

## POD(Proper Orthogonal Decomposition) 방법을 이용한 불안정한 프로펠러 후류 해석

백부근<sup>†\*</sup>, 김경열\*, 김기섭\*, 이정엽\*\*, 이상준\*\*

한국해양연구원 해양시스템안전연구소\*  
포항공과대학교 기계공학과\*\*

### Analysis of the Unstable Propeller Wake Using POD Method

Bu-Geun Paik<sup>†\*</sup>, Kyung-Youl Kim\*, Ki-Sup Kim\*, 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 complicated flow characteristics of upper propeller wake influenced by hull wake are investigated in detail in the present study. A two-frame PIV (particle image velocimetry) technique was employed to visualize the upper propeller wake region. As the upper hull wake affects strongly propeller inflow, upper propeller wake shows much unstable vortical behavior, especially in the tip vortices. Velocity field measurements were conducted in a cavitation tunnel with a simulated hull wake. Generally, the hull wake generated by the hull of a marine ship may cause different loading distributions on the propeller blade in both upper and lower propeller planes. The unstable upper propeller wake caused by the ship's hull is expressed in terms of turbulent kinetic energy (TKE) and is identified by using the proper orthogonal decomposition (POD) method to characterize the coherent flow structure in it. Instabilities appeared in the eigen functions higher than the second one, giving unsteadiness to the downstream flow characteristics. The first eigen mode would be useful to find out the tip vortex positions immersed in the unstable downstream region.

※Keywords : Propeller wake(프로펠러 후류), Hull wake(선미 반류), PIV(입자영상속도계), Tip vortex(날개끝 보오텍스), POD(proper orthogonal decomposition)

접수일: 2009년 9월 18일, 승인일: 2009년 11월 20일

† 교신저자: ppaik@moeri.re.kr, 042-866-3464

## 1. 서론

선박 추진기 관련 연구자들은 선박의 프로펠러에 발생하는 과도한 캐비테이션과 수중 방사 소음을 감소시키면서 추진 효율을 증가시키기 위하여 프로펠러 설계 시 수치해석 방법을 이용하여 프로펠러의 성능을 예측하여 왔다. 그러나 수치해석 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 실험 자료에 입각한 정확한 프로펠러 후류 데이터가 요구되어 왔으며 LDV(laser doppler velocimetry)나 PIV(particle image velocimetry) 등이 이용되어 회전하는 프로펠러 후방의 후류를 실험적으로 조사하기도 하였다.

Di Felice et al.(2004)과 Paik et al.(2005, 2007)은  $10^6$  이상의 높은 레이놀즈 수 조건의 균일 유동장에서 단독으로 회전하는 프로펠러 후류를 고해상도의 분해능으로 계측하였고 프로펠러 미끄럼유동(slipstream)의 수축, 날개간 상호작용, 날개끝 보오텍스의 소용돌이 강도 등에 대하여 논한 바 있다. 그러나 실제 선박의 경우 프로펠러로 유입되는 선미반류가 존재하게 되며 프로펠러 면의 상부와 하부로 서로 상이한 선미 반류가 유입되므로 균일 유입류 조건의 경우와는 다른 모습으로 프로펠러 후류가 나타나게 된다. 불균일한 선미 반류는 상부 프로펠러 후류를 불안정하고 비정상적으로 만든다. 선미 반류는 하부 프로펠러 후류의 보오텍스 구조에 비교적 적은 영향을 미치지만 상부 프로펠러 후류의 보오텍스 구조에는 큰 영향을 주게 되어 불안정하며 비정상적인 보오텍스 거동을 발생시킨다. Kim et al.(2008)은 재현된 선미 반류에 의해 영향을 받는 프로펠러 후류를 가시화 하고 난류 운동에너지 관점에서 복잡한 상부 프로펠러 후류를 분석하고자 하였으나 구체적인 기법이나 연구 방법이 부족하여 상부 후류 모델링을 위한 구체적인 정보를 제공하지 못하였다.

본 연구에서는 상 하부 프로펠러 후류를 측정하고 해석하기 위하여 PIV 속도장 기법과 POD(proper orthogonal decomposition) 방법을 사용하였다. PIV로 측정된 순간(instantaneous) 속도장과 위상

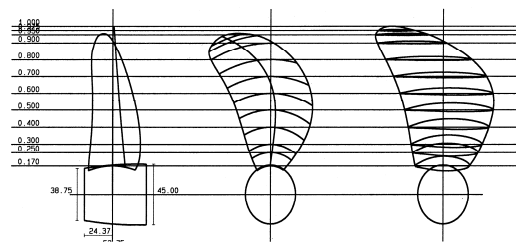
평균(phase-averaged) 속도장은 프로펠러 후류 모델링의 형상 자료를 향상시키는데 사용되었다. 또한 상부 프로펠러 후류 내의 날개끝 보오텍스들이 불안정한 거동을 보이기 때문에 상부 프로펠러 후류의 공간적인 난류 구조를 살펴 보았다. 일반적으로 Reynolds 분해(decomposition) 방법은 측정된 속도 성분에서 유동장의 평균 속도 성분을 빼서 얻는 변동(fluctuation) 속도 성분들을 사용하는 것으로서 난류 유동장을 분석하는데 효율적인 방법으로 알려져 있다. 하지만 Reynolds 분해법으로부터 얻어진 변동 속도장이 유동의 통계적 해석을 위해 유용하게 사용 될 수는 있으나 보오텍스 거동을 포함하는 난류 구조를 가시화하는 최선의 방법이 될 수는 없다. 게다가 서로 관련성이 없는 유동장들에 대한 단순한 통계적 분석으로써 시간 평균화된 유동장에 숨겨진 일관성 있는(coherent) 유동 구조에 관한 정보를 얻는 것은 쉽지 않다. 레이놀즈(Reynolds) 분해법 외에도 고정된 전달(convection) 속도를 이용하는 Galilean 변환법, LES(large eddy simulation) 분해 방법과 같은 유동 해석 방법들이 난류 구조에 대한 연구를 위해 사용되기도 한다. 유동 해석 방법들 중에서도 본 연구에서 적용하려고 하는 POD 방법은 유동장 전체에 걸쳐 불균일한 여과(filtering) 기능을 수행하므로 매우 효과적인 난류 구조 해석 방법이 될 수 있다. 여기서 불균일한 여과란 계측된 속도장에 대해서 전체적으로 동일한 방법으로 유동구조를 분리 해석하는 것이 아니라 국소적으로 형성되는 보오텍스 척도나 난류 운동에너지 등에 따라 유동장을 비균일하게 분리 해석하는 방법이다. POD는 실험 데이터의 앙상블(ensemble)에 대해 모달(modal) 분해를 위한 최적의 기저를 제공하며 하나 이상의 방향에서 불균일한 저통과여과(low-pass filtering) 역할을 담당할 수 있다. 또한 POD는 여러 개의 모드(mode)를 갖는 무한 방향 처리과정에서 가장 에너지가 큰 성분들을 뽑아내는 매우 효율적인 방법이다(Lumley et al. 1996). 그러므로 POD는 다양한 난류 보오텍스 유동에서 지배적인 유동 구조, 즉 일관성 있는

유동 구조를 고집어 내기 위한 적합한 방법으로 알려져 있다(Moreau et al. 2000, Patte-Rouland et al. 2001).

본 연구의 주 목적은 PIV 속도장 측정법과 POD 분석법을 사용하여 재현된 선미 반류의 영향을 받는 프로펠러 후류의 일관성 있는 구조를 조사하는 것이다. 프로펠러 후류, 특히 불안정한 날개끝 보오텍스 거동에서 가장 지배적인 모드를 찾기 위해 유동 구조에 대한 각 고유 모드의 효과를 조사하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

프로펠러 후류 계측은 해양연구원 해양시스템안전연구소 내에 있는 중형 캐비테이션 터널(cavitation tunnel)에서 수행되었다. 터널의 시험부 제원은  $0.6^L \times 0.6^W \times 2.6^H \text{ m}^3$ 이며 최대 유속은 12 m/s, 터널내 압력은  $0.1 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 에서  $2.0 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 까지 변화가 가능하다. 실험에 사용된 프로펠러 모형의 제원은 Fig. 1과 같다. 컨테이너 선박을 위한 프로펠러 모형은 1/16로 축소되어 제작되었으며 5개의 날개, 250 mm의 직경을 갖는다. 프로펠러의 설계 전진비는 0.76이고 평균 피치(pitch)비는 1.0206이다. 실험에 사용된 프로펠러 회전수와 프로펠러 날개의 0.7 반경 위치에서 코드 길이에 근거한 레이놀즈 수는  $1 \times 10^6$  이었다.



PROPELLER PRINCIPAL PARTICULARS	
DIAMETER(MM) : 250	SCALE RATIO : 16.00
(P/D)mean : 1.0105	PORP. TYPE : FPP
HUB RATIO : 0.1820	SECTION : NACA66
NO. OF BLADES : 4	5

Fig. 1 The geometry of propeller model

프로펠러 후류의 속도장 측정을 위한 2차원 PIV 시스템은 Nd:Yag 레이저(펄스 당 200mJ), 두 대의 CCD 카메라, 카메라 이송장치, 영상처리 장치, 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 이루어져 있다. 사용한 CCD 카메라의 해상도는  $1024 \times 1024 \text{ pixels}$ 이며, 한번에 2 개의 프레임씩 쌍으로 유동영상을 취득하였다. 레이저 평면광을 Fig. 2와 같이 공동수조 아래 쪽에서 위 방향으로 조사하고,  $20 \times 10 \text{ cm}^2$  크기의 측정단면에서 속도장을 측정하였다. 산란입자로 사용된  $\text{TiO}_2$ (titanium dioxide)는 평균 입자 직경이  $3 \mu\text{m}$ 이고 밀도는  $4\text{g}/\text{cm}^3$ 이다. 취득된 입자영상으로부터 FFT(fast fourier transformation)에 기초한 알고리즘을 사용하여 속도장을 추출하였다. 미소조사구간의 크기는  $32 \times 32 \text{ pixels}$ 이었으며 50% 겹침(overlapping) 기법을 사용하여 속도장의 공간분해능을 높였다. 유효 공간 해상도는 1.56 mm이고 이것은 이웃한 속도벡터 사이의 평균 거리를 의미한다. 프로펠러 회전 축에 연결된 인코더(encoder)가 동기장치로 트리거(trigger) 신호를 보내어 레이저와 카메라를 동기시킨다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 좌표계와 측정면을 나타낸다. X축은 프로펠러 축을 따라 하류로 나아가는 방향이며 Y축은 윗방향, Z축은 수평방향으로서 좌현쪽을 가리킨다.

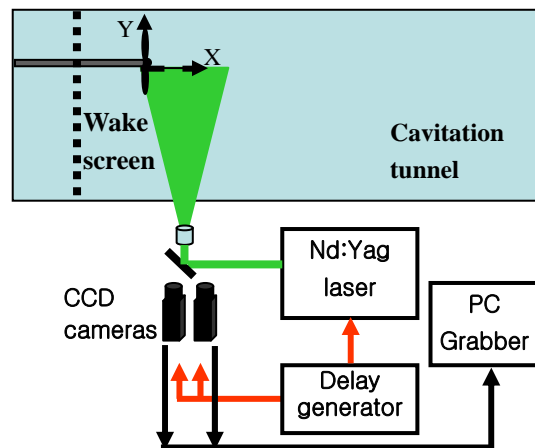


Fig. 2 Experimental set-ups for PIV measurements

원점은 프로펠러 평면의 중심에 위치하고 모든 거리와 계측된 속도 성분들은 각각 프로펠러 직경(D)과 자유흐름 속도(U<sub>0</sub>)로 무차원화 하였다.

본 연구가 진행된 캐비테이션 터널의 경우 시험부 공간 제한으로 인하여 선박 모형을 프로펠러와 함께 설치할 수 없다. 따라서 Fig. 3과 같은 선미 반류를 모사하기 위하여 반류스크린을 제작하여 프로펠러 전방에 배치하였다. 일반적인 반류스크린의 경우 실제 선박의 경우와 유사하게 프로펠러 상부로 강한 선미 반류가 유입되도록 하는데 본 시험부 배치에서는 프로펠러 상부면의 후류에 대한 PIV 계측이 불가하다. 프로펠러 허브가 터널의 바닥에서 조사되는 레이저 평면광을 차단하기 때문에 상부의 후류에 대한 가시화가 어렵다. 본 연구에서는 상부의 프로펠러 후류를 가시화하기 위해 제작된 반류스크린의 위와 아래를 거꾸로 하여 터널의 바닥 가까운 영역에 프로펠러의 상부 후류가 발생되도록 하였다.

POD 방법은 선형 분해 기법 중 하나로서 본 연구에서 사용한 방법은 Sirovich(1987)가 제안한 스냅샷(snapshot) 방법이다. 측정된 속도장에서 각 성분들이 스칼라인 벡터장 {u<sub>i</sub>}를 생각하여 POD 기법을 설명하고자 한다. 이때 아래 첨자 i는

스냅샷 번호를 의미한다. 유한한 최적의 벡터장을 표현하기 위해서 각 속도 벡터는 기저 함수로 투영될 필요가 있고 벡터장 {u<sub>i</sub>}에 최적 직교 공간 모드(optimal orthogonal spatial modes)인 기저 {Φ<sub>j</sub>(x)}<sub>j=1~∞</sub>를 찾아야 한다. POD 해석에서는 유한한 물리적 공간 x 안에서 정의되는 벡터함수 u를 다음과 같은 선형급수로 표현할 수 있다.

$$u(x) = \sum a_j \Phi_j(x) \tag{1}$$

여기서 a<sub>j</sub>는 투영 계수를 의미하며 j는 j번째 모드를 의미한다. 위 급수의 부분합의 평균제곱오차를 최소화하여 수렴시간을 단축시키며 수학적으로는 벡터장 u에 대한 공간모드 Φ로의 정규화 평균 투영(normalized averaged projection)을 최대화하는 공간 모드 Φ를 선택하며 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$\text{Max}(\langle |u, \Phi|^2 \rangle / \|\Phi\|^2) \tag{2}$$

여기서 || ||은 놈(norm)을 의미하며 양상블 평균은 < >로써 표현된다. (2)식은 내적을 최대화하는 것으로서 다음의 고유치 문제를 푸는 것과 같은 의미이다.

$$\iint_D R_{ij}(x, x') \Phi_j^{(n)}(x') dx' = \lambda^{(n)} \Phi_i^{(n)}(x) \tag{3}$$

위의 식에서 D는 속도장의 2차원 영역을 의미하고 함수 R은 평균화된 2점 상관 텐서(averaged two-point correlation tensor)를 나타내며 아래의 식으로 정의된다.

$$R_{ij}(x, x') = \langle u_i(x) u_j(x') \rangle \tag{4}$$

즉, 서로 다른 속도장의 곱에 대한 양상블 평균으로서 나타내어진다. (3)의 식에서 가장 큰 고유치를 가지는 경우, 상응하는 고유 모드는 가장 지배적인 유동 구조를 나타낸다. 또한 전체 유동 구조는 가장 지배적인 고유 모드들의 선형 조합에 의해 재구성될 수 있다.

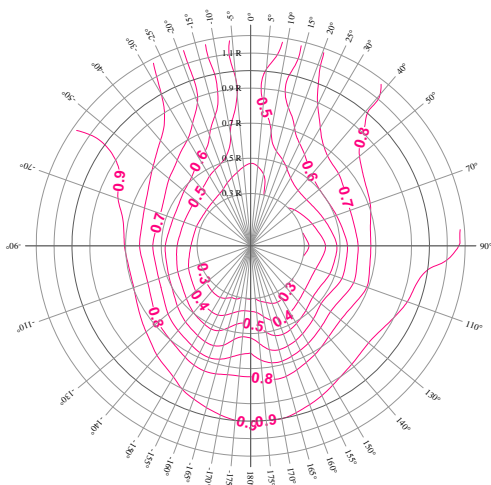
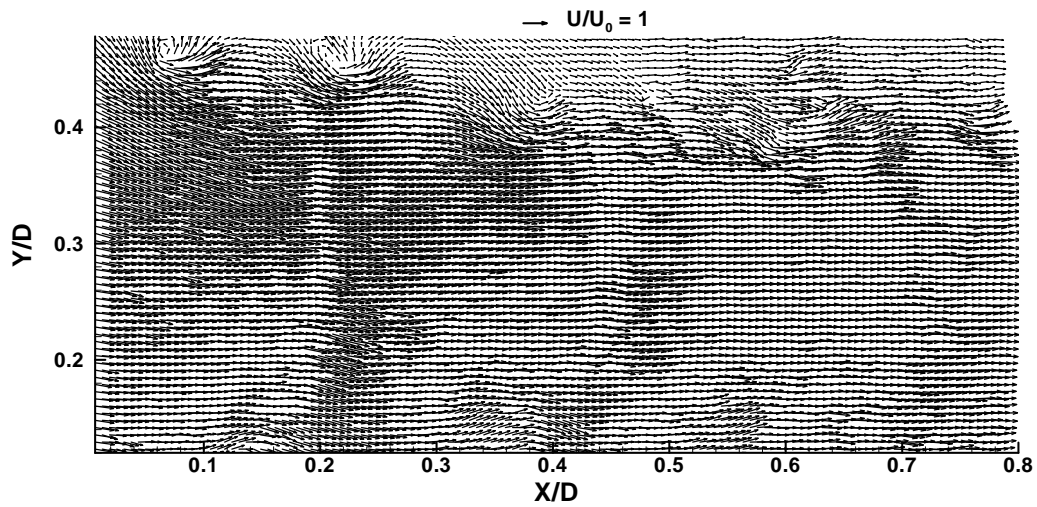


Fig. 3 Axial velocity profiles of hull wake

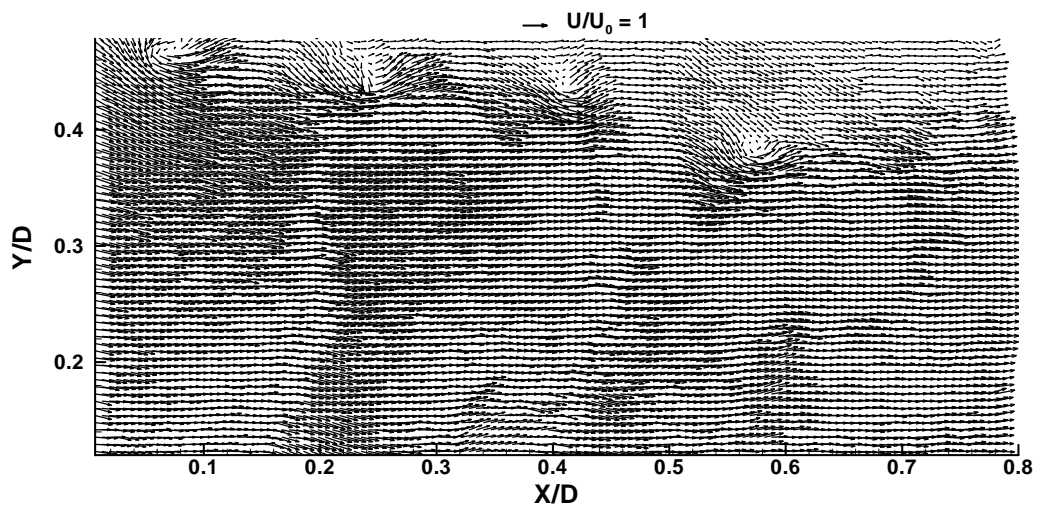
### 3. 결과 및 토의

Fig. 4는 프로펠러의 회전 위상각  $\phi$ 가  $0^\circ$ 일 때 프로펠러 면에 수직인 측정면에서 계측한 상부 프로펠러 후류의 전형적인 순간 속도장을 보인다. 두 개의 순간 속도장은 같은 회전 위상각에서 계측한 것으로서 서로 다른 날개끝 보오텍스 거동이 나타남을 볼 수 있다. 이렇게 불안정하게

타나나는 순간 속도장들을 위상 평균하면 날개끝 보오텍스의 와도(vorticity)가 넓게 분포하며 타원형의 모양을 갖게 된다(Kim et al. 2008). 따라서 순간 속도장들을 위상 평균 처리하는 방법으로는 프로펠러의 상부 후류를 잘 모델링하기 어렵다고 판단된다. 특히,  $X/D > 0.4$  하류 영역에서 날개끝 보오텍스들은 매우 불안정한 거동을 보인다. 그리고 유동은 국소적으로 큰



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 4 Selected instantaneous velocity fields of the upper propeller wake

속도 구배(gradient)를 나타낸다. 하부 프로펠러 후류면의 일관성 있는 보오텍스 구조는 Galilean이나 Reynolds 분해 방법을 이용하여

분석할 수 있다(Paik et al. 2005). 그러나 상부 후류면의 불안정한 후류의 경우, 전달 속도를 이용한 분해 방법을 이용하게 되면 지루하고

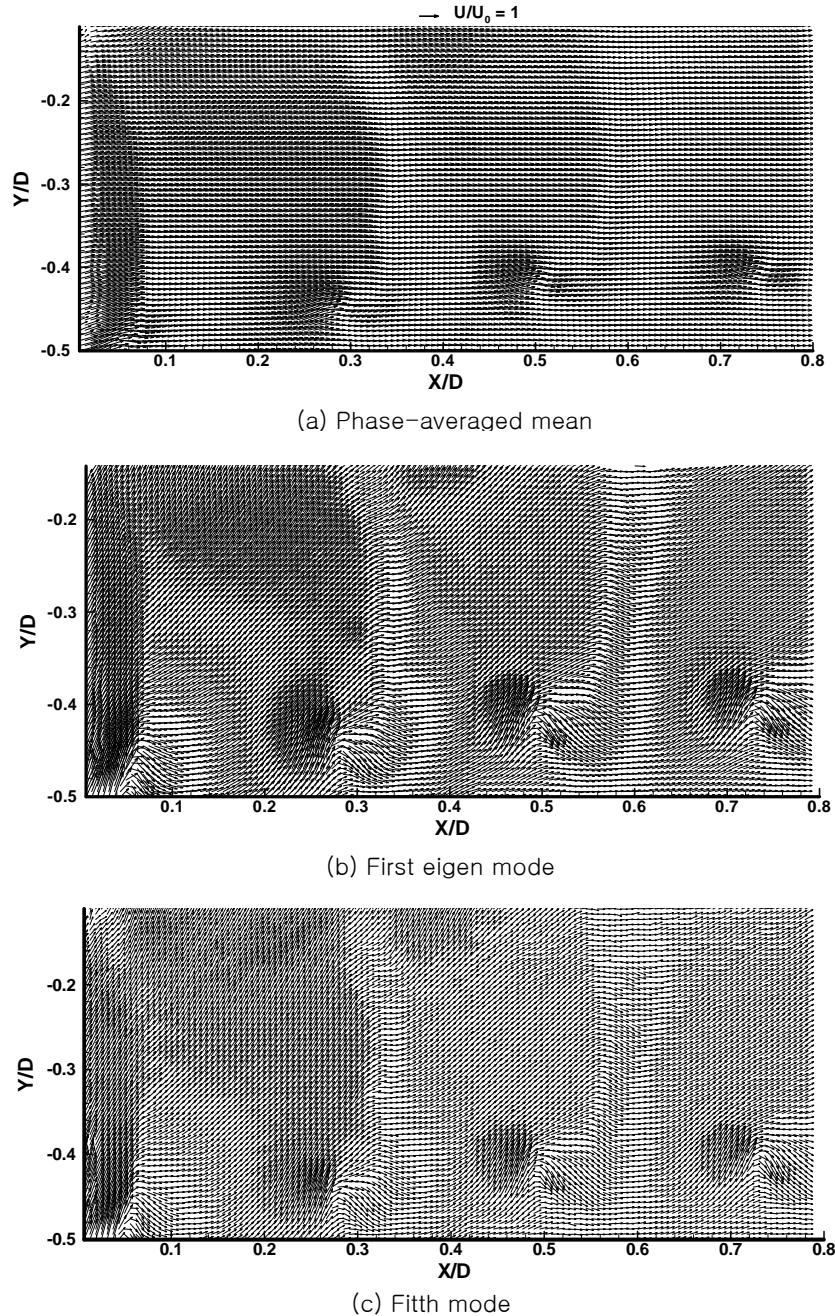


Fig. 5 Comparison between phase-averaged velocity field and other modes in the lower plane

반복적인 계산을 수행하여야 하고 속도장들에 대해 균일한 여과(filtering) 역할을 하게 되므로 효과적이지 못하다.

POD 방법은 난류 후류 유동에서 일관성 있는 유동을 얻기 위하여 불안정한 유동장을 걸러내는 역할을 한다. Fig. 5는 하부 후류면에서 POD 방법을 통하여 얻은 몇 개의 고유 함수와 위상 평균된 속도장을 비교하여 나타낸다. 속도장들은 유동 패턴에 있어 유사함을 보이고 있다. 첫 번째 고유 모드는 첫 번째 고유 함수와 동일하며 다섯 번째 고유 함수는 처음의 다섯 개 고유 모드들을 더한 것과 같다. 즉, 각 고유 함수에 대한 정의는 아래와 같다.

$$\Phi = \sum a_i u(x) \quad (5)$$

여기서  $a_i$ 는 고유치에 따른 고유 벡터이다. 사실 위상 평균 속도장은 모든 고유 모드들을 포함한다. 첫 번째 고유 모드는 날개끝과 후연(trailing) 보오텍스들의 지배적인 유동 구조를 분명하게 보인다. 첫 번째 고유 모드가 지배적인 유동 에너지를 가지기 때문에 다른 모드들 역시 비슷한 유동 패턴을 보이게 된다. 고유치, 즉 난류 운동에너지에 따른 분포를 살펴보기 위하여 POD 고유치들의 모달(modal) 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림은 각 모드 또는 고유 함수에서 축적된 에너지 분포를 보이는데  $k$ 와  $N$ 는 각각 모드 수와 전체 고유 모드의 수를 의미한다. 또한  $\lambda_k$ 와  $\lambda_r$ 는 각 고유 모드에서의 난류 운동에너지와 전체 난류 운동에너지를 각각 나타낸다.

하부 후류면에서 정규화된(normalized) 고유치들은 평균화된 2점 상관(cross-correlation) 텐서로부터 추출되며 첫 번째 고유 모드는 약 98.65%의 난류 운동에너지를 함유한다. 이것은 지배적인 첫 번째 고유 모드가 대부분의 난류 운동에너지를 포함하며 첫 번째 고유 모드로써 하부 프로펠러 후류의 유동 구조를 표현할 수 있음을 의미한다. 상부 후류면에서 모달 분포는 첫 번째 고유 모드가 약 98.34%의 난류 운동에너지를 가지고 있음을 보인다. 이 값은

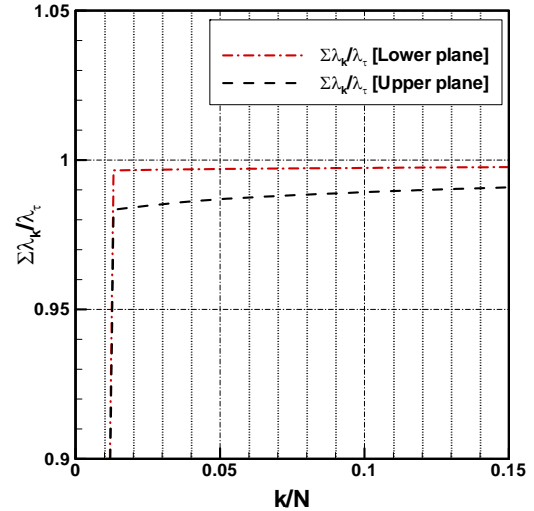
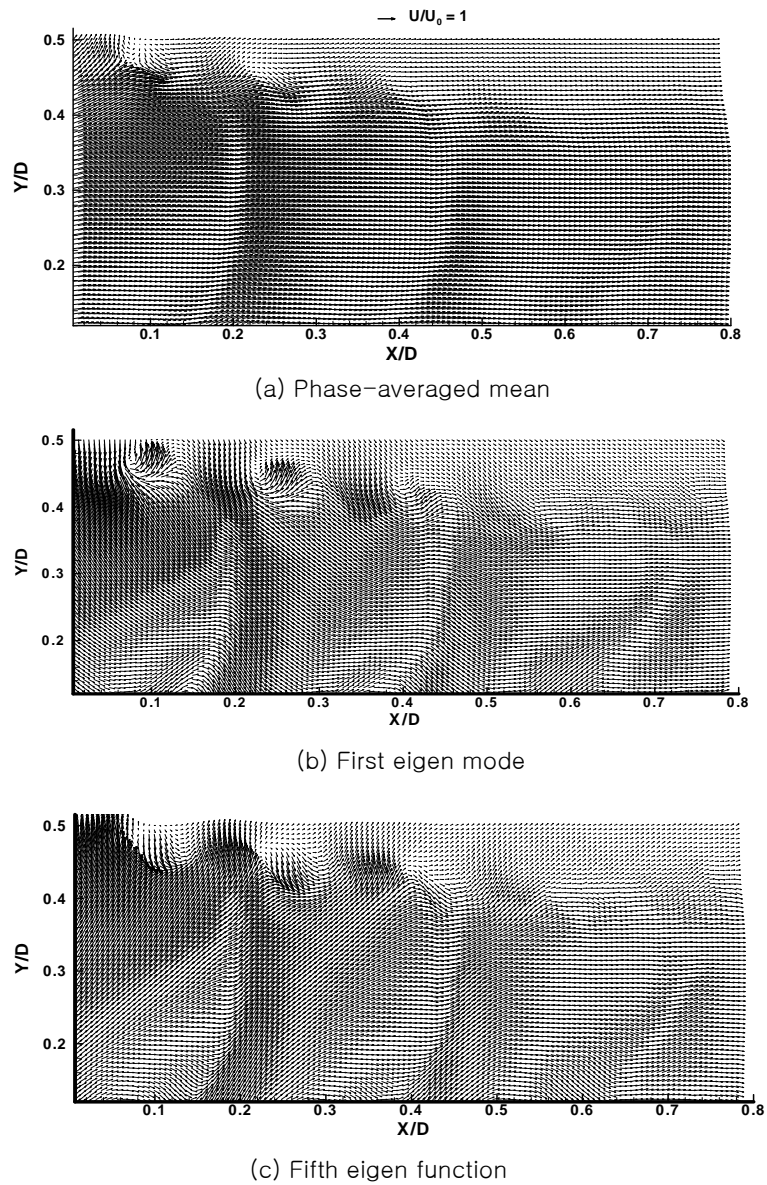


Fig. 6 Kinetic energy accumulated in the first few eigen functions in the lower and upper planes

하부 후류면의 그것과 비교할 때 약간 적은 값이다. 재미 있는 사실은 상부 후류면에서 운동에너지가 하부 후류면에 비해 상대적으로 여러 모드들에 걸쳐 넓게 퍼져 있다는 것이다. 일반적으로 첫 번째 고유 모드가 주된 지배 모드, 즉 가장 큰 난류 운동에너지를 가지고 있다고 가정한다면 위상평균 속도장은 각각의 고유 모드와 유사한 유동 패턴을 가져야 한다. 이 사실을 확인하기 위하여 Fig. 7과 같이 상부 후류면에서 예측한 위상평균 속도장을 몇 개의 모드들과 비교하였다. 하부 후류면의 결과와 비교할 때 상부 후류면의 첫 번째 고유 모드를 제외한 다른 모드들이 위상평균 속도장에 변화를 주는 것으로 보인다. 모드 수가 증가함에 따라 작은 척도의 와(eddy) 운동들이 하류 지역에서 나타난다. 다시 말하면, 비록 상부 후류면에서 거의 모든 난류 운동에너지가 첫 번째 고유 모드에 집중된다 할지라도 두 번째 이상의 고차 모드들에서 첫 번째 고유 모드 또는 위상평균 속도장과는 다소 다른 유동 패턴이 형성된다는 것이다. 첫 번째 고유 모드가 모든 모드에 영향을 주지만 위상평균된 속도장에서는  $X/D = 0.4$  이하의 하류 영역에서 유동구조가 변화하는 것을



**Fig. 7** Comparison between phase-averaged velocity field and other eigen functions in the upper plane

볼 수 있다. 이러한 유동 현상은 위상평균되었거나 위상 공진(phase-lock)된 유동 구조에서 나타나는 경향이 아니다. 후류의 비정상 상태는 하류 지역의 유동 패턴 변화에 기인하며 두 번째 보다 큰 고유 함수들에서 분명하게 나타난다. 사실 작은 난류 운동에너지를 갖는 모드가 유동 구조에 있어서 지배적인 역할을 할

수 없기 때문에 Fig. 7의 결과는 매우 흥미로운 결과라고 할 수 있다.

날개끝 보오텍스의 궤적은 신뢰도가 높은 후류 모델링을 구축하기 위해서 필수적인 정보라고 할 수 있다. 본 연구에서는 날개끝 보오텍스의 궤적을 PIV 계측과 POD 방법을 통하여 Fig. 8과 같이 도출하였다. Fig. 8에 두 개의 궤적 데이터를



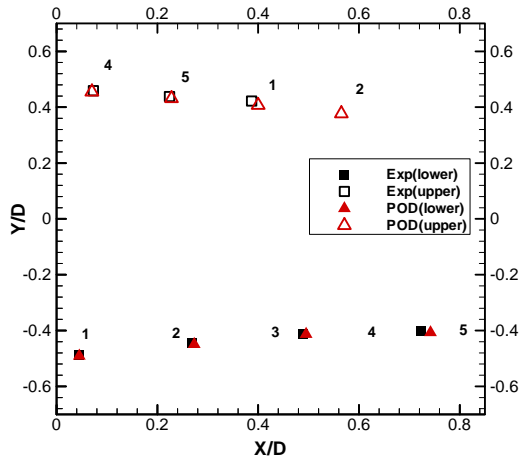


Fig. 8 Comparison of trajectories of tip vortices in both measurement planes

비교하였는데 날개끝 보오텍스 지수 “ 1 ” 은 특정 프로펠러 날개가 하부 후류면에서 0°의 회전 위상각에 위치할 때를 의미한다. 그리고 다른 날개끝 보오텍스 지수들은 순서대로 표시되었다.

PIV로 계측한 하부 미끄럼유동은  $X/D = 0.481$ 까지 계속 수축되다가 하류로 나아감에 따라 수축이 멈춘다. 상부 후류면의 미끄럼유동은 0.4D 하류 위치까지 약하게 수축되지만 보오텍스 구조의 비정상적이고 불안정한 특성으로 인하여 네 번째 날개끝 보오텍스의 정확한 위치를 결정하는 것이 어렵다. 측정된 날개끝 보오텍스들은 하부면에서 더 빠르게 이동하는데 하부 미끄럼유동의 높은 축방향 모멘텀으로 인해 이러한 결과가 나타난다. 그러나 상부 후류면에서는 선미 반류로 인해 날개끝 보오텍스가 낮은 축방향 모멘텀을 갖는 전단(shear) 유동 영역 안에 놓이게 되고 하부면보다 낮은 속도로 진행하게 된다. 상부 후류면에서 위상평균 속도장이나 순간 속도장으로부터 네 번째 날개끝 보오텍스의 위치를 파악하는 것이 어려우므로 POD 방법을 사용하여 보오텍스들의 위치를 찾아 보았다. 일반적으로 날개끝 보오텍스들은 큰 난류 운동에너지를 생산하기 때문에 POD 방법을

이용하는 것은 이상적이라고 보여진다. 첫 번째 고유 모드로부터 얻어진 날개끝 보오텍스들의 궤적을 Fig. 8에 두 가지 델타(delta) 심볼로서 상하부 반류를 표현하였다. 네 번째 날개끝 보오텍스를 포함한 궤적을 보면 상부 미끄럼유동이 0.6D 하류 지역까지 수축되는 현상을 볼 수 있다.

PIV 계측으로부터 얻어진 순간 또는 위상평균 속도장은 상부 후류면의 불안정한 특성으로 인해 날개끝 보오텍스들의 궤적 정보를 자세히 나타내기에 부족하다. 이에 반해 POD 방법으로 순간 속도장들을 분석하게 되면 불안정하고 복잡한 유동 구조에서 일관성 있는 유동 패턴을 얻는 것이 가능해진다. 비록 상부 후류면의 고차 모드들이 하류 유동 구조를 미약하게 변화시키기는 하지만 그 영향은 첫 번째 고유 모드가 주는 영향에 비해 미미하다. 결국 불안정한 상부 후류면의 첫 번째 고유 모드로부터 프로펠러의 성능을 추정하기 위해 사용되는 후류 모델링의 형상 정보를 얻는 것이 가능하다. POD 방법을 이용하여 위상평균 속도장에 대해 추가적으로 공간적인 여과 기능을 수행할 수 있기 때문에 불안정한 프로펠러 후류에서도 일관성 있는 유동 구조를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

재현된 선미 반류에 의해 영향을 받는 프로펠러 후류의 유동 특성을 PIV 속도장 측정 기법과 POD 유동 해석 방법을 통하여 분석하였다. 상부 프로펠러 후류는 선미 반류의 영향으로 인해 비정상적이며 불안정한 유동 구조를 보인다. 상부면에서 측정된 위상평균 속도장은 다양하게 나타나는 유동 패턴들로 인해 날개끝 보오텍스의 형상 왜곡이나 궤적 변화 등과 같이 실제 현상과 다른 모습을 보이게 된다. 즉 PIV 속도장 계측 후 사용되던 위상평균 기법은 상부 프로펠러 후류면의 날개끝 보오텍스의 불안정한 거동을 분석하기에 적합하지 않다. 후류 모델링의 신뢰도를 높이기 위해서 선박과 프로펠러를 동시에 고려해야 하고 난류 운동에너지에 기초한

유동 해석 방법을 사용하여 상부 후류면의 불안정한 보오텍스 구조를 해석할 필요가 있다. 본 연구에서는 POD 방법을 이용하여 상부 및 하부 후류에서의 지배적이고 일관성 있는 유동 구조를 조사하였다. 하부 프로펠러 후류에서는 위상평균 속도장이 POD를 통해 얻은 모드들의 속도장과 매우 유사한 모습을 보인다. 그러나 상부 후류면에서는 두 번째 고유 함수 이상의 고차 고유 함수들이 유동 구조에 영향을 주어  $X/D > 0.3$ 의 하류 지역에서 불안정성이 증가하게 된다. 비록 상부 후류가 불안정한 유동 특성을 가지고 있으나 POD를 통해 얻은 첫 번째 고유 함수의 지배적인 유동 패턴은 신뢰성 있는 후류 모델링을 제공하는데 유용하며 난류 운동에너지 관점에서 날개끝 보오텍스 궤적을 자세히 식별하는데 도움을 줄 수 있다.

**후 기**

본 연구는 "저진동 고효율 추진기 및 방향타 기술 개발(PNS132C)" 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

**참 고 문 헌**

- Di Felice, F., Di Florio, D., Felli, M., Romano, G. P., 2004, " Experimental Investigation of the Propeller Wake at Different Loading Conditions by Particle Image Velocimetry," Journal of Ship Research, 48(2), 168-190.
- Kim, K.Y., Paik. B.G. and Ahn, J.W., 2008, " Visualization of Unstable Vortical Structure in a Propeller Wake Affected by Simulated Hull Wake," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 6, pp. 620-630.
- Lumley, J.L., Holmes, P. and Berkooz, G., 1996, Turbulence, Coherent Structures, Dynamical Systems and Symmetry, Cambridge: Cambridge University Press.

- Moreau, J., Patte-Rouland, B. and Rouland, E., 2000, " Particle Image Velocimetry and Proper Orthogonal Decomposition," Euromech 411 section 5.
- Paik. B.G., Kim, J., Park, Y. H., Kim, K.S. and Kim, K.Y., 2005, " PIV Analysis of Vortical Flow behind a Rotating Propeller in a Cavitation Tunnel," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 6, pp. 619-630.
- Paik. B.G., Kim, J., Kim, K.Y. and Kim, K.S. 2007, " Study on the Three Dimensional Flow Characteristics of the Propeller Wake Using PIV Techniques," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 3, pp. 219-227.
- Patte-Rouland, B., Lalizel, G., Moreau, J. and Rouland, E., 2001, " Flow Analysis of an Annular Jet by Particle Image Velocimetry and Proper Orthogonal Decomposition," Measurement Science & Technology, Vol. 12, pp. 1404- 1412.
- Sirovich, L., 1987, " Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures. Part 1:Coherent Structures," Quarterly Applied Mathematics., Vol. 45, pp. 561-572.



< 백부근 >      < 김경열 >      < 김기섭 >



< 이정엽 >      < 이상준 >