

상승하는 단일 버블 이상유동의 PIV 계측을 위한 영상분리기법

박상민* · 진송완* · 김원태* · 성재용** · 유정열†

Simple Image-Separation Method for Measuring Two-Phase Flow of Freely Rising Single Bubble

Sang-min Park · Song-wan Jin · Won-tae Kim · Jae-yong Sung · Jung-Yul Yoo

Abstract

A novel two-phase PIV algorithm using a single camera has been proposed, which introduces a method of image-separation into respective phase images, and is applied to freely rising single bubble. Gas bubble, tracer particle and background each have different gray intensity ranges on the same image frame when reflection and dispersion in the phase interface are intrinsically eliminated by optical filters and fluorescent material. Further, the signals of the two phases do not interfere with each other. Gas phase velocities are obtained from the separated bubble image by applying the two-frame PTV. On the other hand, liquid phase velocities are obtained from the tracer particle image by applying the cross-correlation algorithm. Moreover, in order to increase the SNR (signal-to-noise ratio) of the cross-correlation of tracer particle image, image enhancement is employed.

Key Words : Image-Separation Method(영상분리기법), PIV(입자영상유속계), Two-Phase Flow(이상유동), Median Filter(미디언 필터), Optical Filter(광학필터)

1. 서 론

화학공학, 생화학, 핵공학 등의 많은 공학분야에서 액체, 기체가 함께 존재하는 이상 유동장(two-phase flow)의 연구에 관한 필요성이 많이 제기되어 왔다. 이상 유동장에서 액체와 기체와의 상호작용은 유동현상에 큰 영향을 미치게 되며, 이러한 이유로 각 상의 순간속도 측정은 이상 유동장의 특성을 규명하는 데 매우 중요하다고 할 수 있다. 또한 이상 유동장의 유동 특성은 매우 복잡하며, 아직 완벽하게 규명되지 못하고 있어 이상 유동장에 대한 이해를 증진시키고, 수치적 모델의 검증을 위하여 각 상의 순간속도를 정량적

으로 측정하기 위한 더 많은 노력이 요구되고 있다.

지금까지 단상 유동장의 비정상 유동의 속도측정에 폭 넓게 적용되어 오던 PIV 기법은 순간 속도장을 측정할 수 있다는 점에서 이상 유동장의 속도측정에 가장 적합한 방법으로 고려될 수 있으나, 기체와 액체의 굴절률 차이로 인해 야기되는 레이저 빔의 분광과 각 상의 경계에서 발생하는 2 차 반사 등의 문제를 가지고 있다⁽¹⁾.

본 연구에서는 형광입자와 광학필터 등을 이용하여 한 개의 CCD 카메라로 각 상의 2 차원 속도를 측정할 수 있는 이상 유동 PIV 시스템을 제안하고자 하며, 미디언 필터(median filter), 팽창연산(dilation), 침식연산(erosion), 영상처리(image enhancement) 등을 이용하여 비교적 간단하게 각 상의 영상을 분리하는 기법에 대하여 토의한다. 마지막으로 이 기법으로 측정된 단일 버블의 후류 유동을 고찰하고자 한다.

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** LG 전자 디지털플라이언스(연)

† 서울대학교 기계항공공학부

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

2. 실험장치 및 영상획득

Fig. 1 은 본 연구에서 버블 유동을 발생시키기 위하여 사용된 실험장치를 보여주며, 가로 100 mm, 세로 3 mm, 높이 300 mm 아크릴로 제작하였다. 중앙 하단에 버블을 발생시키기 위하여 튜브를 설치하였고, syringe 펌프와 연결하여 기체의 유량을 조절하였다.

액체의 속도측정을 위하여 Rhodamine B로 코팅된 형광입자 (직경: 10 μm , 비중: 1.05 g/cm^3) 를 투입하였다. 이 입자들을 발광 시키기 위하여 488 nm, 514.5 nm 의 이중 파장을 갖는 5-W 아르곤이온 레이저(Stabilite 2017, Sepctra-Physics)를 광원으로 사용하였으며, 형광입자는 514.5 nm 의 빛에 의해 여기(excitation) 하여 555 ~ 585 nm 파장의 빛을 방출(emission) 한다. 고속 CCD 카메라 (Hi-Dcam PCI 2000, NAC) 전면에 설치된 필터는 광원의 빛을 제거하고 형광입자로부터 방출된 빛만을 통과시키므로 기체상의 가장자리에서 발생하는 분광과 반사현상이 CCD camera 의 영상에 영향을 주지 않는다.

또한 버블 영상을 획득하기 위하여 측정부 후면에 백색광과 필터를 설치하였으며, 그 사이에 분광판(diffusion plate)을 추가하여 균일한 조명이 이루어지도록 하였다. 후위조명에 의해 버블은 dark-shadow image 의 형태로 CCD 카메라에 기록된다. 즉, 버블 가장자리에서 발생하는 분광과 반사는 카메라 영상에 영향을 주지 않으며, 버블 크기와 형상을 명확히 측정할 수 있다. 결과적으로 형광입자와 버블은 동일한 영상 프레임에 저장되며, 그로부터 각 상의 영상을 분리해 낼 수 있다. 셔터의 노출시간이 길면 빠른 버블 유동에 의해 영상 흐려짐(image blurring)이 발생할 수 있으므로 본 연구에서는 CCD 카메라를 500 Hz 로 작동하였다.

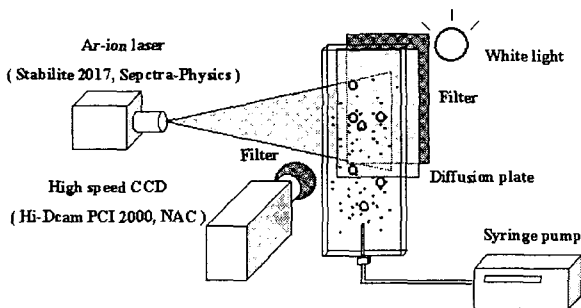


Fig. 1 Schematic of experimental set-up

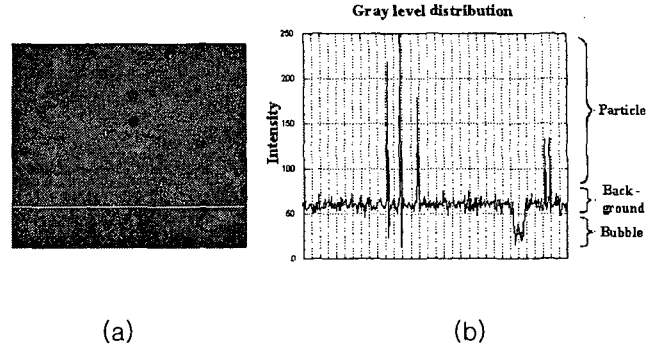


Fig. 2 (a) Two-phase PIV image and (b) the gray value distribution along the horizontal yellow line indicated in (a)

실험결과로 얻어진 영상은 8-비트 비트맵 파일로 저장되며, 320 × 280 픽셀의 해상도를 갖는다. Fig. 2 는 실험결과 얻어진 영상과 이로부터 얻어진 그레이 레벨 분포를 보여주고 있다. 입자, 배경, 버블이 서로 다른 밝기 분포를 가진다. 즉, 배경의 밝기는 50 ~ 70 정도의 값을 가지며, 입자는 더 밝은 값을, 버블은 더 어두운 값을 갖게 된다. 따라서, 하나의 카메라를 이용하여 기체, 액체를 모두 촬영할 수 있게 된다.

3. 영상 분리기법에 의한 PIV 계속

3.1 버블 속도 측정

최초의 영상으로부터 입자 영상을 제거하기 위하여 미디언 필터를 적용하였다. 미디언 필터는 영상처리분야에서 노이즈를 제거하기 위하여 사용되는데, 그 과정에서 영상 흐려짐 현상을 최소화하며, 입자영상과 같이 노이즈 패턴이 spiky 한 경우에 효과적이다⁽²⁾. 필터된 영상은 이진(binary) 영상으로 전환되는데, 문턱값(threshold value)은 그레이 레벨 히스토그램으로부터 얻어내었다. 그리고 후위조명에 의해 생성된 버블 중앙의 빛점(light spot)은 팽창연산(dilation)과 침식연산(erosion)을 반복하여 제거하였다.

최종적으로 이진화된 버블 영상으로부터 각각의 면적과 도심을 추출하였으며, two-frame PTV⁽³⁾를 이용하여 각 버블의 속도를 측정하였고, 추출된 면적으로부터 버블의 크기를 계산하였다.

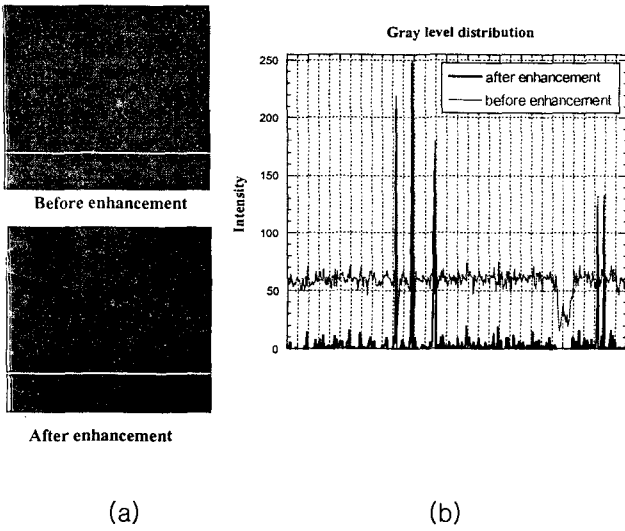


Fig. 3 (a) Two-phase PIV image and (b) the gray value distribution along the horizontal yellow line indicated in (a)

3.2 액체 속도 측정

PIV 를 단상 유동장에 적용하는 경우 영상에서 배경의 그레이 레벨은 0 에 접근하게 된다. 그러나 본 연구에서는 후위조명으로 인하여 배경의 그레이 값이 50 ~ 70 정도로 높은 값을 갖게 된다. 따라서 SNR 이 낮아지고 결과적으로 에러 벡터가 생길 가능성이 높아지게 된다. 이를 방지하기 위하여 아래의 식과 같은 영상처리(image enhancement) 과정을 거치게 된다.

$$I_{enhance} = (I_{original} - I_{cutoff}) \times \frac{255}{(255 - I_{cutoff})} \quad \text{if } I_{original} \geq I_{cutoff} \quad (1)$$

$$I_{enhance} = 0 \quad \text{if } I_{original} < I_{cutoff}$$

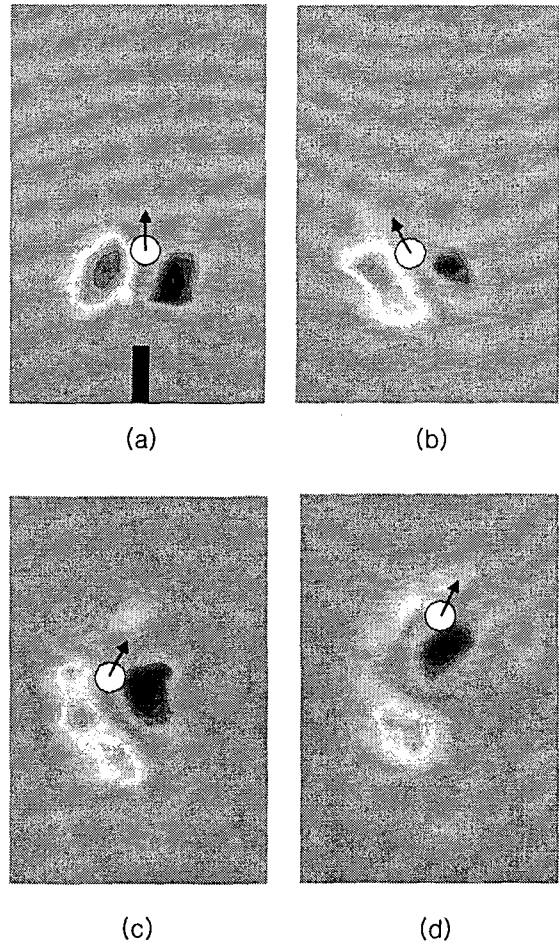
여기서 I_{cutoff} 는 그레이 레벨 히스토그램으로부터 구해지며, 각각의 영상에 대하여 다르게 적용하였다.

Fig.3 에서 I_{cutoff} 는 60 이며, 영상처리과정을 거친 후 배경의 그레이 레벨은 0 에 접근하고, 배경보다 낮은 그레이 레벨을 갖는 버블 영역은 0 값을 갖게 된다. 즉, 영상처리과정을 거치면서 영상의 질적 향상과 버블 영상 제거가 동시에 수행된다. 영상처리를 거친 후 속도 벡터를 구하기 위하여 Cross-correlation PIV 기법을 적용하였다.

4. 자유 상승하는 단일 버블 유동에의 응용

자유 상승하는 버블은 rocking, zig-zagging, spiraling motion 등이 혼합되어 있으며, 그에 따른 후류도 매우 복잡한 3 차원 형상을 지닌다. 또한 zig-zagging motion 은 후류에 생성되는 와류 구조와 연관되어 있다고 알려져 있다⁽⁴⁻⁵⁾. 본 연구에서는 자유 상승하는 단일 버블의 거동을 2 차원으로 단순화 하기 위하여 측정부의 두께를 버블의 직경과 거의 같은 3 mm 로 제작하여 버블의 거동이 2 차원 평면에서 일어나도록 하였다.

Fig. 4(a) 는 버블이 break-up 된 직후 수직 상승 하는 거동을 잘 보여주고 있으며 주변의 와류 구조가 서로 대칭을 이룬다. 그러나 곧바로 와류 구조의 대칭이 깨어지면서 zig-zagging motion 이 시작되며 (Fig. 4(b)), 이는 와쇄딩을 발생시켜 (Fig. 4(c), 4(d)), 결국 활발한 zig-zagging motion 으로 이어지게 된다(Fig. 4(e), 4(f)).



이 논문은 2002년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- 1) Broder, D. and Sommerfeld, M., 2001, "Experimental Studies of the Hydrodynamics in a Bubble Column by an Imaging PIV/PTV-System," 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry, pp. P1089. 1~12.
- 2) Gonzalez, R. C. and Wintz, P., 1993, "Digital Image Processing," Addison-Wesley, USA.
- 3) Baek, S. J. and Lee, S. J., 1996, "A New Two-Frame Particle Tracking Algorithm Using Match Probability," Experiments in Fluids, Vol. 22(1), pp. 23~32.
- 4) Brucker, C., 1999, "Structure and Dynamics of the Wake of Bubbles and Its Relevance for Bubble Interaction," Physics of Fluids, Vol. 11(7), pp. 1781~1796.
- 5) Fan, L. S. and Tsuchiya, K., 1990, "Bubble Wake Dynamics in Liquids and Liquid-Solid Suspensions," Butterworth-Heinemann, Boston, pp. 17~69.

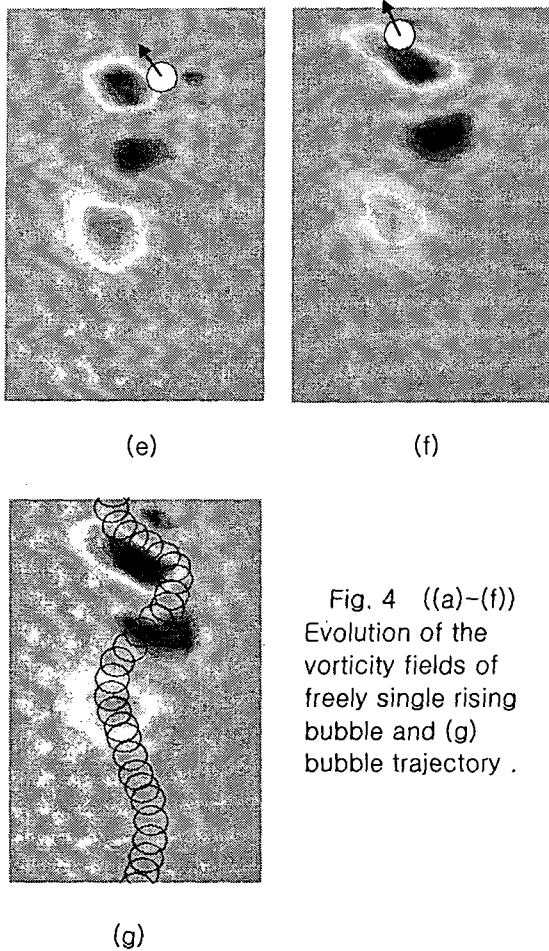


Fig. 4 ((a)-(f)) Evolution of the vorticity fields of freely single rising bubble and (g) bubble trajectory .

Fig. 4 (g) 에 나타난 버블 운동 궤적으로부터 이상의 과정을 명확하게 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 PIV 기법에 광학 필터, 형광입자, 후위 조명 방식 등을 채용하여 하나의 카메라로 이상 유동장에서 각 상의 속도를 2 차원적으로 측정할 수 있는 시스템을 구축하였다.

최초 영상으로부터 입자 영상을 제거하기 위하여 미디언 필터를 적용하였으며, 버블 중심의 빛 점은 팽창연산과 침식연산을 반복하여 간단하게 제거할 수 있었다. 또한 식(1)에 나타난 영상처리 과정을 통해 영상의 질적향상과 버블 영상 제거를 동시에 수행하였다.

이를 이용하여 2 차원 평면에서 자유 상승하는 단일 버블과 후류의 와도 분포를 측정하였으며, 버블 zig-zagging motion 과 와류 구조가 연관되어 있음을 확인 하였다.