

표면 특성에 따른 흰-관 열교환기의 제상 거동에 관한 연구

A study of defrosting behavior according to surface characteristics in a fin-tube heat exchanger

이 관 수*, 김 준 모**, 지 성***
K. S. Lee*, J. M. Kim**, S. Jhee***

Key words: Defrosting(제상), Fin-tube heat exchanger(흰-관 열교환기), Contact angle(접촉각), Hydrophilic surface(친수성 표면), Hydrophobic surface(발수성 표면)

ABSTRACT

In this study, the defrosting behaviors according to the surface characteristics in the fin-tube heat exchanger is experimentally examined. It is found that the draining rate of the hydrophilic and hydrophobic heat exchangers are evenly dispersed during defrosting, compared with that of the bare one. It is caused by the high density frost for the hydrophilic heat exchanger, and surface characteristic for the hydrophobic heat exchanger, respectively. The rest period of the hydrophilic and hydrophobic heat exchangers are shorter and their weight of residual water are smaller than those of the bare heat exchanger. The hydrophilic and hydrophobic heat exchangers are more effective than the bare one in terms of defrosting efficiency, and the hydrophobic heat exchanger is better than the hydrophilic one.

기호설명

그리스 문자

L : 융해잠열 [J/g]
 $M_{w,res}$: 잔류 융해수량 [g]
 m_f : 착상량 [g]
 q_{heater} : 공급전력량 [W]
 T : 온도 [°C]
 t : 시간 [min]
 t_p : 융해 준비 기간 [min]
 t_m : 서리 융해 기간 [min]
 t_r : 수분 제거 기간 [min]
 t_{rest} : 휴지 기간 [min]
 \dot{W} : 융해수 배출율 [g/s]

η_m : 융해 효율 [%]
 η_d : 제상 효율 [%]
 τ_m : 융해 시간 [min]
 τ_d : 제상 시간 [min]
 θ : 접촉각 [°]

1. 서론

저온용 열교환기에서는 그 주위를 흐르는 습공기 중의 수증기가 열 및 물질전달에 의하여 다공성(多孔性) 서리의 형태로 냉각면에 부착되는 착상 현상이 발생한다. 착상에 의하여 생성된 다공성의 서리가 점차로 성장함에 따라 공기와 열교환기 사이의 열저항으로 작용하여 열전달률을 감

* : 정회원, 한양대학교 기계공학과

** : 한양대학교 대학원

*** : 정회원, 한양대학교 대학원

소시키고 유로가 폐색되어 공기에 대한 유동 저항이 증가된다. 또한 공기의 압력강하가 심화되어 송풍기의 성능에 악영향을 미치게 된다. 따라서 요구되는 성능을 지속시키기 위하여 착상에 의하여 열교환기의 표면에 부착된 서리를 적정 시간 마다 주기적으로 제거해 주어야 하는데, 이를 제상(defrosting)이라 한다. 그러나 제상 과정 동안은 열교환기의 운전을 정지하게 되어 냉장 및 냉동을 연속적으로 수행할 수 없고, 또한 부가적인 열이 시스템 내부로 유입되며, 추가적인 제상일이 소모된다. 이로 인하여 냉장·냉동 시스템의 에너지효율, 성능, 신뢰도 및 수명이 저해된다. 그러므로 착상과 더불어 제상의 효율화를 기하여 시스템의 성능을 향상시킬 필요가 있다.

현재까지 열교환기의 착·제상에 관련된 일반적인 연구는 활발히 진행중이나, 표면 특성을 부여한 열교환기의 제상과 관련된 연구는 상당히 미약하다. Fig. 1과 같이 고체 표면에 맺혀 있는 액적은 액체의 종류와 표면의 재질 및 상태에 따라서 표면과 일정한 각도를 유지하게 되는데 이 각도가 물질의 표면 특성을 대표하는 접촉각(contact angle)이다. 친수성(hydrophilic) 표면은 재질이 액체와 친화하는 특성 때문에 접촉각이 예각을 이루면서 액체가 표면과 접하는 면적이 큰 반면, 발수성(hydrophobic) 표면은 재질이 액체를 밀어내는 특성을 가져 접촉각이 둔각을 이루며 액체와 표면이 접하는 면이 작아져 액적이 중력에 의하여 쉽게 굴러 떨어진다. O'Neal 등⁽¹⁾은 친수성과 발수성 표면이 무처리 표면에 비하여 제상 기간이 짧고, 발수성 표면의 잔류 용해수량이 감소한다고 하였다. Saito 등⁽²⁻⁴⁾은 발수성 표면에서 착설(着雪) 및 착빙(着氷)이 약화된다고 하였고, Tsuda 등⁽⁵⁾은 초발수성 표면의 열교환기가 연속 운전 시간이 연장되었다고 하였다. 그

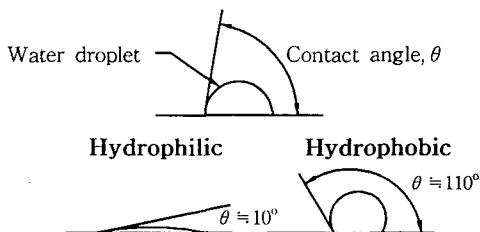


Fig. 1 The contact angle of water droplet.

러나 이전의 연구는 표면에 특성을 부여하기 위한 재료의 연구가 대부분이며 이를 열교환기에 적용하여 연구한 경우가 매우 적고, 표면 특성을 부여한 열교환기의 연구에서도 착상에 대한 이득을 중점적으로 설명하는 등 각 표면 특성별 열교환기의 제상 거동에 관한 연구는 상당히 미약하다.

따라서 본 연구에서는 무처리, 친수성 그리고 발수성 표면 열교환기의 제상 거동을 조사하고 열교환기의 표면 특성이 제상에 미치는 영향을 파악하여 고성능 및 고효율의 저온용 열교환기를 제작하기 위한 기초적인 자료를 마련하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 착·제상 실험 장치는 폐회로 풍동 장치로서 시험부, 항온항습실, 순환부, 냉각부 그리고 전열부로 구성되어 있으며 각각을 독립적으로 제어하여 실험할 수 있다.⁽⁶⁾

Fig. 2는 본 실험에 사용한 원·관 열교환기의 개략도를 보여주고 있다. 열교환기는 알루미늄으로 제작되었으며 2단 2열의 관을 사용하였고, 곡관부를 제외한 관의 길이는 310 mm이며 원 파치는 7 mm이다. 히터는 관과 엇갈린 형태로 원에 부착되어 있고 기준 입력 전압인 220 V에서 32 W의 전력을 소모한다. 친수성 표면 열교환기는 무처리 알루미늄 열교환기를 크롬계 물질로 처리하고, 발수성 표면 열교환기는 테프론으로 처리를 하여 제작하였다. 본 연구에 사용된 일반적인 무처리 알루미늄 열교환기의 물과의 접촉각은 약 74°이고 친수성 열교환기는 약 12°내외, 발수성 열교환기는 약 124°내외의 접촉각을 나타낸다.

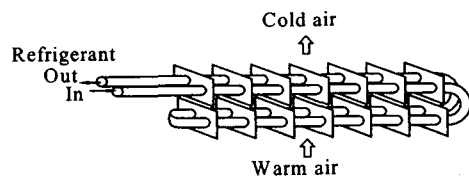


Fig. 2 The schematic of the fin-tube heat exchanger used in this study.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 각 표면 특성별 제상 거동을 파악하기 위하여 각각의 열교환기에 대하여 착상 및 제상 실험을 연속적으로 실시하였다. 착상 기준 조건으로는 입구 공기의 온도, 상대 습도 및 속도를 각각 10°C, 70%, 2 m/s로 하여 실험하였고, 열교환기로 공급되는 냉매의 온도와 유량은 각각 -27°C와 0.04 kg/s로 유지하였으며 총 2시간동안 착상을 시킨 후 제상 실험을 시행하였다. 제상 시 기준 열량은 32 W로 하여 전기 히터에서 공급하였으며, 환 부의 평균온도가 제상 기준 온도인 14°C에 도달하면 제상을 종료하였다.

실험 과정을 살펴보면 먼저 항온항습실에서 공기의 온·습도를 실험 조건과 동일한 상태로 제어하고, 입구 공기를 설정된 유속으로 시험부 내로 유입시킨다. 또한 저온 수조의 냉매를 설정한 온도로 냉각한다. 입구 공기와 냉매가 기준 조건과 동일한 상태가 되면 냉매를 열교환기 내로 순환시켜 착상 실험을 2시간 동안 진행한다. 착상 실험이 완료되면 순환부 내의 공기 흐름을 중지하고 열교환기에 부착된 제상 히터의 전원을 연결하고 제상 실험을 시작한다. 제상 기간 중의 용해수 배출량을 측정하기 위하여 미리 무게를 측정된 흡수지를 용해수 받이에 깔고, 시험부 아래 부분에 설치한다. 용해수 받이는 정해진 시간 간격에 따라 교체하고, 교체 시 각각 배출된 용해수와 흡수지의 총 무게를 정밀 전자 저울로 측정하여 시간별 용해수 배출량을 산출한다. 열교환기의 환의 표면이 제상 기준 온도에 도달하면 서리 용해가 완료된 것으로 간주하여 제상 히터의 전원을 제거하고 일반 냉장고에서와 같이 일정 시간의 휴지 기간을 둔 후 제상 실험을 종료한다. 위와 같은 방법으로 무처리, 친수성 그리고 발수성 표면의 열교환기를 각각 실험하였다.

착·제상 실험을 수행한 후, 열교환기의 제상 성능을 알아보기 위한 용해 및 제상 효율은 착상량, 용해잠열, 공급전력, 용해 시간 및 제상 시간의 함수로 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_m = \frac{m_f L}{q_{heater} \tau_m} \quad (1)$$

$$\eta_d = \frac{m_f L}{q_{heater} \tau_d} \quad (2)$$

본 연구에서 사용된 데이터와 결과의 불확실도는 95%의 신뢰 구간에서 불확실성 해석⁽⁷⁾(root-sum-square)에 의해 계산하였다. 각각의 불확실도는 착상 시 입구 공기 절대 습도가 1.94%, 제상 시 용해수 배출율이 1.14%, 제상후의 잔류 용해수량이 1.08%이다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 친수성 열교환기와 발수성 열교환기의 제상 거동을 파악하고 무처리 열교환기와 의 제상 성능을 비교하기 위하여 착상 기준 조건에 대하여 실험을 수행하였고, 입구 공기의 상대 습도 변화에 따른 각 표면 특성별 열교환기의 제상 거동을 파악하기 위한 실험을 실시하였다.

3.1 기준 조건에서의 제상 거동

각 표면 특성별 열교환기의 제상 거동은 열교환기의 각 부분의 온도 변화와 용해수의 배출 거동을 검토함으로써 알 수 있다. 제상 기간은 제상 시 열교환기의 온도 경향에 따라 용해 준비 기간(t_p), 서리 용해 기간(t_m), 수분 제거 기간(t_r) 그리고 휴지 기간(t_{rest})의 네 구간으로 구분할 수 있다.⁽⁶⁾

Fig. 3은 착상 기준 조건에서 무처리 열교환기, 친수성 열교환기, 그리고 발수성 열교환기의 시간에 따른 히터의 표면온도와 제상 기간을 각각 도시한 것이다. 일반적으로 제상 거동은 환, 관, 시험부 공기 그리고 히터의 온도분포를 사용하여 설명한다. 그러나 본 연구에서는 히터 이외 부분의 온도분포가 각 열교환기에서 동일한 경향을 나타내므로, 히터의 온도분포만을 도시한다. 각 제상 구간별로 무처리 열교환기, 친수성 열교환기와 발수성 열교환기의 제상 거동을 비교하여 보면 다음과 같다. 용해 준비 기간은 무처리와 친수성 열교환기에서는 각각 $t=8.5$ min, $t=8.2$ min으로 각각의 제상 시간(τ_d)의 21%와 20%가 소요된다. 반면에 발수성 열교환기에서는 그 기간이 $t=6.4$ min으로 제상 시간의 17.4%를 차지하였다. 서리 용해 기간은 무처리 열교환기에서는 $t=32$ min까지로 제상 시간의 58%를 소요한 반면, 친수성과 발수성 열교환기는 $t=29.4$ min과 $t=27.6$ min까지로 각각 제상 시간의 51.7%,

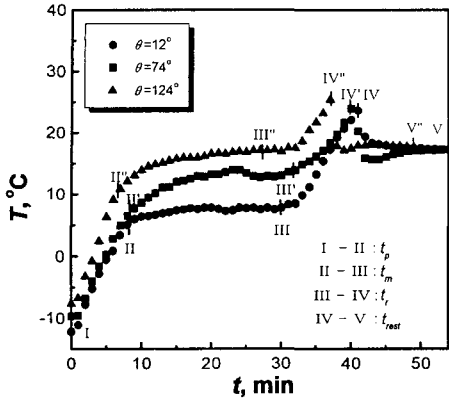


Fig. 3 The variation of heater temperature and defrosting period on the bare, hydrophilic, and hydrophobic fin-tube heat exchangers.

57.8%가 소요된다. 수분 제거 기간은 무처리, 친수성 그리고 발수성 열교환기가 각각 $t=40.5$ min, $t=41$ min, $t=36.7$ min까지로 제상 시간의 21%, 28.3%, 24.8%를 차지한다. 친수성과 발수성 열교환기의 각 제상 구간별 시간을 무처리 열교환기에 대하여 비교하여 보면, 용해 준비 기간은 친수성 열교환기가 무처리 열교환기와 거의 같고, 발수성 열교환기는 약 2분이 짧다. 서리 용해 기간은 친수성과 발수성 열교환기가 2분이 짧으며, 수분 제거 기간은 친수성과 발수성 열교환기가 각각 3.1분, 0.6분이 길게 나타난다.

각 열교환기 히터의 온도 변화에서 나타난 특징은 제상 시간(τ_d)까지의 히터 온도가 친수성 열교환기는 무처리 열교환기에 비해 낮고, 발수성 열교환기는 무처리 열교환기에 비해 높다는 것이다. 특히 그 차이가 명확한 서리 용해 기간 동안 무처리 열교환기에 대하여 친수성 열교환기는 평균 4.8°C 가 낮고, 발수성 열교환기는 평균 2.4°C 가 높게 나타난다. 친수성 열교환기의 히터 온도가 낮은 이유는 선행연구⁽⁸⁾에서 밝혀진 바와 같이 착상 초기에 형성된 고밀도의 서리에 의하여 환과 서리층 사이의 열전도가 상대적으로 용이하게 되어 히터에서 발생된 열이 조속히 상실되기 때문이다. 이렇게 히터로부터 상실된 열은 순수 용해수의 형태로 계속 배출된다. 발수성 열교환기의 히터 온도가 높은 이유는 제상 초기에 서리 내부로 용해수가 침투하면 환 표면의 발수

성에 의하여 서리가 표면으로부터 분리되어, 자중에 의하여 완전히 이탈되기 전까지 서리의 일부분만이 표면에 부착된 상태가 된다. 즉, 서리와 환이 접촉하는 면적이 작아져 히터에서 서리로의 열전달이 무처리 열교환기에 비하여 상대적으로 일어나 히터의 온도가 높게 나타난다.

Fig. 4는 착상 기준 조건에서 각 표면 특성별 열교환기의 시간에 따른 용해수의 배출율을 도시한 것이다. 무처리 열교환기의 용해수 배출은 열량이 공급된 뒤 약 $t=23.5$ min이 경과한 후부터 처음으로 용해수가 배출되기 시작한다. 배출량이 점차 증가하여 $t=35$ min에 용해수 배출의 최대점에 도달한 후, 배출량이 급격히 줄어들면서 $t=40.5$ min에 환의 온도가 14°C 가 되어 히터의 열량 공급이 중단된 후에 한 번의 극대점을 더 가진 후 제상이 종료되었다. 반면, 친수성 열교환기는 무처리 열교환기보다 3.5분이 빠른 $t=20$ min 경부터 용해수가 배출되기 시작하여 무처리 열교환기와 같은 $t=35$ min 경에 용해수 배출의 최대점을 가진 후, $t=41$ min 경에 제상이 종료되었다. 그리고, 발수성 열교환기는 무처리 열교환기보다 6.5분이 빠른 $t=17$ min에 제상이 시작되어 $t=25$ min에 최대점을 가지고 $t=36.7$ min에 제상을 종료하였다. 각 열교환기의 누적배출량은 용해수의 배출과 함께 계속 증가하다가 제상 시간(τ_d)이후는 거의 증가하지 않고, 제상 시간 후에 배출된 용해수량은 무처리 열교환기가 다른 열교환기에 비하여 상대적으로 많다.

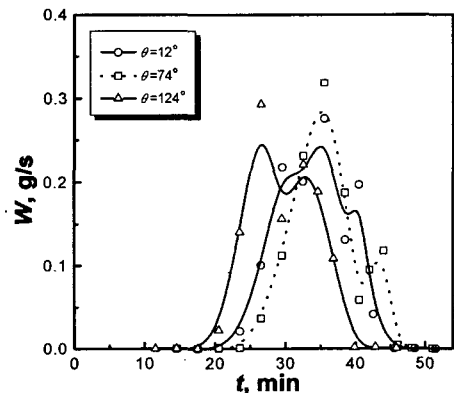


Fig. 4 Water draining rate with time on the bare, hydrophilic, and hydrophobic fin-tube heat exchangers.

용해수 배출 거동에서 각각의 열교환기는 다음의 특징을 가진다. 무처리 열교환기의 경우 2개의 용해수 배출의 극대점을 갖는데, 서리 용해 메카니즘에 의하면 서리가 녹은 용해수가 모세관 현상에 의해 다공성의 서리 내부로 침투하여 완전히 용해되지 않은 상태의 서리가 자중에 의해 열교환기로부터 이탈하여 순수 용해수와 함께 총 배출량으로 측정되기 때문이다. 친수성 열교환기는 용해수 배출의 최대점은 존재하나 무처리 열교환기와 비교하여 명확한 극대점이 존재하지 않으며 용해수 배출율이 제상 기간 동안 상대적으로 균등하게 분포함을 알 수 있다. 이러한 현상은 서리 용해 메카니즘과 함께 친수성 열교환기의 표면 특성에서 기인한다. 친수성 열교환기는 착상 시 생긴 고밀도의 서리로 인하여 제상 시 순수 용해수의 배출량이 많아지고 무처리 열교환기에 비하여 서리 덩어리가 이탈되는 경우가 적게 되어 비교적 균등한 용해수 배출율을 나타낸다. 발수성 열교환기도 친수성 열교환기와 같이 최대점은 존재하나 용해수 배출율이 균등하게 분포한다. 이러한 이유는 용해수에 의해 포화된 서리가 발수성에 의해서 표면과 접촉하는 면적이 작아져, 무처리 열교환기에 비하여 상대적으로 적은 자중에도 서리가 이탈되기 때문이며, 발수성 표면의 접촉각이 증가함에 따라 습설(濕雪)과 표면의 부착력이 감소한다는 Saito 등⁽⁴⁾의 연구 결과와 일치한다.

Fig. 5는 착상 기준 조건에서의 용해 효율과 전체 착상량에 대한 휴지 기간의 용해수 배출 비율을 표면의 접촉각에 따라 도시한 것이다. 용해 효율의 경우는 친수성과 발수성 열교환기가 무처리 열교환기에 비하여 상대적으로 각각 14.4%와 16.2%가 상승한다. 이것은 Fig. 4의 용해수 배출 거동에서 살펴보았듯이 친수성과 발수성 열교환기의 용해수 배출이 제상 구간에 균등하게 분포함으로써 나타나는 현상이다. 즉, 친수성과 발수성 열교환기는 사다리꼴의 용해수 배출로 삼각형의 무처리 열교환기에 비하여 용해 시간까지의 용해수 배출량이 더 많다. 전체 착상량에 대한 휴지 기간의 용해수 배출 비율은 친수성과 발수성 열교환기가 무처리 열교환기에 비하여 상대적으로 각각 38.8%와 43.3%가 감소한다. 이로써 친수성과 발수성 열교환기의 휴지 기간을 무처리 열교환기보다 대폭 감소시킬 수 있으며, 실제의

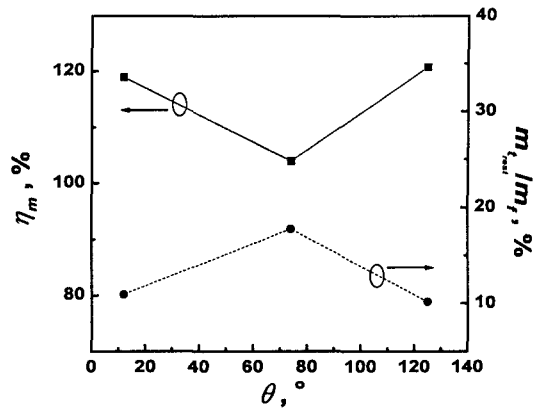


Fig. 5 The effect of contact angle on melting efficiency and draining water ratio during rest period.

냉장·냉동 시스템에 적용하면 전체 제상에 소요되는 시간이 감소되어 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다.

3.2 입구 공기 습도의 영향

열교환기로 유입되는 공기의 습도 변화에 따른 각 표면 특성별 열교환기의 제상 거동의 영향을 파악하기 위하여 입구 공기의 상대 습도를 기준 조건인 70% 이외에 60%와 80%에 대하여 각각 실험을 수행하였다.

Fig. 6은 상대 습도의 변화에 따른 각 표면 특

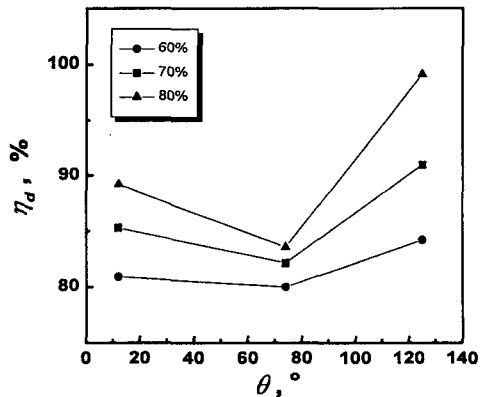


Fig. 6 The effect of contact angle on defrosting efficiency for relative humidity.

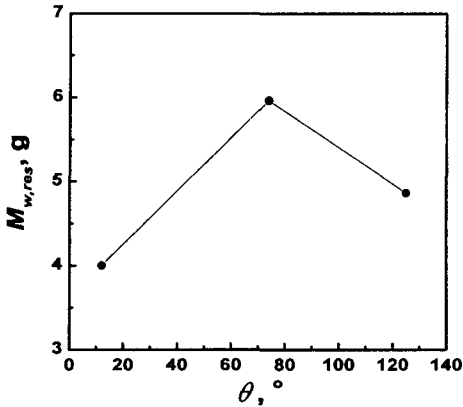


Fig. 7 The weight of residual water with contact angle.

성별 열교환기의 제상 효율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 세 열교환기 모두 상대 습도가 증가할수록 제상 효율이 증가하는데, 이러한 이유는 상대 습도가 증가할수록 착상량이 증가하여 서리 밀도가 상대적으로 작아지기 때문이다. 즉, 서리층 내부로의 용해수 침투가 용이하여져서 서리 용해 속도가 증가한다. 특히, 착상량 증가에 따른 발수성 열교환기의 제상 효율의 증가가 친수성 열교환기에 비하여 우수하다. 이는 친수성 열교환기는 착상시 발생한 고밀도의 서리로 인하여 서리의 용해 속도가 늦어진 반면, 발수성 열교환기는 착상량이 증가할수록 표면의 발수성 때문에 자중에 의한 서리의 이탈이 상대적으로 용이하기 때문이다.

Fig. 7은 각 표면 특성별 열교환기의 잔류 용해수량을 도시한 것이다. 실제 착·제상 과정은 반복 과정이므로 제상 후에 열교환기 표면에 잔류한 용해수는 재착상 시 큰 영향을 미친다. 이 양은 각 표면 특성별로는 같은 양이 잔류한다는 가정 하에 각각의 습도 조건에서 측정된 양을 평균하여 나타내고, 무처리, 친수성 그리고 발수성 열교환기에서 각각 6.03 g, 4.59 g, 4.86 g이다. 친수성과 발수성 열교환기의 잔류 용해수량은 무처리 열교환기를 기준으로 각각 23.9%와 19.4%가 감소하는데 친수성 열교환기의 감소량이 발수성 열교환기보다 많다. 그러나, 접촉각 150° 이상의 초발수성 표면의 열교환기가 개발되면 잔류 용해수량이 본 실험의 결과보다 더욱 감소하리라고 생각된다. 이러한 친수성과 발수성 열교환기

의 잔류 용해수량의 감소는 재착상 시 통풍저항 저하와 착상량 감소 등의 효과가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 무처리, 친수성 그리고 발수성 열교환기의 제상 실험을 수행하여, 제상 시 시험부 내의 온도 분포와 용해수 배출 거동을 파악하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 친수성 열교환기는 착상 시 생성된 고밀도 서리로, 발수성 열교환기는 표면 특성으로 인하여 용해수 배출율이 무처리 열교환기에 비하여 제상 구간에 균등하게 분포한다.

(2) 친수성과 발수성 열교환기는 무처리 열교환기에 비하여 착상 기준 조건의 용해 효율은 상대적으로 약 15%가 상승하였고, 휴지 기간 동안의 전체 착상량에 대한 용해수 배출 비율은 약 40%가 감소하여 두 열교환기의 휴지 기간을 대폭 감소시킬 수 있다.

(3) 친수성 및 발수성 열교환기의 제상 효율은 습도가 증가함에 따라 무처리 열교환기에 비하여 각각 1~6%와 4~16%가 상승하였고, 제상 성능은 발수성 열교환기가 가장 우수하다.

(4) 친수성 및 발수성 열교환기의 잔류 용해수량은 무처리 열교환기에 비하여 약 20%가 감소한다.

(5) 친수성과 발수성 열교환기의 용해 및 제상 효율 증가, 휴지 기간의 배출량 감소 그리고 잔류 용해수량의 감소는 냉장·냉동 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다.

후 기

본 연구는 에너지자원기술개발지원센터의 '98 에너지기술개발 학술진흥사업과제 "열교환기 표면 특성에 따른 착상 거동에 관한 연구"의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 동 기관의 관계 제위께 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. 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.
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. Tsuda, Y. and Iwamoto, A., 1992, Antifrosting Heat Exchanger, National Technical Report, Vol. 38, No. 1, pp. 108-113.
 6. 이관수, 김규우, 지성, 1998, 핀-관 열교환기에 대한 제상 거동에 관한 실험적 연구, 공기조화·냉동공학회 논문집, Vol. 10, No. 6, pp. 649-657.
 7. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, Mechanical Engineering, Vol. 75, pp. 3-8.
 8. 이관수, 류수길, 1999, 핀-관 열교환기의 표면 특성에 따른 착상 거동에 관한 연구, 공기조화·냉동공학회 논문집, Vol. 11, No. 3, pp. 377-383.