

## 이성분 나노에멀전 유체의 분산안정성 및 흡수성능 촉진실험<sup>§</sup>

이진기\* · 김영진\*\* · 신명철\* · 김세원\* · 강용태\*\*\*

\* 한국생산기술연구원 에너지시스템연구그룹, \*\* 경희대학교 기계공학과

### Evaluation of Dispersion Stability and Absorption Performance Enhancement of Binary Nanoemulsion Fluids

Jin Ki Lee\*, Young-Jin Kim\*\*, Myung-Chul Shin\*, Se-Won Kim\* and Yong Tae Kang\*\*\*

\* Energy System R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology

\*\* Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University

(Received December 21, 2011 ; Revised May 20, 2012 ; Accepted June 21, 2012)

**Key Words:** Absorption system(흡수식 시스템), Nanoemulsion fluids(나노에멀전 유체), Absorption performance enhancement(흡수성능 촉진), Ammonia/water(암모니아/물), Dispersion stability(분산안정성)

**초록:** 본 논문에서는 암모니아/물 흡수식 시스템의 흡수성능 촉진에 대한 나노액적의 영향을 파악하고 흡수성능과 분산안정성의 상관관계를 규명함으로써 흡수식 시스템에 대한 이성분 나노에멀전유체의 적용가능성을 제시하고자 한다. 이성분 나노에멀전 유체는 암모니아/물 용액을 모유체로 하며, N-decane 오일을 모유체에 분산시키기 위하여 C<sub>12</sub>E<sub>4</sub>와 Tween20을 첨가제로 사용하였다. 이성분 나노에멀전유체의 안정적인 분산을 위하여 교반과정과 초음파 처리과정을 거쳤으며, 이렇게 분산된 유체는 입도측정과 틸 들현상 분석을 통해 분산안정성 평가를 수행하였다. 그 결과, 이성분 나노에멀전 유체의 흡수성능 및 열전달 성능에 대한 분산안정성의 영향 및 흡수식 시스템으로의 적용가능성을 확인하였다.

**Abstract:** This paper aims to examine the effect of nanodroplets on pool-type absorption heat transfer enhancement and to find the relationship between the dispersion stability and the absorption performance. The concentrations of oil and surfactant are considered as the key parameters. C<sub>12</sub>E<sub>4</sub> and Tween20 are used as the surfactants and N-decane oil is added to the NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O solution to make the binary nanoemulsion fluids. Binary nanoemulsion fluids are dispersed by the ultrasonic vibrator and the stirrer under specific conditions. The dispersion stability of binary nanoemulsion fluids for each oil concentrations is evaluated from the droplet size and Tyndall effect analysis. The absorption performance of binary nanoemulsion fluids is compared with the result of dispersion stability. In addition, it is found that the binary nanoemulsion fluid is a strong candidate as a new working fluid for absorption applications.

- 기호설명 -

$HLB_A$  : 첨가제 A의 HLB 값 [-]

$HLB_B$  : 첨가제 B의 HLB 값 [-]

$HLB_O$  : 오일의 HLB 값 [-]

$x_A$  : 첨가제 A의 농도 [wt%]

$x_B$  : 첨가제 B의 농도 [wt%]

$\dot{Q}$  : 열전달률 [W]

$\dot{m}_c$  : 냉각수 질량유량 [kg/s]

$C_{p_c}$  : 냉각수 비열 [J/kg·°C]

$T_{c,i}$  : 냉각수 입구 온도 [°C]

$T_{c,o}$  : 냉각수 출구 온도 [°C]

$\dot{m}_{abs}$  : 흡수율 [g/s]

$\dot{m}_i$  : 시험부 내부로 유입된 암모니아 가스유량 [g/s]

$m_{g,ts}$  : 흡수 종료 후 시험부에 존재하는 암모니아 가스질량[g]

$\Delta t_{abs}$  : 흡수시간 [sec]

$\Delta m_{abs}$  : 흡수된 암모니아 가스질량 [g]

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011.

11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, ytkang@khu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

### 1. 서론

흡수식 시스템은 열구동 사이클로서 신재생 에너지원인 태양에너지, 지열뿐만 아니라 폐열 및 배열 등의 열원으로부터 그 실용가치를 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다.<sup>(1,2)</sup> 이에 따라 흡수식 시스템의 흡수성능에 대한 연구는 꾸준히 이어지고 있으며 이와 관련된 모델 개발뿐만 아니라 열/물질 전달 실험 및 해석에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>(3,4)</sup> 이와 더불어 나노유체의 개념을 흡수식 시스템에 적용하여 열 및 물질전달 성능을 향상시키려는 연구가 진행되고 있으며 이러한 나노유체의 사용으로 모유체의 열적 성능을 현저하게 향상시킬 수 있음이 보고되었다.<sup>(5,6)</sup> 이와 관련하여 나노유체의 열전도 및 열전달 성능향상에 대한 실험적, 이론적 연구들이 활발히 진행되고 있으며 이러한 결과들을 설명하기 위한 메커니즘들이 제시되고 있다. 이처럼 나노유체의 적용가능성이 확인됨에 따라 그에 따른 문제점들도 지적되고 있다. 실제 시스템으로의 적용을 위해서는 고체/액체 혼합물에서 나타나는 부식, 침착, 침전 등의 분산안정성 문제와 열적 성능 향상에 대한 정량적인 해석방법 등의 문제는 아직 해결되어야 할 과제로 남아 있다.

본 연구에서는 나노유체의 부식, 침착, 침전 등의 문제를 해결하기 위하여 나노에멀전 유체의 개념을 도입하였다. 나노에멀전 유체는 고체 나노입자가 첨가된 나노유체와 마찬가지로 열전도

향상 특성을 가질 뿐만 아니라, 고체입자를 사용함으로써 생기는 여러 문제점들을 해결할 수 있다는 장점을 가진다.<sup>(7,8)</sup>

본 연구에서는 흡수식 적용을 위하여 암모니아/물 모유체에 오일 나노액적을 분산시킨 이성분 나노에멀전 유체가 사용되었으며, 나노에멀전 유체의 입도 측정 및 틴들효과(Tyndall effect) 분석을 통해 분산안정성 평가를 수행하였다. 또한 열/물질전달 성능 향상에 대한 오일 나노액적의 영향을 분석하고, 분산안정성과의 상관관계를 규명하여 흡수식 시스템에 대한 이성분 나노에멀전 유체의 적용 가능성을 제시하고자 한다.

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2.1 이성분 나노에멀전 유체의 제조

Table 1에 나타난 바와 같이 본 실험에서는 20 wt% 암모니아/물 모유체에 N-decane을 분산시킨 이성분 나노에멀전 유체를 사용하였으며, 에멀전 유체의 안정적인 분산을 위하여 C<sub>12</sub>E<sub>4</sub>와 Tween20이 첨가제로 사용되었다. C<sub>12</sub>E<sub>4</sub>와 Tween20은 각각 친유성(Lipophilic), 친수성(Hydrophilic) 계면활성제이며 적절한 비율로 첨가하여 오일액적을 안정적으로 분산시킬 수 있게 된다. C<sub>12</sub>E<sub>4</sub>와 Tween20의 비율은 HLB 시스템을 통해 계산되었으며 오일(N-decane)과 첨가제(C<sub>12</sub>E<sub>4</sub>+Tween20)의 비율(4:1)은 분산안정성 기초실험을 통해 선정하였다. HLB 시스템은 에멀전의 안정적인 분산을

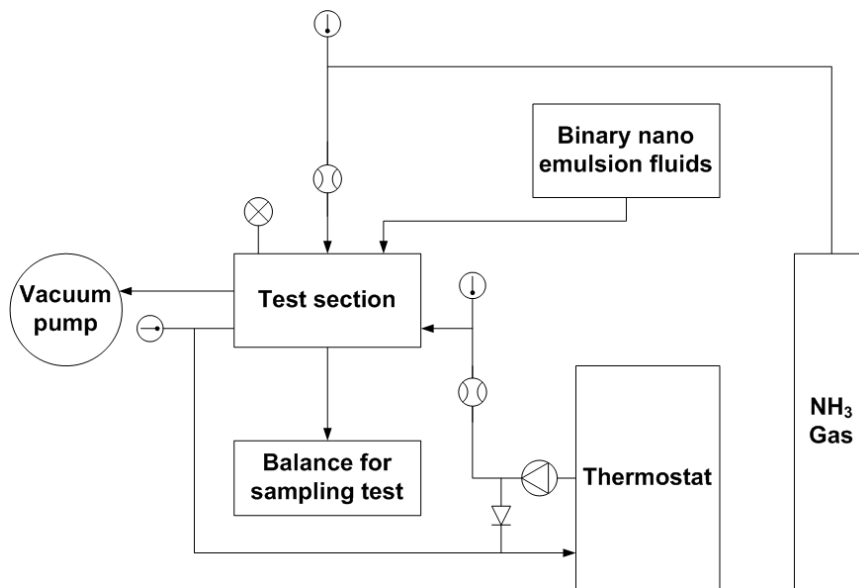


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental equipment

위해 첨가제의 종류에 따라 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\frac{(HLB_A \times x_A + HLB_B \times x_B)}{x_A + x_B} = HLB_O \quad (1)$$

이렇게 제조된 이성분 나노에멀전 유체는 안정적인 분산을 위해 초음파 처리와 교반 과정을 거쳤으며 72시간동안 안정화 후 실험하였다.

2.2 실험장치

실험장치는 시험부(흡수기)와 암모니아 용액주입탱크, 암모니아 가스탱크, 항온장치, 샘플 추출장치 그리고 데이터 수집 장치로 구성되어 있다.(Fig. 1) 흡수기 및 모든 배관재료는 암모니아로 인한 부식을 막기 위하여 스테인리스강이 사용되었다. 흡수기 내부의 온도분포와 냉각수 입출구의 온도측정을 위해 열전대(Thermocouple)가 설치되었고 냉각수의 유량과 암모니아 가스의 유입량을 확인하기위해 각각 액류 및 기류유량계가 설치되었다. 흡수기는 외부로의 열손실을 막기 위하여 단열되었으며 흡수과정 시 불응축 가스의 영향을 없애기 위하여 실험 전 흡수기 내부를 진공상태로 만들었다.

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 사용하였고 냉각수의 유량은 ±1.0%의 오차범위를 가진 유량계를 통하여 일정하게 유지되고 측정된다. 항온장치에 의해 냉각수 입구의 온도는 항상 15°C로 유지되고 계측장비를 통한 모든 데이터는 2초 간격으로 저장된다. 실험조건 및 시험부의 기하학적 조건을 Table 1에 나타내었다.

2.3 데이터 처리방법

냉각수 입출구의 온도측정을 통해 열전달률은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} \cdot (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (2)$$

본 실험을 통한 흡수율은 다음과 같은 식으로 정리된다.

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

$\dot{m}_i$ 는 ±3%의 오차범위를 가진 가스유량계를 통해 유입된 암모니아 가스의 유량이다.  $m_{g,ts}$ 는 흡수 과정이 끝난 직후 시험부 내부에 남아있는 암모니아 가스의 질량이며, 시험부 내부의 온도, 압력 및 부피를 기준으로 계산된다.  $\Delta t_{abs}$ 는 흡수가 일어나는 동안의 시간을 나타낸다. 또한, 흡수 후 추출된 용액의 굴절률 및 밀도측정을 통해 암

Table 1 Geometric and experimental conditions

Test section	Length (L)	300 mm	
	Height (H)	150 mm	
	Width (W)	300 mm	
System pressure		0.5 MPa	
Initial ammonia/water solution concentration		20 wt%	
Ammonia vapor concentration		99.999%	
Oil	N-decane		
	Concentration	0.01~0.08 vol%	
	HLB	11	
Surfactant	HLB	C <sub>12</sub> E <sub>4</sub>	9.7
		Tween 20	16.7
	C <sub>12</sub> E <sub>4</sub> : Tween 20		81 : 19
Oil : Surfactant		4 : 1	

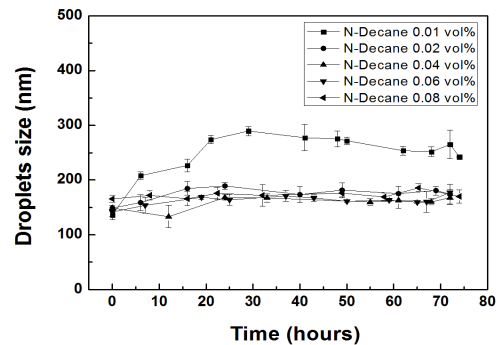


Fig. 2 Droplet size variation for 72 hours

모니아 수용액의 농도를 검증하였다. 이렇게 계산된 흡수율에 대한 불확실성은  $\pm 3.6\%$ 이며, 추출 실험을 통해 검증된 암모니아 농도측정의 오차는  $\pm 1.2\%$ 이다.

### 3. 실험결과

오일농도에 따른 분산안정성 평가를 위하여 제조 후 72시간 동안의 입도변화와 틴들현상을 관찰하였다. (Fig. 2, Table 2) 입도측정결과 0.01 vol%를 제외하고는 모든 경우에서 안정적인 입도분포를 보였으며, 0.01 vol%의 경우 제조 후 20시간이 지나면서 급격한 입도 상승을 보였다.

Figure 3은 0.01 vol% N-decane을 첨가한 이성분 나노에멀전 유체의 제조 72시간 경과 후의 입도분포를 나타낸 그래프이다. 입도분석은 총 10회의 반복측정을 통해 진행되었다. 0.01 vol%의 분석결과, 안정적인 입도분포를 가지는 다른 농도들의 경우(Fig. 4~7)와는 달리 두 개의 피크 영역이 나타났다.

이러한 경향은 48시간 경과 후부터 나타나기 시작하였으며, 이는 분산안정 파괴 현상 중 하나인 오스왈트 숙성(Ostwald ripening) 현상으로 설명될 수 있다. 오스왈트 숙성은 입자의 표면에너지가 구동력이 되어 분산계의 보다 큰 입자가 성장하는 현상으로 입자의 수가 감소하고 평균입도가 증가하게 되는 현상을 말한다.

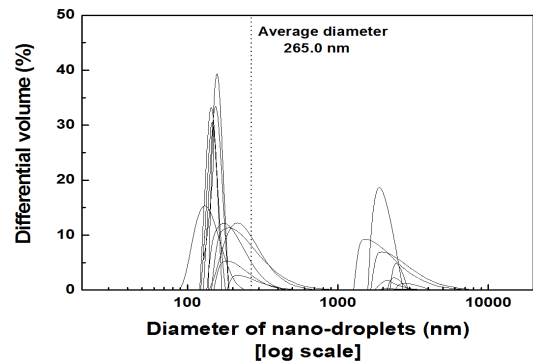


Fig. 3 Volume distribution of binary nanoemulsion fluids (0.01 vol% N-decane, 72 hours)

Table 2 Tyndall effect for binary nanoemulsion fluids

N-decane concentration (vol%)	Bottom side		Middle side		Top side	
	Time(h)		Time(h)		Time(h)	
	0	72	0	72	0	72
0.01						
0.02						
0.04						
0.06						
0.08						

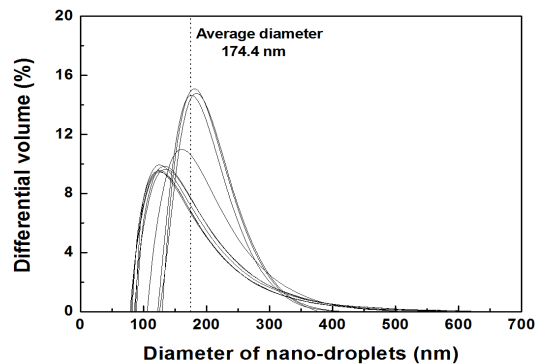


Fig. 4 Volume distribution of binary nanoemulsion fluids (0.02 vol% N-decane, 72 hours)

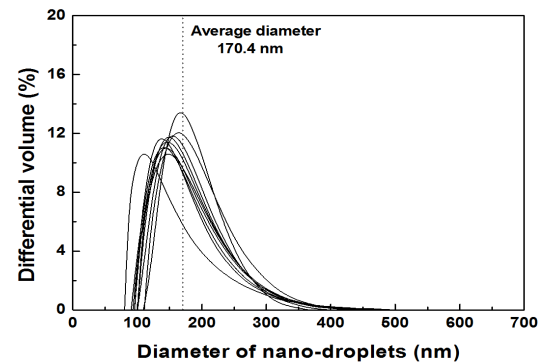
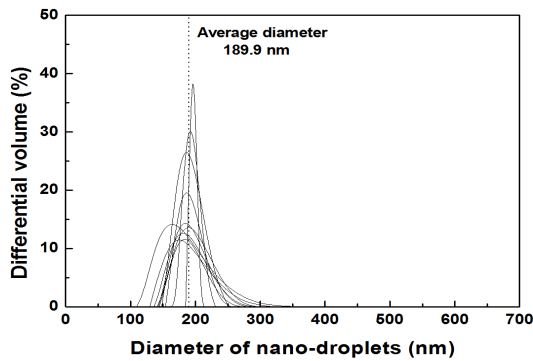


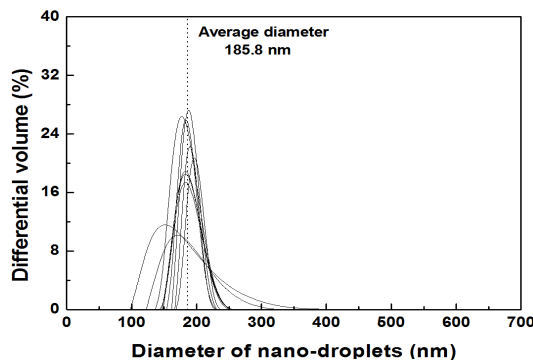
Fig. 5 Volume distribution of binary nanoemulsion fluids (0.04 vol% N-decane, 72 hours)

**Table 3** Dispersion stability for binary nano-emulsion fluids

Oil concentration (vol%)	Droplet size analysis	Tyndall effect
0.01	Not good	Good
0.02	Good	Good
0.04	Good	Good
0.06	Good	Not good (at top side)
0.08	Good	Not good (at top side)

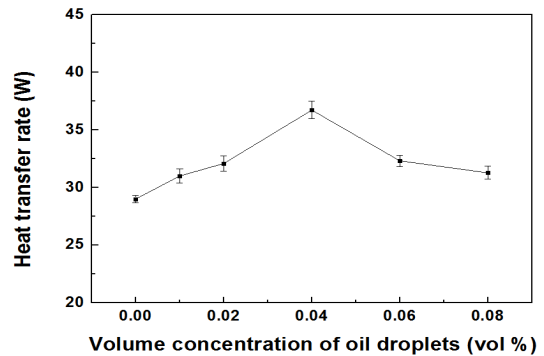


**Fig. 6** Volume distribution of binary nanoemulsion fluids (0.06 vol% N-decane, 72hours)

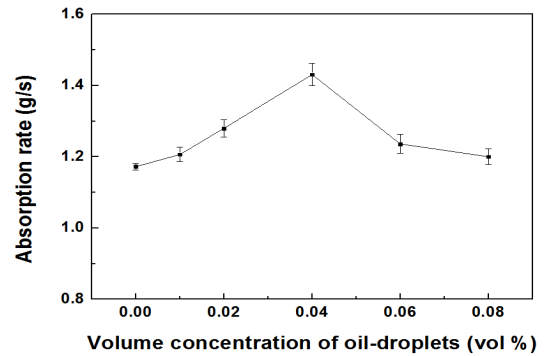


**Fig. 7** Volume distribution of binary nanoemulsion fluids (0.08 vol% N-decane, 72hours)

Table 2는 이성분 나노에멀전유체의 시간에 따른 틴들현상을 관찰하여 비교한 결과이다. 72시간 경과 후 0.06과 0.08 vol% 상부에서 빛의 산란 현상을 관찰할 수 있었으며, 이는 크리밍(Creaming) 현상으로 인해 He-Ne 레이저(=633nm)의 파장보다 큰 입자들이 존재하고 있거나 오일과 용액 간의 부분적인 상



**Fig. 8** Heat transfer rate for binary nanoemulsion fluids



**Fig. 9** Absorption rate for binary nanoemulsion fluids

분리가 일어났음을 의미한다. 입도측정 및 틴들현상 분석을 통한 이성분 나노에멀전 유체의 오일 농도에 따른 분산안정성의 비교 실험결과를 Table 3에 정리하였다. 입도 측정결과, 0.01 vol%를 제외한 모든 경우에서 72시간동안 뛰어난 분산안정성을 보였으며, 틴들현상 비교결과에서는 0.06%이상의 농도에서 분산안정성의 파괴현상이 관찰되었다.

열전달 및 흡수성능 실험결과 모든 경우의 조건에서 열전달 및 흡수성능이 향상되었으며(각각, 0.04 vol%에서 최대 26%, 22%증가) 이를 통해 열전달 및 흡수성능 향상을 위한 이성분 나노에멀전 유체의 적용가능성을 확인하였다. (Fig. 8, 9) 또한, 0.04 vol% 보다 높은 농도에서 열전달 및 흡수성능의 감소가 일어남을 확인할 수 있었는데, 이는 틴들현상 비교를 통해 확인한 크리밍 현상에 기인한 것으로, 분산안정이 파괴되어 실제 흡수가 일어나는 유체의 표면층에 직접적인 영향을 준 결과로 판단된다.

### 3. 결론

N-decane oil을 첨가시킨 암모니아/물 이성분 나

노에멀전 유체에 대한 열전달 및 흡수성능 측진 실험을 통하여 첨가된 오일의 농도와 그에 따른 분산안정성이 열전달 및 흡수성능 향상에 중요한 영향을 미치는 것을 확인하였으며 다음과 같은 결론들을 도출하였다.

(1) 이성분나노에멀전 유체의 입도측정 결과 0.01 vol%에서 Ostwald ripening 현상으로 인한 분산안정성 파괴현상이 나타났다.

(2) 틸들현상분석을 통해 0.06, 0.08 vol%의 최상단 부분에서 크리밍으로 인한 분산안정성 파괴 현상이 발생함을 확인하였다.

(3) 입도측정 및 틸들현상분석 결과 0.02~0.04 vol%에서 분산안정성이 뛰어난 것으로 나타났다.

(4) 이성분 나노에멀전유체의 사용으로 열전달 및 흡수성능 향상을 보였으며 분산안정성이 확보 되지 않은 경우에는 그 정도가 크게 감소하는 경향을 보였다.

(5) 분산안정성이 확보된 0.04 vol%에서 열전달 및 흡수성능향상 또한 가장 높았으며, 이에 따라 0.04 vol%는 흡수식 시스템 적용을 위한 최적의 오일 농도조건으로 추천된다.

## 후 기

본 논문은 지식경제부가 지원한 한국에너지기술평가원의 에너지효율자원프로그램의 결과물입니다. (과제번호 : 20102010101051-21-2-100)

## 참고문헌

- (1) Yaxiu, G., Yuyuan, W. and Xin, K., 2008, "Experimental Research on a New Solar Pump- Free Lithium Bromide Absorption Refrigeration System with a Second Generator," *Solar Energy*, Vol. 82, pp. 33-42.
- (2) Helm, M., Keil, C., Hiebler, S., Mehling, H. and Schweigler, C., 2009, "Solar Heating and Cooling System with Absorption Chiller and Low Temperature Latent Heat Storage: Energetic Performance and Operational Experience," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, pp. 596-606.
- (3) 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.
- (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) Lee, J. K., Koo, J., Hong, H. and Kang, Y. T., 2010, "The Effects of Nanoparticles on Absorption Heat and Mass Transfer Performance in  $NH_3/H_2O$  Binary Nanofluids," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, pp. 269-275.
- (6) Koblinski, 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.
- (7) Chiesa, M., Garg, J., Kang, Y. T. and Chen G., 2008, "Thermal Conductivity and Viscosity of Water-in-Oil Nanoemulsions," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 326, No. 1-2, pp. 67-72.
- (8) Sul, H. Y., Hong, H. and Kang, Y. T., 2011, "Thermal Conductivity Measurement of Oil in Water (O/W) Nanoemulsion and Oil in  $H_2O/LiBr$  (O/S) Binary Nanoemulsion for Absorption Application," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34, No. 6, pp. 1360-1365.