대한설비공학회 2007 동계학술발표대회 논문집 pp. 252 ~ 257

07-W-040

# 착상 시 공기 유속이 슬릿 핀-관 열교환기 서리층 생성에 미치는 영향에 관한 연구

신 성 홍, 조 금 남*†, 하야세 가쿠**

성균관대학교 대학원, *성균관대학교 기계공학부, **삼성전자 생활가전사업부

# Effect of air velocity on frost formation of slit fin-and-tube heat exchanger under frosting condition

Sunghong Shin, Keumnam Cho*†, Gaku Hayase**

*Graduate school, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea*

**School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea*

***System Appliances Division, Samsung Electronics Co., Ltd, Suwon, 443-742, Korea*

**ABSTRACT:** The present study investigated the effect of air velocity on frost formation of slit fin-and-tube heat exchanger under frosting condition. The slit fin-and-tube heat exchanger with outer tube diameter 7.0mm and 1 row was used.

Air side pressure drop, photographs of frost distribution, frost accumulation and frost thickness were presented with respect to the frosting time. In the early stage of experiment, the case with air velocity of 1.5m/s showed 403% higher for the air pressure drop than the case with the air velocity of 0.5m/s. As the frost was accumulated, the effect of air velocity on air pressure drop was decreased. In the end stage of test, air pressure drops of two cases were very close and air pressure drop for the air velocity of 0.5m/s was higher than that of 2.0m/s. It was also shown in the photographs of frost distribution, frost accumulation and frost thickness. From frost thickness, fanning friction factor was presented.

**Key words:** Heat exchanger(열교환기), Frost(착상), Slit(슬릿), air velocity(공기 유속)

## 기 호 설 명

| | |
|---|---|
| $A_{min}$ | 최소 유동 단면적[$m^2$] |
| $A_o$ | 열교환기 표면적[$m^2$] |
| $D_h$ | 수력직경[m] |
| G | 공기 질량 유속[$kg/m^2s$] |
| L | 핀 길이[m] |
| $\Delta P$ | 압력 손실[Pa] |
| $\dot{Q}_t$ | 총 열전달률[W] |
| T | 온도[℃] |
| $T_{w,o}$ | 열교환기 외부 온도[℃] |
| V | 속도[m/s] |

### 그리스 문자

| | |
|---|---|
| $\eta_s$ | 열교환기 표면 효율 |
| $\sigma$ | 면적비[$A_c/A_{fr}$] |

† Corresponding author
Tel.: +82-31-290-7445; fax: +82-31-290-7923
*E-mail address*: keumnamcho@skku.edu

### 하첨자

| | |
|---|---|
| a | 공기 |
| i | 입구 |
| m | 평균 |
| o | 출구 |

## 1. 서 론

핀-관 열교환기는 고밀도화 및 소형화가 가능하였기에 과거 수년 동안 냉동 공조 산업에 이용되어 오고 있다. 그 중 슬릿 핀을 이용한 핀-관 열교환기의 경우에는 평판 핀-관 열교환기와 달리 슬릿에 의한 경계층 선단효과와 후류에서의 유체혼합 효과 등으로 향상된 열전달 성능을 기대할 수 있어 최근에 많이 사용되고 있다. 이와 같은 이유로 건, 습 표면 조건에서의 슬릿 핀에 대한 연구는 활발히 이루어졌다.

특히 겨울철 슬릿 핀-관 열교환기를 열펌프 증발기에 적용할 경우 열교환기 표면에 서리층이 형성되며, 서리층은 증발기의 열전달을 감소, 공기 측 압력손실의 증가, 제상 사이클을 가동시킴에 따라 추가적인 에너지 손실을 발생시키게 된다.

착상관련 연구는 크게 평판, 원관과 같은 단순 형상에서의 착상 연구와 핀-관 열교환기와 같은 복잡 형상에서의 착상 연구로 나눌 수 있다.

단순 형상에서의 실험적인 착상 연구[1,2]는 상대적으로 착상량 및 서리층 두께 측정과 예측이 용이한 이유에서 많은 연구자들에 의해서 연구되어 왔으며, 해석적인 연구로서는 서리층을 고체층[2](solid layer)이나 다공층(porous medium)으로 착상 현상을 이해하고자 하였다.

복잡 형상에서의 실험적인 착상 연구[3,4]는 주로 핀-관 열교환기에 관한 연구가 대부분이다. 해석적인 연구의 대부분은 서리층의 불균일성을 고려하기가 어려운 관계로 서리층이 핀과 관에 있어서 균일하게 생성된다는 기본 가정으로부터 해석을 수행하였다. 기존의 연구들의 경우에 공기 입구 유속이 착상량에 미치는 영향에 대해서 상반된 결과들을 나타내고 있다. Kondepudi and O'Neal[5]와 Rite and Crawford[6]은 공기 입구 유속이 증가할수록 착상량이 증가한다고 보고한 반면 Senshu et al.[3], Yan et al.[4], Yao et al.[7]은 공기 입구 유속이 감소할수록 착상량이 증가하는 상반된 결과를 보고하고 있다. 이와 같이 착상 과정은 열전달과 물질전달이 동시에 발생하는 복잡한 형태의 비정상 과정인 이유로 기존의 연구들의 경우 상반된 연구 결과를 나타내고 있다.

따라서 본 연구에서는 겨울철 열펌프의 착상조건에서 공기유속이 열펌프용 증발 열교환기 서리층 생성에 미치는 영향에 대해 이해하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 착상 실험 장치의 개략도를 보여주고 있다. 실험장치의 주요 부분으로는 Psychrometric Calorimeter, Refrigerant system, Wind tunnel, Test section, Data acquisition system으로 나눌 수 있다.

Psychrometric Calorimeter는 실내의 AHU(Air Handling Unit)를 통해 실내의 건, 습구 온도를 실험 조건에 맞게 조정해 주며 Refrigerant system은 냉매 측 입구 온도 제어를 용이하게 하기 위하여 에틸렌글리콜 수용액(60% wt. %)을 사용하였으며, 냉매의 유량은 mass flow meter(±0.1%)를 이용하여 측정하였다. 냉매의 입, 출구 온도는 열교환기 입, 출구에서 RTD 센서(Pt-100Ω, ±0.15℃)를 이용하여 측정하였다.

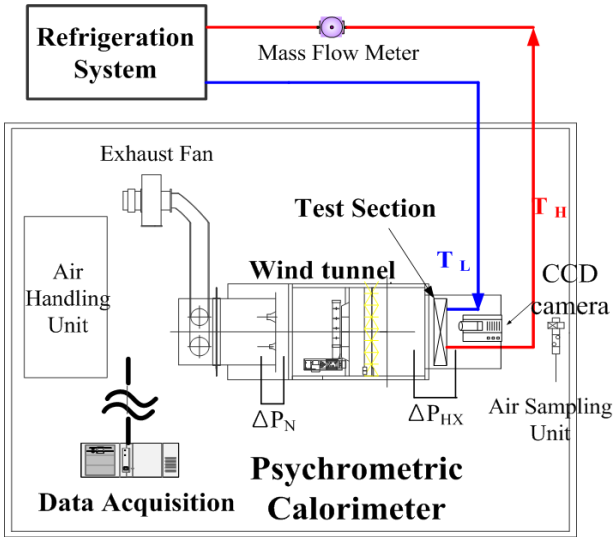


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

Wind tunnel에서는 노즐 차압을 이용하여 일정 풍량을 유지시켜주었으며, 노즐의 차압을 이용하여 풍량을 측정하였으며, 열교환기를 통과하는 공기 측 압력손실은 열교환기의 공기 입, 출구 차압을 측정하였다. 노즐의 차압과 증발기의 입, 출구 차압은 differential pressure transducer(±0.735Pa)를 이용하여 측정하였다. 열교환기를 통과하는 공기의 입, 출구 건, 습구 온도는 ASU(Air Sampling Unit)의 Air Sampler에 의해 포집된 공기를mixing 한 후 RTD 센서(Pt-100Ω, ±0.15℃)를 통해 평균 건, 습구 온도를 측정하였다. Test section은 열교환기와 jig로 구성되어 있으며, 본 연구에서 사용된 열교환기의 제원을 Table 1에 나타내었다. Data acquisition system에서는 실험 데이터를 실험 시간 40분 동안 10초 간격으로 PC로 수집되도록 구성하였다. 이상의 실험장치 외에 acrylic wind tunnel, CCD(410k pixel) 카메라, 전자저울(AND社, 0.01g)을 추가하였다. Table 2는 본 연구의 실험 조건을 나타내고 있다.

2.2 실험 결과 처리

열교환기를 통과하는 공기 측 압력손실은 식(1)과 같이 입구에서의 공기 압력과 열교환기를 지난 후 공기 압력의 차로써 계산되어진다.

$$\Delta P_a = P_{a,i} - P_{a,o} \quad (1)$$

서리층 두께($\delta_f$)는 Xia et al.[8]이 제안한 식(2)의 서리층 두께 모델을 이용하여 계산된다.

$$\delta_f = \int_0^t (1-\alpha)\dot{m}_f/(A_o\rho_{fs})dt \quad (2)$$

여기서, α는 흡수 계수(absorption factor)로써

Table 1 Heat exchanger geometry

| Contents | Value |
|---|---|
| Fin type | Slit |
| Fin pitch(mm) | 1.5 |
| Row No | 1 |
| Column No | 12 |
| Tube outer diameter(mm) | 7 |
| W × H × D(mm) | 400×250×12.7 |

Table 2 Experimental condition

| Contents | | Value |
|---|---|---|
| Air side | Inlet D/B(℃) | 2 |
| | Inlet W/B(℃) | 1 |
| | air velocity(m/s) | 0.5~2.0 |
| Refrigerant side | Inlet temperature(℃) | -10 |
| | Mass flow rate(kg/h) | 200 |

총 착상량 중 서리층 밀도 증가에 이용된 착상량을 의미하며, $\dot{m}_f$는 단위시간당 착상량 으로서 공기 입, 출구에서의 절대습도차로 계산되어진다.

식(2)에서의 서리층 표면 밀도($\rho_{fs}$)는 Hayashi et al.[9]의 상관식을 사용하였으며, 아래와 같이 표현된다.

$$\rho_{fs} = 650\exp(0.277\,T_{fs}) \quad (3)$$

여기서, $T_{fs}$는 서리층 표면 온도를 나타내며, 이는 위의 식(2),(3)을 아래의 식(4)에 대입 후 반복 계산을 통해 구하였다.

$$\dot{Q}_t = \frac{k_{eff}}{\delta_f}(T_{w,o} - T_{fs})A_o\eta_s \quad (4)$$

여기서, $K_{eff}$는 평균 유효 서리층 열전도 계수로써 Lee et al.[10]의 상관식을 사용하였다.

위에서 계산된 서리층 두께를 고려하여 착상시 마찰계수를 아래의 Kays and London[11]의 상관식을 통해 계산하였다.

$$f = \rho_m\frac{A_{min}}{A_o}\left[\frac{2\Delta P}{G^2} - (1+\sigma^2)\left(\frac{\rho_{a,o}-\rho_{a,i}}{\rho_{a,i}\rho_{a,o}}\right)\right] \quad (5)$$

마찰계수에 대한 오차 Maffat[12]이 제시한 방법에 의해 계산되었으며, 마찰계수의 오차 범위는 ±5.3 ~ ±6.9%였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 공기 입구 유속이 공기 측 압력손실에 미치는 영향을 나타내고 있는데, 착상 초기에

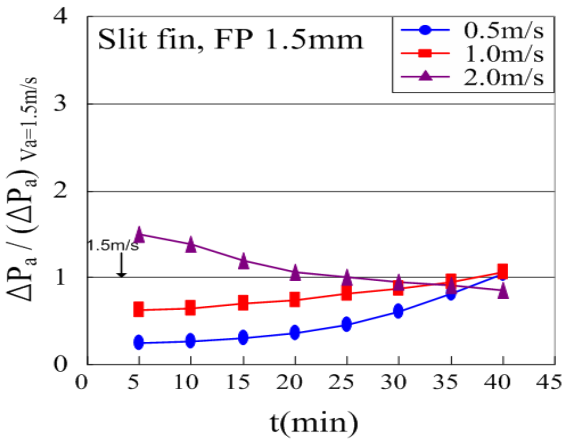


Fig. 2 Effect of air velocity on air pressure drop

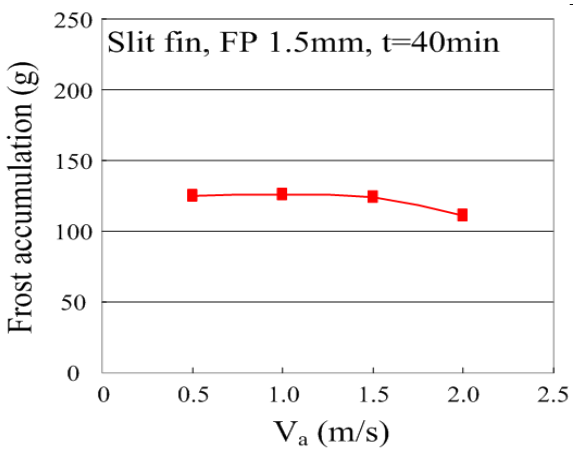


Fig. 4 Effect of air velocity on frost accumulation

는 공기 유속이 빨라질수록 공기 측 압력손실이 증가하는 건, 습 표면 조건에서의 경향과 유사하게 나타내어 착상 시작 5분 후에는 공기 유속이 1.5m/s 일 때의 압력손실이 0.5m/s 일 때에 비해서 약 400% 크게 발생하지만, 착상이 증가함에 따라 공기 유속에 공기 측 압력손실에 미치는 영향은 점점 감소하여 착상이 시작된 후 40분 후에는 공기 유속 0.5, 1.0, 1.5m/s 일 때의 압력손실이 거의 유사해지고 있다. 이는 Yan et al.[4]이 설명하고 있듯이 공기 유속이 낮아질수록 낮은 공기 열전달계수에 의해서 열교환기의 표면 온도가 낮아지기 때문에 착상량이 증가하여 공기 측 압력손실이 증가하게 되는 것이다. 이와 같은 경향은 서리층 분포 특성, 최종 착상량과 서리층 두께에서도 나타나고 있다. Fig. 3은 실험 시작 10분과 40분 경과후의 열교환기 전면 중앙부분에

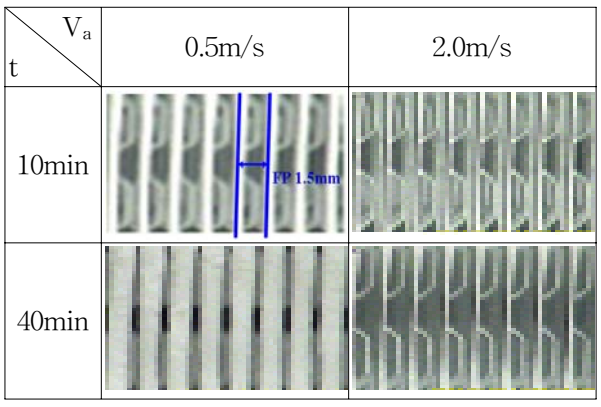


Fig. 3 Frost distribution in the entrance region of slit fin-and-tube heat exchanger

서의 서리층 분포를 나타내고 있는데, 공기 유속 0.5m/s의 경우 실험 40분 경과 후 서리층에 의해서 핀 사이가 거의 막힘을 알 수 있다. Fig. 4, 5는 착상 실험 후(착상 40분경과) 전자저울을 이용하여 측정한 최종 착상량과 식(2)을 통해 계산된 서리층 두께를 나타낸 것으로써 최종 착상량은 실험 완료 후 서리층이 형성된 열교환기의 무게와 서리를 완전 제거 후의 열교환기 무게를 비교하여 측정하였다. Fig. 4,5의 결과 역시 서리층 분포 경향과 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 본 연구의 실험결과는 Yan et al.[4], Senshu et al.[3], Yao et al.[7]과 일치하는 경향을 나타내지만, Kondepudi and O'Neal[5]와 Rite and Crawford[6]는 반대되는 경향을 나타내고 있다. 이와 같이 공기 유속에 의한 서리층 성

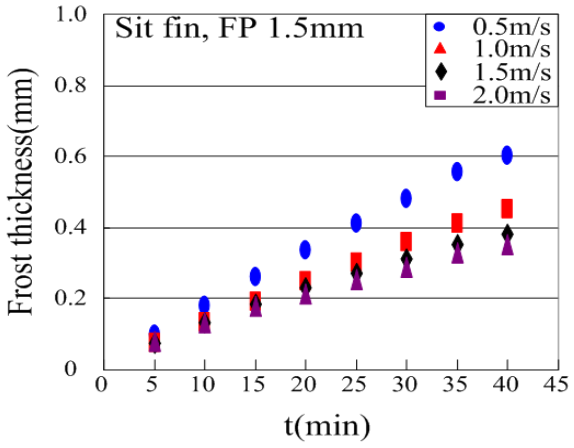


Fig. 5 Effect of air velocity on frost thickness

장에 대한 상반된 결과를 나타내는 이유를 Rite and Crawford[6]의 실험 결과로부터 찾을 수 있다.

단위 면적당 착상량은 식(6)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\dot{m}''_w = h_m (W_{air} - W_{surface}) \quad (6)$$

$\dot{m}''$= 단위면적당 착상량($g/m^2s$)
hm = 물질전달계수($g/m^2s$)
$W_{air}$ = 공기 절대습도($g/g_a$)
$W_{surface}$ = 열교환기 표면에서의 공기 절대습도 ($g/g_a$)

단위 면적당 착상량은 공기 측 물질 전달계수(hm)와 물질전달 구동력($W_{air}-W_{surface}$, mass transfer driving potential)에 의해서 결정되는데 공기 측 물질 전달 계수는 열전달과 물질전달의 상사성에 의해서 공기 측 열전달 계수가 증가할수록 즉 공기 유속이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내게 되며. 물질전달 구동력은 열교환기 표면온도, 공기 온도, 용수량(moisture capacity)에 의해서 영향을 받게 된다.

열교환기 표면온도는 유속이 증가할수록 높은 열전달 계수에 의한 열교환기 표면온도 상승으로 인하여 $W_{surface}$가 증가하여 물질전달 구동력을 감소시키는 방향으로 작용하게 되며, 공기 온도는 유속이 증가할수록 큰 열용량으로 인하여 공기 출구 측 온도가 높아짐에 따라서 $W_{air}$가 증가하게 되어 물질전달 구동력이 증가하게 되며, 용수량 역시 유속이 증가할수록 물질전달 구동력을 증가시키게 된다. 이상에서 열거한 공기 측 물질전달계수와 물질전달 구동력의 영향력에 따라서 공기 유속에 의한 착상 특성이 결정되게 되며, 본 연구에서 유속이 증가할수록 착상량이 감소하는 이유는 물질전달 구동력에 의한 영향력이 물질전달 계수에 의한 영향력보다 크게 작용하기 때문이며, 특히 물질전달 구동력에 영향을 미치는 요소 중 열교환기의 표면온도에 영향이 지배적이기 때문이다.

Fig. 6은 착상 경과 40분 후 공기 유속에 따른 열교환기의 전, 후면에서의 서리층 분포 사진을 나타내고 있는데 공기 유속 2.0m/s인 경우에는 열교환기 후면에서부터 서리가 먼저 생성되고 있다. 이는 Wang et al.[13]과 Lűer and Beer[1]의 실험결과와 일치하는 것으로서 Wang et al.[13]은 이와 같은 현상을 열전달과 물질전달의 상사성으로 설명하고 있으나, 본 연구의 경우에는 공기 유속 2.0m/s조건에서는 빠른 유속에 의해서 열교환기 전면의 응축핵이 열교환기 후면으로 이동하기 때문으로 판단된다.

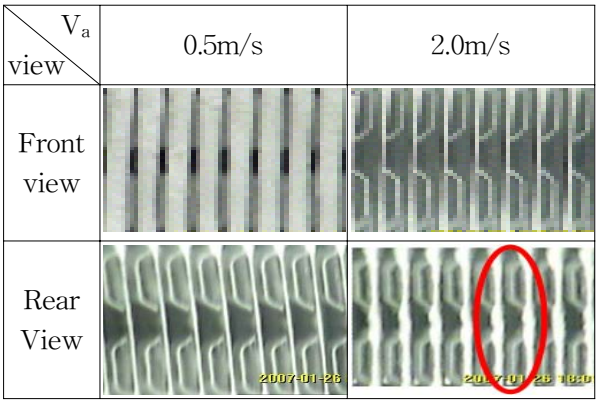


Fig. 6 Frost distribution in the entrance region and rear region of slit fin-and-tube heat exchanger

Fig. 7은 서리층 두께를 고려한 착상 시 마찰계수(f)를 나타내고 있다. 본 연구에서는 특성 길이는 수력직경을 이용하여 나타내었으며 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_h = \frac{4A_c}{A_o}L \quad (7)$$

각각의 수력직경은 서리층 두께가 0, 0.3mm, 0.45mm 일 때를 나타내고 있으며, 마찰계수는 건, 습 표면 조건의 경우와 마찬가지로 Re 수가 증가함에 따라서 감소하는 경향을 나타내고 있다.

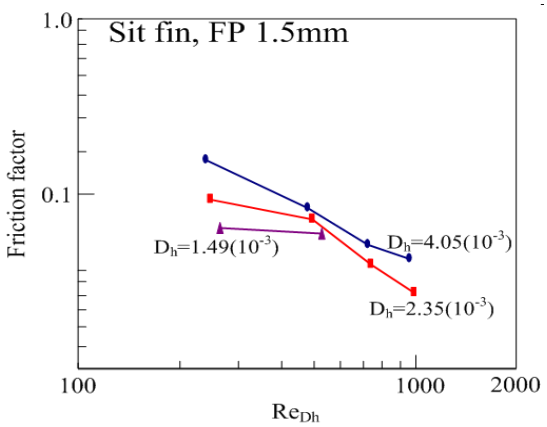


Fig. 6 Friction factor under frosting condition

## 4. 결 론

(1) 공기 측 압력손실은 착상 초기에는 공기 유속이 증가할수록 증가하는 일반적인 경향을 나타내어 공기 유속이 1.5m/s의 압력손실이 0.5m/s에 비해서 약 400% 크게 발생하지만, 착상이 진행됨에 따라서 공기 유속에 의한 영향은 줄어들어 착상 경과 40분 후에는 0.5, 1.0, 1.5m/s의 압력손실이 거의 유사한 값을 나타내었다. 이는 서리층 분포 사진, 최종 착상량과 서리층 두께에서도 동일한 경향을 나타내고 있다.
(2) 착상이 진행됨에 따라 공기 유속이 증가할수록 공기 측 압력손실, 서리층 두께, 착상량이 감소하는 경향이 나타났다. 이는 본 연구의 실험조건에서 공기 유속이 증가함에 따라 열교환기 표면온도의 증가에 의한 착상량 감소 효과가 공기 측 물질전달계수 증가에 의한 착상량 증가 효과보다 지배적이기 때문이다.
(3) 유속 2.0m/s 조건에서는 다른 유속 조건과 달리 열교환기 후면에서 서리층이 먼저 생성되는데 이는 빠른 유속조건하에서는 열교환기의 전면의 응축핵이 후면으로 이동하기 때문이다.
(4) 착상 시 마찰계수는 Re 수가 증가함에 따라 감소하는 일반적인 경향을 나타내었다.

## 후 기

이 논문은 성균관대학교 미래가전연구센터(SFARC), 2007년도 2 단계 두뇌한국(BK) 21 사업 및 2006년도 정부 재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구 되었음.(KRF-2006-521-D00070).

## 참 고 문 헌

1. A. Lűer, A. and Beer, H., 2000, Frost deposition in a parallel plate channel under laminar flow conditions, Int. J. Therm. Sci, Vol. 39, pp. 85-95.
2. Lee, Y. B. and Ro, S. T., 2001, An experimental study of frost formation on a horizontal cylinder under cross flow, Int J Refrigeration, Vol. 24, pp. 468-474.
3. Senshu, T., Yasuda, H., Oguni, K. and Ishibane, K., 1990, Heat pump performance under frosting conditions : Part 1-Heat and mass transfer on cross-finned tube heat exchangers under frosting conditions, ASHRAE Trans, Vol. 96, No. 1, pp. 3073-3080.
4. Yan, W. M., Li, H. Y. and Tsay, Y. L., 2005, Thermofluid characteristics of frosted finned-tube heat exchangers, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 48, pp. 3073-3080.
5. Kondepudi, S. N. and O'Neal, D. L., 1989, Effect of growth on the performance of louvered finned tube heat exchangers, Int. J. Refrigeration, Vol 12, No. 3, pp. 151-158.
6. Rite, R. W. and Crawford, R. R., 1991, A parametric study of the factors governing the rate of frost accumulation on domestic refrigerator-freezer finned-tube evaporator coils, ASHARE Trans, Vol. 97, pp. 438-446.
7. Yao, Y., Jiang. Y., Deng, S. and Ma. Z., 2004, A study on the performance of the airside heat exchanger under frosting in an air source heat pump water heater/chiller unit, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 47. pp. 3745-3756.
8. Xia, Y., Zhong, Y., Hrnjak, P. S. and Jacobi. A. M., 2006, Frost, defrost, and refrost and its impact on the air-side thermal-hydraulic performance of louvered-fin, flat-tube heat exchangers. Int. J. Refrigeration., Vol. 29, pp. 1066-1079.
9. Hayashi, Y., Aoki, A. and Yuhara, H., 1977, Study of frost formation based on a theoretical model of the frost layer, Heat transfer Jpn. Res. Vol. 6, No. 3, pp. 79-94.
10. 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. 1997, No. 18, pp. 4359-4365.
11. Kays, W. M. and London, A. L., 1984, Compact heat exchangers, 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
12. Moffat, R. J., 1985, Using uncertainty analysis in the planning of an experiment, Trans. Of the ASME: J. Fluid Engineering, Vol, 107, pp. 173-182
13. 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, No. 8, pp. 35-47.