

난류유동 해석을 위한 Dynamic PIV 시스템의 개발

이상준[†] · 장영길^{*} · 김석^{*}

Development of a Dynamic PIV System for Turbulent Flow Analysis

Sang-Joon Lee[†], Young-Gil Jang^{*} and Seok Kim^{*}

Abstract. Information on temporal evolution of whole velocity fields are essential for physical understanding of a complicated turbulent flow. Due to advances of high-speed imaging technique, laser and electronics, high-speed digital cameras and high-repetition pulse lasers are commercially available in nowadays. A dynamic PIV system that can measure consecutive instantaneous velocity field with 1K×1K pixels resolution at 1 fps was developed. It consists of a high-speed CMOS camera and a high-repetition Nd:YLF pulse laser. Theoretically, it can capture velocity fields at 20 fps with a reduced spatial resolution. In order to validate its performance, the dynamic PIV system was applied to a turbulent jet of which Reynolds number is about 3000. The particle images of 1024×512 pixels were captured at a sampling rate of 4 KHz. The dynamic PIV system measured successfully the temporal evolution of instantaneous velocity fields of the turbulent jet, from which spectral analysis of turbulent structure was also feasible.

Key Words: Dynamic PIV(다이내믹 PIV), Jet(제트), Flow visualization(유동 가시화)

1. 서 론

난류유동은 시간(t)과 공간(x,y,z)의 함수로 주어지는 매우 복잡한 유동구조를 가지고 있다. 따라서 시간에 따라 변화하는 난류유동의 순간 속도장을 연속적으로 빠르게 측정할 수 있다면 유동구조의 시간에 따른 변화(evolution) 과정을 밝힐 수 있고, 난류유동에 대한 물리적 이해를 향상시킬 수 있을 것이다. 그리고 이들을 앙상블(ensemble) 평균하여 난류통계치들을 구하게 되면 난류구조의 공간변화를 보다 정확하게 해석할 수 있을 것이다.

고속카메라를 사용하여 시간에 따라 변화하는 순간 속도장 변화를 연속적으로 측정하여 유동구조의 시·공간적 변화를 파악할 수 있는 속도장 측정기법을 dynamic PIV라고 한다. 따라서 복잡한 난류유동을 정확하게 측정하기 위한 dynamic PIV시스템의 구축에는 고속카메라와 함께 짧은 노출시간 동안 충분한

강도의 빛을 공급할 수 있는 레이저 광원이 필수적이다.

Dynamic PIV기법에 대한 초기 연구로 Lin & Rockwell⁽¹⁾은 35 mm 무비(movie)카메라와 Ar-ion 레이저를 이용하여 Re=10,000 조건에서 원주 후류에 대하여 초당 65장의 입자영상을 취득하여 시간에 따른 유동장의 변화를 관찰하였다. Oakley등⁽²⁾도 35 mm 무비카메라와 Ar-ion 레이저를 이용하여 Re=2.62 × 10⁴ 조건에서 난류전단유동의 시간에 따른 변화를 연구하였다. 그들은 싱글 프레임(single-frame)에 삼중노출(triple-exposure)하는 방법으로 속도장을 측정하였다. Kasagi & Matsunaga⁽³⁾는 후향단 유동에 대해서 3-D PTV기법으로 3차원 속도장을 구하였는데, 순간속도장 1장에 측정된 속도벡터의 수가 적어 공간해상도가 높지 않았다. Willert등⁽⁴⁾은 Nd:YAG 펄스레이저와 고속 디지털 카메라를 사용하여 출구속도가 60 m/s인 제트유동의 순간속도장을 초당 10장씩 연속으로 측정하였다.

그러나 이와 같은 기존의 연구들은 빠르게 움직이는 난류 에디(eddy)거동을 잡을 수 있을 정도의 시간 분해능과 공간분해능을 가지지 못하였다. 최근 들어,

[†]책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
E-mail: sjlee@postech.ac.kr

^{*}포항공과대학교 대학원 기계공학과

레이저 및 광학 장비의 발달로 디지털 방식으로 높은 해상도를 갖는 입자영상을 고속으로 취득하는 것이 가능해졌다. 따라서 입자영상으로부터 공간상의 상관 관계를 구하는 일반적인 PIV 개념을 넘어서 높은 시간분해능으로 속도장의 시간 변화를 측정할 수 있는 dynamic PIV 시스템의 개발이 가능하게 되었다.

Dynamic PIV시스템은 높은 반복률(repetition rate)을 가지는 펄스형 레이저와 고속으로 영상을 취득할 수 있는 디지털 방식의 고속카메라, 그리고 이들을 정확하게 동기시킬 수 있는 동기장치로 구성된다. 또한 얻어진 수많은 입자영상들을 통계 처리하는데 매우 많은 시간이 소요되므로 측정오차가 적고 빠르게 속도장 정보를 구할 수 있는 효율적인 알고리즘(algorithm)의 개발도 필요하다.

이와 같은 고속카메라와 고속레이저로 구성된 dynamic PIV시스템은 다양한 유동에 적용되고 있다. Nishino & Takahashi⁽⁵⁾는 dynamic PIV시스템을 충돌제트에 적용하여 2000fps로 시간에 따른 순간 속도장의 변화를 측정하였으며 반경방향에 따른 속도분포의 주기적인 변화를 보여주었다. Tanahashi 등⁽⁶⁾은 난류 제트유동을 stereoscopic PIV 기법으로 고속 촬영하여(약 1800fps) 시간에 따른 3차원 속도성분을 측정하였으며, 이를 DNS결과와 비교하였다. Hayami & Aramaki⁽⁷⁾는 습윤기 유동을 약 10000fps로 입자영상을 취득하고 시간에 따른 순간속도장 변화를 측정하였고 POD분석을 통해 유동을 해석하였다.

이미 dynamic PIV 속도장 측정과 관련하여 선진국에서는 측정 정확도를 향상시키고 초당 측정할 수 있는 속도장 개수를 늘리는 연구와 함께 복잡한 난류유동의 3차원 계측도 시도하고 있다. 본 연구실에서는 리블렛 상부 유동 (Lee & Lee⁽⁸⁾), 다공펜스 유동 (Lee & Kim^(9,10))과 원심압축기 내부 유동 (Lee et al.⁽¹¹⁾)등을 cinematic 방식의 PIV기법을 이용하여 연구하였었다. 그러나 이들 연구에서는 충분한 광량을 확보하기 어려웠고 영상 취득속도가 그리 높지 않았었다. 본 논문에서는 최근 구축한 dynamic PIV시스템

에 대해 설명하고자 한다.

2. Dynamic PIV시스템의 구성

2.1 고속레이저

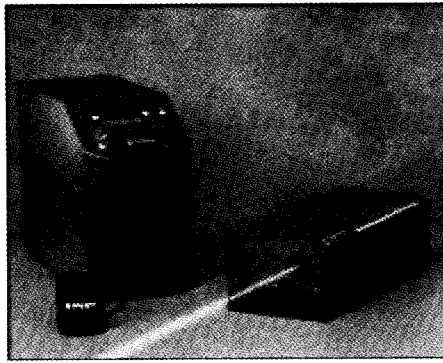
Dynamic PIV실험에서 레이저 평면광을 생성시킬 때 CW(continuous wave)레이저와 AOM(acousto-optic modulator)을 사용하여 아주 짧은 시간으로 빛을 나누어 조사하는 방법과 높은 반복률을 가지는 펄스형 레이저를 사용할 수 있다. dynamic PIV 초기에는 전자와 같은 CW레이저를 많이 사용하였다. 그러나 AOM을 사용할 경우 높은 반복률을 갖는 레이저 광의 생성은 가능하지만 펄스당 에너지 레벨이 낮아서 고속으로 깨끗한 입자영상을 얻기 어렵다. 최근 들어 레이저 기술이 발전하여 높은 반복률을 가지는 펄스형 레이저가 개발되어 dynamic PIV 시스템 구성요소로 사용되고 있다.

Table 1은 높은 반복률을 가지는 상용 레이저들의 성능을 비교한 것이다. 다양한 파장의 레이저가 시판되고 있으나 녹색광($\lambda = 527 \text{ nm}$) 계열의 레이저가 많다. 반복률의 경우 대부분 수십 KHz이상이어서 dynamic PIV에 적용하는데 문제가 없다. 특히 구리 증기 레이저의 경우, 다른 레이저에 비해 반복률도 높고 레이저 광의 노출시간도 짧아 PIV측정에 유리하나 Q-switch로 동기가 되지 않는다는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 높은 반복률을 갖는 이중헤드 방식의 Nd:YLF 레이저(Pegasus)를 사용하였다. 이 레이저는 527 nm의 파장을 갖는 펄스광을 최대 20KHz까지 발생시킬 수 있으며 2KHz에서 10mJ의 세기를 갖는 펄스광을 발생시킨다. 펄스 지속시간은 180ns보다 짧아 일반 레이저보다 다소 긴듯하지만 180ns도 매우 짧은 시간에 속하므로 초음속 유동이 아닌 고속 유동의 계측에는 문제가 없다. 또한 Q-switch로 동기시키기 때문에 dynamic PIV 실험에서 원하는 순간에 작동시킬 수 있다는 장점이 있다. Fig.

Table 1. Comparison of high-repetition rate pulse lasers.

	Pegasus	Copper Vapor Laser	V-Xtreme	Nd:YLF Laser
Wave-length	527 nm	510.6 nm, 578.2 nm	1064 nm	527 nm
Repetition Rate	2~20 kHz	4.5kHz~50 kHz	50 kHz~500 kHz	2~20 kHz
Pulse Width	<180 ns	25 ns	100 ± 15 ns	200ns
Energy	10mJ@2kHz	2mJ@10kHz	> 8.0 W	10 mJ@1kHz
Trigger mode	Q-switch		Q-switch	Q-switch



(a) High-repetition pulse laser



(b) High-speed CMOS camera

Fig. 1. Components of dynamic PIV system.

1(a)는 본 실험에 사용되어진 Pegasus 레이저(New Wave 社)의 사진이다.

2.2 고속카메라

영상취득장치로는 디지털 고속 카메라를 사용하였다. CCD방식의 센서 어레이로는 고해상도 영상을 고속으로 촬영하기가 기술적으로 어렵다. 최근 들어 CMOS카메라 기술이 빠르게 발달함에 따라 CMOS 센서 어레이를 이용한 고해상도 고속카메라가 등장하고 있다. 아직은 CCD방식에 비해 영상의 질이 다소 떨어지긴 하지만, 관련 기술의 발달로 그 차이가 크게 줄어들었다.

Table 2는 시판되고 있는 CMOS센서를 부착한 디지털 고속카메라들을 비교한 것이다. 대부분 최대 해

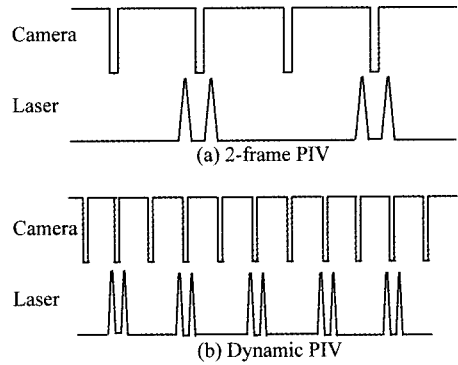


Fig. 2. Synchronizing signal of camera and laser.

상도 $1K \times 1K$ pixels에서 초당 수천 프레임의 영상을 취득할 수 있다. 그리고 해상도를 감소시킬 경우 영상의 취득속도를 수만~수십만 fps까지 증가시킬 수 있다. 고속카메라의 경우, 일반적인 성능의 차이는 크지 않으며 주어진 여건에 따라 적절히 선택하는 것이 좋다.

본 실험에 사용된 고속카메라(FASTCAM-ultra APX)를 Fig. 1(b)에 나타내었으며, 최대 영상취득 속도는 100Kfps이며, $1K \times 1K$ pixels 해상도로 2Kfps까지 영상을 취득할 수 있다.

2.3 동기신호

일반적인 PIV계측에 비해 dynamic PIV경우는 레이저와 카메라를 보다 정확히 동기시켜야 한다. Fig. 2에 two-프레임 PIV와 dynamic PIV방식의 동기신호를 비교하여 나타내었다. 영상을 고속으로 취득할 경우, 높은 반복율의 레이저와 정확하게 동기시키기 위해 동기신호가 빠르고 정확해야 한다. 본 dynamic PIV시스템을 구성하고 있는 동기장치에서 나오는 동기신호의 정확도는 약 5ps이다.

3. 난류제트 유동에의 적용

3.1 제트 실험장치와 실험조건

먼저 구축된 dynamic PIV시스템의 성능을 검증하

Table 2. Comparison of commercial high-speed cameras.

	Motion Xtra HG-100K	SpeedCam Visario g2	Ultima APX-RS	Ultima APX
Full Resolution	1504 × 1128	1536 × 1024	1024 × 1024	1024 × 1024
Max. fps at full Res.	1,000 fps	1,000 fps	3,000 fps	2,000 fps
Max. fps at reduced Res.	100,000 fps	10,000 fps	250,000 fps	100,000 fps
Sensor Type	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS

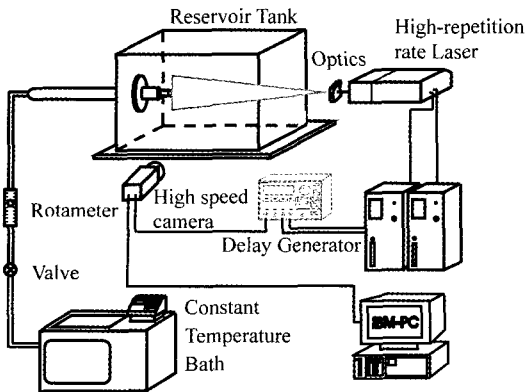


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus.

기 위해 난류 제트유동에 적용하였다. Fig. 3은 실험 장치의 구성을 나타낸 것으로 레이저 빛을 원주형 렌즈를 통과시켜 레이저 평면광으로 만든 후 측정하고자 하는 단면을 조사하였다. 측정 단면에 수직하게 고속카메라를 설치하고 측정면에 초점을 맞춘 후, 1024×512 pixels 해상도의 입자영상을 4000fps로 약 1초간 취득하였다. 이때 동기장치를 사용하여 레이저와 카메라를 정확히 동기시켰다.

Fig. 4는 실험에 사용된 수조와 원형 파이프 노즐의 모습을 보여주고 있다. 수조는 투명 아크릴로 제작하여 PIV 입자영상 취득이 용이하도록 하였다. 수조의 크기는 $0.62 \text{ m}^L \times 0.40 \text{ m}^W \times 0.42 \text{ m}^H$ 이고, 이송장치 위에 위치시켜 실험조건에 맞추어 이송하였다. 완전히 발달한 난류제트 유동을 형성하도록 내경이 $D=9.6 \text{ mm}$, 길이 $L=1 \text{ m}$ 인 긴 아크릴 파이프를 사용하였으며, 수조 옆면에 파이프 노즐을 설치하여 제트가 수평방향으로 분사되도록 하였다. 제트 노즐에서

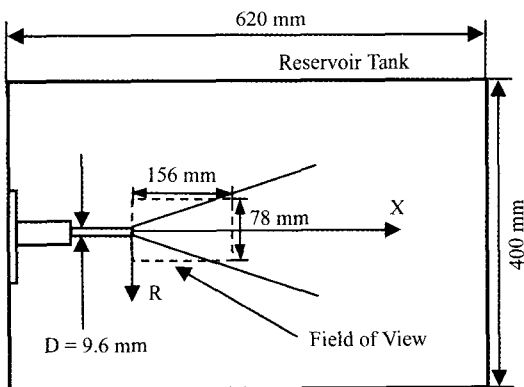


Fig. 4. Measurement plane and coordinate system.

의 출구속도는 $U_0=0.32 \text{ m/s}$ 이며, 파이프 내경(D)을 기준으로 한 레이놀즈수(Re_D)는 약 3×10^3 이다. 또한 관측창의 크기는 폭 156 mm (약 16D), 높이 78 mm (약 8D)로 직사각형이다.

작동 유체로는 물을 사용하였으며, 항온조를 사용하여 실험하는 동안 물의 온도를 20°C 로 일정하게 유지하였다. 유량은 rotameter를 사용하여 측정하였으며 평균 입자직경이 $10 \mu\text{m}$ 인 은으로 코팅된 속이 빈 유리구슬(hollow sphere glass)을 추적입자로 사용하였다. PIV실험시 제트 경계에서 발생하는 에러를 최소화하기 위하여 추적입자를 수조와 항온조에 균일한 입자농도로 주입하였다.

3.2 LIF기법을 이용한 유동가시화

Dynamic PIV시스템은 적용하기 이전에 난류 제트 유동을 LIF기법으로 가시화하였다. 특히 유동에 수직한 횡단면에서는 측정단면을 벗어나는 입자들이 많기 때문에 PIV기법을 이용한 속도장 측정이 쉽지 않기 때문에 유동가시화를 수행하여 제트유동의 정성적 특성을 먼저 관찰하였다.

형광 염료로는 Rhodamine B를 사용하였는데, Rhodamine B는 온도장 및 농도장 측정과 가시화 연구에 주로 이용되며 약 540 nm 파장의 빛에 여기되고 $\lambda=585 \text{ nm}$ 에 형광 빛을 방출하는 특성을 가진다. 미량의 Rhodamine B 염료를 작동 유체와 혼합시켜 흘러가게 하였다.

유동 영상은 길이방향 종단면과 수직방향 횡단면에서 취득하였는데, 각각 4000Hz와 1000Hz로 연속적으로 유동영상을 취득하였다.

Fig. 5는 제트 출구 부근 수직단면($X/D=0.5$)에서 4 msec. 간격으로 연속적으로 측정한 순간 유동영상을 나타낸 것이다. $\tau=0 \text{ sec.}$ 인 순간 제트의 위쪽에 불룩 튀어나온 왼쪽부분이 $\tau=4 \text{ msec.}$ 순간에 이르러 주유동으로부터 분리되기 시작하며 $\tau=8 \text{ msec.}$ 에 이르러 어느 정도 분리된 모습을 보여주고 있다. 보다 시간이 흐르면 분리된 유동 형태를 어느 정도 유지하다가 점차 사라지는 모습을 보여주고 있다. 또한 제트의 아래 부분에서는 $\tau=0 \text{ sec.}$ 순간에 이전에 생성된 와구조의 흔적을 볼 수 있다. 시간경과에 따라 이 흔적은 점차 사라지고, $\tau=12 \text{ msec.}$ 에 다시 새로운 와구조가 생성되기 시작하여 $\tau=20 \text{ msec.}$ 에 이르러 작은 크기의 와구조로 발달하고 있다. 이와 같은 와구조의 발달과 함께 시간에 따라 변화하는 제트 유동 단면의 변

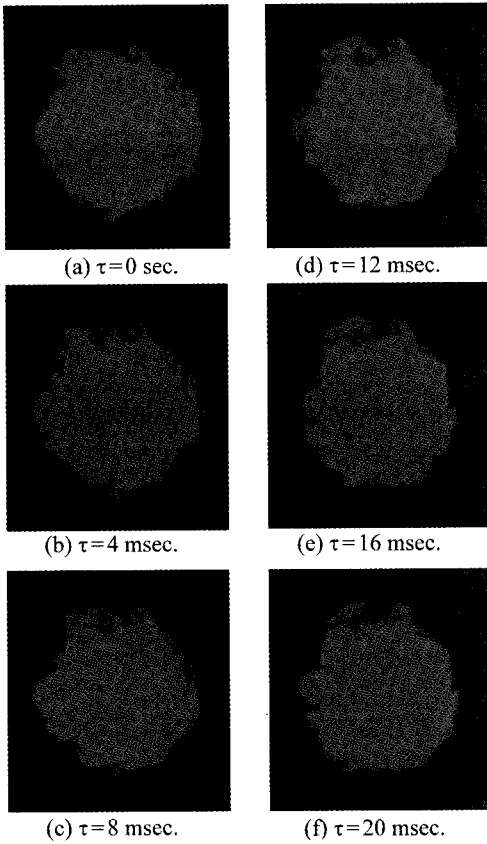


Fig. 5. Instantaneous sequential LIF images captured in the cross section at $X/D=0.5$.

회과정도 관찰이 가능하다.

Fig. 6은 $\tau=0$ sec.과 $\tau=25$ msec.에서 촬영한 주유동방향의 순간 유동영상을 보여주고 있다. 제트 출구로부터 약 1.5D까지는 큰 변화 없이 진행하지만 그 이후 구간에서 주위 유동의 영향으로 위 아래로 흔들리면서 나아가는 모습을 보여주고 있다. 또한 고속으로 촬영한 LIF영상으로부터 와 구조들의 성장과 이동하는 과정을 관찰할 수 있다.

3.3 순간속도장 결과 및 고찰

본 실험에서는 제트 유동의 입자영상을 4000fps로 취득한 후, 시간에 따른 순간 속도장 변화를 구하고 결과 중 일부를 Fig. 7에 나타내었다.

2 msec. 시간간격으로 변화하는 속도장 결과를 살펴보면 $X/D=1$ 이후 구간에서 주유동이 위 아래방향으로 흔들리면서 나아가는 복잡한 난류전단흐름의 유동특성을 보여주고 있다. 또한 속도장 결과들을 비교하여 보면 약 $\tau=8$ msec. 시간간격으로 비슷한 유동

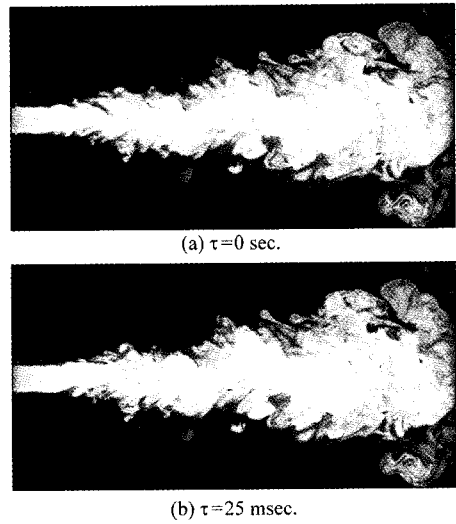


Fig. 6. Instantaneous flow images in the longitudinal section.

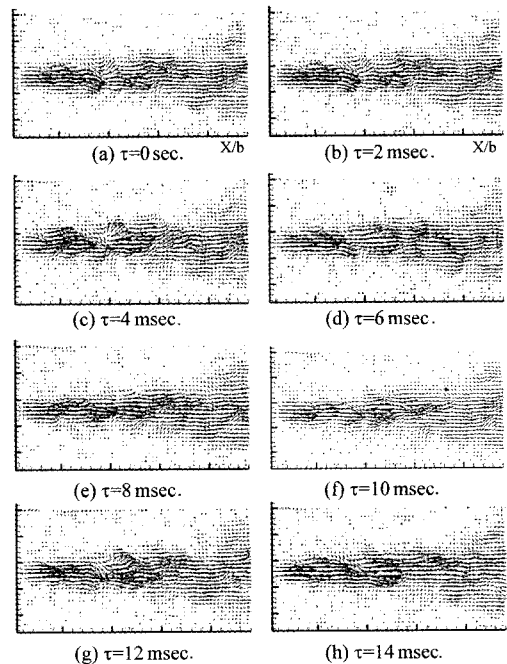


Fig. 7. Instantaneous velocity vector fields showing jet evolution.

패턴을 보여주고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 7(c)와 (g)를 보면 노즐로부터 약 $X/D=4$ 하류위치에서 유동이 크게 섭동(fluctuation)하는 현상을 관찰할 수 있고 다른 위치에서도 유사한 유동패턴이 나타나고 있다.

Fig. 8는 연속적으로 취득한 500장의 순간속도장 결과를 평균하여 구한 속도벡터와 주유동방향 속도성

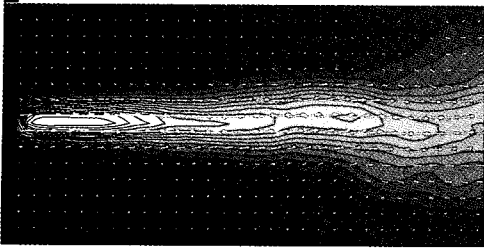


Fig. 8. Mean velocity vectors and contours of streamwise mean velocity.

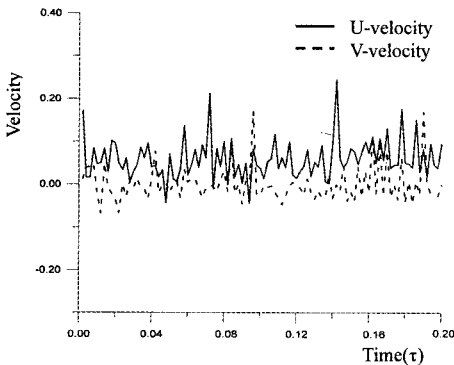


Fig. 9. Velocity variation with time variation.

분의 컨투어를 보여주고 있다. 여기서 보면 제트 출구 부근에서 최대값을 가지고 LIF 가시화결과와 유사하게 하류로 나아갈수록 속도값이 감소하며 제트의 폭이 점차 증가하고 있다.

Dynamic PIV의 경우, 속도장의 공간분포를 측정하는 장점 이외에 열선유속계나 LDV처럼 속도신호의 시계열(time series) 분석도 가능하다. 따라서 dynamic PIV측정 결과로부터 임의의 위치에서의 속도값을 추출하여 각 속도성분의 시계열 신호를 얻을 수 있다. Fig. 9는 $X/D=6$, $Y/D=1$ 위치에서 약 0.2 sec. 동안 주유동 방향 속도성분(U)와 반경방향 속도성분(V)의 변화를 시간의 함수로 나타낸 것이다. 속도신호를 주파수 분석한 결과 주유동 방향 속도성분은 약 8 msec.의 특성시간 스케일(time scale)을 가지고 있었다. 이것은 원주 후류처럼 뚜렷하지는 않지만 제트 유동도 주기적인 유동특성을 가지고 있다는 것을 의미하며, 제트 출구쪽에서 관찰되는 링(ring)형상의 와구조와 관련이 있는 것으로 보인다.

6. 결 론

시간과 공간에 따른 속도장 변화를 정확히 측정할

수 있는 dynamic PIV기법은 난류유동 해석에 있어서 매우 중요한 의미를 지닌다. 본 실험에서는 dynamic PIV 시스템을 구축하고 이를 난류제트 유동에 적용하여 그 성능을 평가하였다.

Dynamic PIV를 이용한 속도장 측정과 함께 횡단면에서의 와구조 발달과정을 LIF기법을 이용하여 가시화하였다. 또한 4000fps로 입자영상을 취득하여 구한 순간속도장 결과는 시간에 따라 변화하는 유동구조의 진행 과정을 잘 보여주고 있다. 그리고 실험결과로부터 임의의 위치에서 추출한 속도의 시계열신호는 속도성분의 시간적 변화에 대한 정보를 제공하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) Lin, J.C. and Rockwell, D., 1994, "Cinematographic System for High-image Density Particle Image Velocimetry," *Exp. Fluids*, Vol.17, pp.110-114.
- 2) Oakley, T.R., Loth, E. and Adrian, R.J., 1996, "Cinematic Particle Image Velocimetry of High-Reynolds-Number Turbulent Free Shear Layer," *AIAA J.* Vol.34, pp. 299-307.
- 3) Kasagi, N. and Matsunaga, A., 1995, "Three-dimensional Particle-Tracking Velocimetry Measurement of Turbulence Statistics and Energy Budget in a Backward-Facing Step Flow," *Int. J. Heat & Fluid Flow*, Vol.16, pp.477-485.
- 4) Willert, C., Raffel, M., Stasicki, B. and Kompenhaus, J., 1996, "High-speed Digital Video Camera Systems and Related Software for Application of PIV in Wind Tunnel Flows," 8th ALTFM, Lisbon, Portugal.
- 5) Nishino, K. and Takahashi, T., 2005, "Measurement of Axisymmetric Impinging Jet by Using Dynamic PIV," *可視化情報*, Vol. 25, pp.25-30.
- 6) Tanahashi, M., Choi, G.M., Itakura, M. and Miyauchi, T., 2005, "Turbulence Measurements by Time-Resolved Stereoscopic PIV," *可視化情報*, Vol. 25, pp.8-13.
- 7) Hayami, H. and Aramaki, S., 2005, "Dynamic PIV for Fluid Flow Measurement," *可視化情報*, Vol. 25, pp.20-24.
- 8) Lee, S.J. and Lee, S.H., 2000, "Flow Field Analysis

- of Turbulent Boundary Layer over a Ribletted Surface,” *Exp. Fluids*, Vol.30, pp.153-166.
- 9) Lee, S.J. and Kim, H.B., 1998, “Velocity Field Measurements of Flow around a Triangular Prism behind a Porous Fence,” *J. Wind Eng. & Ind. Aero.*, Vol.77, pp.521-530.
 - 10) Lee, S.J. and Kim, H.B., 1999, “Laboratory Measurements of Velocity and Turbulence Field behind Porous Fences,” *J. Wind Eng. & Ind. Aero.*, Vol.80, pp.311-326.
 - 11) Lee, S.J., Kim, H.B., Huh, J.G., Lee, S.J., and Ahn, B.H., 2003, “Quantitative Analysis of Flow inside the Accumulator of a Rotary Compressor”, *Int. J. of Refrigeration*, Vol.26(3), pp.321-327.
 - 12) Lee, S.J., 2005, “PIV Velocity Field Measurement Techniques - Theory and Practice”, Dept. of Mech. Eng., POSTECH, pp.253-274.