

나노유체가 열전달 및 CO<sub>2</sub> 흡수에 미치는 영향

정강민, 김규성, 박선희, 김성현\*  
고려대학교 화공생명공학과  
(kimsh@korea.ac.kr\*)

Effect of Nanofluid on Heat Transfer and CO<sub>2</sub> Absorption

Kang-min Jung, Kyu Sung Kim, Sun-hee Park, Sung Hyun Kim\*  
Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University  
(kimsh@korea.ac.kr\*)

## 서론

나노유체란 수내지 수십 나노미터 크기의 입자가 용매 안에 안정적으로 분산되어있는 유체를 말한다. 1995년 Choi 등은 유체의 혁신적인 열전달 성능 향상을 일으킬 수 있는 물질로서 나노유체를 제안했다(Choi, 1999). 그 이후 많은 연구자들이 새로운 열교환 매체로서 나노유체의 가능성에 깊은 관심을 가지고 연구를 진행하고 있다(Kebllinski, 2002). 그러나 열전달 장치의 실용화 그리고 연료전지, MEMS 등의 장치에 나노유체를 사용하기 위해서 나노유체의 물질전달 특성에 대한 연구도 많이 요구된다. 이와 관련하여 Ha 등은 액막형 흡수기에서 나노유체를 이용해 암모니아의 흡수 성능 향상을 보고한 바 있고(Ha, 2002), Kim 등은 기포형 흡수기에서 나노유체를 이용해 암모니아의 흡수 성능 향상을 보고하였다(Kim, 2006). 본 연구에서는 열교환기와 기포형 흡수기에 나노유체를 적용하여 나노유체가 열전달 및 CO<sub>2</sub> 흡수 성능에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다.

## 이론

이중관 열교환기의 열전달 효율이 높지 않기 때문에, 평판형 열교환기가 널리 쓰인다. 일반적인 평판형 열교환기에서의 열전달식은 다음과 같다.

$$Nu = 1.68 \left( Re Pr \frac{d_c}{L} \right)^{0.4} \left( \frac{\eta}{\eta_{wall}} \right)^{0.1} \quad \text{in laminar flow} \quad (1)$$

$$Nu = 0.2 Re^{0.67} Pr^{0.4} \left( \frac{\eta}{\eta_{wall}} \right)^{0.1} \quad \text{in turbulent flow} \quad (2)$$

흡수기에서 물질 수지식은 아래의 식으로 표현된다. 이 식을 조건에 맞추어 풀면 시간에 따른 농도변화를 구할 수 있다. 우변의 마지막 항은 반응을 표현하는 항으로서 반응물들의 종류와 반응차수에 따라 다르게 표현된다.

$$w_A = V \frac{dC_A}{dt} = V k_L a (C_{A,s} - C_A) - V R_A \quad (3)$$

표면에서의 물질전달 현상을 나타낼 수 있는 모델식은 크게 3가지가 있다. (Welty, 2000) 첫째는 Film model로서 물질전달이 일어나는 경계면에 저항으로서 작용하는 막이 있다고 가정하는 모델식이고, 둘째는 Penetration model로서 물질들이 굉장히 짧은 시간 동안 짧은 거리만을 이동하여 순간적으로 침투한다고 가정하는 모델, 마지막으로 유체의 흐름이 기포의 표면에 신선한 용액을 공급해 준다고 가정하는 모델로서 Surface renewal model이라고 불리운다. 이 모델들의 물질전달 계수 관계식은 식 (4)에 표현되었다.

$$\text{Film: } k_c = \frac{D_{AB}}{\delta}, \text{ Penetration: } k_c = \sqrt{\frac{D_{AB}}{\pi t_{\text{exp}}}}, \text{ Surface renewal: } k_c = \sqrt{D_{AB} s} \quad (4)$$

## 실험

나노유체의 열전달 향상을 살펴보기 위해 변압기유에 알루미나를 분산시킨 나노유체를 사용하였는데, 서로 다른 성질의 상용 알루미나(AR, AK 알루미나)를 선택하여 우선 그라인딩을 거친 뒤 올레산으로 에스테르화 반응을 시켜 나노입자를 준비하였다. 전체적인 실험 장치는 Fig. 1. (a) 와 같고 Fig. 1. (b) 의 평판형 열교환기를 사용하였다. 열교환기는 각각 폭 0.11m, 길이 0.31m, 두께 0.09m 이다. 총 8개의 K-타입 써모커플을 사용하여 온도를 측정하고, 유량측정기를 이용하여 열교환기로 주입되는 나노유체의 유량을 측정 및 제어하였다.

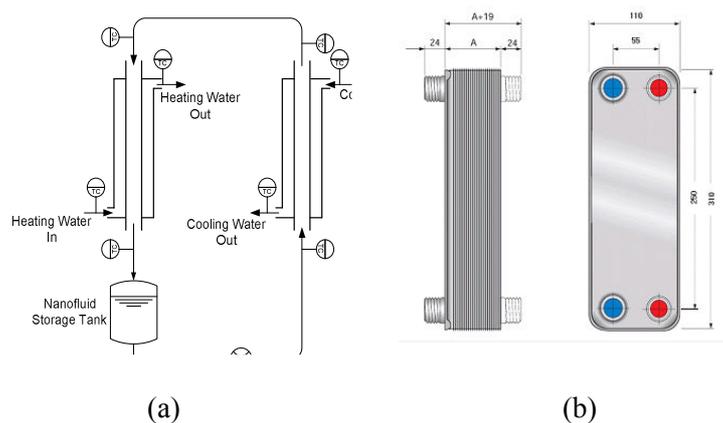


Fig. 1. Experimental apparatus (a) and plate heat exchanger (b)

나노유체의 CO<sub>2</sub> 흡수 성능을 알아보기 위해 12nm 크기의 실리카 나노입자가 안정적으로 분산되어있는 Sigma Aldrich 사의 상용 나노유체인 Ludox를 사용하였으며, 장치 모식도는 Fig. 2. 와 같다. 흡수기는 직경 70mm, 높이 260mm의 원통형으로 설계되어 있으며 유량제어기와 유량측정기를 이용하여 유입과 유출의 직접유량을 측정할 수 있게 하였다. 이는 회분식 흡수조건이므로 비정상 상태의 흡수가 일어난다. 이의 흡수성능 분석을 위해 용액이 포화될 때까지 흡수를 시키며 시간에 따른 CO<sub>2</sub>의 흡수 속도 측정을 하였다.

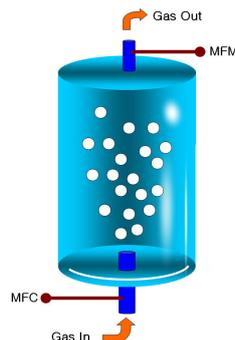


Fig. 2. The schematic diagram of bubble type absorbers

## 결과 및 고찰

나노입자를 포함한 나노유체와 그렇지 않은 일반유체 사이의 열전달 계수를 비교한 결과를 Fig 3. 에 나타내었다. AR 알루미나와 AK 알루미나를 사용한 실험 모두 나노유체의 열전달 계수가 일반유체에 비해 높다. 0.5 vol%의 AR 알루미나를 첨가한 나노유체는 나노입자가 들어가지 않은 변압기유에 비해 10%, 0.5 vol%의 AK 알루미나를 사용했을 경

우에는 11%의 열전달 증가를 보인다. 이는 순수한 변압기유에 첨가된 알루미나 나노입자가 변압기유의 열전도도와 대류 열전달을 향상시켰기 때문으로 설명할 수 있다. 그리고 나노유체의 열전도도 증가를 설명하기 위해 Brown 운동, 나노입자들의 뭉침 등의 메커니즘을 제시할 수 있고, 튜브의 벽 부분에 많이 분포되어 있는 나노입자들이 나노유체의 열전달 계수를 증가시킨다고 할 수 있다.

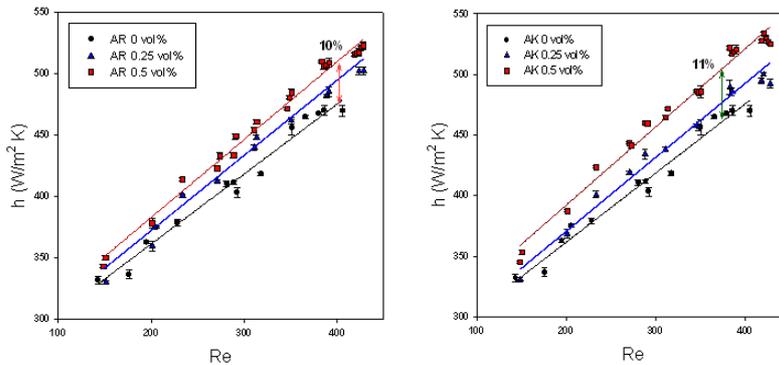


Fig. 3. Effect of particle loadings on heat transfer coefficient

각각의 용액에 대한 CO<sub>2</sub> 흡수 성능 결과는 Fig. 4. 와 같다. 이미 널리 알려진 바와 같이 0.05 M 아민 수용액에서는 아민과 CO<sub>2</sub>의 화학반응으로 흡수속도와 흡수용량이 커진다. 5 wt% 나노유체에서도 일반유체에 비해 초기 흡수속도가 커지고 흡수 용량도 증가한다. 아민과 나노입자를 같이 넣었을 때는 나노유체의 작용 효과와 아민의 반응 효과가 함께 일어나서 전체 흡수성능이 가장 좋은 것으로 나타났다.

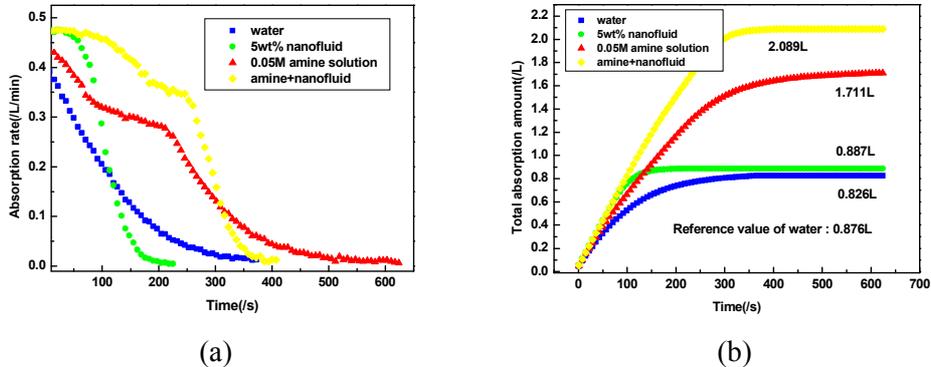


Fig. 4. Absorption rate and cumulative amount depending on time

이러한 실험결과는 다음의 흡수 메커니즘을 통해 설명할 수 있다. 안정하게 분산된 나노유체 안의 입자는 서로의 반발력으로 어느 정도 일정한 형태의 구조를 가지고 배열한다. 여기에 상승하는 기포가 부딪히게 되면 기포가 깨지게 된다. 이처럼 기포의 반경이 작아지면 식 (4)의 Young-Laplace 식을 통해 내부압이 증가할 것으로 예상할 수 있다. 따라서 기체의 용해도가 증가하게 되어 흡수속도가 커지게 되고 동시에 흡수용량도 증가했을 것으로 생각할 수 있다.

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} \quad (4)$$

그리고 아민 용액과 같이 화학반응이 수반된 흡수 공정에서는 화학반응이 추가되어 흡수 증가폭이 더욱 커진 것으로 생각된다.

## 결론

본 연구에서는 나노유체를 평판형 열교환기와 기포형 흡수기에 적용하여 나노유체의 열전달 및 CO<sub>2</sub> 흡수 성능을 각각 분석하였다. 알루미나 나노입자와 변압기유로 만든 나노유체를 열교환기에 흘려주어 대류 열전달 계수를 측정된 결과, 나노입자를 포함한 나노유체에서의 열전달 계수가 순수한 변압기유에서보다 높게 나타났다. 그리고 실리카 나노입자가 분산된 Ludox를 사용하여 기체의 흡수성능 실험에서도 나노유체의 CO<sub>2</sub> 흡수성능이 일반유체보다 뛰어남을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 나노유체 내에 분산되어 있는 나노입자가 튜브의 벽면에 많이 분포하여 열전달 성능을 증가시켰고, 기포를 깨뜨려주어 흡수 성능 향상에도 기여했다고 설명할 수 있다.

## 감사

본 연구는 한국과학재단(KOSEF, ERC) 유변공정연구센터(ARC)의 연구지원에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- [1] D. Wen, Y. Ding, Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, *Int. J. Heat Mass Trans.* 47 (2004) 5181
- [2] Y. Ding, H. Alias, D. Wen, R. A. Williams, Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids), *Int. J. Heat Mass Trans.* 49 (2005) 240-250
- [3] A. Cooper, J.D. Usher, Plate heat exchangers, in "Heat Exchanger Design Handbook III, Thermal and Hydraulic Design of Heat Exchangers", Hemisphere Publishing Co. (1983) 126
- [4] Y. Ding, D. Wen, Particle migration in a flow of nanoparticles suspensions, *Powder Technol.* 149 (2005) 84-92
- [5] Choi, S.U.S., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Development and Application of Non-Newtonian Flows*, FED-Vol. 231/MD-Vol. 66. ASME, New York (1995) 99-105.
- [6] Ha, J.J., Characteristics of Heat and Mass transfer properties by using silica nanoparticles in ammonia-water system, MA thesis, Korea university, Korea, 2002
- [7] Keblinski, P., S.R. Phillpot, S.U.S. Choi, J.A. Eastman, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles, *Int. J. Heat. Mass. Tran.* 45 (2002) 855-863.
- [8] Kim, J.K. , J.Y. Jung, J.H. Kim, M.G. Kim, T. Kashiwagi, Y.T. Kang, The effect of chemical surfactants on the absorption performance during NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O bubble absorption process, *Int. J. Ref.* 29 (2006) 170-177.
- [9] Welty J.R., C.E. Wicks, R.E. Wilson, G.L. Rorrer, *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, John Wiley & Sons (2000) 576-577.