

## 구형용기내 상부면가열에 의한 유동빙의 용해열전달

김 명 환\* · 김 경 근\*

Melting Heat Transfer of Liquid Ice in a Rectangular Vessel with Heated Top Wall

M. H. Kim · K. K. Kim

**Key words** : Melting heat transfer(용해열전달), Liquid ice(유동빙), Close-contact melting(직접접촉용해), Rectangular vessel(구형용기), Aqueous solution(수용액)

## Abstract

Melting characteristics of unrestrained liquid ice in a rectangular vessel with heated top wall were investigated experimentally. The liquid ice, a mixture of ice particles and ethylene-glycol aqueous solution, was adopted as a testing material. During the melting process the liquid ice was drawn by buoyancy to the heated top wall of the rectangular vessel where close-contact melting occurred. The melting behavior and melting rate of the liquid ice as well as local/mean heat-transfer coefficient at the heated top wall were observed and measured under a variety of conditions of heat flux and various initial concentration of the aqueous binary solution.

It was found that the heat transfer of the heated top wall is remarkably promoted by the close-contact melting, and that the dendritic frozen layer at the lower interface of the liquid ice is formed. Photographic evidence demonstrated that plumes containing solute-rich liquid issued from isolated chimneys within the liquid ice layer where segregation of interstitial channel took place.

기호설명		Gr <sub>s</sub> : 농도에 대한 Grashof수
C	: 수용액농도	(= g · β <sub>s</sub> · (C <sub>1</sub> - C <sub>0</sub> ) · H <sup>3</sup> /ν <sup>2</sup> )
C <sub>1</sub>	: 초기수용액농도	g : 중력가속도
C <sub>0</sub>	: 0	H : 시험조의 내부높이
Gr <sub>q</sub>	: 열유속에 대한 Grashof수	h : 평균열전달율
	(= g · β <sub>t</sub> · q · H <sup>3</sup> /(λ · ν <sup>2</sup> ))	h <sub>x</sub> : 국소열전달율
		I.P.F. : 빙층진율

\* 정회원, 한국해양대학교 해사대학

	(Ice Packing Factor, 빙질량/수용액질량)	
L	: 유동빙의 용해잠열	J/kg
Pr	: Prandtl수	( $=\nu/\alpha$ )
$Q_t$	: 무차원 총가열량	( $=q \cdot t/(\rho \cdot L \cdot W)$ )
q	: 가열면 열유속	W/m <sup>2</sup>
Ste	: Stefan수	( $=C_p \cdot (T_o - T_i)/L$ )
T	: 수용액온도	°C
$T_b$	: 유동빙온도	°C
$T_i$	: 초기유동빙온도	°C
$T_o$	: 초기수용액농도 0 wt%의 유동빙온도	°C
$T_{wx}$	: 국소가열면온도	°C
t	: 실험개시로부터의 경과시간	min.
W	: 실험조의 내부폭	m
$W_i$	: 초기충진된 빙질량	kg
$W_m$	: 용해된 빙질량	kg
wt	: 질량백분율	%
X	: 시험조내부 폭방향의 거리	m
Y	: 시험조내부 저면으로부터의 높이	m
$\alpha$	: 열확산계수	m <sup>2</sup> /s
$\beta_t$	: 온도기준 체팽창계수	1/K
$\beta_c$	: 농도기준 체팽창계수	1/wt%
$\lambda$	: 열전도율	W/(m · K)
$\nu$	: 동점성계수	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	: 용해액의 밀도	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_i$	: 얼음의 밀도	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	: 물의 밀도	kg/m <sup>3</sup>
$\Delta V$	: 용해에 의한 체적감소량	m <sup>3</sup>
$\Delta V'$	: 용해액의 온도상승에 의한 체적증가량	m <sup>3</sup>

## 1. 서 론

여름철 주간에는 냉방기 사용이 집중되고, 이로 인한 여름철 주야간의 전력수요격차의 확대는 발전설비 투자의 증가와 성에너지의 차원에서 큰 문제가 되고 있다. 이와 같은 여름철 주야간의 전력수요를 평준화해야 하는 필요성에 따라 냉방장치의 경우에는 값싼 잉여의 야간전력을 이용하여 얼음을 제조하여 그 용해잠열을 주간의 냉방장치에 이용하고자 하는 빙축냉시스템<sup>1)</sup>이 사용되고 있다. 축냉시스템의 축냉재로서는 용해잠열이 큰 고형

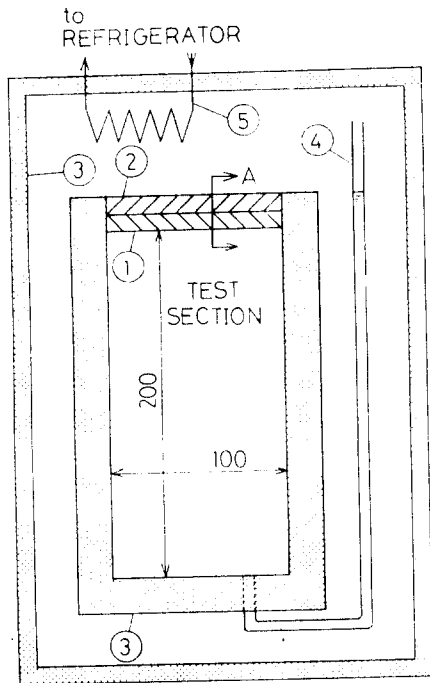
빙이 이용되고 있지만 빙의 연속 제조성, 채냉열시의 부하응답성 및 빙의 운반성등의 측면으로부터 새로운 축냉재로서 유동빙<sup>2),3)</sup>이 주목되고 있다. 유동빙은 주로 에칠렌글리콜수용액 또는 프로필렌글리콜수용액을 동결시킴으로서 얻어지는 미세한 빙립과 빙립의 접합을 막는 윤활제 역할의 에칠렌글리콜수용액 또는 프로필렌글리콜수용액과의 혼합물이다. 유동빙의 제조방법 및 축냉방법에 관한 수용액의 동결문제에 관하여서는 실험적<sup>4),5)</sup> 및 해석적<sup>6),7)</sup>으로 비교적 폭 넓게 검토되어 있다. 그러나 유동빙을 유용하게 이용하기 위하여서는 유동빙으로부터 냉열을 취득하는 방법에 관한 상세한 기초자료가 필요하지만 채냉열시에 발생하는 유동빙의 용해특성에 관하여서는 충분한 검토가 이루어져 있지 않다.

본 연구에서는 유동빙의 용해메카니즘을 규명하고 용해열전달에 관한 기초자료를 확보하고자 한다. 구형용기내에서 측면이 가열되는 경우 및 하부면이 가열 되는 경우에 관하여서는 이미 그 실험적 결과<sup>8),9)</sup> 및 수치해석적 결과<sup>10)</sup>를 보고하여 용해액상부에 있어서의 성층의 형성과 그 메카니즘 및 용해열전달의 특성을 분명히 하였다. 본 연구에서는 상부면이 가열되는 구형용기내에서 유동빙이 용해될 경우의 유동빙의 용해거동과 용해열전달에 미치는 가열면 열유속과 유동빙의 초기수용액농도의 영향에 관하여 실험적으로 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1에 실험장치의 시험부를 나타낸다. 실험장치는 시험부, 브라인 순환계, 광학계 및 측정계로 구성되어 있다. 시험조는 내부길이가 100×70×200mm인 투명 아크릴의 구형용기로 상면은 가열면, 좌·우 수직면과 하면은 단열면으로 되어 있다. 빙의 용해에 의한 체적감소분을 공급하는 보상액과 보상구의 위치설정에 있어서는 보상액의 공급에 의한 용해거동에 미치는 영향을 가능한 막기 위하여 시료인 유동빙의 초기수용액농도와 동일한 농도의 수용액을 보상액으로 하고 보상구는 시



- ① MAIN HEATER                      ② GUARD HEATER
- ③ INSURATION WALL                ④ RECHARGING HOLE
- ⑤ HEAT EXCHANGER

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

험조의 하부에 설치하여 공급된 보상액이 유동하지 않고 시험조의 저면에 정체하도록 하였다. 시험조의 전면에는 단열 및 걸로방지를 위한 이중유리를 사용하여 시험조내를 관찰할 수 있도록 하였다. 가열면은 주가열기와 보조가열기로 구성되어 있다. 두께 5mm의 베이클라이트판의 양면에 두께 30 $\mu$ m의 스테인레스박판을 집착시키고 주가열기의 표면에는 절연용의 도료를 얇게 칠하였다. 주가열기의 표면온도를 측정하기 위하여 스테인레스판과 베이클라이트판 사이에  $\phi$ 0.1mm C A 열전대를 14개소에 등간격으로 부착하였다. 주가열기의 배면에도 보조가열기의 온도측정을 위하여 열전대를 부착하였다. 또한, 유동병층의 온도를 측정하기 위하여  $\phi$ 0.1mm C A 열전대를 외경 0.8mm의 스테인레스봉에 삽입시키고 열전대의 선단인 온도감지부를 봉으로부터 돌출시킨 것을 일정한 속도로 정속히 유동병내를 통과시킴으로서 유동

병내부의 온도분포를 연속적으로 측정하였다. 시험조는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 항온실에 설치하였다.

### 2.2 실험방법

본 실험에서는 임의 조건(빙충진을 및 초기수용액농도)의 유동병을 제작하기 위하여 시료로서 소정의 온도로 유지된 미세한 빙립군(평균직경 0.5mm)을 소정의 온도·농도로 설정된 에칠렌그리콜수용액에 투입하고 교반하여 유동성을 부여한 것을 사용하였다. 유동병의 빙충진율(I.P.F.)은 65wt%로 하였다. 유동병의 실험개시전의 용해를 방지하기 위하여 시험조를 충분히 냉각시킨 뒤에 유동병을 시험조내에 투입시켜 소정의 열유속으로 통전가열을 개시한 시점을 실험개시시각으로 하였다. 실험중에는 계면형상과 용해액상부의 유동상황을 He-Ne가스레이저를 이용한 그림자영법으로 가시화하고 용해량과 가열면의 국소 및 평균열전달율의 측정을 행하였다.

### 2.3 열전달율의 산정법

국소 및 평균열전달율은 가열면과 유동병의 온도차 및 주가열기의 열유속으로부터 다음 식에서 산출한다.

$$h_x = q / (T_{m} - T_b) \tag{1}$$

$$h = (1/W) \int_0^L h_x dx \tag{2}$$

열전달율의 산정에 필요한 유동병의 온도로서는 Fig. 5에 보인 유동병내 평균온도를 이용하였다.

### 2.4 용해량의 측정법

용해량은 보상구에서 소정의 액위를 유지하도록 보상액을 공급하여 보상액의 공급량으로부터 체적감소량을 측정하고 다음 식에서 산출한다.

$$W_m = (\Delta V_l + \Delta V') \times (\rho_c \times \rho_l) / (\rho_w - \rho_l) \tag{3}$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 용해거동 및 용해 메카니즘

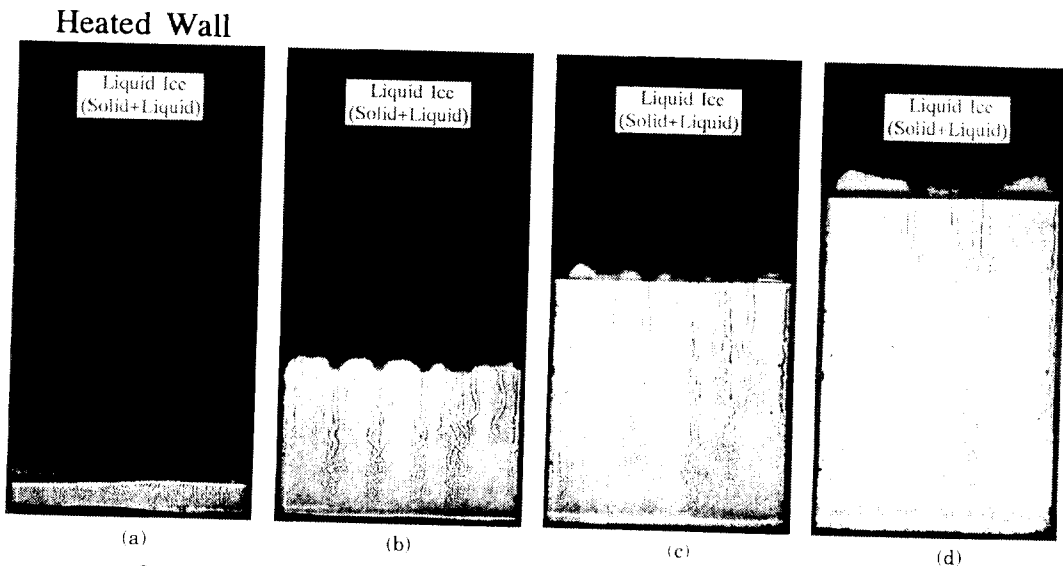
Fig. 2에 그림자영법을 이용하여 가시화한 시간 경과에 따른 유동빙의 용해거동을 보여주고 있다. 그림으로부터 유동빙은 시간의 경과와 함께 상부로 이동하여 가열면에 거의 접촉한 상태에서 용해되어지고, 용해액상부에는 유동빙의 하부계면으로부터 고농도수용액(용해액보다 큰 농도의 수용액)이 흘러 내리는 것을 볼 수 있다. 또한, 유동빙의 하부계면에서는 동결에 의한 침상빙이 관찰되어진다. 유동빙의 하부계면에 보이는 돌기부는 그 중심으로부터 고농도수용액이 흘러 내려서 그 주변에 침상의 동결층이 크게 성장한 것이다. 이와 같이 가열면과의 접촉전열을 동반하는 유동빙의 용해거동은 다음과 같은 메카니즘에 의하여 진행되어진다.

(1) Fig. 3(a)에 보인 바와 같이 용해개시와 함께 유동빙은 용해액과의 밀도차에 기인하는 부력으로 상부로 이동한다. 그 부력은 가열면과 용해계면 사이의 용해액을 연속적으로 구축하여 가열면과 용해계면 사이는 극히 얇은 액층의 상태를 유

지하게 된다. 용해액의 구축에 기인하는 얇은 액층내의 대류에 의한 영향은 무시할 수 있으며 가열면으로부터 용해계면으로의 열이동은 열전도가 지배적으로 된다. 또한, 열이동은 얇은 액층의 사이에서 일어나기 때문에 가열면은 낮은 온도를 유지하며 용해액의 현열 상승에 의한 용해량의 감소는 적다.

(2) 용해액상부에는 부력에 의한 유동빙의 이동과 함께 구축되어진 용해액과 유동빙의 하부계면으로부터 흘러 내리는 고농도수용액이 존재하여 그들 사이의 농도불안정에 의한 대류에 의하여 저농도용해액은 상방으로 고농도용해액은 하방으로 이동하여 정제하게 된다. 그 결과 Fig. 3(c)와 같이 용해액상부의 높이 방향으로 농도분포(상부쪽으로 농도가 증가)가 형성된다. 유동빙의 하부계면 근방에 존재하는 성층계면은 더욱 저농도의 용해액이 유동빙의 하부계면 근방에 정제하여서 그곳에 큰 농도차를 형성하기 때문이다.

(3) 용해계면 주위의 저농도용해액이 다공질층인 유동빙의 내부로 침투하는 것과 유동빙 내부의 고농도수용액과 유동빙 주위의 용해액과의 중력차로 유동빙 내부의 고농도수용액이 하부로 이동하여 유동빙의 하부계면으로부터 흘러 내리게 된



$C_i = 10\text{wt}\%$ ,  $q = 4.5 \times 10^4 \text{W/m}^2$ . a :  $t = 5\text{min}$ ., b :  $t = 30\text{min}$ ., c :  $t = 50\text{min}$ ., d :  $t = 70\text{min}$

Fig. 2 Melting behavior

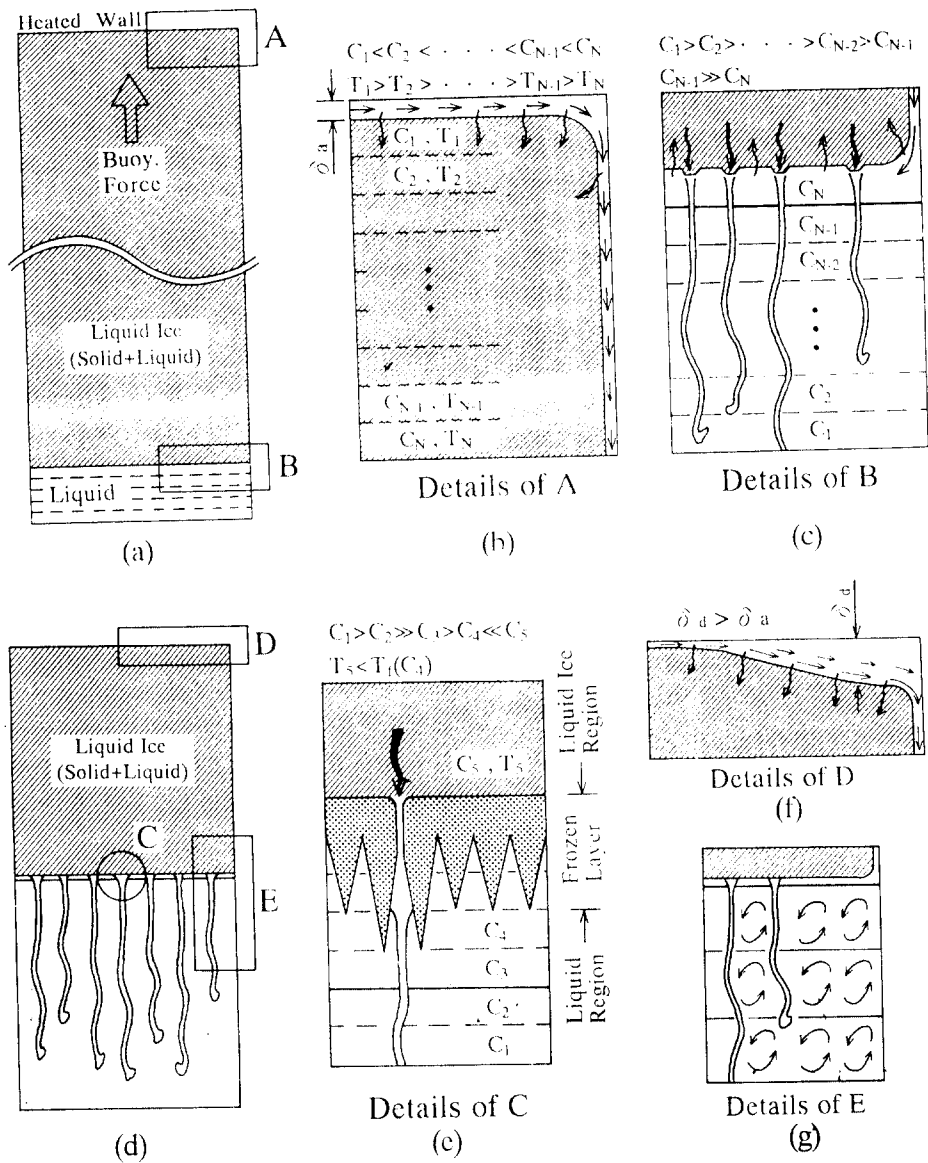


Fig. 3 Melting mechanism of liquid Ice

다. 따라서 용해계면 근방의 유동빙의 온도는 수용액농도의 저하와 함께 상승한다(Fig. 3(b)참조).

(4) 용해가 진행됨에 따라서 유동빙은 부력으로 더욱 더 상부로 이동한다(Fig. 3(d)). 용해계면은 Fig. 3(f)와 같이 가열면의 좌우양단으로 갈수록 가열면으로부터 서서히 멀어지게 된다. 이것은 얇은 액층의 수직단면을 통과하는 단위 시간당의 유량

이 열유속 일정한 가열조건에 의하여 좌우양단으로 갈수록 증가하기 때문이다. 이 액층의 두께의 증가는 가열면으로부터 용해계면으로의 열이동을 방해하여 가열면 온도를 상승시키게 한다.

(5) 유동빙 내부의 저온 고농도수용액이 하부로 이동하여 흘러 내리는 것에 의하여 하부계면 근방의 유동빙온도가 낮게 유지되는 것과 하부계면 근

방의 저농도용해액이 존재하는 것에 의하여 즉, 하부계면 근방의 유동빙 온도( $T_5$ )가 주위의 저농도 용해액의 동결온도( $T_f(C_4)$ )보다 낮기 때문에 유동빙의 하부계면 근방에는 침상의 동결층이 형성된다(Fig. 3(e)참조). 특히, 고농도수용액이 다량으로 흘러 내리는 경우 유출집 근방에는 침상빙이 크게 성장하여 동결층으로부터 돌출하는 형상(Fig. 3(e) 참조)을 하게 된다.

(6) Fig. 3(g)에 나타난 바와 같이 용해액상부에는 고농도수용액의 흘러 내림으로 인한 약한 대류 작용에 의하여 미약한 성층이 형성된다. 이 성층은 미약한 대류에 의한 용해액의 유동에너지와 상부로 갈수록 감소하는 농도분포의 형성으로 인한 힘의 평형작용에 의한 것이다. 그러나 유동빙의 용해에 미치는 성층의 영향은 거의 없다.

### 3.2 유동빙 온도

Fig. 4는 시간경과에 따른 유동빙의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림으로부터 유동빙의 온도분포는 초기유동빙의 온도(초기수용액농도 20wt%의 경우,  $-7.9$ )로부터 용해계면 근방과 하부계면 근방에 있어서 급격하게 상승하는 형태로 된다. 용해

계면 근방의 급격한 상승은 유동빙 내부의 고농도 수용액이 하부로 이동하여 하부계면으로부터 흘러 내리므로서 용해계면 근방의 유동빙의 수용액 농도가 시간경과와 함께 감소하고 유동빙의 온도가 수용액농도에 해당하는 평형동결온도에 가까운 온도를 보지하면서 상승하기 때문이다. 또한, 하부계면 근방에 있어서의 유동빙의 온도 상승은 하부계면 근방에 정체하는 저농도용해액의 침투에 의한 것이지만, 유동빙 내부의 고농도수용액이 하부로 이동하여 흘러 내리는 영향을 받기 때문에 용해계면 근방의 온도상승 만큼 현저하지 않다. 그

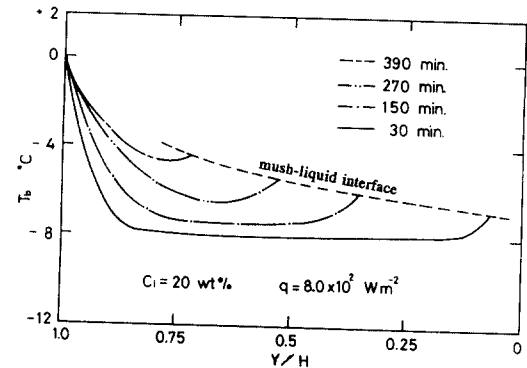


Fig. 4 Temperature distribution in liquid ice layer

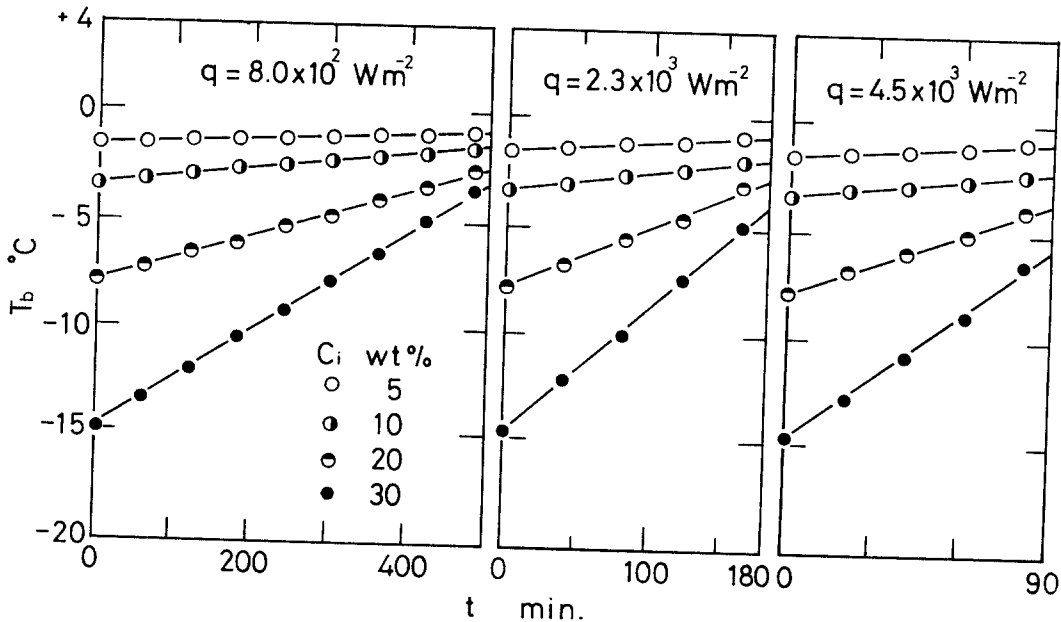


Fig. 5 Mean temperature of liquid ice

림으로부터 알 수 있는 바와 같이 시간의 경과와 함께 유동병의 온도가 증가함을 알 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 유동병 내부의 수용액농도가 시간의 경과와 함께 감소하기 때문이다.

Fig. 5은 유동병의 평균온도의 시간경과를 나타내고 있다. 이 온도는 유동병의 용해계면으로부터 유동병의 하부계면까지의 연속적온도의 평균치이며, 본 연구의 열전달을 산정에 있어서는 유동병의 대표온도로서 이 평균온도를 사용하였다.

### 3.3 국소열전달율 거동

Fig. 6은 시간경과에 따른 가열면의 국소열전달율의 변화를 나타내고 있다. 그림으로부터 가열면의 국소열전달율은 용해초기에 거의 일정한 값을 나타내지만, 시간의 경과와 함께 가열면의 양단으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 가열면과 용해계면 사이의 얇은 액층의 두께가 양단으로 갈수록 증가하여 가열면의 온도가 상승하기 때문이다. 가열면의 중앙부 근방에서 보이는 크고 일정한 국소열전달율의 값은 유동병이 가열면에 거의 접촉한 상태에서 용해됨으로서 가열면의 중앙부 근방이 저온의 일정온도를 유지하기 때문이다. 실험개시로부터 160분이 경과한 경우의 국소열전달율의 값은 대부분의 유동병이 용해를 종료한 시점으로 용해액의 현열의 증가와 함께 국소열전달율이 급격하게 감소함을 나타

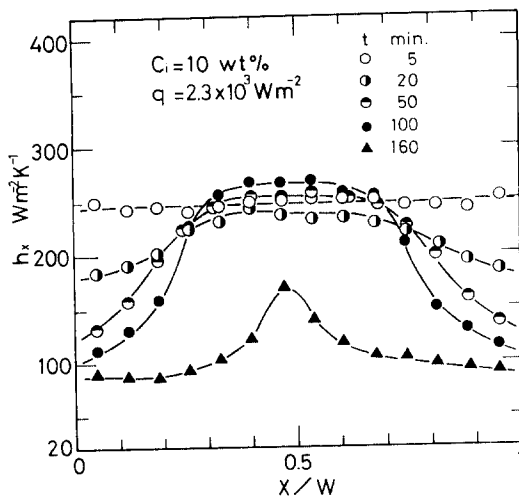


Fig. 6 Local heat transfer coefficient against time

내고 있다.

### 3.4 평균열전달율 거동

Fig. 7은 가열면의 평균열전달율에 미치는 열유속의 영향을 나타낸 것이다. 그림으로부터 평균열전달율은 실험개시와 함께 급격히 감소하고 그후 일정한 값을 유지하다가 어떤 시점부터 재차 감소하고 있음을 알 수 있다. 용해초기의 급격한 감소는 실험개시된 유동병과 접촉상태에 있는 가열면의 온도가 실험개시와 함께 가열면과 용해계면 사이에 얇은 액층이 형성되어 열저항이 증가함에 따라서 초기온도로부터 급격히 상승하기 때문이다. 가열면과 용해계면 사이의 얇은 액층이 충분히 발달한 시점부터 가열면의 평균열전달율은 일정한 값을 나타낸다. 평균열전달율이 재차 감소하는 것은 유동병의 용해가 거의 종료한 시점으로 접촉용해의 부분이 소멸되면서 가열면의 온도가 상승하기 때문이다. 그림으로부터 열유속의 증가와 함께 평균열전달율이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 열유속이 증가함에도 불구하고 접촉용해에 의하여 가열면의 온도가 낮게 유지되기 때문이다.

Fig. 8은 가열면의 평균열전달율에 미치는 초기수용액농도의 영향을 나타내고 있다. 그림으로부터 평균열전달율의 시간적 거동은 열유속의 영향의 경우와 동일하며, 초기수용액농도의 증가와 함께 평균열전달율이 감소하고 있음을 알 수 있다.

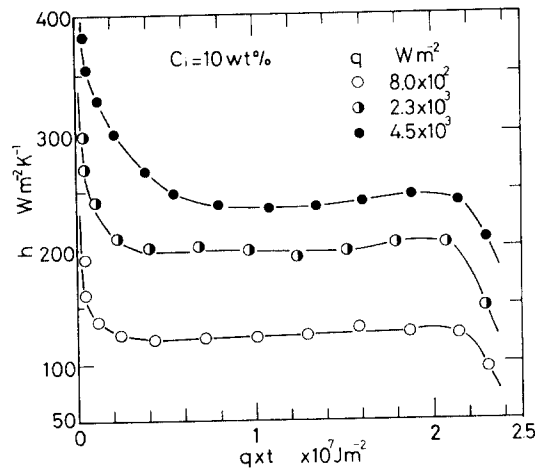


Fig. 7 Effect of heat flux on mean heat transfer coefficient

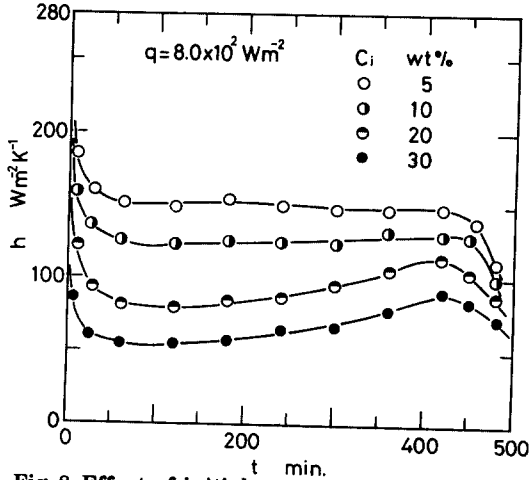


Fig. 8 Effect of initial concentration of solution on mean heat - transfer coefficient

이것은 초기수용액농도의 증가와 함께 가열면의 온도에 크게 영향을 미치는 용해계면 근방의 온도 구배가 크게 되는 것 즉, 초기수용액농도의 증가와 함께 유동빙의 내부온도에 대한 용해계면 근방의 온도의 증가가 크게 되므로서 가열면의 온도가 유동빙의 내부온도의 저하 만큼 낮게 유지되지 않기 때문이다.

### 3.5 용해량

유동빙의 용해량은 총가열량의 증가 및 시간의 경과와 함께 거의 직선적으로 증가하며 용해량에 미치는 가열면 열유속과 초기수용액농도의 효과는 거의 없다. 본 실험의 범위에서 구한 용해량의 데이터를 정리하기 위하여 유동빙의 용해현상을 지배하는 물리량을 도출하여 차원해석을 행하면 용해량은 다음의 식으로 정리되어 진다.

$$W_m / W_i = f(Gr_q, Gr_s, Pr, Ste, Qt) \quad (4)$$

단, 유동빙의 용해잠열로서는 빙의 용해수와 초기수용액농도와와의 혼합에 의한 평균수용액농도의 평형동결온도에 해당하는 빙의 잠열에 단위질량의 유동빙에 대한 빙질량분율을 곱한 것을 사용하였다. 전실험데이터를 최소자승법을 이용하여 식(4)의 형식으로 정리하면 무차원용해량은 10%의 범위에서 식(5)로 표시할 수 있다.

$$W_m / W_i = 1.889 Gr_q^{-0.017} Gr_s^{-0.01} Pr^{-0.02} Ste^{-0.03} Qt^{0.959} \quad (5)$$

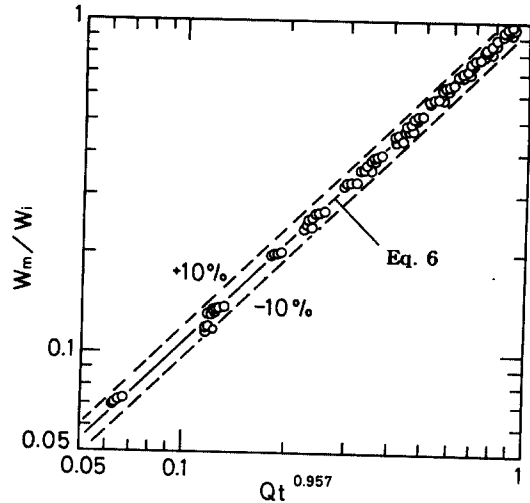


Fig. 9 Correlation of melting rate

여기에서 무차원용해량에 미치는  $Gr_q, Gr_s, Pr$  및  $Ste$ 의 영향은 대단히 작으므로 무시하고  $Qt$ 만의 함수로서 재차 정리하면 Fig. 9에 보인 결과가 얻어진다. 따라서 무차원용해량은 10%의 범위에서 식(6)로 표시할 수 있다.

$$W_m / W_i = 1.075 Qt^{0.957} \quad (6)$$

### 4. 결 론

상부면이 가열되는 구형용기내에서 유동빙이 용해되는 경우의 유동빙의 용해거동 및 용해열전달에 미치는 가열면 열유속과 유동빙의 초기수용액농도의 영향을 실험적으로 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 유동빙은 용해되어짐에 따라 주위 용해액과의 밀도차에 기인하는 부력으로 상부로 이동하여 가열면과 용해계면 사이의 용해액을 연속적으로 구축하면서 가열면과 거의 접촉한 상태에서 신속히 용해가 이루어 진다.

(2) 저농도의 용해액이 유동빙내에 침투하는 것과 유동빙내의 고농도수용액이 유동빙의 하부계면으로부터 유출되는 것에 의하여 유동빙내의 수용액농도가 시간경과와 함께 감소하여 유동빙의 온도가 상승한다. 특히, 유동빙의 용해계면 근방에서 급격한 온도구배가 존재하게 된다.

(3) 가열면과 용해계면 사이의 얇은 액층의 두께



가 가열면의 양단으로 갈수록 증가하는 것과 가열면의 중앙부 근방에서 접촉융해에 의한 전열이 일어나는 이유로 가열면의 국소열전달율은 중앙부 근방에서 최대치를 나타낸다.

(4) 가열면의 평균열전달율은 실험개시와 함께 급격히 감소하여 일정한 값을 유지하다가 유동빙의 융해가 거의 종료한 시점에서 재차 감소한다. 또한, 평균열전달율은 열유속이 높을수록 초기수용액농도가 낮을수록 증가한다.

(5) 유동빙의 융해량은 다음 식으로 정리된다.

$$W_m/W_i = 1.075 Q t^{0.957}$$

### 참고문헌

- 1) 射場本 : 氷蓄熱空調システム概論, 冷凍, 62-714(1987), pp. 351-361.
- 2) 遠藤・星野 : 크리스탈 리키드아이스蓄熱시스템, 冷凍, 62-715(1987), pp. 481-486.
- 3) Tanasawa, I. and Lior, N., ed. : Heat and Mass Transfer in Materials Processing, Hemisphere Pub.Corp., Washington(1992), pp. 347-364.
- 4) 山田, 福迫 : エチレングリコール水溶液の凍結挙動, 日本機械學會論文集, 55-520(1989), pp. 3787-3793.
- 5) Christenson, M. S. and Incropera, F. P. : Solidification of an Aqueous Ammonium Chloride Solution in a Rectangular Cavity. Int. J. Heat Mass Transfer, 32(1989), pp. 47-67.
- 6) Benon, W. D. and Incropera, F. P. : Numerical Analysis of Binary Solid-Liquid Phase Change Using a Continuum Model. Numerical Heat Transfer, 13(1988), pp. 277-296.
- 7) Thompson, M. E. and Szekeley, J. : Mathematical and Physical Modelling of Double-diffusive Convection of Aqueous Solution Crystallizing at a Vertical Wall, J. Fluid Mech., 187(1988), pp. 409-433.
- 8) 福迫・他 2 名 : 垂直加熱壁を有する矩形容器内リキッドア이스の融解熱傳達, 日本機械學會論文集, 58-552(1992), pp. 2535-2542.
- 9) 福迫・他 2 名 : 下部加熱面を有する矩形容器内リキッドア이스の融解熱傳達, 日本冷凍協會論文集, 10-2(1993), pp. 273-281.
- 10) Fukusako, S., Yamada, M. and Kim, M. H. : Numerical and Experimental Study on Melting Heat Transfer of Liquid Ice in a Rectangular Cavity. Proceedings of the 6th International Symposium on Transport Phenomena, Vol. I(1993), pp. 35-40.