

【 論 文 】

상변화물질의 대류유동및 열전달 현상에 관한 연구

Study of Convective Flow and Heat Transfer Phenomena in the Phase Change Material

손 상 석* 이 채 문** 이 재 현*** 임 장 순****
 (Shon, Sang suk) (Lee, Chaemoon) (Lee, Jae heon) (Yim, Chang soon)

ABSTRACT

The objective of this study is to report on the characteristics of convective flow and heat transfer during melting process in order to provide design information for thermal energy storage systems which use phase change material. In present study, flow and heat transfer characteristics of the Phase Change Material in the Open Top Model (O.T.M) and in the Closed Top Model (C.T.M) were studied numerically by the control volume formulation using the algebraic non-orthogonal coordinate transformation. For the calculation procedure, the physical properties of fluid are assumed to be constant except density which is linearly dependent on temperature in the buoyancy term of momentum equations. At start of melting process, the thickness of melting layer is assumed from the Stefan Problem assumption.

The heat transfer results of Open Top Model and Closed Top Model are compared with the parameters of Grashof number and aspect ratio.

It was found that heat transfer phenomena in melted region was greatly affected by buoyancy-driven natural convection and the melting distance of Open Top Model at the upper region is greater than that of Closed Top Model.

NOMENCLATURE

C : specific heat capacity
 \underline{e} : unit base vector
 g : magnitude of gravitational acceleration.
 h : specific enthalpy
 H : height of calculation domain
 k : thermal conductivity
 \underline{n} : unit outward normal vector
 p : pressure
 q : local heat transfer rate per unit unit area

R : dimension less radial coordinate
 Rw : aspect ratio
 r : radial coordinate
 T : temperature
 t : dimensionless time
 \underline{u} : dimensionless velocity
 y : vertical coordinate
 Y : dimensionless vertical coordinate
 Greek Symbol
 λ : heat of fusion per unit mass
 α_T : thermal diffusivity
 β : thermal expansion coefficient
 ν : kinematic viscosity
 η : transformed radial coordinate
 ξ : transformed vertical coordinate
 τ : time in transformed coordinate system

* 正會員 : 삼성기술원
 ** 正會員 : 유한공업전문대학
 *** 正會員 : 한양대학교 공과대학
 **** 正會員 : 인하대학교 공과대학

- δ : thickness of liquid phase region
- θ : dimensionless temperature
- ρ : density
- ρ_0 : reference density at $T = T_m$
- ∇ : gradient operator or divergence operator

Superscript

- * : dimensional variable

Subscript

- i : at interface
- l : liquid region
- m : at phase change temperature
- s : solid region
- w : at heat wall
- r : r-coordinate
- y : y-coordinate
- η : η -coordinate
- ξ : ξ -coordinate

Dimensionless Group

- Gr : Groshof number, $g\beta\Delta TH^3/\nu^2$
- Nu : Nuselt number, $q_w H / K\Delta T$
- Pr : Prandtl number, ν / α_T
- Ste : Stefan number, $C\Delta T / \lambda$

약어

- O.T.M : open top model
- C.T.M : closed top model

1. 서론

최근에 에너지 자원을 유용하게 사용하기 위하여 태양열 지열 및 공장폐열 등의 회수와 이들의 이용에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 시간대별의 전력수요의 극심한 불균형 문제를 해결하기 위하여 심야잉여전력을 열에너지로 변환하여 축열하는 문제가 많은 관심을 불러 일으키고 있다. 이러한 여러가지 축열 방법 중에서 상변화물질의 잠열을 이용하는 잠열이용형 축열방법은 축열밀도가 높고 비교적 작은 온

도범위 내에서 일정한 온도를 유지할수 있는 장이 있으므로 효율적인 축열방법으로 주목 받고 있다.

이와같은 상변화물질의 용융 및 응고시의 열전달 특성에 관한 연구는 용융과 응고시의 열적 불안정성과 액상상변화물질의 자연대류현상등으로 인한 해석상의 복잡성으로 인하여 주로 실험적인 방법^{1, 2, 3)}으로 많이 수행되어져 왔으나 최근에 Saitoh^{4, 5)}, Riger⁶⁾ 등이 수평 원형 용기의 내부에 채워진 상변화물질의 용융시의 열전달특성에 관하여 수치적방법으로 연구한 바 있다.

본 연구에서는 수직가열관 주위를 채우고 있는 상변화물질의 용융시 액상상변화물질의 자연대류 효과를 고려한 상변화물질의 용융열전달 특성을 대수적방법의 좌표변환법을 이용하여 비정규적 경계면을 가지는 해석영역을 직사각형으로 사상(mapping)하고, 지배방정식을 제어체적방법으로 차분화하여 수치적으로 해석하였다.

해석영역의 상부에서 단열된 공기층을 갖는 Open Top Model(이하 O.T.M 으로 표기)과 공기층을 갖지 않는 Closed Top Model(이하 C.T.M)의 두가지 모델내에 상변화물질로 n-eicosan 이 채워져 있는 경우에 대하여 Gr 수를 4.1×10^5 , 6.4×10^6 으로, 형상비 Rw 를 0.25, 0.625, 로 변화시키며 계산을 수행하여 용융열전달특성과 상경계면(interface)의 이동, 자연대류 유동속도 등을 해석하여 실험결과와 비교 검토하였다.

본 연구의 해석결과들은 상변화물질을 이용한 축열을 행하는 열기기 특히 태양열을 이용하기 위한 축열장치의 형상및 크기를 결정하는 설계자료로 사용될수 있으며, 수치해석에 사용한 좌표변환법은 계면고정방법과 함께 금속의 주조과정및 용접시 용재의 상변화과정 그리고 일반좌표계로 해석영역이 표시되는 모든 유동 및 열전달 문제에 응용될수 있을 것이다.

2. 이론적인 연구

2-1. 해석모델의 설정

본 연구에서 고려한 용융상변화계는 Fig. 1에 나타낸 바와같이 상변화물질이 반경 r_w 인 수직가열관 주위에 환상으로 채워져 있으며 용기는 높이가 H 이고 반경방향으로는 무한한 길이를 갖는 것이다. 해석영역은 상변화물질의 액상영역으로서 $r_i(y, t)$ 를 상경계면이라 할 때 $r_w \leq r \leq r_i(y, t)$, $0 \leq y \leq H$ 가 된다.

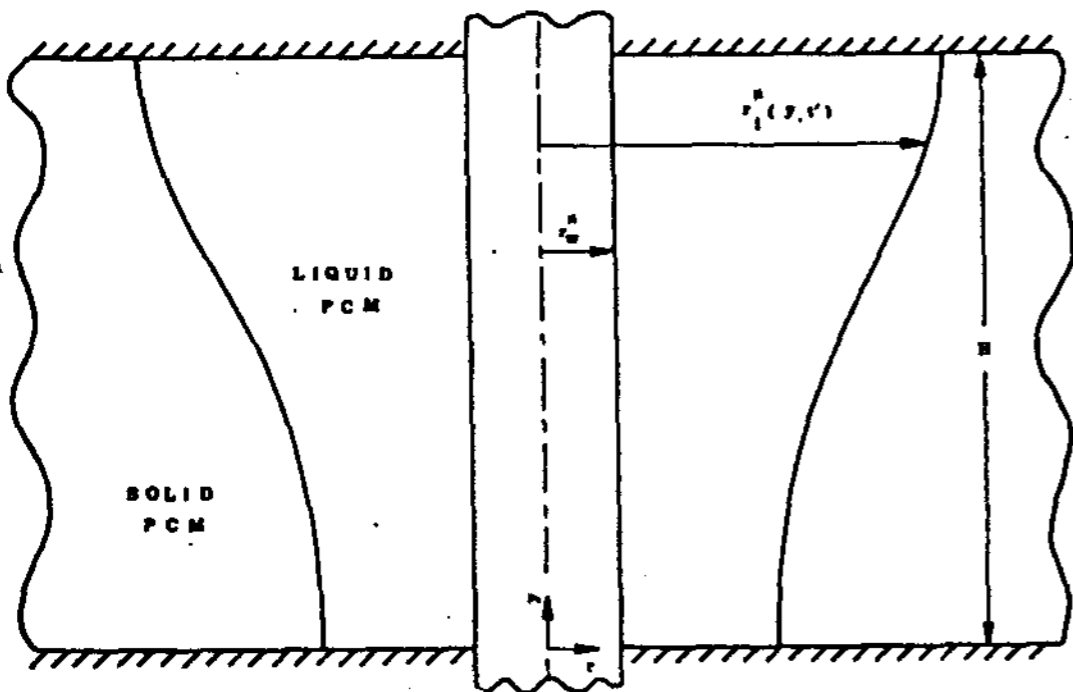


Fig. 1. Schematic Illustration of Melting around a Vertical Tube.

해석영역의 상부 및 하부벽은 단열되었고 상경계면 (interface)은 상변화온도로 유지되며 가열관 표면의 온도는 시간 $t=0$ 에서 $T(t=0) = T_i$ 이고 $t \neq 0$ 에서는 $T(t) = T_w$ 가 된다.

해석영역의 상부에 단열된 공기층이 있는 O.T.M과 공기층이 없는 C.T.M의 두가지 모델을 해석모델로 선정하였다. 상변화물질은 초기에는 상변화온도로 유지되어 있고 가열이 시작된 직후부터 반경방향으로 용융이 진행된다.

상변화물질의 물성치들중 열·유체역학적특성은 운동량방정식에서 체력항을 제외하면 전 계산 영역에서 일정하다고 가정하였다. 또 초기 용융과정의 짧은 시간 동안은 전도만에 의해 열전달이 이루어지는 Stefan Problem이라고 가정하였다.

2-2. 지배방정식과 경계조건

2-1 절의 가정을 도입한 본 연구의 해석영역에서 열전달 및 유동특성을 나타내는 2차원 비정상상태의 유차원 지배방정식들을 아래 식 (1)의 무차원 변수들을 사용하여 무차원화한 지배방정식들은 식 (2), (3), (4)와 같다.

$$R = r^*/H, \quad Y = y^*/H, \quad t = \nu t^*/H^2$$

$$\underline{U} = \underline{u}^*H/\nu, \quad \theta = (T - T_m)/(T_w - T_m),$$

$$P = p^*H^2/\nu^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\nabla \cdot \underline{U} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \underline{u}}{\partial t} + \underline{U} \cdot \nabla \underline{U} = -\nabla P + \nabla^2 \underline{U} - \frac{g}{g} Gr \theta$$

$$\dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \underline{U} \cdot \nabla \theta = \frac{1}{Pr} \nabla^2 \theta \dots\dots\dots (4)$$

한편 상경계면 (interface)에서의 열평형 관계로 부터 얻어지는 상경계면에서의 무차원 열평형방정식은 식 (5)와 같다.

$$-\frac{Ste}{pr} \frac{\partial \theta}{\partial r} \left[1 + \left(\frac{\partial R_i}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{\partial R_i}{\partial t} \dots\dots (5)$$

이상의 무차원지배방정식 (2), (3) 및 (4)와 무차원열평형방정식 (5)에 대한 무차원 경계조건은 식(6)과 같다.

$$R = R_w \text{에서 } \theta = 1$$

$$R = R_i(Y, t) \text{에서 } \theta = 0$$

$$Y = 0 \text{ 또는 } Y = 1 \text{에서 } \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$$

$$Y = 1 \text{ 일때를 제외한 모든벽면에서 } \underline{U} = 0$$

$$\text{단, } Y = 1 \text{에서 Open-top인 경우}$$

$$\frac{\partial \underline{U}_R}{\partial Y} = 0, \quad U_Y = 0$$

$$Y = 1 \text{에서 Closed-top인 경우}$$

$$\underline{U} = 0$$

$$\dots\dots\dots (6)$$

2-3. 좌표변환

일반적인 유한차분법(F.D.M)이나 본 연구에서 채택한 제어체적방법(C.V.M)의 수치해

석 방법들은 정규적인 격자망(Grid System)을 사용하여야 한다. 그러므로 본 연구에서와 같이 경계면이 일반좌표계와 일치하지 않는 비정규적 경계면을 갖는 물리적인 영역에 대하여 이러한 수치해석 방법들을 적용하기 위해서는 물리적인 영역을 정규적형상의 계산영역으로 사상(mapping)하는 좌표변환이 도입되어야 한다.

이를 위하여 본 연구에서는 시간에 따른 상경계면(interface) 이동을 처리하기 편리한 대수적방법(Algebraic Method)으로 좌표변환하여 일반좌표계(R, Y, t)상의 종속변수들을 직교좌표계(η, ξ, τ)상에 표시하였다.

이때 대수적방법에서 사용된 좌표변환식은 아래와 같다.

$$\eta = (R - R_w) / \delta(Y, t) \dots\dots\dots (7)$$

$$\xi = Y \dots\dots\dots (8)$$

$$\tau = t \dots\dots\dots (9)$$

여기서 δ(Y, t)는 가열관 중심으로부터 상경계면(interface)까지의 거리로서 δ(Y, t) = Ri(Y, t) - R_w 이다.

식 (2), (3), (4) 및 (5)를 변환된 직교좌표계(η, ξ, τ)로 표현하기 위해서는 Fig. 2에 나타낸 두좌표계의 단위벡터 e_R 및 e_Y와 e_η 및 e_ξ의 관계식을 구하여 각방정식에 대입하고 일반좌표계(R, y, t)에서의 편미분값들을 연쇄법칙(Chain Rule)을 이용하여 직교좌표계(η, ξ, τ)에서의 편미분 값으로 표시해 주면 된다.

또 본 연구의 시간에 따른 상경계면의 이동은 경계면고정방법(Boundary Immobilization Method)⁹⁾을 이용하여 구하였으며 이를 위하여 Leibnitz법칙을 이용하여 시간증분에 따른 검사체적변화를 보정하였다.

이와같은 방법으로 얻어진 좌표변환된 무차원 지배방정식과 상경계면열평형방정식을 Fig. 2에 나타낸 검사체적에 대하여 적분하여 얻어진 적분형지배방정식과 상경계면열평형방정식은 다음과 같다.

○연속방정식

$$\int_1 U_Y R \delta d\eta - \int_3 U_Y R \delta d\eta + \int_2 U_\eta R d\xi - \int_4 U_\eta R d\xi = 0 \dots\dots\dots (10)$$

○η - 운동량방정식

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \int U_\eta R \delta d\xi d\eta + \int_1 [U_Y U_\eta - \frac{\partial U_\eta}{\partial \xi} + \frac{\beta}{\delta} \frac{\partial U_\eta}{\partial \eta}] R \delta d\eta - \int_3 [U_Y U_\eta - \frac{\partial U_\eta}{\partial \xi} + \frac{\beta}{\delta} \frac{\partial U_\eta}{\partial \eta}] R \delta d\eta \\ & + \int_2 [(U_\eta - \eta \frac{\partial \delta}{\partial \tau}) U_\eta - \frac{\alpha}{\delta} \frac{\partial U_\eta}{\partial \eta} + \beta \frac{\partial U_\eta}{\partial \xi}] R d\xi - \int_4 [(U_\eta - \eta \frac{\partial \delta}{\partial \tau}) U_\eta - \frac{\alpha}{\delta} \frac{\partial U_\eta}{\partial \eta} + \beta \frac{\partial U_\eta}{\partial \xi}] R d\xi = \int (\frac{\alpha}{\delta} \frac{\partial p}{\partial \eta} - \beta \frac{\partial p}{\partial \xi}) \\ & R \delta d\xi d\eta + \int \{ - \frac{U_\eta + \beta U_Y}{R^2} - \beta Gr_H \theta - U_Y (\eta \frac{\partial^2 \delta}{\partial \xi \partial \tau} - \frac{\beta}{\delta} \frac{\partial \delta}{\partial \tau}) - U_Y (\frac{U_\eta}{\delta} \frac{\partial \delta}{\partial \xi} + U_Y \eta \frac{\partial^2 \delta}{\partial \xi^2}) + [\eta \frac{\partial^3 \delta}{\partial \xi^3} + \frac{2\eta}{\delta^2} (\frac{\partial \delta}{\partial \xi})^2 - \frac{3\eta}{\delta} \frac{\partial^2 \delta}{\partial \xi^2} + \frac{1}{R\delta} \frac{\partial \delta}{\partial \xi}] + 2 [\frac{\partial U_Y}{\partial \eta} (\frac{\alpha}{\delta^2} \frac{\partial \delta}{\partial \xi} - \frac{\beta}{\delta} \eta \frac{\partial^2 \delta}{\partial \xi^2}) + \frac{\partial U_Y}{\partial \xi} (\eta \frac{\partial^2 \delta}{\partial \xi^2} - \frac{\beta}{\delta} \frac{\partial \delta}{\partial \xi}) \} R \delta d\eta \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

○ξ - 운동량방정식

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

$$\frac{\partial p}{\partial \eta}) R \delta d \xi d \eta + \int G r_H \theta R \delta d \xi d \eta \dots\dots\dots (12)$$

○에너지방정식

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\tau} \int \theta R \delta d \xi d \eta + \int_1 [U_Y \theta + \frac{1}{pr} (-\frac{\partial \theta}{\partial \xi} \\ & + \frac{\beta}{\delta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta})] R \delta d \eta - \int_3 [U_Y \theta + \frac{1}{pr} (-\frac{\partial \theta}{\partial \xi} \\ & + \frac{\beta}{\delta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta})] R \delta d \eta + \int_2 [(U_\eta - \eta \frac{\partial \delta}{\partial \tau}) \theta + \\ & \frac{1}{pr} (-\frac{\alpha}{\delta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} + \beta \frac{\partial \theta}{\partial \xi})] R d \xi - \int_4 [(U_\eta - \\ & \eta \frac{\partial \delta}{\partial \tau}) \theta + \frac{1}{pr} (-\frac{\alpha}{\delta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} + \beta \frac{\partial \theta}{\partial \xi})] R d \xi \\ & = 0 \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

○상경계면열평형방정식

$$\frac{\partial \theta}{\partial \gamma} = \frac{\partial \theta}{\partial \xi} - \frac{\beta}{\delta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \dots\dots\dots (14)$$

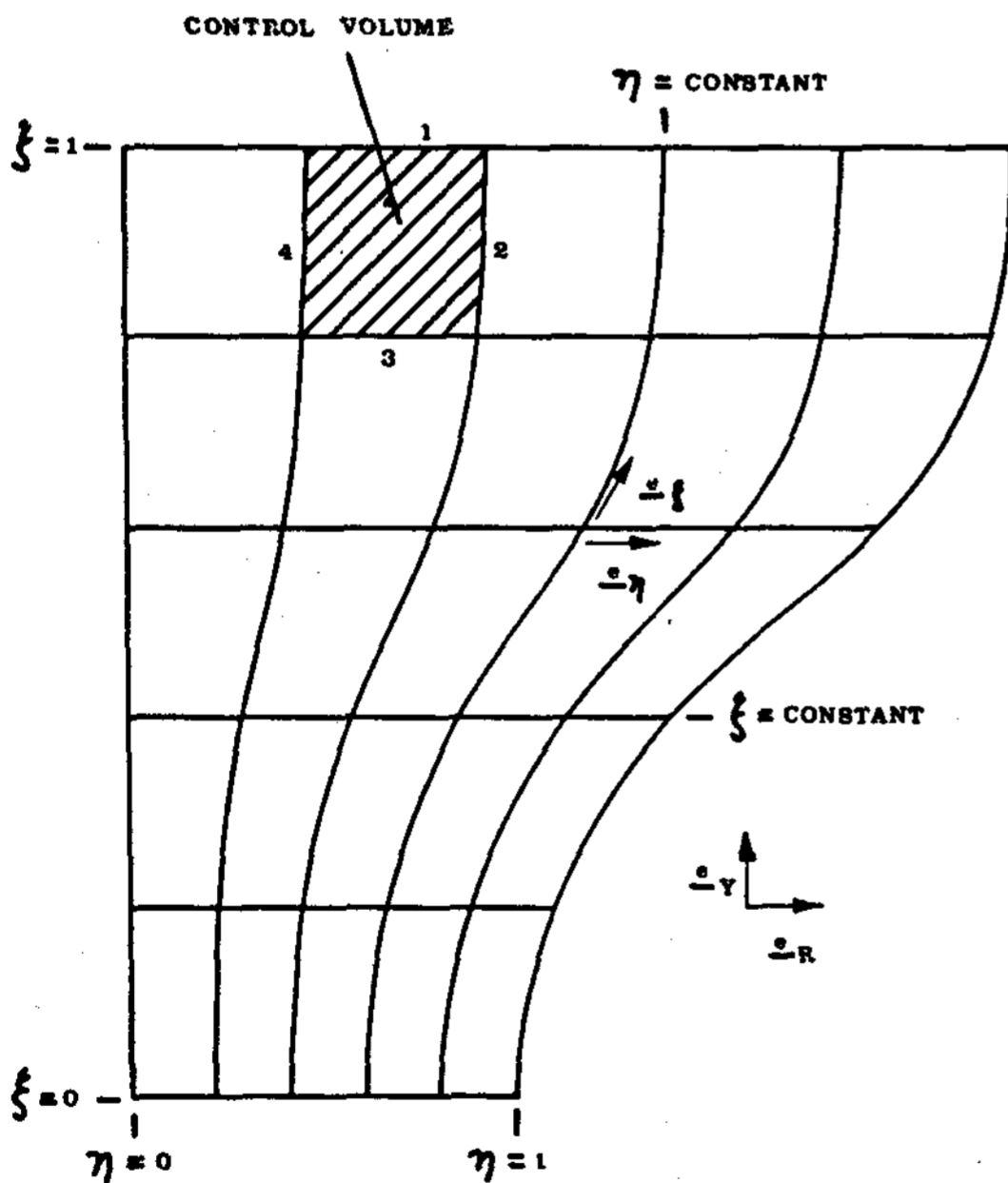


Fig. 2. Liquid Domain with Superimposed (η, ξ) Coordinate System.

3. 수치해석

본 연구에서 용융영역내의 유동 및 열전달 특성

을 수치적방법으로 해석하기 위하여 좌표변환된 각 지배방정식들을 patankar⁹⁾에 의해 제안된 검사체적방법으로 차분하였다.

각 지배방정식들의 대류항과 확산항은 Power-law Scheme을 사용하여 차분하였고 그 외 생성항(Source term)은 1차 중심차분법을 사용하였다. 또 상경계면 열평형방정식의 차분에서는 Implicit 방법을 사용하였다.

해석영역내의 격자계(Grid System)는 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. Fig. 3(a)는 온도장

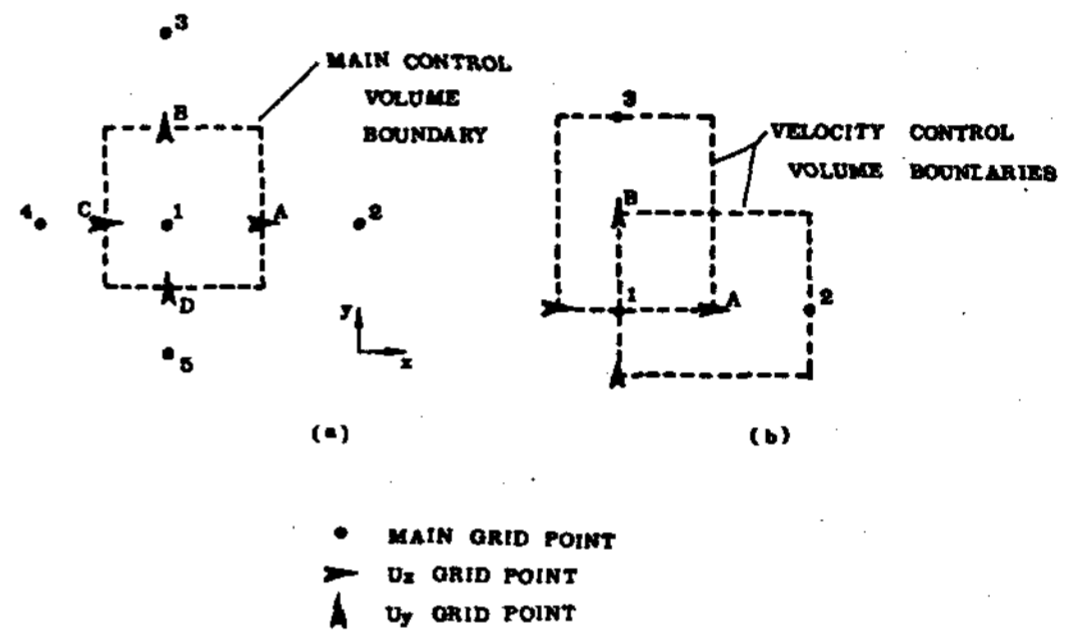


Fig. 3. Orientation of Grid Points and Control Volumes in Melting Region; (a) Main Control Volume, (b) Staggered Control Volumes.

과 압력장에 적용된 주격자(main grid)이고, Fig. 3(b)는 속도장에 적용된 주격자(main grid)에 엇갈려 위치하는 엇갈림격자계(Staggered grid)를 표시한 것이다.

차분방정식들의 해를 구하기 위하여 SIMPLE Algorithm(9)을 이용하였으며 본 연구에서 수행한 전체계산과정은 아래와 같다.

- 1) . 용융과정 초기의 짧은 시간 동안은 일차원적인 전도형태로 열전달이 이루어진다고 가정하여 Stefan Problem 조건으로 상경계면(interface)의 위치를 구한다.
- 2) . 1) 과정에서 상경계면(interface)의 위치를 구한후 용융영역의 온도 분포를 구한다.
- 3) . 2) 과정에서 구한 온도분포를 식(14)에 대입하여 무차원시간 $\Delta \tau$ 경과후의 새로운 상경계면(interface)의 위치를 구한다.
- 4) . 3) 과정에서 구한 새로운 상경계면(i -

interface)의 위치로써 결정된 계산된영역내에서 온도장과 유동장을 SIMPLE Algorithm (9)을 이용하여 수렴된 값을 얻을때까지 반복계산한다음 3)과 4)과정을 되풀이한다.

4. 결과 및 고찰

n-eicosane paraffin (Table 1 참조)이 상변화물질로 채워져 있는 O.T.M과 C.T.M 두가지 응용모델 각각에 대하여 Grashof 수를 4.1×10^5 과 6.4×10^6 으로 형상비 R_w 를 0.25와 0.625로 변화시키며 대수적좌표변환법을 이용하여 수치적방법으로 그 열전달특성과 용융상계면의 위치(δ) 및 액상영역내에서의 자연대류가 열전달과정에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 먼저 본 연구에서 사용한 수치해석방법의 타당성과 신뢰성을 검토하기 위하여 실험결과들과 비교 검토하고, 용융초기 짧은 시간동안의 해를 Stefan Problem으로 가정한본 연구의 타당성을 역시 실험결과와 비교 검토하며 선택된 두 응용모델중 C.T.M에 비해 상부용융영역에서 자연대류유동이 보다 활발한 O.T.M모델에 대하여 상변화물질의 용융과정에서의 열전달특성을 고찰하고자 한다.

Table 1. Parameters Involving Material Properties for $C_{20}H_{42}$ and $C_{22}H_{46}$

	$C_{20}H_{42}$	$C_{22}H_{46}$
$T_m(^\circ C)$	36.4	44.0
$K(W/cm^\circ C)$	1.52×10^{-3}	1.5×10^{-3}
$\nu (cm^2/s)$	5.9×10^{-2}	5.5×10^{-2}
$\alpha (cm^2/s)$	8.9×10^{-4}	9.1×10^{-4}
Pr	67	58.76
$gB/\nu^2 (1/cm^2C)$	2.5×10^3	2.31×10^{-2}
$c/\lambda (1/^\circ C)$	8.9×10^{-3}	9.0×10^{-3}

4-1. 실험결과의 비교

본 연구에서 사용한 수치해석방법과 그 결과들의 신뢰성을 검토하기 위하여 Yim 7)의 실험결과와 비교하였다.

상변화물질로 n-Docosane Paraffin ($C_{22}H_{46}$)을 사용한 Yim의 실험결과와 비교하기 위하여 특별히 n-Docosane Paraffin의 물성치(Table 1 참조)들을 사용하여 수치계산을 수행하였다.

Fig. 4는 C.T.M인 경우의 가열관 높이 방향으로의 용융영역의 두께변화를 시간에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 수치해석결과와 실험연구결과는 비교적 잘 일치하고 있으나 용융상부에서와 용융시간이 긴 경우에는 약간의 차이(60분의 경우 6% 이내)를 나타내고 있다.

이것은 실험의 경우 용기 벽면의 단열을 완전하게 이룰수 없으므로 벽면으로의 열손실을 고려하면 계산결과는 실험결과 보다 용융층 두께가 크게 나타나야만 된다.

따라서 본 연구에서 사용한 수치해석방법은 상변화물질의 용융과정의 해석에 매우 유용한 방법이라고 할수 있다.

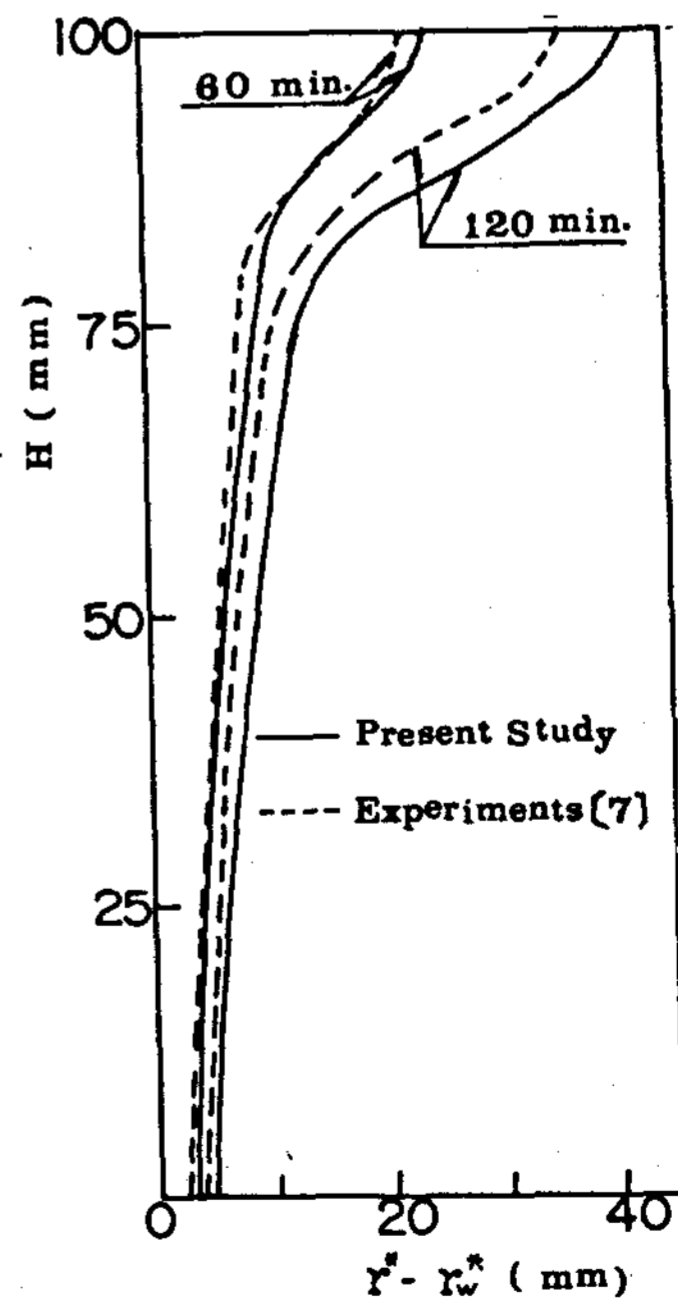


Fig. 4. Comparison of Interface Shapes for Numerical and Experimental Results: $\Delta T=10^\circ C$, Closed-top case.

Fig. 5는 시간 경과에 따른 가열 관벽면에서의 열전달계수(h)의 변화에 대한 실험연구결과와 상변화 물질의 액상영역에서의 자연대류를 고려한 본 수치해석 결과 및 상변화물질의 액상영역에서의 자연대류를 고려하지 않은 수치해석 결과를 비교한 것이다. Fig. 5에서는 용융초기에는 3가지 연구결과가 잘 일치하고 있으나 용융시간이 경과함에 따라 자연대류를 고려하지 않고 순수전도상태의 열전달만을 고려한 결과는 실험결과와 매우 큰 차이를 보이고 있으며, 자연대류를 고려하여 수치적으로 계산한 본 연구의 결과와 실험연구의 결과는 전 계산시간동안에 잘 일치하고 있다는 것을 보여주고 있다.

이러한 Fig. 5의 고찰을 통하여 용융초기의 짧은 시간동안은 순수전도상태가 상변화열전달을 지배한다는 Stefan Problem이라고 가정한 것은 위의 고찰결과 합당한 것이라고 생각된다.

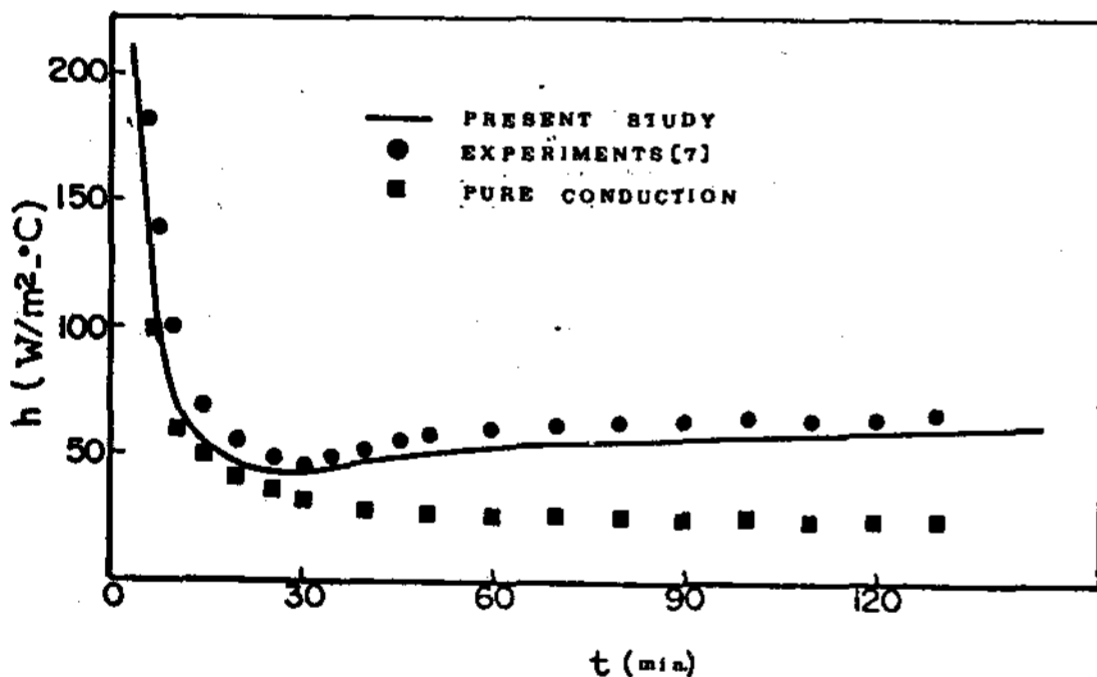


Fig. 5. Comparison of Heat Transfer Coefficients for Numerical and Experimental Results; $\Delta T = 10^\circ C$, Closed-top case.

4-2. 용융영역에서의 자연대류의 영향

Fig. 6은 $Pr = 7$, $Ste = 0.1$ 인 상변화물질에 대하여 $Gr = 4.1 \times 10^5$, 형상비 $Rw = 0.25$ 인 경우 시간경과에 따른 가열관벽면에서의 평균 Nusselt 수의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 용융의 초기과정에는 순수전도상태의 열전달 기구를 갖는다고 가정하고 계산한 결과와 자연대류를 고려하여 두가지 모델(O.T.M과 C.T.

M)에 대하여 계산한 결과들이 잘 일치하는 것을 알수 있으나, 용융시간이 경과함에 따라 자연대류의 영향이 증가하여 자연대류를 고려하지 않았을때(즉 순수전도의 경우 $Gr = 0$)의 평균 Nusselt 수 보다 자연대류를 고려하여 계산한 경우의 평균 Nusselt 수 \bar{Nu} 는 무차원시간 $\tau = 1.22$ 에서 약 2.3배 정도로 크게 나타났다. 따라서 상변화 용융계에 대해 수치해석적으로 연구하고자 할때는 반드시 상변화물질의 액상영역에서의 자연대류를 고려하여야 한다는 것을 알수있다.

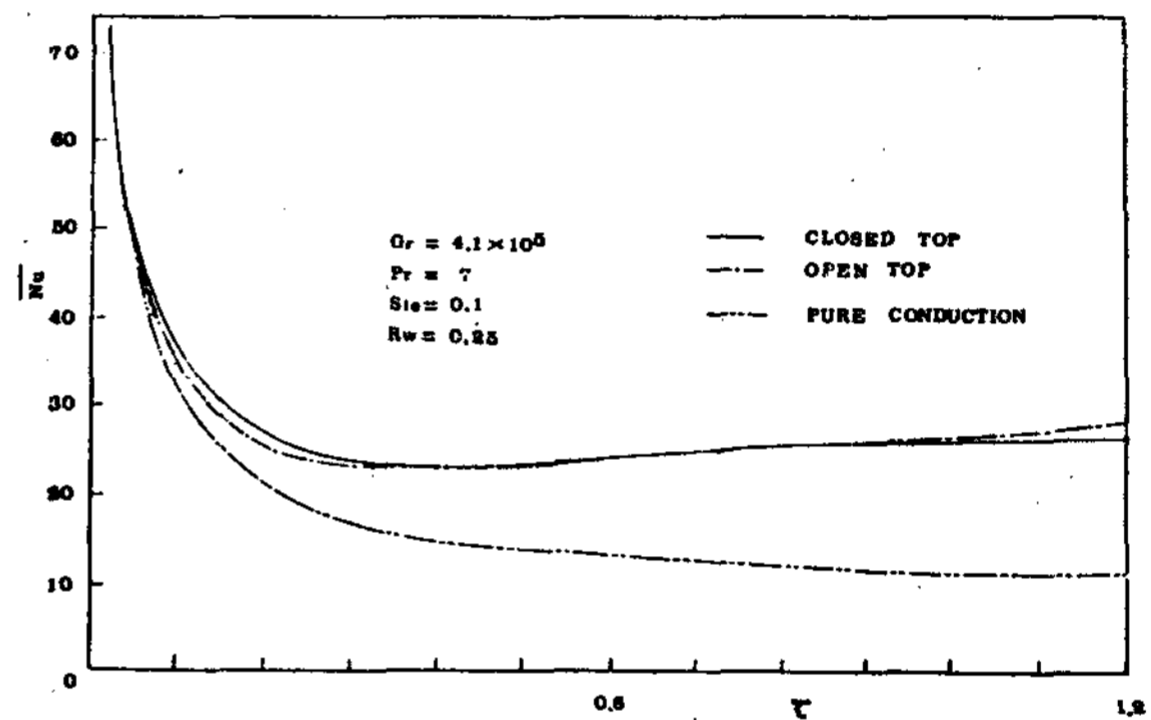


Fig. 6. Comparison of Effect of Natural Convection on Heat Transfer Coefficient with Melting Systems.

4-3. 용융계에 관한 검토

Fig. 7은 $Pr = 7$, $Ste = 0.1$ 인 상변화물질에 대하여 $Gr = 4.1 \times 10^5$, 형상비 $Rw = 0.25$ 일때 O.T.M과 C.T.M 두 용융모델 각각의 경우에 대한 무차원시간 $\tau = 0.57$ 와 $\tau = 1.22$ 에서의 Y방향으로의 용융영역의 두께(δ)의 변화 형태를 나타낸 것이다.

Fig. 7에서는 O.T.M의 경우가 C.T.M의 경우보다 $Y \geq 0.8$ 위치 즉 용융영역의 상부에서 용융이 더 많이 진행되었다는 것을 보여주고 있다. 이것은 O.T.M의 경우가 상변화물질과 상부벽면과의 사이에 마찰력이 존재하지 않으므로 C.T.M의 경우보다는 용융영역의 상부에서 자연대류유동의 영향을 더 크게 받기 때문인 것으로 생각된다.

이상의 Fig. 6과 Fig. 7의 결과들로 부터 상변화물질을 이용한 두가지 용융계 중 O.T.M의 경우가 상부 용융영역에서 용융영역의 두께 (δ)가 더 증가하고 열전달특성이 향상되고 있음을 알수 있으므로 본 연구에서는 다음과 같이 O.T.M용융계를 중심으로 상변화물질의 대류유동과 열전달특성에 관하여 고찰하고자 한다.

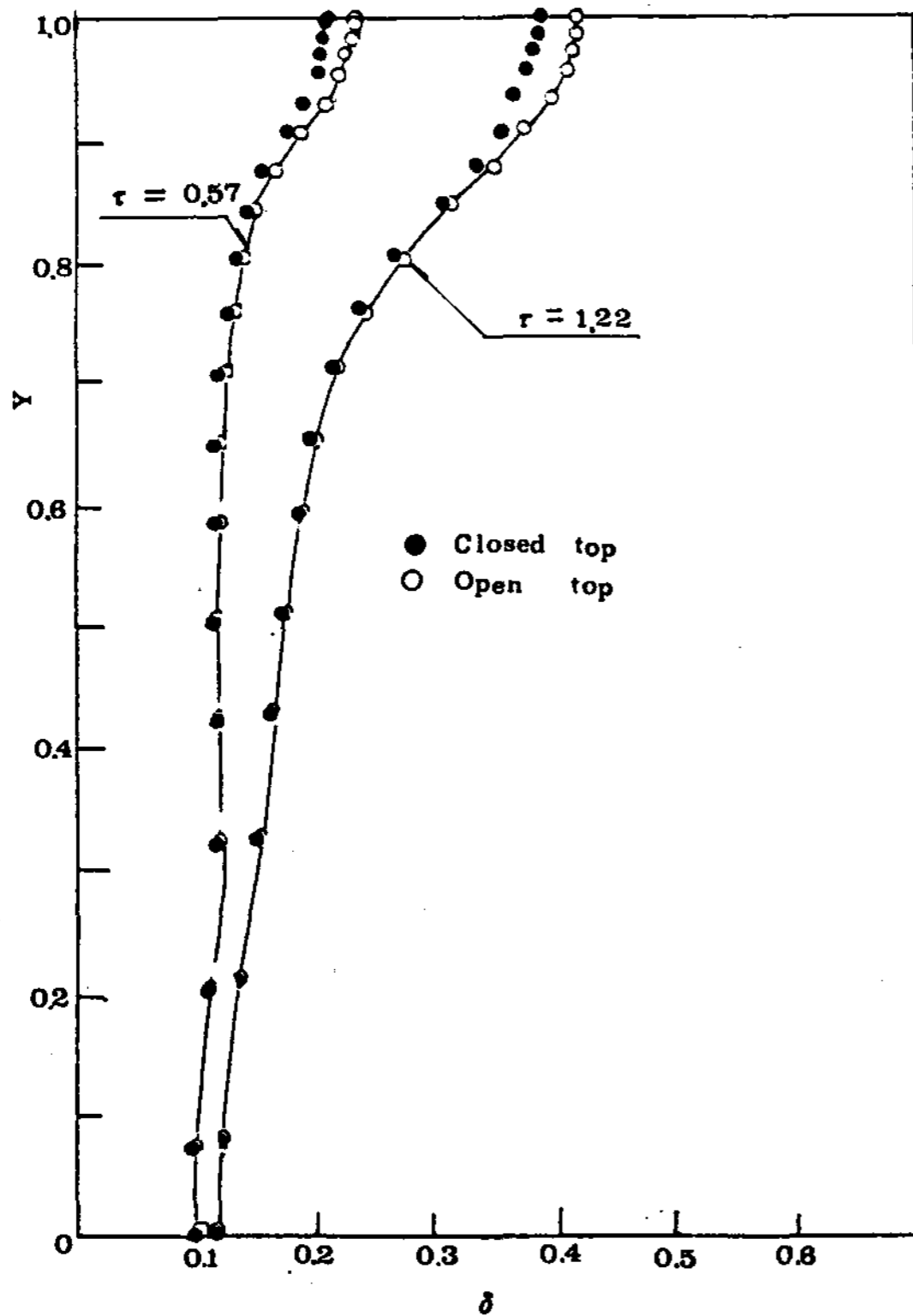


Fig. 7. Comparison of Melting Systems with Different Time: $Gr=4.1 \times 10^5$, $Rw=0.25$.

4-4. O.T.M에 대한 검토

(1) 용융영역의 두께 (δ) 변화

Fig. 8은 형상비(Rw)와 무차원시간 τ 에 따른 Y-방향의 용융영역의 두께 (δ)의 변화를 Grashof수가 6.4×10^6 인 경우에 대하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 나타난 바와 같이 용융영역의 두께 (δ)은 Grashof수와 형상비(Rw)가 클수록 더 두껍게 되며 특히 상

부용융영역에서는 자연대류의 영향으로 하부용융영역의 두께보다는 더 두껍게 된다는 것을 알수 있다.

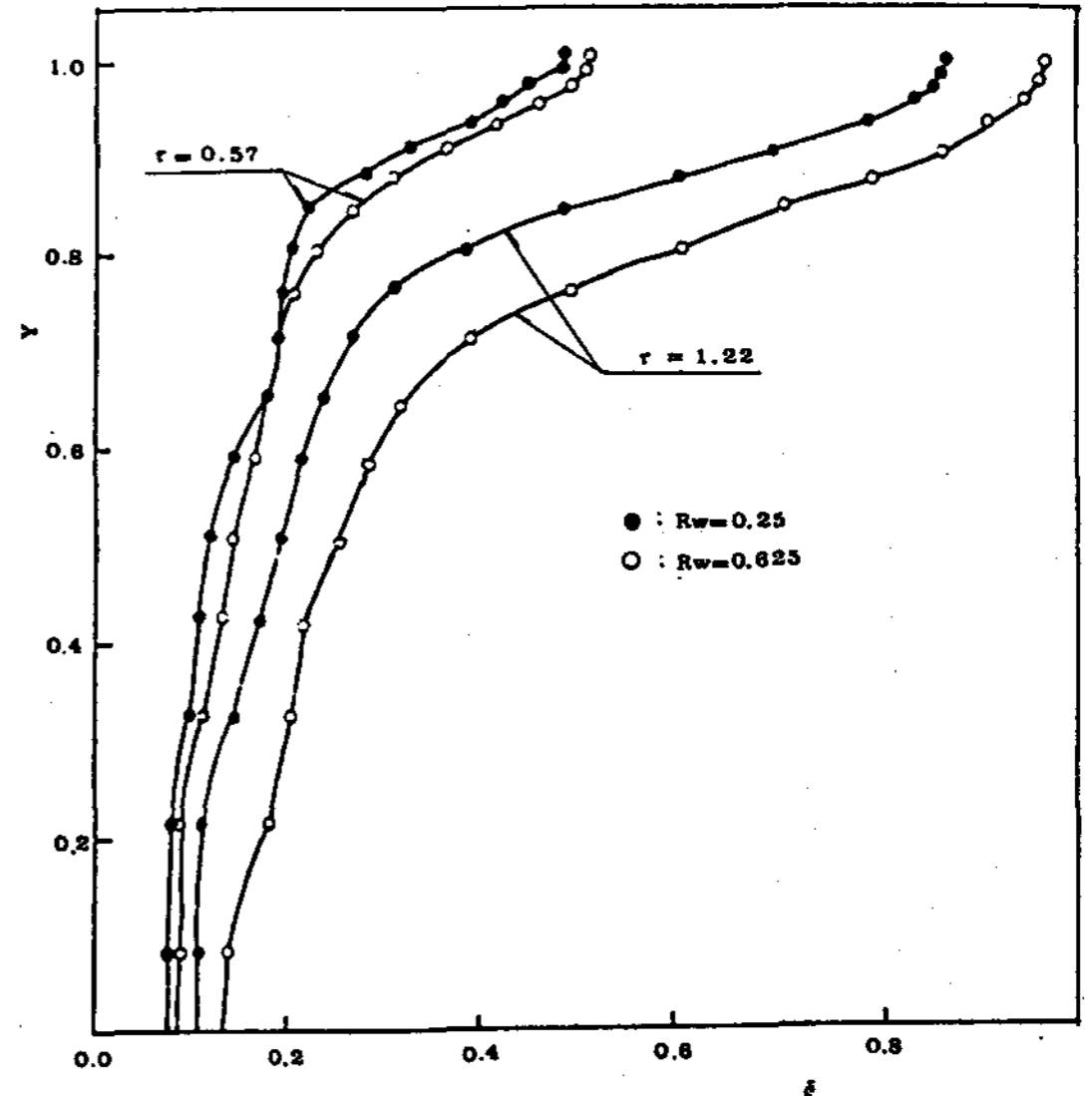


Fig. 8. Comparison of Interface Position with Time; $Gr=6.4 \times 10^6$, $Ste=0.1$, $Pr=7$.

(2) 유동장의 변화

Fig. 9는 무차원시간 $\tau=1.22$ 에서 Grashof수에 따른 $Y=0.86$ 위치에서 용융영역 내에서 발생하는 자연대류의 Y-방향 속도 성분 U_y 의 η -방향으로의 변화 형태를 나타낸 것이다.

Fig. 9에서 (a)는 가열관의 형상비 $Rw=0.625$ 인 경우이고 (b)는 가열관의 형상비가 0.25인 경우이다. 이 그림에서는 가열관벽면 ($\eta=0$)과 냉각부인 상경계면 (interface)에서 ($\eta=1$)는 Grashof수가 클때 자연대류의 강도가 커지므로 유동속도가 빨라지며 Grashof수가 작을때는 3차곡선의 특성을 유지하던 U_y 의 형태가 Grashof수가 증가함에 따라 $0.3 < \eta < 0.7$ 구간에서 정체현상을 나타낸다는 것을 알수 있다. 또 가열관의 형상비가 클수록 가열관벽면과 상경계면 (interface)에서의 유속이 빠르다는 것으로 부터 자연대류강도가 증가한다는 것을 알수 있다.

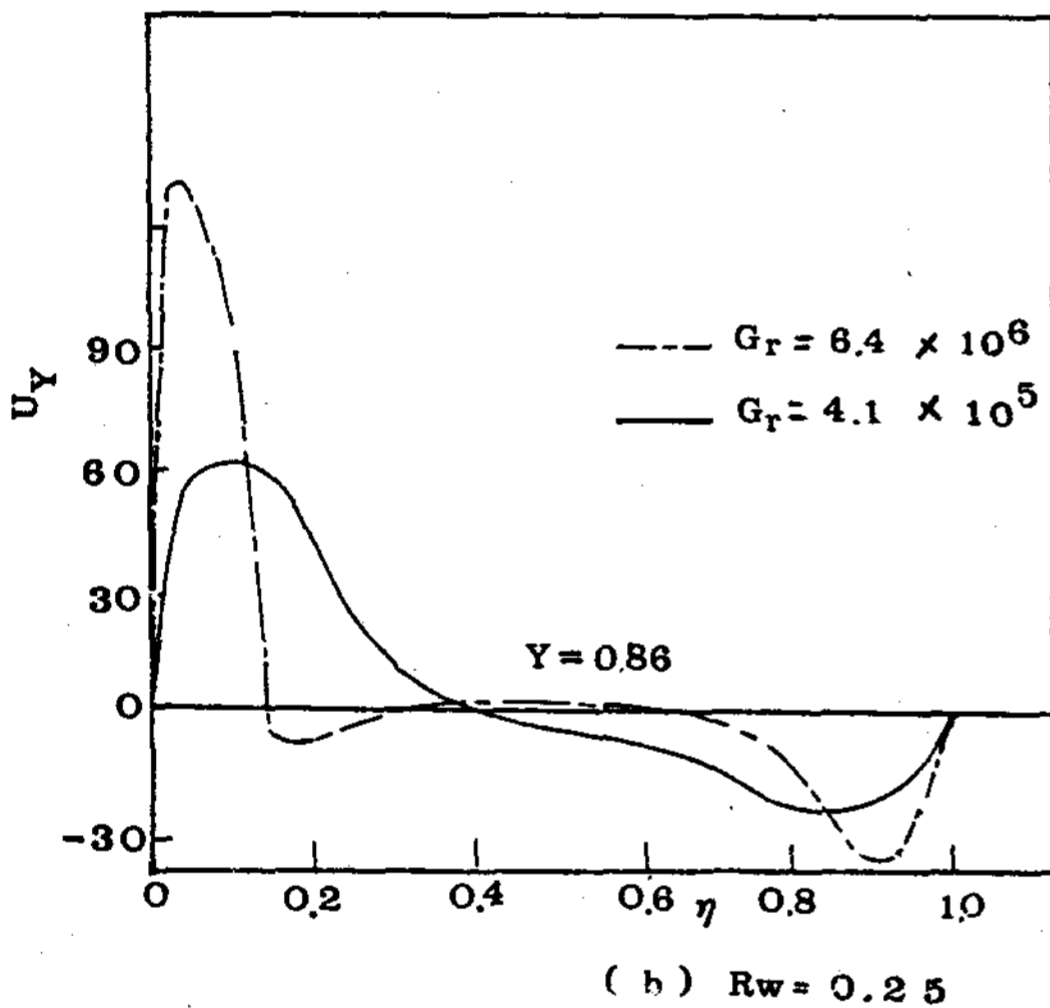
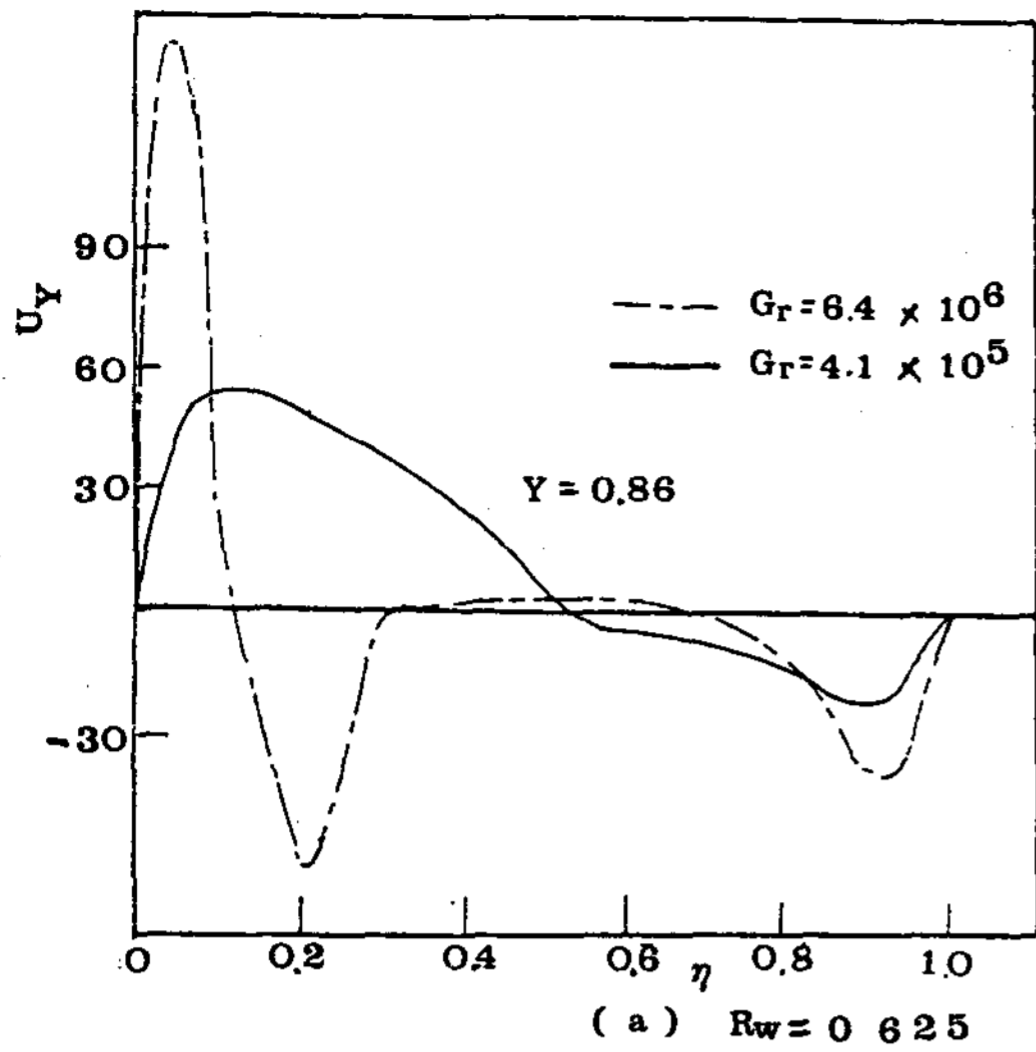


Fig. 9. Comparison of Y-Axis velocity U_y with Grashof number, aspect ratio and R_w ; $\tau = 1.22$, $Ste = 0.1$.

(3) 온도장의 변화

Fig. 10에 $\tau = 1.22$, $Gr = 6.4 \times 10^6$ 인 경우의 Y-방향의 위치 $Y = 0.075, 0.51, 0.99$ 에서 가열관의 형상비 $R_w = 0.25, 0.625$ 에 대한 η 방향으로의 온도분포특성을 나타냈다.

Fig. 10(c)에 나타낸 용융영역의 상부위치 $Y = 0.99$ 에서는 자연대류의 유동방향이 시계방향으로 일정하고 가열된 용융유체가 상부표면을 따라 매우 자유로운 유동을 하므로 가열관으로 부터 열전달은 대류유동에 의해 지배받

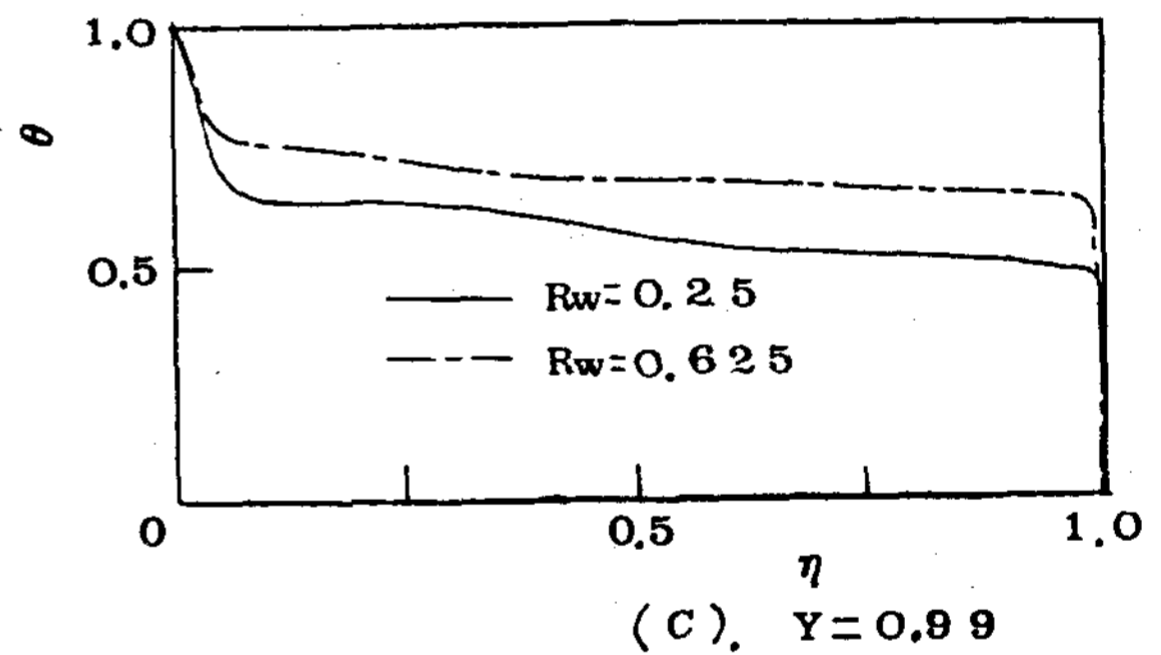
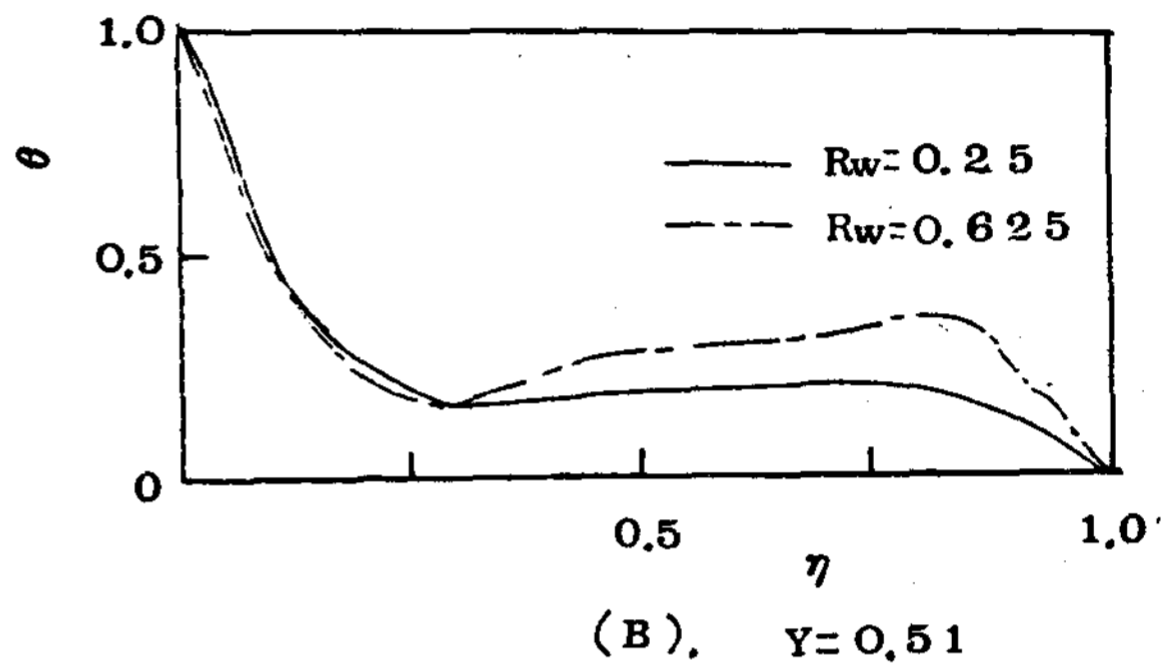
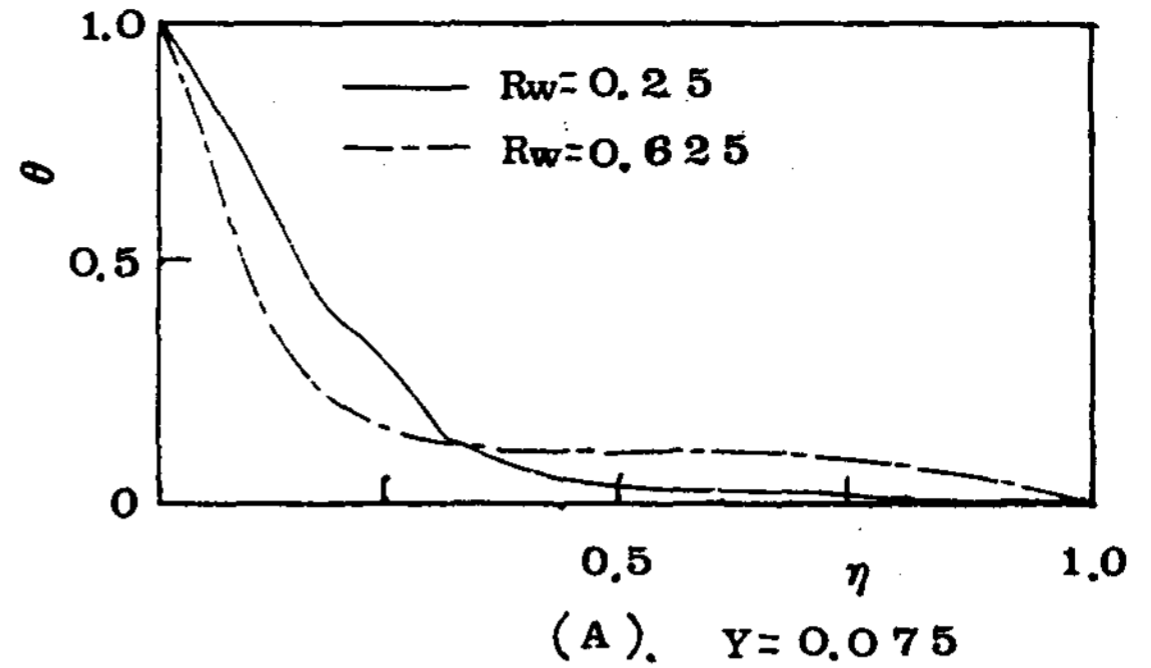


Fig. 10. Comparison of Temperature Field for Aspect Ratio (R_w) and Y-Position; $Gr = 6.4 \times 10^6$, $\tau = 1.2$

는다. 따라서 가열관표면 ($\eta = 0$) 위치에서 상경계면 ($\eta = 1$)까지의 전구간이 거의 일정한 온도를 유지되고 있다는 것을 알 수 있다.

Y-방향으로의 용융영역의 중앙지점인 $Y = 0.51$ 위치에서 η -방향의 온도특성을 나타낸 Fig. 10(b)에서는 가열관근방 ($\eta = 0.25$)에서의 온도보다 상경계면 근방 ($\eta = 0.8$)에서의 온도가 높게 되는 온도반전현상⁹⁾을 보여주고 있다. 이 그림에서 자연대류의 유동이 열전달특성에 매우 크게 미치고 있다는 것을 알 수 있다.

Y-방향으로의 용융영역의 하부지점인 $Y = 0.075$ 위치에서 η -방향으로의 온도분포특성

은 가열관 표면에서 상경계면으로 거의 선형적인 온도분포특성을 보여주고 있다. 이것은 상경계면을 따라 냉각된 상변화물질이 용기 하부에 이르러 그 유속이 늦어져 거의 정체되므로 열전달은 전도에 의해 지배되기 때문인 것으로 생각된다.

(4) 열전달특성

Fig. 11에는 자연대류에 의한 유체유동이 열전달에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 각 가열시간대별로 가열관 높이 방향의 위치(Y)에 따른 국부 Nusselt 수의 변화를 나타냈다.

Fig. 11에서 용융초기인 $\tau = 0.14$ 일때 국부 Nusselt 수는 순수전도상태의 열전달일 경우와 같이 Y-방향을 따라 거의 동일한 값을 가지고 있으나 시간이 경과하여 $\tau = 0.57$, $\tau = 1.22$ 가 되면 국부 Nusselt 수의 Y-방향에 따른 변화특성을 자연대류강도의 증가에 영향을 받아 초기용융시와는 크게 달라지고 있음을 알 수 있다.

이러한 자연대류 유동으로 인한 열전달특성은 시간에 따른 가열관 벽면에서의 평균 Nusselt 수(\bar{Nu})와 총열전달량 $Q_w (= \int_0^{\tau} \bar{Nu} d\tau)$ 를 비교하여 봄으로써 좀더 구체화 할 수 있다.

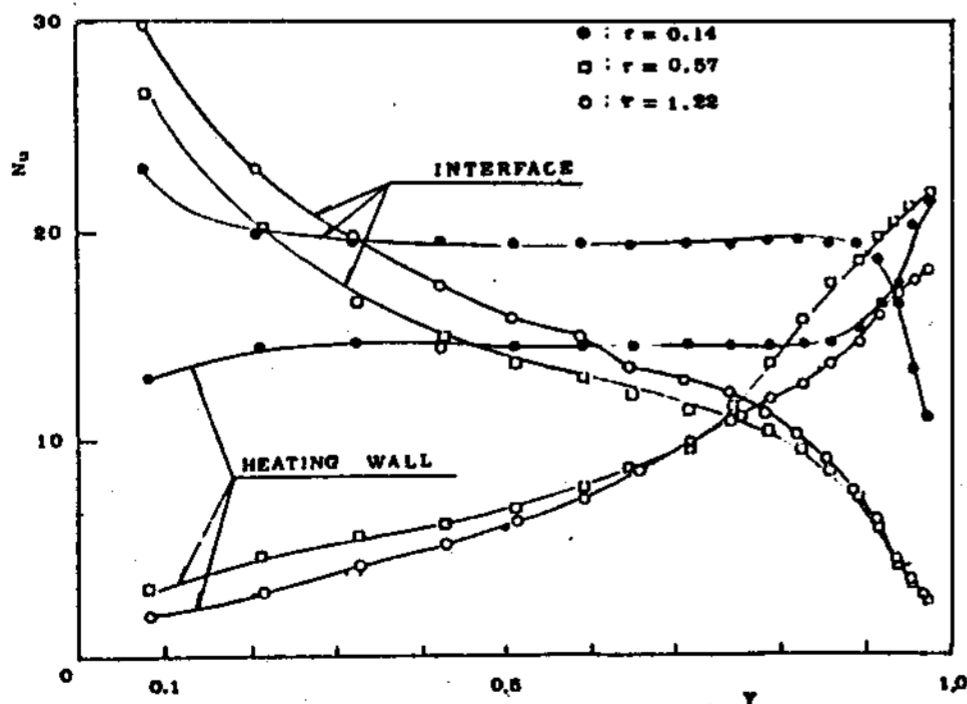


Fig. 11. Comparison of Local Heat Flux each Dimensionless Time; $Gr = 4.1 \times 10^5$, $Rw = 0.25$

Fig. 12는 시간에 따른 평균열전달계수(\bar{Nu})를 Grashof 수가 4.1×10^5 과 6.4×10^6

인 경우 형상비(Rw)가 0.25와 0.625인 각각의 경우에 대해 비교한 것이다.

여기서는 용융이 진행되어 용융영역이 어느 범위 이상으로 넓어지면 시간경과에 따른 벽면 유동속도의 변화폭이 작아지게 되어 열전달율은 시간이 경과하여도 그 변화특성은 일정하게 된다는 것과 Grashof 수가 클수록 순수전도영역과 대류열전달영역이 명확히 나타난다는 것을 알 수 있다.

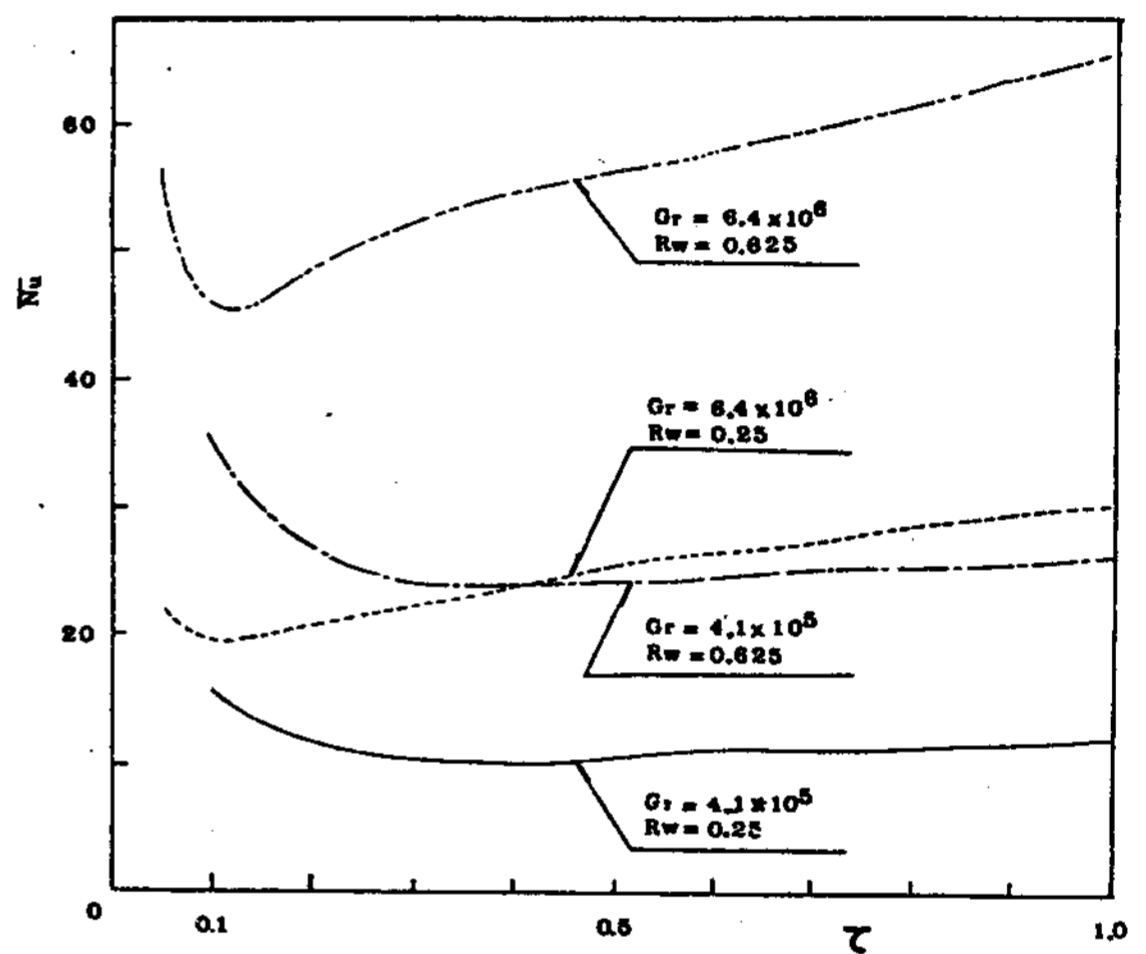


Fig. 12. Comparison of Average Nusselt Number with Melting Systems.

Fig. 13은 순수전도 ($Gr = 0$)라고 가정하고 계산한 총열전달량 Q_0 에 대한 자연대류의 영향을 고려한 경우의 총열전달량 Q 의 비를 각각의 Grashof 수와 형상비에 따라 나타낸 것이다.

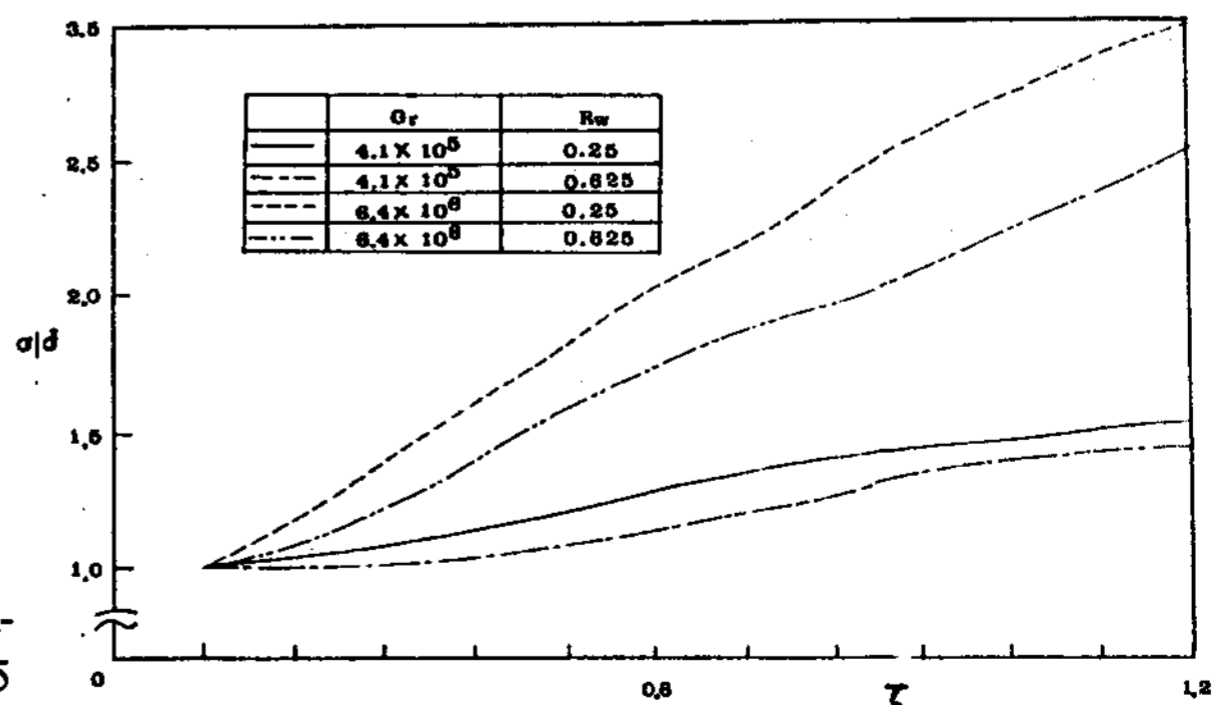


Fig. 13. Comparison of Effect of Natural Convection on Total Heat Flux with Melting Systems.

이 그림으로 부터 자연대류를 고려하지 않을 때와 고려할때의 총열전달량의 비 Q/Q_0 는 Grashof 수가 클수록 그리고 형상비 (Rw)가 작을수록 그량이 증가한다는 것을 알수 있다.

5. 결론

수직가열관 주위에 채워져 있는 상변화물질의 대류유동 및 열전달특성을 대수적 좌표변환 방법을 이용하여 수치적으로 해석한 결과들을 실험결과들과 비교 검토하고 O.T.M에 대하여 중점적으로 고찰하여 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 사용한 대수적 좌표변환방법은 상변화물질의 대류유동 및 열전달특성의 해석에 매우 유용하다는 것이 실험결과와 비교하여 본 결과 입증되었다.

2. 용융과정 초기에는 Stefan Problem이라고 가정한 본 연구의 가정은 타당하다는 것이 실험결과와 비교하여 본 결과 증명되었다.

3. Open Top Model이 Closed Top Model보다 상부에서 용융이 더 많이 진행되었다.

4. 가열벽면을 통해 전달되는 총열전달량은 Grashof 수가 클수록, 형상비 (Rw)가 클수록 많아진다.

5. 용융영역의 두께 (δ)는 Grashof 수 및 형상비 (Rw)가 클수록 두껍게 나타난다.

* 후 기

본 연구는 한국과학재단의 1985년도 후반기 연구지원계획에 의한 연구비 지급으로 이루어 졌으며 재단 및 재단관계 제위께 감사드립니다.

REFERENCES

1. E.M. Sparrow and J.A. Bradbent, Inward

Melting in a Vertical Tube which Allows Free Expansion of Phase-Change Medium, Trans. ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 309-315, 1982.

2. R. Viskanta and P.D. Van Buren, Interferometric Measurement of Heat Transfer during Melting from a Vertical Surface, Int. Journal of Heat Transfer, Vol. 23, pp. 568-571, 1980.
3. E.M. Sparrow and R.G. Kemink, Heat Transfer Coefficients for Melting about Vertical Cylinder without Subcooling and for Open or Closed Containment, Int. Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 24, pp. 1699-1710, 1981.
4. T. Saitoh and Hirose, High Reyleigh Number Solution to Problem of Latent Heat Thermal Energy Storage in a Horizontal Cylinder Capsule, Trans. ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 545-552, 1982.
5. T. Saitoh, Numerical Method for Multi-Dimensional Freezing Problems in Arbitrary Domains, Trans. ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 100, pp. 294-299, 1978.
6. E.M. Sparrow, S.V. Patankar and S. Ramadhyani, analysis of Melting in the Presence of natural Convection in the Melting Region, Trans. ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 99, pp. 530-536, 1977.
7. 이영호, 임장순, 축열과정의 열전달 현상에 관한 실험적연구, 인하대학교 대학원 석사학위논문 예정, 1987
8. 정백영, 임장순, 발열체가 있는 평행평판 공간내의 대류 열전달에 관한 수치해석, 인하대학교 대학원 석사학위논문, 1986
9. Sparrow, E.M., and Patankar, S.V., "Numerical solution of moving boundary problems by boundary immobilization and a control-volume-based finite-difference scheme," International Journal of Heat and Mass transfer, Vol. 24, 1981, pp. 1335-1343.
10. Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and fluid flow," McGraw-Hill Hemisphere, 1980.