Proc. of 4th KSV Conference
PNU, Busan, Korea, Dec. 2, 2005

Dynamic PIV를 이용한 난류 제트유동 해석

이상준† · 장영길* · 김석*

Measurement of turbulent jet flow using dynamic PIV technique

Sang-Joon Lee, Young-Gil Jang and Seok Kim

Abstract

Information on temporal evolution of whole velocity fields is essential for physical understanding of a complicated turbulent flow and was obtainable using dynamic PIV because of advances of high-speed imaging technique, laser and electronics. A dynamic PIV systme consists of a high-speed CMOS camera having 1K×1K pixels resolution at 1 KHz and a high-repetition Nd:Yag pulse laser. In order to validate its performance, the dynamic PIV system was applied to a turbulent jet whose 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 순간속도장 변화를 연속적으로 측정하여 유동구조의 시 공간적 변화를 파악할 수 있는 속도장 측정기법을 dynamic PIV 라고 한다. 따라서 복잡한 난류유동을 정확하게 측정하기 위한 dynamic PIV 시스템의 구축에는 고속카메라와 함께 짧은 노출시간 동안 충분한 강도의 빛을 공급할 수 있는 레이저 광원이 필수적이다.

그러나 기존의 연구들은 빠르게 움직이는 난류에디(eddy)거동을 잡을 수 있을 정도의 시간분해능과 공간분해능을 가지지 못하였다. 하지만 최근들어, 레이저 및 광학 장비의 발달로 디지털 방식으로 높은 해상도를 갖는 입자영상을 고속으로 취득하는 것이 가능해졌다. 따라서 입자영상으로부터 공간상의 상관관계를 구하는 일반적인 PIV 개념을 넘어서 높은 시간분해능으로 속도장의 시간변화를 측정할 수 있는 dynamic PIV 의 개발이 가능하게 되었다.

Dynamic PIV 시스템은 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 통계처리하는데 매우 많은 시간이 소요되므로 측정오차가 적고 빠르게 속도장 정보를 구할 수 있는 효율적인 알고리즘(algorithm)의 개발도 필요하다.

이와 같은 고속카메라와 고속레이저로 구성된

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
E-mail : sjlee@postech.ac.kr
Tel : (054)279-2169 Fax : (054)279-3199
* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

dynamic PIV 시스템은 다양한 유동에 적용되고 있다. Nishino & Takahashi(1)는 dynamic PIV 시스템을 충돌제트에 적용하여 2000fps 로 시간에 따른 순간 속도장의 변화를 측정하였으며 반경방향을 따른 속도분포의 주기적인 변화를 보여주었다. Tanahashi 등(2)은 난류 제트유동을 stereoscopic PIV 기법으로 고속 촬영하여(약 1800fps) 시간에 따른 3 차원 속도성분을 측정하였으며, 이를 DNS 결과와 비교하였다. Hayami & Aramaki(3)는 습윤기 유동을 약 10000fps 로 입자영상을 취득하고 시간에 따른 순간속도장 변화를 측정하였고 POD 분석을 통해 유동을 해석하였다.

이미 Dynamic PIV 속도장 측정과 관련하여 선진국에서는 측정 정확도를 향상시키고 초당 측정할 수 있는 속도장 개수를 늘리는 연구와 함께 복잡한 난류유동의 3 차원 계측도 시도하고 있다. 본 연구실에서는 리블렛 상부 유동 (Lee & Lee(4)), 다공펜스 유동 (Lee & Kim(5,6))과 원심압축기 내부유동 (Lee et. al.(7))등을 cinematic 방식의 PIV 기법을 이용하여 연구하였었다. 그러나 이들 연구에서는 충분한 광량을 확보하기 어려웠고 영상 취득속도가 그리 높지 않았다. 본 논문에서는 최근 구축한 dynamic PIV 시스템에 대해 설명하고자 한다.

2. Dynamic PIV 시스템

2.1 고속레이저

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

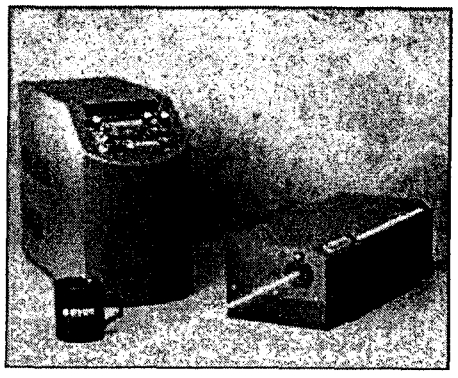
본 연구에서는 높은 반복률을 갖는 이중헤드 방식의 Nd:Yag 레이저(Pegasus)를 사용하였다. 이 레이저는 527nm 의 파장을 갖는 펄스광을 최대 20KHz 까지 발생시킬 수 있으며 2KHz 에서 펄스광은 10mJ 의 세기를 갖는다. 펄스 지속시간은 180ns 보다 짧아 일반 레이저보다 다소 긴듯하지만 180ns 도 매우 짧은 시간에 속하므로 초음속 유동이 아닌 고속 유동의 계측에는 문제가 없다. 또한 Q-switch 로 동기시키기 때문에 dynamic PIV 실험에서 원하는 순간에 작동시킬 수 있다는 장점이 있다. Fig. 1 (a)는 본 실험에 사용되어진 Pegasus 레이저의 사진이다.

2.2 고속카메라 및 동기신호

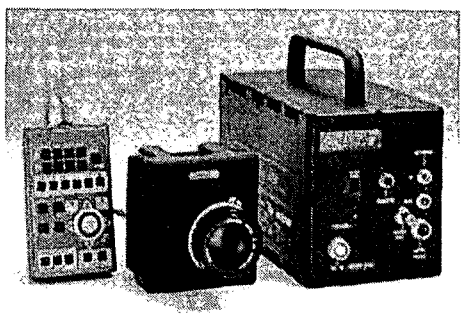
영상취득장치로는 디지털 고속 카메라를 사용하였다. CCD 방식의 센서 어레이로는 고해상도 영상을 고속으로 촬영하기가 기술적으로 어렵다. 최근 들어 CMOS 카메라 기술이 빠르게 발달함에 따라 CMOS 센서 어레이를 이용한 고해상도 고속카메라가 등장하고 있다. 아직은 CCD 방식에 비해 영상의 질이 다소 떨어지긴 하지만, 관련 기술의 발달로 그 차이가 크게 줄어들었다.

본 실험에 사용된 고속카메라(FASTCAM-ultra APX)를 Fig. 1 (b)에 나타내었으며, 최대 영상취득속도는 100Kfps 이며, 1K 1K pixels 해상도로 2Kfps 까지 영상을 취득할 수 있다.

또한 일반적인 PIV 계측에 비해 dynamic PIV 경우는 레이저와 카메라를 보다 정확히 동기시켜야 한다. 영상을 고속으로 취득할 경우, 높은 반복율의 레이저와 정확하게 동기시키기 위해 동기신호가 빠르고 정확해야 한다. 본 dynamic PIV 시스템을 구성하고 있는 동기장치에서 나오는 동기신호의 정확도는 약 5ps 이다.



(a) High-repetition pulse laser



(b) High-speed CMOS camera

Fig.1 Components of dynamic PIV system

2.3 제트 실험장치와 실험조건

먼저 구축된 dynamic PIV 시스템의 성능을 검증하기 위해 난류 제트유동에 적용하였다. Fig.2 은 실험장치의 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 4000fps 로 약 1 초간 취득하였다. 이때 동기장치를 사용하여 레이저와 카메라를 정확히 동기시켰다.

Fig. 3 은 실험에 사용된 수조와 원형 파이프 노즐의 모습을 보여주고 있다. 수조는 투명 아크릴로 제작하여 PIV 입자영상 취득이 용이하도록 하였다. 수조의 크기는 $0.62m^{L}\times0.40m^{W}\times0.42m^{H}$ 이고, 이송장치 위에 위치시켜 실험조건에 맞추어 이송하였다. 완전히 발달한 난류제트 유동을 형성하도록 내경이 D=9.6mm, 길이 L=1m 인 긴 아크릴 파이프를 사용하였으며, 수조 옆면에 파이프 노즐을 설치하여 제트가 수평방향으로 분사되도록 하였다. 제트 노즐에서의 출구속도는 U_0=0.32m/s 이며, 파이프 내경(D)을 기준으로 한 레이놀즈수(Re_D)는 약 3×10^3 이다. 또한 관측창의 크기는 폭 156mm (약 16D), 높이 78mm (약 8D)로 직사각형이다.

작동 유체로는 물을 사용하였으며, 항온조를 사용하여 실험하는 동안 물의 온도를 20°C 로 일정하게 유지하였다. 유량은 rotameter 를 사용하여 측정하였으며 평균 입자직경이 10μm 인 은으로 코팅된 속이 빈 유리구슬(hollow sphere glass)을 추적입자로 사용하였다. PIV 실험시 제트 경계에서 발생하는 에러를 최소화하기 위하여 추적입자를 수조와 항온조에 균일한 입자농도로 주입하였다.

3. 순간속도장 결과 및 고찰

본 실험에서는 제트 유동의 입자영상을 4000fps 로 취득한 후, 시간에 따른 순간 속도장 변화를 구하고 결과 중 일부를 Fig.4에 나타내었다.

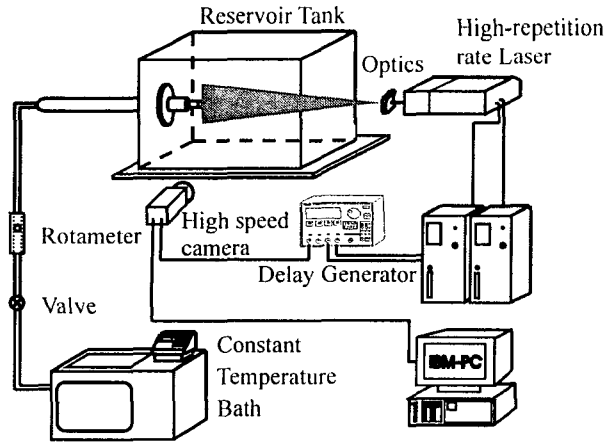


Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

2msec 시간간격으로 변화하는 속도장 결과를 살펴보면 X=1D 이후 구간에서 주유동이 위 아래 방향으로 흔들리면서 나아가는 복잡한 난류전단흐름의 유동특성을 보여주고 있다. 또한 속도장 결과들을 비교하여 보면 약 τ=8msec 시간간격으로 비슷한 유동패턴을 보여주고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 4(c)와 (g)를 보면 노즐로부터 약 X=4D 하류위치에서 유동이 크게 섭동(fluctuation)하는 현상을 관찰할 수 있고 다른 위치에서도 유사한 유동패턴이 나타나고 있다.

Dynamic PIV 의 경우, 속도장의 공간분포를 측정하는 장점 이외에 열선유속계나 LDV 처럼 속도신호의 시계열(time series) 분석도 가능하다. 따라서 dynamic PIV 측정 결과로부터 임의 위치에서의 속도값을 추출하여 각 속도성분의 시계열 신호를 얻을 수 있다. Fig. 5 는 X=6D, Y=1D 위치에서 약 0.2sec 동안 주유동 방향 속도성분(U)와 반경방향 속도성분(V)의 변화를 시간의 함수로 나타낸 것이다. 속도신호를 주파수 분석한 결과 주유동 방향 속도성분은 약 8msec 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.

4. 결 론

시간과 공간에 따른 속도장 변화를 정확히 측정할 수 있는 dynamic PIV 기법은 난류유동 해석에 있어서 매우 중요한 의미를 지닌다. 본 실험에서는 dynamic PIV 시스템을 구축하고 이를 난류제트 유동에 적용하여 그 성능을 평가하였다.

Dynamic PIV를 이용한 속도장을 측정하여 가시화하였다. 또한 4000fps로 입자영상을 취득하여 구

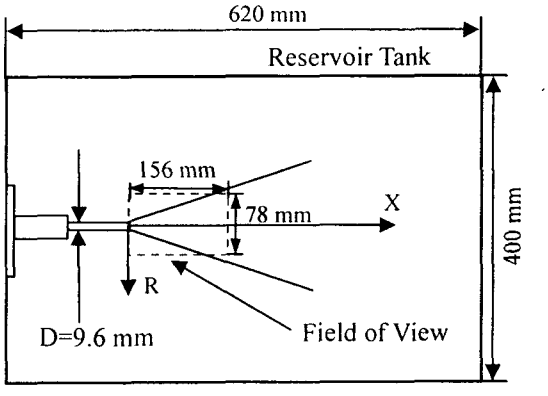


Fig.4 Measurement plane and coordinate

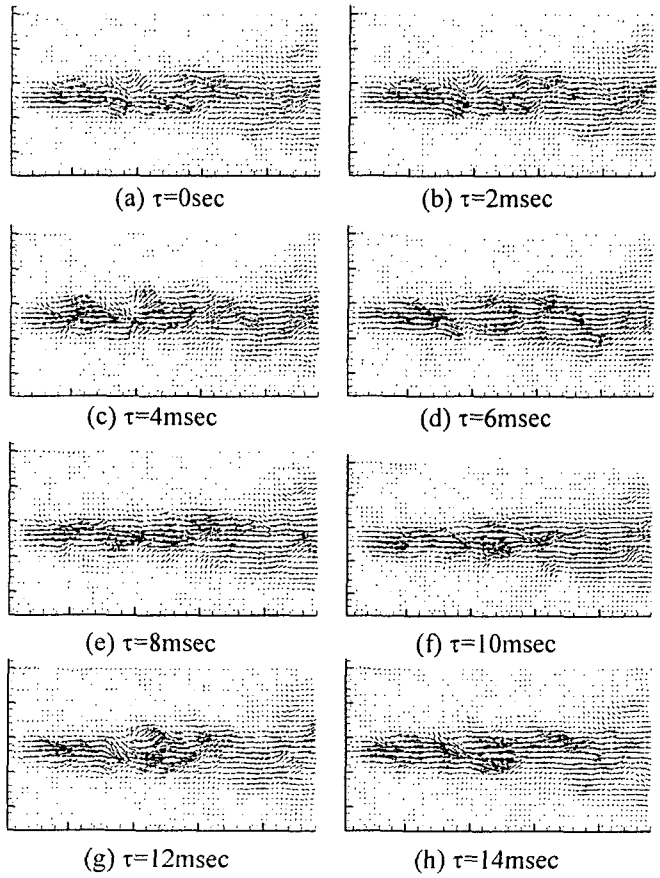


Fig.4 Instantaneous velocity vector fields showing jet evolution

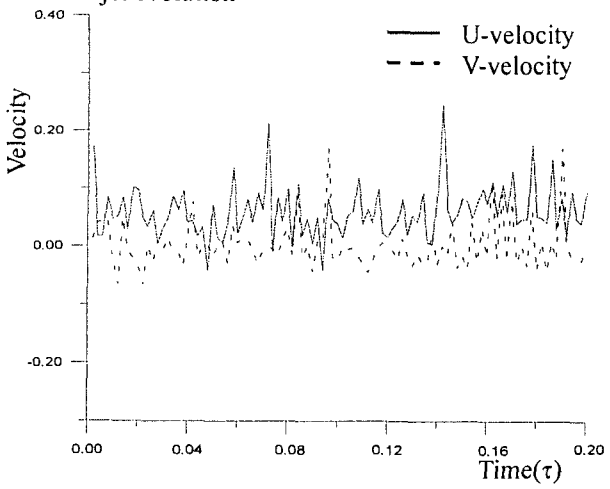


Fig.5 Velocity variation with time variation

한 순간속도장 결과는 시간에 따라 변화하는 유동 구조의 진행 과정을 잘 보여주고 있다. 그리고 실험결과로부터 임의 위치에서 추출한 속도의 시계열신호는 속도성분의 시간적 변화에 대한 정보를 제공하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1) Nishino, K. and Takahashi, T., 2005, "Measurement of Axisymmetric Impinging Jet by Using Dynamic PIV," *可視化情報(Japanese)*, Vol. 25, pp.25~30.
2) Tanahashi, M., Choi, G.M., Itakura, M. and Miyauchi, T., 2005, "Turbulence Measurements by Time-Resolved Stereoscopic PIV," *可視化情報(Japanese)*, Vol. 25, pp.8~13.
3) Hayami, H. and Aramaki, S., 2005, "Dynamic PIV for Fluid Flow Measurement," *可視化情報(Japanese)*, Vol. 25, pp.20~24.
4) Lee, S.J. and Lee, S.H., 2000, "Flow Field Analysis of Turbulent Boundary Layer over a Ribleted Surface," *Exp. Fluids*, Vol. 27, in press.
5) 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.
6) 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.
7) 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.
8) Lee, S.J., 2005, "PIV Velocity Field Measurement Techniques - Theory and Practice", Dept. of Mech. Eng., POSTECH, pp.253~274