

이종 PCM의 선택적 상변화 시의 열전달 해석

Numerical Study of Heat Transfer with Selective Phase Change in Two Different Phase Change Materials

김형국(Hyung Kuk Kim)¹, 이동규(Dong Gyu Lee)¹, 백중현(Jong Hyeon Peck)²,
 강채동(Chaedong Kang)^{3*}

¹전북대학교 대학원, ²한국생산기술연구원, ³전북대학교 지열에너지기술연구센터

¹Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

²Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan 331-822, Korea

³Geothermal Energy technology Research Center, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

(Received March 14, 2013; revision received June 17, 2013)

Abstract A numerical analysis of solid-liquid phase change was performed on a heat transfer module which consisted of circulating water path (BRINE), heat transfer plate (HTP) and phase change material (PCM) layers, such as high temperature PCM (HPCM, 78~79°C) and low temperature PCM (LPCM, 28~29°C). There were five arrangements, consisting of BRINE, HTP, LPCM and HPCM layers in the heat transfer module. The time and heat transfer rate for melting/solidification was compared to their arrangements, against each other. As results, the numerical time without convection was longer than the experimental one for melting/solidification. Moreover, the melting/solidification with the BRINE I -LPCM-BRINE II - HPCM arrangement was faster(10 hours) than the others; HPCM-BRINE-LPCM, BRINE I -HPCM-LPCM-BRINE II one.

Key words Phase Change Material(PCM: 상변화물질), Solidification(응고), Melting(용해), Phase Change(상변화), Computational fluid dynamics(CFD: 전산유체역학)

* Corresponding author, E-mail: ckang@jbnu.ac.kr

기호설명

B I-H-L-B II : 순환수 I -고온PCM-저온PCM-
 순환수 II
B I-L-B II-H : 순환수 I -저온PCM-순환수 II-
 고온PCM
B-H-L : 순환수-고온PCM-저온PCM
FHTP : 핀 부착 열전달판
H-B-L : 고온PCM-순환수-저온PCM
M.P. : 용해점, Melting Point [°C]
HPCM : 고온 PCM (M.P.: 78°C)
HTP : 열전달판
h : 열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]; 비엔탈피 [J/g]
k : 열전도도 [$W/m \cdot ^\circ C$]
LPCM : 저온 PCM(M.P. : 28°C)
q : 열유속 [W/m^2]
S : 운동량 원천항 [N/m^3]
T : 온도 [°C]
u : 속도 요소
 α : 액체 체적 부분

γ : 상변화시 액체 부분
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 β : 열확산계수 [$1/K$]

하첨자

f : 유체영역
h : 열
i : 직교좌표계 I 방향
l : 액체
s : 고체
total : 전체 표면
w : 벽

1. 서 론

최근 전력에너지의 수요가 지속적으로 증가함에 따라 해마다 피크전력이 갱신되고 발전에서의 전력예비율 부족으로 나타나고 있다. 그 원인 중 하나로서 전기구동식 냉난방기기의 보급 확대 및 집중적 가동이

관여하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾

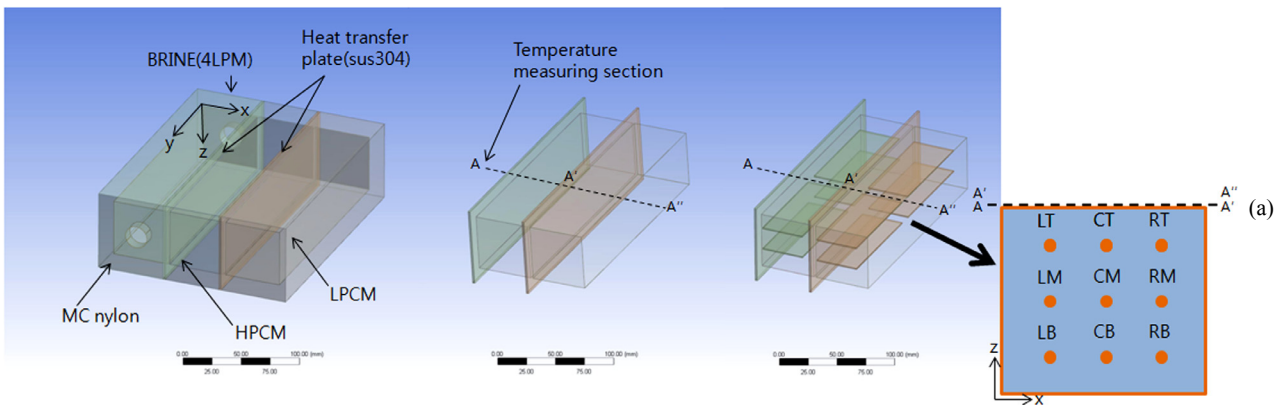
태양열을 이용한 축열시스템은 집열기로부터 축열조에 저장된 열을 난방 및 급탕의 보조열원으로서 사용된다. 하지만 최근 기기효율 향상을 위해 히트펌프의 보조 또는 주열원으로서 사용하는 것이 시도되고 있다. 이와 관련하여 타 연구자들에 의해 축열조에 충전된 축열량의 효과적인 이용을 위해 축열매질의 축/방열특성을 파악하고 계절에 따른 축열량을 측정한 연구가 진행된 바 있다.⁽²⁾ 히트펌프의 열원으로 사용하기 위해서는 냉난방 운전에 필요한 열원온도를 형성해야 하고 안정된 온도대역을 필요로 한다.

상변화물질(PCM)은 응고과정 시 상변화 온도대역을 유지하면서 잠열을 흡수하여 열원으로서의 역할을 수행할 수 있다. 하지만, 시스템에 적용을 위해서는 상변화 시 열전달 현상 파악에 초점이 맞추어져 있다. PCM의 열전달 현상을 예측, 분석하기 위해 Tan et al.은 실험과 전산유체역학(CFD)해석을 통해 캡슐안의 PCM의 용해과정 동안 부력에 의한 대류 현상을 관찰하였다.⁽²⁾ 또한 Ye et al.은 CFD를 이용하여 파라핀계열의 PCM 층에서 길이 2 mm의 핀의 축열/방열 특성을 확인하였다.⁽³⁾

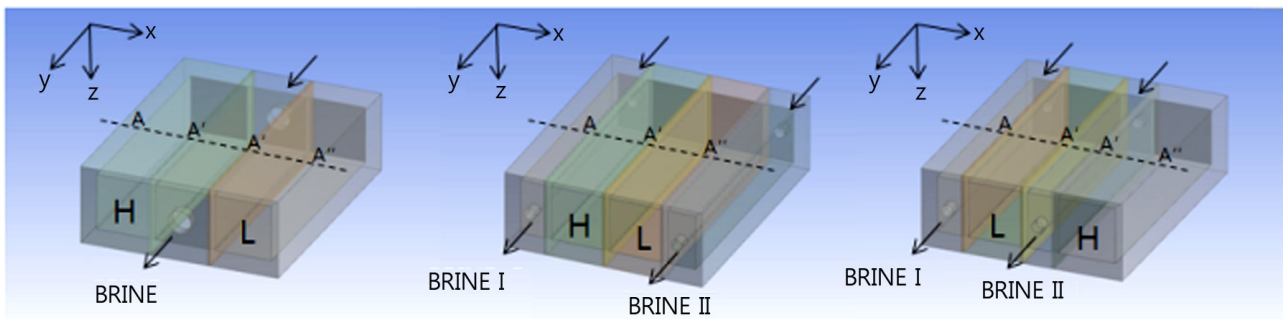
한편 Tay et al.은 물을 수직원통형 탱크 내 4개의 튜브에 충전하여 용해/동결시키는 방냉/축냉과정을 CFD로 이용하여 모사하였다.⁽⁴⁾ 그 밖에도 CFD를 이용한 PCM의 상변화에 대한 많은 연구가 진행되었으나 PCM의 상변화 시 화학적 성분변화, 부피변화 및 PCM의 자연대류 현상 등은 상변화 열 해석에 있어서 상당한 제약이 되고 있다.

한편 태양열 제습-압축식 히트펌프시스템은 분리 충전된 2개의 서로 다른(이종) PCM을 열원으로 사용하는 것을 새롭게 제안하고 있다.⁽⁶⁻⁷⁾ 이를 위해 이전 연구에서는⁽⁵⁻⁸⁾ 이종 PCM의 상변화시 인접한 PCM에서 열적 간섭이 일어나는 것을 확인하였다. 그러나 상변화 과정이 불분명하고 열평형에 도달하기까지의 시간이 매우 길게 나타나 상변화 시 열적 간섭에 대한 영향을 파악하기가 어려웠다.

본 연구에서는 CFD 상용코드를 이용, 열전달판에 핀의 유/무 및 이종 PCM과 순환수의 충전순서 등 이전 실험⁽⁸⁾과 동일조건 하에서 저온 PCM(LPCM)의 용해/응고 시의 열전달 특성을 파악하여 실제 실험과 결과와 비교하고 충전조건이 LPCM의 용해/응고 시간에



BRINE-HPCM-LPCM Module (b) Heat transfer plate (c) Heat transfer plate with fin (d) Thermocouple points
Fig. 1 Schematic of heat exchange module with fin, or without fin.



(a) H-B-L (b) BI-H-L-BII (c) BI-L-BII-H
Fig. 2 Schematic of heat exchange module with the change of PCMs charge.

미치는 영향을 파악하는 것을 목적으로 하였다.

2. 계산영역 모델링 및 계산방법

2.1 열전달부 모델링

Table 1은 계산에 사용된 PCM 및 기타 열전달부 부재의 열물성을 나타낸 것으로서 이전 연구⁽⁵⁾에 적용된 값을 참고 하였다. 열전달부의 외주부에 대한 열물성도 계산에 고려하였다. 계산에서는 이중 PCM이 탑재된 열전달 모듈에서 LPCM의 용해/응고과정에 대해서만의 열전달 특성을 관찰하기 위하여 열전달부 내부의 형태 및 배치를 달리하였다. LPCM의 용해/응고에만 국한시키는 이유로서 이전 연구⁽⁵⁾ 통해 높은 PCM (HPCM)이 LPCM보다 용해/응고 과정이 짧고 상변화 구간이 비교적 명확하게 나타난 반면, LPCM은 공급열 원과의 온도차가 작아서 주위로의 열손실이 상변화 시간에 영향을 미쳐서 이후 평형온도에 도달하는 시간이 길어지는 실험적 오차를 극복하기 어려웠기 때문이다. Fig. 1은 열전달 판에서의 핀의 유무를, Fig. 2는 순환수 유로와 이중 PCM의 충전순서를 달리한 계산 모델을 각각 나타내었다. Fig. 1에서 열전달판(HTP)은 순환수 유로와 HPCM 사이, HPCM과 LPCM 충전층 사이의 각 경계에 놓여 있고(Fig. 1(b)), 열전달판에 fin이 부착된 경우(FHTP) Fig. 1(c)와 같이 fin을 HPCM 및 LPCM 충전층 내에 배치시켜 열전달이 이루어지도록 하였다. Fig. 1 및 2에서 각각의 PCM 층에서 y축의 중앙을 연직으로 하는 면에 총 9개소의 온도값(Fig. 1(d))을 매 계산시간마다 수집하였다. 계산은 LPCM의 온도점 RB(Fig. 1(c))가 35°C에 도달했을 때 종료하였다.

열전달부는 열전달판 및 fin 모두 외형적 치수 50×200×1(mm)이고, 외주부(NC Nylon) 전체가 두께 20 mm로 구성되며 단열재 역할을 하지만 실제과정⁽⁵⁾에서

발생한 열손실을 고려하여 계산에 반영시켰다. 또한 이중 PCM은 50×200×50 mm의 크기로 형성하여 열전달부 내에 배치하였다. 이로부터 HPCM과 LPCM은 각각 1.09 kg, 0.855 kg이 충전되었다. 열전달부의 계산영역에 대한 격자 생성(pre-process)은 CATIA[®] V5와 ANSYS MESHING[®]을 사용하였으며 열전달 해석은 상용코드인 ANSYS FLUENT[®] 12.1을 사용하였다. 열전달부의 계산영역은 4면체(Tetra)와 6면체(Hex)를 조합한 복합 격자로 생성시킨 결과, 대략 40만~45만 개의 요소수로 구성되었다. Fig. 3에 열전달부의 계산영역 가운데 PCM층 일부에 대한 격자를 나타내었다.

계산 조건은 Table 2와 같이 열전달부 내에 5가지의 PCM 충전 순서에 대해, 유량 및 온도를 변화시켜 용해 및 응고과정 각각에 적용하였다.

Fig. 4는 해석 모듈의 요소수에 따른 계산 결과를 나타낸 그래프이다. 요소수가 20만 개와 25만 개일 때 온도값에서 수렴하지 않은데 비해 30만 개, 40만 개 및 44만 개 각각의 요소수에 대한 계산 온도값은 0.01% 이내에서 서로 일치하는 경향을 보였다. 본 계산에 사용한

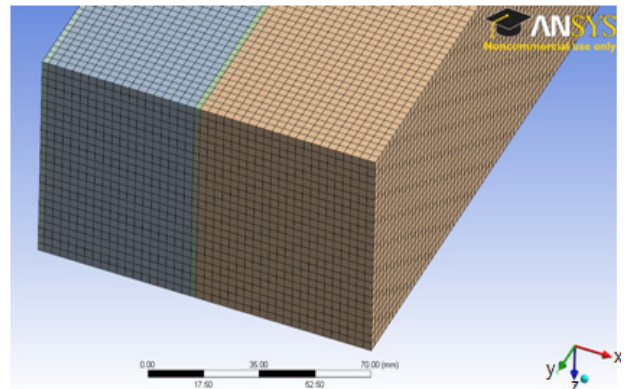


Fig. 3 Geometry of mesh generated PCM layer in analysis.

Table 1 Thermo-physical properties of PCM and others⁽⁵⁾

Property		LPCM	HPCM	HTP* SUS304	NC Nylon*
Melting point(°C)		27.8	78	-	-
Latent heat(J/g)		187	301	-	-
Specific heat (J/g · °C)	Liquid	2.2	-	0.5	1.67
	Solid	1.4	2.25		
Density (kg/m ³)	Liquid	1,530	-	8,030	1,150
	Solid	1,710	2,180		
Thermal conductivity (W/m · K)	Liquid	0.53	-	16.27	0.29
	Solid	1.09	1.3		

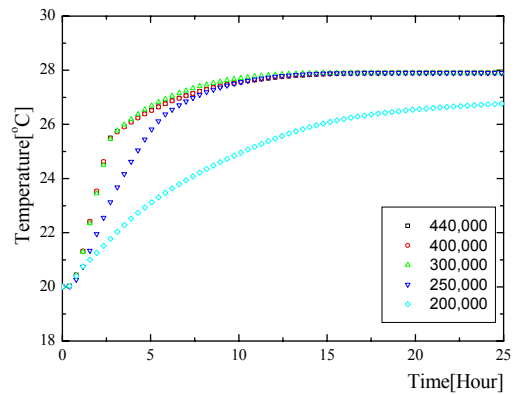


Fig. 4 Time history of temperature on element numbers in BRINE-HPCM-LPCM during melting of LPCM in CFD.

Table 2 Conditions for analysis

Heat transfer module	Flow rate (LPM)	Heating (Cooling) Temp. (°C)	Initial temp. for heating (cooling)(°C)
B-H-L(HTP)	4	35(15)	15(35)
B-H-L(FHTP)	4		
H-B-L	4		
B I -H-L-B II	2/2		
B I -L-B II -H	2/2		

ANSYS FLUENT® 12.1은 교육용으로 운용상의 제약으로 인해 본 연구에서는 해석 모듈의 요소수를 대략 40~45만 개 사이로 설정하였다.

2.2 지배 방정식

PCM 상변화 해석에 사용된 지배방정식은 식(1)~식(3)과 같다. 상변화 동안 액상영역의 유동에 대하여 층류모형을 적용, 또한 온도에 따른 물성변화는 식(4)의 구간선형근사(piecewise-linear approximation)를 사용하였다. 중력이 작용하는 온도장에서는 부력(buoyancy)에 의한 자연대류가 발생하게 되어, 보통 Boussinesq 근사가 고려되어야 한다. 하지만 본 해석에서는 충전부가 중력의 영향을 적게 받는다고 가정하여 중력장을 무시하여 자연대류의 영향을 배제하였다. 따라서 식(5)은 여타 항에 비해 매우 작아서 무시되었다. 한편 상변화를 묘사하기 위해 식(6)으로부터 액상과 고상의 온도에 의해 PCM의 고상과 액상의 분율을 산출하였다. 열유동장 계산은 SIMPLE(Semi implicit method for pressure linked equation)알고리즘이 적용되었다.

The continuity equation

$$\frac{\partial \alpha_n}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_n}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

The momentum equation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + S_i \quad (2)$$

The energy equation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{dT}{dx_j} \right) \quad (3)$$

piecewise-linear

$$\varphi(T) = \varphi_n + \frac{\varphi_{n+1} - \varphi_n}{T_{n+1} - T_n} (T - T_n) \quad (4)$$

The boussinesq model

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0 \beta (T - T_0)g \quad (5)$$

$$\gamma = 0 \text{ if } T \leq T_s, \quad \gamma = 1 \text{ if } T \geq T_l, \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \text{ if } T_s < T < T_l$$

$$q_{total} = h_f (T_w - T_f) \quad (7)$$

3. 용해/응고 해석 결과

3.1 단순 열전달판에 의한 실험 및 해석

Fig. 5는 Fin이 없는 열전달판(HTP)으로 구분지는 열전달부에서 Fig. 1(a)의 배치, 즉 순환수-HPCM-LPCM(B-H-L)의 충전순서에 대해 순환수 가열에 의한 LPCM의 용해 과정을 실험과 해석 모두 나타낸 것이다. 해석 결과는 검정색으로, 실험은 이전 연구(6)로부터 획득한 결과로서 그림에서는 회색으로 나타내었다. 실험, 해석 모두 순환수가 35°C로 열교환부에 유입된 후 열이 열전달판, HPCM, 열전달판, LPCM순으로 전달됨을 알 수 있다. 특히 LPCM의 용해가 시작되는 2시간 부근까지 온도변화에 있어서 실험, 해석 모두 일치하고 있다. 또한 LPCM의 용해가 시작되면서 용해열 흡수로 인해 해석의 경우 HPCM의 온도상승 구배가 급격히 감소하였다. 용해 초반에 해당하는 2시간 부근까지는 LPCM의 액상비율이 상대적으로 작아 전도에 의한 열전달이 지배적이라 추정되어 실험과 해석이 어느 정도 일치하였으나, 시간 경과와 함께 액상이 증가함에 따라 열전달판 온도 및 LPCM의 용점의 차이로 인한 자연대류가 발달되어 실험 결과에서 용해가 해석 보다 약 10시간(20%) 짧게 나타났다. Tay 등에 따르면 얼음의 용해시간은 자연대류를 무시한 경우의 CFD 해석값이 실험값보다 약 20% 길게 나타남

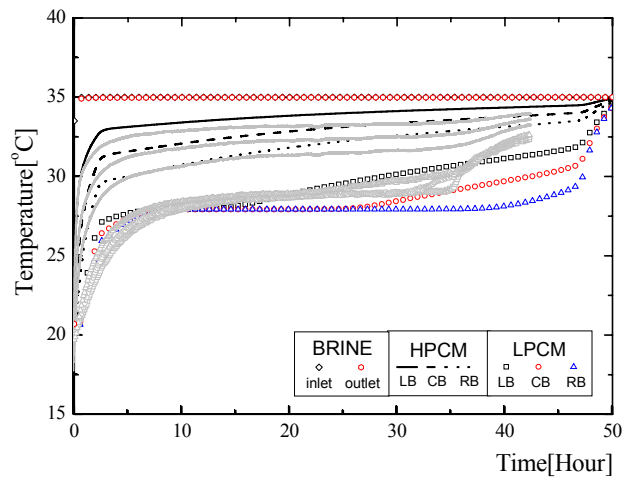


Fig. 5 Temperature history of PCM layers with B-H-L (HTP) arrangement during LPCM melting by experiment and calculation.

을 보였는데 본 해석에서의 비율과 유사하다.⁽³⁾ 따라서 해석에서 나타난 용해시간의 지연은 자연대류의 영향이 고려되지 않아서 나타난 것으로 판단된다.

3.2 핀의 유무에 따른 열전달 해석

Fig. 6은 열 교환부를 Fig. 5와 같은 순환수-HPCM-LPCM(B-H-L)의 충전순서로 배치한 후 Fig. 1(b) 및 (c),

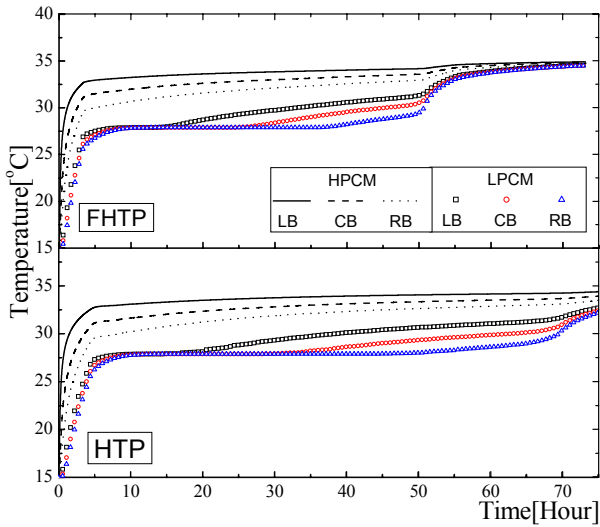


Fig. 6 Temperature history of PCM layers for each B-H-L arrangement with FHTP and HTP during LPCM melting.

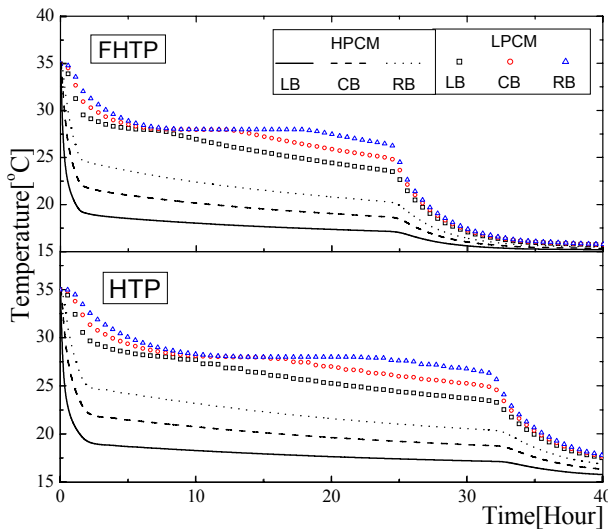


Fig. 7 Temperature history of PCM layers for each B-H-L arrangement with HTP and FHTP during LPCM solidification.

즉 열전달판에 핀 부착 여부에 의한 LPCM의 용해 과정을 해석을 통해 얻은 온도 이력으로 살펴 본 것이다. 초기 15°C로 설정된 PCM층에 35°C의 순환수를 순환시킨 직후부터 열전달 양상은 Fig. 5와 거의 유사하다. 또한 핀이 부착된 열전달판(FHTP)이 핀이 없는 것(HTP)에 비해 용해 시간이 약 25% 감소한 것으로 나타났다.

Fig. 7은 초기온도 35°C의 LPCM의 응고 과정으로서, Fig. 6과 동일한 구조 및 배치 하에 15°C의 순환수를 공급시켰을 때 PCM층의 온도 이력을 나타낸 것이다. 그 결과, FHTP의 경우가 HTP의 경우에 비해 응고 시간이 약 30% 감소한 것으로 나타났다. 또한 핀의 유무에 상관없이, Fig. 5와 마찬가지로 LPCM의 용해 시 흡수한 잠열은 HPCM의 현열변화에 영향을 미친 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6 및 Fig. 7로부터 열전달판에 핀을 부착했음에도 불구하고 해석에서 얻은 용해(50시간) 및 응고(35시간)시간 모두 실험에서의 값(용해 40시간, 응고 30시간) 보다 길게 나타났다.

3.3 모듈 충전순서의 변화에 따른 열전달 해석

Fig. 8은 H-B-L, B I -H-L-B II 및 B I -L-B II -H의 배치에 대하여 각각 LPCM의 용해 해석 결과이다. 열전달부 전체가 열평형에 도달하는 데 걸리는 시간은 H-B-L 배치가 약 35시간, B I -H-L-B II 배치가 약 25시간으로 FHTP의 경우에 비해 각각 30% 및 50% 정도 감소하였다. 또한 B I -L-B II -H 배치에서는 약 10시간으로 FHTP의 경우에 비해 약 85% 감소하였다. 충전순서 및

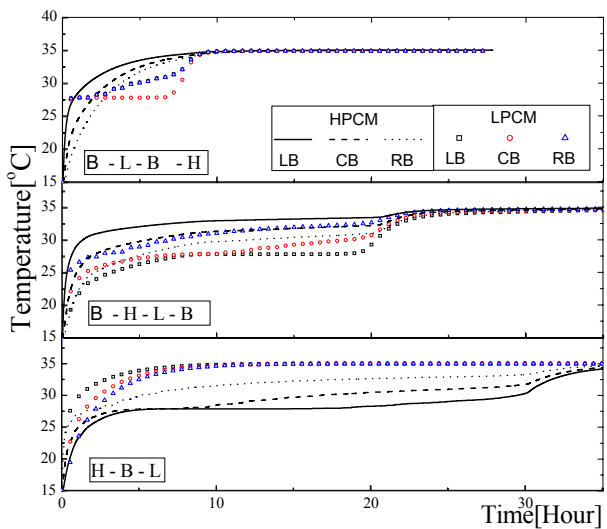


Fig. 8 Comparison of temperature history among H-B-L/B I -H-L-B II/B I -L-B II -H arrangement during melting of LPCM.

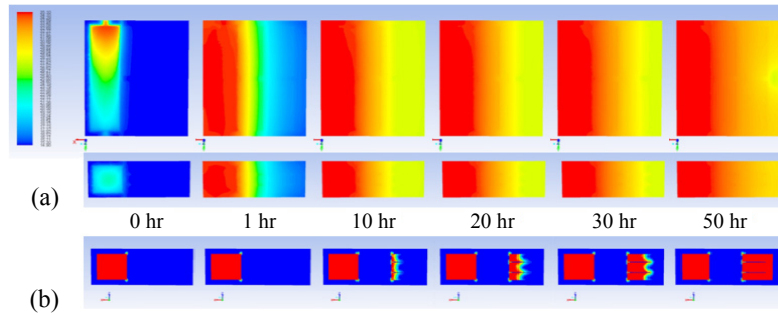


Fig. 9 Temperature and shape profile of PCM layer in B-H-L arrangement with FHTP during LPCM melting.

유로를 변경함으로써 B-H-L(HTP) 배치의 경우 용해 시 약 80시간이 소요되었던 것이 약 10시간으로 줄어들었으며, 이는 축열조에 PCM을 충전 시 적절한 위치 선정 등을 통해 축, 방열 효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 B-H-L(FHTP)충전순서에 대한 해석에서 LPCM 용해 시 PCM충전층의 윗면과 측면에서의 온도 계산 점을 바탕으로 형성시킨 온도 스펙트럼을 나타낸 것이다. Fig. 9에서 청색은 15°C, 적색은 35°C를 나타낸다. 초기 온도 15°C에서 4 LPM으로 35°C의 물이 순환수로 흐르면서 먼저 적색으로 변하고 인접해 있는 HPCM과 LPCM도 청색에서 적색으로 온도가 올라가는 현상을 확인하였다. Fig. 9에서 나타난 것과 같이 SUS재질로 된 핀은 고체형상이므로 청색으로 나타난다. 핀이 부착된 부분부터 용해/응고가 먼저 일어나면서 핀에 의한 열전달 현상을 파악할 수 있었다.

3.4 Heat flux 해석

Fig. 10은 핀이 없는 B-H-L, 핀이 있는 B-H-L, H-B-L, B I-H-L-B II 및 B I-L-B II-H 충전 배치에 대하여 평균 열유속값과 투입된 열량을 비교한 그래프이다. 거의

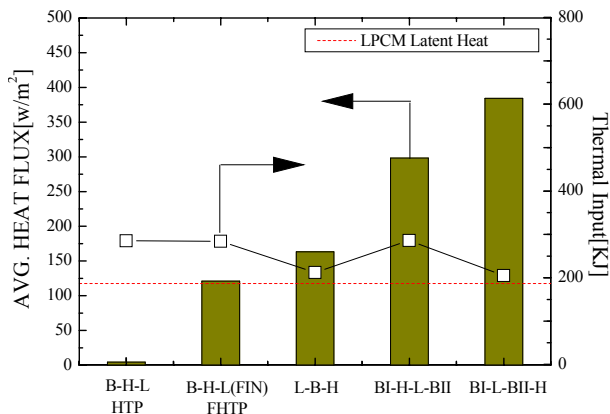


Fig. 10 Average heat flux and thermal input in each case during melting of LPCM.

동일한 열 입력임에도 불구하고 B-H-L순서로 핀이 있는 충전배치(FHTP)가 핀이 없는 경우보다 월등히 높은 열유속을 나타내었다. 또한 순환수유량이 일정한 상태에서 순환수와 PCM과의 접촉면을 증가시킨 결과, 특히 LPCM의 양측면이 순환수에 접한 경우(B I-L-B II-H)에서 결과물 중 최대 열유속을 보였다. 또한 이는 열평형에도달하는 시간이 짧은 조건일수록 평균 열유속값이 크게 나타남을 확인하였다.

4. 결 론

이중 PCM의 배치에 따른 상변화 특성을 CFD 계산으로 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) CFD 해석에 의한 용해, 응고 시의 온도변화 분포는 실험 보다 해석의 경우가 약 10시간(20%) 길게 나타났다.
- (2) 저온 PCM의 용해 시, 열평형에 도달하는 시간은 짧은 순서로 볼 때 B I-L-B II-H(10시간), B I-H-L-B II(25시간), H-B-L(35시간), 핀이 있는 B-H-L(50시간), 그리고 핀이 없는 B-H-L(80시간)의 배열순으로 짧게 나타났고 응고과정에서도 용해과정과 같은 배열순으로 나타났다.
- (3) 핀이 부착된 모듈에 의한 해석시간은 핀이 부착되지 않은 것에 비해 용해 시 25%, 응고 시 30% 짧게 나타났으며, 배치를 달리하여 순환수가 두 PCM사이에 접촉할 때 핀이 없음에도 불구하고 핀의 부착보다 해석시간이 25시간 더 짧게 나타났다.
- (4) 열매체의 열전달면의 총 열전달량(Q_{total}), 평균 표면열유속(q)과 시간당 투입된 열량을 계산하였을 때 열평형에 도달하는 시간이 짧은 조건일수록 평균 표면열유속(q)값이 크게 나타났다.

이상의 결론으로부터 이중 PCM을 열원으로 이용할 경우 PCM의 적절한 배치 및 순환수의 분배를 통해 유효한 열전달을 꾀할 수 있어, 축열조 내 PCM의 충전 설계에 고려되어야 할 요소임을 확인하였다.

참고문헌

1. Esen, M., 2000, Thermal performance of a solar-aided latent heat store used for space heating by heat pump, *Solar Energy*, Vol. 69, pp. 15-25.
2. Tan, F. L., Hosseinizadeh, S. F., Khodadadi, J. M., and Fan, L., 2009, Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 3464-3472.
3. Ye, W. B., Zhu, D. S., and Wang, N., 2011, Numerical simulation on phase-change thermal storage/release in a plate-fin unit, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 3871-3884.
4. Tay, N. H. S., Bruno, F., and Belusko, M., 2012, Experimental validation of a CFD model for tubes in a phase change thermal energy storage system, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 574-585.
5. Jung, U. H., Choi, Y. S., Peck, J. H., Lee, K. Y., and Jung, D. Y., 2011, Investigation of solidification and melting of PCM in a vertical cylinder using CFD, *Proceedings of the SAREK*, pp. 1231-1234.
6. Kim, K. H., Kim, H. K., Park, C. W., Peck, J. H., and Kang, C., 2011, Experimental study on melting/solidification of adjoining two different PCMs in a concentric vertical cylinder, *Proceedings of the KSME*, PP. 130-135.
7. Kim, H. K., Park, C. W., Lee, D. G., Peck, J. H., Choi, Y. S., and Kang, C., 2011, Experimental study on melting/solidification of adjoining two different PCMs with alternate arrangement, *Proceedings of the SAREK*, pp. 393-397.
8. Kim, K. H., Kim, H. K., Park, C. W., Peck, J. H., and Kang, C., 2012, Melting/ Solidification of adjoining two different PCM layers with one-directional heating/cooling, *Proceedings of the 8th KSME-JSME TFEC*.