

환-관 열교환기의 착·제상 거동에 대한 표면처리의 영향에 관한 실험적 연구

지 성* · 이 관 수**
(1999년 12월 21일 접수)

An Experimental Study of the Surface Treatment Effect on the Frosting/Defrosting Behavior of a Fin-Tube Heat Exchanger

Sung Jhee and Kwan-Soo Lee

Key Words: Surface Treatment(표면처리), Fin-tube Heat Exchanger(환-관 열교환기), Frosting(착상), Defrosting(제상), Hydrophilic Surface(친수성 표면), Hydrophobic Surface(발수성 표면)

Abstract

The effect of heat exchanger surface treatment on the frosting/defrosting behavior in a fin-tube heat exchanger is investigated experimentally. It is found that the hydrophilic surface mainly influences on the frosting behavior, however, the hydrophobic surface gives some influence on the defrosting behavior. In view of frosting performance, surface-treated heat exchanger with either hydrophilic or hydrophobic characteristic shows a little improvement in the thermal performance than the aluminium heat exchanger with no surface treatment. The result reveals that the heat exchanger with hydrophobic surface treatment is more effective in view of the defrosting efficiency and time. The amounts of residual water on the surface-treated heat exchangers are shown to be smaller than those of the bare heat exchanger, therefore further improvements on the performance of re-operations are expected.

기호설명

BR : 차단비 [%]
 $M_{w,res}$: 잔류 용해수량 [g]
 m_f : 착상량 [g]
 q : 열유속 [W/m^2]
 S_f : 환 피치 [mm]
 T_{heater} : 히터 온도 [$^{\circ}C$]
 W : 용해수 배출량 [g]
 \dot{W} : 용해수 배출률 [g/min]
 X_f : 환에 부착된 서리두께 [mm]

τ_d : 제상 시간 [min]
 θ : 접촉각 [$^{\circ}$]
 ρ_f : 서리 밀도 [kg/m^3]

하첨자

ave : 평균값
 m : 서리 용해 기간
 max : 최대값
 $total$: 총합

그리스문자

η_d : 제상 효율 [%]

* 한양대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 한양대학교 기계공학부

1. 서론

열펌프나 냉장 및 냉동고 등의 저온 열교환기 표면에서는 공기중에 포함된 수증기와 냉각면과의 열 및 물질전달에 의하여 서리가 성장하게 되며, 이에 따라 열 및 유동저항이 증가하여 열교

환기의 성능이 점차 감소하게 된다. 따라서 열교환기의 성능을 유지하기 위하여 일정 시간이 지난 후에는 표면에 부착된 서리를 제거하는 제상 작업을 하게 되며, 이 때 냉장·냉동시스템 내부로 제상으로 인한 열이 공급되어 시스템의 효율, 신뢰도 및 수명을 감소시키는 요인이 되고 있다.

열교환기의 표면에서 발생하는 문제점을 개선하기 위한 방안으로써 표면처리에 의하여 표면 특성을 개질(改質)하는 방법이 주목을 받고 있다. 표면처리에 의한 특성 변화는 적용하고자 하는 문제 또는 시스템에 대해서 작동중에 물리적인 외력이나 부가적인 장치 및 공간을 필요로 하지 않는다는 장점을 갖는다. 친수성(hydrophilic) 표면은 재질이 액체와 친화하는 특성 때문에 접촉각이 예각을 이루면서 액체가 표면과 접하는 면적이 큰 반면, 발수성(hydrophobic) 표면은 표면장력이 작기 때문에 재질이 액체를 밀어내는 특성을 가져 접촉각이 둔각을 이루며 액적이 중력에 의하여 쉽게 떨어진다. 이러한 특성을 이용하여 열교환기의 표면처리는 운전중 유동저항 감소 및 착상 지연 등을 목적으로 한다. Wang 등⁽¹⁾과 Mimaki⁽²⁾는 계승 조건에 대한 실험에서 친수성 표면 열교환기의 압력 강하량이 감소하며, 열전달 성능은 변화가 없다고 발표하였다. 착상 조건하의 운전에서 Ostin 등⁽³⁾은 친수성 표면이 착상을 지연시킨다고 하였으나, Seki 등⁽⁴⁾은 친수성 표면의 서리의 성장이 발수성 표면보다 더 빠르다고 하였다. 또한 Tsuda 등⁽⁵⁾은 접촉각 160°인 초발수성 표면을 가지는 열교환기의 운전시간이 연장된다고 하였다. 한편 O'Neal 등⁽⁶⁾은 착·제상 사이클에 대한 실험에서 친수성 열교환기가 우수한 성능을 나타내지만 그 효과는 미미하다고 보고하였다. 이와 같이 기존의 연구들은 아직까지 서로 일관된 결과를 제시하지 못하고 있으며, 또한 착상을 수반하는 열교환기에 대해서는 착상 지연 효과만을 고려하고 있어 표면 특성 변화에 의한 열교환기의 착·제상 거동 및 성능 향상에 관한 종합적인 연구는 미진한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 친수성, 무처리 및 발수성 표면의 열교환기에 대한 실험을 수행하여 표면 접촉각이 착·제상 운전 특성에 미치는 물리적 영향을 파악하고, 표면처리에 의한 열교환기의 운전 성능의 변화를 조사한다. 이를 통하여 저온용 열교환기의 착·제상 제어 및 고효율화를

위한 기본적인 자료를 확보하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 환-관 열교환기의 착·제상 성능 실험 장치는 폐회로 풍동 장치로서 시험부, 항온항습실, 순환부, 냉각부 그리고 전열부로 구성되어 있으며 각각의 부분을 독립적으로 제어하여 실험할 수 있다.⁽⁷⁾

Fig. 1은 실험에서 사용한 환-관 열교환기의 개략도이다. 열교환기는 2단 2열의 관을 사용하였고, 곡관부를 제외한 관의 길이는 310 mm이며 환피치는 7 mm이다. 전열식 히터는 관과 엇갈린 형태로 환에 부착되어 있고 제상 입력 전압 220 V에서 32 W의 전력을 소모한다. 열교환기의 재질은 알루미늄이며 친수성 표면 열교환기는 무처리 열교환기를 크롬계 물질, 발수성 표면 열교환기는 테프론으로 표면처리하여 제작하였다. 열교환기 각각의 재질의 겉보기 접촉각은 표면에 고착된 물방울로부터 평형상태에서 측정하였다. 본 연구에 사용된 무처리 알루미늄 열교환기 표면의 물과의 접촉각은 약 74°이고, 친수성 표면은 약 12°내외, 발수성 표면은 약 124°내외의 접촉각을 나타내었다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 각 표면 특성별 환-관 열교환기의 착·제상 거동 특성 및 성능변화를 파악하기 위하여 각각의 열교환기에 대하여 착상 및 제상 실험을 연속적으로 실시하였다. 착상 실험 조건으로는 입구 공기의 온도, 상대 습도 및 초기 속도를 각각 10°C, 70%, 2 m/s로 제어하였으며, 열교환기로 공급되는 냉매의 온도와 유량을 각각

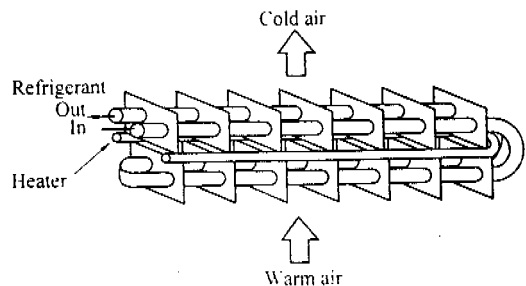


Fig. 1 Schematic of a fin-tube heat exchanger

-27°C와 0.04 kg/s로 유지하여 총 2시간동안 착상을 시킨 후 제상 실험을 시행하였다. 제상시 기준 열량은 32 W로 전기 히터에서 공급하였으며, 흰 부의 평균온도가 14°C에 도달하면 제상을 종료하였다.

실험과정은 먼저 항온항습실에서 공기의 온·습도를 실험 조건으로 제어하고, 시험부 입구 공기를 설정된 초기 유속으로 유입시킨다. 또한 저온 구조의 냉매를 설정 온도로 냉각시킨다. 입구 공기 조건과 냉매 온도가 실험 조건으로 제어되면 냉매를 열교환기 내로 순환시키고 착상 실험을 진행하였다. 2시간 동안의 착상 실험이 완료되면 순환부 내의 공기 흐름을 중지하고 열교환기에 부착된 제상 히터의 전원을 전열부와 연결하여 제상 실험을 시작하였다.

측정 데이터는 공기측 열전달량과 착상량 등을 계산하고 열교환기 운전 조건을 제어하기 위하여 착상이 진행되는 동안 시험부 입·출구의 온도 및 상대 습도, 공기 유량, 냉매의 입·출구 온도 냉매 유량, 열교환기의 흰과 관 온도 등을 데이터 기록계를 이용하여 PC에 기록하였다. 제상 기간 중 용해수 배출량은 미리 무게를 측정된 흡수지를 정해진 시간 간격에 따라 교체하면서 배출된 용해수와 흡수지의 총 무게를 정밀 전자 저울로 측정하여 산출하였다. 착상 운전중 열교환기 표면에 부착되는 서리의 두께는 디지털 카메라로 촬영하여 측정하였으며, 이를 바탕으로 서리의 밀도를 산출하였다.⁽⁸⁾ 이와 같은 방법으로 12°, 74°, 124°의 접촉각을 갖는 친수성, 무처리, 그리고 발수성 열교환기에 대하여 실험을 수행하여 착·제상 거동 특성 및 성능을 비교 평가하였다.

본 연구에서 사용된 결과의 불확실도는 95%의 신뢰 구간에서 불확실성 해석 방법⁽⁹⁾에 의해 계산하였다. 측정값의 불확실도는 시험부 공기 입구 온도 0.1°C, 입·출구 온도차 0.01°C, 공기 유량 1.3%였으며 이로부터 계산된 결과의 불확실도는 착상량 8.4%, 공기측 총열전달율 6.8%, 용해수 배출률이 1.14%였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 표면처리에 의하여 표면 특성을 변화시킨 친수성, 발수성 열교환기 및 무처리 열교환기에 대하여 착·제상 실험을 수행하였으며

이를 통하여 표면 접촉각의 열교환기 착·제상 운전전에 대한 물리적 영향과 성능의 변화를 조사하였다.

3.1 착·제상 거동 특성

열교환기의 착·제상 거동 특성은 착상시 서리의 물성 변화 그리고 제상시 용해수 배출 거동 및 온도 변화로 대표된다.

Fig. 2는 착상 종료시 서리 평균 밀도 및 제상시 평균 용해수 배출률을 접촉각에 따라 도시한 것이다. 친수성 열교환기의 경우 착상 초기에 수막의 형태로 수분이 열교환기 표면에 분포하며 이에 따라 넓은 표면적에서 서리가 성장한다. 그러므로 무처리 열교환기에 비하여 고밀도의 서리가 부착된다. 그러나 발수성 열교환기의 경우 착상 초기에 발생하는 액적의 표면 분포밀도가 적으므로⁽¹⁰⁾ 무처리 열교환기보다 저밀도의 서리가 성장한다. 이 결과는 Tao 등⁽¹¹⁾의 착상 초기에 표면에 착상되는 서리의 기공율(void fraction) 및 액적 반경에 대한 측정 결과에서 접촉각이 큰 재질의 표면에서 기공율이 크고 액적 반경이 작은 서리가 생성된다는 경향과 일치한다.

착상시 생성된 서리의 밀도 차이 및 표면처리에 의한 표면 특성 변화는 제상시 용해수 배출 거동에 큰 영향을 미친다. 제상시 평균 용해수 배출률은 친수성 열교환기가 무처리에 비하여 3.7%, 발수성 열교환기가 11.1% 증가하였다. 친수성 표면 열교환기는 고밀도의 서리 생성으로

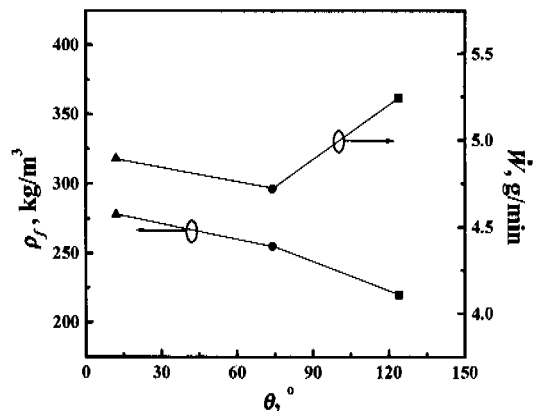


Fig. 2 The effect of surface contact angles on the frost density and average water drain rate

인하여 히터에서 서리로의 열전도가 촉진되며 서리층 내부로 흡수되는 용해수량이 적어 무처리 열교환기에 비하여 빠르게 배출된다. 발수성 표면 열교환기는 표면 특성상 용해수에 의해 포화되지 않은 서리가 상대적으로 작은 자중에도 이탈되어 배출되기 때문에 용해수 배출률이 가장 크게 된다. 이와 관련하여 Saito 등⁽¹²⁾은 발수성 표면의 접촉각이 증가함에 따라 습설(濕雪)의 표면 부착력이 감소한다는 연구 결과를 발표하였다.

Fig. 3은 서리 용해 기간⁽⁷⁾ 동안의 용해수 배출 비율과 제상 기간 중의 히터의 최고 온도를 나타낸 것이다. 서리 용해 기간은 열교환기의 표면 온도가 0℃로 유지되며 서리가 용해·배출되는 기간으로 제상 거동 특성을 대표한다. 전체 용해수 배출량에 대한 서리 용해 기간 동안의 용해수 배출 비율은 친수성 20.9%, 무처리 21.5%, 그리고 발수성 36.2%이다. 친수성 및 무처리 열교환기는 서리가 대부분 순수 용해수의 형태로 배출되므로 이 기간 동안의 배출 비율이 크지 않으나, 발수성 표면 열교환기는 용해수와 함께 녹지 않은 서리 덩어리가 배출되기 때문에 용해 기간 동안의 배출량이 많아지게 된다. 따라서 히터에서 발생한 열이 서리로 전도되어 용해하는데 이용되는 친수성 열교환기의 히터 최고 온도는 24.0℃로 상대적으로 낮다. 반면에, 흰 표면의 발수성에 의하여 서리가 표면으로부터 분리되어 자중에 의하여 완전히 이탈되기 전까지 서리의 일부분만이 표면에 부착·접촉하는 발수성 열교환

기의 히터 최고 온도는 25.4℃로 높게 나타난다. 특히, 히터의 평균 온도는 서리 용해 기간 동안 무처리 열교환기에 비하여 친수성 열교환기는 4.8℃가 낮고, 발수성 열교환기는 2.4℃가 높게 나타난다.

Fig. 2와 Fig. 3의 결과에서 표면처리한 열교환기의 착·제상 거동은 친수성과 발수성 열교환기에서 서로 다른 특징을 나타내고 있다. 친수성 열교환기의 경우 착상시 표면 특성에 의해 생성된 고밀도의 서리가 성장하며, 제상시에는 표면 특성보다는 표면에 형성된 고밀도의 서리에 영향을 받는 특징을 보인다. 반면에 발수성 열교환기의 경우 착상에 의한 영향보다는 제상시 표면 특성에 의하여 제상시 용해수 배출 거동의 변화를 일으킨다.

3.2 착·제상 운전 성능

착상을 수반하는 열교환기의 표면 특성 변화는 착상시 착상 지연, 유동저항 감소 및 열전달 성능 향상 그리고 제상시 용해수 배출 속도 증가에 의한 제상 효율 향상 및 잔류 용해수 제거에 의한 재착상시 초기 유동저항 감소 등을 목적으로 한다.

Fig. 4는 표면 접촉각의 차단비에 대한 영향을 도시한 것이다. 막대 그래프의 상단부는 착상 운전 후 75분에서의 최대 차단비이며 하단부는 이때의 평균 차단비이다. 차단비란 서리층에 의해 열교환기 흰관 유로가 차단되는 비율로써 다음과 같이 정의된다.

$$BR = 2 \times \left(\frac{X_f}{S_f} \right) \times 100 \quad (1)$$

착상을 수반하는 열교환기의 성능은 차단비 70~80%에서 급격히 감소한다.⁽¹⁴⁾ 75분에서의 평균 차단비는 친수성 48.3%, 무처리 49.9%, 발수성 58.3%로 서리 밀도가 낮은 발수성 표면 열교환기의 차단비가 크게 나타나고 있다. 그러나 실제 열교환기의 유동저항은 최대 차단비에 영향을 받으며 75분에서의 최대 차단비는 친수성 68.3%, 무처리 67.6%, 그리고 발수성 73.3%로 모든 열교환기가 70%에 거의 근접하여 있으며, 또한 발수성 열교환기의 유동저항 차이도 평균 차단비에 비하여 크지 않음을 알 수 있다. 평균 차단비와

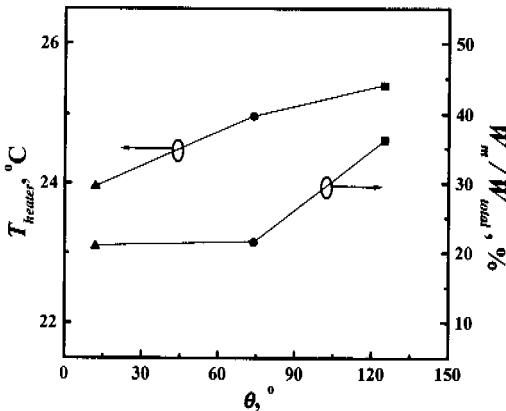


Fig. 3 The draining water ratio during the frost melting period and maximum heater temperature during defrosting period

최대 차단비와의 차이가 발생하는 이유는 fin tip 부분에서 열 및 물질전달이 활발히 발생하기 때문이며, 이 부분에서 표면처리의 효과가 감소하는 원인에 대해서는 차후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 표면 접촉각에 따라 열교환기에 부착되는 누적 착상량의 변화를 시간대별로 도시한 것이다. 착상 실험 종료 후 접촉각 12°인 친수성 표면 열교환기의 착상량이 무처리 열교환기에 비하여 4.9% 증가하였으며, 접촉각 124°인 발수성

열교환기는 무처리에 비해 약 0.4% 증가하였다. 따라서 표면처리에 의한 착상 지연은 이루어지지 않았으며 오히려 다소 촉진되었다. 친수성 표면의 경우 수분이 수막(水膜) 형태로 분포하므로 열교환기 표면과 물방울과의 접촉 면적이 상대적으로 크기 때문에 전열 면적 증가가 착상을 촉진시킨다. Fig. 4의 결과로부터 발수성 표면의 경우 저밀도 서리의 성장으로 평균 차단비가 크기 때문에 튜에서의 공기 국부 유속은 증가한다. 따라서 물질전달이 활발해지기 때문에 착상 초반에 착상량이 다소 증가하는 것으로 판단된다. 각 열교환기의 표면 접촉각 차이가 큼에도 불구하고 전체 착상량의 차이가 작은 것은 다음 두가지 원인에 기인한다고 판단된다. 첫 번째, 착상이 진행되어 열교환기의 표면이 서리로 완전히 덮이면 공기와 직접 열교환기의 표면이 접촉하는 것이 아니고 착상된 서리층과 공기가 접촉하게 되므로 표면처리된 열교환기의 표면이 착상에 아무런 영향을 미치지 못하기 때문이라고 생각된다. 이는 Fig. 5의 결과에서 실험 시작후 40분까지 발생한 착상량의 차이가 착상 종료시까지 유지되는 것으로부터 확인할 수 있다. 두 번째, 상온에서 측정한 접촉각이 실제 열교환기 운전 조건인 저온에서는 유지되지 않고 변화할 수 있다는 점⁽¹³⁾이다.

착상을 수반하는 열교환기의 열전달은 현열 전달과 잠열 전달로 이루어진다. Fig. 4 및 Fig. 5의 결과에서 현열 전달에 영향을 미치는 유동 저항과 잠열 전달에 영향을 미치는 착상량에 큰 차이를 보이지 않으므로 접촉각 변화에 의한 열전달 성능의 향상은 크지 않다. 이에 따라 2시간 착상 운전의 평균 열전달 성능 증가는 접촉각 12°에서 약 2.7%, 124°에서 약 1.8%로 매우 미미하였다.

Fig. 6은 제상 효율⁽⁷⁾과 제상 소요 시간을 표면의 접촉각에 따라 도시한 것이다. 제상 효율은 Fig. 2의 제상 거동 특성에서 살펴본 바와 같이 친수성 및 발수성 표면 열교환기의 용해수 배출 속도가 향상되므로 제상 효율 역시 무처리 열교환기에 비교하여 3.5%, 10.8% 증가한다. 그러나 친수성 표면 열교환기의 경우 착상량 증가로 인하여 제상 소요 시간의 감소 효과는 없다.

Fig. 7은 각 표면 특성별 열교환기의 제상후 잔류 용해수량을 도시한 것이다. 실제 열교환기의 착·제상 과정은 반복 과정이므로 열교환기 표면에 잔류한 용해수는 재착상시 착상량 및 초기 유동

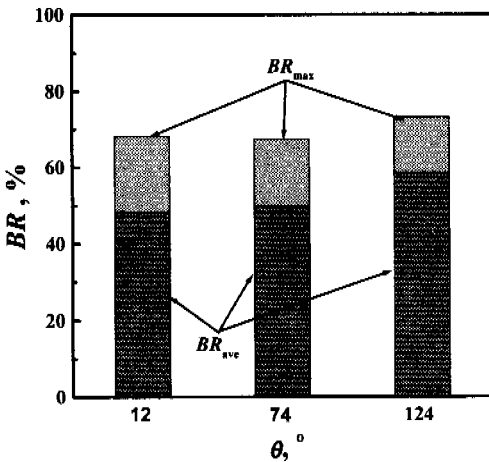


Fig. 4 The effects of surface contact angles on the blocking ratio of a fin-tube heat exchanger

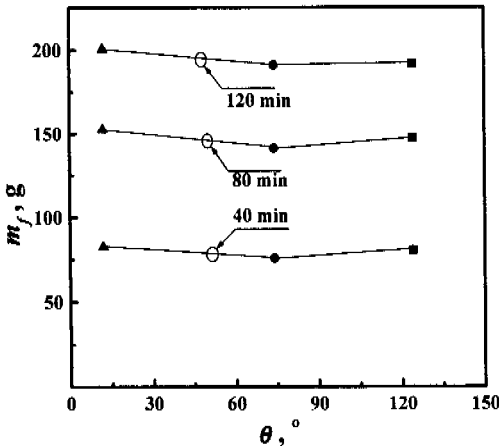


Fig. 5 The effects of surface contact angles on the amount of frost

저항에 큰 영향을 미친다. 무처리, 친수성 그리고 발수성 열교환기의 잔류 용해수량은 각각 6.0 g, 4.6 g, 4.9 g으로 친수성과 발수성 열교환기의 잔류 용해수량이 무처리 열교환기를 기준으로 각각 23.9%와 19.4%가 감소한다. 따라서 재착상시 열교환기 운전 성능의 개선이 기대된다. 또한 현재 수준의 접촉각에서는 친수성의 잔류 용해수량이 더 많이 감소하고 있으나 접촉각 150° 이상인 이른바, 초발수성 표면의 열교환기가 개발되면 액적이 중력에 의하여 쉽게 구르는 특성을 갖는 발수성 열교환기의 감소폭이 더 커질 것으로 생각된다.

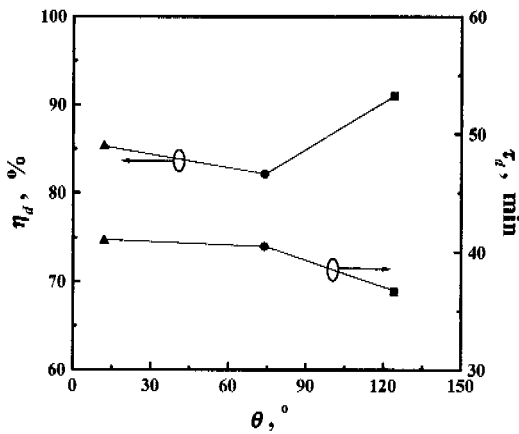


Fig. 6 The effect of contact angles on defrosting efficiency and time

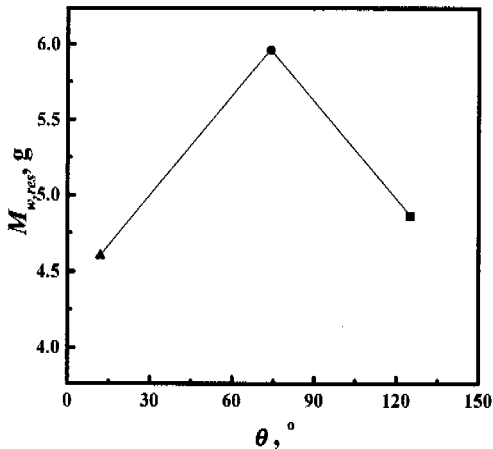


Fig. 7 The weight of residual water with contact angles

4. 결론

본 연구에서는 표면처리에 의하여 흰-관 열교환기의 표면 특성을 변화시켜 착상 및 제상 실험을 연속적으로 실시하여, 착·제상 거동 및 성능 변화에 미치는 영향을 조사하였다.

친수성 표면에서는 착상시 고밀도의 서리가 형성되었으며 이에 따라 제상시 용해수 배출 속도가 향상되었다. 발수성 표면에는 저밀도의 서리가 형성되었으며 제상시 표면 특성에 의하여 녹지 않은 서리가 배출됨으로써 서리 용해 기간 동안의 배출 비율이 증가하였다. 즉, 친수성 표면처리는 착상 거동 변화에 큰 영향을 미치며 발수성 처리는 착상보다는 제상 거동에 큰 효과를 주는 것으로 나타났다. 착상 성능 측면에 있어서 표면처리에 의한 착상 지연 효과는 없었으며 접촉각 변화에 의하여 오히려 다소 촉진시켰다. 유동저항에 있어서는 발수성 열교환기의 유로 폐쇄가 다소 빠르나 그 차이는 크지 않았다. 이에 따라 표면처리에 의한 평균 열전달 성능 증가는 약 2%로 그 효과는 미미하였다. 제상 성능 측면에서 제상 효율은 용해수 배출 속도 증가에 의하여 친수성 3.5%, 발수성 10.8% 증가하였다. 재착상 운전에 영향을 미치는 제상 후 열교환기 표면의 잔류 용해수량은 친수성 및 발수성 열교환기 모두 무처리 열교환기에 비하여 약 20%가 감소하여, 재착상 운전시 성능 개선이 기대된다.

후기

본 연구는 에너지자원기술개발지원센터의 '98 에너지기술개발 학술진흥사업과제 "열교환기 표면 특성에 따른 착상 거동에 관한 연구"의 연구비 지원과 2000년도 두뇌한국21사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 동 기관의 관계체위께 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

- (1) Wang, C. C. and Chang, C. T., 1998, "Heat and Mass Transfer for Plate Fin-and-Tube Heat Exchangers, with and without Hydrophilic Coating," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, No. 20, pp. 3109~3120.

- (2) Mimaki, M., 1987, "Effectiveness of Finned Tube Heat Exchanger Coated Hydrophilic-type Film," *ASHRAE paper* #3017 presented at January meeting.
- (3) Ostin, 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.
- (4) 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.
- (5) Tsuda, Y. and Iwamoto, A., 1992, "Anti-frosting Heat Exchanger," *National Technical Report*, Vol. 38, No. 1, pp. 108~113.
- (6) 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.
- (7) 이관수, 김규우, 지성, 1998, "핀-관 열교환기에 대한 제상 거동에 관한 실험적 연구," *공기조화·냉동공학회 논문집*, Vol. 10, No. 6, pp. 649~657.
- (8) Lee, K. S. and Kim, W. S., 1999, "The Effects of Design and Operating Factors on the Frost Growth and Thermal Performance of a Flat Plate Fin-tube Heat Exchanger Under the Frosting Condition," *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 12, pp. 973~981.
- (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.
- (11) Tao, Y. -X., Mao, Y., and Besant, R. W., 1994, "Frost Growth Characteristics on Heat Exchanger Surfaces: Measurement and Simulation Studies," *HTD-Vol. 286, Fundamentals of Phase Change: Sublimation and Solidification*, ASME.
- (12) 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.
- (13) John, D. B., Issam, M., Christopher, B. W., and Elias, I. F., 1996, "Contact Angle Temperature Dependence for Water Droplets on Practical Aluminum Surfaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 5, pp. 1017~1033.
- (14) 이관수, 이태희, 김우승, 1995, "착상시 설계 인자에 따른 핀-관 열교환기의 성능변화에 관한 실험적 연구, *대한기계학회 논문집*," Vol. 19, No. 10, pp. 2657~2666.