

열교환기 흰에서의 서리층 두께와 서리층 표면온도의 실험 상관식

김 경 민, 김 정 수, 김 장 현, 이 관 수[†]
한양대학교 기계공학과, [†] 한양대학교 기계공학부

Empirical Correlations of Frost Thickness and Frost Surface Temperature on Heat Exchanger Fin

Kyoungmin Kim, Jung-Soo Kim, Janghyun Kim, Kwan-Soo Lee[†]
School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

ABSTRACT: In this study, dimensionless correlations of frost properties (i.e. the thickness and surface temperature of frost) on heat exchanger fin with nonuniform temperature distribution are proposed from frosting experiments. We analyzed the local fin temperature distribution, frost thickness and frost surface temperature on a 2D fin; in the airflow direction and the direction perpendicular to airflow. As a result, the frost growth on the fin had a close relation with fin heat conduction. The dimensionless correlations for the average frost properties were expressed as a function of dimensionless temperature, humidity ratio, Reynolds number, and Fourier number. These correlations agreed well with experimental data with the error less than 14%.

Key words: Empirical correlations(실험상관식), Frost properties(서리 물성치), Heat exchanger fin(열교환기 흰), Nonuniform temperature distribution(불균일한 온도 분포)

———— 기 호 설 명 ————

F : 서리 물성치
 H_{fin} : 흰 높이 [m]
 L_{fin} : 흰 길이 [m]
 t : 착상시간 [min]
 x : 공기 유동 방향
 y_f : 서리층 두께 [m]
 z : 유동 수직 방향

그 리 스 문 자

α : 열확산 계수 [m^2/s]
 ν : 동점성 계수 [m^2/s]

상 첨 자

* : 무차원 변수

하 첨 자

a : 공기
 b : 흰 바탕
 tp : 물의 상중점

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-0426; fax: +82-2-2295-9021
 E-mail address: ksleehy@hanyang.ac.kr

1. 서론

냉장 및 냉동고 등 저온 조건에서 운전되는 열교환기의 환(Fin)표면에 수증기가 접하면 서리가 냉각면에 형성된다. 열교환기는 운전 시간이 경과함에 따라 냉각 표면에 형성되는 서리층으로 인해 공기 유로가 차단되어, 열교환기의 전열 성능이 저하된다. 착상 현상은 저온용 열교환기의 열적 성능에 가장 지배적인 요소이므로 열교환기 환에 형성되는 서리 성장을 정확하게 예측하는 것은 무엇보다도 중요하다.

원관 및 평판에서 서리 물성치 변화를 예측하기 위한 실험상관식들은 많은 연구자들⁽¹⁻⁶⁾에 의해 보고되었다. 원관(tube)에서 착상 실험을 통해, Schneider⁽¹⁾는 서리층 두께에 대한 실험상관식을 제안하였고, Kim et al.⁽²⁾은 서리 물성치에 대한 무차원 상관식을 무차원 변수들의 함수로 정의하였다. 이에 반해, 평판에서 서리 물성치의 실험상관식을 살펴보면⁽³⁻⁶⁾, Lee et al.⁽³⁾는 서리층 유효 열전도계수를 서리층 밀도만의 함수로 표현하였다. Mao et al.⁽⁴⁾은 실내 온도(room temperature), 층류 유동 조건에서 서리 물성치에 대한 실험상관식을 유도하였고, Tokura et al.⁽⁵⁾은 자연 대류에서 수직 냉각 평판에 대한 서리층 두께 및 밀도에 관한 실험상관식을 제시하였다. Yang and Lee⁽⁶⁾은 다양한 착상 인자에 따른 서리층 두께, 밀도, 표면온도 및 서리층의 유효 열전도계수, 열 및 물질전달 계수의 실험상관식을 제안하였다. 이러한 연구들⁽³⁻⁶⁾은 열교환기의 환을 평판으로 단순 모사하고, 그 평판을 일정 표면온도(constant surface temperature)로 간주하였기 때문에 불균일한 온도분포(non-uniform temperature distribution)를 갖는 실제 열교환기 환에서의 착상 거동 특성과는 차이를 가질 수밖에 없다. 그럼에도 불구하고, 지금까지의 착상 연구는 환을 일정 표면온도로 간주한 평판에서의 착상 현상에 초점을 맞추고 있어, 실제 열교환기 환에서의 착상 데이터가 절대적으로 부족한 상태이다. 최근 들어, 소수의 연구자들⁽⁷⁻¹⁰⁾은 불균일한 온도분포를 갖는 평판에서의 착상 현상에 관한 연구를 수행하고 있다. Chen et al.⁽⁷⁾은 국소 체적 평균기법(local volume averaging technique)에 근거하여 열교환기 환의 열전도를 고려한 환에서의 착상 현상을 해석하고, Chen et al.⁽⁸⁾의 실험적 데이터

와 비교하였다. Tso et al.⁽⁹⁾은 직선 환을 환형 환(angular fin)으로 증가하여 불균일한(uneven) 서리 성장을 갖는 환-관 열교환기의 성능 예측을 위한 수학적 모델을 제시하였다. Kim et al.⁽¹⁰⁾은 착상 조건하에서 환의 열전도를 고려하여 유동 방향(1차원적 해석)으로의 착상 거동 예측을 위한 수학적 모델을 제시하였다. 이상에서 살펴본 것들이, 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 환에 대한 착상 연구는 초기 단계에 있으며, 이로 인해 열교환기 환에서의 착상 데이터는 여전히 부족한 상태에 있다. 그 결과, 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 환에서 서리 물성치에 대한 실험 상관식은 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 착상 실험을 통해 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 환에서 서리 물성치(서리층 두께 및 서리층 표면온도)에 대한 실험 상관식을 제시한다. 이를 위해 유동 방향 및 유동에 수직인 방향으로 환에서의 국소 온도 분포 및 착상 특성을 파악한다. 열교환기 환에서 서리 물성치의 무차원 상관식은 무차원 온도, 절대 습도, Re수 및 Fo수의 함수로 표현된다.

2. 실험

본 연구에서는 불균일한 온도분포를 갖는 환에서 서리 물성치의 실험상관식을 제안하기 위해 열교환기 환에서의 착상 실험을 수행하였다. 실험장치는 크게 향온향습실, 시험부, 냉각부 및 순환부로 구성되어 있으며⁽¹¹⁾, 시험부의 중앙에 열교환기가 놓여 있다.

Fig. 1은 시험부의 개략도를 나타낸 것이다. 환의 재질은 열전도성이 우수한 알루미늄 합금이고, 환의 두께는 1 mm이며, 2개의 환은 열교환기(HEX)의 폭(W)을 3등분하는 위치에 하나씩

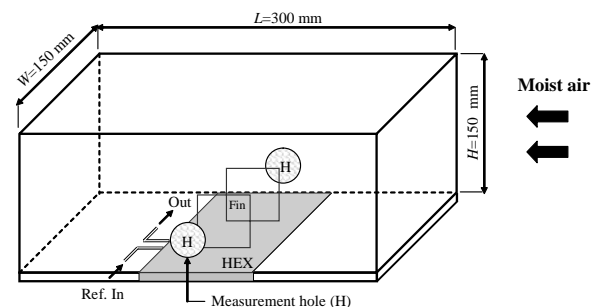


Fig. 1 Schematic of test section

놓여 있다. 서리층 두께와 서리층 표면온도를 측정하기 위하여 시험부의 측면에 측정 구멍(measurement hole)을 내었다. 실험이 진행되는 동안에는 측정 구멍을 막아두었으며, 측정 시 아크릴 구멍을 통한 외부 공기의 유입에 따른 측정 오차를 최소화하기 위해 가능한 한 측정 구멍을 작게 만들었다.

Fig. 2은 흰의 표면온도 및 서리 물성치의 측정점을 나타낸 것이다. 흰의 표면온도, 서리층 두께 및 서리층 표면온도는 $z=35$ mm 위치에서 흰의 선단($x=0$)으로부터 15, 30 및 45 mm의 위치(유동 방향)와 $x=30$ mm 위치에서 흰의 바탕($z=0$)으로부터 17.5, 35 및 52.5 mm의 위치(유동 수직 방향)에서 각각 측정하였다. 흰의 표면온도는 5곳 측정점에 해당하는 흰의 반대편에 T형 열전대(thermocouple)를 부착하여 측정하였다. 이는 열전대 설치에 따른 표면 조도의 변화와 그로 인한 측정 오차를 피하기 위한 조치이다. 서리층 두께는 마이크로미터 게이지를 이용하여 측정하였다. 이 때, 마이크로미터 탐침(probe)이 서리에 닿을 때 얇은 서리층의 액화 현상을 막기 위해 열전도계수가 낮은 아크릴 막대를 이용하였다. 서리층 표면온도는 열화상 카메라를 이용하여 측정하였으며, 측정의 정확도를 향상시키기 위하여 카메라의 모니터에 5곳의 측정점을 미리 선정해 두었다.

흰의 표면온도, 서리층 두께 및 서리층 표면온도의 불확실도(uncertainty)는 각각 0.49°C , 0.03 mm 및 0.31°C 이다⁽¹²⁾.

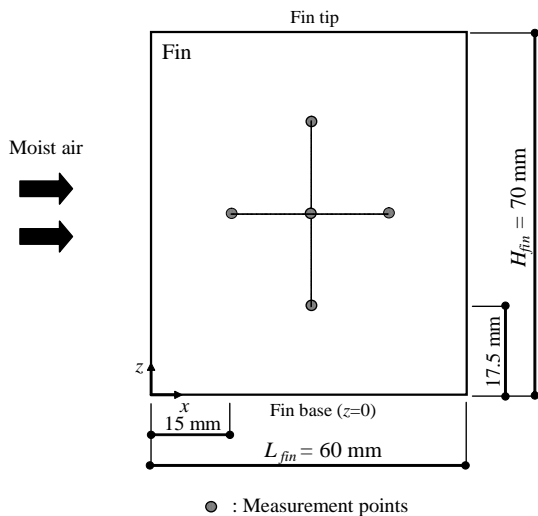
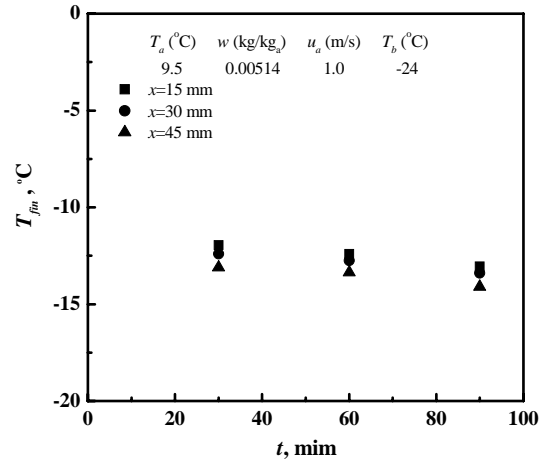
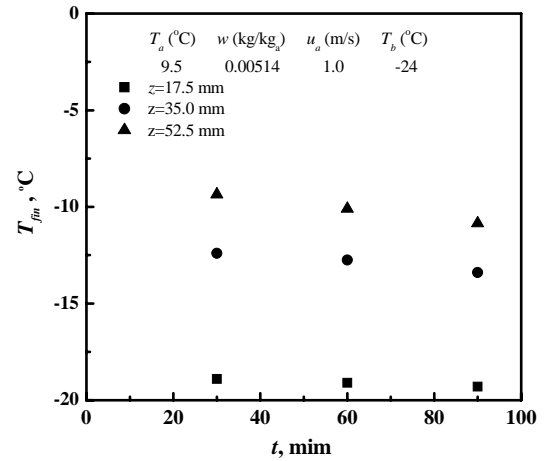


Fig. 2 Measurement points of the fin temperature and frost measure properties



(a) The airflow direction at $z=35$ mm



(b) The directional perpendicular to airflow at $x=30$ mm

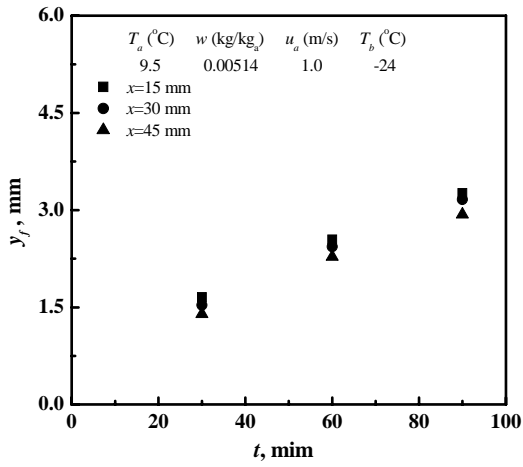
Fig. 3 Temperature distribution on 2D fin surface with frost growth

3. 결과 및 고찰

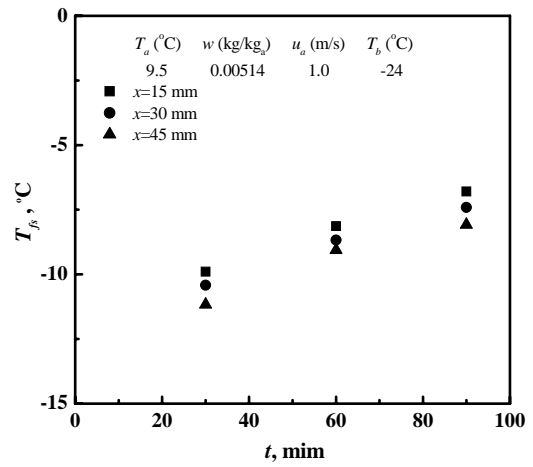
본 연구에서는 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 흰에서 서리 물성치에 대한 실험상관식을 유도하기 위해 착상 실험을 수행하였다. 착상 조건들은 실험계획법(Design of Experiment)에 의해 25가지 후보점을 선정하였다. 실험의 재현성을 구현하기 위해 각각 5회의 실험을 수행하였다.

3.1 흰의 온도 분포 및 착상 특성

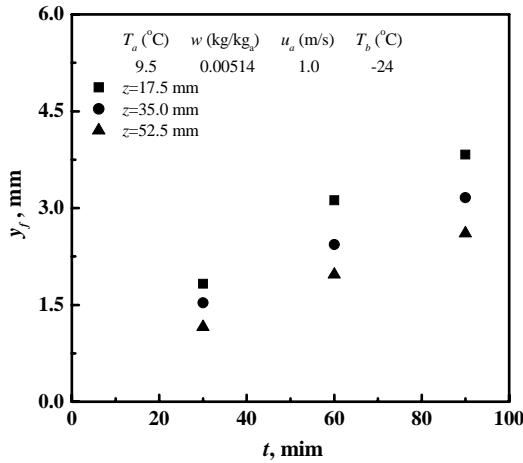
Fig. 3는 서리 성장에 따른 흰에서의 온도분포



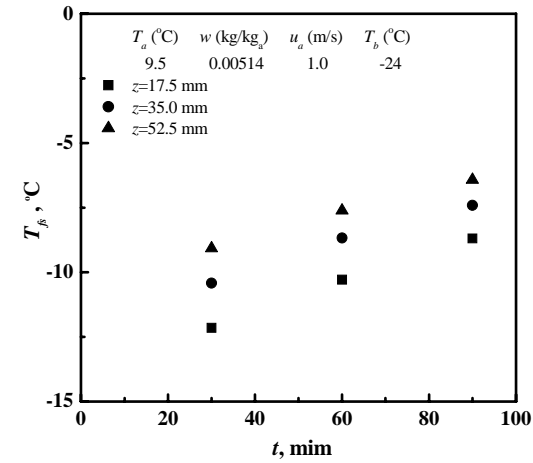
(a) The airflow direction at $z=35$ mm



(a) The airflow direction at $z=35$ mm



(b) The direction perpendicular to airflow at $x=30$ mm



(b) The direction perpendicular to airflow at $x=30$ mm

Fig. 4 Frost thickness on 2D fin surface with frosting time

Fig. 5 Frost surface temperature on 2D fin surface with frosting time

를 도시한 것이다. 2차원 흰의 온도는 착상 초기 ($t=30$ min) 얇은 서리 성장과 강제 대류에 의한 흰 표면과 습공기와의 활발한 열전달로 인해 높게 나타났다. 착상이 진행됨에 따라 열저항 증가와 흰의 열관성(thermal inertia) 효과로 인해 흰의 표면온도는 서서히 하강하였다. 특히, $z=35$ mm 위치에서 유동 방향(a)으로 흰의 온도구배는 상대적으로 작은 반면, $x=30$ mm 위치에서 유동에 수직인 방향(b)으로 흰의 온도구배는 흰의 열전도(fin heat conduction)로 인해 크게 나타났다.

Fig. 4은 착상이 진행되는 동안 2차원 흰에서의 서리층 두께를 나타낸 것이다. 유동 방향(a)으로의 서리층 두께 성장은 흰 선단효과(leading

edge effects)의 영향을 받아 $x=15$ mm에서 활발하나, 그 영향은 작았다. 또한, 착상 시간에 따른 유동 방향으로의 서리층 두께 구배는 크게 변화하지 않았다. 반면에, 유동에 수직인 방향의 경우, 서리층 두께는 흰의 열전도의 영향으로 $z=17.5$ mm에서 상대적으로 활발하게 성장하였고, 서리층 두께 구배는 유동 방향과 달리 일정 시간이 경과한 후 다소 커졌다.

Fig. 5은 착상이 진행되는 동안 2차원 흰 표면에 형성되는 서리층의 표면온도를 나타낸 것이다. 유동 방향으로의 서리층 표면온도는 흰 선단에 비해 흰 후단($x=45$ mm)에서 낮고, 시간에 따른 유동 방향의 서리층 표면 온도구배는 크게 변화하지 않았다. 이는 서리층 두께 성장과 밀접하게

연관되어 있다. 그러나, 유동에 수직한 방향의 경우, 서리층 표면온도는 낮은 흰 표면온도의 영향으로 $z=17.5$ mm에서 낮게 나타나지만, 시간이 경과할수록 서리층 표면 온도구배는 서리층 두께 구배와 달리 점점 감소하였다. 이는 착상 초기에는 서리층 두께가 얇게 형성되어 흰 표면온도의 영향을 크게 받지만, 시간이 경과할수록 서리층 두께 성장이 열저항을 증가시키기 때문이다.

3.2 무차원 상관식

본 연구에서는 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 흰에서 서리 물성치(서리층 두께 및 서리층 표면온도)에 대한 무차원 상관식을 제안한다. 이 무차원 상관식은 차원해석(dimensional analysis)을 통해 무차원 변수들의 함수로 표현된다. 차원 해석에 사용된 변수들은 착상 인자(공기 온도, 공기 유속, 공기 절대습도, 흰 바탕온도 및 착상 시간), 측정 인자(서리층 두께와 서리층 표면온도), 흰 길이 및 물성치(공기의 점성계수와 열확산계수 및 물의 삼중점 온도) 등이다. 착상 인자에 대한 열교환기 흰에서의 착상 거동을 예측하기 위하여 서리물성치의 평균값(mean value)을 이용하여 상관식을 유도하였다. 여기서, 평균값은 fig. 2에서 보듯이 5곳 측정점에 대한 서리 물성치의 평균값을 의미 한다.

열교환기 흰에 대한 서리 물성치(F)는 무차원 온도, 절대 습도, Re_L 수 및 Fo_L 수의 함수로 나타난다.

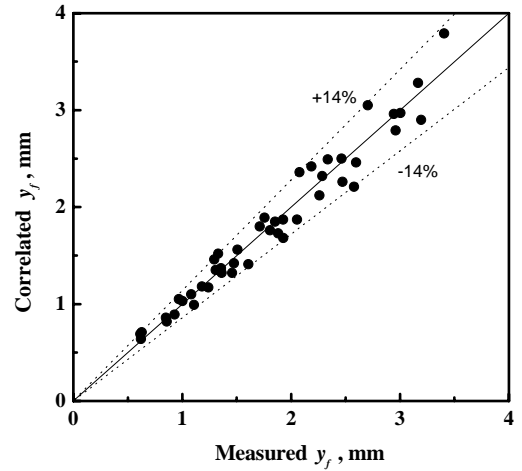
$$F = f(T_a^*, w, Re_L Fo_L) \quad (1)$$

여기서

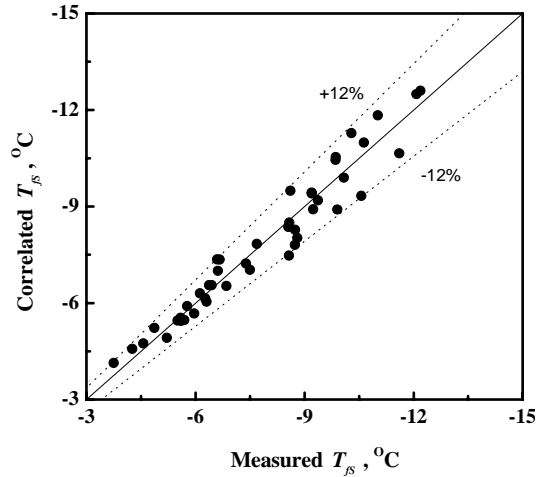
$$T_a^* = \frac{T_a}{T_b}, \quad Re_L = \frac{u_a L_{fm}}{\nu}, \quad Fo_L = \frac{\alpha_a t}{L_{fm}^2}$$

이다.

불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 흰에서 평균 서리층 두께 및 서리층 표면온도에 대한 무차원 상관식은 다음과 같다.



(a) Frost thickness



(b) Frost surface temperature

Fig. 6 Comparison of the measured and correlated data of the average frost properties

$$y_f^* = \frac{y_f}{L_{fm}} = 0.37885 (T_a^*)^{15.22610} (w)^{0.39276} \times (Re_L)^{-0.15768} (Fo_L)^{0.67625} \quad (2)$$

$$T_{fs}^* = \frac{T_{fs} - T_{tp}}{T_a - T_b} = 0.00032 (T_a^*)^{-0.54941} (w)^{-1.62993} \times (Re_L)^{-0.26730} (Fo_L)^{-0.25801} \quad (3)$$

여기서 적용범위는 $278.15 \leq T_a \leq 284.15$ K, $1.0 \leq u_a \leq 2.0$ m/s, $0.00333 \leq w_a \leq 0.00634$ kg/kg_a, $246.15 \leq T_b \leq 258.15$ K 및 $0 \leq t \leq 90$ min 이다.

Fig. 6은 열교환기 흰에서의 평균 서리 물성치에 대한 상관식과 측정 데이터를 비교한 것이다. 이 상관식은 최대 14%의 오차 내에서 측정 데이

터를 잘 예측하였다. 이로부터, 본 연구에서 제시한 실험상관식을 이용하여 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 환에서의 착상 거동을 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 착상 실험을 통해 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 환에서 서리 물성치(서리층 두께 및 서리층 표면온도)에 대한 실험상관식을 제시하였다. 이를 위해 유동 방향 및 유동에 수직인 방향으로 환에서의 국소 온도분포, 서리층 두께 및 서리층 표면온도를 파악하였다. 그 결과, 2차원 환에서의 서리 성장은 환의 열전도와 밀접하게 연관되어 있다. 착상 인자에 대한 열교환기 환에서의 착상 거동을 예측하기 위하여 서리 물성치의 평균값을 이용하여 무차원 상관식을 유도하였다. 열교환기 환에서 서리층 두께 및 표면온도의 무차원 상관식은 무차원 온도, 절대 습도, Re수 및 Fo수의 함수로 표현되며, 이 상관식은 실험 데이터를 최대 14% 오차 내에서 잘 예측하였다.

후 기

이 논문은 2008년 정부재원(교육과학기술부)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2008-313-D00110)

참 고 문 헌

- Schneider, H. W., 1978, Equation of the growth rate of frost forming on cooled surfaces, *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 1019-1024
- Kim, J. S., Yang, D. K. and Lee, K. S., 2008, Dimensionless correlations of frost properties on a cold cylinder surface, *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 51, No. 15-16, pp 3701-4144.
- Lee, K. S., Kim, W. S. and Lee, T. H., 1997, A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface, *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol.40, No. 18, pp.4359-4365.
- Mao, Y., Besant, R. W. and Falk, J., 1993, Measurement and correlations of frost properties with laminar airflow at room temperature over a flat plate, *ASHRAE Trans.*, Vol. 91, pp. 739-745.
- Tokura, I., Saito, H. and Kishinami, K., 1983, Study on properties and growth rate of frost layers on cold surfaces, *J. of Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 895-901.
- Yang, D. K. and Lee, K. S., 2004, Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate, *Int. J. of Refrigeration*, Vol.27, No. 1, pp.89-96.
- Chen, H., Thomas, L., and Besant, R. W., 2000, Modeling frost characteristics on heat exchanger fins: Part I, Numerical model, *ASHRAE Trans.*, pp. 357-367.
- Chen, H., Thomas, L., and Besant, R. W., 2000, Modeling frost characteristics on heat exchanger fins: Part II, Model validation and limitations, *ASHRAE Trans.*, pp. 368-376.
- Tso, C. P., Cheng, Y. C. and Lai, A. C. K., 2006, An improved model for predicting performance of finned tube heat exchanger under frosting condition, with frost thickness variation along fin, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, pp. 111-120
- Kim, J. S., Kang, S. J. and Lee, K. S., 2008, Frost behavior on a one-dimensional fin considering heat conduction of heat exchanger fins, *SAREK Vol.20 No.11*, pp.727-732.
- Lee, K. S., Jhee, S. and Yang, D. K., 2003, Prediction of the frost formation on a cold flat surface, *Int. J. of heat and mass transfer*, Vol. 46, pp. 3789-3796.
- Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3-8.