

스테레오 PTV와 스테레오 PIV에 의한 선박프로펠러 후류측정

도덕희[†] · 황태규^{**} · 이상준^{****}

Measurements of a Ship's Propeller Wake with Stereoscopic-PIV and Stereoscopic-PTV

Deog Hee Doh, Tae Gyu Hwang, and Sang Joon Lee

Abstract. Stereoscopic PTV and Stereoscopic-PIV measurements have been carried out for the studies of the wake of a ship's propeller. Stereoscopic photogrammetry based on a 3D-PTV principle was introduced using two high-definition cameras(1k x 1k, 30Hz). The arrangement of the two cameras was based on angular position. The pair-matching of the three-dimensional velocity vectors were based on Genetic Algorithm based 3D-PTV technique. The results obtained by both measurement systems have been compared at the advance ratio $J=0.88(290 \text{ rpm}, d=54 \text{ mm})$. Turbulent properties have also been compared each other at the same condition.

Key Words : Stereoscopic-PTV(스테레오 입자추적유속계), Stereoscopic-PIV(스테레오 입자영상유속계), Propeller Wake(프로펠러후류)

1. 서 론

선박의 대형화 및 요소마력 증가에 따라 프로펠러 날개의 기하학적 형상도 저마다 복잡하게 변해 왔다. 실제 프로펠러는 자유표면과 선미반류(hull wake)의 영향을 받기 때문에 정확하게 추진성능을 예측하기 위해서는 자유표면의 영향을 고려한 프로펠러 반류면 모델링이 필요하다. 따라서 자유표면의 영향이 고려된 프로펠러 후류에 대한 신뢰성 있는 실험 데이터를 바탕으로 수치해석 코드를 개선하는 작업이 필요하다. 프로펠러 후류 측정 시 주로 사용된 방법은 LDV나 피도관 등에 의존하였으나, 넓은 유동영역을 측정하는데 많은 시간과 노력이 요구된다. 특히 넓은 영역을 위상평균하여 속도장을 분석하기 위해서는 매우 많은 시간이 소요된다. 이에 반해 PIV(Particle Image Velocimetry) 속도장 측정기법을 이용하게 되면 유동을 간섭하지

않고, 넓은 영역의 유동을 짧은 시간내에 측정할 수 있다. 최근에 Controni(2000) 등과 Lee(2004a) 등은 단독으로 회전하는 프로펠러 후류를 각각 PIV와 PTV(Particle Tracking velocimetry) 속도장 측정기법을 이용하여 해석하였다. 특히, Lee(2004b) 등은 SPIV(Stereoscopic PIV)를 이용하여 프로펠러 후류의 3차원 유동특성을 연구하였으며 그 결과를 2-D PIV 결과와 비교하기도 하였다(2004c). 또한 Paik(2004) 등은 자유표면이 있는 경우, 선박모형에 부착되어 회전하는 프로펠러 주위 유동을 PIV 속도장 측정기법으로 조사하였다.

본 연구에서는 SPIV와 SPTV(Stereoscopic PTV)에 의한 측정결과가 선박의 프로펠러후류에 측정하였을 때의 결과특성을 검토함으로써 프로펠러 후류와 같은 매우 복잡한 유동장의 측정시 이들의 성능을 평가하고자 하는 것을 본 연구의 목적으로 삼고자 한다.

2. 스테레오 PIV, 스테레오 PTV

카메라를 이용하여 3차원 공간을 정량적으로 인식하기 위해서는 먼저 2대 이상의 카메라와 각각의 카메라

[†]한국해양대학교 기계공학과

E-mail: doh@hhu.ac.kr

^{*}Dept. of Mech. Eng., Georgia Inst. of Tech.

^{**}포항공대 기계공학과

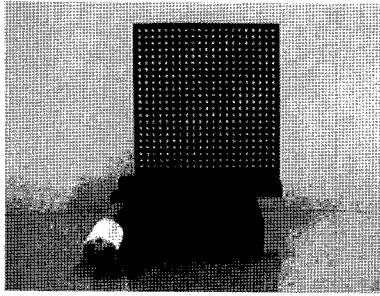


Fig. 1. Used camera calibrator.

에 대한 정보가 필요하다. Fig. 1은 카메라의 교정을 위하여 사용되는 교정기를 나타내는데 이를 이동시킨 상태에서의 카메라영상을 이용하여 카메라에 대한 지상 좌표계에 대한 상대적 위치 및 카메라렌즈의 특성량을 계산한다. 카메라교정법은 Doh 등(2002)이 사용한 10 mm개의 표점요소를 가지는 관측방정식을 이용하여 카메라 정보를 구하였다. 교정기는 가로, 세로 각각 100 mm이고, 5간격으로 직경 1 mm 입자형상들이 오차 한도 ± 0.01 mm 내에서 분포되어 있다. 이 교정기를 카메라를 향하여 수직으로 3간격으로 7번 이동하여 얻어진 3차원적 위치 정보와 교정점들의 영상정보로부터 구해진다. 교정을 통한 카메라의 투시방향(Z방향)으로의 평균오차가 0.25 mm이고, 카메라의 수평방향(X방향)과 수직방향(Y방향)으로의 평균오차는 각각 0.02 mm와 0.04 mm이었음이 교정결과로부터 알 수 있었다. 투시방향으로 큰 것은 실험장치 벽면의 굴절 등에 의한 영향으로 보인다. 한편, 정사각형의 대상물을 두 대의 카메라에서 일정한 각도로 관측할 때 얻어진 영상은 사다리꼴의 일그러진 영상을 얻게 된다. 따라서 정확한 2차원 계산을 위해 mapping function을 이용하여

영상의 변환을 하여야 한다. 본 연구에서는 계속하고자 하는 $Z = 0$ mm 지점의 영상을 기준으로 다음의 식 (1)을 이용하여 2차원 영상변환(Warping)을 행하였다. Fig. 2는 식 (1)로부터 구해진 a_{ij} 값을 이용한 영상변환 전과 후의 교정기 영상을 보여주고 있다.

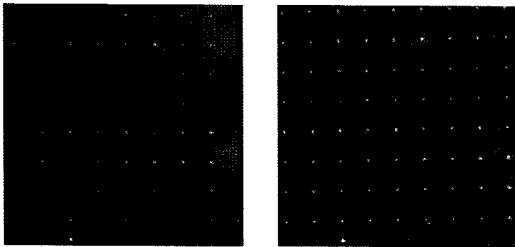
$$\begin{aligned} x &= \frac{a_{11}x_s + a_{12}y_s + a_{13}}{a_{31}x_s + a_{32}y_s + 1} \\ y &= \frac{a_{21}x_s + a_{22}y_s + a_{23}}{a_{31}x_s + a_{32}y_s + 1} \end{aligned} \quad (1)$$

단, x, y : 변환전의 영상의 좌표값

x_s, y_s : 변환후의 영상의 좌표값

변환된 영상으로부터 상호상관 PIV기법을 이용하여 각각 카메라에 대한 2차원 속도 벡터를 구한 다음 이를 식 (1)을 이용하여 역변환을 행함으로써 영상의 3차원 매칭(matching)에 필요한 2장의 비왜곡 영상을 확보하였다. 이들 영상으로 계조차상호상관법(도덕희, 1998)으로 2차원 벡터를 얻었다. Fig. 3은 스테레오 PTV 측정법의 원리를 나타낸다. 두 대의 카메라의 입자영상 사진좌표, $p_1(x, y), p_2(x, y)$ 를 이용하여 스테레오매칭법⁹⁾에 의거하여 3차원 절대좌표, $P(X, Y, Z)$ 를 구할 수 있다. 2차원 속도벡터의 시점과 종점을 입자영상의 사진좌표로 간주하면 식 (2)와 같이 각 카메라의 입자영상의 사진좌표와 절대좌표와의 관계식을 적용함으로써 3차원 좌표로 변환함으로써 3차원 속도벡터를 얻었다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$



(a) before transformation (b) after transformation

Fig. 2. Image of calibrator.

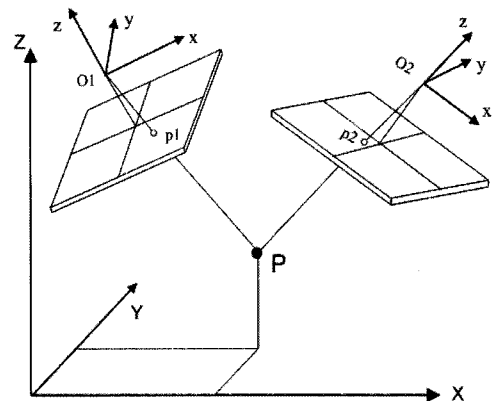


Fig. 3. Principle of Stereoscopic PTV.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} X_{01} \\ Y_{01} \\ Z_{01} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{02} \\ Y_{02} \\ Z_{02} \end{pmatrix} \right] \quad (3)$$

윗 식에서 c는 카메라의 초점거리(pixel 단위), x, y는 사진좌표, X₀, Y₀, Z₀는 카메라의 원점, a_{ij}(i=1,2,3, j=1,2,3)는 카메라교정작업으로부터 얻어지는 회전행렬이다. 이론적으로는 Fig. 3과 같이 두 대의 카메라(1, 2)의 입자영상 사진좌표를 통과하는 직선은 한 점 P에서 만나야겠지만 실제 영상에서는 반드시 그렇지 못하므로 P점의 3차원 위치는 식 (3)과 같이 (2)에서 구한 각 카메라의 절대좌표의 평균을 취하였다. 3차원 속도 벡터를 구하기 위한 두 시각간의 동일입자 판별 알고리즘으로서는 도 등이 사용한 유전알고리즘 기반(GA: genetic algorithm)의 3D-PTV법(도덕희, 2002)을 적용하였다. 이들은 3차원 공간에 있는 모든 입자들에 대한 유전알고리즘을 적용하였지만 본 스테레오 PTV법에서는 2차원 단면광원이 통과하는 영역만을 선별하는 계산방식을 채택하였다. 이 방식은 최초로 얻어지는 원시벡터에 오류벡터를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 속도 벡터회복률도 향상시킬 수 있다. Fig. 4는 본 연구에서 적용된 유전알고리즘(GA)기반의 스테레오 PTV법의 계산원리를 나타낸다. GA계산을 위한 연산자로서 초기개체 생성(Initialization), 격리(Isolation), 재생산(Reproduction), 교배(Crossover) 및 이주(Migration)를 적용하였다. 초기개체생성에는 각 카메라 1, 2의 시점과 종점의 사진좌표를 사용하였다. GA계산을 위한 목적함수로서는 유체의 연속체 개념에 의거한 수정연속

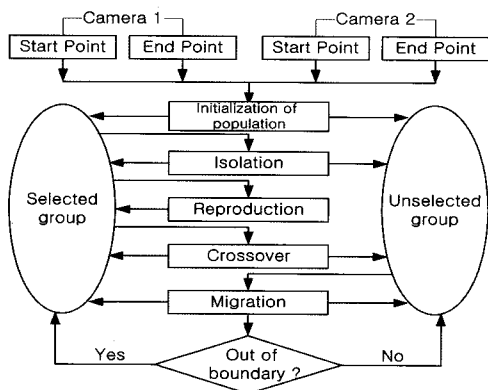


Fig. 4. Principle of Stereo-PTV algorithm using GA.

식과 두 카메라의 공선이 형성하는 두 직선간의 최단 거리의 조건을 사용하였으며 보다 상세한 GA의 계산 과정은 참고문헌(Doh et. al, 2002)에 기술되어 있다. S-PTV에 의한 속도벡터 획득방식은 레이저빔 두께 내부에서 이동하는 개별입자들의 중심좌표를 이용하여 GA계산을 수행함으로써 3차원 속도벡터를 얻어내는 것에 비하여 S-PIV에 의한 속도벡터 획득방식은 2대 카메라영상에 대한 2차원 속도벡터를 각각 구한 다음 이들 속도벡터의 시점과 종점을 재차 입자들의 중심좌표로 간주하여 GA계산을 수행함으로써 3차원 속도 벡터를 얻어낸다는 점에 차이점이 있다.

3. 프로펠러 후류속정 실험

Fig. 5는 측정시스템의 구성을 나타낸다. Fig. 6은 사용된 프로펠러의 사진과 사양을 나타낸다. 시스템은 두 대의 카메라(1k x 1k)와 펄스레이저(120mJ, 15Hz) 및 호스트컴퓨터로 구성된다. 3차원 측정을 위하여 전술의 카메라교정작업을 수행하였다. 굴절의 영향을 없애기 위하여 수조에 물이 채워진 상태에서 실시하였다. 카메라교정작업이 완료되면 카메라 교정기를 제거한 다음 유동장의 유속을 J값에 맞추어 조정하여 두 대의 카메라영상을 취득하였다. 본 연구에서 J=0.88(290 rpm)로 하였다. Fig. 7은 실험장치의 사진을 나타내며, Fig. 8은 실제 실험의 영상을 나타낸다. Fig. 9는 스테

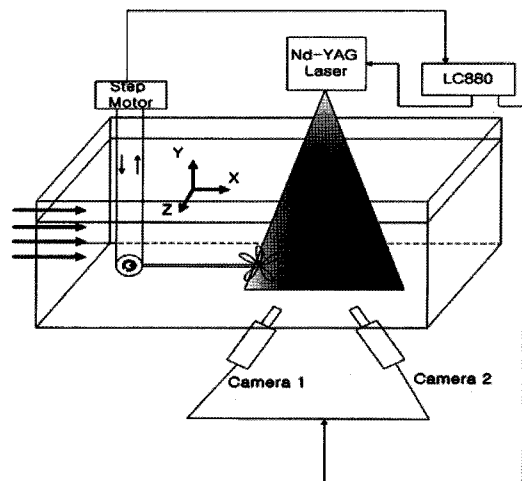


Fig. 5. Experimental setup.



Specification of Kp505 propeller model			
DIAMETER(MM)	:54.0	SCALE RATIO	:146.3
(P/D)mean	:0.950	PROP.TYPE	: FPP
Ae/Ao	:0.800	SECTION	: NACA66
HUB RATIO	:0.180	NO. OF BLADE	: 5

Fig. 6. Used propeller.

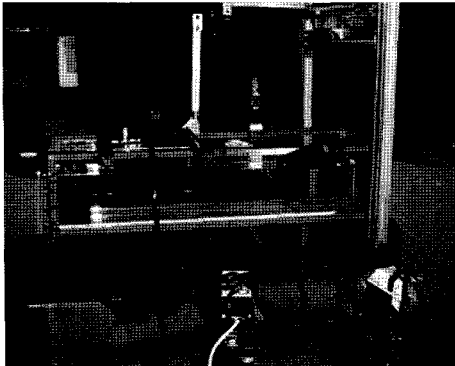


Fig. 7. Picture of experimental apparatus.

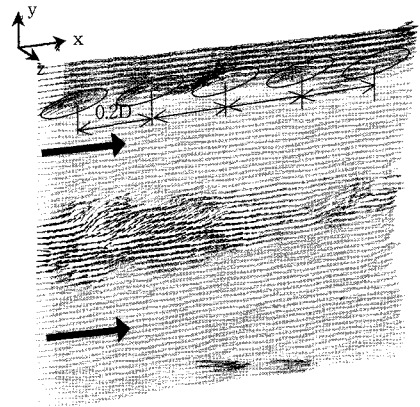


(a) camera 1 (b) camera 1

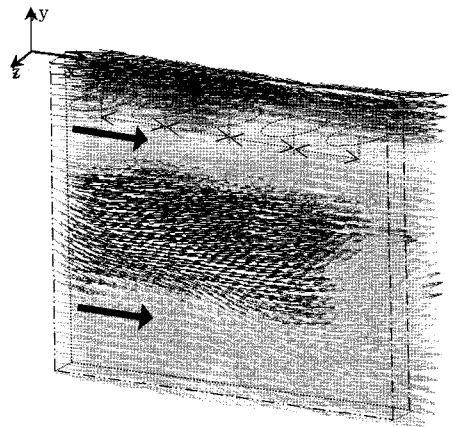
Fig. 8. Stereoscopic images.

레오 PIV(S-PIV)와 스테레오 PTV(S-PTV)에 의하여 측정된 순간 속도장을 나타내며 Fig. 10은 Fig. 9의 영상 140장분을 평균하여 얻어낸 속도장을 나타낸다. 이때, 평균장은 프로펠러 날개의 각도가 동일한 상태에서의 위상평균을 나타낸다. 동일 위상은 프로펠러의 축에 부착된 인코더신호를 이용하여 S-PIV 및 S-PTV측정을 위한 하드웨어시스템을 작동시킴으로써 구하였다.

S-PTV에 의한 결과는 광원 두께내부에서도 3차원



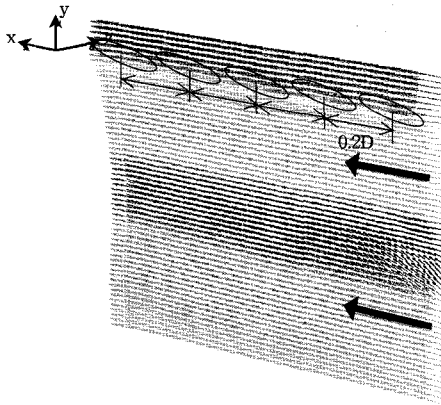
(a) by S-PIV



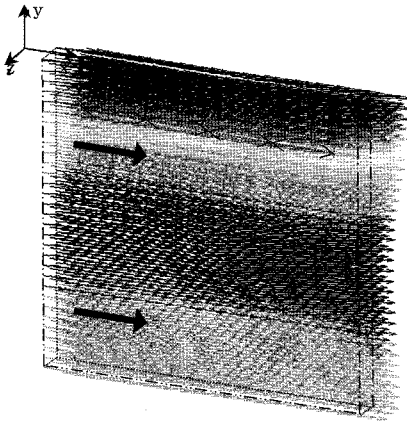
(b) by S-PTV

Fig. 9. Obtained instantaneous 3D vector fields (angle =0).

속도벡터성분이 얻어지는 관계로 그림에서 알 수 있듯이 두께를 가진 속도벡터분포를 보이고 있다. Fig. 10에서의 타원은 속도벡터측정결과를 바탕으로 프로펠러 회전에 의하여 발생된 팁보텍스(tip vortex)를 재현한 것을 나타낸다. S-PIV결과에 의한 것은 팁보텍스(tip vortex)의 간격은 0.2D정도로 상세히 나타나고 있음을 알 수 있다. 반면에 S-PTV에 의한 결과로부터는 이 간격을 구분하기 어렵다. 이는 S-PTV 측정알고리즘 상 한 순간에 얻어지는 3차원 속도벡터의 수가 적었던 점과 이로 인하여 측정된 벡터를 이용한 격자 공간상으로의 보간영향이 크게 나타난 결과로 추정된다. S-PTV에 의하여 얻어진 한 순간의 3차원 속도벡터수는 3000개 이상이지만 펄스레이저의 시간간격이 수직방



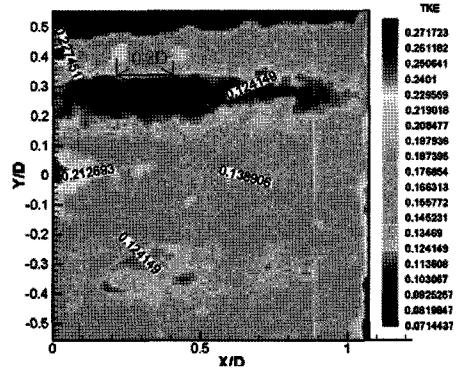
(a) by S-PIV



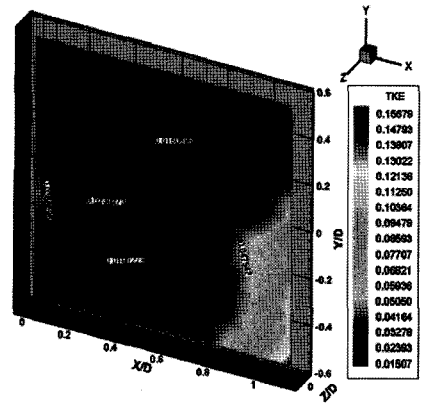
(b) by S-PTV

Fig. 10. Obtained phase-averaged 3D vector fields (angle=0).

향(out-of-plane)으로의 입자들이 사라지게 되는 시간보다 길었던 점과 속도벡터수가 적은 점을 보완하기 위하여 보간을 위한 영역의 크기가 팁보텍스의 크기보다 컸었던 것에 기인하는 것으로 추정된다. Fig. 11의 위상평균장을 살펴보면 S-PIV에 의한 결과에서는 허브(hub)측 상류쪽으로부터 두 번째까지의 프로펠러에 의한 팁보텍스가 나타나 있는 반면 세 번째부터는 잘 나타나 있지 않아 보인다. 이는 하류로 갈수록 팁보텍스들이 주변 유동에 의한 영향으로 와의 응집성(vortex coherence)이 깨어지기 때문인 것으로 볼 수 있다. S-PTV에 의한 결과에서는 와의 응집구조가 거의 나타나고 있지 않는 것으로 보아, 3차원 격자상으로의 보간에 의한 영향으로 와구조가 사라지게 됨을 알 수 있다. 이



(a) by S-PIV



(b) by S-PTV

Fig. 11. Phase-averaged turbulent kinetic energy distribution (angle=0).

는 S-PTV에 의한 결과에 있어서는 보간의 크기를 신중하게 선택해야 함을 의미한다.

Fig. 11은 동일 위상에서의 평균난류운동에너지 분포를 나타내고 있다. 보는 각도가 서로 다른 관계로 두 결과의 차이를 비교하기가 쉽지는 않지만, S-PIV에 의한 결과는 프로펠러 날개의 팁보텍스를 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 프로펠러 허브(hub) 후부에 강한 난류운동에너지 분포가 존재하는 점과 프로펠러 블레이드 팁보텍스에 의한 난류운동에너지 분포가 배열되어 있음을 알 수 있다. S-PTV의 결과는 프로펠러 허브(hub)후부에 상대적으로 높은 난류운동에너지를 반영하고 있을 뿐, 프로펠러 블레이드의 팁보텍스에 의한 난류운동에너지 분포는 전혀 나타나 있지 않음을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 한번에 얻어지는 순간속도벡터의 숫자가 적었던 점, 이로 인한 격자상의 보간

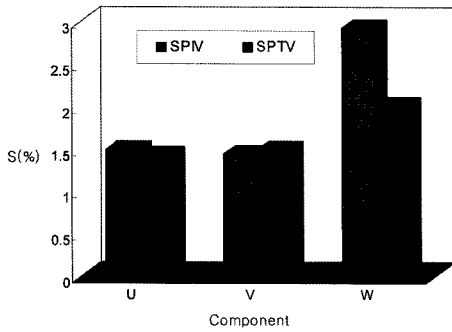


Fig. 12. Relative error(%).

알고리즘의 제약에 따른 유동구조 재현의 상실, 펄스레이저의 어긋난 시간간격조정 등에 기인한 것으로 나타났다. 이처럼 프로펠러 후류측정에 S-PIV에 의한 측정 결과가 S-PTV에 의한 측정결과보다 유동구조를 잘 반영함을 알 수 있었다.

Fig. 12는 본 연구에 적용되었던 S-PIV와 PTV의 측정성능을 나타낸다(도덕희 등, 2002). S-PTV에 의한 결과가 w성분에 있어서 S-PIV에 의한 결과보다 측정의 상대오차가 적음을 알 수 있다. 이 결과는 본 연구에서의 측정결과와 반대의 경향을 나타낸다. 이와 같은 원인으로서는, 실제 실험에 있어서 투입된 입자들에 의한 레이저 산란효과로 인한 실험영상의 노이즈발생, 펄스레이저의 두 시각사이의 부적절한 시간간격 등에 의한 것으로 풀이된다.

5. 결 론

스테레오 PIV(S-PIV)와 스테레오 PTV(S-PTV)의 선박후류측정 결과로부터 다음과 같은 결론으로 정리할 수 있었다.

S-PIV에 의한 결과는 S-PTV에 의한 결과보다 프로펠러 팁보텍스를 잘 반영함을 알 수 있었다. 이는 유동장의 3차원성이 매우 강한 유동장의 경우에는 S-PIV측정이 S-PTV측정보다 좋은 결과를 보여줄 수 있음을 시사한다.

S-PIV에 의한 팁보텍스의 하류방향으로의 간격은 0.2D정도로 나타났으며 프로펠러 허브(hub)쪽에 해당되는 상류측으로부터 3번째 이하의 팁보텍스는 주변 유동장의 영향으로 인하여 응집성이 상실하기 시작됨을 알 수 있었다.

S-PTV에 의한 결과가 S-PIV에 의한 결과보다 프로펠러 팁보텍스를 잘 재현하지 못하는 원인으로서는, 가시화를 위한 레이저광원의 시간간격이 충분히 짧지 못하여 z방향(out-of-plane)으로 입자들이 포획되지 못하였던 것에 기인한다. 이는 선박프로펠러 후류의 경우와 같이 z방향(out-of-plane)성분이 강한 3차원 유동장의 측정인 경우, 레이저의 시간간격을 충분히 짧게 설정하여야 함을 의미한다. 본 연구에서는 측정방향을 유동방향(streamwise)으로 하였으나 횡방향(spanwise, Y-Z평면)으로 측정함으로써 z방향의 측정 성능을 향상시킬 수 있게 된다. S-PIV측정에 의한 결과는 S-PTV측정에 의한 결과보다 펄스레이저의 시간간격에 따른 영향은 적은 것으로 나타났다.

본 연구에 적용된 S-PTV측정에 적용된 알고리즘은 입자수가 많을 때 속도벡터회복율이 좋게 되는 유전알고리즘에 기반하고 있다. 그러나 스테레오측정법의 조명광인 입의 두께를 지닌 레이저광원내에 존재하는 입자수가 적게 되는 관계로 기존의 유전알고리즘은 한계점을 극복해야 하는 것으로 나타났다.

S-PTV측정법은 레이저빔 두께 내부에서도 유동의 미세한 3차원 거동을 파악할 수 있는 관계로, 펄스레이저 시간간격의 적절한 설정 및 계산알고리즘의 개선을 통하여 프로펠러후류와 같은 3차원성이 강한 유동장에 대한 난류운동에너지, 레이놀즈응력 등의 시간변동 물리량의 방대한 DB제공이 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) 도덕희, (1998), PIV 계측기술, 기계저널, Vol.38, No. 10, pp.36-41.
- 2) Doh, D. H., Kim, D. H., Cho, Y. B. and Lee, W. J., (2002), "Development of Genetic Algorithm Based 3D- PTV Technique", Journal of Visualization, Vol. 5(3), pp.243-254.
- 3) 도덕희, 이원제, 조용범, 편용범, 백태실, 하승운, (2002), 스테레오 PIV와 스테레오 PTV에 의한 실시간 난류통계량 계측, 대한설비공학회 2002하계학술 발표대회 논문집(I), 용평리조트, pp.120-125.
- 4) Controni, A., Di, Felice F., Romano, G.P. and Elefante, M., (2000), "Investigation of the Near Wake of a Propeller Using Particle Image Velocimetry," Exp. in Fluids, Vol.29, pp.S227-236.
- 5) Lee, S.J., Paik, B.G and Lee, C.M., (2004a), "Phase-

- averaged PTV Measurements of Propeller Wake,” J. of Ship Research, accepted.
- 6) Lee S.J., Paik, B.G., Yoon, J.H. and Lee, C.M., (2004b), “Three Component Velocity Field Measurements of Propeller Wake Using Stereoscopic PIV Technique,” Exp. in Fluids, Vol.36(4), pp.575-585.
- 7) Lee, S.J. and Paik, B.G., (2004c), “Stereoscopic PIV measurements of Flow around a Marine Propellor,” J. of visualization, Vol.7(1), pp.25-32.
- 8) Paik, B.G., Lee, C.M. and Lee, S.J., (2004), “PIV Analysis of Flow around a Container Ship Model with a Rotating Propellor,” Exp. in Fluids, Vol.36(6), pp.833-846.