

상변화물질을 적용한 건축자재의 에너지절약 가능성 분석

안상민*, 황석호**, 김태연*** 이승복****

*연세대학교 대학원 건축공학과(sman@yonsei.ac.kr),
**연세대학교 친환경 건축연구센터(hwangsh@yonsei.ac.kr),
***연세대학교 건축공학과(tkim@yonsei.ac.kr),
****연세대학교 건축공학과(sbleigh@yonsei.ac.kr)

The Analysis of the Energy Saving Performances of Building Materials using Phase Change Materials

An, Sang-Min*, Hwang, Suck-Ho**, Kim, Taeyeon***, Leigh, Seung-Bok****

*Dept. of Architecture, Graduate School, Yonsei University(sman@yonsei.ac.kr),
**Dept. of Architecture, Center for Sustainable Housing of Yonsei University(hwangsh@yonsei.ac.kr),
***Dept. of Architecture, Yonsei University(tkim@yonsei.ac.kr),
****Dept. of Architecture, Yonsei University(sbleigh@yonsei.ac.kr)

Abstract

Thermal storage plays an important role in building energy saving, which is greatly assisted by the incorporation of latent heat storage in building materials. A phase change material is a substance with a high heat of fusion which, melting and solidifying at a certain temperature, can be storing and releasing large amount of energy. Heat is stored or released when the material changes from solid to liquid. Integration of building materials incorporating PCMs into the building envelope can result in increased efficiency of the built environment. The aim of this research is to identify thermal performance of PCMs impregnated building materials which is applied to interior of building such as gypsum and red clay. In order to analyze thermal performance of phase change materials, test-cell experiments and simulation analysis were carried out. The results show that micro-encapsulated PCM has an effect to maintain a constant indoor temperature using latent heat through the test-cell experiments. PCM wallboard makes it possible to reduce the fluctuation of room temperature and heating and cooling load by using EnergyPlus simulation program. Phase change material can store solar energy directly in buildings. Increasing the heat capacity of a building is capable of improving human comfort by decreasing the frequency of indoor air temperature swings so that the interior air temperature is closer to the desired temperature for a long period of time.

Keywords : 축열(Thermal storage), 상변화물질(Phase change material), 잠열(Latent heat),
PCM보드 (PCM Wallboard)

기 호 설 명

T	: Node temperature (°C)
i	: Node being modeled
$i+1$: Adjacent node to interior of construction
$i-1$: Adjacent node to exterior of construction
$T_{i,new}$: New temperature at end of time step
$T_{i,old}$: New temperature at end of previous time step
Δt	: New temperature at end of time step
Δx	: Finite difference layer thickness
C_p	: Specific heat of material
ρ	: Density of material

1. 서 론

축열재를 이용한 에너지 절약 기술은 냉·난방용으로 다양하게 이용되어 왔으며 상당한 부분에 있어서 에너지 절약에 기여하여 왔다. 국내의 경우에는 실내 냉·난방을 위하여 사용되는 에너지를 장시간 동안에 재실자가 원하는 온도를 유지할 수 있도록 하여 에너지 사용 효율을 높일 수 있는 장점을 지닌 상변화물질을 건축물에 적용한 사례 및 연구 활동이 국외에 비해 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 상변화물질의 축열성능을 실험과 시뮬레이션을 통해 분석하여 공동주택에서의 쾌적성과 에너지효율성을 향상시키고자 하였다.

2. 기존 연구 고찰

상변화물질을 함유한 건축자재의 축열 성능에 대해 국외 연구 문헌들을 중심으로 조사·분석하였다

Peippo K et al.¹⁾은 석고보드에 PCM을 적

1) Peippo K, Kauranen P, Lund PD. A Multi-Component PCM Wall

용하여 남측벽에 큰 창문이 설치된 바닥면적 120m²의 Passive Solar House에 적용하였다. 실험 결과, 연간 에너지비용을 15% 절감하였으며, 3GJ에 해당하는 에너지를 절약하였다. 또한 자연형 태양열 주택에는 실내의 평균온도 보다 2~3°C 높은 상변화온도를 가진 PCM이 적합하다는 결론을 내렸다.

Steitu C et al.²⁾은 PCM wallboard의 잠열에 의한 축열 성능을 평가하였다. 야간에 차가운 외기를 기계환기를 통해 실내에 도입하여 PCM wallboard를 냉각 시킨 후, 저장된 열을 주간에 사용할 경우 최대 냉방부하를 28%까지 줄일 수 있다는 결론을 내렸다.

3. 연구의 방법 및 절차

상변화물질의 축열성능을 분석하기 위해서 테스트 셀 실험(Test-cell experiments)과 인천광역시 연세대학교 송도 캠퍼스에 있는 Greenhome+ 80 Model에 적용된 PCM 축열 보드를 중간기 실측과 시뮬레이션 모델링을 통해 PCM의 축열 성능을 분석하였다.

3.1 Test-cell 실험

(1) 실험 개요

Micro-encapsulated된 상변화물질 자체의 열저장 능력을 분석하기 위해 3개의 테스트 셀을 제작하여 각각의 물질을 넣어 실험을 실시하였다.



• Case 1(시멘트) • Case2
PCM(8)+시멘트(2) • Case 3 (PCM)

그림 1. 적용 물질

Optimized for Passive Solar Heating, Energy Build, 1991

2) Steitu C, Feustel HE, Phase Change Wallboard and Mechanical Night Ventilation in Commercial Buildings, Lawrence Berkeley National laboratory, 1998

표 1. 테스트 셀 실험 개요

항목	내용
실험 일자	2010.11.07.
실험 장소	연세대 건축환경실험실
테스트 셀 크기	500*500*500 (mm)
재료	Extruded Polystyrene Board
각 물질의 양	1.8 kg
적용부위	바닥(가루형태)
실험장비	데이터로거, 열전대, 전구(10W)
측정 항목	실내온도, 표면온도, 물질온도

표 2. 실험재료 물성치

내용	물질	
	PCM	Cement
열전도율 (W/m ² ·°C)	0.21(고체)	0.029
밀도 (kg/m ³)	760(고체), 900(액체)	1920
비열 (kcal/kg·°C)	1675	670
구성 물질	Paraffin C ₁₃ -C ₁₄	Portland C.
잠열량 (kJ/kg)	168	.
상변화온도 (°C)	24	.

(2) 실험 방법

실험 전, 챔버실 및 테스트 셀 내부의 온도를 환기를 통해 일정온도를 유지한 후 각 테스트 셀의 온도가 20°C가 되었을 때 발열기인 10W 전구를 작동하고 문을 폐쇄하였다. 12시간 지나서 전구를 끄고 5시간이 지난 이후에 실험을 중단 한 뒤 실내 및 표면온도 등의 분포를 분석 하였다.

3.2 PCM 축열보드 실험

(1) 실험 개요

상변화물질을 이용한 여러 건축기술 중, 그린홈플러스 80 모델에는 각 실 내부마감재로 PCM 축열보드가 벽면에 적용되었다. 상변화물질을 이용한 건축자재의 축열 성능을 파악하기 위하여 중간기에 야간통풍냉각의 개념의 실측을 실시하였다. 비교 대상 세대는 창호 및 벽체의 열관류율 등 성능이 가장 비슷한 100모델을 비교군으로 선정하여 실측을 하였다.

(2) 실험 방법

야간의 기온이 상변화온도보다 낮은 24°C

이하 일 때, 외기의 차가운 공기를 창문을 통해 유입하여 PCM 축열보드를 냉각 시킨 후, 온도가 올라가는 시점에 문을 닫아 주간에 상승하는 실내온도 변화 폭을 분석하기 위한 실험을 실시하였다. 실험기간은 2010년 9월 15일부터 20일까지 실시하였다.

표 3. 실험 개요

항목	내용
실험 일자	2010.09.15. ~20
실험 장소	인천시 연수구 송도동 연세대학교
실험 대상	Greenhome+ 80, 100 Model (침실1)
실험 장비	노트북, c-DAQ, 열전대, 흑구온도계
측정 항목	실외온도, 실내온도, 벽체표면온도

3.3 시뮬레이션 분석

(1) 개요

PCM 축열보드의 성능을 분석 하기 위해 미국 DOE (Department of Energy)에서 개발 된 EnergyPlus를 사용하여 상변화물질의 유·무에 따른 그린홈플러스 80모델의 실내 열환경을 분석하였다.

(2) 시뮬레이션 알고리즘

EnergyPlus에서는 건물을 구성하고 있는 표면의 해석법은 BLAST에서 이어져온 전달함수의 변형 방법에 의존해 왔다. 이러한 방법은 변수들의 고정된 값과 일정한 물질의 특성 등의 변형을 기본으로 하는 해법의 일반적인 제한을 가진다. 예를 들어 고체에서 액체로 상변화 할 때 에너지의 저장용량이 커지는 상변화물질의 경우 좀 더 진보된 해석 방법이 필요하다. 이는 좀 더 근본적인 형태에서 변형까지 한 단계 뒤로 분석할 수 있는 방법이 필요하게 되었다. EnergyPlus에서는 PCM을 해석하기 위해 Conduction Finite Difference Solution Algorithm 을 사용한다. 이 전도 유한차분법은 EnergyPlus에서 기본적으로 사용하고 있는 전달함수법 (CTF; Conduction Transfer Function)을 대체하는 것이 아닌, 상변화에 따른 열전도율이 변하

는 PCM을 분석하기 위해 보완한 것이다. 이 알고리즘은 상변화물질의 에너지를 정확히 설명하기 위해 엔탈피-온도 함수와 연결된 유한차분 (implicit finite difference) 전략을 사용한다. 상변화물질이 포함된 내부 표면 점에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\rho_p \Delta x (T_{i, new} - T_{i, old})}{\Delta t} = \frac{k(T_{i-1, new} - T_{i, new})}{\Delta x} + \frac{k(T_{i+1, new} - T_{i, new})}{\Delta x} \quad (1)$$

아래의 방정식은 엔탈피와 온도와 관련된 식이다.

$$H_i = HTF(T_i) \quad (2)$$

PCM의 상변화로 인해 생기는 각 단계(고체-액체, 액체-고체)에서의 변화하는 비열 값을 예측하고 발전시키는데 식 (3)을 이용하여 해석한다.

$$C_p = \frac{h_{i, new} - h_{i, old}}{T_{i, new} - T_{i, old}} \quad (3)$$

Time Step을 3분 간격 이하로 설정하여 시뮬레이션을 하면 유한차분법을 이용한 계산을 효율적이고 정확히 할 수 있다.

(3) 분석 대상 및 방법

시뮬레이션의 입력 조건에 대한 설명은 표 4, 5에 나타나 있다.

표 4. 재료 물성치

구분	재료 (외부-내부)	두께 (mm)	열전도율 (W/m·K)	
Gh+80	전·후 벽	마감코트	10	1.4
		미네랄울	110	0.036
		경량콘크리트패널	50	0.32
		그라스울	100	0.034
	측벽	석고보드	9.5	0.174
		마감코트	10	1.4
		미네랄울	110	0.036
		경량콘크리트패널	50	0.32
	그라스울	100	0.034	
	석고보드	9.5	0.174	

표 5. 시뮬레이션 입력 사항

구분	내용
기상데이터	Incheon (IWEC)
내부발열	조명 10.8 W/m ²
	기기 3.5 W/m ²
채실자	2.87명-108W/1인
냉·난방 설정온도 (°C)	냉방기:26 / 난방기 20

4. 상변화물질의 축열 성능에 대한 실험 및 시뮬레이션 결과

4.1 Test-cell 실험 결과

시멘트만 넣은 케이스 1과 PCM과 시멘트의 8:2 비율로 넣은 PCM+시멘트 혼합물의 케이스 2, PCM만 넣은 케이스 3의 실험 결과는 아래와 같다.

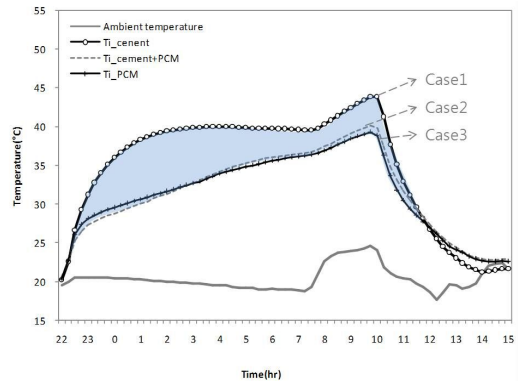


그림 2. 케이스별 실내온도

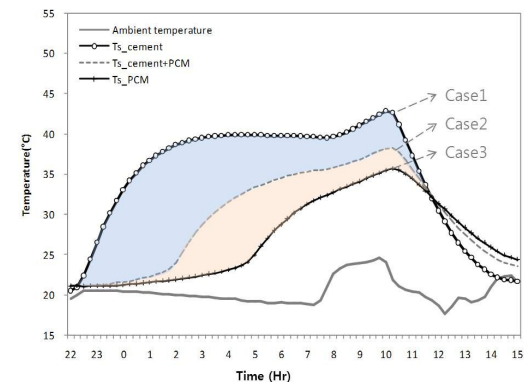


그림 3. 케이스별 물질표면온도

그림 2는 케이스 별 실내온도 곡선을 나타낸 것이다. 시멘트를 넣은 Case 1의 경우, 발열기를 작동 한 시점인 22:00시부터 실내온도가 급격히 상승한 것으로 나타났으며, 발열기를 끈 후에도 온도가 급하게 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. PCM이 포함된 Case 2, 3의 온도곡선을 보면, 전구를 작동 후 30분까지는 실내온도가 급하게 상승하다가 오후 11:00부터는 온도 상승폭이 크지 않으며, Case 1에 비해 온도상승 및 하강폭이 완만한 것을 확인할 수 있으며, 이는 상변화물질의 잠열로 인한 것으로 판단된다. Case 2와 3의 실내온도차이가 크지 않은 것은 Case 2의 PCM 혼합비율이 80%를 차지함으로써 Case 3과 열용량의 차이가 크지 않기 때문인 것으로 판단된다. 실험을 통해 PCM을 시멘트 및 석고 등과 혼합하여 사용 하면 경제성과 시공성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

표 6. Case 별 열용량 비교

Case	열용량 (J)
1	1,206
2	244,573
3	305,415

4.2 PCM 축열보드 실험 결과

PCM 축열보드가 적용되어 있는 그린홈플러스 80모델과 100모델의 중간기 야간통풍냉각 개념의 실측 결과가 아래의 그래프로 나타내었다.

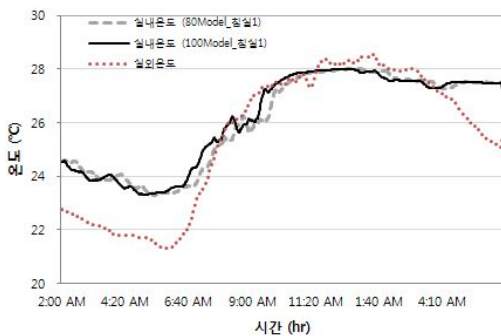


그림 4. 케이스별 실내온도

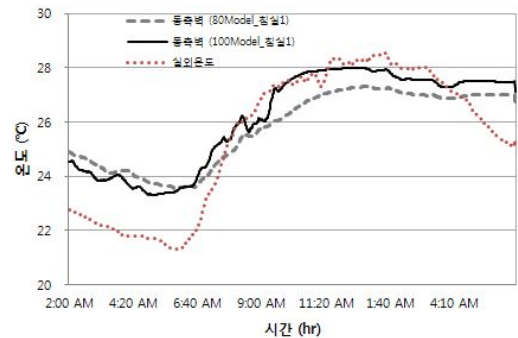


그림 5. 케이스별 벽체표면온도

그림 5의 그래프를 통해 문을 폐쇄한 오전 6:40분부터 100모델의 온도상승곡선이 80모델에 비해 급하게 상승하는 것을 알 수 있으며 80모델의 경우 오전 09:30경에도 100모델보다 1°C 정도 낮은 온도를 유지하고 있는 것을 확인할 수 있다. 벽체표면온도를 통해서도 야간에 환기 이후 개구부를 모두 폐쇄한 6:40분 이후에 0.3°C부터 크게는 1°C 이상의 차이를 유지하는 온도분포를 보인다. 이는 상변화물질의 잠열로 인한 축열 성능이 기인한 것으로 판단된다.

4.3 시뮬레이션 분석 결과

(1) MRT (Mean Radiant Temperature)

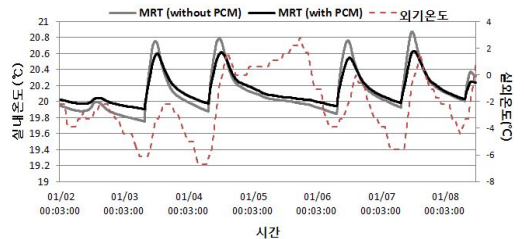


그림 6. 동절기 MRT 비교

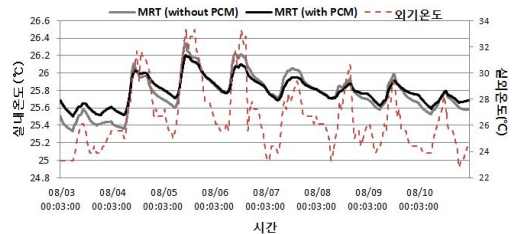


그림 7. 하절기 MRT 비교

표 7. 표준편차 비교

구분	동절기		하절기	
	None	PCM	None	PCM
최고온도	20.87	20.63	26.34	26.20
최저온도	19.75	19.91	25.33	25.50
평균온도	20.13	20.15	25.77	25.79
표준편차	0.26	0.18	0.22	0.15

MRT 분석결과, PCM을 적용한 경우, 그렇지 않은 경우에 비하여 축열성능으로 인한 온도변화 폭이 크지 않은 것으로 확인 되었으며 표준편차의 경우도 PCM을 넣은 케이스의 경우 편차 값이 0에 더 가까움으로 분석값의 산포(散布)의 정도가 크지 않아 실내 온도 변동폭이 크지 않음을 확인 할 수 있다.

(2) 냉·난방 부하 비교

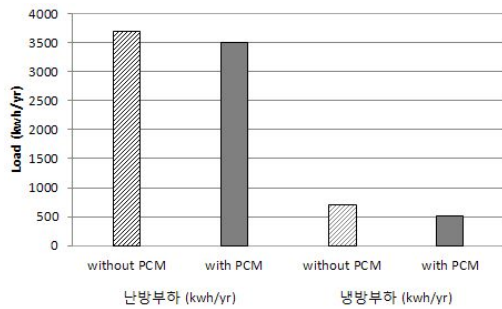


그림 8. 냉·난방 부하 비교

표 8. 냉·난방부하 절감율 비교

난방부하 (kwh/yr)		냉방부하 (kwh/yr)		절감율 (%)	
None	PCM	None	PCM	난방	냉방
3703	3499	713	506	5	29

상변화물질을 적용할 경우 난방부하를 5%, 냉방부하를 29%정도로 효과적으로 줄일 수 있는 것으로 분석되었으며, 이는 PCM의 잠열로 인한 열용량의 증가가 원인이 된 것으로 사료된다. 시뮬레이션 결과를 통해, 그린홈플러스 80모델에 상변화온도 24℃의 PCM을 적용을 하면 냉·난방 부하 모두 긍정적인 에너지절약 가능성이 있음을 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구의 주요 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 테스트 셀 실험을 통해 상변화물질 자체의 축열성능으로 인한 온도변동 폭의 감소를 확인할 수 있었다.
- (2) 그린홈플러스 80모델에 적용된 축열보드의 야간통풍냉각을 이용한 실험결과, 야간에 저장된 냉열을 온도가 상승하는 주간에 방출하여 최고실내온도를 도달점을 낮추고 온도 변동 폭을 줄인 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 시뮬레이션결과를 통해서 상변화온도 24℃의 PCM을 적용할 경우 냉·난방 부하 모두 절약할 수 있는 것으로 분석되었다.

후 기

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(06건설 핵심 BD2)에 의하여 수행되었음

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (R11-2005-056-02001-0)

참 고 문 헌

1. Peippo K, Kauranen P, Lund PD. A Multi-Component PCM Wall Optimized for Passive Solar Heating, Energy Build, 1991
2. Stetiu C, Feustel HE, Phase Change Wallboard and Mechanical Night Ventilation in Commercial Buildings, Lawrence Berkeley National laboratory, 1998
3. US Department of Energy, LBNL Simulation Research Group, EnergyPlus Engineering Reference, 2010