

# 곡유로내 물의 층류유동에서 곡부가 결빙에 미치는 영향

서 정 세\*  
(2000년 4월 27일 접수)

## Effects of the Curvature on the Freezing Phenomena of a Laminar Water Flow in a Curved Channel

Jeong-Se Suh

**Key Words** : Freezing(결빙), Curved Channel(곡유로), Channel Flow(유로), Interface(경계면), Laminar Flow(층류)

### Abstract

A numerical study is made on the ice-formation for a laminar water flow in a curved channel. When the water flows through the curved channel with the walls specified below the freezing temperature, the ice layer has been formed on the curved surface, different from that of a straight channel. The fluctuation of ice layer has been predicted, considering the variation of velocity and temperature near the curved portion of channel. The study also takes into account the interaction existing between the laminar flow and the curved channel. In the solution strategy, the present study is substantially different from the existing works in that the complete set of governing equations in both the solid and liquid regions are resolved. The results from this study have been mainly presented, focusing on the variation of ice layer close to the curved portion. Numerical results have been obtained parametrically by varying the curved angle and the radius of curvature of channel, in addition to the variation of Reynolds numbers and wall temperatures of channel. The results show that the curved shape of channel has the great effect on the thickness of the solidification layer. The wave of ice layer thickness appears in the vicinity of curved portion. This behavior of ice layer has been amplified as is the increasing of curved angle and the radius of curvature of channel. In addition, the ice layer becomes thin as Reynolds number is increasing. And also, as the wall temperature of channel increases, the width of channel becomes to be shrunk due to the growth of ice layers in the upper and lower wall of channel.

### 기호설명

$A$  : 유로의 단면적 [ $m^2$ ]  
 $c$  : 비열 [ $J/kg^\circ C$ ]  
 $H$  : 두평판 사이의 반거리 [ $m$ ]

$k$  : 열전도율 [ $W/m^\circ C$ ]  
 $L$  : 유로의 길이 [ $m$ ]  
 $p$  : 압력 [ $Pa$ ]  
 $Pr$  : Prandtl 수,  $\nu/\alpha_L$   
 $R$  : 곡률 반경 [ $m$ ]  
 $Re$  : Reynolds 수,  $u_{m,i}W/\nu$   
 $T_\infty$  : 물의 입구온도 [ $^\circ C$ ]  
 $T_f$  : 결빙온도 [ $^\circ C$ ]  
 $T_{w,U}, T_{w,L}$  : 상/하벽면의 온도 [ $^\circ C$ ]

\* 회원, 경상대학교 수송기계공학부,  
항공기부품기술연구센터  
E-mail : jssuh@nongae.gsnu.ac.kr  
TEL : (055)751-5312 FAX : (055)757-5622

- $u, v$  :  $x, y$  방향의 속도성분 [m/s]
- $u_{m,i}$  : 유로입구의 평균유속 [m/s]
- $W$  : 유로의 폭 [m]
- $x, y$  : Cartesian 좌표계 [m]

그리스문자

- $\alpha$  : 열확산 계수 [ $m^2/s$ ]
- $\delta_U, \delta_L$  : 하부벽면으로부터 법선방향으로 상/하 결빙층까지의 거리 [m]
- $\Theta$  : 무차원 온도
- $\theta$  : 곡부각(curved angle)
- $\nu$  : 동점성 계수 [ $m^2/s$ ]
- $\xi, \eta$  : 변환좌표
- $\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]

하첨자

- f : 용융점
- i : 입구
- L : 액상
- S : 고상

1. 서 론

상변화 현상은 냉동시스템, 구조공정, 지질학, 핵 기술 등의 다양한 분야에서 나타나는 매우 중요한 것으로서, 이에 대한 연구가 상당히 많이 이루어져 오고 있다. 특히, 유로내로 흐르는 액체의 결빙은 파이프내 물의 결빙, 화학공정라인에서의 침결, 열교환기내 액체금속의 응고 등 공학의 여러분야에서 쉽게 접할 수 있는 현상이며, 핵반응기내의 안전과 관련하여 상당한 관심을 끌고 있다.

지금까지 유로내 결빙문제에 대한 연구자료를 살펴보면 주로 직유로 또는 관에 대해 대부분으로 이루어져 왔다. Zerkle과 Sunderland<sup>(1)</sup>이 파이프내 층류유동시 정상상태 결빙을 최초로 보고한 이후로 파이프와 평판 사이의 결빙현상에 대해 이론적 및 실험적으로 상당히 많이 이루어져 오고 있다. 유로내의 결빙에 대한 지금까지의 연구들을 살펴보면, 크게 유동이 층류인 경우<sup>(1-3)</sup>와 난류인 경우<sup>(4-8)</sup>로 분류할 수 있다. 유로내의 흐름이 층류일 때에는 벽면에 결빙층이 비교적 두껍게

형성되어 유동에 상당한 영향을 주며, 유동이 난류일 때는 빠른 흐름으로 인해 결빙층이 상당히 얇아져서 유동에 큰 영향을 주지 않는다.<sup>(7)</sup> 그러나, 천이영역에서 결빙층이 다소 두꺼워졌을 때는 난류유동과 결빙층이 상호작용을 일으켜 상경계면이 불안정화되면서 입구부근에서 특히 파동형태가 크게 나타난다.<sup>(5-8)</sup> 유로내의 결빙층이 두꺼워질수록 유동에 상당한 영향을 미치는 것은 자명하며, 따라서 난류에 비해 결빙층이 두꺼운 층류유동의 경우를 위주로 많은 연구가 이루어져 왔다. 이러한 연구들이 모두 수평 또는 수직으로 놓인 직선형태의 유로내의 경우에 국한된 것으로서, 공학적으로 유로내의 결빙문제가 유로의 휘어진 부분에서 결정적으로 발생하기 쉽다는 관점에서 다소의 차이가 있을 수 있다. 즉 실제적인 상황에서는 유로가 다른 형태 즉, 휘어진 경우가 많으며, 이러한 경우에는 결빙층의 모양과 두께가 상당히 다르게 형성될 것으로 예상된다. 특히, 곡부가 있는 전후로 유속이 변화되면서 이 부분의 열전달 특성이 달라져, 곡부의 전후 결빙층 두께가 상당히 다르게 형성될 것으로 예상된다. 따라서, 단순한 형태인 직선유로내의 결빙에 대한 문제에서 얻은 결과를 곡부가 있는 상황에 직접적으로 적용하는 데는 다소 무리가 있을 수 있다. 이것이 본 연구를 착수하게 된 기본 동기이다.

본 연구에서는 유로가 곡부를 가졌을 때의 결빙과정을 수치적으로 해석하고자 한다. 유로내의 유동은 정상상태 층류인 경우로 한정하였으며, 해석방법으로 결빙층과 물을 각각 고상영역과 액상영역으로 나누고 결빙면에서 국소적으로 에너지균형이 이루어질 수 있도록 상경계면을 이동하여 결정하였다. 본 연구에서는 주로 유로가 곡부를 가졌을 때 곡부가 결빙층 두께와 형태 변화 등에 미치는 영향을 알아보고자 한다. 이를 위해 곡부각(curved angle)과 곡률의 변화, 유동의 세기를 달리한 각각의 경우에 대해 결빙층의 변화를 알아보고자 하며, 상/하벽면의 온도를 달리한 경우의 결빙층 두께 변화의 정도에 관해 부가적으로 결과를 제시하고자 한다.

2. 해 석

2.1 문제설정 및 기본방정식

폭이  $W$ 인 유로내로 물이 흐르면서 유로 벽에

얼음이 형성되는 현상을 Fig. 1에 개략적으로 도시하였다. 유로의 상/하벽면이 용해온도  $T_f$ 보다 낮은 균일한 온도  $T_w$  ( $T_w < T_f$ )로 유지되고 있는 유로내로 균일한 온도  $T_\infty$  ( $T_\infty > T_f$ )의 물이 완전히 발달된 평균속도  $u_{m,i}$ 로 유입되고 있다. 유로내를 흐르는 물은 입구 ( $x=0$ )에서부터 용해온도 이하의 벽면을 만나면서 냉각되어 벽면근처에 결빙이 생기기 시작한다. 이러한 현상을 효율적으로 수치해석을 하기 위해 결빙과정을 다음과 같이 가정하였다. (1) 물은 비압축성 뉴우톤 유체이고, 유동은 2차원 층류이며, (2) 정상상태 조건이 모든 지역에서 성립되고, (3) 물과 얼음의 물성치들이 일정하다고 가정한다. 본 연구는 결빙층의 형성 형태를 밝히는 것이 주된 목적이며, 따라서 일반적인 열전달 방식에 따라 고상에서의 전도열전달과 액상에서의 대류열전달을 해석함으로써 보다 실질적인 예측결과를 밝히고자 한다. 본 문제에 대한 일반형 지배방정식을 직교좌표계에 대해 먼저 보존식 형태<sup>(9)</sup>로 나타내면

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

이다. 여기서  $\phi$ 는 일반적인 종속변수이며,  $\Gamma$ 와  $S$ 는  $\phi$ 에 따라 적절히 정의되는 확산계수 및 소

스 항이다. 본 연구모델의 해석상 궁극적인 어려움은 고상과 액상의 영역이 불규칙한 데 있다. 따라서, 이러한 난점을 극복하기 위해 경계고착좌표계

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

를 도입하여 식 (1)을 변환하면

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \rho U \phi - \frac{\alpha_\xi \Gamma}{h_\xi} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \rho V \phi - \frac{\alpha_\eta \Gamma}{h_\eta} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) \\ & = JS(\xi, \eta) - \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\beta_\xi \Gamma}{h_\eta} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) - \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\beta_\eta \Gamma}{h_\xi} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

으로 된다. 식 (3)에 나타나는 다른 계수들은 참고문헌(10)에 자세히 정리되어 있으며, 여기서 지면상 생략하기로 한다.

Fig. 1에서와 같은 기하학적 형상을 효율적으로 다루기 위해 다음의 식을 이용해 좌표를 변환하였다.

$$\begin{aligned} x &= L\xi & (0 \leq \xi \leq 1) \\ y &= \begin{cases} \delta_L \eta & (0 \leq \eta < 1) \\ \delta_L + (\delta_U - \delta_L)(\eta - 1) & (1 \leq \eta < 2) \\ \delta_U + (W - \delta_U)(\eta - 2) & (2 \leq \eta \leq 3) \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

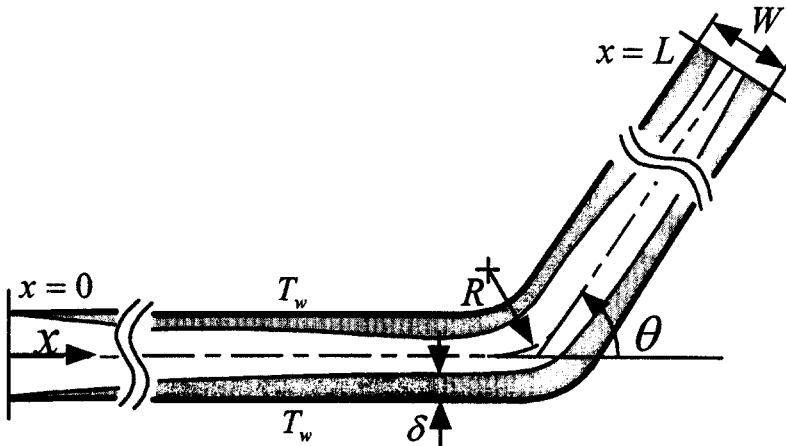


Fig. 1 Schematic diagram of the physical model in which the ice layers are formed, when water flows laminarily into the curved channel, at the walls with temperature maintained below freezing point

이며, 이때 하부와 상부의 결빙층 상경계면은 변 환된 좌표계에서 각각  $\eta=1$ 과  $\eta=2$ 로 각각 고 정된다.

상경계면에서 필요한 조건들은 온도의 연속성, 질량유속과 에너지유속의 보존, 그리고 고상에서 의 접촉조건 등이다. 즉,

$$T_L = T_S = T_f \tag{5}$$

$$(\rho V)_L = (\rho V)_S \tag{6}$$

$$\left( \rho V \phi - \frac{\alpha_r \Gamma}{h_\eta} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right)_L = \left( \rho V \phi - \frac{\alpha_r \Gamma}{h_\eta} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right)_S \tag{7}$$

$$u = v = 0 \tag{8}$$

이다. 여기서 식 (7)의  $\phi$ 는 각상에서의 엔탈피 를 나타낸다. 추가적으로 속도장과 온도장에 대 한 경계조건들은

$$\text{벽면} : u = v = 0, T_S = T_{w,U} (\text{또는 } T_{w,L}) \tag{9}$$

$$\text{대칭축} : \frac{\partial u}{\partial y} = v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \tag{10}$$

로 주어진다.

효율적인 해석을 수행하기 위해 도입한 무차원 수의 식들은

$$\begin{aligned} x^* &= \frac{x}{W}, y^* = \frac{y}{W}, \\ u^* &= \frac{u}{u_{m,i}}, v^* = \frac{v}{u_{m,i}}, p^* = \frac{p}{\rho_L u_{m,i}}, \\ c_r &= \frac{c_S}{c_L}, k_r = \frac{k_S}{k_L}, \\ \Theta_S &= \frac{c_r(T_S - T_f)}{T_\infty - T_f}, \Theta_L = \frac{T_L - T_f}{T_\infty - T_f}, \\ \Theta_m &= \frac{\int_A u \Theta dA}{\int_A u dA}, Re = \frac{u_{m,i} W}{\nu} \end{aligned} \tag{11}$$

이며, 이들 무차원수들을 이용하여 지배방정식 (1)을 각 영역에 대해 다시 표현하면 Table 1에 정리된 바와 같다.

**Table 1** Dimensionless variables in the governing equation for solid and liquid regions

	$\phi^*$	$\Gamma^*$	$S^*$
Solid	$\theta_S$	$(k_r/c_r)(Re \cdot Pr)^{-1}$	0
Liquid	1	0	0
	$u^*$	$(Re \cdot Pr)^{-1}$	$-\partial p^*/\partial x^*$
	$v^*$	$(Re \cdot Pr)^{-1}$	$-\partial p^*/\partial y^*$
	$\theta_L$	1	0

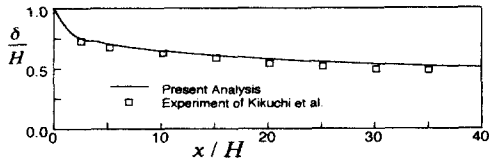
### 2.2 해석 방법

유로의 길이는 곡부에 영향을 미치지 않도록 충분히 길게  $L=70W$ 로 설정하였으며, 곡부 결빙층에 대한 계산결과에 전혀 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 유로와 결빙층을 형성하고 있는 고상과 액상영역에 대해 계산격자계는 유로의 길이방향  $\xi$ 에 대해 81개, 유로길이의 법선방향  $\eta$ 에 대해 25개의 격자점들로 각각 불균일하게 구성되어 있으며, 각 격자점들은 식 (4)를 통해 실제영역에 일대일로 사상된다.

이때 속도 및 온도의 변화가 심한 상경계면과 용기벽면 근처에는 격자점들을 좀더 조밀하게 배치한다. 속도장에서 곡률항은 국소고정좌표계<sup>(11)</sup>를 도입하여 처리하였으며, 속도와 압력은 SIMPLER 알고리즘 방식<sup>(9)</sup>으로 서로 보정되었다. 계산과정에서 고상과 액상이 접하는 상경계면에서의 에너지 균형이 국소적으로 최대 0.001%내에서 만족되었을 때를 수렴이 된 것으로 판정하였다.

### 3. 계산결과 및 토의

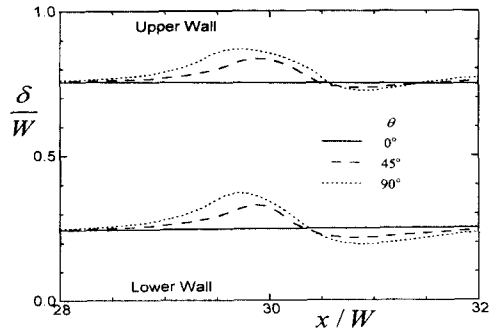
본 연구에서는 먼저, 동일조건하에서 기존의 연구결과와 본 연구의 해석결과를 비교함으로써 여기서 채택하고있는 수치적 모델에 대해 검증을 하고자 하며, 물의 온도가  $T_w=5^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유입되는 경우에 대한 층류유동에서의 해석결과를 제시하고자 한다. 본 연구에서는 유로의 곡률이 유로 양쪽의 벽면에 형성되는 결빙층의 두께에 미치는 영향을 주로 알아보하고자 하며, 이에 따르는 유로내 물의 속도분포 및 온도장의 발달과정을 부가적으로 살펴보고자 한다.



**Fig. 2** The ice layer shape for freezing of liquid in steady-state laminar flow between two parallel plates in  $T_w=-1.2^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty=2^\circ\text{C}$ ,  $u_{m,i}H/\nu=175$ . Experimental results from Ref. (2) (rectangular) and numerical results from this study (solid lines)

먼저, 실질적인 수치적 검증을 위해서는 같은 대상인 곡률을 갖는 유로에 대한 실험결과와 본 연구의 해석결과를 직접적으로 비교 검토하여야 하나, 많은 자료조사 결과 이들에 대한 실험결과가 아직 보고되지 않은 것으로 파악되었다. 따라서, 유사한 조건을 가지고 있는 평행평판내의 층류유동에서의 결빙에 대해 비교적 자세한 결과를 제시하고 있는 Kikuchi 등<sup>(2)</sup>의 실험결과와 본 연구에서 취한 해석방법에 의한 결과를 비교하여 보고자 한다. Kikuchi 등<sup>(2)</sup>은  $2H$ 간격을 유지하는 두 평행평판사이로 물이 흐르면서 벽면에 결빙이 이루어지는 형태를 여러 벽면온도에 대해 제시하였으며, 대표적으로 벽면온도  $-1.2^\circ\text{C}$ , 유입온도  $2^\circ\text{C}$ ,  $u_{m,i}H/\nu=175$ 인 경우에 대해 본 연구의 해석결과와 비교한 것을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 심볼은 실험결과를, 실선은 해석결과를 각각 나타낸 것이다. 해석결과와 실험결과를 자세히 살펴보면 해석결과가 실험에 비해 다소 얇은 결빙층 두께 변화를 보이고 있으나, 전반적으로 비교적 잘 일치하고 있다. 따라서, 이러한 비교결과의 일치 정도로 보아, 곡률을 갖는 유로내의 결빙에 대해 본 연구의 해석 방법으로 충분히 타당한 해석결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구의 계산결과는 유입되는 물의 온도  $T_\infty=5^\circ\text{C}$ 인 경우에 대해 유로의 중심선을 따라 길이 방향으로  $x=30W$ 에 곡부가 위치한 경우에 대해 주로 제시되었다. 먼저 유로의 곡률효과를 알아보기 위해 곡부각(curved angle)과 곡률반경을 변화시킨 경우를 제시하고, 이에 따르는 대표적인 속도 및 온도분포의 변화를 제시하고자 한다. 또

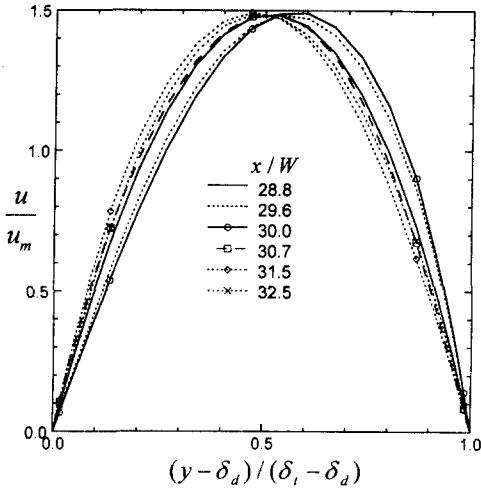


**Fig. 3** The ice layer shapes near a curved portion for several curved angles of channel in  $T_w,T_\infty=-2^\circ\text{C}$ ,  $\text{Re}=300$ , and  $R=0.1W$

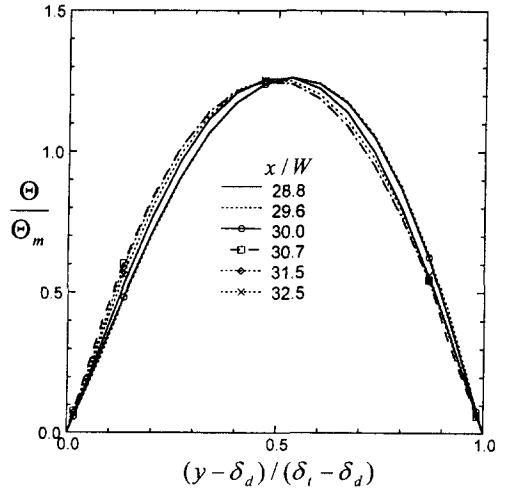
한, 유동의 세기가 곡부의 결빙에 미치는 영향을 알아보기 위해  $\text{Re}=100, 300, 500$ 로 달린 경우를 제시하고자 하며, 부가적으로 곡유로의 양쪽 벽면온도를 달리한 경우에 곡부 주변의 결빙층 두께변화를 제시하고자 한다.

### 3.1 곡부각의 영향

Fig. 3은 유로가 곡부를 가지고 있지 않은 경우와 곡부를 가지고 있을 때 곡부각을 달리한 경우의 길이방향 결빙층의 두께 변화를 곡부 근처를 확대하여 서로 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 직유로를, 점선은 곡유로를 각각 나타내며, 그림의 상부는 윗벽면을 하부는 아랫벽면을 각각 나타낸다. 직유로의 경우에는 길이방향을 따라 임의의 위치에서 결빙층의 두께가 상하부에서 거의 동일하게 변하고 있으며, 길이방향으로 결빙의 두께가 모두 단조적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 곡유로를 갖는 경우들을 보면 곡부가 있는  $x=30W$ 에서 모두 직유로의 경우와 다른 결빙층의 두께변화를 보이고 있으며, 이 부분에서 상부와 하부벽면의 결빙층 변화가 거의 상반되게 나타나고 있다. 즉, 곡부에 이르기 전에는 결빙층의 두께가 상부에서는 점점 얇아지고, 반대로 하부에서는 두꺼워지는 양상을 보이고 있다. 그러나, 곡부를 지나면서 결빙층의 두께변화가 상하부 벽면 모두에서 곡부에 이르기 전과는 상반되는 경향을 보이고 있다. 즉, 결빙층이 상부벽에서는 빠르게 두꺼워지고 있으며, 하부벽에서는 반대로 다시 얇아지고 있다. 좀더 하



**Fig. 4** The distribution of axial velocity of water for selected positions close to the curved portion of channel in  $T_{w,U}=T_{w,L}=-2^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{Re}=300$ , and  $\theta=45^{\circ}$



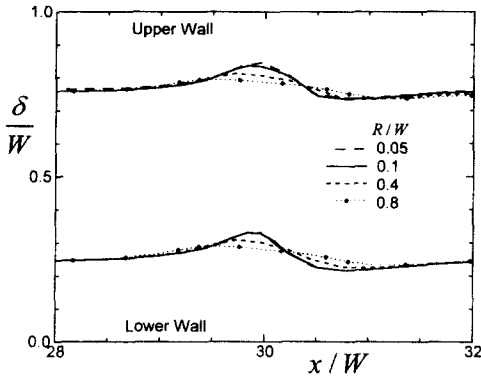
**Fig. 5** The distribution of temperature of water for selected positions close to the curved portion of channel in  $T_{w,U}=T_{w,L}=-2^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{Re}=300$ ,  $\theta=45^{\circ}$

류로 가면서 결빙층이 상부와 하부벽면에서 모두 점점 직유로내의 결빙층 두께로 접근하고 있다. 한편, 곡부각을 달리한 경우를 살펴보면, 곡부각  $\theta$ 를 증가시킬수록 앞에서 언급한 곡부에서의 결빙층의 두께변화 경향이 더욱 뚜렷하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 곡부각이 증가할수록 곡부 전후로 상부벽에서는 결빙층이 더욱 얇아지고, 하부벽에서는 결빙층이 더욱 두터워지고 있다. 결국, 곡유로내 곡부를 전후로 이러한 결빙층의 두께변화는 유로내를 흐르는 물의 속도 및 온도분포의 변화특성으로부터 비롯되었다고 생각되며, 이를 단계적으로 알아보도록 하자.

먼저, 속도분포의 변화를 살펴보면, Fig. 4는 대표적인 경우인  $\theta=45^{\circ}$ ,  $\text{Re}=300$ ,  $T_{w,L}=T_{w,U}=-2^{\circ}\text{C}$ 에 대해 곡부 근처를 따라 몇몇 위치에서 속도 변화를 나타내었다. 그림에서 심불이 미부착된 선은 곡부전의 경우를, 심불이 부착된 선은 곡부를 지난 경우를 나타낸다. 그리고, 그림의 우측은 상부 결빙면을, 좌측은 하부 결빙면을 각각 나타낸다. 전반적으로 완전히 발달된 전형적인 속도분포를 보이고 있다. 그러나, 곡부를 전후하여 최대속도점의 위치가 달라지는 경향을 보이고 있다. 즉, 곡부의 상류에서는 유로중심에서 최대점을 갖는 전형적인 속도분포를 보이다가, 곡부로 접근하면

서 속도 최대점이 상부쪽으로 기울고 있으며, 곡부를 지나 하류로 가면서 속도최대점이 다시 유로 중심부를 지나 급격히 하부 결빙면 쪽으로 이동하고 있다. 이러한 경향은 벽면의 곡유로로 인한 유동의 방향이 바뀌면서 비롯되는 전형적인 속도변화현상이다. 동시에 곡부근처에서의 이러한 속도분포변화와 강하게 연관되어 있고 결빙에 직접적인 영향을 주는 온도분포의 변화에 대해 살펴보도록 하자.

Fig. 5는 곡유로내의 온도분포 변화과정을, 속도분포의 변화를 나타내는 Fig. 4의 경우와 같은  $\theta=45^{\circ}$ ,  $\text{Re}=300$ ,  $T_{w,L}=T_{w,U}=-2^{\circ}\text{C}$ 와 곡부 근처의 몇몇 같은 위치에 대해 나타내었다. 그림에서 역시 심불이 미부착된 선은 곡부전의 경우를, 심불이 부착된 선은 곡부를 지난 경우를 나타낸다. 속도특성에 따른 온도분포를 그림에서 살펴보면, 입구에서 균일한 온도분포가 곡부근처에서는 완전히 발달된 포물선 형태를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 온도분포 역시 속도분포에서와 매우 유사하게 유로의 길이방향을 따라 최고점의 위치변화가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 온도분포의 치우침 변화경향은 상/하부 결빙층 표면 근처에서 온도구배와 직결된다. 따라서, 이것은 결빙층에서의 열유속량에 영향을 주며, 결국 상/하부 결

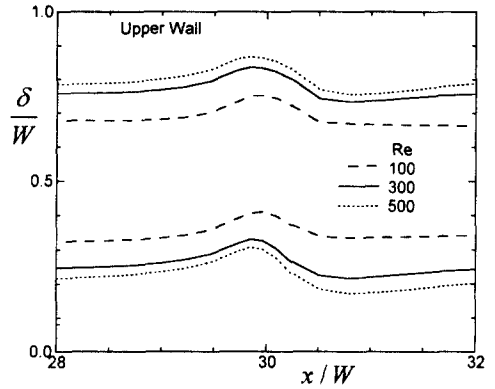


**Fig. 6** The ice layer shapes near a curved portion for several radii of curvature of channel in  $T_{w,U}=T_{w,L}=-2^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{Re}=300$ , and  $\theta=45^{\circ}$

빙층의 두께변화에 직접적인 영향을 준다. 곡부의 상류에서는 온도의 최고점 위치가 중심부 근처에 있으며, 상/하부의 온도구배가 거의 같아서 결빙층의 두께도 비슷한 것을 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 그러나, 곡부근처로 접근하면서 온도의 최고점이 상부벽면으로 치우치는 경향을 보이고 있으며, 이로인해 상부면의 온도구배가 하부면보다 크게 형성되어, 상부면에서의 결빙층 형성이 상대적으로 많이 억제되며, 하부면에서는 결빙층의 증가가 적게 억제된다. 이러한 결빙층의 형태변화를 Fig. 3에서도 역시 확인할 수 있다. 곡부를 지나면서 급격히 최고점의 위치가 다시 중심부로 이동하면서, 근처에서 근소하게 상하로 이동하는 경향을 보이고 있다. 이것으로 인해 역시 곡부를 지나면서 상/하면에서 나타나는 결빙층의 요동하는 변화가 다시 균형되게 발달되어 가는 것으로 나타나고 있다. 결국, 위에서 언급한 분석으로부터 곡부 전후에서의 온도변화와 결빙층의 변화가 서로 일관성 있게 관련되어 나타나고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 곡률, Reynolds 수 및 벽면온도의 영향

곡부에서의 결빙이 곡부각에 따라 다르게 나타나고 있음을 Fig. 3에서 이미 확인하였다. 역시 곡부의 곡률정도가 결빙층 두께에 영향을 미칠 것으로 생각되며, 이것이 결빙에 미치는 영향을 알아보기 위해, 대표적인 경우인  $\theta=45^{\circ}$ ,  $\text{Re}=300$ ,

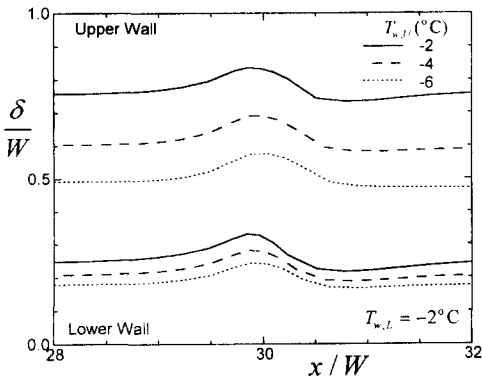


**Fig. 7** The ice layer shapes near a curved port for several Reynolds numbers in  $T_{w,U}=T_{w,L}=-2^{\circ}\text{C}$ ,  $R=0.1W$ , and  $\theta=45^{\circ}$

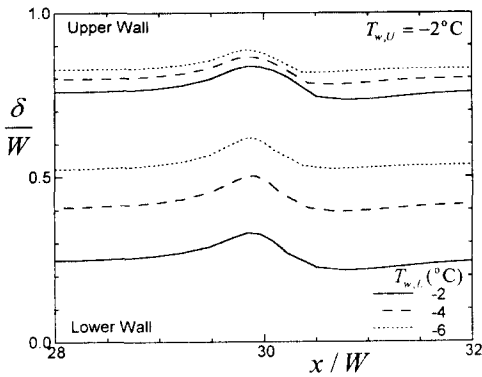
$T_{w,L}=T_{w,U}=-2^{\circ}\text{C}$ 에 대해 곡률을 달리한 몇몇 경우를 Fig. 6에 나타내었다. 곡부에서의 기본적인 변화 경향은 서로 유사한 형태를 보이고 있다. 그러나, 곡률 반경이 커질수록 상/하부면에서 나타나는 결빙층의 두께변화가 점점 줄어드는 것을 볼 수 있다. 즉, 곡률반경이 늘어날수록 곡부에서의 결빙층의 두께가 부드럽게 변하며, 점점 직유로의 경우와 같은 경향으로 변하고 있다. 이는 곡유로의 곡률반경이 증가하면서, Fig. 4와 Fig. 5에서 언급한 곡유로 전후로 나타나는 속도 및 온도분포의 변화가 상대적으로 점점 줄어드는 데서 비롯된 것임을 확인하였다.

유로내 유동의 세기가 결빙층에 미치는 영향을 알아보기 위해  $\theta=45^{\circ}$ ,  $T_{w,L}=T_{w,U}=-2^{\circ}\text{C}$ 에 대해  $\text{Re}$  수를 100, 300, 500으로 변화시켰을 때의 결빙층의 변화를 곡부근처에서 확대하여 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 상/하의 선들은 유로내 상/하벽면에서의 결빙층을 각각 나타낸 것이다. 유동의 세기와 관계없이 곡부 전후로 나타나는 결빙층의 두께변화가 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나, 유동의 강도가 클수록 즉,  $\text{Re}$ 수가 높을수록 결빙층의 두께가 전반적으로 상/하벽면에서 모두 얇아지는 경향을 보이고 있다.<sup>(12,13)</sup> 이는 유속이 빠를수록 결빙면에서 대류열전달이 잘되어 상/하벽면에서의 결빙층의 형성을 보다 많이 억제하는 데서 비롯된 것으로, 이것은 유로내 결빙에서 나타나는 전형적인 현상이다.

부가적으로 유로의 상/하벽면의 온도가 결빙에



(a)



(b)

**Fig. 8** The ice layer shapes near a curved portion in  $Re=300$ ,  $R=0.1W$ , and  $\theta = 45^\circ$  for several wall temperatures; (a) upper wall, (b) lower wall

미치는 영향을 알아보기 위해 Fig. 8에 상부벽면과 하부벽면의 온도를 각각 달리한 경우를 나타내었다. 먼저, Fig. 8(a)에서 상부벽면의 온도를 점점 낮추었을 경우에 상부벽면에서는 전반적으로 결빙층의 두께가 점점 증가하였으며, 하부벽면에서는 반대로 결빙층의 두께가 점점 얇아지고 있다. 이는 상부벽면에서 온도가 낮아질수록 외부로의 열유출이 증가하여 결빙층이 점점 두꺼워지면서, 유로내의 유동을 하부벽면으로 밀어내어 하부벽면의 결빙층의 발달을 억제하고, 동시에 유로가 점점 좁아져 유속의 증가에 따른 결빙면에서의 대류열전달이 증가하여 하부결빙면의 발달을 억제하는 데서 비롯된 것이다. 그림을 자세히

히 살펴보면 상부벽면에서의 결빙층 두께변화가 벽면의 온도에 따라 상당히 많이 변하고 있으나, 하부벽면에서는 변하는 정도가 상대적으로 적게 이루어지고 있다. 이는 상부벽면에서 벽면의 온도가 낮아질수록 외부로 유출되는 열이 결빙면에서 증가하는 대류열전달에 의한 열 유입 보다 상대적으로 크게 작용하는 데서 비롯되며, 하부벽면에서는 반대로 벽면의 온도가 고정되어 있어 외부로의 열 유출이 적은 반면 결빙면에서 대류열전달에 의한 열 유입이 상대적으로 크게 증가하지 못한 데서 비롯된 것이다. 한편, 하부 벽면의 온도를 점차 낮춘 경우를 Fig. 8(b)에 나타내었다. 벽면온도에 따른 결빙층의 두께변화 경향이 Fig. 8(a)의 경우와 거의 상반되게 나타나고 있다. 즉, 하부벽면에서의 결빙층이 두꺼워지고 있으며, 상부벽면에서는 오히려 얇아지고 있다. 결빙층 두께의 변화 정도도 하부면에 비해 상부면에서 상대적으로 적게 이루어지고 있다. 이는 이미 위의 Fig. 8(a)에서 언급하고 있는 것과 유사한 열전달 현상에서 비롯된 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

곡유로내의 결빙과정을 정상상태 층류유동인 경우에 대해 수치해석하였다. 해석방법상에서 완결형 지배방정식이 적용되었으며, 상경계면에서 에너지균형이 이루어질 수 있도록 경계면의 위치를 결정하였다. 연구결과에서 직유로인 경우와 곡유로의 경우를 서로 비교하여 살펴보았으며, 직유로의 경우에는 유로 길이방향으로 상/하벽면에서 결빙층의 두께 변화가 거의 같게 나타났으나, 곡유로에서는 곡부근처에 이르면서 결빙층의 두께가 상부벽에서는 점점 얇아지고, 반대로 하부벽에서는 두꺼워지는 양상을 보이고 있다. 그러나, 곡부를 지나면서 결빙층의 두께가 상하부벽면 모두에서 곡부에 이르기 전과는 상반된 경향으로 변하면서 다시 직유로의 결빙층 두께로 회복하는 양상을 보이고 있다. 즉, 상부벽면에서는 결빙층이 점차 두꺼워지고 있으며, 하부벽면에서는 점차 얇아지고 있다. 이러한 경향이 곡부 각이 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타났다. 속도 및 온도분포에서는 곡부의 상부에서는 유로중심에서 최대점을 갖는 분포가 곡부로 접근하면서 상부쪽으로 쏠리고 있으며, 곡부를 지나 하류로



가면서 최대점이 중심부를 지나 급격히 하부쪽으로 이동하여 나타나고 있다. 이러한 경향이 곡부 근처 결빙층의 변화와 잘 일치하고 있음을 알았다.

부가적으로, 곡부의 곡률 반경이 커질수록 상/하부면에서 나타나는 결빙층의 두께변화의 폭이 모두 점점 줄어들어 결빙층의 두께가 부드럽게 변하며, 점점 직유로의 경우와 같은 경향으로 변하고 있다. 이는 곡유로의 곡률반경이 증가하면서, 곡유로 전후로 나타나는 속도 및 온도분포의 변화가 상대적으로 점점 줄어드는 데서 비롯된 것임을 확인하였다.  $Re$ 수가 높을수록 결빙층의 두께가 전반적으로 상/하부에서 모두 얇아지는 경향을 보이고 있으며, 결빙면에서 대류열전달의 증가에 의해 비롯된 것임을 확인하였다. 한편, 상/하부벽면의 온도를 점점 낮추었을 경우에 온도가 상대적으로 낮은 면에서 전반적으로 결빙층의 두께가 점점 증가한 반면, 맞은편 결빙면에서는 반대로 결빙층의 두께가 점점 얇아졌으며, 결빙면의 두께변화가 온도가 변하는 벽면에서 상대적으로 크게 나타났다. 이는 벽면의 온도변화에 따른 열유출량이, 결빙층의 발달로 인해 유로가 점점 좁아지면서 유속의 증가에 따른 결빙면에서의 대류에 의한 열전달 증가량 보다 결빙층에 상대적으로 크게 영향을 미치는 데서 기인하는 것으로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 두뇌한국21사업에 의해 부분적으로 지원되었습니다.

## 참고문헌

(1) 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.  
 (2) 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.  
 (3) 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.  
 (4) Cho, Chul and Ozisik, M. N., 1979, "Transient Freezing of Liquids in Turbulent Flow inside Tubes," *J. Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 363~468.  
 (5) 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.  
 (6) 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.  
 (7) 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.  
 (8) 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.  
 (9) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington, D. C.  
 (10) 서정세, 노승탁, 1994, 수평원관내 얼음의 접촉용해과정, 대한기계학회논문집, 제19권, 제10호, pp. 2595~2606.  
 (11) 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.  
 (12) 서정세, 노승탁, 1997, "동심원관 환상공간내의 완전히 발달된 층류유동에서 물의 결빙현상에 대한 해석," 대한기계학회논문집, 제21권 제11호, pp.1552~1561.  
 (13) 서정세, 김부근, 노승탁, 임장순, 1998, "협착관내 층류유동에서 물의 결빙현상," 공기조화냉동공학회논문집, 제10권 제1호, pp. 11~21.