

양벽온이 다른 장방형용기 내에서 얼음의 융해과정에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Melting Process of Ice in a Rectangular Cavity with Different Wall Temperature

임 우 택,* 김 병 철**
W. T. Lim, B. C. Kim

Key words : Melting(융해), Density inversion(밀도역전), Natural convection(자연 대류), Melting rate(융해율), Density stratification(밀도층상화)

Abstract

Melting process of ice in a rectangular cavity with different temperature walls has been studied experimentally. Front shape of ice and melting rate were affected by initial temperature of ice and variation of temperature distribution and density gradient. When the hot wall temperature was below 8°C, the melting rates were higher at the bottom than those of at the top due to the density inversion, but with increasing the hot wall temperature the melting rates at the top were affected by hot wall and were higher than those of at the bottom. When the initial temperature of ice was low, melting rates were low, but with increasing the time melting rates were almost the same with those of each initial temperature of ice.

기호설명

A : Aspect Ratio, H/L	c : Cold Surface
H : Height of Cavity [mm]	h : Hot Surface
L : Length of Cavity [mm]	i : Initial
T : Temperature [°C]	
V : Volume [m³]	
t : Time [hour]	
x : Horizontal Coordinate [mm]	
y : Vertical Coordinate [mm]	
ρ : Density [kg/m^3]	
ξ : Dimensionless Horizontal Distance [x/L]	
η : Dimensionless Vertical Distance [y/L]	

첨자

1. 서 론

전열면과 고체 PCM(상변화 물질) 사이의 열전달에 의한 융해현상은 지하저장탱크에서의 토양의 동결과 융해, 융해잠열 축열조의 설계, 식품의 장기보존을 위한 동결처리법, 연약지반에서 건축물의 동결공법 등 여러분야에서 그 용용도가 증가되고 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{(1),(2)} 특히 최근에는 효율적인 에너지 이용의 차원에서 심야의 저렴한 잉여전력을 사용하는 빙축열 시스템에 대해

* 대우중공업 우주항공 연구소

** 조선대학교 기계공학과

관심이 집중되고 있고, 실제로 빙축열 시스템을 도입하고 있는 건물들이 늘어나고 있는 추세이다. 얼음의 형성 및 융해현상에 대한 연구는 빙축열 시스템의 설계와 제작에 있어서 중요한 기초자료가 될 수 있다.⁽³⁾

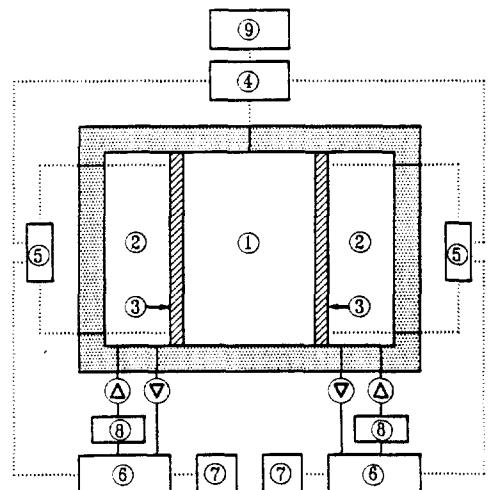
Hong과 Saito⁽²⁾는 직접접촉에 의한 융해과정을 수치해석적으로 규명하였는데, 가열면과 고체 상변화 물질이 밀착되어 있을 때, 그에 따른 열전달은 전열면의 온도가 낮을 때는 전도에 의한 영향이 우세하지만, 온도가 증가함에 따라 대류에 의한 영향이 증가한다고 발표하였고, Ho와 Chu⁽⁴⁾는 장방형 용기 내에서 시간에 따라 온도가 변화하는 얼음의 융해현상은 4°C 근처 물의 밀도역전 현상에 의해 크게 영향이 미친다고 발표하였으며, Webb와 Viskanta⁽⁵⁾는 경사진 장방형용기에서의 융해현상을 관찰하였는데, 전열면의 온도가 증가할수록 상부의 융해율이 커지고, 실험조의 경사각도가 증가 할수록 3차원적인 와류가 심하게 발생하게 되는데, 3차원 자연대류는 2차원의 경우 보다 고액접촉면에서의 열교환이 더 활발하게 일어난다고 발표하였다. 그리고 Zhang⁽⁶⁾은 전열면의 온도가 4°C보다 클 때는 밀도역전의 영향이 감소하게 되며 밀도역전은 유동형태와 고액접촉면의 형태에 크게 영향을 미치고, 전열면의 온도가 5°C보다 낮을 때의 유동은 하부에서 얇은 융해층을 형성하며 가열벽을 따라 하강한다. 또한 밀도역전은 열전달율에 크게 영향을 미치게 되며, 전열면의 온도가 5°C까지는 열전달율이 증가하지만, 그 이후로는 감소하여 8°C에서 최소가 되며, 8°C 이상에서는 다시 증가한다고 발표하였다.

본 연구에서는 형상비(A) 3/2인 장방형의 용기에 기포를 없앤 증류수를 넣고 동결시킨 후, 한쪽 벽면을 가열벽, 그리고 다른 한쪽 벽면을 냉각벽으로 하고 가열벽면의 온도와 얼음의 초기온도를 다양하게 변화시키면서 융해 실험을 수행하여 이에 수반되는 고액접촉면의 형태 및 온도분포, 밀도구배에 따른 열의 유동과 융해율, 그리고 초기온도의 영향을 실험적으로 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치는 크게 실험조, 냉각장치, 가열장치로

구분되고 부속장치로서 냉동기, 항온조, 교반기, 가열기, 순환펌프, 온도조절기 및 온도기록장치로 구성되어 있으며 그 개략도를 Fig.1에 나타냈다. 실험조는 아크릴수지를 사용하여 가로 100mm, 세로 150mm, 폭 150mm의 장방형으로 제작하였다. 전열면인 양쪽벽면은 동판을 사용하여 등온벽으로 하고, 그 둘레를 Styrofoam으로 단열시켰다. 윗면에는 가열벽쪽 가장자리에 배제공을 내어 외부의 매스실린더와 연결하여 동결시 체적팽창에 의해 빠져나간 유량과 융해시 실험조내로 다시 유입되는 유량을 측정할 수 있게 하였다. 항온조는 스텐레스 강판을 사용하여 원통으로 냉각조와 가열조 각각 1개씩 제작하였고, 그 내부에는 냉동관, 가열기, 교반기를 설치하였다. 외부는 단열재를 사용하여 단열시켰고, 항온조내의 냉매가 열교환기를 지나도록 순환펌프를 이용하여 순환시켰으며, 냉매로는 에틸알콜과 물을 혼합하여 사용하였고, 밸브를 이용하여 유량을 조절하였다. 실험조 내부에는 열전대를 42곳에 설치하였으며 관로와 냉각벽 및 가열벽, 그리고 항온조의 14곳에 설치하였다. 얼음의



① Test Section ⑥ Constant Temperature Bath
 ② Heat Exchanger ⑦ Refrigerator
 ③ Constant Temperature Wall ⑧ Circulation Pump
 ④ Temperature Recorder ⑨ Computer
 ⑤ Temperature Controller

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

초기온도는 -2°C ~ -10°C 에서 온도에 따라 설정하였고, 냉각벽의 온도는 -10°C 로 고정시켜, 가열벽의 온도는 각각 초기온도에 따라서 2°C ~ 15°C 로 변화시켜 실험하였다.

$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 까지 조절되는 온도조절기를 사용하여 온도를 제어하였고, 각 등온벽의 온도와 실험내내 얼음의 초기온도를 각각 설정한 후 Data Logging system과 PC를 이용하여 5분간격으로 온도를 측정 기록하고 1mm간격의 격자판을 이용하여 융해형태를 관찰 측정하였으며 창을 통하여 사진 촬영하였다. 매스 실린더를 이용하여 배제된 유량이 다시 실험조 내부로 유입되는 유량을 측정하였고 실험은 실험당 10~20시간 동안 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가열벽온에 따른 융해현상

가열벽온에 따른 융해형태는 초기에는 전도의 영향이 우세함으로 융해량만 다소 차이가 날 뿐 비슷하다. 가열벽 온도가 2°C 부터 7°C 사이에서는 하부로부터 융해가 시작되며 시간이 경과함에 따라 하부로 갈수록 융해율이 커짐을 볼 수 있다. 그러나 가열벽 온도 8°C 를 경계로 하여 그 이상의 온도에서는 상부에서의 융해량이 증가되면서 고액접촉면에 유동경계점을 생성하게 되는데, 가열벽 온도가 올라갈수록 상부의 융해가 하부보다 커지게 되고 유동의 경계점이 점점 하부로 내려가는 현상을 보였다.

Fig.2는 가열벽 온도 5°C , 초기온도 -5°C 의 경우로서, 실험시작 3시간 이후 최하부($\eta/\xi=0/0.1$)부터 밀도가 가장 큰 4°C ($\rho=1000\text{kg/m}^3$) 부근 온도의 물이 존재하기 시작하여 최종 20시간 후에는 하부의 η/ξ 가 $0/0.1 \sim 0/0.6$ 에서는 윗쪽으로 충상을 이루면서 분포한다. 여기서 하부의 융해된 물은 밀도충상화를 이루고 있는 4°C 부근의 온도분포로 인해 유동이 거의 없는 안정된 상태를 유지하고 있으며⁽⁸⁾, 가열벽 5°C 근처에서 액상의 밀도가 4°C 에서보다 약간 낮기 때문에 밀도구배로 인한 부력이 발생하여 전열면을 따라 천천히 상승하게 된다. 이 경우 4°C 부근의 온도영역을 기준으로 하여 좌측의 가열벽 온도 5°C 와 고액접촉면을 따라 위로

상승하는 0°C 부근의 온도가 상부에서 만나게 되지만 5°C 의 밀도가 크므로 곧바로 4°C 부근 온도의 물부터 하부에서 상부로 충상화를 이루며 분포하게 된다. 이러한 현상이 계속되면 상부 η/ξ 가 $1.5/0.1$ 에서 3시간 이후에는 0°C 부근의 온도가 존재하기 때문에 융해가 정지되고 점차 하부로 갈수록 유동이 거의 없는 액상의 4°C 부근 온도영역의 액체와 고액접촉면 사이의 얇은 유동층에 의해 융해되어 감을 볼 수 있다.⁽¹⁾

Fig.3은 가열벽온도 8°C 초기온도 -5°C 의 경우인데 실험시작후 1시간부터 상부는 ξ 가 0.1 지점에서부터 약간씩 융해되고 2시간부터는 η/ξ 가 $1.4/0.13$ 인 지점에서 유동경계점이 형성되며 3시간부터는 η/ξ 가 $1.5/0.2$ 에서 급속하게 융해가 진행되고 5시간째에는 유동경계점이 η 가 1.2인 곳까지 내려오고 6시간까지 융해가 진행되다가, 6시간 이후로는 η/ξ 가 $1.2/0.3$ 인 부분을 중심으로 η/ξ 가 $1.5/0.4$ 인 부분에서부터 재동결이 시작되어 16시간째에는 η/ξ 가 $1.5/0.27$ 인 부분까지 재동결되면

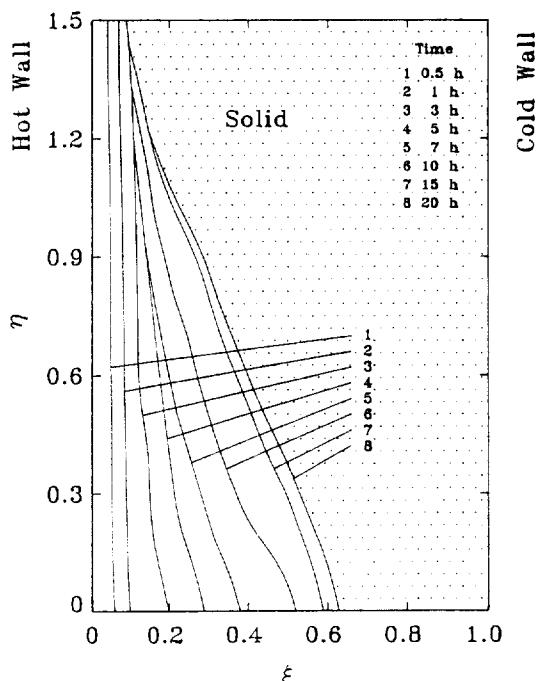


Fig.2 Solid-liquid interface shape
 $T_h=5^{\circ}\text{C}$, $T_c=-10^{\circ}\text{C}$, $T_r=-5^{\circ}\text{C}$

서 유동경계점이 소멸되어 연속선의 고액접촉면을 형성하고, 20시간째에는 η/ξ 가 1.5/0.3인 부근까지 용해된다. 이때 η/ξ 가 1.23/0.3인 부근 아래로는 가열벽 온도 7°C 와 비슷한 형태로 용해가 진행된다. 이 현상은 초기에서 1시간까지는 가열벽 온도 7°C 의 경우처럼 8°C 부근 온도의 액체가 전열면을 따라 위로 상승하게 되며, 고액접촉면을 따라 0°C 부근 온도의 액체도 위로 상승하게 된다. 그런데, 최상부가 η 가 1.5인 곳에서 0°C 와 8°C 의 밀도가 비슷하기 때문에 서로 공존하게 되므로서 상부의 용해가 급속하게 진행된다. 그러나, 시간이 갈수록 상부의 밀도가 점점 커져 하부방향으로 내려오면서 용해가 진행되어 유동경계선은 점점 소멸되어가고 고액접촉면은 점차로 연속선을 이루게 된다. 이 때, 상부의 대류유동으로 인해 정지되었던 얼음표면을 따라 상승하는 0°C 액체의 흐름은 유동경계선이 소멸되는 6시간부터는 다시 최상부 η 가 1.5인 부근까지 얼음표면을 따라 곧바로 상승하게 되므로 η/ξ 가 1.23/0.3인 부근을 중심으로 윗쪽으로

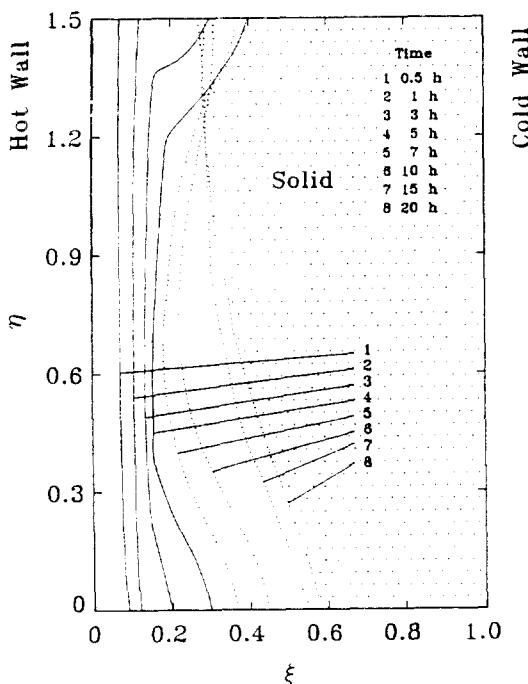


Fig.3 Solid-liquid interface shape
 $T_b = 8^{\circ}\text{C}$, $T_c = -10^{\circ}\text{C}$, $T_i = -5^{\circ}\text{C}$

로는 얼음온도의 영향을 받아 다시 둔전이 진행된다. 그후 16시간째에 고액접촉면이 연속선으로 완전히 만들어지면 상부의 재동결은 더이상 진행되지 않고 가열벽 온도 $5^{\circ}\text{C} \sim 7^{\circ}\text{C}$ 의 경우처럼 고액접촉면이 경사진 완만한 연속선을 이루면서 용해가 진행된다.

Fig.4는 가열벽온도가 8°C 에서 최상부 η 가 1.5인곳의 온도를 시간에 따라 나타낸 것이다.

η/ξ 가 1.5/0.1부터 1.5/0.3인 곳에서는 용해-재동결-재용해현상이 나타나면서 활발하게 열전달이 이루어지며 열음내부의 열전달은 6시간까지는 각 전열면으로부터의 전도에 의해 온도가 일정한 간격으로 변화하지만 6시간 이후로는 각 수평위치에서 온도변화가 거의 없이 평형을 이루게 된다.

Fig.5는 앞에서 설명한 용해형상의 경계가 되는 가열벽 8°C 부근의 최하부 η 가 0인 곳에서 각 수평위치의 온도를 시간대별로 나타낸다. 최상부 η 가 1.5인 곳의 온도분포는 8°C 를 경계로 각각 완전히 다른 온도분포를 나타내고 있지만, 최하부 η 가 0인 곳에서는 초기부터 20시간까지 각 가열벽 모두 비슷한 온도분포를 나타내고 있는데, 상부에서의 심한 온도분포의 변화와는 달리 최하부에서는 가열벽 온도의 증감에 관계없이 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

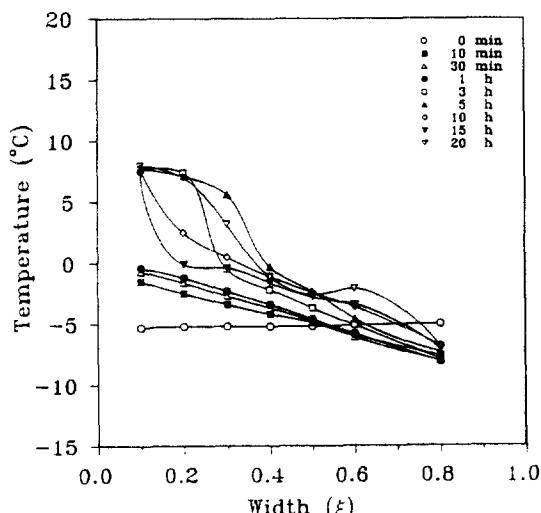


Fig.4 Horizontal temp. distribution with time
 $T_b = 8^{\circ}\text{C}$, $T_c = -10^{\circ}\text{C}$, $T_i = -5^{\circ}\text{C}$, $\eta = 1.5$

Fig.6은 가열벽 온도 10°C , 초기온도 -5°C 의 경우로써, 실험시작 후 30분부터 상부의 융해속도가 하부보다 급속하게 빨라지면서 유동경계점을 만들며 상부의 융해가 진행되는 반면, 최하부 $\eta=0$ 에서는 가열벽 온도 8°C 의 경우와 비슷한 현상을 볼 수 있다. 이때 상부의 융해는 1시간에서 3시간 사이에서 가장 많이 진행되고 차츰 상부의 얼음두께가 얇아짐에 따라 얼음의 열저항이 감소하고 가열부측에서와 냉각부측에서의 공급열량이 차츰 같아지게 되므로 융해량이 점차로 감소하는 반면 중하부는 대류와 밀도역전의 영향에 의하여 융해가 진행된다.

Fig.7은 가열벽 온도 10°C 로 최상부 $\eta=1.5$ 인 곳의 온도를 나타낸다. 여기서 1시간까지는 가열벽 부근의 얼음은 가열벽의 영향을 받아 온도가 상승하지만 냉각벽 부근의 얼음은 냉각벽의 영향을 받아 온도가 내려간다. 그러나 그 이후로는 상부의 액상부분이 전체적으로 가열벽의 영향을 받게되어 각 수평위치의 온도가 모두 10°C 부근의 온도까지 상승하기 시작한다. 그리고, 6시간이후로는 전체적으로 10°C 부근의 온도에서 계속 유지되는데, 최상부 $\eta=1.5$ 인 곳의 융해는 6시간까지는 활발한 대류에 의해 융해가 진행되지만, 그 이후에는 그 지점에서 10°C 부근온도의 액체가 넓게 분포하게 된

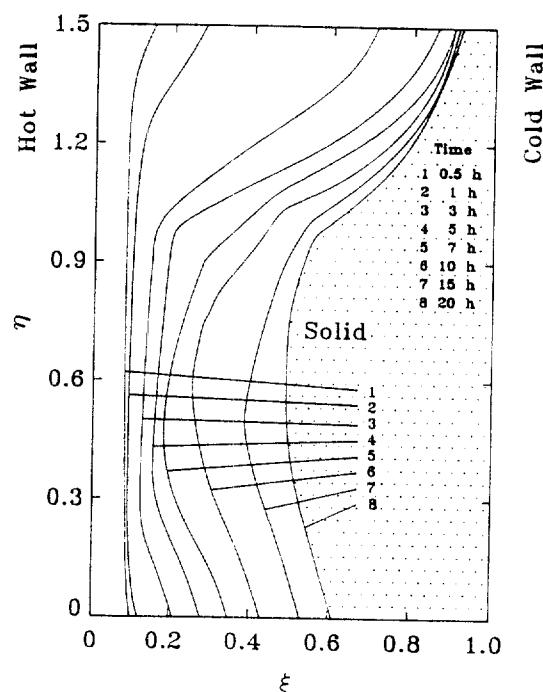


Fig.6 Solid-liquid interface shape
 $T_h=10^{\circ}\text{C}$, $T_c=-10^{\circ}\text{C}$, $T_i=-5^{\circ}\text{C}$

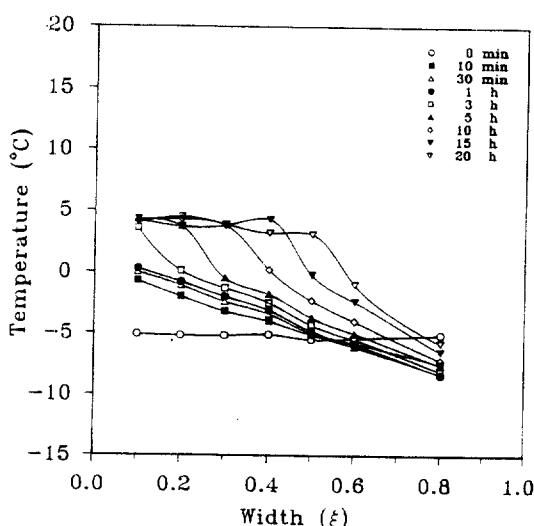


Fig.5 Horizontal temp. distribution with time
 $T_h=10^{\circ}\text{C}$, $T_c=-10^{\circ}\text{C}$, $T_i=-5^{\circ}\text{C}$, $\eta=0$

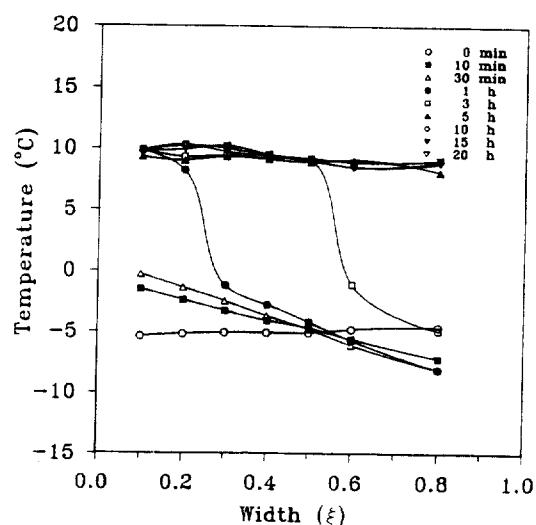


Fig.7 Horizontal temp. distribution with time
 $T_h=10^{\circ}\text{C}$, $T_c=-10^{\circ}\text{C}$, $T_i=-5^{\circ}\text{C}$, $\eta=1.5$

다. 이때 냉각벽으로부터의 전열로 인해 평형을 이루게 되어 상부의 융해는 정지하게 되고 중하부에서만 융해가 계속된다. 가열벽 온도 10°C 이상에서 도 비슷한 상태로 나타난다.

자연대류에서 나타나는 밀도역전 현상은 열전달율에 크게 영향을 미치게 되는데, 가열벽 온도가 5°C 까지는 열전달율이 증가하지만, 그 이후로는 감소하여 8°C 에서는 최소가 되며 8°C 이상에서는 다시 증가한다는 것을 알 수 있다.^{(4), (6), (9), (10)}

Fig.8은 가열벽온도가 10°C 인 경우 최하부 η 가 0인곳에서 각 수평위치의 온도를 시간대별로 나타낸 것이다. 8°C 의 경우와 마찬가지로 최하부 η 가 0인곳에서는 초기부터 20시간까지 각 가열벽 모두 비슷한 온도분포를 나타내고 있다.

Fig.9는 가열벽 온도 15°C , 초기온도 -5°C 의 경우로써, 가열벽 온도가 점차로 높아질수록 고액 접촉면의 0°C 경우의 밀도보다 훨씬 더 낮아지기 때문에 가열벽 온도 10°C 때보다 밀도구배로 인한 대류유동이 더욱 활발하게 일어나므로 상부로부터의 융해속도가 점점 더 빨라지고 융해량도 더 증가하게 된다.

얼음의 융해현상은 초기에는 전도의 영향이 우세함으로써 융해량만 다소 차이가 날 뿐, 융해형태는 비슷하지만, 시간이 경과하고 가열벽 온도가 높아

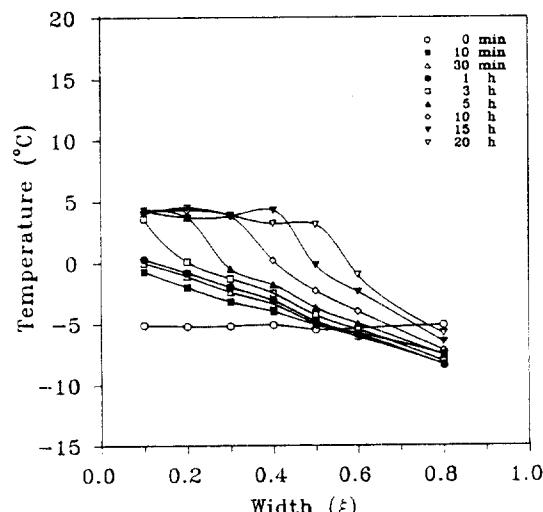


Fig.8 Horizontal temp. distribution with time
 $T_h=10^{\circ}\text{C}$, $T_c=-10^{\circ}\text{C}$, $T_i=-5^{\circ}\text{C}$, $\eta=0$

짐에 따라서 상부의 대류유동이 점점 활발해져 전도보다는 대류에 의한 융해가 우세하게 된다.^{(7), (8)}

3.2 초기온도의 영향

Fig.10과 Fig.11에서는 가열벽 온도 12°C 의 ξ 가 0.2인 지점에서 초기온도가 각각 -2°C 와 -5°C 의 수직온도분포를 나타낸다. 실험시작 후 30분 까지는 초기온도 -2°C 일 때가 온도가 더 높지만 그 이후로는 각 초기온도에서의 온도분포가 비슷해지는 것을 볼 수 있다. 그리고, 하부 η 가 0인 부분에서 4°C 부근의 온도의 물이 2시간 이후부터 존재하기 시작하여 윗쪽으로 분포하고, 상부 η 가 1.5인 곳에서는 1시간까지 온도가 급속하게 높아지다가 1시간 이후로는 온도변화가 극히 적어지며, 시간이 갈수록 하부쪽으로 융해가 진행하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 얼음의 초기온도는 실험시작후 1시간 까지만 영향을 미치고 그 후로는 가열벽의 영향을 받게 되는데, 가열벽 온도가 높을수록 초기온도의 영향이 적음을 볼 수 있다.

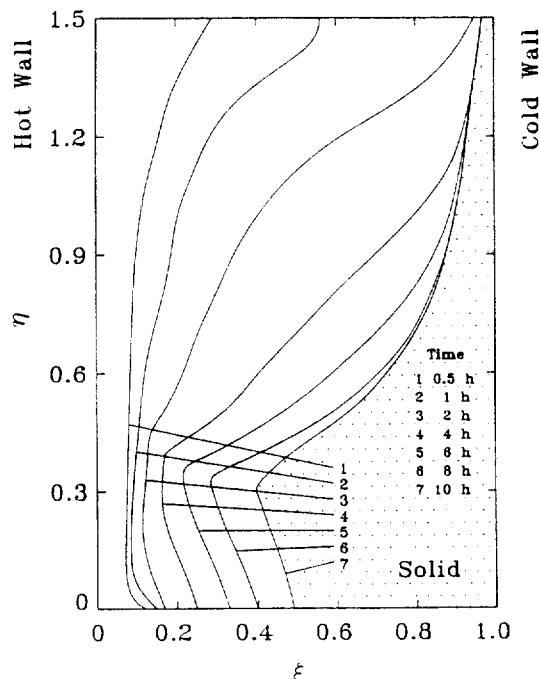


Fig.9 Solid-liquid interface shape
 $T_h=15^{\circ}\text{C}$, $T_c=-10^{\circ}\text{C}$, $T_i=-5^{\circ}\text{C}$

3.3 유입수량 및 융해율

실험조내의 물이 전체적으로 동결될 때 체적팽창에 의해 빠져나가는 배제수량은 전 실험조 체적(2, 250ml)의 약 10%인 220ml 정도인데, 융해시 이 배제수량이 다시 실험조내로 유입하게 된다.

Fig.12와 Fig.13에서는 초기온도 -2°C 와 -5°C

$^{\circ}\text{C}$ 에 대하여 시간에 따른 유입수량을 각 가열벽 온도별로 나타내고 있다. Fig.12에서 가열벽 온도 2°C 의 경우를 보면 1시간까지 15ml(배제수량의 7%)가 유입되고 10시간후에는 25ml(11%)가 유입되는데, 시간에 따른 융해량이 다소 적다. 그러나, 가열벽 온도 15°C 의 경우를 보면, 1시간까지

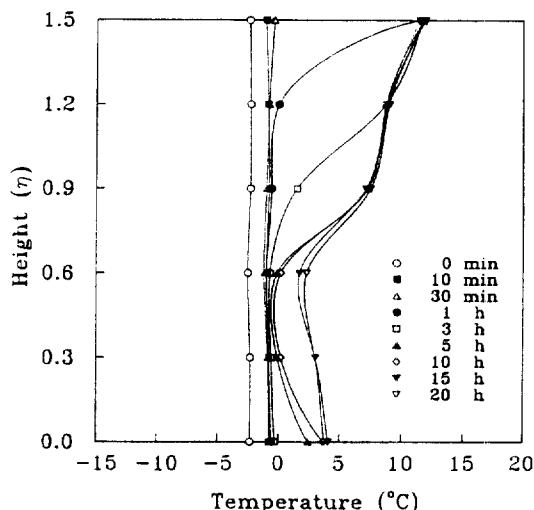


Fig.10 Vertical temperature distribution
 $T_h=12^{\circ}\text{C}$, $T_c=-10^{\circ}\text{C}$, $T_i=-2^{\circ}\text{C}$, $\xi=0.2$

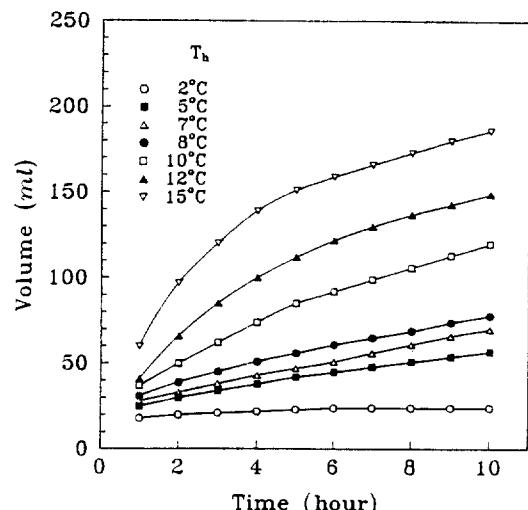


Fig.12 Volume of inflow with time at $T_i=-2^{\circ}\text{C}$

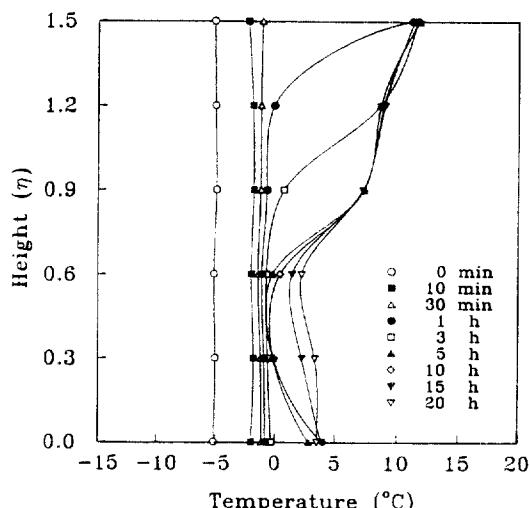


Fig.11 Vertical temperature distribution
 $T_h=12^{\circ}\text{C}$, $T_c=-10^{\circ}\text{C}$, $T_i=-5^{\circ}\text{C}$, $\xi=0.2$

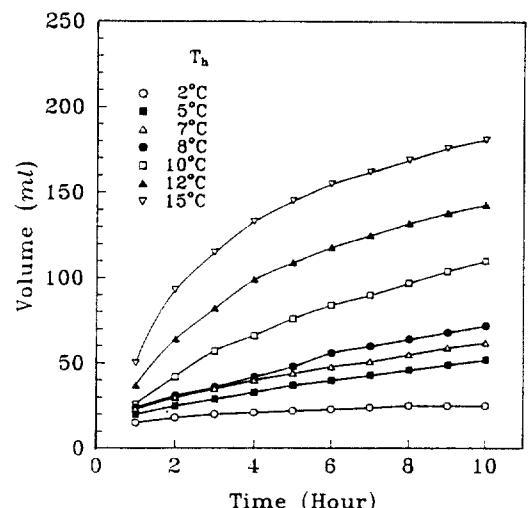


Fig.13 Volume of inflow with time at $T_i=-5^{\circ}\text{C}$

는 50mℓ(23%)가 유입되고 10시간후에는 180mℓ(82%)가 유입되므로서 시간에 따라 유입량이 크게 차이가 난다.

따라서 가열벽 온도가 높아질수록 용해율이 더 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 가열벽 온도 8 °C이하에서는 각 가열벽 온도별 유입량의 차이가 적지만, 10°C 이상의 온도에서는 큰 폭으로 증가하는데, 이것은 8°C이하에서는 고액접촉면을 따라 상승하는 얇은 유동층에 의해 느리게 용해가 진행되어 시간당 용해량이 소량으로 증가하지만, 10°C 이상의 온도에서는 상부의 활발한 자연대류의 영향으로 인해 시간에 따라 용해량이 급격하게 증가하기 때문이다. 따라서 온도차 또는 밀도차가 심할수록 자연대류가 활발하게 일어나게 되고 용해율에 큰 영향을 미치게 되는 것을 알 수 있다. 또한, 초기의 얼음온도가 용해에 미치는 영향은 1시간 정도이고, 그 이후로는 시간당 유입량이 비슷해지는 것을 볼 수 있는데, 초기 1시간까지의 영향도 극히 적은 차이를 보이므로 전체 용해량에 있어서 얼음의 초기온도는 큰 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다.

4. 결 론

양벽온이 다른 장방형용기내에서 얼음에 대한 용해실험을 한 결과, 용해시 얼음의 형상과 용해율은 얼음의 초기온도와 양벽의 온도차에 의한 실험조내 온도분포 및 밀도구배의 변화에 따라 달라지게 되며 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 가열벽 온도 8°C를 경계로 8°C이하에서는 밀도역전의 현상에 의하여 액상의 상부에서의 온도가 하부보다 낮아 하부의 용해량이 많아진다.

2) 가열벽 온도 8°C의 경우 상부에서는 용해-재동결-재용해 현상이 일어난다. 이 온도는 상부의 자연대류가 발달하기 시작하는 경계가 되며 밀도역전 현상의 최소점이 된다.

3) 얼음의 초기온도는 용해량에 있어서 실험초기에만 약간의 영향을 미칠 뿐 시간이 갈수록 그 영향은 줄어들게 되고, 가열벽 온도가 높아질수록 그 영향은 더욱 감소한다.

4) 용해율은 초기온도 보다는 가열벽의 영향을 많이 받고, 가열벽 온도가 8°C 이상에서는 가열벽과 얼음의 온도차가 심해 상부의 자연대류가 활발

하여 지므로 상부의 용해율이 증가한다.

후 기

본 연구의 일부는 1995년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Zhang, Z. and Bejan, A., 1989, "Melting in an enclosure heated at constant rate", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, pp. 1063~1076.
- Hong, H. and Saito, A., 1993, "Numerical method for direct contact melting in transient process", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, pp. 2093~2103.
- Fukusako, S., Yamada, M. and Kim, M. H., 1993, "Numerical and experimental study on melting heat transfer of liquid ice in a rectangular cavity", The 6th International Engineering, May 9-13.
- Ho, C. J. and Chu, H., 1993, "The melting process of ice from a vertical wall with time-periodic temperature perturbation inside a rectangular enclosure", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, pp. 3171~3186.
- Webb, B. W. and Viskanta, R., 1986, "Natural-convection-dominated melting heat transfer in an inclined rectangular enclosure", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.29, pp. 183~192.
- Zhang, X., 1993, "Natural convection and heat transfer in a vertical cavity filled with an ice-water saturated porous medium", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.36, pp.2881~2890.
- Yamada, M., Fukusako, S., Morizane, H. and Kim, M. H., 1993, "Melting heat transfer along a horizontal heated tube immersed in liquid ice", Int. J. JSME, Vol.36, pp. 343

- ~350.
8. Ramachandran, N., Gupta, J. P. and Jaluria, Y., 1981, "Thermal and fluid flow effects during solidification in a rectangular enclosure", Int. J. Heat Mass Transfer, pp. 187~193.
9. Ho, C. J. and Chen, S., 1986, "Numerical simulation of melting of ice around a horizontal cylinder", Int. J. Heat Mass Transfer.
10. Tong, W. and Koster, J. N., 1994, "Density inversion effect on transient natural convection in a rectangular enclosure", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 37, pp. 927~938.