

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 20, No. 1, 2000

상부에 냉각면이 있는 정방형내 이종유체의 저온거동에 관한 실험적 연구

이동석*, 김병철**

*조선대학교 대학원 기계공학과

**종신회원, 조선대학교 기계공학부

An Experimental Study on Low-Temperature Behavior of Stratified Fluids in a Square Cavity with Upper Cooling Surface

D. S. Lee*, B. C. Kim**

**Graduate School, Chosun University*

***Department of Mechanical Engineering, Chosun University*

Abstract

An experimental study on the stratified fluids with water and silicon oil of same volume in the cavity with upper cooling surface was carried out to investigate the flow characteristics, heat transfer through the interface of fluids, and the applications of thermal behaviors in a square cavity. The experiments were performed with variation of initial temperature and cooling surface temperature.

The temperature drop of oil was faster than that of water and freezing was initiated from the interface of oil and water and propagated downward. For the water above 4°C, the cooling rate was faster than that below 4°C and showed almost same temperature distribution but for the water that of below 4°C, it showed the stable stratified temperature distribution. The lower the initial temperature and the higher the cooling surface temperature was, the longer the supercooling duration.

기 호 설 명

- H : Height of enclosure [mm]
- L : Length of enclosure [mm]
- Tc : Cooling surface temperature [°C]
- Ti : Initial temperature [°C]
- x : Horizontal coordinate [mm]
- y : Vertical coordinate [mm]
- η : Dimensionless vertical coordinate [y/H]
- ξ : Dimensionless horizontal coordinate [x/L]

1. 서 론

공기나 그 밖의 기체와 접한 액체의 증발을 막고, 보다 순수한 액체로 유지하기 위하여 화학공정 및 산업현장에서 이중유체가 사용되는데, 이중유체를 사용하는 경우 두 유체간의 열적거동은 서로 다른 물리적 성질과 경계면에서의 열적현상이 존재하기 때문에 매우 복잡하다.

일반적으로 이중유체내의 열전달 메카니즘은 온도차에 의하여 자연대류가 발생하고 두 유체의 경계면에서 표면장력의 변화에 의한 Marangoni 효과가 일어난다고 알려졌다.

특히 상부에 기름이 존재하고 하부에 물이 존재하여 저온에서 냉각되는 경우 상부의 기름이 냉각되면 하부의 물과 열교환이 되며 동결이 일어나고 이 경우 물의 열적거동 또한 흥미의 대상이 되고 있다.

Brewster와 Gebhart¹⁾는 순수한 물의 하향 동결연구에서 자연대류의 효과를 연구하였는데 0°C와 밀도가 최대인 4°C 그리고 0°C에서와 비슷한 밀도를 갖는 8°C를 기준으로 하여 유동방향을 세 가지 영역으로 나누어 0~4°C까지는 상향유동을 8°C이상에서는 하향유동을 하는 것으로 발표하였다. Saito²⁾는 상부에 냉각면을 갖는 순수한 물의 실험을 통하여 과냉각현상에 의한 얼음 성장지연

에 대하여 연구하였다.

Angirasa와 Srinivasan³⁾은 등온 수직가열면을 통한 이중유체의 대류열전달에 관하여 실험을 행하였고, Kimura⁴⁾는 고온영역에서 정방형내 이중유체의 자연대류 열전달에 관한 연구에서 유체들의 조합과 두 유체의 계면의 높이가 평균 Nusselt Number에 많은 영향을 미치며, 유체의 성층이 열전달을 규제하고 제어하는데 있어서 새로운 방법이 될 수 있음을 제안했다. 또한 이중유체를 이용한 열적 시스템이 열교환기로 사용될 수 있음을 예상했다.

Koster와 Nguyen⁵⁾은 수치해석적 모델링을 이용하여 혼합되지 않는 이중유체에서의 밀도역전을 포함한 자연대류 현상을 규명하였다. 그러나 저온에서 과냉각이 수반되는 경우 자연대류 열전달에 대한 연구와 이중유체의 계면에서 활성화된 액체의 계면 난류현상에 대한 연구는 부족한 형편이다.

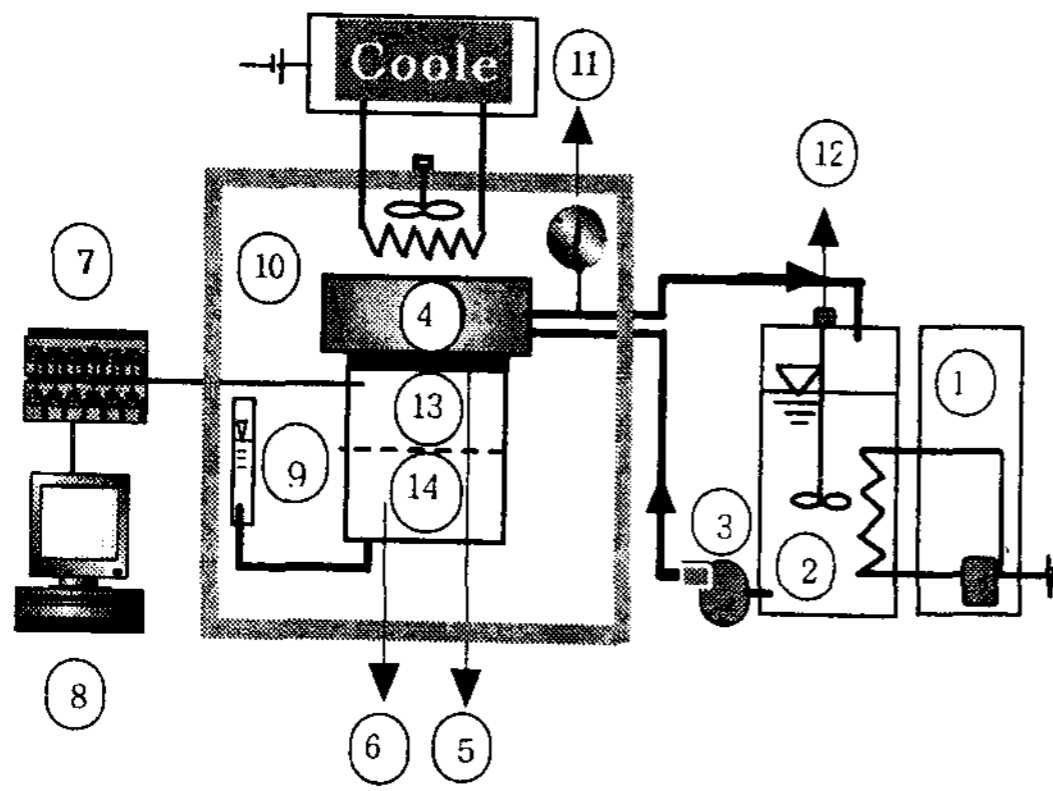
본 연구에서는 물과 실리콘오일이 들어있는 정방형내 이중유체를 상부에서 냉각하였을 경우 유체의 초기온도와 냉각면온도를 변화시켜 이에 따른 상부유체와 하부유체의 열적현상을 규명하므로써 열적제어 시스템의 기초자료를 얻고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

실험장치로는 실험조, 열교환기, 측정장치로 이루어져 있고 부속장치는 냉동장치, 항온조, 온도 조절기 및 온도 기록장치로 이루어져 있는데 그림 1은 그 개략도를 나타내고 있다.

실험조는 가로, 세로, 높이가 각각 100mm인 정방형으로 20mm의 투명한 아크릴로 제작하였고 실험조의 상부는 10mm두께의 동판으로 열교환할 수 있도록 만들어졌으며 외부와의 단열을



- | | |
|-----------------------|----------------------------|
| 1. Refrigerator | 8. Pentium PC |
| 2. Constant bath | 9. Mass cylinder |
| 3. Circulation pump | 10. Constant temp. room |
| 4. Heat exchanger | 11. Temperature controller |
| 5. Cooling surface | 12. Agitator |
| 6. Test section | 13. Silicon oil |
| 7. Data logger system | 14. Distilled water |

Fig. 1. The schematic diagram of the experimental apparatus

위하여 50mm의 Styrofoam을 사용하였다. 초기 온도의 설정과 안정적이며 정확한 실험을 위하여 항온실을 설치하여 실험하였다. 실험조내에는 지름 0.127mm의 열전대를 $\xi=0.05, 0.25, 0.5, 0.75, 0.95$ 인 곳과 $\eta=0.05, 0.2, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.8, 0.95$ 인 곳에 각각 8개씩 설치하여 온도를 측정하였다.

2.2 실험방법

실험조내에 기포를 제거한 증류수와 불순물을 여과한 밀도가 $947.223\text{kg/m}^3(25^\circ\text{C})$ 이고, 비열이 $0.39\text{cal/g}^\circ\text{C}(25^\circ\text{C})$ 인 실리콘오일(KF96-20cs, Sin-Etsu Chemical Co., Ltd.)을 같은 부피로 넣고, 유체의 초기온도가 설정값에 이르렀을 때 실험을 실시하였다. 두 유체의 초기온도를 각각 $2^\circ\text{C}, 7^\circ\text{C}, 15^\circ\text{C}$ 로 동일하게 설정하고 이에 따른 냉각면의 온도를 각각 $-4^\circ\text{C}, -6^\circ\text{C}, -9^\circ\text{C}, -12^\circ\text{C}$ 로 설정하여 실험하였다.

항온장치를 이용하여 실험조 주위의 온도를 유체의 초기온도와 같은 조건으로 설정하고 실험이 끝날 때까지 유지하였다. 유체를 실험조에 넣고 3시간이 경과한 후 유체가 안정되어 있을 때 실험당 24시간씩 실험을 수행하였고 정확성을 얻기 위하여 반복 실험하였다. 온도측정은 Data logging system을 사용하여 2분 간격으로 측정하며 모니터링 하였고 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 까지 제어되는 온도제어기(TZAM, Autonics. Co.)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 냉각면의 온도가 -4°C 인 경우

그림 2는 냉각면의 온도가 -4°C 이고 유체의 초기온도가 각각 $15^\circ\text{C}, 7^\circ\text{C}, 2^\circ\text{C}$ 일 때 시간에 따른 수직온도 분포를 나타낸 것이다. 초기온도 15°C 의 경우 물과 오일은 하향유동으로 인하여 상하부의 온도차가 적었으며 냉각면과의 온도차가 커서 실험초기에 급격한 온도하강을 보였다. 오일의 경우 냉각면과 직접 접촉하고 비열이 물보다 낮아 더욱 급속히 냉각됨을 볼 수 있었으며 오일의 상하부는 시간이 경과할수록 거의 같은 온도분포를 보이며 서서히 냉각되었다. 물은 4°C 가 될 때까지 거의 같은 온도분포를 유지하였으나 냉각되어 4°C 이하가 되며 경계면으로부터 물의 하부로 층상을 이루며 서서히 냉각되었고 빙점 이하로 내려가도 액상을 유지하는 과냉각수가 경계면에서부터 형성되어 시간이 지남에 따라 과냉각 영역이 점점 하부로 확장되었다. 물의 과냉각현상은 실험시작 후 약 11시간까지 지속되다가 $\eta=0.5\sim 0.35$ 인 영역에서 $-1.5^\circ\text{C} \sim -0.4^\circ\text{C}$ 의 물이 순간적으로 슬러지형 얼음으로 상변화되었고 잠열을 방출하며 주위의 물과 오일의 온도가 상승됨을 볼 수 있었다. 그후 슬러지형 얼음은 벽면에서부터 서서히 용해되고 경계면으로부터 얼음이 성장하기 시작하였으며, 실험시작 24시간이 경과한 후

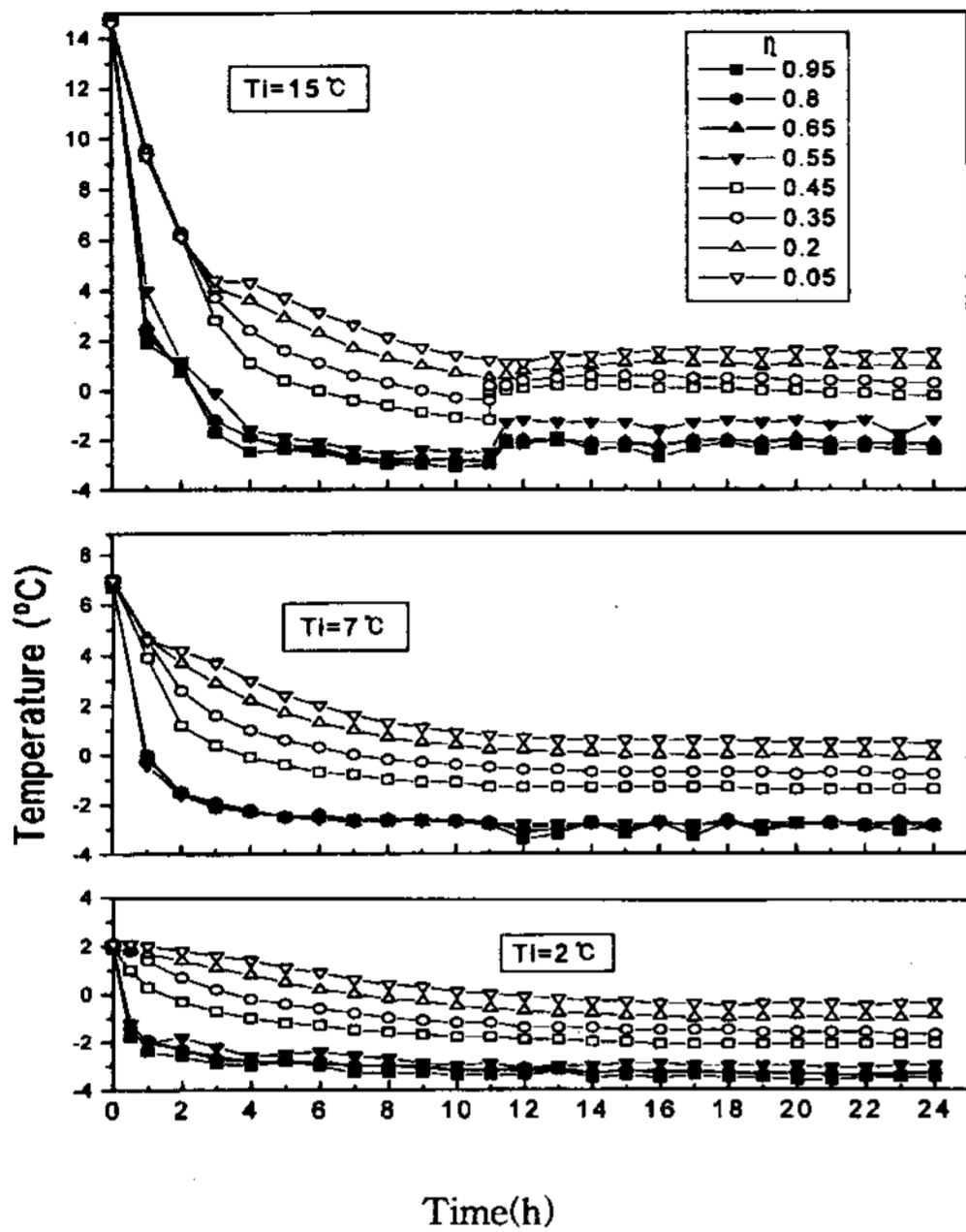


Fig. 2. Vertical temperature distribution with initial temperature of fluid, $T_c = -4^\circ\text{C}$, $\xi = 0.5$

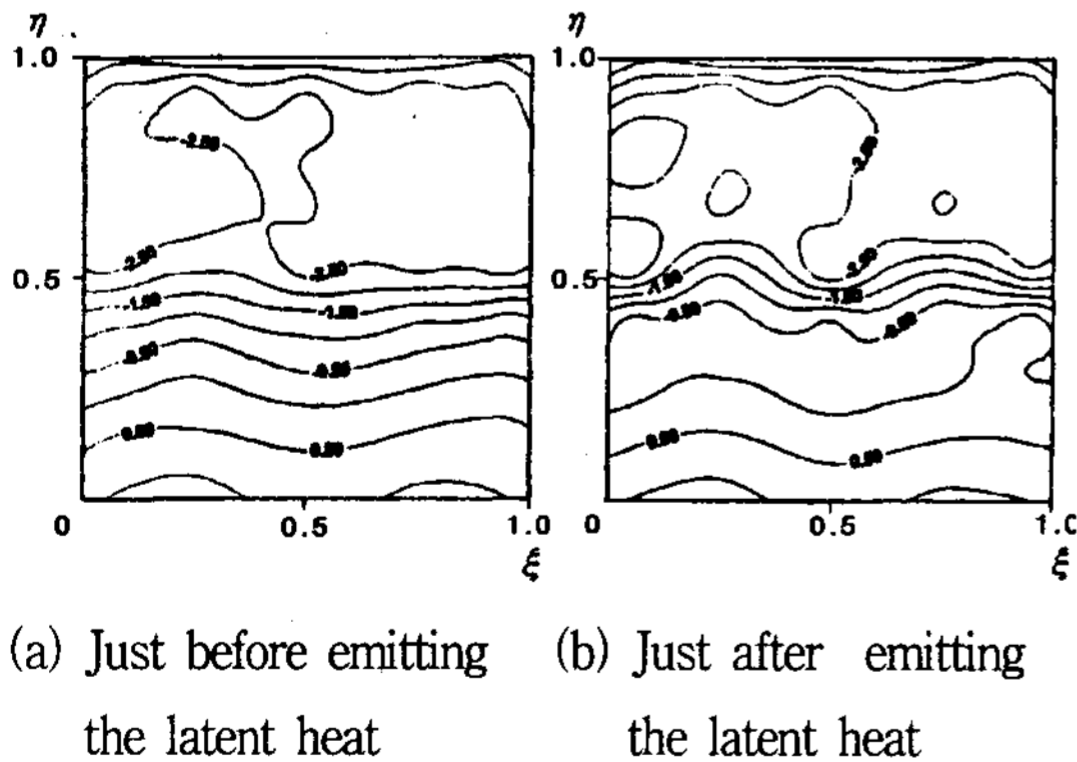


Fig. 3. Isotherms $T_c = -4^\circ\text{C}$, $T_i = 15^\circ\text{C}$

얼음은 경계면으로부터 약 10mm 지점까지 성장하였다.

초기온도 7°C의 경우도 물이 4°C 근처로 냉각될 때 까지는 밀도차로 인한 유동이 발생하여 급속

히 냉각되었으며 과냉각현상이 발생하여 24시간이 지날때까지 지속됨을 볼 수 있었다.

초기온도 2°C의 경우는 밀도가 최대인 4°C를 경유하지 않고 냉각되므로 실험초기부터 물의 유동현상을 보이지 않았고 상부로부터 냉각되었으며 경계면 주위로부터 물의 하부까지 층상적인 온도장이 형성되었고 실험시작후 24시간이 지나도 과냉각현상은 지속되어 $\eta = 0.45$ 와 0.05인 곳에서 각각 -2.1°C 와 -0.4°C 까지 내려가는 전반적인 과냉각현상이 일어났다.

그림 3은 초기온도가 15°C일 때 물의 과냉각현상이 종료되기 전과 후의 등온선을 나타낸 것이다. 실험시작 후 2.5시간까지 냉각면근처와 경계면 근처에서는 온도구배가 커서 열전달이 빠르고 이로 인하여 상·하부 유체의 유동속도는 컸으나 물은 온도가 4°C에서 밀도역전 현상으로 인하여 경계면에서부터 물의 하부로 온도가 서서히 내려갔으며 (a)와 같이 과냉각 종료전에 상부유체는 약 -2.5°C 로 일정한 반면 물은 $-1.5^\circ\text{C} \sim 1^\circ\text{C}$ 까지 층상적인 온도분포가 형성되었다. (b)는 과냉각 종료후의 등온선을 나타내는데 (a)에서의 과냉각 영역인 $\eta = 0.5 \sim 0.35$ 인 곳이 0°C 근처로 상승하였음을 알 수 있다. 그 후 잠열은 주위로 서서히 전달되어 과냉각 종료 30분후에 상부유체와 하부유체의 온도가 각각 약 0.5°C 정도 상승하였다.

3.2 냉각면의 온도가 -6°C 인 경우

그림 4는 냉각면의 온도가 -6°C 이며 유체의 초기온도가 각각 15°C, 7°C, 2°C일 때 시간에 따른 수직온도 분포를 나타낸다. 초기온도 15°C의 경우는 냉각면의 온도가 -4°C 이고 초기온도가 15°C인 경우와 비슷하였으며 실험시작 후 2시간까지는 하향유동과 냉각면과의 온도차로 인하여 물은 4°C 근처까지 급격히 냉각되었으며 그후 물은의 유동 감소로 인하여 경계면에서부터 전도에 의하여 온도가 빠르게 하강하여 빙점이하의 과냉각수가 되었으며 물의 하부에서는 온도가 거의 내려

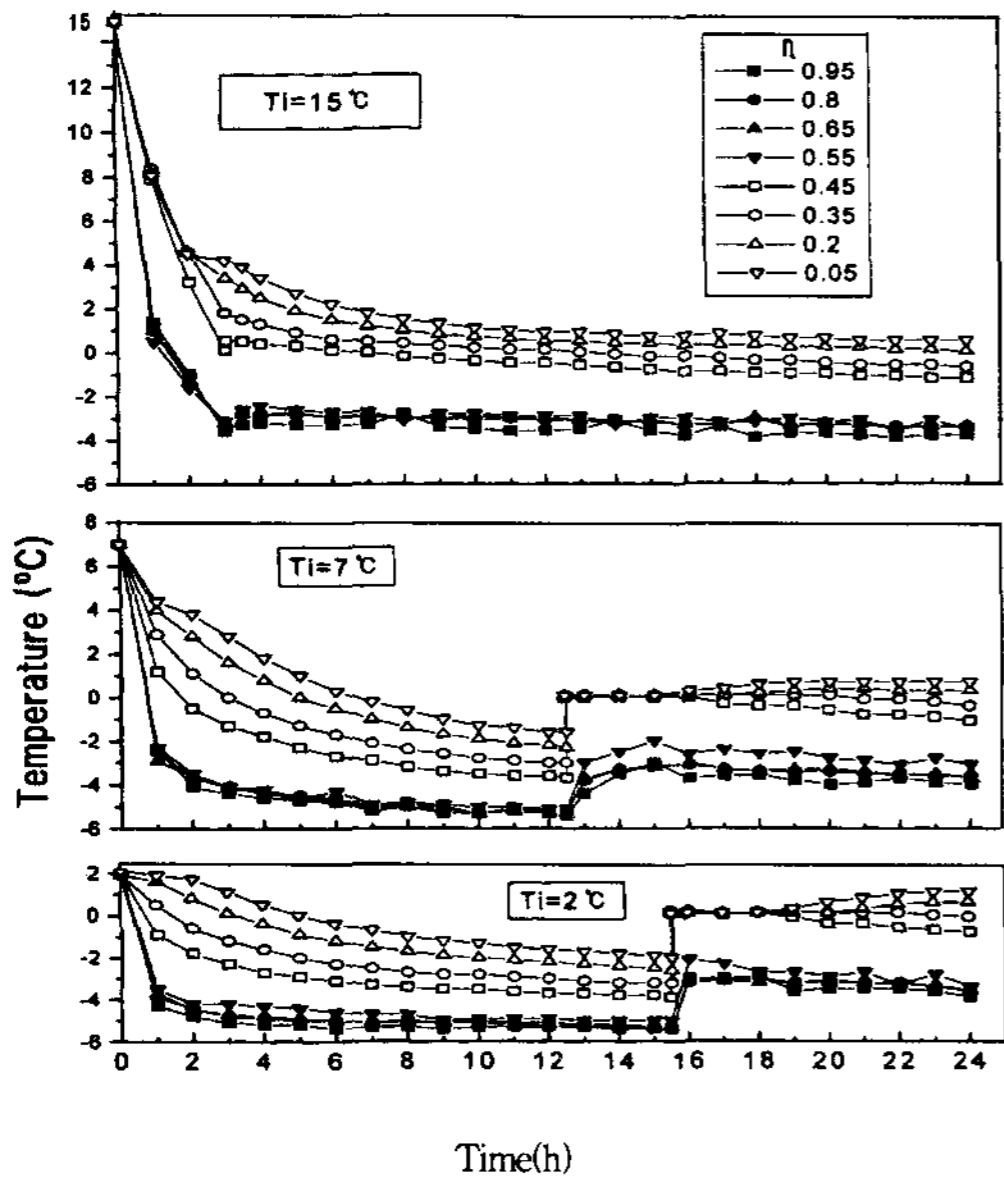


Fig. 4. Vertical temperature distribution with initial temperature of fluid, $T_c = -6^\circ\text{C}$, $\xi = 0.5$

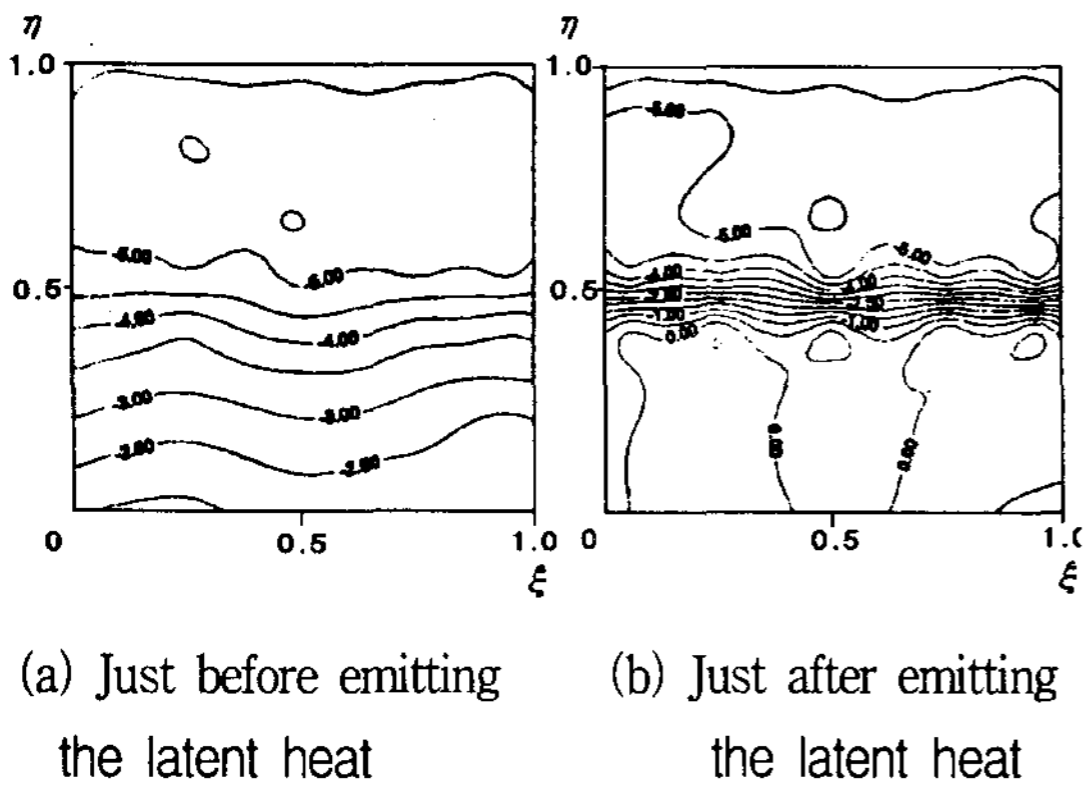


Fig. 5 Isotherms $T_c = -6^\circ\text{C}$, $T_i = 2^\circ\text{C}$

가지 않음을 볼 수 있었다. 그러나 과냉각현상은 냉각면온도가 -4°C 인 경우와 다르게 실험시작 후 3시간만에 종료되었으며 경계면근처에서부터 동결이 시작되었다. 이것은 경계면의 물이 빙점에 이르렀을 때 경계면 근처에서의 온도구배가, 냉각면온도가 -4°C 인 경우 보다 더 크기 때문으로 추

정된다. 초기온도가 7°C 인 경우는 물의 과냉각현상이 실험시작 후 약 13.5시간까지 지속되어 잠열방출 전후의 온도차가 확연하게 나타남을 볼 수 있었다.

초기온도 2°C 인 경우도 과냉각현상이 실험시작 후 15.5시간까지 지속되었으며 $-4^\circ\text{C} \sim -2^\circ\text{C}$ 의 과냉각수가 상변화하며 잠열을 방출하여 물과 오일의 온도가 상승하였다. 이때 슬러지형 얼음은 물의 하부로부터 용해가 진행되었고 동시에 경계면에서는 동결이 시작되었으며 잠열방출 후 약 5시간만에 슬러지형 얼음이 완전히 용해되었다. 이 과정에서 동결시 발생하는 잠열로 슬러지형 얼음 사이에 존재하는 물의 온도가 상승하여 하부로 전해져 $\eta = 0.05$ 와 0.2 인 부분의 온도가 다소 상승하였다.

그림 5는 초기온도가 2°C 일 때 물의 과냉각 현상이 종료되기 전과 후의 등온선을 나타낸 것이다. (a)에서 물의 전 영역이 $-4^\circ\text{C} \sim -2^\circ\text{C}$ 의 과냉각수로 존재하는 것을 볼 수 있었는데 순간적으로 상변화하여 슬러지형 얼음이 되었고 잠열방출의 영향으로 온도가 빙점인 0°C 로 상승되었음을 (b)로부터 확인할 수 있다. 그 후에 서서히 잠열이 상부유체에 전달되어 온도가 약 2°C 정도 상승됨을 볼 수 있었다.

3.3 냉각면의 온도가 -9°C 인 경우

그림 6은 냉각면의 온도가 -9°C 이며 유체의 초기온도가 각각 15°C , 7°C , 2°C 일 때 시간에 따른 수직온도 분포를 나타낸 것이다.

오일은 물보다 빨리 온도가 강하하였고 초기온도가 15°C 의 경우는 과냉각을 수반하지 않았으며 실험시작 후 2.5시간에 경계면으로부터 동결이 시작되었다. 냉각면온도가 -6°C 인 경우에 비하여 냉각열량이 더 크므로 하부유체의 동결속도가 더 빠름을 알 수 있었다. 7°C 의 경우는 실험시작 후 약 1.5시간에 $\eta = 0.45$ 인 부분이 -0.5°C 까지 과냉각되었다가 잠열을 방출하여 상부유체의 미소

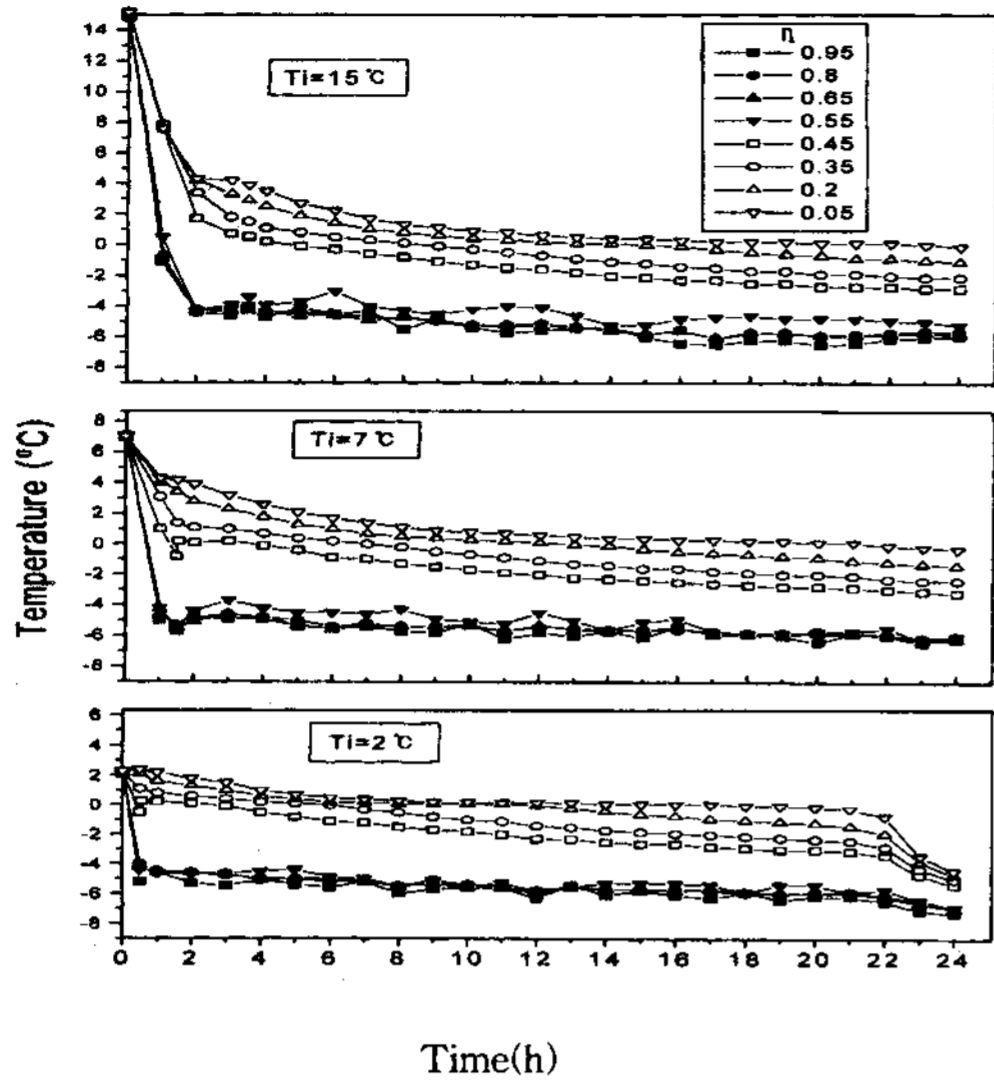


Fig. 6. Vertical temperature distribution with initial temperature of fluid, $T_c = -9^\circ\text{C}$, $\xi = 0.5$

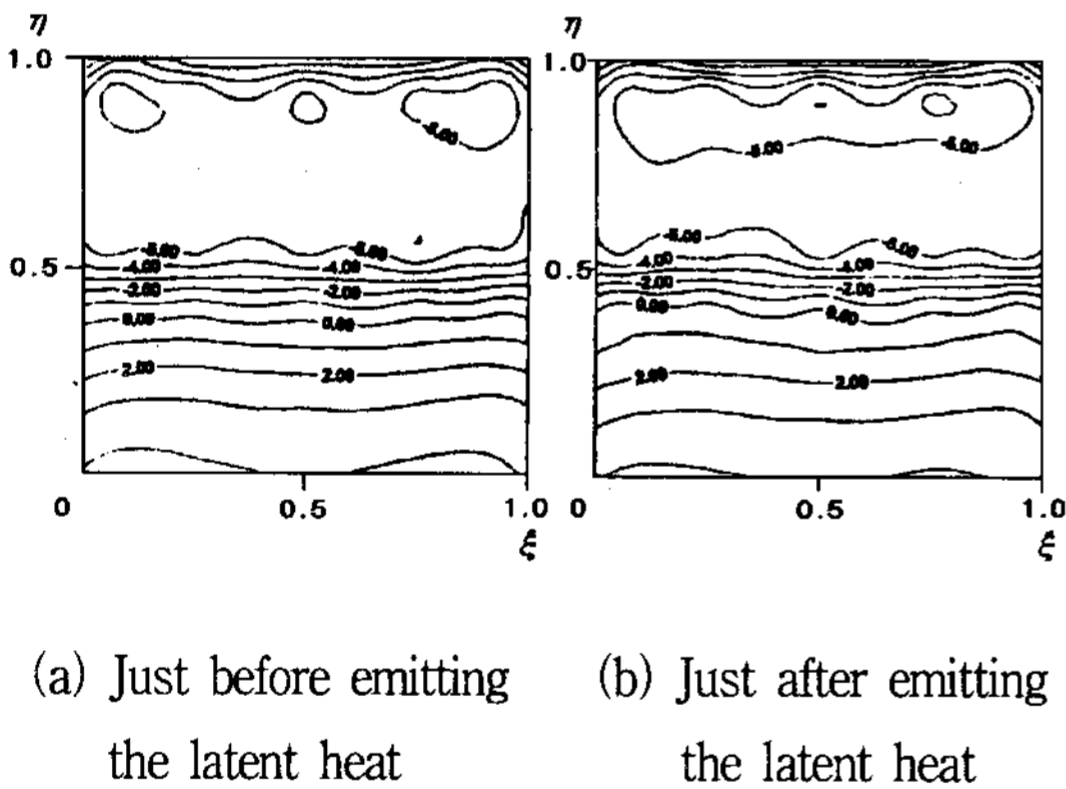


Fig. 7. Isotherms $T_c = -9^\circ\text{C}$, $T_i = 7^\circ\text{C}$

한 온도상승을 일으켰으며 그후 15°C 와 같은 냉각형태를 보였다. 2°C 의 경우도 7°C 와 유사하였고 초기온도가 상대적으로 낮아서 실험시작 후 22시간에 하부유체의 동결이 완료됨을 볼 수 있었다.

그림 7은 초기온도가 7°C 일 때 물의 과냉각현상이 종료되기 전과 후의 등온선을 나타낸 것으로서 냉각속도가 빠르면 과냉각 지속시간이 짧고

과냉각 영역이 좁아 잠열방출의 영향이 미소함을 알 수 있었다.

3.4 냉각면의 온도가 -12°C 인 경우

그림 8은 냉각면의 온도가 -12°C 이며 유체의 초기온도가 각각 15°C , 7°C , 2°C 일 때 시간에 따른 수직온도 분포를 나타낸 것이다. 이러한 경우 물은 과냉각을 수반하지 않고 동결이 진행되었고, 초기온도가 낮을수록 빨리 동결이 시작되었으며 초기온도가 15°C , 7°C , 2°C 인 경우 각각 16.3, 15.2, 14.5시간만에 물의 동결이 완료되었다. 동결이 완료된 후에는 냉각면에 의한 열전도와 잠열방출의 영향을 받지 않음으로 인한 온도강하가 큼을 볼 수 있었다

3.5 과냉각의 영향

0°C 이상인 물이 0°C 이하의 냉각면과 열교환하여 냉각되면 냉각면 근처의 물은 빙점이하로 내려가 곧바로 상변화를 일으키지 않는 과냉각 상태가 유지되며, 순간적으로 과냉각이 종료되면

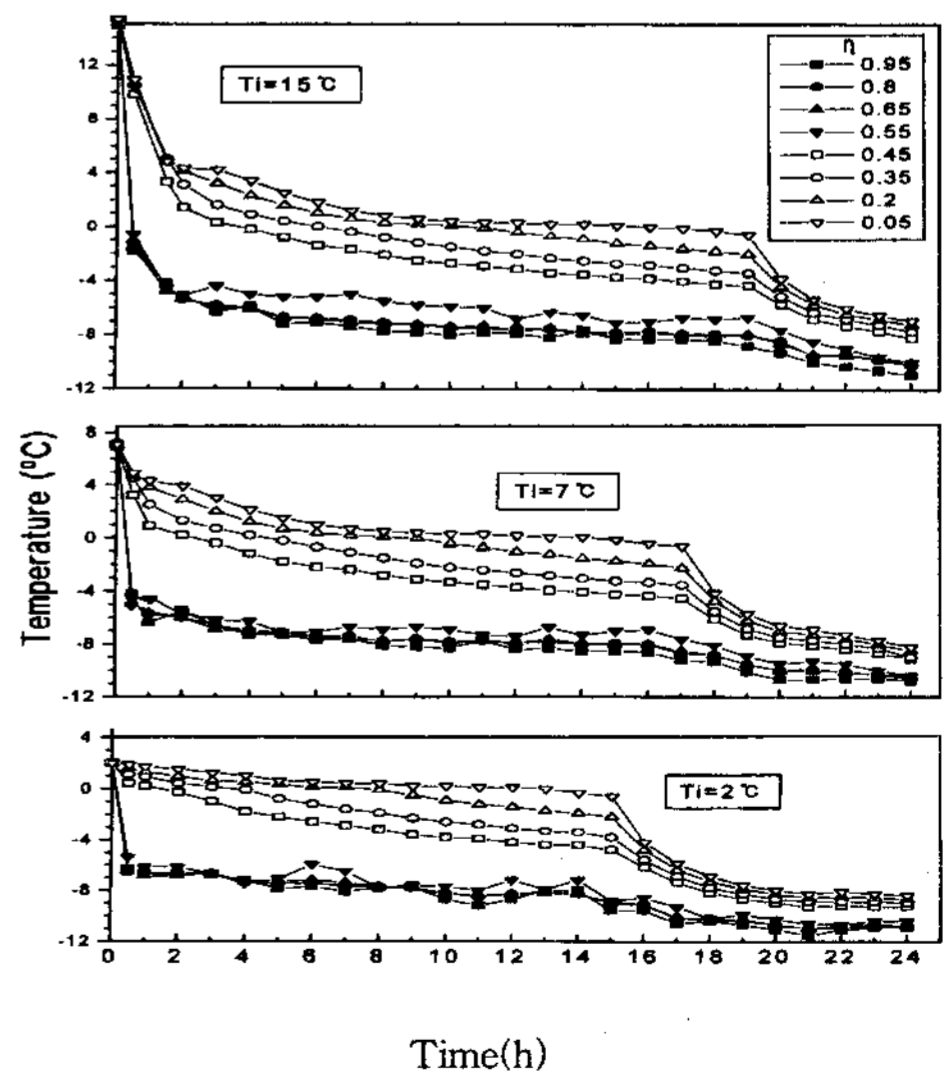


Fig. 8. Vertical temperature distribution with initial temperature of fluid, $T_c = -12^\circ\text{C}$, $\xi = 0.5$

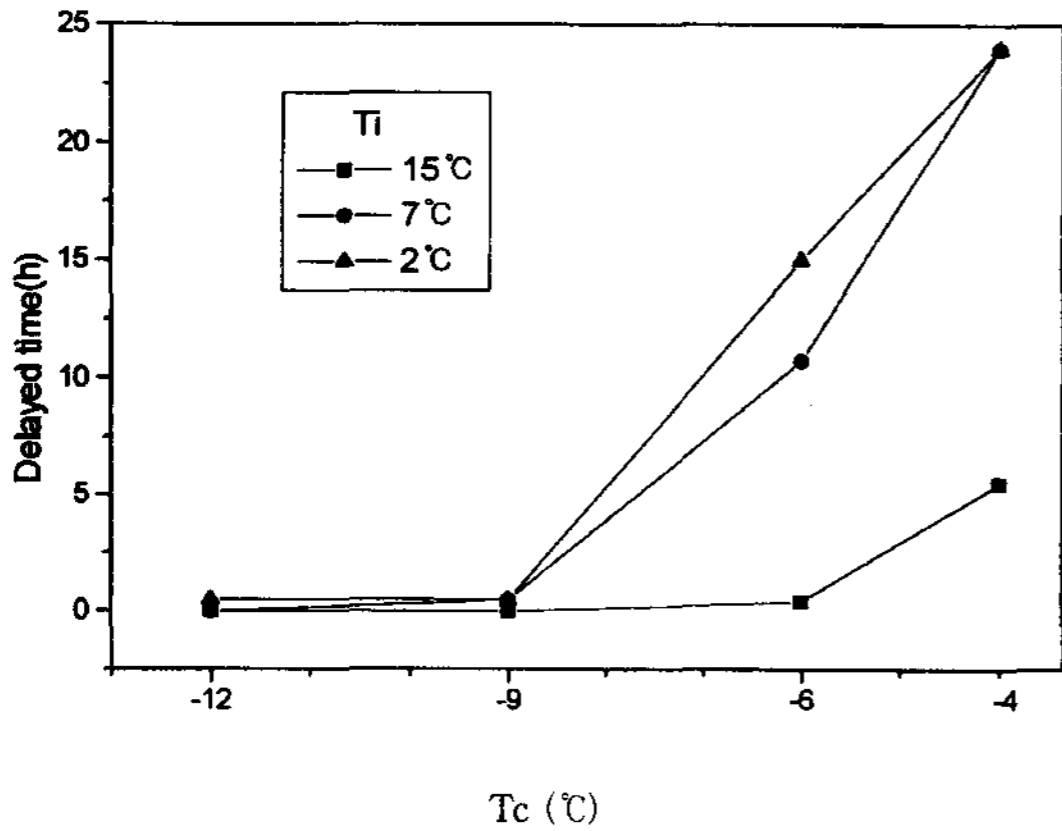


Fig. 9. Delayed times of supercooling phenomena

슬러지형 얼음이 과냉각 영역 전체에 발생하고 잠열방출로 인하여 이 영역의 온도는 빙점인 0°C 까지 상승한다. 슬러지형 얼음이 발생하면 동시에 냉각면에서는 얼음의 성장이 시작되고, 성장과 동시에 슬러지형 얼음이 용해하기 시작하여 완전히 용해하고 얼음이 성장하게 된다.

그림 9는 냉각면의 온도에 따른 과냉각 지속시간을 나타낸 그래프이다. 냉각면 온도가 -4°C이며 초기온도가 각각 7°C, 2°C인 경우는 실험시작 후 24시간까지 물의 과냉각현상이 지속되었고, 과냉각으로 인한 물의 온도강하는 -2°C까지 관찰되었다. 냉각면 온도가 -6°C이며 초기온도가 15°C, 7°C, 2°C인 경우 각각 0.5, 11, 15시간만에 과냉각이 종료되어, 초기온도가 높을수록 과냉각 지속시간이 짧은 것을 볼 수 있었는데 이는 초기온도가 높을수록 냉각면과의 온도차가 커서 유동속도가 크기 때문으로 추정된다. 과냉각으로 인한 물의 온도강하는 -4°C까지 관찰되었다. 냉각면 온도가 -9°C인 경우 과냉각 지속시간은 0.5시간 이하로 매우 짧았으며, 냉각면 온도가 -12°C인 경우는 과냉각을 수반하지 않았다.

3.6 상부유체의 온도변화

그림 10은 각 냉각면에서의 초기온도가 7°C일

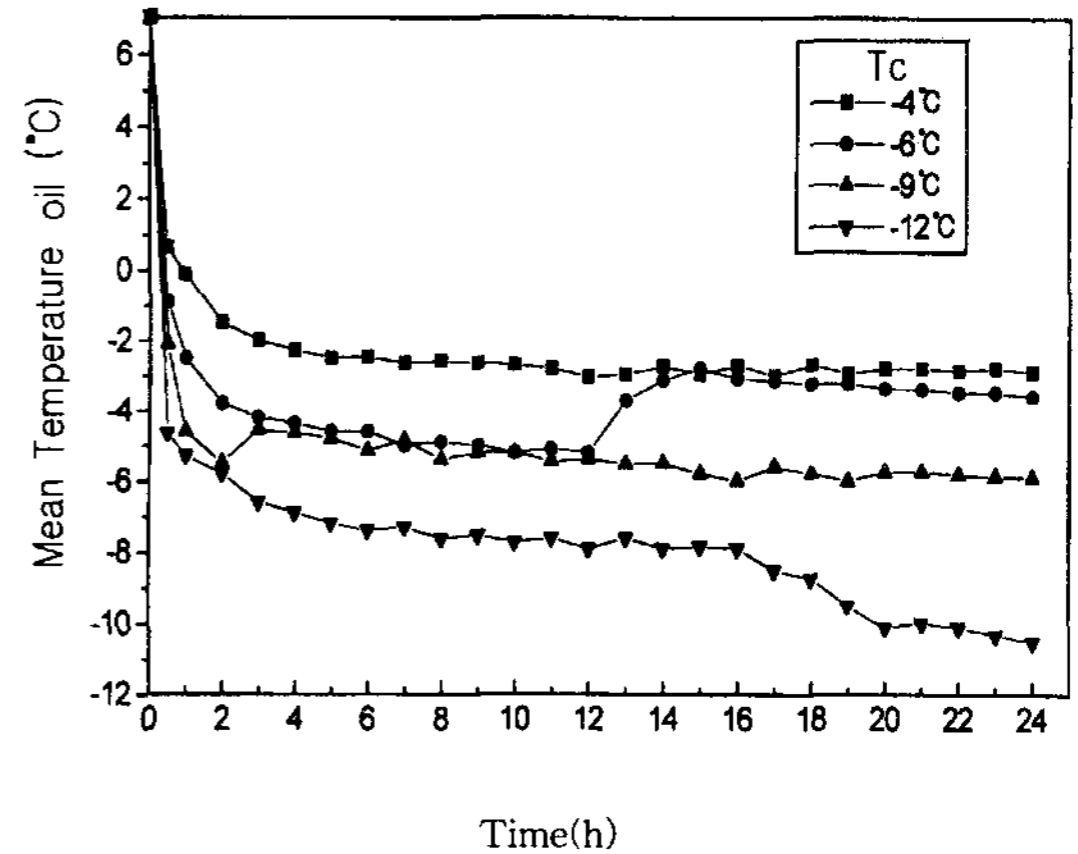


Fig. 10. The variation of oil mean temperature with cooling surface temperature, $T_i=7^\circ\text{C}$

때 시간에 따른 상부유체의 평균온도를 나타낸다. 정방형내 이중유체를 상부에서 냉각하였을 때 상부유체는 실험초기에는 냉각면 온도에 관계없이 빨리 냉각되었으나, 냉각면 온도가 -4°C와 -6°C와 -9°C인 경우에는 과냉각을 수반하였고 과냉각이 지속되는 동안 서서히 냉각되다가 잠열을 방출하여 0.5°C~2°C정도 상승하였으며, 냉각면 온도가 -12°C의 경우는 과냉각을 수반하지 않았고 물의 동결이 진행되는 동안 거의 일정한 온도로 유지되었으며 동결이 완료된 후 다시 냉각면 온도 근처까지 빠르게 냉각되었다.

4. 결 론

저온과 고온 특성 때문에 그 활용도가 증가될 것으로 예측되는 실리콘오일과 물을 열적 제어시스템의 기초자료가 될 수 있도록 상부 냉각면을 갖는 경우 정방형내에서 이중유체의 저온거동에 관한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 오일은 상부에서 냉각면과 접촉하므로 물보다 온도강하가 빨랐으며, 과냉각 종료후 물은 곧 바로 0°C로 상승되었으나, 오일은 서서히 온도

- 가 상승하였다.
2. 오일과 물의 경계면에서부터 하부로 동결이 시작되었고 냉각면온도가 낮고 초기온도가 높을수록 과냉각 지속시간은 짧아졌으며 냉각면온도가 -12°C 에서는 과냉각현상이 나타나지 않았다.
 3. 물은 4°C 로 냉각되기 전에는 냉각속도가 빨랐으나 4°C 이하에서는 하부로 갈수록 밀도역전 현상에 의하여 경계면에서부터 냉각되는 층상적인 온도분포가 형성되어 냉각속도가 느렸다.

후 기

이 연구의 일부는 1999년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Brewster, R. A. and Gebhart, B., "An Experimental Study of Natural Convection Effects on Downward Freezing of Pure Water", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.21, No.2, 1998, pp.331~348.
2. Saito, A., "Experimental Research on the Freezing Process with Super-cooling", *Refrigeration*, Vol.56, No.643, 1981, pp.373~379.
3. Angirasa, D. and Srinivasan, J., "Natural Convection Heat Transfer From an Isothermal Vertical Surface to a Stable Thermally Stratified Fluid", *Int. J. Heat Transfer*, Vol.114, No.923, 1992, pp.199~212.
4. Kimura, T., Heya, N., Takeuchi, M., and Isomid, H., "異種流體が 密閉容器内で 成層する 境遇の 自然對流 熱傳達現象", *Trans. JMSE. B*, Vol.52, No.474, 1988, pp.617~625.
5. Koster, J. N. and Nguyen, K.Y., "Steady Natural Convection in a Double Layer of Immiscible Liquids with Density Inversion", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.39, No.3, 1996, pp.467~478.
6. Shouji, M. J., *機械の 研究*, Vol.26, No.11, 1983, pp.1449.
7. Mcdondugh, M. W. and Faghri, A., "Experimental and Numerical Analyses of the Natural Convection of Water Through Its Density Maximum in a Rectangular Enclosure", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.37, No.5, 1994, pp.783~801.
8. Thompson, M. E. and Szekely, J., "Density Due to Counter Buoyant Flow Along a Vertical Crystallization Front", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.32, No.6, 1989, pp.1021~1036.
9. Hasrent, M., "Heat Transfer With Freezing and/or Melting", *Refrigeration* Vol. 62, No.714, 1987, pp.362~368.