

PIV 기법을 이용한 프로펠러 후류의 3차원 유동 특성 연구

백부근^{†*}, 김진^{*}, 김경열^{*}, 김기섭^{*}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{*}

Study on the Three Dimensional Flow Characteristics of the Propeller Wake
Using PIV Techniques

Bu-Geun Paik^{†*}, Jin Kim^{*}, Kyung-Youl Kim^{*} and Ki-Sup Kim^{*}

Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI^{*}

Abstract

A stereo-PIV (particle image velocimetry) technique is used to investigate the vortical structure of the wake behind a rotating propeller in the present study. A four bladed propeller is tested in a cavitation tunnel without any wake screen. Hundreds of instantaneous velocity fields are phase-averaged to reveal the three dimensional spatial evolution of the flow behind the propeller. The results of conventional 2-D PIV are also compared with those of the stereo-PIV to understand the vortical structure of propeller wake deeply. The variations of radial and axial velocities in the 2-D PIV results seem to be affected by the out-of-plane motion, generating a little perspective error in the in-plane velocity components of the slipstream. The strong out-of-plane motion around the hub vortex also causes the perspective error to vary the axial velocity component a little at the near wake region. The out-of-plane velocity component had the maximum value of about 0.3U0 in the tip vortices and continued its magnitude in the wake region.

※Keywords: Stereo-PIV(스테레오 영상속도계), Propeller wake(프로펠러 후류), Tip vortex(날개끝 보오텍스), Vortex strength(보오텍스 강도), Out-of-plane(면외), In-plane(면내)

1. 서 론

선박용 프로펠러의 후류 모델링이나 날개끝 보오텍스의 거동과 같은 정보를 수치해석을 위한 기본 자료로써 제공하기 위하여 실험적으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 프로펠러 주위 유동에 대한 수치해석의 경우 RANS(Reynolds-Averaged Navier Stokes) 방정식을 이용한 점성유동 해석 방법이 큰 주목을 받고 있다(Stern et al. 1994). Kim(2002)은 RANS 수치해석 방법과 LDV(Laser Doppler Velocimetry) 속도 계측 방법을 이용하여 날개끝(tip)에서 누출되는 보오텍스(vortex)의 코어(core) 중심, 코어 크기, 보오텍스 강도(strength) 등을 연구하였다. 그러나 수치해석을 위한 환경의 제약-격자 수 및 컴퓨팅 능력 제한 등으로 인하여 점성유동 해석 연구는 단지 $X/D < 0.2$ 의 후류 지역에 대해서만 계산이 가능하였기에 수치해석 방법의 정확한 검증 및 개선을 위해서는 보오텍스 구조에 대한 신뢰할 만한 실험적 정보를 $X/D = 0.2$ 이상의 하류 지역까지 얻을 필요가 있다.

최근 들어 피토관이나 LDV 등의 점측정 방식 외에 PIV(Particle Image Velocimetry)와 같은 속도장(velocity field) 측정 방식이 큰 관심을 받고 있다. PIV는 넓은 영역을 유동의 간섭 없이 짧은 시간 안에 계측할 수 있는 장점을 가지고 있으며 점측정 방식과는 달리 순간속도장을 얻을 수 있기 때문에 시간에 따라 변화하는 유동의 해석에도 사용되고 있다. 현범수 등(2000)은 회류수조에서 PIV 계측을 수행하여 수중익과 자유표면 사이 유동장의 순간속도와 평균속도를 계측한 후 와도분포를 구하기도 하였다. Di Felice et al.(2004)은 공동수조에서 PIV 기법을 사용하여 프로펠러 후류를 축방향을 따라 계측하고 해석하였다. 백부근 등(2006)도 공동수조에서 프로펠러 후류를 계측하여 보오텍스 거동을 해석하였다.

카메라 2대를 사용하는 스테레오 PIV 방법도 점차 널리 사용되고 있다. 일반적으로 스테레오 PIV는 일정한 각도로 두 대의 카메라를 배열하여 같은 순간에 입자영상을 취득하게 된다. 따라서 두 대의 카메라로부터 얻은 2차원 입자영상으로부터 3개의 속도성분을 얻기 위하여 보정작업이 반

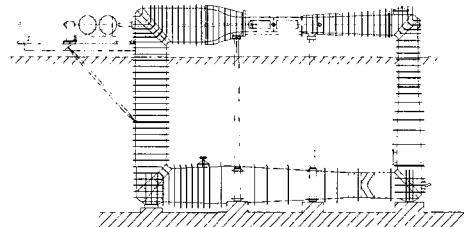


Fig. 1 Schematic diagram of a cavitation tunnel

드시 필요하다. Soloff and Adrian(1997)은 2차원 영상면과 유동 내부 3차원 측정체적 사이의 상호 관계를 보정실험을 통하여 직접 구하는 3차원 보정기법을 개발하였다. 3차원 보정기법은 영상면과 측정면 사이의 기하학적 정보를 필요로 하지 않으며, 굴절률 변화나 영상왜곡에 기인한 확대율의 공간적인 변화를 직접 측정함으로써 스테레오 PIV의 적용범위를 크게 넓혔다. 스테레오 PIV 기법을 사용하게 되면 측정 평면 내(in-plane)의 속도 성분 뿐만 아니라 측정평면에 수직한 면외(out-of-plane) 속도 성분도 함께 얻을 수 있어 복잡한 유동의 분석을 위해 유용하게 사용될 수 있다. Calcagno et al.(2002)과 이상준 등(2003)은 각각 프로펠러 후류를 횡단면과 종단면을 따라 스테레오 PIV를 이용하여 계측하였고 복잡한 후류 유동을 분석하였다.

본 연구의 목적은 스테레오 PIV 기법을 사용하여 프로펠러 후방의 복잡한 3차원 유동을 계측하고 분석하는데 있다. 프로펠러의 각 위상각에서 삼백 개의 순간속도장을 구하고 이를 위상평균(phase-averaging)하여 프로펠러 후류의 공간 발달에 대하여 살펴보았다. 일반적으로 스테레오 PIV로 계측한 결과와 2차원 PIV로 측정한 결과는 정성적으로 유사하다고 알려져 있으나 강한 면외 유동에 의해 발생할 수 있는 원근 오차에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다.

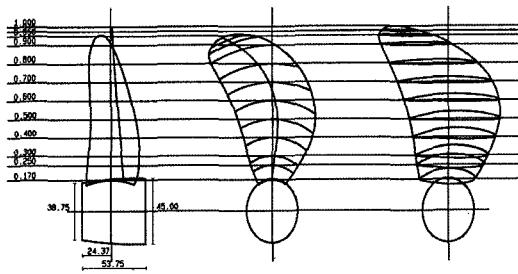
본 연구에서는 2차원 PIV에 나타나는 원근(perspective) 오차의 영향을 살펴보기 위하여 스테레오 PIV와 2차원 PIV의 해석 결과를 비교하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

프로펠러 후류 계측은 해양연구원 해양시스템안전연구소의 공동수조에서 수행되었는데 공동수조 계측부의 제원은 $2.6^{\text{L}} \times 0.6^{\text{B}} \times 0.6^{\text{D}}$ m³이다.

Fig. 1은 시험이 수행된 공동수조를 나타낸다. 공동수조의 최대 유속은 12m/s이고 수조 내부 압력은 0.1 기압(Kg/cm²)에서 2.0 기압까지 변화가 가능하다. 실험에 사용된 프로펠러 모형 KP707의 제원은 Fig. 2와 같다. 프로펠러 모형은 4개의 날개, 250 mm의 직경을 갖는다. 프로펠러의 설계 전진비는 0.6이고 평균 피치(pitch)비는 0.969로서 하중을 많이 받기 때문에 프로펠러 후류의 보오텍스 구조가 뚜렷이 나타날 것을 예측할 수 있다. 실험에 사용된 자유흐름 속도는 4 m/s, 프로펠러 회전수는 20 rps(초당 회전수)이며 이에 대응하는 프로펠러 전진비 및 Kempf 레이놀즈 수($=U_{0.7R} \cdot C_{0.7R}/v$, 여기서 $U_{0.7R}$, $C_{0.7R}$ 은 각각 프로펠러 날개 표면 위 0.7R 위치에서의 전속도, 날개 코드(chord) 길이를 의미하며 v 는 동점성 계수를 나타낸다)는 각각 0.8(저하중), 1.03×10^6 이었다.

프로펠러 후류의 속도장 측정에 사용되어진 스테레오 PIV 시스템은 Nd:Yag 레이저, 두 대의 CCD 카메라, Scheimpflug 조건을 맞추기 위한 렌즈, 회전 스테이지, 보정판 및 이송장치, 동기장치, 영상처리 장치, 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 이루어져 있다. CCD 카메라의 해상도는 1024 ×



| PROPELLER PRINCIPAL PARTICULARS | |
|---------------------------------|----------|
| DIAMETER(MM) | : 250 |
| (P/D)mean | : 0.969 |
| HUB RATIO | : 0.175 |
| SCALE RATIO | : 16.00 |
| PROP. TYPE | : FPP |
| SECTION | : NACA66 |

Fig. 2 The geometry of propeller model

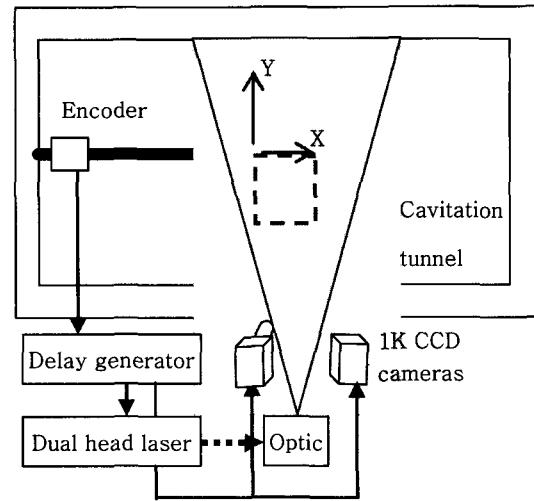


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up

1024 pixels이며, 두 대의 카메라는 $\theta = 33.4^{\circ}$ 의 각도로 기울여져 있으며 한번에 2 프레임씩 쌍으로 입자영상을 취득하였다. 이 때 Fig. 4에 나타난 것처럼 두 카메라의 영상기록 평면과 렌즈를 Scheimpflug 조건으로 기울여 각각의 카메라 렌즈면과 기록면이 측정평면과 한 점에서 만나도록 배치하게 된다. PC(perspective control) 렌즈는 렌즈의 기울임이나 병렬 이동 시에 발생하는 영상의 왜곡이나 화질 저하를 개선하여 Scheimpflug 조건을 만족시키기 위하여 특별히 설계된 것으로 광학적 특성이 매우 우수하다. Fig. 5는 Scheimpflug 조건을 만족하지 않은 영상과 잘 만족한 영상을 보이고 있는데 3차원 속도 성분을 추출하기 위해서는 Scheimpflug 조건을 잘 만족시킨 영상을 이용하는 것이 매우 바람직하다. 본 연구에서는 Scheimpflug 조건을 만족시키기 위하여 CCD 카메라의 영상면을 광학축에 대해 약 2.5도 기울여 실험을 수행하였다. 스테레오 PIV 계측을 위한 보정실험 시 먼저 직경 1mm의 흰색 점들이 10mm간격으로 마킹된 보정판을 이송장치에 부착하고 이를 레이저 평면광(laser sheet)과 평행하게 측정면에 설치한다. 보정판을マイ크로미터를 이용하여 z축 방향으로 정밀하게 이송 시켜 11개 단면에서 영상을 취득하였다. 취득한 영상들로부터

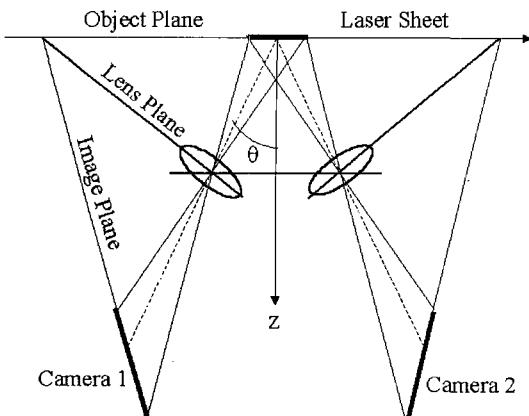
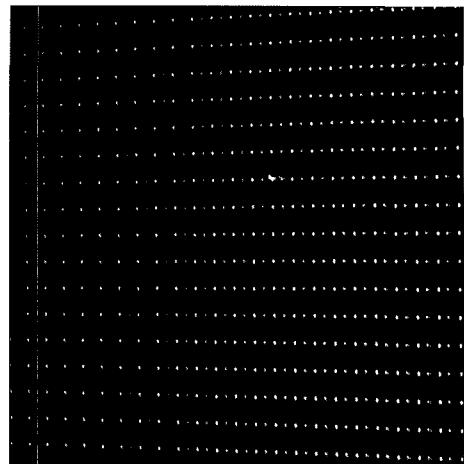


Fig. 4 Angular displacement configuration for stereo-PIV

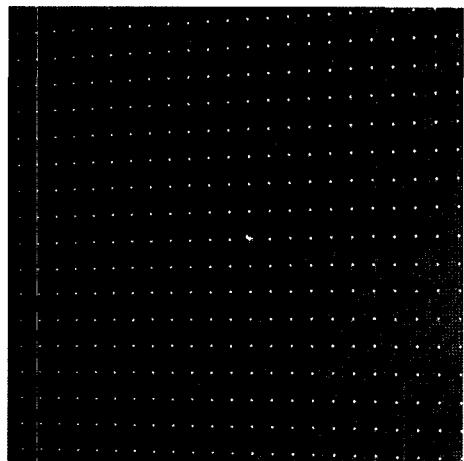
Fig. 6과 같이 속도장을 얻어 평가하여 평균 오차와 RMS (root-mean-square) 오차가 각각 1%와 3%가 됨을 확인하였다.

Nd:Yag 레이저의 노출 시간은 약 7ns이며, 에너지 레벨은 펄스당 200mJ이다. 측정하고자 하는 유동단면을 레이저 평면광으로 Fig. 3과 같이 조명하고 $13 \times 13 \text{ cm}^2$ 크기의 측정단면에서 속도장을 측정하였다. 산란입자로 사용된 폴리아미드(polyamid)는 평균 입자 직경이 20 μm 이고 밀도는 1.03 g/cm^3 이다. 스테레오 PIV의 경우 미소조사구간의 크기는 $28 \times 28 \text{ pixels}$ 이었으며 73×73 의 격자계상에서 순간속도장을 얻었다. 속도벡터에 대한 유효 공간 해상도는 1.78 mm이다.. 프로펠러 회전 축에 연결된 인코더(encoder)가 동기장치로 트리거(trigger) 신호를 보내어 레이저와 카메라를 동기시켰다. 레이저 펄스 사이의 시간간격은 250 μs 이었으며 이 시간간격 동안 프로펠러가 회전하는 각도는 1.8° 이었다. 프로펠러 날개가 수직하게 위치했을 경우를 위상각 0° 로 정의하였고 0° 부터 80° 까지 10° 간격으로 입자영상을 촬득하였다.

본 연구에서 사용된 좌표계와 측정면에서 X축은 프로펠러 축을 따라 하류로 나아가는 방향이며 Y축은 윗방향, Z축은 수평방향으로서 좌현(port)쪽을 가리킨다. 원점은 프로펠러 평면의 중심에 위치하고 모든 거리는 프로펠러 직경(D)으로 무차



(a) bad condition



(b) good condition

Fig. 5 Target images captured by right side camera

원화 하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 7는 회전(위상)각 $\phi = 10^\circ$ 에서 축방향 순간간속도장에서 전달속도(convective velocity) $U_c = 0.95U_0$ 를 뺀 변동 속도장을 나타낸다. 여기서 U_0 는 자유흐름속도를 의미한다. 전달속도를 적절히 선정하게 되면 프로펠러 후류의 날개끝 보오텍스들이 프로펠러 slipstream 안에서 명확하게 나타

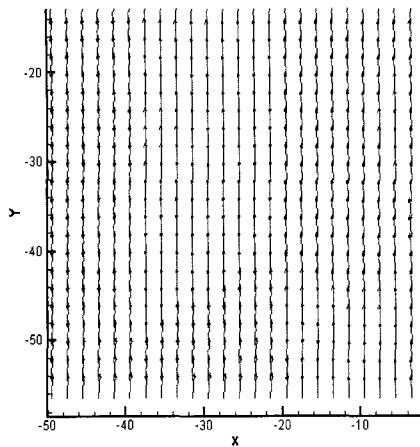


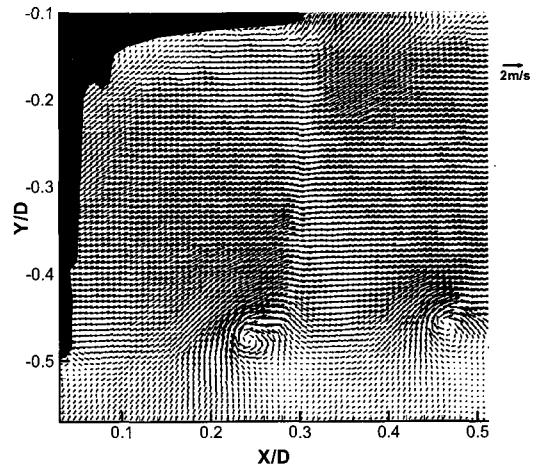
Fig. 6 Velocity field from the calibration process

남을 확인할 수 있다. 스테레오 PIV로 측정한 속도장 결과가 Fig. 7(a)에 나타나 있는데 날개끝 보오텍스, 뒷날개(trailing) 와도(vorticity) 그리고 프로펠러 slipstream과 자유흐름 사이의 경계를 볼 수 있다. 이러한 프로펠러 후류의 특징은 Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 전형적인 2차원 PIV를 사용하여 얻은 속도장에도 똑같이 나타난다.

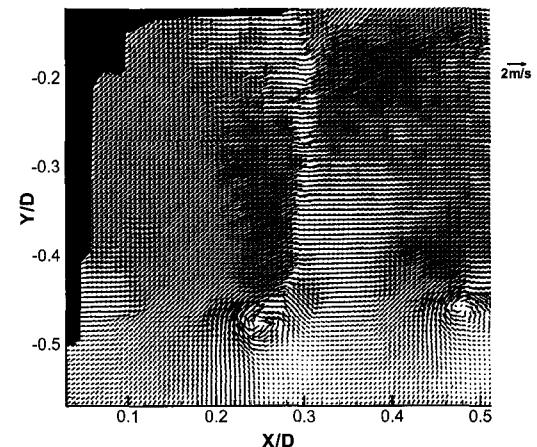
Fig. 8은 스테레오 PIV로 측정한 프로펠러 후류의 속도장을 나타낸 것이다. 여기서 W는 Z방향 면외 속도를 의미하며 음의 부호는 -Z방향 면외 속도를 나타낸다. 프로펠러 허브 주위에 강한 면외 운동이 Z방향으로 나타나고 있으며 프로펠러의 반류면을 따라 역시 Z방향 면외 운동이 존재함을 볼 수 있다. 그러나 날개끝 보오텍스의 경우 X-Y 면에서 시계방향으로 회전하므로 3차원 속도장에서는 -Z방향의 면외 운동이 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 허브 보오텍스, 뒷날개 와도와 날개끝 보오텍스에서 강한 면외 운동이 나타나고 그 외 지역에서는 면외 운동이 미약하게 존재한다. 프로펠러 후류에서 나타나는 면외 운동은 2차원 PIV 계측 시 원근 오차를 유발시킬 수 있으므로 이에 대한 조사가 필요하다.

백부근 등(2005, 2006)은 이미 낮은 레이놀즈 수와 높은 레이놀즈 수의 조건에서 2차원 PIV를 사용하여 프로펠러 후류를 측정하였고 그 특성을 분석하였다.

프로펠러 후류의 가장 큰 특징은 축방향 속도분



(a) Stere-PIV



(b) 2-D PIV

Fig. 7 Fluctuation velocity field at the phase angle of 10°

포에서 나타나는 점성후류(viscous wake)와 반지름 방향 속도분포에서 나타나는 뒷날개 와도의 변화이다. 2차원 PIV에서 축방향을 따라 측정한 결과는 프로펠러 후류의 회전유동 특성상 원근오차를 포함할 수밖에 없다. 이러한 원근오차가 얼마나 어떤 범위에서 발생하는지 조사하기 위해서는 2차원 PIV의 면내(in-plane) 속도성분에서 면외(out-of-plane) 속도성분을 추출할 수 있는 스테레오 PIV를 이용하여 결과를 비교하는 것이 바람직하다.

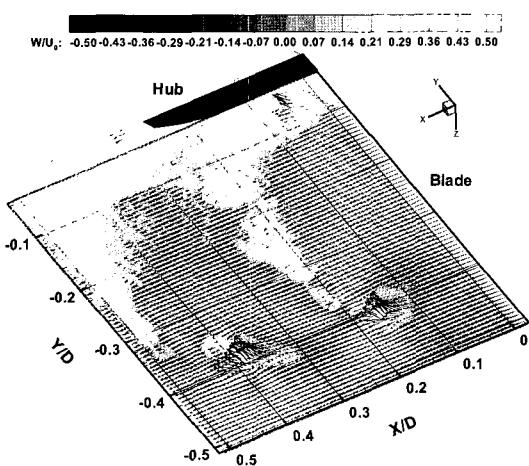


Fig. 8 Three dimensional velocity field of propeller wake

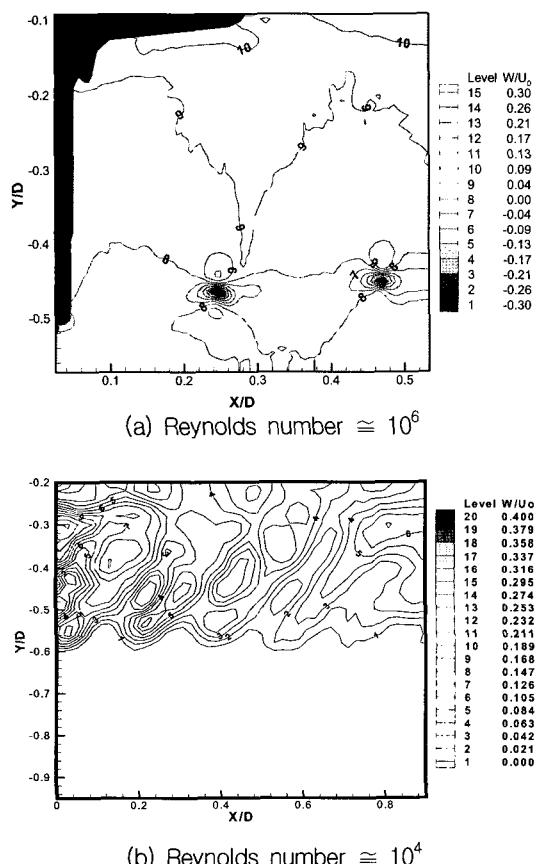


Fig. 9 Spatial distribution of out-of-plane velocity component W

Fig. 9(a)는 스테레오 PIV로 측정한 프로펠러 후류의 면외 속도성분을 나타낸다. Z방향의 면외 속도성분 W는 프로펠러 slipstream 내의 날개끝과 뒷날개 와도를 따라 큰 값을 가지고 있다. 그러나 프로펠러 slipstream 외부에서는 W/U₀ 값이 대부분 0이므로 면내 운동이 지배적임을 알 수 있다. 면외 속도성분의 최대 크기는 첫 번째 날개끝 보오텍스의 코어에서 자유흐름속도 보다 약 30% 정도 크게 형성되고 있다. 그리고 면외 속도성분의 크기는 두 번째 날개끝 보오텍스에서도 유사한 값을 유지하고 있다. 면외 속도성분은 날개끝과 뒷날개 와도를 제외한 프로펠러 slipstream의 내부와 외부에서 자유흐름 속도의 1.05배 이하의 작은 값을 갖는다. 날개끝 보오텍스 주위에서 강한 면외 운동이 존재하기 때문에 2차원 PIV 기법으로 프로펠러 후류를 계측할 경우 약간의 원근 오차를 초래할 수 있다. 비축류 방향의 유동은 추진 에너지를 비효율적으로 소비함을 뜻하므로 면외 속도성분 W가 프로펠러의 최적 설계를 위한 제어 변수로서 사용될 수도 있다.

Lee 등(2004)은 낮은 레이놀즈 실험 조건에서 면외 속도성분의 크기가 프로펠러 하류 방향으로 나아감에 따라 감소한다고 보고하였다. 비록 Lee 등이 사용한 프로펠러가 컨테이너선을 위한 것이기에 본 연구에 사용된 프로펠러와 그 특성이 다르지만 후류의 정성적인 거동은 유사할 것이라고 사료된다.

Lee 등의 결과를 Fig. 9(b)에 나타내었는데 본 연구의 결과와 큰 차이를 보여 실험이 수행된 레이놀즈 수가 프로펠러 후류의 면외 속도분포에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 즉, 낮은 레이놀즈 수에서는 프로펠러 후류가 하류방향으로 진행하면서 강한 정성 효과로 인해 날개끝 보오텍스 코어가 확장되어 면외 속도성분을 더욱 감소시킬 수 있다. 그러나 높은 레이놀즈 수에서는 Fig. 9(a)에서 보는 바와 같이 면외 속도성분이 날개끝 보오텍스 코어에 집중되고 코어의 크기도 매우 작게 형성되며 하류로 나아갈지라도 일정한 크기를 유지하고 있다.

Fig. 10은 위상각이 10°일 경우 몇 개의 반지름 방향 위치에서 스테레오 PIV 및 2차원 PIV로 계측

한 반지름 속도 profile을 나타낸 것이다. 프로펠러 날개의 뒷날개 끝단으로부터 생성되는 뒷날개 와도는 반지름 방향 속도성분에서의 속도 점프(jump)로써 표현된다. 반지름 방향 속도의 점프는 $X/D = 0.3$ 주위에서 $r/R = 0.3$ 부터 $r/R = 0.7$ 까지 프로펠러의 반류면(wake sheet)를 따라 나타난다.

백부근 등(2006)의 논문에서 언급한 바와 같이 속도 점프의 profile은 $r/R = 0.7$ 에서 속도가 후향 계단(backward-facing step) 모양으로 점프하여 $r/R = 0.3$ 구간에서의 점프 모양과는 차이를 보인다. 즉, $r/R < 0.7$ 에서 반지름 방향 속도성분의 변화가 $r/R = 0.7$ 에서의 반지름 방향 속도성분의 변화와는 반대로 나타나게 된다. 반지름 방향 위치가 $r/R = 0.9$ 에 가까워짐에 따라 날개끝 보오텍스가 속도 점프에 큰 영향을 주고 있다. 반지름 방향 위치가 $r/R = 0.3$ 과 0.7일 때 $0.1 < X/D < 0.3$ 의 하류 지역에서 2차원 PIV는 스테레오 PIV의 경우보다 큰 값을 보인다. 프로펠러 slipstream내에서 나타나는 면외 운동이 원근 오차를 발생시켰으며 이 오차는 2차원 PIV로 계측한 면내 속도를 약간 증가시킨 것으로 사료된다. Fig. 7을 보면 면외 운동에 의해 나타나는 반지름 방향 속도의 계측 차이가 뒷날개 와도가 존재하는 $X/D = 0.3$ 위

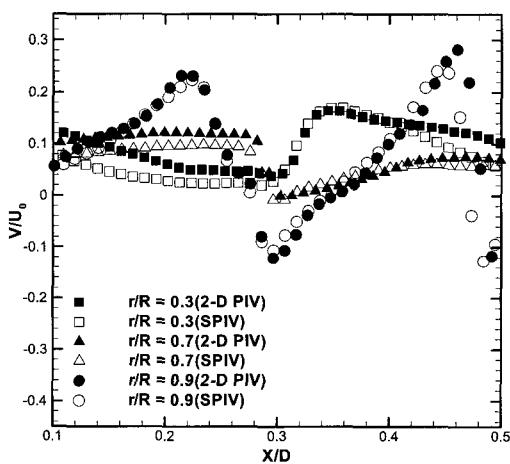


Fig. 10 Comparison of radial velocity profiles at several locations at $\phi = 10^\circ$

치 근방에서 감소하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 후류가 $X/D = 0.4$ 이상의 하류로 나아감에 따라 그 차이는 다시 커지게 된다. 면외 운동이 강하게 나타날 것으로 예상되는 뒷날개 와도에서 오히려 원근 오차가 감소하고 있어 면외운동과 날개끝 보오텍스 사이의 관계를 살펴 볼 필요가 있다.

Fig. 11은 위상각 10° 에서 얻은 축방향 profile들이다. 정성후류라고 불리는 속도결손이 $X/D = 0.3$ 에서 공통적으로 나타났다. 하류 지역 $0 < X/D < 0.2$ 에서 허브 또는 뒷날개 보오텍스의 영향으로 2차원 PIV의 경우 반지름 방향 위치 $r/R = 0.3$ 에서 약간의 원근 오차가 발생하여 스테리오 PIV 보다 큰 축방향 속도 분포를 보이고 있다. 2차원 PIV로부터 얻어진 축방향 속도는 $r/R = 0.7$ 경우에 $X/D = 0.2$ 하류 위치 이후에서 스테레오 PIV 결과보다 큰 값을 갖는다. 반지름 방향 거리가 $r/R = 0.9$ 에 가까워짐에 따라 날개끝 보오텍스들은 점성후류의 특징을 제거하면서 큰 속도구배를 발생시킨다. 시계방향으로 회전하는 날개끝보오텍스는 하류 위치 $X/D = 0.24$ 와 0.48 주위에서 원근오차의 영향으로 축방향 속도의 크기를 다소 증가시키고 있다.

정성후류는 축방향 속도에서 뿐만 아니라 Fig. 12에서 보는 바와 같이 면외 속도 W/U_0 에서도

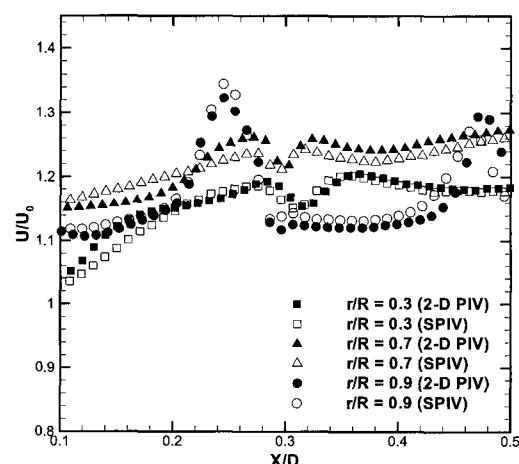


Fig. 11 Comparison of axial velocity profiles at several radial locations at $\phi = 10^\circ$

나타난다. 속도결손이 $X/D = 0.32$ 근처에서 발생하였으나 반지름 방향 거리가 $r/R = 0.9$ 에 가까워짐에 따라 빠르게 감소한다. 면외 속도성분의 크기는 날개끝 보오텍스의 영향에 있는 영역을 제외하고는 매우 작다. 2차원 PIV에서 계측한 축방향 속도성분은 스테레오 PIV로 계측한 속도성분과 유사한 값을 가졌으며 두 값의 차이는 최대 약 1.5% 정도였다. 일반적으로 약 3% 정도의 측정오차를 가지고 있는 스테레오 PIV를 고려할 때 그 차이는 매우 작은 값을 의미한다. 비록 날개끝 보오텍스 주위의 영역이 강한 면외 운동성분을 가지고 있다고는 하나 모든 반지름 방향 거리에서 축방향 속도성분은 면외 운동에 의해 큰 영향을 받지 않았음을 알 수 있다. 이러한 결과를 볼 때 $J = 0.8$ (저하중)의 프로펠러 slipstream에서 면외 운동은 slipstream의 축방향 속도성분에 심각한 원근 오차를 발생시키지 않음을 유추할 수 있다.

Fig. 12는 또한 반지름 방향 위치 $r/R = 0.3$ 에서 면외 속도성이 프로펠러 후류의 하류 위치에 따라 달라지고 있음을 보인다. 즉, $X/D = 0.1$ 에서는 면외 속도가 약 0.30이었으나 프로펠러 후류가 하류로 나아감에 따라 점차 감소하고 있다. 허브 보오텍스에 의해 발생하는 강한 면외 유동 역시 원근 오차에 약하게나마 기여를 하고 있는데 Fig. 11에서 보는 바와 같이 하류 영역 $0 < X/D < 0.2$ 에서 축방향 속도에 영향을 주어 2차원 PIV 계측 값이 약간 크게 나타났다. Fig. 12는 또한 반지름 방향 위치 $r/R = 0.3$ 에서 면외 속도성이 프로펠러 후류의 하류 위치에 따라 달라지고 있음을 보인다. 즉, $X/D = 0.1$ 에서는 면외 속도가 약 0.30이었으나 프로펠러 후류가 하류로 나아감에 따라 점차 감소하고 있다. 허브 보오텍스에 의해 발생하는 강한 면외 유동 역시 원근 오차에 약하게나마 기여를 하고 있는데 Fig. 11에서 보는 바와 같이 하류 영역 $0 < X/D < 0.2$ 에서 축방향 속도에 영향을 주어 2차원 PIV 계측 값이 약간 크게 나타났다.

프로펠러 후류가 하류로 나아감에 따라 면외 유동이 감소하기 때문에 $X/D = 0.5$ 위치에서 두 개의 PIV 기법으로 계측한 값들이 서로 유사한 값을 보인다. 반지름 방향 위치 $r/R = 0.9$ 이고 하류 위치 $X/D = 0.28$ 에서 면외 속도성분은 최고 크기를

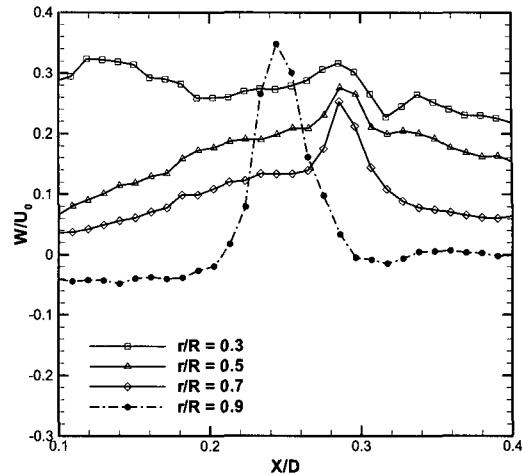


Fig. 12 Variation of out-of-plane velocity profiles at several radial locations at $\phi = 10^\circ$

보이고 있으며 프로펠러 반류면의 뒷날개 와도로부터 초래되는 면외 유동이 2차원 PIV로 계측한 축방향 속도 값에 미약한 영향을 주고 있음을 Fig. 11을 통해 확인할 수 있다.

저하중에 대한 프로펠러 후류의 계측 결과들을 살펴 볼 때 날개끝 보오텍스와 허브 보오텍스 주위의 유동을 제외한다면, 계측 방법에 있어 조심스러운 단계들을 거쳐야 하는 스테레오 PIV를 어렵게 이용하지 않더라도 비교적 다루기 용이한 2차원 PIV를 이용하여 유용한 결과를 얻을 수 있다고 사료된다. 그러나 본 연구는 저하중에 대해서만 다루었으므로 설계 하중 및 고하중에 대한 추가 연구를 수행한 후에 면외 유동에 의한 원근 오차의 영향을 심도 있게 살펴보아야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 프로펠러 후류의 보오텍스 구조의 특성을 자세히 살펴보기 위하여 스테레오 PIV를 이용하여 계측하였고 원근 오차의 영향을 파악하기 위하여 2차원 PIV 기법을 이용하여 계측한 속도장 결과들과 비교하였다. PIV 계측은 축방향을 따라 프로펠러의 회전각 0° 부터 80° 까지 9개의 위상각에서 수행되었다.

스테레오 PIV로 측정하게 되면 허브, 날개끝 보

오텍스 등과 뒷날개 와도 등에서 강한 면외 운동이 나타남을 정량적으로 가시화할 수 있으므로 추후 프로펠러 설계에 대한 신뢰성 검토 등을 위해 유용한 자료로 사용할 수 있다.

스테레오 PIV와 비교할 때 2차원 PIV 계측 결과는 반지름 방향 및 축방향 속도 성분에서 면외 운동에 의한 약간의 변동이 있으나 프로펠러 slipstream 내에서 각각의 속도 성분에 원근 오차를 일으킬 만큼 크지 않았다. 허브 보오텍스 주위의 강한 면외 유동은 원근 오차를 증가시켜 $0 < X/D < 0.2$ 영역에서 축방향 속도 성분에 영향을 미친다. 프로펠러 후류의 날개끝 보오텍스에서 최대 면외 속도 성분은 자유흐름 속도의 약 0.3배에 달하고 이 값은 $X/D = 0.5$ 영역 안의 날개끝 보오텍스에서 일정한 값을 유지한다.

후기

선박의 유체성능 고도화 기반 기술 개발(PN00770)과 고부가가치 선박 산학연 공동연구기 반구축(PG01540)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문현

- 백부근, 이정엽, 이상준, 2005, “자유표면과 수심 깊이가 회전하는 프로펠러 주위 유동에 미치는 영향에 대한 PIV 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 42 권, 제 5호, pp. 427-434.
- 백부근, 김진, 박영하, 김기섭, 김경열, 2006, “캐비테이션 터널에서 PIV를 이용한 프로펠러 후류 보오텍스 유동계측 및 거동해석,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 6호, pp. 619-630.
- 이상준, 백부근, 윤정환, 2003, “Stereoscopic PIV기법을 이용한 선박용 프로펠러 후류의 3차원 속도장 측정,” 대한기계학회논문집(B), 제 27권, 제 12호, pp. 1716-1723.
- 현범수, 최경신, 도덕희, 2000, “PIV를 이용한 수중의 주위 복잡유동장의 정량적 계측,” 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 3호, pp. 37-44.
- Calcagno, G., Di Felice, F., Felli, M. and Pereira, F., 2002, "Propeller Wake Analysis behind a Ship by Stereo PIV," Proceedings of 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, pp. 112-127.
- Di Felice, F., Di Florio, D., Felli, M. and Romano, G.P., 2004, "Experimental Investigation of the Propeller Wake at Different Loading Conditions by Particle Image Velocimetry," J. of Ship Research, Vol. 48, No. 2, pp. 168-190.
- Kim, J., 2002, Sub-visual Cavitation and Acoustic Modeling for Ducted Marine Propulsor, Ph. D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Iowa.
- Lee, S.J. and Paik, B.G., 2004, "Stereoscopic PIV Measurements of Flow around a Marine Propeller," Journal of Visualization, Vol. 7, No. 1, pp. 25-32.
- Soloff, S.M. and Adrian, R.J., 1997, "Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry," Meas. Sci. Technology, Vol. 15, pp. 1441-1454.
- Stern, F., Zhang, D., Chen, B., Kim, H. and Jessup, S., 1994. "Computation of Viscous Marine Propulsors Blade and Wake Flow," Proceedings of 21st Symposium on Naval Hydrodynamics, Santa Barbara CA.



< 백 부 근 >



< 김 진 >



< 김 경 열 >



< 김 기 섭 >