

공동수조에서 추종입자로서 기포를 이용한 정량적 가시화에 대한 연구

백부근[†] · 김경열* · 조성락* · 안종우*

Study on Quantitative Visualization Using Bubble Tracer in a Cavitation Tunnel

Bu-Geun Paik, Kyung-Youl Kim, Seong-Rak Cho and Jong-Woo Ahn

Abstract. In the present study, naturally generated bubbles were investigated to be sure if they could be adopted as the tracer for PIV techniques. The bubble can be grown from the nuclei melted in the water of tunnel and the size of bubbles is changed through the variation of tunnel pressure. Since the trace ability and appropriate size of tracer are so important for PIV techniques, the characteristics of bubbles as tracer are revealed in terms of trace ability and bubble size with the variation of flow speed and tunnel pressure in this study. In addition, PIV measurements of flow behind a rotating propeller are conducted to confirm the trace ability of bubbles even in a highly vortical flow.

Key Words : Bubble(기포), Cavitation Tunnel(공동수조), Tracer(추종입자), PIV(입자영상속도계)

1. 서 론

PIV 측정기법은 LDV와 유사하게 유체 유동 안에 추종입자를 넣어 주어야 유동의 속도를 측정할 수 있다. LDV의 경우 관심영역이 수 mm에 불과한 측정 체적이 되며 많은 양의 추종입자를 유체 유동 안에 넣어 주지 않아도 평균 유속을 측정하는데 큰 무리가 없다. 그러나 PIV의 경우 점측정 방식의 LDV와는 달리 장(field) 측정 방식이므로 측정영역이 수 cm에서 수 m에 이르며 추종입자가 균일하게 분포되어야 올바른 측정이 가능하다. 또한 추종입자의 크기도 측정영역의 크기 및 실험조건에 따라 직경이 수 nm에서 수 mm로 달라진다. 입자의 크기가 커질수록 레이저 평면광으로부터 산란되는 빛의 강도가 커지므로 PIV 측정에 유리하게 된다. 그러나 공동수조(cavitation tunnel)에서는 추종입자의 크기가 커질수록 추종입자가 캐비테이션 씨앗(nuclei) 역할을 하여 캐비테이션에 영향을 미칠 수 있다. 결국 공동수조에서 PIV 실험은 캐비테이션 관측 실험과

동시에 수행할 수 없고 실험 후 추종입자들을 완전히 제거하기 위하여 수조 내부를 청소해야 하는 매우 번거로운 작업이 수반되어야 한다. 해양시스템안전연구소(MOERI)의 소형 공동수조의 용수 용량은 약 50톤이기에 PIV 실험 후 추종입자 제거 작업이 가능하였으나 2008년 건설될 대형 공동수조(관측부 제원:2.8×1.8×12.5 m³)의 경우 약 2100톤의 물을 담을 수 있는 거대한 제원을 가지고 있으므로 수조 내부의 추종입자를 제거하는 작업이 거의 불가능하다고 사료된다. 따라서 소형 공동수조뿐만 아니라 대형 공동수조에서도 PIV 측정기법을 사용하도록 하기 위해서는 추종입자에 대한 심각한 고려가 필요하다. MOERI의 공동 수조에서는 선박의 선미반류 제현, 프로펠러 캐비테이션 관측 뿐만 아니라 프로펠러 후방에 타(rudder)를 장착하여 타 캐비테이션을 관측하고 있다. 최근에 수행한 프로펠러 및 타에 대한 캐비테이션 관측 시험 시 얻은 입자영상 내에는 많은 입자들이 분포하고 있음을 Fig. 1을 통해 확인할 수 있다.

프로펠러 시험조건을 위해 공동 수조의 압력을 낮추어 많은 기포들이 발생하였고 선미 반류를 모사하기 위한 wake screen의 미세한 mesh로 인하여 미세(수 십 μm ~ 수 mm 단위) 기포가 다량 발생하였다. 취득된 입

[†]해양연구원 해양시스템안전연구소
E-mail: ppaik@moeri.re.kr

*해양연구원 해양시스템안전연구소

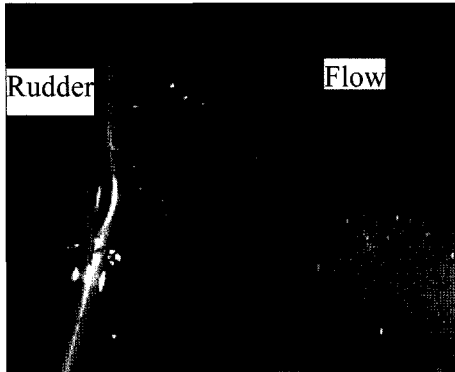


Fig. 1. Observation of rudder cavitation (bottom view).

자영상을 이용하여 속도장을 계산하였고 Fig. 2에 그 결과를 나타내었는데 타의 타각이 +5도로서 관측면이 흡입면인 경우이다. 속도장 그림은 각각 250 μsec .의 시간 간격으로 cinematic하게 얻은 유동장 해석 결과이다. PIV 해석 시 사용된 미소조사 구간은 64x64 pixels이었으며 그에 따른 격자 수는 27x22 (50% 중첩)이었다. 입자영상을 조사하는 백색광이 고르게 미치지 못하여 추종입자들이 제대로 탐지 되지 못한 곳이 보이긴 하나 타 주위의 속도장이 잘 도출되었음을 알 수 있다.

기포가 있는 유동에서 속도장을 얻기 위하여 이상 (two-phase) PIV가 연구되어 왔는데 Lindken 등¹⁾은 기포와 액상 각각의 이동 속도에 대한 정보를 분리하려는 연구를 수행하였다. Jansen²⁾은 공기가 함유된 쇄파 (breaking wave)를 형광입자와 자외선 등을 이용하여

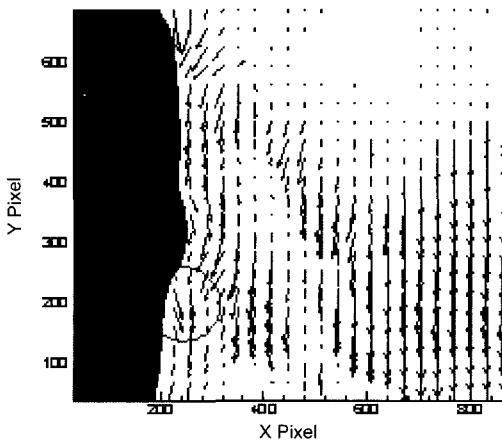


Fig. 2. Velocity field around rudder surface.

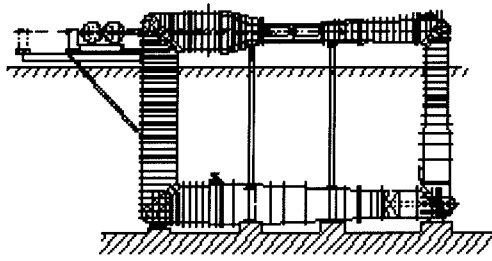
연구하였으나 좋지 않은 공간해상도를 보였다. Govender 등³⁾도 비슷한 PIV 기법을 이용하여 이상 유동을 연구하였지만 기법 자체에 대한 상세한 설명이 부족하였다. 기포의 void fraction이 낮고 기포 크기가 작은 유동에서는 팽 소스에 의한 기포의 산란 정도가 낮기 때문에 팽 소스를 이용한 조사가 더욱 세밀한 연구가 필요하다. Ryu 등⁴⁾은 선수갑판의 green water에 대한 유동가시화를 위하여 기포를 추종입자로 고려하여 실루엣 기법에 기초한 PIV 속도장 측정을 수행하였다. 특히 Ryu 등은 레이저를 이용하지 않고 600W 백색광을 사용하여 기포의 거동을 추적하였다. 하지만 강한 속도구배가 나타나는 유동에 대해서 신뢰성 검증이 필요하다. Pereira 등⁵⁾도 defocusing 방법과 기포를 이용하여 프로펠러 후류의 날개끝 보오텍스의 거동을 살펴본 바 있다. 그러나 defocusing 방법을 사용하기가 까다롭고 낮은 레이놀즈 수에서 매우 단순한 프로펠러 (날개 수 2개)에 대해서 수행되었기에 아직까지는 그 신뢰성을 보장하기 어렵다고 사료된다.

본 연구에서는 공동수조 내에서 기포를 발생시켜 PIV 측정을 위한 추종입자로 적절한 지 알아보기 위하여 10^6 이상의 레이놀즈 수를 갖는 균일유동 및 프로펠러 후류 조건에서 기초연구를 수행하였다.

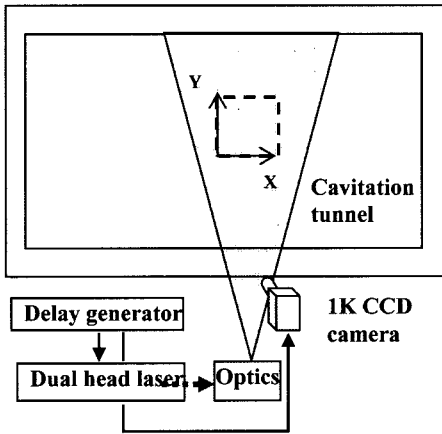
2. 실험 장치 및 실험 방법

기포의 특성을 살펴보기 위한 실험은 MOERI의 공동수조에서 수행되었는데 그 체원은 $2.6^t \times 0.6^b \times 0.6^d$ m^3 이다. Fig. 3(a)는 시험이 수행된 공동수조를 나타낸다. 공동수조의 최대 유속은 12 m/s이고 수조 내부 압력은 0.1 기압($1.033\text{Kg}/\text{cm}^2$)에서 2.0 기압까지 변화가 가능하다. 본 시험에 사용된 2-D PIV 시스템은 CCD camera(Edlake 1K(1024 pixels) ES. 1.0)를 사용하였으며 레이저는 New Wave사의 200mJ Nd:Yag 펄스 레이저를 사용하였다. 원주형 광학계를 사용하여 레이저 평면광을 발생시켜 Fig. 3(b)와 같이 수조 중앙에 위치시켰다. 추종입자의 거동만을 살펴 보기 위하여 수조 내에 wake screen을 설치하지 않았다. 관측면의 크기 (F.O.V.)는 10 cmx10 cm로 결정하였다.

추종입자에 대한 거동을 살펴보기 위하여 실험 조건을 Table 1과 같이 변화시키며 실험을 수행하였다. 이때 수조 유속은 관측부 전방의 수조 벽에 설치된 피토판으로부터 측정하였다.



(a) cavitation tunnel



(b) PIV set-up

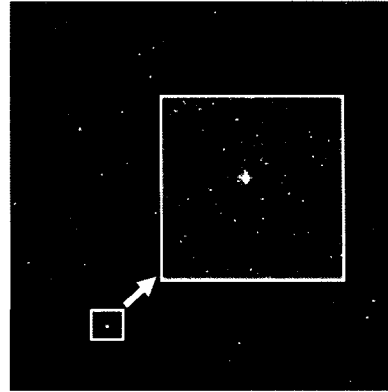
Fig. 3. Schematic diagram of experimental set-up.

Table 1. Test condition for 2-D PIV technique.

Flow speed (m/s)	3	5	8
Time interval (μsec.)	120	100	80
Tunnel pressure (atm.)	1.0	1.0	1.0
	0.8	0.8	0.8
	0.5	0.5	0.5
	0.3	0.3	0.3
	0.2	0.2	0.2

3. 실험 결과 및 고찰

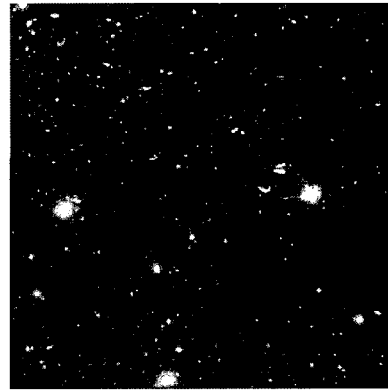
사용된 2-D PIV 시스템은 레이저 펄스 사이의 시간 간격 및 CCD 카메라의 frame straddling 기법을 이용하므로 수조 내 유속의 변화에 따라 시간간격을 변화시켜 가면서 입자영상을 취득하였다. 일반적으로 두 개의 입자영상 사이의 입자 변위가 PIV 알고리즘을 운용하는 데 문제가 없게 하기 위하여 평균 입자 변위가 3



(a) 3m/s



(b) 5m/s



(c) 8m/s

Fig. 4. Particle images at the tunnel pressure of 0.2 atm.

~5 픽셀 정도가 되도록 시간간격을 Table 1과 같이 결정하여 수조 내 입자 및 기포의 입자 영상을 취득하였다.

Fig. 4(a)는 유속이 3 m/s이고 수조 압력이 0.2기압일 때의 입자영상을 나타낸 것이다. 수조 용수에는 종전에 사용하던 50 μm 크기의 polymer 입자를 전혀 투입하

지 않았다. 이 polymer 입자들은 수조 용수의 오염을 가중시켜 캐비테이션 관측을 힘들게 하며 수조 내벽 또는 임펠러에 흡착되기 때문에 입자 제거 작업에 많은 비용과 노력이 요구된다. 확대한 그림을 보면 큰 입자와 작은 입자들을 볼 수 있는데, 큰 크기의 입자는 기포이고 작은 크기의 입자는 LDV 실험 중에 투입한 3 μm 크기의 티타늄 입자이다. 이 티타늄 입자들은 크기가 매우 작아 캐비테이션의 씨앗(nuclei)으로써 역할을 하지 못하기에 프로펠러 날개 등에 대한 캐비테이션 관측 실험 시 유동가시화에 전혀 영향을 미치지 않는다. 수조 내 압력을 1기압부터 시작하여 0.3기압까지 순차적으로 감소시켰는데 입자의 영상 구분이 힘들 정도로 비슷한 모습을 보였다. 그러나 수조 압력이 0.3기압 보다 낮아지게 되면서 수조 내부의 압력 저하로 인하여 다수의 기포가 발생하게 된다. 이 기포 영상에 나타난 추종입자의 크기는 평균 0.9 mm의 직경을 가지고 있어 PIV 해석을 하는 데 큰 문제가 없다. 다만 속도 구배가 큰 영역의 경우에 대해서 실험을 거쳐 기포의 추종성을 확인할 필요가 있다.

Fig. 4(b)는 유속이 5 m/s이고 수조의 압력이 0.2 기압일 때의 입자영상이다. 유속이 증가함에 따른 수조 내부의 압력 저하로 인하여 0.3기압부터 기포가 발생하였다. 0.3기압에서 기포 영상은 기포의 산란편 등을 고려하여 평균 0.8 mm의 직경을 갖는데 유속이 3 m/s의 0.2기압에서 보였던 기포 영상 크기 및 기포 개수 등과 유사하다. 수조 내부 압력을 0.2기압으로 낮추면 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 기포의 수가 많아지고 그 기포 영상의 평균 크기도 1.2 mm 정도로 증가한다. Fig. 4(c)는 유속이 8 m/s이고 수조 압력이 0.2기압일 때의 입자영상을 보여준다. 역시 0.3기압부터 기포가

발생하였으며 평균 0.9 mm의 직경을 갖는 기포 영상은 수조 압력이 0.2기압이 됨에 따라 평균 2 mm의 기포 영상이 나타나게 된다.

또한 기포의 개수도 유속이 5m/s(0.2기압)인 경우에 비해 증가함을 볼 수 있다. 유속의 증가가 기포 영상의 크기를 2배 가까이 증가시키고 기포의 개수를 크게 하였으나 기포 영상 크기의 증가로 인하여 부력이 기포의 거동에 영향을 주는 지에 대하여 확인할 필요가 있으므로 본 연구에서는 기포가 포함된 유동에 대하여 속도장을 측정하여 이를 조사하였다.

수조 내부 용수에서 발생한 기포의 추종성을 자세히 살펴보기 위하여 입자 영상에 대한 PIV 해석을 하였고 속도장을 추출하였다. 유속이 3 m/s와 5 m/s 해석 시 미소조사구간의 크기는 50% 중첩된 32x32 pixels을 사용하였다. 유속이 8 m/s가 되면 기포의 크기가 커져 산란광이 증가하여 기포 영상이 차지하는 픽셀 수가 증가하게 된다. 따라서 미소조사 구간의 크기를 50% 중첩된 48 x 48 pixels을 사용하였다. 또한 속도장 해석 결과의 우열을 구분하기 위하여 에러(error) 벡터들을 제거하지 않고 원시 벡터 파일을 살펴보았다. Fig. 5(a)는 자유흐름속도가 3 m/s이고 수조 압력이 0.2기압일 때의 속도장을 나타낸 것이다. 두 가지의 압력 변화에 대하여 에러 벡터가 매우 작은 속도장이 계산되었다. 1 mm 이하의 직경을 갖는 기포가 포함된 영상에 대해서도 에러 벡터 수가 매우 작게 나타난 것으로 보아 1 mm 이하의 영상 크기를 갖는 기포가 추종입자로서 유용할 것임을 파악할 수 있다. 유속이 5 m/s로 증가하게 되면 3 m/s의 경우에 비해 에러 벡터도 약간 증가하지만 우려할 만한 정도는 아닌 것으로 판단된다(Fig. 5(b)). 8 m/s로 유속이 증가하면서 에러 벡터 수가 점차

Table 2. Summary of the results in the uniform flow.

U ₀	Pt	U _{mean} (pixel)	V _{mean} (pixel)	U _{rms} (pixel)	error ratio (%)	interrogation widow	Remark
3 m/s	1.0	3.07	-0.03	0.002	0.5	32x32	Normal
	0.2	3.07	-0.02	0.002	0.7	32x32	Normal
5 m/s	1.0	5.06	-0.03	0.002	1.2	32x32	Normal
	0.2	5.08	-0.02	0.007	5.2	32x32	Normal
	0.2	5.07	-0.02	0.007	5.2	32x32	Threshold
8 m/s	1.0	5.49	-0.05	0.011	2.8	48x48	Normal
	0.3	5.52	-0.02	0.027	4.7	48x48	Normal
	0.2	5.46	-0.03	0.024	6.1	40x40	Normal
	0.2	5.50	-0.02	0.010	4.3	48x48	Threshold
	0.2	5.46	-0.03	0.066	0.5	40x40	Reverse

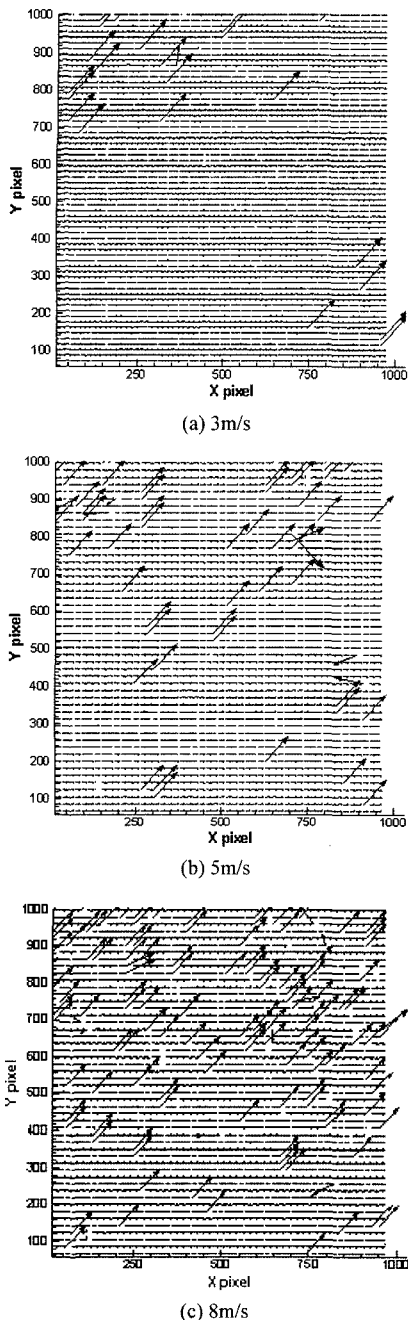


Fig. 5. Velocity fields at the tunnel pressure of 0.2 atm.

증가됨을 볼 수 있다(Fig. 5(c)). 수조 압력 0.3기압에서는 속도장 결과가 5 m/s의 0.2기압일 때의 결과와 유사하지만 압력이 0.2기압으로 더 낮아지면 산란광 등의 효과로 인하여 에러 벡터 수가 크게 증가하게 된다. 이

러한 결과를 볼 때 각 실험 조건에서 추종입자로서 사용 가능한 기포의 크기를 적절히 선별해야 함을 판단할 수 있다.

각 유속 및 압력 조건에서 얻어진 속도장 결과들을 Table 2에 요약 하였다. 여기서 U_0 는 자유흐름속도를 의미하고 P_t 는 수조의 압력을 의미한다. Table 2를 보게 되면 수조 내부 압력과 유속에 따른 균일유동의 속도장 결과가 잘 나타나 있다. 수직방향 평균 변위는 약 -0.03 pixels로서 수조의 유속이나 기포의 크기에 상관없이 일정한 값을 보여주고 있는데 이는 본 연구에서 대상으로 삼은 유속 및 압력 조건에서 기포들의 추종성이 우수함을 나타낸다. 다만 방향성에 있어서는 아래쪽 성분이 미미하게 존재하고 있어 수조 자유흐름의 균일도에 한계점이 있음을 알 수 있다. 대기압 조건에서는 유속이 증가함에 따라 속도장의 RMS(root-mean-square) 값과 에러율(error vector 수/전체 vector 수)은 크게 변하지 않았다. 다만 유속이 8 m/s일 경우 미소조사구간을 48×48 을 사용하였고 에러율이 다른 유속에 비하여 크게 나타났는데, 시간간격을 더욱 감소시키면 에러율을 충분히 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 유속이 3m/s에서는 수조 압력의 변화와는 관계 없이 비슷한 RMS 값과 error ratio을 보이지만 유속을 5 m/s로 증가시키면 RMS 값이 증가하며 에러율도 3 m/s에 비해 2배 가까이 증가한다. 비록 에러율이 증가하기는 하였지만 5% 미만의 에러율은 매우 질 좋은 입자영상을 취득하였음을 의미하며 미소조사구간도 32×32 pixels 이므로 공간해상도가 높은 PIV 해석 결과를 얻을 수 있다. 다만 최대 2 mm 미만의 직경을 갖는 기포 영상이 취득 되므로 영상 해석 시 유의할 필요가 있다.

Fig. 6은 취득한 입자 영상에 대하여 이치화법(threshold method)을 사용하여 영상의 배경(background) 노이즈를 제거한 후 얻은 속도장 결과이다. 수조의 유속이 빨라지고 수조 내 압력이 낮아짐에 따라 기포의 크기도 점차 커지는데 이 때 기포에 의한 산란광이 강하게 나타나 배경 노이즈를 높하게 되고 에러를 증가의 요인이 된다. 이치화법을 사용하게 되면 특정 gray 수준 이하의 값을 갖는 픽셀들을 필터링 할 수 있으므로 배경 노이즈의 감소가 가능해지고 Fig. 6에서 보는 바와 같이 수조에서 생성되는 기포의 궤적이나 거동에 대한 정보를 얻을 수 있음을 예상할 수 있다. 유속이 8 m/s로 더 증가하게 되면 3 m/s, 수조압력 0.2 기압에 비해 RMS 및 에러율이 증가하게 된다. 특히 유속 8 m/

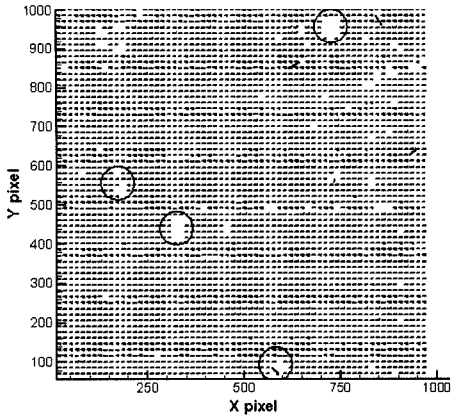


Fig. 6. Velocity field after threshold treatment.

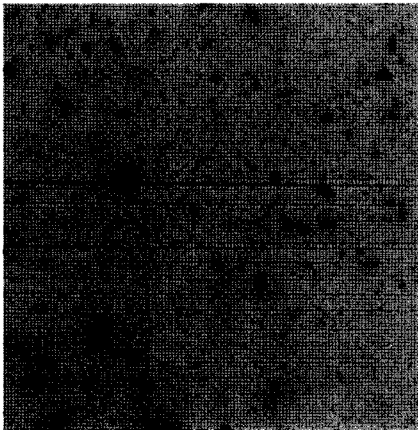
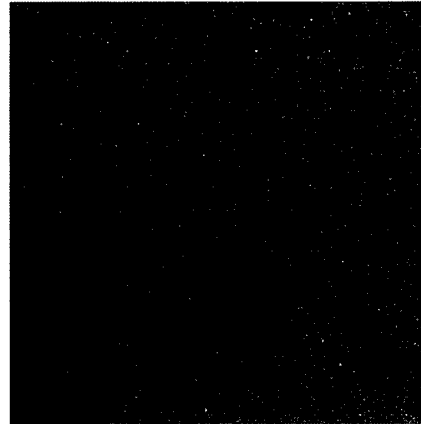
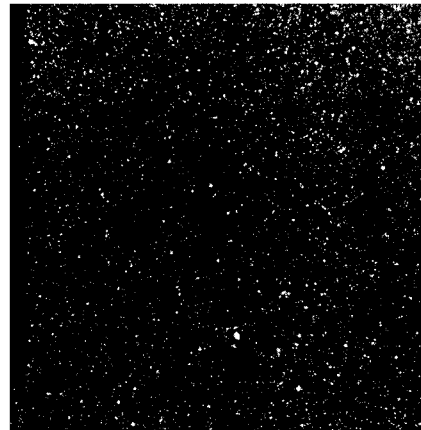


Fig. 7. Particle image after reverse method.

s, 수조 압력 0.3 및 0.2 기압에서 매우 높은 RMS 값을 보이는데 이는 기포의 크기가 증가함에 따라 나타난 현상이라고 사료된다. 임계 방법으로 수조 압력 0.2 기압인 경우에 대하여 계산해 보면 에러율이 5% 정도 발생하게 된다. 기포 및 강한 산란광에 의한 영역이 커지다 보니 특정 gray 수준 이상으로 필터링 하면 그 수준 보다 낮은 gray 수준을 갖는 추종입자들을 많이 잃게 된다. 다른 영상 처리 방법으로써 입자영상의 gray 수준에 대한 흑백을 바꾸어 Fig. 7과 같이 반전(reverse) 입자영상을 취하면 에러율이 1% 이하로 감소되고 기포에 대한 위치 및 거동 조사 등이 가능할 것으로 예상된다. 그러나 RMS 값은 다소 증가하는데 반전 영상을 이용하게 되면 기포 산란광에 의한 노이즈 영향을 받는 픽셀들이 기포 주위에 분포하게 되어 도



(a) atmospheric pressure



(b) 0.25 atm.

Fig. 8. Particle images of propeller wake at the same free stream velocity.

출된 속도장에 빈 공간이 발생하게 되어 RMS 값이 증가한 것으로 사료된다.

따라서 수조 내 자유흐름 속도, 수조 내부 압력, RMS, 에러율 및 미소조사구간 크기 등 모든 요소들을 고려할 때 기포의 추종성 및 공간해상도가 좋은 조건은 유속이 3 m/s 및 5 m/s이고 수조 압력이 0.2 기압 근처인 경우라고 판단된다.

유속을 8 m/s로 증가시키고 수조 내부 압력을 0.2 기압으로 낮출 경우에도 취득한 입자영상을 반전 처리하여 기포를 추종입자로 하는 PIV 해석이 가능하며 적절한 기포 거동에 대한 연구가 가능할 것이라 사료된다.

본 연구에서는 균일유동 외에도 강한 속도구배가 존재하는 유동에 대해서도 생성된 기포가 추종성을 잘 나타내는지를 조사하기 위해서 프로펠러 후류를 2-D

PIV 측정기법을 이용하여 계측하여 보았다. 컨테이너 선을 위하여 제작된 프로펠러 모형을 사용하였으며 5개의 날개 및 250 mm의 직경을 갖는다. 또한 평균 피치 비는 0.990이었다. 선미반류에 의한 영향을 고려하기 위하여 프로펠러 전방에 wake screen을 설치하였다.

Fig. 8과 9는 유속이 5m/s일 때 대기압과 0.25 기압 조건에서 얻은 프로펠러 후류의 입자영상 및 속도장을 보여준다. 두 조건 모두 날개끝(tip) 보오텍스와 뒷날(trailing)에서 발생하는 반류면(wake sheet)이 잘 나타났으며 날개끝 보오텍스 코어의 중심도 서로 같은 위치에 존재하였다. 대기압 조건에서는 기존의 티타늄 입자 영상을 잘 취득하기 위하여 카메라 렌즈의 조리개 수를 2로 정하였으나 0.25 기압 조건에서는 발생된 수많은 기포가 강한 산란광을 발생시켜 조리개 수를 5.6

이상으로 좁혀 영상을 취득하였기에 기존의 티타늄 입자들은 거의 포착되지 못하였다.

사실 공동수조에서 프로펠러의 회전 조건은 K_t (추력 계수) 동일 가정에 따라 결정된다. 따라서 기포 발생을 위해 공동수조의 압력을 무턱대고 낮추는 것은 K_t 의 감소를 가져와 실제 프로펠러의 설계 조건과는 맞지 않게 된다. 따라서 적절한 회전 조건을 찾아야 하고 그에 따른 기포 발생을 기대해야 한다. 본 연구에서는 이러한 K_t 동일 조건을 고려하였으며 도출된 속도장 결과를 볼 때 기포 입자를 사용하여도 속도구배를 잘 표현할 것으로 사료된다. 그러나 캐비테이션 조건에 따른 날개끝 및 뒷날 외도의 변화를 살펴 보기 위해서는 심도있는 연구가 지속되어야 할 것으로 보인다.

지금까지 알아본 바와 같이 MOERI의 소형 공동수조의 경우 수조의 압력을 낮추어 생성된 기포를 이용하여 PIV 계측이 가능함을 알 수 있었다. 추후 완공될 대형 공동수조에서도 적절한 PIV 계측을 위해서 대형 공동수조의 압력을 낮추어 기포를 발생시켜 PIV 계측을 할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 캐비테이션 수에 민감한 실험의 경우 발생시킨 기포가 캐비테이션 씨앗 역할을 하여 기대하지 않은 캐비테이션의 증가나 캐비테이션 패턴에 영향을 줄 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 공동수조에서 생성되는 기포를 PIV 계측에 추종입자로서 사용할 수 있는지에 대하여 기초 연구를 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

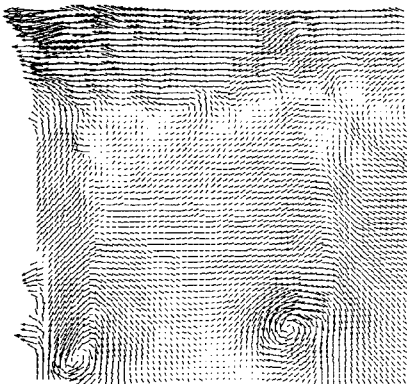
(1) 균일 유동 및 0.2 기압 근처의 수조 압력 조건에서 발생된 기포들은 좋은 추종성을 나타내었다.

(2) 수조의 유속이 3 m/s 일 경우 1 mm 이하의 영상 크기를 갖는 기포가 추종입자로서 유용하다.

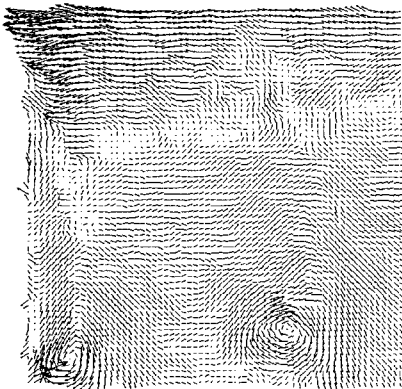
(3) 유속이 5 m/s 이상일 경우 각 압력 조건에서 추종입자로서 사용 가능한 기포의 크기를 적절히 선택해야 한다.

(4) 기포에 의한 산란광이 강할 경우 이치화법이나 반전 영상을 사용하면 에러율이 크게 감소되고 기포에 대한 위치 및 거동 조사가 가능할 것으로 예상된다.

(5) 수조의 압력이 0.25 기압 조건에서 발생하는 다량의 기포들은 프로펠러 후류와 같이 강한 속도 구배를 갖는 유동에 대해서도 높은 추종성을 보였다.



(a) atmospheric pressure



(b) 0.25 atm.

Fig. 9. Instantaneous fluctuating velocity fields subtracted by a convection velocity at the same free stream velocity.

(6) 추후 완공될 대형 공동수조에서도 적절한 PIV 계측을 위해 수조의 압력 및 유속을 조절하여 추종입자로서 기포를 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

(7) 캐비테이션 수에 민감한 실험의 경우 발생시킨 기포가 씨앗 역할을 할 수 있으므로 이에 대한 대비가 필요하다.

후 기

본 연구는 한국해양연구원 신진연구원 연구능력확충사업(PE0115H)과 고부가가치 선박 산학연 공동연구 기반구축(PG01540)의 지원으로 수행되었음을 밝히며 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) Lindken, R., Merzkirch, W., 2002, "A novel PIV technique for measurements in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flows," *Exp. in Fluids*, Vol.33, pp.814-825.
 - 2) Jansen, P.C.M., 1986, "Laboratory observation of the kinematics in the aerated region of breaking waves," *Coast. Eng.* Vol.9, pp.453-477.
 - 3) Govender, K., Mocke, G P., Alport, M. J., 2002, "Video-imaged surf zone wave and roller structures and flow fields," *J. Geophys. Res.*, Vol.107, pp.3072
 - 4) Ryu, Yonguk, Chang, Kuang-An, Lim, Ho-Joon, 2005, "Use of bubble image velocimetry for measurement of plunging wave impinging on structure and associated greenwater," *Meas. Sci. & Technol.* Vol.16, pp.1945-1953.
 - 5) Pereira, Francisco, Castano-Graff, E., Gharib, Morteza, 2006, "Bubble interaction with a propeller flow," *Proc. of 26th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Vol.1, pp.299-307.
- 1) Lindken, R., Merzkirch, W., 2002, "A novel PIV