

직교류 내 원관 표면에서의 서리층 성장 특성

양 동근, 김 민 수, 이 관 수^{†*}

한양대학교 대학원, *한양대학교 기계공학부

Characteristic of Frost Growth on a Cold Cylinder Surface in Cross Flow

Dong-Keun Yang, Min-Soo Kim, Kwan-Soo Lee^{†*}

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

*School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received August 17, 2005; revision received December 23, 2005)

ABSTRACT: In this paper, frosting experiments were conducted with variations of frosting parameters in order to obtain the correlations of frost properties. As a result, the local thickness, density, and surface temperature of the frost layer were presented. The dimensionless correlations for the frost thickness, frost density, frost surface temperature and heat transfer coefficient were derived as functions of dimensionless frosting parameters by using a dimensional analysis.

Key words: Correlation(상관식), Frost property(서리 물성치), Cylinder surface(원관 표면)

기 호 설 명

A : 면적 [m^2]
 c_p : 정압비열 [J/kgK]
 d : 원관 지름 [m]
 Fo : Fourier 수, at/d^2
 h : 평균 열전달계수 [W/m^2K]
 h_{sv} : 승화잠열 [J/kg]
 k : 열전도계수 [W/mK]
 m_f : 착상량 [kg]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 Nu : Nusselt 수, $h_a d/k_a$
 Q : 열전달률 [W]
 r : 원관의 반지름 [m]
 Re_a : Reynolds 수, $u_a d/\nu_a$
 T : 온도 [K]

t : 시간 [s]
 u_a : 공기속도 [m/s]
 W : 원관의 길이 [m]
 w_a : 절대습도 [kg/kg_a]
 y_f : 서리층 두께 [m]

그리스 문자

α : 열확산계수 [m^2/s]
 ν : 동점성계수 [m^2/s]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]

상첨자

* : 무차원

하첨자

a : 공기측

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-0426; fax: +82-2-2295-9021

E-mail address: ksleehy@hanyang.ac.kr

ave : 평균
c : 냉각면
f : 서리층
fs : 서리층 표면
ice : 얼음
in : 입구(inlet)
out : 출구(outlet)
r : 냉매
tot : 전체
tp : 물의 삼중점

1. 서 론

착상 조건 하에서 운전되는 열교환기에 생성된 다공성의 서리는 공기와 열교환기 사이의 열저항으로 작용하여 열전달량을 감소시키고 유로를 폐쇄시켜 열교환기 성능을 저하시킨다. 지금까지의 착상에 대한 연구에서 서리층 물성치는 여러 운전인자에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 운전인자에 따른 서리 물성치의 변화는 열교환기를 설계하는데 있어서 중요한 요소이다.

평판에 형성되는 서리층의 물성치에 대해서는 많은 연구자들에 의해 실험적으로 연구되었다. Ostin and Anderson⁽¹⁾과 Yonko and Sepsy⁽²⁾는 서리층의 유효 열전도계수를 서리 밀도의 함수로 표현하였으며, Tokura et al.⁽³⁾과 Biguria and Wenzel⁽⁴⁾은 서리층 두께, 밀도 및 유효 열전도계수에 관한 실험상관식을 제시하였다. Hosoda and Uzuhashi⁽⁵⁾는 서리층 밀도와 열전달계수에 대해 냉각면온도와 공기속도의 함수로 실험상관식을 유도하였으며, Mao et al.⁽⁶⁻⁷⁾은 극저습 조건에서 대부분의 서리층 물성치에 대한 무차원 상관식을 유도하였다. Yang and Lee⁽⁸⁾는 다양한 착상 조건 하에서 서리층 물성치에 대한 무차원 실험상관식을 중요 착상인자를 고려하여 유도하였다.

이처럼 평판에서 서리층 물성치에 대한 상관식은 여러 연구자들에 의해 제시되었으나, 원관에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 그러나 앞으로 열교환기 설계에서는 전열성능뿐만 아니라 경제성 즉 생산비용이 중요시되고 있으며, 관의 전열면적이 크게 증가된 환·관 일체형 열교환기가 개발되고 있다. 따라서 환과 더불어 원관 주위에서의 착상현상에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

Aoki et al.⁽⁹⁾은 수평 원관에서 공기의 절대습도와 냉각면온도에 따라 서리층 형성과정을 조사하였고, Chung et al.⁽¹⁰⁾은 공기속도와 절대습도의 변화에 따라 서리층 성장에 미치는 영향을 연구하였다. Aoki et al.⁽¹¹⁾은 수직 원관에서의 서리층 두께, 밀도 및 열전달에 대한 실험결과를 제시하였다. Schneider⁽¹²⁾는 서리층 두께에 대한 실험상관식을 제시하였으나 공기속도의 영향을 무시하였고, Lee et al.⁽¹³⁾은 저습 조건에서만 적용 가능한 두께 및 질량에 대한 상관식을 유도하였다. Cremers and Mehra⁽¹⁴⁾는 서리층 두께에 대해, Sengupta et al.⁽¹⁵⁾은 두께 및 밀도에 대한 실험상관식을 제시하였으나 공기온도 및 냉각면온도를 고정시킴으로써 상관식의 적용에 한계가 있다. 이와 같이 원관에 대한 기존의 연구들은 다소 한정된 실험 조건 내에서 서리물성치에 대한 결과를 제시하거나 일부 서리층 물성치에 대해 상관식을 유도하였다.

본 연구에서는 착상 조건 하에서 원관에서의 착상실험을 수행하며, 원관에서 각도 변화에 따른 국소적인 서리층 성장 특성을 조사한다. 이를 통해 다양한 착상인자(Re_d , Fo , w_a , T_a , T_c)를 고려하여 평균 서리층 물성치(두께, 밀도, 표면온도, 열전달계수)에 대한 실험상관식을 유도한다.

2. 실험

본 연구에서 사용된 실험장치는 습공기의 온·습도를 제어하는 항온항습실, 냉매의 온도와 유량을 조절하는 냉각부, 원관에서 착상실험이 진행되는 시험부, 그리고 습공기의 유량을 조절하고 실험장치의 각 부분을 연결하는 순환부로 구성되어 있으며, 각 부분은 독립적으로 제어할 수 있다.⁽⁸⁾

항온항습실 내에는 습공기의 온·습도를 측정하기 위해 Pt 100 Ω의 RTD가 장착되어 있으며, PID controller, 가열 및 가습을 위한 히터, 그리고 냉동장치를 제어하여 공기의 온·습도를 조절하였다. 냉각부는 냉매를 냉각시키는 냉동기와 냉매를 순환시키는 펌프로 구성되어 있으며, 2차냉매는 에틸렌글리콜과 증류수를 6:4로 혼합한 에틸렌글리콜 수용액을 사용하였다. 시험부의 입·출구에서의 공기온도는 20개의 T형 열전대와 thermopile을 사용하여 각각 측정하였고, 습도는 시험부 입·출구에 장착된 습도센서를 이용하여 측

정하였다. 인버터가 부착된 송풍기를 사용하여 공기의 유량을 조절하였고 그 유량은 노즐형 유량계로 측정하였다. 시험부 입·출구에 허니컴과 무동력 팬을 설치하여 공기의 순환을 균일하게 하였으며, 열손실을 방지하기 위해 시험부에 단열재를 부착하였다.

착상실험에 앞서 20 mm의 지름을 갖는 두개의 수평원관에 서리 질량측정용 알루미늄 테잎을 부착하였고, 실험조건에 도달하기 전에 착상이 되는 것을 방지하기 위해 냉각면을 비닐랩으로 완전히 감싼다. 냉동기, 냉매순환용 펌프, 항온항습실을 가동하여 실험조건을 설정하였다. 모든 실험조건이 정상상태에 도달하면 냉각면의 비닐랩을 제거하고 착상실험을 시작하였다. 착상실험 중 측정된 공기의 온·습도와 유량, 냉매의 유량 및 온도 등을 컴퓨터와 자료기록계를 이용하여 4초 간격으로 저장하였으며, 서리층 물성치(서리층 두께, 질량, 표면온도)는 20분 간격으로 실험시간 100분까지 측정하였다. 서리층 두께는 디지털 마이크로미터를 사용하여 30° 간격으로 측정하였으며, 서리층 표면온도는 적외선 복사온도계를 이용하여 45° 간격으로 측정이 이루어졌다. 서리의 무게는 정밀 전자저울을 사용하여 90° 간격으로 측정하였다.

서리층 두께와 무게로부터 서리 밀도를 다음과 같이 계산하였다.

$$\rho_f = \frac{m_f}{\pi \{ (r + y_f)^2 - r^2 \} W} \quad (1)$$

여기서, r 은 원관의 반지름이며, W 는 원관의 길이이다.

공기측 열전달량은 시험부 입·출구에서 공기의 온·습도차와 유량을 이용하여 다음 식으로 구하였다.

$$Q_{tot} = \dot{m}_a c_{p,a} (T_{a,in} - T_{a,out}) + \dot{m}_a (w_{a,in} - w_{a,out}) h_{sv} \quad (2)$$

냉매측의 열전달량은 다음과 같이 계산하였다.

$$Q_{tot} = \dot{m}_r c_{p,r} (T_{r,out} - T_{r,in}) \quad (3)$$

착상실험 중에 공기 측과 냉매 측의 열평형은

ASHRAE Standard 33-78에서 제시된 바와 같이 5% 내로 유지되었다.

위의 실험으로부터 착상조건에서 원관에서의 평균 열전달계수는 다음과 같이 계산하였다.

$$h = \frac{\dot{m}_a c_{p,a} (T_{a,in} - T_{a,out})}{A_{tot} (T_{a,ave} - T_{fs})} \quad (4)$$

실험결과와 불확실도는 측정장치들의 바이어스 오차와 정밀도 오차를 고려해 계산하였다.⁽¹⁶⁾ 실험결과와 불확실도는 평균 서리층 두께, 밀도, 평균 열전달계수에 대해 각각 5.28%, 6.59%, 5.07%이다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 수평 원관에서 서리 물성치에 대한 상관식을 얻기 위해 착상 조건 하에서 실험을 수행하였다. 실험조건들은 실험계획법에 의해 33가지 조건을 선정하였으며, 착상시간에 따라 각 조건에서 각각 5회의 실험이 수행되었다. 본 연구에서 실험조건은 $0.00280 \leq w_a \leq 0.00568$ kg/kg_a, $-32 \leq T_c \leq -20$ °C, $3 \leq T_a \leq 9$ °C, $0.5 \leq u_a \leq 2.0$ m/s이다.

3.1 국소적인 착상거동

본 연구에서는 수평 원관에서 착상실험을 통해 국소적인 서리층 성장 거동 특성을 조사하였다. Fig. 1은 서리층 성장에 대한 공기의 절대습도의 영향을 나타낸 것이다. 공기의 절대습도가 낮을 경우 서리층 두께가 낮고 국소적으로 다소 균일하지 못한 서리층이 형성된다. 이에 비해 공기의 절대습도가 높은 조건에서는 서리층이 두껍고, 원관의 각도 변화에 따라 국소적인 서리층 성장 거동의 차이가 상대적으로 적음을 알 수 있다. 일반적으로 원관의 전면부에서는 상대적으로 고온고습의 공기가 흐르므로 열 및 물질전달이 촉진되고 박리점 이후에는 다시 서리층 성장이 둔화되며, 후면부에서는 와의 생성 및 성장으로 인해 서리층 성장이 다시 촉진된다. 그러나 공기의 절대습도가 높을 경우에는 원관의 전면부에서 많은 물질전달에도 불구하고 박리점 이후 물질전달의 추진력의 감소가 상대적으로 적어서 국소적인 위치에

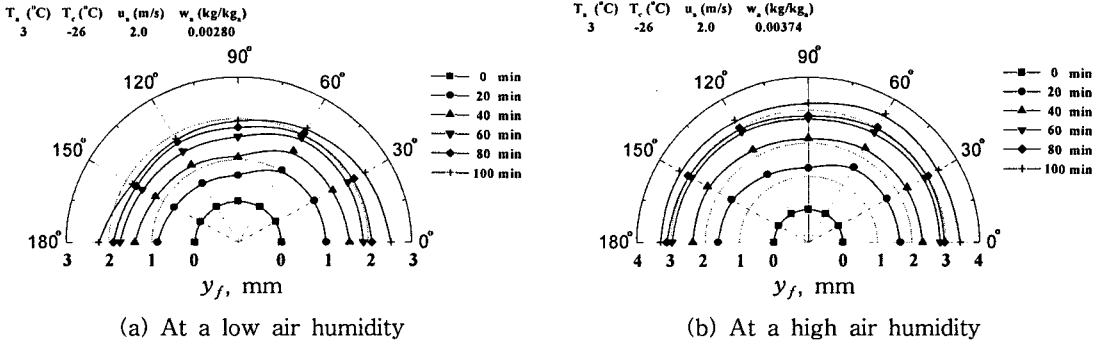


Fig. 1 Temporal variations of frost thickness with angular position.

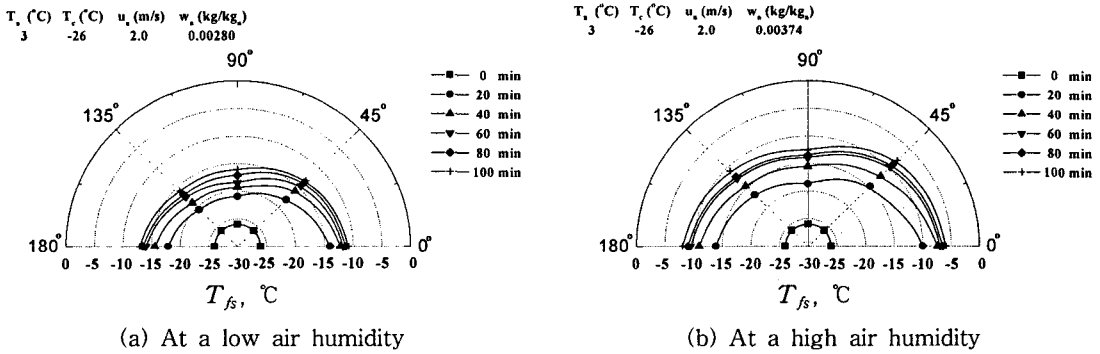


Fig. 2 Temporal variations of frost surface temperature with angular position.

관계없이 상대적으로 균일한 서리층이 형성된다.

Fig. 2는 공기의 절대습도에 따라 국소적인 서리층 표면온도를 각각 나타낸 것이다. 공기의 절대습도에 관계없이 원관의 전면부와 후면부에서 서리층 표면온도가 박리점 부근에서의 서리층 표면 온도보다 다소 높다. 공기의 절대습도가 증가할 경우에는 전체적으로 서리층 성장의 촉진으로

인해 공기와 냉각면 사이의 열저항이 증가하여 서리층 표면온도가 상승한다.

Fig. 3은 공기의 절대습도의 변화에 따라 원관의 위치에 따른 서리층 밀도를 제시한 것이다. 일반적으로 서리층 밀도는 서리층 표면온도(냉각면 온도)에 가장 지배적인 영향을 받는다. 그러나 고습의 공기조건에서는 서리층 표면온도가 상대

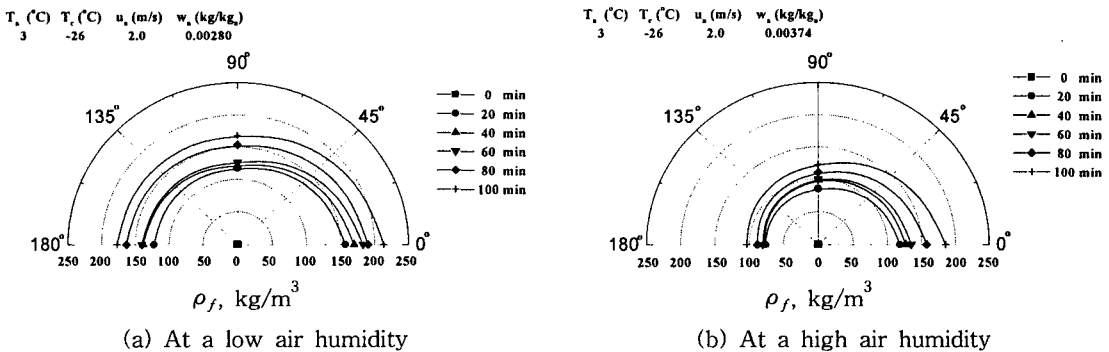


Fig. 3 Temporal variations of frost density with angular position.

적으로 높음에도 불구하고 저습의 공기조건에 비해 서리층 밀도가 현저히 낮음을 알 수 있다. 이는 고습 조건에서 서리층 성장이 매우 촉진되어 상대적으로 밀도가 낮은 서리층이 형성되기 때문이다. 또한, 원관의 전면부에 비해 상대적으로 저온 및 저습의 공기가 흐르는 원관의 후면부에서 물질전달의 추진력은 감소하나, 와의 생성 및 성장으로 인해 서리층 두께가 증가하기 때문에 원관의 후면부로 갈수록 현저히 밀도가 낮은 서리층이 형성된다.

3.2 서리 물성치 상관식

서리 물성치는 차원해석을 통해 착상인자들로 구성된 무차원 변수들의 함수로서 표현하였다.

차원해석을 위해 설정된 변수에는 공기온도, 시간, 공기속도, 절대습도, 냉각면온도, 서리층 표면온도, 두께, 밀도 및 열전달계수가 포함된다. 또한, 원관 지름, 공기의 밀도와 열전도계수, 얼음의 밀도와 물의 삼중점온도를 차원해석을 위한 전체변수로 설정한다. 위의 변수에 대해 차원해석을 수행하면 다음 식이 얻어진다.

$$f(y_f^*, \rho_f^*, T_{fs}^*, Nu, Re_d, Fo, w_a, T_a^*, T_c^*) = 0 \quad (5)$$

여기서, $y_f^*, \rho_f^*, T_{fs}^*, T_a^*, T_c^*$ 는 각각 $y_f/d, \rho_f/\rho_{ice}$,

$T_{fs} - T_{tp}/T_a - T_c, T_a/T_{tp}, T_c/T_{tp}$ 이다.

모든 서리물성치는 각각 Re_d 수, Fo 수, 절대습도, 무차원 공기온도 및 냉각면온도의 함수로 표현할 수 있다.

$$F = f(Re_d, Fo, w_a, T_a^*, T_c^*) = 0 \quad (6)$$

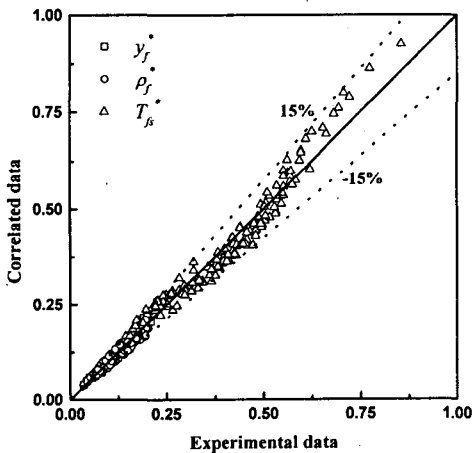
원관에서 무차원 서리층 물성치에 대한 실험상관식은 식(6)을 기초로 유도되며, 상관식의 적용범위는 $3 \leq T_a \leq 9^\circ C, -32 \leq T_c \leq -20^\circ C, 0.5 \leq u_a \leq 2.0$ m/s, $0.00280 \leq w_a \leq 0.00568$ kg/kg_a이다.

착상 조건 하에서 원관에서의 평균 서리 물성치에 대한 무차원 상관식은 다음과 같다.

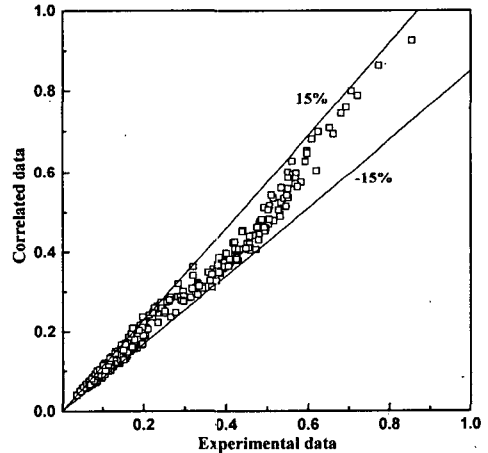
$$y_f^* = \frac{y_f}{d} = 3.236 Re_d^{0.044} Fo^{0.550} w_a^{1.267} \times (T_a^*)^{-14.884} (T_c^*)^{-8.400} \quad (7)$$

$$\rho_f^* = \frac{\rho_f}{\rho_{ice}} = 4.264 \times 10^{-4} Re_d^{0.346} Fo^{0.208} \times w_a^{-0.398} (T_a^*)^{14.001} (T_c^*)^{4.678} \quad (8)$$

$$T_{fs}^* = \frac{T_{fs} - T_{tp}}{T_a - T_c} = \frac{T_c - T_{tp}}{T_a - T_c} + 7.320 Re_d^{0.312} Fo^{0.314} \times w_a^{1.337} (T_a^*)^{-12.980} (T_c^*)^{-8.021} \quad (9)$$



(a) Dimensionless thickness, density and surface temperature of frost layer



(b) Nusselt number

Fig. 4 Comparison of the correlated and measured data of the dimensionless frost properties.

$$Nu_{ave} = \frac{hd}{k_a} = 0.437 Re_d^{0.431} Fo^{0.275} w_a^{-0.173} \times (T_a^*)^{-9.661} (T_c^*)^{7.221} \quad (10)$$

Fig. 4는 서리층 상관식에 의한 결과와 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 제시된 서리층 물성치에 대한 실험상관식들은 실험결과를 15%의 오차범위 내에서 예측하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수평 원관에서의 착상실험을 통해 국소적인 서리층 성장 특성을 분석하고 평균 서리층 물성치에 대한 무차원 실험상관식을 제시하였다. 실험상관식을 유도하기 위해 실험계획법에 의해 설정된 실험조건에서 실험을 수행하였다. 공기의 절대습도가 높을수록 원관에서 국소적인 위치에 관계없이 서리층 두께가 거의 일정하며, 밀도가 매우 낮은 서리층이 생성된다. 실험 결과로부터 다양한 착상인자(Re 수, Fo 수, 절대습도, 무차원 공기온도 및 무차원 냉각면온도)를 고려하여 평균 서리층 물성치(서리층 두께, 밀도, 표면온도, 열전달계수)에 대한 무차원 실험상관식을 유도하였다. 본 연구에서 제시된 상관식의 적용범위는 $3 \leq T_a \leq 9^\circ\text{C}$, $-32 \leq T_c \leq -20^\circ\text{C}$, $0.5 \leq u_a \leq 2.0 \text{ m/s}$, $0.00280 \leq w_a \leq 0.00568 \text{ kg/kg}_a$ 이다.

후 기

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

참고문헌

- Ostin, R. and Anderson, S., 1991, Frost growth parameters in a forced air stream, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 14, No. 4/5, pp. 1009-1017.
- Yonko, J.D. and Sepsy, C.F., 1967, An investigation of the thermal conductivity of frost while forming on a flat horizontal plate, *ASHRAE Trans*, Vol. 73, No. 2, pp. 1.1-1.11.
- Tokura, I., Saito, H. and Kishinami, K., 1983, Study on properties and growth rate of frost layers on cold surfaces, *J. Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 895-901.
- Biguria, G. and Wenzel, L. A., 1970, Measurement and correlation of water frost thermal conductivity and density, *I&EC Fundamentals*, Vol. 9, No. 1, pp. 129-138.
- Hosoda, T. and Uzuhashi, H., 1967, Effects of frost on the heat transfer coefficient, *Hitachi Review*, Vol. 16, No. 6, pp. 254-259.
- Mao, Y., Besant, R. W. and Rezkallah, K. S., 1992, Measurement and correlations of frost properties with airflow over a flat plate, *ASHRAE Trans*, Vol. 91, pp. 267-281.
- Mao, Y., Besant, R. W. and Chen, H., 1999, Frost characteristics and heat transfer on a flat plate under freezer operating conditions: Part I, Experimentation and correlations, *ASHRAE Trans*, Vol. 105, No. 2, pp. 231-251.
- Yang, D.K. and Lee, K. S., 2004, Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 27, No. 1, pp. 89-96.
- Aoki, K., Hattori, M. and Hayashi, Y., 1979, Frost formation on a cylinder surface under forced convection, *Proc. 15th International Congress of Refrigeration*, Paper No. b1/55.
- Chung, P.M., Algren, A.B. and Minneapolis, M., 1959, Frost formation and heat transfer on a cylinder surface in humid air cross flow, *Heating, Piping and Air Conditioning*, Vol. 30, No. 9, pp. 171-178.
- Aoki, H., Yamakawa, N. and Ohtani, S., 1981, Forced convective heat transfer around a vertical cylinder under frosting conditions, *Heat Transfer-Japanese Research*, Vol. 1, pp. 53-63.
- Schneider, H.W., 1978, Equation of the growth rate of frost forming on cooled surfaces, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 1019-1024.
- Lee, Y.B., Ryu, I.S. and Ro, S.T., 2002, The effect of environmental parameters on frost formation on a horizontal cylinder, *Trans. of*

- KSME, Vol. 26, No. 2, pp. 253-260.
14. Cremers, C. J. and Mehra, V. K., 1980, Frost formation on vertical cylinders in free convection, ASME J. Heat Transfer, Vol. 104, No. 1, pp. 3-7.
 15. Sengupta, S., Sherif, S. A. and Wong, K. V., 1998, Empirical heat transfer and frost thickness correlations during frost deposition on a cylinder in cross-flow in the transient regime, Int. J. Energy Research, Vol. 22, pp 615-624.
 16. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, Mechanical Engineering, Vol. 75 pp. 3-8.