

리튬브로마이드 수용액 유하액막의 흡수과정에 대한 근사 해법 : 증기 유동의 영향

Approximate solutions on the absorption process of an aqueous LiBr falling film : effects of vapor flow

김 병 주*, 이 찬 우**
B. J. Kim, C. W. Lee

Key words : Absorption process(흡수과정), Falling film(유하액막), LiBr-water solution(리튬브로마이드 수용액), Heat and mass transfer(열 및 물질전달), Vapor flow(증기유동)

Abstract

Film absorption involves simultaneous heat and mass transfer in the vapor-liquid system. In the present work, the absorption process of water vapor by an aqueous solution of LiBr flowing inside of the vertical tube was investigated. The continuity, momentum, energy and diffusion equations for the solution film and vapor were formulated in integral forms and solved numerically. The model could predict the film thickness, the pressure gradient, and the heat and mass transfer rate. Particularly the effects of vapor flow conditions on the absorption process were investigated in terms of the vapor Reynolds number. As the vapor Reynolds number increased, the shear stress at the vapor-solution interface also increased. Consequently solution film became thinner at higher vapor flowrate under the co-currentflow condition. Thinner film was capable of higher heat transfer to the wall and led to higher absorption rate of the water vapor into the solution film.

기 호 설 명

- | | |
|-----------------------|-------------------------|
| A : 열전달 면적(m^2) | g : 중력가속도(m/s^2) |
| C : 수용액막내의 물의 질량농도 | h : 관벽으로부터의 거리(m) |
| D : 물질확산계수(m^2/s) | i : 엔탈피(J/kg) |
| e : 내부에너지(J/kg) | k : 열전도계수(W/mK) |
| | L : 흡수열(J/Kg) |
| | \dot{m} : 질량 유량(kg/s) |
| | p : 압력(Pa) |
| | q : 열전달율(W) |
| | q'' : 열유속(W/m^2) |

* 홍익대학교 공과대학 기계공학과

** 홍익대학교 대학원

- R : 수직관 반지름(m)
- Re : 레이놀즈수
- T : 온도(°C)
- t : 시간(s)
- u : 속도(m/s)
- x : 유동방향축
- y : 유동방향에 수직인 축

그리스문자

- Γ : 단위 원주당 액막유량(kg/ms)
- δ : 수용액막 두께(m)
- Δ : 농도경계층 두께(m)
- μ : 점성계수(Ns/m²)
- ρ : 밀도(kg/m³)
- τ : 전단력(N)

상첨자

- : 체적평균
- ~ : 단위면적 당

하첨자

- eq : 열역학적 평형
- f : 수용액막
- g : 냉매증기
- o : 가스의 경우 관의 중심선 혹은 용액의 경우 입구상태
- s : 액체-증기계면
- w : 흡수기 관벽
- fs : 액체-증기계면에서 액체측
- gs : 액체-증기계면에서 증기측

1. 서 론

흡수식 열펌프는 기존 CFC계 냉매의 규제로 인한 증기압축식 냉방기의 문제점과 하절기의 냉방기 운전 증가로 인한 전력 수요 급증을 경감시킬 수 있는 방안으로 많은 관심의 대상이 되고 있다. 흡수기는 흡수식시스템의 구성 요소중 큰 체적을 차

지하는 열 및 물질교환기로 냉매 증기인 피흡수제는 흡수기를 통과하면서 리튬브로마이드 수용액과 같은 흡수제에 흡수된다. 그러므로 흡수과정의 효율은 흡수식장치의 저압부 압력을 지배하여 흡수기 성능에 직접적으로 영향을 미친다. 결국 흡수과정 시 수반되는 열 및 물질전달의 현상 및 그 기구를 근본적으로 이해하고 그 전달율을 정량적으로 정확히 예측할 수 있을 때 흡수식 열펌프의 소형화 및 고효율화가 가능하다.

흡수용액에 의한 증기 혹은 가스의 흡수기로 수평관이나 수직관을 이용한 유하액막형이 일반적으로 사용되고 있다. 이는 관내측에서 냉각수의 순환에 의해 흡수과정중 발생하는 흡수열을 용이하게 회수할 수 있기 때문이다. 유하액막에 의한 가스나 증기의 흡수과정은 기계 및 화학공정 기술분야에서 많이 응용되고 있다. 특히 최근 들어 리튬브로마이드 흡수식 시스템의 공냉화 및 소형화에 의한 가정용 냉방기의 다변화의 추진과 함께 수직관을 이용한 유하액막식 흡수기의 전달특성에 대한 실험 및 이론적인연구가 활발히 수행되었다.^{(1),(2)}

Morioka⁽³⁾ 등은 리튬브로마이드 수용액이 수직관 외측을 유하액막의 형태로 흘러내릴 경우의 열 및 물질전달 실험을 통하여 시스템압력의 함수로 최대 물질전달율을 나타내는 액막두께를 제안하였다. Kim 등⁽⁴⁾은 수직관 외측 유하액막식 흡수기에서 흡수기 길이의 함수로 흡수특성을 해석하기 위한 실험적 연구를 행하였다. Kim과 Kang⁽⁵⁾은 수직관내측을 흘러내리는 리튬브로마이드 수용액막의 열 및 물질전달 특성을 흡수기압력, 용액온도 및 용액유량의 함수로 제시하고 최대 열 및 물질전달율이 발생하는 액막 레이놀즈수를 제시하였다.

리튬브로마이드 수용액 유하액막의 흡수과정에 대한 이론적 연구도 의욕적으로 수행되었다. Grossman⁽⁶⁾은 액막의 두께가 일정할 때 증류 액막의 흡수과정을 완전 발달 속도분포를 사용하여 해석하였으며 Urakawa⁽⁷⁾등은 수직평관형 흡수기의 증류 유하액막에 대한 열 및 물질전달특성을 2차원 유한차분법에 의하여 해석하였다. Kiyota와 Morioka⁽⁸⁾는 유하액막의 두께 변화를 고려한 액막 속도를 운동량방정식으로 구하여 수치적으로 함께 풀이하였다. 정은수⁽⁹⁾는 직분방법을 이용하여 수직평관형

흡수기의 운동량, 열 및 물질전달에 대한 근사해를 준 1차원적 해석모델로 구하였고, 김선창⁽¹⁰⁾ 등은 수직관형 흡수기에 대한 열 및 물질전달 특성을 유한차분법으로 연구하였다. 그러나 이러한 이론적연구에서는 계산과정의 단순화나 운전조건에 따라 흡수과정중의 물질, 운동량 그리고 에너지전달에 있어 냉매증기의 유동을 고려하지 않았으므로 그 영향은 의문으로 남아 있다.

본 연구에서는 수직관형 유하액막식 흡수기의 물질, 운동량 그리고 에너지 전달특성에 대하여 연속방정식, 운동량, 에너지 그리고 확산방정식을 적분방법으로 풀이하여 해석하였다. 특히 증기의 유동특성이 흡수과정중 액체-증기의 계면응력, 열전달율, 그리고 흡수율등에 미치는 영향을 증기의 레이놀즈수의 함수로 연구하였다.

2. 해석모델 및 지배방정식

Fig.1은 수직관 흡수기에서 흡수과정중 유하액막과 냉매증기의 속도, 온도 그리고 농도분포와 좌표계를 보여주고 있다. 리튬브로마이드 수용액은 수직관벽을 따라 액막을 형성하며 환상류로 흐르고 관내부를 액막과 같은 방향으로 수증기가 유동하고 있다. 수증기는 액막과 수증기의 계면에서 흡수되

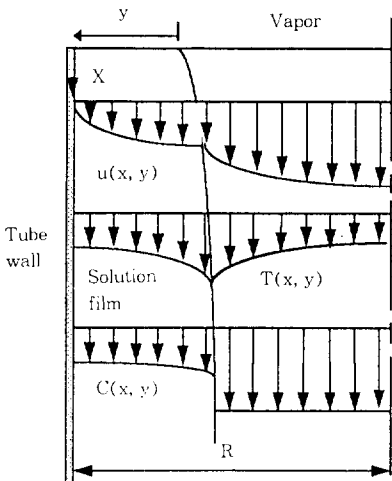


Fig.1 Schematic picture of a falling film

며 액막내에서 냉매의 농도구배로 인하여 액막 내부로 확산된다. 액막 경계면에서 발생하는 수증기의 흡수열은 온도구배에 의해 액막내부로 전달되고 이는 다시 수직관벽을 통하여 관외측의 냉각재로 배출된다.

유하액막 흡수과정에 영향을 주는 중요 요소들로 압력-온도-농도에 의해 결정되는 열역학적 평형상태, 열 및 물질확산계수와 같은 유체의 전달상태량, 층류, 과동류, 난류로 나타낼수 있는 액막의 유동특성, 그리고 수직관의 냉각특성등이 있다. 이들 요소들은 복합적으로 흡수과정에 영향을 미치며 각 요소들의 상대적인 중요성은 경계조건에 따라 다르게 나타난다.

본 해석에서 사용된 가정들은 다음과 같다.

- (1) 리튬브로마이드 수용액과 냉매증기의 열, 물리적 상태량은 일정하다.
- (2) 액체-증기 계면은 열역학적 평형상태이다.
- (3) 유하액막과 증기는 층류 유동이다.
- (4) 증기유동의 경우 그 속도와 온도분포는 완전 발달되어 있다.
- (5) 액막의 속도와 온도분포는 완전히 발달되어 있으나, 농도분포는 발달중이다.
- (6) 두상 사이에는 미끄럼이 없다.
- (7) 역확산은 무시한다.

(5)의 경우 유하액막의 두께가 작고 벽면에서의 운동량 및 열전달율이 상대적으로 크므로 그 속도와 온도는 완전히 발달된 것으로 가정하였으나 리튬브로마이드 수용액의 물질확산계수가 열확산계수나 운동량확산계수에 비하여 아주 작으므로 농도 경계층은 발달중인 것으로 가정하였다.

적분형으로 나타난 유하액막에 대한 연속방정식, 운동량 에너지, 그리고 물요소에 대한 질량보존식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dA_r + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho u dA_r = \dot{m} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int \rho u dA_r - u_s \frac{\partial}{\partial t} \int \rho dA_r + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho u^2 dA_r \\ - u_s \frac{\partial}{\partial x} \int \rho u dA_r = - \left(\frac{\partial p}{\partial t} - \rho_w \right) \int dA_r + \tau_w - \tau_s \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int \rho_e dA_t - e_{is} \frac{\partial}{\partial t} \int \rho dA_t + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho u_i dA_t \\ - i_{is} \frac{\partial}{\partial x} \int \rho u dA_t = -q_w + q_{fs} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho C dA_t + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho u C dA_t = \dot{m} \quad (4)$$

여기서 \dot{m} 은 흡수율, q 는 열전달율, τ 는 전단력, e 는 내부에너지, i 는 엔탈피, 그리고 C 는 리튬브로마이드수용액에서 물의 질량농도이다. 하첨자 f, s 그리고 w 는 액막, 액체-증기의 계면, 그리고 관벽을 의미하며 fs 는 액체-증기의 계면에서 액체측을 의미한다.

증기는 혼합물이 아니므로 연속방정식, 운동량, 그리고 에너지 보존식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho_g dA_g + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_g u_g dA_g = -\dot{m} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int \rho_g u_g dA_g - u_s \frac{\partial}{\partial t} \int \rho_g dA_g + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_g u_g^2 dA_g \\ - u_s \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_g u_g dA_g = -\left(\frac{\partial p}{\partial t} - \rho_{gs}\right) \int dA_g + \tau_s \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int \rho_g e_g dA_g - e_{gs} \frac{\partial}{\partial t} \int \rho_g dA_g + \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_g u_g e_g dA_g \\ - i_{gs} \frac{\partial}{\partial x} \int \rho_g u_g dA_g = -q_{gs} \end{aligned} \quad (7)$$

하첨자 g 는 증기를, gs 는 액체-증기의 계면에서 증기측을 의미한다.

액막과 증기유동에 대하여 속도, 온도 그리고 농도의 분포가 주어지면 위의 식에 의해 물질, 운동량, 그리고 열전달율에 대한 해석이 가능하다.

수용액막에 대한 경계 조건은 다음과 같다.

$$u_l(x, 0) = u_s \quad (8.1)$$

$$u_l(x, \delta_l) = 0 \quad (8.2)$$

$$\mu \frac{\partial u_l(x, 0)}{\partial y} = \tau_s'' \quad (8.3)$$

$$T_l(x, 0) = T_s \quad (9.1)$$

$$T_l(x, \delta_l) = T_w \quad (9.2)$$

$$-k_l \frac{\partial T_l(x, 0)}{\partial y} = \dot{m}'' L + q_{ks}'' \quad (9.3)$$

$$C(x, 0) = C_s \quad (10.1)$$

$$C(x, \Delta_l) = C_o \quad (10.2)$$

$$\frac{\partial C(x, \Delta_l)}{\partial y} = 0 \quad (10.3)$$

여기서 δ_l 와 L 은 액막두께와 흡수열이며 하첨자 o 는 수용액의 흡수관 입구상태를 의미한다. τ_s'' , \dot{m}'' , 그리고 q_{ks}'' 는 계면전단응력, 액막계면 단위면적당 흡수율, 그리고 증기로부터 계면으로의 열유속이다. 위의 경계조건에 따라 유하액막의 속도, 온도 그리고 농도의 분포는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$u_l(x, y) = u_s \left(1 - \frac{y^2}{\delta_l^2}\right) + \frac{\tau_s''}{\mu} \left(y - \frac{y^2}{\delta_l}\right) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} T_l(x, y) = T_s + (T_w - T_s) \frac{y^2}{\delta_l^2} \\ + \frac{\dot{m}'' L + q_{ks}''}{k_l} \left(y - \frac{y^2}{\delta_l}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

$$C(x, y) = C_s \left(1 - \frac{2y}{\Delta_l} + \frac{y^2}{\Delta_l^2}\right) + C_o \left(\frac{2y}{\Delta_l} + \frac{y^2}{\Delta_l^2}\right) \quad (13)$$

여기서 Δ_l 는 액막의 냉매 농도경계층 두께이다. 계면 전단응력과 열유속은 계면에서의 전단력 및 열유속의 연속조건을 고려할 때 냉매증기측 속도와 온도 분포로부터 계산할 수 있다. 증기유동의 경우, 속도와 온도에 대한 경계조건은 액막의 경우와 동일한 개념으로부터 유도할 수 있으며 다음과 같다.

$$u_g(x, 0) = u_s \quad (14.1)$$

$$u_g(x, \delta_l + R) = u_{gs} \quad (14.2)$$

$$\frac{\partial u_g(x, \delta_l + R)}{\partial y} = 0 \quad (14.3)$$

$$T_g(x, 0) = T_s \quad (15.1)$$

$$T_g(x, \delta_t - R) = T_{g0} \quad (15.2)$$

$$\frac{\partial T_g(x, \delta_t - R)}{\partial y} = 0 \quad (15.3)$$

증기의 경우 하첨자 0는 관의 중심선에서의 값을 의미하며 결국 증기의 속도와 온도분포는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$u_g(x, y) = u_s + (u_s - u_{g0}) \left[\frac{2y}{(\delta_t - R)} + \frac{y^2}{(\delta_t - R)^2} \right] \quad (16)$$

$$T_g(x, y) = T_s + (T_s - T_{g0}) \left[\frac{2y}{(\delta_t - R)} + \frac{y^2}{(\delta_t - R)^2} \right] \quad (17)$$

액체-증기 계면에서의 수용액의 농도는 가정 (2)에 의해 열역학적 평형상태에 대한 상태관계식으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$C_s = C_{eq}(T_s, p) \quad (18)$$

계면에서 열 및 물질유속의 연속조건은 다음과 같이 주어진다.

$$-k_l \frac{\partial T_l(x, 0)}{\partial y} = \dot{m}'' L - k_g \frac{\partial T_g(x, 0)}{\partial y} \quad (19)$$

$$\rho_l v_g - \rho_l D_l \frac{\partial C(x, 0)}{\partial y} = \rho_g v_s \quad (20)$$

여기서 D 는 물질확산계수이며 v_s 는 계면의 y 방향 속도이다. 계면을 통한 냉매증기의 흡수과정중 리튬브로마이드 성분은 액체-증기 계면을 침투할 수 없으므로 v_s 는 다음과 같이 주어진다.

$$v_s = -D_l \frac{\partial C(x, 0)}{\partial y} / (1 - C_s) \quad (21)$$

흡수기 벽면의 온도가 일정한 경우 미지수는 $\delta_t, \Delta, u_s, u_{g0}, T_s, T_{g0}, C_s$ 및 p 이다. 식 (1)~(7) 그리고 식 (18)을 시간에 대한 전향차분법과 공간에 대한 후향차분법을 사용하여 이산화시켜 유한 차분법으로 해석하여 그 해를 구할 수 있다. 리튬브로마이드 수용액의 온도와 농도는 액체-증기 계면에서 열역학적 평형상태로 구속되어 있다. 유하액막

으로 흡수되는 수증기의 질량 유속은 식 (20) 및 (21)을 만족해야 하고, 동시에 계면에서 온도 및 농도가 식 (18)의 평형상태의 요구조건을 만족해야 한다. 이는 Newton method에 의해 반복법으로 구할 수 있다.

수치적계산을 위하여 흡수기 입구에서의 각 변수에 대한 경계조건이 주어져야 한다. 액막의 경우 그 두께는 흡수과정의 최적 액막레이놀즈수를 고려하여 Nusselt 이론⁽¹¹⁾에서 계산되는 유하액막의 두께를 사용하였으며 액막의 속도는 질량유량으로부터 환산하였다. 흡수기 입구에서 액막내 물질분의 농도경계층 두께는 액막두께보다 아주 작은 값(1/1000)으로 가정하였다. 수증기의 유동조건 및 액막과 수증기의 열적조건은 흡수기의 운전조건으로부터 결정하였으며 열전달의 경우 벽면의 온도가 일정한 조건을 사용하였다.

3. 계산 결과 및 고찰

Table 1은 본 연구에 사용된 흡수기의 기준 작동조건을 보여주고 있다.

수직관 흡수기에 대한 실험적연구의 결과⁽²⁾에 의하면 열 및 물질전달에 대한 최적 액막 레이놀즈수는 약 120으로 제시되고 있다. 그러므로 실제 응용성을 고려하여 본 연구에서 채택한 유하액막의 레이놀즈수는 약 120이며 이 때 유하액막의 레이놀즈수는 다음과 같이 정의된다.

Table 1 Conditions for the analysis of absorption process

Parameters	Values
Absorption tube diameter(mm)	12.5
Absorption tube length(mm)	500
System pressure(mmHg)	8.0
Wall temperature(°C)	35.0
Solution water concentration(%)	42.0
Solution temperature(°C)	42.0
Solution flowrate(kg/min)	0.4
Vapor flowrate(kg/min)	0.003~0.012
Vapor inlet temperature(°C)	8.0

$$Re_l = \frac{4\Gamma}{\mu} \quad (22)$$

여기서 Γ 는 원주 단위길이당의 수용액 질량유량이다.

흡수기에 유입되는 증기의 질량유량은 유하액막에 비하여 상대적으로 적으나 흡수기의 압력이 아주 낮으므로 그 유동속도는 매우 크다. 흡수과정이 진행되면서 증기의 속도는 흡수과정에 의해 급격히 감소하나 용액과 수증기의 밀도비를 고려할때 유하액막의 평균속도는 계면의 속도와 마찬가지로 거의 일정하다. Fig.2는 냉매증기의 레이놀즈수가 650인 경우에 대하여 수직관 벽과 액체-증기 계면에서 발생하는 전단응력의 변화를 보여주고 있다. 증기의 레이놀즈수는 일반적인 관내 단상유동의 경우와 같이

$$Re = \frac{2\rho_k \bar{u}_k (R - \delta_l)}{\mu_k} \quad (23)$$

로 정의되었다. 관벽의 전단응력은 유하액막의 속도변화가 작으므로 거의 일정하지만 액체-증기 계면에서의 전단응력은 흡수과정에 의해 증기의 속도가 감소하므로 함께 감소함을 알 수 있다. 기준조건의 경우 액체-증기 계면에서의 전단응력이 가장 큰 관 입구에서도 계면 전단응력은 관벽전단응력의 약 5%미만으로 고려된다. 흡수기의 길이가 아주

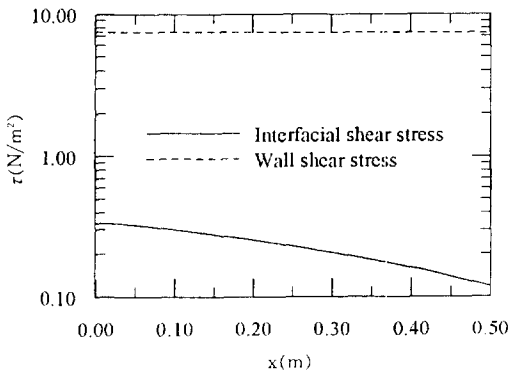


Fig.2 Variation of liquid-vapor interfacial and wall shear stress along the tube length at the vapor Reynolds number of 650

길 경우 흡수과정에 공급되는 수증기의 질량이 높을 것이므로 관 입구에서 계면전단응력은 증가할 수 있을 것이며 수증기의 유동 특성이 난류인 경우 또한 계면 전단응력과 벽전단응력의 상대적 차이는 감소할 것이다.

흡수기내로 수용액과 증기가 유입되어 흡수과정이 진행됨에 따라 유하액막, 증기, 그리고 관벽사이에는 흡수열의 발생 및 온도구배의 형성에 의해 열전달이 진행되어 그 온도 변화는 Fig.3과 같이 발달한다. 액막의 두께가 작아 그 열저항이 작으므로 관벽으로의 높은 열전달율에 의해 유하액막의 체적온도는 계면온도와 함께 서서히 감소하고 증기의 경우, 열전달율에 비해 그 열용량용이 상대적으로 작으므로 그 온도는 액체-증기 계면온도까지 빠르게 증가한다.

Fig.4는 관길이에 따라 관벽, 유하액막, 그리고 증기 사이의 열유속의 변화를 보여주고 있다. 관벽으로의 열유속은 흡수열과 유하액막과의 온도차이에 의한 현열의 합이며 액막층의 열유속은 흡수열과 증기와의 온도차이에 의한 현열의 합으로 주어진다. 증기층의 열유속은 순수히 유하액막과의 온도차이에 의한 현열로 주어지며 그 온도가 계면의 온도보다 낮으므로 열유속의 실제방향은 관벽이나 액막층의 열유속에 대하여 역의 방향이다. 수용액막의 계면에서 발생하는 수증기 흡수과정에 의한 흡수열의 발생으로 액체-증기 계면의 온도는 증가

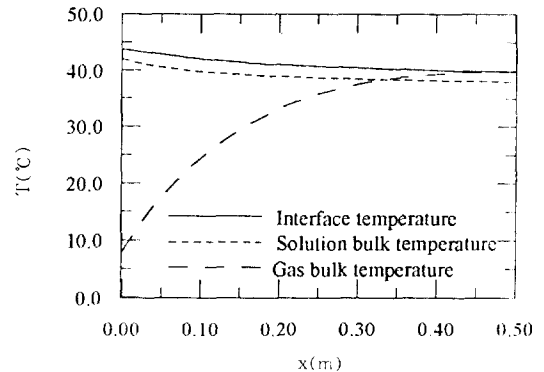


Fig.3 Variation of interfacial and bulk temperature along the tube length at the vapor Reynolds number of 650

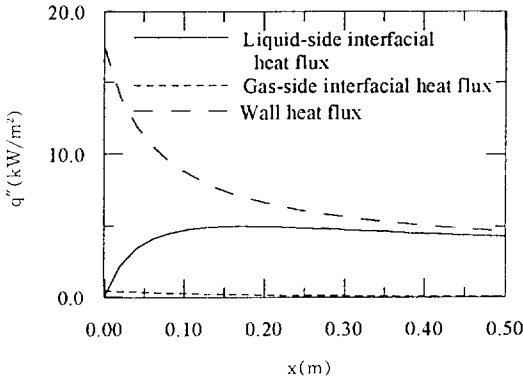


Fig.4 Variation of heat flux along the tube length at the vapor Reynolds number of 650

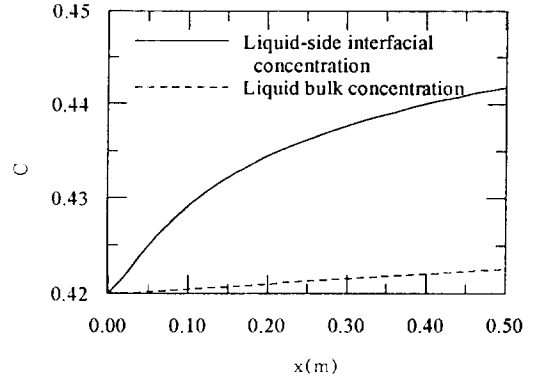


Fig.5 Variation of solution concentration along the tube length at vapor Reynolds number of 650

한다. 관 길이 방향으로 유하액막의 온도가 감소하고 흡수율은 냉각조건에 의해 결정되는 평형상태에 접근하므로 관벽으로의 열유속은 급격히 감소하여 일정치에 접근하게 된다. 액막의 경우 이는 순수한 흡수열에 상응하는 열유속으로 접근하며, 증기의 열유속은 증기체적과 계면과의 온도차이가 감소하므로 무시할 수 있을 만큼 작아진다. 증기의 열유속은 관벽의 열유속에 비하여 1%미만의 대단히 작은 값을 보여주고 있다.

Fig.5는 유하액막의 계면 및 체적농도의 변화를 보여주고 있다. 흡수과정에 의해 계면에서의 물의 농도가 특히 흡수기 입구에서 빠르게 증가함을 알 수 있으며 이에 따라 그 체적농도도 증가한다. 계면 가까이에서의 물농도의 구배는 액막의 두께방향으로 물의 확산을 유도하므로 그 농도경계층의 두께는 증가한다. 그러나 총유액막내의 물성분의 확산을 유도하는 물질확산계수가 아주 작기 때문에 농도경계층의 발달은 느리게 진행되어 흡수관의 출구에서 액막두께의 약 25%까지 성장하였다.

결국 계면에서 흡수된 물은 유하액막의 농도경계층내의 농도구배에 의한 확산과 액막의 법선방향으로의 대류과정에 의해 유하액막내로 유입되며 그 흡수율이 Fig.6에 주어져 있다. 기본적으로 흡수율은 수증기의 압력과 수용액의 증기압력의 차에 의해 결정된다. 관입구에 유입된 포화상태의 용액은 관벽으로의 열전달에 의해 그 온도가 감소하면서

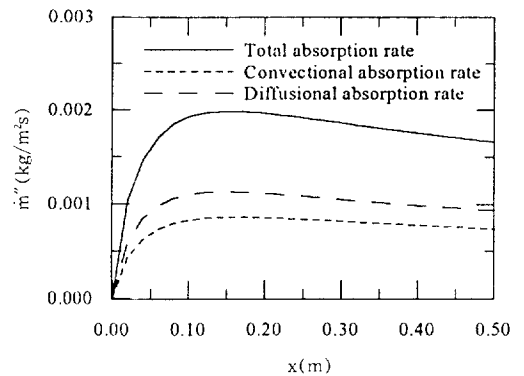


Fig.6 Variation of absorption rate along the tube length at vapor Reynolds number of 650

계면의 증기압력이 감소하고 증기상과의 압력차가 증가하므로 흡수율은 급격히 증가한다. 그러나 농도경계층의 발달에 의해 액막내로의 물 성분의 확산이 제한되면서 흡수율은 서서히 감소한다. Fig.6은 확산에 의한 물질전달율이 액막의 체적 유동 즉 대류에 의한 전달율보다 큰 것을 잘 보여주고 있다.

Fig.2에서 관찰되었듯이 매끄러운 유하액막의 경우 증기의 유동에 의한 계면 전단응력의 크기는 증기의 유동속도에 의해 결정된다. 계면 전단응력의 증가는 액체-증기 계면의 유동속도를 증가시키고 이에 따라 액막의 두께는 감소한다. 액막을 통

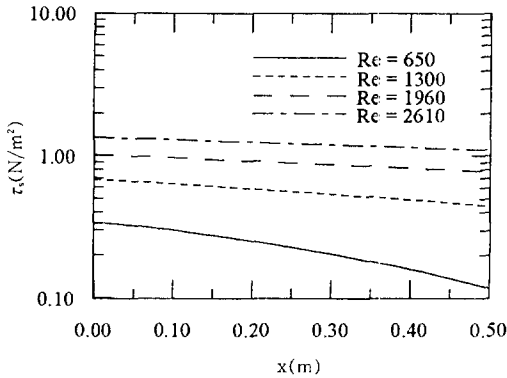


Fig.7 Effect of vapor Reynolds number on interfacial shear stress along the tube length

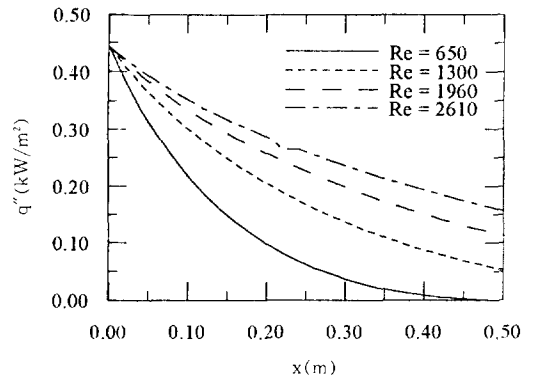


Fig.8 Effect of vapor Reynolds number on vapor-side heat flux along the tube length

한 열전달율이 흡수율을 결정하는 중요 요소임을 고려할 때 증기의 유동속도의 변화는 궁극적으로 흡수율의 변화를 유도할 것이다. Fig.7은 증기의 레이놀즈수가 증가할 때 액체-증기 계면의 전단응력이 함께 증가함을 잘 보여주고 있다. 수증기의 층류유동의 한계내에서 계면 전단응력은 벽전단응력의 약 20% 까지 이르러 증기의 유동속도가 클 때 특히 증기의 유동특성이 난류일 때 흡수과정에 대한 증기의 유동 특성은 필히 고려되어야 할 주요 요소일 것으로 판단된다.

Fig.8은 증기측 열유속에 대한 증기의 레이놀즈수의 영향을 보여주고 있다. 증기측 열유속도 레이놀즈수에 따라 증가하며 특히 낮은 레이놀즈수에서 증기 유동속도를 증가시키는 경우 열전달율의 증가 폭이 크나 이는 흡수열 발생율에 비교하여 무시할 수 있을 정도로 작다. 즉 층류 유하액막의 열 및 물질전달의 해석에 있어서 증기측의 열전달은 무시하여도 이에 의한 오차는 미미함을 알 수 있다.

Fig.9는 앞에서 예측되었듯이 증기의 레이놀즈수가 증가함에 따라 흡수율이 증가함을 보여주고 있다. 기본적으로 관길이에 따른 흡수율의 변화는 증기레이놀즈수에 무관하게 정성적으로 거의 동일함을 알 수 있다. 증기 레이놀즈수가 2배 증가할 때 흡수기에서의 흡수율은 약 6.5% 정도 증가하고 있다. 이는 주로 증기속도의 증가로 액막두께가 감소하여 액막의 열저항이 감소하므로 흡수과정중 발

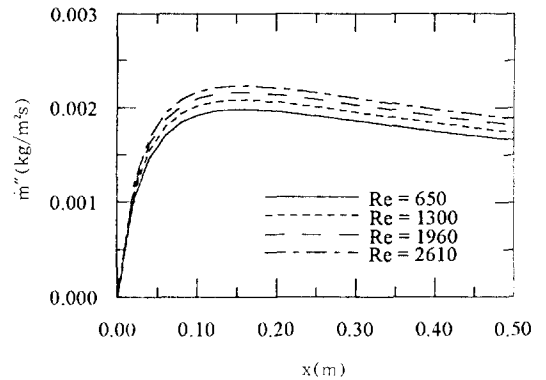


Fig.9 Effect of vapor Reynolds number on the absorption rate along the tube length

생하는 흡수열이 용이하게 배출될 수 있기 때문이다. 결국 계면 전단응력의 경우와 같이 증기의 유동속도가 아주 클 때 증기유동의 영향을 무시하면 이는 흡수율을 과소평가하는 결과를 야기하게 될 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 유하액막식 수직관형 흡수기의 경우 리튬브로마이드 수용액에 의한 수증기의 흡수과정에서 발생하는 운동량, 열 및 물질전달 현상을 일차원 적분형 모델을 통하여 해석하였다. 수증기

의 유동특성이 운동량전달 및 흡수율에 미치는 영향을 중점적으로 해석하였으며 그 결론은 다음과 같다.

1) 흡수과정중 액막에 흡수된 물성분은 체적전달과 확산전달로 액막내로 전달되며 이 중 확산전달의 기여도가 좀 더 크다.

2) 증기의 유동에 따라 액체-증기 계면으로부터 증기측으로의 열유속도 증가하나 이는 관벽에서의 열유속에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다.

3) 증기의 유동에 의한 계면전단응력은 유하액막의 두께를 결정하는 요인으로 증기의 레이놀즈수가 2배 증가할 때 흡수기의 흡수율은 약 6.5% 정도 증가한다.

결국 증기의 유동속도가 증류유동의 한계를 초과할 정도로 크거나 증기-액체계면의 전단응력이 클 때 흡수과정에 대한 증기 유동특성은 필히 고려되어야 할 것이다.

후 기

본 논문은 포항공대 첨단유체공학연구센터의 지원에 의해 수행된 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

1. Kurosawa, S., Nagaoka, Y., Yoshida, A., Ogawa, M., and Kunugi, Y., 1989, "Development of air-cooled gas-fired absorption water chiller-heater", ASHRAE Trans., Vol. 95, part 1, pp. 318~325.
2. Oh, M. D., Kim, S. C., and Kim, Y. L., 1993, "Cycle analysis of air-cooled double-effect absorption heat pump with parallel-flow type", Proc. Int. Absorption Heat Pump Conference, Vol. 31, pp. 117~123.
3. Morioka, I., Kiyota, M., and Nakao, R., 1991, "Absorption of water vapor into a film of aqueous solution of LiBr along a vertical pipe", Transactions of JSME(Part B) Vol. 57, No. 543, pp. 3916~3920.
4. 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 Conference, New Orleans, pp. 41~47.
5. Kim, B. and Kang, I., 1995, "Absorption of water vapor into wavy-laminar falling film of aqueous lithium bromide", KSME Journal, Vol. 9, No. 1, pp. 115~122.
6. 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.
7. Urakawa, K., Morioka, L., and Kiyota, M., 1985, "Absorption of water vapor into lithium bromide-water solution falling film along a vertical plate", Bulletin of JSME, Vol. 25, No. 258, pp. 4218~4222.
8. Kiyota, M. and Morioka, I., 1992, "Numerical method for the absorption of steam into films of aqueous solution of LiBr", J. JSME, Vol. 58, No. 554, pp. 3167~3172.
9. 정은수, 1994, "공냉식 수직평판형 흡수기의 흡수과정에 대한 근사해법", 공기조화냉동공학 논문집, 제6권, 제4호, pp. 453~462.
10. 김선창, 오명도, 이재현, 1995, "공랭형 수직 원관 흡수기에서의 열 및 물질전달에 관한 수치적 연구", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(2), pp. 109~113.
11. Nusselt, W., 1916, "Die oberflächenkondensation des wasserdampfes", Zeitschr. Ver. Deutsch. Ing., Vol. 60, pp. 541 and 569.