

PIV 를 이용한 선박 프로펠러 후류의 속도장 계측

백부근*, 이상준**

포항공과대학교 기계공학과*

PIV Velocity Field Measurements of Flow around a Ship with Rotating Propeller

Bu-Geun Paik* and Sang-Joon Lee*

Dept. of Mechanical Eng., Pohang Univ. of Science and Technology*

Abstract

Velocity field behind a container ship model with a rotating propeller has been investigated using PIV (particle image velocimetry) system. Four hundred instantaneous velocity fields were measured at 4 different blade phases and ensemble-averaged to investigate the spatial evolution of vortical structure of near wake within one propeller diameter downstream. The phase-averaged mean velocity fields show the potential wake and the viscous wake formed due to the boundary layers developed on the blade surfaces. The interaction between bilge vortex developed along the hull surface and the tangential velocity component of incoming flow causes to have asymmetric flow structure in the transverse plane.

※Keywords: PIV(입자영상속도계), propeller wake(프로펠러 후류), tip vortex(날개끝 보오텍스), trailing vortex(후연(trailing) 보오텍스), bilge vortex(빌지 보오텍스), viscous wake(점성반류)

1. 서론

선박의 대형화 및 소요마력 증가는 프로펠러 날개에 걸리는 하중을 증가시켜 왔는데, 이 하중의 증가는 선미 진동 및 소음의 주요 원인이 되는 공동(cavitation) 현상을 일으킬 뿐 아니라 선박의 추진 성능을 저하시키고 선원들에게 좋지 않은 승선감을 제공할 수 있다 특히, 날개 끝 보오텍스나 허브(hub) 보오텍스는 추진효율을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 타(rudder)에 공동현상을 발생시켜 부식이나 침식의 원인이 될 수도 있다.

이러한 문제들을 개선하기 위하여 프로펠러들은 복잡한 기하학적 형상을 가지게 되었으며 프로펠러 후류도 이전보다 복잡한 3 차원 유동구조를 보여주고 있다. 이에 따라 보다 정확한 실험적, 이론적 해석이 요구되어지고 있다.

백부근/이상준(2002)은 2-D PTV (particle tracking velocimetry)와 3-D SPIV (stereoscopic PIV) 등의 속도장 측정기법을 사용하여 단독으로 회전하는 프로펠러 후류의 유동특성을 조사하였다. 이들 연구를 통해 프로펠러 후류의 수축, 반류면과 날개끝 보오텍스의 상호작용 및 날개끝 보오텍스의 거동을 관찰하였으며, 3 차원 속도성분들을 측정하여 프로펠러 후류의 out-of-plane 거동에 의한 영향을 살펴 보았다. 또한 Stella 등(1998)과 Controni 등(2000)도 단독으로 회전하는 프로펠러

접수일: 2003년 4월 4일, 승인일: 2003년 9월 5일
†주저자, E-mail : sjlee@postech.ac.kr
Tel : 054-279-5924

후류를 LDV 와 PIV 로 측정하였다.

그러나 실제 프로펠러는 단독으로 회전하지 않고 선박의 후미에 부착되어 있기 때문에 선체 반류의 영향을 크게 받는다. 또한 프로펠러가 단독으로 회전할 때는 프로펠러가 적절한 수심에 놓여 있으나, 선박 뒤에서 회전할 때에는 선박의 흘수로 인해 상대적으로 수심이 얕기 때문에 자유표면의 영향도 함께 받게 된다. 결국 선박 프로펠러의 성능을 제대로 이해하기 위해서는 선박 후미에서 회전하는 프로펠러에 대한 유동 특성을 조사해야 하며 이를 통해 추진성능을 판단할 수 있을 것이다.

선박 주위의 경계층 유동은 선미에서 선형이 급격하게 변함에 따라 와 구조가 크게 달라지게 되므로 선체로부터 발생하는 입사류는 프로펠러 후류에 영향을 미친다.

프로펠러가 없는 선박 모형에 대해서는 열선유속계(김학록 1999), 5공 pitot 튜브(반석호 2000, 김우전 2000), 그리고 LDV(최정은 1999) 등과 같은 점측정(point measurement) 기법을 사용하여 유동특성을 연구한 바 있다. 그리고 최근들어 PIV(고민석/이상준 2001), PTV(백승조/이상준 1997)와 같은 속도장 측정기법을 이용한 반류 특성 연구도 수행되었다. 그러나 이렇게 구한 공칭반류(nominal wake)의 경우, 프로펠러와 선체와의 상호작용이 제외되어 있기 때문에 추정식이나 경험식 등을 이용하여 프로펠러가 있는 경우의 유효반류(effective wake)를 추정하여 프로펠러 설계를 위한 입력자료로써 사용하고 있다. 비록 유효반류의 추정이 공칭반류에 근거하지만 프로펠러가 비균일한 선미 점성 반류의 영향을 받고 있고 경험식 등이 실제와 동일하지 않으므로 유효반류가 얼마나 정확히 얻어졌는지에 대해 확신할 수 없다.

Calcagno 등(2002)은 두 대의 카메라를 이용하여 선박 모형 뒤에서 회전하는 프로펠러의 반류를 측정하여 보오텍스 구조 및 난류구조를 해석하였으나 카메라들의 보정작업이 까다롭고 후처리의 보관계산 등으로 인해 약 5% 이상의 측정오차를 가지고 있다.

프로펠러 날개 주위 유동에 대한 이론적 해석은 Kerwin/Lee(1978)의 양력면 이론으로부터 최근의 B-스플라인 기저의 고차패널법 (조충호/이창섭 2000)까지 많은 방법들이 사용되어 왔다. 날개 주위 유동에 대해 신뢰성 있는 해석을 위해서는 적절한 후류 반류면(wake sheet) 모델이 필요하다. 수치계산 상의 반복계산을 피하기 위해 실험 또는 이론으로 구한 결과를 사용하여 반류면을 가정하기도 하는데, 선형 반류면 모델 및 비선형(반경수축) 반류면 모델 등이 이용되고 있다. 현재의 반류면 모델링에는 후연(trailing) 보오텍스면이 필라멘트로서 계산되기 때문에 실제로 두께를 가지고 있는 후연(trailing) 보오텍스 및 날개끝 보오텍스의 예측에 있어서 신뢰성이 떨어진다. 즉, 수치적으로 미리 날개끝 보오텍스의 위치를 예측하는 것은 가능하지만, 강도나 두께 등을 정확히 예측하는 것이 어렵다. 따라서 반류면 및 날개끝 보오텍스에 대한 신뢰성 있는 실험자료로부터 수치해석 코드를 개선하는 작업이 필요하다.

본 연구에서는 2-D PIV기법을 이용하여 프로펠러가 회전하는 KRISO 3600TEU 컨테이너선(이후 KCS로 표시함) 모형 반류의 접선방향, 반경 방향 속도장을 측정하여 그 유동특성을 살피고자 한다. 4개의 프로펠러 날개 위상(phase) 각각에 대해 400장의 순간속도장을 측정한 후 이들을 평균하여 평균속도장, 와류장 및 난류강도 분포 등을 얻었으며, 유동 구조 및 반류의 공간분포를 조사하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

프로펠러 후류의 속도장 측정을 위한 화상처리 시스템은 네오디움-야그(Nd:Yag) 레이저, CCD 카메라, 영상처리 장치, 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 이루어진다. 사용한 CCD 카메라의 해상도는 1024 × 1024 pixels 이며, 한번에 2 프레임씩 쌍으로 유동영상을 취득하였다. 레이저의 노출 시간은 약 7ns 이며, 에너지 레벨은 펄스당 125mJ 이다. 측정하고자 하는 유동단면을 얇은 레이저 평면광(laser sheet)으로 조명하고 그 속에 들어있는

입자들에 의해 산란된 빛을 CCD 카메라로 촬영하였다. CCD 카메라와 레이저를 동기시켜 얻은 입자 영상은 프레임 그래버(frame grabber)를 이용하여 실시간으로 디지털 값으로 취득하게 된다. 2개의 레이저 펄스 사이의 시간 간격은 $\Delta t = 300 \mu s$ 로 고정하였다. 이렇게 취득된 입자영상은 FFT(fast fourier transform)에 기초한 상호상관(cross-correlation) 방식의 PIV 알고리즘을 이용하여 속도장을 추출하였다. 이 때 사용한 미소조사구간의 크기는 48×48 pixel으로 하고 50% 중첩하였다. 이러한 PIV 속도장 측정기법에 관한 자세한 내용은 Lee(2001)에 나와 있다.

본 실험은 시험부 제원이 $4.5^L \times 1.0^W \times 1.0^H$ m³인 회류수조에서 수행하였는데, 3차원 수축부를 가지고 있으며 자유흐름 속도가 0.5m/s에서 유속분포가 $\pm 1\%$ 이내의 균일도를 가진다. 본 연구에 사용된 실험 모형은 KRISO 3600TEU 컨테이너선과 이 선박모형에 부착된 KP505 프로펠러를 1/153으로 축소 제작하였다. 선박에 대한 body plan과 제원은 Fig. 1과 Table 1에, 프로펠러의 제원은 Fig. 2에 나타내었다.

실험 시 자유흐름 속도(W_0)는 0.6m/s로 고정시켰는데, 이에 대응하는 Floude 수는 0.16이며 자항점에서 전진비(J)를 0.72로 맞추기 위하여 프로펠러를 초당 15.43rps로 회전시켰다. 선박 모형의 수선간 길이에 기초한 레이놀즈 수는 약 9×10^5 이었다. 원주형 렌즈 및 볼록 렌즈 등에 의해 형성된 레이저 평면광을 회류수조 옆면으로 조사하였고 프로펠러 후방으로 6×6 cm²의 크기의 측정단면에서 속도장을 측정하였다. 좌표축은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 주유동 방향을 Z축, 선박모형의 높이 방향을 Y축으로 하였고, 폭 방향을 X축으로 정의하였다.

실험에 사용한 산란입자는 silver coated hollow glass 입자이며 평균 직경은 약 $10 \mu m$ 이었다. Fig. 3은 실험장치의 구성을 나타내고 있다. 횡방향 측정평면에서의 입자영상을 원근오차 등에 의한 왜곡 없이 취득하기 위하여 카메라 하우스(housing)를 제작하여 수중촬영이 가능하도록 하였다. 입자 주입법으로 하우스 주위 유동을 관찰한 결과 하우스 전방 30cm 부터 유동의 방향이 크게 틀어지고

Table 1 Principal dimensions of prototype and model of KRISO 3600TEU container model

Parameters	Full scale (m)	Model scale (m)
$L(L_{pp})$	230.0	1.50
B	32.2	0.21
D	23.0	0.15
T	10.8	0.07
C_B	0.65	
Re	10^9	9×10^5

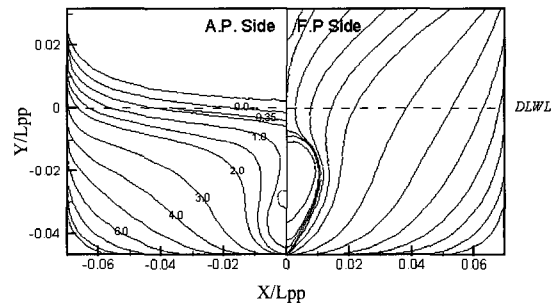


Fig. 1 Body plan of KRISO 3600TEU container ship

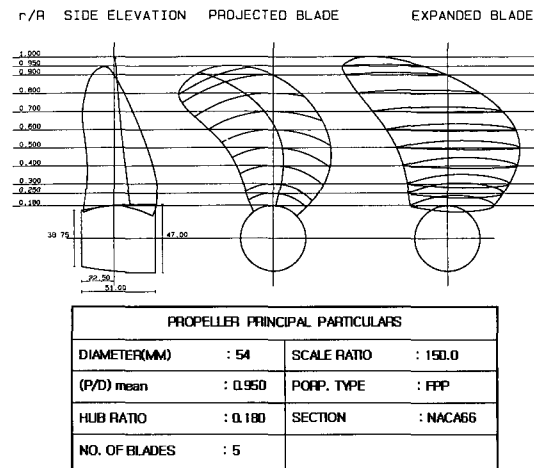


Fig. 2 Geometry of KP505 propeller model used in this study

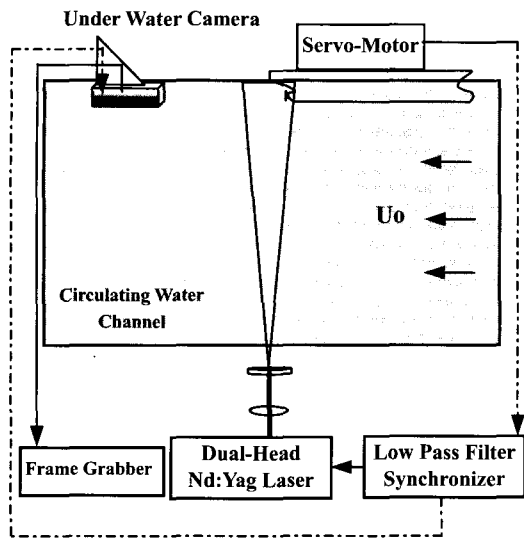


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up

있음을 확인하였다. 이에 따라 실험 결과의 정확성을 기하기 위하여 CCD 카메라에 초점거리가 긴 렌즈를 장착하고 카메라 하우징을 프로펠러 후방 약 0.85m 위치에 설치하였다. 선박 모형에 부착된 프로펠러를 구동시키고 동기신호를 얻기 위하여 인코더(encoder)가 내장된 서보모터를 이용하였다. 프로펠러에 장착된 인코더는 프로펠러 1 회전 당 1000 개의 펄스를 생성시켜서 0.36° 분해능으로 프로펠러의 회전 위상각(phase angle)을 PIV 시스템과 동기시킬 수 있다. 인코더에서 나온 신호에 포함된 노이즈는 저대역 필터를 사용하여 제거하였다.

본 실험에 사용된 프로펠러는 5 개의 날개를 가지며, Fig. 4 와 같이 하나의 날개에 대해 18° 간격으로 나눈 4 개의 위상 각각에서의 순간속도장을 연속적으로 측정하였는데, 이웃한 위상 사이의 시간간격은 6 ms이었다. 각각의 위상각에 대해 동일한 유동조건에서 획득된 800 장의 입자영상으로부터 400 장의 순간속도장을 구하고, 이들을 각각의 위상에 대해 평균한 후 평균속도장, 난류강도 및 와도장등을 얻었다.

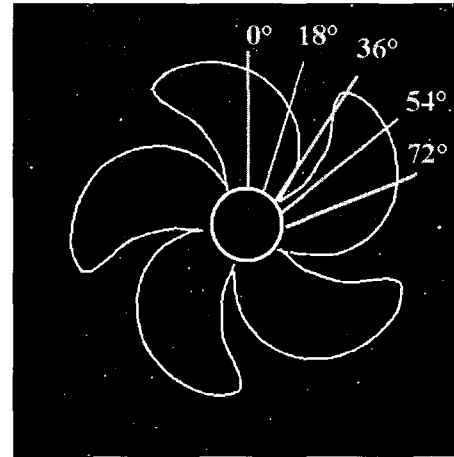


Fig. 4 Phase angles of propeller blade

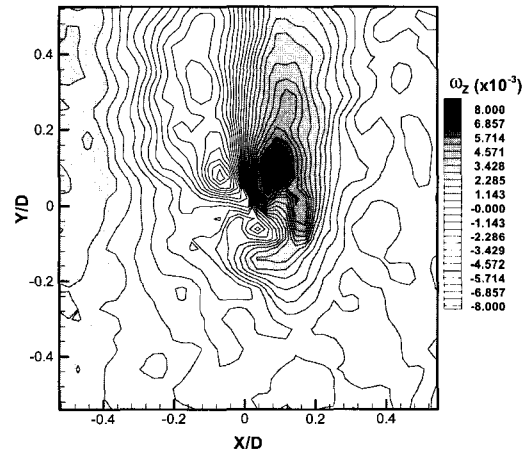


Fig. 5 Vorticity contour of bare hull at propeller plane

3. 결과 및 토의

Fig. 5 는 프로펠러가 없는 선박 모형의 반류를 프로펠러의 횡단면에서 측정한 결과이다. 선체의 좌우 발지를 따라 발달한 한 쌍의 발지 보오텍스가 서로 반대방향으로 회전하면서 프로펠러 평면으로 유입되고 있다. 즉, 양의 값을 갖는 보오텍스는 시계반대 방향으로, 음의 값을 갖는 보오텍스는 시계방향으로 회전하면서 프로펠러로 유입되어 프로펠러 후류의 발달에 영향을 미친다.

날개 끝 보오텍스의 거동을 살펴보기 위하여 프

로펠러 면에 평행한 면들과 수직인 평면 내부유동의 속도장을 측정하였다. Fig. 6은 프로펠러 면에 수직인 평면에서 측정된 주유동 방향(Z 방향) 속도 분포를 나타낸 것으로 상부 slipstream 내의 주유동 방향 속도가 하부 slipstream 보다 낮음을 볼 수 있다. 그림에서 W 는 선미계측치이며 W_0 는 자유흐름 속도 즉 배의 항주속도를 나타낸다.

Fig. 7을 보면 프로펠러 날개 앞위면을 따라 발달하는 경계층의 병합으로 속도결손이 프로펠러 날개 끝과 허브 근처에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 날개 끝($Y/D = \pm 0.5$)에서 발생하는 속도결손은 프로펠러 직후방($Z/D = 0.05$)부터 감소하기 시작하여 $Z/D = 0.5$ 부근에서 거의 사라짐을 알 수 있다. 또한 프로펠러 직후방($Z/D = 0.05$) 위치에서는 허브 근처($Y/D = 0.2$)에서 속도결손이 나타났으나, 하류로 나아감에 따라 급격히 소멸되고 있다. 선미 점성 반류의 영향을 받아 상부 slipstream($Y/D > 0$) 내부 주유동 방향 속도성분이 하부 slipstream($Y/D < 0$) 내부에서의 속도성분보다 약 10% 정도 작게 측정되었으며, 전체적으로 속도분포가 하류로 나아가면서 위쪽으로 이동하고 있다.

Fig. 8은 프로펠러 날개 끝에서 발생하는 날개 끝 보오텍스들의 궤적을 보여주고 있다. 여기서 보면 프로펠러 날개의 후연(trailing)부터 프로펠러 축을 향해 수축한 후 확장되고 $Z/D = 0.5$ 부터는 반류면과 상호작용을 일으켜 아래 위로 요동하고 있다. 날개끝 보오텍스는 후연(trailing) 보오텍스와 쌍을 이루지만 프로펠러 slipstream의 속도가 날개끝 보오텍스 보다 빠르기 때문에 하류로 나아감에 따라 두 보오텍스의 연관성이 점차 작아지게 된다. 주유동 방향 속도성분의 평균속도 및 와도의 공간분포를 살펴보면 slipstream이 정압이 작은 자유표면을 향해 위쪽으로 기울어져 있으며 자유표면이 프로펠러 후류의 보오텍스 거동에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

프로펠러 날개에서 형성되어진 보오텍스 거동을 살피기 위해서 프로펠러 후방 $Z/D = 0.25$ 위치의 횡단면에서 속도장을 측정하였다. Fig. 9를 보면 프로펠러 회전방향을 따라서 유동이 형성되고 있으며 반류면 및 보오텍스가 프로펠러 반경 거리

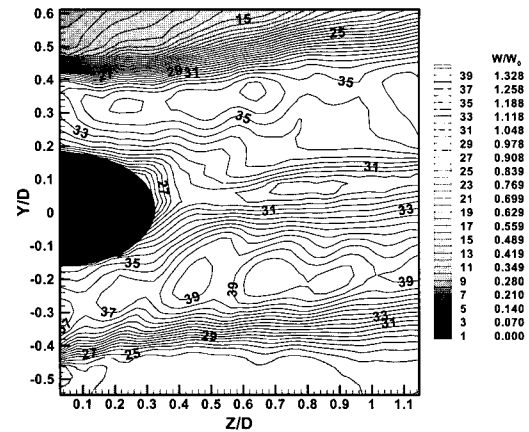


Fig. 6 Contour of phase-averaged axial velocity in the longitudinal plane at $\phi = 0^\circ$

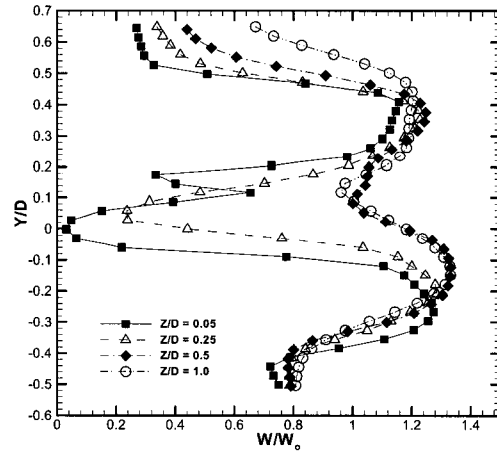


Fig. 7 Variation of axial velocity profiles at several downstream locations at $\phi = 0^\circ$

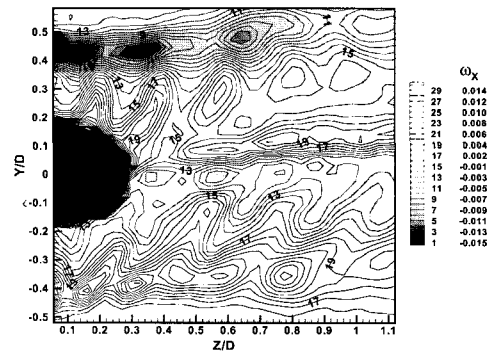


Fig. 8 Contour of phase-averaged vorticity ω_x in the longitudinal plane at $\phi = 0^\circ$

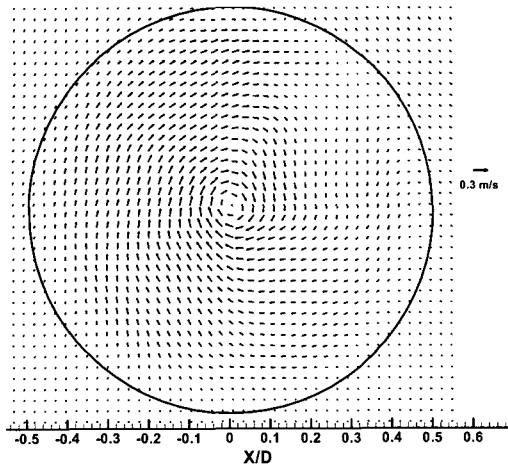


Fig. 9 Velocity field in the cross section at $Z/D = 0.25$ at $\phi = 0^\circ$

내에 위치하고 있다. 서로 반대 방향으로 유입되는 선체 주위의 접선방향 속도성분과 선체표면을 따라 발달하는 필지 보오텍스에 기인하여 1, 4 사분면의 속도장 분포와 2, 3 사분면의 속도장 분포가 서로 다르게 나타난다.

Fig. 10은 4개의 위상각에서 측정한 와도장 분포를 나타낸 것이다. 날개끝 보오텍스가 $r = 0.9R$ (R 은 프로펠러 반경) 정도에 위치해 있어, $Z/D=0.25$ 하류단면에서는 프로펠러의 slipstream이 수축되어 있음을 알 수 있다. 그리고 위상각이 증가함에 따라 각 날개끝과 후연(trailing) 보오텍스가 회전이동하고 있음을 뚜렷이 보여주고 있다. 후연(trailing) 보오텍스는 양과 음의 와도값을 갖는 보오텍스들로 구성되어 있고 날개끝 보오텍스는 양의 와도값을 가진다. 특히 후연(trailing) 보오텍스에서 약 $r = 0.7R$ 이내 구간에서 음의 와도값을 가지다가 이 바깥 영역에서 양의 와도값으로 전이되고 있다. 이것은 $r = 0.7R$ 위치에서 최대 부하가 걸리게끔 설계된 KP505 프로펠러의 날개 특성과 잘 일치하는 것이다. 후류의 와도장은 프로펠러 날개가 받는 부하의 반경 방향 분포에 대한 정보를 제공하며 각각의 날개에 유입되는 유동 조건에 따라 부하가 각각 다르게 분포함을 보여주고 있다.

선미 점성 반류는 프로펠러 후류의 와류 조에 영향을 주는데 Fig. 10(b)/(c)를 보면 1 사분면에

서 와류 구조가 많이 왜곡되어 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 위상각 $\phi = 18^\circ$ 에서 날개끝 보오텍스 및 후연(trailing) 보오텍스는 선미 점성 반류와 점성에 기인하여 주유동방향 속도가 감소하고 회전 방향과 반대로 유입되는 필지 보오텍스와 선체표면을 따라 발달한 접선방향 속도성분이 서로 만나게 되어 다른 사분면에 비해 불균일한 속도구배가 분포되어 있다. 선미 점성 반류에 기인하여 와류가 다소 왜곡되는 현상은 위상각 $\phi = 36^\circ$ 까지 나타나며 위상각이 54° 보다 크게되면 완화되어짐을 볼 수 있다. 불균일한 선미 점성 반류의 유입은 프로펠러 날개에 불안정한 속도구배를 발생시켜 공동 현상이나 소음 등을 유발시킬 수 있으므로 프로펠러 후류의 와류 구조 및 유동특성 등을 면밀히 조사하는 작업이 필요하다.

본 연구에서 측정되어진 프로펠러 후류의 와도장 결과를 보면 날개끝 보오텍스의 크기가 크고 후연(trailing) 보오텍스의 두께가 비교적 두껍게 나타났다. 이러한 결과는 실제 경우보다 낮은 레이놀드 수 영역에서 본 실험이 수행되었기 때문이 아닌가 한다. 레이놀드 수가 10^5 보다 커지게 되면 프로펠러 날개 위에 충분한 난류 경계층이 형성되어 날개끝 보오텍스의 크기가 작아지고 후연(trailing) 보오텍스의 두께가 감소된다고 알려져 있다. 본 실험의 경우, 프로펠러 직경에 기초한 레이놀드 수는 약 5×10^4 이다. 이에 따라 본 연구에서는 약간 두꺼운 와도 분포를 보여주고 있으나, 속도결손이나 날개끝 보오텍스 궤적과 같은 프로펠러 후류의 중요한 유동특성은 비슷하게 나타나고 있다.

Fig. 11은 X 및 Y 방향 속도성분의 난류강도분포를 나타내며 선미 점성 반류가 날개끝 보오텍스 구조를 불안정하게 만들고 있음을 볼 수 있다. X 및 Y 방향 난류강도는 날개끝 보오텍스를 따라 큰 값을 가지고 있는데 특히 Y 방향 보다도 Z 방향 난류강도값이 선미 점성 반류의 영향을 보다 많이 받아 1, 3 사분면에 난류강도가 집중된 모습을 보여주고 있다. 난류강도가 높게 나타난 유동영역은 공동현상의 발단이 되거나 소음의 원인이 될 가능성이 크므로 프로펠러의 작동조건 및 성능 추정에 있어 유용한 정보를 제공할 수 있다.

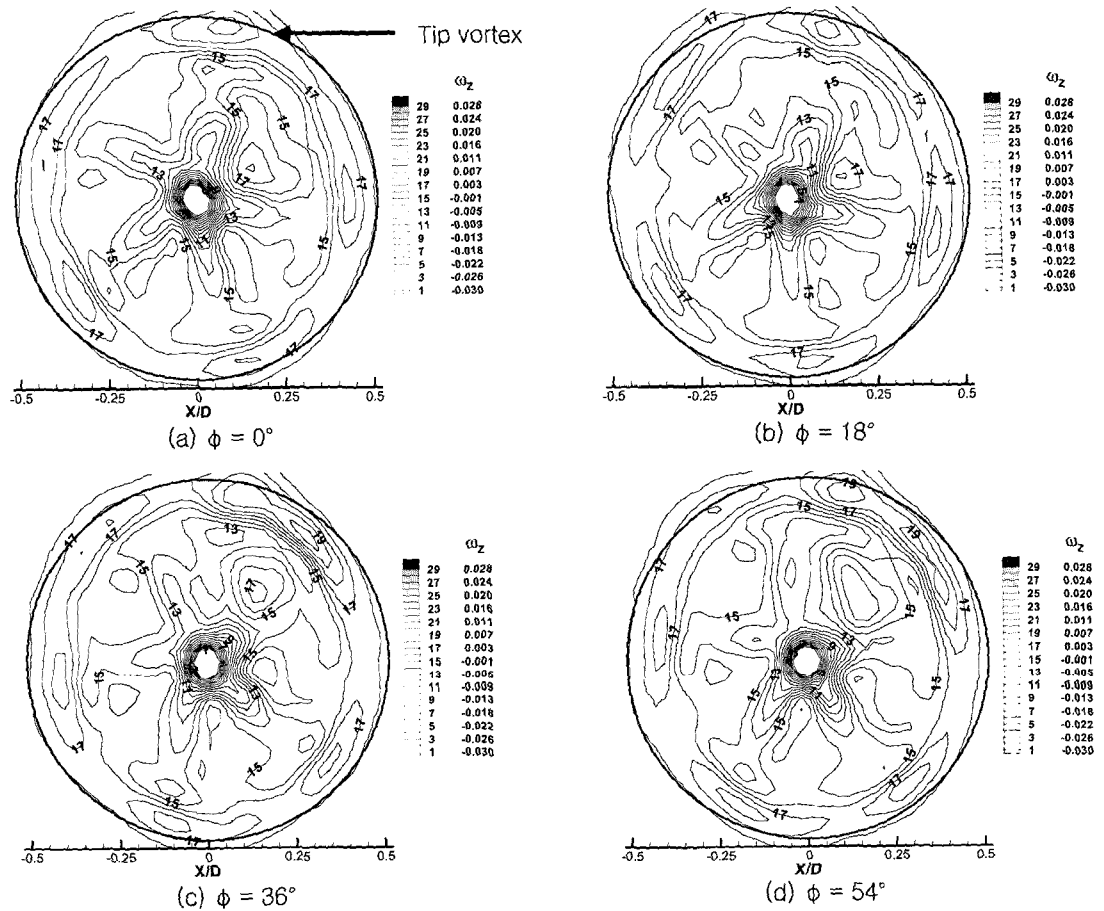


Fig. 10 Contour plots of phase-averaged vorticity at four different phases at $Z/D = 0.25$

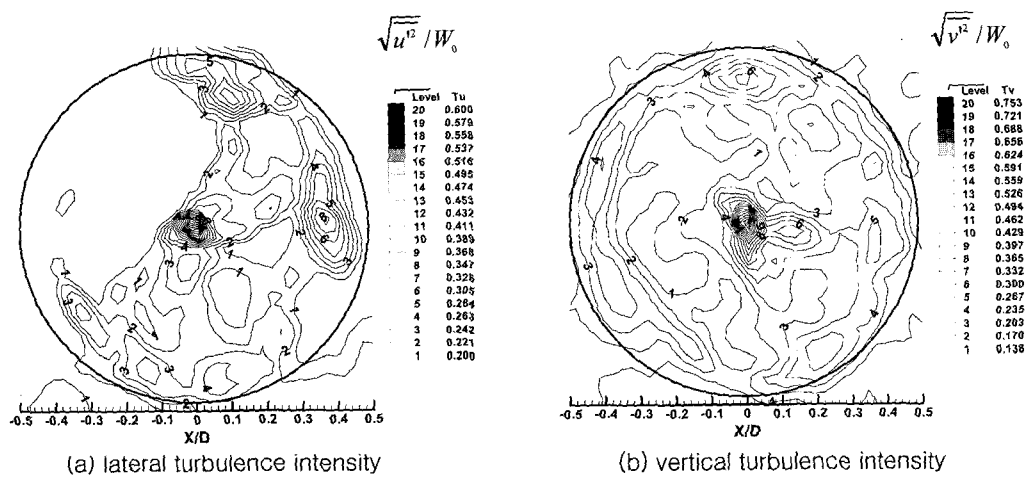


Fig. 11 Spatial distributions of turbulence intensity at $\phi = 0^\circ$

4. 결 론

본 연구에서는 회전하는 프로펠러가 부착된 컨테이너 선박모형 반류유동의 속도장을 측정하여 프로펠러 후류의 유동특성을 살펴보았다. 선체의 좌우 빌지를 따라 발달한 빌지 보오텍스들이 프로펠러 평면으로 유입되어 프로펠러 후류에 불균일한 유동을 형성시켰으며 주유동 방향의 속도결손이 프로펠러 허브와 날개 끝 근처에서 크게 발생하였다. 이러한 속도결손은 $Z/D = 0.5$ 하류 위치를 지나면서 점차 회복되었다.

$Z/D = 0.5$ 이후 구간에서는 날개끝 보오텍스들과 반류면의 상호작용이 본격적으로 시작되어 날개끝 보오텍스 궤적의 요동을 일으키며, 이러한 상호작용에 기인하여 $Z/D = 1$ 이후 구간에서 프로펠러 후류와 주위 유동이 활발하게 혼합되어진다.

자유표면이 프로펠러 후류의 와류 거동에 영향을 주며, 특히 상부 slipstream 의 선미 점성 반류는 저속구간을 야기하고 날개끝 보오텍스의 이동을 지연시키는 것으로 나타났다.

프로펠러 후류에 대하여 횡방향에서 측정된 와도장은 프로펠러 날개가 받는 부하의 반경 방향 분포에 대한 정보를 제공할 수 있다. 또한 난류강도가 높게 나타난 유동영역은 에너지를 크게 소모하는 곳으로 불안정한 유동구조를 갖게 되며, 공동현상의 발단이 되거나 소음의 원인이 될 가능성이 크므로 프로펠러 설계 및 보완 시 유용한 정보를 제공할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 컨테이너 선형과 프로펠러 사양을 제공해주신 KRISO 반석호 박사님과 김우전 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김학록, 이상준 1999 "KRISO 3600TEU 컨테이너 모형선 주위 유동의 난류구조에 관한 실험적 연구," 대한조선학회지, 제36권 제3호, pp. 8-14.
- 김우전, 반석호, 김도현, 이춘주 2000 "선미선형을 변화시킨 두 척의 KRISO 300K VLCC 모형주위의 유동과 저항추진 특성에 대한 실험적 연구," 대한조선학회지, 제37권 제3호, pp. 11-20.
- 반석호, 김우전, 김도현 2000 "KRISO 3600TEU 컨테이너선 모형 주위의 국부유동 계측에 관한 연구," 대한조선학회지, 제37권 제3호, pp. 1-10.
- 백부근, 이상준 2002 "위상평균 PTV 기법을 이용한 프로펠러 후류의 속도장 측정," 대한조선학회논문집, 제39권 제3호, pp. 41-47.
- 백부근, 이상준 2002 "Stereoscopic PIV 기법을 이용한 프로펠러 후류의 3차원 속도장 측정," 제2회 한국유체공학학술대회 논문집, pp. 185-188.
- 백승조, 이상준 1997 "Oil tanker 모델 반류 속도장 측정," 대한조선학회 '97추계학술대회 논문집, pp. 317-320.
- 이상준 2001 "PIV/PTV Velocity Field Measurement Technique," POSTECH.
- 이상준, 고민석, 이정묵 2002 "PIV를 이용한 KRISO 3600TEU 컨테이너선 모형선의 반류 측정 및 해석," 대한조선학회논문집, 제39권 제3호, pp. 48-56.
- 조충호, 이창섭, 2000 "2차원 B-스플라인 기저 고차 패널법의 수치 실험," 대한조선학회지, 제37권 제3호, pp.27-36.
- 최정은, 서희원, 민계식 1999 "에인수소에서 Fiber Optics LDV를 이용한 프로펠러면에서의 유속측정," 대한조선학회지, 제36권 제3호, pp. 22-28.
- Calocagno, G., Di, Felice F., Felli, M. and Pereira, F., 2002 "Propeller Wake Analysis Behind a Ship by Stereo PIV," Proc. of the 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Vol.3, pp.112-127.
- 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.

- Kerwin, J.E. and Lee, C.S., 1978 "Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting Surface Theory," Trans. SNAME, Vol.86, pp.218-253.
- Stella, A., Guj, G., Di, Felice F. and Elefante, M., 1998 " Propeller Wake Evolution Analysis by LDV," Proc. of the 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics. pp.171



< 백 부 군 >



< 이 상 준 >