

위상평균 PTV 기법을 이용한 프로펠러 후류의 속도장 측정

백부근*, 이상준**

Velocity Field Measurements of Propeller Wake Using a Phase-averaged PTV Technique

Bu-Geun Paik* and Sang-Joon Lee**

요 약

선박용 프로펠러 후류의 유동 특성을 적응형 하이브리드 2-frame PTV(Particle Tracking Velocimetry)기법을 적용하여 실험적으로 해석하였다. 프로펠러 위상각에 대해 위상평균하여 하류로 나아감에 따른 후류 유동의 발달과정을 연구하였으며, 주 유동 방향으로 날개의 뒷날로부터 프로펠러 직경만큼의 거리까지를 측정하였다. 하나의 날개에 대해 4개의 다른 위상각 각각에서 얻은 위상평균 속도장 결과는 프로펠러 날개의 압력 차이로 인해 발생하는 주기적인 날개끝 보오텍스가 하류로 이동해 나감을 보여주고 있다. 또한, 프로펠러 날개 표면을 따라 발달하는 경계층에 기인한 점성 후류는 축방향 속도성분의 결손을 가진다. 프로펠러 날개 뒷날에서 발생하는 후연 보오텍스는 하류로 나아감에 따라 수축되며 점성 소산으로 인해 그 세기 및 크기는 점차 작아졌다.

※Keywords: PTV(Particle Tracking Velocimetry, 입자추적속도계), propeller wake(프로펠러 후류), phase-averaging(위상평균)

Abstract

Turbulent wake behind a ship propeller has been investigated using the adaptive hybrid 2-frame PTV(Particle Tracking Velocimetry). 400 instantaneous velocity fields were measured according to 4 different blade phases and ensemble-averaged to investigate the spatial evolution of the 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 by the boundary layers developed on the blade surfaces. As the tip vortex evolves downstream, the slipstream is contracted and the turbulent intensity is decreased with viscous dissipation and turbulent diffusion.

접수일자: 2001년 12월 18일, 승인일자: 2002년 6월 28일

* 학생회원, 포항공과대학교 기계공학과 박사과정(E-mail:ppaik@postech.ac.kr)

** 정회원, 포항공과대학교 기계공학과 교수(E-mail:sjlee@postech.ac.kr)

1. 서언

선박이 대형화되고 소요마력이 증가함에 따라 프로펠러 날개에 걸리는 하중은 점차 증가하고 있다. 하중의 증가는 선미 진동 및 소음의 주요 원인이 되는 캐비테이션 현상을 일으킬 뿐 아니라 선박의 추진 성능을 저하시키고 선원들에게 좋지 않은 승선감을 제공한다. 이러한 문제들을 개선하기 위하여 프로펠러의 기하학적 형상은 계속 바뀌어져 왔고 보다 복잡한 형상 및 구조를 가지게 되었다. 개선된 형상의 프로펠러 후류에서는 이전보다 더 복잡한 유동 현상이 나타나게 되었고, 이에 따라 보다 정확한 실험적, 이론적 해석이 요구되어 왔다.

Kerwin/Lee(1978)는 양력면 이론을 이용하여 프로펠러 날개 주위의 유동해석을 하였는데, 이 논문은 선형이론에 근거하여 비행기 날개 또는 프로펠러 날개 주위 유동을 기술하는데 있어 실용적 가치를 인정받아 왔다. 그러나, 양력면 이론은 날개 앞날(leading edge) 근처에서 실제 현상과 거리가 먼 현상을 보여주고 있어 이진태(1987), 김영기 등(1993)은 날개 선단 근처에서의 유동을 보다 정확하게 해석하기 위하여 포텐셜을 기저로 한 패널법을 프로펠러 주위 유동 해석에 적용하였다. 최근들어 조충호/이창섭(2000)은 저차 패널법의 단점을 보완한 B-스플라인 기저의 고차 패널법으로 계산시간을 단축시키고 계산의 정확도를 높였다. 프로펠러 날개 주위 유동을 이론적으로 해석하기 위해서는 적절한 후류 반류면(wake sheet) 모델을 이용하여야 한다. 후류 반류면의 위치를 가정하게 되면 날개 주위의 속도장을 계산할 수 있고, 경계조건을 만족하는 새로운 후류 반류면의 위치를 추정할 수 있다. 다른 한편으로는 반복계산을 피하기 위해서 실험에 의해 얻어진 계측결과를 사용하여 후류 반류면을 가정하는데, 선형 후류 반류면 모델 및 비선형(반경수축) 후류 반류면 모델 등이 이용되고 있다. Hoshino(1989)는 프로펠러 후류의 수축 및 후연 보오텍스면(vortex sheet) 모델링과 보완된 방법을 이용하여 프로펠러 주위의 유동장을 계산하였으나, 점성 및 허브

효과와 후류의 영향을 받는 속도장을 고려하지 못하였다. 무엇보다도 현재의 후류 반류면 모델링에서 후연 보오텍스면이 필라멘트로써 계산되기 때문에 실제로 두께를 가지고 있는 후연 보오텍스 및 날개끝 보오텍스의 예측에 있어서 신뢰성이 떨어진다. 날개끝 보오텍스는 추진 성능 측면에서 에너지 손실로서 작용하고 선박 진동과 소음의 원인이 되며 방향타의 표면에 침식을 유발할 수 있기 때문에 날개끝 보오텍스를 정확히 예측하고 효과적으로 제어하는 것은 매우 중요하다. 수치적으로 미리 날개끝 보오텍스의 위치를 예측하는 것은 현재 가능하지만 강도나 두께 등을 정확히 예측하는 것이 어렵기 때문에 후류 반류면 및 날개끝 보오텍스에 대한 신뢰성 있는 실험 자료로부터 수치 해석 코드를 개선하는 작업이 필요하다.

지금까지 프로펠러 후류 측정 시 사용된 실험적 방법은 주로 LDV(Laser Doppler Velocimetry)나 피토관 등에 의존하였다. 그러나, 이들은 점 측정 방식이기 때문에 넓은 영역을 측정하는데 있어서 많은 시간이 소요된다. 특히 넓은 영역을 위상 평균하여 속도장을 분석하기 위해서는 매우 많은 시간이 소요된다. 이에 반해 PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정 기법을 이용하면 유동을 간섭하지 않고, 넓은 영역의 유동 전체를 짧은 시간 내에 측정할 수 있다. Stella 등(1998)은 LDV로 프로펠러 후류의 축방향 속도성분을 분석하였으며, Controni 등(2000)은 PIV를 이용하여 후류유동의 속도장을 측정하여 LDV와 거의 같은 수준의 공간 분해능을 얻었다.

본 연구에서는 프로펠러의 후류를 보다 자세히 분석하기 위해 공간분해능이 뛰어난 적응형 하이브리드(adaptive hybrid) PTV(Particle Tracking Velocimetry)기법을 이용하였다. 이 속도장 측정 방식은 방식은 FFT(Fast Fourier Transform)방식의 PIV 기법으로 먼저 구한 예비 결과를 Baek/Lee(1996)가 개발한 일치확률 방식의 PTV 속도장 측정 기법을 사용하여 공간해상도와 속도 벡터 추출률을 크게 향상시켰다. 하이브리드 PTV 기법에 대한 자세한 내용은 김형범/이상준(2000)에 잘 설명되어 있다. 본 연구에서는 프로펠러 날

개의 위상에 따라 프로펠러 후류의 속도장을 측정하여 후류의 발달과정을 살피고, 수 백장의 순간속도장 결과들을 위상평균하여 와류장 및 난류 강도 분포 등을 실험적으로 해석하였다.

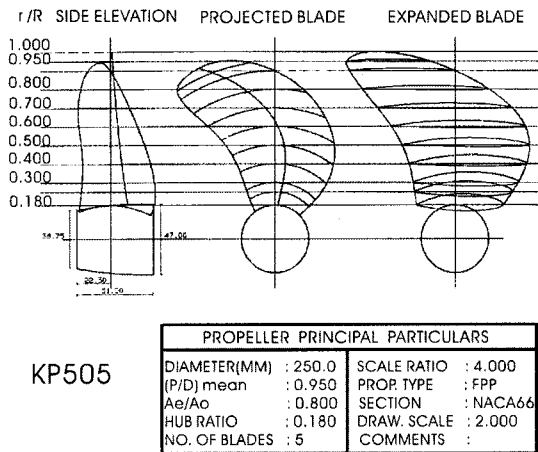


Fig. 1. Geometry of KP505 propeller

2. 실험장치 및 실험 방법

프로펠러 후류의 속도장 측정을 위한 화상처리 시스템은 Nd:Yag 레이저, CCD 카메라, 영상처리 장치, 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 이루어진다. 사용한 CCD 카메라의 해상도는 2048 × 2048 pixels² 이며, 한번에 2 프레임씩 쌍으로 유동영상을 취득하였다. Nd:Yag 레이저의 노출 시간은 약 7ns이며, 에너지 레벨은 펄스당 125mJ 이다. 측정하고자 하는 유동단면을 레이저 평면광(laser sheet)으로 조명하고 유동 단면 내에 들어 있는 입자들에 의해 산란된 빛을 CCD 카메라로 촬영하게 된다. CCD 카메라와 레이저를 동기시켜 얻은 입자 영상은 IBM-PC와 프레임 그래버를 이용하여 실시간으로 디지털 값으로 취득하게 된다. 이렇게 디지털 값으로 취득된 유동화상은 컴퓨터에서 노이즈 제거, 입자 중심추출 등의 전처리 과정과 추출된 입자의 경로 결정, 그리고 속도보간 및 평균 속도장 계산 등의 후처리 과정을 거치게 된다. 화상처리를 이용한 속도장 측정기법에 관한 전반적인 사항은 Lee(2001)에 자세히 나와 있다.

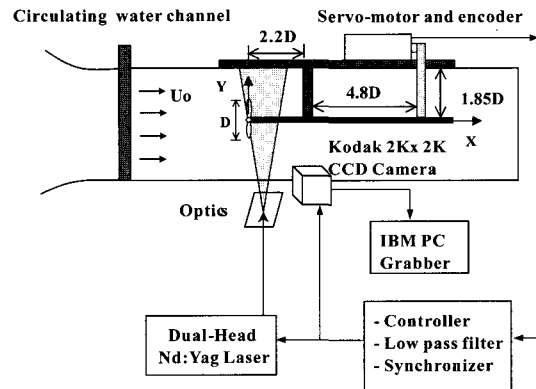


Fig. 2. Schematic diagram and coordinate system

프로펠러 후류 측정을 수행한 소형 회류수조의 시험부 제원은 120^L×30^W×20^H cm³이다. 속도장 측정을 위해 사용된 프로펠러는 KRISO 3600TEU 컨테이너선을 위한 KP505 이며, 제원은 Fig.1과 같다. 본 연구에서는 KP505를 1/4.6 으로 축소하여 실험을 수행하였다. 컨테이너선의 자항점에서 전진비는 0.72이며 이에 대응하는 프로펠러의 초당 회전수는 8.37 rps이었다. 실험시 자유흐름 속도는 32.5 cm/s로 고정시켰는데, 프로펠러 직경(D)은 5.4 cm 이고 이에 기초한 레이놀즈 수는 약 18000 이었다. 원주형 렌즈 및 거울 등에 의해 형성된 레이저 평면광을 회류수조 바닥에서 위쪽으로 조사하였고 프로펠러 후방으로 6×6 cm² 의 크기의 측정단면에서 속도장을 측정하였다. 좌표축은 Fig.2에서 보는 바와 같이 주유동 방향(축 방향)을 x 축으로 하였고, 주유동 방향에 수직인 방향을 y 축으로 정의하였다.

실험에 사용한 산란입자는 silver coated hollow glass 입자이며 평균 직경은 약 10μm이었다. Fig.2는 실험장치의 구성을 나타내고 있다. 프로펠러를 구동시키기 위하여 encoder가 내장된 서보모터를 이용하였고, 프로펠러 축(shaft)의 서지 및 진동현상을 막기 위하여 지지대를 설치하였다. 지지대에 기인한 흐름 교란을 방지하기 위하여 프로펠러와 프로펠러 축의 배치를 반대로 하였다. 따라서 본 실험에서는 프로펠러 축이 하류에 위치하여 반류 중심축 부분은 측정하지 못하였다.

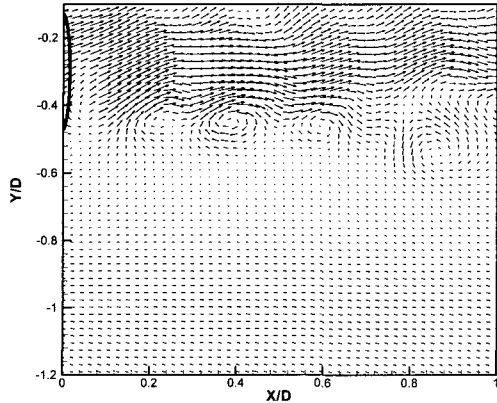


Fig. 3. Instantaneous velocity fluctuation at phase angle $\phi=18^\circ$

프로펠러에 장착된 encoder는 프로펠러 1회전 당 1000개의 펄스를 생성시켜서 0.36°분해능으로 프로펠러 각도를 PIV 시스템과 동기시킬 수 있다. Encoder에서 나온 신호에 포함된 노이즈는 저대역 필터를 사용하여 제거하였다. 2개의 레이저 펄스 사이의 시간 간격은 $\Delta t=300\mu s$ 로 하였는데, 두 장의 필드 영상으로부터 구한 입자중심 위치 데이터에 2-프레임 PTV 알고리즘을 적용하게 되면 각각의 입자위치에서 속도벡터들을 구할 수 있다. 본 실험에 사용한 프로펠러는 5개의 날개를 가지며, 하나의 날개에 대해 4개의 위상으로 나누어 각 위상에서의 순간속도장을 연속적으로 측정하였는데, 각 위상 사이의 시간간격은 6ms이었다. 각각의 위상각에 대해 동일 유동조건에서 획득된 800장의 입자영상으로부터 400장의 순간속도장을 얻었으며, 이들을 앙상블 통계처리하여 평균속도장, 난류강도 및 레이놀즈 전단응력 분포 등을 얻었다.

3. 결과

특정 프로펠러 날개의 위치를 0° 로 설정하고 위상각 $\phi=0^\circ, 18^\circ, 36^\circ, 54^\circ$ 각각에서 얻은 800장의 입자영상들을 화상처리 하여 400개의 순간속도장 결과를 구한 후, 이들을 평균하여 위상각 변화에 따른 프로펠러 후류의 발달 과정을 살펴 보

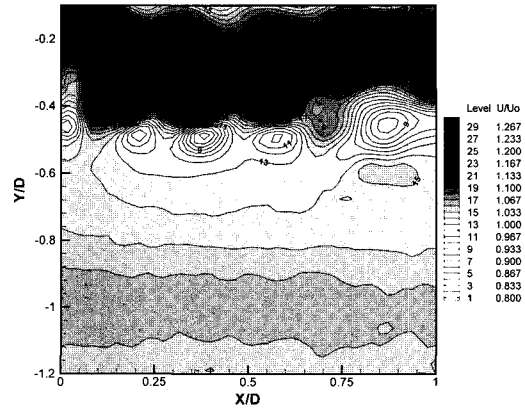


Fig. 4. Contour of phase-averaged axial velocity at $\phi=18^\circ$

았다. Fig.3은 위상각이 18° 인 경우의 특정 순간 속도장 결과에서 평균속도장 결과를 뺀 속도변동 성분의 공간분포를 나타낸 것이다. 프로펠러 평면은 $X/D=0$ 에 위치하며 프로펠러 축(shaft)은 $Y/D=0$ 에 위치하고 있다. Fig.3을 보면, 프로펠러 날개끝 위치에서 프로펠러 날개로부터 날개끝 보오텍스들이 연속적으로 생성되어 하류도 나아가고 있다.

Fig.4는 위상 평균한 축방향 속도성분의 contour를 그린 것인데 프로펠러 날개를 따라 발달한 2개 경계층의 병합으로 인해 발생하는 축방향 속도 손실이 날개의 끝과 프로펠러 축 근처에서 주로 나타남을 볼 수 있다. 축방향 속도 손실을 의미하는 점성후류는 본 실험의 경우, 날개 길이의 약 70% 정도에서 최소값을 가지는데 이것으로부터 날개의 반경(R) 방향으로 약 $0.7R$ 부근에서 가장 큰 부하를 감당하도록 고려되었음을 알 수 있다.

날개끝 보오텍스는 프로펠러 날개의 압력면과 흡입면 사이의 압력 차이로 인해 날개 끝에서 유동이 동그랗게 감기게 되고 결국 날개로부터 떨어져 나가면서 와열(보오텍스 sheet)를 형성하게 된다. 또한 뒷날로부터는 후연 보오텍스가 발생한다. 날개끝 보오텍스들은 나선형의 형상을 갖고 후류로 나아가며 후연 보오텍스는 날개끝 보오텍스로부터 시작하여 프로펠러 축을 향해 감기는 형상을

갖는다. Fig.5는 $\phi=18^\circ$ 위상각의 와도장들을 보여 주고 있으며, 날개끝 보오텍스들이 하류로 일정한 간격으로 나아감을 볼 수 있다. 프로펠러 날개의 뒷날에서 생성되는 후연 보오텍스는 부호가 서로 반대인 2개의 층으로 이루어져 있다. 이것은 프로펠러 날개의 압력면과 흡입면을 따라 발달하는 경계층이 2개의 시트 형태로 발생시키고 있음을 나타내며 $x=0.7D$ 까지 2개의 시트들이 날개끝 보오텍스를 중심으로 가깝게 형성되어 있다. 프로펠러 축으로부터 발생한 와도는 매우 작기 때문에 프로펠러 축이 후류에 크게 영향을 주지 않았음을 알 수 있다. 또한, 각각의 날개끝 보오텍스 및 후연 와도들을 살펴보면 하류로 나아감에 따라 정성 소산 및 난류 확산으로 인해 그 크기는 커지고 세기는 감소함을 알 수 있다. 날개끝 보오텍스들의 중심궤적을 나타낸 Fig.6을 보면, 4개의 위상각에서 측정된 각 날개끝 보오텍스들이 일정한 수축 기울기를 가지고 하류로 나아가다가 $x=0.4D$ 부터 유관 밖으로 확장됨을 보여주고 있다. 이것으로부터 프로펠러가 2/5회전할 때까지는 날개끝 보오텍스가 프로펠러 축을 향해 수축하다가 하류로 나아감에 따라 반류의 발달로 인하여 3/5회전 부터는 축으로부터 바깥으로 확장되고 있음을 알 수 있다.

변동속도장을 통계처리하면 난류강도 분포를 구할 수 있는데, 축방향 및 수직방향 속도 성분의 변동치를 자유흐름속도(U_o)로 나누어 무차원화하였다($(u')^2/U_o$, $(v')^2/U_o$). Fig.7과 Fig.8는 축방향과 수직방향 속도성분의 난류강도 분포를 나타낸 것이다. 축방향 속도성분의 난류강도는 위상평균한 축방향 평균속도(Fig.4)와 유사한 분포를 보이며, 부하를 가장 많이 받는 $Y=0.7R$ 부근에서 큰 난류강도 값을 가진다.

수직방향 속도성분의 난류강도 값이 축방향 난류강도 값과 비슷하기 때문에 프로펠러 후류의 난류구조가 등방성을 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 난류구조의 비등방성은 $x=1D$ 영역까지 현저하며, 축방향 및 수직방향 속도성분의 섭동이 크게 나타나고 있다. 또한, 수직방향 난류강도를 와도 contour와 비교하여보면 그 분포 형상이 유사하고 프로펠러 축으로부터 생성된 난류강도 값

도 매우 작기 때문에 프로펠러 축이 후류에 크게 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다.

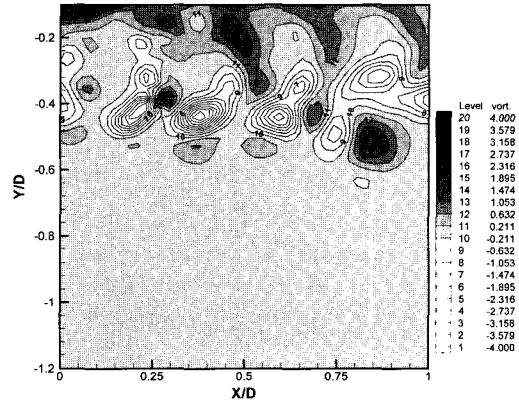


Fig. 5. Contour of phase-averaged vorticity at $\phi=18^\circ$

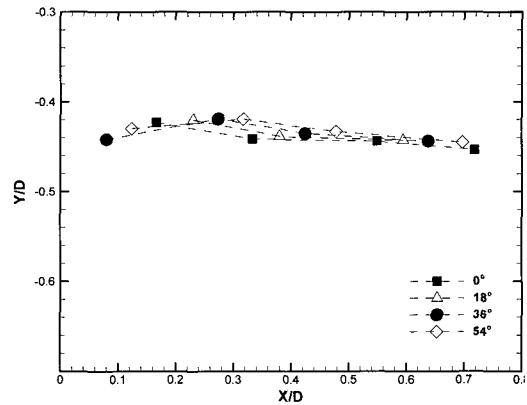


Fig. 6. Traces of tip vortices

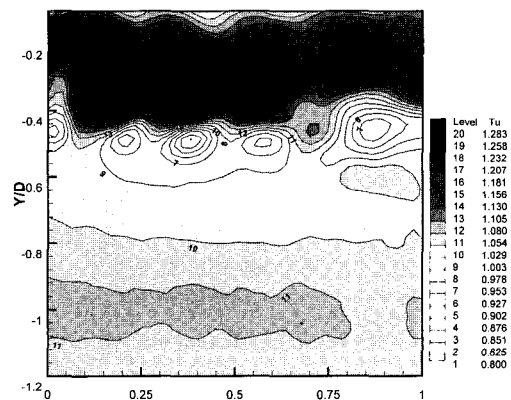


Fig. 7. Spatial distribution of axial turbulence intensity at $\phi=18^\circ$

Kiya/Sasaki(1983)는 축방향 속도성분의 난류강도가 최대값을 갖는 점이 전단층의 중심이라고 가정하였는데, Fig.7을 보면 전단층의 중심이 약 $x=0.4D$ 까지 프로펠러 축 쪽으로 수축한 후, 하류로 나아감에 따라 날개끝 보오텍스와 외면의 상호작용으로 인해 불안정하게 요동하고 있음을 볼 수 있다.

Fig.9는 각 위상각에 따른 레이놀즈 전단응력 분포($\overline{u'v'}/U_o^2$)를 비교한 것이다. 레이놀즈 전단응력은 프로펠러에서 생성, 발달되는 전단층 내부에서 높게 나타난다. 하류 위치 $x=0.4D$ 까지 레이놀즈 전단응력이 낮은 값을 가지나 이 후 큰 값을 가져 프로펠러로부터 생성된 보오텍스가 주위 유동과 활발하게 혼합되고 있음을 알 수 있다. 또한 프로펠러 날개의 난류성분은 점성소산에 의해 하류로 나아감에 따라 크게 감소한다.

4. 결론

프로펠러의 위상에 따른 후류의 속도장을 측정하여 유동구조 및 와류의 발달과정을 살펴보았다. 프로펠러 날개의 압력 차이로 인해 주기적인 날개 끝보오텍스가 발생하였고 위상에 따라 보오텍스들이 하류로 진행해 나감을 관측하였다. 축방향 속도 성분의 결손을 의미하는 점성후류가 프로펠러 날개의 경계층 병합으로 인해 발생하였고, 프로펠러 날개의 뒷날로부터 후연 와도가 생성되었다.

날개끝 보오텍스의 궤적은 프로펠러의 경우에는 수축하면서 나아간 후, $x=0.4D$ 부터 프로펠러의 stream tube 밖으로 확장하였는데, 이것은 위상평균한 속도장의 유선 기울기와 일치하였다. 또한 날개끝 보오텍스는 하류로 진행함에 따라 점성 소산과 난류 확산으로 인해 그 크기는 커지고 세기는 감소하였다.

프로펠러 근접후류는 축방향 속도성분의 난류강도 값이 수직방향 난류강도 값과 비슷한 등방성 난류구조를 가지고 있다. $x=0.4D$ 이 후 영역에서는 날개끝 보오텍스와 외면의 상호작용으로 인해 전단층이 불안정하게 요동하고 주위 유동과 활발하게 혼합되어 레이놀즈 전단응력이 점차 커진다.

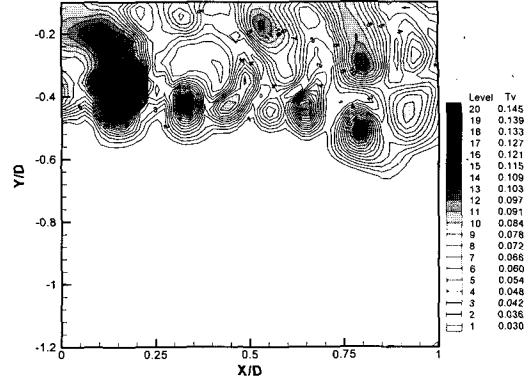


Fig. 8. Spatial distribution of vertical turbulence intensity at $\phi=18^\circ$

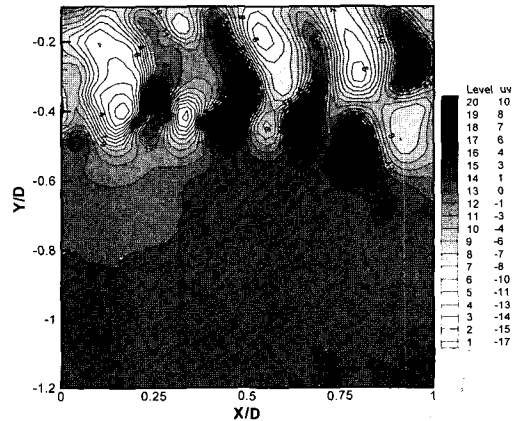


Fig. 9. Spatial distribution of Reynolds shear stress at $\phi=18^\circ$

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 김영기, 이진태, 이창섭, 서정천, 1993 “포텐셜을 기저로 한 패널법에 의한 프로펠러의 정상 성능 해석,” 대한조선학회 논문집, 제30권 제1호, pp.73-86.
- 김형범, 이상준, 2000 “적응형 하이브리드 기법을 이용한 2-frame PTV 기법의 성능향상 연구,” 대한기계학회 논문집, 제24권 제3호, pp. 443-449.
- 조충호, 이창섭, 2000 “2차원 B-스플라인 기저

고차 패널법의 수치 실험,” 제37권 제3호, pp.27-36.

- Lee, S.J. 2001 “PIV/PTV Velocity Field Measurement Technique(Theory and Practices),” POSTECH, Korea.
- Baek, S.J. and Lee, S.J. 1996 “A New Two-Frame Particle Tracking Algorithm Using Match Probability,” Experiments in Fluids, Vol.22, pp. 23-32.
- 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.
- Hoshino, T., 1989 “Hydrodynamic Analysis of Propellers in Steady Flow Using a Surface Panel Method,” J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.166. pp. 79-92.
- 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.

- Kiya, M. and Sasaki, K., 1983 “Structure of a Turbulent Separation Bubble,” Journal of Fluid Mechanics, Vol.137, pp.83-113.
- Lee, J.T., 1987 “A Potential-based Panel Method for the Analysis of Marine Propellers in Steady Flow,” Ph.D. Thesis, Dept. Ocean Engineering, M.I.T., Mass.
- 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 근 >



< 이 상 준 >