

# 경사냉각면에 따른 함수정방형내의 동결현상에 관한 실험적 연구

## An experimental study on freezing phenomena of water saturated square cavity with inclined cold surface

이 춘 희\*, 김 종 준\*\*, 김 병 철\*\*\*  
C. H. Lee, J. J. Kim, B. C. Kim

**Key words** : Inclination angle(경사각), Density inversion(밀도 역전), Initial temperature(초기 온도), Freezing(동결)

### Abstract

It was studied the phenomena of transient freezing of an inclined water-saturated enclosure. One side of the test section was cooled and the other sides were insulated. The effects of the initial temperature, the inclination angle on the temperature field and the shape of the ice-water interface were observed.

In the beginning of freezing, with increasing the inclination angle the freezing rate was increased and in the stable density layer centered 4°C, the freezing was fast as the convective fluid flow became small. When the initial temperature was above the 4°C, the frozen thickness in the upper part of inclined surface was thinner than that in the lower part, but with time the frozen thickness of upper part was thicker than that of lower part, below the 4°C, the frozen thickness in the upper part was thicker than that of lower part from the beginning, and above the 8°C in the beginning upper part was thinner with concave, but with time thicker the upper part, vanishing concave.

### 기 호 설 명

H : 실험조 높이, mm  
L : 실험조 길이, mm  
T<sub>c</sub> : 냉각벽 온도, °C  
T<sub>i</sub> : 초기온도, °C

x : 수평방향좌표, mm  
y : 수직방향좌표, mm  
 $\eta$  : 무차원 y좌표, y/H  
 $\theta$  : 경사각, °  
 $\xi$  : 무차원 x좌표, x/H

### 1. 서 론

\*대우중공업 연구소  
\*\*조선대학교 대학원 기계공학과  
\*\*\*조선대학교 기계공학과

지반을 단단하게 하여 지하 구조물을 지지시키기 위한 토양의 인위적인 동결공법, 식품을 장기적으로 보존하기 위한 동결처리법, 금속의 응고과정 그리고 최근 전기의 수급 불균형으로 인한 문제를 해결하기 위하여 심야전력을 사용하여 에너지를 저장시키는 빙축열시스템 등에 이용하고 있으며 지구 물리학적 및 공학적인 면에서도 그 응용도가 증가하고 있으며 현재 연구가 활발히 이루어지고 있는 분야이다.<sup>(1~5)</sup>

물이 냉각되어 0°C 이하로 되면 냉각되는 부분에서 결정핵이 생성되어 얼음이 성장하게 되는데<sup>(6)</sup> 전열면에 얼음이 성장하면 전열저항이 증가하여 성장이 늦어진다. 물의 초기 온도를 높게 하면 액상 내에서 온도구배가 생겨 각각의 온도값들이 갖는 밀도의 층상분포가 형성되는데 이는 부력을 야기시키며 이로 인해 자연대류가 발생한다. 저온동결의 경우 4°C에서 물의 밀도가 최대가 되므로 밀도역전이 일어나며 이로 인해 조내에 방향이 서로 다른 형태의 유동이 생겨서 초기온도와 함께 동결계면의 형상과 열전달에 영향을 미친다고 알려져 있다. 특히 국내에서 관심을 모으고 있는 빙축열 시스템의 축냉부분에서 축열조 내부의 유동특성이나 축냉 및 냉방능력이 시스템의 성능을 좌우하는 것으로 밝혀져 동결과 융해시의 유동특성이나 축냉방법 및 동결의 형태 그리고 동결시 배제량에 관한 연구가 중요한 관점이 되고 있다.

Brewster와 Gebhart<sup>(8)</sup>는 순수한 물의 하향동결에 대한 연구에서 자연대류의 효과를 연구하였는데, 물의 동결온도인 0°C와 밀도가 최대인 4°C를 기준으로 0°C에서와 비슷한 밀도 값을 갖게 8°C를 기준으로 하여 유동방향을 세가지 영역으로 나누고 0°C~4°C에서는 상향유동, 8°C 이상에서는 하향유동을 한다고 하였으며, 열유속은 5.7°C를 기준으로 하여 그 이하의 온도에서는 온도가 증가할수록 느리게, 그 이상의 온도에서는 온도가 증가할수록 빠르게 증가한다고 하였다.

Kim, C. J.와 Ro, S. T.<sup>(9)</sup> 등은 물이 채워진 수직 원관의 2차원 측면동결을 수치적으로 해석하는 연구에서 상변화 과정 중에 발생하는 밀도와 체적팽창에 대한 영향을 연구하였는데 액체가 최대밀도를 갖는 온도 이상으로 과열되었을 때 유체유동의 변

화와 부분 특성, 그리고 온도분포는 시간에 따라 변화가 크며 동결형태는 더욱 복잡하다고 발표하였다.

Yang, C. H.와 Rastogi, S. K.<sup>(10)</sup>는 냉각면을 -25°C로 하는 다공성물질의 동결거동에서 동결형태와 시점에 대해 발표하였다.

본 연구에서는 정방형 내부의 일면에 냉각면이 존재할 경우, 경사각과 온도에 따른 동결형태와 온도분포, 동결량을 측정하였으며, 초기 수온이 다른 경우 동결에 미치는 영향에 대하여 측정, 분석하였다.

## 2. 실험 장치

실험장치는 실험조, 냉각장치, 측정장치로 이루어졌고 부속장치로는 항온조, 냉각기, 냉동기, 온도조절기 및 온도기록장치가 설치되어 있으며 그 개략도를 Fig.1에 나타냈다. 실험 조는 가로 100mm, 높이 100mm, 폭 100mm의 정방형으로 제작하였고, 실험조 한쪽 면은 10mm 두께의 동판으로 열교환할 수 있도록 만들어졌으며, 나머지 부분은 25mm의 아클릴판으로 제작하였다. 외부와의 단열을 위하여 50mm의 Styrofoam을 사용하였다. 실험조의 경사각을 정확하게 변화시키기 위하여 수평계를 사용하였다. 항온조는 직경과 높이를 각각 400mm 원통형으로 제작하였다. 에틸알콜과 물을

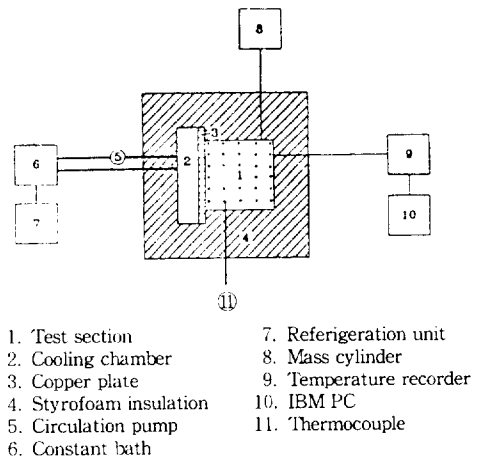


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

혼합하여 냉매로 사용하였고 밸브를 이용하여 그 양을 조절할 수 있도록 하였다. 실험조내에는 지름 0.127mm의 열전대를 가로방향으로 5개, 세로방향으로 6개를 각각 30곳에 설치하였고 관로와 냉각부, 그리고 항온조 5곳에 지름 0.3mm의 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다.

### 3. 실험방법 및 순서

실험조내에 기포를 제거한 물을 넣어 설정한 온도에 맞춘 후 실험조내 물의 온도가 안정되도록 3시간이 경과된 후에 실험을 행하였다. 실험조 내의 냉각면의 온도를  $-6^{\circ}\text{C}$ ,  $-8^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-12^{\circ}\text{C}$ 로 각각 설정한 후 냉각면과 수평면과의 각도를  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $135^{\circ}$ ,  $180^{\circ}$ 로 바꾸어 가면서 실험을 행하였다. 초기온도를  $2^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $9^{\circ}\text{C}$ 와  $15^{\circ}\text{C}$ 의 네 가지로 설정하여 실험당 10시간씩 실시하였다. 온도는  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 까지 조절되는 온도조절기를 사용하여 제어하였다.

실험자료는 FLUKE사의 2286A data logging system을 사용하여 일정한 시간 간격으로 측정하였으며 표준온도계에 의해 보정되었고 실험조 반대편에 빛을 통과시켜 일정 간격으로 동결현상을 사진 촬영하였다. 실험중 격자판을 만들어 각 부위에서 동결두께를 측정하였으며 측정오차와 기계오차는  $\pm 1\text{mm}$  이내로 하였다. 실험중 부피팽창에 의해 배제된 물은 메스실린더로 받아 반복실험하여 정확성을 확인하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 경사각이 $0^{\circ}$ 인 경우

Fig.2는 경사각이  $0^{\circ}$ 이고 하부에 냉각면을 갖는 경우로서 초기온도가  $5^{\circ}\text{C}$ 이며 냉각면온도가  $-6^{\circ}\text{C}$ 일 때 시간에 따른 동결계면의 형태를 나타내며, Fig.3은  $\xi = 0.5$ 에서의 시간에 따른 수직 온도분포를 나타낸 것이다. 초기온도  $5^{\circ}\text{C}$ 의 물은 냉각면의 영향에 의하여 하부에서부터 온도가 낮아지고  $4^{\circ}\text{C}$  이하가 되면  $4^{\circ}\text{C}$ 의 경우보다 밀도가 낮아 가벼우므로 상부로 유동하게 되고  $4^{\circ}\text{C}$ 의 물은 하부로 내려

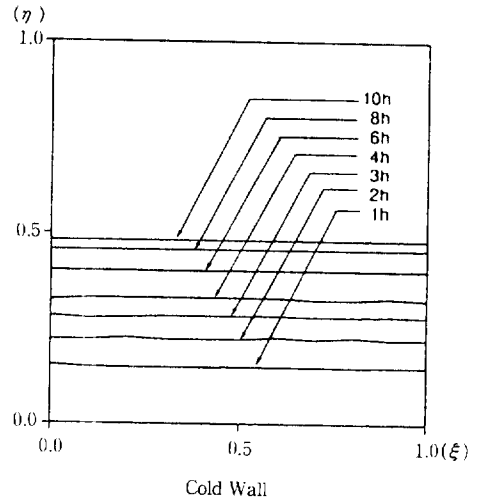


Fig.2 The growth of the ice-water interface ( $\theta = 0^{\circ}$ ,  $T_i = 5^{\circ}\text{C}$ ,  $T_c = -6^{\circ}\text{C}$ )

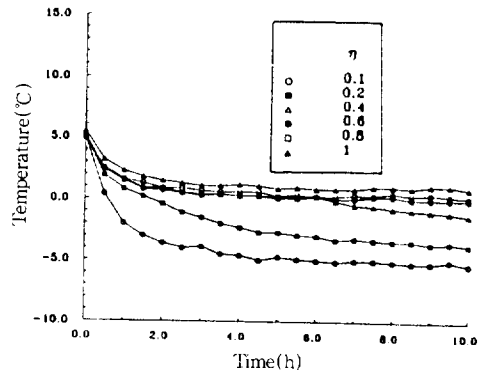


Fig.3 Vertical temperature distribution with time ( $\theta = 0^{\circ}$ ,  $T_i = 5^{\circ}\text{C}$ ,  $T_c = -6^{\circ}\text{C}$ ,  $\xi = 0.5$ )

오면서 냉각되어 온도가 낮아지므로 냉각면 근처의 하부에서는 온도구배가 크며 상부로 갈수록 온도구배가 작아진다. 하부 냉각면에서부터 동결이 시작되어 시간이 경과함에 따라 동결은 상부로 진행된다. Fig.4는 실험시작 3시간 후의 등온선을 나타낸 것이다.

Fig.5는 경사각이  $0^{\circ}$ 이고 하부에 냉각면을 갖는 경우로서 초기온도가  $15^{\circ}\text{C}$ 이며 냉각면의 온도가  $-6^{\circ}\text{C}$ 일 때 시간에 따른 수직 온도 분포를 나타낸

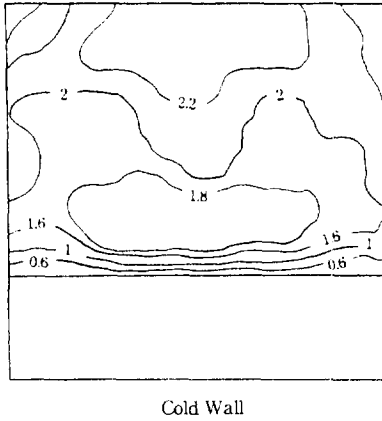


Fig.4 Isotherms after 3 hours  
( $\theta = 0^\circ, T_i = 5^\circ\text{C}, T_c = -6^\circ\text{C}$ )

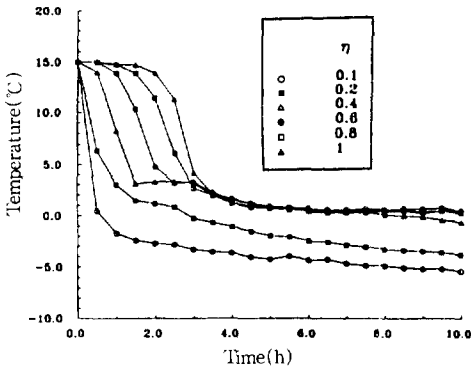


Fig.5 Vertical temperature distribution with time( $\theta = 0^\circ, T_i = 15^\circ\text{C}, T_c = -6^\circ\text{C}, \xi = 0.5$ )

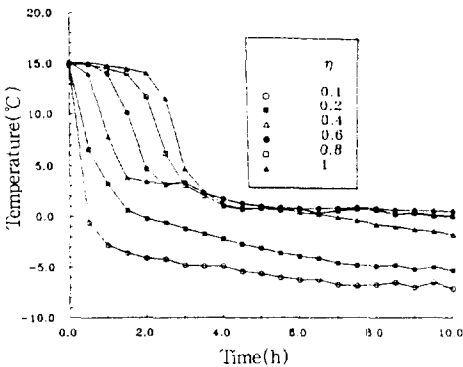


Fig.6 Vertical temperature distribution with time( $\theta = 0^\circ, T_i = 15^\circ\text{C}, T_c = -8^\circ\text{C}$ )

것이다. 초기온도  $15^\circ\text{C}$ 의 물은 처음에는 하부로부터 큰 온도구배를 형성하여 상부는  $15^\circ\text{C}$ 의 두꺼운 유체층이 존재하나 차츰 얇아지며 온도구배가 작아지고  $4^\circ\text{C}$ 층이 하부에서 부터 두꺼워지며 상부로 상승하고 상부의 온도가 낮아지며 하부에서부터 동결이 시작된다. 3시간이 경과한 후부터는 상부로부터  $\eta = 0.33$  까지의 온도 분포가 초기온도가  $5^\circ\text{C}$ 의 경우와 거의 같은 형태를 나타냈다.

Fig.6은 경사각이  $0^\circ$ 로써 하부에 냉각면을 가지며 초기온도가  $15^\circ\text{C}$ 이고 냉각면온도가  $-8^\circ\text{C}$ 일 때 시간에 따른 수직 온도 분포를 나타낸 것이다. Fig.5의 경우와 수직온도분포는 거의 같은 현상을 나타냈으나 냉각면의 온도가 더 낮아 냉각속도가 더욱 빨랐으며 동결속도도 더욱 빠름을 보이고 있다.

#### 4.2 경사각이 $45^\circ$ 인 경우

Fig.7은 경사각이  $45^\circ$ 이고 초기온도가  $5^\circ\text{C}$ 이며 냉각면온도가  $-6^\circ\text{C}$ 인 경우 시간에 따른 동결계면의 형태를 나타낸 것이며, Fig.8은 이러한 경우 1시간 후의 등온선을 나타낸 것이다. 초기온도  $5^\circ\text{C}$ 의 물은 냉각면의 영향을 받아 온도가 낮아지며 냉각면 근처의 온도가  $0^\circ\text{C}$  이하로 되면서 동결이 시작되었다. 초기에는 냉각면과의 직접접촉에 의한 열

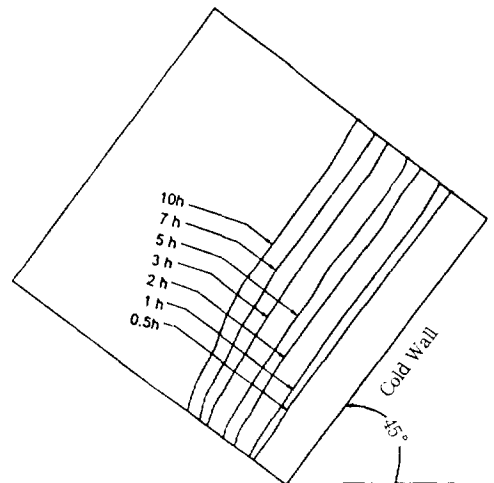


Fig.7 The growth of the ice-water interface  
( $\theta = 45^\circ, T_i = 5^\circ\text{C}, T_c = -6^\circ\text{C}$ )

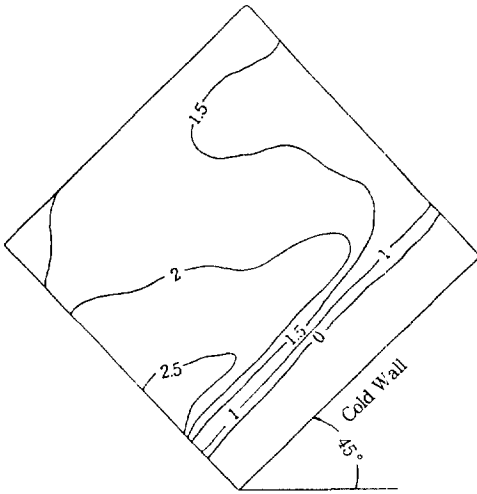


Fig.8 Isotherms after 1 hour  
( $\theta = 45^\circ$ ,  $T_i = 5^\circ\text{C}$ ,  $T_c = -6^\circ\text{C}$ )

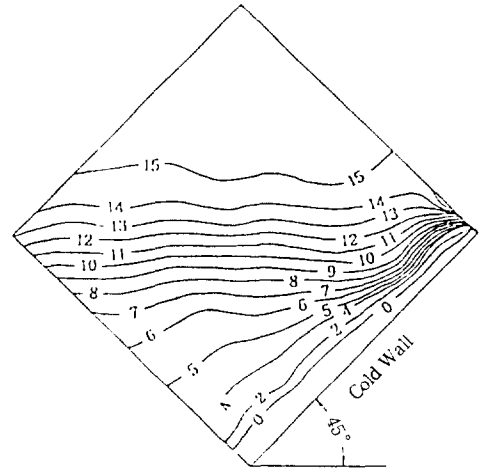


Fig.10 Isotherms after 0.25 hour  
( $\theta = 45^\circ$ ,  $T_i = 15^\circ\text{C}$ ,  $T_c = -6^\circ\text{C}$ )

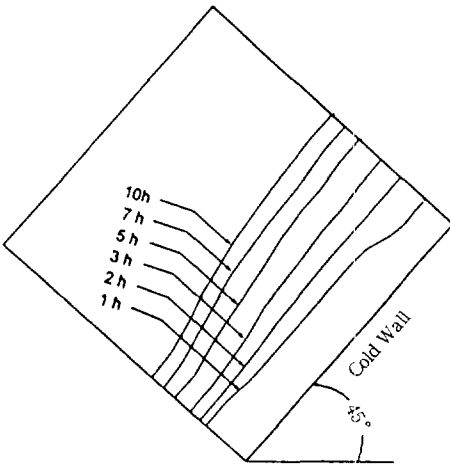


Fig.9 The growth of the ice-water interface  
( $\theta = 45^\circ$ ,  $T_i = 15^\circ\text{C}$ ,  $T_c = -6^\circ\text{C}$ )

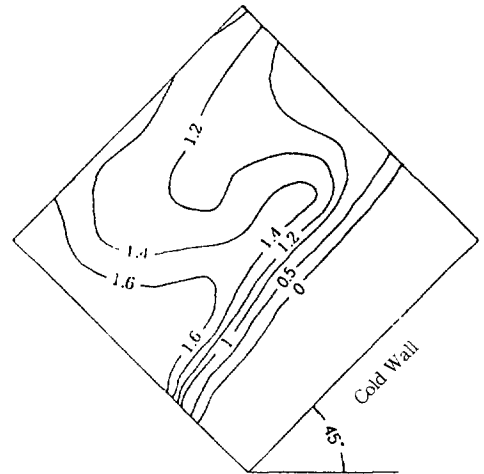


Fig.11 Isotherms after 4 hours  
( $\theta = 45^\circ$ ,  $T_i = 15^\circ\text{C}$ ,  $T_c = -6^\circ\text{C}$ )

전달에 의하여 상부와 하부에 있어서 동결두께에 대한 차이가 적으나 경사면과 냉각되며 발생하는 온도차에 의한 밀도차에 의하여 시계방향의 유동이 형성되며 오른쪽 냉각면 하부 근처의 온도구배는 냉각면 상부 근처의 온도구배보다 크며 중력에 의한 밀도차에 의하여 상부보다 높은 온도의 유체가 모이므로 수직 대각선 방향으로 올라갈수록 낮은 온도 분포를 보인다. 따라서 상부의 동결두께가 하부

보다 두꺼운 형태를 나타내며 상부로 갈수록 열용량이 커짐에 따른 온도분포의 변화로 인하여 처음에는 동결의 두께가 고르지 못함을 볼 수 있다. 시간이 경과함에 따라 밀도차에 의하여 상부의 온도가 하부보다 낮으므로 차츰 상부의 동결두께가 더 두꺼운 형태를 보인다.

Fig.9는 경사각이  $45^\circ$ 이고 초기온도  $15^\circ\text{C}$ 이며 냉각면온도가  $-6^\circ\text{C}$ 인 경우의 동결계면의 형태를

나타낸다. Fig.10은 0.25시간후의 등온선을 나타낸 것이며, Fig.11은 4시간후의 등온선을 나타낸 것이다. 초기온도 15°C의 물은 냉각면의 영향을 받아 낮아지고 처음에는 하부에서부터 상부로 갈수록 온도가 높아지며 상부 냉각면 근처의 온도구배가 하부의 경우보다 크나 시간이 경과함에 따라 밀도차에 의하여 상부도 온도가 낮아지고 온도구배도 크지 않게 되므로, 동결두께는 처음에 상부는 초기 온도의 영향에 의하여 하부보다 더 얇지만 1.7시간이 경과한후 부터는 점차로 상부의 동결두께가 밀도역전현상에 의하여 온도가 더 낮게 되어 하부보다 더 두꺼워지는 현상을 나타냈다.

4.3 경사각이 90°인 경우

Fig.12와 Fig.13은 경사각이 90°이고 냉각면온도가 -6°C이며 실험시작후 각각 0.5시간과 2시간이 경과하였을 때 초기온도에 따른 동결형태를 나타낸 것이다. 초기온도가 낮을수록, 시간이 경과 할수록 동결량이 증가됨을 볼 수 있고 상부가 두꺼워짐을 볼 수 있다.

초기온도 2°C의 경우 0°C에 가까울수록 밀도가 낮으므로 4°C 이하인 물은 처음부터 냉각되며 유동이 느리고 온도가 낮으므로 시간이 경과함에 따라 2°C의 물은 하부에 존재하고 그 이하로 냉각된 물

은 상부에 존재하므로 상부가 하부보다 더 두꺼운 형태가 된다.

초기온도가 5°C의 경우 처음에는 5°C의 물은 냉각되어 하부로 이동하게 되며 4°C이하가 되면 다시 상부로 이동하게 되나 온도가 낮을 수록 냉각속도가 빠르고 유동이 느리므로 0.1시간까지는 상부와 하부의 두께차는 적었으나 0.4시간이 지난후부터는 같아졌고 0.5시간이 지난후에는 더 커짐을 볼 수 있었으며 시간이 경과함에 따라 상부가 더 두꺼워지는 것을 볼 수 있었다.

초기온도 9°C의 경우 상부에 8°C이상의 유체가 존재하고 하부에는 냉각면의 영향에 의하여 냉각되어 8°C이하가 된 유체는 하부로 유동하고 4°C가 되면 하부에 존재하며 더욱 냉각되면 상부로 유동하게 되므로 두개의 유동이 형성되어 동결계면의 형태는 상부가 오목한 형태가 되나<sup>(11)</sup> 1.2시간이 경과한 후부터는 상부가 냉각되어 8°C이하가 되면서 상부의 오목한 형태는 사라졌고 상부유체의 온도는 4°C보다 낮고 하부는 4°C근처의 온도가 존재하게 되어 상부의 동결두께가 하부보다 두꺼운 형태가 되었으며 시간이 경과함에 따라 상부에서부터 두꺼워졌다. 초기온도 15°C의 경우는 9°C와 비슷한 형태이나 상부의 오목한 부분이 더 컸으며 1.5 시간이 경과하 후 오목한 부분이 없어지고 상부가 하부

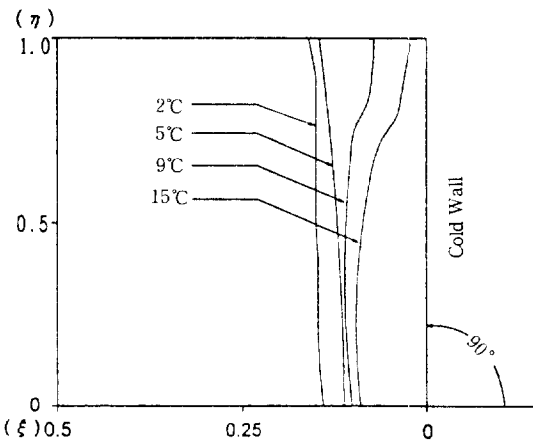


Fig.12 The growth of the ice-water interface with initial temperatures after 0.5 hour ( $\theta = 90^\circ, T_c = -6^\circ\text{C}$ )

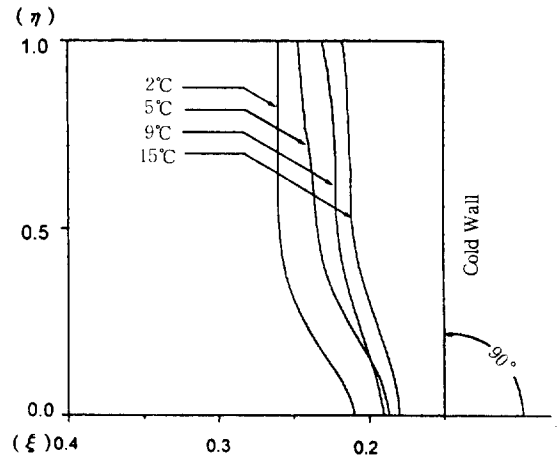


Fig.13 The growth of the ice-water interface with initial temperatures after 2 hours ( $\theta = 90^\circ, T_c = -6^\circ\text{C}$ )

보다 더 두꺼운 형태를 나타냈다.

Fig.14는 경사각이  $90^\circ$ 이고 초기온도가  $15^\circ\text{C}$ 이며  $\xi=0.2$  일때의 수직온도 분포를 나타낸 것이다.

4.4 경사각이  $135^\circ$ 인 경우

Fig.15는 경사각이  $135^\circ$ 이고 초기온도가  $5^\circ\text{C}$ 이며 냉각면온도가  $-6^\circ\text{C}$ 일 때 동결계면의 형태를 나타낸다. 초기온도  $5^\circ\text{C}$ 의 물은 냉각면 온도의 영향에 의하여 냉각되어  $4^\circ\text{C}$ 가 되면 밀도차에 의해 제일 하부에 위치하고 상부에서 부터 냉각되어 그대

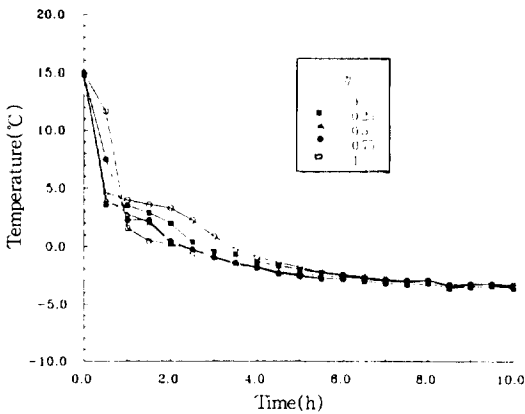


Fig.14 Vertical temperature distribution with time ( $\theta = 90^\circ$ ,  $T_i = 15^\circ\text{C}$ ,  $T_c = -6^\circ\text{C}$ ,  $\xi = 0.2$ )

로 존재하므로 상부로 갈수록 온도가 낮아지며 하부는  $4^\circ\text{C}$  근처의 물이 존재한다. 경사각이  $90^\circ$ 의 경우보다 상부의 열용량이 작으므로 상부의 냉각속도가 빨라 상부와 하부의 동결두께차가 경사각이  $90^\circ$ 의 경우보다 더 커지며 동결초기부터 동결두께 상부는 두껍고 하부는 얇은 형태가 된다.

하부에서는 냉각면의 영향이 적으므로  $4^\circ\text{C}$ 에 이르는 물이 그대로 머물러서 하부의 동결두께는 상부보다 더 얇은 형태가 된다.

Fig.16은 경사각이  $135^\circ$ 이고 초기온도가  $15^\circ\text{C}$ 이며 냉각면온도가  $-6^\circ\text{C}$ 일 때 동결계면의 형태를 나타내며, Fig.17은 0.25시간 후의 동온선을 나타낸다. 초기온도  $15^\circ\text{C}$ 의 물은 밀도가 낮으므로 상부에 존재하게 되고 시간이 경과함에 따라 냉각면의 영향에 의하여 온도가 강하되나 상부는 밀도가 낮은  $15^\circ\text{C}$  근처의 물이 존재하므로 초기에는 상부의 동결두께가 얇으며  $15^\circ\text{C}$  근처의 물은 냉각면의 영향에 의하여 냉각되어 밀도가 높아지므로 하부로 이동하게 되고 시간이 경과함에 따라 밀도가 높은  $4^\circ\text{C}$ 의 물이 하부에 존재하게 되나 냉각면이 없는 하부 근처에서는 물의 유동이 느림을 볼 수 있으며 상부에서는 냉각면과  $15^\circ\text{C}$  유체와의 직접 접촉에 의하여 냉각속도가 빠르므로 초기에만 상부의 동결에 영향을 미치고 따라서 처음 0.25시간 까지는 이러한 온도의 영향에 의하여 동결면이 고르지 못함을

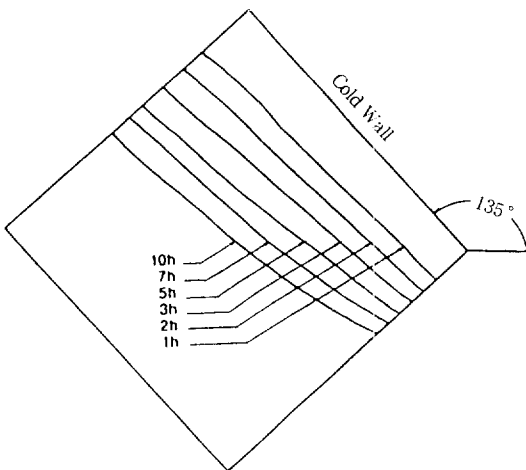


Fig.15 The growth of the ice-water interface ( $\theta = 135^\circ$ ,  $T_i = 5^\circ\text{C}$ ,  $T_c = -6^\circ\text{C}$ )

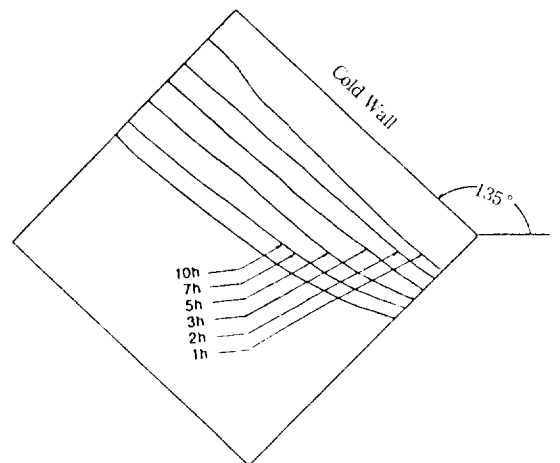


Fig.16 The growth of the ice-water interface ( $\theta = 135^\circ$ ,  $T_i = 15^\circ\text{C}$ ,  $T_c = -6^\circ\text{C}$ )

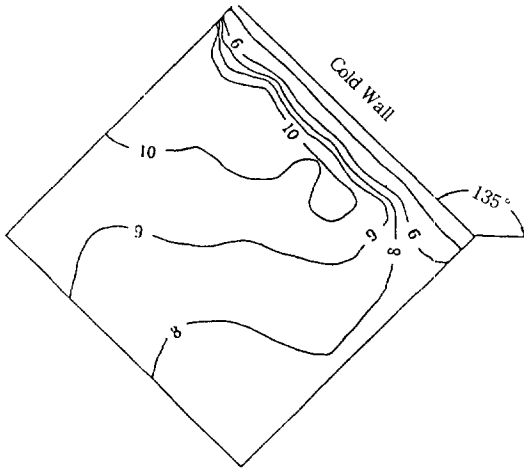


Fig.17 Isotherms for 0.25 hour  
( $\theta = 135^\circ$ ,  $T_i = 15^\circ\text{C}$ ,  $T_c = -6^\circ\text{C}$ )

볼 수 있었으며 1.3시간이 지난 후부터는 차츰 상부의 온도가 낮아 동결두께가 두꺼워짐을 볼 수 있고 경사각이 증가함에 따라 상부 오목한 부분이 없어져가는 시간이 적어짐을 볼수있는데 이는 냉각면과 접하는 부분의 유체 열용량과 관계되는 것으로 추정된다. 또한 온도층은 하부에 4°C 그 위에 8°C 그 상부에 6°C가 존재하다가 차츰 상부로 갈수록 온도가 낮아짐을 볼 수 있다. 그러므로 시간이 경과함에 따라 상부에서는 동결두께가 두꺼운데 비하여 하부에서는 동결의 두께가 얇아지는 현상을 볼 수 있다.

4.5 경사각이 180°인 경우

Fig.18은 경사각이 180°, 냉각면온도 -6°C, 초기온도 5°C일 때의 동결계면의 형태를 나타낸 것이다. 초기온도 5°C의 물은 냉각면의 영향에 의하여 냉각되어 4°C가 되면 밀도가 크므로 하부로 이동되어 4°C의 두꺼운 유체층이 형성되며 상부는 0°C로부터 4°C까지의 온도구배가 큰 층을 형성하며 시간이 경과하면 4°C층이 얇아지고 온도구배도 작아지며 동결이 진행된다.

Fig.19는 경사각이 180°이고 냉각면온도가 -6°C이며 초기온도가 15°C일때 동결계면의 형태이다.

냉각면의 영향에 의하여 상부에서부터 냉각되며

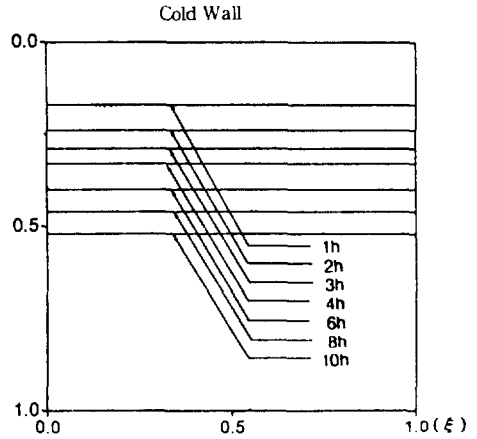


Fig.18 The growth of the ice-water interface  
( $\theta = 180^\circ$ ,  $T_i = 5^\circ\text{C}$ ,  $T_c = -6^\circ\text{C}$ )

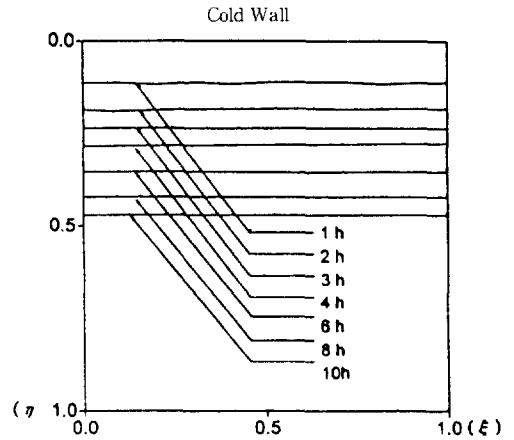


Fig.19 The growth of the ice-water interface  
( $\theta = 180^\circ$ ,  $T_i = 15^\circ\text{C}$ ,  $T_c = -6^\circ\text{C}$ )

유체와 냉각면의 온도차가 크므로 열교환 속도가 빠르고 약 1시간이 경과한 후부터는 초기온도가 5°C인 경우와 온도분포는 거의 같은 형태를 나타내고 따라서 초기에만 동결두께에 영향이 미침을 볼 수 있다. 상부의 15°C 유체와의 열전달에 의하여 상부에서 부터 온도가 낮아지므로 냉각속도가 느리며 동결이 진행됨에 따라 상부로부터 하부로 빠른 속도로 열전달되므로 대류유동이 빨라져서 처음에는 동결계면의 표면이 불규칙하고 냉각속도도 느리다



만 4°C이하로 냉각되어진 후부터는 상부에서부터 고르게 동결이 진행됨을 볼 수 있다.

4.6 경사각, 냉각면온도, 초기온도와 동결량

동결은 경사각이 증가하고 시간이 경과함에 따라 대류 유동의 영향이 적어져서 상부의 두꺼운 부분이 하부로 내려오며 동결량은 증가되었으나 Fig.20에서 보여주는 것처럼 시간이 경과하여 동결두께가 증가됨에 따라 전열저항이 증가되었고 냉각면 온도

가 낮을 수록 동결량은 냉각면온도가 높은 경우보다 증가되었다. 냉각면 온도가 상승할수록 과냉현상을 감지할 수 있었으나 본 실험 범위의 냉각면 온도에서는 그 영향이 적었으므로 무시하였다.

Fig.21은 냉각면 온도가 -6°C일때 초기온도의 증가와 시간이 경과함에 따른 동결량의 관계를 나타낸 것이며 Fig.22는 초기온도가 5°C일때 냉각면 온도에 따른 동결량을 나타낸 것이다.

초기온도가 낮을 수록 안정적 밀도층을 빨리 형

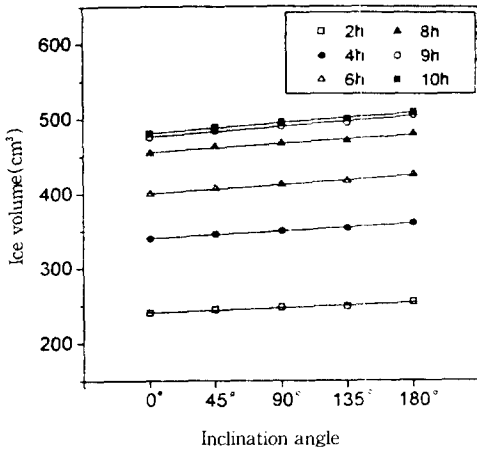


Fig.20 Ice volume with inclination angles (Ti=5°C, Tc=-6°C)

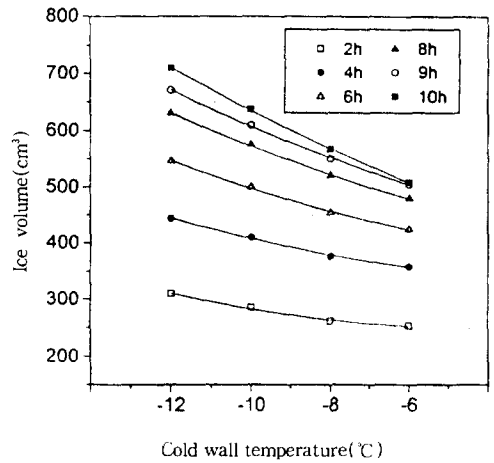


Fig.22 Ice volume with cold wall temperatures ( $\theta = 180^\circ$ , Ti=5°C)

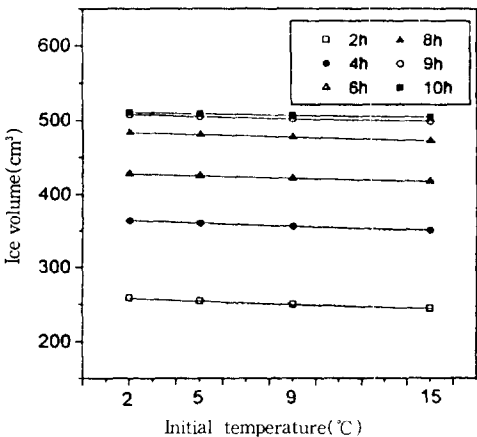


Fig.21 Ice volume with initial temperatures ( $\theta = 180^\circ$ , Tc=-6°C)

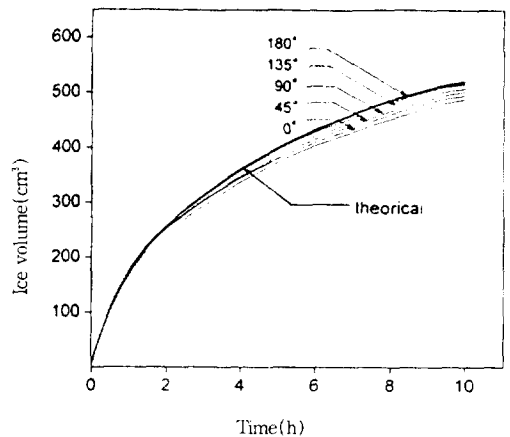


Fig.23 Ice volume with time (Ti=5°C, Tc=-6°C)

성하여 동결두께가 더 커지며 동결량은 증가하였다.

Fig.23은 초기온도 5°C, 냉각면온도가 -6°C일 때 경사각의 증가에 따른 동결량을 나타낸다.

본 실험에서는 미시적관점에서 초기온도와 냉각면 온도 사이에서 실험시작후 냉각면온도를 유지시키는데 걸리는 시간과 동결면을 측정하고 관찰하는 동안의 단열효과는 무시되었는데 Neumann-Stefan의 이론 예상치는 밀도를 일정하게 하고 대류유동이 무시된 경우인데, 이 경우와 본 실험의 경사각이 180°이고 초기온도가 5°C로 대류유동이 적은 경우와 거의 일치하였다.

## 5. 결 론

한 면을 냉각면으로 하는 함수정방형 실험조에서 냉각면의 경사각과 초기온도 그리고 냉각면의 온도를 변화시키면서 물의 동결실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

물의 동결시 경사냉각면의 경사각이 증가함에 따라 동결량이 더 커지며 4°C를 중심으로 안정적 밀도층을 빨리 형성할수록 대류유동이 적어져서 동결이 빠르고 경사냉각면에서의 동결은 초기온도가 4°C 이하에서는 처음부터 상부의 동결두께가 하부 보다 두꺼웠으며 4°C 이상에서는 동결초기에 하부가 상부 보다 두꺼웠으나 시간이 경과할수록 차츰 상부가 두꺼워졌고 8°C 이상에서는 초기에 상부가 오목한 형태가 되나 시간이 지나면서 상부가 더 두꺼워지며 경사각이 증가함에 따라 상부의 오목한 부분이 빨리 없어짐을 알 수 있었고 냉각면온도가 낮을수록 동결량은 증가되었다.

## 후 기

이 연구의 일부는 1997년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Kurz, W. and Fisher, D. J., 1984, "Fundamentals of Solidification", Trans. Tech. Publications, Aldermansdorf, Switzerland.
2. Sasaguchi, K. and Moriyama, Y., 1993, "The Effect of initial superheat on the Solidification of binary mixture", The 6th International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering, May 9~13, Seoul, Korea.
3. Beckermann, C. and Viskanta, R., 1988, "Natural convection solid/liquid phase change in porous media", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 1, pp. 35~46.
4. Chellaiah, S. and Viskanta, R., 1989, "Freezing of water-saturated porous media in the presence of natural convection experiments and analysis", ASME J. Heat Transfer, May, Vol. 111, pp. 425~432.
5. Choi, E, Cho, T. I. and Lorsch, H. G., 1994, "Forced convection heat transfer with Phase-change-material slurries : turbulent flow in a circular tube", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol., 37, No. 2, pp. 207~215.
6. 服部 賢, 1987, "凍結 融解を伴う傳熱(Heat transfer with Freezing and/or Melting)", 氷蓄熱技術, pp. 362~368.
7. Cao, W. Z. and Poulidakos, D., 1990, "Solidification of an alloy in a cavity cooled through its top surface", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33, No. 3, pp. 427~434.
8. Brewster, R. A. and Gebhart, B., 1988, "An experimental Study of natural Convection effects on downward freezing of pure water", Int. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 2, pp. 331~348.
9. Kim, C. J., Ro, S. T., Lee, J. S. and Kim, M. G., 1993, "Two-dimensional freezing of water folled between vertical concentric tubes involving density anomaly and volume expansion", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 10, pp. 2647~2656.
10. Yang, C. H., Rastogi, S. K. and Poulidakos,

- D., 1993, "Freezing of a water-saturated inclined packed bed on bead", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 14, pp. 3583~3592.
11. Masaru Hattori, 1987 "Heat Transfer with Freezing and melting", refrigeration, Vol. 62, No. 714, p.367.