수직관 흡수기의 물질전달에 미치는 계면활성제의 영향

권오경† · 윤정인* · 윤재호**

(2002년 11월 7일 접수, 2003년 3월 21일 심사완료)

Influence of Surfactant on Mass Transfer of Vertical Absorber

Oh-Kyung Kwon, Jung-In Yoon and Jae-Ho Yun

Key Words : Vertical Absorber(수직관 흡수기), Enhancement of Mass Transfer(물질전달 촉진), Surfactant(계면활성제), Marangoni Convection(마랑고니대류)

Abstract

This study was concerned with the enhancement of mass transfer by surfactant added to the aqueous solution of LiBr. Different vertical inner tubes were tested with and without an additive of normal octyl alcohol. The test tubes were a bare tube, groove tube, corrugate tube and inserted spring tubes. The additive concentration of normal octyl alcohol as a surfactant is about 0.08mass%. The Sherwood number was measured as a function of film Reynolds number 20~200. The experimental results were compared with those which use no surfactant. The enhancement of mass transfer by Marangoni convection effect which was generated by addition of the surfactant is proved for each testing tube. Especially, it is clarified that the tube with the spring has the highest enhancement effect. A correlation of the experimental mass transfer data for the bare, groove, corrugate and insert spring tubes results expressed as the form of $Sh = c \cdot Re_f^n$.

기호설명

d	: 전열관 직경	[m]
D	: 물질확산 계수	[m^2/s]
G	: 질량유량	[kg/s]
L	: 전열관 길이	[m^2]
L_s	: 유하액막의 특성길이	[m]
P	: 흡수기 압력	[mmHg]
T	: 온도	[℃]
ξ	: 농도	[wt%]
Re_f	: 막레이놀즈수	
Sh	: 셔우드수	

그리스문자

β	: 물질전달계수	[m/s]
$\Delta\xi_{lm}$	: 대수평균농도차	[wt%]
Γ	: 단위길이당 용액유량	[kg/ms]
δ	: 용액의 유하액막 두께	[m]
ρ	: 밀도	[kg/m^3]

하첨자

i	: 입구
S	: 흡수용액
CO	: 냉각수
A	: 흡수기
o	: 출구
R	: 냉매

† 책임저자, 회원, 한국생산기술연구원 신에너지환경팀
E-mail : kwonok@kitech.re.kr
TEL : (041)589-8528 FAX : (041)589-8330
* 회원, 부경대학교 기계공학부
** 회원, 한국생산기술연구원 신에너지환경팀

1. 서 론

최근 들어 환경에 대한 관심이 고조되어 CFC의 사용이 규제되고, 하절기의 냉방수요 증가에 따른 전력수급의 불균형 문제가 대두되면서 이를 완화시키기 위하여 가스를 이용하는 흡수식 냉난방기의 이용이 권장되고 있다. 특히 근래에 소형 부문에서의 냉방수요가 증대함에 따라 시스템의 소형화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고, 이에 따라 고효율의 공냉 흡수식 냉난방기의 개발에 관심이 모아지고 있다.

흡수기는 흡수식 냉난방기에서 가장 중요한 핵심 부품중의 하나이며, 흡수기의 성능향상이 전체 냉난방기의 성능향상과 직결된다고 할 수 있다. 따라서 흡수기에서의 열 및 물질전달 특성 규명이 중요한 연구과제가 되고 있다. 현재까지 상용화되어 있는 대부분의 흡수기는 흡수용액이 수평관외를 흘러내리는 수냉형의 냉각방식을 채용하고 있는 반면, 최근에 연구되고 있는 공냉식의 형상으로는 용액이 수직관내를 흘러내리는 액막식 흡수기가 가장 많이 제시되고 있다. 그러나 아직까지 열 및 물질전달의 정성적, 정량적 관계가 충분히 연구되지 못한 상태이며, 실제 제품화의 측면에서 필요한 설계기술은 미흡한 실정이고, 각 구성부분의 요소설계를 위한 기초연구도 부족한 상황이다.

이와 관련한 연구로는 조 등[1]은 LiBr 및 LiBr-$CaCl_2$ 혼합흡수제(혼합비 LiBr-$CaCl_2$=2:1)를 사용한 수직관 흡수기의 열 및 물질전달특성에 대한 실험을 수행하였다. 또한 Morioka 등[2]은 액막레이놀즈수에 따라 액막의 형성과 계면파동의 특성이 변화하므로 흡수율이 최대인 액막레이놀즈수가 존재한다고 주장하였다.

윤 등[3]과 김 등[4]은 수직관 흡수기의 관내측에 장착된 스프링이나 철망의 삽입기구가 흡수과정중의 열 및 물질전달향상에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 또한 김 등[5]은 관외측 수직형 흡수기의 흡수성능에 대해서 스프링 간격에 따른 열 및 물질전달특성을 조사하였으며, 액막레이놀즈수가 90일 때와 스프링 간격이 3mm인 경우가 열 및 물질전달이 크게 증가한다고 보고하였다. 실제 흡수식 시스템의 경우 흡수특성을 향상시키기 위하여 계면활성제를 수용액에 혼합하여 사용한다. Kashiwagi[6]는 LiBr 수용액에 미량 첨가된 계면활성제가 마랑고니대류를 발생시켜 흡수촉진에 유효하다는 연구결과를 제시하였다. Kim 등[7]은 수직관 외면에 형성된 50~63 wt%의 리튬브로마이드 수용액막에 대하여 2-ethyl-1-hexanol를 3~6 ppm 첨가하였을 때 흡수율은 증가하기 시작하여 20~30 ppm이 첨가되었을 때 흡수율의 증가폭이 최대가 되며 50%의 수용액의 경우 흡수율은 3배 증가한다고 주장하였다. 엄 등[8]은 수직관내에서의 증기흡수에 관한 실험을 수행하였으며, 액막레이놀즈수가 35~130일 때 수용액의 상태가 과냉인 경우와 과열상태에 대하여 열 및 물질전달의 상관식을 제시하였다. 이외에도 공냉화를 위한 수직관내 평활관과 각종 전열촉진관에 관한 비교연구 등[9-11]이 많이 이루어지고 있다.

그러나 아직까지 각종 흡수촉진관을 이용한 수직관내 흡수기에 관한 연구는 비교적 드물고, 흡수촉진관에 계면활성제를 첨가한 연구는 거의 보고되지 않고 있다. 따라서 본 연구는 수직관 흡수기의 열전달 특성[12]에 이어서 관내로 리튬브로마이드 수용액을 액막상으로 흘리고, 관외로 35℃의 냉각수를 흘리면서 냉매증기를 흡수시켜 물질전달 특성을 실험적으로 파악하였다. 특히, 본 연구에서는 전열관의 관경, 길이, 내면 형상의 변화에 따른 흡수기의 물질전달 특성을 파악하여 고성능 수직 흡수기 개발을 위한 기초 데이터를 얻음과 동시에 공냉화를 위한 유익한 자료를 제공하고자 한다. 또한, 실제 흡수기에는 흡수촉진에 유효한 계면활성제를 경험적으로 사용하고 있으므로 계면활성제가 물질전달성능에 미치는 영향을 계면활성제 무첨가시와 비교하여 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험에서는 계면활성제가 흡수기 성능에 미치는 영향을 파악하고자 흡수기의 관경, 관내면 형상, 흡수 용액의 유하속도를 변화시키면서 흡수기용 전열관의 물질전달에 관해 검토하였다.

Fig. 1은 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 장치는 흡수기, 증발기, 응축기, 재생기 등의 각종 열교환기, 희·농용액 탱크, 냉각수 탱크, 냉수탱크, 냉매 탱크 및 정압 탱크 등의 각종 탱크와 순환 펌프, 제어기기, 계측기 등으로 구성되어 있다. 장치의 각 부분은 배관으로 연결되어 있으며,

Table 1 Specification of test tubes

Test tube	Inside diameter	Length	Configurations
Bare	14.35 [mm]	1,419 [mm]	Smooth Surface
	23.80 [mm]	1,419 [mm]	Smooth Surface
Grooved	14.35 [mm]	1,419 [mm]	Helix angle 18° , 80 Grooves
Corrugated	14.35 [mm]	1,419 [mm]	Pitch 10 [mm], Depth 1.0 [mm]
Insert spring	14.35 [mm]	1,419 [mm]	Spring Dia. 1.0 [mm], Pitch 10 [mm]
	17.60 [mm]	1,119 [mm]	Spring Dia. 1.0 [mm], Pitch 10 [mm]
	17.60 [mm]	1,119 [mm]	Spring Dia. 0.5 [mm], Pitch 10 [mm]

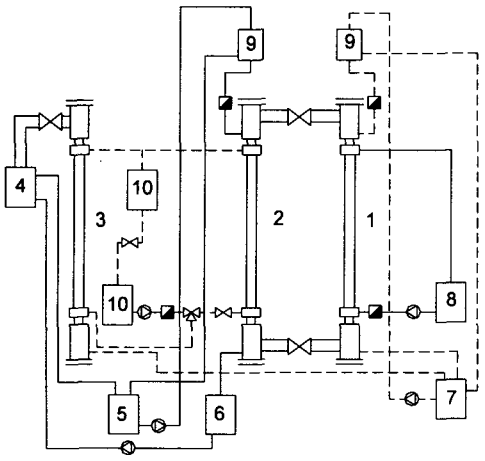

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

단열재로 충분히 단열 되어 있다. 흡수기는 스테인레스 외관에 시험전열관을 내관으로 하는 2중관 구조로써 실험용 전열관 내를 흡수용액이 흐르고, 관외의 환상부를 냉각수가 흐르는 대향류 열교환기이다. 시험전열관에는 평활관과 액막교란효과가 있는 콜게이트관, 내면홈관과 스프링 삽입관을 사용하였다. Table 1에는 이들 전열관들의 주요사양 및 형상을 나타내었다. 모든 전열관

Table 2 Property of surfactant

Molecule name	n-octanol(octyl alcohol)
Molecule equation	$C_8H_{17}OH$
Characteristics	Molecular weight : 130.23 Colorless solution Boiling range : 190~198℃ Fusing point : -16.7℃ Flash point : 81℃

Table 3 Experimental conditions

Strong solution	Film Reynolds number	20~180[-]
	Temperature	45± 0.5[℃]
	Concentration	60± 0.5[wt%]
Cooling water	Flow rate	2.8× 10-5[m^3/s]
	Temperature	35.0± 0.5[℃]
Chilled water	Flow rate	3× 10-5[m^3/s]
	Temperature	18.0± 0.5[℃]
Absorption pressure of absorber		7± 1[mmHg]
Concentration of surfactant		0.08[wt%]

은 동관이며 전열관 길이는 1,419 mm이다. 스프링 삽입관에 삽입하는 스프링은 스테인레스제로 스프링 직경은 1 mm, 피치는 10 mm이다.

흡수기는 7~8mmHg정도의 고진공상태에서 운전되며, 흡수기 전열관위에는 재생기에서 농축된 농용액이 용액펌프에 의해 살포되고 증발기에서

증발한 냉매증기를 흡수하여 희석된다. 이 희석된 용액은 재생기에서 다시 농용액으로 재생되어 흡수기 전열관상에 뿌려지게 된다. 한편 흡수기 내에는 35℃정도의 냉각수가 흐르는데 이 냉각수의 역할은 냉매증기가 흡수기 전열관위의 흡수용액에 흡수될 때에 발생하는 흡수열 및 혼합열을 제거하는 역할을 하며, 냉각수에 의해 제거된 열은 냉각탑에서 대기로 방출된다.

실험에 사용된 계면활성제는 n-octanol이며 물성치는 Table 2와 같다. 계면활성제의 첨가농도는 약 0.08 wt%이다.

2.2 실험방법

실험방법은 배치식으로 흡수용액의 재생과정과 흡수과정으로 나누어 실시하였다. 재생과정에서는 우선 계 전체를 진공펌프로 충분히 진공시킨 후, 희용액 탱크내의 흡수용액을 재생기, 농용액 탱크, 희용액 탱크로 순환시켜 설정농도가 될 때까지 농축하고, 발생한 수증기는 응축기에서 응축하여 냉매탱크로 보낸다. 또한, 냉매 및 냉수도 적정온도로 유지하기 위해 온도제어를 하면서 펌프로 순환시켰다. 흡수과정은 리튬브로마이드 수용액 60 wt%의 용액을 농용액 탱크에서 흡수기 상부에 보내어 시험전열관내에 액막상으로 흘리며, 냉각수를 관외로 흡수용액과 대향류로 흘려 증발기에서 발생한 냉매증기를 흡수시킨다. 흡수용액의 실험유량은 배관 내에 설치한 니들 밸브로 조정하여 흡수기 상부 헤드부에 공급하였다. 실험은 흡수용액 유량을 변화시켜가며 실시하였다. 실험개시 후 흡수용액의 흡수기 입구온도가 흡수기내 평형온도가 되도록 조정하였으며, 각부가 안정된 정상상태에 도달하였을 때 계측하였다. 물질전달계수와 셔우드수를 계산하기 위해서 흡수기 입구와 출구에 샘플링포트를 설치하였고 정확한 농도를 측정하기 위해서 굴절률계(Atago R5000, ± 0.2%)를 사용하였으며 실험결과에 사용된 농도데이타는 몇차례 실험을 거쳐 평균값을 취하였다. 본 실험에서의 실험조건을 Table 3에 나타내었다.

3. 물질전달계수의 산출

흡수과정에서의 물질전달 특성을 평가하기 위해 Fig. 2에 나타낸 것과 같은 흡수 모델을 설정하였다. 액막레이놀즈수 Re_f는 식 (1)과 같이 정의하였다.

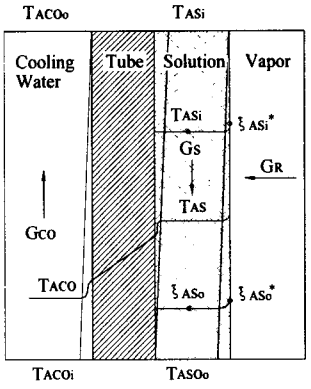

Fig. 2 Physical model of falling film absorption

$$Re_f = 4 \cdot \Gamma_s / \mu_s \tag{1}$$

$$\Gamma_s = G_s / (\pi \cdot d_i) \tag{2}$$

냉매증기와 흡수용액 사이에서의 냉매물질 이동저항은 증기공간과 기액계면사이의 저항은 무시하고, 기액계면과 흡수용액 사이만 생각하기로 한다. 유하액막에서의 기액계면은 기내압력과 평형하다고 생각하여 대수평균농도차 $\Delta\xi_{lm}$을 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$\Delta\xi_{lm} = \frac{\{(\xi_{ASi}^* - \xi_{ASi}) - (\xi_{ASo}^* - \xi_{ASo})\}}{\ln\{(\xi_{ASi}^* - \xi_{ASi})/(\xi_{ASo}^* - \xi_{ASo})\}} \tag{3}$$

여기서, ξ_{ASi}^*, ξ_{ASo}^*는 각각 유하액막 온도와 기내압력으로부터 구한 흡수기 입구, 흡수기 출구에서의 기액계면 평형농도이며, ξ_{ASi}, ξ_{ASo}는 입구, 출구에서의 실제 측정치이다.

이상으로부터 물질전달계수는 다음 식으로 산출하였다.

$$\beta = G_R / \{\rho_m \cdot \Delta\xi_{lm} (\pi \cdot d_i \cdot L)\} \tag{4}$$

ρ_m은 평균용액밀도[kg/m^3]으로 식 (5)로부터 구하였다.

$$\rho_m = (\rho_{ASi} + \rho_{ASo})/2 \tag{5}$$

셔우드수는 식 (6)으로 정의하였다.

$$Sh = \beta \cdot L_s / D_s \quad (6)$$

4. 실험결과 및 고찰

흡수식 냉난방기의 흡수기내의 증기흡수촉진방법으로 널리 이용되고 있는 계면활성제(흡수식 냉난방기에서는 n-octanol, 2에틸렌 1헥사놀이 주로 사용) 첨가는 흡수기내 증기흡수과정시에 흡수용액표면에서 열 및 물질이동이 동시에 발생하고 물질확산계수값이 열확산계수에 비하여 1/100 정도로 현저히 작기 때문에 흡수표면에서의 냉매증기 흡수로 인한 농도저하 및 흡수열의 방출로 인한 표면온도상승에 따른 포화증기압의 상승으로 증기흡수능력이 저하되는 것을 막기 위해서 일반적으로 사용되고 있다.

Fig. 3은 평활관에서의 관내경의 영향에 따른 물질전달 특성을 나타낸 것이다. 열전달 특성과는 달리 전열관 내경에 관계없이 막레이놀즈수의 증가에 따른 물질전달 특성은 거의 변화가 없거나 미소한 증가를 보이고 있다. 물질전달 특성은 열전달과는 달리 액막 두께를 얇게 하는 것만으로는 흡수능력이 증가하지 않음을 알 수 있다. 따라서 액막표면 근처가 항상 액막내의 진한 농도가 되게 액막표면에 대류를 일으키는 것이 중요하다. 계면활성제 첨가시와 무첨가시의 실험결과를 비교해 보면 물질전달의 향상률은 액막레이놀즈수에 따라 약간씩 차이는 있으나 최대 45% 였다.

이와같이 계면활성제 첨가시가 무첨가시보다 물질전달이 향상되는 이유를 알기 위해서는 마란고니 대류 발생 메커니즘을 이해할 필요가 있다.

Kashiwagi[6]에 의하면 물-리튬브로마이드 흡수실험을 통해서 표면에 존재하는 계면활성제 액적을 중심으로 그 액적주위의 액상과 기상사이의 계면에서의 흡수에 따른 계면장력변화에 기인한 마란고니 대류발생 메커니즘을 처음 제안하였다. 이 메커니즘은 흡수용액에 계면활성제를 포화용해농도 이상으로 첨가할 경우, 계면활성제는 액적의 상태로 흡수표면에 존재하게 된다. 이 상태하에서 냉매증기는 계면활성제액적을 제외한 용액표면에서 흡수가 일어나게 된다. 이로 인하여 흡수용액표면농도의 저하에 따라 표면장력은 증대하게 된다. 결과적으로 증기가 흡수되기전의 평형상태에서는 흡수용액의 표면장력과 계면활성제의 표면장력사이의 관계는 일정한 상태를 유지하나, 증기흡수가 개시되면 흡수용액 표면농도의 저하에 따른 표면장력의 증가에 기인한 흡수용액의 표면장력차이에 따라 계면활성제액적의 주변에서 마란고니대류가 발생하게 된다. 이 모델은 용해도 이상의 계면활성제가 첨가되어 표면에 계면활성제의 액적이 존재하는 계의 적용에서, 액적의 기계적 운동에 의한 표면난류 가속화 및 액적을 중심으로 한 대류 세포형성, 세포중심의 상승유동을 예측할 수 있다.

한편 Kren 등[13]에 의하면 표면에서 흡수제의 국소적인 불균일 분포가 형성되면 표면장력과 흡수제 농도간 양의 상관관계에 따라 흡수제의 표면농도가 높은 곳의 표면장력이 그렇지 않은 곳보다 크게 되어 흡수제의 표면농도가 낮은 곳에서 높은 곳으로 표면흐름이 발생하게 된다. 이렇게 발생한 표면흐름은 벌크와의 상호작용에 의해 점점 가속화되어 수직방향의 흐름을 형성하고 결과적으로 마란고니 대류가 발생한다고 보고하였다.

Fig. 4, 5, 6은 전열관의 관내면 형상이 물질전달에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 콜게이트관의 물질전달 특성은 평활관과 마찬가지로 막레이놀즈수에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 내면홈관은 막레이놀즈수의 증가에 대해 물질전달이 증가하고 있으나 스프링삽입관은 감소하고 있다. 이것은 막레이놀즈수의 증가에 따라 스프링에 의한 증기의 유동손실의 증가로 인하여 증기의 압력 강하가 훨씬 크게 나타났으며[3], 유하액막의 대류가 약해져 전열관 근처의 진한 농도의 흡수용액이 수증기를 흡수하고 있는 기액계면까지 이동되지 않기 때문이라 생각된다. 내면홈관, 콜게이트관, 스프링삽입관 모두 평활관에 비해 물질전달 특성이 향상하였으며, 흡수촉진관 가운데 스프링삽입관이 가장 물질전달 특성이 좋았다. 각종 흡수촉진관에서 물질전달 특성이 평활관보다 우수한 원인은 다음과 같은 이유때문이라 생각된다. 리튬브로마이드 수용액의 경우 물질확산계수는 열 및 운동량 확산계수에 비하여 아주 작다. 기액계면에서의 흡수과정이 발생하면 액체-증기 계면으로부터 액막 체적내부로의 농도경계층이 성장하기 시작한다.

농도경계층의 두께가 증가함에 따라 유하액막

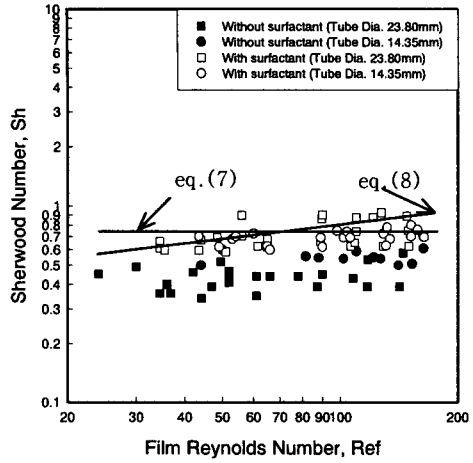

Fig. 3 Effect of film Reynolds number on the Sherwood number with bare tube

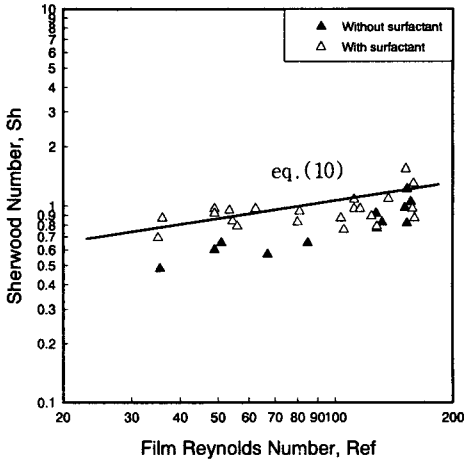

Fig. 5 Effect of film Reynolds number on the Sherwood number with grooved tube

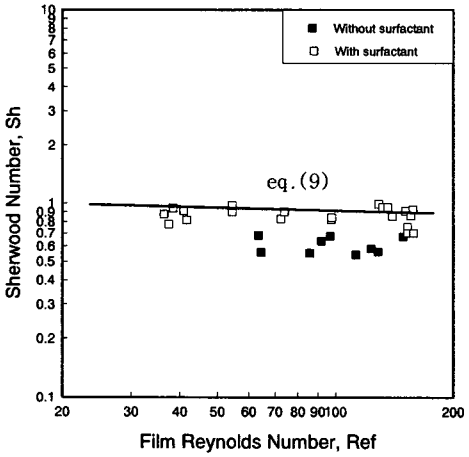

Fig. 4 Effect of film Reynolds number on the Sherwood number with corrugated tube

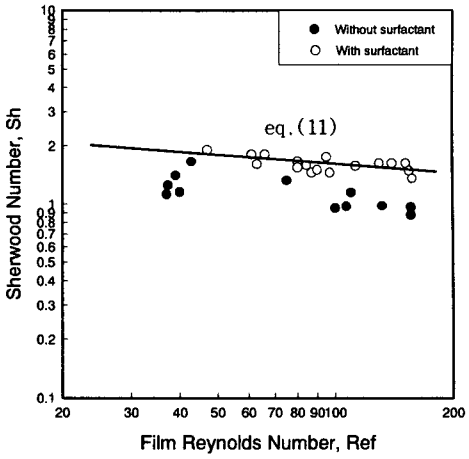

Fig. 6 Effect of film Reynolds number on the Sherwood number with insert spring tube

의 물질전달저항은 증가하여 물질전달 계수는 급격히 감소될 것이다. 이 때 흡수촉진관의 경우 관내면 형상에 의해 계면가까이의 액막유동을 교란하여 농도경계층의 성장을 저해하거나 파괴하여 그 농도구배를 증가시킴으로써 물질전달계수가 넓은 액막레이놀즈수의 범위에서 증가하는 것이라 생각된다. 각종 전열촉진관에 계면활성제를 첨가하였을 경우 물질전달계수는 그 향상율이 증가하였는데 열전달계수와 마찬가지로 계면활성제의 첨가로 인하여 무첨가때보다 용액의 표면장력의 감소 및 계면교란으로 액막의 혼합과 계면의 난류특성이 증가하여 높은 값을 나타내었다고 생각된다.

앞에서 사용한 각종 흡수촉진관 가운데 스프링 삽입관이 가장 양호한 물질전달효과가 있음이 밝혀 졌으므로 Fig. 7에서는 삽입하는 스프링의 직경을 변화시켜 물질전달에 미치는 영향을 파악하였다. 관내경이 17.6 mm, 길이가 1,119 mm인 전열관에 피치는 10 mm로 일정하지만 스프링 직경은 0.5 mm와 1.0 mm 2종류의 스프링삽입관에 대해

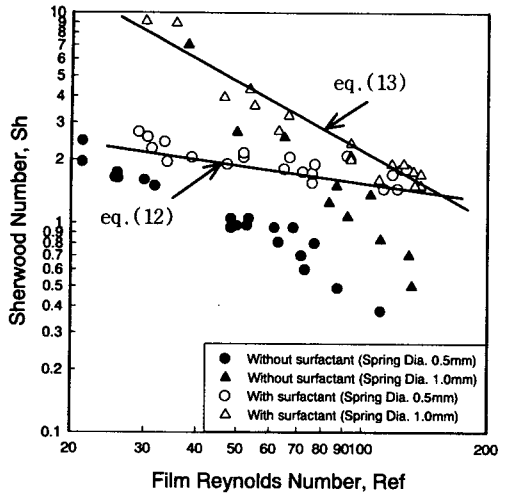

Fig. 7 Effect of film Reynolds number on the Sherwood number for different spring diameter

실험을 하였다. 그림으로부터 삽입스프링의 직경이 1.0 mm인 경우의 셔우드수가 직경 0.5 mm인 경우보다 높은 값을 나타내고 있으나 점차 그 차이는 적어지는 것을 알 수 있다. 이것은 스프링 직경이 1.0 mm인 경우가 상대적으로 낮은 용액 유량범위에서 액막 교란효과가 크기 때문이라 생각되며, 높은 유량범위에서는 스프링 직경의 차이가 액막교란에 미치는 효과가 미미하기 때문이라 생각된다. 스프링 직경에 관계없이 계면활성제를 첨가하였을 경우가 무첨가 때보다 높은 셔우드수를 나타내고 있지만 직경 1.0 mm인 경우는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이것은 스프링 삽입에 의해 액막의 교란이 이미 충분히 활발하여 계면활성제 첨가에 의한 교란 향상 효과가 그다지 크게 나타나지 않은 것이 원인이라 생각된다.

본 연구에서 실험한 평활관, 콜게이트관, 내면홈관, 스프링삽입관에 대한 계면활성제 첨가시 물질전달특성을 액막레이놀즈수의 함수로 정리하면 아래와 같다.

평활관의 경우

$$Sh = 0.623 \cdot Re_f^{0.012} \text{(내경 14.35mm)} \quad (7)$$

$$Sh = 0.370 \cdot Re_f^{0.132} \text{(내경 23.80mm)} \quad (8)$$

콜게이트관의 경우

$$Sh = 0.960 \cdot Re_f^{-0.042} \quad (9)$$

내면홈관의 경우

$$Sh = 0.318 \cdot Re_f^{0.235} \quad (10)$$

스프링삽입관의 경우

$$Sh = 5.367 \cdot Re_f^{-0.282} \quad (11)$$

$$Sh = 5.718 \cdot Re_f^{-0.267} \text{(직경 0.5mm)} \quad (12)$$

$$Sh = 382.82 \cdot Re_f^{-1.139} \text{(직경 1.0mm)} \quad (13)$$

5. 결 론

수직관 흡수기의 물질전달 특성에 미치는 계면활성제의 효과를 파악하기 위하여 관내면 형상을 변화시킨 각종 흡수 촉진관을 사용한 수증기 흡수실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 평활관의 경우 셔우드수는 막레이놀즈수의 증가에 따라 거의 변화가 없거나 미소한 증가를 보였으며, 계면활성제 유· 무 첨가시 모두 셔우드수는 액막레이놀즈수의 증가에 따라 증가함을 알 수 있었다. 계면활성제 첨가시와 무첨가시의 실험결과를 비교해 보면 액막레이놀즈수에 따라 약간씩 차이는 있으나 물질전달의 향상율은 최대 45%였다.

(2) 계면활성제 유· 무 첨가시에 흡수촉진관은 스프링삽입관, 내면홈관, 콜게이트관, 평활관의 순으로 물질전달이 향상됨을 알 수 있었다.

(3) 스프링삽입관의 물질전달특성은 스프링의 직경에 영향을 받음을 알 수 있었으며, 스프링삽입관중 스프링 직경이 큰 1.0mm인 것이 가장 양호한 물질전달효과를 나타냈다.

(4) 평활관, 콜게이트관, 내면홈관, 스프링삽입관에 대한 계면활성제 첨가시 물질전달특성을 액막 레이놀즈의 함수로 정리하였다.

참고문헌

(1) Cho, H, C., Kim, C. B., and Jeong, S. Y.,

1995, "A Study on Heat and Mass Transfer in a Vertical Tube Absorber Using LiBr Family Solutions," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 7, No. 2, pp. 196~206.

(2) Morioka, L., Kiyota, M., and Nakao, R., 1991, "Absorption of Water Vapor into a Film of Aqueous Solution of LiBr Falling Along a Vertical Pipe," *Transactions of JSME(Part B)*, Vol. 57, No. 543, pp. 3916~3920.

(3) Yoon, J. I., and Oh, H. K., and Kashiwagi, T., 1995, "Characteristics of Heat and Mass Transfer for a Falling Film Type Absorber with Insert Spring Tubes," *Transactions of the KSME B*, Vol. 19, No. 6, pp. 1501~1509.

(4) Kim, B, J., Shin, K. S., and Moon, H. S., 1998, "Improvement of Absorption Characteristics by Insert Devices in a Vertical Tube," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp. 466~474.

(5) Kim, D. H, Kim, J. K, and Cho, K. N., 2001, "Effect of Spring Spaces on the Absorption Performance in a Vertical Absorber Tube," *Proceedings of the SAREK 2001 Winter Annual Conference*, pp. 33~38.

(6) Kashiwagi. T., 1985, "The Activity of Surfactant in High-Performance Absorber and Absorption Enhancement," *Refrigeration*, Vol. 60, No.687, pp. 72~79.

(7) Kim, K. J., Berman, N. S., and Wood, B. D., 1993, "Experimental Investigation of Enhanced Heat and Mass Transfer Mechanisms Using Additives for Vertical Falling Film Absorber," *International Absorption Heat Pump Conference*, ASME, pp. 41~47.

(8) Ohm, K, C., and Kashiwagi, T., 1993, "Characteristics of Heat and Mass Transfer Inside Vertical Falling Type of Absorber," *Transactions of JSME(Part B)*, Vol. 59, No. 557, pp. 169~176.

(9) Kurosawa, S., Fujimaki, S., 1989, "Development of Air-Cooled Gas-Fired Absorption Water Chiller-Heater," *ASHRAE Transactions*, Vol. 95, Part 1, pp. 318~325.

(10) Miller, W. A., and Perez-Blanco, H., 1993, "Vertical-Tube Aqueous LiBr Falling Film Absorption Using Advanced Surfaces," *International Absorption Heat Pump Conference*, ASME, Vol. 31, pp. 185~202.

(11) Seol, W. S., Kwon, O. K., Moon, C. G. and Yoon, J. I., 2000, "Heat Transfer Enhancement with Surfactants in Horizontal Bundle Tubes on Absorber," *Transactions of the KSME B*, Vol. 24, No. 8, pp. 1097~1103.

(12) Yoon, J. I, Kwon, O. K, and Moon, C. G., 1999, "Influence of Surfactant on Heat Transfer of Air-Cooled Vertical Absorber," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 11, No. 6, pp. 740~748.

(13) Kren, Ch., Hellmann, H. M., and Ziegler, F., 1999, "Dynamic Surface Tension of LiBr-Solutions with Higher Alcohols as Heat-Transfer-Additives," *Proceedings of the International Sorption Heat Pump Conference*, pp. 375~380.