

# 이성분 나노유체를 이용한 암모니아/물 기포 흡수기 설계

김진경, 김성수\*, 강용태\*

동경농공대학교 생물용용시스템공학 대학원, \*경희대학교 기계산업시스템공학부

## Design of an Ammonia/Water Bubble Absorber with Binary Nanofluids

Jin-Kyeong Kim, Sung Soo Kim\*, Yong Tae Kang\*

Graduate School of BASE, Tokyo University of T & A, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan

\*School of Mechanical and Industrial System Engineering, Yong In, Gyeong Gi 449-701, Korea

(Received September 22, 2005; revision received May 30, 2006)

**ABSTRACT:** The objectives of this paper are to analyze simultaneous heat and mass transfer performance for a plate type bubble absorber with binary nanofluids numerically and to investigate the effects of binary nanofluids and surfactants on the size of the bubble absorber. The effective absorption ratio represents the effect of binary nanofluids and surfactants on the absorption performance. The kinds and concentrations of nano-particles and surfactants are considered as the key parameters. The results show that the addition of surfactants can reduce the size of absorber up to 74.4%, the application of binary nanofluids does the size up to 63.6%. Combination of binary nanofluids and surfactants can reduce the size of absorber up to 77.4%.

**Key words:** Plate type bubble absorber(판형 기포 흡수기), Binary nanofluid(이성분 나노유체), Effective absorption ratio(유효흡수비), Ammonia/water solution(암모니아 수용액)

### 기 호 설 명

$A$  : 면적 [ $m^2$ ]  
 $A_p$  : 사영면적 [ $m^2$ ]  
 $b$  : 판 간격 [m]  
 $Bo$  : Bonds 수,  $gd^2\rho/\sigma$   
 $C_D$  : 항력계수  
 $C_p$  : 정압비열 [J/kgK]  
 $d$  : 직경 [m]  
 $D_A$  : 물질확산계수 [ $m^2/sec$ ]  
 $D_e$  : 유효직경 [m]  
 $Fr$  : Froude 수,  $u^2/dg$

$g$  : 중력가속도 [ $m/sec^2$ ]  
 $G$  : 질량유속 [ $kg/m^2sec$ ]  
 $Ga$  : Galileo 수,  $d^3g\rho^2/\mu^2$   
 $h$  : 열전달계수 [ $kW/m^2K$ ]  
 $k$  : 열전도도 [ $kW/mK$ ]  
 $K_s$  : 물질전달계수 [ $m/sec$ ]  
 $L$  : 판의 폭 [m]  
 $m$  : 질량 [kg]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [ $kg/sec$ ]  
 $Pr$  : Prandtl 수,  $\mu C_p/k$   
 $Q$  : 체적속도 [ $m^3/sec$ ]  
 $Q$  : 열전달률 [kW]  
 $R_{eff}$  : 유효흡수비  
 $Re$  : Reynolds 수,  $\rho ud/\mu$   
 $Sh$  : Sherwood 수,  $K_s d/D_A$   
 $St$  : Stanton 수,  $h/\rho C_p u$

† Corresponding author

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

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

$t$	: 시간 [sec]
$u$	: 속도 [m/sec]
$u_t$	: 최종속도 [m/sec]
$x$	: 농도 [kg/kg]
$Z$	: 높이 [m]

### 그리스 문자

$\lambda$	: 흡수에너지 [kJ/kg]
$\mu$	: 점성계수 [kg/m-sec]
$\rho$	: 밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	: 표면장력 [N/m]

### 하첨자

$abs$	: 흡수
$add$	: 첨가
$b$	: 기포
$bf$	: 기본유체
$bn$	: 이성분 나노유체
$C$	: 냉각수
$CS$	: 단면
$G$	: 기류
$i$	: 계면
$ini$	: 초기상태
$o$	: 오리피스
$S$	: 용액
$sur$	: 첨가제
$tran$	: 천이
$W$	: 벽

## 1. 서 론

흡수기의 성능을 향상시키기 위한 연구들에서 고려되는 흡수성능 향상기술들은 기계적 방법, 화학적 방법 및 나노기술의 응용 등 크게 3가지 분야로 분류할 수 있다. 기계적 방법을 이용한 기술들로는 전열관의 형상변화<sup>(1-3)</sup> 및 표면처리,<sup>(4,5)</sup> 작동유체의 유동변화<sup>(6)</sup> 등을 들 수 있고, 흡수식 시스템에서 적용되는 대표적 화학적 방법으로는 계면활성제의 첨가를 통한 마란고니 대류의 유발 기술<sup>(7,8)</sup>이 있다. 한편 Choi<sup>(9)</sup>는 열적 성능이 뛰어난 금속 및 산화금속 입자들을 100 nm 이하로 분쇄한 나노입자들을 유체에 첨가할 경우 유체의

열적 특성이 향상될 뿐만 아니라, 입자들의 응집, 침전, 부식 등의 문제를 해결할 수 있음을 제안하고, 이러한 유체를 나노유체로 정의하였다.

본 연구팀에서는 나노유체의 개념을 흡수식 시스템에 확장하기 위하여 이성분 혼합물에 나노입자를 첨가한 이성분 나노유체를 정의하고, 암모니아/물 이성분 나노유체에서 암모니아 기포가 흡수되는 경우의 흡수성능에 관한 연구를 수행하였다.<sup>(10)</sup> 또한, 계면활성제가 첨가된 이성분 혼합물 및 이성분 나노유체에서의 암모니아 기포 흡수성능에 관한 실험적 연구를 통하여 흡수성능에 미치는 계면활성제의 영향을 표현하기 위한 유효흡수비를 정의하고, 계면활성제의 농도 및 암모니아 수용액의 초기 농도에 따른 실험적 상관식을 제시하였다.<sup>(10,11)</sup>

본 연구에서는 흡수성능 향상기술로 기계적 방법으로는 기포식을 적용하고, 화학적 방법으로는 마란고니 대류를 유발하는 것으로 알려진 알코올계 계면활성제를 추가하였으며, 나노기술의 일환으로 이성분 나노유체를 사용하여 암모니아 기포 흡수기에 대한 해석적 설계를 수행하였다. 본 연구의 목적은 선행연구에서 실험적으로 제시된 유효흡수비에 대한 상관식들을 이용하여 이성분 나노유체 및 계면활성제가 흡수기의 크기에 미치는 영향을 열 및 물질전달 해석을 통하여 정량적으로 살펴보는 것이다.

## 2. 기포 흡수기의 열 및 물질전달 해석

### 2.1 유효흡수비

Kim et al.<sup>(10,11)</sup>은 계면활성제 및 이성분 나노유체가 암모니아 기포 흡수성능에 미치는 영향을 정량적으로 표현하기 위하여 유효흡수비를 다음의 식(1)과 같이 정의하였다.

$$R_{eff} = \frac{\dot{m}_{abs,w/add}}{\dot{m}_{abs,w/o add}} \quad (1)$$

이는 나노입자 및 계면활성제를 첨가하지 않은 상태에서의 기포 흡수율과 첨가한 경우의 기포 흡수율의 비를 나타내며, 물리적으로 첨가물질이 흡수율 향상에 미치는 효율도를 의미한다.

이들은 유효흡수비에 대한 실험적 상관식을 계면활성제, 이성분 나노유체, 이성분 나노유체와 계

면활성제를 첨가한 경우에 대하여 그 일반형을 각각 식(2)~(4)와 같이 정하고 비선형 회귀분석을 통하여 계면활성제(2-ethyl-1-hexanol, n-octanol), 나노입자(Cu, CuO) 및 나노입자와 계면활성제를 혼합한 각각의 경우에 대하여 그 계수들을 Tables 1~3과 같이 제안하였다.

$$R_{eff, sur} = (a_0 + a_1 x_{NH_3} + a_2 x_{NH_3}^2) + (b_0 + b_1 x_{NH_3} + b_2 x_{NH_3}^2) \times x_{sur} + (c_0 + c_1 x_{NH_3} + c_2 x_{NH_3}^2) \times x_{sur}^2 \quad (2)$$

$$R_{eff, bn} = (p_0 + p_1 x_{NH_3} + p_2 x_{NH_3}^2) + (q_0 + q_1 x_{NH_3} + q_2 x_{NH_3}^2) \times x_{bn} \times 10^2 \quad (3)$$

$$R_{eff, bn \ w/ \ sur} = \xi_0 \times R_{eff, sur}^{\xi_1} \times R_{eff, bn}^{\xi_2} \quad (4)$$

Table 1 The coefficients in Eq. (2)

Coefficient	2-ethyl-1-hexanol	n-octanol
$a_0$	1.825	1.917
$a_1$	7.913	8.778
$a_2$	12.458	9.720
$b_0$	701.338	-291.276
$b_1$	44.708	-4.426
$b_2$	-2416.16	-5389.5
$c_0$	55.704	11.224
$c_1$	16988.06	10620.75
$c_2$	-80.475	14.059

Table 2 The coefficients in Eq. (3)

Coefficient	Cu	CuO
$p_0$	1.125	1.072
$p_1$	-3.5	1.4
$p_2$	50.0	20.0
$q_0$	9.092	8.248
$q_1$	43.3	-4.8
$q_2$	-230.0	100.0

Table 3 The coefficients in Eq. (4)

Coefficient	Cu 0.1% with 2E1H	Cu 0.1% with n-octanol	CuO 0.1% with 2E1H
$\xi_0$	0.921	0.963	0.902
$\xi_1$	0.952	0.546	0.966
$\xi_2$	0.261	0.613	0.237

선행연구들에서 구하여진 이상의 유효흡수비에 대한 실험적 상관식들은 본 연구에서 암모니아 기포 흡수과정에 대한 열 및 물질전달 해석 시 계면활성제 및 나노입자에 의한 흡수성능 향상을 정량적으로 표현하는 인자로 적용된다.

## 2.2 기포 흡수기

암모니아 흡수 과정에 대한 수치해석을 위하여 본 연구에서 고려한 기포 흡수기의 시스템 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 판형 열교환기 형태를 갖는 기포 흡수기는 흡수채널과 냉각채널로 구성되어 있으며, 암모니아 가스는 흡수기의 하단에서 흡수채널로 유입되어 기포를 형성한 후 자유상승을 하며 흡수가 발생한다. 또한 흡수제인 암모니아 수용액은 흡수기의 상단에서 흡수채널로 유입되어 암모니아 가스를 흡수한 후 하단부로 유출된다. 한편 냉각채널에서는 냉각수가 하단부에서 유입되어 상단으로 흐르며 흡수채널의 암모니아 수용액의 열을 대향류 방식으로 냉각시킨다. 이러한 흡수기에 대한 열 및 물질전달 해석

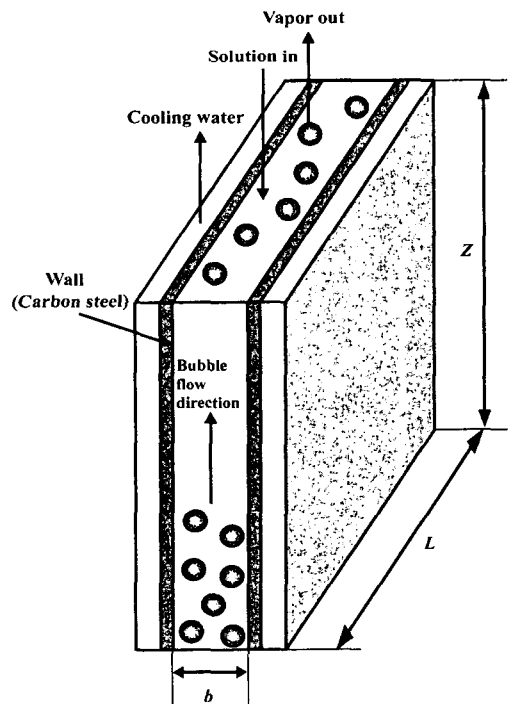


Fig. 1 Schematic diagram of the plate type bubble absorber.

Table 4 Geometric and operational conditions for the design of bubble absorber

Geometric conditions		
Length, $L$		0.10 m
Wall thickness, $t_w$		0.001 m
Gap distance, $b$		0.01 m
Orifice diameter, $d_o$		0.002 m
Number of channels	Absorption channel	5
	Cooling channel	5
Number of orifices in a channel		5
Operational conditions		
System pressure, $P_{total}$		101.3 kPa
Cooling water	Temperature, $T_{C,in}$	15°C
	Mass flow rate, $\dot{m}_C$	0.05 kg/sec
Ammonia solution	Temperature, $T_{S,in}$	20°C
	Mass flow rate, $\dot{m}_{S,in}$	0.02 kg/sec
	Ammonia conc., $x_{S,in}$	0.143 kg/kg
Ammonia gas	Inlet temp., $T_{G,in}$	12.15°C
	Mass flow rate, $\dot{m}_{G,in}$	1200 g/min

을 위하여 고려한 시스템의 기하학적 조건 및 운전 조건들은 Table 4에 정리하였다.

### 2.3 기포 유동모사

#### 2.3.1 형성 기포지름

암모니아 기체가 오리피스로 유입되는 경우 형성되는 기포의 크기는 기체의 유속과 밀접한 관련을 갖는다.<sup>(12)</sup> 매우 느린 유속의 기체에 대하여 기포의 크기는 유속의 영향을 받지 않고, 표면장력과 부력의 평형관계에 의하여 결정되며 이는 식(5)와 같이 표현될 수 있다.

$$d_b = \left[ \frac{6\sigma d_o}{g(\rho_S - \rho_G)} \right]^{1/3} \quad (5)$$

그러나 일정 속도 이상의 기체가 유입되는 경우 표면장력의 영향은 없어지고 부력, 관성력, 점성력의 평형관계에 의하여 기포의 크기가 결정된다. Bhavaraju et al.<sup>(12)</sup>은 표면장력의 영향이 무시되는 천이유속을 식(6) 및 식(7)과 같이 제안하고, 천이유속 이상의 기체에 대한 기포의 크기를 식(8)과 같이 제안하였다.

$$\text{Re}_b \leq 1$$

$$Q_{tran} = \frac{\pi g(\rho_S - \rho_G)}{108\mu_S} \left[ \frac{6\sigma d_o}{g(\rho_S - \rho_G)} \right]^{4/3} \quad (6)$$

$$\text{Re}_b \gg 1$$

$$Q_{tran} = 0.38g^{1/2} \left[ \frac{6\sigma d_o}{g(\rho_S - \rho_G)} \right]^{5/6} \quad (7)$$

$$\frac{d_b}{d_o} = 3.23 \text{Re}_{oS}^{-0.1} \text{Fr}_o^{0.21} \quad (8)$$

#### 2.3.2 기포 상승속도

유체 내부를 자유상승하는 기포의 종말속도는 부력, 중력, 항력의 평형관계에서부터 식(9)와 같이 표현될 수 있다.<sup>(13)</sup>

$$u_t = \sqrt{\frac{2g(\rho_S - \rho_G)m_b}{A_b \rho_G C_D \rho_S}} \quad (9)$$

한편, 대향류로 흐르는 암모니아 수용액의 속도에 의해 실제 기포의 상승속도는 종말속도와 수용액의 속도의 차로 표현될 수 있으며, 이는 식(10)과 같다.

$$u_b = u_t - u_S \quad (10)$$

### 2.4 열 및 물질전달계수

판형 열교환기로 유입되어 흐르는 냉각수의 열전달계수는 Buonopane et al.<sup>(14)</sup> 및 Jackson and Troupe<sup>(15)</sup>의 식(11) 및 식(12)을 이용하여 계산하였다.

#### 층류(Re ≤ 400)

$$h = 0.742 C_p G \text{Re}^{-0.62} \text{Pr}^{-0.667} \left( \frac{\mu_{c,b}}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (11)$$

#### 난류(Re > 400)

$$h = 0.2536 \left( \frac{k}{D_e} \right) \text{Re}^{0.63} \text{Pr}^{0.4} \quad (12)$$

여기서 등가지름( $D_e$ )은 식(13)으로 정의된다.

$$D_e = \frac{4Lb}{(2L+2b)} \quad (13)$$

암모니아 수용액의 열전달계수는 Deckwer<sup>(16)</sup>의 식(14)를, 물질전달계수는 Akita and Yoshida<sup>(17)</sup>의 식(15)를 통하여 예측하였다.

$$St_S = 0.1 Re_b^{-0.25} Fr_b^{-0.25} Pr_S^{-0.05} \quad (14)$$

$$Sh_S = 0.5 Sc_S^{0.5} Ga^{0.25} Bo_b^{0.375} \quad (15)$$

## 2.5 미소 반지름 변화 동안의 기포 흡수

기포가 흡수되는 과정에 대한 해석을 위하여 미소 반지름 변화를 기준으로 검사체적을 설정하였으며, 검사체적 내에서의 기포 흡수율은 식(16)을 통하여 예측하였다.

$$\frac{dm_{abs}}{dt} = R_{eff} \rho_S K_S A_b (x_{S,i} - x_S) \quad (16)$$

한편, 미소 반지름 변화시 흡수되는 암모니아 기체질량은 반지름에 따른 부피 변화로부터 식(17)과 같이 표현될 수 있으며, 이 두 식을 통하여 검사체적을 통과하는 미소시간을 예측한다. 또한 검사체적의 높이는 식(18)에서 계산된다.

$$dm_{abs} = \rho_G \frac{\pi}{6} [d_b^3 - (d_b - 2dr_b)^3] \quad (17)$$

$$dZ = u_b dt \quad (18)$$

## 2.6 검사체적 해석

미소 기포 반지름 변화를 기준으로 결정되는 검사체적의 개략도를 Fig. 2에 나타내었으며, 검사체적에서의 지배방정식은 다음의 식들과 같다.

### 연속방정식

$$\dot{m}_{b,in} - \dot{m}_{b,out} - \dot{m}_{abs} = 0 \quad (19)$$

$$\dot{m}_{S,in} - \dot{m}_{S,out} + \dot{m}_{abs} = 0 \quad (20)$$

$$\dot{m}_{S,in} x_{S,in} - \dot{m}_{S,out} x_{S,out} + \dot{m}_{b,in} x_{b,in} - \dot{m}_{b,out} x_{b,out} = 0 \quad (21)$$

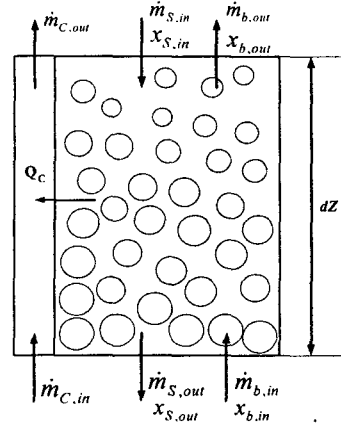


Fig. 2 Schematic diagram of the control volume.

### 에너지평형식

$$\dot{m}_{S,in} i_{S,in} - \dot{m}_{S,out} i_{S,out} + \dot{m}_{v,in} i_{v,in} - \dot{m}_{v,out} i_{v,out} - Q_C = 0 \quad (22)$$

$$Q_C = \dot{m}_{C,out} i_{C,out} - \dot{m}_{C,in} i_{C,in} \quad (23)$$

### 열전달평형식

$$Q_C = UA_{CS} \Delta T_{lm} \quad (24)$$

여기서,

$$\frac{1}{UA_{CS}} = \left( \frac{1}{h_S A_{CS}} + R_W + \frac{1}{h_C A_{CS}} \right) \quad (25)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{S,out} - T_{C,out}) - (T_{S,in} - T_{C,in})}{\ln \left( \frac{T_{S,out} - T_{C,out}}{T_{S,in} - T_{C,in}} \right)} \quad (26)$$

### 흡수열

$$Q_{abs} = \lambda \dot{m}_{abs} \quad (27)$$

여기서,

$$\lambda = i_{b,bulk} - i_{S,bulk} \quad (28)$$

$$Q_{abs} = \frac{C_{0,S}}{1 - e^{-C_{0,S}}} [h_S (T_i - T_S)] A_{b,interface} \quad (29)$$

$$C_{0,S} = \frac{\dot{m}_{abs} C_{p,G}}{h_S} \quad (30)$$

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 이성분 나노유체에 의한 흡수기 크기 변화

Fig. 3은 Table 4에 정리된 운전조건에서, 이성분 나노유체의 농도 변화에 따라 유입되는 암모니아 기체가 모두 흡수되기 위해 요구되는 흡수기의 크기 변화 및 크기 감소율을 나타내는 그래프이다. 흡수기는 나노입자의 첨가 여부에 의해 그 크기가 급격히 감소하고, 나노입자의 농도가 증가함에 따라 그 크기가 계속하여 감소하는 경향을 나타낸다. 특히 구리 나노입자를 0.1% 첨가한 경우 흡수기의 크기는 최대 63.6% 감소되는 것을 알 수 있다.

#### 3.2 계면활성제에 의한 흡수기 크기 변화

Fig. 4는 암모니아 수용액에 계면활성제를 첨가한 경우 그 농도에 따른 흡수기 크기 변화 및 크기 감소율을 나타내는 그래프이다. 이성분 나노유체에서와 마찬가지로 계면활성제의 첨가 여부에 의해 흡수기의 크기가 급격히 감소하는 반면, 계면활성제의 농도에 따라서는 그 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 특히 2E1H를 첨가하는 경우 최대 크기 감소가 74.4%까지 이루어진다. 본 해석 연구의 결과에서 Fig. 4와 같이 2E1H의 첨가농도가 증가함에 따라 유효흡수비의 증가로 흡수기의 크기가 감소하는 경향을 보이는 반면, n-octanol의 경우 농도에 따른 유효흡수비의 변화가 매우 미미한 것을 알 수 있다.

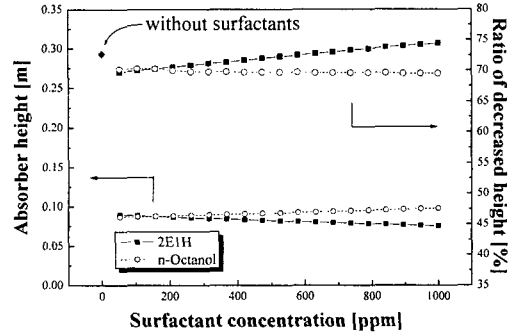


Fig. 4 Variations of absorber height and decreased ratio with each surfactant.

#### 3.3 이성분 나노유체와 계면활성제 혼합 효과

Fig. 5는 이성분 나노유체에 계면활성제를 첨가한 경우, 계면활성제의 농도에 따른 흡수기 크기의 변화 및 크기 감소율을 나타내는 그래프이다. 이성분 나노유체와 계면활성제의 혼합에 의해 Cu 0.1%와 2E1H 1,000 ppm에서 흡수기의 크기는 최대 77.4%까지 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 계면활성제의 첨가에 의한 표면장력 감소 및 마란고니 효과와 더불어 나노입자에 의한 흡수 성능 향상이 복합되어 발생하는 것으로 판단된다.

### 4. 결론

본 연구는 수학적 설계 모델 해석을 통하여 이성분 나노유체 및 계면활성제가 기포 흡수기의 크기에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 해석

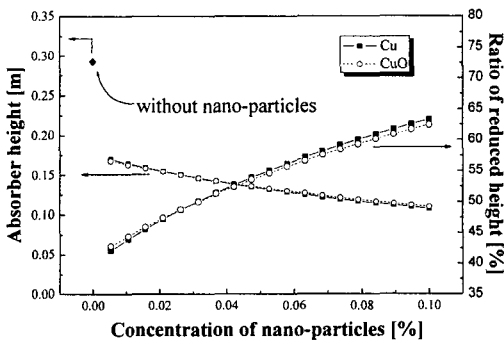


Fig. 3 Variations of absorber height and decreased ratio with each binary nano-fluid.

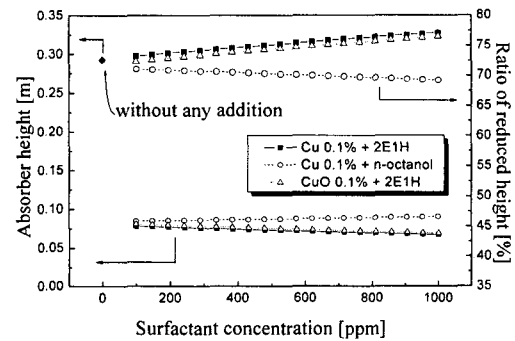


Fig. 5 Variations of absorber height and decreased ratio with binary nanofluids and surfactants.

결과들을 통하여 다음의 결론들을 얻게 되었다.

(1) 이성분 나노유체를 첨가한 경우 기포 흡수기는 최대 63.6%의 크기 감소가 가능하였고, 계면활성제의 경우 74.4%, 두 가지를 함께 첨가한 경우 77.4%의 크기 감소가 예측되었다.

(2) 기포 흡수기의 크기 감소를 위해 고려된 방법 중 이성분 나노유체와 계면활성제를 함께 적용하는 것이 가장 효과적으로 나타났다. 그러나 실제흡수식 시스템에 적용하기 위해서는 나노유체의 장기운전에 따른 분산안정도 확보 등의 신뢰성 평가가 실험적으로 검증되어야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 특정연구과제(과제번호 R01-2004-000-10736-0) 지원으로 수행되었다.

## 참고문헌

- Kang, Y. T., Chen, W. and Christensen, R. N., 1996, Design of ammonia-water condenser with a fluted tube, *ASHRAE Trans.*, Vol. 102, pp. 587-595.
- Christensen, R. N., Cook, F. B. and Kang, Y. T., 1997, Capillary fluted tube mass and heat transfer devices and methods of use, US Patent No. 5617737.
- Isshiki, N., Ogawa, K. and Ishikawa, M., 2002, Development of constant curvature surface (CCS) tubes and plates to get high absorption heat transfer, *Proc. of the ISHPC*, September 24-27, Shanghai, China, pp. 295-299.
- Shoji, M. and Zhang, X. Y., 1994, Study of contact angle hysteresis, *JSME Int. J., Series B*, Vol. 37, pp. 560-567.
- Kim, J.-K., Park, C. W. and Kang, Y. T., 2003, The effect of micro-scale surface treatment on heat and mass transfer performance for a falling film H<sub>2</sub>O/LiBr absorber, *Int. J. Refrig.*, Vol. 26, pp. 575-585.
- Kang, Y. T., Akisawa, A. and Kashiwagi, T., 2000, Analytical investigation of two different absorption modes: falling film and bubble types, *Int. J. Refrig.*, Vol. 23, pp. 430-443.
- Möller, R. and Knoche, K. F., 1996, Surfactants with NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O, *Int. J. Refrig.*, Vol. 19, pp. 317-321.
- Kim, K. J., Berman, N. S. and Wood, B. D., 1996, The interfacial turbulence in falling film absorption: effects of additives, *Int. J. Refrig.*, Vol. 19, pp. 322-330.
- Choi, S. U. S., 1995, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, ASME, New York, FED-Vol. 231 / MD-Vol. 66, pp. 99-105.
- Kim, J.-K., Jung, J. Y. and Kang, Y. T., 2005, The effect of nano-particles on the bubble absorption performance in a binary nanofluid, *Int. J. Refrig.*, Vol. 29, No. 1, pp. 22-29.
- Kim, J.-K., Jung, J. Y., Kim, J. H., Kim, M.-G., Kashiwagi, T. and Kang, Y. T., 2005, The effect of chemical surfactants on the absorption performance during NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O bubble absorption process, *Int. J. Refrig.*, Vol. 29, No. 2.
- Bhavaraju, S. M., Russel, T. W. F. and Blanch, H. W., 1978, The design of gas sparged devices for viscous liquid system, *AIChE J.*, Vol. 24, pp. 454-466.
- McCabe, W. L., Smith, J. C. and Harriott, P., 2001, *Unit Operations of Chemical Engineering*, New York, McGraw-Hill.
- Buonopane, R. A., Troupe, R. A. and Morgan, J. C., 1963, Heat transfer design method for plate heat exchangers, *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 59, No. 7, pp. 57-61.
- Jackson, B. W. and Troupe, R. A., 1964, Laminar flow in a plate heat exchanger, *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 60, No. 7, pp. 62-65.
- Deckwer, W.-D., 1980, On the mechanism of heat transfer in bubble column reactors, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 35, pp. 1341-1346.
- Akita, K. and Yoshida, F., 1974, Bubble size, interfacial area, and liquid-phase mass transfer coefficient in bubble columns, *Ind. Eng. Chem., Proc. and Dev.*, Vol. 13, pp. 84-91.