

## 암모니아 흡수식 열펌프의 Falling Film Type 흡수기에서 냉각수가 미치는 영향에 대한 수치모사 연구

이찬호, 이재철, 하종주, 전병희, 이기봉, 현재천, 김성현  
고려대학교 화학공학과

### The numerical simulation study for effects of cooling water to falling film type absorber in $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ absorption heat pumps

Chan Ho Lee, Jae Chul Lee, Jong Joo Ha,  
Byong Hee Jun, Ki-Bong Lee, Jae Chun Hyun and Sung Hyun Kim  
Department of Chemical Engineering, Korea University

#### 1. 서 론

오존층 문제에 대한 대안으로 제시된 본트리얼 의정서(1987)와 지구 온난화 문제의 대안으로 제시된 교토 의정서(1997)등에 의해 자연냉매인 물, 암모니아 등을 사용하는 흡수식 열펌프에 대한 관심이 높아졌다. 지금까지 흡수식 열펌프는 대형 산업용에 제한적으로 사용되어 왔고 연구는 주로 물을 냉매로 하는 시스템을 대상으로 진행되어 왔다. 그러나 최근에는 흡수식 열펌프의 소형화 및 고 효율화를 목적으로 연구가 진행되면서 암모니아 흡수식 열펌프에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 대부분의 에너지 변환 장치들은 사용되지 못하고 버려지는 에너지를 다시 회수하여 사용할 수 없으므로 에너지를 효율적으로 사용하는 데 한계가 있는 반면 열펌프의 경우 버려지는 에너지를 회수하여 재활용하는 것이 가능하므로 에너지를 효율적으로 사용할 수 있다. 그러나 압축식 열펌프의 경우 오존층을 파괴하는 물질인 CFC를 냉매로 사용하므로 환경문제의 원인이 되는 단점을 가지고 있다. 반면에 흡수식 열펌프는 암모니아 및 물과 같은 환경 친화적인 냉매들을 사용하여 오존층을 파괴하는 CFC계 냉매를 대체할 수 있는 이점을 가지고 있다. 흡수식 열펌프는 응축기와 증발기 그리고 흡수기와 발생기로 구성되어 있으며 냉매는 저압의 증발기에서 증발하고 고압의 응축기에서 응축한다. 그러나 압축식 열펌프에서는 전기에너지로 구동되는 압축기에 의해 냉매기체가 압축되는 반면 흡수식 열펌프의 경우 냉매기체를 흡수기에서 용매에 흡수시킨 후 이 용액을 펌프를 이용하여 고압의 분리기로 보내 이곳에서 기체 냉매를 분리해냄으로써 고압의 냉매 기체를 얻는다. 이 때 흡수기에서는 흡수열( $Q_a$ )이 발생하고 발생기에는 외부로부터 열량( $Q_g$ )이 공급되어야 한다. 고압의 냉매 기체가 응축되면 열( $Q_c$ )이 발생하게 되는 데 이것을 활용하는 경우가 열펌프이고 반대로 저압 상태의 증발기에서 냉매가 증발하면서 외부의 열( $Q_e$ )을 흡수하는 것을 활용하는 경우가 흡수식 냉동기이다. 흡수식 열펌프의 흡수기에서는 암모니아가 물에 흡수되면서 흡수열이 발생하는데 이것을 냉각수를 통해 제거하지 않으면 전체 시스템의 성능은 급격히 저하되고 심한 경우 열역학 사이클을 형성할 수 없게 된다. 따라서 흡수기에 냉각수가 미치는 영향을 규명하기 위한 연구가 수행되어야 한다. 또한

흡수기 내부는 암모니아가 물에 흡수되는 물질전달과 암모니아흡수에 의한 흡수열의 열전달 그리고 마지막으로 흡수기에서 냉각수로의 열전달등의 과정이 동시에 일어나는 복잡한 물리적 시스템이다. 이러한 시스템의 복잡성 때문에 실험을 통해 흡수기내에서 일어나는 물리적 현상을 규명하는 것에는 많은 한계가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 이것을 보완하기 위해 정교한 수학적 모델을 개발하고 이러한 모델을 이용하여 수치모사를 수행하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 암모니아 시스템의 흡수기를 대상으로 진행된 연구에서는 Grossman 등[1]이 1999년에 제시한 흡수기 모델이 흡수기내에서 일어나는 열 및 물질전달을 동시에 고려한 가장 정교한 수학적 모델로 알려져 있다. 그러나 이 모델의 경우 냉각수로의 열전달을 고려하지 않았기 때문에 냉각수 조건이 흡수기 성능에 미치는 영향을 평가할 수 없는 제약성을 가지고 있다. 따라서 이것을 보완하기 위해 Jeong 등[2]은 냉각수로의 열전달을 포함한 모델을 개발하였으나 냉각수의 영향을 평가하는 수치모사는 수행하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 냉각수 조건이 흡수기 성능에 미치는 영향을 분석하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 이론

### 2-1. 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서는 흡수기에서 생성되는 유하액막을 Fig. 1과 같이 모델링 하였고 기본 가정을 아래와 같이 도입하였다[1,2].

- (1) 암모니아 수용액은 Newtonian fluid이고 완전히 발달된 층류를 형성하며 정상상태이다.
- (2) 용액의 점도와 열전도도 및 확산계수는 온도의 함수이며, 나머지 물성값은 일정하다.
- (3) 열 및 물질전달은 용액의 흐름 방향으로는 대류에 의해 수직방향으로는 확산에 의해 지배적으로 일어난다.
- (4) 기-액 계면은 열역학적 평형상태를 유지한다.

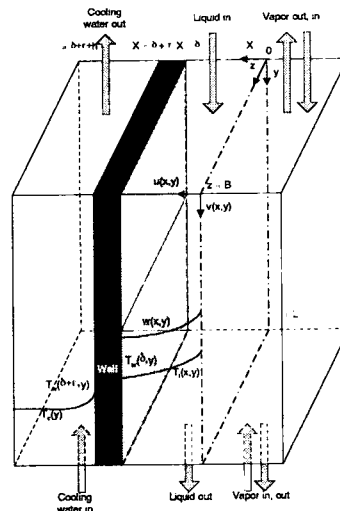


Fig. 1 Schematic diagram describing the gas absorption in the falling film absorber

(5) 냉각수의 온도  $T_c$ 는 흡수기 길이방향(y 방향)의 함수이다.

(6) 흡수기내의 압력은 열펌프 시스템의 저압 상태로 일정하게 유지된다.

위의 가정에 따른 지배 방정식과 경계조건은 다음과 같다.

$$\text{운동방정식: } 0 = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \rho g, \quad (1)$$

$$\text{에너지수지식: } \rho C_p v \frac{\partial T_l}{\partial y} = k_l \frac{\partial^2 T_l}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$\text{물질수지식: } v \frac{\partial w}{\partial y} = D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (3)$$

경계조건 1: at  $y = 0$  for all  $x$

$$v(x, 0) = v_0, \quad w(x, 0) = w_0, \quad T_l(x, 0) = T_{l0} \quad (4-6)$$

경계조건 2: at  $y = L$

$$T_c(L) = T_{c0} \quad (7)$$

경계조건 3: at  $x = 0$  for all  $y$  (기-액 계면)

$$\frac{\partial v}{\partial x}(0, y) = 0 \quad k_l \frac{\partial T_l}{\partial x}(0, y) = \rho (\Delta H) [D \frac{\partial w}{\partial y}(0, y)] \quad (8,9)$$

$$w(0, y) = w_{eq}[T_l(0, y), P] \quad (10)$$

경계조건 식(10)은 열역학적 평형 관계식을 그리고 식(9)는 기-액 계면에서의 에너지수지 관계식으로 여기서  $\Delta H$ 는 암모니아의 흡수열이다[5,6]. (본 연구에서는  $\Delta H=1.8 \times 10^6$  [J/Kg]을 사용함.)

경계조건 4: at  $x = \delta$  for all  $y$  (액막-열교환기 경계면)

$$v(\delta, y) = 0 \quad \frac{\partial w}{\partial x}(\delta, y) = 0 \quad (11,12)$$

$$k_l \frac{\partial T_l}{\partial x}(\delta, y) = k_w \frac{\partial T_w}{\partial x} = h_c [T_c(y) - T_w(\delta + \epsilon, y)] \quad (13)$$

경계조건 식(13)은 용액과 평판형 열교환기 경계면에서의 heat flux와 열교환기 내에서의 heat flux 그리고 냉각수로의 heat flux가 같다는 에너지 수지 관계식이다[2]. 그리고  $h_c$ 는 냉각수로의 대류 열 전달계수이며 본 연구에서는 다음 식을 사용하였다[2].

$$h_c = 0.325 \frac{k}{d_h} Re^{0.5} Pr^{0.33} \left(\frac{d_h}{l}\right)^{0.055} \quad (14)$$

여기서,  $d_h$ 는 냉각수 유로의 직경을 1은 냉각수 유로의 길이를 나타낸다. 본 연구에서는 물을 냉각수로 사용하였다.

에너지 방정식을 풀기 위해 본 연구에서는 냉각수가 흡수기를 빠져나갈 때의 출구온도  $[T_c(0)]$ 를 가정하고 냉각수의 입구온도가 주어진 냉각수 온도에 수렴하도록 반복계산을 수행하였다. 이때 사용한 냉각수의 에너지 수지식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{에너지수지식: } m_c C_{p,c} [T_c(0) - T_c(L)] = B \int_0^L \text{heat flux}(y) dy \quad (15)$$

위의 지배방정식과 경계조건을 유한부피법(Finite Volume Method)으로 차분화하였다[7].

## 2-2. 수치모사 알고리즘

본 연구에서는 다음의 순서에 따라 계산하였다[6].

- (1) 용액의 초기온도  $T_1$  일 때의 평형조성  $w_e$ 를 평형관계[식(10)]로부터 구한다.
- (2) 기-액 계면에서의 에너지 수지 관계[식(9)]을 이용하여 평형 온도  $T_c$ 를 구한다.
- (3) 온도  $T_c$  일 때의 평형조성  $w_e$ 를 평형관계[식(10)]로부터 구한다.
- (4) 평형 온도  $T_c$  와 평형조성  $w_e$ 가 수렴할 때까지 (1) ~ (3) 과정을 반복 계산한다.
- (5) 흡수기 길이방향(y 방향)으로 one step 전진하여 (1) ~ (4) 과정을 반복 계산한다.
- (6) 계산된 냉각수 입구 온도가 주어진 냉각수 입구 온도와 일치하는지 확인한다. 일치하지 않으면 냉각수 출구 온도를 가정하고 단계(1)부터 다시 계산한다.

흡수기 성능을 평가하기 위해 수치모사를 통해  $v$ ,  $w$  를 구하고 다음 식을 흡수기 출구에 적용하여 Absorption rate를 구하였다.

$$\text{Absorption rate of NH}_3 \text{ [kg/s]} = \rho \cdot B \int_0^\delta w \cdot v dx \quad (16)$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 유하액막 내의 농도 및 온도 분포

수치모사를 위해 적용한 기준 조건은 Herold 등[8]이 제시한 1단 암모니아 흡수식 열펌프 사이클의 작동조건에서 구하였고 이것을 Table 1에 정리하였다. 이 조건을 적용하여 수치모사 한 결과로부터 얻은 유하액막 내의 농도 및 온도 분포를 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1. Values of system parameters for reference case

Parameter	Reference value
Pressure [Pa] P	$2.5 \times 10^5$
Liquid mass flow rate [kg/s] m	0.01
Liquid temperature [°C] $T_{10}$	40
Liquid mass fraction $W_{10}$	0.25
Cooling water temperature [°C] $T_{c0}$	3
Cooling water mass flow rate [kg/s] $m_c$	0.05
Length of absorber [m] L	0.3
Wide of absorber [m] B	0.1

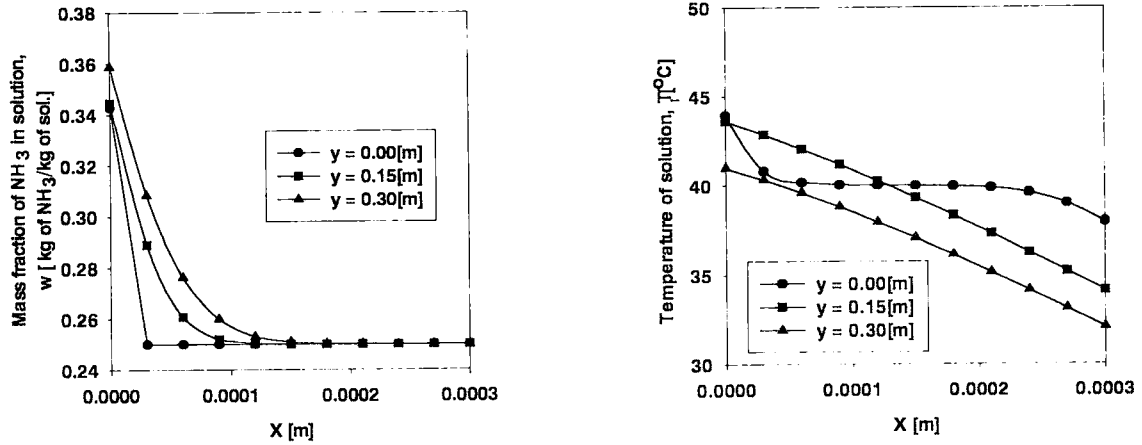


Fig. 2 Profiles of NH<sub>3</sub> mass fraction and temperature in the liquid

### 3-2. 흡수기 성능에 대한 냉각수의 영향

수치모사를 통해 냉각수의 조건이 흡수기 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 냉각수의 온도와 유량에 따른 흡수기 성능을 수치모사 하여 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 흡수기 성능은 단위시간당 흡수되는 암모니아의 질량을 기준으로 정했고 그 값은 앞에서 제시한 (16)식을 이용하여 구하였다. Fig. 3에서 냉각수 온도가 낮을수록 흡수기 효율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 냉각수 온도가 낮을수록 기-액 계면의 평형조건이 낮은 온도에서 형성되고 따라서 암모니아의 평형조성이 증가하기 때문이다. 그리고 냉각수의 유량이 증가하면 흡수기 성능이 증가하는 것을 알 수 있는데 그 이유는 냉각수 유량이 증가함에 따라 냉각효과가 증가하고 이러한 영향으로 기-액 계면에서의 온도가 낮아져 앞에서와 마찬가지로 낮은 온도에서 평형조건이 형성되기 때문이다.

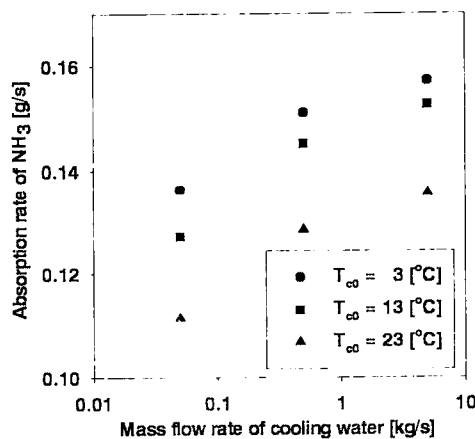


Fig. 3 Effects of cooling water temperature and mass flow rate on absorption rate

#### 4. 결 론

암모니아 흡수식 열펌프의 falling film type 흡수기에 대한 수학적 모델링 및 수치모사를 수행하였으며, 흡수기 효율에 냉각수가 미치는 영향을 평가하였다. 냉각수 온도의 영향은 잘 알려진 것과 같이 온도가 낮을수록 흡수기 성능이 증가함을 알 수 있었다. 그리고 냉각수 유량이 증가하면 흡수기 성능이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 흡수식 열펌프의 소형화 및 고 효율화라는 목표를 달성하기 위해서는 흡수기가 최대의 효율로 운전될 수 있도록 냉각수 조건을 유지해 주는 것이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

#### 감 사

이 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 중점국가연구개발사업(온실가스저감기술연구)의 일환으로 수행되었습니다.

#### 사용기호

$v$	: Velocity of liquid [m/s]	$T$	: Temperature of liquid [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\mu$	: Viscosity of solution [ $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ ]	$\rho$	: Density of solution [ $\text{kg/m}^3$ ]
$\delta$	: Thickness of falling film [m]	$\Delta H$	: Heat of absorption [J/kg]
$P$	: Pressure [Pa]	$D$	: Diffusivity of solution [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$w$	: Mass fraction of $\text{NH}_3$ [kg of $\text{NH}_3$ /kg of solution]		
$m_c$	: Mass flow rate of cooling water [kg/s]		
$h_c$	: Heat transfer coefficient of cooling water [ $\text{J}/\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ]		
$C_p, C_{pc}$	: Heat capacity of solution and cooling water [ $\text{J}/\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ]		
$k_l, k_w$	: Thermal conductivity of solution and wall [ $\text{J}/\text{s} \cdot \text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ]		

#### 참고문헌

1. Gommed, K., Grossman, G. and Koenig, M.: *Proc. Of Int. Sorption Heat Pump Conference* 275(1999)
2. Cheon, T. S. and Jeong, E. S.: *Air conditioning and Refrigeration* **12**, 102(2000)
3. Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Poling, B. E.: "The Properties of Gases & Liquids," McGRAW-HILL(1987)
4. Perry, R. H. and Green, D.: "Perry's Chemical Engineers Handbook," McGRAW-HILL (1984)
5. Sun, D. W.: *Energy Convers. Mgmt.* **39**, 357(1998)
6. Grossman, G.: *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **26**, 357(1983)
7. Patanka, S. V.: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," McGraw-Hill(1980)
8. Herold, K. E., Radermacher, R. and Klein, S. A.: "Absorption Chiller and Heat Pumps," CRC Press(1996)
9. Lee, K.-B.: Master's Thesis, Department of Chemical Engineering, Korea University (2000)