

[논문] 태양에너지

Solar Energy

Vol. 12, No. 2~3, 1992

상변화물질을 이용한 축열조에서 열전달현상에 관한 연구 —수직원통관 내에서 응고 열전달—

이 채 문 · 임 장 순* · M. Iqbal**

유한전문대학교

*인하대학교

**University of British Columbia

A study of heat transfer with Phase Change Material in heat storage system —Inward freezing in the vertical cylinder—

C.M.Lee · C.S.Yim* · M.Iqbal**

Yuhan Junior Collage

**Inha University*

***University of British Columbia*

요 약

본 연구는 용융된 파라핀을 채운 수직원통관 내의 상변화물질의 초기온도와 수직원통관의 벽면온도를 변화시켰을 때 관 내에서 일어나는 열전달현상을 다루었다. 자연대류의 효과는 초기과열된 액상영역 내에서 응고초기 짧은 시간에 걸쳐 일어났고, 그 후 전도 열전달이 paraffin 전 영역을 지배하였다.

실험에서 관찰한 응고 형태는 상부표면에서 밀도 증가에 의한 수축공간이 발생하였으며, 그 공간의 크기는 냉각이 진행됨에 따라 증가하였다. 자연대류가 끝나자, 상경계면 상에서 수지상 결정과 mush-zone이 발견되었다. 액상 paraffin의 초기과열은 실험 전반부의 응고질량과 응고두께를 감소시키는 경향을 보였으며, 초기액상과열도와 벽면과냉도가 큰 경우에 크게 나타났다.

ABSTRACT

This study investigated heat transfer phenomena during the freezing of an initially superheated or non-superheated liquid in a cooled cylinder tube. Numerical and experimental method were performed to obtain the temperature and velocity distribution,

the shape of interface. Natural convection effects in the superheated liquid were confined and moderated a short freezing time. After natural convection ceases, heat conduction dominated in the whole paraffin, so Crystal and much-zone were found out in PCM.

Initial superheating of liquid tended to moderately diminish the frozen layer thickness at short freezing times but little effect on the these quantities at longer times. On the amount of frozen mass, initial liquid superheating is less affected than tube wall subcooling.

NOMENCLATURE

Gr^H : Grashop number based on H , $\frac{g\beta_v T H^3}{\nu^2}$

k : thermal conductivity

P : dimensionless pressure, $\frac{P' H^2}{\nu^2}$

R : dimensionless radial coordinate, $\frac{r}{H}$

R_i : dimensionless interface radius, $\frac{r_i}{H}$

R_w : dimensionless wall radius, $\frac{r_w}{H}$

Ra : Rayleigh number based on H , $\frac{g\beta_v (T_i - T_m) H^3}{\nu \alpha_t}$

Ste_l : Stefan number in liquid $\frac{C_p (T_i - T_m)}{\lambda}$

Ste_s : Stefan number in solid $\frac{C_{p_s} (T_m - T_w)}{\lambda}$

T_b : bulk temperature of liquid

T_i : initial temperature

T_m : melting temperature

T_w : wall temperature

U : dimensionless velocity, $\frac{uH}{\nu}$

Y : dimensionless distance coordinate, $\frac{y}{H}$

GREEK SYMBOLS

α_t : thermal diffusivity, $\frac{k}{\rho c}$

β_v : thermal expansion coefficient

δ : thickness of liquid region, R_i

δ_i : thickness of solid region, $R_w - R_i(y, t)$

η : transformed coordinate, $\frac{R}{\delta(y, t)}$ for liquid region

η_1 : transformed coordinate, $\frac{R - R_i(y, t)}{\delta_i(y, t)}$ for solid region

θ_l : dimensionless temperature, $\frac{(T - T_m)}{(T_i - T_m)}$

θ_s : dimensionless temperature, $\frac{(T - T_m)}{(T_m - T_w)}$

λ : heat of fusion per unit mass

ν : kinematic viscosity, $\frac{\mu}{\rho}$

ξ, ξ_1 : transformed coordinate system, $\xi = \xi_1 = Y$

ρ : density

τ : dimensionless time, $\tau = t$

I. 서론

효과적이고 경제적인 열저장은 거의 무한한 저온 공급원인 태양에너지 이용의 관건이다. 여러가지 주요한 열저장 방법 중 잠열축열은 축열밀도가 높고, 열저장 매질의 상변화온도 부근의 일정한 열원을 저장할 수 있기때문에 효율적인 축열 방법으로 주목을 받고 있다. 잠열이용형 축열조의 열전달 특징은 열전달이 진행되면서, 상경계면이 이동하며 액상영역에 자연대류가 발생하고, 고상에서는 전도열전달이 일어난다. 상변화물질의 열전달에 관한 연구는 주로 용융의 경우, 상경계면이 뚜렷하게 발생되기 때문에 많은 실험, 해석이 이루어져 왔으나, 응고의 경우 상변화가 진행됨에 따라 응고 초기에는 액상 영역에서는 자연대류가 발생하며, 과열도가 소멸함에 따라 열전도가 지배한다. 그리고 전도열전달이 진행되면서 상경계면 부근에서 수지상 결정이 생기며, 그로 인해 mush zone의 형성이 되어 해석의 어려움이 수반되어 이와 관련된 연구는 드문 실정이다.

본 연구에서는 상변화물질이 채워져 있는 수직원통형 용기벽면을 등온냉각 시 상변화물질의 응고과정에서 상변화물질의 초기온도, 용기벽면 온도를 변화시키면서, 시간의 경과에 대한 상변화물질의 온도분포, 액상영역의 속도 분포, 응고층두께, 상경계면의 형상 등의 고찰하였다.

II. 이론적 해석

1. Modeling 및 지배방정식

본 연구에서는 Fig.1에 나타난 것과 같이 높이가 H, 반경이 R_w 인 수직원통형 축열조의 내향응고 시 액상 및 고상 PCM 내의 열전달현상을 고찰하려고 한다.

Model을 단순화하기 위해 다음과 같은 가정 하에서 수치해석을 수행하였다.

- 상변화물질의 열적물성치는 운동량방정식

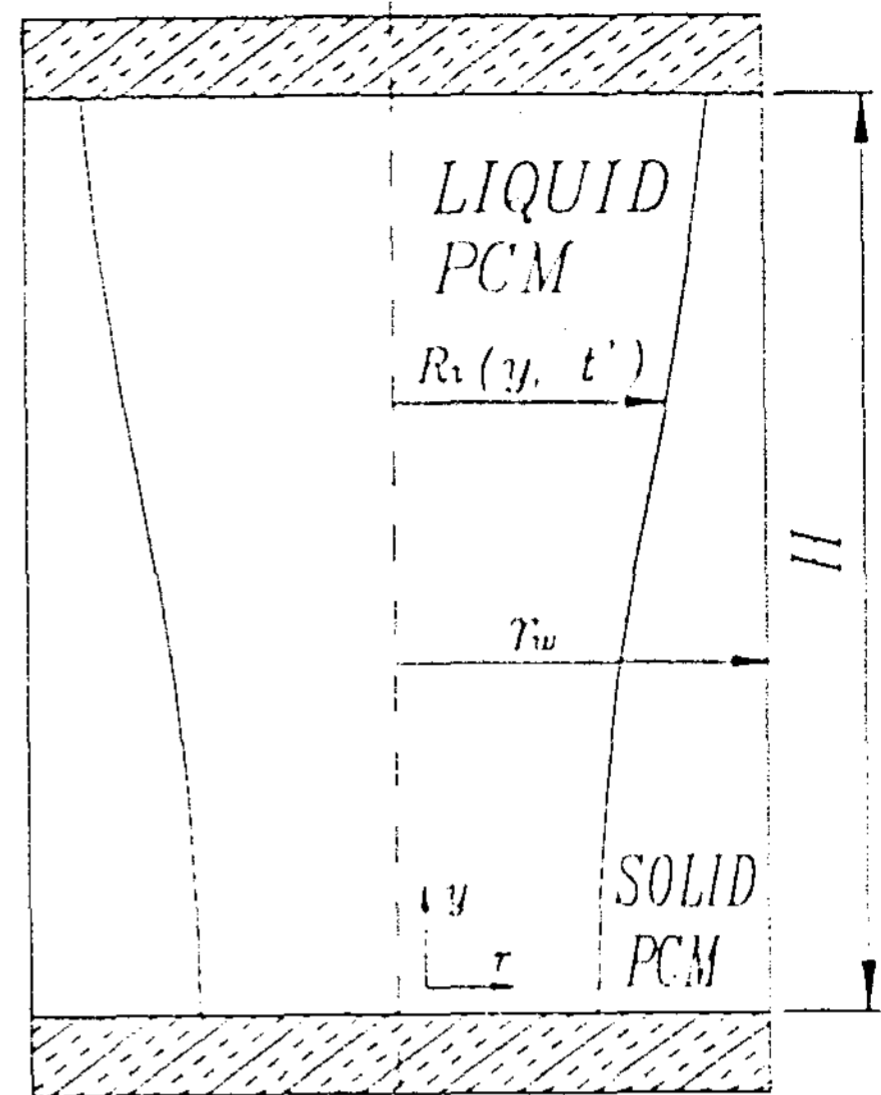


Fig. 1 Schematic Illustration of Inward Solidification of P. C. M.

에서 부력항의 밀도를 제외하고 모두 일정하다.

- 운동량방정식의 부력항에서 밀도는 온도의 선형함수이다.
- 액상영역 에너지방정식에서 점성확산과 압축일은 무시한다.
- 상변화물질의 응고과정은 축열조의 반경방향으로만 진행된다.

2. 지배방정식 및 경계조건

선정한 Model에 대하여 지배방정식을 도출하면,

$$\nabla U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \cdot \nabla U = -\nabla P + Pr \nabla U - \frac{g^*}{g} Gr_H \cdot Pr \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} + U \cdot \nabla \theta_1 = \nabla^2 \theta_1 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \nabla^2 \theta_s \quad (4)$$

여기서 식 (1)~(3)은 각각 액상영역에서 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식이며, 식 (4)는 고상영역에서 에너지방정식이다.

초기조건(t=0)

$$\theta_1 = 1, \quad \theta_s = \theta_s(0, r, z) \\ U = 0$$

경계조건

$$R=R_1 \text{에서} \quad \theta_1 = 0, \theta_s = 0 \\ R=R_w \text{에서} \quad \theta_s = -1$$

$$R=0 \text{에서} \quad \frac{\partial \theta_1}{\partial R} = 0$$

$$Y=0 \text{와 } Y=1 \text{에서} \quad \frac{\partial \theta_1}{\partial Y} = 0,$$

$$\text{모든 경계면에서} \quad U \cdot e_r = 0$$

$$R=0 \text{에서} \quad \frac{\partial(U \cdot e_r)}{\partial R} = 0$$

$$Y=0, Y=1 \text{ 및 } R=R_m \text{에서} \quad U \cdot e_r = 0$$

$$Y=0 \text{ 및 } Y=1 \text{에서} \quad \frac{\partial R_i}{\partial Y} = 0$$

상경계면에서 열평형방정식

$$\frac{\rho_s}{\rho_l} \frac{\partial R_i}{\partial \tau} = \left[\text{ste} \frac{K_s}{K_l} \frac{C_{p_l}}{C_{p_s}} \frac{\partial \theta}{\partial R} \Big|_s - \text{Ste}_1 \frac{\partial \theta}{\partial R} \Big|_s \right] \\ \left[1 + \left(\frac{\partial R_i}{\partial R} \right)^2 \right] \quad (5)$$

위 식에서 사용한 무차원 변수와 무차원상수는 다음과 같이 정의된다.

$$R = \frac{r}{H}, \quad Y = \frac{y}{H} \quad U = \frac{UH}{\alpha_l} \\ \theta_1 = \frac{(T-T_m)}{(T_m-T_w)} \quad \theta_s = \frac{(T-T_m)}{(T_m-T_w)} \\ \tau = \frac{\alpha_l t}{H^2} \quad P = \frac{p \cdot H^2}{\alpha_l} \\ Gr = \frac{g\beta_v(T_i-T_m)H^3}{\nu^2} \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha_l} \\ Ste_s = \frac{C_{p_s}(T_m-T_w)}{\lambda} \quad Ste_1 = \frac{C_{p_s}(T_i-T_m)}{\lambda}$$

3. 좌표변환

직교좌표계(R-Y좌표계)에서 지배방정식의 계산영역은 시간 경과에 따라 상경계면이 불규칙적으로 이동함으로 인해 경계조건의 적용에 어려움이 있다. 따라서 시간에 따라 이동하는 이동경계를 사용하면 이런 어려움을 극복할 수 있다. 이를 목적으로 Landau변환을 사용하여 액상영역과 고상영역을 다음과 같이 정의하였다.

액상영역에 대하여

$$\eta = \frac{R}{\delta(Y, t)}, \quad \delta = R(Y, t),$$

$$\xi = Y, \quad \tau = t.$$

고상영역에 대하여

$$\eta_1 = \frac{R-R(Y, t)}{\delta_1(Y, t)} \quad \delta_1 = R_w - R(Y, t),$$

$$\xi_1 = Y, \quad \tau = t$$

그러면 좌표변환된 방정식들은 아래와 같이 정의 된다.

연속방정식

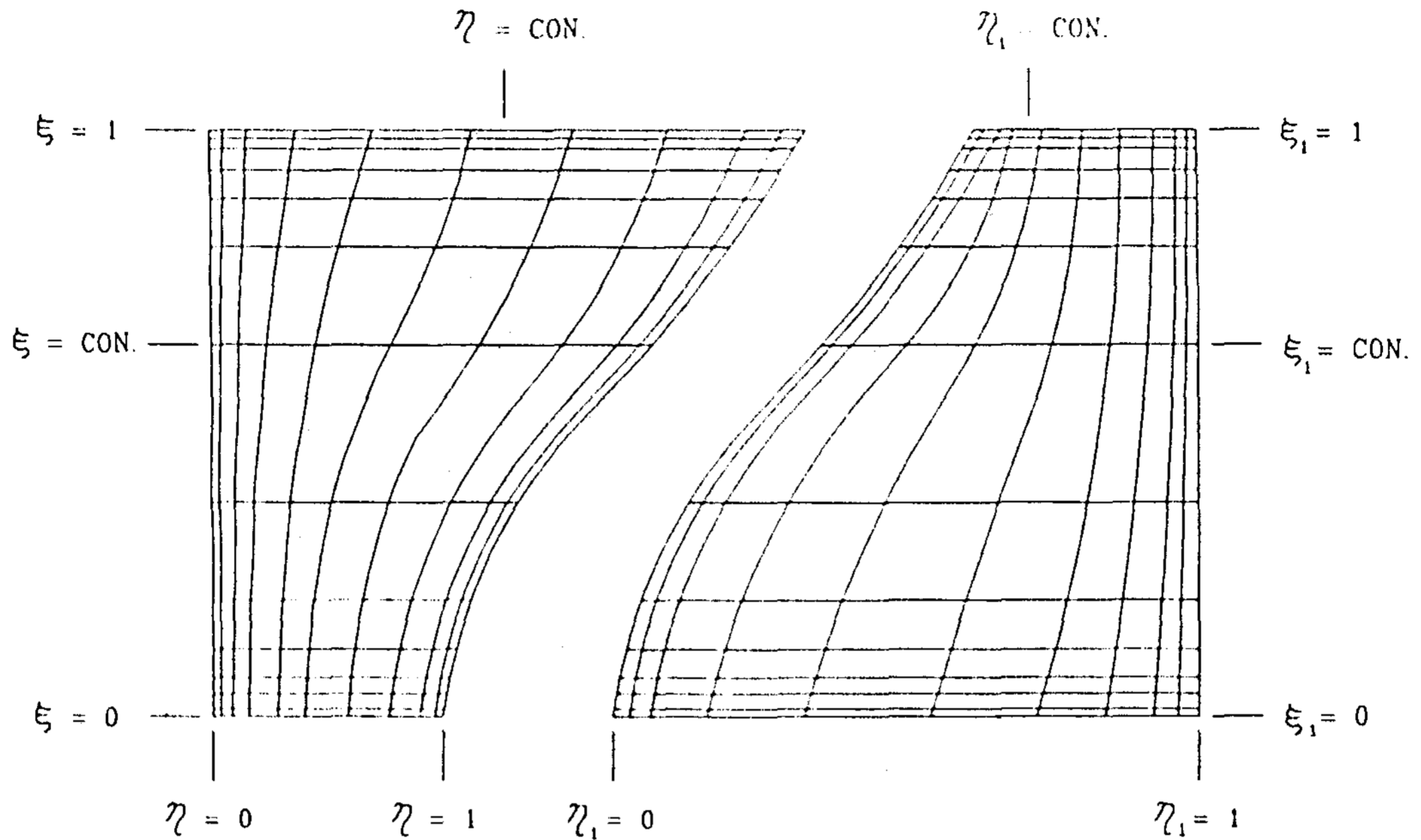


Fig. 2 Solid and liquid domain with transformed coordinate system

$$\int_1 U_Y R \delta d\eta + \int_2 U_\eta R d\xi - \int_3 U_Y R \delta d\eta - \int_4 U_\eta R d\xi = 0 \quad (6)$$

η-운동량방정식

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int U_\eta R \delta d\xi d\eta + \int_1 [U_Y U_\eta + Pr \frac{\beta}{\delta} \frac{\partial U}{\partial \eta} - Pr \frac{\partial U}{\partial \xi}] R \delta d\eta + \int_2 [(U_\eta - \eta \frac{\partial \delta}{\partial \tau}) U - Pr \frac{\alpha}{\delta} \frac{\partial U}{\partial \eta} + Pr \beta \cdot \frac{\partial U}{\partial \eta}] R d\xi - \int_3 [U_Y U_\eta + Pr \frac{\beta}{\delta} \frac{\partial U}{\partial \eta} - Pr \frac{\partial U}{\partial \xi}] R \delta d\eta - \int_4 [(U_\eta - \eta \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \tau}) U - Pr \frac{\alpha}{\delta} \frac{\partial U}{\partial \eta} + Pr \beta \cdot \frac{\partial U}{\partial \eta}] R d\xi \\ & = - \int [\frac{\alpha}{\delta} \frac{\partial P}{\partial \eta} - \beta \cdot \frac{\partial P}{\partial \xi}] R \delta d\xi d\eta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \int [\frac{-Pr(U_\eta + \beta U_Y)}{R_\delta} - Pr^2 \beta Gr_H \theta_1 - U_Y (\eta \frac{\partial \delta^2}{\partial \xi \partial \tau} - \frac{\beta}{\delta} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \tau}) - U_Y (\frac{U_\eta}{\delta} \partial \delta \partial \xi + U_Y \eta \cdot \frac{\partial^2 \delta}{\partial \xi^2}) + U_Y Pr (\eta \frac{\partial^3 \delta}{\partial \xi^3} + 2 \frac{\eta}{\delta^2} \cdot (\frac{\partial \delta}{\partial \xi})^3 - 3 \frac{\eta}{\delta} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial^2 \delta}{\partial \xi^2} + \frac{1}{R \delta} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \xi}) - 2 Pr [\frac{\partial U_Y}{\partial \eta} (\frac{\alpha}{\delta} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \xi} - \frac{\beta}{\delta} \eta \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \xi^2}) + \frac{\partial U_Y}{\partial \xi} (\eta \cdot \frac{\partial^3 \delta}{\partial \xi^3} - \frac{\beta}{\delta} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \xi})]] R \delta d\xi d\eta \quad (7) \end{aligned}$$

ξ-운동량방정식

$$\frac{d}{dt} \int U_Y R \delta d\xi d\eta + \int_1 [U_Y U_Y + Pr \frac{\beta}{\delta} \cdot \frac{\partial U_Y}{\partial \eta}] R \delta d\xi d\eta$$

$$\begin{aligned}
 & -Pr \frac{\partial U_Y}{\partial \xi}] R \delta d\eta + \int_2 [(U_\eta - \eta \frac{\partial \delta}{\partial \tau}) U_Y \\
 & - Pr \frac{\alpha}{\delta} \cdot \frac{\partial U_Y}{\partial \eta} + Pr \beta \cdot \frac{\partial U_Y}{\partial \xi}] R d\xi \\
 & - \int_3 [U_Y U_Y + Pr \frac{\beta}{\delta} \cdot \frac{\partial U_Y}{\partial \eta} - Pr \frac{\partial U_Y}{\partial \xi}] R \delta d\eta \\
 & - \int_4 [(U_\eta - \eta \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \tau}) U_Y - Pr \frac{\alpha}{\delta} \cdot \frac{\partial U_Y}{\partial \eta} \\
 & + Pr \beta \cdot \frac{\partial U_Y}{\partial \xi}] R d\xi = \int [\frac{\partial P}{\partial \xi} - \frac{\beta}{\delta} \cdot \frac{\partial P}{\partial \eta}] \\
 & R \delta d\xi d\eta + Pr_2 \int Gr_H \theta_1 R \delta d\xi d\eta \quad (8)
 \end{aligned}$$

에너지방정식

$$\begin{aligned}
 & \frac{d}{d\tau} \int \theta_1 R \delta d\xi d\eta + \int_1 [U_Y \theta_1 + (\frac{\beta}{\delta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \\
 & - \frac{\partial \theta_s}{\partial \xi})] R \xi d\eta + \int_2 [(U_\eta - \eta \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \tau}) \theta_1 \\
 & + (\beta \cdot \frac{\partial \theta_s}{\partial \xi} - \frac{\alpha}{\delta} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial \eta})] R d\xi \\
 & - \int_3 [U_Y \theta_1 + (\frac{\beta}{\delta} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial \eta} - \frac{\partial \theta_1}{\partial \xi})] R \delta d\eta \\
 & - \int_4 [(U_\eta - \eta \cdot \frac{\partial \delta}{\partial \tau}) \theta_1 + (\beta \cdot \frac{\partial \theta_s}{\partial \xi} \\
 & - \frac{\alpha}{\delta} \cdot \frac{\partial \theta_1}{\partial \eta})] R d\xi = 0 \quad (9)
 \end{aligned}$$

여기서 $\beta = \frac{(1-\eta) \partial \delta}{\partial \xi}$, $\alpha = 1 + \beta_2$

고상영역 에너지방정식

$$\begin{aligned}
 & \frac{d}{d\tau} \int \theta_s R \delta_1 d\eta_1 d\xi_1 + \int_1 [(\frac{\beta_1}{\delta_1} \frac{\partial \theta_s}{\partial \eta_1} - \frac{\partial \theta_s}{\partial \xi_1})] R \delta_1 d\eta_1 \\
 & + \int_2 [\beta_1 \cdot \frac{\partial \theta_s}{\partial \xi_1} - \frac{\alpha_1}{\delta_1} \cdot \frac{\partial \theta_s}{\partial \eta_1}] R d\xi_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \int_3 [\frac{\beta_1}{\delta_1} \frac{\partial \theta_s}{\partial \eta} - \frac{\partial \theta_s}{\partial \xi_1}] R \delta_1 d\eta_1 \\
 & - \int_4 [\beta_1 \cdot \frac{\partial \theta_s}{\partial \xi_1} - \frac{\alpha_1}{\delta_1} \frac{\partial \theta_s}{\partial \eta}] R \xi d_1 = 0 \quad (10)
 \end{aligned}$$

여기서 $\beta_1 = \frac{\eta_1 \partial \delta_1}{\partial \xi}$, $\alpha_1 = 1 + \beta_1^2$

상경계면 열평형방정식

$\eta = 0$, $\eta_1 = 1$ 에서

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho_s}{\rho_l} \frac{\partial R_i}{\partial \tau} = & \left[\frac{Ste_s}{\delta_1} \frac{C_{p1}}{C_{p2}} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right]_s \\
 & - \left[\frac{Ste_l}{\delta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right]_l \left[1 + \left(\frac{\partial R_i}{\partial \xi} \right)^2 \right] \quad (11)
 \end{aligned}$$

위 식에서 설정한 좌표계의 계산영역은 각각 $0 \leq \eta \leq 1$, $0 \leq \xi_1 \leq 1$, $0 \leq \eta \leq 1$, $0 \leq \xi_1 \leq 1$, $0 \leq \eta_1 \leq 1$, $0 \leq \xi_1 \leq 1$ 의 범위이다.

새로운 좌표계에서 경계조건은

$\eta = 0$ 에서 $\frac{\partial \theta_1}{\partial \eta} = 0$

$\eta = 1$, 에서 $\theta_1 = 0$, $\theta_s = 0$

$\xi = 0$ 와 $\xi = 1$ 에서 $\frac{\partial \theta_1}{\partial \xi} = 0$

모든 경계면에서 $U = 0$ 와 $U_Y = 0$

$\eta = 0$ 에서 $\frac{\partial U_Y}{\partial \eta} = 0$

고상영역에서

$\eta_1 = 0$ 에서 $\theta_s = 0$

$\eta_1 = 1$ 에서 $\theta_s = -1$

$\xi = 0, 1$ 에서 $\frac{\partial \theta_s}{\partial \xi_1} = 0$

상경계면의 열평형방정식에서

$$\xi_1=0, 1 \text{에서} \quad \frac{\partial \theta}{\partial \xi_1} = 0$$

4. 수치계산

고상영역과 액상영역의 계산을 위하여 유한 차분법(FDM)으로 전개하여 구하였고, 초기에 아주 미소량의 고상영역이 생성된다고 가정하였다. 그리고 프로그램의 수행은 SIMPLER ALGOLRITHSM을 사용하였다.

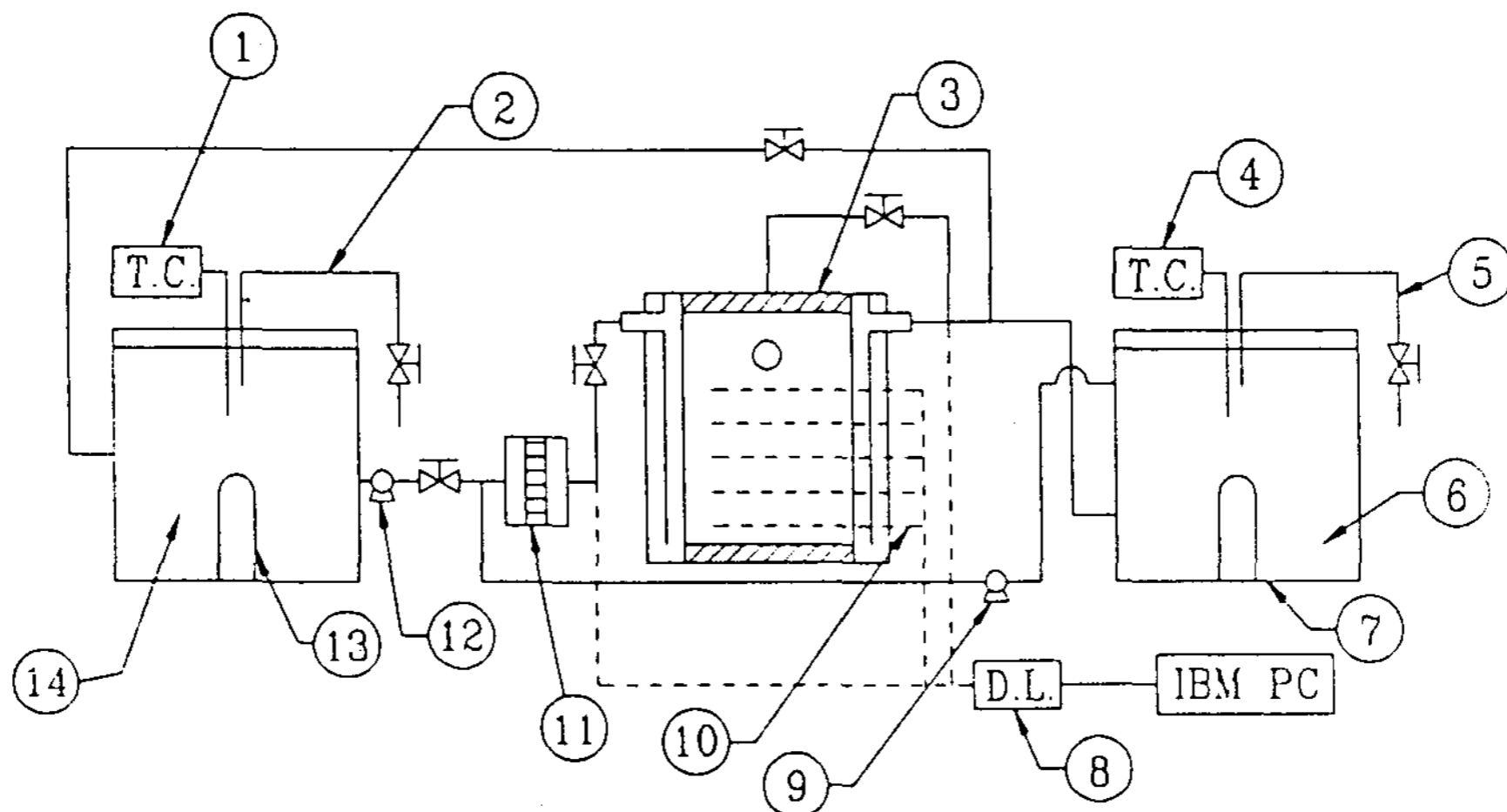
III. 실험장치 및 실험방법

1. 실험장치

본 실험에서 사용된 실험장치의 개략도와 용기의 상세도는 Fig3, Fig4에 나타내었다. 실험

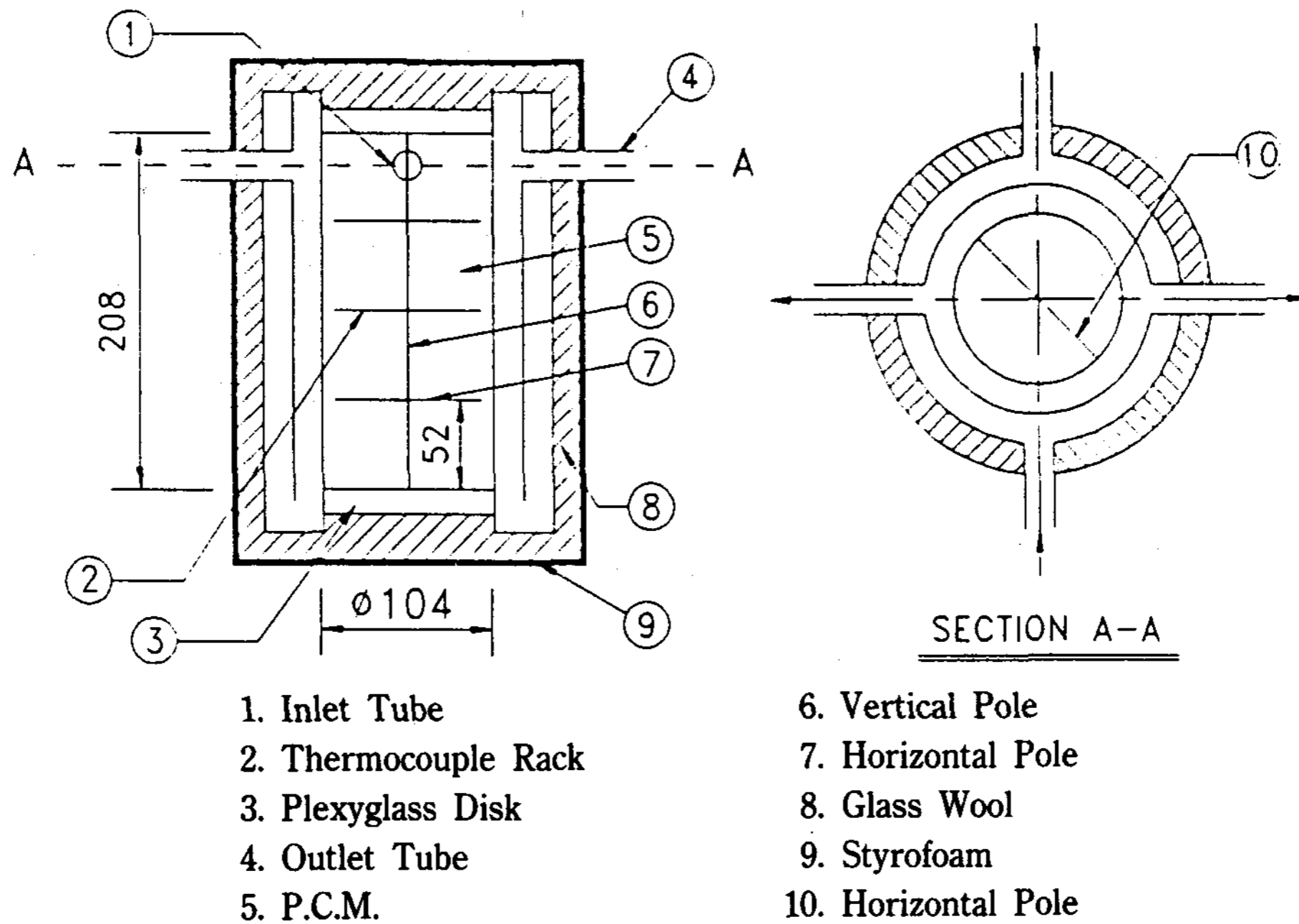
장치의 주요부는 가열·냉각항온조, PCM이 담긴 용기, 온수공급 및 온도조절장치, Data acquisition system으로 이루어 진다.

항온조와 배관 주위는 단열하였고, 항온조의 온도조절은 자동온도 조절장치(온도조절범위 0.1°C)를 전기 Heater에 연결하여 전력을 공급, 차단하여 항온을 유지하였다. PCM용기는 내경 104mm, 높이 300mm, 두께 1mm인 동관을 사용하였고, 용기 내의 등온을 위하여 내경 112mm 및 120mm의 3중 동심관을 사용하여 온수를 재순환 시켰다. 설정된 실험시간에서 상경계면을 얻기 위하여 잔류액상 상변화물질을 진공펌프를 이용하여 흡출하였고, PCM용기 상하부는 스티로폴과 Plaxy glass을 사용하였다. 여기서 Plaxyglass는 액상 상변화물질의 Styroform의 흡수를 막고 표면의 마찰저항을 줄이기 위한 역할을 하였다. 상변화 물질 내의 온도측정은 Y/H=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0인 지점과 흡입관, 송출관, 가열·냉각항온조 등 총49개의 열전대를 사용하였다.



- | | |
|---------------------------|-----------------------|
| 1. Temperature Controller | 8. Data Logger |
| 2. By-pass line | 9. Pump |
| 3. P.C.M. container | 10. Thermocouple rack |
| 4. Temperature Controller | 11. Flow meter |
| 5. By-pass line | 12. Circulation pump |
| 6. Cooling chamber | 13. Heater |
| 7. Heater | 14. Heating chamber |

Fig. 3 Schemetic diagram of experimental apparatus.



- 1. Inlet Tube
- 2. Thermocouple Rack
- 3. Plexyglass Disk
- 4. Outlet Tube
- 5. P.C.M.
- 6. Vertical Pole
- 7. Horizontal Pole
- 8. Glass Wool
- 9. Styrofoam
- 10. Horizontal Pole

Fig. 4 Schematic diagram of containment vessel

2. 실험방법

본 실험에 사용된 상변화물질은 Table 1에 나타내었으며, 상변화물질의 초기온도는 44, 49, 54°C이며, 벽면온도는 29, 34, 39°C로 하고, 실험간격은 10, 20, 30, 60, 90, 120분에 걸쳐 총 54조건에 걸쳐 수행하였다.

DATA의 추출을 위해 열평형 상태에 도달까지 총 16시간 정도 소요되었고, 상변화물질을 응고

하기 위하여 초기고온수와 냉각수가 교체되는 시간은 약 7초 소요되었으며, 응고가 시작된 후 1초 간격으로 온도를 측정하였다. 응고량과 상경계면의 측정을 위하여 설정된 실험시간이 되면 냉각수의 공급을 중단하고 잔류액상 PCM을 진공 Pump로 흡출하였다. 흡출이 종료될 때까지 걸리는 시간은 약 30초에서 2분가량 소요되었으며, 응고시간이 길어 질수록 흡입 시 많은 시간이 소요되었다. 상경계면 형상의 측정은 채취된 원통형 응고 상변화물질을 축방향으로 절단한 후 그 단면을 방안지에 투영시켜 얻었다.

Table 1. Thermophysical properties of paraffin (C₂₂H₄₆)

| Properties | Value | Properties | Value |
|----------------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|
| T (°C) | 42-44 | ρ_{sol} (kg/m ³) | 788 |
| C _{sol} (KJ/kg°C) | 2.2 | ρ_{liq} (kg/m ³) | 776 |
| C _{liq} (KJ/kg°C) | 1.8 | β_v | 8.3x10 ⁻⁴ |
| λ (KJ/kg) | 248.3 | μ (kg/ms) | 3.8x10 ⁻³ |
| K _{sol} (KW/m°C) | 1.6x10 ⁻⁴ | α_{sol} (m ² /s) | 8.94x10 ⁻⁸ |
| K _{liq} (KW/m°C) | 1.54x10 ⁻⁴ | α_{lip} (m ² /s) | 1.02x10 ⁻⁷ |
| Pr | 55.37 | ν (m ² /s) | 4.90x10 ⁻⁷ |

IV. 결과 및 검토

1. 온도분포

용융상태의 상변화물질이 채워진 용기벽면을 냉각하면 상변화물질 내에서 밀도구배로 인한 자연대류가 발생하고, 이로 인해 용기 상부와 하부의 온도구배가 다르게 나타난다. 만일 액상 영역 내에서 열전달현상이 전도 만에 의해 지배

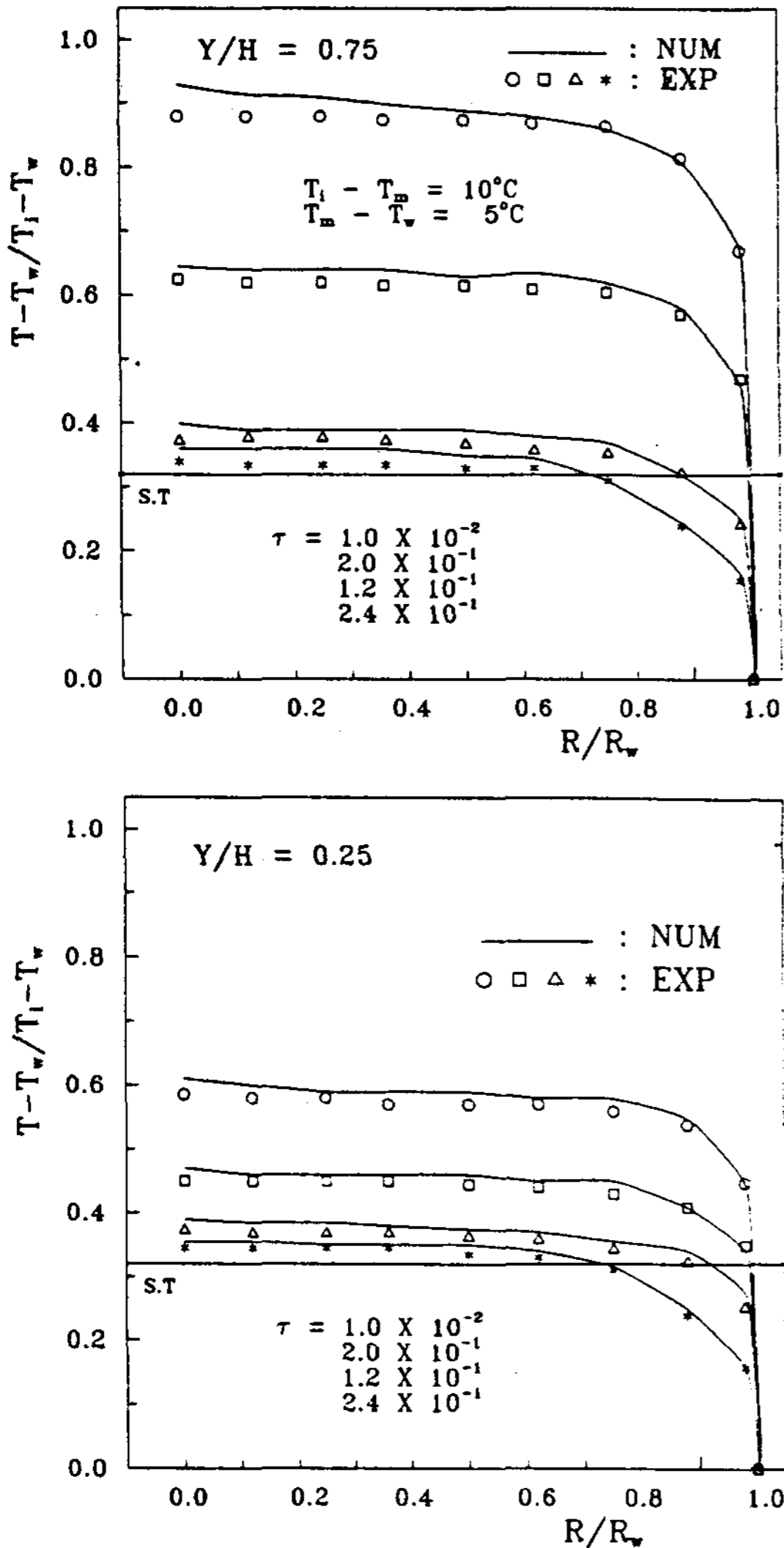


Fig. 5 Temperature profiles at different Y/H (=0.25, 0.75) : $T_i - T_m = 10^\circ\text{C}$, $T_m - T_w = 5^\circ\text{C}$

된다고 가정할때, 수직방향의 온도구배는 동일하게 되나, 열전달특성이 자연대류인 경우 상부층은 하부층보다 온도가 높게 된다. 따라서 수직방향의 온도구배를 구하면 액상영역 내에서 열전달현상을 추정할 수 있다.

Fig. 5는 상변화물질의 초기과열도를 10°C 로 하고 벽면과냉도를 5°C 로 하였을때 상부($Y/H=0.75$)와 하부($Y/H=0.25$)의 위치에서 시간 경과에 따른 각점의 온도분포를 나타낸 것이다. 냉각초기 상변화물질 내부에서 자연대류 영향으로 상부와 하부의 온도차가 크게 나타났으며 용기벽면으로부터 응고가 진행됨에 따라 상하부의 온도차는 감소함에 따라 전도열전달이 지배하였고 응고층이 점차 두꺼워져 열저항이 증가함으로 인해 냉각벽면 부근의 고상영역 온도구배는 완만하여졌다.

Fig. 6은 실험결과로서 상변화물질의 초기과열도에 따른 액상영역의 상변화물질의 평균온도를 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 T_b 는 액상 내에서의 평균온도이며, 시간 $t=0$ 일 때는 $T_b = T_i$ 이고, 상변화물질의 온도가 용융온도까지 냉각될때, 즉 $T_b = T_m$ 일때 '0'이 된다.

실험에서 많은 DATA들이 중복되어 나타났으며 상변화물질의 액상영역에서 초기과열도는 응고개시 30분후에 거의 '0'이 되었으며 냉각초기에는 액상과열도가 크기때문에 자연대류가 활발할 것으로 생각되며 과열도가 '0'이 되면 액상영역 내의 온도차가 거의 나지않기 때문에 전

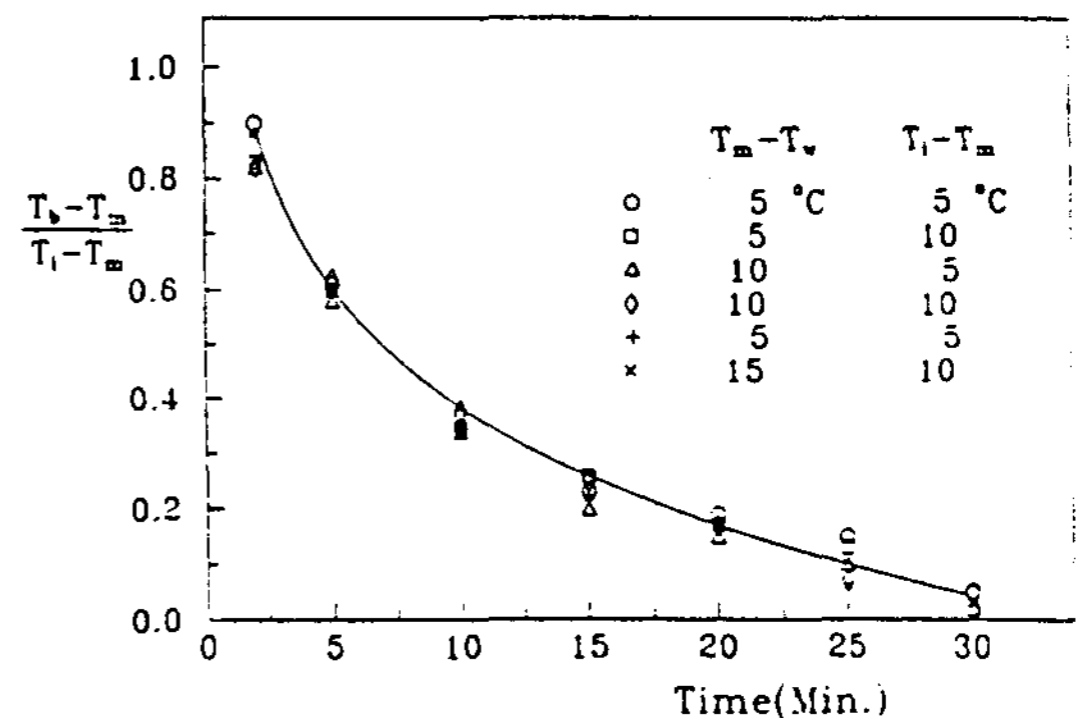


Fig. 6 Decay of the liquid superheat with time (Experimental results)

도열전달의 형태로 변환되었다.

2. 속도 분포

Fig. 7은 상변화물질의 초기과열도($T_i - T_m$)가 10°C 이며 벽면과냉도($T_m - T_w$)가 15°C 인 경우에 대한 액상영역의 상부($Y/H=0.75$)와 하부($Y/H=0.25$)위치에서 시간에 따른 수평방향의 속도 분포를 수치해석 방법으로 나타낸 것이다.

상부에서 수평방향의 속도분포는 유동이 개시됨에 따라 초기 짧은 시간에는 증가하는 현상을 보이다가 시간이 경과함에 따라 액상영역의 온도차가 감소함으로 인해 자연대류효과 또한 감소하였다.

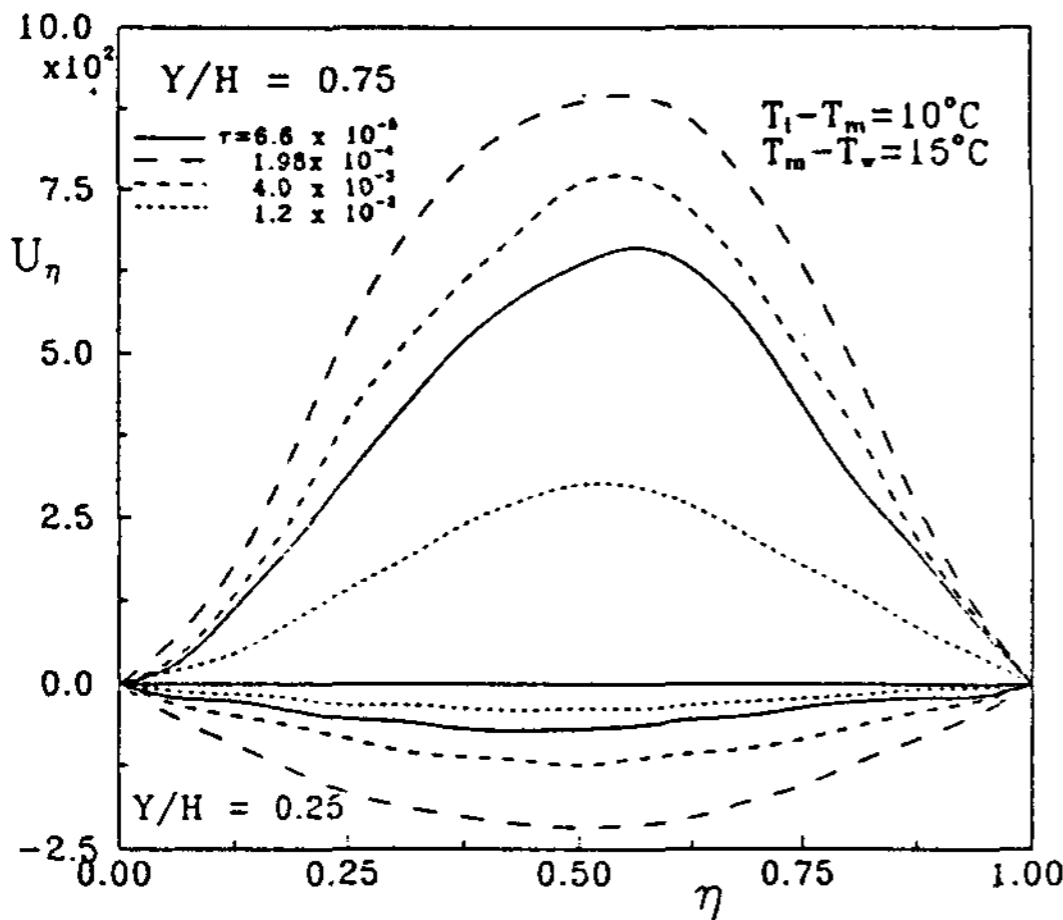


Fig. 7 The profiles of horizontal velocity(Numerical results) : $T_i - T_m = 10^\circ\text{C}$, $T_m - T_w = 15^\circ\text{C}$

그리고 수평방향의 최고점 또한 냉각초기에는 상경계면 부근의 유동이 활발하였으나, 시간이 경과함에 따라 액상영역 중심으로 이동하였다. 하부위치에서 수평방향의 속도분포는 상부와 유사한 경향을 보이나 그 크기가 적게 나타났다.

Fig. 8은 액상영역 상·하부에서 수직방향의 속도분포를 나타낸 것으로 용기의 중앙 부근에서 그 값이 크게 나타났으며 액상부의 중앙부근에서 그 값의 크기가 적게 나타났다.

수직속도의 변화는 상경계면에 가까워지면서

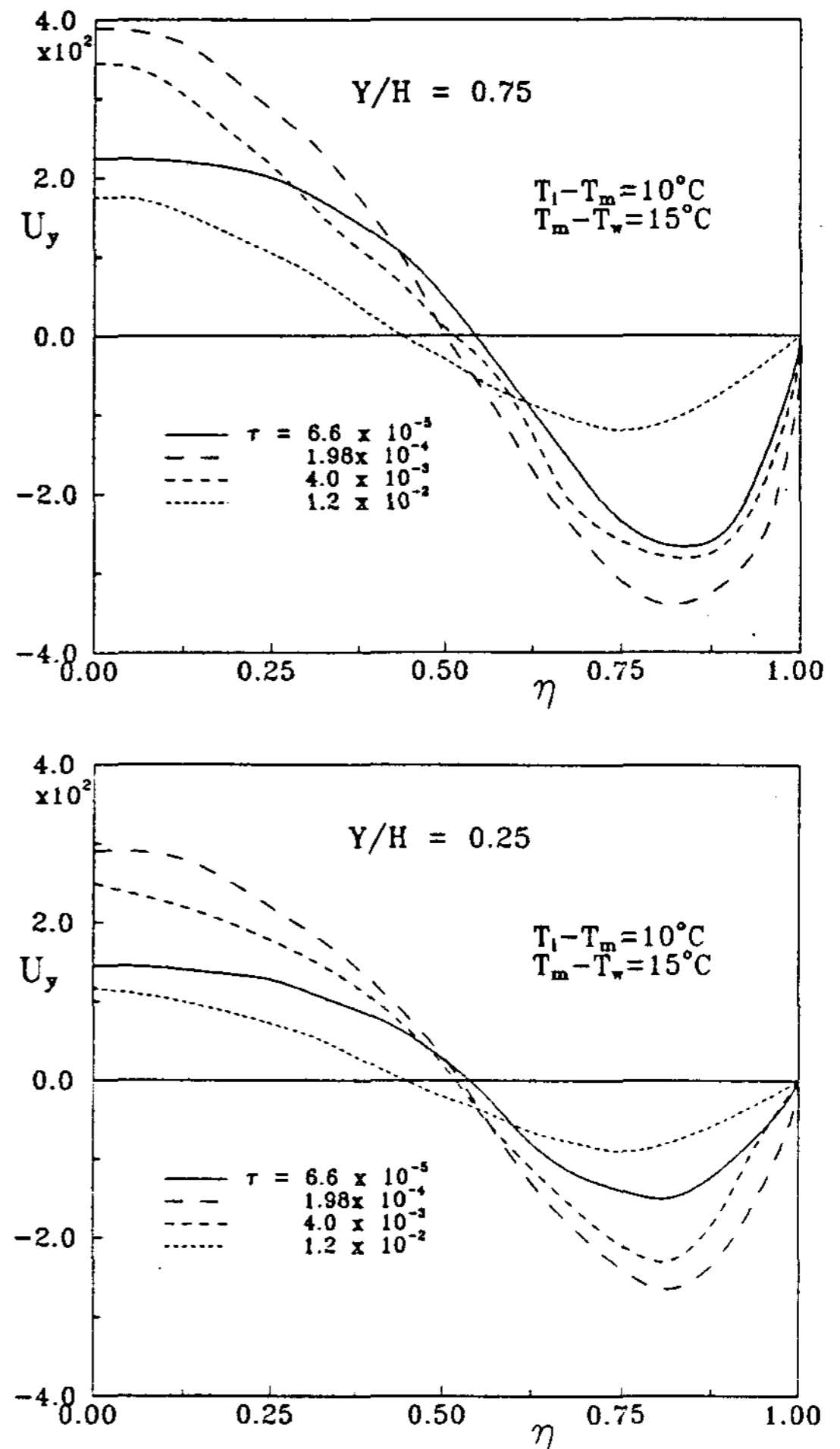


Fig. 8 The profiles of vertical velocity(Numerical results) : $T_i - T_m = 10^\circ\text{C}$, $T_m - T_w = 15^\circ\text{C}$ ($Y/H = 0.25, 0.75$)

증가하다가 상경계면에 도달하면서 다시 『0』이 되었다. 수직방향속도 또한 액상의 초기과열도가 감소함에 따라 감소하였다.

3. 상경계면의 두께 및 형상

무차원 응고두께(δ/R_w)를 Fig. 9에 나타내었으며 여기서 τ 는 무차원시간이다. 그림의 Data는 상변화물질의 초기과열도가 $0, 10^\circ\text{C}$ 일 때의 값을 비교한 결과이다. 실험결과에 의하면 초기과열도 $T_i - T_m = 0$ 인 경우가 $T_i - T_m > 0$ 인 경우보다 응고

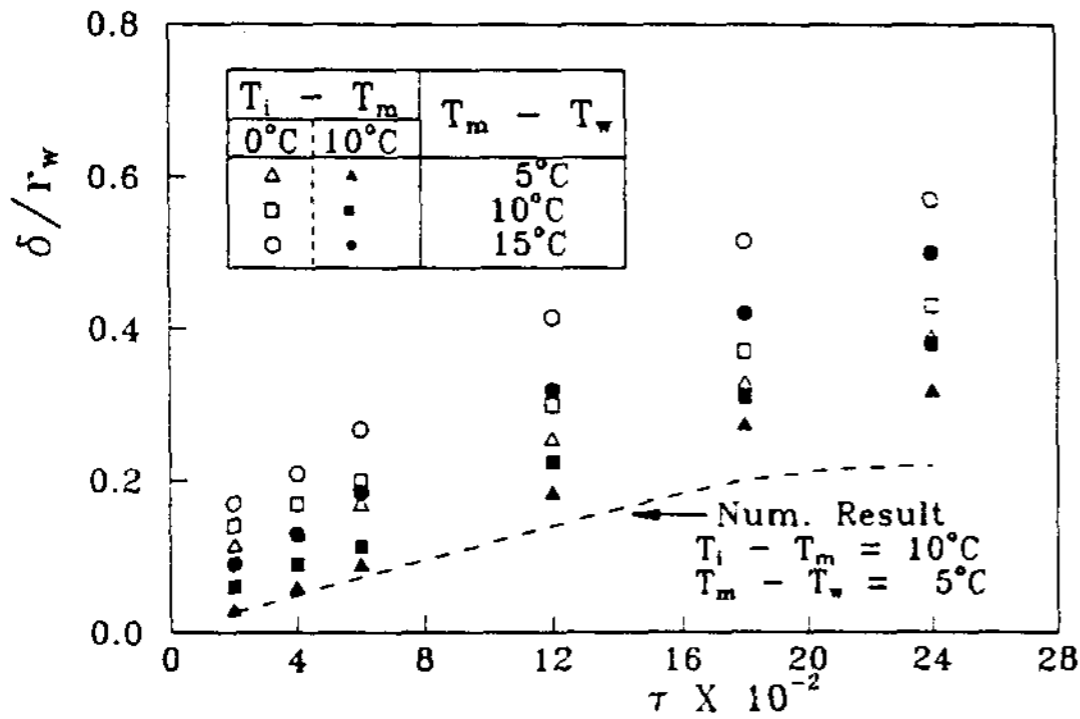


Fig. 9 Dimensionless of results for the frozen layer thickness. : $T_i - T_m = 0, 10^\circ\text{C}$ $T_m - T_w = 5, 10, 15^\circ\text{C}$

층의 두께가 두껍게 나타났으며 벽면과냉도가 클수록 응고층 두께 또한 두꺼웠다. 그리고 수치해의 결과는 실험치보다 적게 나타났으며 이는 실험치의 경우는 전도열전달이 지배할 때에는 상경계면과 액상영역 내에 수지상결정이 발달됨으로 인하여 전열면적이 증가한 결과로 사료된다.

Fig. 10은 상변화물질의 초기과열도가 0, 10°C 이고 벽면과냉도가 15°C이며 형상비 $A_s(H/R) = 4$ 일때의 상경계면 형상을 시간의 경과에 따라 나타내었다. 그림에서 나타난 특징은 초기과열된 경우 액상영역 내의 온도차이가 존재함으로 인하여 초기단계에는 자연대류열전달이 지배하여

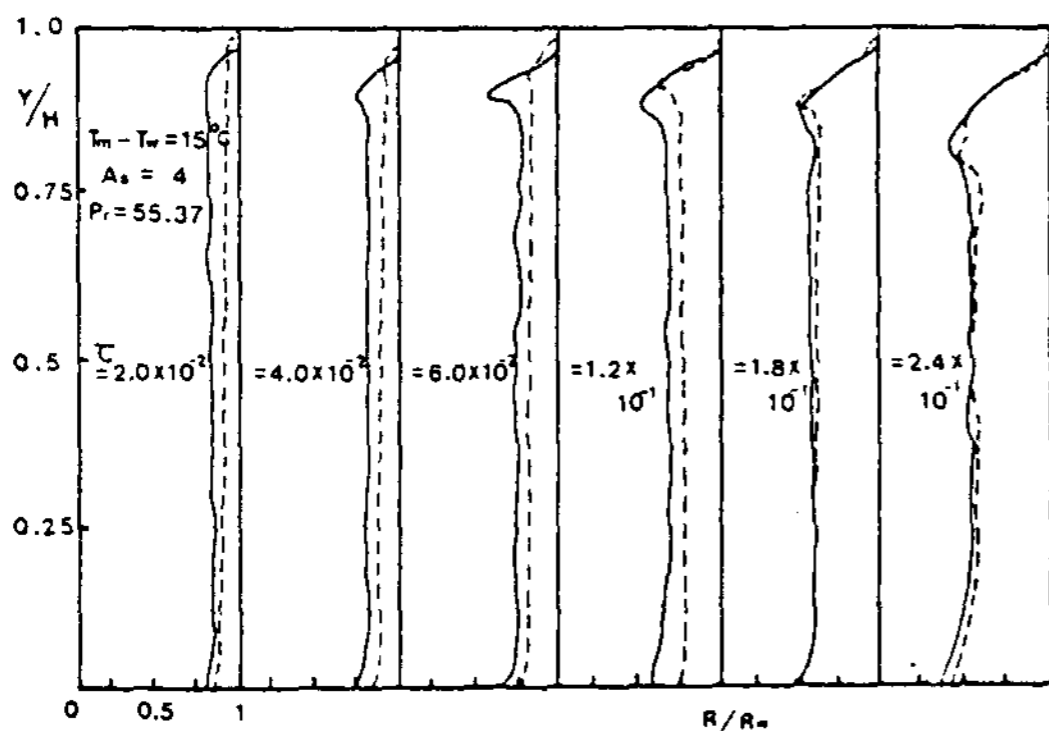


Fig. 10 Comparison of experimental typical patterns of freezing
 — ; $T_i - T_m = 0^\circ\text{C}$, $T_m - T_w = 15^\circ\text{C}$
 - - - ; $T_i - T_m = 10^\circ\text{C}$, $T_m - T_w = 15^\circ\text{C}$

상경계면이 매끈하며, 시간의 경과에 따라 자연대류는 소멸하고, 전도열전달 형태로 천이 됨에 따라 상경계면에는 수지상 결정이 발달되고 mush zone이 생성되었다. 그리고 체적수축으로 인해 상부표면이 오목하게 수축되었으며, 상부 표면과 벽면과 이루는 접촉각도는 20~30°로 측정되었다.

그리고 상변화물질의 초기과열도가 0°C인 경우 온도구배가 없음에 따라 전도열전달이 지배하였고, 이는 응고층의 상하부의 두께가 같고 상경계면이 거칠기의 크기가 크므로써 추정할 수 있다.

VI. 결 론

본 연구는 상변화물질이 채워져있는 수직원통형 용기의 벽면을 등온냉각시킬 때의 응고과정에서 초기과냉도를 0, 5, 10°C로 하고 벽면과냉도를 5, 10, 15°C로 변화시킬 때 유한차분법을 이용한 수치해석 방법과 실험적 방법으로 시간의 경과에 대한 상변화물질 내부의 온도분포, 액상영역의 속도 분포, 응고층의 두께, 상경계면의 형상 등을 구하였다.

그리고 연구 결과는 다음과 같다.

- 액상영역 과열도는 응고초기 30분까지 유지되었으며, 과열도의 크기가 클수록 응고질량이 감소되었으며 총응고 질량의 증가는 초기과열도보다 벽면과냉도의 영향이 크게 나타났다.

- 상변화물질의 응고과정 중 자연대류 현상은 실험초기에 일어나 크기는 Ra수가 크고 클수록 τ 가 4×10^{-2} 후에는 소멸하였다.

- 상경계면의 두께는 응고초기는 자연대류의 영향으로 상하부의 두께차이를 보였으나 자연대류 소멸 후에는 열전도가 지배하는 관계로 상경계면에서 수지상결정이 생성되며, mush zone이 형성되었다.

REFERENCES

- 1 이재목, "수직냉각관 내에서 상변화물질의 응

- 고에 관한 실험적연구”, 인하대학교 대학원 기계공학과, 석사학위논문 1985.
2. D.G. Neilson & F.P. Incropera, “Unidirectional Solidification of a Binary Alloy and the Effect of Induced Fluid Motion”, *Int. J. Heat Mass Transfer* Vol. 34, No. 7, pp 1717–1732, 1991.
 3. Herbert E. Huppert, “The Fluid Mechanics of Solidification”, *J. Fluid Mec.*, Vol. 212, pp.209–240, 1990.
 4. P.G. Kroeger, S. Ostrach, “The Solution of Two-Dimensional freezing Problem Including Convection Effects in the Liquid Region”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 17, pp. 1191–1207, 1974.
 5. E. M. Sparrow, J. W. Ramsey and R. G. Kemink, “Freezing Control by Natural Convection”, *Trans. of ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 101, pp. 578–584, 1974.
 6. C. J. Ho and R. Viskanta, “Inward Solid-liquid Phase-change Heat Transfer in a Rectangular Cavity with Conduction Vertical Walls”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, No. 7, pp. 1055–1065, 1984.

Experimental Study on the Effective Use of Thermally Stratified Hot Water Storage System

Ee-Tong Pak

Dept. of Mech. Eng. Sung Kyun Kwan Univ

The benefits of thermal stratification in sensible heat storage were investigated for residential solar applications. The effect of increased thermal useful efficiency of hot water stored in an actual storage tank due to stratification has been discussed and illustrated through experimental data and computer simulation, which were taken by changing dynamic and geometric parameters. When the flow rate was 8 liter/min and ΔT was 40°C , the useful efficiency(η_u) was about 90% in case of using a distributor, but not using a distributor the useful efficiency(η_u) was about 82%. So these kinds of distributor would be recommendable for a hot water storage system and residential solar energy application to increase useful efficiency(η_u). In the case of the uniform circular distributor, when the flow rate was 8 liter/min partial mixing was decreased and a stable stratification was obtained. Furthermore, if the distributor was manufactured so that the flow is to be the same from all perforations in order to enhance stratification, it might be predicted that further stable stratification and higher useful efficiency(η_u) are obtainable.

A study of heat transfer with Phase Change Material in heat storage system —Inward freezing in the vertical cylinder—

C.M.Lee · C.S.Yim* · M.Iqbal**

Yuhan Junior Collage

**Inha University*

***University of British Columbia*

This study investigated heat transfer phenomena during the freezing of an initially superheated or non-superheated liquid in a cooled cylinder tube. Numerical and experimental method were performed to obtain the temperature and velocity distribution, the shape of interface. Natural convection effects in the superheated liquid were confined and moderated a short freezing time. After natural convection ceases, heat conduction dominated in the whole paraffin, so Caystal and much-Zone were found out in PCM.

Initial superheating of liquid tended to morderatly diminish the frozen layer thickness at short

freezing times but little effect on the these quantities at longer times. On the amount of frozen mass, initial liquid superheating is less affected than tube wall subcooling.

Study on the Thermal Storage Characteristics of Phase Change Materials for Greenhouse Heating

Song, Hyun-Kap* · Ryou, Young-Sun* · Kim, Young-Bok**

*Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Chung-Buk National University

**Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Kyung-Sang National University

An overdose of fossil fuel for greenhouse heating causes not only the high cost and low quality of agricultural products, but also the environmental pollution of farm village. To solve these problems it is desirable to maximize the solar energy utilization for the heating of greenhouse in winter season.

In this study phase change materials were selected to store solar energy concentratively for heating the greenhouse and their characteristics of thermal energy storage were analyzed. The results were summarized as follows.

The organic $C_{28}H_{58}$, and the inorganic $CH_3COONa \cdot 3H_2O$ and $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ were selected as low temperature latent heat storage materials. The equation of critical radius was derived to define the generating mechanism of the maximum latent heat of phase change materials. The melting point of $C_{28}H_{58}$ was $62^\circ C$, and the latent heat was $50.0 \sim 52.0 kcal/kg$. The specific heat of liquid and solid phase was $0.54 \sim 0.69 kcal/kg^\circ C$ and $0.57 \sim 0.75 kcal/kg^\circ C$ respectively. The melting point of $CH_3COONa \cdot 3H_2O$ was $61 \sim 62^\circ C$, the latent heat was $64.9 \sim 65.8 kcal/kg$ and the specific heat of liquid and solid phase was respectively $0.83 kcal/kg^\circ C$ and $0.51 \sim 0.52 kcal/kg^\circ C$. The melting point of $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ was $30 \sim 30.9^\circ C$, the latent heat was $53.0 kcal/kg$ and the specific heat of liquid and solid phase was respectively $0.78 \sim 0.89 kcal/kg^\circ C$ and $0.50 \sim 0.70 kcal/kg^\circ C$. When the urea of 21.85% was added to control the melting point of $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ and the phase change cycles were repeated from 0 to 600, the melting point was $16.7 \sim 16.0^\circ C$ and the latent heat was $36.0 \sim 28.0 kcal/kg^\circ C$.

A Theoretical Study for the Design of Solar Air Heaters Using Porous Material

Yong-Ha Hwang* · Seung-ho Park** · Jong-Eok Kim**

Department of Thermal Engineering, National Chung ju University

Department of Mechanical Engineering, Hong-Ik University