

## 자유표면과 수심깊이가 회전하는 프로펠러 주위 유동에 미치는 영향에 대한 PIV 해석

백부근\*†, 이정엽\*\*, 이상준\*\*

한국해양연구원 해양시스템안전연구소\*  
포항공과대학교 기계공학과\*\*

### 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\*\*

Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI\*  
Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology\*\*

#### Abstract

The free surface influenced the wake behind a rotating propeller and its effects were investigated experimentally in a circulating water channel with the variation of water depth. Instantaneous velocity fields were measured using two-frame PIV technique and ensemble-averaged to study the phase-averaged flow structure in the wake region. For an isolated propeller, the flow behind the propeller is affected only by the propeller rotation speed, the loading on the blades and the proximity of the propeller to the free surface. The phase-averaged mean velocity fields show that the potential wake and the viscous wake developed on the blade surfaces. The interaction between the tip vortices and the slipstream causes the oscillating trajectory of tip vortices. The presence of the free surface greatly affected the wake structure, especially for propeller immersion depth of 0.6D. At small immersion depths, the free surface modified the tip and trailing vortices and the slipstream flow structure downstream of  $X/D = 0.3$  in the propeller wake.

※Keywords: Propeller wake(프로펠러 후류), Tip vortex(날개끝 보오텍스), Free surface(자유표면)

---

접수일: 2005년 4월 29일, 승인일: 2005년 6월 14일

†주저자, E-mail : ppaik@postech.ac.kr

Tel : 042-868-7694

#### 1. 서론

선박의 대형화 및 소요마력 증가는 프로펠러 날개의 기하학적 형상을 점차 복잡하게 변화시켜

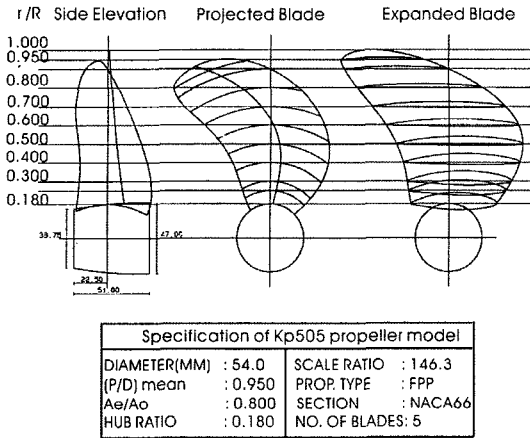


Fig. 1 The geometry of propeller model

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 흡수(draft)로 인해 상대적으로 수심(water depth)이 얇기 때문에 자유표면의 영향을 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 자유표면에 의한 영향을 배제한 상태에서 예측되어 왔다. 그러나 실제 프로펠러는 자유표면과 선미반류(hull wake)의 영향을 받기 때문에 정확하게 추진성능을 예측하기 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 피토포관 등에 의존하였으나, 넓은 유동영역을 측정하는데 많은 시간과 노력이 요구된

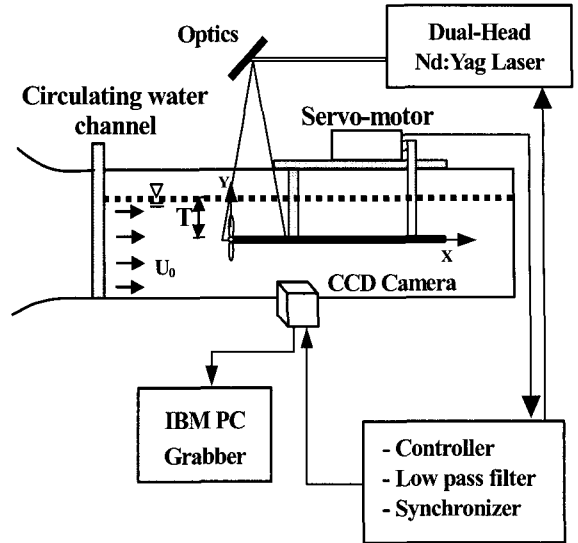
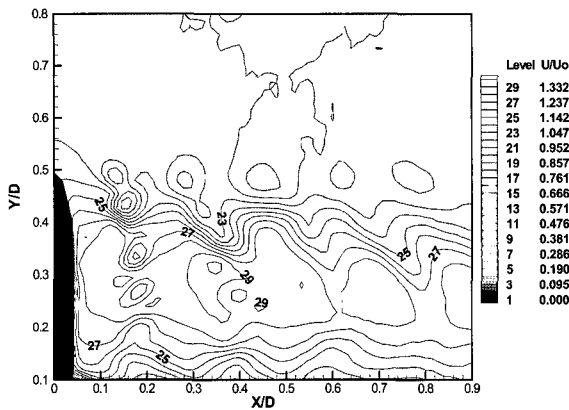


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

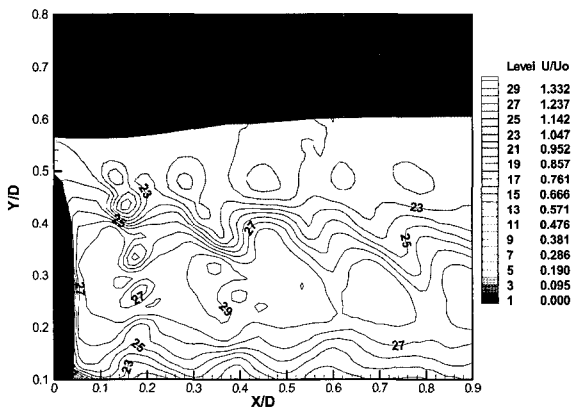
다. 특히 넓은 영역을 위상평균하여 속도장을 분석하기 위해서는 특별한 노력과 많은 시간이 소요된다. 이에 반해 PIV(particle image velocimetry) 속도장 측정기법을 이용하게 되면 유동을 간섭하지 않고, 넓은 영역의 유동을 짧은 시간 내에 측정할 수 있다. 최근에 Controni et al.(2000)과 백부근과 이상준(2002a)은 단독으로 회전하는 프로펠러 후류를 각각 PIV와 PTV(particle tracking velocimetry) 속도장 측정기법을 이용하여 해석하였다. 특히, 백부근과 이상준(2002b)은 SPIV(Stereoscopic PIV)를 이용하여 프로펠러 후류의 3차원 유동특성을 연구하였으며 그 결과를 2차원 PIV 결과와 비교하기도 하였다(Lee and Paik 2004). 또한 백부근과 이상준(2003)은 자유표면이 있는 경우, 선박 모형에 부착되어 회전하는 프로펠러 주위 유동을 PIV 속도장 측정기법으로 조사하였으며 이 결과들을 자유표면을 제거하였을 경우의 프로펠러 주위 유동과 비교하기도 하였다(Paik et al. 2005).

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

## 2. 실험 장치 및 실험 방법



(a) T/D = 2.5



(b) T/D = 0.6

Fig. 3 Phase-averaged axial velocity at  $\phi = 0^\circ$

프로펠러 후류의 속도장 측정을 위한 2차원 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 개의 프레임씩 쌍으로 유동영상을 취득하였다. 프로펠러 후류 측정을 수행한 회류수조의 시험부 제원은 120<sup>L</sup> × 30<sup>W</sup> × 25<sup>H</sup> cm<sup>3</sup>이다. 속도장 측정을 위해 사용된 프로펠러는 KRISO 3600TEU 컨테이너선을 위한 KP505 모델이며 제원은 Fig. 1과 같다. 레이저 평면광을 Fig. 2와 같이 회류수조 위 쪽에서 아래 방향으

로 조사하고, 9.1×9.1cm<sup>2</sup> 크기의 측정단면에서 속도장을 측정하였다. 컨테이너선의 자항점에서 전진비 (advance ratio)는  $J = 0.72$ 이며 이에 대응하는 프로펠러의 초당 회전수는 8.37rps이었다. 프로펠러에 날개에 걸리는 하중이 어떻게 프로펠러 후류에 영향을 미치는가를 알아보기 위해 전진비가 0.59(고하중), 0.72(설계하중), 0.88(저하중)에서 속도장을 측정하였다. 실험시 자유흐름 속도는 32.5cm/s로 고정시켰는데 프로펠러 직경에 기초한 레이놀즈 수는 약 18000이었다. 실험에 사용한 산란입자는 silver coated hollow glass 입자이며 평균 직경은 약 10 $\mu$ m이었다. 프로펠러를 구동시키기 위하여 인코더(encoder)가 내장된 서보모터를 이용하였고 0.36° 분해능의 인코더 동기신호를 이용하여 CCD 카메라와 레이저를 동기시켰다. 또한 트레이버스에 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  $\Delta t$ 는 300  $\mu$ s로 고정 하였다. 각각의 위상각에 대해 400장의 순간 속도장을 얻고 이들을 양상불 통계 처리하여 평균속도장, 평균와도 분포 등을 구하였다.

### 3. 결과 및 토의

Fig. 3은 전진비가 0.72이고 위상각이 0°인 경우, 위상평균한 축방향 속도성분의 공간분포를 나타낸 것이다. 프로펠러 평면은 X/D = 0에 위치하며 프로펠러 축(shaft)은 Y/D = 0에, 프로펠러 날개끝은 Y/D = 0.5에 위치하고 있다. Fig. 3(a)의 경우 프로펠러가 잠긴 깊이는 T/D = 2.5이다. 프로펠러 날개 표면을 따라 발달한 2개의 경계층의 병합으로 인해 프로펠러 날개 끝 근처에서 속도결손이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 축방향 속도결손을 의미하는 점성후류(viscous wake)는 slipstream (0 < Y/D < 0.5) 안에서 크게 감소하였다. 프로펠러 축

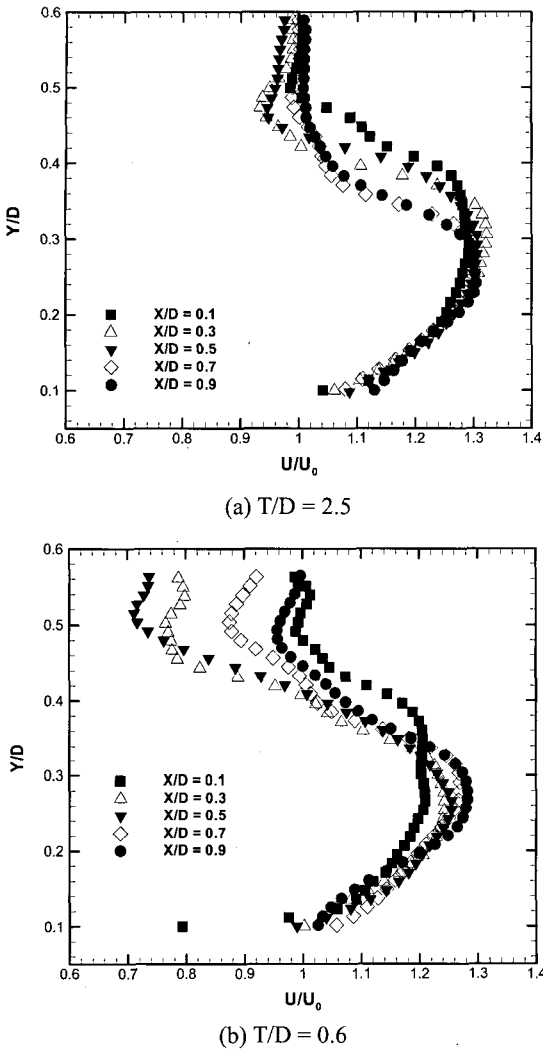


Fig. 4 Variation of axial velocity profiles at several downstream locations at  $\phi = 0^\circ$

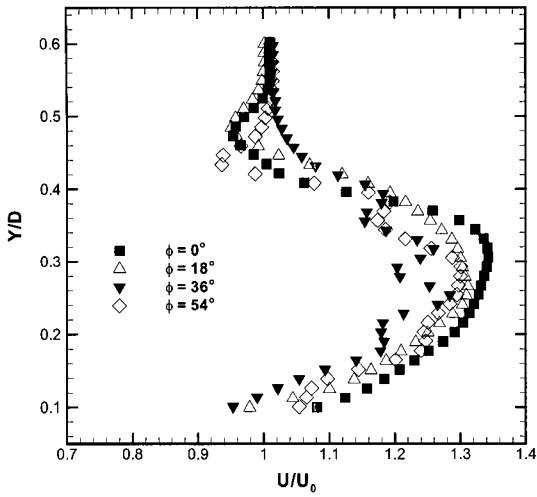
이 자유표면에 가까워지는  $T/D = 0.6$ 의 경우에는 프로펠러의 작동으로 인해  $0 < X/D < 0.4$  구간에서 자유표면이 프로펠러를 향해 오목해져 자유표면의 형상이 달라진 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 전진비가 0.72, 위상각이  $0^\circ$ 인 경우에 프로펠러가 잠기는 수심 변화에 따라 프로펠러 후방 하류로 나아가면서 측정한 축방향 속도 profile이다. 수심 깊이  $T/D$ 가 2.5일 때를 보면 축방향 속도 손실이 날개의 끝( $Y/D = 0.5$ ) 안 쪽에서 나

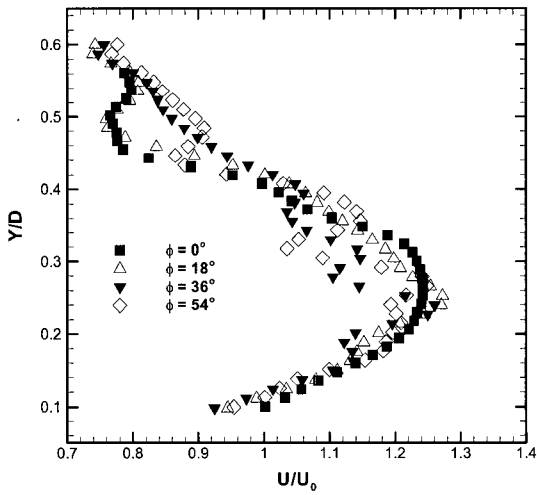
타나고 있음을 뚜렷이 볼 수 있다. 프로펠러의 slipstream에서 점성후류가 날개 끝에 비해 작아짐을 알 수 있으며  $X/D = 0.3$ 에서 최대의 속도 손실을 보인 후 하류로 나아가기에 따라 점차 속도 손실이 회복됨을 알 수 있다. 일반적으로 낮은 레이놀즈 수에서는 프로펠러 날개 표면 위에서 층류 경계층이 형성되므로 경계층의 유동 박리(separation)가 난류 경계층 보다 빨리 일어나게 된다. 이러한 빠른 경계층 박리는 원심력을 약화시켜 점성후류가 프로펠러 날개 끝 안 쪽, 즉  $Y/D < 0.5$  영역에서 발생하도록 한다. 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. 프로펠러 후류는 하류로 나아가기에 따라 난류 확산, 소산 그리고 주위 유체와의 활발한 혼합으로 인하여 slipstream 관의 지름 및 점성 후류의 크기가 점차 감소한다.

프로펠러 축이  $T/D = 0.6$ 에 위치할 경우, 날개 끝 ( $Y/D = 0.5$ )에서 발생하는 속도결손은 프로펠러 직 후방  $X/D = 0.1$  위치에서 나타나기 시작한다. 속도결손은 하류로 나아가면서 크게 증가하며  $X/D = 0.5$  위치에서 약 30%의 속도 손실이 발생하였음을 Fig. 4(b)에서 볼 수 있다. 특히, 속도결손이 날개끝 위치 ( $Y/D = 0.5$ )에서 주로 발생하고 있어  $T/D = 2.5$ 의 경우와는 다른 모습을 보여주고 있다. 즉, 프로펠러 날개에서 발생하는 층류 경계층 보다 프로펠러 상방의 자유표면이 축방향 속도결손에 더 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 프로펠러 후류가 하류로 더 나아가면 속도결손은 점차 감소하여  $X/D = 0.9$  위치에서 자유흐름 속도와 비슷한 값을 가지나 여전히 속도결손의 흔적은 남아 있다. 이러한 속도결손은 프로펠러 날개 끝 부근에서만 나타나는 것이 아니라 slipstream 영역에서도 나타나는데,  $0 < X/D < 0.5$  구간에서 최대 약 5%의 속도결손이 발생한 후 속도손실을 회복하게 된다.

Fig. 5는 전진비가 0.72이고  $X/D = 0.3$  위치에서 위상각 변화에 따른 축방향 속도 profile을 나타낸 것이다.  $T/D = 2.5$ 의 경우, 다른 위상각과는 달리



(a)  $T/D = 2.5$



(b)  $T/D = 0.6$

Fig. 5 Axial velocity profiles with the variation of phase angles at  $J = 0.72$  and  $X/D = 0.3$

위상각 36°에서 속도결손이 사라지게 된다. 이것은 프로펠러 후류가 이웃한 프로펠러 날개들 사이에 놓인 측정 단면을 지나기 때문에 정성후류가 순간적으로 약화 되는 것으로 사료된다. 위상각 36°와 54°에서는 프로펠러 날개가 측정단면과 거리가 멀어지기 때문에 날개끝 근처의 정성후류 뿐만 아니라 slipstream 안의 축방향 유동 구조가

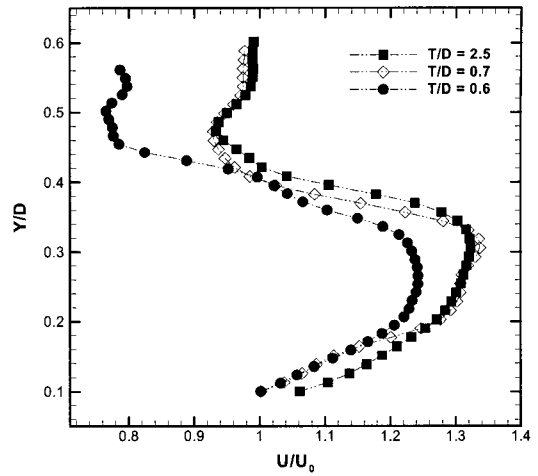


Fig. 6 Variation of axial velocity profiles at several  $T/D$  locations at  $\phi = 0^\circ$  and  $X/D = 0.3$

전체적으로 변화됨을 알 수 있다. 즉,  $0.2 < Y/D < 0.4$  영역에서 축방향 속도 크기가 작아지고 불안정한 속도분포를 갖게 된다.

프로펠러 축을  $T/D = 0.6$ 으로 옮길 경우, 프로펠러는 자유표면의 영향을 받게 되어 속도결손이 크게 증가하게 된다. 자유표면에 가까워질 수록 축방향 속도는 점차 작아져 날개끝 위치에서는 자유흐름 속도의 약 70% 정도 만을 나타낸다. 비록 slipstream 안에서 속도 profile 형태는  $T/D = 2.5$ 와 비슷하나 최대 축방향 속도 크기는 더 작아짐을 볼 수 있다. 위상각 0°와 18°는 서로 비슷한 속도 profile을 보이고 있으나 위상각 36°와 54°는 불안정한 속도분포와 점성후류의 큰 감소를 보이고 있다.

Fig. 6은  $X/D = 0.3$  하류 위치에서 slipstream의 축방향 속도 profile을 수심  $T/D$ 에 따라 나타낸 것이다. 날개 끝 부근 흐름의 속도분포를 보면  $0.7 < T/D < 2.5$ 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  $0.7 < T/D < 2.5$  실험조건에서는  $Y/D = 0.32$  위치에서 최대 축방향 속도값을 가지나  $T/D = 0.6$ 에서는  $Y/D = 0.25$  위치에서 최대 축방향 속

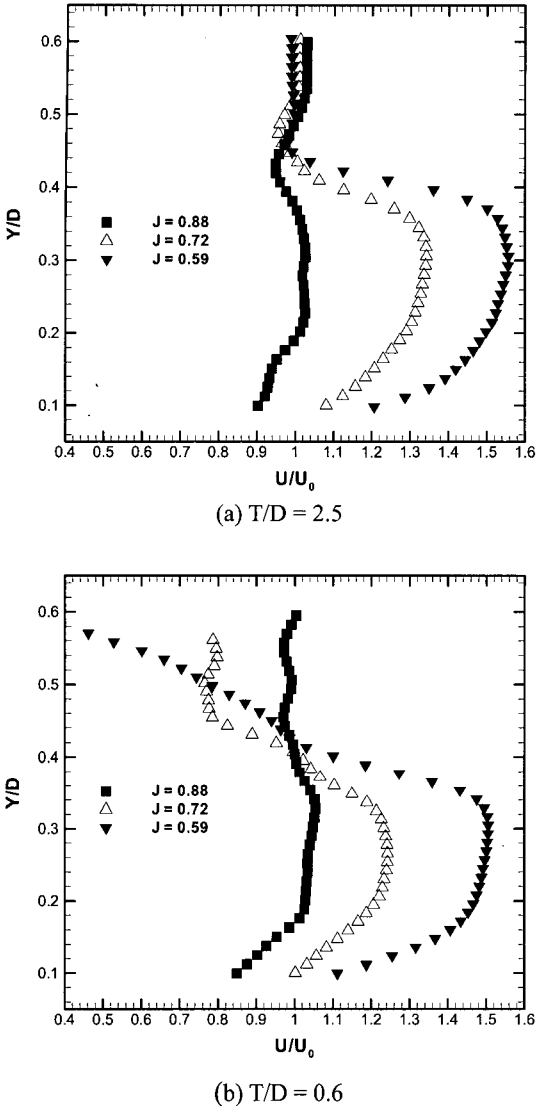


Fig. 7 Variation of axial velocity profiles at three loading conditions at  $\phi = 0^\circ$  and  $X/D = 0.3$

도가 발생하여 자유표면이 축방향 속도분포에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 선박이 발라스트(ballast) 조건으로 운항 시 프로펠러가 자유표면에 특정 값 이하로 가까워지게 되면 추력이 감소될 수 있음을 예측할 수 있다. 따라서 발라스트와 같은 낮은 흘수 조건으로 운항이 불가피한 선박의 경우, 모형실험에서 추력 손

실이 없는 프로펠러 잠김 깊이 구간을 미리 살펴볼 필요가 있다.

프로펠러 날개에 걸리는 하중과 자유표면에서의 상대적 거리는 축방향 속도 분포에 큰 영향을 미친다. Fig. 7에서  $T/D = 2.5$ 의 경우 자유표면은 후류 구조에 영향을 주고 있지 않으나 프로펠러 하중은 프로펠러 후류에 뚜렷한 영향을 주고 있다. 프로펠러에 고하중( $J = 0.59$ )이 걸릴 경우에는 slipstream 영역 안에서 축방향 속도를 크게 증가시키나 날개끝 영역에서는 속도결손을 감소시킨다. 반면에 저하중이 프로펠러 날개에 주어질 경우( $J = 0.88$ )에는 slipstream 영역 안에서 속도결손이 증가하며, 심지어 음의 추력이 발생하는 breaking 조건을 야기시킨다. 이러한 효과는 잠재적으로 프로펠러에 의해 충분하지 못한 추력을 초래하게 한다. 또한 다른 하중( $J = 0.59, 0.72$ )의 경우와는 달리 점성후류가 프로펠러 축에 더 가까운 곳( $Y/D = 0.42$ )에서 형성이 된다.

$T/D = 0.6$ 의 프로펠러 후류 구조는  $T/D = 2.5$ 와는 매우 다른 모습을 보인다. 설계하중( $J = 0.72$ )의 경우 날개 끝 근처에서 축방향 속도가 20% 정도 감소하게 되며 점성후류의 흔적이  $Y/D = 0.5$ 에 남아 있다. 저하중 ( $J = 0.88$ ) 조건에서는 slipstream 안에서 자유흐름 속도( $U_0$ )를 유지하나 날개끝으로 갈수록 불안정한 속도분포를 보인다. 고하중 ( $J = 0.59$ ) 조건에서는 날개끝 위치에서 특이한 속도 분포를 보인다. 즉,  $Y/D > 0.4$  영역에서 점차 감소하는 속도 profile이 나타나게 된다. 이는 slipstream 안에서 축방향 모멘텀(momentum)을 크게 증가시키기 위해 slipstream 외부 ( $Y/D > 0.5$ )에서 모멘텀을 slipstream 안으로 전이시켰기 때문이라고 사료되며 이에 따라  $Y/D > 0.4$  영역에서 축방향 속도가 점차 감소하게 된다.

Fig. 8은 전진비 0.72, 위상각  $0^\circ$ 에서 위상평균된 날개 폭 방향의 와도장( $\omega_z$ )을 나타낸 것이다.  $T/D = 2.5$ 의 경우에는 날개끝 보오텍스들이 날개 끝으로부터 발생되어 주기적인 간격을 가지고 하류로 나아간다. 또한 날개 끝단에서 형성된 후연 보오텍스들은 2개의 와도층으로 구성되어 프로펠러 날개끝 보오텍스와 연결이 된다. 날개끝과 후연 보오텍스들의 거동은 날개끝과 slipstream 영

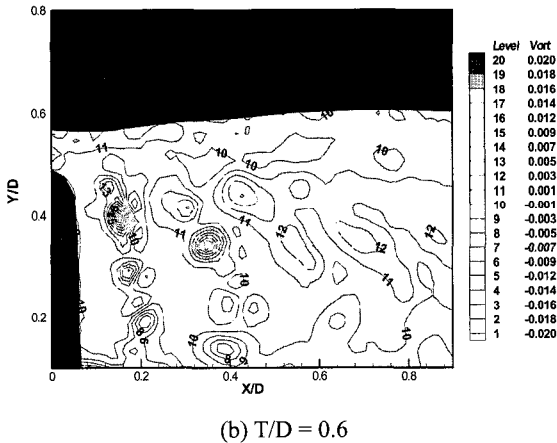
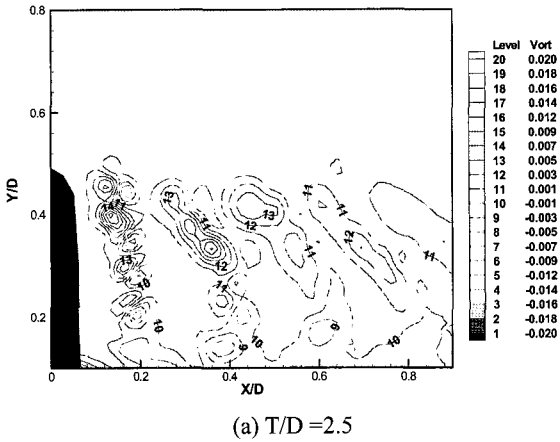


Fig. 8 Contour of phase-averaged vorticity at  $\phi = 0^\circ$

역에서 축방향 속도분포의 차이를 뚜렷이 나타낸다. 프로펠러 후류 영역의  $X/D = 0.2$  까지는 날개 끝과 slipstream 영역 사이의 축방향 속도 차이는 크지 않다. 그러나 하류로 더 나아가게 되면 날개 끝과 slipstream 영역 사이의 축방향 속도 차이는 점차 커져 결국, 후연 보오텍스 층이 프로펠러 후류 구조에서 떨어져 나가게 된다. 또한 와도의 세기가 점차 감소하여 날개 끝 보오텍스와 후연 보오텍스의 구분이 모호해진다.

프로펠러가 잠기는 깊이  $T/D$ 를 0.6으로 작게 하면 프로펠러 후류의 와구조는 자유표면의 영향을 크게 받게 된다. 비록 후연 보오텍스의 거동은  $T/D = 2.5$ 의 경우와 유사하게 보이지만 날개 끝 보오텍스들은  $T/D = 2.5$ 의 경우와는 다른 거동을

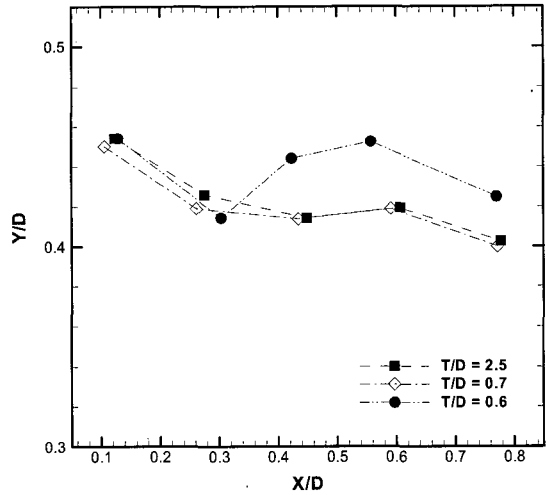


Fig. 9 Traces of tip vortices with respect to water depth at  $\phi = 0^\circ$

보인다. 즉, 프로펠러 후류가 자유표면에 가까워지게 되면 후류의 와구조가 영향을 받아 날개 끝 보오텍스의 궤적이 양의  $Y$ 축 방향으로 상승하며 하류로 나아가게 된다. 또한  $T/D = 0.6$ 의 경우는  $T/D = 2.5$ 의 경우에 비해 후연 보오텍스의 세기가 날개 끝 보오텍스의 세기 보다 더 커지고, 보오텍스들의 와도 값이 전체적으로 증가하였음을 알 수 있다.

Fig. 9는 수심 깊이  $T/D$ 에 따른 날개 끝 보오텍스의 궤적 변화를 보여준다. 수심이  $0.7 < T/D < 2.5$  구간에서는 거의 비슷한 궤적을 따라 날개 끝 보오텍스들이 이동하고 있으며  $X/D = 0.45$  하류 위치까지 궤적이 수축되고 있음을 볼 수 있다. 또한  $X/D = 0.5$  부근에서 날개 끝 보오텍스와 후류면 사이의 상호작용이 시작되고 날개 끝 보오텍스의 궤적이 요동하게 된다.

그러나 잠김 깊이가  $T/D = 0.6$  이 되면  $X/D = 0.3$  까지 궤적이 수축된 후 하류로 나아감에 따라 궤적이 확장되어진다. 즉,  $X/D > 0.3$  하류 위치에서 후류의 와구조가 자유표면의 영향을 받아 날개 끝 보오텍스들이 자유표면 쪽으로 상승하고 있다. 이러한 자유표면의 영향은 날개 끝 보오텍스와 후류면 사이의 상호작용에도 영향을 미쳐  $X/D > 0.3$  구간에서 날개 끝 보오텍스의 궤적을 크게 요동하

게 하는 것으로 보인다.  $X/D = 0.58$  위치에서 유동의 진폭이 가장 크며 프로펠러 후류가 하류로 나아감에 따라 프로펠러 축을 향해 다시 수축하게 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 2-D PIV 기법을 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 변화뿐만 아니라 프로펠러 후류 구조에도 크게 영향을 미치는 것으로 이해된다.

특히, 발라스트와 같은 낮은 흘수 조건에서 프로펠러가 작동하는 경우에는 프로펠러 날개끝 보오텍스에 의한 공동현상이나 수중소음 등을 보다 정확히 예측하기 위해서는 이와 같은 자유표면 효과를 고려하여야 할 것이다

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원과 차세대 친환경 해양운송시스템 기반기술 개발(II)(PE00950)의 일부로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 백부근, 이상준, 2002a, "위상평균 PTV 기법을 이용한 프로펠러 반류의 속도장 측정," 대한조선학회 논문집, 제 39 권, 제 3 호, pp. 41-47.
- 백부근, 이상준, 2002b, "Stereoscopic PIV 기법을 이용한 프로펠러 반류의 3 차원 속도장 측정," 제 2 회 한국유체공학학술대회 논문집, pp. 185-188.
- 백부근, 이상준, 2003, "PIV를 이용한 프로펠 후류의 속도장 측정," 대한조선학회 논문집, 제 40권, 제 5호, pp. 17-25.
- 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.
- Lee, S.J. and Paik, B.G., 2004, "Stereoscopic PIV measurements of Flow around a Marine Propeller," J. of Visualization, Vol.7(1), pp. 25-32.
- Paik, B.G. Lee, C.M and Lee, S.J., 2005, "Comparative measurements on the flow structure of a marine propeller wake between an open free surface and closed surface flows," J. of Marine Sci. & Tech., Vol.10(3), pp.123-130.



< 백 부 근 >

< 이 정 업 >

< 이 상 준 >