

수직관내 리튬브로마이드 수용액막의 흡수과정에 대한 비흡수가스의 영향 (2) — 이론적 연구 —

김 병 주* · 이 찬 우**
(1997년 9월 19일 접수)

Effects of Non-Absorbable Gases on the Absorption Process of Aqueous LiBr Solution Film in a Vertical Tube (II) — Analytical Studies —

Byong Joo Kim and Chan Woo Lee

Key Words : Absorption Heat Pump(흡수식열펌프), Falling Film(유하액막), Non-Absorbable Gases(비흡수가스), Heat and Mass Transfer(열 및 물질전달)

Abstract

In the absorption process of water vapor in a liquid film, the composition of the gas phase, in which a non-absorbable gas is combined with the absorbate influences the transport characteristics remarkably. In the present study, the absorption processes of water vapor into aqueous solution of lithium bromide in the presence of non-absorbable gases were investigated analytically. The continuity, momentum, energy and diffusion equations for the solution film and gas phase were formulated in integral forms and solved numerically. It was found that the mass transfer resistance in gas phase increased with the concentration of non-absorbable gas. However the primary resistance to mass transfer was in the liquid phase. As the concentration of non-absorbable gas in the absorbate increased, the liquid-vapor interfacial temperature and concentration of absorbate in solution decreased, which resulted in the reduction of absorption rate. The reduction of mass transfer rate was found to be significant for the addition of a small amount of non-absorbable gas to the pure vapor, especially at the outlet of an absorber where non-absorbable gases accumulated. At higher non-absorbable gas concentration, the decrease of absorption flux was almost linear to the volumetric concentration of non-absorbable gas.

기호 설명

A : 면적
C : 액막내 물성분의 질량농도
D : 물질확산계수
e : 비내부에너지

g : 중력가속도
i : 비엔탈피
k : 열전도계수
L : 흡수열
L_r : 특성길이
m : 질량유량
Nu : 누셀트수

*회원, 홍익대학교 공과대학 기계공학과

**회원, 홍익대학교 대학원 기계공학과

- p : 압력
 q : 열전달율
 r : 반경방향
 Re : 레이놀즈수
 R_m : 물질전달저항
 Sh : 셔우드수
 T : 온도
 t : 시간
 u : 축방향속도
 v : 반경방향 속도
 W : 공기-수증기 혼합가스에서 물성분 질량농도
 x : 유동방향축
 y : 유동에 대한 법선 방향
 y_a : 공기-수증기 혼합가스에서 공기의 평균 체적 농도

그리스문자

- Γ : 원주길이 당 질량유량
 δ : 액막두께
 Δ : 농도경계층 두께
 μ : 점도
 ν : 동점성계수
 ρ : 밀도
 τ : 전단력

상첨자

- $'$: 단위 길이 당
 $''$: 단위 면적 당
 $*$: 열역학적 평형

하첨자

- a : 공기
 f : 수용액막
 g : 수증기-공기 혼합가스
 o : 가스상의 중심선 혹은 수용액 입구
 i : 액상-기상의 계면
 in : 입구
 out : 출구
 v : 수증기
 w : 흡수관벽

1. 서 론

흡수식 시스템을 구성하는 여러 요소 중 시스템

의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 흡수기이다. 흡수과정을 지배하는 변수로 유체의 물리적 상태량, 유동양식, 흡수제와 냉매의 열역학적 평형상태량, 그리고 계면에서의 국소불안정성과 관벽의 열전달특성 등이 있으며 이들은 서로 중복적으로 흡수과정에 영향을 미치며 각각의 기여도는 운전조건에 따라 다르다.

Grossman⁽¹⁾은 증류액막 계면에서의 수증기 흡수과정시 열 및 물질전달 특성을 수용액 막에 대하여 균일한 속도분포를 가정하여 에너지방정식과 확산방정식에 의해 해석적으로 구하였다. Yang과 Wood⁽²⁾은 수직관벽을 액체가 흘러내릴 때 포물선형 속도분포의 증류유동에 대하여 액막 내부의 온도와 농도분포를 계산하였다. Choudhury 등⁽³⁾은 수평원관의 외부에 대한 유하액막의 흡수현상을 유한차분법을 사용하여 해석하였으며 Jeong 등⁽⁴⁾은 적분방법을 이용하여 수직평판형 흡수기 내부에서 일어나는 운동량, 열 및 물질전달에 대한 근사해를 준 1차원적 해석 모델로 제시하였다. Urakawa 등⁽⁵⁾은 액막표면에서의 물질전달량은 확산에 의한 것과 대류에 의한 것의 합이며 이 중 대류에 의한 물질전달율이 크다고 장하였다. 김병주와 이찬우 등⁽⁶⁾은 수직관형 유하액막식 흡수기 내의 질량, 운동량, 그리고 에너지 전달과정을 적분방법에 의해 해석하였으며 냉매증기의 유동 특성이 흡수기 성능에 미치는 영향을 연구하였다.

흡수율에 영향을 주는 또 다른 요소로서 비흡수가스의 존재는 물질전달 과정을 방해한다는 측면에서 응축과정에서의 비응축가스와 유사하다. 증기의 응축과정에서 비응축가스의 영향에 관한 실험 및 이론적 연구는 아주 다양하게 발표되고 있으나^(7,8) 비흡수가스의 증기 흡수과정에서 그 영향에 관한 연구내용은 상대적으로 제한되어 있다.

Grossman⁽⁹⁾은 흡수과정에 대한 비흡수가스의 영향을 이론적으로 해석하였으며, 가스상에서의 확산저항과 액막에서의 확산저항의 비에 의해 흡수율의 감소율이 결정된다고 주장하였다. Habib 등⁽¹⁰⁾은 경계층 이론을 이용하여 흡수기의 입구영역에서 비흡수가스인 공기의 체적농도의 영향을 이론적으로 연구하였으며 2% 정도의 비흡수가스가 50% 정도의 흡수율 감소를 야기한다고 주장하였다. 그러나 유하액막과 냉매증기-비흡수가스의 혼합가스의 유동을 함께 고려하여 흡수과정에서 비흡수가스가 열 및 물질전달에 미치는 영향을 해석한 경우는 부족

하여 이에 대한 이해가 요구되고 있다.

본 연구에서는 비흡수가스가 있을 때 리튬브로마이드수용액의 수증기 흡수과정을 이론적으로 연구하고자 한다. 수증기에 포함된 비흡수가스가 흡수과정중의 열 및 물질전달에 미치는 영향을 수용액막의 레이놀즈수와 비흡수가스의 체적농도의 함수로 해석하였다.

2. 이론적 해석

Fig. 1은 수직관형 흡수기 내 유하액막의 흡수과정 중 수용액막과 수증기-비흡수가스의 혼합가스의 속도, 온도 그리고 농도분포와 좌표계를 보여주고 있다. 리튬브로마이드 수용액은 수직관벽을 따라 액막을 형성하며 환상류로 흐르며 그 내부로 액막과 같은 방향으로 수증기가 유동하고 있다. 수증기는 액막과 수증기의 계면에서 흡수되고 액막 내부로 확산된다. 액막 경계면에서 발생하는 수증기의 흡수열은 온도구배에 의해 액막으로 전달되고 이는 다시 관벽을 통하여 외부로 배출된다.

2.1 주요 가정

흡수기 내부의 열, 운동량, 그리고 물질전달의 해석을 위한 주요 가정은 다음과 같다.

- (1) 열, 운동량, 그리고 물질전달은 액체-가스 계면의 법선방향으로의 확산과 대류에 의하여 일어난다.
- (2) 액막과 혼합가스사이의 계면은 열역학적 평형상태이다.
- (3) 수증기-비흡수가스의 혼합가스 유동의 경우 속도, 온도, 그리고 농도분포는 완전히 발달되어 있다.
- (4) 매끄러운 층류 유하액막의 속도와 온도분포는 완전히 발달되어 있으나 농도경계층은 발달 중이다.
- (5) 두 상 사이에는 미끄럼이 없다.
- (6) 뉴우턴유체인 리튬브로마이드 수용액과 수증기의 물리적 성질은 일정하다.
- (7) 물질확산에 의한 열전달은 무시한다.
- (8) 축방향의 확산은 무시한다.

수직벽을 따라 흘러내리는 유하액막의 경우 그 두께는 액막 레이놀즈수의 함수이며 수직관식 흡수기의 일반적인 운전 조건에서 약 0.4 mm 정도이다. 흡수기 입구에서 균일 속도 및 온도 분포를 가

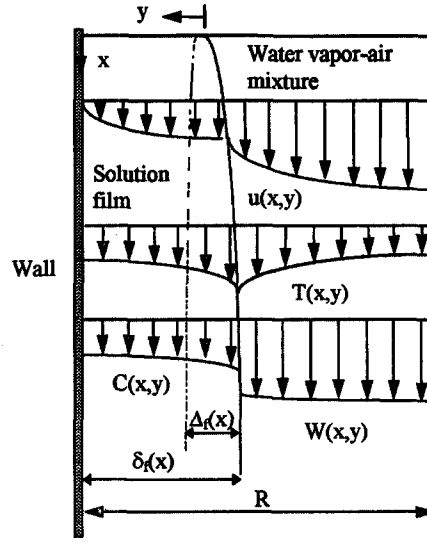


Fig. 1 Schematic of a falling film in absorption process.

정하여 예비 해석을 수행한 결과 액막두께의 약 100배인 지점에서 속도 및 온도 분포는 포물선형으로 완전 발달하였다. 이 길이는 본 연구에서 채택한 흡수기의 길이에 비하여 무시할 수 있으므로 흡수기내 유하액막의 속도 및 온도분포는 완전 발달한 것으로 가정하였다. 그러나 리튬브로마이드 수용액의 물질확산계수는 열 및 운동량확산계수에 비하여 아주 작으므로 농도경계층은 발달 중인 것으로 가정하였다. 수증기와 비흡수가스의 혼합가스인 경우 열, 운동량 그리고 물질확산계수는 크게 다르지 않으므로 농도경계층은 속도경계층이나 온도경계층과 함께 흡수기의 상류에서 재빠르게 발달할 것으로 예측된다. 유하액막의 레이놀즈수가 20 이상일 경우 액막표면에는 파동이 발생한다. 본 연구에서는 해석의 단순화를 위하여 매끄러운 유하액막으로 가정하였다.

2.2 지배 방정식

유하액막의 수증기 흡수과정에 대한 열 및 물질전달특성은 수용액막과 혼합가스에 대한 보존식으로부터 해석할 수 있다. 수용액 유하액막에 대한 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 그리고 확산방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho_t dA_t + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_t u_t dA_t = m' \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho_r u_r dA_t - u_r \frac{\partial}{\partial t} \int \rho_r dA_t + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_r u_r^2 dA_t - u_r \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_r u_r dA_t \quad \frac{\partial C(x, \Delta t)}{\partial y} = 0 \quad (11.3)$$

$$dA_t = - \frac{\partial p}{\partial x} \int dA_t + \rho_r g \int dA_t + \tau_w' - \tau_i' \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho_r e_r dA_t - e_{ri} \frac{\partial}{\partial t} \int \rho_r dA_t + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_r u_r i_r dA_t - i_{ri} \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_r u_r dA_t = -q_w' + q_{ri}' \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho_r C dA_t + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_r u_r C dA_t = m' \quad (4)$$

여기에서 m' 은 단위 길이당의 흡수율, τ 는 전단력, q 는 열전달율, e 는 내부에너지, i 는 엔탈피, 그리고 C 는 유하액막내의 물의 질량농도이다. 하첨자 f, g, i , 그리고 w 는 액막, 가스, 액막-가스의 계면, 그리고 벽이다.

가스유동의 경우 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 그리고 확산방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho_g dA_g + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_g u_g dA_g = m' \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho_g u_g dA_g - u_{ri} \frac{\partial}{\partial t} \int \rho_g dA_g + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_g u_g^2 dA_g - u_{ri} \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_g u_g dA_g = - \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_g g \right) \int dA_g + \tau_i' \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho_g e_g dA_g - e_{gi} \frac{\partial}{\partial t} \int \rho_g dA_g + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_g u_g i_g dA_g - i_{gi} \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_g u_g dA_g = -q_{gi}' \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho_g W dA_g + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_g W dA_g = -m' \quad (8)$$

여기에서 W 는 혼합가스에서 수증기의 질량농도이다. 속도, 온도, 그리고 농도의 분포가 주어지면 위에서 주어진 식 (1)~(8)에 의해 질량, 운동량, 에너지 및 물질전달율에 대한 해석이 가능하다.

적분형 해석을 위하여 수용액막과 가스상에 대한 속도, 온도, 그리고 농도분포가 필요하며 수용액막에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$u_r(x, 0) = u_i \quad (9.1)$$

$$u_r(x, \delta_t) = 0 \quad (9.2)$$

$$\mu_r \frac{\partial u_r(x, 0)}{\partial y} = \tau_i'' \quad (9.3)$$

$$T_r(x, 0) = T_i \quad (10.1)$$

$$T_r(x, \delta_t) = T_w \quad (10.2)$$

$$-k_r \frac{\partial T_r(x, 0)}{\partial y} = m''L + q_{gi}'' \quad (10.3)$$

$$C(x, 0) = C_i \quad (11.1)$$

$$C(x, \Delta t) = C_o \quad (11.2)$$

여기서 δ_t 는 수용액막의 두께, Δt 는 농도경계층의 두께이고 L 은 흡수열이다. 가정 2)에 의해 액막-가스의 계면에서 수용액의 농도는 흡수기의 압력과 수용액의 온도에 결정되는 열역학적 평형농도이고 액막 내 농도경계층의 두께에서 수용액의 농도는 흡수기 입구에서의 농도와 같으며 그 농도구배는 0이다. 계면전단응력과 열유속은 혼합가스상의 속도와 온도분포로부터 계산할 수 있다. 위에서 주어진 경계조건을 만족하는 속도, 온도, 그리고 농도의 포물선 분포식은 다음과 같다.

$$u_r(x, y) = u_i \left(1 - \frac{y^2}{\delta_t^2}\right) + \frac{\tau_i''}{\mu_r} \left(y - \frac{y^2}{\delta_t}\right) \quad (12.1)$$

$$T_r(x, y) = T_i + (T_w - T_i) \frac{y^2}{\delta_t^2} + \frac{m''L + q_{gi}''}{k_r} \left(y - \frac{y^2}{\delta_t}\right) \quad (12.2)$$

$$C(x, y) = C_i \left(1 - \frac{2y}{\Delta t} + \frac{y^2}{\Delta t^2}\right) + C_o \left(\frac{2y}{\Delta t} + \frac{y^2}{\Delta t^2}\right) \quad (12.3)$$

액체-가스 계면에서의 흡수유속, 벽 및 계면에서의 전단응력 τ_w'' 및 τ_i'' , 그리고 계면에서의 열유속 q_{gi}'' 은 식 (13)~(16)과 같다.

$$m'' = \rho_{rv} v_{r,t} - \rho_r D_r \frac{\partial C(x, 0)}{\partial y} \quad (13)$$

$$\tau_w'' = -\mu_r \frac{2u_i}{\delta_t} - \tau_i'' \quad (14)$$

$$\tau_i'' = \mu_r \frac{\partial u_r}{\partial y} \Big|_{y=0} = \mu_g \frac{2(u_i - u_{go})}{(R - \delta_t)} \quad (15)$$

$$q_{gi}'' = \frac{2k_g}{(R - \delta_t)} (T_i - T_{go}) \quad (16)$$

여기서 ρ_{rv} 는 수용액의 물성분의 밀도이고, v_r 는 계면의 반경방향 속도, 그리고 D 는 물질확산계수이다. 하첨자 0는 수용액막인 경우 흡수기 입구에서의 값을 나타내고 가스상에서는 중심선에서의 값을 의미한다.

가스유동의 경우 속도, 온도, 그리고 농도분포에 대한 경계조건은 수용액막에서와 동일한 개념으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$u_g(x, 0) = u_i \quad (17.1)$$

$$u_g(x, \delta_t - R) = u_{go} \quad (17.2)$$

$$\frac{\partial u_g(x, \delta_t - R)}{\partial y} = 0 \quad (17.3)$$

$$T_g(x,0) = T_1 \quad (18.1)$$

$$T_g(x, \delta_f - R) = T_{g0} \quad (18.2)$$

$$\frac{\partial T_g(x, \delta_f - R)}{\partial y} = 0 \quad (18.3)$$

$$W(x,0) = W_1 \quad (19.1)$$

$$W(x, \delta_f - R) = W_0 \quad (19.2)$$

$$\frac{\partial W(x, \delta_f - R)}{\partial y} = 0 \quad (19.3)$$

그러므로 가스상에서의 속도, 온도, 그리고 농도 분포는 다음과 같이 유도된다.

$$u_g(x,y) = u_1 + (u_1 - u_{g0}) \left[\frac{2y}{(R - \delta_f)} + \frac{y^2}{(R - \delta_f)^2} \right] \quad (20)$$

$$T_g(x,y) = T_1 + (T_1 - T_{g0}) \left[\frac{2y}{(R - \delta_f)} + \frac{y^2}{(R - \delta_f)^2} \right] \quad (21)$$

$$W(x,y) = W_1 + (W_1 - W_0) \left[\frac{2y}{(R - \delta_f)} + \frac{y^2}{(R - \delta_f)^2} \right] \quad (22)$$

가정 2)로부터, 액체-가스 계면에서의 수용액농도는 열역학적 평형조건을 만족해야 하므로 다음과 같은 관계식으로 주어진다.

$$C_l = C^*(T_l, p_{vl}) \quad (23)$$

여기서 p_{vl} 는 액체-가스 계면에서의 수증기 압력이고, 계면에서 가스상 내의 수증기 물분율과 전압의 곱으로 추정할 수 있다. 가스 내에서 수증기 물분율은 가스 내의 수증기 질량농도와 혼합물의 분자량의 함수로 결정된다. 액체-가스 계면에서 흡수 유속에 대한 연속조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \rho_{lv} v_{l,t} - \rho_l D_l \frac{\partial C(x,0)}{\partial y} \\ &= \rho_{gv} v_{1,g} - \rho_g D_g \frac{\partial W(x,0)}{\partial y} \end{aligned} \quad (24)$$

액체-가스 계면에서 가스의 반경방향 속도는 비흡수가스가 액체-가스 계면을 투과할 수 없으므로 다음과 같이 주어진다.

$$v_{1,g} = -D_g \frac{\partial W(x,0)}{\partial y} / (1 - W_1) \quad (25)$$

속도, 온도, 그리고 질량분율의 분포식을 수용액 및 가스상에 대한 적분방정식들인 식 (1)~(8)에 대입하여 정리하면 유하액막의 흡수과정을 해석하기 위한 지배방정식이 유도된다.

2.3 해 법

보존방정식과 구속관계식이 비선형 특성을 가지고 있는 경우, 이들을 동시에 함께 해석하여 정상

상태의 해를 얻는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 모델을 과도(transient)식으로 공식화하였고 임의의 변수에 대한 변화율이 아주 작을 때까지 비정상상태 해석을 수행하여 정상상태 해를 구하였다. 본 연구에서 적용한 리튬브로마이드 수용액의 열역학적, 물리적 상태량에 대하여는 DiGiulio 등,⁽¹¹⁾ Lee 등,⁽¹²⁾ 그리고 McNeely⁽¹³⁾이 제시한 상관식을 사용하였다.

벽면의 온도가 일정한 경우 11개의 식 (1)~(8), (13), (23), (24)에서 미지수들은 δ_f , Δ_f , u_1 , u_{g0} , T_1 , T_{g0} , C_1 , m'' , W_1 , W_0 , 그리고 p 이다. 본 연구에서는 적분형 지배방정식들의 해를 구하기 위하여 양함수방법(explicit method)으로 해석하였다. 지배방정식들을 이산화시켜 시간에 대한 전향(forward time)차분 및 공간에 대한 후향(backward space)차분을 사용하였다. 리튬브로마이드의 온도 및 농도는 액체-가스 계면에서의 열역학적 평형조건에 의하여 강하게 구속되어 있다. 수용액막에 수증기가 흡수될 때 그 질량유속은 식 (24)를 만족해야 하고, 동시에 계면에서의 온도 및 농도의 열역학적 평형조건인 식 (23)을 충족해야 한다.

계면에서의 온도와 농도의 관계는 뉴턴 반복기법에 의해 해석하고 흡수유속을 계산하였다. 흡수기의 입구에서 유하액막의 두께는 누셀트의 이론⁽¹⁴⁾에서 구하였고 각 격자에서 수용액막의 발달은 식(1)로부터 계산하였으며, 그 때 계면에서의 속도, 혼합가스의 중심선 속도 및 압력은 식 (2), (5), 및 (6)에 의하여 계산하였다. 수용액막과 가스의 온도 및 농도는 식 (23)과 및 (24)에서 주어진 계면조건과 함께 두 유체에 대한 에너지방정식과 확산방정식으로부터 계산하였다. 시간에 대하여 각 변수들의 변화율이 지정한 오차범위보다 작을 때 정상상태에 도달하였다고 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

흡수과정의 해석을 위한 작동유체는 리튬브로마이드 수용액막과 수증기-공기의 혼합가스이다. 리튬브로마이드는 흡수제이고 물은 냉매이며 실제 시스템의 경우를 고려하여 공기가 비흡수가스로 선택되었다. 리튬브로마이드 수용액막은 유하액막으로 수직관 내측을 따라 하향유동한다. 수증기와 공기의 혼합가스도 관 중심부에서 수용액막과 동일한 방향으로 유동한다. Table 1은 흡수과정 해석에서

Table 1 Conditions for the analysis of absorption process.

Parameters		Base-line conditions
Absorption tube	Inner diameter (mm)	13.3
	Outer diameter (mm)	15.8
	Length (mm)	1000
System	Pressure (mmHg)	8.0
Cooling conditions	Isothermal wall temperature (°C)	35
	Cooling water temperature (°C)	30
LiBr-water solution	Water mass concentration (%)	42
	Temperature (°C)	40.0
	Flow rate (kg/min)	0.4
Vapor-air mixture	Air volume concentration (%)	3.0
	Temperature (°C)	20.0
	Flow rate (kg/min)	0.007

사용한 수직관 흡수기 제원과 운전조건을 보여주고 있다. 수증기-공기의 혼합가스가 흡수과정을 겪으면서 지속적으로 수증기가 유하액막에 흡수되므로 공기의 체적농도는 흡수기의 하류로 갈수록 증가한다. 본 연구에서는 흡수기 전체에 대한 공기의 체적농도의 대표치로 흡수기의 입구와 출구에서 공기의 체적농도의 평균치를 사용하였다.

본 연구에서 변수로 고려한 혼합가스중 공기의 체적농도의 범위는 0-20%이고 유하액막의 레이놀즈수의 범위는 65-195이다. 혼합가스의 레이놀즈수는 기준조건인 1400으로 고정하였다. 시스템이 진공으로 유지되고 있으므로 흡수기 입구에서의 수증기-공기 혼합가스의 속도는 상대적으로 높다. 기준조건에서 계면전단응력은 벽면전단응력의 5%정도이지만 보다 높은 가스 유량에서는 증가할 것이다. 수용액막은 흡수기 출구로 유동함에 따라 수증기의 흡수뿐 만 아니라 낮은 가스유동 속도로 인한 계면전단응력의 감소로 두꺼워진다. 수용액막과 가스유동이 서로 동일한 방향인 경우 가스유량이 증가하면 계면전단응력이 증가하므로 수용액막은 얇아지고 수용액막의 열전달저항은 감소하여 흡수 특성은 향상될 것이다. 이러한 현상은 대향류(counter-current flow)인 경우에는 반대가 될 것이다.

Fig. 2는 벽면의 온도가 35°C로 일정한 조건에서 공기의 평균 체적농도가 3.0%일 때 흡수관을 따라 발달하는 액체-가스의 계면과 혼합가스의 체적 온도분포를 보여주고 있다. 이 때 수용액 유하액막의

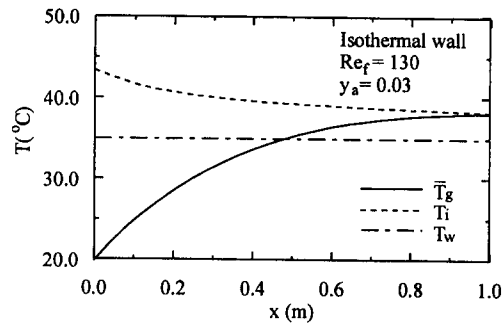


Fig. 2 Profiles of liquid-vapor interface and gas bulk temperatures along the tube.

레이놀즈수는 130으로 다음과 같이 정의되었다.

$$Re_f = \frac{4\Gamma}{\mu_f} \quad (26)$$

여기서 Γ 는 원주길이 당 수용액의 질량 유량이다. 수용액막에 의한 수증기 흡수와 흡수열 방출로 인하여 액체-가스 계면온도가 가장 높으며 가스의 체적온도는 용액으로부터의 열전달에 의해 입구조건으로부터 매우 빠르게 증가하여 계면온도에 접근함을 알 수 있다. 계면에서 흡수율이 증가할 때 수용액측 계면의 물농도는 증가하고 열역학적 평형상태인 계면의 온도도 증가할 것이다. 이는 유하액막내에 높은 온도구배를 형성하므로 벽을 통하여 외부로 방출되는 열유속도 또한 증가할 것이다.

Fig. 3은 비흡수가스인 공기의 체적농도가 증가

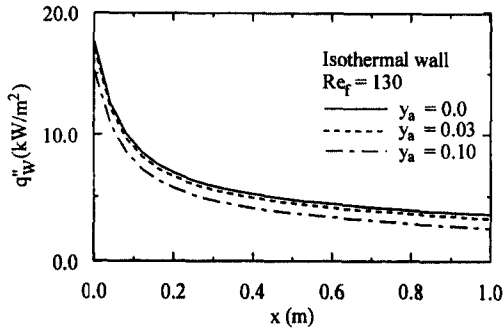


Fig. 3 Effects of non-absorbable gas on the wall heat flux.

할 때 벽면 열유속이 감소함을 보여주며 이 때 흡수율이 감소함을 암시하고 있다. 기본적으로 흡수기의 입구에서는 수용액막의 체적온도가 높아 벽면과의 온도차이가 크므로 흡수유속이 낮더라도 높은 열유속이 가능하다. 그러나 하류로 갈수록 수용액막의 체적온도가 감소하므로 벽면을 통한 열유속의 대부분은 계면에서의 흡수열이 차지하게 된다. 액체-가스의 계면으로부터 혼합가스로의 열유속은 벽면으로의 열유속의 약 1% 미만으로 무시할 수 있을 정도로 작다.

본 연구에서 가정한 유해액막의 온도분포에 의하면 유해액막의 국부 누셀트수는 다음과 같이 유도된다.

$$Nu_x = \left[\frac{2}{\delta_f} - \frac{\dot{m}'' L + q_{\text{eff}}''}{k_f (T_1 - T_w)} \right] L_f \quad (27)$$

여기서 특성길이 L_f 는 실험자료의 해석에서 사용되는 값으로 다음과 같이 정의되고 있으며

$$L_f = \left[\frac{\mu_f^2}{\rho_f^2 g} \right]^{1/3} \quad (28)$$

μ_f 와 ρ_f 는 각각 수용액의 점도와 밀도이고 g 는 중력가속도이다. 결국 유해액막의 국부누셀트수는 액막의 두께로써 표현되는 흡수전열이 없는 경우에 흡수열에 의한 계면의 온도변화의 영향을 합한 값으로 Fig. 4와 같이 주어진다. 흡수기의 입구영역에서 국부누셀트수는 가장 큰 값을 가지며 하류로 갈수록 감소한다. 액막레이놀즈수가 증가할 때 액막의 두께가 증가하므로 국부누셀트수는 감소한다. 그러나 주어진 액막레이놀즈수에 대하여 공기의 체적농도가 변화하더라도 이는 액막두께에 미치는 영향이 없고 흡수율이 감소하는 만큼 열역학적인 평형상태 특성에 의하여 계면의 온도도 상대적으로

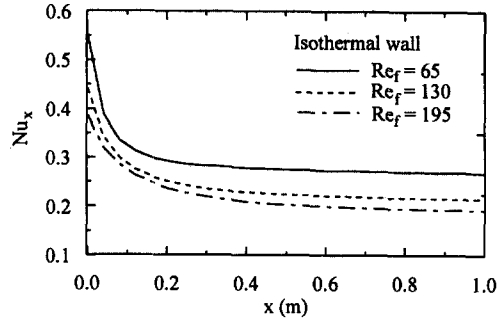


Fig. 4 Variation of local film Nusselt number along the tube.

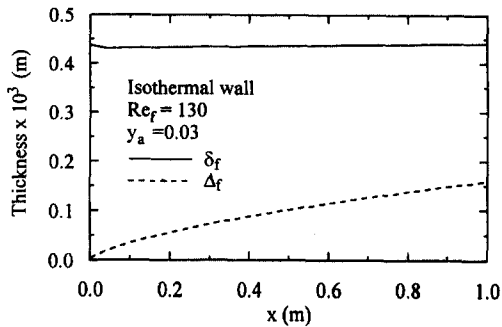


Fig. 5 Development of film and concentration boundary layer thickness along the tube.

감소하므로 공기의 체적농도가 증가하더라도 국부 누셀트수는 거의 일정하다.

흡수과정이 진행 됨에 따라 수용액막과 액막내 농도경계층의 두께는 Fig. 5와 같이 발달한다. 흡수기의 하류로 갈수록 수용액막의 두께는 수증기의 흡수로 두꺼워 질 수 있으며 또한 계면 전단응력의 감소로 두꺼워 질 수 있다. 그러나 수용액의 질량 유량에 비하여 흡수율이 상대적으로 미미하고 전단응력이 벽응력에 비하여 아주 작으므로 액막의 두께는 거의 일정하다. 계면에서 수증기의 흡수과정은 액막내에서 농도구배의 형성을 초래하므로 이에 의한 물성분의 액막내 확산전달에 의하여 농도경계층의 두께는 성장한다. 농도경계층의 성장은 필연적으로 액막 내의 확산물질전달을 저하시켜 냉매의 흡수율은 감소한다. 본 연구에서 채택한 흡수기의 길이에 대하여 그 출구에서 농도경계층의 두께는 액막두께의 약 30%정도로 발달함을 알 수 있다. 공기의 체적농도가 변화하여 흡수율이 변화하더라도 리튬브로마이드 수용액의 물질확산계수가 아주 작으므로 농도경계층 두께의 변화는 무시할

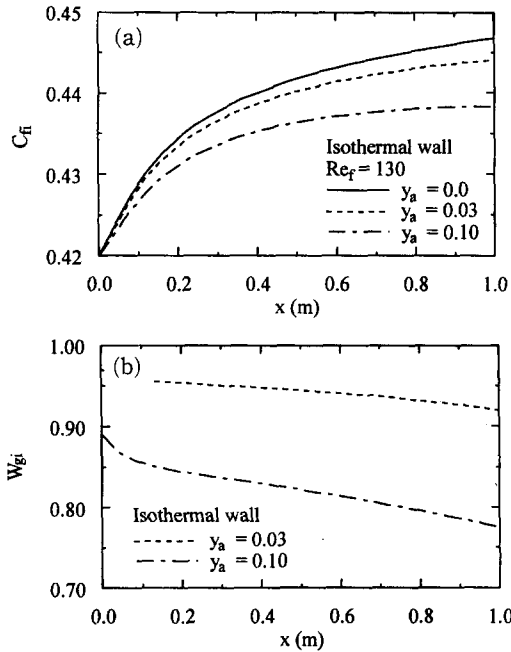


Fig. 6 Effects of non-absorbable gas on the profiles of water concentration along the tube; (a) solution film, (b) water vapor-air mixture.

수 있을 정도로 작았다.

흡수과정중 수용액막과 혼합가스 사이의 계면에서 물농도의 발달과정이 Fig. 6에 주어져 있다. 공기의 체적농도가 변화하여 흡수율이 변화하면 이는 수용액측 계면의 물농도와 혼합가스측 계면의 물농도에 직접적으로 영향을 미친다. 공기의 체적농도가 증가하여 흡수율이 감소하면 수용액막 계면의 물농도는 감소할 것이다. 수용액막내의 농도경계층 발달은 낮은 물질확산 특성에 의해 제한되므로 수용액의 물농도는 액체-가스 계면에서 현저하게 증가한다. 특히 혼합가스의 유동이 수용액막과 같이 하향유동하여 공기는 흡수기 출구 근처에서 쌓이므로 공기의 체적농도가 클 때 계면농도의 감소는 흡수기 출구에서 현저하게 나타난다. 가스 내에서 물농도는 계면 근처에서 상대적으로 천천히 감소한다.

수용액과 수증기-공기의 혼합가스가 흡수과정에 공급되면 높은 증기압력차에 의해 흡수유속은 급격히 증가한다. 그러나 흡수율에 의해 수용액의 온도가 증가하므로 물질전달에 대한 구동력, 즉 계면과 체적의 물농도의 차이가 감소하므로 흡수유속은 최대치에 도달한 다음 다시 감소한다. 흡수과정 시의

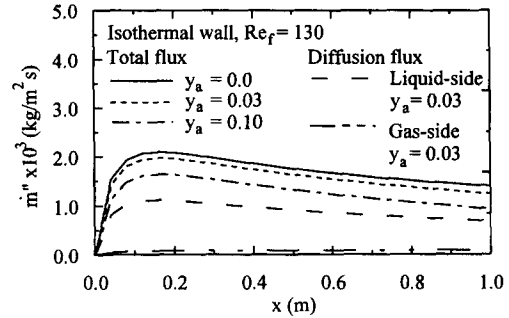


Fig. 7 Variation of total and diffusion absorption mass fluxes along the tube.

냉각 용량에 따라 총 흡수유속은 최고치에 도달한 다음 다시 서서히 감소함을 Fig. 7은 보여주고 있다. 매우 얇은 수용액막의 경우 흡수기의 길이가 상대적으로 짧으면 액막 내의 열전달저항이 매우 작기 때문에 흡수기 전체에서 흡수율이 증가할 수도 있을 것이다. 수증기-공기의 혼합가스중 공기의 체적농도가 증가하면 비흡수가스인 공기의 계면에 대한 차폐효과에 의하여 수용액의 계면에서 물농도와 수증기 압력차가 감소하므로 흡수유속은 감소한다. 수용액측 계면에서 물농도의 변화에 대한 해석에서 설명하였듯이 흡수율 감소는 흡수기 출구 가까이에서 상대적으로 크다. 그러나 흡수기 길이에 대한 흡수유속의 정성적인 변화특성은 공기의 체적농도에 관계없이 유사함을 알 수 있다. 수용액과 혼합가스 각각에 있어 흡수과정은 확산과 대류(유체의 체적운동)에 의해 발생한다. 혼합가스의 경우 흡수유속의 대부분이 대류에 의해 발생하고 수용액막의 경우 Urakawa 등⁽⁵⁾의 주장과는 달리 확산속이 대류속보다 큼을 알 수 있다. 수용액막의 경우 대류와 확산의 중요성은 거의 동일하게 물질전달에 기여하는 것으로 고려된다.

흡수기의 길이에 대하여 수용액막과 수증기-공기 혼합가스의 물질전달저항의 변화가 Fig. 8에 주어져 있다. 물질전달저항은 흡수유속을 물질전달 구동력으로써 각 상에 존재하는 물성분의 질량농도의 차이로 나눈 값이다. 기본적으로 수용액의 아주 낮은 물질확산계수때문에 물질전달의 주된 저항은 수용액측에 존재한다. 수용액의 물질전달 저항은 흡수과정이 진행되면서 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 수증기의 흡수에 의해 액막내 농도경계층이 발달하기 때문이다. 수용액막에서의 농도경계층의 성장은 수증기-공기 혼합가스의 공기의 체적

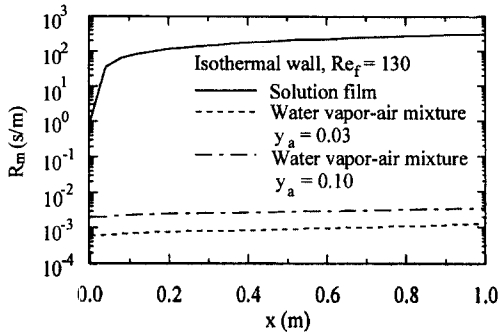


Fig. 8 Effects of non-absorbable gas on the mass transfer resistance in the solution film and water vapor-air mixture along the tube.

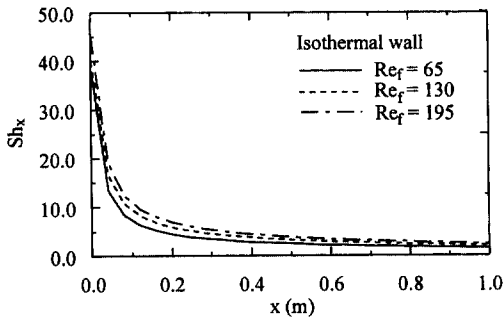


Fig. 9 Variation of local Sherwood number along the tube.

농도에 크게 영향을 받지 않으므로 수용액막의 물질전달저항은 공기의 체적농도에 거의 무관하다. 결국 유하액막에 의한 흡수과정을 고양하기 위하여 우선적으로 해결하여야 할 문제는 유하액막의 혼합이나 계면 교란등을 통하여 농도경계층내의 성장을 억제하는 것이다. 수증기-공기 혼합가스의 물질전달저항은 공기농도의 증가에 따라 증가한다. 그리고 흡수기의 하류로 갈수록 공기의 축적에 의한 공기농도의 증가로 물질전달저항이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 9는 유하액막의 국부셔우드수의 변화를 보여주고 있다. 본 해석에서 가정한 수용액막내 농도 분포에 의해 국부셔우드수는 다음과 같이 유도된다.

$$Sh_x = \frac{2L_f}{z_f(1-C_n)} \quad (29)$$

농도경계층의 성장은 액막내 물질확산저항의 증가를 야기하므로 물질전달특성을 대변하는 셔우드수는 흡수과정이 진행됨에 따라 감소한다. 혼합가스

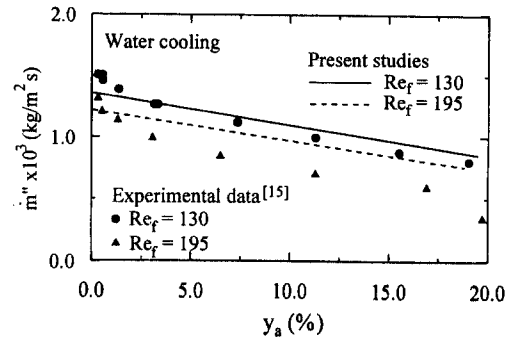


Fig. 10 Comparison of mean absorption mass flux with experimental data.

중 공기의 체적농도의 변화는 수용액측 계면의 물농도의 변화를 야기하나 그 차이는 상대적으로 작다. 그러므로 혼합가스중 공기의 체적농도가 증가더라도 농도경계층의 성장은 이와는 거의 무관하게 지속되므로 국부셔우드수는 공기의 체적농도에 관계없이 동일한 정량적, 정성적 특성을 갖는다. 그러나 수용액막의 레이놀즈수가 증가하면 액막내 농도경계층의 성장은 둔화되므로 국부셔우드수는 증가하는 특성을 보여주고 있다. 열전달과 물질전달에 대한 액막레이놀즈수의 영향은 적분해석에서 온도경계층과 농도경계층에 대한 가정의 차이로부터 이해할 수 있다.

Fig. 10은 수직관 외측에 형성된 환상 공간에 유하액막과는 역류로 공급되는 냉각수에 냉각이 될 경우의 흡수과정에서 평균 흡수유속을 실험의 결과⁽¹⁵⁾와 비교하여 보여 주고 있다. 공기의 체적농도가 증가함에 따라 흡수유속이 감소하는 정성적인 특성은 실험의 경우와 같이 이론적 해석결과도 보여주고 있다. 그러나 순수 수증기에 공기가 미소량 첨가된 낮은 공기의 체적농도영역에서 실험의 경우 그 흡수율이 급격히 감소하는 반면 이론적 해석의 결과는 거의 선형적인 감소율을 나타내고 있다. 이는 수용액막내의 국부적인 속도, 온도, 농도의 급격한 구배나 변동을 수용하지 못하고 포물선형으로 가정된 각 분포식에 의해 해석하는 적분해석 방법의 문제점으로 고려된다. 낮은 공기의 체적농도영역을 제외하고 유하액막의 액막레이놀즈수가 130과 195일 때 모두 이론적해석의 결과는 실험결과보다 높은 흡수유속을 보여주고 있다.

Fig. 11은 공기의 체적농도가 평균셔우드수에 미치는 영향을 실험 결과와 비교하여 보여주고 있다.

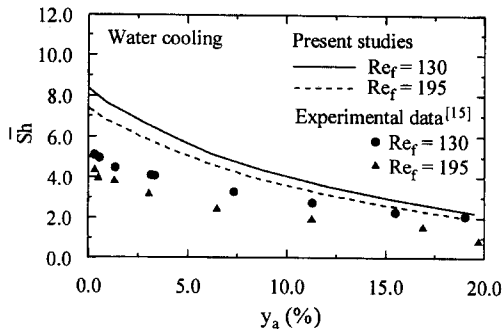


Fig. 11 Comparison of mean Sherwood number with experimental data.

실험적 결과와의 비교를 위하여 평균셔우드수는 식 (28)에 의해 정의된 국부셔우드수의 평균치가 아니라 실험적 해석에서 사용하는 대수평균밀도차에 의하여 정의되었다. 계면에서 물의 밀도(ρ^*)와 유하액막내 물질분의 체적밀도(ρ)로부터 흡수기의 입, 출구를 고려하여 대수평균밀도차는 다음과 같이 정의된다.⁽¹⁶⁾

$$\Delta\rho_{lm} = \frac{(\rho_{in}^* - \rho_{in}) - (\rho_{out}^* - \rho_{out})}{\ln\left(\frac{\rho_{in}^* - \rho_{in}}{\rho_{out}^* - \rho_{out}}\right)} \quad (30)$$

여기서 하첨자 in과 out은 흡수기 입, 출구를 각각 의미한다. 공기의 체적농도가 증가함에 따라 셔우드수가 감소하는 정성적인 특성은 실험적 결과와 유사하게 이론적 해석의 결과도 제시하고 있으나 정량적인 특성에는 큰 차이가 있다. 특히 공기가 소량 존재하는 영역에서 셔우드수에 대한 이론적 해석과 실험결과는 큰 차이를 보여주고 있다. 그러나 진공시스템에서의 실험조건이 복잡성과 본 해석모델의 특성을 고려할 때 이론적 해석의 결과는 실험결과와 상대적으로 잘 일치하고 있다고 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 리튬브로마이드수용액의 수증기 흡수과정에서 비흡수가스의 영향을 이론적으로 연구하였다. 수용액막과 가스상에 대하여 연속방정식, 운동량, 에너지, 그리고 확산방정식을 적분형으로 유도하여 수치적으로 해석하였다. 냉매중의 비흡수가스의 농도가 증가함에 따라 가스상의 물질전달저항은 증가하였다. 그러나 물질전달에 대한 주된 저항은 수용액막에 존재하였다. 냉매중의 비흡수가스의 농도가 증가함에 따라 수용액에서 액상

-기상 계면의 온도와 농도는 감소하여 흡수율의 감소를 초래하였다. 물질전달율의 감소는 특히 순수수증기에 소량의 비흡수가스가 소량 첨가되었을 때 비흡수가스가 축적되는 흡수기 출구에서 현저하였다. 비흡수가스의 농도가 증가함에 따라 흡수유속은 비흡수가스의 체적농도에 거의 비례하여 감소하였다.

후 기

본 연구는 포항공과대학교 첨단유체공학연구센터에서 지원한 연구의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Grossman, G., 1983, "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Film Absorption Under Laminar Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, No. 3, pp. 357~371.
- (2) Yang, R., and Wood, D., 1992, "A Numerical Modeling of an Absorption Process on a Liquid Falling Film," *Solar Energy*, Vol. 48, No. 3, pp. 195~198.
- (3) Urakawa, K., Morioka, I., and Kiyota, M., 1986, "Absorption of Water Vapor into Lithium Bromide-Water Solution Film Falling Along a Vertical Plate," *Bulletin of JSME*, Vol. 52, No. 476, pp. 1766~1771.
- (4) Chodhury, S. K., Hisajima, D., and Oouch, T., 1993, "Absorption of Vapors into Liquid Films Flowing Over Cooled Horizontal Tubes," *ASHRAE Transactions*, Vol. 99, Part 2, pp. 81~89.
- (5) Jeong, E. S., Lee, D. J., and Kim, T. J., 1994, "Analysis of Momentum, Heat, and Mass Transfer in a Falling Film of a Vertical Plate Absorber," *Proceedings of the Third JSME-KSME Fluids Engineering Conference*, pp. 379~383.
- (6) 김병주, 이찬우, 1997, "리튬브로마이드 수용액 유하액막의 흡수과정에 대한 근사해법: 증기 유동의 영향," *공기조화 냉동공학 논문집*, 제9권, 제2호, pp. 144~152.
- (7) Rose, J. W., 1980, "Approximate Equations for

- Forced Convection Condensation in the Presence of a Non-Condensing Gas on a Flat Plate and Horizontal Tube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 539~546.
- (8) Bannwart, A. C., and Bontemps, A., 1990, "Condensation of a Vapor with Incondensables : an Improved Gas Phase Film Model Accounting for the Effect of Mass Transfer on Film Thickness," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 33, No. 7, pp. 1465~1474.
- (9) Grossman, G., 1990, "Film Absorption Heat and Mass Transfer in the Presence of Non-Condensables," *Proc 9th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 6, Jerusalem, Israel. pp. 247~252.
- (10) Habib, H. M., Ameel, T. A., and Wood, B. D., 1996, "Effects of Non-Absorbable Gas on Interfacial Heat and Mass Transfer for the Entrance Region of a Falling Film Absorber," *J. of Solar Energy Engineering, ASME*, Vol. 118, pp. 45~49.
- (11) DiGuilio, R. M., Lee, R. J., Jeter, S. M., and Teja, A. S., 1990, "Properties of Lithium Bromide-Water Solutions at High Temperatures and Concentrations- I : Thermal Conductivity," *ASHRAE Trans.*, Vol. 96, Part 1, pp. 702~708.
- (12) Lee, R. J., DiGuilio, R. M., Jeter, S. M., and Teja, A. S., 1990, "Properties of Lithium Bromide-Water Solutions at High Temperatures and Concentrations- II : Density and Viscosity," *ASHRAE Trans.*, Vol. 96, Part 1, pp. 709~714.
- (13) McNeely, L. A., 1979, "Thermodynamic Properties of Aqueous Solutions of Lithium Bromide," *ASHRAE Trans.*, PH-79-3, No. 3, pp. 413~434.
- (14) Nusselt, W., 1916, "Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes," *VDI, Z.*, Vol. 60, pp. 541~569.
- (15) 이찬우, 1997, "수직관내 리튬브로마이드 수용액막의 흡수과정에 대한 비흡수가스의 영향," 박사학위논문, 홍익대학교, 서울
- (16) Kim, B. J., and 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.