

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.9.669

이성분 나노유체 (NH₃/H₂O + 나노입자)의
열전달 및 흡수성능 촉진실험

이진기* □정청우* □강용태†

(2008년 5월 7일 접수, 2008년 7월 19일 수정, 2008년 7월 29일 심사완료)

Experiment on Heat Transfer and Absorption Performance Enhancement
for Binary Nanofluids (NH₃/H₂O + Nano-Particles)

Jin Ki Lee, Chung Woo Jung and Yong Tae Kang

Key Words: Binary Nanofluids(이성분 나노유체), Absorption(흡수), Nano-particles(나노입자), Ammonia/Water(암모니아/물), Al₂O₃(산화알루미늄), CNT(탄소나노튜브)

Abstract

The objectives of this paper are to examine the effect of nano-particles on the pool type absorption heat transfer enhancement and to find the optimal conditions to design a highly effective compact absorber for ammonia/water absorption system. The effect of Al₂O₃ nano-particles and carbon nanotube(CNT) on the absorption performance is studied experimentally. The experimental ranges of the key parameters are 20% of ammonia concentration, 0~0.08 vol% (volume fraction) of CNT particles, and 0~0.06 vol% of Al₂O₃ nano-particles. For the ammonia/water nanofluids, the heat transfer rate and absorption rate with 0.02 vol% Al₂O₃ nano-particles were found to be 29% and 18% higher than those without nano-particles, respectively. It is recommended that the concentration of 0.02 vol% of Al₂O₃ nano-particles be the best candidate for ammonia/water absorption performance enhancement.

기호설명

C_p	:	정압비열 [kJ/kg°C]
E_{HT}	:	열전달촉진계수
m	:	질량 [kg]
\dot{m}	:	질량유량 [kg/s]
\dot{Q}	:	열전달율 [J/s]
R_{eff}	:	유효흡수비
T	:	온도 [°C]
t	:	시간 [sec]

하첨자

0	:	암모니아/물 이성분 모유체
abs	:	흡수
c	:	냉각수
g	:	가스
i	:	입구
o	:	출구
tot	:	전체
ts	:	시험부

1. 서론

† 경희대학교 기계-산업시스템 공학부
E-mail : ytkang@khu.ac.kr
TEL : (031)201-2990 FAX : (031)202-3260
* 경희대학교 대학원 기계공학과

지구 온난화와 오존층 파괴로 인한 환경문제가 심각해짐에 따라 압축식 냉동시스템의 대체방안 중 하나인 흡수식 냉동시스템에 대한 관심이 높

아지고 있다. 그러나 흡수식 시스템은 증기 압축식에 비해 고가(高價)이며 COP가 낮아 경제적 관점과 열역학적 관점에서의 최적화가 필요한 실정이다.⁽¹⁾ 이에 따라 흡수식 시스템의 흡수 성능에 대한 연구는 꾸준히 이어지고 있으며 이와 관련된 모델 개발뿐만 아니라 열/물질 전달 실험 및 해석에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.⁽²⁻⁵⁾ 이와 더불어 최근에는 나노유체의 개념을 흡수식 시스템에 적용하여 열 및 물질전달 성능을 향상시키려는 연구가 진행되고 있다.⁽⁶⁾

나노유체란 100nm 이하의 나노입자가 모유체에 안정적으로 분산이 되어있는 유체를 말한다. 이러한 나노유체는 밀리미터나 마이크로미터단위의 입자가 첨가된 고체/액체 혼합물에 주로 생기는 침전, 점착, 부식 등의 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라, 모유체의 열적 성능을 현저하게 향상시킬 수 있음이 제안되었다.^(7,8) 이와 관련하여 1995년 Choi⁽⁷⁾는 소량의 나노입자를 모유체에 첨가해 열전도율이 40%까지 향상된 것을 확인하였으며 이러한 결과들을 설명하기 위해 Koblinski et al.⁽⁸⁾은 나노유체의 열전도율 향상에 대한 브라운 운동(Brownian motion), 액류 층화(Liquid layering), 나노입자 클러스터링(Nanoparticle clustering)과 같은 메커니즘들을 정리하였다.

이처럼 열적특성이 뛰어난 나노유체를 흡수식

시스템에 적용하기 위해 이성분 혼합물을 모유체로 하는 나노유체를 이성분 나노유체라 정의하였고 이성분 나노유체에서도 나노입자의 영향으로 열전달 및 물질전달 성능이 촉진될 것으로 기대된다.⁽⁹⁾

본 실험에서의 작동유체 또한 암모니아/물을 모유체로 하여 CNT 입자와 Al_2O_3 나노입자를 분산시킨 이성분 나노유체를 사용하였다. 이와 관련하여 본 연구팀은 이성분 나노유체의 분산안정성에 대한 연구를 함께 진행하였으며 이성분 나노유체의 적용가능성을 확인하였다.

본 연구에서는 열/물질전달 성능 향상에 대한 CNT 입자와 Al_2O_3 나노입자의 영향을 분석하고, 최적의 나노입자 첨가비율을 선정하여 흡수식 시스템에 대한 이성분 나노유체의 적용 가능성을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치의 전체 구성에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 시험부(흡수기)와 암모니아 용액주입탱크, 암모니아 가스탱크, 항온장치, 샘플 추출장치 그리고 데이터 수집 장치로 구성되어 있다.

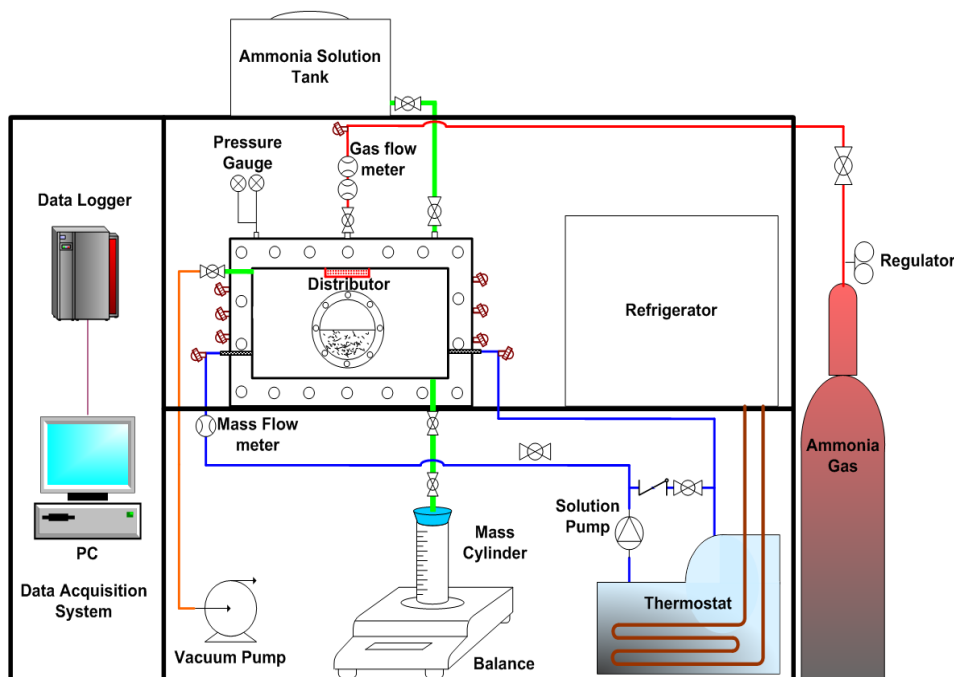
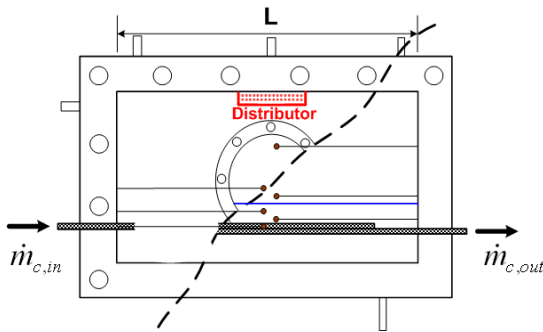


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental equipment

Table 1 Geometric anental conditions

System pressure		0.5 MPa
Initial ammonia/water solution concentration		20 wt%
Ammonia vapor concentration		99.999%
Inlet coolant temperature		15°C
Test section	Length(L)	300 mm
	High(H)	150 mm
	Width(W)	300 mm
CNT	Thermal conductivity	3000 W/m□K
	Diameter	10 ~ 40 nm
	Length	1 ~ 25 μm
	Concentration	0 ~ 0.08 vol%
Al ₂ O ₃	Thermal conductivity	40 W/m□K
	Average diameter	35 nm
	Concentration	0 ~ 0.06 vol%



흡수기 및 모든 배관재료는 암모니아로 인한 부식을 막기 위하여 스테인리스강을 사용하여 제작되었다. 흡수기 내부의 온도분포와 냉각수 입·출구의 온도측정을 위해 열전대(Thermocouple)가 설치되었고 냉각수의 유량과 암모니아 가스의 유입량을 확인하기 위해 각각 액류 및 기류유량계가 설치되었다. 흡수기는 외부로의 열손실을 막기 위하여 단열되었으며 흡수과정 시 불응축 가스의 영향을 없애기 위하여 실험 전 흡수기 내부를 진공상태로 만들었다.

실험에 사용된 이성분 나노유체는 나노입자의 안정적인 분산을 위해 초음파 분쇄기에 의해 1시간동안 분산 되었으며 72시간 동안 안정화 시킨 후 실험하였다.

실험이 시작되면 시험부 상부에 위치한 분배기(Distributor)를 통하여 암모니아 가스가 주입되고 시험부 내부의 압력은 ±0.002 MPa의 오차를 가지는 압력조절기(Regulator)에 의해 0.5 MPa로 유지된다. 암모니아 가스가 주입되면 암모니아 수용액과 암모니아 가스의 경계면에서 흡수가 일어나기 시작하고, 이때 발생하는 흡수열은 냉각수로 전달된다. 냉각수는 30%의 에틸렌글리콜 수용액을 사

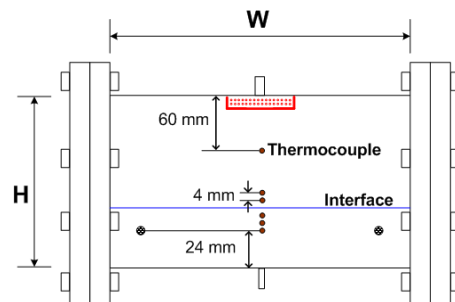
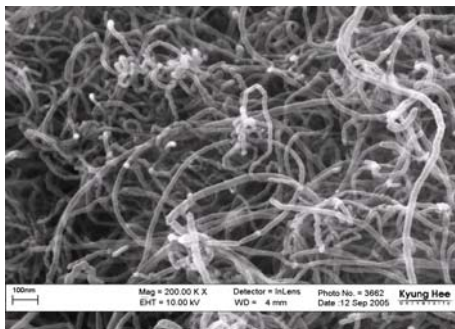
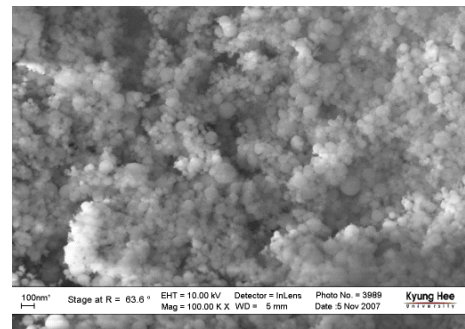


Fig. 2 Schematic diagram of the test section



(a) CNT particles



(b) Al₂O₃ nano-particles

Fig. 3 Photograph of the CNT and Al₂O₃ particles

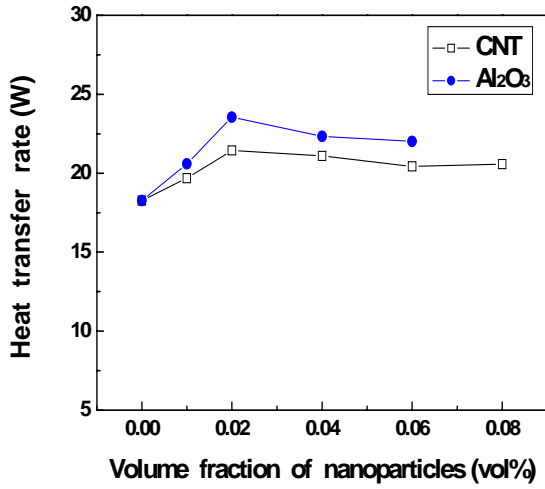


Fig. 4 Heat transfer rate during initial 3 minutes

용하였고 냉각수의 유량은 $\pm 1.0\%$ 의 오차범위를 가진 유량계를 통하여 일정하게 유지되고 측정된다. 항온장치에 의해 냉각수 입구의 온도는 항상 15°C 로 유지되고 계측장비를 통한 모든 데이터는 2초 간격으로 저장된다. 실험조건 및 시험부의 기하학적조건은 Fig. 2와 Table 1에 나타내었으며, Fig. 3은 CNT와 Al_2O_3 나노입자의 FE-SEM 분석 결과를 보여주고 있다.

2.2 실험결과 처리 방법

냉각수 입·출구의 온도측정을 통해 열전달율은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (1)$$

또한 열전달촉진계수(E_{HT})를 식 (2)와 같이 정의한다.

$$E_{HT} = \frac{\dot{Q}}{Q_0} \quad (2)$$

여기서 \dot{Q}_0 는 나노입자가 첨가되지 않은 암모니아/물 이성분 모유체에서의 열전달율을 의미한다.

본 실험을 통한 흡수율은 다음과 같은 식으로 정리된다.

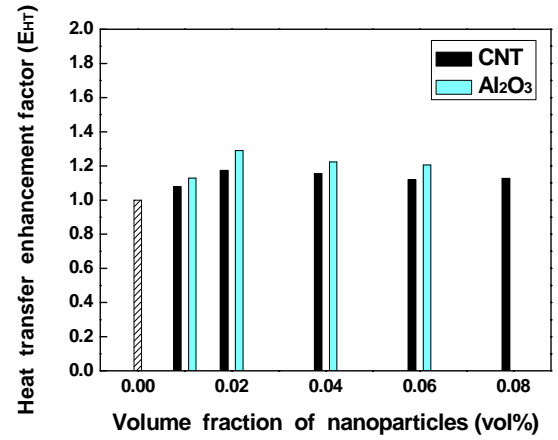


Fig. 5 Heat transfer enhancement factor during initial 3 minutes

$$\dot{m}_{abs} = \frac{m_{g,tot} - m_{g,ts}}{\Delta t_{abs}} = \frac{\Delta m_{abs}}{\Delta t_{abs}} \quad (3)$$

$m_{g,tot}$ 은 $\pm 3\%$ 의 오차범위를 가진 가스유량계를 통해 측정되어, 시험부내부로 유입된 암모니아 가스의 총 질량이다. $m_{g,ts}$ 는 흡수과정이 끝난 직후 시험부 내부에 남아있는 암모니아 가스의 질량이며, 시험부 내부의 온도와 압력 및 부피를 기준으로 계산된다. Δt_{abs} 는 흡수가 일어나는 동안의 시간을 나타낸다.

이성분 나노유체의 흡수율에 대한 영향을 파악하기 위하여 유효흡수비(R_{eff})를 식 (4)와 같이 정의한다.

$$R_{eff} = \frac{\dot{m}_{abs}}{\dot{m}_{abs,0}} \quad (4)$$

이 값은 이성분 모유체와 이성분 나노유체의 흡수율의 비를 나타내며 이 값을 통해 흡수율 향상에 대한 이성분 나노유체의 효율도를 파악할 수 있다.

3. 해석결과

3.1 열전달 실험결과

흡수과정이 시작된 후 3분 동안의 열전달율을 Fig. 4에 나타내었고, Fig. 5에는 식 (2)에서 정의

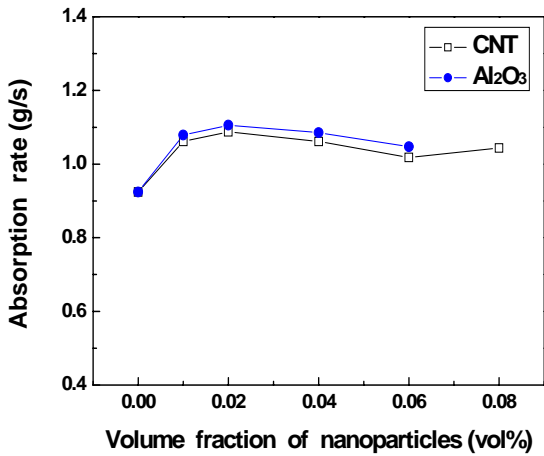


Fig. 6 Absorption rate during initial 3 minutes

된 열전달촉진계수를 나타내었다.

열전달촉진계수는 모든 조건에서 1.0보다 높게 나타났다. 이는 두 입자 모두 열전달성능을 향상시키는데 기여했음을 의미한다. 그 중 Al₂O₃ 나노입자를 0.02 vol% 첨가시킨 이성분 나노유체의 경우 열전달촉진계수가 1.29, CNT 0.02 vol%의 경우는 1.17로 각각의 입자에서 가장 높은 값을 나타내었다. 두 입자 모두 입자의 농도가 증가할수록 열전달율이 증가하다가 0.02 vol% 이상에서는 거의 변화가 없거나 서서히 감소하는 경향을 보인다. 따라서 본 연구에서의 실험조건 하에서는 Al₂O₃ 0.02 vol%가 열전달 성능향상을 위한 최적의 농도조건임을 제시할 수 있다.

3.2 흡수성능 실험결과

각 입자의 농도에 따른 흡수율을 Fig. 6에 나타내었고, Fig. 7에는 각 입자에 대한 유효흡수비를 나타내었다. 실험 전후 암모니아 수용액의 농도는 추출실험을 통해 검증되었고 가스유량 측정에 의한 실험값과의 오차는 ±5.2% 이내였다. 열전달촉진계수와 마찬가지로 모든 경우의 유효흡수비가 1.0보다 높은 것으로 보아 이성분 나노유체가 열전달뿐만 아니라 흡수성능 향상에도 긍정적인 영향을 주었다고 볼 수 있다. 이 중 0.02 vol%의 Al₂O₃ 나노입자를 첨가 한 이성분 나노유체에서 가장 높은 18%의 흡수율 향상을 보였다.

두 입자의 농도에 따른 열전달 및 흡수율은 거의 비슷한 경향을 보였으며 CNT보다는 Al₂O₃ 나

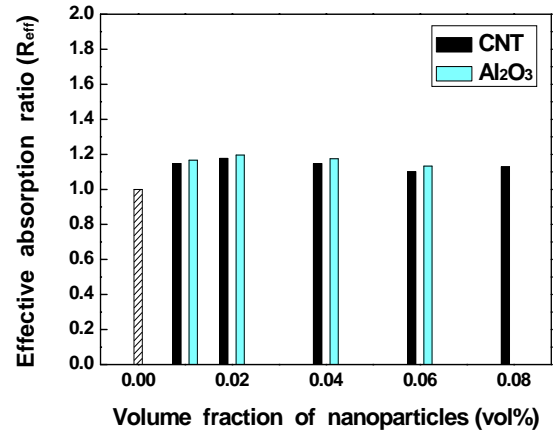


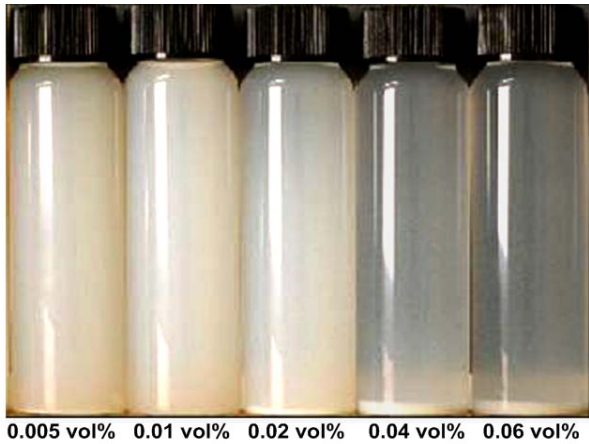
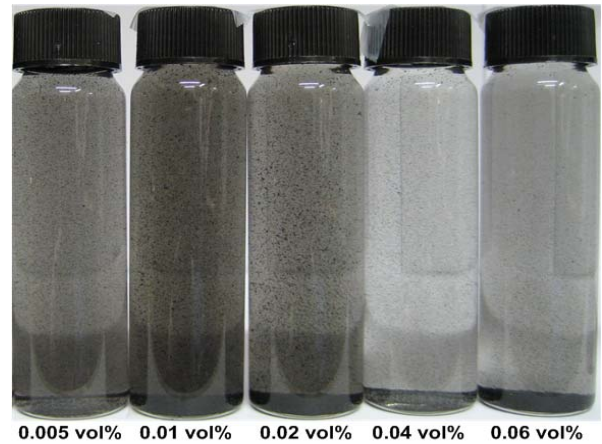
Fig. 7 Effective absorption ratio during initial 3 minutes

노입자를 첨가시킨 이성분 나노유체에서의 열전달 및 흡수성능 향상효과가 더 크게 나타났다.

CNT 입자의 기하학적 형태는 구형인 Al₂O₃ 나노입자와는 달리 원통형으로써 직경에 비해 그 길이가 매우 크다. 입자의 유동에 있어서 이러한 형상비에 의한 회전효과의 영향으로 CNT 입자는 Al₂O₃ 나노입자에 비해 더 큰 유동저항을 가지게 된다. 또한 Al₂O₃에 비해 CNT 입자의 열전도도가 상당히 높음에도 불구하고 이러한 결과를 나타내는 것은 이성분 나노유체의 흡수성능에 있어 입자의 열전도도에 의한 차이, 즉 입자의 종류에 의한 영향보다는 입자의 크기와 형상에 의한 영향이 지배적임을 보여주는 것이라 할 수 있다. 그러나 이는 이론적으로 검증하여 비교되어야 할 것이다.

3.3 열전달 및 흡수성능과 분산안정도와와의 관계

분산안정도 실험결과 CNT보다는 상대적으로 입자의 크기가 작은 Al₂O₃ 나노입자의 분산성이 더 높은 것으로 나타났다. 입자농도에 따른 분산안정도 비교를 위하여 CNT 및 Al₂O₃ 이성분 나노유체에 대한 분산 7일 후의 가시화 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 가시화 결과를 통해 탁도 및 침전도를 비교하여 0.04 vol% 이상의 농도에서는 분산안정도가 급격히 떨어지는 것을 확인하였다. 이는 열전달 및 흡수성능 촉진결과를 뒷받침 해주는 정성적인 근거로 적용될 수 있다. 본 연구에서 사용된 이성분 나노유체의 경우 0.04 vol% 이상의 농도에서는 입자간의 응집 및 침전현상으로 인하

(a) Al₂O₃ binary nanofluids

(b) CNT binary nanofluids

Fig. 8 Visualization of distribution stability

여 실제 흡수가 이루어지는 경계층 및 암모니아 수용액 내의 평균 입자농도가 감소함으로써 열 및 물질전달 성능 촉진에 미치는 나노입자의 영향 또한 감소하게 된다. 그 결과 0.02 vol% 보다 높은 농도에서는 열전달 및 흡수 성능이 더 이상 증가하지 않는 것으로 판단된다. 이는 열전달 및 흡수 성능 실험 결과에 상응하는 결과로써 이성분 나노유체의 분산안정도와 흡수 성능의 상관관계를 나타내 주는 것이라 할 수 있다. 이러한 결과들을 통해 나노입자의 농도가 높고 분산안정도가 좋을수록 열전달 및 흡수 성능 향상 효과가 탁월한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

CNT와 Al₂O₃ 나노입자를 첨가시킨 암모니아/물 이성분 나노유체에 대한 열전달 및 흡수 성능 촉진 실험을 통하여 첨가된 나노입자의 크기와 농도가 주요 변수임을 확인하였으며 다음과 같은 결론들을 도출하였다.

(1) CNT 입자를 0.02 vol% 첨가한 이성분 나노유체는 나노입자를 첨가하지 않은 이성분 모유체 (NH₃/H₂O)에 비해 열전달율은 17%, 흡수율은 16% 향상되었다.

(2) Al₂O₃ 나노입자를 0.02 vol% 첨가한 이성분 나노유체의 열전달율과 흡수율은 각각 29%, 18% 향상되었다.

(3) 암모니아/물 이성분 나노유체의 경우 CNT 입자보다는 Al₂O₃ 나노입자를 첨가한 이성분 나노유체가 열전달 및 흡수 성능 향상에 더 큰 효과가 있

음을 확인하였다. 이를 통해 열전달 및 흡수 성능 향상에 있어 입자의 종류보다는 입자의 크기와 형상에 의한 영향이 더 지배적임을 알 수 있었다.

(4) 분산안정도 가시화 실험은 열전달 및 흡수 성능 실험 결과와 상응하는 결과를 보였으며 나노입자의 농도가 높고 분산안정도가 좋을수록 열전달 및 흡수 성능 향상 효과가 더 높게 나타났다. 그러나 향후 이론적 연구를 통해 분산안정도와 열 및 물질 전달 촉진의 상호관계가 규명되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단 에너지자원기술개발 사업, 고효율 흡수식냉운수기 개발과제 (과제번호: 2005-E-BD011-P-02-3-020-2007)와 경희대학교 대학원 2007년도 2차 우수연구논문장학금의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) Misra, R. D., Sahoo, P. K. and Gupta, A., 2006, "Thermoeconomic Evaluation and Optimization of an Aqua-ammonia Vapour-absorption Refrigeration System," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 29, No. 1, pp. 47~59.
- (2) Tobias, R. G. and Jader, R. B. Jr, 2006, "Modeling Absorption of Pure Refrigerants and Refrigerant Mixtures in Lubricant Oil," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 29, No. 5, pp. 773~780.

- (3) Kim, J. K. and Kang, Y. T., 2006, "A Review of Heat and Mass Transfer Analysis for Absorption Process," *International Journal of Refrigeration and Air-Conditioning*, Vol. 14, No. 4, pp. 131~137.
- (4) Killion, J. D. and Garimella, S., 2001, "A Critical Review of Models of Coupled Heat and Mass Transfer in Falling-film Absorption," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 24, No. 8, pp. 755~797.
- (5) Vemuri, S., Kim, K. J. and Kang, Y. T., 2006, "A Study on Effective Use of Heat Transfer Additives in the Process of Steam Condensation," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 29, No. 5, pp. 724~734.
- (6) Kang, Y. T. and Kim, J. K., 2006, "Comparisons of Mechanical and Chemical Treatments and Nano Technologies for Absorption Applications," *HVAC&R Research*, Vol. 12, No. 3b, pp. 807~819.
- (7) Choi, S. U. S., 1995, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," *ASME New York*, FED-vol. 231, MD-vol. 66, pp. 99~105.
- (8) 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, No. 4, pp. 855~863.
- (9) Kim, J. K., Jung, J. Y. and Kang, Y. T., 2007, "Absorption Performance Enhancement by Nanoparticles and Chemical Surfactants in Binary Nanofluids," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 30, No. 1, pp. 50~57.