

수평 냉각관 외부를 흘러내리는 LiBr-H₂O 수용액의 유동 및 열/물질 전달 특성에 관한 실험적 연구

설 신 수* · 이 상 용**

(2000년 3월 10일 접수)

An Experimental Study on Flow and Heat/Mass Transfer Characteristics of LiBr-H₂O Solution Flowing over a Cooled Horizontal Tube

Sin Su Seol and Sang Yong Lee

Key Words : Absorption(흡수), LiBr-H₂O Solution(리튬브로마이드 수용액), Horizontal Tube(수평관), Liquid Film(액막), Drainage Pattern(배출 양식)

Abstract

An experimental study was performed to examine the heat and mass transfer characteristics of LiBr-H₂O solution flowing over a single horizontal tube with the water vapor absorption. Effects of the flow rate and the temperature of the solution at the top of the tube, the absorber pressure and the drainage pattern were considered. The absorption rate depends highly on the absorber pressure at the low flow rate condition while on the solution inlet temperature at the high flow rate condition. Also, when the flow rate is low, the absorption performance with the sheet flow drainage appeared to be higher than that with the dripping/jet drainage. However, at the high flow rate condition, the case became reversed. The liquid film became wavy with the higher absorption rate. The waves were more probable to form with the lower flow rate and temperature of the solution, and with the higher absorber pressure..

기호설명

A : 관 단면적 [m²]
c_p : 비열 [J/kg°C]
D : 확산계수 [m²/s]
d : 관 직경 [m]
h : 열전달계수 [W/m²°C]
i : 비엔탈피 [J/kg]
k : 열전도계수 [W/m°C]
L : 관 길이 [m]
Nu : Nusselt 수 [-]
p : 압력 [mmHg]
Q : 체적유량 [m³/s]
q" : 열유속 [W/m²]

Re : Reynolds 수 [-]
Sh : Sherwood 수 [-]
T : 온도 [°C]
W : 질량유량 [kg/s]
X : LiBr 수용액 농도 [wt%]

그리스문자

β : 물질전달계수 [m/s]
Γ : 단위길이 당 질량유량 [kg/m·s]
μ : 점성계수 [kg/m·s]
ρ : 밀도 [kg/m³]

하첨자

A : 흡수기
c : 냉각수
i : 내부, 입구
o : 외부, 출구
R : 냉매

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : e_hyunny@cais.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3026 FAX : (042)869-5210

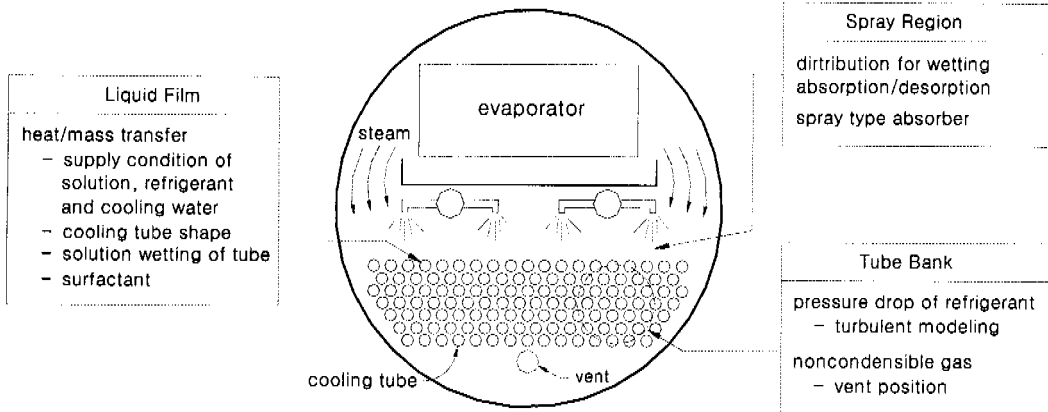


Fig. 1 Horizontal cooling tube type absorber

- s : LiBr 수용액
- sat : 포화 (saturation)
- t : 관 (tube)

1. 서론

최근 들어 생활 수준의 향상에 따른 냉난방 및 공조 시스템에 대한 수요의 증가와 함께 환경보호에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 흡수식 시스템의 효율성과 시스템의 소형화, 경량화와 고 효율화에 대한 요구가 높아지고 있다.

흡수식 시스템의 중요한 구성 기기의 하나인 흡수기는 흡수 기구에 대한 규명이 명확하지 않고 내부 유동이 복잡하다. 따라서 흡수기 내부에서의 유동 및 열/물질 전달 특성에 관한 연구는 필수적이다.

대용량의 흡수식 시스템에 사용되는 흡수기의 구조는 일반적으로 Fig. 1 과 같이 냉각수가 수평관 내부로 흐르고 수평관 외부에는 흡수액이 흘러 내리면서 냉매증기를 흡수하는 원통다관(shell-and-tube) 형태가 많이 사용되고 있다. 이와 같은 형태의 흡수기에 관한 연구는 노즐을 통해 분사된 흡수 용액이 노즐로부터 냉각관군의 상부에 도착할 때까지의 영역(분무 영역, spray region)에서의 흡수, 냉각관군에서의 냉매 증기와 불용축 기체의 유동, 그리고 흡수냉각관 외부를 흘러내리는 액막(liquid film)에서의 열/물질 전달 등으로 나눌 수 있다.

수평 냉각관 외부를 흘러내리는 액막에서의 열/물질 전달에 관한 기존의 연구에서는 수치해석을 통하여 Fig. 2 와 같이 액막에서의 속도 및 온도, 농도의 분포와 열 및 물질전달계수를 구하였다. 단일 수평 냉각관에 대하여는 Andberg 와 Vliet,^(1,2)

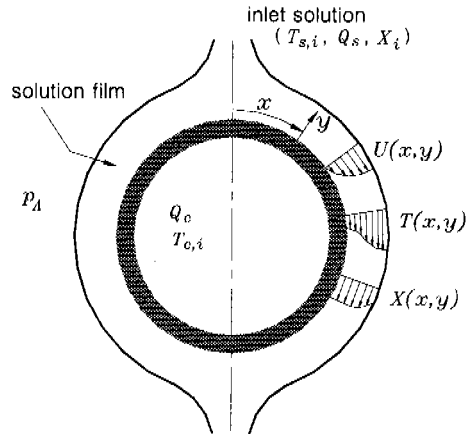


Fig. 2 Absorption at liquid film flowing over a cooled horizontal tube

그리고 Choudhury 등⁽³⁾이, 여러 단의 냉각관군에 대하여는 Kirby 와 Perez-Blanco⁽⁴⁾가 수치 모델을 제시하여 흡수 성능을 계산하였다.

실험적인 연구로는 여러 개의 단을 갖는 냉각관군에 대하여 Cosenza 와 Vliet,^(5,6) Greiter 등⁽⁷⁾과 Nomura 등⁽⁸⁾의 연구 결과가 알려져 있다. 이 밖에도 계면활성제에 의한 흡수기의 성능 향상에 대한 연구가 Rie 와 Kashiwagi,^(9,10) Kim 등,⁽¹¹⁾ 그리고 Zheng 과 Worek⁽¹²⁾에 의해 수행되었다.

한편 국내에서는 단일 수평 냉각관 외부에서의 열/물질 전달에 관한 수치해석이 수행되었으며,⁽¹³⁾ 수평 냉각관군을 갖는 흡수기에 대하여 흡수가 일어나는 경우와 흡수가 일어나지 않는 경우의 열전달 특성을 실험적으로 파악하였다.⁽¹⁴⁾ 이 후 흡수

성능의 향상을 위해 평활관을 인발 가공한 플로럴 (floral) 관에 대한 실험적인 연구^(15,16)가 수행되었으며 그 결과를 평활관의 경우와 비교하였다.

그러나 기존의 수평 냉각관에 대한 수치해석 연구들은 주로 흡수제의 유량이 층류 영역에 해당되며 실험 결과에 의한 검증이 부족하다. 특히 층류-파동(laminar-wavy) 영역의 경우 흡수제의 유량 범위가 실용적인 사용 범위에 유사함에도 불구하고 그 이론적인 모델링이 부족한 실정이다. 또한 기존의 실험적 연구는 대부분 흡수기의 전체적인 성능에 초점을 두고 있다. 이러한 연구들의 한계는 각 변수들의 영향을 독립적으로 파악하기 어려우며, 기본적인 흡수 기구와 내부 유동장 및 열/물질 전달 특성에 대한 규명이 어렵다는 것이다.

따라서 여러 개의 냉각관을 갖는 흡수기의 성능을 해석하기 위해서는 그 구성 단위인 단일 냉각관에 대한 유동 및 열/물질 전달에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 단일 수평 냉각관에서의 흡수 특성을 파악하고 각 변수들의 영향에 따른 흡수 성능의 정량적인 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치의 구성

본 연구의 실험 장치는 Fig. 3 과 같으며 냉매로

는 물을 사용하고 흡수제로는 LiBr-H₂O 수용액을 사용하였다

재생기는 재생 과정 시 냉매 증기를 흡수한 회용액의 흡수제를 농용액으로 재생시키며 흡수 실험 시에는 농용액의 저장 탱크 역할을 한다. 용액 탱크는 흡수 과정 시 흡수기(시험부)를 통과한 회용액을 저장한다. 응축기는 재생 과정 시 흡수제인 LiBr-H₂O 수용액으로부터 발생하는 냉매 증기를 응축시키는 구성부이다. 증발기는 응축기에서 응축된 액체상태의 냉매를 가열하여 시험부에서 필요한 냉매 증기를 발생시키는 구성부이다.

시험부(Fig. 4)인 흡수기는 재생기로부터 공급된 농용액의 흡수제가 증발기로부터 공급되는 냉매 증기를 흡수하여 회용액으로 변환되는 구성부이다. 시험부는 1 개의 냉각관(시험관, test tube)이 있고 그 위에 농용액의 균일한 공급을 위한 노즐들이 배치되어 있다. 시험관의 외경은 19.05mm 이다. 또한 시험관 양측에 설치된 2 개의 관을 통하여 증발기에서 생성된 냉매 증기가 공급된다. 액막의 형상을 관찰하기 위해 시험부의 전면과 후면에 가시창을 설치하였다.

Fig. 3 에서와 같이 시험부의 압력과 함께 재생기 출구와 용액 펌프의 입구 사이, 시험부의 입구와 출구에서 LiBr-H₂O 수용액의 온도를 측정하였다. 아울러 냉각수에 의한 전열량을 파악하기 위

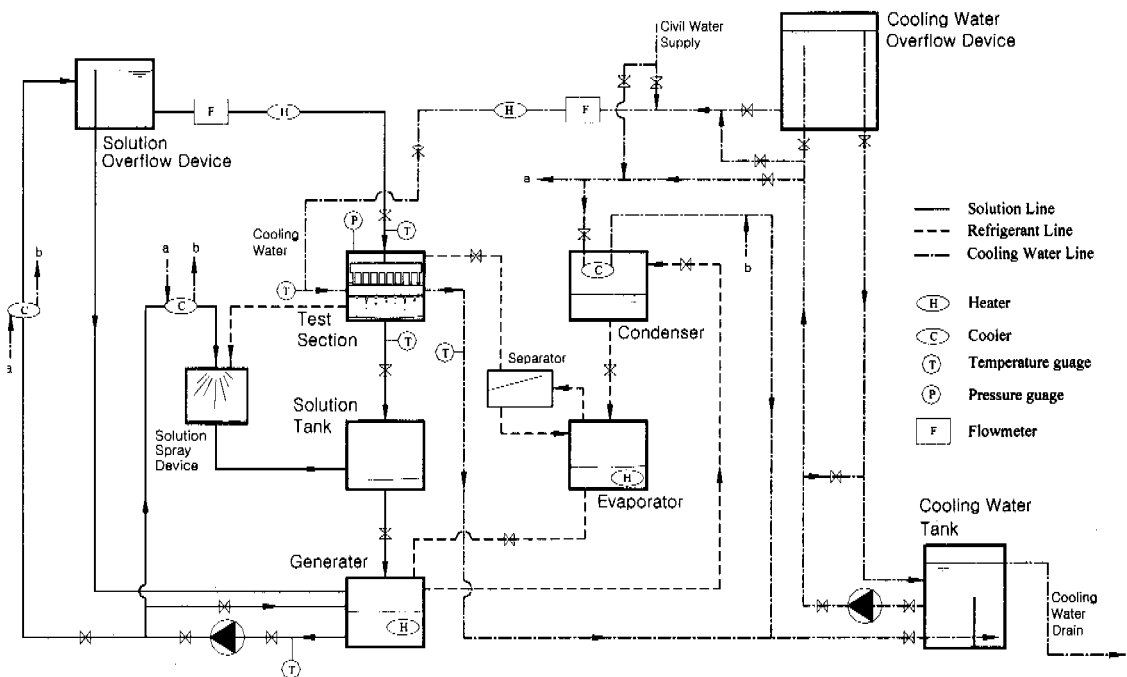


Fig. 3 Schematic diagram of experimental loop

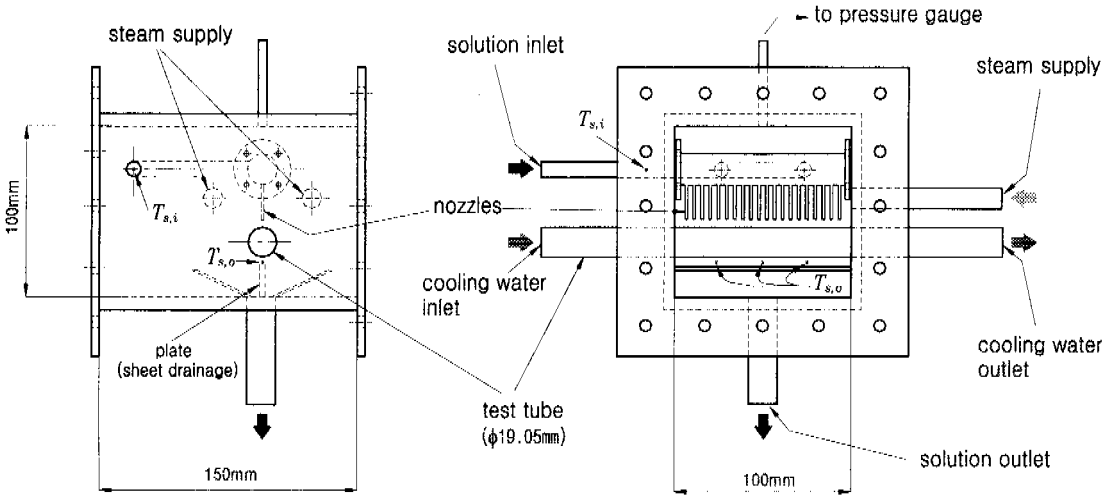


Fig. 4 Test section

Table 1 Range of parameters

Parameters	Range
LiBr-H ₂ O flow rate(m ³ /s)	3.33×10 ⁻⁶ - 6.67×10 ⁻⁶
LiBr-H ₂ O concentration(wt%)	60 - 62
LiBr-H ₂ O temperature(°C)	32 - 50
Cooling water inlet temperature (°C)	26, 32
Test chamber pressure (mmHg)	4 - 10

해 시험관 입구와 출구에서 냉각수의 온도를 측정하였다. 그리고 Fig. 4 와 같이 시험관 하단의 3 지점에서 용액의 온도를 측정하였다. 온도 측정에 사용된 열전대는 K-type 이며 열전대 온도계(Model SR630, 16-channel, Stanford Research System)에 연결되어 있다. 또한 진공용 수은 마노미터(U tube)와 절대 압력계(Model EJA310, Yokogawa Electric Co., 0 - 44 mmHg)를 사용하여 시험부 내부의 압력을 측정하였다.

시험관 외부를 흐르는 용액의 포화 압력이 흡수기 내부 압력보다 높은 경우에는 흡수기 내부에서 용액의 증발 현상이 일어난다. 이 때 흡수기의 압력을 일정하기 유지하기 위해서는 용액의 증발에 의해 발생하는 냉매증기를 연속적으로 제거할 수 있는 장치가 필요하게 된다. 본 연구에서는 증발 실험을 수행하기 위해 별도의 보조 냉각기와 용액 분사 장치를 이용하여 흡수기에서 발생하는 냉매증기를 계속적으로 제거, 조절함으로써 흡수기 내부 압력을 일정하게 유지하였다.

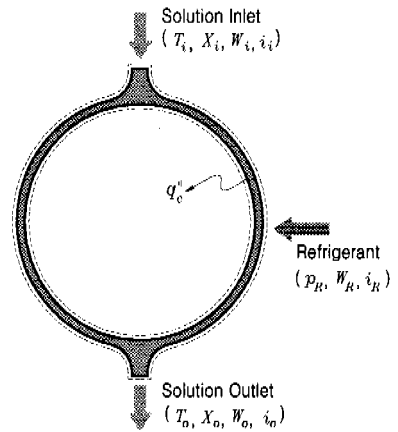


Fig. 5 Heat and mass balance at absorber

2.2 실험 방법

실험 변수 및 범위는 Table 1 과 같으며 각 변수가 흡수 성능에 미치는 영향을 독립적으로 파악하였다.

본 연구에서는 시험부의 입, 출구에서 측정된 온도($T_{s,i}$, $T_{s,o}$)를 이용하여 냉매의 흡수량을 결정하였다. Fig. 5 는 시험관을 검사체적(control volume)으로 하여 열/물질 전달 수치 균형(heat and mass balance) 관계를 나타낸 그림이다. 이 때 수치 균형 관계식(balance equation)과 LiBr-H₂O 수용액의 상태방정식은 다음과 같다.

$$W_i + W_R = W_o \quad (1)$$

$$X_i W_i = X_o W_o \quad (2)$$

$$i_i W_i + i_R W_R = i_o W_o + q_c'' A_o \quad (3)$$

$$i_o = i_o(T_o, X_o) \quad (4)$$

식 (1) ~ (4)에서 미지수는 X_o , W_o , i_o 와 W_R 이므로 이들을 연립하여 풀면 냉매증기의 흡수량(W_R)을 결정할 수 있다.

시험관을 통한 총괄 열전달계수와 시험관의 외부/내부 열전달계수의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{1}{UA_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} + \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi k_i L} \quad (5)$$

따라서 시험관의 외부를 흘러내리는 흡수제의 열전달계수를 파악하기 위해서는 시험관을 통한 총괄 열전달계수(U)와 시험관 내부에서의 열전달계수(h_i)를 알아야 한다.

냉각 열유속은 시험관의 입/출구에서 냉각수의 온도와 유량으로부터 다음과 같이 계산되며 실험에 의해 총괄 열전달계수를 구할 수 있다.

$$q_c'' = W_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) / A_o \quad (6)$$

$$= U \cdot \Delta T_{lm}$$

여기서 대수평균온도차 ΔT_{lm} 은 다음과 같다.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{s,i,sat} - T_{c,o}) - (T_{s,o,sat} - T_{c,i})}{\ln \frac{(T_{s,i,sat} - T_{c,o})}{(T_{s,o,sat} - T_{c,i})}} \quad (7)$$

$T_{s,i,sat}$ 와 $T_{s,o,sat}$ 는 각각 시험관 입/출구에서의 용액의 농도와 흡수기 압력으로부터 결정되는 포화 온도($T_{s,sat} = f(p_A, X)$)이며 듀링(Dürring) 선도에서 구할 수 있다.

본 연구에서는 흡수/증발 실험과 동일한 냉각수

공급 조건에서 시험관 외부에서의 응축 실험을 통하여 내부 전열 계수를 구하였다. 시험관 내부에 전열 촉진기를 설치하지 않은 경우와 설치한 경우에 대하여 실험을 통하여 얻어진 내부 열전달계수는 각각 $700 \pm 20 \text{ W/m}^2\text{C}$ 와 $3200 \pm 50 \text{ W/m}^2\text{C}$ 이다. 계산에 사용된 응축수의 물성치는 포화 온도 조건에서 구하였다.

액막의 열전달 특성을 나타내는 Nusselt 수는 다음과 같다.

$$Nu = \frac{h_o d_o}{k_s} \quad (8)$$

물질전달에 사용된 식들은 다음과 같다.

$$\Delta \rho_{lm} = \frac{(\rho_{i,sat} - \rho_i) - (\rho_{o,sat} - \rho_o)}{\ln \frac{(\rho_{i,sat} - \rho_i)}{(\rho_{o,sat} - \rho_o)}} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{W_R}{\Delta \rho_{lm} A_o} \quad (10)$$

$$Sh = \frac{\beta d_o}{D} \quad (11)$$

여기서 ρ 는 냉매의 밀도이며 β 는 물질전달계수이다. 또한 $\rho_{i,sat}$ 와 $\rho_{o,sat}$ 는 각각 흡수기 입, 출구에서 흡수기 압력과 용액의 온도로부터 결정된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동 현상

흡수기의 열/물질 전달 성능은 냉매와 흡수제의 공급 조건과 함께 흡수제의 냉각관 적심(wetting) 상태에 의해서도 큰 영향을 받는다. Fig. 6은 2개의 단(row)을 갖는 수평 냉각관 외부에서 흡수제인 LiBr-H₂O 수용액의 유동 상태를 나타낸다. 냉

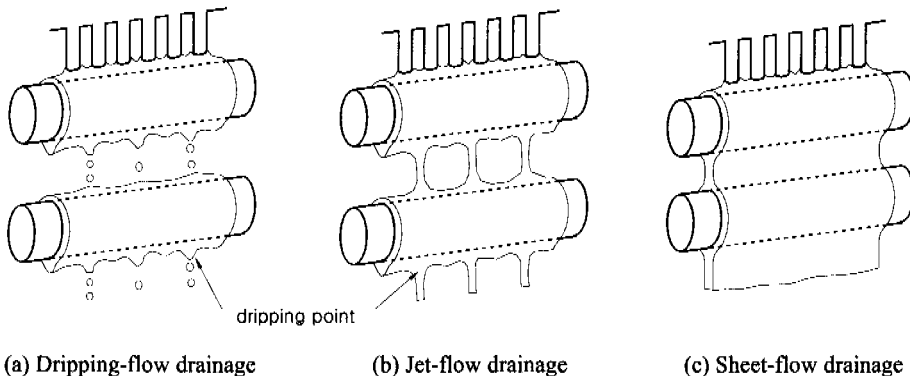


Fig. 6 Drainage pattern

각관 상부에 설치되어 있는 노즐에서 분사된 용액은 시험관 외부 표면에서 얇은 액막을 형성하며 흘러내린다. 분사용액의 유량이 작은 경우에 시험관 하부에서의 용액은 표면장력에 의하여 액적의 형태를 이루며 다음 단의 시험관을 거쳐 흡수기 출구로 떨어져서 배출된다(Fig. 6(a)). 분사용액의 유량이 증가하면 시험관 하부에서의 용액의 흐름은 액주(liquid column)의 형태로 변하게 되며(Fig. 6(b)) 시험관 표면에서의 액막 두께와 떨어지는 액주의 수(적하지점, dripping point)가 증가 한다.

상단과 하단의 냉각관의 간격이 작은 경우 용액의 배출 형태는 막(sheet)의 형태가 나타나는데(Fig. 6(c)) 수치 해석을 이용한 대부분의 연구들은 이러한 막 형태의 배출을 가정하여 수행되었다. 본 연구에서는 Fig. 4 와 같이 시험관 하부에 얇은 판을 설치하여 막 배출을 형성시켰으며 액주 배출의 실험 결과(판이 설치되지 않았을 때)와 비교하였다.

용액의 배출 형태는 시험관 하부에서의 유동과 다음 단 시험관 표면에서의 액막 형태에 직접적인 영향을 주게 되므로 많은 단을 가지는 흡수기를 해석하기 위해서는 시험관 하부에서의 용액의 배출 양식(drainage pattern)에 대한 연구가 중요하다.

Fig. 7 은 막 배출인 경우에 시험관 외부 표면에서 형성된 LiBr-H₂O 수용액 액막의 유동 상태를 나타낸다. Fig. 7(a)는 용액을 분사하지 않은 경우이며 수평 시험관 상부에 설치된 여러 개의 단공 노즐과 시험관 하부에 설치된 열전대를 볼 수 있다. Figs. 7(b), (c)와 (d)는 분사용량이 $3.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, 분사용액의 온도와 농도는 각각 32°C, 62 wt%이며 냉각수의 온도는 26°C인 경우이다. Fig. 7(b)는 냉매 증기를 공급하지 않은 경우로 단공 노즐을 통

하여 분사된 용액이 수평관 외부를 따라 흘러 내려가면서 냉각수와 열 교환을 통해 냉각되고, 시험관 하부에서 막의 형태로 배출된다.

냉매 증기의 공급량이 증가하면 흡수기의 압력은 상승하고 공급되는 냉매는 용액에 흡수된다. 이 때 발생하는 흡수열은 시험관 내부의 냉각수를 통하여 제거된다. 냉매 증기의 공급량을 계속 증가시키면 흡수는 더 활발히 일어나고 시험관 외부의 액막에서는 미세한 파동이 발생한다. 이러한 파동은 냉매 증기의 공급량이 증가함에 따라 Fig. 7(c)와 같이 성장한다. 냉매의 공급량을 더욱 증가시키면 Fig. 7(d)에서 알 수 있듯이 용액이 시험관의 표면을 적시지 않는 영역이 반복적으로 발생하는 액막 교란이 일어난다.

일반적으로 액막에서 발생하는 파동은 열/물질 전달을 촉진시키는 역할을 한다. 지금까지의 연구에서는 파동영역에서 용액의 분사용량이 증가함에 따라 흡수 성능이 향상되는 것으로 알려져 있다. 이는 용액의 유량이 증가함에 따라 액막 자유표면에 파동이 발생하여 기-액 경계면의 면적 증가에 의해 성능이 향상되는 것으로 예측되고 있다. 그러나 본 연구에서 관찰된 액막 파동은 같은 용액 유량에서 냉매 공급량의 증가에 따라 발생하는 것으로 분사용량 증가에 의한 파동의 발생과는 원인이 다른 것으로 판단된다.

3.2 열/물질 전달 특성

3.2.1 분사용액 온도의 영향

냉각수의 입구 온도($T_{c,i}$)가 일정하게 유지된 상태에서 흡수기 입구의 용액 온도($T_{s,i}$)를 높이면 용액과 냉각수와의 온도차가 커지므로 냉각수의 열 제거량(q_c)은 증가하게 된다. 그러나 흡수기 입구

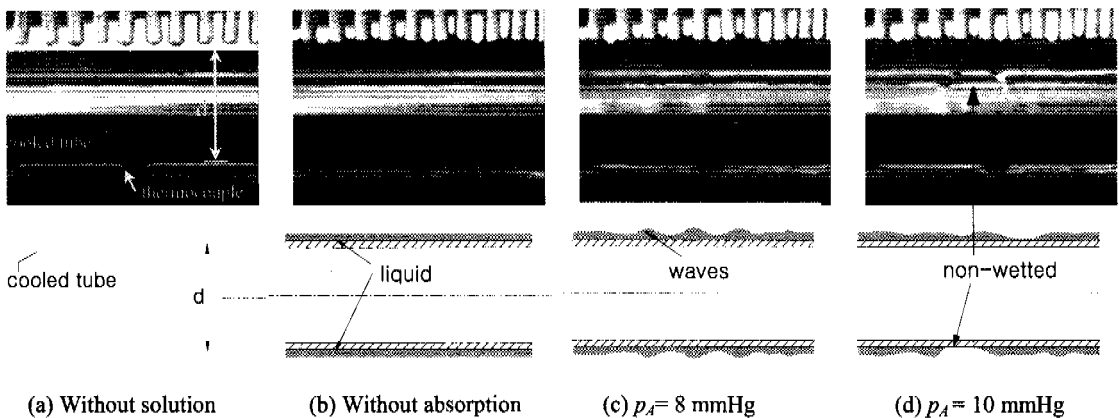


Fig. 7 Photographs of solution film flowing over a cooled horizontal tube ($Q_s=3.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $T_{s,i}=32^\circ\text{C}$, $X_{s,i}=62 \text{ wt}\%$, $T_{c,i}=26^\circ\text{C}$, $h_f=3200 \text{ W/m}^2\text{C}$, sheet drainage)

에서의 용액의 포화 압력($p_{s,i,sat}$)이 흡수기 압력(p_a , 냉매 공급 압력)보다 높으면 분사된 용액은 바로 증발을 하게 된다. 용액의 온도가 증가하면 이에 상응하는 용액의 포화 압력도 증가하므로 일정한 흡수기 압력 하에서는 분사용액의 온도가 높을수록 증발이 활발하게 일어난다.

Figs. 8 과 9 는 액주 형태의 배출인 경우로서 용액의 입구 온도 변화에 따른 용액의 출구 온도($T_{s,o}$)와 냉각 열유속(q_c'')을 나타낸 것이다. 또한 Figs. 8 과 9 에는 용액의 분사유량(Q_s)을 변화시킨 결과를 비교, 도시하였으며, 각 조건에서의 실험치를 최소자승법을 이용하여 2 차식으로 표현한 선을 함께 도시하였다. 용액의 출구 온도는 시험관 하부에 설치한 3 개의 열전대로부터 측정된 온도를 평균한 것이다.

Figs. 8 과 9 에서 알 수 있듯이 분사유량이 작고 흡수기 압력이 높은 경우를 제외하면 분사용액의 온도가 증가할수록 용액의 출구 온도와 냉각 열유속은 거의 선형적으로 증가한다.

흡수기 압력보다 높은 포화 압력을 갖는 온도로 분사되는 용액은 증발과 함께 냉각수와 열 교환을 통해 온도가 낮아진다. 이러한 용액의 증발은 시험관 외부를 흐르는 액막의 포화 압력과 흡수기 압력이 같아질 때까지 계속된다. 따라서 분사용액의 온도가 높으면 냉각 열유속, 즉 열제거 부하는 커지지만 증발이 일어나므로 흡수기의 성능은 저하된다.

분사용액의 온도가 낮으면 분사된 용액은 냉매를 흡수하게 된다. 흡수 시 발생하는 흡수열에 의하여 시험관 외부 액막의 자유표면(기-액 경계면)에서는 용액의 온도가 높아지지만 시험관 내부를 흐르는 냉각수와 열 교환을 통해 흡수열이 제거됨으로써 지속적인 흡수작용이 일어난다. 따라서 흡수식 냉동기의 성능 향상을 위해서는 분사용액의 온도를 낮추어야 하며, 이 때 용액열교환기의 성능이 중요한 역할을 한다.

Fig. 10 은 Figs. 8 과 9 의 결과 값으로부터 계산된 것으로 용액의 입구 온도 변화에 따른 시험관 단위 면적 당 냉매 흡수량(W_R/A_o)을 나타낸다. 양(+)의 값의 흡수량은 냉매의 흡수를 음(-)의 값은 용액의 증발을 의미한다. 냉매 흡수량은 흡수기의 성능을 나타낸다. 따라서 냉각 열유속이 작고 냉매 흡수량이 커질수록 흡수식 시스템의 성능을 나타내는 성적계수(COP)는 증가한다. Fig. 10 에서 알 수 있듯이 일정한 흡수기 압력에서 분사용액의 온도가 증가하면 흡수 성능은 감소한다.

3.2.2 흡수기 압력의 영향

Figs. 8 ~10 에서 흡수기 압력에 따른 열/물질 전달 특성을 알 수 있다. 흡수기 압력이 증가하면 기-액 자유표면에서의 용액 온도와 냉매 농도가 증가하므로, 흡수기 출구의 용액 온도와 냉각 열유속, 그리고 냉매 흡수량이 모두 증가한다. Fig. 8

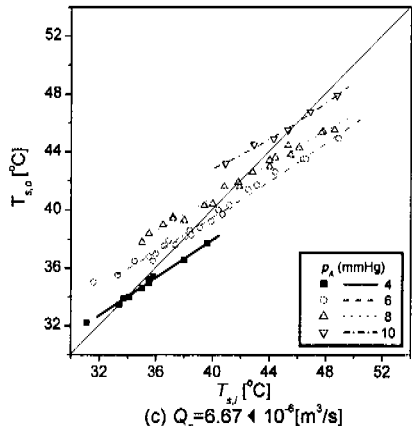
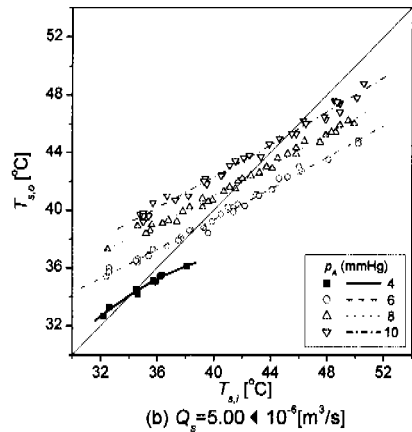
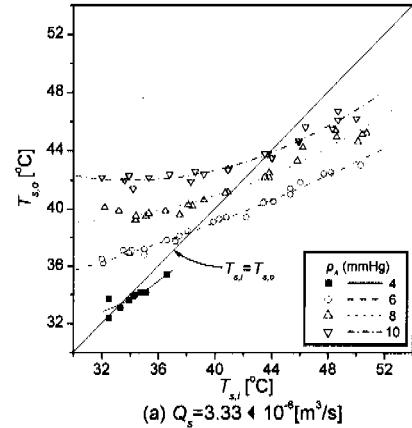
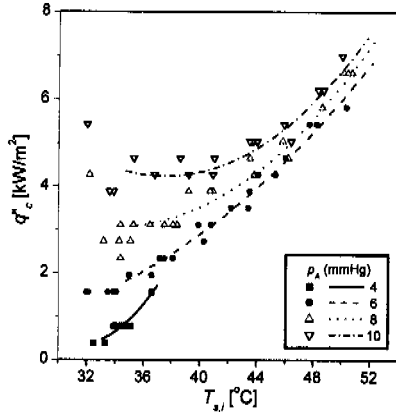


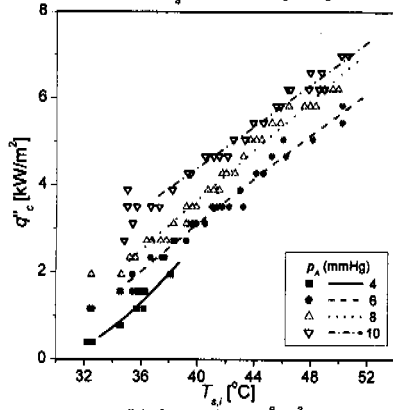
Fig. 8 Variation of solution temperature at absorber outlet with solution temperature at absorber inlet ($X_{s,i}=60$ wt%, $T_{c,i}=32^\circ\text{C}$, $h_i=700$ W/m²·°C, jet drainage)

에서 알 수 있듯이 흡수기 압력이 높으면 용액의 출구 온도가 입구 온도보다 상승하게 된다. 이는 흡수된 냉매에 의해 발생하는 흡수열이 냉각수에 의해 제거되는 열량보다 많아지게 되어 흡수기 출구에서의 용액 엔탈피가 입구에서의 엔탈피보다

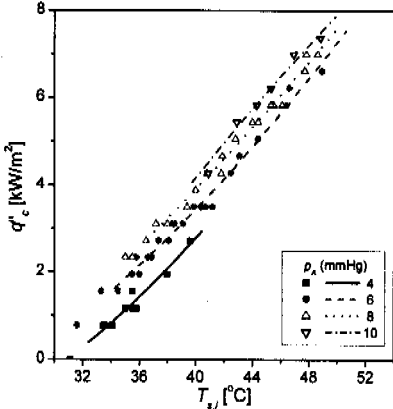
증가되는 것을 의미한다. 또한 분사용액의 입구 온도가 일정할 때, 흡수기 압력이 증가하면 냉각수 열제거 부하는 전체적으로 증가하나 분사유량이 커질수록 그 증가 폭은 점차 감소한다. 그러나 냉매 흡수량은 지속적인 증가 경향을 나타낸다.



(a) $Q_s = 3.33 \times 10^{-6} [\text{m}^3/\text{s}]$

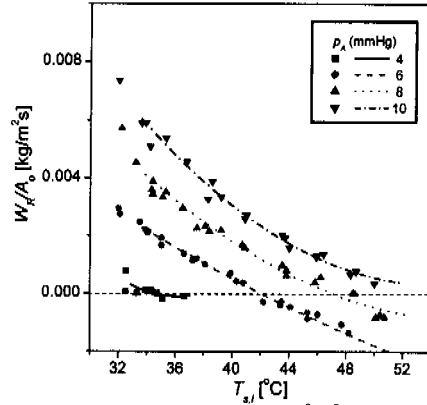


(b) $Q_s = 5.00 \times 10^{-6} [\text{m}^3/\text{s}]$

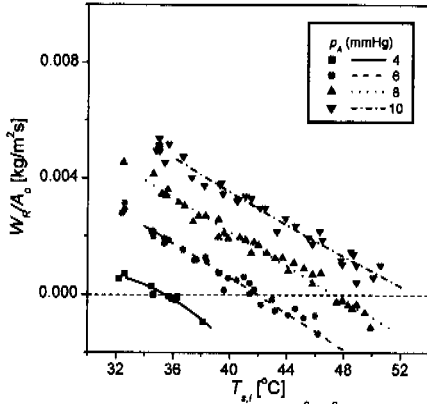


(c) $Q_s = 6.67 \times 10^{-6} [\text{m}^3/\text{s}]$

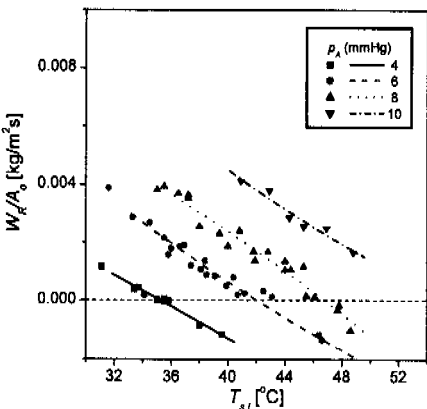
Fig. 9 Variation of cooling heat flux with solution temperature at absorber inlet ($X_{s,i}=60$ wt%, $T_{c,i}=32$ °C, $h_f=700$ W/m²·C, jet drainage)



(a) $Q_s = 3.33 \times 10^{-6} [\text{m}^3/\text{s}]$



(b) $Q_s = 5.00 \times 10^{-6} [\text{m}^3/\text{s}]$



(c) $Q_s = 6.67 \times 10^{-6} [\text{m}^3/\text{s}]$

Fig. 10 Variation of absorption rate with solution temperature at absorber inlet ($X_{s,i}=60$ wt%, $T_{c,i}=32$ °C, $h_f=700$ W/m²·C, jet drainage)

Figs. 8(a)와 9(a)에서 알 수 있듯이 분사유량이 작고 분사용액의 온도가 낮은 경우에 용액 공급 조건에서 흡수기 내부 압력의 영향은 크게 나타난다. 이 조건은 Figs. 7(c)와 (d)와 같이 액막의 표면에서 파동이 발생하는 경우이며 분사용액의 온도가 낮고 흡수기 압력이 높아서 냉매의 흡수가 잘 일어나는 경우이다.

3.2.3 분사 유량의 영향

용액의 분사유량이 작은 경우(Fig. 8(a))에는 시험관 외부에 형성되는 액막의 두께가 얇아지게 되므로 흡수기出口的 용액 평균 온도는 냉각수 입구 온도의 영향과 액막의 자유표면에서 일어나는 증발, 흡수의 영향을 많이 받는다. 따라서 분사유량이 작은 경우의 용액 출구 온도는 분사유량이 큰 경우(Fig. 8(c))에 비하여 증발이 일어날 때에는 낮아지고 흡수가 일어날 때에는 높아진다. 또한 분사유량이 작은 경우에는 흡수기 압력에 따라 용액의 출구 온도 변화가 크게 나타난다. Fig. 8에서 대각선 방향으로 그려진 실선($T_{s,o}=T_{s,i}$)은 용액의 분사 온도와 출구 온도가 같은 것으로 냉각을 하지 않을 경우에는 흡수와 증발의 경계가 된다. 실험 결과 값들이 실선에 가까운 값을 갖는 것은 흡수기 압력의 영향은 작고 분사용액 온도의 영향을 크게 받는다는 것을 의미한다. 따라서 용액의 출구 온도가 분사유량이 작은 경우에는 흡수기 압력의 영향을 크게 받으며, 분사유량이 큰 경우에는 분사용액 온도의 영향을 크게 받음을 알 수 있다.

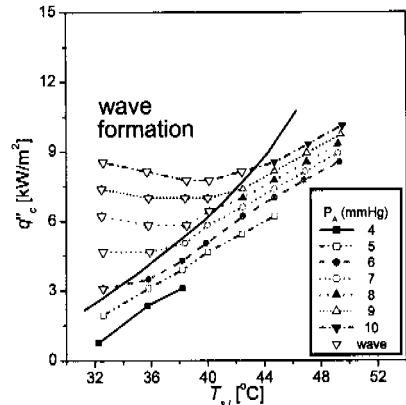
Fig. 11은 막 형태의 배출인 경우로서 분사용액 온도에 따른 냉각 열유속을 나타낸 것이다. 또한 수평 시험관 외부를 흘러내리는 액막의 표면에 파동이 발생하는 유동 영역도 함께 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 액막 파동은 분사용액의 온도가 낮고 흡수기 압력이 높을 때 발생한다. 또한 분사유량이 작은 경우가 분사유량이 큰 경우에 비하여 더 넓은 분사 용액의 온도와 흡수기 압력 범위에서 액막 파동이 발생한다. 액막 파동이 일어나지 않는 경우에는 분사용액의 온도가 감소함에 따라 냉각 열유속도 선형적인 감소를 보이지만, 액막 파동이 발생하는 경우에는 선형적인 감소에 비해 높은 냉각 열유속을 나타낸다. 따라서 이러한 액막 파동이 일어나는 경우의 분사용액과 냉매의 공급 조건을 제시하고 액막 파동에 의한 흡수 특성을 파악함으로써 흡수기의 성능 향상과 함께 정량적인 해석을 기대할 수 있다.

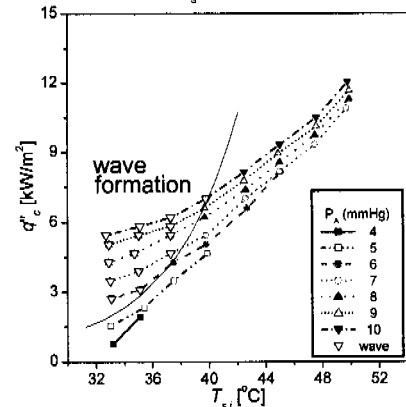
3.2.4 분사용액 농도의 영향

Fig. 12는 분사용액 농도가 각각 60, 62 wt%인 경우에 대하여 분사용액 온도에 따른 흡수기 출구

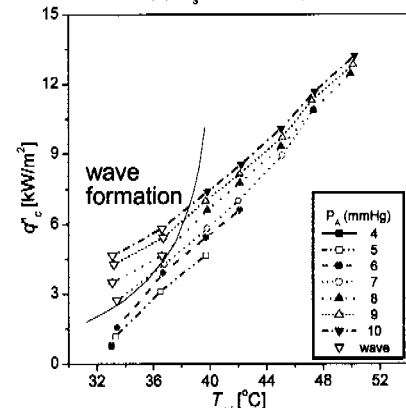
의 온도(Fig. 12(a)), 냉각 열유속(Fig. 12(b))과 냉매 흡수량(Fig. 12(c))의 변화를 나타낸 것으로 막 형태의 배출이다. 일정한 온도에서 용액의 농도가 증가하면 용액의 수증기 포화 압력은 감소한다. 따라서 냉매를 일정한 압력으로 공급하는 경우,



(a) $Q_s = 3.33 \times 10^{-6} \text{ [m}^3/\text{s]}$



(b) $Q_s = 5.00 \times 10^{-6} \text{ [m}^3/\text{s]}$



(c) $Q_s = 6.67 \times 10^{-6} \text{ [m}^3/\text{s]}$

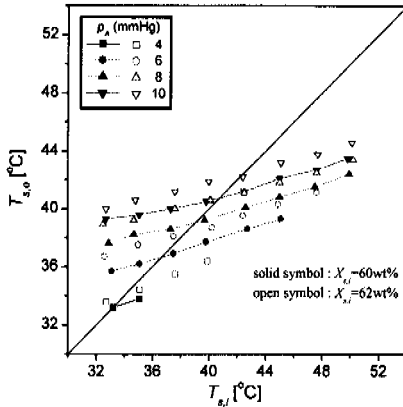
Fig. 11 Range of wave formation ($X_{s,i}=60 \text{ wt\%}$, $T_{c,i}=32 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_i=3200 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, sheet drainage)

같은 분사용액 온도에서 분사용액의 농도가 증가하면 분사용액의 포화 압력과 냉매(수증기) 공급 압력과의 차이가 커지게 되므로 Fig. 12(c)에서 볼 수 있듯이 냉매의 흡수량은 증가하게 된다. 이에 따라 흡수기 출구 온도와 냉각 열유속도 각각 증

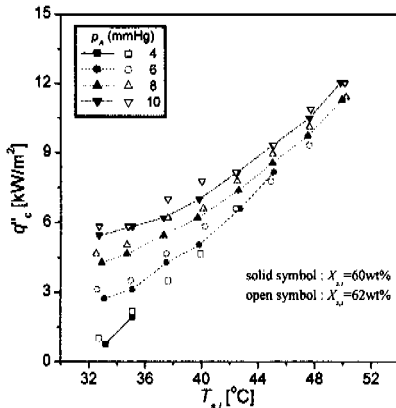
가한다.

3.2.5 배출 형태의 영향

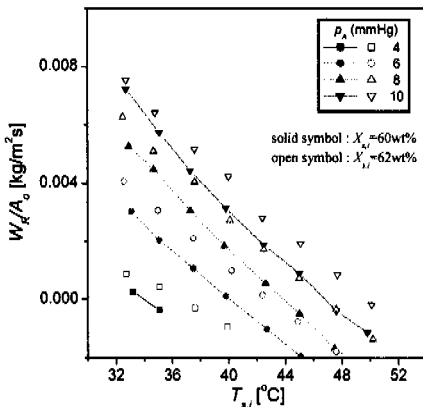
Fig. 13은 액주 및 막 배출 형태에 따른 냉매 흡수량의 변화를 나타낸다. 그림에서 선은 배출



(a) temperature at absorber outlet

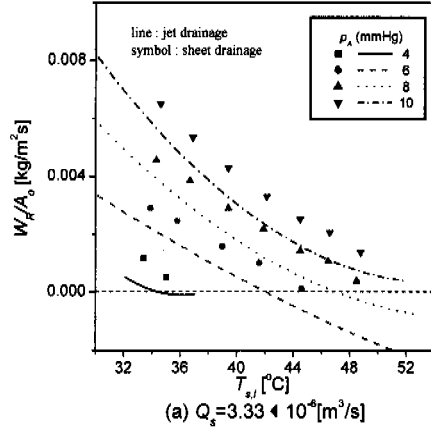


(b) cooling heat flux

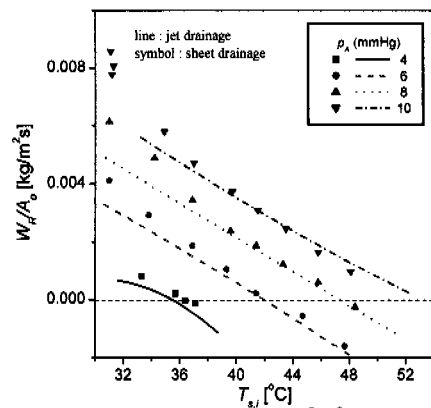


(c) absorption mass flux

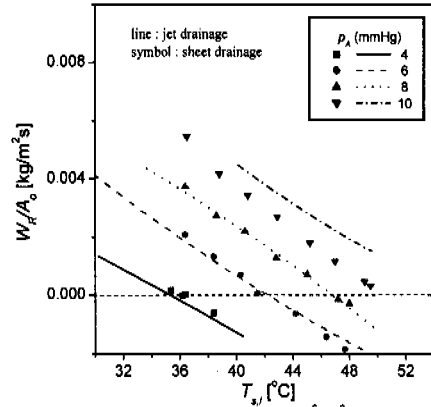
Fig. 12 Variation of solution temperature at absorber outlet, cooling heat flux and absorption rate with solution concentration ($Q_s=5.00 \times 10^{-6}$ m³/s, $T_{c,i}=32$ °C, $h_i=3200$ W/m² °C, sheet drainage)



(a) $Q_s=3.33 \times 10^{-6}$ [m³/s]



(b) $Q_s=5.00 \times 10^{-6}$ [m³/s]



(c) $Q_s=6.67 \times 10^{-6}$ [m³/s]

Fig. 13 Variation of absorption rate with solution temperature at absorber inlet ($X_{s,i}=60$ wt%, $T_{c,i}=32$ °C, $h_i=700$ W/m² °C)

형태가 적하 또는 액주 유동인 경우로 Fig. 10 에서의 실험치를 2 차식으로 표현한 것이고 각 기호는 막 유동인 경우를 의미한다.

분사유량이 작고 용액의 배출 형태가 액주 유동(Fig. 6(b))일 때 시험관 하부에서의 용액의 유동은 액주가 떨어지는 지점(적하지점)들 사이의 영역에 용액이 모였다가 적하지점으로 이동하여 흡수기 출구로 배출된다. 따라서 액주 배출의 경우가 막 배출의 경우에 비하여 상대적으로 두꺼운 액막이 시험관 하부에 형성된다. 두꺼운 액막은 열 및 물질 전달의 저항으로 작용한다. 그러므로 Fig. 13(a)에서와 같이 액주 형태의 배출이 막 형태의 배출에 비하여 낮은 흡수 성능을 나타낸다.

막 배출의 경우, 분사 유량이 증가하면 냉각관 외부의 액막 두께가 증가하여 열/물질 전달의 저항이 커진다. 반면 액주 배출의 경우, 분사 유량이 증가하면 적하지점의 수가 많아지고 적하지점이 불규칙하게 발생하므로, 시험관 하부에서의 액막의 유동이 활발해지고 흡수 성능이 점차 증가하는

경향을 보인다. 따라서 분사유량이 증가하면 Fig. 13(c)와 같이 액주 배출인 경우의 흡수 성능이 막 배출인 경우와 유사하게 되며, 흡수기 압력이 높은 경우에는 더 높은 흡수 성능을 갖는다.

Fig. 14는 막 형태의 배출로서 Reynolds 수에 따른 Nusselt 수와 Sherwood 수의 변화를 나타낸다. 본 연구에서 사용된 Reynolds 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{4\Gamma}{\mu} \quad (12)$$

여기서 Γ 는 시험관 단위 길이 당 분사용액의 질량유량이다. Fig. 14(a)와 (b)에서 동일한 분사유량인 경우에도 Reynolds 수가 변하는 것은 분사용액의 온도의 변화로 인하여 점도가 달라지기 때문이다. 따라서 그림에서 알 수 있듯이 동일한 분사유량에서도 넓은 범위의 Nusselt 수와 Sherwood 수를 갖는다. 이는 Nusselt 수와 Sherwood 수의 계산 과정에서 사용된 대수평균 온도차(식 (7))와 대수평균 밀도차(식 (9))가 각각 액막의 자유표면에서의 포화 온도와 포화 밀도로 표현되었기 때문이다. 여기서 포화 온도($T_{s,sat} = f(p_A, X)$)는 흡수기 압력과 용액의 농도로부터 구할 수 있으며 포화 밀도($\rho_{sat} = f(p_A, T_s)$)는 흡수기 압력과 용액의 온도로부터 구할 수 있다. 따라서 식 (7)은 흡수기 압력의 영향이 고려된 용액의 포화온도와 냉각수의 온도로 표현되었지만 분사용액의 온도의 영향은 무시되었다. 식 (9)는 용액 온도와 흡수기 압력의 영향이 고려된 포화 밀도와 용액에 포함되어 있는 냉매의 밀도로 표현되었지만 냉각수에 의한 액막의 온도 분포는 적절히 표현되지 않았다.

따라서 분사유량에 따른 대수평균 온도차와 대수평균 밀도차의 적절한 표현이 요구된다.

4. 결론

본 연구에서는 단일 수평 시험관 외부를 흘러내리는 LiBr-H₂O 수용액의 열/물질 전달 특성을 파악하였다. 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 분사용액 온도가 낮고 흡수기 압력이 높은 경우에는 시험관 외부를 흘러내리는 액막의 표면에서 파동이 발생하며 흡수 성능은 증가한다. 또한 분사유량이 작은 경우에 더 넓은 용액 입구 온도와 공급 압력 범위에서 파동이 발생한다.

(2) 용액의 출구 온도는 작은 분사유량에서는 흡수기 압력의 영향을 크게 받는 반면, 큰 분사유량에서는 분사용액의 온도에 의해 영향을 크게 받

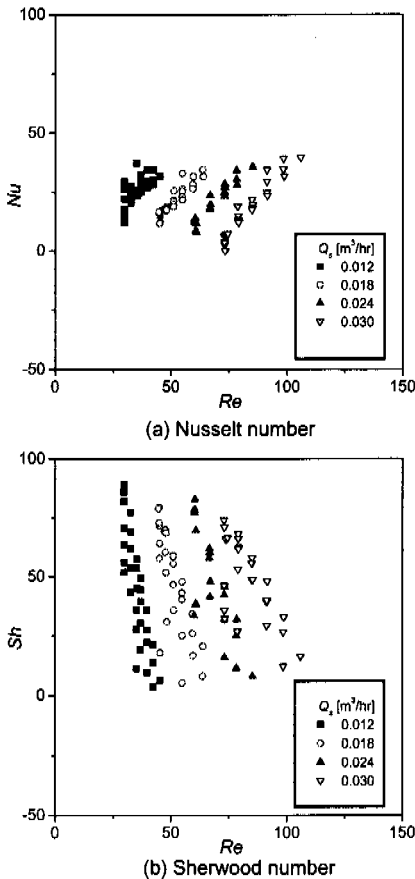


Fig. 14 Variation of Nusselt number and Sherwood Number with Reynolds number ($X_{s,i}=60$ wt%, $T_{c,i}=32^\circ\text{C}$, $h_i=3200$ W/m²°C, sheet drainage)

는다.

(3) 주어진 분사 유량에서 분사용액의 온도와 흡수기의 압력이 높을수록 냉각 열유속은 증가한다. 또한 분사용액의 온도가 낮을수록, 분사용액의 농도와 흡수기 압력이 높을수록 냉매 흡수량은 증가한다.

(4) 낮은 분사유량에서는 막 형태의 배출이 액적 또는 액주의 형태보다 높은 흡수 성능을 나타내며, 분사유량이 증가할수록 액적 또는 액주 형태의 배출이 막 형태의 배출에 비해 높은 흡수 성능을 나타낸다.

단일 수평 시험관에서의 흡수 특성을 관건 전체에 적용할 때에는 상부 시험관에서의 용액 배출 형태에 따른 하부 시험관에서의 입구 조건 변화와 시험관 외부의 용액 적심 상태 등이 추후 연구과제로 고려되어야 한다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 학위 논문 연구비와 한국과학재단 지정 전문대학교 공조기술지역협력 연구센터의 지원 및 교육부의 BK21 사업비 일부 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) Andberg, J. W. and Vliet, G. C., 1987, "A Simplified Model for Absorption of Vapor into Liquid Films Flowing Over Cooled Horizontal Tubes," *ASHRAE Trans.*, Vol. 93, Part 2, pp. 2454~2466.
- (2) Andberg, J. W. and Vliet, G. C., 1987, "Absorption of Vapors into Liquid Films Flowing Over Cooled Horizontal Tubes," *Second ASME/JSME Joint Thermal Eng. Conf.*, Honolulu, Hawaii, March, pp. 533~541.
- (3) Choudhury, S., Hisajima, D., Ohuchi, T., Nishiguchi, A., Fukushima, T. and Sakaguchi, S., "Absorption of Vapors into Liquid Films Flowing Over Cooled Horizontal Tubes," *ASHRAE Trans.: Research*, pp. 81~89.
- (4) Kirby, M. J. and Perez-Blanco, H., 1994, "A Design Model for Horizontal Tube Water/Lithium Bromide Absorbers," *Heat Pump and Refrigeration Systems Design, Analysis and Applications ASME*, AES-Vol. 32, pp. 1~10.
- (5) Cosenza, F. and Villet, G. C., 1990, "Absorption in Falling Water/LiBr Films on Horizontal Tubes," *ASHRAE Trans.*, Vol. 96, Part I, pp. 693~701.
- (6) Vliet, G. C. and Cosenza, F. B., 1991, "Absorption Phenomena in Water-Lithium Bromide Films," *Proc. Absorption Heat Pump Conf.*, pp. 53~61.
- (7) Greiter, I., Wagner, A., Weiss, V. and Georg, A., 1991, "Experimental Investigation of Heat and Mass Transfer in a Horizontal-Tube Falling-Film Absorber with Aqueous Solutions," *Int. Absorption Heat Pump Conf.*, ASME, AES-Vol. 31, pp. 225~232.
- (8) Nomura, T., Nishimura, N., Wei, S. and Yamaguchi, S., 1993, "Heat and Mass Transfer Mechanism in the Absorber of Water/LiBr Conventional Absorption Refrigerator Experimental Examination by Visualized Model," *Int. Absorption Heat Pump Conf.*, ASME, AES-Vol. 31, p.203.
- (9) Rie, D. H. and Kashiwagi, T., 1991, "Computer Simulation of Vapor-Absorption Enhancement onto H₂O/LiBr Absorbent by Marangoni Convection," *JSME Int. J., Series II*, Vol. 34, No. 2, pp. 355~361.
- (10) Rie, D. H. and Kashiwagi, T., 1993, "Numerical Analysis of Heat and Mass Transfer Enhancement Process Accompanying Interfacial Disturbance in Water Vapor Absorption," *JSME Int. J., Series B*, Vol. 36, No. 4, pp. 636~643.
- (11) Kim, K. J., Berman, N. S. and Wood, B. D., 1994, "Experimental Investigation of Enhanced Heat and Mass Transfer Mechanisms Using Additives for Vertical Falling Film Absorbers," *Proc. Int. Absorption Heat Pump Conf.*, New Orleans, pp. 41~47.
- (12) Zheng, G. S. and Worek, W. M., 1995, "Effect of Additives on the Regeneration of a Dilute Absorbent," *J. of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 9, No. 4, October-December, pp. 743~748.
- (13) 이관수, 서석청, 김영인, 박동규, 1988, "수평 원관상의 LiBr 수용액에 수증기가 흡수될때의 열 및 물질전달," 공기조화 냉동공학 논문집, 제 17 권, 제 2 호, pp. 140~149.
- (14) 설신수, 고광웅, 이상용, 1995, "LiBr-H₂O 흡수기 내부에서의 유동 및 열/물질전달 현상에 관한 실험적 연구(I)," 공기조화 냉동공학회 동계학술발표논문집, pp. 330~334.
- (15) 박석호, 김현기, 김태진, 윤정인, 1997, "흡수기의 열물질전달 특성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B, pp. 96 ~ 101
- (16) 설원실, 권오경, 윤정인, 1998, "LiBr/H₂O 계 흡수기의 흡수축진에 관한 실험적 연구," 공기조화 냉동공학 논문집, 제 10 권, 제 5 호, pp. 581~588.