

공냉형 흡수식 냉방 시스템에서 LiBr 수용액의 과열도가 증기 흡수에 미치는 영향

Effect of degree of superheat of LiBr aqueous solution on the vapor absorption process for an air-cooled absorption cooling system

김 선 창*, 오 명 도**, 이 재 현***
S. C. Kim, M. D. Oh, J. H. Lee

Key words : Vapor absorption(증기 흡수), LiBr aqueous solution(LiBr 수용액), Degree of superheat (과열도), Air-cooled absorption coling system(공냉형 흡수식 냉방 시스템)

Abstract

Numerical analysis using finite volume method has been carried out to examine the effect of degree of superheat of LiBr aqueous solution on heat and mass transfer occurred in absorption process. According to the result of this study, it was found that refrigerant vapor was generated at the entrance region of absorber when LiBr aqueous solution was superheated. As the degree of superheat increases, heat transfer rate increases and vapor absorption rate decreases. The increase in averaged Nusselt and Sherwood numbers could be found as film Reynolds number increases. The larger the degree of superheat, the greater the averaged Nusselt and Sherwood numbers.

기 호 설 명

C : LiBr 수용액농도, kg/kg
 c_p : 정압비열, J/(kg · K)
 D : 물질확산계수, m²/s
 d_i : 관의 내경, m
 g : 중력가속도, m²/s
 H_{abs} : 흡수열, J/kg
 $H_{distortion}$: LiBr의 희석열, J/kg
 H_{latent} : 냉매 증기의 응축잠열, J/kg

h_i : 열전달계수, W/(m²·K)
 k : 열전도율, W/(m·K)
 L : 흡수관의 길이, m
 M_{LiBr} : LiBr의 분자량
 M_{total} : 냉매증기의 단위시간당 총흡수량, kg/s
 \dot{m}_{sol} : LiBr 수용액 질량유량, kg/s
 \dot{m}_v : 냉매 증기의 단위면적 단위시간당 흡수량, kg/(m²·s)
 Nu : Nusselt 수
 P : 압력, kPa
 Q_{total} : 단위시간당 총열전달량, W
 \dot{q} : 열유속, W/m²
 r : 흡수기 반경 방향좌표

* 정회원, 생산기술연구원
 ** 정회원, 서울시립대학 정밀기계공학과
 *** 정회원, 한양대학교 기계공학과

Re_r : 막 Reynolds 수
 Sh : Sherwood 수
 T : 온도, $^{\circ}C$
 ΔT_h : 과열도, $^{\circ}C$
 u : x 방향의 속도, m/s
 v : r 방향의 속도, m/s
 x : 흡수기 길이 방향좌표

그리스문자

α : 열확산계수, m^2/s
 β : LiBr 수용액의 물질전달계수, m/s
 Γ : 액막유량, $kg/m \cdot s$
 δ : 액막두께, mm
 μ : 점성계수, $N \cdot s/m^2$
 ρ : 밀도, kg/m^3

하 첨 자

air : 공기
 $mean$: 평균값
 i : 초기조건
 s : 기/액 경계면
 $tube$: 흡수관
 v : 냉매증기
 w : 흡수관의 관벽

1. 서 론

최근 가스를 구동 열원으로 사용하는 냉난방 기기의 보급율이 증가함에 따라 이에 대한 관심이 고조되고 있으며, 특히 지난 수년간 가스 열원 흡수식 열펌프에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다.

흡수식 열펌프는 제1종 흡수식 열펌프와 제2종 흡수식 열펌프로 분류할 수 있다. 전자의 경우는 일반적으로 흡수식 냉동기 또는 냉온수기로 불리우는 시스템으로 주로 냉난방을 목적으로 사용되고 있으며, 후자의 경우는 흡수식 열변환기라고 불리며, 중온(약 $60^{\circ}C \sim 70^{\circ}C$)의 폐온수를 이용하여 고온의 열원수를 얻는데 목적을 두고 있다. 제1종 흡수식 열펌프에서는 흡수기가 저온·저압부에 위

치하고 있으며 흡수기에 유입되는 LiBr 수용액은 과열상태이다. 반면에 제2종 흡수식 열펌프의 경우에는 고온·고압부에 흡수기가 위치하고 있으며, 과냉상태의 LiBr 수용액이 흡수기로 유입된다. 이와 같이 흡수식 열펌프는 그 종류에 따라 흡수기에 유입되는 LiBr 수용액의 상태가 서로 다르므로, LiBr 수용액의 과냉·과열상태가 증기 흡수 현상에 미치는 영향에 관한 연구는 실제의 흡수현상을 규명하는데 매우 중요한 과제라 할 수 있다.

지금까지 흡수기에서의 열 및 물질전달에 관한 연구^(1~3)는 많이 수행된 바 있지만, 흡수기에서의 과냉·과열 상태의 영향에 대한 연구는 소수에 불과하다. 국내에서는 엄기찬 등^(4,5)이 처음으로 흡수현상에 있어서의 과냉·과열에 의한 영향을 실험적으로 연구한 바 있으며, 조현철 등⁽⁶⁾ 및 Kim 등⁽⁷⁾도 실험을 통하여 LiBr 수용액의 입구 온도에 따른 열 및 물질전달에 관한 연구를 수행한 바 있다. 그러나 이들의 연구 결과를 제외하고는 흡수기에서 LiBr 수용액이 과냉·과열상태인 경우에 대한 연구 결과는 거의 발표되지 않았으며, 특히 수치적 연구는 전무한 실정이다.

지금까지 국내에 보급된 흡수식 열펌프는 대부분이 제1종 흡수식 열펌프이며, 최근 중점적으로 연구의 대상이 되고 있는 소형 공냉형 흡수식 냉난방기 역시 제1종 흡수식 열펌프에 속한다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 통하여 공냉형 흡수식 냉방 시스템에서 LiBr 수용액의 과열도가 흡수 열전달 및 물질전달에 미치는 영향을 검토하고자 하였다.

2. LiBr 수용액의 과열

흡수식 열펌프는 그 종류에 따라 흡수기로 유입되는 LiBr 수용액의 열적 상태가 서로 다르다. 흡수식 냉동기 혹은 흡수식 냉온수기 등의 제1종 흡수식 열펌프의 경우에는 과열된 LiBr 수용액이 흡수기로 유입되며, 제2종 흡수식 열펌프인 흡수식 열변환기(absorption heat transformer)는 과냉각된 LiBr 수용액이 흡수기로 유입된다. Fig.1은 제1종 흡수식 열펌프에서 흡수기와 발생기간의 LiBr 수용액의 순환을 개략적으로 도시한 평형상태도이다. 일반적으로 제1종 흡수식 열펌프의 작동 사이

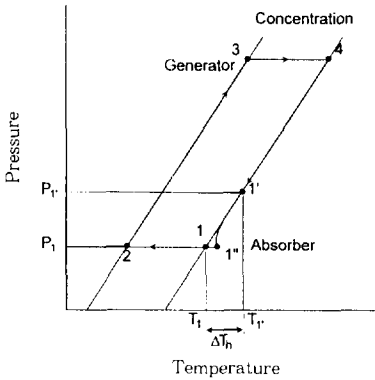


Fig.1 Schematic of solution circulation patterns for type I absorption heat pump

클을 평형상태도상에 나타낼 때에는 Fig.1에서와 같이 흡수기의 입구 및 출구를 각각 (1)과 (2)점으로, 발생기의 입구 및 출구를 각각 (3) 및 (4)의 점으로 표시한다. 그러나 실제 사이클의 경우 흡수기에 유입되기 직전의 LiBr 수용액의 상태는 압력과 온도가 각각 P_1 과 T_1 인 상태로 흡수기 입구의 평형상태인 (1)점보다 ΔT_h 만큼 온도가 높은 과열 상태가 된다. 한편, (1)점보다 고온·고압의 상태인 (1')점의 LiBr 수용액은 흡수기로 유입된 직후 갑자기 낮아진 압력으로 인하여 평형상태가 깨어지며, 다시 평형 상태가 되기 위하여 냉매 증기가 증발된 후 LiBr 수용액의 농도가 진하게 되어 (1')의 상태가 된다. 이러한 현상을 단열재생(adiabatic desorption)이라 한다.

단열재생⁽⁸⁾은 LiBr 수용액이 노즐이나 용액 분배기에 의하여 흡수기에 유입된 직후부터 흡수기의 전열관 표면에 접촉되기 전까지의 공간에서 이루어지는 현상이므로 냉각수 혹은 냉각 공기 등의 매체와는 열교환이 이루어지지 않는다. 본 연구에서는 흡수기에 유입된 LiBr 수용액이 바로 흡수관의 내벽면을 통하여 흘러내린다는 가정하에 단열 재생에 의한 영향은 고려하지 않았다.

3. 해석 모델 및 지배방정식

3.1 해석모델

Fig.2는 본 연구에서 해석 모델로 채택한 공냉형

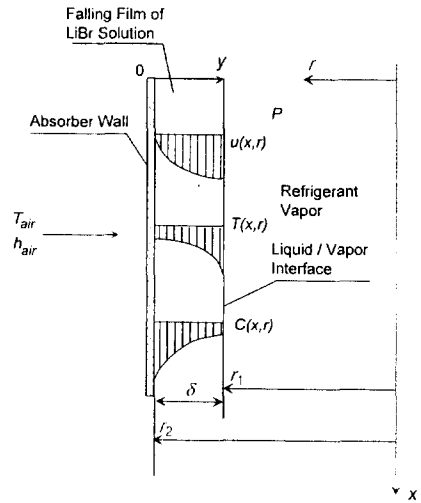


Fig.2 Typical model of absorption process in a vertical tube absorber

수직원관 흡수기의 개략도 이다. 수직원관 흡수기의 길이 L 은 2.0m로 설정하였으며, 수직원관의 내경 d_i 는 17.05mm 이다. 그림에서와 같이 공냉형 흡수기는 대류열전달계수 h_{air} , 온도 T_{air} 인 공기로 냉각된다. 흡수기의 벽면(absorber wall)으로는 액막의 두께가 δ 인 LiBr 수용액이 흘러 내리며 기/액 경계면(liquid/vapor interface)을 통하여 액막 외부에 존재하는 냉매 증기(refrigerant vapor)가 흡수된다. 그림에서 시스템의 압력 P 는 흡수기 내부의 압력을 의미하는 것으로, 이 압력은 증발기에서 냉매인 물의 증발온도에 의해서 결정된다.

그림에서 x 좌표 및 r 좌표는 각각 흡수기 길이방향과 반경방향을 나타내며, r_1 과 r_2 는 각각 기/액 경계면과 흡수기 내벽면을 의미한다. y 좌표는 흡수기 내벽면으로부터 기/액 경계면까지의 거리를 나타내는 좌표이며, 그 방향은 반경방향과 반대 방향이다.

3.2 지배방정식

공냉형 흡수기에서 과열된 LiBr 수용액의 증기 흡수과정 중에 일어나는 열전달 및 물질전달에 관한 수치계산을 위하여 다음과 같은 가정들을 도입하였다.

- (1) 흡수기의 벽면을 흘러내리는 LiBr 수용액

의 유동 양식은 층류이며, 액막내의 속도 분포는 완전히 발달되었다.

- (2) LiBr 수용액의 기/액 경계면을 통하여 액막 내부로 흡수되는 냉매 증기의 양은 극히 미소하므로⁽⁹⁾ 흡수기의 길이 방향으로 액막의 두께는 일정하게 유지된다.
- (3) LiBr 수용액의 액막 외부에 존재하는 냉매 증기의 점성계수는 매우 작으므로 기/액 경계면에서는 전단력이 존재하지 않는 것으로 가정한다.
- (4) 흡수기내의 압력은 일정하다.
- (5) LiBr 수용액의 기/액 경계면은 열적평형상태에 있다.
- (6) 흡수기 입구에서 단열재생은 일어나지 않는다.

i) 속도 분포식

유동방향에 따라 액막 두께가 일정하다는 가정에 의하여 반경방향 속도 성분 $v=0$ 으로 간주하며, 유동방향의 속도 분포 $u(r)$ 은 포물선형 속도 분포로서 아래와 같은 식으로 기술될 수 있다.

$$u(r) = \frac{3}{2} u_{mean} \left[2 \left(\frac{r}{\delta} \right) - \left(\frac{r}{\delta} \right)^2 \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 u_{mean} 은 LiBr 수용액의 평균유속으로 식(2)와 같이 표현되며, δ 는 LiBr 수용액의 액막두께로 식(3)으로 정의된다.

$$u_{mean} = \frac{\dot{m}_{sol}}{\rho \delta \pi d_i} \quad (2)$$

$$\delta = \left(\frac{3 \Gamma \mu}{\rho g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

ii) 물질확산방정식

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right) \quad (4)$$

iii) 에너지방정식

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \frac{D(c_{p, LiBr} - c_{p, H_2O})}{c_p} \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{T}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + T \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right)$$

식(5)에서 우변의 마지막 항은 물질확산에 의한 열전달 효과(thermo-diffusion effect)를 나타내는 항이다.⁽⁹⁾

3.3 경계조건

공냉형 흡수기에서는 흡수기의 입구($x=0$)에서 임의의 온도 및 농도를 갖는 LiBr 수용액이 유입되어 액막을 형성하며 내벽면을 흘러내린다. 이때, 수용액의 액막과 냉매증기의 경계면에서의 수용액 농도는 흡수기내의 압력과 기/액경계면에서 수용액의 온도에 의해 결정된다. 또한 기/액경계면에서의 열유속은 반경방향의 열확산 및 물질확산에 의한 열전달항으로 표현되며, 이것은 흡수열과 질량유속의 곱으로 나타낼 수 있다. 공냉형 흡수기의 벽면에서는 대류경계조건이 주어지며, 벽면에서는 물질전달이 일어나지 않는다. 흡수기의 출구($x=L$)에는 유출상계조건을 설정한 후 수치계산을 수행하였다. 이러한 경계조건들을 식으로 표현하면 다음과 같다.

흡수기 입구에서의 경계조건은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$x=0; C=C_o, T=T_o \quad (6)$$

기/액 경계면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$r=r_1; C=f(T, P) \quad (7)$$

$$\dot{q}_s = k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_1} - (c_{p, H_2O} - c_{p, LiBr}) T \rho D \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=r_1} \quad (8)$$

여기서, H_{abs} 는 LiBr 수용액의 단위 질량당 흡수열로서 식 (9)와 같이 표현된다.

$$H_{abs} = H_{diffusion}(C, T) + H_{latent} \quad (9)$$

식 (9)에서 $H_{diffusion}$ 은 리튬브로마이드의 희석열로서 LiBr 수용액의 농도와 온도에 의해 결정되며, H_{latent} 는 흡수기 압력에 해당하는 냉매인 물의 응축잠열이다. 본 연구에서는 참고문헌⁽¹¹⁾에 수록

된 리튬브로마이드의 희석열에 관한 실험 데이터를 수식화하여 $H_{dilution}$ 의 계산에 사용하였다. \dot{m}_i 는 단위시간당, 단위면적당 LiBr 수용액에 흡수되는 냉매증기의 양으로 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\dot{m}_i = \rho D \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=\delta} \quad (10)$$

공랭형 흡수기 내벽면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$r = r_2; \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=r_2} = 0 \quad (11)$$

$$q_u = \frac{(T_w - T_{air})}{\left(\frac{1}{h_{air}} + \frac{t}{k_{tube}} \right)} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_2} \quad (12)$$

식 (12)에서 t 및 k_{tube} 는 각각 흡수기용 동관의 두께와 열전도계수이다. 식 (12)를 본 수치계산에서 구하고자 하는 벽면에서의 온도 T_w 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_w = \frac{\frac{k}{\Delta} \left(\frac{1}{h_{air}} + \frac{t}{k_{tube}} \right) T_w + T_{air}}{1 + \frac{k}{\Delta} \left(\frac{1}{h_{air}} + \frac{t}{k_{tube}} \right)} \quad (13)$$

식 (13)에서 T_w 은 벽면에 바로 인접한 격자점에서의 온도이며, Δ 는 벽면과 벽면에 바로 인접한 격자점 사이의 거리이다.

흡수기 출구에서의 유출경계조건은 식 (14)와 같다.

$$x = L; \partial C / \partial x = 0, \partial T / \partial x = 0 \quad (14)$$

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 LiBr 수용액의 과열도가 증기 흡수과정에서의 열 및 물질전달에 미치는 영향을 검토하기 위하여 평형상태 즉, 과열도가 0°C인 경우와 과열도가 각각 3°C 및 5°C인 경우에 대한 수치 해석을 수행하였다. 흡수기에 유입되는 LiBr 수용액의 질량유량을 0.003kg/s부터 0.014kg/s까지 0.001kg/s씩 증가시킨 경우에 대하여 수치계산을

Table 1 Nominal operating conditions of absorber

Solution mass flowrate, m_{sol}	0.005 [kg/s]
Convective heat transfer coefficient at air side, h_{air}	350.0 [W/m ² K]
Cooling air temperature, T_{air}	35.0 [°C]
System pressure, P	0.9 [kPa]
Inlet concentration, C_i	62.0 [%]

수행하였다. 본 해석에 적용한 LiBr 수용액의 과열도는 공랭형 흡수식 냉방기의 사이클 해석⁽¹⁰⁾ 결과와 참고하였으며, 공랭형 흡수기의 운전조건은 관련자료^(11,12)를 근거로 하여 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 1의 기준조건에서 공기측의 대류열전달계수는 다음과 같이 가정하여 설정한 것이다. 일반적으로 수냉형 열교환기의 경우 물측의 열전달계수는 약 1200W/m²·K이며, 공랭형의 경우 공기측의 열전달계수는 약 24W/m²·K 정도이다. 그러나 공랭형의 경우 튜브의 면적이 튜브면적의 약 14~15배 정도 임을 고려하면, 환-튜브 형식의 공랭형 흡수기를 공기측의 열전달계수가 약 350W/m²·K 정도인 튜브형 흡수기로 가정할 수 있다⁽¹⁾.

Table 1의 기준조건에서 LiBr 수용액의 물성치는 참고문헌⁽¹²⁾를 참조하였으며, 과열도가 0°C, 3°C 및 5°C인 경우의 물질확산계수는 각각 1.493×10^{-5} , 1.624×10^{-5} 및 1.717×10^{-5} m²/s이다. LiBr 수용액의 물질확산계수 D 는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$D(T) \mu(T) / T = (D \mu / T)_{ref} = \text{constant}^{(13)} \quad (15)$$

이때, 하첨자 ref 는 이미 알고 있는 기준값을 의미한다. Kashiwagi⁽¹³⁾의 데이터를 이용하여 온도가 25°C일 때, LiBr 수용액 내에서의 물의 물질확산계수를 구한 상관 관계식은 다음과 같다.

$$D(25^\circ\text{C}) = (1.3528 + 0.19881m - 0.036382m^2 + 0.0020299m^3 - 0.000039375m^4) \times 10^{-9} \quad (16)$$

$$m = 1000 \frac{C_{LiBr}}{M_{LiBr}(100 - C_{LiBr})} \quad (17)$$

$$M_{LiBr} = 86.845 \quad (18)$$

여기서, m 과 M_{LiBr} 은 각각 용질인 LiBr의 몰랄 농도(molality)와 분자량을 나타낸다. 기준 온도인 25°C에 대하여 식 (15)를 다시 정리하면, 임의의 온도에서의 물질확산계수 $D(T)$ 는 식 (19)와 같이 표현된다.

$$D(T) = D(25^\circ\text{C}) \left(\frac{T + 273.15}{298.15} \right)^2 \left(\frac{\mu(25^\circ\text{C})}{\mu(T)} \right) \quad (19)$$

4.1 LiBr 수용액내의 온도 및 농도 분포

흡수기 입구에서 LiBr 수용액의 과열도가 존재할 경우, 냉매인 물의 물질확산 거동을 검토하고자 LiBr 수용액 액막 내부에서의 반경방향 농도 분포를 Fig.3에 나타내었다. 그림에서 횡좌표는 흡수기 벽면으로부터 기/액 경계면까지의 거리를 액막 두께로 나누어준 무차원 길이로서 $y/\delta = 0$ 및 $y/\delta = 1$ 은 각각 흡수기 벽면과 기/액 경계면을 나타낸다. LiBr 수용액이 평형상태인 경우 즉 과열도가 0°C인 경우에는 흡수기의 입구에서부터 흡수가 시작되기 때문에 흡수기 입구로부터의 거리가 약 0.01m, 0.18m 및 0.5m인 경우 모두 벽면에서의 농도가 가장 높으며 기/액 경계면에서의 농도가 가장 낮음을 알 수 있다. 이러한 현상은 기/액 경

계면을 통하여 흡수된 냉매의 물질확산이 기/액 경계면으로부터 흡수기 벽면 방향으로만 이루어짐을 나타낸다. 그러나 LiBr 수용액이 가열된 경우에는 액막 내부의 냉매 증기압이 액막 외부에 존재하는 냉매의 증기압보다 높기 때문에 수용액이 흡수기로 유입된 직후 순간적으로 냉매 증기를 증발시켜 LiBr 수용액의 농도가 증가한다. 그림에서 수용액의 과열도가 5°C인 경우에는 흡수기 입구로부터의 거리가 약 0.01m인 위치에서 기/액 경계면에서의 농도가 LiBr 수용액의 초기 농도인 62%보다 높으며 이는 냉매인 물의 물질확산이 평형상태인 경우와 반대 방향으로 이루어지고 있음을 의미한다. 또한 과열도가 5°C인 경우에는 흡수기 입구로부터의 거리가 약 0.18m인 경우에 LiBr 수용액의 액막내부에 수용액의 농도가 가장 높은 점이 존재하게 되어 이점을 중심으로 양 방향으로부터 냉매인 물의 물질확산이 이루어짐을 알 수 있다. 이와같이 LiBr수용액이 과열상태인 경우에는 흡수기 입구로부터의 거리가 0.01m 및 0.18m인 흡수기 입구영역에서의 반경방향 농도분포는 평형상태의 경우와 매우 상이하며, 흡수기 입구로부터의 거리가 0.5m인 위치에서는 평형상태의 경우와 유사한 농도분포를 보이게 된다.

Fig.4는 LiBr 수용액의 과열도가 0°C 및 5°C인

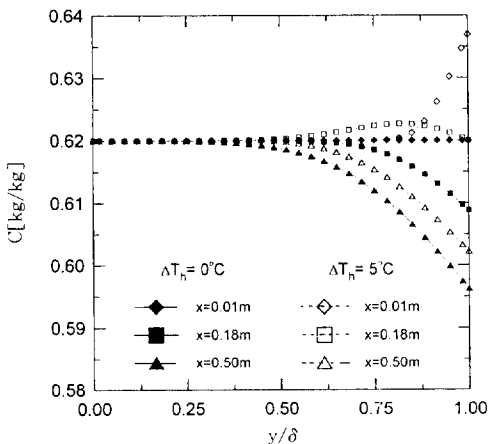


Fig.3 Concentration profiles across the film thickness

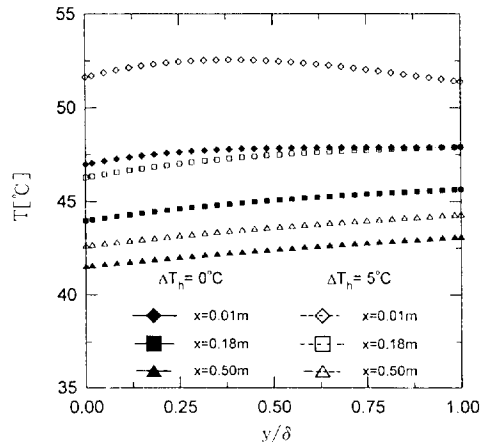


Fig.4 Temperature profiles across the film thickness

경우, 흡수기 입구로부터의 거리가 약 0.01m, 0.18m 및 0.5m 떨어진 위치에서의 LiBr 수용액의 반경방향 온도 분포를 나타내고 있다. LiBr 수용액의 과열도가 0°C인 경우, 반경방향의 온도 분포는 $x=0.01m$, $x=0.18m$ 및 $x=0.50m$ 인 경우 모두 흡수기의 벽면에서 가장 낮고 기/액 경계면에서 제일 높아지는 분포를 이룬다. 이는 흡수기의 벽면에서 냉각 공기 측으로 열이 방출되기 때문에 열전달이 벽면 방향으로만 이루어지기 때문이다. 그러나 과열도가 5°C인 경우 $x=0.01m$ 인 위치에서 반경방향의 온도 분포를 보면 액막의 중간 부분에 온도가 가장 높은 점이 존재함을 알 수 있다. 이러한 이유는 LiBr 수용액이 과열된 경우에 앞서 기술한바와 같이 흡수기의 입구에서 냉매의 증발이 이루어지기 때문에 기/액 경계면을 통하여 냉매의 증발 잠열이 방출되며, 따라서 이 경우에는 벽면과 기/액 경계면 양 방향으로 열이 방출되기 때문이다.

4.2 증기 흡수량 및 열전달량

LiBr 수용액의 과열도가 존재하는 경우 냉매인 물의 물질전달 거동을 알아보기 위하여 Fig.5에 과열도가 0°C, 3°C 및 5°C인 경우에서의 흡수기 길이방향에 따른 단위 시간당·단위 면적당 증기 흡수량의 변호를 나타내었다. 그림의 종좌표에서 양의 값은 냉매 증기의 흡수량을 나타내며, 음의 값

은 냉매 증기의 증발량을 의미한다. 흡수기에 유입되는 LiBr 수용액이 평형상태인 경우에는 흡수기의 입구에서부터 냉매 증기의 흡수가 시작되며, 흡수기의 입구에서부터 흡수기의 중간정도 까지는 흡수량이 증가한 후 흡수기의 하류 방향으로 갈수록 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. LiBr 수용액은 흡수기의 벽면을 따라 흘러내리면서 벽면을 통하여 지속적으로 열을 방출하기 때문에 수용액의 온도 또한 흡수기의 하류로 갈수록 계속 낮아지게 된다. 따라서 흡수기의 하류로 갈수록 LiBr 수용액과 냉각 공기와의 온도차가 감소하여 벽면을 통하여 방출되는 열량이 감소하며, 이로 인하여 흡수능력이 저하되기 때문에 흡수기의 하류에서의 냉매 증기 흡수량이 감소하게 된다. LiBr 수용액이 과열상태인 경우에는 흡수기의 입구 영역에서는 오히려 냉매 증기가 증발하며, 그 이후에는 평형상태인 경우의 증기 흡수량의 분포와 유사한 거동을 나타낸다. LiBr 수용액의 과열도가 큰 경우가 흡수기 입구에서 증발되는 냉매의 양이 더 많으며, 흡수를 시작하는 지점이 과열도가 작은 경우보다 흡수기의 하류쪽에 위치함을 알 수 있다.

LiBr 수용액의 유입 질량유량이 0.003kg/s~0.014kg/s 범위에서 LiBr 수용액의 과열도가 0°C, 3°C 및 5°C인 경우에 대한 LiBr 수용액의 질량유량과 냉매 증기의 총 흡수량과의 관계를

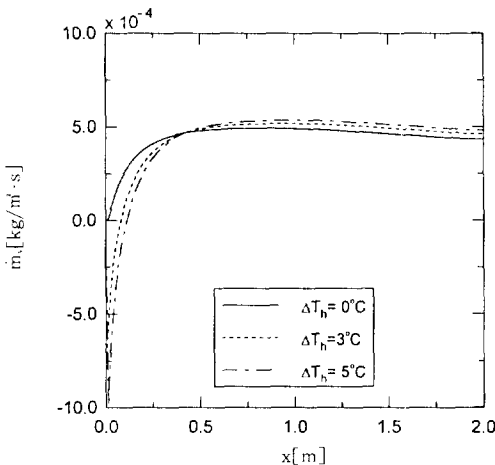


Fig.5 Effect of degree of superheat on local mass flux along the absorber tube

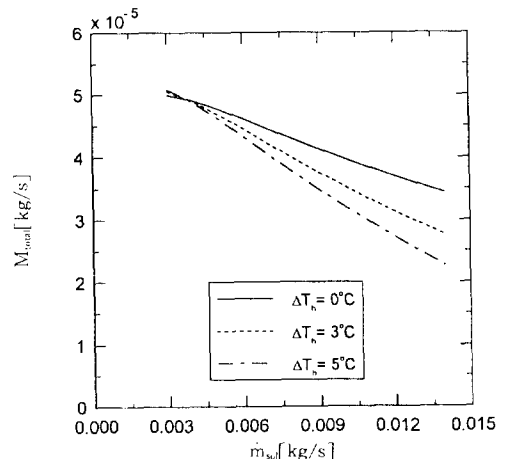


Fig.6 Effect of degree of superheat on local mass transfer rate

Fig.6에 나타내었다. 여기서, 냉매증기의 총 흡수량이란 공냉형 흡수기 중 단일 흡수관에서 흡수한 냉매 증기의 양을 의미하며 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$M_{total} = \int_0^L \dot{m}_v(x) dx \cdot \pi d_i \quad (20)$$

세가지 과열도 모두의 경우에 있어서, LiBr 수용액의 질량유량의 증가에 따라 냉매증기의 총 흡수량은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 이유는 LiBr 수용액의 질량유량이 증가하면 액막두께가 두꺼워 지며, 이러한 액막두께의 증가가 물질확산의 저항요소로 작용하기 때문인 것으로 판단된다. LiBr 수용액이 과열상태인 경우 평형상태에 비하여 냉매 증기의 총 흡수량이 적음을 알 수 있는데, 이는 위에서 기술한 바와 같이 LiBr 수용액이 과열상태로 흡수기에 유입되는 경우에는 흡수기의 입구로부터 냉매증기를 흡수하기 시작하는 위치 전까지는 냉매 증기가 증발하기 때문이다. 또한 LiBr 수용액의 과열도가 3°C인 경우에 비하여 과열도 5°C인 경우가 냉매 증기의 총 흡수량이 더 적음을 알 수 있는데, 이는 LiBr 수용액의 과열도가 큰 경우가 흡수기 입구에서의 냉매 증발량이 더 많기 때문이다.

Fig.7은 LiBr 수용액의 과열도가 0°C, 3°C 및 5°C인 경우에 LiBr 수용액의 유입 질량유량과 흡수기의 벽면을 통하여 방출되는 총 열전달량과의 관계를 나타낸 그림이다. 흡수기의 벽면을 통하여 방출되는 총 열전달량은 식 (21)으로부터 구한다.

$$Q_{total} = \int_0^L \dot{q}_w(x) dx \cdot \pi d_i \quad (21)$$

그림에 의하면 LiBr 수용액의 유입 질량유량이 증가할수록 총 열전달량도 증가하며 과열도가 큰 경우가 총 열전달량의 증가율이 더 큼을 알 수 있다. 또한 LiBr 수용액의 과열도가 큰 경우가 벽면을 통하여 방출되는 총 열전달량이 큼을 알 수 있는데, 이와 같은 이유는 LiBr 수용액이 과열도가 큰 경우일수록 흡수기 전체에 걸쳐 액막 내부의 온도는 물론 벽면에서의 수용액의 온도가 높으므로 열전달의 구동력인 냉각 공기와의 온도차가 상대적

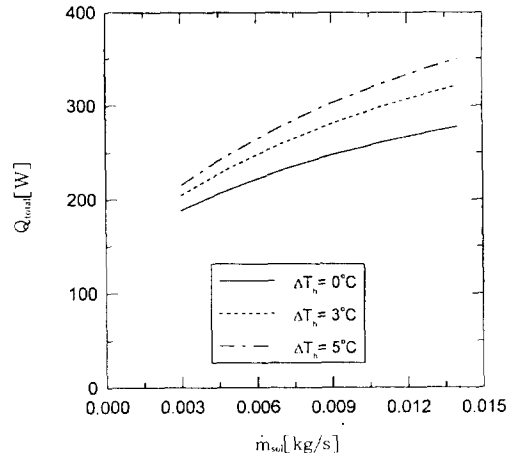


Fig.7 Effect of degree of superheat on total heat transfer rate

으로 커지기 때문이다.

4.3 열전달계수 및 물질전달계수

본 절에서는 과열된 LiBr 수용액의 증기 흡수과정에서의 열전달계수 및 물질전달계수에 관한 논의를 하고자 한다. 흡수기 벽면에서의 평균 열전달계수 \bar{h}_i 및 기/액 경계면에서의 평균 물질전달계수 $\bar{\beta}_i$ 는 식 (22) 및 식 (23)과 같이 정의된다.

$$\bar{h}_i = \frac{1}{L} \int_0^L h_i(x) dx \quad (22)$$

$$\bar{\beta}_i = \frac{1}{L} \int_0^L \beta_i(x) dx \quad (23)$$

식 (22)에서의 h_i 와 식 (23)에서의 β_i 는 각각 국소 열전달계수와 국소 물질전달계수로서 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$h_i = \frac{\dot{q}_w}{T_s - T_w} = \frac{k(\partial T / \partial r)_{r=r_i}}{T(r_1) - T(r_2)} \quad (24)$$

$$\beta_i = \frac{\dot{m}_i}{\rho(C_w - C_s)} = \frac{-D(\partial C / \partial r)_{r=r_i}}{C(r_2) - C(r_1)} \quad (25)$$

식 (24)와 식 (25)에서 하첨자 s 와 w 는 각각 기/액 경계면과 흡수기의 벽면을 의미한다. 평균 Nusselt수와 평균 Sherwood수의 정의는 식 (26)

과 식 (27)와 같이 표현된다.

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}_s \delta}{k} \quad (26)$$

$$\overline{Sh} = \frac{\overline{\beta \delta}}{D} \quad (27)$$

LiBr 수용액의 과열도가 존재하는 경우, LiBr 수용액의 유입 질량유량의 변화에 따른 흡수기 벽면에서의 평균 열전달계수의 변화를 알아보기 위하여 과열도가 0°C, 3°C 및 5°C인 경우 유입 질량유량이 0.003kg/s~0.014kg/s의 범위에서의 평균 열전달계수를 Fig.8에 나타내었다. LiBr 수용액의 과열도가 0°C인 경우에는 LiBr 수용액의 유입 질량유량이 증가함에 따라 평균 열전달계수는 감소하는 경향을 보이고 있는데 그 이유는 다음과 같다. LiBr 수용액의 유입 질량유량이 큰 경우 일수록 액막의 두께가 두꺼워진다. 액막두께가 두꺼워지면 흡수기의 벽면과 기/액 경계면과의 열저항이 커지게 되므로 벽면과 기/액 경계면과의 온도차가 커지게 되는데, 과열도가 0°C인 경우에는 유입 질량유량의 증가에 따른 벽면 열유속의 증가율보다 벽면과 기/액 경계면과의 온도차의 증가율이 더 크기 때문에 식 (24)의 정의에 의하여 열전달계수가 감소하게 된다. 그러나 LiBr 수용액의 과열도가 3°C 및 5°C인 경우에는 평균 열전달계수가 LiBr

수용액의 유입 질량유량이 약 0.005kg/s일 때까지는 감소하는 반면, 그 이후에는 증가하는 경향을 보이고 있는데 이 경우에는 벽면과 기/액 경계면과의 온도차의 증가율보다 벽면 열유속의 증가율이 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한 본 연구결과, LiBr 수용액의 유입 질량유량이 0.003kg/s~0.014kg/s의 범위에서는 LiBr 수용액의 과열도가 큰 경우에 평균 열전달계수가 큰 것으로 나타났다.

Fig.9는 본 연구에서 채택한 세가지 과열도의 경우에서 막 Reynolds수와 평균 Nusselt수와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 횡축 및 종축의 좌표계를 log 좌표계로 채택한 이유는 평균 Nusselt수와 막 Reynolds수와의 관계를 직선적으로 나타내기 위함이다. 본 연구에서 사용된 막 Reynolds수의 정의는 식 (28)과 같다.

$$Re_r = \frac{4\dot{m}_{mi}}{\mu \pi d} \quad (28)$$

LiBr 수용액의 과열도가 0°C인 경우에는 막 Reynolds수가 약 30~200의 범위에서 평균 Nusselt수가 일정한 기울기로 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 과열도가 3°C 및 5°C인 경우에는 막 Reynolds수가 약 60인 이후에 평균 Nusselt수의 증가율이 갑자기 커짐을 알 수 있다. 이러한 이유는 Fig.8에 나타난 바와 같이 과열도가 3°C 및

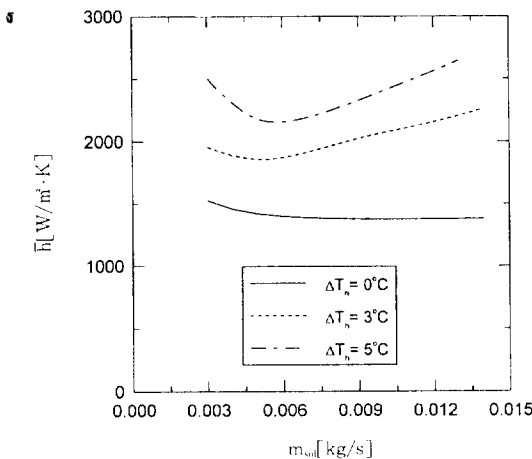


Fig.8 Effect of degree of superheat on averaged heat transfer coefficient

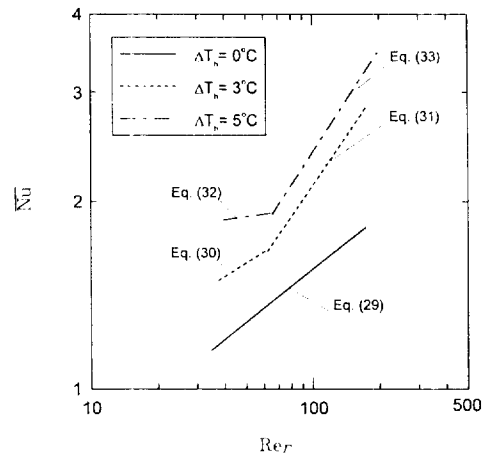


Fig.9 Effect of degree of superheat on averaged Nusselt number

5°C인 경우에는 평균 열전달계수가 LiBr 수용액의 유입 질량유량의 증가에 따라 감소하다가 증가하는 경향이 있기 때문이다. LiBr 수용액의 유입 질량 유량의 증가에 따라 평균 열전달계수가 감소하는 영역에서 평균 Nusselt수가 증가하는 이유는, 막 Reynolds수의 증가에 따른 LiBr 수용액의 액막두께의 증가율이 평균 열전달계수의 감소율보다 더 크기 때문에 식 (26)의 정의에 의하여 막 Reynolds수가 증가하면 평균 Nusselt수도 증가하는 것이다. 본 연구에서 구한 세가지 과열도의 경우에서의 막 Reynolds수와 평균 Nusselt수와의 상관 관계식은 다음과 같다.

(1) 과열도가 0°C인 경우

$$\overline{Nu} = 0.422Re_r^{0.283}; 30 < Re_r < 200 \quad (29)$$

(2) 과열도가 3°C인 경우

$$\overline{Nu} = 0.664Re_r^{0.223}; 30 < Re_r \leq 60 \quad (30)$$

$$\overline{Nu} = 0.193Re_r^{0.520}; 60 < Re_r \leq 200 \quad (31)$$

(3) 과열도가 5°C인 경우

$$\overline{Nu} = 1.549Re_r^{0.051}; 30 < Re_r \leq 60 \quad (32)$$

$$\overline{Nu} = 0.194Re_r^{0.546}; 60 < Re_r < 200 \quad (33)$$

LiBr 수용액의 과열도가 존재하는 경우, LiBr 수용액의 유입 질량유량과 기/액 경계면에서의 평균 물질전달계수의 관계를 Fig.10에 나타내었다. LiBr 수용액의 과열도가 0°C, 3°C 및 5°C인 경우 모두 유입 질량유량이 증가함에 따라 평균 물질전달 계수도 증가하는 경향을 보이고 있으며, 유입 질량유량이 0.003~0.014kg/s의 범위내에서는 LiBr 수용액의 과열도가 큰 경우가 평균 물질전달계수의 증가율이 큼을 알 수 있다.

Fig.11은 LiBr 수용액의 과열도가 0°C, 3°C 및 5°C인 경우에서의 막 Reynolds수와 평균 Sherwood수와의 관계를 나타낸 것이다. 평균 Sherwood수 역시 과열도가 0°C, 3°C 및 5°C인 경우 모두 막 Reynolds수가 증가 할수록 증가하며, LiBr 수용액의 과열도가 큰 경우가 평균 Sherwood수가 큼을 알 수 있다. 본 연구에서 구한 막

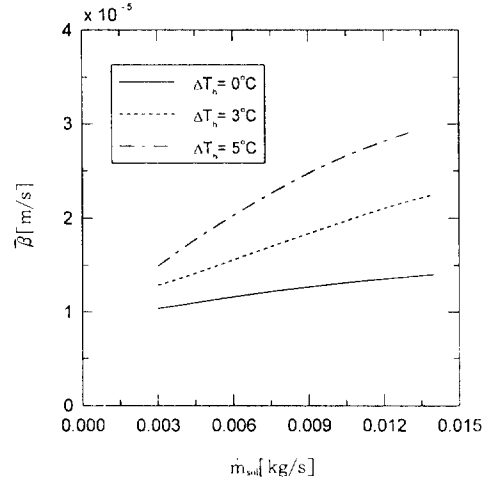


Fig.10 Effect of degree of superheat on averaged mass transfer coefficient

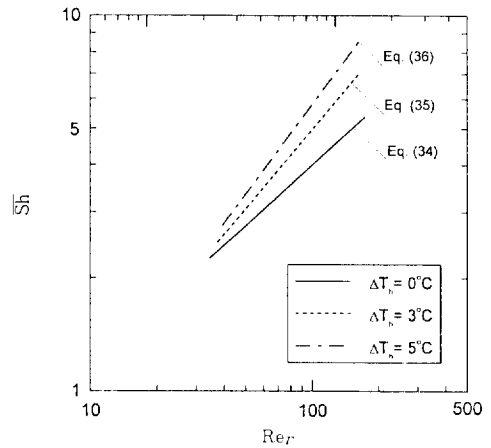


Fig.11 Effect of degree of superheat on averaged Sherwood number

Reynolds수가 30~200의 범위에서의 막 Reynolds수와 평균 Sherwood수와의 상관 관계식은 다음과 같다.

(1) 과열도가 0°C인 경우

$$\overline{Sh} = 0.337Re_r^{0.537} \quad (34)$$

(2) 과열도가 3°C인 경우

$$\overline{Sh} = 0.197Re_r^{0.701} \quad (35)$$

(3) 과열도가 5°C인 경우

$$\overline{Sh} = 0.151 Re_r^{0.792} \quad (36)$$

5. 결 론

본 연구에서 LiBr 수용액의 과열도가 증기 흡수 과정에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) LiBr 수용액이 과열상태인 경우, 흡수기 입구 영역에서는 냉매 증기가 증발하여 수용액의 농도가 증가하며, LiBr수용액의 과열도가 큰 경우 일수록 많은 양의 냉매가 증발한다.

2) LiBr 수용액의 과열도가 큰 경우에 냉매증기의 총 흡수량은 적으며, 흡수기 벽면을 통하여 방출되는 총 열전달량은 크다.

3) 본 연구에서 얻은 공냉형 흡수기에서의 평균 열전달계수는 약 1300~2800W/m²·K의 범위에 있으며, 평균 물질전달계수는 약 1~3×10⁻³m/s의 범위 내에 있다.

4) Log좌표계에서, 과열도가 0°C인 경우에는 막 Reynolds수의 증가에 따라 평균 Nusselt수가 일정한 기울기로 증가하는 반면, 과열도가 3°C 및 5°C인 경우에는 막 Reynolds수의 범위에 따라 평균 Nusselt수의 증가 기울기가 다름을 알 수 있다.

5) Log좌표계에서, 과열도가 0°C, 3°C 및 5°C인 경우 모두 막 Reynolds수의 증가에 따라 평균 Sherwood수가 일정한 기울기로 증가함을 알 수 있다.

6) LiBr 수용액의 과열도가 없는 경우에 비하여 과열도가 존재하는 경우의 평균 Nusselt수 및 평균 Sherwood수가 더 큼을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. Shigekichi Kurosawa, 1989, "Development of Air-Cooled Double-Effect Gas-Fired Absorption Water Chiller-Heater", Refrigeration, Vol. 64, No. 739, pp. 39~49.
2. Grossman, G., 1983, "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Film Absorption

- under Laminar Flow", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 28, No. 4, pp. 357~371.
3. Kishishita, K., Morioka, I., and Kiyota, M., 1992, "Correlation of Steam Absorption by a Falling Film of Aqueous Solution of LiBr", Proceedings of Second JSME-KSME Thermal Engineering Conference, pp. 3-1~3-6.
4. 엄기찬, 柏木孝夫, 서정운, 1993, "垂直管内를 흘러내리는 液膜式 吸收器의 吸收 및 熱傳達特性(第1報, 吸收特性)", 空氣調和冷凍工學 論文集, 第5卷, 第1號, pp. 1~9.
5. 엄기찬, 이동호, 최국광, 柏木孝夫, 서정운, 1993, "垂直管内를 흘러내리는 液膜式 吸收器의 吸收 및 熱傳達特性(第2報, 熱傳達特性)", 空氣調和冷凍工學 論文集, 第5卷, 第4號, pp. 257~264.
6. 조현철, 김종보, 정시영, 강상우, 이춘식, 1995, "LiBr계 용액을 사용한 수직관 흡수기의 열 및 물질전달에 관한 연구", 空氣調和冷凍工學論文集, 第7卷, 第2號, pp. 196~206.
7. 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.
8. Grossman, G., "Adiabatic Absorption and Desorption for Improvement of Temperature-Boosting Absorption Heat Pump"
9. Kawae, N., Shigehi, T., Kanemaru, K and Yamada, T., 1989, "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., pp. 58~70.
10. Oh, M. D., Kim, S. C., Kim, Y. L., and Kim, Y. I., 1994, "Cycle Analysis of an Air-Cooled LiBr/H₂O Absorption Heat Pump of

- Parallel-Flow Type”, *Int. J. Refrig.*, Vol. 17, No. 8, pp. 555~565.
11. 大内富久 外 3人, “公冷吸收器·凝縮器の配分検討 冷媒循環吸收システムの検討(第3報)”, 第25回 空氣調和·冷凍連合講演會講演論文集, 1991, pp. 177~180.
 12. McNeely, L. A., 1979, “Thermodynamic Properties of Aqueous Solutions of Lithium Bromide”, *ASHRAE Trans.*, PH-79-3, No. 3, pp. 413~434.
 13. Reid, R. C., Prausnitz, J. and Sherwood, T., 1977, *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill, New York.
 14. Kashiwagi, T., 1984, “Heat and Mass Diffusion in the Absorption of Water Vapor by Aqueous Solution of Lithium Bromide”, *Transactions of the Japanese Association of Refrigeration*, Vol. 1, pp. 89~98.