

친수성 표면처리가 수평관 외벽의 증발열전달에 미치는 영향

박 노 성, 황 규 대, 강 병 하*, 정 진 택*

한국과학기술연구원 열유동제어연구센터, *고려대학교 기계공학과

Effects of Hydrophilic Surface Treatment on Evaporation Heat Transfer at the Outside Wall of Horizontal Tubes

N. S. Park, K. D. Hwang, B. H. Kang[†], J. T. Chung^{*}

Thermal/Flow Control Research Center, KIST, Seoul 136-791, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

(Received January 17, 2000; revision received March 20, 2000)

ABSTRACT: Evaporation heat transfer characteristics have been investigated experimentally when distilled water is sprayed on the outside wall of horizontal tubes in a evaporator. This problem is of particular interest in the design of evaporator of an absorption system. Hydrophilic surface treatment was employed to increase the wettability on copper tubes. The results indicate that evaporation heat transfer with hydrophilic tubes is shown to be 25-44% higher than that with bare tubes at evaporation pressure of 31.8 Torr(evaporation temperature 30°C). Evaporation heat transfer rates of hydrophilic treatment tubes are improved substantially, comparing with those of conventional copper tubes in the wide range of operating parameters, such as water inlet temperatures, water mass flow rates and evaporation pressures.

Key words: Hydrophilic surface treatment(친수성 표면처리), Absorption refrigerator(흡수식 냉동기), Evaporation heat transfer(증발열전달), Heat transfer coefficient(열전달계수), Horizontal tubes(수평관)

기 호 설 명

C_p : 비열 [J/kg · °C]

h : 열전달계수 [W/m²°C]

h_o : 증발열전달계수 [W/m²°C]

k : 열전도계수 [W/m°C]

\dot{m} : 질량 유량 [kg/s]

ν : 동점성계수 [m²/s]

Nu : Nusselt 수 $h_o \left(\frac{\nu^2}{k^3 g} \right)^{1/3}$

Pr : Prandtl 수 ν / α

Q : 열전달량 [W]

Re : Reynolds 수 $\frac{\rho V D_o}{\mu}$

ΔT_{lm} : 대수평균 온도차 [°C]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5673; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: bhkang@kist.re.kr

U : 총괄열전달계수 [$W/m^2\text{C}$]

하첨자

c : 응축기
 e : 증발기
 H : 증발기 관내 온도
 i, o : 관 내 · 외부
 in : 입구
 out : 출구

1. 서론

흡수식 냉동기는 증기 압축식 장치에 비해 환경 친화적이면서 효율적으로 에너지를 이용할 수 있는 장점을 가지고 있어 현재 우리나라에서도 30 RT이상의 중대형 건물을 중심으로 수요가 증가하고 있다. 최근에는 환경문제의 해결과 에너지 지원 다변화 정책으로 인해 수요가 많은 3 RT급 미만의 소형 가정용 흡수식 시스템에 대한 시급한 개발이 요구되고 있다. 효율성 높은 흡수식 시스템의 소형화는 다중효용의 고효율 사이클 개발과 함께 주요 구성요소인 흡수기, 증발기, 응축기, 재생기 및 용액열교환기 등의 열교환기에서 보다 높은 전열성능 향상이 이루어져야 한다. 흡수식 냉동기의 열교환기들은 대부분 원통-관형 열교환기의 형태로 수평관군을 이루며 설치되어 있는데 본 연구에서는 직접적인 냉동작용이 이루어지는 증발기를 실험모델로 하였다.

흡수식 냉동기의 증발기와 같이 관 외벽으로 냉매가 유하하는 경우의 액막 증발열전달에 관하여 Chun과 Seban⁽¹⁾이 실험상관식을 처음 제시한 이래로 증발열전달 현상에 대한 해석모델 개발과 함께 액막의 유동상태, 관경, 열유속, 작동 유체의 종류 등의 변화에 따라 증발열전달계수 예측을 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다.⁽²⁻⁵⁾

또한, 수평관에서의 액막증발 촉진에 관한 연구로서는 Schultz et al.⁽⁶⁾과 Fletcher et al.⁽⁷⁾이 관 표면에 홈을 파거나 널링가공을 하여 열전달 계수가 평활관에 비해 2.5배 향상된 결과를 얻었으며, Chyu와 Bergles⁽⁸⁾는 다공성 물질을 수평관 증발기 관 표면에 코팅처리하여 열전달 성능이 5배 향상된 결과를 얻었다. 그리고, Kim⁽⁹⁾은 수평 로우핀관의 액막증발에 관한 실험적 연구를 수행하여 로우핀관의 열전달계수가 평활관에 비해

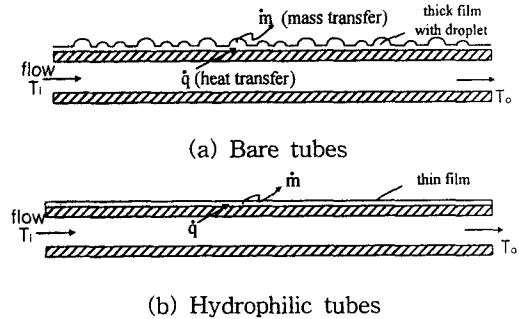
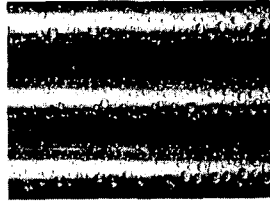


Fig. 1 Schematic shapes of evaporation phenomena on tube surface.

60~100% 정도 크다는 결과를 얻었다.

증발열전달 촉진의 방법으로는 관을 가공하는 방법외에 관 표면을 친수성 처리하는 방법이 있다. 기존 평활관의 경우 Fig. 1(a)와 같이 분사된 냉매는 불규칙한 형태의 액적과 액막이 함께 형성되어 관외부에서 냉매의 증발에 대한 열저항이 큰 반면, 친수성 처리된 관 표면의 경우는 Fig. 1(b)에서와 같이 표면장력의 증가에 의한 접촉각 감소로 인해 얇은 수막이 전열관 전체에 골고루 퍼지게 된다. 따라서 전열면적의 증가와 얇은 액막두께로 인한 열저항 감소로 전열성능이 향상되게 된다. 그러나, 계면활성제를 이용하여 관표면을 친수성 처리하는 방법은 증발기에서와 같이 관외벽에서 냉매가 흘러내리면서 열 및 물질전달이 발생하는 경우에는 코팅된 계면활성제가 냉매에 용해되어 친수성능의 유지가 한시적이라는 문제점이 있다.

본 연구에서 사용된 친수성 표면처리 기술은 Koh et al.⁽¹⁰⁾에 의해 개발된 플라즈마를 이용한 방법으로 처리과정은 다음과 같다. 진공조 안에 처리하고자 하는 금속재료를 고정하고 고분자 중합기체와 반응성 기체를 주입한다. 가스 주입이 완료되면 금속재료의 양 전극에 전압을 인가하여 DC방전이나 RF방전을 통해 생성된 플라즈마로 금속표면에 친수성을 갖는 고분자 중합막이 형성되는 것으로 물리적, 화학적으로 안정된 친수성능을 유지하는 기술이다. 이 표면처리 기술에 대한 실험적 검증은 Ha et al.⁽¹¹⁾이 에어컨 증발기용 핀-관 열교환기에서의 응축수 생성 및 배수 특성에 관한 실험적 연구를 통해 계면활성제에 의한 친수성 처리방법 보다도 우수한 전열특성과 지속적인 성능 유지가 됨을 입증하였다.



(a) Before hydrophilic treatment



(b) After hydrophilic treatment

Fig. 2 Comparison of wettability of sprayed water on tube surfaces.

Fig. 2는 평활관 외벽에 냉매가 분사된 상태를 비교한 사진으로 친수성 처리전에는 외벽에 불규칙한 크기의 액적이 형성되는 것에 비해 친수성 처리 후에는 냉매가 관 표면에 얇게 퍼짐을 확인할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 일반 평활관을 증발기의 전열관으로 선정하여 플라즈마를 이용한 관 표면의 친수성 처리가 수평관 외벽의 증발열전달에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 또한 증발기 입구온도, 증발기 관내측 유량 및 시험체적내 증발압력을 변화시키면서 증발열전달 특성을 비교 실험하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

일반 평활관의 표면에 플라즈마를 이용한 친수성 처리 유무에 따른 증발열전달 특성을 비교 실험하기 위하여 흡수식 냉동기의 주요 열교환기 중 하나인 증발기 부분에 해당하는 실험장치를 제작하였다. Fig. 3와 같이 실험장치는 일정온도의 고온수가 순환하는 전열관 표면에서 노즐을 통해 분사된 냉매(증류수)가 증발되는 증발기, 전열관 내부로 일정온도의 냉각수를 순환시켜 발생

Table 1 Experimental conditions

Component	Parameter	Value
Condenser	Inlet temperature (°C)	10 ±0.5
	Flow rate (ℓ/min)	3.9 ±0.1
	Heat exchange area (m ²)	0.2154
Evaporator	Inlet temperature (°C)	40 ~ 60
	Flow rate (ℓ/min)	3.9 ±0.1
	Heat exchange area (m ²)	0.0359
Nozzle	Inlet temperature (°C)	15 ±0.5
	Flow rate (ℓ/min)	0.24
	Spray angle	60 °

된 증기를 다시 응축시키는 응축기, 증발기 표면에 균일한 냉매 분사를 위한 노즐분사장치, 시험체적내 일정압력유지를 위한 진공장치, 일정온도의 고온수와 냉각수를 공급하기 위한 항온조, 온도와 유량측정장치 등으로 구성되었으며 가시창을 설치하여 시험체적 내부를 관찰할 수 있도록 하였다.

응축기 부분은 냉각수의 냉열 공급원인 냉각기(3 RT), 냉각수 입구온도를 일정하게 유지하기 위한 냉각수 항온조(80 ℓ), 응축기내로 냉각수 공급을 위한 순환펌프, 냉각수의 유량 측정을 위한 유량계 등으로 구성된다. 응축기 관내로 유입되는 냉각수는 유량계를 통과한 후 열교환기로 유입되어 증발기에서 공급된 증기와 열교환에 의해 가열된 후 다시 냉각기로 유입되어 재순환한다.

또한 시험체적 내부를 실험조건에 해당하는 진공상태로 유지하기 위하여 진공펌프와 진공게이지, 진공밸브를 장착하였다. 노즐은 전열관의 길이(400 mm)를 고려하여 3개의 분무형 분사노즐(Full cone type)을 설치하였으며 구동원으로서 고압펌프를 사용하였다. 그리고, 열교환기 입·출구 온도와 노즐입구온도 측정을 위해 T형 열전대(입·출구 상대온도 편차 ±0.1°C)를 설치하였다.

증발기 부분은 전기히터(3 kW)에 의한 열원 공급으로 증발온도보다 높은 고온수를 항상 일정한 온도로 유지시키는 항온조와 시험체적 안의 증발기내로 고온수 공급을 위한 순환펌프, 유량 측정을 위한 유량계(0.18~0.96 m³/h)등으로 구성되어 있다. 펌프에 의해 순환하는 고온수는 증발기 외벽에서 발생하는 냉매의 증발에 의해 냉각된 후 다시 항온조로 유입되어 재순환한다. 증발

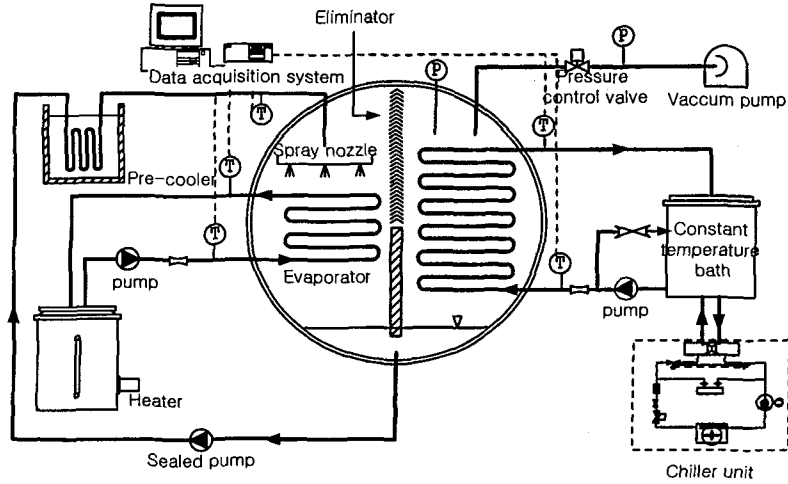


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up.

기 전열관은 길이 400 mm, 외경 9.525 mm 평활관 3열을 수평배열한 수평관군 형태로 제작되었다.

본 연구에서의 실험조건은 Table 1과 같으며 실험은 먼저 전기히터에 의해 일정온도로 유지된 고온수 항온조로부터 펌프를 사용하여 고온수를 증발기 관내로 순환시키고, 냉각기에 의해 일정온도로 유지되어 있는 냉각수를 응축기 관내로 순환시킨다. 고온수와 냉각수 유량은 전자저울로 측정후 유량조절밸브를 조절하여 매 실험마다 일정하게 유입되도록 한다.

시험체적내의 압력을 증발온도에 해당하는 압력으로 낮추기 위해 진공펌프를 작동한 후 진공게이지를 통해 일정압력에 도달되면 노즐에 연결된 고압펌프를 가동시켜 증발기 전열관 외벽에 냉매(중류수)를 분사시킨다. 증발된 냉매는 엘리미네이터(eliminator)를 거쳐 응축기에서 다시 응축되며 발생된 증기가 증발기의 증발성능에 미치는 영향을 최소화하기 위해 응축기는 증발기보다 약 6배의 열교환 면적을 갖도록 제작하였다. 또한, 고압펌프를 지나면서 마찰에 의해 중류수의 온도가 상승하므로 펌프출구와 노즐입구 사이에 열교환기를 설치하여 노즐입구온도를 항상 일정하게 유지시켰다.

실험데이터는 실험장치를 20여분간 가동하여 정상상태에 도달시킨 후 5분간 데이터취득시스템(Yokogawa, DR 230)과 컴퓨터를 이용하여 취득 저장하였다.

3. 결과 및 검토

증발열전달 특성을 비교실험하기 위하여 흡수식 냉동기의 증발기 부분 실험장치를 구성하였으며, 일반 평활관으로 증발기 전열관을 제작하였다. 그리고 친수성 표면처리가 증발열전달에 미치는 영향을 규명하고자 제작된 증발기에 플라즈마를 이용한 친수성 처리를 하여 증발기 입구온도, 증발기 관내 유량, 시험체적내 증발압력의 변화에 따른 증발열전달 특성을 비교 실험하였다.

3.1 실험결과의 해석

증발기의 입출구온도 및 유량의 측정값으로부터 증발기측 열량은 식(1)과 같이 계산된다.

$$Q_e = \dot{m}_H C_p (T_{Hout} - T_{Hin}) \quad (W) \quad (1)$$

여기서, \dot{m}_H 는 증발기 관내유량, T_{Hin} 와 T_{Hout} 는 각각 증발기 입구와 출구의 온도이다. 마찬가지로 증발된 냉매로부터 잠열을 흡수하여 가열되는 부분인 응축기측 열량을 응축기 입출구 온도 측정으로 구할 수 있다.

$$Q_c = \dot{m}_c C_p (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (W) \quad (2)$$

총괄열전달계수 U 는 Q_e 값을 사용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$U = \frac{Q_e}{(\pi \cdot d_o \cdot L) \Delta T_{lm}} \quad (\text{W/m}^2\text{C}) \quad (3)$$

여기서, d_o 는 관외경, L 은 전열관 총길이 이고, ΔT_{lm} 은 대수평균 온도차(LMTD) 방법으로 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{Hout} - T_{Hin})}{\ln \left[\frac{(T_{Hout} - T_{sat})}{(T_{Hin} - T_{sat})} \right]} \quad (\text{C}) \quad (4)$$

여기서 T_{sat} 는 시험체적내 증발압력에 해당하는 포화수증기 온도이다.

한편, 증발기 관내 열전달계수 h_i 는 Dittus-Boelter 식 (5)를 사용하였으며,

$$\frac{h_i d_i}{k} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (5)$$

식(3)과 식(5)로부터 관외 증발열전달계수 h_o 를 구하였다.

$$h_o = \frac{1}{\left\{ \frac{1}{U} - \left(\frac{d_o}{d_i h_i} \right) \right\}} \quad (\text{W/m}^2\text{C}) \quad (6)$$

그리고, 관외 누셀 수는 식(7)을 이용하여 계산된다.

$$Nu_o = h_o \left(\frac{\nu^2}{k^3 g} \right)^{1/3} \quad (7)$$

3.2 실험결과 및 토의

본 실험의 결과는 Fig. 4에서와 같이 60여개의 점으로 표현되며 증발열량(q_e)과 엘리미네이터를 통과하여 응축기에서 열교환된 열량(q_c)의 차이는 증발된 냉매가 시험체적 내벽에서 응축되는 열량

으로 판단된다. 그림에서 응축열량이 증발열량의 0.8이상이므로 발생된 증기의 80% 이상이 응축기에서 실제 열교환이 이루어짐을 알 수 있다.

증발압력 31.8 Torr(증발온도 30°C), 증발기 입구온도 45°C, 노즐입구온도 15°C인 실험조건에서 레이놀즈 수의 영향을 Fig. 5에 도시하였다. 레이놀즈 수는 증발기 관내측 고온수 유량의 측정으로부터 계산되어진다. 레이놀즈 수가 증가할수록 증발열전달량은 증가하였으며, 레이놀즈 수가 14,000이상에서는 증발열량이 일정하게 유지되었

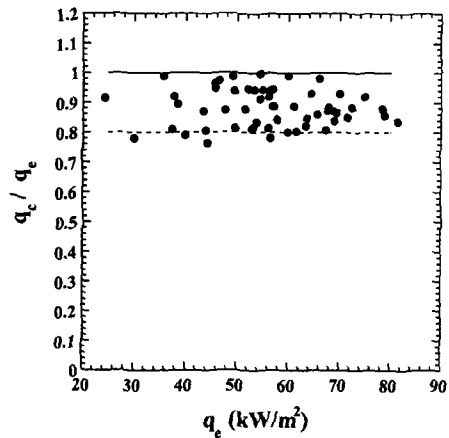


Fig. 4 Comparison of evaporation heat transfer (q_e) and condensation heat transfer(q_c).

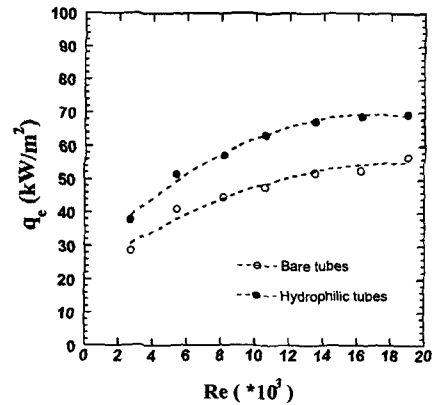


Fig. 5 Effect of water mass flow rate on evaporation heat transfer.

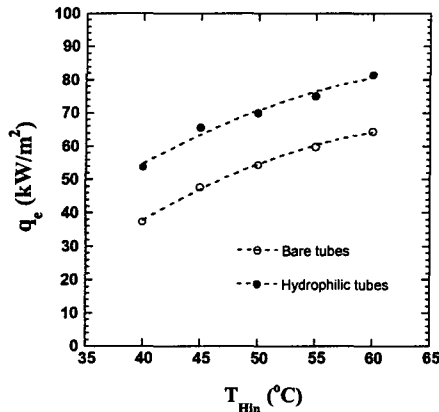


Fig. 6 Effect of water inlet temperature on evaporation heat transfer.

그리고, 레이놀즈 수가 증가할수록 친수성 처리된 평활관보다 친수성 처리후 평활관의 증발열량 증가폭은 증가하였으나, 증가폭은 레이놀즈 수 10,000이상에서는 일정한 경향을 보였다. 이는 관 내부에서 관 외벽으로 미치는 열전달의 영향이 포화상태에 도달하였음을 의미하는 것이다.

본 실험의 다른 변수에 대한 실험조건 설정시에는 뚜렷한 성능차이를 보이는 영역에서 비교실험을 위하여 레이놀즈 수가 10,000이 되도록 증발기 관내측 유량을 설정하였고, 이 때 유속은 약 1.4 m/s이다.

Fig. 6은 증발기 입구온도의 변화가 증발열량에 미치는 영향을 나타내었다. 시험체적의 증발압력이 31.8 Torr일 때 증발기 입구온도를 40°C에서 60°C까지 증가시키며 따라 증발열량도 점진적으로 증가함을 알 수 있다. 그리고, 증발기 입구온도의 전 실험범위에서 친수성 처리관의 증발열량 증가폭은 일정한 크기를 보였으며, 친수성 처리관의 증발열전달 성능 향상은 평활관에 비해 약 25-44%정도였다. 이것은 냉매가 친수성 처리된 평활관의 외벽에서 작은 접촉각을 이루며 관 표면에 넓게 퍼짐으로써 얇은 액막두께로 인한 열저항 감소가 전열성능을 증가시킨 것으로 판단된다.

증발열전달량으로부터 식(3)~(7)을 이용하여 관의 누셀 수를 계산한 결과 Fig. 7과 같으며, 증발열량의 경향과는 반대로 증발기 입구온도가 증

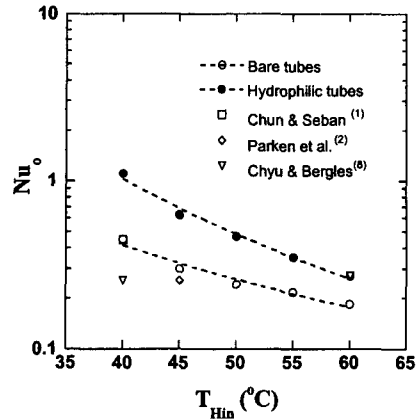


Fig. 7 Variation of Nu for water inlet temperature to the evaporator.

가함에 따라 누셀 수는 감소하는 경향을 보였다. 이것은 증발열량 증가폭에 비해 대수평균온도차 (ΔT_{lm})의 증가폭이 상대적으로 큰 결과에서 기인한다. 이러한 실험 결과의 타당성 입증을 위해 본 논문에서는 Chun과 Seban⁽¹⁾, Parken 등⁽²⁾ 및 Chyu와 Bergles⁽⁸⁾의 실험결과와 정량적인 비교를 하여 평활관 액막 증발열량이 해당 온도에서 비교적 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

시험체적내 증발압력의 변화가 증발열전달에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 증발기 입구 온도 45°C인 실험조건에서 증발압력을 17.5, 31.8, 55.3 Torr로 변화시키면서 실험을 수행하였고, 이 때 증발온도는 각각 20, 30, 40°C이다. 증발압력 전 실험범위에서 친수성 처리관의 증발열량은 평활관에 비해 일정한 증가폭을 보였다. 그리고, 시험체적내 증발압력의 증가는 높은 증발온도에서 냉매가 증발함을 의미하므로 증발 열량은 완만하게 감소하는 경향을 보였다.

그리고, 시험체적내 증발압력의 변화에 따른 관 외벽에서의 누셀 수의 변화를 Fig. 9에 도시하였다. 증발열전달량 변화의 경향과는 반대로 증발압력이 높을수록 누셀 수는 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 증발열량의 감소폭에 비해 대수평균온도차 (ΔT_{lm})의 감소폭이 상대적으로 큰 결과로 사료된다.

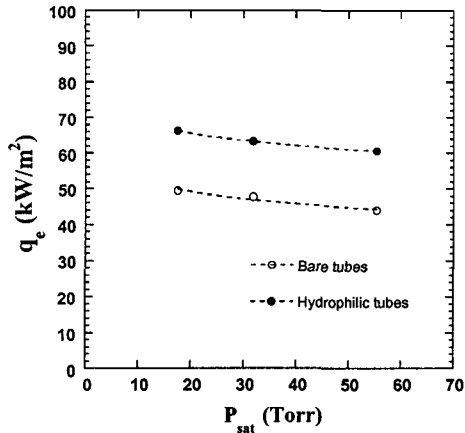


Fig. 8 Effect of evaporation pressure on evaporation heat transfer.

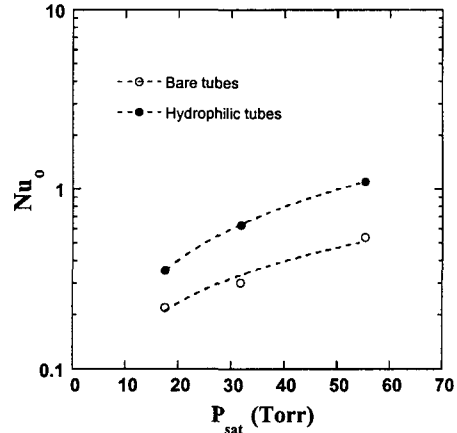


Fig. 9 Effect of evaporation pressure on Nu_0 .

4. 결론

본 연구에서는 흡수식 냉동기를 구성하는 열교환기중 증발기 성능실험을 위한 실험장치를 구성하였고, 일반 평활관으로 증발기를 제작한 후 플라즈마를 이용한 관 표면의 친수성 처리가 증발열전달에 미치는 영향을 규명하였다. 또한 증발기 입구온도, 증발기 관내측 유량, 시험체적내 증발압력을 변화시키면서 증발열전달 특성을 비교 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 증발압력이 31.8 Torr(증발온도 30℃)인 실험조건에서 증발기 입구온도를 40℃에서 60℃까지 증가시키에 따라 증발열량은 점진적으로 증가하였으며, 플라즈마를 이용한 친수성 처리관의 증발열전달량은 평활관에 비해 약 25-44% 정도 향상된 열전달 성능을 보였다.
- (2) 증발기 관내측 고온수 유량이 증가할수록 증발열전달량은 증가하였으며, 레이놀즈 수가 14,000이상의 범위에서는 증발열량의 증가가 둔화됨을 알 수 있었다. 또한, 레이놀즈 수가 증가할수록 기존 평활관 보다 친수성 처리관의 증발열량 증가폭도 증가하였으나, 증가폭은 레이놀즈 수 10,000이상에서는 일정한 경향을 보였다.
- (3) 증발기 입구온도가 일정한 조건에서 시험체적내 증발압력이 증가하면 높은 증발온도에서 냉매가 증발하므로 증발열전달량은 완만하게 감

소하였다.

참고문헌

1. Chun, K. R. and Seban, R. A., 1971, Heat Transfer to Evaporating Liquid Films, J. Heat Transfer, pp. 391-396.
2. Parken, W. H., Flecture, L. S., Sernas, V., and Han, J. C., 1990, Heat Transfer Through Falling Film Evaporation and Boiling on Horizontal Tubes, J. Heat Transfer, Vol. 112, pp. 744-750.
3. Sernas, V., 1979, Heat Transfer Correlation for Subcooled Water Films on Horizontal Tubes, J. Heat Transfer, Vol. 101, pp. 176-177.
4. Lorenz, J. J. and Yung, D., 1979, A Note on Combined Boiling and Evaporation of Liquid Films on Horizontal Tubes, J. Heat Transfer, Vol. 101, pp. 178-180.
5. Fujita, Y. and Tsutsui, M., 1997, Evaporation Heat Transfer of Falling Films on Horizontal Tubes, JSME J. Series B, Vol. 63, No. 609, pp. 213-218.
6. Schulz, V. N., Edwards, D. K., and Catton, I., 1977, Experimental Determination of Evaporative Heat Transfer Coefficients on

- Horizontal Threaded Tubes, AIChE Symposium Series, Vol. 73, pp. 223-227.
7. Fletcher, L. S., Sernas, V., and Parken, W. H., 1975, Evaporation Heat Transfer Coefficients for Thin Sea Water Films on Horizontal Tubes, Industrial and Engineering Chemistry, Process Design and Development, Vol. 14, pp. 411-416.
 8. Chyu, M. C. and Bergles, A. E., 1989, Horizontal-Tube Falling-Film Evaporation With Structured Surfaces, J. Heat Transfer, Vol. 111, pp. 518-524.
 9. Kim, N. H., 1998, Enhancement of thin film evaporation on low-fin tubes, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 10, No. 6, pp. 674-682.
 10. Koh, S. K., Kim, K. H., Choi, W. K., Choi, S. C. and Ha, S. C., 1998, Wettability hydrophilic surface formation by ion assisted reaction, Proceedings, Int. Conference and Exhibit, Heat exchangers for sustainable development, Lisbon, Portugal, pp. 593-612.
 11. Ha, S. C., Kim, C. H., Ahn, S. P. and Dreitser, G. A., 1998, Condensate Drainage Characteristics of Plate Fin-and-Tube Heat Exchanger, Int. Conference and Exhibit, Heat exchangers for sustainable development, Lisbon, portugal, pp. 423-430.