

**SiO<sub>2</sub> 나노입자에 의한 암모니아-물 흡수용액의 열 및 물질전달 특성 연구**

하중주, 이찬호, 김성현  
 고려대학교 화공생명공학과\*

**Effect of SiO<sub>2</sub> Nano-sized particle on heat and mass transfer in ammonia-water absorption**

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

**1. 서론**

인류가 직면한 환경 및 에너지 문제를 타개하기 위한 많은 연구 중 흡수식 열펌프는 환경 친화적인 자연냉매를 사용하는 열구동 시스템으로 다시 주목을 받고 있다. 흡수식 열펌프의 구성요소 중 흡수기는 암모니아의 흡수에 의한 열 및 물질전달 현상이 동시에 일어나는 곳으로 암모니아-물 열펌프 시스템의 성능 향상을 위해 가장 중요한 부분이다. 최근에 나노입자가 주입된 나노유체 용액은 열전달을 크게 향상시킨다는 연구결과들이 발표되고 있다. 또한 나노유체를 기존의 에너지 이용시스템의 효율향상을 위한 목적으로 활용하기 위한 연구들이 시작되고 있다. 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 연구하고자 하였다. 또한 무차원수를 사용하여 나노입자의 농도가 열 및 물질전달에 미치는 영향에 대한 해석도 시도하였다.

**2. 실험방법 및 장치**

본 연구에서의 기체, 액체 및 냉각수의 흐름에 대한 개략도를 Fig.1에 나타내었다.

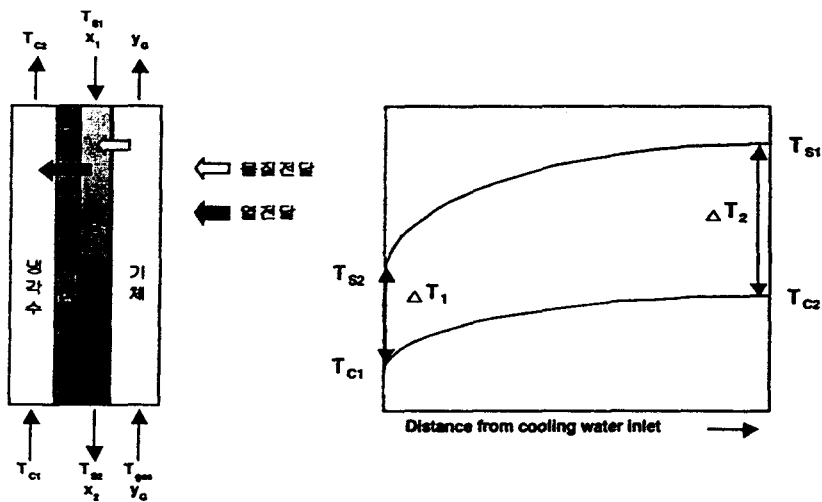


Fig.1 기체, 액체 및 냉각수의 흐름에 대한 개략도

흡수기는 충분한 열 및 물질전달이 일어날 수 있도록 70cm 정도의 Falling Film Type으로 제작하였으며, 실험에 사용된 암모니아 가스는 98% 이상의 순도(성강가스(주))를 가지는 기

체를 사용하였으며, 용액에 포함되는 나노입자는 암모니아-물 시스템의 염기 상에서 안정한 무기물인 SiO<sub>2</sub> 입자가 분산된 Ludox 용액(Aldrich Chemical Company)을 사용하였다. Ludox 용액에 관한 물성치를 Table 1에 정리하였다.

흡수과정의 열전달에 관한 해석을 위해 흡수기 용액의 입구와 출구 및 냉각수의 입, 출구에 thermocouple을 설치함으로써 온도 분포상태를 확인하였으며, 측정된 온도는 자료저장시스템(Data aquisition system)에 의하여 컴퓨터에 on-line으로 저장하였다. 이와 함께 기체입구에 MFC(mass flow control)를 설치하여 가스유량 변화 실험이 가능하도록 하였으며, 용액 흐름에는 MFC를 설치하여 용액 흐름량을 조절함으로써 흡수기에서 형성되는 용액의 Film이 일정하게 형성되도록 하였다. 또한, 흡수과정에서의 물질전달에 관한 해석을 위해서 용액 출구에 포트를 설치하여 시료를 채취하고 채취된 시료는 열전도도를 측정하여 기 수행된 실험으로 부터 구한 표준커브(standard curve)로부터 농도를 분석하여 나노입자의 농도에 따른 물질전달의 변화를 측정할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1. Properties of Ludox solution

	Density (g/cm <sup>3</sup> )	pH	Particle wt%	Particle Molecular Weight	average particle size (nm)
	1.21	8.2	30	60.09	about 12

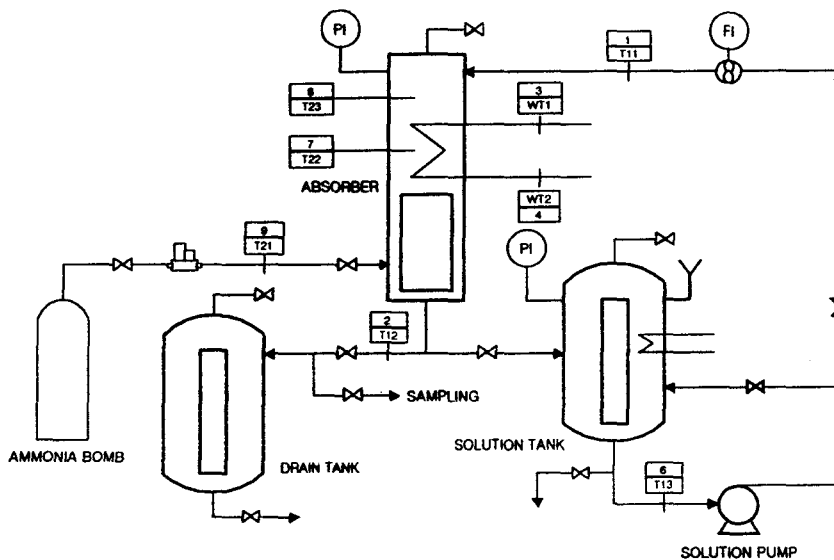


Fig. 2 실험장치의 개략도

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 SiO<sub>2</sub> 용액의 농도에 따른 물성값 측정

나노입자의 농도에 따른 열 및 물질전달의 현상을 해석하기 위하여 SiO<sub>2</sub> 입자의 농도에 따른 밀도와 점도를 측정하여 추후 진행하게 될 무차원수를 이용한 해석을 수행하는 데 필요한 자료를 수집하였다. Table 2에 입자의 농도에 따른 밀도와 점도의 측정값을 정리하였다.

### 3.2 염기상태에서의 나노입자의 안정성 검토

암모니아 기체의 흡수과정에서 용액에 포함된 나노입자의 거동에 관한 해석방법으로는 고-액-기 삼상 유동에 의한 해석보다 액체상과 나노입자 고체상이 단일상으로 거동하고 기체의 흡수가 수반되는 기-액 평형으로 가정하여 해석을 수행한다. 그러기 위해서는 나노입자가 액체 상에서 상호작용이나 응집 등의 현상을 유발하지 않고 분산된 상태의 유지가 요구된다. Fig. 3은 액체상에 분산된 SiO<sub>2</sub> 입자의 안정성을 TEM을 이용하여 관찰한 것이며, 이를 통해 염기 상에서 SiO<sub>2</sub> 입자가 응집 등의 현상을 보이지 않고 평균 입자의 크기를 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

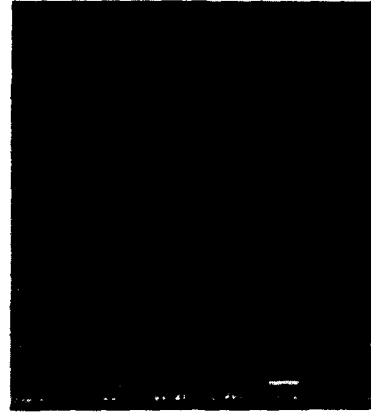


Fig. 3 SiO<sub>2</sub> 나노입자의 TEM 사진

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

### 3.3 예비실험 수행 결과

증류수를 이용한 실험장치의 시운전을 수행하여 용액의 흐름량과 암모니아 기체량의 결정 및 기초 비교 Data를 수집하였다. 실험결과를 해석하기 위해 적용된 식을 다음과 같이 정리하였다.

$$Q = m \times C_p \times \Delta t_{\text{Coolant}} = h_i \times A \times \Delta T_{\log, \text{mean}} \quad (1)$$

$$h_i = \frac{m \times C_p \times \Delta t_{\text{Coolant}}}{A \times \Delta T_{\log, \text{mean}}} \quad (2)$$

$$N_{\text{Re}} = \frac{4 \times m}{\mu \times b} \quad (3)$$

$$N_{\text{Nu}} = \frac{h_i \times H}{k} = \frac{m \times C_p \times \Delta t_{\text{Coolant}}}{k \times b \times \Delta T_{\log, \text{mean}}} \quad (4)$$

- 여기서,
- $m$  = Mass Flow Rate (kg/sec)
  - $C_p$  = Heat Capacity (kcal/kg.°C)
  - $\Delta t_{\text{Coolant}}$  = Temp. Difference of Cooling water (°C)
  - $\Delta T_{\log, \text{mean}}$  = LMTD (°C) =  $(\Delta T_2 - \Delta T_1) / \ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)$
  - $h_i$  = Heat Transfer Coefficient (kcal/sec.m<sup>2</sup>.°C)
  - $\mu$  = Viscosity of Liquid (cP)
  - $k$  = Thermal Conductivity (kcal/sec.m.°C)
  - $A$  = Heat Transfer area (m<sup>2</sup>) = 흡수기 높이 × 흡수기 폭 =  $H \times b$

예비실험 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 기체의 흐름량

의 변화에 따른 열전달 계수는 12.5L/min의 기체 흐름량에서 최대값을 보이고 있고, 이는 기체의 흐름량이 증가하면 기체의  $N_{Re}$ 가 증가하여 기체 흡수가 활발하게 이루어지지만, 용액의 Film 두께에 의해서 흡수가 제한되는 현상을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 5에서 알 수 있듯이 일정한 기체 흐름량에서 용액의 흐름량에 따른 열전달 계수 변화는 용액의 흐름량이 증가할수록 감소하는 경향을 보이며, 열전달 계수의 감소는 암모니아 기체의 흡수가 매우 쉽게 일어난다는 점을 고려할 때 용액 흐름량의 증가에 의해 용액 Film 두께가 변할 뿐 흡수의 증가에는 기여를 하지 못한다는 결과를 보여주고 있다.

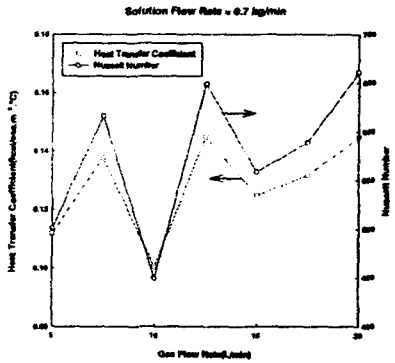


Fig. 4 기체 흐름량에 따른  $h_i$  와  $N_{Nu}$

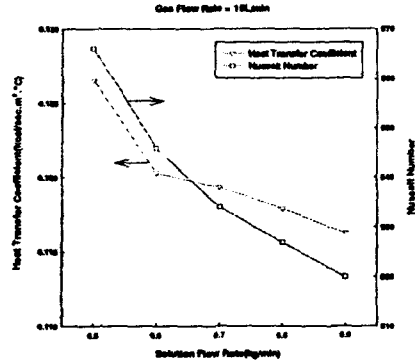


Fig. 5 용액 흐름량에 따른  $h_i$  와  $N_{Nu}$

### 3.4 SiO<sub>2</sub> 입자를 포함한 용액에 대한 실험결과

예비실험을 통해 결정된 적정 기체-액체의 흐름량을 기준으로 실제 SiO<sub>2</sub> 입자의 농도를 변화시키면서 실험하여 나노입자의 농도가 암모니아-물 흡수과정에 미치는 영향에 대해 실험을 수행하였다.

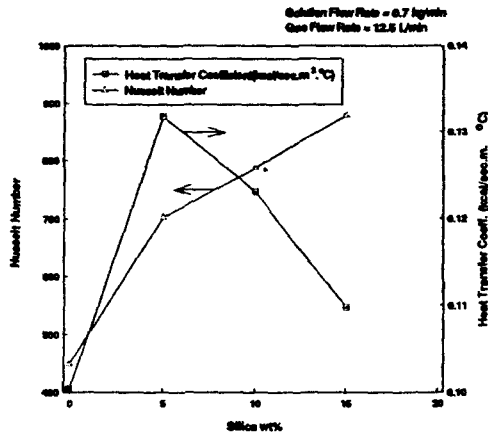


Fig. 6 SiO<sub>2</sub> 나노입자의 농도에 따른 열전달 계수 및  $N_{Nu}$ 의 변화

나노입자의 농도에 따른 열전달 효과의 분석 결과, Fig. 6에 나타난 바와 같이 입자의 농도가 5%인 경우 열전달 계수가 가장 큰 수치를 보이고 입자의 농도가 계속 증가하면 다시 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이는 SiO<sub>2</sub> 입자의 농도가 비교적 낮은 경우에는 입자의 유동에 의한 Convection 효과가 크게 작용하여 열전달 계수의 증가를 야기하지만, SiO<sub>2</sub> 입자의 농도가 증가하면, 입자유동에 의한 Convection 효과보다 실리카 입자 자체의 열차단 효과가

크게 나타나 열전달 계수의 감소 현상을 보이는 것으로 예상된다.

#### 감사

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

#### 참고문헌

1. 강용태: "흡수식 냉동기 및 열펌프 워크샵", 한국정밀화학공업 진흥회(1999)
2. S.Lee, S. U. S Choi, S. Li, J.A. Eastman : "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles" ASME J. Heat Transfer 121(1999)
3. A. T. Conlisk : "Analytical solution for the Heat and Mass Transfer in a Falling Film Absorber" Chemical Engineering Science. Vol. 50, No. 4 (1995)
4. Kang Y. T., et al. : "Experimental correlation of combined heat and mass transfer for NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O falling film absorption". International Journal of Refrigeration, Vol. 22, pp 250-262 (1999)
5. W. L. McCabe, J. C. Smith, P. Harriott : "Unit Operations of Chemical Engineering" 4th Edition McGraw-Hill, Singapore.
6. 이기봉, et al. 2000. "운전조건에 따른 평판형 흡수기의 흡수능 및 온도거동에 관한 연구". 화학공학의 이론과 응용, 제6권 제1호, pp 1537-1540