

# 상변화 보드 설계 변수의 축열성능에의 영향 연구

구 준 모, 홍 희 기, 서 형 석\*

경희대학교 기계공학과, \*삼성건설 친환경에너지팀

## Effects of Wall Board Design Parameters on the Thermal Storage Performance

Junemo Koo<sup>†</sup>, Hiki Hong, Hyungsuk So<sup>\*</sup>

Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea

<sup>\*</sup>Sustaivable Technology Research Team, Institute of Construction Technology,

Samsung C&T Co., Seoul 137-956, Korea

**ABSTRACT:** The effects of the temperature difference between the average room- and phase change (PCM) material phase changing temperatures, and the duration of its phase change on the stored energy and the temperature profile time shift are investigated. The optimal thickness of PCM board is presented based on the simulation results.

**Key words:** Phase change material(상변화물질), PCM board(상변화 보드), Latent heat(잠열), Time shift(시간지연)

### 기 호 설 명

- h : 엔탈피 [J/kg], 열전달계수 [W/m<sup>2</sup>K]
- k : 열전도도 [W/mK]
- T : 온도 [°C]
- t : 시간 [s]
- x : 좌표축에서의 거리 [m]

### 그리스 문자

- ρ : 밀도

### 하첨자

- m : melting,                    r : Room

### 1. 서 론

일반적으로 벽체 보드는 실내와 실외의 환경을 분리시켜 실내온도의 변화를 억제하기 위하여 설치하므로, 그 열물성치가 건물 에너지 성능에 큰 영향을 준다. 건물 벽체의 두께가 두꺼워 열용량이 큰 경우가, 반대의 경우에 비교하여, 실내온도 변화가 적으며 생활하기 쾌적한 것으로 알려져 있다. 벽체의 열용량을 증가시키는 방법으로 벽체의 두께를 증가시키는 방법 외에 잠열체를 포함한 벽체인 상변화 보드를 사용하여 얇은 두께의 벽체로 큰 열용량의 효과를 얻으며 건물 냉난방 시 에너지 절감을 도모하기 위한 연구가 국내외 여러 연구자들에 의해 진행되고 있다.<sup>(1-7)</sup>

관련 리뷰 논문들<sup>(2, 5, 6)</sup>에서는 상변화 물질의 작동원리, 건물 냉난방에의 적용방법 및 그 예들을 정리해 놓았다.

Neper<sup>(1)</sup>는 상변화 온도구간, 열전달계수, 상변

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-31-201-3834; fax: +82-31-202-8106

E-mail address: jmkoo@khu.ac.kr

화 물질 함유량 등의 축열량에 미치는 영향을 이론적으로 고찰하였다. Zalba 등<sup>(6)</sup>은 순물질이 아닌 두 개 이상의 혼합물에 대한 용융-응고 문제의 경우 에너지 방정식을 엔탈피에 대하여 정리하여 해를 얻는 장점에 대하여 정리하고, 실제 적용례를 제시하였다. Zhang 등<sup>(7)</sup>은 Neeper<sup>(1)</sup>의 벽체 내 열전달 해석방법의 문제점을 보완하여 벽체 내 열전도, 유한한 잠열량을 고려한 모델을 제시하였다. Feustel과 Stetiu<sup>(3)</sup>는 상변화 보드를 이용한 주거공간 내의 냉방에 대한 연구내용을 보고하였다.

본 연구에서는 간절기 건물 냉방 시 냉방부하 저감의 방법으로 상변화 보드를 사용한 경우, 상변화 보드 설계변수의 보드 열적 성능에의 영향을 이론적으로 고찰한 내용을 보고한다.

## 2. 이론

### 2.1 수치모델

#### 2.1.1 지배방정식

상변화 축열 (PCM) 보드 내 열전달 현상을 모사하기 위하여 다음의 식(1)과 같이 에너지보존 법칙을 적용하였다.

$$\rho \frac{\partial h(T)}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

일반적으로 식(1)의 좌항은 엔탈피 대신 비열과 온도의 곱의 항으로 나타낸다. 상변화 물질이 상변화를 거치는 구간에서는 비열이 온도의 함수

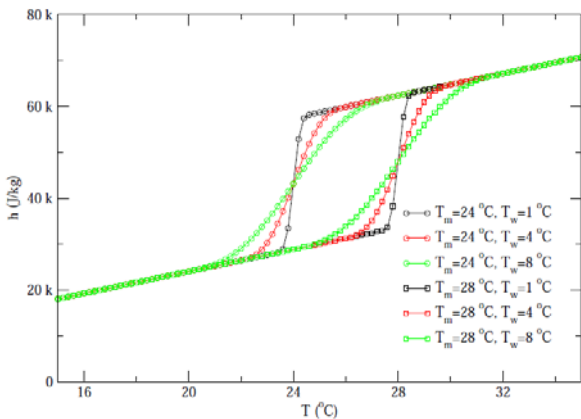


Fig. 1 Enthalpy as a function of temperature

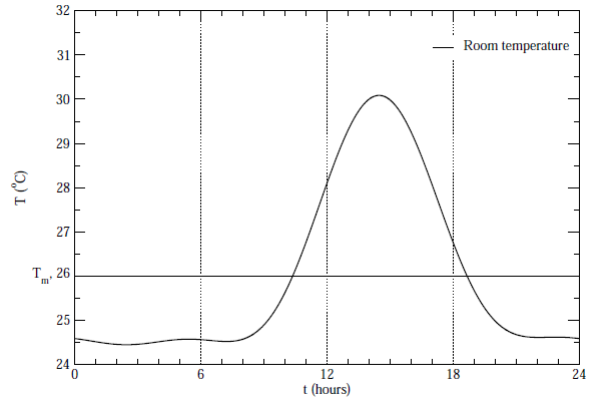


Fig. 2 Daily room temperature variation in time used in the simulation ( $T_{ave}=26^{\circ}\text{C}$ )

가 되며, 비열과 온도의 곱을 고려하기 위해서는 비선형 미분방정식을 풀어야하는 어려움이 있다. 본 연구에서는 비열을 온도의 함수로 나타내는 대신 점함수인 엔탈피를 온도의 함수로 나타내고 온도에 따른 엔탈피를 테이블로 만들어 계산과정을 단순화하였다. Fig. 1은 엔탈피와 온도와의 관계를 나타낸다. 그림에서  $T_m$ 과  $T_w$ 는 각각 평균 상변화온도와 상변화 온도구간을 나타낸다.

#### 2.1.2 경계조건

PCM 보드의 한쪽은 시간에 따라 변화하는 실내온도에 노출되어 있으며, 다른 한쪽은 단열조건인 경우를 고려하였다. 실내로부터의 열전달의 경우 열전달계수를  $3, 9 \text{ kW/m}^2$ 의 경우를 검토하였으며, 단열이 잘되어 있는 외벽 층의 경우는 단열조건을 적용한 경우를 검토하였다. 실내온도 변화는 Neeper<sup>(1)</sup>의 논문에 제시된 실내온도 함수를 목표 평균 실내온도인  $26^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 밤낮의 온도가 변화하도록 식(2)와 같이 가정하였으며 그 개형을 Fig. 2에 나타냈다.

$$\begin{aligned} T_r = & 26 + 2.41 \cos(\omega t + 2.4725) \\ & + 1.265 \cos(2\omega t - 1.3037) \\ & + 0.4126 \cos(3\omega t + 1.2236) \end{aligned} \quad (2)$$

## 2.2 열물성

PCM 보드 내의 비정상 열전도 현상을 모사하기 위하여 필요한 보드의 대표 상변화 온도, 잠열 및 열전도도 등의 열물성 정보는 Table 1에

Table 1 Material properties of the PCM board

Property	Value
Base material	gypsum
Nominal phase change temperature	26 °C
Latent heat	28.7 kJ/kg
Specific heat	1.2 kJ/kgK
Thickness	15 mm
Thermal conductivity	0.134 W/mK

정리하였다. 상변화 온도구간의 경우 상변화 물질의 특성에 따라 그 값이 크게 변화한다. Neeper<sup>(1)</sup>는 상변화 온도구간의 효과를 고찰하기 위하여 1, 2 및 4°C인 경우를 고찰하였다. 본 연구에서는 PCM 보드 및 상변화 물질의 DSC 분석으로부터 상변화 온도구간이 4에서 25도까지 변화함을 관찰하였으며, 다양한 상변화 온도구간 조건에 대한 전산모사를 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 축열량

Fig. 3은 상변화 물질의 평균 상변화온도와 상변화 온도구간이 축열량에 주는 영향을 보인다. 평균 상변화온도가 실내 평균온도와 같을 때 축열량이 가장 큰 것으로 관찰되었다. 상변화 온도와 실내 평균온도의 차가 증가할수록 축열량은 감소한다.

상변화 온도구간이 증가함에 따라 최대 축열량은 감소하지만 상변화 온도와 실내 평균온도와의 차이에 의한 효과는 작아진다. 실내 평균온도인 26°C에서는 상변화 온도구간이 좁은 잠열 벽체의 축열량이 가장 크지만 상변화 온도가 24 혹은 28°C인 경우에는 상변화 온도구간이 좁은 잠열 벽체의 축열량이 가장 작은 것으로 나타났다. 상변화 온도구간이 20°C인 경우는 평균상변화 온도에 관계없이 매우 일정한 축열 성능을 보임을 알 수 있다.

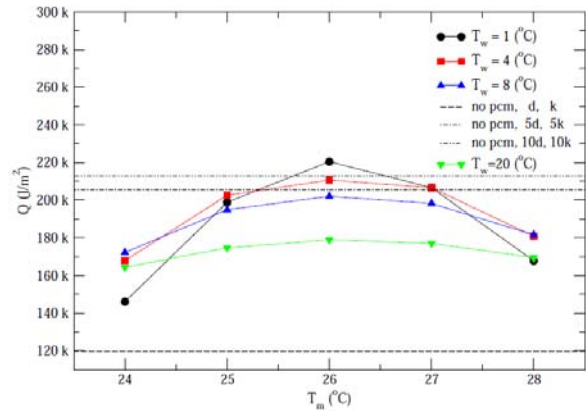


Fig. 3 The effects of the average phase change temperature and its interval on the stored energy

일반 벽체와의 축열 성능 비교를 위하여 일반 석고 벽체를 축열벽체와 같은 두께, 5배 및 10배의 두께를 갖는 경우에 대하여 축열량을 비교하여 점선으로 나타내었다. 이때 열전도에 의한 효과를 제거하기 위하여 벽체두께 증가와 같은 비율로 열전도도를 증가하여 계산하였다. 최대 축열량의 경우 상변화 온도구간이 작은 경우에는 10배의 두께를 갖는 일반 석고벽체의 축열량보다 축열 성능이 우수한 것을 알 수 있다.

이로부터 적용목적에 따라 특정한 실내온도에 정확히 맞춘 잠열 벽체 혹은 넓은 실내온도 구간에서 잠열효과를 작용하는 잠열 벽체 개발의 방향이 다름을 파악할 수 있다.

#### 3.2 시간지연 효과

실내온도가 변화하여도 벽체가 가지고 있는 잠열 효과에 의하여 잠열 벽체의 온도는 상당시간을 큰 온도변화 없이 열을 흡수하거나 방출하여 실내온도 변화를 억제할 수 있다. 이때 잠열벽체가 실내온도 변화에 대하여 가지고 있는 위상차를 시간지연이라 한다. 시간지연이 클수록 냉난방에 필요한 에너지를 절약할 수 있다.

Fig. 4에 서로 다른 평균 상변화온도를 가지고 있는 잠열벽체의 시간에 따른 벽체 평균온도를 도시하였다. 최대 실내온도 시간과 최대 벽체 평균온도 시간의 차이를 시간지연으로 정의하여

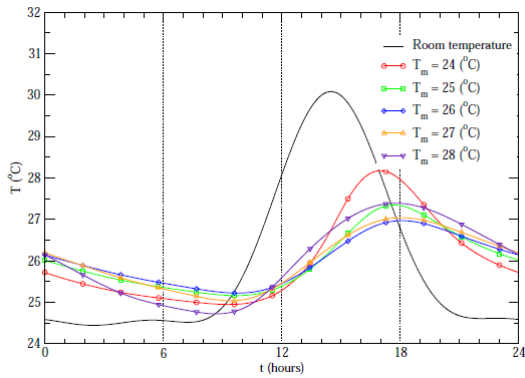


Fig. 4 Temperature variations of the room and the PCM wall board of different phase change temperature in time ( $T_w=8^\circ\text{C}$ )

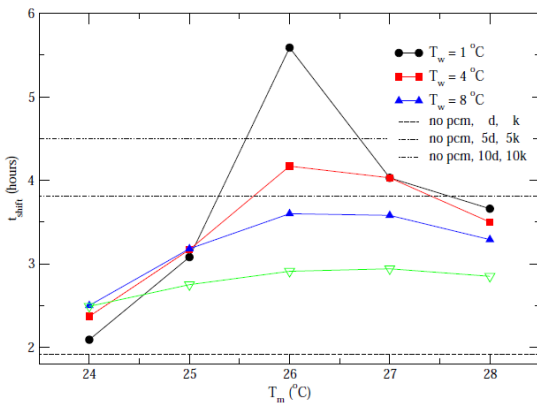


Fig. 5 The time shift between the room- and wall-temperatures

Fig. 5에 나타내었다. 일반 석고보드 벽체의 경우도 벽체 두께의 증가에 따라 시간지연 효과가 증가함을 볼 수 있다. 잠열벽체의 경우 평균 상변화 온도와 상변화 온도구간에 따라 시간지연이 다르게 나타난다. 일반적으로 평균 상변화 온도와 평균 실내온도 간의 차이가 작은 경우 더 큰 시간지연을 갖고 온도차가 클수록 시간지연이 작아진다. 상변화 온도구간이 큰 경우 평균 상변화 온도가 평균 실내온도가 같은 조건에서 최대 시간지연이 크게 나타나지만 두 온도간의 차이가 작아짐에 따른 시간지연 감소가 매우 커 오히려

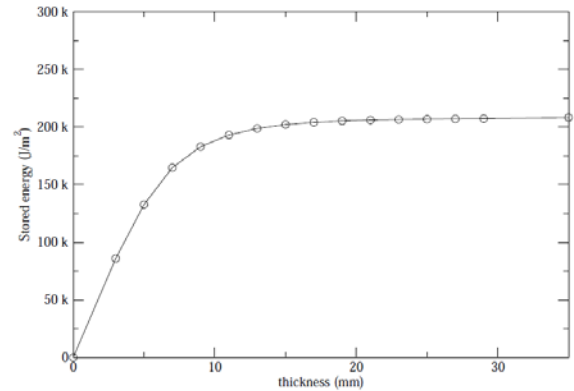


Fig. 6 The effect of wall board thickness on stored energy ( $T_w=8^\circ\text{C}$ )

상변화 온도구간이 큰 경우에 비하여 시간지연이 작아지게 된다.

축열량의 경우 평균 상변화온도와 평균 실내온도의 차에 대하여 대칭적인 경향을 보였으나, 시간지연의 경우 평균 상변화온도가 평균 실내온도보다 더 높은 구역에서 최대 시간지연이 나타남을 관찰할 수 있다.

### 3.3 잠열벽체 두께

Fig. 6에 잠열벽체 두께의 변화에 따른 벽체 내 축열량의 변화를 보였다. 벽체의 두께증가에 따라 초기에는 축열량이 크게 상승하다가 벽체 두께가 15mm 이상이면 축열량 증가효과가 미미해짐을 관찰할 수 있다. 따라서 현재 고려하고 있는 잠열벽체의 두께의 선정은 잘 되었다고 할 수 있다.

## 4. 결론

상변화 보드의 평균 상변화온도, 상변화 온도구간, 두께의 설계변수의 축열 성능에의 영향을 엔탈피에 대하여 정리한 에너지방정식을 풀어 고찰하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 평균 상변화온도가 평균 실내온도에 가까울수록 축열량이 증가하며, 시간지연 효과는 평균상변화 온도가 약간 높은 경우에 최대값을 갖는다.

(2) 상변화 온도구간이 좁으면 최대 축열량이 매우 큰 값을 갖지만 평균 상변화온도와 평균 실내온도가 커지면서 급격히 축열량이 감소한다. 반대로 상변화 온도구간이 크면 상변화 온도구간이 작은 경우에 비하여 최대 축열량은 작지만 평균 실내온도에서 벗어난 환경에서도 일정한 축열 성능 및 시간지연 효과를 보인다.

(3) 상변화 보드의 두께가 증가함에 따라 축열량은 증가하지만 일정두께 이상이 되면 축열량 증가가 미미해진다.

Thermal storage and nonlinear heat-transfer characteristics of PCM wallboard, *Energy and Buildings*, Vol. 40, pp. 1771-1779.

### 참고문헌

1. Neeper, D.A., 2000, Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage, *Solar Energy*, Vol. 68, pp. 393-403.
2. Khudhair, A.M., Farid, M.M., 2004, A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, Vol. 45, pp. 263-275.
3. Feustel, H.E., Stetiu, C., 1997, Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application, Technical report, DOE's Office of Building Technology.
4. Hittle, D.C., 2002, Phase change materials in floor tiles for thermal energy storage, Topical Report, Colorado State University, Fort Collins, CO, USA
5. Tyagi, V.V., Buddhi, D., 2007, PCM thermal storage in buildings: A state of art *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, pp. 1146-1166.
6. Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H., 2003, Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 251-283.
7. Zhang, Y., Lin, K., Jiang, Y., Zhou, G., 2008,