

## 다른 친수성능을 가진 두 표면에서의 착상에 관한 연구

김철환<sup>†</sup>, 신종민, 하삼철

LG전자 DAC 연구소

### A Study of Frost Formation on Different Hydrophilic Surfaces

Cheolhwan Kim<sup>†</sup>, Jongmin Shin, Samchul Ha

DAC Lab., LG Electronics, Changwon city, 641-711, Korea

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

**ABSTRACT:** An experimental study has been conducted to investigate the effects of surface energy on frost formation. Test samples with two different surfaces are installed in a wind tunnel and exposed to a humid airflow. Dynamic contact angles (DCA) for these surfaces are 23° and 88°, respectively. The thickness and the mass of frost layer are measured and used to calculate the frost density while frost formation is visualized simultaneously with their measurements. Results show that frost density increases as time increases at specific test conditions. The air Reynolds number, the airflow humidity and the cold plate temperature are maintained at 12,000, 0.0042 kg/kg and -21°C, respectively. The surface with a lower DCA shows a higher frost density during two-hour test, but no differences in the frost density have been found after two hours of frost generation. Empirical correlations for thickness, mass and density are assumed to be the functions of the test time and DCA.

**Key words:** Surface energy(표면에너지), Frost generation(서리성장), Frost thickness(서리두께), Frost mass(서리질량), Frost density(서리밀도), Hydrophilicity(친수성)

#### 기호 설명

DCA : 동적접촉각 [°]  
 m : 서리질량 [kg]  
 Q : 공기풍량 [CMM]  
 t : 실험시간 [minute]

#### 그리스 문자

$\delta$  : 서리두께 [mm]  
 $\theta$  : 공기건구온도 [°C]

$\rho$  : 서리밀도 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\omega$  : 공기 절대습도 [kg/kg]

#### 1. 서론

서리는 습공기 중의 수분이 물질전달을 통하여 0°C 이하의 차가운 표면에 결정형태로 부착된 것이다. 이는 초저온, 냉동, 냉장, 우주 등의 산업 분야에서 발생하는데, 설비의 효율 측면에서는 바람직하지 못한 현상이다. 서리의 성장은 공기 측의 압력손실을 증가시키고, 열전달효율을 떨어뜨려 설비의 효율을 저하시킨다. 따라서 냉동기의 COP(coefficient of performance)는 점진적으로 저하되어, 제상운전을 필요로 하게 된다. 제상운전시 서리를 제거하기 위하여 일반적으로 전기

<sup>†</sup> Corresponding author

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

E-mail address: cheolhkim@lge.com

적인 가열방법을 사용한다. 그러나 전기적인 가열은 소비전력을 증가시키고, 고내 음식의 선도를 떨어뜨리므로, 효율적인 서리제어(frost control)를 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다.

연구자들이 중요하게 생각하는 서리실험에서의 측정항목은 서리두께, 서리질량 및 서리의 표면온도인데, 이러한 항목을 이용하여 서리밀도와 열전도계수를 도출할 수 있다. 이러한 서리의 특징은 공기속도, 공기온도, 공기습도, 표면온도 그리고 표면에너지 등 많은 인자들에 의하여 영향 받는다. 지금까지 서리의 성장에 관한 연구는 공기조건과 표면온도가 서리에 미치는 영향이 주를 이루어 왔다.<sup>(1-3)</sup> Hayashi et al.<sup>(4)</sup>은 서리의 성장과 관련된 모델을 제시하였다. 그들은 서리의 성장을 결정성장단계, 서리층 성장단계, 서리층 완전성장단계의 세 가지 단계로 분류하고 있다. 하지만 그들은 표면에너지와 서리성장의 관계에 관하여는 언급하지 않았다.

그 이후로 서리의 성장과 표면에너지의 효과에 관한 연구들이 몇몇 연구자에 의하여 발표되었다. Seki et al.<sup>(5)</sup>은 동적 접촉각(dynamic contact angle)으로 대표되는, 표면의 에너지가 낮을수록 밀도가 높은 서리가 자란다는 것을 발견하였다. Yoshiuki and Akiko<sup>(6)</sup>는 열교환기의 표면에 소수성 코팅(hydrophobic coating)을 하여 공조기에서의 제상시간간격을 늘리려고 시도하였다. 동적 접촉각 160도 이상의 시료를 사용하였을 경우, 제상운전 후 다음 제상운전 사이의 압축기 운전시간은 기존의 재료를 사용했을 때보다 동일한 성능을 내면서도 두 배로 증가하였다. Nikulshina et al.<sup>(7)</sup>은 Seki et al.<sup>(5)</sup>과 유사한 결과를 발표하였다. Ryu et al.<sup>(8)</sup>은 표면이 다른 핀-관 열교환기(fin-tube heat exchanger)에서의 서리성장을 연구하였다. 그들은 친수성 열교환기(hydrophilic heat exchanger)의 서리두께가 일반적인 알루미늄 재료의 열교환기에 비하여 더 얇고 공기측 압력강하도 더 적다는 사실을 발견하였다. 하지만 친수성 열교환기의 이점은 상대습도가 증가하면서 급격하게 저하되었다.

본 연구는 일반적인 냉장고 조건 중에서 한 조건을 선택하여 서리가 평행 평판 위에서 성장할 경우, 표면에너지가 다른 두 가지 표면간의 서리의 두께, 질량, 그리고 밀도의 효과를 규명하기 위한 목적이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 항온항습실, 냉매공급회로, 그리고 실험부를 포함한 풍동의 세 부분으로 나누어져 있다. 항온항습실은 온도조절장치(temperature control unit)와 공기채취부(air sampling unit)로 구성되어 있다. 온도조절장치는 3대의 압축기와 10kW의 가습기 그리고 7kW의 가열기들로 구성되어 있다. 압축기의 용량은 각각 1.5, 2.5, 그리고 4kW이다. 공기채취부는 ASHRAE Standard<sup>(9)</sup>를 근거로 제작되었고, 공기 입출구의 온도는 백금 측온저항체(Pt 100 $\Omega$ , CHINO)를 사용하여 측정하였다. 측정 오차는  $\pm 0.025^{\circ}\text{C}$ 이다.

풍동은 ASHRAE Standard<sup>(9)</sup>에 의거하여 제작되었고, 공기유량을 측정하기 위한 노즐과 팬을 포함한 3kW 모터와 덕트로 구성된다. 덕트는 10mm 두께의 아크릴로 제작되었고, 입구측 단면적은 220mm $\times$ 300mm, 길이는 1,500mm이고, 공기흐름방향으로 20mm 두께의 아크릴판으로 분리되어 있다. 실험시료는 아크릴판의 중앙에 위치한다.

냉매공급회로(RBC-10, JEIO TECH)는 히터가 내장된 스테인리스 스틸(stainless steel) 용기와 저온 냉동기에 연결된 열교환기로 구성되어 있다. 냉매 온도조절범위는  $-30\sim-5^{\circ}\text{C}$ 이며 최대 오차는  $0.2^{\circ}\text{C}$ 이다. 냉매유량을 정밀하게 조절하기 위하여 스테인리스 스틸 펌프와 질량유량계가 사용되었다.

실험장치에 사용되는 모든 계측기는 복합형 기

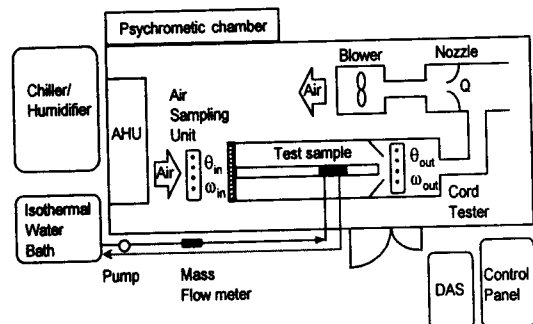


Fig. 1 Schematic diagram of test equipment.

록계(HR2400, YOKOGAWA)에 연결되어 있고, RS-232C 선을 통하여 3초마다 컴퓨터에 저장된다. 서리밀도는 서리의 질량과 두께를 측정하여 계산되며, 서리두께와 질량측정의 불확실성  $\pm 0.02$  mm와  $\pm 0.1$  g을 고려하였을 경우, 서리밀도 측정의 불확실성은  $\pm 2.5\%$  이내이다.<sup>(10)</sup>

2.2 실험시료

Fig. 2에 시료의 개략도를 보인다. 시료는 5 mm 두께의 알루미늄판을 잇대어 용접하여 제작하였다. 공기흐름방향의 시료길이는 100 mm이고, 폭은 300 mm이며, 두께는 20 mm이다.

시료 내부에 냉매를 공급하기 위하여  $10 \times 10$  mm<sup>2</sup>의 정사각형 유로가 시료 내부에 형성되어 있고, 폭 2 mm, 깊이 0.5 mm 홈이 시료의 표면에 10개 가공되어 T형 열전대(TT-T-36, OMEGA)가 설치된다. 이 중 다섯 개의 열전대는 시료의 상면에 설치되고, 나머지는 하면에 설치되어, 실험시 시료의 표면온도를 측정한다.

시편은 표면처리된 0.1 mm 두께의 알루미늄판이며, 시료의 양측면에 열전도가 높은 접착제(D-500, DOTITE)를 사용하여 부착한다.

시료의 표면온도는 시험 초기에 실내온도와 동

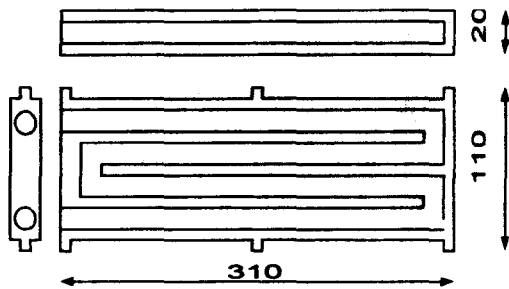


Fig. 2 Schematic diagram of test sample.

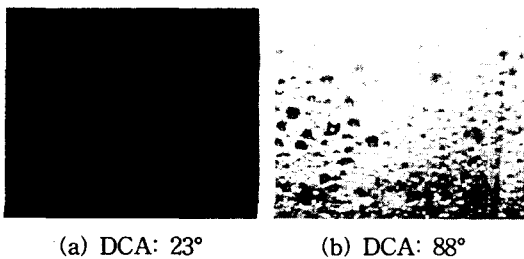


Fig. 3 Photo of water spray results.

일하게 유지되었다가 시료 내부로 차가운 냉매가 통과하면서, 급격하게 하강한 후 열저항의 증가에 의한 열전달량의 감소로 인하여 점진적으로 하강한다. 표면온도의 산포는  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 이다.

표면에너지는 동적 접촉각을 측정하여 평가하였다. 시료의 동적 접촉각은 동적 접촉각 측정장치(KSV 77000B, SIGMA 70)를 이용하여 측정하였다.<sup>(11)</sup> Fig. 3은 시료의 동적 접촉각에 따른 응축특성을 보인다. 동적 접촉각이 낮은 시료의 표면에서는 막상응축(filmwise condensation)이 발생하지만 높은 시료에서는 적상응축(dropwise condensation)이 발생한다.

서리두께의 측정은 특수하게 제작된 두께측정장치를 사용하는데, 캘리퍼스(CD-15C, MITUTOYO)와 열전대용 단열재(TRM005132, OMEGA), 그리고  $\phi 0.0254$  mm의 콘스탄탄 선(constantan wire)으로 구성된다. 25배 확대된 화면으로 관찰하여 콘스탄탄 선의 끝단이 시료의 표면에 닿을 때의 위치를 초기위치로 정하고, 실험이 끝난 뒤 서리선단의 위치를 읽어 서리두께를 계산한다.

서리질량의 측정은 정도가  $\pm 0.01$  g인 저울(TP-2KS, OHAUS)을 사용한다. 실험이 끝난 시료의 무게를 측정한 후 서리를 완전히 말린 다음 시료의 무게를 측정하여, 그 차로서 서리의 질량을 결정한다.

서리의 형상은 CCD 카메라(VX-1, SONY)를 사용하여 촬영하였다.

2.3 실험조건 및 실험방법

Table 1은 실험조건을 나타낸다. 열전달량을 측정하기 위하여 냉매 입출구의 온도차는  $2^\circ\text{C}$ 로 유지되었다. 서리 질량과 두께는 실험시작 후 각 30, 60, 120, 180, 그리고 240분 시점에서 측정되

Table 1 Test conditions

Air	Inlet dry bulb temp., $^\circ\text{C}$	12.0
	Inlet wet bulb temp., $^\circ\text{C}$	7.0
	Air Reynolds number	12,000
	Relative humidity, %	50
	Absolute humidity, kg/kg	0.0042
Water + Ethyleneglycol	Inlet temperature, $^\circ\text{C}$	-25.0
	Flow rate, kg/h	50
	Mass ratio	50 : 50

었다. 실험 시편의 동적 접촉각은 23°와 88°이다. 플라즈마 처리(plasma treatment)<sup>(12)</sup>를 통하여 동적 접촉각 23°의 시편이 제작되었고, 88°의 시료 제작시에는 락카 코팅(lacquer coating)을 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 서리두께

서리두께는 서리밀도의 계산과 공기층 압력각하의 예측에 필요한 항목이다. Fig. 4에 실험시간과 동적 접촉각을 인자로 한 서리두께의 측정결과를 보인다. 표면에너지에 대한 언급이 없어 시험자 간에 큰 차이를 보이나, 본 실험의 결과는 Kim et al.<sup>(3)</sup>의 결과와 유사한 경향을 보인다.

서리두께는 60분 이내에 실험시간이 증가함에 따라 급격하게 증가하나, 그 이후에는 기울기가 완만해지기 시작한다. 서리의 성장은 동적 접촉각이 큰 시료에서 적은 시료보다 상대적으로 빠르다.

Fig. 5에 실험시간 2분에서의 서리 성장형태를

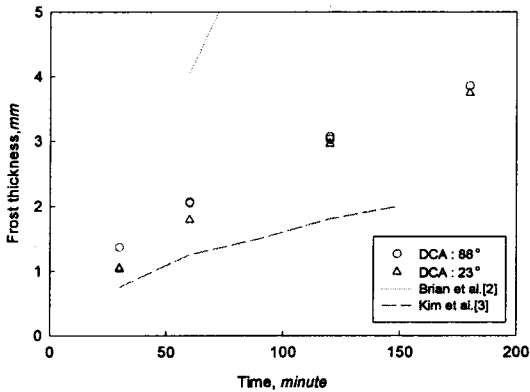


Fig. 4 Test results of frost thickness.

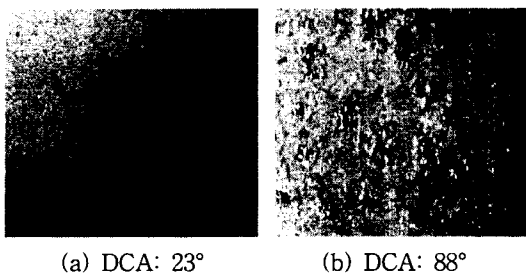


Fig. 5 Photo of the frost generation in different surfaces.

보인다. 동적 접촉각이 낮은 시료에서는 균일한 서리가 성장하는 반면, 높은 시료의 표면에서는 불규칙한 서리가 생성된다. 이것은 Fig. 3에서 보듯이 서리가 자라기 전에 서로 다른 모드의 응축 현상에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 동적 접촉각이 크면 표면에서는 적상응축이 발생하고 응축수들의 배치는 불균일하게 되어 각 위치에서의 서리의 성장속도는 불균일하게 된다. 그리고 물질 전달(mass transfer)은 특정한 서리두께까지는 높이 자란 서리에 집중되는 것으로 생각된다. 이러한 현상들이 동적 접촉각이 큰 시료의 표면에서 서리두께의 불균일성을 촉진하는 것으로 판단된다. 반면, 동적 접촉각이 낮은 시료의 표면에서는 막상응축이 발생하여 물방울이 넓게 형성되어 표면 전체를 덮게 되고, 서리의 성장을 균일하게 촉진하는 것으로 생각된다. 실험시간이 30분 경과하였을 때, 동적 접촉각이 23°인 시료의 표면에서 서리두께는 88°인 시료에 대비하여 76%에 지나지 않으나, 실험시간 120분 후에는 97%로 증가한다.

서리는 열저항으로 작용하므로 성장함에 따라 위치에 따른 열저항을 평균화시켜, 서리의 성장을 균일하게 한다. 따라서 서리성장의 위치에 따른 불균일성은 감소하고 120분의 실험시간 이후에는 표면의 성질에 따른 효과를 찾을 수 없다.

Fig. 6은 시간의 변화에 따른 서리의 측면사진

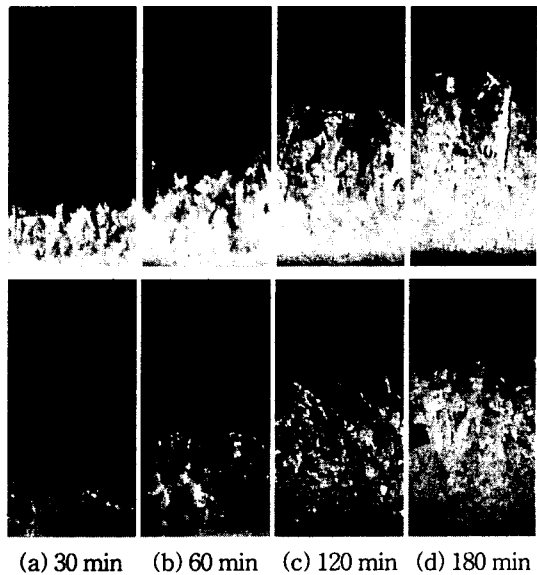


Fig. 6 Side view of the frost on different surfaces (Up: 23°, Down: 88°).

을 나타낸 것이다. 60분 이전에는 서리의 표면이 대체적으로 균일하나, 120분 이후에는 서리층 표면이 불규칙해지기 시작한다.

식(1)은 서리두께와 실험시간 그리고 동적 접촉각 간의 관계를 보이는 것으로 최대오차 22%, 상관계수 0.989로서 실험결과와 잘 일치한다.

$$\delta = 0.15 \cdot t^{0.55} \cdot DCA^{0.08} \quad (1)$$

### 3.2 서리질량

Fig. 7은 실험시간과 동적 접촉각에 따른 서리 질량의 변화 경향을 보인다. 본 실험의 결과는 Brian et al.<sup>(2)</sup>과 Kim et al.<sup>(3)</sup>의 중간에 위치하며, 실험시작 이후 완만하게 증가한다.

그러나 서리질량은 표면의 차이에도 불구하고 표면간에 큰 차이를 보이지 않는다.

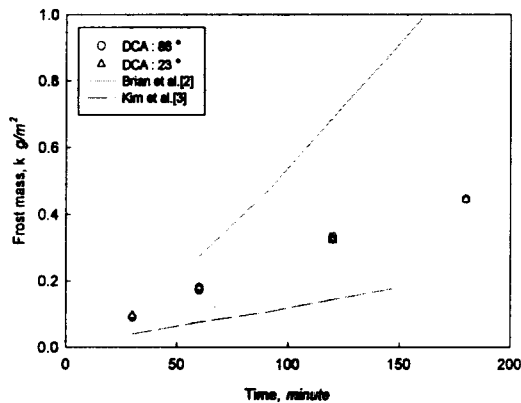


Fig. 7 Test results of frost mass.

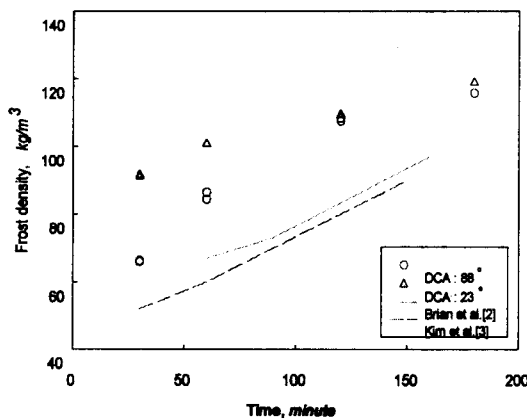


Fig. 8 Test results of frost density.

즉, 동적 접촉각은 서리의 질량전달에는 영향을 미치지 못한다. 이는 서리의 불균일성이 표면간에 차이가 있더라도, 표면성질이 다른 시료간에 평균적인 습도차가 큰 차이를 나타내지 못하기 때문인 것으로 생각된다.

서리질량은 실험시간의 함수로서 아래의 식으로 표현되며, 최대오차 8%, 상관계수는 0.998로서 실험결과와 잘 일치한다.

$$m = 0.005 \cdot t^{0.87} \quad (2)$$

### 3.3 서리밀도

Fig. 8은 실험시간 및 동적 접촉각과 서리밀도의 관계를 보인다. 본 실험의 결과는 Brian et al.<sup>(2)</sup>과 Kim et al.<sup>(3)</sup>의 결과보다 30% 정도 높으며, 비슷한 경향을 보이고 있다.

실험 초기에 동적 접촉각이 낮은 시료의 서리 밀도가 높은 시료보다 큰 것은, 앞서 설명한 바와 같이 동일한 질량의 서리에 얇은 두께의 서리가 생성되기 때문이다.

서리의 밀도는 실험시간이 증가함에 따라 증가한다. 동적 접촉각이 88°인 시료의 경우, 실험시작 후 120분 이내에 서리의 밀도는 급격하게 증가하다가 그 이후에는 완만해진다. 동적 접촉각이 낮은 시료의 표면에서는 밀도가 높은 서리가 성장하나, 실험시간에 따른 증가는 완만하여 120분 이후에는 동적 접촉각이 높은 표면과 밀도차를 보이지 못한다.

실험 초기에는 응축현상이 표면간에 상이하므로 서리의 성장과정도 상이하다. 따라서 서리의 성장도 쉽게 표면의 영향을 받는다. 그러나 서리가 성장하고 특정한 높이에 이르면, 즉 서리의 표면이 시료의 표면과 어느 정도 멀어지게 되면 서리의 표면은 시료의 표면보다는 주위조건에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

서리밀도는 실험시간과 동적 접촉각의 인자로서 식(3)과 같이 표현되며, 최대오차는 15%이고, 상관계수는 0.865이다.

$$\rho = 56 \cdot t^{0.23} DCA^{-0.12} \quad (3)$$

## 4. 결 론

본 연구에서는 실험시간과 동적 접촉각이 서리

두께, 질량, 밀도에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과 본 연구의 실험조건에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 표면성질에 관계없이 서리의 두께, 질량, 그리고 밀도는 실험시간의 증가에 따라 증가한다. 표면성질의 효과는 실험시간의 증가에 따라 약해지며 120분 이후에는 효과가 사라진다.

(2) 동적 접촉각이 높은 시료의 표면에서는 불규칙하고 거친 서리가 초기에 성장하여 서리두께를 증가시켜 서리밀도를 감소시키는 반면, 낮은 동적 접촉각 시료의 표면에서는 균일하고 규칙적인 서리가 성장하여 상대적으로 서리두께가 작고 밀도가 높은 서리가 형성된다.

(3) 시료의 표면은 서리의 초기 성장에 큰 영향을 미치는데, 서리가 특정한 높이까지 자라면 시료의 영향보다는 오히려 주위조건을 더 크게 받는다.

(4) 동적 접촉각은 물질전달에는 큰 영향을 미치지 못하므로, 동적 접촉각이 다르더라도 표면에 부착되는 서리의 질량은 서로 다르지 않다.

### 참고문헌

- O'Neal, D.L. and Tree, D.R., 1985, A review of frost formation in simple geometries, ASHRAE Transation, Vol. 91, pp. 267-281.
- Brian, P.L.T., Reid, R.C. and Shah, Y.T., 1970, Frost deposition on cold surfaces, Ind. Eng. Chem. Fundam., Vol. 9, No. 3, pp. 375-380.
- Kim, Y.C., Jhee, S. and Lee, K.S., 2000, An experimental study of frost growth according to environmental parameters on a flat plate, Proceedings of SAREK, pp. 98-103.
- Hayashi, Y., Aoki, A., Adachi, S. and Hori, K., 1977, Study of frost properties correlating with frost formation types, Trans. of ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 99, No. 5, pp. 239-245.
- Seki, N., Fukusako, S., Matsuo, K. and Uemura, S., 1984, Incipient phenomena of frost formation, Bulletin of JSME, Vol. 27, No. 233, pp. 2476-2482.
- Yoshiyuki, T. and Akiko, I., 1992, Anti-frosting heat exchanger, National Technical Report, Vol. 38, No. 1, pp. 108-113.
- Nikulshina, D.G., Popova, E.M., Dolskaya, V.I., Izotov, V.N., Luchin, V.A. and Starikh, Y.V., 1979, The study of the influence of hydrophobic coating on thermal and aerodynamic characteristics of air coolers, Refrigerating Technique, No. 6, pp. 28-30.
- Ryu, S.G. and Lee, K.S., 1999, A study on the behavior of frost formation according to surface characteristics in the fin-tube heat exchanger, J. Air-Conditioning and Refrigerating, Vol. 11, No. 3, pp. 377-383.
- ASHRAE, 1989, ASHRAE Handbook, ASHRAE, Atlanta.
- Abernathy, R.B., Benedict, R.P. and Dowedell, R.B., 1985, ASME Measurement Uncertainty, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 107, pp. 161-164.
- Shin, J.M., Lee, N.G., Han, S.J. and Ha, S.C., 2001, The effect of water contact angles of the fin surfaces of the fin-and-tube heat exchangers on the water hold-up, J. Air-Conditioning and Refrigerating, Accepted for publication.
- 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, J. Material Research, Vol. 10, No. 6, pp. 2390-2397.