

# 수평 2열 원통관 주위의 동결형상에 관한 연구

## Experimental Study for Ice Formation around Two Horizontal Circular Tubes

윤 정 인\*, 김 재 돌\*\*, 加藤豊文\*\*\*, 오 후 규\*\*\*\*  
J. I. Yoon, J. D. Kim, Kato Toyofumi, H. K. Oh

**Key words** : Ice Storage(빙축열), Two Horizontal Circular Tubes(수평 2열 원통관), Free Convection(자연대류), Super Cooling(과냉각), Density Inversion(밀도역전)

### Abstract

Experimental study was performed for free convection and ice formation around two horizontal circular tubes which were placed vertically. Temperature and velocity distributions were visualized with real time holographic interferometry technique and tracer method. When water was cooled, super cooled region was formed around cooling pipe. It was found that flow induced by free convection always directed downwards when the coolant temperature was low, while it directed upwards when the coolant temperature was comparably high though it directed downwards initially. Flow phenomena with free convection were investigated in detail with varying cooling rate and length between cooling pipes. And growing process of dense ice was also investigated. Dendritic ice is suddenly formed within a supercooled region, and a dense ice layer begins to develop from the cooling wall.

### 기 호 설 명

$A$  : 면적[m<sup>2</sup>]  
 $c_p$  : 정압비열[J/kg · K]  
 $g$  : 열유속[W/m<sup>2</sup>]  
 $h$  : 평균 열전달률[W/m<sup>2</sup> · K]  
 $M$  : 냉매의 질량유량[kg/s]  
 $Q$  : 열량[W]  
 $S_m$  : 등온선  $T_m$ 과  $T_{m+1}$ 간의 면적[m<sup>2</sup>]  
 $T$  : 온도[°C]  
 $t$  : 시간[s]

### 그리스 문자

$\epsilon$  : 초기수온의 무차원수  
 $\theta$  : 온도의 무차원수  
 $\tau$  : 시간의 무차원수

### 하 첨 자

b : 혼합평균  
in : 입구  
o : 초기  
out : 출구  
w : 관벽  
1 : 위쪽 냉각관  
2 : 아래쪽 냉각관

\* 동경농공대 대학원 기계시스템 공학과  
\*\* 부산수산대학교 대학원 냉동공학과  
\*\*\* 동경농공대 기계시스템 공학과  
\*\*\*\* 부산수산대학교 냉동공학과

## 1. 서 론

우리의 일상생활은 전기 에너지에 지배되고 있다 해도 과언이 아니다. 국민경제의 질적 성장에 기인한 고급 에너지 선호도의 증가 및 냉난방기 등 에너지 다소비 기기의 보급확대 등으로 에너지 사용이 급격한 신장세를 나타내고 있다. 특히 전력 수요량은 계절이나 일상의 시간대 등에 따라 크게 변동되며, 여름의 주간은 냉방의 다용도에 따라 수요량은 급증하여 피크를 이룬다. 이 수요 피크 시에 대응하여 전력회사에서는 충분한 발전을 하지 않으면 안된다. 그러나 석유 등 에너지원의 대부분을 외국으로부터 수입에 의존하고 있는 우리나라에서는 여름철의 전력 피크가 큰 문제로 되고 있다. 따라서, 전력부하 평균화 즉, 피크 전력을 경감시키기 위한 전력의 저장 혹은 에너지의 저장이 중요시되고 있다. 이와 같은 저장기술에 있어서 최근 새로운 공조 열원방식으로서 현열과 잠열을 이용한 빙축열 시스템이 관심을 모으고 있다.

현열에 의한 축열은 액체 또는 고체 재료를 가열 혹은 냉각함으로써 에너지(열)를 저장하는 것이며, 잠열에 의한 축열은 응고나 증발 등의 상변화(고상변태를 포함)시의 잠열을 이용하여 에너지를 저장하는 것이다. 예를 들면, 물을 냉각해서 축열을 하는 경우 전자는 냉수축열, 후자는 빙축열이라 한다. 그러나, 축열에 있어서는 잠열이 현열 보다도 크기 때문에 빙축열은 냉수축열에 비해 용적당의 축열용량이 크고, 축열용적도 작아지는 등의 이점이 있으므로 작은 용기로 대량의 축열을 할 수 있다.

따라서, 전력에 의한 공기조화, 특히 보급이 현저한 공기열원 히트펌프에 의한 공기조화는 부하가 가장 큰 한여름에 그 능력이 감소하는 특성을 구조적으로 가지고 있다. 따라서, 히트펌프를 사용한 빙축열 공조 시스템은 수요자측에는 어떠한 제약도 주지 않고, 전력 소비가 큰 열원기기를 장시간 운전하므로써 피크 시프트(peak shift)를 실행하여 수요자측 및 전력회사 양쪽 모두에 장점이 있는 시스템이다.

본 연구에서는 이 빙축열 시스템을 대상으로 관외 생성형(static type)빙축열 장치를 모델로 하였다. 이 장치는 냉각관을 축열조내에 배치하고, 조내에 물을 넣어 냉각관에 냉매를 순환시키므로써 냉각관

외부에 얼음을 생성시키는 것이다. 물을 냉각해서 얼음을 생성시킬 때의 유의점으로는 과냉각 상태의 물이 존재하게 된다는 것이다. 이 과냉각 상태는 열전달에 있어서는 전열면 온도가 0°C이하로 되기 때문에 유의하지만, 얼음의 생성을 지연시키는 등 시스템의 성능저하에 관여하는 결점도 있다. 또, 물은 4°C에서 최대밀도를 가지므로 이 과냉각수는 밀도 역전을 현저히 발생시키는 요인으로도 작용한다. 그러므로, 이 문제는 냉각속도나 형태 등의 파라미터 차이에 관여하고, 밀도역전에 따른 흐름장(velocity distribution)의 역전, 동결개시 후는 얼음의 생성에 따른 이동경계 문제 등 복잡한 요소가 복합되어 작용하고 있다.

냉각·동결문제에 관해서는 많은 연구<sup>1,2)</sup>가 보고되고 있으며, 관내 동결에 관한 연구<sup>3,4)</sup>나 과냉각을 동반한 응고과정에 관한 연구<sup>5,6)</sup>는 많이 보고되고 있다. 그러나, 수평원관 주위의 동결에 관해서는 그다지 보고되고 있지 않다.

따라서, 본 연구에서는 관외 생성형 빙축열장치를 모델로하여 냉각관을 축열조 내에 수평 2열의 냉각관으로 하고, 냉각속도나 냉각관 거리를 파라미터로 온도장(temperature distribution)·흐름장 및 동결형상에 관한 실험적 연구를 하여 그 현상 파악을 목적으로 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치는 주요 시험부, 홀로그래피 간섭법(holographic interferometry technique) 광학계, 냉각장치로 구성되어 있다. 시험부는 관외 생성형 축열장치를 모델화한 것으로, 참고한 실제 장치는 드럼관상의 축열조내에 외경 15.8mm의 평활관이 나선상으로 이중 배열된 구조로 되어 있다. 본 연구의 시험부는 나선상의 나선직경을 무한히 길게 잡아 원관을 수직 2열로 하여 배관내를 냉매가 흘러 축열조내의 물을 냉각하는 형식으로 구성되어 있다.

Fig.1은 본 실험에 사용된 시험부를 나타낸 것이다. 시험부의 형상은 정방형으로 전열부분의 길이는 35mm로 하였다. 또, 시험부의 크기는 전열면적에 대한 물의 체적이 실제 기기와 거의 동일하게 되도록 결정하였다. 그림에서와 같이 시험부

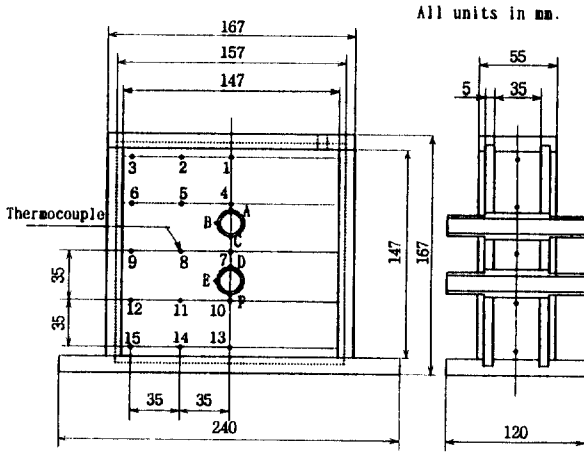


Fig.1 Test section for temperature distribution measurement.

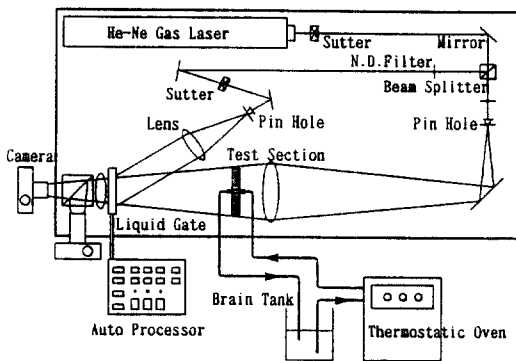


Fig.2 Details of visualization.

내의 온도를 측정하기 위해 냉각관벽에  $90^\circ$  간격으로 각 3개소, 실험장치내에 15개소에 T(C-C) 열전대를 부착하였다. 즉, 그림 중의 1~15, A~F는 열전대 번호를 나타낸다. 또, 냉각관 중심간 거리 차이에 따른 현상을 파악하기 위해 중심간 거리가 24mm, 32mm, 48mm인 3종류의 시험부를 제작하였다. 이 냉각관 중심간 거리는 냉각관 외경에 대한 중심간 거리의 비(L.D.R: Length between cooling pipe-cooling pipe Diameter Ratio)를 사용하였다. 따라서, 위 3종류의 파라미터는 각각 L.D.R=1.5, 2, 3으로 나타낼 수 있다.

온도장 측정에 사용한 홀로그래피 간섭법 광학계를 Fig.2에 나타내었다. 광원에는 He-Ne가스레이

저(파장  $0.6328\mu\text{m}$ , 출력 30mV)를 사용하였으며, 레이저의 간섭 거리가 짧기 때문에 물체광과 참조광의 광로길이는 동일하도록 설정하였다. 또, 홀로그래피를 설치한 채로 현상·정지·정착이 이루어지도록 현상용기(liquid gate)를 설치하였다.

실험에서는 2대의 카메라를 사용하여 시험부 전체와 냉각관 근방을 동시에 촬영하는 방법을 취하였으며, 현상용기 뒤쪽에 Beam splitter를 설치하였다. 냉각장치는 항온조에 의해 냉각된 냉매(60 vol% 에틸렌글리콜 수용액)가 실리콘 튜브에 의해 시험부를 거쳐 다시 냉매 탱크로 되돌아오는 순환방식이다. 그리고, 시험부내에 부착한 각 열전대는 데이터로그에 의해 측정·기록할 수 있도록 하였으며, 동결형상 측정용으로 참조광 차단 셔터를 참조광 도중에 설치하였다. 흐름장은 트레이서(tracer)법으로 가시화 하였으며, 트레이서에는 글라스 피스(SF10-100)를 사용하였다.

## 2.2 실험방법

냉각관 중심거리가 다른 3종류의 시험부에 대해 각각 완만냉각과 급속냉각의 조건에서 실험을 하였다. 동결형상 실험은 온도장 실험과 동시에 실시하였으며, 흐름장 측정 실험은 별도로 실시하였다.

완만냉각과 급속냉각의 기준은 냉각속도의 크기로 정의된다. 즉, 냉각속도가 큰  $1.0\sim 1.2 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C/s}$ 인 경우를 급속냉각, 냉각속도가 비교적 작은  $2.0\sim 2.3 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/s}$ 인 경우를 완만냉각으로 구분하는 것이 일반적이다.

본 실험에서는 냉각개시 직후의 냉매온도가  $-6^\circ\text{C}$  전후를 완만냉각,  $-16^\circ\text{C}$  전후를 급속냉각이라 정의하였다. 그러나 실제 완만냉각과 급속냉각의 조건은 단순히 냉매온도에만 의존하는 것이 아니고, 초기수온과 외기온도 등에도 관계되므로 일반적으로 말할 수는 없다. 따라서, 냉매의 초기온도는 초기수온 등에서 어느 정도 경험적으로 설정하여 실험을 하였으며, 완만냉각은 급속냉각과 현상이 있어서 뚜렷한 차이를 관찰할 수 있도록 외기온도 및 초기수온이 낮은 상태에서 실험을 하였다.

온도장 측정방법은 Fig.2에서와 같이 광학계를 설치하고, 물을 가득 채운 온도장 측정용 시험부를 소정의 위치에 설치하였다. 이 때, 물체광과 참조광의 광로길이를 동일하게 설정하였다. 또, 열전대

는 데이터로그의 단자에 접속하였으며, 다음에 N.D필터에 의해 물체광과 참조광의 광량이 거의 같게 조절하여 홀로그램을 작성하였다. 작성 후 다시 레이저광을 비추어 간섭호를 확실히 볼 수 있는 상태에서 ND필터를 조절·설정하였다. 설정 종료 후 냉각조건에 맞추어 냉각된 냉매를 시험부에 흘려 실험을 시작하였다. 실험 시작과 동시에 데이터로그로 온도를 측정하였으며, 현상용기 뒤에 설치된 카메라로 임의 시간의 간섭호를 촬영하였다. 2대의 카메라 중 표준렌즈 부착 카메라는 시험부 전체의 간섭호를 촬영하였고, 줌렌즈 부착 카메라는 냉각관 부근의 간섭호를 촬영하였다. 또한, 동결형상은 온도장 실험 상태에서 참조광 차단 셋터를 끄고, 줌렌즈 부착 카메라로 촬영하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 급속냉각과 완만냉각의 현상 비교

Fig.3과 4는 LDR=2에 있어서 급속냉각과 완만냉각의 각부 온도의 시간적 변화를 나타낸 것이다. 각 조건에 있어서 외기온도, 초기수온, 냉매온도, 동결개시(파냉각 해제)시간 등이 일정하지 않으므로, 아래와 같이 시간  $t$ 와 온도  $T$ 를 무차원화 하였다. 시간  $t$ 의 무차원수를  $\tau$ , 온도  $T$ 의 무차원수를  $\theta$ 라 하면, 이들의 관계식은 (1), (2)와 같다.

$$\tau = \frac{t}{t_1} \text{ or } \frac{t}{t_2} \tag{1}$$

$$\theta = \frac{\epsilon}{T_0} T(T > 0)$$

$$\theta = \frac{T}{1} (T < 0) \tag{2}$$

여기서,  $t_1, t_2$ 는 냉각관의 동결개시 시간이며,  $T_0$ 는 초기수온,  $\epsilon$ 는 초기수온에 해당하는 임의의 무차원수이다. 무차원수  $\theta$ 는 다른 실험과의 비교 등에 사용될 수 있으나, 그 절댓값은 아무런 의미를 갖지 않기 때문에 비교 이외에는 온도  $T$ 를 사용하였다. 또 무차원수  $\tau$ 의 경우도 시간  $t$ 를 사용하는 편이 좋을 때는  $\tau$ 와  $t$ 를 병용하였다.

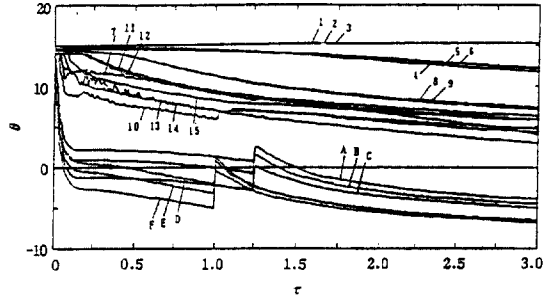


Fig.3 Temperature changes at rapid cooling(LDR=2).

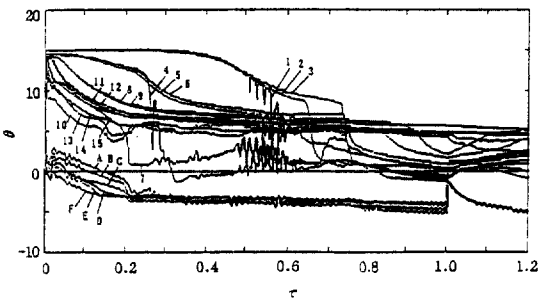


Fig.4 Temperature changes at slow cooling(LDR=2).

냉각관 중심거리에 관계없이 3종류의 급속냉각과 완만냉각의 경우에는 대류현상에 현저한 차이를 나타내었다. LDR=2의 경우를 예로 들면, 급속냉각의 경우는 Fig.5의 흐름장 변화에서와 같이 냉각개시에서 파냉각 해제 후에 이르기까지 냉각관에 의해 냉각된 물은 계속 아래방향으로 대류하고 있다. 또한 Fig.6의 간섭호 사진을 참조하면, 아래방향의 자연대류에 의해 냉각된 물이 시험부 저부에 고이는 것을 알 수 있다. 그러나, 시험부 상부(위냉각관 이상)는 거의 냉각되지 않고 있다. 이것은 Fig.3에 의해 정량적으로 알 수 있다. 시험부 저부에서 순차적으로 온도는 단조 저하하며, 상부 온도는 거의 변화하지 않고 있는 것을 알 수 있다.

냉각관 둘레의 온도는 Fig.3과 Fig.6의 온도장 변화에서와 같이 전체 냉각관 둘레중 최하부가 가장 낮고, 상부로 이동할수록 서서히 높아지고 있다. 또, 상하의 냉각관을 비교하면 아래 냉각관 둘레의 온도쪽이 낮아지고 있다. 이것은 위쪽 냉각관에서

냉각된 물이 아래방향으로 대류하여 그 냉각된 물이 다시 아래 냉각관에서 냉각되기 때문이라 생각된다. 또, 아래 냉각관에서 동결이 먼저 시작되는 것도 이 이유 때문으로 생각된다.

Fig.6의 냉각관 둘레 간섭호를 보면, 호가 상당히 밀집해 있는 것을 알 수 있다. 이것은 냉각이 급속하게 이루어지기 때문이며, 냉각관 주위와 다른 부분과의 온도차가 상당히 큰 것을 나타내고 있고, 냉각관벽 주위만 급속하게 냉각되어 다른 부분의 온도가 저하하기 전에 동결이 시작되는 과정을 나타낸다.

Fig.7은 완만냉각에 있어서의 흐름장 변화를, Fig.8은 온도장의 변화를 나타낸 것이다. Fig.7의 흐름장 변화에서 완만냉각의 자연대류 현상을 파악하면, 냉각개시 직후는 급속냉각의 경우와 동일하게 아래 방향으로 자연대류가 일어나지만,  $\tau = 0.06$  부근에서 급속냉각의 경우와 차이가 발생된다. 아래 냉

각관의 옆부분에서 역방향(윗쪽방향)으로 대류가 시작된다. 이 윗방향의 대류는 시간이 경과함에 따라 서서히 발달하여 최종적으로는 시험부 상부까지 대류하게 되어 완전히 급속냉각의 경우와는 흐름장이 역전되고 있다. 따라서, 흐름장 역전 이후는 시험부 상부에서 냉각된 물이 머무르고 있다. Fig.4에서 알 수 있듯이  $\tau = 0.8$ 부근에서 시험부 상부의 온도가 하부의 온도보다 낮게 된다. Fig.4에 Fig.8의 온도장 변화를 대응시켜 보면, Fig.8의 ②에서와 같이 그 윗방향의 대류가 아래 냉각관에서 위 냉각관으로 발달하여 그곳에서 시험부 상부로 발달하고 있는 모습을 볼 수 있다. 또, 이 때 상하 냉각관 주위의 온도차는 작고, 위 냉각관 둘레의 온도가 약간 낮다. 그리고, 동결은 상하 냉각관에서 거의 동시에 일어난다. 이 흐름장 역전에는 물의 최대 밀도영역이  $4^{\circ}\text{C}$ 인 것에 기인한다. 즉,  $4^{\circ}\text{C}$ 이하로 냉각됨에 따라 밀도의 역전이 흐름장의 역전을 일

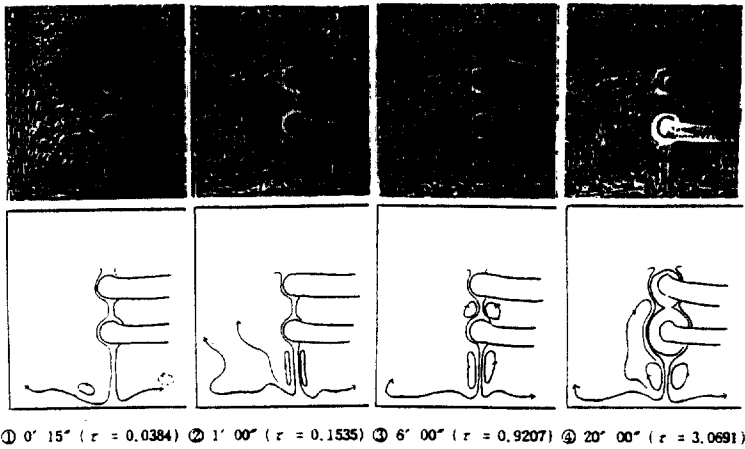


Fig.5 Velocity distribution at rapid cooling(L.D.R. = 2).

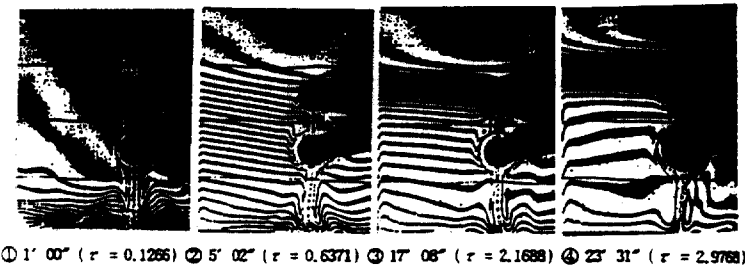


Fig.6 Temperature distribution at rapid cooling(L. D.R.=2).

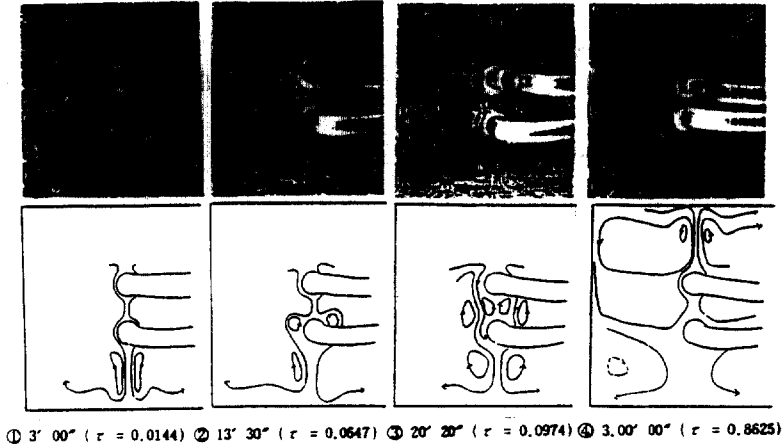


Fig.7 Velocity distribution at slow cooling(L.D.R= 2).

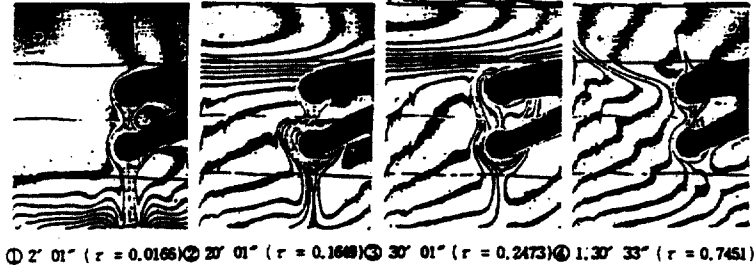


Fig.8 Temperature distribution at slow cooling(L.D.R=2).

으킨다. 이 위쪽 대류에 대해 또 한가지 주목할 점은 Fig4의 열전대 번호 1, 4, 7의 온도변화이다. 이것은 중심선상의 온도로 흐름장 역전을 일으키고 나서 부터 짧은 시간에 온도의 상승·강하가 반복되고 있다. 이것은 급속냉각의 경우인 단조하향 대류와 달리, 주위 부분과의 온도차가 작아 불안정한 상태에서 대류가 이루어지기 때문이라 생각된다. 서서히 윗방향의 대류가 발달하고 있는 과정에서는 중심선상을 한 형태로 윗방향으로만 대류하고 있는 것은 아니고, 좌우로 진동하면서 대류하고 있는 것이라 생각된다. 따라서, 완만냉각인 경우의 특징은 냉각개시 직후는 아래방향으로 대류하지만 냉각도중에 흐름장 역전을 일으켜, 윗방향의 자연대류를 형성하는 것이다.

### 3.2 냉각관 중심거리의 차이에 따른 현상 비교

급속냉각과 완만냉각의 경우, 3종류의 중심거리

에 따라 어느 시험부에서나 거의 L.D.R=2일때와 같은 현상을 나타내었다. 급속냉각의 경우는 냉각개시부터 계속 아래방향으로 자연대류를 형성하며, 동결은 아래 냉각관부터 시작된다. 완만냉각의 경우는 앞에서 서술한 것과 같이 흐름장 역전을 발생시키지만, 이 때 약간의 차이가 발생된다. Fig.7의 ② L.D.R=2와 Fig.9의 ③ L.D.R=3의 흐름장 역전시 아래 냉각관의 횡측에 독특한 대류가 발생된다. 그러나 Fig.10의 L.D.R=1.5의 경우에는 이 현상은 나타나지 않고, 상하의 냉각관 주위에서 각각 흐름장 역전이 일어나고 있다.(단, 아래에서 먼저 일어남) 이것은 냉각관의 간격이 좁아 상하의 냉각관 주위 온도차가 작고, 위 냉각관 주위에도 상당한 과냉각 영역이 형성되기 때문이라 생각된다.

### 3.3 상하 냉각관의 과냉각 해제

급속냉각과 완만냉각의 경우 과냉각 해체에 있어서는 큰 차이를 나타내었다. 급속냉각의 경우에는

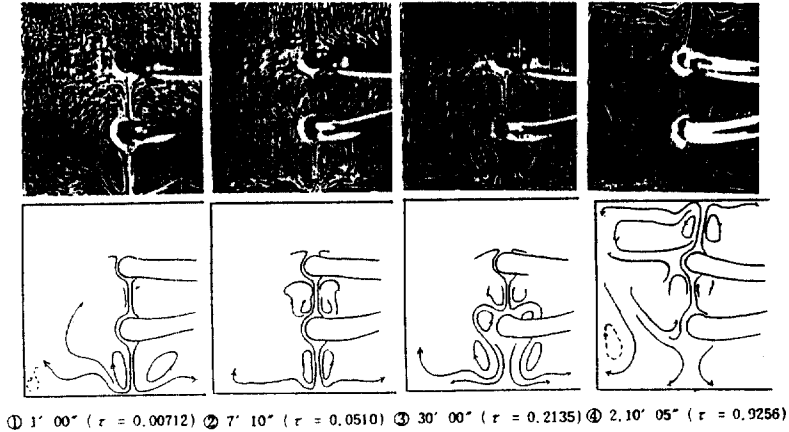


Fig.9 Velocity distribution at slow cooling(L.D.R= 3).

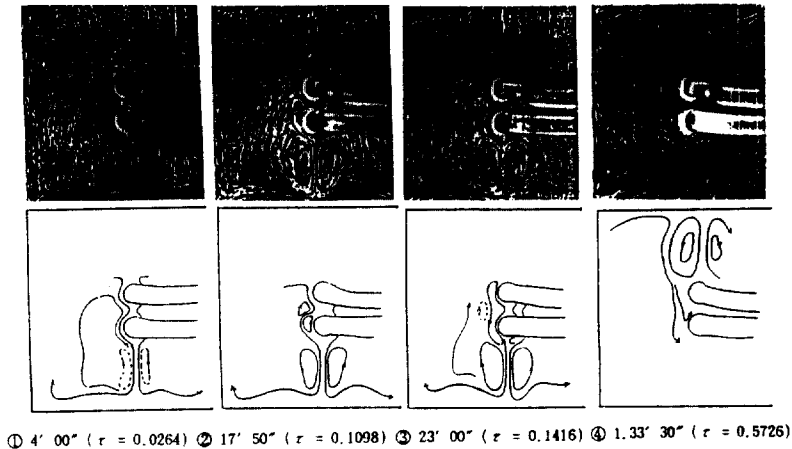


Fig.10 Velocity distribution at slow cooling(L.D.R= 1.5).

아래 냉각관에서 과냉각이 해제(동결개시)되어 한참 후, 위 냉각관이 과냉각 해제된다. 한편, 완만냉각의 경우 L.D.R=1.5, 2는 상하가 거의 동시에 과냉각 해제가 일어나고, L.D.R=3에서는 위 냉각관에서 먼저 과냉각 해제가 일어났다.

과냉각이 해제되면 침상빙(dendritic ice)이 어느 영역까지 확장되고, 그 후 전열면으로부터 조밀빙이 성장한다. 급속냉각은 앞에서와 같이 냉각관벽 부근과 그 주위와의 온도차가 크므로 과냉각 영역은 거의 냉각관 근방이다. 따라서, 아래 냉각관이 과냉각 해제될 때에 발생하는 침상빙은 냉각관 둘레에 수 mm정도 밖에 되지 않으며, 위 냉각관에는 어떠한 영향도 주지 않는다. 그러나, 완만냉각의 경

우는 흐름장 역전을 일으켜 상하 냉각관을 포함한 영역의 온도차가 작고, 극히 저온의 상태이다. 따라서, 위 냉각관에서 동결이 먼저 개시되고, 발생된 침상빙은 아래 냉각관까지 도달하게 된다. 이 원인으로 아래 냉각관도 동결을 개시하기 때문에 상하 거의 동시에 과냉각이 해제되는 것으로 생각된다.

L.D.R=3인 경우, 상하 동시에 과냉각 해제가 일어나지 않는 것은 냉각관 간격이 넓어, 침상빙이 아래 냉각관까지 도달하지 않기 때문이라 생각된다.

#### 3.4 혼합 평균온도와 열전달률

측정한 간섭호 선도와 시험부내 온도, 그리고 물의 온도와 굴절률 관계 등에서 급속냉각과 완



만냉각에 있어서 각각의 평균 열전달률을 아래의 식으로 구하였다.

$$Q = c_p(T_{in} - T_{out})M \quad (3)$$

$$q = Q/A \quad (4)$$

$$T_b = \frac{\sum [S_m(T_m + T_{m+1})/2]}{\sum S_m} \quad (5)$$

$$h = \frac{q}{(T_b - T_w)} \quad (6)$$

여기서,  $Q$ : 전열면적의 전체 열량,  $c_p$ : 냉매의 비열,  $M$ : 냉매의 질량유량,  $T_{in}$ ,  $T_{out}$ : 냉매의 유입, 유출 온도,  $q$ : 열유속,  $A$ : 전열면적,  $T_b$ : 혼합 평균온도,  $S_m$ : 등온선  $T_m$ 과  $T_{m+1}$ 간의 면적,  $h$ : 평균 열전달률,  $T_w$ : 관벽온도의 평균값이다.

무차원 시간  $\tau$ 와 열유속, 혼합 평균온도, 평균 열전달률과의 관계를 Fig.11~13에 나타내었다. 그림에서와 같이 열유속은 급속냉각에서는  $60W/m^2$  전후, 완만냉각은 약 절반인  $30W/m^2$  전후인 것을 알 수 있고, 혼합 평균온도는 급속냉각의 경우 그다지 저하하지 않는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 급속냉각은 냉각관 둘레만 급속하게 냉각되고, 다른 부분은 그다지 냉각되지 않은 상태에서 동결이 개시되고 있는 것을 추정할 수 있다. 한편, 완만냉각의 경우는  $T_b$ 가 서서히 낮아져  $T_b$ 가 낮은 상태에서 동결이 시작되는 것을 알 수 있다. 열전달률은 냉각 직후는 상승됨을 볼 수 있지만, 그 후는 거의 일정한 경향을 나타내었다.

#### 4. 결 론

관의 생성형 빙축열 시스템을 모델화 한 축열조 내에 수평 2열 냉각관에 대한 온도장·흐름장 및 동결형상에 관한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 홀로그래피 간섭법 광학계에 2대의 카메라를 사용하여 시험부 전체와 냉각관 근방 간섭호의 동시 촬영이 가능하여 간섭호의 해석에 유용한 것을 확인하였다.

2) 자연대류에 있어서 급속냉각의 조건으로 냉

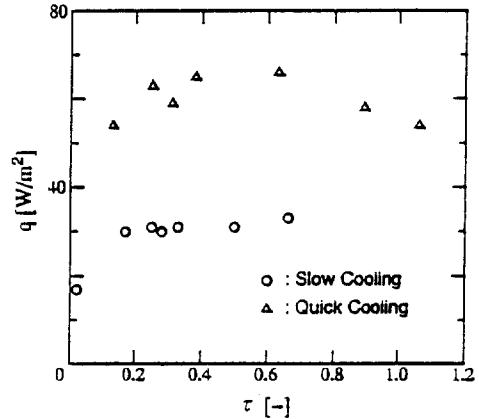


Fig.11 Dimensionless time vs heat flux.

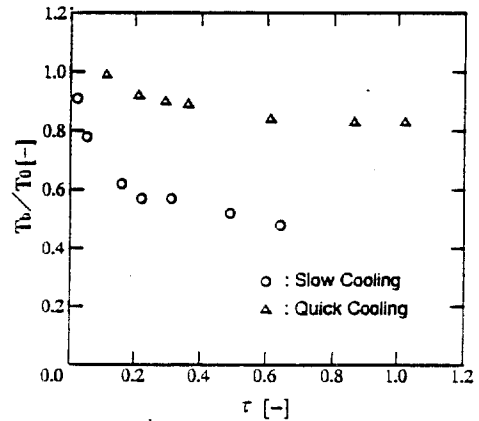


Fig.12 Dimensionless time vs mixing mean temperature.

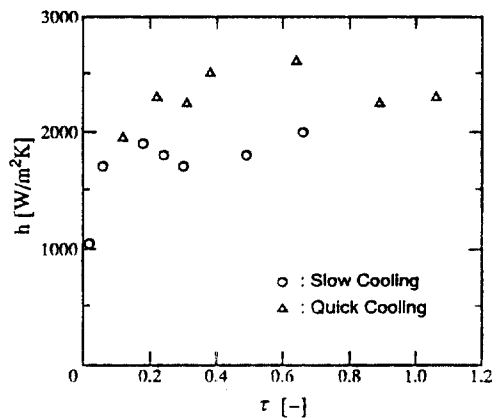


Fig.13 Dimensionless time vs mean heat transfer coefficient.



각한 경우 흐름장은 항상 아래 방향이었고, 완만 냉각의 경우는 냉각개시 직후는 아래 방향으로 자연대류를 발생시키지만, 완만냉각 중에 물의 밀도역전에 따라 흐름장 역전을 일으켜 윗방향으로 대류가 발생되었다.

3) 과냉각 해체에 있어서 급속냉각의 조건으로 냉각한 경우는 냉각관벽 부근과 그 주위와의 온도차가 크고, 동결은 아래 냉각관에서 개시되었다. 완만냉각의 경우는 먼저, 위의 냉각관부터 동결이 시작되지만 냉각관 주위 온도가 거의 같기 때문에 광범위하게 침상빙이 생겨, 아래 냉각관도 동결을 시작하여 동결은 상하 냉각관에서 거의 동시에 일어났다.

4) 열전달률은 완만냉각, 급속냉각 모두 냉각 직후는 상승됨을 볼 수 있었지만, 그 후는 거의 일정하였다.

## 후 기

본 연구의 일부는 포항공과대학 첨단유체공학 연구센터(AFERC)의 지원을 받아 수행하였으며, 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Cheng, K.C., Takeuchi, M., 1976, "Transient Natural Convection of Water in a Horizontal Pipe with

Constant Cooling Rate Through  $4^{\circ}\text{C}$ ", Trans. ASME Journal of Heat Transfer, Vol.98, pp.581-587.

2. Gilpin, R.R., 1975, "Cooling of a Horizontal Cylinder of Water Through its Maximum Density Point at  $4^{\circ}\text{C}$ ", Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.18, pp.307-315.
3. Gilpin, R.R., 1977, "The Effect of Cooling Rate on the Formation of Dendritic Ice in a Pipe with No Main Flow", Trans. ASME Journal of Heat Transfer, Vol.99, pp.419-423.
4. Gilpin, R.R., 1981, "Ice Formation in a Pipe Containing Flows in the Transition and Turbulent Regimes", Trans. ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 103, pp.363-368.
5. 柏木孝夫, 外, 1987, "過冷却域を有する氷の凍結開始に及ぼす自然対流の影響", 日本機械學會論文 文集(B), Vol.53, pp.1822-1827.
6. 齊藤彬夫, 外, 1988, "過冷却をともなう凝固過程の研究", 日本機械學會論文 文集(B), Vol.54, pp.1439-1446.