

열교환기 핀에서의 서리층 물성치에 대한 실험 상관식

김 경 민, 이 관 수^{*†}

한양대학교 대학원 기계공학과, *한양대학교 기계공학부

Empirical Correlations of Frost Properties on the Fin of a Heat Exchanger

Kyoungmin Kim, Kwan-Soo Lee^{*†}

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

(Received September 11, 2009; revision received October 6, 2009)

ABSTRACT: In this study, fin surface temperature and frost properties, i.e., frost thickness and frost surface temperature on a heat exchanger, were experimentally analyzed with different fin thicknesses, fin sizes and thermal conductivities of fin. As a result, it is found that fin thickness and thermal conductivity of fin should be considered in order to design an efficient heat exchanger fin. Correlations of dimensionless average frost properties were proposed as functions of dimensionless air temperature, dimensionless fin base temperature, dimensionless fin thickness, absolute air humidity, Reynolds number and Fourier number. The correlations predicted well the average frost thickness with a maximum error of 10.5% and frost surface temperature with a maximum difference of 0.89 °C, respectively.

Key words: Empirical correlations(실험상관식), Frost properties(서리 물성치), Heat exchanger fin (열교환기 핀), Non-uniform temperature distribution(불균일한 온도분포)

기 호 설 명

- F : 서리 물성치
- Fo_L : Fourier 수, $\alpha_a t / L_{fin}^2$
- H_{fin} : 핀 높이 [m]
- k_{ifin} : 핀 열전도 계수 [W/mK]
- L_{ifin} : 핀 길이 [m]
- Re_L : Reynolds 수, $u_a L_{fin} / \nu$
- T : 온도 [K]
- t : 착상시간 [min]
- t_{fin} : 핀 두께 [mm]
- u : 공기 유속 [m/sec]
- w : 절대 습도 [kg_a/kg]
- x : 유동방향

- y_f : 서리층 두께 [m]
- z : 유동 수직 방향

그리스 문자

- α : 열확산 계수 [m²/s]
- ν : 동점성 계수 [m²/s]
- Δ : 증가량

상첨자

- $*$: 무차원 변수

하첨자

- a : 공기

† Corresponding author

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

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

<i>al</i>	: 알루미늄
<i>b</i>	: 핀 바탕
<i>cu</i>	: 구리
<i>f</i>	: 서리층
<i>fs</i>	: 서리층 표면
<i>ref</i>	: 핀 기준 두께
<i>tp</i>	: 물의 삼중점

1. 서 론

냉장 및 냉동고 등 저온 조건에서 운전되는 열교환기의 핀(fin) 표면에 수증기가 집하면 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 핀에 형성되는 서리 성장을 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다. 평판에서 서리 물성치 변화를 예측하기 위한 실험상관식은 많은 연구자들^(1~5)에 의해 보고되었다. Yonko and Sepsy⁽¹⁾와 Lee et al.⁽²⁾는 서리층 유효 열전도계수를 서리층 밀도만의 함수로 표현하였다. Mao et al.⁽³⁾은 실내 온도(room temperature), 층류 유동 조건에서 서리 물성치에 대한 실험상관식을 유도하였고, Tokura et al.⁽⁴⁾은 자연 대류에서 수직 냉각 평판에 대한 서리층 두께 및 밀도에 관한 실험상관식을 제시하였다. Yang and Lee⁽⁵⁾은 다양한 착상 인자에 따른 서리층 두께, 밀도, 표면온도 및 서리층의 유효 열전도 계수, 열 및 물질전달 계수의 실험상관식을 제안하였다. 이러한 연구들^(1~5)은 열교환기의 핀을 평판으로 단순 모사하고, 그 평판을 일정 표면온도(constant surface temperature)로 간주하였기 때문에 불균일한 온도 분포(non-uniform temperature distribution)를 갖는 실제 열교환기 핀에서의 착상 거동 특성과는 차이를 가질 수 밖에 없다. 그럼에도 불구하고, 지금까지의 착상 연구는 핀을 일정 표면온도로 간주한 평판에서의 착상 현상에 초점을 맞추고 있어, 실제 열교환기 핀에서의 착상 데이터가 부족한 상태이다. 최근 들어, 소수의 연구자들^(6~12)은 불균일한 온도분포를 갖는 평판에서의 착상 현상에 관한 연구를 수행하고 있다. Chen et al.⁽⁶⁾은 국소 체적 평균기법(local volume averaging technique)에 근거하여 열교환기 핀의 열전도를 고려한 핀에서의 착상 현상을 해석하고, Chen et al.⁽⁷⁾의 실험적

데이터와 비교하였다. Tso et al.⁽⁸⁾은 직선 핀을 환형 핀(angular fin)으로 등가하여 불균일한(uneven) 서리 성장을 갖는 핀-관 열교환기의 성능 예측을 위한 수학적 모델을 제시하였다. Kim et al.⁽⁹⁾은 착상 조건하에서 핀의 열전도를 고려하여 유동 방향(1차원적 해석)으로의 착상 거동 예측을 위한 수학적 모델을 제시하였다. Kwon et al.⁽¹⁰⁾은 착상 실험을 통해 냉각면에서 국소 온도분포 및 서리 성장 거동을 파악하였다. 그러나, 이는 유동 방향(1차원적 실험)만에 대한 착상 현상을 파악하여, 이로부터 얻어진 착상 데이터를 실제 열교환기 핀에 적용하기에는 한계가 있다. Kim et al.⁽¹¹⁾은 열전도를 고려한 열교환기 핀에서의 착상 거동을 예측하기 위한 수학적 모델을 제시하였으며, 등가 온도 상관식을 제안하였다. An et al.⁽¹²⁾은 불균일한 온도분포를 가지는 열교환기 핀에서의 착상 실험을 통하여 유동 방향 및 유동에 수직인 방향으로 서리층 두께, 밀도 및 표면온도를 분석하였으나 착상에 영향을 미치는 핀 재료와 핀 형상(핀 두께 및 핀 크기)를 고려하지 않았다. 이상에서 살펴보았듯이 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 핀에 대한 착상 연구는 초기 단계에 있고 열교환기 핀에서의 착상 데이터는 부족한 상태이며, 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 핀에서 서리 물성치에 대한 실험 상관식은 전무하다.

따라서 본 연구에서는 착상 실험을 통해 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 핀에서 핀 형상 및 핀 재료에 대한 착상 특성을 파악한다. 또한 서리 평균 물성치(서리층 두께 및 서리층 표면온도)에 대한 무차원 실험 상관식을 제시한다.

2. 실험

본 연구는 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 핀에서 핀 형상 및 핀 재료에 따른 착상거동과 평균 서리 물성치의 실험상관식을 제안하기 위해 열교환기 핀에서의 착상 실험을 수행하였다. 실험 장치는 크게 항온항습실, 시험부, 냉각부 및 순환부로 구성되어 있으며⁽¹³⁾, 시험부의 중앙에 열교환기가 놓여 있다.⁽¹²⁾

Fig. 1은 시험부의 개략도를 나타낸 것이다. 핀의 재질은 알루미늄($k_{fin,al} = 220 \text{ W/mK}$)과 구리($k_{fin,cu} = 390 \text{ W/mK}$) 2가지를 이용 하였으며 핀 두께는 0.6, 0.8, 1.0 mm로서, 총 6종류의 핀으로 실험을

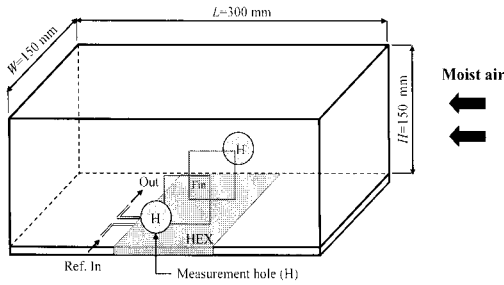


Fig. 1 Schematic of test section.

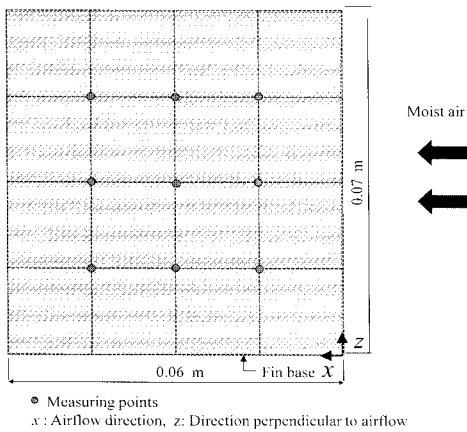
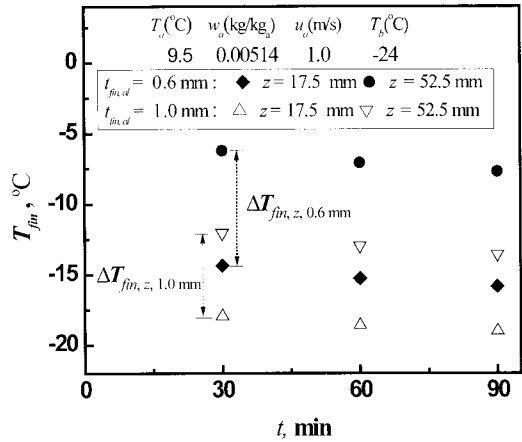


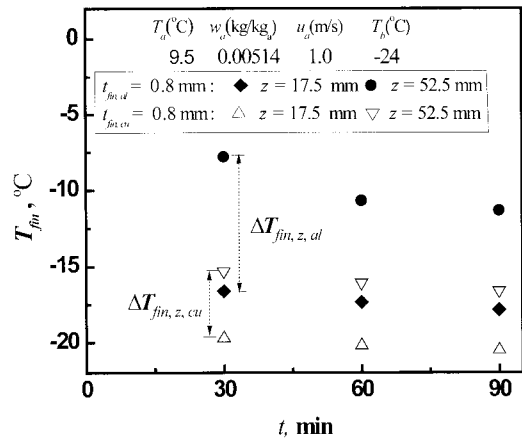
Fig. 2 Locations of the measurement of the fin temperature and frost properties.

하였다. 2개의 핀은 열교환기(HEX)의 폭(W)을 3등분하는 위치에 하나씩 놓여 있다. 서리층 두께와 서리층 표면온도를 측정하기 위하여 시험부의 측면에 측정 구멍(measurement holes)을 내었다. 실험이 진행되는 동안에는 측정 구멍을 막아두었으며, 측정 시 아크릴 구멍을 통한 외부 공기의 유입에 따른 측정 오차를 최소화하기 위해 가능한 측정 구멍을 작게 만들었다.

Fig. 2은 핀의 표면온도 및 서리 물성치의 측정 위치를 나타낸 것이다. 핀의 표면온도, 서리층 두께 및 서리층 표면온도는 핀을 4등분하는 9점에서 측정하였다. 핀의 표면온도는 9곳 측정점에 해당하는 핀의 반대편에 T형 열전대(thermocouple)를 부착하여 측정함으로써, 열전대 설치에 따른 표면 조도의 변화와 그로 인한 측정 오차를 최소화 하였다. 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 이용하였



(a) With different fin thicknesses



(b) With different fin thermal conductivities

Fig. 3 Temporal temperature of fin surface at $x = 30$ mm.

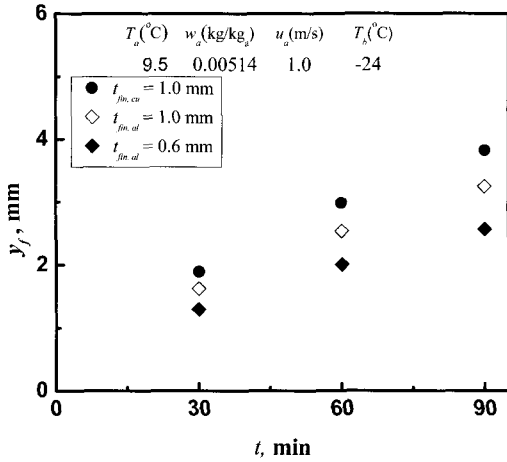
다. 서리층 표면온도는 열화상 카메라를 이용하여 측정하였으며, 측정의 정확도를 향상시키기 위하여 카메라의 모니터에 9곳의 측정점을 미리 선정해 두었다.

핀의 표면온도, 서리층 두께 및 서리층 표면온도의 불확실도(uncertainty)는 각각 0.38 °C, 0.042 mm 및 0.45 °C 이다.⁽¹⁴⁾

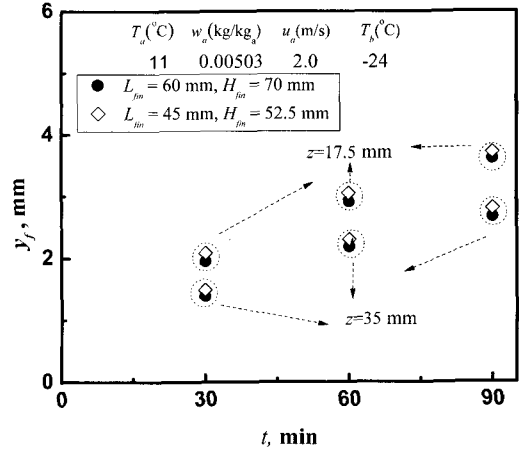
3. 결과 및 고찰

3.1 핀 형상 및 핀 재료에 따른 착상 특성

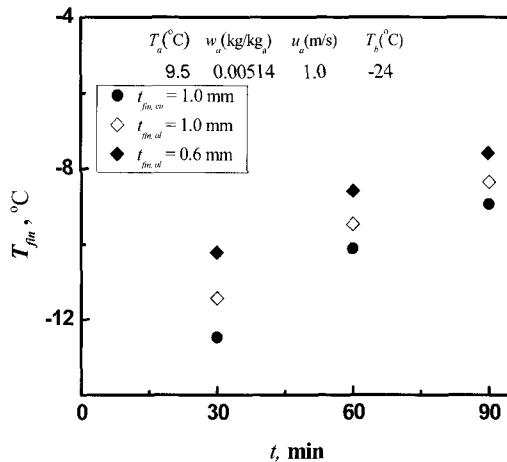
Fig. 3은 동일한 착상 운전조건에서 핀 두께와



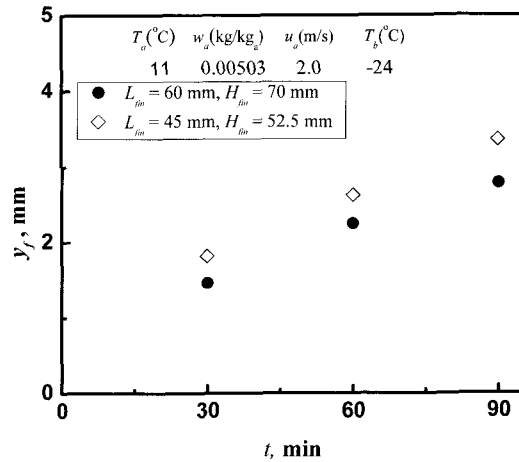
(a) Frost thickness



(a) Local frost layer thickness at $x = 15$



(b) Frost surface temperature



(b) Average frost layer thickness

Fig. 4 Comparison of average frost properties with different fin thicknesses and fin thermal conductivities.

핀 재료의 변화에 따른 핀 표면온도를 도시하였다. 핀 표면온도는 유동에 수직한 방향으로 $x = 30$ mm 에서, 시간에 따른 변화를 나타내었다. 실험 결과 알루미늄 재질의 두께가 1.0 mm인 핀($t_{fin,al} = 1.0$ mm)이 같은 재질의 두께가 0.6 mm인 핀($t_{fin,al} = 0.6$ mm)보다 낮은 핀 표면온도를 가지며, 유동에 수직한 방향으로의 핀 표면온도 구배($\Delta T_{z,fin}$)는 두께가 두꺼운 흰이 더 작은 온도구배를 보였다. 또한 같은 핀 두께($t_{fin} = 0.8$ mm)에서 알루미늄 핀보다 열전도 계수가 더 큰 구리 핀이 더 낮은 핀 표면 온도를 가지었으며, 상대적으로 작은 핀

Fig. 5 Frost thickness with different fin sizes.

표면 온도 구배를 보였다. 이는 핀 두께가 증가하거나 핀 열전도 계수가 증가하면, 핀의 열저항 (thermal resistance)이 감소하여 핀 바탕으로부터 핀 표면온도 변화가 작아지기 때문이다.

Fig. 4은 동일한 착상조건에서 서리층 평균 두께 및 서리층 평균 표면온도를 비교하여 도시하였다. 여기서 평균값은 Fig. 2에서 보듯이 9곳 측정점에 대한 물성치의 평균값 이다. 앞서 살펴본 것과 같이 서리층 두께의 경우, 동일한 착상 운전조건에서 핀의 열저항이 감소하면 핀 표면 온도와 핀 바탕 온도의 차이가 작아짐에 따라 서리층 두께 성장이 촉진 되게 된다. 서리층 표면온도는 핀 두께가 증가하거나 핀 열전도가 증가할 경우, 핀 열저항 감

소로 인해 더 낮은 서리층 표면온도를 갖게 된다.

Fig. 5는 핀 크기에 따른 서리층 두께이다. 국소적으로 관찰하면, 작은 크기의 핀($L_{fin} \times H_{fin} = 0.045 \times 0.0525$ m)이 큰 크기의 핀($L_{fin} \times H_{fin} = 0.06 \times 0.07$ m)보다 동일 측정지점(Fig. 2의 $0 \leq L_{fin} \leq 0.045$ m, $0 \leq H_{fin} \leq 0.0525$ m의 측정점 4곳)에서 더 큰 서리층 두께를 가지었으나, 그 차이는 최대 0.12 mm로 작았다. 이는 핀 높이 방향의 길이가 줄어들어 따라 핀 열전도에 의해, 동일 지점에서 더 낮은 핀 표면온도를 가지기 때문이다.⁽¹⁵⁾ 그러나 실험결과 동일 지점에서의 두 핀의 핀 표면 온도차이 역시 최대 0.76 °C로 미소 하였다. 또한, 다른 착상 운전조건에서 추가 실험을 실시하여 동일한 경향성을 갖는 결과를 얻었다. 이에 반해 서리층 평균 두께의 경우, 크기가 큰 핀의 평균두께(9곳 측정점 평균값)가 크기가 작은 핀의 평균두께(4곳 측정점 평균값)보다 최대 24% 작은 값을 가지었다. 이는 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 핀의 착상 특성을 보여주는 것으로서, 핀 상단부로 갈수록 핀 표면온도와 핀 바탕온도와의 차이가 커짐에 따라 서리 두께 성장이 적어지기 때문이다. 또한 이 결과는 핀-관(fin-tube) 열교환기에서 핀이 길어짐에 따라 핀 선단부에서 서리 착상량이 감소하여, 핀 전체의 서리층 평균두께는 감소하는 Ogawa et al.⁽¹⁶⁾의 실험결과와 일치한다. 이로부터 불균일한 온도분포를 가지는 열교환기 핀의 특성상, 동일한 착상 조건에서는 핀의 크기가 커질수록 평균 서리층 두께는 감소하는 경향을 알 수 있다. 따라서 핀 전체에 균일한 착상을 통한 열교환기의 성능향상을 위해서는 핀 열전도와 핀 두께를 설계인자로 고려 해야 한다.

3.2 무차원 상관식

본 연구에서는 열교환기 핀의 주된 재료인 알루미늄 핀의 평균 서리 물성치(서리층 두께 및 서리층 표면온도) 무차원 실험 상관식을 제안한다. 알루미늄핀의 크기는($L_{fin} \times H_{fin}$) 60 × 70 mm이며, 27가지 착상 운전조건들을 실험계획법(Design of Experiment)에 의해 후보점으로 선정하였다. 실험의 재현성을 구현하기 위해 각각 5회의 실험을 수행하였다. 이 상관식은 Fig. 2에서 보듯이 9곳 측정점에 대한 평균값(mean value)를 이용하였으며, 무차원 상관식은 차원해석(dimensional analysis)을 통해 무차원 변수들의 함수로 표현된다. 차원

해석에 사용된 변수들은 착상 인자(공기 온도, 공기 유속, 공기 절대습도, 핀 바탕온도 및 착상 시간), 측정 인자(서리층 두께와 서리층 표면 온도), 핀 길이 및 물성치(공기의 점성계수와 열확산계수 및 물의 삼중점 온도) 등이다. 열교환기 핀에 대한 서리 물성치(F)는 무차원 공기온도, 무차원 핀 바탕온도, 무차원 핀 두께, 절대 습도, Re수 및 Fo수의 함수로 나타난다.

$$F = f(T_a^*, T_b^*, t_{fin}^*, w, Re_L, Fo_L) \quad (1)$$

여기서

$$T_a^* = \frac{T_a}{T_{tp}}, T_b^* = \frac{T_b}{T_{tp}}, t_{fin}^* = \frac{t_{fin}}{t_{fin,ref}}, \quad (2)$$

$$Re_L = \frac{u_a L_{fin}}{\nu}, Fo_L = \frac{\alpha_a t}{L_{fin}^2}$$

이며 $t_{fin,ref} = 1.0$ mm 이다.

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

$$y_f^* = \frac{y_f}{L_{fin}} = 1.8905 \times 10^6 (T_a^*)^{-22.7924} \quad (3)$$

$$(T_b^*)^{-18.5624} (t_{fin}^*)^{0.5377} (w)^{2.0840}$$

$$(Re_L)^{-0.0077} (Fo_L)^{0.6042}$$

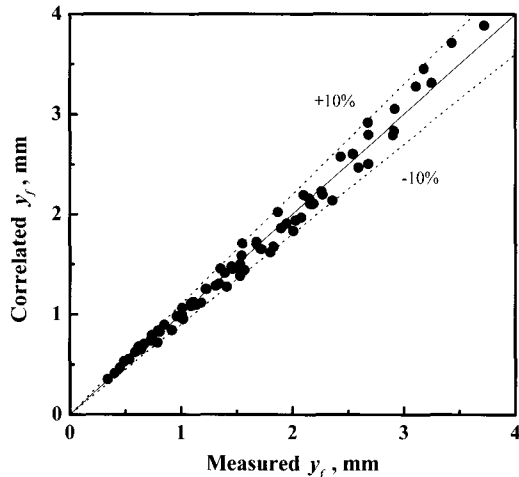
$$T_{fs}^* = \frac{T_{fs} - T_b}{T_a - T_b} = 4.4430 (T_a^*)^{-8.3712} \quad (4)$$

$$(T_b^*)^{-6.3789} (t_{fin}^*)^{-0.1943} (w)^{0.7483}$$

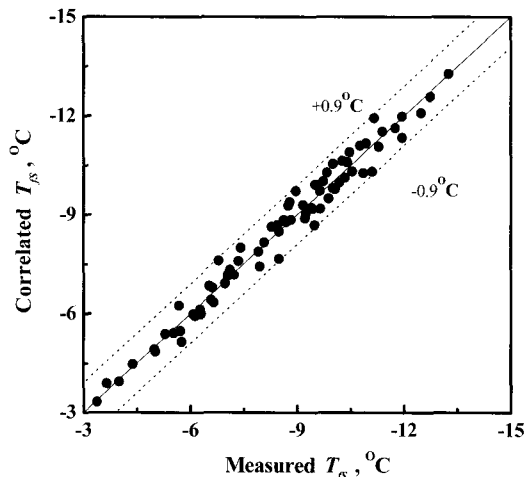
$$(Re_L)^{0.2049} (Fo_L)^{0.3033}$$

여기서 적용범위는 $278.15 \leq T_a \leq 284.15$ K, $246.15 \leq T_b \leq 258.15$ K, $0.6 \leq t_{fin} \leq 1.0$ mm, $1.0 \leq u_a \leq 2.0$ m/s, $0.00333 \leq w_a \leq 0.00634$ kg/kg_a 및 $0 \leq t \leq 90$ min 이다.

Fig. 6은 열교환기 핀에서의 평균 서리 물성치에 대한 상관식과 측정 데이터를 비교한 것이다. 이 상관식은 서리층 두께 10.5%, 서리층 표면온도 0.89 °C의 오차 내에서 측정 데이터를 잘 예측하였다. 따라서, 본 연구에서 제시한 실험상관식을 이용하여 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 핀



(a) Frost thickness



(b) Frost surface temperature

Fig. 6 Comparison of frost properties between the present correlation and average experimental data.

에서의 착상 거동을 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 착상 실험을 통해 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 핀에서 핀 형상(핀 두께와 핀 크기) 및 핀 재료에 대한 착상 거동의 변화 관찰하였다. 불균일한 온도분포를 가지는 열교환기에서 핀의 균일한 착상을 위해서는 핀 두께 및 열전도 계수를 고려해야 한다. 착상 인자에 따른 열교

환기 핀에서의 착상 거동을 예측하기 위해 서리 물성치의 평균값을 이용하여 무차원 상관식을 유도하였다. 이 상관식은 실험 데이터를 서리층 두께의 경우 최대 10.5%의 오차, 서리층 표면온도의 경우 최대 0.89 °C의 차이 내에서 잘 예측하였다.

후 기

이 논문은 2008년 정부재원(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-D00110)

참고문헌

1. 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. I11-I111.
2. 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. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 18, pp. 4359-4365.
3. 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. 99, pt 1, pp. 739-745
4. 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, No. 4, pp. 895-901
5. 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.
6. Chen, H., Thomas, L. and Besant, R. W., 2000, Modeling frost characteristics on heat exchanger fins: Part I, Numerical model, ASHRAE Trans., Vol. 106, pp. 357-367.
7. Chen, H., Thomas, L. and Besant, R. W., 2000, Modeling frost characteristics on heat exchanger fins: Part II, Model validation and limitations, ASHRAE Trans., Vol. 106, pp. 368-376.
8. Tso, C. P., Cheng, Y. C. and Lai, A. C. K., 2006, An improved model for predicting per-

- formance of finned tube heat exchanger under frosting condition, with frost thickness variation along fin, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 111-120
9. 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.
 10. Kwon, J. T., Lim, H. J., Kwon, Y. C., Koyama, S., Kim, D. H. and Kondou, C., 2006, An experimental study on frosting of laminar air flow on a cold surface with local cooling, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 29, No. 5, pp. 754-760
 11. Kim, J. S., Lee, K. S. and Yook, S. J., 2009, Frost behavior on a fin considering the heat conduction of heat exchanger fins, *Int. J. Heat and Mass Transfer* Vol. 52, No. 11-12, pp. 2581-2588
 12. An, W. J., Kim, J. S. and Lee, K. S., 2009, Characteristics of frost formation on heat exchanger fins of non-uniform temperature distribution, *SAREK*, Vol. 21, No. 7, pp. 373-379.
 13. Lee, K. S., Jhee, S. and Yang, D. K., 2003, Prediction of the frost formation on a cold flat surface, *Int. J. heat and mass transfer*, Vol. 46, No. 20, pp. 3789-3796
 14. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, *Mechanical Engineering*, Vol. 75, No. 1, pp. 3-8.
 15. Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. and Lavine, A. S., 2007, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th Ed, John Wiley and Sons, pp. 141-145
 16. Ogawa, K., Tanaka, N. and Takeshita, M., 1993, Performance improvement of plate fin and tube heat exchangers under frosting conditions, *ASHRAE Trans.*, Vol. 99, part 1, pp. 762-774.