

과냉각을 동반한 동결과정의 수치해석

Numerical Analysis for Cooling and Freezing Processes with Subcooling

윤 정 인*, 김 재 돌*, 김 성 규**
 J. I. Yoon, J. D. Kim, S. G. Kim

Key words : Ice Storage(빙축열), Subcooling(과냉각), Freezing(동결), Numerical Analysis(수치해석), Natural Convection(자연대류), Dendritic Ice(침상빙), Dense Ice(조밀빙)

Abstract

In this study, which focuses on ice storage, a fundamental study in cooling and solidification was performed, including the interesting phenomena of density inversion, supercooling and dendritic ice. A numerical study was performed for natural convection and ice formation considering existence of subcooling and dendritic ice were analyzed numerically by using finite difference method and boundary fixing method. In the mesh, the solid fraction was introduced with adding as a term to the energy conservation equation. A flow in the dendrite was modelled as a flow in a porous medium, and the momentum conservation equation was modified to incorporate resistance forces involved in flows through porous media. A numerical solution of the time dependencies of dendrite area and dense ice front was successfully obtained, and the numerical results were good agreement with experimental results. Based on this methodology, a discussion was made of phenomena and characteristics of cooling and freezing processes under various conditions.

기 호 설 명

<p>a : 열확산 계수 m^2/s B : 외벽까지의 무차원 거리 C : Kozeny 상수 c_p : 정압비열 $J/kg \cdot K$ Da : Darcy Number $=K/d^2$</p>	<p>d : 대표길이 m(냉각관 직경 m) g : 중력가속도 m/s^2 Gr : Grashof Number $= \{g \cdot \beta \cdot (T_m - T_\infty) \cdot d^3\} / \nu^2$ H : 냉각속도 $^{\circ}C/h$ H* : 무차원 냉각속도 $= [(r_2 - r_1)^2 / \{\alpha \cdot ((T_m - T_\infty))\}]$ K : 투과계수 l/m^2 L : 응고잠열 J/kg P : 공극률</p>
---	---

* 부경대학교 냉동공학과

** 한국해양대학교 운항시스템 공학부

Pr	: Prandtl Number = ν/a
r	: 좌표
r_1	: 냉각관 반경 m
r_2	: 외벽 반경 m
R	: r좌표의 무차원수 = 좌표 r/d
Ra	: Rayleigh Number = $Pr \cdot Gr$
s	: 비내부 표면적
S	: 고액경계면 위치의 무차원수
Ste	: Stefan Number = $\{c_p \cdot (T_m - T_\infty)\}/L$
T	: 온도 °C
t	: 시간 s
V	: 속도벡터
α	: Neumann해의 계수
β	: 굴절률
δ	: 부분 응고역의 액상률(공극률) = V_l/V
ϵ	: 부분 응고역의 고상률 = $1 - \delta$
η	: 좌표(경계고정법)
θ	: 온도의 무차원수 = $(T - T_\infty)/(T_m - T_\infty)$
κ^*	: 고액 혼합상과 액상의 비열비 = λ_l/λ_i
λ^*	: 고상과 액상의 열전도비 = λ_s/λ_l
σ^*	: 고액 혼합상과 액상의 비열비 = c_{pl}/c_{pl}
τ	: Fourier Number(무차원 시간) = $(a \cdot t)/d^2$
Φ	: 좌표(극좌표계)
Ψ	: 유선
Ω	: 와도의 무차원수

참 지

f	: 고상과 액상 혼합체의 등가값
F	: 동결개시 직전
i	: x방향 또는 r방향에 관한 차분요소 번호
ini	: 초기값
j	: y방향 또는 Φ 방향에 관한 차분요소 번호
l	: 액상
p	: 시간에 관한 차분요소 번호
s	: 고상
w	: 관벽
∞	: 기준값

1. 서 론

동결현상은 빙축열 외에 공업적 제빙이나 식품의 냉동, 저온 열교환기나 발전 플랜트 등 각종 공업용 유체 수송관의 동결문제 등에 관여하므로 그 응용 범위는 대단히 넓다. 물은 냉각하여 동결시킬 경우, 4°C에서 최대의 밀도를 가지므로 밀도역전이나 0°C이하에서도 얼지 않는 과냉각 상태가 존재하며, 또한 과냉각 상태에서부터 동결이 시작될 때 침상빙(dendritic ice)의 발생 등 특이한 점이 많아 냉각·동결현상만을 고려해도 대단한 흥미가 있는 분야이다.

이들 분야에 관해서는 오래 전부터 많은 연구가 이루어져 왔다. 예를 들면, 최대 밀도 영역에서 자연대류의 역전현상에 관하여 Gilpin은 수평 원통관 내의 냉각에 관한 이론적 연구⁽¹⁾를 수행하였으며, Chen 등은 이 부분에 관한 실험적 연구⁽²⁾를 수행하였다. 또한 Katoh는 2개의 냉각관에서 각각이 간섭하는 복잡한 모델에 관한 실험적 연구⁽³⁾를 수행하였다.

동결에 관해서는 실험적 연구가 대부분으로, Saito, T는 밀도의 역전영역에 있어서 수평원주 둘레의 동결에 관한 실험적 연구⁽⁴⁾를, 윤정인, 김재돌 등은 수평 2열 원통관 주위의 동결형상에 관한 연구⁽⁵⁾를, Saito, A 등은 과냉각을 동반하는 동결에 관한 연구^{(6),(7)}를, Kashiwagi 등은 과냉각 상태에서 동결에 미치는 자연대류의 영향에 관한 연구⁽⁸⁾를 수행하였다. 또한, Gilpin 등은 과냉각에서 동결이 개시될 때 발생하는 조밀빙(dense ice)에 관한 연구^{(9),(10)}를 보고하였다.

동결문제의 수치해석에 관한 연구로서는 Hattori⁽¹¹⁾ 등의 연구가 있고, 다공체중의 동결에 관한 연구로서는 Beckermann 등의 연구⁽¹²⁾가 있다. 그러나 이들 대부분의 연구들은 응고점 온도를 경계로 상변화가 개시되는 경우, 즉 과냉각이 존재하지 않은 경우를 주로 다루었다. 그러나 실제로 대부분의 경우에 있어서는 과냉각 영역이 존재하고, 특히 냉각속도가 낮은 경우에는 과냉각이 현저히 관찰⁽³⁾되고 있으므로 그 영향을 고려할 필요가 있다.

과냉각 및 조밀빙을 고려한 수치해석에는 Saito,

A등^{(13), (14)}에 관한 연구가 있지만, 이것은 물의 전열만을 고려하고, 대류에 관해서는 고려하지 않았으며, 침상빙을 고려한 일반적인 동결문제에 관한 이론적인 연구는 되지 못한다. 따라서, 본 연구에서는 물의 자연대류를 고려하여 과냉각 상태에서 동결이 개시되었을 때의 동결현상을 수치해석에 의해 밝혔다.

2. 과냉각을 동반한 동결현상

과냉각을 동반한 냉각현상을 거시적 관점에서 보면 응고점 온도 이상인 물을 응고점 온도 이하의 전열면으로 냉각하면 전열면 근방의 물은 응고점 온도 이하로 뒴에도 불구하고 곧바로 상변화를 일으키지 않으며, 어느 정도 과냉각상태가 유지된다. 그러나 어떤 원인에 의해 갑작스럽게 과냉각은 해제되고, 침상빙이 발생하여 과냉각 영역 전체로 침상빙은 성장한다. 이 때, 잠열을 방출하기 때문에 이 영역의 온도는 응고점 온도까지 상승하게 된다. 또, 침상빙의 발생과 동시에 전열면에서는 조밀빙이 성장하기 시작하고 이것이 성장과 동시에 침상빙은 용해하기 시작하여 완전히 용해하며 조밀빙의 성장만으로 된다⁽⁵⁾. 따라서, 이 이후의 응고과정은 과냉각을 동반하지 않는 경우의 응고과정과 동일하다. 여기서 문제가 되는 것은 과냉각 해제(침상빙의 생성) 시기로 이것은 물의 순도, 부유입자의 존재, 전열면의 상태나 기계적 진동, 또는 냉각속도나 물의 대류상태 등 다양한 요소들에 관련된다. 이와 같은 이유에서 동결개시 시기를 정확히 예측하는 것은 대단히 곤란하다. 이 과냉각 해체에 관해서는 실험에 의해 통계적인 연구가 이루어지고 있지만, 액적 등을 대상으로한 것이 많고, 일반적인 동결현상에 적용할 수 있는 것은 거의 없는 실정이며, 이는 동결문제에 관한 앞으로의 과제중 하나라 생각된다. 단, 실험에 의하면 -5~-7°C 부근의 온도에서는 동결이 개시되는 경우가 많기 때문에 본 논문에서도 이 부근의 온도에서 동결이 개시되는 것으로 하였다.

3. 수치해석

3.1 해석모델 및 기초방정식

Fig.1은 본 연구에 사용된 수치해석의 모델을 나타낸 것이다. Fig.1에서 (a)는 형상과 치수를 (b)는 각 기호를 나타낸다. 수치해석은 냉각관과 동심원상의 외벽을 가지는 이중 원관 모델로서 해석은 차분법(FTCS)을 이용하였고, 해의 안정을 위해 풍상차분과 SOR법을 도입하였다. 본 수치 해석에 적용된 가정중 몇가지를 예로 들면 다음과 같다.

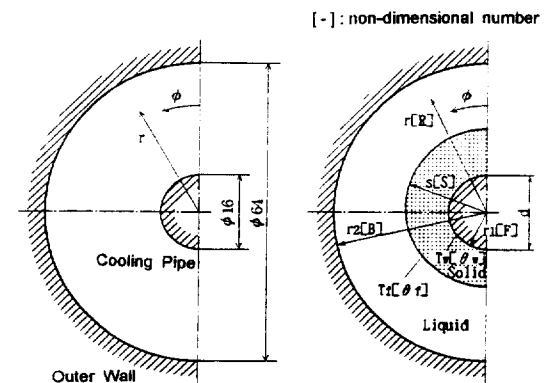
- (1) 현상은 2차원으로 한다.
- (2) 유체(물)는 비압축성 뉴우튼 유체로 한다.
- (3) 부력항에 있어서는 밀도만을 온도의 함수로 하고, 다른 물성값은 일정한 것으로 한다.
- (4) 운동에너지로부터 열에너지로의 비가역적인 손실은 무시한다.

Boussinesq의 근사를 적용하면 밀도는 온도의 함수로서 취급되며, 온도와 밀도의 관계는 5차의 근사식으로 아래와 같이 표시할 수 있다⁽¹⁵⁾.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} (1 + A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3 + A_4 T^4) \quad (1)$$

여기서, $\rho_0 = 999.8396[\text{kg/m}^3]$,

$$A_1 = -0.678964520 \times 10^{-4} [1/^\circ\text{C}],$$



(a) Configuration and Size (b) Symbols

Fig.1 Model of analysis

$$A_2 = 0.907294338 \times 10^{-5} [1/^\circ\text{C}^2],$$

$$A_3 = -0.964568125 \times 10^{-7} [1/^\circ\text{C}^3],$$

$$A_4 = 0.873702983 \times 10^{-9} [1/^\circ\text{C}^4]$$

이 근사식은 온도 T가 [°C]로 표시되기 때문에 이것을 [K]로 변환하면 다음 식과 같다.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_0} (B_0 + B_1 T + B_2 T^2 + B_3 T^3 + B_4 T^4) \quad (2)$$

여기서, $B_0 = 0.852499470 \times 10 [-]$,
 $B_1 = -0.978388153 \times 10^{-1} [1/\text{K}]$,
 $B_2 = 0.479241192 \times 10^{-3} [1/\text{K}^2]$,
 $B_3 = -0.105106469 \times 10^{-5} [1/\text{K}^3]$,
 $B_4 = 0.873702983 \times 10^{-9} [1/\text{K}^4]$

이상의 식은 압력·속도계로 표시되지만 계산의 용이성, 오차의 경감 등의 면에서 와도 및 유동함수계가 자주 사용되고 있으므로 본 연구에서도 이 와도 및 유동함수계에 의해 계산하였다.

그리고 실제 계산에 사용된 물 및 얼음의 물성치와 특성인자는 Table 1과 같고, 부력항 이외의 물성치는 일정한 것으로 가정하여 0°C의 값을 대표값으로 하였다.

3.2 침상빙의 생성 및 융해과정의 계산

차분요소내의 침상빙이 차지하는 비를 고상률 ϵ 으로 도입한다. 또한, 액상률을 δ 로 하면, $\delta = 1 - \epsilon$ 으로 되고, 침상빙이 존재하지 않는 영역에서는 $\epsilon = 0 (\delta = 1)$ 로 된다. 이 모델에서의 지배 방정식은 다음과 같다.

질량 보존법칙 :

$$\Omega = - \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \Phi^2} \right) \quad (3)$$

운동량 보존법칙 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} = & \frac{1}{R} \left(- \frac{\partial \psi}{\partial \Phi} \frac{\partial \Omega}{\partial R} + \frac{\partial \psi}{\partial R} \frac{\partial \Omega}{\partial \Phi} \right) \\ & + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Omega}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial \Phi^2} \right) \\ & - \delta \frac{\text{Pr}}{\text{Da}} \Omega + \text{Pr} \cdot \text{Ra} \left(\frac{\partial \theta}{\partial R} \cos \Phi - \frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \sin \Phi \right) \end{aligned} \quad (4)$$

에너지 보존법칙 :

$$\begin{aligned} \sigma^* \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = & \delta \frac{1}{R} \left(- \frac{\partial \psi}{\partial \Phi} \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{\partial \psi}{\partial R} \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right) \\ & + \kappa^* \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \Phi^2} + \frac{1}{\text{Ste}} \frac{\partial \epsilon}{\partial \tau} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

이상의 식은 유동함수와 와도를 도입하여 압력과 속도항을 소거하였으며, 각 변수는 아래와 같이 무차원화 하였다⁽¹⁵⁾.

$$\text{Da} = \frac{K}{d^2}, \quad \text{Ste} = \frac{c_p (T_m - T_\infty)}{L} \quad (6)$$

여기서, Da는 Darcy 수, Ste는 Stefan 수, K는 다공체의 투과계수 [l/m^2], L은 응고잠열 [J/kg]이다.

부분 응고영역내의 흐름을 다공체 중의 흐름으로 가정하였기 때문에 운동량 방정식의 우변 제3항에

Table 1 Physical properties of water and ice

Properties	Water	Ice
Density ρ [kg/m^3]	999.8	999.8(917)
Thermal Conductivity λ [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}$]	0.568	2.21
Specific Heat c_p [$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$]	4.129	2.0
Thermal Diffusion Coefficient α [m^2/s]	1.347×10^{-7}	1.2×10^{-5}
Kinematic Viscosity ν [m^2/s]	1.792×10^{-5}	
Prandtl Number Pr [-]	13.3	
Freezing Latent Heat L [kJ/kg]		336

그 저항력을 외력으로서 추가하였다. 그리고 침상빙의 용해에 관한 열량을 추가하여 에너지 방정식을 수정하였다.

Scheidegger⁽¹⁶⁾는 다공체중의 흐름을 Kozeny 이론을 이용하여 다음과 같은 식으로 투과계수 K를 나타내고 있다.

$$K = \frac{CP^3}{\beta s^2} \quad (7)$$

여기서, P는 공극률, s는 비내부 표면적, C는 Kozeny 상수, β 는 굴절률을 나타낸다. 본 논문에서는 Beckermann⁽¹²⁾이 추천하고 있는 Kozeny-Carman⁽¹⁷⁾식으로부터 아래와 같이 K값을 구하였다.

$$K = \frac{d^2 \delta^3}{175(1-\delta)^2} \quad (8)$$

위 식에서 대표길이 d는 실제에 있어서는 다양한 방향으로 흐르기 때문에 정확한 값을 결정하기가 어려우므로 적당한 값을 근사적으로 취해야 한다. 단, 본 논문에서는 δ 는 거의 1에 근사하는 값을 가지기 때문에 K의 값은 상당히 크게 되고, d 값에 의해 결과는 큰 영향을 받지 않는 것으로 생각된다. 따라서, 본 논문에서는 경험적으로 d를 1mm로 취하였다.

3.3 조밀빙의 성장과정 계산

조밀빙의 두께(고액 경계면 위치)를 변수 S로 도입하기 위하여 고액 경계면 위치 $X=S$ 에서의 열평형식을 추가하였다.

$$\frac{\partial S}{\partial \tau} = \frac{1}{1-\varepsilon} \text{Ste} \left[1 + \left(\frac{1}{s} \frac{\partial S}{\partial \Phi} \right) \right] \left(\lambda^* \frac{\partial \theta_s}{\partial R} - \frac{\partial \theta_i}{\partial R} \right) \quad (9)$$

$$\theta_s = \theta_i = \theta_l \quad (10)$$

고액 경계면 위치 S는 시간 변수이므로 식 (3)에서 식 (5)의 상태에서는 해를 구할 수 없다. 즉, 계산영역의 경계위치가 시간과 동시에 변화하는 이동 경계문제로 다루어져야 한다. 따라서, 경계 고정법을 적용하였는데, 이것은 차분 계산점이 항상 경계상에 위치하도록 1회의 계산마다 좌표변환을

하는 방법으로, 좌표 R은 다음 식에 의해 η 로 변환하였다.

$$\eta = \frac{R-S}{B-S} \quad (11)$$

또한, 계산에는 준정상근사를 적용하였으며, 이것은 Ste수가 작고, 빙면의 성장이 충분히 느다고 가정한 것으로 다음 2가지의 근사를 이용하였다. 첫째, 고상영역의 온도분포는 정상이며, 둘째, 식 (9) 이외 S시간의 미분은 0으로 한다. 즉, 고상영역의 계산은 생략하고, 경계면의 위치와 액상영역만을 계산하는 것으로 하였다.

3.4 초기 및 경계조건

액상영역에 있어서 냉각과정과 동결과정의 경계조건 및 초기조건은 아래와 같이 도입하였다⁽¹⁵⁾.

냉각과정 :

$$\tau=0 : \Psi=0, \Omega=0, \theta=0 \text{ (초기조건)}$$

$$R=F : \Psi=0, \Omega = -2 \frac{\Psi}{\Delta R^2},$$

$$\theta = \theta_w \text{ (냉각관벽면상)}$$

$$R=B : \Psi=0, \Omega = -2 \frac{\Psi}{\Delta R^2}, \frac{\partial \theta}{\partial X} = \theta \text{ (벽면상)}$$

$$\Phi=0, \pi : \Psi=0, \Omega=0, U=0, \frac{\partial V}{\partial \Phi} = 0,$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \Phi} = 0 \text{ (대칭)} \quad (12)$$

동결과정 (경계고정법을 적용) :

$$\tau = \tau_f : \Psi = \Psi_f, \Omega = \Omega_f, \theta = \theta_f \text{ (초기조건)}$$

$$\eta=0 : \Psi=0, \Omega = -\frac{2}{(B-S)^2} \frac{\Psi}{\Delta \eta^2},$$

$$\theta = \theta_l \text{ (냉각관벽면상)}$$

$$\eta=1 : \Psi=0, \Omega = -\frac{2}{(B-S)^2} \frac{\Psi}{\Delta \eta^2},$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \eta} = 0 \text{ (벽면상)}$$

$$\Phi=0, \pi : \Psi=0, \Omega=0, U=0, \frac{\partial V}{\partial \Phi} = 0,$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \Phi} = 0 \text{ (대칭)} \quad (13)$$

여기서, 첨자 F는 냉각과정의 계산에서 얻어진 동결개시 직전의 값이다.

3.5 계산방법

과냉각 해제 이전 및 동결개시 후 침상빙이 존재하지 않는 액상영역에서는 $\epsilon_{i,j}=0$ 로 식 (3)에서부터 식 (5)는 일반적인 자연대류 문제의 기초식과 같게 되어 냉각과정으로 계산할 수 있다. 동결개시 직후의 과냉각 영역($\theta_{i,j} < \theta_i$)의 고상률 $\epsilon_{i,j}$ 는 다음 식과 같다.

$$\epsilon_{i,j}^p = Ste(\theta_i - \theta_{i,j}^p) \tag{14}$$

4. 결과 및 고찰

4.1 타당성 검토

본 논문에서 사용한 해석방법 또는 결과에 대한 타당성 검증을 위해 차분 격자의 크기, 반복계산에 의한 수렴조건에 타당성 및 부분 응고영역에 있어서 흐름 계산에 이용한 투과계수, 고상률 계산에 있어서 준안정 근사에 관하여 검토를 수행하였다. 계산에서 사용한 차분격자는 반경방향 Δr 에는 냉각관 근방이 0.5mm로 최대 1mm에 부등간격 격자를 채용하였고, 원주방향 $\Delta \theta$ 은 72등분할하였다. 먼저, 반경방향 격자 Δr 의 타당성에 관해서, Δr 을 0.05mm에서 8mm까지 변화하여 각각 등분할한 경우의 계산을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 냉각관벽 온도 $T_w = -5^\circ\text{C}$ 의 등온조건하에서 계산을

하고, 1분후의 평균 Nusselt 수 \overline{Nu} 및 혼합평균 온도 T_b 를 비교한 결과를 Fig.2에 나타내었다. 점선은 본 계산에 사용한 부등간격 격자에 의해 얻어진 값이다. Fig.2로부터 $\Delta r = 1\text{mm}$ 이하에서는 \overline{Nu} 는 거의 일정한 것으로 생각된다. 그러나 혼합평균 온도 T_b 는 다소 차이가 있지만 $\Delta r = 0.5\text{mm}$ 이하에서는 거의 일정하다. 따라서, 본 논문에 사용한 반경방향에 관한 부등간격의 차분 격자는 T_b 의 결과에 있어서 약 2.3%의 오차를 포함하는 것으로 \overline{Nu} 의 결과 및 계산시간면에서 타당성이 있는 것으로 생각된다.

Fig.3은 침상빙의 생성·융해에 관한 계산 결과를 동일조건에 실험 결과와 비교하여 나타낸 것이

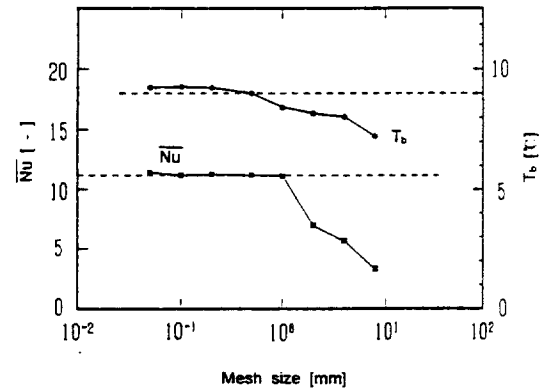


Fig.2 Investigation of mesh size for analysis propriety

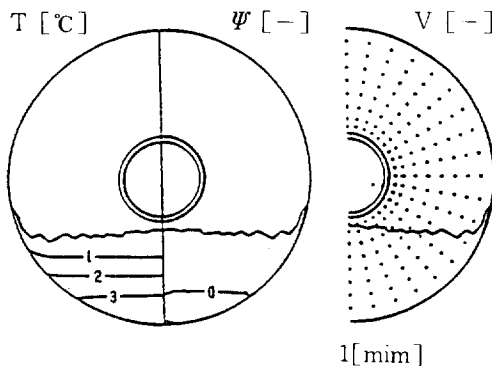


Fig.3 Reference with a calculation about generation fusion of dendritic ice and experiment

다. Fig.3은 동결개시후 침상빙의 시간변화를 나타낸 것으로 계산에서는 극히 짧은 시간에 침상빙이 형성된다고 가정한 것에 반해 실제로는 진행속도를 가지고 침상빙이 생성되기 때문에 계산, 실험 모두 동결개시 직후의 상태로서 동결개시 1분후의 상태를 나타내었다. 계산결과에는 온도분포와 유선을 첨가하였으며, 전체적으로는 서로 잘 일치하였으나, 침상빙이 생성되는 범위에서는 실험과 계산에 다소 차이를 나타내었다. 계산결과 쪽이 침상빙이 생성되는 범위가 넓게 나타났으며, 이것은 침상빙은 짧은 시간에 곧 바로 생성되는 것이 아니라 어느 정도 성장속도를 가지고 생성되거나, 동결개시 직전의 온도분포가 계산과 실험에 다소 차이가 있었던 것으로 생각된다. 실험에 있어서는 침상이 진행하는데 약 1분이 소요되어, 생성 순간만을 고려하면 시간적인 오차는 상당히 크다. 또, 생성시 결정성장의 방향성도 문제가 된다. 그러나 실험에 있어서 1분 직후부터 침상빙은 서서히 용해되므로 그다지 긴시간을 요하지 않고, 침상빙의 성장은 완료된다. 따라서, 침상의 생성범위가 다소 차이가 나지만 잠열의 방출은 충분히 이루어지는 것으로 볼 수 있다. 그 후, 외벽에서의 열유입과 대류에 의한 열이동에 따른 침상이 용해되어가는 형태는 거의 완전히 일치함을 알 수 있다. 그리고, 물의 대류에 의한 열이동에 있어서 침상빙이 아래쪽에서 용해하고 있는 형태도 실험과 계산이 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서, 침상빙 영역을 열평형에 의해 계산하고, 침상빙내의 흐름을 다공체중의 흐름으로 가정한 침상의 생성·용해과정에 관한 계산방법은 타당하다고 사료된다.

4.2 침상빙의 조밀빙에 대한 영향

여기서는 침상빙 속에 조밀빙이 성장하는 경우에 대하여 검토하였다. Fig.4는 동결 개시점의 상태를 나타낸 것이다. 이 상태는 외벽의 지름이 96mm인 계산모델을 대상으로 관벽의 온도가 -5°C 상태에서 30분간 냉각한 경우, 얻어진 상태로서 전체 영역중 거의 위쪽 반이 과냉각 영역을 나타내고 있다.

Fig.5는 냉각관 최상부에서 각도 ϕ 와 조밀빙 두

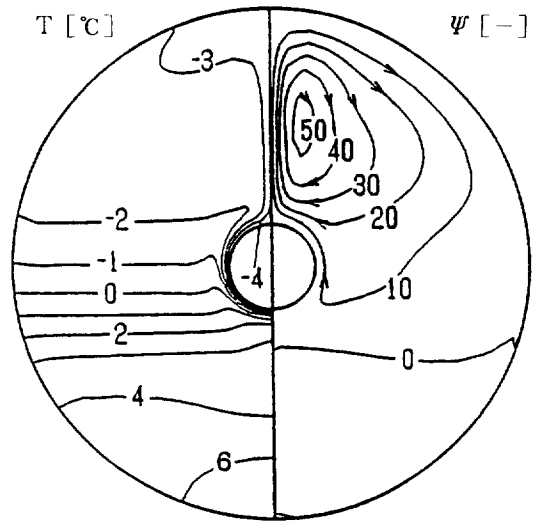


Fig.4 Condition of freezing initiation right before

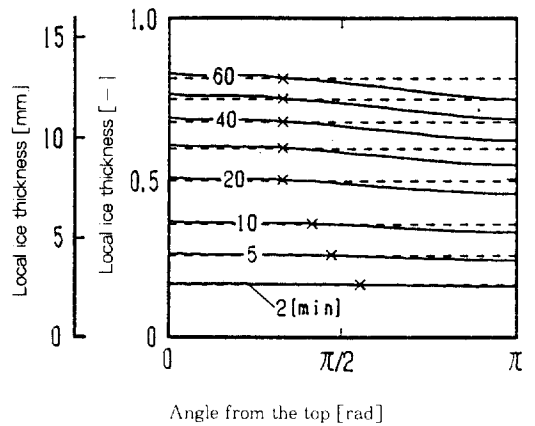


Fig.5 Time change of local ice thickness

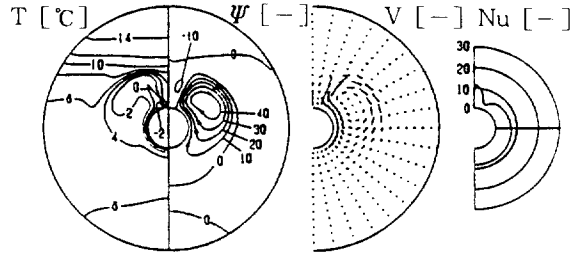
께와의 관계를 시간에 따라 나타낸 것이다. Fig.5에서 × 표시는 침상빙의 생성범위를 나타내며, $\phi = 0$ 과 × 표시 사이에 침상빙이 존재하고 있다. 따라서 침상빙이 존재하는 범위내에 있어서 빙의 두께는 최상부를 제외하고 거의 동일한 형태임을 알 수 있다. 또한, 그림 중의 파선은 0°C 물에 대한 조밀빙의 변화를 나타낸 것이다. 이것은 조밀빙

의 온도가 0°C로 유지되는 것과 유사하므로 거의 동일한 형태의 변화가 예상되기 때문에 나타난 것으로 생각된다. 침상빙이 존재하는 방향으로 조밀빙의 성장은 침상빙 가운데에 빙을 포함하기 때문에 0°C 물의 동결보다도 약간 빠르지만 거의 같은 변화를 하고 있다. 따라서, 침상빙 중 빙의 성장은 0°C 물에 대한 조밀빙의 성장보다도 수 % 정도 높은 값을 나타낸 것으로 생각된다.

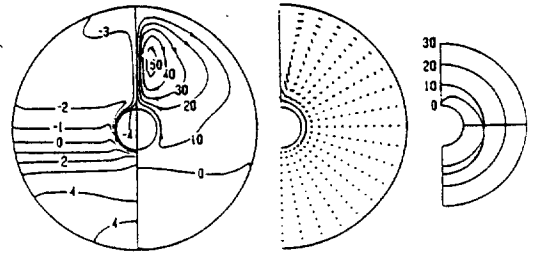
4.3 동결개시 시간지연과 조밀빙의 성장

Fig.6은 동결개시 시간이 지연된 경우의 동결개시 상태를 나타낸 것이다. 실제적으로 냉각면 온도는 동결개시 이후 그다지 저하하지 않는 경우가 많으므로 냉각면 온도를 일정한 것으로 고려하였다. 관벽온도는 -5°C로 하고, 동결개시 시간을 15, 30, 45, 60분간 지연된 경우(과냉각이 유지된 경우)에 대하여 시간지연에 따른 동결개시 상태에 대하여 각각 계산하였으며, 외벽 지름은 96mm로 하였다. 15분 후의 동결개시 직전의 냉각상태는 역전류가 냉각관벽에서 발달하고 있는 단계로서 과냉각 영역은 냉각관 근방에 불과하다. 30분 후는 냉각관의 높이보다 위쪽이 과냉각 영역으로 되고 있으며, 45분, 60분 이후에는 그 과냉각 영역은 더욱 아래방향으로 넓어지고 있음을 알 수 있다.

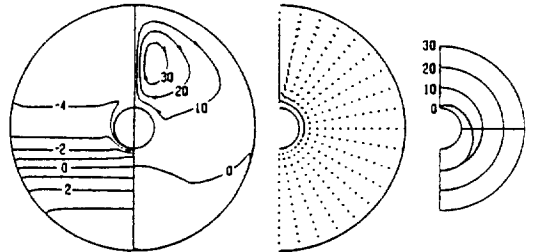
Fig.7은 동결이 시작될 때 조밀빙의 평균두께를 시간변화에 따라 나타낸 것으로 0분의 위치에서 시작하고 있는 곡선은 과냉각을 고려하지 않은 경우이다. 이 선이 동결개시 50분후 정도에서 기울기가 변화하고 있는 것은 대류의 역전효과에 의한 것으로, 기타의 경우는 대류역전 후에 동결이 개시되기 때문에 이 효과는 나타나지 않는 것으로 생각된다. 15분 및 30분간 동결이 지연된 경우에는 과냉각이 없는 경우와 도중에서 거의 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 엄밀히 말하면 과냉각이 없는 경우보다도 약간 큰 값을 나타내었다. 그러나, 45분 후나 60분 후에 동결이 개시된 경우에는 과냉각 상태에 도달하고 있지 않다. 이 2가지의 경우에는 동결개시 직전의 상태에서 냉각관 주위 전체가 과냉각 영역이기 때문에 침상빙이 전체 냉각관 주위에 형성되고 있다. 따라서, 0°C 물의 동결과 거



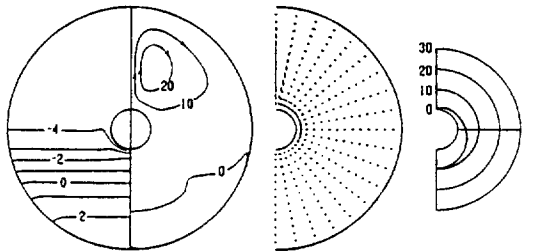
(a) 15 [min]



(b) 30 [min]



(c) 45 [min]



(d) 60 [min]

Fig.6 Freezing initiation condition in case that freezing initiation time was behind

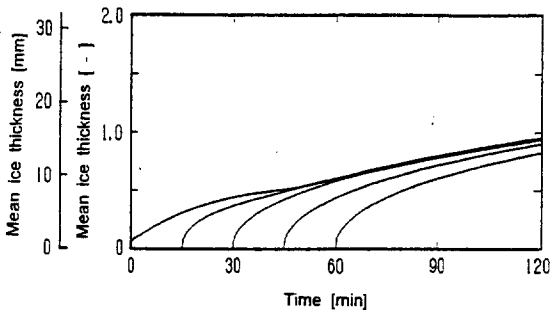


Fig.7 Effect to dense ice of delay of freezing initiation time

의 같은 변화를 하고 있는 것으로 생각된다. 즉, 45분 후와 60분 후의 그래프는 같은 형태로서 0℃ 물의 동결과 거의 같은 변화를 하고 있다. 이것은 결과를 증첩해 보면 확인할 수 있다. 이 때문에 60분 후 빙의 두께가 과냉각이 없는 상태에 도달하는 것은 빙이 거의 전체 영역으로 성장한 후라고 생각된다. 침상빙이 생성되면 액상의 온도구배가 없기 때문에, 동결개시 후는 어떠한 과냉각 상태에 대해서도 동일한 조건으로 된다. 따라서, 과냉각 상태가 유지되는 것에 의한 동결개시 시간의 지연은 적절하지 않다고 말할 수 있다.

Fig.6, 7의 결과로부터 냉각개시 시간이 어느 정도 지연되면 짧은 시간 내에서는 그 영향은 없지만, 장시간 동결이 지연된 경우에는 최후까지 그 영향이 남는다는 것을 알 수 있다. 또한, 그 임계 시간은 액상영역의 크기, 전열면 온도, 총 냉각시간 등 여러 가지 요인에 의한 것이라 생각되므로 일괄적으로 말할 수 없지만, 본 결과에서는 약 40분에서 50분이 여기에 해당한다고 생각된다. 또, 동결직전의 온도분포에서 그 과냉각 영역을 고려하면 어느 정도의 예측은 가능할 것으로 생각된다. 그리고 15분이나 30분 정도 지연된 경우에는 도중에서 과냉각이 없는 경우보다 약간 큰 값이었지만, 현저한 차는 아니었다. 따라서, 과냉각 상태에서 높은 열전달 특성을 가지는 것이 빙의 성장에는 도움이 되지 않는다는 것을 알 수 있었다. 또, 이 결과는 동결문제에 있어서 과냉각을 고려할 필요성을 나타내고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이, 지금까지

지 수행된 동결에 관한 수치해석에 관한 연구들은 과냉각을 동반하지 않은 것이 대부분이었다. 이 때문에, 이들의 해법은 이상적인 문제에 대해서는 충분하지만, 실제의 일반적인 문제에 대해서는 적절하지 못하므로 본 해석방법과 같이 과냉각을 고려한 해석이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

4.4 동결에 미치는 대류 효과

액상에 대류가 없는 경우, 또는 이것을 무시한 경우에서 조밀빙의 성장은 완전한 동심원상이 된다. 그러나, 앞의 결과들로부터 알 수 있듯이 실제 빙의 형상은 동심원상이 아니며, 이것이 대류의 영향이라는 것은 명백하므로 여기에서는 동결이 미치는 대류의 영향에 관하여 파악하였다. Fig.7에서 알 수 있듯이 과냉각이 없는 경우의 동결현상에서는 침상빙이 존재하지 않았다.

Fig.8은 시간의 경과에 따른 대류의 변화 형태를 나타낸 것이다. 이것은 냉각과정에서와 마찬가지로 냉각개시 직후에는 냉각관을 따라 하향 대류하고 있지만, 시간이 경과함에 따라 밀도역전으로 상향 대류가 생긴다. 이 역전류는 시간이 경과함에 따라 발달해 가지만, 지금까지 나타낸 것과는 약간 다른 현상을 나타내었다. 지금까지는 대류역전 후 어느 정도 시간이 지나면 수직상향 대류가 발생되었지만, 이 경우는 냉각관 최상부에서 약 30~50°의 방향으로 대류하고 있다. 이것은 조밀빙의 성장에 따른 대류영역의 감소나 냉각면 온도가 0℃(얼음면)이기 때문에 Ra수가 작아져, 대류가 약해지는 점 등에 의한 것으로 생각된다. 이 현상에 대해서는 Cheddadi 등에 의한 연구⁽⁹⁾가 있지만, 여기서는 동결에 미치는 대류 효과를 파악하기 위한 것이므로 이 현상에 대해서는 자세히 다루지 않았다. Fig.8에서 냉각개시 직후는 하향 대류하기 때문에 냉각관 하부에서 빙의 성장이 현저한 것을 알 수 있다. 그리고, 대류역전에 따른 위쪽 방향으로 빙의 성장이 빠른 것을 알 수 있다. 즉, 얼음면상 대류 합류점에서 빙의 성장이 빠르다는 것을 알 수 있다. 이것은 열전달로부터도 명백히 알 수 있다.

Fig.9는 각도 θ 와 고액 경계면 위치를 시간변화에 따라 나타낸 것이다. 이것은 조밀빙의 성장 형태를 파악하기 위한 것으로 Fig.9의 냉각개시 직후

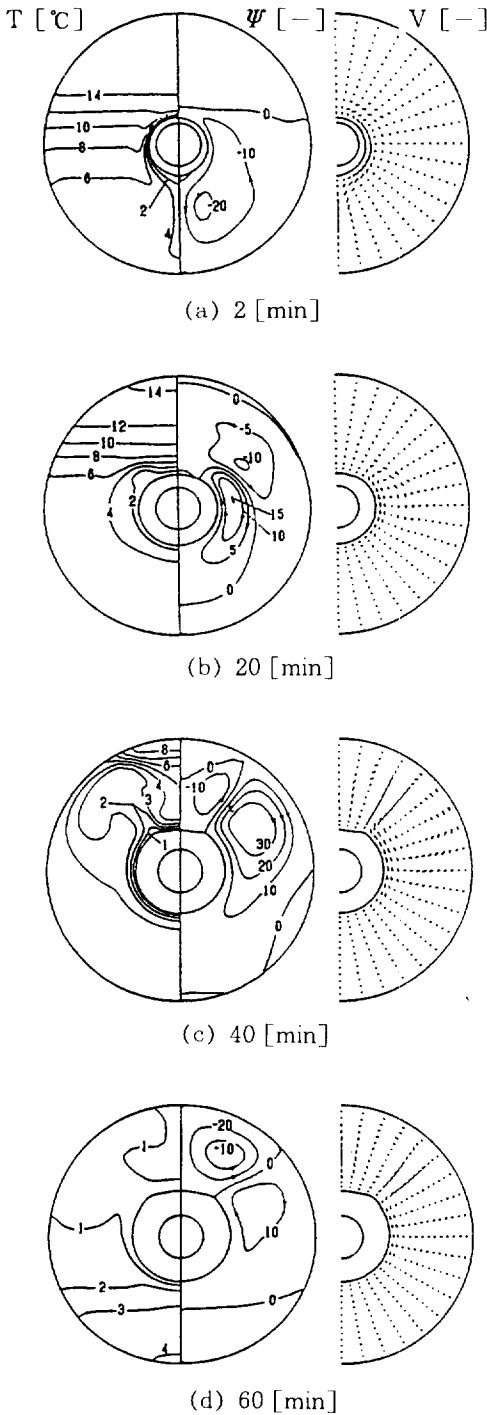


Fig.8 Time change of configuration and free convection of dense ice

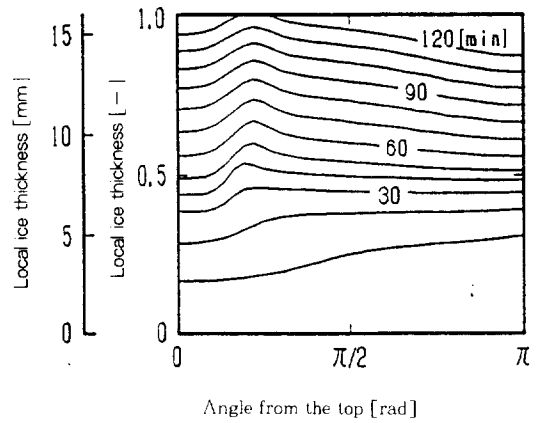


Fig.9 Effect to dense ice of convection

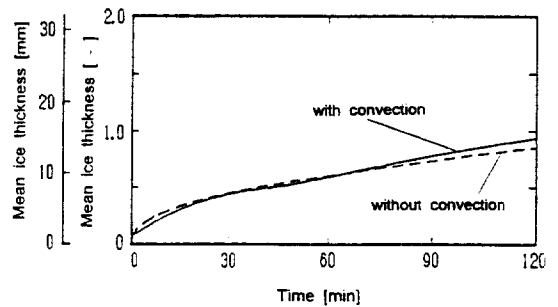


Fig.10 Time change of local in thickness

는 하향 대류에 의해 아래쪽($\phi = \pi$)으로 조밀빙의 성장이 큰 것을 알 수 있다. 그리고, 대류역전이 진행됨에 따라 아래쪽에서의 성장은 약해지고, 대류 합류점인 $\phi = 50^\circ$ 부근에서 성장이 현저하게 되었다. 이것으로부터 흐름의 상태와 조밀빙의 성장에는 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다.

Fig.10은 위의 결과와 대류가 없다고 가정된 경우의 결과를 비교한 것으로서 시간변화에 따른 평균 빙 두께를 나타낸 것이다. Fig.10에서 냉각개시 후 잠깐 동안은 대류가 없는 경우가 큰 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 대류가 있는 경우 아래쪽으로 빙의 성장이 뚜렷하기 때문에 전체적으로는 대류가 마이너스 효과로 작용함을 의미한다. 그러나, 대류역전 후는 대류가 있는 쪽이 큰

값을 나타내어 대류에 의한 전열촉진으로 동결 촉진효과가 나타났음을 알 수 있다.

5. 결 론

과냉각을 동반하는 동결현상에 주목하여, 동결시에 발생하는 침상빙의 생성·유해를 고려한 동결현상에 대하여 수치해석에 의해 검토를 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 차분요소내의 침상빙이 차지하는 비율을 고상률로서 도입하고, 또한 침상빙이 존재하는 영역에 있어서의 흐름을 다공체 중의 흐름으로 가정하여, 경계고정법을 적용하여 해석하므로써 침상빙의 발생을 고려한 과냉각을 동반하는 동결과정의 해석이 가능하였다.

2) 과냉각이 유지되는 상태에서 동결개시 시간의 지연과 조밀빙 성장과의 관계는 관벽온도가 일정할 경우, 과냉각이 존재하는 경우가 존재하지 않는 경우의 조밀빙 두께를 현저히 초과하지는 않았다. 따라서, 냉각시에 높은 열전달 특성을 나타내고, 액상의 온도저하에 관련되는 것으로 과냉각상태는 조밀빙의 성장에 대해 이점이 없다는 것을 알 수 있었다.

3) 과냉각 및 침상빙을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에서는 조밀빙의 성장에 대해 큰 차이가 발생된다는 것을 알 수 있었으며, 일반적인 동결문제에서 과냉각을 고려하지 않은 해석은 불충분하고, 과냉각을 고려한 해석이 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

4) 액상이 대류를 동반하는 동결에 있어서는, 그 대류에 의한 빙의 성장은 다차원으로 되며, 고액경계면 부근의 대류가 합류하는 점에서 조밀빙의 성장이 현저해지는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- Gilpin, R. R., 1975, "Cooling of a Horizontal Cylinder of Water Through its Maximum Density Point at 4°C", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 1307~1315.
- Cheng, K. C., Takeuchi, M., 1976, "Transient Natural Convection of Water in a Horizontal Pipe with Constant Cooling Rate Thought 4°C", *J. Heat Transfer*, Vol. 98, pp. 581~587.
- 加藤豊文, 1991, "2列水平圓筒管まわりの自然對流と凍結舉動に關する實驗", *環境工學シンポジウム'91 講演論文集*, pp. 32~37.
- 齊藤武雄, 1981, "密度反轉領域における圓筒管と2次元凍結の實驗", *冷凍* Vol. 53, No. 612, pp. 362~368.
- 윤정인, 김재돌, 오후규, 1995, "수평 2열 원통관 주위의 동결형상에 관한 연구", *공기조화·냉동공학회논문집*, Vol. 7, No. 1, pp. 89~97.
- 齊藤彬夫ら, 1981, "過冷却をともなう凝固過程の實驗的研究", *冷凍*, Vol. 56, No. 643, pp. 373~379.
- 齊藤彬夫ら, 1988, "過冷却をともなう凝固課程の研究", *日本機械學會論文集*, Vol. 54, No. 502, pp. 1439~1446.
- 柏木孝夫, 1987, "過冷却を有する水の凍結開始に及ぼす自然對流の影響", *日本機械學會論文集*, Vol. 53, No. 490, pp. 1822~1827.
- Gilpin, R. R., 1976, "The Influence of Natural Convection on Dendritic Ice Growth", *J. Crystal Growth*, Vol. 36, pp. 101~108.
- Gilpin, R. R., 1977, "The Effect of Cooling Rate on the Formation of Dendritic Ice in a Pipe with No Main Flow", *J. Heat Transfer*, Vol. 99, pp. 419~424.
- 服部賢, 1987, "凍結・融解を伴う傳熱", *冷凍*, Vol. 62, No. 714, pp. 362~368.
- Beckermann, C., Viskanta, R., 1988, "Natural Convection Solid/Liquid Phase Change in Porous Media", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 1, pp. 35~46.
- 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.

14. 齊藤彬夫ら, 1983, “過冷却をともなう凝固過程の數値計算法”, 冷凍, Vol. 58, No. 670, pp. 757~765.
15. 藤井哲ら, 1976, “傳熱工學の進展 3”, 養賢堂, pp. 65~68.
16. Scheidegger, A. E., 1974, “The Physis of Flow Through Porous Media(3rd Edition)”, University of Tronto Press, pp. 137~142.
17. Carman, P. C., 1937, “Fluid Flow Through Granular Beds”, Trans. Inst. Chem. Engrs, Vol. 15, pp. 150~166.
18. 大山眞, 1993, “過冷却をともなう冷却・凍結過程の數値解析”, 東京農工大修士學位論文.
19. Cheddadi, A., et al., 1992, “Free Two-Dimensional Convective Bifurcation in a Horizontal Annulus”, J. Heat Transfer, Vol. 114, pp. 99~106.