

핀-관 열교환기의 착상 거동에 대한 표면 접촉각의 영향

The effect of surface contact angle on the behavior of frost formation in a fin-tube heat exchanger

이 관 수*, 지 성**, 이 동 욱***

K. S. Lee, S. Jhee, D. W. Lee

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

ABSTRACT

The effect of surface contact angle on the behavior of frost formation in a fin-tube heat exchanger is investigated experimentally. It is shown that both heat exchangers with hydrophilic and hydrophobic surfaces appear to have a better thermal performance than bare aluminium heat exchanger, but the improvements are very small. There is a little increase in the amount of the frost deposited onto the heat exchanger with both hydrophilic and hydrophobic surface. However, the effect of contact angle on the frost density is observed; the frost with high density forms on the heat exchanger with hydrophilic surface; and the frost with low density is deposited onto the heat exchanger with hydrophobic surface when compared with the frost deposited onto the heat exchanger with bare aluminium surface. This may be attributed to the fact that the shape of water droplets which condense on the surface of heat exchanger at the early stage of frosting varies with contact angle, and thus makes a difference on the structure of frost formation. From the experiments with different relative humidity of inlet air, it is shown that the variations of operating parameter make no influence on the effect of surface contact angle on the frosting behavior in the heat exchanger.

기 호 설 명

BR : 차단비 [%]
 m_f : 착상량 [g]
 ΔP : 압력차 [mmH₂O]
 q : 열유속 [W/m²]
 RH : 상대습도 [%]
 t : 시간 [min]

그리스 문자

ρ_f : 밀도 [kg/m³]

1. 서 론

공기를 작동유체로 사용하는 열펌프나 냉장고 등의 저온 열교환기에서는 공기 중에 포함된 수증기와 냉각면과의 열 및 물질전달에 의하여 착상이 발생하며, 이에 따라 열저항 및 유동저항이 증가하여 열전달 성능이 점차 감소하게 된다. 따

* 정회원, 한양대학교 기계공학부
 ** 정회원, 한양대학교 대학원
 *** 한양대학교 대학원

라서 일정 시간이 지난 후에는 열교환기에 부착된 서리를 제거하는 제상 작업을 하게 되며, 이때 냉장·냉동시스템 내부로 제상으로 인한 부가적인 열이 공급되어 냉동시스템의 에너지 효율, 신뢰도 및 수명을 감소시키는 요인이 되고 있다. 착·제상으로 인한 문제점을 해결하기 위한 이상적인 대책은 열교환기 표면에 착상이 일어나지 않도록 하는 것이지만 현실적으로 거의 불가능하다. 따라서, 현실적인 대책으로써 착상 지연에 의한 시스템 연속운전시간 증대, 제상 성능의 향상, 그리고 착·제상 운전의 최적화에 관한 연구 등이 진행되고 있다.

착상에 의한 문제점을 해결하기 위한 직접적인 방법으로써 착상 지연 및 착상 저감에 의한 연속운전시간 증대에 관한 방안으로는 첫째 외력을 필요로 하는 능동적 대책으로써 전기장에 의한 방법^(1,2)과 유동층에 의한 방법에 관한 연구가 진행되고 있으며, 둘째로는 외력에 의존하지 않는 수동적 대책으로써 열교환기의 핀 형상변화에 의한 착상 균일화⁽³⁾ 그리고 표면 특성 변화에 의한 착상 지연⁽⁴⁻⁷⁾에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히 표면 특성 변화에 의한 방법은 물리적인 외력이나 부가적인 장치 및 공간을 필요로 하지 않는다는 장점을 가지고 있다.

열교환기의 표면 특성은 재질의 표면과 물과의 접촉각으로 대표된다. 물과의 접촉각이 예각을 이루는 것을 친수성(hydrophilic) 표면이라고 하고 둔각을 이루는 것을 발수성(hydrophobic) 표면이라고 한다. Östin 등⁽⁴⁾은 고분자를 이용하여 열교환기에 발수성 및 친수성을 부여한 결과, 친수성 표면이 착상을 지연 및 억제시킨다고 하였다. 이와는 달리 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 운전시간이 연장되었다고 하였다. 한편 O'Neal 등⁽⁷⁾은 친수성 열교환기가 우수한 성능을 나타내지만 그 효과는 미미하다고 보고하였다. 이와 같이 기존의 연구 동향은 연구자에 따라 서로 상반된 견해를 보이고 있으며, 열교환기 착상 거동에 대한 표면 접촉각의 영향에 관한 물리적 고찰보다는 직접적인 성능 변화에만 주안점을 두고 있다.

따라서 본 연구에서는 무처리, 친수성 및 발수성 표면의 열교환기의 착상 거동을 조사하여 표

면 접촉각이 착상 운전에 미치는 물리적 영향을 파악하고자 한다. 또한 이를 통하여 저온용 열교환기의 착상 제어 및 고효율화를 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 네 부분으로 구성되어 있으며 각 부분은 독립적으로 제어할 수 있도록 설계하였다.⁽⁸⁾

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 핀-관 열교환기를 개략적으로 도시한 것이다. 열교환기는 알루미늄으로 제작하였으며 관의 단수와 열수는 각각 2개이며, 곡관부를 제외한 관의 길이는 310 mm, 핀 피치를 7 mm로 하였다. 친수성 표면 열교환기는 알루미늄 열교환기를 크롬계 물질로 처리하였으며, 발수성 표면 열교환기는 테프론 처리하여 제작하였다. 무처리 알루미늄 열교환기의 물과의 접촉각은 약 74°이며, 표면 처리한 친수성 열교환기는 약 12°, 그리고 발수성 열교환기는 약 124° 내외의 접촉각을 나타내었다.

2.2 실험 방법

열교환기의 착상 거동에 대한 표면 접촉각의 영향을 조사하기 위한 실험에서 각 열교환기에 대한 착상 기준 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 설정하였으며, 착상 실험은 총 2시간 동안 실시하였다.

착상 운전 중의 공기측 열전달량과 착상량 등을 계산하고 열교환기 운전 조건을 제어하기 위

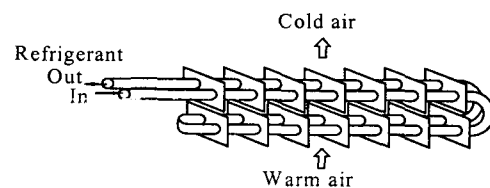


Fig. 1 Schematic of fin-tube heat exchanger.

하여 착상이 진행되는 동안 시험부 입·출구의 온도 및 상대 습도, 공기 유량, 냉매의 입·출구 온도, 냉매 유량, 열교환기의 핀과 관 온도 등을 데이터기록계를 이용하여 PC에 기록하였다. 공기측 압력 강하는 시험부 입·출구의 4개씩 설치한 압력공에 의하여 측정하였다. 열교환기 표면에 부착된 서리의 물성치를 조사하기 위하여 디지털 카메라로 촬영하여 서리층의 두께를 측정하였다. 이와 같은 방법으로 12°, 74°, 124°의 접촉각을 갖는 각각의 열교환기에 대하여 실험을 수행하여 그 착상 거동 및 성능을 비교 평가하였다. 또한 운전인자로서 입구 공기의 상대 습도를 변화시켜 그 영향을 파악하였다.

본 연구에서 얻어진 데이터들의 불확실도는 95%의 신뢰 구간에서 불확실성 해석 방법⁽⁹⁾에 의해 계산하였다. 실험으로부터 얻어진 불확실도는 착상량 8.4%, 공기측 총열전달률 6.8% 이내로 평가되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 열교환기의 표면 접촉각이 착상 시 핀-관 열교환기의 성능 및 착상 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 접촉각이 각각 12°, 74°, 124°인 친수성, 무처리, 그리고 발수성 시험 열교환기에 대하여 착상 기준 조건에서 2시간 동안 착상 실험을 실시하였다. 또한 착상에 영향을 미치는 가장 중요한 운전인자 중의 하나인 입구 공기 상대습도를 변화시켜 열교환기 표면 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

3.1 열 및 물질전달 특성

Fig. 2는 서로 다른 접촉각을 갖는 각 열교환기에 대해서 시간 변화에 따른 공기측 총열유속을 도시한 것이다. 착상이 진행되면서 각 열교환기의 열전달 성능은 시간이 경과함에 따라 감소하고 있다. 착상 실험 시간 동안의 평균 열유속은 무처리 열교환기에 비하여 친수성 및 발수성 열교환기 모두 증가하였으나, 그림에서 볼 수 있듯이 시간에 대해서 계속 일관된 경향을 보이는 것이 아니며 또한 그 증가분도 접촉각 12°에서 약 2.73%, 124°에서 약 1.8%로 매우 미미하였다.

Fig. 3은 접촉각에 따른 각 열교환기에서의 압

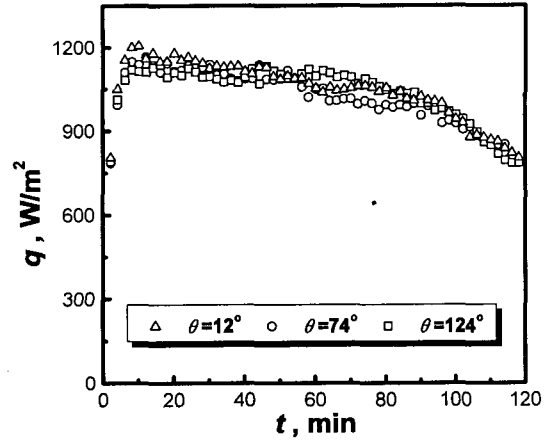


Fig. 2 Temporal variation of heat flux for different contact angles.

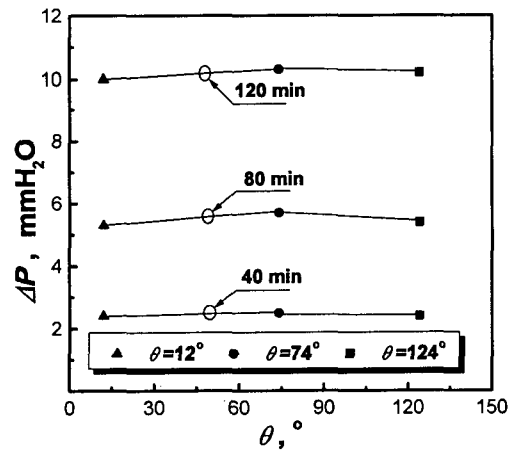


Fig. 3 The effect of surface contact angle on the air pressure drop across the fin-tube heat exchanger.

력 강하량의 변화를 시간대별로 도시한 것이다. 공기측 압력 강하량은 서리층의 성장으로 인한 공기 유동에 대한 차단 효과를 나타내며, 압력 강하량의 증가는 공기 유량 및 열교환기의 현열 전달을 감소시켜 직접적으로 열교환기의 성능을 떨어뜨리는 요인이 된다. 세 열교환기의 착상 초기 압력 강하량은 대체로 비슷하나 약 t=80 분경 이후부터는 친수성과 발수성 열교환기의 압력 강하량이 무처리 열교환기에 비하여 다소 낮게 나타났다. 따라서, Fig. 3에서 설명한 바와

같이 친수성 및 발수성 열교환기의 열전달 성능이 무처리 열교환기보다 증가하게 된다. 그러나, 압력 강하량의 차이는 접촉각 12° 에서 약 4.7%와 124° 에서 4.2% 정도로 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 4는 접촉각의 변화에 따라 열교환기에 부착되는 누적 착상량을 시간대별로 도시한 것이다. 실험 전반에 걸쳐 친수성 열교환기의 착상량이 무처리 열교환기에 비하여 약 7.6% 정도 더 많았고 발수성 열교환기의 경우는 무처리에 비해 약 4.1% 정도 증가하여 그 차이가 크지 않았다. 친수성의 경우 무처리 열교환기와 착상량의 차이가 생긴 이유는 접촉각 12° 인 경우 수분이 도막 형태로 표면에 분포하므로 열교환기 표면과 물방울과의 접촉 면적이 상대적으로 크기 때문에 열전달 면적의 증가가 착상을 촉진시킨 것으로 생각된다. 접촉각 124° 인 발수성 열교환기와 접촉각 74° 인 무처리 열교환기는 표면에 물방울의 형태로 서로 유사하게 접촉하므로 착상량의 차이가 상대적으로 작다. 그러나 물방울당 수분량이 발수성의 경우 더 많으므로 전체 착상량은 약간 증가하는 것으로 판단된다. 실험 초기에는 친수성과 발수성 열교환기의 착상률이 무처리 열교환기보다 높아 각각의 열교환기의 착상량의 차이가 증가하나 실험이 진행되는 중반 이후 그 차이는 거의 일정해지므로 각각의 열교환기의 착상량의

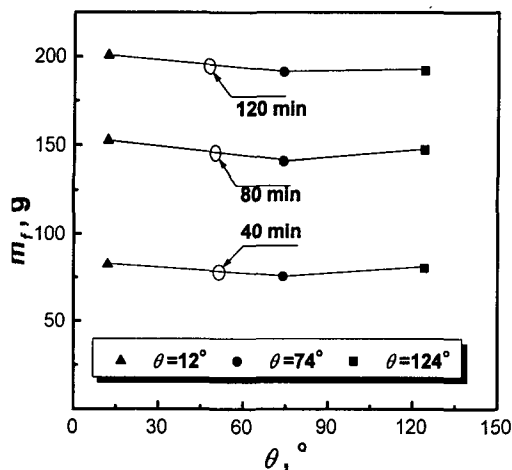


Fig. 4 The effect of surface contact angle on the amount of frost deposited on the fin-tube heat exchanger.

차이는 실험 초반에 기인하고 있다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 착상이 진행되어 열교환기의 표면이 서리로 완전히 덮이면 공기와 열교환기의 표면이 접촉하는 것이 아니고 착상된 서리층과 공기가 접촉하게 되므로 표면 처리된 열교환기의 표면이 착상에 아무런 영향을 미치지 못하기 때문이라고 생각된다.

3.2 서리 구조적 특성

Fig. 5에는 시간에 따른 서리밀도의 변화를 각각의 접촉각에 대해서 나타내었다. Fig. 4에서 접촉각의 변화에 대해서 착상량은 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 이 그림에서 알 수 있듯이 생성된 서리의 밀도는 각 열교환기에서 시간에 따라 일관되게 확실한 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 접촉각에 따라 착상 초기에 표면에 응축·냉각되는 액적(液滴)의 형태 변화에 기인한다. 즉, 친수성 열교환기의 경우 도막의 형태로 수분이 열교환기 표면에 분포하며 이에 따라 넓은 표면적에서 서리가 성장한다. 그러므로 무처리 열교환기에 비하여 고밀도의 서리가 부착된다. 발수성 열교환기의 경우 착상 초기에 발생하는 액적의 표면 분포밀도가 가장 적으므로⁽¹⁰⁾ 무처리 열교환기보다 저밀도의 서리가 성장한다. 따라서 동일한 착상량에도 불구하고 접촉각에 따라 생성되는 서리의 구조가 달라짐으로써 서

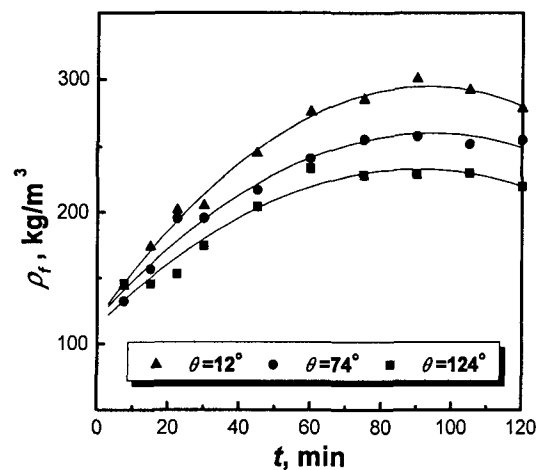


Fig. 5 The effect of surface contact angle on the frost density.

로 다른 밀도를 갖게 된다. 그림에서 서리 밀도는 시간이 경과함에 따라 증가하다가 $t=90$ 분 이후 모든 열교환기에서 서서히 감소하는 경향을 볼 수 있다. 그 이유는 이 시간 이후에는 착상의 증가는 둔화되는 반면, 핀 사이의 간섭은 커져 바늘형태의 서리가 열교환기에 착상되므로 그 부피가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 접촉각에 따른 시험 열교환기들의 차단비를 나타낸 것이다. 차단비란 서리층에 의해 공기 유량이 차단되는 비율로써 다음과 같이 정의된다.

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

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

Fig. 4의 착상량과 Fig. 5의 서리 밀도에 대한 결과로부터 발수성 열교환기의 차단비가 가장 높고 친수성 열교환기의 차단비가 가장 낮게 된다. 그러나 이는 접촉각의 변화에도 압력강하량이 큰 차이가 없는 Fig. 3의 결과와 모순되는 것처럼 보인다. 이러한 현상은 착상이 핀의 전 부분에 고르게 일어나지 않고 핀 tip 부분에 두꺼운 서리가 형성되기 때문에 발생한다. 실제로 열교환기의 전열성능이 급격하게 감소하는 차단비 60%에

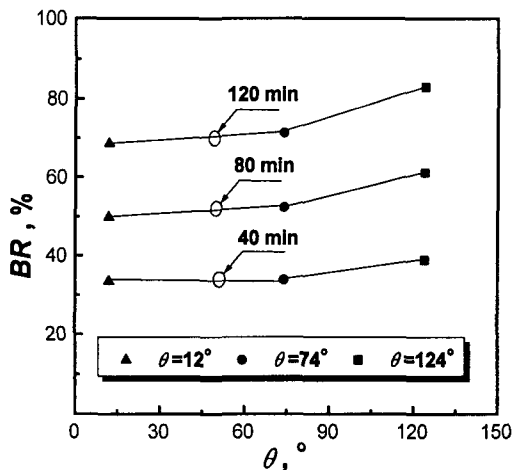


Fig. 6 The effect of surface contact angle on the blocking ratio of fin-tube heat exchanger.

이르는 시간은 평균 두께를 기준으로 계산하면 무처리 열교환기는 약 $t=90$ 분, 친수성 $t=100$ 분 그리고 발수성 약 $t=75$ 분으로 상당한 차이를 나타내고 있다. 그러나 열교환기를 통한 압력강하에 영향을 미치는 핀 tip 부분에서의 최대 차단비가 60%에 도달하는 시간은 무처리, 친수성, 발수성이 각각 약 $t=55$ 분, $t=50$ 분, $t=50$ 분으로 서로 거의 비슷하게 된다. 즉, 서리 물성 측면에서는 접촉각이 작은 친수성의 경우 서리 두께가 얇고 고밀도의 서리가 형성되고 접촉각이 큰 발수성의 경우 두께가 두껍고 저밀도의 서리가 형성되지만, 열교환기 성능 측면에 있어서는 핀 tip 부분의 영향으로 접촉각의 변화에 따른 차이는 크지 않다.

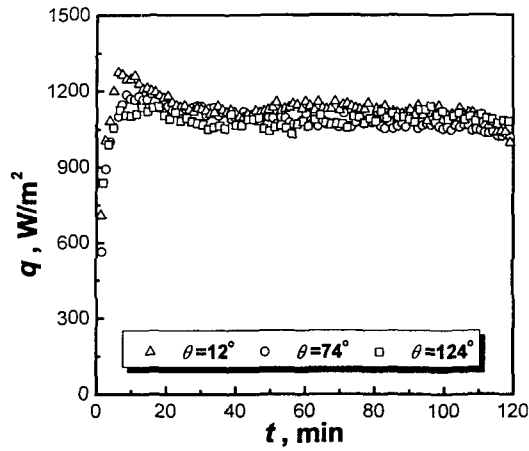
3.3 운전 인자의 영향

운전 인자의 변화에 따라 표면 접촉각이 열교환기의 착상 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 입구 공기의 상대 습도를 기준조건인 70% 이외에 60%와 80%에 대하여 각각 실험을 수행하였다. 착상 기준 조건에 대한 결과에서 표면 접촉각이 전열성능에는 큰 영향을 주지 않고 서리 물성에만 영향을 미치는 것으로 나타났으므로 이 절에서는 전열성능과 차단비만을 비교하기로 한다.

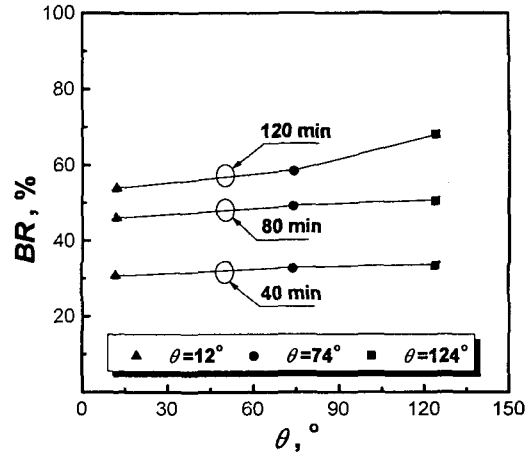
Fig. 7의 (a)와 (b)는 각각 입구 공기 상대 습도 60%와 80%일 때의 시간 변화에 따른 각 열교환기의 열유속을 나타낸 것이다. 두 조건에서 모두 친수성 표면 및 발수성 표면 열교환기에서 물질전달의 증가와 공기 유량의 증가로 인하여 잠열유속과 현열 유속이 증가하였다. 그러나 전체적인 총열유속의 증가량은 상대 습도가 60%일 때 접촉각 12°에서 3.98%, 124°에서 약 0.18%, 상대 습도 80%일 때 각각 6.68%, 2.62%로 전열성능의 증가는 미미하였다.

Fig. 8은 상대 습도 변화에 따른 각각의 열교환기에 대한 차단비의 변화를 나타낸 것이다. 세 열교환기 모두 상대습도가 높을수록 차단비가 높게 나타나며, 전체 착상 실험 동안 습도 변화에 관계없이 발수성 열교환기의 차단비가 가장 크고 친수성 열교환기의 차단비가 가장 작은 것으로 나타났다.

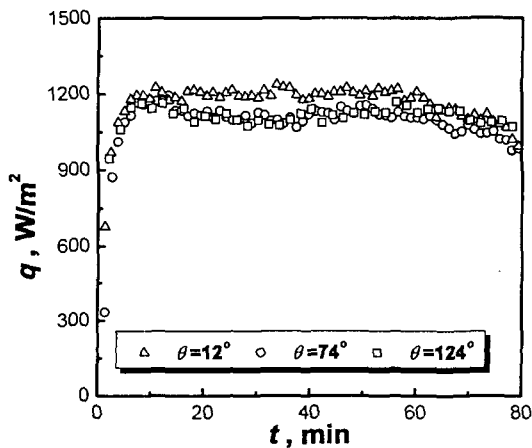
Fig. 7과 Fig. 8의 결과로부터 운전 인자를 변



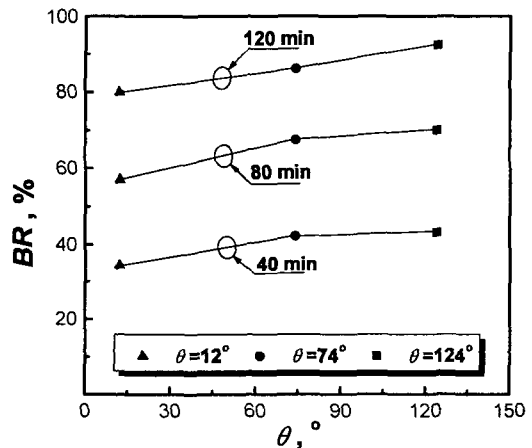
(a) RH = 60%



(a) RH = 60%



(b) RH = 80%



(b) RH = 80%

Fig. 7 Effect of inlet air humidity on the temporal variation of heat flux for different contact angles.

Fig. 8 Effect of air humidity on blockage ratio of fin-tube heat exchanger for different contact angles.

화시킨 경우에도 표면 접촉각의 차이에 의한 열교환기의 열전달 특성과 서리 구조적 특성에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 핀-관 열교환기의 표면 접촉각을 변화시켜 착상 거동 및 성능의 변화를 조사하였다. 열교환기 성능 측면에서 착상 기준 조건에 대한 실험으로부터 친수성 열교환기와 발수성 열

교환기의 열전달 성능은 증가하였으며, 압력 강하량은 무처리보다 작게 나타났으나 그 양은 매우 미미하여 실질적인 효과를 기대할 수 없다. 누적 착상량 역시 친수성 및 발수성 열교환기의 경우 약간 증가하였으나 그 차이는 크지 않으며, 또한 착상된 서리에 의해 표면 특성을 상실하기 전인 실험 초반에 발생하였다. 서리 구조적 측면에서 접촉각의 변화에 따라 착상 초기에 응축되는 물방울의 형태의 차이에 의하여 친수성 열교환기는 두께가 얇고 고밀도의 서리가 성장하였으

며, 발수성 열교환기는 두께가 두껍고 저밀도의 서리가 형성되었다. 입구 공기의 상대 습도를 변화시켜 착상 실험을 수행한 결과, 기준 조건에서와 마찬가지로 친수성 열교환기에서는 고밀도 서리의 부착을, 발수성 열교환기에서는 저밀도 서리의 부착을 확인할 수 있었다. 또한 표면처리에 따른 열유속의 증가도 기준 조건에서와 마찬가지로 매우 작게 나타났다. 따라서 표면 접촉각의 변화가 열유속의 증가와 착상량에 주는 영향이 거의 없으므로 표면처리의 경우 열교환기의 열 및 물질 전달에는 거의 영향을 주지 못하고 단지 서리의 구조에만 영향을 미친다고 판단된다.

후 기

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

참고문헌

1. Munakata, T., Yabe, A. and Tanasawa, I., 1992, Effect of electric field on frosting phenomenon, *Trans. of JSME*, 58-548, pp. 1171-1177.
2. Babakin, B. C. and Elykin, M. A., 1985, Frost formation on the surface of refrigeration apparatus under electric fields, *Journal of Refrigeration*, No. 2, pp. 33-37.
3. Ogawa, K., Tanaka, N. and Takeshita, M., 1993, Performance improvement of plate fin-and-tube heat exchangers under frosting conditions, *ASHRAE Transactions*, CH-93-2-4, pp. 762-771.
4. Östin, R. and Johannesson, G., 1991, A poly-metric approach to counteract frosting in air-to-air heat exchanger, *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 11, No. 5, pp. 415-421.
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)*, 50-451, 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. 이관수, 이태희, 김우승, 1995, 착상시 설계인자에 따른 핀-관 열교환기의 성능변화에 관한 실험적 연구, *대한기계학회논문집(B)*, 제 19권, 제10호, pp. 2657-2666.
9. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3-8.
10. Bryant, J. A., 1995, Effects of Hydrophobic Surface Treatments on Dropwise Condensation and Freezing of Water, Ph.D. Thesis, Texas A&M University, USA.