

## 회전하는 선박 프로펠러 전방 유입류에 대한 PIV 속도장 해석

백부근\*, 이상준\*

포항공과대학교 기계공학과\*

PIV Velocity Field Analysis of Inflow ahead of a Rotating Marine Propeller

Bu-Geun Paik\* and Sang-Joon Lee†\*

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

### Abstract

Flow characteristics of the inflow ahead of a rotating propeller attached to a container ship model were investigated using a two-frame PIV (Particle Image Velocimetry) technique. Ensemble-averaged mean velocity fields were measured at four different blade phases. The mean velocity fields show the acceleration of inflow due to the rotating propeller and the velocity deficit in the near-wake region. The axial velocity distribution of inflow in the upper plane of propeller is quite different from that in the lower plane due to the thick hull boundary layer. The propeller inflow also shows asymmetric axial velocity distribution in the port and starboard side. As the inflow moves toward the propeller, the effect of phase angle variation of propeller blade on the inflow becomes dominant. In the upper plane above the propeller axis the inflow has very low axial velocity and large turbulent kinetic energy, compared with the lower plane. The boundary layer developed along the bottom surface of stern hull forms a strong shear layer affecting vortex structure of the propeller near-wake.

※Keywords: PIV(입자영상속도계), Total flow velocity (전속도), Effective wake (유효 반류), Phase averaging (위상평균), Tip vortex(날개끝 보오텍스)

### 1. 서론

프로펠러는 선미후류 속에 놓여 회전하기 때

문에 프로펠러와 선미후류 사이의 상호작용에 대한 이해가 필요하며 이로부터 얻을 수 있는 유효 반류에 대한 정보는 프로펠러의 설계 및 성능추정을 위해서 매우 중요하다. 특히 프로펠러 날개에서 공동현상(cavitation)이 발생하는 경우에는 더욱 중요해지는데, 공동(cavity)의 크기나 프로펠러 변동압력 등에 대한 예측은 유효반류의 추정과 밀

접수일: 2004년 4월 8일, 승인일: 2004년 6월 4일

†주저자, E-mail: sjlee@postech.ac.kr

Tel: 054-279-5924

접하게 관련되어 있기 때문이다.

유효속도(effective velocity)는 회전하는 프로펠러 전방의 전속도(total flow velocity)로부터 포텐셜로 표현된 프로펠러에 의해 유도된 속도(propeller-potential induced velocity)를 뺀 값이며, 유효반류는 프로펠러 평면에서의 전속도와 유효속도의 차로 정의된다.

Stern 등(1988)은 프로펠러와 선체 사이의 상호작용, 즉 프로펠러 회전에 의해 유도된 유속분포를 계산하기 위하여 축대칭 물체에 대하여 점성을 고려한 수치해석을 수행하였다. 이창섭/이진태(1990)는 축대칭 전단류(shear flow) 속에 원판형 추진장치가 작동할 때 프로펠러에 의한 유선변화 모형을 변화시켜 유효반류를 추정하였다. 또한 Choi/Kinnas (1999)는 Euler 방정식을 사용하여 비대칭/비정상 유효반류를 예측하기도 하였다.

유효반류를 추정하는 방법은 수치해석에 필요한 입력자료에 따라 크게 두 가지로 나뉜다. 먼저, 프로펠러가 없는 상태에서 계측한 공칭속도(nominal velocity)를 사용하는 방법은 비교적 실험이 간단하고 공칭반류 (nominal wake)를 실선으로 확장하는 경험식 등을 이용할 수 있어 많이 사용되고 있다. 그러나 프로펠러와 선미후류 사이의 상호작용이 근사적으로 처리되거나 경험식을 사용함에 따라 예측된 유효반류의 신뢰성이 다소 떨어진다. 반면에 전속도를 직접 계측하는 방법은 계측된 전속도에 선미후류 등의 영향이 포함되어 있어 공칭속도 계측에 비해 프로펠러 유도속도를 보다 쉽고 정확하게 구할 수 있다.

지금까지 전속도 계측은 주로 LDV를 이용하여 수행되어 왔다. Lauden(1981)과 이창섭 등(1991)은 프로펠러 전방에서 LDV로 전속도를 계측하고 이 값들을 유효반류 추정에 사용하였다. 그러나 LDV를 이용한 전속도 계측 방법은 실험이 복잡하고 계측된 속도분포의 공간해상도가 낮아 많이 이용되지 못하였다.

최근에는 PIV (백부근/이상준 2003)나 PTV (백부근/이상준 2002)등의 속도장 측정기법을 이용하여 프로펠러 후류의 속도장을 연구하기도

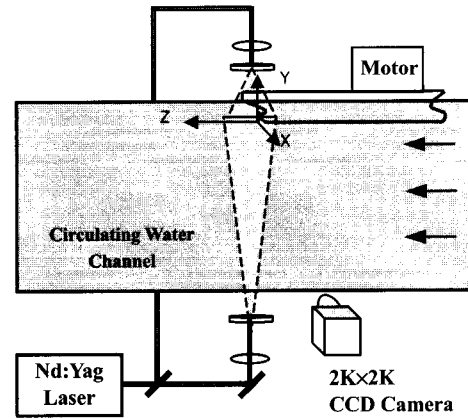


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

하였다. 본 연구에서는 2-D PIV 속도장 측정기법을 이용하여 KRISO 3600TEU 컨테이너선(이후 KCS로 표시함) 모형에 부착되어 회전하는 프로펠러 전방의 전속도의 공간분포를 계측하여 프로펠러 유입류의 유동 특성을 연구하였다. 특히, 선미후류와 프로펠러 사이의 상호작용은 프로펠러 날개의 회전 각도에 따라 다르게 나타나므로 4개의 프로펠러 날개 위상각각에 대해 400장의 순간속도장을 위상평균 기법으로 측정하여 평균속도장, 와류장 및 난류에너지 분포 등을 실험적으로 해석하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

프로펠러 유입류의 속도장 측정을 위해 본 연구에 사용되어진 PIV 시스템은 Nd:Yag 레이저, CCD 카메라, 영상처리 장치, 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 CCD 카메라의 해상도는 2048 × 2048 pixels이며, 한번에 2 프레임씩 쌍으로 입자영상을 취득하였다. Nd:Yag 레이저의 에너지 레벨은 펄스당 125mJ 이며 2개의 레이저 펄스 사이의 시간간격은  $\Delta t = 300\mu s$ 로 고정하였다. 산란입자로는 평균 직경이 약  $10\mu m$ 인 silver coated hollow glass 입자를 사용하였다. 선박 모형에 부착된 프로펠러를 구동시키고 동기신호를

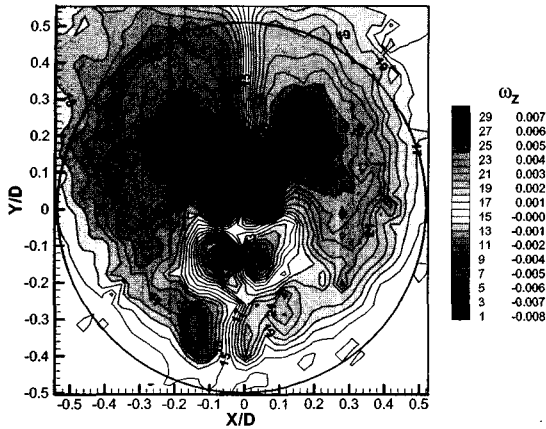


Fig. 2 Vorticity contour of bare hull at propeller plane

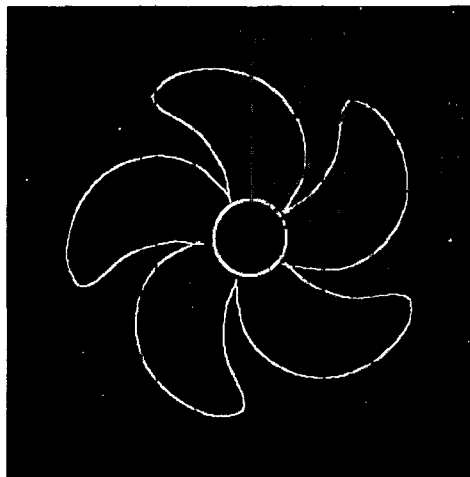


Fig. 3 Phase angles of propeller blade

얻기 위하여 인코더(encoder)가 내장된 서보모터를 이용하였다. 프로펠러에 장착된 인코더는 0.36°의 분해능으로 프로펠러의 회전 위상각(phase angle)을 PIV 시스템과 동기시킬 수 있다. CCD 카메라로 얻은 입자영상은 FFT(fast fourier transform)에 기초한 상호상관(cross-correlation) 방식의 PIV 알고리즘을 이용하여 속도장을 추출하였다. 이 때 사용한 미소 조사구간의 크기는 48 × 48 pixels이었고 50%

중첩하였다. 속도장 측정기법에 관한 전반적인 사항은 이상준(2001)에 자세히 나와있다.

본 실험은 시험부 제원이 4.5<sup>L</sup>×1.0<sup>W</sup>×1.0<sup>H</sup> m<sup>3</sup>인 회류수조에서 수행되었다. 실험 모형은 KRISO 3600TEU 컨테이너선과 KP505 프로펠러를 1/153 크기로 축소 제작하였다. 선체와 프로펠러에 대한 정확한 정보는 백부근/이상준(2003)에 나와있다.

실험시 자유흐름 속도를 0.6m/s로 일정하게 유지하여 Floude 수를 0.16으로 고정시켰으며, 프로펠러를 초당 15.43rps로 회전시켜 자항점에서 전진비(J)를 0.72로 유지시켰다. 선박 모형의 수선간 길이에 기초한 레이놀즈 수는 약 9×10<sup>5</sup>이었다.

프로펠러 전방의 유입류를 계측하기 위하여 선박 모형의 선미부분을 일부 개조하였는데, 레이저 평면광을 선미 상부에서 아래방향으로 조사될 수 있도록 선미에 아크릴 투명창을 설치하였다. 그리고 광분리기(beam splitter)를 사용하여 레이저 빔을 2개로 나누어 회류수조의 바닥창과 선박 모형을 통해 프로펠러 전방 유동 전체를 조명하도록 하였다. 원주형 렌즈와 볼록 렌즈를 이용하여 레이저 평면광을 형성시켰으며 측정단면의 크기는 9.4 × 9.4cm<sup>2</sup> 이었다. Fig. 1은 실험장치의 구성을 나타내고 있으며 좌표축은 주유동 방향을 Z축, 선박모형의 높이 방향을 Y 축, 폭 방향을 X 축으로 정의하였다. 또한 각 축의 길이는 프로펠러 직경(D)으로 무차원화 하였다.

선미에 설치한 투명창에 기인하여 선미 형상의 왜곡이 있는지를 판단하기 위하여 프로펠러가 없는 상태에서 선박 모형의 반류를 횡단면에서 측정하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 선체의 좌우 빌지(bilge)를 따라 발달한 한 쌍의 빌지 보오텍스가 서로 반대방향으로 회전하면서 프로펠러 평면으로 유입되고 있어 선미형상이 왜곡되지 않고 잘 개조 되었음을 알 수 있다. 이 때 시계 방향과 반시계 방향으로 회전하는 빌지 보오텍스의 중심 좌표는 각각 (-0.0663, 0.0524)과 (0.0492, 0.0524)이다. 그런데, -0.4<Y/D<-0.3 영역에서 와도장 분포가 미소하게 찌그러지게 나타났는데, 이것은

프로펠러 보스(boss)로부터 난반사된 레이저 빛에 기인해 발생한 것으로 전체 와도장 분포에는 크게 영향을 주지 않았다.

본 실험에서는 Fig. 3과 같이 하나의 프로펠러 날개에 대해  $18^\circ$  간격으로 나눈 4개의 위상각에 대해 순간속도장을 측정하였다. 각각의 위상각에 대해 연속적으로 획득된 800장의 입자영상으로부터 400장의 순간속도장을 구하고, 이들을 통계처리하여 평균속도장, 난류강도 및 와도의 공간분포를 얻었다.

### 3. 결과 및 토의

Fig. 4는 위상각  $\phi=0^\circ$  조건에서 프로펠러 면에 수직한 평면에서 측정된 프로펠러 주위 유동의 순간속도장을 나타낸다. 프로펠러 축과 평면은 각각  $Y/D=0$ ,  $Z/D=0$ 에 위치한다. 프로펠러 축 아래 부분에 위치한 날개로 유동이 균일하게 유입되고 있으나 프로펠러 축 보다 위쪽에 위치한 날개로 유입되는 유동은 프로펠러 축에 대해 경사각을 가지며 유동도 균일하지 못하고 날개 길이 방향으로 속도구배가 존재함을 알 수 있다. 이것은 프로펠러 축 상부의 선미후류는 두꺼운 경계층을 가지나 프로펠러 축 하부의 선미 후류는 비교적 얇은 경계층을 가지기 때문으로 생각되어진다. 이와 같은 프로펠러 유입류의 유동구조 차이는 프로펠러 후류에도 영향을 미치게 되어 상부 slipstream에 강한 후류면을 발생시키게 된다.

Fig. 5는 축방향(Z 방향)의 속도분포를 나타낸 것이다. 프로펠러 축을 경계로 상부와 하부에서 축방향 유입류의 속도분포가 크게 다르며 선체를 따라 발달한 경계층을 뚜렷이 볼 수 있다. 특히  $Y/D>0$ 의 상부 영역에서 저속유동이 프로펠러로 접근함에 따라 축방향 속도성분이 점차 증가하고 있다. 또한  $Y/D=0.5$  지점 위로 축방향 속도가 크게 감소한 영역이 나타났는데, 이 영역이 선미 바닥면까지 연결되어 선미후류의 이동에 방해가 되고 있다. 선미를 따라 발달한 저속 경계층은 프로펠러의 slipstream과 확연히 구분되며 이들 사이의 계면(interface)에서 강한 전단층이 형성되어진다.

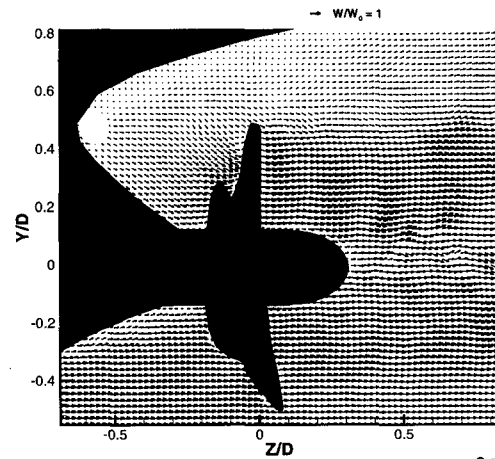


Fig. 4 Instantaneous velocity field at  $\phi=0^\circ$

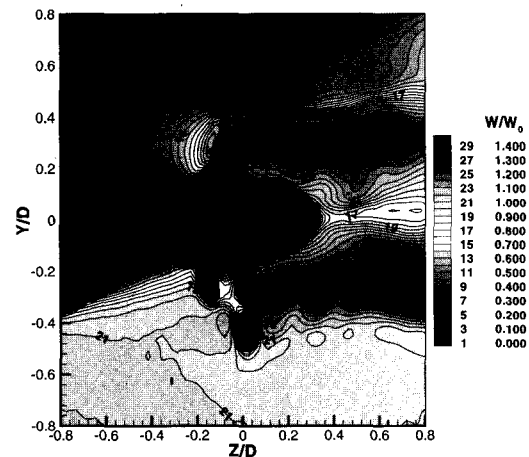
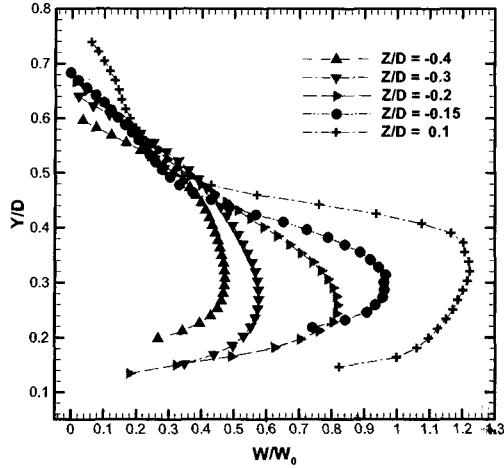
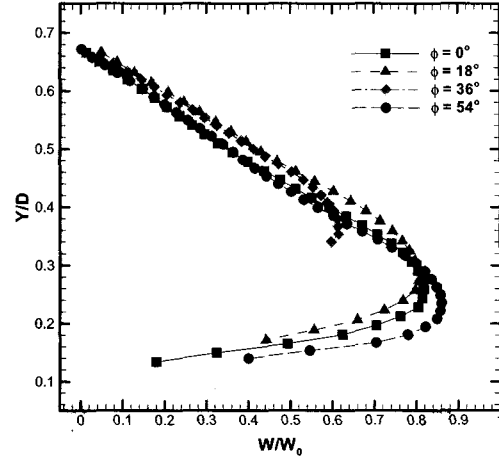


Fig. 5 Contour of phase-averaged axial velocity in the longitudinal plane ( $\phi=0^\circ$ )

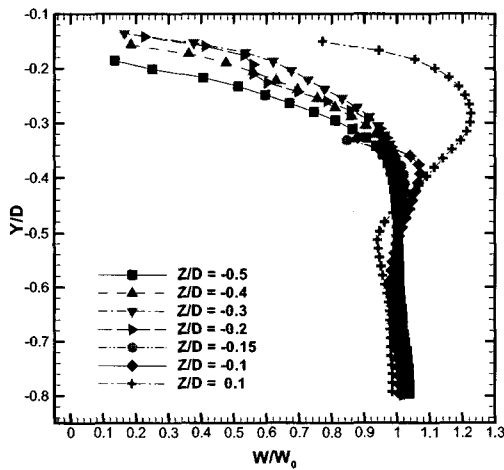
선미후류가 프로펠러로 접근함에 따라 축방향 속도가 어떻게 변화하는지를 알아보기 위하여 Fig. 6과 같이 프로펠러 전방의 몇 개 지점에서 축방향 속도분포의 변화를 조사하였다. Fig. 6(a)를 보면  $Y/D>0$ 의 상부 영역에서 선미후류가  $Z/D=-0.3$  단면위치부터 본격적으로 가속되기 시작하는 것을 알 수 있다. 또한 가속된 유동은 일정한 경사각을 가지고 프로펠러로 접근하는데, 이 경사각은 프로펠러 평면을 지난 후류 영역에서도 유지되고 있다. 프로펠러 유입류는 약  $0.6R$  ( $R$ 은 프로펠러 반경) 위치에서 축방향 속도가 최대값을 가지나 프로펠러로 유입된 후, 프로펠러 후류의



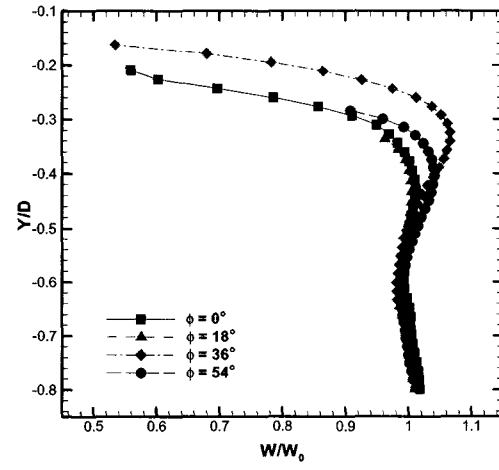
(a) upper plane



(a) upper plane



(b) lower plane



(b) lower plane

Fig. 6 Variation of axial velocity profiles at several upstream locations ( $\phi=0^\circ$ )

Fig. 7 Variation of axial velocity profiles at four phase angles at  $Z/D=-0.2$

slipstream 에서는 약  $0.7R$  위치에서 최대값을 가진다.

$Y/D < 0$  의 하부 영역에서는  $Z/D = -0.15$  위치까지 선미반류의 축방향 속도분포가 비슷하게 유지되나  $Z/D = -0.1$  단면의  $-0.35 < Y/D < -0.45$  영역에서 유동이 가속되기 시작함을 보여주고 있다. 프로펠러 후류 영역인  $Z/D = 0.1$  위치단면에서는 날개 표면에서 발생하는 경계층의 병합으로 날개끝 위치( $Y/D = -0.5$ )에서 속도결손이 발생하고 있다.

Fig. 7 은 프로펠러 전방  $Z/D = -0.2$  위치단면에

서 프로펠러의 위상각 변화에 따른 축방향 속도분포를 보여주고 있다.  $Z/D = -0.3$  위치단면에서 가속되기 시작한 선미반류는 프로펠러로 접근하면서 프로펠러 날개의 움직임에 의하여 영향을 받게 된다. 즉, Fig. 7 에서 보는 바와 같이 프로펠러 날개의 위상각 변화에 따라 유입류의 축류속도가 달라지게 된다. 또한 프로펠러 축에 가까운  $-0.5 < Y/D < 0.5$  영역에서는 위상각 변화에 따라 유속변화가 크나 바깥영역( $|Y/D| > 0.5$ )에서는 축류속도의 변화가 크지 않다.

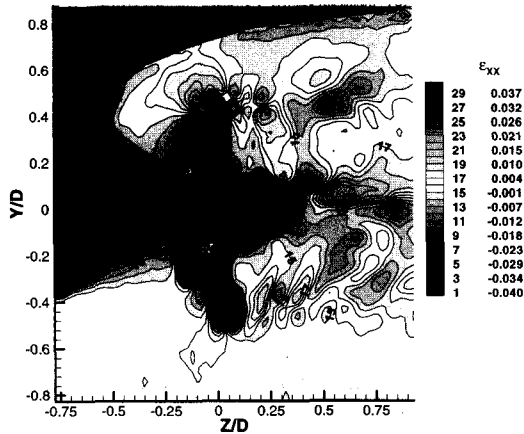


Fig. 8 Phase-averaged out-of-plane normal strain rate  $\epsilon_{xx}$  distributions ( $\phi=0^\circ$ )

Fig. 5에서 설명한  $Y/D=0.5$  지점 상부 영역의 급격한 축방향 속도의 감소 원인을 찾아내기 위하여 out-of-plane 변형률( $\epsilon_{xx}$ )을 구하여 Fig. 8에 나타내었다. Out-of-plane 변형률은 측정평면을 수직으로 가로지르는 out-of-plane 속도성분의 구배를 나타내며 연속방정식을 이용하여 구하게 된다. 비록 이것이 out-of-plane 속도성분을 나타내는 것은 아니지만 out-of-plane 유동이 존재하는 영역을 정성적으로 나타내기 때문에 유용하게 사용될 수 있다. Fig. 8을 보면 프로펠러 날개끝에 해당하는  $Y/D=0.5$  주위에서 out-of-plane 변형률이 비교적 큰 값을 가지는데, 이것은 프로펠러의 고속 회전에 따라 형성된 out-of-plane 속도성분에 기인한 것으로 보인다. 이러한 out-of-plane 유동은 프로펠러 후류의 날개끝과 후연 보오텍스에서 크게 나타나고 있으며, 상부 slipstream을 벗어나 선미 바닥 가까운 영역까지 존재하여 선미를 따라 발달하는 경계층의 속도를 감소시키는 역할을 하는 것으로 보인다.

프로펠러로 유입된 유동은 프로펠러 회전에 의해 교란되어 난류성분이 크게 증가하게 된다. 본 연구에서는 2-D PIV 시스템을 사용하였기 때문에 in-plane 속도성분 ( $w, v$ )만 측정하였고 out-of-plane 속도성분 ( $u$ ) 정보는 얻지 못하였다. 이에 따라 프로펠러 주위 유동이 등방성

(isotropic) 난류구조를 가진다고 가정하여 난류 운동에너지를 구하고 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 보면 난류운동에너지가  $0.4 < Y/D < 0.5$  영역에 집중되어 있으며, 특히 후류의 날개 끝, 후연, 허브 보오텍스가 형성된 영역에서 큰 값을 가졌다. 그리고  $Y/D > 0.5$  영역에서도 난류운동에너지가 프로펠러 위상 변화에 따라 그 영역이 확장 수축하면서 선미 바닥에 주기적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 상부영역( $Y/D > 0$ )에서는 유동이 프로펠러를 지나서도 난류운동에너지가 어느 정도 이상의 값을 가지나 하부영역( $Y/D < 0$ )에서는 프로펠러를 지나면 따라 난류확산 및 점성소산이 빠르게 일어나 난류운동에너지가 크게 감소하였다. 이상준 등(2002)은 프로펠러가 없을 경우, 선미 영역에서 난류운동에너지가 프로펠러 평면에서 약 2D 정도 떨어진 하류 영역까지 축방향으로 수평하게 분포하다가 점차 감소한다고 하였다. 그러나 선박모형에 회전하는 프로펠러가 부착된 경우에는 Fig. 9의  $Y/D < 0$  영역에서 보는 바와 같이 난류운동에너지가 일직선으로 분포하지 않고 프로펠러 축을 향해 일정한 경사각을 갖는다. 이러한 경향은 하류 영역에서 사라지며 프로펠러가 없는 경우에 비해 난류운동에너지가 작은 값을 가진다.

Fig. 10은 프로펠러 주위 유동의 와도분포를 보여주고 있다. 프로펠러 전방에서는 선체를 따라 큰 와도값을 가지며 하부영역( $Y/D < 0$ )의 선미후류에서 더 두꺼운 와도층이 형성되었다. 프로펠러 후류의 와도 분포를 보면 날개 끝, 후연 그리고 허브 보오텍스 위치에 높은 와도가 발생하여 프로펠러 전방의 와류구조와 뚜렷한 차이를 보여주고 있다. 후류의 하부 slipstream에서는  $Z/D=0.5$  근처에서 후류면과 날개끝 보오텍스가 상호작용을 일으켜 날개끝 보오텍스의 궤적이 요동하기 시작하나, 상부 slipstream에서는 선체의 저속 경계층으로 인해 발생한 전단층이 프로펠러 날개끝 보오텍스의 진행속도를 감소시켜 약  $Z/D=0.4$  부근에서 후류면과의 상호작용이 일어나게 된다. 또한  $Z/D=0.2$  위치단면을 지나면서 하부 slipstream 내의 날개끝 보오텍스의 와도값은 급격히 감소하여

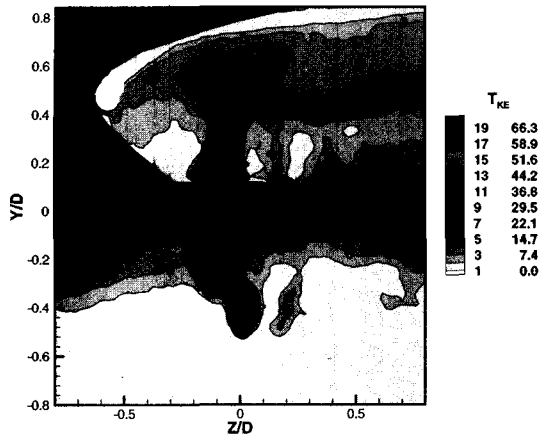


Fig. 9 Contour of phase-averaged turbulence kinetic energy ( $\phi=0^\circ$ )

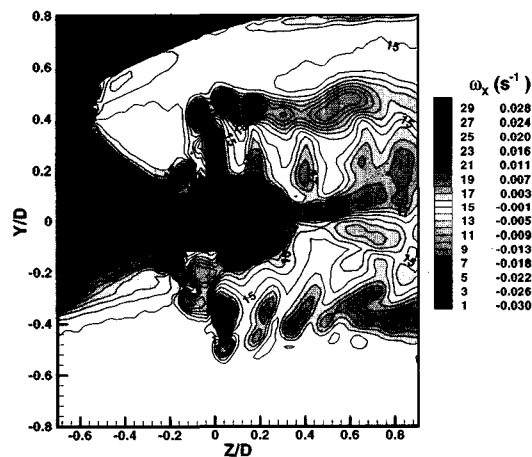


Fig. 10 Contour of phase-averaged vorticity in the longitudinal plane ( $\phi=0^\circ$ )

상부 slipstream 의 와도값에 비해 약 30% 정도 감소한다. 이것은 하부 slipstream 에 접한 자유흐름 속도가 선미후류 속도 보다 상대적으로 빠르기 때문에 하부 slipstream 의 와류구조가 빨리 소산되어 와도 값이 감소하는 것으로 생각된다.

본 연구에서는 전속도(total flow velocity)를 구하기 위해 21개의 종단면을 결정하였다. 각 종단면 사이의 간격은 0.05mm이며 좌우현 방향으로 프로펠러 반경거리 까지 축방향 속도장을 측정하였다. 그리고 각 종단면에서  $Z/D=-$

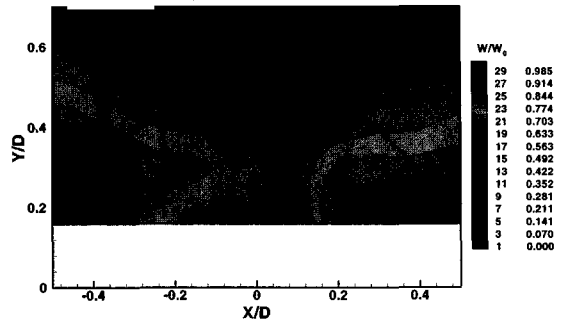


Fig. 11 Contour of phase-averaged axial velocity in the transverse plane of  $Z/D=-0.2$  ( $\phi=0^\circ$ )

0.2 위치에 해당하는 축방향 속도성분을 추출하여 Fig. 11 에 프로펠러 전방  $Z/D=-0.2$  횡단면에서의 축방향 속도분포를 나타내었다. 프로펠러 보스에 해당하는 부분( $0 < Y/D < 0.16$ )에서는 PIV 속도장 측정 시 선체의 난반사로 인해 속도벡터를 제대로 얻을 수 없었다. 일반적으로 공칭속도는 프로펠러 축을 중심으로 할 때 좌우현이 대칭인 분포를 갖는다. 그러나 프로펠러가 회전하고 있는 경우, 전속도는 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 좌우가 비대칭인 분포를 갖게 된다. 즉, 좌현영역( $X/D < 0$ )은 프로펠러의 회전에 의해 선미후류의 축방향 속도 크기를 증가시켜  $0.8W_0$  이상의 속도 값을 갖는 영역이 증가하게 된다. 반대로 우현영역( $X/D > 0$ )에서 축방향 속도 크기가 감소하고  $0.8W_0$  이상의 속도값을 가지는 영역이 감소하게 된다. 특히  $X/D < 0$  영역에서  $\phi=0^\circ$ 에 위치한 프로펠러 날개로 선미후류가 빠르게 유입되고 있음을 알 수 있다. 이것으로부터 프로펠러 회전에 기인하여 전방에서 유입되는 선미후류가 불균일하고 대칭적이지 못하기 때문에 프로펠러 날개에 걸리는 하중도 각각 다르게 나타남을 예측할 수 있다. 따라서 프로펠러 전방 유입류에 대한 검토가 적절히 이루어진다면 프로펠러로 인해 나타나는 공동현상, 진동, 소음, 프로펠러 변동압력 등에 대한 보다 정확한 예측과 개선이 가능할 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 컨테이너 선박모형에 부착되어 회전하는 프로펠러의 전방 유입류의 속도장을 측정하여 프로펠러 유입류의 유동특성을 살펴보았다.

저속의 선미후류는 프로펠러로 유입되는 유동구조에 크게 영향을 미친다. 특히 상부로 유입되는 유동은 프로펠러로 접근함에 따라 가속되며 후류의 상부 slipstream에 강한 후류면을 발생시킨다.

프로펠러 회전에 따른 out-of-plane 유동에 기인하여 프로펠러 날개끝( $Y/D=0.5$ ) 상부에 저속영역이 발생하였다.

프로펠러에서 멀리 떨어진 상류에서는 선미후류가 회전하는 프로펠러의 영향을 적게 받으나  $Z/D=-0.3$  부터 프로펠러 날개의 위상각에 따라 각기 다른 축방향 속도분포를 갖게 된다.

프로펠러의 고속회전에 따라 프로펠러 날개 주위 유동의 난류운동에너지를 증가시킨다. 또한  $Y/D>0.5$  영역에서 위상각 변화에 따라 난류운동에너지가 주기적으로 수축 팽창하며 선체에 영향을 미친다.

프로펠러 전방의 상부영역에서 선체를 따라 작은 와도가 분포하나 프로펠러를 지난 후, 날개끝  $Y/D=0.5$  부근의 전단층 내부에서 날개끝 보오텍스가 큰 와도값을 가진다.

프로펠러 전방에서 프로펠러로 유입되는 유입류의 축방향 속도분포를 살펴보면 프로펠러 축을 중심으로 프로펠러에 의해 유도된 비대칭이며 불균일한 속도분포를 갖는 것으로 나타났다. PIV를 이용한 이러한 전속도의 측정은 프로펠러 설계나 성능예측에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

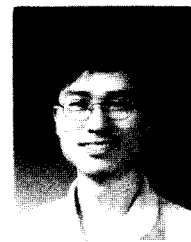
- 백부근, 이상준, 2002, "위상평균 PTV 기법을 이용한 프로펠러 후류의 속도장 측정,"

대한조선학회 논문집, 제 39권, 제 3호, pp. 41-47.

- 백부근, 이상준, 2003, "PIV를 이용한 선박 프로펠러 후류의 속도장 측정," 대한조선학회 논문집, 제 40권, 제 5호, pp. 17-25.
- 이상준, 2001, PIV/PTV Velocity Field Measurement Technique, POSTECH.
- 이상준, 고민석, 이정목, 2002, "PIV를 이용한 KRISO 3600TEU 컨테이너선 모형선의 반류 측정 및 해석," 대한조선학회 논문집, 제 39권, 제 3호, pp. 48-56.
- 이창섭, 이진태, 1990, "선미후류-프로펠러 상호작용을 고려한 유효반류 추정법," 대한조선학회지, 제 27권, 제 2호, pp. 1-12.
- 이창섭, 이진태, 서정천, 김영기, 1991, "프로펠러에 의해 유기된 선체표면 기진력 해석," 대한조선학회 춘계연구발표회, pp. 102-115.
- Choi, J.K. and Kinnas, S., 1999, "Numerical Model of a Cavitating Propeller Inside of a Tunnel," Journal of Fluids Engineering, Vol.121, pp. 297-304.
- Lauden, J., 1981, "The Influence of the Propeller on the Wake Distribution as Established in a Model Test," SNAME Propeller '81, pp. 233-242.
- Stern, F., Kim, H., Patel, V. and Chen, H., 1988, "Computation of Viscous Flow around Propeller-shaft Configurations," Journal of Ship Research, Vol.32, No. 4, pp. 263-284.



< 이 상 준 >



< 백 부 근 >