

공기구동 이젝터를 이용한 ABB (Air Bubble Barrier)의 기포거동 특성 연구 (I): 영상처리 및 통계적분석방법 개발

서현덕* · 알리유 무사 알리유** · 김민균*** · 김경천†

A Study on Bubble Behavior Generated by an Air-driven Ejector for ABB (Air Bubble Barrier) (I): Development of Image Processing Method and Statistical Analysis

Hyunduk Seo*, Aliyu Musa Aliyu**, Minkyun Kim*** and Kyung Chun Kim†

Abstract To analyze bubbles generated by an ABB (Air Bubble Barrier), we developed image processing procedure and statistical analysis method. Air was discharged from 5 mm nozzle as swarm form at the bottom of 1 m3 water tank. Flow rates of discharged air are ranged from 2 L/min to 20 L/min and these are corresponding to Reynolds number of 1766-17663. Rise velocity of bubble is extracted by using image process pretending intrusive method. Mean equivalent velocity was calculated using void fraction weighting factor. Bubble diameter is obtained and compared with correlations in the literature. Also, we present a correlation according to the result of this study. Mean velocity and mean diameter of bubbles increase with increasing gas Reynolds number. But these parameters show an asymptotic trend when they approach to high Reynolds number.

Key Words : Air Bubble Barrier, Image Processing (영상처리분석), Bubble Swarm (공기방울 군집), Flow Visualization (유동가시화)

1. 서론

우리나라를 포함한 세계의 여러 국가에서는, 중

분한 양의 냉각수를 공급하기 위해, 원자력 발전소 및 화력발전소등을 주로 해안가에 위치시킨다. 그러나 최근 바닷물 수온 상승 및 기후변화로 인하여 해파리 등 난류성 바다생물들의 번식이 증가하고 있으며, 해파리의 출현 빈도 및 출현 시기가 증가하고 있는 추세를 보인다. 이들 생물의 증가는 해안/하안 시설의 취수구를 통한 원활한 냉각수 공급을 방해하여 심지어 발전소 가동중단을 야기하여 시간적, 비용적 문제를 초래할 수 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위한 방법으로 여러 가지 취수구 스크린 시스템이 제안되었으며 그 중

† School of Mechanical Engineering,
Pusan National University
E-mail: kckim@pusan.ac.kr

* School of Mechanical Engineering,
Pusan National University

** School of Mechanical Engineering,
Pusan National University

*** Infra & Offshore Research Team,
GS Engineering & Construction

하나가 ABB (Air Bubble Barrier)이다. ABB는 다른 스크린에 비해 이물질 끼임이 없으며 이미 시공 완료된 취수구 시스템들에 추가적으로 설치가 가능하다는 장점이 있다.

ABB의 성능을 분석하기 위해서는 공기방울 거동의 분석이 필수적이다. 공기방울을 포함하는 이상 유동은 유체역학적으로 아주 중요하고 분석하기 어려운 주제 중 하나이다. 공기방울 거동의 정보를 얻기 위해 많은 연구자들이 노력하였으며, 그 방법은 크게 두 가지로 나뉜다.

첫 번째는 관입식 방법 (intrusive method)이다. 관입식 방법의 예로는 광섬유 탐침법 등의 국소적 기포율 측정 및 기상의 유동속도 측정이 있다.^[1-3] 그러나 관입식 방법은 측정 기구가 유동과 직접 맞닿게 되어 공기방울이 측정 시간 동안 형상의 왜곡이 생길 수 있으며, 공기방울이 측정기구를 뚫고 지나갈 수 있어야 한다는 문제점이 있다. 하지만 광섬유 탐침법의 경우, Sampling rate가 사용 장비에 따라 2 MHz 이상의 뛰어난 성능을 보인다.

두 번째로는 비관입식 방법 (Non-intrusive method)이 있다. 이는 최근 초고속 카메라의 개발 및 진보된 영상처리 기법의 개발로 인해 발전되어왔다. 공기방울 거동을 분석하기 위한 비관입식 방법의 예로는 PTV (Particle Tracking Velocimetry)가 있다. PTV 방법은 개개의 공기방울의 속도를 정의하기에 좋은 방법이며, LVT (Lagrangian Velocimetry Technique)적인 접근 방법 중 하나이다. 최근에는 공기방울의 겹침 등을 영상 처리를 통해 복원하여 공기방울의 분포에 신뢰성을 높이는 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 이는 ABB과 같이 높은 유량과 높은 Reynolds number 영역의 유동분석에는 적절하지 않으며, 공기방울의 병합 (coalescence) 및 분열 (break-up)이 억제된 상태의 분산 기포류 (finely dispersed bubbly flow) 혹은 유동층 (fluidized bed) 내에서의 유동에 적절하다.^[4,5]

또 다른 비관입식 방법의 예로는 PIV (Particle Image Velocimetry)가 있다. PIV 기법은 형광 추적 입자 (fluorescent trace particle)를 분석대상인 유체에 고르게 살포 (seeding)하고 입자를 발광 시킬 수 있는 레이저 시트를 생성하여, FOV내의 입자의 움직임을 통해 속도를 측정하는 EVT (Eulerian

Velocimetry Technique)적인 접근 방법이다. 이는 공기방울에 추적 입자를 살포하기 어렵기 때문에, 주로 공기방울 주변 액상의 유동장 측정 후 Slip velocity를 통해 공기방울의 속도를 계산하지만 부정확성이 있다.^[6-7]

본 연구에서는 ABB의 군집 (swarm)형태로 발생하는 공기방울의 거동을 분석하기 위해 일련의 영상 처리 방법을 사용하였다. 공기방울의 상승속도를 분석하기 위해, 광섬유 탐침법을 모방하였으며, 공기방울의 크기 분포를 통계적으로 분석하였다. 또한 이를 선행 문헌과 비교함으로써 본 접근법의 타당함을 확인하였다. 이를 토대로 앞으로 개발될 향상된 ABB시스템과의 성능 비교가 가능해질 것이다.

2. 실험 및 영상처리

2.1 실험 장치 구성

본 실험에 사용된 실험 장치는 Fig 1 과 같이 구성되었다. Water tank는 가로, 세로, 높이가 각각 1m이며, 약 90cm 이상의 물을 채우고 실험하였다. 카메라는 PCO 1200hs CCD카메라 (500fps) 및 Photron 사의 SA1.1 (750fps)을 사용하였다. 압축공기는 3bar의 압력으로 Dwyer 사의 체적유량계를 통해 2L/min ~ 20L/min으로 공급되었다. 공기는 내경 5mm의 노즐 출구를 통해 분사되었으며, 이는 Reynolds number로 환산하였을 시에 1766~17663이다. 노즐 출구는 바닥으로부터 13cm 위에 위치하고 있다.

실험을 시작하기에 앞서, 카메라의 교정(calibration)을 위해 target이미지 촬영 후 각각 0.125mm/pix, 0.2

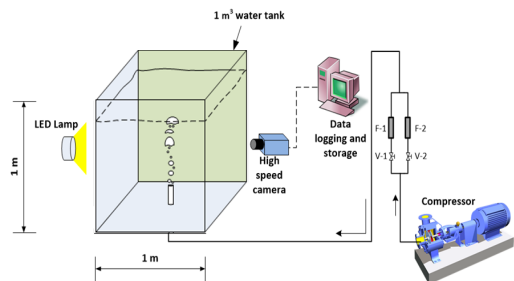


Fig. 1. Experimental Setup

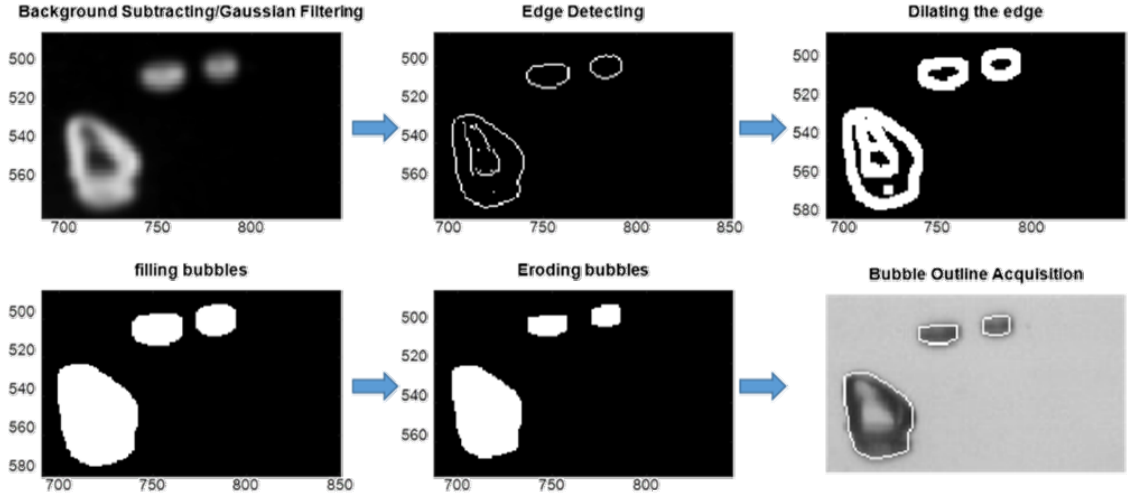


Fig. 2. Image Processing Procedure

mm/pix의 고정 값을 획득하였다.(1280 x 1024 pixels image of 1200hs, 1024 x 1024 pixels image of SA1.1)

2.2 실험 조건

본 실험에서 수행된 실험 조건은 Table 1 에 명시됐다. 표에 나타난 Reynolds number는 다음과 같이 계산되었다.

$$Re_g = \frac{\rho_g u_g D_{nozzle}}{\mu_g} \quad (1)$$

ρ_g 와 μ_g 는 각각 상온에서의 공기의 밀도 [kg/m^3] 및 점성 [kg/sm]을 나타내고 D_{nozzle} 은 노즐의 내경을 나타낸다. u_g 는 노즐에서의 공기의 속도로써 아래와 같이 계산된다.

$$u_g = \frac{4Q_g}{\pi D_{nozzle}^2} \quad (2)$$

Q_g 는 컴프레서를 통하여 공급되는 유량 [m^3/s]을 의미한다.

2.3 영상처리 방법

공기방울의 등가 직경 및 속도는 Matlab을 이용한 Image processing을 통하여 Fig. 2와 같이 처리된 이미지를 통해 측정되었다. 일련의 영상 처리 알고리즘은 (1) background subtraction, (2) filtering, (3) edge detection, (4) edge dilatation, (5) filing holes, (6) edge eroding, (7) property extraction으로 구성되었다.

2.3.1 Background subtraction

공기방울 영상 처리에 있어서, 추후에 배경으로 인한 Edge detection의 교란을 방지하기 위하여 공기방울 영상(I_O)과 배경(I_B)의 Grayscale value를 감해서 영상처리의 대상 이미지(I)를 생성한다.

$$I(x, y) = I_B(x, y) - I_O(x, y) \quad (3)$$

Table 1. Air flow rates used for experiments

Q [L/min]	u_g [m/s]	Re_g [-]
2	1.7	1766
3	2.5	2650
5	4.2	4416
7	5.9	6182
10	8.5	8832
15	12.7	13248
20	17	17663

2.3.2 Filtering

대상 이미지에 존재하여 Edge detection을 방해할 수 있는 Noise를 제거하기 위한 방법으로, 본 연구에서는 Gaussian filter를 사용하였다.

2.3.3 Edge detection

필터링된 이미지에서 Grayscale value의 구배를 이용하여, 공기방울의 외곽선을 구해내서 이진화(Binary) 하는 방법이다. 본 연구에서는 Prewitt method를 사용하였다. 이 방법은 수직 및 수평 마스크를 이용하여 빠른 영상처리 속도를 갖고 있으나, 대각선 방향의 Edge detection에는 다소 약한 모습을 보여준다.^[8]

2.3.4 Edge dilatation

Edge detection의 결과 이미지의 외곽선이 완벽한 폐곡선을 이루기는 어렵다. Prewitt method의 경우 대각방향의 Edge가 채워지지 않은 경우가 많은데, 이를 보완하기 위해서 각 외곽선의 Pixel영역을 각각 x 와 y 방향을 향해 확장해주는 과정이다.

$$I_{dil,x}(x,y) = \begin{cases} 1 & I(x-1,y) = 1 \\ 1 & I(x+1,y) = 1 \\ 0 & else \end{cases}$$

$$I_{dil,y}(x,y) = \begin{cases} 1 & I(x,y-1) = 1 \\ 1 & I(x,y+1) = 1 \\ 0 & else \end{cases}$$

$$I_{dil}(x,y) = I(x,y) + I_{dil,x}(x,y) + I_{dil,y}(x,y) \quad (4)$$

$$I_{dil}(x,y) = \begin{cases} 0, & I_{dil}(x,y) = 0 \\ 1, & I_{dil}(x,y) > 0 \end{cases}$$

2.3.5 Filing holes

확장된 공기방울의 폐곡선 내부를 채우는 과정으로, Soille가 개발한 알고리즘을 사용하였다.^[9]

2.3.6 Edge eroding

Edge dilatation 과정과 반대로, 이미지의 외곽선

을 확장된 상태에서 기존의 상태로 되돌리기 위한 과정이다.

3. 영상처리 결과 및 고찰

3.1 공기방울 신호 획득 및 속도 측정

일련의 영상처리 과정 이후, Fig. 3과 같이 이진화된 공기방울 유동 영상이 생성된다. 유동영상에 존재하는 두 십자 표시는, 영상에서의 이진화된 신

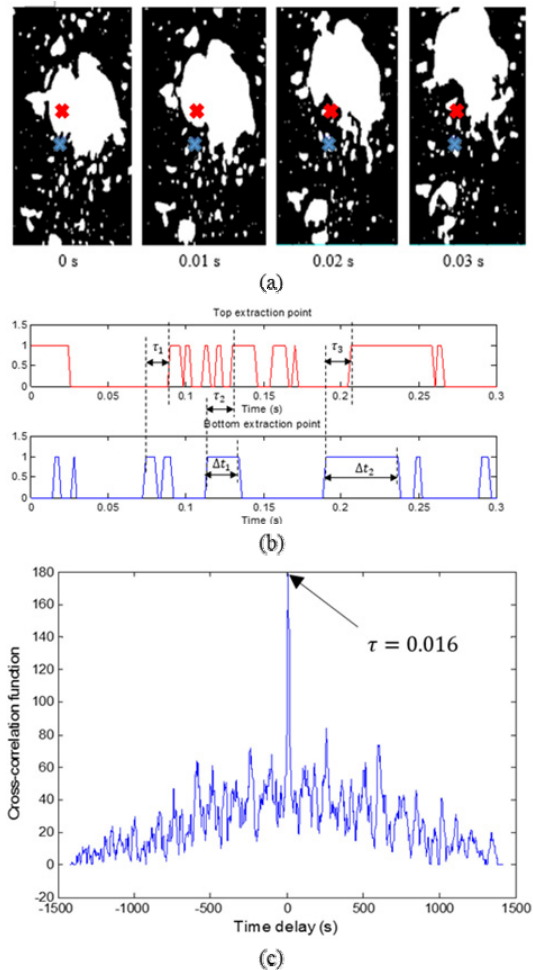


Fig. 3. (a): Processed image sequence at Reynolds number of 6182.

(b): Corresponding signal from extraction points of (a)

(c): Cross-correlation result of signals

호를 받아 각 Frame별로 물(0)인지 공기(1) 인지를 추출하는 지점이다. 두 추출 지점은 노즐 출구로부터 약 30cm 위에 존재한다. 두 추출 지점 사이의 거리(y)는 80pixel (10mm)로, 공기방울이 상승하면서 발생하는 왜곡 현상이나 병합 및 분열 효과를 최소화 하면서, 속도의 분해능을 높일 수 있는 높은 값으로 선정하였다.

공기방울의 상승속도는 추출된 신호 (Fig 3 (b))의 시간 차이 (τ_k)를 분석함으로써 구해질 수 있다. 그러나 위에 언급한 공기방울의 비선형적 거동으로 인해 두 신호는 완전히 같을 수는 없으며, 공기방울 마다 각각 다른 시간 차이 (τ_1, τ_2, τ_3)를 보이며, 이는 Cross-correlation을 이용하여 위 추출 지점 신호(U)와 아래 추출 지점 신호(B)의 가장 적절한 시간 차이를 Cross-correlation의 Peak값으로 구해낼 수 있다.

$$R_{T,B}(k) = \sum_{k=1}^N [U(k) - \bar{U}][B(k+\tau) - \bar{B}] \quad (5)$$

\bar{U} 및 \bar{B} 는 각 신호의 평균 값을 의미한다. 이 방법은 EVT적 접근 방법이며, 가장 적절한 시간 차이를 통해 알 수 있다. 이 때의 시간 차이를 라고 할 때, 추출 지점의 속도는 아래와 같이 계산된다.

$$u_b = \frac{y}{\tau_{max}} \quad (6)$$

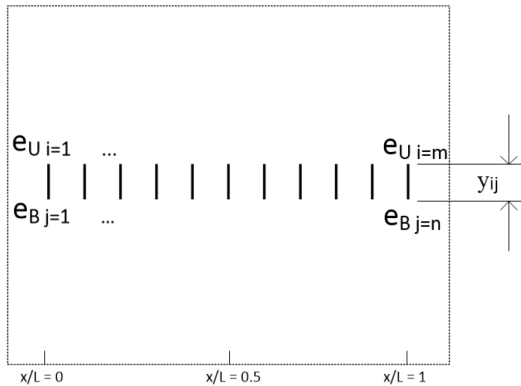


Fig. 4. Arranged data extraction points on the Field of View

Fig. 4와 같이 추출 지점은 수평방향으로 5pixel (0.625mm)마다 위치하고 있으며 각 지점의 속도는 아래와 같이 계산된다.

$$u_{b,i} = \frac{y_i}{\tau_{max,i}} (1 \leq i = j \leq n) \quad (7)$$

각 추출 지점의 기포율 (void fraction, $a_{b,i}$)을 구하기 위해, 아래 식과 같이 각 추출 지점을 지나는 공기방울의 신호량(Δt_i)의 합을 전체 시간(T)으로 나눠주었다.

$$a_{b,i} = \frac{1}{T} \sum_{l=1}^M \Delta t_l \quad (8)$$

Fig. 5는 Reynolds number 1766~8832에서의 속도 분포 ($u_{b,i}$) 및 기포율 분포 ($a_{b,i}$)의 결과를 보여주고 있다. 두 가지 분포 모두 Reynolds number가 증가함에 따라 같이 증가하고 있는 모습을 보여준다. $u_{b,i}$ 는 $x/L=0.5$ 를 중심으로 포물선 모양으로 분포하고 있지만 x/L 이 0이나 1에 가까워질 수록 더욱 불연속적인 분포를 보여준다. 이러한 현상은 $a_{b,i}$ 의 분포를 통해 설명될 수 있다. 공기방울은 수직 상승하는 움직임뿐만 아니라 수평방향의 움직임을

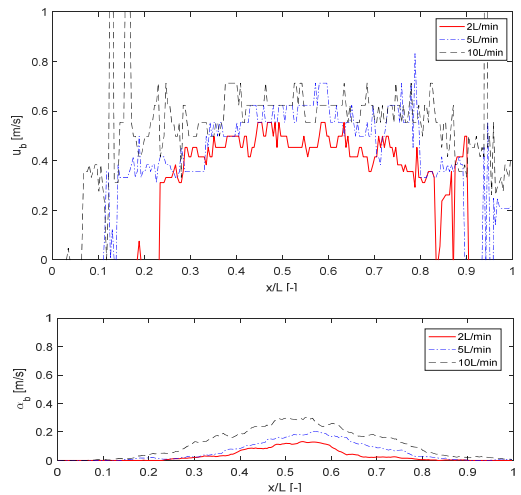


Fig. 5. Bubble velocity(u_b) and void fraction(α_b) profiles at Reynolds number of 1766, 4416, 8832

을 갖고 있다. 이러한 움직임으로 인하여 공기방울 상승 지점의 좌우에 위치한 추출 지점에 정상적인 신호를 방해하는 노이즈를 준다. 그리고 그 추출 지점에 정상적인 신호에 비해 노이즈가 많이 존재하게 된다면, 적절한 시간 차이를 구할 수 없게 되고 오류가 발생하게 된다. 본 실험의 영상 처리 및 Cross-correlation에서는, 총 240개의 추출 지점 중 약 20개의 오류가 발생하였다.

그러므로, 공기방울의 상승 분포를 통하여 단순 산술 평균을 내는 것을 부적절하다. 상승 분포의 중간지점에 더욱 신뢰도를 부여하여 높게 가중시키고, 분포의 끝 지점은 오류이므로 무시되거나 가중치를 적게 주어야 한다. 본 연구에서는 유효한 추출 지점을 기포율의 CDF (Cumulative Distribution Function)값이 30% ~ 70% 이내인 지점으로 제한하고, 아래와 같이 등가 평균 상승 속도에 기포율을 이용하여 가중치를 주었다.

$$u_{b,mean} = \frac{\sum_{i=1}^N a_{b,i} u_{b,i}}{\sum_{i=1}^N a_{b,i}} \quad (9)$$

$$a_{b,i} = \begin{cases} 0 & a_{b,i} \in CDF(a_b) < 0.3 \\ a_{b,i} & a_{b,i} \in 0.3 \leq CDF(a_b) \leq 0.7 \\ 0 & a_{b,i} \in CDF(a_b) > 0.7 \end{cases} \quad (10)$$

Fig. 6은 Reynolds number 1766~17633에서의 등가 평균 속도($u_{b,mean}$)를 나타낸 것이다. 오차 범위는 앞서 언급한 속도 추출 시의 오류에 의한 $\pm 8\%$ 의 오차를 뜻한다. Random 오차가 다소 큰 이유는

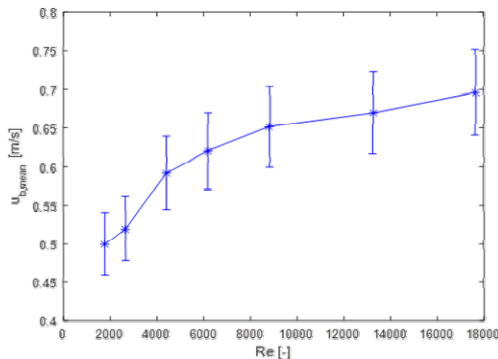


Fig. 6. Mean velocity of entire condition

공기방울의 군집 현상으로 다양한 크기의 공기방울들이 동시에 서로 다른 속도로 상승하는 현상 때문으로 판단된다.

3.2 공기방울의 평균 크기

본 연구에서는 Matlab을 이용하여 이진화된 공기방울 거동 영상에서 공기방울의 개수, 각 공기방울의 픽셀화된 넓이를 구하였다. 세 번의 실험 및 영상 처리의 결과로써, 평균 공기방울의 숫자는 $\pm 0.7\%$ 에서 $\pm 9.8\%$ 에 걸쳐 나타났다. 이러한 현상은 공기방울의 병합 및 분열뿐만 아니라 3차원적 거동으로 인해 큰 공기방울이 작은 공기방울을 가리게 되면서 발생하였다.

공기방울의 넓이는 아래와 같은 식을 통해 계산되었다.

$$A_{b,i} = \sum P(x_v, y_h) = \iint p(x, y) dx dy \quad (11)$$

p 는 (x, y) 에서의 픽셀의 위치를 뜻하며, 하첨자 v 와 h 는 수직과 수평방향 픽셀의 수를 뜻한다. 즉, 각 버블 내부에 존재하는 픽셀의 수를 모두 합친 것을 의미하며 이 넓이를 통해 등가 지름은 아래와 같은 식을 통해 계산된다.

$$d_{b,i} = \sqrt{\frac{4A_{b,i}}{\pi}} \quad (12)$$

공기방울의 평균 크기를 연구한 많은 선행 문헌에서는, 크기 분포 모델링에 유용한 여러 가지 통계적인 매개 변수를 통해 분석하였다. 주로 아래와 같이 구해지는 Volume averaged diameter($d_{b,v}$)와 Sauter mean diameter ($d_{b,32}$)가 제시되었다.

$$d_{b,v} = \left[\frac{\sum (n_i d_{b,i}^3)}{\sum n_i} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

$$d_{b,32} = \frac{\sum (n_i d_{b,i}^3)}{\sum (n_i d_{b,i}^2)} \quad (14)$$

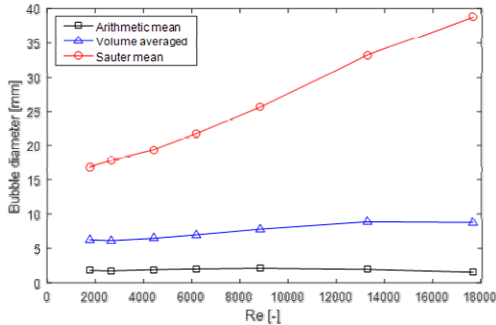


Fig. 7. Comparison of three different mean diameter of bubbles

$d_{b,i}$ 는 공기방울의 크기에 따라 분류된 i 번째 공기방울 크기를 나타내며, n_i 는 i 번째 그룹에 속하는 공기방울의 수를 나타낸다. Volume averaged diameter는 2차원 영상으로 얻어진 면적을 토대로 등가적인 3차원 기포의 직경으로 변환하는 방법이며, 공기 방울 군집 형태에서 대표적인 기포 크기의 스케일링에 적합하다. Yin 등은 Venturi 형태의 Bubble generator에서 생성되는 공기방울의 직경을 Volume averaged diameter를 이용하여 모델링 하였으며, Zheng 등과 Gordiychuk 등은 Sauter mean diameter를 이용하였다.^[10-12]

Fig. 7은 세 가지 평균 직경의 값산술평균된 지름 (Arithmetic diameter), Volume averaged diameter, Sauter mean diameter)을 Reynolds number에 따라 비교하여 나타내고 있다. 산술 평균값의 경우 너무 작은 공기방울로 인한 편향이 보이며 Sauter mean diameter에 경우는 큰 공기방울로 인한 편향을 보이기 때문에 Volume averaged diameter가 가장 용인될만한 값이다.

Fig. 8은 Volume averaged diameter를 Reynolds number에 따라 나타낸 값이며, 오차 범위는 3번의 반복 측정 결과로써 얻어졌으며, 그래프 상의 오차 범위는 가장 높은 유량에서의 오차 값인 $\pm 6\%$ 로써 표현하였다. Random 오차가 다소 큰 이유는 공기방울의 군집 현상으로 다양한 크기의 공기방울들이 동시에 상승하는 현상 때문으로 판단된다.

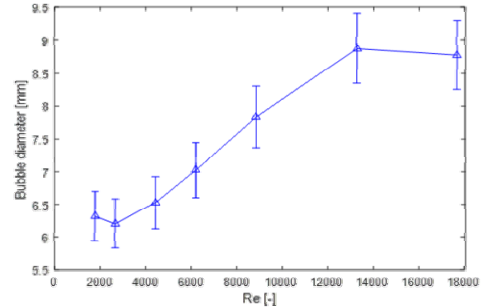


Fig. 8. Volume averaged diameter with standard deviation ($\pm 6\%$)

3.3 공기방울 크기에 대한 관계식

공기방울 및 공기방울 주위 유체의 움직임에 대한 정확한 이론적 모델을 세우기는 상당히 어렵다. Nogami 등은 유동 입구에서의 액상 및 기상의 특성, 오리피스 사이즈뿐만 아니라 연속적으로 상승하는 공기방울로 인한 Wake 및 Entrainment가 뒤따라오는 공기방울에 중대한 영향을 끼친다고 하였다. 그러므로 공기방울에 대한 이론적 모델은 부력, 기상의 모멘텀, 표면장력, 항력, 관성력 등을 포함하는 비선형적인 미분대수방정식으로 구성되어야 한다. 낮은 유량의 공기방울 유동에서의 공기방울 크기, 상승 속도는 상대적으로 쉽게 수치해석적으로 계산되었다. 그러나 군집 형태의 공기방울의 계산에서 높은 시간적, 공간적 해상도를 가지려면 상당한 성능의 컴퓨팅 소스가 필요하다. 이러한 이유로 공기방울의 크기, 모양, 생성 주기, 항력에 대한 실험적 관계식이 많이 연구되었다.^[13-14]

3.3.1 평균 공기방울 직경에 대한 관계식

다량의 액상이 포함된 유동에서, 액상의 성질은 공기방울의 크기 분포에 지배적인 영향을 준다. 공기방울의 분열은 공기방울이 움직이면서 정체된 다량의 물과 충돌하게 되면서 확연히 발생하게 될 것이고, 공기방울의 크기 분포는 더욱 작은 쪽으로 편향될 것이다. 그러나 이러한 현상은 공기방울의 압축성, 결합, 왜곡 등으로 인해 복잡한 메커니즘을 갖고 있다. 이러한 이유로 공

Table 2. Summary of correlations regarding bubble diameter

Investigator(s)	Correlation	Conditions
Akita & Yoshida (1974)	$\frac{d_b}{d_{noz}} = 26 Fr^{-0.12} Ga^{-0.12} We^{-0.5}$ Where $Fr = \left(\frac{u_g}{\sqrt{g d_{noz}}}\right)$, $Ga = \left(\frac{\rho_l^2 g d_{noz}^3}{\mu_l^2}\right)$, and $We = \left(\frac{\rho_l g d_{noz}^2}{\sigma}\right)$	$998 < \rho_l < 1500 \text{ kg/m}^3$ $0.05 < \sigma < 0.08 \text{ N/m}$ $0.001 < \mu_l < 0.006 \text{ Ns/m}^2$ $0.001 < d_{noz} < 0.006 \text{ m}$
Kumar et al. (1976)	$d_b = 1.56 Re_g^{0.058} \left(\frac{\sigma d_{noz}^2}{\Delta \rho g}\right)^{0.25}$ $d_b = 0.32 Re_g^{0.425} \left(\frac{\sigma d_{noz}^2}{\Delta \rho g}\right)^{0.25}$ $d_b = 100 Re_g^{0.4} \left(\frac{\sigma d_{noz}^2}{\Delta \rho g}\right)^{0.25}$	$1 < Re_g < 10$ $10 < Re_g < 2100$ $4,000 < Re_g < 70,000$
Bhavaraju et al. (1978) (Source: Kantarci et al. (2005))	$\frac{d_b}{d_{noz}} = 3.23 Re^{-0.1} Fr^{0.21}$ Where $Re = \left(\frac{4 \rho_l Q_g}{\pi \mu_l d_{noz}}\right)$, $Fr = \left(\frac{Q_g^2}{d_{noz}^5 g}\right)$	—
Moo-Young & Blanch (1981)	$d_b = 0.19 d_{noz}^{0.48} Re_g^{0.32}$	$Re_g < 2,000$
Wilkinson et al. (1994)	$\frac{\rho_l g d_b^2}{\sigma} = 8.8 Ca^{-0.04} Fr^{0.21} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{-0.04}$ Where $Ca = \left(\frac{u_g \mu_l}{\sigma}\right)$, and $Fr = \left(\frac{Q_g^2}{d_{noz}^5 g}\right)$	—
Tsuge et al. (1986)	$d_b = 6.9 \left(\frac{\sigma}{\rho_l}\right)^{0.5} u_g^{0.44}$	—
Jamialahmadi et al. (2001)	$\frac{d_b}{d_{noz}} = \left(\frac{5}{Bd^{1.08}} + \frac{9.26 Fr^{0.36}}{Ga^{0.39}} + 2.147 Fr^{0.51}\right)^{\frac{1}{3}}$ Where $Bd = \frac{\rho_l g d_{noz}^2}{4\sigma}$, $Ga = \left(\frac{\rho_l^2 g d_{noz}^3}{\mu_l^2}\right)$, and $Fr = \frac{u_g}{\sqrt{g d_{noz}}}$	—
Al Ba'ba'a et al. (2016)	$d_b = 0.0113 Re_g^{1.045} We_g^{-0.447}$	—

기방울에 대한 전반적인 해석은 어려우며 무차원화를 거친 관계식을 통한 해석이 연구되어왔다. 이러한 연구는 여러 가지 가정을 통해 간단화 된다. (a) 공기방울은 구형의 형태를 유지한다. (b) 공기방울의 움직임은 주위 공기방울의 움직임에 영향을 받지 않는다. (c) 노즐로부터 토출 되는 기상의 체적유량은 일정하다. (d) 액상은 Newtonian 유체이며, 그 성질 (밀도, 점도, 표면장력)등은 일정하다.

평균 직경은 액상-기상 시스템에서 모멘텀 전달의 특성을 정의하기에 가장 중요한 매개 변수이다. 그러므로 많은 관계식이 Table 2와 같이 개발되어 왔으며, 공기방울의 크기는 노즐의 크

기를 이용해 무차원화 된다. 그러나 선행 연구에서 종종 평균 직경을 직접적으로 이용하여 무차원화 시키지 않은 관계식을 사용하기도 하였다. (Kumar 등 (1976), Tsuge 등 (1986) 그리고 Al Ba'ba'a 등 (2016)) 이는 해석 모델을 무차원화를 할 때, 모델이 다른 시스템에도 적용 될 수 있는 확장성이 손상되기 때문이다.^[15-17]

Fig. 9에서 선행 연구의 관계식과 본 연구에서 얻어진 공기방울 직경 데이터를 비교되어있다. 대부분의 관계식은 Reynolds number가 증가함에 따라 점근적으로 공기방울 직경이 증가하고 있다. Akita & Yoshida의 데이터는 상반된 결과를 보여주고 있는데, 이것은 Webber number(We)의

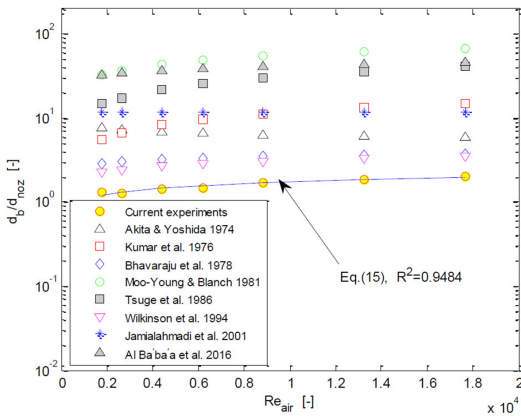


Fig. 9. Comparison of experimental result with correlations

존재로 인한 것이다. 높은 Weber number은 공기방울 직경 감소에 영향을 끼치기 때문이다. 그렇지만, Reynolds 수가 증가함에 따라 실험값에 수렴하고 있는 경향을 보여주고 있다.

선행 연구의 관계식 중 가장 편차가 큰 식은 무차원화 되지 않은 식들(Moo-Young과 Blanch (1981), Tsuge 등 (1986) 그리고 Al Ba'ba'a 등 (2016)) 으로 나타났다. 실험에서 사용된 노즐의 크기 및 채널의 크기의 차이와 대상 유체의 차이가 편차를 발생시킨 것으로 보인다. 이를 통해, 유체의 물리적 특성들을 고려한 무차원화 된 관계식이 본 연구에 더욱 적합함을 알 수 있었다.^[19]

반면에 가장 정확한 결과를 보인 관계식은 Bhavaraju 등 (1978)과 Wilkinson 등 (1994)의 식이다. 이 식은 non-Newtonian 유체를 사용하여 얻어낸 식이지만, 철저한 수학적 접근을 통해 식을 유도하였으며 결과적으로 공기방울의 직경은 수정된 Froude number와 Reynolds number 그리고 Capillary number에 영향을 받는 것을 보였다. 후자의 식의 경우, 다양한 기체 (Carbon dioxide, Nitrogen, Argon, Helium, and SF3)와 액체(n-Heptan, glycol, water and sodium sulphite solution)를 158 mm내경의 원주기둥 내에서 실험한 결과를 토대로 세워졌다. 또한, 다양한 노즐 (단일 노즐, 구멍넉 평판, 다중 오리피스)을 사용하여 다양한 물리적 성질과 유동 조건을 만족하는 관계식을 세울 수

있었다.^[20-21]

Jamialahmadi 등이 유도한 상관식의 경우, 본 실험의 조건과 같은 5mm의 오리피스로부터 나온 결과이다. 하지만 레이놀즈 수가 증가함에 따라 공기방울의 직경 크기의 증가 폭이 아주 작게 나타났는데 그 이유는 실험에 사용된 액체 (alcohols and glycerol)가 달라 이로 인한 물리적, 화학적 성질의 차이가 있기 때문이다.^[22]

앞서 언급했듯이 Bhavaraju 등과 Wilkinson 등이 유도한 관계식이 본 실험의 결과 값을 잘 예측하였기 때문에, 유도식에 이용된 무차원 수 (Reynolds, Capillary and Froude numbers)로 무차원화 된 공기방울 직경 (d_b/D_{nozzle})을 아래와 같이 Power law 형식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d_b}{D_{nozzle}} = \alpha Re_g^\beta Ca^\gamma Fr_g^\delta \quad (15)$$

이때 각각의 무차원 수는 다음과 같다.

$$Re_g = \frac{\rho_g u_g D_{nozzle}}{\mu_g}, Ca = \frac{u_g \mu_l}{\sigma}, Fr_g = \frac{u_g^2}{g D_{nozzle}}$$

Reynolds number 와 Froude number는 노즐에서 토출되는 공기의 성질에 따라 변하며, 공기의 관성력을 의미한다. 토출되는 공기의 관성력은 정지 상태의 물과 상호작용하게 되는데, 이 때 물의

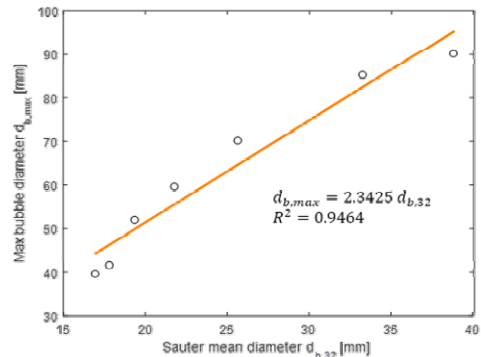


Fig. 10. Tendency between maximum diameter and Sauter mean diameter

에 직접적으로 영향을 주게 된다. 이와 같은 밀도, 점도, 표면장력 등이 공기 방울의 거동현상을 기상의 관성력과 액상의 표면장력간의 관계를 의미하는 Capillary number을 이용하여 표현하였다. 상수들은 비선형 회귀 방법을 통하여 다음과 같이 구하였다.

$$\frac{d_b}{D_{nozzle}} = 6.6783 Re_g^{-0.0772} Ca^{0.2945} \quad (16)$$

for $Re_g \leq 18,000$

그 결과 Froude number은 아주 작은 영향을 끼쳐 생략되었다. Reynolds number지수는 음의 값을 가지므로, Reynolds number의 증가는 공기 방울 크기의 감소에 영향을 주는 것으로 나타났다. 그러나 전체 상관식에서 노즐에서의 공기의 속력(u_b)의 지수를 고려한다면 약 0.21으로 나타났다. 상관식은 Fig. 9에 표현되었으며, R^2 값은 0.9848이었다.

3.3.2 최대 직경과 평균 직경 사이의 관계

Azzopardi and Hewitt (1997)은 최대 공기 방울 직경과 Sauter mean diameter 사이에는 1.5에서 3 사이의 비를 가진다고 보고하였다. Fig. 10은 본 연구에서 획득한 공기방울 최대 직경과 Sauter mean diameter 사이에는 2.7568의 비가 있으며, R^2 값은 0.9786임을 보여 주고 있다. 이는 본 연구의 결과가 이전의 보고 결과에 상응한다는 것을 의미한다.

4. 결론

공기방울의 유동 속도 및 크기를 분석하기 위한 영상처리방법 및 통계적 분석방법에 대한 실험적 연구가 수행되었다. 공기방울영상 및 공기방울의 상승속도 및 크기 분포를 획득하기 위하여 $1m^3$ 크기의 물 탱크, 초고속 카메라, 5mm의 노즐 등이 사용되었다. 공기방울의 상승 속도 분포는 포물선모양의 분포였으며, 토출되는 공기의 양에 따라 증가

하였다. 공기방울의 평균 상승 속도는 측정 위치별 기포율에 따라 가중치를 주어 계산하였는데, 그 이유는 기포율 또한 포물선 모양의 분포를 가졌으며, 포물선 끝에 달해서는 공기방울의 수평방향 움직임으로 인한 noise가 상당하여 충분한 양의 신호 샘플을 얻지 못했기 때문이다. 또한 본 연구에서 개발된 영상 처리를 통해 얻어진 공기방울 크기 분포의 결과를 선행 문헌과 비교함으로써, 결과의 타당성을 얻는 한편, 노즐에서 토출되는 공기방울의 크기 분포를 예측할 수 있는 상관식을 제시하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 선도연구센터 (GCRC) 지원과제 (No. 2011-0030013) 및 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20151120100140)임.

REFERENCE

- 1) Tayagi, P. and Buwa, V.V., 2017, "Experimental characterization of dense gas-liquid flow in a bubble column using voidage probes," *Chemical Engineering Journal*, Vol.308, pp.912-928.
- 2) Kim, G., Choi, S.W., Kim, Y.K., Kim, K.C., 2012, "Measurement of Bubble Diameter and Rising Velocity in a Cylindrical Tank using an Optical Fiber Probe and a High Speed Visualization Technique," *Journal of the Korean Society of Visualization*, 10(2), pp.14-19.
- 3) Morris, D., Teyssedou, A., Lapiere, J. and Tapucu, A., 1987, "Optical fiber probe to measure local void fraction profiles," *Applied Optics*, Vol.26(21), p.4660.
- 4) Busciglio, A., Vella, G., Micale, G. and Rizzuti, L., 2008, "Analysis of the bubbling behaviour of 2D gas solid fluidized beds Part I. Digital image analysis technique," *Chemical Engineering Journal*, Vol.140, pp.398-413

- 5) Liu, L., Yan, H. and Zhao, G., 2015, "Experimental studies on the shape and motion of air bubbles in viscous Liquids," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.62, pp.109-121
- 6) Liu, Z. and Zheng, Y., 2006, "PIV study of bubble rising behavior," *Powder Technology*, Vol.168(1), pp.10~20
- 7) Sathe, M.J. Thaker, I.H., Strand and T.E., Joshi, J.B., 2010, "Advanced PIV/LIF and shadowgraphy system to visualize flow structure in two-phase bubbly flows," *Chemical Engineering Science*, Vol.65(8), pp.2431~2442
- 8) Prewitt, J.M.S., 1970, "Object enhancement and extraction," *Picture Processing and Psychopictorics*, B. Lipkin and A. Rosenfeld, Eds., New York: Academic Press, pp.75~149.
- 9) Soille, P., 2004, "Morphological Image Analysis", Springer Berlin Heidelberg.
- 10) Yin, J., Li, J., Li, H., Liu, W. and Wang, D., 2015, "Experimental study on the bubble generation characteristics for an venturi type bubble generator," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.91, pp.218-224.
- 11) Zheng, S., Yao, Y., Guo, F., Bi, R. and Li, J., 2010, "Local bubble size distribution, gas-liquid interfacial areas and gas holdups in an up-flow ejector," *Chemical Engineering Science*, Vol.65(18), pp.5264-5271.
- 12) Gordiychuk, A. Svanera, M., Benini, S. and Poesio, P., 2016, "Size distribution and Sauter mean diameter of micro bubbles for a Venturi type bubble generator," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.70, pp.51~60.
- 13) Nogami, S., Ogusu, T. and Shoji, M., 2001, *Nonlinear interaction between bubble generation and micro-convection*, University of Tokyo.
- 14) Zhang, L. and Shoji, M., 2001, "Aperiodic bubble formation from a submerged orifice," *Chemical Engineering Science*, Vol.56(18), pp.5371~5381.
- 15) Kumar, A., Degaleesan, T.E., Laddha, G.S. and Hoelscher, H.E., 1976, "Bubble Swarm Characteristics in Bubble Columns," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol.5, pp.503~508.
- 16) Tsuge, H., Rudin, P. and Kammel, R., 1986. "Bubble formation from a vertically downward facing nozzle in liquids and molten metals." *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 19(4), pp.326-330.
- 17) Al Ba'ba'a, H.B., Elgammal, T. & Amano, R.S., 2016, "Correlations of Bubble Diameter and Frequency for Air-Water System Based on Orifice Diameter and Flow Rate," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.138(11), pp.114501.
- 18) Akita, K. and Yoshida, F., 1974, "Bubble Size, Interfacial Area, and Liquid-Phase Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns," *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol.13(1), pp.84~91.
- 19) Moo-Young, M. and Blanch, H.W., 1981, "Design of biochemical reactors mass transfer criteria for simple and complex systems," In *Reactors and Reactions*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 1~69.
- 20) Bhavaraju, S.M., Mashelkar, R.A. and Blanch, H.W., 1978, "Bubble Motion and Mass Transfer Non-Newtonian Fluids: Part I. Single Bubble in Power Law and Bingham Fluids," *AIChE Journal*, Vol.24(6), pp.1063~1070.
- 21) Wilkinson, P.M., Haringa, H. and Van Dierendonck, L.L., 1994, "Mass transfer and bubble size in a bubble column under pressure," *Chemical Engineering Science*, Vol.49(9), pp.1417~1427.
- 22) Jamialahmadi, M., Zehtaban, M.R., Müller-Steinhagen, H. Sarrafi, A. and Smith, J.M., 2001, "Study of Bubble Formation Under Constant Flow Conditions," *Chemical Engineering Research and Design*, Vol.79(5), pp.523~532.
- 23) Azzopardi, B.J. and Hewitt, G.F., 1997, "Maximum Drop Sizes in Gas-Liquid Flows," *Multiphase Science and Technology*, Vol.9(2), pp.109~204.