

암모니아/물 흡수과정중 기포거동의 가시화 및 기포직경의 실험적 상관식

강 용 태[†], 홍 희 기, Takao Kashiwagi^{*}

경희대학교 기계산업시스템공학부, *동경농공대학 공학부

Visualization of bubble behavior and experimental correlation of bubble diameter during ammonia/water absorption process

Yong Tae Kang[†], Hiki Hong, Takao Kashiwagi^{*}

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

^{*}Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology
2-24-16 Nakacho, Koganei, Tokyo, Japan

ABSTRACT: The objectives of this paper are to visualize the bubble behavior for ammonia-water absorption process, and to study the effect of key parameters on ammonia-water bubble absorption performance. The orifice diameter, orifice number, liquid concentration and vapor velocity are considered as the key parameters. The departing bubbles tend to be spherical for surface tension dominant flow, and the bubbles tend to be hemispherical for inertial force dominant flow. A transition vapor Reynolds number is observed at a balance condition of internal absorption potential (by the concentration difference) and external absorption potential (by the vapor inlet mass flow rate). As the liquid concentration increases, the transition Reynolds number and the initial bubble diameter increase. This study presents a correlation of initial bubble diameter with $\pm 20\%$ error band.

Key words : ammonia-water absorption, bubble diameter, transition vapor Reynolds number

기 호 설 명

A : 면적 [m^2], d : 직경 [m]
 m : 질량 [kg], \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 n_o : 오리피스수, t : 시간 [s]
 V : 속도 [m/s], x : 암모니아농도 [%]

하첨자

abs : 흡수, f : 최종상태
 i : 초기상태, ib : 초기기포
 l : 액류, o : 오리피스
 v : 기류

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

최근들어 환경친화적 자연냉매를 사용하는 열구동 흡수식시스템이 가정용과 소형 상업용 (암모니아-물 시스템) 및 대형 산업용 (리튬브로마이드-물 시스템) 에서 각광을 받고 있다⁽¹⁾. 특히 큰

[†] Corresponding author

Tel.: +82-331-201-2990; fax: +82-331-201-8106

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

래에는 소형열구동 흡수식시스템이 가정용에어컨에 대비하여 차세대 환경친화적 냉난방시스템으로 주목을 받고있는 바, 흡수식 시스템의 초소형 경량화를 위한 연구가 절실히 요구된다. 일반적으로 초소형 경량화를 위하여 기계적인 방법과 화학적인 방법에 이용되고 있다. 먼저 기계적인 방법으로는 플루티드관등 여러 가지 원을 이용한 확장된 열전달면을 이용하는 방법과 뛰어난 열전달 계수를 제공하는 효과적인 열전달 모듈을 개발하는 것이다. 효과적인 열전달 모듈로는 박막모드와 기포모드가 있다⁽²⁾. 특히 암모니아/물에서 뛰어난 열 및 물질전달성능을 제공하는 기포식 흡수에 관하여 실험적 연구가 활발하게 진행되고 있다. 화학적인 방법으로는 흡수첨가제를 사용하여 마란고니대류 (Marangoni convection)를 발생시킴으로써 열전달 성능을 촉진시키는 방법이 연구되고 있는데, 이에 대한 실험결과와 모델개발이 Kang 등⁽³⁾에 나타나 있다.

본 연구에서는 최근 열교환기의 초소형 경량화를 위하여 관심이 집중되고 있는 기포식 암모니아/물의 흡수과정을 고속카메라를 이용하여 가시화를 수행하고, 기포의 직경에 대한 실험적 상관식을 제시한다. 본 연구에서 얻어진 기포직경에 대한 실험적 상관식은 암모니아/물의 흡수과정중 물질전달 면적을 계산하는데 유용하게 이용될 수 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1에 실험장치에 대한 개략도가 나타나 있다. 암모니아 기류가 압력용기로부터 시험부의 하단으로 유입되고, 유입된 암모니아 기류는 기포의 균일한 분포를 위하여 시험부의 하단에 설치된 기류분류기에 의하여 분리된다. 초기상태에서 시험부는 초기농도 x_i 와 초기질량 m_i 의 액류로 채워져 있고, 하단부로부터 유입되는 암모니아기류의 질량유량은 압력조절밸브와 스톱밸브에 의해서 조절된다. 시험부는 가시화를 위하여 정면과 후면에 투명유리가 부착되었고, 흡수과정중 기포의 거동은 최대 1/500초까지의 셔터스피드를 가진 초고속카메라와 VCR에 의해서 가시화 된

다. 시험부의 압력은 대기압으로 유지되고, 시험부내의 액류온도는 열전대와 데이터기록장치에 의해서 지속적으로 기록이 된다. 실험과정중 온도측정에 따른 오차는 $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 이다. Fig. 2에 시험부에 대한 개략도가 나타나 있다. 시험부는 가시화를 위한 투명유리와 강관으로 만든 기류분류기로 구성되어 있다. 기류의 레이놀드수 (Re_v)가 기포의 거동 및 흡수성능에 미치는 영향을 고려하기 위하여 기류분류기의 오리피스수 (n_o)를 변화시키며 실험을 수행하였다. 수행된 실험조건으로는 초기액류농도 x_i 0.0%, 10.0% 및 20.0%, 오리피스수 n_o 1, 2, 및 3, 오리피스직경 d_o 3.0mm, 3.8 mm 및 5.5 mm의 조합으로 설정되었다. 실험과정중 초기 액류의 질량과 온도는 각각 1000.0 kg 및 22.5°C 로 일정하게 유지되었다. 시험부에 대한 구체적인 기하학적 조건들이 Table 1에 정리되어 있다.

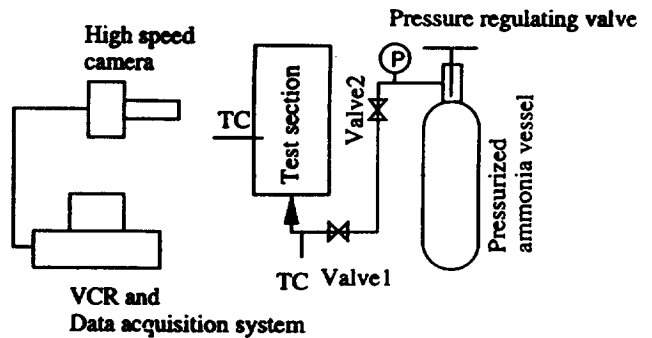


Fig. 1 Experimental apparatus

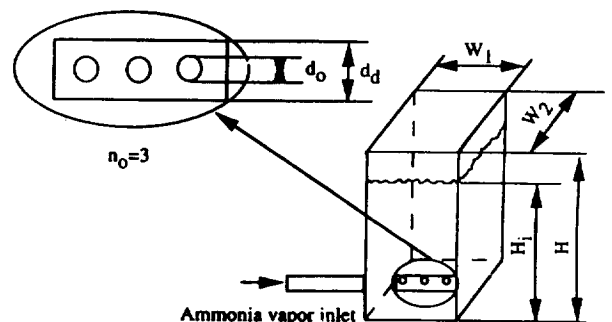


Fig. 2 Test section and vapor distributor

Table 1. Geometric dimensions of the test section

W_1 (mm)	80.0
W_2 (mm)	53.4
H (mm)	300.0
H_i (mm)	234.1
d_o (mm)	3.0, 3.8, 5.5
d_d (mm)	10.0
n_o (mm)	1, 2, 3

2.2 실험결과 처리 방법

흡수된 기류의 질량은 시험부내의 액류초기질량과 최종질량을 측정하여 결정되고, 유입된 기류의 평균질량유량은 주어진 시간에 흡수된 기류의 질량을 측정하여 계산된다. 따라서 흡수율은 다음의 식으로부터 결정된다.

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

여기서 m_f , m_i 및 Δt 는 각각 액류의 초기 질량, 최종질량 및 경과된 시간을 나타낸다. 기류의 레이놀드수를 구하기 위하여 필요한 평균기류 속도 V_o 는 다음의 식에 의해서 결정된다.

$$V_o = \frac{\Delta \dot{m}_{abs}}{n_o \rho_v A_o} \quad (2)$$

여기서 A_o 는 각 오리피스 단면적이다. 실제의 기포형상은 구형 또는 타원형을 이루므로 장방직경 및 단방직경을 각각 측정하여 완전구에 대한 동일체적에 해당하는 유효직경을 초기기포 직경으로 취하였다. 따라서 본 연구에서 측정되는 기포직경은 기포의 동일체적에 상응하는 직경 (volumetric bubble diameter) 이다. 본 연구에서 기포직경과 흡수율을 계산하는데 발생한 실험오차는 각각 4.47-8.69 %, 2.5-5.5% 로 나타났고, 모든 실험데이터에 대한 불확실성 (uncertainty) 이 실험결과와 함께 계산되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기포거동의 가시화

모든 실험과정을 통하여 기포의 거동이 1/100

초의 간격으로 기포생성 초기 1초간 가시화 되었다. 본 연구에서는 기류의 유입속도가 증가함에 따라 오리피스로부터 이탈하는 기포의 형상은 구형에서 타원형으로 전이되는 것을 밝혀 내었고, 중요한 실험적 결과로는 표면장력이 판성력 보다 지배적일 경우 기포의 형상은 구형이 되고, 그 반대의 경우 타원형이 된다는 것이다.

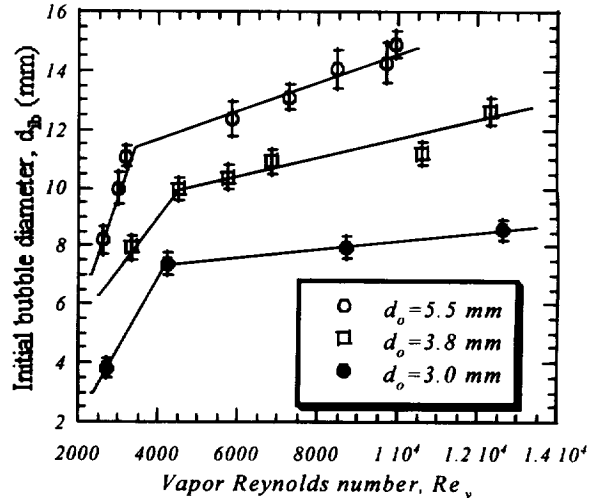


Fig. 3 Initial bubble diameter versus vapor Reynolds number for $x_i=0.0\%$ and $n_o=1$

Fig. 3에 $n_o=1$, $x_i=0.0\%$ 의 경우 각각의 오리피스 직경에 대한 초기직경값들이 기류 레이놀드수의 함수로 나타나 있다. 실험결과로부터 초기 기포직경은 기류레이놀드수가 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있고, 오리피스 직경이 증가함에 따라 기포직경도 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 증기/공기와 같이 비응축가스가 존재하는 경우 오리피스 직경의 크기가 기포직경의 크기에 미치는 영향은 아직 명확하게 밝혀지지 않았다. 본 연구에서는 액류농도 10 % 와 20% 에 대하여도 실험을 하였다. 서로 다른 액류농도에 대한 실험결과로부터 액류의 농도가 증가함에 따라 초기 기포직경이 증가하는 것을 밝혀 내었다. 기포직경이 증가하는 이유는 액류농도가 증가함에 따라 흡수구동력 (absorption driving potential) x_v-x_l 이 감소하게 되고, 흡수율이 감소함에 따라서 초기기포직경이 증가하게 된다. 암모니아/물의 경우 표면장력은 액류농도가 증가함에 따라 감소

한다. 그런데 이상유동의 경우 표면장력이 감소함에 따라 기포의 직경은 감소하는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 액류농도가 증가함에 따라 (즉 표면장력이 감소함에 따라) 기포의 직경이 증가하는 결과를 얻었는데, 이는 암모니아/물의 이성분 흡수과정에서 흡수구동력이 기포직경에 미치는 영향이 표면장력이 미치는 영향보다 훨씬 지배적이라는 것을 의미한다.

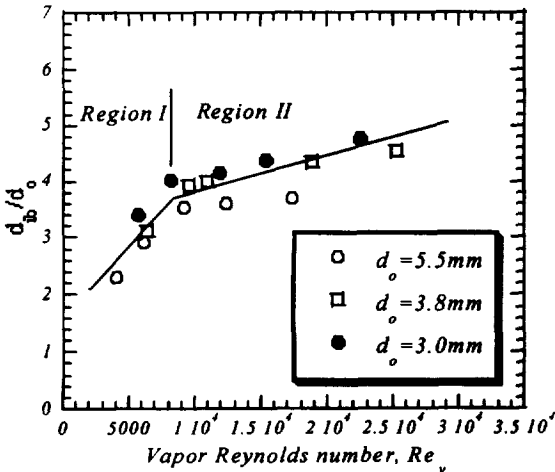


Fig. 4 The ratio of initial bubble diameter to orifice diameter for $x_i=10.0\%$ and $n_o=1$

Fig. 4에 $n_o=1$, $x_i=10.0\%$ 의 경우에 대한 초기 기포직경과 오리피스 직경의 비율 기류레이놀드수의 함수로 나타내었다. 초기 기포직경과 오리피스직경의 비는 오리피스의 크기에 관계없이 기류레이놀드수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것을 보여주고 있다. 초기액류농도가 10.0%의 경우, 초기 기포직경의 증가율은 기류레이놀드수 8500 근처에서 갑자기 감소하는 것을 보여주고 있다. 이때의 기류레이놀드수를 본 연구에서는 천이 기류레이놀드수 (transition vapor Reynolds number) 라고 정의한다. 천이 기류레이놀드수는 내부흡수구동력 (기류와 액류의 농도차에 의한) 과 외부흡수구동력 (유입기류의 질량유량) 의 평형조건에 의해서 발생이 된다. 즉 농도차에 의한 내부흡수구동력이 외부흡수구동력보다 지배적일 경우 흡수과정은 영역 I 에 속하고, 그 반대의 경우 영역 II 에 속한다. 본 실험에서 천이 기류레이놀드수는 액류의 농도가 증가함에

따라 증가하는 결과를 얻었다. 초기 액류농도가 0.0% 와 20.0% 의 경우 천이 레이놀드수는 각각 4000 과 10000 으로 얻어졌다. 천이 레이놀드수가 액류의 농도에 따라 증가하는 이유는 액류의 농도가 증가함에 따라 기포의 직경이 증가하고, 이에 따라 기류레이놀드수가 증가하기 때문이다.

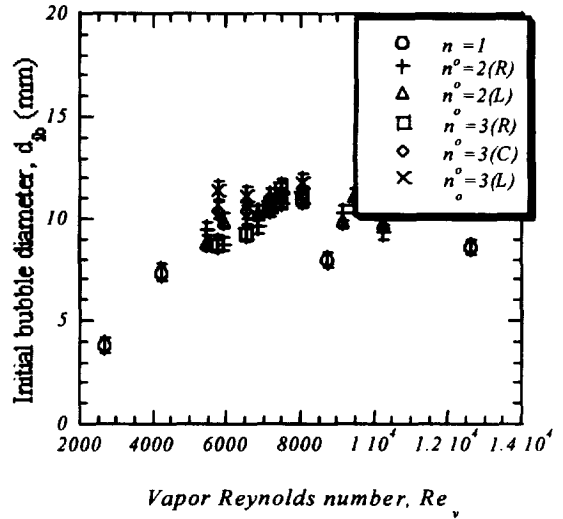


Fig. 5 Initial bubble diameter versus vapor Reynolds number for $x_i=0.0\%$ and $d_o=3.0\text{mm}$

Fig. 5에 $d_o=3.0\text{mm}$, $x_i=0.0\%$ 의 경우 각각의 오리피스 수에 대한 초기기포직경이 기포레이놀드수의 함수로 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 오리피스 수가 증가함에 따라 초기 기포직경은 그다지 영향을 받지 않는다. 액류의 농도가 10% 및 20% 에 대하여도 동일한 실험적 결과를 얻었다. 따라서 오리피스수가 초기기포직경에 미치는 영향은 무시할 만 하다.

3.2 기포직경의 실험적 상관식

앞장에서의 실험결과에 대한 고찰을 통하여 다음의 실험적 상관식에 대한 기본식을 고려하였다.

$$\frac{d_{ib}}{d_o} = c_1 Re_v^{c_2} We_v^{c_3} (Bu_v \times 10^6)^{c_4} x_{vi}^{c_5}$$

여기서 (3)

$$Re_v = \frac{\rho_v V_o d_o}{\mu_o} = \frac{\text{관성력}}{\text{점성력}} \quad (4)$$

$$We_v = \frac{V_o^2 d_o \rho_v}{\sigma} = \frac{\text{관성력}}{\text{표면장력}} \quad (5)$$

$$Bu_v = \frac{V_o^2 d_o \rho_v}{g \Delta \rho} = \frac{\text{관성력}}{\text{부력}} \quad (6)$$

그리고

$$x_{vi} = x_v - x_l \quad (7)$$

이다.

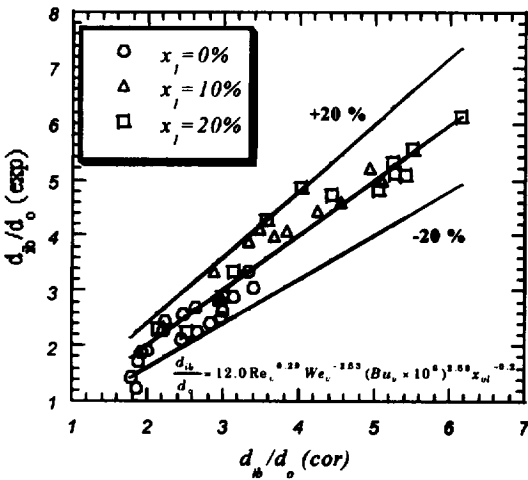


Fig. 6 Experimental correlation of the bubble diameter

Fig. 6에 위의 기본식으로부터 구한 실험적 상관식이 $\pm 20\%$ 의 오차를 가지고 다음의 식으로 표현되었다.

$$\frac{d_{ib}}{d_o} = 12.0 Re_v^{0.29} We_v^{-2.53} (Bu_v \times 10^6)^{2.58} x_{vi}^{-0.2} \quad (8)$$

위의 실험적 상관식으로부터 초기 기포직경은 기류레이놀드수와 부력수 (Bu_v)가 증가함에 따라 증가하고, 기류웨버수 (We_v)와 기류와 액류의 농도차가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있

다. 일반적으로 암모니아/물의 흡수과정중 물질전달이 흡수성능에 미치는 영향이 지대한 바, 본 연구에서 얻어진 기포직경에 대한 실험적 상관식은 기포식 흡수기에서 물질전달면적을 구하는데 유용하게 이용될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 수행된 암모니아/물의 기포식 흡수과정에 대한 실험을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 오리피스에서 이탈하는 기포는 기류의 속도가 증가함에 따라 타원형의 형상을 가진다. 표면장력이 관성력보다 지배적인 경우 구의 형상을 가지나 그 반대의 경우 타원형의 형상이 된다.

2. 초기 기포직경의 크기는 액류의 농도가 증가함에 따라 커진다. 농도차에 의한 흡수구동력이 기포의 크기에 미치는 영향이 표면장력의 영향보다 더 지배적이다.

3. 내부흡수구동력과 외부흡수구동력의 평형조건으로부터 정의된 천이 기류레이놀드수는 액류 농도가 증가함에 따라 증가한다.

4. 본 연구에서는 암모니아/물의 기포식 흡수와 정중 초기기포직경에 대한 실험적 상관식을 $\pm 20\%$ 의 오차 내에서 제시하여 물질전달면적을 계산하는데 유용하게 이용할 수 있도록 하였다.

참고문헌

- [1] Kang, Y. T., Kunugi, Y. and Kashiwagi, T., 2000, Review of advanced absorption cycles, : Performance improvement and temperature lift enhancement, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 23, No. 5, pp. 388-411
- [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, No. 6, pp.430-443
- [3] Kang, Y. T., Akisawa, A. and Kashiwagi, T., 1999, Visualization and model development of Marangoni convection in NH₃-H₂O system, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 22, No. 8, pp. 640-649