

## 표면특성이 다른 두 핀-관 열교환기의 착상 및 제상 성능

최 봉 준, 신 종 민<sup>†</sup>

LG전자 디지털 어플라이언스 사업본부 연구소

### The Frost and Defrost Performances of Fin-and-Tube Exchangers with Different Surface Characteristics

Bong-Jun Choi<sup>†</sup>, Jongmin Shin

Digital Appliance Company Research Lab., LG Electronics, Gyeong Nam 641-711, Korea

(Received May 26, 2002; revision received May 11, 2002)

**ABSTRACT:** The effects of different surface hydrophilicity on frosting and defrosting characteristic were experimentally investigated. Mass of frost and water hold-up was measured. Results showed that no significant difference in the frost mass was found between the two different surfaces while the water hold-up of heat exchanger could be reduced by the enhancement of surface hydrophilicity. Also, the defrosting efficiency on hydrophilic surface was improved by 76%. It was expected that hydrophilic heat exchanger could provide the improvements in both thermal-hydraulic performances and system reliability during frost/defrost operating in refrigeration systems.

**Key words:** Fin-and-tube heat exchanger(핀-관 열교환기), Surface characteristics(표면특성), Frost(착상), Defrost(제상), Hydrophilicity (친수성), Contact angle(접촉각)

#### 기 호 설 명

$B$  : Bias limit  
 $C$  : Nozzle discharge coefficient  
 $C_p$  : 정압비열 [kJ/kg · °C]  
 $DCA$  : 동적 접촉각(dynamic contact angle) [°]  
 $h$  : 엔탈피 [kJ/kg]  
 $LH$  : 용해잠열 [kg/kg]  
 $\dot{m}$  : mass flow rate [kg/s]  
 $M_f$  : 제상량 [gr]  
 $P$  : Precision limit  
 $q$  : 열전달량 [kW]

$Q$  : 체적유량 [m<sup>3</sup>/min]  
 $SCA$  : 정적 접촉각(static contact angle) [°]  
 $T$  : 온도 [°C]  
 $U$  : Uncertainty [%]  
 $WH$  : 잔수량(water hold-up) [kg/m<sup>2</sup>]

#### 그리스 문자

$\Delta$  : Difference  
 $\eta_b$  : 제상효율  
 $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\tau$  : 시간 [min]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-55-260-3828; fax: +82-55-260-3507

E-mail address: shinjm@lge.com

#### 하첨자

$a$  : 공기

*c* : 냉매  
*i* : 입구  
*n* : 노즐  
*o* : 출구

## 1. 서 론

가정용 냉장고 혹은 냉동고의 증발기는 그 특성상 영하의 온도에서 작동하므로 그 표면에 착상이 생기게 된다. 착상이 계속 되면 열교환기의 열저항 증가와 공기유로의 감소에 의한 압력손실의 증가로 인하여 풍량이 감소하게 되어 열교환기의 성능은 크게 저하하게 된다. 그러므로 일정한 운전시간 후에는 열교환기 표면에 부착된 서리를 제거하기 위해 히터 등을 이용한 제상(Defrosting) 작업이 필요하게 된다. 이러한 제상요구는 냉동장치의 불연속적인 운전에 의한 냉각성능 저하 이외에도 제상히터에 의한 부가적인 전기소모 및 제상에 의한 냉동부하 증가로 이어진다. 이것은 냉동장치의 효율을 크게 떨어뜨리는 원인이 됨은 물론 제품의 신뢰도 및 수명을 감소시키는 요인이 되고 있다. 따라서 착상에 대한 보다 정확한 이해와 착상을 고려한 열교환기 설계는 냉동장치효율을 개선하는 데 있어 매우 중요한 위치를 차지하고 있으며, 지금까지 착상에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다.

Stoecker<sup>(1)</sup>은 냉동시스템에서 착상이 진행됨에 따라 초기에는 총합 열전달계수는 증가하나, 어느 일정 이상 착상량이 증가하면 점차적으로 감소함을 보였다. 또, 동일한 냉동능력 기준으로 열교환기 핀 간격의 영향에 대해서도 착상이 적은 초기에는 좁은 핀 간격이 유리하나, 착상이 진행됨에 따라 넓은 핀 간격을 갖는 열교환기가 보다 효율적이라는 결론을 얻었다. Aoki et al.<sup>(2)</sup>은 착상이 진행될수록 서리층에 의한 열저항의 증가로 열전달계수는 감소하며, 또한 공기유속 증가에 의한 열전달계수의 증가는 무착상시에 비해 착상시에는 현저히 둔화됨을 밝혔다. 그리고 열교환기 표면에 착상된 서리의 밀도는 공기유속이 빠를수록 증가하며, 공기습도의 영향은 착상 초기에는 습도가 낮은 경우가 서리 밀도가 높았다가, 운전시간이 길어지면 고습조건의 경우 서리밀도가 급격히 상승하는데 이는 서리구조가 시간에 따라 달라지기 때문으로 이해하였다. 또, Aoki et

al.<sup>(3)</sup>은 착상과 제상을 포함한 열교환기 성능실험을 통해, Dry 상태에서의 착상(First cycle)과 제상 후 열교환기 표면에 수막(Water film)이 남아 있는 Wet 상태에서의 착상(Second cycle)시 열교환기 성능을 비교하였다. 그리고 Rite et al.<sup>(4)</sup>은 열교환기의 착상에 미치는 주요 인자들, Fin Pitch, 공기속도, 열교환기 표면온도, 공기온도, 공기상대습도의 변화가 착상률에 미치는 영향을 조사, 정리하였다. 대부분의 연구결과, 공기속도가 빠를수록, 상대습도가 높을수록 착상률은 증가하며, 표면온도는 낮을수록 착상률이 빠른 것을 알 수 있다. 그리고 공기온도도 높을수록 착상률이 빨라지는 것으로 평가되었다.

제상성능과 관련한 잔수량(water hold-up)에 대해서는 하삼철 등<sup>(5,6)</sup>이 동적 접촉각(dynamic contact angle, DCA)이 10~40°인 친수(hydrophilic) 표면과 약 90°인 알루미늄 표면에 대해 조사하여 응축잔수량이 있을 때 열교환기의 압력강화모델을 제시하였고, 표면의 친수처리에 의해 응축잔수량이 감소할 수 있음을 보였다. 신종민 등<sup>(7)</sup>은 다른 성질을 가지는 표면에 물입자를 분사할 때 일정 크기의 표면에 부착될 수 있는 잔수량에 대해 조사하여 표면을 친수처리할 때 잔수량은 감소함을 보였고, 또한, 신종민 등<sup>(8)</sup>은 여러 가지 다른 표면특성을 가지는 열교환기에 대해 일반적으로 표면특성을 논할 때 주로 사용되는 정적 접촉각(static contact angle, SCA)과 동적 접촉각을 이용하여 이들 관계를 정량적으로 규명하여, 이들 변수와 잔수량과의 관계를 파악했다. 본 연구에서는 다른 접촉각을 갖는, 즉 표면특성이 다른 두 열교환기에 대하여 착상과 제상의 영향을 검토하였다

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 열교환기 시료

본 연구에서는 동일한 형상의 Fig. 1과 같은 핀-관 열교환기를 각각 두 가지 다른 표면특성으로 실험을 하였다. 열교환기는 알루미늄으로 제작하였으며 관의 단 수는 2개, 열 수는 8개이며, 꼭관부를 포함한 열교환기의 치수는 폭×깊이×높이가 295×44×220 mm이며 열교환기의 각 핀은 일체형(straight)으로 되어 있다. 핀가공유(va-

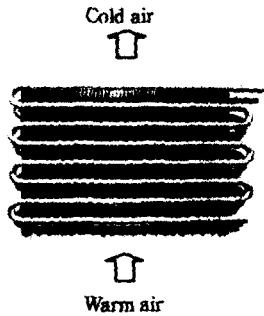


Fig. 1 Photo of fin-and-tube heat exchanger.

por oil)를 이용하여 제작한 일반 열교환기의 경우 핀 표면은 정적 접촉각 약 90°를 나타내었다. 다른 표면특성을 얻기 위하여 고석근 등(9)이 제안한 방법으로 플라즈마 처리하였는데 이때 열교환기 핀의 평균 정적 접촉각은 65°를 나타내었다. 제상 잔수량을 측정한 다음 열교환기를 분해, 절단하여 각기 다른 위치에서 가로×세로가 5mm×10mm인 12개 5.2의 시료를 만들어 신종민 등(7)과 동일한 방법으로 정적 접촉각을 측정하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

2.2.1 착상실험

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도이다. 보여지는 실험장치의 테스트부(test section)에 열교환기를 설치하여 항온조 온도와 공기 입구온도 및 습도가 정상상태에 도달하면 착상시험을 시작한다. 입구공기의 시험조건은 히터와 가습기를 이용하여 진구온도 5℃, 상대습도는 90%로 관리하였고, 항온조 온도와 냉매유량은 -30℃,

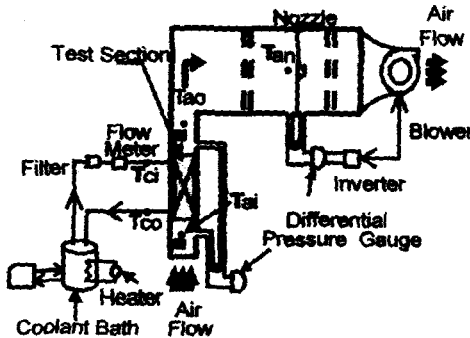


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

126 kg/hr로 고정하여 열교환기 내로 순환시켰으며 입구공기 체적유량은 1.5 m<sup>3</sup>/min로 하여 10분 간격으로 30분간 착상을 진행하였다. 착상량은 순수한 열교환기 무게와 착상 후의 열교환기 무게의 차로 계산하였고 무게는 로드셀(load cell, 제작처 : CAS, 모델명 : BCL-1L)로 측정하였다.

2.2.2 제상실험

착상실험이 완료되면 순환부 내의 공기흐름을 중지시키고 곧바로 제상을 시작하였으며 제상 센서(defrost sensor)가 5℃에 도달하면 제상을 중단하였고 제상수가 충분히 흘러내릴 수 있도록 7분 동안의 휴지기간을 둔 다음 제상실험을 종료하고 이때 열교환기 표면에 부착되어 있는 물의 양을 제상 잔수량이라고 한다. 제상 후 잔수량은 제상수가 부착된 상태에서의 열교환기 무게와 제상수를 제거한 후의 열교환기 무게의 차로 계산하였고 무게는 로드셀(load cell, 제작처 : CAS, 모델명 : BCL-1L)로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험의 반복성 및 재현성

실험장치의 전체적인 정확성을 평가하기 위하여 중요 측정항목인 냉매측 열전달량, 공기풍량, 그리고 공기측 현열 열전달량에 대해서 불확실도(uncertainty)를 평가하였다. 그리고 냉매측 열전달량과 공기측 현열 열전달량에 대하여 에너지 균형(energy balance)을 평가하였다. 먼저 냉매측의 열전달량  $q_c$ 은 다음과 같이 구한다.

$$q_c = \dot{m}_c c_p \Delta T_c \tag{1}$$

$$\Delta T_c = T_{c,i} - T_{c,o} \tag{2}$$

그리고 공기의 열전달량  $q_a$ 는 공기유량과 열교환기 입구와 출구에서의 엔탈피차로 나타낼 수 있다.

$$q_a = \dot{m}_{a,i} (h_{a,i} - h_{a,o}) \tag{3}$$

따라서 냉매측 열전달량, 공기 풍량, 그리고 공기측 현열 열전달량에 대한 불확실도는 Aber-

Table 1 Summary of uncertainty analysis

Parameter	Range	Precision limit	Bias limit	Uncertainty
$q_c$	$m$	5 kg/min	0.3%	2.6%
	$C_p$	-	-	1.0%
	$\Delta T_c$	3°C	0.04°C	0.2°C
$Q$	$C$	-	-	2.0%
	$Y$	-	-	2.0%
	$\rho_a$	-	-	1.0%
	$\Delta P_N$	800 Pa	1.0 Pa	3.0 Pa
$q_a$	$Q$	1.5 CMM	1.5%	3.0%
	$\rho_a$	-	-	1.0%
	$\Delta T_c$	10°C	0.03°C	0.2°C
	$h$	-	-	0.5%

nathy et al.<sup>(10)</sup>의 방법에 따라 구할 수 있고 Table 1에 나타내었다. 상세한 계산내용은 부록 1에 나타내었다. 한편, 냉매측 열전달량과 냉매측 열전달량과 공기측 열전달량을 측정하여 다음의 평가식으로 에너지 균형을 평가하였다.

$$EB = \frac{2(q_c - q_a)}{(q_c + q_a)} \times 100 \quad (4)$$

평가결과 본 실험장치의 불확실도는 ±8%였다.

### 3.2 착상 및 제상특성

본 연구에서는 열교환기의 표면 접촉각이 착상 시 핀-관 열교환기의 성능 및 착상 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 정적 접촉각이 90°인 열교환기와 65°인 열교환기에 대하여 30분 동안 10분 간격마다 착상량과 제상량 및 제상 잔수량을 측정하였다. 이때 착상량과 제상 잔수량은 Shin et al.<sup>(11)</sup>과 같이 반복성을 통해 신뢰성을 확보하였고, 이때 반복에 의한 오차는 ±3.1% 이내로 확인하였다.

#### 3.2.1 착상특성

Fig. 3은 서로 다른 접촉각을 갖는 각 열교환기에 대해서 시간변화에 따른 착상량을 도시한 것이다. 착상이 진행되면서 각 열교환기의 착상량은 시간이 경과함에 따라 증가하고 있다. 접촉각이 65°인 열교환기는 90°인 열교환기에 비해서 착상량이 30분 기준으로 5.6% 작은 것으로 본 연

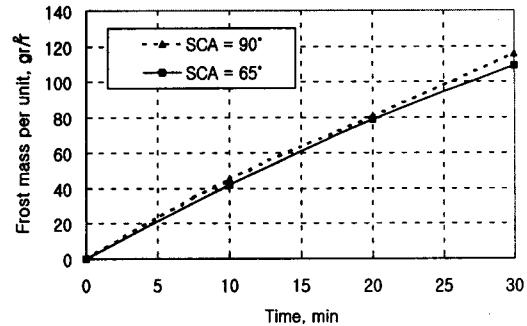


Fig. 3 Time variation of frost mass for different surface at 5°C, 1.5 CMM.

구의 최대 불확실도 8%를 고려할 때 착상량의 차이는 없는 것으로 판단된다. 하지만 이 결과는 이관수 등<sup>(12)</sup>의 연구에서 친수성 표면의 경우 수분이 도막형태로 표면에 분포하므로 열교환기 표면과 물방울과의 접촉면적이 상대적으로 크기 때문에 열전달면적의 증가가 착상을 촉진시킨다는 경향과 상반된 결과를 보이고 있다. 이는 표면 처리방법, 핀 간격 등의 열교환기 형상, 그리고 평가방법에 따라 결과가 다를 수 있다는 것을 시사한다.

#### 3.2.2 제상특성

냉동시스템에서 있어서 제상수의 배출성이 좋을수록 제상 시간단축에 의한 시스템의 효율을 증가시킬 수 있다. 제상수의 배출성은 친수 표면이 소수 표면에 비해 빠르므로 제상 후 응축 잔수량은 접촉각이 작은 65° 열교환기가 작을 것으로 기대된다. Fig. 4는 10분 간격으로 30분 동안 착상 후에 제상을 실시하여 표면 접촉각에 따른

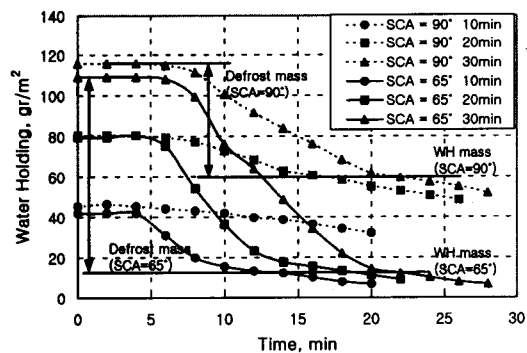


Fig. 4 Water holding on heat exchanger after defrosting for different surface.

제상량과 제상 잔수량을 나타낸 것이다. 다른 접촉각을 갖는 각 열교환기의 제상성능을 알아보기 위하여 다음과 같이 정의된 제상효율을 사용하였다.<sup>(13)</sup>

$$\eta_b = \frac{M_f \times LH}{q \times \tau} \quad (5)$$

여기서  $\eta_b$ 는 제상효율이며  $M_f$ 는 제상량[gr],  $LH$ 는 용해잠열[kg/kg],  $q$ 는 공급되는 열량,  $\tau$ 는 제상 종료시간이다. Fig. 4에서 제상시 접촉각이 65°인 열교환기는 30분 기준으로 90°인 열교환기에 비해서 제상 잔수량(Fig. 4의 WH mass) 및 제상량(Fig. 4의 Defrost mass)이 현저하게 작으며 또한 제상시간이 단축되어 제상효율이 76% 상승하였다. 접촉각이 90°인 열교환기는 10분 기준으로 제상 후 착상량의 대부분이 제상 잔수량으로 존재하여 제상량은 거의 없는 것으로 판단되었다. 또한 신종민 등<sup>(8)</sup>의 시험결과에서 보인 바와 같이 정적 접촉각이 65°인 경우 90°에 비해서 잔수량의 기울기가 상당히 가파름을 보이고 있다. 따라서 제상 후 제상 잔수량을 접촉각을 기준으로 비교한 결과 정적 접촉각이 낮은 표면이 높은 표면에 비하여 우수하다고 말할 수 있다. 이것은 실제 냉동시스템에 있어서 친수 표면 열교환기 적용에 의하여 시스템 효율 및 시스템 신뢰성을 높일 수 있음을 의미한다.

#### 4. 결 론

열교환기 표면특성이 착상 및 제상에 미치는 영향에 대해서 정적 접촉각이 65°와 90°인 두 시료에 대해 입구공기의 건구온도, 상대습도 및 체적유량이 각각 5°C, 90%, 그리고 1.5 m<sup>3</sup>/min이고, 냉매측 온도와 냉매유량을 각각 -30°C, 126 kg/hr로 고정하여 30분간 착상을 진행 실험결과 다음과 같이 결론지을 수 있다.

(1) 열교환기 표면이 건조한 상태에서 착상이 시작될 때 표면특성에 따른 착상량의 차이는 미미하였으나 압력강하에 있어서 정적 접촉각이 작은 경우 12% 적었다.

(2) 건조한 상태에서 착상 후 제상시켰을 때 친수성능이 좋을수록 제상수 배출이 빨라 제상시간이 단축되었으며 제상효율이 76% 상승하였다.

(3) 냉동시스템에 있어서 65°인 표면을 갖는 열교환기가 90°인 표면을 갖는 열교환기에 비해 낮은 공기측 압력손실 특성에 의한 열전달량의 효율향상과 착상에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

#### 부록 1

##### 1) 냉매측 열전달량의 불확실도

$$\begin{aligned} \frac{U_{q_c}}{q_c} &= \sqrt{\left(\frac{P_{q_c}}{q_c}\right)^2 + \left(\frac{P_{q_c}}{q_c}\right)^2} \\ \left(\frac{P_{q_c}}{q_c}\right)^2 &= \left(\frac{P_{m_c}}{m}\right)^2 + \left(\frac{P_{T_{c,c}}}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{P_{T_{c,i}}}{\Delta T}\right)^2 \\ \left(\frac{B_{q_c}}{q_c}\right)^2 &= \left(\frac{B_{m_c}}{m}\right)^2 + \left(\frac{B_{c_p}}{c_p}\right)^2 \\ &\quad + \left(\frac{B_{T_{c,c}}}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{B_{T_{c,i}}}{\Delta T}\right)^2 \end{aligned}$$

##### 2) 공기유량의 불확실도

$$\begin{aligned} Q &= 60 \cdot C \cdot A_N \cdot Y \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_N}{\rho_1}} \\ \frac{U_Q}{Q} &= \sqrt{\left(\frac{P_Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{B_Q}{Q}\right)^2} \\ \left(\frac{P_Q}{Q}\right)^2 &= \left(\frac{P_{\Delta P_N}}{2 \cdot \Delta P_N}\right)^2 \\ \left(\frac{B_Q}{Q}\right)^2 &= \left(\frac{B_C}{C}\right)^2 + \left(\frac{B_Y}{Y}\right)^2 \\ &\quad + \left(\frac{B_{\rho_1}}{\rho_1}\right)^2 + \left(\frac{B_{\Delta P_N}}{2 \cdot \Delta P_N}\right)^2 \end{aligned}$$

##### 3) 공기 현열 열전달의 불확실도

$$\begin{aligned} \frac{U_{q_a}}{q_a} &= \sqrt{\left(\frac{P_{q_a}}{q_a}\right)^2 + \left(\frac{P_{q_a}}{q_a}\right)^2} \\ \left(\frac{P_{q_a}}{q_a}\right)^2 &= \left(\frac{P_{m_{a,i}}}{m_{a,i}}\right)^2 + \left(\frac{P_{h_{a,i}}}{\Delta h}\right)^2 + \left(\frac{P_{h_{a,c}}}{\Delta h}\right)^2 \\ \left(\frac{B_{q_a}}{q_a}\right)^2 &= \left(\frac{B_{m_c}}{m}\right)^2 + \left(\frac{B_{c_p}}{c_p}\right)^2 \\ &\quad + \left(\frac{B_{T_{c,c}}}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{B_{T_{c,i}}}{\Delta T}\right)^2 \end{aligned}$$

## 부록 2

Table 2 Summary of sensors used in the present study

측정항목	모델명	측정범위	정확도
압력	Furness사 FCO12-2	0~19.9 mmH <sub>2</sub> O	0.01 mmH <sub>2</sub> O
질량유량	Oval사 E25	0~18 kg/min	0.2 kg/min
온도	CHINO사 R003-1	-200~600 ℃	0.001 ℃
무게	CAS사 BCA5L	0~5 kg	0.01 g

## 참고문헌

1. Stoecker, W.F., 1957, How frost formation on coils affects refrigeration systems, *Refrigerating Engineering*, Vol. 65, No. 2, pp. 42-46.
2. Aoki, K., Hattori, M. and Itoh, T., 1986, A study of extended surface heat exchanger with frosting, *Bulletin of JSME*, Vol. 29, No. 251, pp. 1499-1505.
3. Aoki, K. and Sawada, M., 1998, Characteristics estimation of heat exchanger operating with frosting, *Thermal Science & Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 99-104.
4. 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 evaporators coils, *ASHRAE Transactions*, Vol. 97, No. 2, pp. 438-446.
5. Ha, S. C., Kim, C. H., Ahn, S. P. and Dreitser, G. A., 6/98, Condensate Drainage Characteristics of Plate Fin-and-Tube Heat Exchanger, *Proceedings of the International Conference on Heat Exchangers for Sustainable Development*, Lisbon, Portugal, pp. 423-430.
6. Ha, S. C., Kim, C. H., Ahn, S. P. and Dreitser, G. A., 7/99, Hydraulic Performance of Wet Fin-and-Tube Heat Exchanger for Various Wettability Surfaces, *Proceedings of Compact Heat Exchangers and Enhancement of Technology for the Process Industries*, Banff, Canada, pp. 463-470.
7. Shin, J. M., Kim, J. B., Kim, C. H. and Ha, S. C., 8/2000, A Study of Water Hold-up of Two Surfaces Having Different Hydro-Characteristics, *Proceedings of the 9th International Symposium on Flow Visualization*, Edinburgh, UK, No. 413, pp. 413\_1-413\_8.
8. Shin, J. M., Lee, N. G., Han, S. J. and Ha, S. C., 4/2001, The effect of water contact angles of the fin surfaces of the fin-and-tube heat exchangers on the water hold-up, *Proceedings of the SAREK*, Vol. 10, No. 6, pp. 490-496.
9. Koh, S., Han, S., Song, S., Choi, W. and Jung, H., 1995, Improving Wettability of Polycarbonate (PC) and Adhesion with Aluminum by Ar<sup>+</sup> Ion Irradiation, *Journal of Material Research*, Vol. 10, No. 6, p. 2390.
10. Abernathy, R. B., Benedict, R. P. and Dowl, R. B., 1985 ASME Measurement Uncertainty, *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161-164.
11. Shin, J. and Ha, S., 2001, The effect of Hydrophilicity on Condensation over Various types of Fin-and-Tube Heat Exchangers, *International Journal of Refrigeration* (Accepted for publication, 08/2001).
12. Lee, K. S., Jee, S. and Lee, D. W., 2000, The effect of surface contact angle on the behavior of frost formation in a fin-tube heat exchanger, *Journal of HVAC&R*, Vol. 12, No. 1, pp. 99-101.
13. Lee, K. S., Kim, G. W. and Jee, S., 1998, Anexperimental study of behavior of defrosting on the fin-tube heat exchanger, *Journal of HVAC&R*, Vol. 10, No. 6, pp. 649-657.