

원관의 냉각면에서의 착상

이 동 훈[†] · 양 동 근* · 이 관 수**

Frost formation on a cold cylinder surface in cross flow

Dong-Hoon Lee, Dong-Keun Yang, Kwan-Soo Lee

Key Words : Frost formation(착상), Cylinder surface(원관 표면), Correlation(상관식), Frosting parameter(착상인자)

Abstract

This paper presents a semi-empirical model to predict the frost growth formed on the cold cylinder surface. The model is composed of the correlations for frost properties including the various frosting parameters and local heat transfer coefficient. The effects of varying the correlations for local heat transfer coefficient on the frost growth are examined to establish the model. The numerical results are compared with experimental data obtained by the previous researchers. The results agree well with the experimental data within a maximum error of 13%. As the results, the frost thickness decreases with changing angular position from front stagnation to separation point. Also the effects of air velocity on the frost growth are negligible, as compared to the other frosting parameters.

기호설명

C_p	: 정압 비열	[kJ/kg·K]
d	: 원관 지름	[m]
D	: 확산계수	[m ² /s]
h_h	: 열전달계수	[W/m ² ·K]
h_m	: 물질전달계수	[kg/m ² ·s]
k	: 열전도계수	[W/m·K]
L	: 원관의 길이	[m]
Le	: Lewis 수	
L_h	: 서리의 승화 잠열	[kJ/kg]
m_f''	: 서리의 물질유속	[kg/m ² ·s]
Pe	: Peclet 수	
Pr	: Prandtl 수	
\dot{Q}_{sen}	: 현열전달에 의한 열전달율	[W]

\dot{Q}_{lat}	: 잠열전달에 의한 열전달율	[W]
\dot{Q}_{cond}	: 서리층내부의 전도 열전달율	[W]
R	: 원관 반지름	[m]
T	: 온도	[°C]
U	: 유속	[m/s]
w	: 절대습도	[kg/kg _{DA}]
y	: 서리층 두께	[m]

그리스문자

α	: 열확산계수	[m ² /s]
δ	: 미소 변화량	
θ	: 전면 정체점부터의 각도	[°]
ϕ	: 상대 습도	
ρ	: 밀도	[kg/m ³]

하첨자

a	: 공기
f	: 서리 표면
ice	: 얼음
θ	: 각도

[†] 한양대학교 대학원 기계공학과

Email : ksleehy@hanyang.ac.kr

Tel : (02)2290-0426, FAX:(02)2295-9021

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 한양대학교 기계공학부

1. 서론

습공기가 0°C 이하로 유지되는 냉각면과 접촉 때 냉각면에 다공성의 서리층이 형성된다. 이러한 착상조건 하에서 운전되는 냉장고나 에어컨 등의 증발기 표면에서는 서리층의 성장으로 인해 열저항이 증가하고 서리 성장에 따른 유로 저항으로 인해 착상이 시스템의 성능을 저하시키는 주요 요인이 된다. 현재 저온공학 분야 및 공기조화 산업에서 가장 보편화된 환-관 열교환기에서의 착상거동을 예측하기 위해 열교환기 전열면적의 80%를 차지하는 환에 대한 연구가 많은 연구자들에 의해 활발히 진행되어왔다. 그러나 최근 들어 제작 단가 절감 및 성능향상을 위해, 전체 환-관 열교환기 중 원관이 차지하는 전열면적의 비가 50%에 이르는 증발기에 대한 관심이 부각되면서 원관에서 발생하는 착상거동에 대한 연구의 필요성이 증대되었다. 원관에서 발생하는 착상 현상을 해석적으로 예측한 기존의 연구자들의 연구 경향은 그 해석 방법에 따라 세가지로 구분된다.

첫째, 원관의 표면 열전달계수와 서리의 물성치에 대한 실험 상관식을 통해 열 및 물질 전달량을 계산하여 서리층 성장 거동을 예측하였다^(1,2). 둘째, 유동장 해석을 통해 서리층 외부 해석을 하고, 서리층 내부는 서리 물성치에 대한 기존의 실험 상관식을 사용하거나⁽³⁾ 확산방정식과 서리 물성치의 실험 상관식을 혼용하여 열 및 물질전달량을 계산하여 착상 거동을 제시하였다⁽⁴⁾. 셋째, 서리층 외부는 유동장 해석을 하고 서리층 내부는 서리를 다공성 물질로 간주하여 다공도에 따라 서리 성장 예측 모델을 구성하였다⁽⁵⁾.

대부분의 기존의 연구자들이 공기층 모델링에 유동장 해석을 사용하였는데, 이는 상당히 긴 계산 시간에도 불구하고 정확한 착상 거동을 예측하지 못하였다. 따라서 최근에는 계산 시간을 단축시키고 적용기준 내의 조건에서 착상거동을 비교적 정확히 예측하는 이점이 있는 실험 상관식을 사용한 공기층 해석을 통한 연구가 활발히 진행 중이다⁽¹⁾. 그러나 공기층 해석에 실험 상관식을 사용한 최근의 연구⁽¹⁾는 습공기와 냉각면 표면에서의 습도 차에 의한 물질전달이 전부 서리 두께를 성장하게 하는 것으로 해석을 하여 밀도를 증가시키는 양을 무시하였고, 과포화 상태의 습공기를 해석에 적용하여 실제 열교환기에서의 착상 거동을 예측하는 것에 있어서 한계를 보였다.

기존 연구자들의 대부분이 서리층 내부 해석에 Hayashi 등⁽⁶⁾ 이나 Yonko 와 Sepsy⁽⁷⁾ 의 서리물성치의 실험 상관식을 주로 사용하였다. 그럼에도 불구하고 기존의 연구자들 결과가 다소 차이를 보이는 이유는, 실험 상관식의 사용 범위와 정확성에 따라 해석결과의 신뢰성이 결정되기 때문이다. 예를 들어 대부분의 연구자들에 의해 사용된

Hayashi 등⁽⁶⁾ 의 서리 밀도 상관식은 그 적용 범위가 매우 제한되어 다양한 조건에서 적용시 상당히 큰 오차가 발생할 수 밖에 없다. 또한 이 상관식은 서리층 표면 온도만의 함수로 이루어져, 공기의 온도, 절대 습도, 유속이나 냉각면 온도와 같은 서리 밀도 변화에 영향을 주는 인자들을 포함하고 있지 않아 정확한 착상거동 예측이 다소 어렵다.

본 연구에서 서리층 성장 거동 예측을 위해 공기층에서는 원관 표면의 국소적인 열전달계수 상관식을 사용하고, 서리층 내부 해석에는 다양한 착상인자를 포함하는 서리 물성치의 상관식을 이용하여 시간과 각도에 따른 서리층 두께와 표면 온도에 대한 해석 결과를 제시하였다. 또한 공기층 해석시 여러 연구자들에 의해 제시된 열전달 계수에 대한 상관식을 사용하여 그 적용성 여부를 판별하였으며, 서리층 성장에 대한 여러 착상인자의 영향을 제시하였다.

2. 이론

본 연구에서는 빙점 이하로 유지되는 원관의 냉각면에서 형성되는 서리층의 성장 거동을 예측할 수 있는 수학적 모델을 제시하고자 한다. 원관에서 열전달계수에 대한 관계식과 서리층 밀도와 열전도 계수에 대한 실험 상관식을 사용하여 착상 거동에 주된 영향을 미치는 인자인 유입 공기의 온도, 습도, 속도와 냉각면 온도 이외에 원관의 위치에 따른 영향을 살펴보기 위해 다음과 같이 해석 영역을 설정하였으며, Fig. 1 과 같다.

2.1 기본 가정

- 1) 서리층 성장의 전 과정은 준정상상태 (quasi-steady state)로 가정한다.
- 2) 공기-서리층 경계면으로부터 냉각면으로의 열전달은 순수한 전도이다.
- 3) 복사에 의한 열전달은 무시한다.
- 4) 서리층 표면은 포화 상태에 있다.

2.2 서리층 외부 모델링

원관의 임의의 위치에서 미소각도 ($\delta\theta$)에 따라 에너지 평형식을 세워보면 다음과 같다.

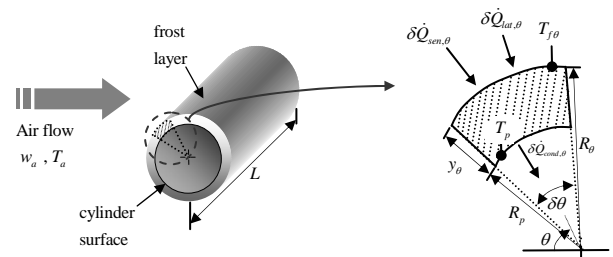


Fig. 1 Schematic diagram of frosting formation on a cylinder surface

$$\delta\dot{Q}_{sen,\theta} + \delta\dot{Q}_{lat,\theta} = \delta\dot{Q}_{cond,\theta} \quad (1)$$

공기측 열전달은 공기측에서 서리층 표면으로의 대류에 의한 현열전달과 물질 전달에 의한 잠열전달의 합으로 구성되며 서리표면과 공기의 온도차에 의한 현열전달은 다음과 같이 표현된다.

$$\delta\dot{Q}_{sen,\theta} = h_{h,\theta} LR_\theta \delta\theta (T_a - T_{f\theta}) \quad (2)$$

각도(θ)에 따른 서리 표면의 열전달계수를 구하기 위해 국소 Nusselt 수는 다음 식을 사용한다.

$$Nu_\theta = \frac{h_{h,\theta} d_\theta}{k_a} = 1.14 Re_{d_\theta}^{0.5} Pr^{0.4} \left[1 - \left(\frac{\theta}{90} \right)^3 \right] \quad (3)$$

본 연구의 공기측 모델링에 사용된 국소 Nusselt 수의 적용 범위가 원관의 전면부 ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)이므로 해석영역을 원관의 전면부로 제한한다. 서리 표면과 공기의 습도차에 의한 물질전달에 따른 잠열전달은 다음과 같이 표현된다.

$$\delta\dot{Q}_{lat,\theta} = h_{m,\theta} L_{n,\theta} LR_\theta \delta\theta (w_a - w_{f\theta}) \quad (4)$$

여기서, $w_{f\theta}$ 는 서리 표면 온도 ($T_{f\theta}$)에서의 포화 절대 습도이다.

열 및 물질 전달의 상사성에 의해서 물질전달계수는 다음과 같이 나타낸다.

$$h_{m,\theta} = \frac{h_{h,\theta}}{C_{pa} Le^{2/3}}$$

Lewis 수는 다음과 같이 정의되는 무차원수이다.

$$Le = \frac{\alpha_a}{D_a}$$

2.3 서리층 내부 모델링

서리층 내부는 서리층 유효 열전달 계수와 밀도를 나타내는 실험 상관식을 사용하여 모델링하였다. 착상된 서리 두께의 열저항에 따른 서리표면과 냉각면의 온도차를 Fourier의 열전도 방정식에 적용하면 다음과 같다.

$$\delta\dot{Q}_{cond,\theta} = \frac{k_{f\theta} L \delta\theta (T_{f\theta} - T_p)}{\log_e (R_\theta / R_p)} \quad (5)$$

식(5)에 사용되는 서리의 열전도계수는 다양한 착상 인자를 고려한 실험결과⁽⁸⁾로부터 다음과 같이 밀도 함수로 구성 하였다.

$$k_{f\theta} = 0.132 + 3.13 \times 10^{-4} \rho_{f\theta} + 1.6 \times 10^{-7} \rho_{f\theta}^2 \quad (6)$$

식 (6)에 사용되는 서리밀도를 구하기 위해 기존의 원관 연구자들은 대부분 Hayashi 등⁽⁶⁾의 서리 밀도 상관식을 사용하였으나, 이는 단지 서리 표면 온도의 함수로 구성되어 그 적용성에 한계가 있다. 또한 그 적용 범위가 다음과 같이 국소적으로 제한되어 있어 다양한 조건에서 사용될 때 발생하는 오차가 불가피하였다.

$$-25^\circ\text{C} \leq T_{f\theta} \leq 0^\circ\text{C}, \quad 2 \text{ m/s} \leq U_a \leq 6 \text{ m/s}, \\ w_a = 0.0075 \text{ kg/kg}_{\text{DA}}$$

따라서 본 연구에서는 서리층 밀도에 가장 큰 영향을 미치는 서리층 표면 온도, 공기 유속, 공기 온도, 절대 습도를 사용하여 얻어진 실험결과⁽⁸⁾로부터 다음과 같은 국소 서리 밀도 상관식을 재구성 하였다.

$$\frac{\rho_{f\theta}}{\rho_{ice}} = 4.9509 \left(\frac{U_a}{2.5} \right)^{-0.0254} \times (1000 w_a)^{-1.2643} \\ \times \left[\exp \left(\frac{T_{f\theta} - T_{fp}}{T_a - T_p} \right) \right]^{3.934} \quad (7)$$

여기서, T_{fp} 은 물의 삼중점 온도이다.

식(7)의 적용 범위는 다음과 같다.

$$-35^\circ\text{C} < T_p < -15^\circ\text{C}, \quad 5^\circ\text{C} < T_a < 15^\circ\text{C},$$

$$1 \text{ m/s} < U_a < 2.5 \text{ m/s},$$

$$0.00322 \text{ kg/kg}_{\text{DA}} < w_a < 0.00847 \text{ kg/kg}_{\text{DA}}$$

착상 현상이 일어나는 동안 수증기의 일부는 서리층의 두께를, 그 나머지는 서리층의 밀도를 증가시킨다. 공기와 서리 표면에서의 습도차에 따른 국소 질량유속은 다음과 같다.

$$m''_{f\theta} = h_{m,\theta} (w_a - w_{f\theta}) = m''_{f\theta,y} + m''_{f\theta,d} \quad (8)$$

여기서 $m''_{f\theta,y}$ 와 $m''_{f\theta,d}$ 는 각각 두께와 밀도를 증가시키는 물질유속이다.

$$m''_{f\theta,y} = m''_{f\theta} - m''_{f\theta,d} \\ = h_{m,\theta} (w_a - w_{f\theta}) - \frac{y_\theta}{\Delta\tau} (\rho_{f\theta}^{\tau+\Delta\tau} - \rho_{f\theta}^\tau) \quad (9)$$

여기서 $\Delta\tau$ 와 $\rho_{f\theta}^\tau$ 는 미소 시간간격과 이전 시간 단계에서의 서리층 밀도를 각각 의미한다.

새로운 시간 단계에서 서리층 두께는 다음과 같이 계산된다.

$$y_\theta = y_\theta + \frac{m''_{f\theta,y}}{\rho_{f\theta}^\tau} \Delta\tau \quad (10)$$

서리층 표면온도는 식(1)에 식(2), (4), (5)를 대입하여 정리하면 다음과 같이 계산된다.

$$T_{f\theta} = \frac{[h_{m,\theta} L_{n,\theta} R_\theta \log_e (R_\theta / R_p) (w_a - w_{f\theta}) \\ + h_{h,\theta} R_\theta \log_e (R_\theta / R_p) T_a + k_{f\theta} T_p]}{h_{h,\theta} R_\theta \log_e (R_\theta / R_p) + k_{f\theta}} \quad (11)$$

2.4 계산 과정

- 1) 공기 온도, 원관 표면 온도, 공기 절대 습도, 시간, 시간간격 등의 자료를 입력한다.
- 2) 초기 조건 대입; $T_{f\theta} = T_p$, $R_p = R_\theta$, $y_\theta = 0$
- 3) 막온도에서 공기의 물성치를 계산하고, 그에 따른 원관 표면 열전달계수, Le 수, 원관 표면 물질전달계수, 서리층 열전달계수, 착상량, 서리층 두께를 구하고 최종적으로 서리층 표면온도를 구한다.

- 4) 계산된 새로운 서리 표면온도를 이용하여 막 온도를 구하고, 그에 따른 공기 물성치를 다시 계산한다. 또한 새로 계산된 공기측 물성치를 이용하여 원관 표면 열전달계수, Le 수, 원관 표면 물질전달계수, 서리표면에서의 포화 절대습도, 서리층 열전달계수와 새로운 서리층 표면 온도를 구한다.
- 5) 다음 수렴조건을 만족하면 원관의 계산위치를 변경한다.

$$|T_{f\theta}^{new} - T_{f\theta}^{old}| \leq 0.001$$

- 6) 임의의 시간에서 모든 각도에 따른 서리층 물성치 계산이 종료되면 계산 시간을 증가시킨다.
- 7) 모든 착상 시간에서 각도에 따른 서리층 물성치의 계산이 완료되면 계산을 종료한다.

본 연구에서는 수학적 모델의 해에 대한 열전달 계수 상관식의 적용성을 판별하고자 다음의 열전달 계수 상관식을 사용하였다. 각도(θ)의 함수로 이루어진 Galante 와 Churchill⁽⁹⁾의 국소 열전달 계수 상관식은 다음과 같이 표현된다.

$$Nu_{\theta} = 2 \left[\frac{(1 + \cos \theta) Pe_{D_0}}{\pi} \right]^{1/2} \quad (12)$$

식 (12)의 Nusselt 수는 원관 지름을 기준으로 하고 Pe 수가 8 이상인 경우에 적용된다.

또한 원관 전 범위에서 균일하게 착상된다는 가정 하에서, 즉 각도(θ)에 무관한 Churchill 과 Bernstein⁽¹⁰⁾의 평균 열전달 상관식을 사용할 수 있으며 다음과 같다.

$$Nu_{avg} = 0.3 + \frac{0.62 Re_{d_0}^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr} \right)^{2/3} \right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_{d_0}}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (13)$$

식(13)의 Nusselt 수는 $Re_{d_0} Pr > 0.2$ 인 경우에 적용된다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 습공기가 빙점 이하의 온도로 유 지되는 원관을 지날 때 발생하는 착상 거동을 예측하기 위해, 공기측 해석에 국소 열전달 계수 상관식을 사용하고 서리층에는 서리의 물성치에 대한 실험 상관식을 사용하였다. 기존의 공기측 국소 열전달 계수의 상관식의 적용성을 판별하기 위해, 식(3)과 식(12)를 각각 사용하여 서리층 두께를 일정 시간($\tau = 180 \text{ min}$)에서 각도에 따라 비교하여 Fig. 2 에 제시하였다. 식(12)에 의해 계산된 서리 두께가 각도 변화에도 불구하고 거의 차이를 보이지 않고 있는 것에 비해 식(3)의 상관식을 통한 서리두께는 전면 정체점에 비해 박리점이 약

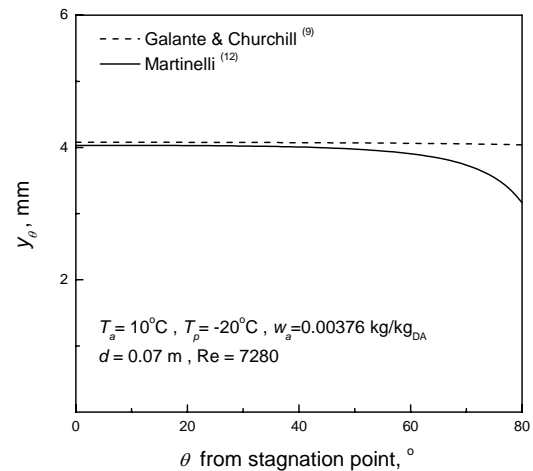


Fig. 2 Variation of the frost thickness along the angular coordinate with correlations

0.8 mm 정도 적게 착상되는 것을 확인할 수 있다. 이는 동일한 조건에서 원관 표면에서의 열전달 계수가 전면 정체점($\theta = 0^\circ$)에서 박리점($\theta = 80^\circ$)로 갈수록 감소 됨에 따라⁽¹¹⁾ Lewis 상사성에 의한 물질전달 계수 역시 감소되어 각도에 따라 다른 착상 거동이 나타날 것이라는 물리적 현상을 잘 예측하였다. 그러므로 본 연구에서는 물리적으로 더 타당한 결과를 보이는 식(3)의 열전달 계수 상관식을 사용하였다.

본 연구에서는 해석 결과에 대한 시간 간격의 의존성을 검증하기 위해 동일한 착상 조건에서 서로 다른 시간 간격을 사용하여 해석을 수행하였다. 1 초, 5 초, 10 초의 세 시간 간격에 대해 서리층 두께에 대한 해석결과의 변화가 0.5% 이내이므로, 본 연구에서는 5 초의 시간 간격에서 수치해석을 수행하였다.

Fig. 3 은 서로 다른 조건에서 시간에 따른 서리 두께의 변화를 실험치와 비교하여 제시한 것이다. CASE 1 과 CASE 2 에서는 본 연구에서 사용된 국소 열전달 계수에 대한 상관식인 식(3)을 이용해 해석한 서리 두께의 각도에 대한 평균값과 평균 열전달 계수에 대한 상관식인 식(13)을 사용한 해석 결과를 균일하게 서리가 성장하는 실험결과⁽¹⁴⁾와 비교한 것이다. 해석 결과가 실험치⁽¹⁴⁾와 비교적 정확히 일치하는 것으로 보아 각도에 따라 균일하게 착상된다는 가정에서는 Churchill 과 Bernstein⁽¹⁰⁾의 열전달 상관식이 적용 가능 함을 보여주고 있다. CASE 3 에서는 전면 정체점에서 서리층 두께의 변화를 실험결과⁽¹³⁾와 비교하였다. 본 연구의 해석 결과가 초기를 제외하고는 실험결과⁽¹³⁾와 최대 13% 내외로 잘 일치하였다.

Fig. 4 는 각도(θ)에 따른 서리의 두께와 표면 온도의 변화를 제시한 것이다. 시간이 지남에 따라 전면 정체점에서 박리점까지의 모든 각도 위치

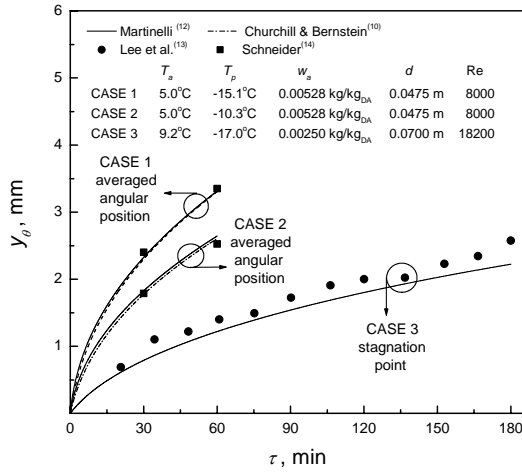


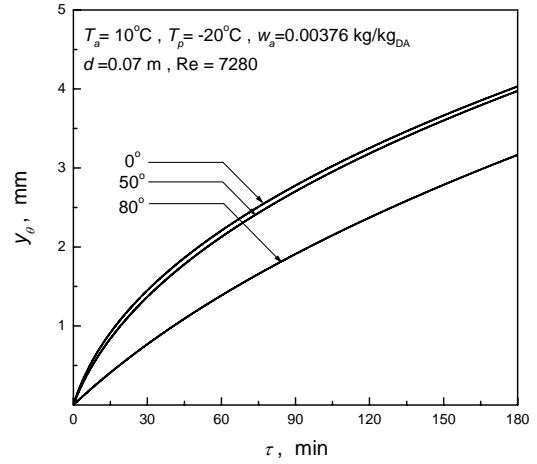
Fig. 3 Comparisons of numerical results and experimental data on the frost thickness

에서 서리 두께가 증가하고 서리층 표면 온도가 상승하는 결과를 보였다. 전면 정체점에 비해 박리점에서 비교적 적은 양의 서리가 착상되어 서리층의 두께가 얇아졌고 그에 따라 서리층의 열저항이 감소하여 서리층 표면 온도가 낮아졌다. 이는 실린더의 박리점에 비해 정체점에서 더 얇은 경계층이 생성이 되고 그에 따라 정체점에서 더 많은 열 및 물질 전달이 일어나기 때문이다.

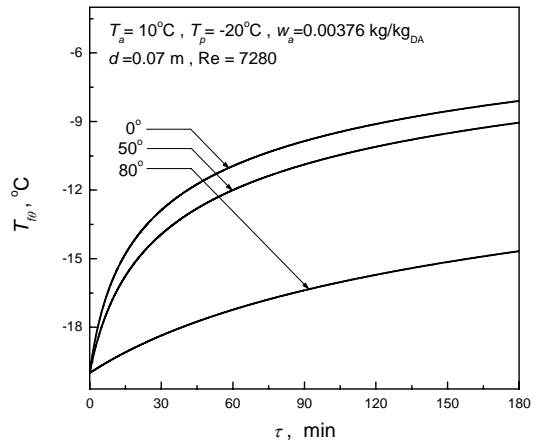
Fig. 5는 임의의 시간대에서의 각도에 따른 서리층 두께를 비교하여 제시한 것이다. 40° 까지 모든 시간대에서 균일한 서리 성장을 보이는 것은 원관의 전면부에 비교적 균일한 경계층이 형성되어 거의 일정한 열 및 물질 전달이 발생되기 때문이다. 그러나 전면 정체점부터의 각도가 40°를 지나 박리점에 가까워짐에 따라 원관 표면에 경계층이 두꺼워지고 박리점에 이르러 가장 적은 착상이 발생한다.

본 연구에서는 서리층 성장에 대한 착상인자의 영향을 파악하기 위해 공기온도, 공기습도, 공기유속, 냉각면 온도의 변화에 따라 수치해석을 수행하였다. 그 결과 공기온도, 공기 습도, 냉각면 온도에 대한 해석 결과 선행 연구자들과 일관된 결과를 얻었다. 서리두께에 대한 착상인자의 영향은, 이미 알려진 것과 같이 공기 유속이 증가할수록, 냉각면 온도가 낮을수록, 공기 온도가 낮을수록, 공기의 절대습도가 높을수록, 서리층의 두께는 증가한다.

Fig. 6은 전면 정체점($\theta=0^\circ$)에서 서리 두께에 대한 공기 속도의 영향을 제시한 것이다. 공기 유속이 증가할수록 서리층 성장이 다소 촉진되었으나 다른 착상인자들에 비해 서리층 성장에 대한 Re 수의 영향은 미미하였다. 그러나 박리점으로 접근할수록 Re 수의 영향이 다소 증가하였으나 다른 착상인자에 비해 비교적 작은 변화를 보였다.



(a) Frost thickness



(b) Frost surface temperature

Fig. 4 Temporal variations of the frost thickness and surface temperature with angular positions

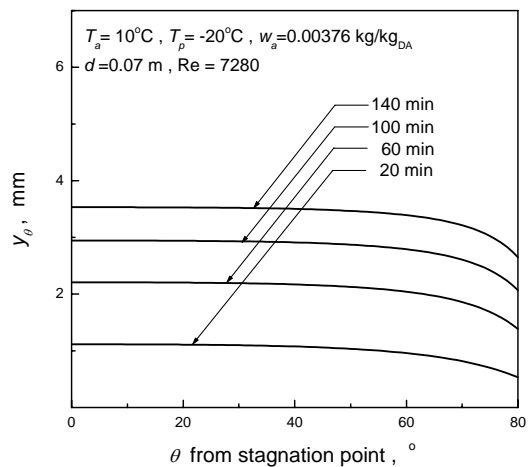


Fig. 5 Variations of the frost thickness along the angular coordinate for different times

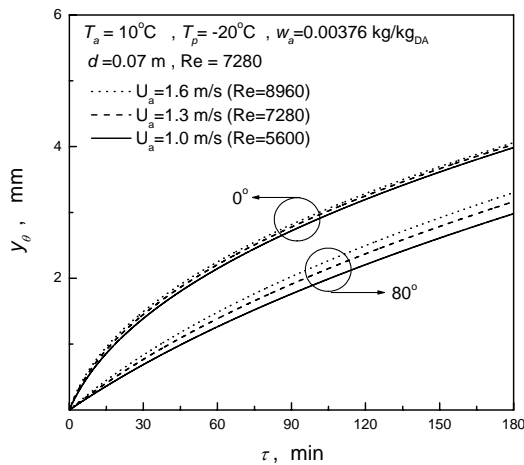


Fig. 6 The effect of Reynolds number on the frost thickness at the stagnation and separation points

이는 일정 Re 수 이상에서는 열 및 물질전달이 균일하다는 실험결과⁽¹⁴⁾와 잘 일치하고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 착상 조건하에 원관 표면에서 각도 위치와 시간에 따라 발생하는 서리층 성장 거동을 예측하기 위해 착상 모델링을 수행하였다. 계산시간의 단축을 위해 공기측에서는 원관 표면의 국소적인 열전달계수 상관식을 사용하고, 서리층 내부 해석에는 다양한 착상 인자를 포함하는 서리 물성치의 상관식을 사용하였다. 본 연구에서는 모델링 검증에 대해 공기측 해석시 여러 연구자들에 의해 제시된 열전달 계수에 대한 상관식을 사용하여 그 적용성 여부를 판별하였으며, 실험 결과와 최대 13%로 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 본 연구의 해석 결과 전면 정체점에서 박리점으로 갈수록 서리층 두께가 감소하였으며 전면 정체점에서의 각도가 40°를 지나 박리점에 가까워짐에 따라 열 및 물질전달이 감소하였다. 착상 인자 중 공기 유속이 증가함에 따라 서리층 성장이다소 촉진 되었으나 다른 착상 인자에 비해 서리층 성장에 대한 공기 유속의 영향은 미미하였다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 최적설계기술연구센터(iDOT)의 지원에 의해 수행되었습니다.

- (1) Mago, P. J., Sherif, S. A., 2003, " Heat and mass transfer on a cylinder surface in cross flow under supersaturated frosting conditions ", *Int. J. refrigeration*, Vol. 26, No. 8, pp. 889~899.
- (2) Padki, M. M., Sherif, S. A., Nelson R. M., 1989, " A simple method for modeling frost formation in different geometries ", *ASHRAE Transactions*, Vol. 95, No. 2, pp. 1127~1137.
- (3) Raju, S. P., Sherif, S. A., 1993, " Frost formation and heat transfer on circular cylinders in cross-flow ", *Int. J. refrigeration*, Vol. 16, No. 6, pp. 390~402.
- (4) Parish, H. C., Sepsy, C. F., 1972, " A numerical analysis of frost formation under forced convection ", *ASHRAE Transactions*, Vol. 78, No. 2231, pp. 236~251.
- (5) Ismail, K. A. R., Salinas, C., Goncalves, M. M., 1996, " Frost growth around a cylinder in a wet air stream ", *Int. J. refrigeration*, Vol. 20, No. 2, pp. 106~119.
- (6) Hayashi, Y., Aoki, K., Yuhara, H., 1977, " Study of frost formation based on a theoretical model of the frost layer ", *Heat transfer-Japanese Research*, Vol. 6, No. 3, pp. 79~94.
- (7) Yonko, J. D., Sepsy, C. F., 1967, " An investigation of the thermal conductivity of frost while forming on a flat horizontal plate ", *ASHRAE Transactions*, Part 2, Vol. 73, No. 2043, I.1.1~I.1.10.
- (8) Yang, D. K., Lee, K. S., 2004, " Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate ", *Int. J. Refrigeration*, Vol. 27, No. 1, pp. 89~96.
- (9) Galante, S. R., Churchill, S. W., 1990, " Applicability of solutions for convection in potential flow ", *Advances in heat transfer*, Vol. 20, pp. 353~388.
- (10) Churchill, S. W., Bernstein, M., 1977, " A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in cross flow ", *J. Heat transfer*, Vol. 99, pp. 300~306.
- (11) Giedt, W. H., 1949, " Investigation of variation of point unit heat transfer coefficient around a cylinder normal to an air stream ", *ASME Transactions*, Vol. 71, pp. 375~381.
- (12) Mertinelli R. C., Guibert, A. C., Morin, E. H., Boelter, L. M. K., 1943, " An investigation of aircraft heaters VIII-a simplified method for calculating the unit surface conductance over wings ", *NACA ARR*.
- (13) Lee, Y. B., Ro, S. T., 2001, " An experimental study of frost formation on a horizontal cylinder under cross flow ", *Int. J. refrigeration*, Vol. 24, No. 6, pp. 468~474.
- (14) Schneider, H. W., 1978, " Equation of the growth rate of frost forming on cooled surfaces ", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, No. 8, pp. 1019~1024.