

# LiBr 수용액을 이용한 수평관 유하액막 증발의 촉진관 전열향상 특성

김 동 관\* · 김 무 환\*\*

(1997년 12월 29일 접수)

## Heat Transfer Enhancement Characteristics for Falling-Film Evaporation on Horizontal Enhanced Tubes with Aqueous LiBr Solution

Dong Kwan Kim and Moo Hwan Kim

**Key Words :** Falling-Film Evaporation (유하액막 증발), Aqueous LiBr Solution (리튬브로마이드 수용액), Evaporation Flux (증발유속), Film Reynolds Number (액막 레이놀즈수), Wall Superheat (벽면 과열도), Generator (발생기)

### Abstract

Falling-film evaporation experiments with aqueous lithium bromide (LiBr) solution were performed to investigate the heat transfer characteristics of enhanced copper tubes. Enhanced tubes (a knurled tube, a spirally grooved tube, and a tube coated with 20  $\mu\text{m}$  aluminum particles) and a bare tube were selected as test specimens. Averaged evaporation fluxes of water were obtained from horizontal tubes with various film Reynolds numbers, system pressures, LiBr concentrations and degrees of wall superheat. The enhanced performance of steam generation was compared between tubes with varying parameters. The knurled tube geometry showed the most excellent performance among the tubes tested. The specified enhanced tubes were more useful for generating steam on a low grade heat source such as waste heat.

### 기 호 설 명

$h_f$  : 액막 열전달계수,  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$   
 $p$  : 계내압력, Torr  
 $q''$  : 열유속,  $\text{W/m}^2$   
 $Re_f$  : 액막 레이놀즈수  
 $T_{sat}$  : 용액 포화온도,  $^{\circ}\text{C}$   
 $T_w$  : 전열관 벽면온도,  $^{\circ}\text{C}$   
 $\Delta T_{sat}$  : 벽면 과열도,  $^{\circ}\text{C}$   
 $w$  : LiBr 농도, wt%  
 $\mu_f$  : 수용액 점도,  $\text{kg/ms}$   
 $\Gamma$  : 전열관 단위길이당 액막 질량유량,  $\text{kg/m}$

### 1. 서 론

흡수식 열펌프는 저온의 열을 고온의 열로 변환시키는 냉난방 장치에 있어서 구동에 필요한 에너지 지원을 열에너지로 하여 냉매가 흡수제로 흡수 또는 분리되는 특성을 이용한 냉난방 기기를 말한다. 특히 이들 장치는 최근 오존층을 파괴하는 일부 프레온 냉매를 사용하는 전기구동 압축식 냉동기를 대체하고 하절기 피크전력을 감소하며, 에너지 수급균형에 기여하고 에너지원을 다변화 하기 위하여 개발되고 있는 냉난방기이다. 흡수식 열펌프 기기는 이미 19세기초에 개발되어 사용되어 왔고 그 작

\* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 포항공과대학교 기계공학과

동유체는 LiBr-water 계와 Water-ammonia 계가 채용되었으며 20세기 중반에 프레온계열 냉매의 개발로 성능면에서 유리한 증기압축식 냉난방 기기가 도입됨에 따라 흡수식 냉난방 기기는 이후 1980년대 초까지 발전이 중단된 상황이었다. 그러나 최근 들어 발견된 프레온 작동매체의 오존층 파괴특성과 이에 따른 지구온난화 문제가 제기되어 이의 대체 기기 개발이 시급한 과제로 대두되었다. 흡수식 열펌프 시스템은 설비의 간단성, 저렴한 운전유지비, 설비의 안전성 등의 장점을 가지고 있으며, 에너지원에 있어서 증기압축식 냉동기가 고급의 에너지원인 전기를 사용하는데 반하여 흡수식 열펌프 시스템은 태양열, 지열 및 폐열을 이용하여 고온의 온수를 생산한다든지 수증기를 생산할 수 있다는 측면에서 기존의 증기압축식 장치에 비해 유리한 점이 있다<sup>(1)</sup>

흡수식 냉난방 기기에서 채용하는 열교환 장치부는 크게 발생기(generator), 응축기(condenser), 증발기(evaporator), 흡수기(absorber) 등 네부분의 주된 열교환기부로 구성되어 있다. 이 중에서 리튬브로마이드-물 계를 채용하는 장치를 예로 들면 냉매인 물은 증발기, 흡수기, 발생기, 응축기를 순환하고, 흡수제인 LiBr 수용액은 흡수기, 발생기를 순환한다. 기본적인 흡수 사이클에서 증발기와 흡수기는 저온·저압 하에서 작동하고, 발생기와 응축기는 고온·고압 하에서 작동한다. 이들 열교환기에서는 상변화를 동반한 열 및 물질의 전달이 일어나고, 열 및 물질 전달의 향상은 흡수식 냉동기의 성능 향상과 설치 면적의 감소라는 측면에서 매우 중요하다. 증발기와 응축기는 각각 단일 성분의 유체인 물의 증발과 응축이 일어나는 곳으로 이들 열교환기부는 기존의 고성능 전열관(high-performance heat transfer tubes)의 적용으로 장치의 소형화가 가능하나 반면 흡수기 및 발생기부는 LiBr 수용액중의 냉매(물)의 흡수 및 분리가 일어나는 곳으로 장치의 크기면에서 상당부분을 차지하고 아울러 열 및 물질전달이 동시에 발생하여 학문적으로도 연구의 가치가 있다. 따라서 이러한 열 및 물질 전달장치에 있어서의 열교환기 효율증대와 사용 열교환 장치부의 소형화 및 경량화 등을 위해서는 장치최소상의 개선으로 열교환 효율을 증대 시키고자 하는 연구방향(GAX, 이중효용장치 등)과 열교환 현상에 대한 전열촉진 기술개발<sup>(2)</sup>(전열촉진관 등)이 연구되고 있다.

이들중 열교환기부의 전열촉진을 위한 전열면 열전달 성능개선을 위해서는 열교환 장치부중 크기면에서 상당한 비중을 차지하는 흡수기 및 발생기부의 연구가 시급하며 이들중 흡수기에 대해서는 연구<sup>(3-5)</sup>가 어느정도 진행되어 현재 수평관 유하액막식 시스템이 적용되고 있다. 발생기부의 열교환 구조는 기존의 시스템의 경우 푸울비등을 이용한 방식이 적용되고 있으며<sup>(6-8)</sup>, 장치의 구동을 위한 가열원으로는 가스나 기름등과 같은 비교적 고등급의 에너지를 이용하고 있다. 이들 연구의 결과들을 종합하여 보면 LiBr 수용액의 경우 핵비등은 벽면과 열도가 10°C 정도 이상의 경우에 발생하며 그 이하의 벽면과열도인 자연대류 영역에서는 열전달 계수가 열유속의 2/3승에 비례하는 것으로 보고 되었다. 따라서 이러한 저벽면 과열도 영역에서의 열전달 성능향상을 위해서는 새로운 전열방식을 이용한 수증기 생산이 필요하며 아울러 장치의 구동 에너지원을 다변화하여 저등급 에너지를 활용하고자 한다면 유하액막식 열교환 구조가 성능향상이나 장치의 소형화에 기여할 것이다. 이러한 유하액막식 열교환 구조를 발생기의 전열구조로 택할 경우에는 유하액막상의 열전달 및 2성분 유체의 물질전달에 의한 수증기 발생현상을 규명하여야 한다. 현재까지 발생기부의 열전달 성능향상 연구는 주로 수직관형의 유하액막 연구가 주로 행해지고 있으나 이러한 수직관형의 구조는 액막의 형성을 위한 수용액의 용액분배, 발생 수증기의 수송 등 기타 부대 장치의 설계에 있어서 까다로운 점이 있어 실제 시스템의 적용에 있어서는 수평관을 이용한 외부증발 혹은 비등에 의한 수증기 생산이 여러면에서 장점이 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(9)</sup> 그러나 이들 수평관 유하액막식 발생기에 있어서의 전열향상을 위한 전열촉진관의 연구는 미흡한 상태이며 전열현상에 있어서의 열 및 물질전달 구조는 그 메카니즘이 명확히 규명되고 있지 못한 상황이다. 따라서 이러한 현상의 해석은 열전달은 물론 물질전달까지 고려한 해석이 필요하며 이러한 해석방법을 증명하고 필요시 열 및 물질전달을 촉진할 수 있는 형태의 전열관에 대한 관계식을 도출할 수 있는 연구가 요구된다.

본 논문은 이들 수평관 유하액막식 증발열전달의 전열성능 향상을 위한 전열관별 증발성능을 비교한 것이며 이러한 성능비교를 통하여 실제 시스템에 적용 가능한 최적의 전열관 형상을 제시하고자 함

에 목적이 있다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

실험 장치는 크게 4개의 유로(LiBr 수용액의 유로, 가열수의 유로, 수증기 유로, 냉각수의 유로)로 구성된다(Fig. 1). 실험은 발생기의 작동압력인 60 Torr를 기준으로 행해지기 때문에 외압으로부터 견딜 수 있도록 제작되었다.

LiBr 수용액의 유로는 용액공급 탱크(200 liter, SUS)를 포함하여 용액의 실험부 공급을 위한 용액펌프(자기기어펌프, 15 lpm), 용액의 미세가열을 위한 보조 복사가열기(500 W), 수평관의 액막 증발을 모사하기 위한 실험단면부(원통형, 300  $\phi$  × 400 L, 3t) 등으로 구성되어 있다. 용액 공급탱크에서는 수증 전기 가열기(12 kW)에 의해 LiBr 수용액이 실험하고자 하는 포화 온도까지 가열되

며, 가열된 LiBr 수용액은 용액펌프에 의해 용액 유량계(3 lpm)와 복사 가열기(radiant heater)를 거쳐 시험부로 흐르게 된다. 시험부로 유입된 LiBr 수용액은 용액분배기(distributor)를 통하여 시험전열관의 상부에 액막의 형태로 떨어지고, 시험부를 흘러나온 용액은 용액 공급탱크로 되돌아온다. 실험단면부에는 수평으로 설치된 전열관의 외부에 용액을 균등히 분배할 수 있는 용액분배기가 설치되어 있으며 용액분배기는 전열관의 상부 11 mm 지점에 설치하였고 내부에 2중 격막을 포함하는 천공식 분배시스템을 적용하였다. 용액의 분배 노즐은 2 mm 구멍이 13.5 mm 간격으로 천공된 것이며 이는 용액의 균일한 흐름을 위한 분배 기초 실험으로부터 얻어진 사양이다. 또한 이들 용액의 균일흐름을 관찰하기 위하여 원통형 실험단면부의 전면에 강화유리로 가시창(150  $\phi$ , 10t)을 설치하여 용액의 관외흐름을 육안관찰 할 수 있도록 하였다. 또한 원통형 실험단면부는 외부로의 열손실을 막기

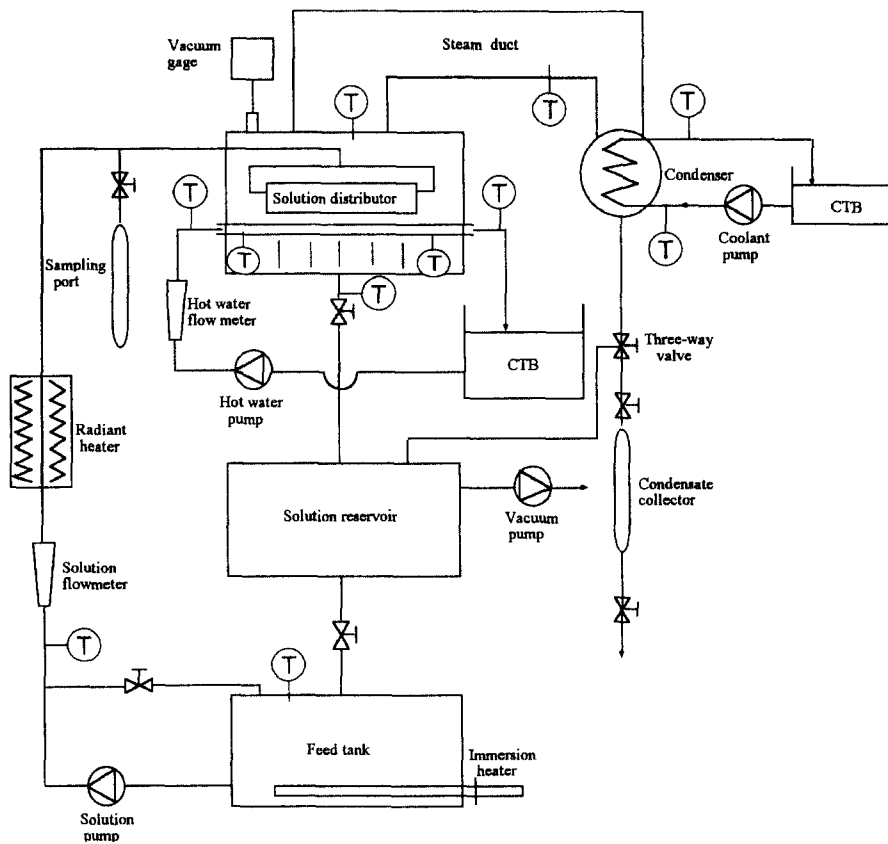


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

위하여 가시창을 제외한 부분을 유리석면으로 단열하였다.

가열수 유로는 수평관 외에 공급된 LiBr 수용액 중의 물을 증발을 이용하여 분리시키기 위한 가열원으로서 여기에는 가열수용 항온조(1 kW)를 포함하여 가열수의 수평관내 공급을 위한 가열수 펌프(15 lpm), 가열수의 유량 감지를 위한 체적식 유량계(10 lpm) 등으로 구성되어 있다. 이로부터 관벽의 온도를 일정벽면 온도조건으로 유지하였다.

수증기 유로는 실험단면부에서 발생한 수증기의 유로이며 여기에는 발생수증기의 원활한 수송을 위한 수증기 덕트, 그리고 발생 수증기량의 계측을 위한 포집통(300 cc) 등으로 구성되어 있다.



냉각수 유로는 이들 발생수증기의 양을 계측하기 위한 유로로서 발생수증기의 양을 응축수의 형태로 계측할 수 있도록 하는 냉각시스템이며 이를 위해서 냉각수용 항온조(250 W)를 포함하여 냉각수 펌프(25 lpm), 응축기(2 마력) 등이 설치되어 있다.

## 2.2 실험 방법

먼저 용액 공급탱크에 LiBr 수용액을 주입하기

위해서 압력 차이에 의한 주입 방법을 사용하였다. 진공 펌프로 실험 장치 내부의 공기를 완전히 추기고 외부와의 압력 차이를 이용하여 LiBr 수용액을 용액 공급탱크로 주입하였다. 용액공급 탱크에 저장되어 있는 LiBr 수용액은 실험하고자 하는 작동압력과 수용액중 LiBr의 농도에 따라 포화 온도까지 가열되어 실험단면부로 순환된다. 동시에 수증기 증발의 가열원인 가열수와 발생수증기의 응축을 위한 냉각수를 각각의 유로로 순환시킨다. 실험 단면부에서는 용액펌프에 의해 이송된 LiBr 수용액이 용액분배기를 거쳐 수평으로 설치된 시험관의 외측으로 중력에 의해 흐르게 되며 이들 용액중의 물은 관내 가열된 가열수로부터 가열되어 증발하게 된다. 이때 증발된 수증기는 부력차이에 의해 실험 단면의 상단부에 설치된 증기통로를 따라 흐르게 되며 덕트를 거친 수증기는 응축기부에서 응축되어 응축수 포집통으로 모이게 된다. 한편 관외를 흘러 떨어진 LiBr 수용액은 용액 공급탱크로 되돌아 오게 된다. 일정시간의 정상상태 가동에 의해 응축수 포집통에 모인 응축수는 그 양이 계측되고 각 변수별 수증기 발생량은 전열관별 수증기 발생성능을

Table 1 Specification of test tubes.

Tube name	Dimensions	Ratio of surface area based on bare tube
Bare tube	Outer diameter=19.05 mm Thickness=1.07 mm	1
*Spirally grooved tube (F-tube, Absorber tube) 	Outer diameter=19.05 mm Thickness=1.0 mm 61 fins/periphery Groove depth=0.3 mm	1.4
Particle coated tube	Outer diameter=19.05 mm Particle diameter=20m Aluminum particle coated	**1.6
*Knurled tube (THERMOEXCEL-C tube) 	Outer diameter=19.05 mm Thickness=1.09 mm 26 fins/inch Fin pitch=0.7 mm Fin height=0.45 mm	3

\* Hitachi manufactured

\*\* Surface area is calculated with assuming that all particles are same sized and arranged regularly on the tube surface.

비교하는데 사용되었다. 변수해석에 쓰인 인자들과 그 계측 방법은 4장에서 상세히 설명하였다.

### 3. 실험전열관

유하액막 증발과 같은 관외흐름에서 수증기의 발생을 촉진하기 위해서는 우선 전열관의 관외측 전열면적이 커야 하며, 액막의 열함유 시간을 늘이기 위해 액막의 관외 체재시간이 길어야 한다. 이 외에 전열면상에 액막이 흘러내릴때 액막이 관외측에 적서지지 않는 건조부(dry patch)가 생기지 않아야 하며 또한 액막을 혼합 시키거나 와류동을 유발할 수 있는 표면구조가 되어야 할 것으로 생각된다.

이를 기초로 본 실험연구에서 사용한 전열관은 전열촉진관의 성능비교를 위한 기준관으로 쓰인 평활관을 비롯하여 촉진관으로 knurled 관, 나선 그루브관, 20  $\mu\text{m}$  알루미늄 입자가 평활관에 코팅된 관 등 모두 4종이며 이들 실험 전열관의 사양을 Table 1에 나타내었다. knurled 관은 국내에서 THERMOEXCEL-C로 불리우는 일본 Hitachi사 제품이며 나선 그루브관은 기존의 상용 흡수식 열펌프의 흡수기부에서 사용하고 있는 관(F 관 또는 Absorber 관)이다. 이밖에 알루미늄 입자가 코팅된 관은 현재 상용화가 되어 있지는 않지만 푸울비등의 핵비등 촉진을 위해 개발중인 전열관으로 이의 유하액막 증발특성을 시험해 보기 위하여 적용되었다.

### 4. 결과해석방법

유하액막의 증발에 영향을 미치는 변수로는 용액의 유량을 대표하는 액막 레이놀즈수(film Reynolds number), 수용액중 LiBr의 농도, 계내의 압력, 전열면의 벽면과열도 등을 들 수 있으며 이때 액막 레이놀즈수와 전열면의 벽면 과열도는 아래의 식과 같이 정의된다.

$$Re_f = 4\Gamma / \mu_f \quad (1)$$

$$\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat} \quad (2)$$

여기서  $\Gamma$  는 전열관 단위길이당의 수용액의 질량 유량,  $\mu_f$  는 수용액의 점도,  $T_{sat}$  은 수용액의 LiBr 농도와 계내의 압력에 기초하여 Duhring 선도로부터 얻어진 용액의 포화온도이다. 용액의 유량은 용액유로에 설치된 유량밸브를 이용하여 조절

Table 2 Experimental conditions.

Operation	Ranges
LiBr concentration (wt%)	50, 53, 57, 60
System pressure (Torr)	40, 50, 60, 70, 80
Wall superheat ( $^{\circ}\text{C}$ )	2.5, 5, 7.5, 10
Film Reynolds number (-)	50, 75, 100, 125, 150, 175, 200

하였으며 벽면의 온도  $T_w$ 는 전열관의 표면에 정확도 0.1  $^{\circ}\text{C}$ 의 T 형 열전대를 전열관의 가열수 입출구부에 각각 4군데 원주방향으로 장착하여 계측하였고 이들 8군데 온도를 평균하여 벽면온도로 설정하였으며 이로부터 전열면의 벽면과열도를 산정하였다. 열전대가 장착된 열전대 홈은 폭 1 mm, 깊이 0.5 mm로 밀링 가공된 것이며 열전대의 장착은 전도성이 좋은 접착제(OMEGA bond 200)를 사용하여 접착하였으며 열전대 선은 장착후 보정을 통하여 그 오차를 줄이는 과정을 행하였다. 아울러 계내의 압력은 실험단면부의 상단에 진공압력계(0-100 Torr, ABS)를 설치하여 실측하였으며, 수용액중의 LiBr 농도계측은 실험단면부의 용액공급직전에 포집통을 설치하여 포집된 용액의 밀도와 온도를 밀도계(PAAR DMA-35)를 이용하여 계측하고 이로부터 농도를 산출하였다. 본 실험에서 행한 액막유동의 범위는 파형이 존재하는 층류영역이며 Table 2에 이들 실험의 범위를 나타내었다.

액막의 증발에 따른 액막의 열전달 계수는 다음과 같이 전열벽면을 통한 열유속과 전열면의 벽면과열도의 정의(식 2)로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$h_f = q'' / (T_w - T_{sat}) \quad (3)$$

위의 액막 전열계수 획득에 필요한 열유속은 응축수 수집부에서 계측된 발생 수증기량으로부터 얻어진 증발잠열 값과 수용액의 전열관 흐름에 있어서의 온도증가분인 현열값을 더한 총열유속 값이며 액막의 유량이 증가할수록 총열유속 값은 증가하나 이 중에서 현열유속의 비율도 따라서 증가함을 실험을 통하여 알 수 있었다. 이들 현열의 증가분은 용액의 전열면 공급 전단부와 실험단면부의 용액 출구부에 열전대를 이용하여 계측하였다. 전열관의 각 변수에 대한 전열성능은 수증기 발생량을 포함하여 열유속, 액막 전열계수 등으로 하여 비교해 볼 수 있겠으나 본 논문에서는 실제 시스템의 최종 발생기 성능인 수증기 발생량을 기준으로 각 실험

관의 성능을 비교하였다.

## 5. 결과 및 토의

### 5.1 평활관의 증발성능 특성

수평관에서의 액막유동의 형태는 주로 액막의 유량과 용액분배기의 형태에 따라 결정되며 액막유량의 경우를 볼 때 액막의 유량이 작을 경우 용액은 액적(liquid droplet)의 형태로 떨어지고 액막의 유량이 상대적으로 크게 되면 용액은 액주(liquid column)의 형태로 떨어진다. 그러나 이러한 용액의 흐름 또한 용액분배기의 노즐 형태에 의존하며 본 연구에서 적용된 용액분배기처럼 용액이 천공노즐관을 통해 공급될 때는 일정이하 유량의 경우에 수용액은 관표면에 고르게 분포하지 못하여 건조부가 생길수 있고 이때 전열면 전체에 있어서의 열전달 성능은 오히려 떨어지게 된다.

Fig. 2에 수증기 증발에 영향을 미치는 각 변수들에 대한 평활관의 수증기 증발유속의 경향을 나타내었다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 평활관의 수증기 증발유속은 액막 레이놀즈수로 대표되는 LiBr 수용액의 유량의 증가에 대해 거의 변화를 보이지 않음을 알 수 있다. 이는 본 실험에서 채택한 액막유량의 범위( $50 < Re_f < 200$ )에서 액막유량이 증가 할수록 가열수로부터 액막으로 전달된 총 열유속 값은 증가하나 반면 이들 열유속중 증발에 기여하는 잠열부는 용액의 현열증가에 비해 낮아져서 나타나는 결과로 생각된다. 액막유량이 증가함에 따라 액막의 두께는 비례하여 증가하며 이로 인한 열저항의 증가로 수증기 발생을 위한 유효 열유속 성분은 그다지 크지 않은 반면 용액의 온도를 상승시키는 현열증가분은 상대적으로 크게 됨을 알 수 있다. 따라서 평활관의 경우 본 실험의 범위에 해당하는 유량의 범위에서는 수증기의 증발유속에 대한 액막유량의 경향은 파악되지 않았다.

계내 압력의 증가에 대한 수증기의 발생유속(Fig. 2(b))은 증가하는 것으로 나타났는데 이는 주로 다음의 이유에 의한 결과로 파악되었다. 계내 압력의 증가에 대해 LiBr 수용액의 물성치중 포화온도는 증가하며 본 실험은 포화상태로 유입되는 액막을 기초로 행한 단관 실험이므로 이로인한 액막의 물성치, 특히 점도의 감소로 인한 액막두께의 감소에 기인하는 것으로 생각된다. 액막의 두께가 감소할 경우 액막상의 열 및 물질전달 계수는 열저

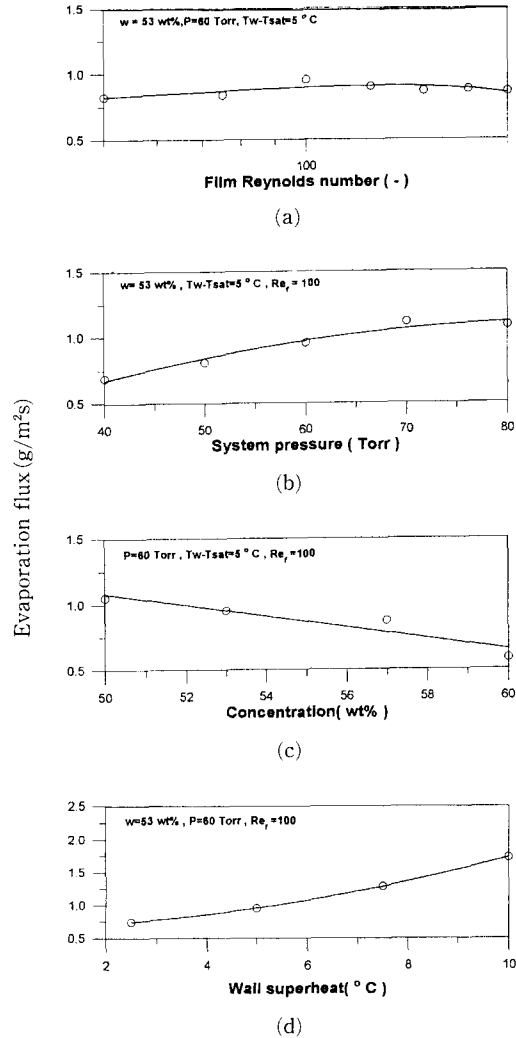


Fig. 2 Effect of variables on evaporation fluxes in a falling film (bare tube).

항의 감소로 증가하게 되며 이로 인해 총 열유속에 대한 증발 열유속의 비는 증가하며 따라서 액막중의 수증기 발생유속은 증가하게 되는 것으로 파악되었다.

수용액중의 LiBr 농도의 영향(Fig. 2(c))을 보면 LiBr의 농도가 증가할수록 수증기의 증발유속은 감소하는 것으로 나타났는데 이는 다음과 같은 이유로 생각된다. 수용액중의 LiBr의 농도가 증가하게 되면 점도의 증가에 의한 액막의 두께 증가로 인하여 열저항은 증가하게 되고 따라서 수증기 증발유속은 감소하게 된다.

전열면의 벽면과열도에 대한 수증기 증발유속의 경향(Fig. 2(d))을 보면 그림에서 볼 수 있듯이 전열면 벽면과열도의 증가에 대해 수증기의 증발유속은 증가하게 됨을 볼 수 있고 이는 벽면과열도의 증가에 따라 전열면으로의 열유속이 증가되어서 나타나는 당연한 결과로 보여진다. 그러나 이들을 액막의 열전달 계수로 하여 비교해 보면 식 (3)에서와 같이 분모항에 해당하는 벽면과열도의 증가함에 따라 분자항인 총열유속 값도 따라서 증가하게 되어 이들 액막 열전달 계수는 벽면과열도의 증가에 반드시 증가한다고 볼 수는 없으며 본 실험의 경우에는 이들 열전달 계수의 벽면과열도에 대한 경향은 오히려 약간 감소하는 경향을 보여 주었다.

## 5.2 전열 축진관의 평활관에 대한 성능비교

본 절에서는 5-1절의 평활관 실험결과를 기초데이터로 하여 전열축진관으로 선정된 3종의 전열관(knurled 관, 나선 그루브관, 입자피막관)에 대해 수증기 발생의 증가 성능의 실험값을 최적곡선화(polynomial fitting) 하여 비교하였으며 이때 실험값은 최적곡선상의 값에 비해 최대 30% 정도의 오차내에 근사하였다.

Fig. 3은 이들 전열축진관에 있어서 수증기 증발유속의 증가성능을 평활관 실험값을 1로 하여 액막 레이놀즈수의 변화에 대해 도시한 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 3종의 전열축진관은 액막 레이놀즈수가 75 이상에서는 모두 평활관에 비해 높게 나타나고 있으며 반면에 액막 레이놀즈수가 75 이

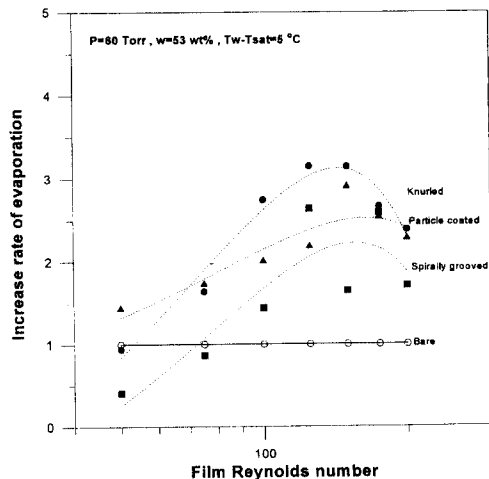


Fig. 3 Increase rate of evaporation flux on enhanced tubes (film Reynolds number effect).

하일 경우에는 그 성능이 오히려 평활관 보다 낮아지는 경우를 볼 수 있는데 이는 주로 용액의 관외 공급에 의한 액막의 형성 측면에서 기인하는 것으로 파악된다. 액막의 유량이 크지 않은 경우에는 앞 절에서 설명한 바와 같이 용액의 공급부족에 따른 건조부의 생성으로 인하여 전열면이 확장된 전열축진관의 경우 관외에 건조부가 발생함을 육안 관찰할 수 있었고 이때에는 증발에 유효한 전열면적은 오히려 평활관보다 낮아 질 수 있다. 그러나 액막 레이놀즈수가 75 이상의 경우에서는 전열축진관 모두 건조부가 발생하지 않았고 액막 유량이 증가함에 따라 전열축진관의 전열면 확장효과에 의한 수증기의 증발유속은 증가됨을 알 수 있었고 액막 레이놀즈수가 150 근처의 값이 될 때 전열면 확장효과에 의한 수증기 발생성능은 최대가 됨을 알 수 있었다. 이후 액막 레이놀즈수의 증가에 대해 증발유속이 감소하는 것은 액막의 유량증가에 따른 액막두께의 증가로 인하여 전열면의 확장효과가 더 이상 발휘되지 않는 것으로 파악되었다. knurled 관의 경우를 예로들면 액막 레이놀즈수가 150 정도에서 수증기의 증발유속이 평활관에 비해 3배 이상 증가함을 알 수 있었고 나선 그루브관 역시 2배 이상의 수증기 발생 증가를 보여 주었다. 이는 Table 1에 보인 바와 같이 평활관에 기초한 전열축진관의 면적증가비의 값과 유사하며 수증기의 증발량 값이 전열면의 면적증가에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 채택한 전열축진관의 경우 액막 레이놀즈수는 150 정도의 값이 수증기 발생증가 측면에서 최적이며 3종의 축진관 역시 평활관 보다 수증기 발생성능이 우수한 것으로 나타났다. 다만 이들 값은 전열면 상에 액막의 건조부가 생성되지 않는 범위( $Re_f > 75$ )에서의 결과이며 데이터의 오차는 나선그루브관의 경우 최적곡선상의 값보다 최대 30% 정도의 오차를 보여 주었다. 또한 전열면 상의 건조부 제거를 위한 용액 분배의 문제는 여전히 연구의 과제로 남아있다.

Fig. 4는 이들 축진관의 평활관에 대한 수증기 발생유속 증가성능을 계내의 압력변화에 대해 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 축진관 3종의 성능은 평활관에 비해 1.5~3배 가량의 증가성능을 보이며 knurled 관의 경우에 있어서는 최대 3배 정도의 증가성능을 보여 앞에서 설명된 전열면 확장효과에 의한 결과로 예측되며 knurled관의 경우 최적곡선상의 값보다 최대 15% 정도의 오차를 보여

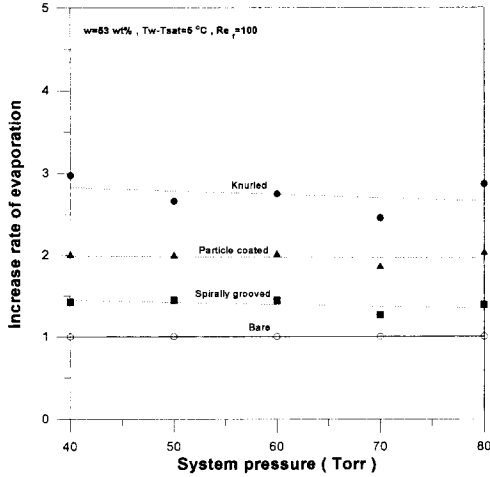


Fig. 4 Increase rate of evaporation flux on enhanced tubes (system pressure effect).

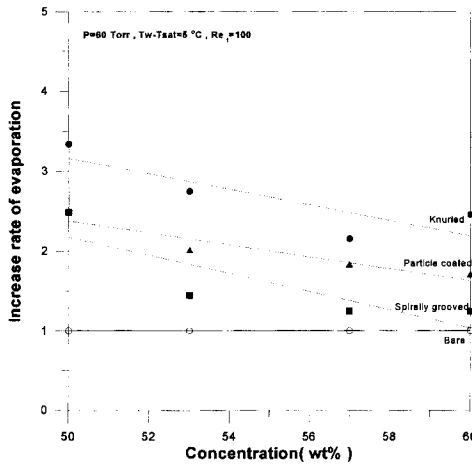


Fig. 5 Increase rate of evaporation flux on enhanced tubes (LiBr concentration effect).

주었다.

Fig. 5는 축진관의 경우에 있어서 LiBr 농도에 대한 수증기 발생 성능을 보여 주는 그림으로 축진관의 증발성능은 모두 평활관의 경우에 비해 우수하며 특히 LiBr의 농도가 작은 경우에 우수하며 이는 저 LiBr 농도액의 경우 점도의 감소로 인한 액막두께 감소의 결과로 보이며 전열축진관의 경우 전열면의 확장효과가 더욱 분명히 나타남을 알 수 있고 knurled 관의 경우 최대 3.5배 정도의 증가성을 보여 주었다.

Fig. 6은 전열면 벽면과열도의 변화에 따른 축진

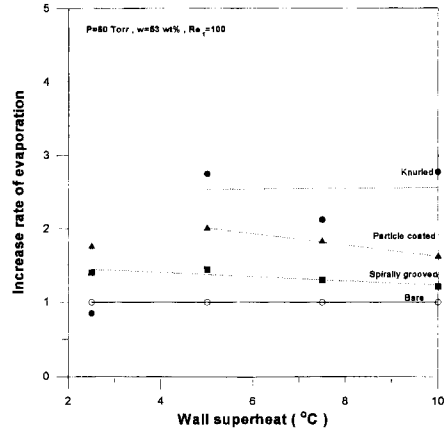


Fig. 6 Increase rate of evaporation flux on enhanced tubes (wall superheat effect).

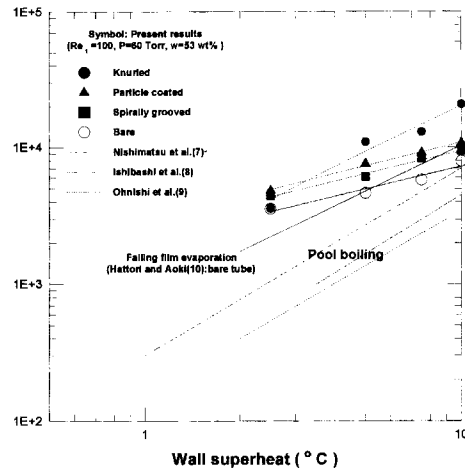


Fig. 7 Heat flux comparison between tubes.

관의 수증기 발생증가 성능을 보여주는 그림으로 축진관은 본 실험의 벽면과열도 범위에서 평활관에 비해 우수한 성능을 보여 주었으며 knurled 관의 경우 벽면과열도  $2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서의 증가성능이 그 외의 벽면과열도에서 보다 상당히 낮은 값을 보여주고 있는데 이는 knurled 관이 푸울비등의 핵비등 축진을 위해 고안된 관으로서 실제 저벽면 과열도에서는 핀에 의한 전열면 확장효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 벽면과열도가 그 이상으로 증가함에 따라서는 핀의 효과가 나타나고 있으며 벽면과열도가  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  정도 이상에서는 knurled 관이 벽면과열도의 증가에 대해 가장 우수한 관으로 파악되었다.

Fig. 7은 이들 4종의 전열관의 열유속 전달 성능



을 기존의 연구결과와 비교하기 위한 것으로 가로축을 전열면의 벽면과열도, 세로축을 총열유속으로 하여 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전열촉진관으로 선정된 3종의 관은 본 연구에서 행한 벽면과열도 범위(2.5°C-10°C)에서 모두 평활관에 비해 우수하며 푸울비등의 열유속에 비해 3-4배 정도 우수함을 알 수 있으며 특히 전열면 과열도가 낮을수록 우수한 결과를 보여주었다. 또한 기존의 평활관 유하액막 증발의 연구결과<sup>(10)</sup>와 비교해 볼 때 유사한 열유속 성능을 나타냄을 알 수 있었다. 본 연구에서 채택한 전열관 중 knurled 관은 전열면 확장효과에서 가장 우수하며 그 기울기도 커서 실험관중 가장 우수한 열유속 향상성능을 보여 주었다.

### 5.3 오차분석

본 실험의 정상상태 계측시간은 5분 정도이며 본문에서 제시한 변수 데이터는 벽면과열도의 경우 9.4%, 액막레이놀즈 수는 6.8%, 압력은 1%, LiBr의 농도는 0.3%의 최대 편차를 가지며 전열촉진관의 수증기 발생량 증가성능은 평활관 실험데이터를 기준으로 직선화 하였을 때 최대 30%의 오차범위 내에서 표시되었다.

## 6. 결 론

LiBr 수용액을 작동유체로 하는 수평관 유하액막 열전달에 있어서의 수증기 발생성능을 파악하기 위하여 평활관을 비롯한 4종의 전열관(평활관, knurled 관, 나선 그루브관, 입자피막관)을 선정하여 전열관별 수증기 발생성능을 실험을 통하여 비교하였다. 수증기의 발생성능을 파악하기 위한 변수로는 액막 레이놀즈수, 계내의 압력, 수용액중 LiBr의 농도, 전열면의 벽면과열도 등을 선정하였고 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 평활관의 경우에 있어서는 액막유량의 증가에 따라 수증기 발생유속은 거의 변화가 없었으며 그 외의 전열촉진관의 경우는 최대의 수증기 발생을 위한 최적의 액막 유량이 존재 하였으며 본 실험의 경우에 있어서는 그 값이 액막 레이놀즈수 150 정도의 값에 해당하였다.

(2) 수증기의 증발유속은 4종의 전열관 모두 계내의 압력 증가와 전열면의 벽면 과열도의 증가에 따라 증가된 값을 보였고 수용액중 LiBr 농도의

증가에 대해서는 감소하는 경향을 나타내었다.

(3) 3종의 전열촉진관의 수증기 증발성능은 전열면에 건조부가 발생하지 않을 경우( $Re_f > 75$ ) 평활관의 증발성능에 비해 우수하게 나타났다.

(4) 본 연구에서 채택한 4종의 전열관은 10°C 이하의 저벽면 과열도에서 푸울비등에 비해 우수한 열유속 성능을 나타내며 knurled 관은 벽면과열도가 5°C 이상일 경우 수증기 발생과 열유 속의 증가 측면에서 실험 전열관 중에서 가장 우수한 성능을 보여 주었다.

## 후 기

본 연구는 현대중공업 주식회사(HHI)와 첨단유체공학 연구센터(AFERC)의 기술 및 재정적 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Minton, P. E., 1986, *Handbook of Evaporation Technology*, Noyes Publication, pp. 70~84.
- (2) 윤정인, 오후규, Kashiwagi, T., 1995, "스프링 삽입형 유하액막식 흡수기의 열 및 물질전달 특성," 대한기계학회논문집, Vol. 19, No. 6, pp. 1501~1509.
- (3) 박일석, 최도형, 1996, "수평원관상의 LiBr-H<sub>2</sub>O 액막 흡수현상 해석," 대한기계학회논문집, Vol. 20, No. 2, pp. 670~679.
- (4) 김선창, 오명도, 이재현, 1995, "공랭형 수직 평관 흡수기 액막에서의 열 및 물질전달에 관한 수치적 연구," 대한기계학회논문집, Vol. 19, No. 4, pp. 1071~1082.
- (5) Kim, B. J., 1995, "Absorption of Water Vapor into Wavy-Laminar Falling Film of Aqueous Lithium Bromide," *KSME Journal*, Vol. 9, No. 1, pp. 115~122.
- (6) Nishimatsu, A., et al., 1979, "Pool boiling Heat Transfer to Lithium Bromide Water Solution under Vacuum," *Heat Transfer Japanese Research*, Vol. 8, pp. 1~15.
- (7) Ishibashi, E., and Iwasaki, K., 1982, "Results of Boiling Experiments for Solar Powered Absorption Type Chiller (report I)," *Trans. of Japanese Association of Refrigeration*, Vol. 57, pp.

- 231~238.
- (8) Ohnishi, M., et al., 1978, "Pool Boiling Heat Transfer to lithium Bromide Water Solution," *Heat Transfer Research*, Vol. 7, pp. 67~77.
- (9) Fujita, T., 1993, "Falling Liquid Films in Absorption Machines," *Int. J. Refrig.*, Vol. 16, No. 4, pp. 282~294.
- (10) Hattori, M., and Aoki, K., 1987, "On the Falling Film Evaporation of Lithium Bromide Water Solution around a Horizontal Circular Cylinder," *Rep. on Heat Pump Technology, Japanese Association of Refrigeration*, pp. 311~319.