

암모니아/물 흡수식 냉동기의 수직원관형 흡수기의 동적 모델

문 현 석, 정 은 수*, 김 병 주*

홍익대학교 대학원, *홍익대학교 기계·시스템디자인공학과

Dynamic Model of a Vertical Tube Absorber for Ammonia/Water Absorption Refrigerators

Hyun Suk Moon, Eun Soo Jeong*, Byongjoo Kim*

Graduate School of Mechanical Engineering, Hong-Ik University, Seoul 121-791, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Hong-Ik University, Seoul 121-791, Korea

(Received May 20, 2002; revision received August 27, 2002)

ABSTRACT: A dynamic model which simulates the coupled heat and mass transfer within a vertical tube absorber was developed. The liquid film is a binary mixture of two components, and both of these components are present in the vapor phase. The pressure, concentration, temperature and mass flow rate of the vapor are obtained by assuming that the pressure is uniform within an absorber. The model was applied to an absorber for an ammonia/water absorption refrigerator. The transient behaviors of the pressure, the outlet temperature and the concentration of the solution and the cooling water outlet temperature on a step change at the absorber inlet of the cooling water temperature, the vapor mass flow rate and the concentration of the solution were shown.

Key words: Dynamic model(동적 모델), Absorber(흡수기), Vertical tube(수직원관), Absorption refrigerator(흡수식 냉동기), Ammonia/water(암모니아/물)

기 호 설 명

A_c : 냉각수의 유동단면적 [m^2]

C : 암모니아의 질량분율

C_p : 정압비열 [$J/kg \cdot K$]

dm_g : 기체의 단위폭당 질량 [kg/m]

f : 액막두께의 계수(식(2))

g : 중력가속도

h : 비엔탈피 [J/kg]

K : 물질전달계수 [m/s]

L : 흡수기의 길이 [m]

\dot{m} : 질량유량 [kg/s]

m'' : 흡수되는 기체의 질량유속 [$kg/m^2 \cdot s$]

p : 압력 [Pa]

q'' : 열유속 [W/m^2]

R : 흡수기 내관의 반지름 [m]

T : 온도 [$^{\circ}C$]

t : 시간 [s]

x : 축방향 좌표, Fig. 1 [m]

x' : 축방향 좌표, Fig. 1 [m]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-320-1676; fax: +82-2-322-7003

E-mail address: esjeong@wow.hongik.ac.kr

그리스 문자

α : 열전달계수 [$W/m^2 \cdot ^{\circ}C$]

- Γ : 단위폭당 질량유량 [$\text{kg/m} \cdot \text{s}$]
- δ : 액막의 두께 [m]
- δ_w : 흡수기 내관의 벽두께 [m]
- λ : 단위질량당 흡수열 [J/kg]
- μ : 점성계수 [$\text{kg/m} \cdot \text{s}$]
- ν : 동점성계수 [m^2/s]
- ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

- b : 혼합 평균(bulk)
- c : 냉각수
- g : 암모니아/수증기 혼합기체
- H_2O : 물
- in : 입구
- l : 액체
- NH_3 : 암모니아
- out : 출구
- s : 액막과 혼합기체의 경계
- tot : 암모니아+물
- w : 흡수기 관벽

1. 서 론

흡수식 열펌프는 하절기의 전력수요를 경감시킬 수 있고, 오존층 파괴의 주요인인 CFC계 냉매를 사용하지 않으며, 시스템의 효율이 높다는 장점들을 갖고 있어서 중·대형 건물의 냉난방에 널리 사용되고 있다. 최근에는 가정용 및 소형 상업용으로 암모니아/물을 사용하는 흡수식 열펌프를 개발하려는 연구들이 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁾

암모니아/물 흡수식 냉동기는 LiBr/물을 사용하는 냉동기와 달리 식품의 냉동과 얼음제조에도 사용할 수 있는데, 이러한 경우 냉동기의 성능에 큰 영향을 미치는 냉각수온도와 냉동온도와 같은 작동조건들이 크게 변화한다.⁽²⁾ 또한, 태양열이나 폐열을 열원으로 이용하는 흡수식 열펌프의 작동조건(열원의 온도, 유량 등)은 계절이나 공장 가동상태에 따라 크게 변화한다.⁽³⁾ 작동조건 변화에 따른 흡수식 열펌프의 반응과 탈설계조건(off-design condition)에서의 성능을 예측하기 위해서는 동적 모델이 필요하다.⁽⁴⁾ 소형화와 성능

향상을 위하여 고효율 열교환기를 사용하고 복잡한 사이클을 채용한 흡수식 열펌프가 점차 증가하고 있는데, 이러한 열펌프들을 효율적으로 제어하고 안전하게 운전하기 위해서는 설계단계에서 동적 모델을 이용하여 시스템의 동특성을 파악하는 것이 요구된다.⁽⁵⁾

Jeong et al.⁽⁴⁾과 Sugano et al.⁽³⁾은 흡수식 사이클의 동적 모델을 제시하였다. 이 모델들은 단순화를 위하여 흡수기나 재생기와 같은 요소들의 성질이 균일하다고 가정한 집중변수(lumped parameter) 모델들이다. 그러나, 이러한 요소들 내부에서 온도와 농도는 균일하지 않으므로 좀더 실제에 가까운 동특성을 모사하기 위해서는 흡수기나 발생기 등의 구성요소들의 내부를 더 세부적으로 해석하는 것이 필요하다.

흡수기에 대한 해석모델들은 대부분 정상상태에 대한 것이고, 동적 모델은 매우 드물다. Hajji and Worek⁽⁶⁾은 정지 상태의 LiBr 수용액에 흡수되는 수증기의 비정상 흡수과정에 대한 이론적인 해석을 수행하였다. Wassenaar and Westra⁽⁵⁾는 유해액막형 흡수기에서 일어나는 열 및 물질전달에 대한 동적 모델을 제시하였는데, 기체를 단일 성분으로 가정하였기 때문에 암모니아/물을 작동 유체로 사용하는 흡수기에는 적용할 수 없다.

본 연구에서는 암모니아/물을 작동유체로 사용하는 흡수식 냉동기의 수직원관형 흡수기 내부에서 일어나는 열 및 물질의 전달과정을 해석할 수 있는 동적 모델을 제시하였다. 액체영역과 기체 영역에 각각 1차원 질량보존식, 암모니아 질량보존식, 그리고 에너지보존식을 적용하였고, 액막과 기체 사이의 열전달률과 물질전달률을 구하기 위하여 정상상태의 관계식들을 사용하였다. 이 모델을 이용하여 냉각수의 입구온도, 암모니아 수용액의 입구농도, 그리고 흡수기로 들어오는 증기의 질량유량의 변화가 흡수기의 압력, 냉각수의 출구온도, 흡수기를 나가는 암모니아 수용액의 농도와 온도에 미치는 영향을 보였다.

2. 해석 모델

Fig. 1은 수직원관형 흡수기의 개략도이다. 암모니아 수용액은 안쪽 관의 내벽을 따라 액막을 형성하며 흐르고, 그 내부로 암모니아/물의 혼합기체가 액막과 대향류로 유동한다. 냉각수는 내

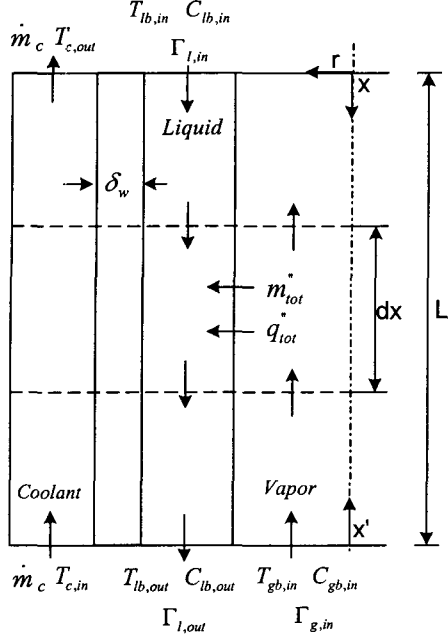


Fig. 1 Schematic of a vertical tube absorber.

관과 외관의 환상공간을 액막과 대향류로 흐른다. 본 연구에 사용된 주요 가정들은 다음과 같다.

- (1) 열 및 물질전달은 반경방향의 확산과 축방향으로의 대류에 의하여 일어난다.
- (2) 액상과 기상은 액막과 기체의 경계면에서 열역학적 평형상태에 있다.
- (3) 흡수기 내부의 압력은 균일하다.
- (4) 액막의 두께는 내관의 지름에 비하여 매우 작다.
- (5) 액막의 두께와 열전달 및 물질전달의 정상상태 관계식들은 비정상상태에서도 유효하다.

2.1 액체의 지배방정식

액막의 두께 δ 와 암모니아 수용액의 질량유량을 흡수기 내관의 원주길이로 나눈 단위폭당 질량유량 Γ_l 사이의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁵⁾

$$\begin{aligned} \delta &= a \left(\frac{\nu_l^2}{g} \right)^{1/3} \left(\frac{4\Gamma_l}{\rho_l \nu_l} \right)^b \\ &= \left(\frac{a \nu_l^{2/3 - b} 4^b}{g^{1/3} \rho_l^{b-1}} \right) \Gamma_l^b = \frac{1}{f} \frac{\Gamma_l^b}{\rho_l} \end{aligned} \quad (1)$$

$$f = \frac{g^{1/3} \rho_l^{b-1}}{4^b a \nu_l^{2/3-b}} \quad (2)$$

액막 레이놀즈수 $Re_l (= 4\Gamma_l/\mu_l) \leq 1600$ 일 때 $a = 0.909$, $b = 1/3$ 이고, $Re_l > 1600$ 일 때 $a = 0.2077$, $b = 0.533$ 이다.⁽⁷⁾ 암모니아 수용액의 밀도 ρ_l 과 동점성계수 ν_l 은 액막의 온도와 농도의 함수이므로 액막두께의 계수 f 는 액막의 온도와 농도의 함수이다.

액체의 질량보존식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial(\rho_l \delta)}{\partial t} = m_{tot}'' - \frac{\partial \Gamma_l}{\partial x} \quad (3)$$

여기서 m_{tot}'' 은 액막에 흡수되는 암모니아와 수증기의 총질량유속이다. 식(1)을 식(3)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 액막의 질량보존식을 Γ_l 로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Gamma_l}{\partial t} + \frac{f}{b} \Gamma_l^{1-b} \frac{\partial \Gamma_l}{\partial x} &= \frac{f}{b} \Gamma_l^{1-b} m_{tot}'' \\ &+ \frac{\Gamma_l}{bf} \left(\frac{\partial f}{\partial T_{lb}} \frac{\partial T_{lb}}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial C_{lb}} \frac{\partial C_{lb}}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

암모니아의 질량보존은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial(\rho_l \delta C_{lb})}{\partial t} = m_{NH_3}'' - \frac{\partial(\Gamma_l C_{lb})}{\partial x} \quad (5)$$

여기서 m_{NH_3}'' 는 액막으로 흡수되는 암모니아 증기의 질량유속이다. 식(1)과 (3)을 식(5)에 대입하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial C_{lb}}{\partial t} + f \Gamma_l^{1-b} \frac{\partial C_{lb}}{\partial x} = \frac{f}{\Gamma_l^b} (m_{NH_3}'' - m_{tot}'' C_{lb}) \quad (6)$$

액막의 에너지보존식은 다음과 같이 표현된다.⁽⁵⁾

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_l \delta h_{lb})}{\partial t} &= q_{tot}'' - \frac{\partial(\Gamma_l h_{lb})}{\partial x} \\ &- \alpha_{lw}(T_{lb} - T_w) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 q_{tot}'' 은 기체에서 액막으로 전달되는 총열 유속이고, 우변의 마지막 항은 액막에서 벽으로의 열유속을 나타낸다. 식(1)과 (3)을 식(7)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial T_{lb}}{\partial t} + f\Gamma_l^{1-b} \frac{\partial T_{lb}}{\partial x} = \frac{f}{C_{p,l}\Gamma_l^b} \left[q_{tot}'' - m_{tot}'' h_{lb} - \frac{\partial h_{lb}}{\partial C_{lb}} (m_{NH_3}'' - m_{tot}'' C_{lb}) - \alpha_{lw} (T_{lb} - T_w) \right] \quad (8)$$

압력이 암모니아 수용액의 엔탈피에 미치는 영향은 매우 작으므로 식(8)을 유도하는 과정에서 $\partial h_{lb}/\partial p$ 를 포함하는 항들은 무시하였다.

2.2 기체의 지배방정식

암모니아와 수증기의 혼합기체는 Fig. 1에 보인 바와 같이 수직상방(x' -방향)으로 유동하며 액막에 흡수된다. 가정 (4)를 이용하면 기체의 질량보존식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial (dm_g)}{\partial t} = - \frac{\partial \Gamma_g}{\partial x'} dx' - m_{tot}'' dx' \quad (9)$$

여기서 Γ_g 는 기체의 질량유량을 흡수기 내관의 원주길이로 나눈 값이고, dm_g 는 다음과 같이 표현된다.

$$dm_g = \frac{\rho_g \pi (R - \delta)^2 dx'}{2\pi R} \cong \frac{1}{2} \rho_g R dx' \quad (10)$$

식(10)을 식(9)에 대입하고, 기체의 혼합평균밀도 ρ_g 가 온도, 농도, 그리고 압력의 함수인 것을 이용하여 전개하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_g}{\partial T_{gb}} \frac{\partial T_{gb}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g}{\partial C_{gb}} \frac{\partial C_{gb}}{\partial t} \\ = - \frac{2}{R} \left(\frac{\partial \Gamma_g}{\partial x'} + m_{tot}'' \right) \end{aligned} \quad (11)$$

암모니아의 질량보존은 다음과 같다.

$$\frac{\partial (dm_g C_{gb})}{\partial t} = - \frac{\partial (\Gamma_g C_{gb})}{\partial x'} dx' - m_{NH_3}'' dx' \quad (12)$$

식(9)와 (10)을 식(12)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 표현을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial C_{gb}}{\partial t} + \frac{2\Gamma_g}{\rho_g R} \frac{\partial C_{gb}}{\partial x'} = \frac{2}{\rho_g R} (m_{tot}'' C_{gb} - m_{NH_3}'') \quad (13)$$

기체의 에너지보존은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial (dm_g h_{gb})}{\partial t} = - \frac{\partial (\Gamma_g h_{gb})}{\partial x'} dx' - q_{tot}'' dx' \quad (14)$$

이 식에 식(9)와 (10)을 대입하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{gb}}{\partial t} + \frac{2\Gamma_g}{\rho_g R} \frac{\partial T_{gb}}{\partial x'} = \frac{2}{\rho_g R C_{p,g}} \left[m_{tot}'' h_{gb} - q_{tot}'' - \frac{\partial h_{gb}}{\partial C_{gb}} (m_{tot}'' C_{gb} - m_{NH_3}'') \right] \end{aligned} \quad (15)$$

흡수기 내부의 압력은 균일하다는 가정 (3)을 이용하여 식(11)을 흡수기 전체 길이에 대하여 적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \int_0^L \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial T_{gb}} \frac{\partial T_{gb}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g}{\partial C_{gb}} \frac{\partial C_{gb}}{\partial t} \right) dx' \\ + \left(\int_0^L \frac{\partial \rho_g}{\partial p} dx' \right) \frac{\partial p}{\partial t} \\ = - \frac{2}{R} [(\Gamma_g)_{x'=L} - (\Gamma_g)_{x'=0}] \\ - \frac{2}{R} \int_0^L m_{tot}'' dx' \end{aligned} \quad (16)$$

흡수기를 나가는 기체는 없으므로 $(\Gamma_g)_{x'=L} = 0$ 이고, $(\Gamma_g)_{x'=0}$ 은 흡수기로 들어오는 기체의 질량유량이므로 압력의 시간에 대한 변화율은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{\int_0^L \frac{\partial \rho_g}{\partial p} dx'} \left[\frac{2}{R} \Gamma_{g,in} - \int_0^L \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial T_{gb}} \frac{\partial T_{gb}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g}{\partial C_{gb}} \frac{\partial C_{gb}}{\partial t} + \frac{2}{R} m_{tot}'' \right) dx' \right] \end{aligned} \quad (17)$$

2.3 냉각수와 벽의 에너지보존

냉각수와 벽의 에너지보존식은 다음과 같이 표현된다.

$$\rho_c C_{p,c} A_c \frac{\partial T_c}{\partial t} + \dot{m}_c C_{p,c} \frac{\partial T_c}{\partial x'} \quad (18)$$

$$= \alpha_c P_c (T_w - T_c)$$

$$\rho_w C_{p,w} \delta_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \alpha_c (T_c - T_w) \quad (19)$$

$$- \alpha_{lw} (T_w - T_{lb})$$

여기서 P_c 는 내관의 원주길이이고, α_c 와 α_{lw} 는 각각 내관과 냉각수 사이의 열전달계수, 액막과 관벽 사이의 열전달계수를 나타낸다.

2.4 열 및 물질전달관계식

기체에서 액막으로 전달되는 질량유속과 열유속은 Colburn-Drew 해석⁽⁸⁾을 이용하여 구하였다. 액막에 흡수되는 암모니아 증기의 질량유속은 다음과 같이 표현된다.⁽⁹⁾

$$\dot{m}_{\text{NH}_3}'' = \frac{\Phi_m}{1 - e^{-\Phi_m}} \rho_g K_{gs} (C_{gb} - C_{gs}) \quad (20)$$

$$+ \dot{m}_{\text{tot}}'' C_{gs}$$

$$\Phi_m = \frac{\dot{m}_{\text{tot}}''}{\rho_g K_{gs}} \quad (21)$$

또한, 기체영역에서 액막과 기체의 경계면으로 전달되는 총열유속은 현열과 잠열의 합으로 다음과 같이 표현된다.^(8,9)

$$\dot{q}_{\text{tot}}'' = \frac{\Phi_H}{1 - e^{-\Phi_H}} \alpha_{gs} (T_{gb} - T_s) + \dot{m}_{\text{tot}}'' \lambda \quad (22)$$

$$\Phi_H = (\dot{m}_{\text{NH}_3}'' C_{p,\text{NH}_3} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}'' C_{p,\text{H}_2\text{O}}) / \alpha_{gs} \quad (23)$$

여기서 K_{gs} 와 α_{gs} 는 각각 기체와 액체/기체 경계면 사이의 물질전달계수와 열전달계수인데, 기체의 유동을 완전히 발달한 관내 유동으로 가정하고 Chilton-Colburn 상사성⁽¹⁰⁾을 이용하여 구하였다.

경계면에서 액체로의 열유속 및 암모니아의 질량유속, 그리고 액체에서 벽으로의 열유속은 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$\dot{q}_{ls}'' = \alpha_{ls} (T_s - T_{lb}) \quad (24)$$

$$\dot{m}_{\text{NH}_3}'' = \rho_l K_{ls} (C_{ls} - C_{lb}) \quad (25)$$

$$\dot{q}_{lw}'' = \alpha_{lw} (T_{lb} - T_w) \quad (26)$$

α_{ls} 와 α_{lw} 는 Chen et al.⁽¹¹⁾과 McAdams⁽¹²⁾가 제시한 관계식들을 이용하여 구하였고, 물질전달계수 K_{ls} 는 Henstock and Hanratty⁽¹³⁾가 제시한 식을 사용하였다.

냉각수가 흐르는 환상공간의 대류열전달계수는 McAdams⁽¹²⁾가 제안한 식을 사용하였다.

액체와 기체의 경계면에서 열유속과 암모니아 질량유속의 연속조건은 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$\alpha_{ls} (T_s - T_{lb}) = \frac{\Phi_H}{1 - e^{-\Phi_H}} \alpha_{gs} (T_{gb} - T_s) \quad (27)$$

$$+ \dot{m}_{\text{tot}}'' \lambda$$

$$\rho_l K_{ls} (C_{ls} - C_{lb}) = \frac{\Phi_m}{1 - e^{-\Phi_m}} \rho_g K_{gs} (C_{gb} - C_{gs}) \quad (28)$$

$$+ \dot{m}_{\text{tot}}'' C_{gs}$$

3. 수치해석방법

흡수기의 동적 거동을 모사하기 위해서는 8개의 미분방정식(식(4), (6), (8), (13), (15), (17), (18), (19))의 해를 구하여야 한다. 유한차분법을 사용하여 미분방정식들의 해를 구하였는데, 시간에 관한 미분항은 1차 명시적 방법(explicit method)을 사용하여 차분하였고, 공간에 관한 미분항은 상류차분방법(upwind difference method)을 사용하여 차분하였다. 기체의 질량유량 Γ_g 는 식(11)에서 구할 수 있다.

미분방정식들에서 액체와 기체의 혼합평균온도와 농도를 구한 후 식(27)과 (28)을 동시에 만족시키는 액체/기체 경계면의 온도 T_s 와 흡수율 \dot{m}_{tot}'' 을 구한다. 액체/기체 경계면에서의 액체와 기체의 농도 C_{ls} 와 C_{gs} 는 가정 (2)를 사용하여 구할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

Table 1은 본 연구에서 사용된 흡수기의 제원과 기준작동조건들을 보여준다. 이 조건들에서 구한 정상상태의 해를 비정상상태의 초기조건으로 사용하였다.

흡수식 냉동기의 고온, 중온, 저온 열원들의 온도 변화는 각각 흡수기로 들어오는 암모니아 수용액의 농도, 냉각수 온도, 그리고 암모니아/물 혼합기체의 질량유량에 영향을 미친다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 이 변수들의 갑작스런 변화가 압력, 냉각수 출구온도, 그리고 암모니아 수용액의 출구온도와 출구농도에 미치는 영향을 알아보았다.

Fig. 2는 냉각수 입구온도가 갑작스럽게 변하였을 때 암모니아 수용액의 출구온도와 냉각수 출구온도의 시간에 따른 변화를 보여준다. 냉각수 출구온도는 일정하다가 약 1.5 sec 후에 변하기 시작하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 냉각수의 체류시간이 약 1.5 sec이기 때문이다. 암모니아 수용액의 출구는 냉각수 입구와 인접하고 있으므로 냉각수의 온도가 변하면 곧 변하기 시작한다.

Fig. 3은 냉각수 입구온도의 변화가 암모니아 수용액의 출구농도에 미치는 영향을 보여준다. 냉각수의 입구온도가 상승하면 암모니아 수용액의 온도도 상승하고 기체의 흡수율이 낮아지므로 출구농도가 낮아진다. 그러나, 냉각수의 입구온도가 하강하면 흡수율이 증가하므로 출구농도가 상승

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)	0.7
System pressure (bar)	3.2
Solution inlet concentration (%)	34.32
Solution inlet temperature (°C)	47.27
Solution inlet flow rate (g/s)	2.0
Vapor inlet concentration (%)	99.9
Vapor inlet temperature (°C)	42.08
Vapor inlet flow rate (g/s)	0.285
Coolant inlet temperature (°C)	40
Coolant flow rate (g/s)	62.01

하는 것을 볼 수 있다.

냉각수 입구온도의 변화가 압력에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 냉각수 입구온도가 낮아지면 기체가 액막으로 많이 흡수되어 기체의 질량이 감소하므로 압력이 낮아진다. 냉각수 입구온도가 높아지면 흡수율이 낮아지므로 흡수기 내부의 압력은 상승한다. 암모니아/물 혼합기체는 냉각수에서 가장 멀리 위치하고 있으므로 정상상태에 도달하는 데 필요한 시간이 가장 긴 것을 볼 수 있다.

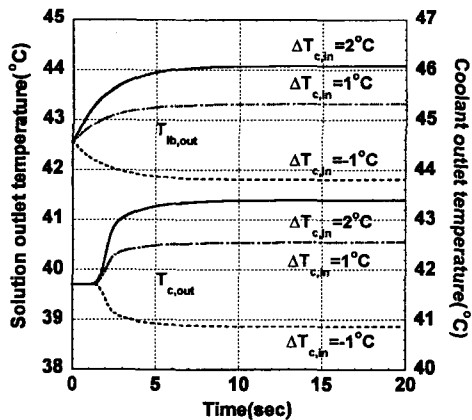


Fig. 2 Variations of outlet temperatures on a step change of cooling water temperature.

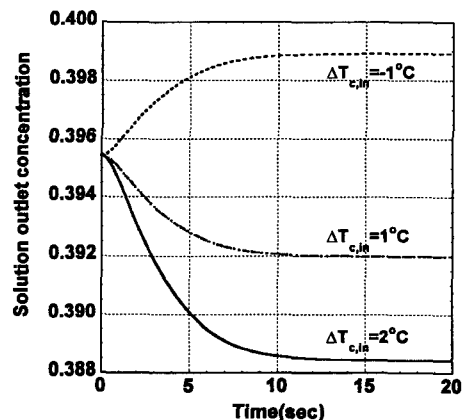


Fig. 3 Variation of solution outlet concentration on a step change of cooling water temperature.

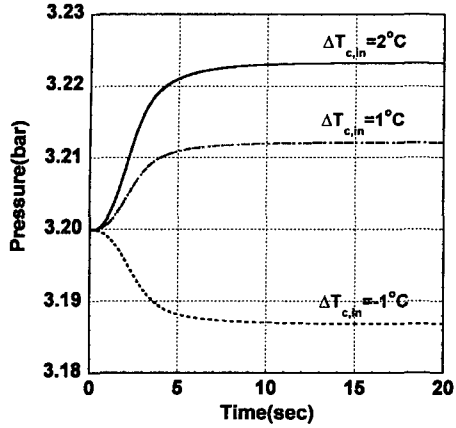


Fig. 4 Variation of pressure on a step change of cooling water temperature.

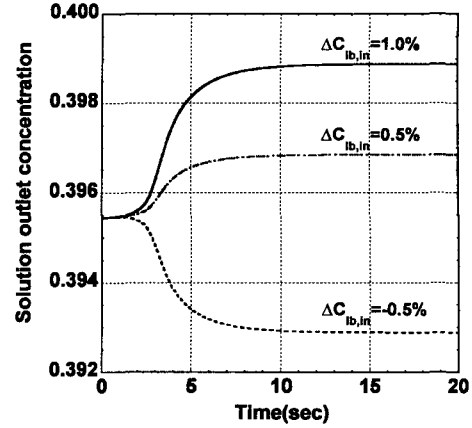


Fig. 6 Variation of solution outlet concentration on a step change of solution inlet concentration.

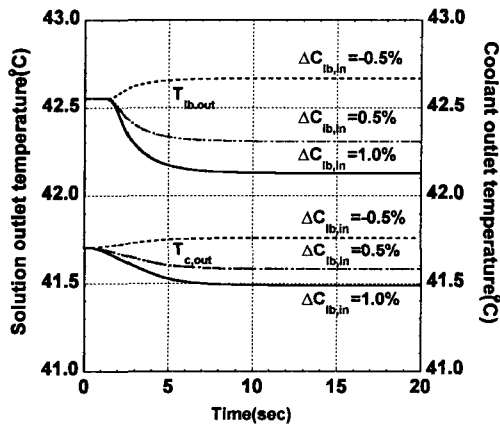


Fig. 5 Variations of outlet temperatures on a step change of solution inlet concentration.

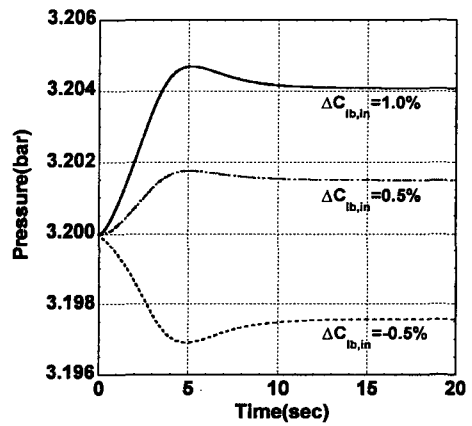


Fig. 7 Variation of pressure on a step change of solution inlet concentration.

Fig. 5는 암모니아 수용액의 입구농도를 변화시켰을 때 암모니아 수용액의 출구온도와 냉각수 출구온도의 시간에 따른 변화를 보여준다. $\Delta C_{lb,in} = 1.0\%$ 는 흡수기로 들어가는 암모니아 수용액의 농도가 Table 1에 표시된 기준조건 34.32%에서 35.32%로 증가한 것을 나타낸다. 암모니아 수용액의 입구농도가 낮아지면 기체가 액막으로 많이 흡수되므로 액막으로 전달되는 흡수열이 증가하고, 냉각수로 전달되는 열전달률도 증가한다. 따라서, 암모니아 수용액의 입구농도가 낮아지면 암모니아 수용액의 출구온도와 냉각수 출구온도는 상승한다. 암모니아 수용액의 입구농도가 높아지

면 기체의 흡수율이 감소하므로 냉각수와 암모니아 수용액의 출구온도는 낮아진다.

암모니아 수용액의 입구농도의 변화가 출구농도에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 입구농도가 0.5% 감소하였을 때 출구농도는 약 0.27% 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 입구농도가 낮아짐에 따라 기체가 액막으로 더 많이 흡수되었기 때문이다. 입구농도가 1% 증가하였을 때 출구농도가 약 0.35% 증가하는 것은 입구농도가 높아짐에 따라 기체의 흡수율이 초기상태에 비하여 낮아졌기 때문이다.

Fig. 7은 암모니아 수용액의 입구농도가 압력

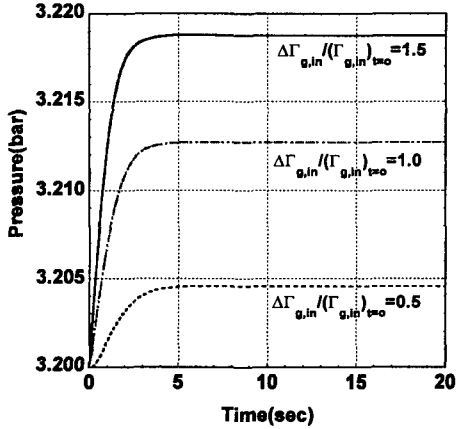


Fig. 8 Variation of pressure on a step change of vapor mass flow rate.

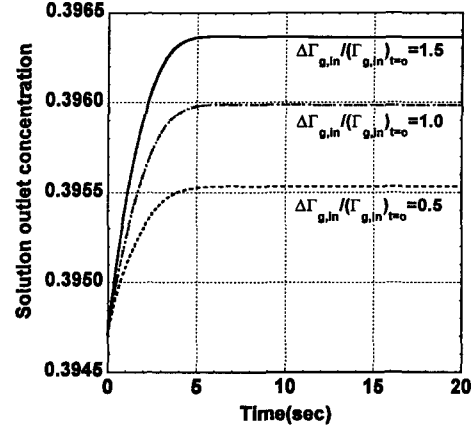


Fig. 9 Variation of solution outlet concentration on a step change of vapor mass flow rate.

변화에 미치는 영향을 보여준다. 입구농도가 갑자기 낮아지면 암모니아 수용액의 입구 근처에서 기체의 흡수율이 증가하므로 기체의 질량이 감소하여 압력은 낮아진다. 그러나, Fig. 5에서 볼 수 있는 액막의 온도상승과 압력강하는 흡수율을 저하시키므로 압력은 다시 상승하고 새로운 정상상태에 도달한다. 입구농도가 갑자기 높아지면 입구 근처에서는 액막에서 기체로의 물질전달(desorption)이 일어나기 때문에 압력이 갑자기 상승한 후 새로운 정상상태로 접근해 가는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 기체의 질량유량의 갑작스런 증가가 압력변화에 미치는 영향을 보여준다. 기체의 질량유량이 증가하면 흡수기 내부의 기체의 질량이 증가하므로 압력이 높아진다. 압력의 상승은 기체의 흡수율을 증가시키므로, 액막으로 흡수되는 기체의 질량이 흡수기로 들어오는 기체의 질량과 같게 되는 상태에 도달한 후 압력은 일정하게 된다.

기체의 질량유량의 변화가 암모니아 수용액의 출구농도에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타내었다. 기체의 질량유량이 증가하면 흡수율이 증가하므로 암모니아 수용액의 출구농도는 증가하나, 기체의 질량유량은 암모니아 수용액의 질량유량에 비하여 매우 작으므로 그 변화는 매우 작다.

Fig. 10은 기체의 질량유량이 암모니아 수용액과 냉각수의 출구온도의 변화에 미치는 영향을 보여준다. 기체의 질량유량이 증가하면 기체의 흡

수율이 증가하고, 따라서 액막에 전달되는 흡수열도 증가하므로 암모니아 수용액과 냉각수의 출구온도는 미세하게 증가한다.

냉각수의 온도가 갑작스럽게 2°C 상승하였을 때 흡수기 내부에서 일어나는 암모니아 수용액의 혼합평균온도와 농도의 변화를 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 나타내었다. 냉각수는 흡수기 하단($x=0.7$ m)으로 들어오고 암모니아 수용액은 흡수기 상단($x=0$ m)으로 들어오므로 암모니아 수용액의 혼합평균온도와 농도 모두 하단에서부터 변하고, 시간이 경과할수록 온도와 농도가 변하는 영역이 흡수기 상단으로 넓어지는 것을 볼 수 있다.

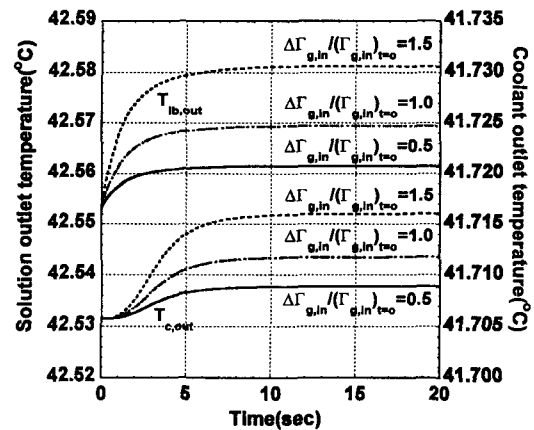


Fig. 10 Variations of outlet temperatures on a step change of vapor mass flow rate.

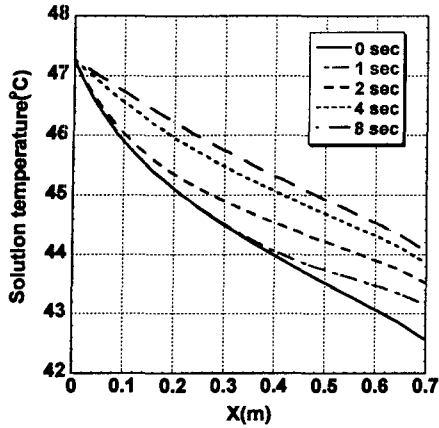


Fig. 11 Variation of solution bulk temperature profile along the tube on a step change of cooling water temperature ($\Delta T_{c,in} = 2^\circ\text{C}$).

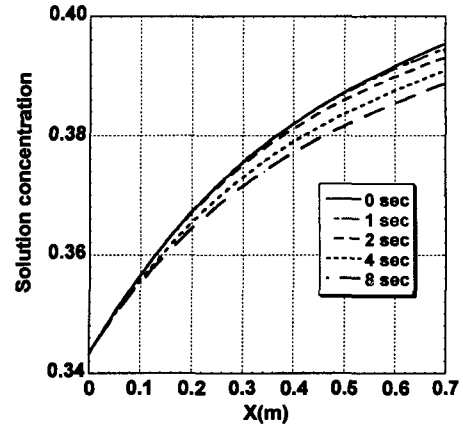


Fig. 12 Variation of solution bulk concentration profile along the tube on a step change of cooling water temperature ($\Delta T_{c,in} = 2^\circ\text{C}$).

5. 결 론

본 연구에서는 흡수식 냉동기의 수직원관형 흡수기에서 일어나는 열 및 물질전달에 대한 동적 모델을 제시하였다. 기체가 단일 성분으로 구성되어 있다고 가정한 기존의 모델과 달리 이 모델은 기체가 2성분으로 구성되어 있다고 가정하였으므로 암모니아/물을 작동유체로 사용하는 흡수기에 적용할 수 있다. 이 모델을 이용하여 냉각수의 입구온도, 암모니아 수용액의 입구농도, 그리고 기체의 질량유량에 교란이 발생하였을 때 흡수기 내부의 압력, 암모니아 수용액의 출구온도와 출구농도, 그리고 냉각수 출구온도의 시간에 따른 변화를 알아보았다.

후 기

이 연구는 1999년도 한국과학재단 연구비(과제번호 : 1999-2-304-007-3) 지원에 의한 결과입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Kang, Y. T., 1998, Ammonia-water absorption technologies in USA and Japan(1), Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 27, No. 1, pp. 53-74.
2. Saito, K., Kimijima, S., Takei, T. and Kawai, S., 1998, Study on the characteristics of ammonia-water absorption refrigerator, IIF-IIR-Sections B and E, pp. 503-512.
3. Sugano, N., Saito, K., Kawai, S., Nisiyama, N., Honma, R. and Wakimizu, H., 1994, Simulation and experimental research of dynamic characteristics of single-effect absorption refrigerators driven by waste hot water, Journal of JSME(B), Vol. 60, No. 576, pp. 290-296.
4. Jeong, S., Kang, B. H., Lee, C. S. and Karng, S. W., 1993, Computer simulation on dynamic behavior of a hot water driven absorption chiller, International Absorption Heat Pump Conference, pp. 333-338.
5. Wassenaar, R. H. and Westra, J. J. W., 1992, Dynamic model of a film absorber with coupled heat and mass transfer, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, pp. 87-99.
6. Hajji, A. and Worek, W. M., 1992, Transient heat and mass transfer in film absorption of finite depth with nonhomogeneous boundary conditions, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, pp. 2101-2108.
7. Arman, B. and Panchal, C. B., 1993, Absorption Analysis of Ammonia in an Aqueous

- Solution, Proceedings of 28th IECEC, Vol. 1, pp. 873-878.
8. 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.
 9. Cheon, T. S. and Jeong, E. S., 2000, A numerical model for heat and mass transfer processes within a vertical tube GAX absorber, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 102-111.
 10. Bejan, A., 1993, Convection Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc., p. 352, 496.
 11. Chen, S. L., Gerner, F. M. and Tien, C. L., 1987, General film condensation correlations, Experimental Heat Transfer, Vol. 1, pp. 93-107.
 12. McAdams, W. H., 1954, Heat Transmission, 3rd ed., McGraw-Hill, p. 242, 245.
 13. Henstock, W. H. and Hanratty, T. J., 1979, Gas absorption by a liquid layer flowing on the wall of a pipe, AIChE Journal, Vol. 25, No. 1, pp. 122-131.