

## 수직형 흡수기내 열 및 물질 전달 특성

### Heat and mass transfer characteristics in a vertical absorber

서 정 훈\*, 조 금 남\*\*, 최 기 봉\*  
 J. H. Seo, Keumnam Cho, K. B. Choi

**Key words:** Absorber(흡수기), LiBr-H<sub>2</sub>O solution(리튬브로마이드 수용액), Film Reynolds number(막Reynolds수), Absorption mass flux(흡수질량유속), Heat transfer coefficient(열전달계수)

#### ABSTRACT

The objective of the present study was to investigate heat and mass transfer characteristics in a vertical falling film type absorber using LiBr-H<sub>2</sub>O solution with 60wt%. The experimental apparatus consisted of an absorber with inner diameter of 17.2 mm and length of 1150 mm, a generator, an evaporator/condenser, a solution tank, a sampling trap etc. The parameters were solution temperature of 45 and 50°C, coolant temperature of 30 and 35°C, and film Reynolds numbers from 50 to 150.

Pressure drop in the absorber increased as solution and coolant temperatures decreased. Pressure drop in the absorber increased up to the film Reynolds number of 90, and then decreased at the further increase of the Reynolds number above 90. The maximum absorption mass flux observed at the film Reynolds number of 90. Absorption mass fluxes increased as coolant temperature decreased. Absorption mass fluxes and heat transfer coefficients under subcooled condition were larger than those under superheated condition. Heat transfer coefficients were affected by solution temperature more than coolant temperature. The maximum absorption effectiveness under the subcooled condition was 23% for coolant temperature of 30°C and 31% for coolant temperature of 35°C under the present experimental conditions.

#### 기 호 설 명

*A* : 열전달 면적 [m<sup>2</sup>]  
*C* : LiBr 수용액농도 [wt%]  
*C<sup>o</sup>* : LiBr 계면농도 [wt%]  
*C<sub>p</sub>* : 정압 비열 [kJ/kg · K]

*D* : 물질 확산계수 [m<sup>2</sup>/s]  
*d* : 직경 [m]  
*d<sub>h</sub>* : 수력직경 [m],  $d_a - d_o$   
*E* : 흡수효율 [%]  
*F* : 오염계수 [m<sup>2</sup>°C/W]  
*f* : 직경비의 함수,  $1 + 0.14\sqrt{d_a/d_o}$   
*G* : 흡수질량유속 [kg/m<sup>2</sup> · s]  
*h* : 열전달계수 [kW/m<sup>2</sup> · K]  
*k* : 열전도계수 [kW/m · K]

\* 성균관대학교 대학원

\*\* 정희원, 성균관대학교 교수

- $L$  : 흡수기 관길이 [m]  
 $LMTD$  : 대수평균온도차 [K],  
 $(\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)$   
 $L_s$  : 액막의 특성길이 [m],  $(\nu^2/g)^{1/3}$   
 $M$  : 냉매흡수량 [kg/s]  
 $\dot{m}$  : 질량 유동률 [kg/s]  
 $Nu$  : Nusselt 수,  $hL_s/k_s$   
 $Nu_\infty$  : 무한한 길이의 환상공간내 Nusselt 수,  
 $3.66 + 1.2 \left(\frac{d_o}{d_a}\right)^{-0.8}$   
 $P$  : 압력 [kPa]  
 $Pr$  : Prandtl 수,  $\mu C_p/k$   
 $Q$  : 열량 [kW]  
 $q$  : 열유속 [kW/m<sup>2</sup>]  
 $Re_f$  : 액막 Reynolds 수,  $4\Gamma_s/\mu_s$   
 $r$  : 흡수기 관 반지름 [m]  
 $Sh$  : Sherwood 수,  $\beta L_s/D_s$   
 $T$  : 온도 [K]  
 $U$  : 열관류율 [kW/m<sup>2</sup>·K]

### 그리스 문자

- $\beta$  : 물질전달계수 [m/s]  
 $\Gamma$  : 원주길이당 질량유량 [kg/m·s]  
 $\mu$  : 점성계수 [kg/m·s]  
 $\nu$  : 동점성계수 [m<sup>2</sup>/s]  
 $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

### 하첨자

- $a$  : 냉각수 관 내측  
 $c$  : 냉각수  
 $eq$  : 평형  
 $f$  : 액막  
 $i$  : 흡수기 관 내측  
 $lm$  : 대수 평균  
 $o$  : 흡수기 관 외측  
 $s$  : 수용액  
 $ss$  : 스펀덴스 강판  
 $w$  : 벽면  
 $1$  : 입구  
 $2$  : 출구

## 1. 서론

현재 사용되고 있는 흡수식 장치의 대부분은 수냉식이며 증대형 용량을 갖는다. 그러나, 흡수식 장치가 가정용으로 전기 구동식 냉동기에 대해 경쟁력을 갖기 위해서는 흡수식 장치의 소형화, 공냉화 및 고효율화에 대한 연구 개발이 필요하다. 흡수식 장치를 구성하고 있는 열교환기들 중 흡수기는 중요한 영향을 담당하며 특히 흡수기 내에서 흡수제가 냉매를 흡수하는 성능은 흡수기 설계 시 중요한 부분이다. 흡수기내 흡수성능을 제고시키기 위해 LiBr-H<sub>2</sub>O 시스템에 CaCl<sub>2</sub>를 첨가하여 흡수제의 용해도를 향상시키는 연구<sup>(1)</sup>, 흡수기의 형상을 바꾸거나 수직관내 스프링을 삽입하는 연구<sup>(2)</sup> 등이 이루어졌다. 또 흡수율에 영향을 주는 주요 요소로서 장비의 부식이나 미소누설에 의한 비흡수 가스<sup>(3)</sup>의 영향조사가 있는데 이는 흡수제와 냉매증기의 계면 상에 비흡수 가스가 축적되어 냉매가 흡수제 액막으로 이동함을 방해함으로써 미소량의 비흡수 가스라도 흡수율을 크게 감소시키기 때문이다. 이러한 영향을 최소화시키기 위한 연구가 진행중이고, 흡수메카니즘<sup>(4-7)</sup>을 규명해 흡수성능을 촉진시키려는 연구로 Morioka와 Kiyota<sup>(8)</sup>와 Morioka 등<sup>(9)</sup>은 크롬도금 수직 황동관 표면상의 리튬브로마이드 수용액 막에 대해 최대 수증기 흡수율을 위한 유하액막의 최적 두께를 제시했고, 수용액 막의 흡수과정에 대한 실험결과를 이론적 해석과 비교하였다. Ohm과 Kashiwagi<sup>(10)</sup>은 수직원관 내부 유하액막의 냉매증기 흡수에 관한 실험에서 실험으로 부터 과냉액과 과열액에 대한 상관식과 과냉액 조건에서 총 흡수율이 최대가 되는 액막두께는 0.3~0.4 mm임을 제시했다. 엄기찬 등<sup>(11-12)</sup>은 내경 25 mm, 길이 1 m의 수직관내 유하 액막식 동관 흡수기에서 수용액농도 60wt%, 액막 레이놀즈수 35~130의 범위에서 냉각수 유동을 난류로 고려하여 열 및 물질전달을 측정하였다. Kim과 Kang<sup>(13)</sup>은 수직원관 내부의 유하액막에 대한 냉매증기 흡수실험에서 액막 레이놀즈수가 30~200의 범위일 때 흡수과정에 대한 시스템의 압력과 수용액의 온도의 영향을 실험적으로 조사하였다. 액막 레이놀즈수에 따라 액막의 형성과 계면파동의 특성이 변화하므로 액막 레이놀즈수가 130일

때 흡수율이 최대가 된다고 보고하였다.

공냉형의 경우 수평관내 흡수에 비해 수직관내 흡수기인 경우는 냉매증기의 유동면적이 작아 압력강하가 크기 때문에 증발기내의 압력상승과 냉매증기 온도의 상승을 초래하므로 증발기 및 흡수기 능력에 영향을 미치게 된다. 이를 해결하기 위하여 수직 흡수기관 내에서 열 및 물질전달 기구에 대해 유량, 온도, 압력, 농도, 전열관 직경, 냉각수 온도 등을 실험 변수로 취한 연구가 이루어 졌으나, 유사한 조건상에서도 연구자에 따라 결과들의 경향이 일치하지 않는 등 기존의 연구 자료들을 공냉식 흡수기의 설계에 직접 사용하는 데는 체계적이지 못한 상태이다.

따라서 본 연구의 목적은 LiBr 수용액을 흡수제로 하는 공냉형 흡수식 장치의 흡수기를 모사한 수직원관 내부에 흘러내리는 유하액막에 냉매증기가 흡수될 때 흡수제가 과열인 조건과 과냉인 조건에서 냉각수온도와 흡수제의 액막유량을 변수로 수직형 흡수기내 열 및 물질전달의 특성을 조사함에 있었다.

## 2. 실험장치

실험장치는 Fig. 1과 같이 시험부(흡수기), LiBr 수용액 재생기, 수용액 탱크, 증발기/응축기, 항온조, 유량계, 샘플링 장치로 구성되었다. 흡수기는 상부헤더, 흡수관 및 하부헤더로 구성되었다. 흡수관 내경은 17.2 mm, 두께 1.0 mm, 길이 1150 mm인 매끄러운 스텐레스 강관(SUS316)으로 제작되어 있다. 흡수과정 증발 발생하는 흡수열은 공냉식 시스템의 경우 수직관 주위를 직교류로 유동하는 공기에 의해 냉각이 되지만, 본 연구에서는 실험의 단순성과 냉각과정의 효율성을 높이기 위하여 수직관 외부에 환상공간을 형성하여 일정한 온도의 냉각수를 순환시키는 방식을 취하며 LiBr 수용액과 대향류로 흐르는 냉각수에 의해 냉각됐다. 환상공간을 형성하는 아크릴관의 내경은 24 mm였고, 길이는 1150 mm였다. 흡수기로 유입되는 리튬브로마이드 수용액은 우선 흡수기 상부헤더에 모인 다음 흡수관 상부를 넘쳐 흡수관의 내면에 액막의 형태로 흘러내리게 되며, 이와 동시에 증발기로부터 온 냉매증기가 흡수기 상부

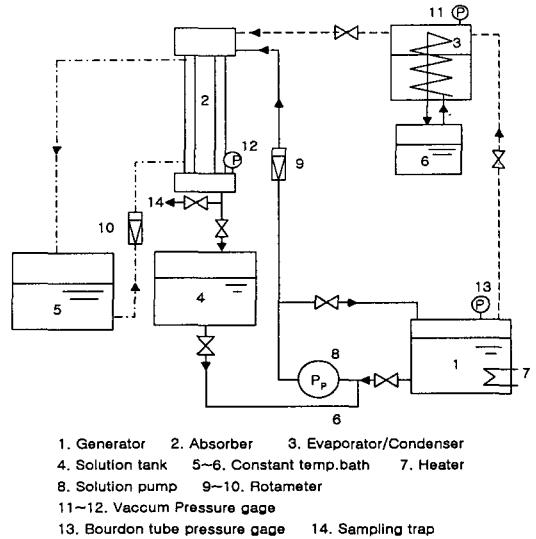


Fig. 1 Schematic diagram of the present experimental apparatus.

헤더의 흡수관 가까이 공급되어 최대한 흡수기 수직관 내부에서 일어날 수 있도록 설계되었다. 흡수과정을 통해 회색된 수용액은 흡수기 하부헤더에 모인 후 수용액 탱크로 보내졌다. 흡수기 상부 및 하부헤더에는 냉매증기를 흡수하기 전 농용액의 온도와 흡수한 후 희용액의 온도를 측정 할 수 있도록 각 3개의 열전대가 설치되었다. 하부헤더 바로 밑에는 샘플링트랩을 설치하여 흡수과정 후 농도를 측정하였고, 상부 및 하부헤더에는 흡수관내 압력을 측정할 수 있는 진공압력계가 설치되어 흡수과정 동안의 흡수기내 압력변화를 계측하였다. 냉각수관 입출구에 열전대를 각각 2개씩 설치하여 냉각수 온도를 측정했다. 흡수기관 입출구측 수용액 온도와 냉각수 입출구 온도를 계측한 열전대는 외경이 0.0762 mm인 T형 열전대였으며, 이는 표준백금 저항온도계를 사용하여 실험온도 범위를 포함하는 20~50℃ 온도범위 내에서 ±0.10℃내로 보정됐다. 본 실험에서 사용한 표준백금 저항온도계의 측정 온도범위는 -70~420℃이며 측정 정밀도는 실험 온도범위에서 ±0.01℃ 이내였다. 재생기내 용액과 흡수기 출구에서의 희용액 농도를 측정하기 위해 각 부위에 부착되어 있는 샘플링 트랩에서 채취한 용액을 우선 비중병(용량:25 ml)을 이용하

여 비중과 온도를 측정 한 후 LiBr 수용액의 비중량-온도-농도 선도로부터 농도를 구했다. 온도 차이로 인한 비중의 측정오차를 줄이기 위해 비중병을 측정온도로 설정된 항온조 내에 충분히 위치 시켜 정확한 비중병의 체적을 측정하였고 용액이 담긴 비중병의 무게를 전자저울(범위 200 g 최소단위 0.1 mg)로 측정하였다. 재생기에서 조절된 온도와 농도를 갖는 수용액은 마그네틱 용액펌프(최대펌핑 용량 2 l/min)를 사용하여 흡수기 안으로 유입시켰고, 유입되는 농용액의 유량측정은 로터미터(유량 범위 0.05~0.5 l/min)로 0.01 l/min 오차 이내로 측정되었다. 냉각수 유량도 로터미터(0~7 l/min 범위)를 사용하여 0.14 l/min 오차 이내로 계속되었다.

흡수관 입구와 출구에서의 압력은 다이아프램 방식의 진공압력계(260 mmHg 범위, 정밀도  $\pm 0.1\%$ BLS)로 측정되었고, 용액 재생 시 재생기 내부의 압력은 진공 브루돈관 압력계(0~760 mmHg, 정밀도  $\pm 5\%$ )를 사용하여 측정되었다. 증발기는 원통형 용기로 재질은 SUS 304로 제작되었고 내부체적은 4 l이며 증기 생성을 위한 히터(1 kW)가 증발기 하부에 설치되어 있다. 히터에 공급되는 전력은 냉매온도와 재생기내 수용액 온도를 측정하면서 온도조절기에 의해 공급되었다. 흡수과정 시 가열기에 대한 공급전력을 조절함으로써 증기 생성율을 제어했고 흡수기의 압력은 일정하게 유지시켰다. 수용액 재생과정 시에는 증발기 내부에 삽입하여 설치한 냉각코일 내를 통과하는 냉각수에 의해 증발기가 응축기로서 작용되었다. 수증기의 응축과정 시 순환되는 냉각수는 항온조에서 공급되었다.

수직형 흡수기내 열 및 물질전달 특성에 영향을 미치는 주요 실험변수들은 수용액 온도, 수용액 유량과 냉각수 온도였다. 실험변수들의

Table 1 Range of experimental parameters

Parameters	Range
Solution temperature(°C)	45, 50
Coolant temperature(°C)	30, 35
Film Reynolds number ( $Re_f$ )	50, 70, 90, 110, 130, 150

범위는 실제 공냉형 흡수식 냉동기의 작동조건과 관련문헌에 제시된 범위를 고려하여 Table 1과 같이 선정되었다. LiBr-H<sub>2</sub>O 시스템을 사용하였으며<sup>1)</sup>, 이중효용 흡수기에서의 실제 조건을 고려하여 수용액 농도는 60wt%, 흡수기내 압력은 7.6 mmHg로 설정되었고, 냉각수 유량은 0.09 m<sup>3</sup>/h였다. 수용액 농도는 LiBr-H<sub>2</sub>O 혼합물의 전체 질량에 대한 LiBr의 질량분율을 %로 나타낸다.

### 3. 자료 처리

#### 3.1 열전달

수용액으로부터 냉각수 측으로 전달되는 열량은 식 (1)과 같다.

$$Q = \dot{m}_c C_{pc} (T_c - T_d) = UA_i LMTD \quad (1)$$

열유속( $q$ )은 식 (1)의 열량을 흡수기 관내 열전달 면적으로 나누어 구한다.

식 (1)의 열관류율은 식 (2)와 같다.

$$U = \frac{1}{\frac{A_i}{A_o} \frac{1}{h_c} + \frac{A_i \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k_{ss} L} + \frac{1}{h_s} + F} \quad (2)$$

오염계수는 흡수식 냉동기에 대해 적용되는 0.00015 m<sup>2</sup>°C/W의 값을 택했으며, 식 (2)의  $h_c$ 는 동심이중관 환상류의 층류조건에 대한 Stephan이 제시한 식<sup>(14)</sup>을 이용하여 식 (3)으로부터 구해졌다.

$$Nu_c = \left[ Nu_{\infty} + f \frac{0.19(Re_c Pr_c \frac{d_h}{L})^{0.8}}{1 + 0.117(Re_c Pr_c \frac{d_h}{L})^{0.467}} \right] \left( \frac{Pr_c}{Pr_w} \right)^{0.11} = \frac{h_c d_h}{k_c} \quad (3)$$

흡수기내의 열전달 계수는 식 (1)~(3)으로부터 구할 수 있다.

#### 3.2 물질전달

흡수제에 흡수되는 단위시간당 냉매흡수량은 식 (4)와 같다.

$$M = GA_i = \dot{m}_{s1} (C_{s1}/C_{s2} - 1) \quad (4)$$

유하액막에서 물질전달의 구동력은 기액 표면에서의 농도와 유하액막의 평균농도와의 농도차이다. 그러나 기액 표면에서 LiBr농도 측정이 불가능하므로 흡수기 입구와 출구에서의 LiBr 계면농도는 시스템의 압력과 수용액의 온도에서의 포화농도값을 근사치로 정할 수 있다. 냉매 흡수량은 식 (5)와 같다.

$$M = \rho_s \beta A_i \Delta C_{lm} \quad (5)$$

식 (5)에서 수용액 밀도( $\rho_s$ )는 흡수기 입출구에서 수용액 밀도의 산술 평균값이고,  $\Delta C_{lm}$ 은 식 (6)과 같다.

$$\Delta C_{lm} = \frac{(C_{s1} - C_1^s) - (C_{s2} - C_2^s)}{\ln[(C_{s1} - C_1^s)/(C_{s2} - C_2^s)]} \quad (6)$$

물질전달계수는 식 (4)~(6)으로 부터 구해지며, 물질전달계수를 이용해 셔우드수를 식 (7)으로 부터 구할 수 있다.

$$Sh = \beta L_s / D_s \quad (7)$$

## 4. 실험결과

### 4.1 흡수기내 압력변화

흡수기의 수직원관 유하액막에서 열 및 물질 전달과정에 대한 흡수모델은 Fig. 2에 나타나 있다.

흡수기 입구 수용액 45℃, 농도 60wt%, 포화압력 6.7 mmHg인 상태를 과냉조건으로 설정 시, 증발기내 냉매증기가 형성하는 포화압력이 약 7.8 mmHg이므로 냉매증기는 1.1 mmHg의 압력구배에 의해 흡수기로 흡수되게 된다. 반

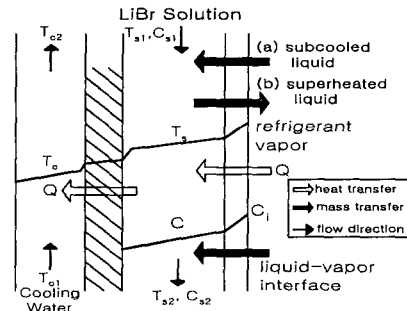
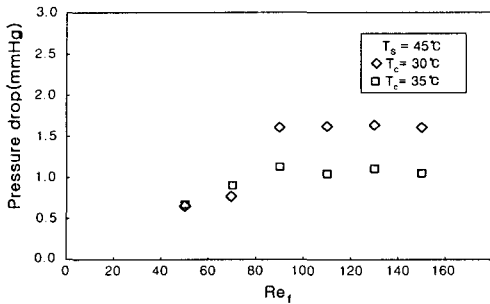


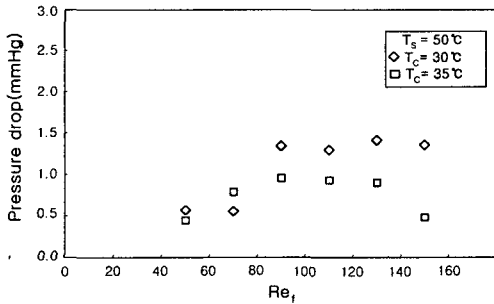
Fig. 2 Absorption model.

면 흡수기 입구의 수용액온도 50℃와 농도 60wt%, 포화압력 8.5 mmHg인 상태를 과열조건으로 설정 시, 증발기내 냉매증기가 형성하는 포화압력은 7.8 mmHg이므로 오히려 흡수기 입구에서 일시적으로 흡수제가 증발하는 효과가 일어났다가 냉각수에 의한 포화압력의 하강으로 흡수과정이 일어나게 된다.

흡수기의 입출구간 압력강하를 과냉조건과 과열조건에 대해 Fig. 3에 나타내고 있다. 과냉조건인 경우, 냉각수 온도가 30℃일 때 막레이놀즈수가 50에서 70까지는 미소한 압력변화를 보였지만 90에서는 압력강하가 약 1.2배 정도로 급격하게 증가하는 경향을 보이다가 90 이후부터 130까지는 소량(2%)의 증가를 보인 후 다시 완만하게 감소하는 경향을 보였으며, 냉각수 온도가 35℃일 때 막레이놀즈수 70 이하인 경우에는 냉각수온도 30℃ 조건보다 최대 15%정도 큰 압력강하를 보였고 90이상에서는 냉각수온도 30℃ 조건과 유사한 경향을 보였지만 압력강하 값이 최대 약 32%정도 낮게 나타났다. 냉각수 온도가 30℃와 35℃인 두 조건에서 막레이놀즈수의 범위가 50~70일 때 압력강하가 미소하게 증가하는 것은 적은 액막유량으로 전열관이 불안정한 막을 형성하기 때문에 냉매증기 흡수속도가 작기 때문이며 막레이놀즈수 90에서의 큰 압력강하 상승은 흡수속도가 크게 일어난다는 것을 의미하는데 그 이유는 이 유량범위에서 전열관에 흡수제가 안정된 유하액막을 형성하여 흡수면적이 최대가 되기 때문이다. 막레이놀즈수 90 이후에 압력강하 변화가 거의 없다가 다소 감소하는 경향을 보이는 것



(a) subcooled solution



(b) superheated solution

Fig. 3 Pressure drop in absorber.

은 액막유량의 증가로 액막에서의 열저항이 증가하여 냉각수의 냉각효과가 떨어져 흡수제의 포화압력을 상승시켜 흡수속도가 다소 감소되는 것으로 사료된다.

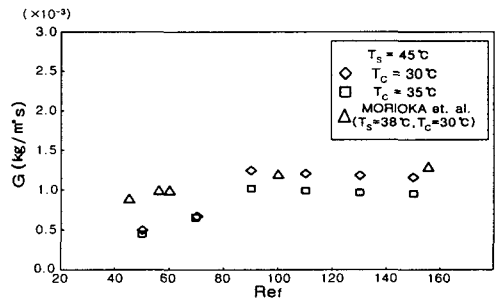
과열조건의 경우, 냉각수온도가 30°C일 때 압력강하는 과냉조건과 유사하게 50에서 70까지는 변화가 매우 작았지만 90에서는 약 1.4배 만큼 압력강하가 커진 후 150까지 거의 일정한 경향을 나타냈고, 냉각수 온도가 35°C일 때 50에서 90까지 약 90%의 압력강하 상승을 보이며 130까지 7%정도의 압력강하 감소를 보인 후 150에서는 50%의 압력강하 감소를 나타냈다. 이는 과냉조건의 경우와 동일한 이유로 설명할 수 있으며, 전체적으로 냉각수 온도가 동일한 조건에서 과냉조건이 과열조건보다 압력강하값이 컸던 이유는 Fig. 2의 흡수모델에서 설명한 증발기출구와 흡수기 입구에서 냉매와

흡수제가 형성하는 포화압력의 차에 기인한 것으로 사료된다.

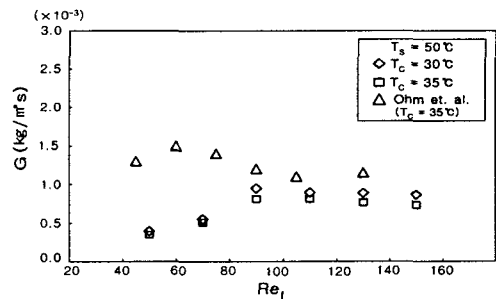
흡수제온도와 냉각수온도가 낮을수록 흡수기 입출구의 압력강하는 증가했고, 수용액 유량이 증가함에 따라 흡수기 입출구의 압력강하는 증가한 후 일정구간에서는 일정한 값을 갖다가 감소하는 경향을 나타냈는데 이는 각각의 실험 조건에서 흡수제와 냉매증기가 형성하는 포화압력에 따른 흡수기내 구동력의 변화 때문으로 판단된다.

#### 4.2 흡수기내 물질전달

Fig. 4는 각각 흡수기 입구의 초기 조건이 과냉액(45°C)과 과열액(50°C) 조건일 때, 냉각수온도와 막레이놀드수에 따른 흡수질량유속의 변화를 보여주고 있다. 과냉조건에서 냉각수온도 30°C일 때, 냉매증기의 흡수 질량유속은



(a) subcooled solution



(b) superheated solution

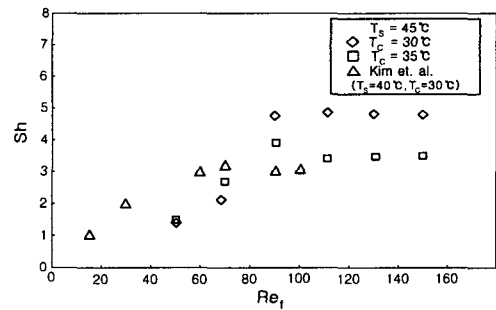
Fig. 4 Absorption mass flux.

막레이놀즈수 50에서 70까지는 약 40%의 증가를 보인 후 90에서 80%의 급격한 흡수량 증가를 보였고 90 이후에서는 1.6% 정도씩 감소하는 경향을 보였다. 냉각수 온도 35℃일 때도 30℃일 때와 유사한 경향을 나타냈다. 과열조건에서 냉각수온도 35℃일 때 막레이놀즈수가 70까지는 냉각수온도가 30℃일 때와 유사한 흡수량을 보였고 90조건에서는 냉각수온도 30℃일 때보다 26% 적은 흡수량을 보인 후 냉각수온도 30℃조건과 유사한 경향으로 서서히 감소하는 경향을 보였다. Morioka 등<sup>(9)</sup>의 결과에서도 이와 유사한 결과를 보고했다. 액막유량이 낮은 영역에서는 본 실험결과와 Morioka 등<sup>(9)</sup>의 결과가 차이를 보였는데 이는 Morioka 등<sup>(9)</sup>의 전열관(동관외경 28 mm, 길이 1400 mm)의 유효흡수면적이 본 실험에서 사용한 전열면적보다 약 90% 크고, 용액유동형태가 관외부를 흐르는 조건으로 전열관 내부를 흐르는 본 실험조건에 비해 냉매증기의 유동면적이 넓어 흡수에 방해될 적게 주고, 수용액온도가 본 실험조건보다 낮은 면에서는 흡수량 증가를 유발하고, LiBr 수용액 농도가 50wt%를 사용했다는 점에서는 흡수량 감소를 유발하기 때문으로 판단된다.

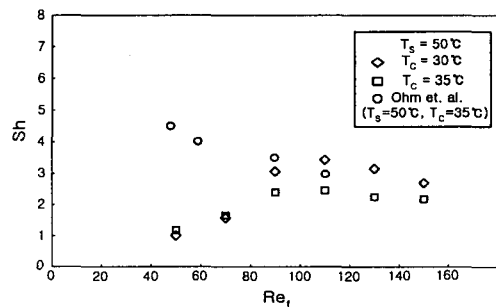
본 실험결과에서 막레이놀즈수 90이전에 흡수량이 적은 것은 흡수제 유량이 적어 전열관의 유효흡수면적이 적어 젖음성이 낮기 때문이며 90이후에 냉각수온도에 따라 흡수량에 차이를 보인 것은 Fig. 3에서 설명했듯이 흡수제가 냉매증기를 흡수할 때 발생하는 열을 냉각수가 제거해 흡수제의 포화압력이 높아지지 않도록 해야하는데 냉각수온도가 높을수록 냉각수의 냉각능력이 떨어져 흡수제의 포화압력을 상승시키는 결과를 가져와 증발기출구에서 흡수기까지의 구동력이 떨어지기 때문에 냉각수온도가 낮은 경우가 흡수율이 더 큰 것으로 판단된다. 막레이놀즈수가 90보다 큰 경우 흡수량이 약간씩 감소하는 것은 액막유량의 증가에 따른 액막에서의 열저항이 증가해 냉각수의 흡수능이 조금씩 떨어져 흡수제의 포화증기압이 상승하는데서 기인하는 것으로 생각되며, 과냉조건이 과열조건보다 냉매 흡수량이 최대 30% 큰 결과를 보인 것은 앞에서 설명한 흡수제의 과냉조건과 과열조건이 형성하는 흡수기안에서

의 냉매증기 구동력에 기인한 것으로 판단된다.

과열조건에서 냉각수온도변화가 냉매증기 흡수율에 영향을 미치는 정도는 과냉조건보다 약 16% 작았다. 이는 흡수제가 과열조건이기 때문에 과냉조건보다 적은 양의 흡수가 일어나 냉각수의 냉각효율에 크게 영향을 받지 않기 때문으로 판단된다. 과열조건에서는 엄기찬 등<sup>(11-12)</sup>의 실험결과와 차이를 보이고 있는데, 이는 본 실험에서 사용된 전열관(SUS 316,  $k=13 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , 내경 17.2 mm, 두께 1 mm, 길이 1150 mm)과 엄기찬 등<sup>(11-12)</sup>이 사용한 전열관(동관,  $k \approx 350 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , 내경 25 mm, 두께 2.5 mm, 길이 1000 mm)의 차이에 의한 냉각수 냉각효과와 엄기찬 등<sup>(11-12)</sup>은 실험과정 중에 흡수기 입구의 압력변화가 5~9 mmHg 까지 바뀌는 조건에서 실험을 한 결과라는 것 때문에 본 실험결과와 차이를 보인 것으로 판



(a) subcooled solution



(b) superheated solution

Fig. 5 Sherwood numbers.

단된다. 상기한 결과를 통해 냉매흡수량이 최대가 되는 액막 레이놀즈수는 90이며, 과냉조건이 과열조건보다 큰 흡수량을 보였고, 과냉조건에서 냉각수의 영향은 과열조건에서 보다 컸다.

Fig. 5는 막레이놀즈수에 따른 셔우드수를 과냉액과 과열액 조건에서 나타냈다. 냉각수 온도가 낮은(30℃)경우가 높은(35℃)경우 보다 셔우드수는 과냉조건에서 최대 45%, 과열조건에서 최대 38% 정도 높았고, 과냉조건은 과열조건보다 셔우드수가 냉각수 온도 30℃일 때 42% 정도 높았고, 냉각수 온도 35℃일 때 39% 정도 높았다. 즉, 과냉조건이 과열조건보다 더 큰 물질전달이 일어났고, 과냉조건이 과열조건보다 냉각수온도의 영향을 더 받았고, 냉각수 온도가 낮을수록 물질전달은 컸다. 이는 과열액의 경우 흡수제가 흡수기 유입 직후 증발이 일어나면서 흡수로 전환하는데는 어느 정도의 시간 및 구간이 소요되어서 흡수기간 및 흡수구간이 과냉액에 비해 감소하기 때문이다.

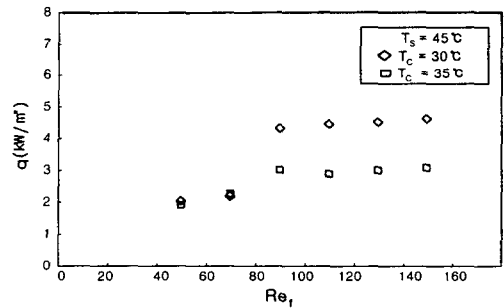
Kim 등<sup>(15)</sup>은 본 실험결과와 유사한 경향을 나타내는 결과를 제시했으나 최대 흡수유량의 최대 값은 막레이놀즈수가 약 70일 때 나타났다. 이는 Kim 등<sup>(15)</sup>의 실험에서는 흡수제가 전열관 외벽을 타고 흐르는 유동이었기 때문으로 판단된다. 즉 냉매증기가 흡수기 내로 유입하는데 전열관 내벽보다는 외벽의 조건이 더 넓어 좋은 조건을 갖고 있어서 보다 낮은 유량에서도 흡수기 계면에서 빠른 흡수가 일어나기 때문이다. 과열조건에서 엄기찬 등<sup>(11-12)</sup>의 결과와 막레이놀즈수가 낮은 영역에서 차이를 보인 것은 Fig. 4의 과열조건에서 나타났던 흡수질량유속의 경우와 동일한 이유 때문이다.

4.3 흡수기내 열전달

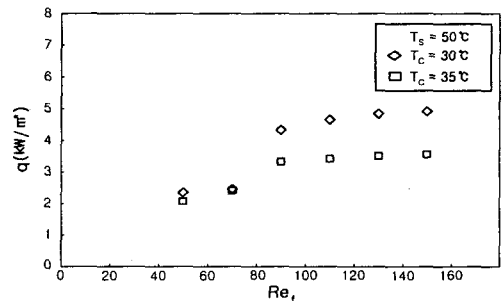
Fig. 6은 흡수기 입구의 초기조건이 과냉상태와 과열상태에서 막레이놀즈수가 열유속에 미치는 영향을 나타내고 있다. 과냉조건인 경우 막레이놀즈수 50과 70에서는 냉각수온도 변화에 따른 열유속의 변화가 20%정도 범위였으나 70에서 90으로 증가할 때 열유속이 약 50~100% 증가하는 경향을 보였고, 90이후에서는 거의 일정하거나 완만하게 증가했다. 과열조건인 경우 막레이놀즈

수 50과 70에서는 냉각수온도 변화에 따른 열유속의 변화가 10%정도였으나 70에서 90으로 증가할 때 열유속이 약 38~72% 증가하는 경향을 보였고, 90이후에서는 완만하게 증가했다. 이는 막레이놀즈수 90에서 물질전달이 급격하게 상승하기 때문이다. 막레이놀즈수 90이후에 열유속이 약간 상승하는 경향을 나타냈는데 이는 액막유량이 증가하면 냉매흡수 시 발생 하는 열량 중 흡수제가 갖고 있는 현열의 비중이 차츰 증가 때문에 막레이놀즈수 90이후에 흡수량은 약간 감소하지만 열유속은 약간 증가하는 것으로 판단된다.

과냉조건 보다 과열조건에서 냉각수온도가 낮은 쪽이 약 5%정도 더 큰 열유속을 보였는데, 이는 엄기찬 등<sup>(12)</sup>의 결과에서도 유사하게 나타났다. 과냉조건에서는 냉매증기 흡수에 의한 흡수열이 열유속에 큰 영향을 주지만, 과열조건인 경우는 흡수열과 흡수제의 현열이 열유속에 영향을 주기 때문으로 판단된다.



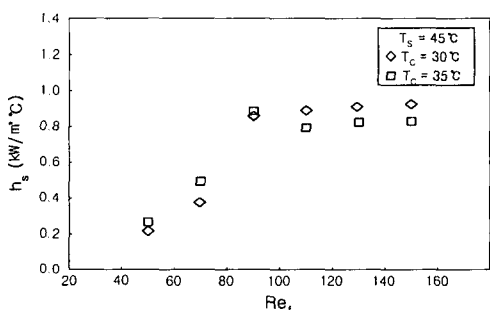
(a) subcooled solution



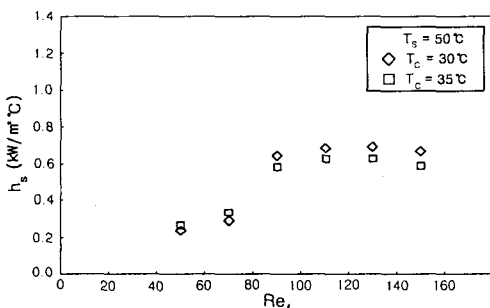
(b) superheated solution

Fig. 6 Heat fluxes.





(a) subcooled solution



(b) superheated solution

Fig. 7 Heat transfer coefficients.

Fig. 7은 흡수기 입구조건이 과냉액과 과열액일 때 막레이놀드수에 따른 열전달계수 변화를 나타내고 있다. 흡수기내 물질전달의 결과와 유사하게 막레이놀드수가 90이상 일 때 과열조건보다 과냉조건에서 냉각수온도가 낮은 쪽이 35% 높은 열전달계수 값을 보였고, 과냉조건의 냉각수온도가 높을 때가 과열조건의 냉각수 온도가 낮을 때보다 20% 높은 열전달계수를 보였다. 즉 과냉조건이 과열조건보다 열전달계수가 컸고, 냉각수 온도의 영향보다는 흡수제 입구온도가 열전달계수에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 이는 흡수액이 과냉액의 상태로 흡수기내로 유입되면 두 유체간에 포화증기압의 구배가 생겨 바로 흡수를 개시하여 물질전달을 동반하는 열전달이 일어나 열전달계수는 상승하게 되기 때문이다. 반면 열전달계수가 일정하게 되는 영역에서는 증가하는 액막유량에 따른 열저항 증가로 냉각수의 냉각

효과 저하로 인한 흡수 구동력이 감소하게 되어서 물질전달과 함께 열전달의 감소를 가져오게 되기 때문이다.

과열액의 경우는 유입초기에 흡수제가 잠시 증발하기 시작하고, 흡수제가 유하하면서 냉각수에 의한 냉각효과로 액막온도가 저하하여 포화상태로 전환하면서 서서히 흡수가 시작되고 냉각수 방향으로 열이동이 이루어진다. 초기 증발영역에서는 흡수제의 증발잠열을 냉각수로부터 얻기 때문에 열이동 방향이 일부는 흡수제방향으로 이루어질 것으로 생각하며 이런 메커니즘 때문에 과열조건에서는 열전달계수가 과냉조건에 비해 낮은 것으로 판단된다. 과열조건에서 얻기찬 등<sup>(11-12)</sup>의 결과가 본 실험의 결과와 차이를 나타낸 이유는 Figs. 4와 5의 과열조건에서 나타났듯이 낮은 막레이놀드수의 경우 물질전달량이 얻기찬 등<sup>(11-12)</sup>의 경우에 더 컸기 때문이다.

#### 4.4 흡수효율

흡수제의 증기압이 흡수기 압력에 도달할 때 흡수는 멈추게 된다. 그러므로 흡수효율( $E$ )은 최대 구동력에 대한 실제농도변화의 비로 나타낼 수 있고 식 (8)과 같다.

$$E = \frac{C_{s1} - C_{s2}}{C_{s1} - C_{eq}(T_{cl}, P_{s2})} \quad (8)$$

여기서  $C_{eq}(T_{cl}, P_{s2})$ 는 냉각수 입구온도와 흡수기 출구압력이 이루는 평형농도를 의미한다. 냉각수 온도를 사용한 것은 냉각수 입구온도가 흡수제가 도달할 수 있는 최소의 온도이기 때문에 냉각수 입구온도를 평형조건으로 잡았다.

Fig. 8은 과냉조건에서 액막 레이놀드수에 따른 흡수효율을 나타낸다. Kim 등<sup>(15)</sup>의 결과는 수용액 온도 40°C, 냉각수 입구온도 30°C, 흡수기관 길이 85 cm일 때 얻은 결과이다. Kim 등<sup>(15)</sup>의 결과는 막레이놀드수 100이하의 범위에서 본 실험결과와 유사한 흡수효율 값을 나타내었다. 본 실험의 흡수효율은 냉각수 온도가 35°C일 때 최대 31%의 효율을 보였으며 30°C인 경우는 최대 23%를 보였다. 이는 냉각수온도가

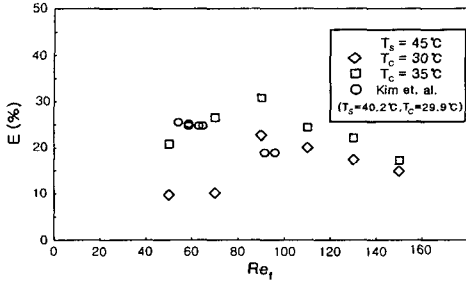


Fig. 8 Absorption effectiveness.

낮을수록 흡수율을 개선할 수 있는 정도가 크다는 것을 의미하며, 최대 물질전달을 이루기 위해서는 확산 경계층을 보다 격렬하게 깨뜨리거나 냉매증기와 흡수제가 계면에서 접촉하는 시간을 늘리는 것이 필수적일 것이다. 접촉길이를 증가시키고 유동율을 감소시키는 것으로 접촉시간을 증가시킬 수는 있지만 흡수기 길이의 증가는 장치크기와 더 높은 제작 원가를 요구하게 된다. 수냉식에서는 보다 큰 물질전달과 열전달을 일어날 수 있도록 소량의 계면활성제를 첨가하여, 확산 경계층을 깨뜨리고 계면에서 큰 교란과 좋은 젖음성을 형성하고 있다. 따라서 본 실험 결과를 바탕으로 공냉식에서 계면활성제의 효용성과 역할에 대한 명확한 규명이 필요하다.

## 5. 결론

(1) 흡수제 온도와 냉각수 온도가 낮을수록 흡수기 입출구의 압력강하는 증가했고, 수용액 유량이 증가함에 따라 압력강하는 증가한 후 일정한 값을 갖다가 감소하는 경향을 나타냈다.

(2) 수직원관 내부의 유하액막에서 최대의 흡수질량유속이 나타나는 막레이놀즈수는 90이었다.

(3) 과냉조건이 과열조건보다 30%정도 흡수율이 높았으며, 과열조건과 과냉조건에서 냉각수 입구온도가 낮을수록 냉매증기 흡수량은 증가했다.

(4) 과냉조건이 과열조건보다 열전달 계수가 컸고, 냉각수온도의 영향보다는 흡수제 입구온도가 열전달 계수에 더 큰 영향을 줬다.

(5) 과냉조건시 최대 흡수효율은 냉각수 온도 30°C일때 23%, 35°C일 때 31%였다.

## 참고문헌

1. 조현철, 김종보, 정시영, 강상우, 이춘식, 1995, LiBr계 용액을 사용한 수직관 흡수기의 열 및 물질전달에 관한 연구, 공기조화·냉동공학 논문집, 제7권, 제2호, pp. 196-206.
2. 윤정인, 오후규, Kashiwagi, T., 1995, 스프링 삼입형 유하액막식 흡수기의 열 및 물질전달특성, 대한 기계학회논문집, 제19권, 제6호, pp. 1501-1509.
3. 이찬우, 1997, 수직관내 리튬브로마이드 수용액막의 흡수과정에 대한 비흡수가스의 영향, 박사학위논문, 홍익대학교, 서울.
4. Kashiwagi, T., Kurosaki, Y., Shishido, H., 1985, Enhancement of vapour absorption into a solution using the marangoni effect, Transaction of the JSME(Part B), Vol. 51, No. 84, pp. 1002-1009.
5. Hozawa, M., Inoue, M., Sato, J., Tsukada, T., Imaishi, N., 1991, Marangoni convection during steam absorption into aqueous LiBr solution with surfactant, J. Chem. Eng. Japan, Vol. 24, No. 2, pp. 209-214.
6. Hihara, E., Saito, T., 1993, Effect of surfactants on falling film absorption, Int. J. Refrigeration, Vol. 16, No. 5, pp. 339-346.
7. Daiguji, H., Hihara, E., Saito T., 1997, Mechanism of absorption enhancement by surfactant, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 8, pp. 1743-1752.
8. Morioka, I., Kiyota, M., 1987, Absorption of water vapor into a lithiumbromide water solution film falling along a vertical plate, Transactions of the JSME(Part B), Vol. 53, No. 485, pp. 236-240.
9. Morioka, I., Kiyota, M., Nakao, R., 1991, Absorption of water vapor into a film of aqueous solution of LiBr falling along a

- vertical pipe, Transactions of the JSME (Part B), Vol. 57, No. 543, pp. 3916-3920.
10. Ohm, K. C., Kashiwagi, T., 1993, Characteristics of heat and mass transfer inside vertical falling type of absorber, Transactions of the JSME(Part B), Vol. 59, No. 557, pp. 169-176.
  11. 엄기찬, 柏木孝夫, 서정윤, 1993, 수직관내를 흘러내리는 액막식 흡수기의 흡수 및 열전달 특성(제1보, 흡수특성), 공기조화·냉동공학 논문집, 제5권, 제1호, pp. 1-9.
  12. 엄기찬, 柏木孝夫, 서정윤, 1993, 수직관내를 흘러내리는 액막식 흡수기의 흡수 및 열전달 특성(제2보, 열전달특성), 공기조화·냉동공학 논문집, 제5권, 제4호, pp. 257-263.
  13. Kim, B. J., Kang, I. S., 1995, Absorption of water vapor into wavy-laminar falling film of aqueous lithium bromide, KSME Journal, Vol. 9, No. 1, pp. 115-122.
  14. 독일기술자협회(VDI) 편, 이봉동 역, 열교환기설계계산핸드북, 세화, pp. Gd1-Gd2.
  15. Kim, K. J., Berman, N. S., Wood, B. D., 1995, Absorption of water vapor into falling films of aqueous lithium bromide, Int. J. Refrigeration, Vol. 18, No. 7, pp. 486-494.