

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol. 15, No. 1, 1995

## 수평 원통형 빙축열조에서의 열전달에 관한 연구 — 얼음의 부피 팽창을 고려하는 내향 응고 실험 —

이준용\* · 김영기\* · 조남철\* · 김영중\* · 임장순\*\*

\* 인하대학교 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학과

## A Study of Heat Transfer in a Horizontal Ice Storage Tube — Inward Freezing Process with Volume Expansion of Ice —

J. Y. Lee\* · Y. K. Kim\* · N. C. Cho\* · Y. J. Kim\* · C. S. Yim\*\*

\* Graduate School, Inha University

\*\* Inha University

### 요 약

본 연구는 수평원통내에 물을 체적비( $V_l/V_{tot}$ ) 0.50, 0.91로 각각 장입한 후 물의 초기 과열온도와 벽면 냉각온도를 각각 변화시키면서 내향 응고시켰을 경우, 시간에 따른 상변화물질의 평균온도, 상경계면의 형상, 응고율, 응고에너지 등을 실험적으로 구하여 이를 비교·검토한 것이다.

응고진행시 상경계면은 물의 초기 과열온도가 높을수록 응고초기에 상단부분이 하단 부분보다 빠르게 진행되었으나 응고가 진행됨에 따라 상하단의 상경계면 전진속도는 거의 동일하게 나타났다.

동일한 온도조건에서 전과정에 걸친 응고율( $M_s/M_{tot}$ )은 체적비 0.5인 경우가 0.91인 경우 보다 크게 나타나 수평원통내 물의 내향응고시 물의 체적비( $V_l/V_{tot}$ ) 변화에 의한 영향도 고려하여야 함을 알 수 있었다.

## Abstract

Heat transfer phenomena during inward freezing process of the water in a horizontal cylinder were experimentally studied.

The cooling temperature of a wall more significantly affects the timewise average temperature than the initial superheating temperature of the water.

In addition, it was observed that the timewise average temperature was influenced by the initial volume ratio of the water ( $V_l/V_{tot}$ ) at the same temperature conditons.

One the other hand, the freezing speed of the upper part in the water-ice interface was quickly progressed due to natural convection.

Furthermore, experimental observation showed that the frozen mass fraction ( $M_s/M_{tot}$ ) was influenced by the initial volume ratio of the water ( $V_l/V_{tot}$ ).

It was noted that the frozen mass fraction for each  $V_l/V_{tot}$  represented by  $Ste^*$  and  $Fo$ .

## Nomenclature

$C$	: Specific heat	[kcal/kg · °C]
$E_{tot}$	: Total energy storage or total energy released	[kcal/kg]
$Fo$	: Fourier number ( $\alpha_s \cdot t'/r^2$ )	
$M$	: Mass	[kg]
$r$	: Radius of cyliner	[m]
$Ra$	: Rayleigh number	
	$\left( \frac{g\beta_T  T_i - T_m ^q r^3}{\alpha_l \cdot \nu} ; q=1.8948 \right)$	
$Ste_l$	: Stefan number of melt	
	$(C_l \cdot (T_l - T_m) / \lambda)$	
$Ste_s$	: Stefan number of solid	
	$(C_s \cdot (T_m - T_w) / \lambda)$	
$Ste^*$	: Modified Stefan number	
	$(Ste_s / (1 + Ste_l))$	
$t'$	: Time	[sec]
$T, t$	: Temperature	[°C]
$T$	: Average temperature	[°C]
$V$	: Volume	[m <sup>3</sup> ]

## Greek symbol

$\rho$	: Density	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda$	: Latent heat of fusion	[kcal/kg]
$\alpha$	: Thermal diffusivity	[m <sup>2</sup> /s]
$\beta_T$	: Coefficient of volume expansion	
	$(=9.2972 \times 10^{-6})$	[°C <sup>-1</sup> ]
$\nu$	: Kinematic viscosity	[m <sup>2</sup> /sec]

## Subscript

$i$	: Initial	$l$	: Liquid phase
$m$	: Fusioning point	$s$	: Solid phase
$tot$	: Total	$w$	: Wall of cyliner

## I. 서 론

상변화물질로 물을 이용하는 빙축열시스템은 축열밀도가 크고, 경제성이 우수하여 하절기의

전력에너지와 태양열과 같은 대체에너지를 효과적으로 이용할 수 있다는 장점이 있다.

수평원통형 빙축열조내 물의 응고 및 용융과정에 관한 열전달특성 해석은 빙축열시스템 설계에서 뿐만 아니라, 동절기의 배관을 통한 물 공급 및 배수, 배관동파 등에서의 문제해결에도 중요하므로 이에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>1)~4)</sup>

R. A. Brewster<sup>5)</sup> 등은 직육면체형 용기내 물의 응고 과정을 실험적으로 연구하여 액상내에서의 자연대류 유동현상을 고찰하였으며, S. L. Chen<sup>6)</sup> 등은 원통외부에서 작동 유체의 유량 변화에 따르는 물의 내향 응고과정을 실험적으로 구하고 이를 해석적인 방법과 비교·검토하였다.

또한, K. Yoshiyuki<sup>7)</sup> 등은 구형 캡슐내 물의 내향 응고과정시 열전달문제를 수정된 전도열전달 해석으로 구하여 이를 실험 결과와 비교·검토한 바 있다.

이러한 연구 결과들은 수평원통내 물의 내향 응고과정시 물의 초기과열도가 크지 않을 경우 전도열전달이 지배적으로 작용함을 알려주고 있다. 그러나 실제 수평원통내 물의 내향 응고과정을 해석할 때에는 응고가 진행될수록 물이 상층부로 이동되는 부피팽창이 발생되어 이에 대한 영향을 고려해야 한다.

이에 본 연구에서는 수평원통형 빙축열조내에 물을 수평원통내 전체체적의 50%( $V_l/V_{tot}=0.50$ ) 및 91%( $V_l/V_{tot}=0.91$ )로 각각 장입하여 부피팽창을 고려할 수 있게 한 후 물의 초기온도와 벽면온도를 각각 변화시켰을 경우에 시간 경과에 따른 상변화물질의 온도분포를 측정하고 상경계면의 형상, 응고율, 응고에너지 등을 구하여 빙축열시스템의 설계시에 필요한 기초자료를 도출하고자 한다.

## II. 이론적 고찰

상변화물질의 응고과정 중 수평형 원통용기내 물-얼음의 평균온도(average temperature)는 아래와 같은 식으로 부터 구하였다.

$$\bar{T} = \frac{1}{\rho_l V_l + \rho_s V_s} \int [\rho_l t_l dV_l + \rho_s t_s dV_s]$$

수평원통 내부에서 상변화물질의 응고과정 중 방출되는 총에너지  $E_{tot}$ 는 액상으로 남아있는 상변화물질이 초기온도  $T_1$ 부터 액상 평균온도  $\bar{T}_l$ 까지 냉각될 때의 방출되는 현열에너지, 액상 상변화물질이 응고시 방출되는 잠열에너지, 응고된 상변화물질이 용융점온도 이하 공상 평균온도  $\bar{T}_s$ 까지 냉각될 때 방출하는 현열에너지, 초기온도  $T_1$ 부터 용융점온도  $T_m$ 까지 냉각될 때의 현열에너지의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{tot} = M_l \cdot C_l \cdot (T_1 - \bar{T}_l) + \lambda \cdot M_s + M_s \cdot C_s \cdot (T_m - \bar{T}_s) + M_s \cdot C_l \cdot (T_1 - T_m)$$

빙축열조를 설계하는데 있어 주요 설계자료로는 시간경과에 따라 응고되는 얼음의 질량비인 응고율( $M_s/M_{tot}$ )이 있으며 응고율은 축열조 내부 상변화물질에서 일어나는 전열특성을 고찰하는 중요한 지표가 될 수 있다.

수평원통내 물의 내향응고시 주요 열전달 기구는 수평원통내 벽면의 온도와 얼음의 온도와 차에 의한 열전도, 상경계면의 온도와 물의 온도와의 차이에서 발생하는 물 영역에서의 자연대류 및 열전도등으로 구분할 수 있다.

또한, 수평원관내 물의 초기 체적비( $V_l/V_{tot}$ )의 변화에 따르는 체적팽창 및 전열면 증대 효과 등도 고려되어야 한다.

그러므로 수평원통형 빙축열조내 물의 응고

율( $M_s/M_{tot}$ )에 대한 각 영향 인자들과의 상관 관계는 다음과 같은 무차원 식으로 나타낼 수 있다.

$$M_t/M_{tot} = f(Ste^*, Fo, Ra, V_l/V_{tot})$$

### III. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 수평원통형 빙축열조내에서 물이 내향 응고될 때 얼음 생성에 의한 체적팽창의 영향을 고찰하기 위하여 수평원통내 물이 체적비 50%로 채워져 있는 경우(응고완료시 54.5%의 얼음)와 체적비 91%로 물이 채워져 있는 경우(응고완료시 100%의 얼음)로 구분하여 연구를 행하였다.

또한 물의 최대밀도점인 4°C 부근에서 응고 과정에 미치는 자연대류의 영향을 고찰하기 위하여 물의 초기 과열온도를 각각 7°C, 4°C,

1°C, 벽면냉각온도를 각각 -5°C, -10°C로 변화시켜 물의 내향 응고과정시 열전달현상을 실험적인 방법으로 규명하였다.

Fig 1에서 보는 바와 같이 실험장치의 주요 부로는 가열 및 냉각 항온조, 수평원통형 빙축열조, 온도조절장치, 순환 pump, 전자유량계, 온도측정장치 및 기록장치 등으로 이루어져 있다.

실험에 사용된 수평원통형 빙축열조는 내경 63.5 mm, 길이 121 mm, 두께 2 mm의 순동재질이며, 수평원통내 물의 온도와 초기 설정온도와의 차가 ±0.05°C 이내일 때를 열평형상태로 가정하여 응고실험을 시작하였다.

수평원통내 상변화물질의 온도는 data acquisition system(Fluke 2280B)을 통하여 매 30초 간격으로 측정하였고, 응고과정시 시간경과에 따른 상경계면의 형상은 수평원통형 후면에 광원으로 할로겐 lamp를 설치한 후 정

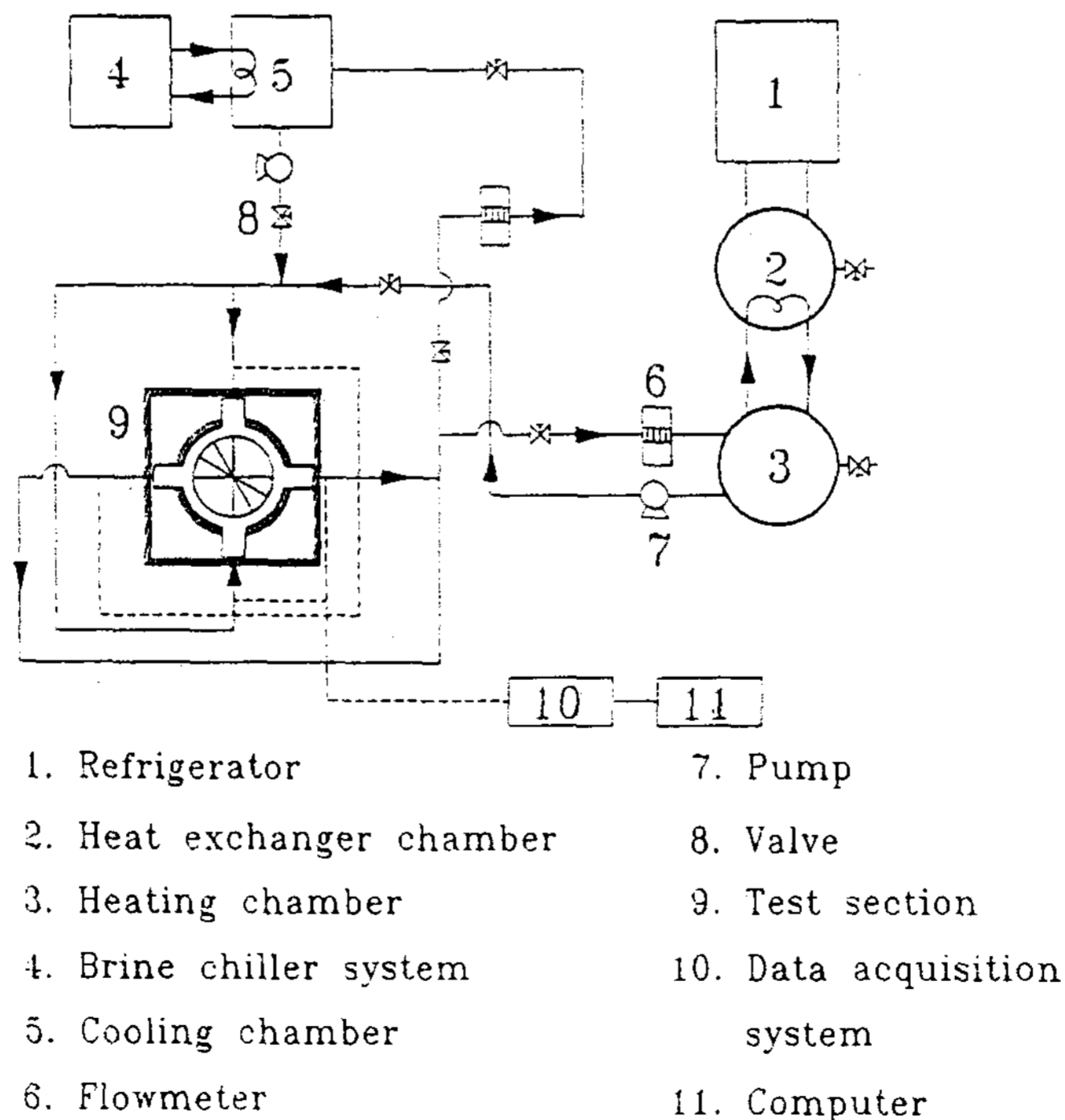


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

면에서 CCD camera(Panasonic WV-BP100)로 촬영하였다.

이러한 온도와 화상자료들은 RS-232C port가 장착된 PC에 저장하여 기록하고 이들 자료를 해석하였다.

#### IV. 결과 및 고찰

##### 1. 평균온도

Fig 2과 Fig 3은 물이 수평원통내 전체체적의 50%( $V_l/V_{tot}=0.50$ ) 및 91%( $V_l/V_{tot}=0.91$ )로 채워져 있는 경우 물의 초기온도가 각각 7°C, 4°C, 1°C, 벽면온도가 각각 -5°C, -10°C 일 때 시간경과에 따른 상변화물질의 평균온도( $\bar{T}$ )들을 나타낸 것이다.

상변화물질의 평균온도는 물의 초기온도가 동일한 경우 벽면온도가 낮을수록, 벽면온도가 동일한 경우에는 물의 초기온도가 낮을수록 낮게 나타남을 알 수 있다.

물의 초기 과열온도와 벽면 냉각온도 조건이 동일한 응고과정시 응고초기에는 체적비가 0.91인 Fig 3의 경우가 체적비가 0.50인 Fig 2의 경우보다 상변화물질의 평균온도는 낮게 나타났다.

이는 동일한 온도 조건하에서 응고초기 과정시 체적비가 0.91인 경우가 0.50인 경우보다 자연대류 열전달이 활발하게 작용되었기 때문이라 사료된다.

그러나 일정시간이 경과된 후에는 체적비가 0.50인 경우가 평균온도는 낮게 나타나 응고가 빠르게 완료되었다.

##### 2. 상경계면의 형상

Fig 4는 물이 수평원통내 전체체적의 50%

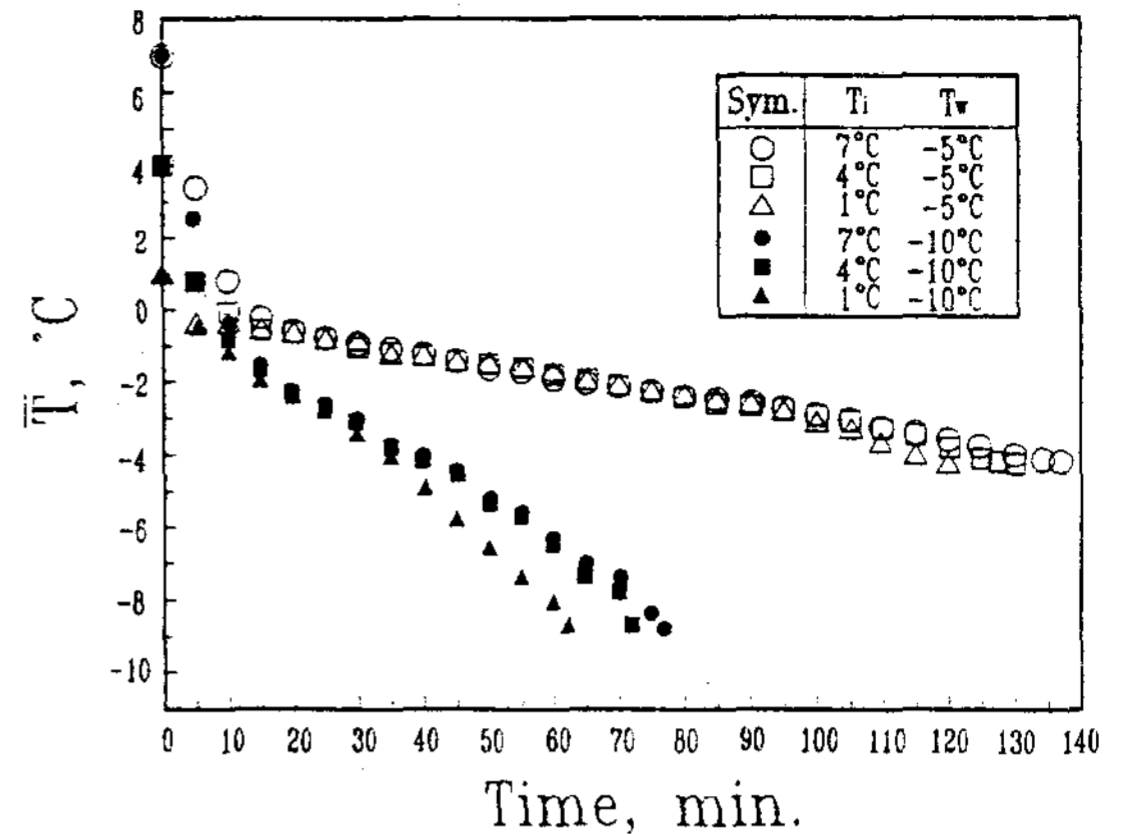


Fig. 2. Average temperature( $\bar{T}$ ) profile of water during freezing process at  $V_l/V_{tot}=0.50$

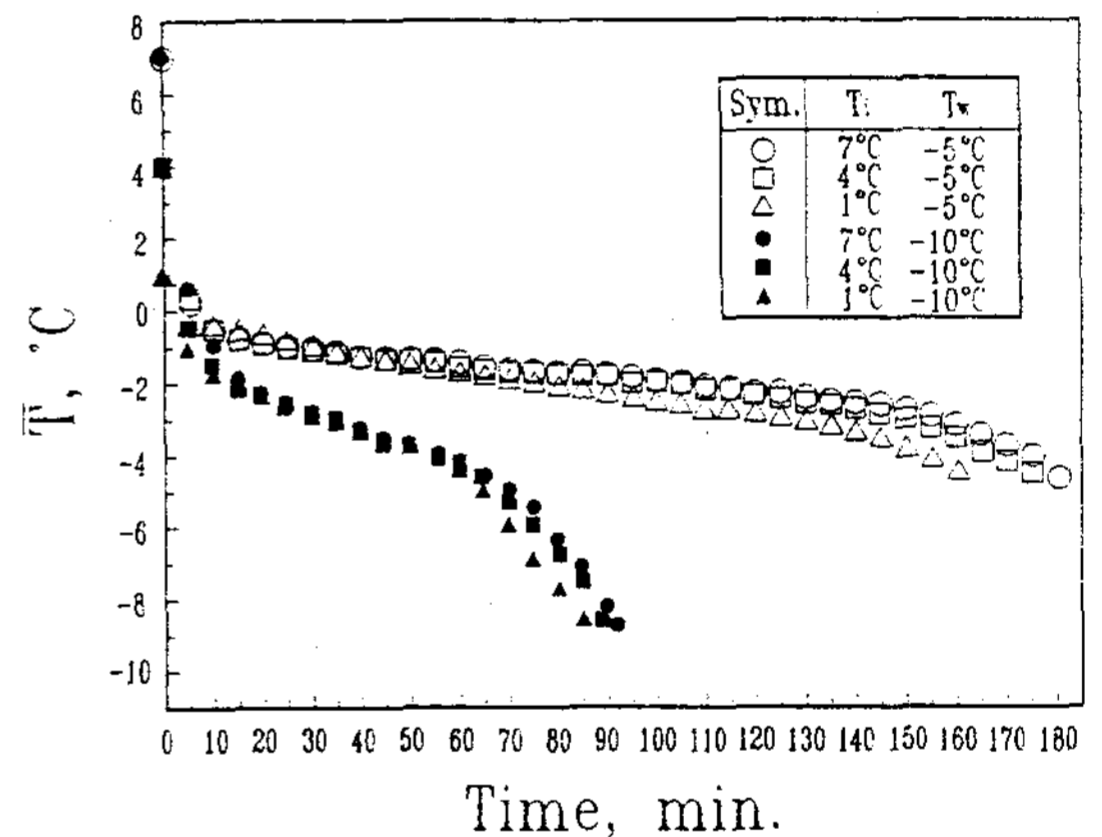


Fig. 3. Average temperature( $\bar{T}$ ) profile of water during freezing process at  $V_l/V_{tot}=0.91$

( $V_l/V_{tot}=0.50$ ), 91%( $V_l/V_{tot}=0.91$ )로 채워져 있는 경우 물의 초기온도를 각각 7°C, 1°C, 벽면온도를 -10°C 인 조건하에서 응고시켰을 때 시간 경과에 따르는 상경계면의 형상변화와 사진들을 나타낸 것이다.

물의 초기온도가 7°C 인 그림 (a)와 (c)에서 보는 바와 같이 응고초기에는 상경계면의 상단

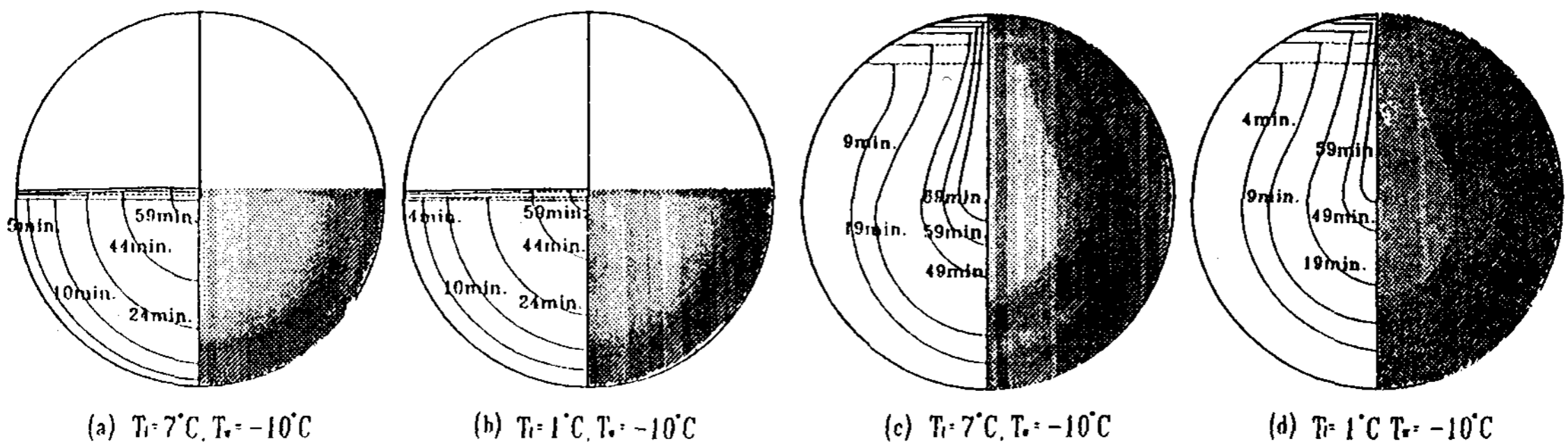


Fig. 4. Timewise motion of water-ice interface during freezing process ;  
 (a), (b) :  $V_i/V_{tot}=0.5$ , (c), (d) :  $V_i/V_{tot}=0.91$

부분이 하단부분보다 빠르게 진행하였으나 응고가 진행됨에 따라 상경계면의 상단부분과 하단부분이 비교적 일정하게 진행하였다.

이는 응고과정 최기에 최대 밀도점을 갖는 4°C 부근의 물이 수평원통내 하단부분으로, 4°C 이하로 냉각된 물은 상단 벽면부분으로 유동하게 되는 자연대류에 의한 열전달은 감소하고 전도열전달이 지배적으로 작용하는 영향이라 사료된다.

물의 초기온도가 1°C 인 그림 (b) 와 (d)의 경우에는 응고초기부터 자연대류에 의한 영향은 미소하고 전도에 의한 열전달이 지배적으로 작용하여 상경계면의 상하단부분이 비교적 일정하게 진행하였다.

체적비가 0.91인 (b), (d)의 경우에는 응고과정동안 수면 상단부분의 체적팽창으로 인하여 수면이 상승하면서 응고형상이 물방울 형태로 나타남을 알 수 있다.

### 3. 응고율

Fig 5와 Fig 6은 물을 수평원통내 전체체적의 각각 50%( $V_i/V_{tot}=0.50$ ), 91%( $V_i/V_{tot}=0.91$ )로 채우고 물의 초기온도를 각각 7°C, 4°C, 1°C, 벽면온도를 각각 -5°C,

-10°C 인 조건하에서 응고시켰을 때 시간경과에 따른 응고율( $M_s/M_{tot}$ )을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 각 체적비( $V_i/V_{tot}$ )에 대해 횡축을  $Ste^* \cdot Fo \times 10^2$ 로 잡으면 종축의 응고율( $M_s/M_{tot}$ )은 비교적 일정한 곡선으로 나타나며  $0.0282 < Ste^* < 0.0602$  범위에서 이 곡선을 무차원 상관관계식으로 구하면 아래와 같다.

- ① 체적비( $V_i/V_{tot}=0.50$ )인 경우  
 $(0.0282 < Ste^* < 0.0602)$   
 $M_s/M_{tot} = C' \cdot (Ste^* \cdot Fo \cdot 10^2)^n$   
 $(C' = 0.1979, n = 0.50) \dots \dots \dots \text{Eq. (A)}$
- ② 체적비( $V_i/V_{tot}=0.91$ )인 경우  
 $(0.0282 < Ste^* < 0.0602)$   
 $M_s/M_{tot} = C' \cdot (Ste^* \cdot Fo \cdot 10^2)^n$   
 $(C' = 0.2024, n = 0.46) \dots \dots \dots \text{Eq. (B)}$

그림에서 보는 바와 같이 각 체적비( $V_i/V_{tot}$ )에 대한 응고율( $M_s/M_{tot}$ )의 실험식을 실험값들과 오차  $\pm 10\%$  이내에서 비교적 잘 일치하였다.

### 4. 응고에너지

Fig 7과 Fig 8은 물이 수평원통내 전체체

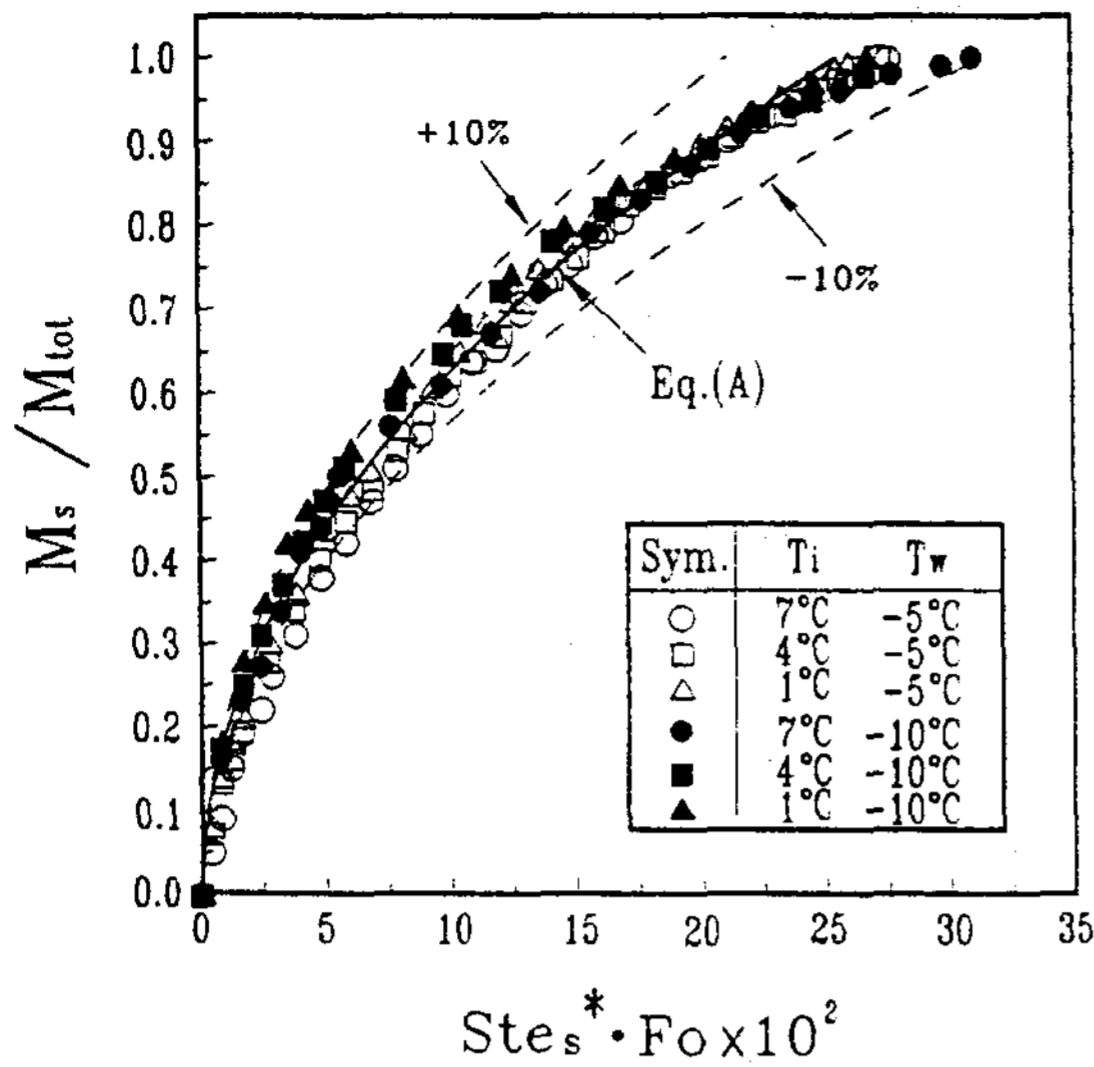


Fig. 5. Correlation between frozen mass fraction versus  $Ste^* \cdot Fo$  at  $V_i/V_{tot}=0.50$

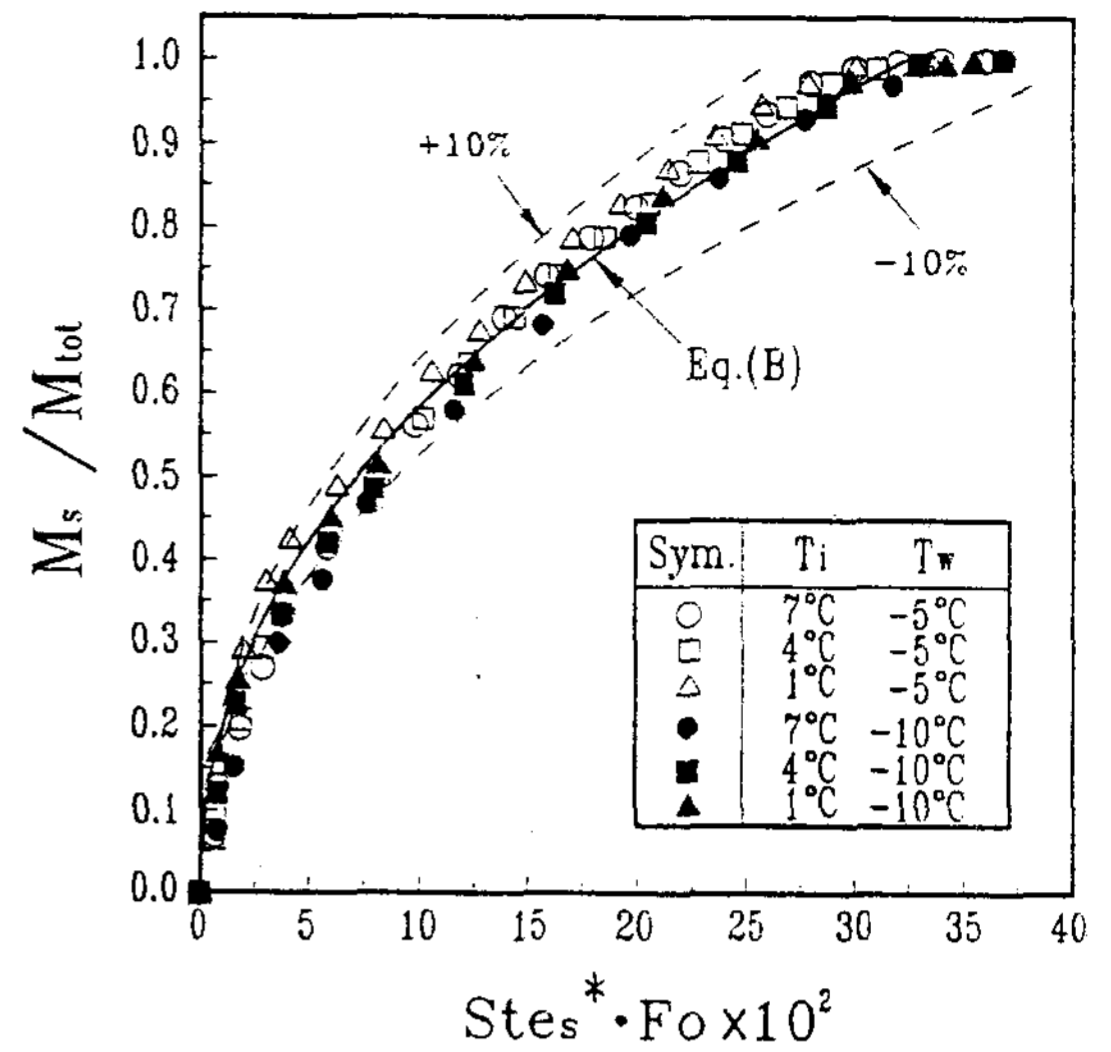


Fig. 6. Correlation between frozen mass fraction versus  $Ste^* \cdot Fo$  at  $V_i/V_{tot}=0.91$

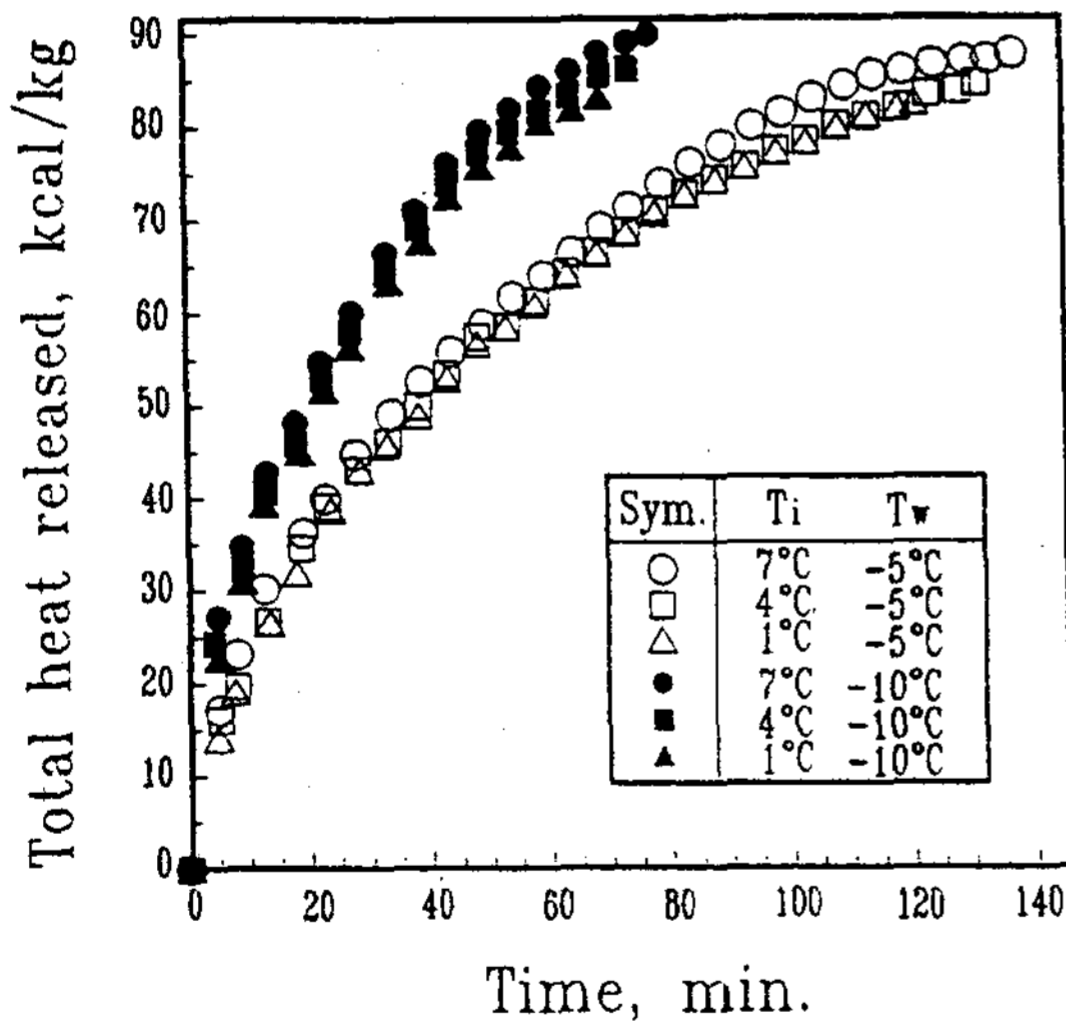


Fig. 7. Timewise variation of frozen energy during freezing process at  $V_i/V_{tot}=0.50$

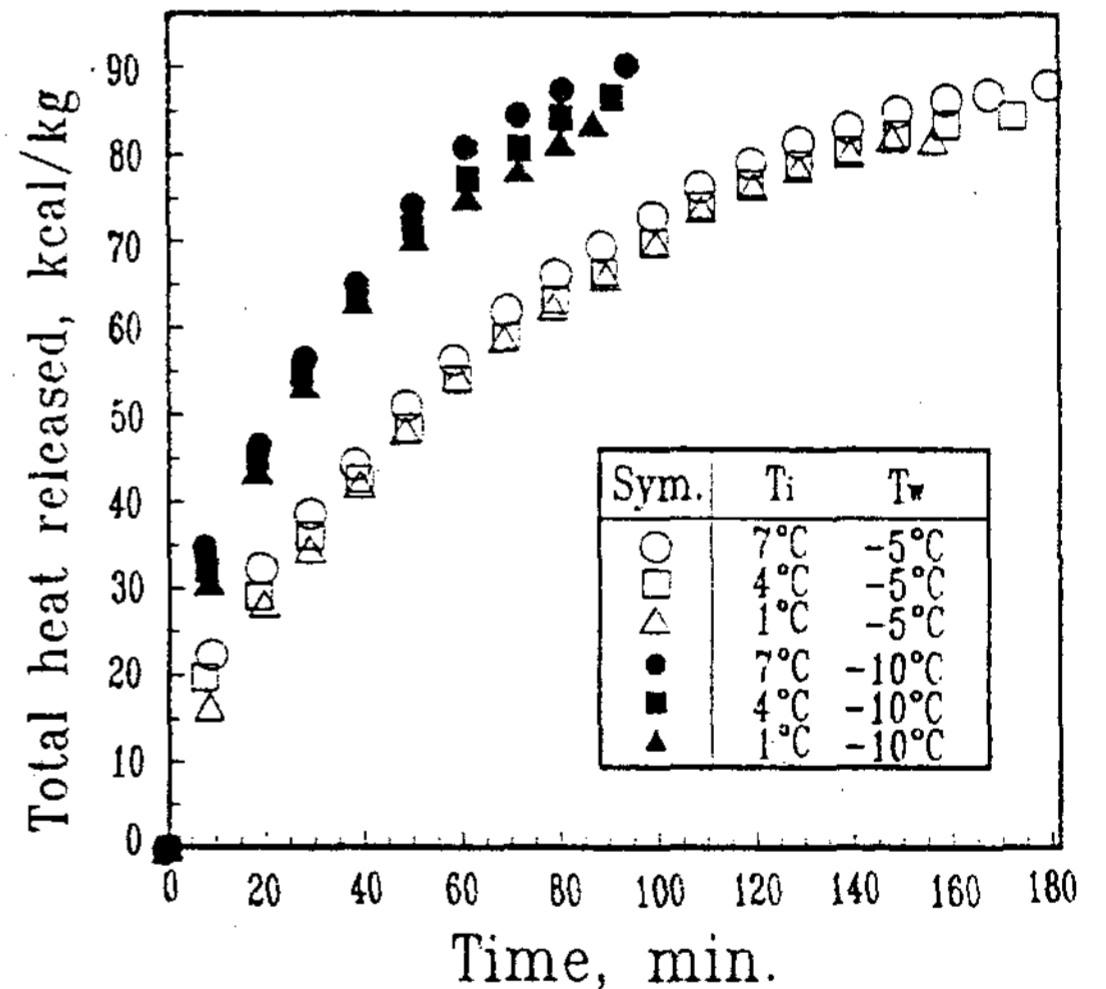


Fig. 8. Timewise variation of frozen energy during freezing process at  $V_i/V_{tot}=0.91$

적의 50% ( $V_i/V_{tot}=0.05$ ) 및 91% ( $V_i/V_{tot}=0.91$ )로 채워져 있는 경우 물의 초기 과열온도를 각각 7°C, 4°C, 1°C, 벽면 과냉온도를 각각 -5°C, -10°C 인 조건으로 변화시켰을 때

상변화물질로 부터 방출되는 총에너지( $E_{tot}$ )를 시간경과에 따라 나타낸 것이다.

수평원통내 물의 내향응고시 시간경과에 따라 상변화물질로 부터 방출되는 에너지는 물의

초기온도가 동일한 경우에는 벽면온도가 낮을수록, 벽면온도가 동일한 경우에는 물의 초기온도가 높을수록 크게 나타났으며, 벽면 냉각온도의 영향이 물의 초기 과열온도의 영향보다 큰것을 알 수 있다.

동일한 물의 초기온도 및 벽면온도 조건시 시간 경과에 따르는 응고에너지는 체적비( $V_i/V_{tot}$ )가 0.50인 경우와 체적비( $V_i/V_{tot}$ )가 0.91인 경우 모두 응고초기인 10분이 경과할 때까지는 거의 동일하였으나, 그 이후로는 체적비 0.50인 경우가 체적비 0.91인 경우보다 크게 나타났다.

이는 동일한 온도조건하에서 초기 체적비에 대한 원통벽면의 초기 전열면적이 체적비 0.50인 경우보다 체적비에 대한 전열면적이 작은 체적비 0.91인 경우가 응고 초기인 10분이 경과할 때까지 자연대류 열전달이 활발하게 작용하여 체적비 0.50인 경우와 거의 동일하게 응고에너지가 축열된 것이라 사료된다.

그러나, 응고가 진행될수록 자연대류 열전달 기구는 점차 감소하고 전도열전달이 지배적으로 작용하게 되어 초기 체적비에 대한 전열면적이 큰 체적비 0.50인 경우가 체적비 0.91인 경우보다 응고에너지가 크게 된 것이라 생각된다.

## V. 결 론

1. 물의 응고과정시 상변화물질의 평균온도는 물의 초기온도가 동일할 때에는 벽면 온도가 낮을수록, 벽면온도가 동일할 때에는 물의 초기온도가 낮을수록 낮게 나타났다.
2. 응고율( $M_s/M_{tot}$ )은 물의 초기온도와 벽면온도가 낮은 경우에 크며, 본 실험범위내에서는 벽면온도가 물의 초기온도보다 응고율에 더 큰 영향을 미친다.

3. 수평원통내 물의 내향 응고과정시 물의 초기체적비( $V_i/V_{tot}$ )가 각각 0.50, 0.91인 경우 시간 경과에 따른 응고율은 다음과 같은 무차원 상관관계식으로 도출된다.

$$M_s/M_{tot} = C' \cdot (Ste^* \cdot Fo \cdot 10^2)^n$$

4. 응고과정시 시간경과에 따라 상변화물질로부터 방출되는 에너지( $E_{tot}$ )는 물이 초기온도가 높고 벽면온도가 낮은 경우에 크게 나타났으며 벽면 냉각온도의 영향이 물의 초기온도의 영향보다 큰것을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 1994년도 교육부 학술 연구 조성비(기계공학 : ME 94-F-06)에 의하여 수행되었다.

## 참고문헌

1. H. Rieger, H. Beer, 1986, "The Melting Process of Ice Inside a Horizontal Cylinder : Effects of Density Anomaly", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 108, pp. 166~173.
2. B. W. Webb, M. K. Moallemi & R. Viskanta, 1987, "Experiments of Melting of Unfixed Ice in a Horizontal Cylindrical Capsule", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 109, pp. 454~459.
3. S. Fukusako, M. Yamada, 1993, "Recent Advances in Research on Water-Freezing and Ice-Melting Problems", Int. J. of Experimental Heat Transfer Thermodynamics and Fluid Mechanics, Vol. 6, pp. 90~103.
4. M. Sugawara, H. Saito & N. Seki 1993, "Experimental Study of Freezing of Water in Closed Circular Tube with Pressure



- Increasing”, Fourth Int. Thermal Engineering & Science for Cold Regions Symposium, pp. 96~101.
5. R. A. Brewster, B. Gebhart, 1988, “An Experimental Study of Natural Convection Effects on Downward Freezing of Pure Water”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 2, pp. 331~348.
6. S. L. Chen, J. S. Yue, 1991, “Water Thermal Storage with Solidification”, Heat Recovery System & CHP, Vol. 11, No. 1, pp. 79~90.
7. K. Yoshiyuki, 1994, “球カプセル潜熱蓄熱材の蓄放熱特性”, 空気調和. 衛生工學學會術講演會講演論文集, F-30, F-31, pp. 941~948

**A Study of Heat Transfer in a Horizontal Ice Storage Tube**

— Inward Freezing Process with Volume Expansion of Ice —

J. Y. Lee\* · Y. K. Kim\* · N. C. Cho\* · Y. J. Kim\* · C. S. Yim\*\*

\* *Graduate School, Inha University*\*\* *Inha University***Abstract**

Heat transfer phenomena during inward freezing process of the water in a horizontal cylinder were experimentally studied.

The cooling temperature of a wall more significantly affects the timewise average temperature than the initial superheating temperature of the water.

In addition, it was observed that the timewise average temperature was influenced by the initial volume ratio of the water ( $V_l/V_{tot}$ ) at the same temperature conditons.

One the other hand, the freezing speed of the upper part in the water-ice interface was quickly progressed due to natural convection.

Furthermore, experimental observation showed that the frozen mass fraction ( $M_s/M_{tot}$ ) was influenced by the initial volume ratio of the water ( $V_l/V_{tot}$ ).

It was noted that the frozen mass fraction for each  $V_l/V_{tot}$  represented by  $Ste^*$  and  $Fo$ .