실측한 값으로 녹색 우레탄 방수코팅은 0.26, 0.27이며, 회색 몰탈 방수는 0.31, 0.27로 녹색 우레탄 방수코팅에 비해 높게 나타났다.
- 우드 데크의 경우 알베도가 0.11으로 기존 지붕보다 알베도가 낮아 태양복사 에너지의 유입 및 유출이 많을 수도 있으나, 열전도율이 매우 낮아 축열 되는 복사에너지가 적어 표면온도 상승으로 인한 온도 상승은 적을 것으로 판단된다.
- 도로의 경우 아스팔트 도로는 반사율이 0.10으로 매우 낮았으며, 보도의 경우 마감 형태 및 색상에 따라 0.11 ~ 0.21까지 다양하였다.
- 녹지를 대표하는 잔디의 동절기 반사율을 0.29로 다른 마감 재료에 비해 비교적 높게 나타났다. 이는 계절적인 요인을 반영한 것으로 하절기 반사율과는 다소 차이가 있을 것으로 예상된다.

2) 시뮬레이션 분석을 통한 도심열섬저감 효과 도출

- 시뮬레이션 분석에 활용된 ‘ENVI-met’ 프로그램을 활용하여 반사율을 0.2, 0.4, 0.6으로 변화시켜 실시한 하절기의 시뮬레이션 결과, 반사율을 0.2(기준)에서 0.4로 변경할 경우 2m높이에서는 평균 0.22℃, 캐노피 높이에서는 평균 약 0.04℃ 낮은 온도를 나타냈으며, 0.6으로 변경할 경우에는 2m높이에서 평균 0.37℃, 캐노피 높이에서 평균 0.08℃ 낮은 온도를 나타냈다.
- 건물의 비율이 비교적 높게 나타난 중저층주거단지(광진)과 상업단지(서초)의 온도저감 효과가 크게 나타났으며, 건물 및 지붕층의 비율이 낮은 고층주거단지(송파)지역의 경우에는 온도차이가 크게 나타나지 않았다. 캐노피 높이의 온도보다 2m위에서 측정한 온도가 더 크게 저감되는 것으로 나타났다.
- 캐노피 높이의 온도보다 2m위에서 측정한 온도가 더 크게 저감되는 것으로 나타났다. 동절기의

시뮬레이션의 결과, 하절기와 마찬가지로 반사율을 높일수록 온도가 저감되는 것을 확인 할 수 있었다. 반사율을 0.2(기준)에서 0.4로 변경할 경우 2m높이에서는 평균 0.06℃, 캐노피 높이에서는 평균 0.01℃가량 온도가 낮은 온도를 나타냈으며, 0.6으로 변경할 경우에는 2m 높이에서는 평균 0.12℃, 캐노피 높이에서는 평균 0.03℃의 낮은 온도를 나타냈다. 하절기와 마찬가지로 캐노피 온도보다는 지상 2m의 높이에서 온도변화가 더 크게 나타났으며, 하절기 결과와 비교해 동절기의 온도변화가 적게 나타났다.

3) 개별건물의 냉방 에너지 성능 분석

- 전체 건물에서 전체 에너지 소비량과 단위면적당 에너지 소비량 및 냉·난방 피크 부하에 대해서는 옥상의 영향을 가장 크게 받는 최상층을 분석하였다. PCM 플레이트를 적용한 옥상의 경우 일반 옥상과 비교 시 최상층의 Total Site Energy는 약 1.77%의 절감효과를 확인 할 수 있었다.
- 총 에너지 소비량은 조명 및 기기부하 등이 포함된 것으로 지붕을 통한 에너지 절감량이 차지하는 비율은 미미하지만, 최상층의 냉방 부하 절감량은 2.5%의 감소효과를 보였으며 난방에너지는 1.0%의 절감효과를 보였다.
- 시뮬레이션 내 설정 조건에서 상변화 시 엔탈피 값을 2배로 늘려 RT44 PCM의 축열성능을 향상시켰다. 총 에너지 소비량의 절감량은 1.3%로 나타났고 최상층의 냉·난방 피크 부하는 각각 2.3%와 0.41%의 감소효과를 보였다. PCM의 축열 성능을 향상 시킨 결과, 기존 PCM Roof System에 비해 1~2%정도 성능이 향상됨을 보였다.

4) PCM Cool Roof 축열플레이트 열성능 검증

가) 지붕 마감재 색상별 열성능 실험

기존 옥상 마감재료 별 온도 차이를 분석한 결과 석재타일과 목재가 알루미늄보다 약 3.6℃ 크게 나타났으며, PCM을 적용 했을 경우 20분 ~ 150분의 Time-lag현상을 보이고 있었다. 실험결과와 Time-lag 현상은 PCM의 축열 성능으로 인한 결과로 판단되며, 이러한 현상을 이용하면 하절기 표면온도 및 냉방부하 저감에 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다.

나) WPC의 열적 거동과 PCM 결합 실험

WPC와 목재의 열전도율 측정결과 콘크리트보다 열전도율이 낮은 것을 확인하였으며, WPC와 목재의 열전도율 차이는 0.2(W/m℃)로 나타났다. 축소모형 실험결과 WPC와 목재의 외부 실험결과 표면의 경우 최고온도는 WPC가 11.6℃ 더 높게 나타났고, 평균온도는 4.4℃, 최저온도는 1.2℃로 WPC가 더 높게 나타났다. 이러한 실험결과 목재가 WPC에 비하여 낮은 온도를 나타냈지만, 일반 목재의 경우내구성과 강도가 상대적으로 부족하기 때문에 PCM Cool Roof System의 마감재로서는 적합하지 않은 것으로 사료된다.

다) PCM Cool Roof System의 마감재색상별 열성능 실험

표면색상에 따른 열성능 측정결과 표면온도는 갈색이 38.9℃, White는 23.7℃로 15.2℃의 차이를 보였고, 플레이트 내부온도는 Brown이 38.9℃, White는 22.8℃로 16.1℃의 차이, 플레이트 하부온도는 Brown이 36.1℃, White는 22.6℃로 13.5℃의 차이, 실내 천장면 온도는 Brown이 29.4℃, White는 24.0℃로 5.4℃의 차이를 보였다. 이러한 결과 값은 표면 색상에 의한 결과로

판단되며, 표면 색상의 다양한 변화를 통하여 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

라) 인공기후 실험동을 이용한 PCM Cool Roof System 열적 거동 실험

RT 44 PCM 적용 시, 플레이트 내부최고온도는 각각 Brown(56.9℃), Gray(52.5℃), White(41.4℃)순으로 나타났다. 마감색상의 반사율 차이로 인한 온도차이가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, WPC플레이트의 내부 최고온도 도달 시간의 경우 Brown이 7시간 08분, White가 8시간 51분으로 White가 Brown보다 약 1시간 43분 늦게 도달하였다. 이러한 결과를 토대로 마감색상의 반사율 변화만으로도 난방피크부하의 시간을 피할 수 있는 효과가 있을 것으로 사료된다.

마) 박공(경사)지붕 열성능 실험

동일면적의 평지붕과 박공지붕에 PCM RT 44를 적용하여 온도를 측정한 결과 플레이트 표면온도의 차이는 평균 5.1℃, 플레이트 내부온도는 평균 2.4℃ 박공지붕이 낮게 측정되었다.

5) 상안정 PCM이 들어간 축열 플레이트 개발 및 축열 성능 향상 연구

가) DSC 분석을 통한 세 종류의 PCM 물성치 분석

- DSC분석을 통해서 세 종류의 PCM(n-octadecane, n-eicosane, docosane)의 잠열량, 엔탈피, 상변화온도를 분석하였으며, MPPCM 제조 전 후의 열전도율을 측정하여 열적 성능에 대한 개선 여부를 확인하였다.
- n-octadecane의 경우, 가열 시에는 23-37 ℃ 사이에서 상변화가 일어났고 냉각 시에는 17-25 ℃ 사이에서 상변화가 일어났으며, 그 때의 잠열량은 256.5 J/g이었다. 세 종류의 파라핀계 PCM 중에서 n-octadecane의 잠열량이 가장 높고, 상변화 온도는 n-docosane이 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.
- 세 가지의 PCM은 5 ℃에서 유사한 엔탈피 값을 보였으나, 55℃까지 가열한 후 엔탈피 값은 각각 1703.4, 2045.6, 2380.6 J/g을 나타내었다. 변화한 폭은 n-octadecane의 경우가 가장 컸으며, 이러한 변화의 이유는 n-octadecane의 잠열량이 가장 큰 것에 기인한다.

나) TCi 열전도율 분석기를 통한 순수한 PCM의 열전도율과 MPPCM의 열전도율 측정

- 순수한 n-octadecane, n-eicosane, n-docosane의 열전도율은 0.260 W/mK, 0.248 W/mK, 0.240 W/mK이며, MPPCM으로 제조 후의 열전도율은 각각 0.847 W/mK, 0.776 W/mK, 0.648 W/mK으로 약 300%의 증가율을 보였다. 전체적인 열전도율이 증가한 이유는 나일론 패킹 백의 열전도율이 1.424 W/mK으로 상대적으로 높은 열전도율을 갖고 있기 때문이다. 일반적으로 건축자재의 경우에는 열전도율이 증가하는 것이 단점일 수 있으나, PCM의 측면에서는 PCM의 잠열 성능이 더 빠르고 원활하게 발현되기 위해서 열전도율이 증가하는 것은 장점이다.

이러한 실험 결과는 향후 도시열섬현상을 저감하기 위한 최적의 PCM을 선정함에 있어서 큰 지침이 될 수 있다. 예를 들어, 구조체의 온도 변화가 20-35℃ 사이를 반복한다면 일반적으로 그 범위 안에 포함되는 상변화 온도를 갖는 PCM(상변화온도 : 28℃)을 선택적으로 사용할 것이다. 그러나 이 결과에 따르면 35℃에 가까운 상변화 온도를 갖는 PCM은 흡열을 천천히 오랫동안 할 수 있으며, 20℃에 가까운 상변화 온도를 갖는 PCM은 발열을 천천히 오랫동안 할 수 있게 된다.

다. 3차 년도

(1) 연구 범위 및 연구 수행 방법

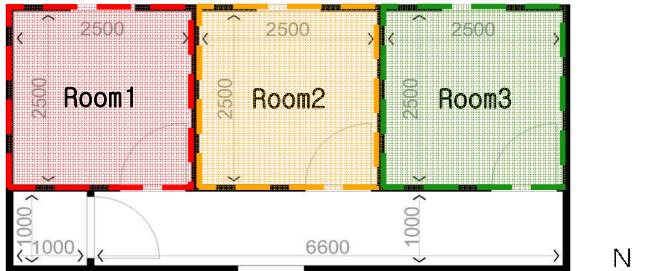
연구 범위	연구 수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
PCM Cool Roof System의 성능검증	Test-bed를 활용한 성능 검증	Test-bed WPC에 PCM 삽입유무에 따른 실물모형 실험 실시
	열성능 시뮬레이션을 통한 냉·난방부하 저감 성능 검증	실제 측정데이터와 시뮬레이션 데이터의 비교 검증을 통한 Designbuilder 프로그램의 신뢰성 확보
		열성능 시뮬레이션을 통한 연간 냉·난방부하저감 성능 분석
	기류분석 시뮬레이션을 통한 열섬현상 저감 효과 검증	- 아파트와 주택단지의 옥상에 PCM 적용 시 냉방부하 저감 효과 비교 분석 및 검증 - 기류 분석 시뮬레이션인 Star-CCM을 활용하여 PCM Cool Roof System 도시열섬현상 저감 효과 검증
PCM Cool roof system 활용을 위한 PCM의 최적 적용 방안 분석 및 제안	Energyplus를 활용한 시뮬레이션 분석으로 최적의 PCM 적용방안 제안	- PCM 적용 유무 상변화온도 변화에 따른 표면온도 변화 확인 - 표면온도 저감을 위한 반사율 선정 및 PCM의 최적 적용 방안 분석 및 제안
PCM Cool Roof System의 설계기준(안) 개발	PCM Cool roof system의 보급 및 활성화를 위한 설계기준(안) 작성	PCM Cool roof system 상세 기능 설명, 설계기준, 적용범위, 유지관리 및 교체시기에 대한 전반적인 PCM Cool Roof System 가이드라인 제시

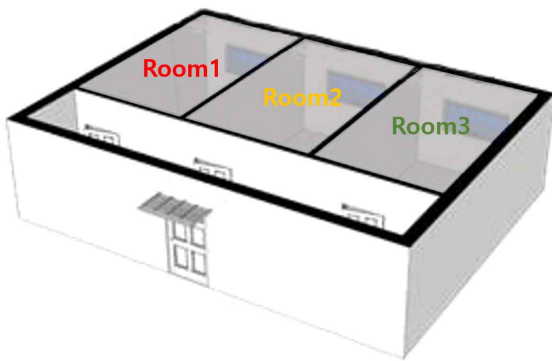
(가) PCM Cool Roof System의 성능검증

1) Test-bed를 활용한 성능 검증

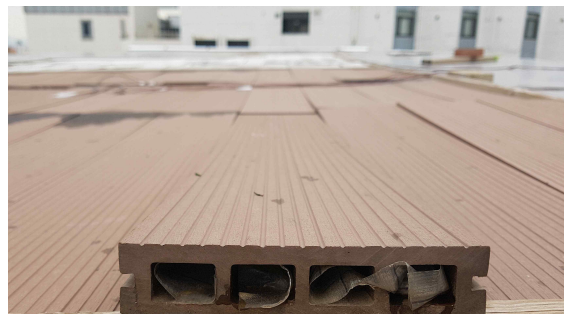
- PCM Cool Roof System의 Test-bed 적용실험을 위하여, 단열재 패널 100mm에 모르타르 마감으로 1개 층, 3개의 실(각 6.25㎡), 전실로 사용되는 복도로 구성을 하여 성능 측정 및 검증을 실시하였다.
- Test-bed 개요는 다음 <표 3.70>과 같다.

<표 3.70> 실물모형 실험체 개요

구분		내용		Test-bed(실물모형)	
높이		2.5m			
층수		1층			
향		정남향			
층고		2.4m			
지붕면적	26㎡	Room1	6.25㎡		
		Room2	6.25㎡		
		Room3	6.25㎡		
지붕외피	Room1	WPC		단일 WPC WPC+PCM WPC+PCM+Cool Paint	
	Room2	WPC+PCM			
	Room3	WPC+PCM+Cool Paint			



(그림 3.123) Test-bed 조감도

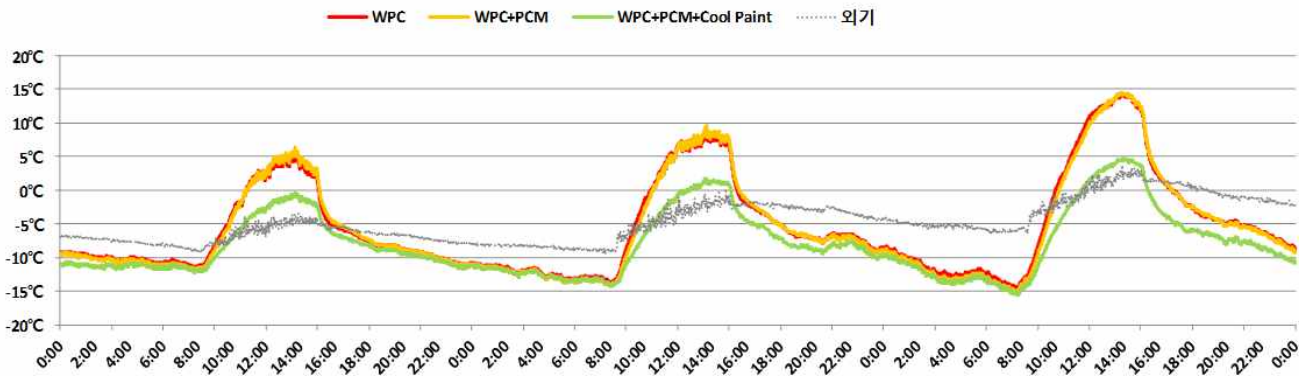


(그림 3.124) WPC+PCM 실물 모습

가) 동절기 Test-bed를 활용한 성능 검증

- 기간 : 2017년 1월 01일 ~ 2017년 2월 28일
- 장소 : 서울특별시 동작구 흑석동 중앙대학교 208관 건물 옥상 Test-bed
- 동절기 기간 대표 데이터 : 1월 14일 ~ 1월 16일 (72시간)(그림 3.125)
 - 평균기온 4.8℃, 평균운량 0, 평균풍속 3.2m/s
- 변수선정
 - Room1 : WPC, Room2 : WPC+PCM, Room3 : WPC+PCM+Cool Paint
- Test-bed 온도측정 결과

• 플레이트 표면온도



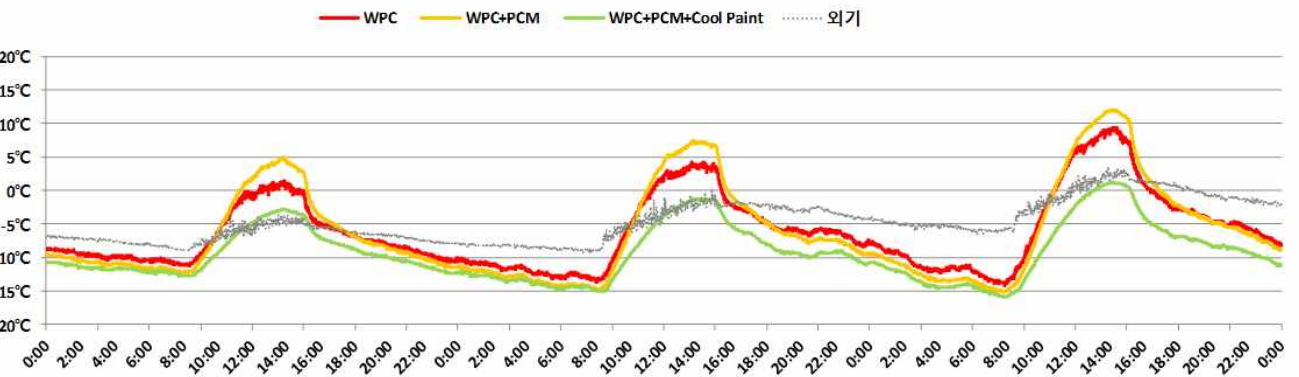
(그림 3.125) 플레이트 표면 측정 결과 그래프

<표 3.71> 플레이트 표면온도 측정결과 (단위 : °C)

	플레이트 표면온도		
	WPC	WPC+PCM	WPC+PCM+Cool Paint
최고	14.3	14.6	4.7
최저	-14.6	-15.1	-15.5
평균	-5.4	-5.5	-7.9

플레이트 표면온도 측정결과, 평균온도는 WPC:-5.4°C, WPC+PCM: - 5.5°C, WPC+PCM+Cool Paint: - 7.9°C로 나타났다.

• 플레이트 내부온도



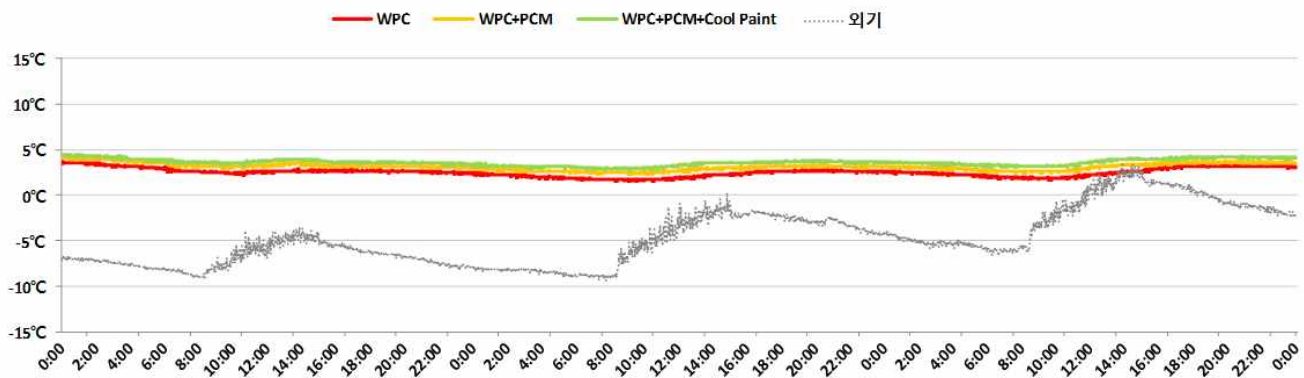
(그림 3.126) 플레이트 내부 측정 결과 그래프

<표 3.72> 플레이트 내부온도 측정결과 (단위 : °C)

	플레이트 내부온도		
	WPC	WPC+PCM	WPC+PCM+Cool Paint
최고	9.4	12.0	1.2
최저	-14.1	-15.2	-16.0
평균	-6.1	-5.2	-9.3

플레이트 내부온도 측정결과, 평균온도는 WPC:-6.1°C, WPC+PCM: - 5.2°C, WPC+PCM+Cool Paint: - 9.3°C로 나타났다.

- 실내 온도 (높이 : 1200mm)



(그림 3.127) 실내 측정 결과 그래프

<표 3.73> 실내 측정결과

(단위 : °C)

	실내 1200mm 온도		
	WPC	WPC+PCM	WPC+PCM+Cool Paint
최고	3.7	4.2	4.5
최저	1.6	2.4	2.8
평균	2.5	3.1	3.6

실내 온도 측정결과, 평균온도는 WPC:2.5°C, WPC+PCM:3.1°C, WPC+PCM+Cool Paint:3.6°C로 나타났다.

㉑ 실험결과 및 요약

본 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 플레이트 표면 평균온도는 WPC:-5.4°C, WPC+PCM: - 5.5°C, WPC+PCM+Cool Paint: - 7.9°C로 WPC만 적용한 Room1이 가장 높게 나타났지만, 실내 평균 온도는 WPC:2.5°C, WPC+PCM:3.1°C, WPC+PCM+Cool Paint:3.6°C로 Room3가 가장 높게 나타났다.
- 따라서, PCM Cool roof system은 표면의 반사율을 낮춰 표면온도의 저감효과를 가지면서 동시에 단열재 역할을 하는 PCM의 영향으로 실내 온도 유지 효과가 있음을 입증하였다.

나) 중간기 Test-bed를 활용한 성능 검증

㉑ 기간 : 2017년 3월 01일 ~ 2017년 4월 30일

㉒ 장소 : 서울특별시 동작구 흑석동 중앙대학교 208관 건물 옥상 Test-bed

㉓ 중간기 기간 대표 데이터 : 4월 21일 ~ 4월 23일 (72시간)(그림 3.128)

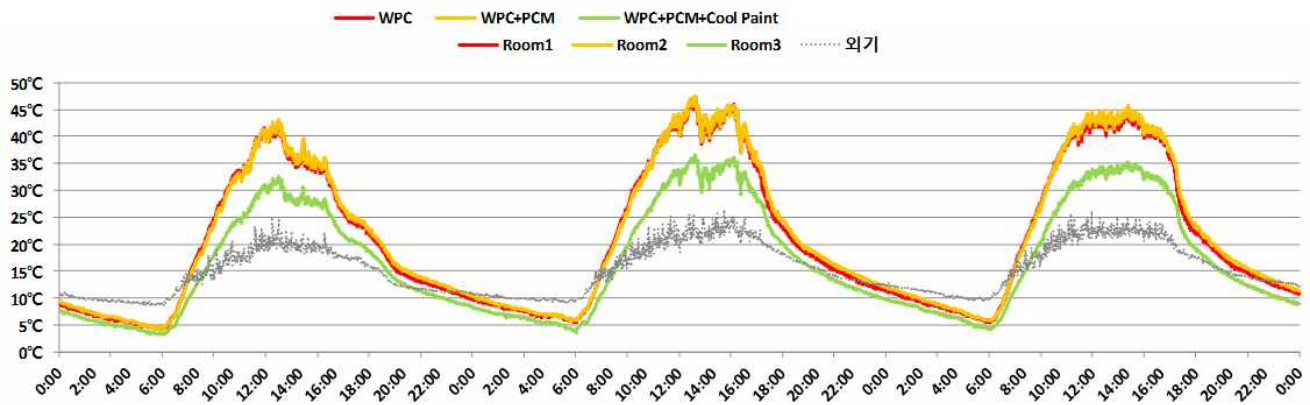
- 평균기온 19.5°C, 평균운량 0.7 평균풍속 2.4m/s

㉔ 변수선정

- Room1 : WPC, Room2 : WPC+PCM, Room3 : WPC+PCM+Cool Paint

㉕ Test-bed 온도측정 결과

- 플레이트 표면온도



(그림 3.128) 플레이트 표면 측정 결과 그래프

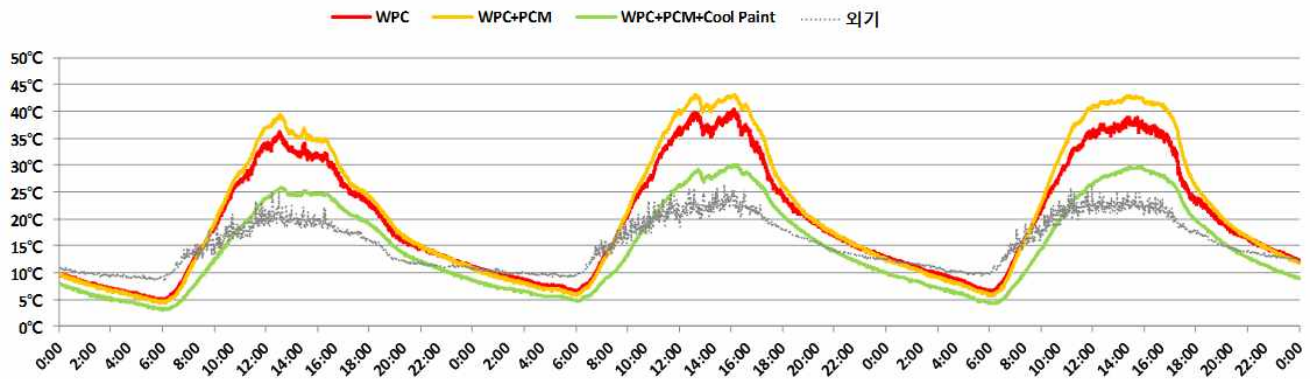
<표 3.74> 플레이트 표면온도 측정결과

(단위 : °C)

	플레이트 표면온도		
	WPC	WPC+PCM	WPC+PCM+Cool Paint
최고	47.3	47.5	36.5
최저	4.3	4.4	3.3
평균	21.0	21.5	16.8

플레이트 표면온도 측정결과, 평균온도는 WPC:21°C, WPC+PCM:21.5°C, WPC+PCM+Cool Paint:16.8°C로 나타났다.

- 플레이트 내부온도



(그림 3.129) 플레이트 내부 측정 결과 그래프

<표 3.75> 플레이트 내부온도 측정결과

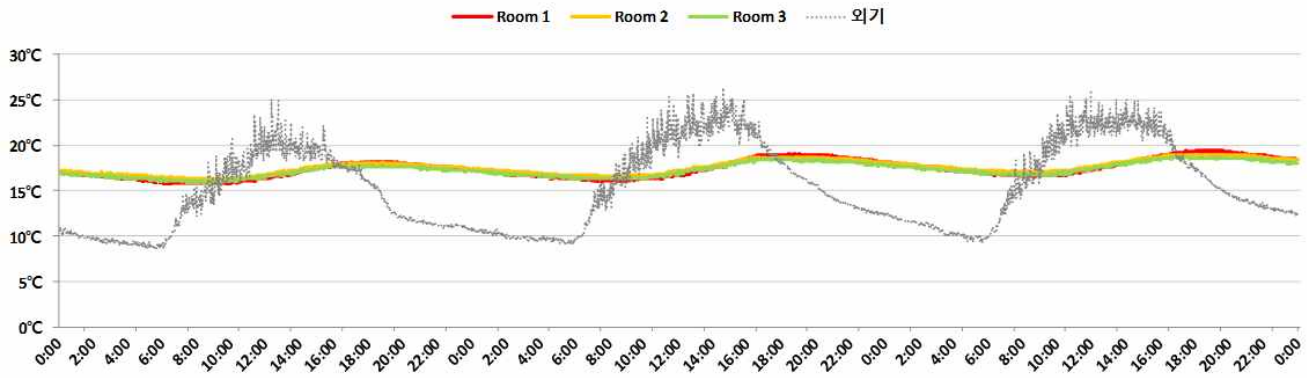
(단위 : °C)

	플레이트 내부온도		
	WPC	WPC+PCM	WPC+PCM+Cool Paint
최고	40.5	43.2	30.1
최저	5.0	4.5	3.1
평균	19.7	20.9	14.9

플레이트 내부온도 측정결과, 평균온도는 WPC:19.7°C, WPC+PCM:20.9°C, WPC+PCM+Cool Paint:14.9°C로 나타났다.

- 실내 온도 (높이 : 1200mm)





(그림 3.130) 실내 측정 결과 그래프

<표 3.76> 실내 측정결과

(단위 : °C)

	실내 1200mm 온도		
	WPC	WPC+PCM	WPC+PCM+Cool Paint
최고	19.4	19.0	18.7
최저	15.8	16.2	15.9
평균	17.4	17.6	17.3

실내온도 측정결과, 평균온도는 WPC:17.4°C, WPC+PCM:17.6°C, WPC+PCM+Cool Paint: 17.3°C로 나타났다.

㉠ 실험결과 및 요약

본 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 플레이트 표면 평균온도는 WPC:21°C, WPC+PCM:21.5°C, WPC+PCM+Cool Paint: 16.8°C로 PCM cool roof system인 Room3(WPC+PCM+Cool Paint)의 온도가 가장 낮게 나타났으며, 실내 평균 온도는 WPC:17.4°C, WPC+PCM:17.6°C, WPC+PCM+Cool Paint: 17.3°C로 나타났다.
- 따라서, PCM cool roof system을 사용하여 표면온도를 저감하고, 궁극적으로 도시열섬현상을 저하 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

다) 하절기 Test-bed를 활용한 성능 검증

㉠ 기간 : 2017년 5월 01일 ~ 2017년 6월 30일

㉡ 장소 : 서울특별시 동작구 흑석동 중앙대학교 208관 건물 옥상 Test-bed

㉢ 하절기 기간 대표 데이터 : 6월 14일 ~ 6월 16일 (24시간)(그림 3.130)

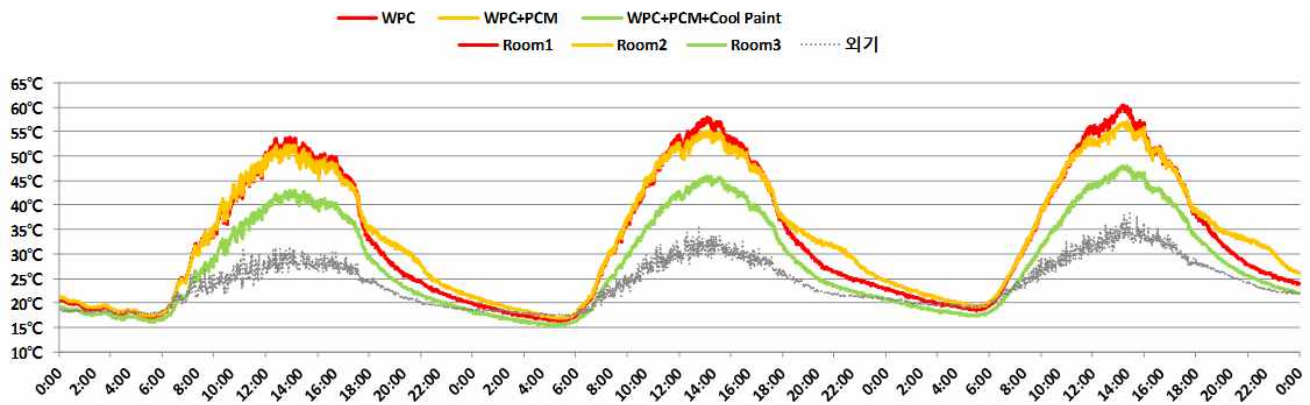
- 평균기온 26.8°C, 평균운량 0.3 평균풍속 2.6m/s

㉣ 변수선정

- Room1 : WPC, Room2 : WPC+PCM, Room3 : WPC+PCM+Cool Paint

㉤ Test-bed 온도측정 결과

- 플레이트 표면온도



(그림 3.131) 플레이트 표면 측정 결과 그래프

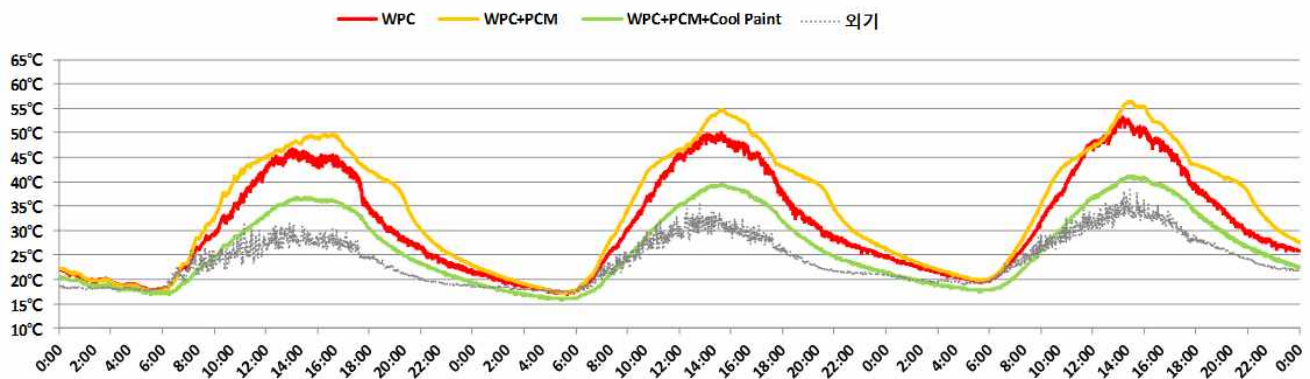
<표 3.77> 플레이트 표면온도 측정결과

(단위 : °C)

	플레이트 표면온도		
	WPC	WPC+PCM	WPC+PCM+Cool Paint
최고	60.5	57.1	48.1
최저	16.2	16.8	15.4
평균	33.1	33.9	28.2

플레이트 표면온도 측정결과, 평균온도는 WPC:33.1°C, WPC+PCM:33.9°C, WPC+PCM+Cool Paint:28.2°C로 나타났다.

• 플레이트 내부온도



(그림 3.132) 플레이트 내부 측정 결과 그래프

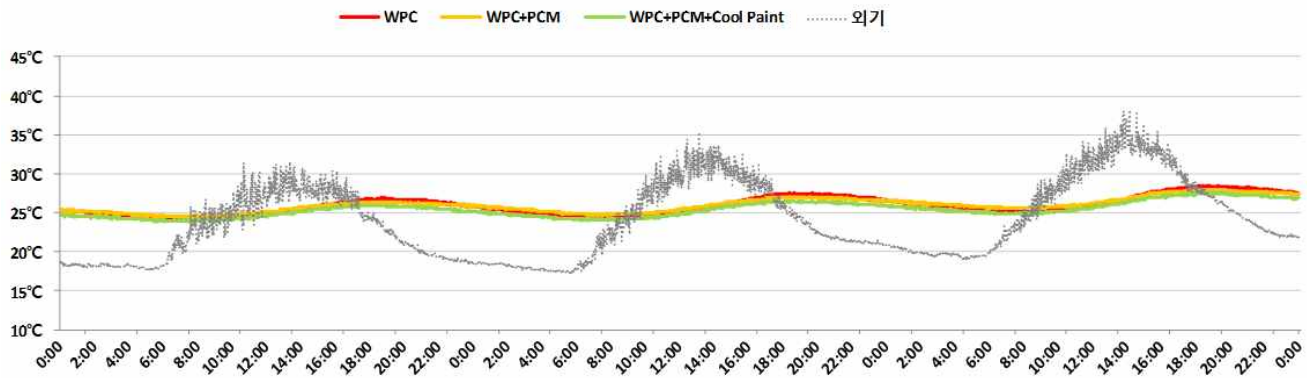
<표 3.78> 플레이트 내부온도 측정결과

(단위 : °C)

	플레이트 내부온도		
	WPC	WPC+PCM	WPC+PCM+Cool Paint
최고	53.3	56.4	41.2
최저	17.2	17.2	16.0
평균	31.4	34.4	26.5

플레이트 내부온도 측정결과, 평균온도는 WPC:31.4°C, WPC+PCM:34.4°C, WPC+PCM+Cool Paint:26.5°C로 나타났다.

- 실내 온도 (높이 : 1200mm)



(그림 3.133) 실내 측정 결과 그래프

<표 3.79> 실내 측정결과

(단위 : °C)

	실내 1200mm 온도		
	WPC	WPC+PCM	WPC+PCM+Cool Paint
최고	28.5	27.9	27.5
최저	24.1	24.5	23.9
평균	25.9	26.0	25.4

실내온도 측정결과, 평균온도는 WPC:25.9°C, WPC+PCM:26°C, WPC+PCM+Cool Paint:25.4°C로 나타났다.

㉠ 실험결과 및 요약

본 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 플레이트 표면 평균온도는 WPC:33.1°C, WPC+PCM:33.9°C, WPC+PCM+Cool Paint:28.2°C로 나타났으며, 실내 평균온도는 WPC:25.9°C, WPC+PCM:26°C, WPC+PCM+Cool Paint:25.4°C로 나타났다. 즉, 표면온도와 실내온도 모두 Room3(WPC+PCM+Cool Paint)가 가장 낮게 나타났다.
- 따라서, PCM cool roof system의 하절기 적용은 지붕 표면온도 저감과 실내 온도 저감(냉방부하저감) 효과 둘다 나타나는 것을 입증하였다.

2) PCM cool roof 의 열성능 시뮬레이션을 통한 냉방부하 저감 성능 검증

- 개요 : PCM cool roof의 냉방부하 저감 성능 검증을 위해 축소모형과 Test-bed의 열성능 분석을 시뮬레이션을 통해 수행하였다. 사용된 프로그램은 EnergyPlus Ver. 8-5를 에너지분석 엔진으로 사용하는 Design Builder version 4.7 이다. 연구수행과정은 다음과 같다. (1) PCM Cool Roof의 축소모형실험 실측데이터와 축소모형실험과 동일한 조건으로 모사한 축소모형 시뮬레이션 데이터를 비교하여 시뮬레이션의 신뢰도를 검증하고, (2) PCM Cool Roof가 적용된 축소모형과 Test-bed, PCM Cool Roof가 적용되지 않은 축소모형과 Test-bed를 시뮬레이션 프로그램을 통해 구성한다. (3) 시뮬레이션 수행으로 냉방부하량을 산출한다. 마지막으로 (4) 축소모형과 Test-bed에 PCM Cool Roof 적용시와 미적용시의 냉방부하량(시뮬레이션 결과값) 비교를 통해 PCM Cool Roof의 냉방부하 저감 성능을 검증한다.

가) 열성능 시뮬레이션 프로그램의 신뢰성 확보

- 시뮬레이션을 통한 냉방부하 저감 성능 검증비교 분석에 앞서 PCM Cool Roof System의 실제 실험 실측데이터와 시뮬레이션 데이터를 비교·검증하여 시뮬레이션 프로그램의 신뢰도 및 적정성을 검증
- 신뢰도 확보 기준 (ASHRAE 기준)
 - 실험의 결과와 시뮬레이션 결과의 비교 검토는 ASHRAE에서 제안하고 있는 MBE (Mean Bias Error, 평균 편중 오차), RMSE (Root Mean Square Error, 평균 제곱근 오차), CVRMSE (Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error, 평균 제곱근 오차의 변동계수)를 사용하여 검증하였다. 적정성 평가에 사용된 식은 다음 (수식 1, 2, 3)과 같다.

$$(수식 1) \quad MBE(\%) = \frac{\sum(S-M)}{\sum M} \times 100$$

$$(수식 2) \quad RMSE = \sqrt{\sum \frac{(S-M)^2}{N}}$$

$$(수식 3) \quad CVRMSE(\%) = \frac{RMSE}{A} \times 100$$

ASHRAE(2002) 기준에 따르면, 시간별 데이터로 구축된 모델의 MBE 값이 $\pm 10\%$ 이내인 경우, CVRMSE 값이 30% 이내인 경우 모델이 적정한 것으로 판단된다. ASHRAE에서 제공하는 MBE, CVRMSE 기준은 다음 <표 3.80>와 같다.

<표 3.80> ASHRAE(2002) 기준

Calibration Type	Index	Acceptable Value
Monthly	MBE	$\pm 5\%$
	CVRMSE	15%
Hourly	MBE	$\pm 10\%$
	CVRMSE	30%

㉠ 시뮬레이션 적정성 검증 개요

- 에너지 분석 시뮬레이션 : EnergyPlus Ver. 8-5
- 모델링 프로그램 : Design Builder version 4.7
- 기후데이터 : 최근 10년간의 서울 데이터 (기상청)
- 시뮬레이션 및 실험의 모든 재료 동일하게 설정
- PCM의 온도별 잠열량 값 : 시차주사 열량측정법(DSC)으로 측정 및 적용
- 시뮬레이션에 적용된 값은 다음 <표 3.81> 과 같다.

<표 3.81> 시뮬레이션 적용 값

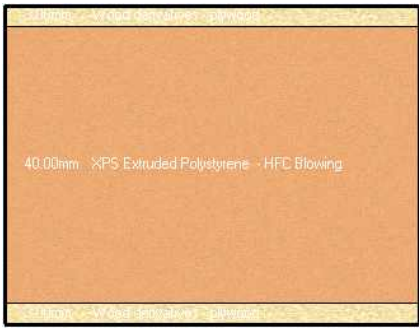
항목	참조
시뮬레이션 개요	EnergyPlus + Design Builder
기상데이터	기상청 최근 10년간의 데이터
모델링	축소모형실험체
PCM 잠열량	시차주사 열량측정법(DSC)
측정시간	24시간 / 1시간

⑥ 축소모형의 물성치 설정 조건

• 외벽 설정 조건

시뮬레이션 모델의 외벽은 축소모형 실험체의 조건과 동일하게 적용하였으며, 시뮬레이션에 적용된 외벽 구성과 값은 다음 <표 3.82>와 같다.

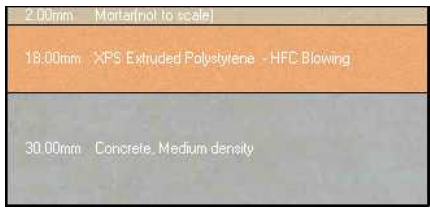
<표 3.82> 축소모형 외벽 적용 값

구성	두께	열전도율	단면도
Wood derivatives-plywood	3 mm	0.12 W/m-K	
XPS Extruded Polystyrene -HFC Blowing	40 mm	0.03 W/m-K	
Wood derivatives -plywood	3 mm	0.12 W/m-K	

• 지붕 설정 조건

시뮬레이션 모델의 지붕은 축소모형 실험체의 조건과 동일하게 적용하였으며, 시뮬레이션에 적용된 지붕 구성과 값은 다음 <표 3.83>과 같다.

<표 3.83> 축소모형 지붕 적용 값

구성	두께	열전도율	단면도
Mortar	2 mm	0.88 W/m-K	
XPS Extruded Polystyrene -HFC Blowing	18 mm	0.03 W/m-K	
Concrete	30 mm	1.35 W/m-K	

• PCM Cool Roof System 설정 조건

시뮬레이션 모델의 PCM Cool Roof System은 축소모형 실험체의 조건과 동일하게 적용하였으며, 시뮬레이션에 적용된 PCM Cool Roof System의 구성과 값은 다음 <표 3.84>와 같다.

<표 3.84> 축소모형 PCM Cool Roof System 적용 값

구성	두께	열전도율	단면도
WPC	3 mm	0.25 W/m-K	
RT 44 PCM	7 mm	0.18 W/m-K	
WPC	3 mm	0.25 W/m-K	

RT 44 PCM의 잠열량 값은 시차주사 열량측정법(DSC)의 측정결과를 적용하였다. 시차주사 열량측정법(DSC)의 측정값은 다음 <표 3.85>와 같다.

<표 3.85> RT 44 PCM 시차주사 열량측정 결과

측정	온도 (℃)	Enthalpy (j/kg)
Point 1	10	19907
Point 2	15	29700
Point 3	20	39907
Point 4	25	50700
Point 5	30	61249
Point 6	35	72180
Point 7	40	83268
Point 8	42	89458
Point 9	43	94921
Point 10	44	109212
Point 11	45	137871
Point 12	46	167454
Point 13	48	184978
Point 14	50	190852
Point 15	55	202534
Point 16	60	214415

© Test-bed의 물성치 설정 조건

• 외벽 설정 조건

실물모형 외벽은 샌드위치 패널 100mm, 북측 벽 800×600mm 창문으로 구성되었으며, 남측 북도를 통해 일사에 영향을 받지 않는 구조이다. 시뮬레이션 모델의 외벽은 실물모형실험실의 조건과 동일하게 적용하였으며, 시뮬레이션에 적용된 외벽조건은 다음 <표 3.86>과 같다.

<표 3.86> 실물모형 외벽 적용 값

구성	두께	열전도율	단면도
Mortar	3 mm	0.88 W/m-K	
Zinc	2 mm	110.00 W/m-K	
XPS Extruded Polystyrene -HFC Blowing	96 mm	0.03 W/m-K	
Zinc	2 mm	110.00 W/m-K	
Mortar	3 mm	0.88 W/m-K	

- 지붕 설정 조건

실물모형의 지붕은 샌드위치 패널 100mm로 구성되었으며, 시뮬레이션 모델 지붕은 실물모형 실험실 조건과 동일하게 적용하였으며, 시뮬레이션에 적용된 지붕 조건은 <표 3.87>과 같다.

<표 3.87> 실물모형 지붕 적용 값

구성	두께	열전도율	단면도
Mortar	3 mm	0.88 W/m-K	
Zinc	2 mm	110.00 W/m-K	
XPS Extruded Polystyrene -HFC Blowing	96 mm	0.03 W/m-K	
Zinc	2 mm	110.00 W/m-K	
Mortar	3 mm	0.88 W/m-K	

- PCM Cool Roof System 설정 조건

실물모형의 PCM Cool Roof System은 축소모형과 동일한 조건으로 사용하였으며, 시뮬레이션에 적용된 PCM Cool Roof System 조건은 다음 <표 3.88>과 같다.

<표 3.88> 실물모형 PCM Cool Roof System 적용 값

구성	두께	열전도율	단면도
WPC	3 mm	0.25 W/m-K	
RT 44 PCM	7 mm	0.18 W/m-K	
WPC	3 mm	0.25 W/m-K	

④ 열성능 시뮬레이션 프로그램의 신뢰성 검증 결과

- 축소모형실험을 대상으로 시뮬레이션 신뢰성 검증 결과

- 시뮬레이션 결과와 축소모형실험의 측정값을 검증항목은 플레이트 표면 온도, 실내 천장 온도, 외기 온도로 각각의 항목을 MBE, RMSE, CVRMSE를 사용하여 검증하였다.
- 축소모형 시뮬레이션 검증 결과는 다음 <표 3.89>와 같다. 검증 결과, 표면 온도는 다른 지점에 비하여 오차율을 보이거나 오차 기준범위에 충족하고 있으며, 이번 축소모형실험 시뮬레이션 검증 결과는 적정한 것으로 판단된다.

<표 3.89> 축소모형 시뮬레이션 검증 결과

검증 방법	시뮬레이션 결과		
	표면 온도	실내 천장 온도	외기 온도
MBE	-6.4 %	-2.4 %	0.1 %
RMSE	2.8	2.6	1.5
CVRMSE	10.4 %	10.2 %	6.7 %

- Test-bed 실험을 대상으로 시뮬레이션 신뢰성 검증 결과

- 시뮬레이션 결과와 Test-bed실험 결과의 검증항목은 플레이트 표면 온도, 실험체 천장 온도,

실내 온도, 외기 온도로 각각의 항목을 MBE, RMSE, CVRMSE를 사용하여 검증하였다.

- Test-bed 시뮬레이션 검증 결과는 다음 <표 3.90>과 같다. 검증 결과, 축소모형 시뮬레이션 검증 결과와 같이 표면 온도가 다른 지점에 비하여 오차를 보이거나 오차 기준범위에 충족하고 있으며, 실물모형실험 시뮬레이션 검증 결과는 적절한 것으로 판단된다.

<표 3.90> 실물모형 시뮬레이션 검증 결과

검증 방법	시뮬레이션 결과			
	표면 온도	실내 천장 온도	실내 온도	외기 온도
MBE	5.5 %	0.1 %	-0.8 %	6.8 %
RMSE	3.1	0.6	0.5	1.4
CVRMSE	14.1 %	2.9 %	2.3 %	7.9 %

나) 연간 냉·난방 부하 저감 성능 검증

- PCM Cool Roof System의 건물적용 시 연간 냉·난방 부하 저감 성능 검증을 위하여 열성능 및 에너지 저감 분석을 실시하였다. 건물의 높이는 2.4m의 1층 일반 사무용 건물로 서울시의 기상 데이터를 적용하였다. 건물의 향은 정남향이며 PCM Cool Roof System을 적용할 총 지붕 면적은 26㎡이다. 건물에 대한 내용은 <표 3.91>과 같다.

<표 3.91> 기본건물 개요

구 분	내 용	건물도면
높이	2.5m	
층수	1층	
향	정남향	
총고	2.4m	
지붕 면적	26 m²	

• 외벽 설정 조건

건물의 외벽은 샌드위치 패널 100mm, 북측 벽에는 800×600mm 창문으로 구성되어 있으며, 남측 남측의 북도로 인하여 일사에 영향을 받지 않는 구조이다. 모델의 외벽은 실물모형실험실의 조건과 동일하게 적용하였으며, 시뮬레이션에 적용된 외벽조건은 다음 <표 3.92>과 같다.

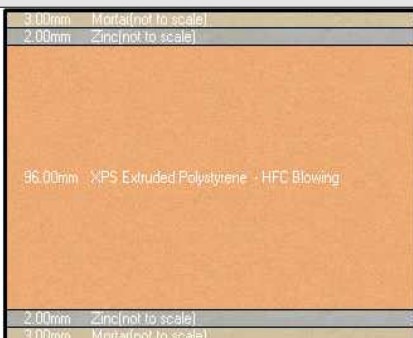
<표 3.92> 기본건물 외벽 적용 값

구성	두께	열전도율	단면도
Mortar	3 mm	0.88 W/m-K	
Zinc	2 mm	110.00 W/m-K	
XPS Extruded Polystyrene -HFC Blowing	96 mm	0.03 W/m-K	
Zinc	2 mm	110.00 W/m-K	
Mortar	3 mm	0.88 W/m-K	

- 지붕 설정 조건

건물의 지붕은 샌드위치 패널 100mm로 구성되어 있다. 시뮬레이션 모델의 지붕은 실험실의 조건과 동일하게 적용하였으며, 시뮬레이션에 적용된 지붕 조건은 다음 <표 3.93>과 같다.

<표 3.93> 기본건물 지붕 적용 값

구성	두께	열전도율	단면도
Mortar	3 mm	0.88 W/m-K	
Zinc	2 mm	110.00 W/m-K	
XPS Extruded Polystyrene -HFC Blowing	96 mm	0.03 W/m-K	
Zinc	2 mm	110.00 W/m-K	
Mortar	3 mm	0.88 W/m-K	

- PCM Cool Roof System 설정 조건

건물적용 PCM Cool Roof System은 변수에 따른 열성능 시뮬레이션 결과를 적용하였으며, RT 44 PCM, PCM 두께(수량) 7mm로 적용하였다. 시뮬레이션에 적용된 PCM Cool Roof System 조건은 다음 <표 3.94>과 같다.

<표 3.94>기본건물 PCM Cool Roof System 적용 값

구성	두께	열전도율	단면도
WPC	3 mm	0.25 W/m-K	
RT 44 PCM	7 mm	0.18 W/m-K	
WPC	3 mm	0.25 W/m-K	

- 공조시스템 설정 조건

일반 사무용 건물 설비 시스템으로 기본적인 FCU(Fan Coil Unit)과 공랭식 냉동기(Air Cooled Chiller) 시스템으로 설정하였으며 난방 시 천연가스 사용과 냉방 시 전기사용을 가정하였다. 스케줄 조건은 ASHRAE 90.1-2007의 Building Area Method_Office Building을 참고하여 건물의 운영 및 조명 스케줄을 적용하였다. Heating System의 COP는 0.85이며 공급온도는 35℃로 설정하였고, Cooling System의 COP 계수는 1.8이며 공급온도는 12℃로 설정하였다.

- 연간 냉·난방 부하 저감 성능 검증 결과

기존 지붕 마감재(반사율 0.1), Cool Roof System(반사율 0.1, 0.3, 0.5, 0.7), PCM Cool Roof System(반사율 0.1, 0.3, 0.5, 0.7),의 냉·난방 에너지 및 피크 부하를 비교분석하였다.

반사율이 0.3일 때 Cool Roof의 냉방에너지는 8.91%, 냉방 피크 부하는 3.86% 감소하였다. PCM Cool Roof System의 냉방에너지는 9.96%, 냉방 피크 부하는 4.00% 감소하였다.

반사율이 0.5일 때 Cool Roof의 냉방에너지는 15.24%, 냉방 피크 부하는 7.29% 감소하였다. PCM Cool Roof System의 냉방에너지는 15.07%, 냉방 피크 부하는 7.19% 감소하였다.

반사율이 0.7일 때 Cool Roof의 냉방에너지는 21.91%, 냉방 피크 부하는 11.63% 감소하였다.

PCM Cool Roof System의 냉방에너지는 20.85%, 냉방 피크 부하는 11.60% 감소하였다.

• Cool Roof, PCM Cool Roof System 에너지 소비량 비교

기존 건물 지붕 마감재, Cool Roof, PCM Cool Roof System의 반사율에 따른 에너지 소비량 분석 결과를 정리해 보면 아래의 <표 3.95>와 같다. PCM Cool Roof System과 Cool Roof와 비교할 경우, PCM Cool Roof System의 반사율이 0.7인 경우 Cool Roof를 적용하는 경우보다 총 에너지량은 0.72% 감소, 냉방 에너지량은 1.34% 상승, 난방 에너지량은 1.60% 감소, 냉방 피크 부하는 0.03% 상승, 난방 피크 부하는 0.22% 감소하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 국내 시범사업으로 건물 지붕에 적용되고 있는 Cool Roof 캠페인과 비교 시 PCM Cool Roof System의 총 에너지량의 감소로 기존의 Cool Roof 보다 효과적인 것으로 판단된다.

<표 3.95> 기존 지붕 마감재 대비 PCM Cool Roof System 에너지 절감량

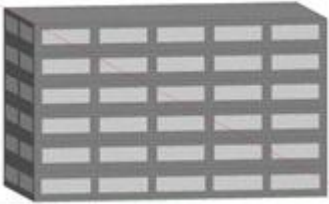
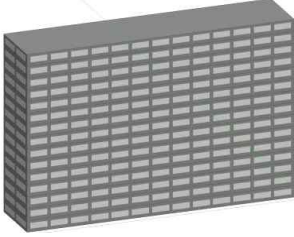
항목	PCM Cool Roof System 반사율			
	0.1	0.3	0.5	0.7
냉방 에너지 (kWh)	5.44% ↓	9.96% ↓	15.07% ↓	20.85% ↓
냉방 피크부하 (W)	0.62% ↓	4.00% ↓	7.19% ↓	11.60% ↓
난방 에너지 (kWh)	-3.69% ↑	-5.67% ↑	-8.03% ↑	-10.90% ↑

다) 아파트와 주택단지의 옥상에 PCM Cool Roof 적용 시 냉방부하 저감 효과 비교 분석 및 검증

① Design Builder를 활용한 시뮬레이션

- 활용된 분석프로그램은 Design Builder로 'PCM cool roof system' 적용 시 단지 유형별 냉방에너지 소비량 저감 효과를 분석하기 위하여 사용하였다.
- 건물의 외피 모델링 및 HVAC 시스템, 스케줄 입력 등에 사용되어지는 프로그램이다.
- 분석하고자 하는 영역을 정의하고, 각 영역 내의 건물들에 대한 평균값을 도출한다.
- 아래 <표 3.96>과 같다.

<표 3.96> 단지종류별 건물 개요 및 시뮬레이션 모델링

단지종류	대상지 위성사진	구분	내용	시뮬레이션 모델
업무		높이	18m	
		층수	6층	
		향	정남향	
		층고	3m	
		옥상면적	405m ²	
아파트		높이	45m	
		층수	15층	
		향	정남향	
		층고	3m	
		옥상면적	1,079m ²	

• 시뮬레이션 설정 조건

- 분석 대상은 에너지 시뮬레이션 분석에서 사용한 저층고밀의 업무 단지와 고층저밀의 아파트(주거) 단지로 분류하였으며, 각 요소별로 설정 값을 부여하였다.
- 요소별 설정 조건은 아래의 <표 3.97>와 같다.

<표 3.97> 요소별 시뮬레이션 모델링 설정 조건

시뮬레이션 모델링 설정조건	
지붕 설정 조건	PCM Roof System 적용과 적용하지 않았을 때로 구분 지붕조건 : 평지붕 RT 44 PCM, 열 전도율 : 0.2W/m-K Heat Storage Capacity : 241KJ/kg 설정재질 : Asbestos Related Materials:Cement Sheet(외부) Glass fibre/wool-fibre slab Cast Concrete PlasterBoard(내부)
외벽 설정 조건	설정재질 : Asbestos Related Materials:Cement Sheet(외부) Glass fibre/wool-fibre slab Cast Concrete PlasterBoard(내부)
창문 설정 조건	건물 창면적비 : 43% 열 전도율(W/m-K) : 0.9 열 관류율(U-Value) : 1.978W/m ² -K 두께 : 3mm , 투명 유리 일사 투과율 : 0.687 직달 일사 투과율 : 0.624 가시광선 투과율 : 0.744 중공층 : 13mm
공조시스템 설정 조건	설비 시스템 설정 : FCU , 공랭식 냉동기 난방 시 천연가스 사용, 냉방 시 전기사용 스케줄 조건 : ASHRAE 90.1-2007 건물의 운영 및 조명 스케줄 적용 Heating System COP : 0.85 공급온도 : 35℃ Cooling System COP : 1.8 공급온도 12℃

<표 3.98> 시뮬레이션 모델링 설정 조건 및 단면도

구 분	구 성	두 게	열 전도율	단 면 도
PCM 미적용 지붕	Abestos Related Materials : Cement Sheet	0.08m	0.36W/m-K	
	Glass fibre/wool - fibre slab	0.14m	0.035W/m-K	
	Cast Concrete	0.19m	1.13W/m-K	
	Plasterboard	0.01m	0.25W/m-K	
PCM 적용 지붕	RT 44 PCM	0.03m	0.2W/m-K	
	Asbestos Related Materials : Cement Sheet	0.08m	0.36W/m-K	
	Glass fibre/wool - fibre slab	0.14m	0.035W/m-K	
	Cast Concrete	0.19m	1.13W/m-K	
	PlasterBoard	0.01m	0.25W/m-K	
외벽	Abestos Related Materials : Cement Sheet	0.08m	0.36W/m-K	
	Glass fibre/wool - fibre slab	0.14m	0.035W/m-K	
	Cast Concrete	0.19m	1.13W/m-K	
	Plasterboard	0.01m	0.25W/m-K	

㉞ 시뮬레이션 결과

- 상업단지의 냉방에너지 소비량은 <표 3.99>와 같이 PCM cool roof system 미적용에 비해 PCM cool roof system를 적용 했을 경우 연간 냉방에너지 소비량이 2.9% 절감의 효과를 나타냈으며 평균적인 단일건물의 냉방에너지 피크 소비량에서는 6.7%의 절감을 나타냈다.

<표 3.99> 상업단지 냉방에너지 소비량 분석 결과

	연간 냉방에너지 소비량(A) [kWh] -평균 단일 건축물-	총 냉방에너지 소비량 (A*건물의 개수) [kWh] -전체 건축물-	평균 단일 건축물의 냉방에너지 피크 소비량 [kWh/min]
PCM cool roof system 미적용	182,326.8	2,370,248.4	34.82
PCM cool roof system 적용	177,210.4	2,368,735.2	32.63
에너지 소비량 절감률	2.9% 절감		6.7% 절감

- 아파트주거단지의 냉방에너지 소비량은 <표 3.100>와 같이 PCM cool roof system 미적용에 비해 PCM cool roof system를 적용 했을 경우 연간 냉방에너지 소비량이 0.15% 절감의 효과를 나타냈으며 평균적인 단일건물의 냉방에너지 피크 소비량에서는 3.7%의 절감을 나타냈다.

<표 3.100> 아파트주거단지 냉방에너지 소비량 분석 결과

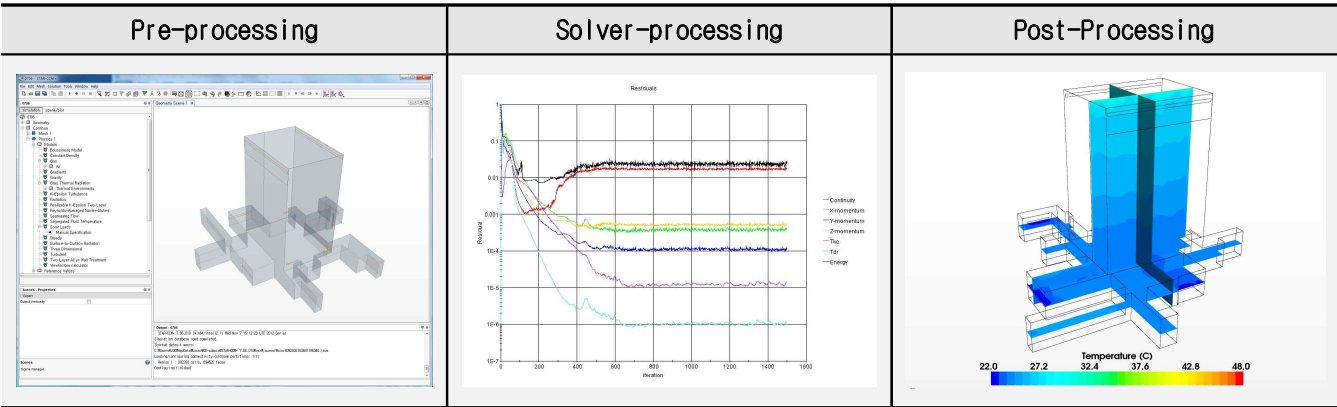
	연간 냉방에너지 소비량(A) [kWh] -평균 단일 건축물-	총 냉방에너지 소비량 (A*건물의 개수) [kWh] -전체 건축물-	평균 단일 건축물의 냉방에너지 피크 소비량 [kWh/min]
PCM cool roof system 미적용	693,592.67	4,855,148.69	659.9
PCM cool roof system 적용	692,531.86	4,847,723.02	636.1
에너지 소비량 절감률	0.15% 절감		3.7% 절감

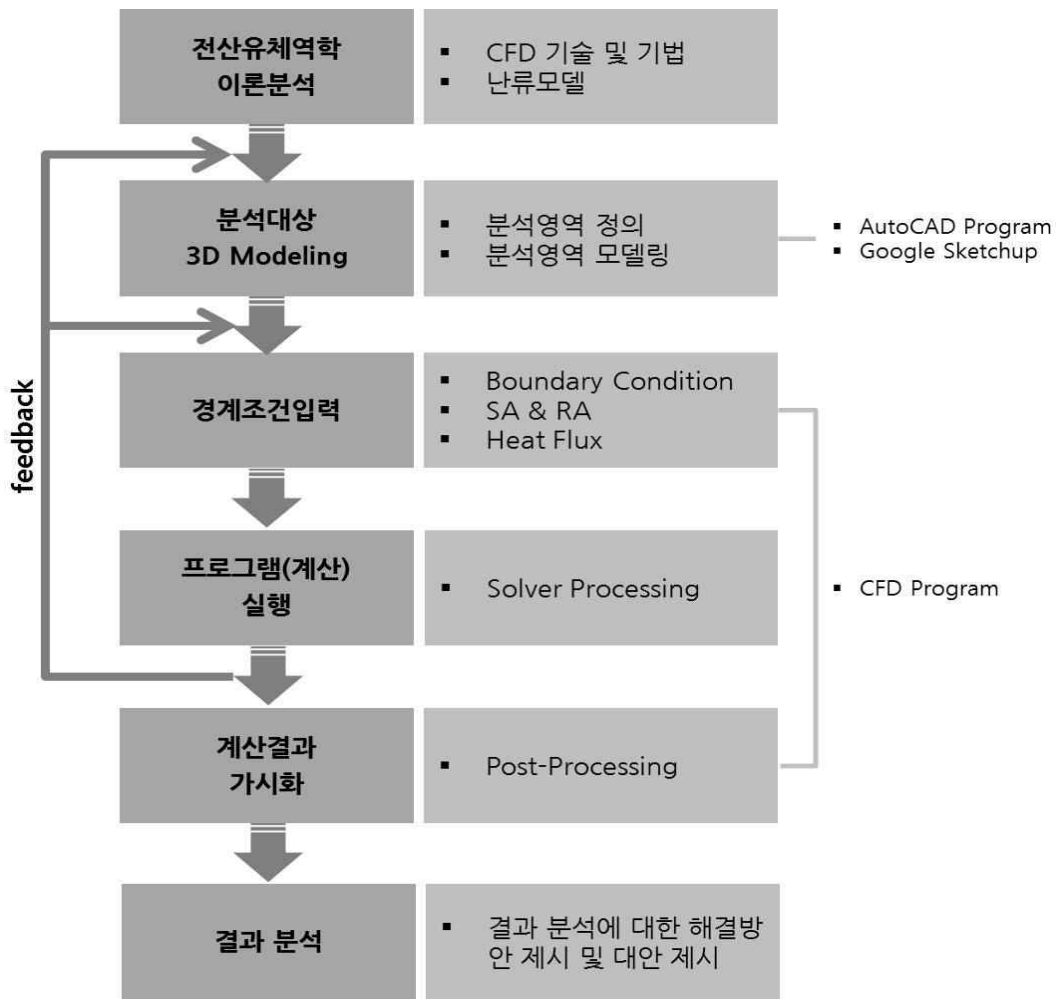
3) 기류분석 시뮬레이션을 통한 열섬현상 저감 효과 검증

가) 분석개요 및 시뮬레이션

- 활용된 분석프로그램은 Star-CCM+로 ‘PCM cool roof system’ 적용 시 도시단위의 열섬현상 저감 효과를 분석하기 위하여 분석공간영역에서의 수치해석을 하였다.
- 분석하고자 하는 영역을 정의하고, 분석영역 내 분석결과(기류유동)에 중요한 영향을 주는 것으로 판단되는 일부 구성요소 등을 제외한 나머지 요소들은 단순화 및 제외하여 최종 분석영역을 구성하였다. 또한, 계산된 결과가 수렴되면 해석 공간 내 기류·유동 등을 가시화 하고 시뮬레이션 결과로 제시되는 해석공간의 특성을 토대로 분석하여 공간 내 적용된 공조시스템의 신뢰도를 검증하였다.

<표 3.101> 프로그램 구성도





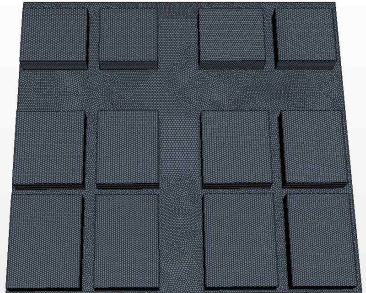
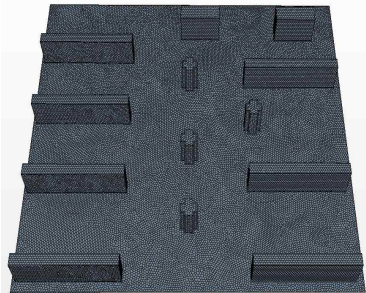
(그림 3.134) 분석 흐름도

나) 시뮬레이션 설정 조건

(1) 시뮬레이션 모델링

- 단지유형 대비 옥상 면적비율에 따른 도시 열섬현상을 분석하기 위해 균집화 된 건물을 모델링하였다. 모델링 대상지는 서초구의 업무단지와 송파구의 주거단지이다.
- 대상 모델의 규모를 고려하여 격자(mesh) 크기는 0.2m로 설정하였고, 3차원 해석이 효과적으로 구현 가능한 육각형 격자(polyhedral mesh)로 설정하였다.
- <표 3.102>는 Star-CCM+에서 대상 건물의 모델링과 생성된 격자 결과를 나타낸다.

<표 3.102> 대상 건물의 격자 모델링

구분	업무 단지	주거 단지
격자 모델		
건물 비율	50%	14%

다) 경계조건

- 외기는 기상청 자료를 참고하여 우리나라의 여름철 평균기온(26℃), 겨울철 평균기온(-6℃)을 적용하였으며, 중앙대학교 Mock-up 실험동에서 실시한 PCM cool roof system 온도 저감 실험결과를 바탕으로 일반 건물 옥상과 PCM cool roof system 적용 옥상을 비교하였다.
- <표 3.103>에서는 여름철과 겨울철에 실시한 옥상 표면온도 실험결과를 나타내고 있다.

<표 3.103> Mock-up 실험 결과

구분	일반 옥상 표면온도	PCM cool roof 표면온도	온도 저감
여름철	54.5℃	47.7℃	6.8℃ ↓
겨울철	28.8℃	17.8℃	11℃ ↓

<표 3.104> 시뮬레이션 해석 조건

항 목	내 용
공 간	Three Dimensional
시 간	Steady
물 체	Gas
유동 흐름	Segregated Flow
유체 상태	Equilibrium Air
점성 정도	Turbulent
레이놀즈 난류 해석	k-ε Turbulence
시뮬레이션 횟수	100회

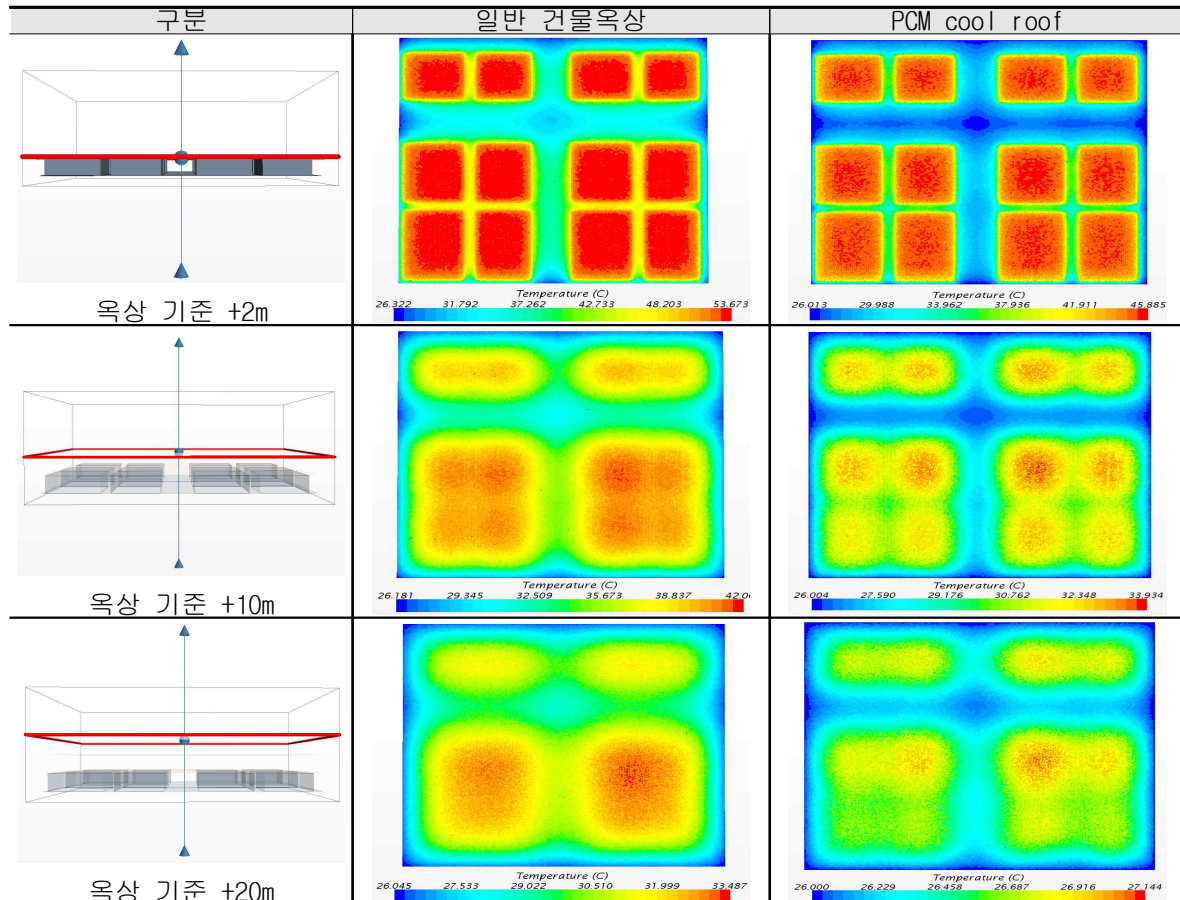
라) 시뮬레이션 결과

(1) 업무 단지

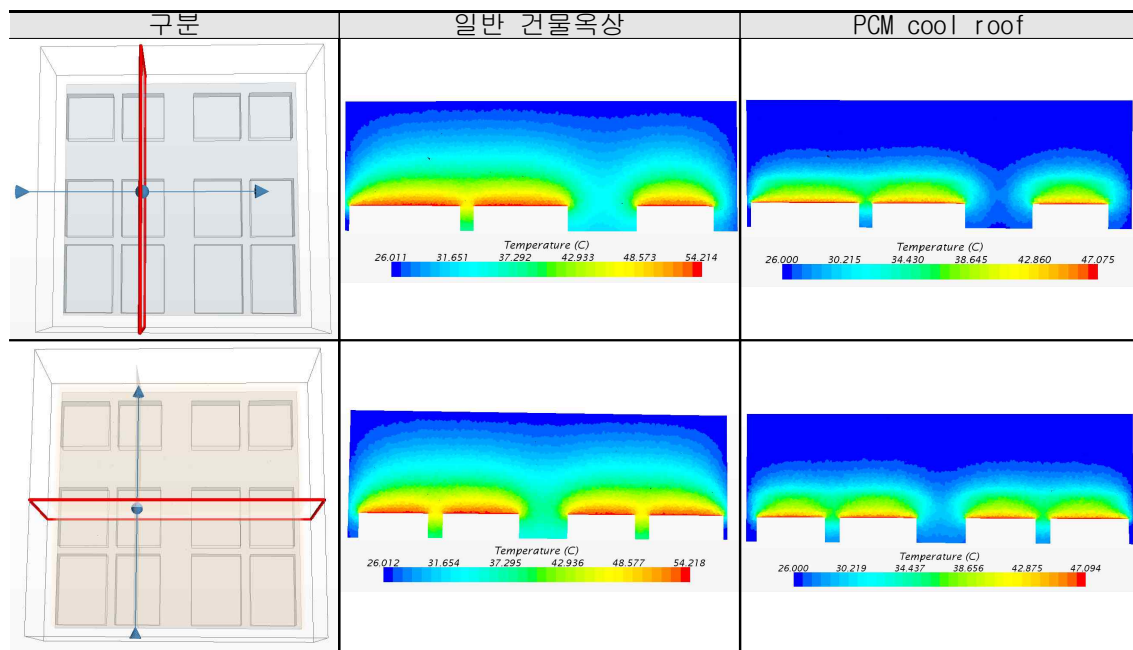
㉠ 여름철 온도 분포도

- 업무 단지에서 일반 건물 옥상(54.5℃)과 PCM cool roof system(47.7℃)의 여름철 온도 분포도는 아래 <표 3.105>, <표 3.106>와 같다.

<표 3.105> 수평 단면도에 따른 온도 분포도(여름)



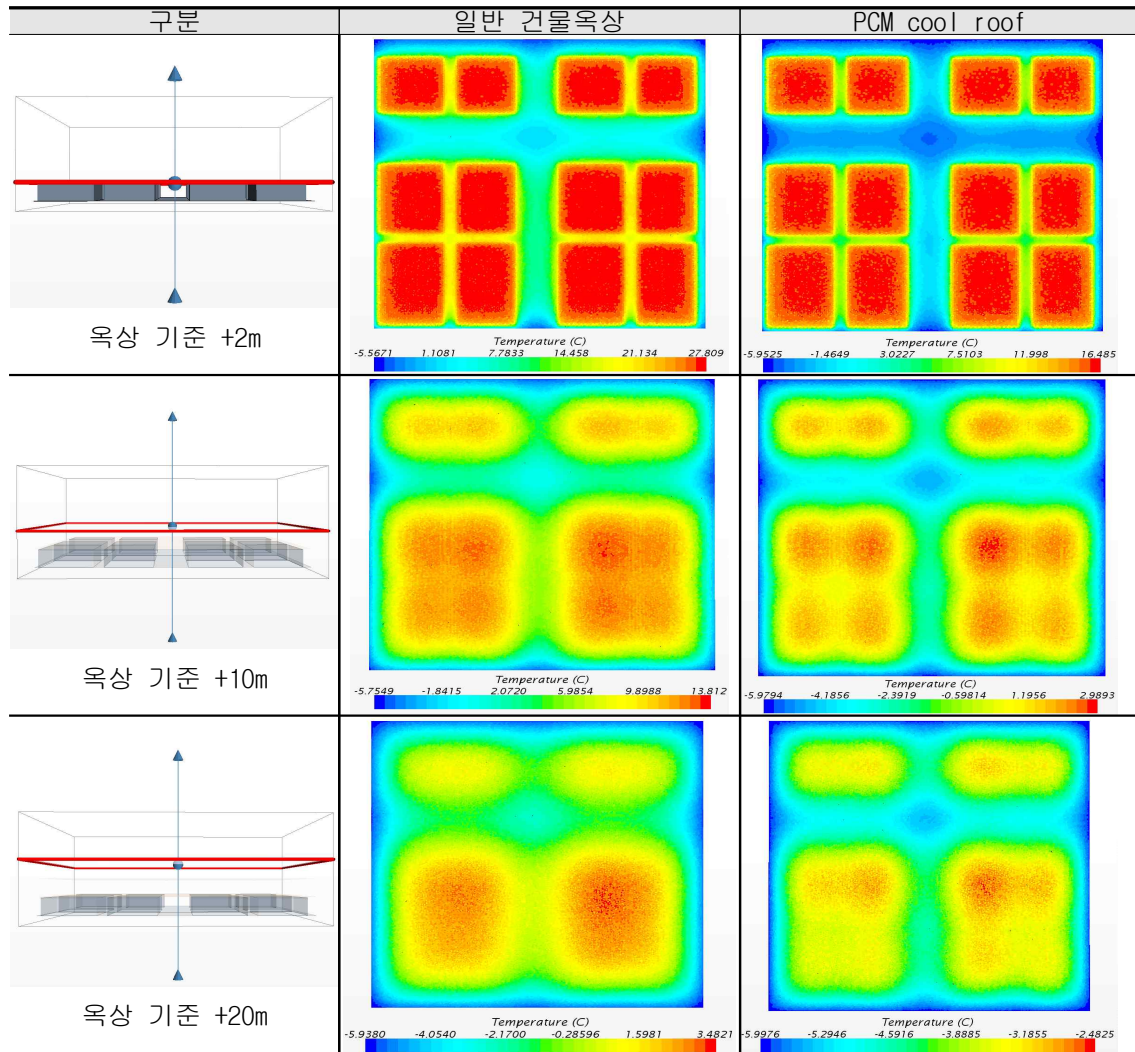
<표 3.106> 수직 단면도에 따른 온도 분포도(여름)



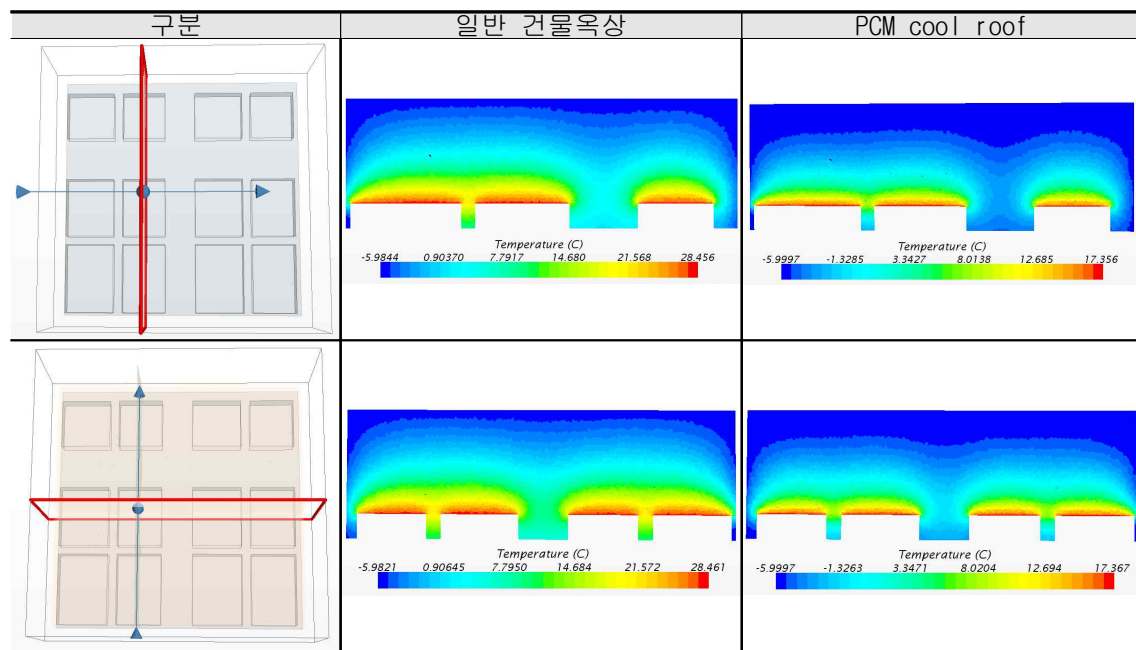
② 겨울철 온도 분포도

- 업무 단지에서 일반 건물 옥상(28.8℃)과 PCM cool roof system(17.8℃)의 겨울철 온도 분포도는 아래 <표 3.107>, <표 3.108>와 같다.

<표 3.107> 수평 단면도에 따른 온도 분포도(겨울)



<표 3.108> 수직 단면도에 따른 온도 분포도(겨울)

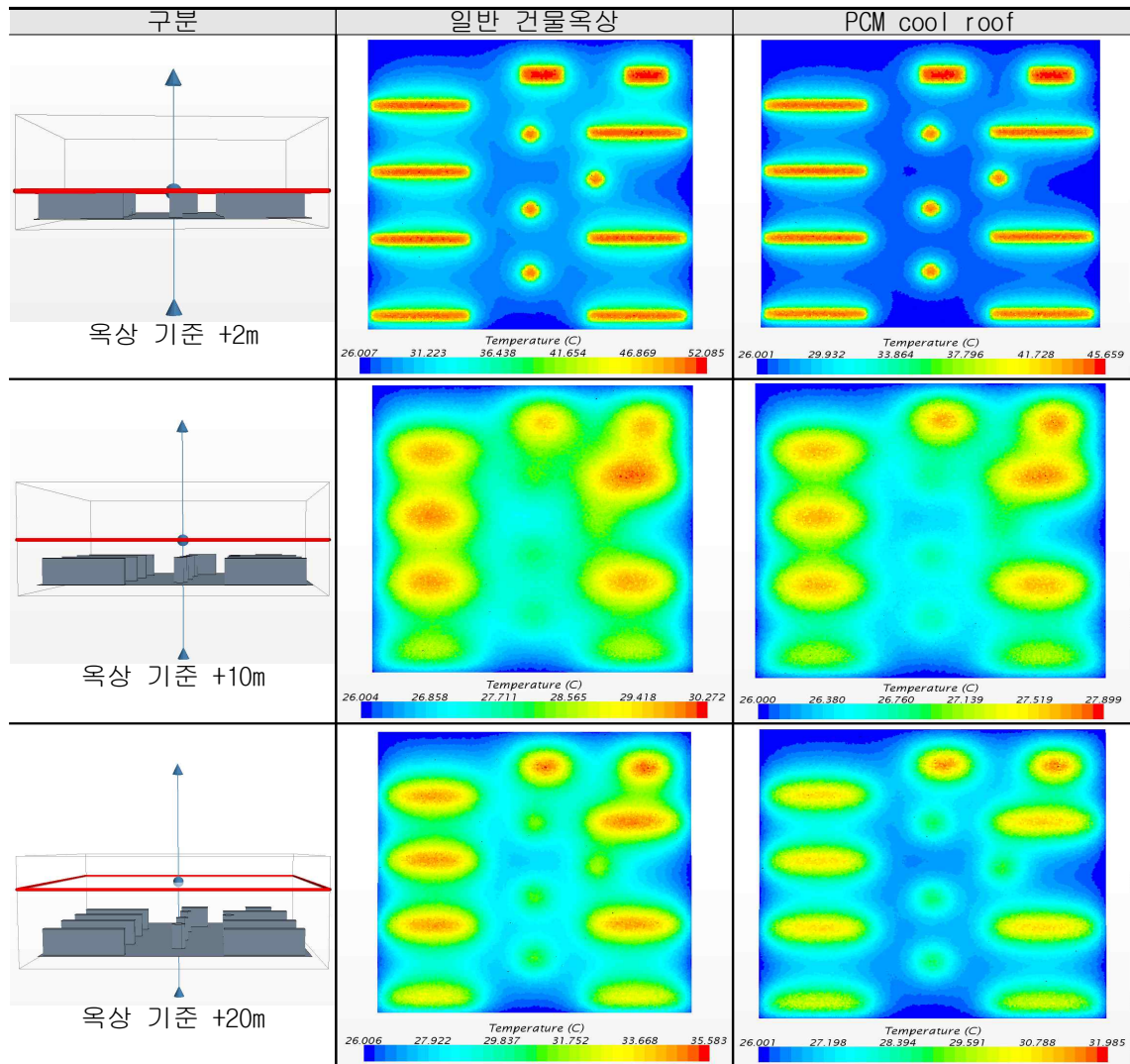


(2) 주거 단지

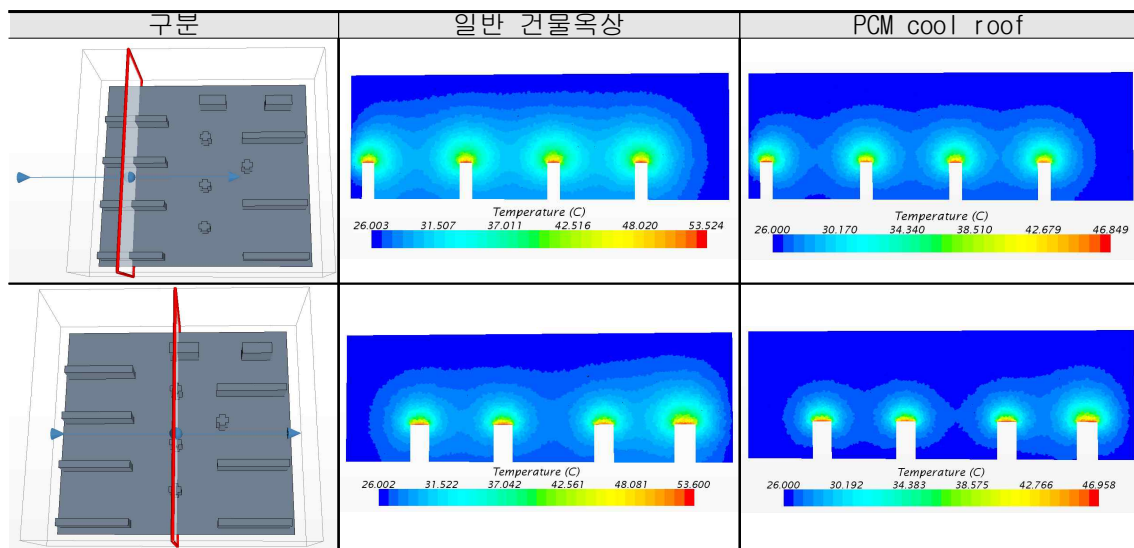
㉠ 여름철 온도 분포도

- 주거 단지에서 일반 건물 옥상(54.5℃)과 PCM cool roof system(47.7℃)의 여름철 온도 분포도는 아래 <표 3.109>, <표 3.110>와 같다.

<표 3.109> 수평 단면도에 따른 온도 분포도(여름)



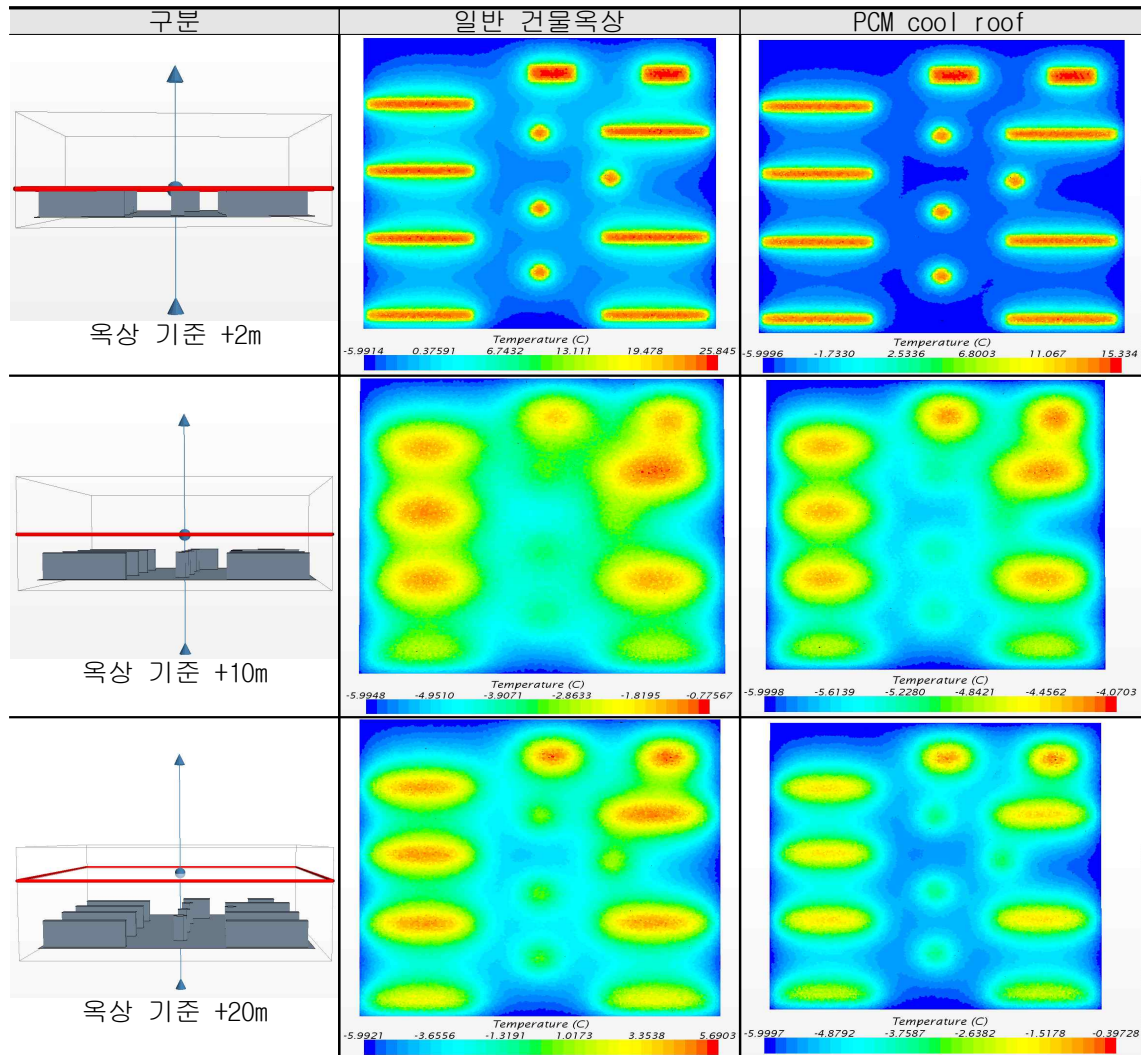
<표 3.110> 수직 단면도에 따른 온도 분포도(여름)



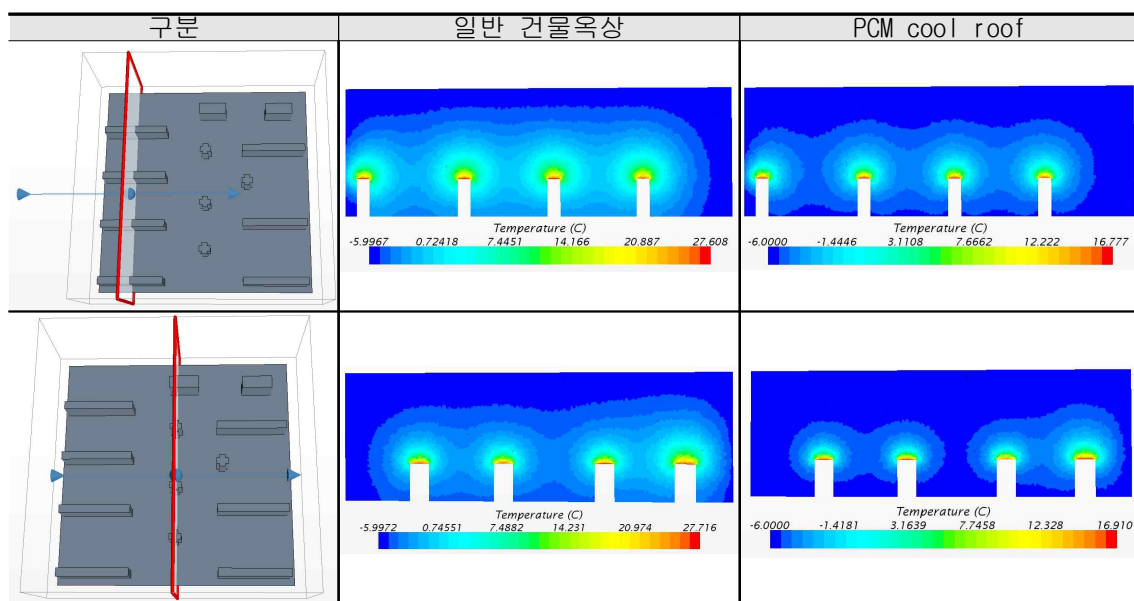
② 겨울철 온도 분포도

- 주거 단지에서 일반 건물 옥상(28.8℃)과 PCM cool roof system(17.8℃)의 겨울철 온도 분포도는 아래 <표 3.111>, <표 3.112>와 같다.

<표 3.111> 수평 단면도에 따른 온도 분포도(겨울)



<표 3.112> 수직 단면도에 따른 온도 분포도(겨울)



마) 시뮬레이션 결과 분석

- 일반옥상 마감재와 PCM cool roof system의 열섬현상 저감 성능 비교를 위하여 기류분석 시뮬레이션을 통해 분석을 실시하였다. 업무단지와 주거단지로 나누고, 여름철 및 겨울철 온도 분포도를 각각 비교·분석하였다.
- 여름철과 겨울철에 지붕 표면온도가 각각 6.8℃, 11℃ 줄어들었을 때, 온도 분포도 상에서 고온 지점(붉은 부분)의 비율이 감소하였으며, 건물 중심에서의 열전달 효과 또한 비교적 감소하였다.
- 건물 밀도가 높은 업무 단지(상업용 건물)에서 열섬현상 저감 효과가 주거 단지(아파트)보다 비교적 뚜렷하게 나타난 것으로 분석되었다.
- PCM cool roof system의 건물의 옥상 적용 시 도시 캐노피층에서 약7~8℃의 열섬현상 저감 효과를 확인 할 수 있었으며, 건물 밀도가 높은 도심지에서 효과가 더욱 크게 나타나는 것으로 나타났다.

(나) PCM Cool roof system 활용을 위한 PCM의 최적 적용 방안 분석 및 제안

1) Energy plus를 활용한 시뮬레이션 분석으로 최적의 PCM 적용방안 제안

가) 시뮬레이션 개요

- PCM Cool Roof System의 경우에는 실측실험에 큰 한계를 갖는다. 상변화온도 범위가 다른 PCM의 종류가 매우 많지만 MPPCM의 제조 및 실험 장비를 구축하는데 큰 어려움을 갖는다. 따라서 다양한 상변화온도 범위를 갖는 PCM의 최적 적용 방안에 대해 고찰하기 위해서는 시뮬레이션을 통한 예측이 필요하다. 본 연구에서는 에너지 성능 평가 프로그램인 EnergyPlus 프로그램을 활용하여 개발된 PCM Cool Roof System의 표면 반사율 및 PCM 온도대에 따른 도시열섬현상 저감 효과를 분석하고, 최적의 적용방안을 제안하고자 한다.

나) 시뮬레이션 프로그램 (EnergyPlus)

- EnergyPlus 프로그램은 난방, 냉방, 환기, 조명, 급수 등을 모두 포함하는 건물에너지 소비량을 평가하는 프로그램이다. 가장 큰 특징은 스케치업, 디자인빌더 등의 다른 엔진과 연동이 가능하다는 것이며, 이러한 엔진을 통해 가시적인 모델링이 가능하다.

다) 건물개요 및 모델링

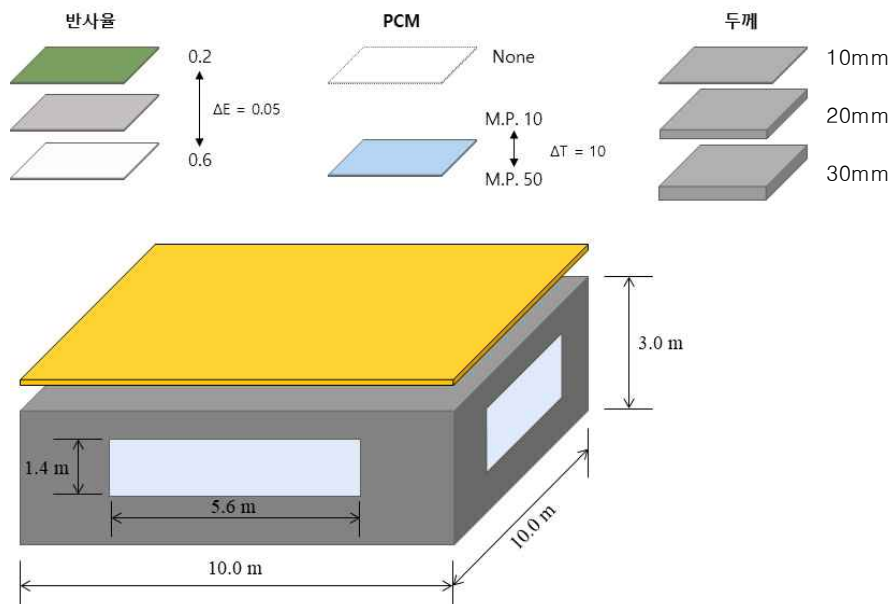
- 시뮬레이션 연구에 활용한 건물의 개요는 아래 <표3.113>, <표3.114>와 같다. 벽체, 지붕, 바닥 및 창호의 열관류율은 에너지절약설계기준 이하로 설정하여 기본적으로 에너지사용량이 적은 건물을 형성하였다. 건물의 바닥면적과 높이는 100m², 3.0m이다. 실내설정온도, 재실스케줄, 인체발열량 등 건물에너지에 직접적으로 영향을 미치는 조건에 대해서는 일정하게 설정하였으며, 지붕표면의 반사율, PCM의 상변화 온도범위, PCM 적용 두께를 변수로 하여 최적의 PCM 적용 방안에 대해 분석하였다.
- 지붕표면의 반사율은 일반 녹색방수표면(0.2)와 회색방수표면(0.6)을 기준으로 설정하였고, PCM의 상변화 온도는 10℃에서 50℃ 범위에서 10℃ 간격으로 구분하여 설정하였으며, PCM의 두께는 0.1, 0.2, 0.3 mm로 설정하여 총 162개의 CASE에 대한 비교분석을 실시하였다. 실외 기상조건은 EnergyPlus에서 제공하고 있는 인천 실외 기후데이터를 활용하였다.

<표3.113> 건물 부위별 설정 열관류율 및 설정기준

부위	열관류율 (W/m^2K)	
	설정조건	에너지절약설계기준
벽체	0.262	0.270
지붕	0.179	0.180
바닥	0.223	0.230
창호	2.100	2.100

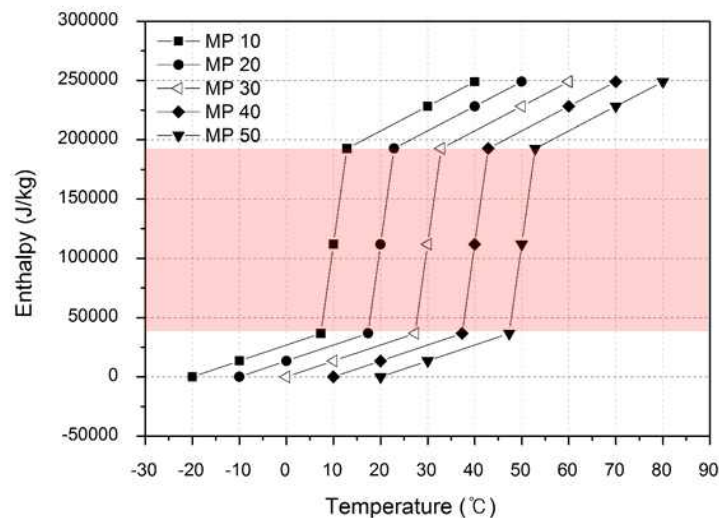
<표3.114> 세 종류의 파라핀계 PCM의 상변화 온도 구간 및 잠열량

실내설정온도	Heating : 20℃, RH 50%, Cooling : 26℃, RH 50%
스케줄	재실, 히팅, 쿨링, 조명 : 0N(00:00~24:00)
인체발열량	117W/person
재밀 밀도	0.0440
조명 발열	5.0 W/m^2
기기 발열	기기발열은 없는 것으로 가정
거주자 수	0.113(People/ m^2)
침기량	0.2 ACH
환기량	10 l / sec · person
HVAC	Ideal Load Air System
기상데이터	Incheon, Korea (.epw)



(그림 3.135) 건물개요 및 변수설정

- EnergyPlus에서는 온도-엔탈피 함수를 통해 PCM의 상변화 물성을 입력할 수 있다. PCM의 온도-엔탈피 함수는 1차 년도에 실시한 PCM의 기본 물성 데이터인 DSC 데이터를 활용하여 계산하였다. 온도-엔탈피 곡선의 기울기는 비열을 의미하며, 각 PCM의 상변화 시점에서 온도-엔탈피 곡선의 기울기가 증가하는 것으로 보아 PCM의 비열이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. (그림 3.136)는 본 시뮬레이션에서 변수로 설정한 PCM의 상변화 온도범위를 나타내며, n-octadecane의 온도-엔탈피 곡선을 기준으로 동일한 기울기를 갖는 PCM을 임의로 설정하였다. 각 온도에서 곡선의 기울기를 동일하게 설정한 것은 PCM의 잠열량이 동일하게 설정하였음을 의미한다.

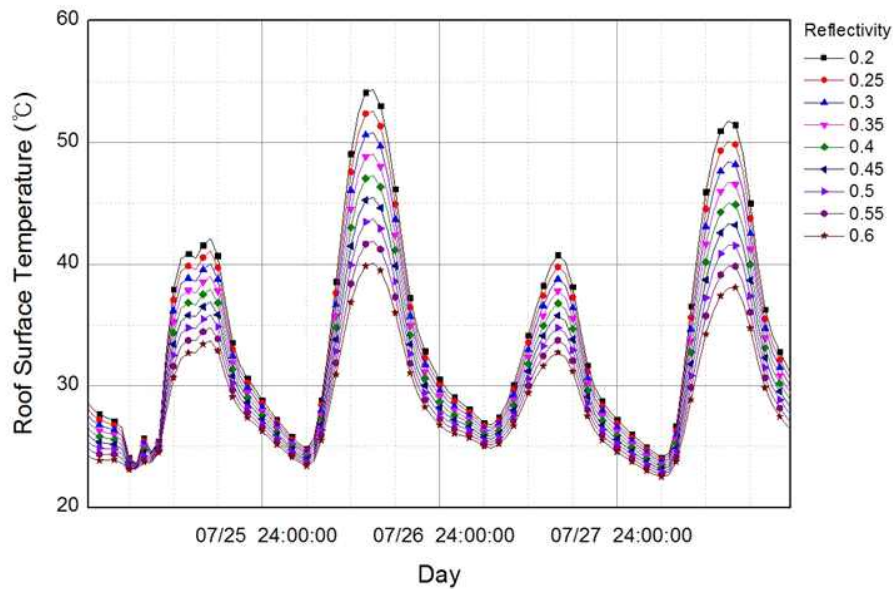


(그림 3.136) PCM의 온도-엔탈피 곡선
(기준 : n-octadecane)

2) PCM cool roof system의 표면온도 저감 효과 분석

가) 반사율 변화에 따른 표면온도 변화

- 기존 개발되어 있는 Cool Roof의 경우에는 지붕 표면을 흰색으로 마감을 하여 반사율을 높인 기술이며, 이에 대한 분석을 위해 반사율을 0.2에서 0.6까지(0.05단위로 구분) 총 9개로 구분지어 분석하였다. (그림 3.137)는 여름철 반사율 변화에 따른 지붕 표면의 온도변화를 나타낸다. 그 결과, 최대 14.23°C의 온도 차이를 나타내는 것을 확인하였고 반사율을 높이는 것으로 도시열섬 현상을 저감할 수 있다. 그러나 기존 Cool Roof는 높은 반사율로 인해 겨울철에 지붕 표면온도가 매우 낮아지고 이는 겨울철 난방부하가 증가하는 단점으로 작용된다. 따라서 PCM의 적용을 통해 여름철에는 기존 Cool Roof(반사율 0.6)와 유사한 표면온도 저감효과를 갖고, 동시에 겨울철에는 표면온도가 크게 낮아지는 것을 방지하여 기존 Cool Roof의 단점을 해결할 수 있는 최적안을 제안하고자 한다.



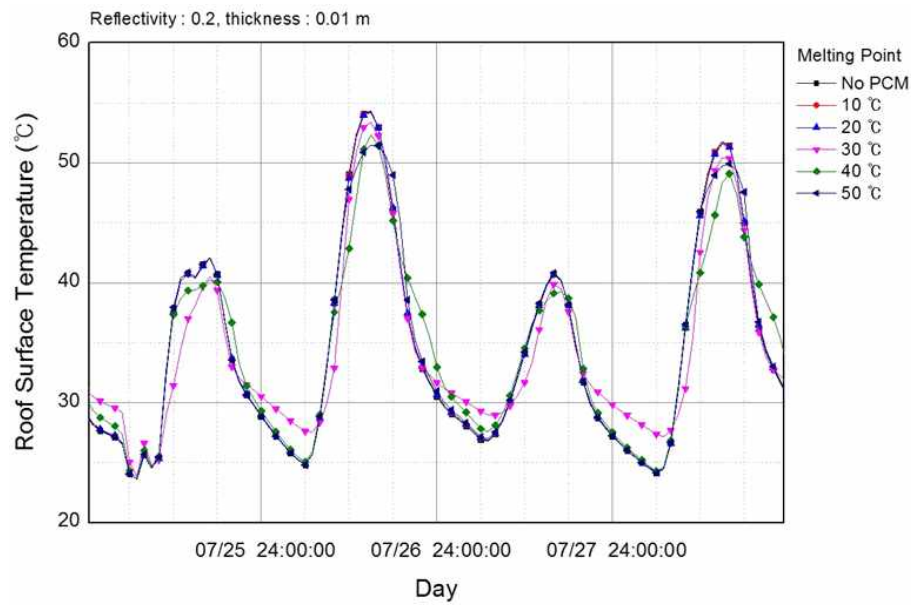
(그림 3.137) 반사율 변화에 따른 지붕층 표면온도 변화 (여름철)

<표3.115> 반사율에 따른 지붕층 최대 표면온도

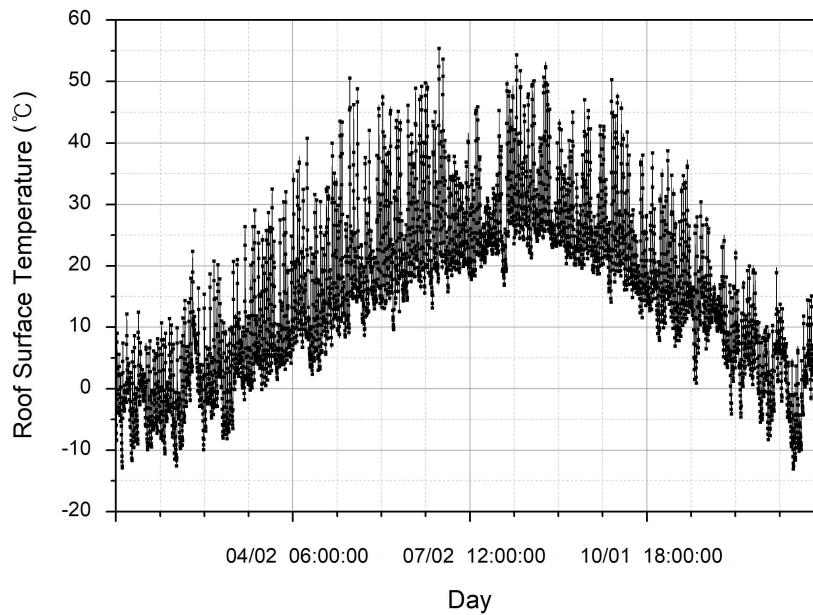
반사율	최외측 표면온도 (°C)			
	7월 25일	7월 26일	7월 27일	7월 28일
0.2	42.13	54.32	40.76	51.76
0.25	41.09	52.57	39.77	50.09
0.3	40.05	50.82	38.77	48.41
0.35	39.00	49.05	37.78	46.72
0.4	37.95	47.28	36.78	45.02
0.45	36.90	45.49	35.77	43.30
0.5	35.83	43.70	34.76	41.57
0.55	34.77	41.90	33.75	39.82
0.6	33.70	40.09	32.74	38.09

나) PCM 적용 유무 및 PCM의 상변화온도 변화에 따른 표면온도 변화

- 반사율이 가장 낮은 0.2 조건에서 PCM의 적용 유/무에 따른 여름철 표면온도에 대한 분석을 실시한 결과는 (그림 3.138)과 같다. 여름철 가장 더운 날을 고려했을 때에는 50°C의 상변화온도를 갖는 PCM이 가장 큰 효과를 보인다. 그러나 1년을 고려하였을 때 50°C를 넘는 기간이 거의 없기 때문에 50°C보다 더 낮은 상변화온도를 갖는 PCM을 적용해야 한다. 30°C의 상변화온도를 갖는 PCM(자주색 그래프)은 상변화가 확연하게 확인되며, 여름철 전체적으로 표면온도를 골고루 저감시키는 것으로 확인되었다.



(그림 3.138) PCM 상변화온도 범위에 따른 지붕층 표면온도 변화
(여름철)



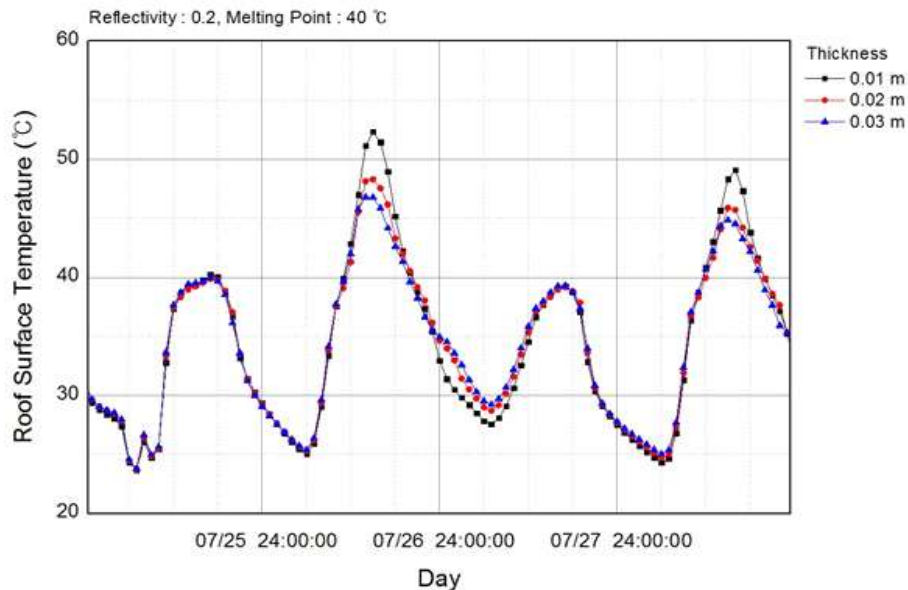
(그림 3.139) 1년간 지붕층 표면온도 변화

<표3.116> PCM의 상변화온도에 따른 지붕층 최대 표면온도

상변화온도 (°C)	최외측 표면온도 (°C)			
	7월 25일	7월 26일	7월 27일	7월 28일
No PCM	42.13	54.32	40.76	51.76
10	42.04	54.27	40.67	51.68
20	42.01	54.21	40.66	51.57
30	40.53	53.37	39.85	50.43
40	40.21	52.33	39.24	49.10
50	42.13	51.48	40.82	49.92

다) PCM 두께 변화에 따른 표면온도 변화

- PCM의 두께를 두껍게 적용할수록 지붕면 표면온도의 저감 효과가 큰 것으로 분석되지만, 두께와 표면온도의 저감효과가 정비례하지는 않음을 알 수 있다. 본 연구에서 PCM의 두께가 증가하는 것의 의미는 PCM의 함량 증가 또는 PCM의 잠열량의 증가를 의미하게 되고, 이는 무분별하게 높은 잠열량을 갖는 PCM을 적용하거나 PCM의 함량 과하게 적용하게 되면 가격대비 효율이 크게 떨어지게 되는 것을 의미한다. 따라서 본 연구 결과는 예측 시뮬레이션을 통해 최적의 PCM 적용 방안을 고찰할 필요가 있음을 시사한다.



(그림 3.140) PCM 적용 두께에 따른 표면온도 변화 (여름철)

<표3.117> 적용 PCM 함량에 따른 지붕층 최대 표면온도 (7월 26일)

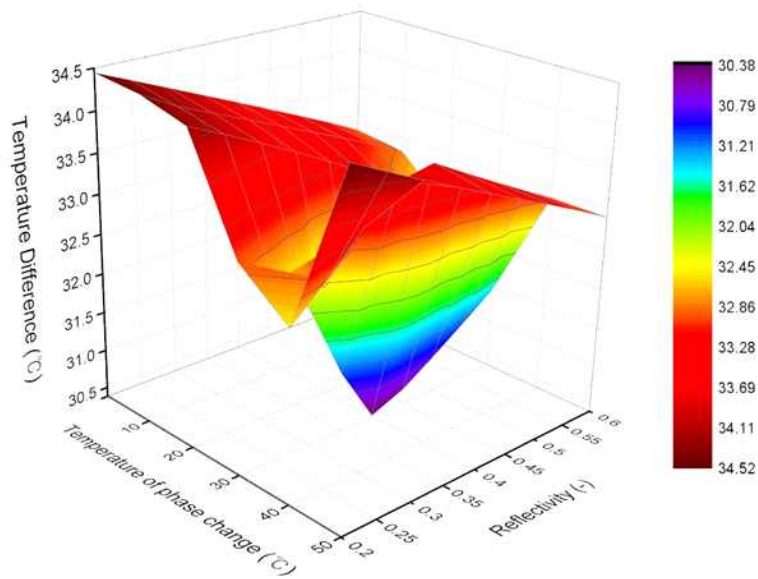
PCM 적용 두께 (m)	최외측 표면온도 (°C)	표면온도 저감 (°C)
No PCM	54.32	-
0.01	52.33	- 1.99
0.02	48.31	- 6.01
0.03	46.79	- 7.53

라) 표면온도 저감을 위한 반사율 선정 및 PCM 적용 최적 방안 고찰

- 반사율, PCM 적용 유무, PCM의 상변화온도 범위를 변수로 CASE Study를 진행하였으며, 각 CASE에서 여름철 최대온도와 겨울철 최대온도의 차이를 계산하여 (그림 3.141)과 같은 3D 그래프로 표현하였다. 여름철 표면온도 저감효과 분석에서는 40 °C의 상변화온도를 갖는 PCM이 가장 효과적인 것으로 평가되었지만, 단순히 여름철 표면온도만 저감시키는 효과는 기 개발된 Cool Roof가 경제성에서도 우월하다. 하지만 본 연구의 목표가 기존 Cool Roof의 겨울철 단점을 보완하는 것이기 때문에 겨울철 가장 추운 날(1월 11일)의 최대 표면온도가 높을수록 유리하다. 따라서, 여름철(7월 26일)과 겨울철(1월 11일)의 최대 표면온도 차이가 작을수록 여름철 온도는 낮고 겨울철 온도는 높게 유지가 되는 것이므로 (그림 3.191)에서 가장 하단 부분의 CASE가 가장 효과적임을 판단할 수 있다.

(그림 3.191)에서는 두께변화에 따른 경제성을 동시에 비교하기 어렵기 때문에 두께를 0.03

m로 고정하였고, 이때, 반사율 0.4에 상변화온도가 30℃인 PCM을 적용하는 경우가 여름철 도시열섬현상과 겨울철 난방부하 저감효과를 동시에 만족하는 최적의 적용방안으로 분석된다. 본 연구의 경우 실외 기후조건을 인천으로 시뮬레이션 결과를 보여주며, 각 지역별 예측 시뮬레이션을 통해 최적의 적용방안을 제시할 수 있다.



(그림 3.141) 상변화온도와 반사율에 따른 최적의 PCM 적용 방안 제안

마) 소결

- 반사율을 높이는 것으로 여름철 열섬현상을 크게 줄일 수 있으나(최대 14.23℃ 저감), 겨울철에도 표면온도가 크게 감소하기 때문에 단순히 반사율을 높이는 것은 겨울철 난방부하를 높이는 요인으로 작용함. 따라서 PCM의 적용을 통해 여름철과 겨울철의 문제점을 동시에 해결 가능한 디테일을 선정하고자 함.
- 여름철 가장 더운날(7월 26일)의 지붕층 최대 표면온도는 54.32℃이며, 50℃의 상변화온도를 갖는 PCM을 적용한 경우 최대 표면온도가 51.48℃로 가장 큰 저감효과를 보임. 다만, 1년간 지붕층 최대 표면온도가 50℃를 넘는 날이 9일 밖에 되지 않기 때문에, 50℃의 상변화온도를 갖는 PCM을 적용하기에는 문제점이 있음.
- PCM 두께가 증가함에 따라 최대 표면온도가 저감되는 경향이 나타나지만, 그 감소비율이 비례하지 않기 때문에 경제성을 고려하여 적절한 두께의 선정이 필요함.
- 건물에너지 해석 시뮬레이션 평가를 통한 총 163개의 데이터 분석 결과, 단순히 여름철 열섬현상 저감을 위해 표면온도 저감을 목표로 한다면 반사율만을 가장 높게 하는 것이 효율적인 것으로 분석되었지만, 겨울철 난방부하를 같이 고려하였을 때는 인천지역을 기준으로 반사율이 0.4인 지붕에 상변화온도가 30℃인 PCM을 적용하는 것이 가장 효과가 좋은 것으로 나타남.

(다) PCM Cool Roof System의 설계기준(안) 개발

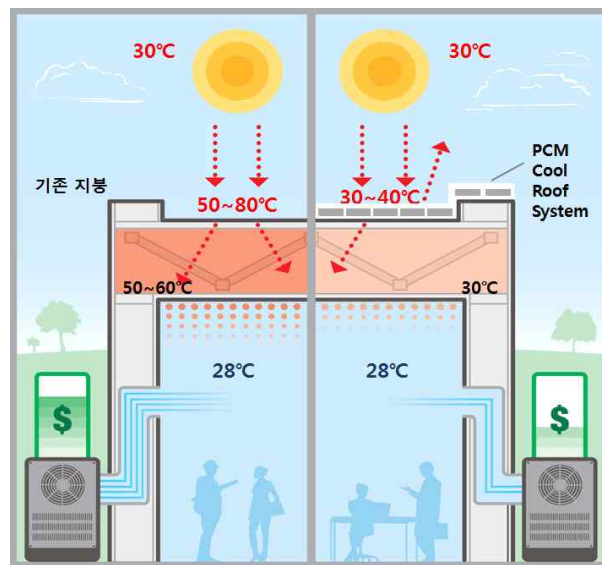
1) PCM Cool Roof System의 설계기준(안) 개발의 개요

- 목적 : PCM 적용으로 도시의 지붕표면온도 및 도시 열섬 현상 효과적 저감
- 범위 : 상세기능 설명, 설계기준, 유지관리 및 교체시기 등 전반적인 가이드라인 제시

2) PCM cool roof system의 정의 및 특성

가) PCM cool roof system 정의

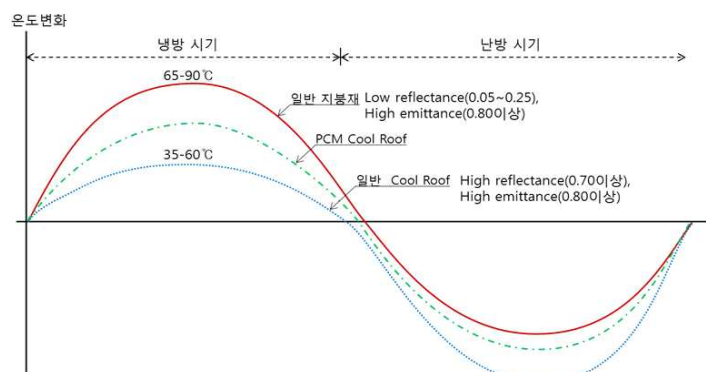
- PCM Cool Roof System은 PCM의 상변화 특성을 이용하여 지붕재의 여름철 과열을 막고 단열성능 증가를 통해 겨울철 난방부하의 증가를 막고자 하는 것이다.
- PCM의 온도가 상변화 온도에 도달하게 되면 열을 잠열의 형태로 축적하여 지붕 표면의 열이 현열의 형태로 저장하는 기존 지붕재와는 달리 일정한 온도를 유지시킴으로써, 도시가 과열되는 것을 막고자 하는 것이다.
- (그림 3.142)와 같이 기존 지붕의 온도가 50~80℃까지 상승하는 것과 대조적으로 표면의 온도를 30~40℃로 유지하여 지붕의 과열을 방지하는 것이 목적이다.



(그림 3.142) PCM Cool Roof System의 개념

나) PCM cool roof system 특성

- 기존 건물에도 적용이 가능해야하므로 경량의 플레이트 형태로 개발한다.
- 경량의 플레이트 형태에 packing type의 PCM을 삽입한다.
- 표면 마감은 반사율과 방사율이 높은 재료로 마감하여 내부로의 열전달을 최소화한다.



(그림 3.143) PCM Cool Roof System의 온도변화 특성

- PCM의 조건은 크게 세 가지 성질을 만족해야 함
 - 열역학적 성질 : 적정온도 범위 내에서 상변화가 이루어져야 함, 높은 비열과 축열 성능
 - 동역학적 성질 : 과냉각 현상이 적게 발생해야 하며, 높은 결정 성장률을 보여야 함
 - 화학적 성질 : 응결·용해 순환 시 내구성이 확보, 비인화성, 비폭발성, 비부식성

<표 3.118> PCM 건물 적용 시 고려사항

구분	영향 평가
상변화 온도	건물이 속한 기후대와 계절에 따라 외기 및 표면 온도가 달라지며, 적용부위에 따라 상변화 온도를 설정하게 된다. 건물 지붕에 PCM을 적용할 경우 외기 온도와 표면 온도는 상변화가 일어나는 시간을 결정하는 중요한 요소이며, 건물 내부에 적용할 경우 실내 온도를 고려하여야 한다.
PCM 적용부위	건물의 적용부위는 상변화 온도를 결정하는 중요한 요인이며 특히 건물 내부와 외부에 적용하는 경우 유지하고자 하는 상변화 온도를 결정한다.
PCM 두께(수량)	PCM의 수량은 상변화가 일어나는 시간과 유지하는 시간 그리고 표면 온도의 최댓값에 영향을 준다. 즉, PCM의 수량은 총 잠열량을 결정하는 것으로 표면 및 내부 온도, 열의 유입에 영향을 미치게 된다.
PCM 적용방법	PCM의 적용방법은 기존의 재료에 함침, 도포, 캡슐화, 패킹 등 다양한 방법들을 선택할 수 있다. PCM의 특징인 잠열량을 최대한 활용하기 위해서는 적용 방법을 고려해야한다. 또한, 실외에 적용하는 경우 내구성 및 안전성을 고려해야 한다.

3) 국내 지붕재 유형 및 특성

가) 국내 지붕재의 유형

<표 3.119> 국내 지붕재의 유형

경사지붕							
지붕재료	분류	건물용도	적용사례	지붕재료	분류	건물용도	적용사례
기와	점토기와	주택		금속	도강판	아파트, 단독주택, 대형공장	
	적삼목 기와	주택			스테인리스 강판	대형건축물, 미술관, 극장, 체육관 등	
	시멘트 기와	주택			징크	주택	
슬레이트	천연 슬레이트	주택			금속기와	신축아파트, 빌라, 콘도, 리조트시설	
	인조 슬레이트	주택 (발암물질이 함유된 석면 슬레이트 지붕은 철거 진행중)		아스팔트 성글	아스팔트 성글	전원주택의 경량지붕재	
평지붕							
지붕재료	분류	건물용도	적용사례	지붕재료	분류	건물용도	적용사례
슬래브	방수 보호층 노출	주택, 상업용건물 등		슬래브	방수층 노출	주택, 상업용건물 등	

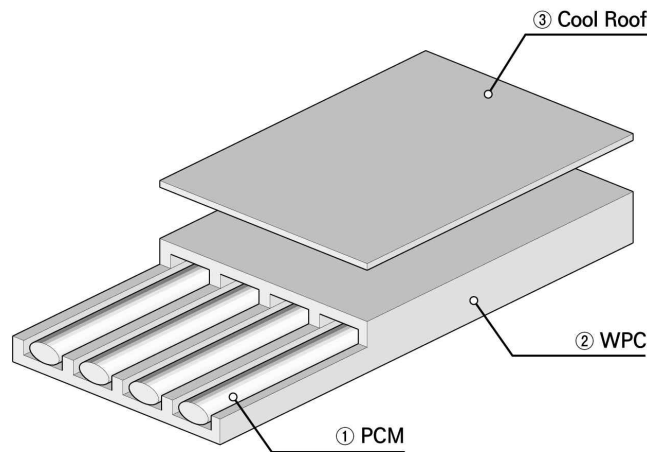
나) 국내 지붕재 종류별 반사율

<표 3.120> 국내 지붕재 종류별 반사율

구분	최대온도		최저온도		평균온도	
	동계	하계	동계	하계	동계	하계
녹색마감	20.5℃	58℃	-12.9℃	16.1℃	-0.6℃	38℃
회색마감	16℃	53.9℃	-12.9℃	16.9℃	-1.2℃	15.7℃
외기온도	3.9℃	38℃	-3.6℃	29.5℃	0.7℃	24.3℃

4) PCM cool roof system 설계

가) PCM cool roof system 주요 구성 및 기능



(그림 3.144) PCM cool roof system 주요 구성

① PCM (Phase Change Material)

- 온도의 변화에 따라 상이 변하는 물질
- 물질이 고체에서 액체, 혹은 액체에서 고체로 상이 변할 때 잠열의 형태로 열에너지를 축적하는 특성
- Micro-encapsulation 기술과 Composite PCM을 이용한 Shape-Stabilized PCM(SSPCM) 기술의 두 가지 측면에서 접근

② WPC (Wood-Plastic Composite)

- 원목의 장점과 플라스틱의 장점을 두루 갖춘 환경 친화적인 신소재
- 목섬유와 열가소성 고분자를 혼합, 개개의 목섬유가 용융된 고분자에 의해 완전히 캡슐화(Encapsulation)된 상태로 최종 압사출하여 성형된 재료
- 목질 섬유 및 플라스틱 외에도 다른 셀룰로오스 등 무기 충전재 포함 가능



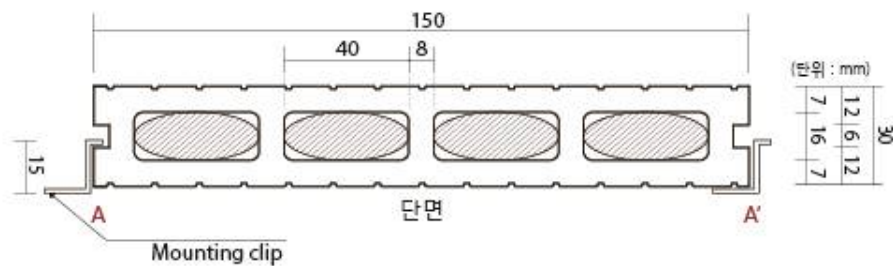
(그림 3.145) WPC
(Wood-plastic composite)

③ Cool Roof

- 쿨루프(Cool Roof)란 일반 지붕마감재에 비하여 표면의 온도가 낮은 것
- 지붕 표면의 온도를 낮추기 위해서는 지붕재료 표면의 높은 반사율(Solar reflectance)과 방사율(Thermal emittance)을 요구
- 쿨루프 적용 시 개별건물에는 에너지 절약가능성, 비용절감, 지붕재의 내용연수 연장, 경제성, 쾌적성 향상 등의 효과 기대
- 쿨루프의 적용은 건물 구조체의 열 축적을 막음으로 인해 냉방부하 저감 및 도시 열섬 저감의 효과가 높음
- 그러나 이는 난방기에는 표면의 열 축적을 막아 오히려 난방부하 증가의 가능성이 높은 단점
- 겨울철 난방부하가 큰 우리나라와 같은 계절에서는 쿨루프 적용 시 신중해야하므로 PCM cool roof system에 결합하여 적용

나) 적정설계방안

- PCM cool roof system은 일반적으로 건축물의 외부 마감에 사용되는 WPC의 중공층에 PCM을 삽입한 형태
- 따라서 WPC와 PCM 그리고 PCM cool roof system의 적정설계방안에 대해 기술



(그림 3.146) PCM cool roof system의 예시 단면도

① PCM (Phase Change Material)

- 반사율에 따른 PCM종류별 표면온도에 따라 Packing type PCM 제작에 사용되는 PCM은 상변화온도가 44℃인 Rubitherm®사의 n-Paraffin 계열 RT44 PCM을 사용
- PCM의 잠열량은 241/g 이므로 충분한 잠열량 확보를 위해 1팩 당 35g이상으로 제작
- 액체 상태의 PCM을 보관하기 위해 액체가 새어나가지 않도록 패킹(Packing)하여 구조체에 그대로 삽입
- 패킹의 손상시의 상누출을 대비해 추가적인 실링부재를 사용

<표 3.121> 반사율에 따른 PCM종류별 표면온도

반사율 PCM종류	반사율 0.17 (회색마감)	반사율 0.22 (갈색마감)	반사율 0.47 (흰색마감)
Bio 25	61.0℃	64.5℃	49.3℃
Bio 30	59.6℃	61.6℃	47.9℃
Bio 34	53.8℃	54.8℃	47.7℃
RT 44	64.8℃	57.5℃	45.5℃
평균	59.8℃	59.6℃	47.6℃

- 패킹 소재는 열전도율이 높아 열전달과정에서 손실이 적으며 내구성 및 내열성이 높은

소재로 제작되어야 하며 제작 예시는 다음과 같다.

<표 3.122> PCM Packing 제작 예시



② WPC (Wood-Plastic Composition)

- WPC는 플레이트는 목재-플라스틱 복합체를 성형하여 만든 마감재로서 기존 건물의 지붕 마감재로 적용이 비교적 수월하고, 구조적 안전성을 확보할 수 있기에 사용이 적절한 것으로 판단(그림 3.147)
- 또한 PCM 물질 특성상 잠열을 활용하기 위해서는 PCM 물질층에 열전달이 원활히 이루어져야하기 때문에 단순 목재테크 플레이트가 아닌 더 높은 열전도율을 가지고 있는 목재-플라스틱 복합체인 WPC 플레이트를 사용<표 3.123>
- 패킹 PCM이 삽입될 수 있는 중공층이 있어야 하며 WPC의 상부는 반사율이 높은 흰색 등으로 처리
- 중공층으로 외기도입을 최소화하기 위해 WPC의 끝부분에는 별도의 cap을 장착하여 마감



(그림 3.147) WPC플레이트

<표 3.123> WPC와 일반 목재 열전도율 비교

재질	WPC	목재 (경량)	목재 (중량)	소나무	가문비나무
열전도율 (W/m · K)	0.53~0.55	0.14	0.19	0.13	0.13

③ PCM cool roof system

- 표면온도 저감을 위한 반사율 선정 및 PCM 적용 최적 방안에 대한 연구 결과, 반사율 0.4에 상변화온도가 30℃인 PCM을 적용하였을 때가 최적의 적용방안임을 도출
- 태양의 일사열로 PCM의 상변화가 진행되므로 일간 일사량이 많은 위치가 적합
- WPC의 양쪽 외측면을 따라 길게 형성된 연결홈으로 복수의 WPC를 평행 연결하며 그 방법은 다음과 같음
- 마운팅 클립 : 금속 부재로 구성된 마운팅 클립과 나사를 WPC의 양쪽 외측면의 연결홈을 따라 설치해 복수의 WPC를 연결. 이는 일반적인 WPC의 시공방법과 동일. 마운팅 클립과

나사를 활용해 조립함으로써 건식시공이 가능하며 설치 및 제거가 간편.

- 끼움홈 방식 : 서로 나란히 배치되는 WPC의 연결홈에 연결 리브를 끼워 시공. WPC의 손상 없이 연결이 가능하므로 탈착의 횟수에 제한이 없어 반영구적 사용이 가능. 150mm*800mm*30mm WPC 1개의 무게가 약2.7kg임을 고려했을 때 연결리브는 충분한 강도가 요구됨.
- PCM cool roof system의 하중은 약 11.6kg/m²이므로 기존 건축물에 추가로 설치할 경우 추가되는 하중에 대한 구조적 진단 및 보강이 필수적.
- 패킹 PCM은 WPC와 착탈 가능하게 결합되며 액체 상태의 PCM이 유출되지 않도록 실링부재를 더하여 이중마감 처리.
- PCM cool roof system의 기존 옥상 적용시 풍하중으로 인한 문제점을 대비하여 WPC 프레임을 시공하여 중저층 및 고층 건물에서 안전 확보
- 향후, 초고층건물(50층 이상) 옥상에 적용시 CFD 시뮬레이션을 통하여 풍속에 따른 WPC의 안정성 분석 후, 분석 결과를 PCM cool roof system 시공 시 활용하는 것이 필수적.

④ PCM cool roof system 적용범위

- PCM cool roof system은 건물용도와 건물규모에 크게 구애받지 않고 적용 가능한 건축 자재로 분류 될 수 있음.
- WPC는 기존 목재의 단점을 극복하고 뛰어난 내구성을 지녔으며 변형이나 변색이 없어 반영구적 사용이 가능하다. 또한 내수성 및 난연재로써 화재로부터 안전한 자재로 판명됨. 이로 인해 야외 환경에 적용되면서 건물외피로 기능을 충분히 발휘할 수 있음
- WPC의 평균 규격은 W: 145~150mm, T: 25~30mm, L: 3,000이며 건물규모나 형태에 맞게 응용하여 조절 가능하므로 면적제한이 발생하지 않음
- PCM cool roof system의 하중이 약 11.6kg/m²임을 감안하여 건물 외피, 지붕면 등에 적용 적합
- 추가되는 하중으로 인해 중소규모 주택, 근린생활시설, 상업시설에 적용이 용이 할 것으로 판단되나, 구조설계 및 시공 시 전문가의 구조진단 및 안전진단이 시행된다면 적정 범위 내에서 건물 층수 및 높이에 제한 없이 적용 가능 함
- 신축 건물 및 기존 건물에 적용 시 부분 교체가 가능하여 유지관리·보수에 용이 함

5) PCM Cool roof system의 시공 상세

가) WPC

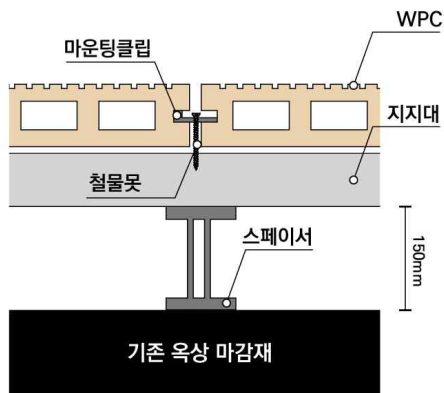
(1) 기존 구조물(건축물)과의 접합

- 기존 옥상 마감재 해체 후 재시공이 아닌 기존 옥상 마감재 위에 설치하는 추가 시공이므로 철골기둥, 지붕골조 등의 기본 골조와의 접합은 불필요함
- 배수, 방충, 통풍 등의 사항을 고려하여 기존 옥상 마감재로부터 최소 150mm 이격거리를 두어 WPC 시공
- 기존 옥상마감재와 WPC 이격시, 부재 중간부분이 휘는 것을 방지하기 위해 WPC 방향과 수직방향의 장선(목재 또는 철재 지지대)을 300~400mm간격으로 설치
- WPC와 지지대가 교차하는 지점의 하부에는 철재 스페이서를 배치해 하중을지지



(그림 3.148) 기존 구조물 위에 시공된 WPC

- WPC와 지지대의 고정은 마운팅클립에 철물못 시공으로 함(그림 3) (마운팅클립 상세-2절)



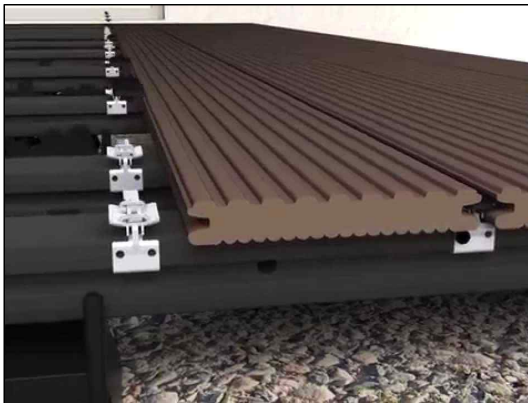
(그림 3.149) 단면개념도



(그림 3.150) 마운팅클립에 철물못 시공>

(2) WPC의 연결

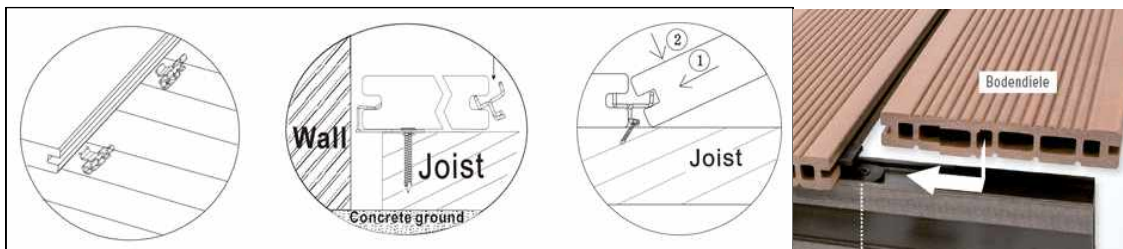
- WPC측면의 홈에 마운팅클립을 삽입하는 방식으로 고정하여 WPC부재를 연결
- WPC부재의 연결은 강풍, 강우 등 기후조건에 대응하기 위한 방안임
- 마운팅클립은 수직압력과 휨모멘트에 강한 강도를 보이는 알루미늄 등의 부재를 사용하여 제작. 폭방향 수축/팽창에 대한 완충 기능을 하여야 함
- WPC를 연결한 마운팅클립은 철물못으로 지지대에 고정
- WPC의 측면 홈에 마운팅클립을 끼워넣고 연결할 WPC를 밀어넣는 방식으로 고정(그림 3.151,152) 참고



(그림 3.151) 마운팅클립1



(그림 3.152) 마운팅클립2



(그림 3.153) WPPC 단면 상세

(3) WPC의 시공순서

- 시공 순서는 다음과 같음

<표 3.124> WPC의 시공

	① 시공면에서 150mm정도의 이격거리를 두어 프레임(장선) 시공
	② 시공면적에 적절한 길이로 WPC를 재단
	③ WPC측면의 홈에 마운팅클립 삽입 후 고정
	④ WPC 각 부재를 마운팅클립으로 연결

(4) WPC의 유지관리 및 기타

- 얼룩오염 : 데크의 얼룩은 가벼운 물청소만으로도 없어짐. 깨끗한 외관유지를 위해 6개월 정도에 한번씩 일반세제와 플라스틱재질로 된 수세미를 사용해 물청소도 가능함. 이때, 데크의 표면에 긁힘 발생을 유발하는 금속재질의 브러시는 사용하지 않도록 주의함
- 기름오염 : 기름때가 끼인 경우에는 일반세제를 사용해 부드러운 솔이나 스펀지로 문질러 줌
- 표면도장 : 오일스테인, 페인트 등 별도의 표면처리가 필요하지 않으나, 표면에 도장을 할 경우에는 데크재 제조사 기술팀과 상의.
- 변 색 : 직사광선에 노출되는 경우 10~12주 정도 후 데크 표면의 자연스러운 변색이 진행됨. 이 변색은 제품의 내구성이나 물성에 영향을 주지 않으며 변색의 원인은 데크재 제품에 다량 함유된 목분의 영향이므로 극히 정상적인 현상임. 데크재의 변색이 지나치게

빨라지는 것을 막기 위해 눈이나 빗물이 쌓이거나 고이지 않도록 함.

- 긁힘발생 : 데크 표면에 긁힘이 발생한 경우에는 와이어브러쉬를 이용해 결 방향으로 부드럽게 표면을 문질러줌. 이 경우 내부의 변색이 되지 않은 부분이 드러나게 되는데 이것은 시간이 지나면 주변과 동일한 색상으로 변화함.
- WPC는 아래 시험을 통과한 제품이어야함

<표 3.125> WPC 품질규격

품질 항목		품질 기준	시험방법
포름알데히드		0.5 mg/L 이하	GR F 2016 : 2008
VOCs 방출량(7일 후)		0.4 mg/㎡·h 이하	실내공기질공정시험기준 (환경부고시 제2010-24호)
유해물질 용출시험 (mg/L)	Pb	3.0 미만	폐기물공정시험기준 (환경부고시 제2009-132호)
	Cu	3.0 미만	
	As	1.5 미만	
	Hg	0.005 미만	
	Cd	0.3 미만	
	Cr ⁶⁺	1.5 미만	

- 시공시 온도차에 의한 신축력을 반드시 고려해야 함



(그림 3.154) WPC의 신축력을 고려하지 않은 시공하자 사례

나) Packing type PCM 시공상세

(1) PCM 수급

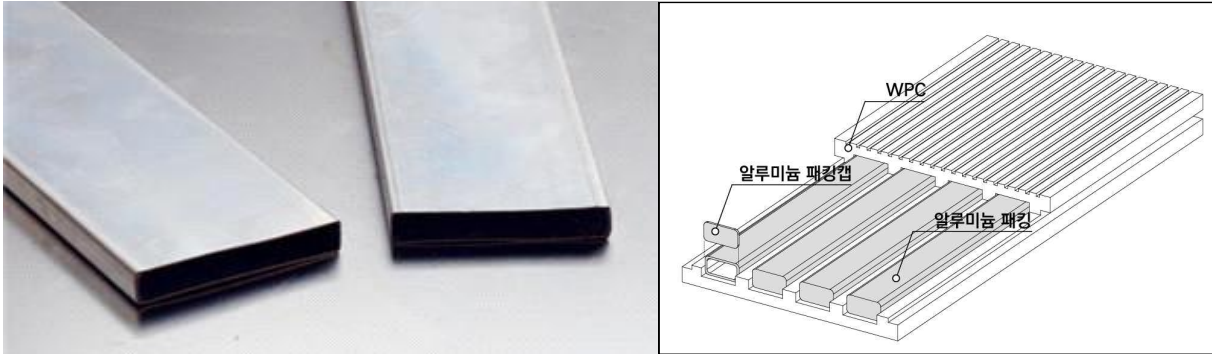
- PCM의 제조에는 파라핀계 PCM인 n-docosane RT44 PCM이 사용됨
- RT44 PCM의 물성치는 다음과 같음
 - 잠열량 : 241/g
 - 녹는점 : 44℃
- 1팩 당 35g으로 제작하여 충분한 잠열량 확보
- RT44 PCM은 현재 국내 수급이 불가하며 전량 수입 필요

(2) Packing Type PCM 제작

- 내구성 및 내열성을 고려하여 PCM의 패키징은 알루미늄 등 반영구적 소재로 함
- 고온에서의 PCM은 액체상태이므로 누수가 될 수 있는 점을 고려해 PCM의 패키징은 완전한

밀폐상태로 함

- 패킹된 내부 물질의 상에 따라 패킹의 형태가 변형되지 않도록 고휘도의 케이스에 패킹함
- PCM의 잠열이 충분히 전달될 수 있도록 열전도율이 높은 소재를 사용함
- Packing Type PCM은 WPC의 중공층에 삽입가능해야하므로 WPC중공층의 규격과 동일한 규격으로 제작함



(그림 3.155) 알루미늄 패킹 케이스 예시

(그림 3.156) 알루미늄 패킹 모식도

다) 기타 시공 상세

(1) Cool Paint 표면처리

- 피도면의 유수분, 모래, 먼지 등 이물질들을 완전히 제거 후 도포함
- 피도면을 완전히 건조함

(2) Cool Paint 사용시 주의사항

- 사용전 도료를 잘 혼합하여 균일하게 한 후 사용
- 혼합비율을 정확히 지킴
- 지나친 희석은 PCM cool roof system의 효과를 저하시키므로 금함
- 기온이 5℃이하이거나 상대습도가 85% 이상에서는 도장하지 말 것

(3) Cool Paint 도장방법

- 붓이나 롤러를 이용하여 도장시 도료가 도포면에 고이지 않도록 얇게 도장함
- 도장시 화기에 주의하고 통풍에 유의함

(4) Cool Paint 건조시간 (우레탄 상도 2액형 사용시)

<표 3.126> Cool Paint의 건조시간

구분	5℃	20℃	30℃
지촉건조	1시간	30분	20분
고화건조	18시간	12시간	8시간
후속도장 가능시간(최소)	18시간	12시간	8시간
가사시간	6시간	4시간	2시간

- * 지축건조 : 만저도 점착성이 없을 정도로 경화가 진행되어 있는 상태
- * 고화건조 : 손으로 힘껏 눌렀다가 떼어냈을 때 도막에 지문자국이 없는 상태
- * 가사시간 : 2액형의 이상의 도료를 혼합하여 사용할 때 겔화, 경화등이 일어나지 않고 사용하기 좋은 유동성을 유지하는 시간

(5) WPC에 Cool Paint 도장시 유의사항

- WPC제품 표면의 이물질을 제거한 뒤 Cool Paint를 도포함
- 표백제를 물과 1:3으로 희석하여 WPC에 전체적으로 도포하여 세척한 뒤 샌드페이퍼로 샌딩함
- 자외선과 강우 등에 지속적으로 노출되면 도장의 내구성이 약화되므로 3-5년 간격으로 재도장을 해야함

5) 유지관리

가) 개요

- 시스템을 안전하고 경제적으로 유지관리 하는데 있어서 기본적으로 알아야 할 결함 및 손상의 종류와 원인, 점검 종류별 점검요령, 조치 대책 등에 관한 필수적인 내용을 그림 및 사진 위주로 구성.
- PCM cool roof system에 대하여 전문지식이 적은 사람도 쉽게 활용할 수 있도록 구성함으로써 효율적인 유지관리를 통해 궁극적으로 시스템의 수명연장에 기여하는 것을 목적으로 함.

나) 결함 및 손상

- PCM
 - Packing type의 PCM은 특성상 pack외부로 유출될 가능성이 상대적으로 높음.
 - 따라서, 외관상 PCM의 유출이 확인될 경우 보수 작업이 필요.
- WPC
 - WPC는 기본적으로 습기 및 곰팡이 등의 외부 환경에 강하여 반영구적으로 사용할 수 있는 것으로 알려져 있지만, 외부에 노출되어 장시간 사용하게 될 경우 동절기 결빙 현상에 의한 균열(crack)이 발생할 가능성이 있음.
 - 이 경우 방치하게 되면 내부의 PCM 및 단열재에 추가적인 손상이 갈 수 있기 때문에 교체 작업이 이루어져야함.

다) 점검 및 조치 요령

- 점검 시기 및 방법
 - 하절기에는 매일 PCM의 상변화 과정이 이루어지기 때문에 packing의 유출 위험이 높음. 따라서, 하절기 지난 후 PCM의 유출을 확인 실시
 - 국내의 기후 특성 상 동절기에 WPC의 균열(crack) 발생 위험이 높기 때문에 동절기가 지나고 전체적인 외관 이상 유무 점검 실시

- PCM 유출 시 점검 요령
 - 정확한 유출 부위 파악
 - PCM packing 교체 또는 보수
 - 그 외 다른 부위의 유출 파악 및 보수
- WPC 균열(crack) 발견 시 점검 요령
 - WPC 균열 부위 주변으로 PCM packing의 손상 확인
 - PCM packing의 손상이 없을 경우 WPC교체

(라) PCM Cool Roof System의 경제성 평가

1) 기존의 cool paint 지붕 단열소재

- Cool Roof 제품

쿨루프 인증 기관 CRRC(Cool Roof Rating Council)의 인증을 받은 제품의 시중가격을 측정하였다. 제품사는 노루페인트, 어드그린코드, GAF, KCC로 금액의 평균값은 14,000원/L이다. 이론 도포량은 5~6㎡/L로 Cool paint는 면적 당 2,800원/㎡이다.

<표 3.127> CRRC 인증을 받은 쿨루프 제품의 단가

제품사	제품명	가격
노루페인트	ENERGY SAVER 쿨루프	14,000원/L
어드그린코드	차열페인트	13,500원/L
GAF	Roof Mate	13,800원/L
KCC	스포탄상도 에너지	14,900원/L
평균 cool paint 금액		14,000원/L

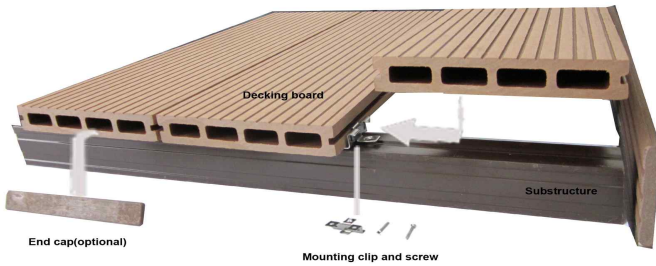
2) PCM cool roof system 자재

- PCM 자재
 - Packing type PCM 제작에 사용되는 PCM은 상변화온도가 44℃인 Rubitherm®사의 n-Paraffin 계열 RT44 PCM을 사용
 - PCM의 잠열량은 241/g 이므로 충분한 잠열량 확보를 위해 1팩 당 35g이상으로 제작
 - WPC 하나의 모듈에는 4개의 Packing type PCM이 삽입. 즉, 한 Plate당 140g의 PCM 사용 (12g/㎡)
- PCM 가격
 - 유기계 PCM만 수입이 가능하고 PCM의 온도에 따라 가격이 \$1.5/lb에서 \$7.5/lb로 차이를 보이며, 본 연구 실험에서 사용된 PCM은 45,000원/L이다.
- Wood Plate 가격
 - PCM Cool Roof System의 최종 모델에 사용한 WPC(Wood Plastic Composite)의 1㎡당 금액은 50,000원이다.
 - Packing type PCM은 하나의 팩에 0.13L의 PCM이 주입되며 WPC 하나의 유닛(150mm*800mm*30mm)에는 PCM 팩이 16개 즉, 2.05L의 PCM이 들어간다.

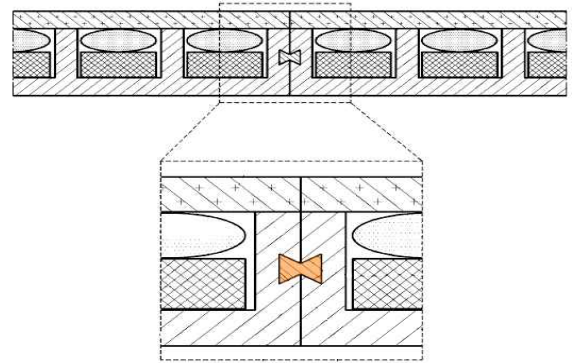
- PCM Cool Roof System의 면적당 금액은 52,000원/m² 이라 산정할 수 있다.
- PCM의 공급가격은 다양하며 보급형 재료가 아니어서 금액이 높게 측정된다.
- BioPCMatTM사의 PCM 지붕재 패키지의 가격이 약 60,000원/m²인 것을 고려하여 현재까지 PCM 상용화를 위한 초기 투자비용은 높다.

3) PCM Cool Roof System의 시공

기존 건축물에도 적용이 가능하도록 규격화된 모듈을 지붕 마감부 최상부에 설치 가능한 방식이다. 마운팅 클립과 나사 및 연결리브를 사용한 조립재로 별도의 설치비 및 시공비가 필요하지 않는다.



(그림 3.157) 마운팅클립 및 나사의 WPC의 연결



(그림 3.158) 연결리브 상세

4) 유지보수

- PCM을 알루미늄 등 내구성을 강화시킨 제품으로 패키징하여 적용시키면 반영구적 PCM Cool Roof 형성이 가능하다.
- 기존 지붕의 정기적 옥상 관리 비용이 단위면적당 연간 300원/m²이므로 반영구적 packing PCM을 활용하여 유지보수 비용을 절감시킬 수 있다.

5) 에너지

- Cool paint 등의 기존 지붕 단열소재를 사용했을 시 보다 PCM플레이트 적용 시 부하저감으로 인한 에너지 비용이 저감된다.
- 에너지 성능 평가를 위한 시뮬레이션 입력 조건은 <표 3.127>과 같다.

<표 3.127> 시뮬레이션 대상건물 입력 조건

구분	내용
건물 위치	대한민국, 서울
건물 연면적	25.92m ²
설비 시스템	Fan Coil Unit + Air Cooled Chiller
운전 기간	냉방 기간 : 5~10월
	난방 기간 : 11~4월
실내 가동조건	평일 : 08:00 ~ 17:00
실내 온도조건	22℃DB ~ 26℃DB
실내 발열조건	사람 : 123W/person
	조명 : 9.7W/m ²
	기기 : 12W/m ²

<표 3.128> 에너지 비교·분석

항목	기존건물	Cool Roof 적용건물	PCM Cool Roof System 적용건물	기존 건물 대비 절감율	
				Cool Roof 절감율	PCM Cool Roof System 절감율
	반사율 0.1	반사율 0.7	반사율 0.5		
총 에너지 양 (kWh/m ² · yr)	236.40	233.42	232.74	1.26%	1.55%
냉방 에너지 (kWh/m ² · yr)	70.64	61.63	62.20	12.76%	11.95%
난방 에너지 (kWh/m ² · yr)	50.99	57.03	55.78	-11.82%	-9.37%
냉방 피크부하 (W/m ²)	119.69	110.44	110.48	7.72%	7.69%
난방 피크부하 (W/m ²)	131.94	131.94	131.59	0%	0.26%

- <표 3.128>은 기존건물과 반사율 0.7의 Cool Roof와 반사율 0.5의 PCM Cool Roof System을 적용한 건물의 냉난방 에너지 요구량을 비교한 것이다.
- <표 3.128>에서 Cool Roof의 반사율이 0.7일 때 단위면적 당 총 에너지량은 1.26% 감소하고 냉방에너지는 12.76% 감소 난방에너지는 11.82% 증가하였다. 냉방 피크부하는 7.72% 감소하였다.
- PCM Cool Roof System은 반사율이 0.5일 때 기존건물 대비 총 에너지량은 1.55% 감소하였고 냉방에너지는 11.95% 감소, 난방에너지는 9.34% 증가하였다.
- PCM Cool Roof System과 Cool Roof를 비교할 경우, 반사율 0.7인 PCM Cool Roof System의 경우 Cool Roof를 적용하는 것보다 총 에너지량은 0.29% 감소하였다. 냉방에너지량은 0.81% 상승, 난방에너지 양은 2.45% 감소하였다.
- 이러한 결과로 PCM Cool Roof System은 기존건물 대비 단위면적 당 연간 1.55%의 에너지 절감과 Cool Roof 대비 0.29%의 에너지 절감을 보이며 기존 보다 효과적인 것으로 판단된다.

(마) 연구성과 적용을 위한 특기시방서(안)

1) 일반사항

가. 적용범위

- 본 특기 시방서(이하 시방서라고 함)는 옥상마감에 사용되는 합성목재
- 시방서에 기재된 이외의 사항은 건교부 제정 건축공사 표준시방서(이하 ‘표준시방서’ 라 한다)에 따른다.
- 공사에 사용되는 주자재 및 부자재는 K.S 또는 ASTM 규정에 준하여야 한다.

나. 설계도서와 내역서 및 시방서가 서로 달라 문제점이 발생할 경우에는 담당자와 협의를 거쳐 시행한다.

다. 관련법규 및 기준

- 시공자는 본 공사에 적용되는 관계 법령(건축법, 건설기술 관리법, 산업안전 보건법,

근로안전관리규정, 소방법, 전기관계법등) 및 기타 관련 법규에 준해 성실히 공사를 이행하여야 한다.

- 관련 규준은 특기가 없는 한, KS규격과 강구조 계산 규준, 철근 콘크리트 계산 규준에 적합해야 한다.

라. 사용재료

- WPC 제품 사양

종 류	플라스틱 복합체(WPC)
규 격	800*150*30mm
열 전 도 율	0.35 W/m°C
강 도	

- PCM 제품 사양

종 류	파라핀계 n-docosane RT44 PCM
잠 열 량	6.7 J/g
녹 는 점	44°C

- Cool Paint 제품 사양

종 류	외부도장용 수성페인트(흰색)
반 사 율	0.47

2) 자재관리

가. 본 지방서에 지정한 자재는 설계의 기준으로서 사전에 감독원에게 제출하여 승인을 받아야 하며 신품사용을 하여야 한다.

나. 현장 반입되는 자재는 사전에 감독원이 승인 한 자재 이어야 하며, 도면과 지방 서에 표시된 품질과 동등 혹은 그 이상의 품질이어야 한다.

다. 당해 공사에 사용되는 모든 자재는 SAMPLE 또는 견본품을 포함한 관련 자료를 제출하여 감독원의 승인을 득해야 하며, 사용 계획서에는 적용부위, 시공방법, 순서절차, 주의사항 및 자재 요구 성능과 특징 등이 명시되어야 한다.

라. 운반 시 자재는 견고하게 밴딩하여 운반도중에 파손이나 전도 되는 것을 방지한다.

마. WPC의 외관 유지를 위한 관리 도중 표면에 긁힘을 발생 시킬 수 있는 금속 재질의 브러쉬는 사용하지 않도록 한다.

바. 적재

- 현장에 반입되는 자재는 지정된 장소에 적재하는 것을 원칙으로 한다.
- WPC의 파손 및 변형을 막기 위해 반드시 평탄한 곳을 택하여 그 위에 합판 등 바닥 지지물을 일정 간격으로 설치한 후 제품을 적재하며 비닐 등으로 덮어둔다.
- 현장 내 적재한 자재는 보호조치를 충분히 하여 외부로부터의 충격 등으로 손상이 가지 않도록 한다.

사. 검사

- 감독원의 검사를 한 후 합격한 것만 사용하며, 불합격품은 즉시 장외로 반출하여야 한다. 불합격품이 장외로 반출 될 때까지 감독원은 전 공정의 공사를 중지 할 수 있다.
- 사전에 제출하여 승인된 견본에 따라 관련성을 검사하고 재료 검사 시 시공자는 검사에 따르는 제 사항에 협조하여야 한다.
- 사용되는 재료 및 부재는 설계자에 의해서 지정되거나 그와 동등한 것이어야 한다.
- 별도로 명시되지 않은 재료는 설계자에 의해 승인되고, 그 용도에 가장 합당한 최상의 자질이어야 한다.
- 설치검사 시 보강 부재의 취부검사를 행하며, WPC 설치에 따른 관련 검사 일체를 실시한다. (기타 감독원이 중요하다고 판정된 부위 검사 실시)

3) 시공사항

가. WPC

- WPC를 시공해야 할 장소의 상태를 검사해야하며, 부적절한 작업장 조건이 완전히 개선되기 전에 설치 공사를 개시 하여서는 안 된다.
- WPC 시공은 기존 옥상 마감재 위 추가 시공을 하는 것으로 배수(5mm), 방충, 통풍 등의 사항을 고려한다.
- WPC와의 결합부품은 아연도금, 스테인리스 스틸, 녹방지용 코팅 등의 처리가 된 제품이어야 한다.
- WPC와 기존 옥상 마감재로부터 최소 150mm 이상의 이격거리를 두어 시공한다.
- 기존 옥상 마감재와의 이격거리로 인한 부재의 휨을 방지하기 위해 WPC 방향과 수직 방향으로 지지대를 설치한다.
- 배관, 배선, 기타 기기류 설치에 있어 WPC 상부에 구멍을 뚫어야 할 경우 이의 작업과 마무리 작업 특히 구멍 뚫기 작업의 경우 PCM 손상 및 WPC 내구성 문제로 인해 반드시 시공자 측 입회하에 작업이 이루어져야 한다.

나. PCM

- PCM Packing 작업 시 PCM이 굳기 전 Packing 안에서의 골고루 퍼질 수 있도록 평탄한 바닥이 있는 곳에서 작업을 실시한다.
- 고온에서 액체상태인 PCM의 상태를 고려하여 PCM Packing은 완전한 밀폐상태로 제작하고 Packing의 변형을 막기 위해 고형의 케이스를 사용하도록 한다.
- WPC 중공층에 PCM 삽입 시 PCM Packing의 손상을 방지하기 위해 WPC 내부 및 입구 부분의 상태를 확인하고 Packing의 마감상태를 확인한다.
- 옥상에 적용시키는 PCM의 성능은 모두 동일한 제품을 사용해야 하며 사용되는 PCM의 용량 또한 모두 정량으로 공급한다.

다. Cool Paint

- 작업 시 Cool Paint 도포면 이물질을 완전히 제거하고 완전히 건조된 상태에서 작업한다.
- 페인트가 도포면에 고이지 않도록 얇게 여러번 도장하고 통풍에 주의한다.(화기 주의)
- 외부 기상 상태에 지속적으로 노출이 되면 도장의 내구성을 약화될 우려가 있으므로 3-5년 간격으로 재도장을 한다.

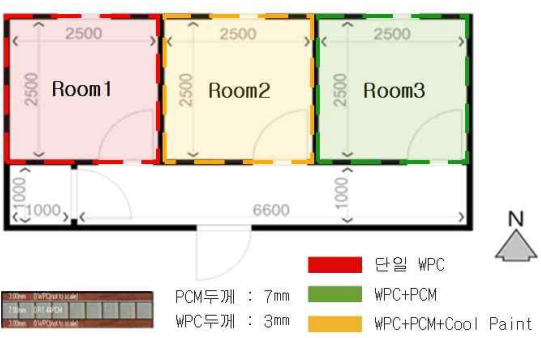
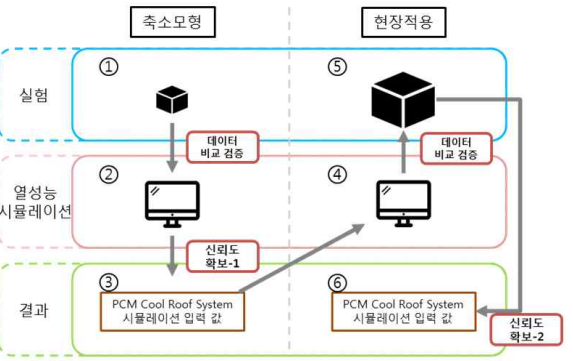
4) 연관공사의 시공한계와 협의 사항

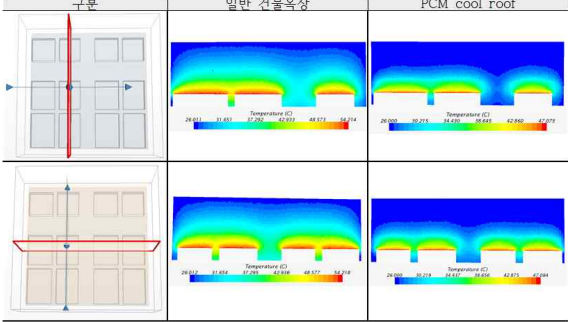
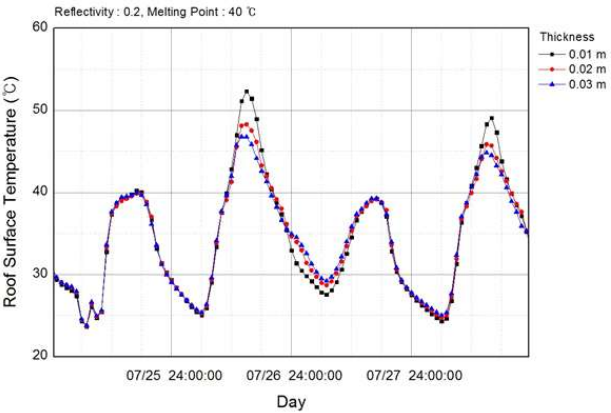
가. 본 공사 중 시공한계는 원칙적으로 공사내역서 범위에 국한하며 특히 다음에 열거하는 공사부분을 제외한다.

- 건축공사 시 기초공사, 일반건축공사, 바닥 콘크리트 등의 공사
- 전기 설비공사 시 옥, 내외 배관, 배선공사 및 기타 이에 관련된 공사
- 기계 설비공사 시 냉, 난방 위생 및 소화설비를 위한 일체의 공사
- WPC 상부에 중량물을 설치하는 경우 반드시 사전에 시공사 측에 문의하여 설치에 관련된 중량제한 한계 등에 관한 자문을 받아 시공하여야 한다.

(3) 연구수행 결과

- 본 연구의 최종목표인 PCM Cool Roof System 적용을 통한 도시열섬현상 저감을 위해 당해 연도에는 크게 ‘PCM Cool Roof System의 성능 기준 및 설계지침 개발’과 ‘상안정 PCM이 들어간 축열 플레이트 개발 및 축열성능 향상 연구’의 2가지로 나누어 실시하였다. 당해 연도의 연구 결과는 다음과 같다.

연구 기관	연구 범위	연구 수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
중앙대학교	PCM Cool Roof System의 성능검증	▪ Test-bed를 활용한 성능 검증	▪ Test-bed WPC에 PCM 삽입유무에 따른 실물모형 실험 실시  • 플레이트 내부온도 측정 결과 WPC+PCM가 단일 플레이트 보다 더 높게 나타남을 통해 WPC에 삽입한 내부 PCM의 축열 성능효과 검증 • PCM Cool roof system의 실내 온도 저감 효과 및 도시열섬현상 저감 효과 입증
		▪ 열성능 시뮬레이션을 통한 냉·난방부하 저감 성능 검증	▪ 실제 측정데이터와 시뮬레이션 데이터의 비교 검증을 통한 Designbuilder 프로그램의 신뢰성 확보 

연구 기관	연구 범위	연구 수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
송 실 대 학 교			열성능 시뮬레이션을 통한 연간 냉·난방 부하 저감 성능 검증
			- 상업단지 연간 냉방에너지 소비량 분석 결과 - PCM Cool Roof System 적용 시 연간 냉방에너지 소비량 2.9% 절감 - 평균 단일 건축물 냉방에너지 피크 소비량 6.7% 절감 - 아파트주거단지 연간 냉방에너지 소비량 분석 결과 - PCM Cool Roof System 적용 시 연간 냉방에너지 소비량 0.15% 절감 - 평균 단일 건축물 냉방에너지 피크 소비량 3.7% 절감
중 앙 대 학 교		기류분석 시뮬레이션을 통한 열섬현상 저감 효과 검증	기류 분석 시뮬레이션인 Star-CCM을 활용하여 PCM Cool Roof System 도시열섬현상 저감 효과 검증 
송 실 대 학 교	PCM Cool roof system 활용을 위한 PCM의 최적 적용 방안 분석 및 제안	Energypius를 활용한 시뮬레이션 분석으로 최적의 PCM 적용방안 제안	- PCM 적용 유무 상변화온도 변화에 따른 표면온도 변화 확인 - 표면온도 저감을 위한 반사율 선정 및 PCM의 최적 적용 방안 분석 및 제안 - 겨울철 난방부하의 고려를 위해 인천지역을 기준으로 반사율 0.4인 지붕에 상변화온도가 30℃인 PCM을 적용하는 것이 가장 효과가 좋은 것으로 분석 
중 앙	PCM Cool Roof	PCM Cool roof system의 보급 및 활성화를 위한	PCM Cool roof system 상세 기능 설명, 설계기준, 적용범위, 유지관리 및 교체시기에 대한 전반적인

연구 기관	연구 범위	연구 수행 방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
대학교	System의 설계기준(안) 개발	설계기준(안) 작성	PCM Cool Roof System 가이드라인 제시

가) Test-bed를 활용한 PCM Cool Roof System의 성능검증

㉠ Test-bed 실험

- PCM Cool Roof System의 실물적용(Test-bed)실험을 위해 중앙대학교 208관 옥상에 위치한 실물모형을 Test-bed로 선정하였고, 반사율 0.17의 WPC에 PCM을 삽입한 PCM Cool Roof System을 변수에 따라 적용하였다. WPC에 PCM의 유무에 따른 결과, 플레이트 표면의 주간 최고온도는 단일 WPC가 42.2℃, PCM Cool Roof System은 41.4℃로 나타나 단일 WPC 온도가 높았고, PCM Cool Roof System과 비교 시 최대 0.8℃의 차이를 보였다.
- WPC+PCM 혼합재료를 지붕마감재에 적용할 경우, 일반 건축 마감재보다 표면 온도가 낮게 나타나고 있음을 확인했다.
- Melting Point가 44℃인 RT 44 PCM이 PCM을 사용하지 않은 단일 WPC보다 온도를 낮추고, 최고 온도 도달 시간을 지연시키는데 적절함을 확인했다.

㉡ 열성능 시뮬레이션을 통한 냉·난방부하 저감 성능 검증

- ‘EnergyPlus Ver. 8-5’ 프로그램을 사용하여 PCM Cool Roof System의 건물적용 예측 열성능 시뮬레이션 비교 분석에 앞서 PCM Cool Roof System의 시뮬레이션 입력 값을 도출하기 위해 축소모형실험과 Test-bed 실험의 실측데이터를 시뮬레이션과 비교 검토하여 적정성을 검증하였다. ‘Design Builder version 4.7’ 프로그램을 사용하여 시뮬레이션의 실험 모델을 축소모형 실험에 적용된 재료와 동일하게 적용하였으며, PCM의 특징인 온도별 잠열량 값은 시차주사 열량측정법(DSC)으로 측정하여 동일하게 적용하였다.
- 플레이트 표면 최고온도는 축소모형실험이 49.2℃로 시뮬레이션보다 0.2℃ 높게 나타났고, 실험체 천장 최고온도는 축소모형실험이 35.8℃로 시뮬레이션보다 2.8℃ 높게 나타남
- 플레이트 표면 최고온도는 실물모형실험이 40.1℃로 시뮬레이션보다 2.9℃ 높게, 실험실 천장 최고 온도는 실물모형실험이 23.6℃로 시뮬레이션보다 0.9℃ 높게, 실험실 실내 최고 온도는 실물모형실험이 23.1℃로 시뮬레이션보다 0.4℃ 높게 나타남
- 따라서, 시뮬레이션은 실제의 축소모형실험과 실물모형실험을 적절하게 모사하고 있으며, PCM Cool Roof System의 입력 값은 적절한 것으로 판단된다.

㉢ Design Builder활용 시뮬레이션 분석

- ‘PCM cool roof system’ 적용 시 단지 유형별 냉방에너지 소비량 저감 효과를 분석하기 위하여 ‘Design Builder version 4.7’ 프로그램을 사용해 건물의 외피 모델링 및 HVAC 시스템, 스케줄 입력 등을 수행하였다. 분석 대상은 저층고밀의 업무 단지와 고층저밀의 아파트(주거) 단지로 분류하였으며 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.
- 상업단지의 냉방에너지 소비량은 PCM cool roof system 미적용에 비해 PCM cool roof system을 적용했을 경우 연간 냉방에너지 소비량이 2.9% 절감의 효과를 나타냈으며 평균적인

단일건물의 냉방에너지 피크 소비량에 6.7%의 절감을 보였다.

- 아파트주거단지의 냉방에너지 소비량은 PCM cool roof system 미적용에 비해 PCM cool roof system를 적용했을 경우 연간 냉방에너지 소비량이 0.15% 절감의 효과를 나타냈으며, 평균적인 단일건물의 냉방에너지 피크 소비량에서는 3.7%의 절감을 보였다.
- 연간 냉방에너지 소비량은 아파트주거단지보다 옥상면적이 약 4배 넓은 상업단지에서 약 19배의 절감폭을 보였다.
- 이는 PMC Cool Roof System이 건물의 옥상에 적용되므로 지붕면적의 합이 큰 도심지 내 고밀도지역에서 효과가 뚜렷한 것으로 사료 된다.

④ 기류분석 시뮬레이션 열섬현상 저감 효과 분석

- CFD 시뮬레이션을 통해 업무 단지와 주거 단지의 여름철 및 겨울철 온도 분포도를 비교·분석하였다. 온도 분포의 수평 단면과 수직 단면을 통해 분석한 결과는 다음과 같다.
- 여름철과 겨울철 지붕 표면온도가 각각 6.8℃, 11℃ 줄어들었을 때, 온도 분포도 상에서 고온 지점의 비율이 감소하였고, 건물 중심에서의 열전달 효과도 비교적 감소하였다.
- 건물 밀도가 높은 업무 단지에서 열섬현상 저감 효과가 주거 단지(아파트)보다 비교적 뚜렷하게 나타난 것으로 분석되었으며, 이에 따라 PCM cool roof system의 건물의 옥상 적용 시 열섬현상 저감 효과를 확인하였다.
- 건물 밀도가 높은 도심지에서 효과가 더욱 크게 나타날 것으로 사료 된다.

나) PCM Cool Roof System의 설계기준(안) 개발

- 연구내용을 바탕으로 PCM Cool Roof System의 적용성 향상을 위한 설계기준(안)을 제시하였다. PCM Cool Roof System의 주요 적정설계방안은 다음과 같다.
- PCM의 상변화온도에 대한 물성치 분석 및 반사율에 따른 PCM종류별 건축 마감재 표면온도 실험결과를 고려하여 Packing type PCM 제작에 사용되는 PCM은 상변화온도가 44℃인 Rubitherm®사의 n-Paraffin 계열 RT44 PCM을 사용하였다.
- PCM의 잠열량은 241/g 이므로 충분한 잠열량 확보를 위해 1팩 당 35g이상으로 제작
- 액체 상태의 PCM을 보관하기 위해 액체가 새어나가지 않도록 패킹(Packing)하여 구조체에 그대로 삽입하였다.
- 패킹의 손상시의 상누출을 대비해 추가적인 실링부재를 사용할 수 있으며, 패킹 소재는 열전도율이 높아 열전달과정에서 손실이 적고 내구성 및 내열성이 높은 소재로 제작하였다.
- WPC내 중공층으로의 외기도입을 최소화하기 위해 WPC의 끝부분에는 별도의 cap을 장착하여 마감하였다.
- 설계기준(안)의 개발로 PCM cool roof system에 대하여 전문지식이 적은 사람도 쉽게 적용 가능하며, 효율적인 유지관리를 통해 궁극적으로 시스템의 수명연장에 기여하는 것으로 사료된다.

다) PCM cool roof system 활용을 위한 PCM의 최적 적용 방안 분석 및 제안

① Energy plus 시뮬레이션 분석을 통한 최적의 PCM 적용방안 제안

- 반사율, PCM 적용 유무, PCM의 상변화온도 범위를 변수로 CASE Study를 진행하였으며 그

결과는 다음과 같다.

- 반사율 0.4에 상변화온도가 30℃인 PCM을 적용하면 여름철 도시열섬현상 저감효과와 겨울철 난방부하 저감효과를 동시에 가져오며, 표면온도 저감을 고려하였을 때 최적의 적용방안이라고 사료 된다.
-

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 연구개발성과 평가

(1) 총괄 성과점검 기준표

구 분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		최종 성과점검기준							해당 기관	양적 성과목표
					질적 성과지표		목 표 치	달 성 치	측장방법	검증 방법	가중 치		
주 관	A	PCM Cool Roof System 개발을 위한 pilot 플레이트 개발	A-1	Pilot플레이트 모듈 제작	①	모듈설계안	1건	1건	플레이트단면도	보고서	3	중앙 대	<u>특허: 출원 1 건</u> <u>등록 1 건</u> <u>논문: 1 건</u> <u>학술발표: 3 건</u> <u>시제품: 1 건</u> <u>SW: 1 건</u> <u>기타: 1 건</u>
					②	경제성평가	1건	1건	편익비용분석	보고서	3		
	B	상안정 PCM 축열 플레이트 개발	B-1	Macro-packed PCM 제조 및 축열 성능 향상 방안 연구	①	PCM의 대용량 적용 방안 도출	1건	3건	대용량 패킹형 PCM 제조와 열전해석을 통한 열적성능 분석	보고서	2	중앙 대	<u>특허: 출원 1 건</u> <u>등록 1 건</u> <u>논문: 3 건</u> <u>시제품: 1 건</u> <u>SW: 1 건</u> <u>기타: 1 건</u> <u>학술발표: 6 건</u>
					②	PCM의 축열 성능 향상 방안 고찰	1건	4건	이중 PCM 및 혼합 PCM의 열적 성능 분석을 실시하여 기존 성능과 비교 분석	보고서	2		
	C	PCM Cool Roof System의 에너지절감 효과 및 성능검증	C-1	에너지 효율 분석	①	실내온도 변화 검증 (평균온도 5℃ 저감)	1건	1건	축소모형실험을 통해 일간평균온도 변화 분석	보고서	2	중앙 대	<u>특허: 출원 1 건</u> <u>등록 1 건</u> <u>논문: 1 건</u> <u>시제품: 1 건</u> <u>SW: 1 건</u> <u>학술발표: 4 건</u>
					②	건물 적용에 따른 에너지 해석 (표준건물 대비 연간에너지 5% 저감)	1건	1건	에너지 시뮬레이션을 실시하여 기존모델 대비 연간에너지 저감량 분석	시뮬레이션 분석	2		
	D	PCM Cool Roof System 설계기준안	D-1	설계기준안 성능평가	①	설계기준(안) 성능평가	1건	1건	에너지 시뮬레이션 분석	보고서	2	중앙 대	<u>특허: 출원 1 건</u> <u>등록 1 건</u> <u>논문: 3 건</u> <u>시제품: 1 건</u> <u>SW: 1 건</u> <u>학술발표: 3 건</u>
					②	설계지침 작성	1건	1건	설계지침 작성건수	설계지침	1		
공 동	E	상안정 PCM 축열 플레이트 개발	E-1	PCM 모델 개발	①	표면온도 20%저감	1건	1건	현장 실험	보고서	1	승실 대	<u>특허: 출원 1 건</u> <u>등록 1 건</u> <u>논문: 2 건</u> <u>시제품: 1 건</u> <u>SW: 1 건</u> <u>학술발표: 10 건</u>
					②	PCM축열 플레이트 특허출원	1건	1건	특허 출원 건수	특허출원	2	승실 대	
계											20		<u>특허: 출원 3 건</u> <u>등록: 1 건</u> <u>논문: 10 건</u> <u>설계기준(안): 1 건</u> <u>기술실시계약: 1 건</u> <u>학술발표: 26 건</u>

(2)연차별 성과점검 기준표

[1차 연도]

구분		핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						해당 기관	양적 성과목표	
						질적 성과지표		목 표 치	달 성 치	측정방법	검증 방법			가중치
주관	A	PCM Cool Roof System 개발을 위한 pilot 플레이트 개발		A-1	Pilot 플레이트 모듈 제작	①	모듈 설계안	1건	1건	플레이트 단면도	보고서	10	중앙대	<u>특허: 출원 건</u> <u>논문: 1 건</u> <u>학술발표: 3 건</u> <u>시제품: 1 건</u> <u>SW: 1 건</u> <u>기타: 1 건</u>
						②	경제성 평가	1건	1건	편익비용 분석	보고서	10		
계												20		<u>특허: 출원 건</u> <u>논문: 1 건</u> <u>학술발표: 3 건</u> <u>시제품: 1 건</u> <u>SW: 1 건</u> <u>기타: 1 건</u>

[2차 연도]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수	
					질적 성과지표	목 표 치	달 성 치	측정방법	검 증 방 법	가 중 치		
주관	B	상안정 PCM 축열 플레이트 개발	B-1	Macro-pack ed PCM 제조 및 축열 성능 향상 방안 연구	①	PCM의 대용량 적용 방안 도출	1건	3건	대용량 패킹형 PCM 제조와 열전해석을 통한 열적성능 분석	보고서	5	<u>특허: 출원 1 건</u> <u>등록 1 건</u> <u>논문: 3 건</u> <u>시제품: 1 건</u> <u>SW: 1 건</u> <u>기타: 1 건</u> <u>학술발표: 6 건</u>
					②	PCM의 축열 성능 향상 방안 고찰	1건	4건	이중 PCM 및 혼합 PCM의 열적 성능 분석을 실시하여 기존 성능과 비교 분석	보고서	5	
	C	PCM Cool Roof System의 에너지 절감 효과 및 성능검증	C-1	에너지 효율 분석	①	실내온도 변화 검증 (평균온도 5℃ 저감)	1건	1건	축소모형실험을 통해 일간평균온도 변화 분석	보고서	5	<u>특허: 출원 1 건</u> <u>등록 1 건</u> <u>논문: 1 건</u> <u>시제품: 1 건</u> <u>SW: 1 건</u> <u>학술발표: 4 건</u>
					②	건물 적용에 따른 에너지 해석 (표준건물 대비 연간에너지 5% 저감)	1건	1건	에너지 시뮬레이션을 실시하여 기존모델 대비 연간에너지 저감량 분석	시물레 이션 분석	5	
계											20	<u>특허: 출원 2 건</u> <u>등록 1 건</u> <u>논문: 4 건</u> <u>시제품: 1 건</u> <u>SW: 1 건</u> <u>기타: 1 건</u> <u>학술발표: 10 건</u>

[3차 연도]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
					질적 성과지표		목표 치	달성 치	측정방 법	검증 방법	가 중 치	
주관	D	PCM Cool Roof System 설계기준안	D-1	설계기준안 성능평가	①	설계기준(안) 성능평가	1건	1건	에너지 시뮬레이션 분석	보고서	6	<u>특허: 출원 1 건</u> <u>등록 1 건</u> <u>논문: 3 건</u> <u>사제품: 1 건</u> <u>SW: 1 건</u> <u>학술발표대회: 3 건</u>
					②	설계지침 작성	1건	1건	설계 지침 작성 건수	설계지 침	4	
공동	E	상안정 PCM 축열 플레이트 개발	E-1	PCM 모델 개발	①	표면온도 20%저감	1건	1건	현장 실험	보고서	4	<u>특허: 출원 1 건</u> <u>등록: 1 건</u> <u>논문: 2 건</u> <u>사제품: 1 건</u> <u>SW: 1 건</u> <u>학술발표대회: 10 건</u>
					②	PCM축열 플레이트 특허출원	1건	1건	특허 출원 건수	특허출 원	6	
계											20	<u>특허: 출원 1 건</u> <u>등록 1 건</u> <u>논문: 5 건</u> <u>설계기준(안): 1 건</u> <u>기술실시계약: 1 건</u> <u>학술발표: 13 건</u>

(3) 총괄 핵심 연구 성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형 ¹⁾	연구기관	해당 연차	TRL
1	PCM Cool Roof System 개발을 위한 pilot 플레이트 개발	PCM을 혼합하기 전, 표면온도 저감을 위해 플레이트의 프로토타입을 개발	장비 · 장치	중앙대학교	‘14.07 ~ ‘15.07 (1년)	TRL 5
2	상안정 PCM 축열 플레이트 개발	축열성과 에너지절감성을 갖춘 상안정 PCM 축열플레이트 개발	재료 · 자재	숭실대학교	‘15.07 ~ ‘17.07 (2년)	TRL 5
3	PCM Cool Roof System의 에너지 절감 효과 및 성능검증	PCM Cool Roof System의 축열성을 보완할 경우, 건축물의 에너지 효율을 향상시킬 수 있으며, 이를 검증하기 위해 에너지 절감 특성을 분석하는 연구 수행	공법 · 기법	중앙대학교	‘15.07 ~ ‘16.07 (1년)	TRL 5
4	PCM Cool Roof System 설계기준(안)	기존건축물에 ‘PCM Cool Roof System’ 을 적용하기 위한 설계 기준안을 작성하여, 본 기술의 보급 및 확산 유도	정책 · 제도	중앙대학교	‘16.07 ~ ‘17.07 (1년)	TRL 8
5	상안정 PCM 축열 플레이트 개발	상안정 PCM을 활용한 축열성능이 향상된 축열 플레이트 (Packing type PCM을 이용하여 축열성능 향상과 열섬현상 저감성능 평가)	재료 · 자재	숭실대학교	‘15.07 ~ ‘17.07 (2년)	TRL 8

(4) 연차별 핵심 연구 성과

[1차 연도]

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형 ¹⁾	연구기관	해당 연차	TRL
1	PCM Cool Roof System 개발을 위한 pilot 플레이트 개발	PCM을 혼합하기 전, 표면온도 저감을 위해 플레이트의 프로토타입을 개발	장비 · 장치	중앙대학교	‘14.07 ~ ‘15.07 (1년)	TRL 5

[2차 연도]

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형 ¹⁾	연구기관	해당 연차	TRL
1	상안정 PCM 축열 플레이트 개발	축열성과 에너지절감성을 갖춘 상안정 PCM 축열플레이트 개발	재료 · 자재	숭실대학교	‘15.07 ~ ‘17.07 (2년)	TRL 5
2	PCM Cool Roof System의 에너지 절감 효과 및 성능검증	PCM Cool Roof System의 축열성을 보완할 경우, 건축물의 에너지 효율을 향상시킬 수 있으며, 이를 검증하기 위해 에너지 절감 특성을 분석하는 연구 수행	공법 · 기법	중앙대학교	‘15.07 ~ ‘16.07 (1년)	TRL 5

[3차 연도]

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형 ¹⁾	연구기관	해당 연차	TRL
1	PCM Cool Roof System 설계기준(안)	기존건축물에 ‘PCM Cool Roof System’을 적용하기 위한 설계 기준안을 작성하여, 본 기술의 보급 및 확산 유도	정책 · 제도	중앙대학교	‘16.07 ~ ‘17.07 (1년)	TRL 8
2	상안정 PCM 축열 플레이트 개발	상안정 PCM을 활용한 축열성능이 향상된 축열 플레이트 (Packing type PCM을 이용하여 축열성능 향상과 열섬현상 저감성능 평가)	재료 · 자재	숭실대학교	‘15.07 ~ ‘17.07 (2년)	TRL 8

(5) 핵심 연구 성과별 설명

[1차 연도]

핵심성과1		
정의	PCM Cool Roof System으로 발전시키기 위한 pilot 플레이트	
목적	PCM을 혼합하기 전, 표면온도 저감을 위한 최적의 재료를 선정하여 플레이트의 프로토타입을 개발함	
성능목표	(기존기술 수준) 현재 지붕면의 표면온도 저감을 위해 일사의 반사율 및 방사율만을 고려하여 흡수된 열의 내부 열전달로 인한 에너지 소비는 고려하지 않음 (개발기술 수준) 플레이트의 열전도율을 고려하여 일사의 반사율을 고려하여 내부 열전달을 최소가 되도록 함	
성과달성 책임자 (소속기관)	이언구(중앙대)	
소요기간	’ 14.07 ~ ’ 15.07(1년0개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	PCM Cool Roof System 개발을 위한 플레이트의 프로토타입 선정 및 시작품 제작 여부	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	
	논문	SCI급 : 1건
	저작	
	S/W	
	신기술	
	기타	학술발표대회 : 3건

[2차 연도]

핵심성과 1		
정의	상안정 PCM을 활용한 축열성능이 향상된 축열 플레이트 (Macro-packed PCM을 이용하여 축열성능 향상과 열섬현상 저감성능 평가)	
목적	Cool roof system과의 기술적 연계성과 열섬현상 저감을 목적으로 함	
성능목표	(기존기술 수준) Macro-packed PCM (MPPPCM)에 대한 기존 성능 기준 없음 (개발기술 수준) MPPPCM의 물리적, 열적성능 및 전열해석 장비를 이용한 표면온도 저감 성능에 대한 객관적인 기술 수준	
성과달성 책임자 (소속기관)	김수민 (숭실대학교)	
소요기간	’ 15.07 ~ ’ 16.07(1년, 2년차)	
성과달성 확인방법	- 한 겹 또는 두 겹 MPPPCM의 전열해석 분석 - 피크온도 저감 및 타임랙을 통한 열섬현상 저감 성능 확보 - 혼합 PCM의 제조 및 최적의 PCM 선정에 대한 고찰	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건
	논문	SCI급 : 2건, 학술지 : 1건
	저작	
	S/W	
	신기술	
	기타	학술발표대회 : 6건

핵심성과 2		
정의	PCM Cool Roof System의 에너지절감 효과 및 성능검증	
목적	PCM Cool Roof System을 지붕면에 설치함으로써, 지붕표면온도 저감효과와 축열효과를 이용하여 냉방 피크부하를 줄이고, 건축물의 에너지 효율을 향상할 수 있음을 보이고자 함	
성능목표	(기존기술 수준) 기존건물은 열섬저감을 위해 옥상녹화가 주로 적용되었으며, 국내 쿨루프(Cool roof) 적용은 초보적인 단계임 (개발기술 수준) : - Cool Roof에 PCM을 결합하여 지붕 표면온도를 저감시켜 열섬현상 완화 - PCM의 축열성능을 이용하여 건물 냉방 피크부하를 줄임	
성과달성 책임자 (소속기관)	박진철(중앙대학교)	
소요기간	’ 15.07 ~ ’ 16.07(1년0개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	연구보고서를 통한 PCM Cool Roof System의 에너지 절감 달성 여부 확인 및 환경 성능 분석 결과 확인	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건
	논문	SCI급 : 1건
	저작	
	S/W	
	신기술	
	기타	학술발표대회 : 4건

[3차 연도]

핵심성과 1		
정의	PCM Cool Roof System 설계기준(안) 작성	
목적	기존건축물에 ‘PCM Cool Roof System’을 적용하기 위한 설계 기준안을 작성하여, 본 기술의 보급 및 확산 유도	
성능목표	(기존기술 수준) 기존건축물의 지붕 외피에 상변화물질(PCM)을 적용 가능한 설계 방법 및 기준이 전무한 상태 (개발기술 수준) PCM Cool Roof System 설계기준안 작성을 통하여 기존건축물에 전반에 걸쳐 적용 가능한 설계기준 도출	
성과달성 책임자 (소속기관)	박진철(중앙대학교)	
소요기간	’16.07 ~ ’ 17.07 (1년0개월, 3년차)	
성과달성 확인방법	작성 완료된 설계기준안을 통한 적용 가능성 여부 확인	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건
	논문	학술지 : 2건
	저작	
	S/W	
	설계기준(안)	설계기준(안) 제시 : 1건
	기타	학술발표대회 : 3건

핵심성과 2		
정의	상안정 PCM을 활용한 축열성능이 향상된 축열 플레이트 (혼합 PCM 및 Macro-packed PCM을 이용한 축열성능 향상과 열섬현상 저감성능 평가)	
목적	Cool roof system과의 기술적 연계성과 열섬현상 저감을 목적으로 함.	
성능목표	(기존기술 수준) 같은 계열 또는 다른 계열 PCM 간의 혼합 PCM에 대한 기존 성능 분석 연구 미흡 (개발기술 수준) 혼합 PCM을 통해 열섬현상 저감을 위한 최적의 혼합 PCM 제조 / 혼합 PCM을 적용한 MPPCM 및 축열 플레이트 개발	
성과달성 책임자 (소속기관)	김수민 (숭실대학교)	
소요기간	' 15.07 ~ ' 17.07 (3년, 2 - 3년차)	
성과달성 확인방법	혼합 PCM의 제조 및 최적의 PCM 선정 혼합 PCM이 적용된 MPPCM 제조 및 축열 플레이트의 전열해석 분석	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	등록 : 1건
	논문	SCI(E) : 3건
	저작	
	S/W	
	기술실시계약	기술실시계약 : 1건
	기타	학술발표대회 : 10건

나. 총 연구성과 목표 및 달성도

[1차 연도]

구분		목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	1	100%	
	비SCI			
	계	1	100%	
국내 논문 게재	SCI			
	비SCI			
	계			
특허 출원	국내	1	100%	
	국외			
	계	1	100%	
특허 등록	국내			
	국외			
	계			
인력 양성	석사			석사 1명
	박사			
	계			
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문			
	연구시설·장비			
	기술요약정보			
	생명자원	생명정보		
		생물자원		
		신품종		
	소프트웨어			
기타	화학물			
	시제품			
	성과 홍보			
	일자리 창출			

[2차 연도]

구분		목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	1	300%	3건
	비SCI			
	계	1	300%	3건
국내 논문 게재	SCI			
	비SCI	2	50%	
	계	2	50%	KCI : 1건
특허 출원	국내	1	200%	초과달성 : 2건
	국외			
	계	1	200%	초과달성 : 2건
특허 등록	국내			
	국외			
	계			
인력 양성	석사	1	200%	석사 2명
	박사			
	계	1	200%	
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문			
	연구시설·장비			
	기술요약정보			
	생명자 원	생명정보		
		생물자원		
		신품중		
	소프트웨어			
기타	화학물			
	시제품			
	성과 홍보			
	일자리 창출			

[3차 연도]

구분		목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	1	300%	3건
	비SCI			
	계	1	300%	
국내 논문 게재	SCI			
	비SCI	1	200%	
	계	1	200%	KCI : 2건
특허 출원	국내	1	100%	
	국외			
	계	1	100%	
특허 등록	국내			
	국외			
	계			초과달성 : 1건
인력 양성	석사			초과달성 : 석사 2명
	박사			
	계			
기술 이전	계약 건수	1	100%	
	계약액	매출액의 3%		
	징수액			
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문			
	연구시설·장비			
	기술요약정보			
	생명 자원	생명정보		
		생물자원		
		신품중		
	소프트웨어			
기타	화학물			
	시제품			
	성과 홍보			
	일자리 창출			

[최종 달성도]

구분		목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	3	233%	7건
	비SCI			
	계	3	233%	
국내 논문 게재	SCI			
	비SCI	3	100%	
	계	3	100%	KCI : 3건
특허 출원	국내	3	100%	
	국외			
	계	3	100%	
특허 등록	국내			
	국외			
	계			초과달성 : 1건
인력 양성	석사	1	500%	
	박사			
	계	1	500%	석사 5명
기술 이전	계약 건수	1	100%	
	계약액	매출액의 3%		
	징수액			
국제 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
국내 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문			
	연구시설·장비			
	기술요약정보			
	생명자 원	생명정보		
		생물자원		
		신품종		
	소프트웨어			
기타	화학물			
	시제품			
	성과 홍보			
	일자리 창출			

2. 관련 분야 기여도

성과 목표	자체 평가
PCM Cool Roof System 개발을 위한 pilot 플레이트 개발	- 지붕면의 표면온도 저감을 위해 기존의 일사의 반사율 및 방사율만을 고려하던 기술에서 국내 최초 PCM Cool Roof System을 플레이트형태로 개발 - PCM Cool Roof System의 플레이트는 표면온도 저감에 기여하였고 특히, 에너지저감에도 기여함.
상안정 PCM 축열 플레이트 개발	- PCM을 옥상표면에 실제 사용하기 위하여 상안정상태로 개발 - 기존의 PCM 대비 열적거동 및 표면온도변화 폭을 줄임
PCM Cool Roof System의 에너지절감 효과 및 성능검증	- PCM Cool Roof System 설계 및 제작 - 인공기후동 실험을 통한 성능 검증 - Test-Bed를 통한 현장 적용 - PCM Cool Roof System적용에 따른 CFD 시뮬레이션을 통한 도심지역의 온실가스 저감 확인
PCM Cool Roof System 설계기준(안)	- 특허안 등록을 근거로 설계기준(안) 제시 - PCM Cool Roof System의 구성방안 - PCM Cool Roof System의 시공 및 적용방안 - PCM Cool Roof System의 유지관리 및 보수 등에 대한 이해를 도울 수 있는 자료로 활용

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 연구개발성과 활용계획

가. 상안정 PCM 축열 플레이트 개발

- PCM을 건축재료에 적용하기 위해서는 고체에서 액체, 액체에서 고체로 상(Phase)이 변할 때, PCM이 누출이 되지 않도록 상안정화 과정이 필수이다. 1차 년도에는 비교적 작은 사이즈의 상안정 PCM을 제조/수급하여 고축열 석고보드 및 축열 페인트를 제조하였으나, 최종 제조된 축열 건축자재의 잠열량은 최초의 순수한 PCM이 가지는 잠열량의 15% 수준밖에 발현될 수 밖에 없었고, 적외선 조사 실험 분석 결과, 표면온도 저감 효과가 매우 미비한 것을 확인하였다.
- 이를 토대로 2,3차 년도 연구에서는 대용량 포장 방법으로 PCM을 상안정화하는 방법에 대해 고찰하였으며, 연구과제의 최종 축열 플레이트의 형태는 대용량 PCM (Macro-Packed PCM: MPPPCM)을 스틱형태로 제조하여 중공형 합성목재 (Wood Plastics Composites: WPC) 내부에 PCM을 적용하여 지붕층 표면온도를 크게 감소시킬 수 있었다.
- 최종 PCM 축열 플레이트의 형태는 지붕에만 적용 가능한 것이 아니라, 야외 테라스, 목재 데크 등이 사용되는 곳에 적용하여 도시 전체의 온도를 낮추는데 큰 영향을 줄 수 있을 것으로 기대한다. 또한 PCM의 종류에 따라 다양한 상변화온도를 갖는 MPPPCM의 제조가 가능하기 때문에 건축분야 뿐만 아니라 다양한 산업 분야에 적용될 가능성이 있다.
- 더 나아가 MPPPCM을 WPC 중공층에 넣는 형태가 아닌 알루미늄 패널 등을 이용하여 PCM을 대용량으로 적용한 단일화 제품으로 개발할 수 있고, 이를 실내에 적용하여 도시열섬현상 저감 효과 뿐만 아니라, 실내 온열쾌적감 증가 및 건물 냉난방에너지 감소 효과를 기대한다.

나. PCM Cool Roof System 성능평가 및 열섬현상 저감 효과 분석

- PCM Cool Roof System을 플레이트의 형태로 기존건물 및 신축건물 옥상에 적용이 용이하도록 설계하여 성능평가를 실시하고 궁극적으로 열섬효과 저감 효과를 확인하였다.
- 본 기술은 경량이면서 고강도의 마감재로 제작하여 하중의 영향을 감소시키고 구조적 안정성을 확보하였으며 이는 다양한 용도의 건축물에 적용 가능성을 보여주며 시스템 유지관리·보수의 어려움을 감소시켜 현 시점 대비 향후 PCM Cool Roof 적용성 확대에 이어질 수 있을 것이다.
- 또한, 개발기술의 열 성능평가 및 온실가스 저감 효과 분석을 위해 실시한 실험 결과를 바탕으로 PCM을 활용한 건축자재 및 관련분야의 다양하고 심도 높은 연구에 기초자료로 활용될 수 있고 관련 산업의 활성화에 크게 기여할 것이다.
- 더 나아가 시제품 개발 시 합리적인 성능 발현이 가능하도록 성능지침으로서 활용 할 수 있을 것이며 궁극적으로 건물에너지절감과 온실 가스 저감 효과로 인한 열섬현상 저감을 기대 할 수 있다.

다. PCM Cool Roof System 설계 기준(안)

- 현재 기존 건축물의 지붕 외피에 상변화물질(PCM)적용이 가능한 설계 방법 및 기준은 전 무한 상태이며, 본 개발 기술 적용 시 설계 및 시공뿐만 아니라 지속적 유지관리를 위한 가이드라인으로 본 설계 기준(안) 작성을 통하여 기존건축물 전반에 걸쳐 적용 가능한 PCM Cool Roof System 적용 설계 기준안을 작성하여 본 기술의 보급 및 확산을

유도하고자 한다.

- 또한, 현업에 종사하는 실무자뿐만 아니라 관심을 갖는 일반인이 본 설계 기준(안)에 따라 PCM Cool Roof System의 기본개념·성능·시공방안·유지관리 및 보수·전문용어에 대한 이해를 도울 수 있는 자료로 활용할 수 있다.

2. 연구개발성과 기술개요 및 실용화 방안

가. 기술개요

- 본 기술은 열섬현상 저감 및 건물에너지 절감 효과가 있는 경량 구조의 지붕 마감재로서, 상변화물질(PCM:Phase Change material)을 WPC(Wood Plastic Composite)에 적용한 제품이다. 경량으로 제작되어 기존건축물에도 적용이 가능하고 현장에서 조립하여 사용할 수 있도록 사전에 제작된 형태로 설치 및 시공이 용이하도록 제작되어 많은 건물에 시공 가능하다. PCM의 잠열 흡수 및 방사하는 특성을 활용하여 지붕 표면 온도 및 건물의 내부 온도 변화의 폭을 줄임으로 열섬현상과 건물의 냉난방에너지 소비 절감 효과를 기대할 수 있다.
- 기존에 많이 사용되는 옥상녹화는 토양의 적재 하중 이내에서 소생태계를 조성하기 위한 계획 및 설계와 식재계획과 유지관리계획에 대한 다양한 문제점들로 인하여 기존 건축물에 대해 옥상녹화 시스템을 쉽게 적용하지 못하고 있다.
- 본 기술의 차별성은 지붕표면온도 저감(Cool Roof) 및 피크부하시간지연(PCM)을 통해서도 열섬현상에 대한 영향을 감소시키면서 기존의 건축물에 적용이 가능한 시스템이다.

나. 기술적·경제적 효과

(1) 기술적 효과

- 지붕 표면온도 저감 및 피크부하 시간 지연을 통해 도시 열섬현상 완화 가능
- 냉난방부하저감에 따른 제로에너지 건축물로의 패러다임 전환을 위한 에너지 절약 및 에너지 수요관리 정책에 부응

(2) 경제적 효과

- 열섬현상 및 건물에너지 소비 절감을 통한 경제적 이득 효과
- 국내 녹색건축 시장이 2030년까지 최대 32%까지 비중 확대 예상되기 때문에 이와같은 시장 진출 기대

다. 수요처 및 권리현황

(1) 수요처

수요처	적용처
· 옥상녹화 업체 · 시공 회사	· 기존 건물 및 신축건물
ex) 이안랜드, 현대건설	ex)도심지 건물

(2) 권리현황

특허명	특허번호	비고
■ 대용량 포장된 상변화 물질이 적용된 바닥 난방 구조 시공방법 및 축열 바닥 난방 구조	10-1746433	등록
■ 상변화 물질의 잠열과 태양열을 이용하는 건물의 열교환 시스템	10-2016-0003378	출원
■ 지붕용 마감재	10-2017-0045057	출원

(3) 기술실시계약 현황

- 계약명 : 상변화 물질의 잠열과 태양열을 이용하는 건물의 열교환 시스템
- 계약당사자 : 갑 - 중앙대학교 산학협력단
을 - (주)구성이엔드씨

기술이전계약서



그림 5.1 기술이전계약서

라. 실용화 한계점 및 대책

(1) 한계점 및 해결방안

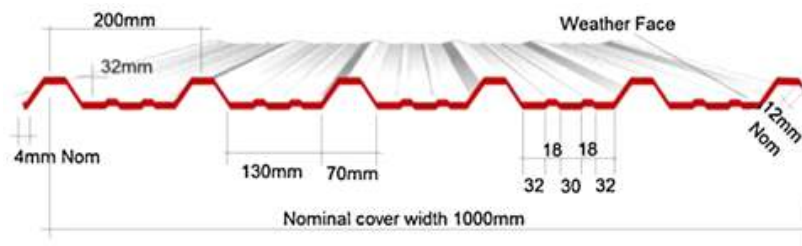
- 현재 연구단계에서의 Packing type PCM은 합성비닐 또는 폴리에틸렌 재질의 실험용이기 때문에 PCM 유출의 위험이 있다. 따라서, 이를 보완할 수 있는 스테인레스스틸 또는 알루미늄으로의 대체품이 필요
- 기존 cool roof의 동절기 단점을 극복하기 위하여 본 연구 성과물인 PCM cool roof system을 개발했다. 하지만, 동절기의 단점이 완전히 극복되지 않았기 때문에 이를 개선할 수 있는 방안(시온안료 등)을 도출해야 할 필요성이 있음

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

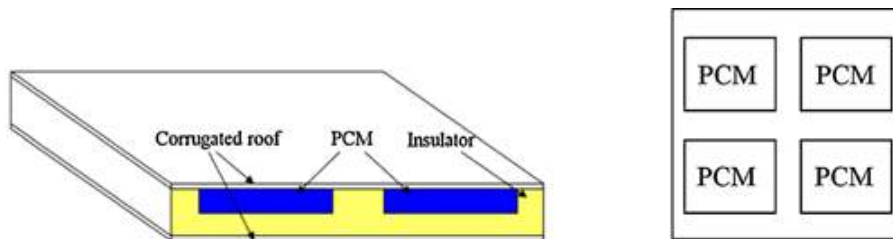
1. PCM의 건물 적용 연구 동향

가. 문헌고찰을 통한 열섬현상 저감 관련 PCM 적용 사례 분석

Chou et al.은 일반적인 물결모양 지붕(그림 6.1)과 단열재가 적용된 지붕, 단열재와 PCM이 추가된 지붕(그림 6.2)에 대해 열적 성능을 평가하였다. 실험은 지붕층의 위쪽 표면온도와 아래쪽 표면온도를 측정하고, 추가적으로 실내온도를 측정하는 것으로 진행되었다. 실내 온도 분석 결과, 단열재와 PCM이 같이 적용된 지붕에서 가장 낮은 피크 온도를 보였고, 단열재가 추가되지 않은 일반적인 물결모양 지붕의 경우에는 실내온도가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, PCM이 들어간 단열 지붕이 약 52.7%의 에너지 저감율을 보였고, 단열재만 적용된 지붕은 약 43.1%의 에너지 저감율을 보임을 알 수 있었다. 결과적으로 PCM을 적용하는 것이 지붕에서의 에너지 저감효과를 가져올 수 있음을 도출해 내었고 뿐만 아니라, 지붕층에 다양한 형태로 PCM을 적용하여 열적 성능을 높일 수 있음을 보여주었다.

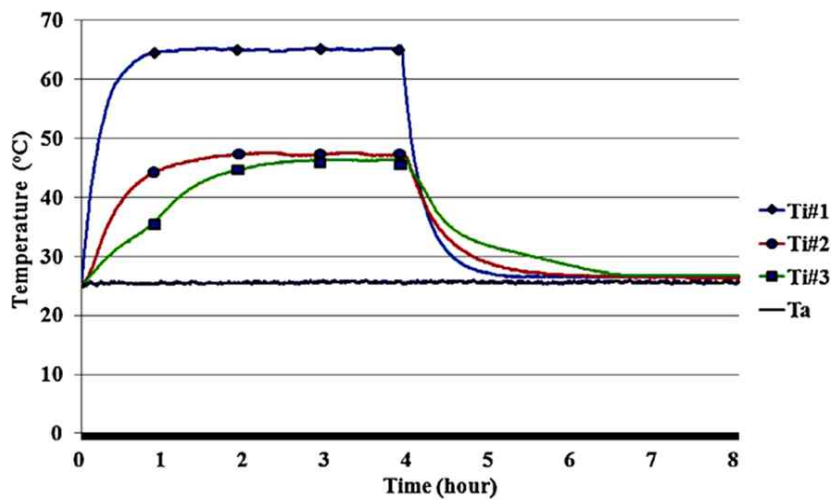


(그림 6.1) 일반적인 물결모양 지붕



(그림 6.2) PCM이 들어간 단열 지붕

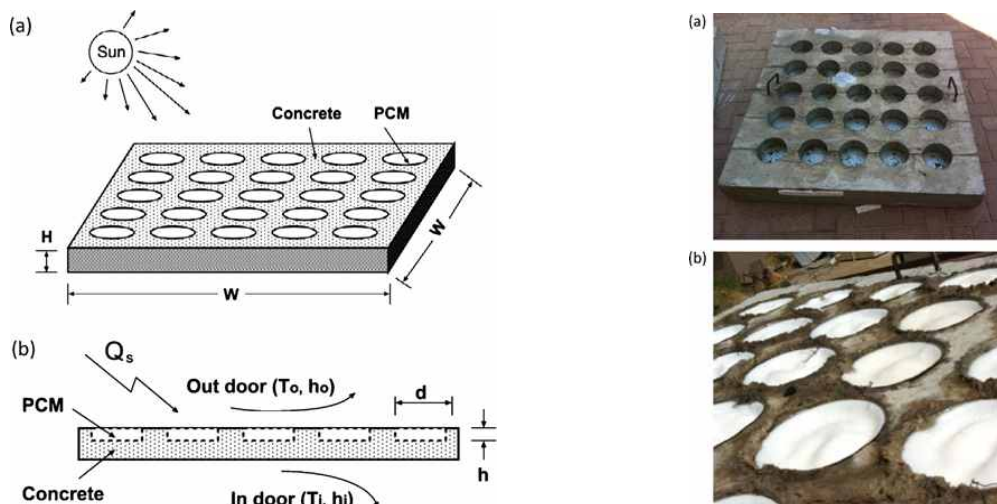
1) Alqallaf, H.J. & Alawadhi, E.M. (2013). Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain. *Energy and Buildings*, 61, 73-80.



#1 = 일반적인 물결모양 지붕 single layer (단열 X)
 #2 = #1 + PU 15mm layer (단열 O)
 #3 = #1 + PU 15mm + PCM layer (단열 O)

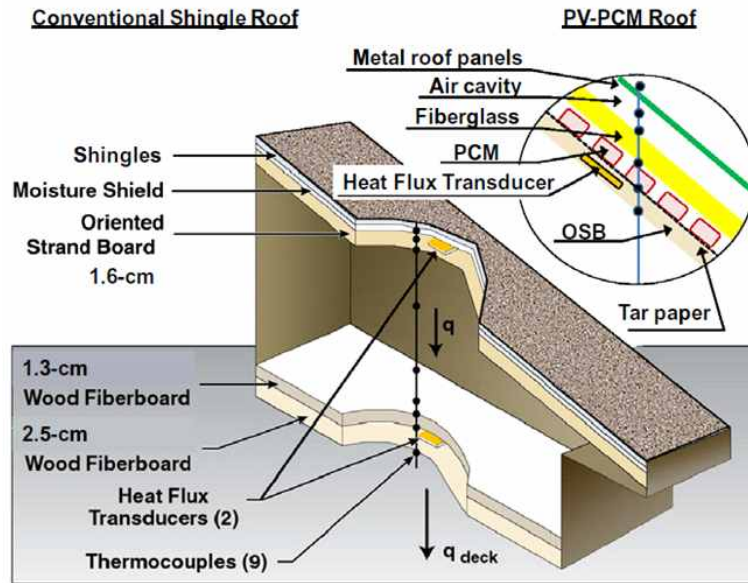
(그림 6.3) 지붕층에 따른 실내온도 분석결과

또 다른 연구 사례로 Alawadhi et al.¹⁾은 지붕층에 적용되는 콘크리트 구조내에 원기둥 및 원뿔형태로 PCM을 적용하여 PCM의 고체-액체로의 가역적인 반응에 있어 열적 효율을 최대로 끌어올리기 위한 최적안을 도출하였다. 실험에 사용된 PCM은 n-eicosane을 사용하였다. 결과론적으로 지붕층 콘크리트에 PCM을 적용하여 총 열류량의 39%를 저감하는 연구성과를 도출해내었다. 아래의 (그림 6.4)는 실험에 사용된 콘크리트 구조의 모식도 및 실제로 제작한 콘크리트 구조물을 보여준다.

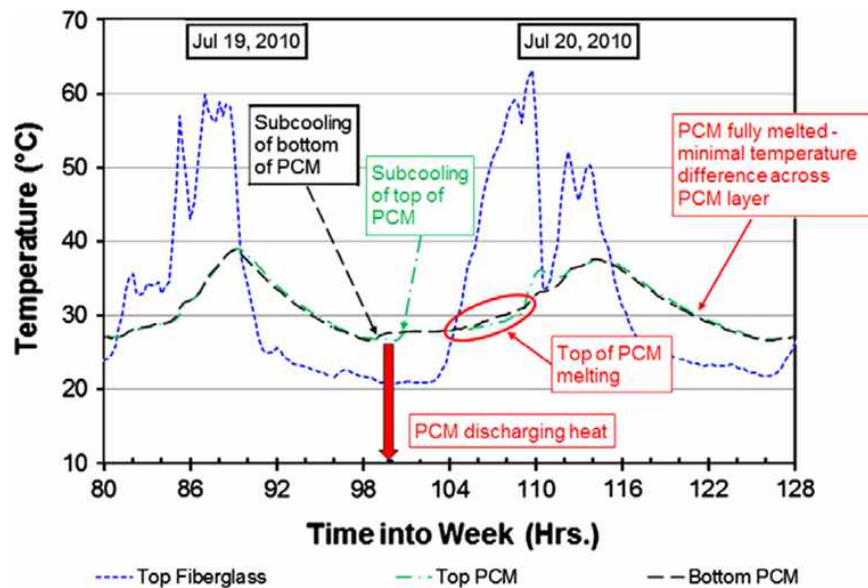


(그림 6.4) PCM 적용을 위한 지붕층 콘크리트 구조물의 모식도 및 Mock-up 이미지

또한 Kośny et al.은 Bio PCM을 적용하여 경사진 지붕층에 축열층을 구성하여 건물 내 냉난방 부하저감을 위한 연구를 수행하였다. 특히, PCM은 경사 지붕층의 태양광 패널이 들어가는 곳에 적용되었다. 결과적으로 PCM이 들어간 지붕층의 열류량이 90%정도 저감되는 것을 보여주었다. PCM이 들어간 경사진 지붕층의 모식도(그림 6.5)와 냉방시즌의 지붕층의 온도변화에 대한 결과는 (그림 6.6)에 나타내었다.



(그림 6.5) PCM이 들어간 경사 지붕 레이어 모식도



(그림 6.6) 냉방시즌 기준 지붕층의 온도변화

나) 적용 가능한 PCM 선정과 열적 성능 분석

1) 상변화물질(PCM)

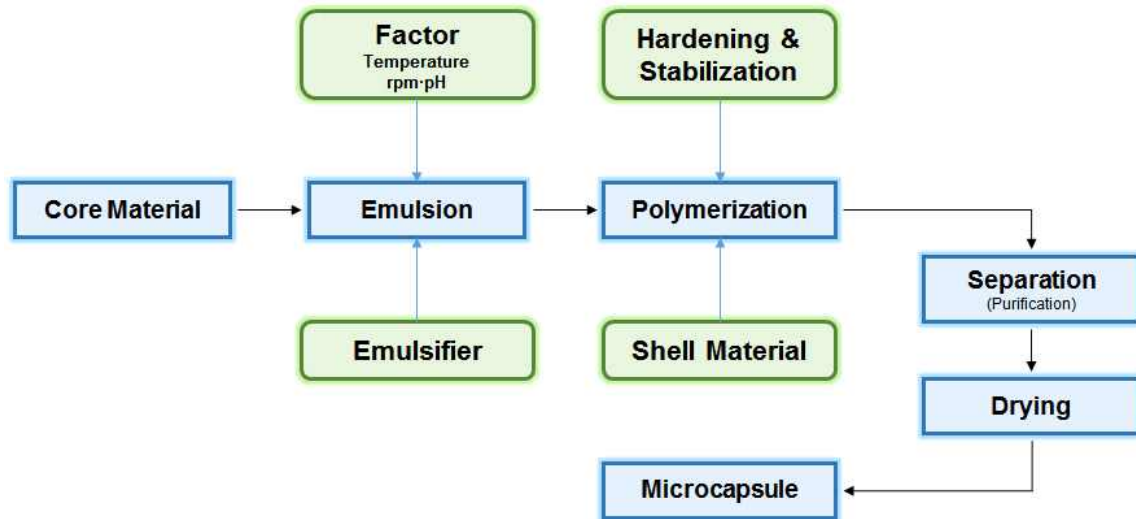
- PCM은 온도의 변화에 따라 상이 변하는 물질로, 물질이 고체에서 액체, 혹은 액체에서 고체로 상이 변할 때 잠열의 형태로 열에너지를 축적하는 특성을 지니는 물질을 말한다. 최근 PCM의 축열성능을 이용한 연구가 국내외에서 활발하게 이루어지고 있는 실정이며, 본 연구에서는 건물외피에 적용 가능한 도료 및 판상재 형태로서 도시열섬현상을 저감하기 위한 연구를 수행하였다. 적용된 PCM은 상누출을 방지하기 위하여 MPCM(Microencapsulated PCM; 캡슐화 PCM)을 사용하였다.

2) MPCM(Microencapsulated PCM; 캡슐화 PCM)

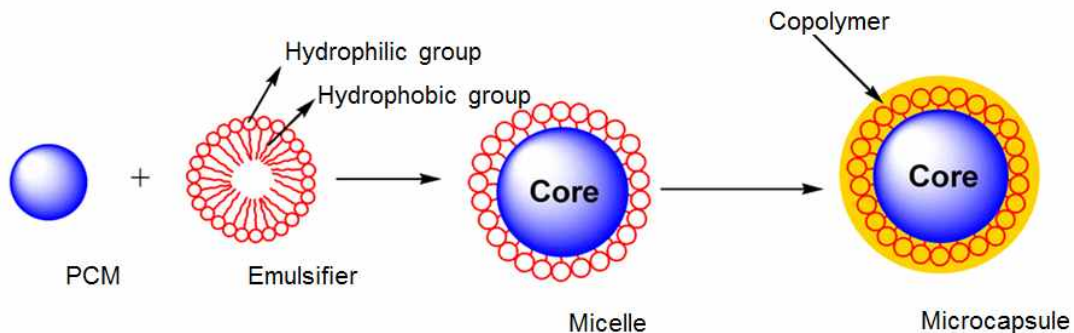
- MPCM 제조과정 분석
 - 일반적으로 MPCM은 Core material과 Shell material로 구성되어 있는데, 일반적으로 MPCM은 Core material에 유화제를 혼합한 후에 온도 조건과 pH 조건을 맞추어 에멀전화 시킨 상태에서 여기에 Shell material을 넣어줌으로서 polymerization

을 시키고 분산시켜 MPCM을 제조한다.

- 일반적으로 PCM의 마이크로 캡슐화 과정에서 PCM과 유화제가 혼합되는데, 이 과정에서 PCM에 유화제의 소수성인 부분이 달라붙게 되고 바깥부분은 친수성이 달라붙게 되고, 이 과정에서 구형의 입자를 띄게 되는데 이를 Micelle이라고 한다. 이 Micelle에 다시 shell material이 달라붙게 되어 캡슐레이션을 통한 MPCM이 제조된다.
- MPCM을 제조하는 방법은 이 외에도 Coacervation 및 Solgel 합성법 등 다양한 방법으로 제조가 가능하며, 국내외 많은 연구진들이 MPCM 제조 방법에 대한 연구를 수행하고 있다. (그림 6.7)는 일반적인 MPCM 제조방법에 대한 모식도를 보여준다.



(그림 6.7) Microcapsulated PCM 제조과정 모식도



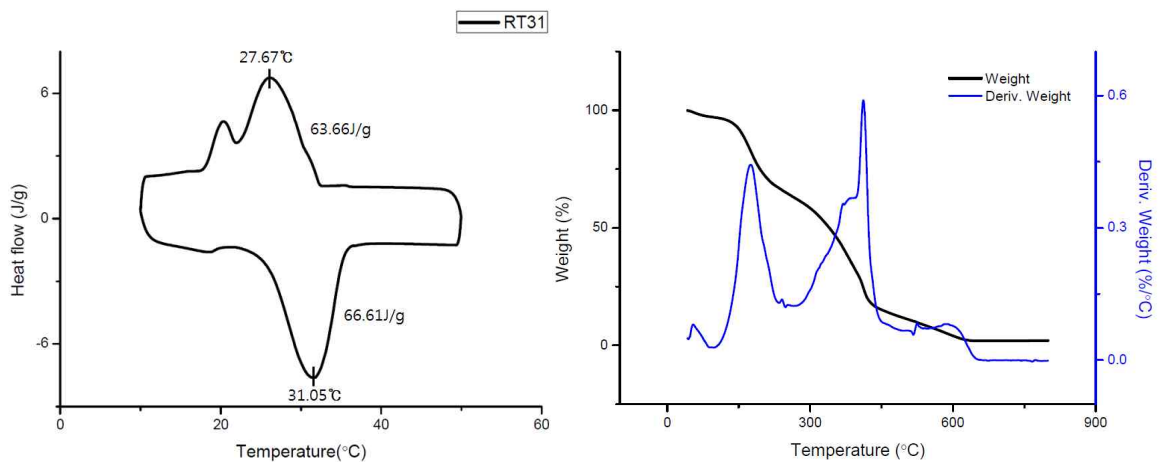
(그림 6.8) Microcapsulation과정에 따른 MPCM 형성과정 모식도

- MPCM(Microencapsulated PCM) 재료 분석
- 본 연구에서 사용된 PCM은 RT31이라는 물질로서 Rubitherm사에서 제조된 것을 사용하였다. MPCM은 심물질을 RT31, 벽물질을 멜라민으로 하는 캡슐형태의 것을 사용하였다. 순수한 RT31은 29℃에서 상변화를 일으키며, 169kJ/kg의 잠열량을 가지는데 캡슐화 과정에서 외부 물질과 혼합하게 되면서 전체 질량대비 잠열량은 떨어진다. 본 연구에서 사용한 MPCM은 최종적으로 66.61kJ/kg의 잠열량을 가지는 것을 사용하였다. (그림 6.9)는 MPCM의 실제 모습과 주사전자현미경(SEM: Scanning electron microscopy) 이미지 분석을 통한 미세구조를 보여준다.



(그림 6.9) MPCM의 형태와 SEM 분석 결과

- MPCMV(Microencapsulated PCM)의 형태와 SEM 분석결과 MPCM은 백색 파우더의 형태로서 마이크로 단위의 캡슐입자로 되어있는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 작은 캡슐모양의 형태로 인하여 MPCM은 순수한 PCM이 가지고 있는 leakage 현상이 발생하지 않고 다양한 분야에 적용이 가능한 장점을 지닌 것으로 확인하였다.



(그림 6.10) MPCM의 DSC 분석 및 TGA 분석 결과

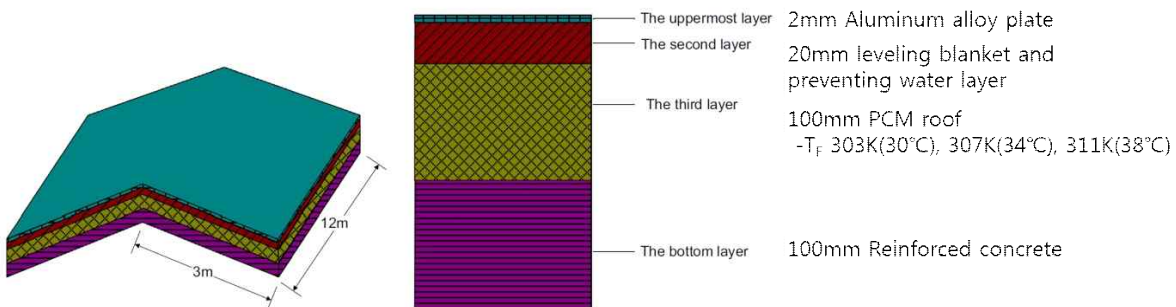
- MPCM의 열적 성능에 대한 분석은 시차주사열량계(DSC; Differential scanning calorimetry)를 통하여 확인할 수 있으며, DSC 분석은 PCM이 가지고 있는 축열 성능과 상변화 온도에 대한 다각적이 분석이 가능한 장비이다. 분석결과 70℃까지 승온 시 31.05℃에서 고체-액체의 상변화가 일어났으며 이때의 잠열량은 66.61J/g을 나타내었고, 다시 10℃까지 냉각시키는 과정에서 27.67℃에서 액체-고체의 상변화가 일어나며, 이때의 잠열량은 66.61J/g을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.
- 또한, RT31을 심물질로 하고 있기 때문에 RT31과 동일하게 27-32℃에서 상변화가 일어나고 있음을 그래프를 통해 확인할 수 있었다.
- 열중량 분석(TGA; Thermogravimetric analysis)을 PCM의 열적 내구성에 대한 분석을 실시할 수 있는데 그림을 보면 2번에 걸쳐 그래프가 급속하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 RT31과 멜라민이 열로 인하여 산화되는 구간이기 때문에 2군데에 걸쳐 각각 그래프의 기울기가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, RT31보다 멜라민이 들어간 MPCM이 열적으로도 안정성이 높은 것을 확인할 수 있다.

- PCM을 내장재가 아닌 외장재로 활용한 사례를 조사하였다.
- Karlessi, et. al는 PCM의 잠열 저장 성능을 이용하여 타일에 PCM이 포함된 도료를 도포하여 코팅하여 표면온도를 저감하는 연구를 수행되었다. 총 6가지 색상의 타일에 상변화 온도를 각기 달리하여 이에 따른 PCM의 축열 성능을 이용한 표면온도 저감을 분석한 것이다. 그 결과, PCM을 도포하였을 경우 색상에 따라 3~7℃ 표면온도 저감 성능이 있는 것으로 조사되었다. 향후 PCM의 상변화에 따른 축열 성능을 이용한다면 도시의 열섬현상 저감 뿐 만 아니라 겨울철 난방 패널티 저감에도 효과적일 것으로 예상된다.

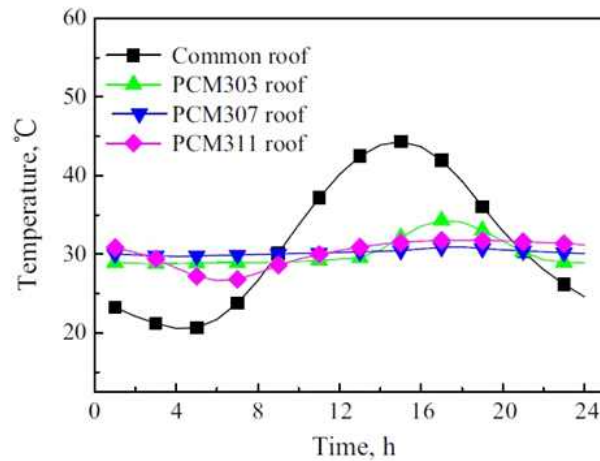


(그림 6.11) Tested tiles coated with common, cool and PCM coatings (Source: Karlessi, 2011)

- Dong et. al은 지붕 레이어에 PCM을 삽입하여 PCM의 변화에 따른 표면온도를 분석하였다. 분석 대상 기후는 중국 북동부 다칭시를 기준으로 설정하였으며 해석프로그램은 FLUENT 6.3을 이용하였다. PCM은 지붕층의 콘크리트 상부에 위치하며 100mm두께로 상변화온도 30℃, 34℃, 38℃를 적용하였다. 분석일은 6월 22일을 기준으로 실시하였으며 기존 지붕마감재의 온도가 최대 45℃까지 상승하는 것과 비교하여 PCM을 삽입한 경우 지붕층의 표면온도가 30℃ 내외로 안정적인 분포를 나타내는 것으로 조사되었으며, 이는 PCM의 양이 많아 모든 PCM이 상변화를 일으키지 않아 안정적인 온도를 나타낼 수 있었던 것으로 분석되었다. 또한 피크온도는 약 3시간가량 지연되는 것으로 조사되었다.

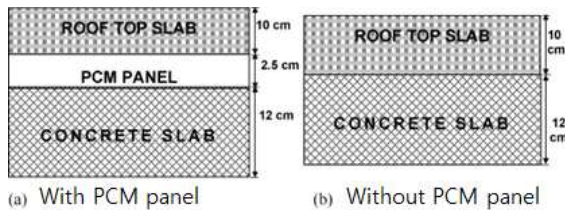


(그림 6.12) 지붕레이어 구성

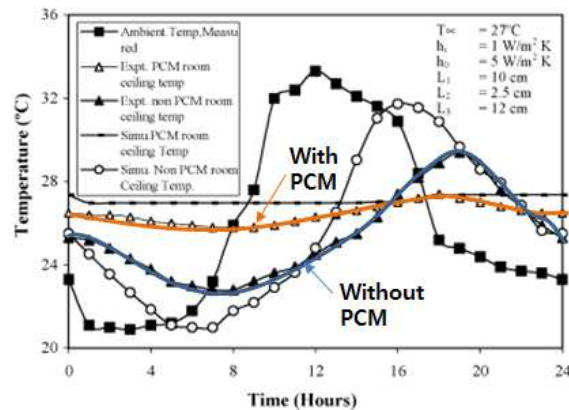


(그림 6.13) 분석 결과 지붕층의 온도 분포

- Pasupathy et. al.은 1.22×1.22×2.44m의 실험실 규모에서 지붕층에 PCM패널을 설치하여 천장면의 온도 변화를 실측하였다. PCM패널은 2.5cm두께로 삽입되었으며 열전달을 위하여 스테인리스 강으로 제작되었으며, 상변화온도 26~28℃의 PCM을 적용하였다. 측정지역은 인도이며, 측정일 1~2월 중 평균온도 27℃인 날을 선정하여 비교분석을 실시하였다. PCM패널이 들어가지 않은 경우, 실내 천장면의 온도가 23~30℃의 분포를 보인 반면 PCM패널이 들어간 경우 실내 온도가 27~28℃로 비교적 일정한 온도 분포를 나타내는 것으로 나타났다.

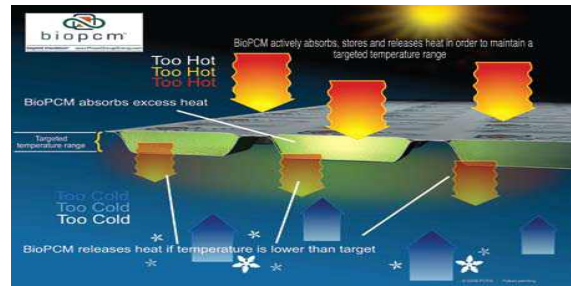
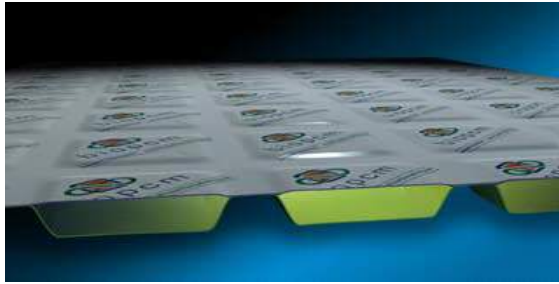


(그림 6.14)지붕 패널의 구성

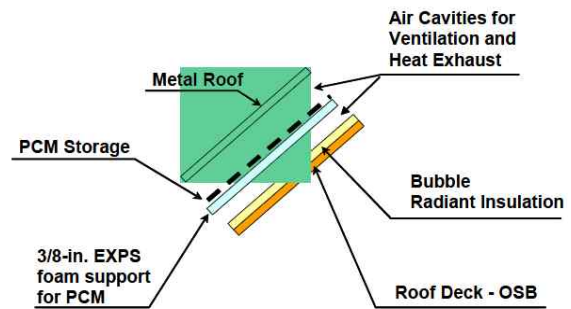


(그림 6.15) 분석결과-천장면 온도 분포

- PCM을 지붕마감재로 상용화한 사례는 미국의 Phase change energy solutions사에서 개발한 'BioPCMat™'이 대표적이다. PCM의 상변화 온도는 23℃, 25℃, 27℃ 등 3종류가 있으며, 지붕과 벽체의 마감재로 일체화된 제품이다. 주거용 건물의 지붕층에 적용한 결과 여름철 지붕층 중공층에서의 일반적인 열획득량의 90%를 줄일 수 있었으며 쿨루프와 함께 시공한 경우 열성능이 향상된 것으로 측정되었다. 제품을 적용 결과 기후에 따라 차이가 있지만 대략적으로 전체 에너지의 30%가량 절약할 수 있는 것으로 나타났다. 대략적인 PCM 패키지의 비용은 \$5/ft²(60,000원/㎡)이 소요되었다. PCM의 하중은 4.5kg/㎡인 것으로 나타났다. Mock-up 실험 결과 외기온이 25℃일 때 PCM roof는 38℃로 기존 마감재보다 18℃낮게 측정되었다.



(그림 6.16) BioPCMatTM의 모습 및 특징



(그림 6.17) BioPCMatTM의 적용 사례

제7장. 연구개발성과의 보안등급

일반

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

해당없음

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

교내 연구실 안전사고를 예방하고, 연구실안전관리규정에 의거 연구실 정기점검 및 정밀안전진단을 실시하여 연구실의 안정성을 확보하여 연구수행

■ 연구실 안전조치 이행사항

○ 연구실 안전관리 개요

교내연구실 안전사고를 예방하고 연구실의 안전성을 확보하고자 연구실안전관리규정에 의거 연구실 정기 점검 및 정밀안전진단실시, 연구 활동 종사자의 교육 및 검진을 통한 피해를 최소화 하였다.

○ 연구실 안전관리 개요

구분	담당업무
총장 및 부총장	연구실 안전관리 총괄
연구환경안전관리자 (시설관리처 안전관리팀)	- 연구(실험)실 안전관리 총괄 관리 - 연구활동종사자 안전교육 운영 관리 - 상시 연구활동종사자 건강검진 진행 - 연구(실험)실 안전점검 진행 (정기점검, 정밀안전진단) - 관련법, 안전수칙 교육 및 홍보 - 법 이행사항 보고 외부 점검 수행
대학 연구환경담당자 /학과담당자	- 계열 연구(실험)실 안전관리 관리 - 연구활동종사자 안전교육 홍보 및 이수현황 관리 - 상시 연구활동종사자 건강검진 홍보 및 현황 관리 - 연구(실험)실 안전점검 관리(정기점검, 정밀안전진단) - 관련법, 안전수칙 교육 및 지도 - 각종 폐기물 처리 지침 준수 및 교육
연구실안전관리자 (정,부)	- 연구(실험)실 실별 안전관리 총괄 관리 - 연구활동종사자 안전교육 홍보 및 이수현황 관리 - 상시 연구활동종사자 건강검진 홍보 및 현황 관리 - 연구(실험)실 안전점검 대비 일지 작성 - 관련법, 안전수칙 교육 및 지도 - 각종 폐기물 처리 지침 준수 및 교육 - 위험물 및 유해인자별 MSDS 비치 및 교육 - 각종 폐기물 처리 지침 준수 및 교육
(상시)연구활동종사자	- 연구실 안전교육 및 건강검진 참여 - 연구(실험)실 안전점검 실시

구분	담당업무
	• 각종 폐기물 처리 지침 준수 폐기 • 위험물 및 유해인자별 MSDS 확인 후 실험

○ 연구실 안전관리 개요

① 위험도에 따른 연구실 등급 관리

- A등급 : 가연성가스, 인화성 시약, 유해화학물질, 다량의 폐액배출, 독극물, 생물 및 동물, 방사성 동위원소, 위험성이 높은 기계장비가 설치된 실험실
- B등급 : 일반시약, 소규모 인화성 시약, 불연성가스, 소량의 폐수발생실험실
- C등급 : 이화학실험을 수행하지 않는 전기, 설계, 컴퓨터 관련 실험실

② 연구실 정기점검 및 정밀안전진단

- 일상점검 : 연구실안전관리자 책임 하에 일일 및 월별 점검 실시하여 특이사항 안전관리팀으로 보고
- 정기점검 : 연구실 등급에 따라 안전관리팀 주관 하에 교내 전체 연구실에 대한 안전점검을 실시하여 문제점 개선 조치(1회/년)
- 정밀안전진단 : 외부 전문기관에 의뢰하여 교내 위험등급 A, B등급 연구실에 대하여 정밀안전진단을 실시하고 문제점 도출 및 개선 조치(1회/년)



③ 연구실 안전교육

- 관련근거 : 연구실안전환경 조성에 관한 법률 제18조 및 연구실안전관리규정 18조 (안전교육)에 의거 교내 연구활동종사자에 대하여 교육 실시
- 교육방법 : 재학생(학부생, 대학원생)은 일괄 등록되며, 위험등급 A, B등급 상시 연구 활동종사자의 경우 학과에서 취합 후 안전관리팀으로 대상 인원 제출
- 교육 이수시간 : 학기당 6시간, 연간 12시간 이수해야 하며, 이수증 연구실 앞 게시

구분	교육 대상	시간	교육 내용
정기	(상시)연구활동종사자	6시간이상 /학기	· 연구실 안전환경 조성 법령에 관한 사항 · 연구실내 유해·위험요인에 관한 사항 · 안전한 연구개발 활동에 관한 사항 · 물질보건 안전자료에 관한 사항 · 그 밖에 연구실 안전관리에 관한 사항
특별	중대사고 및 필요시 (상시) 연구활동종사자	2시간이상	· 연구실내 유해·위험 요인에 관한 사항 · 안전한 연구개발 활동에 관한 사항 · 물질안전보건자료에 관한 사항 · 그 밖에 연구실 안전관리에 관한 사항

④ 연구실 건강검진

- 관련근거 : 연구실안전환경 조성에 관한 법률 시행규칙 제10조, 연구실안전관리규정 21조(건강검진)
- 검진대상 : 위험등급 A, B등급 연구실에 상주하는 상시 연구 활동종사자
- 검진방법 : 위험등급 A, B등급 연구실 유해인자에 따른 상시 연구 활동종사자 특수 검진 실시(매년)

⑤ 연구실 안전 보험

- 관련근거 : 연구실 안전환경 조성에 관한 법률 제14조, 연구실안전관리규정 20조(보험가입)
- 보험대상 : 과학기술분야 학과(부)생 및 대학원생, 위험등급 A, B등급 연구실에 상시 근무하는 대학원 수료생 및 연구원
- 보험 보상한도
 - 상해사망 : 1인당 1억원
 - 상해, 후유장애 : 1인당 1억원 한도로 장애등급별 정액 보상
 - 부상 : 1인당 1천만원 한도로 상해등급별 정액 및 실손 보장
- 보험 청구절차 : 연구실 안전관리자가 연구 활동종사자에 대한 사고경위서 및 보험 청구서를 작성하여 안전관리팀으로 제출하며, 안전관리팀에서는 사고 경위 및 피해 상황을 검토하여 보험금 청구 및 안전조치 이행

10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기 타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Effect of PCM cool roof system on the reduction in urban heat island phenomenon	중앙대학교	주저자	Building and Environm ent	4.46	2017.06	중복사사	SCI
2	논문	Hygrothermal performance improvement of the Korean wood frame walls using macro-packed phase change materials (MPPPCM)	송실대학교	주저자	Applied Thermal Engineeri ng	3.043	2016.11.28	단독 사사	SCI/1
3	논문	Thermal performance evaluation of macro-packed phase changematerials (PCMs) using heat transfer analysis device	송실대학교	주저자	Energy and Buildings	2.97	2016.02.06	단독사사	SCI/23
4	논문	Development of PCM cool roof system to control urban heat island considering temperate climatic conditions	중앙대학교	주저자	Energy and Buildings	2.97	2016.01.20	단독사사	SCI
5	논문	Thermal properties of shape-stabilized phase change materials using fatty acid ester and exfoliated graphite nanoplatelets for saving energy in buildings	송실대학교	주저자	Solar Energy Materials & Solar Cells	4.79	2015.12	단독사사	SCI/11

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기 타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
7	특허	지붕용 마감재 (Finishing materials for roof)	중앙대학교 산학협력단	출원인	대한민국		2017.04.07		
8	특허 등록	대용량 포장된 상변화 물질이 적용된 바닥 난방 구조 시공방법 및 축열 바닥 난방 구조	승실대학교	등록인	대한민국	-	2017.06.07	단독 사사	

제11장. 기타 사항

해당없음

제12장. 참고 문헌

1. 김인수, 한의석, 이광호, Cool Asphalt Pavement(열섬완화 아스팔트 포장)기술, 한국도로학회 제10권 1호(2008.3), 2008
2. 송상철, 강인준, 송명찬, 한기봉, GIS를 활용한 부산지역의 해안·강변지역 열섬특성 분석, 한국지형공간정보학회지 Vol.21 No.1 March 2013 pp 3-9, 2013
3. 배웅규, 윤기학, 공동주택단지에 적용된 주거군의 유형분석을 통한 열섬현상 완화 설계방향 연구 -2005~2010년 준공 및 당선 설계안을 대상으로, 한국도시설계학회지 제13권 제2호 (2012년 4월), 2012
4. 김용진, 강동화, 안건혁, 기후변화에 따른 도시열섬현상 특성 변화와 도시설계적 대안 모색에 관한 기초연구, 한국도시설계학회지 제12권 제3호(2011년 6월), 2011
5. 조희선, 정유진, 최막중, 도시공간특성이 열섬현상에 미치는 영향, 환경정책 제22권 제2호(2014.6), 2014
6. 박은진, 강규이, 남미아, 도시열섬 완화를 위한 옥상녹화 활성화 방안, 정책연구 2010-25, 2010
7. 서용철, 도시열섬 완화를 위한 제도개선, 한국생태환경건축학회논문집 Vol.7, No.2 2007.04, 2007
8. 정민희, 정주리, 신창섭, 강인성, 박진철, 도시열섬 저감을 위한 쿨루프(Cool Roof)의 적용 사례 연구, 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집 제35권 제1호(통권 제63집) 2015.4.24, 2015
9. 김수봉, 김기호, 조진희, 도시열섬현상의 원인과 대책, 환경과학논집 제6권 제1호(2001), 2001
10. 황지옥, 김소정, 도시열섬현상의 주거 형태별 비교분석, 대한국토·도시계획학회지 「국토계획」 제38권 제7호 2003.12, 2003
11. 송진희, 임재한, 강소라, 송승영, 도심지 옥상녹화에 의한 열섬현상 저감 효과 분석, 한국태양에너지학회 추계학술발표대회 논문집 Vol.33 No.2 2013.11.1, 2013
12. 서지은, 박병용, 김석기, 도시지역의 열섬현상에 영향을 미치는 요소 분석-서울시를 중심으로, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 계획계 제29권 제1호(통권 제53집) 2009.10.23-24, 2009
13. 방재성, 미국 지방자치단체 도시열섬완화 대책의 계획적 특성, 大韓建築學會論文集計劃系 제29권 제4호(통권294호) 2013.4, 2013
14. 구해정, 김연희, 최병철, 서울시 도시 열섬 구조의 변화에 관한 연구, 기후연구 제2권 제2호 2007(67~78), 2007
15. 이예영, 윤근영, 서울의 미래 열섬현상 예측과 건물에너지 소비 영향, 대한설비공학회 2015 하계학술발표대회 논문집 pp.208~211, 2015
16. 김보선, 김영문, 유기표, 유장열, 실시간 계측을 통한 도심 내 열섬평가를 위한 연구, 대한건축학회 추계학술발표대회논문집 제32권 제2호(통권 제58집) 2012.10.25, 2012
17. 이현주, 이귀옥, 이순환, 이화운, 알베도 증가에 따른 도시 기온 하강 효과에 관한 수치연구, 한국대기환경학회지 제24권 제4호 pp.383~392, 2008
18. 배웅규, 송두삼, 열섬현상 완화를 위한 주거지 공간위계별 설계요소 도출 연구, 大韓建築學會論文集計劃系 제27권 제6호(통권272호) 2011.6, 2011
19. 진상현, 정경화, 지역별 온실가스 배출특성에 관한 연구: 지수분해분석을 중심으로, 「한국정책과학학회보」 제17권 제2호 2013.6, 2013
20. 김경태, 송재민, 청계천 복원사업이 도시열섬현상에 미치는 영향, 대한국토·도시계획학회지 「국토계획」 제50권 제4호 p.139~154, 2015
21. 윤용한, 박봉주, 김원태, 조현수, 토지이용형태에 따른 계절별 열섬현상의 강도, 대한국토·도시계획학회지 「국토계획」 제43권 제4호 2008.08, 2008
22. 정임수, 최동호, 이부용, 하절기 도시의 장·단파 복사특성 관측, 한국태양에너지학회

23. 정옥희, 최영석, 백중현, 이경용, 정동렬, CFD를 이용한 수직 원통관에서의 PCM 상변화 과정 연구, 대한설비공학회 2011 하계학술발표대회 논문집 pp.1231~1234, 2011
24. 김형국, 김경훈, 백중현, 강채동, CFD를 이용한 인접한 이중 PCM의 열전달 해석, 대한설비공학회 2012 하계학술발표대회 논문집 pp.457~461, 2012
25. 임명관, 오돈투야, 김영호, 최동욱, PCM 혼입 경량기포콘크리트 패널 개발을 위한 기초적 연구, KIEAE Journal Vol.14 No.4 Aug 2014 pp.133~138, 2014
26. 류리, 지충구, 김용성, PCM을 적용한 창호형 이중외피 시스템 연구-냉·난방 에너지 저감을 중심으로, 大韓建築學會論文集計劃系 제29권 제4호(통권294호) 2013.4, 2013
27. 이현화, 이수진, 송진희, 김수민, 임재한, 송승영, PCM을 활용한 구체축열시스템의 축열 및 방열 특성 연구, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering Vol.25 No.12(2013) pp.647~653, 2013
28. 김수민, 건축물 에너지 저감을 위한 다공성 물질 기반 상안정 PCM개발, 대한설비공학회 설비저널 제42권 2013.12월호, 2013
29. 정수광, 전지수, 서정기, 김수민, 건축물에너지 저감을 위한 Phase change material(PCM)적용에 대한 고찰, 한국건축친환경설비학회논문집 5권 1호 2011 pp.7~15, 2011
30. 정수광, 유슬기, 장슬애, 박진성, 김태현, 이정훈, 김수민, 건축적용을 위한 다공성 물질을 이용한 상안정 PCM 제조, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering Vol.25 No.8(2013) pp.432~437, 2013
31. 김원욱, 이상렬, 김용찬, 냉동트럭용 강제대류방식 PCM 냉동모듈의 방냉성능 최적화에 관한 연구, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering Vol.25 No.11(2013) pp.624~630, 2013
32. 이규영, 류리, 서장후, 김용성, 냉방에너지 저감을 위한 PCM적용 축열벽 시스템 연구, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering Vol.26 No.6(2014) pp.247~256, 2014
33. 이진욱, 안상민, 김태연, 이승복, 동적 에너지 시뮬레이션을 이용한 PCM보드의 설계변수 분석에 관한 연구, 한국생태환경건축학회논문집 Vol.12 No.4 2012.08, 2012
34. 윤재호, 김종하, 정순영, 양운섭, 김성현, 송덕용, 상변화물질(PCM)을 이용한 열교환기용 동파방지밸브에 관한 실험적 연구, 한국태양에너지학회 논문집 Vol.32 No.6 2012, 2012
35. Santamouris, M. On the energy impact of urban island and global warming on buildings. Energy and Buildings, 82, 100-113, 2014
36. Sarrat, C., Lemonsu, A., Masson, V., & Guedalia D. Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. Atmospheric Environment, 40(10), 1743-1758, 2006
37. Shahmohamadi, P., Che-Ani, A.I., Etessam, I., Maulud, K.N.A., & Tawil, N.M. Healthy environment: The need to mitigate urban heat island effects on human health. Procedia Engineering 20, 61-70, 2011
38. Santamouris, M., Papanikolaou, N., & Mihalakakou, G. Estimating the ecological footprint of the heat island effect over Athens, Greece. Climate Change, 80, 265-276, 2007
38. 김유진, 서울 도시 열섬의 공간분포 및 열섬 강도 특성에 관한 연구, 건국대학교 석사학위 논문, 2012
39. Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., & Assimakopoulos, D. N. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. Solar energy 70(3), 201-216, 2001
40. 에너지경제연구원, 2011년도 에너지총조사 보고서, 지식경제부, 2012

41. Huang, J., Hanford, J., & Yang, F. Residential heating and cooling loads component analysis. Building Technologies Department, Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 1999
42. Chou, H.M., Chen, C.R., & Nguyen, V.L. A new design of metal-sheet cool roof using PCM. *Energy and Buildings* 57, 42-50, 2013
43. Alqallaf, H.J., & Alawadhi, E.M. Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain. *Energy and Buildings* 61, 73-80, 2013
44. Kośny, J., Biswas, K., Miller, W., & Kriner, S. Field thermal performance of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink. *Solar Energy* 86(9), 2504-2514, 2012
45. Karlessi, T., Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, D., Didaskalopoulos, P., & Apostolakis, K. Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat island and cool buildings. *Building and Environment*, 46(3), 570-576, 2011
46. Li, D., Zheng, Y., Liu, C., & Wu, G. Numerical analysis on thermal performance of roof contained PCM of a single residential building. *Energy Conversion and Management* 100, 147-156, 2015
47. Pasupathy, A., & Velraj, R. Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management. *Energy and Buildings* 40(3), 193-203, 2008
48. Phase change energy solutions, <http://www.phasechange.com/>
49. Kosny, J., Miller, W., & Syed, A. M. Field testing of second-generation residential attic using inorganic PCM thermal storage. Oak ridge national laboratory (ORNL), 2007
50. Kim, S., Paek, S., Jeong S.G., Lee, J.H., & Kim, S. Thermal performance enhancement of mortar mixed with octadecane/xGnP SSPCM to save building energy consumption. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 122, 257-263. 2014
51. 김수봉, 장중근, 대구시 중구의 옥상녹화를 통한환경 및 경제적 편익 분석. *한국환경과학회지* 16(5), 603-610, 2007
52. 이희범 이현우, 도심지 상업시설에서의 옥상녹화 경제성에 대한 연구, *한국건설관리학회지 학술발표대회*, 239-242, 2010
53. Carter, T., & Keeler, A. Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems, *Journal of Environmental Management* 87(3), 2008
54. Doshi, H., Peck, & S. Methods for estimating economic public benefits from regional implementation of green roof technology, *Green Roofs for Healthy Cities*, Working Draft Paper for Review, 2013
55. 김홍순 외, op. cit.
56. 염윤숙, 강혜진, 박진철, 이연구, LCC 분석법을 이용한 친환경 건축 요소기술의 경제성 평가방법에 관한 연구. *대한건축학회 2008년도 학술발표대회 논문집* 28(1), 655-658, 2008
57. 김홍순, 최재연, 신은하, 옥상녹화사업의 종류에 따른 경제성 분석. *대한건축학회 논문집-계획계* 30(10), 159-167, 2014
58. 신한술, 데이터 전처리와 랜덤 포레스트를 이용한 냉동기 모델 개발, *성균관대학교, 석사학위논문*, 2016
59. M&V Guidelines : Measurement and Verification for Performance-Based Contracts Version 4.0, 2015
60. 방선규, 도시열섬효과 저감을 위한 PCM의 열성능 축소모형 실험, *중앙대학교, 석사학위논문*, 2016
61. Berdahl, K. & Bretz, S. E. Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing

- materials. *Energy and Buildings* 25, 149–158, 1997
62. Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy* 85(12), 3085–3102, 2011
63. ASTM International ASTM E1980–11, Standard practice for calculating Solar Reflectance Index of horizontal and low-sloped opaque surfaces. West Conshohocken, PA, 2011
64. Levinson, R., Akbari, H. Konopacki, S., & Bretz, S. Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements. *Energy Policy* 33(2), 151–170, 2005
65. Levinson, R. & Akbari, H. Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants. *Energy Efficiency* 3(1), 53–109, 2010.
66. Berdahl, P. Akbari, H., Levinson, R., & Miller, W. A. Weathering of roofing materials—An overview. *Construction and Building Materials* 22(4), 423–433, 2008
67. Levinson, R. & Akbari, H., op.cit.
-

9. 뒷면지

주 의

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