

스테레오PIV에 의한 원주후류 난류통계량 계측

도덕희*, 이원제*, 조용범*, 편용범**, 하승운***

Measurement of Turbulent Properties of a Circular Cylinder with a New Stereoscopic PIV

D. H. Doh*, W. J. Lee*, Y. B. Cho*, Y. B. Pyeon** and S. U. Ha***

Key Words : Stereoscopic PIV(스테레오 입자영상유속계), GA-3D-PTV(유전 알고리즘기반 3차원 입자영상유속계), Gray-level Cross-Correlation Method(계조치상호상관법), Wake of a Circular Cylinder(원주후류), Turbulent Properties(난류통계량)

Abstract

A new stereoscopic PIV has been constructed using two CCD cameras, stereoscopic photogrammetry, and 3D-PTV principle. The capability of the developed stereoscopic PIV was verified through a test on the Standard Images which are provided on the website of VSJ. The arrangement of the two cameras was based on angular position. For the acquisition of 3D velocity vectors, 2D velocity vectors were obtained using the gray-level cross-correlation method from the two camera images and they were matched stereoscopically. The wake of a circular cylinder was measured and turbulent properties were presented.

1. 서론

유동 속에 놓인 뾰족한 물체 뒤의 후류는 오랜 동안 자연과 학이나 공학적으로 의의가 있는 주제가 되어왔으며 이에 대한 연구에 많은 진전이 있었다. 특히 Roshko[1]에 의해 전단유동에 있어서의 와에 대한 거대구조가 밝혀진 이후로 뾰족한 물체 후류에 있어 이의 응용과 연구가 활발하게 이루어져 왔다.

최근 PIV(입자영상유속계) 계측 기법의 발달과 함께 와 구조의 공간적 분포형태에 대한 연구가 이루어지고 있다. 와의 구조가 보다 3차원적으로 보다 복잡하게 발생할 경우에는 와의 구조해명을 위해서는 얻어낸 속도정보에 대하여 유동장 3차원 공간에 걸친 시간 연속적인 계측이 필요하게 된다.

유동장의 3차원 공간에 걸친 시간 연속적 계측이 가능한 계측법으로서 HPIV(Holographic PIV)[2], 3차원 PTV(Particle Tracking Velocimetry)[3][4], Stereoscopic PIV 계측법[5][6]이 있다. HPIV는 한 순간에 있어서의 데이터처리량이 방대한 관계로 아직은 시간 연속적 다량의 데이터획득은 용이하지 않은 단계에 있을 뿐만 아니라 미소추적입자를 고해상도로 기록할 수 있는 필름의 개발 혹은 매개체가 없는 한 실용화는 당분간 힘든 상태에 있다. 3차원 PTV는 3차원 속도벡터를 측정대상공간에 대하여 시간 연속적으로 제공할 수 있으므로 유체유동관련 연구자가 최종적으로 추구하고자 하는 계측법이다.

이 계측법은 최근 광학 및 비디오기술의 발달에 힘입어 상용화가 된 단계에 있으나 숙련자의 도움이 필요하다. 스테레오 PIV 계측법은 3차원 PTV와 달리 단면상에서의 3차원 속도벡터분포를 얻어내는 것으로서 영상계측의 비 숙련자가 비교적 용이하게 다룰 수 있다는 점에서 상용화가 되면서부터 급속도로 많이 이용되고 있다.

본 연구에서는 스테레오 PIV 계측시스템을 구축한 뒤 이에 대한 성능평가를 실시한 뒤 최적의 계측조건을 찾고 그 조건에서 원주후류의 난류통계량 계측에 적용함으로써 스테레오 PIV 계측법의 난류계측에 대한 유효성을 확인하고자 한다.

구축된 스테레오 PIV 계측시스템에 대하여 표준화상[7]을 이용하여 성능검정을 실시한 후 최적의 성능조건을 찾고 그 조건에서의 실험조건을 구현한 다음 이를 원주후류계측에 적용하고자 한다.

2. 스테레오 PIV 계측시스템

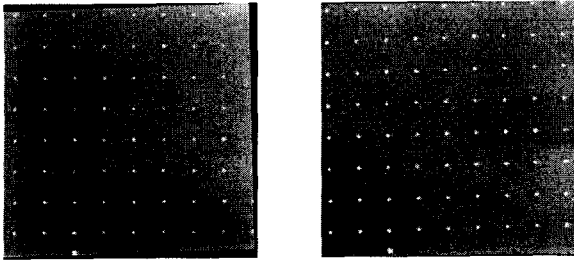
2.1 스테레오 PIV 계측원리

스테레오 계측은 두 대의 카메라를 이용하여 3차원 공간을 정량적으로 인식하는 것을 말한다. 이를 위해서는 먼저 2대에 대한 카메라위치, 자세정보, 렌즈 및 CCD소자의 상태에 관한 정보를 얻기 위하여 교정작업이 필요하다. 이를 위해서는 Doh 등 [7][8]이 사용한 10개의 표정요소를 가지는 관측방정식을 이용하여 카메라 정보를 구하였다. 교정기는 가로, 세로 각각 100mm이고, 5mm간격으로 직경 1mm 입자형상들이 오차한도 $\pm 0.01\text{mm}$ 내에서 분포되어 있다. 이 교정기를 카메라를 향하여 수직으로 3mm간격으로 7번 이동하여 얻어진 3차원적 위치 정보와 교정점들의 영

* 한국해양대, 기계정보공학부, doh@hanara.kmaritime.ac.kr

** (주)티엔텍, bdt048@hanmail.net

*** (주)삼성물산 건설기술연구소, sungunha@empal.com



(a) before transformation (b) after transformation.
Fig. 1 Image of calibrator.

상정보로부터 구해진다. 교정을 통한 카메라의 투시방향(Z방향)으로의 평균오차가 0.25mm이고, 카메라의 수평방향(X방향)과 수직방향(Y방향)으로의 평균오차는 각각 0.02mm와 0.04mm이었음이 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 계측하고자 하는 $Z = 0\text{mm}$ 지점의 영상을 기준으로 다음의 식 (1)을 이용하여 2차원 영상변환(Warping)을 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. 1은 식 (1)로부터 구해진 a_{ij} 값을 이용한 영상변환 전과 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. 각 2차원 속도벡터를 구하기 위해서는 제조치상호상관법[9]을 적용하였다.

2.2 스테레오 PIV계측시스템 성능

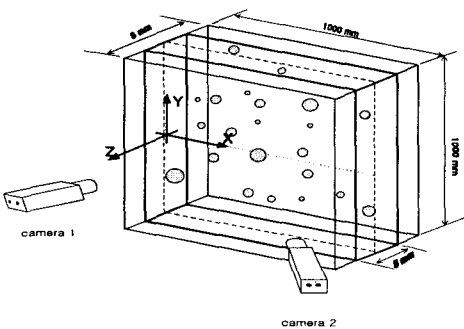


Fig. 2 Camera location for virtual image generation.

Fig. 2는 구축된 스테레오 PIV계측시스템의 성능분석을 실시하기 위하여 설치된 가상카메라의 배치를 나타낸다. VSJ[10]에서 제공하는 충돌제트의 LES결과에 의한 속도벡터 데이터를

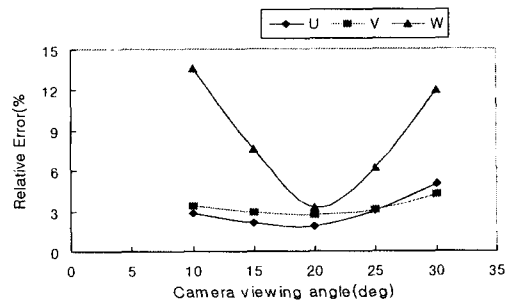


Fig. 3 Relative error vs the camera viewing angle.

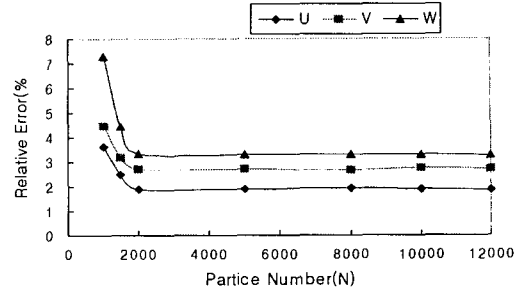


Fig. 4 Relative error vs particle number(N).

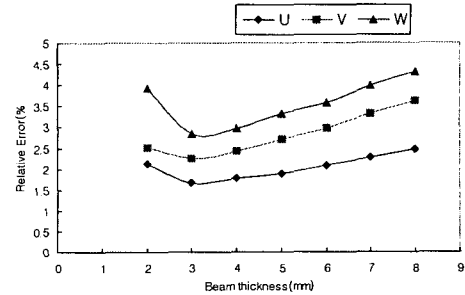


Fig. 5 Relative error vs beam thickness(mm).

Fig. 2와 같이 가상공간에 배치하고 이를 향하여 20° 의 각도로 배치된 가상카메라를 통하여 가상영상을 얻어낸다. 상세한 가상 영상 발생법은 Okamoto 등[11][12]의 연구성과에 잘 기술되어 있다. Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 충돌제트의 가상영상에 대하여 스테레오 PIV계측시스템으로 측정된 결과들을 나타낸다. 이들은 LES데이터와 구축한 계측시스템으로 가상영상을 이용하여 속도 벡터 각 성분에 대하여 계측한 결과와의 상대오차를 식 (2)와 같이 정의하여 구한 결과들이다.

$$\begin{aligned} E(\%) &= \frac{1}{N} \sum \frac{u_{ref} - u_{meas}}{V_{ref}} \quad (u\text{성분}) \\ &= \frac{1}{N} \sum \frac{v_{ref} - v_{meas}}{V_{ref}} \quad (v\text{성분}) \\ &= \frac{1}{N} \sum \frac{w_{ref} - w_{meas}}{V_{ref}} \quad (w\text{성분}) \end{aligned} \quad (2)$$

(여기서,

$$\begin{aligned} u_{ref} &= \text{reference vector data(LES)} \\ u_{meas} &= \text{measured velocity data(3D-PIV)} \\ N &= \text{vector number} \\ \bar{V}_{ref} &= \sqrt{u_{ref}^2 + v_{ref}^2 + w_{ref}^2} \quad (\text{LES}) \end{aligned}$$

Fig. 3은 두 카메라간의 각에 대한 측정상대오차를 나타내고 있다. 카메라 사이의 각이 20°일 때가 오차가 최소임을 알 수 있다. Fig. 4는 입자의 개수에 따른 측정상대오차를 나타내고 있다. 측정영역내의 입자수가 2000개 이상일 때 오차가 최소로 유지하고 있음이 보인다. Fig. 5는 가시화용 광원단면의 두께에 따른 상대오차의 변화를 나타내고 있다. 2차원 광원의 두께가 3mm정도일 때 최소의 상대오차값을 보인다. 또한, 위의 값들은 Walker[13]가 제시한 결과와 비슷한 오차값이 확인되어 타당한 결과임을 알 수 있었다.

3. 원주 근접 후류 계측

3.1 계측 시스템

Fig. 6은 직경 D=10mm인 원주 근접후류에 대하여 본 연구에서 구축된 스테레오 PIV 계측법으로 측정하기 위한 시스템의 개요를 나타낸다. 계측 시스템은 2대의 CCD카메라(768 × 494 pixels), 이미지그래버(image grabber : 512 × 512 pixels, 256 gray levels), 레이저(5W), AOM장치, 그리고 32bit 호스트 컴퓨터로 구성되어있다. 사용된 수조의 크기는 1200L × 30W × 200H(mm)이며 카메라의 교정기를 측정영역에 설치하여 카메라 교정을 실시하였다. 계측영역(X, Y, Z)은 실린더 중심으로부터 하류방향의 2.5D 지점을 중심으로 X(-20 ~ 20mm), Y(-20 ~ 20mm), Z(-1.5 ~ 1.5mm)로 하였다. 카메라 교정작업을 마친 후 직경 100μm가량의 미소추적입자(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. 6과 같이 설치하여 시간연속적인 영상을 획득하여 전술의 방법으로 3차원 속도벡터를 구하였다. 본 연구에서 관의 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수는 $Re = 500$ 정도이다. 원주 근접후류 (near wake)에서의 유동구조는 그 발생과정과 관련하여 많은 관심의 대상이 되어 왔지만 계측기술의 한계로 인하여 정량적 해석이 어려웠다. 본 연구에서는 원주 근접후류에 대한 난류통계량을 획득하였다.

3.2 측정 결과

Fig. 7은 두 대의 카메라에 의하여 얻어진 순간 영상을 나타내고 있다. Fig. 8은 본 연구에서 구축한 스테레오 PIV시스템에 의하여 얻어진 3차원 순간속도 벡터의 분포를 보이고 있다. (a)는 3차원 투시방법으로 표시한 것이고 (b)는 수직방향에서 봤을 때의 속도벡터를 나타낸다. (b)에서 칼리로 표시된 것은 w 성분을 나타내고 벡터는 u와 v성분을 나타낸다. Brede 등[14]에 의하면 Reynolds수가 300이상에서는 B mode 유동구조(중방향 와 구조)가 원주후방에 나타나는데 Fig. 8로부터 이 구조를 유추할 수 있다. 본 연구의 Reynolds 수가 500인 점으로부터 계측시스템은 타당한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 계측의 원점(Fig. 6의 좌표원점)으로부터 $x/D=1.5$, $y/D=0.5$ 지점에서 v 성분에 대한 스펙트럼분석(DFT 방식)을 행하여 얻어낸 스트로울 수를 나타낸다. 탁월주파수가 1Hz 근방이었으며 이 때의 스트로울 수는 0.18정도였으며 이는 성 등[15]과 Persillon 등[16]이 제시한 결과와 비교할 때 일치함으로부터 구축된 계측결과가 타당함을 의미한다. 이와 같은 계측시스템으로 난류통계량을 측정하였다. 난류통계량은 256장의 시간연속적 순간속도벡터들을 통계처리함으로써 얻어내었다. Fig. 10은 레이놀즈응력의 분포를 나타내고 있다. (a)는 $\overline{u'v'}/U_0^2$ 에 대하여 (b)는 $\overline{v'w'}/U_0^2$ 에 대한 분포를

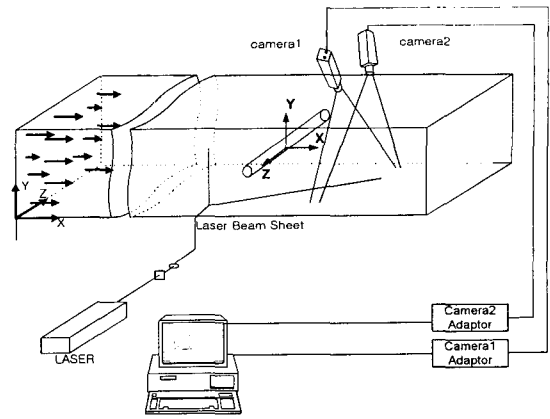
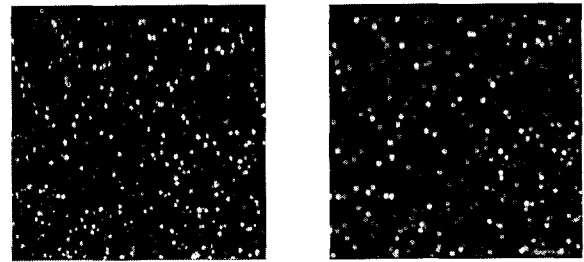
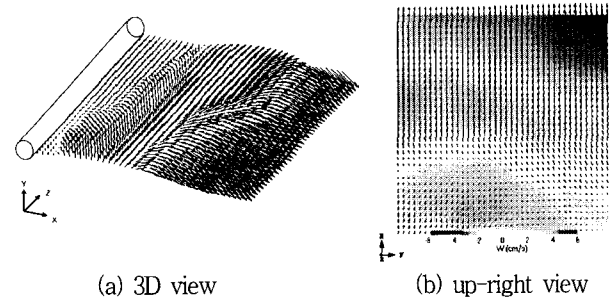


Fig. 6 Experimental setup for Stereoscopic PIV measurement.



(a) captured by left camera (b) captured by right camera
Fig. 7 Raw images.



(a) 3D view (b) up-right view
Fig. 8 Instantaneous 3D vector field.

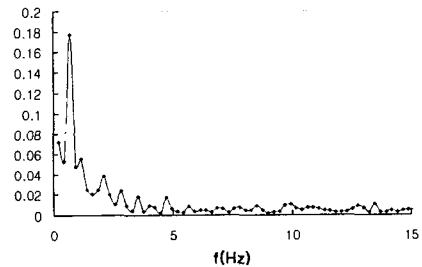
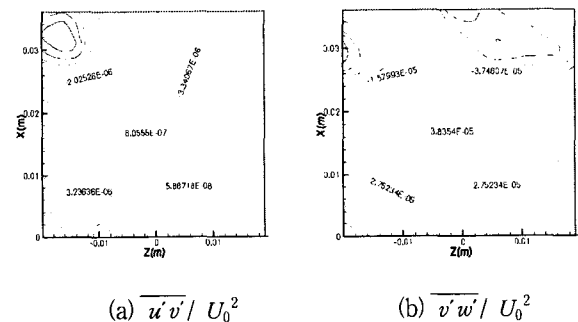


Fig. 9 St number at $x/D=1.5$, $y/D=0.5$.



(a) $\overline{u'v'}/U_0^2$ (b) $\overline{v'w'}/U_0^2$
Fig. 10 Distribution of Reynolds stress.

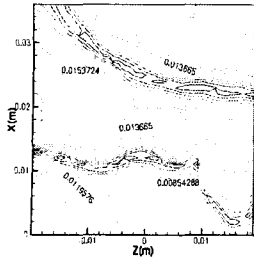


Fig. 11 Turbulent intensity distribution, w^2/U_0^2 .

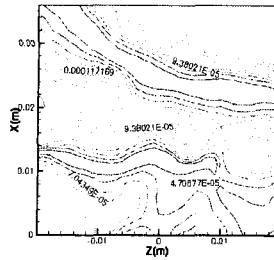


Fig. 12 Turbulent kinetic energy distribution, $(u^2+v^2+w^2)^{1/2}/U_0^2$.

나타낸다. 이 두 그림으로부터 종방향 와구조가 존재함을 유추할 수 있으며 종방향 와구조간의 간격이 1D정도임을 알 수 있다. 이는 기존의 연구성과들과 일치하는 사항이다. Fig. 11은 w 성분에 대한 난류강도분포를 나타낸다. 이 그림에서도 확연히 알 수 있듯이 하류방향으로 줄무늬모양의 강한 난류강도분포는 종방향 와구조가 순간적으로 존재함을 의미한다. 또한, 횡방향으로 2차 와구조가 확연히 드러나 있음이 보인다. Fig. 12는 순시 난류운동에너지의 분포를 보이고 있다. 이 그림으로부터도 상기의 종방향 와구조 특성을 가진 와구조가 존재함을 추정할 수 있다.

4. 결론

2대의 CCD카메라와 스테레오사진원리 및 3차원 PTV계측기술의 원리를 이용한 스테레오 PIV계측시스템을 구축 개발하여 원주근접후류의 계측에 적용하는 과정에서 다음과 같이 결론을 얻었다.

원주후류에 발생하는 Stream-wise 방향의 와구조간의 간격이 1D정도임을 확인하였으며, 실린더 중심으로부터 $x/D=1.5$, $y/D=0.5$ 지점에서의 u 성분 속도에 대한 스펙트럼분석을 통하여 얻어낸 St 수는 0.18로 기존의 연구결과와 일치하였다. 이는 본 연구에서 구축한 계측시스템을 원주근접후류에 있어서 타당한 결과임을 알 수 있었다.

얻어진 순간 속도벡터장으로부터 레이놀즈응력, 난류강도, 난류운동에너지 등과 같은 난류통계량을 얻어내었으며 이들 결과는 타당한 결과를 보였다. 도 등[17]에 의한 결과와 일치하는 결과를 보이는 바, 본 연구결과를 바탕으로 실용화된 스테레오 PIV는 추후 유동장의 3차원 해석에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

[1] Roshko A., On the development of turbulent wakes from vortex streets, NACA 1191, 1954.
 [2] Herrmann, S., Hinrichs, H., Hinsch, K. D., Surmann, C., Coherence concepts in holographic particle image velocimetry, *Exp. in Fluids, Suppl.*, (2000), S108-116.

[3] Mass, H. G., Gruen, A., Papantoniou, D. A., Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows. Part 1 photogrammetric determination of particle coordinates, *Exp. in Fluids, Vol.15*, (1993), pp.133-146.
 [4] Doh, D. H., Kim, D. H., Choi, S. H., Hong, S. D., Kobayashi, T., Saga, T., Single-Frame 3-D PTV for high speed flows, *Exp. in Fluids, Vol.29, Suppl.*, (2000), pp.85-98.
 [5] Prasad, A. K., Adrian, R. J., Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows, *Exp. Fluids, Vol.15*, (1993), pp.49-60.
 [6] Doh, D. H., Lee, W. J., Cho, K. R., Pyun, Y. B., Kim, D. H., *Stereoscopic PIV*, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, (2001), pp.394-399.
 [7] Doh D. H., Cho K. R., Baek T. S., Cho Y. B., 유전알고리즘기반 3차원 입자영상유속계, 공기조화냉동공학회 동계학술대회 논문집(II), (2000), pp.601-605.
 [8] 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, Hawaii, CD-ROM Proc. Paper No. F3134*, (2001), pp.241-242.
 [9] 도덕희, PIV 계측기술, 기계저널, Vol.38, No.10, (1998), pp.36-41.
 [10] VSJ, <http://www.vsj.or.jp/piv>.
 [11] Okamoto, K., Nishio, S., Kobayashi, T., Saga, T., Standard Images for Particle Imaging Velocimetry," *Proc. PIV'97-Fukui, Fukui*, (1997), pp.229-236.
 [12] Doh, D. H., Choi, S. H., Cho, K. R., Lee, Y. W., Virtual images for a benchmark test of 3-dimensional PIV algorithm for unsteady turbulent flows, 대한기계학회 유체공학부문 추계학술대회논문집, 서울대, (1999), pp.152-158.
 [13] Walker, S. Large-scale three-dimensional particle image velocimetry, NASA Ames Research Center Moffett Field, CA.
 [14] Brede, M., Eckelmann, H. and Rockwell, D., On secondary vortices in the cylinder wake, *Phys. Fluids, Vol. 8*, (1996), pp.2117-2124.
 [15] 성재용, 유정열, Cinematic PIV 데이터의 3차원 위상평균 기법을 이용한 실린더후류의 2차 와류 측정, 대한기계학회 논문집 B권, 제 24권 제11호, (2000), pp.1540-1548.
 [16] Persillon H., Braza M., 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*, (1998), pp.23-88.
 [17] 도덕희, 김동혁, 조용범, 이원제, 백태실, 3차원 PTV에 의한 원주후류 난류통계량 데이터베이스 구축, 제2회 한국 유체공학 학술대회논문집, 무주리조트, 2002.