

암모니아-물 기포분사형 흡수기의 물질전달 모사 및 실험 연구

이재철 · 이기봉 · 전병희 · 이찬호 · 하종주 · 김성현[†]

고려대학교 화학공학과

(2001년 8월 16일 접수, 2001년 12월 13일 채택)

The Study on Model Simulation and Experiment for Mass Transfer in Bubble Mode Absorber of Ammonia and Water

Jae-Cheol Lee, Ki-Bong Lee, Byung-Hee Chun, Chan-Ho Lee, Jong-Joo Ha and Sung-Hyun Kim[†]

Department of Chemical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received 16 August 2001; accepted 13 December 2001)

요 약

흡수기는 흡수식 열펌프 시스템에서 중요한 구성요소일 뿐만 아니라 흡수기의 성능은 전체 시스템에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 기포분사형 흡수기에 대한 수학적 모사와 흡수실험을 동시에 수행하였다. 일정하게 흘러가는 용액 속으로 흡수기 하단부에서 암모니아 기체를 분사하여 그 기체의 도달 높이를 수학적 모사와 실제 흡수실험을 통하여 산출하였다. 주입 기체의 양이 많을수록 그 흡수높이가 증가하였으며, 주입용액의 온도와 농도가 낮을수록, 또한 주입용액과 주입기체의 방향이 서로 향류인 경우 분사되는 기체의 흡수영역이 감소하였다. 소량인 물의 물질전달은 무시하고 암모니아 기상에서 액상으로의 단방향 물질전달로 가정하여 이 수학적 모사결과와 실험결과를 비교한 결과 유사한 결과 값을 보였으며, 이를 통하여 본 모델의 적용 타당성을 검증할 수 있었다.

Abstract – An absorber is a major component in the absorption refrigeration systems and its performance greatly affects the overall system performance. In this study, both the numerical and experimental analyses on the absorption process of bubble mode absorber were performed. Gas was injected into the bottom of absorber at constant solution flow rate. Region of gas absorption was estimated by both the numerical and experimental analyses. Higher flow rate of gas makes the region of gas absorption increases. As the temperature and concentration of input solution decrease, the region of gas absorption goes down. In addition, the absorption performance on the countercurrent was superior to that of cocurrent flow. Mathematical model equations were derived from material balance for gas and liquid phase based on the negligible mass transfer of water from liquid to gas phase. Comparison of model simulation and experimental results shows similar values. This means that this numerical model can be applied for design of bubble mode absorber.

Key words: Absorption Process, Absorption Heat Pump, Ammonia-Water, Bubble Mode, Heat and Mass Transfer

1. 서 론

산업과 과학발달에 의해 더욱 물질적으로 풍요로워진 인류에게 에너지와 환경문제는 새로운 당면문제로 부각되고 있다. 특히 1992년 몬트리올 협정에서는 CFC 및 HCFC의 사용을 각각 1997과 2002년부터 전면 금지시키기로 하였고, 1997년에는 2008-2012년까지 전세계 온실가스 배출량을 5.2% 줄이는 것을 골자로 하는 교토 선언이 합의되었다. 이러한 상황을 타개하기 위한 많은 연구 중 흡수식 열펌프는 환경 친화적인 자연냉매를 사용하는 열구동 시스템으로 다시 주목을 받고 있다. 특히 흡수식 열펌프의 구성요소 중 흡수기는 냉매와 용액간의 활발한 물질전달과 냉각수방향으로의 열전달이 동시에 일어나는 핵심요소이다.

일반적으로 흡수기 형태로는 박막유동 및 기포분사형 등으로 볼 수 있다. 박막유동 흡수기는 뛰어난 열전달 효과와 안정된 운전상태유지로 인하여 현재 상용화 되어 사용되고 있으나, 용액의 분사 및 효과적 박막 형성에 여러 가지 문제점을 가지고 있다[1-2]. 최근에는 열전달 효과 뿐만 아니라 우수한 물질전달효과를 나타낼 수 있는 기포분사형 흡수기에 대한 연구가 점점적으로 진행중이다[3-5]. 그러나 최근 수년동안 수치모사를 통한 기포모드 흡수기에 연구가 활발히 진행되었으나[6-8] 실제 흡수실험을 통한 연구나 수치모사 결과와 흡수실험의 비교를 통한 수치모사의 타당성을 검증한 경우는 없는 상황이다.

본 연구에서는 물과 암모니아간의 물질전달을 실제 기포모드 흡수과정에 적용할 수 있도록 재해석하여 생성기포의 반지름의 변화에 따른 흡수기내의 온도, 농도, 기포존재 높이에 대해 수치모사를 실시하였으며, 그 결과와 실제 실험데이터형으로 제작된 흡수기에서 진행된 기포흡수실험결과와 비교하여 실제 열펌프 운전상태에서의 적용 가능성을 검토하였다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: kimsh@korea.ac.kr

2. 수치모사의 이론적 배경

2-1. 흡수과정

기상에서 액상으로의 물질전달에 있어, 물질전달 계면은 계면이론(film theory)에 따라 평형 상태에 해당하며 그 계면을 중심으로 형성되는 농도구배에 의해 물질전달이 일어난다[9]. 기상과 액상의 bulk영역이 평형에 도달했을 때 더 이상의 물질전달이 일어나지 않는다. 압력과 온도가 일정한 조건에서 암모니아가 기상에서 액상으로 물질전달이 일어날 경우, 계면에서 흡수열을 발생하며 안정한 액상으로 이동하면서 시작된다. 중간단계에서는 용액 속의 소량의 물이 열을 얻어 증발하며, 증발된 수증기는 다시 확산에 의해 기상 안으로 확산된다. 그러나 작은 암모니아 기포가 용액 속으로 녹아 들어가는 기포분사형 흡수의 경우, 상대적으로 소량의 암모니아 기체에 비해서 액상의 농도는 크게 변화하지 않으므로 기상 즉 기포가 먼저 평형농도에 도달하게 된다. 그 후에는 기상은 계속 평형을 유지하며 액상으로의 물질전달은 계속 일어난다. 1988년 Perez-Blanco[8]는 기상의 암모니아의 흡수와 액상의 물의 증발에 대한 분배계수를 다음과 같이 구하였다.

$$\phi = -(y - y_{eq}) / (1 - y_{eq}) \quad (1)$$

ϕ =분배계수
 y =기상에서의 암모니아 농도
 y_{eq} =기상에서의 암모니아 평형농도

그러나 액상의 물이 기상으로 증발되는 과정은 흡열과정일 뿐만 아니라, 반지름이 1 cm인 기포의 경우, 기포 속으로 수증기가 확산되어 전체 기포영역이 평형농도에 도달하는 데에도 4초 이상이 소요된다[10], 흡수기에 분사된 기포가 100 cm의 흡수기를 종말속도로 올라갈 경우 최대 체류시간이 3초 이내 [11]이며 대부분의 실험조건에서 0.2초 이내에 기포가 사라진다. 즉, 흡수과정은 대부분 초기과정과 중기과정에서 종결됨을 알 수 있다. 기상에서의 평형조건인 농도 또한 실험조건인 1기압, 상온에서 암모니아 질량분율이 0.95이상이므로 기상이 평형에 도달했다고 하더라도 거의 순수한 암모니아와 다를 바가 없으므로 소량의 물이 증발되는 과정은 고려하지 않고, 암모니아 기상의 단일 흡수과정이라고 정의하였다.

2-2. 모델링을 위한 가정

실린더형 흡수기의 하단에서 분사되어 상승하는 암모니아 기포가 용액에 흡수되는 경우를 모사하기 위한 가정은 다음과 같다.

- 기포는 완전구형이다.
- 물질전달은 기상의 암모니아에서 액상으로만 일어난다.
- 기포 표면에서의 물질전달플럭스는 모든 표면에서 일정하다.
- 기포 서로간의 상호작용, 응집 등은 존재하지 않는다.
- 생성된 기포는 종말속도로 상승한다.
- 기포의 온도, 압력, 부피관계는 이상기체방정식을 따른다.
- 기체와 액체의 온도는 같다.
- 액체에서 기포로의 물질전달은 무시한다.
- 압력은 1기압으로 일정하다고 가정한다.

또한 물질의 기본 물성값은 [12-14]의 문헌값을 참조하였다.

2-3. 기포의 크기와 속도

기체 분사구에서 분출되는 기포의 초기크기는 Treybal이 1980에 발표한 물질전달 운전 [11]에 대한 경험식을 사용하였다.

$$Re_o < 2100 \text{ 일 때} \\ d_p = 0.0287 d_o^{1/2} Re_o^{1/3} \quad (2)$$

$$10,000 < Re_o < 50,000 \text{ 일 때} \\ d_p = 0.0071 Re_o^{-0.05} \quad (3)$$

2,100 < Re_o < 10,000 일 때는 Re_o의 값이 2,100, 10,000 일 경우의 d_p값을 이용하여 log좌표로 추정 d_p=분출되는 기포의 지름
 Re_o=분출관에서 기체의 Reynolds number
 d_o=분출관의 지름

기포의 종말속도(terminal velocity)는 중력, 부력 그리고 항력의 힘의 평형에서 얻을 수 있다.

$$F_g - F_b + F_D = 0 \\ F_g = mg/g_c \\ F_b = m\rho g/\rho_p g_c \\ F_D = C_D V_p \rho A_p / 2g_c \\ \therefore V_t = [2g(\rho_p - \rho)m/A_p \rho_p C_D \rho]^{0.5} \quad (4)$$

F_g =기포에 작용하는 중력
 F_D =기포에 작용하는 항력
 g =중력가속도
 C_D =항력계수
 V_t =종말속도
 F_b =기포에 작용하는 부력
 ρ =용액의 밀도
 ρ_p =기포의 밀도
 A_p =항력면적

기포의 종말속도는 흡수기 온도와 기포반지름에 대한 함수로써 높이가 변화함에 따라 계속적으로 변화하는 값이다.

기포의 속도 V_b 는 기포의 종말속도(terminal velocity)와 용액의 유속 V_a 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$V_b = V_t + V_a \quad (5)$$

2-4. 물질전달 계수

물질전달계수 K는 Treybal[11]이 발표한 기포와 액상간의 물질전달 경험식을 사용하였다.

$$K_f = N_{sh,l} D_f / d_b \quad (6)$$

$$N_{sh,l} = 2.0 + 0.0187 N_{Reb}^{0.779} N_{sc}^{0.546} (d_b g^{0.333} D_f^{-0.666})^{0.116} \quad (7)$$

K_f =용액에서의 물질전달계수
 $N_{sh,l}$ =용액에서의 Sherwood Number
 D_f =용액에서의 확산도
 d_b =기포의 지름
 N_{Reb} =기포의 Reynolds Number
 N_{sc} =Schmidt Number
 g =중력 가속도

물질전달계수 또한 흡수기온도, 용액농도, 기포반지름에 대한 함수이므로 높이의 변화에 따라 계속적으로 변화한다.

2-5. 기본 수식 전개

먼저 높이 dZ를 기포상승속도 V_b 와 시간 dt의 곱의 나타낼 수 있다.

$$dZ = V_b \cdot dt \quad (8)$$

물질전달에 대한 기본식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dm = \frac{\rho_l K_f A_b (X_i - X)}{V_b} dZ \quad (9)$$

위 식의 물질전달량(dm)은 기포의 반지름의 변화량(dR)으로 표현할 수 있다.

$$dm = \rho_{gas} 4\pi R^2 dR = \frac{\rho_l K_f A_b (X_i - X)}{V_b} dZ \quad (10)$$

식 (10)으로부터 흡수기 높이와 기포반지름에 대한 다음과 같은 상미

분석을 얻을 수 있다.

$$\frac{dZ}{dR} = \frac{\rho_{gas} V_b}{\rho_l K_f (X_i - X)} \quad (11)$$

K_f =물질전달계수 A_b =기포와 용액사이의 물질전달면적
 X_i =용액 표면에서의 평형농도 X =용액농도
 m =암모니아 물질전달량 V_b =기포의 속도
 ρ_{gas} =암모니아 기체의 밀도 ρ_l =용액의 밀도

식 (11)과 같은 흡수기 높이에 대한 상미분식 뿐만 아니라 다음과 같이 용액의 질량유속, 용액의 농도, 그리고 흡수기 온도에 대해서도 기포 반지름에 대한 상미분방정식이 유도된다.

$$\frac{dm}{dR} = -4\pi N \rho_{gas} R^2 \quad (12)$$

$$\frac{dX}{dR} = \frac{4\pi N \rho_{gas} R^2}{m} \quad (13)$$

냉각수가 없는 경우

$$\frac{dT}{dR} = -\frac{4\pi Q N \rho_{gas} R^2}{m C_p} \quad (14)$$

냉각수가 있는 경우

$$\frac{dT}{dR} = -\frac{4\pi Q N \rho_{gas} R^2}{m C_p} + \frac{2\pi R_{cylinder} U (T - T_{cooling\ water}) \rho_{gas} V_b}{m C_p \rho_l K_f (X_i - X)} \quad (15)$$

Q =흡수열 N =시간당 생성되는 기포수
 $R_{cylinder}$ =흡수기의 반지름 U =총괄 열전달 계수
 $T_{cooling\ water}$ =냉각수 온도 C_p =용액의 열용량

단, 시간당 생성되는 기포수(N)는 시간당 유입되는 기체유량과 그에 따라 계산된 기포의 크기를 이용하여 산술적으로 계산할 수 있다.

2-6. 본 모델의 특징

본 모델은 흡수기에서 수평방향으로는 완전 혼합으로 가정하였고 기포 주위의 미세한 Momentum의 변화에 의존하지 않았으며 실험값과 비교를 위해 완전 구형 기포의 흡수로 인한 흡수기안을 흐르는 용액의 온도, 농도에 초점을 두어 만들어졌다. 문헌[7]은 기포분사형 흡수를 기상 bulk와 액상 bulk의 혼합으로 가정하여 행렬을 이용한 모델이며, 문헌[8]은 흡수기안을 상승하는 기포 하나의 주위에서 일어나는 Momentum 변화와 물질과 열의 diffusion에 대해 자세히 풀어놓았으나, 두 모델 모두 기포분사형 흡수기 실험과 비교하기에는 거리가 있는 모델이다. 또한 문헌[6]의 모델은 본 모델과 유사한 점이 많이 있으나 액상에서의 물에 대한 증발을 지나치게 고려하여 암모니아 기포가 거의 수증기 기포에 가까운 농도로 떨어지는 결과를 보이고 있어 실제 실험결과와 일치하지 않는다.

3. 실험장치

3-1. 실험장치

기포분사형 흡수기는 높이가 100 cm, 지름이 3 cm이며 내부 거동을 살펴볼 수 있도록 아크릴로 실린더형태로 제작하였다. 흡수기 하단부에 3 mm의 기포분사부를 설치하였으며 기체는 하단에서부터 상단으로 분사된다. 용액은 흡수기 하단 또는 상단으로 유입될 수 있도록 제작하였다. 물질전달 거동을 살펴보기 위해 5개의 샘플링 포트를 20 cm 간격으로 설치하였고, 12개의 열전대를 설치함으로써 온도 분포상태를 확인하

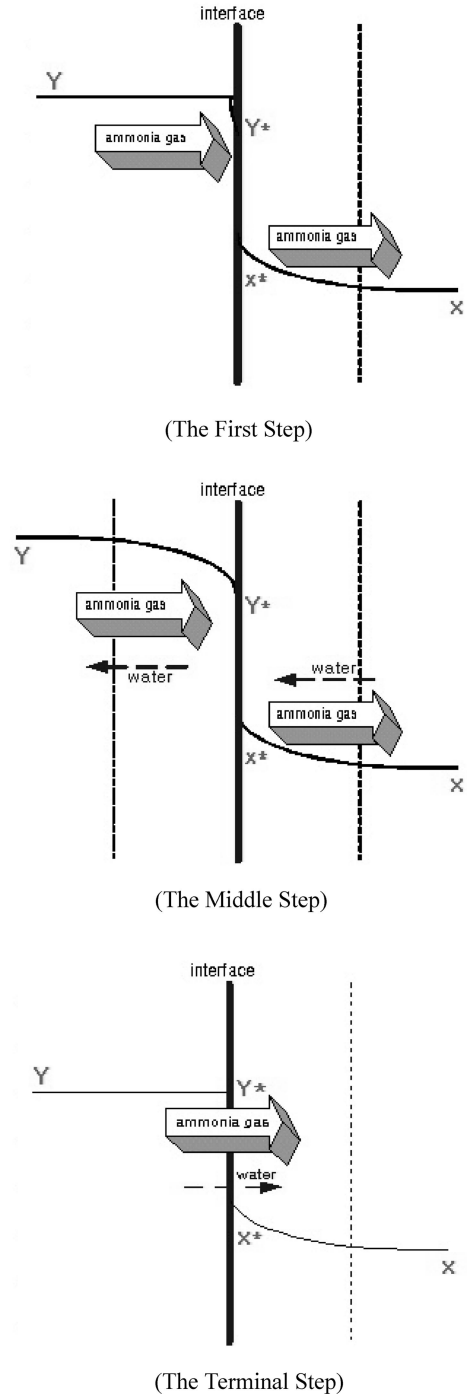


Fig. 1. The stages of ammonia absorption process.

였다. 또한 압력 거동을 알아보기 위해 7개의 마노미터(manometer)를 설치하였다. 흡수기에 유입되는 용액은 500 W의 카트리지 가열기(cartridge heater) 3개가 설치된 용액탱크에서 예열시키고 유입라인에 500 W, embedded type의 카트리지 가열기(cartridge heater)를 설치하여 원하는 온도로 조절하였다. 실험장치에서 측정된 온도는 데이터 측정 시스템에 의하여 컴퓨터에 on-line으로 저장하였고, 채취된 샘플은 전기전도도를 측정하여 실험으로 구한 표준 커브(standard curve)로부터 농도를 분석하였다. 시약으로는 Junsei사의 암모니아 수용액 28% 제품을 직접 혹은 희석하여 사용하였다. 또한 용액 주입 펌프는 최대용량 2 L/min, 최대 토출압

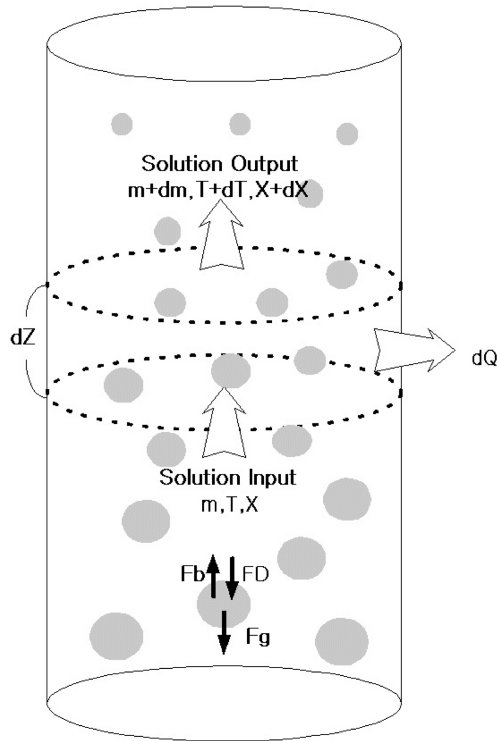


Fig. 2. The theoretical schematic of numerical analysis.

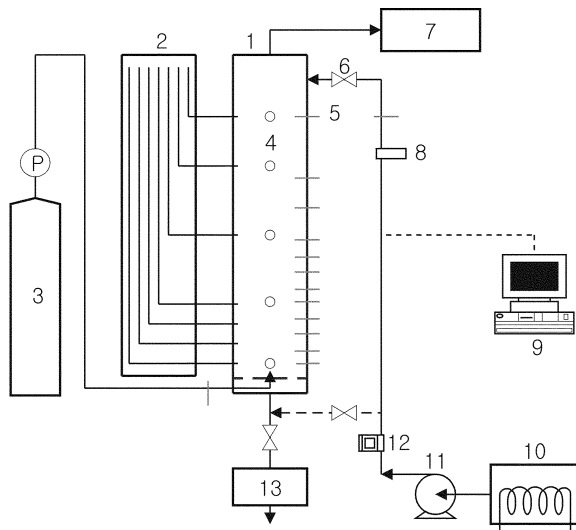


Fig. 3. Experimental absorption system.

- | | |
|-------------------------|----------------------------|
| 1. Absorber | 8. Cartridge heater |
| 2. Manometer | 9. Data acquisition system |
| 3. NH ₃ bomb | 10. Solution tank |
| 4. Sampling port | 11. Solution pump |
| 5. Thermocouple | 12. Flow meter |
| 6. Valve | 13. Neutralization tank |
| 7. Venting | |

이 $5 \text{ kg} \cdot \text{f}/\text{cm}^2$ 인 다이어프램 방식의 (주)이화정량Pump사의 제품을 사용하였으며, on/off 밸브, metering 밸브 등은 1/4 in 스테인레스 재질의 미국 Swagelok사 제품을 사용하였다. 용액용 flow meter는 미국 Krohne사의 signal converter를, 기체유입조절용 flow meter는 최대용량 20L/min의 독일 Hi-Tec사의 부식 가스용 MFC를 사용하였다. 흡수기 실험장

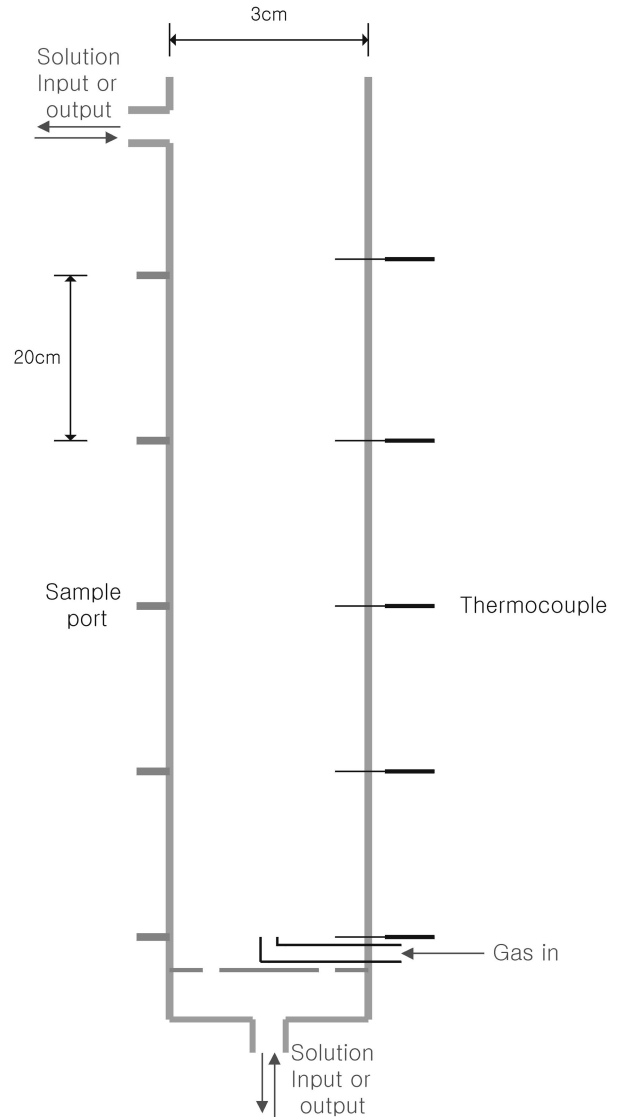


Fig. 4. Schematic of bubble mode absorber.

치의 개략도는 Fig. 3에, 기포분사형 흡수기에 대한 개략도는 Fig. 4에 나타내었다.

3-2. 실험방법

물질전달실험은 1기압 상태의 조건에서 지름이 3cm인 흡수기에 0-30%의 암모니아 수용액을 283-288 K, 0.3 kg/min로 유입시키고 암모니아 기체의 유속을 변화(1-9 L/min)시켜가면서 수행하였다. 이때 각 조건에서 암모니아 기체와 용액을 병류와 향류로 흘려주면서 각각의 결과를 비교하였다. 흡수기는 아크릴로 제작하였으며 기포의 거동을 관찰하기 위해 이중관 구조가 아닌 단일관 구조로 제작하여 흡수열을 제거하기 위한 냉각수는 주입하지 않았다. 실제 열펌프 시스템에 적용되는 흡수기의 운전조건과는 조금의 차이는 있으나 유사한 영역에서 실험을 실시하였으며, 유입 용액량은 병류와 향류의 영향을 알아보기 위해 실제 시스템에 비해 다소 높은 값으로 지정하였다. 실험적 결과는 흡수기 높이에 대한 농도, 온도, 압력의 변화로 나타낼 수 있었으며, 실제 열펌프 시스템에 사용되는 흡수기에서의 작동조건과 본 실험조건과의 비교를 위해 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Comparison experimental operation conditions with those of typical absorber for heat pump system

	Experiment in this study	Typical absorber
Pressure	1 bar	0.5-4 bar
Temperature	295-310 K	300-340 K
Re_{sol}	530	500-100
Re_{gas}	500-3,000	500-1,500

4. 결과 및 고찰

4-1. 수치모사에 의한 결과

위의 실험방법에서 언급한 바와 같이 흡수기의 지름은 3 cm, 용액의 유속은 0.3 kg/min의 조건에서 정상상태에 도달했다는 가정 하에서 흡수기 높이에 따른 내부의 온도분포 및 흡수에 의한 용액의 농도 변화에 대한 모사를 실시하였다. 실린더 모양의 흡수기에 용액은 흡수기 상단 또는 하단으로 일정한 유량으로 유입, 유출되는 것으로 가정하였으며 기체는 흡수기 하단에서 일정한 유량으로 유입되는 것으로 가정하였다. 본 실험은 냉각수를 주입하며 시행할 수 없는 시스템이므로 수치모사 역시 냉각수는 사용하지 않는 조건으로 정하였다. 식 (11)-(14)에서 잘 알 수 있듯이 높이에 따라 흡수기 온도, 용액의 농도가 변화함에 따라 여러 가지 변수가 유기적으로 관련되어 변화한다. 분사된 기포의 반지름의 변화에 따라 흡수기 높이(Z), 용액의 유량(m), 용액의 농도(X), 흡수기 온도(T)에 대하여 상미분방정식 (11)-(14)를 함께 풀어 그 결과를 정리하였다.

Fig. 5는 지름이 3 cm인 흡수기 하단부에서는 용액이 28%, 288 K로

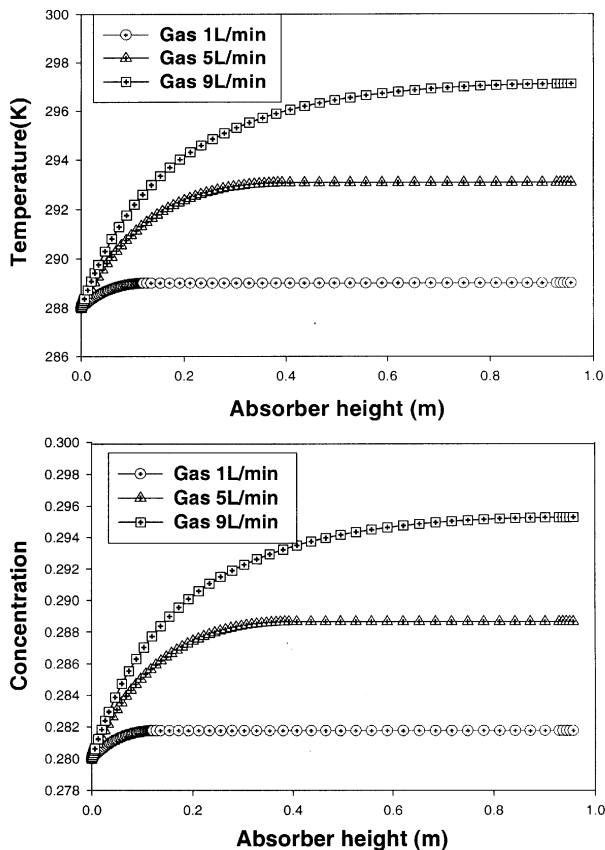


Fig. 5. Numerical simulation of cocurrent system 1(at input solution's temperature=288 K).

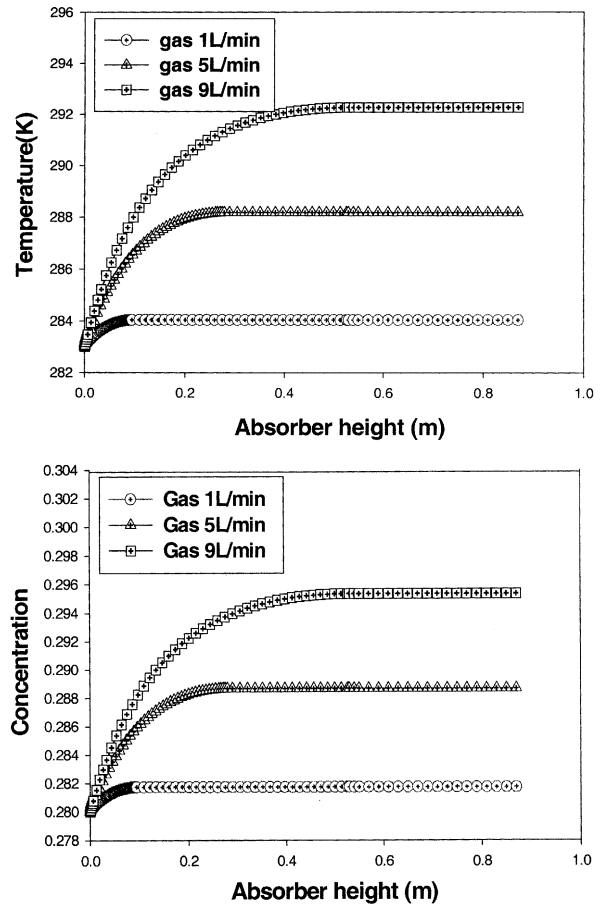


Fig. 6. Numerical simulation of cocurrent system 2(at input solution's temperature=283 K).

유입되며 같은 하단부의 0.3 cm 오리피스 분출관에서 암모니아 기체가 유입될 때의 흡수기 높이에 대한 용액의 온도, 농도의 변화를 나타낸 것이다. 흡수열에 의한 흡수기 내의 온도변화와 용액의 농도 변화도를 보면 집중흡수영역을 쉽게 알 수 있다. 기체가 1 L/min($Re_g=552$)으로 분사될 경우 식 (2)를 초기 기포 크기로 사용하였으며 흡수영역은 약 10 cm 이하영역이며 5 L/min($Re_g=2760$)인 경우 40 cm, 9 L/min($Re_g=4968.15$)인 경우 70 cm 이하 영역에서 집중적으로 흡수된다. Fig. 6은 용액의 온도가 283 K로 유입될 경우의 모사 결과이다. 288 K때에 비해 흡수영역이 훨씬 짧음을 잘 알 수 있다. 흡수현상은 온도에 민감한 함수이며 흡수기에서의 흡수열을 효과적으로 빼앗을 수 있는 냉각효과가 필요함을 보여주는 결과이기도 하다. Fig. 7은 기체와 액체의 유입방향을 반대로 한 결과이다. 용액의 유입농도와 온도는 28%, 283 K이다. Fig. 7에서 잘 알 수 있듯이 병류에 비해 향류의 경우 동일조건에서 흡수영역의 높이가 15 cm 가량이나 더 짧음을 알 수 있다.

4-2. 실험적 해석

각각의 실험조건에 따라 흡수영역 및 기포의 존재 영역을 확인하기 위하여 농도, 온도 및 압력을 측정하였다. Fig. 8은 288 K의 암모니아 기체와 암모니아 30% 용액이 흡수기 하단부로 주입되어 병류로 흐를 때의 높이에 따른 농도 변화를 보여준다. 가스의 주입 유속이 높아질수록, 농도 증가 구역이 커지고 이때 높이가 증가할수록, 용액의 농도도 증가한다. 이러한 경향성은 농도뿐 아니라 온도그래프에서도 나타나며, 각 높이마다 설치된 마노미터(manometer)에 의해 측정된 압력에 대한 데이터와 종합하여 그 흡수영역과 기포 존재 높이를 추측할 수 있다. 30%

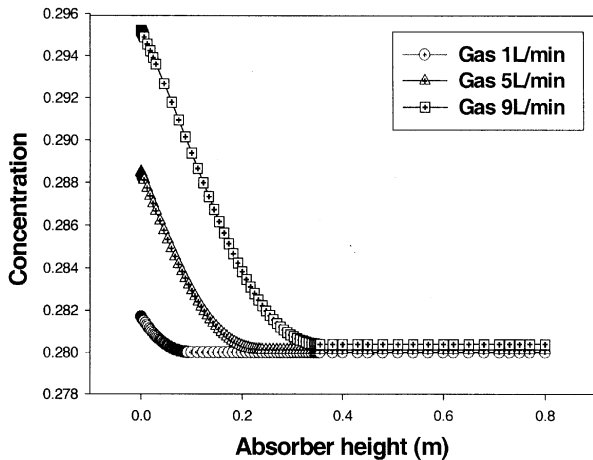
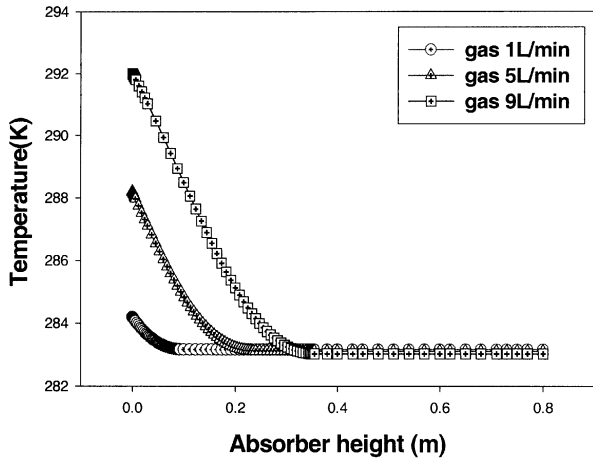


Fig. 7. Numerical simulation of countercurrent system (at input solution's temperature=283 K).

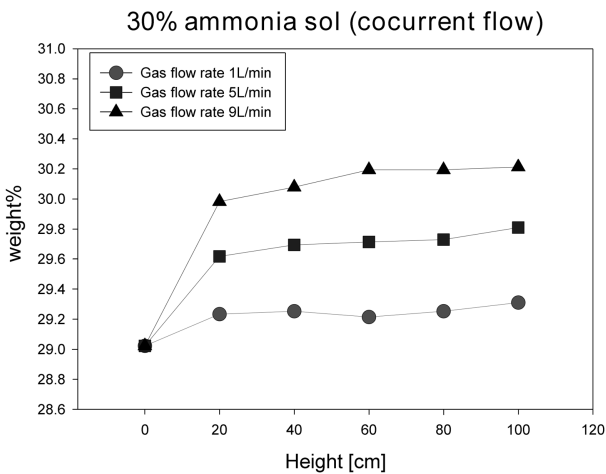


Fig. 8. The effect of gas flow rate on temperature profile (cocurrent).

용액에 9 L/min으로 암모니아 기체를 주입하는 경우 기체 흡수높이를 약 70 cm로 예측할 수 있었다.

향류실험에서도 결과는 병류의 경우와 마찬가지로, 낮은 가스 유속에서는 20 cm 이후로 농도가 거의 일정하고, 높은 가스 유속에서는 흡수기 하단부에서 흡수되지 않고 남은 가스의 양이 증가하여 필요한 흡수기 높이가 증가한다. 뿐만 아니라 주입용액의 농도가 높을수록 존재 가

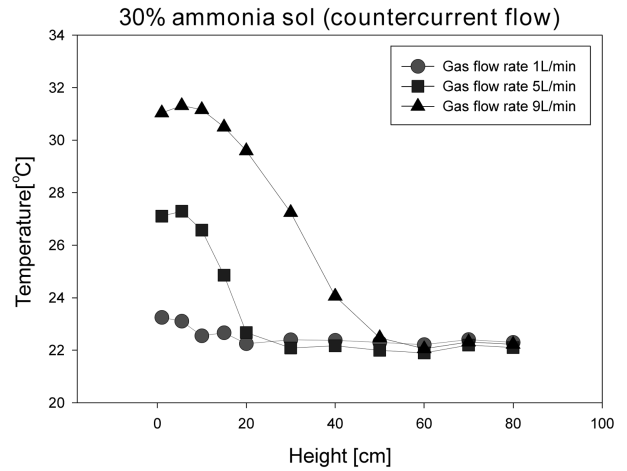


Fig. 9. Effect of gas flow rate on concentration profile (countercurrent 1).

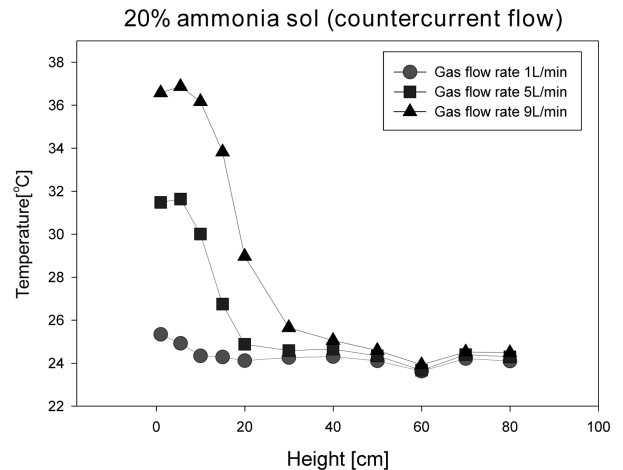


Fig. 10. Effect of gas flow rate on temperature profile (countercurrent 2).

스의 높이는 증가하는 모습을 나타낸다. 병류실험에 비해 실험 데이터를 통하여서도 그 흡수영역을 확연히 알 수 있었으며 기포 존재 높이 또한 쉽게 파악할 수 있었다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 288 K의 30% 용액에 9 L/min으로 암모니아 가스를 주입하는 경우 60 cm이하 영역에서 흡수가 대부분 일어남을 알 수 있다. Fig. 10은 용액의 농도를 20%로 하여 기체와 반대방향으로 주입시킨 향류 실험의 결과이다. Fig. 9와 비교하여 볼 때 확연히 기체 흡수높이가 줄어드는 모습을 확인할 수 있다. 주입 용액이 20%인 경우 30% 용액일 때에 비해 기체주입량이 9 L/min인 경우 최대 25 cm 가량이 줄어든다.

본 실험을 통하여 상압, 상온 조건에서의 암모니아 흡수기의 적정 흡수길이를 예측할 수 있었으며, 용액과 기체의 주입방향에 따라, 암모니아 용액의 주입농도에 따라 흡수높이의 변화가 민감함을 알 수 있다.

4-3. 모델과 실험치의 비교

Fig. 11은 병류 흐름으로 주입 용액의 온도를 288 K로 하였을 때의 흡수기에서의 농도 분포에 대한 모사결과와 실험치를 비교한 것이다. Fig. 12는 향류 흐름으로 283 K로 용액이 주입될 때의 모사결과와 실험치를 비교한 것이다. 모사의 결과는 실제 실험 중에 있을 수 있는 와류 등의 비규칙성을 예측할 수는 없지만, Fig. 11-12에서 볼 수 있듯이 흡수기 전체에서 일어나고 있는 경향성이나 집중 흡수높이 등은 실험결과와 모사결과가 아주 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 흡수가 일어난 후

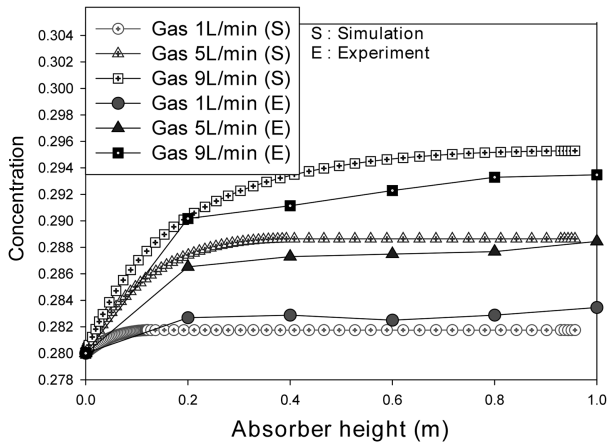


Fig. 11. Comparison between simulation and experimental data 1(input solution 288 K, cocurrent).

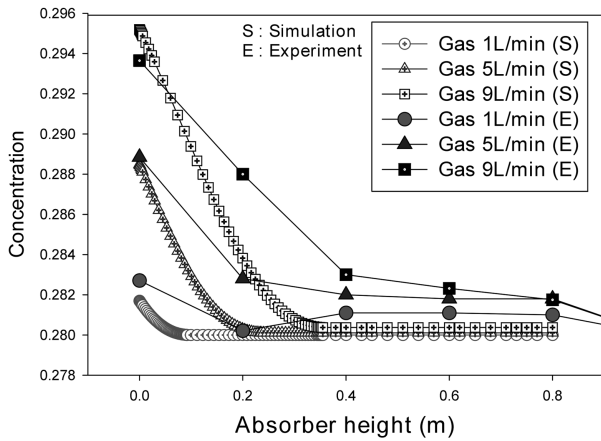


Fig. 12. Comparison between simulation and experimental data 2(input solution 283 K, countercurrent).

에 도달하는 최종 농도에 있어서도 비슷한 결과를 나타내고 있다. 그러나 병류의 결과에 비해 향류의 결과가 모사결과와 실험치의 비교오차가 더 큰 것으로 나타난다. 그 이유는 모사결과가 혼합에 의한 난류등의 비규칙성에 대한 영향을 배제한 것이므로 병류에 비해 상대적으로 혼합에 의한 난류형성이 더 잘 일어나는 향류의 경우 오차가 더 큰 것으로 사료된다. 또한 향류 흐름 결과에서 모사결과에 비해 흡수영역이 더 크게 나타난 것은 기체 분사구에서의 분사압력이 있어 예상에 비해 기포가 더 빠른 속도로 상승하기 때문이다. 그러나 모사결과의 타당성이 실험적 결과를 통하여 확인되었으며 이러한 실험을 통하여 직접 확인할 수 없는 냉각수의 영향이나, 고온 또는 고압 조건에서의 흡수기 거동 또한 일정 오차 범위 안에서 모사를 통하여 예측할 수 있음을 의미한다.

5. 결 론

암모니아 기체의 흡수에 대한 수학적 모사와 실험의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 암모니아 기체의 흡수는 주입 기체량, 주입용액 농도, 온도, 주입 방향에 민감한 영향을 받는다. 주입 기체의 양이 많을수록 그 흡수 영역이 늘어나며, 주입용액의 농도, 온도가 낮을수록, 또한 주입용액과 주입기체의 방향이 서로 향류를 이룰 때 분사되는 기체의 흡수영역이 줄어든다. 3 cm 지름의 흡수기를 통한 실험에서 상온, 상압에서는 최대 70 cm 정도의 흡수높이가 필요함을 알 수 있다.

(2) 소량의 물에 대한 물질전달은 무시하며 암모니아 기체의 단방향 흡수과정으로 정의한 모델과 실험 결과는 그 경향성과 결과값에 있어 일치를 보이고 있어 본 모델의 타당성과 적용가능성이 검증되었다.

(3) 본 모델을 통하여 실험적으로 예상하기 어려운 고온, 고압조건에서의 실제 흡수과정을 예측가능하며, 실제 흡수식 열펌프에 적용 가능한 흡수기 제작에 활용 가능하다.

감 사

본 연구는 유변공정연구센터(한국과학재단 ERC)의 연구지원에 의해 수행되었으며 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, K. B.: "Study of the Absorber for Ammonia-Water Absorption Heat Pump," Ph. MA. Thesis, Korea University, Seoul, Korea(2001).
2. Lee, K. B., Chun, B. H., Lee, J. C., Park, C. J. and Kim, S. H.: *Experimental Heat Transfer*, in press(2001).
3. Kang, Y., Lim, W. M. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **25**, 460(1987).
4. Lee, K. B., Chun, B. H., Lee, J. C., Park, C. J. and Kim, S. H.: *HWAHAK KONGHAK*, in press(2001).
5. Sujatha, K. S., Mani, A. and Srinivasa Murthy, S.: *International Community Heat Mass Transfer*, **26**, 975(1999).
6. Herbine, G. S. and Perez-Blanco, H.: *ASHRAE Transactions*, **101**, 1324 (1995).
7. Sujatha, K. S., Mani, A. and Srinivasa Murthy, S.: *Heat and Mass Transfer*, **32**, 255(1997).
8. Merrill, T. L. and Perez-Blanco, H.: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **40**, 589(1997).
9. McCabe, W. L., Smith, J. C. and Harriott, P.: "Unit Operations of Chemical Engineering," McGraw-Hill, Singapore, 115(1993).
10. Seader, J. D. and Ernest, J. H.: "Separation Process Principles," Wiley, New York, 123(1998).
11. Treybal, R. E.: "Mass-transfer Operations," McGraw-Hill, New York 139(1980).
12. Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Poling, B. E.: "The Properties of Gases and Liquids," McGraw-Hill, Singapore(1986).
13. Perry, R. H. and Green, D. W.: "Perry's Chemical Engineers' handbook," 6th ed., McGraw-Hill International Editions, Japan(1984).
14. Korean Thermophysical Properties Data Bank of Thermodynamics and Properties Lab. of Korea University.