

Stereoscopic-PIV 개발과 원주근접 후류 계측

도 덕희* · 김 동혁* · 조 경래** · 이 원제** · 편 용범***

Development of Stereoscopic-PIV and its Application to the Measurement of the Near Wake of a Circular Cylinder

Doh, D. H., Cho, G. R., Lee, W. J., Pyun, Y. B.

Key Words: Stereoscopic PIV(스테레오 PIV), Two CCD cameras(2대의 CCD카메라), 3D-PTV(3차원 입자영상유속계), Wake of Circular Cylinder(원주후류).

Abstract

A new stereoscopic PIV is developed using two CCD cameras, stereoscopic photogrammetry, and a 3D-PTV principle. The wake of a circular cylinder is measured by the developed stereoscopic PIV technique. The B mode vortical structure of the wake over the Reynolds number 300 is clearly seen by the developed technique. The arrangement of the two cameras is based on angular position. The calibration of cameras and the pair-matching of the three-dimensional velocity vectors are based on 3D-PTV technique.

기호설명

- D : 실린더 직경
- u, v, w : x, y, z 방향의 속도 성분
- U_0 : 입구 속도
- x, y : 변환전의 영상의 좌표값
- x_s, y_s : 변환후의 영상의 좌표값

1. 서론

산업현장 및 공업분야에서 나타나는 대부분의 유동현상은 3차원적인 유동현상이 많다. 공학적으로 2차원적으로 해석을 하여도 그다지 문제가 되지 않는 경우에는 2차원적인 해석을 하는 선에서 Trade-Off하는 경우가 많다.

그러나, 3차원성이 매우 강하여 2차원적인 해석을 하여도 그 결과가 충분히 3차원적인 유동의 운동을 제대로 반영을 하지 못하는 경우에는 해석의 비용을 들여서라도 그 가치가 있는 경우에는 수치적 계산에 의하거나 실험적 방법을 동원하여 3차원적 해석결과를 얻고자 하는 것이 공학적 연구활동의 추세임은 두말할 나위가 없다.

최근, 광학기공기술, 레이저기술, 비디오 및 주변장치기술, 컴퓨터성능 등의 발달에 힘입어 PIV 장비의 가격면에서나 성능면에서 과거보다 낮은 현실로 다가와 있다. 이는 유동현상에 대한 해석에 있어서 공학적 가치가 있는 경우에는 2차원적인 해석결과에만 그치지 아니하고 3차원적인 해석결과에 대한 기대가 매우 크게 된다.

한편, 유동장의 전체에 걸쳐 유동현상에 대한 속도정보를 제공해 줄 수 있는 PIV계측기술⁽¹⁾⁽²⁾은 전술과 같은 분야의 기술발달에 가장 많은 혜택을 받아 시기 적절하게 2차원적인 계측에서부터 3차원적인 계측으로 전환되어 가고 있는 추세에 있다.

PIV계측기술을 이용한 유동장의 3차원적 해석 기법에는 크게 2D3C, 3D3C로 구분된다. PIV계측

* 정회원. 한국해양대학교 기계·정보공학부

** 회원. 한국해양대학교 대학원

*** (주)티엔텍

을 하기 위하여 유동장에 레이저광원으로 조사(照査)된 可視영역이 2차원 단면형상으로 되어 있지만 그 단면도 좁은 폭(3mm 전후)을 가진 단면이기 때문에 레이저광원을 매우 빠르게 2회 이상 斷續하면 그 단면내의 추적입자들은 3차원적 운동의 정보를 가지게 된다. 2D3C란 이와 같이 가시화된 2차원(2-Dimensional) 단면을 향하여 설치된 2대의 카메라 영상으로부터 스테레오 사진기술을⁽³⁾⁽⁴⁾ 이용하여 유동장의 3성분(u, v, w)(3-Component)을 얻어내는 계측법을 말한다. 3D3C란 레이저광원을 광학적 기구를 이용하여 3차원적(3-Dimensional)으로 형성한 후 이를 유동장의 공간에 照査함으로써 얻어진 계측영역에 대하여 2대 이상의 카메라를 이용하여 2시간 이상의 영상을 얻은 후 이들 영상에 대하여 스테레오 사진기술 혹은 3차원 계측기술⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾을 이용하여 유동의 3성분(3-Component)을 측정영역 전체에 걸쳐 동시에 얻어내는 계측법을 말한다.

Stereoscopic-PIV 계측법⁽⁸⁾⁽⁹⁾은 현재 시판되고 있는 PIV계측장비들의 성능한계가 유동의 상세 구조까지 제공할 수 있는 수준까지 와 있다는 점으로부터 최근 많이 이용되고 있다. 지금까지의 Stereoscopic-PIV 계측법은 2대의 카메라렌즈를 유동가시영역에 대하여 평행으로 설치하여 계측하는 Translation 방법과 2대의 카메라렌즈가 유동가시영역을 향하여 소정의 각으로 설치하여 계측을 하는 Angular 방법이 있다. Translation 법은 (Prasad & Adrian,) 투시방향에 대한 왜곡이 거의 없기 때문에 기록면의 좌표를 유체내부 입자 좌표로 쉽게 변환할 수 있으며 확대율이 영상기록면의 변위에 무관하므로 3차원 속도성분을 쉽게 계산할 수 있는 장점이 있지만 카메라 측정각도가 제한되기 때문에 out-of-plane 속도성분의 오차를 줄이는데 한계가 있으며, 일반적으로 렌즈의 왜곡을 고려하지 않기 때문에 성능이 우수한 렌즈를 사용하여야 한다. 반면에 Angular 법은 측정각도에 거의 제약이 따르지 않으나 취득한 영상에 강한 투시왜곡에 발생하게 되므로 영상기록면 좌표와 측정단면 좌표 사이의 상관함수를 구하는 작업이 필요할 뿐만 아니라 유동장의 가시용 벽면에 의한 굴절의 영향으로 카메라렌즈의 설치를 가능하면 지상면을 기준으로 평형하게 설치해야하는 단점이 있다.

본 연구에서는 Angular법의 장점을 살리고 카

메라의 배치에 자유성을 부여할 수 있도록 하기 위하여 영상의 평면변환법과 3차원 PTV계측법(Nishno, 도 등)에 적용되고 있는 카메라교정법을 이용한 Stereoscopic-PIV계측법을 구축하였으므로 이에 보고하고자 한다.

2. Stereoscopic PIV

2.1 카메라의 교정작업

카메라를 이용하여 3차원 공간을 정량적으로 인식하기 위해서는 먼저 2대 이상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 정보가 필요하다. 카메라 정보를 구하기 위해 Fig. 1.에 보이는 교정기를 사용하였으며, 교정기는 가로, 세로 각각 100mm이고, 5mm간격으로 직경 1mm입자형상들이 오차한도 $\pm 0.01\text{mm}$ 내에서 분포되어 있다. 이 교정기를 카메라를 향하여 수직으로 3mm간격으로 7번 이동하여 얻어진 3차원적 영상 정보로부터 Doh 등⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾이 사용한 10개의 표정요소를 가지는 관측방정식을 이용하여 카메라 파라미터를 구하였다. 이와 같은 방법에 의하여 얻어진 기준점의 절대 좌표값과 계측된 3차원 좌표 값들간의 오차의 평균값 및 분산값이 Table 1 에 나타나 있다.

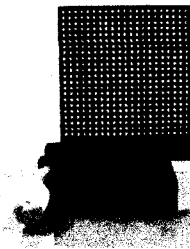


Fig. 1 Calibrator

Table 1 Measurement errors in calibration

Z plane (mm)	Average error			Standard deviation		
	X	Y	Z	X	Y	Z
-9	0.02	0.03	0.28	0.03	0.04	0.30
-6	0.02	0.02	0.21	0.03	0.03	0.23
-3	0.02	0.02	0.20	0.03	0.03	0.22
0	0.02	0.03	0.18	0.03	0.03	0.24
3	0.02	0.05	0.14	0.03	0.05	0.15
6	0.02	0.05	0.39	0.03	0.06	0.40
9	0.03	0.09	0.14	0.04	0.10	0.18
Total Average	0.02	0.04	0.22	0.03	0.05	0.26

카메라의 투시방향으로 약 0.25mm 정도의 오차를 가지고 X, Y방향에 비하여 상대적으로 오차가 큰 것을 알 수 있으나 이 보다 큰 유체의 운동계측에는 유효하다고 볼 수 있다.

2.2 영상변환

정사각형의 대상물을 두 대의 카메라에서 일정한 각도로 관측할 때 얻어진 영상은 Fig. 2와 같이 사다리꼴의 일그러진 영상을 얻게 된다. 따라서 정확한 2차원 계산을 위해 mapping function을 이용하여 영상의 변환을 하여야 한다.

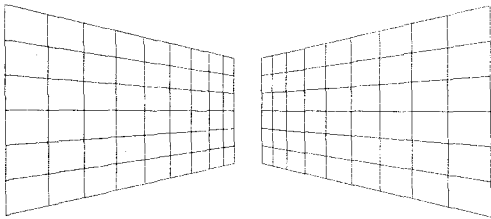


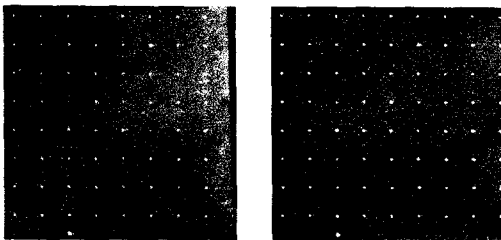
Fig. 2 Images of each camera for a regular square

본 연구에서는 계측하고자 하는 $Z = 0\text{mm}$ 지점의 영상을 기준으로 다음의 식 (1)을 이용하여 2차원 영상변환을 행하였다.

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

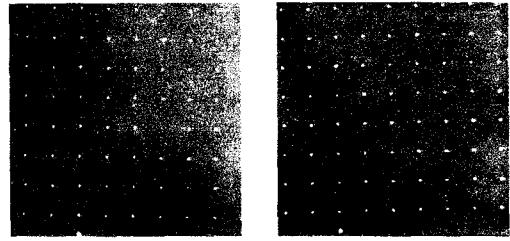
단, x, y : 변환전의 영상의 좌표값
 x_s, y_s : 변환후의 영상의 좌표값

Fig. 3은 변환전의 교정기 영상을 Fig. 4는 식



(a) camera image 1 (b) camera image 2

Fig. 3 Calibrator image before transformation



(a) camera image 1 (b) camera image 2

Fig. 4 Calibrator image after transformation

(1)으로부터 구해진 a_{ij} 값을 이용한 변환 후의 교정기 영상을 보여주고 있다. 변환된 영상으로부터 상호상관 PIV기법을 이용하여 각각 카메라에 대한 2차원 속도 벡터를 구한 다음 이를 식 (1)을 이용하여 역변환을 행함으로써 3차원 벡터를 얻어내었다.

3. 원주 근접 후류 계측

3.1 계측 시스템

Fig. 5는 직경 $D=10\text{mm}$ 인 원주 근접후류에 대하여 본 연구에서 개발된 Stereoscopic PIV 계측법으로 계측하기 위한 시스템을 나타낸다.

계측 시스템의 구성은 2대의 CCD카메라(768 × 494 pixels), 이미지그래버(image grabber : 512 × 512 pixels, 256 gray levels), 레이저(5W), AOM장치, 그리고 32bit 호스트 컴퓨터로 되어있다. 본 연구에서 사용된 수조는 1200L × 30W × 200H(mm)이며 카메라에 대한 교정을 하기 위하여 Fig. 1의 교정기를 원주 후방에 1D~10D 사이 설치하였다.

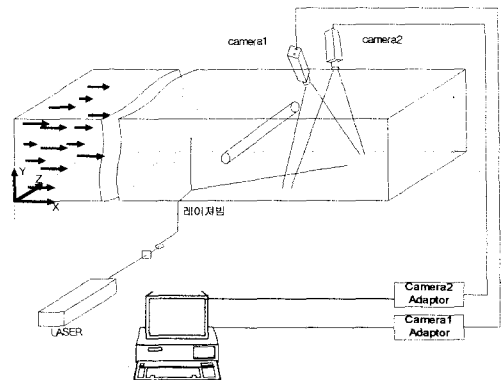


Fig. 5 Experimental setup for Stereoscopic-PIV measurement.

계측영역(X, Y, Z)은 실린더 중심으로부터 하류방향의 2.5D 지점을 중심으로 X(-20 ~ 20mm), Y(-20 ~ 20mm), Z(-5 ~ 5mm)로 하였다.

카메라의 교정작업을 마친 후 추적입자(나일론 12, 비중 1.02)를 유동장에 투입한 후 Ar-ion 레이저 (5W)의 광원을 원주 두께(3mm) 정도로 평행하게 설치하여 관측영역 전체에 걸쳐 조사하여 형성된 2차원 단면상의 가시영역을 향하여 2대의 카메라를 Fig. 5와 같이 설치하여 시간연속적인 영상을 획득하여 전술의 방법으로 3차원 속도벡터를 구하였다. 본 연구에서 관의 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수는 $Re = 500$ 이다.

한편, 원주 근접 후류(near wake)에서의 유동구조는 그 발생과정과 관련하여 많은 관심의 대상이 되어 왔지만 계측기술의 한계로 인하여 정량적 해석이 어려웠다. 본 연구에서는 원주 근접 후류에 대한 유동구조의 발생과정을 정량화하기 위한 일환으로 본 연구에서 구축한 계측법을 적용하여 얻어낸 결과를 논하고자 한다.

3.1 계측 결과

Fig. 6은 본 연구에서 구축한 Stereoscopic PIV법에 의하여 얻어진 3차원 순간속도 벡터의 분포를 보이고 있다. Fig. 7은 200 프레임 시간연속분의 순간속도분포를 평균한 평균속도벡터분포를 보이고 있다. Brede 등⁽¹²⁾에 의하면 Reynolds 수가 300이상에서는 Fig. 8과 같은 유동의 운동모드(B mode)가 존재함이 확인되었는데 본 연구의 Reynolds 수가 500인 점으로부터 Fig. 6 및 Fig. 7에서 보이는 유동구조는 타당한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

실린더 중심으로부터 $x/D=1.5$, $y/D=0.5$ 지점에서 본 연구에서 구축된 계측법으로 시간 연속적인 128개의 속도 데이터를 이용하여 스펙트럼분석(DFT 방식)을 행하여 본 결과 스트로울수는 0.189였으며 이 값이 성재용 등⁽¹³⁾과 Persillon 등⁽¹⁴⁾이 제시한 결과와 비교할 때 일치함으로부터 본 연구에서 개발된 계측법의 유효성을 입증한다고 할 수 있다. Fig. 9는 실린더 근접후류에서의 평균속도의 프로파일을 나타내고 있다. 또한, Stream-wise방향의 구조를 가지는 와구조간의 간격은 1D정도로 알려져 있는데 Fig. 7과 Fig. 9의 V성분에 대한 프로파일을 보면 약 1D정도로 잘 재현하고 있음이 보인다.

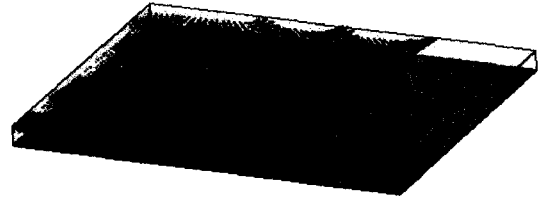


Fig. 6 Instantaneous 3D vector distribution.



Fig. 7 Mean 3D vector distribution.

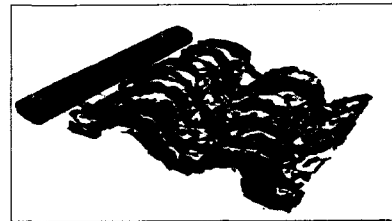


Fig. 8 B mode structure (Brede et al., 1996)

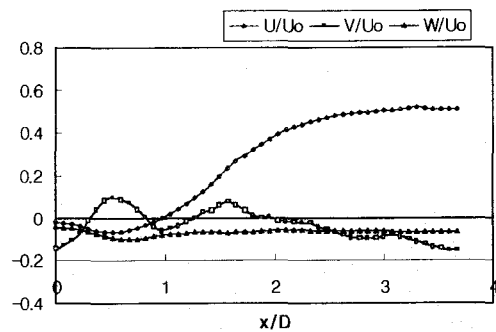


Fig. 9 Averaged velocity profile $x/D=0$ (centerline).

보다 상세한 난류통계치는 방대한 실험데이터로부터 구해질 수 있으며 추후 연구로서 본 연구에서 개발된 계측법을 이용하여 근접후류에서의

와의 거동구조에 대한 시간이력을 명확히 밝히고자 한다.

4. 결 론

2대의 CCD카메라와 스테레오사진원리 및 3차원 PTV계측기술의 원리를 이용한 Stereoscopic PIV계측법을 구축개발하여 원주근접후류의 계측에 적용하는 과정에서 다음과 같이 결론을 얻었다.

원주후류에 발생하는 Stream-wise 방향의 와 구조간의 간격이 1D정도로 됨을 확인할 수 있었으며, 실린더 중심으로부터 $x/D=1.5$, $y/D=0.5$ 지점에서의 u성분 속도에 대한 스펙트럼분석을 통하여 얻어낸 St 수는 0.18로 기존의 연구결과와 일치하였다. 이는 본 연구에서 구축한 계측시스템을 원주근접후류에 있어서 타당한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

추후 본 계측법으로부터 얻어낸 방대한 량의 계측결과에 위상평균기법, 고유치탐색 등의 방법을 이용함으로써 원주 근접후류의 난류통계치 및 와의 발생구조에 대한 정량적 데이터베이스 제공에 도움이 될 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Adrian R. J., 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", *Ann. Rev. J. Fluid Mech.*, Vol.23, pp.261-304.
- (2) 도덕희, 1998, "PIV 계측기술", *기계저널*, 제38권 10호, pp.36-41.
- (3) Murai S, Nakamura H, Suzuki Y, 1980, "Analytical orientation for non-metric camera in the application to terrestrial photogrammetry", *Architecture Photogrammetry XXIII. Commision V*, pp. 516-524.
- (4) Kobayashi T., Saga T., Sekimoto K., 1989, "Velocity measurement of three-dimensional flow around rotating parallel disks by digital image processing.", *ASME FED 85*, pp.29-36.
- (5) Nishino K., Kasagi N., Hirata M., 1989, "Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing", *ASME J. Fluids Eng.* Vol. 111 No.4, pp.384-391.
- (6) 도덕희, 1999, "3차원 PIV를 이용한 유동장의 3차원 계측", *대한기계학회 '99년도 유체공학부문 춘계학술강연회 강연집*, 한양대학교 백남학술정보관, 5월 14일, pp.41-49.
- (7) Doh D. H., Kim D. H., Choi S. H., Hong S. D., Saga T., Kobayashi T., 2001, "Single-Frame (Two-Field Image) 3D-PTV for high speed flows", *Exp. in Fluid*, Vol.7, pp.84-95.
- (8) Adamczyk A. A., Rimai L., 1988, "Reconstruction of a 3-Dimensional flow field from orthogonal views of seed track video images", *Exp. in Fluids*, Vol.6, pp.380-386.
- (9) Racca, R. G., Dewey, J. M., 1988, "A method for automatic particle tracking in a three-dimensional flow field", *Exp. in Fluids*, Vol.6, pp.25-32.
- (10) Doh D. H., Cho K. R., Baek T. S., Cho Y. B., 2000, "3D-PTV using a Genetic Algorithm", *Proc. of Winter Annual Conference, Society of Air-conditioning and Ref. Engineers of Korea*, Vol.2, pp.601-605.
- (11) Doh, D. H., Cho, K. R., Cho Y. B., Baek T. S., Ryu D. S., Hwang Y. C., Chang K. S., 2001, "Development of a new 3D-PTV using genetic algorithm", *Proc. of 3rd Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing, PSFVIP-3, Maui, Hawaii, Mar. 18-21*, pp.241-242, CD-ROM Proc. Paper No. F3134.
- (12) Brede, M., Eckelmann, H. and Rockwell, D., 1996, "On secondary vortices in the cylinder wake", *Phys. Fluids*, Vol. 8, pp. 2117-2124.
- (13) 성재용, 유정열, 2000, "Cinematic PIV 데이터의 3차원 위상평균 기법을 이용한 실린더후류의 2차 와류 측정", *대한기계학회논문집 B권*, 제 24권 제11호, pp 1540-1548.
- (14) Persillon H., Braza M., 1998, "Physical analysis of the transition to turbulence in the wake of a circular cylinder by three-dimensional Navier-Stokes simulation", *J. Fluid Mech.* Vol. 365 pp.23-88.