

# 수치해석과 실험을 통한 Can type container 내부 상변화 물질의 열유체적 특성분석

허승민\* · 현수웅\*\* · 정희준\*\*\* · 신동호†

## Numerical analysis of the thermal fluid characteristics of phase change material in can type container

Seung Min Heo\*, Su Woong Hyun\*\*, Hee Jun Jeong\*\*\* and Dong Ho Shin†

**Abstract** Energy storage and distribution technologies are emerging as important factors as research on renewable energy continues. Analyzing the thermal flow of phase change material inside a latent heat storage device and to predict the phase change time is an important part for improvement of thermal performance. However, most of the current research is based on the trial-and-error experimental investigation to measure the phase change time. Therefore, in this study, a can-type phase change material container was designed, and the numerical method for analyzing the thermal flow of phase change material was established and validated. The error rate of the phase change time between the numerical and experimental results was within 5%, which proves its reliability. As a result, the phase change finishing times were found to be 78 minutes with inlet fluid temperature of 80°C during charging process, and 126 minutes with inlet fluid temperature of 9°C during discharging process.

**Key Words** : Phase change material (상변화물질), Phase change time (상변화시간), correlation (상관식), Numerical analysis (수치해석)

### 1. 서론

우리나라는 2030년 배출 전망치 대비 37%를

감축 및 저 탄소 녹색성장 기본법 시행령을 개정하는 등 감축목표 이행을 하고 있다. 이에 따라 재생에너지 중 태양 에너지에 대한 관심이 대두되고 있다. 태양 에너지는 친환경적이며 자원의 고갈없이 사용 가능하지만 간헐적 사용이라는 단점이 있다.<sup>(1)</sup> 이를 극복하기 위해 현재 효과적인 에너지 저장 시스템에 대한 연구가 활발히 지속되고 있다.

열저장을 위한 축열 소재 자원 중 상변화 물질(Phase change material, PCM)은 수축열 대비 5~14배 정도의 열을 저장할 수 있어 효과적이며, 이

---

† Department of Smart Automotive Engineering, Wonkwang University (WKU), Assistant Professor  
E-mail: goodsdh555@wku.ac.kr

\* Department of Mechanical Engineering, Hanyang University (HYU), M.S/Ph.D combined student

\*\* Department of Mechanical Engineering, WKU, Ph.D student

\*\*\* Department of Smart Automotive Engineering, WKU, Undergraduate student

---

를 활용한 잠열 packed bed 연구가 활발히 진행 중이다.<sup>(2,3)</sup> 하지만 PCM은 열전도도가 낮아, 축, 방열 시간이 매우 길다는 단점이 있다.<sup>(4)</sup> 즉, 열을 저장 또는 방출하는 시간이 길어지고, 이로 인해 축, 방열 효율 및 에너지 효율이 낮아진다. 열전달 속도를 향상시키기 위한 기술 개발은 열 저장 시스템 최적화에 있어 주요 과제이며 연구 중인 기술은 크게 열전달 면적, Fin<sup>(5)</sup> 또는 packed bed<sup>(6)</sup>를 통한 비표면적 확장과 더불어, PCM에 그래핀<sup>(7)</sup>, 그라파이트<sup>(8)</sup>, 탄소 나노튜브<sup>(9)</sup> 등 탄소 또는 금속 나노 입자 등의 물질을 혼합하여 열전도도를 향상시키는 방법 등이 진행되고 있다.

특히 packed bed는 열전달 측면에서 용이하고 이를 열 저장장치로 활용 시 제조과정이 단순하며 제작 단가가 Fin-tube 열 교환 방식에 비해 낮아 packed bed 연구는 관심을 받고 있다.<sup>(10)</sup> packed bed의 성능은 기하학적 형태에 크게 좌우되며, 내부의 열유체적 특성을 파악하여 성능개선을 위한 해석적인 연구가 이루어지고 있다.<sup>(11)</sup> N. Amin<sup>(12)</sup>은 구형 PCM packed bed 내부 자연대류 계산을 위한 온도차에 따른 액상 PCM의 유효 열전도도를 경험적 상관식을 제시하였다. B. Izgi<sup>(13)</sup>은, 원통형 잠열 packed bed시스템을 고안하였고 방열 과정에서의 캡슐 외부 표면에서의 열전달 계수를 측정하였다. T. Sardari<sup>(14)</sup>는 사각 인클로저형 packed bed 내부 PCM을 다공성 메질로 가정하고 엔탈피 변화량에 따른 용융 속도를 분석하였고 결과를 전산가시화 하였다. R. M. Mahmoud<sup>(15)</sup>는 배 형상의 packed bed를 개발하였고 액체상과 고체상에서의 PCM의 밀도를 구분하여 수치해석 및 가시화하였고, volume fraction의 차이가 5% 이내임을 증명하였다.

이러한 잠열 packed bed 시스템에서 내부 상변화 물질의 상태 변화에 대한 열유체적 특성을 파악하는 것은 잠열 저장 시스템의 효율적인 설계에 있어 중요하다<sup>(15)</sup>. 하지만 현재까지의 연구는 잠열 packed bed 실험에 대한 경험에 의존하고 있으며 해석 시 온도에 따른 액상PCM의 밀도 변화를 고려하지 않고<sup>(19)</sup> 고체 PCM과 액상 PCM사이의 계면을 Boussinesq근사법을 적용하여 계산한다. 이는 축, 방열 시 과도상태에서의 정확한

열유체적 특성 파악에 한계점을 가지고 있다. 또한 대부분의 연구는 축열 과정에 대한 해석만을 주로 다루고 있어 전체적인 축 방열 성능에 대한 연구가 부족<sup>(18)</sup>하다. 잠열 packed bed내부의 열유체적 특성을 정확하게 파악하고, PCM의 축 방열 시 시간을 예측하는 것은 시스템의 개발에 있어 중요하다. 또한 잠열 packed bed를 활용한 축열 장치를 제작하여 실험하는 과정은 많은 시간과 비용이 발생하기 때문에 시뮬레이션을 통한 해석기법을 정립하여 활용한다면 시스템 개발에 있어 시간적 경제적 이점을 가져올 수 있다.

본 연구에서는 Can type container를 이용한 상변화 물질 packed bed를 고안하였고, 내부 상변화 물질의 열 유동 현상에 대한 가시화 실험과 온도에 따른 액상 PCM의 밀도변화를 고려한 상변화 과정을 전산수치해석 하였다. 그리고 실험을 통해 상변화 시간을 측정하여 수치해석 결과와 비교 분석하였다. 이를 통해 축, 방열 시 상변화 과정에 대한 전산가시화가 가능해졌고, 조건에 따른 상변화 시간을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다.

## 2. 실험 및 수치해석 세팅

### 2.1 실험 세팅

Fig. 1은 Can type container에 대한 온도 실험 모식도이다. 실험은 열 교환기, 항온수조, 카메라, Can type container로 구성되었다. Can type container내부에는 PCM으로 가득 차 있다. 재질은 알루미늄이며, 직경 66mm, 높이 158mm 두께 0.13mm이다. Table. 1은 실험에 사용된 PCM의 물성표이다. 57 ~ 59 °C 사이에서 상변화가 되는 유기계열의 n-Octadecanol이 사용되었고, 수치해석 시 부여한 물성 값 또한 Table 1과 동일한 값을 부여하였다. PCM의 잠열량은 234 kJ/kg이고 70 ~ 100 °C에서의 점도는 3.5 ~ 7.0 cP이다. Can type container는 물을 HTF(Heat transfer fluid)로 하는 항온수조 가운데 거치되었고, 상변화 완료시간을 예측하기 위해 Can type container 내부 중앙과 외부 표면에 K-type 온도센서를 부착하여 상변화 과정에서의 PCM 온도를 모니터링 하였다. 온도

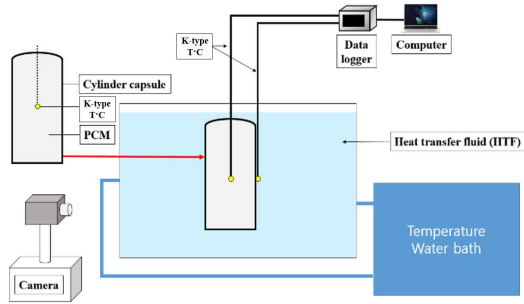


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set up

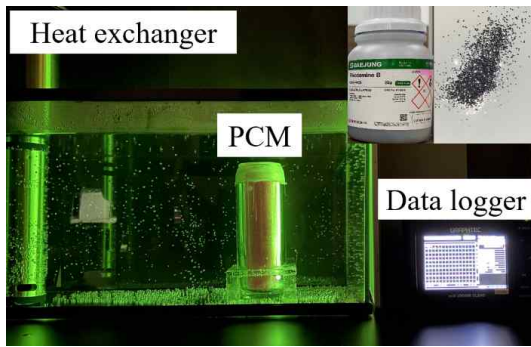


Fig. 2. Photo of experimental set up

Table 1. Properties of PCM

Properties	PCM(Solid)	PCM(liquid)	Units
Density	812	781	Kg/m
Thermal conductivity	0.31	0.2	W/mk
Specific heat capacity		2.61	kJ/kgk
Latent heat of fusion		234	kJ/kg
Thermal expansion coefficient	8.161 x 10 <sup>-4</sup>		1/K

데이터 기록을 위해 GL840 data logger를 사용하였으며 축, 방열 시 PCM의 온도 측정 실험을 수행하였다. Fig. 2는 투명Can type container내부 PCM의 유동 가시화 실험 실제 사진이다. 가시화 실험을 위해 투명 Can type container내부에 rhodamine B 염료와 Silver particle을 첨가하여 축 열 시 PCM의 상 변화과정을 모니터링 하였다.

## 2.2 수치해석 기법과 지배방정식

본 연구에서는 상변화 과정을 수치해석하기

위해 STARCCM+ V22.06을 사용하였다. 상변화 물질 저장 장치를 수치해석 하는데 사용된 지배 방정식은 다음과 같이 식(1) 연속방정식, 식(2) 운동량 방정식, 식(3) 에너지 방정식이다.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + f_g + S \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

액상에서의 PCM은 비압축성, 층류로 가정하였다. 내부 자연대류는 Boussinesq근사법을 활용하여 계산하였으며 이때, 고상PCM의 부력 효과는 중력과 액상과 고상의 밀도의 차의 관계로 식(4)와 같이 식(2)에서  $f_g$ 로 정의되었으며 액상 PCM의 밀도 ( $\rho_l$ )는 식(5)와 같이 온도와 열팽창 계수( $\beta$ )의 관계로 정의되었다.

$$f_g = (\rho - \rho_l)g \quad (4)$$

$$\rho_l = \rho / \beta (T_l - T_{melt}) \quad (5)$$

여기서  $\rho$ 는 PCM의 밀도,  $\mu$ 는 PCM의 점도,  $H$ 는 총 엔탈피,  $T_l$ 은 액체 PCM의 온도,  $T_{melt}$ 는 PCM의 상변화 온도이다. PCM의 상변화 과정은 enthalpy-porosity model을 도입하여 계산하였다. “Mushy”는 다공성 영역으로 액체의 경우 1, 고체의 경우 0으로 값을 취한다. 식(6)의  $\Delta H$ 는 식(3)에서 사용된 총 엔탈피 변화량이고, 현열 식(7)의  $h$ 는 현열,  $L$ 은 잠열,  $h_0$ 는  $T_0$ 에서의 현열,  $c_p$ 는 비열이며, 현열 ( $h$ )과 PCM의 잠열 ( $L$ )의 합으로 계산된다. 식(8)은 상변화 온도에 따른 PCM의 액분율  $\alpha_l$ 을 나타낸다. 액분율은 식(9)와 같이 정의되었다 식(9)의  $T_{solid}$ 와  $T_{liquid}$ 는 용융과정에서 고체상의 온도, 액체상의 온도를 나타낸다. 용융 과정에서 온도는  $T_{liquid} > T > T_{solid}$ 이다.

$$\Delta H = h + \alpha_l L \quad (6)$$

$$h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT \quad (7)$$

$$\alpha_l = \begin{cases} 0 & \text{if } T^* < 0 \\ T & \text{if } 0 < T^* < 1 \\ 1 & \text{if } 1 < T^* \end{cases} \quad (8)$$

$$T^* = \frac{T - T_{solid}}{T_{liquid} - T_{solid}} \quad (9)$$

식(10)  $S$ 는 운동량 방정식에서 다공성 영역 내 부유동에 관한 Darcy 법칙의 감쇠 항으로 “Mushy” 영역에서 고체 PCM 상태에서 속도가 0에 수렴하도록 계산하기 위해 정의된 Momentum Sink이다.

$$S = \frac{(1 - \alpha_l)^2}{(\alpha_l^3 + \epsilon)} A_{mush} u_i \quad (10)$$

여기서 공극률  $\epsilon$ 는 분모가 0이 되는 것을 피하기 위해 0.001로 설정되었고,  $A_{mush}$ 는 유체가 응고될 때 속도 변화의 정도를 나타내는 상수이다.

### 2.3 수치해석 조건

Fig. 3은 실험과 해석 시 사용되었던 Can type container이다. 그림 (a)는 실험에서 사용된 Can type container이고, 그림 (b)는 해석 도메인이다. 실험 시 장치 내부 중앙에 온도센서를 설치하였고, 해석 시 센서와 같은 위치에 온도를 관찰하여 실험과 해석의 결과값을 비교하였다. Can type container 표면에는 실험에서 측정된 온도 값을 고정 온도로 경계조건을 부여하였다. 축열 시 PCM의 초기 온도는 24.5°C이고 벽면에 80°C 온도조건을 부여하였다. PCM 벽면은 No slip wall 조건으로 해석하였다. 방열 시 PCM의 초기 온도는 80°C이며, 벽면에 9°C의 온도조건을 부여하였다. 비정상해석을 진행하였다. 운동량 보존식에서 압력-속도 관계는 The semi-implicit method

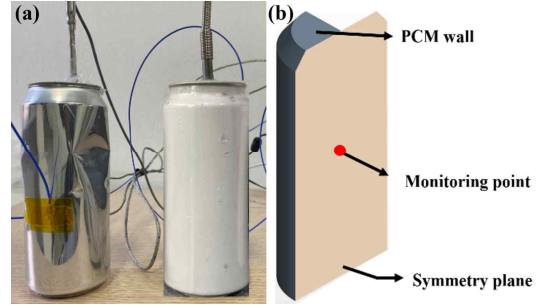


Fig. 3. Photo of Can type container (a) Domain of numerical set up (b)

for pressure-linked equations (SIMPLE) 알고리즘을 적용하였다. 지배방정식의 대류, 확산항은 Second order Upwind로 이산화 하였으며 시간에 대한 적분방법으로 fourth order backward differentiation formula (BDF4)가 사용되었다.

## 3. 결과

### 3.1 Mesh number 및 time step 독립성 평가

해석 시에는 3차원 형상의 사면체 격자를 사용하였다. 격자에 대한 민감도를 확인하기 위해 15,000개부터 86,000개까지 메쉬 격자 개수에 따른 전체 축열 소요시간을 비교하였다. Fig. 4는 격자 개수에 대한 해석결과를 보여준다. 해석 결과, 52,000 과 86,000 타입 메쉬 구성 시 수렴 구간에서의 축열시간 상대 오차는 2% 이내로 나타났다지만 해석 시간은 2배 이상의 차이가 있어 52,000개의 격자 타입이 가장 적당한 메쉬 개수로 선정되었다. 이를 통해 수치해석의 수렴성을

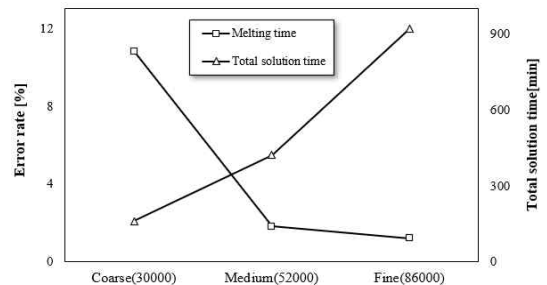


Fig. 4. Result of mesh independence test

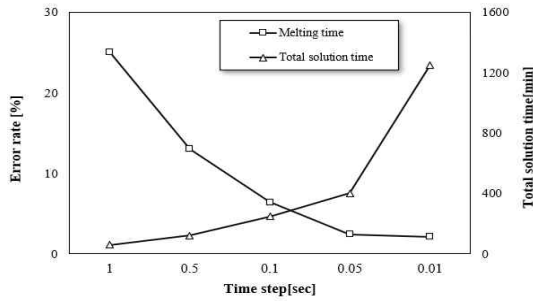


Fig. 5. Result of time independence test

검증하였고, 이를 바탕으로 전반적인 시뮬레이션에서는 52,000개의 사면체 격자를 구성하여 해석을 수행하였다.

Fig. 5 는 Time step dependence test 결과를 보여 준다. 1, 0.5, 0.1, 0.05, 0.01 sec 로 Time step을 설정하여 진행하였고, 이 때, Error rate은 실험과 해석상의 melting time을 비교하여 계산하였다. Time step을 0.01sec, 0.05sec, 0.1sec 로 설정하였을 때 오차율로 각각 2.1%, 2.5%, 6.4% 로 계산되었다. Time step 이 0.05sec에서 0.01sec로 주는 경우, 해석시간은 325%로 크게 증가하게 된다. 따라서 2.5%의 낮은 오차율을 보이며, 해석시간이 적절한 Time step은 0.05sec임을 알 수 있다.

### 3.2 해석결과의 신뢰도 검증

Fig. 6 은 축열 시 전체 상변화 과정 동안의 PCM 의 온도 값에 대한 실험 및 수치해석 결과를 보여준다. 24°C의 상온의 상변화 물질을 80°C로 축열 하였을 때, 상변화 완료 시간은 78분이

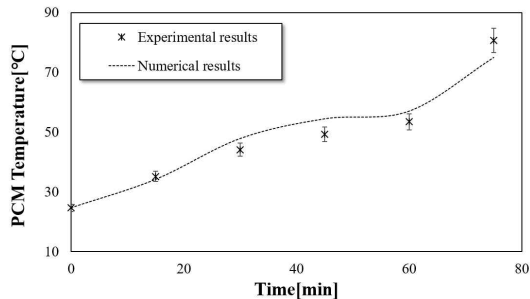


Fig. 6. Experimental and numerical results of PCM temperature by time during charging process

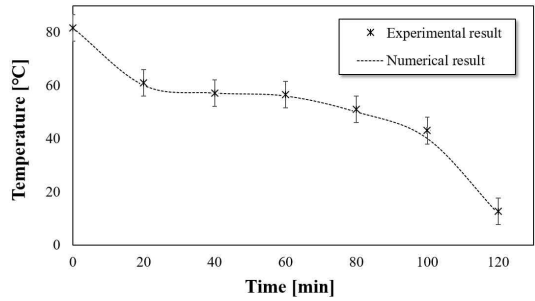


Fig. 7. Experimental and numerical results of PCM temperature by time during discharging process

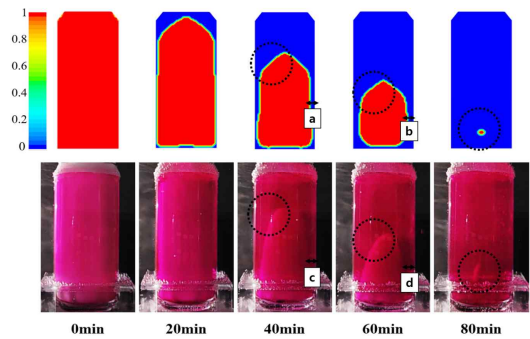


Fig. 8. Experimental and numerical results of volume fraction of solid PCM in melting processes inside the can type container

소요되었으며, 해석 시 83분이 소요되었다. 상변화 완료시점에 실험값과 해석의 차이는 해석의 가정으로부터 비롯되었으며 수치해석 값의 실험값과의 상대 오차율은 5% 이내로 수렴되었다.

Fig. 7 는 방열 시 전체 상변화 과정 동안의 PCM 의 온도 값에 대한 실험 및 수치해석 결과를 보여준다. 80°C의 축열 된 상변화 물질을 9°C로 방열하였을 때, 상변화 시간은 126분이 소요되었으며, 해석 시 120분이 소요되었다. 따라서 수치해석 값의 실험값과의 상대 오차율은 5% 이내로 수렴되었다.

Fig. 8 은 Can type container 내부의 PCM 용융 과정을 가시화 실험 및 수치 결과를 비교한 값이다. 벽면에서 열전달 된 고체 PCM의 온도가 증가함에 따라 PCM 내부의 온도 구배는 캡슐의 중심에서 벽면에 온도로 발달하게 된다. 내부 PCM 온도가 용융 온도에 도달하면 PCM이 용융되기

시작한다. 이 액체 PCM은 실험 및 수치 결과 모두에서 20분 후에 명확하게 볼 수 있는 액체-고체 계면을 형성하기 시작한다. 축열이 진행됨에 따라 액체 PCM의 비중이 증가하여 캡슐의 상부와 하부에 걸쳐 온도 구배가 설정된다. 고온 액체 PCM의 캡슐 상부 방향으로의 이동함을 관찰하였고, 내부의 고체 PCM은 중력방향으로 이동한다. Can type container 벽면과의 거리 a와 c를 비교했을 때, 실험에서는 9mm, 해석에서는 6mm 임을 확인하였다. b와 d를 비교했을 때, 실험에서는 13mm, 해석에서는 8mm 임을 확인하였다. 바닥에서의 수직거리와 모서리부분 그림에서 원안의 곡률 차이를 계산해 본 결과 총 부피비는 거의 동일한 결과임을 입증하였다. 이러한 형상에서 차이가 나타나는 이유는 해석에서의 여러 가정들로 인해 생긴 것으로 판단하였다.

Fig. 9는 Can type container 내부 온도 contour 장이다. 용융 속도는 캡슐의 하부보다 상부에서 더 높은 것을 관찰하였다. 녹는 과정의 이러한 특성은 80분 동안 관찰될 수 있으며, 이는 자연 대류에 의해 영향받으며, 용융 PCM의 자연대류 현상으로 상부는 하부와 측면에 비해 용융 영역이 크게 형성되었고, 이 후 온도 구배는 벽면과 하부에 치중하여 발생하였다. 열전달 초기 PCM의 열전도에 의한 원뿔형 용융 층 형성은 자연대류에 의한 액상 분율에 대한 기존의 선행연구 [17]와 비교해 본 결과, 실험결과 및 해석결과에 잘 부합하였다.

Fig. 10은 축열 시 공급온도에 따른 PCM의 상변화 시간에 대한 실험값과 상관식을 나타낸다. 해석 결과를 통해 상변화 시간을 예측하는 선형

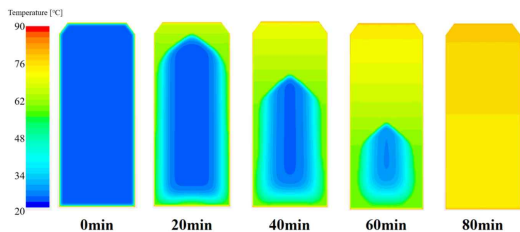


Fig. 9. Temperature distributions in can type container by time during charging process

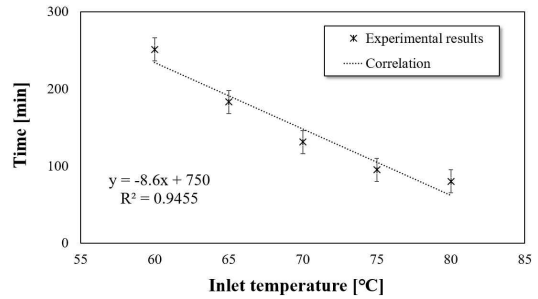


Fig. 10. Experimental results of the phase changing time according to the charging inlet temperature with empirical correlation

관계식을 도출하였고, 이를 실험값과 비교하여 신뢰도를 검증하였다. 축열 온도는 80°C부터 60°C까지 점차 감소시키며 계산하였고, 60°C로 축열 시 약 300분이 소요되었다. Can type container의 경우 내부의 용융과정을 확인할 수 없기 때문에 축열 온도에 따른 PCM의 용융시간을 예측하기 위한 상관식인 식(11)을 아래와 같이 도출하였다.

$$t = -8.6 T_{in} + 750 \quad (11)$$

식(11)의  $t$ 는 PCM의 용융 시간이고,  $T_{in}$ 은 축열 온도이다. 축열 온도에 따른 PCM의 용융시간 및 상태를 예측할 수 있게 되었다.

### 3.3 해석을 통한 축, 방열 조건에 따른 PCM의 온도 분석

Fig. 11은 축열 시 입구 온도에 따른 PCM 상변화 종료시간을 나타내는 그래프이다. Fig.3에서 보이듯이 온도 측정을 위한 TC 위치는 can의 정중앙이다. 열전달 유체의 온도범위는 축열탱크에 축열되는 작동 온도로 60, 70, 80°C 입구온도 기준으로 실험하였다. 실험 결과 상 변화 물질은 60°C 축열 시 300분, 70°C 축열 시 150분 80°C 축열 시 78분이 소요되었다. 상변화 물질의 온도와 입구 온도 차이가 클수록 상변화 시간이 짧아지며 60°C 대비 80°C 축열 시 축열 시간이 300분에서 78분으로 74% 단축됨을 확인하였다.

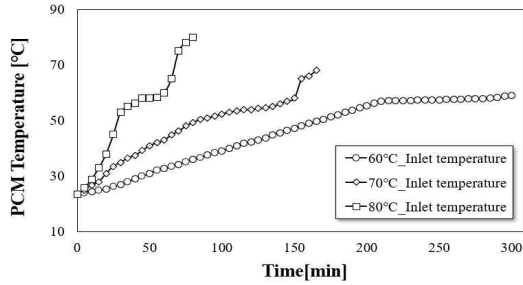


Fig. 11. PCM temperature by time during charging experiment of can type PCM container with the different charging inlet temperature

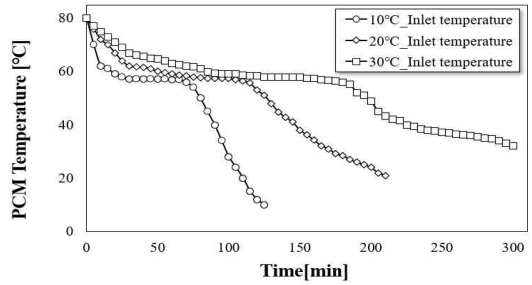


Fig. 13. PCM temperature by time during discharging experiment of can type PCM container with the different charging inlet temperature

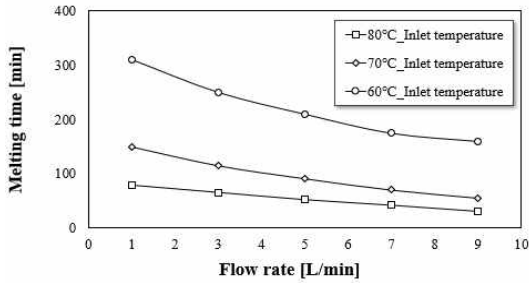


Fig. 12. Melting time of PCM in can type container according to the flow rate with the different charging inlet temperature

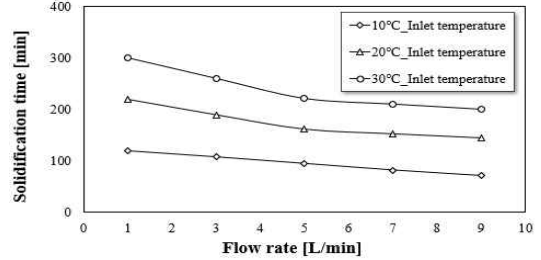


Fig. 14. Solidification time of PCM in can type container according to the flow rate with the different discharging inlet temperature

Fig. 12은 축열 시 입구유량에 따른 PCM 상 변화 종료시간을 나타내는 그래프이다. 작동 온도로 60, 70, 80°C 입구온도 기준으로 실험하였다. 실험 유량은 1,3,5,7,9 L/min으로 80°C 축열 기준 1 L/min에서는 78분, 9 L/min 일 때 31분이 소요되었다. 또한 Flow rate 이 증가함에 따라, melting time이 감소하는 경향을 보여준다. 그러나 melting time 감소비율은 Flow rate이 증가함에 따라 감소하고 있으며, 약 5 L/min 이상의 유량에서는 melting time 이 거의 일정해짐을 알 수 있다. 이는 melting time 단축을 위한 유량 증가는 5 L/min 이하에서 더 효율적임을 알 수 있다.

Fig. 13은 방열 시 입구 온도에 따른 PCM 의 온도를 보여준다. 열전달 유체의 온도범위는 축열탱크에 축열되는 작동 온도로 10, 20, 30°C 입구온도 기준으로 실험하였다. 실험 결과 상 변화 물질은 10°C 방열 시 126분, 20°C 방열 시 210분 30°C 축열 시 320분이 소요되었다. 상변화 물질의

온도와 입구 온도 차이가 클수록 상변화 시간이 짧아지며 30°C 대비 10°C 방열 시 방열 시간이 320분에서 126분으로 61% 단축됨을 확인하였다.

Fig. 14은 방열 시 입구 유량에 따른 PCM 상 변화 종료시간을 나타내는 그래프이다. 작동 온도로 10, 20, 30°C 입구온도 기준으로 실험하였다. 실험 범위는 1,3,5,7,9 LPM으로 10°C 방열 기준 1 LPM에서는 126분, 9 LPM 일 때 71분이 소요되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 캔 형태 상변화물질 저장장치 내부PCM의 상변화 시 열 유동 현상에 대한 전산 가시화 및 상변화 시간 예측 수치해석 모델을 정립하였다. PCM의 상변화 과정을 전산가시화 할 수 있는 수치해석적 기법을 정립하였고, 실험값과의 비교를 통해 이의 신뢰도를 입증하였다. 정립된 수치 해석 기법을 활용하여 PCM 내부 열적

거동을 전산가시화 하였고, 축열 온도에 따른 상 변화 시간 상관 관계식을 도출하였다. 상 변화 물질은 60℃ 축열 시 300분, 70℃ 축열 시 150분 80℃ 축열 시 78분이 소요되었으며 방열 시 상 변화 물질은 10℃ 방열 시 126분, 20℃ 방열 시 210분 30℃ 축열 시 320분이 소요되었다. 이를 통해 입구 온도와 유량에 따른 PCM의 상변화 시간을 예측할 수 있음을 입증하였다.

## 후 기

이 논문은 2021학년도 원광대학교의 교비 지원에 의해 수행됨.

## REFERENCE

- 1) Korea Energy Agency, 2018, Korea Energy Agency Handbook, 2018.
- 2) Shin, D. H., 2018, "Development of a calorific value controller using bimetal fin channel for PCM heat storage," *Energy Conversion and Management*. Vol 173, pp. 508-515.
- 3) Shin, D. H., 2019, "A new type of heat storage system using the motion of phase change materials in an elliptical-shaped capsule", *Energy Conversion and Management*, Volume 185, pp.508-519.
- 4) Singh Rathore, P. K., 2019, "An experimental evaluation of thermal behavior of the building envelope using macro encapsulated PCM for energy savings", *Renewable energy*, Vol 149, pp. 1300-1313.
- 5) Khan, Z., 2016, "Parametric investigations to enhance thermal performance of paraffin through a novel geometrical configuration of shell and tube latent thermal storage system," *Energy Conversion and Management*, Vol 127, pp. 355-365.
- 6) Aziz, S., 2018, "CFD simulation of a TES tank comprising a PCM encapsulated in sphere with heat transfer enhancement", *Applied Thermal Engineering*, Vol 143, pp. 1085-1092.
- 7) Vivekananthan, M., 2019, "Characterisation and thermophysical properties of graphene nanoparticles dispersed erythritol PCM for medium temperature thermal energy storage applications", *Thermochimica Acta*, Vol 676, pp. 94-103.
- 8) Zhao, C., 2021, "Phase change behaviour study of PCM tanks partially filled with graphite foam", *Applied Thermal Engineering*, Vol 196, 117313.
- 9) Elbahjaoui, R., 2016, "Transient behavior analysis of the melting of nanoparticle-enhanced phase change material inside a rectangular latent heat storage unit", *Applied Thermal Engineering*, Vol 112, pp. 720-738.
- 10) Patel, J. R., 2020, "Thermal performance investigations of the melting and solidification in differently shaped macro-capsules saturated with phase change material" *Journal of Energy Storage*, Vol 31, 101635.
- 11) He, X., 2022, "A review on numerical simulation, optimization design and applications of packed-bed latent thermal energy storage system with spherical capsules", *Journal of Energy Storage*, Vol 51, 104555.
- 12) Amin, N. A. M., 2014, "Effective thermal conductivity for melting in PCM encapsulated in a sphere", *Applied Energy*, Vol 122, pp. 280-287.
- 13) Izgi, B., 2020, "Numerical analysis of solidification of PCM in a closed vertical cylinder for thermal energy storage applications", *Heat and Mass Transfer*, Vol 56, pp. 2909-2922
- 14) Pouyan, T. S., 2020, "Numerical modelling of phase change material melting process embedded in porous media: Effect of heat storage size", *Proc Instit Mech Eng, Part A: J Power Energy*, Vol 234(3), 365-83.
- 15) Mahmoud, R. M., 2021, "Melting of PCM inside a novel encapsulation design for thermal energy", *Energy Conversion and Management: X*, Vol 11, 100098.
- 16) Michael, J. A., 2015, "Effect of inclination



- angle during melting and solidification of a phase change material using a combined heat pipe-metal foam or foil configuration”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol 80, pp. 767-780.
- 18) Vidula, A., 2021, “Prediction of melting characteristics of encapsulated phase change material energy storage systems”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol 181, 121872.
- 18) Mahdi J.M., 2017, “Melting enhancement in triplex-tube latent heat energy storage system using nanoparticles-metal foam combination”, *Applied energy*, Vol 191, pp.22-34.
- 19) Raja, A., 2021, “Numerical study of an Evacuated Tube Solar Collector incorporating a Nano-PCM as a latent heat storage system”, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol 24, 100859.