PIV 기법과 Digital Mask 기법을 적용한 버블유동 측정

김상문† · 김현동* · 김경천**

The Measurement of Bubble Driven Flow Using PIV and Digital Mask Technique

Sang Moon Kim, Hyun Dong Kim and Kyung Chun Kim

Key Words : Bubble-driven flow(버블유동), Digital mask technique(디지털 마스크 기법), Particle image velocimetry(입자영상유속계)

Abstract

An experiment on bubble-driven flow was performed in order to understand fundamental knowledge of flow structure around a rising bubble in a stagnant fluid. The measurement technique consists of a combination of the three most often used PIV techniques in multiphase flows: PIV with fluorescent tracer particles, the digital phase separation with a masking technique and a shadowgraphy. The key point of the measurement is that the background intensity of a PIV recording can be shifted to a higher level than a bubble region using a shadowgraphy in order to distinguish from fluorescent particles and a bubble as well. Flow fields were measured without an inaccurate analysis around a fluid-bubble interface by using only one camera simply.

기호설명

$D(m,n)$: 상관관계 평가함수
$g(i,j)$: 영상 i,j 픽셀의 그레이값
$\Delta(i,j)$: 영상 i,j 픽셀의 마스크값
$g'(i,j)$: 영상 i,j 픽셀의 마스크 가중치값
$\Phi'(i,j)$: Mask 가 적용된 상관관계 평가함수

1. 서 론

화공학이나 생화학분야, 생체공학등에서 액체, 기체가 함께 존재하는 이상유동장(two-phase flow)은 흔히 볼 수 있으며, 여기서 각 상들간의 상호작용에 의해 전체적인 유동장이 큰 영향을 받는다. 그렇지만 다상유동을 연구하는 데 있어 각 상의 속도장을 동시에 측정할 수 있는 방법의 부재로 이상유동장의 독특한 특징인 기체-액체 상호작용의 파악에 많은 어려움이 있었다. 이에 이상유동장에서 발생하는 상호작용에 대한 더 나은 이해와 수치모델의 개발을 위해서 순간속도장을 정확하게 정량적으로 측정할 수 있는 기법의 개발에 대한 노력이 시도되어 왔다. PIV 기법은 순간속도장을 측정할 수 있는 장점으로 인하여 단상유동장의 측정에 널리 이용되어 왔고, 이를 바탕으로 이상유동장에 대한 적용을 시도할 수 있으나, 기체와 액체의 굴절률 차이와 2 차 반사등의 문제로 인하여 정확한 측정이 불가능하였다. 이에 Lindken 과 Merzkirch[1] 는 기존에 시도되었던 기법들의 장점을 적용 발전시켜 새로운 PIV 기법을 개발하였다. 이 기법은 형광입자와 광학필터, Shadowgraphy 에 의해 획득한 영상을 Digtial Mask 기법을 활용하여 각 상을 분리시켜 속도장을 구하는 것이었고, Gui[2] 등에 의해 PIV 와 Digital Mask 기법의 적용이 고체 /액체, 기체/액체, 적혈구주변 유동등 다양한 경우에 적용된 바 훌륭한 결과를 보이는 것이 확인되었다.

† 부산대학교 기계공학과
E-mail : kckim@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3947 FAX : (051)515-7866
* 부산대학교 기계공학과
** 부산대학교 기계공학과

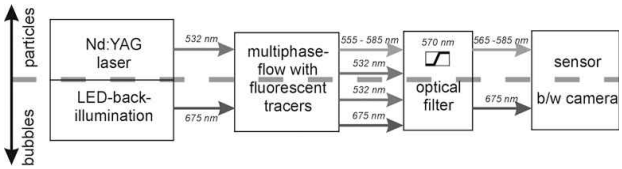


Fig. 1 Principle o the combined PIV/shadowgraphy experiment[2]

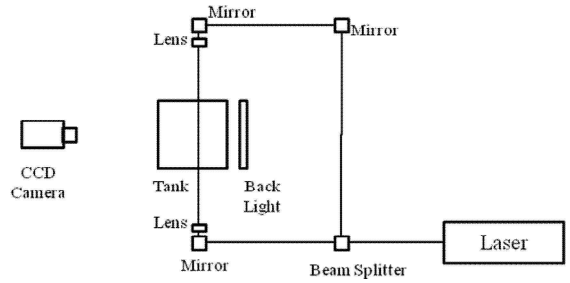


Fig. 2 Experimental setup

2. 측정기법

2.1 측정원리

Fig. 1 에 액체상에 조사된 레이저 시트빔에 의한 형광입자의 영상과 버블의 shadow 이미지를 동일한 CCD 카메라에 획득하는 원리가 자세히 보여진다. 도식의 윗부분은 형광입자의 획득을 설명하고, 아랫부분은 버블의 shadow 이미지획득을 보여준다.

2.2 실험장치

실험장치의 구성이 개략적으로 Fig. 2 에 보여진다. 주변 유동장 측정을 위하여 Rhodamine-B 로 코팅된 10 ㎛의 형광입자와 이를 형광시키기 위한 532 ㎚의 다이오드 레이저가 사용되었고 1k×1k 해상도의 고속카메라(pco.1200 hs)와 오렌지색 광학필터가 영상획득에 사용되었다. 버블의 교란에 상관없이 레이저 시트빔을 균일하게 조사함으로써 영상의 질을 높이기 위해서 beam splitter 를 이용, 관심영역의 양쪽에서 시트빔을 조사하였다. 형광기법을 통하여 버블주위에서 산란되는 빛이 차단되기 때문에 정확한 버블의 경계와 경계 주변의 유동측정이 가능하다.

2.3 영상처리

각 영상 이미지에 대한 Digital Mask 를 생성하기 위해서 획득된 원본 이미지는 여러 단계의 영상처리를 거치게 된다. 간략히 설명하면 원본영상에 Median 필터를 적용하여 입자를 제거[2), 3)]하고, 영상의 히스토그램을 구한 후, 그 결과에 따라 자동으로 경계값을 생성하여 버블에 대한 영상을 분리시킨다. 이렇게 분리된 버블영상에 대하여 부가적인 후처리를 통해서 최종적인 버블 Mask 영상을 생성하게 된다. 그런데 Median 필터의 적용에 있어 필터의 특성상 Salt-and-Pepper 노이즈 제거에는 매우 유용한 반면, 급속한 경계를 가지는 곳에서는 주변부의 값으로 대체되기 때문에 경계가 흐려지는 아쉬운 점이 있다. 이를 극복하기 위해 Lindkenem 등[2]은 Median 필터에 이용되었던 반경값만큼 최종적인 버블 Mask 의 경계를 확장시키는 방법을 채택하였다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위하여 Adpative smoothing 알고리즘[4]을 적용하였다. 이 알고리즘의 특징은 신호의 비연속성을 보전하면서 smoothing 이 수행된다는 것으로, 버블영상을 추출하는데 있어서 경계의 왜곡을 최소화 시킬 수 있다.

2.4 Digital Mask 기법

Gui 등이 제안한 Digital Mask 기법을 2 Frame Cross correlation 기법에 적용하면 아래와 같이 정리 될 수 있다. 아래의 평가함수 *D(m,n)*에, 마치 이진영상으로 고려 수 있는 두 개의 영역을 가지는 마스크 $\Delta(i,j)$를 적용하여,

$$D(m,n)=\frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left[g_1(i,j)-g_2(i+m,j+n)\right]^2 \quad (1)$$

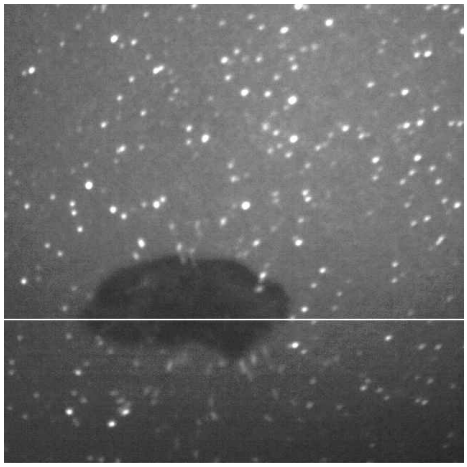
$$\Delta(i,j)=\begin{cases}0 & \text{if 버블 마스크}\\ 1 & \text{if 주변 유동장}\end{cases} \quad (2)$$

원본영상의 그레이값과 마스크값을 곱한 새로운 그레이 값을

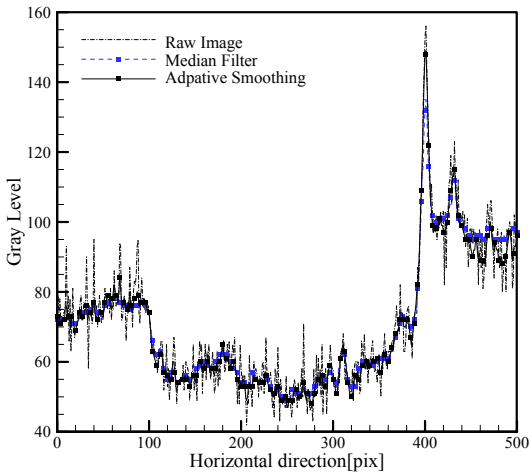
$$\begin{aligned} g_1'(i,j)&=g_1(i,j)\cdot\Delta_1(i,j)\\ g_2'(i,j)&=g_2(i,j)\cdot\Delta_2(i,j)\end{aligned} \quad (3)$$

사용하면 최종적인 평가함수는 식 (4)와 같이 나타내진다.

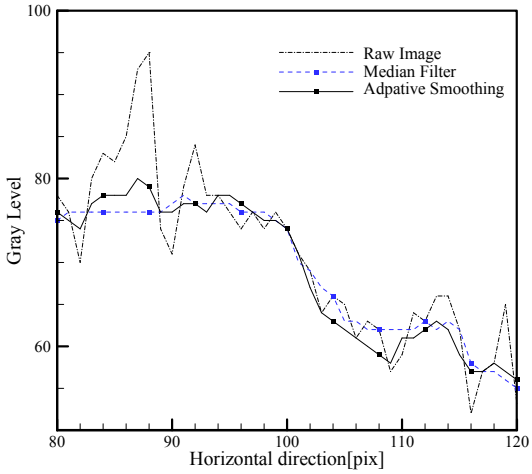
$$\Phi'(m,n)=\frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}g_1'(i,j)\cdot g_2'(i+m,j+n)}{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\Delta_1(i,j)\cdot\Delta_2(i+m,j+n)} \quad (4)$$



(a) Raw Image(cropped)



(b) Gray level of each image along the line

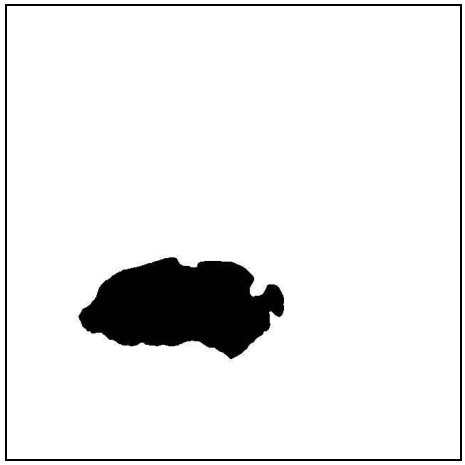


(c) Magnified comparison among images

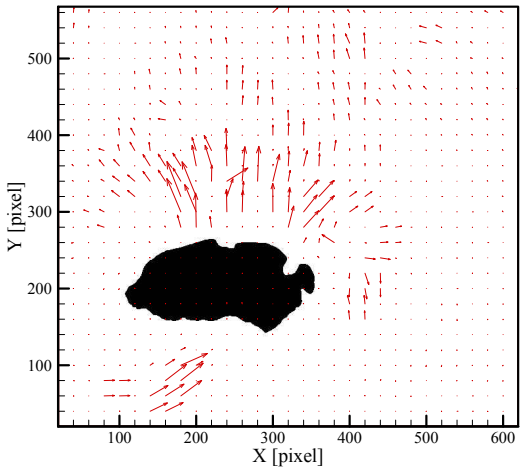
Fig. 3 (a) A single image, (b)Gray level of a raw, a Median-filtered, and an Apdative smoothing of the line of (a)

3. 버블유동 측정 결과

Fig. 3(a)에 측정된 결과가 보여진다. Fig. 3(a)는 한 장의 순간영상에 밝게 보이는 점들은



(a) Digital Mask



(b) Velocity field using a Digital Mask

Fig. 4 Digital Mask and Velocity field using the digital mask from an adaptive smoothing technique

형광입자들이며, 가장 어둡게 보이는 부분이 Shadowgraphy 에 의한 버블이다. 배경조명의 적용에 따라 배경부가 버블보다 더욱 밝은 것을 확인할 수 있다. 이 원본이미지에 대한 필터결과들이 Fig. 3(b)에 나타내어지고 있으며, 이를 버블 경계면에서 확대한 Fig. 3(c)를 확인해보면 점선으로 표시되는 Median filter 결과는 해당 픽셀의 값을 픽셀 주변부의 중간값을 택하는 그 태생적인 요인으로 인하여 Adaptive smoothing 결과에 비해 원본이미지의 값에 대한 추종성이 떨어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4(a)에 Adaptive smoothing 을 이용해 생성된 Digital Mask 가 보여지고, Fig. 4(b)에 이를 사용하여 구해진 순간속도장이 보이고 있다. 계산에 이용된 윈도우 사이즈는 48x48 이고, FFT 사이즈는 64x64 이다. 버블 윗부분에 버블의 빠른 상승에 의해 유도되는 속도 벡터들이 보여지고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고전적인 PIV 기법에 형광입자, 광학필터, 후배경조명, 고속 카메라를 활용하여 기존의 Median filter 기법을 적용한 것보다 버블의 경계를 더욱 잘 추종할 수 있는 Adaptive smoothing 기법이 적용된 PIV 알고리즘이 개발되었다. 이 기법을 버블유동장에 적용하여, 버블에 의해 유도되는 버블경계주변 유동장을 관찰하였다. 상승하는 버블 윗부분의 빠른 속도 벡터들이 관찰되었고, 버블 후류의 와구조가 관찰되었다.

참고문헌

(1) R. Lindken and W. Merzkirch, 2002, “A novel PIV technique for measurements in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flows”, *Experiments in Fluids*, Vol. 33, pp. 814~825.

(2) L Gui, S T Werelery and Y H Kim, 2003, “Advances and Applications of the Digital Mask Technique in Particle Image Velocimetry Experiemtns”, *Meas. Sci. and Technol.*, Vol. 14, pp. 1820~1828.

(3) 성재용, 박상민, 유정열, 2004, “단일 카메라의 영상분리를 이용한 자유 상승 기포의 고속 이상유동 PIV 계측”, *가시화정보학회지*, Vol. 2, No. 1, pp. 39~45.

(4) Philippe Saint-Marc and Jer-Sen Chen, 1991, “Adaptive Smoothing: A General Tool for Early Vision”, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 6, pp. 514~528