

자유표면과 수심깊이가 회전하는 프로펠러 주위 유동에 미치는 영향에 대한 PIV 해석

백부근* · 이정엽* · 이상준†

PIV analysis of free surface effects on flow around a rotating propeller with varying water depth

Bu Geun Paik, Jung Yeop Lee and Sang Joon Lee

Abstract

The effects of free surface on wake behind a rotating propeller were investigated experimentally in a circulating water channel with the variation of water depth. Instantaneous velocity fields were measured using two-frame PIV technique at four different blade phases and ensemble-averaged to investigate the phase-averaged flow structure in the wake region. For an isolated propeller, the flow behind the propeller is influenced by the propeller rotation and the free surface. The phase-averaged mean velocity fields show that the potential wake and the viscous wake are formed by the boundary layers developed on the blade surfaces. The interaction between the tip vortices and the slipstream causes the oscillating trajectory of tip vortices. Tip vortices are generated periodically and the slipstream contracts in the near-wake region. The presence of free surface affects the wake structure largely, when the water depth is less than $0.6D$. The free surface modifies the vortex structure, especially the tip and trailing vortices and flow structure in slipstreams of the propeller wake behind $X/D = 0.3$.

Key Words : Propeller Wake(프로펠러 후류), Tip Vortex(날개끝 보오텍스), Free Surface(자유표면)

	기호설명
U	streamwise velocity component
U_0	free stream velocity
J	advance ratio, $J = V_a/(nD)$
V_a	advance speed of propeller
n	revolution per second
D	propeller diameter
ϕ	phase angle of propeller rotation
T	water depth
ω_z	spanwise vorticity

1. 서론

최근 선박의 대형화 및 소요마력 증가에 따라 프로펠러 날개의 기하학적 형상도 점차 복잡하게 변해 왔다. 프로펠러 날개에 걸리는 하중의 증가는 선미 진동 및 소음의 주요 원인이 되는 공동(cavitation) 현상을 일으킬 뿐 아니라 선박의 추진 성능을 저하시킬 수 있다. 특히, 프로펠러는 단독으로 회전하지 않고 선박의 후미에 부착되어 있기 때문에 선체 반류의 영향을 크게 받는다. 또한 프로펠러 단독 실험 시 프로펠러는 적절한 수심에 놓여 있으나, 실제 선박 뒤에서 회전할 때에는 선박의 흘수(draft)로 인해 상대적으로 수심(water depth)이 얇기 때문에 자유표면의 영향을 다소 많이 받게 된다. 선박의 추진 성능을 정확히 이해하기 위해서는 회전하는 프로펠러 주위 흐름의 유동특성을 이해하여야 하며 자유표면 효과도 함께 검토해야 한다.

지금까지 회전하는 선박 프로펠러의 추진성능은

† 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

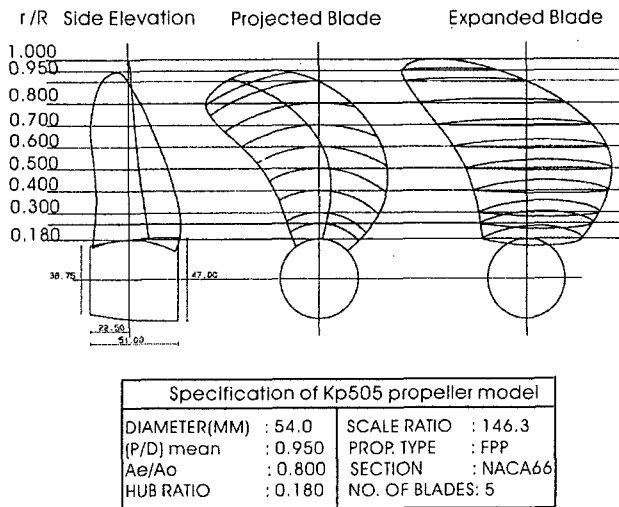


Fig. 1 The geometry of propeller model

자유표면에 의한 영향을 배제한 상태에 예측되어 왔다. 그러나 실제 프로펠러는 자유표면과 선미반류(hull wake)의 영향을 받기 때문에 정확하게 추진성을 예측하게 하기 위해서는 자유표면의 영향을 고려한 프로펠러 반류면 모델링이 필요하다. 따라서 자유표면의 영향이 고려된 프로펠러 후류에 대한 신뢰성 있는 실험 데이터를 바탕으로 수치해석 코드를 개선하는 작업이 필요하다.

지금까지 프로펠러 후류 측정 시 주로 사용된 방법은 LDV나 피토관 등에 의존하였으나, 넓은 유동영역을 측정하는데 많은 시간과 노력이 요구된다. 특히 넓은 영역을 위상평균하여 속도장을 분석하기 위해서는 매우 많은 시간이 소요된다. 이에 반해 PIV(particle image velocimetry) 속도장 측정기법을 이용하게 되면 유동을 간섭하지 않고, 넓은 영역의 유동을 짧은 시간 내에 측정할 수 있다. 최근에 Controni(2000) 등과 Lee(2004a) 등은 단독으로 회전하는 프로펠러 후류를 각각 PIV와 PTV(particle tracking velocimetry) 속도장 측정기법을 이용하여 해석하였다. 특히, Lee(2004b) 등은 SPIV(Stereoscopic PIV)를 이용하여 프로펠러 후류의 3차원 유동특성을 연구하였으며 그 결과를 2-D PIV 결과와 비교하기도 하였다(2004c). 또한 Paik(2004) 등은 자유표면이 있는 경우, 선박 모형에 부착되어 회전하는 프로펠러 주위 유동을 PIV 속도장 측정기법으로 조사하였다.

본 연구에서는 2-D PIV기법을 이용하여 단독으로 회전하는 프로펠러 후류에 대한 자유표면의 영향을 살펴보고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

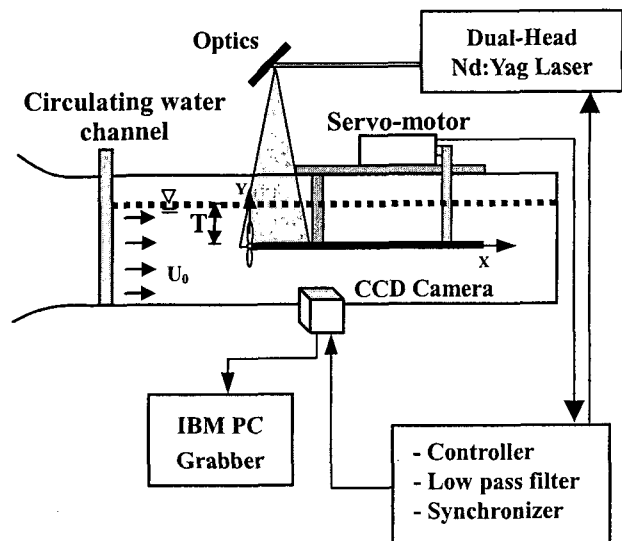


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

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 2048×2048 pixels이며, 한번에 2 프레임씩 쌍으로 유동영상을 취득하였다.

프로펠러 후류 측정을 수행한 회류수조의 시험부 재원은 120^L × 30^W × 25^H cm³ 이다. 속도장 측정을 위해 사용된 프로펠러는 KRISO 3600TEU 컨테이너선을 위한 KP505 모델이며 재원은 Fig.1과 같다. 레이저 평면광을 회류수조 위 쪽에서 아래 방향으로 조사하고, 9.1×9.1cm² 크기의 측정단면에서 속도장을 측정하였다.

컨테이너선의 자항점에서 전진비 (advance ratio)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 μ m이었다. 프로펠러를 구동시키기 위하여 인코더(encoder)가 내장된 서보모터를 이용하였고 0.36° 분해능의 인코더 동기신호를 이용하여 CCD 카메라와 레이저를 동기시켰다. 또한 트레이스에 연결된 프로펠러 구동 시스템을 Y축을 따라 위 아래로 자유롭게 이동하게 하여 프로펠러가 잠기는 수심 깊이 T를 조절하였다.

본 실험에 사용한 프로펠러는 5개의 날개를 가지며, 하나의 날개에 대해 18° 간격으로 4개의 위상으로 나누어 속도장을 측정하였다. 이 때 2개의 레이저 펄스 사이의 시간간격 Δt 는 300 μ s로 고정 하였다. 각각의 위상각에 대해 400장의 순간 속도장을 얻고 이들을 앙상블 통계 처리하여 평균속도장, 난류강도 분포 등을 구하였다.

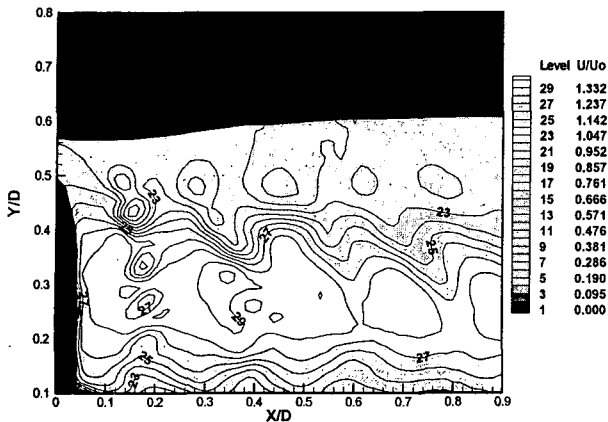


Fig. 3 Phase-averaged axial velocity at $\phi = 0^\circ$ and $T/D = 0.6$

3. 결과 및 토의

Fig. 3은 위상각이 0° 인 경우, 위상평균한 축방향 속도성분의 공간분포를 나타낸 것이다. 프로펠러 평면은 $X/D = 0$ 에 위치하며 프로펠러 축(shaft)은 $Y/D = 0$ 에, 프로펠러 날개끝은 $Y/D = 0.5$ 에 위치하고 있다. 프로펠러 축은 자유표면으로부터 $T/D = 0.6$ 에 위치하고 있으나 프로펠러로 인해 $0 < X/D < 0.4$ 구간에서 자유표면이 프로펠러를 향해 볼록해져 자유표면의 형상이 달라진 것을 볼 수 있다.

프로펠러 날개를 따라 발달한 2개 경계층의 병합으로 인해 발생하는 축방향 속도 손실이 날개 끝과 축 근처에 나타나고 있다. 프로펠러의 slipstream 안에서 축방향 속도 손실을 의미하는 점성후류(viscous wake)가 날개 끝과 프로펠러 축 근처에 비해 작아짐을 알 수 있다. 자유표면이 $Y/D = 0.6$ 에 위치할 경우, 날개 끝($Y/D = 0.5$)에서 발생하는 속도결손은 프로펠러 직후방 $X/D = 0.1$ 위치에서 발생하기 시작한다. 속도결손은 하류로 나아가면서 크게 증가하며 $X/D = 0.5$ 위치에서 약 30%의 속도 손실이 발생하였음을 Fig. 4에서 볼 수 있다. 프로펠러 후류가 하류로 더 나아가면 속도결손은 점차 감소하여 $X/D = 0.9$ 위치에서 자유 흐름 속도와 비슷한 값을 가지나 여전히 속도결손의 흔적은 남아 있다. 이러한 속도결손은 프로펠러 날개 끝 부근에서만 나타나는 것이 아니라 slipstream 안에서 나타나는데, $0 < X/D < 0.5$ 구간에서 최대 약 5%의 속도결손이 발생한 후 속도손실을 회복하게 된다. 그러나 프로펠러 축이 시험부의 중심에 위치하는 $T/D = 2.5$ 의 경우, 속도결손이 $X/D = 0.3$ 위치단면에서 최대 10% 정도 나타났으며 slipstream 안에서는 $X/D = 0.1$ 위치에서 약 3%의 속도결손을 보인 후 하류로 나아가면서 속도결손을 빠르게 회복하는 모습을 보이고 있다.

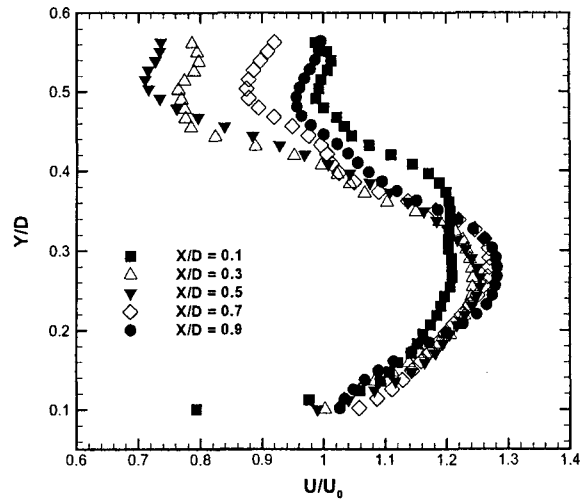


Fig. 4 Variation of axial velocity profiles at several downstream locations at $\phi = 0^\circ$ and $T/D = 0.6$

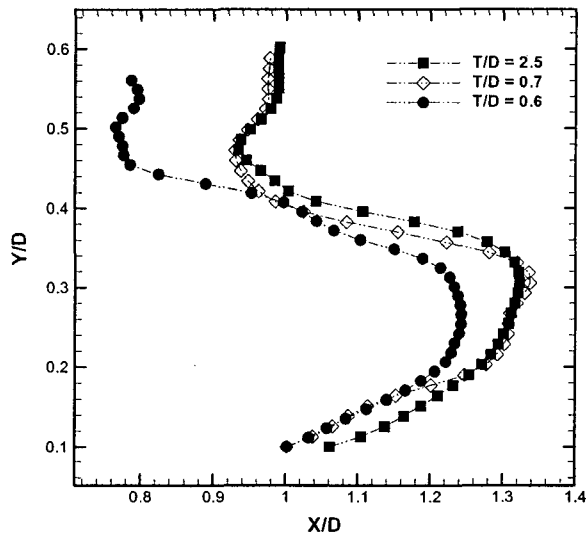


Fig. 5 Variation of axial velocity profiles at several T/D locations at $\phi = 0^\circ$ and $X/D = 0.3$

Fig. 5는 $X/D = 0.3$ 하류 위치에서 slipstream의 축방향 속도 profile을 수심 T/D 에 따라 나타낸 것이다. 날개 끝 부근 흐름의 속도분포를 보면 $0.7 \leq T/D \leq 2.5$ 에서는 속도결손이 크게 변화가 없으나 프로펠러가 잠긴 수심 깊이 T/D 가 0.6보다 작아지게 되면 속도결손이 크게 발생하고 있다. 속도결손은 slipstream 안에서 발생하고 있는데 $T/D = 0.6$ 의 경우 약 6.7%의 속도결손이 나타났다. 또한 $0.7 \leq T/D \leq 2.5$ 실험조건에서는 $Y/D = 0.32$ 위치에서 최대 축방향 속도값을 가지나 $T/D = 0.6$ 에서는 $Y/D = 0.25$ 위치에서 최대 축방향 속도가 발생하여 자유표면이 축방향 속도분포에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 위상각이 0° 이고 $T/D = 0.6$ 인 경우의 와도(ω_z)장 결과를 나타낸 것인데, 프로펠러 후류가 자유표면에 가까워지게 되면 후류의 와구조가 영

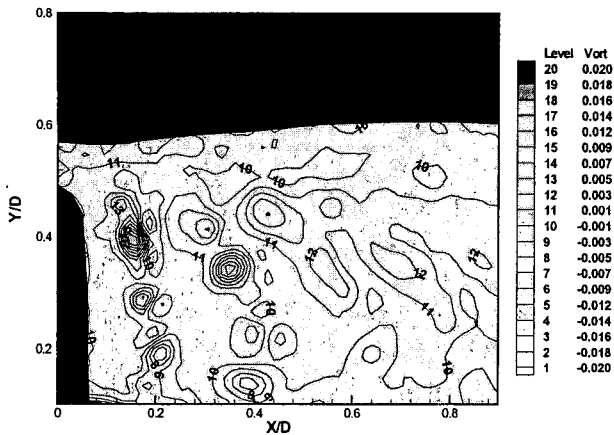


Fig. 6 Contour of phase-averaged vorticity at $\phi = 0^\circ$ and $T/D = 0.6$

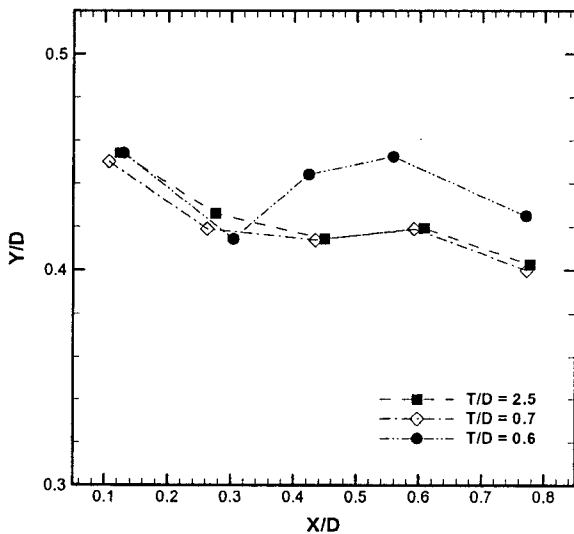


Fig. 7 Traces of tip vortices with respect to water depth at $\phi = 0^\circ$

향을 받아 날개끝 보오텍스의 궤적이 양의 Y축 방향으로 상승하며 하류로 나아가는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 수심 깊이가 T에 따른 날개끝 보오텍스의 궤적 변화를 보여준다. 수심이 $0.7 \leq T/D \leq 2.5$ 구간에서는 거의 비슷한 궤적을 따라 날개끝 보오텍스들이 이동하고 있으며 $X/D = 0.45$ 하류 위치까지 궤적이 수축되고 있음을 볼 수 있다. 또한 $X/D = 0.6$ 부근에서 날개끝 보오텍스와 후류면 사이의 상호작용이 일어나 궤적이 요동하게 된다. 그러나 설치 깊이가 $T/D = 0.6$ 이 되면 $X/D = 0.3$ 까지 궤적이 수축된 후 하류로 나아가함에 따라 궤적이 확장되어진다. 즉, $X/D > 0.3$ 하류 위치에서 후류의 와 구조가 자유표면의 영향을 받아 날개끝 보오텍스

들이 자유표면 쪽으로 상승하고 있다.. 이러한 자유표면의 영향은 날개끝 보오텍스와 후류면 사이의 상호작용에도 영향을 미쳐 $X/D > 0.3$ 구간에서 날개끝 보오텍스의 궤적을 크게 요동하게 하는 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 2-D PIV기법을 이용하여 단독으로 회전하는 프로펠러 후류에 대한 자유표면의 영향을 분석하였다.

자유표면은 프로펠러 slipstream 내부의 축방향 속도를 저하시킬 뿐만 아니라 날개끝 부근의 축방향 속도성분을 저하시켜 날개끝 보오텍스 거동에 영향을 준다. 또한 자유표면은 $X/D = 0.3$ 하류 위치부터 와구조에 영향을 주어 날개끝 보오텍스들을 자유표면 쪽으로 상승하도록 한다. 따라서 수심 변화는 정압(static pressure)과 자유표면의 형상 변화 뿐만 아니라 프로펠러 후류 구조에도 크게 영향을 미치는 것으로 사료된다.

선박설계 시 날개끝 보오텍스에 의한 공동현상이나 수중소음 등을 보다 정확히 예측하기 위해서는 이와 같은 자유표면 효과를 고려하여야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

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," *Exp. in Fluids*, Vol.29, pp.S227-236.
- 2) Lee, S.J., Paik, B.G. and Lee, C.M., 2004a, "Phase-averaged PTV Measurements of Propeller Wake," *J. of Ship Research*, accepted.
- 3) Lee S.J., Paik, B.G., Yoon, J.H. and Lee, C.M., 2004b, "Three Component Velocity Field Measurements of Propeller Wake Using Stereoscopic PIV Technique," *Exp. in Fluids*, Vol.36(4), pp.575~585.
- 4) Lee, S.J. and Paik, B.G., 2004c, "Stereoscopic PIV measurements of Flow around a Marine Propeller," *J. of Visualization*, Vol.7(1), pp.25~32.
- 5) Paik, B.G., Lee, C.M. and Lee, S.J., 2004, "PIV Analysis of Flow around a Container Ship Model with a Rotating Propeller," *Exp. in Fluids*, Vol.36(6), pp.833~846.