

암모니아-물 기포분사형 흡수기의 물질전달 특성 연구

이재철 · 이기봉 · 전병희 · 이찬호 · 하종주 · 김성현*
고려대학교 화학공학과

The Study on the Characteristics of 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, Sung-Hyun Kim*
Dept. of Chemical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, KOREA

1. 서론

흡수식 열펌프는 환경 친화적인 자연냉매를 사용하는 열구동 시스템으로 환경 친화적 대체 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 상용화되어 사용되고 있으나, 용액의 분사 및 효과적 박막 형성에 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 최근에는 열전달 효과뿐만 아니라 우수한 물질전달효과를 나타낼 수 있는 기포분사형 흡수기에 대한 연구가 점진적으로 진행중이다. 그러나 최근 수년동안 수치모사를 통한 기포모드 흡수기에 연구가 활발히 진행되었으나 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 실린더형으로 제작된 흡수기에서 진행된 기포흡수실험결과와 비교하였다. 또한 물질전달에 치명적인 해를 주는 기포 slug 형성에 대한 실험을 실시하여 운전 가능 조건을 제시하였다.

2. 수치모사의 이론적 배경

2-1. 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 물질전달프릭스는 모든 표면에서 일정하다.
- 기포 서로간의 상호작용, 응집 등은 존재하지 않는다.
- 생성된 기포는 종말속도로 상승한다.
- 기체와 액체의 온도는 같다.
- 액체에서 기포로의 물질전달은 무시한다.
- 압력은 1기압으로 일정하다고 가정한다.

2-2. 기포의 속도

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

있다.

$$F_g - F_b + F_D = 0 \quad F_g = mg/g_c$$

$$F_b = m \rho g / \rho_p g_c \quad F_D = C_D V_t \rho A_p / 2g_c$$

$$\therefore V_t = (2g(\rho_p - \rho)m / A_p \rho_p C_D \rho)^{0.5}$$

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

2-4. 물질전달 계수

물질전달계수 K 는 Treybal([11])이 발표한 기포와 액상간의 물질전달 경험식을 사용하였다.

$$K_i = N_{sh,i} D_i / d_b$$

$$N_{sh,i} = 2.0 + 0.0187 N_{Reb}^{0.779} N_{sc}^{0.546} (d_b g^{0.333} D_i^{-0.666})^{0.116}$$

K_i = 용액에서의 물질전달계수 $N_{sh,i}$ = 용액에서의 Sherwood Number
 D_i = 용액에서의 확산도 d_b = 기포의 지름
 N_{Reb} = 기포의 Reynolds Number N_{sc} = Schmidt Number
 g = 중력 가속도

2-5. 기본 수식 전개

물질전달에 대한 기본식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

위 식으로부터 흡수기 높이와 기포반지름에 대한 다음과 같은 상미분식을 얻을 수 있다.

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

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

또한 흡수기 높이에 대한 상미분식 뿐만 아니라 다음과 같이 용액의 질량유속, 용액의 농도, 그리고 흡수기 온도에 대해서도 기포 반지름에 대한 상미분방정식이 유도된다.

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

$$\frac{dX}{dR} = - \frac{4\pi N \rho_{gas} R^2}{m}$$

냉각수가 없는 경우

$$\frac{dT}{dR} = - \frac{4\pi QN \rho_{gas} R^2}{mC_p}$$

냉각수가 있는 경우

$$\frac{dT}{dR} = - \frac{4\pi QN \rho_{gas} R^2}{mC_p} + \frac{2\pi R_{cylinder} U (T - T_{coolingwater}) \rho_{gas} V_b}{mC_p \rho_l K_l (X_i - X)}$$

Q = 흡수열

N = 시간당 생성되는 기포수

R_{cylinder} = 흡수기의 반지름

U = 총괄 열전달 계수

T_{cooling water} = 냉각수 온도

C_p = 용액의 열용량

3. 실험장치

3-1. 실험장치

기포분사형 흡수기는 높이가 100cm, 지름이 3cm이며 내부 거동을 살펴볼 수 있도록 아크릴로 실린더형태로 제작하였다. 흡수기 하단부에 3mm의 기포분사부를 설치하였으며 기체는 하단에서부터 상단으로 분사된다. 용액은 흡수기 하단 또는 상단으로 유입될 수 있도록 제작하였다. 물질전달 거동을 살펴보기 위해 5개의 샘플링 포트를 20cm 간격으로 설치하였고, 12개의 열전대를 설치함으로써 온도 분포상태를 확인하였다. 또한 압력 거동을 알아보기 위해 7개의 마노미터(manometer)를 설치하였다. 흡수기에 유입되는 용액은 500W의 카트리지가열기(cartridge heater) 3개가 설치된 용액탱크에서 예열시키고 유입라인에 500W, embedded type의 카트리지가열기(cartridge heater)를 설치하여 원하는 온도로 조절하였다. 실험장치에서 측정된 온도는 데이터 축적 시스템에 의하여 컴퓨터에 on-line으로 저장하였고, 채취된 샘플은 전기전도도를 측정하여 실험으로 구한 표준 커브(standard curve)로부터 농도를 분석하였다.

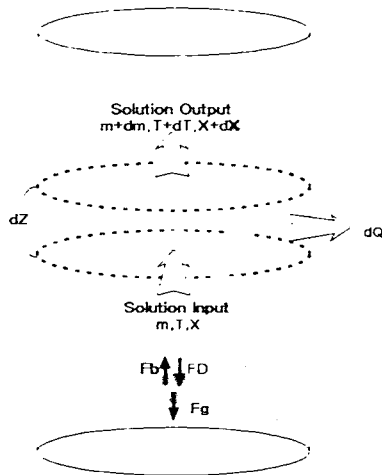


Fig. 1. The Theoretical Schematic of Numerical Analysis

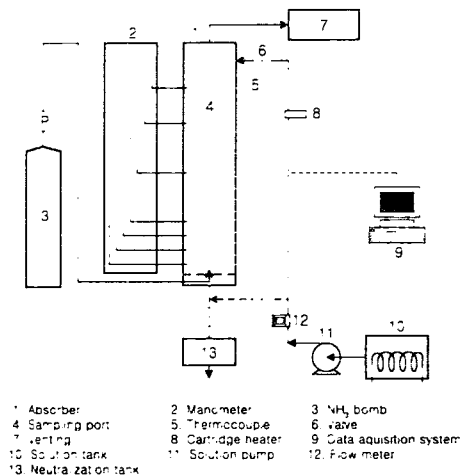


Fig. 2. Experimental Absorption System for Bubble Mode Absorber

3-2. 실험방법

물질전달실험은 1기압 상태의 조건에서 지름이 3cm인 흡수기에 0~30%의 암모니아 수용액을 283~288K, 0.3 kg/min로 유입시키고 암모니아 기체의 유속을 변화(1~9L/min)시켜가면서 수행하였다. 이때 각 조건에서 암모니아 기체와 용액을 병류와 향류로 흘려주면서 각각의 결과를 비교하였다. 실험적 결과는 흡수기 높이에 대한 농도, 온도, 압력의 변화로 나타낼 수 있었다. 또한 기포형 흡수에서 물질전달과 열전달에 치명적 해를 주는 Slug 형성을 관측하기 위해 상압, 상온에서 기체의 유속, 용액의 유속, 유입방향, 유입농도등을 변화시키며 Slug가 흡수기 전체에 발달하는 시점(Critical Point)을 관측하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 수치모사에 의한 결과

위의 실험방법에서 언급한 바와 같이 흡수기의 지름은 3cm, 용액의 유속은 0.3kg/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.

Fig. 3는 지름이 3cm인 흡수기 하단부에서는 용액이 28%, 283K로 유입되며 같은 하단부의 0.3cm 오리피스 분출관에서 암모니아 기체가 유입될 때의 흡수기 높이에 대한 용액의 농도의 변화를 나타낸 것이다. 용액의 농도 변화도를 보면 집중흡수영역을 쉽게 알 수 있다. 기체가 1L/min으로 분사될 경우 흡수영역은 약 10cm 이하영역이며 5L/min인 경우 40cm, 9L/min인 경우 70cm 이하 영역에서 집중적으로 흡수된다. Fig. 4은 기체와 액체의 유입방향을 반대로 한 결과이다. 용액의 유입농도와 온도는 28%, 283K이다. Fig. 4에서 잘 알 수 있듯이 병류에 비해 향류의 경우 동일조건에서 흡수영역의 높이가 15cm 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. 5은 288K의 암모니아 기체와 암모니아 30% 용액이 흡수기 하단부로 주입되어 병류로 흐를 때의 높이에 따른 농도 변화를 보여준다. 농도, 온도 변화와 각 높이마다 설치된 마노미터(manometer)에 의해 측정된 압력에 대한 데이터와 종합하여 그 흡수영역과 기포 존재 높이를 추측할 수 있다. 30% 용액에 9L/min으로 암모니아 기체를 주입하는 경우 기체 흡수높이를 약 70cm로 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 가스의 높이는 증가하는 모습을 나타낸다. 병류실험에 비해 실험 데이터를 통하여서도 그 흡수영역을 확연히 알 수 있었으며 기포 존재 높이 또한 쉽게 파악할 수 있었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 288K의 30% 용액에 9L/min으로 암모니아 가스를 주입하는 경우 60cm이하 영역에서 흡수가 대부분 일어남을 알 수 있다.

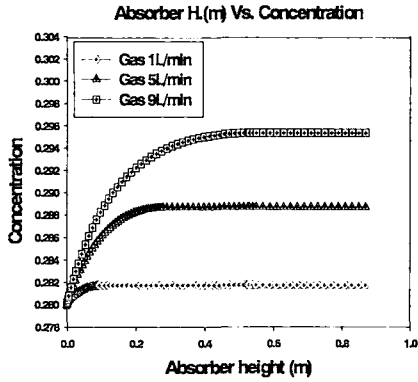


Fig. 3 Numerical Simulation of Cocurrent System (Input Solution's Temperature = 283K)

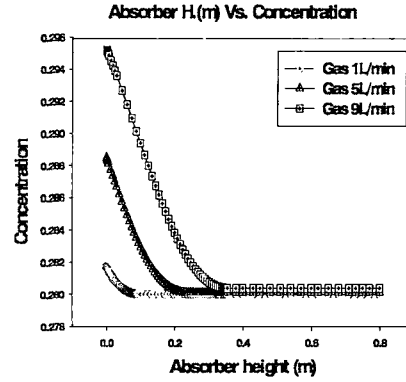


Fig. 4 Numerical Simulation of Countercurrent System (Input Solution's Temperature = 283K)

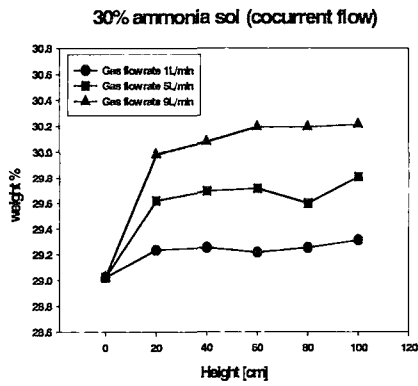


Fig. 5 The Effect of Gas Flow Rate on Temperature Profile (Cocurrent)

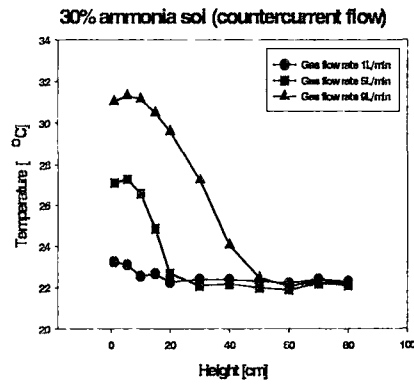


Fig. 6 Effect of Gas Flow Rate on Concentration Profile (Countercurrent)

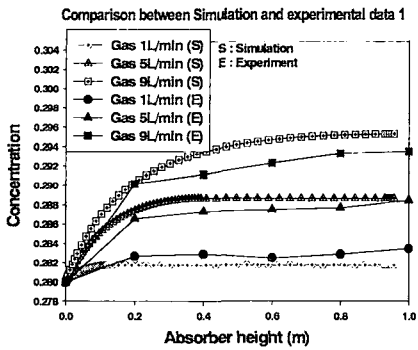


Fig. 7. Comparison between Simulation and Experimental Data 1 (Input Solution 288K, Cocurrent)

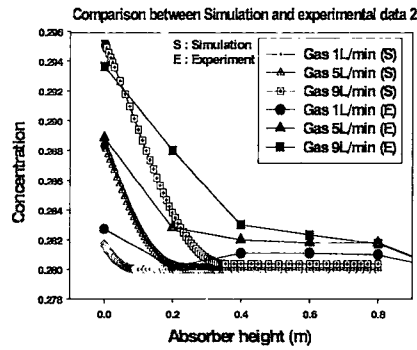


Fig. 8. Comparison between Simulation and Experimental Data 2 (Input Solution 283K, Countercurrent)

4-3. 모델과 실험치의 비교

Fig. 7은 병류 흐름으로 주입 용액의 온도를 288K로 하였을 때의 흡수기에서의 농도 분포에 대한 모사결과와 실험치를 비교한 것이다. Fig. 8는 향류 흐름으로 283K로 용액이 주입될 때의 모사결과와 실험치를 비교한 것이다. 모사의 결과는 실제 실험 중에 있을 수 있는 와류등의 비규칙성을 예측할 수는 없지만, Fig. 7~8에서 볼 수 있듯이 흡수기 전체에서 일어나고 있는 경향성이나 집중 흡수높이 등은 실험결과와 모사결과가 아주 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 흡수가 일어난 후에 도달하는 최종 농도에 있어서도 비슷한 결과를 나타내고 있다. 모사결과의 타당성이 실험적 결과를 통하여 확인되었으며 이러한 실험을 통하여 직접 확인 할 수 없는 냉각수의 영향이나, 고온 또는 고압 조건에서의 흡수기 거동 또한 일정 오차 범위 안에서 모사를 통하여 예측할 수 있음을 의미한다.

4-4. Slug 형성 실험

Slug의 형성은 유입용액의 속도와 유입가스의 양, 용액과 가스간의 농도차, 물질전달 계수, 온도, 압력, 표면장력, 점도 등의 여러 가지 물성치의 함수이며 유입가스의 양의 변화에 따라 형성된 Slug의 유동특성 또한 변화한다. 위 실험에서는 일정한 온도, 압력하에서 미세하게 변화하는 물성치에 대한 영향은 무시할 수 있다는 가정하에서 유입용액의 속도, 유입가스의 양, 용액과 가스간의 농도차를 변화시키면서 Slug의 형성관찰 및 Slug의 완전발달 영역을 측정하였다. Fig. 9는 지름 2cm 흡수기에서의 Slug형성에 대한 임계점 조건을 나타낸 그래프이다. 기체의 유입량이 증가할수록 흡수기를 흐르는 용액의 유입량 또한 증가하여야만 안정된 상태, 즉 Slug가 발생하지 않는 상태를 유지할 수 있다. 기상과 액상의 초기 농도 차이가 클수록 Slug 형성이 일어나기 위해서는 기체의 유입량이 많아져야 됨을 알 수 있다. 그 뿐만 아니라 기체와 용액의 유입방향이 반대일 경우가 동일한 방향으로의 유입일 경우보다 흡수기 전체에 Slug 형성이 잘 되지 않음을 잘 알 수 있다.

그러나 향류의 경우 흡수기 전체영역까지 Slug가 확장되기는 어려우나 병류에 비해 훨씬 더 큰 Slug가 흡수기 하부, 즉 기체의 유입부에 형성된다. 이는 용액과 흐름방향이 반대로 형성되어 있어 Slug의 상승이 어려워 하부에 기체가 축적되어 생기는 현상으로 흡수기내의 용액의 수위를 심하게 유동시키며 흡수기 전체 운전이 불안정요소로 작용한다. 비록 흡수높이가 더 필요할지라도 흐름방향이 병류인 경우가 향류인 경우에 비해 안정된 작동이 가능하다.

또한 위 실험을 통하여 Slug 형성에 대한 Re_l , Re_g , 농도차의 간단한 함수로 표현된 간단한 상관관계식을 유도할 수 있다.

(Stable region)

$$(8.237 \times 10^{-5})Re_l - (1.00317 \times 10^{-4})Re_g + dX > 0.04455$$

(Fully developed slug formation region)

$$(8.237 \times 10^{-5})Re_l - (1.00317 \times 10^{-4})Re_g + dX \leq 0.04455$$

Re_l = Reynolds number of input solution

Re_g = Reynolds number of input ammonia gas

dX = solution equilibrium concentration - input solution concentration

위 식을 통하여 Re_l 의 증가, dX 의 증가는 Slug 형성을 억제하며, Re_g 는 slug 형성을 증진 시킴을 잘 알 수 있다.

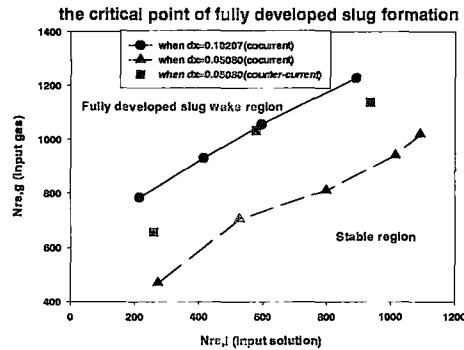


Fig. 9. The Critical Points of Fully Developed Slug Formation

5. 결론

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

(1) 암모니아 기체의 흡수는 주입 기체량, 주입용액 농도, 온도, 주입방향에 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.

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

(3) 실린더형 기포분사모드 흡수기에서의 Slug 형성의 지배변수는 기체, 용액의 유입량이며, 무차원수로 이루어진 결과식을 통하여 실험이 어려운 실제 고온 고압의 흡수기 설계에서 Slug 형성의 가능성 추측이 가능할 것으로 예상된다.

감사

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

References

- [1] Lee, K. B.: "Study of the Absorber for Ammonia-Water Absorption Heat Pump", Ph. MA. Thesis, Korea University, Seoul, Korea (2001)
- [2] Kang, Y., Lim, W. M., and Kim, S. D. : *Journal of the Korea Institute of Chemical Engineers*, 25(5), pp 460-467(1987)
- [3] Sujatha, K. S., Mani, A. and Srinivasa Murthy, S.: *International Community Heat Mass Transfer*, 26(7), pp 975-984(1999)
- [4] Herbine, G. S. and Perez-Blanco, H.: *ASHRAE Transactions*, 101(2), pp 1324-1332 (1995)
- [5] Sujatha, K. S., Mani, A. and Srinivasa Murthy, S.: *Heat and Mass Transfer*, 32, pp 255-259(1997)
- [6] Merrill, T. L. and Perez-Blanco, H.: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(3), pp 589-603 (1997)
- [7] Treybal, R. E.: "Mass-transfer operations" McGraw-Hill, New York pp 139-147(1980)