

층류 - 파동 액막의 열 및 물질전달

Heat and mass transfer in laminar-wavy film

김 병 주*, 김 정 현**
B. J. Kim, J. H. Kim

Key words : Laminar-wavy film(층류-파동액막), Absorption process(흡수과정), Heat and mass transfer(열 및 물질전달), Wave frequency(파동 주파수)

Abstract

Falling film absorption process is an important problem in application such as absorption chillers. The presence of waves on the film affects the absorption process significantly. In the present study the characteristics of heat and mass transfer in laminar-wavy falling film were studied numerically. The wavy flow behavior was incorporated in the energy and diffusion equation. The numerical solution indicated that the interfacial wave increased the transfer rates remarkably. Interfacial shear stress and wave frequency seemed to be the dominant factors on the film Nusselt number and Sherwood number in the wavy film. A comparison of the transfer rates of the wavy film to that of the smooth film showed that the mass transfer rate could be increased by more than 50%.

기 호 설 명

<p>a : 무차원 액막 두께(δ / δ_0) A_n : 조화함수에서 n번째 사인함수의 상수 B_n : 조화함수에서 n번째 코사인함수의 상수 c : 파동속도, m/s C : 리튬브로마이드 수용액 질량농도, % D : 물질 확산계수, m^2/s f^* : 무차원 파동 주파수(f/f_u) g : 중력가속도, m/s^2</p>	<p>H_a : 흡수열, J/kg k : 열전도계수, W/mk L_H : 특성길이, m p : 압력, Pa Re : 액막 레이놀즈수 ($4U_0\delta_0/\nu$) T : 온도, $^{\circ}C$ u : 액막내의 국소 속도, m/s U : 액막 두께 평균 속도, m/s x : 직교좌표계 U_0 : 파장 평균 액막 속도, m/s</p>
--	---

그리스문자

* 정회원, 홍익대학교 공과대학 기계공학과
** 홍익대학교 대학원

α : 열확산 계수, m^2/s

- β : 첫 번째 조화함수의 상수
 δ : 국소 액막 두께, m
 δ_0 : 파장 평균 액막두께, m
 η : 액막 유동의 법선 방향 좌표계(x_2/δ)
 λ : 파장, m
 ν : 동점성계수, m^2/s
 ξ : 유동방향 무차원 좌표 [$(x_1 - ct)/\lambda$]
 ρ : 밀도, kg/m^3
 τ : 전단응력, N/m^2
 ϕ : 자유 표면의 무차원 변위($a-1$)

상첨자

+ : 무차원 변수

하첨자

- 1 : 액막 유동 방향
 2 : 액막 유동의 법선 방향
 eq : 평형 상태
 i : 액체-기체 계면
 o : 입구
 w : 벽
 ∞ : 무한

1. 서 론

최근에 들어 하절기의 전력수요 급증이나 에너지 보존의 측면에서 폐열을 사용하는 흡수식 냉방기에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다. 흡수기는 흡수식 열펌프의 핵심요소로서 흡수기에서의 열전달과 물질전달에 대한 정확한 이해는 고효율 흡수식 냉난방기의 설계를 위한 선행조건이다. 유하액막에 의한 냉매 증기의 흡수과정이 기존의 흡수기에서 주로 채택되고 있으나 자유표면에서의 파동의 발달과 함께 열 및 물질전달이 동시에 발생하므로 해석적 접근이 용이하지 않다. 특히 수직평판을 따라 얇은 액막으로 흘러 내리는 파동류의 거동은 공학적인 응용분야가 넓을 뿐만 아니라 열 및 물질전달을 향상시킬 수 있다는 특성 때문에 많은 이론적 연구의 대상이 되어왔다.

평활액막의 냉매 증기 흡수과정에 대한 이론적

연구는 아주 다양하게 발표되고 있다. Grossman⁽¹⁾은 벽면이 균일한 온도와 균일한 열유속인 조건에서 층류 액막의 냉매 증기 흡수과정을 이론 및 수치적으로 해석하였다. Kishishita등⁽²⁾은 온도가 균일한 수직평판 위를 흘러내리는 LiBr 수용액의 흡수과정에 대한 수치해석을 통하여 냉매증기 흡수량에 관한 관계식을 발표하였다. 김선창 등⁽³⁾은 공랭형 수직평판 흡수기에서의 열 및 물질전달 특성을 유한차분법에 의하여 해석하였다. 김병주와 이찬우⁽⁴⁾는 수직관내 유하액막의 흡수과정을 액상과 기상을 모두 고려하여 적분형 방법에 의해 해석하였으며 특히 계면전단응력의 영향을 고려하였다.

실제 응용의 경우 흡수과정중 액막의 자유표면, 즉 수용액막과 냉매증기 사이의 계면에는 다양한 형상의 파동이 발달한다. 계면에 존재하는 파동은 열 및 물질전달을 향상시킨다고 인식되어져 왔으나 이에 대한 이론적 연구는 평활액막의 경우에 비해 상대적으로 부족하다.

Hirshburg와 Florschuetz⁽⁵⁾는 선형 파동류의 특성을 고찰하고 유하액막의 응축 또는 증발과정에 대한 수치해석을 수행하였다. 평활액막의 경우에 대하여 Nusselt⁽⁶⁾이 유도한 열전달 계수는 실험결과보다 작았으나 파동특성이 고려된 경우의 열전달 계수는 실험결과와 잘 일치한다고 주장하였다. Yang과 Wood⁽⁷⁾는 Hirshburg와 Florschuetz⁽⁵⁾의 연구와 유사하게 계면에 푸리에급수로 표현되는 파동류의 유동특성을 해석하고 압력과 액막 레이놀즈수에 따른 열 및 물질전달 계수의 상관관계를 이론적으로 제시하였다. 그러나 층류-파동 유하액막의 열 및 물질전달특성에 대한 충분한 이해는 아직 부족하며 특히 계면 전달특성의 영향에 대한 이해도는 취약하다.

본 연구에서는 수직벽을 흘러내리는 층류-파동 LiBr 수용액막의 수증기 흡수과정을 이론적으로 해석하여 평활액막의 경우와 비교하였다. 그리고 액막-냉매 증기간의 계면 전단응력과 파동주파수가 열 및 물질전달에 미치는 영향을 수치적으로 고찰하였다.

2. 해석모델 및 지배방정식

Fig.1은 수직벽상에서 자중에 의해 흘러내리는

유하액막의 개념도이다. 액막의 자유표면에는 파동이 존재할 수 있으며 파동의 파고, 파장 그리고 파동속도는 유하액막의 레이놀즈수, 파동의 주파수와 경계조건에 의해 결정된다.

본 해석에서 사용한 주요 가정은 다음과 같다.

- 1) 층류-파동 액막은 주기파(periodic wave) 혹은 중간파(intermediate wave)의 특성을 갖는다.
 - 2) LiBr 수용액의 물성치는 일정하다.
 - 3) 흡수기의 압력은 일정하다.
 - 4) 수증기와 LiBr 수용액막의 계면은 열역학적 평형상태에 있다.
 - 5) 물질확산에 의한 열전달 효과는 무시한다.
- 주기파는 파동 시작점으로부터 나타나는 불안정한 특성을 갖는 파동류이며 중간파는 주기파와 단일파의 특성을 공유하는 파동으로써 액막의 자유표면에서 장파를 이루다가 파동의 전반부에서 급한 경사를 이루는 눈문 방물이 형성되는 것이 특징이다. 층류-파동액막에 대한 선형 해석의 결과⁽⁸⁾

로부터 계산된 액막의 무차원 속도분포는 다음과 같다.

$$u_1^+ = \frac{3}{2} U_0 (2\eta - \eta^2) \left[1 + \left(\frac{c}{U_0} - 1 \right) \phi - \left(\frac{c}{U_0} - 1 \right) \phi^2 \right] - \frac{\tau_i^+}{2} U_0 \left(\eta - \frac{3}{2} \eta^2 \right) \quad (1)$$

$$u_2^+ = -3U_0 \delta_0 \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \left\{ \left(\frac{c}{U_0} - 1 \right) (1 - 2\phi) (1 + \phi) \left(\frac{\eta^2}{2} - \frac{\eta^3}{6} \right) - \left[1 + \left(\frac{c}{U_0} - 1 \right) \phi - \left(\frac{c}{U_0} - 1 \right) \phi^2 \right] \left(\frac{\eta^2}{2} - \frac{\eta^3}{3} \right) \right\} - \frac{\tau_i^+}{4} U_0 \delta_0 \frac{\partial \phi}{\partial \xi} (\eta^2 - 2\eta^3) \quad (2)$$

여기서, U_0 는 파장기준 평균 액막속도, δ_0 는 평균 액막두께, c 는 파동속도, ϕ 는 자유표면의 무차원변위, τ_i^+ 는 무차원 계면 전단응력이며 무차원 속도 u_1^+ , u_2^+ 그리고 좌표계 ξ , η 는 다음과 같이 정의되었다.

$$u_1^+ = u_1 / U_0 \quad (3)$$

$$u_2^+ = u_2 \lambda / (\delta_0 U_0) \quad (4)$$

$$\xi = (x_1 - ct) / \lambda \quad (5)$$

$$\eta = x_2 / \delta \quad (6)$$

$$\tau_i^+ = \tau_i / (\rho U_0^2) \quad (7)$$

여기서 λ 는 파장이며 하첨자 1과 2는 유하액막의 유동방향과 유동방향의 법선방향을 의미한다.

국소 액막두께(자유표면)의 파장 기준 평균 두께로부터의 변위는 다음과 같이 푸리에급수로 표현되었다.

$$\phi(\xi) = \beta \sin 2\pi \xi + \sum_{n=2}^{\infty} \beta^n (A_n \sin 2\pi n \xi + B_n \cos 2\pi n \xi) \quad (8)$$

층류-파동 액막의 선형 해석으로부터 자유표면의 형상을 결정하는 상수와 액막내 속도분포식의

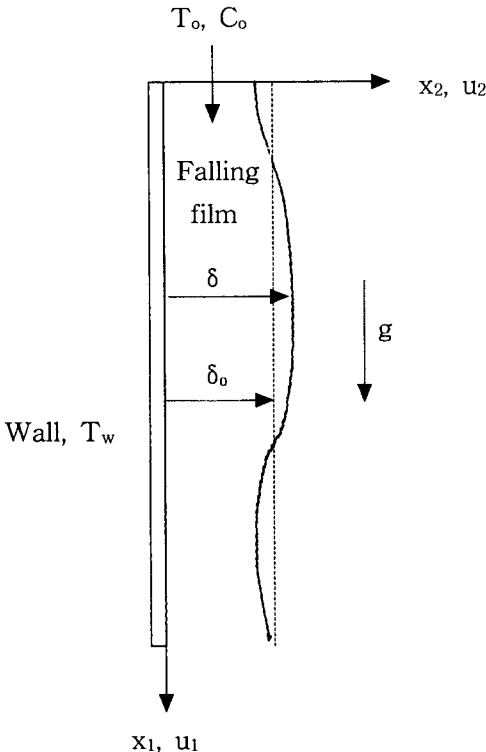


Fig.1 Schematics of wavy falling film

각 변수들이 결정된다.

LiBr 수용액막의 온도와 농도분포는 에너지 방정식과 물질 확산 방정식으로부터 해석할 수 있다.

$$u_1 \left(\frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + u_2 \left(\frac{\partial T}{\partial x_2} \right) = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} \right) \quad (9)$$

$$u_1 \left(\frac{\partial C}{\partial x_1} \right) + u_2 \left(\frac{\partial C}{\partial x_2} \right) = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial x_2^2} \right) \quad (10)$$

여기서 α 는 열확산 계수, C는 LiBr 수용액의 농도, 그리고 D는 물질확산 계수이다.

온도 및 농도 분포에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$T(x_1, 0) = T_w \quad (11.1)$$

$$T(0, x_2) = T_o \quad (11.2)$$

$$T(x_1, \delta) = T_i \quad (11.3)$$

$$C(x_1, 0) = C_o \quad (11.4)$$

$$C(x_1, \delta) = C_i \quad (11.5)$$

$$\partial C(x_1, 0) / \partial x_2 = 0 \quad (11.6)$$

$$-k \frac{\partial T(x_1, \delta)}{\partial x_2} = H_a \rho D \frac{\partial C(x_1, \delta)}{\partial x_2} \quad (11.7)$$

여기서 H_a 는 흡수열이며 하첨자 eq는 평형조건, i는 계면, o와 w는 각각 흡수기 입구와 벽면을 의미한다.

가정 (4)로부터 계면에서의 평형농도 C_i 는 평형상태량 관계식에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$C_i = C_{eq}(T_i, p) \quad (12)$$

에너지 방정식, 물질 확산 방정식, 그리고 경계조건을 무차원화하면 다음과 같이 유도된다.

$$u_1^+ \frac{\partial T^+}{\partial \xi} \frac{1}{\lambda} + \left\{ \left[\eta \frac{c-u_1}{1+\phi} \right] \left(\frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) + \left(\frac{u_2}{\delta} \right) \right\} \left(\frac{\partial T^+}{\partial \eta} \right) = \alpha \left(\frac{\partial^2 T^+}{\partial \xi^2} \frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\delta^2} \frac{\partial^2 T^+}{\partial \eta^2} \right) \quad (13)$$

$$u_1^+ \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\partial C^+}{\partial \xi} \right) + \left\{ \left[\eta \frac{c-u_1}{1+\phi} \right] \left(\frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) + \left(\frac{u_2}{\delta} \right) \right\} \frac{\partial C^+}{\partial \eta} = D \left\{ \frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial^2 C^+}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\delta^2} \frac{\partial^2 C^+}{\partial \eta^2} \right\} \quad (14)$$

$$T^+(\xi, 0) = 0 \quad (15.1)$$

$$T^+(0, \eta) = 1 \quad (15.2)$$

$$T^+(\xi, 1) = T_i^+ \quad (15.3)$$

$$C^+(0, \eta) = 0 \quad (15.4)$$

$$C^+(\xi, 1) = C_i^+ \quad (15.5)$$

$$\partial C^+(\xi, 0) / \partial \eta = 0 \quad (15.6)$$

$$-(T_o - T_w) k \left\{ -\frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial \delta}{\partial \xi} \frac{\partial T^+}{\partial \xi} + \left[\frac{1}{1+\phi} \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \delta}{\partial \xi} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + \frac{1}{\delta} \right] \frac{\partial T^+}{\partial \eta} \right\} = \rho D H_a \left\{ \frac{1}{\lambda^2} \left(-\frac{\partial \delta}{\partial \xi} \right) \left[(C_o - C_\infty) \frac{\partial C^+}{\partial \xi} \right] + \left[\frac{1}{1+\phi} \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \delta}{\partial \xi} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \frac{1}{\delta} \right] \left[(C_o - C_\infty) \frac{\partial C^+}{\partial \eta} \right] \right\} \quad (15.7)$$

여기서 무차원 온도 T^+ 와 무차원 농도 C^+ 는 다음과 같이 정의되었다.

$$T^+ = \frac{T - T_w}{T_o - T_w} \quad (16)$$

$$C^+ = \frac{C - C_\infty}{C_o - C_\infty} \quad (17)$$

여기서 C_∞ 는 무한히 긴 흡수기의 경우 용액온도가 벽면온도와 같은 경우의 평형농도이다.

3. 수치해법

본 논문에서는 에너지 방정식과 물질 확산 방정식을 유한차분법에 의해 이산화하여 수치적으로 해석하였다.

흡수과정에서는 열전달과 물질전달이 동시에 발생하여 액막-냉매증기 사이의 계면은 열역학적 평

형상태에 있다. 계면의 온도 및 농도는 식 (15.6) 와 (15.7)을 동시에 만족하여야 하며 이는 뉴우튼 법을 이용한 반복기법을 사용하여 풀이하였다. 이 때 수렴의 판정조건은 다음과 같다.

$$\text{Max} \left[\frac{\Omega_{i+1} - \Omega_i}{\Omega_{i+1}} \right] \leq \epsilon \quad (18)$$

여기서 Ω 는 LiBr 수용액의 온도 또는 농도를 의미하며 각 변수의 오차가 허용범위내에 도달할 때 수렴된 것으로 판정하여 정상상태 해로 취하였다.

4. 결과 및 토의

파동 액막의 해석에 사용된 흡수기의 운전 조건은 Table 1과 같다. 해석에서 고려된 주요 독립변수는 용액의 온도, 액막의 레이놀즈수 그리고 계면 전단응력이며 파동액막의 경우 주기파와 중간파의 특성이 함께 고찰되었다.

Fig.2는 과냉상태의 용액이 흡수기에 공급되어 흡수과정이 진행될 때 파동액막의 국소 온도분포를 보여주고 있다. 여기서 f^* 는 가장 불안정한 주파수에 대한 실제 파동 주파수의 비로써 1인 경우

Table 1 Conditions for the analysis of absorption process of falling film

Parameters	Conditions
Absorbent/absorbate	LiBr/water
Inlet concentration	58%
Inlet temperature	40°C (subcooled sol.), 43.7°C (saturated sol.)
Film Reynolds number	50, 100, 150
Absorber pressure	8 torr
Absorber length	1m
Wall temperature	30°C
Dimensionless Interfacial shear stress	-0.01, 0.0, 0.01
Dimensionless wave frequency	0.5, 1.0

는 주기파를 의미한다. 입구온도가 포화온도보다 낮은 경우 수용액이 흡수기에 유입하면서 계면의 온도는 포화온도로 급격히 상승하여 흡수기 입구 가까이에서 액막내의 온도는 변곡점을 가지며 계면과 벽면에서 그 온도구배는 아주 크다. 그러나 흡수과정에 의해 계면의 농도가 감소하므로 계면의 온도도 감소한다. 흡수과정시 발생한 흡수열은 액막을 통하여 벽으로 전달되어 액막내의 온도장은 완전히 발달하며 본 연구의 경우 열 입구영역의 길이($\xi=1.0$)는 흡수기 길이에 비하여 아주 짧은 것을 알 수 있다. 액막이 하류로 유동함에 따라 온도분포는 거의 선형적이 되어 구배가 감소하므로 흡수 질량유속도 감소할 것임을 예측할 수 있다.

Fig.3은 평할액막과 주기파-액막의 경우 액체-

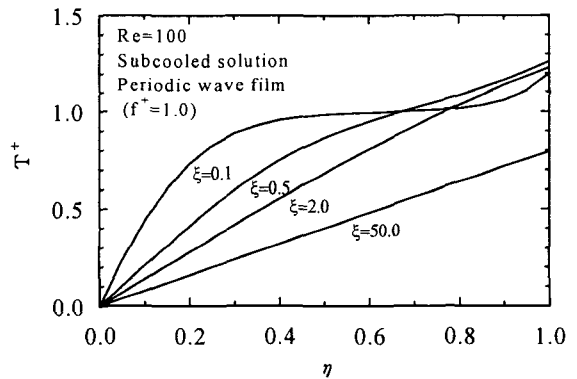


Fig.2 Temperature profiles in laminar-wavy falling film along the absorber

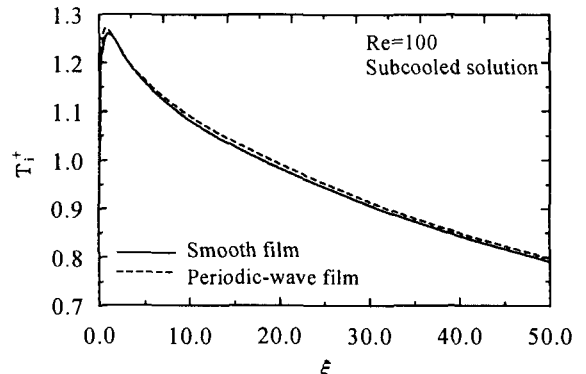


Fig.3 Variation of interfacial temperature along the absorber

증기 계면의 온도변화를 보여주고 있다. 과냉상태의 용액이 흡수기에 공급되었을 때 그 입구에서 급격한 흡수과정에 의해 계면의 온도는 입구온도보다 높게 증가한다. 그러나 Fig.2에서 제시되었던 것과 같이 수증기의 흡수과정에 의해 계면의 리튬브로마이드 농도의 감소와 함께 계면의 온도는 다시 감소한다. 흡수기를 따라 계면의 온도는 지속적으로 감소하며 무한히 긴 흡수기의 경우 이는 벽 온도까지 감소할 것이다. 주기파-액막의 경우 평활액막에 비하여 다소 높은 계면온도를 보여주고 있으며 이로부터 주기파-액막에 의한 흡수유속이 평활액막의 경우보다 클 것임을 예측할 수 있다.

Fig.4는 과냉 수용액이 흡수기에 공급될 때 주기파 및 중간파-액막과 평활액막의 국소 누셀트수의 변화를 보여주고 있다. 여기서 국소 누셀트수는 다음과 같이 정의되었으며

$$Nu = \frac{\partial T(x_1, \delta) / \partial x_2}{(T_w - T_i)} L_H \quad (19)$$

특성길이 $L_H = (\nu^2/g)^{1/3}$ 이다. 파동액막의 경우 LiBr 수용액막내의 법선방향 속도성분에 의한 대류효과가 발생하여 계면 및 벽면에서의 온도구배가 평활액막보다 높으므로 열유속도 높다. 특히 과냉수용액의 경우 흡수기의 입구에서 온도구배가 아주 크므로 열유속은 높으나 이는 열경계층의 발달과 함께 급격히 감소한다. 결국 유하액막의 누셀트수는 흡수기 입구에서 아주 큰 값이나 이는 급

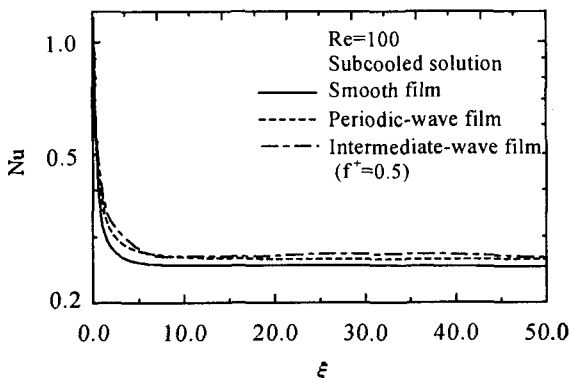


Fig.4 Local Nusselt number for smooth and wavy film

격히 감소하여 액막내의 온도분포가 선형화되면서 일정치에 접근하게 된다. 이후 계면에서의 흡수과정에 따른 열유속은 벽면 열유속과 거의 동일한 값으로 완전 발달된 온도장을 통하여 전달된다. 즉, 흡수기의 냉각능력이 흡수 물질 전달유속을 지배하는 것이다. 국소 누셀트수는 평활액막, 주기파-액막, 중간파-액막의 순서로 높게 나타나고 있다. 그러나 Fig.2에서 제시되었듯이 액막의 형태에 따라 계면 온도에 차이가 있으므로 벽을 통한 실제 열유속은 중간파-액막의 경우가 평활액막보다 약 30%가량 높게 나타나고 있다.

Fig.5는 수용액의 입구조건이 과냉상태일 때 파동액막의 LiBr 농도분포를 나타낸 것이다. 입구 가까이에서 계면에 큰 농도구배를 확인할 수 있으며 액막이 하류로 유동함에 따라 흡수과정에 의해 LiBr수용액의 계면농도가 점차로 감소하고 농도경계층이 발달하는 것을 잘 보여주고 있다. 흡수기 입구 근처에서 농도구배가 크므로 수증기 흡수작용이 활발하나 액막내 확산에 의하여 하류로 갈수록 농도구배가 서서히 감소하고 있다. 열경계층의 경우와는 달리 수용액의 물질확산계수가 아주 작으므로 농도경계층은 흡수기 출구에서 액막두께의 약 30% 정도까지 성장하였다.

Fig.6은 평활액막, 주기파 그리고 중간파-액막의 액체-증기 계면의 무차원 농도변화를 보여주고 있다. 과냉 수용액이 흡수기에 유입하면서 흡수과정이 급격히 유도되어 계면농도는 입구상태로부터

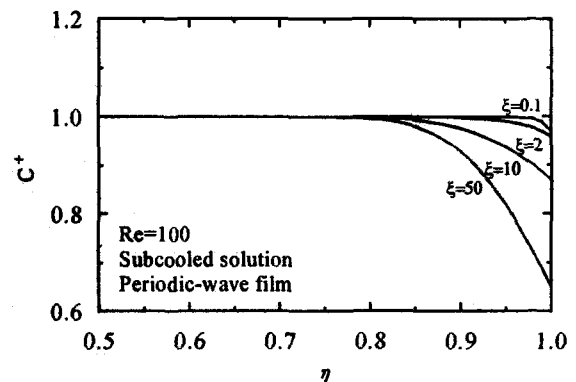


Fig.5 Concentration profiles in laminar-wavy falling film along the absorber

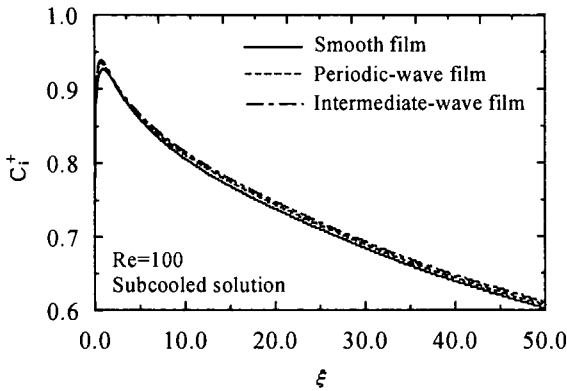


Fig.6 Variation of interfacial concentration along the absorber

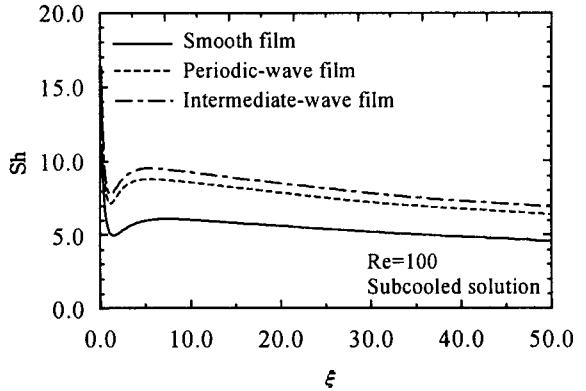


Fig.7 Local Sherwood number for subcooled solution at absorber inlet

현저히 감소한다. 그러나 열경계층이 발달하면서 흡수 질량유속이 신속히 감소하고 농도경계층의 발달과 함께 파동유동에 의해 액막내에서의 혼합 과정이 유도되므로 계면 가까이에서 농도구배가 감소하면서 계면농도는 도리어 증가하는 경향을 보여주고 있다. 벽면에서 성장하는 열경계층이 액막의 계면에 도달하여 열경계층이 포물선형으로 완전 발달함에 따라 냉각율이 다시 증가하므로 계면에서의 흡수과정이 고양되어 계면농도는 다시 감소하기 시작한다. 이 후 흡수유속은 벽면에 의한 냉각율에 의해 결정되며 계면의 온도 감소와 함께 농도도 감소한다. 무한히 긴 흡수기의 경우 계면농도는 벽온도에 해당하는 평형농도까지 감소할 것이다. 중간파-액막의 경우 계면 농도가 가장 큰 값을 보여주고 있으며 이는 파동 계면의 변형이 상대적으로 심하여 계면 가까이에서 액막의 혼합이 양호하기 때문으로 고려되며 동시에 우수한 흡수특성을 가질 것으로 예측할 수 있다.

Fig.7은 입구조건이 과냉상태일 때 파동액막과 평활액막의 국소 셔우드수를 보여주고 있다. 여기서 국소 셔우드수는 다음과 같이 정의되었다.

$$Sh = \frac{\partial C(x_1, \delta) / \partial x_2}{(C_0 - C_i)} L_H \quad (20)$$

흡수기 입구 가까이에서 LiBr 수용액내 물의 분압은 수증기의 압력보다 낮으므로 흡수과정이 급격히 발생하고 이 때 흡수 질량유속은 최대가

된다. 하류로 유동하면서 액막내의 온도구배는 감소하고 계면의 온도는 증가하여 액막 계면의 냉매 증기압이 상승하므로 냉매 증기의 흡수량이 결국 감소하게 된다. 특히, 입구 가까이에서 흡수량이 최대치로부터 급격히 감소하다가 다시 완만히 증가하는 것은 액막내부에 형성되는 온도분포로부터 그 경향을 이해할 수 있다. 즉 벽면에서부터 성장하기 시작한 열경계층이 액막의 계면에 도달하면서 열경계층이 포물선형으로 완전 발달하여 계면으로부터 액막내로의 열전달율이 증가하기 때문이다. 일반적으로 액막유동은 주기파에서 중간파 영역으로 이동할수록 자유표면의 변형이 왕성하여 체적 혼합효과가 높고 평균 액막두께가 감소하는 경향을 갖는다. 이에 따라 LiBr 수용액과 수증기 사이의 열 및 물질 저항이 감소하여 액막에서 흡수기 벽면으로의 열전달율이 증가하고 흡수 질량유속도 증가한다. 계면 전단응력이 없을 때 국소 셔우드수는 중간파-액막의 경우가 최대치를 보이며 평활액막의 경우보다 약 40% 정도, 그리고 주기파-액막의 경우보다 약 10% 정도 높게 나타났다. Fig.6에 주어진 것과 같이 중간파-액막의 경우가 계면농도도 좀 더 높으므로 평균 흡수 질량유속은 평활액막보다 50% 이상 높을 것이다. 그러나 국소 질량유속의 정성적 변화는 파동액막과 평활액막의 경우가 유사하였다.

Fig.8은 수용액의 입구조건이 포화상태일 때 파동액막과 평활액막의 국소 셔우드수의 변화를 나

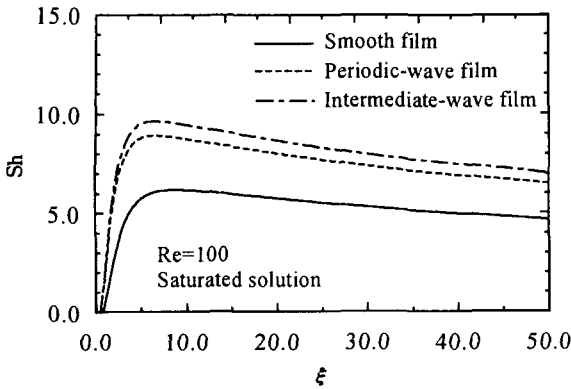


Fig.8 Local Sherwood number for saturated solution at absorber inlet

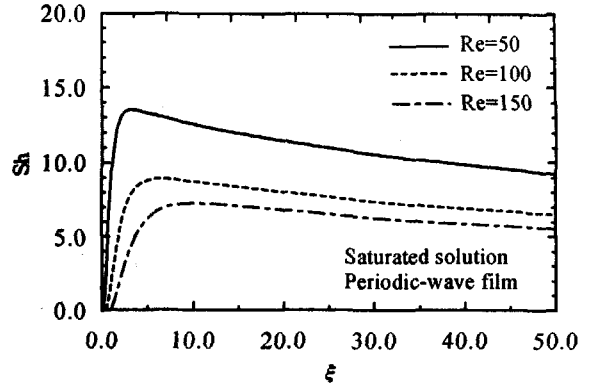


Fig.10 Effect of film Reynolds number on local Sherwood number

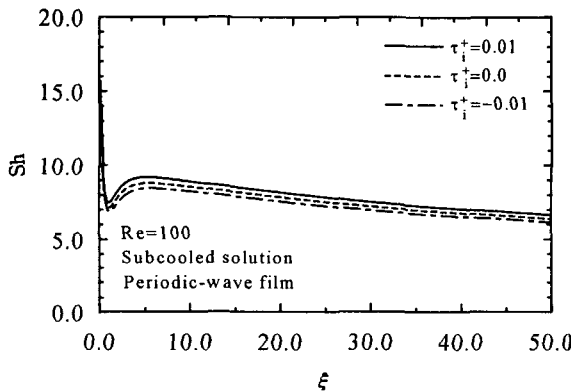


Fig.9 Effect of interfacial shear stress on local Sherwood number

타낸 것이다. 수용액이 포화온도로 공급되면 과냉 상태와는 달리 흡수기 입구가까이에서 LiBr 수용액 내부의 물의 분압이 수증기의 압력과 같으므로 흡수과정은 발생하지 않는다. 유동이 하류로 진행함에 따라 벽면에서 성장하는 온도장이 계면까지 발달하여 계면에 온도구배가 형성되면서 계면의 온도가 감소하고 흡수과정이 시작된다. 그림에서도 알 수 있듯이 파동액막의 경우 체적혼합의 영향으로 온도경계층의 성장이 빠르므로 평활액막의 경우보다 흡수과정이 빨리 시작되고 국소 셔우드수도 훨씬 크게 나타나고 있다. 이 후 온도장의 완전 발달과 함께 계면에서의 온도구배가 감소하므로 냉각능력이 저하되어 흡수유속도 서서히 감소하게

된다. 파동특성에 의한 물질전달의 향상효과는 과냉 수용액의 경우와 거의 유사하다.

Fig.9는 주기파-액막에서 국소 셔우드수에 대한 계면 전단응력의 영향을 보여주고 있다. 계면 전단응력은 기본적으로 평균 액막두께와 자유표면의 변형에 영향을 준다. 계면 전단응력이 주유동방향으로 작용할 경우 평균 액막두께는 감소하고 액막의 유동속도가 증가하여 주기파의 특성을 보이며 역방향인 경우 유동속도는 감소하여 평균 액막두께가 증가하며 중간파의 특성을 나타낸다. 결국 계면 전단응력이 액막 유동의 역방향으로 작용할 때 계면에서의 교란을 증가시켜 체적 혼합효과를 고양시키나 동시에 평균 액막두께도 증가하므로 국소 셔우드수는 감소한다. 이와 같이 계면 전단응력은 액막두께와 자유표면의 변형에 대하여 복잡적이고 이중적인 영향을 미치므로 계면 전단응력이 국소 셔우드수에 미치는 영향은 파동 주파수에 비하여 상대적으로 작다고 할 수 있다.

Fig.10은 계면 전단응력이 없는 경우 국소 셔우드수에 대한 액막 레이놀즈수의 영향을 보여주고 있다. 국소 셔우드수의 기본적인 경향은 Fig.8에서 제시되었던 것과 유사하다. 액막레이놀즈수가 증가할 때 액막두께는 증가하여 열 및 물질 전달 저항이 증가하므로 국소 셔우드수는 감소한다. 이 때 그 감소율은 특히 낮은 액막 레이놀즈수에서 현저함을 알 수 있다. 결국 유하액막식 흡수기는 낮은 액막레이놀즈수에서 냉매증기와 수용액이 동향류로

유동하는 중간파-액막의 조건을 갖출 때 최대의 흡수율을 나타낼 수 있을 것으로 예측된다. 그러나 이는 낮은 액막레이놀즈수에서 액막을 완전하게 형성할 수 있을 경우에만 유효할 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 층류-파동 유하액막의 열 및 물질전달 특성을 수치적으로 해석하였으며 그 결론은 다음과 같다.

1) 층류-파동액막은 평활액막에 비해 높은 열 및 물질전달 특성을 가지며 파동특성에 따라 그 전달유속은 50%이상 증가한다.

2) 중간파는 주기파보다 열 및 물질전달 유속을 고양시킨다.

3) 계면전단응력은 그 작용방향과 크기에 따라 액막 유동특성에 영향을 주며 액막의 유동방향과 같을 때 흡수특성을 향상시킨다.

후 기

본 논문은 포항공대 첨단유체공학 연구센터의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Grossman, G., 1983, "Simultaneous heat and mass transfer in film absorption under

laminar flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, No. 12, pp. 2365~2376.

2. Kishishita, K., Morioka, I., and Kiyota, M., 1992, "Correlation of steam absorption by a falling film of aqueous solution of LiBr", *Proceedings of Second JSME-KSME Thermal Engr. Conf.*, pp. 3-1~3-6, October.

3. 김선창, 오명도, 이재현, 1995, "공랭형 수직평판 흡수기 액막에서의 열 및 물질전달에 관한 수치적 연구", *대한기계학회 논문집*, 제19권, 제4호, pp. 1071~1082.

4. 김병주, 이찬우, 1997, "리튬브로마이드 수용액 유하액막의 흡수과정에 대한 근사해법 : 증기유동의 영향", *공기조화·냉동공학 논문집*, 제9권, 제2호, pp. 144~152.

5. Hirshburg, R.I., and Florschuetz, L.W., 1982, "Laminar wavy film flow : Part II Condensation and evaporation", *J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 459~464.

6. Nusselt, W.A., 1916, "Die oberflächen-kondensation des wasserdampfes", *Zeitschr. Ver. Deutsch. Ing.*, pp. 541~569.

7. Yang, R., and Wood B.D., 1993, "Heat and mass transfer on the wavy-film absorption process", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 71, pp. 533~538.

8. 김정현, 박찬영, 김병주, 1997, "층류 파동액막의 거동에 대한 계면응력의 영향", *공기조화 냉동공학회, 하계학술발표회 논문집*, pp. 386~391. 386~391.