

## 수평원관내 체적변화를 고려한 얼음의 용융시 전열특성에 관한 연구

조 남 철<sup>†</sup>, 김 동 춘\*, 이 채 문\*\*, 임 장 순\*\*\*

안산공과대학 기계공학과, \*경문대학 기계과, \*\*유한대학 기계과, \*\*\*인하대학교 기계공학과

### Melting of Ice Inside a Horizontal Cylinder under the Volume Change

Nam Cheol Cho, Dong Choon Kim<sup>\*</sup>, Chae Moon Lee<sup>\*\*</sup>, Chang Soon Yim<sup>\*\*\*</sup>

Department of Mechanical Engineering, Ansan College of Technology, Ansan 425-792, Korea

<sup>\*</sup>Department of Mechanical Engineering, Kyungmoon College, Pyoungtaek 459-070, Korea

<sup>\*\*</sup>Department of Mechanical Engineering, Yuhan College, Pucheon 422-749, Korea

<sup>\*\*\*</sup>Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received April 11, 2001; revision received November 3, 2001)

**ABSTRACT:** Heat transfer phenomena during melting process of the phase change material (ice) was studied by numerical analysis and experiments. In a horizontal ice storage tube, the natural convection caused an increase in melting rate. However, the reduction of the heating surface area caused a decrease in melting rate. Therefore, during the melting process of ice in a horizontal cylinder, the reduction of the heating surface area should be considered. Under the same heating wall and initial water temperature condition, the melting rate became higher for  $V_s/V_{tot}=0.545$  than that for  $V_s/V_{tot}=1.00$  due to the difference in the reduction of heating surface area. A modified melting model considering the equivalent thermal conductivity of liquid phase and volume reduction was proposed. The results of the model were compared with the measured values and found to be in good agreement.

**Key words:** Equivalent thermal conductivity(상당 열전도율), Ice storage(빙축), Melting(용해), Phase change material(상변화물질)

#### 기 호 설 명

C : 비열 [kJ/kg°C]  
 $F_s$  : 전열면 감소인자,  $\psi/\psi_i$   
g : 중력가속도 [m/s<sup>2</sup>]  
K : 열전도율 [W/mK]

$K_e$  : 유효 열전도율, 식(3)  
 $K_{eq}$  : 상당 열전도율, 식(2), (5), (6), (7)  
L : 원관과 상경계면사이의 간격 [m]  
M : 질량 [kg]  
 $\overline{Nu}$  : 평균 Nusselt 수  
R, r : 원관반경, 반경좌표 [m]  
 $Ra_L$  : Rayleigh 수, 식(4), (6)  
T : 온도 [°C]  
V : 체적 [m<sup>3</sup>]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-031-490-6052; fax: +82-031-490-6050

E-mail address: chonc@ansantc.ac.kr

## 그리스 문자

$\alpha$	: 열확산율
$\beta$	: 체적탄성 계수
$\lambda$	: 용해열량 [kJ/kg]
$\nu$	: 동점성 계수
$\rho$	: 밀도
$\tau, \bar{\tau}$	: 시간, 무차원시간, 식(4)
$\psi$	: 각도

## 하첨자

i	: 초기
in	: 상경계면
l	: 액상
m	: 용융
s	: 고상
tot	: 전체(총)
w	: 벽면

## 1. 서 론

물-얼음의 상변화 과정시 전열특성에 관한 연구는 빙축열 시스템의 설계에서 뿐만 아니라, 상변화 과정을 해석해야 하는 구조 및 용접 등의 공학분야, 저온 마취 및 장기 냉동보존 등의 의학분야, 식품 냉동 및 냉동 건조 등의 농수산 분야, 마그마 및 빙산의 거동 등의 지구 물리학 분야에서 이용된다. Neumann<sup>(1)</sup> 이 물의 동결문제를 이론적으로 해석(엄밀해)한 이래 Sparrow et al.<sup>(2,3)</sup>, Viskanta et al.<sup>(4,5)</sup> 은 파라핀과 게르마늄과 같은 상변화 물질의 용융 및 응고과정시의 전열특성을 실험적인 방법과 해석적인 방법으로 연구하여 왔다. 최근에는 Fomin and Saitoh<sup>(6)</sup>, Ghasemi and Molki<sup>(7)</sup> 등이 고정되어있지 않은 상변화물질의 용융시 잔여 고상의 하강 및 이에 따르는 접촉용융에 관한 연구가 진행되었다. 그러나, 상변화물질로서 물은 여타의 유·무기 물질과는 달리 액상의 밀도가 고상의 밀도보다 커 동일질량에 대해 응고체적이 용융체적보다 크며, 4°C 부근에서 최대 밀도점이 존재하여 얼음의 용융시 액상 내 자연대류 유동이 매우 복잡하게 나타나는 특성을 갖고 있다.

근래에 들어 물-얼음의 상변화 과정은 Ho and

Chu<sup>(8)</sup>, Rieger and Beer<sup>(9)</sup>, Brewster and Gebhart<sup>(10)</sup>, Fukusako and Yamada<sup>(11)</sup> 등의 여러 연구자들에 의해 활발히 연구되고 있으며, 최근 배관내 유동하고 있는 물의 결빙 및 응고열전달에 대한 연구도 활발하다.<sup>(12,13)</sup> 그러나, 그동안 얼음의 용융열전달에 대한 연구는 상변화시 액상인 물 영역에서의 자연대류 열전달 기구를 규명하는데 중점을 두었으며, 실제 발생하는 상변화물질의 체적변화에 대한 영향을 고려한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

이에 본 연구에서는 수평원관 내 얼음이 안쪽으로 용융될 때에 얼음의 용융속도를 증가시키는 원인으로 작용하는 액상내 자연대류 열전달의 영향뿐만 아니라, 용융속도를 저하시키는 원인으로 작용하는 상변화 물질의 체적축소에 따르는 전열면 감소의 영향을 함께 고려하는 수정 용융모델을 제시하여 이를 수치적인 방법으로 구한 후에 그 결과를 실험결과와 비교 검토하고자 한다.

2. 상당열전도율( $K_{eq}$ )

Kuehn and Goldstein<sup>(14,15)</sup>은 이중 수평원관내에서 발생하는 각종 유체의 자연대류 열전달 특성을 연구하여 액상 내 자연대류에 의한 열전달 기구의 세기는 Ra 수와 이중 원통 사이의 반경과 길이차에 의한 함수임을 밝혔다. 또한, Hirata and Nishida<sup>(16)</sup>는 이러한 연구 결과를 이용하여 수평원관내 상변화물질의 용융시 액상 내에서의 자연대류 열전달을 고려하는 유효 열전도율(effective thermal conductivity:  $K_e$ )을 다음과 같이 정의하여 상변화물질의 용융과정을 해석하였다.

$$\overline{Nu} = [(\overline{Nu}_{cond.})^{15} + (\overline{Nu}_{conv.})^{15}]^{1/15} \quad (1)$$

$$K_{eq}(\tau) = \overline{Nu} / \overline{Nu}_{cond.} \quad (2)$$

$$K_e(\tau) = K_{eq}(\tau) \cdot K_l \quad (3)$$

식(1), (2)에서  $\overline{Nu}_{cond.}$ 는 액상 내 대류열전달을 무시하고 전도 열전달만을 고려하였을 때의 평균 Nusselt 수이며,  $\overline{Nu}_{conv.}$ 는 액상 내 대류 열전달을 고려하였을 때의 평균 Nusselt 수이다. 식(2),

(3)에서  $K_{eq}(\tau)$ 는 액상내 상변화물질의 자연대류에 의한 열전달에 상응되는 상당 열전도율(equivalent thermal conductivity of natural convective liquid)이다. Hirata and Nishida<sup>(16)</sup>는 수평원관내 파라핀 및 물 등의 용융시 용융된 액상 상변화물질에서의 상당 열전도율을 다음과 같은 열전달 관계식(4)를 적용하여 수치해석한 후 그 결과를 실험결과와 비교·검토하였으며 수치해석 결과치가 실험치와 비교적 일치하였다고 발표하였다.

$$K_{eq}(\tau) = 0.228 c^* Ra_L^*(\tau)^{\frac{1}{4}} \left[ 1 - \frac{r_{in}(\tau)}{R} \right]^{\frac{1}{4}}$$

with  $c^* = 0.9$ ,  $L = R - r_{in}(\tau)$ , (4)

$$Ra_L^* = \frac{g\beta(T_w - T_m)L^3}{(\alpha\nu)}, \quad \tau = \frac{K(T_w - T_m)\tau}{\rho\lambda R^2}$$

그러나, Hirata and Nishida는 그의 논문에서 그가 제시한 식(4)는 상변화물질로서 물을 사용하는 경우에는 벽면온도가 10°C 이상인 조건에서만 사용할 수 있다고 밝혔다. 이러한 원인으로 물은 최대 밀도점이 4°C 부근에 존재하기 때문에 벽면온도를 4°C 이상으로 하여 얼음을 용융시킬 경우에는 액상 내 유동역전이 발생되기 때문이며, 이에 따른 자연대류 열전달의 영향이 벽면 온도 조건에 따라 서로 다르게 작용된다.

물의 최대 밀도점 4°C 전후에서의 밀도 역전에 의한 자연 대류 열전달 기구에 관한 연구로는 Seki et al<sup>(17)</sup> 과 Nguyen et al<sup>(18)</sup> 이 이중 수평원통내 물의 가열 및 냉각 조건 변화에 따르는 전 열특성을 연구하여, 액상 내 물의 평균  $\overline{Nu}$  수는 이중 원통 내에서 내측 원통 벽면의 온도가 0°C로 일정할 때에 외측 원통 벽면 온도가 4°C인 조건에서 최대가 되며, 외측 벽면 온도가 6°C ~ 7°C 부근인 조건에서 최소가 됨을 발표하였다.

Rieger and Beer<sup>(9)</sup>도 그의 논문에서 유사한 연구 결과를 보고한 바 있으며, 그는 수평원관내 얼음의 내향 용융시 벽면 온도가 4°C인 조건에서는 벽면 주위의 물이 하향으로 유동되는 일방향의 유동이 활발하나, 벽면 온도가 4°C 이상에서 10°C 사이인 조건에서는 용융이 진행됨에 따라 물의 온도 4°C 이상인 영역과 물의 온도 4°C 이하인 영역에서 두가지 형태의 서로 다른 유동

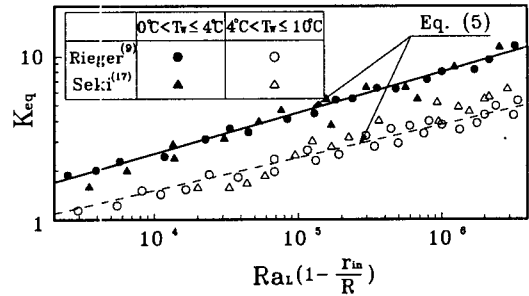


Fig. 1 Correlation (Eq.5) for  $K_{eq}$  as a function of the  $Ra_L(1-r_{in}/R)$  by previous investigators.

이 발생되어 벽면온도가 8°C 인 경우에서 액상내 자연대류에 의한 열전달이 미약하다고 하였다.

이와 같이 수평원관내 상변화물질로 물을 사용할 경우에 벽면 가열온도가 10°C 이하인 조건에서는  $Ra_L$  수에 따라 선형적으로 변화되는 Hirata and Nishida 가 제시한 상당 열전도율( $K_{eq}$ )에 관한 식(4)를 이용하여 수치 해석을 행하면 그 수치해석의 결과값이 실험치와 오차가 발생하게 된다. 그러므로 수평원관내 얼음의 내향 용융시 벽면 온도가 10°C 이하인 경우에는 벽면 가열 온도 조건, 즉 물의 최대 밀도점 4°C 전후로 하여 액상내 상변화물질의 상당 열전도율( $K_{eq}$ )은 달라 나타나기 된다. 이에 본 연구에서는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 액상 내 자연 대류에 의한 열전달의 크기를 나타내는 상당 열전도율의 계수들은 벽면 온도 4°C 를 전후하여 Rieger and Beer<sup>(9)</sup>, Seki et al<sup>(17)</sup>의 연구결과와 비교·검토하여 식(5)와 같이 도출하였다.

$$K_{eq}(\tau) = c' Ra_L(\tau)^n \left[ 1 - \frac{r_{in}(\tau)}{R} \right]^n \quad (5)$$

with  $c'=0.252, n=0.25$  (at  $0^\circ\text{C} < T_w \leq 4^\circ\text{C}$ )

$c'=0.238, n=0.20$  (at  $4^\circ\text{C} < T_w \leq 10^\circ\text{C}$ )

식(5)는 물의 용융진행에 따르는 체적축소에 의한 전열면 감소의 영향을 고려하지 않은 경우에서의 액상 내 상당 열전도율을 나타낸 것이다. 이와 같이 자연대류에 의한 영향을 상당 열전도

울에 포함하게 되면 자연대류를 해석에 직접 포함시키는 방법보다 유체유동 및 국부온도 등의 미시적인 결과를 예측할 수는 없으나 에너지 수 및 열성능 평가등의 거시적인 예측을 보다 신속하고 용이하게 수행 할 수 있다

### 3. 이론적 해석

#### 3.1 용융모델과 전열면 감소인자(Fs)

수평원관내 얼음의 내향 용융과정시 용융 항상 효과로 작용되는 액상 내 자연대류에 의한 열전달의 영향과 용융진행에 따라 용융 저하 효과로 작용되는 수평원관내 상부에서의 전열면 감소의 영향을 상당 열전도율에 함께 고려하였을 때 본 수치해석에서 채택한 수정 용융모델을 Fig. 2 에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 수치 해석에서 채택한 용융모델에서는 시간경과에 따라 용융되는 실선으로 표시한 얼음의 실제체적을 굵은 파선으로 표시한 수치 해석상의 얼음의 체적으로 동일하게 대체할 수 있다. 따라서 수평원관내 얼음의 내향 용융 과정시에는 액상인 물의 상당열전도율에 액상내 자연대류에 의한 열전달 효과뿐 아니라 얼음 상부에서의 전열면 감소 효과를 나타내는 인자( $F_s$ )를 포함시켜야 하며, 상당 열전도율은 다음과 같은 상관 관계식(6)으로 나타낼 수 있다.

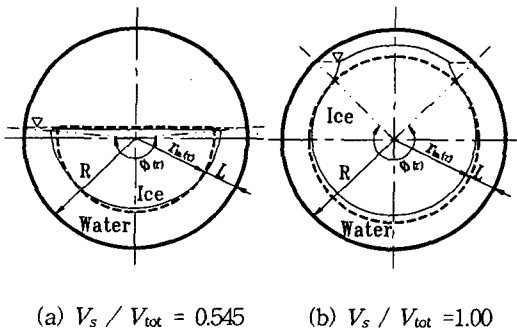


Fig. 2 Schematic illustration of modified melting model.

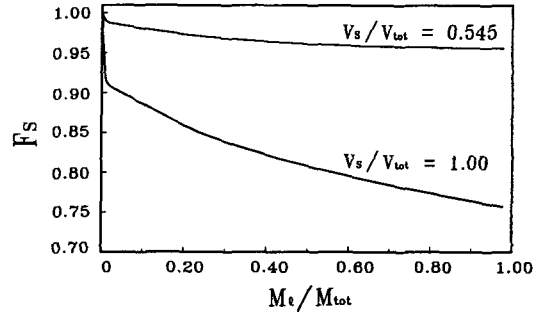


Fig. 3 Variation of decreasing factor( $F_s$ ) of heating surface area as a function of the molten mass fraction( $M_t/M_{tot}$ ) for  $V_s/V_{tot}=0.545$  and 1.00.

$$K_{eq} = f\left(Ra_L, \frac{r_{in}}{R}, F_s\right) \quad (6)$$

$$Ra_L = \frac{g\beta_T |T_w - T_m| \rho L^3}{\alpha \nu}, \quad F_s = \frac{\phi}{\phi_i}$$

Fig. 3 은 수평원관내 얼음의 내향 용융시 얼음의 초기 체적비( $V_s/V_{tot}$ )가 각각 1.00, 0.545 인 경우에서 얼음의 용융 진행에 따르는 즉, 용융율( $M_t/M_{tot}$ ) 증가에 대한 전열면 감소 효과를 나타내는 인자( $F_s$ )의 값을 나타낸 것이다. 얼음의 초기 체적비( $V_s/V_{tot}$ )가 1.00 으로 채워져 있을 경우 용융이 진행됨에 따라  $F_s$  가 급속하게 감소하게 되어 용융 완료시에는 약 0.75 값을 갖게 되며, 얼음의 초기 체적비( $V_s/V_{tot}$ )가 0.545 로 채워져 있을 경우에는 용융진행에 따라  $F_s$  가 완만히 감소하게 되어 용융 완료시에는 약 0.955 값을 갖게 된다. 이로부터 수평원통형 빙축열조내 얼음의 내향 용융시에는 축열조의 기하학적 형상에 기인되는 영향으로 얼음의 초기 체적비( $V_s/V_{tot}$ ) 변화에 따라 전열면 감소의 영향이 각기 달리 나타남을 알 수 있다.

이에 본 수치 해석적인 연구에서는 상당 열전도율( $K_{eq}$ )에 관한 앞절의 식(5)에 용융 진행에 따르는 전열면 감소효과를 나타내는 인자( $F_s$ )를 포함하여 아래의 식(7)을 제안하였다.

$$K_{eq}(\tau) = c' Ra_L(\tau)^n \left[ 1 - \frac{r(\tau)}{R} \right]^n F_s(\tau) \quad (7)$$

### 3.2 지배방정식 및 경계조건

용융모델을 단순화하기 위하여 다음과 같은 가정하에서 수치해석을 수행하였다. ; i) 물의 밀도차에 의한 자연대류 효과와 용융진행에 따르는 전열면 감소효과는 액상인 물의 상당 열전도율에 반영한다, ii) 물과 얼음의 각종 물성치는 일정하다, iii) 상변화물질의 용융과정은 축열조의 반경방향으로만 진행된다, iv) 용융진행시 공기에 노출된 얼음 상단부에서의 열전달은 무시한다.

수평원관내 얼음의 내향용융 과정에 관한 지배방정식을 앞 절의 가정 조건하에서 원통 좌표계로 도출하면 액상과 고상에서의 에너지방정식은 각기 식(8), (9)와 같으며, 원관 중심에서의 에너지 방정식과 상경계면 방정식은 식(10), (11)과 같다. 경계 및 초기온도 조건은 각각 식(12), (13)과 같으며, 얼음의 초기 체적비율이 54.5%와 100%로 각각 차 있을 경우 초기  $\psi_i$ 의 범위는 식(14)와 같다. 그러나, 용융이 진행될수록 전체 상변화물질의 부피축소로 인하여, 물 영역과 얼음 영역의  $\psi$  변화가 나타난다.

$$\frac{\partial T_l}{\partial \tau} = \alpha_l(\tau) \left( \frac{\partial^2 T_l}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_l}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_l}{\partial \phi^2} \right) \quad (8)$$

(at  $r_{in}(\tau) \leq r \leq R$ )

$$\alpha_l(\tau) = K_e(\tau) / \rho_l c_l$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial \tau} = \alpha_s \left( \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_s}{\partial \phi^2} \right) \quad (9)$$

(at  $0 < r \leq r_{in}(\tau)$ )

$$\frac{\partial T_s}{\partial \tau} = \alpha_s \left( 2 \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} \right) \quad (at \ r = 0) \quad (10)$$

$$- \rho_s \lambda \frac{dr_{in}(\tau)}{d\tau} \quad (at \ r = r_{in}(\tau)) \quad (11)$$

$$= K_e(\tau) \frac{\partial T_l(r(\tau), \tau)}{\partial r} - K_s \frac{\partial T_s(r(\tau), \tau)}{\partial r}$$

$$r = R; \quad T_l = T_w \quad (12)$$

$$r = r_{in}(\tau); \quad T_l = 0, \quad T_s = 0$$

$$\tau = 0; \quad T_s = T_i \quad (13)$$

$$0 \leq \psi_i \leq \left( \approx \frac{94.2}{90} \pi \right), \quad 0 \leq \psi_i \leq 2\pi \quad (14)$$

### 3.3 수치계산법 및 좌표변환

지배방정식을 일반화하기 위하여 대표길이를 수평원관의 반경  $R$ , 대표온도를 벽면과열도  $(T_w - T_m)$ 로 정하여 지배방정식을 무차원화 하였으며, 앞서의 원통좌표계로 나타낸 지배방정식의 계산영역을 일반화된 유한차분법(F.D.M scheme)에 직접 적용시키기가 어려우므로, 이를 차분화 방정식으로 도출하기에 용이한 경계고정법을 이용하여 좌표변환시켰다.

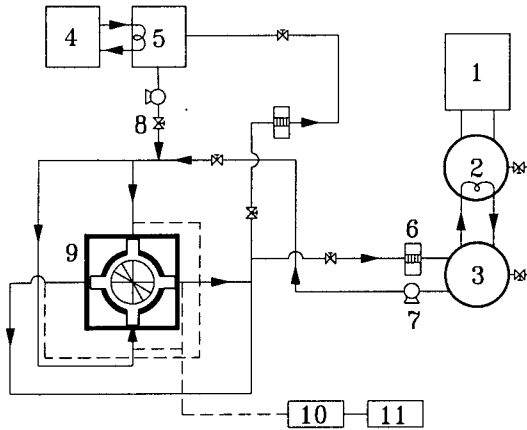
새로운 좌표계는 얼음 영역 및 물 영역에 대하여 각각 독립변수를 사용하였으며, 각 좌표는 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} <\text{물영역}> & \quad <\text{얼음영역}> \\ \eta = \frac{X - X'(\tau)}{1 - X'(\tau)} & \quad \xi = \frac{X}{X'(\tau)} \end{aligned}$$

위에서 정의한 새로운 좌표계의 계산영역은 물 영역에서는  $0 \leq \eta \leq 1$ , 얼음 영역에서는  $0 \leq \xi \leq 1$ 이며, 무차원 지배방정식을 이러한 좌표계를 통하여 좌표변환한 후 차분화하였다.

### 4. 실험장치 및 실험방법

수평원관 내 얼음이 체적비율 54.5%로 채워져 있는 경우(용융완료시 50%의 물)와 체적비율 100%로 얼음이 채워져 있는 경우(용융완료시 91%의 물)로 구분하여 실험을 행하였다. 또한 물의 최대밀도점인 4°C 부근에서 용융과정에 미치는 자연대류의 영향을 고찰하기 위해서 얼음의 초기 과냉온도를 각각 -5°C, -10°C, 벽면 가열



- |                           |                             |
|---------------------------|-----------------------------|
| 1. Refrigerator           | 7. Pump                     |
| 2. Heat exchanger chamber | 8. Valve                    |
| 3. Heating chamber        | 9. Test section             |
| 4. Brine chiller system   | 10. Data acquisition system |
| 5. Cooling chamber        | 11. Computer                |
| 6. Flowmeter              |                             |

Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

온도를 각각 7°C, 4°C, 1°C로 변화시켰다.

실험장치의 개략도는 Fig. 4와 같으며, 수평원통형 빙축열조는 내경 63.5 mm, 길이 121 mm, 두께 2 mm의 순동재질로 수평원관내 얼음의 초기 설정온도와의 차가 ± 0.05°C 이내 일 때를 열평형 상태로 가정하여 용융실험을 시작하였다.

수평원관내 상변화물질의 온도는 data acquisition system(Fluke 2280B)을 통하여 매 30초 간격으로 측정하였고, 용융과정시 시간경과에 따른 상경계면의 형상은 수평원관 후면에 광원으로 할로겐 lamp를 설치한 후 정면에서 CCD camera (Panasonic WV-BP100)로 촬영하였다.

이러한 온도와 화상자료들은 RS-232C port가 장착된 PC에 저장하여 기록하였다.

## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 상경계면의 형상

Fig. 5는 얼음을 수평원관내 전체체적에 각각 (a) 54.5%, (b) 100%로 채우고 얼음의 초기온도를 -5°C, 벽면 가열온도를 7°C인 조건하에서 내향용융시켰을 때 시간경과에 따른 상경계면의

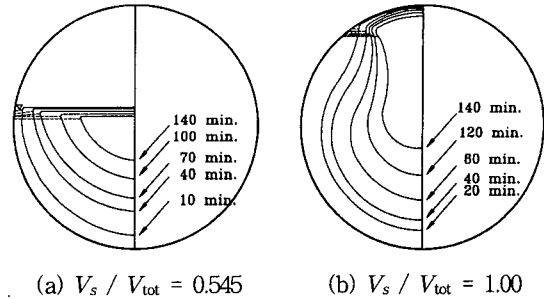


Fig. 5 Timewise motion of water-ice interface during melting process ( $T_i = -5^\circ\text{C}$ ,  $T_w = 7^\circ\text{C}$ )

형상변화를 실험으로부터 측정하여 나타낸 것이다. 체적비( $V_s/V_{tot}$ )가 0.545인 경우에 용융초기 약 10분 경과시에는 전도열전달이 지배적으로 작용하게 되어 상경계면의 상·하단 부분에서의 전진속도가 비교적 일정하게 됨을 알 수 있다. 그러나 용융이 진행될수록 액상내 자연대류에 의한 열전달과 용융진행에 따르는 체적축소로 인한 상경계면 상단부분에서의 전열면 감소효과가 발생되어 용융이 진행될수록 상경계면 하단부분에서의 상경계면 전진속도가 상단부분에서보다 빠르게 되었다. 얼음의 초기체적비( $V_s/V_{tot}$ )가 1.00인 경우에서도 얼음의 상단부에서의 상경계면 전진속도가 하단부에서보다 늦어져 체적비 0.545인 경우와 유사한 결과를 보여주고 있다. 그러나 동일한 온도조건시 얼음을 체적비 1.00로 채웠을 경우가 0.545로 채웠을 경우에서보다 용융과정동안 수면 상단부분에서의 전열면 감소효과가 더 크게 작용하게 되어 얼음 상단부분에서의 용융이 늦게 일어난다.

이로부터 수평원관내 얼음의 내향용융과정시에는 벽면온도와 얼음의 초기온도조건에 대한 액상내 자연대류의 의한 열전달 뿐만 아니라, 얼음의 초기체적비( $V_s/V_{tot}$ ) 조건에 따라 서로 다르게 나타나는 전체 상변화물질의 체적축소의 영향도 고려하여야 함을 알 수 있다.

### 5.2 체적축소를 고려하지 않은 결과

Fig. 6은 수평원관내 100%로 채워져 있는 얼음이 내향용융될 때 시간경과에 따르는 용융율을 체적축소를 고려하지 않은 상당열전도율에 관한

식(5)를 사용하여 수치 해석적인 방법으로 구한 후, 이를 실험결과와 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 용융율에 대한 실험치가 수치해석의 결과치보다도 적게 됨을 알 수 있다. 이는 실제 수평원관내 얼음이 내향 용융될 때에 용융진행에 따라 전체 상변화물질의 체적이 축소되고, 액상인 물이 접하게 되는 수평원관내 벽면에서의 전열면 감소 효과가 발생되기 때문으로 사료된다.

Fig. 7은 초기 얼음이 54.5% 로 채워져 있는 경우로 체적비( $V_s/V_{tot}$ ) 1.00인 Fig. 6의 경우와는 달리 수치해석의 결과치와 실험치가 거의 일치하고 있다. 이러한 원인으로 체적비( $V_s/V_{tot}$ ) 0.545

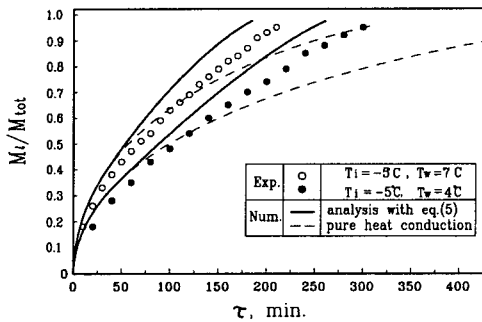


Fig. 6 Comparison of the molten mass fraction between the analytical(using eq. (5)) and experimental results for  $V_s/V_{tot}=1.00$

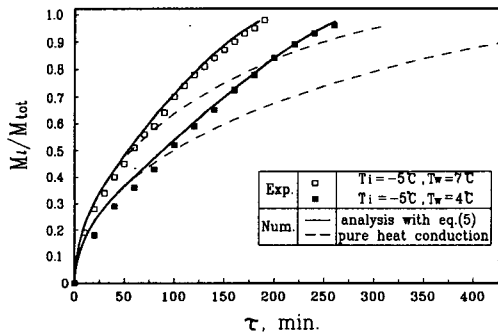


Fig. 7 Comparison of the molten mass fraction between the analytical(using eq. (5)) and experimental results for  $V_s/V_{tot} = 0.545$

인 경우에는 수평원관의 기하학적인 구조 특성으로 인하여 용융진행시 전열면 감소효과가 미약하게 작용되기 때문이다.

### 5.3 체적축소를 고려한 결과

Fig. 8은 체적비( $V_s/V_{tot}$ )를 1.00, 얼음의 초기 과냉온도를 각각  $-10^{\circ}\text{C}$ , 벽면 가열 온도를  $7^{\circ}\text{C}$ ,  $4^{\circ}\text{C}$ ,  $1^{\circ}\text{C}$ 인 조건하에서 내향 용융시켰을 때 수치해석을 통하여 구한 용융율( $M_t/M_{tot}$ )을 실험치와 비교하여 나타낸 것이다. 벽면온도가 각각  $7^{\circ}\text{C}$ ,  $4^{\circ}\text{C}$ 인 경우에는 얼음의 용융시 전체 상변화물질의 체적축소를 고려한 수치해석의 결과치와 실험치가 비교적 잘 일치하고 있다. 또한 용융 초기에 용융율은 용융에 따르는 전체 상변화물질의 체적축소를 무시하는 순수 전도모델에서 구한 수치해석의 결과치보다 적게 되나, 용융이 진행될수록 액상 내 자연대류에 의한 열전달 증진 효과로 인하여 순수 전도 모델에서 구한 용융율보다 크게 된다. 벽면 가열온도가  $1^{\circ}\text{C}$ 인 경우에는 순수 전도모델에서 구한 용융율이 전열면 감소효과를 고려하는 수치해석의 결과치보다 크게 나타나고 있다.

Fig. 9는 체적비( $V_s/V_{tot}$ )를 0.545 로 채우고 얼음의 초기 과냉온도를  $-10^{\circ}\text{C}$ , 벽면 가열온도를  $7^{\circ}\text{C}$ ,  $4^{\circ}\text{C}$ ,  $1^{\circ}\text{C}$ 인 조건하에서 내향 용융시켰을 때 시간경과에 따른 용융율( $M_s/M_{tot}$ )을 나타낸 것으로 수치해석의 결과치가 실험치와 비교적 잘 일치하고 있다. 벽면 가열온도가  $4^{\circ}\text{C}$ 인 경우에서

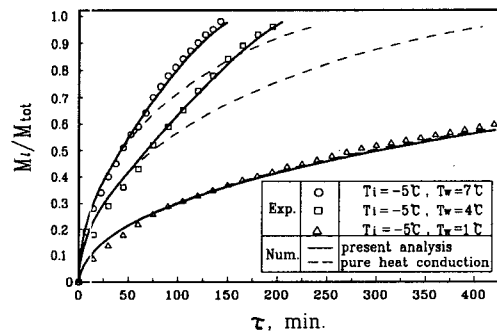


Fig. 8 Comparison of the predicted molten mass fraction with experimental results for various wall temperatures for  $V_s/V_{tot}=1.00$

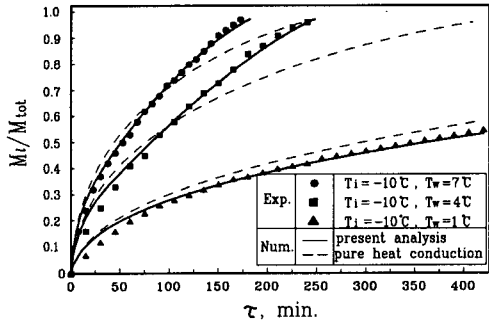


Fig. 9 Comparison of the predicted molten mass fraction with experimental results for various wall temperatures for  $V_s/V_{tot}=0.545$

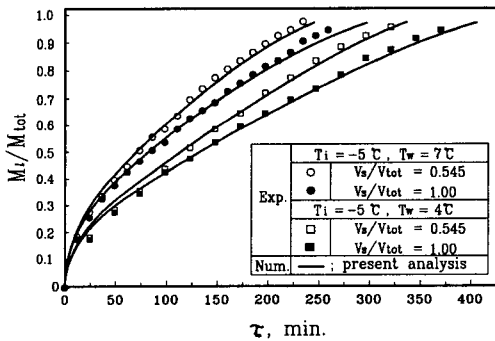


Fig. 10 Comparison of the predicted and experimental molten mass fraction for  $V_s/V_{tot} = 0.545$  and 1.00

시간경과에 따르는 용융율은 벽면 가열온도가 7°C 일 때 보다 액상 내 자연대류에 의한 열전달이 활발하게 작용되므로 용융 진행에 따르는 전체 상변화물질의 체적축소를 무시하는 순수 전도 모델에서 구한 수치 해석의 결과치보다 용융이 진행될수록 크게 나타나고 있다.

Fig. 10은 동일한 얼음의 초기온도 및 벽면가열 온도조건하에서, 얼음의 초기체적비( $V/V_{tot}$ )에 대한 시간경과에 따르는 용융율을 비교한 것이다. 동일한 얼음의 초기 온도 및 벽면 가열 온도 조건하에서 용융율은 체적비 0.545 인 조건이 체적비 1.00 인 조건보다 크게 나타나고 있다.

Fig. 8~Fig. 10 으로부터 얼음의 내향 용융 과정시에 용융 진행에 따르는 전열면 감소의 영향

을 고려하여 수치 해석적으로 구한 본 연구의 결과가 순수 전도나 액상 내 자연 대류만을 고려한 경우에서 구한 결과보다 실제 경우에 잘 부합됨을 알 수 있다.

### 6. 결론

등온으로 유지되는 수평원관내 얼음의 내향용융시 체적변화가 고려되는 상변화물질의 전열특성을 실험과 수치 해석적인 방법으로 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 수평원관내 얼음의 용융초기에는 전도에 의한 열전달의 지배적인 영향으로 상경계면은 비교적 일정하게 전진되나 용융이 진행됨에 따라 액상내 자연대류에 의한 열전달 뿐만 아니라 체적축소의 영향으로 상경계면 상·하부에서의 상경계면 전진이 서로 다르게 나타났다. 이러한 체적축소에 따르는 전열면 감소효과는 동일한 온도 조건시 체적비 ( $V_s/V_{tot}$ ) 1.00 인 경우가 0.545인 경우에서 보다 더 크게 작용하게 된다.

(2) 상당열전도율( $K_{eq}$ )에 얼음의 용융진행에 따르는 전열면 감소의 영향( $F_s$ )을 포함하는 식(7)을 제안하였으며, 수치해석의 결과치와 실험치가 비교적 일치하였다.

(3) 용융 진행에 따르는 전열면 감소의 영향을 고려하여 수치 해석적으로 구한 결과가 순수 전도나 액상 내 자연 대류만을 고려한 경우에서 구한 수치 해석의 결과보다 실제 경우인 실험 결과에 잘 부합되었다. 따라서 수평원관내 얼음의 내향 용융시에는 얼음의 용융 속도를 증가시키는 원인으로 작용하는 액상 내 자연대류의 영향뿐만 아니라 용융속도를 저하시키는 원인으로 작용하는 상변화물질의 체적 축소에 따른 전열면 감소의 영향을 고려하여야 한다.

### 후 기

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음. (KRF-99-003-E00010) 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Lunardini, V. J., 1990, Heat Transfer with



- Freezing and Thawing, Elsevier, pp. 30-35.
2. Sparrow, E. M., Ramadbarri, S. and Partan-  
nkar, S. V., 1978, Effect of Subcooling on  
Cylindrical Melting, ASME J. of Heat  
Transfer, Vol. 100, pp. 395-402.
  3. Sparrow, E. M., Broadbent, J. A., 1982,  
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.
  4. Bathlet, G., Viskanta, R. and Leidenfrost,  
W., 1979, Latent Heat-of-Fusion Energy Sto-  
rage ; Experiment on Heat Transfer from  
Cylinders During Melting, ASME J. of Heat  
Transfer, Vol. 101, pp. 453-458.
  5. Gau, C. and Viskanta, R., 1986, Melting and  
Solidification of a Pure Metal on a Vertical  
Wall, ASME J. of Heat Transfer, Vol. 108,  
pp. 174-181.
  6. Fomin, S. A. and Saitoh, T. S., 1999,  
Melting of unfixed material in spherical  
capsule with non-isothermal wall, Int. J. of  
Heat and Mass Transfer, Vol. 42, pp.  
4197-4205.
  7. Ghasemi, B. and Molki M., 1999, Melting of  
unfixed solids in square cavities, Int. J. of  
Heat and Fluid Flow, Vol. 20, pp. 446-452.
  8. Ho, C. J. and Chu, C. H., 1993, The Mel-  
ting Process of Ice from a Vertical Wall  
with Time-Periodic Temperature Perturbati-  
on inside a Rectangular Enclosure, Int. J. of  
Heat and Mass Transfer, Vol. 36, No. 13,  
pp. 3171-3186.
  9. Rieger, H. and Beer, H., 1986, The Melting  
Process of Ice inside Horizontal Cylinder :  
Effects of Density Anomaly, ASME J. of  
Heat Transfer, Vol. 108, pp. 166-173.
  10. Brewster, R. A. and Gebhart, B., 1988, An  
Experimental Study of Natural Convection  
Effects on Downward Freezing of Pure  
Water, Int. J. of Heat and Mass Transfer,  
Vol. 31, No. 2, pp. 331-348.
  11. Fukusako, S. and Yamada, M., 1993, Recent  
Advances in Research on Water-Freezing  
and Ice-Melting Problems, Int. J. of  
Experimental Heat Transfer, Thermodyna-  
mics and Fluid Mechanics, Vol. 6, No. 1,  
pp. 90-105.
  12. Suh, J. S., Kim, M. G., Ro, S. T. and Yim,  
C. S., 1998, Ice-formation phenomena for  
laminar water flow in a stenotic tube,  
Korean J. of Air-Conditioning and  
Refrigeration Eng., Vol. 10, No. 1, pp. 11-21.
  13. Bak, Y. D., Cho, H. C., Choi, B. I. and Kim,  
K. S., 2001, An Experimental Study for the  
Liquid Freezing Phenomena in a Pipe  
During Ice Plugging, Transactions of  
KSME(B), Vol. 25, No. 3, pp. 366-372.
  14. Kuehn, T. H. and Goldstein, R. J., 1976,  
Correlation Equations for Natural Convection  
Heat Transfer between Horizontal Circular  
Cylinders, Int. J. of Heat Transfer, Vol. 19,  
pp. 1127-1134.
  15. Kuehn, T. H. and Goldstein, R. J., 1978, A  
Experimental Study of Natural Convection  
Heat Transfer in Concentric and Eccentric  
Horizontal Cylindrical Annular, ASME J. of  
Heat Transfer, Vol. 100, pp. 635-640.
  16. Hirata, T. and Nishida, K., 1989, An Analy-  
sis of Heat Transfer Using Equivalent Ther-  
mal Conductivity of Liquid Phase during  
Melting inside an Isothermally Heated  
Horizontal Cylinder, Int. J. Heat Mass  
Transfer, Vol. 32, No. 9, pp. 1663-1670.
  17. Seki, N., Fukusako, S. and Nakaoka, M.,  
1975, Experimental Study on Natural  
Convection Heat Transfer with Density  
Inversion of Water between Two Horizontal  
Concentric Cylinders, ASME J. of Heat  
Transfer, Vol. 97, pp. 556-561.
  18. Nguyen, T. H., Vasseur, P. and Robillard,  
L. 1982, Natural Convection between  
Horizontal Concentric Cylinders with  
Density Inversion of Water for Low  
Rayleigh Numbers, Int. J. Heat Mass  
Transfer, Vol. 25, pp. 1559-1568.