

# 이성분 나노유체에서의 암모니아 기포 흡수 성능 향상

정 준 영, 김 진 경, 강 용 태\*

경희대학교 기계공학과, \*경희대학교 기계산업시스템공학부

## Enhancement of NH<sub>3</sub> Bubble Absorption Performance in Binary Nanofluids

Jun Young Jung, Jin-Kyeong Kim, Yong Tae Kang\*

School of Mechanical and Industrial Systems Engineering, Kyung Hee University, Kyung-gi 449-701, Korea

(Received August 9, 2004; revision received January 20, 2005)

**ABSTRACT:** The objectives of this paper are to study the absorption characteristics of NH<sub>3</sub> bubbles in the binary nanofluids and to quantify the effects of surfactants and nano-particles on the bubble absorption performance. 2-Ethyl-1-Hexanol, n-Octanol, and 2-Octanol are used as the surfactants and nano-sized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Cu particles are added to make the binary nanofluids into NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O solution. The concentration of NH<sub>3</sub> solution ( $x_s$ ), the concentration of surfactants ( $x_{SA}$ ), and the mass fraction of nano-particles ( $w_{np}$ ) are considered as key parameters. The experimented ranges of  $x_s$ ,  $x_{SA}$ , and  $w_{np}$  are 0~17.92%, 0~1,500 ppm and 0~0.2%, respectively. The absorption rates are calculated by measuring initial and final weights of test section and exposed time. In addition, the bubble absorption processes are visualized using the shadow graphic method. The results show that the absorption performance is significantly enhanced up to 4 times by adding the surfactants and up to 3 times in the binary nanofluids.

**Key words:** Bubble absorption(기포흡수), NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O(암모니아/물), Surfactant(계면활성제), Nanoparticle(나노입자), Absorption rate(흡수율)

### 기 호 설 명

$d$  : 직경 [m]  
 $H$  : 높이 [m]  
 $L$  : 길이 [m]  
 $m$  : 질량 [g]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [g/min]  
 $P$  : 압력 [bar]  
 $T$  : 온도 [°C]

$t$  : 시간 [min]  
 $W$  : 너비 [m]  
 $w$  : 질량분율 [%]  
 $x$  : 농도 [%]

### 하첨자

$abs$  : 흡수  
 $f$  : 최종  
 $i$  : 초기  
 $np$  : 나노입자  
 $o$  : 오리피스  
 $s$  : 수용액

\* Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2990; fax: +82-31-201-8106

E-mail address: ytkang@khu.ac.kr

SA : 계면활성제

TS : 시험부

$v$  : 기체

## 1. 서론

가스 구동에 의한 흡수식 냉난방 시스템은 계절 간 에너지 수급 불균형 문제의 해결 방안인 동시에 지구 온난화 및 오존층 파괴 등의 환경 문제를 해결할 수 있는 환경 친화적 냉난방 시스템으로 주목받고 있다. 그러나 이를 구성하는 대부분의 요소들이 열교환기로 되어 있어 압축식 시스템에 비해 그 크기가 매우 크고 효율이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 특히 열 및 물질전달이 동시에 발생하는 흡수기는 전체 시스템의 성능 및 크기에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 따라서 흡수기의 고효율화를 통한 흡수식 시스템의 소형화 및 성능향상을 위한 연구들이 전 세계적으로 활발하게 이루어지고 있는 실정이다.

흡수 성능을 향상시키는 대표적인 방법으로는 크게 기계적·화학적 방법과 나노기술을 이용하는 방법이 있다.<sup>(1)</sup> 우선, 기계적 방법으로는 전열관의 형상 변형 및 표면 가공 등을 통한 유동 변형 방법과 흡수 형태의 변형 방법을 들 수 있다. 특히 대표적인 흡수 형태로는 유하 박막식과 기포식 흡수가 있다. Kang et al.<sup>(2)</sup>은  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  흡수식 시스템에 대한 유하 박막식과 기포식 흡수에 따른 성능을 비교 연구하여 유하 박막식에 비해 기포식 흡수기의 경우 그 크기를 최대 48.7%까지 감소시킬 수 있음을 보고하였다.

흡수기의 성능을 향상시키는 또 다른 방법으로는 계면활성제 첨가에 의한 화학적 방법이 있다. 계면활성제에 의한 성능 향상 메커니즘은 아직 명확하게 밝혀지지 않았지만, 흡수과정 중 표면장력 구배에 의해 계면에서 발생하는 마란고니 대류 현상(Marangoni convection)에 의한 것으로 알려지고 있다. Möller et al.,<sup>(3)</sup> Nordgren and Setterwall,<sup>(4)</sup> 그리고 Kang et al.<sup>(5,6)</sup>은  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  시스템뿐만 아니라  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 를 작동유체로 사용하는 시스템에서 역시 계면활성제에 의해 흡수 성능이 향상됨을 보고하였다. 그러나 계면활성제에 의한 흡수 성능 향상에 관한 기존의 연구들<sup>(3-8)</sup>은 유하 박막식 및 풀(pool)상태의 계면에서 흡수 현상을 연구한 것으로 기포 흡수 과정 중 계면활성

제의 영향에 관한 연구는 미비한 실정이다.

최근 들어 나노기술을 이용하여 작동유체의 열적특성 향상에 관한 많은 연구들이 수행되어 오고 있다. 특히 Choi et al.<sup>(9)</sup>의 연구에서는 금속제 나노입자가 유체에 혼합되어 있는 경우 모유체의 물성치를 변화시켜 열적 특성을 향상시킬 수 있음을 밝혀내었다. 또한 Eastman et al.<sup>(10)</sup>의 연구에서는 평균 10 nm 직경의 Cu 나노입자 0.3 vol%를 갖는 나노유체에서 열전도도가 최대 40% 향상된다고 보고했으며, Koblinski et al.<sup>(11)</sup>은 Choi<sup>(9)</sup>의 실험에서 얻어진 결과를 바탕으로 이론적인 열전달 향상 메커니즘을 제시하였다. Xuan et al.<sup>(12-14)</sup>은 나노유체에서의 열전달 상관식을 도출하였다.

본 연구에서는 정적 상태의 용액으로 암모니아 기포식 흡수를 할 때, 계면활성제와 나노입자의 첨가에 의한 암모니아 흡수율의 변화를 정량적으로 살펴봄으로써 물질전달 특성을 파악하고 고효율 흡수기의 설계를 위한 최적 조건을 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 시험부 내부에는 일정한 초기농도와 초기질량을 가진 암모니아 수용액이 채워져 있고 시험부 하단에는 오리피스가 설치되어 있다. 암모니아 가스는 오리피스를 통해 기포를 형성한 후 자유 상승을 하며 암모니아 수용액 층으로 흡수된다. 이때 shadow graphic 법을 이용한 가시화 장치를 통하여 기포 흡수 과정을 관찰하고, 정밀히 보정된 전자저울을 이용하여 흡수율을 측정한다. 시험부의 개략도는 Fig. 2에 나타

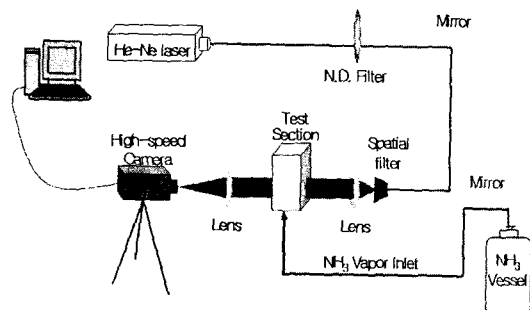


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

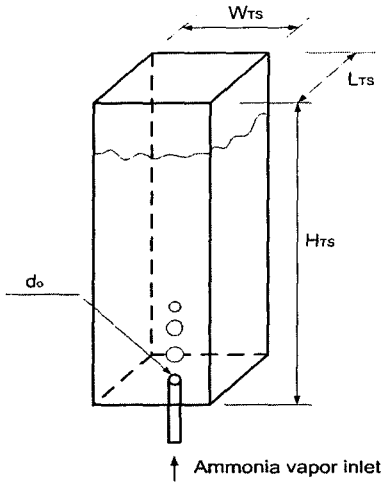


Fig. 2 Schematic of test section.

나 있다. 시험부의 기하학적 조건과 주요 인자들의 실험조건은 Table 1에 나타나 있다. 실험은 대기압 상태에서 수행되었으며, 용액의 온도는 항온조를 이용하여 일정하게 유지시켰다.

계면활성제로는 2-Ethyl-1-Hexanol(2E1H), n-Octanol 및 2-Octanol을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 계면활성제 농도는 0, 100, 500, 700, 1,000, 1,500 ppm이다. 나노입자는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Cu를 각각 질량 분율 0, 0.05, 0.1, 0.2 wt%로 첨가하여 실험을 하였다.

Table 1 Experimental conditions

Vapor concentration, $x_v$		99.999%
Solution temperature, $T_s$		20°C
Pressure, $P_{TS}$		0.1 MPa
Solution concentrations, $x_s$		0~17.92%
Surfactant	Kinds	2E1H n-Octanol 2-Octanol
	Concentrations, $x_{SA}$	0~1,500 ppm
Nanofluid	Nano particle	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cu
	Size of nano-particle	under 50 nm
	Mass fraction, $x_{np}$	0~0.2%
Test section width, $W_{TS}$		20 mm
Test section length, $L_{TS}$		20 mm
Test section height, $H_{TS}$		200 mm
Orifice diameter, $d_o$		2 mm

### 3. 실험결과 및 토의

각 실험조건에서의 흡수성능을 판단하기 위한 기준으로 암모니아 흡수율( $\dot{m}_{abs}$ )을 식(1)과 같이 구한다. 이때  $m_i$ 와  $m_f$ 는 각각 암모니아 가스 유입 전과 흡수과정 후의 시험부 무게를 나타내며,  $\Delta t$ 는 전체 흡수시간을 의미하며, 120초간 암모니아 가스를 흡수시켰다.

$$\dot{m}_{abs} = \frac{m_f - m_i}{\Delta t} \quad (1)$$

Fig. 3과 Fig. 4는 기포 흡수 과정을 shadow graphic 법으로 가시화한 결과를 나타낸다. Fig. 3은 계면활성제를 첨가하지 않은 7.56%의 암모니아 수용액으로 순수 암모니아 기체가 흡수되는 과정을 보여준다. 가시화를 통하여 계면활성제가 첨가되지 않은 용액에서 암모니아 기포는 완전한 구형을 이루며 오리피스에서 이탈이 되는 것을 확인할 수 있다.

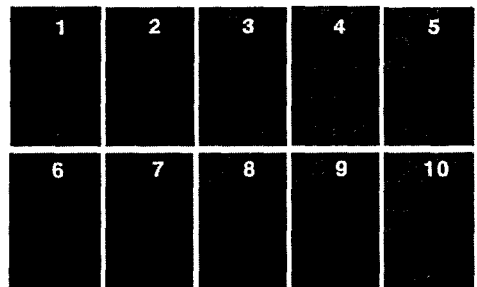


Fig. 3 Bubble absorption process without surfactant.

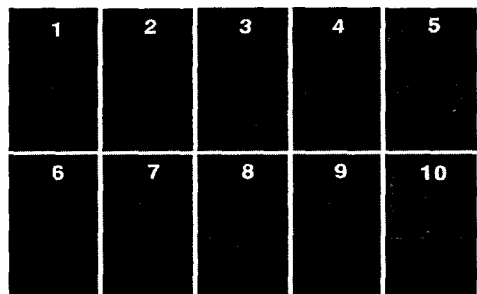


Fig. 4 Bubble absorption process with 2E1H 700 ppm.

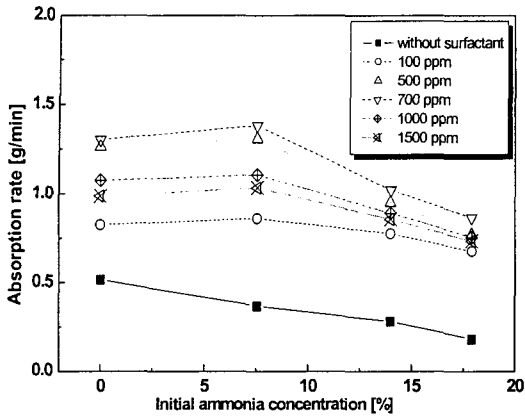


Fig. 5 Absorption rate vs initial ammonia concentration with 2E1H.

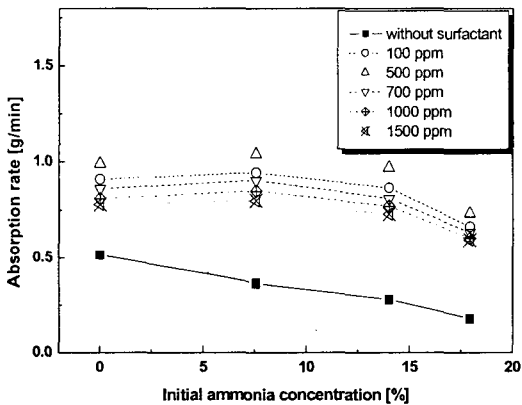


Fig. 6 Absorption rate vs initial ammonia concentration with n-Octanol.

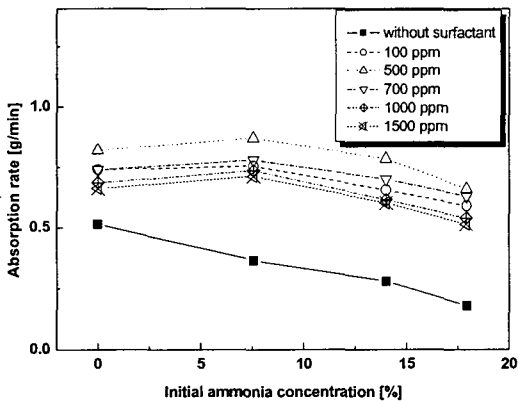


Fig. 7 Absorption rate vs initial ammonia concentration with 2-Octanol.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 조건에서 2E1H를 700 ppm 첨가한 경우의 흡수 과정을 나타낸다. 계면활성제를 첨가하지 않은 경우에 비하여 기포의 크기 및 기포 소멸거리가 증가함을 알 수 있었다. 또한 표면장력의 감소로 기포형상이 반구형으로 변화되고 하나의 기포가 오리피스로부터 이탈한 후 상승하는 동안 뒤에 발생하는 기포에 의해 간섭을 받는 현상을 목격할 수 있다.

Fig. 5~7에서는 초기 암모니아 수용액의 농도의 변화에 따른 흡수율의 변화를 각 계면활성제(2E1H, n-Octanol, 2-Octanol)의 농도에 대하여 표현한 결과를 보여주고 있다. 초기 암모니아 수용액의 농도가 0%인 증류수의 경우 2E1H 700 ppm을 첨가하였을 때 흡수율 상승률이 최대값을 가지며 약 2.3배까지 증가함을 알 수 있었다.

7.56%의 농도를 갖는 초기 암모니아 수용액에서 역시 흡수율 상승률은 2E1H 700 ppm에서 최대가 되었고, 이 경우에는 약 4배 증가하였다. 다른 계면활성제에 비하여 2E1H를 첨가하였을 경우 흡수율이 더 높게 나타났으며, 특히 암모니아의 농도 범위가 낮은 조건에서 계면활성제에 의한 흡수율 증가 현상이 더욱 두드러짐을 알 수 있었다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각 나노입자( $Al_2O_3$ , Cu)의 질량 분율이 0, 0.05, 0.1, 0.2 wt%인 경우에 대하여 초기 암모니아 수용액의 농도에 따른 흡수율을 나타내고 있다. 나노입자의 질량 분율이 증가함에 따라 각 암모니아 농도에서의 흡수율을 향상되는 경향을 나타낸다. 이는 나노입자를 첨가한

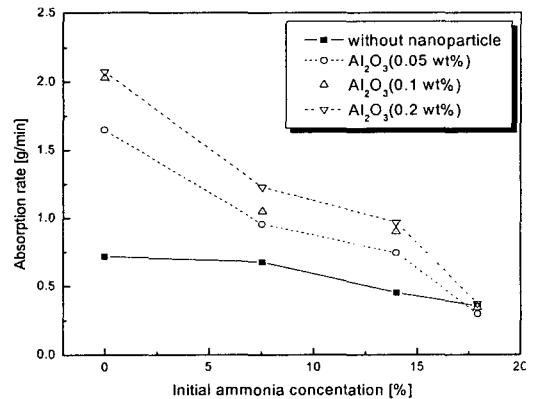


Fig. 8 Absorption rate vs initial ammonia concentration with  $Al_2O_3$  nano-particle.

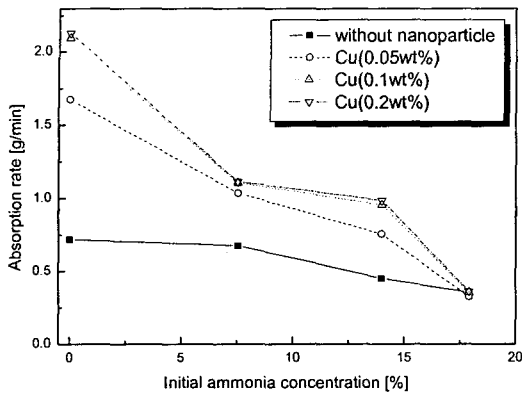


Fig. 9 Absorption rate vs initial ammonia concentration with Cu nano-particle.

이성분 나노유체에 대해서 물질전달 성능을 향상시키는 효과가 있는 것을 의미한다.

또한 각 나노입자의 질량 분율에 대하여 암모니아 수용액의 농도가 낮아수록 흡수 성능 촉진 효과가 뛰어나며 암모니아 수용액의 농도가 높을수록 나노입자 첨가에 의한 효과는 줄어든다. 하지만 나노입자 종류에 따른 흡수율 차이는 거의 나타나지 않았다. 이를 통하여 이성분 나노유체에서 물질전달이 촉진되는 메커니즘은 물질전달에 관여하는 유체의 물성치를 변화시키는 데에서 오는 것이 아니라 콜로이드 상태로 용액 중에 분포되어 있는 미소입자들이 농도 경계층을 파괴하는 등의 물리적 촉매 효과에 의한 것으로 예측할 수 있다.<sup>(15)</sup>

#### 4. 결 론

본 연구에서는 계면활성제의 종류 및 농도, 나노입자의 종류와 질량 분율에 따른 암모니아 기포의 흡수율 변화를 살펴보았다. 본 실험 결과를 통하여 다음과 같은 결론들을 유추할 수 있다.

(1) 계면활성제를 첨가한 경우 계면활성제를 첨가하지 않았을 경우에 비해 암모니아 흡수율은 최대 4배 정도까지 증가하였다.

(2) 낮은 농도 범위의 암모니아 수용액에서 계면활성제에 의한 흡수율의 증가 효과는 더욱 두드러지게 나타났다.

(3) 나노입자를 첨가하였을 경우 역시 암모니아 기포의 흡수율이 증가하였다. 특히 증류수의 경우 흡수율이 약 3배 정도 증가하였다.

(4) 나노입자의 질량 분율(0~0.2 wt%)이 증가함에 따라 암모니아 흡수율이 증가하는 경향이 나타났다. 하지만 나노입자의 종류에 의한 흡수율 상승 경향은 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판명되었다.

(5) 이성분 나노유체에서의 물질전달 향상 효과에 대한 메커니즘으로는 나노유체의 화학적 특성 변화 등에 의한 물질전달 포텐셜의 증가 현상보다는 농도 경계층 파괴 등의 물리적 촉매 역할에 기인하는 것으로 예상된다.

실제 흡수식 냉동장치에서는  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  흡수과정 중 열 및 물질전달이 동시에 발생하는데, 본 연구에서는 열전달 성능에 대한 고려를 하지 않고 계면활성제와 나노입자에 의한 영향을 살펴보았다. 그러나 흡수기 내의 열전달을 고려할 경우 계면활성제 및 나노입자의 첨가는 기존 연구들에서 검증되었던 열전달 촉진 및 물질전달 성능 향상의 복합적 효과로 인하여 흡수 성능을 더욱 상승시킬 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 2003년도 한국학술진흥재단의 선도연구자 지원사업(과제번호 KRF-2003-041-D00113)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Kang, Y. T., Kim, J., Kim, J.-K. and Choi, C. K., 2003, Comparisons of mechanical, chemical and nano technologies for absorption applications, Proceeding of the International Seminar on Thermally Powered Sorption Technology, Fukuoka, Japan, pp. 69-77.
2. Kang, Y. T., Akisawa, A. and Kashiwagi, T., 2000, Analytical investigation of two different absorption modes: Falling film and Bubble types, International Journal of Refrigeration, Vol. 23, pp. 430-443.
3. Möller, R. and Knoche, K. F., 1996, Surfactants with  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ , International Journal of Refrigeration, Vol. 19, pp. 317-321.
4. Nordgren, M. and Setterwall, F., 1996, An experimental study of the effects of surfac-

- tant on a falling liquid film, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 19, pp. 310-316.
5. Kang, Y. T. and Kashiwagi, T., 2002, Heat transfer enhancement by Marangoni convection in the  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  absorption process, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 25, pp. 780-788.
  6. Kang, Y. T., Akisawa, A. and Kashiwagi, T., 1999, Visualization and model development of Marangoni convection in  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  system, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 22, pp. 640-649.
  7. Koenig, M. S., Grossman, G. and Gommed, K., 2003, The role of surfactant adsorption rate in heat and mass transfer enhancement in absorption heat pumps, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 26, pp. 129-139.
  8. Glebov, D. and Setterwall, F., 2002, Experimental study of heat transfer additive influence on the absorption chiller performance, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 25, pp. 538-545.
  9. Choi, U. S., 1995, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Development and Applications of Non-Newtonian flows* edited by Siginer, D. A. and Wang, H. P., EFD-Vol. 231 / MD-Vol. 66, ASME New York, pp. 474-480.
  10. Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W. and Thomson, L. J., 2001, Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Applied Physics Letters*, Vol. 78, pp. 718-720.
  11. Keblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S. and Eastman, J. A., 2002, Mechanism of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 855-863.
  12. Xuan, Y. and Li, Q., 2000, Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 58-64.
  13. Li, Q. and Xuan, Y., 2002, Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid, *Science in China Series E; Technological Science*, Vol. 45, pp. 408-416.
  14. Xuan, Y. and Roetzel, W., 2000, Conceptions for heat transfer correlations of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3701-3707.
  15. Kim, L. H. and Jung, S. J., 1993, The effects of suspended particles on mass transfer in electrochemical system, *Report of Korea Science and Engineering Foundation*, KOSEF 911-1001-026-2.