

2D PIV와 stereoscopic PIV 기법으로 측정된 프로펠러 후류의 속도장 비교 연구

백 부 근* · 이 상 준†

Comparison of Velocity Fields of Wake behind a Propeller Using 2D PIV and stereoscopic PIV

Bu-Geun Paik · Sang-Joon Lee

Abstract

The phase-averaged velocity fields of 3 dimensional turbulent wake behind a marine propeller measured by 2D PIV and stereoscopic PIV(SPIV) were compared directly. In-plane velocity fields obtained from the consecutive particle images captured by one camera in 2D PIV have perspective errors due to out-of-plane motion. However, the perspective errors can be removed by measuring three component velocity fields using SPIV method with two cameras. It is also necessary to measure three components velocity fields for the investigation of complicated near-wake behind the propeller for the suitable propeller design. 400 instantaneous velocity fields were measured for each of four different blade phases of 0°, 18°, 36° and 54°. They were ensemble averaged to investigate the spatial evolution of the propeller wake in the downstream region. The phase-averaged velocity fields show the viscous wake developed along the blade surfaces and tip vortices were formed periodically. The perspective errors caused by the out-of-plane motion was estimated by the comparison of 2D PIV and SPIV results. The difference in the axial mean velocity fields measured by both techniques are nearly proportional to the mean out-of-plane velocity component which has large values in the regions of the tip and trailing vortices. The axial turbulence intensity measured by 2D PIV was overestimated since the out-of-plane velocity fluctuations influence the in-plane velocity vectors and increase the in-plane turbulence intensities.

Key Words : 2D PIV(2차원 입자영상유속계), Stereoscopic PIV(스테레오스코픽 입자영상유속계), Phase-average(위상평균), Propeller wake(프로펠러 후류), Tip vortex(날개끝 보오텍스)

1. 서 론

선박이 대형화되고 소요마력이 증가함에 따라 프로펠러 날개에 걸리는 하중은 점차 증가하고 있다. 하중의 증가는 선미 진동 및 소음의 주요 원인이 되는 캐비테이션(cavitation) 현상을 일으킬 뿐 아니라 선박의 추진성능을 저하시킨다. 특히, 날개끝 보오텍스나 허브(hub) 보오텍스는

추진효율을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 선박의 타에 캐비테이션을 발생시켜 부식이나 침식의 원인이 되기도 한다. 이러한 문제들을 개선하기 위하여 프로펠러의 기하학적 형상은 지속적으로 바뀌어져 왔으며, 보다 복잡한 형상 및 구조를 가지게 되었다. 개선된 프로펠러 후류에서는 이전보다 더 복잡한 3차원 유동현상이 나타나게 되고, 이에 따라 보다 정확한 실험적, 이론적 해석이 요구되고 있다.

지금까지 프로펠러 후류 측정 시 사용된 방법은 주로 LDV(Laser Doppler Velocimetry)나 피토크관의 점 측정 방식에 의존하였으나, 넓은 영역을 측정하거나 위상평균하여 속도장을 분석하기 위해서는 매우 많은 시간이 소요된다. 이에 반해,

† 포항공과대학교 기계공학과 교수
E-mail : sjlee@postech.ac.kr
* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

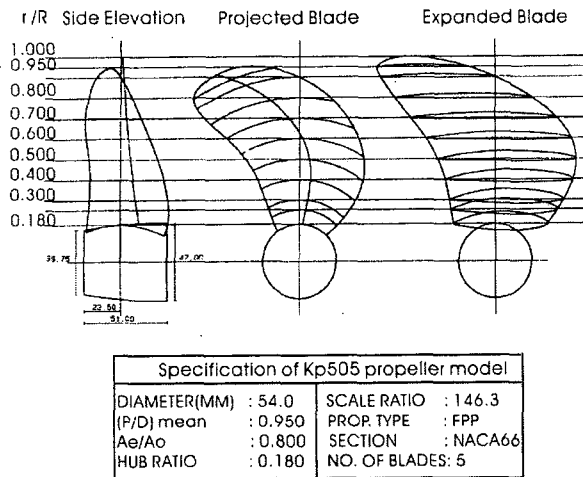


Fig. 1 The geometry of propeller model

PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정기법을 이용하면 유동을 간섭하지 않고, 넓은 영역의 유동 전체를 짧은 시간 내에 측정할 수 있다.

Controni(2000) 등과 Lee(2002) 등은 한 대의 카메라를 사용하는 2D PIV 기법을 이용하여 프로펠러 후류의 속도장을 축방향으로 측정하였고, 후류의 공간적 발달과정을 분석하였다. 그러나 프로펠러 후류는 복잡한 3차원 유동구조를 가지고 있기 때문에 out-of-plane 속도성분에 기인하여 2D PIV 속도장 측정 결과에서 오차가 발생하게 된다. Yoon(2002) 등은 axial 현에 대해 2D PIV 및 SPIV 기법을 적용하여 out-of-plane 속도성분이 2D PIV 결과에 적지 않은 영향을 미치고 있음을 밝혔다..

본 연구에서는 두 대의 카메라를 적용한 SPIV 기법을 사용하여 측정오차가 제거된 프로펠러 후류의 3차원 속도장을 축방향으로 구하였고, 그 결과를 2D PIV 결과와 비교하여 out-of-plane 유동의 영향을 살펴 보았다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 2D PIV

프로펠러 후류의 속도장 측정을 위한 2D PIV 시스템은 Nd:Yag 레이저, 한 대의 CCD 카메라, 카메라 이송장치, 영상처리 장치, 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 이루어져 있다. 사용한 CCD 카메라의 해상도는 $2K \times 2K$ pixels²이며, 한번에 2 프레임씩 쌍으로 유동영상을 취득하였다. 프로펠러 후류 측정을 수행한 소형 회류수조의 시험부 체원은 $120^L \times 30^W \times 20^H$ cm³ 이다. 속도장 측정을 위해 사용된 프로펠러는 KRISO 3600TEU 컨테이너선을 위한 Kp505 모델이며 체원은 Fig.1과 같다. 레이저 평면광을 회류수조 바닥에서 윗방향으로 조사하고, 11×11 cm² 크기의

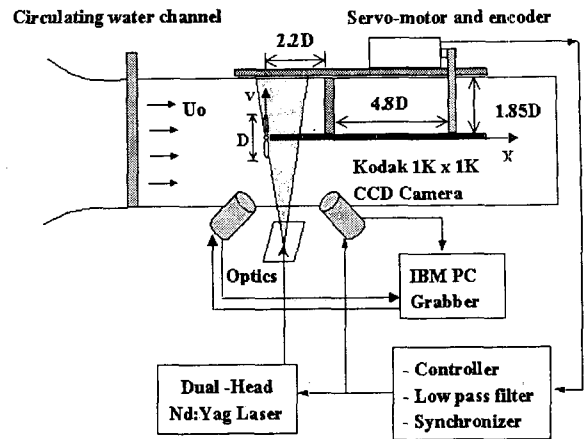


Fig. 2 Schematic diagram of SPIV system

측정단면에서 속도장을 측정하였다. 컨테이너선의 자항점에서 전진비(advance coefficient)는 $J=0.72$ 이며 이에 대응하는 프로펠러의 초당 회전수는 8.37rps이었다. 실험 시 자유흐름 속도는 32.5cm/s로 고정시켰는데, 프로펠러 직경에 기초한 레이놀즈 수는 약 18000 이었다. 실험에 사용한 산란입자는 silver coated hollow glass 입자이며 평균 직경은 약 $10\mu\text{m}$ 이었다. 프로펠러를 구동시키기 위하여 encoder가 내장된 서보모터를 이용하였고 encoder에서 생성되는 약 0.36° 분해능의 동기신호를 이용하여 CCD 카메라와 레이저를 동기시켰다. 또, 동기 신호의 노이즈를 제거하기 위하여 저대역 필터를 사용하였다. 2개의 레이저 펄스 사이의 시간간격 Δt 는 300 μs 로 하였다. 본 실험에 사용한 프로펠러는 5개의 날개를 가지며, 하나의 날개에 대해 18° 간격으로 4개의 위상으로 나누어 속도장을 측정하였다. 각각의 위상각에 대해 400장의 속도장을 얻고 앙상블 통계 처리하여 평균속도장, 난류강도 분포 등을 구하였다

2.2 Stereoscopic PIV

SPIV 시스템은 2D PIV 시스템과 유사하나 두 대의 CCD 카메라, stereoscopic 렌즈, 회전 스테이지, 보정판 및 이송장치 등을 사용하는 것이 다르다. 사용한 CCD 카메라의 해상도는 $1K \times 1K$ pixels²이며 stereoscopic 렌즈는 일반 렌즈와 달리 tilt / shift 시에 발생하는 영상의 왜곡이나 화질 저하를 개선하기 위하여 특별히 설계된 것으로 광학적인 특성이 매우 우수하다. 소형 회류수조의 시험부 크기, 프로펠러 모델, 유속 등의 실험조건은 2D PIV의 경우와 모두 동일하다. Fig.2는 SPIV 실험장치의 구성을 나타내고 있으며 6×6 cm² 크기의 측정단면에서 속도장을 측정하였다.

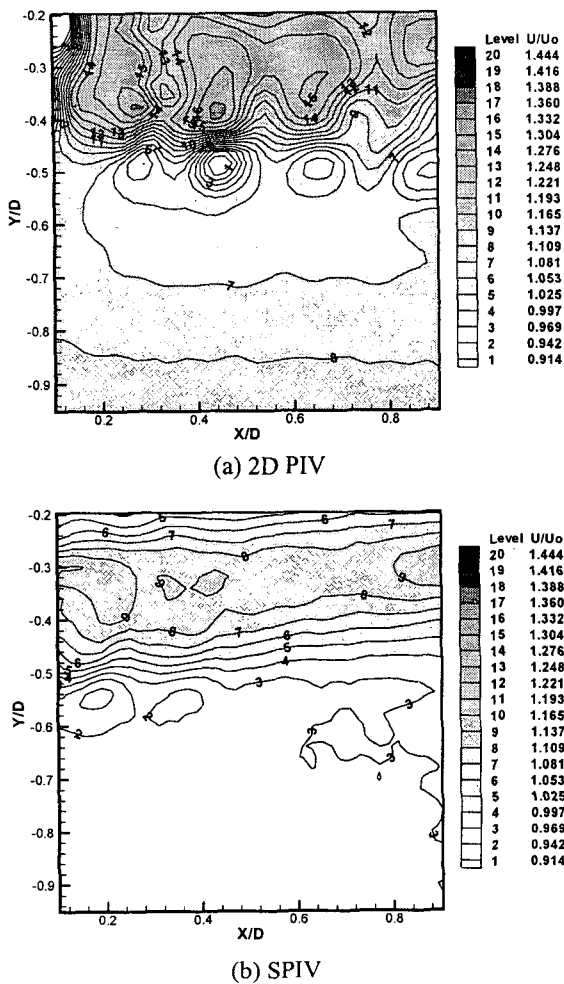


Fig. 3 Contour plots of phase-averaged axial velocity at $\phi = 0^\circ$

본 연구에서는 angular 배치방식으로 카메라를 설치하였고, Soloff(1997) 등이 개발한 3차원 보정기법을 적용하여 영상의 왜곡 및 굴절을 변화를 보정하였다. 좌우 카메라로부터 취득한 2개의 입자영상으로부터 각 카메라의 변위벡터를 구한 다음, 3차원 속도성분(축방향 속도 u , 수직방향 속도 v , out-of-plane 속도 w)을 도출하였으며 2D PIV에서와 같은 방식으로 평균속도장, 난류강도 분포 등을 구하였다

3. 결과 및 토의

Fig.3은 2D PIV와 SPIV 속도장 측정기법으로 위상평균하여 구한 축방향 속도성분의 contour를 그린 것이다. 프로펠러 날개를 따라 발달한 2개 경계층의 병합으로 인해 발생하는 축방향 속도 손실, 즉 정성후류가 날개의 끝과 프로펠러 축 근처에 나타남을 볼 수 있다. 2D PIV로 측정된 결과가 SPIV로 측정된 결과보다 다소 큰 축방향

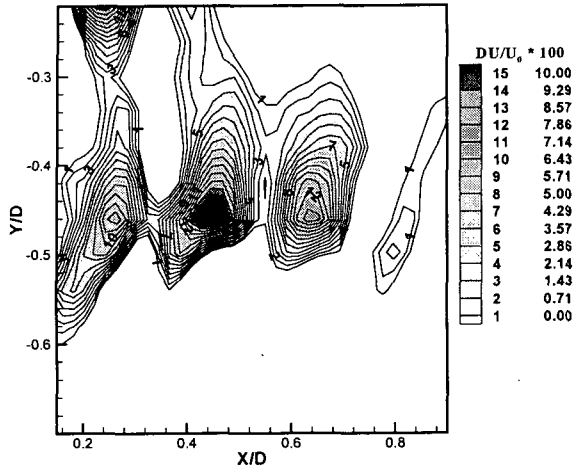
속도 결과를 보여주고 있다.

프로펠러 회전 시 발생하는 날개끝 보오텍스들은 나선형 형상을 갖고 하류로 나아가며 뒷날로부터 발생하는 후연 보오텍스는 프로펠러 날개의 경계층으로 인해 부호가 서로 반대인 2개의 전단층(shear layer)으로 이루어져 있다. Slipstream 내부에서 후류는 프로펠러에 의해 축방향으로 강한 모멘텀을 갖게 되며, 하류로 나아가면서 후류구조를 변화시키게 된다. 즉, 특정한 날개 후류의 축방향 전진속도는 날개끝 보오텍스의 축방향 전진속도 보다 빠르기 때문에, 날개 후류는 $X/D = 0.5$ 위치부터 이전 날개에서 발생한 날개끝 보오텍스의 영향을 받게 되어 후류가 변하기 시작한다. $X/D = 0.75$ 위치부터는 날개 후류가 이전 날개로부터 발생한 날개끝 보오텍스와 상호작용을 일으키게 된다. 프로펠러의 slipstream은 회전축을 향해 수축하다가 다시 팽창하게 되는데 하류로 나아가며 따라 날개끝 보오텍스는 후류의 영향을 받아 비대칭적인 형상에서 점차 대칭적인 형상으로 변해간다.

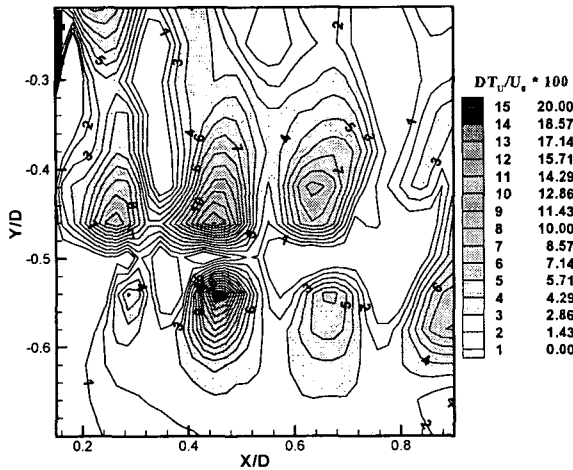
변동속도장을 통계처리하면 난류강도 분포를 구할 수 있는 있는데, 축방향 속도성분의 변동치 rms 값을 자유흐름속도(U_0)로 나누어 무차원하였다. 축방향 속도성분의 난류강도 분포를 보면 날개 끝과 후연 보오텍스 위치에 비교적 강한 난류강도가 발생하였으며 후류로 나아가며 따라 점성 소산 및 난류 확산으로 인해 점진적으로 소멸되어 감을 알 수 있다. 또, 2D PIV로 측정된 난류강도가 SPIV로 측정된 난류강도 보다 훨씬 큰 값을 보여주고 있다.

SPIV기법으로 측정된 out-of-plane 속도성분 w 를 보면 날개끝 보오텍스와 후연 보오텍스를 따라 큰 값을 가지는데 하류로 나아가며 따라 그 값은 점차 작아지며 $X/D = 0.75$ 를 지나면서 아래 위로 진동하는 날개끝 보오텍스 주위로 w 값이 집중되어 있다. 여기서 w 값이 크다는 것은 강한 out-of-plane 유동이 존재하는 것을 의미하며, 이 영역을 2D PIV로 측정할 경우 in-plane 속도성분에 적지 않은 측정오차가 나타나게 된다.

실제로 2D PIV로 측정된 프로펠러 후류 속도장에서 out-of-plane 속도성분에 기인한 측정오차가 얼마나 발생하였는가를 살펴보기 위해 같은 실험조건에서 측정된 2D PIV와 SPIV 결과들을 비교하여 보았다. 2D PIV와 SPIV 기법을 동시에 적용한 것이 아니기 때문에 측정단면의 크기에 다소 차이가 있다. 그래서 거의 같은 간격으로 발생한 날개끝 보오텍스의 위치를 기준으로 속도장 단면크기를 같게 조절하였다. Fig.4(a)는 2D PIV로 측정된 축방향 속도성분에서 SPIV로 측정된 축방향 속도성분을 뺀 결과를 나타낸다. 프로펠러 slipstream 안쪽의 날개끝



(a) difference of axial velocity component



(b) difference of axial turbulence intensity

Fig. 4 Difference between 2D PIV and SPIV results

보오텍스와 후연 보오텍스 주위에서 차이가 많이 나타나며, 2D PIV로 측정할 경우 out-of-plane 성분이 큰 영역에서 축방향 속도성분이 보다 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 2D PIV로 측정한 축방향 난류강도에서 SPIV로 측정한 축방향 난류강도를 뺀 결과(Fig.4(b))를 보면, out-of-plane 속도성분에 기인하여 측정오차가 2D PIV로 측정한 난류강도가 보다 크게 나타남을 알 수 있다. 평균속도장의 경우, 날개끝 보오텍스 주위에서 차이가 가장 크게 나타나는데 축방향 속도성분의 경우 최대 10%의 차이를 보여주고 있다. 축방향 난류강도의 경우 이 위치에서 15% 이상의 차이를 보인다. 2D PIV 기법과 SPIV 기법에서 서로 다른 분해능을 갖는 CCD 카메라를 사용하였다 할지라도 2D PIV 결과에 out-of-plane 유동의 영향이 크게 나타남을 알 수

있다. 프로펠러 후류는 회전유동의 특성상 날개끝과 후연 보오텍스에서 강한 out-of-plane 유동을 나타내므로 프로펠러의 유체역학적인 설계관점에서 out-of-plane 유동에 대한 정보가 필요하다. 즉, 프로펠러 후류를 측정할 때 SPIV 기법을 이용하여 속도장을 측정해야 out-of-plane 유동에 기인한 오차가 제거된 in-plane 유동정보를 얻을 수 있게 된다.

4. 결 론

2D PIV 기법 및 SPIV 기법을 이용하여 프로펠러 후류의 복잡한 유동구조를 실험적으로 해석하였다. Angular 배치방식의 SPIV 시스템에 3차원 보정기법을 적용하여 영상왜곡을 제거한 3차원 속도장 결과들을 구하였다.

프로펠러 날개 후방에서 주기적인 보오텍스 및 점성후류를 관측하였고 하류로 나아감에 따라 후류의 난류강도는 점차 소산되어졌다.

후연 보오텍스 및 날개끝 보오텍스는 강한 out-of-plane 속도성분을 가지며 2D PIV로 이 영역을 측정할 경우, 실제 값 보다 큰 in-plane 평균속도 및 난류강도 분포를 얻게 된다. 따라서, out-of-plane 유동에 기인한 측정오차를 제거한 in-plane 속도장을 얻기 위해서는 SPIV 기법을 이용하여 프로펠러 후류를 측정하여야 한다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다

참 고 문 헌

- 1) Cotroni, A., Di, Felice F., Romano, G.P. and Elefante, M., 2000, "Investigation of the Near Wake of a Propeller Using Particle Image Velocimetry," Experiments in Fluids, Vol.29, pp.S227-236..
- 2) Lee, S.J., Paik, B.G. and Lee, C.M. 2002, "Phase-averaged PTV measurements of propeller wake," Proceedings of 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Vol.3, pp.18-25.
- 3) Soloff, S. M., Adrian, R. J., Liu, Z.C. 1997, "Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry," Meas. Sci. Technol., Vol.19, pp.214-221.
- 4) Yoon, J.H. and Lee, S.J. 2002, "Direct comparison of 2D PIV and stereoscopic PIV measurements," Meas. Sci. Technology, Vol.13, pp.1631-1642.