

핀-관 열교환기의 표면특성에 따른 착상 거동에 관한 연구

A study on the behavior of frost formation according to surface characteristics in the fin-tube heat exchanger

류 수 길*, 이 관 수**
S. G. Ryu*, K. S. Lee**

Key words: Frost formation(착상), Fin-tube heat exchanger(핀-관 열교환기), Contact angle(접촉각), Hydrophilic surface(친수성 표면)

ABSTRACT

In this study, the behavior of frost formation according to surface characteristics in the fin-tube heat exchanger has been examined experimentally. The results show that the thickness of the frost which is attached to the hydrophilic heat exchanger becomes thin and the air pressure drop is smaller than that of bare aluminium heat exchanger. However, the frost mass of hydrophilic heat exchanger is more than the bare one. Hence, high density frost is attached to hydrophilic heat exchanger. The sensible and latent heat flux of hydrophilic heat exchanger is bigger than that of bare one, but the increasing amount is very small and the improvement of thermal performance is also very small. The variation of fin-pitch of heat exchanger shows little influence on frost formation and hydrophilic heat exchanger loses its surface characteristics rapidly with increasing relative humidity.

기호설명

BR : 차단비 [%]
 m_f : 착상량 [g]
 ΔP : 압력차 [Pa]
 q : 열유속 [W/m^2]
 t : 시간 [min]

그리스 문자

ρ_f : 밀도 [kg/m^3]

1. 서론

착상이란 차가운 표면 주위를 흐르는 습공기중의 수증기가 열교환이 진행되면서 정압 냉각되어 응축된 후, 과냉각되어 다공성의 서리로써 냉각면에 부착되는 현상이다. 열교환기에 부착된 서리는 단열재의 역할을 하여 공기와 증발기 사이의 열전달을 감소시키며, 공기 유로 면적을 축소시켜 공기의 압력 강하를 크게 하여 송풍기의 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서 규정된 성능을 유지하기 위해서는 일정 시간이 지난 후 증발기에 부착된 서리를 제거해 주어야만 하는데, 이를 제상(defrosting)이라 한다. 그러나 제상을 하게 되면 냉동 또는 냉장 운전을 중단하여야 하며 부가적인 열이 저온으로 유지되어야 할 냉동시스템 내부로

* 한양대학교 대학원

** 정회원, 한양대학교 기계공학부

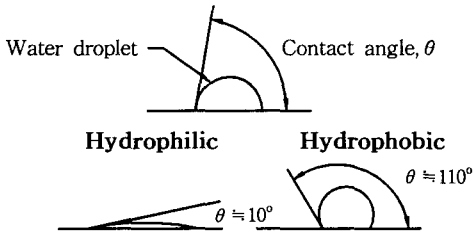


Fig. 1 The contact angle of water droplet.

공급되어 냉동시스템의 에너지 효율, 신뢰도 및 수명을 감소시키는 요인이 되고 있다.

본 연구에서는 외부장치에 의존하지 않는 저착상 방법으로 열교환기 표면의 특성을 변화시켜 착상을 감소시키는 방법에 주목하였다. Fig. 1에 표면과 물과의 접촉각을 나타냈다. 그림에서 보듯이 물과의 접촉각이 예각을 이루는 것을 친수성(hydrophilic) 표면이라고 하고 둔각을 이루는 것을 발수성(hydrophobic) 표면이라고 한다. Saito 등⁽¹⁻⁴⁾은 발수성 표면이 착설(着雪) 및 착빙(着氷)의 부착력을 약화시킨다고 하였으며 Seki 등⁽⁵⁾은 친수성 표면의 서리의 성장이 발수성 표면보다 더 빠르다고 하였다. 또한 Tsuda 등⁽⁶⁾은 접촉각이 160°인 초발수성 표면을 가지는 열교환기가 운전시간의 연장되었다고 하였다. 한편 O'Neal 등⁽⁷⁾은 발수성 보다는 친수성 열교환기가 우수한 성능을 가진다고 하였다. Östin 등⁽⁸⁾은 고분자를 이용하여 열교환기에 발수성 및 친수성을 부여한 결과, 친수성 표면이 착상을 지연 및 억제시킨다고 하였다.

따라서 본 연구에서는 무처리 열교환기와 친수성 표면의 열교환기의 착상 거동을 조사하여 열교환기의 표면 특성이 착상에 미치는 영향을 파악함으로써 저온용 열교환기의 고성능화 및 고효율화를 도모하기 위한 기본적인 자료를 확보하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 착상 실험 장치는 폐회로 풍동 장치로서 항온항습실, 순환부, 시험부, 그리고 냉각부의 네가지로 구성되어 있으며 각각 독립적으로 제어할 수 있다.⁽⁹⁾

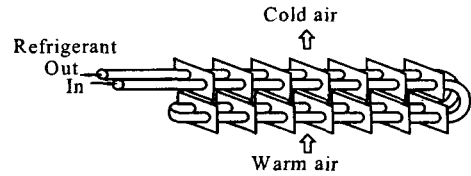


Fig. 2 Fin-tube heat exchanger.

Fig. 2는 실험에 사용한 핀-관 열교환기의 개략도를 나타낸 것이다. 열교환기는 알루미늄으로 제작하였으며 관의 단수와 열수는 각각 2개이며, 곡관부를 제외한 관의 길이는 310 mm이다. 기준 열교환기는 핀 피치를 7 mm로 하였으며 핀 피치의 변화에 따른 착상 거동을 파악하기 위하여 10 mm의 열교환기도 제작하였다. 친수성 표면 열교환기는 무처리 알루미늄 열교환기를 크롬계 물질로 친수 처리하여 제작하였다. 일반적인 무처리 알루미늄 열교환기의 물과의 접촉각이 약 74°인데 반하여 본 연구에 사용된 친수성 열교환기는 약 12° 내외의 접촉각을 얻었다.

2.2 실험 방법

본 실험에서는 기준 착상 조건으로 입구 공기의 온·습도 및 속도를 각각 10°C, 70%, 2 m/s로 하였다. 열교환기로 공급되는 냉매의 온도와 유량은 각각 -27°C와 0.04 kg/s로 하였으며 총 2시간동안 착상 실험을 실시하였다.

착상이 진행되는 동안 시험부 입·출구의 온도 및 상대 습도, 유동 노즐에 의해 측정된 공기 유량, 냉매의 입·출구 온도, 냉매 유량, 열교환기의 핀과 관 온도 등을 데이터 기록계를 이용하여 PC에 기록하였다. 서리층의 두께를 측정하기 위하여 스케일의 기준과 함께 사진 촬영을 실시하였다. 공기측 압력 강하는 시험부 입·출구의 4개씩 설치한 압력공에 의하여 측정하였다. 위와 같은 방법으로 무처리 열교환기와 친수성 열교환기를 각각 실험을 실시하여 그 착상 거동을 비교 평가하였으며 공기의 상대 습도와 열교환기의 핀 피치를 변화시켜 그 영향을 파악하였다. 본 연구에서 사용된 데이터들의 불확실도는 95%의 신뢰구간에서 root-sum-square uncertainty 방법⁽¹⁰⁾에 의해 계산하였다. 착상량의 불확실도는 8.4%, 공기측 총열전달율은 6.8% 이내로 평가되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 기준 착상 조건에서 핀 피치가 각각 7 mm인 기준 열교환기의 착상 실험을 2시간동안 실시하였다. 또한 기준조건 외의 다른 조건들이 착상 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 입구 공기의 습도와 열교환기의 핀 피치를 각각 변화시켰다.

3.1 기준 착상 조건

핀-관 열교환기의 성능 감소에 큰 영향을 미치는 것이 공기 유량의 감소이다. 따라서 서리층에 의해 공기의 유로가 차단되는 비율인 차단비를 다음과 같이 정의하였다.⁽⁹⁾

$$BR = 2 \times \left(\frac{X_{f,F}}{S_F} \right) \times 100 \quad (1)$$

여기서 $X_{f,F}$ 는 핀에 부착된 서리의 두께이고 S_F 는 핀 피치이다.

Fig. 3은 시간에 따른 두 시험 열교환기의 차단비를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 무처리 열교환기의 차단비가 친수성 열교환기에 비하여 더 높게 나타나고 있다. 차단비가 60%가 되는데 무처리 열교환기는 약 $t=90$ 분이 걸린 반면, 친수성 열교환기는 약 $t=100$ 분이 걸렸다.

착상 시간에 따른 각 열교환기에서의 압력 강하량의 변화는 Fig. 4에 도시하였다. 압력 강하량은 서리층의 성장으로 인한 공기 유동에 대한 차단 효과를 나타내며 압력 강하량의 증가는 팬 부하를 증가시킨다. 그림에서 보듯이 두 열교환기의 착상 초기의 압력 강하량은 대체로 비슷하나 약 $t=40$ 분경 이후부터는 친수성 열교환기의 압력 강하량이 무처리 열교환기에 비하여 다소 낮게 나타났다. 그러나 그 차이는 약 4.7%정도로 그다지 크지는 않음을 알 수 있다.

Fig. 5는 각 열교환기에 부착되는 누적 착상량을 나타낸 것이다. 실험 전반에 걸쳐 친수성 열교환기의 착상량이 무처리 열교환기에 비하여 더 많았다. 그 이유는 친수성 열교환기 표면과 물방울과의 접촉 면적이 상대적으로 크기 때문에 전열 면적 증가로 인한 열전달의 증가가 착상을 촉진시킨 것으로 생각된다. 실험 초기에는 친수성

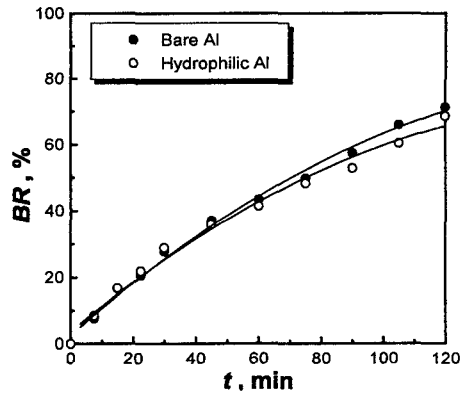


Fig. 3 Temporal variation of blockage ratio for the bare and hydrophilic fin-tube heat exchanger.

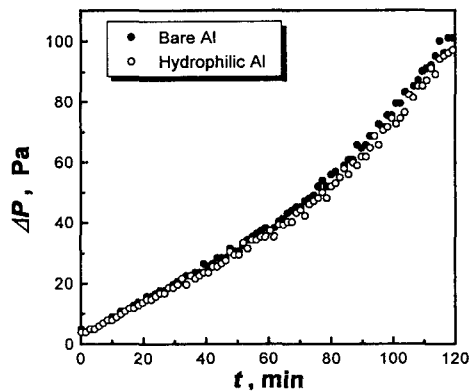


Fig. 4 Temporal variation of air pressure drop across the bare and hydrophilic fin-tube heat exchanger.

열교환기의 착상율이 무처리 열교환기보다 높아 두 열교환기의 착상량의 차이가 증가하나 중반 이후 그 차이는 일정해진다. 따라서 두 열교환기의 착상량의 차이는 실험 초반에 기인하고 있다. 그 이유로는 착상이 진행되어 열교환기의 표면이 서리로 완전히 덮이면 공기와 열교환기의 표면이 접촉하는 것이 아니고 착상된 서리층과 공기가 접촉하게 되므로 열교환기가 표면의 특성을 잃어버리게 되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 6에 두 시험 열교환기의 서리의 밀도를 시간에 따라 비교하였다. 밀도는 사진을 이용한 서리층 평균 두께와 착상량, 그리고 무착상시의

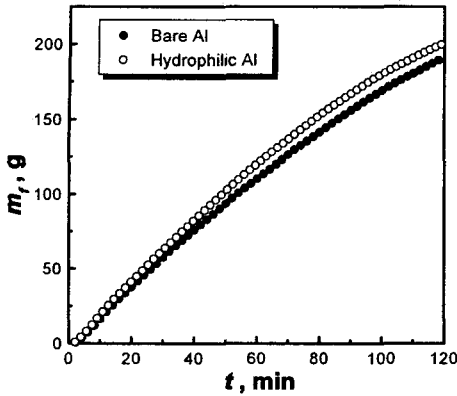


Fig. 5 Temporal variation of frost accumulation on the bare and hydrophilic fin-tube heat exchanger.

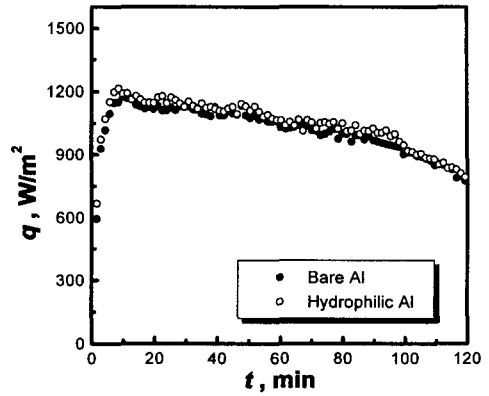


Fig. 7 Temporal variation of heat flux on the bare and hydrophilic fin-tube heat exchanger.

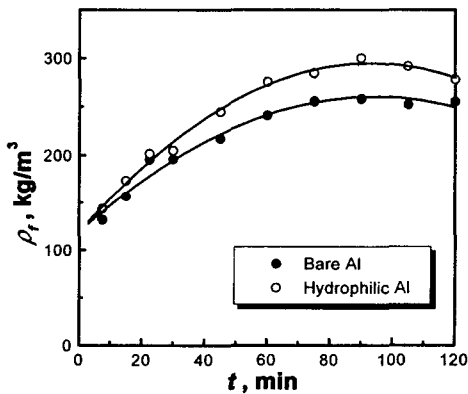


Fig. 6 Temporal variation of frost density on the bare and hydrophilic fin-tube heat exchanger.

열교환기의 전열 면적을 이용하여 계산하였다. 친수성 열교환기는 서리층 두께는 무처리에 비하여 낮은 반면, 착상량은 더 많으므로 전 실험 과정을 통해 무처리 열교환기보다 상대적으로 고밀도의 서리가 발생하였다. 두 열교환기 모두 약 $t=90$ 분 이후는 밀도가 서서히 감소하고 있다. 그 이유로는 실제로는 시간에 따라 서리의 밀도는 증가하나 약 $t=90$ 분 이후 차단비가 60%를 넘으며 착상의 증가는 둔화되는 반면, 핀 사이의 간섭은 커져 바늘형태의 서리가 열교환기에 착상되므로 그 부피가 증가하기 때문에 밀도가 감소하는 것으로 나타난다.

Fig. 7은 시간 변화에 따른 열교환기의 공기측 총열유속을 표면 특성별로 도시한 것이다. 친수성 열교환기는 무처리 열교환기에 비하여 물질 전달의 증가로 인해 잠열유속이 증가하였으며, 차단비가 무처리 열교환기보다 작으므로 열교환기를 통과하는 공기유량이 상대적으로 크기 때문에 현열유속도 증가하였다. 따라서 공기측 총열유속은 친수성 열교환기가 무처리 열교환기에 비하여 증가되나 그 증가량은 약 2.73%에 불과하며 친수성 열교환기의 전열성능 증가는 미미하였다.

3.2 입구 공기 습도의 영향

각 열교환기의 공기의 습도 변화에 따른 착상 거동의 영향을 파악하기 위하여 입구 공기의 상대 습도를 기준조건인 70%이외에 60%와 80%에 대하여 각각 실험을 수행하였다.

Fig. 8은 상대 습도 변화에 따른 각 열교환기에서의 차단비의 변화를 나타낸 것이다. 상대 습도가 높을수록 차단비가 높게 나타나며, 전체 착상 실험동안 습도 변화에 관계없이 친수성 열교환기의 차단비가 무처리 열교환기의 차단비보다 낮게 나타나고 있다.

Fig. 9는 상대 습도의 변화에 따른 무처리 및 친수성 열교환기에 부착되는 누적 착상량을 나타낸 것이다. 상대 습도가 변하여도 친수성 열교환기의 누적 착상량이 무처리 열교환기보다 많았다. 또한 친수성 열교환기와 무처리 열교환기의

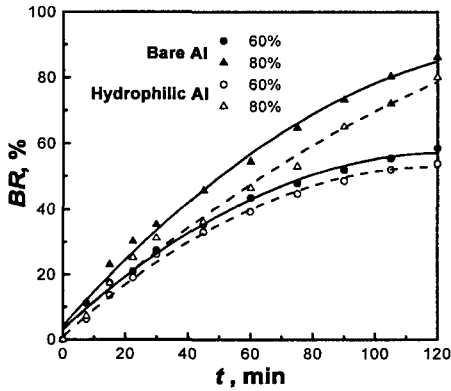


Fig. 8 Effect of air humidity on blockage ratio of the bare and hydrophilic fin-tube heat exchanger.

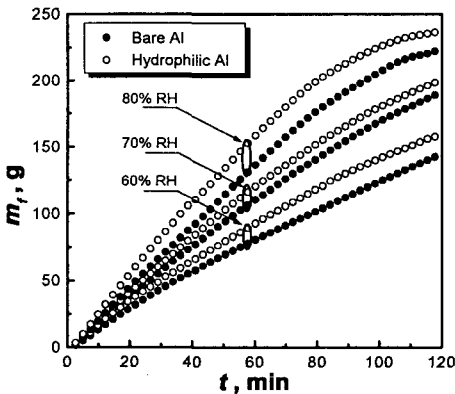
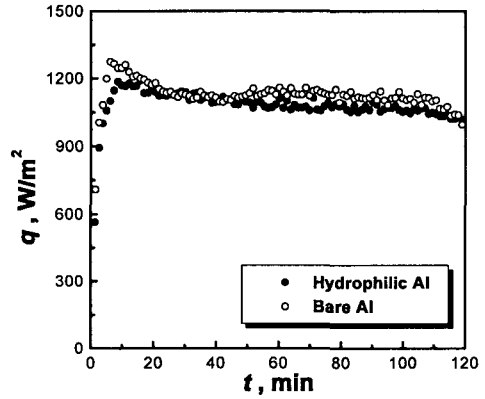


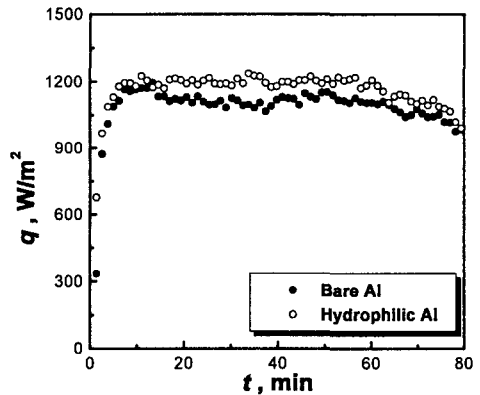
Fig. 9 Effect of air humidity on frost accumulations of the bare and hydrophilic fin-tube heat exchanger.

착상율의 차이는 상대 습도가 낮을 때는 실험 중반까지 나타나고 있으나, 상대습도가 높을 때는 실험 초반에만 발생하고 있다. 이것은 상대 습도의 증가로 인한 착상량의 증가가 친수성 열교환기의 표면 특성을 빨리 잃게 한다고 판단된다. 또한, 친수성 열교환기는 무처리 열교환기보다 차단비는 낮고 착상량은 더 많기 때문에 고밀도의 서리가 부착되고 있다.

Fig. 10의 (a)와 (b)는 각각 상대 습도 60%와 80%일 때의 시간 변화에 따른 각 열교환기의 열유속을 나타낸 것이다. 두 경우 모두 친수성 열교환기에서 물질전달의 증가와 공기 유량의 증가



(a) RH = 60%



(b) RH = 80%

Fig. 10 Temporal variation of heat flux on the bare and hydrophilic fin-tube heat exchanger.

로 인하여 잠열유속과 현열유속이 증가하였다. 따라서 총열유속은 무처리 열교환기에 비하여 친수성 열교환기가 증가했으나 증가량은 상대 습도가 60%일 때와 80%일 때 각각 약 2.6%와 6.5%로 기준 조건에서와 같이 전열성능의 증가는 미미하였다.

3.3 핀 피치 변화의 영향

열교환기의 핀 피치 변화에 따른 각 열교환기의 표면 특성별 착상 거동을 파악하기 위하여 핀 피치가 10 mm인 열교환기를 기준 공기 조건에서 착상 실험을 수행하였다.

Fig. 11은 핀 피치 변화에 따른 누적 착상량을 나타낸 것이다. 10 mm 핀 피치 열교환기에서도 친수성 열교환기는 실험 초기에 착상율이 높기 때문에 누적 착상량이 무처리 열교환기보다 많았다. 그러나 기준 열교환기의 착상율은 실험 중반이후 감소하였으나, 핀 피치가 10 mm 열교환기의 착상율은 실험 종료시까지 계속 증가하였다. 이는 10 mm 핀 피치의 열교환기가 상대적으로 핀 사이의 간섭 영향을 적게 받기 때문이라고 생각된다.

Fig. 12는 10 mm 핀 피치 열교환기의 시간에 따른 밀도 변화를 도시한 것이다. 7 mm 기준 열교환기와 같이 전반적으로 친수성 열교환기에 고밀도 서리가 착상되고 있었으며 이로 인하여 친

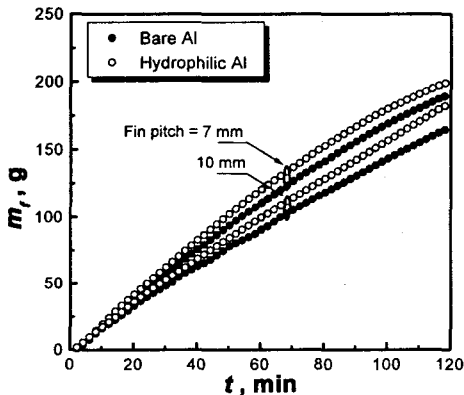


Fig. 11 Effect of fin-pitch on frost accumulations of the bare and hydrophilic fin-tube heat exchanger.

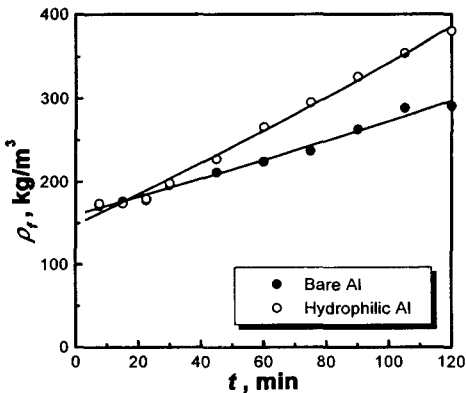


Fig. 12 Temporal variation of frost density on the bare and hydrophilic fin-tube heat exchanger with 10mm fin-pitch.

수성 열교환기의 차단비가 무처리 열교환기의 차단비보다 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 7 mm 열교환기는 착상 실험 중반이후 밀도가 감소하였으나 10 mm 열교환기에서는 밀도가 계속 증가되고 있다. 그 이유로는 10 mm 열교환기는 핀 피치가 넓어 공기유로의 차단효과가 적으므로 착상량이 실험이 종료될 때까지 계속 증가되기 때문이라고 판단된다.

4. 결론

본 연구는 핀-관 열교환기의 표면 특성을 변화시켜 다양한 조건에서 착상 거동을 조사하였다. 기준 공기 조건에서 친수성 열교환기는 무처리 열교환기에 비하여 착상되는 서리의 두께가 작게 나타났으며 열교환기 전·후의 공기의 압력 강하량도 전체적으로 친수성 열교환기가 작게 나타났다. 누적 착상량은 친수성 열교환기가 더 많으나 두 열교환기의 차이는 주로 실험 전반에 나타나고 있으며, 친수성 열교환기에는 무처리 열교환기보다 고밀도의 서리가 부착되고 있다. 친수성 열교환기는 열유속이 증가되었으나 그 양은 상당히 작으므로 전열 성능의 향상은 기대하기 어려웠다. 입구 공기의 상대 습도와 핀 피치를 변화시켜 착상 실험을 수행한 결과, 기준 조건에서와 마찬가지로 친수성 열교환기에서 착상량의 증가와 고밀도 서리의 부착을 확인할 수 있었으며 상대 습도가 높을수록 친수성 표면의 특성을 빨리 잃었다. 또한 열유속의 증가도 기준 조건에서와 마찬가지로 매우 작게 나타났다.

후 기

본 연구는 에너지자원기술개발지원센터의 '98 에너지기술개발 학술진흥사업과제 "열교환기 표면특성에 따른 착상거동에 관한 연구"의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 동 기관의 관계제 위께 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. Saito, H., Takai, K., and Takazawa, H., 1996, A Thermodynamic Study on the Ice Adhesiveness for Water Repellent Surface, 表面技術, Vol. 47, pp. 83-84.

2. Saito, H., Takai, K., and Takazawa, H., 1996, A Study on the Relationship between Roughness and Ice Adhesiveness of Water Repellent Surface, 表面技術, Vol. 47, No. 2, pp. 87-88.
3. Saito, H., Takai, K., and Takazawa, H., 1996, Modification of Water Repellent Property for the Surface by Painting of Water Repellent Coatings, 表面技術, Vol. 47, No. 7, pp. 2-5.
4. Saito, H., Takai, K., and Takazawa, H., 1997, A Study of Adhesiveness of Wet Snowflakes for Water Repellent Surface, 表面技術, Vol. 48, No. 2, pp. 105-106.
5. Seki, N., Fukusako, S., Matsuo, K., and Uemura, S., 1983, Incipient Phenomena of Frost Formation, 日本機械學會論文集(B편), 50 - 451호, pp. 825-830.
6. Tsuda, Y. and Iwamoto, A., 1992, Anti-frosting Heat Exchanger, National Technical Report, Vol. 38, No. 1, pp. 108-113.
7. O'Neal, D. L., Bryant, J. A., and Parker, B., 1997, Impact of Hydrophobic Coating on the Frost Buildup and Defrost Performance of a Heat Pump Evaporator, 45th Oji International Seminar, pp. 181-187.
8. Östin, R. and Johannesson, G., 1991, A Polymetric Approach to Counteract Frosting in Air-to-air Heat Exchanger, Heat Recovery Systems & CHP, Vol. 11, No. 5, pp. 415-421.
9. 이관수, 이태희, 김우승, 1995, 착상시 설계인자에 따른 핀-관 열교환기의 성능변화에 관한 실험적 연구, 대한기계학회논문집, 제19권, 제10호, pp. 2657-2666.
10. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, Mechanical Engineering, Vol. 75, pp. 3-8.