

수직원관형 흡수기의 흡수과정에 미치는 비흡수가스의 영향

Effect of a non-absorbable gas on the absorption process in a vertical tube absorber

허 기 준*, 정 은 수**, 정 시 영***
K. J. Hur, E. S. Jeong, S. Jeong

Key words : LiBr/water(LiBr/물), Non-absorbable gas(비흡수가스), Absorption process(흡수과정), Vertical tube absorber(수직원관형 흡수기), Numerical analysis(수치해석), Heat and mass transfer(열 및 물질전달)

Abstract

Effect of a non-absorbable gas on the absorption process in a vertical tube absorber was investigated numerically. The water vapor mixed with air as the non-absorbable gas is absorbed into LiBr/water solution film. The flow is assumed to be laminar and fully developed in both liquid and gas phases. The diffusion and energy equations were solved in both phases to give the temperature and concentrations, from which heat and mass fluxes were determined. It was shown that the local absorption rate decreases as the mass fraction of air in water vapor increases. The vapor pressure of water at the liquid-vapor interface reduces significantly since the non-absorbable gas is accumulated near the interface. The effect of non-absorbable gases on absorption rate becomes larger as the mass flow rate of the vapor decreases. For small amount of non-absorbable gases the total absorption rate of water vapor increases as the mass flow rate of the vapor decreases. Total absorption rate increases as the mass flow rate of the vapor increases for large concentration of non-absorbables at the inlet of an absorber.

기 호 설 명

C : LiBr의 질량분율
 D : 물질확산계수

g : 중력가속도
 H_a : 단위질량당 흡수열
 k : 열전도도
 L : 흡수기의 길이
 \dot{M}_{total} : 수증기의 단위시간당 총흡수율
 \dot{m}_{abs} : 흡수되는 수증기의 질량유속
 p : 압력
 p_{vs} : 액막과 기체의 경계면에서의 수증기분압

* 홍익대학교 대학원
** 정희원, 홍익대학교 기계공학과
*** 정희원, 서강대학교 기계공학과

- r : 반경방향의 좌표(Fig.1)
 R : 흡수기의 반경(Fig.1)
 T : 온도
 u : 축방향 속도
 W : 기체영역의 수증기의 질량분율
 W_a : 기체영역의 공기의 질량분율
 x : 축방향의 좌표(Fig.1)

그리스문자

- α : 열확산계수
 Γ : 질량유량
 δ : 액막의 두께
 η : 반경방향의 무차원 좌표
 μ : 점성계수
 ν : 동점성계수
 ξ : 축방향의 무차원 좌표
 ρ : 밀도

하첨자

- g : 수증기/공기 혼합기체
 i : 축방향의 i 번째 절점(node)
 in : 흡수기 입구
 l : 액막
 s : 액막과 혼합기체의 경계
 w : 흡수기 벽면

1. 서 론

LiBr 계열의 수용액을 사용하는 흡수식 열펌프에서 비흡수가스(non-absorbable gas)는 흡수기(adsorber) 내부의 LiBr 수용액과 수증기/비흡수가스 혼합기체의 경계면에 축적되어 수증기의 흡수를 방해하므로 전체 시스템의 성능을 크게 저하시킨다. 비흡수가스는 대부분 외부에서 유입되는 공기와 시스템 내부에서 발생하는 부식가스로 이루어진다. 공기는 대기보다 압력이 낮은 증발기와 흡수기로 누설에 의하여 유입되며, 부식가스는 온도가 높은 재생기(generator)에서 화학반응에 의하여 발생한다.⁽¹⁾

흡수기에서 수증기가 LiBr 수용액에 흡수됨에 따라 수증기는 액막과 기체의 경계면으로 이동하며 비흡수가스도 경계면으로 이동하게 된다. 비흡수가스는 LiBr 수용액에 흡수되지 않으므로 경계면에 축적되어 수증기의 경계면으로의 확산을 막고, 또한 경계면에서 수증기의 분압을 감소시키므로 수증기의 흡수율을 저하시킨다.⁽²⁾

Burdukov 등⁽³⁾은 수평원관형 흡수기를 흐르는 LiBr 수용액막에 수증기가 흡수되는 과정에 비흡수가스가 미치는 영향을 실험적으로 규명하였는데, 흡수기 내부의 공기의 함량이 0.5%일 때 물질전달계수는 50% 감소하였고, 공기의 함량이 2%이면 물질전달계수는 비흡수가스가 없는 경우의 물질전달계수의 40%였음을 발견하였다. Yang과 Wood⁽⁴⁾는 수직원관형 흡수기를 흐르는 LiCl 수용액에 흡수되는 수증기의 흡수과정에 미치는 비흡수가스의 영향에 대한 실험을 수행하였다. 이들의 실험결과 Burdukov 등⁽³⁾의 실험결과에 비하여 비흡수가스가 흡수율에 미치는 영향이 작았으며, 공기의 체적분율이 30%에 이를 때까지 흡수율은 연속적으로 감소하는 것을 보여주었다. Vliet과 Cosenza⁽⁵⁾는 수평원관 외부를 흐르는 LiBr 수용액막의 수증기 흡수과정에서 물질전달과 열전달은 공기의 체적분율이 0.1% 이하에서는 공기가 없는 경우와 비교하여 큰 차이가 없으나, 공기의 체적분율이 1%와 5%일 경우에는 흡수율이 각각 20%, 50% 감소하는 것을 실험적으로 보였다. 국내에서는 손병후 등⁽⁶⁾과 이찬우 등⁽⁷⁾이 수직원관 내부를 흐르는 LiBr 수용액막의 수증기 흡수과정에 대한 비흡수가스의 영향을 실험적으로 규명하였다.

흡수기에서 일어나는 열 및 물질전달에 관한 해석적 연구는 대부분 비흡수가스를 고려하지 않고 순수한 수증기가 LiBr 수용액막에 흡수되는 과정에 대하여 이루어졌고, 비흡수가스가 흡수과정에 미치는 영향을 규명하는 연구는 최근에야 이루어지고 있다. Grossman⁽²⁾은 액체영역과 기체영역에 에너지방정식과 물질전달방정식을 적용하여 비흡수가스가 극소량일 경우에도 완전히 없는 경우에 비하여 물질전달율이 매우 크게 감소하는 것을 보였으며, Habib 등⁽⁸⁾은 공기의 함량이 증가할수록 수증기의 흡수율은 연속적으로 감소하는 것을 보였

으며, Habib 등⁽⁸⁾은 공기의 함량이 증가할수록 수증기의 흡수율은 연속적으로 감소하는 것을 보였다. 이 연구들의 결과는 비흡수가스가 흡수기에서 일어나는 열 및 물질전달에 미치는 영향을 보여주나, 이들이 사용한 해석모델들은 흡수기의 입구영역에만 적용할 수 있으므로 비흡수가스가 흡수기 전체의 흡수과정에 미치는 영향을 알아보는 것은 곤란하다. Yang과 Chen⁽⁹⁾은 수직평판형 흡수기에서 비흡수가스가 수증기의 흡수과정에 미치는 영향을 유한차분법을 사용하여 해석하였는데, 비흡수가스의 양이 매우 작을 경우에도 액체와 기체의 경계에서 비흡수가스의 질량분율은 매우 높고 수증기의 흡수율은 상당히 감소한다는 것을 보였다. 이들의 해석모델은 수증기와 공기로 이루어진 기체영역의 속도를 흡수제 수용액의 액막표면속도와 같다고 가정하여 기체의 속도가 흡수과정에 미치는 영향을 무시하였고, 또한 액막표면에서 먼 기체영역의 비흡수가스의 질량분율은 일정하다고 가정하였다. Lee 등⁽¹⁰⁾은 적분방법을 이용하여 수직원관형 흡수기에서 일어나는 흡수과정에 대한 비흡수가스의 영향을 해석적으로 보였다.

본 연구에서는 수직원관 내부를 흐르는 LiBr 수용액에 흡수되는 수증기 흡수과정에 대한 비흡수가스의 영향을 유한차분법을 사용하여 수치적으로 해석하였다. 액막과 기체의 유동은 층류이고 완전발달되었다고 가정하였으며, 액체와 기체영역에 물질전달방정식과 에너지보존식을 적용하여 흡수기로 들어오는 비흡수가스의 질량분율, 기체의 질량유량, LiBr 수용액의 질량유량이 흡수기 성능에 미치는 영향을 규명하였다.

2. 흡수기 해석모델 및 지배방정식

Fig.1은 수직원관형 흡수기의 개략도이다. LiBr 수용액은 온도가 일정한 수직원관의 벽을 따라 액막을 형성하며 흐르고, 그 내부로 수증기/공기의 혼합기체가 유동한다. 본 연구에서 사용된 주요 가정들은 다음과 같다.

1) 액막과 기체의 유동은 층류이고 완전히 발달되어 있다.

2) LiBr 수용액과 수증기/공기 혼합기체의 열

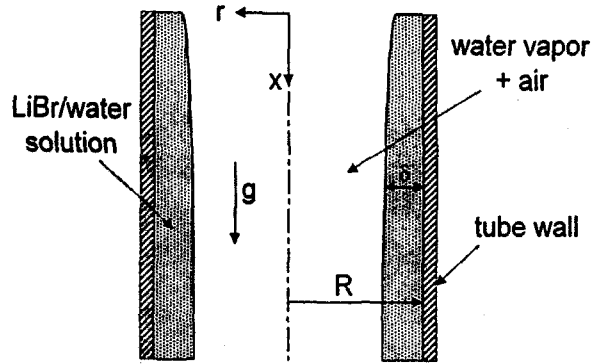


Fig.1 Schematic of vertical tube absorber

및 물리적 성질은 일정하다.

3) LiBr 수용액은 액막과 기체의 경계면에서 열역학적 평형상태에 있다.

4) 열 및 물질전달은 원관에 수직인 방향(r -방향)의 확산과 원관에 평행한 방향(x -방향)으로의 대류에 의하여 일어난다.

가정 (1)을 사용하여 구한 액막과 기체영역의 x -방향 운동량보존식은 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + g \quad (1)$$

액막의 경계조건 $r=R$ 에서 $u_l=0$, $r=R-\delta$ 에서 $u_g=u_s$ 와 기체영역의 경계조건 $r=0$ 에서 $\partial u_g/\partial r=0$, $r=R-\delta$ 에서 $u_g=u_s$ 을 이용하여 액막과 기체의 속도분포를 구하면 다음과 같다.

$$u_l = \frac{gR^2}{4\nu_l} \left(1 - \frac{db/dx}{\rho_l g} \right) \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 - \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\delta}{R} \right)^2 \right\} \frac{\ln(r/R)}{\ln(1-\delta/R)} \right] + u_s \frac{\ln(r/R)}{\ln(1-\delta/R)} \quad (2)$$

$$u_g = \frac{gR^2}{4\nu_g} \left(1 - \frac{db/dx}{\rho_g g} \right) \left[\left(1 - \frac{\delta}{R} \right)^2 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] + u_s \quad (3)$$

여기서 하첨자 l 과 g 는 각각 액체와 기체영역을 의미하며, ρ 는 밀도, ν 는 동점성계수를 나타낸다.

u_s 는 액막과 기체의 경계면에서의 속도이다.

액막과 기체의 경계면에서 전단응력은 같아야 하므로 식 (2)와 (3)에서 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & -\frac{\rho_l g R}{4} \left(1 - \frac{dp/dx}{\rho_l g}\right) \left[2 \left(1 - \frac{\delta}{R}\right) + \frac{1 - (1 - \delta/R)^2}{(1 - \delta/R) \ln(1 - \delta/R)}\right] \\ & + \frac{\mu_l u_s / R}{(1 - \delta/R) \ln(1 - \delta/R)} \\ & = -\frac{\rho_g g R}{2} \left(1 - \frac{dp/dx}{\rho_g g}\right) \left(1 - \frac{\delta}{R}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 μ_g , μ_l 은 각각 기체와 액체의 점성계수이다. 액막과 기체의 질량유량을 식 (2)와 (3)으로부터 구하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Gamma_l &= \frac{\pi \rho_l g R^4}{4 \nu_l} \left(1 - \frac{dp/dx}{\rho_l g}\right) \left[1 - \left(1 - \frac{\delta}{R}\right)^2 - \frac{1 - (1 - \delta/R)^4}{2} + \left\{1 - \left(1 - \frac{\delta}{R}\right)^2\right\} \right. \\ & \times \left. \left\{\left(1 - \frac{\delta}{R}\right)^2 + \frac{1 - (1 - \delta/R)^2}{2 \ln(1 - \delta/R)}\right\}\right] \\ & - \pi \rho_l u_s R^2 \left[\left(1 - \frac{\delta}{R}\right)^2 + \frac{1 - (1 - \delta/R)^2}{2 \ln(1 - \delta/R)}\right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_g &= \frac{\pi \rho_g g R^4}{4 \nu_g} \left(1 - \frac{dp/dx}{\rho_g g}\right) \left[\left(1 - \frac{\delta}{R}\right)^4 - \frac{(1 - \delta/R)^4}{2}\right] + \pi \rho_g u_s (R - \delta)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

가정 (4)를 이용하여 액막에서 일어나는 물질전달 및 열전달의 지배방정식들을 다음과 같이 구할 수 있다.⁽¹¹⁾

$$u_l \frac{\partial C}{\partial x} = D_l \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r}\right) \quad (7)$$

$$u_l \frac{\partial T_l}{\partial x} = \alpha_l \left(\frac{\partial^2 T_l}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_l}{\partial r}\right) \quad (8)$$

여기서 C 와 T_l 은 LiBr의 질량분율과 액막의 온도

를 나타내며, D_l 과 α_l 은 기체의 물질확산계수와 열확산계수이다.

기체영역에서 일어나는 물질전달과 열전달의 지배방정식은 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$u_g \frac{\partial W}{\partial x} = D_g \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r}\right) \quad (9)$$

$$u_g \frac{\partial T_g}{\partial x} = \alpha_g \left(\frac{\partial^2 T_g}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_g}{\partial r}\right) \quad (10)$$

여기서 W 와 T_g 는 수증기의 질량분율과 기체의 온도를 나타내며, D_g 와 α_g 는 기체의 물질확산계수와 열확산계수이다.

흡수기 입구조건과 경계조건들은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x=0: & T_l = T_{l,in}, \quad C = C_{in}, \\ & T_g = T_{g,in}, \quad W = W_{in} \\ r=R: & T_l = T_w, \quad \partial C / \partial r = 0 \\ r=0: & \partial T_g / \partial r = 0, \quad \partial W / \partial r = 0 \\ r=R-\delta: & T_l = T_g, \\ & -k_l \frac{\partial T_l}{\partial r} = -k_g \frac{\partial T_g}{\partial r} + \dot{m}_{abs} H_a, \\ & \frac{\rho_l D_l}{C_s} \frac{\partial C}{\partial r} = -\frac{\rho_g D_g}{1-W} \frac{\partial W}{\partial r} \end{aligned} \quad (11)$$

3. 수치해법

액막의 두께 δ 는 수증기가 흡수됨에 따라 유동 방향으로 변하므로 다음과 같은 좌표변환을 하여 수치해석을 수행하였다.

$$\xi = x/L \quad (12)$$

$$\eta_l = (R-r)/\delta \quad (13)$$

$$\eta_g = r/(R-\delta) \quad (14)$$

식 (12)~(14)를 사용하여 식 (7)~(10)을 좌표변환⁽¹²⁾하면 다음과 같은 식들을 얻을 수 있다.

$$\frac{u_l}{L} \frac{\partial C}{\partial \xi} - \frac{u_l}{L} \frac{\eta_l}{\delta} \frac{d\delta}{d\xi} \frac{\partial C}{\partial \eta_l}$$

$$= D_l \left[\frac{1}{\delta^2} \frac{\partial^2 C}{\partial \eta_l^2} - \frac{1}{(R-\delta)\delta} \frac{\partial C}{\partial \eta_l} \right] \quad (15)$$

$$\frac{u_l}{L} \frac{\partial T_l}{\partial \xi} - \frac{u_l}{L} \frac{\eta_l}{\delta} \frac{d\delta}{d\xi} \frac{\partial T_l}{\partial \eta_l}$$

$$= \alpha_l \left[\frac{1}{\delta^2} \frac{\partial^2 T_l}{\partial \eta_l^2} - \frac{1}{(R-\delta)\delta} \frac{\partial T_l}{\partial \eta_l} \right] \quad (16)$$

$$\frac{u_g}{L} \frac{\partial W}{\partial \xi} + \frac{u_g}{L} \frac{\eta_g}{R-\delta} \frac{d\delta}{d\xi} \frac{\partial W}{\partial \eta_g}$$

$$= D_g \left[\frac{1}{(R-\delta)^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \eta_g^2} - \frac{1}{(R-\delta)^2 \eta_g} \frac{\partial W}{\partial \eta_g} \right] \quad (17)$$

$$\frac{u_g}{L} \frac{\partial T_g}{\partial \xi} + \frac{u_g}{L} \frac{\eta_g}{R-\delta} \frac{d\delta}{d\xi} \frac{\partial T_g}{\partial \eta_g}$$

$$= \alpha_g \left[\frac{1}{(R-\delta)^2} \frac{\partial^2 T_g}{\partial \eta_g^2} - \frac{1}{(R-\delta)^2 \eta_g} \frac{\partial T_g}{\partial \eta_g} \right] \quad (18)$$

경계조건 식 (11)은 다음과 같이 변환된다.

$$\xi=0 : T_l = T_{l,in}, \quad C = C_{in},$$

$$T_g = T_{g,in}, \quad W = W_{in}$$

$$\eta_l=0 : T_l = T_w, \quad \partial C / \partial \eta_l = 0$$

$$\eta_g=0 : \partial T_g / \partial \eta_g = 0, \quad \partial W / \partial \eta_g = 0 \quad (19)$$

$$\eta_l = \eta_g = 1 : T_l = T_g,$$

$$\frac{k_l}{\delta} \frac{\partial T_l}{\partial \eta_l} = - \frac{k_g}{(R-\delta)} \frac{\partial T_g}{\partial \eta_g} + \dot{m}_{abs} H_a,$$

$$- \frac{\rho_l D_l}{C_s \delta} \frac{\partial C}{\partial \eta_l} = - \frac{\rho_g D_g}{(1-W_s)(R-\delta)} \frac{\partial W}{\partial \eta_g}$$

좌표변환된 액막과 기체영역의 물질전달방정식과 에너지보존식(식 (15)~(18))의 해를 유한차분법을 사용하여 구하였다.

액막과 기체영역의 물질전달방정식과 에너지방정식에서 LiBr 수용액막에 흡수되는 수증기의 질량 유속을 구하면 ξ -방향으로의 i -번째 절점(node)에서의 LiBr 수용액과 기체의 질량유량은 다음 식

들에서 구할 수 있다.

$$\Gamma_{l,i} = \Gamma_{l,i-1} + \frac{(\dot{m}_{abs,i-1} + \dot{m}_{abs,i})}{2}$$

$$2\pi(R-\delta)\Delta x \quad (20)$$

$$\Gamma_{g,i} = \Gamma_{g,i-1} - \frac{(\dot{m}_{abs,i-1} + \dot{m}_{abs,i})}{2}$$

$$2\pi(R-\delta)\Delta x \quad (21)$$

식 (20)과 (21)에서 LiBr 수용액과 기체의 질량유량을 알면 액체와 기체의 경계면에서 전단응력이 같다는 조건식 (4)과 LiBr 수용액과 기체의 질량유량식 (5), (6)에서 δ , dp/dx , u_s 를 구할 수 있다.

계산은 흡수기 입구에서 출구방향으로 진행하였다. ξ -방향으로의 i -번째 절점(node)에서의 계산은 먼저 $(i-1)$ -번째 절점에서 구한 액막두께 δ 를 사용하여 액막과 기체영역의 온도와 질량분율을 구하고 수증기 흡수율을 계산한다. 새로 얻어진 수증기 흡수율을 사용하여 다시 δ , dp/dx , u_s 를 계산한다. 새로 구한 액막의 두께가 가정한 액막의 두께와 같아질 때까지 이 과정을 반복하였다.

4. 흡수기 해석 결과

Table 1은 본 연구에서 사용된 흡수기의 재원파 기준작동조건들을 보여준다.⁽¹³⁾ 기체영역의 물질

Table 1 Absorber geometry and reference operating conditions

Parameter	Values
Absorption tube diameter(mm)	13.3
Absorption tube length(mm)	1,000
System pressure(mmHg)	8.0
Wall temperature(°C)	35.0
Solution LiBr concentration(%)	58.0
Solution temperature(°C)	40.0
Solution flowrate(kg/min)	0.4
Gas flowrate(kg/min)	0.005
Gas temperature(°C)	8.0
Air concentration at inlet(%)	1.0

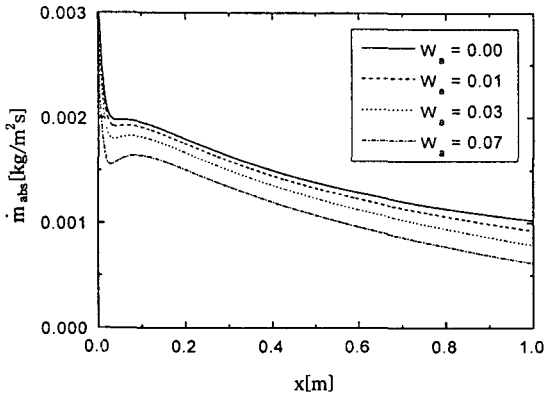


Fig.2 Effect of non-absorbable gas on local absorption rate

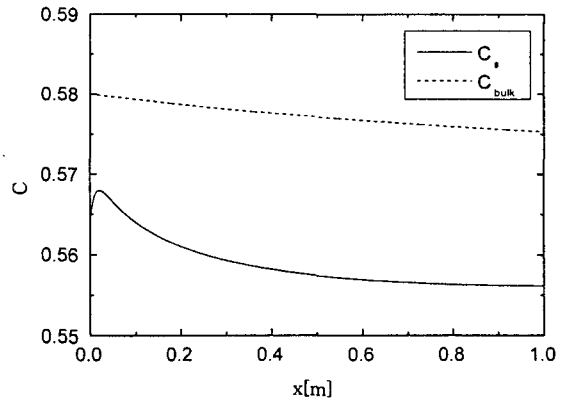


Fig.4 Bulk and surface concentration variations along the tube

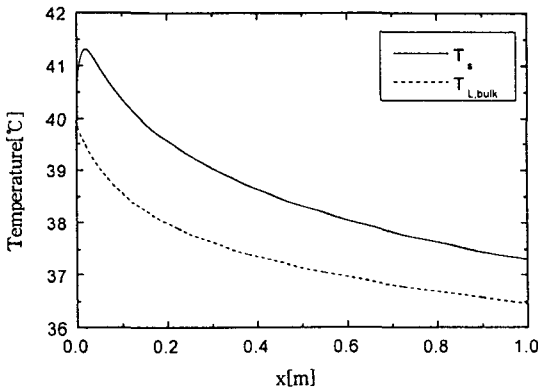


Fig.3 Bulk and surface temperature variations along the tube

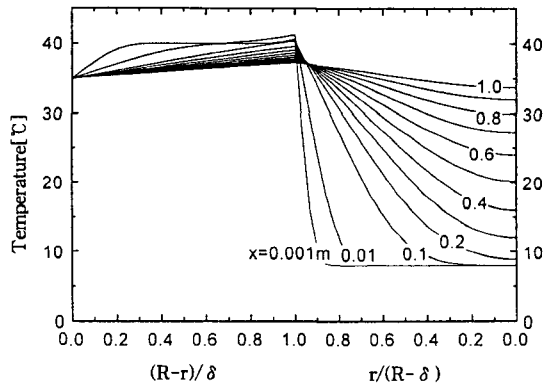


Fig.5 Variations of solution film and gas temperature profiles

확산계수는 Wilke-Lee 방법⁽¹⁴⁾을 사용하여 구하였으며 열전도도는 Mason과 Saxena 방법⁽¹⁵⁾을 사용하여 구하였는데 기준작동조건에서 각각 $18.96 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{sec}$ 와 0.018W/m-K 이다. 기준작동조건에서 구한 입구에서의 액막두께는 0.44mm이다.

Fig.2는 비흡수가스가 액막에 흡수되는 수증기의 흡수율에 미치는 영향을 보여준다. 흡수기 입구로 들어오는 수증기/공기의 혼합기체에 비흡수가스가 많이 포함될수록 흡수율은 낮아지는 것을 볼 수 있다. 흡수기 입구로 들어오는 LiBr 수용액은 과냉상태이므로 기체영역의 수증기 분압은 LiBr 수용액의 증기압보다 높다. 따라서, 흡수기 입구에서부터 수증기의 흡수가 시작된다. 흡수기로 들어

오는 비흡수가스의 질량분율이 클수록 기체영역의 수증기 분압은 감소하므로 흡수율은 감소하는 것을 볼 수 있다. 수증기가 흡수됨에 따라 흡수열이 액막표면의 온도를 높이므로 액막표면에서 LiBr 수용액의 증기압은 높아지고 흡수율은 급격히 감소하게 된다. 입구에서 3cm 정도 지나면서 흡수기 벽에서 발달한 온도경계층이 LiBr 수용액막의 표면까지 도달하게 되면 액막표면의 온도가 낮아지므로 흡수율은 조금 증가하나, 그 이후는 액막의 온도가 낮아져 액막에서 흡수기벽으로 전달되는 열전달율이 작아지므로 흡수율은 서서히 감소한다.

Fig.3과 4는 LiBr 수용액막의 온도와 LiBr의 질량분율의 변화를 보여준다. 입구에서부터 수증기

가 LiBr 수용액에 흡수되므로 흡수열에 의하여 액막표면의 온도는 입구 근처에서 급격히 증가하고, 액막표면의 LiBr의 질량분율은 흡수기 입구에서 크게 낮아진다. 입구 근처에서 표면온도가 올라가므로 액막표면에서의 열역학적 평형조건에 의하여 표면의 LiBr의 질량분율도 증가한다. 그러나, 입구에서 3cm 정도 지나면 흡수기벽에서 발달한 온도 경계층이 액막표면까지 도달하므로 액막표면온도는 서서히 낮아지고 표면온도가 낮아짐에 따라 LiBr의 질량분율도 감소한다. LiBr 수용액막은 흡수기벽에 의하여 냉각되므로 액막의 혼합평균온도(bulk temperature)는 입구에서부터 서서히 감소하고, 수증기가 액막에 흡수되므로 LiBr의 혼합평균질량분율도 서서히 감소한다.

액막과 기체영역의 반경방향 온도분포의 변화를 Fig.5에 나타내었다. $x=0.001\text{m}$ 와 0.01m 에서 액막표면의 온도가 입구온도보다 높아지나 그 이후에는 액막의 온도가 서서히 감소하고 온도분포는 선형적이 되는 것을 볼 수 있다. 흡수기 입구 가까이에서 기체의 온도구배는 경계면에서 매우 크나 출구로 갈수록 온도구배는 감소하고 관중심부의 온도도 흡수기벽의 온도로 접근하는 것을 알 수 있다.

Fig.6은 $\Gamma_l=0.4\text{kg/min}$, $W_a=0.01$ 일 경우 기체의 질량유량이 흡수기 내부의 압력분포에 미치는 영향을 보여준다. 흡수기 출구로 갈수록 압력은 감소하고, 기체의 질량유량이 증가할수록 압력강하

가 커지는 것을 알 수 있다. 기체의 질량유량이 0.006kg/min 일 경우의 입구와 출구사이의 압력강하는 입구압력의 약 10%이므로 흡수기 내부의 압력강하를 무시할 수 없다는 것을 보여준다. 기체영역의 압력강하는 물질전달의 구동력(driving potential)인 수증기의 분압을 감소시키므로 수증기의 흡수율을 낮추게 된다.

흡수기 입구로 들어오는 기체의 질량유량이 흡수율에 미치는 영향을 Fig.7에 보였다. 입구에서 $x=0.4\text{m}$ 까지는 기체의 질량유량이 작을수록 흡수율이 약간 커지는 것을 볼 수 있다. 기체의 질량유량이 큰 경우($\Gamma_g=0.005, 0.006\text{kg/min}$)에는 흡수기 전체에 걸쳐서 기체의 질량유량이 작을수록 흡수율은

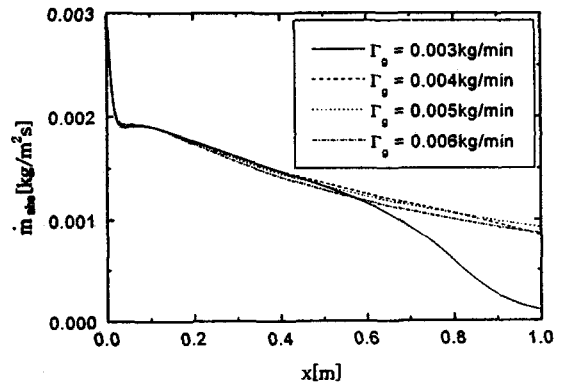


Fig.7 Effect of vapor flow rate on local absorption rate ($\Gamma_l=0.4\text{kg/min}$, $W_a=0.01$)

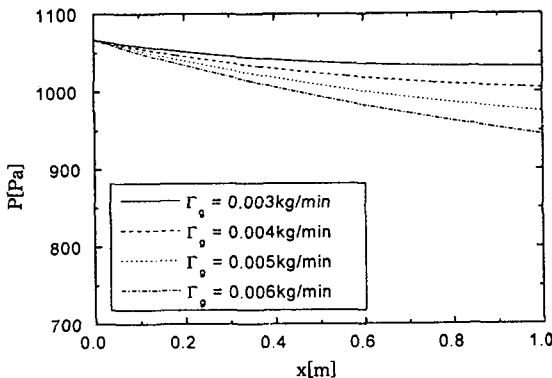


Fig.6 Effect of vapor flow rate on pressure ($\Gamma_l=0.4\text{kg/min}$, $W_a=0.01$)

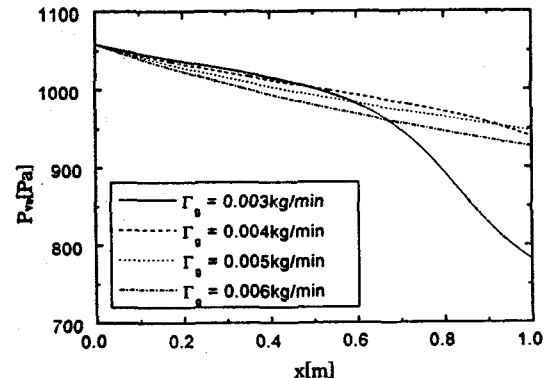


Fig.8 Effect of vapor flow rate on surface vapor pressure ($\Gamma_l=0.4\text{kg/min}$, $W_a=0.01$)

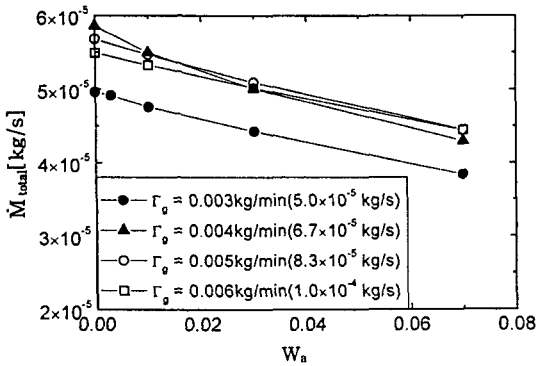


Fig.9 Effect of vapor flow rate on total absorption rate($\Gamma_l=0.4\text{kg/min}$)

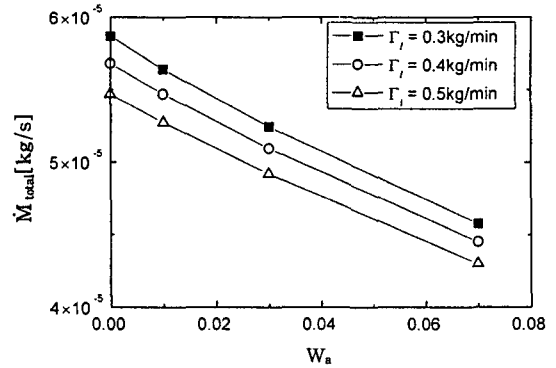


Fig.10 Effect of liquid flow rate on total absorption rate($\Gamma_g=0.005\text{kg/min}$)

증가하나, $\Gamma_g=0.004\text{kg/min}$.인 경우의 흡수율은 $x=0.8\text{m}$ 부터 $\Gamma_g=0.005\text{kg/min}$.일 때의 흡수율 보다 낮아지며, $\Gamma_g=0.003\text{kg/min}$.일 때의 흡수율은 $x=0.5\text{m}$ 부터 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig.8은 흡수기로 들어오는 기체의 질량유량이 LiBr 수용액과 기체의 경계면에서의 수증기 분압에 미치는 영향을 보여준다. 흡수기 입구에서 출구로 진행함에 따라 기체영역의 수증기는 액막에 흡수되고 경계면으로 수증기와 같이 이동한 비흡수 가스는 흡수가 되지 않으므로 경계면에서 수증기의 질량분율은 감소하고 비흡수가스의 질량분율은 증가한다. 기체영역의 수증기 분압은 입구근처를 제외하고는 Fig.7에 보인 수증기의 흡수율과 비슷한 경향을 보여준다. 흡수기의 전반부에서 기체의 질량유량이 작을수록 경계면에서의 수증기 분압이 큰 것은 Fig.6에 보인 바와 같이 기체의 질량유량이 작을수록 압력강하가 작으므로 수증기의 분압이 커지기 때문이다. 흡수기의 후반부에서는 기체의 질량유량이 큰 경우($\Gamma_g=0.005, 0.006\text{kg/min}$.)에는 수증기 분압이 감소하는 기울기가 일정하나, 질량유량이 작은 경우($\Gamma_g=0.003, 0.004\text{kg/min}$.)에는 기체의 질량유량이 작을수록 경계면에서의 수증기 분압이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig.7에서 볼 수 있는 바와 같이 $x=0.5\text{m}$ 까지는 수증기의 흡수율이 기체의 질량유량에 따라 크게 변화하지 않으므로 흡수기 입구에서 출구로 진행하면서 흡수되지 않은 수증기의 질량유량과 입구

로 들어온 수증기의 질량유량의 비는 기체의 질량유량이 작을수록 낮아진다. 그러나, 비흡수가스의 질량유량은 흡수기 출구방향으로 변화가 없으므로 기체의 질량유량이 작을수록 기체영역의 수증기의 질량분율은 낮아지고 수증기의 분압도 감소한다. 수증기의 분압이 감소하므로 Fig.7에 보인 바와 같이 기체의 질량유량이 작을수록 흡수기 후반부에서 수증기의 흡수율도 크게 감소하는 것으로 생각된다.

Fig.9는 흡수기로 들어오는 기체의 질량유량과 비흡수가스의 질량분율이 흡수기 전체에서 흡수되는 수증기의 질량에 미치는 영향을 보여준다. 비흡수가스가 없을 경우에는 $\Gamma_g=0.004\text{kg/min}$.에서 0.006kg/min .까지는 기체의 질량유량이 증가할수록 흡수되는 수증기의 질량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 기체의 질량유량이 증가할수록 압력강하가 커져서 흡수기 출구로 갈수록 수증기의 분압이 감소하므로 흡수율이 감소하기 때문으로 생각된다. $\Gamma_g=0.003\text{kg/min}$.인 경우의 총흡수율이 $\Gamma_g=0.004\text{kg/min}$.일 경우에 비하여 작은 것은 흡수기 입구로 들어오는 수증기의 질량유량이 너무 작아서 수증기가 액막에 모두 흡수되었기 때문이다. $W_a=0.07$ 일 때 Γ_g 가 0.003kg/min .에서 0.004kg/min .로 증가하면 수증기의 총흡수율은 약 13% 증가하는 것을 볼 수 있다. 기체의 질량유량이 작을수록 비흡수가스가 흡수되는 수증기의 총흡수율에 미치는 영향이 큰 것을 볼 수 있는데, 이

것은 Fig.7에 보인 바와 같이 기체의 질량유량이 작을수록 흡수기 후반부의 흡수율이 감소하기 때문으로 생각된다.

흡수기로 들어오는 LiBr 수용액의 질량유량과 비흡수가스의 질량분율이 흡수기 전체에서 흡수되는 수증기의 양에 미치는 영향을 Fig.10에 나타내었다. LiBr 수용액의 질량유량이 증가할수록 액막의 두께는 두꺼워지므로 액막표면에서 흡수기벽으로의 열전달율은 감소한다. 따라서, LiBr 수용액의 질량유량이 증가할수록 흡수되는 수증기의 양은 감소한다. 흡수기로 들어오는 기체에 포함된 비흡수가스의 양이 증가할수록 흡수기 전체에서 흡수되는 수증기의 양은 감소하는 것을 알 수 있다. $\Gamma_1 = 0.4\text{kg/min.}$ 의 경우 흡수기로 들어오는 수증기에 포함된 비흡수가스의 질량분율을 1%, 3%, 5%로 변화시키면 수증기의 총흡수율은 비흡수가스가 없는 경우에 비하여 각각 4%, 10%, 20% 정도 감소하는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 비흡수가스의 영향을 고려하여 수직원관형 흡수기에서 수증기가 LiBr 수용액에 흡수되는 과정을 수치적으로 해석하였다. LiBr 수용액막과 기체의 유동은 완전발달한 층류로 가정하여 압력강하를 구하였고, 액막과 기체영역에 물 질전달식과 에너지보존식을 각각 적용하였다. 흡수기로 들어오는 수증기에 포함된 비흡수가스의 질량분율, 기체의 질량유량, 그리고 LiBr 수용액의 질량유량이 흡수율에 미치는 영향을 알아보았다.

수증기에 포함된 비흡수가스의 질량분율이 증가할수록 수증기의 흡수율은 감소한다. 비흡수가스는 흡수기 출구로 갈수록 액막과 기체의 경계면에 축적되므로 기체의 질량유량이 작은 경우 흡수기 출구 부근의 수증기의 분압은 크게 감소하고, 수증기의 흡수율은 급격히 감소한다.

기체의 질량유량이 작을수록 흡수율에 미치는 비흡수가스의 영향은 커진다. 흡수기 입구로 들어오는 수증기의 질량유량이 흡수기에서 흡수되는 수증기의 총흡수율보다 크고 비흡수가스의 질량분율이 작을 경우에는 기체의 질량유량이 작을수록

흡수기에서 흡수되는 수증기의 총흡수율은 증가한다. LiBr 수용액의 질량유량이 증가할수록 액막의 두께가 두꺼워지므로 수증기의 흡수율은 감소한다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학: ME96-F-11)에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사사를 포함합니다.

참 고 문 헌

1. Vliet, G. C. and Chen, W. 1993, "Location of non-absorbable gases in a simplified absorber geometry", International Absorption Heat Pump Conference, pp. 171~177.
2. Grossman, G., 1990, "Film absorption heat and mass transfer in the presence of non-condensables", Proceedings of the Ninth International Heat Transfer Conference, Jerusalem, Israel, Vol. 6, pp. 247~252.
3. Burdukov, A. P., Bufetov, N. S., Deriy, N. P., Dorikhov, A., and Kazakov, V. I., 1980, "Experimental study of the absorption of water vapor by thin films of aqueous lithium bromide", Heat Transfer-Soviet Res., Vol. 12, pp. 118~123.
4. Yang, R. and Wood, B. D., 1988, "Heat and mass transfer in laminar wavy film absorption with the presence of non-absorbable gases", Proceedings of the National Heat Transfer Conference, Houston, Texas, HTD-96, Vol. 3, pp. 141~148.
5. Vliet, G. C. and Cosenza, F. B., 1991, "Absorption phenomena in water-lithium bromide films", Proceedings of absorption heat pump Conference, pp. 53~61.
6. 손병후, 김병주, 1994, "흡수과정에 대한 비흡수가스의 영향", 공기조화 냉동공학회 동계학

- 술발표논문집, pp. 7~12.
7. 이찬우, 손병후, 김병주, 1995, "수직원관 내부를 흘러내리는 LiBr 수용액의 수증기 흡수 과정에 대한 비흡수가스 영향의 실험적 연구", 공기조화 냉동공학회 동계학술발표논문집, pp. 324~329.
 8. Habib, H. M., Ameer, T. A. and Wood, B. D., 1991, "Effects of a non-absorbable gas on the heat and mass transfer for the entrance region of a falling film absorber", Proceedings of the JSME/ASME Thermal Engineering Conference, Reno, Nevada, pp. 475~481.
 9. Yang, R. and Chen, J. H., 1991, "A numerical study of the non-absorbable effects on the falling liquid film absorption", *Warme und Stoffubertragung*, Vol 26, pp. 219~223.
 10. Lee, C. W. and Kim, B. J., "Analytical model for the absorption process of falling film in the presence of non-absorbable", Proc. of the 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conf., 1996, pp. 541~546.
 11. Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N., 1960, *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, Inc., p. 85, p. 319, p. 559.
 12. 명현국, 1995, *수치유체역학*, 한미, pp. 171~176.
 13. 김병주, 이찬우, 1998, "수직관내 리튬브로마이드 수용액막의 흡수과정에 대한 비흡수가스의 영향", *대한기계학회논문집(B)*, 제22권, 제3호, pp. 1304~1314(계재예정).
 14. Treybal, R. E., 1987, *Mass-Transfer Operation*, McGraw-Hill, pp. 31~32.
 15. Reid, R. C., Prausnitz, J. M., and Poling, B. E., 1988, *The Properties of Gases & Liquids*, McGraw-Hill, pp. 530~531.