

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 15, No. 3, 1995

직육면체형 잠열축열조내 상변화물질의 열전달특성에 관한 연구

임장순*·최국광**·김준근***·김영기****·김일겸****·김동춘****

* 인하대학교 ** 인천대학교 *** 인하대학교 산업과학 기술연구소 **** 인하대학교 대학원

A Study of Heat Transfer Characteristics of P. C. M. in a Latent Heat Storage Tank(Cubic Type)

C. S. Yim* · K. K. Choi** · J. K. Kim*** · Y. K. Kim**** · I. G. Kim**** ·
D. C. Kim****

*Inha Univ. Incheon Univ. Science & Technology Research Institute, Inha Univ. Graduate School,
Inha Univ.*

요 약

본 연구는 상변화물질로써 무기염수화물계 물질인 피로인산나트륨($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)이 채워져 있는 직육면체형 잠열축열조 내에서 축열과정시 일어나는 상변화물질의 온도특성, 열전달현상, 축열량 등을 실험적으로 측정하고 그 결과들을 수치해석결과들과 비교·검토한 것이다. 축열과정시 상변화물질인 피로인산나트륨은 용융상태가 액체상태가 아닌 gel상태이므로 액체상태에서의 주된 열전달현상으로 나타나는 자연대류 유동현상이 일어나지 않아 전도에 의한 열전달현상이 지배적인 것으로 나타났다.

무기염수화물계 상변화물질은 공극율(공기 함유율)이 작을수록 열용량이 커지므로 축열과정시 공극율이 큰 경우보다 온도가 서서히 상승되었으며, 실험으로 측정된 온도값과 수치해석적인 방법으로 계산된 온도값은 최대 15%의 차이가 났다.

Abstract

This study presents experimental and numerical results of the temperature characteristics, the heat transfer phenomena, and the heat storage quantity during the heat storage process with sodium pyrophosphate decahydrate($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)-Phase Change Material(PCM) in a latent heat storage tank(cubic type).

It was proved that heat transfer by conduction was dominant because PCM($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) during heating processes was gel phase, not liquid phase

The gap ratio(rate of air content) of PCM became smaller, the thermal capacity of PCM became larger, therefore the temperature distribution of PCM slowly increased than that of large gap ratio.

There was maximum 15% difference between measured temperatures and calculated temperatures.

Nomenclature

C : Specific heat of the mixture [kJ/kg · °C]	t : Time coordinate [min.]
C_p : Constant pressure specific heat of water [kJ/kg · °C]	X' : Coordinate measured horizontally from the left-vertical wall of the rectangular test section [m]
E : Energy stored in PCM [kJ]	X'' : Dimensionless horizontal coordinate, X'/L
E_o : Total energy stored in PCM [kJ]	Y' : Coordinate measured vertically from the bottom of the rectangular test section [m]
H_r : Height of PCM($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) for rectangular test section [m]	Y'' : Dimensionless vertical coordinate, Y'/L
L : Half width of rectangular test section [m]	V : Molten volume of PCM [m ³]
T : Temperature [°C]	V_o : Total volume of PCM
T_c : Cooling temperature of heat transfer fluid [°C]	
T_h : Heating temperature of heat transfer fluid [°C]	
T_i : Initial temperature of PCM [°C]	
T_m : Melting temperature [°C]	
T_s : Heat source temperature for rectangular test section [°C]	

Greek symbols

α : Thermal diffusivity
ϵ : The volume ratio of air to PCM in mixture
ρ : Density
λ : Latent heat of fusion

- τ : Dimensionless time, $\alpha \cdot t/L^2$
 θ : Dimensionless temperature, $(T-T_i)/(T_s-T_i)$

Abbreviation

PCM Phase Change Material

Dimensionless Group

- Ste Stefan number, $C \cdot (T_s-T_i) / \lambda$
 Fo Fourier number, $\alpha \cdot t/L^2$

I. 서 론

산업발전과 더불어 전력에너지와 같은 고급에너지의 사용량이 증가함에 따라 고급 에너지의 효율적인 활용방안에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 에너지의 효율적 이용면에 있어서 가장 중요한 점은 에너지의 공급과 수요의 균형이 이루어져야 한다는 것이며 에너지의 수요변동에 따른 공급을 만족시키기 위해서는 에너지 저장이 필연적으로 수반되어야 한다. 열에너지의 저장방법중 지금까지 알려져온 대표적 방법들은 현열이용형 열에너지 저장방법과 상변화물질(PCM)을 축열매질로 사용하는 잠열이용형 열에너지 저장방법이 있으며, 이중 잠열이용형 열에너지 저장방법이 현열이용형 열에너지 저장방법에 비해 단위 체적당 축열밀도가 크다는 장점이 있다.

잠열 이용형 열에너지 저장에 관한 연구로는 상변화물질의 용융 및 응고과정에서의 열전

달 현상에 관한 것^{1),2),3),4),7),8)}과 축열 및 방열장치를 포함한 시스템에서의 열전달현상에 관한 것^{5),6),9),10)}이 실험적^{1),4),5),6),9)} 또는 해석적인 방법^{2),3),7),8),10)}으로 연구되어 왔다.

그러나 잠열이용형 축열장치에 사용되는 축열매질의 가열 및 냉각과정시 일어나는 열전달 현상은 열전달에 대한 일반적인 지식으로만 해석될 수 있는 것이 아니며 화학적 변화, 온도 변화에 따르는 부피팽창률 변화 등의 문제들이 각 경우마다 서로 다르게 나타나게 되므로 매우 복잡한 문제로 알려져 있다.

본 연구에서는 직육면체형 잠열축열조를 제작하여 상변화물질로써 잠열용량이 비교적 큰 무기염수화물계의 피로인산나트륨($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)을 사용하여 축열과정시 시간경과에 따른 축열조내 상변화물질의 온도특성, 열전달현상, 축열량을 실험적으로 구하고 이러한 실험결과들을 수치해석을 통한 수치해와 비교·검토함으로써 축열시스템의 설계시에 필요한 기초자료를 도출하였다.

II. 실험

1. 실험 장치

본 실험에서 사용된 실험장치의 개략도와 직육면체형 실험용 잠열축열조의 상세도는 Fig. 1, Fig. 2에 나타내었다. 실험장치의 주요부로는 가열 및 냉각항온조, 실험용축열조, 온도측정 및 기록장치, 온도 및 유량제어장치 등으로 이루어져 있다.

실험용 잠열축열조는 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 두께 1.5mm의 동판으로 제작한 것으로 폭 60mm, 가로 200mm, 세로 200mm 크기의 두개의 열원을 200mm 간격으로 좌우에 설치하여 상·하면은 두께 20mm, 가로 370mm, 세로 200mm, 좌·우면은 두께 20m-

m, 가로 200mm, 세로 197mm 크기의 베이클라이트를 사용하여 단열시켰으며, 고무판을 사이에 끼운 후 볼트와 너트로 조여 고정시켰다. 또한 전, 후면은 두께가 10mm인 아크릴판을 사용하여 단열을 목적으로 판과 판 사이에 공기층을 두어 2중으로 설치한 후 볼트와 너트로 조여 밀봉시켰다.

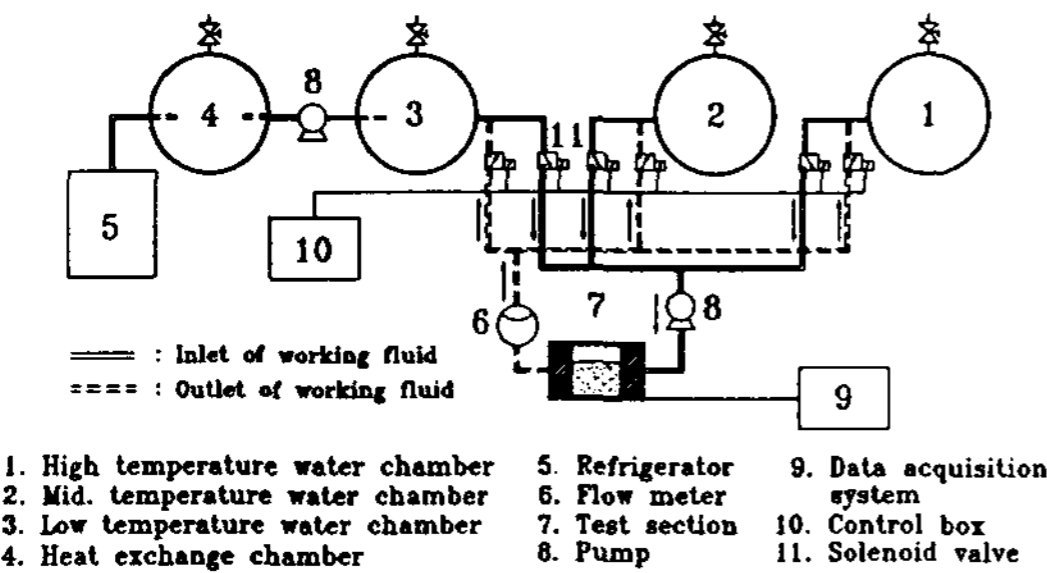


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

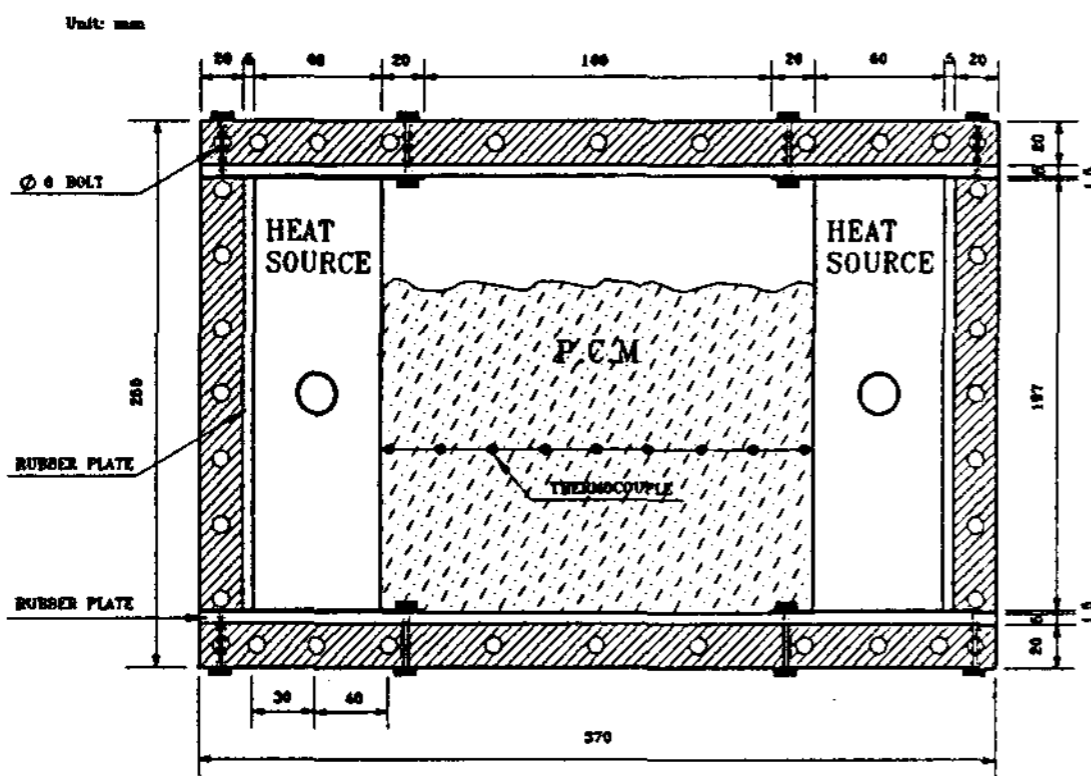


Fig. 2 Details of test section.(front view)

실험과정에서 상변화물질의 내부온도를 측정하기 위한 열전대는 축열조 내부 정중앙의 밑면에서부터 높이가 80mm 되는 지점에 가로방향으로 두 열원 사이를 가는 줄로 연결한 후 그 가는 줄(φ 0.1mm wire)에 좌우대칭 형태로 총 9개의 열전대(T-type, φ0.1mm)를 설치하였다.

또한 각 항온조 내에 1개씩 총 4개, 축열조 내 열원의 각각 2곳의 유입구 및 유출구에 각 1개씩 총 4개 등 모두 17개의 열전대를 설치하였다. 이 열전대로부터 측정된 실험용 축열조의 내부 상변화물질의 온도는 Data Logger (FLUKE-2280B)를 통하여 RS-232C port가 장착된 IBM PC(AT)로 수신시켜 보조기억장치에 기록하였다.

2. 실험방법

본 실험에서 축열재로 사용한 무기염수화물계 피로인산나트륨($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, 용융점 79°C)의 양은 총 4kg이며, 상변화물질의 물성치는 Table 1. 에 나타내었다.

Table 1. Thermophysical properties of $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ^(11),12)

PCM	Melting temp. (T_m) (°C)	Density (ρ) (g/cm ³)	Specific heat (C_p) (J/g · °C)	Latent heat (λ) (J/g)
$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	79.0	1.80(S)	3.10	259.58

S : Solid , L : Liquid

실험은 작동유체의 유량을 각각 7ℓ/min., 14ℓ/min.,로 하고 상변화물질의 초기온도(T_i), 가열수의 온도(T_h), 냉각수의 온도(T_c)를 변화시키면서 정해진 실험시간에 따라 축열 및 방열실험을 행하였다.

실험용 잠열축열조 내 상변화물질의 초기온도를 열평형상태로 유지하기 위하여 중온항온조에서 설정온도로 항온이 유지된 항온수를 순환펌프를 이용하여 순환시켜 잠열축열조 내 상변화물질 온도와 초기 설정 온도와의 차가 0.05°C 이내일 때를 열평형상태로 가정하여 실험을 시작하였다.

III. 이론해석

Fig. 3 에 나타낸 것과 같이 가로가 $2L$, 높이가 H_r 인 직육면체형 축열조를 Model로 하여 윗면과 아랫면을 단열상태로 가정하고 일정온도를 가지고 있는 양벽면을 열원으로 할때 축열과정시 시간경과에 따라 변화되는 상변화물질(피로인산나트륨)내 각 위치의 온도와 용융량 그리고 축열량을 수치해석적으로 계산하여 그 결과를 실험결과와 비교함으로써 수치해석에 대한 타당성을 검토하였다. 또한 상변화물질의 초기온도나 열원의 온도를 변화시켜가며 수행한 수치해석의 결과로부터 초기온도와 열원간의 온도차에 따라 변화되는 용융을 및 축열량에 대한 실험식을 구하였다.

계산에 사용된 물질의 물성치와 각 조건들은 Table 2. 과 Table 3. 에 나타내었다.

Table 2. Thermophysical properties of $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ and Air^{(11),(12)}

Material property	$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Air
Density [g/mm ³]	1.8×10^{-3}	1.059×10^{-6}
Specific heat [J/g · °C]	3.10	1.009
Thermal conductivity [W/mm · °C]	7.013×10^{-4} (S) 5.510×10^{-4} (L)	2.879×10^{-5}
Heat of fusion [J/g]	259.58	-
Thermal diffusivity [mm ² /s]	0.1258	27.05

S : Solid , L : Liquid

Table 3. Calculation parameters

ϵ	T_i	T_s	Ste
35%	30°C	90°C	0.841
	35°C	95°C	
45%	25°C	95°C	1.057
	30°C	90°C	0.906
	35°C	95°C	0.906
	40°C	90°C	0.755
	45°C	95°C	0.755
55%	30°C	90°C	1.000
	35°C	95°C	

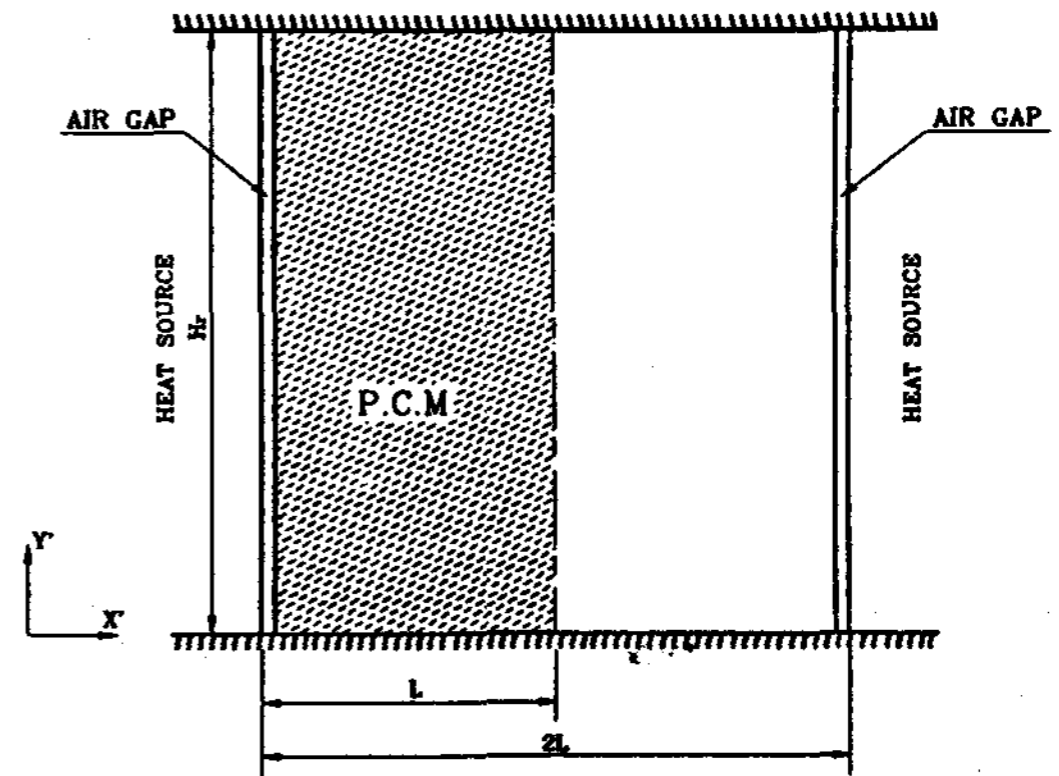


Fig. 3 Schematic diagram of calculation domain.

Model을 단순화하기 위하여 다음과 같은 가정 하에서 수치해석을 수행하였다.

1. 상변화물질의 성질은 공극율을 고려하여 공기와 상변화물질의 혼합물에 대한 물성치를 이용한다.
2. 상변화물질인 피로인산나트륨은 용융상태가 액체상태가 아닌 gel상태이므로 용융상태에서의 주된 열전달기구인 자연대류는 무시한다.
3. 공기와 상변화물질의 혼합물에 대한 물성치는 두 물질(공기, PCM)의 체적비에 비례하여 계산하며 혼합물은 단일물질로 취급한다.
4. 축열조의 중심을 기준으로 좌우의 온도분포는 대칭적으로 동일하다.
5. 열원이 되는 축열조 양벽면의 온도는 항상 일정하다.
6. 축열조의 윗면과 아랫면, 전면과 후면을 통한 열전달은 없다.
7. 열원인 양벽면과 상변화물질사이의 공기층은 1.5mm이며, 공기층에서는 전도열전달만이 일어난다.

1. 지배방정식

축열과정시 용융열전달을 지배하는 방정식을 앞에서 언급한 가정 아래에서 유도하면 다음과 같다.¹³⁾

〈에너지방정식〉

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\lambda}{C} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X'^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y'^2} \right) \quad (1)$$

여기서 λ/C 항은 상변화물질의 온도가 용융점에 도달되었을때 상변화물질이 흡수하는 잠열을 나타내는 항이다.

수치해석에 대한 경계조건 및 초기조건과 계산영역은 아래와 같다.

〈경계조건〉

$$\begin{aligned} X'=0 \text{ 에서} & \quad T=T_s \\ X'=L \text{ 에서} & \quad \frac{\partial T}{\partial X'}=0 \\ Y'=0 \text{ 에서} & \quad \frac{\partial T}{\partial Y'}=0 \\ Y'=H_r \text{ 에서} & \quad \frac{\partial T}{\partial Y'}=0 \end{aligned}$$

〈초기조건〉

$$t=0 \text{ 일때} \quad T=T_i$$

〈계산영역〉

$$0 \leq X' \leq L, 0 \leq Y' \leq H_r$$

2. 지배방정식의 무차원화

지배방정식을 일반화하기 위하여 대표길이를 L , 대표온도를 $(T_s - T_i)$ 로 하여 아래의 무차원변수를 정의하였다.

$$X''=X'/L, Y''=Y'/L$$

$$\theta=(T-T_i)/(T_s-T_i)$$

$$\tau=\alpha \cdot t/L^2$$

위의 무차원변수를 사용하여 지배방정식을 무차원화하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{1}{Ste} = \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X''^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y''^2} \right)$$

$$Ste=C \cdot (T_s - T_i) / \lambda$$

〈경계조건〉

$$\begin{aligned} X''=0 \text{ 에서} & \quad \theta=1 \\ X''=1 \text{ 에서} & \quad \frac{\partial \theta}{\partial X''}=0 \\ Y''=0 \text{ 에서} & \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y''}=0 \\ Y''=\frac{H_r}{L} \text{ 에서} & \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y''}=0 \end{aligned}$$

〈초기조건〉

$$\tau=0 \text{ 일때} \quad \theta=0$$

〈계산영역〉

$$0 \leq X'' \leq 1, 0 \leq Y'' \leq H_r/L$$

IV. 결과 및 고찰

본 실험에 앞서 측정된 피로인산나트륨의 밀도값(실험용 축열조내에 장입된 피로인산나트륨의 단위부피당 질량)과 Table 2. 에 나타난 공기가 함유되지 않은 순수 피로인산나트륨의 밀도값을 비교한 결과, 실험에 사용된 피로인산나트륨은 약 45%의 공극율(공기의 부피/PCM의 총부피)을 가지고 있음을 계산으로 부터 알 수 있었으며, 실험시작 약 10분 후 부터 PCM의 부피변화에 의하여 축열조 양벽면과 PCM 사이에 1.5mm정도의 공기층이 형성됨이 관찰되었다. 또한 초기 축열과정 이후부터 실험이 종료되는 시간까지 축열조 내부의 PCM은 부피변화가 없었고 양벽면에 형성된 공기층의 두께도 변화가 없었으며 실험과정에서 나타난 이러한 사항들은 가정조건에서 요약되어 수치적 해석이 수행되었다.

1. 수평방향의 온도분포

Fig. 4는 상변화물질인 피로인산나트륨($Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$)의 초기온도(T_i)가 30℃, 35℃이고 가열수의 평균온도(T_h)가 90℃ 및 95℃일 때 축열조로 유입되는 작동유체의 유량이 7ℓ

/min. 인 경우의 축열과정시 직육면체형 축열조내부 밑면에서 수직 상방으로 80mm 거리에 위치하여 있는 수평 측정점($X'/L=0.02, 25, 0.50, 0.75, 1.00$)들에서의 시간경과에 따른 온도분포를 나타낸 것이다.

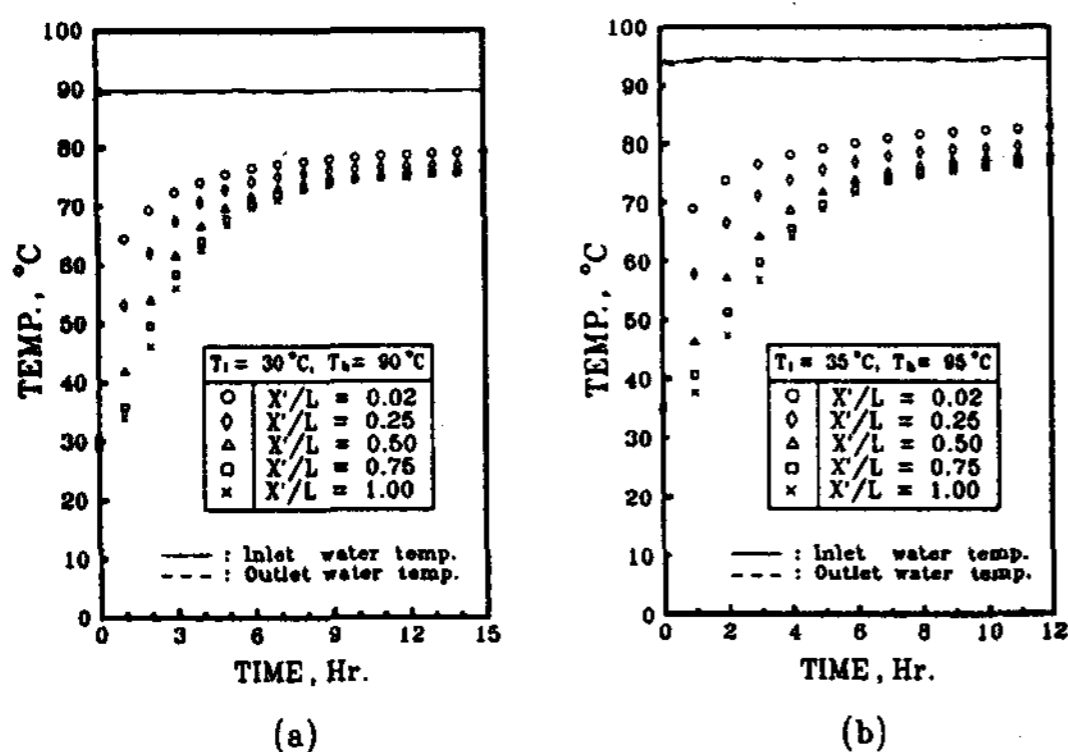


Fig. 4 Horizontal temperature profiles of the PCM during the heat charging process. ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $G=7 \ell / \text{min.}$)

Fig. 4(a)는 초기온도가 30°C 이고 가열수의 평균온도가 90°C 인 경우 상변화물질의 온도변화를 나타낸 것으로 축열과정시 열원인 벽면으로부터 가장 근접한 ($X'/L=0.02$)지점에서부터 상변화물질의 온도가 상승되며 약 10시간이 경과되면서 정중앙에 위치한 $X'/L=1.00$ 지점의 상변화물질이 용융되기 시작하여 이후 약 $75\sim 80^\circ\text{C}$ 의 온도구간에서 상변화물질의 온도는 증가하지 않고 일정하게 유지되는 잠열구간이 나타났다.

Fig. 4(b)는 상변화물질의 초기온도(T_i)가 35°C 이고 가열수의 평균온도(T_h)가 95°C 인 경우의 온도분포를 나타낸 것으로써 Fig. 4(a)의 경우보다 상변화물질의 초기온도와 가열수의 평균온도가 큰 이유로 급격한 온도구배가 나타나고 있다. 또한 약 8시간의 경과 후 정중앙에 위치한 $X'/L=1.00$ 지점의 상변화물질이 용융되어 Fig. 4(a)의 경우보다 약 2시간 빠르

게 나타내고 있다.

Fig. 5는 유량이 $14 \ell / \text{min.}$, 상변화물질의 초기온도(T_i)가 30°C , 35°C , 가열수의 평균온도(T_h)가 90°C , 95°C 인 경우의 축열과정시 상변화물질의 온도분포를 나타낸 것이다.

Fig. 5(a)는 상변화물질의 초기온도가 30°C , 가열수의 평균온도(T_h)가 90°C 인 경우의 온도분포를 나타낸 것으로 축열과정시 약 90분이 경과된 후 $X'/L=0.02$ 지점에서부터 용융되기 시작하였으며 14시간이 경과되면서 정중앙에 위치한 $X'/L=1.00$ 지점의 상변화물질이 용융되기 시작하였다. 또한 Fig. 5(b)는 상변화물질의 초기온도가 35°C , 가열수의 평균온도(T_h)가 95°C 인 경우의 온도분포를 나타낸 것으로 Fig. 5(a)와 비교하였을 때 상변화물질의 온도분포곡선은 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나, 정중앙에 위치한 $X'/L=1.00$ 지점의 상변화물질은 축열과정시 약 10시간이 경과되며 용융하기 시작하여 Fig. 5의 경우보다 약 4시간 빠르게 나타났다.

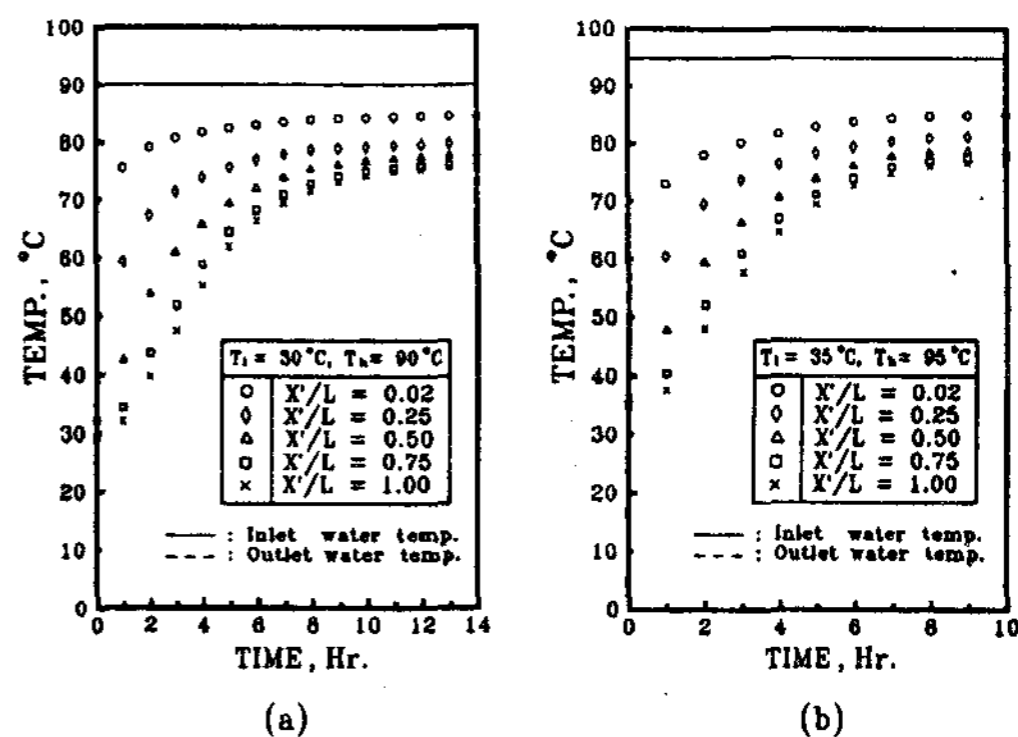


Fig. 5 Horizontal temperature profiles of the PCM during the heat charging process. ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $G=14 \ell / \text{min.}$)

Fig. 6은 상변화물질의 초기온도(T_i)가 30°C , 35°C 이고 열원의 온도가 90°C , 95°C 인 경우의 축열과정시 벽면으로부터의 거리가 X'

$X'/L=0.02, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ 인 위치에서 시간경과에 따른 온도변화의 계산값들을 나타낸 것이다.

$X'/L=0.02$ 인 지점에서의 온도는 매우 빠르게 상승되어 약 2시간 이후부터는 열원의 온도와 거의 동일한 온도를 나타내고 있으며 실험으로부터 측정된 결과(Fig. 4, Fig. 5)와 비교해 볼때 매우 차이가 큰 것으로 나타났다. 이것은 수치해석시에는 공기층의 두께가 적어 온도가 매우 빠르게 상승되었으나 실험시에는 벽면으로부터 떨어진 상변화물질의 측벽부분이 고온과 접하여 경화됨으로써 온도 측정 지점에서의 상변화물질의 물성치가 변화되어 열전도율이 떨어짐에 의한 것으로 사료된다. 그러나 $X'/L=0.25$ 이후 지점에서 계산된 각 지점의 온도분포는 실험에서 측정된 온도분포와 유사한 경향을 나타내고 있음을 보여주고 있다.

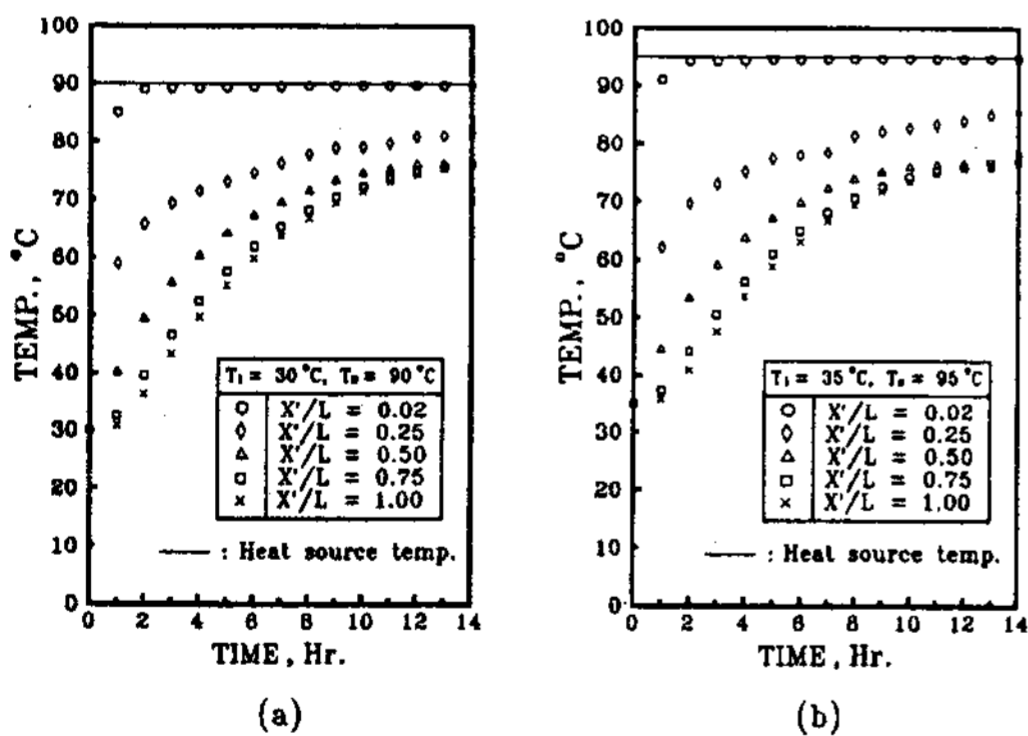


Fig. 6 Horizontal temperature profiles of the PCM during the heat charging process. (Ste=0.906, $\epsilon=45\%$, Calculation)

Fig. 7은 본실험에 사용된 피로인산나트륨의 공극율이 45%이므로 이때 실험에서 측정된 온도값과 공극율이 45%인 경우를 가정하여 수치적으로 계산된 온도값을 비교하기 위하여 나타낸 그림이다. 피로인산나트륨에 대

한 실험결과 도표인 Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 온도분포를 이용하여 열원인 벽면에서의 평균 열유속값을 계산한 결과 Fig. 4는 약 $1.140 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, Fig.5는 약 $1.372 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 의 값이 도출되었다.

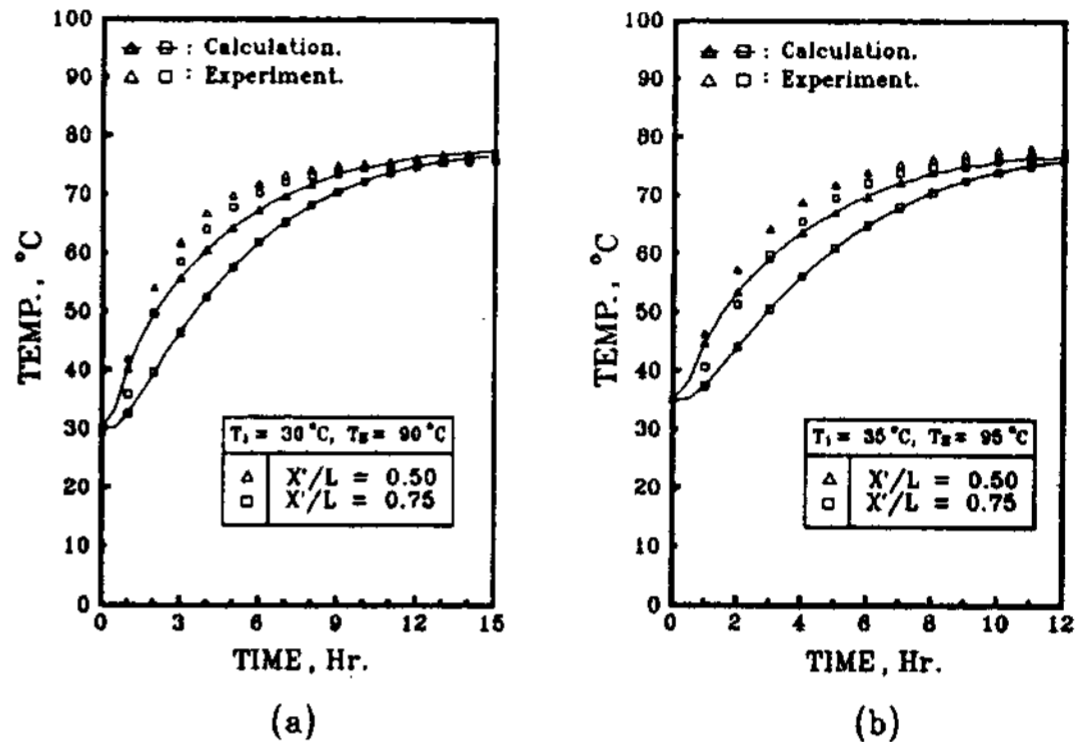


Fig. 7 Comparison of horizontal temperature profiles of the PCM during the heat charging process. (Calculation and experiment)

또한 수치계산에 의한 결과 도표인 Fig. 6에서는 열원인 벽면에서의 평균 열유속값이 약 $1.116 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 로 계산되었다. 계산으로부터 도출된 열유속값을 고려하여 수치계산의 결과와 비교하기 위한 실험결과의 도표는 열유속값의 차이가 거의 없는 Fig. 4를 선택하였다. 실험에서 측정된 온도값과 수치적으로 계산한 온도값을 비교하여 볼때 수치계산에 의한 온도값이 실험에서 측정된 온도값 보다 평균적으로 전체 온도구간차($\Delta T=60^\circ\text{C}$)의 약 6% 정도 낮게 나타났다. 이것은 수치적 계산에서 가정되어 사용된 혼합물(공기가 함유된 피로인산나트륨)의 열전도율값이 실제 상변화물질의 열전도율값과 차이가 나기 때문인 것으로 사료되며, 공극율(상변화물질의 공기함유율)에 따르는 열전도율의 변화에 대한 연구는 좀더 이루어져야 될 것으로 생각된다.

Fig. 8과 Fig. 9는 상변화물질의 공극율이

35% 인 경우와 55% 인 경우를 가정하여 수치적으로 계산한 온도분포값을 나타낸 것이다. 공극율이 각각 변화되는 경우에도 온도변화의 경향은 유사하였으며, 공극율이 높을수록 온도분포가 약간 높게 나타났다. 이것은 공기의 함유율이 많아질수록 열전도율이 낮아 지나 공기가 가지고 있는 열용량이 적어 공극율이 높을수록 온도가 빠르게 상승된 것으로 사료된다.

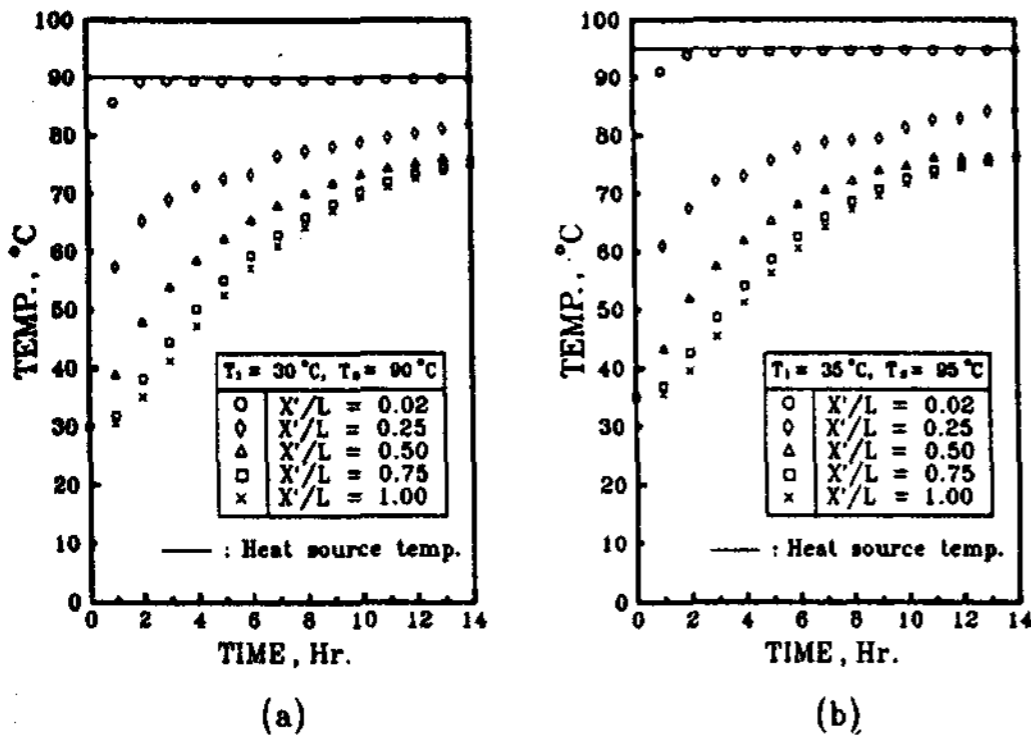


Fig. 8 Horizontal temperature profiles of the PCM during the heat charging process. ($\epsilon=35\%$, Calculation)

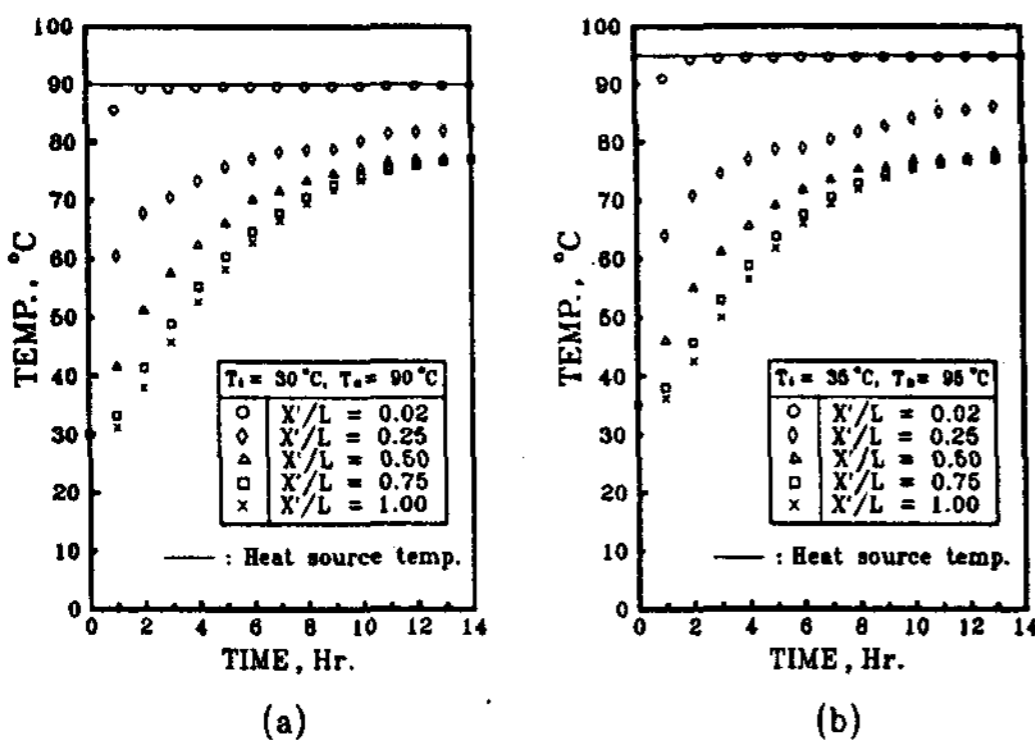


Fig. 9 Horizontal temperature profiles of the PCM during the heat charging process. ($\epsilon=55\%$, Calculation)

Fig. 10은 공극율의 변화에 따른 온도변화를 비교하기 위하여 공극율이 각각 35%,

45%, 55% 인 경우에 계산된 온도값을 $X'/L=0.5$ 인 지점을 대표로 하여 같은 그림에 나타낸 것이다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 공극율이 클수록 온도가 빠르게 상승됨을 보여주고 있다.

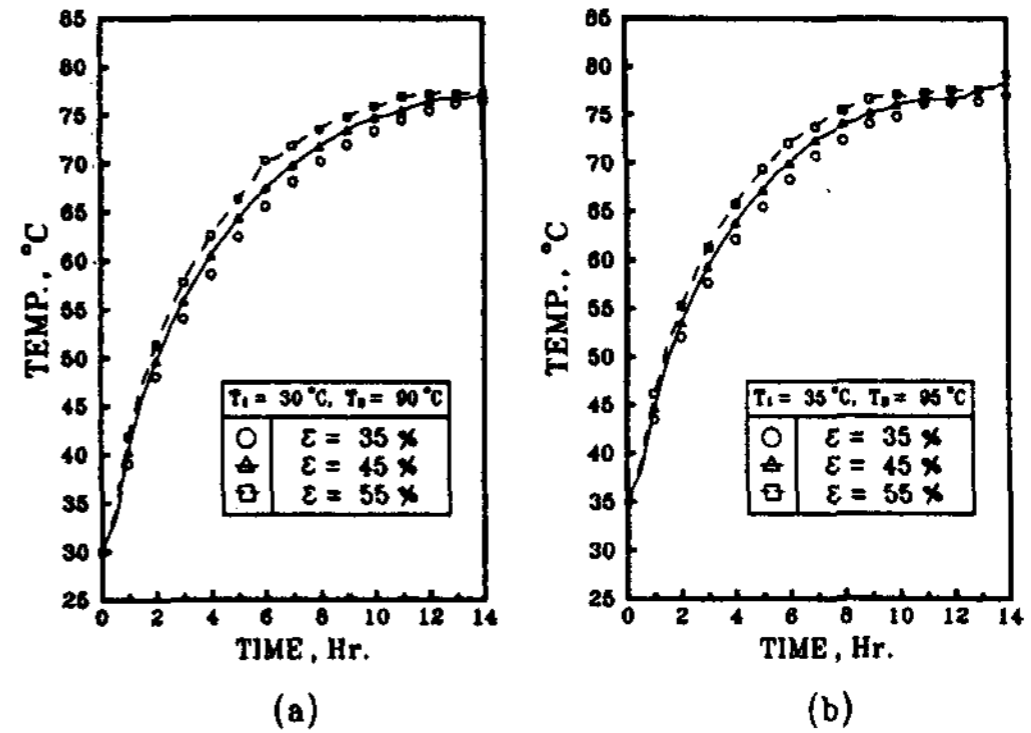


Fig. 10 Comparison of temperature profiles of the PCM for the variation of ϵ at $X'/L=0.5$, (Calculation)

2. 용융율

Fig. 11은 열원의 온도(T_2)를 95°C로 일정하게 하고 상변화물질의 초기온도(T_1)를 각각 25°C($Ste=1.057$), 35°C($Ste=0.906$) 및 45°C($Ste=0.755$)로 변화시켰을 경우 시간경과에 따른 용융체적비(용융된 상변화물질의 체적/전체 상변화물질의 체적, V/V_0)를 나타낸 것으로, 상변화물질의 초기온도와 열원온도간의 온도차가 용융율에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 무차원 용융율(V/V_0)의 값을 시간의 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 용융체적비는 Ste 수가 작을수록 크며, 용융 초기과정에는 직선적으로 증가하나 용융이 진행됨에 따라 그 증가폭이 커지는 것으로 나타났다. 이것은 용융 초기과정 동안에는 용융되지 않은 상변화물질이 흡수하는 현열(Sensible heat)이 커서 용융이 서서히 진행되나 시간이 경과함에 따라 전체 상변화물질

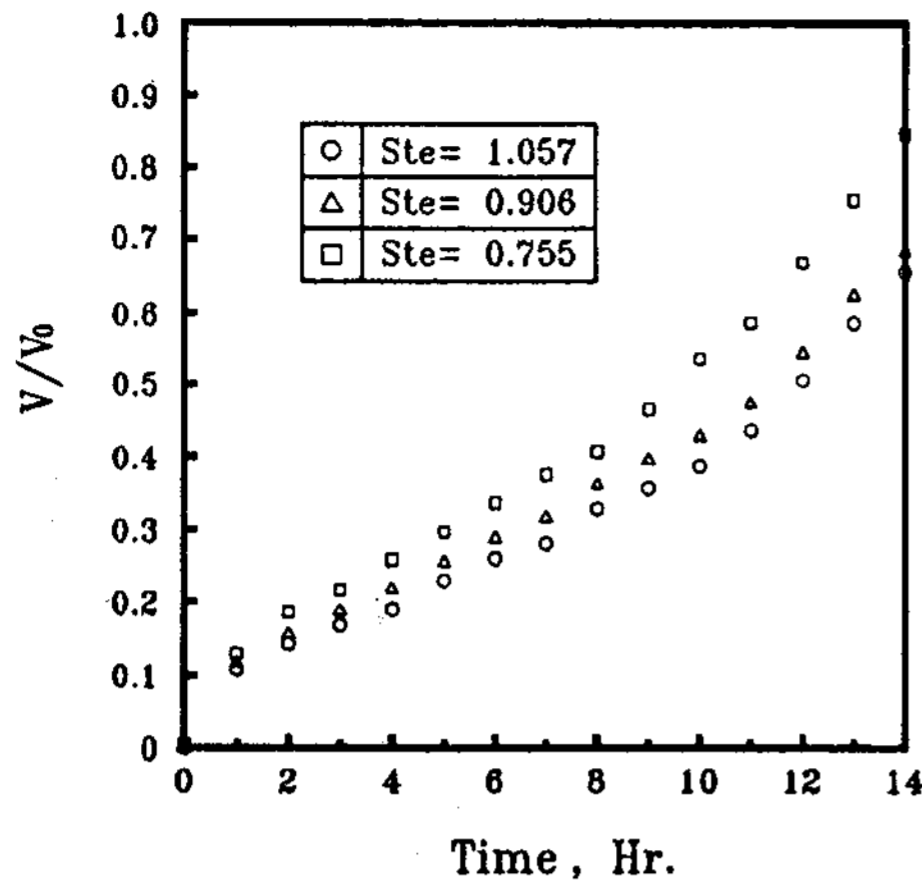


Fig. 11 Comparison of molten volume fraction for the variation of time and Ste. ($\epsilon=45\%$, Calculation)

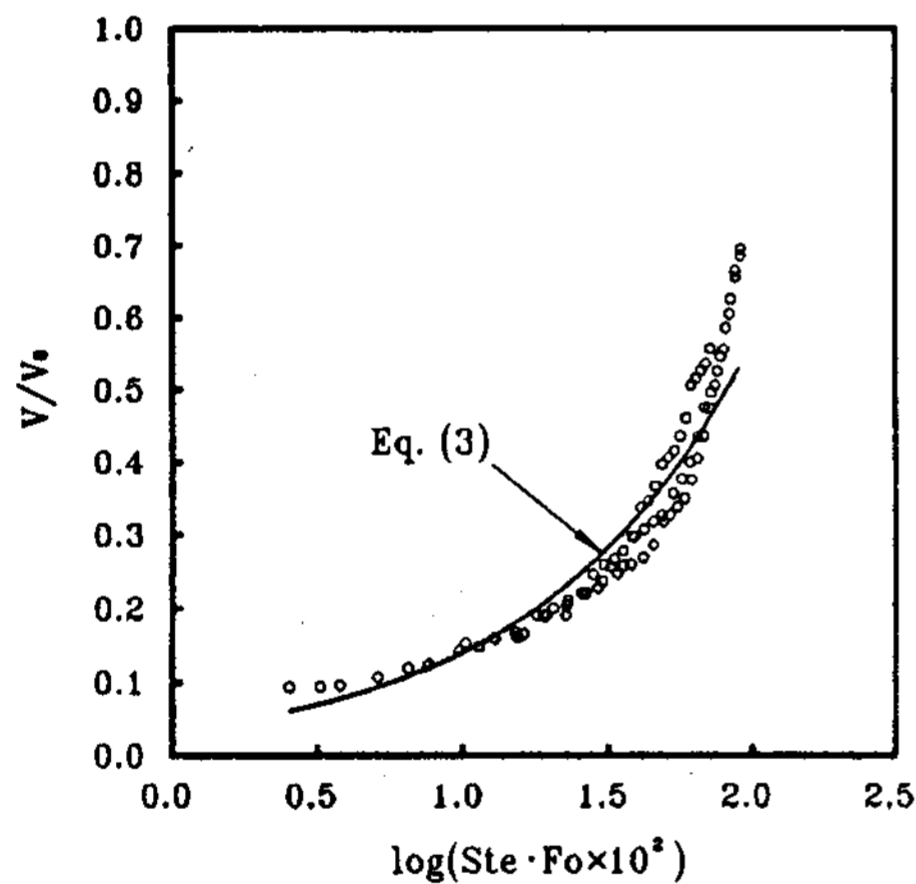


Fig. 12 Correlation between molten volume fraction versus Ste · Fo.

의 온도가 증가됨으로써 용융점에 도달되는 시간이 점점 짧아지기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 12는 Table 3. 에 나타낸 각 공극율 (ϵ)과 Ste수의 조건에 따라 상변화물질의 축열 과정동안 계산된 용융체적비의 값들을 나타내었으며, 이러한 자료를 토대로 도출된 실험식을 이용하여 각 조건에 대하여 계산된 용융체적비 결과값들과 비교한 곡선식을 나타내었

다. 또한 상변화물질의 용융율에 대한 식은 지수함수식이 가장 적은 오차값을 가지는 것으로 알려져 있으므로 지수함수 형태의 실험식을 도출하였고 그 실험식은 아래와 같다.

$$V/V_0 = 3.51 \cdot \exp \{1.39(\log Ste \cdot Fo \times 10^2)\} \quad (3)$$

3. 축열량

Fig. 13은 작동유체의 유량이 7 l/min 및 14 l/min 일 경우 상변화물질의 초기온도(T_i)가 30°C, 35°C이고 가열수의 평균온도(T_h)를 90°C, 95°C로 변화시켰을 때 실험종료시간에 상변화물질에 축열된 총 축열량을 100%로 하여 시간경과에 따른 각 축열량의 비를 백분율로 나타낸 것이다.

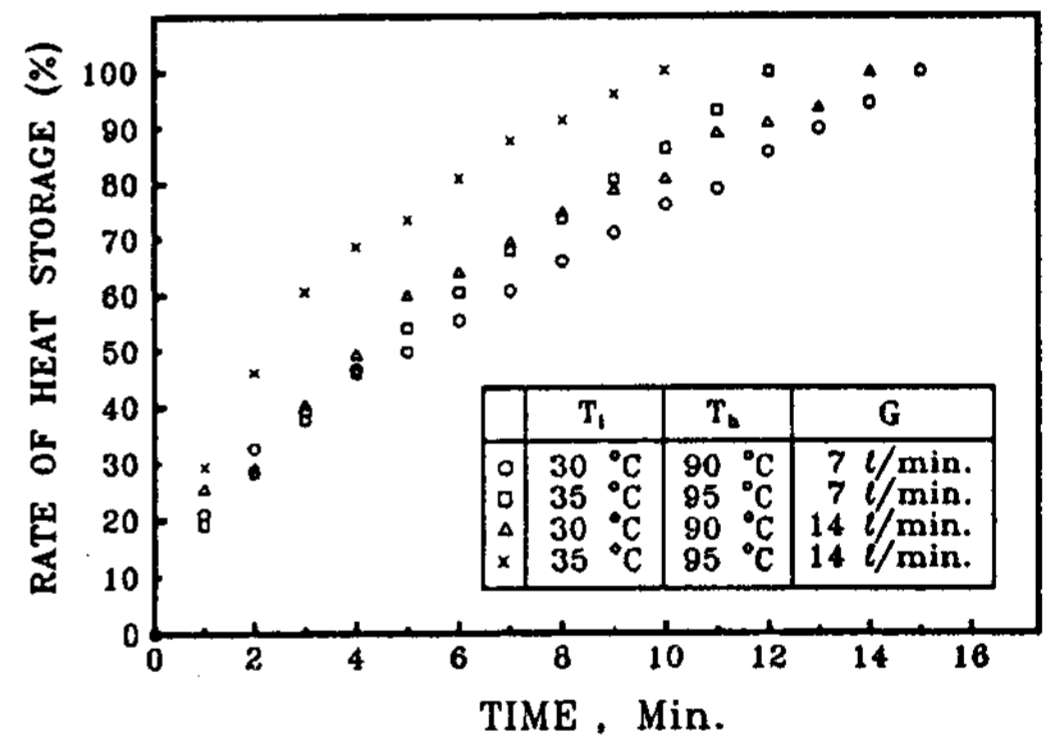


Fig. 13 Timewise variation of the rate of heat stored.

($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $G=7 \text{ l/min.}$)

가열수의 평균온도가 동일한 경우 축열조내로 유입되는 작동유체의 유량이 7 l/min. 인 경우보다 14 l/min. 인 경우 축열량의 비가 높게 나타났으며 상변화물질의 초기온도(T_i)가 35°C이고 가열수의 평균온도(T_h)가 95°C인 실험조건에서는 2시간 이후부터 유량이 7 l/min. 인 경우보다 유량이 14 l/min. 인 경우가 약 20% 더 높게 나타났다. 또한 동일한 유량일 경우에는 가열수의 평균온도가

90℃인 경우보다 95℃인 경우의 축열비가 높게 나타났다.

또한 가열수의 평균온도가 95℃이고 작동유체의 유량이 7ℓ/min. 인 경우와 가열수의 평균온도가 90℃이고 작동유체의 유량이 14ℓ/min. 인 경우의 축열량비를 비교하였을 때 축열과정시 초기에는 가열수의 평균온도가 90℃이고 작동유체의 유량이 14ℓ/min. 인 경우 축열량의 비가 높게 나타났으나 시간이 경과하면서 가열수의 평균온도가 95℃이고 작동유체의 유량이 7ℓ/min. 인 경우의 축열량의 비가 더 높게 나타나고 있다. 이것은 축열 초기과정 동안에는 축열매질과 가열수의 온도차가 크기 때문에 가열수의 유량이 많을수록 열전달이 잘 이루어지나 시간이 경과함에 따라 축열매질과 가열수와의 온도차가 적어지므로 열전달에 대한 주요 기구는 축열매질과 가열수와의 온도차에 기인하는 것으로 사료된다.

Fig. 14는 열원의 온도(T_s)를 95℃로 일정하게 하고 상변화물질의 초기온도를 각각 25℃(Ste=1.057), 35℃(Ste=0.906), 45℃(Ste=0.755)로 변화시켰을 경우에 축열 시작시간으로 부터 14시간 동안 상변화물질에 축열된 총축열량을 100%로 하여 시간경과에 따른 축열량의 비를 수치해석적으로 나타낸 것이다.

축열 초기과정 1시간 동안 큰 온도차로 인하여 총축열량의 약 25%가 축열되었으며 1시간 이후에는 단위시간당의 축열량이 급속히 감소되고 이후 시간이 경과함에 따라 단위시간당의 축열량은 서서히 감소되었다. 또한 그림에서 나타난 바와 같이 열원의 온도가 일정하고 상변화물질의 초기온도가 다른 경우에도 전체 축열량에 대한 단위시간당의 축열량비는 거의 일정하게 나타났으며 이러한 결과로부터

상변화물질의 용융과정동안 축열되는 열량은 상변화물질의 초기온도와 열원간의 온도차에 직선적으로 비례한다는 것을 알 수 있었다.

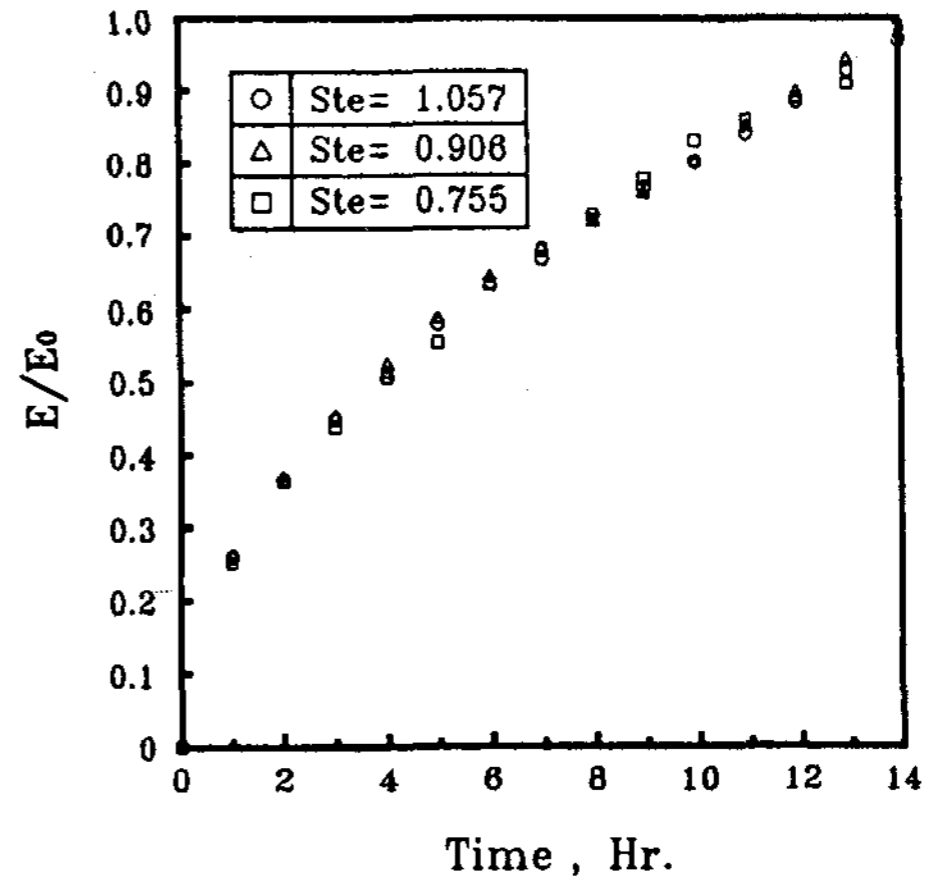


Fig. 14 Comparison of the rate of heat storage for the variation of time and Ste. ($\epsilon=45\%$, Calculation)

Fig. 15에서는 용융율에 대한 실험식을 도출한 방법과 동일한 방법으로 부터 유도된 실험식에 대한 곡선을 각 조건에 대하여 계산된 축열비 값들과 비교하여 나타내었으며 도출된 실험식은 다음과 같다.

$$E/E_o = 0.11 \cdot \exp \{1.15(\log Ste \cdot Fo \times 10^2)\} \quad (4)$$

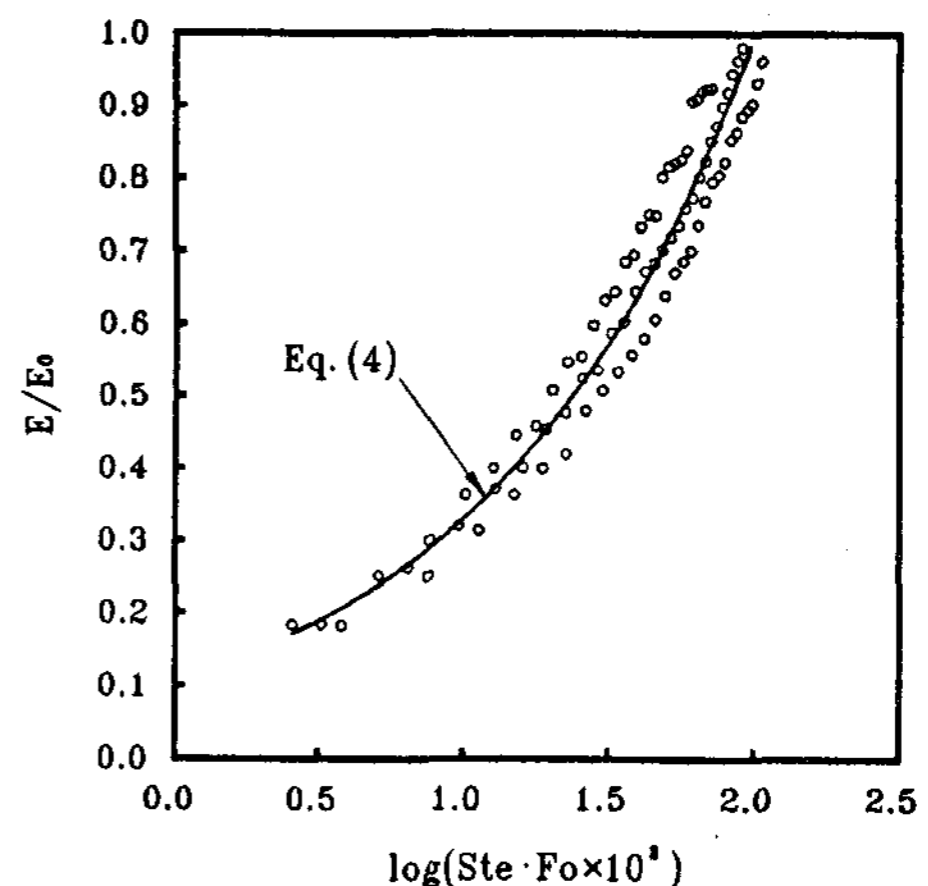


Fig. 15 Correlation between the rate of heat storage versus Ste · Fo.

V. 결 론

1. 상변화물질인 피로인산나트륨은 용융상태가 액체상태가 아닌 gel상태이므로 액체상태에서의 주된 열전달현상으로 나타나는 자연대류 유동현상이 일어나지 않아 전도에 의한 열전달현상이 지배적으로 일어난다.
2. 피로인산나트륨의 축열과정시 실험으로 측정된 온도분포와 수치해석적인 방법으로 계산된 온도분포는 거의 유사한 경향으로 나타났으며 온도값은 최대 15%의 차이가 났다.
3. 상변화물질인 피로인산나트륨은 공극율(공기 함유율)이 작을수록 열용량이 커지므로 축열과정시 공극율이 큰 경우보다 온도가 서서히 상승된다.
4. 직육면체형 축열조내에 장입된 피로인산나트륨의 축열과정시 용융율(V/V_0)과 축열비(E/E_0)에 대하여 도출된 실험식은 아래와 같다.

$$V/V_0 = 3.51 \cdot \exp\{1.39(\log Ste \cdot Fo \times 10^2)\}$$

$$E/E_0 = 0.11 \cdot \exp\{1.15(\log Ste \cdot Fo \times 10^2)\}$$

후 기

본 연구는 1994년도 인하대학교 교내연구비 지원에 의하여 그 일부가 수행되었다.

참 고 문 헌

1. P. D. Van Buren and R. Viskanta, "Interferometric Measurement of Heat Transfer During Melting from a Vertical Surface", *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 23, pp. 568-571, 1980.
2. H. Rieger, U. Projahn & H. Beer, "Analysis of the Heat Transport Mechanisms during Melting Around a Horizontal circular Cylinder", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, No. 1, pp. 137-147, 1982.
3. N. Ranachandran, J. P. Gupta and Y. Jaluria, "Thermal and Fluid Flow Effects During Solidification in Rectangular Enclosure", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 5, pp. 187-194, 1982.
4. M. Yanadori & T. Masuda, "Heat Transferential Study on a Heat Storage Container with Phase Change Material", *Solar Energy*, Vol. 36, pp. 169-177, 1986.
5. K. A. R. Ismil & C. L. F. Aluev, "Analysis of Shell-Tube PCM Storage System" *Proc. of the Int. Heat Transfer Confer.*, pp. 1781-1786, 1986.
6. T. Honda, Y. Kim, H. Kishigami & A. Kanzawa, "Change and Discharge Heat Transfer if the Latent Heat Transfer Energy Transfer", *World Congress III of Chemical Engineering, Torko*, pp. 629-632, 1986.
7. R. siegel. "Boundary Pertubation Method for free Boundary Problem in Convectively Cooled Continuous Casting", *J. of Heat Transfer*, Vol. 108, pp. 230-234, 1986.
8. 임장순, 손화승, 황태인, 이채문, 최국광, "상변화물질을 사용한 축열조에서의 열전달", *한국태양에너지 학회지*, 9(1), pp. 53-61, 1989.
9. 임장순, 김준근, 조남철, 김영기, " $C_{28}H_{58}$ 과 $Na_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$ 의 전열특성 및 축열성능

- 비교에 관한 연구”, 한국태양에너지학회지, Vol. 11, No. 2, pp. 41-50, 1991.
10. M. Lacriox, “Numerical Simulation of a Shell and Tube Latent Heat Thermal Energy Storage Unit”, Solar Energy, Vol. 50, pp. 357-367, 1993.
11. Gerge A. Lane, “Solar Heat Storage : Latent Heat Materials”, CRC Press, Inc. , Volume II ; Technology, pp. 67~70, 1986
12. J. P. Holman, “Heat Transfer”, McGraw-Hill, 1986
13. M. Necati zisic, “Finite Difference Methods in Heat Transfer”, CRC Press, 1994

A Study of Heat Transfer Characteristics of P. C. M. in a Latent Heat Storage Tank(Cubic Type)

C. S. Yim* · K. K. Choi · J. K. Kim*** · Y. K. Kim**** · I. G. Kim**** · D. C. Kim******

Inha Univ. Incheon Univ. Science & Technology Research Institute, Inha Univ. Graduate School, Inha Univ.

Abstract

This study presents experimental and numerical results of the temperature characteristics, the heat transfer phenomena, and the heat storage quantity during the heat storage process with sodium pyrophosphate decahydrate($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)-Phase Change Material(PCM) in a latent heat storage tank(cubic type).

It was proved that heat transfer by conduction was dominant because PCM($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) during heating processes was gel phase, not liquid phase

The gap ratio(rate of air content) of PCM became smaller, the thermal capacity of PCM became larger, therefore the temperature distribution of PCM slowly increased than that of large gap ratio.

There was maximum 15% difference between measured temperatures and calculated temperatures.