

## 열펌프 시스템에서 박막 모드와 기포타입 모드의 열 및 물질전달 비교

이기분, 전병희, 이재철, 박찬진\*, 김성현  
고려대학교 화학공학과, 시립인천전문대학 환경공학과\*

### Comparison of Heat & Mass Transfer of Falling Film and Bubble Mode in Heat Pump System

Ki-Bong Lee, Byung-Hee Chun, Jae-Cheol Lee, Chan-Jin Park\*, Sung-Hyun Kim  
Dept. of Chem. Eng., Korea University,  
Dept. of Environ. Eng., Junior College of Incheon\*

#### 서론

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 환경친화적인 자연냉매를 사용하는 열구동 시스템으로 다시 주목을 받고 있다. 특히 흡수식 열펌프의 구성요소 중 흡수에 의하여 고온의 열을 얻을 수 있는 흡수기에 박막유동 및 기포타입유동 등의 효율적인 열전달 모드를 적용함으로써 제품의 소형화와 에너지 손실 감소를 이루고 있다. 이에 본 연구에서는 동일한 평판형 흡수기에서 박막유동과 기포타입유동을 모두 적용시켜 봄으로써 각 운전모드에서의 흡수능 및 온도 거동을 비교·분석하고, 실험결과를 dimensionless number로 정리하여 물리적인 해석을 도출하고자 하였다.

#### 실험

흡수기 실험에 사용된 ammonia gas는 98% 이상의 순도(성강가스(주))이며, ammonia 용액은 Kanto Chemical사의 29% 시판시약을 사용하였다.

흡수기에 설치된 흡수판의 크기는 11.2(가로)×26.4(세로)×3(두께) mm로 적은 유량에서도 층류를 얻기 위해서 흡수판을 바꾸어 가며 예비실험을 행하였다. 이때 매끈한 평판, hair line을 준 판, sand paper로 처리한 판의 세 가지로 테스트한 결과 sand paper로 처리한 판에서 적은 유속에서도 만족할 만한 층류가 생성되는 것을 확인하였고, 실험장치에 적용할 수 있었다. 또한 흡수기 내부의 온도 상태를 확인하기 위해서 5개의 thermocouple을 등간격으로 설치하였으며, 용액의 흐름상태를 확인하기 위하여 정면에 sight glass를 넣었다.

흡수기에 유입되는 용액은 500W의 cartridge heater 3개가 설치된 solution tank에서 예열시키고 input line에 500W, embedded type의 cartridge heater를 설치하여 원하는 온도로 조절하였다. 또한 용액의 유량을 조절하기 위해 흡수기 입구부에 metering valve를 설치하였고, 용액의 양이 많을 때는 input line에서 by-pass를 행하였다.

실험장치에서 thermocouple에 의해 측정된 온도는 data aquisition system에 의하여 컴퓨터에 on-line으로 저장되고, 채취된 sample은 conductivity를 측정하여 실험으로 구한 standard curve로부터 농도를 분석하였다.

실험은 흡수기에 0, 10, 20, 30%의 ammonia 수용액을 20℃, 0.3kg/min로 유입시키고 ammonia gas의 유속을 변화시켜가면서 수행하였다. 이때 각 조건에서 흡수기를 falling film mode와 bubble mode로 운전하면서 각각의 결과를 비교하였다.

흡수기 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.

### 이론 및 계산

실험결과로부터 열전달 계수와 물질전달 계수를 구하기 위해서 다음의 관계식을 이용하였다.

Heat transfer

$$Q_c = UA \Delta T_{lm}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{[T_{sol, in} - T_{cw, out}] - [T_{sol, out} - T_{cw, in}]}{\ln[(T_{sol, in} - T_{cw, out}) / (T_{sol, out} - T_{cw, in})]}$$

Mass transfer

$$m_{abs} = K \rho A_{abs} \Delta x_{lm, l}$$

$$\Delta x_{lm, l} = \frac{[x_{in}^* - x_{in}] - [x_{out}^* - x_{out}]}{\ln[x_{in}^* - x_{in}] / [x_{out}^* - x_{out}]}$$

한편, 얻어진 결과를 다음의 정의식에 의하여 dimensionless number로 표현하였다.

	Falling film mode	Bubble mode
Reynolds No.	$N_{Re} = \frac{4m}{W\mu_l}$	$N_{Re} = \frac{4r_H V \rho}{\mu_l}$
Sherwood No.	$N_{Sh} = \frac{K_l}{D} \left(\frac{\gamma_l^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}}$	$N_{Sh} = 1.62 \left(\frac{m}{DL\rho}\right)^{\frac{1}{3}}$
Nusselt No.	$N_{Nu} = \frac{h_{abs}}{k_l} \left(\frac{\gamma_l^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}}$	$N_{Nu} = \frac{hL}{k_l}$

### 결과 및 토론

흡수기에 유입되는 ammonia 수용액의 농도가 일정할 때, falling film mode와 bubble mode에서 유입되는 ammonia gas의 유속이 증가할수록 흡수되는 ammonia의 양과 전달되는 열량이 증가함을 알 수 있다. 이때 상대적으로 bubble mode에서 물질전달이 더 우수한 결과를 얻을 수 있는데, 이는 bubble mode에서 용액에 대한 ammonia gas의 접촉면적이 커지기 때문으로 해석할 수 있다. 한편 열전달 과정에서는 falling film mode에서 더 우수한 결과를 얻을 수 있는데, 이는 평판형 흡수기가 한 면에서만 열전달이 이루어지는 falling film mode에 적합하게 설계되었기 때문이다. 즉 한 면에만 열교환기가 설치된 평판형 흡수기는 전체 주위면에서의 열전달이 필요한 bubble mode에는 불리한 면이 있었다. 그러나 gas의 유속이 증가함에 따라 falling film mode의 열전달 거동은 일정하거나 오히려 감소되었고, bubble mode의 열전달 거동은 증가하여 그 차이가 급격히 줄어드는 현상을 볼 수 있었다. 이는 falling film mode에서는 channeling 현상이 일어나 열전달 면적이 줄어드는 반면, bubble mode에서는 유동화 현상이 발생하여 thermal boundary에 영향을 미치지 않으므로 설명할 수 있다. 한편 흡수기 내부의 온도 분포를 살펴보면 falling film mode에서는 위로 갈수록 온도가 높고, bubble mode에서는 전체적으로 크게 온도차이가 없으나 아래로 갈수록 온도가 높게 나왔다. 이러한 현상은 흡수가 주로 일어나는 영역의 차이와 냉각수의 영향으로 볼 수 있다.

결론적으로 물질전달 측면에서는 bubble mode가 우수하고, 열전달 측면에서는 falling film mode가 우수하다고 할 수 있는데, gas의 유속이 증가하여 유동화가 발생하거나 열전달을 전체적으로 일어나게 한다면 bubble mode에서 열 및 물질전달 모두 향상된 성능을 얻을

수 있다는 것을 알 수 있다.

### 감사

본 연구는 과학기술부 온실가스저감기술개발사업단의 과제로 수행되었으며, 연구비를 지원한 사업단에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 강용태: 空氣調和 冷凍工學, 27(1), (1998)
2. 강용태: “흡수식 냉동기 및 열펌프 워크샵”, 한국정밀화학공업 진흥회(1999)
3. 이기봉, 전병희, 이재철, 박찬진, 김성현: *Proceedings of 2000 KICChE Spring Meeting*, 6(1), (2000)
4. Reid R. C., Prausnitz J. M. and Poling B. E.: “The Properties of Gases & Liquids”, McGraw-Hill Book Company(1988)
5. McCabe W. L., Smith J. C. and Harriott P.: “Unit Operations of Chemical Engineering”, McGraw-Hill Book Company(1993)
6. Herold K. E., Radermacher R. and Klein S. A.: “Absorption Chillers and Heat Pumps”, CRC Press(1996)
7. Kang Y. T., Christensen R. N. and Kashiwagi T.: *ASHRAE Transaction*, 104(1), (1998)
8. The Korean Institute of Chemical Engineers: *NICE*, 17(6), 367(1999)
9. Kang Y. T., Akisawa A. and Kashiwagi T.: *International Journal of Refrigeration*, 22, (1999)

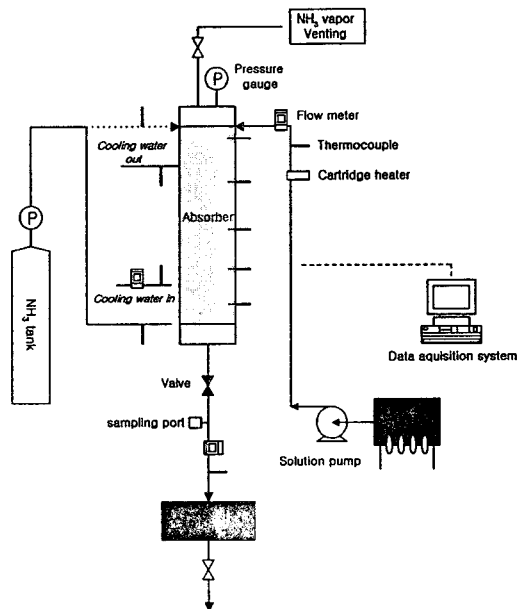


Fig. 1 Experimental absorption system

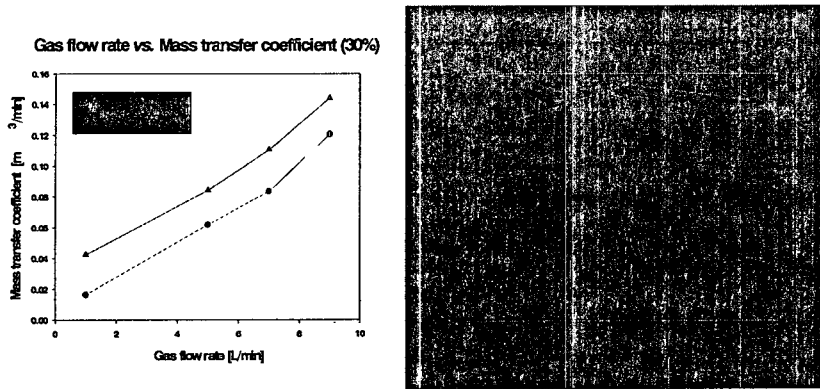


Fig. 2 Effect of gas flow rate on mass and heat transfer coefficient

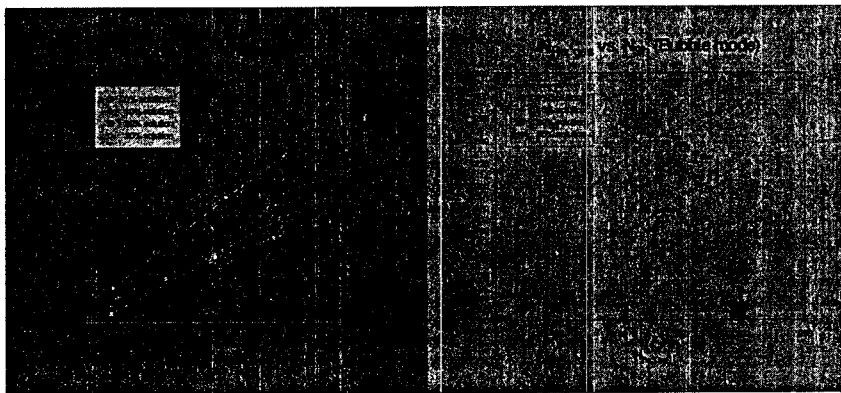


Fig. 3 Relation of Reynolds numbers and Sherwood numbers

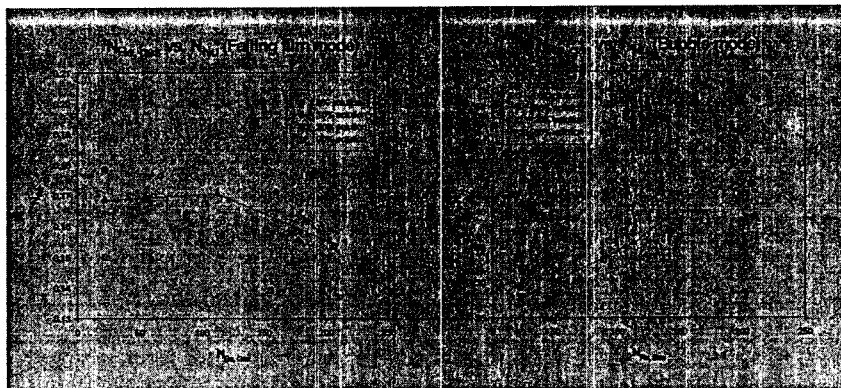


Fig. 4 Relation of Reynolds numbers and Nusselts numbers