

수직형 흡수기 최적화에 따른 흡수 성능 예측에 관한 연구

김정국 · 조금남[†]

성균관대학교 기계공학부

(2005년 5월 25일 접수, 2005년 6월 21일 채택)

Study on the Prediction of Absorption Performance by the Optimization of a Vertical Absorber

Jungkuk Kim and Keumnam Cho[†]

School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea

(Received 25 May 2005, Accepted 21 June 2005)

요 약

본 연구는 다양한 수직 액막형 흡수기에서 열 및 물질전달 과정에 따른 흡수 특성 예측을 이론 및 실험적으로 수행하였다. 열 및 물질전달 향상은 해석적으로 조사되었으며, 흡수 성능에 대한 유동 형태, 삽입기구 및 주름에 의한 형상 변수의 영향 등을 조사하였다. 특히, 최대 흡수 성능에 대한 동적 변수(수용액 유량, 유동형태)와 흡수기 형상(ID=22.8 mm, L=1150 m)의 최적값을 수치 해석적으로 예측하였다. 수치 해석 및 실험에서 최대 흡수 성능은 삽입기구(스프링)에 의한 파동 유동에서 나타났다.

주요어 : 수직형 흡수기, 열 및 물질전달, 유동 형태, 형상 변수, 삽입기구(스프링)

Abstract — The present study was analytically and experimentally carried out to predict the absorption characteristics on combined heat and mass transfer process in a vertical falling film of variable absorbers. Heat and mass transfer enhancements were analytically investigated. Effects of geometric parameters by insert device (spring) and corrugate, flow pattern on absorption performances has been also investigated. Especially, the optimal values of absorber geometry (ID=22.8 mm, L=1150 m) and kinetic variables (solution flow rate, flow pattern) for maximum absorption performance has been predicted by the numerical analysis. The maximum absorption performance in a numerical analysis and experiment was shown at the wavy-flow by insert device (spring).

Key words : Vertical absorber tube, Heat and mass transfer, Flow pattern, Geometric parameter, Insert device (spring)

1. 서 론

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 있

다. 이러한 흡수식 시스템에 대한 연구개발 방향은 크게 전체 시스템 성능의 주요 요인인 흡수기의 흡수 성능향상^[1]과 용액 열교환기 및 시스템 제어에 의한 성능향상^[2]으로 나뉘며, 특히, 시스템 성능을 좌우하는 핵심 요소인 흡수기의 열 및 물질전달현상에 대한 기본 메카니즘과 액막의 유동변화에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 흡수기의 표면에 형성되는 유해액막의 유동변화와 계면형성에 따른 열 및 물질전달 기본 메카니즘의 변화에 관한 연구로서 Shkadov^[3]는 액막유동 경계층방정식에 푸리에 변환기법을 적용, 액막파동을 해석하였으며, 액막 레이놀즈수 100 이하에서 실험결과와 유사

[†]To whom correspondence should be addressed.
School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea
Tel: 031-290-7445
E-mail: E-mail: keumnamcho@skku.edu

한 결론을 얻었다. 그러나, 경계층 방정식의 적용이 낮은 액막 레이놀즈수의 큰 액막유동 가정 조건에만 제한되고 있으며, Hirshburg¹⁴⁾는 Shkadov가 제시한 해석방법을 개선해 보다 넓은 액막 레이놀즈수에서 액막파동을 연구하였고, 액막거동을 관측, 해석한 Kapitza¹⁵⁾의 결과와 유사한 결론을 얻었다. Morioka *et al.*¹⁶⁾은 입의 파동진폭과 단열벽면, 계면 열평형 등의 가정 조건에서 액막 두께가 최소가 되는 유동골(troughs of wave)에서 최대흡수 질량유속이 나타나며, 검증 실험을 통해 액막 레이놀즈수에 따른 흡수성능의 민감한 변화를 보여주었다. 또한, Killion *et al.*¹⁷⁾은 기존 연구들에 제시된 각 모델에 대한 특성 및 적용 한계성을 제시하기도 하였다. 김병주 등¹⁸⁾은 층류 파동 액막이 평활액막에 비해 높은 열 및 물질전달 특성을 가지며, 파동특성에 따라 약 50% 이상의 성능향상을 예측하였으며, 균일 액막 두께를 가지는 평활액막과 주기파, 중간파 등의 파동 액막에 대한 열 및 물질전달 특성을 수치해석 하였다. 또한, 액막 유동특성에 미치는 계면전단응력의 영향도 함께 조사하였다. 윤정인 등¹⁹⁾은 수직형 흡수기의 대표적인 향상관인 스프링 삽입관에 대한 열 및 물질전달 성능향상 정도를 실험적으로 조사하였으며, 스프링 직경(0.5, 1.0 mm)에 따른 전달 특성 변화와 민관 대비 스프링 삽입관의 최대 흡수 성능이 나타나는 조건을 제시하였다.

하지만, 이러한 기존 연구는 주어진 가정 조건과 설정범위에 국한되어 있으며, 실제 흡수기내 유동변화에 대한 정성적 관측과 검증실험의 비교를 통한 체계화와 최대 흡수성능에 대한 최적화 설계가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 흡수기내 유동특성 파악 및 액막 유동형태에 따른 흡수성능 변화 실험¹¹⁾에 이어서 수직형 흡수기의 흡수성능에 대한 이론적 해석과 수직액막 유동변화에 따른 흡수특성을 이론적으로 관찰하고 최적값을 예측함으로써 수직형 흡수기 설계활용에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 해석모델 및 지배방정식

2-1. 지배방정식

다양한 형상변화에 따른 수직 액막 유동에 관한 해석 모델은 Fig. 1과 같으며, 수치계산을 위한 기본 가정 조건들은 다음과 같다.

- (1) 유하 액막은 층류 유동이며, 원심축 회전방향의 전단응력 및 유동현상은 없다.
 - (2) 흡수기 입구의 수용액 농도와 온도분포, 냉매 증기의 온도분포, 압력, 유량은 균일하다.
 - (3) 물질전달에 의한 냉매증기의 열전달량은 냉각수 측으로 완전 방열되며, 냉각수로의 열 유속은 균일하다.
 - (4) 층류 파동 액막은 주기파의 특성을 가진다.
- 식(1)과 (2)는 냉매증기와 액막 계면의 열평형과 질량 균형에 의한 물질확산방정식과 에너지방정식을 나타낸다.

$$u_x \frac{\partial C_s}{\partial x} + u_r \frac{\partial C_s}{\partial r} = D \left(\frac{\partial^2 C_s}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_s}{\partial r^2} \right) \quad (1)$$

$$u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \frac{D(C_{p,s} - C_{p,l})}{C_p} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial C_s}{\partial r} + \frac{T}{r} \frac{\partial C_s}{\partial r} + T \frac{\partial^2 C_s}{\partial r^2} \right) \quad (2)$$

층류 액막 파동의 경우, 수용액의 유동방향(x) 및 반경방향(r)에 대한 Navier-Stokes 방정식과 식(3)과 (4)의 연속방정식에 의해 유동특성을 해석할 수 있으며, 본 연구에서는 주기파(periodic wave)에 의한 액막두께 변화를 고려하였다.

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_r \frac{\partial u_x}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g + \nu \left\{ \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial r^2} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_r}{\partial x} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left\{ \frac{\partial^2 u_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} \right\} \quad (4)$$

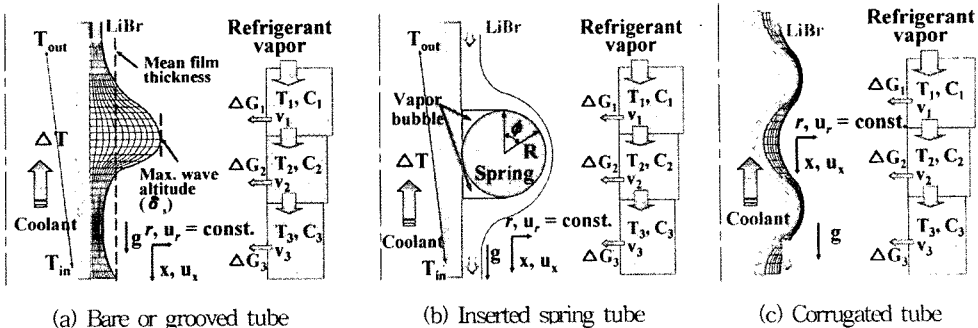


Fig. 1. Schematic of wavy flow model.

여기서, 반경방향 속도(u_r)는 일정하다고 간주하며, 유동방향 속도(u_x)는 식(5)와 같이 표현된다.

$$u_x = \frac{3}{2}U \left\{ 2\left(\frac{r}{\Delta x}\right) + \left(\frac{r}{\Delta x}\right)^2 \right\} \quad (5)$$

2-2. 열 및 물질 전달

유하액막의 각 검사체적(control volume) 내 열전달량(Q)은 식(6)과 같으며, 냉각수측 온도변화는 흡수기 방열에 따른 냉각수 현열량으로 나타낼 수 있다.

$$Q = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,in} - T_{c,out}) = h_s A_{in} (T_{s,in} - T_{s,out}) \quad (6)$$

Moffat^[11]이 제시한 식에 따라 구한 열전달계수의 오차해석은 식(7)과 같다.

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

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

단위시간당 냉매흡수량은 식(8)과 같으며, 각 검사체적(control volume) 입출구의 농도변화(ΔC_{lm})는 식(9)와 같다.

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

$$\Delta C_{lm} = \frac{(C_{s1} - C_1^s) - (C_{s2} - C_2^s)}{\ln[(C_{s1} - C_1^s)/(C_{s2} - C_2^s)]} \quad (9)$$

흡수질량유속에 대한 오차해석은 식(10)과 같다.

$$\frac{\partial G}{G} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_s}{\rho_s}\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{in}}{\Delta C}\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{out}}{\Delta C}\right)^2} \quad (10)$$

식(10)에서 흡수질량유속에 대한 오차는 $\pm 2.7 \sim \pm 4.3\%$ 범위였다.

2-3. 경계조건 및 수치해석

흡수기의 입구($x=0$)에서 유하 액막의 온도와 농도 분포는 균일하며, 경계면 열유속은 반경방향의 열/물질 확산에 의한 열전달항으로 표현된다. 수직 액막에서의 초기 경계조건은 다음과 같다.

$$x=0; \quad T=T_0, \quad C=C_0 \quad (11)$$

$$r=r_s; \quad T=f(C, P) \quad (12)$$

$$q_r = k \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=r_s} - (C_{p,c} - C_{p,s}) T \rho D \left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_{r=r_s} = Q_{abs} \dot{m}_{ur} \quad (13)$$

\dot{m}_{ur} 은 반경방향에 대한 단위체적당 수용액에 흡수되는 냉매증기량이며, 수직원관 내벽면 경계조건은 다음과

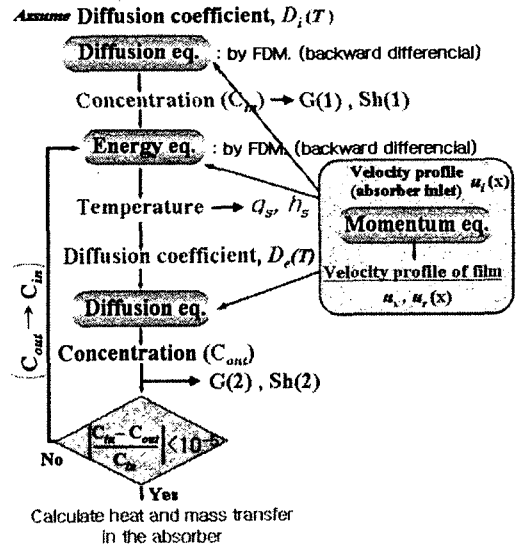


Fig. 2. Flowchart of the analysis.

Table 1. Parameters of analytical model.

Tubes	Parameters	Value [mm]
Bare	Outer diameter	23.5
	Length	1150
Spring inserted	Outer diameter	23.5
	Length	1150
	Spring diameter	1.0
Hatched	Hatched roughness	0.1
Corrugated	Corrugated pitch	10
	" depth	1~5

같다.

$$r=r_c; \quad \dot{q}_w = \frac{(T_w - T_c)}{\left(\frac{1}{h_c} + \frac{\delta_{tube}}{k_{tube}}\right)}, \quad \left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)_{r=r_c} = 0 \quad (14)$$

상기 기액 경계면에 대한 경계조건들은 주기와 액막의 파동 반복으로 인해 일정한 반복성을 가지며, 식(1)과 (2)는 유한체적 방식에 의해 이산화시켜 풀었다. 각 해석모델의 유한 체적의 배열은 유동방향(x)과 반경방향(r)에 대한 균일 격자계로 구성하였으며, 흡수기 출구 조건을 결정하기 위해 유동 진행 방향의 계산영역에 대한 추가영역(계산영역의 1/2)을 설정하였다. 출구경계조건은 수용액으로 전달현상이 일어나지 않는 것으로 간주하였으며, 수치해를 구하기 위한 전체 작업순서는 Fig. 2와 같고 해의 수렴조건은 10^{-5} 이하로 설정하였다. 흡수기 해석모델 형상에 대한 주요변수는 Table 1에 나타내었다.

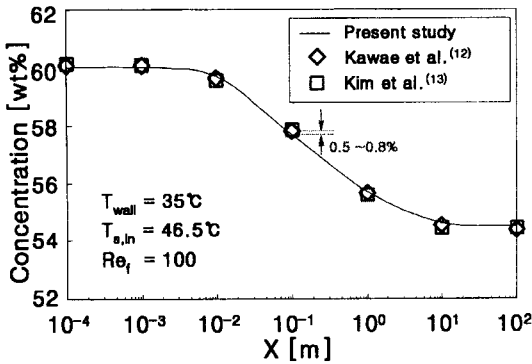


Fig. 3. Comparison of concentration profile.

Fig. 3은 기존 문헌의 계산조건과 동일한 조건을 본 해석모델에 적용시 LiBr 수용액의 기액 경계면에서 유동방향에 대한 농도 변화를 나타내고 있다. 기존 연구^{[12][13]}와 본 연구의 수치해석 결과가 잘 일치됨을 볼 수 있으며, 최대 상대오차는 0.5~0.8% 정도로서, 본 연구에 적용된 수치해석 방법에 대한 타당성을 검증할 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 액막 파동 변화

흡수기내 수직액막 유동변화는 수용액 유량, 유동방향에 대한 계면 전단응력, 파장에 따라 변화되며, Figs. 4, 5는 파장과 유량변화에 따른 최대 액막 두께 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 4는 파장이 고정된 일반유체(H₂O)의 주기파 조건($\lambda=0.03$ m)에서 해석모델과 기존 실험결과와의 비교를 통해 유량변화에 따른 액막파고 변화를 보여주고 있다. 주기파에서 저유량 조건($Re_f < 100$)의 해석결과는 shadow photograph를 이용, 파동의 종류와 액막두께 및 유동변

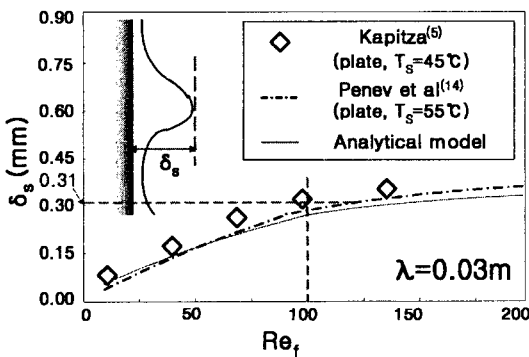


Fig. 4. Effect of Re_f on wave film thickness.

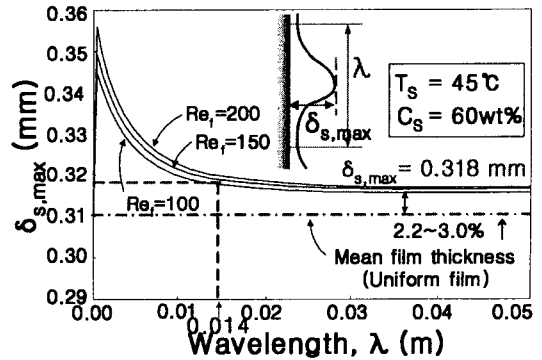


Fig. 5. Effect of λ on maximum wave film thickness.

화를 실험적으로 관측한 Kapitza^[5]의 실험결과와 거의 일치하며, Navier-stokes 방정식과 수정된 Galerkin 기법을 통해 파동액막의 거동을 해석한 Penev *et al.*^[14]의 모델과도 유사한 경향을 나타냄을 보여주고 있다. 저유량 조건 ($Re_f < 100$)에서 낮은 유량과 액막 자체의 점성력에 비해 상대적으로 큰 전단응력으로 인해 액막파고의 변화는 낮았으나, 유량변화에 대한 국부 액막 증가율은 11~15.3% 정도로 $Re_f > 100$ (증가율 : 5.2~8%)보다 크게 나타났다.

이러한 액막유동의 변화는 흡수기 내 열 및 물질전달 성능을 변화시키는 주요 인자로서 특히, 저유량 조건하에서 주기파에 의한 액막변화는 흡수성능 예측에 큰 변수요인이 되며, 이는 해석모델에 의한 흡수기내 전달특성변화 결과를 통해서도 예측할 수 있다.

Fig. 5는 주기변화에 따른 최대액막파고의 변화와 임계 최대액막파고를 보여주고 있다. 수용액 농도와 온도의 균일 조건시 0.014 m 이하의 파장(λ)에서 최대액막 파고(δ_s)의 급격한 감소 결과를 보이며, $\lambda=0.014$ mm 이후에 최대 액막파고가 약 0.319 mm의 임계치로 수렴되었다. 또한, 주기파에 의한 액막유동의 경우, 수용액 유량을 기준한 균일 액막두께($t=0.31$ mm)에 비해 2.2~3.0% 정도 증가된 액막파고가 나타나며, 다른 액막 레이놀즈수에서 거의 유사한 경향을 보였다. 초기 파동주기의 경우, 고정된 유량조건에서 짧은 파장으로 인해 수용액의 점성력에 비해 흡수기 벽면과의 전단력 영향이 증가하게 되고, 이로 인해 액막 파고가 증가되었다.

3-2. 유량 조건에 따른 형상변화

3-2-1. 흡수기 길이 변화

Fig. 6은 흡수기로 유입되는 수용액(45°C)과 냉각수(30°C)의 초기 조건하에서 수용액의 유량 변화에 따른 흡수기 전 구간에 대한 온도 변화로서 수용액과 냉각수의 열교환으로 인해 흡수기로 유입된 LiBr 수용액은 입구

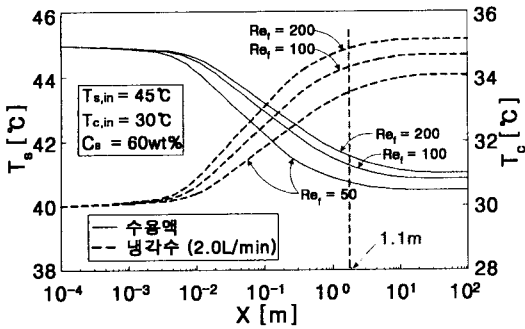


Fig. 6. Temperature profile of LiBr solution along the absorber tube.

측에서 급격한 온도 감소가 나타났으며, 냉매 증기 흡수에 의한 수용액 농도 저하와 흡수열 감소에 따른 냉각수와 수용액의 열교환 저하로 인해 흡수기 길이 약 1.1 m 이후에서 온도 변화율이 크게 둔화되는 것으로 예측되었다. 냉각수는 수용액과 대향류 형태의 열교환을 하며, 흡수기 출구측에서 입구측으로 진행할수록 점차 온도가 상승하게 되고, 일정 유량 조건에 따른 열교환 능력의 한계로 인해 수용액의 온도 변화와 유사하게 임의의 흡수기 길이(약 1.1 m) 이후 변화폭이 크게 둔화되는 것으로 나타났다. 이러한 수용액과 냉각수의 온도 변화는 모든 액막 레이놀즈수에서 유사한 경향을 보였으며, 액막 레이놀즈수가 증가할수록 흡수기 입구측의 온도 변화율은 작게 나타났다. 이는 일정한 냉각수 유량 조건에서 흡수기로 유입되는 수용액의 유량이 증가할수록 수용액측의 열용량은 증가하게 되고, 냉각수로의 방열량 증가에 따른 열전달량 증가를 유도하게 된다. 또한, 냉각수의 과냉 효과로 인한 흡수기 내 압력 저하를 방지함으로써 흡수 포텐셜인 포화증기압이 유지되고, 이로 인한 전체 흡수량 증가는 흡수열의 증가와 함께 냉각수와

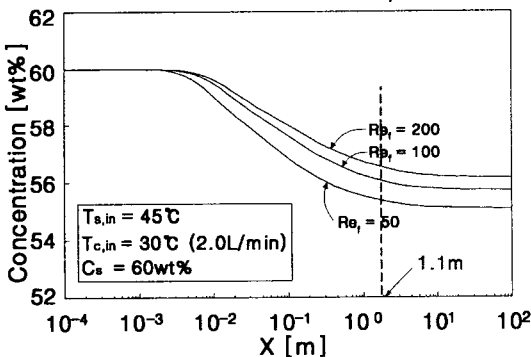


Fig. 7. Concentration profile of LiBr solution along the absorber tube.

수용액의 열교환량 증가를 유도한 것으로 사료된다.

또한, Fig. 7과 같이 흡수기 전 구간에 대한 수용액의 농도 변화도 온도 변화와 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 수용액 온도와 농도의 밀접한 관련성에 의한 것으로서, 흡수기 입구측에서 냉매 증기 흡수에 의한 급격한 농도 저하와 흡수열의 증가가 발생되며, 냉각수와 열교환을 통해 흡수열을 외부로 방열하게 된다. 또한 이러한 냉각수로의 방열은 수용액의 온도 저하와 이로 인한 내부 포화압력 감소를 유도하게 되고, 냉매 증기와 수용액의 포화 압력차가 점차 감소하게 된다. 수용액과 냉매증기의 포화 압력차 감소는 흡수기 출구측으로 진행될수록 냉매 증기의 흡수율을 감소시키며, 전체적으로 수용액의 농도 변화율을 감소시키는 주요 원인이 된다. 이러한 농도 변화율은 온도변화와 유사하게 임의의 흡수기 길이(약 1.1 m)이후에 점차 감소하게 되며, 이를 통해 임의의 전달 특성 수렴 범위(약 1.15 m)를 예측하였다. 본 연구에서는 이상의 해석 결과들을 통해 각 해석 모델과 검증 실험에 적용된 흡수기 길이를 약 1150 mm로 설정하였다.

3-2-2. 흡수기 관경 변화

본 연구에 적용된 수직 내부 유동의 경우, 주어진 수용액과 냉각수 온도 및 길이 조건 이외에도 냉매 증기의 유동조건이 흡수 성능 변화의 주요 요인이 될 수 있으며, 이러한 냉매 증기의 유동과 밀접하게 관련된 조건이 흡수기의 관경과 액막 두께에 의한 냉매 증기의 유동 면적 변화가 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 흡수기 관경과 수용액 유량 조건 변화에 따른 흡수 성능 변화를 예측하였으며, 최대 전달 특성이 나타나는 범위를 분석하였다.

특히, Fig. 8에서 보듯이 형상(관경) 조건에 의한 흡수 성능 변화에서 수용액 유량이 증가하여도 임의의 관

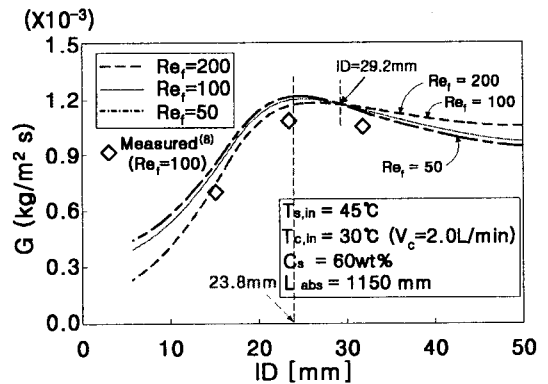


Fig. 8. Effect of inner diameter of absorber on absorption rate.

경(ID=29.2 mm) 이하에서는 오히려 흡수 성능이 낮아지는 특이한 결과가 나타났다. 이는 임의의 관경 이하에서 수용액 유량이 증가함에 따라 내부벽면에 형성되는 수직 액막의 두께가 증가하게 되고, 이로 인해 냉매 증기의 유동 단면적인 흡수기 내부 공간이 감소하게 된다. 이러한 유동 단면적의 감소는 냉매 증기의 질량유속이 일정한 조건하에서 흡수기로 유입되는 냉매 증기에 대한 유동 저항으로 작용하게 되며 저유량 조건에 비해 고유량 조건에서 오히려 흡수성능이 저하되는 현상이 나타난 것으로 사료된다.

또한, 임의의 관경 이후에는 관내부 단면적의 확대로 인해 액막 두께 증가에 의한 유동 면적 감소 영향이 상쇄되며, 흡수기로 공급되는 수용액 유량이 증가할수록 흡수 성능도 증가하게 된다. 본 연구의 해석 결과를 통해 수용액 유량 증가에 따라 흡수 성능도 함께 증가되는 임의의 관경(ID=29.2 mm)과 최대 흡수 성능이 나타나는 임계점(ID=23.8 mm)을 예측하였으며, 이를 근거로 검증 실험에 적용된 흡수기 관경도 상용 스테인레스관 중에서 가장 유사한 제원(약 23.4 mm)을 선정하였다.

3.3. 삽입기구(스프링)의 영향

Fig. 9은 각 검사체적(control volume) 내 국소 체적에서 삽입기구(스프링)에 의한 액막 변동과 열전달특성 변화를 보여주고 있다. 수용액 농도와 온도의 균일 조건시 최대 열전달특성은 기존 실험^[10]의 가시화 결과에서도 관측되었던 스프링에 의한 공동화 부분, 즉 국부 공기방울 현상이 각 스프링의 입출구 상/하단에서 나타나며, 공동화 부분(공기방울)에 의한 열전달계수 감소와 균일 유량에 따른 국부적인 액막 두께 감소로 인해 30.7% 정도 전달특성이 감소되는 것으로 나타났으며, 모든 액막 레이놀즈수에서 거의 유사한 경향을 보였다.

Fig. 10은 액막 레이놀즈수 90에서 스프링 간격이 액막 서우드수에 미치는 영향을 보여주고 있다. 동일한 수용액 농도하에서 스프링 간격이 좁아질수록 국부 공기방울에 의한 흡수성능의 오차는 크게 나타나며, 특히 좁

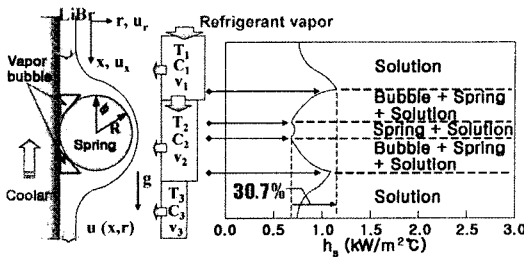


Fig. 9. h_s for the spring-inserted tube.

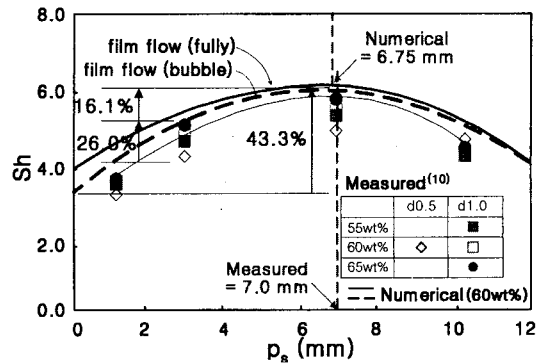


Fig. 10. Effect of spring pitch on Sh ($Re=90$).

은 간격하에서는 상하단 공기방울이 결합함으로써 인해 각 스프링 간에 얇은 공기막이 형성되고, 흡수기 관벽을 통한 수용액의 방열을 방해하는 열저항체의 역할을 함으로서 국부 열전달 성능이 감소하게 된다. 따라서, 스프링 간격이 좁아질수록 공기방울이 없는 경우(fully)와 국부 공기방울 조건(bubble)의 오차는 증가하게 되며, 간격에 대한 최대 변화폭은 43.3% 정도로 예측되었다. 국부 공기방울 조건하에서 해석 모델을 통한 최대 흡수성능은 간격 6.75 mm에서 나타나는 것으로 예측되었으며, 검증 실험에서도 이와 유사한 간격 7.0 mm에서 최대 흡수성능이 나타났다. 스프링 간격에 의한 흡수성능 향상은 해석 및 검증실험을 통해 간격 1 mm, 3 mm, 7 mm 순으로 증가됨을 관찰하였으며, 향상폭은 각각 26%, 16.1% 정도로 분석되었다.

3.4. 형상(주름)에 의한 영향

Fig. 11은 주름관에서의 액막 파동시 각 검사체적(control volume) 내 국소 체적에서 흡수관의 주름 형상에 따른 국부 열전달 성능 변화를 보여주고 있다. 수용액 농도와 온도의 균일 조건시 최대 열전달 특성은 국부액막 모임 현상이 발생하는 피치간의 각 주름골에서 25.1% 정도 감소되고, 각 주름 피치에서 최대로 증가되

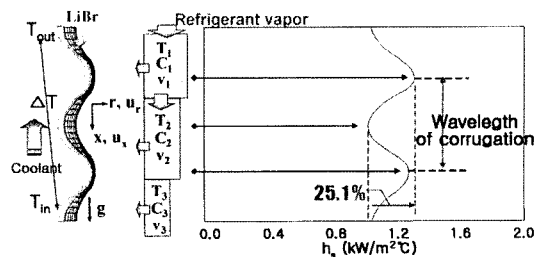


Fig. 11. h_s for the corrugated tube.

는 것으로 나타났으며, 모든 액막 레이놀즈수에서 거의 유사한 경향을 보였다. 이러한 현상은 평활관의 액막 파동시 국부적으로 액막 두께가 최소화되는 유동골(Troughs of the wave)에서 최대 흡수성능이 나타남을 보인 Morioka 등⁽⁶⁾의 연구에서도 관측되고 있다.

3-5. 열전달 특성

평활관, 스프링 삽입관의 열유속 변화는 기존 연구⁽¹⁰⁾에서 수행되었으며, 본 연구에서는 평활관, 해칭관의 균일 액막/파동유동 조건, 삽입기구(스프링) 및 액막유동 변화에 따른 열전달특성 변화를 수치계산하고, 기존 실험결과와 비교하였다. Fig. 12에서 평활관의 주기와 유동시 액막 균일조건에 비해 3.2~6.1% 정도 열전달계수가 향상됨을 보여주고 있으며, 해석과 실험결과 비교시 12.5~35% 정도의 오차를 보이고 있다. 이는 저유량($Re_f < 100$) 조건시 낮은 액막유동 변화에 따른 열전달특성 저하와 기존 실험⁽¹⁰⁾에서 관찰되었던 저유량($Re_f < 100$)에서의 액막 벗겨짐 현상에 따른 액막 불안정과 열전달면적 감소, 국부 액막두께 증가로 인한 열저항 증가에 의한 것으로 사료된다. Grossman 등⁽¹⁵⁾의 경우, 액막의 균일 두께, 등은 벽면 가정 조건으로 인해 유사한 온도 조건시 액막 레이놀즈수 80 이하에서 낮은 열전달특성을 보여주고 있다. 또한, Fig. 12에서 보듯이 평활관, 해칭관, 스프링 삽입관의 경우에도 유사한 경향이 나타나고 있으며, 스프링에 의한 액막의 과도한 유동변화를 가정한 수치해석에서도 관찰할 수 있다. 유해액막의 모든 유동조건에서 저유량($Re_f < 100$) 조건시 열전달계수의 급격한 상승폭을 보이며, 일정 유량 조건 이후에 다소 완만하게 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 냉각수 유량이 고정되었을 경우, 낮은 액막 레이놀즈 수에서 수용액의 저유량과 얇은 액막두께로 인해 전체 열전달량이 낮게 나타난 때문으로 사료된다. 해칭관의 경우, 표면의 조도에

의한 액막의 정체시간 증가와 관벽두께의 미소한 감소에 의한 열전달률 증가로 인해 평활관에 비해 0.8~1.1% 정도의 미소한 증가폭을 보였다. 스프링 삽입관의 경우, 스프링에 의한 전체 열전달면적 증가와 액막유동으로 인해 평활관, 해칭관에 비해 최대 16% 정도 증가되었으며, 국부 공기 방울에 의한 성능변화는 2.1~3.1% 정도로 예측되었다. Fig. 12에서 나타난 균일 액막 파동조건

3-6. 물질전달 특성

Fig. 13은 균일 액막두께, 액막유동 변화 등을 적용한 수치해석과 검증실험에서 흡수기내 흡수질량유속에 대한 액막 레이놀즈수의 영향을 보여주고 있다. 평활관의 액막두께 균일 조건에서 수용액 유량에 따른 흡수질량유속의 증가율은 액막 레이놀즈수 100 이하에서 15~21% 정도 급격하게 증가하는 데 반해 100 이상에서는 증가폭이 크게 둔화되는 것을 볼 수 있으며, 표면장력에 의한 주기와 유동조건에서는 액막 균일 조건에 비해 4.2~10.2% 정도 흡수질량유속이 향상됨을 보여주고 있다. 해칭관의 경우, 표면의 조도로 인해 미소한 관벽두께 감소와 액막유동에 의해 흡수질량유속이 0.3~0.6% 정도 다소 증가하는 것으로 계산되었으나, 수용액 온도의 미소 변화에 따른 확산계수의 변화폭이 거의 일정함에 따라 열전달률에 비해 그 증가폭은 낮게 나타났으며, 유량변화에 대한 흡수질량유속의 변화는 모든 유동조건에서 거의 유사한 경향이 나타났다. 동일한 조건에서 최대 흡수질량유속을 나타낸 실험결과와 비교시 저유량 조건($Re_f < 100$)에서 5.1~35.2% 정도 해석결과가 높게 나타났으며, 이는 실제 흡수현상에서 나타난 액막 유동 저하 및

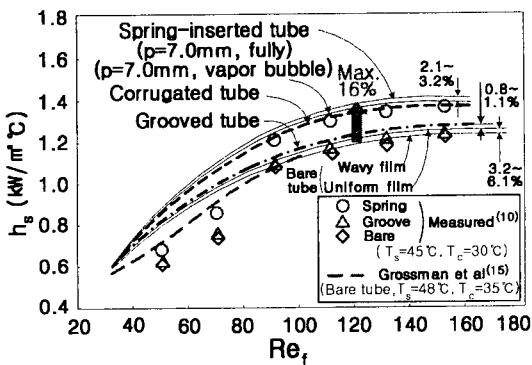


Fig. 12. h_g for various absorber tubes.

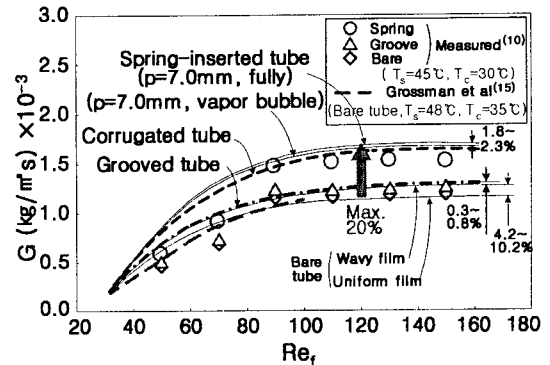


Fig. 13. G for various absorber tubes.

국부 액막 이탈현상 등의 원인에 의한 것으로 사료된다. 흡수질량유속도 열전달계수의 경우와 유사하게 흡수기 표면의 조도와 액막 유동에 의해 흡수질량유속이 다소 증가하였으나, 온도에 대한 확산계수의 미소변화로 인해 열전달 계수에 비해 증가폭이 낮았다. 스프링 삽입관 실험에 적용된 변수조건을 기준으로 해석모델에 의한 흡수성능을 계산할 경우 평활관에 비해 최대 8.9~20% 정도 증가되는 것으로 계산되었으며, 국부 공기 방울에 의한 성능변화는 1.8~2.3% 정도로 예측되었다. 각 흡수관의 균일 액막 조건시 흡수질량유속의 해석과 실험결과¹⁰⁾는 저유량($Re_c < 100$)에서 해석결과가 최대 29~43% 정도 크게 나타났으며, 이는 열전달특성과 동일한 원인으로 낮은 액막 레이놀즈수에서 액막 이탈현상에 의한 불안정한 액막 형성과 계면교란이 동시에 발생하는데 기인하는 것으로 사료된다.

4. 결 론

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

(1) 일정 액막과장(0.02 m) 이후 액막진폭은 임의의 임계값(0.319 mm)으로 수렴하였으며, 균일 액막에 비해 액막진폭은 2.2~3.0% 정도 증가되었다.

(2) 균일 온도, 농도조건에서 최대 물질전달성능이 나타나는 임계 액막 과장($\lambda=0.014$ m)을 조사하였으며, 열 및 물질전달 특성이 최대로 증가되는 길이(1150 mm) 및 관경(22.8 mm)이 존재함을 수치해석 결과를 통해 예측하였다.

(3) 국부 열전달 성능변화는 주름관 및 스프링 삽입관 등의 형상조건에 따라 최대 25.1~30.7% 정도 크게 변화하였다.

(4) 해석모델에서 유량변화에 따른 열 및 물질전달 성능변화는 균일액막 조건에 비해 액막 파동 조건에서 각각 3.2~6.1%와 4.2~10.2% 정도 향상되는 것으로 예측되었다. 해석과 기존 실험의 오차는 유량 변화에 따라 최대 12.5~35.2% 정도이고, 저유량 조건($Re_c < 100$)에서는 낮은 유량과 액막 불안정으로 인해 해석치가 최대 35~43% 정도 높게 나타났다.

(5) 열 및 물질전달특성 모두 “평활관<해칭관<주름관<스프링 삽입관”의 순으로 증가되었으며, 평활관 대비 스프링 삽입관의 열 및 물질전달 향상정도는 각각 최대 16%, 20% 정도로 나타났다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 에너지관리공

단의 에너지·자원기술 개발사업(2005-E-BD11-P-05-3-010-2005)과 일부 2005년도 BK21 핵심분야 사업비에서 지원되었으며, 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

기호설명

A	: 열전달면적[m ²]
C	: LiBr 수용액농도[wt%]
D	: 물질확산계수[m ² /s]
G	: 흡수질량유속[kg/m ² ·s]
h	: 열전달계수[kW/m ² ·K]
\dot{m}_u	: 냉매증기 흡수량[kg/(m ² ·s)]
q	: 열유속[kW/m ²]
x	: 수용액 유동방향
r	: 흡수기 반경방향
Nu	: Nusselt수,
Re_r	: 액막 Reynolds수, hL_s/k_s
Sh	: Sherwood수, $\beta L_s/D_s$
T	: 온도[K]
g	: 중력 가속도[m/s ²]
δ	: 수용액 국부 액막 두께[mm]
p	: 압력[Pa]
u	: 국부 액막속도[m/s]
\bar{U}	: 평균 액막속도[m/s]
$r/\Delta x$: 단위 유동 길이에 대한 액막두께 비

그리스 문자

β	: 물질전달계수[m/s]
μ	: 점성계수[kg/m·s]
Γ	: 원주 길이당 질량유량[kg/m·s]
ρ	: 밀도[kg/m ³]
ν	: 동점성계수[kg/m ²]
λ	: 파장[m]

하첨자

in, out	: 흡수기 입/출구
o	: 초기조건
s	: 수용액
c	: 냉각수
w	: 흡수기 벽면
n	: Control volume step

참고문헌

1. Kashiwagi, T.; Kurosaki, Y.; Shishido, H. "Enhancement of Vapour Absorption into a Solution using the

- Marangoni Effect”, Transaction of the JSME (Part B), 1985, 51(84), 1002-1009.
2. 조현철; 강용태. 온수 및 재생기 온도 회수를 위한 HGAX의 사이클 해석, 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, 2001, 27-32.
 3. Shkadov, V.K. Wave Flow Regimes of a Thin Layer of Viscous Fluid Subject to Gravity, Fluid Dynamics, 1967, 43-51.
 4. Hirshburg, R.I. Laminar Film Flow Phenomena-Theory and Application to the Two Phase Closed Thermosyphon, Ph. D., Thesis, Arizona State Univ., 1980.
 5. Kapitza, P.L. Wave Flow of Thin Layers of a Viscous Fluid, Collected Papers of P. L. Kapitza, Pergamon Press, 1965, 662-709.
 6. Morioka, I.; Kiyota, M. Absorption of water vapor into a wavy film of an aqueous solution of LiBr, JSME International Journal Series II, 1991, 34(2), 183-188.
 7. Killion, J.D.; Garimella, S. A critical review of models of coupled heat and mass transfer in falling-film absorption, Int. J. of Refrigeration, 2001, 24, 755-797.
 8. 김병주; 김정현. 증류-파동 액막의 열 및 물질전달, 공기조화·냉동공학 논문집, 1998, 10(4), 431-439.
 9. 윤정인; 오호규; Kashiwagi, T. 스프링 삼입형 유하액 막식 흡수기의 열 및 물질전달 특성, 대한기계학회 논문집, 1995, 19(6), 1501-1509.
 10. 김정국; 조금남. 수직형 흡수기의 흡수성능에 미치는 스프링의 영향, 대한설비공학회 논문집, 2002, 14(10), 825-832.
 11. Moffat, R.J. Using uncertainty analysis in the planning of an experiment, Trans. of the ASME: J. of Fluid Engineering, 1985, 107, 173-182.
 12. Kawae, N.; Shigehi, T.; Kanemaru, K.; Yamada, T. Water Vapor Absorption into Laminar Film Flow of a Lithium Bromide Water Solution (Influence of Variable Properties and Inlet Film Thickness on Absorption Mass Transfer Rate), Scripta Technica, Inc., 1989, 58-70.
 13. Kim, S.C.; Oh, M.D.; Lee, J.H. A Numerical Study on Heat and Mass Transfer in a Falling Film of Vertical Plate Absorber Cooled by Air, Transaction of the KSME, 1995, 19(4), 1071-1082.
 14. Penev, V.; Krylov, V.S.; Boyadjiev, C.H.; Vorotilin, V.P. Wavy flow of thin liquid films, Int. J. of Heat and Mass Transfer, 1972, 15, 1395-1406.
 15. Grossman, G. Simultaneous heat and mass transfer in absorption of gases in turbulent liquid film, Int. J. of Heat and Mass Transfer, 1984, 27(12), 2366-2376.