

수직관내 삽입기구에 의한 흡수특성의 향상

Improvement of absorption characteristics by insert devices in a vertical tube

김 병 주*, 신 광 섭**, 문 형 석***
 B. J. Kim, K. S. Shin, H. S. Moon

Key words : Absorption characteristics(흡수특성), Insert devices(삽입기구), Heat and mass transfer(열 및 물질전달), Non-absorbable gas(비흡수가스)

Abstract

In the present study, the improvement of absorption characteristics by installing insert devices, such as spring and wire screen, inside the vertical tube absorber were studied experimentally. Momentum, heat and mass transfer rate in the absorption process of smooth bare tube, smooth tube with spring-insert, and with wire screen-insert were compared and analysed in range of film Reynolds number of 40~200. The improvement of heat transfer rate by spring-insert and screen-insert were remarkable especially in the low Reynolds number region. As the mesh number increased in screen-insert and as the pitch decreased in spring-insert, Nusselt and Sherwood number increased. Degradation of mass transfer by non-absorbable gas showed similar qualitative trends regardless of the insert type.

기 호 설 명

A : 면적, m^2
 C : 질량농도
 c : 비열, J/kgK
 D : 물질확산계수, m^2/s
 d_h : 수력직경, m
 g : 중력가속도, m/s^2

h : 열전달계수, W/m^2K
 k : 열전도계수, W/mK
 L : 길이, m
 \dot{m} : 질량유량, kg/s
 Nu : 누셀트수
 P : 피치, m
 Q : 열전달율, W
 q'' : 열유속, W/m^2
 r : 반경, m
 Pr : 프란틀수
 Re : 레이놀즈수
 Sh : 셔우드수

* 정회원, 홍익대학교 공과대학 기계공학과

** 홍익대학교 과학기술연구소

*** 홍익대학교 대학원

T : 온도, $^{\circ}\text{C}$
 U : 열관류율, $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
 y_a : 체적농도, %

그리스문자

β : 물질전달계수, m/s
 Γ : 원주 단위길이당 질량유량, kg/ms
 μ : 점도, Ns/m^2
 ρ : 밀도, kg/m^3

하첨자

a : 흡수과정 혹은 공기
 c : 냉각수
 eq : 열역학적 평형
 f : 액막
 i : 계면
 in : 입구
 lm : 대수평균
 out : 출구
 s : 수용액
 v : 증기

1. 서 론

CFC계 냉매에 의한 오존층 파괴와 하절기의 냉방용 전력소비를 급증등에 대한 대안으로 천연 가스를 이용한 흡수식 냉·난방기구의 개발 및 보급에 대한 사회적 요구가 높아지고 있다. 흡수식 냉·난방기의 소형화 및 고효율화는 흡수과정의 성능향상을 통하여 가능하다. 흡수제에 의한 냉매의 흡수과정은 흡수식 열펌프나 특정 화학 기술분야의 핵심기술이나, 흡수성 향상을 위한 기술개발은 아직 충분히 정립되지 않고 있다.

흡수제 수용액막에 의한 냉매 증기의 흡수과정에는 열 및 물질전달이 동시에 발생한다. 유하액막식 흡수기에서의 흡수특성에 대하여 많은 실험적 연구가 수행되었다.^(1~3) 흡수율을 촉진하기 위하여 전열면상에 유하액막을 완전하게 형성하고 계면에서의 흡수과정에 따른 농도경계층의 성장을 방지

할 수 있도록 액막의 체적혼합을 유도하는 것이 필수적이다. 이를 위하여 수용액에 계면활성제를 첨가하거나⁽⁴⁾ 관의 표면을 기계적으로 가공하거나 수직관의 경우 관내에 스프링 등의 삼입기구를 설치하는 기법이 고려될 수 있다.

Hijikata 등⁽⁵⁾은 수평관 외부에서 흡수과정 중의 흡수율 촉진에 대하여 연구하였다. 나선형관, 원주방향에 핀(integral fin)을 설치한 관 그리고 물결형 핀(ridged fin)을 설치한 관의 경우에 대하여 실험한 결과 액막내의 유동교반 효과가 있는 물결형 핀을 설치한 흡수관에서 최대흡수율을 확인하였다. Hoohuku 등⁽⁶⁾은 수직관 내면에 나선형을 설치한 경우에 대하여 단위길이당 흡의 수, 산의 높이, 두께 등의 함수로 열 및 물질전달 특성을 연구하였다. 액막레이놀즈수가 100일 때 흡수율은 최대치를 나타내며 나선형이 있을 때 평활관에 비하여 1.3배 정도의 흡수율 증가 효과를 보고하였다. 그리고 Schwarzer 등⁽⁷⁾은 열 및 물질교환기로서 수직관내면에 대하여 스파이럴형의 핀을 장착한 유하액막식 교환기를 제안하였다.

윤정인 등⁽⁸⁾은 수직관내에 스프링을 삽입한 경우에 대하여 전열관의 관경, 길이, 내면형상의 차이에 따른 흡수관 내 열전달계수와 물질전달특성 그리고 증기유동에 따른 압력강하 등 일련의 실험 결과를 분석하였다. 열전달계수와 물질전달계수 모두 스프링을 삽입한 관에 있어서 크게 향상되었음을 보여주었다. 권태호⁽⁹⁾도 수직관 내에 삽입한 스프링의 굵기 및 피치가 리튬브로마이드 수용액의 수증기 흡수과정에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 스프링을 장착함에 따라 열전달율과 물질전달율이 증가하는 것을 확인하였으며 특히 낮은 액막레이놀즈수 30~60의 범위에서 그 증가율이 현저하다고 주장하였다. 이는 스프링의 장착에 의하여 수직관 내면에서 수용액 액막의 형성이 좀더 완전하여지고 수용액 액막의 내부혼합이 활발하여지기 때문으로 해석하였다.

본 연구에서는 리튬브로마이드-물 시스템의 수직관 흡수기에서 관내측에 장착된 스프링이나 철망(wire screen)의 삼입기구가 흡수과정중의 열 및 물질전달 향상에 미치는 영향을 실험적으로 연구하고자 한다. 주요 변수중 액막레이놀즈수와 냉

매증기에 포함된 비흡수가스인 공기의 농도가 흡수 전열 특성에 미치는 영향을 삽입기구의 형태의 측면에서 해석하고자 한다.

2. 실험적 연구

2.1 실험장치의 구성 및 방법

본 연구에서는 흡수과정의 실험을 위한 흡수제/냉매로 리튬브로마이드 수용액/수증기를 사용하였다. 흡수 전열 과정에 대한 실험적 해석은 Fig.1의 실험장치를 제작하여 수행하였다. 실험장치는 리튬브로마이드 수용액의 재생기, 수용액 탱크, 증발기/응축기, 흡수기 그리고 각각의 요소들을 연결하는 배관들로 구성하였다.

2.1.1 흡수기

흡수기는 상부헤더, 흡수관, 하부헤더로 구성하였다. 흡수관은 내경 13.3mm, 두께 1.3mm, 길이 1,150mm인 매끄러운 스테인레스 강관으로 제작하였다. 수증기의 흡수과정은 관 내측의 적서진 표면 상에서 발생한다. 흡수과정중 발생하는 흡수열은 관 외측의 환상공간에서 리튬브로마이드 수용액막과 반대 방향으로 유동하는 냉각수에 의해 회수되

며 환상공간을 형성하는 아크릴관은 길이 1,080mm, 두께 5mm, 그리고 내경이 20mm이다.

2.1.2 재생기

재생기는 체적이 65리터인 SUS304의 강성용기로 제작하였다. 재생기는 진공펌프에 의해 추기, 진공될 수 있도록 용접, 제작하였으며 그 체적은 2시간 이상의 실험을 수행할 수 있도록 설계하였다. 흡수제를 재생하기 위하여 용액 증발용의 카트리리지형 가열기 4개를 재생기의 하부에 설치하였다.

2.1.3 수용액 탱크

리튬브로마이드 수용액 탱크는 흡수과정 후 흡수기로부터 배출되는 수용액의 회수탱크로 체적이 47리터이며 SUS304로 제작하였다.

2.1.4 증발기

재생기에 연결된 증발기는 직경 100mm, 높이 500mm의 실린더로 플랜지에 의해 상단과 하단을 체결, 처리하였다. 흡수과정 중 필요한 수증기의 생산을 위하여 카트리리지형 잠입가열기 4개를 증발기의 하부에 설치하였다. 흡수과정 중 잠입가열기에 대한 공급전력을 조절함으로써 증기생성률을 제어하고 흡수기의 압력을 일정하게 유지하였다. 리튬브로마이드 수용액의 재생과정 중 증발기는 수증기의 보유공간에 설치된 코일내를 통과하는 냉수에 의해 응축기로서 작용한다.

2.1.5 실험방법

재생기에서 그 농도의 조정과정을 거친 리튬브로마이드 수용액은 실험시에 자기식 기어펌프, 필터, 질량유량계 그리고 유량조절용 미터링밸브를 통과한 후 흡수기 상부헤더에 공급된다. 공급된 수용액은 수직관 내면에 유하액막으로 흘러 내리면서 증발기로부터 공급되는 수증기를 흡수하고 이때 발생한 흡수열은 수직관 외측의 환상공간을 유동하는 냉각수에 의해 회수된다. 제측되는 온도, 압력등이 정상상태에 이르렀을 때 실험을 종료하며 흡수과정에서 배출된 회수액은 재생기에서의 재생과정을 통하여 다시 그 농도를 조정하였다. 흡수제인 수용액속에는 일반적으로 미소량의 비흡수가스가 용해되어 있으며 이는 계의 압력이 감소하거나 수용액의 온도가 증가할 때 수용액 외부로 배출된다. 그러므로 수용액이 흡수기 관벽에 액막의 형태로 흘러 내릴 때 용해된 비흡수가스는 계

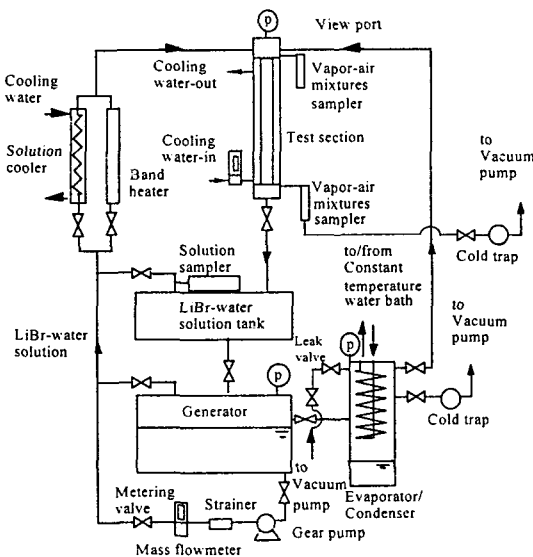


Fig.1 Experimental setup for the absorption process of water vapor into aqueous LiBr solution film

면을 통해 방출될 수 있으며 부식에 의한 비흡수 가스의 생성과 함께 흡수 시스템 실험장치를 구성하는 배관의 연결부에서 외부공기의 미소 누설도 가능하다. 결국 흡수과정의 실험에 있어 실험시간에 비례하여 흡수기 내의 비흡수가스 체적농도가 시간에 따라 증가하는 문제점이 발생한다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고 정상상태조건을 성립시키기 위하여 증발기의 수증기 출구에 공기 누설변을 설치하여 원하는 공기의 체적농도에 따라 일정유량의 외부 공기를 유입시켜 수증기와 함께 흡수기에 공급되도록 하였다. 그리고 실험 중 흡수기 하부에 연속 추기장치를 구성하여 지속적인 추가를 실시하여 실험 중 발생하는 비흡수가스와 공급된 공기를 제거하였다.⁽¹⁰⁾

2.1.6 계측 및 자료처리

흡수과정에 유입, 유출되는 수용액은 흡수기의 입·출구에 설치된 채취구로부터 추출하여 밀도계와 비중병에 의해 그 밀도를 측정하며 온도도와 함께 농도를 계산할 때 사용하였다. 재생기, 증발기 그리고 흡수기의 압력은 컨택트론 계기와 캐패시턴서 계기에 의해 측정하였다. 비흡수가스의 체적분율은 냉매-공기 혼합가스를 포집한 샘플러를 드라이 아이스를 응결제로 사용한 용기에서 -70°C 이하로 냉각하여 샘플러속의 수증기 전체를 응결시켰을 때 측정되는 온도 및 압력자료를 채취시의 자료와 비교하여 계산하였다. -70°C 이하로 혼합기체중 수증기를 응결시키면 수증기의 부분압이 공기의 부분압에 비해 무시할 수 있을 만큼 작아진다. 그러므로 응결전의 수증기-공기 혼합물의 온도 및 압력을 T_1 및 p_1 , 응결후의 값을 T_2 및 p_2 라고 할 때, 응결전의 흡수기내 공기의 체적농도는 이상기체의 거동으로 가정하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_a = \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} \quad (1)$$

2.1.7 실험조건

본 실험의 조건 및 범위는 Table 1과 같다. 유입되는 용액의 유량은 액막레이놀즈수 40~200의 범위이며, 이 구간에서 액막의 구조는 층류 혹은 파형-층류이다. 수직관내에 설치된 삽입기구는 스테인레

Table 1 Range of experimental conditions

	Parameters	Range
Absorption tube(SUS)	Inner Diameter(mm)	13.3
	Length(mm)	1,150
	Pressure(mmHg)	8.0
Coolant	Temperature($^{\circ}\text{C}$)	25
	Flowrate(l/min)	1.2
LiBr-Water Solution	Temperature($^{\circ}\text{C}$)	35
	Flowrate(kg/min)	0.1~0.6 (Re=40~200)
	Concentration(%)	55
Air	Volumetric	0.3~6.0
	Concentration(%)	
Spring (SUS)	Diameter(mm)	0.4
	Pitch(mm)	1.0, 3.5
Screen Wire (SUS)	Diameter(mm)	0.4
	Mesh no.	40, 320

스강으로 제작된 스프링과 철망으로 그 탄성을 이용하여 수직관 내벽에 충분히 접촉하도록 장착하였다. 스프링과 철망은 그 나선 직경이 동일하고 스프링의 피치와 철망의 나선이 형성하는 정사각형 격자의 변 길이가 동일하게끔 선택하였다. 즉 체수 40인 경우의 철망에서 정사각형 격자의 한 변의 길이는 3.5mm이고 320의 경우 1mm이며 이와 비교할 수 있도록 스프링의 피치도 3.5mm와 1mm인 경우를 선택하였다.

3.2 열 및 물질전달에 대한 해석

흡수과정에 영향을 미치는 요소에는 여러 가지가 있으며 이들은 흡수율만이 아니라 열 및 물질전달의 기구까지도 결정하게 된다. 유체의 물리적 상태량 중 열 및 물질확산계수 그리고 유동양식(층류, 파동류, 난류) 등이 액체/증기 계면에서의 열 및 물질전달율에 영향을 미치게 된다. 흡수제와 냉매의 열역학적 평형상태량, 즉 온도, 압력, 평형 조성비 그리고 흡수열 등이 상대적으로 열전달 및 물질전달을 결정하게 된다. 또한 계면에서의 국소 불안정성과 표면장력에 의한 2차유동특성, 부력, 그리고 관벽의 열전달 등도 흡수과정에 영향을 미

치게 된다. 따라서 흡수과정에서는 이와같은 요인들이 서로 중복적으로 영향을 미치며 각각의 기여도는 운전조건에 따라서 변하게 된다.

스프링이나 철망등의 삽입기구가 장착된 수직관 내의 유하액막에 대한 개념도가 Fig.2에 나타나 있다. 유하액막은 냉매증기-비흡수가스의 혼합가스와 함께 하향유동하며 관벽 외부의 환상공간으로 냉각수가 반향류로 상향유동하고 있다.

흡수과정 중 냉각수로의 열전달율은 흡수기 입·출구에서 냉각수의 온도와 냉각수 유량에 의해 다음과 같이 계산되며

$$Q = \dot{m}_c c_{pc} (T_{c,out} - T_{c,in}) = UA \Delta T_{lm} \quad (2)$$

여기서 대수평균온도차 ΔT_{lm} 은 다음과 같다.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{f,in,eq} - T_{c,out}) - (T_{f,out,eq} - T_{c,in})}{\ln \left(\frac{T_{f,in,eq} - T_{c,out}}{T_{f,out,eq} - T_{c,in}} \right)} \quad (3)$$

흡수과정의 열관류율은 냉각수의 대류열전달계수와 수용액막의 대류열전달계수로부터 다음과 같이 산정된다.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_f A_f} + \frac{1}{h_c A_c} + \frac{\ln(r_c/r_f)}{2\pi kL} \quad (4)$$

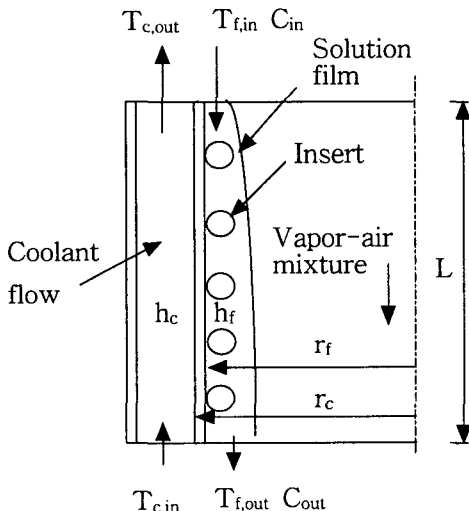


Fig.2 Schematic picture of falling film inside a vertical tube with insert

수용액막의 열전달계수의 산정을 위하여 요구되는 냉각수측의 누셀트수는 입구영역의 영향을 고려한 다음의 상관식을 사용하였다.⁽¹¹⁾

$$Nu_c = 0.325 Re_0^{0.5} Pr_c^{0.33} \frac{d_h^{0.055}}{L} \quad (5)$$

여기서 d_h 는 환상공간의 수력직경으로서 환상공간의 외경과 내경의 차이이고 L은 길이이다. 흡수과정 중 액막의 열전달 특성을 대변하는 누셀트수는 다음과 같이 정의된다.

$$Nu_f = \frac{h_f L_s}{k_s} \quad (6)$$

여기서 특성길이 L_s 는 다음과 같다.

$$L_s = \left[\frac{\mu_s^2}{\rho_s^2 g} \right]^{1/3} \quad (7)$$

흡수과정중 수증기의 흡수율은 수용액의 질량보존으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{m}_a = \dot{m}_f \left(\frac{C_{in}}{C_{out}} - 1 \right) \quad (8)$$

유하액막에서 액체/증기 계면은 흡수기내에서 용액의 압력 및 온도에 따라 결정되는 열역학적 평형 상태이다. 계면에서 물의 밀도(ρ_i)와 유하액막의 물의 체적평균 밀도(ρ)에 의하여 흡수기의 대수평균밀도차($\Delta \rho_{lm}$)는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta \rho_{lm} = \frac{(\rho_{in,i} - \rho_{in}) - (\rho_{out,i} - \rho_{out})}{\ln \left(\frac{\rho_{in,i} - \rho_{in}}{\rho_{out,i} - \rho_{out}} \right)} \quad (9)$$

유하액막에 의한 흡수과정의 물질전달계수는

$$\beta_f = \frac{\dot{m}_a}{\Delta \rho_{lm} A} \quad (10)$$

이며 셔우드수는 다음과 같이 정의된다.

$$Sh_f = \frac{\beta_f L_s}{D_s} \quad (11)$$

수용액막의 열 및 물질전달에 대한 누셀트수와

서우드수는 수용액막의 레이놀즈수의 함수이다.^(1,2)

$$Re_f = \frac{4\Gamma}{\mu} \quad (12)$$

여기서 Γ 는 단위 원주길이당 수용액막의 질량유량이다.

3. 결과 및 고찰

유하액막의 열 및 물질전달은 수용액의 유량과 온도 및 농도, 시스템의 압력, 그리고 흡수기 내면의 기하학적 형상에 크게 의존한다. 본 연구의 목적이 흡수과정의 열 및 물질전달에 있어서 흡수기 내면에 장착된 스프링 및 철망의 삽입기구가 흡수특성에 미치는 영향을 해석하는 것이므로 용액의 질량 유량, 흡수기에 장착한 스프링과 철망의 삽입기구 형태, 그리고 비흡수가스인 공기의 체적농도를 실험범위 내에서 독립변수로 선택하였으며 나머지 조건은 일정하게 유지하였다.

수직관내벽에서 유하액막의 완전한 형성은 액막 레이놀즈수 50이하에서 불가능한 것으로 알려져 있다. Fig.1과 같이 수직관 흡수기의 상부에 관측창을 설치하여 흡수기 입구부근의 영역에서 유하액막의 형성정도를 육안으로 확인할 수 있었으나 하류영역은 확인할 수 없었다. 본 연구에서는 실험장치에 존재할 수 있는 비흡수가스의 농도를 낮추기 위하여 주기적으로 수용액을 가열, 추기하는 등 여러 가지 방법을 시도하였으나 본 실험에서 도달할 수 있는 비흡수가스의 최소 체적농도는 0.3%이었다.

Fig.3은 비흡수가스의 체적농도 0.3%에서 나관과 스프링 및 철망 삽입기구를 장착한 경우 흡수기의 열유속에 대한 액막레이놀즈수의 영향을 보여주고 있다. 수용액막의 수증기 흡수현상은 리튬브로마이드 수용액의 수증기 분압과 수증기-공기 혼합가스의 수증기 분압의 차이에 의해서 발생한다. 리튬브로마이드 수용액의 수증기 분압이 가스 중의 수증기 분압보다 낮을 때 gas와 액막사이의 계면을 통하여 냉매인 수증기가 리튬브로마이드 수용액 내로 흡수된다. 본 실험의 범위내에서 열유속은 평활관보다 삽입기구를 장착한 관이 높게 나

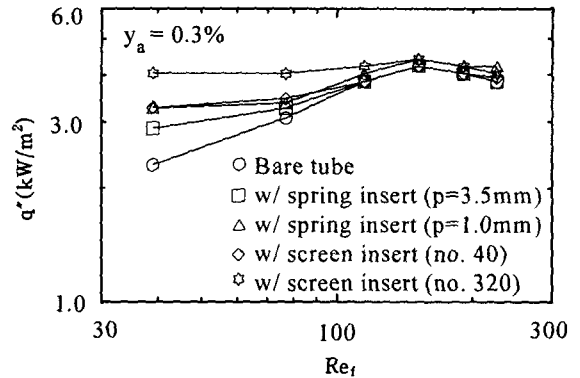


Fig.3 Effects of film Reynolds number on heat flux

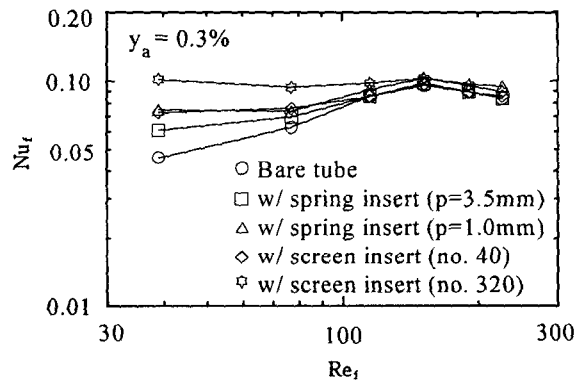


Fig.4 Effects of film Reynolds number on the Nusselt number

타났다. 특히 낮은 수용액 유량에서 열유속의 향상 효과가 현저하게 나타났으며 액막레이놀즈수가 40일 때 평활관에 비하여 스프링 삽입관은 40%, 그리고 철망 삽입관은 최대 75%까지 증가함을 알 수 있다. 이는 철망 삽입관의 경우 철망에 의한 모세관 효과로 수직관 내벽에 대한 액막의 형성이 용이하여 실질적인 액막과 관벽사이의 열전달면적이 증가하기 때문으로 고려된다. 그러나 나관의 경우에도 액막의 형성이 완전할 것으로 예측되는 액막레이놀즈수 약 150이상인 경우 삽입기구에 의한 촉진효과는 아주 미약하며 액막이 두꺼워지므로 열전달 저항이 증가하여 열유속이 도리어 감소함을 알 수 있다. 액막의 레이놀즈수가 40에서 100사이인 경우 관내 삽입기구의 조밀도에 따라 열유

속은 거의 선형적으로 증가하고 있다.

Fig.4는 액막레이놀즈수가 액막의 누셀트수에 미치는 영향을 각 관형에 대하여 보여주고 있다. 액막의 누셀트수는 액막의 대류열전달 계수와 특성길이에 의해 정의된다. 수용액이 흡수기내를 통과할 때 액막의 형성도와 액막내 열 경계층의 성장 정도에 따라 수용액막의 열전달계수와 누셀트수는 결정될 것이다. 대부분 관의 경우 액막레이놀즈수가 150일 때 누셀트수는 최대치를 나타내며 삽입기구가 장착되었을 때 그 조밀도에 따라 낮은 액막레이놀즈수에서 나관의 경우보다 높은 값을 보여주고 있다. 체수가 320인 철망 장착관의 경우 누셀트수는 액막레이놀즈수 40에서 나관에 비하여 2배이상의 높은 값을 보여주고 있다. 액막레이놀즈수 약 150이상인 경우 나관의 경우에도 액막의 형성이 완전하며 이 때 수직관내 삽입기구는 액막의 유동을 교란하여 난류 발생을 촉진하여 열전달특성을 향상시킬 수 있을 것으로 예측된다. 그러나 Fig.4는 이에 의한 향상효과가 거의 미미함을 보여주고 있다. 본 실험의 경우 채택한 삽입기구의 나선 직경은 액막레이놀즈수 120에서 예상되는 액막의 두께와 유사하다. 결국 열전달의 경우 리튬브로마이드 수용액의 열확산계수가 크고 액막두께가 얇아 열경계층이 충분히 발달되어 있을 것이므로 삽입기구에 의한 경계층의 파괴효과는 상대적으로 작을 것으로 추측된다.

Fig.5는 흡수과정시 흡수질량유속에 대한 액막레이놀즈수의 영향을 각 관에 대하여 비교한 것이다. 열유속의 경우와 유사하게 삽입기구를 장착함에 따라 흡수유속이 증가함을 알 수 있다. 흡수유속은 본 연구에서 취한 액막레이놀즈수의 전 범위에서 나관, 스프링 삽입관, 철망 삽입관의 순으로 증가하며 조밀도가 클수록 증가하였다. 흡수질량유속의 증가율은 낮은 액막레이놀즈수에서 가장 크다. 액막레이놀즈수 40에서 나관을 기준으로 한 흡수질량유속의 증가율은 스프링 장착관의 경우 76%까지, 그리고 철망 장착관의 경우 최대 85%까지 증가하였다. 열유속의 경우와는 달리 본 실험에서 채택한 액막레이놀즈수의 전 범위에서 흡수질량유속은 삽입기구 장착관이 나관에 비하여 크게 나타나고 있다. 이는 특히 액막레이놀즈수 110이상의

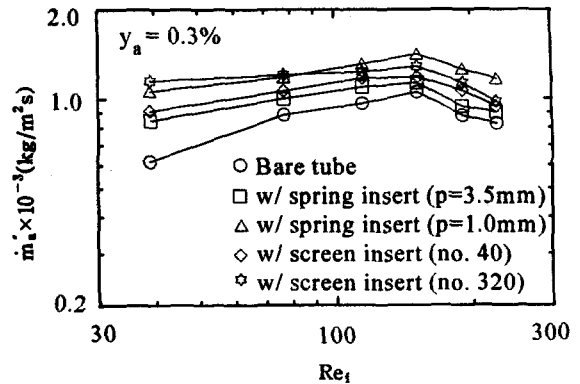


Fig.5 Effects of film Reynolds number on absorption mass flux

경우에서 Fig.3과 비교하여 보면 쉽게 알 수 있다. 리튬브로마이드 수용액의 경우 물질확산계수는 열 및 운동량 확산계수에 비하여 아주 작다. 계면에서의 흡수과정이 발생하면 액체-증기 계면으로부터 액막 체적내부로의 농도경계층이 성장하기 시작한다. 농도경계층의 두께가 증가함에 따라 유해액막의 물질전달저항은 증가하여 흡수질량유속을 급격히 감소시킬 것이다. 이 때 관내 삽입기구는 계면 가까이 액막유동을 교란하여 농도경계층의 성장을 저해하거나 파괴하여 농도구배를 증가시킬 것으로 예측된다. 열경계층의 경우 완전 발달된 경계층을 교란하므로 온도구배의 증가 효과가 상대적으로 작은 데 비하여 농도경계층의 경우에는 성장 도중에 경계층을 파괴하여 그 농도구배를 증가시킴으로써 흡수질량유속이 넓은 액막레이놀즈수의 범위에서 증가할 수 있을 것이다. 특히 낮은 액막레이놀즈수의 영역에서 삽입기구는 액막의 형성과 계면교란을 동시에 유도하므로 물질전달 특성의 향상은 아주 클 것이다. 그러나 액막레이놀즈수가 150이상 이 되면 액막두께에 의한 열전달 저항이 증가하므로 흡수질량유속은 감소하게 된다.

Fig.6은 흡수과정시 리튬브로마이드 수용액막의 셔우드수에 대한 액막레이놀즈수의 영향을 각 관에 대하여 비교한 것이다. 셔우드수는 흡수과정중의 물질전달계수와 수용액막의 특성길이, 그리고 수용액의 물질확산계수에 의해 계산된다. 셔우드수는 나관의 경우 낮은 유량 영역에서 유량의 증가에 따라 급격히 증가하나 삽입기구가 장착된 관의

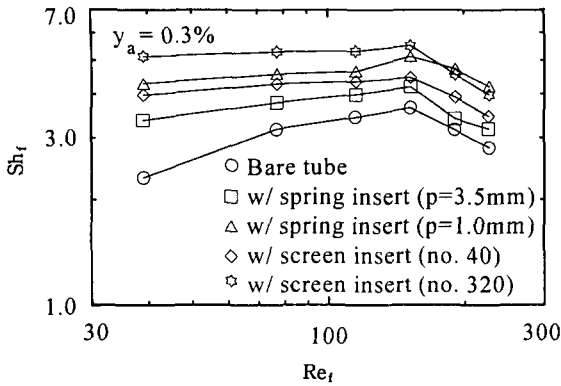


Fig.6 Effects of film Reynolds number on the Sherwood number

경우 그 조밀도가 클수록 거의 일정한 값을 보여 주고 있다. 액막레이놀즈수 40에서 셔우드수는 나관에 비하여 스프링 장착관은 85%, 철망 장착관은 120% 증가하였다. 삽입기구에 의한 셔우드수의 증가특성은 높은 액막레이놀즈수의 영역에서도 확인할 수 있으며 그 물리적 이유는 Fig.5에서 제시한 내용과 동일할 것이다. 본 연구의 실험조건인 경우 최대 흡수특성을 나타내는 최적 액막레이놀즈수는 약 150정도이며 이에 대한 삽입기구의 영향은 없음을 알 수 있다. 윤정인 등⁽⁸⁾은 스프링 삽입관의 경우 스프링의 피치에 따라 물질전달계수가 액막레이놀즈수에 대하여 일관되게 증가하거나 혹은 감소하는 상반된 결과를 제시하였다. 그러나 본 연구의 결과에 의하면 물질전달의 정량적 특성은 삽입기구의 피치나 조밀도에 따라 다를 수 있으나 정성적 특성은 유사할 것으로 고려된다.

Fig.7은 흡수과정시 흡수기에서 발생하는 압력구배를 나타낸 것이다. 흡수기의 압력구배는 냉매의 유동에 의한 마찰 압력구배이다. 모든 종류의 관에서 액막레이놀즈수가 증가함에 따라 압력구배는 증가함을 알 수 있다. 삽입기구 장착시 이에 의한 증기유동의 저항이 커지므로 압력구배는 나관, 스프링 삽입관, 철망 삽입관의 순으로 증가하였다. 피치가 1mm인 스프링 삽입관이나 체수 40, 320의 철망 삽입관은 나관에 비하여 압력구배가 2.5~4배까지 증가하며 거의 유사한 압력구배특성을 보여주고 있다. 철망 삽입관의 경우 높은 수용액 유량에서 압력구배가 아주 크므로 요구되는 증발기의 압

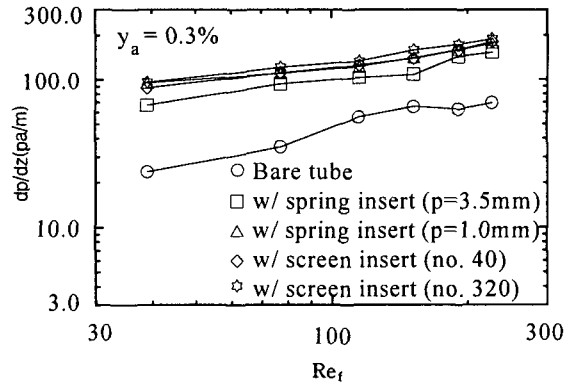


Fig.7 Effects of film Reynolds number on pressure gradient

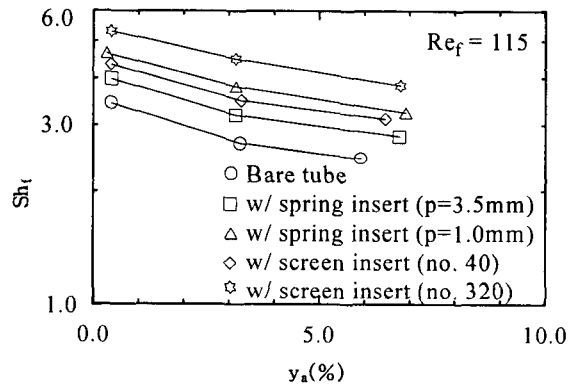


Fig.8 Effects of volumetric concentration of air on the Sherwood number

력을 고려할 때 실용적인 흡수기로 채택될 수 있는 가능성이 작다. 그러나 낮은 수용액유량에서 높은 전달특성을 나타내므로 철망 삽입관을 낮은 액막레이놀즈수에서 운전한다면 효과적인 것이다.

Fig.8은 액막레이놀즈수 115의 경우 흡수과정시 셔우드수에 대한 비흡수가스인 공기의 영향을 각 관에 대하여 나타낸 것이다. 비흡수가스는 순수 냉매증기에 미소 첨가된 경우 흡수특성을 급격히 감소시키는 것으로 알려져 있다.⁽¹²⁾ 비흡수가스인 공기의 체적농도가 증가함에 따라 물질전달 특성을 대변하는 셔우드수가 감소함을 알 수 있다. 공기의 체적농도가 0.3%에서 6%로 증가할 때 셔우드수의 감소율은 나관에서 28%, 스프링 삽입관에서 30%, 철망 삽입관에서 28%로 측정되어 정성적이고 정

량적인 감소특성이 거의 유사함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수직관 흡수기에서 관내측에 장착된 스프링이나 철망의 삽입기구가 흡수과정중의 열 및 물질전달 향상에 미치는 영향을 액막레이놀즈수의 함수로 실험적으로 연구하였다.

1) 삽입기구에 의해 열유속은 낮은 용액유량 영역에서 현저히 증가하였으나 흡수질량유속은 전유량영역에서 증가하였다.

2) 나관, 스프링 삽입관, 철망 삽입관의 순으로 전달특성이 향상하였으며 삽입기구의 조밀도가 높을수록 증가하였다.

3) 최대 물질 전달특성을 나타내는 최적 액막레이놀즈수는 삽입기구에 무관하게 약 150정도이다.

4) 흡수특성에 대한 비흡수가스의 저해효과는 삽입기구에 무관하다.

후 기

본 연구는 포항공과대학교 첨단유체공학연구센터의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Cosenza, F. B., and Vliet, G. C., 1990, "Absorption in falling water/LiBr films on horizontal tubes", ASHRAE Transactions, Vol. 96, Part I, pp. 693~701.
- Ohm, K. C., and Kashiwaki, 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.
- Kim, B. J., and Kang, I. S., 1995, Absorption of water vapor into wavy-laminar falling film of aqueous lithium bromide, KSME Journal, Vol. 9, No. 1, pp. 115~122.
- Kashiwagi, T., Kurosaki, Y., and Shishido, H., 1985, "Enhancement of vapor absorption into a solution using the marangoni effect", Transactions of JSME(Part B), Vol. 51, pp. 1002~1009.
- Hijikata, K., Lee, S. K., and Nagasaki, T., 1992, "Water vapor absorption enhancement in LiBr/H₂O films falling on horizontal tubes", Transactions of JSME (Part B), Vol. 58, No. 547, pp. 243~248.
- Hoochuku et al., 1993, "Study on the vertical heat transfer tube as an absorber", Proc. 27th Japanese Joint Conf. on Air-Conditioning and Refrigeration, Tokyo, pp. 101~104.
- Schwarzer, B.P, Rahbar, M.S., and Legoff, P., 1993, "A spiral fin tube : a novel type of falling film heat and mass exchanger", AES-Vol. 31, Int. Absorption Heat Pump Conf. pp. 179~183.
- 윤정인, 오후규, Takao Kashiwagi, 1995, "스프링 삽입형 유해액막식 흡수기의 열 및 물질전달특성", 대한기계학회논문집, 제19권, 제6호, pp. 1501~1509.
- 권태호, 1997, 스프링 삽입형 수직관 흡수기의 열 및 물질전달특성, 석사학위논문, 홍익대학교
- Ameel, T. A., 1991, Non-absorbable gas effects on heat and mass transfer in falling film absorption, Ph.D. Dissertation, Arizona State University."
- 이찬우, 1997, 수직관내 리튬브로마이드 수용액막의 흡수과정에 대한 비흡수가스의 영향, 박사학위논문, 홍익대학교
- Yang, R., and Wood, B. D., 1993, "Experimental study for heat and mass transfer in wavy film absorption with the presence of non-absorbable gases", Chem. Eng. Comm, Vol. 125, pp. 77~90.