

상변화 물질을 사용한 축열조에서의 열전달 —수직원관내에서의 내향용융실험 및 수치해석—

임장순 · 최국광* · 이채문** · 김준근*** · 송하진*** · 조남철***

인하대학교
인천대학교 *
유한공업전문대학 **
인하대학교대학원 ***

Heat Transfer in Heat Storage System with P.C.M. —Experimental and Numerical Investigation during Inward Melting in a Vertical Tube—

Chang-Soon Yim · Guk-Gwang Choi* · Cha-Moon Lee**
Jun-Gun Kim*** · Ha-Jin Shong*** · Nam-Cheol Cho***

Inha Uni.
Inchon Uni. *
Yuhan Technical College **
Graduate School, Inha Uni. ***

요 약

온도가 일정한 외벽을 열원으로 하는 수직원통형 축열조 내에 채워진 상변화물질의 내향용융 과정에서 자연대류에 의한 열전달현상을 유한차분법을 이용하여 수치해석하였고, 그 결과를 실험을 통하여 검증하였다.

상변화물질로는 용융점온도가 42.5°C인 n-docosane paraffin(C₂₂H₄₆)을 사용하였다.

본 연구 결과에서 상변화물질의 용융속도는 액상영역의 자연대류로 인하여 축열조 상부로 갈수록 빠른 것으로 나타났다. 그리고 상변화물질의 초기온도는 액상영역의 속도분포에 큰 영향을 주지 않으며, 상변화물질의 초기온도가 낮을수록 용융속도는 늦어지고 축열조의 형상비(H/r_w)가 커질수록 자연대류는 활발해지는 것으로 나타났다.

이러한 수치해석의 결과는 실험 결과와 잘 일치하였으나, 수치해석시 상변화물질의 용융에 따르는 체적팽창을 고려하지 않았기 때문에 용융이 진행 됨에 따라 오차가 발생하였다.

ABSTRACT

In the present investigation, experiments and numerical analysis during melting process of a phase change material were performed to research heat transfer phenomena generated by means of conduction and natural convection in the vertical tube at inward melting.

The phase change material used in the experiments is 99 percent pure n-Docosane paraffin($C_{22}H_{46}$).

In the results, it is found that the velocity of phase change interface at the top of tube is faster than at the bottom of tube because of the effect of natural convection, and the distribution of velocity at the liquid region is little affected by the initial temperature of phase change material.

The velocity of phase change interface is slower as the initial temperature of phase change material is lower, and the effect of natural convection is larger as the aspect ratio of tube is larger.

In tendency of heat transfer phenomena, the experimental results were well corresponded with numerical results.

But there were a little disagreements between the results of experiment and numerical analysis because of the assumption of the constant volumetric expansion coefficient in numerical analysis.

NOMENCLATURE

g : gravitational acceleration vector
 H : height of domain
 k : thermal conductivity
 \underline{n} : unit outward normal vector
 p' : modified pressure
 P : dimensionless pressure, $p'H^2/\nu^2$
 R : dimensionless radial coordinate, r/H
 R_i : dimensionless interface radius, r_i/H
 R_w : dimensionless wall radius, r_w/H
 r : radial coordinate
 r_i : radius of interface
 r_w : radius of wall
 T : temperature
 T_i : initial temperature
 T_m : melting temperature
 T_w : wall temperature
 t' : dimensional time
 t : dimensionless time, $\nu t'/H^2$
 \underline{U} : dimensionless velocity, $\underline{u}H/\nu$
 \underline{u} : velocity
 Y : dimensionless distance coordinate, y/H

GREEK SYMBOLS

α : $1 + \beta^2$, value of α at the interface
 α_T : thermal diffusivity, $k/\rho c$
 β : function defined as $(1 - \eta)(\partial \delta / \partial Y) = (1 - \eta)(\partial \delta / \partial \xi)$
 β_v : thermal expansion coefficient
 δ : dimensionless thickness of liquid region, $R_w - R_i$
 δ_1 : dimensionless thickness of solid region, R_i
 η : transformed distance coordinate, $(R - R_w)/$ for melting problem
 θ : dimensionless temperature, $(T - T_m)/(T_w - T_m)$
 λ : heat of fusion per unit mass
 ν : kinematic viscosity, μ/ρ
 ξ : distance coordinate in transformed coordinate system, $\xi = Y$
 ρ : density
 τ : time coordinate in transformed coordinate system, $\tau = t$

1. 서론

최근에 태양열, 지열등과 같은 대체에너지의 활용 및 심야 잉여전력의 효율적인 이용과 관련하여 열에너지의 저장방법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다.

일반적으로 열에너지의 저장방법에는 단상물질을 축열매질로 하는 현열이용형 열에너지 저장방법과 상변화물질(P.C.M ; phase Change material)을 축열매질로 하는 잠열이용형 열에너지 저장방법이 있으며, 이중 잠열이용형 열에너지 저장방법이 단위 체적당 축열밀도가 높기때문에 효율적인 축열의 한 방법으로 주목받고 있다.¹⁻⁶⁾

용융열전달에 관한 수치해석적인 연구는 대부분 상변화물질의 초기온도가 용융점온도인 경우(no-subcooling)에 대하여 수행되어 왔으나, 실제 열에너지 저장장치에서의 열적 초기조건은 상변화물질의 초기온도가 용융점온도 이하인 경우(Subcooling)가 대부분이기 때문에 이에대한 해석적 연구가 요구되고 있는 실정이다.¹⁻³⁾

본 연구에서는 수직으로 설치된 원통형 축열조내에 채워진 상변화물질의 용융과정을 온도가 일정한 외벽을 열원으로하는 경우에 대하여 유한차분법(FDM)을 이용한 수치해석적인 방법과 실험적인 방법으로 상변화물질의 초기온도와 축열조의 형상비가 변화하는데 대하여 해석하였다. 즉 임의시간 경과 후의 축열조 내의 온도분포 및 속도분포, 상경계면의 형상을 해석적으로 구하고 이 해석 결과와 축열매질로 상변화물질(n-docosane paraffin, 용융온도 42.5°C, 시약용)을 사용하여 얻은 실험결과를 비교함으로써 상변화물질의 초기온도와 축열조의 형상비가 용융열전달에 미치는 영향을 규명하였다.

2. 실험 및 이론적 고찰

2.1 Modeling

본 연구에서는 Fig.2.1에 나타낸 것과 같이

높이가 H , 반경이 r 이고 온도가 일정한 벽면을 열원으로 하는 수직 원통형 축열조 내에서 상변화물질이 내향용융(Inward melting)될 때, 고상 및 액상영역의 온도분포와 액상영역의 속도분포, 고-액상경계면의 형상변화를 상변화물질의 초기온도와 축열조의 형상비(H/r_w)를 변화시켜 고찰하고자 한다. Model을 단순화하기 위하여 다음과 같은 가정하에서 수치해석을 수행하였다.

1. 상변화물질의 성질은 운동량방정식에서 부력항 밀도를 제외하고는 모두 일정하다.
2. 운동량방정식의 부력항에서 밀도는 온도의 선형함수이다.
3. 액상영역의 에너지방정식에서 점성확산과 압축일은 무시한다.
4. 상변화물질의 용융과정은 축열조의 반경 방향으로만 진행된다.
5. 열원이 되는 축열조 외벽의 온도는 일정하다.
6. 축열조 윗벽과 아랫벽을 통한 열전달은 없다.

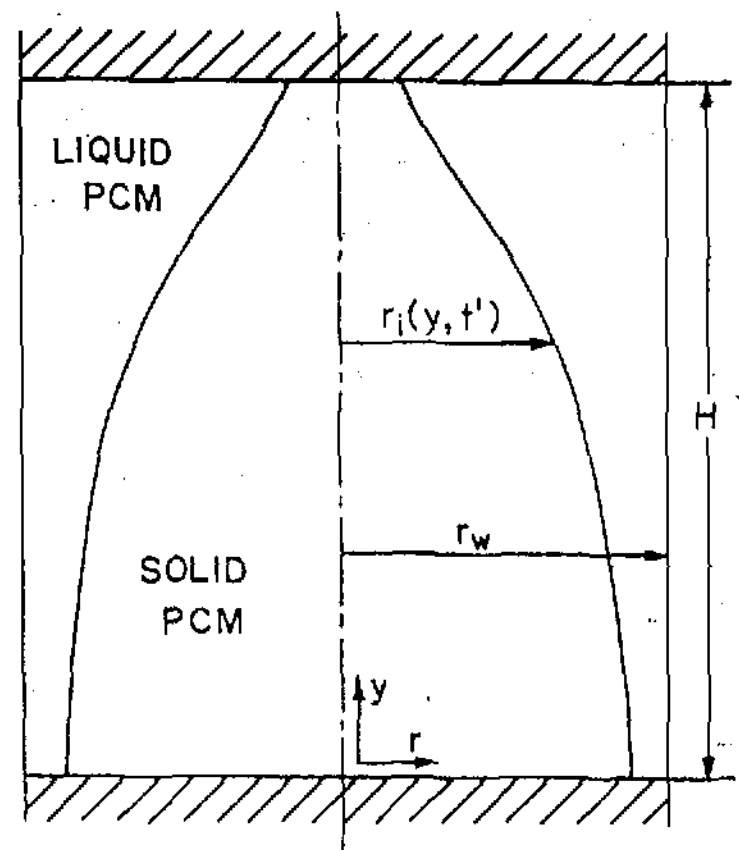


Fig.2-1 Schematic Illustration of Inward Melting of PCM

2.2 지배 방정식

용융열전달을 지배하는 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla' \cdot \underline{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \underline{u}}{\partial t'} + \underline{u} \cdot \nabla' \underline{u} = -\frac{\nabla' p}{\rho^*} + \nu \nabla'^2 \underline{u} + \underline{g} \frac{\rho}{\rho^*} \tag{2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t'} + \underline{u} \cdot \nabla' T = \alpha_r \nabla'^2 T \tag{3}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t'} = \alpha_r \nabla'^2 T \tag{4}$$

$$-K \underline{\eta} \cdot \nabla' T|_i = \rho^* \lambda \underline{\eta} \cdot \underline{U}_i - K \underline{\eta} \cdot \nabla' T|_s \tag{5}$$

식(1)~(3)은 각각 액상영역에서의 연속방정식(continuity eq.), 운동량방정식(momentum eq.), 에너지방정식(energy eq.)이며 식(4)는 고상영역의 에너지방정식, 식(5)는 상경계면에서의 열평형방정식(energy balance eq. at the interface)이다. 위 식에서 ()' 기호는 차원시간과 유차원 gradient operator를 나타내며, 식(5)에서 $\eta_{i,s}$ 는 액상 및 고상영역에서 상경계면의 위치를 나타내고, ρ^* 는 용융점온도(T_m)에서의 밀도이다.

<경계조건>

모든 벽면과 상경계면에서 속도는 영(zero)이다. 또한, 온도는

$$r = r_i \text{에서 } T = T_m$$

$$r = r_w \text{에서 } T = T_w$$

$$r = 0 \text{에서 } \partial T / \partial r = 0$$

$$y = 0 \text{ 및 } y = H \text{에서 } \partial T / \partial y = 0$$

이며, 상경계면에서의 열평형방정식에서 경계조건은

$$y = 0, y = H \text{에서 } \partial r_i / \partial y = 0 \text{ 이다.}$$

2.3 지배방정식의 무차원화

지배방정식을 일반화하기 위하여 대표길이를 H, 대표온도를 $(T_w - T_m)$ 으로하여 아래의 무차원변수를 정의하였다.

$$R = r / H, \quad Y = y / H,$$

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

$$t = \nu t' / H^2, \quad P = p' H^2 / \nu^2$$

위의 무차원 변수를 사용하여 지배방정식을 무차원화하면 무차원 지배방정식은

$$\nabla \cdot \underline{u} = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial \underline{u}}{\partial t} + \underline{u} \cdot \nabla \underline{u} = -\nabla p + \nabla^2 \underline{u} - \underline{g} G_{rn} \theta \tag{7}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \underline{u} \cdot \nabla \theta = \frac{1}{Pr} \nabla^2 \theta \tag{8}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{Pr} \nabla^2 \theta \tag{9}$$

$$\frac{Ste}{Pr} \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial R} \right\}_s - \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial R} \right\}_i \left[1 + \left(\frac{\partial R_i}{\partial Y} \right)^2 \right] = \frac{\partial R_i}{\partial t} \tag{10}$$

이 된다. 이때 무차원화된(경계조건)은 다음과 같다.

$$R = R_i \text{에서 } \theta = 0$$

$$R = R_w \text{에서 } \theta = 1$$

$$R = 0 \text{에서 } \partial \theta / \partial R = 0$$

$$Y = 0 \text{ 및 } Y = 1 \text{에서 } \partial \theta / \partial Y = 0$$

$$\text{모든 경계에서 } \underline{U} = 0$$

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

2.4 좌표변환

본 연구에서는 새로운 좌표계를 액상영역과 고상영역 각각에 대하여 설정하였는데, 각 좌표는

액상영역에 대하여

$$\eta = (R - R_i) / \delta, \quad \delta = R_w - R_i, \quad \xi = Y, \quad \tau = t$$

고상영역에 대하여는

$$\eta = R / \delta_1, \quad \delta_1 = R_i, \quad \xi_1 = Y, \quad \tau = t$$

로 정의 하여 적분형 지배방정식과 새로운 η - ξ 좌표계의 경계조건을 구하였다.

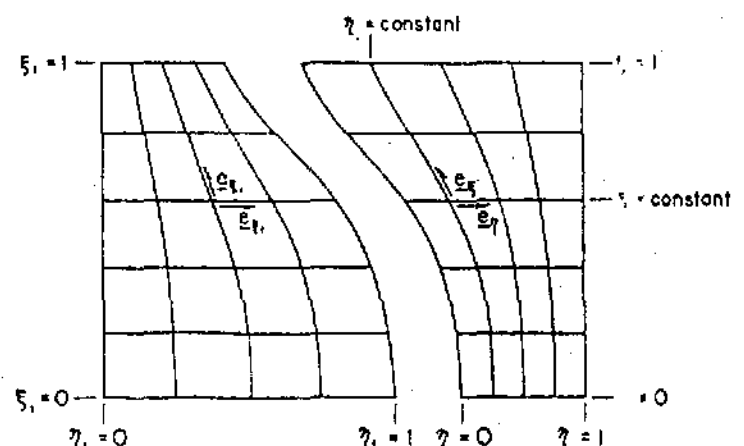


Fig. 2-2 Solid and Liquid Domain With Superimposed Coordinate System

2.5 수치해석

본 연구의 해석에서 온도장과 stream function은 scalar grid를, 속도장은 staggered grid를 사용하였으며, power-law scheme을 이용하여 계산하였다.

일반적으로 운동량방정식에서 계산된 속도는 연속방정식을 만족하지 않으므로 압력 보정을 반복 수행하여 연속방정식과 운동량방정식의 연립해를 구하는 방법을 사용하였다.

2.6 실험장치와 실험방법

본 실험 장치의 주요부분은 수직 원통형 PCM 용기, 저온 항온수조(100 l), 고온 가열 수조수조(100 l), 온도조절장치(thermo controller), 온수 공급장치(pump. PDB-86)등이며 기타 온도 측정장치(data logger), 질량측정기(천칭), 등으로 구성되어 있다. 상변화물질은 용융점온도가 42.5°C인 n-docosane paraffin(C₂₂H₄₆)을 사용하였다. Test section 용기의 재질은 동관을 사용하였으며 내경은 104mm, 높이는 208mm, 두께는 2mm로 형상비(H/r_w)가 4이다. 열전대의 위치는 Y=1.0H의 위치인 PCM 상부표면에 1개, 자연대류의 발생이 많고 상경계면의 이동이 심한 Y=0.75H 위치에 7개, Y=0.5H에 5개, Y=0.25H 위치에 4개, Y=0.0H에 1개를 설치하여 용기내에 총 18개를 고정시켰다. PCM 상부표면과 단열막 사이에는 25mm의 단열 공기층(air space)을 두어 PCM의 용융시 체적팽창에 대비하였다. Test section의 개략도와 실험방법의 자세한 내용은 참고문헌(2)에 나타나 있다.

3. 결과 및 고찰

수직 원통형 축열조 내에 채워진 상변화물질의 용융과정에서 액상영역의 속도장과 액상 및 고상영역의 온도장, 고-액 상경계면의 형상변화에 대하여 실험 및 수치적으로 해석한 결과를 비교 검토하고자 한다.

3.1 온도 분포

Fig.3.1은 상변화물질의 초기과냉도(T_m-T_i)를 10°C로 하고 벽면과열도(T_w-T_m)를 10°C로 하였을때 상부(Y/H=0.75)인 위치에서 측정 한 온도분포를 나타낸 것이다.

또한 이러한 실험치와 수치해석결과치를 비교하였고, 각 조건에 따른 수치해석 결과치는 초기과정에는 실험값과 잘 일치하였으나, 시간이 경과할수록 수치해석 결과치가 실험에 의한 값보다 조금 낮게 나타났다.

이것은 수치해석에서는 용융시 상변화물질의 체적팽창을 고려하지 않은것 때문인 것으로 사료된다.

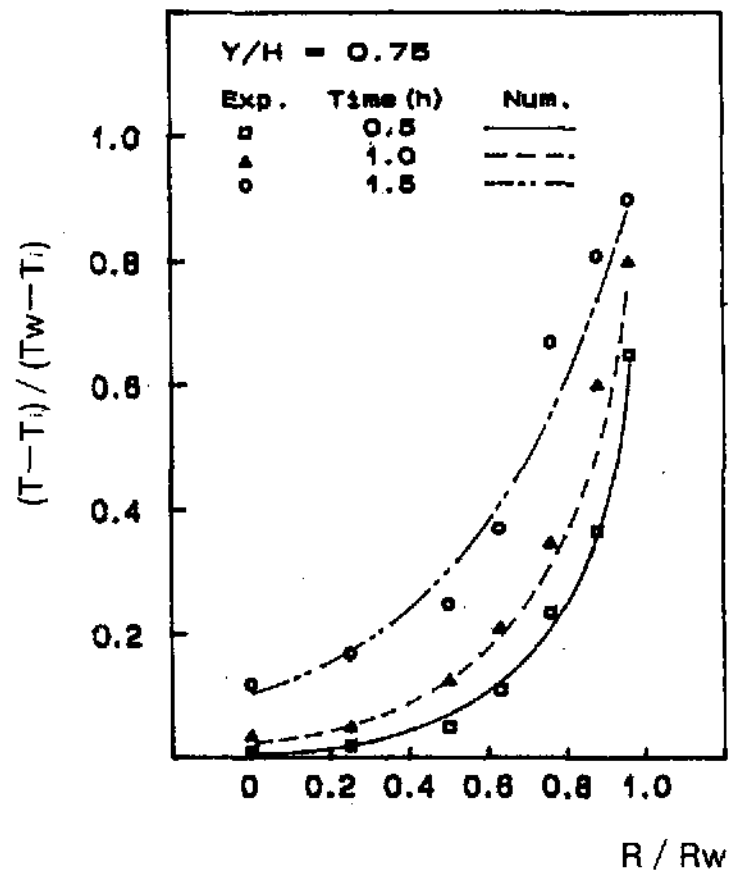


Fig. 3-1 Temperature Profiles at Y/H=0.75
T_w=52.5°C, T_i=32.5°C(Subcooling.)

Fig.3.2는 초기과냉도(T_m-T_i)가 0°C이고 벽면과열도(T_w-T_m)가 10°C인 no-subcooling 상태의 용융실험을 행한것으로 Fig.3.1에 비하여 벽면에서의 온도확산이 빠르게 진행되었다.

이것은 no-subcooling 상태가 subcooling 상태보다 용융이 더 잘 이루어짐을 의미하는 것

로 타 연구자의 결과¹⁾와 일치하는 것으로 나타났다.

그리고 해석결과와 실험값의 오차는 시간이 경과함에 따라 subcooling의 경우보다 더 크게 나타났다. 이것은 온도확산이 subcooling 경우보다 잘 일어남으로 인하여 체적팽창된 액상부분의 영역이 상변화물질 상부 표면을 덮음으로써 상부표면 전체가 열원으로 작용하고 있기 때문인 것으로 생각된다.

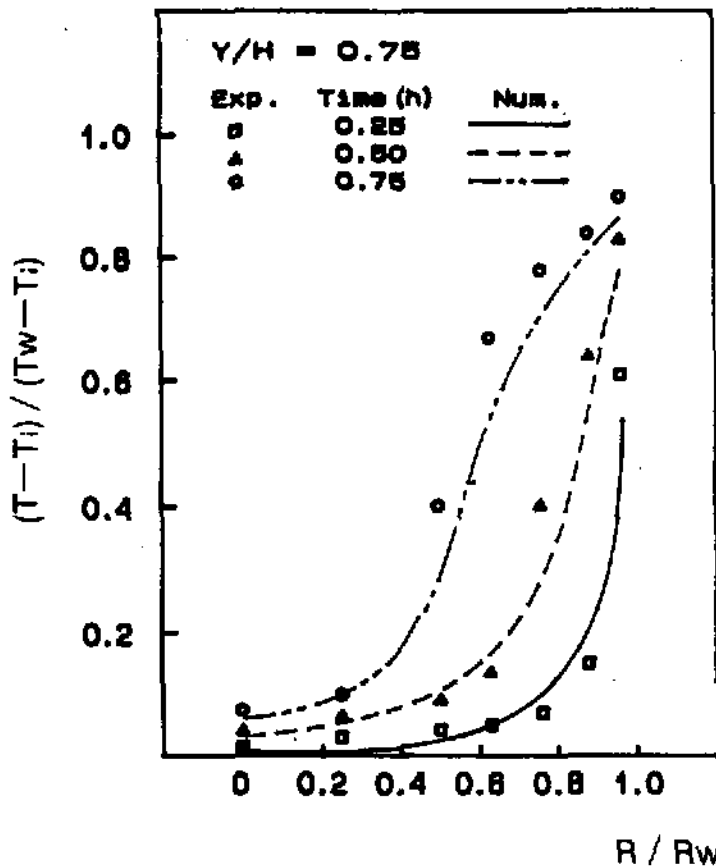


Fig.3-2 Temperature Profiles at $Y/H=0.75$
 $T_w=52.5^\circ\text{C}$, $T_i=42.5^\circ\text{C}$
 (Nosubcooling)

3.2 속도 분포

Fig.3.3은 초기과냉도($T_m - T_i$)가 10°C 이고 축열조의 형상비 (H/r_w)가 4인 경우에 대하여 액상영역의 상부($Y=0.99$)와 하부($Y=0.075$)에서의 시간경과에 따른 η 방향의 속도분포를 나타낸 것이다.

상부에서의 η 방향 속도는 시간이 경과함에 따라 상경계면($\eta=0$)부근이 벽면($\eta=1$)부근보다 활발해지는 것으로 나타났고, 하부에서의

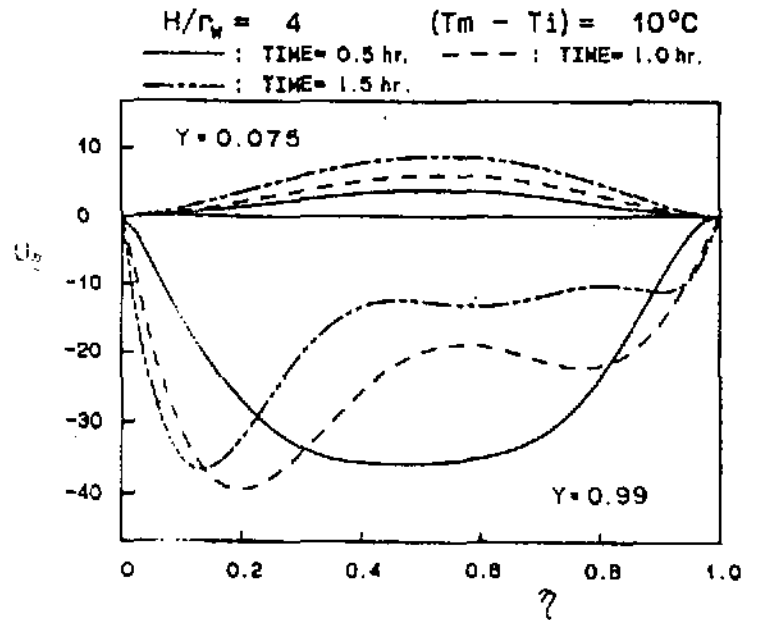


Fig.3-3 Horizontal Profiles of Horizontal Velocity; Effect of Increment of Time

η 방향 속도는 $\eta=0.5$ 를 중심으로 대칭인 형태를 보이며 시간에 따른 속도분포 형태의 변화는 거의 없으나 유동이 활발해지는 것으로 나타났다.

Fig.3.4와 Fig.3.5는 각각 액상영역의 상부($Y=0.98$)와 하부($Y=0.14$)에서의 시간 경과에 따른 Y 방향 속도분포를 나타낸 것이다. Fig.3.4에서 나타난바와 같이 상부에서의 Y 방향 속도는 시간이 경과 함에 따라 상경계면 부근이 벽면부근보다 활발해지고 하부에서의 Y 방향속도

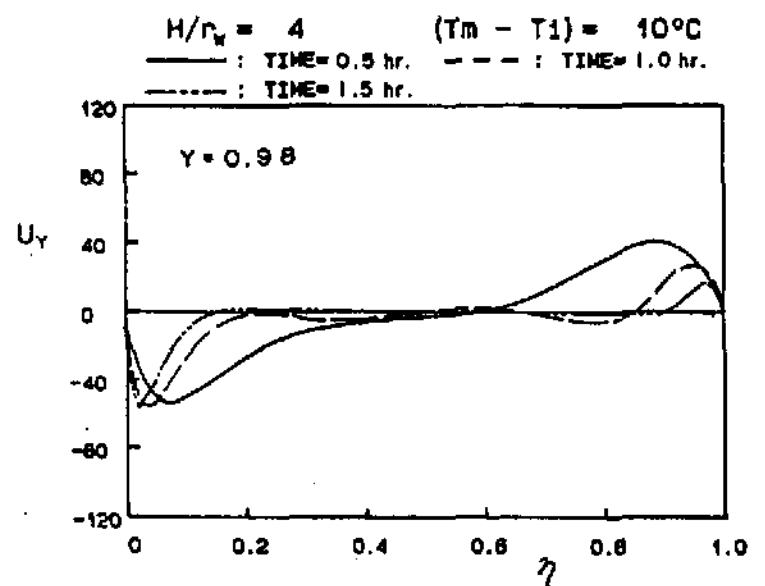


Fig.3-4 Horizontal Profiles of Vertical Velocity At $Y=0.98$; Effect of Increment of Time

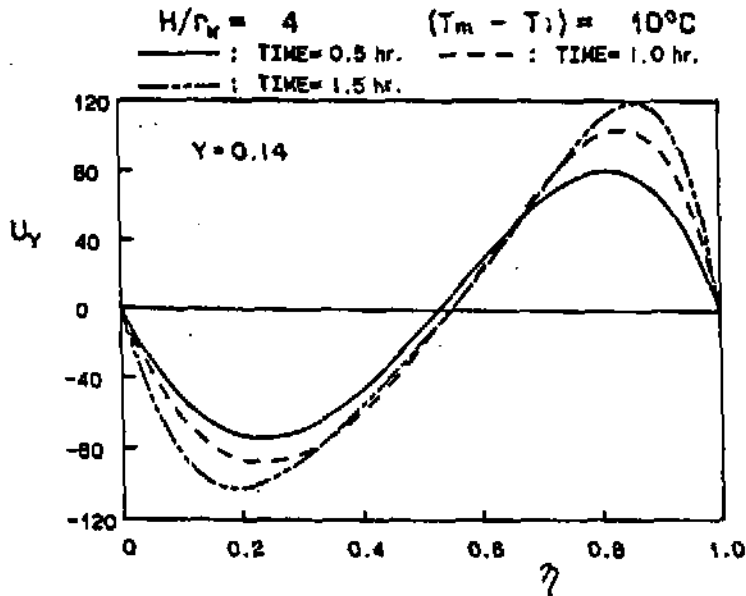


Fig.3-5 Horizontal Profiles of Vertical Velocity At $Y=0.14$; Effect of Increment of Time

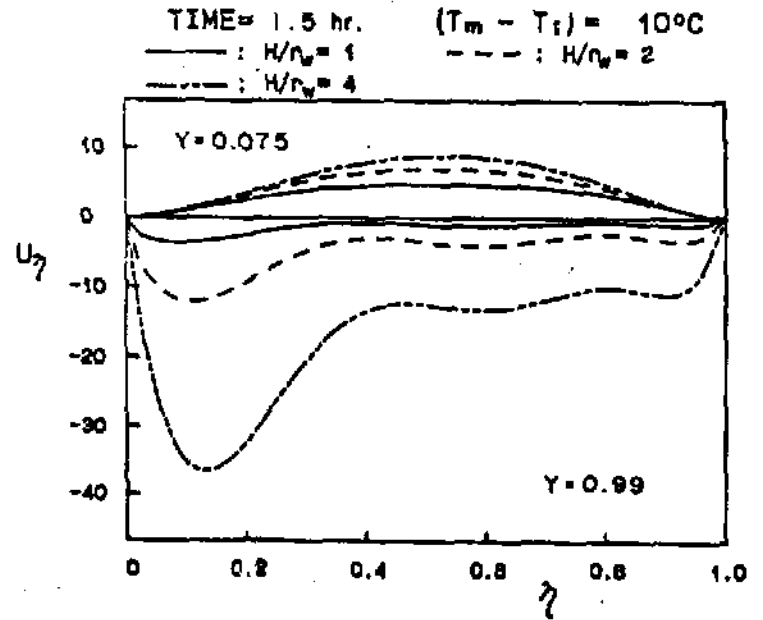


Fig.3-7 Profiles of Horizontal Velocity; Effect of H/r_w

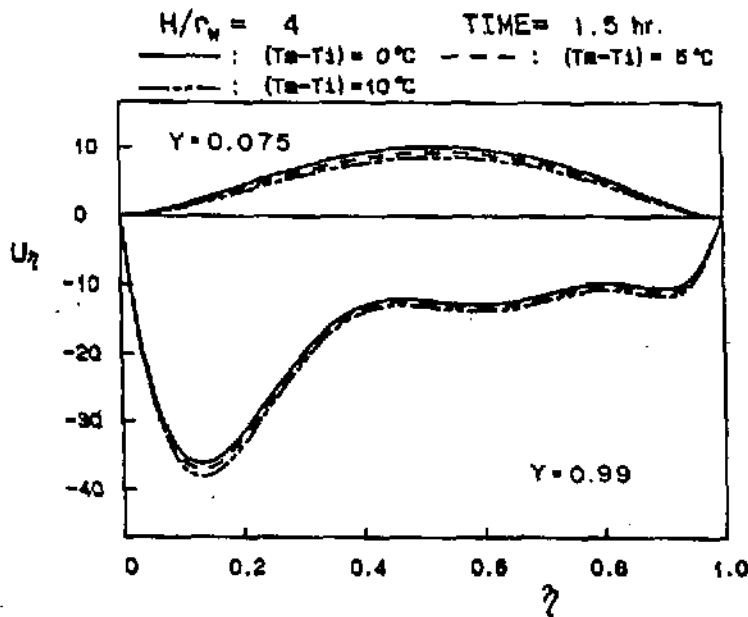


Fig.3-6 Profiles of Horizontal Velocity; Effect of $(T_m - T_i)$

는 Fig.3.5와 같이 시간이 경과함에 따라 활발해지지만 속도분포의 상태변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 이것은 r 방향 속도의 경우와 잘 일치하고 있다.

Fig.3.6은 상변화물질의 초기온도의 변화에 따르는 액상영역 상부에서의 r 방향 속도분포를 나타낸 것으로, 상부 및 하부에서 r 방향 속도분포는 상변화물질의 초기온도의 영향을 거의 받지 않고, 상변화물질의 용융점온도와 초기온도의 차가 커짐에 따라 상부에서의 속도는 빨라지고 하부에서는 느려지게 된다.

Fig.3.7은 축열조의 형상비(H/r_w)에 따르는 액상영역 상·하부에서의 r 방향 속도분포이며, 형상비가 커질수록 유동이 활발해지는 것으로 나타났다.

3.3 상경계면의 형상

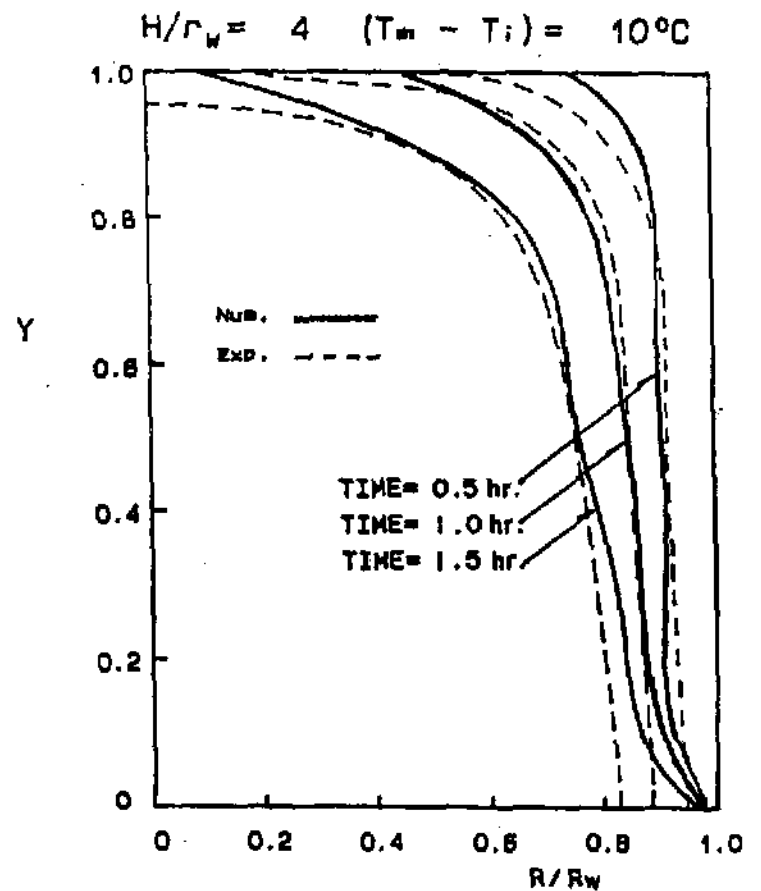


Fig.3-8 Profiles of Interface; Effect of Increment of Time

Fig.3.8은 축열조의 형상비(H/r_w)가 4이고 초기과냉도($T_m - T_i$)가 10°C 인 경우, 시간 경과에 따른 상경계면의 형상을 나타낸 것이다. 축열조 상부에서는 상변화물질의 용융속도가 빠르나 축열조 하부에서는 매우 느리게 나타났으며, 해석적인 결과와 실험결과를 비교하여 보면 상경계면의 전진경향이 유사한 것으로 나타났다.

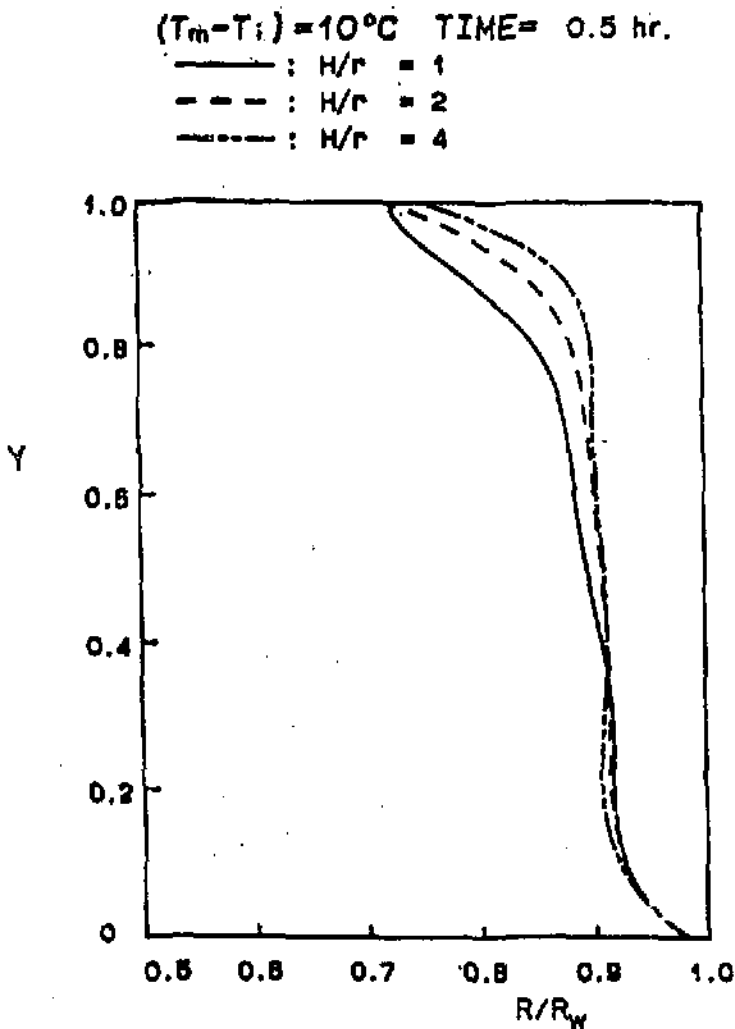


Fig.3-9 Profiles of Interface; Effect of H/r_w

Fig.3.9는 초기과냉도($T_m - T_i$)가 10°C 이고 경과시간이 0.5hr일때 축열조의 형상비(H/r_w)의 변화에 따른 상경계면의 형상을 표시한 것으로 축열조 하부에서는 축열조의 형상비가 클수록 상경계면의 전진이 빠르게 나타나나, 상부에서는 축열조의 형상비가 작을수록 빨라지는 것으로 나타났다. 그리고 축열조의 형상비가 클수록 축열조 상부에서의 상경계면 형상이 급격히 변화하는 것으로 나타났다.

3.4 용융율

Fig.3.10은 축열조의 형상비(H/r_w)가 4이고 초기과냉도($T_m - T_i$)가 0°C , 10°C 인 경우, 각 벽면온도에 따른 상변화물질의 용융율을 수치해와 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 초기과냉도가 10°C 인 경우에는 실험치와 수치해가 거의 유사하게 나타나고 있으며, 용융이 진행될수록 수치해에 의한 용융율이 실험치보다 적게 나타나고 있다. 또한, 이러한 수치해와 실험치의 오차는 초기과냉도가 없는 경우에 더 크게 나타나고 있다. 또한, 이러한 수치해와 실험치의 오차는 초기과냉도가 없는 경우에 더 크게 나타나고 있는데, 이는 시간에 따른 용융율이 증가할때 체적팽창률의 변화가 커지므로 이로 인한 수치해의 오차가 커진 결과로 사료된다.

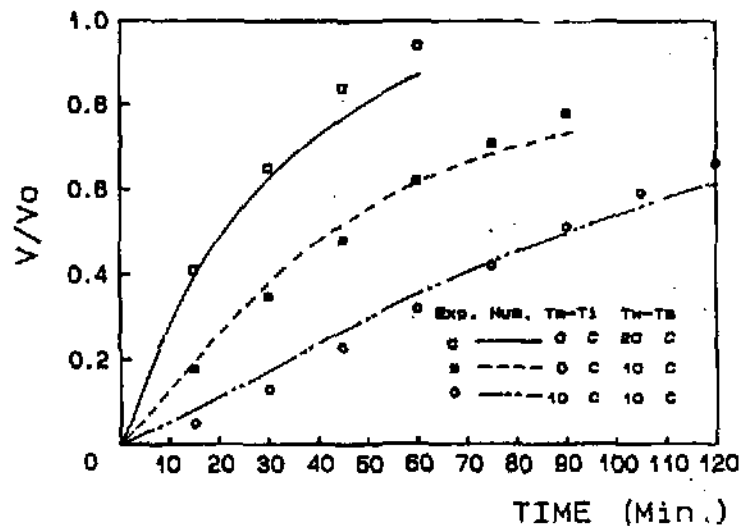


Fig.3-10 Timewise Variation of Molten Volume Fraction

4. 결론

수직으로 설치된 원통형 축열조 내에 채워진 상변화물질의 용융과정을 온도가 일정한 외벽을 열원으로 하는 경우에 대하여 액상영역의 속도장과 액상 및 고상영역의 온도장, 그리고 고-액상경계면의 형상변화를 유한차분법을 이용하여 해석한 결과를 실험을 통하여 검증한바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상경계면의 형상은 액상영역의 자연대류

로 인하여 상부에서는 넓고 하부에서는 좁은 형태를 나타내고, 실험의 경우에 있어서는 상변화물질의 부피팽창으로 상부경계면이 올라가게 된다.

2. 용융이 시작된 후부터 시간이 경과함에 따라 액상영역에서 상경계면으로의 열전달은 축열조의 하부보다 상부에서 잘 이루어진다.

3. 액상영역에서의 유동은 상변화물질의 초기온도의 영향을 거의 받지않는다.

4. 축열조의 형상비가 커질수록 액상영역에서의 유동이 활발해진다.

5. 용융율(V/V_0)은 subcooling조건시 시간의 경과에 따라 거의 직선적으로 증가하고 있으며 no-subcooling조건에서는 시간의 경과에 따라 증가율이 감소한다.

6. 실험적인 결과와 해석적인 결과가 정성적으로 대부분 일치하고 있으나, 수치해석시에 체적팽창계수를 일정하게 가정함으로 인하여 약간의 오차가 발생한다.

부기 :

본 연구는 1989년도 학술진흥재단의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝혀두며 이에 감사한다.

REFERENCE

1. E.M.Sparrow and J.A.Broadbent, "Inward melting in a vertical tube which allows free expansion of the phase-change medium", ASME J. of Heat Transfer, Vol.104, pp.309-315, 1982.
2. 임장순, 손화승, 황태인, 이채문, 최국광, "상변화물질을 사용한 축열조에서의 열전달," 한국태양에너지 학회지 9(1) pp.53-61, 1989.4
3. M.Bareiss and H.Beer, "Influence of natural convection on the melting process in a vertical cylindrical enclosure", Letters in Heat and Mass Transfer, Vol.7, pp.329-338, 1980.
4. E.M.Sparrow and T.A.Myrum, "Inclination-induced direct-contact melting in a circular tube", ASME J. of Heat Transfer, Vol.107, pp.533-540, 1985.
5. C.J.Ho and R.Viskantan, "Heat transfer during inward melting in a horizontal tube", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.27, No.5, pp.705-716, 1984.
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.
7. C.J.Ho and R.Viskanta, "Heat Transfer during melting from an isothermo vertical wall", ASME J. of Heat Transfer, Vol.106, pp.12-19, 1984.