

〈논 문〉

이중원관의 냉각과정에 미치는 과냉각의 영향

윤정인* · 김재돌* · 加藤豊文**

(1996년 1월 31일 접수)

Effect of Supercooling on the Cooling in Horizontal Cylindrical Annuli

Jung-In Yoon, Jae-Dol Kim and Toyofumi Kato

Key Words: Cooling(냉각), Double Cylinder(이중원관), Supercooling(과냉각), Natural Convection(자연대류), Dendritic Ice(침상빙), Dense Ice(조밀빙), Cooling Speed(냉각속도)

Abstract

A fundamental study in cooling and solidification process focused on ice storage was performed, including the interesting phenomena of density inversion, supercooling and dendritic ice. A numerical study was performed for natural convection and ice formation in the cooling and freezing processes with supercooling in a space between double cylinders. When water was cooled under the freezing point by a cooling wall in a cavity, solidification was not started at once, but a subcooled region was formed near the wall. Especially, when the cooling rate was low, subcooled region extended to a wide area. However, after a few minutes, supercooling is released by some triggers. Dendritic ice is suddenly formed within a subcooled region, and a dense ice layer begins to be developed from the cooling wall. Due to the difficulties, most previous studies on solidification process with numerical methods had not treated the supercooling phenomena, i. e. the case considering only the growth of dense ice. In this study, natural convection and ice formation considering existence of supercooling and dendritic ice were analyzed numerically with using finite difference method and boundary fixing method. The results of numerical analysis were well compared with the experimental results.

기 호 설 명

a : 열확산계수 m^2/s

B : 외벽까지의 무차원 거리

c_p : 정압비열 $J/kg \cdot ^\circ C$

d : 대표길이 m(냉각관 직경 m)

F : 내벽까지의 무차원 거리

g : 중력 가속도 m/s^2

Gr : Grashof 수 $= g\beta(T_{ini} - T_\infty)d^3/\nu^2$

H : 냉각속도 $^\circ C/h$

H^* : 무차원 냉각속도 $= [(r_2 - r_1)^2 / \{a \cdot (T_{ini} - T_\infty)\}] \cdot H$

Pr : Prandtl 수 $= \nu/a$

R : r좌표의 무차원수 = 좌표 r/d

r : 좌표

r_1 : 냉각관 반경 m

r_2 : 외벽 반경 m

Ra : Rayleigh 수 $= Pr \cdot Gr$

T : 온도 $^\circ C$

s : 고액 경계면 위치

S : 고액 경계면 무차원수

* 회원, 부경대학교 냉동공학과

** Tokyo Univ. of A & T

- t : 시간 s
 v : 속도벡터
 β : 팽창계수 $1/^\circ\text{C}$
 βm : 평균체 팽창계수 $1/^\circ\text{C}$
 θ : 온도의 무차원수 $= (T - T_\infty) / (T_{\text{int}} - T_\infty)$
 λ : 열전도율 $\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$
 ν : 동점성계수 m^2/s
 τ : Fourier 수 (무차원시간) $= (a \cdot t) / d^2$
 Φ : 좌표 (극좌표계)
 Ψ : 유동함수의 무차원수 $= \psi / a$
 ψ : 유동함수 m^2/s
 Ω : 와도의 무차원수 $= (d^2 \cdot \omega) / a$
 ω : 와도 $1/\text{s}$

하첨자

- b : 혼합 평균
 CL : 중심선
 f : 고상과 액상 혼합체의 등가값
 i : x방향 또는 r방향에 관한 차분요소 번호
 ini : 초기값
 j : y방향 또는 Φ 방향에 관한 차분요소 번호
 p : 시간에 관한 차분요소 번호
 w : 관벽
 ∞ : 기준값

1. 서 론

열에너지를 저장하는 형태인 축열 시스템은 공조 설비 등에 이용되고 있는 유용한 방법의 하나로써 여름철 주간의 전력 피크컷(peak cut), 열원기기 용량의 축소, 열원기기 고장시의 대응 등을 목적으로 채용하는 경우가 많으며, 에너지 절약 및 유지비 절감 등의 가능성도 있다. 축열 시스템은 냉수 또는 온수를 저장하는 방법이 가장 대표적이지만 물 이외의 축열재로는 얼음, 잠열 축열재, 건물 구조체, 암석 등 여러 가지가 사용될 수 있다. 이들을 크게 분류하면 현열형과 축열형으로 나눌 수 있다. 전자는 온도차(현열)를 이용하여 축열을 하는 방법으로 냉수, 온수, 건물 구조체, 암석 등이 있으며, 후자는 상변화(잠열)를 이용하여 축열을 하는 방식으로 얼음이나 잠열 축열재(유기화합물, 파라핀 등)가 여기에 해당된다.

물을 축열재로하는 수축열 시스템은 단위 체적당 열용량이 크고, 가격이 저렴하며, 화학적으로 안정적이고, 자원이 풍부하여 공급이 안정적인 점 등

의 이점을 갖고 있어 현재 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 설비가 커지고, 축열조에서의 열손실이 큰 점 등의 결점이 있다. 한편, 빙축열은 물이 얼음으로 상변화할 때의 잠열을 이용한 것으로, 이 잠열은 현열에 비해 약 80배 정도로 상당히 크다. 따라서, 적은 체적으로도 효율적인 냉열 저장이 가능하다. 또 축열방식의 결점 중 하나인 방열손실에 대해서도 축열조의 소형화와 단열의 손쉬움 때문에 수축열 방식에 비해 유리하며, 일정온도의 열을 용이하게 이용할 수 있는 이점도 있다. 따라서, 최근에는 빙축열 방식에 대한 관심이 높으며, 이에 따른 신기술 개발이 절실히 요망되고 있다.

본 연구에서는 이 빙축열 시스템의 근본적 문제인 물의 냉각 동결현상에 관한 기초적 연구를 수행하였다. 동결현상에 관한 실험적 연구에는 밀도 역전현상에 관한 연구,⁽¹⁾ 수평원주 주위의 동결현상에 관한 연구^(2~4) 등이 있으며, 수치해석에 관한 연구는 다공체의 동결에 관한 연구^(5~6) 및 과냉각을 고려한 동결에 관한 연구^(7~8) 등이 있다.

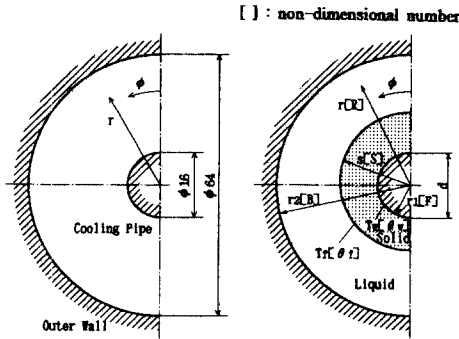
본 연구에서는 동결에 관한 수치해석이 상당히 복잡하기 때문에 비교적 간단한 수평원통 냉각관과 동심원상의 외벽을 가진 이중 원관 모델을 사용하여 과냉각을 동반한 냉각 동결과정의 현상을 수치해석과 실험을 통하여 그 특징을 파악하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

과냉각 동결에 관한 수치해석은 계산이 매우 복잡하기 때문에 비교적 간단한 하나의 수평원통 냉각관과 동심원상의 외벽을 가진 이중 원관 모델을 이용하였고, 과냉각을 수반하는 일련의 냉각과정에 대한 현상을 수치해석에 의해 구하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 해석 모델을 나타낸 것으로 그림 (a)는 형상과 치수를 (b)는 각 기호를 나타낸다. 이것은 냉각관과 동심원상의 외벽을 가진 이중 원관 모델로서 차분법(FTSC법)을 이용하였다. 해석 시 적용한 가정에 대하여 몇가지를 나열하면 다음과 같다.

- ① 현상은 2차원으로 한다.
- ② 유체(물)는 비압축성 뉴턴 유체로 한다.
- ③ 부력항에 있어서는 밀도만을 온도의 함수로 하고, 다른 물성치는 일정한 것으로 한다.
- ④ 운동에너지에서 열에너지로의 비가역적인 이



(a) Configuration and size (b) Symbols
Fig. 1 Analysis model

산은 무시한다.

2.2 해석방법

침상빙이 발생하면 그 영역은 액체와 고체가 공존하는 영역으로 된다. 소요내의 침상빙이 점유하는 비율을 고상률로서 도입하고, 에너지 평형식으로부터 침상빙 영역에 관한 계산을 하였다. 조밀빙 성장과정의 계산은 시간과 동시에 고액 경계면 위치가 변화하기 때문에 이동경계 문제(moving boundary problem)로서 취급할 필요가 있다. 따라서, 이동경계치 문제해석에 유효한 수단인 경계 고정법(boundary fixing method)을 이용하여 해석하였다.

2.3 지배방정식

본 연구에서의 질량 보존법칙, 운동량 보존법칙, 에너지 보존법칙의 기초식들은 각각 다음과 같다.

질량 보존법칙 :

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla \cdot \vec{v}) \tag{1}$$

운동량 보존법칙 :

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \tag{2}$$

에너지 보존법칙 :

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \lambda \nabla^2 T \tag{3}$$

여기서, ρ 는 밀도[kg/m³], \vec{v} 는 속도벡터, p 는 압력[Pa], μ 는 점성계수[Pa·s], λ 는 열전도율[W/m·K], c_p 는 정압비열[kJ/kg·K], t 는 시간[s], T 는 온도[°C], g 는 중력 가속도[m/s²], ν 는

동점성계수[m²/s]를 각각 나타낸다. 또, D/Dt 및 ∇ 는 각각 아래와 같이 표시된다.

$$\frac{D}{Dt} = \frac{d}{dt} + u \frac{d}{dx} + v \frac{d}{dy} \tag{4}$$

$$\nabla = \frac{d}{dx} \vec{i} + \frac{d}{dy} \vec{j} \tag{5}$$

가정에 기초하여 식 (1)에서 식 (3)을 변형하면, 아래와 같은 식이 얻어진다. 단, 운동량 방정식은 x, y방향 성분으로 나누어 표시한다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{6}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \tag{7}$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\rho_\infty - \rho)g \tag{8}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \tag{9}$$

이상의 식들은 압력 속도계에 의한 표시이지만, 계산의 편이성, 오차의 경감 등에서 이점이 있는 와도 유동 함수계가 자주 이용되므로 본 연구에서도 이 와도 유동 함수계에 의해 계산을 하였다. 유동 함수를 ψ , 와도를 ω 라 하면, 아래와 같은 식이 성립한다.

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{10}$$

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = -\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) = -\nabla^2 \psi \tag{11}$$

이 관계를 이용하여 식 (6)에서 식 (9)를 변형하여 압력 p 를 소거하면, 다음 두 개의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \left(\frac{\rho_\infty - \rho}{\partial x} g \right)}{\partial x} \tag{12}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \tag{13}$$

식 (11)에서 식 (13)의 세 식이 자연대류장에 있어서 수치해석의 기초가 되는 식이다.

2.4 무차원화 및 무차원수

아래에 나타낸 식들에 의해 각 변수들을 무차원

화하였다.

$$X = \frac{x}{d}, \quad Y = \frac{y}{d}, \quad \Psi = \frac{\phi}{a}, \quad \Omega = \frac{d^2 \omega}{a}$$

$$\tau = \frac{at}{d^2}, \quad \theta = \frac{T - T_x}{T_{lm} - T_\infty} \quad (14)$$

여기서, d 는 대표길이[m], a 는 열확산 계수 [m^2/s], T_{lm} 는 초기수온[$^\circ C$], T_∞ 는 기준온도[$^\circ C$]이다. 대표길이 d 에는 냉각관 직경($d=16 \times 10^{-3}$ [m])을 이용하였고, 기준온도 T_∞ 에는 물의 밀도가 최대로 되는 $4^\circ C$ 를 이용하였으며, τ 는 시간의 무차원수이다. 식 (11)에서 식 (13)에 표시한 지배방정식에 이 무차원화를 적용하면, 다음과 같은 식들을 얻을 수 있다.

$$\Omega = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} = -\frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Omega}{\partial X} + \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Omega}{\partial Y} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + \text{PrRa} \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = -\frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \theta}{\partial X} + \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \theta}{\partial Y} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (17)$$

여기서, Pr은 Prandtl 수, Ra는 Rayleigh 수를 나타내며, Ra는 $\text{Pr} \cdot \text{Gr}$ 로 정의하였다. 여기서, β 는 팽창계수로 아래와 같이 정의하였다.

$$\text{Gr} = [g\beta(T_{lm} - T_\infty)d^3/\nu^2]$$

$$\beta = - (1/\rho) \cdot (\partial\rho/\partial T)$$

$$= (\beta_0 + 2\beta_1 T + 3\beta_2 T^2 + 4\beta_3 T^3) / (\beta_0 + \beta_1 T_\infty + \beta_2 T_\infty^2 + \beta_3 T_\infty^3 + \beta_4 T_\infty^4)$$

3. 실험

가열이나 냉각에 의한 밀폐용기내의 자연대류 문제에 관해서는 실험이나 수치해석에 의해 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 자연대류를 포함한 일반적인 동결문제에 대해서는 실험에 의존하는 경우가 많다. 따라서, 본 연구에서도 동결거동에 관하여 실험을 수행하여 수치해석 결과의 타당성을 비교 검토하고자 한다.

3.1 실험장치

과냉각 상태에서 동결이 개시되면 먼저 침상빙이 발생하고, 전열면으로부터 조밀빙이 성장한다. Fig. 2는 그 현상을 파악하기 위한 실험장치의 개략도로서 사진촬영과 온도 등을 측정할 수 있도록

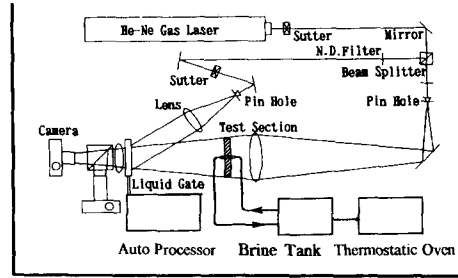


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

구성되어 있다. 실험의 광원에는 He-Ne가스 레이저를 사용하였고, 핀홀(pin-hole)에 의해 확장된 광을 렌즈에 의해 평행광으로 시험부 뒤쪽에서 투과시켜 사진촬영에 의해 임의 시간에서의 동결거동을 관측하였다. 광학계는 홀로그래피 실시간 간섭법 광학계이며, 동결거동과 온도분포의 측정을 동시에 실시하였다. 또한, 시험부는 계산모델과 동일한 형태로서, 폭은 35mm로 하였다. 그리고, 냉각 상태를 확인하기 위하여 냉각관벽 및 외벽에 열전대를 부착하였으며, 시험부의 외부로 열출입량을 확인하기 위하여 외벽의 외측에도 열전대를 부착하였다.

3.2 실험방법

과냉각 상태에서 동결에 관한 실험을 수행하기 위해서는 냉각속도를 비교적 느리게 할 필요가 있다. 또, 과냉각 상태를 장시간 유지할 필요가 있기 때문에 냉각관벽의 온도가 약 $-5^\circ C$ 가 되도록 설정하였다. 이와 같은 조건에서 실험을 하여, 온도계측과 임의 시간의 촬영을 실시하여 촬영결과를 기초로하여 침상빙과 조밀빙의 동결거동에 관하여 정리하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 계산결과와 실험결과와의 비교

냉각조건으로서는 일정온도로 냉각된 냉매를 냉각관에 흘려, 냉각관 벽면온도가 약 $-5^\circ C$ 가 되도록 설정하였다. 냉각관벽에 설치된 세 개의 열전대에 의해 측정된 온도변화를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 ▲표시는 냉각관 상부($\phi=0$), ■는 냉각관 측부($\phi=\pi/2$), ●는 냉각관 하부($\phi=\pi$)의 온도변화를 나타낸다. 냉각개시 직후 약 10분간은 구배가 크게되지만, 그 이후는 거의 등온조건으로

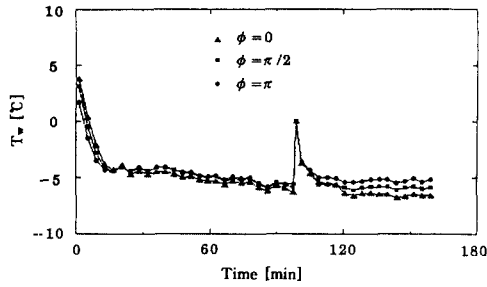


Fig. 3 Change of cooling pipe wall temperature in experiment.

나타났으며, 초기수온에서 동결개시 직전까지의 냉각속도는 평균 약 15.2°C/h였다. -5°C로 유지된 관벽온도가 순간적으로 0°C로 상승하고 있는 부분이 있지만, 이것은 동결이 개시된 점이다. 또한, 과냉각 상태로 유지된 물이 잠열을 방출하여 관벽의 온도가 응고점 온도가 되는데 이 점의 시간은 냉각개시후 약 98분이었다. 따라서, 실험에 의한 냉각관벽의 온도변화를 수식화하여, 이것을 냉각관벽 온도의 경계조건으로 수치해석을 하였다. 그리고 실험의 경우 시험부의 외측은 단열재로 단열하였지만, 완전하게 단열벽으로서 인정하는 것은 불가능하므로 수치해석에서는 주위로의 열손실을 경계조건으로 하였다.

Fig. 4는 동결개시후 침상빙의 생성용해에 관한 계산과 실험결과와의 비교를 시간변화에 대해 나타낸 것이다. 계산에서는 순간적으로 침상빙이 형성되는 것으로 가정한 것에 대해, 실제로는 어떤 진행속도를 가지고 침상빙이 생성되기 때문에, 계산과 실험 모두 동결개시 직후의 상태를 동결개시 1분후의 상태로 나타내었다. 또, 계산결과에는 온도분포와 유선을 첨가하였다. 전체적으로 실험과 계산은 상당히 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 먼저 침상빙이 생성되는 범위에서는 실험과 계산이 다소 다른 결과를 나타내었다. 계산결과 쪽이 실험결과에 비해 침상빙이 생성되는 범위가 넓었다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이, 침상빙은 순간적으로 생성되는 것이 아니라 어떠한 성장속도를 가지고 생성된다는 점, 또는 동결개시 직후의 온도분포가 계산과 실험에서 다소 다르다는 점 등을 들 수 있다. 실험에서는 Fig. 4의 (a)상태까지 침상빙이 진행하는데 약 1분이 걸려 생성 순간만을 생각하면 시간적 차는 상당히 크다. 또한, 생성시 결정성장의 방향성도 문제가 된다고 생각된다. 그러나 실험에서

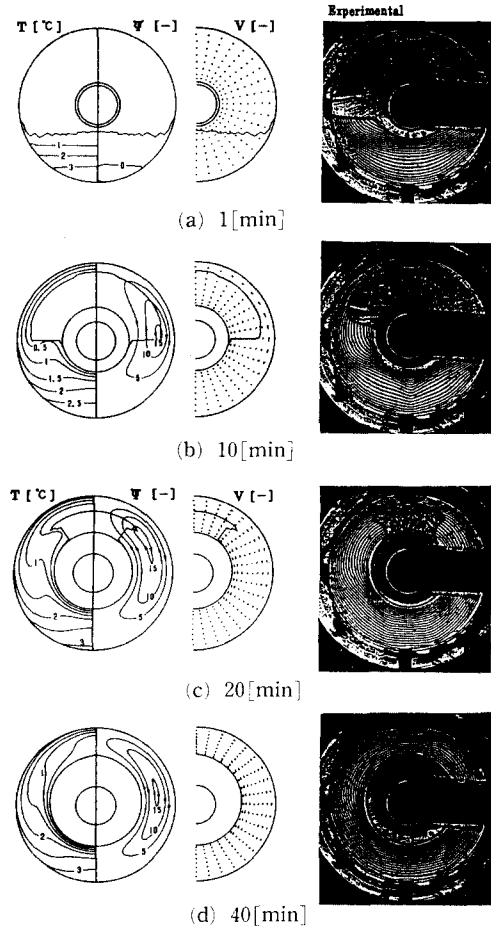


Fig. 4 Reference with a calculation about generation fusion of dendritic ice and experiment.

(a)직후부터 침상빙은 서서히 용해하고 있는 것에서 그다지 긴 시간을 요하지 않고 침상빙의 성장은 완료되는 것으로 생각된다. 본 실험의 경우, 계산 결과의 약 -2°C 범위까지 침상빙은 생성하였다. 그후, 외벽으로부터 열유입과 대류에 의한 열의 이동에 의해 침상빙이 용해해 가는 형태는 거의 완전하게 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 외벽에서의 열유입에 의해 침상빙이 주위로부터 서서히 용해하고 있는 형태는 시험부 상부 침상빙의 변화를 보면 명백하며, 실험과 계산은 잘 일치하고 있다. 또, 물의 대류에 따른 열의 이동에 의해 침상빙이 아래측(횡측)으로부터 용해하고 있는 형태는 20분후의 그림을 보면 확실히 알 수 있으며, 이 점에 대하여도 실험과 계산은 잘 일치하고 있다. 계산결과에 첨가한 흐름도를 참조하면, 조밀빙에 따라 상

항 대류에 의한 열의 이동으로 침상빙이 융해하고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 침상빙의 영역을 열평형에 의해 계산하고, 또, 침상빙내의 흐름을 다공체 중의 흐름으로 가정한 본 계산방법으로 침상빙의 생성 융해과정에 관한 계산이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5는 조밀빙의 단면 형상을 계산값과 실험값으로 비교한 것이다. 계산값과 실험값과의 차이는 계산에서는 온도장 및 유동장이 동시에 좌우 대칭으로 되기 때문에 상부점에서 열전달률이 매우 작게 되지만, 실제로는 축방향으로 약간의 열이동이 존재하기 때문에 열전달률이 비교적 크게 나타났다. 실험에서는 위쪽 방향의 대류가 좌우로 다소 진동하기 때문에 국소적으로 뚜렷한 성장이 평균화된 것과, 계산에서 이용한 가정에 비해서 얼음내의 온도분포가 정상 온도분포에서 현저하게 다른 것 등을 생각할 수 있다. 이 점은 본 계산의 문제점으로서 앞으로 개선의 여지가 있다. 그러나, 이와 같은 경우를 제외하면 전체적으로 좋은 일치를 나타내었으며, 경계조건법을 이용한 본 계산방법 즉, 침상빙이 존재하는 부분에 있어서 조밀빙의 성장에 관한 계산이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 이상의 결과에서 침상빙의 성장 융해와 조밀빙의 성장에 관한 계산결과는 실험결과와 좋은 일치를 나타내었으며, 본 해석방법에 의해 과냉각을 동반한 일련의 동결과정의 계산이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 외벽으로의 열손실

냉수 축열에서 하나의 결점은 외부로의 열손실이

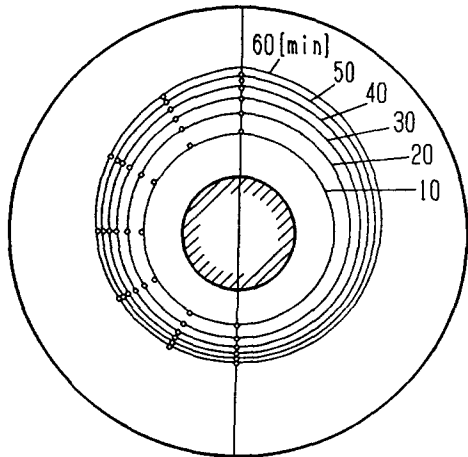


Fig. 5 Reference of section configuration of dense ice.

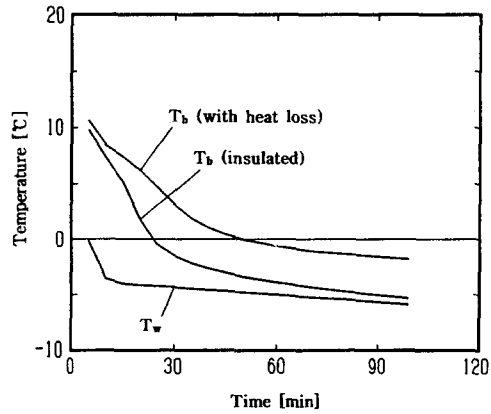


Fig. 6 Time change of mixing average temperature. (Reference with slow cooling and rapid cooling)

큰 것을 들 수 있다. 본 항에서는 외부로의 열손실에 대하여 앞 항에서와 동일한 냉각관의 온도조건 및 외벽단열 조건 상태에서 계산을 하였다. Fig. 6은 냉각 시간에 따른 혼합 평균온도 T_b 의 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 단열의 경우에는 관벽온도 T_w 에 거의 접근하는 형태로 냉각이 진행되고 있지만, 열손실이 있는 경우에는 약 60분 부근에서 T_w 와 T_b 는 거의 평행하게 온도변화가 진행되고 있고, 냉각관에서 얻은 열량과 외벽에서의 열손실량이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 또한, 동결개시 직전 상태에서의 냉각관벽 온도 T_w 에 대한 냉각률은 단열의 경우 약 97.2%인 것에 비해 열손실을 고려한 경우에는 약 80.5%였다. 이것으로도 외부로의 열손실이 냉수 축열의 특성에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 냉각개시 5분, 30분 및 60분 후에 있어서 온도분포 및 유선의 비교를 나타낸 것이다. (a)는 열손실이 있는 경우를, (b)는 단열인 경우를 각각 나타내었다. 단열의 경우에는 냉각개시 60분 후에 이미 전체 영역이 모두 과냉각 상태로 되는 것에 비해, 열손실을 고려한 경우에는 동결개시 직전에도 0°C 이상의 영역이 약 1/3정도 존재하고 있다. 즉, 열손실이 있는 경우에는 위쪽 반까지는 어느 정도 빨리 과냉각영역으로 되지만, 그 이후는 진행이 매우 늦으며, 아래쪽 반으로의 과냉각 진행이 매우 지연되는 것이 하나의 특징이라 할 수 있다.

Fig. 8은 동결 후의 현상을 비교한 것으로서 시간변화에 따른 평균 빙두께(고액 경계면 위치의 원

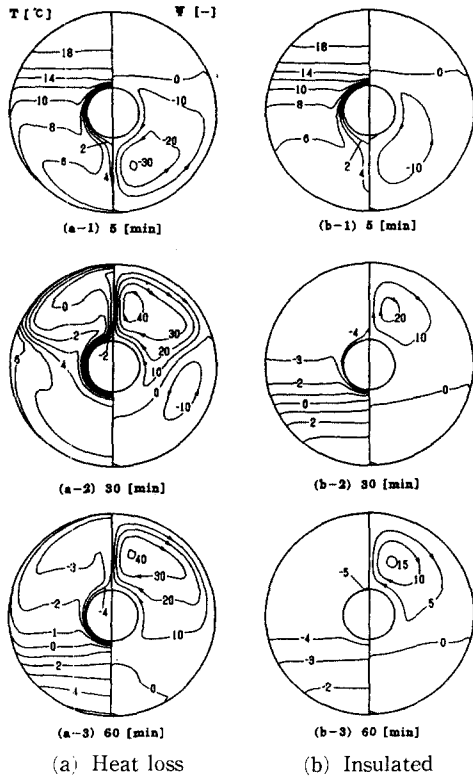


Fig. 7 Difference of temperature distribution elementary stream by a difference of external wall condition

주 평균값)를 나타낸 것이다. (a)는 열손실이 있는 경우이며, (b)는 단열조건에서의 결과를 나타낸다. 또, (c)는 열손실이 있는 조건에서 냉각한 경우의 온도분포를 초기값으로 하여, 단열조건으로 동결과정의 계산을 수행한 것이다. 즉, (a)와 (c)의 경우 동결개시 직전의 상태는 동일하다. 먼저 (a)와 (b)를 비교하면 두 조건에서의 결과가 차이를 나타낸다. 동결개시 1시간 후의 상태에서, 열손실을 고려한 경우의 평균 빙 두께는 약 86.7% 정도 적다. 이 값은 냉각시에 있어서 냉각률의 차이 (82.8%)와 거의 일치하고 있지만, 빙 성장에의 영향이 약간 적게 나타났다. 그리고 (b)와 (c)의 결과를 비교하면, 동결의 초기상태가 다름에도 불구하고, 결과는 거의 동일하게 나타났으며, 이것은 침상빙의 영향이 크게 나타난 것으로 생각된다. 냉각개시 직전에 있어서 (b)의 경우는 영역 전체가 또, (c)의 경우에는 상부 약 2/3가 과냉각 상태로 되어 있어, 그 범위에서 침상빙이 생성된다.

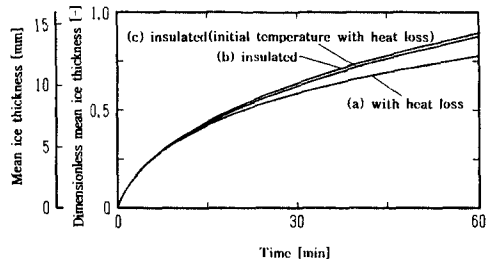


Fig. 8 Difference of dense ice thickness by a difference of external wall condition

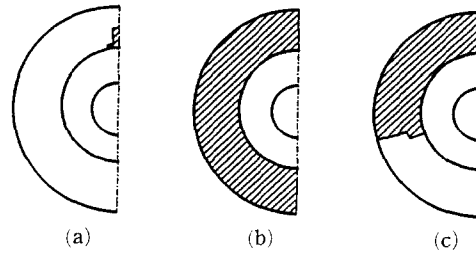


Fig. 9 Generation limit of dendrite ice in freezing initiation 30 minutes after. (a) With heat loss, (b) Insulated, (c) Insulated (initial temperature with heat loss)

Fig. 9는 동결개시 30분 후에 있어서 (a), (b), (c) 각각의 상태를 나타낸 것으로, 단열조건인 경우에는 침상빙의 용해속도가 지연되는 것을 알 수 있다. (b)의 경우에는 전체 영역이 침상빙의 영역으로 되기 때문에 침상빙은 전혀 용해하지 않는 것이다. 또, (c)에서도 흐름에 따라 침상빙은 용해하고 있지만, (a)와 비교하면 그 용해량은 적고, 침상빙의 용해에는 흐름에 의한 영향보다 외부의 열에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있다. 또, (b)와 (c)의 결과가 유사한 것은 이 침상빙의 용해가 지연되기 때문이라 생각된다. 이것은 과냉각 상태가 대부분을 차지하는 경우, 동결개시 직전의 온도분포가 조밀빙의 성장에 그다지 영향을 주지 않는다는 것을 나타내고 있다. 결국, 과냉각 영역이 대부분을 차지한 후 냉각의 진행은 그 후의 동결에 대해서 이점을 가지지 않는 것을 알 수 있었다. 따라서 이로부터 장시간에 걸친 과냉각 상태의 존재는 바람직하지 못하다고 말할 수 있다.

4.3 냉각과정에서의 현상

Fig. 10은 서냉(냉각속도 H=10°C/h)과 급냉(냉

각속도 $H=120^{\circ}\text{C/h}$ 에 있어서 냉각특성의 차이를 시간에 따라 혼합평균 온도 T_b 와 관벽온도 T_w 의 변화로 나타낸 것이다. 급냉의 경우는 냉각속도가 빠르기 때문에, 서냉의 경우와 비교하여 T_b 의 저하율이 매우 크며, 온도차 T_b-T_w 도 커서, 최종적인 T_b 의 감소는 미소하다. 한편, 서냉의 경우에는 T_w 에 거의 평행한 형태로 냉각이 진행되고 있어서 T_b 는 0°C 이하에서 많은 과냉각 영역이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 또, 서냉에 있어서 냉각 현상의 특징으로서는 냉각도중에 냉각특성이 완만해지는 부분(80분에서 100분까지)이 있다. 이것은 밀도역전에 의해 대류 역전현상이 발생되고, 이때 위쪽 방향의 대류를 역전류(inversion flow)라 하면, 이 역전류가 발생한 직후부터 냉각특성은 나쁘게 된다는 것을 알 수 있다. 그리고, 역전류는 당초 정체점과 같은 상태에서 존재하기 때문에 냉각관 주위의 대류는 감소하여, 열전달률이 감소하는 것으로 생각된다. 그러나, 그후 상향 대류가 발달하기 때문에 냉각특성은 다시 회복된다. 이것을 확인하기 위해서 다음은 역전류의 발생에 따른 열전달률의 변화를 조사하였다.

Fig. 11은 시간변화에 따른 평균 넛셀수를 나타낸 것이다. 냉각속도가 10°C/h 의 경우를 보면, 역전류가 발생한 80분 부근에서 대류가 매우 약한 것으로 생각할 수 있으며, 넛셀수도 80분 이후 매우 작은 값으로 된다. 그러나 그후, 역전류가 서서히

발달하여 흐름이 강하게 됨에 따라 넛셀수도 회복되어, 높은 값을 나타낸다. 즉, 냉각속도가 작은 경우에 냉각개시 직후는 잠시 동안 어느 정도의 넛셀수를 유지하지만, 대류가 역전하기 시작하면 열전달 특성은 급격하게 저하한다. 그러나, 그후 역전류의 발달에 따라 넛셀수는 상승하고, 그 이하는 냉각개시 직후와 같은 높은 값을 유지하는 것을 알 수 있다.

4.4 냉각속도와 대류특성

여기서는 비교적 냉각속도가 작은 경우에 있어서 냉각속도와 대류의 관계를 나타내었다. Fig. 12는 초기수온이 15°C 의 경우의 냉각특성을 나타낸 것으로, 냉각속도는 다음의 무차원 속도 H^* 로 나타내었다.

$$H^* = \frac{(r_2 - r_1)^2}{a \cdot (T_{ini} - T_{\infty})} \cdot H \quad (18)$$

여기서, r_1 은 냉각관의 반경, r_2 는 외벽의 반경이다. 이 무차원수는 냉각속도에 외벽 반경의 크기를 고려하여 무차원화한 것이다.

Fig. 12에서 두 개의 파선은 $T_{cl}-T_w$ 가 최대로 되는 점 및 평균체 팽창계수 $\beta_m=0$ 가 되는 점을 각각 연결한 것이다. 두 파선 모두 $T_w=4^{\circ}\text{C}$ 즉,

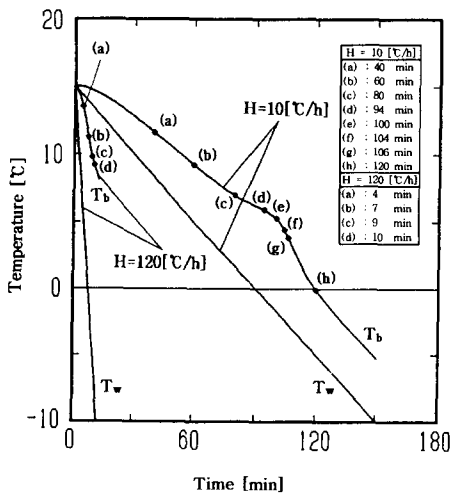


Fig. 10 Time change of mixing average temperature. (Reference with slow cooling and rapid cooling)

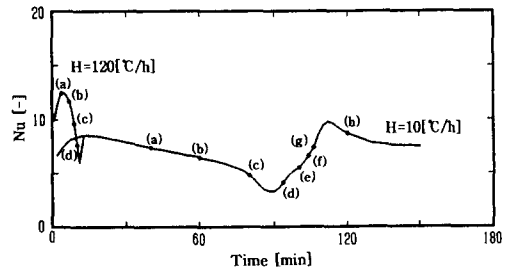


Fig. 11 Time change of average Nusselt number

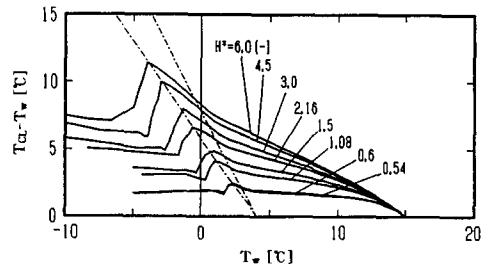


Fig. 12 Cooling characteristics in case of initial water temperature 15°C

물의 밀도가 최대가 되는 점을 지나는 직선임을 알 수 있다. 이와 같이 냉각속도와 흐름의 특성은 일정한 관계가 있음을 알 수 있다.

먼저, $T_{CL}-T_w$ 가 최대로 될 때의 냉각관 벽면온도를 T_{w1} 이라 하면, $(T_{CL}-T_w)_{max}$ 와 T_{w1} 의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$(T_{CL}-T_w)_{max} = -1.437 \cdot T_{w1} + 5.747 \quad (19)$$

동일한 방법으로 평균체 팽창계수 $\beta_m=0$ 점에서 $T_{CL}-T_w$ 의 값과 관벽온도 T_{w2} 와의 관계는 아래와 같은 식으로 근사된다.

$$(T_{CL}-T_w)_{\beta_m=0} = -1.935 \cdot T_{w2} + 7.742 \quad (20)$$

또한, $T_{CL}-T_w$ 가 최대인 점의 관벽온도 및 $\beta_m=0$ 로 되는 점의 관벽온도(T_{w1} 과 T_{w2})와 무차원 냉각속도와와의 관계는 Fig. 13과 같고, 이것을 수식화하면 각각 다음의 근사식을 얻을 수 있다.

$$T_{w1} = 4 - 2.714 \cdot (H^*)^{0.615} \quad (21)$$

$$T_{w2} = 4 - 1.875 \cdot (H^*)^{0.524} \quad (22)$$

이상에서와 같이, 냉각속도와 대류특성의 관계를 수식화하여 일반성을 얻을 수 있었다. 따라서, 냉각속도가 비교적 낮은 (H^* 가 6 이하) 경우에서의 냉각특성은 4°C 를 지나는 직선으로서 정리할 수 있고, 이 관계를 알고 있으면 H^* 에 의해서 냉각의 상태를 예측할 수 있다.

5. 결 론

2중 원관의 냉각과정에 미치는 과냉각의 영향에 주목하여 그 동결시에 발생하는 침상빙의 성장 용해를 고려한 동결현상에 관한 수치해석 및 실험적

연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 경계 고정법을 적용하여 해석한 결과 실험과 잘 일치하여, 본 해석방법에 의해 침상빙의 발생을 고려하고, 과냉각을 동반하는 동결과정의 해석이 가능한 것을 알 수 있었다.

(2) 냉각속도에 따라 대류현상의 차이는 냉각속도가 느린 경우에는 밀도역전에 의한 대류역전이 지배적으로 된 후에 동결이 개시되지만, 냉각속도가 빠른 경우에는 역전류의 영향을 거의 받지 않고 동결이 개시됨을 밝혔다.

(3) 냉각속도가 비교적 작은 경우(무차원 냉각속도가 약 6 이하의 경우), 여러 가지 냉각속도에 의해 얻어진 냉각관벽 온도와 온도차(중심선 온도와 냉각관벽 온도차)와의 관계에는 일정한 관계가 있었으며, 4°C 를 지나는 직선으로 정리할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Cheng, K. C. and Takeuchi, M., 1976, "Transient Natural Convection of Water in a Horizontal Pipe With Constant Cooling Rate Through 4°C ," *J. Heat Transfer*, Vol. 98, pp. 581~587.
- (2) 齊藤武雄, 1978, "密度反轉領域における水平圓柱まわりの2次元凍結の實驗," *冷凍*, Vol. 53, No. 612, pp. 362~368.
- (3) 柏木孝夫ら, 1987, "過冷却域有する水の凍結開始に及ぼす自然對流にの影響," *日本機械學會論文集*, Vol. 53, No. 490, pp. 1822~1827.
- (4) 윤정인, 김채돌, 1995, "수평 2열 원통관 주위의 동결형상에 관한 연구," *공기조화 냉동공학회 논문집*, Vol. 7, No. 1, pp. 89~97.
- (5) 服部 賢, 1987, "凍結融解を伴う傳熱," *冷凍*, Vol. 62, No. 714, pp. 362~368.
- (6) Beckermann, C. and Viskanta, R., 1988, "Natural Convection Solid/Liquid Phase Change in Porous Media," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31-1, pp. 35~46.
- (7) 齊藤彬夫ら, 1981, "過冷却凝固を伴う熱傳導の研究," *日本機械學會論文集*, Vol. 47, No. 420, pp. 1586~1593.
- (8) 齊藤彬夫ら, 1983, "過冷却を伴う凝固過程の數値計算法," *冷凍*, Vol. 58, No. 670, pp. 757~765.

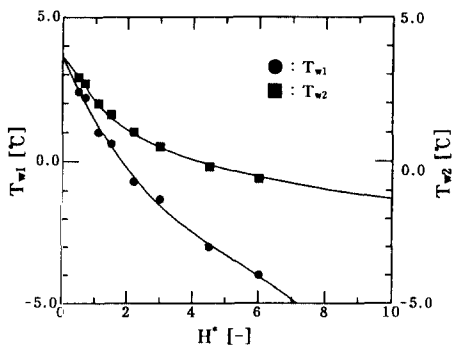


Fig. 13 Relation with nondimension cooling rate and T_{w1} and T_{w2}