

# 상변화물질을 이용한 열방어체계의 수치해석 연구

오창묵\* · 유영준\* · 이형주\* · 민성기\*

## A numerical analysis of the PCM applied Thermal Protection System

Changmook Oh\* · Youngjune Yoo\* · Hyungjoo Lee\* · Sungki Min\*

### ABSTRACT

This paper is focused on the numerical analysis of two Thermal Protection Systems. Both systems have been provided two different temperature of heating at two walls. Outer wall is heated by high temperature( $T_{max}$ ). Inner wall is heated by heat source( $710W/m^2$ ) while the outer wall is heated. Each system has been provided one side heating(outer wall only) and both side heating respectively. The effects of the heat transfer of both sides of wall, PCM temperature variance through the operation time and Inner space average temperature are investigated. The results have shown that the duration of latent heat mainly depends on the materials, the direction of heat transfer and the heat source and these factors should be concerned in the future.

### 초 록

본 논문은 내외부에 열원이 있는 시스템에 상변화물질(PCM, Phase Change Material)을 적용한 경우를 수치해석으로 분석한 것으로 컨넥터가 없는 경우와 있는 경우에 대하여 분석한 것이다. 각각의 경우에  $T_{max}$  열원만 있을 경우와  $T_{max}$ 와  $710W/m^2$  열원이 동시에 있을 경우가 고려되었다. 연구 결과 벽면에서의 열전달, 시간에 따른 PCM 온도변화 그리고 내부온도의 변화를 정리하였으며 그 결과 시스템의 구성품과 열전달 방향 및 열원의 종류에 따라 PCM의 잠열 시간이 달라진다는 점을 알 수 있었다.

Key Words: Thermal Protection System(열방호 시스템), PCM, Phase Change Material(상변화 물질), Latent Heat(잠열), Melting(녹는점), Connector(컨넥터)

### 1. 서 론

최근 에너지의 저장 및 효율적인 활용에 관련된 기술의 발전은 차세대 에너지에 대한 위기의식과 함께 폭넓게 연구되고 있다. 그 중 잠열에너지를 이용하는 PCM(Phase Change Material) 시스템에 관련되어 연구가 활발히 진행되고 있다. 선진국에서는 PCM이 높은 에너지 저장밀도

\* 국방과학연구소 1-5

† 교신저자, E-mail: cmoh99@hanmail.net

와 녹는점과 어는점 사이에서의 일정한 온도유지의 장점을 가지고 있어 PCM 시스템을 이용하여 태양열 에너지 저장과 빌딩 중앙 공조 시스템의 온도 저장 그리고 폐열 회복(recovery) 시스템에 이용한다.[1] 국내에서는 휘발유가격 상승과 함께, 냉동기 소모를 대체하는 목적으로 PCM을 연구하고 있다.[2,3] 향후 동 분야의 발전은 화석연료의 생태계 파괴를 방지하는 목적과 에너지의 효율적인 관리라는 차원으로 비약적인 발전이 기대되는 분야이다.

상변화 현상은 고체-액체, 액체-기체로 변화하는 현상을 의미하는데 본 연구에서는 더 많은 잠열에너지를 필요로 하는 고체-액체 상변화에서의 용융(melting) 현상을 이용하였다. 본 연구를 토대로 상변화물질을 이용한 냉난방장치 개발 가능성을 검토하였고 추후 개선사항들을 정리하였다.

## 2. 전산해석 조건 및 지배방정식

### 2.1 해석형상

본 PCM 시스템의 구성은 총 부피 117mm\*200mm\*200mm 정해진 공간 속에 내부공기-알루미늄(덮개)-PCM-단열재 순으로 이뤄져 있다.

해석 형상은 Fig. 1, Fig. 2에서와 같다. Fig. 1에서는 PCM 시스템의 오른쪽 벽면에서는 고온의 외부온도가 들어올 때 PCM 시스템의 열전달 현상(Case 1-1)과 내부에서 발열체가 추가적으로 주어졌을 때(Case 1-2)의 영향을 서로 비교하였다.

Case 2에서는 컨덕터가 Fig. 2와 같이 중앙에 있을 때 PCM 시스템의 열전달 특성을 분석하였다. 이 때, 컨덕터의 본래 형상은 원형이지만 해석의 용이성과 신속성을 고려하여 정사각형으로 제작하였다.

### 2.2 경계조건

Case 1에서 외부환경 모사하기 위해 Fig. 1과 같이 우측면에  $T_{max}$  조건과 내부 열로 인한 발열체는 Fig. 1의 좌측면에  $710W/m^2$  발열체 조건을 주었다. 이외 벽면에는 단열조건을 주었다.

Case 2에서는 Table 1에 있는 특성치에 따른 조건을 주고 전산해석을 수행하였다.

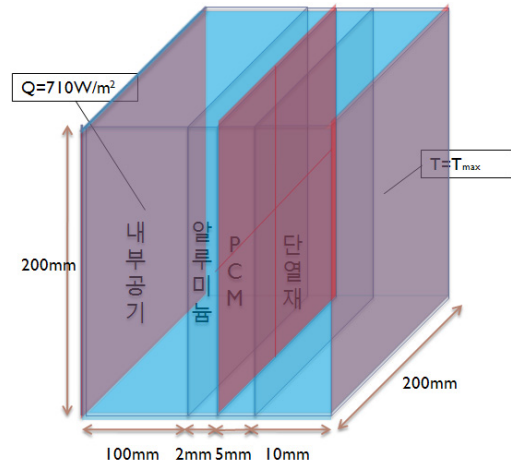


Fig. 1 Geometry of PCM system (Case 1)

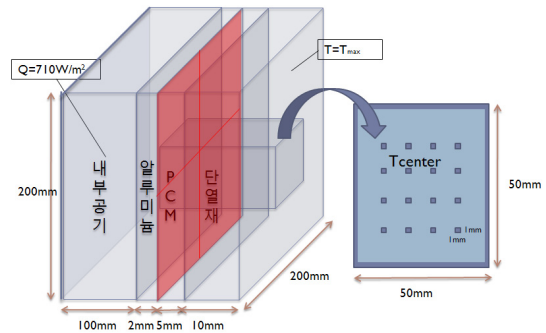


Fig. 2 Geometry of PCM system (Case 2)

### 2.3 지배방정식

본 연구는 전산해석 프로그램인 CFD-ACE+를 이용하여 해석모델을 바탕으로 다음 몇 가지 가정을 적용하여 주어진 경계조건식을 반영하여 계산하였다.

#### 2.3.1 가정

본 연구에서는 다음의 가정을 적용하여 해석을 단순화하였다.

- 1) 외부벽면의 온도는  $T_{max}$ 으로 일정하다.
- 2) 내부벽면에서 발열체는  $710W/m^2$ 로 일정

Table 1 Properties of PCM system compartments

	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	점성 (kg/ms)	비열 (J/kgK)	열전도도 (W/mK)	잠열 (J/kg)	녹는온도 (°C)	초기온도 (°C)
단열재	2.793	X	1047	0.0936	X	X	50
PCM	2180	X	1260(액) 1170(고)	1.26	301000	78	50
고무	1190	X	2010	0.16	X	X	50
구리	8960	X	385	385	X	X	50
알루미늄	2698.9	X	900	210	X	X	50
내부공기	1.1614	1.846E-005	1007	0.0263	X	X	50

한 열량을 공급한다.

- 3) 비열과 열전도율은 무시한다.
- 4) PCM은 녹은 후 유동의 흐름은 무시한다.

2.3.5 열전도율

$$k = \frac{C_P \mu}{Pr}$$

2.3.2 에너지보존 방정식

$$\frac{\partial(\rho h_0)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h_0) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + \frac{\partial p}{\partial t} + \left[ \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial x} \right] + \left[ \frac{\partial(v\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{zx})}{\partial x} \right] + \left[ \frac{\partial(w\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{zx})}{\partial x} \right] + S_k$$

3. 해석 결과

2.3.3 열전도식

$$q_w = -k \frac{T_c - T_w}{dx}$$

이 때 k, T<sub>c</sub>, dx 은 각각 열전도율, 셀의 중심 온도, Wall에서 셀 중심간의 거리 이다.

2.3.4 비열

$$C_{P,i}(T) = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 + C_4 T^4 + C_5 T^5$$

3.1 외부온도와 발열체 유무에 따른 PCM 시스템의 영향

발열체가 없을 경우 Fig 3.과 같이 외부온도 T<sub>max</sub>로 인해 온도가 상승하게 된다. 고온은 단열재를 지나게 되면 열의 일부를 흡수하면서 온도가 올라가고 PCM의 잠열에너지 때문에 일정 시간동안 온도가 일정한 구간이 존재한다. Fig. 4와 같이 PCM과 알루미늄 덮개 사이 온도를 측정 한 값을 보면 발열체가 없는 경우 시간이 지남에 따라 내부 온도는 상승하지만 단열재에서의 열차폐와 PCM의 잠열에너지로 인해 1800초까지 78도로 유지되는 것을 볼 수 있다. 마찬가지로 Fig. 3에서 발열체가 있는 경우에도 PCM의 잠열에너지 때문에 내부로 들어오지 못하고 일정시간동안 열이 차단되지만, 열이 Fig. 4와 같이 내부에 있는 발열체가 알루미늄 덮개 때문

에 PCM으로 많은 양의 열이 흡수되지 않고 내부에서 순환하면서 온도가 상승하게 된다. 그러므로 외부온도와 내부발열체로 인해 PCM이 전부 녹는 시점인 1500초 이후(Fig. 4)에는 온도가 급격히 상승하게 된다.

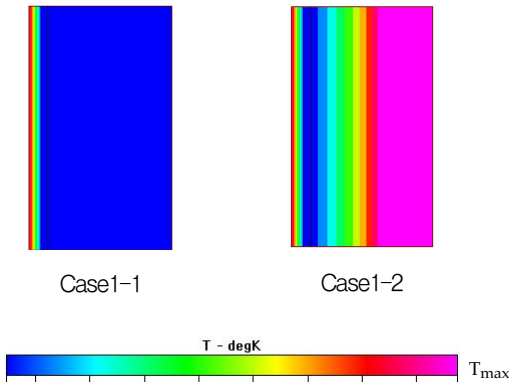


Fig. 3 Side View of Temperature Distribution at 100s

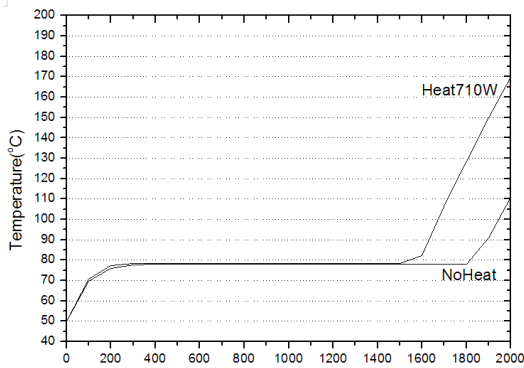


Fig. 4 Comparison of Average Temperature of PCM-Aluminum Plate in Case1-1(NoHeat) and Case1-2(Heat710W)

한편 시간에 따른 내부공기의 온도 그래프를 보면(Fig. 5), Case 1-1에서 외부의 고온은 PCM을 통과하고 나머지 열은 내부공기를 가열한다. 따라서 내부 공기 온도는 PCM이 전부 녹기 전 1800초까지 PCM의 녹는점 온도인 78°C로 일정하게 된다. 반면 Case 1-2에서는 외부에서뿐만 아니라 내부에서의 발열체에서 발생하는 온도로 인하여 내부온도는 약 1400°C까지 상승하게 되

고 PCM이 다 녹은 후(1500초) 온도는 계속 상승하게 된다. Fig. 5의 Case 1-2와 같은 고온의 문제점을 해결하기 위해서는 발열면의 적절한 배치를 통한 내부공기온도상승을 최대한 연구하여야 할 것으로 판단된다.

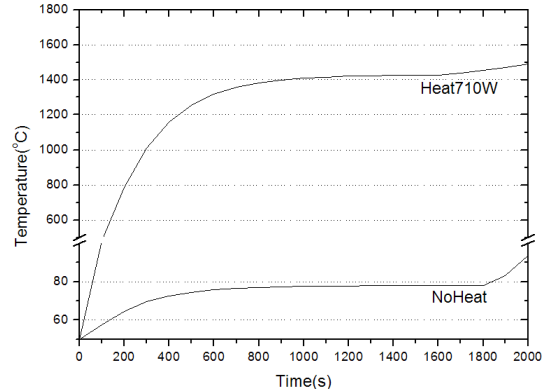


Fig. 5 Comparison of Average Temperature of Inner Space in Case1-1(NoHeat) and Case1-2(Heat710W)

### 3.2 컨넥터(Connector)가 삽입된 PCM 시스템의 해석

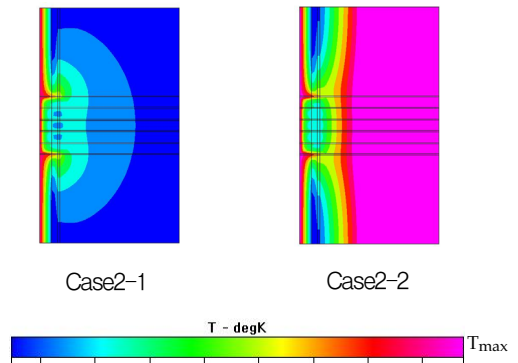


Fig. 6 Side View of Temperature Distribution at 100s

컨넥터를 외부로부터 연결하였을 때에는 컨넥터를 통하여 외부 고온의 열이 PCM 시스템으로 빠르게 전달될 수 있다. Fig. 6은 각각 외부온도의 영향(좌)과 외부온도와 내부발열체(우)의 영향을 PCM 시스템 옆면에 나타낸 온도분포도이다. Fig. 6의 Case2-1를 보면 외부온도의 영향만 있을 때에는 외부벽면으로 들어온 고온의 열이 컨

넥터의 가장자리에 위치한 컨넥터의 몸체를 통해 내부로 열이 빨리 전달되어서 가장자리 바깥 방향의 PCM으로 열이 전달되는 반면 컨넥터의 중심에 있는 작은 fin들은 상대적으로 열전달면적도 작고 주변에 열전도율이 낮은 고무가 감싸고 있기 때문에 열이 상대적으로 느리게 전달된다. 또한 외부의 고온이 PCM층을 지나 내부로 침투하면 PCM의 영향에서 벗어나므로 고온의 영역이 커지게 된다. 그러므로 Fig. 6의 왼쪽과 같이 버섯모양으로 열전달이 된다. 하지만 Fig. 6의 Case2-2처럼 외부온도와 내부발열체가 있을 경우에는 내부발열체에서의 열과 외부방향으로 열이 동시에 PCM층으로 전달이 되므로 전체 시스템의 온도는 빠르게 전달될 것이다.

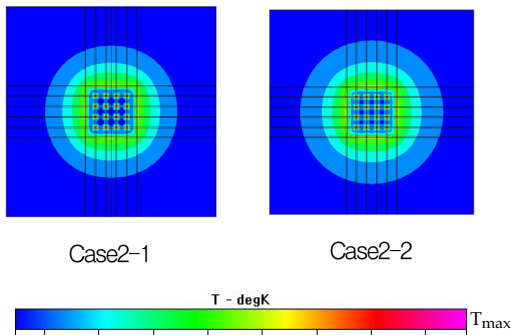


Fig. 7 Cross Sectional Area of Temperature Distribution at PCM-Aluminum Plate(100s)

Figure 7은 컨넥터를 PCM과 알루미늄 덮개 사이에서 수직으로 자른 단면의 열분포도이다. 외부에서 들어오는 열은 열전도율이 안좋은 고무가 있는 컨넥터의 중심보다 가장자리에 바깥 방향에 위치한 PCM층으로 방사형으로 전달된다.

PCM층에서 컨넥터가 차지하고 있고 열전달율이 낮은 컨넥터 중심부에서 많은 열을 흡수하지 못하므로 PCM층은 잠열에너지가 작고 상변화가 빨리 일어나게 된다. Fig. 8과 Fig. 9에서 보면 약 100초 이후에 PCM이 고체에서 액체로 상변화가 완료된다. 낮아진 냉각효과로 인하여 발열체에 상관없이 Fig. 8과 Fig. 9의 시간에 따른 온

도상승은 매우 비슷한 경향을 보인다. 그리고 2000초에서는 외부온도에 근접하며 온도상승은 느려지게 된다. 따라서 PCM 시스템에서 PCM의 부피와 PCM과 접한 컨넥터의 열전도율은 PCM 시스템에 큰 영향을 준다는 점을 알 수 있다.

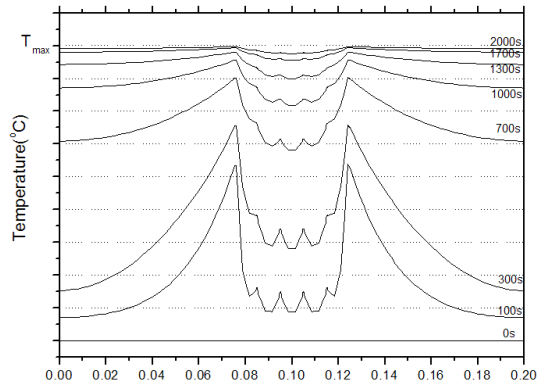


Fig. 8 Cross Sectional Length of Temperature Distribution of Case2-1 at Center of the PCM-Aluminum Plate

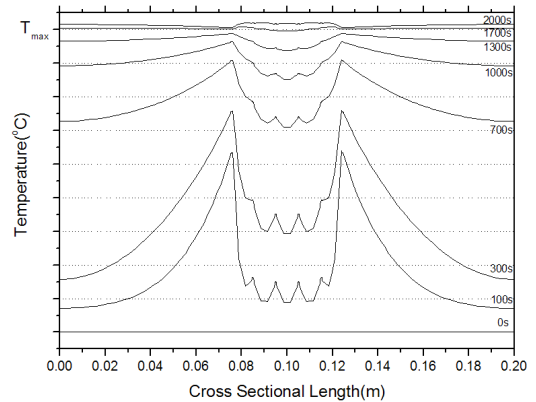


Fig. 9 Cross Sectional Length of Temperature Distribution of Case2-2 at Center of the PCM-Aluminum Plate

외부의 고온과 발열체로 인하여 Fig. 10과 같이 내부온도는 상승하게 된다. 컨넥터와 감소된 PCM으로 인하여 PCM이 상변화가 끝나는 시점부터 내부의 온도는 빠르게 상승하게 된다. Case2-1(NoHeat) 경우, 약 1800초에서 외부온도와 같아진 후 온도는 평형이 된다. 또한

Case2-2(Heat710W)에서는 발열체의 열로 인해 1800초에 온도가 평형이 된다.

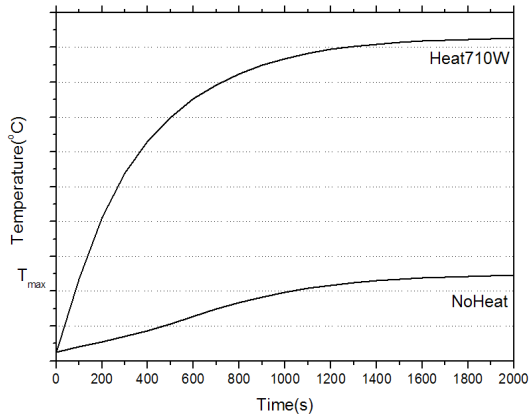


Fig. 10 Comparison of Average Temperature of Inner Space in Case2-1(NoHeat) and Case2-2(Heat710W)

#### 4. 결 론

외부 고온 환경과 내부 발열 상황에서 PCM 시스템의 적합성 및 개발 가능성을 알아보기 위해 전산해석을 수행하였다. 전산해석에서는 외부 고온 환경만 있을 경우와 내부에 추가적으로 발열이 있을 경우로 나눈 후 해석을 한 결과 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

1. 외부에서 들어오는 고온의 열을 차단하기 위해 단열재, PCM으로 구성된 PCM 시스템은 내

부 온도 유지에 적합하지만 내부에서 발생하는 열원이 있을 경우, 열이 외부로 전달이 안되면 Fig. 5에서처럼 내부온도는 상승하게 된다. 따라서 내부의 열을 PCM 쪽으로 전달시켜 온도를 유지해야할 필요가 있다.

2. 외부에서 PCM 시스템으로 컨넥터를 연결할 때 컨넥터 하우징의 열전도율이 높아서 하우징 주변을 감싸고 있는 PCM을 녹인다. 그 결과 Fig. 6 Case 2-1과 같이 외부의 고온이 빠르게 내부로 침투하게 된다. 고온으로 인한 내부환경에 악영향을 막기 위해 컨넥터와 PCM의 형상은 신중히 고려되어야 한다.

#### 참 고 문 헌

1. Felix Regin A, Solanki SC, Saini JS, "Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsule: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;12:2438-58
2. 오창목, 유영준, 민성기, "상변화물질 적용 시스템의 열해석 연구," 제 15차 유도무기학술대회, 2009
3. 유영준, 오창목, 민성기, "과형 유로를 갖는 마이크로채널 PCM 열교환기의 전산해석 연구," 2010년 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2010