

불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 흰에서의 착상 특성

안 원 준, 김 정 수, 이 관 수^{**}
 한양대학교 대학원 기계공학과, *한양대학교 기계공학부

Characteristics of Frost Formed on Heat Exchanger Fins of Non-Uniform Temperature Distribution

Won-Jun An, Jung-Soo Kim, Kwan-Soo Lee[†]
 Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

(Received April 6, 2009; revision May 15, 2009)

ABSTRACT: In this study, frosting experiment was conducted to investigate the characteristics of frost formed on heat exchanger fins of non-uniform temperature distribution. Temperature distribution and frost characteristics of a 2-D fin surface were investigated in the airflow direction and the direction perpendicular to airflow. Temperature gradient was very small in the airflow direction, while it was large in the direction perpendicular to airflow due to fin heat conduction. The variations of the frost thickness gradient and the frost density gradient in the direction perpendicular to airflow were significant. On the other hand, the temperature gradient on frost surface in the direction perpendicular to airflow was significant at the early stage of frosting, while it decreased gradually as time elapsed.

Key words: Frost characteristics(착상 특성), Heat exchanger fin(열교환기 흰), Non-uniform temperature distribution(불균일한 온도분포)

기 호 설 명

A_{oi} : 압부미늬 태옹 표몡적 [m²]
 T : 온도 [°C]
 u : 유속 [m/s]
 y_f : 서리층 두께 [mm]
 w : 절대습도 [kg/kg_a]

하첨자

a : 공기
 b : 흰 바탕
 fs : 서리층 표몡

그리스 문자

ρ_f : 서리층 밀도 [kg/m³]
 Δ : 증가량

1. 서 론

습공기가 빙점 이하로 유지되는 냉각면과 접하면 냉각면 위에 다공성 구조의 서리가 형성된다. 이러한 현상은 냉장고나 에어컨 등 저온조건에서 운전되는 열교환기 표몡에서 주로 발생하며 열교환기의 성능에 부정적인 영향을 미친다. 따라서 열교환기의 성능을 향상시키기 위해서는 열교환기 표몡에 형성되는 착상과 관련된 문제를 반드시 고려해야 한다.

[†] Corresponding author

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

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

열교환기 환에서 착상에 대한 연구는 냉각면의 조건에 따라 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 하나는 평판이 일정 표면온도(constant surface temperature)를 갖는 경우이고, 또 하나는 불균일한 온도분포(non-uniform temperature distribution)를 갖는 조건이다. 기존의 많은 착상 연구들⁽¹⁻¹⁴⁾은 일정 표면온도를 갖는 평판에 치중되어 있으며, 서리층 성장과 열 및 물질 전달 특성을 제시하였다. 그러나 이러한 연구들은 냉각면 온도를 일정하다고 간주하였기 때문에 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 환에서의 착상 거동과는 차이를 가질 수 밖에 없다. 이와 관련하여 최근 소수의 연구자들⁽¹⁵⁻²²⁾이 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 환에서의 착상 연구를 수행하였다. 해석적 연구를 살펴보면, Chen et al.⁽¹⁵⁾은 열교환기 환의 열전도를 고려하여 환에서의 착상 현상을 해석하였으나, 공기층 유동장의 변화는 고려하지 않았다. Xia and Jacobi⁽¹⁶⁾은 열교환기 환과 서리층을 하나의 복합매체(composite medium)로 간주하고 복합매체의 온도분포를 파악할 수 있는 해석적 방법을 제시하였지만, 열교환기 환에서 서리 성장 특성을 파악하는 것과는 무관하였다. Kim et al.⁽¹⁷⁾은 환의 열전도를 고려한 1차원 환(유동 방향만 고려)에서의 착상 거동을 예측할 수 있는 수학적 모델을 제시하였고, Tso et al.⁽¹⁸⁾은 열교환기의 직사각형 환을 환형 환(angular fin)으로 등가하여 환의 온도분포 및 서리층 두께변화의 예측을 통해 열교환기의 성능을 파악하였다. 실험적 연구의 경우, Thomas et al.⁽¹⁹⁾은 특정조건(저온조건)에서 착상 실험을 통해 열교환기 환에서의 서리 물성치와 열 및 물질전달의 특성을 파악하였으며, Kwon et al.⁽²⁰⁾은 국소적인 온도분포를 갖는 평판에서의 온도 분포 및 서리 성장 거동을 실험적으로 연구하였다. 그러나 이 연구는 특정조건에서 착상 거동을 1차원(유동 방향)적으로 조사하여 2차원 환에서의 서리층 성장 특성을 파악하는데 제한성이 있다. Wang et al.⁽²¹⁾은 열교환기 환의 배열에 따른 서리층 성장을 시각화하였지만, 서리층 두께를 제외한 서리 물성치 특성에 대한 정보는 전혀 언급하지 않았다. 이상에서 살펴봐왔듯이, 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 환에서의 착상 연구는 부족하며, 그 결과 착상 데이터 또한 미진한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 환에서의 서리 성장 거동을 파악하

기 위해 다양한 운전조건(공기 온도, 공기 절대습도, 공기 유속 및 환 바탕온도)에 따른 열교환기 환에서 착상 실험을 수행한다. 이러한 연구를 통해 2차원 환에서의 온도분포 및 서리 물성치 특성을 조사한다.

2. 착상 실험

2.1 실험 장치

실험장치는 항온항습실, 시험부, 냉각부 및 순환부로 구성된다.⁽²³⁾

시험부(test section)는 열교환기 환에서 서리층 성장을 관측하고 측정하는 부분이다. Fig. 1은 평판-환 열교환기가 설치된 시험부의 개략도를 도시한 것이다. 시험부는 서리 성장을 시각적으로 관측하기 위해 투명 아크릴로 제작하였으며, 시험부의 차원($L \times W \times H$)은 $300 \times 150 \times 150$ mm이다. 서리층 두께와 서리층 표면온도를 측정하기 위해 시험부 측면에 2개의 측정구멍을 뚫었고 실험이 진행되는 동안 닫아두었다가 측정시에만 열었다. 열교환기는 시험부 중앙에 설치하였으며, 열교환기 폭(W)을 3등분하는 지점에 2개의 환을 하나씩 장착하였다. 시험부 주위는 단열처리를 하여 외부로의 열손실을 최소화하였다.

Fig. 2는 Fig. 1의 시험부에 설치된 열교환기의 단면도(A-A)를 나타낸다. 열교환기는 3개의 블록으로 구성되어 있으며, 각 블록은 독립적으로 제작하였다. 블록 1과 블록 2의 재질은 알루미늄 합금(aluminum alloy)이며, 두 블록을 체결하여 냉매 유로를 형성하였다(Fig. 3 참조). 열교환기 환을 제외한 나머지 부분에서 착상이 발생하는 것을 방지하기 위해 블록 2와 블록 3 사이에 단열재

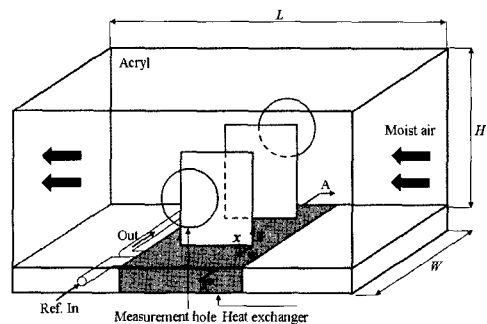


Fig. 1 Schematic of test section.

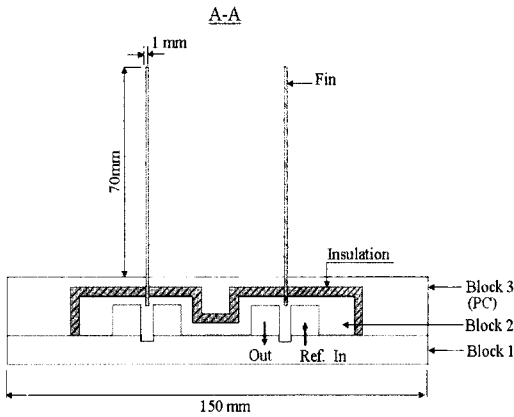


Fig. 2 Cross-sectional view of a heat exchanger.

를 삽입하였다. 이 때, 블록 3은 내한성과 단열성 능이 우수한 폴리카보네이트(PolyCarbonate, PC) 를 이용해 제작하였다. 환은 열전도성이 높은 알루미늄 합금을 사용하였으며, 환의 차원($L_{fin} \times H_{fin} \times t_{fin}$)은 $60 \times 70 \times 1$ mm이다. 환은 블록 2와 블록 3 및 단열재에 홈을 파서 삽입하였고, 열전도성이 우수한 thermal grease를 홈에 주입하여 환과 블록 2와의 접촉열저항을 최소화하였다.

냉각부는 알루미늄 환 바탕(fin base)의 온도를 일정하게 유지시키는 부분이다. 냉매는 에틸렌글리 콜(ethylene glycol)과 물을 중량비 5 : 5로 혼합한 에틸렌글리콜 수용액을 사용하였다. 냉매유로는 2개의 환 바탕의 온도를 균일하게 유지시키기 위 해 Fig. 3과 같은 형태로 제작하였으며, 제작 전 수치해석을 수행하여 환 바탕온도의 균일함을 확인하였다. 유로의 단면은 한 변이 10 mm인 사각형 이며, 유로의 모서리 부분에 원형 처리(rounding)

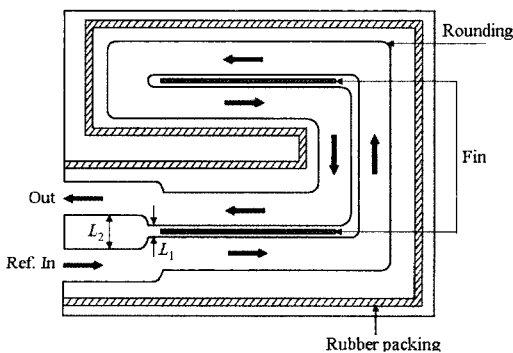


Fig. 3 Path of refrigerant flow.

를 하여 냉매가 원활히 흐를 수 있도록 하였다. 유로사이의 간격(L_1)은 3 mm이며, 이는 환을 삽입할 수 있는 공간을 확보하고 환 바탕의 온도를 균일 하게 유지하기 위한 최소 간격이다. 냉매 순환부 와 체결할 공간을 확보하기 위해 냉매 입·출구 사이의 간격(L_2)은 10 mm로 하였고, 유로 주위에 고무패킹(rubber packing)을 하여 냉매의 누수를 방지하였다.

2.2 실험 방법

Fig. 4는 2차원 환 표면에서 측정위치를 나타 낸다. 환 표면온도 및 서리 물성치의 측정위치는 유동 방향(x-dir.)과 유동에 수직인 방향(z-dir.)에 대하여 각각 등간격으로 나누어져 있다. 환 바 탕(fin base) 온도와 환 표면온도는 T형 열전대를 환에 부착하여 측정하였으며, 열전대는 서리 물성 치 측정에 방해가 되지 않도록 환 뒷면에 부착하 였다. 이 때, 예비실험을 통해 측정된 결과 환 앞 면과 뒷면의 온도는 동일함을 확인하였다. 서리 층 두께는 마이크로미터 게이지를 이용해 측정하 였으며, 측정시 서리의 액화현상을 방지하기 위해 마이크로미터 게이지의 탐침은 열전도도가 낮은 아크릴을 이용하였다. 또한 서리와의 접촉면을 구 분하기 위해 탐침 끝부분을 검게 칠하였다. 서리 층 표면온도는 열화상 카메라를 이용해 측정하였 으며, 카메라는 실험 시작 전 미리 설치하고 카메라와 연결된 PC의 화면에 측정위치를 표시하였 다. 서리 질량은 유동 방향(x-dir.)과 유동에 수직 인 방향(z-dir.)에 대해 각각 측정하였으며, 이를

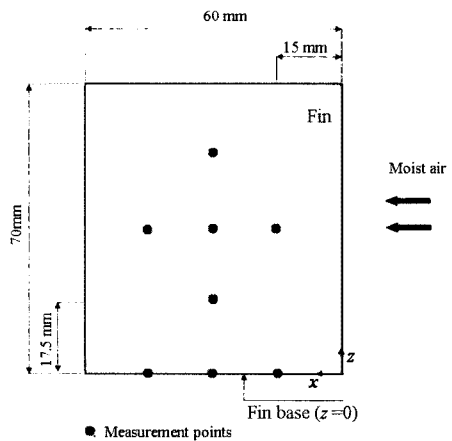


Fig. 4 Locations of measurement points.

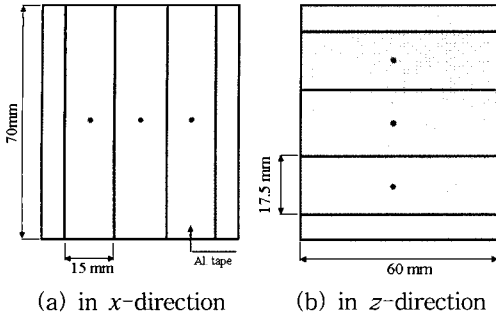


Fig. 5 Frost mass measurement.

위해 Fig. 5와 같이 서리층 두께 측정점을 중심으로 동일한 표면적을 갖는 알루미늄 테잎을 부착하였다.

실험시작 후 일정시간 간격으로 흰 표면온도, 서리층 두께 및 서리층 표면온도를 측정하고 실험종료 후 알루미늄 테잎을 떼어내어 정밀 전자저울을 이용해 서리 질량과 알루미늄 테잎의 질량을 각각 측정하였다. 측정된 서리 질량(m_f)과 서리층 두께(y_f)를 아래 식에 대입하여 서리층 밀도를 계산하였다.

$$\rho_f = \frac{m_f}{y_f A_{al}}$$

여기서 A_{al} 은 알루미늄 테잎의 표면적이다.

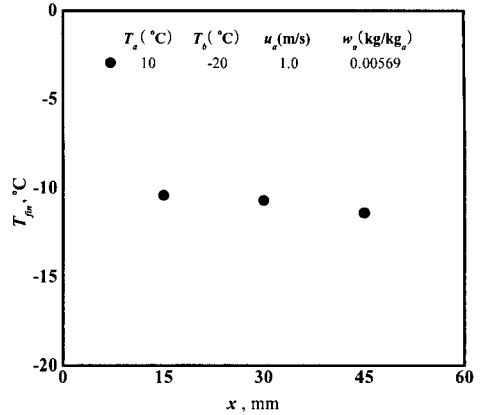
실험을 통해 얻은 데이터의 불확실도(uncertainty)는 정밀도 오차(precision error)와 바이어스 오차(bias error)로부터 계산하였으며, 그 결과 흰 표면온도는 0.23 °C, 서리층 두께는 0.039 mm, 서리층 밀도는 7.15% 및 서리층 표면온도는 0.67 °C이다.

3. 결과 및 고찰

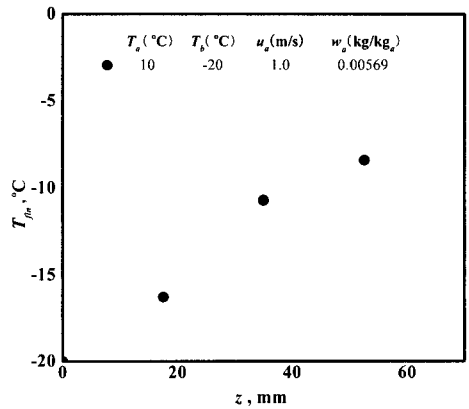
본 연구에서는 열교환기 흰에서의 서리 성장 거동을 파악하기 위해 착상 실험을 수행하였다. 실험 조건은 $5 \leq T_a \leq 10$ °C, $1 \leq ua \leq 2$ m/s, $0.00355 \leq w \leq 0.00569$ kg/kg_a, $-15 \leq T_b \leq -25$ °C이다. 실험을 통해 측정된 흰 표면온도, 서리층 두께, 서리층 밀도 및 서리층 표면온도의 값들은 유동 방향과 유동에 수직인 방향에 대해 각각 나타내었다.

3.1 흰 표면온도

흰 표면온도는 서리층 성장에 중요한 영향을 미



(a) in the airflow direction at $z = 35$ mm



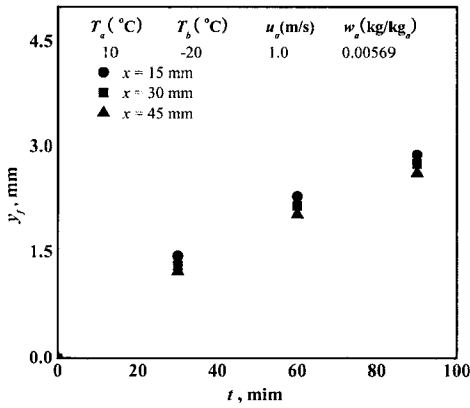
(b) in the direction perpendicular to airflow at $x = 30$ mm

Fig. 6 Temperature distributions on a 2-D fin at 90 min.

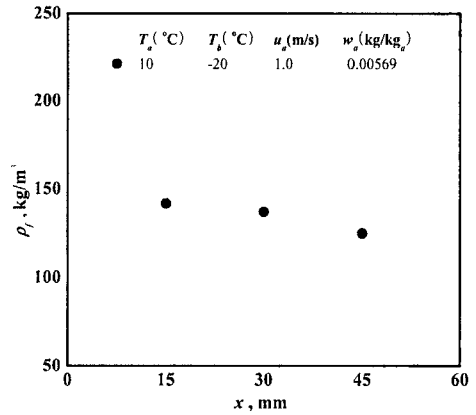
치는 요소이다. Fig. 6은 착상시간 90분 일 때 유동 방향(a)과 유동에 수직인 방향(b)으로 2차원(2-D) 흰에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 유동 방향으로 흰의 온도구배는 작게 나타난 반면, 유동에 수직인 방향으로 흰의 온도구배는 흰의 열전도(fin heat conduction)의 영향으로 유동 방향에 비해 상대적으로 크게 나타났다.

3.2 서리 물성치

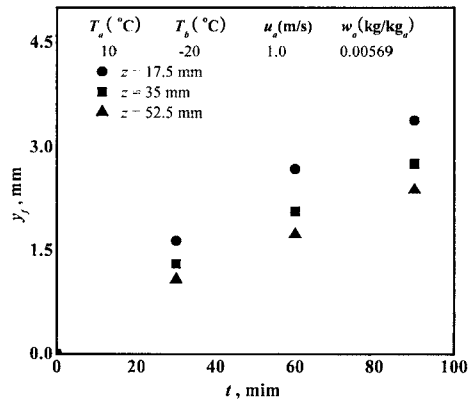
Fig. 7은 유동 방향(a) 및 유동에 수직인 방향(b)으로 시간에 따른 서리층 두께의 변화를 보여준다. 유동 방향으로의 서리층 두께 성장은 $x = 45$



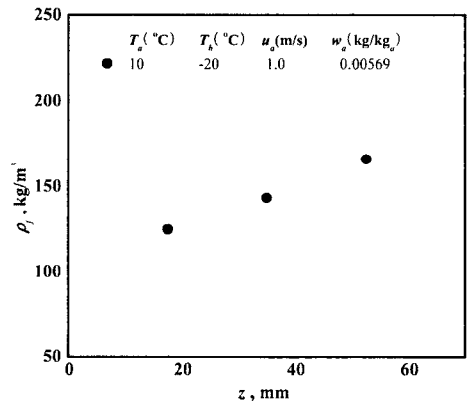
(a) in the airflow direction at $z = 35$ mm



(a) in the airflow direction



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



(b) in the direction perpendicular to airflow

Fig. 7 Transient frost thickness on a 2-D fin.

mm에 비해 $x = 15$ mm에서 선단효과의 영향으로 활발하지만, 그 영향은 미미하였다. 유동에 수직인 방향으로의 서리층 두께는 흰 표면온도의 영향으로 $z = 52.5$ mm에 비해 $z = 17.5$ mm에서 두껍게 형성되었다. 특히, 유동에 수직인 방향으로의 서리층 두께 구배는 유동 방향에 비해 주어진 조건에서 최대 3.2배로 나타났다. 이를 통해 환의 온도 구배가 서리층 두께 성장에 지배적인 영향을 미치는 요소임을 확인하였다.

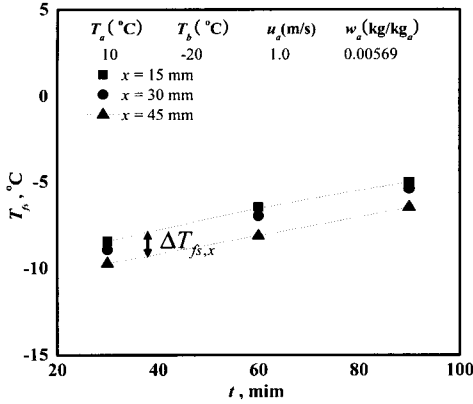
Fig. 8은 착상 시간 90분 일 때 서리층 밀도를 제시한 것이다. 유동 방향(a)으로 서리층 밀도는 흰 선단인 $x = 15$ mm에서 $x = 45$ mm에 비해 컸으나, 선단효과의 영향은 작았다. 유동에 수직인 방향(b)으로는 $z = 52.5$ mm에서 높은 흰의 표면 온도의 영향으로 조밀한 서리가 형성되었다. 여기

Fig. 8 Frost density on a 2-D fin at 90 min.

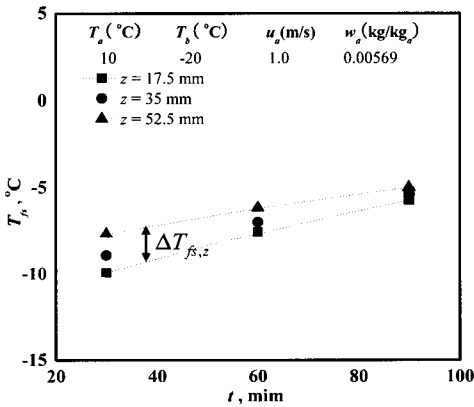
서 유동에 수직인 방향의 서리층 밀도 구배가 유동 방향에 비해 약 2.4배 크게 나타났다. 이는 서리층 밀도 성장 역시 앞서 살펴본 서리층 두께 성장처럼 흰 표면온도에 지배적 영향을 받음을 보여 준다.

Fig. 9는 유동 방향(a)과 유동에 수직인 방향(b)으로의 서리층 표면온도를 비교한 것이다. 유동 방향으로 서리층 표면온도는 흰 선단에서 흰 후단으로 갈수록 낮게 나타났다. 이는 흰 후단에서 서리층 두께가 얇게 형성되고, 흰으로 유입되는 공기와 서리층 표면 사이의 열전달이 흰 후단에서 감소하기 때문이다. 또한, 시간에 따른 유동 방향의 서리층 표면온도의 구배($\Delta T_{f,s,x}$)는 크게 변하지 않았으며, 이러한 현상은 Fig. 7에서 살펴본 바와 같이 유동 방향으로의 서리층 두께 성장과 밀접하게 관련되어 있다. 유동에 수직인 방향의 경

우, 서리층 표면온도는 낮은 흰 표면 온도의 영향



(a) in the airflow direction



(b) in the direction perpendicular to airflow

Fig. 9 Transient frost surface temperature on a 2-D fin.

으로 흰 바탕에서 낮게 나타났다. 특히, 서리층 표면온도의 구배($\Delta T_{fs,z}$)는 착상 초기에 유동 방향에 비해 큰 값을 갖지만 시간이 경과할수록 감소하였다. 이는 착상 초기에 서리층 두께가 얇게 형성되어 흰 표면온도의 영향을 크게 받지만, 시간에 따른 서리층 두께의 성장이 열저항을 증가시키기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 운전 조건의 변화에 따라 불균일한 온도분포를 갖는 열교환기 흰에서 착상 실험을 수행하였다. 이를 통해 2차원 흰에서 유동 방향과 유동에 수직한 방향으로 흰의 온도분포 및 서리층

성장 거동(서리층 두께, 서리층 밀도 및 서리층 표면온도)을 파악하였다. 흰의 온도구배는 흰의 열전도의 영향으로 유동 방향에 비해 유동에 수직한 방향으로 크게 나타났다. 또한 서리층 두께 및 밀도 구배도 유동에 수직한 방향으로 큰 변화를 보였다. 따라서 서리 성장은 흰 표면온도에 지배적인 영향을 받음을 알 수 있다. 이에 반해, 유동에 수직한 방향으로 서리층 표면온도의 구배는 착상 초기에 유동 방향에 비해 상대적으로 큰 값을 갖지만, 착상이 진행될수록 점차 감소하였다.

후 기

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

참고문헌

1. Cheng, C. H. and Shiu, C. C., 2002, Frost formation and frost crystal growth on a cold plate in atmospheric air flow, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 4289-4303.
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. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 4359-4365.
3. 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.
4. Hayashi, Y., Aoki, A., Adachi, S. and Hori, K., 1997, Study of frost properties correlating with frost formation types, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 99, pp. 239-245.
5. Östin, R. and Anderson, S., 1991, Frost growth parameters in forced air stream, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, No. 4/5, pp. 1009-1017.
6. Lee, Y. B. and Ro, S. T., 2002, Frost formation on vertical plate in simultaneously developing flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, pp. 939-945.
7. Lüer, A. and Beer, H., 2000, Frost deposi-

- tion in a parallel plate channel under laminar flow conditions, *Int. J. of Thermal Science*, Vol. 39, pp. 85-95.
8. Yun, R., Kim, Y.C. and Min, M. K., 2002, Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate, *Int. J. of Refrigeration*, Vol. 25, pp. 362-371.
 9. Tokura, I., Saito, H. and Kishinami, K., 1983, Study on properties and growth rate of frost layers on cold surfaces, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 895-901.
 10. Jones, B.W. and Paker, J.D., 1975, Frost formation with varying environmental parameters, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 97, pp. 255-259.
 11. Tao, Y.X., Besant, R.W. and Mao, Y., 1993, Characteristics of frost growth on a flat plate during the early growth period, *ASHRAE Trans.*, Vol. 99, pp. 746-753.
 12. Ismail, K. A. R. and Salinas, C. S., 1999, Modeling of frost formation over parallel cold plates, *Int. J. of Refrigeration*, Vol. 22, pp. 425-441.
 13. Yang, D.K. and Lee, K. S., 2005, Modeling of frosting behavior on a cold plate, *Int. J. of Refrigeration*, Vol. 28, pp. 396-402.
 14. Yang, D.K. and Lee, K. S., 2004, Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate, *Int. J. of Heat and mass transfer*, Vol. 27, pp. 89-96.
 15. Chen, H., Thomas, L. and Besant, R. W., 2000, Modeling frost characteristics on heat exchanger fins, *ASHRAE Trans.*, Vol. 105, pp. 357-367.
 16. Xia, Y. and Jacobi, A.M., 2004, An exact solution to steady heat conduction in a two-dimensional slab on a one-dimensional fin : application to frosted heat exchangers, *Int. J. of Heat and mass transfer*, Vol. 47, pp. 3317-3326.
 17. 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, *The Society Of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, Vol. 20, No. 11, pp. 727-732.
 18. Tso, C. P., Cheng, Y. C. and Lai, A. C. K., 2006, An improved model for predicting performance of finned tube heat exchanger under frost condition, with frost thickness variation along fin, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, pp. 111-120.
 19. Thomas, L., Chen, H. and Besant, R. W., 1999, Measurement of frost characteristics on heat exchanger fins, Part I-Test facility and instrumentation, *ASHRAE Trans.*, Vol. 105, pp. 283-293.
 20. 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 cold surface with local cooling, *Int. J. of Refrigeration*, Vol. 29, pp. 754-760.
 21. Wang, C. C., Chang, Y. J., Fan, S. J. and Sheu, W. J., 2004, Some observations of the frost formation in fin arrays, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 25, pp. 35-47.
 22. 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. of Heat and mass transfer*, Vol. 52, pp. 2581-2588.
 23. 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.