

Multi-Vision PIV에 의한 2차원 단순물체의 유동장 해석

송근택* · 이현** · 김유택*** · 이영호****

An Analysis of 2-D Bluff Bodies Flows by Multi-Vision PIV

K-T Song* · H Lee** · Y-T Kim*** · Y-H Lee****

Key words : PIV(입자영상유속계), Vorticity(와도), Turbulent intensity(난류강도),
Turbulent kinetic energy(난류운동에너지), Reynolds stress(레이놀즈 응력)

Abstract

Animation and time-resolved analysis of the wake characteristics of 2-D bluff body flows were examined by applying the multi-vision PIV to square cylinders(three angles of attack: 0°, 30° and 45°) and circular cylinders(three rotating speeds:0rpm, 76rpm, 153rpm) submerged within a circulating water channel($Re=10^4$). The macroscopic shedding patterns and their dominant frequencies were discussed in terms of instantaneous velocity, vorticity and turbulent quantities such as turbulent intensity, turbulent kinetic energy and three Reynolds stresses. Particularly, the time-averaged distribution of turbulent intensity 'islands' where their peak magnitudes were focused always small regions behind the bodies without noticeable spatial migration were particularly discovered in all cases. And the dominant frequencies of the turbulent quantities in the wake regions were two times larger than those of the velocity and vorticity.

1. 서 론

지난 수년간 이루어진 단순물체(bluff body) 주위의 유동흐름에 관한 연구는 실제 공학에서 일어나는 문제의 해결에 많은 기여를 했다^[1]. 그러나 이러한 연구는 양력, 항력, 스트로할수

(Strouhal number) 등의 측정이 주된 목적이었으므로, 단순물체에서의 비선형적인 성질이나, 큰 와류영역을 가지는 흐름에 대하여서는 시간 평균 등의 정보에 대하여 제한적일 수 밖에 없었다.

20여년 동안 입자영상유속계(Particle Image

* 한국해양대학교 공과대학 기계공학과 대학원
** (주)IIT
*** 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부
**** 한국해양대학교 기계·정보공학부

Velocimetry)^{[2],[3]}는 LDV(Laser Doppler Velocimetry)나 열선유속계(Hot-Wire)와 같은 점계측이나 시간평균의 측정에 대응할 수 있는 강력한 계측기법으로 발전되어 왔다. 이러한 실험 기법은 전통적으로 행해져 왔던 실험기법과 비교할 때 정도 등의 여러 가지 면에서 우수성을 평가받고 있으며, 기계분야뿐 아니라 항공, 환경, 토목 등의 다양한 분야에 응용되며, 현재는 유체기계의 3차원 속도성분 측정에도 적용되고 있다.

Time-resolved PIV^[4] 기법은 시간변동이 심한 흐름의 정보에 대하여 정확하고 유용한 정보를 제공할 수 있기 때문에 많은 연구자들에 의해 적용이 되고 있다.

PIV 데이터의 후처리 과정으로서, 애니메이션은 특히 단순물체에서의 비정상 유동장의 해석에 관하여 많은 관심의 대상이 되어왔다. 이러한 배경으로 Lee^{[5],[6]} 등은 독자적인 애니메이션 소프트웨어를 개발하여 2차원 원주, 각주 등의 유동장에 적용하여 레이놀즈 응력 등을 포함하는 난류정보량과 다양한 유동정보를 제공하였다.

본 연구에서는 단순물체 후류영역에서의 유동장을 보다 정확하게 측정하기 위하여 3대의 CCD 카메라를 이용한 Multi-vision PIV를 적용하여 현실적인 애니메이션을 구현하였다. 0°, 30°, 45°의 기울기를 가지는 정방형 각주와 0rpm, 76rpm, 153rpm의 회전속도를 가지는 원주를 소형 회류수조 안에 설치하여 각각의 경우에 대하여 실험을 행하였다.

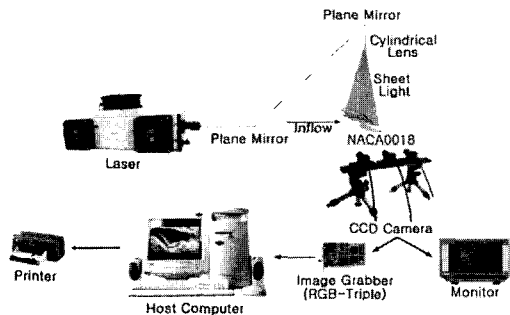


Fig. 1 Arrangement of PIV system

2. PIV 장치

그림 1은 본 실험에 사용된 PIV 시스템의 구성도를 나타내고 있다. 2차원의 회류수조는 투명 아크릴과 고강도 유리로 제작되었으며, 균일한 유입을 확보하기 위하여 단순물체의 전방에 정류관과 다공판을 설치하였다. 5W출력의 Argon-Ion 레이저로부터 원통형 렌즈를 통해 2차원의 단면광을 생성하여 유동장에 조사하였고, 입력장치로는 3대의 CCD카메라(SONY, XC-77RR, B&W, 768×439 pixel)가 Multi-vision 영상의 획득을 위하여 사용되었다. 단순물체는 대표길이가 50mm, 폭이 17mm인 각주와 원주를 회류수조의 후면 패널에 메커니컬 씰(Machnical seal)을 이용하여 고정하였으며, 실험에 사용된 모델은 정밀한 피칭 컨트롤러와 서보모터를 이용하여 제어하였다. 추적입자는 평균직경이 110 μ m인 구형의 PVC(PolyVinyl Chloride)를 사용하였고, 채널의 입구에 디지털 마그네틱 유량계를 설치하여 유량을 측정하였다.

그림 2는 획득한 영상중 실제 실험의 처리에 사용된 영역을 표시하고 있다. 회류수조의 윗면과 아랫면에 고정벽면을 설치하여 밀폐수조를 제작하였고, 유입부의 속도는 약 0.2m/sec(Re=10⁴)로 설정하였다. 3대의 CCD 카메라에서 획득된 영상은 합성과정을 거친 후 465(mm)×142(mm)의 계측영역이 만들어지며, 3대의 CCD 카메라가 동일축상에서 평행하게 이동할 수 있도록 이송장치를 이용하였다.

카메라에 의해 획득된 아날로그 신호는 Host Computer(Pentium, 500MHz)에 설치된 RGB의 칼라 이미지 보드(Data Translation Co.,

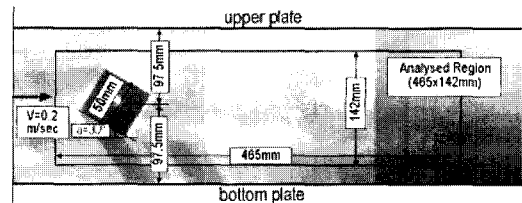


Fig. 2 PIV measurement configuration

DT3154, 640×480 square pixel, non-compressed 8bit \times 3)를 통하여 30Hz의 sampling rate로 메모리에 디지털 영상으로 저장되며, 영상은 상호상관 동일입자 추적을 위하여 1/60초의 홀수필드와 짝수필드의 영상으로 분리되어 진다.

상관계수는 직접계산에 의한 Non-FFT 상호상관을 이용하였으며, 53×45 (R), 52×45 (G), 42×45 (B)의 격자점에 동일입자추적을 위한 상관영역은 35×35 pixel, 최대 탐색반경 8 pixel로 설정하였고 이때 계산시간은 프레임당 평균 11.3초가 걸렸다. 동일입자추적에 의해 획득된 벡터는 Bicubic 보간에 의해 48×41 (R) 47×41 (G), 39×41 (B)의 격자점 재배치를 행하여 134 (H) \times 41 (V)의 격자를 형성하였다. 또한 sub-pixel 해상도를 만족시키기 위하여 8근방 estimator가 채택되었으며, 여기서 사용된 8근방 estimator는 실제유동을 해석하는 데 있어서 여러 문헌에 소개된 다른 방법보다 우수한 것으로 입증되었다^[7].

3. Multi-vision PIV

넓은 유동장, 또는 Karman Vortex 등과 같은 후류에서의 유동장을 관찰하고자 할 경우 한 대의 입력메체를 이용하여 영상을 획득하고 해석하는 것에는 많은 한계가 있다. 이러한 제약 때문에 기존의 연구에서는 해석하고자 하는 유동장을 여러 부분으로 나누어 실험을 하거나, 국소부위에 한정해 실험을 행할 수 밖에 없었다. 이와 같이 유동장을 여러 부분으로 나누어 실험을 하는 경우에는 전체유동장의 동일시간에 대한 유동해석이 불가능하다. 이에 본 실험에서는 넓은 유동장이나 종축에 비해 횡축이, 혹은 횡축에 비해 종축이 긴 경우의 유동장에 대응할 수 있는 Multi-vision PIV를 개발·적용하였다.

Multi-vision PIV란 2대 이상의 카메라를 동기시켜 영상을 획득하여 처리하는 방법으로 보다 다양한 유동장에 대응할 수 있는 PIV 측정 기술이다. Multi-vision PIV를 적용하기 위해서는 2개 이상의 카메라를 동기시키는 문제와, 동

일시간에 동기화된 영상을 획득할 수 있는 이미지 보오드를 운용할 수 있는 기술이 필요하며, 본 실험에서는 PCI 이미지 보오드(DT3154)를 이용하여 동기화된 3대의 CCD 카메라에서 동일시간에 영상을 획득하였다.

4. 결 과

PIV 데이터의 후처리에 의한 애니메이션은 단순물체 후방에서의 다양한 유동 정보량에 관하여 거시적인 후류의 형태를 제공해 줄 수 있는 방법으로 이용된다. 그림 3은 한 예로서 30° 의 기울기를 가지는 각주의 순간 유동패턴을 보여주고 있다. 그림 3(a)는 3대의 카메라를 이용하여 획득된 영상을 결합하여 나타낸 원시영상을 보여주고 있다. Multi-vision PIV 기술은 각주로부터 발생하는 두 개의 전단흐름의 상호작용을 관찰하기 위한 후류영상을 제공할 수 있다. PIV 처리의 적용을 위하여 우선 속도벡터를 구하는 것이 필요하며, 그림 3(b)의 순간 속도벡터 분포로부터 경사진 물체에서 방출되는 Karman vortex가 넓은 후류영역에서 잘 관찰된다. 그림 3(c)의 운동에너지 분포는 속도분포와 비슷한 유동형태를 나타내며, 난류강도의 경우는 그림 3(d)에 나타나 있듯이 애니메이션을 통해 관찰하여 보면 항상 국소위치에 집중되어 나타나고 있는것을 발견할 수 있다. 그림 3(e)의 난류운동에너지는 물체의 물체의 후방에서 덩어리의 형태로 주기적으로 방출하는데 후류영역으로 갈수록 난류운동에너지의 집중영역이 커지다가 다시 점성확산에 의해 강도가 약해지는 것을 알 수 있다. 그림 3(f)의 $\rho(u')^2$ 는 2개의 집중된 응력의 덩어리가 각주의 후방에서 흐름에 대해 거의 대칭으로 나타나며, 이 2개의 영역은 서로 충돌하지 않고 각자의 형태를 보존하며 후방으로 이동한다. $\rho(v')^2$ 의 흐름유형은 난류운동에너지와 비슷한 경향을 나타낸다. $-\rho u'v'$ 는 $\rho(u')^2$ 와 비슷하게 흐름에 대해 대칭의 형태를 나타내며 유체의 흐름에 따라 후방으로 분포가 이동한다. 위의 관찰을 통해서 Multi-vision PIV를 적용하여 획득한 30° 의 기울기를 가지는 각주후방에서

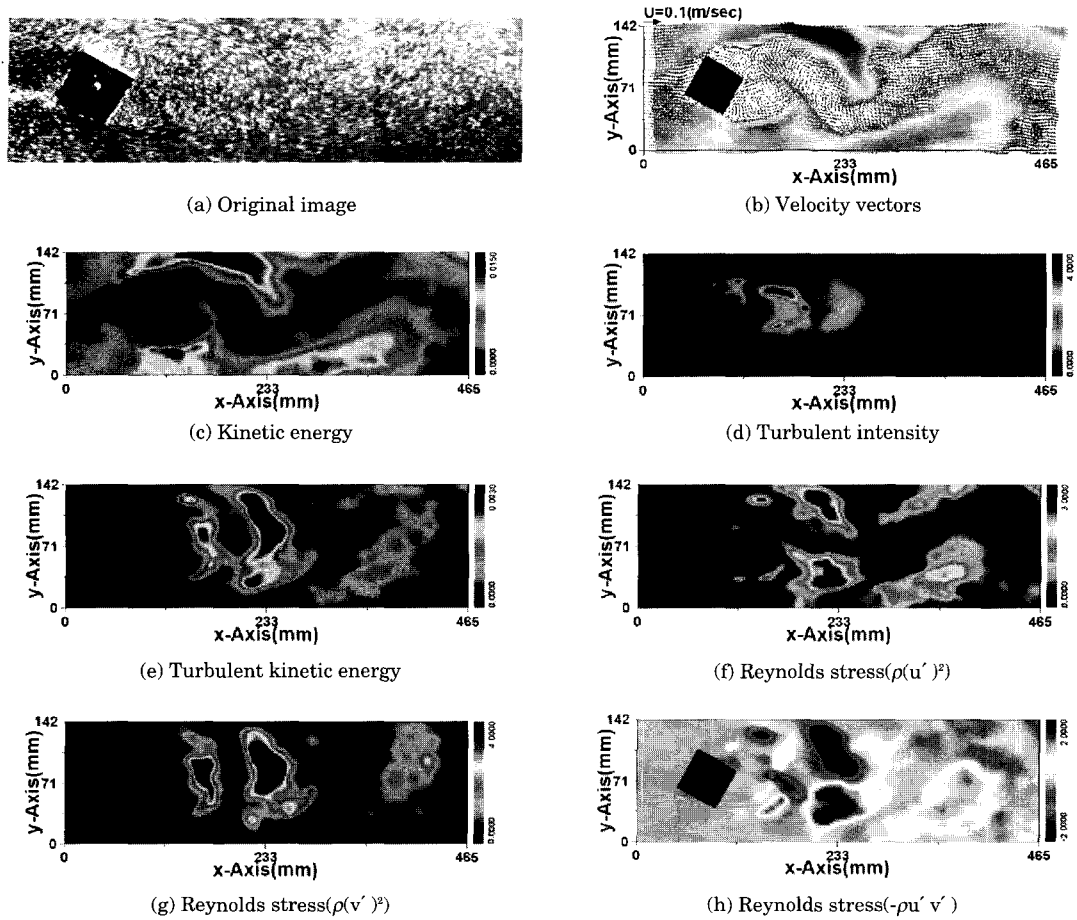


Fig. 3 Instantaneous flow patterns(30° square prism)

의 유동현상은 현재까지 보고되어 있는 각주 후방에서의 유동특성에 관한 연구와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있으며, Multi-vision PIV의 적용을 통하여 각주후방에서 발생하는 비정상적인 유동현상을 높은 해상도를 이용하여 쉽게 관찰할 수 있었다.

그림 4는 시간평균 난류량을 나타내고 있는데 Multi-vision PIV에서와 동일한 유동조건에서 한 대의 CCD 카메라를 사용하여 실험을 행하였다. 계측영역은 156mm(V)×362mm(H)이며 928개의 영상을 약 30초가량 획득함으로써 시간평균 데이터를 처리하기 위한 충분한 영상을 이용하였으며, 이때 30초의 영상을 연속적으로 얻기 위하여 Motion-JPEG 보오드(miroVideo

DC30Plus, 24bit, RGB:256 color)를 이용하였다. 그림 4의 시간평균 난류량은 그림 3의 순간데이터와는 상당히 다른 양상을 나타내고 있으며, 단순물체의 후방에서 난류량의 집중영역이 크게 나타나서 뒤쪽으로 갈수록 강도가 약해지며 넓게 분포된다. $\rho(u')^2$ 의 시간평균 분포는 물체후방의 상하부에서 비슷한 분포를 보이며, $-\rho u'v'$ 역시 반대의 부호를 갖는 난류량(a)Reynolds stress($\rho(u')^2$) 영역이 각주후방의 상하부에 나타난다. $\rho(v')^2$ 는 난류운동에너지의 경우와 같이 하나의 큰 난류량 분포가 각주의 후방에서 발생한다. 수학적으로 $\sqrt{(u'^2 + v'^2)/2}$ / $\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$ 로 표현되어지는 난류강도의 경우 애니메이션의 관찰로부터 꽤 흥미 있는 현상을 발견할 수 있

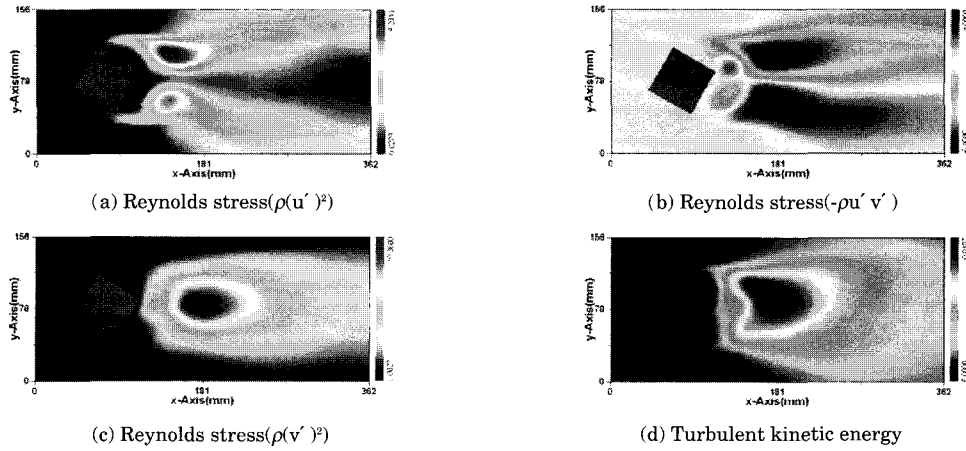


Fig. 4 Time-averaged turbulent quantities(30° prism)

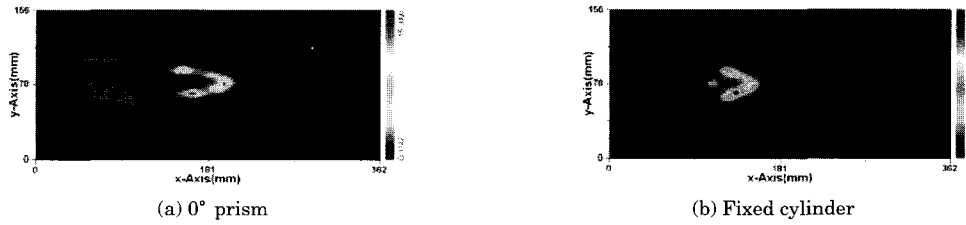


Fig. 5 Time-averaged distribution of turbulent intensity

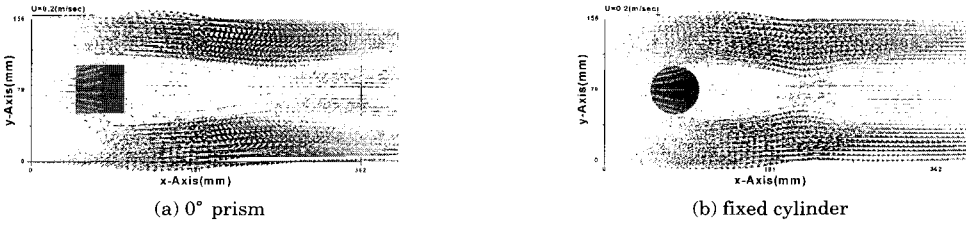


Fig. 6 Time-averaged velocity vectors

다. 난류강도의 세기가 급격히 증가한 2-3개의 작은 영역이 단순물체의 후방에 일정한 형태를 가지고 나타나며, 이러한 분포는 유동의 흐름과 관계없이 일정한 위치에 고정되어 있는 것을 알 수 있다.

이와같은 난류강도의 특성은 이전에 설명한 난류성분의 유동패턴과는 다르게 나타난다.

그림 5는 0°의 기울기를 가지는 정방형 각주 (a)와 고정된 원주(b)의 시간평균 난류강도 분포를 나타내고 있으며, 각주와 원주의 흐름방향에서의 비대칭적인 분포는 유입류의 비균일성으

로 기인한 것이다.

그림 6은 2가지의 단순물체 후류에서의 시간 평균 속도분포를 보여주고 있다. 이 그림에서 와류전단유동의 상호작용에 의해 생성되는 와류와 2개의 와방출의 중심이 관찰되며, 이러한 위상적 중심과 와류의 중심은 그림 5에서의 난류강도의 중심점과 일치하는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 2차원 단순물체 유동에서의 난류강도의 분포는 레이놀즈 응력 및 난류운동에너지와 같은 난류량과 서로 상관관계가 없다는 것을 보여주며, 난류강도분포의 거동을 이해하기 위

해서는 순간속도분포와 시간평균에 대한 정보에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

5. 주파수 해석

단순물체에 관련된 유체역학의 대표적인 현상이 카르만 와류(Karman vortex)라 불리는 전단층의 주기적인 흐름이다. 단순물체에서 시계열 유동신호의 FFT 분석은 거시적인 bluff body 유동패턴의 탁월주파수를 정량화 할 수 있으며, 스트로할수가 대표적이다. 본 연구에서는 단순물체의 후방에서 여러 픽업포인트를 선정하여 예비연구를 수행한 후 그림 7에서와 같이 최종적으로 4개의 픽업포인트(각주의 기울기 30° =219.1, 42.4, 각주의 기울기 45° =225.5, 41.0)을

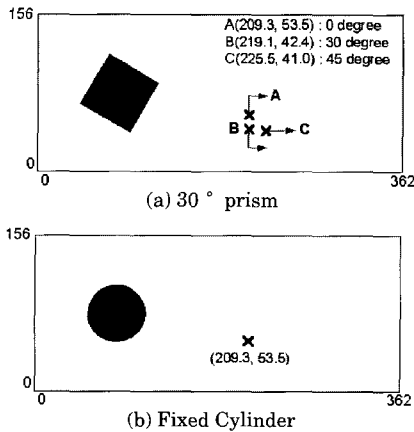


Fig. 7 Pick-up points for frequency analysis

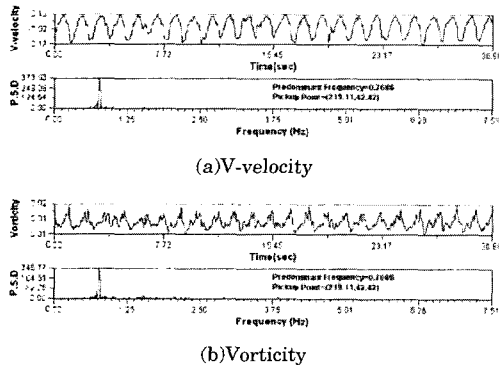


Fig. 8 Spectral analysis of v-velocity and vorticity in 30° prism

Table 1. Frequency analysis(1)

bluff body	u	v	K.E.	V	St(V)
square prism(0°)	0.817	0.809	0.817	0.809	0.202
square prism(30°)	0.769	0.769	0.769	0.769	0.192
square prism(45°)	0.744	0.744	0.744	0.744	0.186
cylinder(0 rpm)	0.971	0.971	0.971	0.971	0.242
cylinder(76 rpm)	1.036	1.036	1.036	1.036	0.259
cylinder(153 rpm)	1.155	1.041	1.155	1.155	0.289

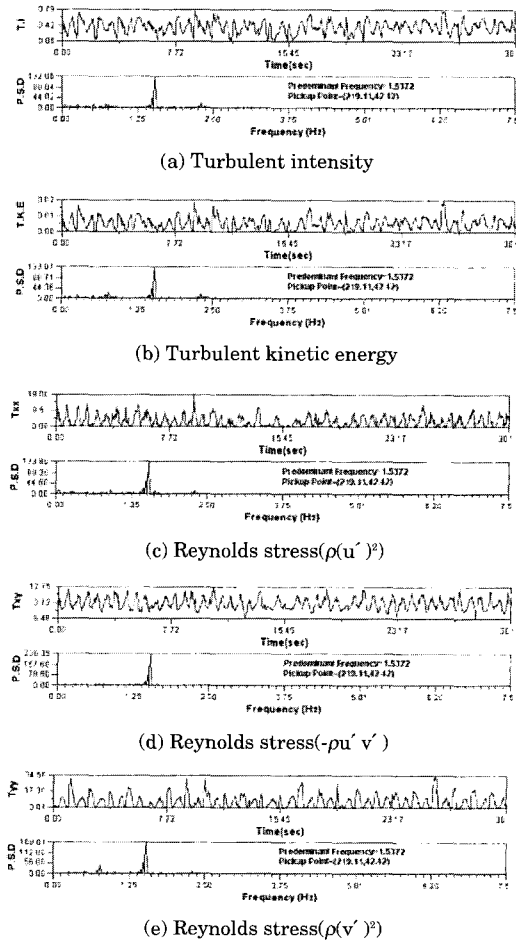


Fig. 9 Spectral analysis of v-velocity and vorticity in 30° prism

선택하여 주파수 분석^[8]을 행하였다.

그림 8(a)은 그림 7의 픽업포인트에서 v속도 성분의 주파수 분석을 행한 결과를 보여주고 있다. 탁월주파수 0.768Hz를 갖는 v속도의 주기성이 나타나고 있으며, 그림 8(b)에는 동일한 위

Table 2 Frequency analysis(2)

bluff body	T.I.	$\rho(u')^2$	$\rho(v')^2$	$-\rho u' v'$	T.K.E.	St(T.K.E.)
square prism (0°)	1.545	1.545	1.545	1.545	1.545	0.386
square prism (30°)	1.537	1.537	1.537	1.537	1.537	0.384
square prism (45°)	1.497	1.489	1.489	1.489	1.489	0.372
cylinder (0 rpm)	0.979/1.950	1.950	0.979/1.950	1.950	0.979	0.245
cylinder (76 rpm)	1.050	2.079	2.079	1.036/2.079	1.036	0.259
cylinder (153 rpm)	1.050	1.050	1.041	1.050	1.050	0.263

지에서 와도의 주파수 분석을 행한 결과를 나타내고 있는데 속도와 동일한 0.768Hz의 탁월주파수를 나타낸다. 표1은 u , v 의 속도성분, 운동에너지 그리고 와도성분에 대해 탁월주파수 분석을 행한 결과를 나타내고 있으며, 테이블에서 St는 유입속도 (0.2m/s), 대표길이(0.05m)에 의해 계산된 스트로할수를 의미한다.

그림 9는 30°의 기울기를 가지는 각주의 후방에서 각 난류량에 대한 주파수 분석을 행한 결과를 나타내고 있다. 난류강도, 난류운동 에너지, 레이놀즈 응력의 모든 난류량에서 1.537Hz의 탁월주파수를 가지는 결과를 얻을 수 있었고, 표2에는 난류량의 주파수분석을 행한 결과를 정리하였다. 이 표에서 T.I.는 난류강도를 의미하고 T.K.E.는 난류운동에너지를 의미한다. 난류 성분에 의한 탁월주파수와 속도 성분에 의한 탁월주파수의 비교는 대부분의 경우에서 난류 주파수는 속도 주파수의 2배가 되는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

기존의 PIV에서 한대의 카메라를 이용하여 넓은 유동장에 적용하고자 할 경우, 종축에 대하여 횡축의 영역이 큰 경우, 혹은 횡축에 비하여 종축이 큰 경우에 필연적으로 발생하는 해상도가 저하되는 문제를 해결하기 위하여 3대의 카메라를 동기화 시켜 동일시간에 영상을 획득할 수 있는 Multi-vision PIV를 개발·적용하였다. 이러한 Multi-vision PIV의 개발로 다양한 실험에서 해상도가 높은 영상을 획득할 수 있으며, 특히 넓은 해석영역으로 말미암아 계측이 어려웠던 부분에 적용하여, 2대 이상의 카메라

를 동기시켜 동일시간대의 영상을 획득함으로써 계측영역의 한계를 극복할 수 있었다.

Multi-vision PIV의 한가지 적용예로서 단순물체 후방에서의 유동현상을 규명하였다. 각주 등의 단순물체는 물체후방에서의 넓은 유동현상을 규명하는 것이 중요한 의미를 가진다. Multi-vision PIV를 6가지의 단순물체 후류영역에 적용하여 유동특성을 관찰하였고, 애니메이션을 통한 순간속도, 와도, 난류량(난류강도, 난류운동에너지, 레이놀즈 응력)등의 거시적인 흐름유형을 분석하였다. 이러한 흐름유형의 분석을 통하여 모든 경우의 실험에서 난류강도의 분포는 국소적인 위치에서 독립적으로 강하게 집중되어 분포함을 알 수 있었다.

비정상적인 유동특성을 가지고 있는 단순물체 후방에서의 보다 정확한 시간평균 난류량의 정보를 획득하기 위하여 약 30초의 영상(920 프레임)을 연속적으로 획득하였다. 시계열적인 영상을 통하여 시간평균적인 유동장의 해석과 주파수 분석을 행한 결과 일반적으로 난류량의 탁월주파수는 속도와 관련된 탁월주파수에 비해 2배가 됨을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 2000년 목적기초연구(과제번호 2000-1-30500-003-3)의 지원에 의한 것임을 밝히며, 관계자 여러분께 사의를 표한다.

참 고 문 헌

- [1] A. Okajima, "Strouhal Numbers of Rectangular Cylinders", Fluid Mech. Vol.123, pp.379-398, 1982.

- [2] H. Hu, T. Saga, T. Kobayashi, K. Okamoto, and N. Taniguchi, "Evaluation of the Cross Correlation Method by Using PIV Standard Images", J. of Visualization Vol.1 No.1, pp.87-94,1998.
- [3] I. Grant, "A PIV and LSV Study in the Wake of an Aircraft Model", J. of Visualization Vol.2 No.1, pp.85-92, 1999.
- [4] M. Trinite, B. Lecordier and, A. Lecerf, "Simultaneous Development of Time-Resolved Laser Tomography and PIV for Flames Propagation Studies". J. Visualization Vol.2 o. 3/4, pp.245-256, 1999.
- [5] Y. H. Lee, C. J. Yang, J. W. Choi, and M. Y. Kim, "Animation of Multi-Vision PIV for a Pitching Aerofoil", Proc. of '99 Korea-Japan Joint Seminar on Particle Image Velocimetry, pp.126-131, 1999.
- [6] Y. H. Lee and J. W. Choi, "PIV Animation of Turbulence Information in the Wake of a Pitching Aerofoil", Proc. of EUROMECH411, Rouen, 2000.
- [7] Fincham A.H., Spedding G.R., (1997), "Low Cost High Resolution DPIV for Measurement of Turbulent Fluid Flow Exp. in Fluids Vol.23, pp.449-462.
- [8] R. D. Blevins, "Flow-Induced Vibration(2nd ed.)", Van Nostrand Reinhold, 1990.

저 자 소 개



송근택(宋根澤)

1970년 7월생. 1996년 한국해양대학교 기계공학과 졸업. 1998년 동 대학원 기계공학과 수료(석사). 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정. 1995년~2001년 현대그룹. 2001년~현재 Hilti Korea.



이 현(李賢)

1974년 4월생. 1999년 경남대학교 기계공학과 졸업. 2001년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정. 2000~현재 (주)아이아이티 근무.



김유택(金由澤)

1968년 2월생. 1990년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1996년 한국해양대학교 대학원 졸업(석사). 2000년 일본 큐슈공업대학 대학원 졸업(박사). 1990년~1993년 SK 해운, 엔지니어. 2000년~2001년 일본 큐슈공업대학 SVBL 강사. 2001년~현재 한국해양대학교 재직(해사대학, 기관시스템공학부 전임강사)



이영호(李英浩)

1957년. 2. 24일생. 1980년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1982년 한국해양대학교 대학원졸업 (석사, 유체공학). 1986년 동경대학 기계공학과졸업(박사, 유체공학). 한국해양대학교 기계·정보공학부 교수. 당 학회 증신회원.