

## Stereoscopic PIV기법을 이용한 프로펠러 후류의 3차원 속도장 측정

백부근\*·이상준\*\*

### 3-D Velocity Fields Measurements of Propeller Wake Using a Stereoscopic PIV

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

**Keywords :** Stereoscopic PIV(스테레오스코픽 입자영상유속계), Phase-Averaging(위상평균),  
Propeller Wake(프로펠러 후류), Tip Vortex(날개끝 보오텍스), Trailing vortex(후연 보오텍스)

#### Abstract

The objective of present paper is to apply a stereoscopic PIV(Particle Image Velocimetry) technique for measuring the 3 dimensional flow structure of turbulent wake behind a marine propeller with 5 blades. It is essential to measure 3-components velocity fields for the investigation of complicated near-wake behind the propeller. The out-of-plane velocity component was measured using the particle images captured by two CCD cameras in the angular displacement configuration. 400 instantaneous velocity fields were measured for each of four different blade phases of 0°, 18°, 36° and 54°. They were ensemble averaged to investigate the spatial evolution of the propeller wake in the region ranged from the trailing edge to the region of one propeller diameter(D) downstream. The phase-averaged velocity fields show the viscous wake formed by the boundary layers developed along the blade surfaces. Tip vortices were formed periodically and the slipstream contraction occurs in the near-wake region. The out-of-plane velocity component has large values at the tip and trailing vortices. With going downstream, the axial turbulence intensity and the strength of tip vortices were decreased due to the viscous dissipation, turbulence diffusion and blade-to-blade interaction. The blade wake traveling at higher speed with respect to the tip vortex overtakes and interacts with tip vortices formed from the previous blade. Tip vortices are separated from the wake and show oscillating trajectory.

#### 1. 서론

선박이 대형화되고 소요마력이 증가함에 따라 프로펠러 날개에 걸리는 하중은 점차 증가하고 있다. 하중의 증가는 선미 진동 및 소음의 주요 원인이 되는 캐비테이션(cavitation) 현상을 일으킬 뿐 아니라 선박의 추진성능을 저하시킨다. 특히, 날개끝 보오텍스나 허브(hub) 보오텍스는 추진효율을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 선박의 타에 캐비테이션을 발생시켜 부식이나 침식의 원인이 된다. 이러한 문제들을 개선하기 위하여 프로펠러의 기하학적 형상은 지속적으로 바뀌어져 왔으며, 보다 복잡한 형상 및 구조를 가지게 되었다. 개선된 프로펠러 후류에서는 이전보다 더 복잡한 3차원 유동현상이 나타나게 되고, 이에 따라 보다 정확한 실험적, 이론적 해석이 요구되고 있다.

Kerwin & Lee[1]는 양력면 이론을 이용하여 프로펠러 날개 주위의 유동해석을 하였으나, 양력면 이론은 날개 앞날(leading edge) 근처에서 실제 현상과 크게 다른 결과를 보여준다. Lee[2], 김영기 등[3]은 날개 선단 근처에서의 유동을 보다 정확하게 해석하기 위하여 포텐셜을 기본으로 한 패널법을 프로펠러 주위 유동에 적용하였다. 최근 들어 조충호 &

이창섭[4]은 고차 패널법의 단점을 보완한 B-스플라인 방식의 고차 패널법으로 계산시간을 단축시키고 계산의 정확도를 높였다. 프로펠러 날개 주위 유동을 이론적으로 해석하기 위해서는 적절한 반류면(wake sheet) 모델을 이용하여야 한다. 실험에 의해 얻어진 계측결과를 사용하여 후류 반류면을 가정하기도 하는데, 선형 반류면 모델 및 비선형(반경수축) 반류면 모델 등이 이용되고 있다. 무엇보다도 수치적으로 미리 날개끝 보오텍스의 위치를 예측하는 것 뿐만 아니라 강도나 두께 등을 수치해석 코드로 정확히 예측하기 위해서는 반류면 및 날개끝 보오텍스에 대한 신뢰성 있는 실험자료가 필요하다.

지금까지 프로펠러 후류 측정 시 사용된 방법은 주로 LDV(Laser Doppler Velocimetry)나 피토판 등에 의존하였다. 그러나, 이들은 점 측정 방식이기 때문에 넓은 영역을 측정하는데 있어서 많은 시간이 소요된다. 특히 넓은 영역을 위상평균하여 속도장을 분석하기 위해서는 매우 많은 시간이 소요된다. 이에 반해, PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정기법을 이용하면 유동을 간섭하지 않고, 넓은 영역의 유동 전체를 짧은 시간 내에 측정할 수 있다. Stella 등[5]은 LDV로 프로펠러 후류의 측방향 속도성분을 분석하였으며, Controni 등[6]은 PIV를 이용하여 후류유동의 속도장을 측정하여 LDV와 거의 같은 수준의 공간 분해능을 얻었다.

\* 포항공과대학교 대학원, ppaik@postech.ac.kr

\*\* 포항공과대학교 기계공학과, sjlee@postech.ac.kr

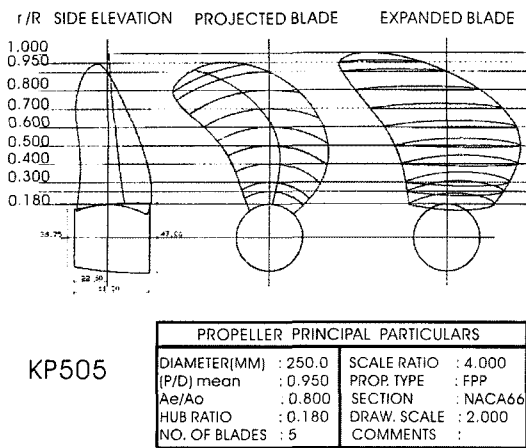


Fig. 1 Geometry of KP505 propeller

최근들어 프로펠러 후류의 3차원 유동정보를 얻기 위하여 stereoscopic PIV(SPIV) 3차원 속도장 측정기법이 이용되기 시작하였다. Soloff 등[7]은 3차원 보정기법을 이용하여 영상면과 3차원 측정체적 사이의 관계식을 구한 다음, 측정면에서의 변위값을 얻었다. 윤정환 & 이상준[8]은 축류 웅 후류를 SPIV를 이용하여 유동해석 하였는데, SPIV 방식에 비해 2-D PIV로 측정된 in-plane 속도성분은 2.7%, 축방향 난류강도는 최대 5.8%의 차이를 보이며, 이러한 차이는 out-of-plane 속도성분이 큰 구간에서 크게 발생한다고 하였다.

본 연구에서는 SPIV 속도장 측정기법을 이용하여 프로펠러 날개의 위상에 따른 프로펠러 후류의 3차원 속도장을 측정하고 수 백장의 순간속도장 결과들을 위상평균하여 평균속도장, 와류장 및 난류강도 분포 등을 실험적으로 해석하여 유동구조 및 후류의 발달과정을 살펴보았다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

프로펠러 후류의 속도장 측정을 위한 SPIV 시스템은 Nd:Yag 레이저, 두 대의 CCD 카메라, stereoscopic 렌즈, 회전 스테이지, 보정판 및 이송장치, 카메라 이송장치, 영상처리 장치, 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 이루어져 있다. 사용한 CCD 카메라의 해상도는  $1K \times 1K$  pixels<sup>2</sup>이며, 한번에 2 프레임씩 쌍으로 유동영상을 취득하였다. Stereoscopic 렌즈는 일반 렌즈와 달리 tilt / shift 시에 발생하는 영상의 왜곡이나 화질 저하를 개선하기 위하여 특별히 설계된 것으로 광학적인 특성이 매우 우수하다. Nd:Yag 레이저의 노출 시간은 약 7 ns이며, 에너지 레벨은 펄스당 125 mJ 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.

프로펠러 후류 측정을 수행한 소형 회류수조의 시험부 크기는  $120^L \times 30^W \times 20^H$  cm<sup>3</sup> 이다. 본 연구에서는 KRISO 3600TEU 컨테이너선용 프로펠러 KP505를 사용하였는데, 제원은 Fig.1과 같으며, 1/4.6 축소모형으로 실험을 수행하였다. 컨테이너선의 자항점에서 전진비는 0.72이며 이에 대응하는 프로펠러의 초당 회전수는 8.37tps이었다. 실험시 자유흐름

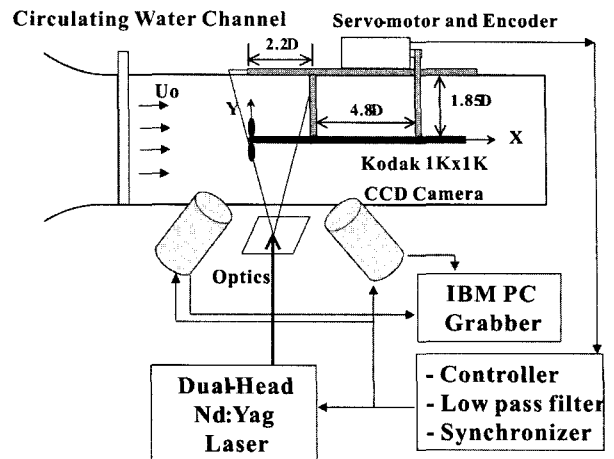


Fig. 2 Schematic diagram and coordinate system

속도는  $U_0 = 32.5$ cm/s로 고정시켰는데, 프로펠러 직경  $D = 5.4$ cm 이고 이에 기초한 레이놀즈 수는 약 18000 이었다. 본 실험에 사용한 산란입자는 silver coated hollow glass 입자이며 평균 직경은 약  $10\mu$ m이었다.

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 유동 교란을 방지하기 위하여 프로펠러와 프로펠러 축의 배치를 반대로 하였다. 따라서 본 실험에서는 프로펠러 축이 프로펠러 하류에 위치하여 반류 중심축 부분은 속도장을 측정하지 못하였다.

원주형 렌즈 및 거울 등에 의해 형성된 레이저 평면광을 회류수조 바닥에서 윗방향으로 조사하고,  $6 \times 6$ cm<sup>2</sup> 크기의 측정단면에서 속도장을 측정하였다. 좌표축은 Fig.2에서 보는 바와 같이 주유동 방향(축방향)을 x 축으로 하였고, 주유동 방향에 수직인 방향을 y 축으로 정의하였다. 프로펠러에 장착된 encoder는 프로펠러 1회전 당 1000개의 펄스를 생성시켜서  $0.36^\circ$  분해능으로 프로펠러 각도를 PIV 시스템과 동기시킬 수 있다. Encoder에서 나온 신호에 포함된 노이즈는 저대역 필터를 사용하여 제거하였다. 2개의 레이저 펄스 사이의 시간 간격은  $\Delta t = 300\mu$ s로 설정하였는데, 좌우 카메라로부터 취득한 2개의 입자영상으로부터 각 카메라의 변위벡터를 구한 다음, 3차원 속도성분(축방향 속도  $u$ , 수직방향 속도  $v$ , out-of-plane 속도  $w$ )를 도출하였다.

본 실험에 사용한 프로펠러는 5개의 날개를 가지며, 하나의 날개에 대해 4개의 위상으로 나누어 각 위상에서의 순간속도장을 위상평균 방식으로 측정하였는데, 이웃한 위상 사이의 시간간격은 6ms이었다. 각각의 위상각에서 400장의 순간속도장을 얻었으며, 이들을 양상블 통계처리하여 평균속도장, 평균 strain, 와도장 및 난류강도 분포 등을 구하였다.

## 3. 결과 및 토의

Fig.3은 위상각이  $0^\circ$ 인 경우의 임의의 순간속도장 결과에서 평균속도장 결과를 뺀 속도변동성분의 공간분포를 나타낸 것이다. 여기서 프로펠러 평면은  $X/D = 0$ 에 해당하며 프로펠러 축(shaft)은  $Y/D = 0$ 에, 프로펠러 날개끝은  $Y/D = -0.5$ 에 위치하고 있다. 프로펠러 날개끝 위치에서 날개끝

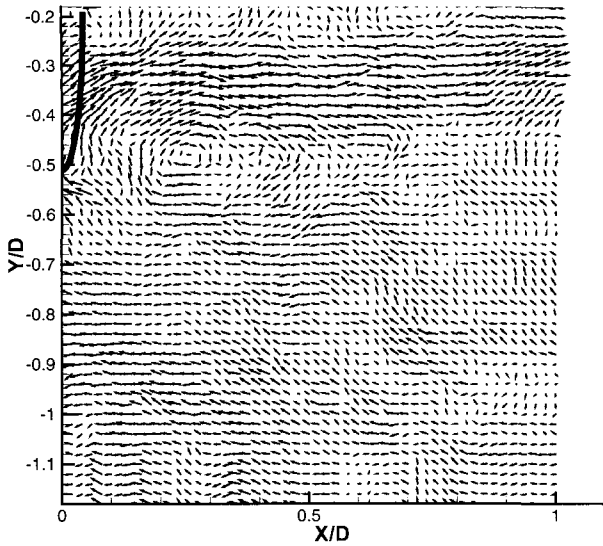


Fig. 3 Instantaneous velocity fluctuations at phase angle  $\phi = 0^\circ$

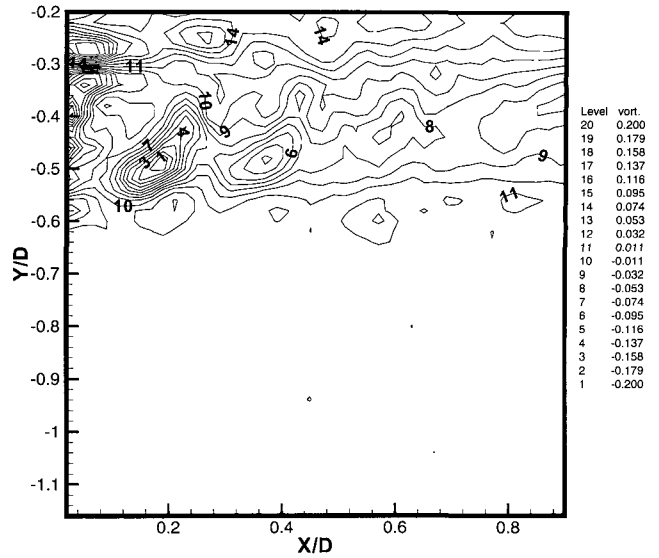


Fig. 5 Contour of phase-averaged vorticity at  $\phi = 0^\circ$

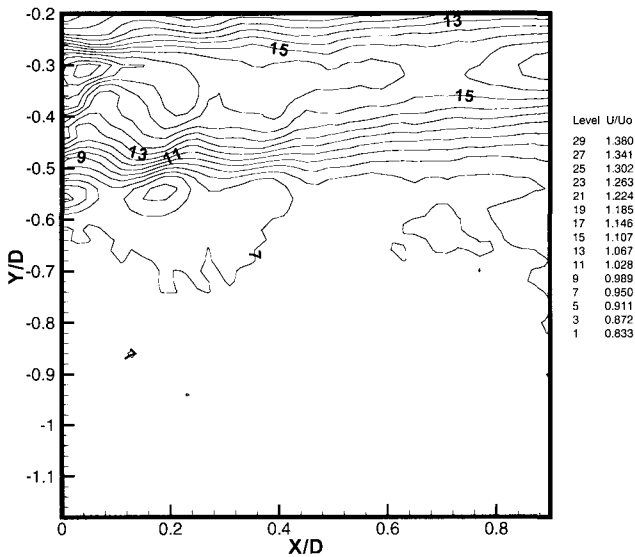


Fig. 4 Contour of phase-averaged axial velocity at  $\phi = 0^\circ$

보오텍스들이 연속적으로 생성되어 하류로 나아가고 있음을 볼 수 있다.

Fig.4는 위상평균한 축방향 속도성분의 contour를 그린 것이다. 프로펠러 날개를 따라 발달한 2개 경계층의 병합으로 인해 발생하는 축방향 속도 손실이 날개의 끝과 프로펠러 축 근처에 나타남을 볼 수 있다. 축방향 속도 손실을 의미하는 점성후류는 프로펠러의 slipstream 안쪽 구간에서 날개 끝과 프로펠러 축 부근에 비해 작아짐을 알 수 있다.

날개끝 보오텍스들은 나선형 형상을 갖고 하류로 나아가며 뒷날로부터 발생하는 후연 보오텍스는 날개끝 보오텍스로부터 시작하여 프로펠러 축을 향해 감기는 형상을 보여주고 있다. Fig.5는 위상각이  $0^\circ$ 인 경우의 와도장 결과를 나타낸 것인데, 날개끝 보오텍스들이 일정한 간격을 가지고 하류로 나아가고 있다. 후연 보오텍스는 프로펠러 날개의 압력면과 흡입면을 따라 발달하는 경계층으로 인해 부호가 서로 반대인 2개의 층으로 이루어져 있다. Slipstream 내부에서 후류는 프로펠러에 의해 축방향으로 강한 모멘텀을 갖게 되며, 하류로 나아가면서 후류구조를 변화시키게 된다. 즉, 특정한

날개 후류의 축방향 전진속도는 날개끝 보오텍스의 축방향 전진속도 보다 빠르기 때문에, 날개 후류는  $X/D = 0.5$  위치부터 이전 날개에서 발생한 날개끝 보오텍스의 영향을 받게 되어 후류가 변하기 시작한다.  $X/D = 0.75$  위치부터는 날개 후류가 이전 날개로부터 발생한 날개끝 보오텍스와 상호작용을 일으키게 되고,  $X/D = 1$  하류 위치에서는 특정 날개의 후류가 자신의 날개끝 보오텍스와 연결이 끊어지면서 이전 날개의 날개끝 보오텍스로 흡수(roll up)되어간다. 이러한 과정 동안에 프로펠러의 slipstream은 축을 향해 수축되었다가 다시 팽창하게 된다. 하류로 나아감에 따라 후류면에서 분리된 날개끝 보오텍스는 점차 그 강도를 잃으며 아래 위로 진동하는 궤적을 가지게 된다. 또한, 하류로 나아감에 따라 날개끝 보오텍스는 후류의 영향을 받아 비대칭적인 형상에서 대칭적인 형상을 보여준다.

날개끝 보오텍스에서 out-of-plane 유동이 존재하는가를 알아보기 위하여  $u, v$  속도에 대하여 out-of-plane strain 분포  $\epsilon_{zz}(=dw/dz)$ 를 구하였다. 그 결과 날개끝 보오텍스 위치에 강한  $\epsilon_{zz}$ 가 나타났고, 그 주위에 out-of-plane 유동이 존재함을 알 수 있었다. 그러나,  $\epsilon_{zz}$ 로부터 out-of-plane 속도성분을 직접적으로 구해 낼 수는 없으므로 SPIV기법을 이용하여 out-of-plane 유동을 측정하는 과정이 필요하다.

Fig.6은 SPIV기법으로 측정된 out-of-plane 속도성분  $w$ 를 나타낸 것이다. 날개끝 보오텍스와 후연 보오텍스를 따라  $w$ 가 큰 값을 가지고 있음을 볼 수 있다. 이러한 큰  $w$  값은 하류로 나아감에 따라 점차 작아지며  $X/D = 0.75$ 를 지나면서 아래 위로 진동하는 날개끝 보오텍스 주위로  $w$  값이 집중하게 됨을 알 수 있다. 그런데  $w$ 는 날개끝 보오텍스의 강도와 더불어 프로펠러의 에너지 소모를 나타내므로 프로펠러의 최적 설계를 위한 기초자료로도 사용될 수 있을 것이다.

변동속도장을 통계처리하면 난류강도 분포를 구할 수 있는데, 축방향 속도성분의 변동치를 자유흐름속도( $U_0$ )로 나누어 무차원화한다( $u'/U_0$ ). Fig.7은 축방향 속도성분의 난류강도 분포를 나타낸 것이다. 날개 끝과 후연 보오텍스 위치에 비교적 약한 난류강도가 발생하였으며 후류로 나아감에 따라 점성 소산 및 난류 확산으로 인해 점진적으로

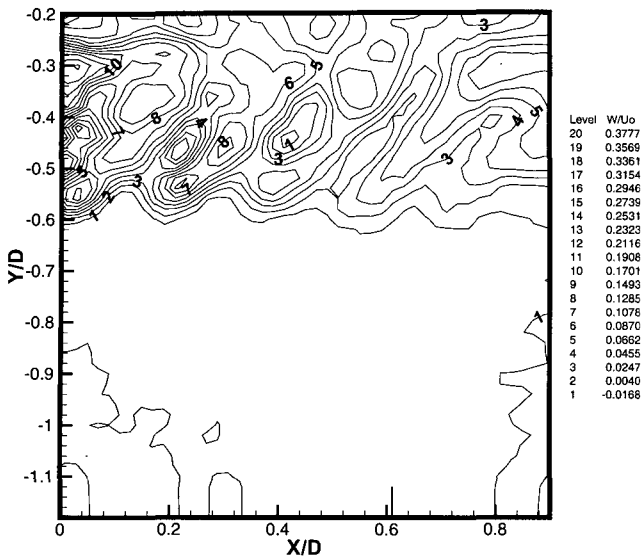


Fig. 6 Contour of phase-averaged out-of-plane velocity  $w$  at  $\phi = 0^\circ$

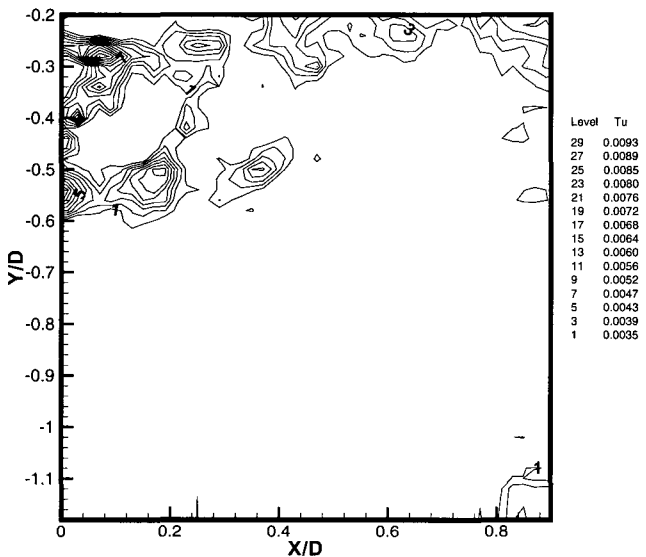


Fig. 7 Spatial distribution of axial turbulence intensity at  $\phi = 0^\circ$

소멸되어 간다.

#### 4. 결론

SPIV 기법을 이용하여 프로펠러 후류의 복잡한 3차원 유동구조를 실험적으로 해석하였다. Angular displacement 배치방식의 SPIV 시스템에 3차원 보정기법을 적용하여 영상왜곡을 제거한 3차원 속도장 결과를 얻을 수 있었다.

프로펠러 날개의 후방에 주기적인 날개끝 보오텍스가 발생하였고 위상에 따라 이들 보오텍스들이 하류로 진행해 나감을 관측하였다. 프로펠러 날개의 경계층 병합으로 인해 점성후류가 발생하였고, 프로펠러 날개의 뒷날로부터 후연 보오텍스가 생성되었다.

날개끝 보오텍스는  $X/D = 0.5$ 까지 slipstream 안에서 프로펠러 축을 향해 수축한 후, 점차 팽창하며 하류로 나아간다.  $X/D = 0.75$  부터는 날개의 후류가 이전 날개의 날개끝 보오텍스를 만나 상호작용을 일으킨다. 날개끝 보오텍스는 하류로 나아가면서 그 강도가 감소하며 점차

대칭적인 형상을 가지게 된다.

후연 보오텍스 및 날개끝 보오텍스는 강한 out-of-plane 속도성분을 가졌다. 그런데, out-of-plane 유동은 프로펠러의 추진효율을 떨어뜨리는 원인이되므로 프로펠러 설계시 유의하여야 한다.

축방향 난류강도는 날개끝 보오텍스와 후연 보오텍스에 집중적으로 나타나고 있으며 이를 통해 프로펠러의 후류 에너지가 날개끝과 후연 보오텍스에서 난류에너지로 소모되고 있음을 알 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Kerwin, J.E. and Lee, C.S., "Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting Surface Theory," Trans. SNAME, Vol.86(1978), pp.218-253.
- [2] Lee, J.T., "A Potential-based Panel Method for the Analysis of Marine Propellers in Steady Flow," Ph.D. Thesis, Dept. Ocean Engineering, M.I.T., Mass.(1987)
- [3] 김영기, 이진태, 이창섭, 서정천, "포텐셜을 기저로 한 패널법에 의한 프로펠러의 정상 성능 해석," 대한조선학회 논문집, 제30권 제1호(1993), pp.73-86.
- [4] 조충호, 이창섭, 2000 "2차원 B-스플라인 기저 고차 패널법의 수치 실험," 제37권 제3호, pp.27-36.
- [5] 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
- [6] 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.
- [7] Soloff, S. M., Adrian, R. J., Liu, Z-C, "Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry," Meas. Sci. Technol., Vol.19(1997), pp.214-221.
- [8] 윤정환, 이상준, "Stereoscopic PIV 기법의 개발과 이를 이용한 축류 웅 후류의 유동해석," 대한기계학회 논문집 B권, 제26권, 제2호(2002), pp.362-373.