

협착관내 층류유동에서 물의 결빙현상

Ice-formation phenomena for laminar water flow in a stenotic tube

서 정 세*, 김 무 근**, 노 승 탁***, 임 장 순****
 J. S. Suh, M. G. Kim, S. T. Ro, C. S. Yim

Key words : Ice-formation(결빙), Stenotic tube(협착관), Phase-change(상변화), Laminar flow (층류)

Abstract

A numerical study is made on the ice-formation for water flow inside a stenotic tube. The study takes into account the interaction existing between the laminar flow and the stenotic port in the circular tube. In the solution strategy, the present study is substantially distinguished from the existing works in that the complete set of governing equations in both the solid and liquid regions are resolved. In a channel flow between parallel plates, the agreement of predictions and available experimental data is very good. Numerical results are mainly obtained by varying the height and length of a stenotic shape and additionally for several temperatures of the wall and inlet of tube. The results show that the shape of stenotic port has the great effect on the thickness of the solidification layer in the tube. As the height of a stenosis grows and the length of a stenosis decreases, the ice layer thickness near the stenotic port is thinner due to backward flow caused by the sudden expansion of water tunnel. It is also found that the ice layer becomes more fat in accordance with Reynolds number and the temperature of the wall and inlet of tube decreased.

기 호 설 명

c : 비열 [$J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$]
 D : 관의 직경 [m], 2R

H : 두평판 사이의 반거리 [m]
 k : 열전도율 [$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$]
 L : 관의 길이 [m]
 p : 압력 [Pa]
 Pr : Prandtl 수, ν/α_i
 R : 관의 반지름 [m]
 Re : Reynolds 수, $u_{m,i} D/\nu$
 T_i : 물의 입구온도 [$^\circ C$]
 T_f : 결빙온도 [$^\circ C$]
 T_w : 원관 벽면온도 [$^\circ C$]

* 경상대학교 공과대학 기계공학과, 항공기부품기술 연구센터
 ** 인제대학교 공과대학 기계공학과, 항공기부품기술 연구센터
 *** 서울대학교 공과대학 기계공학과
 **** 인하대학교 공과대학 기계공학과

- u, v : x, r 방향의 속도성분 [$m \cdot s^{-1}$]
 u_i : 원관 입구의 유속 [$m \cdot s^{-1}$]
 $u_{m,i}$: 원관 입구의 평균유속 [$m \cdot s^{-1}$]
 u_{max} : 축방향 임의의 위치에서 최대유속 [$m \cdot s^{-1}$]
 x, γ : 축/반경방향 직교 좌표계 [m]

그리스문자

- α : 열확산 계수 [$m^2 \cdot s^{-1}$]
 Δ_i : 협착부 중심에서의 결빙층 두께 [m]
 δ_i, δ_o : 유로 및 관 협착부 중심의 반경 [m]
 θ : 무차원 온도, 식(6)
 λ_i : 협착부의 절반길이 [m]
 ν : 동점성 계수 [$m^2 \cdot s^{-1}$]
 ξ, η : 변환좌표
 ρ : 밀도 [$kg \cdot m^{-3}$]

하첨자

- f : 용융점
 i : 입구
 L : 액상
 S : 고상
 s : 협착부

1. 서 론

결빙은 냉동시스템분야, 구조, 제강, 용접 등의 금속분야, 마그마의 행동을 예측하거나 극점 빙산의 발달과 쇠퇴를 연구하는 지구 물리학 분야, 핵기술, 결정성장, 식품의 냉동건조, 이식용장기의 보존 등 다양한 분야에서 나타나는 매우 중요한 현상으로 이에 대한 연구가 최근까지 상당히 많이 이루어져 오고 있다. 특히, 유로내의 결빙과정은 파이프내 물의 결빙, 화학공정라인에서의 편석, 열교환기내 액체금속의 응고 등 공학의 여러분야에서 쉽게 접할 수 있는 현상이다. 특히, 화학공정라인 및 열교환기 등의 유로내에 밸브 등이 부착되거나 소방호스 등에 노즐이 부착되었을 때는 이곳에서 급격한 협착부가 발생하며, 이러한 협착유로내에 결빙이 수반될 때는 협착부위에서의 압력강하가 증

가할 뿐만 아니라 유로가 막힐 수 있어 시스템에 상당한 손상 및 경제적 손실을 가져올 수 있다. 따라서, 최근에 이러한 협착부가 있는 유로내의 결빙 문제가 안전과 관련하여 상당한 관심을 끌고 있다.

유로는 파이프 또는 두평판으로 이루어지며, 유로내 결빙문제에 대해 Zerkle과 Sunderland⁽¹⁾가 파이프내 층류유동시 정상상태 결빙을 보고한 이후로 여기에 대한 이론 및 실험적 연구가 상당히 많이 이루어져 오고 있다. 지금까지의 연구들을 살펴보면, 유동양식에 따라 층류인 경우⁽¹⁻⁴⁾와 난류인 경우⁽⁵⁻⁹⁾로 크게 분류할 수 있다. 유로내의 흐름이 층류일 때에는 벽면에 결빙층이 비교적 두껍게 형성되어 유로가 좁아지면서 유동에 상당한 영향을 주며, 유동이 난류일 때는 빠른 흐름으로 인해 결빙층이 비교적 얇아져서 유동에 큰 영향을 주지 않는다.⁽⁸⁾ 그러나, 천이영역에서 결빙층이 다소 두꺼워졌을 때는 유동과 결빙층이 상호작용을 일으켜 상경계면이 불안정해지면서 입구근처의 결빙층이 파동형태를 나타낸다.⁽⁷⁻⁹⁾ 따라서, 유로내의 결빙층이 두꺼워질수록 유동에 상당한 영향을 미치는 것은 자명하며, 난류에 비해 결빙층이 두꺼운 층류 유동의 경우를 위주로 많은 연구가 이루어져 왔다. 유로의 형상을 보면 지금까지 주로 모두 수평 또는 수직으로 놓인 직선형태인 경우에 대한 결빙현상에 국한하여 연구가 이루어 졌다. 그러나, 유로가 다른 형태 즉, 유로의 중심부 등에 협착부가 있는 경우에 대해서는 앞에서 언급하였듯이 상당한 응용성을 가지고 있음에도 불구하고, 아직까지 보고된 바 없는 것으로 생각된다. 이것이 본 연구를 하게 된 기본 동기이기도 하다.

원관내에 협착부가 있을 경우에는 단순한 직관과는 상당히 다르게 결빙층이 형성될 것으로 예상되며, 특히 협착부 전후로 유로 형상의 변화로 인해 유동 특성이 달라지면서 이곳의 결빙층에 상당한 영향을 줄 것이다. 따라서, 기존에 많은 연구를 통해 얻은 직관내 결빙층에 대한 결과를 협착관에 직접적으로 적용할 수는 없을 것이다.

본 연구에서는 협착관내의 결빙현상을 정상상태 층류유동인 경우에 대해 수치적으로 해석하고자 한다. 해석방법상으로 고상영역과 액상영역으로 나누고 각 영역에 완전한 형태의 기초방정식을 적용하

며, 상경계면에서 에너지균형이 이루어질 수 있도록 경계면을 이동하여 결정하고자 한다. 본 연구에서 협착부가 결빙층 두께에 미치는 영향을 주로 알아보고자 하며, 이를 위해 연구결과로 협착부의 형상 및 위치 등을 변화시켰을 경우와 유속의 강도, 벽면온도, 물의 유입온도 등을 달리하였을 때 결빙층의 변화에 대해 제시하며, 협착부 중심의 결빙두께를 변화시킬 경우에 대해서도 제시하고자 한다.

2. 수치적 모델

2.1 문제설정 및 기본 방정식

내부직경이 $D(=2R)$ 이고, 길이가 L 인 관의 입구로부터 x 의 위치에 협착부위가 있는 원형관내로 물이 흐르면서 관벽에 얼음이 형성되는 현상을 Fig.1에 개략적으로 도시하였다. 벽의 온도가 용해 온도 T_w 보다 낮은 T_w 로 일정하게 유지되고 있는 원관으로 균일한 온도 $T_i(>T_w)$ 와 완전히 발달된 유속 u_i 의 물이 유입된다. 관내를 흐르는 물은 관 입구($x=0$)에서부터 냉각이 시작되면서 축방향으로 진행할수록 점차 물의 온도가 낮아질 것이다. 이때 관의 입구에서부터 벽면에 결빙이 생기기 시작하면서 하류로 갈수록 결빙층이 점차 두껍게 형성될 것이다. 이러한 일련의 결빙과정을 효율적으로 수치해석하기 위해 다음과 같은 가정을 도입하였다. (1) 물은 비압축성 뉴턴 유체로서 유동이 2차원 층류이고, (2) 정상상태 조건이 모든 지역에서 성립되며, (3) 물과 얼음의 물성치들이 일정하다. 본 연구의 주된 목적은 고상에서의 전도열전달과 액상에서의 대류열전달을 해석함으로써 보다 실질적인 결빙층에 대한 예측결과를 얻는 데 있다.

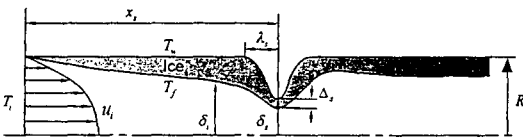


Fig.1 Schematic representation of the physical model for the ice-formation in a stenotic tube

이를 위해 먼저, 일반형 지배방정식을 직교좌표계에 대해 보존식 형태⁽¹⁰⁾로 나타내면

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(r \rho u \phi - r \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho v \phi - r \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = r S(x, r) \quad (1)$$

이다. 여기서 ϕ 는 일반적인 종속변수이며, Γ 와 S 는 ϕ 에 따라 적절히 정의된다. 본 연구의 수치모델 해석상 궁극적인 어려움은 상경계로 인한 고상과 액상영역의 형상이 불규칙한 데 있다. 따라서, 이러한 난점을 극복하기 위해 경계교착좌표계

$$x = x(\xi, \eta), \quad r = r(\xi, \eta) \quad (2)$$

를 도입하여 식(1)을 변환하면

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\rho U \phi - \frac{\alpha \Gamma}{h \epsilon} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\rho V \phi - \frac{\alpha \Gamma}{h \eta} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) = J S(\xi, \eta) - \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\beta \Gamma}{h \nu} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) - \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\beta \Gamma}{h \epsilon} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) \quad (3)$$

로 된다. 여기서 나타나는 다른 계수들은 참고문헌⁽¹¹⁾에 자세히 정리되어 있다.

경계조건으로 상경계면에서는 온도의 연속성, 질량유속 ($F \equiv \rho V$)과 에너지유속 (J)의 보존 그리고 고상에서의 정착조건 등이 요구되며, 이들에 관해서는 이전의 연구⁽¹¹⁾에 자세히 언급되어 있다. 속도장과 온도장에 대한 추가적인 경계조건들은 대칭축($r=0$)과 벽면($r=R$)에 대해

$$\frac{\partial u}{\partial r} = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (r=0) \quad (4)$$

$$T = T_w \quad (r=R) \quad (5)$$

로 주어지며, 이들 경계조건은 수치계산에 앞서 적절히 좌표변환되고 이산화되어야 한다.

한편, 효율적인 해석을 수행하기 위해 도입한 무차원수들은

$$x^* = \frac{x}{D}, \quad r^* = \frac{r}{D}, \quad u^* = \frac{u}{u_{m,i}}, \quad v^* = \frac{v}{u_{m,i}}$$

$$p^* = \frac{p}{\rho_i u_{m,i}^2}, \quad c_r = \frac{c_s}{c_L}, \quad k_r = \frac{k_s}{k_L}$$

$$\theta_s = \frac{c_s(T_s - T_f)}{T_i - T_f}, \quad \theta_i = \frac{T_i - T_f}{T_i - T_f}$$

$$Re = \frac{u_m D}{\nu}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha_i} \quad (6)$$

이며, 이들 무차원수를 이용하여 지배방정식(1)을 각 영역에 대해 재표현하면 Table 1에 정리한 바와 같다.

본 연구에서 설정한 원관 협착부는 전형적인 형상을 갖는 코사인(cosine)곡선으로 하였으며, 이는 기존의 연구⁽¹²⁾ 등에서 협착부와 관련하여 많이 다루고 있는 형상이다. 즉,

$$r = R - \frac{R - \delta_s}{2} \left[1 + \cos \frac{\pi(x - x_s)}{\lambda_s} \right]$$

$$(x_s - \lambda_s \leq x \leq x_s + \lambda_s) \quad (7)$$

이며, 여기서 δ_s , λ_s 그리고 x_s 는 Fig.1에 도시하였듯이 협착 중심부에서의 관의 반경, 협착부의 절반 길이, 관입구로부터 협착부까지의 거리를 각각 나타낸다.

2.2 수치해석 방법

수치계산을 위한 계산격차계는 고상영역과 액상영역에 대해 각각 ξ 방향으로 81개, η 방향으로 23개의 격자점들로 불균일하게 구성되어 있으며, 각 격자점들은 위의 식(2) 즉,

$$x = L\xi \quad (0 \leq \xi \leq 1)$$

$$r = \begin{cases} \delta_s \eta & 0 \leq \eta < 1 \\ \delta_s + (\eta - 1)(R - \delta_s) & 1 \leq \eta \leq 2 \end{cases} \quad (8)$$

를 통해 실제영역에 일대일로 사상된다. 이때 상경

Table 1 Variables in the dimensionless governing equation

	ϕ^*	Γ^*	S^*
Solid	θ_s	$(k_s/c_s)(RePr)^{-1}$	0
Liq.	1	0	0
uid	u^*	Re^{-1}	$-\partial p^*/\partial x^*$
	v^*	Re^{-1}	$-\partial p^*/\partial r^* - Re^{-1}v^*/r^{*2}$
	θ_i	$(RePr)^{-1}$	0

계는 변환된 좌표계에서 $\eta=1$ 로 고정되며, 속도 및 온도의 변화가 심한 상경계면과 용기벽면 근처 그리고 협착부위 등에서는 격자점들을 좀더 조밀하게 배치한다. 속도장은 엇갈림격자계에서 계산하였으며, 속도의 곡률항은 국소고정좌표계⁽¹²⁾를 도입하여 처리하였다. 속도와 압력은 SIMPLER 알고리즘 방식⁽¹⁰⁾으로 서로 보정되었다. 계산과정에서 고상과 액상이 접하는 상경계면에서의 에너지균형이 국소적으로 최대 0.001내에서 만족되었을 때 수렴이 된 것으로 판정하였다.

3. 결과 및 토의

본 연구의 주된 목적은 협착관내 층류유동시 협착부가 결빙층 두께에 미치는 영향을 알아보는 것이다. 따라서, 본 연구의 계산결과는 협착부의 형상 및 위치 등을 변화시켰을 경우와 유속의 강도, 관의 벽면온도, 물의 유입온도 등을 달리하였을 때 결빙층의 변화에 대해 주로 제시하였으며, 협착부 중심의 결빙두께 변화에 대해서도 각각의 경우를 제시하였다. 그러나, 본 연구에서 제시한 계산결과에서의 유동은 모두 층류($2u_m \delta_s/\nu < 2100$)범위에서 이루어졌음을 확인하였다.

먼저, 본 연구의 해석방법에 대한 수치적 검증을 위해, 많은 자료조사 결과 평행평판내의 층류유동에서의 결빙에 대해 비교적 자세하고 정확한 결과를 제시하고 있는 Kikuchi 등⁽²⁾의 실험결과와 본 연구에서 취한 해석방법에 의한 결과를 비교하여 보고자 한다. Kikuchi 등⁽²⁾은 $2H$ 간격을 유지하는 두 평행평판사이로 물이 흐르면서 결빙되는 형태를 여러 벽면온도에 대해 제시하였으며, 대표적인 경우인 벽면온도가 -1.2°C , 유입온도가 2°C , $u_m H/\nu = 175$ 에 대해 본 연구의 해석결과와 비교한 것을 Fig.2에 나타내었다. 그림에서 심볼은 실험결과를, 실선은 해석결과를 각각 나타낸 것이다. 실험결과에 비해 해석결과가 다소 얇은 결빙층 두께를 보이고 있으나, 전반적으로 두 결과가 비교적 잘 일치하고 있다. 이러한 두 결과의 일치 정도로 보아, 본 연구의 해석 방법으로 협착관내 결빙에 대한 충분히 타당한 해석결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

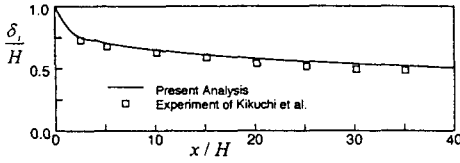
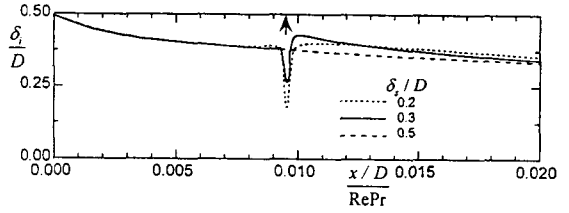


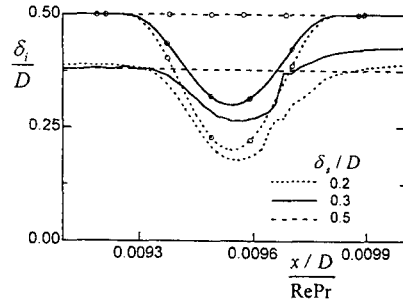
Fig.2 The shapes of the interface for steady state freezing of liquid in laminar flow between two parallel plates at $T_w = -1.2^\circ\text{C}$, $T_\infty = 2^\circ\text{C}$, $u_m H/\nu = 175$. Experimental results from ref. (2) (rectangular) and Numerical results from this study (solid line)

3.1 협착부 높이 및 길이의 영향

협착부 높이가 결빙층에 미치는 영향을 알아보기 위해 $T_w = 1^\circ\text{C}$, $T_i = 5^\circ\text{C}$, $Re = 300$, $\lambda_i = 1.0D$ 에서 δ_i 를 $0.2D$, $0.3D$, $0.5D$ 즉, 협착부 높이 $0.5D - \delta_i$ 를 달리한 경우에 대한 결빙층의 모양을 각각 Fig. 3(a)에 나타내었다. 그림에서 화살표의 위치는 협착부의 중심위치를 나타내며, 여기서는 $x_s = 35D$ (즉, $(x_s/D)/(RePr) = 0.0095$)이다. 먼저, 협착부 위가 없는 즉, 직관의 경우($\delta_i = 0.5D$)를 살펴보면, 축방향으로 갈수록 결빙층의 두께가 단조적으로 증가하고 있으며, 전반적으로 관입구에서 증가의 폭이 빠르다가 입구에서 멀어질수록 점차 증가폭이 둔화되는 전형적인 관내 결빙현상을 보이고 있다. 이는 잘 알려진 바와 같이 관입구로 유입되는 물의 온도가 후미로 갈수록 점차 낮아지는 데서 비롯된 것이다. 한편, 협착관의 경우($\delta_i = 0.2D, 0.3D$)에 협착부 이전에서는 직관의 경우와 거의 일치되는 결빙층 두께의 변화를 보이다가, 협착부 근처에서 직관의 경우와 상당히 다른 양상을 보이고 있다. 협착부 결빙층의 변화를 보다 명확히 보기위해 Fig.3(b)에 확대된 결빙층의 형상을 협착관과 함께 나타내었다. 그림에서 원형심볼이 부착된 선은 관벽을 나타내며, 이후의 표기에서도 동일하다. 결빙층이 협착부로 근접하면서 다소 얇아졌다가 높은 협착부로 인해 높아지고 협착부위를 지난 직후에는 급격히 얇아지는 현상을 보이고 있으며, 협착중심부 직후에서는 결빙층에 갑작스런 계단형상이 나타나고 있다. 이러한 경향이 협착부의 높이가 클수록



(a) overall shapes of ice layer

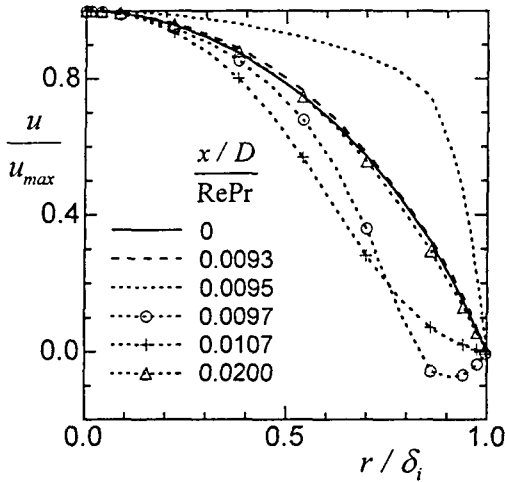


(b) enlarged stenosis

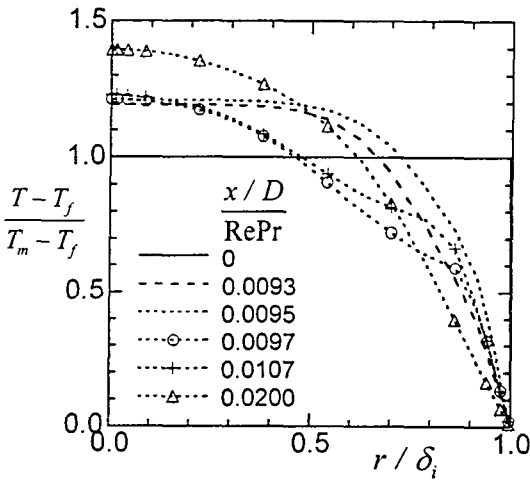
Fig.3 The frozen layers of ice in a stenotic tube with various heights of stenosis at $T_w = -1^\circ\text{C}$, $T_i = 5^\circ\text{C}$, $Re = 300$ and $\lambda_i = 1.0D$

보다 선명하게 나타나고 있음을 두 경우 즉, $\delta_i = 0.2D, 0.3D$ 의 경우를 비교하여 봄으로써 알 수 있다. 반면, 결빙층이 협착부를 지나 관의 후미로 가면서 직관의 경우로 점차 근접해 가고 있다. 협착관의 이러한 현상이 관내에 형성되고 있는 속도 및 온도분포와 밀접한 관련이 있음이 자명하며, 이들을 단계적으로 살펴보도록 하자.

Fig.4는 결빙층이 형성된 관내를 흐르는 물의 속도와 온도분포의 위치에 따른 변화과정을 주로 협착부 전후로 하여 $\delta_i = 0.2D, 0.3D$ 인 경우에 대해 Fig.3에 나타내었다. 그림에서 협착부의 위치는 $(x_s/D)/(RePr) = 0.0095$ 이며, 실선은 관입구에서 속도 및 온도분포를 나타낸 것으로 속도의 경우 완전히 발달되어 유입된다. 그리고, 점선은 협착 중심부에서의 속도 및 온도분포이며, 심볼이 부착된 선은 협착부 이후에 대한 것이다. 속도분포를 나타내고 있는 Fig.4(a)를 보면, 협착부 이전에서는 완전히 발달된 전형적인 포물선 형태를 유지하고 있으며, 이로부터 직관의 경우에 관의 전범위에 걸쳐 속도가 완전히 발달된 형태를 유지한다는 점으로



(a) axial velocity



(b) temperature

Fig.4 Axial velocity and temperature profiles within the circular tube at $T_w = -1^\circ\text{C}$, $T_i = 5^\circ\text{C}$, $\text{Re} = 300$, $\lambda_r = 1.0D$ and $\delta_s = 0.3D$

볼 때 Fig.3에서 언급하고 있는 협착부 이전의 결빙층이 직관의 경우와 일치한다는 사실을 확인할 수 있는 것이다. 그러나, 협착부 중심을 지나면서 결빙층($r = \delta_i$) 근처에서 급격한 속도변화가 이루어지고 있으며, 중심부를 지난 직후에는 오히려 결빙층 근처에서 역류현상이 나타나고 있다. 이는 협착부에서 갑작스런 관의 수축 및 확장이 이루어지기 때문이다. 이때의 온도분포를 Fig.4(b)에서 보면

결빙층근처로 밀착하는 현상을 나타내고 있다. 이는 물로부터 결빙층으로의 급격한 열전달을 의미하며, 이러한 사실을 본 연구를 통해 확인하였고, 역시 Fig.3에서 언급한 협착부 직후 결빙층이 불안정한 계단형상을 보이고 다소 얇아지는 이유이기도 하다. 후미로 갈수록 이러한 역류현상이 점차 사라지면서 다시 완전히 발달된 속도분포로 복원되고 있으며, 속도분포의 변화와 더불어 온도분포의 변화도 발달된 형태로 진행되고 있음을 보이고 있다. 위에서 언급한 협착부로 인한 속도 및 온도의 분포 변화가 협착부의 높이를 증가한 $\delta_s = 0.2D$ 의 경우에 더욱 뚜렷하게 나타날 것으로 예상되며, 이를 확인하기 위해 협착부 직전/후의 속도분포를 대표적으로 $\delta_s = 0.2D$ 와 $0.3D$ 의 경우에 대해 비교하여 Fig.5에 나타내었다. 그림에서 심볼이 부착된 선은 $\delta_s = 0.2D$ 의 경우를 나타낸다. 협착부의 높이가 상대적으로 높은 $\delta_s = 0.2D$ 의 경우에서 협착부 전후의 속도변화 경향이 더욱 뚜렷하게 나타나고 있으며, 특히 협착부 직후의 속도 역류현상이 상대적으로 클 뿐만 아니라 다소 멀리까지 이루어지고 있다. 이는 Fig.3의 $\delta_s = 0.2D$ 에서 협착부 후미의 결빙층 두께가 상대적으로 다소 멀리까지 얇게 이루어지게 되는 이유이기도 하다. 한편, 협착관내의 결빙문제에서 관내의 물의 유동을 고려할 때 협착부위에서의 결빙층 두께가 중요한 요소가 될 수 있다. 따라서, 이를 알아보기 위해 협착부의 높이에 따른 협착부 중심에서의 결빙층의 두께변화를 Fig.6에 나타내었다. 그림에서 협착부의 높이($0.5D - \delta_s$)가 증가할수록 이 곳의 결빙층 두께가 단조적으로 감소하고 있다. 이러한 현상은 Fig.5에서 이미 언급한 바와 같이 협착부의 높이가 클수록 이 곳의 결빙면에서 속도구배가 반경방향으로 급하게 이루어지고, 온도구배 역시 증가하여 결국 열전달량을 증가시킴으로써 결빙층의 발달이 억제되기 때문이다.

협착부 길이의 변화가 결빙층의 두께에 미치는 영향을 알아보기 위해, $\delta_s = 0.3D$ 인 경우에서 λ_r 를 $0.5D$, $1.0D$, $1.5D$ 로 변화시켰을 때 결빙층의 변화를 Fig.7(a)에 나타내었다. 먼저, 협착부 근처를 살펴보면, 길이가 줄어들수록 협착부 직전/후에서의 결빙층 두께의 감소가 뚜렷하게 나타나고 있음

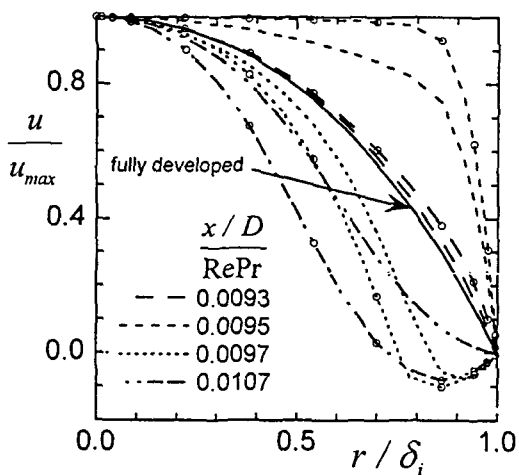


Fig.5 Comparison of axial velocity distribution of $\delta_s=0.2D$ with that of $\delta_s=0.3D$ near the stenosis within the circular tube at $T_w = -1^\circ\text{C}$, $T_i=5^\circ\text{C}$, $\text{Re}=300$ and $\lambda_s=1.0D$

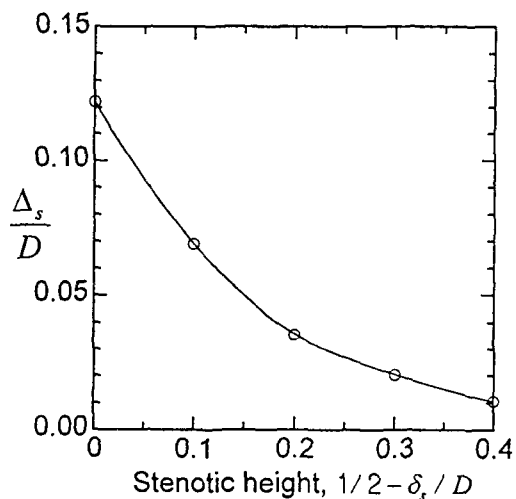
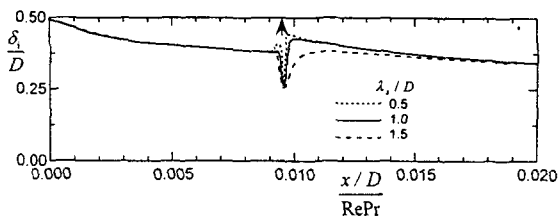
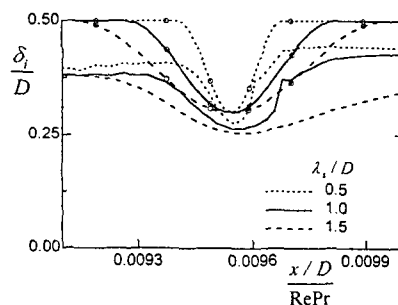


Fig.6 Variation of the ice layer thickness at the center of stenosis with several heights of stenosis for $T_w = -1^\circ\text{C}$, $T_i=5^\circ\text{C}$, $\text{Re}=300$ and $\lambda_s=1.0D$

며, 협착부위를 확대한 Fig.7(b)에서 이를 확인할 수 있다. 이는 협착부의 길이가 줄어들면서 관의 갑작스런 수축 및 확장이 심화되어, 협착부 직후의 결빙층의 계단형상이 더욱 뚜렷하게 나타나며, 이는 Fig.4에서 언급한 결빙층면에서의 역류속도 및



(a) overall shapes of ice layer



(b) enlarged stenosis

Fig.7 The frozen layers of ice in a stenotic tube with various base lengths of stenosis at $T_w = -1^\circ\text{C}$, $T_i=5^\circ\text{C}$, $\text{Re}=300$ and $\delta_s=0.3D$

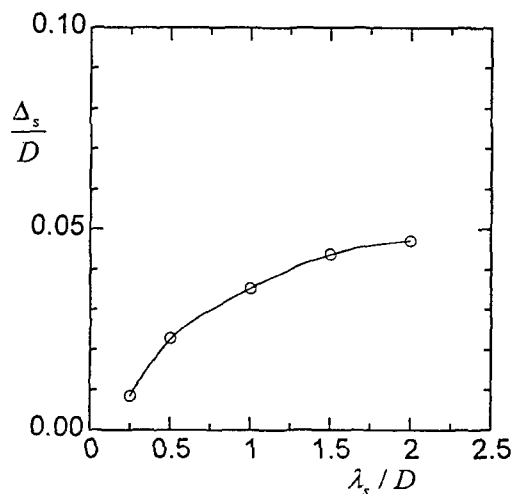


Fig.8 Variation of the ice layer thickness at the center of stenosis with various base lengths of stenosis for $T_w = -1^\circ\text{C}$, $T_i=5^\circ\text{C}$, $\text{Re}=300$ and $\delta_s=0.3D$

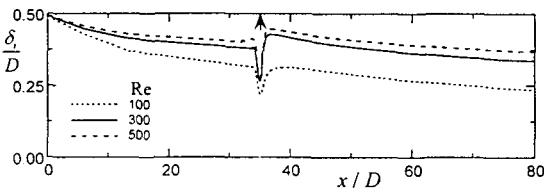
온도구배가 증가하여 결빙층의 성장을 더욱 억제하기 때문임을 알 수 있다. 이것은 협착부 직전/후 결빙층에 협착부의 길이가 중요한 요소로 작용함을 의미한다. 그러나, 협착부의 길이가 줄어 덜더라도 관의 후미로 갈수록 결빙층의 두께가 빠르게 증가하여 서로가 거의 일치하는 양상을 보이고 있다. 한편, 협착부의 길이가 협착부 중심에서의 결빙층 두께에 미치는 정도를 알아보기 위해 이를 Fig.8에 나타내었다. 협착부의 길이가 줄어들수록 결빙층의 두께가 단조적으로 감소하고 있다. 그러나, 감소경향은 협착부의 높이를 증가시켰을 때와는 다른 위로 볼록한 형태를 보인다.

3.2 Reynolds 수 및 벽면/유입 온도의 영향

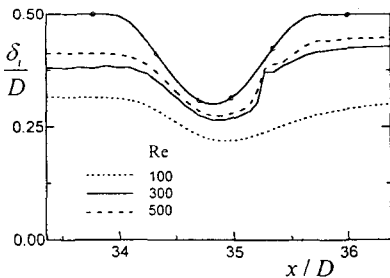
협착관내 유속의 강도가 결빙층의 두께변화에 미치는 영향을 알아보기 위해 $T_w = -1^\circ\text{C}$, $T_i = 5^\circ\text{C}$, $\delta_s = 0.3D$ 에서 $Re = 100, 300, 500$ 의 경우에 대한 결빙층의 두께변화를 Fig.9(a)에 비교하여 나타내었다. Re 수가 낮을수록 전반적으로 결빙층 두께가 증가하는 양상을 보이고 있다. 협착부를 확대하여

나타낸 Fig.9(b)에서도 역시 이를 확인할 수 있으며, Re 수가 낮을수록 점차 협착부 직후의 결빙층 계단형상이 점차 사라지고 있다. 이는 이전에 언급하였듯이 유속이 낮을수록 결빙층면에서의 역류속도가 점차 사라지고 온도구배가 낮아져 이 곳으로의 열전달량이 줄어드는 데서 비롯된 것이다. 특히 유속의 강도가 낮은 $Re = 100$ 의 경우에는 결빙층의 두께가 협착부를 제외하고는 거의 직관의 경우와 비슷한 단조적 증가를 보이고 있다. Re 수에 따른 협착부 중심에서의 결빙층 두께 변화를 Fig.10을 통해 살펴보면 다른 곳에서의 비슷한 두께변화를 보이고 있으며 즉, Re 수가 증가할수록 아래로 볼록한 단조적 감소를 하고 있다.

한편, Fig.11은 $T_i = 5^\circ\text{C}$, $\delta_s = 0.3D$ 에서 $Re = 300$ 인 경우에 관의 벽면온도를 $T_w = -4^\circ\text{C}$, -2°C , -1°C 로 높였을 때 결빙층의 두께변화를 나타낸 것이다. Fig.11(a)를 보면, 벽면온도를 증가시키면 따라 결빙층의 두께가 전반적으로 비교적 큰 폭으로 증가하고 있으나, 협착부에서는 상대적 결빙층 두께 증가폭이 적음을 Fig.11(b)에서 알 수 있다. 이는 관내의 결빙과정에서 관벽면의 온도가 미치는 정도가 협착부위를 제외하고는 전반적으로 큼을 의미한다. 그림에서 $T_w = -4^\circ\text{C}$ 인 경우에 결



(a) overall shapes of ice layer



(b) enlarged stenosis

Fig.9 The frozen layers of ice in a stenotic tube with several Reynolds numbers at $T_w = -1^\circ\text{C}$, $T_i = 5^\circ\text{C}$, $\lambda_s = 1.0D$ and $\delta_s = 0.3D$

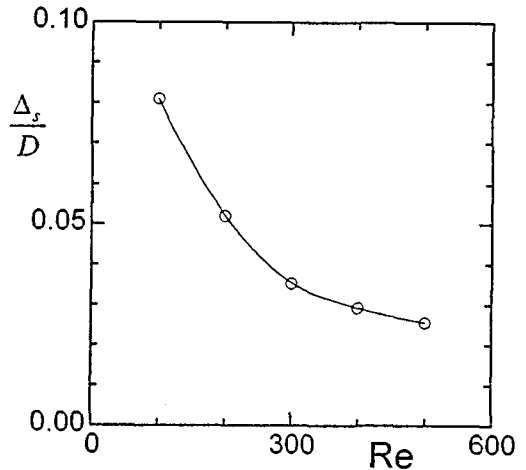
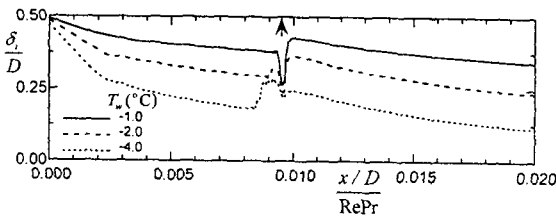


Fig.10 Variation of the ice layer thickness at the center of stenosis with various Reynolds numbers for $T_w = -1^\circ\text{C}$, $T_i = 5^\circ\text{C}$, $\lambda_s = 1.0D$ and $\delta_s = 0.3D$

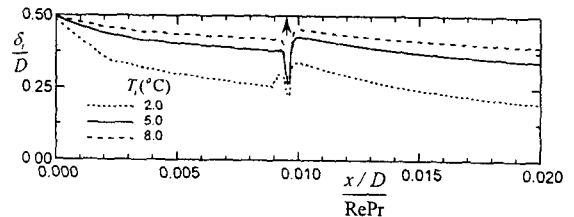
빙층의 증가가 급격하게 이루어져 최소 유로 반경이 협착부 이전의 위치에서 두께가 중요한 요소가 될 수는 없을 것이다. 그리고, 결빙층이 두껍게 형성될수록 결빙층의 두께변화에서 협착부 직전에 결빙층이 얇아지는 현상이 두드러지게 나타나고 있다. 이는 급속한 결빙층의 발달로 인해 줄어들던 유로가 관의 협착부에서 결빙층이 얇아지면서 갑자기 확장하게 되고, 동시에 협착부 자체의 갑작스런 유로수축이 이루어지면서 협착부 직전에 역류현상이 발생하여 비롯되었으며, 협착부 이전의 결빙층이 두껍게 형성될수록 이러한 현상이 더욱 뚜렷하게 나타나는 것이다. $T_w = -4^\circ\text{C}$ 인 경우에는 협착부 이전에 결빙층의 발달이 상당히 커져 오히려 협착부 직전에 유로가 확장되면서 역류가 발생하여 이러한 현상이 증폭되었음을 확인하였다. 지금까지의 협착부 전후로 나타나는 결빙층 두께의 변화에 대한 결과로 보아, 관내의 결빙층 두께를 줄이기 위해 오히려 관을 적절히 협착시키는 것이 유용할

수 있다는 부가적인 결과를 얻을 수 있다. 관로 입구부근에서 결빙층 두께의 증가율을 보면, T_w 가 낮을수록 현저히 다르게 나타나는 경향이 있다. 즉, 결빙층이 입구 근처에서 증가율이 높다가 이를 지나면서 증가율이 다소 감소한다. 이는 축방향으로 결빙층두께가 빠르게 증가할수록 유로의 수축이 급격하게 이루어지게 되고, 이곳의 속도분포가 관입구와는 다른 즉, 완전히 발달된 포물선 형태를 벗어나면서 이루어지는 현상임을 확인하였다.

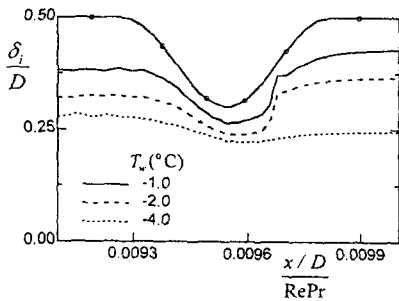
한편 Fig.12에서는 관입구에서 물의 유입온도가 결빙층의 두께에 미치는 영향을 알아보기 위해 $T_w = -1^\circ\text{C}$, $\delta_s = 0.3D$, $Re = 300$ 에서 $T_i = 2^\circ\text{C}$, 5°C , 8°C 로 달리한 경우의 결빙층의 변화를 나타내었다. 유입온도를 높게 할수록 결빙층의 두께가 얇게 형성되었으며, 이는 높은 온도의 물이 유입되면서 결빙층의 형성을 억제하는 데서 비롯된 것으로 매우 자명한 결과이다. 그러나, Fig.11과 Fig.12를 면밀히 비교하여 보면 유입온도를 달리한 정도에 비해



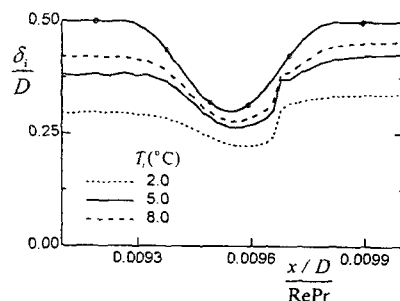
(a) overall shapes of ice layer



(a) overall shapes of ice layer



(b) enlarged stenosis



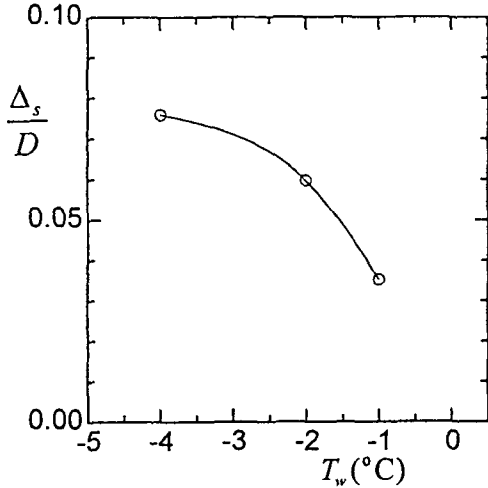
(b) enlarged stenosis

Fig.11 The frozen layers of ice in a stenotic tube with several wall temperatures of tube at $T_i = 5^\circ\text{C}$, $\lambda_s = 1.0D$, $Re = 300$ and $\delta_s = 0.3D$

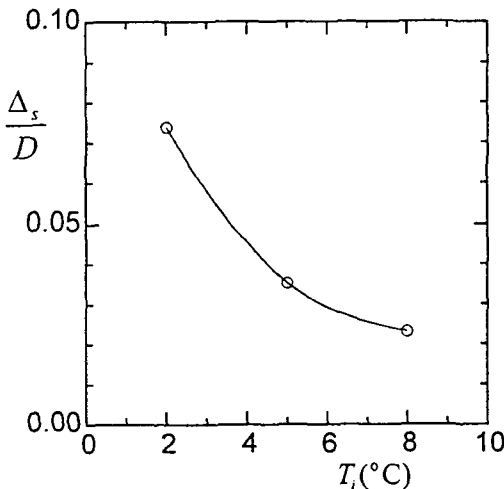
Fig.12 The frozen layers of ice in a stenotic tube with several inlet temperatures of water at $T_w = -1^\circ\text{C}$, $\lambda_s = 1.0D$, $Re = 300$ and $\delta_s = 0.3D$

벽면온도를 달리한 정도가 결빙층의 전체적인 두께 변화에 더욱 크게 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 이는 축방향으로 갈수록 벽면의 온도는 일정하게 유지되는 반면 유입온도는 물 자체의 열손실로 인해 떨어져 영향이 줄어들기 때문이다.

Fig.13은 관벽면과 유입 물의 온도를 달리하였을 때의 협착부 중심에서의 결빙층 두께를 나타낸



(a) with various wall temperatures of tube



(b) with various inlet temperatures of water for $\lambda_s=1.0D$ and $\delta_s=0.3D$

Fig.13 Variation of the ice layer thickness at the center of stenosis

것이다. 관벽면의 온도와 유입온도가 증가할수록 관의 다른 부위와 마찬가지로 협착부 중심의 결빙 두께가 감소하였으나, 감소경향은 서로 다르게 나타나고 있다. 즉, 벽면온도가 높아질수록 위로 볼록한 단조감소를 하는 반면, 유입온도가 증가하였을 때는 아래로 볼록한 단조증가를 보이고 있다.

협착관내의 물의 결빙현상을 정상상태 층류운동인 경우에 대해 수치해석하였다. 해석방법상에서 완전한 형태의 지배방정식이 적용되었으며, 상경계면에서 에너지균형이 이루어질 수 있도록 경계면의 위치를 결정하였다. 연구결과에서 협착부의 높이/길이의 변화와 유동강도의 변화, 관벽면/유입온도가 결빙층에 미치는 영향을 서로 비교하여 살펴본다. 결빙층의 두께가 직관의 경우에는 관의 길이 방향으로 단조적으로 증가하고 있으나, 협착관의 경우에는 협착부의 높이가 증가할수록 후미의 넓은 영역에 걸쳐 결빙층이 얇아졌으며, 협착부의 길이가 좁을수록 협착부 직전/후의 결빙층이 얇아지는 경향이 뚜렷하였다. 이는 협착부 직전에 나타나는 물의 역류 영향임을 속도 및 온도분포를 통해 확인하였다. 동시에 협착부의 높이가 클수록, 길이가 좁을수록 협착부 중심에서의 결빙층 두께가 낮아졌으며, 감소경향은 서로 다르게 나타났다. 한편, Re 수가 증가할수록 결빙층의 전체적 두께가 감소하였으며, 협착부 중심에서도 단조적으로 감소하였다. 관의 벽면온도와 유입온도가 낮아질수록 결빙층이 전체적으로 두껍게 형성되었으며, 협착부 중심의 결빙층 두께 역시 증가하였으나, 증가하는 경향이 서로 다르게 나타났다. 관 입구의 유입온도에 비해 관벽면의 온도변화가 결빙층에 미치는 영향이 상대적으로 크게 나타났으며, 이는 물의 유입온도가 축방향으로 진행하면서 감소하는 데 기인한 것이다. 결빙층이 두껍게 형성된 경우에는 협착부 직전에 결빙층 두께가 급격히 감소하는 현상을 보였으며, 이는 협착부 이전의 결빙층 발달로 인해 점차적으로 좁아지는 유로가 협착부 직전에 갑자기 확대되고, 연이어 협착부에서의 갑작스러운 유로변화가 이루어지면서 협착부 직전에 역류가 발생하여 비롯된 것임을 확인하였다. 또한, 결빙층이 두껍게 형성된 경우에는 관의 입구지역에서 축방향으로 결빙층의 증가가 빠르게 이루어지다가 다시 증가율이

감소하는 경향을 보였으며, 이는 관입구에서 완전히 발달된 포물선 속도분포가 축방향 결빙층 증가로 인한 빠른 유로수축으로 변형되면서 비롯된 것임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 교육부 기계공학연구학술조성비(ME95-F-08)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Zerkle, R. D. and Sunderland, J. E., 1968, "The effect of liquid solidification in a tube upon laminar-flow heat transfer and pressure drop", *J. Heat Transfer*, Trans. ASME, pp. 183~190.
- Lee, D. G. and Zerkle, R. D., 1969, "The effect of liquid solidification in a parallel plate channel upon laminar-flow heat transfer and pressure drop", *J. Heat Transfer*, Trans. ASME, pp. 583~585.
- Kikuchi, Y., Shigemasa, Y., Oe, A. and Ogata, T., 1986, "Steady-state freezing of liquids in laminar flow between two parallel plates", *J. Nucl. Sci. Technol.*, Vol. 23, pp. 979~991.
- Suh, J.-S., Ro, S. T. and Kim, M.-G., 1996, "Analysis of ice-formation phenomena in a stenotic tube, *Proci. ISTECR-5*, Vol. 1, pp. 264~269.
- Cho, Chul and Ozisik, M. N., 1979, "Transient freezing of liquids in turbulent flow inside tubes", *J. Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 363~468.
- Gilpin, R. R., 1981, "Ice formation in a pipe containing flow in the transition and turbulent regimes", *J. Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 363~368.
- Seki, N., Fukusako, S. and Younan, G. W., 1984, "Ice-formation phenomena for water flow between two cooled parallel plates", *J. Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 498~505.
- Hirata, T. and Matsuzawa, H., 1987, "A study of ice-formation phenomena on freezing of flowing water in a pipe", *J. Heat Transfer*, Vol. 109, pp. 965~970.
- Weigand, B. and Beer, H., 1993, "Ice-formation phenomena for water flow inside a cooled parallel plate channel: an experimental and theoretical investigation of wavy ice layers", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 685~693.
- Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington, DC.
- 서정세, 노승탁, 1995, "수평원관내 얼음의 점축응해과정", *대한기계학회논문집*, 제19권, 제10호, pp. 2595~2606.
- Karki, K. C. and Patankar, S. V., 1988, "Calculation procedure for viscous incompressible flows in complex geometries", *Numer. Heat Transfer*, Vol. 4, pp. 295~307.