

열교환기 흰에서의 서리 성장

안 원 준, 김 정 수, 이 관 수[†]

한양대학교 대학원 기계공학과, [†] 한양대학교 기계공학부

Growth of frost formed on heat exchanger fins

Won-Jun An , Jung-Soo Kim , Kwan-Soo Lee[†]

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

ABSTRACT: In this study, frost behavior on two dimensional fins of a heat exchanger was experimentally investigated. Temperature distribution on a 2-D fin surface and frost properties were measured in the directions perpendicular to and parallel to airflow. The results indicated that the temperature gradient in the direction perpendicular to airflow was large because of fin heat conduction, while that in the direction parallel to airflow was very small. Frost thickness in the airflow direction decreased from the leading edge towards the trailing edge of the fin due to leading edge effect. The reduction rate of frost thickness in the airflow direction, however, was very small compared with that in the direction perpendicular to the airflow, as affected by the temperature distribution.

Key words: Frost growth(서리성장), Heat exchanger fins(열교환기 흰), Non-uniform temperature distribution(불균일한 온도분포)

1. 서 론

냉장고나 에어컨 등에 광범위하게 사용되는 열교환기는 저온조건에서 운전된다. 습공기 중의 수증기가 차가운 열교환기 표면과 접하면 다공성 구조의 서리(frost)가 형성된다. 이러한 서리는 착상 초기에 열교환기의 표면조도를 향상시켜 열전달을 촉진시키지만 운전시간이 경과할수록 공기와 냉각면 사이에 열저항으로 작용하여 전열성능을 감소시킨다. 따라서 열교환기의 성능을 향상시키기 위해서 열교환기 표면에 형성된 서리층 특성을 파악하는 것은 필수적이다.

착상 조건하에서 운전되는 열교환기에 대하여 많은 연구자들⁽¹⁻⁵⁾이 열교환기 흰을 평판으로 단

순 모사하여 연구를 수행하였다. 예컨대, Cheng 등⁽¹⁾은 수평 평판에서 착상인자 변화에 따른 유동 방향으로의 서리층 성장을 실험적으로 연구하였고 Lee 등⁽²⁾은 강제대류시 수직평판에서 열 및 물질전달의 특성을 조사하였다. Ro 등⁽³⁾은 수직 평판에서 실험을 통해 냉각면 온도와 공기의 절대습도가 서리층 형성에 지배적 인자임을 제시하였다. Yun 등⁽⁴⁾과 Lee와 Yang⁽⁵⁾은 수학적 모델링을 통해 평판에서의 서리층 성장거동을 예측하였다. 그러나 이러한 연구들⁽¹⁻⁵⁾은 냉각면의 온도를 일정하다고 간주하였기 때문에 열전도의 영향을 받는 열교환기 흰에서의 실제 착상거동을 파악하는데는 한계가 있다. 이를 보완하기 위하여 불균일한 온도분포(non-uniform temperature distribution)를 갖는 냉각면에서 착상에 대한 연구가 소수의 연구자들⁽⁶⁻⁹⁾에 의해 수행되었다. Kwon 등⁽⁶⁾은 국소적인 냉각면을 갖는 평판에서 유동방향의 온도분포에 따른 서리층 성장거동을 실험적으로 연구하였으나, 유동 수직방향에 대한 서리층 성장특성

[†] Corresponding author

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

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

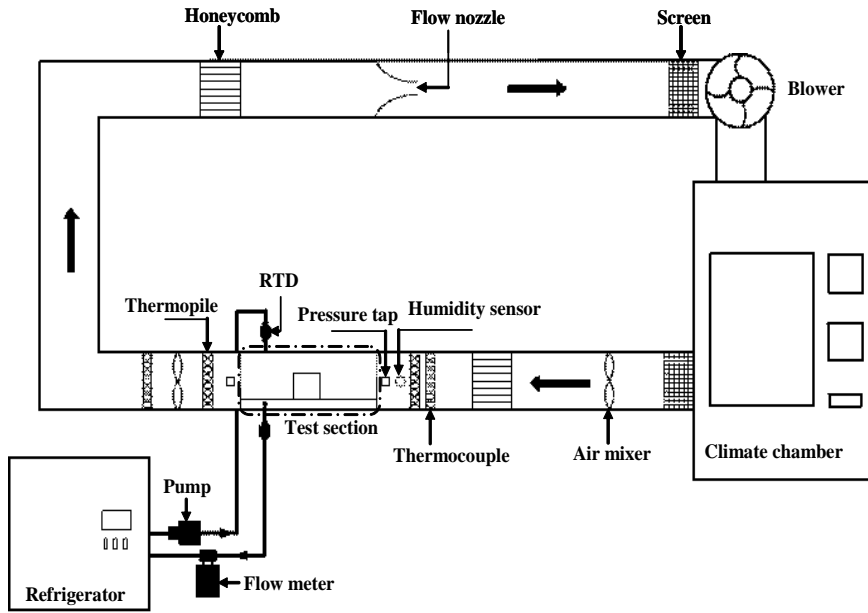


Fig. 1 Experimental apparatus.

을 파악하는데는 한계가 있다. Wang과 Chang⁽⁷⁾은 열교환기 흰의 배열에 따른 서리층 두께성장의 특성을 시각화하여 관찰하였지만 서리층 두께를 제외한 서리 물성치를 제시하지는 못하였다. Chen 등⁽⁸⁻⁹⁾은 실험을 통해 열교환기 흰에서 서리 물성치와 열 및 물질전달의 특성을 연구하였다. 그러나 제한적인 실험 조건으로 인해 다양한 운전조건에서의 서리층 성장특성을 예측하는데 한계가 있다.

본 연구의 목적은 불균일한 온도분포를 갖는 2차원 열교환기 흰에서 착상 거동을 예측하는 것이다. 이를 위해 다양한 운전조건에서 평판-흰 열교환기 흰에서의 착상실험을 수행한다. 이를 통해 2차원 흰에서의 온도분포 및 서리층 물성치를 파악한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 시험부로 유입되는 공기의 온도와 습도를 조절하는 항온항습실(climate chamber), 착상현상을 관찰하는 시험부(test section), 흰바탕(fin base)온도를 일정하게 유지시키는 냉각부(cooling section), 시험부를 통과한 공기가 다시 항

온항습실로 귀환하는 순환부(circulation section)로 구성된다.

항온항습실은 시험부로 유입되는 공기의 온도와 습도를 일정하게 유지시킨다. 항온항습기 내부에 설치된 백금 RTD를 이용한 건·습구 온도계가 공기의 온도와 습도를 측정하여 PID 제어기로 입력신호를 보낸다. PID 제어기는 SSR(solid state relay)을 이용하여 항온항습실내의 공기의 온도와 습도를 실험조건과 동일하게 유지한다.

시험부는 열교환기를 장착하여 서리층 성장을 관측하는 부분이다. 시험부 입·출구에는 각각 9개의 type-T 열전대와 6개의 비드를 갖는 thermopile을 설치하고 세라믹 습도센서를 장착하여 공기의 온도와 습도를 측정하였다. 시험부 전방에 무동력휠(air mixer), 허니콤(honeycomb) 및 스크린(screen)을 설치해 공기의 유입을 균일하게 하였다. Fig. 2는 평판-흰 열교환기(heat exchanger)가 설치된 시험부의 개략도를 나타낸 것이다. 시험부는 투명한 아크릴로 제작하였으며 차원(L×W×H)은 300×150×150 mm이다. 서리층 물성치를 측정하기 위해 시험부 측면에 2개의 구멍(measuring hole)을 뚫었고 실험이 진행되는 동안 닫아두었다가 측정시에만 열도록 하였다. 열교환 폭(W)을 3등분 하는 지점에 두 개의 흰(fins)을 장착하였고 시험부는 외부로의 열손실을 최소화하기 위해 단열재를 부착하였다. Fig. 3은 시험부에 설치된 열교환기의

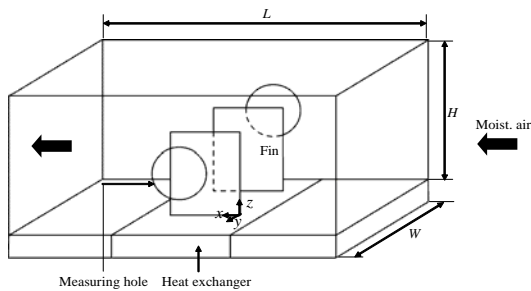


Fig. 2 Schematic diagram of test section.

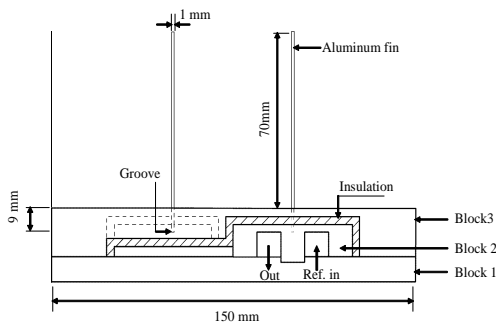


Fig. 3 Sideview of a plate-fin heat exchanger.

측면도를 나타낸다. 블록 1(block 1)과 블록 2(block 2)의 재질은 알루미늄 합금(aluminum alloy)이며 두 블록을 체결하여 냉매유로를 형성하였다(냉각부 참조). 환을 제외한 부분에서 착상이 발생하는 것을 방지하기 위해 블록 2 주위에 단열재를 부착하였고 그 위에 블록 3(block 3)을 체결하였다. 이때 블록 3은 내한성과 단열성능이 우수한 폴리카보네이트(polycarbonate)를 이용해 제작하였다. 블록 3의 표면을 지나는 공기가 나사산에 의해 유동의 교란을 받을 수 있으므로 밑에서부터 나사를 삽입하여 3개의 블록을 체결하였다. 환은 열전도성이 높은 알루미늄 합금을 사용하였고 환을 고정시키기 위해 블록 2와 블록 3에 홈을 파서 2개의 환을 삽입하였다. 환 삽입시 환과 블록 2와의 접촉열저항(thermal contact resistance)을 최소화하기 위해 열전도성이 우수한 thermal grease(CW7100)를 도포하였다.

냉각부는 알루미늄 환 바탕(fin base)의 온도를 일정하게 유지시키는 부분으로 냉매를 냉각시키는 냉동기와 냉매를 순환시키는 펌프(pump) 및 유량계

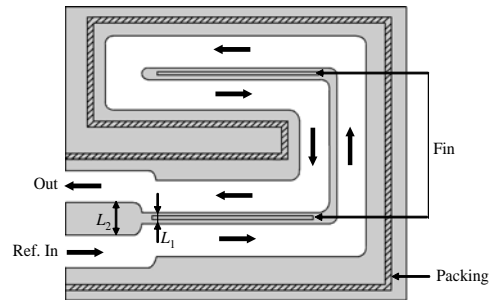


Fig. 4 The path of coolant flow.

(flow meter)로 구성되어 있다. 냉매는 에틸렌 글리콜(ethylene glycol)과 물을 중량비 6:4로 혼합한 에틸렌글리콜 수용액을 사용하였고 냉동기는 R-22를 냉매로 사용하여 에틸렌 글리콜 수용액을 설정온도로 냉각하고 유지한다. 냉매의 유량은 펌프의 회전수를 조절하여 제어하며 시험부 냉매유로 입·출구에 설치한 백금 RTD를 이용해 냉매의 온도를 측정하였다. 냉매 유로는 2개의 환 바탕의 온도를 균일하게 유지시키기 위해 Fig. 4와 같이 제작하였다. 유로 간격(L_1)은 3 mm로 하였으며 이는 환을 삽입할 수 있는 공간을 확보하고 냉매의 평균온도를 균일하게 하는 최소 간격이다. 냉매순환부와 체결할 공간을 확보하기 위해 입·출구 사이의 간격(L_2)은 10 mm로 하였고 냉매의 누수를 방지하기 위해 유로 주위에 고무패킹(packings)을 하였다.

순환부는 시험부를 통과한 공기를 항온항습실로 귀환시키는 부분으로 PVC 관으로 제작하였고 외부로의 열손실을 최소화하기 위해 단열재로 감쌌다. 순환부 내부에 설치된 노즐형 유량계로 공기유속을 측정하며 공기유량은 인버터가 부착된 송풍기로 조절한다.

2.2 실험방법

실험 전 2차원 환 표면에 Fig. 5와 같이 측정위치를 선정한다. 서리 물성치 측정위치는 유동에 수직한 방향(z -dir.)과 유동 방향(x -dir.)에 대하여 등간격으로 하며 환 바탕의 온도를 파악하기 위해 세 개의 점을 선정한다. 환 표면온도를 측정하기 위해 위해 type-T 열전대를 환에 부착한다. 열전대는 서리층 물성치 측정에 방해가 되지 않도록 환 뒷면에 부착하고 공기유동을 교란시키지 않게 유동 방향으로 가지런히 배열한다. 이때 환 앞

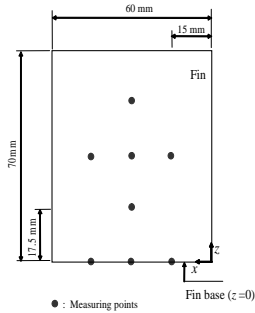


Fig. 5 The position of measuring points.

면과 뒷면의 온도차는 0.3 °C 이내였다. 서리층 두께 측정시 서리의 액화현상을 방지하기 위해 마이크로미터 게이지의 탐침은 아크릴을 이용하며 서리층과의 접촉면을 구분하기 위해 끝 부분을 검게 칠하였다. 서리층 밀도는 유동에 수직인 방향과 유동 방향에 대해 측정점을 정확히 3등분하는 지점에 알루미늄 테이프를 부착한다. 전체 착상량을 측정하기 위해 선단 여분과 후단 여분에도 알루미늄 테이프를 부착한다. 이때 알루미늄 테이프의 질량은 흰에 부착하기 전 미리 측정한다. 서리층 표면온도를 측정하기 위해 열화상카메라를 설치하고 카메라의 모니터에 측정위치를 표시한다. 실험조건이 정상상태(steady state)에 도달하기 전 착상이 되는 것을 방지하기 위해 흰을 비닐랩으로 완전히 감싸고 향온습기를 가동시켜 공기의 온도와 습도를 조절한다. 실험조건이 정상상태에 도달하면 냉매 펌프를 가동시키고 비닐랩을 제거한 후 실험을 시작한다.

실험 시작 후 일정시간 간격으로 흰 표면온도, 서리층 두께, 서리층 표면온도, 서리층 밀도를 측정하고 실험종료 후 알루미늄 테이프를 떼어내어 정밀 전자저울을 이용해 서리 질량을 측정한다. 측정된 서리 질량(m_f)과 서리층 두께(y_f)를 식 (1)에 대입하여 평균 서리층 밀도를 계산한다.

$$\rho_f = \frac{m_f}{A_{al}y_f} \quad (1)$$

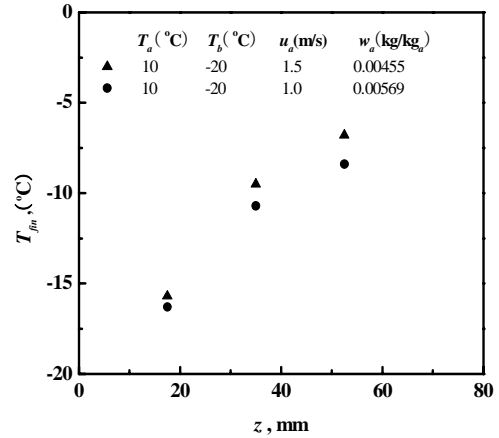
여기서 A_{al} 은 알루미늄 테이프의 면적이다. 실험을 통해 얻은 데이터의 불확실도는 정밀도 오차와 바이어스 오차로부터 계산하며 각각 흰 표면온도 0.228 °C, 서리층 두께 0.0394 mm, 서리층 밀도 6.15%, 서리층 표면온도 0.67 °C이다.

3. 실험결과 및 고찰

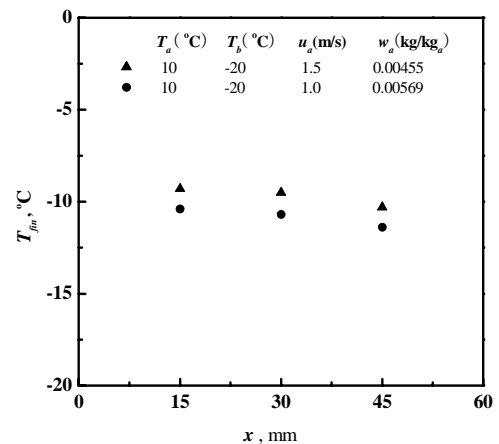
본 연구에서는 평판-흰 열교환기 흰에서 서리층 물성치 특성을 파악하기 위해 운전조건을 선정하여 실험을 수행하였다. 운전조건은 $5 \leq T_a \leq 10$ °C, $-15 \leq T_b \leq -25$ °C, $0.00349 \leq w_a \leq 0.00569$ kg/kg_a, $1.0 \leq u_a \leq 2.0$ m/s

3.1 서리층 성장

흰 표면온도는 서리층 성장에 중요한 영향을 미친다. Fig. 6은 착상시간 90분 일 때 유동에 수직인

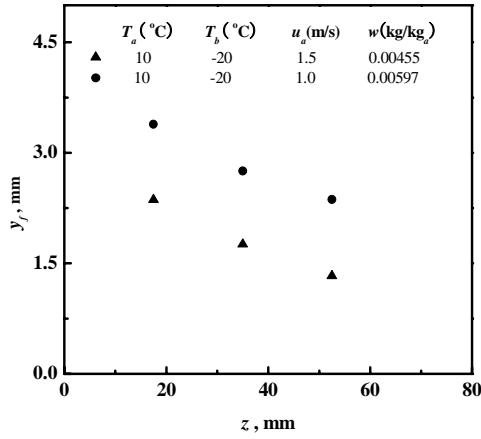


(a) The direction perpendicular to airflow.

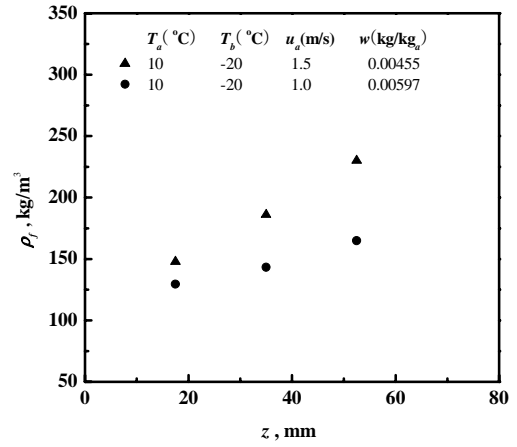


(b) The airflow direction.

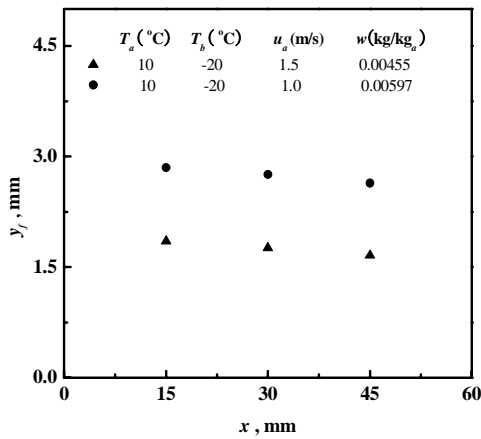
Fig. 6 Temperature distributions of a 2-D fin surface at 90 min.



(a) The direction perpendicular to airflow.

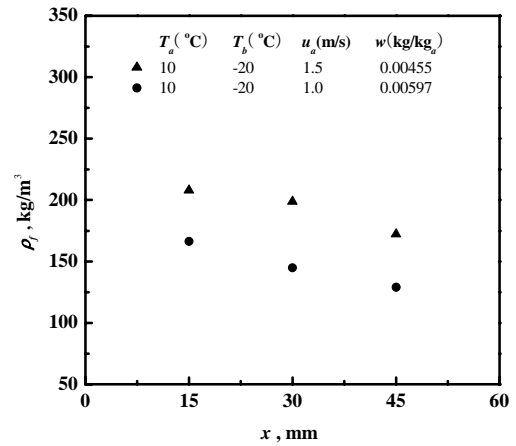


(a) The direction perpendicular to airflow.



(b) The airflow direction.

Fig. 7 Frost thickness of a 2-D fin surface at 90 min.



(b) The airflow direction.

Fig. 8 The average frost density at 90 min.

방향(a)과 유동 방향(b)에 대한 2차원(2-D) 흰에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 유동에 수직인 방향에 대한 흰의 온도구배는 흰의 열전도(heat conduction)로 인해 크게 나타났다. 반면에 유동 방향 흰의 온도구배는 흰 전반에 걸쳐 작다.

Fig. 7은 주어진 조건에서 유동에 수직인 방향(a)과 유동 방향(b)의 서리층 두께를 비교한 것이다. 서리층 두께는 유동에 수직인 방향으로 흰 바탕(fin base)에서 흰 끝(fin tip)으로 갈수록 큰 폭으로 감소한다. 이는 흰 표면온도의 변화와 동일한 경향성을 갖는다. 유동 방향의 서리층 두께 성장은 선단 효과(leading edge effect)의 영향으로 흰

선단에서 활발하고 흰 후단으로 갈수록 다소 감소하지만, 그 감소폭은 유동에 수직인 방향의 감소폭에 비해 매우 작다. 이는 2차원 흰에서의 서리층 두께 성장이 흰의 온도분포에 지배적인 영향을 받기 때문이다.

Fig. 8는 착상 실험 90분 일 때 측정된 평균 서리층 밀도를 나타낸 것이다. 유동에 수직인 방향의 평균 서리층 밀도는 흰 끝에서 높은 흰의 온도분포로 인해 조밀하다. 유동 방향의 평균 서리층 밀도는 흰 선단에서 선단 효과에 의해 조밀한 성장을 보인다. 여기서 유동 방향에 비해 유동에 수직인 방향의 평균 서리층 밀도 변화가 상대적으로 더 크다. 이는 2차원 흰에서 선단효과보다 흰의

온도구배가 서리층 밀도 성장에 지배적인 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다. 특히 2차원 환에서 유동에 수직한 방향으로의 서리층 밀도분 포는 서리층 두께 성장과 서로 상반된다. 이는 습공기로부터 서리층 내부로 흡수되는 수증기의 일부는 서리층 두께를 증가시키고, 나머지 일부는 서리층 밀도의 증가를 야기시키는 착상 매커니즘을 잘 보여준다 .

4. 결 론

본 연구의 목적은 불균일한 온도분포를 갖는 2차원 열교환기 환에서 착상 거동을 예측하는 것이다. 이를 위해 다양한 운전조건에서 평판-환 열교환기 환에서의 착상실험을 수행하였다. 환 표면 온도의 변화는 유동에 수직한 방향으로 환의 열전도로 인해 컸으며 유동 방향에 대해서는 전반적으로 작은 온도구배를 가졌다. 유동 방향의 서리층 두께 성장은 선단 효과의 영향으로 환 선단에서 활발하고 환 후단으로 갈수록 다소 감소하지만, 그 감소폭은 유동에 수직한 방향의 감소폭에 비해 매우 작았다. 서리층 밀도의 변화는 유동 방향에 비해 유동에 수직한 방향으로 상대적으로 크게 나타났다. 이로부터 2차원 환의 온도분포가 서리층 성장에 지배적 영향을 미침을 알 수 있다.

참고문헌

1. Cheng, H., Shiu, S. S., 2002, Frost formation and frost crystal growth on a cold plate in atmospheric air flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 4289-4303.
2. Lee, K. S., Lee, T. H., Kim, W. S., 1994, Heat and mass transfer of parallel palte heat exchanger under frosting condition, *Journal of Air-Conditioning and refrigeration*, Vol.6, pp.155-165.
3. Lee, Y. B., S. T., 2002, Frost formation on vertical plate in simultaneously developing flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, pp. 939-945.
4. Yun, R., Kim, Y. C., Min, M. K., 2002, Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 25, pp.362-371.
5. Lee, K. S., Yang, D. K., 2004, Modeling for frost growth on a cold plate, *Proceeding of the KSME Spring Annual Meeting*, pp.1546-1551.
6. Kwon, J. T., Lim, H. J., Kwon, Y. C., Koyama, S., Kim, D. H., Kondou, C., 2006, An experimental study on frosting of laminar air flow on cold surface with local cooling, *International Journal of Refrigeration*, Vol.29, pp.754-760.
7. Wang, C. C., Chang, Y. J., Fan, S. J., Sheu, W. J., 2004, Some observations of the frost formation in fin arrays, *Heat Transfer Engineering*, Vol.25, pp.35-47.
8. Thomas, L., Chen, H., Besant, R. W., 1999, Measurement of frost characteristics on heat exchanger fins, Part I - Test facility and instrumentation, *ASHRAE Transaction*, Vol.105, pp.283-293.
9. Chen, H., Thomas, L., Besant, R. W., 1999, Measurement of frost characteristics on heat exchanger fins, Part II - Data and analysis, *ASHRAE Transaction*, Vol.105, pp.294-302.