

수직원관형 GAX 흡수기 내부의 열 및 물질전달과정에 대한 수치모델

A Numerical Model for Heat and Mass Transfer Processes within a Vertical Tube GAX Absorber

천 태 식*, 정 은 수**
T. S. Cheon, E. S. Jeong

Key words: Ammonia/water(암모니아/물), Absorber(흡수기), Vertical tube(수직원관),
GAX(재생기-흡수기 열교환기), Heat and mass transfer(열 및 물질전달)

ABSTRACT

A numerical model which simulates the simultaneous heat and mass transfer within a vertical tube GAX absorber was developed. The ammonia vapor and the solution liquid are in counter-current flow, and the hydronic fluid flows counter to the solution liquid. The film thickness and the velocity distribution of the liquid film were obtained by matching the shear stress at the liquid-vapor interface. Two-dimensional diffusion and energy equations were solved in the liquid film to give the temperature and concentration, and a modified Colburn-Drew analysis was used for the vapor phase to determine the heat and mass fluxes at the liquid-vapor interface. The model was applied to a GAX absorber to investigate the absorption rates, temperature and concentration profiles, and mass flow rates of liquid and vapor phases. It was shown that the mass flux of water was negligible compared with that of ammonia except the region near the liquid inlet. Ammonia absorption rate increases rapidly near the liquid inlet and decrease slowly. Both the absorption rate of ammonia vapor and the desorption rate of water near the liquid inlet increase as the vapor mass flow rate increases, but the mass fluxes of the ammonia and the water near the liquid outlet decrease as the mass flow rate of the vapor increases.

기호설명

B : 반경방향 좌표, Fig. 1 [m]
 B_0 : 기체의 유효액막두께, Fig. 1 [m]
 C : 암모니아의 질량분율
 D : 물질확산계수 [m^2/s]
 f_i : Fanning 마찰계수

g : 중력가속도
 k : 열전도도 [$W/m \cdot K$]
 K : 기체의 물질전달계수 [m/s]
 L : 흡수기의 길이 [m]
 \dot{m} : 흡수율 [$kg/m^2 \cdot s$]
 p : 압력 [Pa]
 r : 반경방향의 좌표, Fig. 1 [m]
 R : 원관의 반지름, Fig. 1 [m]
 Re : Reynolds수
 T : 온도 [$^{\circ}C$]

* 홍익대학교 대학원

** 정희원, 홍익대학교 기계공학과

- t : 관벽의 두께 [m]
 u : 축방향 속도 [m/s]
 x : 축방향 좌표, Fig. 1 [m]
 z : 흡수되는 기체의 암모니아 질량분율

그리스문자

- α : 열확산계수 [m^2/s]
 Γ : 질량유량 [kg/s]
 δ : 액막의 두께 [m]
 Δx : 검사체적의 축방향 길이 [m]
 ζ : 반경방향의 무차원 길이
 η : 반경방향의 무차원 좌표
 λ : 단위질량당 흡수열 [J/kg]
 μ : 점성계수 [$kg/m \cdot s$]
 ν : 동점성계수 [m^2/s]
 ξ : 축방향의 무차원 좌표
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 τ_s : 액체-기체 경계면의 전단응력 [Pa]

하첨자

- b : 혼합평균(bulk)
 c : 순환수
 g : 암모니아/수증기 혼합기체
 H_2O : 물
 i : 방향 절점(node)의 번호
 in : 입구
 l : 액체
 NH_3 : 암모니아
 s : 액막과 혼합기체의 경계
 tot : 암모니아+물

1. 서론

흡수식 열펌프는 하절기의 전력수요를 경감시킬 수 있고 오존층 파괴의 주 요인인 CFC 냉매를 사용하지 않는 장점을 갖고 있어서 대형 건물의 냉/난방에 널리 사용되고 있으며, 최근에는 가정용으로 소형 공냉식 흡수식 열펌프를 개발하려는 연구들이 활발하게 진행되고 있다.^(1,2)

암모니아/물 GAX 사이클 흡수식 열펌프는 이

중효용이나 삼중효용 사이클에 비교하여 구조가 간단하고 성능계수가 높기 때문에 미국에서는 암모니아/물을 사용하는 GAX 사이클이 주거용과 소형의 상업용 냉난방기로 채택되어 많은 연구가 수행되고 있으며, 국내에서도 암모니아/물 GAX 사이클을 실용화하려는 연구를 수행하고 있다.⁽²⁾

흡수식 열펌프의 열 및 물질전달과정은 내부열회수장치를 사용함에 따라 더욱 복잡해진다.⁽³⁾ GAX 사이클 흡수식 열펌프의 경우 GAX 성분의 열 및 물질전달의 제한 때문에 사이클 해석에서 제시된 높은 성능계수를 얻지 못하고 있으므로 GAX 성분의 열 및 물질전달을 향상시키려는 연구들이 수행되고 있다.⁽⁴⁾

흡수기에서 일어나는 열 및 물질전달에 대한 연구들은 대부분 물/LiBr에 대하여 이루어졌고, 암모니아/물을 사용하는 흡수기에 대한 연구는 그다지 많지 않다. Briggs⁽⁵⁾는 암모니아/물 흡수식 열펌프 흡수기의 향류(cocurrent), 대향류(counter current) 흡수기에 대한 간단한 모델을 제시하였고, Guerreri와 King⁽⁶⁾은 유하액막(falling film) 흡수기에 대한 근사설계방법을 제안하였다. Perez-Blanco⁽⁷⁾는 암모니아/물 흡수기의 액막과 증기를 1차원으로 근사하여 해석하는 모델을 제시하였는데, 흡수율을 높이기 위해서는 증기의 속도를 최대한으로 하여야 한다고 제안하였으며, Aman과 Panchal⁽⁸⁾은 확산에 의한 저항이 암모니아/물 수용액에 암모니아증기가 흡수되는 과정에 미치는 영향을 규명하였다. Kang과 Christensen⁽⁹⁾은 흡수판(vertical fluted) 수직원관 GAX 흡수기의 대향류 모델을 제시하였고, 흡수기를 소형화하기 위하여 흡수율을 높이려면 증기의 속도를 최대한으로 하여야 한다고 제안하였다. Shailesh 등⁽⁴⁾은 비등형 재생기와 유하액막식 흡수기로 이루어진 GAX 성분해에 대한 해석프로그램을 개발하였다. 김홍연과 노승탁⁽¹⁰⁾은 냉각수를 고려한 암모니아/물 흡수식 냉동기의 흡수기에 대한 2차원 해석모델을 제시하였으며, Kim⁽¹¹⁾은 적분방법을 이용하여 흡수기에서 일어나는 열 및 물질전달현상을 규명하였다.

지금까지 제시된 흡수기의 해석모델들은 흡수기 내부의 압력이 일정하다는 가정을 사용하였으므로 기체가 액막에 미치는 전단응력을 고려하지 않았다. 그러나, 액막과 기체의 경계면에 작용하는 기체의 전단응력은 액막의 두께와 속도분포에 직접적인 영향을 미치므로 물질전달에 큰 영향을

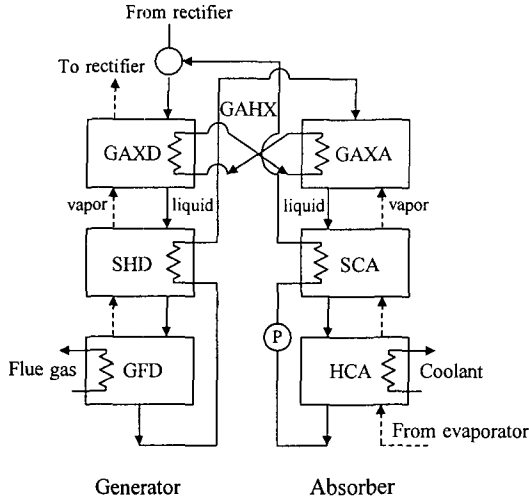


Fig. 1 Schematic diagram of a GAX cycle.

미칠 수 있다.^(12,13) 흡수기를 소형화하기 위하여 증기의 속도를 높일수록 기체가 액막에 가하는 전단응력의 영향은 커지게 된다.

본 연구에서는 기체가 액막에 미치는 전단응력을 고려하여 수직원관형 흡수기 내부에서 일어나는 열 및 물질전달과정을 해석할 수 있는 수치모델을 제시하였다. 액막의 유동은 완전발달한 층류로 가정하였으며, 액체영역에 2차원 물질전달 방정식과 에너지보존식을 적용하였고, 기체영역에는 수정된 Colburn-Drew 해석⁽¹⁴⁾을 적용하였다. 흡수율, 냉각수의 온도, 액체와 기체의 온도와 질량분율, 액체와 기체의 질량유량 등의 변화를 규명하였으며, 기체의 속도가 흡수율에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 해석모델

GAX 사이클의 흡수기는 Fig. 1에 보인 바와 같이 3개의 흡수기로 구성될 수 있다.⁽⁹⁾ 증발기에서 나온 암모니아증기는 순환수냉각 흡수기(HCA), 용액냉각 흡수기(SCA), GAX 흡수기(GAXA)를 통과하며 암모니아 수용액에 흡수된다. GAX 흡수기와 GAX 발생기(GAXD) 사이를 순환수가 흐르며 흡수기의 흡수율을 GAX 발생기에 전달하여 암모니아 증기의 발생에 이용한다.

Figure 2는 GAX 사이클의 수직원관형 흡수기의 개략도이다. 암모니아 수용액은 안쪽 관의 내

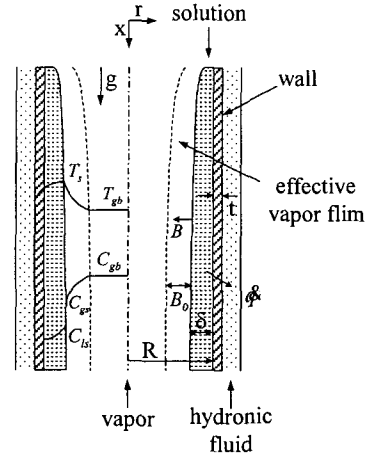


Fig. 2 Schematic of a vertical tube absorber.

벽을 따라 액막을 형성하며 흐르고, 그 내부로 암모니아/물의 혼합기체가 액막과 대향류로 유동한다. 냉각수는 내관과 외관의 환상공간을 액막과 대향류로 흐른다. 본 연구에서 사용된 주요 가정들은 다음과 같다.

- (1) 액막의 유동은 완전히 발달한 층류이다.
- (2) 기체영역의 열 및 물질전달의 저항들은 두께가 B_0 인 유효기체막에만 존재한다. 즉, 온도와 질량분율의 변화는 유효기체막에서만 일어난다.
- (3) 액상과 기상은 액막과 기체의 경계면에서 열역학적 평형상태에 있다.
- (4) 열 및 물질전달은 반경방향의 확산과 축방향으로의 대류에 의하여 일어난다.

2.1 액체의 속도분포와 열 및 물질전달

가정 (1)을 사용하여 구한 액막의 x -방향 운동량보존식은 다음과 같다.⁽¹⁵⁾

$$0 = -\frac{1}{\rho_l} \frac{dp}{dx} + \nu_l \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_l}{\partial r} \right) + g \quad (1)$$

액막의 경계조건 $r=R$ 에서 $u_l=0$, $r=R-\delta$ 에서 $u_l=u_s$ 를 사용하여 구한 액막의 속도분포는 다음과 같다.

$$u_i = \frac{gR^2}{4\nu_i} \left(1 - \frac{dp/dx}{\rho_i g} \right) \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 - \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\delta}{R} \right)^2 \right\} \frac{\ln(r/R)}{\ln(1-\delta/R)} \right] + u_s \frac{\ln(r/R)}{\ln(1-\delta/R)} \quad (2)$$

여기서 u_s 는 액체-기체 경계면에서의 속도이고, 액체의 속도 u_i 와 u_s 의 방향은 $+x$ 방향이다. 압력구배와 액체-기체 경계면에서의 전단응력 τ_s 사이의 관계 $dp/dx = 2\tau_s/(R-\delta)$ 를 사용하면 식 (2)에서 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\tau_s = -\frac{\rho_i g R}{4} \left(1 - \frac{2\tau_s}{\rho_i g (R-\delta)} \right) \left[2 \left(1 - \frac{\delta}{R} \right) + \frac{1 - (1-\delta/R)^2}{(1-\delta/R) \ln(1-\delta/R)} \right] + \frac{\mu_i u_s / R}{(1-\delta/R) \ln(1-\delta/R)} \quad (3)$$

액체의 질량유량은 식(2)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Gamma_l = \frac{\pi \rho_i g R^4}{4\nu_i} \left(1 - \frac{2\tau_s}{\rho_i g (R-\delta)} \right) \left[1 - \left(1 - \frac{\delta}{R} \right)^2 - \frac{1 - (1-\delta/R)^4}{2} + \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\delta}{R} \right)^2 \right\} \times \left\{ \left(1 - \frac{\delta}{R} \right)^2 + \frac{1 - (1-\delta/R)^2}{2 \ln(1-\delta/R)} \right\} \right] - \pi \rho_i u_s R^2 \left[\left(1 - \frac{\delta}{R} \right)^2 + \frac{1 - (1-\delta/R)^2}{2 \ln(1-\delta/R)} \right] \quad (4)$$

가정 (4)을 이용하여 액막에서 일어나는 물질전달 및 열전달의 지배방정식들은 다음과 같이 표현된다.⁽¹⁵⁾

$$u_i \frac{\partial C_l}{\partial x} = D_l \left(\frac{\partial^2 C_l}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_l}{\partial r} \right) \quad (5)$$

$$u_i \frac{\partial T_l}{\partial x} = \alpha_l \left(\frac{\partial^2 T_l}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_l}{\partial r} \right) \quad (6)$$

2.2 기체영역의 열 및 물질전달

기체에서 액막으로 전달되는 질량유속과 열유속은 Colburn-Drew 해석⁽¹⁴⁾을 수정하여 구하였다.

가정 (2)에 의하여 액막과 기체의 경계면으로 흡수되는 암모니아의 질량유속은 다음 식과 같이 확산과 유동에 의한 질량유속의 합으로 표현할 수 있다.^(9,14)

$$\dot{m}_{NH_3} = \rho_g K \frac{dC_g}{d\zeta} + \dot{m}_{tot} C_g \quad (7)$$

여기서 K 는 기체의 물질전달계수이다. \dot{m}_{tot} 은 액막에 흡수되는 암모니아와 수증기의 총질량유속을 나타내며, $\zeta (= B/B_0)$ 는 경계면에서 기체영역으로의 무차원 길이이다. 암모니아 증기의 질량유속을 $\dot{m}_{NH_3} = (\dot{m}_{NH_3})' + \dot{m}_{tot} C_{gs}$ 로 가정하여 식 (7)에 대입하면 다음 식을 얻을 수 있고

$$\rho_g K \frac{dC_g}{d\zeta} = (\dot{m}_{NH_3})' - \dot{m}_{tot} (C_g - C_{gs}) \quad (8)$$

식(8)을 경계조건들 $\zeta=0$ 에서 $C_g = C_{gs}$, $\zeta=1$ 에서 $C_g = C_{gb}$ 를 이용하여 적분하여 $(\dot{m}_{NH_3})'$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(\dot{m}_{NH_3})' = \frac{\dot{m}_{tot}}{1 - e^{-\dot{m}_{tot}/\rho_g K}} (C_{gb} - C_{gs}) \quad (9)$$

따라서, 액막에 흡수되는 암모니아증기의 질량유속은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{m}_{NH_3} = \frac{\Phi_m}{1 - e^{-\Phi_m}} \rho_g K (C_{gb} - C_{gs}) + \dot{m}_{tot} C_{gs} \quad (10)$$

$$\Phi_m = \dot{m}_{tot} / \rho_g K \quad (11)$$

기체에서 액막과 기체의 경계면으로 전달되는 현열(sensible heat)은 다음과 같이 주유동의 냉각에 의한 열유속과 액막에 흡수되는 증기가 주유동의 온도 T_{gb} 에서 액막과 기체의 경계면의 온도 T_s 로 냉각되기 때문에 발생하는 열유속의 합으로 표현할 수 있다.^(9,14)

$$q''_{sen} = h_g \frac{dT_g}{d\zeta}$$

$$+ (\dot{m}_{NH_3} C_{pNH_3} + \dot{m}_{H_2O} C_{pH_2O})(T_g - T_s) \quad (12)$$

여기서 h_g 는 대류열전달계수이다. 식(12)을 경계 조건들 $\zeta=0$ 에서 $T_g = T_s$, $\zeta=1$ 에서 $T_g = T_{gb}$ 를 이용하여 적분하면 증기영역에서 경계면으로 전달되는 현열은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q''_{sen} = \frac{\Phi_H}{1 - e^{-\Phi_H}} h_g (T_{gb} - T_s) \quad (13)$$

$$\Phi_H = (\dot{m}_{NH_3} C_{pNH_3} + \dot{m}_{H_2O} C_{pH_2O}) / h_g \quad (14)$$

기체영역에서 액막과 기체의 경계면으로 전달되는 총열유속은 현열과 잠열의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$q''_{tot} = \frac{\Phi_H}{1 - e^{-\Phi_H}} h_g (T_{gb} - T_s) + \dot{m}_{tot} \lambda \quad (15)$$

본 연구에서는 기체유동을 완전히 발달한 관내 유동으로 가정하여 액막과 기체의 경계면에서의 전단응력을 구하였다. 흡수나 증발 등의 상변화에 의한 운동량전달에 의하여 계면전단응력이 증가하는 것을 고려하기 위하여 Blangetti와 Nanshaki⁽¹⁶⁾가 제시한 다음 식을 사용하여 계면에서의 전단응력을 구하였다.

$$\tau_s = \frac{f_i}{2} \frac{\phi}{e^{\phi} - 1} \rho_g (u_{gb} + u_s)^2 \quad (16)$$

$$\phi = \frac{-\dot{m}_{tot}}{\frac{1}{2} f_i \rho_g (u_{gb} + u_s)} \quad (17)$$

여기서 u_{gb} 는 기체의 평균속도로 $-x$ 방향이 양의 방향이다.

Fanning의 마찰계수 f_i 는 다음 식과 같이 주어진다.⁽¹⁷⁾

$$\begin{aligned} f_i &= 16/Re_g & Re_g < 2000 \\ f_i &= Re_g^{0.33}/1525 & 2000 < Re_g < 4000 \\ f_i &= 0.079Re_g^{-0.25} & 4000 < Re_g < 30000 \end{aligned} \quad (18)$$

$$f_i = 0.046Re_g^{-0.2} \quad 30000 < Re_g < 10^6$$

여기서 기체의 Reynolds수는 다음과 같이 기체의 계면에 대한 상대속도로 정의된다.⁽¹⁷⁾

$$Re_g = \frac{2\rho_g(u_{gb} + u_s)(R - \delta)}{\mu_g} \quad (19)$$

액막과 기체 사이의 대류열전달계수와 물질전달계수는 Chilton-Colburn 유사성⁽¹⁸⁾을 이용하여 구하였다.

2.3 질량보존과 에너지보존

기체영역의 질량보존, 암모니아 성분의 질량보존, 그리고 에너지보존식들은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma_{g,i-1} = \Gamma_{g,i} - 2\pi(R - \delta)\Delta x \dot{m}_{tot} \quad (20)$$

$$C_{gb,i-1}\Gamma_{g,i-1} = C_{gb,i}\Gamma_{g,i} - 2\pi(R - \delta)\Delta x \dot{m}_{NH_3} \quad (21)$$

$$\Gamma_{g,i} C_{pg}(T_{gb,i} - T_{gb,i-1}) = 2\pi(R - \delta)\Delta x q''_{sen} \quad (22)$$

여기서 i 는 x -방향으로의 절점(node)를 나타내고, Δx 는 검사체적의 축방향 길이이다. C_{gb} 와 T_{gb} 는 기체의 암모니아 혼합평균 질량분율과 혼합평균 온도이다.

순환수의 에너지보존은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{m}_c C_{p,c}(T_{c,i-1} - T_{c,i}) = \frac{T_{wi} - T_c}{R_{tot}} \quad (23)$$

여기서 T_{wi} 는 내관의 안쪽 면의 온도이고, R_{tot} 은 내관의 전도열저항과 내관 외벽과 냉각수 사이의 대류열저항의 합이다.

순환수가 흐르는 환상공간의 대류열전달계수는 이찬우⁽¹⁹⁾가 제안한 식을 사용하였다.

$$h_c = 0.325 \frac{k}{d_h} Re^{0.5} Pr^{0.33} \left(\frac{d_h}{l} \right)^{0.055} \quad (24)$$

여기서, d_h 는 환상공간의 수력직경이고, l 은 순

환수유로의 길이이다.

2.4 입구조건과 경계조건

입구조건과 경계조건들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 x=0 & \quad ; T_l = T_{l,in}, C_l = C_{l,in} \\
 x=L & \quad ; T_g = T_{g,in}, C_g = C_{g,in} \\
 r=R & \quad ; -k_l(\partial T_l / \partial r)(2\pi R) = (T_l - T_c) / R_{tot}, \\
 & \quad \partial C_l / \partial r = 0 \\
 r=R-\delta & \quad ; T_l = T_g, C_b = C(p, T_s), \\
 & \quad C_{gs} = C_g(p, T_s), \\
 & \quad -k_l \frac{\partial T_l}{\partial r} = q''_{tot}, \\
 \dot{m}_{NH_3} & = \dot{m}_{tot} C_b - \rho_l D_l \frac{\partial C_l}{\partial r} \\
 & = \frac{\Phi_m}{1-e^{-\Phi_m}} \rho_g K (C_{gb} - C_{gs}) + \dot{m}_{tot} C_{gs}
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

3. 수치해석방법

액막의 두께 δ 는 암모니아가 흡수됨에 따라 유동방향으로 변하므로 식(5)과 (6)를 다음 식들을 사용하여 좌표변환하고 유한차분법으로 해를 구하였다.

$$\xi = x/L \tag{26}$$

$$\eta = (R-r)/\delta \tag{27}$$

GAX 사이클의 흡수기에서 액체와 기체, 그리고 액체와 순환수가 대향류로 흐르기 때문에 순환수의 온도를 가정하여 액체와 기체 영역의 해를 구하고, 그 결과를 이용하여 순환수로 전달되는 열유속을 계산하여 순환수의 온도와 내관 벽의 온도를 구하였다. 새로 얻은 순환수의 온도가 가정한 값과 같을 때까지 이 과정을 반복하였다.

액체와 기체 영역의 해는 다음 순서에 따라 구하였다.

- (1) 각 길이방향 절점(node)에서 액체/기체 경계면의 액막의 온도구배를 가정한다.
- (2) 액체의 입구에서 출구방향으로 가정된 경계면에서의 온도구배를 사용하여 액체의 온도분포를

구한다.

(3) (2)에서 구한 액체/기체 경계면의 온도와 열역학적 평형조건을 사용하여 계면에서의 액체와 기체의 암모니아 질량분율을 계산한다.

(4) 액체의 입구에서 출구방향으로 (3)에서 구한 경계면에서의 질량분율을 사용하여 액체의 질량분율을 계산한다.

(5) 식(25)의 액체/기체 경계면에서 암모니아의 질량유속이 같다는 조건을 사용하여 각 길이방향 절점에서 흡수되는 총질량유속을 계산하고, 암모니아와 물의 질량유속을 각각 계산한다.

(6) (5)에서 구한 흡수율을 사용하여 각 절점에서 액체의 질량유량과 기체의 질량유량, 혼합평균 질량분율과 온도를 계산한다.

(7) 식 (3), (4), (16)에서 δ, τ_s, u_s 를 구한다.

(8) 각 절점에서의 액체의 계면에서의 온도구배를 새로 가정하고 액체/기체 경계면의 온도가 수렴될 때까지 (2)에서 (7)까지의 과정을 반복한다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서 제시된 해석모델을 Fig. 1의 GAX 흡수기(GAXA)에 적용하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 흡수기의 제원과 기준작동조건들을 보여준다. Table 1의 액체와 기체의 입구조건들은

Table 1 Geometry and reference operating conditions of the absorber.

Parameter	
Inner tube diameter (mm)	25.0
Outer tube diameter (mm)	31.0
Inner tube thickness (mm)	1.0
Length (m)	2.0
System pressure (bar)	4.6
Solution inlet concentration (%)	9.6
Solution inlet temperature (°C)	120.0
Solution inlet flow rate (g/s)	3.0
Vapor inlet concentration (%)	92.0
Vapor inlet temperature (°C)	80.0
Vapor inlet flow rate (g/s)	1.0
Coolant inlet temperature (°C)	77.0
Coolant flow rate (ℓ/min)	1.2

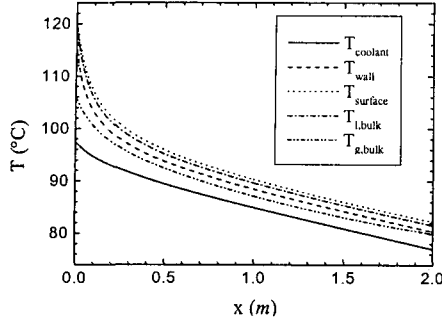


Fig. 3 Temperature variations along the tube.

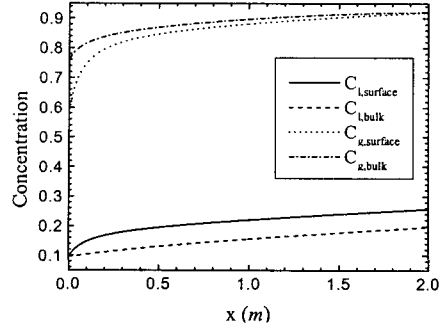


Fig. 5 Concentration variations along the tube.

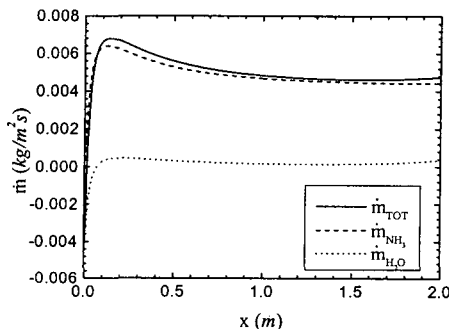


Fig. 4 Absorption rates along the tube.

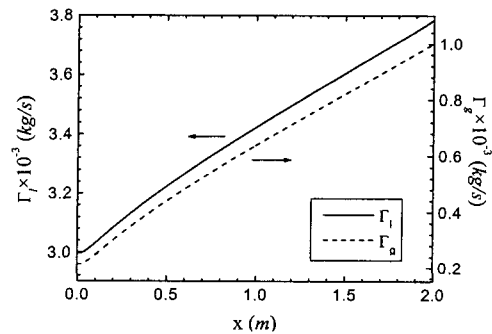


Fig. 6 Mass flow rates of liquid and vapor.

Herold 등⁽²⁰⁾이 제시한 GAX 사이클의 작동조건에서 구하였다. 순환수는 체적농도 30% 에틸렌글리콜을 사용하였다.

Fig. 3은 냉각수의 온도, 내관의 안쪽 벽의 온도, 액체와 기체의 계면온도, 액막의 평균온도, 그리고 기체의 평균온도의 길이방향 변화를 보여준다. 암모니아 증기가 액막에 흡수되며 흡수열을 액체와 기체의 계면에 방출하기 때문에 계면온도가 액막과 기체의 평균온도 보다 높은 것을 볼 수 있다. 기체의 평균온도가 액체의 평균온도 보다 낮은 것은 기체의 열전도도가 낮기 때문에 계면에서 기체로 전달되는 열전달율이 작기 때문으로 생각된다. 계면에서 흡수된 흡수열은 액막을 통하여 냉각수로 전달된다. 액체의 입구 부근

에서 액막과 냉각수의 온도차가 매우 크므로 액막과 계면의 온도는 급격히 감소한다.

Fig. 4는 흡수되는 질량유속의 길이방향 변화를 보여준다. 흡수기 전체에 걸쳐서 암모니아/수증기 혼합기체의 암모니아 증기는 액막으로 흡수되는 것을 볼 수 있는데, 액체의 입구 부근에서 암모니아의 흡수율은 급격히 증가하다가 $x=0.1m$ 부근에서 최대가 되고, 그 이후에는 서서히 감소한다. 액체의 입구 부근을 제외하고 물의 흡수율이 암모니아의 흡수율에 비하여 매우 작은 것을 알 수 있다. 액체의 입구부근에서는 암모니아가 액막으로 흡수되는 양보다 물이 기체로 증발하는 양이 더 큰 것을 볼 수 있는데, 이것은 암모니아/수증기 혼합기체의 수증기 질량분율이 계면의 수

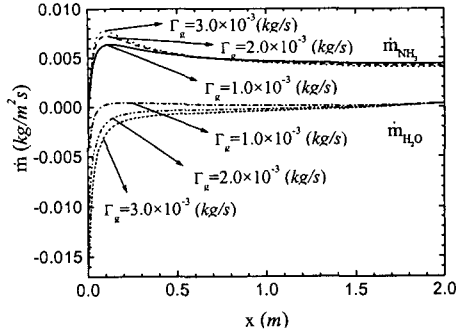


Fig. 7 Effect of vapor mass flow rate on absorption rate.

증기 질량분율과 평형상태를 이루는데 필요한 질량분율보다 낮기 때문이고, 액체의 출구방향으로 진행해 가면서 평형상태에 도달되어 물의 증발율이 0이 된 이후에는 암모니아/수증기 혼합기체의 수증기가 액막으로 흡수되는 것을 볼 수 있다.⁽⁸⁾

Fig. 5는 액체와 기체의 체적평균 암모니아 질량분율과 계면에서의 질량분율의 변화를 보여준다. Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼 액체/기체 경계면의 온도는 액체의 입구 부근에서 급격히 감소하므로 열역학적 평형조건에 의하여 계면에서의 액체와 기체의 질량분율은 빠르게 증가하나, 온도변화의 기울기가 감소하면서 질량분율은 서서히 증가하는 것을 볼 수 있다. 액체의 입구 부근을 제외하고는 흡수되는 암모니아의 질량유속이 물의 질량유속에 비하여 매우 크고 거의 일정하므로 액체의 질량분율은 출구방향으로 선형적으로 증가하고, 기체의 암모니아 질량분율은 기체의 입구에서 출구방향으로 감소한다.

액체와 기체의 질량유량의 길이방향 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 액체의 질량유량은 약 27% 증가하고, 기체의 질량유량은 약 80% 정도 감소하였다.

Fig. 7은 기체의 질량유량의 변화가 암모니아와 물의 흡수율에 미치는 영향을 보여준다. 기체의 질량유량이 증가할수록 액체의 입구 ($x=0m$) 부근에서 암모니아의 흡수율과 물의 증발율이 현저하게 증가하나, 기체의 입구 ($x=2m$) 부근에서는 암모니아와 물의 흡수율은 기체의 질량유량에 크

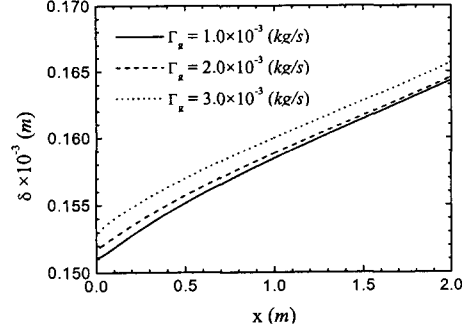


Fig. 8 Effect of vapor mass flow rate on liquid film thickness.

게 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다. 기체의 입구부근에서 암모니아와 물의 흡수율은 기체의 질량유량에 크게 영향을 받지 않으므로 액체의 입구 부근에서 암모니아/수증기 혼합기체의 암모니아 질량분율은 기체의 질량유량이 증가할수록 증가하고, 물의 질량분율은 감소한다. 따라서, 기체의 질량유량이 증가할수록 액체의 입구부근에서 기체와 액체 사이의 암모니아 질량분율의 차와 물의 질량분율의 차가 증가하므로 암모니아의 흡수율과 물의 증발율이 모두 증가하는 것으로 생각된다. GAX 사이클은 GAX 흡수기에서 발산되는 열을 순환수가 받아 GAX 재생기로 공급하는 내부 열교환 사이클이다. 액막에서 기체로의 물의 증발은 순환수로 전달되는 열전달율을 감소시키므로 GAX 흡수기 설계에 있어서 흡수기 내부의 물의 증발을 고려해야 한다.⁽⁷⁾

액막 두께의 길이방향 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 액막의 두께는 액체의 입구에서 출구로 가면서 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 기체와 액체는 대향류로 흐르고 기체의 질량유량이 증가할수록 기체가 액막에 가하는 전단응력은 커지므로 기체의 질량유량이 증가할수록 액막의 두께는 증가한다. 액막 두께의 증가는 액막의 물질전달저항을 증가시킨다. Perez-Blanco⁽⁷⁾와 Kang과 Christensen⁽⁹⁾은 흡수율을 높이기 위해서는 기체의 속도를 증가시켜 기체의 열 및 물질전달 계수를 크게 하여야 한다고 제안하였으나, 이들은 기체가 액막에 작용하는 전단응력을 고려하지 않았다. Fig. 7에서 $x > 1$ m일 경우 기체의 질량유

량이 증가할수록 암모니아의 흡수율과 물의 증발율이 감소하는 것은 기체의 열 및 물질전달계수의 증가가 물질전달에 미치는 영향 보다 액막 두께의 증가가 물질전달에 미치는 영향이 크다는 것을 보여준다.

5. 결론

본 연구에서는 암모니아/물 흡수식 열펌프의 수직원관형 흡수기에서 일어나는 열 및 물질전달을 해석할 수 있는 수치모델을 제시하였다. 액체는 완전발달한 층류로 가정하여 속도분포와 액막의 두께를 구하였고, 기체가 액막에 작용하는 전단응력의 영향을 고려하였다.

이 모델을 암모니아/물 GAX 흡수기에 적용하여 암모니아와 물의 흡수율과 증발율, 냉각수의 온도, 액체와 기체의 질량유량, 온도, 그리고 질량분율의 변화를 규명하였다. 본 연구에서 사용된 작동조건에서는 물의 질량유속은 액체의 입구 부근을 제외하고는 암모니아의 질량유속에 비하여 무시할 정도로 작으며, 암모니아의 흡수율은 액체의 입구 부근에서 급격히 증가하다가 서서히 감소한다. 기체의 질량유량이 증가할수록 액체의 입구 부근에서 암모니아의 흡수율과 물의 증발율은 모두 증가하나, 기체의 입구 부근에서는 액막 두께의 증가로 인하여 모두 감소한다.

후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학:ME97-F-15)에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 표합니다.

참고문헌

- Kim, Y. and Kang, B. H., 1996, Air-cooled absorber design for an $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ absorption heat pump, Proceedings of the 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference, pp. 493-498.
- 오명도, 김광진, 1994, GAX 응용 $\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3$ 흡수식 열펌프, 공기조화 냉동공학, 제23권, 제4호, pp. 269-281.
- Panchall, C. B. and Bell, K. J., 1992, Heat and mass transfer considerations in advanced heat pump systems, Proceedings of 27th IECEC, Vol. 3, pp. 221-226.
- Shailesh, V. P., Gomezplata, A., Papar, R. A., Anand, G., and Erickson, D. C., 1997, GAX component simulation and validation, ASHRAE Trans., Vol. 103, Part 1.
- Briggs, B. W., 1971, Concurrent, crosscurrent and countercurrent absorption in ammonia-water absorption refrigeration, ASHRAE Trans., Vol. 77, Part, 1., pp. 171-175.
- Guerreri, G., and King, C. J., 1974, Design of falling film absorber, hydrocarbon Processing, January, pp. 131-136.
- Perez-Blanco, H., 1988, A model of an ammonia-water falling film absorber, ASHRAE Trans., Vol. 94, Part 1., pp. 467-483.
- Aman, B., and Panchall, C. B., 1993, Absorption analysis of ammonia in an aqueous solution, Proceedings of 28th IECEC, Vol. 1, pp. 873-878.
- Kang, Y. T., and Christensen, R. N., 1993, Development of a counter-current model for a vertical fluted tube GAX absorber, Proceedings of the International Absorption Heat Pump Conference, ASME AES-31, pp. 7-16.
- 김홍연, 노승탁, 1995, 흡수식냉동기 흡수기의 열 및 물질전달 해석, 공기조화냉동공학회 동계학술발표논문집, pp. 335-342.
- Kim, B. J., 1998, Heat and mass transfer in a falling film absorber of ammonia-water absorption systems, Heat Transfer Engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 53-63.
- Yih, S-M. and Seagrave, R. C., 1980, Mass transfer in laminar falling liquid films with accompanying heat transfer and interfacial shear, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 23, pp. 749-758.
- Shair, F. H., 1971, Dispersion in laminar flowing liquid films involving heat transfer and interfacial shear, A.I.Ch.E.Jl., Vol. 17, pp. 920-926.
- Colburn, A. P. and Drew, T. B., 1937, The condensation of mixed vapors, Transaction of the American Inst. of Chemical Engineering,

- Vol. 33, pp. 197-215.
15. Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N., 1960, Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc.
 16. Blangetti, F. and Naushani, M. K., 1980, Influence of mass transfer on the momentum transfer in condensation and evaporation phenomena, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 23, pp. 1694-1695.
 17. Chen, S. J., Reed, J. G. and Tien, C. L., 1984, Reflux condensation in a two-phase closed thermosyphon, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No. 9, pp. 1587-1594.
 18. Bejan, A., 1993, Convection heat transfer, John Wiley & Sons, Inc., p. 352, p. 496.
 19. 이찬우, 1997, 수직관내 리튬브로마이드 수용액막의 흡수과정에 대한 비흡수가스의 영향, 홍익대학교 기계공학과 박사학위논문.
 20. Herold, K. E., He, X., Erickson, E. C., and Rane, M. V., 1991, The Branched GAX Absorption Heat Pump Cycle, Proc. of Absorption Heat Pump Conf., Tokyo., pp. 127-132.