
2차원 직사각형 덕트 내부에 돌기부를 갖는 흐름의 동결특성에 관한 연구

오 철*

Freezing Characteristics in a Horizontal Rectangular Channel with the Two-Dimensional Protuberances

Cheol Oh

Abstract

Freezing of turbulent water flow between two horizontal cooled parallel plates with the separated region has been investigated experimentally. The flow separation was induced by vertical plates(two-dimensional plates) situated at the inlet of the rectangular channel. The degree of flow separation was varied by employing vertical thin plates with various heights. Three kinds of the vertical plates with 8.0, 9.8 and 12.5 mm in height were utilized. The Reynolds number and cooling temperature ratio were ranged from 3.45×10^3 to 1.73×10^4 and 7.0 to 20.0 respectively. The measurements show that the flow separation influenced remarkably on the local ice formation characteristics. The location of the first ice layer and the average heat transfer at the ice surface were found be correlated as a function of the Reynolds number, the cooling temperature ratio, and the orifice height ratio.

Key words : Freezing(동결), Cooling Temperature Ratio(냉각온도비), Separated Region(박리영역), Turbulent Water Flow(난류흐름)

기 호

h_m : 평균열전달율 [$W/m^2 \cdot K$]
 h_o : 오리피스 높이 [m]

h_x : 국소열전달율 [$W/m^2 \cdot K$]

H : 시험부의 높이 [m]

I : 난류강도 [%]

Nu_m : 평균누셀트수 [$h_m 2H / \lambda_o$]

* 한국해양대학교

- P_i : 빙층에 의한 압력 [Pa]
 P_o : 오리피스에 의한 압력 [Pa]
 P_w : 시험부 유로 중앙벽면의 압력 [Pa]
 T : 온도 [°C]
 T_f : 동결온도 [°C]
 δ_i : 동결층의 두께 [m]
 ξ_i : 무차원 압력손실계수 $[(P_w - P_o) / (0.5\rho U_o^2)]$
 η : 무차원 오리피스 높이 $[2h_o / H]$
 θ_c : 무차원 냉각온도비 $[(T_w - T_f) / (T_o - T_f)]$
 λ : 열전도율 $[W / m \cdot K]$
 첨자 ; I : 얼음, w : 냉각벽, ∞ : 물

1. 서 론

저온환경 하의 유체수송 등에 있어서 나타나 는 관내 강제대류에 나타나는 유체의 동결· 응고는, 유로 내의 압력손실의 증대를 유발하고 최종적으로는 관내 폐색을 일으킨다. 이 현상은 저온 열교환기에서의 성능저하뿐만 아니라 파손의 원인이 되고 있다. 또한 해상구조물로부터 육상 저장탱크까지의 원유수송을 위한 해저 수송관의 경우 심해에서는 해수온도가 낮기 때문에 왁스 성분의 응고 때문에 관로의 압력손실이 증가하여 관로의 폐색에 의한 관이 파괴되는 등 해상 오염(Oil Pollution)을 환경에 심각한 영향을 미칠 가능성이 있다. 이 때문에 관내 흐름의 동결· 응고거동의 해명을 목적으로서 원관, 평행 평판 및 곡관내의 동결에 관하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 관로 내에 밸브나 관의 지름이 다른 접합부 등 돌기물이 존재하는 경우의 동결 열전달에 관해서는 연구가 대단히 부족한 실정이다.

본 연구에서는 박리영역을 갖는 직사각형 유로 내의 동결열전달거동에 관하여 동결에 영향을 미치는 인자의 효과에 관하여 실험적으로 검

토하여 관로 내의 동결· 응고에 의한 폐색을 방지하기 위한 기초 자료를 얻는데 목적이 있다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험장치는 저수탱크, 압축부, 발달부 및 시험부의 작동유체 순환부와 냉각면 온도 및 작동수의 온도를 제어하는 냉각액 순환계로 구성되어 있다. 시험부는 Fig. 1에 나타내는바와 같이 높이가 30mm, 폭 100mm 및 길이 500mm로 상하면에 냉각면을 갖는 2차원 구형유로이다. 유로 입구부분에 설치한 오리피스는 높이가 8.0, 9.8 및 12.5mm의 3 종류를 이용하였고, 상하는 동일한 치수로 하였다. 냉각면 온도를 일정하게 온도로 유지시킬 수 있도록 냉각면에 100mm 간격으로 C-A 열전대를 5개 설치하여 일정한 온도로 되도록 브라인의 유량을 조절하였으며, 브라인이 냉각면 모든 부분에 골고루 분사되도록 내부에 5개의 노즐을 설치하였다.

압력분포는 시험부 측판에 직경 2.0mm의 탭을 15-25mm의 간격으로 16개를 설치하여 측정오차 범위가 $\pm 0.2\%$ 인 차압계(Digital Manometer, MT210)를 이용하여 측정하였다.

또한 시험부 내에 발달한 정상상태의 빙층계면상의 유속 및 난류강도를 측정하기 위하여 LDV(Laser Doppler Velocimeter)를 사용하였다. 측정 위치는 X축 방향(빙층에 대하여 수평방향)에 대하여서는 10-20mm 간격으로 5지점을 측정하였고, Y축 방향(빙층에 대하여 수직방향)에 대하여서는 0.5mm 간격으로 측정하였다. 각 측정점의 데이터는 1000개의 데이터를 채택하여 이 중 10%를 제외한 900개의 평균치를 이용하였고, 사용된 입자는 산화알루미늄을 이용하였다. 오차 분석의 결과 본 실험은 $\pm 3.5\%$ 의 오차범위의 정확도를 갖는 것을 알 수 있었다.

열전달율을 시간의 변화에 따라서 빙층의 형상이 변하지 않는 정상상태의 빙층의 두께를 측정하여 1차원적으로 열전달율을 산정하였다. 이는 Hirata⁽¹⁾의 연구 결과에서 2차원적으로 산정할 경우와의 오차가 ± 2.6% 정도이기 때문이다.

도가 오리피스 높이 12.5, 9.8, 8.0mm의 순으로 크게 되기 때문에 오리피스 직후의 동결층이 얇게 되고, 그 결과 재순환영역(Fig.3 파선 참조)이 넓게 됨에 따라 흐름의 층류화가 제어되어 스텝의 위치가 후방에 발생된다.

3. 열전달율의 산정

국소 열전달율, 평균열전달율 및 평균누셀수는 다음 식으로부터 산정하였다.

$$h_x = \lambda_i(T_f - T_w)/[\delta_i(T_\infty - T_f)] \quad (1)$$

$$h_m = [1/(x_2 - x_1)] \int_{x_1}^{x_2} h_x dx \quad (2)$$

$$N_m = h_m 2H/\lambda_\infty \quad (3)$$

4. 실험결과 및 고찰

4.1 동결거동 및 유동거동

Fig. 2에 입구 평균유속 0.5m/s, 유입수 온도 1.0℃, 냉각면온도 -7.0℃의 조건에 있어서 정상상태에 있어서 동결층형상에 미치는 오리피스 높이를 8.0, 9.8 및 12.5mm로 변화시켰을 때 오리피스 높이의 영향을, Fig. 3에는 Fig.2와 동일한 조건에서의 유로 내의 유속분포 및 난류분포에 미치는 오리피스 높이의 영향을 나타낸다.

Fig. 2에 나타낸바와 같이 오리피스의 높이가 높을수록 오리피스가 없는 경우[(a)참조]에 비하여 스텝(시험부 입구부에서부터 첫 번째凸의 정점까지의 길이) 정점까지의 동결층의 두께가 얇고, 또한 스텝이 후방에 위치하는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig.3에 나타낸바와 같이 오리피스의 높이가 높을수록 유로 중심부분의 유속이 증가함과 동시에 오리피스로부터 발생하는 난류강

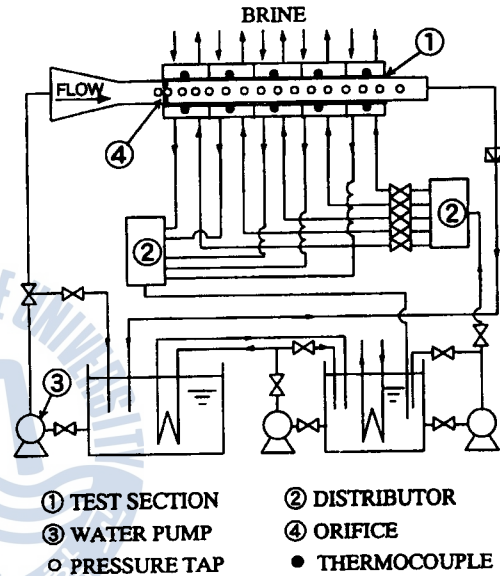


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

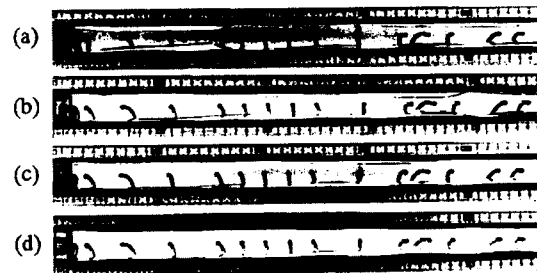


Fig. 2 Effect of orifice height on ice layer profile at steady state for $U_0 = 0.5\text{m/s}$ and $T_w = -7.0^\circ\text{C}$: (a) $h_0 = 0.0\text{mm}$, (b) $h_0 = 8.0\text{mm}$, (c) $h_0 = 9.8\text{mm}$, (d) $h_0 = 12.5\text{mm}$

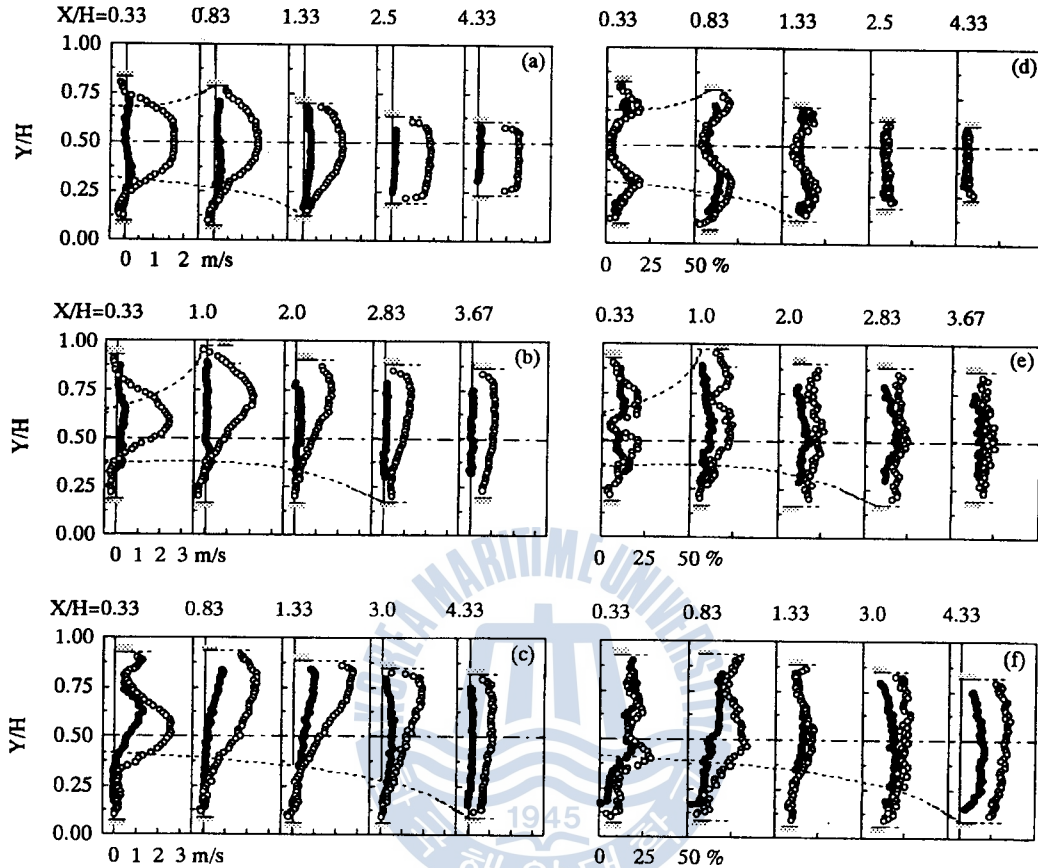


Fig. 3 Effect of orifice height on velocity profile and turbulence intensity at steady state condition for $U_0 = 0.5\text{m/s}$ and $T_w = -7.0^\circ\text{C}$; velocity profile(\circ :u, \bullet :v):(a) $h_0 = 8.0\text{mm}$,(b) $h_0 = 9.8\text{mm}$,(c) $h_0 = 12.5\text{mm}$; turbulence intensity(\circ : I_x , \bullet : I_y):(d) $h_0 = 8.0\text{mm}$,(e) $h_0 = 9.8\text{mm}$,(f) $h_0 = 12.5\text{mm}$
 — (\circ : Position of the ice surface ---- : Border of stall area)

Fig.4에 오리피스 높이 12.5mm, 유입수 온도 1.0°C, 냉각면온도 -7.0°C의 조건에 있어서 정상 상태의 동결층형상에 미치는 평균유속을 0.1, 0.3 및 0.5m/s로 변화시켰을 때의 평균유속의 영향을, Fig.5에 Fig.4와 동일한 조건에 있어서의 유로 내의 유속분포 및 난류분포에 미치는 평균유속의 영향을 나타냈다. Fig.4로부터 평균유속이 빠를수록 동결층이 얇게 되고, 스텝이 전방에

위치하는 것을 알 수 있다. 이것은 평균유속이 빠를수록 오리피스로부터 발생하는 난류강도의 크기가 Fig.5(d),(e),(f)에 나타낸바와 같이 상대적으로 크기 때문에 오리피스 직후의 열전달율의 증가에 따라 빙층은 얇게 된다. 또한 스텝의 위치는 확대부의 열전달율이 크게 지배되기 때문에 평균유속이 빠를수록 확대부에 있어서 박리가 크게 되고, 그 결과 스텝이 보다 전방에 위치한다.

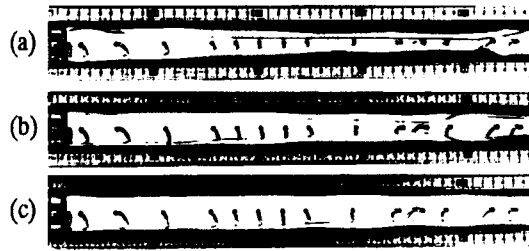


Fig. 4 Effect of velocity on ice layer profile at steady state for $h_0 = 12.5\text{m/s}$ and $T_w = -7.0^\circ\text{C}$: (a) $U_0 = 0.1\text{m/s}$, (b) $U_0 = 0.3\text{m/s}$, (c) $U_0 = 0.5\text{m/s}$

4.2 스텝위치

Fig.6에 냉각개시 단부터 제1스텝 정점까지의 거리 X_s 를, 레이놀즈수 Re_H , 무차원 냉각파라미터 θ_c 및 무차원 오리피스 높이 η 를 이용하여 정리한 결과를 나타낸다. Gilpin⁽²⁾⁻⁽³⁾과 關⁽⁴⁾은 스텝 (Gilpin의 경우 ripple로 정의)에 의한 유로의 축소·확대에 의하여 박리 또는 층류화가 발생하기 때문에 스텝의 위치는 θ_c 만으로 정리가 가능하다고 보고하고 있다.

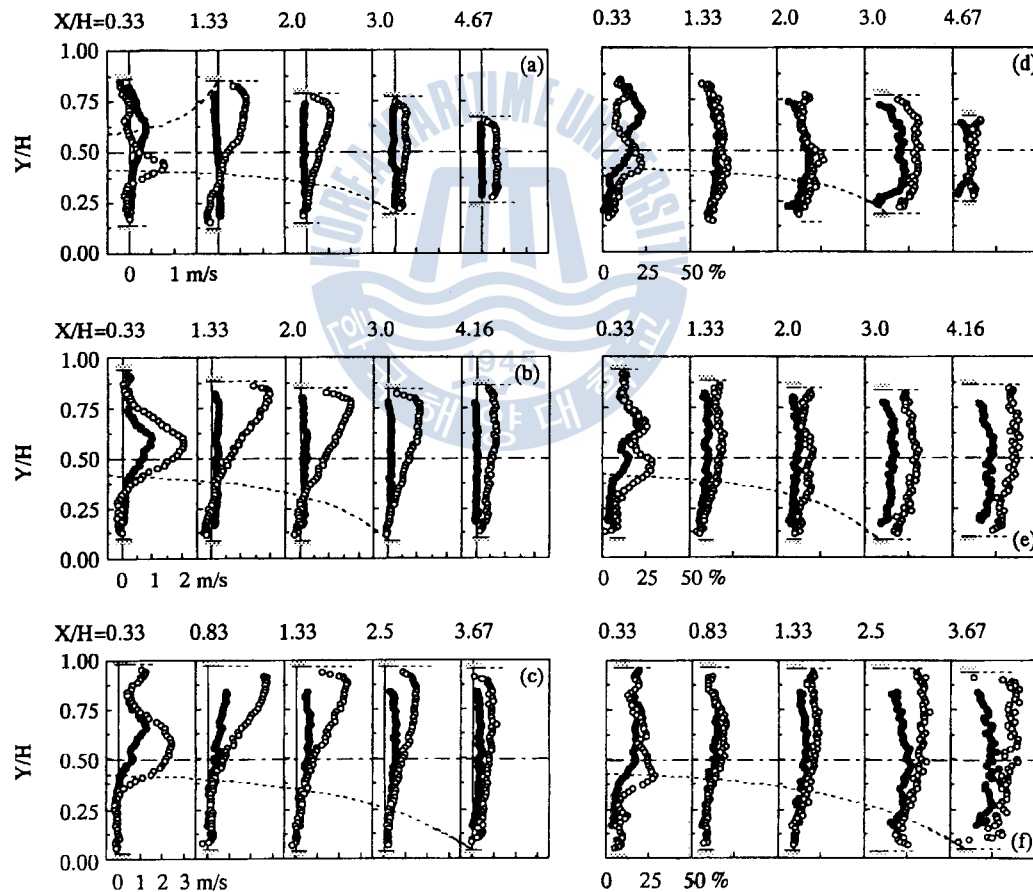


Fig. 3 Effect of average velocity on velocity profile and turbulence intensity at steady state condition for $h_0 = 12.5\text{mm}$ and $T_w = -14.0^\circ\text{C}$: velocity profile (\circ : u , \bullet : v): (a) $U_0 = 0.1\text{m/s}$, (b) $U_0 = 0.3\text{m/s}$, (c) $U_0 = 0.5\text{m/s}$; turbulence intensity (\circ : I_x , \bullet : I_y): (d) $U_0 = 0.1\text{m/s}$, (e) $U_0 = 0.3\text{m/s}$, (f) $U_0 = 0.5\text{m/s}$ (——: Position of the ice surface, - - - -: Border of stall area)

한편 냉각개시 단계 오리피스가 존재하는 본 연구의 경우 스텝의 위치는 유속이 빠를수록, 냉각면온도가 낮을수록 경우에는 유로 내의 흐름이 압축되어 층류화가 가속화됨에 따라서 난류 강도의 감소에 따라서 빙층이 두껍게 발달됨에 따라서 전방에 위치하고, 오리피스의 높이가 낮을수록 오리피스로부터 발생하는 난류의 강도가 감소함에 따라서 열전달효과의 감소로 인하여 빙층의 발달에 의하여 전방에 발생하는 것을 알 수 있다. 즉 θ_c 의 관수뿐만 아니라 Re_H 및 η 임을 나타낸다.

Fig.6으로부터 스텝의 위치 X_s 는 오리피스가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 대해서 각각 식(4) 및 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$X_{st} = 2.58 \times 10^2 Re_H^{0.216} \theta_c^{-0.542} (1+2\eta)^{0.138} \quad (4)$$

$$X_{st} = 5.26 \times 10^3 Re_H^{-0.463} \theta_c^{-1.163} \quad (5)$$

단, $3.45 \times 10^3 \leq Re_H \leq 1.73 \times 10^4$, $7.0 \leq \theta_c \leq 20.0$, $0 \leq \eta \leq 0.42$ 이다.

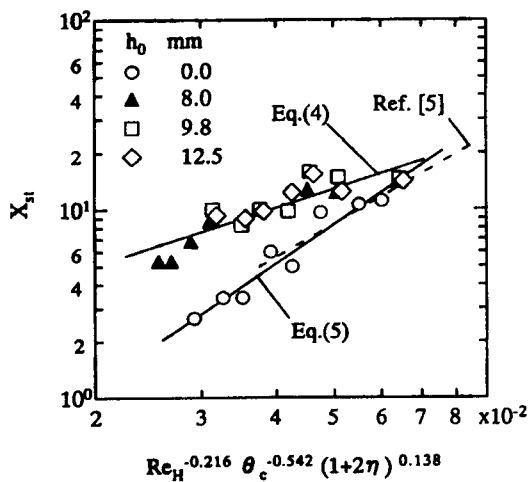


Fig. 6 Correlation of dimensionless icetransition position

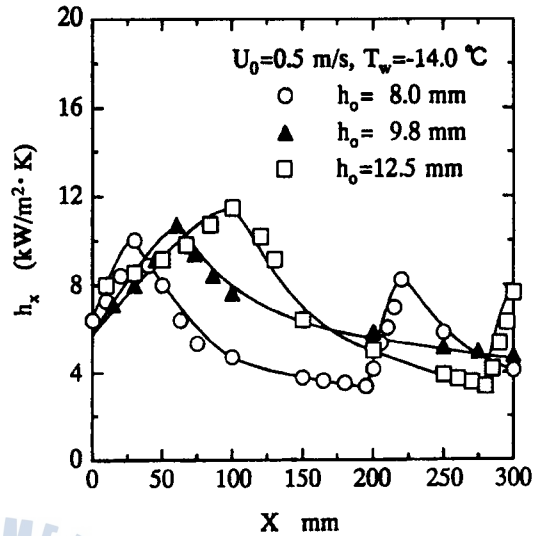


Fig. 7 Local heat transfer characteristics at the lower ice surface

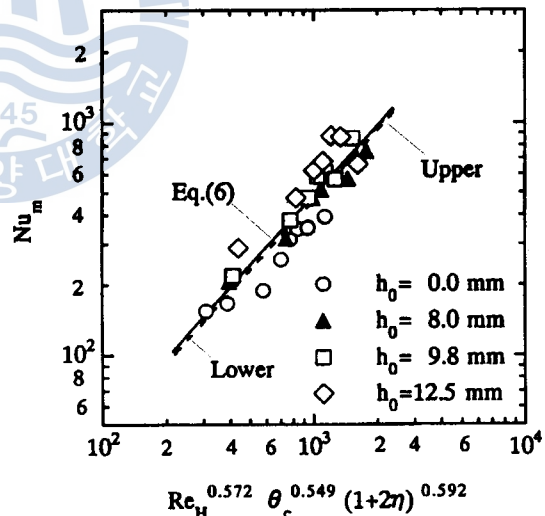


Fig. 8 Correlation of mean Nusselt number

오리피스 존재하지 않는 경우의 본 결과는 그림에 나타남과 같이 Seki⁽⁵⁾의 결과와 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

4.3 열전달거동

Fig.7은 평균유속 0.5m/s, 유입수 온도 1.0°C, 냉각면온도 -14.0°C의 조건에 있어서 정상상태에 있어서의 오리피스 높이를 8.0, 9.8 및 12.5mm로 변화시켰을 때 시험부 하부 동결층 계면의 국소열전달율에 미치는 오리피스의 영향을 나타낸다. Fig.7로부터 알 수 있는바와 같이 오리피스의 높이가 높을수록 유로 내의 국소열전달율은 크게 됨을 알 수 있다. 이것은 Fig.3에 나타낸 바와 같이 오리피스의 높이가 높을수록 유속의 증가와 더불어 난류의 강도가 증가하기 때문에 빙층의 두께가 얇아지기 때문이다.

시험부 입구로부터 제1스텝까지의 시험부 상하면의 평균열전달율 Nu_m 을 Fig.8에 나타냈다. 그림으로부터 시험부 상하면의 열전달율의 경향이 거의 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig.3 및 Fig.5에 나타낸바와 같이 상하부의 유속 분포 및 난류분포가 거의 같은 값을 나타내고 있기 때문이다. 그 결과 유로 내의 동결층은 난류강도에 지배되고 있기 때문에 상하부의 평균열전달율의 차이가 없다. 또한 시험부 입구로부터 제1스텝까지의 평균열전달율 Nu_m 은 오리피스의 높이 및 시험부의 상하면에 관계없이 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$N_m = 0.479 \times Re_H^{0.572} \theta_c^{0.549} (1 + 2\eta)^{0.592} \quad (6)$$

4.4 압력손실거동

Fig.9는 정상상태에 있어서 유로 내 국소압력손실에 미치는 오리피스 높이의 영향을 나타낸다. 그림으로부터 재 부착점(Reattachment Point)인 $X=100\text{mm}$ 까지의 국소압력손실은 오리피스의 높이가 높을수록 오리피스에 의한 압력손실이 크기 때문에 큰 값을 나타내고 있다. 한편 $X=100$

mm 이후의 압력손실은 오리피스 높이 12.5mm의 경우를 제외하고 오리피스가 존재하는 경우가 오리피스가 존재하지 않는 경우에 비하여 작음을 알 수 있다. 이것은 오리피스가 존재함에 따라서 $X=100\text{mm}$ 이후부터 하류의 동결층 계면의 열전달율이 증가하고, 그 결과 그 부분의 동결층의 성장이 작기 때문이다. 또한 오리피스 높이 12.5mm의 경우는 오리피스 그 자체에 의한 압력손실이 대단히 크기 때문에 동결층의 생성에 의한 국소압력손실에의 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

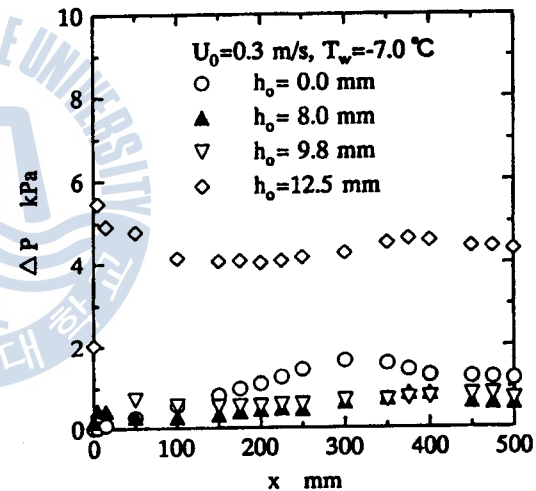


Fig. 9 Pressure-loss characteristics

Fig.10은 정상상태에 있어서 국소압력손실에 미치는 평균유속의 영향을 나타낸다. 그림에서 평균유속이 빠를수록 오리피스에 의한 압력손실은 크지만 압력손실의 국소적 변화는 작게 됨을 알 수 있다. 이것은 Fig.5에 나타낸바와 같이 평균유속이 빠를수록 오리피스에 의한 난류강도가 커지기 때문에 동결층 계면의 열전달율이 증가해서 하류부의 동결층의 성장이 작게 되기 때문이다.

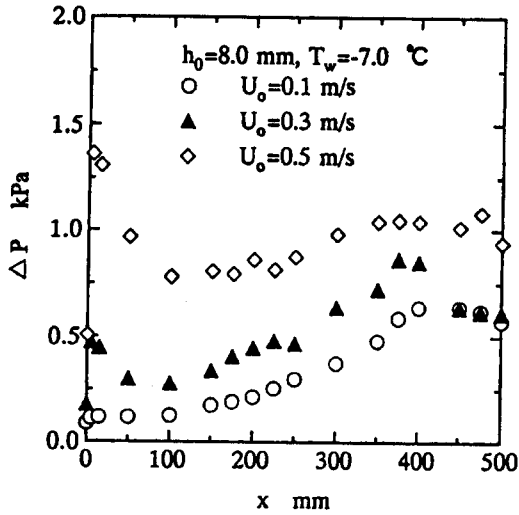


Fig. 10 Pressure-loss characteristics

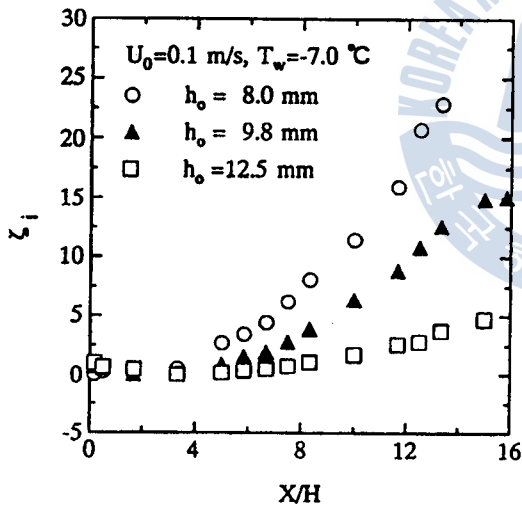


Fig. 11 Pressure-loss characteristics

Fig.11은 정상상태에 있어서 국소압력손실에 미치는 오리피스 영향의 영향을 나타낸다. 오리피스의 높이가 높을수록 냉각개시 단으로부터 $x/H=4$ 까지는 오리피스 그 자체에 의한 압력손실이 크기 때문에 압력증가율이 크지만 그 이후 하류부에서는 작게 됨을 알 수 있다. 이것은 앞에서 설명한바와 같이 오리피스의 높이가 높을

수록 난류강도가 커지기 때문에 재 부착점으로부터 하류의 동결층 계면의 열전달율이 증가해서 이 부분의 빙층의 성장이 감소하기 때문이다.

5. 결론

오리피스를 갖는 구형유로 내에 있어서 동결에 관한 동결계면상의 유동거동 및 난류거동에 관한 검토를 행하여 본 실험결과와 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 오리피스에서 발생하는 난류로 인하여 동결층의 두께는 오리피스가 존재하는 경우가 오리피스가 존재하지 않는 경우에 비하여 감소한다. 그 결과 동결층의 생성에 동반되는 압력손실의 증가율이 현저하게 작다.

(2) 오리피스의 높이가 높을수록 난류강도의 증가로 인하여 재 부착점의 열전달율이 증가한다.

(3) 냉각개시 단으로부터 제1스텝 정점까지의 시험부 상하부의 평균열전달율은 오리피스 유무에 관계없이 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$N_m = 0.479 \times Re_H^{0.572} \theta_c^{0.549} (1 + 2\eta)^{0.592}$$

참고문헌

- [1] T. Hirata 외 3명, "The steady state ice layer profile on a constant temperature plate in a forced convection flow - I laminar regime", Int. J. Heat Mass Trans., 22-10(1979), pp.1425-1433
- [2] Gilpin, R. R., "The effect of dendritic ice formation in water pipes", Int. J. Heat Mass Trans., 20-16(1976), pp.693-699
- [3] Gilpin, R. R., "Ice formation in a pipe containing flow in the transition and turbulent regimes", Trans. ASME, J. Heat

- Trans. 103-2(1981), pp.363-368
- [4] 關 외 4명, "冷却平行平板を流れる水の非定常凍結", 일본기계학회논문집(B편), 49-446 (1983), pp.2172-2180
- [5] Seki, N. 외 2명, "Transition Phenomena of ice formation in water flow between two horizontal parallel plates", Trans. ASME, J. Heat Trans. 106(1988), pp.117-128



