

수직 액막 흡수관의 유동변화에 따른 흡수성능 변화에 관한 해석적 연구

김정국[†] · 조금남^{*}

Numerical Study on the change of Absorption Characteristics by Change of Flow pattern in the Vertical Falling Film Absorber

Jungkuk Kim and Keumnam Cho

Key Words: Vertical Absorber(수직형 흡수기), Uniform Film(균일 액막), Wavy Film(파동 액막), Periodic-wave(주기파), Heat and Mass transfer(열 및 물질전달)

Abstract

Numerical analyses have been performed to obtain the absorption heat and mass transfer coefficients and the absorption mass flux from a falling film of LiBr solution. In the present study, the behavior of laminar-wavy falling film in the vertical absorber was studied analytically and experimentally. The change of absorption performance on mean film thickness, wave amplitude, wave celerity was analysed. The heat and mass transfer equations are solved simultaneously to give the temperature and concentration variations at the LiBr solution/refrigeration vapor interface and at the wall. Effects of uniform film, wavy film and film Reynolds number on the heat and mass transfer coefficients have been estimated. The analytical results of the uniform and wavy falling film in the bare tube was higher than experimental result for $Re_f < 100$. The absorption performance showed the maximum at the wavy film by the insert device(spring).

기호설명

A	: 열전달면적 [m^2]
C	: LiBr 수용액농도 [wt%]
D	: 물질확산계수 [m^2/s]
G	: 흡수질량유속 [$kg/m^2 \cdot s$]
h	: 열전달계수 [$kW/m^2 \cdot K$]
\dot{m}	: 질량 유동률 [kg/s]
q	: 열유속 [kW/m^2]
x	: 수용액 유동방향

r	: 흡수기 반경방향
Re_f	: 액막 Reynolds 수,
T	: 온도 [K]
g	: 중력 가속도, m/s^2

그리스문자

β	: 물질전달계수 [m/s]
μ	: 점성계수 [$kg/m \cdot s$]
ρ	: 밀도 [kg/m^3]
ν	: 동점성계수 [kg/m^2]

그리스문자

[†] 성균관대학교 기계공학부
E-mail : keumnam@yurim.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7445 FAX : (031)290-5849

^{*} 성균관대학교 기계공학부 대학원

air	: 공기층
in, out	: 흡수기 입/출구
o	: 초기조건

s : 수용액
 δ : 수용액 국소 액막 두께

1. 서론

최근 증기압축식 냉동시스템의 이용에 따른 하절기 전력수요의 급증과 CFC계 냉매에 의한 환경오염이 국제적인 문제로 대두됨에 따라 열구동 시스템인 흡수식 냉동시스템의 연구가 다양한 분야에서 활발히 진행되고 있으며 이러한 흡수식 시스템 개발은 크게 전체 시스템 성능의 주요 요인인 흡수기의 흡수 성능향상⁽¹⁾과 용액 열교환기 및 시스템 제어에 의한 성능향상⁽²⁾으로 나뉜다. 특히, 시스템 성능을 좌우하는 핵심 요소인 흡수기의 열 및 물질전달현상에 대한 기본 메카니즘과 액막의 유동변화에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있으며, 흡수기의 표면에 형성되는 유하액막의 유동변화와 계면 형성의 따라 열 및 물질전달 기본 메카니즘이 변화됨을 보여주고 있다. Shkadov⁽³⁾는 액막 유동 경계층 방정식에 푸리에 변환기법을 적용, 액막파동을 해석하였으며, 액막 레이놀즈수 100이하에서 실험결과와 유사한 결론을 얻었다. 그러나, 액막 레이놀즈수가 큰 액막유동의 경우에 제한되고 있다. Hirshburg⁽⁴⁾는 Shkadov가 제시한 해석방법을 개선해 보다 넓은 액막 레이놀즈수에서 액막 파동을 연구하였으며, 액막 거동을 관측, 해석한 Kapitza⁽⁵⁾의 결과와 유사한 결론을 얻었으며, Morioka 등⁽⁶⁾은 임의의 파동진폭과 단열벽면, 계면 열평형 등의 가정조건에서 액막두께가 최소가 되는 유동골(troughs of wave)에서 최대흡수질량이 나타나며, 검증실험을 통해 액막 레이놀즈수에 따른 흡수성능의 민감한 변화를 보여주었다. 또한, Killion 등⁽⁷⁾은 기존 연구들에 제시된 각 모델에 대한 특성 및 적용한계성을 제시하기도 하였다. 하지만, 이러한 기존 연구는 주어진 가정조건과 설정범위에 국한되어 있으며, 실제 흡수기내 유동변화에 대한 정성적 관측과 검증실험의 비교를 통한 체계화가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 흡수기내 유동특성 파악과 시스템 공냉화 방안으로 민관, 스프링 삼입관에 대한 실험⁽⁸⁾에 이어서 수직 흡수기의 흡수성능에 대한 이론적 해석과 수직액막 유동변화에 따른 흡수특성을 이론적으로 관찰하고 최적값을 예측함으로써 수직형 흡수기 설계 활용에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 해석모델 및 지배방정식

2.1 지배방정식

Fig. 1은 수직 액막 유동에 관한 해석모델이며, 수치계산을 위한 가정조건들은 다음과 같다.

- (1) 수용액과 냉매 증기의 물성치는 일정하다.
- (2) 흡수기 입구의 수용액 농도와 온도분포는 균일하며, 시스템 내 압력은 일정하다.
- (3) 유하 액막하는 수용액은 층류 유동이며, 수용액과 냉매증기 계면에서 유동에 의한 전단력은 작용하지 않는다.

상기된 가정조건과 냉매증기와 수용액막 계면의 열평형과 질량균형에 의한 물질확산방정식과 에너지방정식은 식(1), 식(2)와 같다.

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right) \quad (1)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \left(\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \quad (2)$$

유하액막 자체의 유동 특성인 층류 파동의 경우, 식 (3), (4)의 연속방정식과 수용액의 유동방향(x) 및 관경방향(r)에 대한 Navier-Stokes eq.에 의해 해석될 수 있으며, 본 연구에서는 주기파(periodic wave)에 의한 액막두께 변화를 고려하였다.

여기서, p는 압력, g는 중력가속도이며, 유동방향에 대한 속도(u)는 평균유동속도(\bar{u})와 유동방향의 단위길이에 대한 액막 두께의 비(r/δ)를 이용

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u \frac{\partial u_x}{\partial x} + v_r \frac{\partial u_x}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3)$$

$$+ g + \nu \left\{ \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial r^2} \right\}$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + u \frac{\partial u_r}{\partial x} + v_r \frac{\partial u_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (4)$$

$$+ \nu \left\{ \frac{\partial^2 u_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} \right\}$$

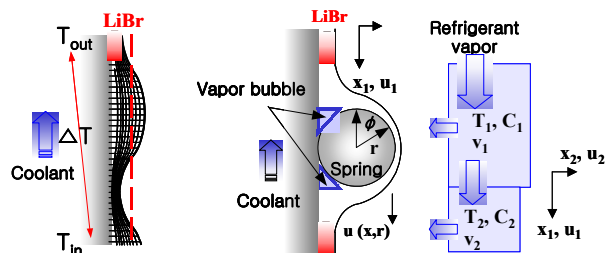


Fig. 1. Schematic of wavy flow model

해 식(5)과 같이 표현된다.

$$u = \frac{3}{2} \bar{u} \left\{ 2 \left(\frac{r}{A} \right) + \left(\frac{r}{A} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

2.2 열전달

유하액막의 각 control volume내 열전달량(\dot{Q})은 식(6)과 같으며, 수용액에서 흡수기 벽면으로 전달되는 열전달량은 흡수 전열관 내부 단위 열전달 면적에 대한 열량으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_s C_{ps} (T_{sin} - T_{sout}) = h_s A_{in} T_{sin} - T_{sout} \quad (6)$$

Moffat⁽¹²⁾가 제시한 식에 따르면 열전달계수의 오차해석은 식(7)와 같다.

$$\frac{\delta h_s}{h_s} = \sqrt{\left(\frac{\delta \dot{Q}}{\dot{Q}} \right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A} \right)^2 + \left(\frac{\delta T_{in}}{\Delta T} \right)^2 + \left(\frac{\delta T_{out}}{\Delta T} \right)^2} \quad (7)$$

식(7)에서 열전달 계수에 대한 오차는 $\pm 1.2 \sim \pm 3.1 \%$ 범위였다.

2.3 물질전달

단위시간당 흡수제에 흡수되는 냉매흡수량은 식 (8)와 같다.

$$G = \rho_s \beta \Delta C \quad (8)$$

냉매흡수량에 대한 오차해석은 식(9)과 같다.

$$\frac{\delta M}{M} = \sqrt{\left(\frac{\delta \rho_s}{\rho_s} \right)^2 + \left(\frac{\delta \beta}{\beta} \right)^2 + \left(\frac{\delta C_{in}}{\Delta C} \right)^2 + \left(\frac{\delta C_{out}}{\Delta C} \right)^2} \quad (9)$$

식(9)에서 흡수질량유속에 대한 오차는 $\pm 2.7 \sim \pm 4.3 \%$ 범위였다.

2.4 경계조건 및 수치해법

흡수기의 입구(x=0)에서 유하액막의 온도와 농도분포는 균일하며, 경계면에서의 열유속은 반경 방향의 열/물질 확산에 의한 열전달항으로 표현된다. 수직벽면에서는 물질전달이 일어나지 않으며, 액막에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$x=0 \quad ; \quad T = T_0, C = C_0 \quad (10)$$

$$r=r_1 \quad ; \quad T = f(C, P) \quad (11)$$

\dot{m}_v 은 단위시간당, 단위면적당 수용액에 흡수되

Assume diffusion coefficient, $D, (\tau)$

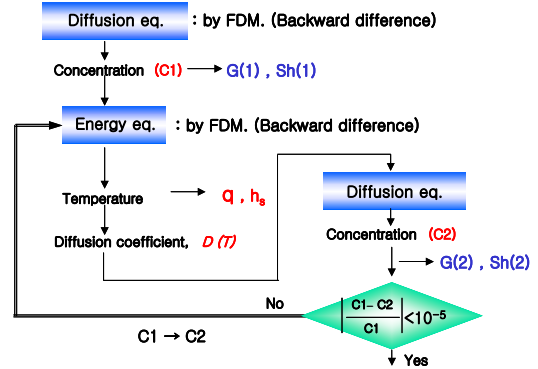


Fig. 2 Flowchart of the analysis

$$q_{\delta} = k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_1} - (C_{P2} - C_{P1}) T \rho D \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=r_1} \quad (12)$$

$$= Q_{abs} \dot{m}_v$$

는 냉매증기의 양이며, 수직원관 내벽면 경계조건은 다음과 같다.

$$r=r_2; \quad \dot{q}_w = \frac{(T_w - T_{air})}{\left(\frac{1}{h_0} + \frac{\delta_{tube}}{k_{tube}} \right)} \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=r} = 0 \quad (13)$$

상기 기/액 경계면에 대한 경계조건들은 주기파에 의한 액막의 일정 반복으로 인해 일정한 반복성을 가지며, 식(1),(2)는 유한체적 방식에 의해 이산화시켜 풀었다. fig.1에서 보듯이 유한 체적의 배열은 유동방향(x)과 반경방향(r)에 대한 균일 격자계로 구성하였다. 수직 액막의 유동 형태는 유동 입구, 기/액 경계면의 조건만 주어지므로 출구에 대한 조건이 결정되지 않은 상태이다. 따라서, 유동 진행 방향에서 계산영역에 대한 추가영역(계산영역의 1/2)을 설정하였으며, 이 영역의 출구경계조건은 $\partial C / \partial x = \partial T / \partial x = 0$ 으로 열/물질 전달이 일어나지 않는 것으로 간주하였다. 흡수 과정에서 열/물질전달은 동시에 발생하며, 수치해를 구하기 위한 전체적인 수행선도는 fig.2와 같으며, 수렴정도는 10^{-5} 이하로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 액막 유동변화

흡수기내 수직액막 유동변화는 수용액 유량, 유동방향에 대한 수용액과 벽면 전단응력, 파동 주기에 따라 변화되며, fig. 3, 4는 파동주기와 유량변화에 따른 액막 두께 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 3는 주기변동에 따른 최대 액막 진폭의 변화와 임계 진폭을 보여주고 있다. 수용액 농도와 온도의 균일 조건시 0.02m이하의 파장(λ)에서 액막 진폭(t_s)의 급격한 감소결과를 보이며, $\lambda = 0.02m$ 이후에 액막 진폭이 약 0.318cm의 임계치로 수렴되었다. 또한, 주기파에 의한 액막 유동의 경우, 수용액 유량을 기준한 균일 액막 두께($t=0.31cm$)에 비해 약 3.2~3.8%정도 증가된 액막 진폭이 나타나며, 모든 액막 레이놀즈수에서 거의 유사한 경향을 보였다. 초기 파동주기의 경우, 고정된 유량조건에서 짧은 파장으로 인해 수용액의 점성력에 비해 흡수기 벽면과의 전단력 영향이 증가됨에 따라 액막 진폭이 증가되었다.

Fig. 4는 해석 모델과 기존 실험 결과의 비교를 통해 파장이 고정된 주기파 조건($\lambda = 0.03m$)에서 액막 유량 변화에 따른 파고 변화를 보여주고 있다. 주기파에서 저유량 조건($Re_f < 100$)의 해석 결과는 shadow photograph를 이용, 파동의 종류와 액막 두께 및 유동변화를 실험적으로 관측한 Kapitza⁽⁶⁾의 실험 결과와 거의 일치하며, Navier-stokes 방정식과 수정된 Galerkin기법을 통해 파동액막의 거동을 해석한 Penev 등⁽¹³⁾의 모델과도 유사한 경향을 나타냄을 보여주고 있다. 저유량 조건($Re_f < 100$)에서 낮은 유량과 액막 자체의 점성력에 비해 상대적으로 큰 벽면 전단력으로 인해 액막 파고의 변화는 낮았으나, 유량 변화에

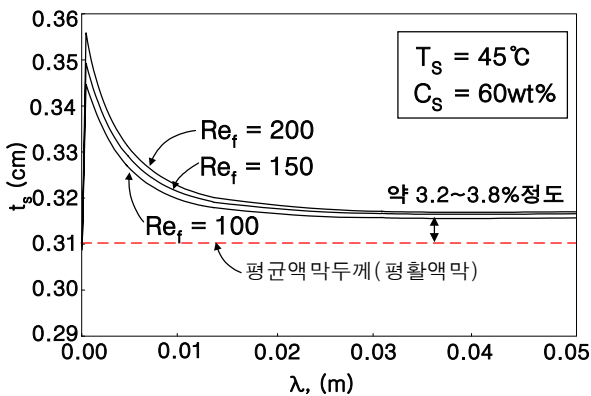


Fig. 3 Effect of λ on wave amplitude.

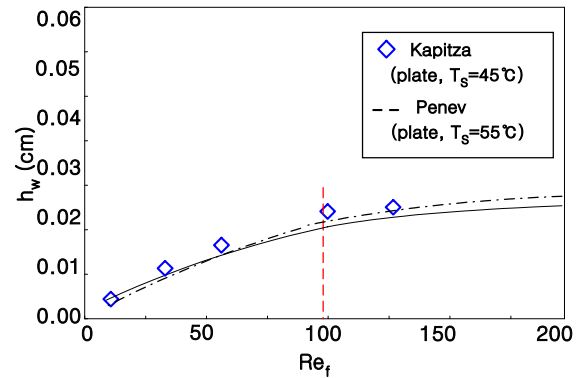


Fig. 4 Comparison of wave amplitude by Re_f

대한 액막변화의 증가율은 약 11~15.3%정도로 액막 레이놀즈수 100이상(증가율:5.2~8%)보다 크게 나타났다. 이러한 액막 유동의 변화는 흡수기 내 열 및 물질전달 성능을 변화시키는 주요인자로서 특히, 저유량 조건하에서 주기파에 의한 액막 변화는 흡수성능 예측에 큰 변수 요인이 되며, 이는 해석 모델에 의한 흡수기 내 전달 특성 변화 결과를 통해서 예측할 수 있다.

3.2 열전달

민관, 스프링 삼입관의 열유속 변화는 기존 연구⁽⁸⁾에서 수행되었으며, 본 연구에서는 민관과 해칭관의 균일 액막 조건, 삼입기구(스프링) 및 액막 유동 변화에 따른 열전달 특성변화를 수치 계산하고, 기존 실험 결과와 비교하였다. Fig. 5,6에서 민관의 주기파 유동시 액막 균일조건에 비해 약 3.2~9.1%정도 열전달계수가 향상됨을 보여주고 있으며, 해석과 실험결과 비교시 약 12.5~25%정도의 오차를 보이고 있다. 이는 저유량($Re_f < 100$) 조건시 낮은 액막 유동변화에 따른 열전달 특성 저하와 기존 실험⁽¹⁰⁾에서 관찰되었던 저유량($Re_f < 100$)에서의 액막 벗겨짐 현상에 따른 액막 불안정과 열전달 면적 감소에 의한 것으로 사료된다. Grossman 등⁽¹¹⁾의 경우, 액막의 균일 두께, 동온 벽면 가정 조건으로 인해 유사한 온도 조건시 액막 레이놀즈수 80이하에서 낮은 열전달 특성을 보여주고 있다. 또한, Fig 5에서 보듯이 민관, 해칭관, 스프링 삼입관의 경우에도 유사한 형태가 나타나고 있으며, 스프링에 의한 액막의 과도한유

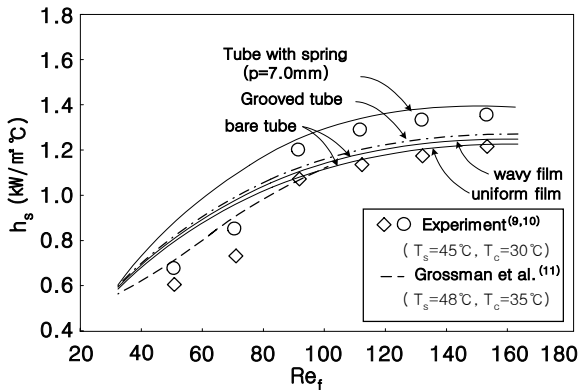


Fig. 5 Effect of Re_f on h_s .

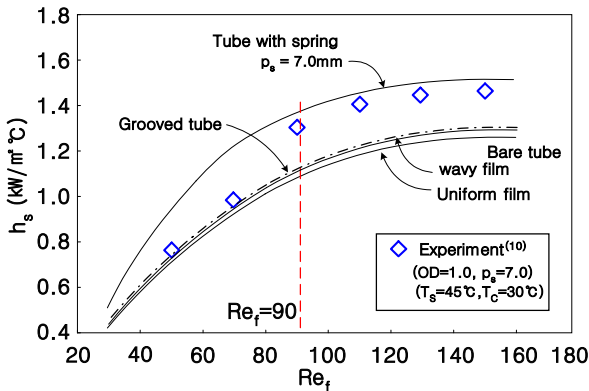


Fig. 6 Effect of surface shape on h_s

동변화를 가정한 수치해석 결과에서도 관찰할 수 있다. 유하 액막의 모든 유동조건에서 저유량 ($Re_f < 100$) 조건시 열전달 계수의 급격한 상승폭을 보이며, 이후 다소 완만하게 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 냉각수 유량이 고정되었을 경우, 낮은 액막레이놀즈 수에서 수용액의 저유량과 얇은 액막 두께로 인해 전체 열전달량이 낮게 나타난 것이다. Fig.6에서 해칭관의 경우, 표면의 roughness에 의한 액막의 정체시간 증가와 관벽 두께의 미소한 감소에 의한 열전달률 증가로 인해 민관에 비해 약 2~3.1%정도의 미소한 증가폭을 보였으며, 스프링 삽입관의 경우, 스프링에 의한 전체 열전달 면적 증가와 액막 유동으로 인해 민관, 해칭관에 비해 최대 18%정도 증가되었다.

3.3 물질전달

Fig 7은 균일 액막 두께, 액막 유동변화 등을 적용한 수치해석과 검증실험에서 흡수기 내 흡수질량유속에 대한 액막 레이놀즈수의 영향을 보여

주고 있다. 민관의 액막두께 균일조건에서 수용액 유량에 따른 흡수질량유속의 증가율은 액막 레이놀즈수 100이하에서 약 15~21%정도 급격하게 증가하는데 반해 100이상에서는 증가폭이 크게 둔화되는 것을 볼 수 있으며, 표면장력에 의한 주기와 유동조건에서는 액막 균일조건에 비해 약 4.0~10.2%정도 흡수질량유속이 향상됨을 보여주고 있다. 해칭관의 경우, 표면의 roughness로 인해 미소한 관벽두께 감소와 액막 유동에 의해 흡수질량유속이 약 0.9~1.5%정도 다소 증가하는 것으로 계산되었으나, 수용액 온도의 미소변화에 따른 확산계수의 변화폭이 거의 일정함에 따라 열전달률에 비해 그 증가폭은 매우 낮게 나타났다. 또한, 유량 변화에 대한 흡수질량유속의 변화는 모든 유동조건에서 거의 유사한 경향을 나타냈으며, 동일한 조건에서 최대흡수질량유속을 나타낸 실험결과와 비교시 저유량 조건($Re_f < 70$)에서 약 5.1~12.1%정도 수치계산이 높게 나타났으며, 이는 실제 흡수현상에서 나타난 액막유동의 저하 및 액막 벗겨짐 등의 원인에 의한 것으로 사료된다. Fig. 8은 삽입기구(스프링)과 해칭관에서 스프링 간격(p)과 관표면 변화시 흡수질량유속에 대한 액막 레이놀즈수의 영향을 보여주고 있다. 흡수질량유속도 열전달 계수의 경우와 유사하게 흡수기 표면의 roughness와 액막 유동에 의해 흡수질량유속이 다소 증가하였으나, 온도에 대한 확산계수의 미소변화로 인해 열전달 계수에 비해 증가폭이 낮았다. 스프링 삽입관 실험에 적용된 변수 조건을 기준으로 해석모델에 의한 흡수성능을 계산할 경우 민관에 비해 최대 8.9~20%정도 증가되는 것으로

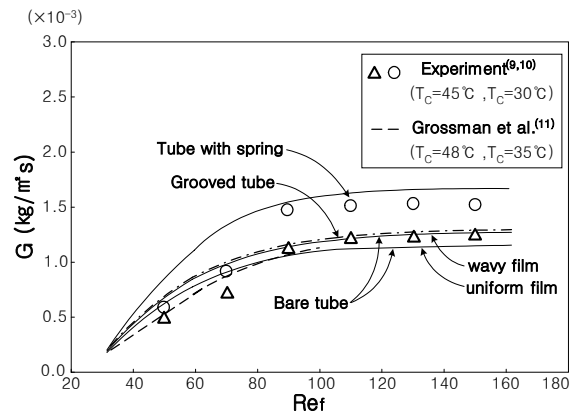


Fig. 7 Effect of Re_f on G

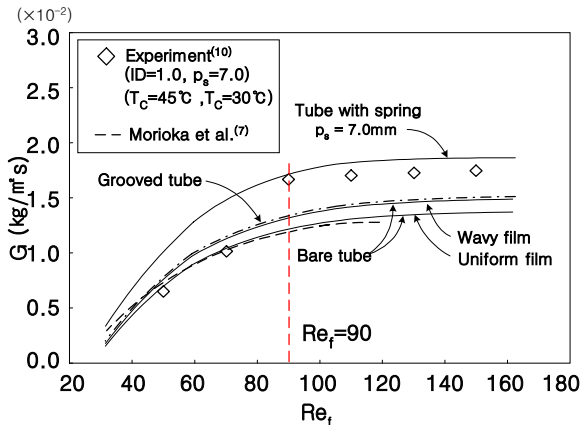


Fig. 8 Effect of surface shape on G.

계산되었다. Fig. 7, 8에서 수치 계산과 실험 결과에 다소 오차가 있으며, 이는 전단력에 의한 국부적 액막 불안정에 의한 것으로 사료되며, 민관에 대한 기존 실험⁽⁹⁾의 결과에서도 관찰되고 있다.

Fig. 8에서 민관의 균일 액막 조건시 흡수질량 유속의 해석과 실험 결과⁽⁹⁾는 저유량($Re_f < 100$)에서 해석결과가 최대 29~43%정도 크게 나타났으며, 이는 열전달 특성과 동일한 원인으로 낮은 액막 레이놀즈수에서 액막 이탈현상에 의한 불안정한 액막 형성과 계면 교란이 동시에 발생하는데 기인하는 것으로 사료된다.

4. 결론

수직형 흡수기내 유동특성 및 전달 특성에 관한 본 연구의 주요결과는 다음과 같다.

- (1) 일정 액막 파장($\lambda=0.02m$)이후 액막 진폭은 임의의 임계값($t_s=0.318cm$)으로 수렴하였으며, 균일 액막에 비해 액막 진폭은 약 3.2~3.8%정도 증가되었다.
- (2) 해석모델에서 유량변화에 따른 액막과동시 균일액막 조건에 비해 약 9~10.2%정도 전달 특성이 향상되었으며, 저유량 조건($Re_f < 100$)에서는 낮은 유량과 전단력으로 인해 액막 유동현상과 전달특성이 낮게 나타났다.
- (3) 균일 액막과 주기파 조건의 해석과 기존 실험결과의 오차정도는 유량 변화에 따라 최대 12.5~25%정도였으며, 저유량 조건($Re_f < 100$)에서는 낮은 유량과 액막 불안정으로 인해 실

험치가 최대 45%정도 낮게 나타났다.

- (4) 균일 액막 조건시 민관, 해칭관, 스프링관의 순으로 전달특성이 증가되었으며, 민관의 경우, 액막 균일조건에 비해 주기파 액막유동 조건에서 열전달 계수와 흡수질량유속은 각각 최대 9.1%와 10.2%정도 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-01484-0)와 일부 2003년도 BK21 핵심분야 사업비에서 지원되었으며 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kashiwagi, T., Kurosaki, Y., Shishido, H., 1985, Enhancement of Vapour Absorption into a solution Using the Marangoni Effect, Transaction of the JSME(Part B), Vol. 51, No. 84, pp. 1002~1009.
- (2) Yun, H. J., Cho, H. C. and Kang, Y. T., 2001, Cycle analysis of HGAX for reduction of generator temperature and obtaining hot water temperature., Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference. pp. 27~32.
- (3) V. K. Shkadov, 1967, Wave Flow Regimes of a Thin Layer of Viscous Fluid Subject to Gravity, Fluid Dynamics, pp. 43~51.
- (4) R. I. Hirshburg, 1980, Laminar Film Flow Phenomena—Theory and Application to the Two Phase Closed Thermosyphon, Ph. D., Thesis, Arizona State Univ.
- (5) P. L. Kapitza, 1965, Wave Flow of Thin Layers of a Viscous Fluid, Collected Papers of P. L. Kapitza, Pergamon Press.
- (6) I. Morioka and M. Kiyota, 1991, Absorption of water vapor into a wavy film of an aqueous solution of LiBr. JSME International Journal Series II, Vol. 34, No. 2, pp. 183~188.
- (7) J. D. Killion and S. Garimella, 2001, A

- critical review of models of coupled heat and mass transfer in falling-film absorption, *Int. J. of Refrigeration*, Vol. 24, pp. 755~797.
- (8) Kim, J. K. and Cho, K. N., 2002. Influence of Spring on The Absorption Performance of a Vertical Absorber Tube, *Transaction of SAREK*, Vol. 14, No. 10, pp.825~832.
- (9) G. Grossman , 1984, "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Absorption of Gases in Turbulent Liquid Film", *Int. J. of Heat and Mass transfer*, Vol. 27, No. 12, pp. 2366~2376.
- (10) Moffat, R. J., 1985, Using uncertainty analysis in the planning of an experiment, *Trans. of the ASME: J. of Fluid Engineering*, Vol. 107, pp.173-182.
- (11) Penev, V., Krylov, V. S., Boyadjiev, C. H. and Vorotilin, V. P., 1972, Wavy Flow of THin Liquid Films, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.15, pp. 1395-1406. Put reference text here. Put reference text here. Put reference text here. Put reference text here.