

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol. 16, No. 2, 1996

## 수직원통형 빙축열조내 얼음의 외향용융과정시 전열특성에 관한 실험적 연구 (작동 유체의 유입 방향에 따른 비교)

김동환\* · 김동춘\* · 김일겸\* · 김영기\* · 임장순\*\*

\* 인하대학원 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학과

## An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics during Outward Melting Process of Ice in a Vertical Cylinder

(comparison of thermal performance on the flow direction of working fluid)

D. H. Kim\* · D. C. Kim\* · I. K. Kim\* · Y. K. Kim\* · C. S. Yim\*\*

\* *The graduate school of Inha University*

\*\* *Inha University*

### 요 약

본 연구는 수직원통형 빙축열조 내에 상변화물질로서 순수한 물을  $-10^{\circ}\text{C}$ 의 초기 과냉온도로 응고시킨 후, 작동유체의 입구온도를  $7^{\circ}\text{C}$ ,  $4^{\circ}\text{C}$ ,  $1^{\circ}\text{C}$ 로, 작동유체의 유입방향을 상향과 하향으로 각각 변화시키면서 외향용융시켰을 경우, 시간경과에 따른 축열매질의 온도분포, 상경계면의 형상, 용융율, 용융에너지를 실험적으로 구하여 이를 비교·검토한 것이다.

작동유체의 입구온도가  $7^{\circ}\text{C}$ ,  $4^{\circ}\text{C}$ 의 경우에는 작동유체의 유입방향이 상·하향 모두 물의 최대 밀도점인  $4^{\circ}\text{C}$  부근에서 일시적으로 온도가 상승하지 않고 일정 시간동안 정체하는 온도정체구간이 나타났다. 또한, 용융이 진행됨에 따라 물이 축열조의 하부에 적체되고, 이에 따라 하부에서의 용융이 활발히 진행됨으로써 상경계면 형상은 전체적으로 종모양 형태의 곡선을 나타낸다. 작동유체의 입구온도가  $7^{\circ}\text{C}$ 인 경우, 용융율( $V/V_{\text{tot}}$ )과 용융에너지는 작동유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우에서보다 크게 나타난 반면, 작동유체의 입구온도가  $4^{\circ}\text{C}$ ,  $1^{\circ}\text{C}$ 인 경우는  $7^{\circ}\text{C}$ 의 경우와는 달리 하향인 경우가 상향인 경우에서보다 큰 것으로 나타났다.

## ABSTRACT

This study presents experimental results of heat transfer characteristics of P. C. M. during outward melting process in a vertical cylinder. The experiment was carried out in six conditions, i. e. , three different inlet temperature (7°C, 4°C and 1°C) and two directions of working fluid (upward and downward). Melting P. C. M. produced a bell-shaped phase change interface. When the inlet temperature was 7°C, the lower region remained at 4°C until the temperature of upper region reached 4°C. This was due to the state of maximum density of the lower region. When the direction of the working fluid in the case of 7°C, inlet temperature, was upward, the rate of melting and the total melting energy were higher than when it's direction was downward. But the rate of melting and the total melting energy appeared higher value as it's direction was downward when the inlet temperature is 4°C and 1°C.

## NOMENCLATURE

$C_l$ : Specific heat of the liquid(water)	
	[kJ/kg · °C]
$C_s$ : Specific heat of the solid(ice)	[kJ/kg · °C]
$\bar{C}_s$ : Mean specific heat of the solid(ice)	
	[kJ/kg · °C]
$E_1$ : Sensible heat of the solid(ice)	[kJ]
$E_2$ : Latent heat	[kJ]
$E_3$ : Sensible heat of the liquid(water)	[kJ]
$E_{tot}$ : Total heat	[kJ]
$T$ : Temperature	[°C]
$T_{ini}$ : initial temperature	[°C]
$T_{mel}$ : melting temperature of P. C. M.	[°C]
$dV$ : infinitesimal volume	[m <sup>3</sup> ]
$\lambda$ : latent heat per unit mass	[kJ/kg]
$\rho_l$ : Density of the liquid(water)	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$ : Density of the solid(ice)	[kg/m <sup>3</sup> ]

## 1. 서론

여름철 주간 냉방전력의 집중화를 방지하기 위한 목적으로 야간의 심야전력을 이용하여 전기에너지를 빙축열시스템의 냉열에너지로 저장한 후, 주간에 냉방열원으로 사용하는 빙축열시스템에 대한 연구 및 활용방안이 최근 활발히 전개되고 있다. 일반적으로 축열 방식은 현열만을 이용하는 것과 현열 및 잠열을 동시에 이용하는 것으로 나눌 수 있으며, 빙축열 시스템은 후자에 속한다. 현열 및 잠열을 이용한 축열 방식은 현열만을 이용한 방식보다 축열조의 부피가 작아지고 열손실 또한 낮아지는 장점을 가진다. 그러나 빙축열시스템의 축열매질로써 사용되는 물은 여타의 유·무기 물질과는 달리 액상의 밀도값이 고상의 밀도값보다 커 동일질량에 대하여 응고 체적이 용융체적보다 크게 된다. 그리고 물은 4°C에서 최대 밀도점이 존재하여 물의 초기 온도 및 벽면 온도가 4°C 이상 혹은 이하인 조건에 따라 액상 내 대류 유동 현상이 다르게 나타나는 특성을 갖고 있다.

이러한 물의 응고 및 용융 과정에 관한 주요 논문들은 다음과 같다. H. Rieger 와 H.

Beer<sup>(1)</sup>는 수평원통내 채워져 있는 얼음을 벽면 가열 온도와 얼음의 초기 온도가 각각 변화되는 조건하에서 내향용융시켰을 경우, 시간 경과에 따른 얼음의 용융 형상과 용융율 등을 구하여 액상내 자연 대류에 의한 열전달이 용융에 미치는 영향을 실험적인 방법과 수치 해석적인 방법으로 연구하였다. R. A. Brewster 와 B. Gebhart<sup>(2)</sup> 는 직육면체형 용기 내에서 물이 수면으로부터 바닥면으로 응고될 때의 응고 과정을 실험적인 방법으로 연구하여 액상 내에서의 자연 대류 유동 현상을 고찰하였다. M. Sugawara<sup>(3)</sup> 등은 직육면체형 용기 내 다공질 물질 속에 장입되어 있는 물이 용기의 상부면 혹은 하부면으로부터 각각 응고될 경우에 냉각 벽면 온도, 물의 초기 온도 등의 변화에 따르는 물의 응고시의 전열 특성을 실험적인 방법과 수치 해석적인 방법으로 연구하여 액상 내의 자연 대류 열전달 기구는 응고 초기에만 작용된다고 보고하였으며, S. T. Ro<sup>(4)</sup> 등은 수직 원관 주위에서 물이 외향 응고될 경우에는 물의 용융 과정과는 달리 일정한 응고 초기 시간 동안에 액상내 자연대류 유동이 상변화 과정을 저해한다고 실험과 수치 해석적인 연구 결과를 통하여 보고하였다.

이와 같이 그 동안 발표되어온 빙축열 시스템에 관한 많은 연구에서는 제빙과정인 축열 과정에서의 열전달 특성을 규명하는데 주목적을 두었다. 그러나 실제 빙축열 시스템이 이용될 수 있는 시간은 전력 부하가 편중되는 여름철 전력소비 최고기간이므로 이때 냉방수요에 관련된 방열시 해빙과정에 대한 연구 또한 필요하다.

이에 본 연구에서는 수직원통형 빙축열조에서 수직원관으로 유입되는 작동유체의 유입방향을 상향과 하향으로 변화시키며 얼음을 외

향용융시켰을 때에 축열조 내부의 온도분포, 상경계면의 형상 등을 실험적으로 규명하고 용융에너지를 계산한 후, 이를 비교·검토하여 빙축열 시스템의 효율 개선에 유용한 기초 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

온도에 따라 물의 비열과 밀도는 변하는데 특히, 물의 밀도는 4℃를 최대값으로 0℃~4℃ 사이에서는 온도가 증가함에 따라 밀도도 증가하지만 4℃ 이후에는 온도가 증가함에 따라 밀도는 감소한다.

위의 이유로하여 얼음의 밀도는 S. J. Laplaca 등<sup>(5)</sup>이 제시한 식 (1)을, 온도에 따른 얼음의 비열은 M. Sugisaki 등<sup>(6)</sup>이 제시한 식 (2)를 사용하여 구하였다. 물의 밀도에 대해서는 B. Gebhart<sup>(7)</sup>가 제시한 식 (3)을 이용하여 온도에 따른 각 물성치들을 계산한 후, 그 물성치를 통해 각각의 식 (6), (7), (8)을 이용하여 시간에 따른 수직원통내 상변화 물질에서의 전체적인 용융에너지를 도출하였다.

$$\rho_s = 917(1 - 1.17 \times 10^{-4}T) \quad \text{at } 0^\circ\text{C} \geq T \geq -140^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$C_s = 0.185 + 0.689 \times 10^{-2}(T + 273) \quad \text{at } 0^\circ\text{C} \geq T \geq -183^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$\rho_l = 999.9720(1 - 9.2972 \times 10^{-6}|T - 4.0293|^{1.8948}) \quad \text{at } 173^\circ\text{C} \geq T \geq 0^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$C_l = 4.2 \sim 4.21 \quad (4)$$

$$\bar{C}_s = \frac{1}{T - T_{ini}} \int_{T_{ini}}^T C_s dT \quad (5)$$

$$E_1 = \int \rho_s \bar{C}_s (T - T_{ini}) dV \quad (6)$$

$$E_2 = \int \lambda \rho_l dV \quad (7)$$

$$E_3 = \int \rho_1 C_1 (T - T_{mel}) dV \quad (8)$$

$$E_{tot} = E_1 + E_2 + E_3 \quad (9)$$

### 3. 실험장치 및 실험방법

본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치의 주요부로는 수직원통형 빙축열조, 실험수행시 열손실을 최소화하기 위한 빙축열조의 외벽과 주위와 빙축열조를 단열시켜주는 항온시스템, 유입구에서의 입구온도를 제어해 주는 온도 조절장치 및 온도 측정장치 그리고 기록장치 등이 있다.

본 실험에서 사용된 수직원통형 빙축열조는 용융과정시 가시화를 위하여 내경 100mm, 길이 250mm, 두께 3mm의 pyrex 재질의 유리관을 사용하였다. 또한, 항온시스템에는 빙축

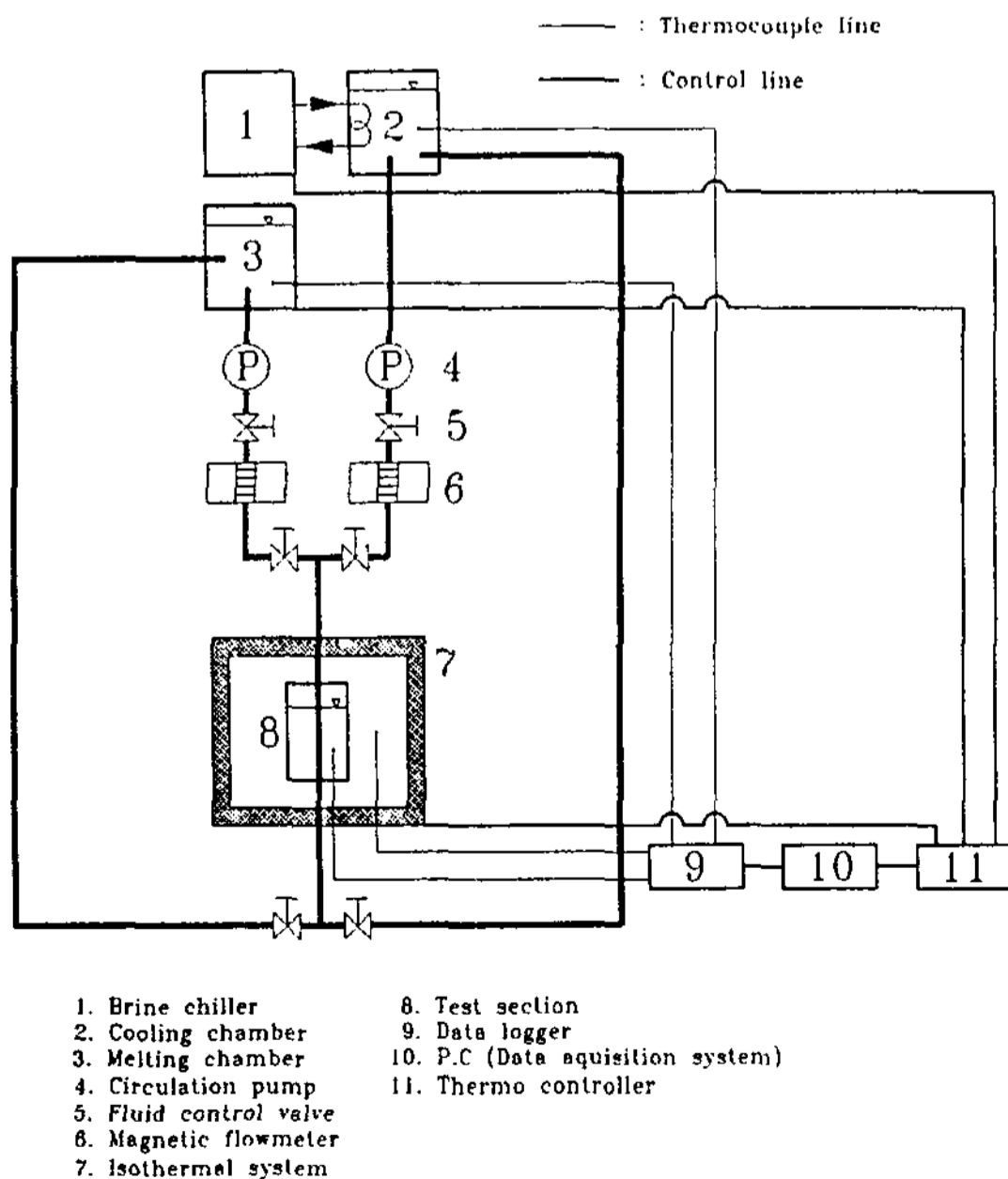


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

열조 크기의 acrylic plate로 제작한 window를 만들어 camcorder로써 용융형상을 촬영하였으며, Fig. 2에서와 같이 열전대(T-type ;  $\phi = 0.1mm$ )를 장착하여 축열조 내부의 온도를 측정하였다. 측정된 온도와 용융형상은 data acquisition system(Fluke 2280B)과 video recorder를 이용하여 PC에 기록하여 분석하였다.

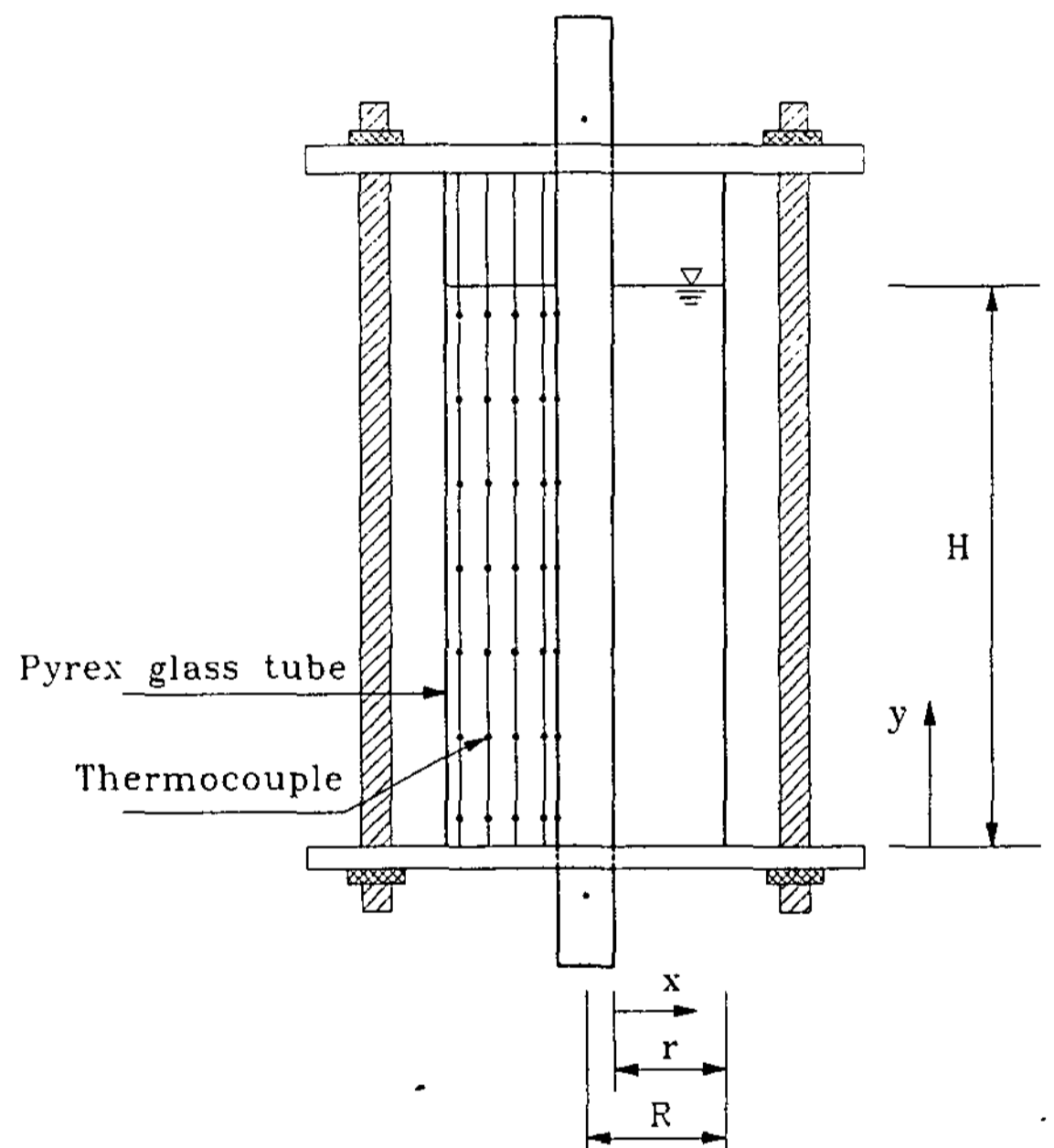


Fig 2. Thermocouple positions in the test section

실험방법으로는 축열조 내 200 mm의 높이에 해당하는 1.64liter의 순수한 물을 채우고 실험 초기조건인  $-10^{\circ}C$ 의 초기 과냉온도로 응고시킨 후, 입구온도가 각각  $7^{\circ}C$ ,  $4^{\circ}C$ ,  $1^{\circ}C$ 인 작동유체를 각각 상향과 하향으로 유입시켜 용융실험을 수행하였다. 용융실험 중에 일정시간마다 camcorder로써 상변화물질의 상경계면을 촬영하여 상경계면을 측정하였다. 실험에 사용된 각 실험조건들은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions.

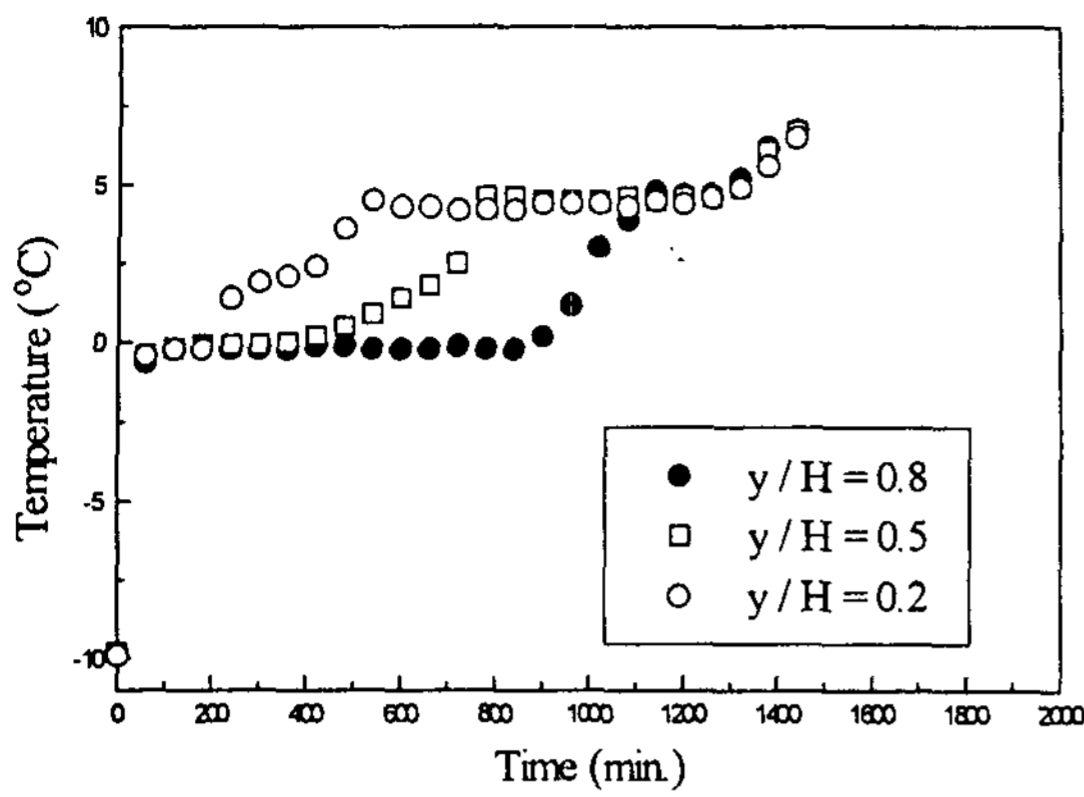
Initial temperature of ice	Flow direction of working fluid	Working fluid temperature
-10℃	Downward	1℃
		4℃
		7℃
	upward	1℃
		4℃
		7℃

#### 4. 결과 및 고찰

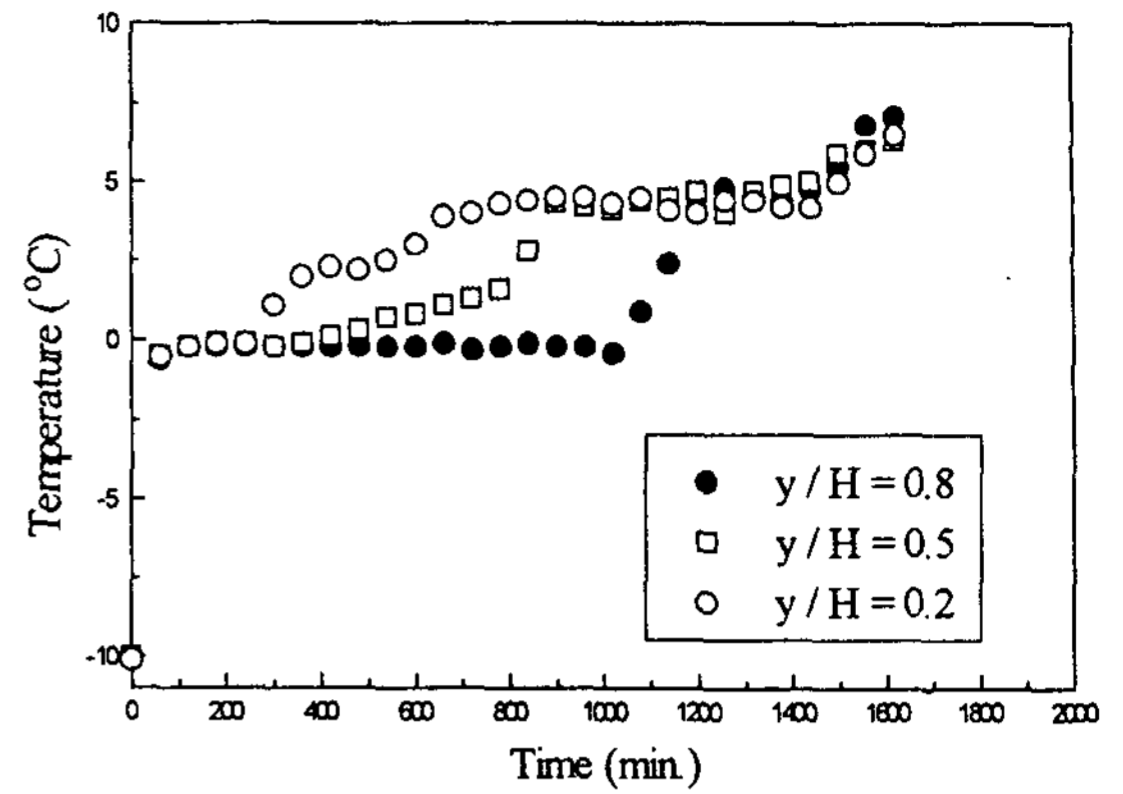
Fig. 3 (a), (b)는 얼음의 초기온도( $T_{ini}$ )가  $-10^{\circ}\text{C}$ , 입구온도( $T_{inlet}$ )가  $7^{\circ}\text{C}$ 일 때 작동유체의 유입방향이 상향과 하향인 경우, 수직원통내 반경방향의 위치( $x/r$ )가 0.375, 축방향의 위치( $y/H$ )가 각각 0.8, 0.5, 0.2인 지점에서 상변화물질의 온도를 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 작동유체의 유입방향이 상향일 경우 용융 실험시작 후 약 180분까지는 전도의 영향으로 상부( $y/H=0.8$ ), 중앙부( $y/H=0.5$ ), 하부( $y/H=0.2$ )의 온도가 유사하게 나타났으나 축열조내 하부에서는 실험 시작후 약 180분, 중앙부에서는 약 300분, 상부에서는 약 840분 정도에서 잠열구간을 거쳐 온도가 상승하였다. 이후 하부에서는 약 600분, 중앙부에서는 약 840분, 상부에서는 약 1140분부터  $4^{\circ}\text{C}$  부근에서 온도가 일시적으로 상승하지 않는 온도정체구간이 나타났다. 이는 최대밀도점( $4^{\circ}\text{C}$ )에 도달한 액상이 자연대류에 의하여 축열조 하부로 이동하게 되는, 즉 가열관에서 전달되는 에너지가 축열조 하부에 적체되어 있는 최대밀도점의 액상온도를 높여주는 현열에너지로 사용되는 것이 아니라, 고상인 얼음

이 액상인 물로 용융될 때의 잠열에너지로 사용됨에 따라 이때 용융된 물이 최대밀도점 온도에 도달하게 됨으로써 다시 축열조 하부로 이동하게 되는 자연대류에 기인함이라 사료된다.

이후 가열관에서 전달되는 에너지는 최대밀도점 온도를 유지하고 있는 액상의 현열에너지로 사용됨에 따라 약 1260분부터 전체 액상내의 활발한 자연대류의 영향으로 상부, 중앙부, 하부의 온도가 상승하여 약 1440분 후에는 입구온도에 도달한다. 작동유체의 유입방향이 하향일 경우, 각 위치에서의 온도변화는 상향의 경우와 유사한 경향을 나타낸다. 용융 실험시작 후, 약 240분까지는 전도의 영향으로 상부, 중앙부, 하부에서의 온도가 유사하게 나타났으나 축열조내 하부에서는 실험 시작후 약 240분, 중앙부에서는 약 360분, 상부에서는 약 1020분에 잠열구간을 지나 온도가 상승하였다. 이후 하부에서는 약 660분, 중앙부에서는 약 900분, 상부에서는 약 1200분부터  $4^{\circ}\text{C}$  부근에서 온도가 정체되는 구간을 나타냈다. 그리고 약 1440분부터 상부, 중앙부, 하부의 온도가 상승하여 약 1600분 후에는 입구온도에 도달한다. 작동유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우에 비해 용융 진행속도가 빠른 이유로는 유입방향이 상향인 경우 가열관에 접하는 가열관 부근의 액상 하부온도가 상부의 온도보다 높으므로 밀도가 낮은 하부의 물이 가열관을 따라 상승하게 되고 이에 따른 자연대류가 발생하여 용융이 활발히 진행된다. 반면 하향으로 유입되는 경우에는 반대로 가열관에 접하는 가열관 부근의 액상 상부온도가 하부의 온도보다 높아 상향에 비해 자연대류의 영향이 상대적으로 적기 때문이라 사료된다.

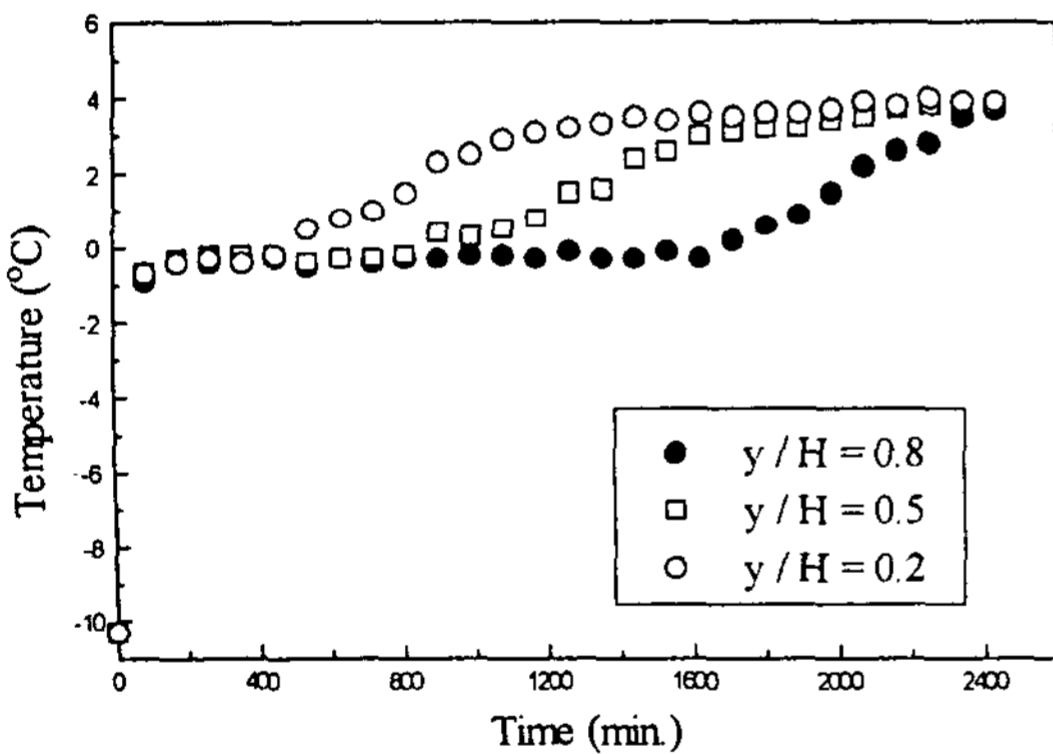


(a) upward

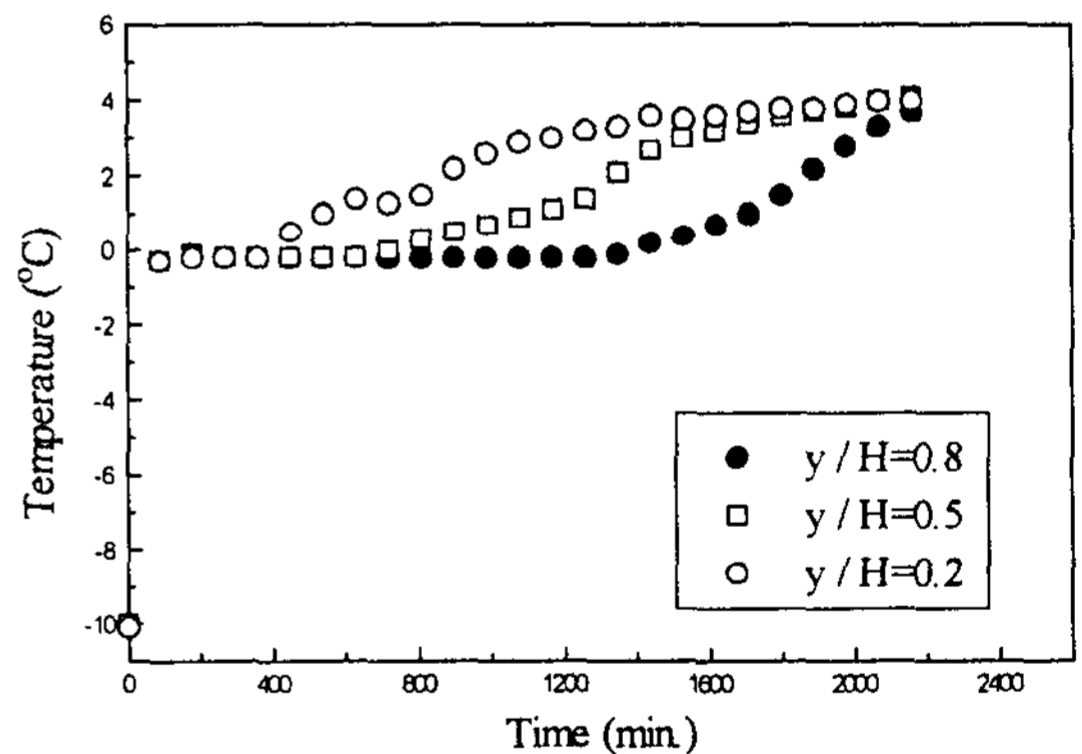


(b) downward

Fig 3. Temperature profiles at the different position of  $y/H$   
( $x/r=0.375$ ,  $T_{ini}=-10^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{inlet}=7^{\circ}\text{C}$ )



(a) upward flow



(b) downward flow

Fig 4. Temperature profiles at the different position of  $y/H$   
( $x/r=0.375$ ,  $T_{ini}=-10^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{inlet}=4^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 4 (a),(b)는 입구온도가  $4^{\circ}\text{C}$ 일 때 작동 유체의 유입방향이 상·하향일 경우 수직원통 내 반경방향의 위치( $x/r$ )가 0.375, 축방향의 위치( $y/H$ )가 0.8, 0.5, 0.2인 지점에서 상변화 물질의 온도를 시간의 경과에 따라 나타낸 것으로 입구온도가  $7^{\circ}\text{C}$ 일 때의 경우와 유사한

경향을 나타내고 있다. 그러나 시간이 경과됨에 따라 작동유체의 입구온도가  $7^{\circ}\text{C}$ 인 경우와는 달리 하향인 경우가 상향인 경우보다 온도 상승이 빨라져 최대 밀도점인  $4^{\circ}\text{C}$ 에 빠르게 도달하는 것으로 나타났다. 이는 상향인 경우 실험초기에 작동유체의 입구온도 영향으로 축

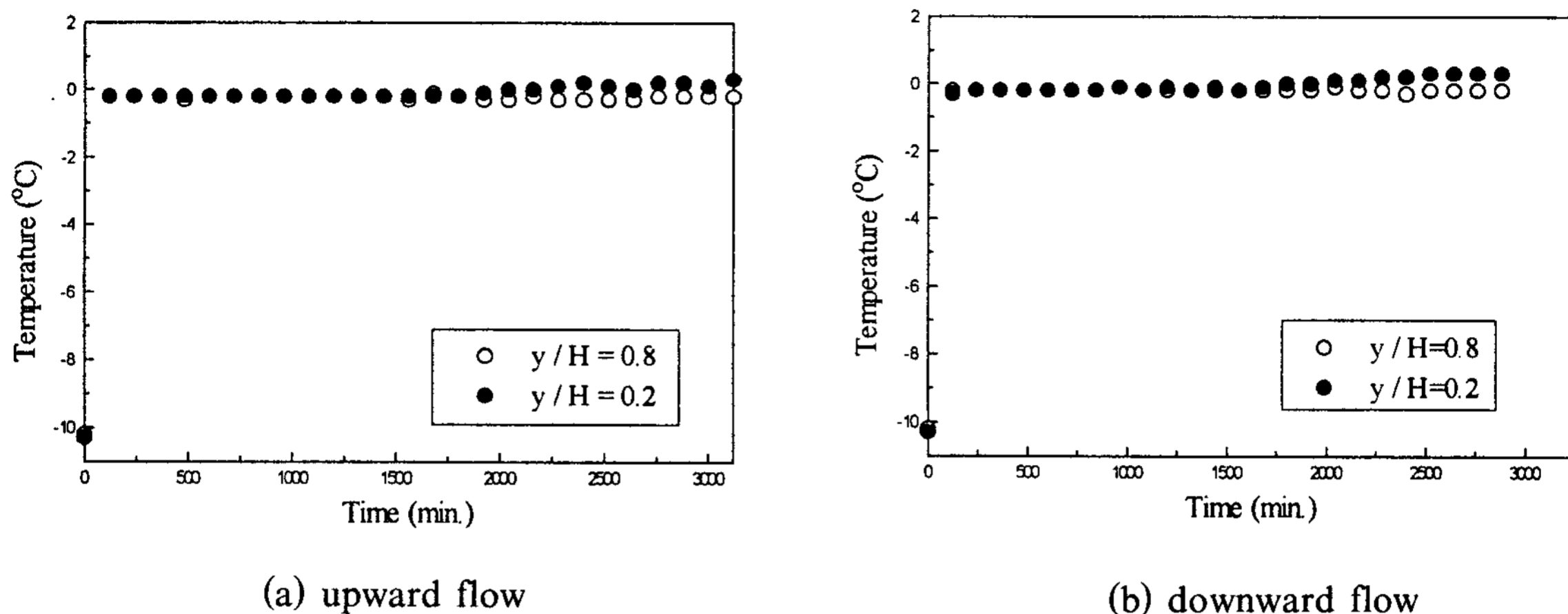


Fig 5. Temperature profiles at the different position of  $y/H$   
 ( $x/r=0.375$ ,  $T_{ini}=-10^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{inlet}=1^{\circ}\text{C}$ )

열조내 하부의 온도가 하향인 경우보다 빠르게 상승한 반면, 시간이 경과되면서 역으로 하향인 경우가 용융에 따른 부피축소에 의한 전열면의 감소효과보다는 입구온도의 영향이 더 크게 작용하여 액상의 상부온도가 상향인 경우보다 빠르게 상승됨에 따라 이로 인한 자연대류 열전달이 활발히 일어나기 때문이라 사료된다.

Fig. 5 (a), (b)는 입구온도가  $1^{\circ}\text{C}$ 일 때 작동유체의 유입방향이 상향 및 하향일 경우 수직원통내 반경방향의 위치( $x/r$ )가 0.375, 축방향의 위치( $y/H$ )가 0.8, 0.5, 0.2인 지점에서 상 변화물질의 온도를 시간의 경과에 따라 나타낸 것으로 전도 열전달의 지배적임에 따라 온도분포는 매우 유사하게 나타나고 있다.

Fig. 6 (a),(b),(c)는 입구온도가  $7^{\circ}\text{C}$ ,  $4^{\circ}\text{C}$ ,

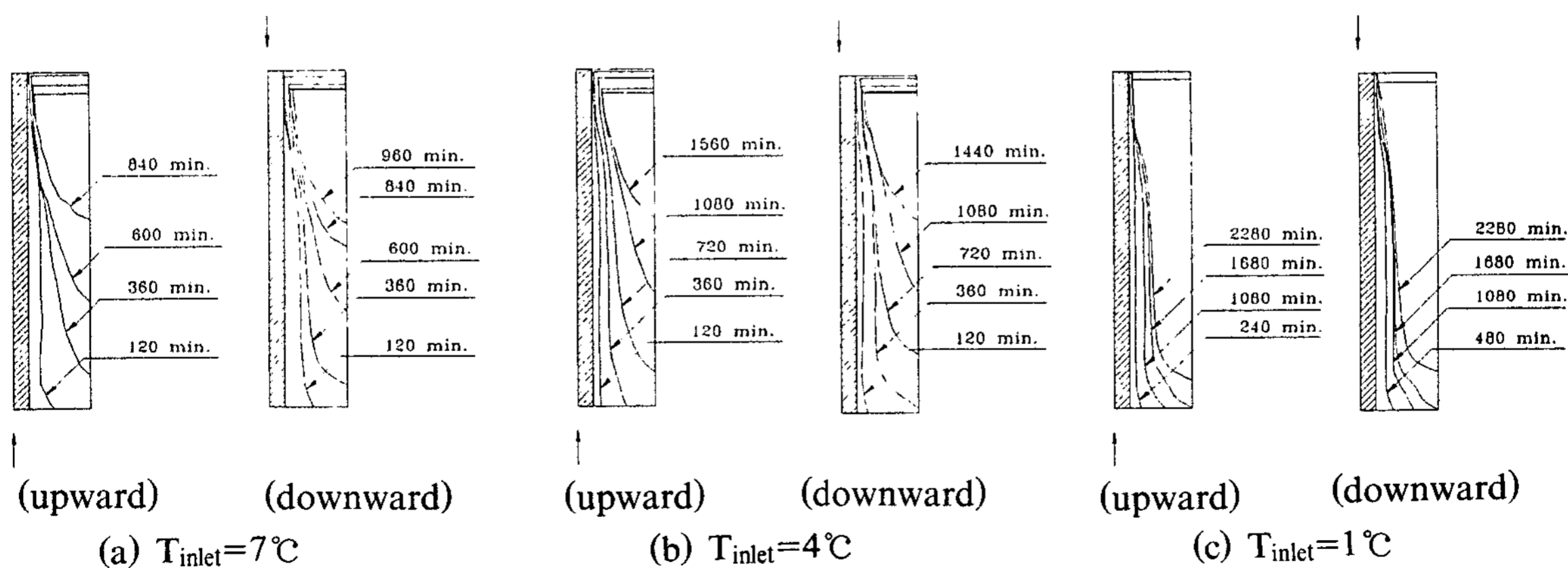


Fig. 6 Timewise variations of solid-liquid interfaces ( $T_{ini}=-10^{\circ}\text{C}$ )



1°C인 경우 작동유체의 유입방향에 따른 상경계면의 형상변화를 그림으로 나타낸 것이다.

그림에서 나타난 바와 같이 용융이 진행됨에 따라 고상인 얼음이 액상인 물로 상변화되면서 얼음과 물의 밀도차에 의해 물은 축열조 하부에 적체되며 얼음은 부양하게 된다. 이때 최대밀도점인 4°C의 물은 항상 축열조 하부로 유동함에 따라 축열조 하부에서 용융이 활발히 진행됨으로써 상경계면의 모양은 상·하향 모두 전체적으로 종모양 형태의 곡선을 나타내고 있다. 또한 작동유체의 입구온도가 7°C인 경우가 4°C, 1°C인 경우보다 용융과정시 액상내 자연대류에 의한 열전달이 활발하게 작용함에 따라 상경계면의 전진속도가 빠르게 진행됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 작동유체의 입구온도가 각각 7°C, 4°C, 1°C인 경우 작동유체의 유입방향에 대한 용융률 변화를 시간경과에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 작동유체의 입구온도가 7°C인 경우 4°C, 1°C인 경우보다 액상내 자연대류에 의한 열전달이 활발하게 작용함에 따라 용융이 빠르게 진행되는 것으로 나타났다. 작동유체의 입구온도가 7°C인 경우 작동유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 용융 진행 속도가 빠른 것으로 나타났다. 이는 작동유체의 입구온도가 4°C 이상일 경우 입구온도의 영향으로 축열조 하부의 물은 4°C 이상으로 온도가 상승함에 따라 축열조 상부로 유동하게 된다. 따라서 작동유체의 입구온도가 7°C인 경우 유입방향이 하향인 경우보다 상향인 경우에서 이러한 자연대류 열전달이 보다 활발하게 일어남에 따라 용융 진행 속도 또한 상향인 경우가 하향인 경우보다 빠르게 나타났다. 그러나 작동유체의 입구온도가 4°C인 경우 입구온도가 7°C인 경우와는 반대로 유입방향이 하향인 경

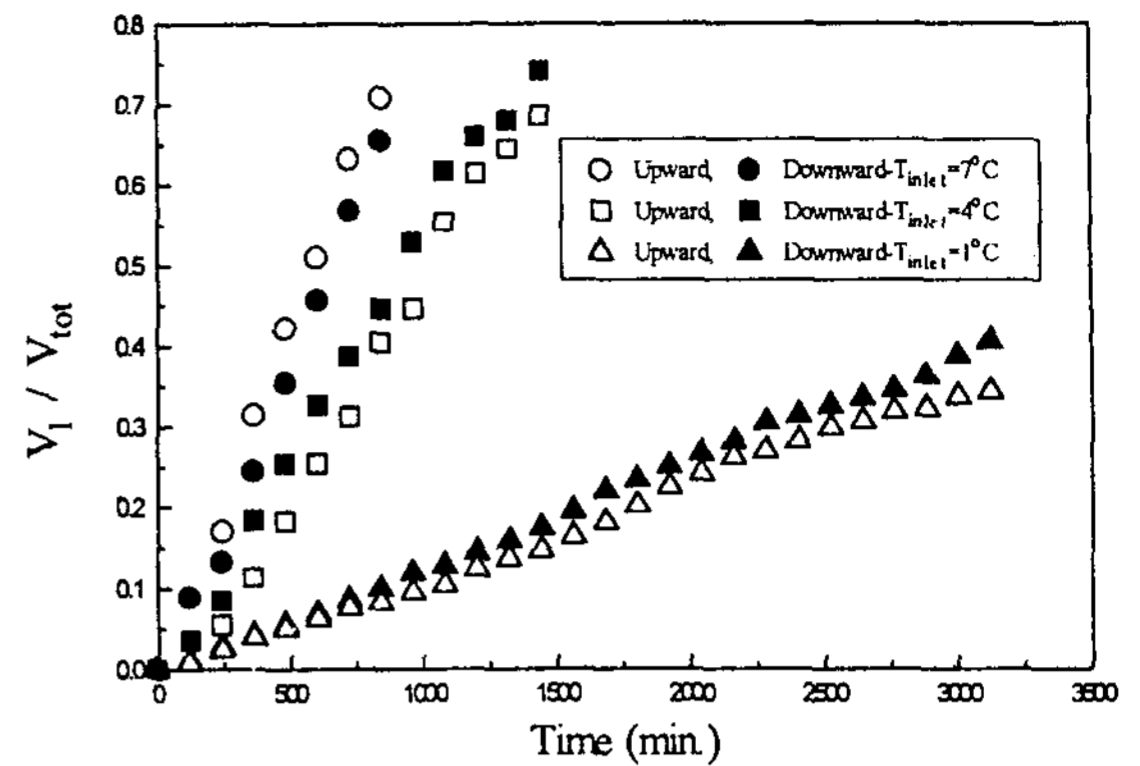


Fig. 7 Timewise variations of the rate of melting ( $T_{ini} = -10^\circ\text{C}$ )

우가 상향인 경우보다 용융 진행속도가 빠른 것으로 나타났다. 이는 작동유체의 입구온도가 최대밀도점 온도인 4°C임에 따라 입구온도의 영향으로 작동유체의 유입방향이 하향인 경우가 상향인 경우보다 액상 상부에서의 온도상승이 빠르게 진행되어 최대밀도점온도에 가까운 액체가 하향으로 유동하는 자연대류에 의해 용융속도는 하향인 경우가 상향인 경우보다 빠르게 나타나는 것이라 사료된다. 작동유체의 입구온도가 1°C인 경우, 작동유체의 유입방향에 의한 용융률 변화는 용융시작후 약 720분까지는 작동유체의 입구온도에 의한 전도열전달의 지배적인 영향으로 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 용융속도가 약간 빠른 것으로 나타났으나, 이후부터는 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 용융이 빠르게 진행되는 것으로 나타났다. 이는 용융이 진행됨에 따라 유입방향이 하향인 경우 입구온도의 영향으로 인하여 축열조내 액상 상부에서의 온도가 상향인 경우보다 높은 온도를 유지함에 따라 앞서 논한 자연대류의 영향을 받아 하향인 경우가 상향인 경우보다 용융이 빠르게 진행되는 것이라 사료된다.



Fig. 8 은 입구온도가 7°C, 4°C, 1°C일 경우 시간 경과에 따른 용융에너지의 변화를 나타낸 것으로 이중 1°C의 경우에는 용융율이 약 40%까지 이르는 시각까지의 용융에너지를 나타낸 것이다. 실험초기에는 전도의 지배적인 영향으로 용융에너지가 급격하게 증가하였으나 시간이 경과함에 따라 그 증가율은 서서히 둔화되는 경향을 보여 주고 있다. 또한 작동유체의 입구온도가 7°C 인 경우, 작동유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 빠르게 증가하는 것으로 나타났으나, 4°C 와 1°C 의 경우에는 7°C 와는 달리 유입방향이 하향인 경우가 상향인 경우보다 빠르게 증가하는 것으로 나타났다.

이는 7°C의 경우 하향에 비하여 상향인 경우가 입구온도의 영향으로 인해 축열조 하부에 적체된 액상의 온도가 최대밀도점 온도 이상으로 상승됨으로써 발생하는 자연대류의 영향이 크게 작용한 반면, 4°C, 1°C 의 경우는 작동유체의 입구온도가 최대밀도점 이하의 온도임에 따라 7°C 와는 달리 상향보다는 하향의 경우가 입구온도의 영향을 더 크게 받기 때문이라 사료된다.

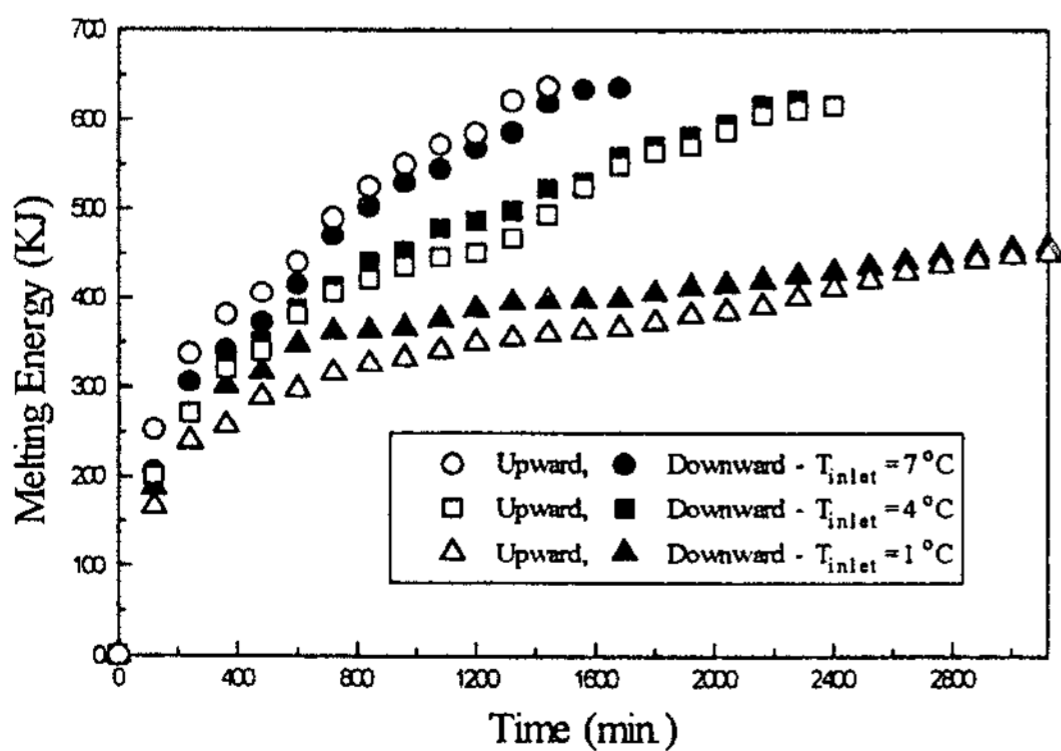


Fig. 8 Timewise variations of melting energy during melting process ( $T_{ini} = -10^{\circ}\text{C}$ )

## 5. 결 론

1. 작동유체의 입구온도가 7°C, 4°C이고 작동유체의 유입방향이 상·하향인 모든 경우 최대밀도점 온도인 4°C 부근에서 온도가 일시적으로 상승하지 않는 온도정체구간이 나타났다.

2. 작동유체의 입구온도가 7°C인 경우, 작동유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 축열조 상부에서의 온도상승이 빠르게 나타난 반면, 작동유체의 입구온도가 4°C인 경우, 작동유체의 유입방향이 하향인 경우가 상향인 경우보다 빠르게 나타났다. 입구온도가 1°C인 경우는 전도열전달이 지배적으로 유입방향이 상향과 하향인 경우 온도분포가 거의 같은 경향을 보여주고 있다.

3. 용융이 진행됨에 따라 고상인 얼음이 액상인 물로 상변화되면서 얼음과 물의 밀도차에 의해 물은 축열조 하부에 적체되고 얼음은 부양하게 된다. 이때 최대밀도점인 4°C의 물은 항상 축열조 하부로 유동함에 따라 축열조 하부에서 용융이 활발히 진행됨으로써 상경계면의 모양은 상·하향 모두 전체적으로 종모양을 나타내고 있다. 또한 작동유체의 입구온도가 높을수록 자연대류에 의한 열전달이 활발하게 작용함에 따라 상경계면의 전진속도는 빠르게 나타났다.

4. 작동유체의 입구온도가 7°C인 경우, 용융율( $V_i/V_{tot}$ )은 작동유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 빠르게 증가한 반면, 작동유체의 입구온도가 4°C, 1°C인 경우는 7°C 경우와는 달리 상향인 경우가 하향인 경우보다 빠르게 증가하는 것으로 나타났다.

5. 시간경과에 따른 용융에너지( $E_{tot}$ )의 변화는 용융초기에 전도의 지배적인 영향으로 빠르게 증가하는 것으로 나타났으나, 이후 시간

이 경과함에 따라 그 증가율이 서서히 둔화되는 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 1994년도 한국과학재단(특정연구과제 : 94-0200-10-01-3)의 연구비지원에 의하여 그 일부가 수행되었다.

## 참고 문헌

1. H. Rieger, H. Beer, "The Melting Process of Ice inside Horizontal Cylinder : Effects of Density Anomaly", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 108, pp. 166-173, 1986.
2. R. A. Brewster, B. Gebhart, "An Experimental Study of Natural Convection Effect on Downward Freezing of Pure Water", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 2, pp. 331-348, 1988
3. M. Sugawara, H. Saito, N. Seki and T. Fujita, "Experimental Study of Freezing of Water in a Closed Circular Tube with Pressure Increasing", 4th Int. Symposium on Thermal Engineering & Science for Cold Regions, New Hampshire, pp. 96-101, 1993
4. S. T. Ro, "Two-Dimensional Freezing of Water Filled Between Vertical Concentric Tubes Involving Density Anomaly and Volume Expansion", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 10, pp. 2647-2656, 1993
5. S. J. Laplaca, B. Post, "Thermal Expansion of Ice", Acta Crystallogr, Vol. 13, pp. 503~505, 1960.
6. M. Sugisaki, H. Suga and S. Seki. "Calorimetric Study of the Glassy State. IV. Heat Capacities of Glassy Water and Cubic Ice", Bull, Chem. Soc. Japan, Vol. 41, pp. 2591~2599, 1968.
7. B. Gebhart, "A New Density Relation for Pure and Saline Water", Deep Sea Res., Vol. 24, pp. 831~848, 1977.

# An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics during Outward Melting Process of Ice in a Vertical Cylinder

(comparison of thermal performance on the flow direction of working fluid)

D. H. Kim\* · D. C. Kim\* · I. K. Kim\* · Y. K. Kim\* · C. S. Yim\*\*

\* *The graduate school of Inha University*

\*\* *Inha University*

## ABSTRACT

This study presents experimental results of heat transfer characteristics of P. C. M. during outward melting process in a vertical cylinder. The experiment was carried out in six conditions, i. e. , three different inlet temperature (7°C, 4°C and 1°C) and two directions of working fluid (upward and downward). Melting P. C. M. produced a bell-shaped phase change interface. When the inlet temperature was 7°C, the lower region remained at 4°C until the temperature of upper region reached 4°C. This was due to the state of maximum density of the lower region. When the direction of the working fluid in the case of 7°C, inlet temperature, was upward, the rate of melting and the total melting energy were higher than when its direction was downward. But the rate of melting and the total melting energy appeared higher value as its direction was downward when the inlet temperature is 4°C and 1°C.