

동적 에너지 시뮬레이션을 이용한 PCM보드의 설계변수 분석에 관한 연구

Analysis of PCM Wallboards Design Parameters using Dynamic Energy Simulation

이진욱* 안상민** 김태연*** 이승복****
Lee, Jin-Uk An, Sang-Min Kim, Taeyeon Lee, Seung-Bok

Abstract

A phase-change material is a substance with a high heat of fusion which, melting and freezing at a certain temperature, is capable of storing and releasing large amounts of energy. Heat is absorbed or released when the material changes from solid to liquid. Therefore, PCMs are classified as latent heat storage (LHS) units.

The purpose of this study is to analyze PCM wallboard design parameters using dynamic energy simulation. Among the factors of PCM, melting temperature, latent heat, phase change range, thermal conductivity are very important element to maximize thermal energy storage. In order to analyze these factors, EnergyPlus which is building energy simulation provided by department of energy from the U.S is used. heat balance algorithm of energy simulation is conduction finite difference and enthalpy-temperature function is used for analyzing latent heat of PCM.

The results show that in the case of melting temperature, the thermal energy storage could be improved when the melting temperature is equal to indoor surface temperature. It seems that when the phase change range is wide, PCM can store heat at a wide temperature, but the performance of heat storage is languished.

키워드 : 상변화물질, 미립캡슐보드, 축열, 진폭감쇄율, 작용온도

Keywords : Phase Change Material, Microencapsulated PCM Wallboard, Thermal Energy Storage, Decrement Factor, Operative Temperature

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 기후변화로 인해 온실가스 저감 정책 및 기술 개발의 필요성이 대두되고 있다. 온실가스 배출과 밀접한 관계가 있는 에너지의 소비는 전 세계적으로 산업, 수송, 건물 분야에서 집중되어 있고, 특히 건물에서의 에너지 소비량은 전체의 약 30%에 달한다. 이처럼 건물에서 발생하는 에너지 소비량을 저감하기 위한 기술을 살펴보면 크게 옥상, 벽면 녹화, 단지환경 개선과 같은 외부 열 환경적 분야와 창호, 벽체의 개선과 관련된 건물 분야, 냉난방시스템 및 환기시스템, 신재생에너지 기술과 같은 시스템 분야로 나눌 수 있다. 그 중에서 건물분야와 관련하여 건물의 외피는 핵심적인 요소로 냉난방에너지 소비량과 밀접한 관계가 있다. 외피와 관련된 다양한 기술 중 상변화물질의 축열 효과를 이용한 건축자재의 활용은, 건물

외피의 열용량을 증대시켜 건물의 냉난방부하를 감소시키고 동시에 내부 온도의 변화폭을 줄여 채실자의 쾌적성을 증진시킬 수 있는 방안이라 할 수 있다. 특히, 건물의 사용성과 수익성 측면에서 벽체와 바닥 두께가 얇아지는 시점에서 충분한 열용량의 확보는 반드시 선결되어야 할 주제이다. 상변화물질과 관련된 연구들은 유럽과 미국, 중국에서 활발히 연구가 진행 중에 있으나 국내의 경우, 관련 연구가 미비하며 건축물에 적용되는 사례가 적은 것으로 사료된다.

따라서 본 논문에서는 동적에너지 시뮬레이션을 이용하여 상변화물질을 국내 건축물에 올바르게 적용하기 위한 PCM의 타당한 설계 변수를 분석하는 것이 목적이다.

1.2 연구 방법 및 범위

본 연구의 방법으로는 미국 에너지성에서 제공하는 EnergyPlus 6.0 version을 이용하여 PCM의 핵심 변수인 상변화온도, 상변화온도범위, 잠열량, 열전도를 변화에 따른 실내 열환경 변화 여부를 분석하였다. 본 연구에서는 마이크로캡슐화된 상변화물질을 석고보드와 혼합·제조 하여 만든 실내 건축 마감재료를 Microencapsulated PCM

* 주저자, 포항산업과학연구원 (rumor7@rist.re.kr)
** 교신저자, SGS Korea Environment (sangmin.an@sgs.com)
*** 정회원, 연세대학교 건축학과 부교수(tkim@yonsei.ac.kr)
**** 정회원, 연세대학교 건축공학과 교수(sblee@yonsei.ac.kr)

Wallboard로 정의 한 후, 동, 서, 남, 북 측 벽면에만 설치하는 Wallboards 개념으로 적용하였다. 그림 1에 전체 연구에 대한 진행 흐름을 나타내었다.

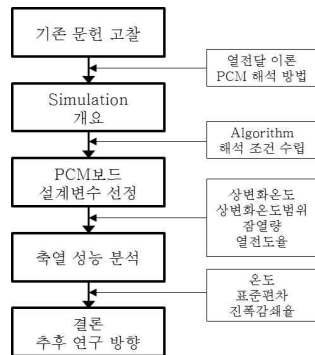


그림 1. 연구 진행 절차

2. 상변화물질 해석 방법

2.1 상변화물질의 정의 및 열전달 특성

모든 물질은 고체 상태에서 액체 상태 또는 액체 상태에서 기체 상태와 같이 물리적인 상태변화 과정을 통하여 열을 축적하거나 방출하게 된다. 이때 축적되거나 방출되는 열을 잠열 (Latent Heat)이라 하며 잠열의 크기는 일반적으로 현열 (Sensible Heat)보다 훨씬 크기 때문에 상변화온도 부근에서의 물질의 열용량은 매우 커진다. 상변화물질은 이러한 성질을 이용한 것으로 상변화온도를 용도에 맞게 조절한 물질이다. 최근에는 상변화 과정에서 발생하는 상분리 현상을 막아 열의 저장 및 방출 과정을 원활하게 하기 위한 미립캡슐잠열재에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 견고한 피막의 형성이 용이한 고분자 물질을 특정 온도 범위에서 상변화를 일으키는 잠열재의 외부에 크기 1 μ m~1mm 정도에 이르는 캡슐화를 통해 잠열 물질간의 응집을 방지하는 동시에 미립자 고유의 특성을 활용함으로써 열저장 및 전달 효과를 극대화시킬 수 있다.[1] 이렇게 마이크로캡슐화된 상변화물질은 건축 마감재료로 넓게 사용되고 있는 석고에 쉽게 혼합 및 적용할 수 있다.

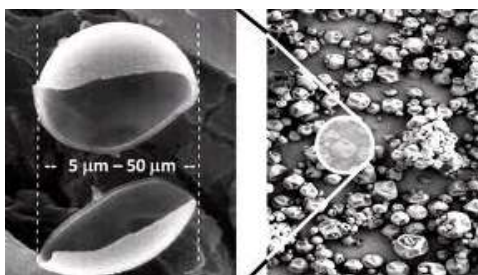


그림 2. PCM microcapsules - composite skin and PCM core material [2]

Microencapsulated PCM Wallboard를 내부 마감재로 설치한 경우, 상변화물질이 저장할 수 있는 열원은 태양 복사에너지와 실내에서 대류와 복사로 전달되는 열, 크게

두 가지로 나눌 수 있다. 실내에서 벽체로 열이 전달되는 열의 양은 (1)로 나타 낼 수 있다.[3]

$$Q = h \int_0^P (T_r - T_m)^+ dt \quad (1)$$

여기서, h = 표면열전달계수 (복사 h_r +대류 h_c)

T_r = 실내온도 (°C)

T_m = 상변화온도 (°C)

P = Period (86400s or 24H)

t = Time (s or H)

위의 식은 실내온도 및 실내평균온도와 상변화온도와 의 관계를 나타낸 식이다. 실내온도가 상변화온도 보다 높을 때, 하루 동안에 벽체에 전달되는 열, 즉 저장할 수 있는 열의 양은 대류 현상에 의해 고체 표면에서 유체에 열을 전달하는 크기를 나타내는 계수인 표면 열전달 계수 값에 비례하고 실내온도가 상변화온도보다 온도가 높은 시간이 길수록 저장할 수 있는 열, 즉 열의 전달이 잘 됨을 알 수 있다. 반대로, 실내온도의 변화폭이 일정할 경우, 상변화물질의 용해 및 응고 과정 (Melting & Freezing Process)이 미비하여 축열 성능이 저하함을 알 수 있다.

아래의 그림은 실내온도분포가 사인그래프와 유사할 때 상변화물질이 저장할 수 있는 열의 양을 나타낸 그래프이다.

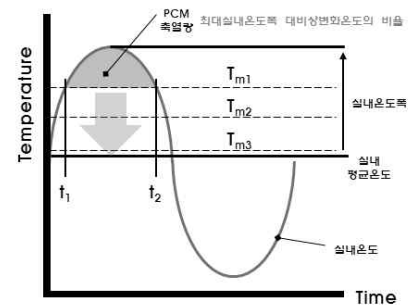


그림 3. 실내온도와 상변화온도와의 관계

상변화물질이 열을 저장할 수 있는 온도 구간(t_1-t_2)은 식 (2)를 통해 알 수 있다.

$$\sin\left(\frac{t_1}{2\pi P}\right) = \sin\left(\pi - \frac{t_2}{2\pi P}\right) = \frac{T_m}{T_a} \quad (2)$$

여기서, T_m = 상변화온도 (°C)

T_a = 최대실내온도폭

t = 실내온도 (°C)

t_1 과 t_2 는 최대실내온도폭 대비 상변화온도의 비율, 즉 PCM이 저장할 수 있는 열의 구간을 의미한다. 이 구간에 저장할 수 있는 열 에너지는 식 (3)을 통해 구할 수 있다.

$$Q_{\sin} = h \int_{t_1}^{t_2} [T_a \sin(\frac{2\pi}{P}t) - T_m] dt \quad (3)$$

위에 나타난 식과 다이어그램을 통해, 평균 상변화온도가 평균 실내온도에 가까울수록 축열량이 증가하고 평균 상변화온도와 평균 실내온도 차이가 커지면 축열량이 감소하는 것을 알 수 있다. 시간지연효과의 경우, 평균상변화온도보다 약간 높은 경우에 최대값을 나타내며, 상변화온도구간이 크면 최대 축열량은 작지만 평균 실내온도에서 벗어난 환경에서 일정한 축열 성능 및 시간지연 효과에 영향을 미치는 것으로 알 수 있다.

2.2 상변화물질의 시뮬레이션 알고리즘

EnergyPlus의 기본 외피 알고리즘인 전달함수법(Conduction Transfer Function, CTF)은 BLAST의 전달함수를 변형한 것으로 상변화물질의 비선형적 특징을 구현하기 어렵다. 따라서 전도 유한차분법(Conduction Finite Difference Solution)을 적용한 알고리즘을 이용하여 해석해야 한다. 이 알고리즘은 상변화 에너지를 명확히 구현하기 위해 음함수형 유한차분법(Implicit Finite Difference)과 엔탈피-온도 함수를 결합하여 사용한다. 이때 내부 절점(node)에 대한 음함수 식은 다음과 같다.

$$\frac{\rho c_p \Delta x (T_{i,new} - T_{i,old})}{\Delta t} = \frac{k(T_{i-1,new} - T_{i,new})}{\Delta x} + \frac{k(T_{i+1,new} - T_{i,new})}{\Delta x} \quad (4)$$

- 여기서, T = 절점에서의 온도
- i = 대상이 되는 절점
- $i+1$ = 구조물 내부에 인접한 절점
- $i-1$ = 구조물 외부에 인접한 절점
- new = 새로운 시간스텝
- old = 이전의 시간스텝
- Δt = 시간스텝의 크기
- Δx = 격자간격
- C_p = 비열
- ρ = 밀도

식(1)과 결합되는 엔탈피와 온도에 관련된 식은 다음과 같다.

$$h_i = HTF(T_i) \quad (5)$$

여기서, HTF 는 엔탈피-온도 함수로 사용자에게 의해 데이터가 입력된다.

상변화물질은 온도에 따라 비열이 변화하므로 iteration이 진행될 때마다 이를 반영해주어야 하는데, 이와 관련된 식은 다음과 같다.

$$C_p = \frac{h_{i,new} - h_{i,old}}{T_{i,new} - T_{i,old}} \quad (6)$$

2.3 기존문헌 고찰

일반적으로 상변화물질을 시뮬레이션을 이용하여 분석하기 위해서는 크게 Effective Heat Capacity Method (유효 열용량 방식)와 Enthalpy-Temperature Method (엔탈피-온도 방식)로 해석할 수 있다. Chun-long Zhuang, An-zhong Deng 등은 EnergyPlus에서 PCM의 비선형적 특징을 구현하기 위해 제공되는 Enthalpy and Temperature Method (엔탈피-온도 방식)의 정확성을 파악하기 위해 PCM보드가 적용된 실제 건물에서의 실측값과 비교하였다. 실험실 내부 벽체 표면온도 값과 시뮬레이션 결과 값을 비교한 결과, 최대 12.41%, 최소 0.71% 차이가 나타나 EnergyPlus의 시뮬레이션 알고리즘이 타당한 것으로 연구·보고 했다.[4]

Dariusz Heim, Joe A. Clarke은 Effective Heat Capacity Method (유효 열용량 방식)를 이용하여 PCM의 잠열 축열 성능을 분석할 수 있는 ESP-r 건물에너지 시뮬레이션을 이용하여 건물의 실내 열환경을 분석하였다. 해석 결과, PCM의 냉각온도(Solidification Temperature)가 난방 설정온도인 20℃보다 2℃높게 설정할 경우, 냉난방 초기 시점인 3월과 11월에 에너지 소비량이 90%까지 절감 가능하다는 연구 결과를 보고 한 바 있다.[5]

Chao Chen, Haifeng Guo 등은 MATLAB software를 이용하여 Effective Heat Capacity Method (유효 열용량 방식) 계산을 통해 상변화온도 및 두께, 잠열량 변화에 따른 PCM Wallboard의 축열 성능을 분석하였다. 분석 결과, 잠열량이 증가할수록 에너지 절감률도 향상되지만 잠열량이 40kJ/kg을 초과하면 그 효과는 미비하며, PCM layer의 두께가 30mm, 40mm, 50mm일 경우, 에너지절감율은 큰 차이가 나타나지 않은 것으로 보고했다. 상변화온도의 경우, 난방설정온도보다 3℃높게 설정한 23℃의 PCM Wallboard가 에너지 절감율이 17%로 가장 높게 나타났으며, 이는 PCM의 용융 및 응고 과정이 가장 활발하게 작용한 것에 기인한 것으로 보고하였다.[6]

3. 시뮬레이션을 이용한 PCM보드의 설계변수 분석

3.1 개요

PCM의 핵심 변수인 상변화온도, 상변화온도범위, 잠열량, 열전도율 변화에 따른 실내 열환경 분석하였다. PCM을 주거건물, 업무시설, 학교 시설 등 건축물에 적용하기 전, 상변화물질의 핵심변수를 정확히 이해하고 올바르게 적용하기 위해 기본적 변수에 대한 분석을 동적 에너지 시뮬레이션을 이용하여 실시하였다. PCM적용 부위는 PCM Wallboards 개념으로 동, 서, 남, 북 측 벽면에만 적용하였다. 상변화물질의 활발한 용해 및 응고 과정을 최대화하기 위해 실내온도 분포가 사이곡선과 비슷한 분포를 보이는 중간기 5월로 선정하였다. 냉난방시스템은 작동하지 않았으며 PCM 변수에 따른 정확한 분석을 위하여 내부발열을 제거하였다. 표 1에 PCM을 분석하기 위해 가정한 시뮬레이션 사용법을 기술하였으며, 표 2에 PCM보드 설계 변수 분석을 위한 시뮬레이션 개요를 분

석하였다.

표 1. PCM 해석을 위한 시뮬레이션 개요 및 PCM 물성치

항목	내용
해석 대상	5m * 4m * 3m
해석 지역	Incheon
해석 기간	5월1일~31일
냉난방시스템	off
환기량	시간당 0.7회 환기
방위	정남향
열관류율 (W/m ² K)	벽체: 0.4 / 창호: 3.5
창호 면적	벽면적 대비 창호 비율 : 20%
PCM 물성치	유기질 물질: Paraffin Hexadecane C16H34)
	잠열량: 100 kJ/kg
	밀도: 830 kg/m ³
	열전도율: 0.2 W/m · K
	비열: 1842J/kg · K

표 2. PCM 해석을 위한 시뮬레이션 가정

1. 상변화온도 전에는 석고보드, 석고보드의 표면온도가 상변화온도에 도달할 경우, PCM보드 역할을 하는 것으로 가정
2. 상변화온도범위 : 임의로 설정한 상변화온도 범위 내에서 완전한 상변화과정이 이루어지는 것으로 가정
3. 상변화온도범위 : 상변화온도를 기준으로 전, 후의 상변화범위는 동등한 간격의 온도 범위로 가정
4. 잠열량 : 최저 상변화온도에서 최고상변화온도로 상승할수록 잠열량이 비례적으로 증가하는 것으로 가정

3.2 적정 상변화온도 분석

상변화물질의 상변화온도는 PCM보드의 가장 큰 변수이며, 올바른 온도산정을 통해 실내 열환경을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 앞에서 언급한 열전달 부분을 바탕으로 상변화온도 분석 대안을 선정하였다. 분석에 앞서 에너지시뮬레이션을 통해 석고보드를 적용한 건물의 실내온도 및 벽체표면온도 분포를 분석하였다. 표 3에 상변화온도 변화에 따른 축열 성능 분석을 위한 대안을 나타내었다.

표 3. 상변화온도변화에 따른 축열 성능 분석 대안

항목	상변화온도 (°C)	
Case 1	21	평균 실내온도 동일
Case 2	22	평균 벽체표면온도 동일
Case 3	23	평균 실내온도 2°C 높게 설정
Case 4	24	평균 벽체표면온도 2°C 높게 설정

3.3 상변화온도 범위

상변화물질의 경우 고유의 상변화온도와 상변화온도 범위에 걸쳐 응고 및 용해를 한다. 건물의 열환경을 개선하기 위해서 상변화물질의 상변화온도 범위가 실내에 어떠한 영향을 미치는지 건물에너지 시뮬레이션 프로그램을 통해 비정상해석을 실시하였다. 본 연구에서는 상변화온도범위 증가에 따른 실내 온열환경 변화를 분석 하였다. 표 4에 시뮬레이션 분석 케이스를 명시하였다. 본 연구에서는 상변화물질의 냉각 프로세스는 고려하지 않았다.

표 4. 상변화온도범위에 따른 시뮬레이션 분석 대안

항목	상변화온도범위 (±)	상변화범위 온도 (°C)
Case1	1	22
Case2	2	21~23
Case3	4	20~24
Case4	8	18~26

3.4 잠열량

본 연구에서는 잠열량 증가에 따른 실내 열환경 변화를 분석하였다. 잠열량 변화에 따른 실내 열환경 분석시, 상변화온도 및 상변화온도범위 변화에 따른 분석 결과를 바탕으로 축열 성능이 가장 뛰어난 22°C(상변화온도), 21~23°C(상변화온도 범위)로 선정하였다.

표 5. 잠열량 변화에 따른 분석 대안

항목	잠열량 (kJ/kg)
Case 1	50
Case 2	100
Case 3	150
Case 4	200
Case 5	250
Case 6	300

3.5 열전도율

EnergyPlus에서는 각 건축재료의 온도변화에 따른 열전도율 변화 값을 입력할 수 있도록 Material Property: Variable Thermal Conductivity 모듈을 제공한다. 상변화물질이 적용된 건축자재를 선정된 후, 20°C에서의 기준 건축자재의 열전도율 및, 상변화온도 때의 PCM의 열전도율을 입력하여 분석 할 수 있다. PCM을 이용한 축열 방법은 높은 잠열량을 이용하기 때문에 특정 온도범위에서 사용자가 원하는 온도를 장시간 유지할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 PCM 고유의 낮은 열전도율 문제로 인해 열이 잘 전달되지 않는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 높은 열전도율의 충전제를 이용한 고효율 PCM에 대한 연구가 이루어지고 있다. 김수민 외 3명(2011)은 Exfoliated graphic nanoplatelets (xGnp)를 이용하여 PCM의 열전도율 개선을 하였다. 본 연구에서는 열전도율과 PCM의 축열 성능을 건물에너지 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 분석하였다. 표 6에 PCM 열전도율 변화에 따른 축열 성능을 분석하기 위한 해석 대안을 나타내었다.

표 6. PCM 열전도율 변화에 따른 축열 성능 분석 대안

항목	잠열량 (kJ/kg)
Case 1	0.2
Case 2	0.5
Case 3	0.8

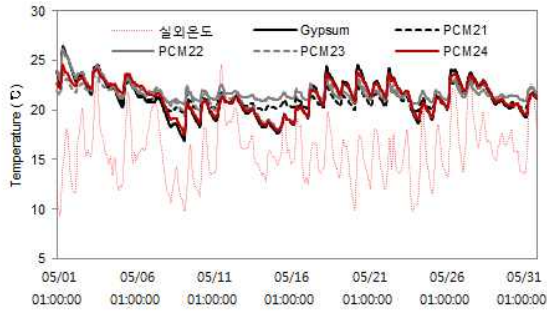


그림 4. 상변화온도 변화에 따른 실내온도

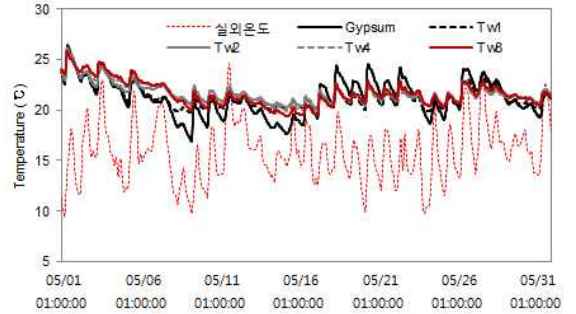


그림 9. 상변화온도 범위 변화에 따른 실내온도

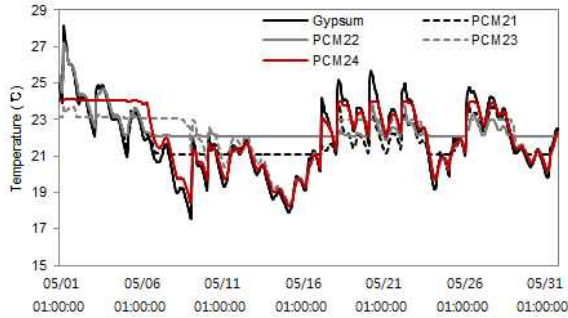


그림 5. 상변화온도 변화에 따른 벽체 표면온도

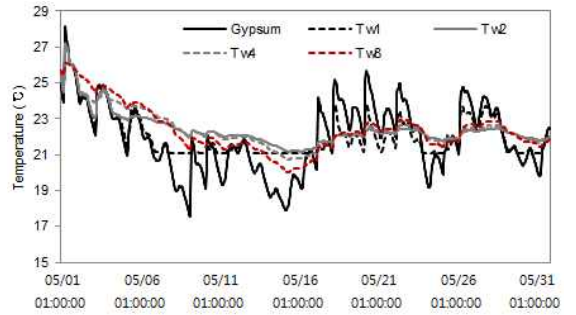


그림 10. 상변화온도 범위 변화에 따른 벽체 표면온도

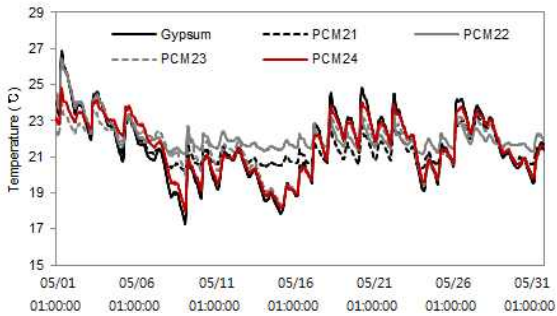


그림 6. 상변화온도 변화에 따른 작용온도

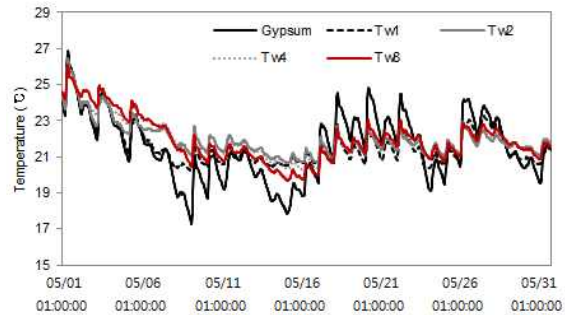


그림 11. 상변화온도 범위 변화에 따른 작용온도

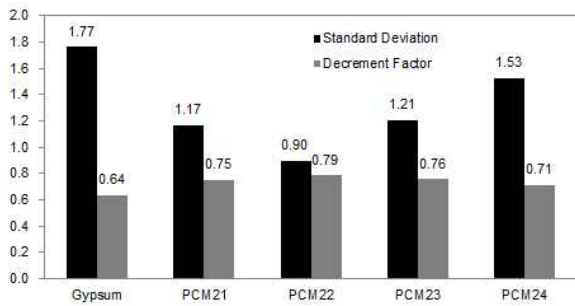


그림 7. 상변화온도 변화에 따른 실내온도에 대한 표준편차 및 진폭감쇄율

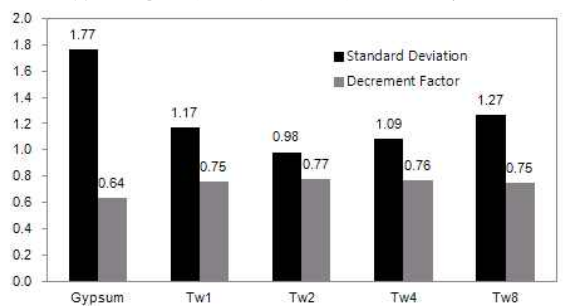


그림 12. 상변화온도 범위 변화에 따른 실내온도에 대한 표준편차 및 진폭감쇄율

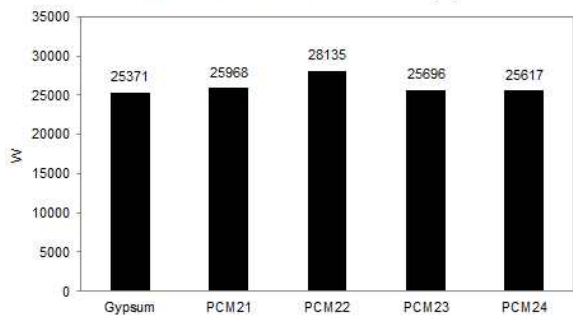


그림 8. 상변화온도 변화에 따른 Surface Convection Rate

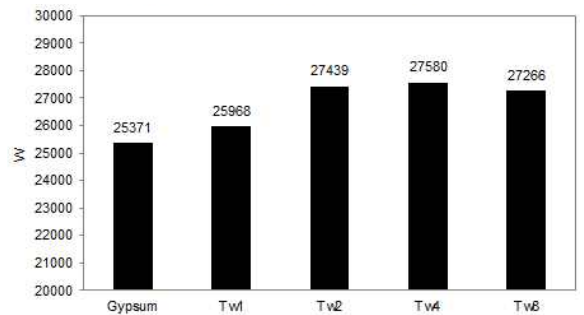


그림 13. 상변화온도 범위 변화에 따른 Surface Convection Rate

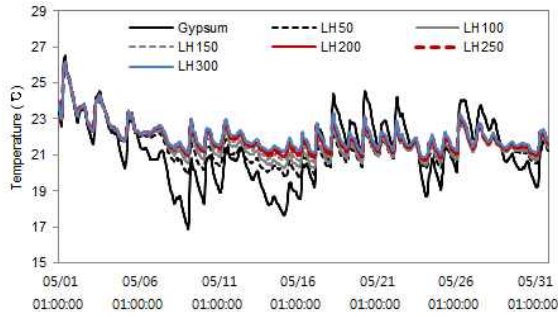


그림 14. 잠열량 변화에 따른 실내온도

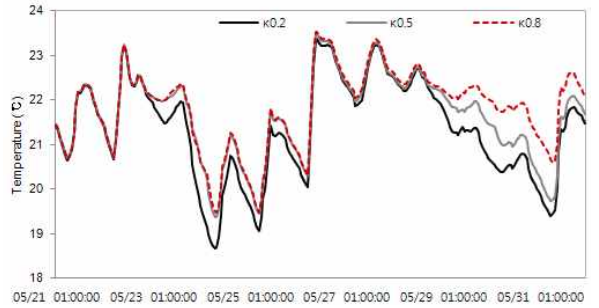


그림 19. 열전도율 변화에 따른 실내온도

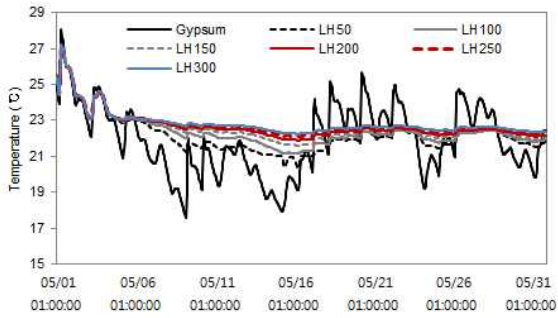


그림 15. 잠열량 변화에 따른 벽체표면온도

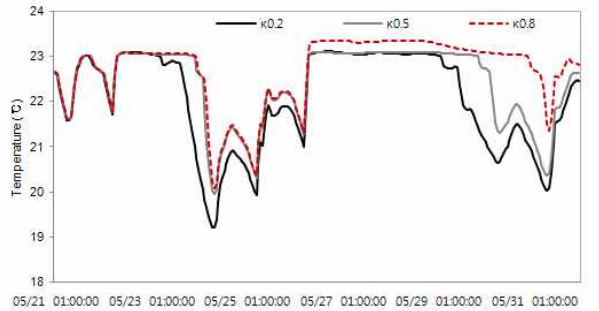


그림 20. 열전도율 변화에 따른 벽체표면온도

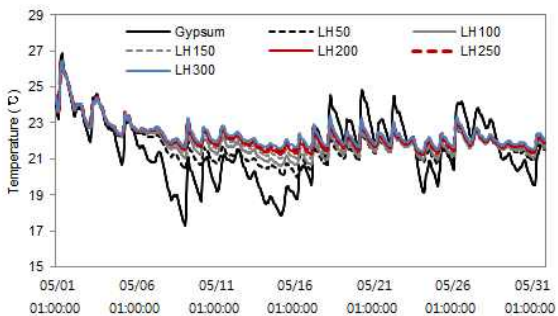


그림 16. 잠열량 변화에 따른 작용온도

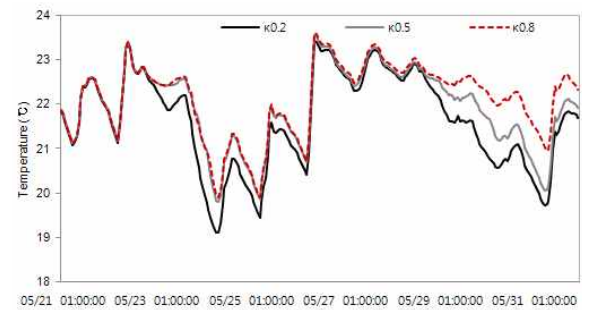


그림 21. 열전도율 변화에 따른 작용온도

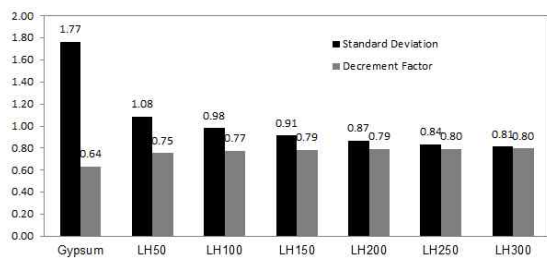


그림 17. 잠열량 변화에 따른 실내온도에 대한 표준편차 및 진폭감쇄율

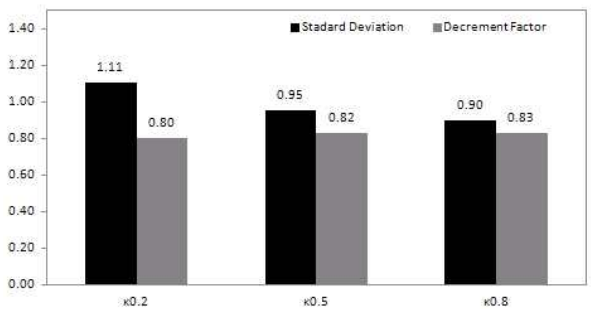


그림 22. 열전도율 변화에 따른 실내온도에 대한 표준편차 및 진폭감쇄율

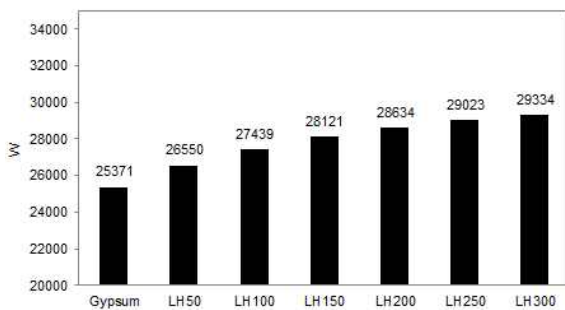


그림 18. 잠열량 변화에 따른 Surface Convection Rate

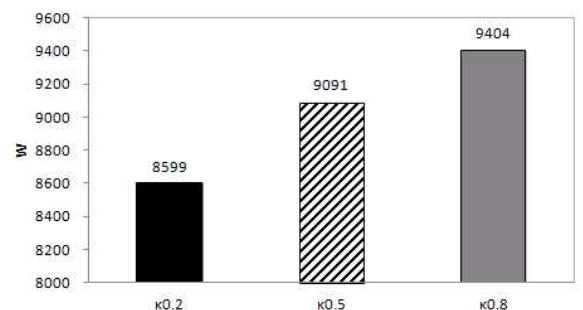


그림 23. 열전도율 변화에 따른 Surface Convection Rate

4. 해석 결과

4.1 상변화온도 (Melting Temperature)

그림 4~6에 나타난 온도 그래프를 통해서 벽체평균온도와 동일하게 선정된 상변화온도 22°C의 PCM보드가 설정된 상변화온도 범위에서 가장 긴 시간 온도를 유지하는 것으로 나타나 잠열체의 축열 및 방열 과정이 가장 활발하게 일어난 것으로 사료된다. 정량적인 평가를 위해 해석 기간 동안의 표준 편차 및 진폭감쇄율을 그림 7에 표시하였다. 표준편차의 경우, 실내 평균온도에 대한 산포도를 나타낸 값으로 낮을수록 실내 온도 변동폭이 크지 않음을 의미한다. 진폭감쇄율은 일반적으로 외벽체에 설치된 축열체에서 일어난 열류의 최대편차와 열용량이 0으로 가정된 구조체 내에서 발생하는 열류의 최대편차와의 비를 말한다. 본 연구에서는 실내최고온도대비 최저온도 비율을 진폭감쇄율로 정의하였으며 1에 가까울수록 실내 온도 변동폭이 크지 않음을 의미 한다.[7] 표준편차를 비교해 보면 평균 벽체표면온도와 동일하게 설정한 경우가 0.90 실내온도가 평균온도 범위에서 큰 변화 없이 유지하는 것으로 나타났다. 진폭감쇄율 분석 결과, 벽체 표면온도와 동일하게 설정한 22°C의 PCM보드가 가장 우수한 것으로 나타났다. 그림 8은 상변화온도 변화에 따른 Surface Convection Rate를 표시하였다. EnergyPlus 프로그램에서는 실내의 열평형을 맞추기 위해 벽체에서 방출하거나 축열한 에너지의 합을 의미하는 Surface Convection Rate 결과 값을 제공한다. 벽체 평균온도와 동일하게 설정한 상변화온도 22°C의 PCM보드가 상변화물질의 응고 및 용해과정이 가장 활발히 발생하여 가장 높은 에너지의 양을 나타냈다. 분석을 통해, PCM보드의 적정상변화온도는 벽체평균표면온도와 동일하게 설정해야 함을 알 수 있으며, 실내온도패턴이 제어되지 않고 일교차가 큰 중간기에 축열 효과를 최대화 할 수 있을 것으로 사료된다.

4.2 상변화온도 범위

그림 24는 상변화온도 범위 변화에 따른 PCM보드의 축열 성능을 분석하기 위하여 시뮬레이션에 입력한 온도 변화에 따른 엔탈피 값을 의미한다. 그래프를 통해, 상변화온도범위가 좁은 경우, 특정 상변화온도 범위에서 축열량이 증대하고, 상변화온도범위가 넓은 경우, 넓은 온도 범위에서 축열이 가능하지만 각 상변화온도 때의 축열량은 감소하는 것을 확인할 수 있다.

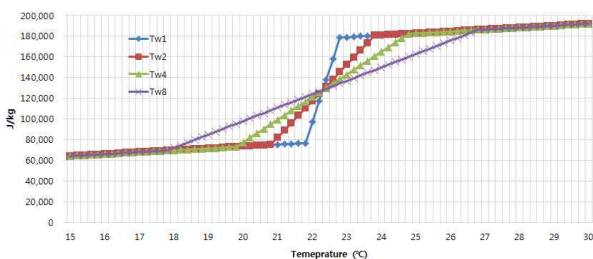


그림 24. 상변화온도 범위 변화에 따른 엔탈피-온도 곡선

그림 9~11에는 상변화온도 범위 변화에 따른 온도 분포 결과를 그래프로 나타냈다. 실내온도 그래프 해석결과, 상변화온도 범위가 21~23°C로 설정된 Tw2 (Temperature Width: 2°C)의 경우, 실내온도 변동 폭이 가장 일정한 것으로 나타났다. 실내평균온도보다 높은 범위에서 설정된 상변화온도로 인하여 주간에 일사를 저장하고 야간에 방출하여 실내평균온도 범위에서 장시간 실내온도를 유지하는 것으로 판단된다. 또한 너무 넓지도 않은 상변화온도 범위 설정으로 온도 때 별 잠열량이 낮지 않게 설정되어 PCM보드의 축열 성능이 가장 활발하게 작용한 것으로 판단된다. 하지만, 상변화온도가 너무 좁게 설정된 경우 축열 성능이 활발히 일어나지 않는 것으로 나타났다. 5월의 실내온도의 경우, 최저 16°C에서 최고 27°C온도 분포를 나타내는데, 상변화온도 범위가 좁을 경우, 변화하는 실내온도에서 열을 저장할 수 있는 시간 범위 또한 줄어들어, 상변화과정이 활발하게 일어나지 않는 것으로 사료된다. 반면, 상변화온도 범위를 넓게 설정한 경우, 실내온도 변동 폭이 쾌적 범위 내에 장시간 머무는 것으로 나타났다. 상변화온도 범위가 넓을수록 다양한 온도범위에서 실내의 열을 저장할 수 있으므로 장시간 재실자가 원하는 쾌적 범위에서 온도를 유지하는 것으로 판단된다. 하지만 각 온도 때별 저장가능한 축열량이 줄어들게 되어 가장 넓게 설정한 Tw8 (18~26°C)의 PCM보드의 경우, Tw2 (21~23°C), Tw4 (20~24°C)의 PCM보드 보다 축열 성능이 떨어지는 것으로 나타났다. 표준편차 및 진폭감쇄율 분석 결과, Tw2 (21~23°C)의 PCM보드가 가장 축열 성능이 우수하여 실내온도 변동폭이 크지 않은 것으로 나타났다. 그림 13에 나타난 Zone Air Balance Surface Convection Rate를 분석한 결과, 상변화온도 Tw4 (20~24°C)의 PCM보드가 27580W로 가장 많은 축열 및 방열에너지를 나타냈으며, Tw2 (21~23°C)의 PCM보드가 27439W로 나타났다.

4.3 잠열량

그림 14~18까지는 잠열량 변화에 따른 온도 분포 곡선 및 축열 성능을 그래프로 나타내었다. 분석 결과, 잠열량이 증가 할수록 상변화물질이 축열을 하거나 방출할 수 있는 에너지의 양이 증가하여 실내 열환경이 향상되는 것으로 나타났다. 높은 잠열량 일수록 상변화온도 범위 내에서 각 온도 별 축열량의 증가로 인하여 설정된 쾌적 범위 안에서 장시간 실내온도를 유지하는 것으로 판단된다.

4.4 열전도율

그림 19~23까지는 상변화물질의 열전도율 변화에 따른 온도 분포 및 축열 성능을 그래프로 나타내었다. 실내온도 분석 그래프를 통해, 열전도율이 증가함에 따라 실내온도 변동 폭이 크지 않음을 알 수 있다. 이는 PCM의 열전도율 향상을 통해 실내 열환경을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 작용온도 분석결과, 실내온도와 비슷한 경향을 나타냈다. 벽체표면온도 분석결과, PCM의 열전도

율이 0.8로 향상된 대안의 경우, 상변화온도 23℃부근에서 장시간 온도를 유지함을 판단 할 수 있다. 열전도율 향상에 따른 PCM보드의 축열 성능을 정량적으로 분석하기 위하여 PCM보드의 잠열로 인한 저장된 열을 실내의 열평을 맞추기 위해 방출한 에너지의 합을 그래프에 나타내었다. 그래프를 통해, 열전도율 0.8인 PCM보드의 경우, 축열 및 방출한 열의 합이 9404W로써 가장 우수한 축열 성능을 나타내는 것으로 알 수 있다.

5. 결론 및 추후 연구 내용

본 연구는 상변화물질의 핵심 변수 인 상변화온도, 상변화온도 범위, 잠열량 및 열전도율 변화에 따른 PCM보드의 축열 성능을 동적 에너지 시뮬레이션을 이용하여 분석한 연구이며, 건물에너지 시뮬레이션 해석을 통한 결론은 아래와 같다.

(1) PCM보드의 설계 변수 분석 결과, 상변화온도의 경우, 벽체표면온도와 동일하게 설정하면 축열 성능이 가장 활발히 일어나는 것으로 판단되었다. 시뮬레이션 해석을 통해, 건물 벽체 표면온도 분석을 통해 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

(2) 상변화온도범위의 경우, 상변화온도를 기준으로 $\pm 1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 로 선정하는 것이 실내 열환경 개선에 가장 효율적인 것으로 나타났다. 상변화물질을 적용하기 전, 특정 물질의 용융 및 냉각점, 상변화온도 범위를 확인할 수 있는 시차주사열량측정(Differential Scanning Calorimetry; DSC)을 실행하는 것이 중요할 것으로 사료된다.

(3) 잠열량의 경우, 잠열량이 증가할 수록 실내 열환경 개선이 가능한 것으로 판단되어 PCM자체 비열이 높고 잠열량이 높은 유기질 물질을 선택하는 것이 잠열량 측면에서 바람직한 것으로 사료된다.

(4) 시뮬레이션 결과, PCM의 열전도율이 높을수록 축열량의 증가로 인해 실내 온도 변동 폭이 크지 않아 건물의 열환경 측면이 개선될 수 있을 것으로 판단된다. 가급적, 열전도율이 높은 상변화물질이 주입된 PCM보드를 이용하여 건물에 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 시뮬레이션을 통해 PCM보드를 벽면에 적용하여 상변화물질의 핵심 변수에 따른 축열 성능을 분석하였다. 추후 연구 진행 사항으로 실내 내부마감재로써 벽체 외에, 바닥과 천장에 PCM보드를 적용 한 후 건물의 실내 열환경에 대한 변화 여부를 평가하는 것이 필요하다. 또한, 에너지 소비 경향이 다른 주거용 건물과 상업용 건물에 일반적으로 사용하는 냉·난방시스템을 구현 한 후 적합한 PCM보드의 설계 변수에 대한 분석과 에너지 절감 가능성에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발 연구개발사업의 연구비지원(11첨단도시G03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 이효진, 이재구, 미립잠열체를 이용한 축열 특성에 관한 실험적 연구, 설비공학논문집 13-2, 2001, pp.80-81
2. Jan Kosny, Dynamic thermal performance analysis of fiber insulations containing bio-based phase change materials (PCMs), Energy and Buildings, Volume 52, 2012, p123
3. D. A. NEEPER, THERMAL DYNAMICS OF WALLBOARD WITH LATENT HEAT STORAGE, Solar Energy 68, 2000, pp394 - 395
4. Chun-long Zhuang, An-zhong Deng, Yong Chen et. al., Validation of Veracity on Simulating the Indoor Temperature in PCM Light Weight Building by EnergyPlus, LSMS/ICSEE 2010, Part I, LNCS 6328, 2010
5. Dariuz Heim, Joe A. Clarke, Numerical Modelling and Thermal Simulation of PCM-gypsum Composites with ESP-r, Energy and Buildings 36, 2004
6. Chao Chen, Haifeng Guo, Yuning Liu, Hailin Yue, Chendong Wang, A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard, Energy and Buildings 40, 2008
7. 구준모, 홍희기, 서형석, 상변화 보드 설계 변수의 축열 성능 영향 연구, 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, 2008, 178
8. J. Kooa, H. Sob, S.W. Honga, H. Honga, Effects of wallboard design parameters on the thermal storage in buildings, Energy and Buildings 43, 2011
9. Atul Sharma, V.V. Tyagi b, C.R. Chen a, D. Buddhi b, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 2009
10. Bogdan M. Diaconua,b, Thermal energy savings in buildings with PCM-enhanced envelope: Influence of occupancy pattern and ventilation, Energy and Buildings 43, 2011
11. 김수민, xGnP를 이용한 건축재료용 고효율·고열전도율 상변화 물질(PCM), 한국건축친환경설비학회 추계학술발표대회, 2008
12. 유석영, 안상민, 김태연, 이승복, 상변화물질을 적용한 건물의 열적 성능 평가 방법에 관한 연구, 한국생태환경건축학회 학술 발표대회 통권21호, 2011

투고(접수)일자: 2012년 6월 19일
수정일자: 2012년 8월 24일
게재확정일자: 2012년 8월 26일