

나노유체 내에서의 기포의 거동과 이산화탄소 흡수성능 분석

김운귀, 강현욱, 김성현*
고려대학교 화공생명공학과
(kimsh@korea.ac.kr*)

Effect of Nanofluid on Bubble Behaviors and CO₂ Absorption

Wun-gwi Kim, Hyun Uk Kang and 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.[1] 그 이후 많은 연구자들이 새로운 열교환 매체로서 나노유체의 가능성에 깊은 관심을 가지고 연구를 진행하고 있다.[2] 그러나 열전달 장치의 실용화 그리고 연료전지, MEMS 등의 장치에 나노유체를 사용하기 위해서 나노유체의 물질전달 특성에 대한 연구도 많이 요구된다. 또한 이에 대한 연구결과는 에너지 저감 및 환경개선 기술로 직접적으로 이용될 수 있는 가능성이 있다. 이와 관련하여 Ha 등은 액막형 흡수기에서 나노유체를 이용해 암모니아의 흡수 성능향상을 보고한 바 있고[3], Kim 등은 기포형 흡수기에서 나노유체를 이용해 암모니아의 흡수 성능 향상을 보고하였다.[4] 본 연구에서는 Manuel 등에 의해 연구된 바 있고[5] 온실가스의 주범인 CO₂를 대상물질로 삼아 기포형 흡수기를 이용하여 나노유체에서의 기포의 거동 및 물질 흡수 특성을 분석해보았다. 또 이를 바탕으로 하여 나노유체에서의 물질전달 현상에 대한 가능한 메커니즘을 제시해 보았다.

이론

물질전달 성능의 지표가 될 수 있는 물질전달계수는 아래의 식으로 추정할 수 있다.

$$N_{A,z} = k_c(C_{A,s} - C_A) \quad (1)$$

($k_c = \text{mass transfer coefficient}$, $C_{A,s} = \text{Surface concentration}$)

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

$$w_A = V \frac{dC_A}{dt} = V k_L a (C_{A,s} - C_A) - V R_A \quad (2)$$

표면에서의 물질 전달현상을 나타낼 수 있는 모델식은 크게 3가지가 있다.[6] 첫째는 Film model 로서 물질전달이 일어나는 경계면에 저항으로서 작용하는 막이 있다고 가정하는 모델식이고, 둘째는 Penetration model 로서 물질들이 굉장히 짧은 시간 짧은 거리에만 이동을 하여 순간적으로 침투한다고 가정하는 모델, 마지막으로 유체의 흐름이 기포의 표면에 신선한 용액을 공급하여 준다고 가정하는 모델로서 Surface renewal model 이라고 불리 운다. 이 모델들의 물질전달 계수 관계식은 식 (3)에 표현되었다. 더 나아가, 이번 연구에서는 상수라고 생각되었던 기존의 surface renewal effect factor에서 벗어나서

회분식 공정이기 때문에 시간에 대한 변수라고 가정하고 실험결과와의 regression 을 통해 surface renewal effect factor의 값을 구해보았다.

$$\text{Film: } k_C = \frac{D_{AB}}{\delta}, \text{ Penetration: } k_C = \sqrt{\frac{D_{AB}}{\pi t_{\text{exp}}}}, \text{ Surface renewal: } k_C = \sqrt{D_{ABS}} \quad (3)$$

실험

본 연구에서는 12nm 크기의 나노입자가 안정적으로 분산되어있는 Sigma Aldrich 사의 상용 나노유체인 Ludox를 사용하였다. 그리고 이의 성질을 분석하기 위해서 Rheometer (TA instrument, ARES) 와 Surfacetensiometer (K-9, Kruss) 를 사용하였다.

나노유체의 흡수성능을 알아보기 위한 장치 모식도는 Fig. 1 과 같다. 흡수기는 직경 70mm 높이 260mm의 원통형으로 설계되어 있으며 MFC 와 MFM 을 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 CO₂ 의 흡수 속도 측정을 하였다. 이와 함께 일반유체와 나노유체 그리고 점탄성용액인 PMMA 용액에서의 기포의 거동을 관찰하였다.

결과 및 토론

Rheometer 를 통하여 관찰한 나노유체의 물성은 Fig. 2와 같다. (a)는 dynamic test의 결과이고 (b) 는 steady test 를 이용하여 0~5wt% 나노유체의 점도를 측정한 값이다. 이의 결과에서 보면 5wt% 이하의 나노유체 영역에서는 탄성도 없고 점도 변화도 거의 없다는 것을 확인할 수 있다. surfacetensiometer를 이용한 결과에서도 물과 나노유체의 계면 장력이 거의 같다는 것을 확인할 수 있었다.

흡수기 에서의 기포의 거동에 대한 그림은 Fig. 3과 같다. 일반적인 기포의 모양과 달리 나노유체에서는 기포의 크기가 아주 미세해지는 것을 확인할 수 있다. 유변학적인 물성과 표면 장력이 일반유체와 다르지 않다는 실험 결과 보았을 때 상승 기포들은 나노입자들의 작용으로 작아졌다고 생각된다. 그리고 PMMA 용액에서는 기포가 퍼지지 않고 기동형태로 상승 하는 것을 볼 수 있는데 이는 PMMA 용액의 탄성이 초기기포의 유출에 의한 용액의 변형을 복원시켰기 때문으로 보여진다.

CO₂ 의 각각의 용액에 대한 흡수성능 결과는 Fig. 4 와 같다. 이미 널리 알려진 바와 같이 0.05M 아민 수용액에서는 아민과 CO₂ 의 화학반응으로 흡수속도와 흡수용량이 커진다. 5 wt% 나노유체 에서도 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. 그리고 Fig. 5 에서 볼 수 있듯이 나노입자의 분율이 커질수록 흡수 속도는 증가한다.

위의 실험결과를 설명하기 위해 Fig. 6 에 가능한 나노유체의 흡수 메카니즘을 제시 하였다. 안정하게 분산된 나노유체 안의 입자는 그들끼리의 반발력으로 어느 정도 일정한 형태의 구조를 가지고 배열을 할 수 있다. 이와 함께 상승하는 기포의 속도에 의한 운동에너지가 기포의 총에너지를 높여서 기포의 면적을 높이게 된다. 그로인해 기포의 반경이 작아지면 식 (4)의 Young-Laplace 식에 의해 내부압이 증가하게 되고 기체의 용해도가 증가하게 되어 흡수 속도가 커지게 되고 흡수 용량도 증가 했을 거라 생각된다.

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

(Young-Laplace Eqn)

그리고 아민 용액같이 화학반응이 수반된 흡수 공정에서는 화학반응을 증가시켜 흡수 증가폭이 더욱 커질 것이라 생각된다.

결론

본 연구에서는 기포형 흡수기를 사용하여 용액의 종류에 따른 기포의 거동을 관찰하였고 CO₂의 나노유체에 대한 흡수 성능을 분석하였다. 그리고 흡수 메커니즘에 대한 복합적인 설명을 위하여 나노유체와 함께 아민용액을 흡수공정에 사용하였다. 그 결과 나노유체를 사용하면 기체의 흡수성능을 증가시킬 수 있을 거라는 실험결과를 얻을 수 있었고, 그를 설명할 수 있는 메커니즘을 제안할 수 있었다. 나노유체에서는 입자가 기포의 크기를 작게 만드는데 영향을 미칠 거라 생각되며 그에 따라 흡수 면적이 넓어지게 된다. 이와 함께 Laplace 식으로부터 알 수 있듯이 나노유체를 사용하여 발생하는 작은 기포방울 속의 압력증가가 기체의 흡수 성능을 증가시킬 것이라 생각된다. 나노유체를 사용한 흡수성능 증가 기술을 적절히 이용하면 대규모 공장과 같은 오염원에서 발생하는 대기 오염물질들을 효과적으로 처리할 수 있고 환경오염 개선에 큰 기여를 할 수 있을 거라고 보여진다.

감사

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

References

- [1] S.U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Development and Application of Non-Newtonian Flows, FED-Vol. 231/MD-Vol. 66. ASME, New York, 99-105(1995).
- [2] P. Keblinski, S.R. Phillpot, S.U.S. Choi and J.A. Eastman, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles, Int. J. Heat. Mass. Tran. 45 (2002) 855-863.
- [3] J.J.Ha, Characteristics of Heat and Mass transfer properties by using silica nanoparticles in ammonia-water system, MA thesis, Korea university, Korea, 2002.
- [4] J.K. Kim, J.Y. Jung, J.H. Kim, M.G. Kim, T. Kashiwagi, Y.T. Kang, The effect of chemical surfactants on the absorption performance during NH₃/H₂O bubble absorption process, Int. J. Ref. 29 (2006) 170-177.
- [5] M.A. Pacheco, S. Kaganoi, G.T. Rochelle, CO₂ absorption into aqueous mixtures of diglycolamine[®] and methyldiethanolamine, Chem. Eng. Sci. 55 (2000) 5125-5140.
- [6] J.R. Welty, C.E. Wicks, R.E. Wilson, G.L. Rorrer, Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer, John Wiley & Sons (2000) 576-577.

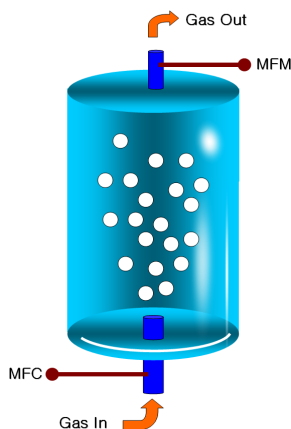


Fig. 1. The schematic diagram of bubble type absorbers

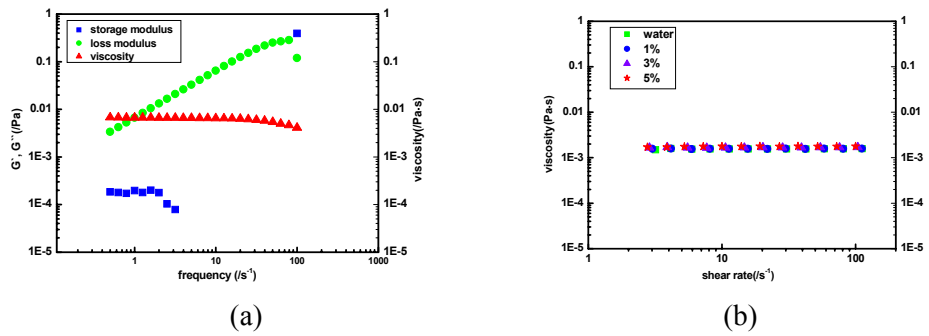


Fig. 2. Material property of nanofluid (a) Dynamic test (b) Steady test

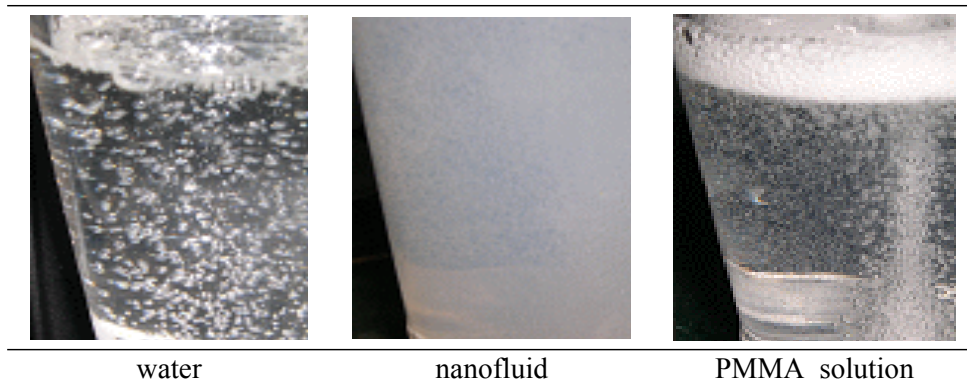


Fig. 3. Bubble behaviors at each solution

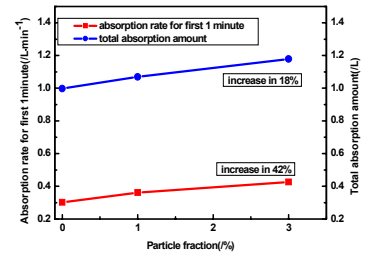
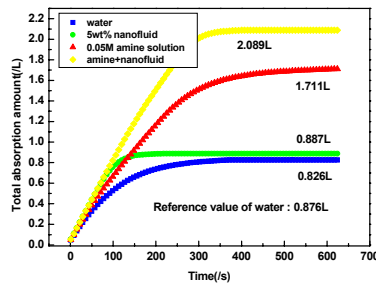
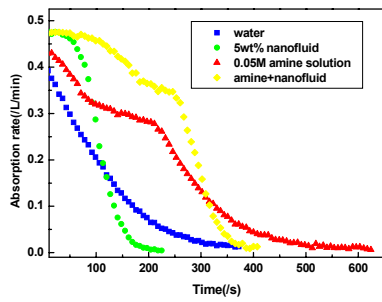


Fig. 4. Absorption rate and cumulative amount as the time

Fig. 5. particle fraction effect

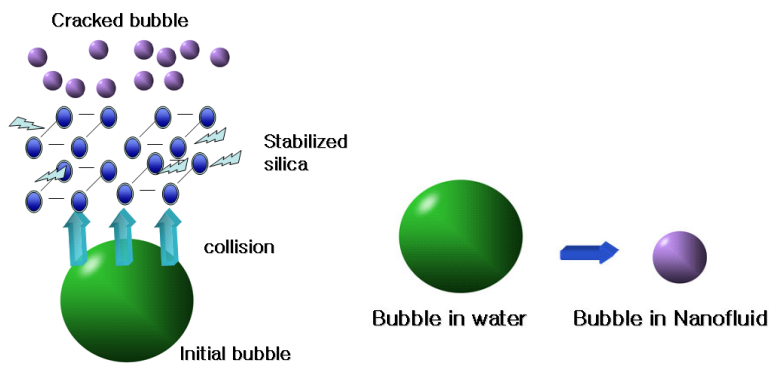


Fig. 6. Absorption mechanism in bubble type absorber