2016 대한건축학회 추계학술발표대회논문집
제36권 제2호(통권 제66집) 2016.10.4~10.6

2016 추계 학술

도시열섬현상 저감을 위한 PCM(Phase Change Material)의 단열성능 시뮬레이션 분석

Simulation Analysis of Thermal Insulation Performance of PCM for Mitigating Urban Heat Island Effect

○이 효 은* 양 영 권** 정 민 희*** 박 진 철****
Lee, Hyo Eun Yang, Young Kwon Chung, Min-Hee Park, Jin Chul

Abstract

This study aimed to analyze the Thermal Insulation Performance of the PCM Cool Roof System, which is being developed for mitigating the Urban Heat Island Effect. We compared the performance of common insulation material versus that of PCM, both applied on a standard roof model. We found that PCM had less cooling energy consumption compared to common insulation, whereas common insulation had less heating energy consumption. The annual total energy consumption was found to be lower when using PCM. Therefore, we conclude that the PCM Cool Roof System has insulating capacity comparable to that of common insulation.

키워드: 상변화물질, 단열성능, 에너지플러스 시뮬레이션, 냉·난방 에너지

Keywords: Phase Change Materials(PCM), Energy Plus SImulation, Insulation Performance, Cooling & Heating Energy Consumption

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

도시열섬현상이란, 상대적으로 축열 성능이 높은 구조물이 밀집되어 있는 도심지에서 기온이 높게 나타나는 현상이다. 우리나라의 경우 압축적 경제성장을 거치면서 서울 및 수도권, 광역시 등 대도시 중심의 도시개발과 이에 따른 인구집중화에 따른 도시열섬현상 발생이 심각한 환경문제로 대두되고 있다.

이에 따라 본 연구진은 선행연구로서, '도시열섬저감을 위한 PCM과 Cool Roof System 성능실험'을 진행하였고, 기존건축물에 PCM(Phase Change Material)을 적용하여 도시열섬현상 저감 효과를 검증하였다.

하지만, 기존 건축물의 지붕 마감재로 적용이 되는 PCM에 대한 단열성능 검증은 아직 이루어지지 않았다. 건축물의 에너지 소모량 감소를 위해 단열은 매우 중요하다. 건축마감재 상단에 추가적으로 적용되는 시스템인 만큼 건축물 관점에서 단열효과에 대한 검증이 꼭 필요하다.

따라서, 본 연구는 PCM의 단열 성능 파악을 위하여 에너지 시뮬레이션 분석을 통해 PCM의 건축마감재 적용성을 도출하고자 하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 오피스와 주택 표준모델을 대상으로 한 시뮬레이션 결과를 분석함으로써 PCM의 단열성능에 대해 분석하는 것을 연구 범위로 한다. 또한 기존건축물을 대상으로 하는 PCM Cool Roof System의 특성을 고려하였을 때, 에너지 시뮬레이션 표준모델 대상을 기존건축물로 정하였다. 본 연구의 흐름은 다음의 순서와 같고, 흐름도는 그림 1과 같다.

첫째, 건축 마감재로서의 단열성능 파악 및 에너지 시뮬레이션 분석을 위하여 선행 연구 및 이론 고찰을 실시하였다. 둘째, 미국 에너지성(Department of Energy, DOE)에서 개발된 에너지 시뮬레이션 프로그램인 Energy Plus-ver.8.1을 사용하여 기존 건축물의 옥상에 PCM을 추가적으로 적용하였을 때와 일반적인 단열재를 추가적으로 적용하였을 때의 실내 에너지소비량을 비교·검토 하였다. 셋째, 도출된 PCM 단열 성능 결과를 바탕으로 PCM 적용 가능성을 도출하였다.

*중앙대 대학원 석사과정
(Corresponding author : bell3457@hanmail.net)
**중앙대 대학원 박사과정
***중앙대 건축학부 초빙교수, 공학박사
****중앙대 건축학부 교수, 공학박사
이 논문은 2016년도 중앙대학교 CAU GRS 지원에 의하여 작성되었음.
본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(16CTAP-C078014-03)에 의해 수행되었음.

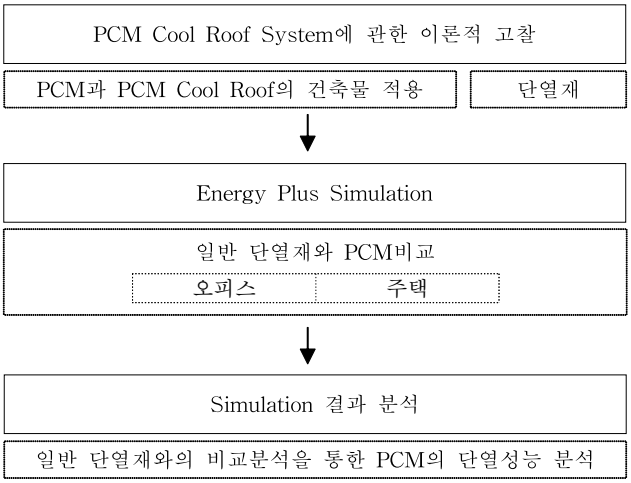

그림 1. 연구흐름도

2. 선행연구 고찰

2.1 PCM의 건축물 적용

PCM이 건축물이 적용되었을 때의 열성능에 대한 선행연구를 고찰한 결과 PCM이 도시열섬현상 저감 및 실내 쾌적도 향상에 효과가 있는 것을 확인하였다.

Bang(2016)은 PCM을 건물 옥상 구조체에 삽입하였을 경우 표면 반사율과 PCM의 종류에 따른 표면온도 저감 효과와 구조체에 미치는 열성능을 측정한 축소모형실험을 진행한 바 있다. 실험 결과 같은 반사율과 외기 조건 및 일사량 하에서 PCM 적용시 약 10℃의 표면온도 저감 효과가 있는 것을 확인하였다.

Kim et al.(2011)에 따르면 재실자가 느끼는 쾌적한 온도범위에서 상변화를 일으키는 PCM을 적용하면 에너지 측면에서 큰 효과를 얻을 수 있으며 환경부하량을 줄임과 동시에 재실자의 쾌적성 또한 보장할 수 있다.

Jiawei Lei et al.(2016)의 연구에서는 Energy Plus-ver.8.1을 사용하여 PCM의 외벽 적용에 따른 냉방부하 저감에 관한 연구를 진행하였으며, 건물의 외기 조건, 상변화 온도, 위치, PCM의 두께 등에 따른 수치해석 연구를 진행하였다.

PCM의 열적 특성이 우수함과 재실자의 쾌적도 향상에 기여함에 대한 연구는 다수 진행되었지만 단열성능에 대한 고찰은 없었기 때문에 본 연구를 시행하고자 한다.

2.2 건축물의 단열성능

Kim(1996)은 건물의 외벽에 적용하는 단열 공법에 따른 열성능의 변화에 대해 연구했다. 단열재의 사용 유무, 두께 및 마감재료의 특성에 따라 변화하는 벽체의 열관류율은 동일한 재료와 두께로 구성되어 있으면 단열재의 위치에 관계없이 열관류저항은 동일하게 나타나고 연간 냉난방부하 또한 거의 동일하게 나타난다. 즉 이론상 내외단열에 따른 에너지절약 효과는 차이가 없다. 따라서 본 연구에서 작성한 시뮬레이션 모델에서는 단열재의 위치에 따른 열성능의 차이는 고려하지 않는 것으로 한다.

3. PCM적용과 일반 단열재 적용의 실내 에너지사용량 비교 시뮬레이션 개요

3.1 시뮬레이션 개요

분석 모델의 단열 성능 평가를 위해 영국 Design Builder사에서 개발한 통합 건축 시뮬레이션 Tool인 Design Builder를 사용하여 모델링하고 미국 에너지성(Department of Energy, DOE)에서 개발한 에너지 시뮬레이션 프로그램인 'Energy Plus ver.8-5'를 엔진으로 하여 에너지성능평가를 하였다.

기존건축물에의 적용 시 열성능 분석을 위하여 '건축물 설비기준 등에 관한 규칙'의 1992년 기준을 사용하였다. 따라서, 벽과 바닥의 열관류율 0.5㎉/㎡h℃, 지붕의 열관류율 0.35㎉/㎡h℃로 설정하였다. 지붕 위에 추가적으로 PCM과 일반 단열재를 각각 적용하여 냉·난방에너지 사용량 변화를 비교한다.

기후자료는 기상청의 서울 30년 평년값자료(1981년-2010년)를 사용하였다.

3.2 시뮬레이션 변수

분석모델에 적용하는 PCM(Phase Change Material)은 상변화온도(Melting point)가 44℃인 RUBITHERM®의 n-docosane계열 RT44 PCM이다. 대조군은 일반적으로 많이 사용하는 3가지 종류와 두께의 일반단열재로 설정한다. 첫 번째는 국내 1980년 이후부터 1990년대 까지 준공된 10층이상 건물 88개소에서 가장 많이 적용되었던 50mm 발포 폴리스티렌 스탠다드(Expanded Poly Styrene, EPS)이며 열전도율이 0.04(W/mk)다. (Kim, 1996) 두 번째는 다가구 주택의 지붕단열에 주로 사용하고 있는 135mm EPS이고 열적특성은 첫 번째 경우와 같다. (Park, 2013) 세 번째는 밀도가 높고 비교적 친환경적인 셀룰로오스 135mm를 적용했다. 열전도율은 0.04 W/mk다. 네 번째는 불에 잘 타지 않고 비교적 저렴한 가격으로 많이 사용되고 있는 글라스울(열전도율 0.035 W/mk)을 두 번째, 세 번째와 같은 135mm로 설정했다. 열관류율이 0.35㎉/㎡h℃인 지붕 위에 위의 네 가지 일반단열재의 두께에 상응하는 RT 44 PCM을 적용하여 시뮬레이션한다.

표 1. PCM과 대조한 일반단열재의 종류와 두께

	일반단열재	PCM
1	50mm 스티로폼(비드법, EPS)	50mm RT44 PCM
2	135mm 스티로폼(비드법, EPS)	135mm RT44 PCM
3	135mm 셀룰로오스	135mm RT 44 PCM

재실스케쥴, 냉난방 공조시스템, 규모 등 에너지부하에 영향을 미치는 요소가 상이한 오피스(Office)와 주택(Residential) 두 가지의 Case로 구분하여 분석모델을 설정한다. 각 Case에 따른 분석모델 설정 값은 표 2와 같다.

분석모델의 규격은 선행연구와 ASHRAE 62.1를 참고하였고 열관류율은 기존건축물과 유사한 조건을 위해 1992

년 개정된 건축물 설비기준 등에 관한 규칙을 기반으로 작성하였다. 오피스의 HVAC시스템은 냉난방 및 기계환기가 가능한 Fan Coil Unit(4-Pipe)이므로 4계절 모두 냉난방에너지소비량이 발생한다. 반면에 주택의 HVAC시스템은 국내 대부분의 공동 및 단독주택에 적용된 바닥 난방 보일러 방식과 에어컨 냉방방식을 적용하였으므로 하절기와 동절기로 나뉘어 냉난방에너지소비가 발생한다.

표 2. Case별 분석모델과 설정값

Case / 설정요소	오피스	주택[1]
규모	면적 : 288㎡ 층고 : 4m	면적 : 85㎡ 층고 : 2.6m
열관류율(U-value)	벽, 바닥 : 0.5㎉/㎡h℃ 지붕 : 0.35㎉/㎡h℃	
창면적비	30%	
HVAC System	Fan Coil Unit(4-Pipe) with District Heating+Cooling	Heated floor, Boiler HW, Nat Vent
재실자 스케쥴	ASHRAE 62.1 - Office Buildings - Office-Open Plan	ASHRAE 62.1 - Residential - Dwelling unit (with kitchen)

4. PCM적용과 일반 단열재 적용의 실내 에너지사용량 비교 분석 결과

4.1 50mm EPS(스티로폼) vs. 50mm RT44 PCM

1) 오피스(Office)

열관류율이 0.35㎉/㎡h℃인 지붕 위에 국내 1980년 이후부터 1990년대 까지 준공된 10층이상 건물 88개소에서 가장 많이 적용되었던 50mm 발포 폴리스티렌 스탠다드(Expanded Poly Styrene, EPS)과 이와 동일한 두께인 50mm RT44 PCM를 적용한 결과는 다음과 같다. EPS를 적용한 경우 연간 냉방에너지소비량이 26757.26kWh, 연간 난방에너지소비량이 13443.58kWh, 총계 40200.84kWh다. 반면 PCM을 적용한 경우는 연간 냉방에너지소비량이 26744.01kWh, 연간 난방에너지소비량이 11759.50kWh로 총계 38503.51kWh다. PCM을 적용하였을 때가 냉방에너지소비량은 13.25kWh, 난방에너지소비량은 1684.08kWh만큼 낮아 총 1697.33kWh의 에너지가 적게 소모됨을 알 수 있다.

표 3. 오피스에 50mm EPS와 50mm PCM 적용시 냉난방에너지소비량

(단위 : kWh)

구분 / 월	50mm EPS		50mm PCM	
	냉방	난방	냉방	난방
1월	144.57	3555.72	45.30	3333.91
2월	494.21	2467.52	340.55	2093.65
3월	1291.84	1312.53	1135.53	1014.19
4월	1988.77	512.74	1907.72	466.44
5월	3065.71	338.25	3109.32	243.22
6월	4058.90	151.73	4271.63	90.64
7월	4251.39	83.31	4497.33	77.87
8월	4831.35	90.94	5113.95	82.42
9월	3423.40	202.36	3514.91	138.46
10월	2248.82	467.64	2159.50	414.08
11월	658.79	1503.44	496.68	1346.67
12월	299.51	2757.40	151.59	2457.95
계	26757.26	13443.58	26744.01	11759.50
총계	40200.84		38503.51	

(단위 : kWh)

그림 2. 오피스에 50mm EPS와 50mm PCM 적용시 냉난방에너지 소비량

2) 주택(Residential)

주택에 50mm EPS를 적용한 경우 연간 냉방에너지소비량이 7021.36lkWh, 연간 난방에너지소비량이 1593.82kWh, 총 8615.18kWh가 사용됐다. PCM을 적용했을 때는 연간냉방에너지가 6463.96kWh, 연간난방에너지가 1971.39kWh 사용되어 총 8435.35kWh가 소비되었다. 즉, 냉방에너지는 PCM을 적용했을 때가 557.4kWh만큼 절약되고 난방에너지는 EPS를 적용했을 때가 377.57kWh절약되어 결과적으로 PCM을 사용했을 때 연간 총 냉난방에너지소비량이 179.83kWh 절약된다.

1) 상세 건물에너지 시뮬레이션을 위한 표준주택모델 정의에 관한 연구, 서동현,노병일,임병찬, 대한건축학회논문집 16권 6호, 2014

표 4. 주택에 50mm EPS와 50mm PCM 적용시 냉난방에너지소비량

(단위 : kWh)

구분 / 월	50mm EPS		50mm PCM	
	냉방	난방	냉방	난방
1월	0	578.13	0	695.64
2월	0	338.99	0	420.1
3월	0	101.34	0	145.42
4월	294.65	0	246.78	0
5월	687.36	0	614.31	0
6월	1324.32	0	1212.44	0
7월	1838.85	0	1724.66	0
8월	1825.34	0	1699.56	0
9월	1050.84	0	966.21	0
10월	0	6.01	0	4.74
11월	0	170.45	0	216.03
12월	0	398.9	0	489.46
계	7021.36	1593.82	6463.96	1971.39
총계	8615.18		8435.35	

(단위 : kWh)

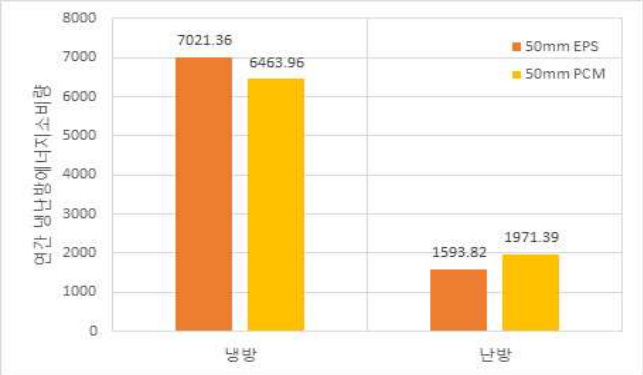

그림 3. 주택에 50mm EPS와 50mm PCM 적용시 냉난방에너지 소비량

표 5. 오피스에 135mm EPS와 135mm PCM 적용시 냉난방에너지소비량

(단위 : kWh)

구분 / 월	135mm EPS		135mm PCM	
	냉방	난방	냉방	난방
1월	269.13	3124.73	144.17	3428.66
2월	674.3	2155.82	491.55	2356.49
3월	1550.36	1147.63	1283.02	1226.42
4월	2225.15	467.54	1969.76	482.71
5월	3311.12	318.58	3045.99	319.98
6월	4288.94	141.4	4054	136.94
7월	4399.09	82.43	4253.39	81.99
8월	5028.06	89.76	4841.12	88.75
9월	3616.78	189.32	3418.02	188.93
10월	2481.26	437.09	2235.27	444.43
11월	828.45	1309.75	661.32	1425.35
12월	455.31	2409.49	298.92	2644.92
계	29127.95	11873.54	26696.53	12825.57
총계	41001.49		39522.1	

(단위 : kWh)

그림 4. 오피스에 135mm EPS와 135mm PCM 적용시 냉난방에너지 소비량

4.2 135mm EPS(스티로폼) vs. 135mm RT44 PCM

1) 오피스(Office)

점차 강화되고 있는 건축물에너지절약 기준에 따라 근래의 단열재 적용 또한 강화되고 있다. 2013년 소규모 설계사무실을 대상으로 한 설문조사에 따르면 지붕의 단열재로 가장 많이 사용하는 것은 135mm EPS이다.(Park. et al. 2013) 135mm의 EPS와 PCM을 적용하였을 때의 결과를 비교하면 다음과 같다.

EPS 적용시 연간 냉방에너지소비량은 29127.95kWh, 연간 난방에너지소비량은 11873.53kWh다. PCM을 적용한 경우 연간 냉방에너지소비량이 26696.53kWh, 연간 난방에너지소비량이 12825.57kWh이므로 냉방에너지소비량의 측면에서는 2431.42kWh만큼 PCM이 유리하고, 난방에너지소비량 측면에서는 952.03kWh만큼 EPS가 유리하다. 따라서 연간 총 냉난방에너지사용량은 EPS가 41001.49kWh, PCM이 39522.1kWh로 PCM이 1479.39kWh만큼 유리하다.

2) 주택(Residential)

주택 적용 또한 오피스에 적용한 것과 비슷한 양상의 결과가 도출되었다. EPS적용의 경우 7006.88kWh, PCM적용의 경우엔 6529.71kWh의 냉방에너지소비량이 발생하여 PCM을 적용할 때 477.17kWh의 에너지가 절약되었다. 반면 난방에너지는 EPS가 1398.66kWh, PCM이 1855.39kWh 소비되어 EPS 적용시에 456.73kWh 만큼 에너지가 절약되었다. 따라서 연간 총 냉난방에너지소비량의 차는 20.44kWh로 미세하게 PCM이 유리하다.

(단위 : kWh)

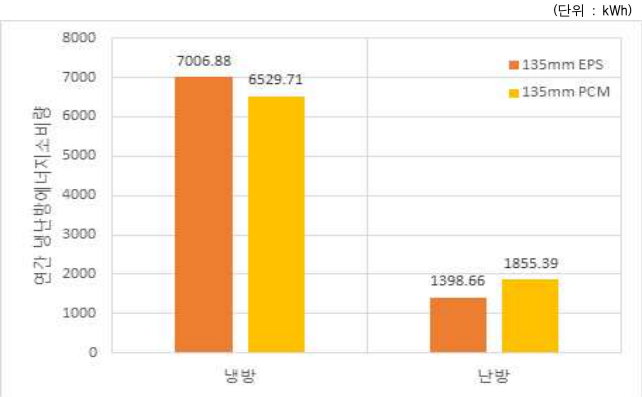

그림 5. 주택에 135mm EPS와 135mm PCM 적용시 냉난방에너지 소비량

표 6. 주택에 135mm EPS와 135mm PCM 적용시 냉난방에너지소비량

(단위 : kWh)

구분 / 월	135mm EPS		135mm PCM	
	냉방	난방	냉방	난방
1월	0	513.12	0	656.81
2월	0	294.41	0	395.9
3월	0	88.36	0	136.53
4월	304.26	0	258.25	0
5월	689.53	0	625.15	0
6월	1317.32	0	1223.82	0
7월	1827.2	0	1733.4	0
8월	1814.2	0	1709.52	0
9월	1054.37	0	979.57	0
10월	0	5.01	0	4.59
11월	0	146.21	0	200.28
12월	0	351.55	0	461.28
계	7006.88	1398.66	6529.71	1855.39
총계	8405.54		8385.1	

4.3 135mm 셀룰로오스 vs. 135mm RT44 PCM

1) 오피스(Office)

셀룰로오스는 신문지 등의 지류를 재활용한 단열재로 유리섬유 대비 3배의 고밀성과 화재시 유독가스가 배출되지 않는다는 점에서 비교적 친환경적인 단열재로 분류되고 있다. 4.2절에서와 같은 두께의 셀룰로오스와 PCM을 비교하여 단열성능을 분석하였다.

셀룰로오스는 같은 두께의 EPS보다 냉방에너지가 581.02kWh, 난방에너지가 143.99kWh 적게 소모되었다. 하지만 같은 두께의 PCM은 냉방에너지소비량이 26696.53kWh, 난방에너지소비량이 12825.57kWh 소비되어 연간 총 냉난방에너지소비량이 39522.1kWh로 셀룰로오스보다 754.38kWh의 에너지가 절약된다. 앞절에서와 마찬가지로 냉방에너지소비량 측면에서는 일반단열재인 셀룰로오스가 유리하고 난방에너지소비량 측면에서는 PCM이 유리함을 알 수 있다.

표 6. 오피스에 135mm 셀룰로오스와 135mm PCM 적용시 냉난방에너지소비량

(단위 : kWh)

구분 / 월	135mm 셀룰로오스		135mm PCM	
	냉방	난방	냉방	난방
1월	239.39	3101.71	144.17	3428.66
2월	632.2	2127.09	491.55	2356.49
3월	1491.87	1122	1283.02	1226.42
4월	2165.9	462.07	1969.76	482.71
5월	3243.76	315.24	3045.99	319.98
6월	4223.46	138.1	4054	136.94
7월	4361.17	82.01	4253.39	81.99
8월	4979.27	89.06	4841.12	88.75
9월	3567.32	185.66	3418.02	188.93
10월	2428	430.78	2235.27	444.43
11월	793.28	1292.16	661.32	1425.35
12월	421.31	2383.67	298.92	2644.92
계	28546.93	11729.55	26696.53	12825.57
총계	40276.48		39522.1	

(단위 : kWh)

그림 6. 오피스에 135mm 셀룰로오스와 135mm PCM 적용시 냉난방에너지 소비량

2) 주택(Residential)

주택에 셀룰로오스와 PCM을 적용한 것을 비교분석한 결과 연간 총 냉난방에너지소비량이 셀룰로오스를 적용한 경우 8384.36kWh, PCM을 적용한 경우 8385.1kWh로 셀룰로오스를 적용하였을 때가 더 적은 에너지가 소요됐으나 그 차이가 20.44kWh로 거의 동일하다고 볼 수 있다. 냉방에너지소비량은 PCM이 6529.71kWh, 셀룰로오스가 6955.91kWh로 426.2kWh만큼 PCM이 유리했으나 난방에너지소비량의 차이가 426.94kWh로 연간 총 냉난방에너지소비량의 측면에서는 셀룰로오스가 다소 우수하다.

표 7. 주택에 135mm 셀룰로오스와 135mm PCM 적용시 냉난방에너지소비량

(단위 : kWh)

구분 / 월	135mm 셀룰로오스		135mm PCM	
	냉방	난방	냉방	난방
1월	0	523.9	0	656.81
2월	0	302.61	0	395.9
3월	0	88.39	0	136.53
4월	298.63	0	258.25	0
5월	681.38	0	625.15	0
6월	1306.81	0	1223.82	0
7월	1818.5	0	1733.4	0
8월	1804.47	0	1709.52	0
9월	1046.12	0	979.57	0
10월	0	6.16	0	4.59
11월	0	147.6	0	200.28
12월	0	359.79	0	461.28
계	6955.91	1428.45	6529.71	1855.39
총계	8384.36		8385.1	

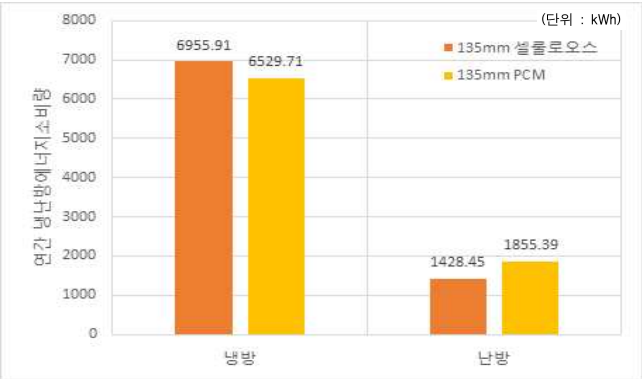

그림 7. 주택에 135mm 셀룰로오스와 135mm PCM 적용시 냉난방에너지 소비량

4.4 EPS, 셀룰로오스, 글라스울과 PCM의 비교분석

135mm의 동일한 두께로 시뮬레이션을 진행한 EPS, 셀룰로오스, 글라스울 그리고 PCM의 연간 냉난방에너지 사용량을 비교했다. 오피스와 주택의 경우 모두 냉방에너지사용량은 PCM이 낮은 편으로, 난방에너지사용량은 일반단열재들이 낮은 편으로 나타났다. 연간 총 냉난방에너지사용량은 차이가 21kWh 미만으로 작게 나타나거나 PCM의 사용량이 더 적게 나타났다.

1) 오피스(Office)

냉방에너지는 PCM이 26696.53kWh으로 가장 낮은 소비량을 보였고 반대로 난방에너지는 12825.57kWh로 가장 높은 소비량을 보였다. 하지만 총합은 39522.1kWh로 역시 가장 낮게 나타났으며 EPS와는 1479.39kWh, 셀룰로오스와는 754.38kWh, 글라스울과는 1255.49kWh만큼의 차이를 보였다.

(단위 : kWh)

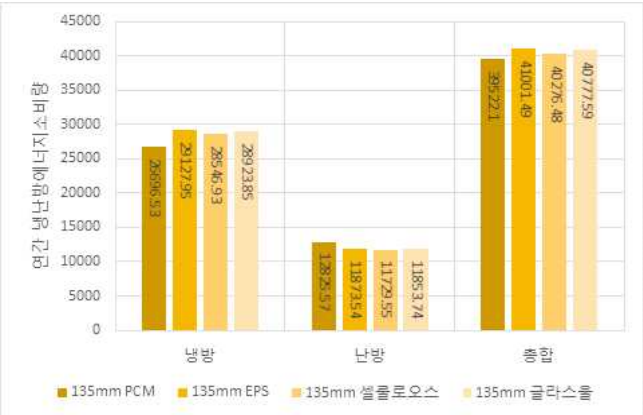

그림 8. EPS, 셀룰로오스, 글라스울과 PCM의 비교분석(오피스)

2) 주택

오피스와 마찬가지로 냉방에너지소비량은 PCM이 적은 것으로, 난방에너지소비량은 일반단열재가 적은 것으로 나타났다. 총합은 PCM이 8385.1kWh로 EPS보다 20.44kWh 높았고 셀룰로오스와 글라스울과는 각각 0.74kWh, 15.45kWh의 차이로 낮게 나타났다.

(단위 : kWh)

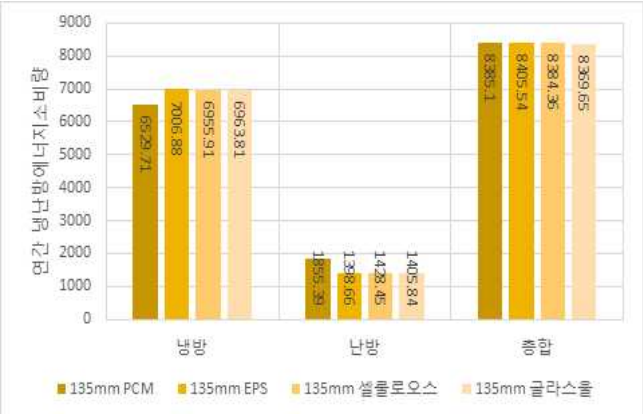

그림 9. EPS, 셀룰로오스, 글라스울과 PCM의 비교분석(주택)

5. 결　　론

본 연구에서는 도시열섬현상 저감을 위한 PCM Cool Roof System에 적용되는 PCM의 단열성능을 분석하기 위해 시뮬레이션 분석을 수행하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

(1) PCM은 일반단열재보다 냉방에너지소비 측면에서 우수하고 난방에너지소비 측면에서는 불리하다.

(2) 이는 낮은 온도에서 불투명한 고체상태가 되는 PCM이 겨울철 외기온도로 인해 고체가 되어 태양복사에너지가 실내로 유입되는 것을 차단하기 때문으로 사료된다.

(3) 그러나 대체로 난방에너지소비량보다 냉방에너지소비량이 많은 것으로 나타났기 때문에 연간 총 냉난방에너지소비량은 PCM과 일반단열재가 비슷하거나 PCM이 더 적어 에너지절약에 유리하다.

(4) 따라서 도시열섬현상 저감을 위한 PCM Cool Roof System에 적용되는 PCM의 단열성능은 일반 단열재에 준한다는 결과를 도출하였고 건축마감재로서의 적용성을 확인하였다.

참고문헌

1. 국토개발연구원, 지역별 주택시장에 관한 연구, 1986
2. Bang.S.K., 도시열섬효과 저감을 위한 PCM의 열성능 축소모형 실험 석사학위논문, 중앙대대학원 건축공학과 건축설비 및 에너지 전공, 2016
3. Jung,S.K. et al., 건축물에너지 저감을 위한 Phase change material(PCM) 적용에 대한 고찰, 한국건축친환경설비학회논문집 5권 1호, 2011
4. Jiawei Lei et al., Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore, Applied Energy, Vol. 162, pp 207-217, 2016
5. Kim.J.H., 건물외벽의 단열 공법에 따른 열성능 평가에 관한 연구 : 건물의 사용 용도를 중심으로 석사학위논문, 수원대학교대학원 건축공학과 , 1996
6. Park. S.J. et al. A study on Design Current State and Optimization of Envelope Composition of Multi-Family Housing, 대한건축학회논문집 15권 2호, 2013