

단일 카메라 입자영상유속계를 이용한 이상유동 기포율 측정방법

최동환* · 성재용** · 유정열†

On the Measurement Technique of Void Fraction by Single Camera Two Phase PIV

Dong Whan Choi, Jaeyong Sung and Jung Yul Yoo

Key Words : Void Fraction(기포율), Bubbly flow(기포 유동), Stereo-Matching Technique(스테레오 매칭 기법), Two Phase PIV(이상유동 입자영상유속계)

Abstract

A measurement technique for the void fraction and the bubble dynamics in gas-liquid two-phase flows has been proposed using a time-resolved two-phase PIV system. For the three-dimensional evaluation of the bubble information, both the images from the front and side views are simultaneously recorded into a high speed CCD camera by reflecting the side image into the front view with the help of a 45° oriented mirror. Then, a stereo-matching technique is applied to calculate the void fraction, bubble size and shape. To obtain the rising bubble velocities, the 2-frame PTV method was applied. Consequently, the present technique shows good feasibility for the measurements of the volume fractions, mean diameters, aspect ratios and velocities of the bubbles at the three-dimensional point of view.

	기호설명
x_b	: 기포의 X 좌표 성분
y_b	: 기포의 Y 좌표 성분
z_b	: 기포의 Z 좌표 성분
a	: 기포의 X 축 반경
b	: 기포의 Y 축 반경
c	: 기포의 Z 축 반경
V_b	: 기포의 부피
α	: 기포율
β	: 기포 면적율
χ	: 종횡비
d_{long}	: 기포의 장축 직경
d_{short}	: 기포의 단축 직경
d_{eq}	: 평균등가기포지름

u	: 기포의 x 방향 속도성분
v	: 기포의 y 방향 속도성분
w	: 기포의 z 방향 속도성분
V_{total}	: 기포의 전체 속도
V_{rise}	: 기포의 상승 속도 성분
$V_{horizontal}$: 기포의 수평 속도

1. 서론

화학, 생화학, 원자핵공학, 조선 해양 공학에 이르기 까지 많은 공학 분야에서 기포 유동은 발생하게 된다. 또한 액체와 기체의 이상유동은 특히 질량 전달 과정과 혼합 과정 속에서 발생하는 상승 기포의 국부적인 난류를 발생시키기 때문에 더욱 발생 빈도가 높다. 특히, 기포율은 열전달과 유동 소음 특성 때문에 매우 중요한 물리적 특성을 가지고 있다. 하지만 다상 유동은 매우 복잡하여 그 중요성에도 불구하고 해석하는 데 어려움이 따른다.

종래의 기포율을 측정 하는 기법으로는 크게 접촉식 측정 기법과 비 접촉식 기법이 있는데, 접촉식 측정 기법에는 액상과 기상 사이의 전기

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 서울산업대학교 기계공학과

† 서울대학교 기계항공공학부

E-mail: jyyoo@plaza.snu.ac.kr

TEL: (02) 880-7112 FAX: (02) 888-2968

저항 차이를 이용한 임피던스 프로브^(1, 2)와 초음파 도플러 측정기법⁽³⁾을 이용하였고, 비 접촉식 기법으로는 중성자 방사선 영상 기법⁽⁴⁾을 이용하여 순간적인 2 차원의 기포 유동을 측정할 수 있다. 하지만 이들 기법은 유동에 교란을 주거나 고가의 장비가 필요하였다.

이에 비해, 영상 처리 기법을 이용한 기포 유동 측정 방법⁽⁵⁾은 광학적 처리 과정을 통하여 별도의 속도 보정 필요 없이 계측할 수 있는 장점이 있다. 또한 스테레오 PTV (stereoscopic particle tracking velocimetry) 기법⁽⁶⁾을 통하여 이상유동의 3 차원 정보를 얻을 수도 있다. 평면 수직 거울을 이용하여 단일 카메라를 통한 정면과 측면의 영상에서 순간적인 3 차원 기포 유동을 측정 하는 기법⁽⁷⁾도 소개되었다. 3 차원 입자 영상 추적 기법⁽⁸⁾을 이용하여 입자와 액상의 이상유동을 연구하여 정면과 측면의 영상을 3 차원으로 조합할 수 있다.

본 연구에서는 단일 카메라를 이용하여 자유 상승하는 기포의 이상유동을 측정하는 기법⁽⁹⁾을 소개하고자 한다. 유량의 변화에 따른 기포율의 변화와 기포의 형상 및 크기를 측정⁽¹⁰⁾하고, 또한 3D PTV 기법⁽¹¹⁾을 통하여 기포의 속도를 영상 측정하여 결과를 비교해 보고자 한다.

2. 실험 장치

2.1 기포 발생기 및 액체 용적

정지에 있는 액체에 자유 상승하는 3 차원의 기포 유동을 구성하기 위해, Fig. 1 에서와 같이 9 개의 바늘을 이용하여 공기를 발생시켜 수직관에 주입하는 실험장치를 구성한다. 실험 장치의 수직관은 각각 60 mm 길이의 정사각형 단면적이고, 높이가 200 mm 이다. 수직 관에는 액체로 사용되는 물이 150 mm 의 높이까지 채워져 있고, 기체로 사용한 공기가 수직 관의 바닥에 7 mm 간격으로 총 9 개의 바늘을 통해 정지 액체에 투입된다. 바늘의 직경은 0.6 mm 이고, 25 mm 의 길이가 사용되었다. 기체의 유량은 시린지 펌프에 의해 0 에서 2,500 mm³/s 까지 조절하면서 실험하였다.

2.2 기체 측정 장치

기포의 영상을 획득하기 위해서 Fig. 2 에서와 같이 두 개의 광원과 두 개의 광학 필터가 사용되었다. 75 W 의 광원에서 나온 빛이 광학 필터를 거치면서 적색 광원만이 통과하고, 다시 디퓨저를 설치하여 균일한 조명을 측정용 단면에

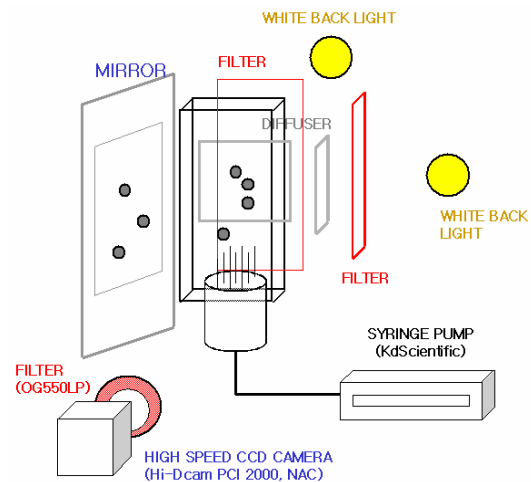


Fig. 1 A schematic of the experimental facilities

투과하였다. 따라서 수직관 내의 기포를 뒤에서 조명하여 기포의 그림자 영상을 만들어 내고, 이를 광학용 필터 (OG550LP)를 거쳐서 고속 CCD 카메라 (Hi-Dcam PCI 2000, NAC)에 저장되게 된다. 자유 상승하는 기포의 영상을 정확하게 획득하기 위해서 카메라의 셔터 속도를 초당 250 프레임으로 저장하였다.

단일 카메라로 3 차원의 기포 영상을 측정하기 위해서 평면 거울을 수직관 옆에 설치하였다. 가로 85 mm, 세로 200 mm 인 수직 평면 거울을 카메라의 평행선과 45° 각도로 세워서 측면의 영상을 반사해 준다. 따라서 단일의 고속 CCD 카메라에 정면과 측면을 동시에 측정할 수 있게 된다.

3. 측정 기법

3.1 영상 처리 기법

고속 CCD 카메라로 얻어진 영상은 PC 에 480 × 420 의 8 bit window BMP 파일로 저장된다. 뒤에

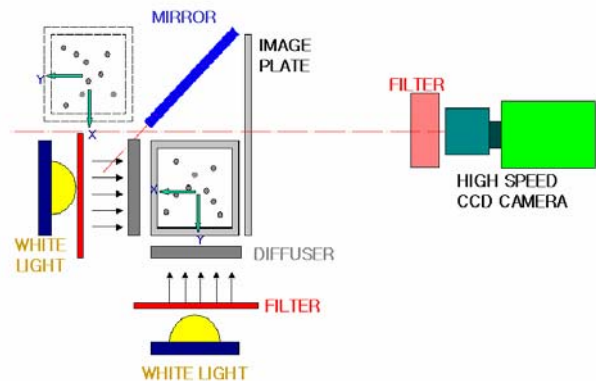


Fig. 2 Top view of the experimental set-up

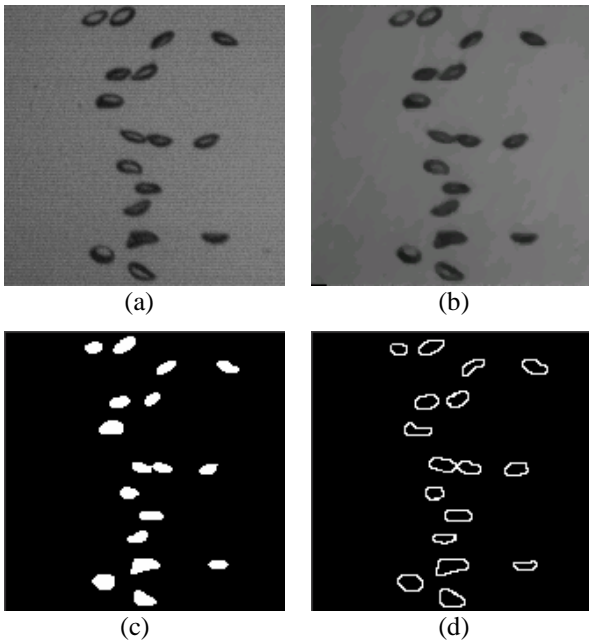


Fig. 3 Image processing step. (a) original image (b) median filter (c) dilation / erosion (d) edge detection

조명에 의한 영상의 배경과 기포의 명암 차이를 가지기 때문에 이를 이용하여 기포를 영상에서 분리하여 측정하게 된다. 영상 처리 과정을 Fig. 3에서 보여주고 있다. 최초의 영상에서 미디언 필터를 거치고 침식 연산과 팽창 연산 과정을 거쳐 기포의 이미지를 분리하여 기포와 배경과의 경계를 결정 짓게 된다.

3.2 기포의 체적 계산

자유 상승하는 기포 유동에서 3 차원의 기포 체적을 측정하기 위해 정면의 영상과 평면 수직 거울을 이용하여 반사된 측면의 영상을 조합하는 기법을 사용하였다. 우선 단일 카메라로 얻은 영상을 통해서 정면과 측면에서 기포의 도심과 기포의 크기를 구할 수 있다. 모형화한 기포의 예에서 도심크기와 좌표 성분을 Fig. 4에서 보여 주고 있다.

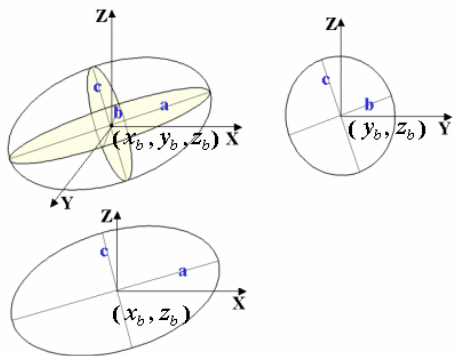


Fig. 4 A test bubble

기포율이 증가함에 따라 기포의 모양과 크기가 변하기 때문에 기포의 모양은 단축을 기준으로 측대칭이 되는 타원체로 가정하였다. 따라서 기포의 부피는 Fig. 5와 같이 스테레오 매칭 기법으로 결정할 수 있다. 수직 방향을 Z 축으로 하여 정면과 측면의 영상에서 얻은 기포는 동일한 좌표 z_b 와 반경 c 를 가지고 있다. 또한 정면과 측면의 영상은 각각 ZX와 YZ 평면을 구성할 수 있고, 이들 평면에서 기포의 좌표 x_b, y_b 와 기포의 반경 a 와 b 를 각각 구할 수 있다. 이를 이용하여 기포의 형상과 크기를 결정하고 기포의 부피(V_b)를 다음의 식과 같이 계산할 수 있다.

$$V_b = \frac{4}{3}\pi \times (a \cdot b \cdot c) \tag{1}$$

3.3 중첩되는 기포의 분리 기법

유량이 증가함에 따라 기포들이 중첩되는 현상이 발생하게 된다. 정면 혹은 측면 영상의 2차원에서는 이를 해결할 수 없으나 Fig. 5에서와 같이 평면 수직 거울을 이용한 3차원 측정에서는 동일한 수직 높이에 두 개 이상의 기포에 대하여 (a)에서 얻은 정면의 영상을 (b)에서 얻은 측면의 영상을 통해 중첩된 기포를 분리하여 3차원의 기포를 측정이 가능해진다.

3.4 기포의 속도 측정 기법

기포의 속도를 측정하기 위해서 기포를 타원체로 가정하여 구한 도심을 2-frame PTV (particle tracking velocimetry) 기법으로 기포의 수직관내 공간에 걸친 속도벡터의 3성분을 측정할 수 있다.

정면의 영상에서 얻은 속도 성분 u 와 w , 측면의 영상에서 얻은 속도 성분 v 와 w 에서 각각 동일한 수직 상승 속도 성분 w 에 대하여 u 와 v 를 조합하여 3차원의 기포 속도를 얻을 수 있다.

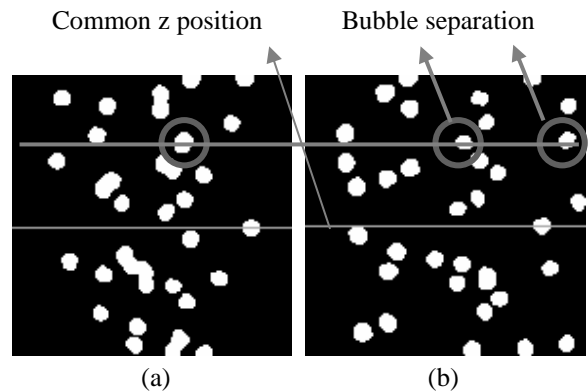


Fig. 5 Bubble matching technique. (a) front image (b) side image

4. 결과 및 고찰

4.1 기포율 측정 결과

유량의 증가에 따른 정면과 측면의 기포 면적을 스테레오 매칭 기법을 이용하여 Fig. 6 과 같이 나타내고 있다. 시험 면적내의 영상에서 얻어지는 기포들의 면적을 겹쳐지는 기포의 분리 기법을 통하여 기포의 부피를 계산하여 기포율을 Fig. 7 과 같이 계산하였다. 2 차원에서의 계산된 기포율과 3 차원에서의 기포율은 유량이 증가함에 따라 그 차이가 더욱 나는 것을 알 수 있고 따라서 2 차원에서의 기포율 계산은 한계가 있음을 보여준다. 하지만 유량이 증가함에 따라 겹쳐지는 기포가 많아 지므로 보다 더 고급 기술이 필요하다.

수직관 내에 유량이 증가함에 따른 3 차원 기포 율과 2 차원 기포 면적율(bubble shadow fraction)과 의 상관관계를 Fig. 8 과 같이 나타 내었다. 기포율 (α)과 기포 면적율(β)는 다음과 같이 정의된다.

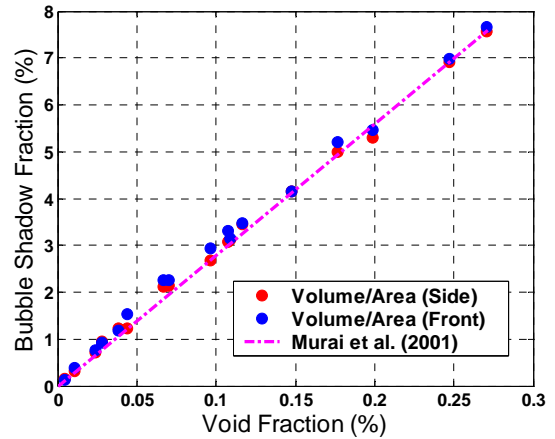


Fig. 8 Correlation of the bubble shadow fraction and volume fraction

$$\alpha = \frac{\text{기포 체적}}{\text{시험 체적}} \tag{2}$$

$$\beta = \frac{\text{기포 면적}}{\text{시험 면적}} \tag{3}$$

Murai⁽⁷⁾의 결과와 비교해 보면, 기포율이 증가함에 따라 기포 면적율도 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

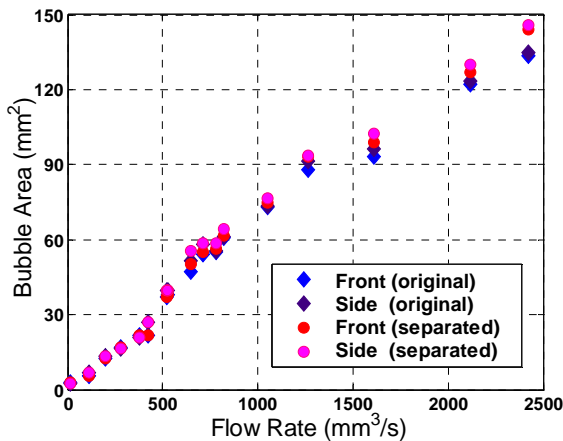


Fig. 6 Bubble areas of the original and separated bubble images

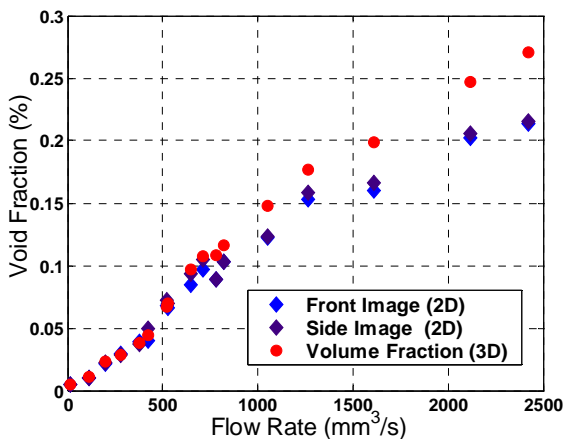


Fig. 7 Difference between the void fraction from 2D image and the 3D volume fraction

4.2 기포의 형상, 크기 및 속도

유량이 증가함에 따른 기포의 형상을 Fig. 9 에 서와 같이 나타내었다. 타원체로 가정한 기포의 길이 중에서 가장 짧은 길이(d_{short})를 가장 긴 길이(d_{long})로 나눈 종횡비($\chi = d_{short} / d_{long}$)로 계산한 결과, 유량이 증가함에 따라 종횡비가 1 에 가깝게 증가함을 알 수 있다. 이는 기포의 형상이 타원체에서 구에 가까워 지고 있음을 보여준다.

Zenit⁽¹⁰⁾의 정의에 따라 아래의 식과 같이 기포의 평균등가지름(d_{eq})을 구해 보면 Fig. 10 과 같은 결과를 얻을 수 있다.

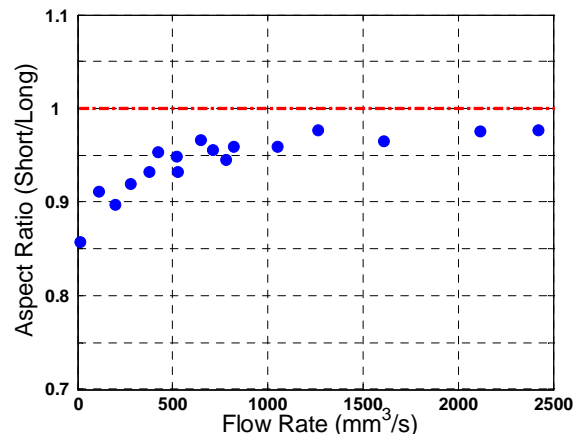


Fig. 9 Measurement of the bubble aspect ratio

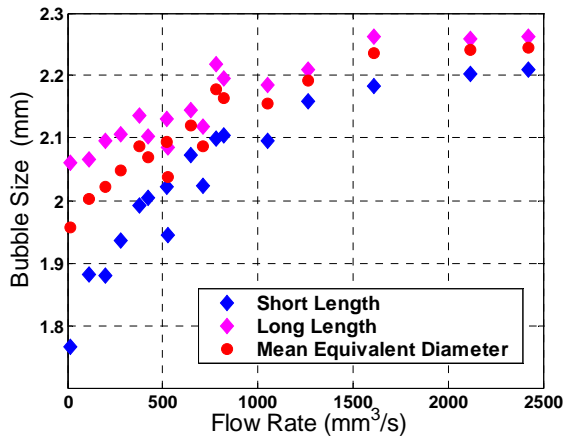


Fig. 10 Mean equivalent bubble diameter

$$d_{eq} = (d_{long}^2 d_{short})^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

유량이 증가함에 따라 기포의 가장 긴 길이와 가장 짧은 길이를 이용하여 구한 평균 등가 지름이 증가함을 알 수 있다.

유량의 증가에 따른 기포의 속도를 계산한 결과가 Fig. 11 에서와 같이 나타내었다. 타원체로 가정 한 기포의 도심의 이동을 2-frame PTV 기법을 이용하여 각각의 속도 성분 u, v, w 를 구할 수 있다.

기포의 속도 성분 중에서 상승속도(V_{rise})와 수평 속도($V_{horizontal}$), 그리고 전체속도(V_{total})는 각각 다음과 같이 정의한다.

$$V_{total} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (5)$$

$$V_{rise} = w \quad (6)$$

$$V_{horizontal} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (7)$$

기포의 수직성분 속도는 유량이 적은 경우에는 선형적으로 증가함을 보이다가, 유량이 계속 증가

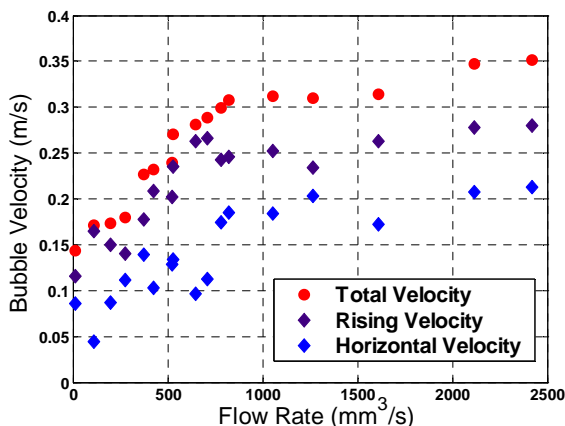


Fig. 11 The measurement of the bubble velocity

할수록 그 증가율이 점점 감소하는 경향을 보인다. 그에 반해 수평 속도는 유량의 증가에 따라 지속적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 기포의 좌우로 Zig-Zag 움직임이 활발해 짐을 보여준다. 또한 전체 속도도 유량의 증가에 따라 증가함을 확인할 수 있다.

5. 결론

자유 상승하는 기포 유동에 대하여 정면과 측면의 영상을 스테레오 매칭 기법으로 3 차원의 기포 율과 기포의 크기, 형상을 영상 처리 기법으로 측정할 수 있었다. 단일 카메라와 평면 수직 거울을 이용하여 정면과 측면의 영상을 동시에 측정하고, 측정된 영상 정보에서 동일한 수직 높이에 기포의 위치와 크기, 형상을 정확하게 획득하는 기법을 사용하였다.

유량이 증가하면서 기포가 많아지고 겹쳐지는 기포를 기포 분리 기법을 이용하여 기포율을 측정할 수 있었다. 그리고 3 차원 기포율과 2 차원 기포 면적율의 관계는 기포율이 증가함에 따라 기포 면적율은 선형적으로 증가함을 보여주었다. 또한 유량이 증가함에 따른 기포의 형상은 점점 구에 가까운 형태로 변화하였으며, 기포의 크기도 서서히 증가함을 알 수 있었다. 또한 기포의 속도 측정에서는 유량의 증가에 따라 기포의 수직 상승 속도와 수평 속도가 증가함을 보여주었지만, 수직 상승 속도의 증가율은 유량의 증가에 따라 서서히 감소함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Liu, T. J. and Bankoff, S. G., 1993, "Structure of Air-Water Bubbly Flow in a Vertical Pipe-I. Liquid Mean Velocity and Turbulence Measurements," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 4, pp. 1049~1060.
- (2) Liu, T. J. and Bankoff, S. G., 1993, "Structure of Air-Water Bubbly Flow in a Vertical Pipe-II. Void Fraction, Bubble Velocity and Bubble Size Distribution," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 4, pp. 1061~1072.
- (3) Murakawa, H., Kikura, H. and Aritomi, M., 2003, "Measurement of Liquid Turbulent Structure in Bubbly Flow at Low Void Fraction Using Ultrasonic Doppler Method," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 40, No. 9, pp. 644~654.
- (4) Matsubayashi, M. and Tsuruno, A., 1992, *Neutron Radiography*, Gordon and Breach Science Publishers, San Francisco, Vol. 4, pp. 415~422.
- (5) Murai, Y., Watanabe, S., Yamamoto, F. and

- Matsumoto, Y., 1997, "Three-Dimensional Measurement of Bubble Motions in Bubble Plume Using Stereo Image Processing," *Proceedings of the 2nd International Workshop on PIV'97*, Fukui, Japan, pp. 13~18.
- (6) Hassan, Y. A., Villafuerte, J. O. and Schmidl, W. D., 2001, "Three-Dimensional Measurements of Single Bubble Dynamics in a Small Diameter Pipe Using Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *International Journal of Multi Phase Flow*, Vol. 27, pp. 817~842.
- (7) Murai, Y., Matsumoto, Y. and Yamamoto, F., 2001, "Three-Dimensional Measurement of Void Fraction in a Bubble Plume Using Statistic Stereoscopic Image Processing," *Experiments in Fluids*, Vol. 30, pp. 11~21.
- (8) Pan, X. H., Luo, R., Yang, X. Y. and Yang, H. J., 2002, "Three-Dimensional Particle Image Tracking for Dilute Particle-Liquid Flow in a Pipe," *Measurement Science and Technology*, Vol. 13, pp. 1206~1216.
- (9) Choi, D. W., Sung, J. and Yoo, J. Y., 2004, "Time-Resolved Identification of Void Fraction by Single Camera Two-Phase PIV," *Proceedings of 11th International Symposium on Flow Visualization*, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana, USA, P92.
- (10) Zenit, R., Koch, D. L. and Sangani, A. S., 2001, "Measurements of the Average Properties of a Suspension of Bubbles Rising in a Vertical Channel," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 429, pp. 307~342.
- (11) Ishikawa, M., Qu, J. W., Murai, Y. and Yamamoto, F., 2003, "Bubble-Bubble Interaction in Free-Rising Bubbly Flows Using 3-D PTV," *Proceedings of 5th International Symposium on Particle Image Velocimetry*, Busan, Korea, P3113.