

저온에서 정방형 공간내 성층화된 유체의 열적거동에 관한 실험적 연구

강 한 용[†], 이 동 석, 김 병 철^{*}

조선대학교 대학원, ^{*}조선대학교 기계공학부

An Experimental Study on the Low-Temperature Behavior of Stratified Fluids in the Square Cavity

Han-Yong Kang[†], Dong-Suk Lee, Byung-Chul Kim^{*}

Postgraduate School, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

^{*}Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

(Received April 1, 1999; revision received January 10, 2000)

ABSTRACT: An experimental study on the stratified fluids was carried out to investigate the flow characteristics, heat transfer through the interface of fluids, and the applications of thermal behaviors in the square cavity. The same volume of water and silicon oil was filled in it. The experiments were performed with the variations of initial temperatures and cooling surface temperatures. And the effect of vertical or horizontal cooling surface positions in the square cavity was investigated.

When the cooling surface temperatures were -4°C , the supercooling phenomena were observed for both cases of cooling surface positions in the full region regardless of the initial temperature of fluid. In the square cavity with horizontal cooling surfaces, the lower the initial temperatures were, the longer the supercooling durations were, and with vertical cooling surface the lower the initial temperatures were, the shorter the supercooling durations were.

Key words: Supercooling (과냉), Freezing interface (동결계면), Stratified fluid (층상유체), Cooling surface (냉각면), Latent heat (잠열)

기 호 설 명

H : 실험조 높이 [mm]
 L : 실험조 길이 [mm]
 T_c : 냉각면 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 T_i : 유체 초기온도 [$^{\circ}\text{C}$]

그리스 문자

η : 수직좌표계의 무차원수 (y/H)
 θ : 냉각면의 각도 [$^{\circ}$]
 ξ : 수평좌표계의 무차원수 (x/L)

[†] Corresponding author

Tel.: +82-62-230-7041; fax: +82-62-230-7041

E-mail address: kalmool@nuri.net

1. 서 론

성층을 이룬 서로 다른 유체는 외부와 접하여

있는 액체의 증발을 막고, 외부와 열출입으로 인한 열적변화량을 줄이기 위하여 사용하며 공기나 기타 불순물과의 접촉을 피해 보다 순수한 액체 상태로 사용하기 위하여 화학공정 및 일반 산업 현장에서 쓰인다. 상 하부의 유체상호간에 열 또는 물질전달이 있는 경우 밀도차에 의해서 자연 대류가 발생하며 계면의 표면장력은 Marangoni 대류를 일으킨다고 알려져 왔다. 상부에 기름이 존재하고 하부에 순수한 물이 있는 경우의 저온냉각 열전달 시스템에서 하부유체인 물은 4°C에서 밀도가 최대가 되며 0°C이하로 냉각되면 동결이 시작되거나 경우에 따라서는 과냉현상이 나타나 더욱 복잡하다.

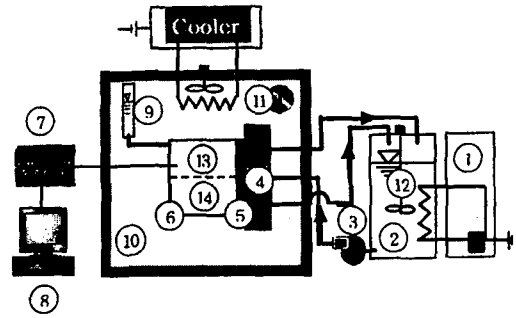
순수한 물 혹은 이중유체의 자연대류에 대하여 Brewster and Gebhart⁽¹⁾는 순수한 물의 하향동결의 경우 자연대류에 대한 효과를 연구하였는데 물의 동결온도인 0°C와 밀도가 최대인 4°C 그리고 0°C와 비슷한 밀도값을 갖는 8°C를 기준으로 하여 유동방향을 세가지 영역으로 나누어 연구하였다. Saito⁽²⁾는 상부에 냉각면을 갖는 순수한 물의 실험을 통하여 과냉현상에 의한 얼음 성장 지연에 대하여 연구하였으며 Kimura⁽³⁾는 이중유체 간의 계면현상을 거시적인 관점에서, 계면에서는 물질유동이 없다고 가정하여 차분해석에 의한 정상상태 자연대류 열전달을 연구하였는데, 계면에서는 하부유체에서 상부유체로의 열이동이 생기며 이때 이동열량은 순환류의 세기에 의해서 결정된다고 하였다.

이들 대부분은 한 면을 전열면으로 하고 나머지 부분들은 단열시켜 고·액상 접촉부 및 이중유체간의 계면을 통한 열적거동을 연구하였으나 그 과냉현상을 수반한 경우의 이중유체 자연대류 열전달에 대한 연구는 부족한 형편이다.⁽⁴⁻⁵⁾

본 연구에서는 하부냉각면($\theta=0^\circ$)을 갖는 경우와 수직냉각면($\theta=90^\circ$)을 갖는 경우 정방향 실험조 내에서 이중유체의 초기온도와 냉각면 온도를 변화시켜 물의 과냉현상이 일어나는 경우와 그렇지 않은 경우의 냉각속도와 유동특성 그리고 계면을 통한 열이동을 고찰함으로써 이를 응용할 수 있는 기초자료를 얻고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치로는 실험조, 열교환기, 측정장치로 이



- | | |
|------------------------|----------------------------|
| 1. Refrigerator | 8. Workstation |
| 2. Constant temp. 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 Schematic diagram of experimental apparatus.

루어져 있고 부속장치는 냉동장치, 항온조, 온도 조절기 및 온도기록장치로 이루어져 있는데 Fig. 1은 그 개략도를 나타내고 있다.

실험조는 가로, 세로, 높이가 각각 100 mm이고 두께가 25 mm인 투명 아크릴 수지로 제작하였으며 냉각면은 두께가 10 mm인 동판을 통하여 열교환을 할 수 있도록 하였다. 실험조내 유체의 온도를 측정을 하기 위하여 지름이 0.127 mm인 T-type 열전대를 실험조 내에 설치하여 온도를 측정하고 분석하였다.

실험조 내에 기포를 제거한 증류수와 불순물을 여과한 silicon oil(KF96-20cs)을 넣고 3시간후 설정한 유체의 초기온도가 안정된 설정값에 이르렀을 때 실험을 시작하였다. 두 유체의 초기온도를 각각 2°C, 5°C, 7°C, 9°C, 15°C로 균일하게 설정하고 이에 따른 각 냉각면의 온도를 각각 -4°C, -6°C, -9°C로 설정하여 실험하였다.

항온장치를 이용하여 실험조 주위의 온도를 유체의 초기온도와 같은 조건으로 설정하였으며 한 실험당 10시간씩 수행하였고, 정확성을 얻기 위하여 반복 실험을 행하였다. 온도는 보정하였고 측정오차가 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내인 온도제어기를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 냉각면 온도가 -4°C 인 경우

Fig. 2는 하부냉각면의 온도가 -4°C 이며 유체의 초기온도가 각각 2°C , 5°C , 7°C , 9°C 일 때 시간에 따른 수직온도 분포를 나타낸 것이다.

시간이 경과함에 따라 냉각면의 온도에 의한 영향으로 온도가 하강하여 물의 온도가 0°C 이하로 내려가도 액상에서 고상으로 상변화를 하지 않는 과냉현상을 보였다. 하부유체인 물의 과냉현상이 종료되며 잠열방출과 함께 상변화가 일어나고 이 두 유체의 온도를 상승시켰다.

유체의 초기온도가 높아 갈수록 냉각면과의 온도차에 의한 열교환 속도가 빨라서 0°C 이하의 과냉시간이 짧아짐을 알 수 있었으며 상변화 이후 잠열방출로 인하여 하부유체인 물의 온도상승은 순간적으로 이루어진 반면, silicon oil의 경우는 열전도율이 물보다 낮아 시간이 경과함에 따라

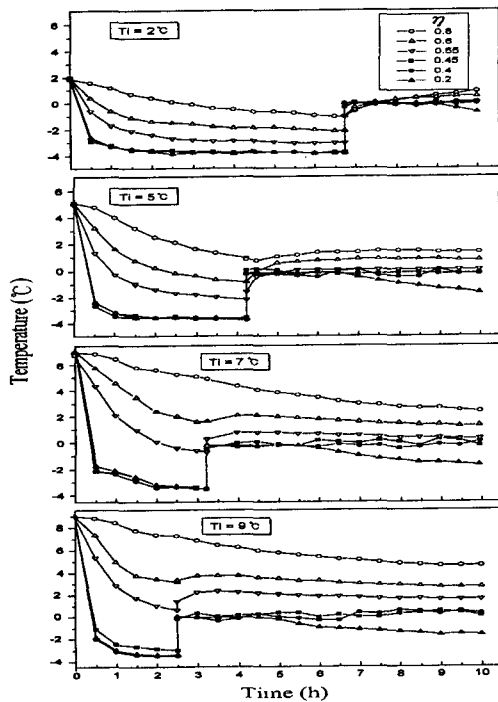
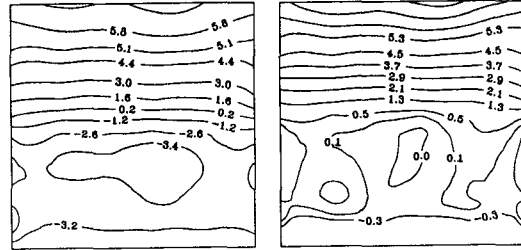


Fig. 2 Vertical temperature distribution with initial temperature of fluid, $T_c = -4^{\circ}\text{C}$, $\theta = 0^{\circ}$, $\xi = 0.4$.



(a) Just before emitting latent heat. (b) Just after emitting latent heat.

Fig. 3 Isotherms $T_c = -4^{\circ}\text{C}$, $T_i = 7^{\circ}\text{C}$, $\theta = 0^{\circ}$.

온도가 서서히 상승함을 볼 수 있었으며 상부로 올라갈수록 냉각면으로부터 멀어짐에 따라 온도 상승율이 적어짐을 볼 수 있다.

Fig. 3은 유체의 초기온도가 7°C 이고 하부에 냉각면이 있는 경우의 과냉종결 전(a) 후(b)의 등온선으로 Windows용 프로그램을 이용하였다.

하부의 물은 과냉 종결 전에는 0°C 이하의 과냉된 액상으로 존재하다가 잠열 방출로 인하여 온도가 순간적으로 0°C 근처까지 상승하여 수직상 다공성 얼음으로 상변화 되었으며, 상부유체는 실험초기에 하부유체의 영향으로 서서히 냉각되다가 하부유체의 과냉 종결이 이루어지면서 그 영향을 받아 계면의 가까운 쪽에서부터 온도가 상승되었고 상부로 갈수록 그 증가율이 적어짐을 볼 수 있다.

Fig. 4는 수직냉각면의 온도가 -4°C 이고 유체의 초기온도가 각각 2°C , 5°C , 7°C , 9°C 일 때 시간에 따른 수직온도 분포를 나타낸 그림이다.

하부냉각면을 갖는 경우와 마찬가지로 냉각면의 영향에 의하여 냉각된 물은 초기온도와 관계없이 온도가 0°C 이하로 내려가도 액상에서 고상으로 상변화를 하지 않고 유체의 초기온도에 따라 일정시간 동안 0°C 이하의 액상으로 존재하는 과냉현상을 보이고 있다가 잠열을 방출하며 상변화를 수반하였고 이로 인하여 상부유체의 온도상승이 일어남을 볼 수 있으며, 이러한 경우 하부에 냉각면이 있는 경우보다 상부 유체의 유동속도가 큼을 알 수 있었다. 두 유체에 있어서 각 유체의 온도차가 적었고 초기 온도가 높을수록 열용량이 커서 과냉시간이 길어짐을 알 수 있다.

초기온도가 2°C 인 경우, 하부 유체인 물은 약

-3.5°C 정도의 과냉각 상태로 지속되다가 약 1.4 시간이 경과된 후 물이 순간적으로 상변화를 일으키며 잠열을 방출하였는데 냉각면에 가까울수록 온도 상승률이 컸고, 이때 하부유체의 온도는 0°C 정도를 유지하면서 전 영역에 걸쳐 융해와 동결이 반복되고 냉각면과 두 유체의 계면에서부터 동결이 진행됨을 볼 수 있었다.

Fig. 5는 초기온도가 7°C이고 냉각면 온도가 -4°C인 경우, 하부유체인 물이 0°C이하의 과냉된 액상을 유지하다가 상변화를 수반하면서 잠열을 방출한 직후의 등온선(a)과, 냉종결후 1시간이 경과되었을 때의 온도분포(b)인데 상부유체인 기름의 온도분포가 과냉종결 직후의 온도분포인 경우(a)보다 더 높게 형성됨을 알 수 있었다. 기름은 물과 달리 점도가 크고 열전도율이 낮아 물의 상변화로 인한 잠열방출시 계면을 통한 상부로의 온도상승은 대류보다 전도에 의한 온도상승 때문

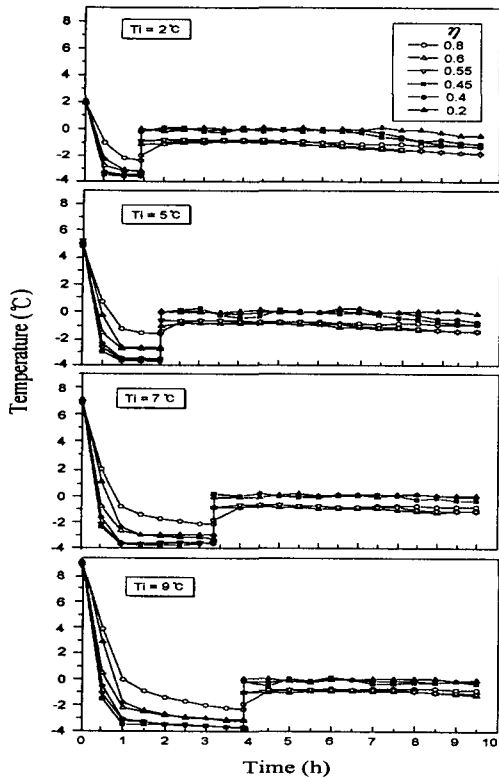


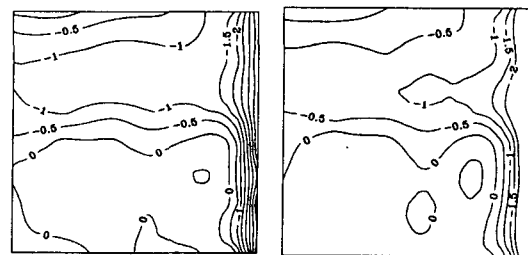
Fig. 4 Vertical temperature distribution with initial temperature of fluid. $T_c = -4^\circ\text{C}$, $\theta = 90^\circ$, $\xi = 0.4$.

임을 알 수 있었으며 상부로 갈수록 온도상승이 적어짐을 알 수 있었다.

Fig. 6은 유체의 초기온도가 7°C이고 수직냉각면의 온도가 -4°C인 물에서의 과냉현상이 존재할 때의 동결과정을 보여준 것이다. 실험시작 후 약 0.5시간이 경과하면서 유체의 온도는 0°C이하로 빠르게 냉각되고 약 3시간 정도 과냉현상이 지속되다가 순간적으로 잠열을 방출하며 수직상다공성 얼음으로 Fig. 6의 (a)와 같이 상변화를 하였다.

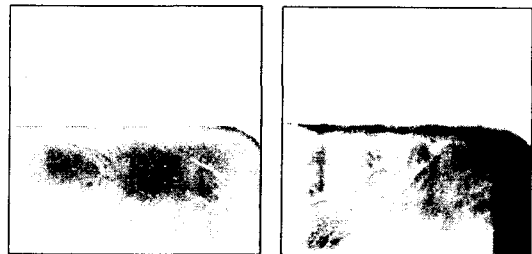
이때 얼음은 Fig. 5의 (a)에서 보여준 것과 같이 0°C 근처의 온도를 유지하면서 융해와 동결이 반복되면서 물의 빙점온도 이하의 온도를 갖는 냉각면과 기름하부의 계면에서부터 동결이 진행됨을 볼 수 있었다.

3.2 냉각면 온도가 -6°C인 경우



(a) Just after emitting latent heat. (b) 1 hour after emitting latent heat.

Fig. 5 Isotherms, $T_c = -4^\circ\text{C}$, $T_i = 7^\circ\text{C}$, $\theta = 90^\circ$



(a) Just after emitting latent heat. (b) 1 hour after emitting latent heat.

Fig. 6 Freezing process of water, $T_c = -4^\circ\text{C}$, $T_i = 7^\circ\text{C}$, $\theta = 90^\circ$.

하부냉각면의 온도가 -6°C 이고 유체의 초기온도가 각각 2°C , 5°C , 7°C 인 경우에는 Fig. 2와 비슷한 온도분포를 나타냈지만 하부 유체인 물은 0°C 이하의 액상을 유지하는 과냉 지속시간이 냉각면 온도가 -4°C 인 경우보다 더 짧았고 초기온도가 9°C 와 15°C 인 경우에는 과냉현상이 일어나지 않았으며 하부에서부터 동결이 진행되는 것을 볼 수 있었다. 그러나 수직냉각면인 경우에는 유체의 초기온도와 관계없이 과냉현상이 일어나지 않았고 냉각면과 두 유체의 계면에서부터 동결이 일어났다.

3.3 냉각면의 온도가 -9°C 인 경우

Fig. 7은 하부냉각면의 온도가 -9°C 인 경우 초

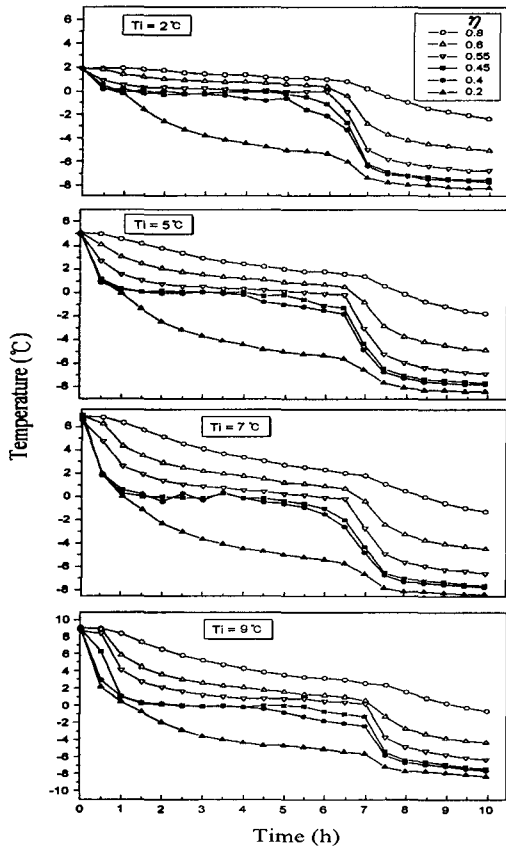


Fig. 7 Vertical temperature distribution with initial temperature of fluid, $T_c = -9^{\circ}\text{C}$, $\theta = 0^{\circ}$, $\xi = 0.4$.

기온도에 따른 수직온도 그래프이다. 유체의 초기온도에 관계없이 물에서의 과냉각현상은 발생하지 않았고 0°C 이하로 냉각되면서 하부에서부터 동결이 시작되어 실험시작 후 6시간 후에 전반적인 동결이 이루어 졌다.

물이 얼음으로 동결된 후에는 얼음의 열전도에 의해 하부와 상부 유체인 기름의 온도 강하율이 급격히 커짐을 알 수 있었다. 그러나 실험초기에는 유체의 온도 강하율은 냉각면이 -4°C 인 경우에는 물의 과냉으로 냉각면과의 원활한 열전달⁽⁶⁾이 일어났지만 -9°C 인 경우에는 하부에서 부터 성장된 물의 동결로 인하여 전열저항이 증가하고 상변화시 발생하는 잠열에 의한 열교환이 일어나므로 온도 강하율이 과냉이 일어나는 조건에 비해 적었음을 알 수 있었다. Fig. 8은 수직 냉각면의 온도가 -9°C 이고 $\xi = 0.4$ 에서 초기온도에 따른 수직온도분포를 나타낸다.

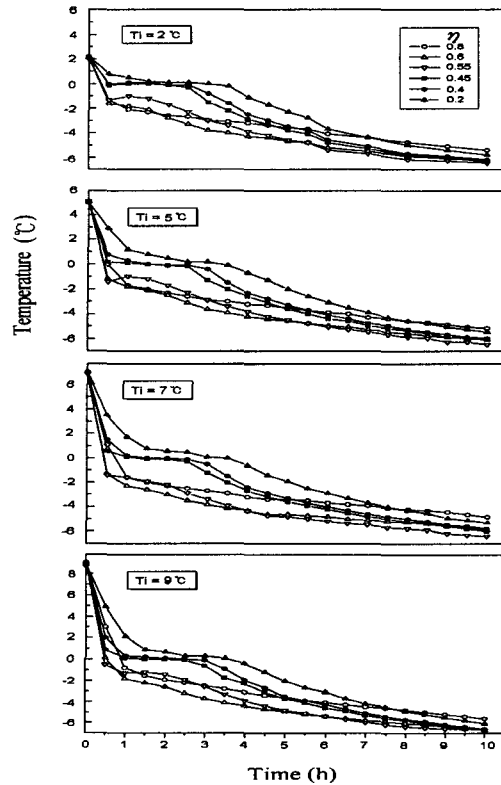


Fig. 8 Vertical temperature distribution with initial temperature of fluid. $T_c = -9^{\circ}\text{C}$, $\theta = 90^{\circ}$, $\xi = 0.4$.

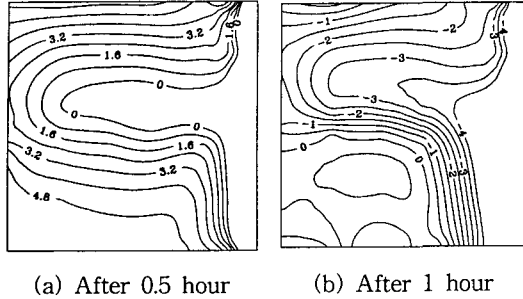


Fig. 9 Isotherms, $T_c = -9^\circ\text{C}$, $T_i = 7^\circ\text{C}$, $\theta = 90^\circ$.

처음에는 유체의 초기온도 영향을 크게 받지 않고 빠르게 냉각되었으며 실험시작 후 약 0.5시간이 지나면서 하부유체인 물의 온도 강하율은 급속하게 저하되어 0°C 근처의 액상을 유지하면서 상변화를 위한 냉각면과의 잠열에 의한 열교환이 이루어지고 있음을 알 수 있었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 물의 초기온도가 높고 η 가 적을수록 상변화 구간이 길어져 동결이 느리게 일어남을 볼 수 있었다.

Fig. 9은 유체의 초기온도가 7°C 이며 수직냉각면을 갖고있는 경우 시간에 따른 등온선을 나타낸 그림이다. 물은 냉각면을 기준으로 반시계 방향의 상향유동이 이루어지고 기름은 시계방향의 하향유동이 이루어지므로 유체의 계면 근처에서 낮은 온도장을 형성하고 있으며 냉각면과 계면에서부터 'ㄱ'자 모양의 동결이 이루어졌다.⁽⁷⁾ 또한 하부유체의 온도강하보다 상부유체의 온도강하율이 더 컸는데 상부유체인 기름은 냉각면과 직접적인 열교환을 하면서 하향유동이 이루어지지만 하부유체에서는 냉각면에서부터 물의 상변화가 시작되고 잠열교환이 이루어지므로 액상으로 존재하는 부분과의 전열저항이 증가하여 열전달율이 저하하였으며 계면에서의 얼음성장으로 인하여 상부유체와의 열교환이 느리기 때문에 추정된다.

3.4 상부유체의 온도변화

Fig. 10은 초기온도가 5°C 이고 냉각면의 온도가 각각 -4°C , -6°C , -9°C , -12°C 일때 상부유체의 평균온도를 나타내는 그래프이다.

하부냉각면의 온도가 -4°C 일때 오일의 평균온

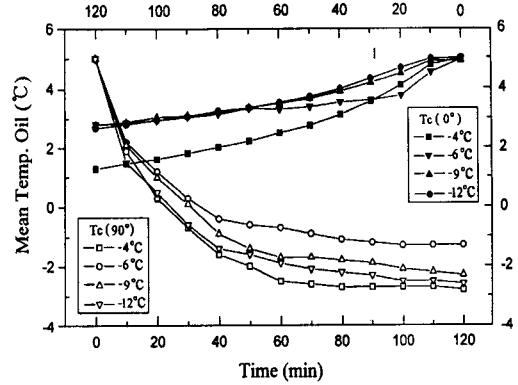


Fig. 10 Bulk mean temperatures of oil with the vertical and horizontal cooling surfaces, $T_i = 5^\circ\text{C}$, $\xi = 0.4$.

도가 약 2시간까지 낮게 형성됨을 알 수 있었다. 이는 비록 냉각면의 온도가 상대적으로 높지만, -4°C 일때의 하부유체는 과냉현상으로 인해 액상을 유지하고 유체내의 대류 열전달이 활발하게 이루어지며 상부 유체와의 열전달이 원활하게 되었다. 반면에, 냉각면의 온도가 -9°C , -12°C 인 경우, 실험초기에 냉각면 부근부터 동결이 진행되고 이 동결층은 전열저항⁽⁸⁾으로 작용하여 상부유체로의 열전달에 좋지않은 영향을 미치기 때문이며, 장시간 액상을 유지하는 서냉쪽이 열전달의 관점에서 우수함을 알 수 있다.

수평냉각면을 갖는 경우보다 수직 냉각면을 갖는 경우, 상부유체의 온도변화는 물에서 과냉이 없는 경우보다 과냉이 일어나는 경우가 상부유체의 온도 강하율이 컸다.

과냉이 존재할 경우, 물의 상변화의 지연으로 냉각면과 잠열 교환량이 없어서 하부유체인 물은 보다 낮은 온도장을 형성하므로 계면을 통한 상부에서 하부유체로의 열이동이 일어나는 반면에, 과냉이 존재하지 않고 동결이 진행될 때는 하부유체에서는 계면과 냉각면에서의 동결로 인하여 상부유체인 기름의 온도는 계면근처에서 상대적으로 물의 온도보다 크게 낮아 하부에서 상부유체로의 열이동이 이루어진다.

3.5 과냉현상의 지속정도

Fig. 11은 이번 실험에서 나타난 과냉각 지속 시

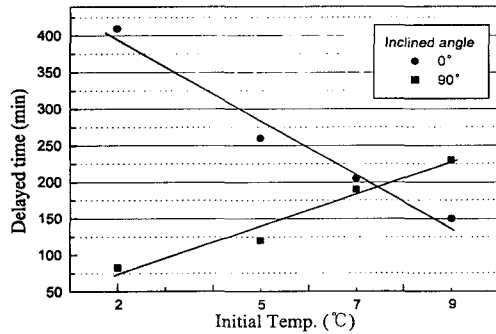


Fig. 11 Supercooling durations with initial temperature of fluid.

간과 초기온도의 관계를 나타낸다. 수평냉각면을 갖는 경우는 초기온도가 높을수록 하부유체의 상하부의 온도구배가 커서 밀도역전에 의한 대류유동이 활발하였고 이로 인하여 과냉현상의 지속시간이 짧았다. 그러나 수직냉각면의 경우는 하부유체의 상하부를 함께 냉각 하므로 상대적으로 하부에 냉각면이 있는 경우에 비하여 하부유체인 물의 온도가 층상적인 온도장을 형성하여 안정되므로 유체유동이 활발하지 못했으며, 초기온도가 높을수록 과냉각 지속시간이 길어지는 현상을 보인 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

정방형 공간내 하부냉각면을 갖는 경우와 수직 냉각면을 갖는 경우의 성층화된 유체의 열적 거동에 관한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었으며 저온의 열적제어를 통한 열교환기에 적용될수 있다.

- (1) 냉각면의 온도가 -4°C일때는 초기온도와 냉각면의 위치에 관계없이 하부유체에서 전체적인 과냉현상이 발생하였으며 과냉현상이 일어나는 동안 열 전달율이 더 컸다.
- (2) 수직냉각면을 갖는 경우 과냉각 종결 전에는 계면을 통한 열이동이 상부유체에서 하부유체로 이루어졌으며 과냉각 종결 후에는 하부에서 상부로 열이동이 일어난다.
- (3) 하부냉각면을 갖는 경우 초기온도가 낮을수록 과냉각 지속시간이 길어졌으며 수직냉각면을 갖는 경우에는 초기온도가 높을수록 과냉각

지속시간이 길었다.

후 기

본 연구의 일부는 1998년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Brewster, R.A. and Gebhart, B., 1988, An Experimental Study of Natural Convection Effects on Downward Freezing of Pure Water, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, No. 2 pp. 331-348.
2. Saito, A., 1980, Experimental Research on the Freezing Process with Supercooling, Tokyo Institute of Technology, pp. 70-89.
3. Kimura, T., Naomichi, H. and Masanori T., 1988, 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, *JMSE. Heat Transfer*, Vol. 52, No. 474, pp. 617-625.
4. Angirasa, D. and Srinivasan, J., 1992, Natural Convection Heat Transfer From an Isothermal Vertical Surface to a Stable Thermally Stratified Fluid, *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 114, No. 923, pp. 199-212.
5. Koster, J.N. and Nguyen, K.Y., 1996, Steady Natural Convection in a Double Layer of Immersible Liquids with Density Inversion, *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 39, No. 3, pp. 467-478.
6. Yoshinobu, K. and Toyofumi, K., 1994, Analysis of Cooling Phenomenon of Water With the Supercooled, *Transactions of the KSME (B)*, Vol. 16, No. 7, pp. 862-872.
7. Thompson, M.E. and Szekeley, J., 1989, Density Due to Countbuoyant Flow Along a Vertical Crystallization Fron, *Int. J. Heat Mass transfer*, Vol. 32, No. 6, pp. 1021-1036.
8. 腹部賢, 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.