

단일 카메라의 영상분리를 이용한 자유 상승 기포의 고속 이상 유동 PIV 계측

성재용* · 박상민** · 유정열†

Time-Resolved Two-Phase PIV Measurements of Freely Rising Bubble Flows with an Image Separation Method

Jaeyong Sung, Sang Min Park and Jung Yul Yoo

Abstract. A time-resolved two-phase PIV system using a single camera has been developed, 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 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 particles. 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 PIV. On the other hand, liquid phase velocities are obtained from the tracer particle image by applying the cross-correlation algorithm. As a result, the bubble rises rectilinearly just after it is released from an injector and then has a zigzag motion in the far field. From the trajectory of the bubble, it is found that the period of the zigzag motion is closely related to the vortex shedding although the wavelength of it varies along its movement.

Key Words : Time-Resolved Two-Phase PIV(고속 이상유동 PIV), Image Separation Method(영상분리 기법), Bubble Flow(기포 유동), Fluorescent Particles(형광입자), Optical Filter(광학필터)

1. 서 론

화학공학, 생화학, 핵공학 등의 많은 공학분야에서 액체, 기체가 함께 존재하는 이상유동장(two-phase flow)은 흔히 볼 수 있으며, 이상유동장에서 액체와 기체와의 상호작용은 유동현상에 큰 영향을 미치게 된다. 그럼에도 불구하고 이상유동을 연구하는 연구자들에게 있어서 각 상의 속도장을 동시에 측정하는 방법의 부재로 말미암아 이상유동장의 중요한 특성인 기체-액체 상호작용 등을 규명하는 데 많은 어려움을 겪어 왔다. 따라서 이상유동장에 대한 이해를 증진시키고, 수치적 모델의 검증을 위하여 각 상의 순간속도를 정량적으로 측정할 수 있는 기법을 개발하는 것

은 매우 중요한 일이다.

지금까지 단상 유동장에서 비정상 유동의 속도측정에 폭 넓게 적용되어 오던 PIV 기법은 순간 속도장을 측정할 수 있다는 점에서 이상유동장의 속도측정에 가장 적합한 방법으로 고려될 수 있으나, Fig. 1과 같이 기체와 액체의 굴절률 차이로 인해 야기되는 레이저 빔의 분광과 각 상의 경계에서 발생하는 2차 반사 등의 문제를 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Brorder와 Somerfeld⁽¹⁾는 형광입자를 액체에 주입하고 카메라 렌즈 앞에 광학필터를 설치함으로써 기포에 의한 레이저의 난반사를 제거하였다. Hassan⁽²⁾, Gui 등⁽³⁾은 배경조명으로 적색 계열의 LED를 조사하고 광학필터를 카메라에 부착하는 방식의 Shadow PIV기법을 제시하였다. 한편, 기체-액체 이상유동에서 각 상의 속도장을 구하기 위해서는 각 상의 영상을 분리 획득하여야 하는데, Brorder와 Somerfeld⁽¹⁾, Hassan⁽²⁾은 두 대 이상의 카메라를 사용

†서울대학교 기계항공공학부
*서울산업대학교 기계공학과
**현대중공업
E-mail : jyyoo@snu.ac.kr

하여 한 대의 카메라에는 액상의 입자영상을 저장하고 나머지 카메라는 기상의 기포 영상을 분리 저장하는 기법을 채택하였다. 그러나 이들의 기법은 고가의 카메라를 여러 대 사용한다는 단점과 두 카메라의 광학적 배치를 정밀하게 조절하여야 한다는데 어려움이 있다. 이에 반하여 최근 기포영상과 입자영상을 한 대의 카메라에 동시에 기록한 후, 영상처리 알고리즘에 의해 두 영상을 분리하는 기법이 소개되었다. Lindken과 Merzkirch⁽⁴⁾는 입자와 기포의 크기가 서로 다르다는 점에 착안하여 영상분리를 위한 디지털 마스크(digital mask) 기법을 제안하였고, 입자의 변위를 추적하기 위하여 MQD(minimum quadratic difference) 기법을 사용하였다. Delnoji 등⁽⁵⁾은 획득한 영상에서 직접 두 상을 분리하지 않고 상호상관 계수의 앙상블 평균을 통하여 액상과 기상의 속도를 구분하였는데, 이는 두 상의 속도가 서로 다르기 때문에 상관계수에서 두 개의 최고점(peak)이 나타난다는 사실을 이용한 것이다. 그러나 이 방법은 두 상의 미끄럼속도(slip velocity)가 작을 경우 최고점이 중첩되어 적용하기

어려운 한계점을 지닌다.

기체-액체로 이루어진 이상유동은 기포의 빠르고 비정상적인 운동으로 인하여 두 상의 상호작용을 엄밀하게 규명하기 위해서는 고속 측정에 기반한 이상유동 계측기법이 요구된다. 따라서, 본 연구의 목적은 고속 이상유동 PIV(time-resolved two-phase PIV) 기법의 개발에 있으며, 정지된 액체에서 수직 상승하는 단일 기포의 운동과 그로 인해 발생하는 와류유동에 적용하고자 한다. 하드웨어를 간소화 함으로써 측정을 용이하게 하도록 단일 고속 카메라에 의한 영상데이터 획득을 시도하고, Lindken과 Merzkirch⁽⁴⁾이 제안한 방법과 유사하게 형광입자와 광학필터 그리고 배경조명을 활용하여 두 상의 경계에서 발생하는 2차 반사 문제를 해결한다. 각 상의 영상은 메디안 필터(median filter), 팽창연산(dilation), 침식연산(erosion), 영상처리(image enhancement) 등을 이용하여 소프트웨어에 의해 비교적 간단하게 분리하여 각 상의 속도를 추출하는 기법을 논의한다. 그리고 이 기법으로 측정된 단일 기포의 후류 유동을 고찰하고자 한다.

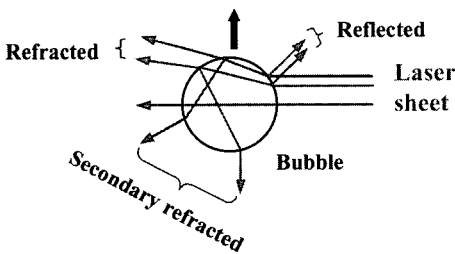


Fig. 1. Fundamental problem of the two-phase PIV: serious reflection and dispersion occur at the phase boundary due to refractive index difference.

2. 실험장치 및 영상획득

Fig. 2는 본 연구에서 기포 유동을 발생시키기 위하여 사용된 실험장치를 보여주며, 가로 100 mm, 세로 3 mm, 높이 300 mm 아크릴로 제작하였다. 중앙 하단에 기포를 발생시키기 위하여 주사 바늘을 설치하였고, 시린지 펌프와 연결하여 기체의 유량을 조절하였다. 시험부를 얇은 슬릿으로 만든 이유는 본 연구에서 개발하는 시스템이 2차원이므로 기포의 운동을 2차원으로 한정하기 위한 것이다. 주입된 기포의

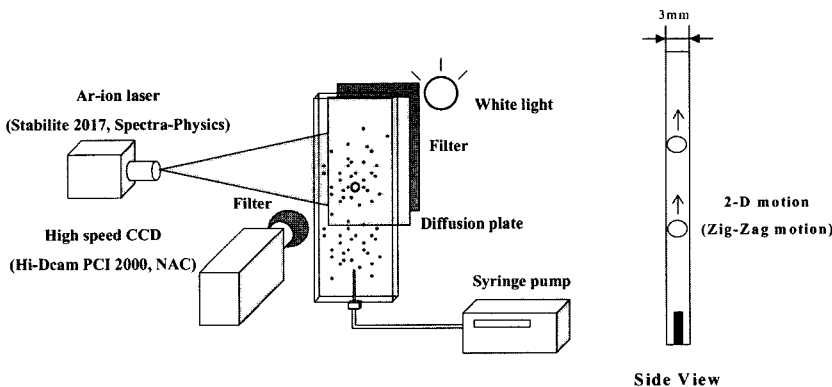


Fig. 2. Schematic of experimental set-up with flat test-section.

평균직경이 약 2.2 mm로서 일반적인 기포 운동에서 나타나는 3차원 운동을 배제하였다.

액체의 속도측정을 위하여 Rhodamine B로 코팅된 형광입자 (직경: 10 μm , 비중: 1.05 g/cm^3)를 유동장에 주입하였다. 이 입자들을 발광 시키기 위하여 514.5 nm 의 파장을 갖는 5-W 아르곤이온 레이저 (Stabilite 2017, Sepctra-Physics)를 광원으로 사용하였으며, 형광입자는 514.5 nm의 빛에 의해 여기 (excitation) 되어 555~585 nm 파장의 빛을 방출 (emission) 한다. 이 때 방출되는 빛은 565 nm에서 에너지가 가장 크다. 480 \times 420 해상도의 고속CCD 카메라 (Hi-Dcam PCI 2000, NAC) 전면에 설치된 오렌지색 필터(OG 550LP)는 레이저 광원의 빛을 차단하고 형광입자로부터 방출된 빛만을 통과시키므로 기체상의 가장자리에서 발생하는 분광과 반사현상이 CCD 카메라의 영상에 영향을 주지 않는다. 또한 기포 영상을 획득하기 위하여 측정부 후면에 백색광과 오렌지색 필터를 설치하였으며, 그 사이에 분광판(diffusion plate)을 추가하여 균일한 조명이 이루어지도록 하였다. 후위조명에 의해 기포는 어두운 그림자 영상(dark-shadow image)의 형태로 CCD 카메라에 기록된다. 따라서, 기포 가장자리에서 발생하는 분광과 반사는 카메라 영상에 영향을 주지 않으며, 기포 크기와 형상을 명확히 측정할 수 있다.

이상의 기법으로 형광입자와 기포는 동일한 영상 프레임에 저장되며, 이로부터 각 상의 영상을 영상분리 알고리즘을 이용해 분리해 낼 수 있다. 고속 카메라는 500 Hz의 속도로 영상을 획득하도록 설정하였으며, 획득된 영상은 320 \times 280 픽셀의 해상도를 갖는 8-비트 비트맵 파일로 저장된다. Fig. 3은 실험결과 얻어진 영상과 이로부터 얻어진 그레이 레벨 분포를 보여주고 있다. 여기서 입자, 배경, 기포가 서로 다른 밝기 분포를 가진다. 즉, 배경의 밝기는 50~70 정도의 값을 가지며, 입자는 이 보다 더 밝은 값을, 기포는 더 어두운 값을 갖게 된다. 따라서, 하나의 카메라를 이용하여 기체, 액체 영상을 모두 촬영할 수 있게 된다.

3. 영상분리 알고리즘

기포와 입자로 이루어진 영상으로부터 각각을 분리하기 위한 과정이 Fig. 4에 잘 나타나 있다. 첫번째 단계로서 최초의 영상(Fig. 4(a))으로부터 입자 영상을 제거하기 위하여 메디안 필터(median filter)를 적용

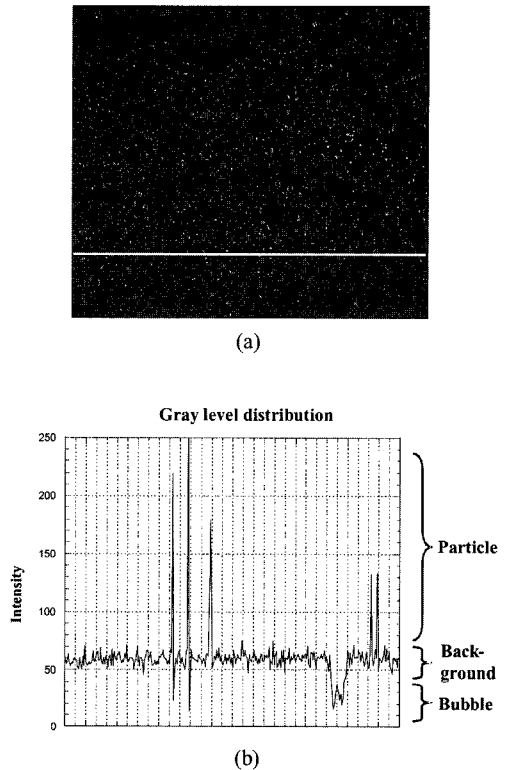


Fig. 3. (a) Two-phase PIV image and (b) the gray value distribution along the horizontal yellow line indicated in (a).

하였다. 메디안 필터는 영상처리분야에서 노이즈를 제거하기 위하여 사용되는데, 그 과정에서 영상 흐려짐 현상을 최소화하며, 입자영상과 같이 노이즈 패턴이 짧은 길이에 급격히 변하는 경우에 효과적이다⁽⁶⁾. 메디안 필터는 모든 픽셀에 대하여 주위 픽셀의 그레이 값을 평균하여 대체하는 것으로 Lindken과 Merzkirch⁽⁴⁾, Gui 등⁽³⁾이 사용한 바가 있다. Fig. 4(b)의 필터된 영상은 이를 통해 입자 정보가 제거되었음을 확인할 수 있다. 입자의 도심을 정확히 측정하기 위해서는 Fig. 4(c)와 같이 이진화된 영상(binazed image)으로 전환하여야 하며, 이 때 기포와 배경을 구분하기 위한 문턱값(threshold value)은 그레이 레벨 히스토그램으로부터 얻어내었다. 이진화된 영상은 후위조명에 의해 생성된 기포 중앙의 빛점(light spot)이 생길 수 있으며, 이를 제거하기 위하여 Fig. 4(d)의 팽창연산(dilation)과 Fig. 4(e)의 침식연산(erosion)을 반복하여 적용하였다. 팽창연산은 기포의 경계를 1 픽셀씩 바깥으로 증가시키는 역할을 하므로 기포 내

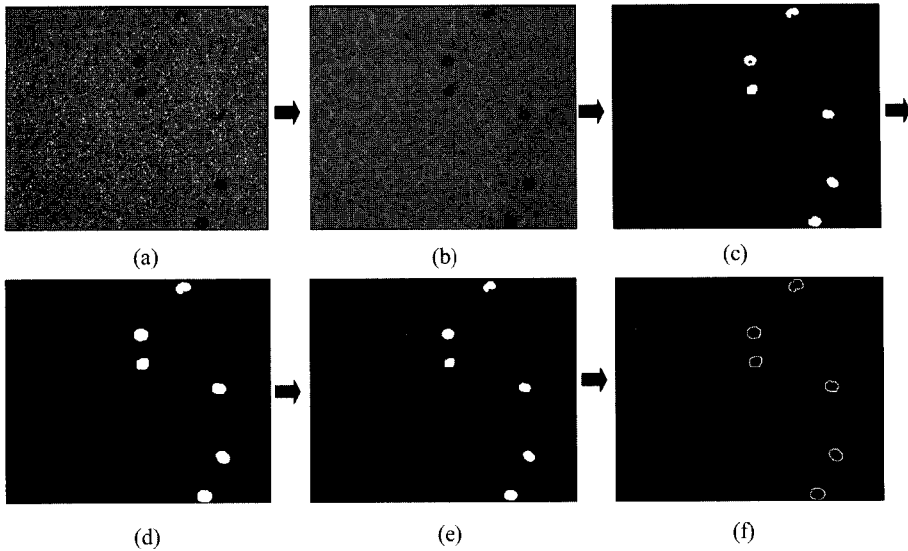


Fig. 4. Pre-processing of an image to calculate bubble velocity: (a) original image, (b) bubble image after median-filtering, (c) binarization, (d) dilation process, (e) erosion process, and (f) bubble edge image.

부에 있는 빛점은 사라지게 된다. 확대된 기포의 경계는 다시 침식연산을 수행함으로써 원래 크기대로 복원된다. 팽창-침식 연산은 내부의 빛점이 완전히 사라질 때까지 반복 적용되며, Fig. 4(e)와 같이 최종적으로 이진화된 기포 영상으로부터 Fig. 4(f)와 같은 기포의 경계를 찾아 도심을 추출하게 된다. 도심이 구해지면 기포는 그 밀도가 상대적으로 낮기 때문에 2-프레임(two-frame) PTV⁽⁷⁾를 이용하여 각 기포의 속도를 계산하였다. 이상의 방법을 사용하여 기포 경계로 둘러싸인 면적을 구하면 기포의 크기도 계산이 가능하다. 도심 추출의 정확성을 테스트하기 위하여 일본 가시화학회(VSJ)에서 제공하는 표준영상(standard image)로부터 도심을 구하여 참값과 비교하였다. 그 결과 도심의 rms 위치 오차가 x, y 방향으로 각각 0.23, 0.32 픽셀 이내가 됨을 확인하였다.

한편, 액상의 속도장을 구하기 위해서는 획득된 영상으로부터 기포의 정보를 제거하여야 한다. PIV 알고리즘을 일반적인 단상 유동장에 적용하는 경우 영상에서 배경의 그레이 레벨은 0에 접근하게 된다. 그러나 본 연구에서는 기포 영상을 위한 후위조명으로 인하여 배경의 그레이 값이 50~70 정도로 높은 값을 갖게 된다. 따라서 신호대잡음비(SNR)가 낮아지고 결과적으로 에러 백터가 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 $I_{original}$ 은 최초영상의 그레이 값을 나타내고, $I_{enhance}$ 는 영상처리 후 그레이 값을 나타낸다. I_{cutoff} 는 그레이 레벨 히스토그램으로부터 구해지며, 각각의 영상에 대하여 다르게 적용하였다.

본 연구에서는 I_{cutoff} 를 60으로 설정하였으며, 영상처리과정을 거친 후 배경의 그레이 레벨은 0에 접근하고, 배경보다 낮은 그레이 레벨을 갖는 기포 영역은 0 값을 갖게 된다. 즉, 영상처리과정을 거치면서 영상의 질적 향상과 기포 영상 제거가 동시에 수행된다. 기포 영상에 비하여 액상의 속도를 나타내는 입자영상은 그 밀도가 상대적으로 높기 때문에 이상의 영상처리를 거친 후 FFT 상호상관(cross-correlation) PIV 기법⁽⁸⁾을 적용하여 속도장 추출하였다. Fig. 5는 각 상에 대한 속도장 계산 후 이를 합성한 최종적인 이상유동 PIV 측정결과의 예를 보여준다.

4. 상승하는 단일 기포 유동의 응용

자유 상승하는 기포는 rocking, zigzagging, spiraling motion 등이 혼합되어 있으며, 그에 따른 후류도

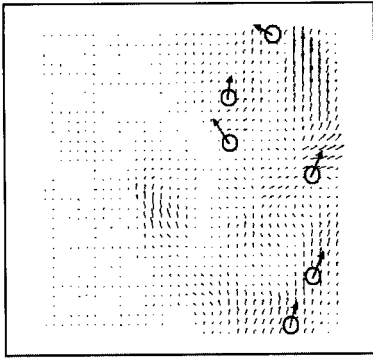


Fig. 5. Simultaneous measurement of liquid and bubble phase velocities.

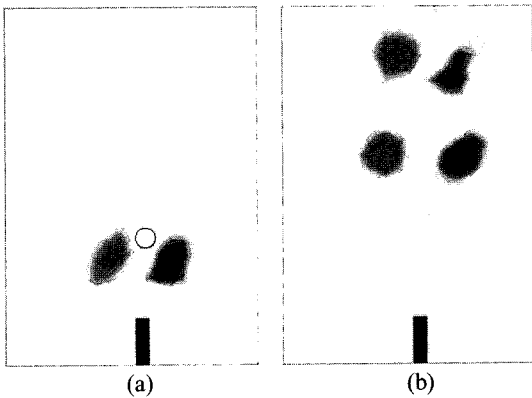


Fig. 6. Vorticity fields near the injector (a) just after a single bubble is released and (b) after the bubble has passed the field of view. The bubble rises rectilinearly and induces symmetric vorticity fields.

매우 복잡한 3차원 형상을 지닌다. 또한 zig-zagging motion은 후류에 생성되는 와류 구조와 연관되어 있다고 알려져 있다⁽⁹⁻¹⁰⁾. 본 연구에서는 자유 상승하는 단일 기포의 거동을 2차원적으로 단순화 하기 위하여 측정부의 두께를 기포의 직경과 거의 같은 3 mm로 제작하여 기포의 거동이 2차원 평면에서 일어나도록 하였다. 무한공간에서 기포의 운동은 3차원이나 본 연구는 2차원 고속 이상유동 PIV 측정 기법을 개발하고 이를 통한 기체-액체 상의 상호작용에 대한 연구의 정당성을 확인하고자 하였다. 추후 3차원 기포 운동의 측정과 3차원 PIV기법이 결합된다면 일반적인 기체-액체 이상유동에 대한 포괄적인 접근이 가능하다. 마이크로 채널에서의 이상 유동과 같이 실제 문제에서 기포의 운동이 2차원으로 제한되는 경우도 종종 발생하며, 본 연구에서 개발한 고속 이상유동 계

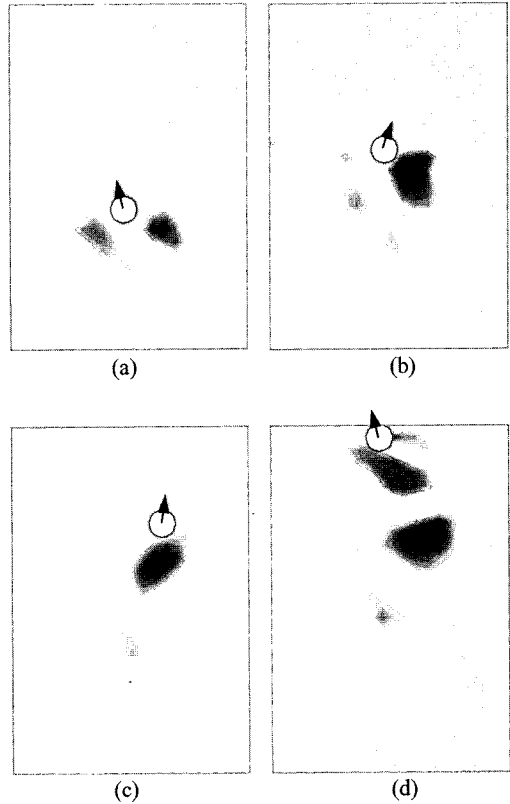


Fig. 7. Evolution of the vorticity fields far from the injector of a freely rising single bubble.

측기법은 이러한 문제에 직접 응용할 수 있다는데도 그 의의가 있다.

Fig. 6에서는 기포가 인젝터에서 분사된 직후와 측정영역을 벗어난 이후의 액상의 와 구조를 보여주고 있다. 인젝터에서 분사된 기포의 초기 운동은 그림에서 보는 바와 같이 직선운동을 하고 있으며, 기포 주위에서 발생하는 와류는 정지된 구 주위에서 발생하는 대칭적 와 유출과 같이 Galilean 상사성을 지닐 수 있다. 인젝터에서 분사된 직후 기포는 항력보다 부력의 힘이 크게 작용하므로 점점 가속되어 최종적으로 두 힘이 균형을 이루면 종단속도(terminal velocity)에 이르게 된다.

Fig. 7에서는 인젝터에서 멀리 떨어진 부분에서의 기체-액체 상호작용을 시간의 변화에 따라 고찰하였다. 이 영역에서 기포의 운동은 수직 직선운동을 하지 않고 후류의 와 유출과 함께 지그재그 운동을 하고 있는데, 그 이유는 주기적인 와 유출로 인한 좌우 방향의 힘을 받으면서도 이에 저항할 반발력을 가지

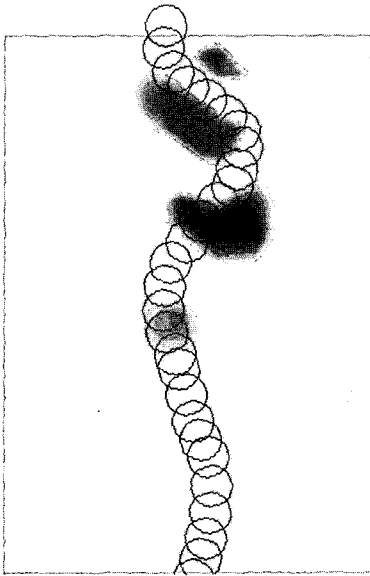


Fig. 8. Trajectory of a freely rising single bubble.

지 못하기 때문이다. 이러한 지그재그 운동을 정량화하기 위하여 Fig. 8에서는 그 궤적을 표시하였다. 본 연구는 이상유동에 대한 고속 PIV 계속이므로 기포 운동에 대한 세부적인 고찰이 가능하며, Fig. 8의 결과는 기포 운동에 있어 방향의 전환이 와 유출과 동기화 되어 있음을 확인할 수 있다. 즉, 와 유출이 끝남과 동시에 기포는 방향을 바꾸게 되며, 지그재그 운동의 주기는 와 유출의 주기와 일치하게 된다. 이 그림에서 기포가 상승하면서 지그재그 운동의 수직방향 파장이 감소함을 볼 수 있는데, 이는 기포에서 발생하는 와 유출의 강도가 증가하는 것과 밀접한 관련이 있다. 와의 강도가 클수록 기포가 받는 수평방향 힘이 증가하고 그에 따른 항력이 증가하여 기포의 수직방향 속도는 감소한다. 기포 운동과 유동의 불안정성에 대한 엄밀한 연구를 위해서는 압력분포에 대한 측정도 동시에 이루어져야 하며, 비록 본 연구가 기체-액체 상호작용에 대한 가시화에 초점을 두었지만 두 상의 동적거동 해석을 위한 기초자료를 제공한다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 PIV 기법에 광학 필터, 형광 입자, 후위 조명 방식 등을 채용하여 하나의 카메라로 이상 유동장에서 각 상의 속도를 2차원적으로 측정할 수 있는 고속 이상유동 PIV 시스템을 구축하였

다. 최초 영상으로부터 입자 영상을 제거하기 위하여 메디안 필터를 적용하였으며, 기포 중심의 빛점은 팽창연산과 침식연산을 반복하여 간단하게 제거할 수 있었다. 최종적으로 얻어진 양질의 기포 영상으로부터 2-프레임 PTV를 적용하여 기포의 속도장을 구하였으며, 액상의 속도장은 간단한 영상처리를 통해 입자영상을 추출한 후 상호상관 PIV 알고리즘으로 구하였다.

개발된 고속 이상유동 PIV 기법을 2차원 평면에서 자유 상승하는 단일 기포 유동에 적용하여 기포와 후류의 상호작용에 대하여 고찰하였다. 그 결과 인젝터에서 분사된 초기 기포는 대칭적 와 유출과 함께 직선적으로 상승하다가 와 유출에 의한 수평방향힘이 증가하면서 지그재그 운동을 함을 볼 수 있었다. 이러한 지그재그 운동 주기는 와 유출과 동기화되어 일어나며, 위로 상승할수록 와의 강도가 커지고 지그재그 운동의 파장이 짧아짐을 확인하였다.

후 기

이 논문은 서울대학교 마이크로열시스템 연구센터의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Broder, D. and Sommerfeld, M., 2001, "Experimental Studies of the Hydrodynamics in a Bubble Column by an Imaging PIV/PTV-System," Proc. 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry, pp. P1089. 1-12.
- 2) Hassan Y., 2002, "PIV Measurements and Analysis of Mutiphase Bubbly Flows," Proc. 10th International Symposium on Flow Visualization, F0455.1-9.
- 3) Gui, L., Lindken, L. and Merzkirch, W., 1997, "Phase-Separated PIV Measurements of the Flow Around Systems of Bubbles Rising in Water," ASME-FEDSM97-3103.
- 4) Lindken, R. and Merzkirch, W., 2002, "A Novel PIV Technique for Measurements in Multiphase Flows and Its Application to Two-Phase Bubbly Flows," Exp. Fluids, Vol. 33, pp.814-825.
- 5) Delnoij, E., Westerweel, J., Deen, N.G., Kuipers, J. A.M. and van Swaaij, W.P.M., 1999, "Ensemble Correlation PIV Applied to Bubble Plumes Rising in a Bubble Column," Chem. Eng. Sci., Vol. 54, pp.

- 5159-5171.
- 6) Gonzalez, R.C. and Wintz, P., 1993, Digital Image Processing, Addison-Wesley, USA.
 - 7) 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.
 - 8) Sung, J. and Yoo, J.Y., 2001, "Three-Dimensional Phase Averaging of Time-Resolved PIV Measurement Data," Meas. Sci. Technol., Vol. 12, pp.655-662.
 - 9) 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.
 - 10) Fan, L.S. and Tsuchiya, K., 1990, Bubble Wake Dynamics in Liquids and Liquid-Solid Suspensions, Butterworth-Heinemann, Boston, pp.17-69.