

과냉각을 동반하는 물의 동결현상에 관한 실험

An experimental study of freezing phenomenon with supercooled water region

윤 정 인*, 김 재 돌**, 금 종 수*, 추 미 선***, 鎌田佳伸****, 加藤豊文*****
J. I. Yoon, J. D. Kim, J. S. Kum, M. S. Chu, Y. Kamata, T. Kato

Key words : Supercooled region(과냉각 영역), Freezing phenomenon(동결현상), Density inversion (밀도역전), Cooling rate(냉각속도), Holography(홀로그래피)

Abstract

The freezing phenomenon of saturated water with the supercooled region in a horizontal circular cylinder has been studied experimentally by using the holographic real time interferometry technique. From the experiments, it was found that there were three types of freezing patterns. The first is the annular ice layer growing from the cylinder surface at a high cooling rate; the next is the asymmetric ice layer at a moderate cooling rate; and the last is the instantaneous ice layer growth over the full region at lower cooling rate. As the water was cooled from room temperature to the subfreezing point passing through the density inversion point, the freezing pattern was largely affected by the inversion phenomenon, which had much effected the free convection and was susceptible to influences from the cooling rate. When the cooling rate is high, supercooling energy is released before the water is sufficiently mixed by free convection. On the other hand, when the cooling rate is low, there is much time for the water to be mixed by free convection. This seems to be the reason why the different ice layer growths occur.

기 호 설 명

h : 열전달률
L : 투과거리

m : 간섭호 차수
n : 굴절률
q : 열유속
r : 관경
S : 면적
T : 온도
V : 냉각속도
w : 발신과장
 λ : 열전도율

* 부경대학교 냉동공조공학과

** 동명전문대 건축설비과

*** 경상대학교 의류학과

**** Kagawa university

***** Tokyo university of A&T

하 첨 자

- b : 혼합평균
- c : 과냉각 해체
- i : 내경
- n : 등온선
- o : 외경, 외벽평균
- s : 기준
- w : 내벽평균

1. 서 론

생활수준의 향상에 따라 최근 공조기 수요가 급격히 증가하여 여름철 냉방부하가 급증하고 있다. 이에 따라 여름철 전력피크가 국가적으로 큰 문제가 되고 있고, 피크전력 경감을 위한 에너지의 저장 및 열원 구동 냉방시스템의 보급 등이 중요한 과제로 되고 있다. 이와 같은 에너지 저장 기술중 얼음에서 물로 상변화할 때의 잠열을 이용하는 빙축열 시스템이 최근 큰 관심을 모으고 있다. 이 빙축열 기술은 공조용에 냉동기가 사용되기 시작한 1930년경에 이미 미국에서 이용되었다.⁽¹⁾ 그러나 그 당시에는 냉동기를 작게하여 설비비를 감소하는 것이 목적이었으며, 오늘날은 냉동기 비용의 절감 뿐만 아니라 운전비 절감을 위한 전체 라이프 사이클 코스트(life cycle cost)의 감소를 목적으로 하고 있다.

빙축열 시스템의 경우 물을 냉각하여 얼음을 생성하는 축냉과정에서 과냉각이 발생하면 일정온도 열에너지를 고효율로 축적할 수 있는 잠열 축열재로서의 이점을 잃게 된다. 그러나, 관점을 달리하면 냉각 벽면상에 성장하는 동결층은 열저항이 되기 때문에 액층을 유지하고 있는 과냉각층은 오히려 바람직할 가능성도 있다. 그러므로 축열조의 고효율화를 도모하기 위해서는 열전달의 관점에서 이 과냉각 현상에 관한 기초적인 연구자료가 필요하다. 지금까지 액체의 과냉각 현상에 관해서는 많은 연구 보고가 있다. 예를 들면, 과냉각도에 주목하여 액적의 응고확률을 구하고 그것을 실험적으로 검토한 보고가 있다.⁽²⁾ 또, 수도관내의 수돗물 동

결 방지입장에서 동결로 인해 관내가 막히게 되는 냉각조건을 실험 및 수치계산에 의해 검토한 보고^(3,4)도 있다. 그리고, 빙축열의 관점에서 구형용기내에 물을 가득 채웠을 때 과냉각 해체를 실험적으로 규명한 연구도 있다.⁽⁵⁾ 수평 동심원통내에서의 과냉각 동결현상을 열전달의 관점에서 실험 및 수치해석에 의해 검토한 보고^(6,7)도 있지만, 이것은 관의 동결의 경우이고, 캡슐형 축열조를 가정한 관내 동결의 경우에 있어서 과냉각 현상을 실험에 의해 검토한 연구는 극히 드물다. 따라서, 본 연구에서는 캡슐형 빙축열조를 가정하여 증류수를 축열제로 선정하여 수평 원통용기내에 가득 채웠을 경우, 과냉각수의 동결메카니즘을 실험적으로 밝히고, 동시에 열전달 측면에서 우수한 과냉조건을 검토하는 것을 목적으로 하였다. 실험에서는 광학적 수법인 홀로그래피 실시간 간섭법을 이용하고, 냉각조건에 대한 각각의 동결메카니즘을 가시화 하여 밝혔다.

2. 실험

2.1 실험장치

실험장치는 Fig.1에서와 같이 냉동기에 의해 냉각된 브라인(70wt%의 에틸렌글리콜 용액)을 펌프로 시험부에 보내고, 브라인 탱크로 되돌아오는

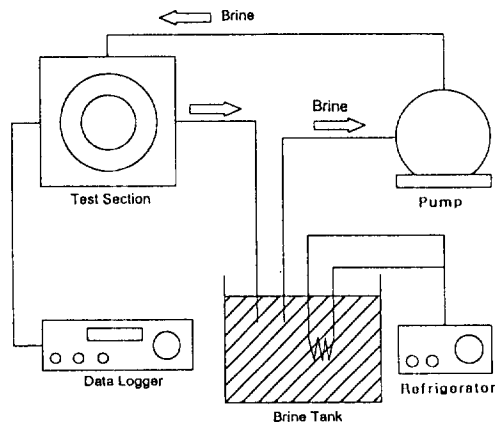


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

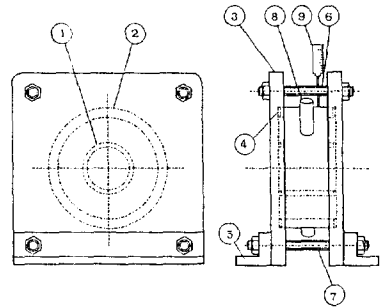
순환방식을 채용하였다. 시험부내의 온도 데이터는 Fig.2와 같이 각 점에 설치된 열전대에 의해 측정하였다. 시험부는 동관과 아크릴관의 이중구조로 되어 있고, 증류수를 가득 채운 동관의 내경은 30 mm, 외측 아크릴관의 내경은 60mm이며, 전체길이는 각각 50mm이다. 또, 동관에서 일정한 냉각을 얻기 위하여 브라인을 3방향에서 유입·유출하는 구조로 되어 있다. 열전대는 C-C열전대를 사용하였으며, 이 열전대를 동관 내·외벽에 24개소에 설치하였다. 또 동관내 증류수의 체적팽창에 기인하는 압력 변화를 피하기 위하여 동관 상부에 미세한 구멍을 만들어 동결 개시까지는 동관 내부압력을 대기압으로 유지할 수 있도록 하였다.

2.2 실험조건

본 연구에서는 냉각속도 V 를 $2.0 \times 10^{-2} \sim 3.0 \times 10^{-1} [^{\circ}\text{C}/\text{s}]$ 로 비교적 넓은 범위에서 변화시켰으며, 이를 크게 냉각속도가 빠른 경우, 중간인 경우와 느린 경우로 구분하여 실험을 수행하였다. Table 1에서 T_o 는 초기 외벽 평균온도, t_f 는 과냉각 해제시의 온도를 나타내며, V 는 냉각속도를 각각 나타낸다. 이와 같은 조건에서 냉각속도가 동관내 증류수의 대류 형태에 미치는 영향을 조사함과 동시에 그 대류 형태의 차이가 과냉각 해제시 동결층의 형상에 어떠한 영향을 미치는가를 검토하였다.

2.3 광학 측정법

액층내의 온도분포 측정에는 등밀도 간섭호를 씩



① Copper Pipe ② Acrylic Pipe ③ Acrylic Plates
④ Packing ⑤ stands ⑥,⑦ Bolts ⑧ Acrylic Pipes
⑨ Pin Hole

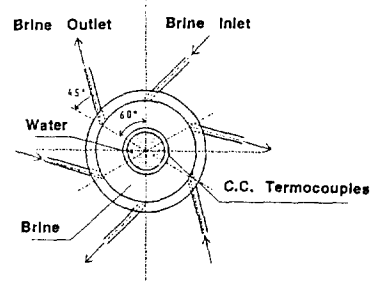


Fig.2 Schematic diagram of test section

Table 1 Experimental Conditions

| | High | Middle | Low |
|--|----------|----------|-----------|
| Cooling Rate, ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) | 0.16~0.3 | 0.07~0.1 | 0.02~0.06 |
| Outside Wall Temperature, ($^{\circ}\text{C}$) | 20 | 20 | 20 |
| Freezing Started Temperature, ($^{\circ}\text{C}$) | -5 | -7 | -7 |
| Freezing Started Time(sec) | 82 | 185 | 1265 |

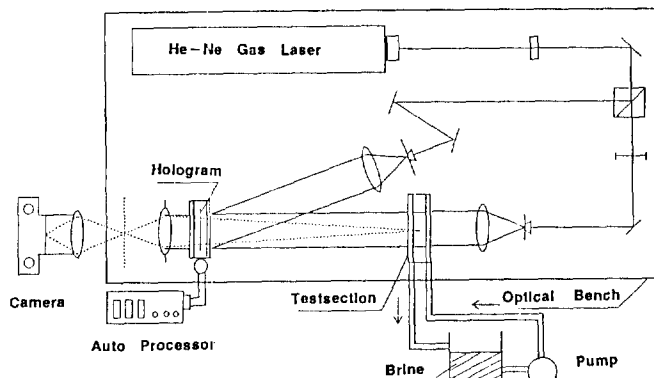


Fig.3— Optical system of holographic real time interferometer

게 얻을 수 있도록 Fig.3과 같이 홀로그래피 실시간 간섭법(holographic real time interferometer technique)을 이용하였다. 실시간 간섭법에는 시험부의 기준상태에서 파면을 홀로그래프에 기록하고, 이것을 리퀴드 게이트(liquid gate)를 이용하여 노출시 위치를 변화시키지 않고 현상, 정착을 행하여 항상 기준상태에 해당하는 파면을 재생할 수 있도록 하였다. 이것은 재생기준 파면과 측정부를 통과한 신호 파면을 간섭시킴에 따라 온도 변화에 따른 위상변조를 간섭호로서 관찰할 수 있으므로 비정상 계측에 상당히 유효한 방법이다. 그리고 레이저 광원에는 30mW의 He-Ne가스 레이저를 사용하였다.

2.4 간섭호 해석법

실험에서 얻어진 과냉각 해제 직전에 있어서 간섭호 사진으로부터 Fig.4와 같이 간섭호를 해석하여 그 때의 전열계수를 아래의 식과 같이 계산하였다.⁽⁸⁾

$$q = \frac{\lambda (T_0 - T_w)}{r_i \ln(r_o/r_i)} \quad (1)$$

$$m \cdot w = L(n_o - n) \quad (2)$$

$$T_b = \frac{\sum S_n (T_n + T_{n+1}) / 2}{\sum S_n} \quad (3)$$

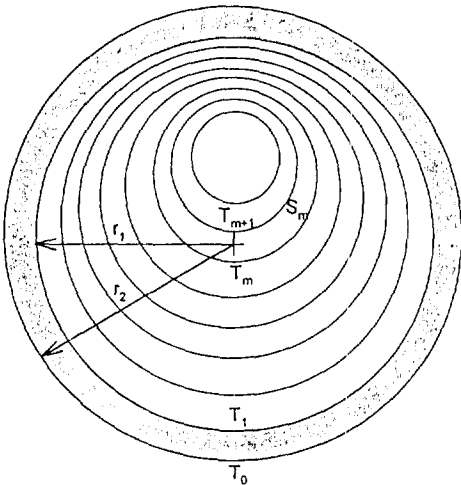


Fig.4 Model of interference fringe

$$h = q / (T_b - T_w) \quad (4)$$

동관 외벽에 의해 관내 증류수를 일정하게 냉각한다는 가정하에 각점에 설치한 열전대에 의해 외벽 평균온도 T_o 및 내벽 평균온도 T_w 를 구하고 식 (1)에 의해 동관 내벽에서 열유속 q 를 구한다. 여기서, λ 는 동관의 열전도율, r_i , r_o 는 각각 동관의 내경 및 외경을 나타낸다. 또, 식 (2)에 의해 각 간섭호에 대응하는 굴절률을 구함과 동시에 등온도 선을 얻는다. 여기서, m , w , L , n_o , n 은 각각 간섭호 차수, 레이저 발진파장(632.8nm), 레이저 투과 거리(45.0mm), 기준 굴절률 및 굴절률을 나타낸다. 그리고 얻어진 등온선 T_m , T_{m+1} 사이의 면적을 S_m 으로 하여 혼합 평균온도 T_b 를 식 (3)에서 정의하였다. 이상에서 얻어진 열유속 q , 내벽평균온도 T_w 및 혼합 평균온도 T_b 에 의한 열전달률 h 를 산출하였다. 냉각속도에 관해서는 동관 내벽온도의 냉각 개시에서 동결개시까지의 평균 냉각속도로 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 냉각속도와 간섭호의 형태

Fig.5는 냉각속도가 빠른($V=0.16\sim 0.3^\circ\text{C}/\text{s}$) 경우의 간섭호 사진을 나타낸 것으로 사진(A-1)은 좌·우가 내려가고, 중심부분이 올라간 형상의 간섭호가 발생되고 있고, 벽면의 냉각에 따른 내부에서의 대류 발생을 관찰할 수 있다. 그 후 벽면 냉각의 진행에 따라 내부 유체의 온도차가 증가하고, 동시에 간섭호의 수도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또, 중심의 간섭호 즉, 고온부는 동결 개시까지는 상부에 존재하고 그곳에서의 온도는 물이 최대 밀도로 되는 온도 3.98°C 보다 높은 것을 간섭호의 해석으로 알 수 있다. 즉, 과냉각 해제 직전에 있어서 간섭호 사진(A-5)의 해석에 의해 가장 높은 온도를 나타내는 간섭호에서 약 8.4°C 이고, 과냉각 영역은 벽면 근방의 환상영역에만 분포한다. 이 형태의 동결층은 원통에 수직으로 동결이 발생, 성장하는 동심원상의 동결층으로 투명도가 높은 조밀한 결정이다.

Fig.6은 냉각속도가 중간($V=0.07\sim 0.1^\circ\text{C}/\text{s}$)인

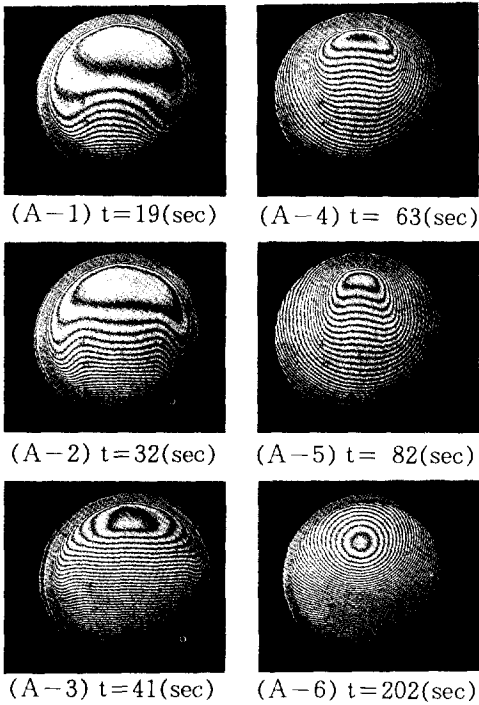


Fig.5 Photographs of interference fringe under $V=0.16\sim 0.3^{\circ}\text{C}/\text{s}$

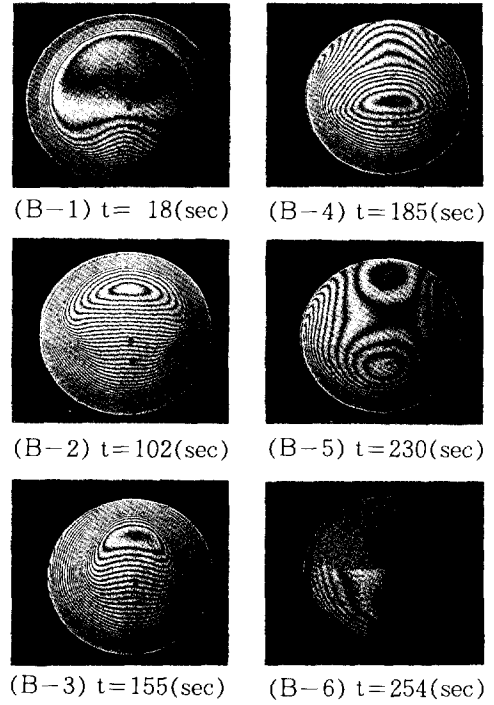


Fig.6 Photographs of interference fringe under $V=0.07\sim 0.1^{\circ}\text{C}/\text{s}$

경우의 간섭호 사진을 나타낸 것으로 고온부가 원통 상부에 존재할 때까지의 과정은 냉각속도가 빠른 경우와 동일하지만 그 후 고온부가 상부보다 중앙부 혹은 하부로 이동하는 과정이 차이점이다. 이 고온부의 이동현상은 물의 3.98°C 에 따른 밀도역전이 원인이며, 고온부에서 3.98°C 이하로 냉각이 진행된 것을 의미한다. 또, 과냉각 해제 직전에 있어서 간섭호 사진(B-4)의 해석에 의해 가장 높은 온도의 간섭호는 약 2.3°C 를 나타내었고, 원통표면에 수직 부분과 원통 위쪽 영역의 반이 과냉각 영역에 도달하는 것을 알 수 있다. 이 형태의 동결층은 상부 중심의 비대칭 형상의 동결층으로 동결개시 직후는 투명도가 낮은 침상 결정이지만 시간의 경과에 따라 이 형상을 유지하면서 조밀한 빙이 성장하였다.

Fig.7은 냉각속도가 느린($V=0.02\sim 0.06^{\circ}\text{C}/\text{s}$) 경우의 간섭호 사진을 나타낸 것으로 고온부가 물

의 밀도역전에 의해 상부에서 하부로 이동하는 현상까지 냉각속도가 중간인 경우와 동일하지만 그 후 더욱더 간섭호의 수가 감소하는 것은 충분히 내부까지 온도가 강하된 상태에서 과냉각이 해제되는 점이 양자의 차이점이다. 이 경우 과냉각 해제 직전에 있어서 가장 높은 온도를 나타내는 간섭호에서 약 -0.9°C 로 되고, 과냉각 영역이 원통내부 전체 영역을 점하는 것을 알 수 있다. 동결층은 짧은 시간에 전영역으로 성장하지만, 이 동결층도 냉각속도가 중간인 경우와 동일한 형태로 동결직후는 침상 결정이다.

이상에서와 같이 본 실험의 냉각속도 범위내에서는 동결 형태가 크게 3종류로 구별되었다. 즉, 중심원상의 동결이 발생하여 성장하는 형태, 비대칭적으로 상부를 중심으로 동결이 발생하는 형태 및 짧은 시간에 전면 동결이 발생하는 형태로 구분되었다.

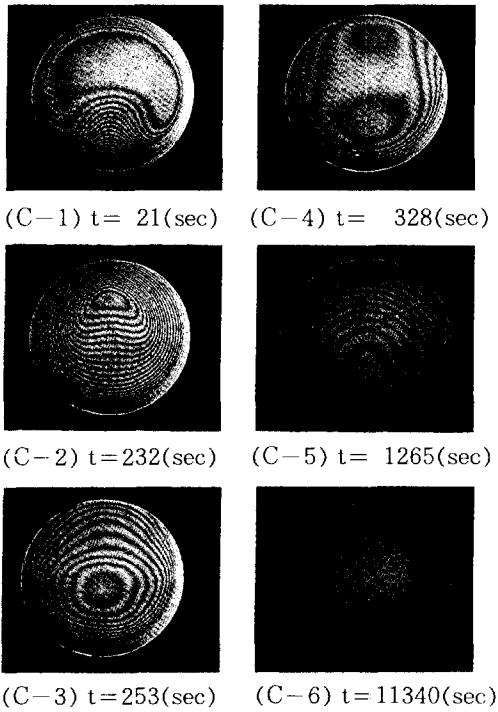


Fig.7 Photographs of interference fringe under $V=0.02\sim 0.06^{\circ}\text{C/s}$

3.2 냉각속도와 혼합 평균속도

Fig.8은 냉각속도와 과냉각 해제 직전에 있어서 혼합 평균온도의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서의 값은 각 형태의 일정 영역에서의 값으로 크게 구분하면 약 4°C , 0°C 및 -4°C 에 분포하며, 혼합 평균온도는 냉각속도에 거의 비례하는 것으로 나타났다. 이것은 냉각속도가 빠른 경우에는 급냉에 의해 내부까지 충분한 냉각이 진행되기 이전에 과냉각이 해제되며, 냉각속도가 느린 경우에는 서서히 내부까지 충분히 온도가 강하된 후에 과냉각이 해제되는 것을 나타내고, 냉각속도가 중간인 경우에는 중간형태로 과냉각 해제가 이루어지는 것을 의미한다.

3.3 냉각속도와 열유속

Fig.9는 냉각속도와 과냉각 해제 직전에 있어서 원통 내벽면에서의 열유속의 관계를 나타낸다. 그

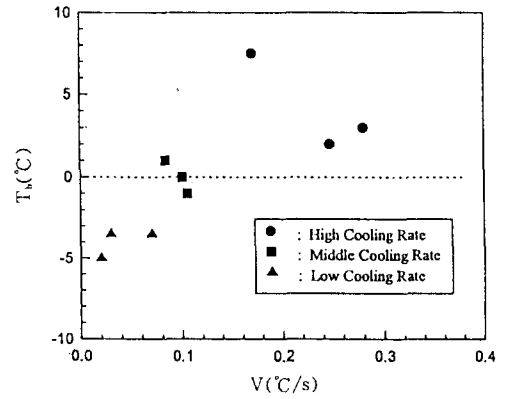


Fig.8 Relation between cooling rate and mixed mean temperature

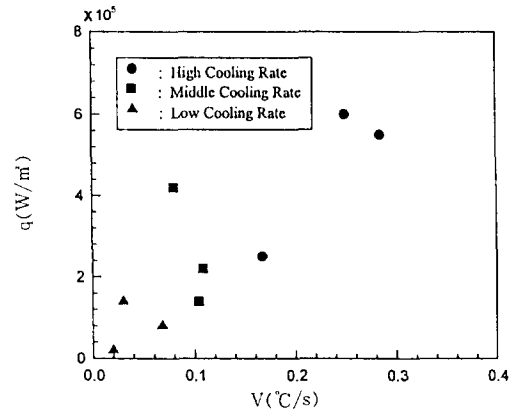


Fig.9 Relation between cooling rate and heat flux

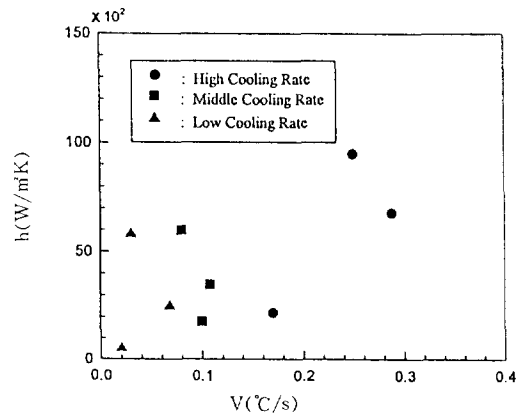


Fig.10 Relation between cooling rate and heat transfer coefficient

림에서와 같이 전체적으로 비례 관계를 나타내고, 냉각속도가 클수록 열유속은 높은 값을 나타내고 있다. 이것은 식 (1)에서도 설명이 가능하며, 열유속은 온도차($T_o - T_w$)에 비례하므로 냉각속도가 빠른 경우에는 이 온도차가 크게되어 열유속은 크게 된다. 그리고, 냉각속도가 느린 경우에는 온도차가 작게 되어 열유속이 작게 된다.

3.4 냉각속도와 열전달률

Fig.10은 냉각속도와 과냉각 해제 직전에 있어서 열전달률의 관계를 나타낸 것이다. 냉각속도에 대한 열전달률의 변화는 그다지 확인되지 않았다. 이것은 3.3항에서 냉각속도와 열유속은 비례관계에 있지만 식 (4)에서 정의한 열전달률 산출시 대표온도($T_b - T_w$)가 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 즉, 냉각속도가 중간 및 느린 경우에는 냉각속도가 작기 때문에 빠른 경우에 비해 대표온도차가 작고, 열유속과 냉각속도와의 비례관계가 열전달률에 대해서는 상쇄되는 방향으로 영향을 미치는 것으로 생각된다. 또, 냉각속도가 빠른 경우에는 냉각시간이 짧기때문에 충분한 자연대류의 영향이 발생하기 전에 과냉각이 해제하게 되는데 비해 중간 및 느린 경우에는 장시간의 냉각에 의해 자연대류에 의한 전열촉진 효과가 얻어진다. 이 결과로서 각 냉각속도에 따라 열전달률에 큰 차이가 나타나는 것으로 생각된다. 그리고, 간섭호의 본수가 냉각속도가 크면 클수록 많이 관찰되는 것에서도 이 결과를 이해할 수 있다.

3.5 냉각속도와 과냉각도

Fig.11은 냉각속도와 과냉각도의 간계를 나타낸 것이다. 여기서 과냉각도 ΔT_c ($\Delta T_c = 273.15 - T_c$)란, 과냉각 해제 직전의 냉각면상에서 측정된 수온의 최저온도를 T_c 라 할 때, 종래 대부분의 연구에서 과냉각 현상을 검토하는 중요한 인자로서 취급된 것이다. 그림에서 냉각속도가 중간 및 느린 경우에 비해 빠른 경우에는 낮은 과냉각도를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것도 내부에서의 자연대류의 존재가 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 즉, 급냉에서는 짧은 시간내에 원통의 표면이 냉각되기 때문에 자연대류는 원통의 벽면 근

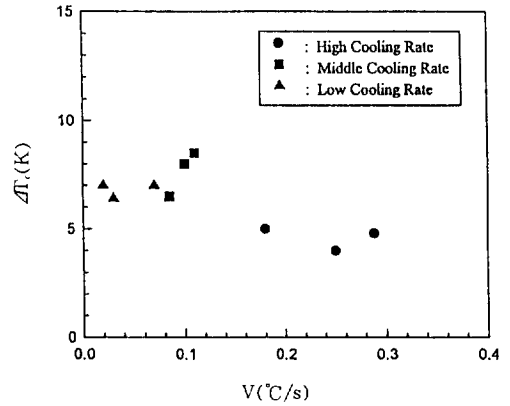


Fig.11 Relation between cooling rate and degree of supercooling

방에서 활발하게 발생하고, 이 원인으로 냉각속도가 중간 및 느린 경우와 비교하여 높은 온도에서 과냉각이 해제되는 것으로 생각된다. 이상에서 T_b , q , h , ΔT_c 를 각각 V 에 관해서 정리하였다. 데이터가 일정치 못하지만 이것은 간섭호 사이의 면적을 산출할 때의 오차, 수온 4°C 부근 영역에 있어서 간섭호의 감도 저하와 실험에서는 정확히 일정한 냉각속도를 유지하기가 곤란한 것 등이 원인인 것으로 생각된다. 그러나 이들의 관계는 각각의 형태에서 정리한 분포를 나타내고, 정상적인 문제로서는 타당성이 있는 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 캡슐형 빙축열조에서 발생하는 과냉각 현상에 주목하여 수평 원통용기내에 증류수를 가득채워 냉각속도 변화에 따른 홀로그래피 실시간 간섭법에 의해 가시화 및 동결 메커니즘을 실험에 의해 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 냉각속도의 차이에 따라 동결의 형태가 크게 3가지종류로 구분되어 있다. 즉, 냉각속도가 큰 경우에는 동심원상의 동결상이, 작은 경우에는 짧은 시간에 전면 동결상이, 그 중간인 경우에는 비대칭형 동결상이 형성되었다.

2) 동결상의 차이는 냉각속도의 차이가 영향을 미치지만 그 근본 원인은 3.98°C에서 물의 밀도역전현상에 의해 발생하는 2차 대류의 존재가 원인

이었다.

3) 냉각속도가 큰 급냉의 경우와 냉각속도가 중간이나 그 보다 작은 서냉의 경우에는 얼음의 질에 차이가 있었다. 즉, 전자는 조밀결정으로, 후자는 침상결정으로 되었으며, 그 침상결정은 시간의 경과에 따라 냉각면보다 조밀한 결정으로 성장하였다.

4) 서냉의 경우에 비하여 냉각과정 후반에서 열전달이 향상되는 경향을 나타내었고, 장시간 액상을 유지하는 서냉 쪽이 열전달의 관점에서 우수하였다.

참 고 문 헌

1. 高田秋一, 1987, “氷蓄熱の課題と將來”, 日本冷凍協會, Vol. 62, No. 715, pp. 42~56.
2. 一宮浩市, 望月康德, 1984, “液滴の過冷却凝固について”, 日本冷凍協會論文集, Vol. 1, No. 1 pp. 37~42.
3. Gilpin R.R., 1977, “The effect of cooling rate on the formation of dendritic ice in a pipe with no main flow”, Heat Transfer, Vol. 99, No. 3, pp. 419~424.
4. Cheng K.C. and Takeuchi, M. 1976, “Transient natural convection of water in a horizontal pipe with constant cooling rate through 4°C”, Journal of Heat Transfer, Vol. 98, No. 4, pp. 581~587.
5. 柏木孝夫, 伊藤伸治, 1987, “過冷却域を有する水の凍結開始に及ぼす自然対流の影響”, 日本機械學會論文集B, Vol. 53, No. 490, pp. 1822~1827.
6. 鳴海明, 柏木孝夫, 酒徳裕二, 1990, “水平同心圓管内での過冷却を伴うお水の冷却・凍結課程に関する研究”, 日本機械學會論文集B, Vol. 56, No. 527, pp. 213~220.
7. 윤정인, 김재돌, 1995, “수평 2열 원통관 주위의 동결현상에 관한 연구”, 공기조화·냉동공학 논문집, Vol. 7, No. 1, pp. 89~97.
8. 日本機械學會, 1986, “傳熱工學資料”, pp. 300~302.