

LiBr/H₂O계 흡수기의 흡수촉진에 관한 실험적 연구

Experimental investigation of enhanced heat and mass transfer for LiBr/H₂O absorber

설 원 실*, 권 오 경*, 윤 정 인**
W. S. Seol, O. K. Kwon, J. I. Yoon

Key words : Absorption chiller-heater(흡수식 냉온수기), Absorber(흡수기), Floral tube(Floral관), Heat transfer(열전달), Mass transfer(물질전달), Lithium Bromide solution(LiBr 수용액)

Abstract

An experimental study of the absorption process of water vapor into Lithium Bromide solution was performed. For the purpose of development of high performance absorption chiller-heater utilizing Lithium Bromide solution as working fluid, the absorber is the most effective to improve the performance of an absorber because it requires the largest heat transfer area in an absorption chiller-heater system. This paper introduces bare tube and floral tube for the absorber of absorption chiller-heaters. Floral tube has higher heat and mass transfer performance than bare tube conventionally used in absorbers and the it is expected to perform high heat and mass transfer. This paper will provide important information on the selection of absorber tubes in commercial absorption chiller-heaters.

————— 기 호 설 명 —————

d : 흡수기 전열관 지름, m
 G_R : 냉매증기 흡수량, kg/s
 K : 열관류계수, kW/(m² · K)
 L : 흡수기 전열관 길이, m
 Ng : 그루브 수
 Q : 교환열량, kW

ΔT_{lm} : 대수평균 온도차, °C

그리스문자

β : 물질전달계수, m/h
 ρ : 밀도, kg/m³
 ξ : 측정 평균농도, wt%
 ξ^* : 평형농도, wt%
 $\Delta \xi_{lm}$: 대수평균 농도차, wt%

* 부경대학교 대학원
 ** 정회원, 부경대학교

하첨자

- A : 흡수기
- c : 냉각수
- i : 입구(내부)
- m : 평균
- o : 출구(외부)
- s : 흡수용액

1. 서 론

최근 세계적으로 오존층파괴, 온실효과 등의 환경문제에 대한 관심이 높아지고 있으며, 국내에서는 에너지의 유효이용과 여름철 하계전력수요 피크 경감에 대한 기술개발의 중요성이 점점 커지고 있다. 이러한 요구에 직면하여 프레온계 냉매를 쓰지 않으며 각종 폐열 및 가스를 사용하는 흡수식 냉온수기 및 열펌프에 관한 연구가 각계에서 활발히 진행되고 있다. 흡수식 냉온수기는 최근의 냉열기기 신장에서도 가장 주목되고 있는 기기의 하나로써 일본에서는 대형 공조기기 시장의 대부분을 차지하고 있으며 코제너레이션 시스템의 도입 등 신기술의 발전에 따라 다시 한번 그 성장이 기대되고 있다. 흡수식 냉온수기는 증발기, 흡수기, 재생기, 응축기의 열교환기로 이루어져 있으며, 이 중에서 흡수기는 체적이 상당히 크고, 전체 성능에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서 흡수기의 성능향상이 흡수식 냉온수기의 성능향상과 직결되며, 장치의 소형화 및 고효율화를 위해서는 흡수기의 열 및 물질전달특성을 명확히 규명해야 한다. 그러나 흡수기에서 냉매증기가 흡수될 때에는 발열을 동반한 열이동 및 물질이동이 동시에 일어나기 때문에 열이동만을 고려한 기존의 전열관은 적용의 한계가 있다. 따라서 흡수식 냉온수기의 성능향상을 위해서는 흡수현상에 대한 명확한 특성해석과 더불어 유효한 전열관의 구조를 밝히는 것이 중요한 과제이다.

흡수기에서의 흡수 및 전열현상에 대한 연구는 일본뿐만 아니라 미국, 유럽 등 세계적으로 활발히 이루어지고 있다. 최근 일본의 경우 기존관에 대한 성능평가 및 신형관에 대한 연구⁽¹⁻⁵⁾와 관군에 대한 실험 및 해석⁽¹⁾ 또한 활발히 이루어지고 있다.

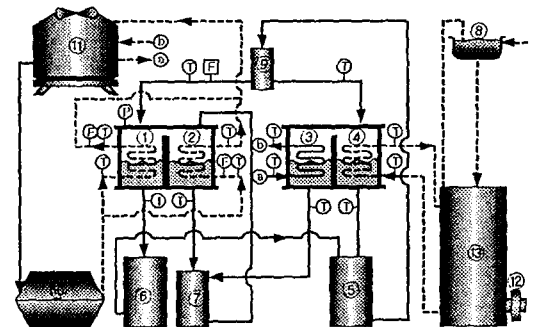
국내의 경우, 실제 사용되는 관의 대부분이 수평관임에도 불구하고, 이에 대한 기존관의 재평가와 고성능 전열관 개발에 관한 연구는 비교적 드물고, 공냉을 위한 수직관에 대한 연구⁽⁶⁻¹³⁾가 주류를 이루고 있다.

따라서, 본 연구에서는 실제 국내에서 사용되는 흡수식 장치와 동일한 구조의 냉동능력 7kW급 실험장치를 이용하여 수평관에서의 흡수 열 및 물질전달 촉진에 관한 실험을 수행하였다. 본 연구는 우선 기존에 사용되고 있는 흡수전열관의 열 및 물질전달을 평가하고, 젖음성 실험을 기초로 새로운 전열관을 개발하여 흡수성능을 평가함으로써 궁극적으로 흡수식 냉온수기의 원가절감, 고성능화 및 컴팩트화를 위한 설계자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig.1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로써 실험장치는 흡수기(1), 증발기(2), 응축기(3), 재생기(4), 농용액탱크(5), 희용액탱크(6), 냉매탱크(7), 냉각수 탱크(10), 냉각탑(11), 히터(12) 및 온수탱크(13)와 그들을 연결하는 배관으로 구성되어 있다. 시스템내의 진공을 유지하기 위



⑤ Water flow meter ⑥ Solution flow meter ⑦ Thermo couple ⑧ Pressure gague

- 1 Absorber
- 2 Evaporator
- 3 Condenser
- 4 Generator
- 5 Strong solution tank
- 6 Weak solution tank
- 7 Refrigerant tank
- 8 Expansion tank
- 9 Steady head tank
- 10 Cooling water tank
- 11 Cooling tower
- 12 Heater
- 13 Hot water tank

Fig.1 Experimental apparatus

하여 진공펌프가 설치되어 있으며, 기기내의 압력을 알 수 있도록 진공용 압력계가 설치되어 있다. 또한, 흡수기에는 냉각수가, 증발기에는 냉수가 순환될 수 있도록 순환용 배관이 설치되어 있으며, 흡수기, 증발기, 재생기, 응축기 및 탱크류의 각 수·용액배관의 입·출구 온도측정을 위하여 열전대(copper-constantan)를 설치하였다. 그리고 냉각수, 냉수 및 용액유량을 측정하기 위하여 수유량계 및 용액유량계를 설치하였다.

실험 장치는 하나의 1중효용 흡수식 냉동기로 간주하여 약 2USRT(7kW)정도의 냉동용량을 가지도록 설계 제작하였다. 흡수기의 본체길이는 400mm이며, 흡수 전열관은 유효길이 360mm, 외경 15.88mm의 6열 8단으로, 전열관의 배열구조는 엇갈림 배열의 수평관구조로 구성되어 있다. 최상부에 산포관(tray)을 6열 배치하고, 산포구는 외경 3mm로 산포관의 길이방향으로 40mm피치로 설치되어 있으며, 이들 치수는 실제 기기에 적용되는 것과 동일하며, 용액은 순차적으로 하단으로 자유낙하한다. 한편, 냉각수는 최하단 전열관으로부터 12본씩을 1패스(pass)로 하여 총 4패스(pass)로 흐른다. 흡수기 전체로 보면 용액과 냉각수는 직교류(cross flow)로 흐르도록 되어 있다.

2.2 실험방법

실험은 3가지 과정으로 나누어 진행하였다. 즉 실험조건 설정과정과 성능 측정과정, 용액 재생과정으로 진행하였으며, 실험조건 설정과정은 다음과 같이 진행하였다. 먼저, 진공펌프로 계내가 충분히 진공이 되도록 한후 농용액탱크 내에 있는 용액을 용액펌프로써 순환시킨다. 이때 용액은 적정온도의 온수 및 냉각수가 흐르는 열교환기를 통하여 원하는 온도로 설정된후 농용액 탱크에 저장된다. 온수 온도는 온수가열히터에서 써모스텝으로 조정하였으며, 냉각수 온도는 냉각탑과 냉각수 탱크에서 조정하였다. 적정온도로 맞추어진 온수 및 냉각수는 펌프에 의해 각 열교환기로 이동된다.

성능 측정과정은 농용액 탱크내의 농용액을 용액펌프를 이용하여 흡수기로 이송하여 흡수기 상부에서 시험전열관에 유하시켜 액막상으로 흐르게 하였다. 이때, 흡수기 입구의 용액유량과 흡수기 입구

및 출구의 용액 온도를 측정하였다. 농용액을 흡수기에 이송시킬 때에는 중간에 정수두탱크를 설치하여 유량이 일정하게 흐르도록 하였으며, 여분의 흡수용액은 바이패스관을 통해 농용액탱크로 되돌아오도록 하였다. 그리고 냉매탱크에 저장된 냉매는 냉매펌프를 이용하여 증발기로 보내어 증발기에서 증발되도록 하였다. 증발된 냉매는 흡수기에서 시험전열관을 유하하는 용액에 흡수되고, 증발하지 못한 냉매는 다시 냉매탱크로 유입된다. 냉매를 흡수하여 묽어진 용액은 회용액 탱크에 저장되며, 이때, 흡수기 출구의 샘플링 밸브에서 회용액을 취출하여 용액농도를 측정하였다. 냉각수 탱크의 냉각수는 펌프에 의해 증발기 및 흡수기로 이송되며, 흡수기에서의 냉각수는 관내를 흡수용액과 직교류로 흐른다. 흡수기에서 열을 얻은 냉각수와 증발기에서 열을 빼앗긴 냉수는 출구에서 합쳐져 냉각탑에서 다시 적정온도로 냉각된다. 이때 증발기와 흡수기 입구의 냉수 및 냉각수유량을 각각 측정하고 흡수기 입구와 출구 및 각 패스의 냉각수 온도를 측정하였다.

용액 재생과정은 먼저, 회용액 탱크에 모인 회용액을 회용액 펌프로써 농용액 탱크로 이송시킨다. 모든 회용액이 농용액 탱크로 이송되면, 용액 펌프로 농용액 탱크에 고인 회용액을 순환시켜 재생기 전열관 내를 흐르는 온수에 의해 가열되도록 하였다. 가열된 회용액은 냉매가 분리되어 농용액이 되고, 분리된 냉매는 응축기에서 냉각수에 의해 냉각, 응축되어 냉매 탱크에 저장되게 된다. 농용액은 샘플링 밸브로 취출하여 적정농도가 될 때까지 재생기와 농용액 탱크를 순환시켰다. 응축기로 유입되는 냉각수는 냉각수 펌프를 이용하여 장치 내로 순환되고, 다시 냉각탑에서 냉각된다. 온수는 시험조건 설정과정과 동일하게 온수가열히터로 가열하여 써모스텝으로 온도를 조정하였으며, Table 1은 본 연구에서 사용한 실험조건을 나타낸다.

3. 새로운 고성능 흡수관 개발

고성능 전열관 개발에 앞서 전열관에 대한 아이디어 스케치(idea scetch)는 무엇보다도 우선적으로 선행되어야 한다. 전열관의 전열성능은 보통 관

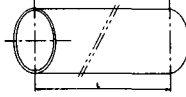

Table 1 Experimental conditions

Absorption pressure of absorber(mmHg)		8±1
Refrigerant	Evaporation temperature(°C)	8±1.5
LiBr-solution	Inlet concentration(wt%)	58±0.5
	Inlet temperature(°C)	40±0.5
	Mass flow rate(kg/s)	0.028~0.139
Cooling water	Inlet temperature(°C)	28±0.5
	Mass flow rate(kg/s)	0.56

의 상당전열면적(상당접수면적)에 비례하여 향상되는 것으로 알려져 왔으며, 이는 전열면적을 넓히는 방법과 접수율을 높임으로서 접수면적을 향상시키는 방법으로 나눌 수 있다. 이러한 상당전열면적의 향상을 위하여 전열관의 내·외부에 종·횡방향 또는 경사형의 요철을 가공함으로써 전열면적의 향상을 도모하는 것이 일반적이다. 단순히 전열성능의 향상만을 고려한다면 가능한 관두께에 비하여 최대한도로 높은 환을 가공하는 것이 효과적이라고 할 수 있으나, 전열관 내·외부의 압력차와 온도차이로 인해 실제시스템에서는 인장·압축 및 전단응력과 열응력의 값을 어느 수준 이하로 유지시킬 수 있는 입계두께(최소두께)가 필요하므로 무한정 높은 환의 가공은 불가능하다. 또한 고부식성의 물질이 내외에 접촉되는 흡수기 내의 전열관과 같은 경우는 부식으로 인한 손상을 고려하여야만 하기 때문에 입계두께의 설정은 중요한 인자가 된다. 이렇게 환높이 향상과 입계두께확보라는 상호 배치되는 설계요구사항을 동시에 해결하며, 제작 단가를 낮출 수 있는 방법으로서, 튜브 드로잉(tube drawing)과 튜브 싱킹(tube sinking) 등의 방법을 들 수 있다. 특히, 튜브 싱킹 공정에 의하면 각종 플로럴 튜브(floral tube)를 저가에 제작할 수 있으며, 베어 튜브(bare tube) 1차가공 방향과 동일한 방향으로 가공함으로써 횡방향 스트레인 증분이 없어 장기간 사용할 수 있는 장점이 있을 뿐만 아니라, 튜브의 입계두께를 확보함과 동시에 환효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서 개발한 흡수전열 촉진관은 접수율의 향상에 따른 접수면적의 확대에 초점을 두면서

Table 2 Specification of test tubes

Type	Appearance	Dimensions
Bare Tube		do=15.88 di=13.88 L=400
Floral Tube		do=15.88 di=13.88 Ng=11 L=400
do : Outside diameter (mm) di : Inside diameter (mm) L : Length (mm) Ng : Number of grooves		

전열면적을 고려하였으며, Table 2에 전열관의 상세를 나타내었다. 플로럴 튜브는 베어 튜브를 가공한 것으로 전열관 외표면에 11개의 골과 산을 주어 용액 하강시 용액의 시간지연 및 퍼짐성을 향상시켜 접수율의 향상을 도모하고, 용액의 교란작용을 촉진시켜 흡수성능향상을 꾀한 전열관이다. 여기서 기존의 로핀 튜브(lowfin tube)는 전조로 가공되어진 반면, 플로럴 튜브는 1회의 인발로 가공되어 진다.

본 연구는 고가인 흡수관의 원가절감을 위하여 기존의 두께 1.24mm 로핀 튜브를 두께 0.7mm이하의 플로럴 튜브로 대체 개발함으로써 재료 비용을 크게 줄이고, 가공공간이 많이 소요되는 로핀의 전조가공방식을 플러그형 드로잉 공정을 개발하여 가공성을 높임과 동시에 이로 인한 생산비용은 20% 이상 절감하는데 그 목적이 있다.

4. 열 및 물질전달계수의 산출

4.1 열관류계수

열교환기의 대수평균온도차 ΔT_{lm} 은 식 (1)과 같이 정의하였으며, 열관류계수 K 는 식 (2)로 부터 구하였다.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\{(T_{Asi} - T_{Acoo}) - (T_{Aso} - T_{Acoi})\}}{\ln\{(T_{Asi} - T_{Acoo}) / (T_{Aso} - T_{Acoi})\}} \quad (1)$$

$$K = \frac{Q}{\{\Delta T_{lm} \cdot A\}} \quad (2)$$

여기서, T_{Asi} 는 실험에서 측정된 흡수용액의 흡수기 입구온도, T_{Aso} 는 출구온도 및 T_{Acoi} 는 냉각수 입구온도, T_{Acoo} 는 출구온도, A 는 전열면적을 나타낸다.

4.2 물질전달계수

냉매증기와 흡수용액 사이에서 냉매물질 이동저항은 증기공간과 기·액계면간의 저항을 무시하여, 기·액계면과 흡수용액사이만을 고려하였다. 또한 유하액막에서 기·액계면은 기내압력과 평형으로 가정하여, 기·액계면의 평형농도(ξ^*)와 유하액막의 농도(ξ)와의 대수평균농도차 $\Delta \xi_{lm}$ 을 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$\Delta \xi_{lm} = \frac{\{(\xi_{Asi}^* - \xi_{Asi}) - (\xi_{Aso}^* - \xi_{Aso})\}}{\ln\{(\xi_{Asi}^* - \xi_{Asi}) / (\xi_{Aso}^* - \xi_{Aso})\}} \quad (3)$$

여기서, ξ_{Asi}^* , ξ_{Aso}^* 는 각각 유하액막 온도와 기내압력으로부터 구해지는 흡수기 입·출구에서의 기·액계면 평형농도이며, ξ_{Asi} , ξ_{Aso} 는 입·출구에서 실제 측정된 농도를 나타낸다. 이상의 상태치들을 이용하여 식 (4)와 같이 물질전달계수를 구하였다.

$$\beta = G_R / \{\rho_m \cdot \Delta \xi_{lm} \cdot A\} \quad (4)$$

여기서, G_R 은 냉매증기 흡수량이며, ρ_m 은 평균 용액밀도로 식 (5)로부터 구하였다.

$$\rho_m = (\rho_{Asi} + \rho_{Aso}) / 2 \quad (5)$$

여기서, ρ_{Asi} 는 흡수기 입구의 용액밀도, ρ_{Aso} 는 흡수기 출구의 용액밀도이다.

5. 실험결과 및 고찰

흡수식 냉온수기에서 전열관의 잦은 교체는 진

공압의 유지 때문에 많은 문제점을 안고 있다. 따라서 실제 장치에 도입되기 이전에 접수현상을 규명하는 것은 상당히 중요하다.

Fig.2와 Fig.3은 접수현상을 고려하여 기존 전열관과 신형 전열관의 상대적인 평가를 행한 후 고성능 전열관으로서의 타당성 여부를 평가하는 접수율과 접수면적 유동실험 결과로, 색소를 넣은 물(15~

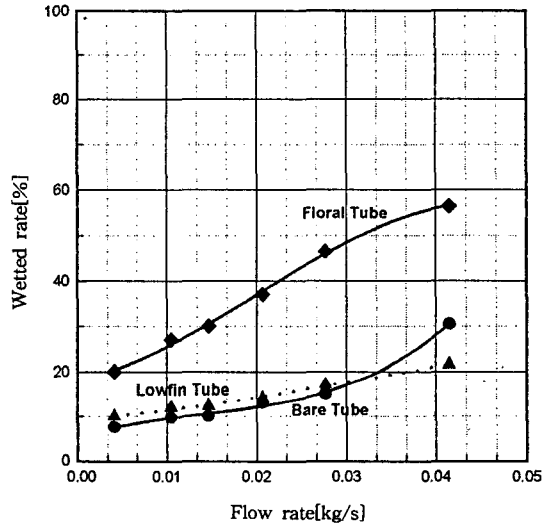


Fig.2 Wetted rate of each tube bases on flow rate

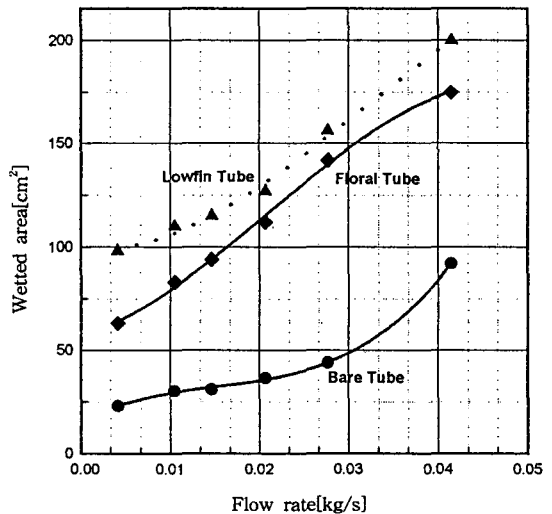


Fig.3 Wetted area of each tube bases on flow rate

150 l/h)로 기초 실험을 한 경우이다. 신형 전열관을 기존 전열관과 비교해 본 결과 접수율에 있어서는 플로럴 튜브가 기존 전열관에 비해 약 2배 가량 높게 나타났지만 접수면적에 있어서는 로핀 튜브가 플로럴 튜브보다 다소 높은 수치를 보였다. 이 실험에서 접수면적 자체만을 고려해 볼 때, 로핀 튜브가 유량의 차이에 따라 약간의 변동이 있으나 가장 좋게 나타났다. 그러나 실험에서의 접수현상 및 관 표 면에서 용액의 지연과 원가계산 등의 모든 면을 고려해 본다면 퍼짐성이 좋고 액막두께가 얇은 플로럴 튜브가 고성능 전열관으로서 상당히 기대할 만한 전열관이라 생각되어 개발된 여러 관 중에서 이 관을 택하였다.

Fig.4는 용액유량 변화에 따른 흡수기의 열교환량을 나타낸 것으로 이것은 각 관의 성능을 평가하는 지수로도 활용된다. 베어 튜브에 비해 플로럴 튜브는 비교적 높은 열교환량을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 플로럴 튜브의 형상으로 인해 용액이 관을 적시는 접수면적이 향상되었고, 아이디어 스케치에서 예상한 것과 같이, 용액이 관의 요철면에 지체하는 시간의 지연과 액막의 교란작용 촉진에 따라 열교환이 충분히 되었기 때문이라 생각된다.

Fig.5는 용액유량 변화에 따른 각 전열관의 열관류계수를 나타낸 것으로 그림에서와 같이 열관류계수는 두관 모두 용액의 액막유량이 커질수록 그 증

가율이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 용액의 액막유량이 적정 수준을 넘어가면 액막유량의 증가는 열관류계수 향상에 그다지 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 베어 튜브의 경우는 본 연구와 비슷한 조건에서 실험한 Furukawa⁽¹⁾의 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 플로럴 튜브의 경우 전체적으로 베어 튜브보다 약 40%정도 향상된 열관류계수값을 보여주고 있다. 이것은 관형상 변화에 따라 용액의 접수면적이 커지고, 용액의 체류시간 증가 및 용액층 교란작용의 증대에 따른 열전달 상승으로 생각된다.

Fig.6은 흡수용액의 액막유량을 변화시켰을 때 물질전달계수의 변화를 나타낸 것이다. 베어 튜브의 물질전달계수를 Furukawa⁽¹⁾와 Kawamata⁽²⁾의 실험치와 비교했을 때 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 베어 튜브의 경우와 비교할 때 플로럴 튜브는 용액유량에 따라 약 60%정도까지 높은 물질전달 성능을 나타내었다. 이것은 흡수용액이 플로럴 튜브 관길이 방향의 볼록(凸)부분으로부터 오버플로하여 오목(凹)한 부분으로 흘러들면서, 액막표면 근처에 분포하는 회용액층과 전열관표면 근처에 분포하는 농용액층을 교란시켜 물질이동을 촉진시키기 때문이라 생각된다. 또한 플로럴 튜브의 경우 액막유량이 증가하여도 물질전달계수의 증가율은 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있었다.

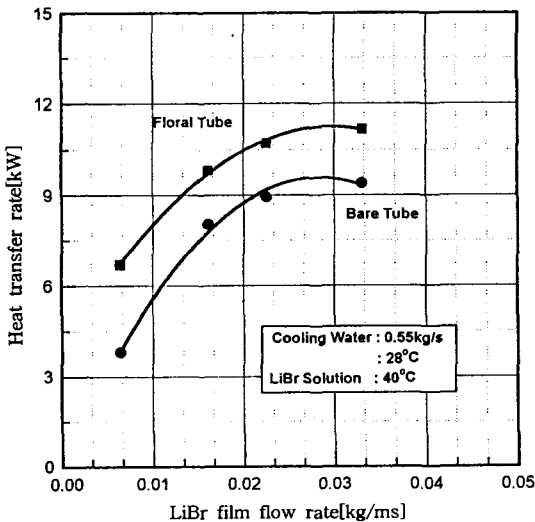


Fig.4 Heat transfer rate in the absorber

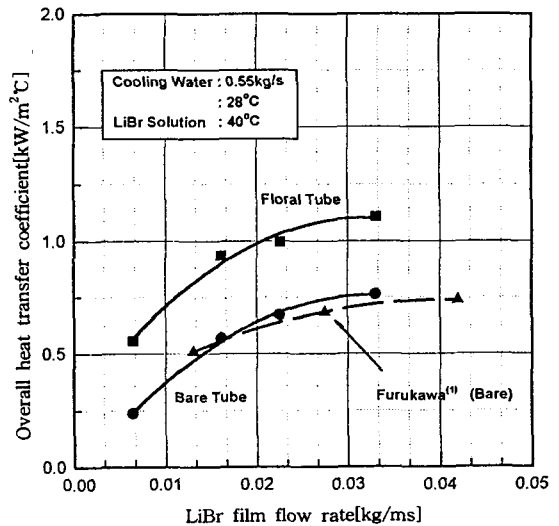


Fig.5 Variation of overall heat transfer coefficient

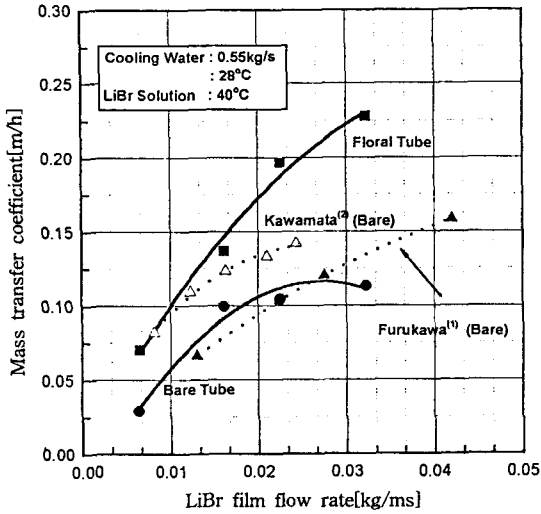


Fig.6 Variation of mass transfer coefficient

6. 결 론

흡수식 냉동기의 흡수기용 고성능 전열관 개발을 위하여 베어 튜브와 플로럴 튜브에 대한 열 및 물질전달실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 개발된 플로럴 튜브의 집수율은 베어 튜브에 비해 약 2배 가량 높게 나타났으며, 집수면적에 있어서는 로렌 튜브보다 약간 낮은 값을 나타내어 퍼짐성이 상당히 양호함을 확인할 수 있었다.

2) 본 연구에서 개발한 플로럴 튜브는 베어 튜브에 비해 열전달에서 약 40%, 물질전달에서 약 60% 정도 향상된 성능을 나타내어, 흡수 전열관으로 충분한 효과가 있음을 알 수 있었다.

3) 플로럴 튜브의 물질전달특성은 베어 튜브에 비해 액막유량이 증가하여도 물질전달계수의 증가율은 용액교란효과에 의해 거의 일정하게 유지되었다.

본 연구에서 개발한 신형 플로럴 튜브는 베어 튜브에 비해 약간의 가공비 증대로 월등한 흡수성능향상을 보여 실용화 측면에서 상당한 가능성을 가진 흡수 축진관임을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비(과제번호 971

-1006-037-2)지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 古川雅裕, 佐木直榮, 金子敏之, 野世溪精, 1993, "吸收冷温水機の吸収器用伝熱促進管", 日本冷凍協會論文集, Vol. 10, No. 2, pp. 219~226.
2. 川又治, 大谷忠男, 石塚伸明, 宮内徳雄, 1985, "吸收冷凍機の吸収器用高性能伝熱管の開発", 日本電線, No. 8, pp. 57~62.
3. Naoyuki Inoue, 1988, "Practical studies on absorbers in Japan", Refrigeration Engineering Division EBARA Corporation, pp. 1~19.
4. 永岡義一, 西山教之, 鯨坂和浩, 中村誠, 1987, "吸收冷温水機の高性能に関する研究開発(第3報)-吸収器・蒸發器の高性能化-", 東京カス株式会社技術研究所 研究報告, 第31號.
5. N. Isshiki, K. Ogawa, N. Sasaki, Y. Funato, 1991, "R & D of CCS(Constant Curvature Surface) tubes for absorption heat exchangers", Proceedings of Absorption Heat Pump Conference '91, Tokyo, Japan, pp. 377~382.
6. 박석호, 김현기, 김태진, 윤정인, 1997, "흡수기의 열물질전달 특성에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 1997년도 춘계학술대회논문집(II), pp. 96~101.
7. 윤정인, 오후규, 柏木孝夫, 1994, "스프링 삽입형 유하액막식 흡수기의 열 및 물질전달 특성", 대한기계학회논문집, 제19권, 제1호, pp. 1501~1509.
8. 조현철, 김중보, 정시영, 강상우, 이춘석, 1995, "LiBr계 용액을 사용한 수직관 흡수기의 열 및 물질 전달에 관한 연구", 공기조화·냉동공학 논문집, 제7권, 제2호, pp. 196~206.
9. 엄기찬, 柏木孝夫, 서정윤, 1993, "수직관내를 흘러내리는 액막식흡수기의 흡수 및 열전달 특성(제1보, 흡수특성)", 공기조화·냉동공학 논문집, 제5권, 제1호, pp. 1~9.

10. 엄기찬, 柏木孝夫, 서정윤, 1993, “수직관내를 흘러내리는 액막식흡수기의 흡수 및 열전달 특성(제2보, 열전달특성)”, 공기조화·냉동공학 논문집, 제5권, 제4호, pp. 257~264.
11. 엄기찬, 柏木孝夫, 서정윤, 1994, “수직관내를 흘러내리는 액막식흡수기의 흡수 및 열전달 특성(제3보, 증발기의 냉동능력과 흡수기의 난방능력)”, 공기조화·냉동공학 논문집, 제6권, 제3호, pp. 175~181.
12. 설신수, 고흥웅, 이상용, 1995, “LiBr-H₂O 흡수기 내부에서의 유동 및 열/물질전달 현상에 관한 실험적 연구(1)”, 공기조화 냉동공학회 1995년도 동계학술발표논문집, pp. 330~334.
13. 윤정인, 김태진, 이재승, 김재돌, 유선일, 1997, “수직 액막식 흡수기의 흡수특성”, 공기조화 냉동공학회 1997년도 하계학술발표회 논문집, pp. 392~397.