

수직관내 리튬브로마이드 수용액막의 흡수과정에 대한 비흡수가스의 영향 (1) — 실험적 연구 —

김 병 주* · 이 찬 우**
(1997년 9월 19일 접수)

Effects of Non-Absorbable Gases on the Absorption Process of Aqueous LiBr Solution Film in a Vertical Tube (I) — Experimental Studies —

Byong Joo Kim and Chan Woo Lee

Key Words : Absorption Process(흡수과정), Falling Film(유하액막), Non-Absorbable Gases
(비흡수가스), Heat and Mass Transfer(열 및 물질전달)

Abstract

Among the heat/mass exchange units composing an absorption system, the absorber, where the refrigerant vapor is absorbed into the liquid solution is the one least understood. In the present study, the effects of non-absorbable gas on the absorption process of aqueous lithium bromide solution falling film inside a vertical tube were experimentally investigated. In the range of film Reynolds number of 30~195, heat and mass transfer characteristics were investigated as a function of non-absorbable gas volumetric concentration, 0.2~20%. An increase of non-absorbable gas volumetric concentration degraded the mass transfer rate dramatically in the absorption process. The reduction of mass transfer rate was significant for the addition of small amount of non-absorbable gas to the pure vapor. At film Reynolds number of 130, an increase of non-absorbable gas concentration from 0.2 to 6.0% resulted in the decrease of mass transfer rate by 36% and 20% of non-absorbable gas by 59%. However the decrease of film Nusselt number with the increase of volumetric concentration of non-absorbable gas was relatively smaller than the decrease of Sherwood number. Critical film Reynolds number was identified to exist for the maximum heat and mass transfer regardless of the volumetric concentration of non-absorbable gases.

기호 설명

A : 면적

c_p : 정압비열

C : 액막내 물성분의 질량농도

D : 물질확산계수

d_h : 환상유로의 수력직경

g : 중력가속도

h : 열전달계수

k : 열전도계수

L_f : 특성길이

*회원, 홍익대학교 공과대학 기계공학과

**회원, 홍익대학교 대학원 기계공학과

l : 길이
 m : 질량유량
 Nu : 누셀트수 ($=hL/k$)
 Pr : 프란틀수
 q : 열전달율
 r : 반경
 Re : 레이놀즈수 ($=4\Gamma/\mu$)
 Sh : 셔우드수 ($=\beta L/D$)
 T : 온도
 U : 열관류율
 y_a : 공기-수증기 혼합가스에서 공기의 체적농도

그리스문자

β : 물질전달계수
 Γ : 원주길이 당 질량유량
 μ : 점도
 ν : 동점성계수
 ρ : 밀도

상첨자

$''$: 단위 면적 당
 $*$: 열역학적 평형상태

하첨자

a : 공기
 c : 냉각수
 f : 수용액막
 in : 입구
 lm : 대수평균
 out : 출구

1. 서 론

최근 들어 하절기 냉방용 전력 소비율이 급증하여 하절기 전력 수급의 불균형이 국가적, 사회적인 문제로 대두되고 있다. 한편 날로 심각하여지는 환경 오염 문제는 국제적인 규제로 나타나고 있으며 특히 지구 오존층 파괴를 유발하는 CFC계 냉매에 의한 냉방설비의 운전은 크게 제한되고 있다. 이에 대한 대처 방안으로 가스 흡수식 냉·난방기는 가스사용의 계절적 불균형을 해소하고 하절기 전력소비를 완화할 수 있으므로 많은 관심의 대상이 되고 있다. 또한 흡수식 냉·난방기에서 냉매를 물로 사용할 경우에는 기존 냉방기기의 CFC냉매에 의한

오존층 파괴를 방지할 수 있으므로 환경보호의 측면에서도 유리하다.

흡수식 냉·난방기의 고효율화를 위한 흡수과정의 성능 향상은 수용액의 냉매 흡수과정에 대한 열 및 물질전달의 기초지식을 필요로 한다. 특히 리튬브로마이드-물 시스템의 경우 외부 공기의 유입 등에 의한 비흡수가스는 흡수율을 크게 저하시키는 요인으로 그 영향이 크나 흡수과정중 열 및 물질전달에 미치는 정상적인 특성을 제시하는 기초 연구 자료는 극히 제한되어 있다.

흡수과정에서 비흡수가스의 영향은 물질전달 과정을 방해한다는 면에서 응축과정에서의 비응축가스와 유사하나 이 두 과정 사이에는 근본적인 차이가 있다. 흡수과정의 경우 흡수제 용액 액막은 흡수제 뿐만 아니라 냉매도 포함하고 있으므로 열전달만이 아니라 물질전달에 대한 저항의 역할을 수행한다. 그리고 흡수과정에서 가스-액막 계면의 평형조건은 응축의 경우와 같이 포화온도와 압력의 함수일 뿐만 아니라 계면에서 물질전달에 의해 결정되는 흡수용액의 농도에 의해 결정된다. 증기의 응축과정에서 비응축가스의 영향에 관한 실험 및 이론적 연구는 아주 다양하게 발표되고 있으나^(1,2) 흡수과정에서 비흡수가스의 영향에 관한 연구내용은 상대적으로 제한되어 있다.

Burdukov 등⁽³⁾은 수평관군에 의한 리튬브로마이드 수용액의 수증기 흡수과정에서 비흡수가스의 영향을 분석하였으나 실험자료의 부족으로 이에 대한 신뢰도는 낮다. Cosenza와 Vliet⁽⁴⁾은 공기의 체적농도가 0.1% 이하로 유지될 때 흡수과정의 열 및 물질전달에 대한 영향은 2% 이하인 것을 밝혔다. Vliet과 Cosenza⁽⁵⁾은 수평관 외측의 리튬브로마이드 수용액막의 흡수과정에서 5% 정도의 비흡수성 가스가 열 및 물질전달율을 1/2 이하로 감소시킨다는 것을 확인하였다. Vliet과 Chen⁽⁶⁾은 수평관군의 흡수기를 수직 평행관군의 흡수기로 이상화하여 해석하고 비흡수가스가 정제될 수 있는 영역은 일반적으로 흡수기의 중간부분이라고 주장하였다.

Ameel과 Wood⁽⁷⁾은 태양열을 이용한 개방형 흡수식 냉방시스템에 적용하기 위하여 수직관 외측에서 리튬브로마이드 수용액막의 흡수과정에 대한 공기의 영향을 연구하였으며 액막레이놀즈수가 60인 조건에서 공기의 체적농도가 0%에서 10%로 증가할 때 흡수율은 45% 감소함을 관찰하였다. Yang과 Wood⁽⁸⁾은 LiCl-H₂O 시스템에서 수직관의 외면

에 형성된 층류/파동류액막의 흡수과정중 공기의 농도가 5%에서 15%로 증가할 때 액막레이놀즈수가 50인 경우 흡수율은 50% 감소하고 액막레이놀즈수가 150인 경우에는 15% 감소함을 밝혔다.

본 연구에서는 수직관내 면에서 리튬브로마이드 수용액 유해액막의 수증기 흡수과정 중 열 및 물질전달에 대한 비흡수가스의 영향을 실험적으로 연구하였다. 실제의 흡수식 시스템의 경우 비흡수가스의 체적농도는 3% 미만일 것으로 추측되나 비흡수가스의 영향을 포괄적으로 해석하기 위하여 본 연구에서는 액막레이놀즈수 30~195의 범위에서 열 및 물질전달계수를 비흡수가스의 체적농도 0~20%의 함수로 해석하였다. 본 연구의 결과는 흡수식 시스템에 대한 기초적 이해를 높이고 흡수식 시스템의 안전하고 효율적인 운전 조건과 최적 설계에 대한 기준으로 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험적 연구

2.1 실험장치의 구성 및 방법

본 연구에서는 흡수과정의 실험을 위한 흡수제/냉매는 리튬브로마이드 수용액/수증기이며 비흡수가스로는 공기가 사용되었다. 실제 시스템에 존재하는 비흡수가스에는 외부로부터 시스템으로 누입

되는 공기를 비롯하여 부식과정에서 발생하는 수소 성분도 포함되어 있다. 그러나 흡수과정에 대한 이들의 영향은 물질전달 저항체로서 동일하므로 대표적으로 공기를 비흡수가스로 취하였다. 흡수전열과정에 대한 해석은 Fig.1의 실험장치를 제작하여 수행하였다. 실험장치는 리튬브로마이드 수용액의 재생기, 수용액 탱크, 증발기/응축기, 흡수기, 그리고 각각의 요소들을 연결하는 배관들로 구성되어 있다.

흡수기: 흡수기는 상부헤더, 흡수관, 하부헤더로 구성되었다. 흡수관은 내경 13.3 mm, 두께 1.3 mm, 길이 1150 mm인 매끄러운 강관으로 제작되어 있다. 수증기의 흡수과정은 관 내측에 형성되는 유해액막상에서 발생한다. 흡수과정 중 발생하는 흡수열은 관 외측의 환상공간에서 리튬브로마이드 수용액막과 반대방향으로 흐르는 냉각수에 의해 회수되며 환상공간을 형성하는 아크릴관은 길이가 1080 mm, 두께 5 mm, 그리고 내경이 20 mm이다. 흡수기에 유입하는 리튬브로마이드 수용액은 먼저 흡수기의 상부헤더에 모인 다음 흡수관의 내면에 액막의 형태로 흘러내린다. 흡수과정에 필요한 수증기와 비흡수가스인 공기의 혼합가스는 증발기로부터 흡수기의 상부로 공급된다. 흡수과정에 의해 회색된 수용액은 흡수기의 하부헤더에 모인 다음 수용액탱크로 보내어 진다. 흡수과정후 배출되는 수증기-공기의 혼합가스는 흡수기 하부에 설치되어 있는 추기라인을 통하여 추기펌프로 추출된다.

재생기: 재생기는 체적이 65리터인 SUS304의 강성용기로 제작되었다. 재생기는 진공 펌프에 의해 추기, 진공될 수 있도록 용접, 제작 되었으며 그 체적은 3시간 이상의 실험을 batch형으로 수행할 수 있도록 설계되었다. 흡수제의 농도화를 위하여 수용액 증발용의 카트리지형 가열기(1kW) 4개가 재생기의 하부에 설치되어 있다. 흡수과정에 공급되는 리튬브로마이드 수용액의 온도는 재생기에 설치된 가열기와 유로에 설치된 밴드가열기에 의해 조정된다.

수용액 탱크: 리튬브로마이드 수용액탱크는 흡수과정 후 흡수기로부터 배출되는 수용액의 회수탱크로 체적이 47리터이며 SUS304로 제작되었다.

증발기: 재생기와 연결된 증발기는 직경 150 mm, 높이 500 mm의 실린더로 흡수과정 중 필요한 수증기의 생산시 작동하는 카트리지형 가열기

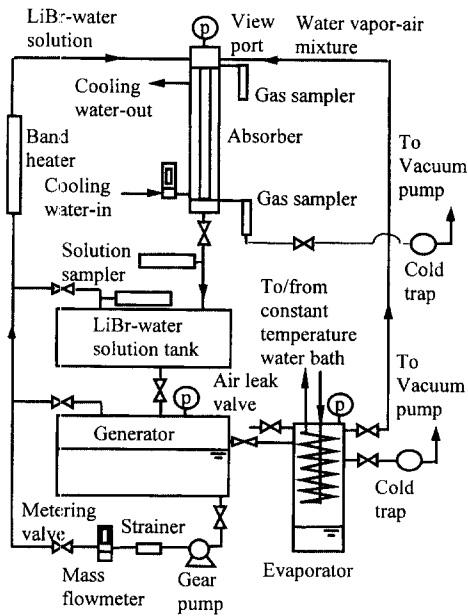


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

(250W) 4개가 하부에 설치되어 있다. 흡수과정 중 가열기에 대한 공급전력을 조절함으로써 증기생성율을 제어하고 흡수기의 압력을 일정하게 유지한다. 리튬브로마이드 수용액의 재생과정 중 증발기는 그 내부에 설치된 코일내를 통과하는 냉수에 의해 응축기로서 작동한다. 또한 비흡수가스인 공기가 수증기와 혼합하여 흡수기 내로 유동할 수 있도록 증발기 상부부위에 누설밸(Leak valve)을 설치하여 비흡수가스인 공기의 체적농도를 조절할 수 있도록 하였다.

실험 방법: 흡수과정에 대한 실험은 우선 리튬브로마이드 수용액의 온도와 농도, 그리고 냉각수의 유량 및 온도를 설정치로 조절한 후 수행되었다. 수용액펌프를 사용하여 설정된 유량의 수용액을 흡수기에 공급하고 증발기에서 공기와 수증기의 혼합가스를 흡수기에 공급하며 이 때 흡수기의 압력이 설정치로 유지될 수 있도록 증발기에서의 수증기생산량이 제어되었다. 흡수기의 각 부위(수용액출구와 냉각수출구 등)에서의 온도를 관찰하여 정상상태에 도달하였을 때 흡수기 입, 출구에서 수용액과 수증기-공기 혼합가스를 채취병을 이용하여 추출하였다.

수용액에 용해된 비흡수가스는 흡수과정 중 계면을 통해 방출될 수 있다. 부식에 의한 비흡수가스의 생성과 함께 배관의 연결부에서 미소 누설이 가능하므로 완벽한 진공시스템의 구축이란 아주 어렵다. 결국 실험시간에 비례하여 흡수기 내의 비흡수가스 체적농도가 시간에 따라 증가하는 문제점이 발생하며 측정되는 비흡수가스는 흡수기 내에 균일

하게 분포하지 않고 냉매증기의 유동에 의해 흡수기의 하부에 축적된다. 그러므로 흡수과정에 대한 비흡수가스의 영향을 정상상태에서 해석하기 위하여 본 연구에서는 실험 중 흡수기 하부에 연속추기장치를 구성하여 지속적인 추기를 실시하여 실험 중 측정되는 비흡수가스를 제거하였다.⁽⁹⁾

계측 및 자료처리: 흡수과정에 유입, 유출되는 수용액은 흡수기의 입, 출구에 설치된 채취병으로 추출하여 밀도계와 비중병에 의해 그 밀도를 측정하며 이는 온도를 고려하여 농도를 계산할 때 사용하였다. 재생기, 증발기 그리고 흡수기의 압력은 캐패시턴스형 압력계에 의해 측정되며 정확한 측정을 위해 Mcleod 계기로 먼저 교정하였다. 본 실험에서 측정되는 흡수기 입, 출구에서 리튬브로마이드 수용액의 유량, 온도와 밀도, 냉각수의 유량과 입, 출구 온도, 흡수기의 압력들은 자료획득장치를 사용하여 개인용 전산기에 기록, 저장되며 실험 후 물질 및 열전달계수의 산정을 위한 자료로 사용하였다.

비흡수가스인 공기의 체적농도는 공기-수증기 혼합가스를 동결(freezing)하여 측정하였다. 드라이아이스를 이용하여 수증기-공기의 혼합가스를 -70°C 이하로 냉각하여 수증기를 동결시키면 수증기의 부분압이 공기의 부분압에 비해 무시할 수 있을 정도로 작아진다. 동결전의 수증기-공기 혼합가스의 온도 및 압력을 T_1 및 p_1 , 동결후의 값을 T_2 및 p_2 라고 할 때 흡수기내 공기의 체적농도는 이상기체의 거동으로 가정하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1 Range of experimental conditions.

	Parameters	Range
Absorption tube (SUS304)	Inner diameter (mm)	13.3
	Length (mm)	1150
	Pressure (mmHg)	8.0
Coolant (Water)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	30
	Flow rate (l/min)	1.2
LiBr-water solution	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	40
	Flow rate (kg/min)	0.1~0.6 ($\text{Re}_f=30\sim195$)
	LiBr mass concentration (%)	58
Non-absorbable gas (Air)	Volumetric Concentration (%)	0.2~20

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

흡수과정이 진행됨에 따라 흡수기 내 비흡수가스의 국부 체적농도는 하류로 갈수록 증가한다. 본 연구에서는 흡수기 입구와 출구에서 비흡수가스의 체적농도를 식 (1)로 각각 측정, 계산한 후 그 평균값을 대표치로 사용하였다.

실험조건: 본 실험의 조건 및 범위는 Table 1과 같다. 대부분의 실제 흡수식 시스템은 운전 중 결정화를 방지하기 위하여 농도 60%이하의 리튬브로마이드 수용액을 사용한다. 흡수기에 유입하는 리튬브로마이드 수용액의 농도는 흡수과정에 대한 높은 구동력을 보유하면서도 결정화의 염려가 없는 58%로 사용하였다. 본 실험에서 흡수기의 압력은 8 torr이고 흡수기에 공급되는 수용액의 유량은 액막 레이놀즈수가 30~195의 범위이며 이 구간에서 액막의 구조는 층류 혹은 파형층류라고 할 수 있다. 또한 열 및 물질전달에 영향을 끼치는 비흡수가스인 공기의 체적농도의 변화는 본 실험장치에서 도달할 수 있는 최소치인 0.2%로부터 20%로 채택하였다.

2.2 열 및 물질전달에 대한 해석

유하액막에 의한 흡수과정에서는 열 및 물질전달이 동시에 발생하게 된다. 흡수열에 의해 유하액막 체적 내이 온도구배가 형성되며 이에 따라 열전달이 유도되고 수용액의 증기압-농도의 평형조건이 변화하므로 물질전달율이 영향을 받게 된다.

비흡수가스는 흡수과정에는 직접 참여하지는 않지만 이는 열 및 물질전달에 큰 영향을 미친다. 액체-증기 계면에서 냉매의 흡수로 인하여 기상에서 계면방향으로 냉매의 유동이 발달하게 된다. 이때 비흡수가스가 냉매와 혼합되어 계면쪽으로 이동하며 쌓이게 되면 계면에서의 비흡수가스의 농도가 증가하고 물질전달율은 감소한다. 수용액과 증기내의 속도, 온도, 그리고 농도의 분포에 대한 개념도가 Fig. 2에 나타나 있다.

흡수과정 중 냉각수로의 열전달률은 흡수기 입, 출구에서 냉각수의 온도차와 유량에 의해

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

로 계산되며 \dot{m}_c 는 냉각수의 질량유량, $c_{p,c}$ 는 냉각수의 비열, U 는 열관류율이고 대수평균온도차 ΔT_{lm}

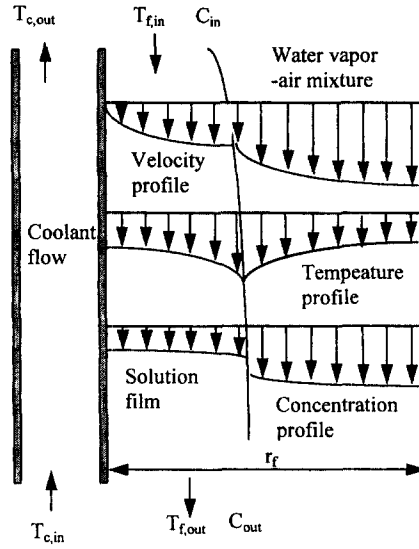


Fig. 2 Physical model of absorption process.

은 다음과 같다.

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

여기서 하첨자 f 와 c 는 리튬브로마이드 수용액막과 냉각수를 의미하고, 하첨자 in 과 out 은 각각 흡수기 입구 및 출구를 의미하며 상첨자 $*$ 는 흡수기의 압력과 수용액의 농도로부터 결정되는 열역학적 평형상태를 나타낸다. 수용액막의 대류열전달계수는 흡수과정의 열관류율과 냉각수의 대류열전달계수로부터 다음과 같이 산정된다.

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

여기서 r_c 및 r_f 는 흡수관의 외부반경 및 내부반경을 의미하며 k 는 흡수관의 열전도계수, l 은 흡수관의 길이이다. 흡수과정의 열전달특성을 대변하는 누셀트수(Nusselt number)는

$$Nu = \frac{h_f L_f}{k_f} \quad (5)$$

로 정의되며 특성길이 L_f 는 다음과 같다.

$$L_f = \left[\frac{\mu_f^2}{\rho_f^2 g} \right]^{1/3} \quad (6)$$

여기서 μ_f 와 ρ_f 는 각각 수용액의 점도와 밀도이고 g 는 중력가속도이다. 일반적으로 흡수과정에서 유

하액막의 누셀트수는 액막 레이놀즈수의 함수로 표현되며 이는 다음과 같이 정의되고 있다.

$$Re_r = \frac{4\Gamma}{\mu_t} \quad (7)$$

여기서 Γ 는 단위 원주길이당의 질량유량이다.

흡수과정 중 단위시간당 흡수되는 수증기의 흡수율은 수용액의 질량보존으로부터 다음과 같이 유도된다.

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

여기서 C 는 수용액의 농도이다. 유하액막의 액체-증기 계면은 흡수기 열역학적 평형상태에 있다. 계면에서 물의 평형밀도(ρ^*)와 유하액막의 물의 체적밀도(ρ) 사이의 대수평균 밀도차는 다음과 같이 정의되며,

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

유하액막에 의한 물질전달계수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

결국 물질전달 특성을 대변하는 셔우드수(Sherwood number)는 다음과 같이 정의된다.

$$Sh = \frac{\beta_t L_t}{D_t} \quad (11)$$

여기서 D_t 는 수용액의 물질확산계수이다.

3. 결과 및 고찰

유하액막의 열 및 물질전달특성은 리튬브로마이드 수용액과 냉매의 유량 그리고 흡수기 내면의 기하학적 형상과 더불어 흡수기 내 비흡수가스의 양에 크게 지배된다. 본 연구에서는 수용액유량과 비흡수가스인 공기의 체적농도를 독립변수로 채택하였고 수용액 입구온도, 냉각수 유입온도, 수용액의 입구농도, 냉각수 유입유량, 흡수기 내의 압력 등의 조건은 일정하게 유지하였다.

유하액막의 열전달계수 산정에 필요한 냉각수측의 대류열전달계수는 본 실험장치와 유사한 별도의 실험장치를 구성하여 구하였다. 입구영역의 영향을 고려한 시험의 범위는 냉각수 유로 길이 0.6 m-

1.2 m, 수력직경 9.2 mm-9.8 mm, 그리고 냉각수 레이놀즈수 300-1500이다. 환상공간의 대류열전달에 대한 누셀트수는 다음과 같은 상관식으로 유도하였다.

$$Nu_c = 0.325 Re_c^{0.5} Pr_c^{0.33} \left(\frac{d_h}{l} \right)^{0.055} \quad (12)$$

여기서 Pr_c 은 냉각수의 프란틀수이며 d_h 는 수력직경, l 은 환상유로의 길이이다. Fig.3은 실험적 결과로부터 도출된 누셀트수(Nu_{exp})와 상관식으로부터 계산된 누셀트수(Nu_{pre})를 비교하여 보여주고 있다. 본 상관식의 평균오차는 5%이다.

환상공간을 유동하는 냉각수에 의한 열전달율은 흡수기 입구에서의 수용액과 수증기의 엔탈피와 출구에서의 엔탈피의 차와 같아야 한다. 실험에서 측정된 압력, 온도, 유량, 그리고 농도로부터 계산된 흡수기에서의 열전달율에 대한 오차는 4%미만으로 확인되었다. 본 실험적 연구에서 산정된 열전달율, 물질전달율 그리고 압력구배는 반복 실험에서 약 10%의 편차를 나타내었다. 그러나 시스템의 압력

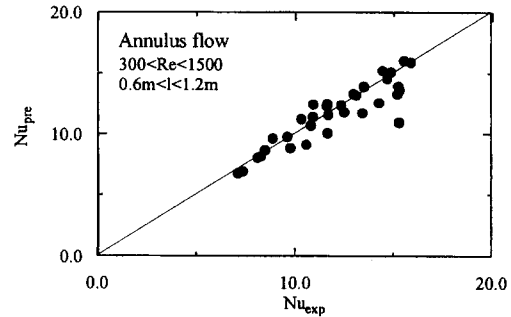


Fig. 3 Comparison of experimental data with the prediction of correlation.

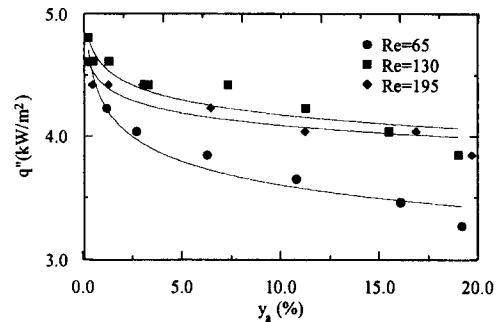


Fig. 4 Effect of non-absorbable gas concentration on heat flux.

조절, 수용액의 농도 측정, 그리고 지속적인 추기 과정 등의 실험의 복잡성을 고려할 때 흡수과정에 대한 실험의 반복성은 아주 높은 것으로 고려된다.

Fig. 4는 수용액유량의 변화에 대하여 흡수과정 중 흡수기로부터 냉각수에 전달되는 열유속에 대한 비흡수가스의 영향을 보여주고 있다. 수용액막의 수증기 흡수현상은 리튬브로마이드 수용액에서 계면의 증기압력과 수증기-공기 혼합가스의 수증기압력의 차이에 의해서 발생한다. 리튬브로마이드 수용액 계면의 수증기압력이 혼합가스 중의 수증기압력보다 낮을 때 수용액막과 혼합가스 사이의 계면을 통하여 냉매인 수증기는 리튬브로마이드 수용액 내로 흡수된다. 흡수현상과 함께 발생하는 흡수열은 수용액막을 통하여 흡수기 외부의 환상공간으로 수용액 유동방향에 대하여 대향류(counter flow)로 흐르는 냉각수에 의해 회수된다. 본 실험에서와 같이 흡수기 입구에서 수용액의 온도와 농도를 일정하게 유지하는 경우 흡수과정 중의 열유속은 냉매의 흡수율에 의해 크게 지배된다. 냉매 중에 공기가 존재할 때 수용액유량에 관계없이 전열율이 감소함을 알 수 있다. 실험 중 공기 주입량을 증가시키면 흡수기 출구에서의 수용액 온도가 감소하는 것을 관찰할 수 있었으며 이는 공기의 증가에 의한 흡수열 발생의 감소로 수용액이 냉각수에 의해 쉽게 냉각되기 때문이다. 특히 공기의 체적농도가 2.5% 미만인 아주 작은 경우의 전열율 감소량은 상대적으로 급격함을 보여주고 있다.

Fig. 5는 비흡수가스의 체적농도가 유해액막의 누셀트수에 미치는 영향을 액막레이놀즈수가 65, 130, 그리고 195인 경우에 대하여 보여주고 있다. 액막의 열전달특성을 대변하는 누셀트수는 공기의 체적농도가 0.2%에서 6.0%로 증가할 때 $Re_t=65$

에서 18%, $Re_t=130$ 에서 10% 그리고 $Re_t=195$ 에서 10% 감소하였으며 특히 순수 수증기에 대하여 미소량의 공기가 첨가된 경우, 즉 0.2%에서 1.5%로 증가할 때, 그 감소율이 현저함을 알 수 있다. 액막 레이놀즈수가 130일 때 액막의 두께는 0.4 mm 정도로 추측되며 유동양식은 파동-층류로 예측된다. 공기의 체적농도가 19.5%일 때 $Re_t=65$ 에서 누셀트수의 감소율은 37%, $Re_t=130$ 나 $Re_t=195$ 에서 20%로 수용액유량이 적을 경우 그 감소율이 큼을 알 수 있다. 이는 Yang과 Wood⁽⁶⁾이 주장하였듯이 수용액의 유량이 크면 액체-기체의 계면은 더욱 불규칙적인 양식을 가져 계면 주위에 형성된 비흡수가스의 경계층이 교란, 파괴되므로 비흡수가스의 계면에 대한 차폐효과가 줄어들기 때문으로 고려된다.

Fig. 6은 흡수유속에 대한 비흡수가스의 영향을 보여주고 있다. 공기의 체적농도를 0.2%에서 6.0%로 증가할 때 흡수율은 $Re_t=65$ 에서 30%, $Re_t=130$ 에서 26%, 그리고 $Re_t=195$ 에서 35% 감소하였다. 이는 공기의 체적농도가 증가함에 따라 혼합가스상의 물질전달저항이 증가하기 때문이다. 흡수과정에서 축적된 비흡수가스는 흡수식시스템의 운전시 다시 응축기나 재생기등의 성능에 영향을 미치므로 시스템의 냉각능력 및 성능계수는 크게 감소할 것으로 예측된다. 실제 시스템의 비흡수가스의 체적농도는 정확히 알 수 없으나 비흡수가스의 체적농도가 5%정도가 되면 흡수식시스템의 정격운전은 불가능할 것으로 추측된다. 공기에 의한 흡수유속의 감소특성을 열유속의 경우와 비교하여 보면 흡수유속의 감소폭이 열유속에 비하여 좀 더 높음을 알 수 있다.

Fig. 7은 수용액막의 셔우드수에 대한 비흡수가

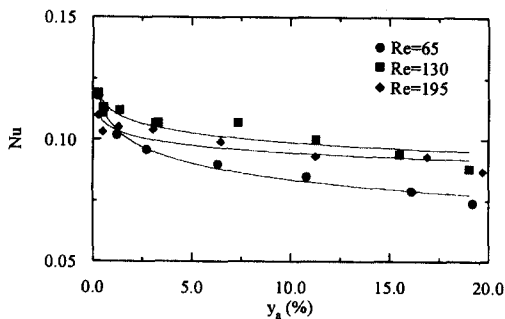


Fig. 5 Effect of non-absorbable gas concentration on Nusselt number.

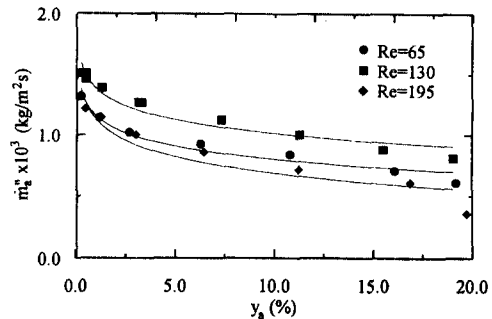


Fig. 6 Effect of non-absorbable gas concentration on absorption mass flux.

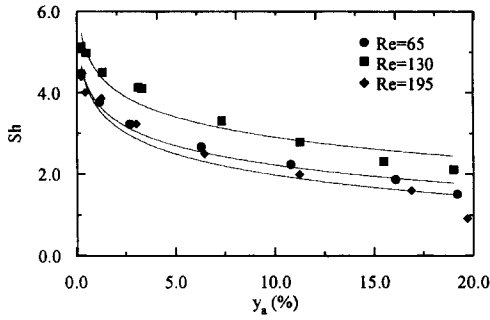


Fig. 7 Effect of non-absorbable gas concentration on Sherwood number.

스의 영향을 보여주고 있다. 셔우드수는 흡수과정 중의 물질전달계수와 수용액막의 특성길이, 그리고 수용액의 물질확산계수에 의해 계산된다. 흡수과정 시 물질전달계수는 냉매 흡수유속과 액체-기체 계면에서의 물의 밀도와 유해액막의 물의 평균밀도의 차에 의한 대수평균밀도차로 정의할 수 있으므로 Fig. 6에서 제시된 흡수유속의 감소는 대수평균밀도차에 큰 변화가 없는 경우 물질전달계수의 감소와 함께 셔우드수의 감소를 초래한다. 공기의 체적농도의 6%로 증가할 때 셔우드수의 감소량은 $Re_r=65$ 에서 42%, $Re_r=130$ 에서 36%, 그리고 $Re_r=195$ 에서 44%로 측정되었다. 누셀트수의 경우와 같이 순수 수증기에 비흡수가스인 공기가 미소량 증가할 때 셔우드수가 급격히 감소함을 알 수 있으며 그 감소율은 공기의 체적농도가 계속 증가 할때 크게 둔화됨을 보여주고 있다. 또한 공기의 유해액막의 전달특성에 대한 방해효과는 열전달의 경우보다 물질전달의 경우 더욱 심하게 나타나고 있다. 이는 공기가 수용액막을 덮는 효과로 계면의 수증기분압이 감소하여 액체-기체 계면에서 물질전달을 위한 농도구배가 크게 감소하기 때문으로 고려된다. 그러나 수용액의 계면에서의 온도구배는 흡수열의 발생에 의한 2차효과로 나타나므로 열전달특성의 감소율은 물질전달의 경우보다 작을 것이다.

Fig. 8은 흡수과정시 흡수기에서 발생하는 압력구배를 보여주고 있다. 흡수기의 압력구배는 유해액막의 정압구배, 수증기-공기 혼합가스의 유동에 의한 마찰 압력구배, 그리고 흡수기 길이방향으로 흡수과정중 수증기의 질량유량의 감소에 의한 가속 압력구배의 합으로 구성된다. 비흡수가스인 공기의 체적농도가 작을 때 수용액의 냉매 흡수과정이 활발하여 많은 양의 냉매가 공급되어 흡수기 내에서

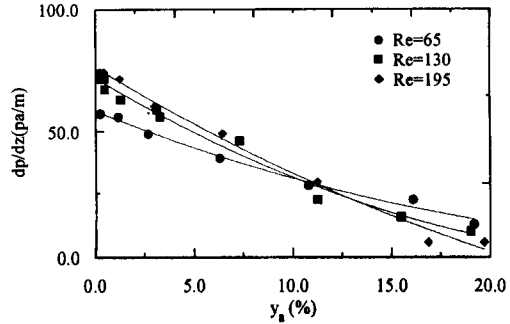


Fig. 8 Effect of non-absorbable gas concentration on pressure gradient.

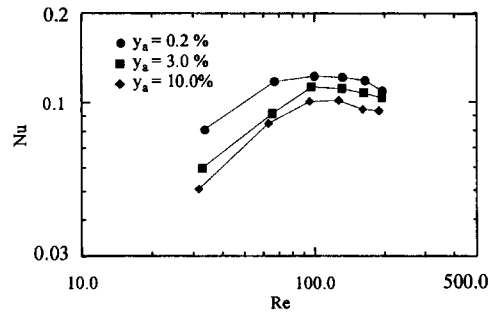


Fig. 9 Effect of film Reynolds number on film Nusselt number.

유동하므로 압력구배가 크게 형성됨을 알 수 있다. 그러나 액막레이놀즈수의 영향은 상대적으로 미미한 것으로 고려된다.

Fig. 9는 비흡수가스의 체적농도가 0.2%, 3.0%, 그리고 10.0%일 때 유해액막의 누셀트수에 대한 액막레이놀즈수의 영향을 보여주고 있다. 공기의 체적농도에 관계없이 누셀트수에 대한 액막레이놀즈수의 영향은 정성적으로 동일한 경향을 보여주고 있다. 즉 누셀트수는 액막레이놀즈수가 130정도에서 가장 크며 액막레이놀즈수가 이보다 크거나 작을 때 누셀트수는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 물론 공기가 증가함에 따라, 특히 소량의 공기가 수증기에 첨가되었을 때 누셀트수는 본 실험에서 고려한 액막레이놀즈수의 전 범위에 대하여 크게 감소함을 알 수 있다. 누셀트수가 최대치를 나타내는 최적 액막레이놀즈수에서 유해액막의 이론적해석에서 예측되는 수용액막의 두께는 0.4 mm 정도이다.⁽¹⁰⁾ 액막레이놀즈수가 130보다 작을 때 특히 액막레이놀즈수가 35일 때 누셀트가 현저히 작은 것은 낮은 수용액유량에서 유해액막의 형성이

완전하지 못하기 때문으로 고려된다. 또한 액막레이놀즈수가 130보다 크면 유하액막의 형성은 양호하나 액막두께가 증가하여 열전달저항이 증가하기 때문에 누셀트수는 감소할 것이다.^(11,12)

실제 시스템의 경우 흡수특성을 향상시키기 위하여 2-에틸-1-헥사놀등의 계면활성제를 수용액에 혼합하여 사용한다. 계면활성제가 수용액에 혼합될 경우 표면장력의 감소 및 마랑고니 효과에 의해 액막의 혼합과 계면의 난류특성이 증가하여 액막의 물질전달 저항이 감소하므로 흡수율은 크게 증가한다. 만약 계면활성제에 의해 계면의 난류특성이 증가하면 이는 인접한 비흡수가스층을 교란할 수 있으며 이 때 비흡수가스에 의한 흡수율의 저하는 계면활성제가 사용되지 않은 경우에 비하여 상대적으로 둔화될 수도 있을 것이다.

Fig. 10은 흡수기 내의 비흡수가스의 체적농도가 0.2%, 3.0%, 그리고 10.0%일 때 액막레이놀즈수와 셔우드수의 관계를 나타낸 것이다. 물질전달도수용액막의 열전달계수를 대변하는 누셀트수와 유사한 경향을 보여주고 있다. 본 실험에서 최대 흡수율을 나타내는 액막레이놀즈수 130를 경계로 하여 액막레이놀즈수가 130보다 작을 때 셔우드수는 서서히 증가하다가 액막레이놀즈수가 130이상이 되면 다시 서서히 감소하는 추세를 보이고 있다. 이러한 특성은 누셀트의 경우와 동일한 물리적 이유에서 설명될 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10이 제시하는 누셀트수나 셔우드수는 매끄러운 유하액막의 열 및 물질전달 특성에 대한 예측과는 크게 다르다. 완전 발달된 매끄러운 유하액막이 수직관 내벽에 완전하게 형성될 경우 액막레이놀즈수가 증가할 때 액막이 두꺼워지므로 열 및 물질전달 저항이 증가하여 액막누셀트수와

셔우드수는 감소할 것이다. 그러나 본 실험의 결과는 액막레이놀즈수 130을 정점으로 하여 그 이상, 혹은 그 이하의 액막레이놀즈수에서 열 및 물질전달 특성이 저하됨을 보여주고 있다. 리튬브로마이드 수용액의 경우 그 표면장력은 아주 크고 금속표면과의 적시특성(wetting characteristics)은 낮아서 낮은 액막레이놀즈수에서 액막의 형성 대신 수용액은 세류(rivulet)를 형성하여 관벽의 일부분을 적시며 흘러 내릴 것으로 예상된다. 그러므로 최대 열 및 물질전달 특성이 나타나는 최적 액막레이놀즈수 이하에서 액막레이놀즈수가 증가할 때 액막형성의 향상과 계면 파동의 영향으로 누셀트수와 셔우드수는 도리어 증가할 것으로 추측된다.^(12,13) 그러나 수용액의 유량이 충분하여 액막이 완전히 형성될 경우 수용액유량의 증가는 액막두께의 증가를 야기하여 열 및 물질전달저항이 증가하나 계면의 파동에 의한 혼합효과는 수용액유량의 증가에 대해 선형적으로 증가하지 않으므로 결국 누셀트수와 셔우드수는 다시 감소하게 될 것이다. 최적 액막레이놀즈수는 액막의 완전도, 액막의 두께, 그리고 계면파동에 의한 혼합효과의 함수로서 수용액과 관벽 사이의 접촉각(contact angle), 계면전단응력, 그리고 수용액의 물리적 상태량과 흡수기의 구조에 따라 다른 값을 가질 수 있을 것이다. Fig. 9와 Fig. 10은 열전달과 물질전달 간의 상사성을 잘 보여주고 있다고 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 리튬브로마이드 수용액이 수직원관 내면을 따라 액막의 형태로 흘러 내릴 때 수증기와의 흡수전열 과정을 실험적으로 해석하였다. 흡수전열 특성에 영향을 미치는 주요 변수 중에서 냉매에 포함된 비흡수가스인 공기의 체적농도(0.2~20.0%)가 흡수과정의 열 및 물질전달 특성에 미치는 영향을 리튬브로마이드 수용액막의 레이놀즈수의 함수(30~195)로 해석하였다.

본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 비흡수가스는 액막의 열 및 물질전달 특성을 크게 저해하며 그 저하율은 낮은 비흡수가스 농도에서 특히 심각하다. 액막레이놀즈수 130인 경우 공기의 체적농도가 0.2%에서 6.0%로 증가하면 셔우드수는 36% 감소하고, 20.0% 증가하면 셔우드수는 59% 감소하였다.

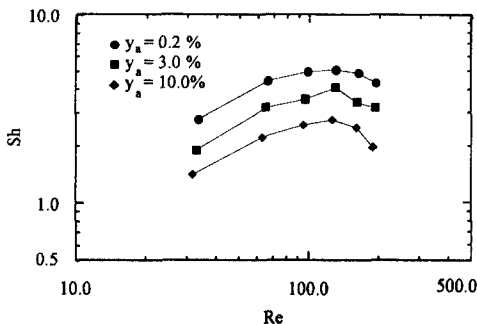


Fig. 10 Effect of film Reynolds number on film Sherwood number.

(2) 비흡수가스에 의한 유하액막의 열전달특성의 감소율은 물질전달특성에 비해 상대적으로 둔감하다.

(3) 비흡수가스의 체적농도에 관계없이 최대 열 및 물질전달율을 나타내는 최적 액막레이놀즈수는 약 130정도이다.

(4) 비흡수가스에 의한 열전달특성의 저하율은 액막레이놀즈수가 증가할수록 감소한다.

후 기

본 연구는 포항공과대학교 첨단유체공학연구센터가 지원한 연구의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Mincowycz, W. J., and Sparrow, E. M., 1966, "Condensation Heat Transfer in the Presence of Noncondensables, Interfacial Resistance, Superheating, Variable Properties and Diffusion," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 9, pp. 1125~1144.
- (2) Kakapantsios, T. D., and Karabelas, A. J., 1995, "Direct-Contact Condensation in the Presence of Noncondensables over Free-Falling Films with Intermittent Liquid Feed," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 5, pp. 795~805.
- (3) Burdukov, A. P., Bufetov, N. S., Deriy, N. P., Dorokhov, A. R., and Kazakov, V. I., 1980, "Experimental Study of the Absorption of Water Vapor by Thin Films of Aqueous Lithium Bromide," *Heat Transfer - Soviet Research*, Vol. 12, pp. 118~123.
- (4) 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.
- (5) Vliet, G. C., and Cosenza, F. B., 1992, "Absorption Phenomena in Water-Lithium Bromide Films," *Proc. Absorption Heat Pump Conf.*, pp. 53~61.
- (6) Vliet, G. C., and Chen, W., 1994, "Location of Non-Absorbable Gases in a Simplified Absorber Geometry," *AES-Vol. 31, Proc. Int. Absorption Heat Pump Conference*, pp. 171~177.
- (7) Ameer, T. A., and Wood, B. D., 1992, "Non-Absorbable Gas Effects on Heat and Mass Transfer in Wavy Laminar Falling Film Absorption," *Solar Engineering*, Vol. 1, ASME, pp. 219~228.
- (8) 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.
- (9) Ameer, T. A., 1991, "Non-Absorbable Gas Effects on Heat and Mass Transfer in Falling Film Absorption," Ph. D. Dissertation, Arizona State University.
- (10) Nusselt, W., 1916, "Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes," *VDI, Z.*, Vol. 60, pp. 541~569.
- (11) Morioka, I., 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.
- (12) 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.
- (13) Hikita, H., Nakanishi, K., and Kataoka, T., 1959, "Liquid Phase Mass Transfer in Wetted-Wall Columns," *Chem. Eng. Tokyo*, Vol. 23, No. 7, pp. 459~466.