

암모니아-물 흡수과정에서의 SiO₂ 나노입자의 열 및 물질전달 특성연구

하종주, 이찬호, 김성현
고려대학교 화공생명공학과

Effect of SiO₂ Nano-sized particle on heat and mass transfer in ammonia-water absorption

Jong-Joo Ha, Chan Ho Lee, Sung-Hyun Kim
Dept. of Chemical & Biological Eng., Korea University

서론

인류에 직면해 있는 환경, 에너지 문제를 타개하기 위한 많은 연구 중 흡수식 열펌프는 환경 친화적인 자연냉매를 사용하는 열구동 시스템으로 주목을 받고 있다. 흡수식 열펌프의 구성요소 중 흡수기는 암모니아의 흡수에 의한 열 및 물질전달 현상이 동시에 일어나는 곳으로 열펌프 시스템의 성능에 큰 영향을 미치는 구성요소이다[1-3]. 이와 함께 최근에 나노크기의 입자가 열 전달의 향상에 크게 기여한다는 연구 결과가 보고되어 이를 토대로 대표적인 흡수공정으로 많은 연구가 진행되어 온 암모니아-물 흡수과정에 나노입자의 영향에 대한 연구에 관심을 가지게 되었다[4-6]. 이에 본 연구에서는 나노입자를 암모니아-물 흡수과정에 도입하여 열 및 물질전달 특성 실험을 실시하고 나노입자에 의한 열 및 물질전달의 향상 및 흡수기의 성능 개선에 미치는 영향을 분석하고, 무차원수를 사용하여 나노입자의 농도가 열 및 물질전달에 미치는 영향에 대한 해석을 수행하였다.

실험장치 및 해석방법

1. 실험장치

본 연구의 실험장치 모식도를 Fig.1에 나타내었다.

흡수기는 충분한 열 및 물질전달이 일어날 수 있도록 70cm 정도의 Falling Film Type으로 제작하였으며, 실험에 사용된 ammonia gas는 98% 이상의 순도(성강가스(주))를 가지는 기체를 사용하였다. 흡수과정의 열전달에 관한 해석을 위해 흡수기 용액의 입구와 출구 및 냉각수의 입, 출구에 thermocouple을 설치함으로써 온도를 측정하고 Data acquisition system에 의하여 컴퓨터에 on-line으로 저장하였다. 이와 함께 기체입구에 MFC를 설치하여 Gas Flow Rate 변화 실험이 가능하도록 하였으며, 용액 흐름에는 Mass Flow meter를 설치하여 용액 흐름량을 조절하였다. 또한, 흡수과정에서의 물질전달에 관한 해석을 위해서 용액 출구에 샘플링 포트를 설치하였고, 채취된 sample은 전기전도도를 측정하고 standard curve로부터 농도를 분석하여 나노입자의 농도에 따른 물질전달의 영향을 분석 가능하도록 하였다. 용액에 포함되는 나노입자는 암모니아-물 시스템의 염기 상에서 안정한 무기물인 SiO₂ 입자가 분산된 Ludox 용액(Aldrich Chemical Company)을 사용하였으며, Ludox 용액에 관한 물성치는 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Properties of Ludox solution

| | Density (g/cm ³) | Particle wt% | Particle Molecular Weight | average particle size (nm) |
|--|---------------------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|
| | 1.21 | 30 | 60.09 | about 12 |

2. 실험방법 및 해석방법

2.1 SiO₂ 용액의 농도에 따른 물성값 측정

나노입자의 농도에 따른 열 및 물질전달의 현상을 무차원화하여 해석하기 위하여 SiO₂ 입자의 농도에 따른 밀도와 점도를 측정하였다. Table 2에 입자의 농도에 따른 밀도와 점도의 측정값을 정리하였다.

Table 2. 입자의 농도에 따른 밀도와 점도의 측정값

| 입자의 농도 | 5% | 10% | 15% | 20% |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 밀도 | 1.029 | 1.053 | 1.088 | 1.137 |
| 점도 | 1.1294 | 1.3775 | 1.4738 | 1.5550 |

2.2 예비실험 수행 및 해석방법

증류수를 이용한 실험장치의 시운전을 수행하여 용액의 흐름량과 암모니아 기체량의 적정 실험조건을 산출하였다. 예비실험의 결과를 통해서 기체의 흐름량이 증가하면 기체의 N_{Re} 가 증가하여 기체 흡수가 활발하게 이루어지지만, 과량의 기체흐름의 경우 용액 흐름에 영향을 주어 Film 형성을 방해하는 현상을 보임을 확인하였고, 일정한 기체 흐름량에서 용액의 흐름량이 증가할수록 미세하게 감소하는 경향을 보이며, 용액 흐름량의 증가는 용액 Film 두께에 영향을 줄 뿐 흡수의 증가에는 기여를 하지 못하는 결과를 확인하였다. 또한 실험결과를 해석하기 위해 적용된 식을 다음과 같이 정리하였다.

$$Q = mc \times C_{p,c} \times \Delta T_{c,w} = U \times A \times \Delta T_{LMTD} \quad (1)$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{[T_{sol,in} - T_{c,out}] - [T_{sol,in} - T_{c,out}]}{\ln[(T_{sol,in} - T_{c,out}) / (T_{sol,in} - T_{c,out})]} \quad (2)$$

$$\frac{1}{h_i} = \frac{1}{U} - \frac{1}{h_o} - \frac{\delta_w}{k_w} \quad (3)$$

$$m_{abs} = K \times \rho \times A_{abs} \times \Delta x_{lm,l} \quad (4)$$

$$\Delta x_{lm,l} = \frac{[x_{in,eq} - x_{in}] - [x_{out,eq} - x_{out}]}{\ln[(x_{in,eq} - x_{in}) / (x_{out,eq} - x_{out})]} \quad (5)$$

결과 및 토론

1. 염기상태에서의 나노입자의 안정성 검토

암모니아 흡수과정에서 용액에 포함된 나노입자를 적용하기 위해서는 나노입자가 액체상에서 상호작용이나 응집 등의 현상을 유발하지 않고 분산된 상태의 유지가 요구된다. Fig.2는 액체상에 분산된 SiO₂ 입자의 안정성을 TEM을 이용하여 관찰한 것이며, 이를 통해 염기 상에서 SiO₂ 입자가 응집 등의 현상을 보이지 않고 평균 입자의 크기를 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

2. SiO₂ 입자를 포함한 용액에 대한 실험결과

예비실험을 통해 결정된 실험조건 하에서 나노입자의 농도가 암모니아-물 흡수과정에 미치는 영향에 대해 실험을 수행하였다.

기체의 흐름량은 2.5L/min, 흡수기의 입구온도는 24℃를 기준으로 하여 SiO₂ 나노입자가 포함된 용액을 이용한 실험결과를 Fig.3과 Fig.4에 나타내었다. Fig.3에서 보는 바와 같이

입자가 5wt% 포함된 용액의 경우 약간의 증가를 보이지만, 10wt% 포함된 용액의 경우 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다. 이를 통해서 열전달 계수는 나노입자가 포함된 경우에도 크게 향상되지 않는 결과를 보이고 있으며, 이는 얇은 막을 형성하며 Laminar flow를 형성하는 흡수기에서의 흐름에는 나노입자가 열전달의 향상에 미치는 영향이 크지 않음을 보여주고 있다.

또한 Fig.4에서 보는 바와 같이 나노입자의 농도에 따른 물질전달 계수는 열전달 계수의 경우와는 달리 나노입자의 농도에 비례하여 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이는 물질전달이 일어나는 용액의 표면에서 입자에 의한 Convection의 영향이 증가함에 따라 일어나는 현상으로 풀이된다.

위의 실험결과를 통하여 암모니아-물 흡수과정에서 나노입자가 열전달 및 물질전달에 영향을 주고 있음을 확인하였으며, 특히 본 연구에서 사용한 SiO₂ 나노입자의 경우 낮은 열전도도로 인해 열전달의 향상에는 크게 기여하지 못하지만, 물질전달의 향상에는 기여하고 있으며, 이를 통하여 높은 열전도도를 가지면서 암모니아-물 시스템에서도 안정한 나노입자를 찾아내어 적용할 경우 큰 성능향상을 이루어 낼 수 있음을 확인하였다.

감사

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

참고문헌

1. 강용태: “흡수식 냉동기 및 열펌프 워크샵”, 한국정밀화학공업 진흥회(1999)
2. Kang, Y. T., Akisawa, A. and Kashiwagi, T., International Journal Refrigeration 22; 250-262(1999)
3. A. T. Conlisk, Chemical Engineering Science 50; No. 4 (1995)
4. S. Lee, S.U.-S. Choi, S. Li, J.A. Eastman, Journal of Heat Transfer 121; 280-289(1999)
5. Y. Xuan, Q. Li, International Journal Heat Fluid Flow 21; 158-164(2000)
6. Y. Xuan, W. Roetzel, International Journal of Heat and Mass Transfer 43; 3701-3707(2000)
7. Lee, K. B., MA. Thesis, Korea University, Seoul, Korea (2001)
8. W. L. McCabe, J. C. Smith, P. Harriott, 4th Edition McGraw-Hill, Singapore(1993)
9. H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, International Journal of Thermophysics 23; 571-580(2002)

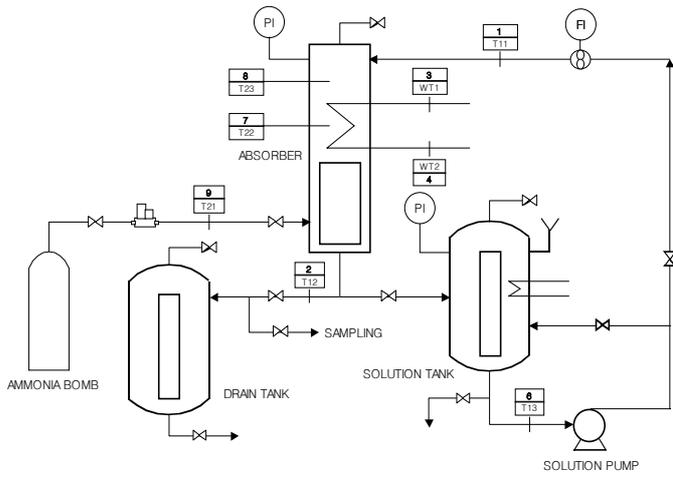


Fig. 1 실험장치의 개략도



Fig. 2 SiO₂ 나노입자의 TEM 사진 (암모니아 1wt%, 나노입자 5wt%)

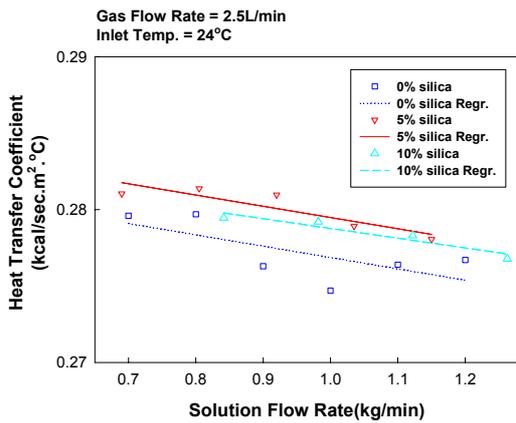


Fig.3 SiO₂ 나노입자의 농도에 따른 열전달 계수의 변화

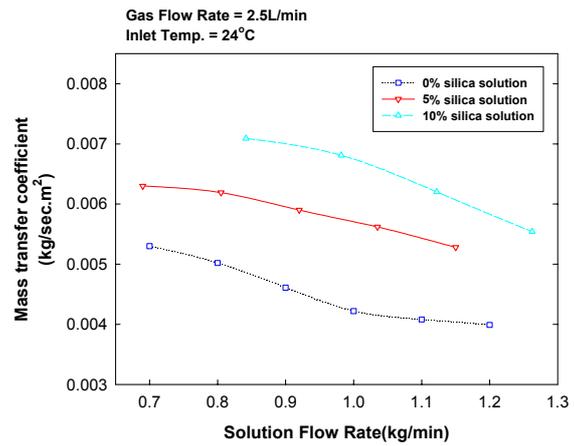


Fig.4 SiO₂ 나노입자의 농도에 따른 물질전달 계수의 변화