

가공관의 외벽에서 친수성 표면처리가 증발열전달에 미치는 영향

박노성* · 황규대* · 김호영* · 강병하* · 정진택**

(2000년 10월 12일 접수, 2001년 3월 20일 심사완료)

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

Nho Sung Park, Kyu Dae Hwang, Ho-Young Kim, Byung Ha Kang and Jin Taek Chung

Key Words: Hydrophilic Surface Treatment(친수성 표면처리), Absorption Refrigerator(흡수식 냉동기), Evaporation Heat Transfer(증발열전달), Overall Heat Transfer Coefficient(총괄열전달계수)

Abstract

Experiments have been carried out to investigate the evaporation heat transfer characteristics of various tubes on which hydrophilic surface treatment using plasma was employed. Spiral, corrugated and low-finned tubes were selected as test tubes. The evaporator tubes were bundled to form three rows of tubes connected in series, with each row being 400mm long. The results obtained indicate that hydrophilic treated tubes tested exhibit better evaporation heat transfer performance as compared with untreated tubes. It is found that the high wettability of the surface obtained through hydrophilic treatment induces film flow onto the tubes during the evaporation process, while sessile drops are formed on untreated tubes.

1. 서론

패적인 생활 환경의 추구하고 에너지 관련 산업의 발전으로 공기조화 및 냉동 시스템의 수요가 급속히 증가하는 추세이다. 이러한 열시스템에서는 유체 사이의 열교환이 필수적으로 수반되며, 효과적인 열교환을 위해 여러 가지 형태의 열교환기가 용도에 따라 사용되고 있다. 최근 환경보호정책으로 수요가 급증하고 있는 흡수식 냉동기에서도 압력 손실에 의한 성능 저하가 비교적 적은 유하액막식 원통-관 열교환기를 증발기와 흡수기 등 주요 요소기에 사용하고 있다.⁽¹⁾ 그러나 흡수식 시스템은 증기 압축식에 비해 부피가

크기 때문에 고성능, 소형화에 대한 연구가 절실한 상황이다. 컴팩트한 시스템 제작을 위해서는 열교환기의 성능 향상을 필요로 하는데 일반적인 전열촉진방법으로 사용되는 것이 기계적 가공에 의한 전열관의 열교환면적 확대방법과 계면활성제를 관 외벽에 코팅하거나 흡수제에 첨가시켜 열경계층을 감소시키는 화학적 방법⁽²⁾ 등이 있다.

가공관 외벽에서의 증발열전달에 관한 연구는 Fletcher 등⁽³⁾이 평활관 외벽에 흡을 내어 증발열전달계수를 가공전에 비해 2.5배 향상시킨 것을 비롯하여 많은 연구가 진행되고 있다.^(4,5) 국내에서는 김내현⁽⁶⁾이 수평 로우핀 관의 액막증발에 관한 실험적 연구를 수행하여 평활관에 비해 로우핀 관의 열전달계수가 60-100% 정도 향상된 결과를 얻었다. 한편, 계면활성제를 이용하는 방법은 흡수식 시스템의 증발기나 흡수기에서와 같이 관 외벽에서 냉매가 흘러내리면서 열 및 물질전달이 발생하는 경우, 코팅된 계면활성제가 냉매

* 책임저자, 회원, 국민대학교 기계자동차공학부
E-mail : bhkang@kookmin.ac.kr

TEL : (02)910-4681 FAX : (02)910-4839

* 한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

** 고려대학교 기계공학과

에 용해되어 친수성능이 시간경과에 따라 급격히 저하되며 환경오염의 문제점도 있다.

최근 이러한 문제점을 해결한 친수성 표면처리 방법이 Koh 등⁽⁷⁾에 의해 개발되었다. 이 표면처리 기술은 플라즈마를 이용한 방법으로 진공조내에 처리하고자 하는 금속재료를 고정하고 진공펌프를 이용하여 비교적 저진공상태(10-3 mmHg 이하)를 유지시키고 고분자 중합기체와 반응성 기체를 주입한다. 가스주입이 완료되면 금속재료의 양 전극에 전압을 인가하여 DC방전 또는 RF방전을 통해 생성된 플라즈마로 금속표면에 친수성을 갖는 고분자 중합막을 형성시키는 방법이다. 형성된 플라즈마 고분자층은 동적 접촉각(dynamic contact angle) 측정시 30° 이하의 후퇴 접촉각(receding contact angle)값을 지니는 우수한 친수 특성을 가지게 되는데 친수특성을 유발하는 높은 표면에너지는 표면층의 친수성 작용기(C-N, C-O, N-H)의 형성으로부터 기인된다. 따라서 계면활성제의 표면 코팅방법에 비해 우수한 열 및 물질전달 성능과 물리적, 화학적으로 안정된 친수성능을 유지하는 기술이다.

이 표면처리 기술의 성능평가에 대한 실험적 검증은 Ha 등⁽⁸⁾이 에어컨 증발기용 판-관 열교환기에서의 응축수 생성 및 배수 특성에 관한 실험적 연구를 통해 계면활성제에 의한 친수성 처리방법 보다도 우수한 전열특성과 지속적인 성능 유지가 됨을 입증하였다. 또한, 정용욱 등⁽⁹⁾은 흡수기의 전열관을 플라즈마 친수성 처리하여 열 및 물질전달 계수가 30%이상 향상된 결과를 얻었으며, 박노성 등⁽¹⁰⁾은 플라즈마 친수성 표면처리가 평활관 외벽에서 증발열전달계수에 미치는 영향을 실험하여 약 25-44% 증발성능이 향상된 실험결과를 얻었다. 그러나 실제 산업용 열교환기의 전열관은 가공관을 주로 채택하고 있기 때문에 플라즈마 친수성 처리로 접촉각이 변화된 가공관에 대한 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 여러 가지 가공관을 플라즈마 친수성 처리하여 흡수식 냉동기의 증발기용 실험장치에 장착한 후, 관 외벽에서 변화된 접촉각이 증발기 입구온도와 증발기 관내측 유량 및 시험체적내 증발압력 등의 변화에 따라 어떠한 증발열전달 특성을 가지고 있는가에 대해 비교 실험하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구의 실험장치는 흡수식 냉동기의 주요 열교환기에서 직접적인 냉동이 일어나는 증발기 부분을 간이 제작한 것이다. Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 분사된 냉매(증류수)가 관 외벽에서 증발되는 증발기, 발생된 증기를 다시 응축시키는 응축기, 증발기 표면에 균일한 냉매 분사를 위한 노즐분사장치, 시험체적내 일정 압력유지를 위한 진공장치, 온도 및 유량 측정장치 등으로 구성되어 있다.

증발기 부분은 시스템 내부의 증발온도보다 높은 고온수가 공급되도록 전기히터(3 kW)가 장착된 항온조와 증발기 관내로 고온수를 유입시키기 위한 순환펌프, 정밀한 유량 측정을 위한 유량계(0.18~0.96 m³/h) 등으로 구성되어 있다. 냉매의 증발에 의해 냉각된 고온수는 항온조로 유입되어 재순환한다.

응축기 부분은 일정한 온도의 냉각수 공급과 순환을 위한 냉각기(3 RT)와 순환펌프로 구성된다. 냉각수의 순환경로는 유량계를 지나 응축기 관내로 유입되고 증발기에서 발생된 증기와 열교환을 통해 가열된 후, 다시 냉각기로 유입된다.

또한 진공펌프와 진공게이지, 진공밸브를 장착하여 시험체적 내부를 실험조건에 해당하는 진공 압력상태로 유지하였다. 분무형 분사노즐을 전열관의 150 mm 상단에 120 mm 간격으로 3개 설치하여 전열관 외벽에 균일한 냉매 분사가 되도록 하였으며, 분사 상태는 가시창을 통해 육안으로 관찰하였다. 그리고, 열교환기 입·출구 온도와 노즐입구온도 측정을 위해 T형 열전대(입·출구 상대온도 편차 ±0.1°C)를 설치하였다.

본 연구에서의 실험조건은 Table 1과 같으며 실험 방법은 먼저 전기히터가 장착된 항온조로부터 고온수를 증발기 관내로 순환시키고, 냉각기에 의해 일정한도로 유지되어 있는 냉각수를 응축기 관내로 순환시킨다. 고온수와 냉각수의 유량은 전자저울로 보정된 유량조절밸브를 사용하여 정확한 유량이 일정하게 유입되도록 한다. 진공펌프의 운전으로 시험체적 내부가 설정압력이 되면 노즐에 연결된 고압펌프를 가동시켜 증발기 외벽에 냉매를 분사시킨다. 이 때 분사된 냉매가 완전 발달된 유동으로 관 외벽을 통해 전부 흘러 내린다고 가정하면 액막레이놀즈수(Re_f)는 8.68이

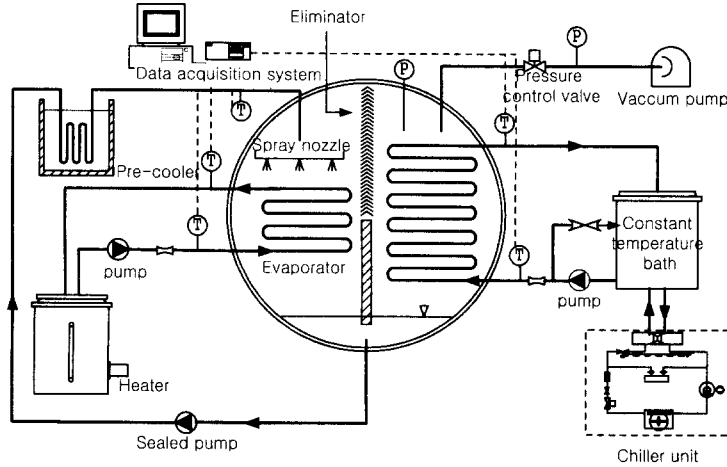


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

Table 1 Experimental conditions

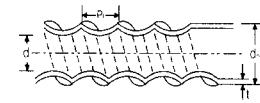
Component	Parameter	Value
Condenser	Inlet temperature (°C)	15 ± 0.5
	Flow rate (ℓ/min)	3.9 ± 0.1
	Heat exchange area (m ²)	0.2154
Evaporator	Inlet temperature (°C)	40 ~ 60
	Flow rate (ℓ/min)	0.928 ~ 5.22
	Heat exchange area (m ²)	0.0479
	Pressure (Torr)	17.5 ~ 55.3
Nozzle	Inlet temperature (°C)	20 ± 0.5
	Flow rate (ℓ/min)	0.24
	Spray angle	60 °

고 액막두께는 약 100 μm로 계산된다. 증발된 냉매는 엘리미네이터(eliminator)를 지나 응축기에서 응축된다. 한편, 고압펌프를 지나면서 증류수는 마찰에 의해 온도가 상승하므로 펌프출구와 노즐 입구 사이에 예냉장치를 설치하여 노즐입구온도가 항상 일정하게 유지되도록 한다.

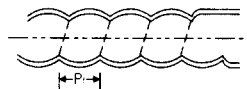
이상의 방법으로 실험장치를 20여분간 가동하여 모든 실험조건이 정상상태에 도달하면, 5분 동안 계속된 실험데이터를 데이터 취득시스템(Yokogawa, DR 230)과 컴퓨터에 저장한다.

3. 실험 전열관

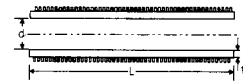
본 연구에 사용된 전열관의 종류는 Fig. 2와 같다. 성능 비교의 기준관으로 평활관을 사용하였으며, 가공관으로는 현재 산업체에서 널리 사



(a) Spiral tube



(b) Corrugated tube



(c) Low-finned tube

Fig. 2 Schematic of test tubes

용되고 있는 스파이럴(spiral) 관, 콜리게이트(corrugated) 관, 로우핀(low-finned) 관 등의 3 종류를 선정하였다.

각각의 전열관에 대한 자세한 사양은 Table 2와 같다. 평활관과 가공관의 가공되지 않은 부분의 관외경은 모두 1/2" (Ø12.7 mm)이며, 로우핀관의 경우 일반적으로 사용되는 26 fpi(fins per inch)를 선정하였고, 핀의 높이는 1 mm이다. 콜리게이트 관과 스파이럴 관의 경우 관내경의 변화를 고려하여 관내 유속과 레이놀즈수 계산시 평균치를 사용하였다.

Table 2 Specification of test tubes

Type	d _o	d _i	t	P _r	L
Spiral tubes	12.7	7	0.6	6.2	400
Corrugated tubes	12.7	10.2	0.6	6.4	400
Low-finned tubes	12.7	8.5	1.1	26 fpi	400

d_o:Outside diameter(mm), d_i:Inside diameter(mm)

t:Thickness(mm), P_r:Groove pitch(mm)

증발기 전열관은 관외경(Ø12.7 mm), 길이(400 mm)의 직관을 3열 수평배열한 형태로 제작하였다. 본 연구에서는 박노성 등⁽¹⁰⁾의 실험적 연구를 통해 우수한 열전달 성능이 입증된 친수성 처리 조건으로 전열관을 플라즈마 친수성 처리하여 관 외벽에서의 접촉각을 감소시켰다. 실제로 접촉각의 변화를 측정된 결과, 동판 기준으로 처리된 60-65°의 접촉각이 10-15°로 감소됨을 확인하였다.

한편, 정확한 증발열전달 성능 측정을 위하여 응축기 부분은 관외경(Ø12.7 mm), 길이(400 mm)의 동관을 3×5열로 배치하여 증발기의 열교환 면적보다 5배정도 크게 제작함으로써 증발된 냉매가 응축기에서 충분히 응축되도록 하여 불응축 냉매 증기로 인한 영향을 최소화하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 실험결과의 해석

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

$$Q = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (W) \quad (1)$$

여기서, \dot{m} 는 증발기 관내유량, T_{in} 와 T_{out} 는 각각 증발기 입구와 출구의 온도이다. 총괄 열전달계수를 포함하는 UA는 Q값을 사용하여 다음과 같이 구하였다.

$$UA = \frac{Q}{\Delta T_{lm}} \quad (W / ^\circ C) \quad (2)$$

여기서, ΔT_{lm} 은 대수평균 온도차(LMTD) 방법으로 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{out} - T_{in})}{\ln \left[\frac{(T_{out} - T_{sat})}{(T_{in} - T_{sat})} \right]} \quad (^\circ C) \quad (3)$$

여기서, T_{sat} 는 증발압력에 따른 포화온도이다.

또한, 레이놀즈수는 식 (4)와 같이 정의하였다.

$$Re = \frac{\rho d_i V}{\mu} \quad (4)$$

여기서, ρ 와 μ 는 고온수의 밀도와 점성계수이며, V 는 관내 평균유속이다.

4.2 실험결과 및 토의

본 실험에서는 플라즈마를 이용한 친수성 처리로 변화된 관 외벽에서의 접촉각이 여러 가지 가공관의 증발열전달에 미치는 영향을 파악하고자 증발기 입구온도, 증발기 관내 유량, 시험체적내 증발압력의 변화 등을 변수로 실험하여 다음과 같은 실험결과를 얻었다.

우선 증발압력과 증발기 입구온도를 각각 31.8 Torr(증발온도 30°C)와 50°C로 유지시킨 상태에서 증발기 관내의 레이놀즈수 증가가 증발열전달에 미치는 영향을 Fig. 3에 도시하였다. 그림에서 HPT(hydrophilic treatment)는 친수성 처리된 관을 의미한다. 관내 레이놀즈수가 증가할수록 증발열전달량도 증가하였으며, 레이놀즈수가 15,000 이상에서는 증발열량의 증가가 둔화되지만 각 가공관의 성능차이가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서는 다른 변수에 대한 실험조건 설정시 레이놀즈수가 15,000이 되도록 증발기 관내측 유량을 설정하였다. 이때 전열관내의 유속은 평활관과 콜리게이트 관의 경우 약 0.8 m/s, 스파이럴 관과 로우핀 관의 경우 약 1 m/s이다. 여기서, Fig. 2에서 볼 수 있듯이 스파이럴 관과 콜리게이트 관의 관내 직경은 일정하지 않으므로 돌출 부분과 안지름을 산술 평균하여 관내 유속과 레이놀즈수 계산시 사용하였다.

증발기 관내 유량의 증가에 따른 UA값(총괄열

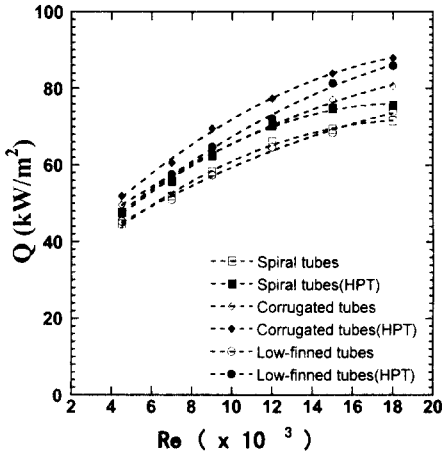


Fig. 3 Effect of water mass flow rate on evaporation heat transfer.

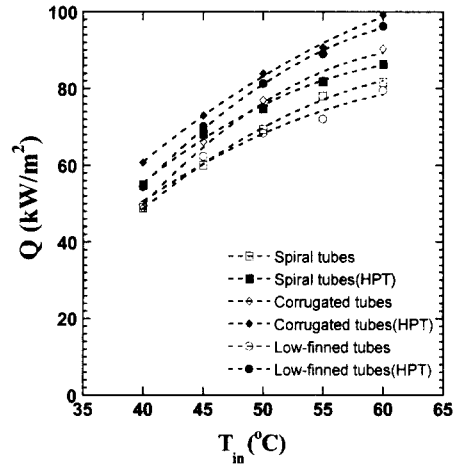


Fig. 5 Effect of water inlet temperature on evaporation heat transfer

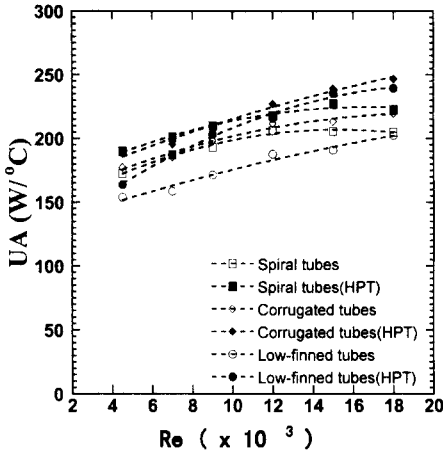


Fig. 4 Effect of water mass flow rate on UA

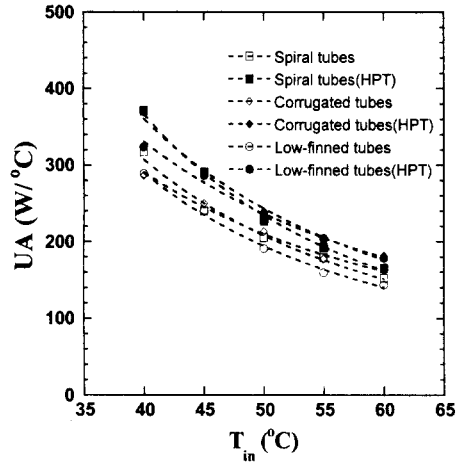


Fig. 6 Effect of water inlet temperature on UA

전달계수×전열면적)의 변화를 Fig. 4에 도시하였다. 증발기 관내 유량 전 범위에서 UA값은 완만하게 증가하는 경향을 보이고 있으며, 친수성 처리에 따른 접촉각의 감소로 UA값은 비처리관에 비해 스파이럴 관 6-11%, 폴리카이트 관 5-12%, 로우핀 관 7-23% 정도 증가하였다.

Fig. 5는 시험체적의 증발압력이 31.8 Torr일 때 증발기 입구온도 증가에 따른 영향을 나타낸 것이다. 증발기 입구온도가 40°C에서 60°C까지 증가함에 따라 증발열전달량도 점진적으로 증가

하며 친수성 처리된 경우, 스파이럴 관 약 10%, 폴리카이트 관 10-24%, 로우핀 관 10-23% 정도 비처리관에 비해 향상되었다. 이것은 친수성 처리를 통해 감소된 접촉각으로 인해 관 외벽에서 얇은 두께의 액막을 형성하면서 넓게 퍼지기 때문에 열저항이 감소되어 전열성능이 증가된 것으로 생각된다.

Fig. 6은 증발기 입구온도의 증가에 따른 증발열전달량을 UA값으로 계산한 결과이다. Fig. 5에서의 경향과는 반대로 증발기 입구온도가 증가할

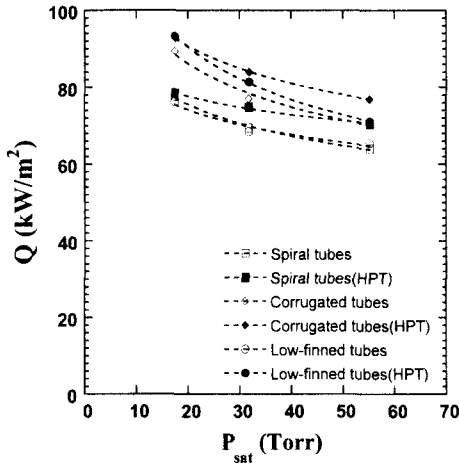


Fig. 7 Effect of evaporation pressure on evaporation heat transfer

수축 UA값이 감소하였다. 이것은 UA값이 관외측과 관내측 열전달계수의 총합이기 때문에 관외측 조건이 일정한 경우, 관내측 물의 Pr수가 온도 증가에 따라 감소하기 때문에 이러한 경향을 나타낸 것이다. UA값은 친수성 처리된 가공관이 비처리관에 비해 스파이럴 관 8-21%, 폴리게이트 관 12-29%, 로우핀 관 12-28% 정도 각각 증가되었다. 시험체적내 증발압력의 변화가 증발열전달에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 실험조건은 노즐입구온도 20℃, 증발기 입구온도 50℃로 유지시킨 상태에서 시험체적내 압력을 17.5, 31.8, 55.3 Torr로 변화시켰다. 이 때의 증발온도는 각각 20, 30, 40℃이다. 실험결과로부터 시험체적내 증발압력이 증가할수록 증발열전달량은 완만하게 감소하는 경향을 보였다. 이것은 시험체적 안의 증발압력이 높을수록 냉매가 높은 포화온도에서 증발하기 때문에 증발기의 입구온도와 증발온도의 차이가 작아진 것에 기인된 결과로 사료된다.

노즐입구온도와 증발기 입구온도가 일정한 조건에서 시험체적내 증발압력의 변화가 UA값에 미치는 영향을 Fig. 8에 도시하였다. 시험체적내 증발압력이 높을수록 UA값은 증가하는 경향을 보였으며, 친수성 처리후 UA값이 처리전에 비해 스파이럴 관 5-27%, 폴리게이트 관 5-12%, 로우핀 관 19-26%정도 향상되었다.

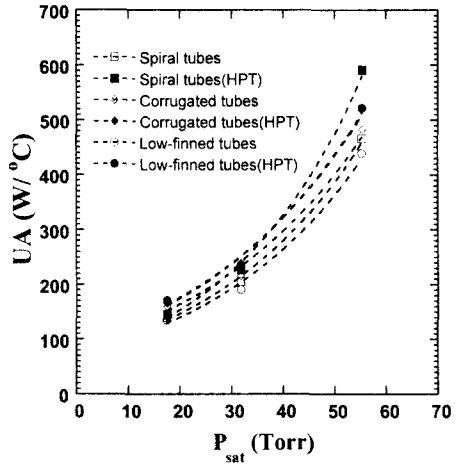


Fig. 8 Effect of evaporation pressure on UA

5. 결론

본 연구에서는 여러 가지 가공관을 증발기의 전열관으로 채택하여 플라즈마를 이용한 친수성 처리로 변화된 관 외벽에서의 접촉각이 증발열전달에 미치는 영향에 관한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 증발압력이 일정한 상태에서 증발기 입구온도를 증가시키면 증발열전달량도 점진적으로 증가하였으며, 친수성 처리로 접촉각이 감소되어 증발열전달량이 처리전에 비해 스파이럴 관 약 10%, 폴리게이트 관 10-24%, 로우핀 관 10-23%정도 향상되었다.

(2) 증발기 입구온도가 증가함에 따라 증발열전달량도 증가하지만 UA값은 감소하는 경향을 보였다.

(3) 증발기 관내측 유량이 증가할수록 증발열전달량도 증가하였으나, 레이놀즈수가 15,000이상의 범위에서는 증발열전달량의 증가폭이 둔화됨을 알 수 있었다.

(4) 증발기 입구온도가 일정한 조건에서 증발압력이 증가할수록 증발열전달량은 감소하는 경향이 파악되었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 특정연구개발사업 중

국가연구실지정사업으로 지원되어 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) 이상천, 1998, "공기조화 및 냉동 시스템용 원통다관용열교환기," 공기조화·냉동공학, 제27권, 제3호, pp. 209~217.
- (2) Yoon, J. I., Kwon, O. K., Moon, C. G., and Kashiwagi, T., 1999, "The Effect of Surfactant in the Absorptive and Generative Processes," *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 3, pp. 264~272.
- (3) 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.
- (4) Chyu, M. C. and Bergles, A. E., 1989, "Horizontal-Tube Falling-Film Evaporation With Structured Surfaces," *J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 518~524.
- (5) 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.
- (6) 김내현, 1998, "낮은 핀관의 액막 증발 촉진에 관한 연구," 공기조화·냉동공학 논문집, 제10권, 제6호, pp.674~682.
- (7) 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," *Proc. of Int. Conference and Exhibit, Heat Exchangers for Sustainable Development*, pp. 593~612.
- (8) Ha, S. C., Kim, C. H., Ahn, S. P., and Dreitser, G. A., 1998, "Condensate Drainage Characteristics of Plate Fin-and-Tube Heat Exchanger," *Proc. of Int. Conference and Exhibit, Heat Exchangers for Sustainable Development*, pp. 423~430.
- (9) 정용욱, 설원실, 윤정인, 강병하, 1999, "하이드로필릭 코팅 흡수기의 열 및 물질전달 특성," 공기조화 냉동공학회 '99동계 학술발표회 논문집, pp.14~18.
- (10) 박노성, 황규대, 강병하, 정진택, 2000, "친수성 표면처리가 수평관 외벽의 증발열전달에 미치는 영향," 설비공학 논문집, 제12권, 제5호, pp. 525~532.