

PTV-AOM을 이용한 속도계측 기법의 개발에 관한 연구

조대환* · 김진구** · 이영호***

A Study on Development of Velocity Measuring Method by PTV-AOM

D.H.Cho · J.G.Kim · Y.H.Lee

Key words : AOM(Acousto Optical Modulator), PTV(입자추적영상유속계), Correlation Coefficient(상관계수), Image Processing(영상처리), Two-Frame(2프레임)

Abstract

Instantaneous velocity distribution within coaxial circular pipe for measurement velocity of high speed is acquired simultaneously by applying the 2-dimensional PTV system consisting of a pulse generator(AOM:Acousto-Optical Modulator), a continuous-output laser and a PC image grabber together with experimental apparatus. The basic mechanism of AOM and vector identification method and performance-related image processing techniques are discussed. Representative measuring regions 90x90mm are selected and instantaneous vectors are represented and fully developed turbulent flow of maximum velocity up to about 1.0 m/sec is obtained.

1. 서 론

유동장의 속도를 계측하기 위한 방법으로는 여러 가지 계측기법이 제안되어 사용되고 있으나 대부분이 계측기법의 고유의 제한으로 인하여 점계측의 한계를 갖고 있다. 가시화는 흐름 중에 추적입자를 넣고 조명을 가하여 카메라 등의 영상매체에 의해 유체역학적인 특성을 고찰하는 작업으로 지금까지 다양한 기법¹⁻²⁾이 제시되었고 그 중

PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계, 이하에서 PIV)^{3,6)}는 전술한 가시화기법과 컴퓨터의 영상처리기법을 결합하여 유동장 전 영역의 순시속도벡터를 동시에 정량적으로 구할 수 있는 계측기법이다. Adrian³⁾은 추적입자의 밀도에 따라 LSV, 고밀도(high-image density)PIV 및 저밀도(low-image density)PIV로 분류하였다. 이는 검사셀에 존재하는 입자의 영상 개수를 나타내는 영상밀도의 개념을 적용하여 정의된 것이며 저영

* 한국해양대학교 대학원 (원고접수일 : 97년 11월)

** (사)한국선급

*** 한국해양대학교 기계·냉동·자동차공학부

상밀도 PIV를 입자추적 PIV를 대표하여 PTV (Particle Tracking Velocimetry, 입자추적유속계, 이하에서 PTV)라는 명칭으로 사용하고 있다.

PTV에서 속도를 구하기 위한 기본적인 개념은 질점역학에서와 마찬가지로 입자의 입자운동에 요하는 시간간격 및 벡터 변위사이의 관계로부터 구해진다. 이 때의 전체조건으로서 미소시간 동안 개개의 유체입자 또는 미소면적을 갖는 제어체적 내의 다수의 유체입자군은 등속도 직선운동을 하여야 하며 PTV에서는 유체입자를 대신한 다양한 종류의 추적입자가 이 조건을 만족하여야 한다. 그리고 입자의 인식 및 속도벡터를 추출하기 위한 연산기능을 컴퓨터를 이용하여 효율적으로 행하고 있으며 최근에는 개인용 컴퓨터의 성능이 비약적으로 발전하여 많은 적용례를 보이고 있을 뿐만 아니라 비정상, 동시다점계측 및 유동장의 재현성 확보가 원리적으로 가능함으로서 CFD에 필적할 수 있는 유일한 실험기법으로 평가되고 있다. 그러나 고속유동장에서 이동하는 추적입자의 변위가 매우 클 경우에는 직선 등속도 조건을 만족하기 위해서는 짧은 시간간격이 필요하다. 이를 해결하는 방법에는 PTV의 해석에 적합할 만큼 시공간적인 해상도를 제공할 수 있는 고속도카메라를 사용하거나 고출력 펄스레이저(Keane et.al.)⁷⁾ 또는 기계식의 회전 초파를 이용하여 영상을 기록할 때에 필요한 조명을 제어하여 매우 짧은 시간간격을 얻는 방법 등이 있으나 고유의 단점이 상존하고 있다. 이러한 단점을 원리적으로 극복할 수 있는 방법으로서 광음향의 특성을 이용한 광음향변조기(acousto-optical modulator, 이하 AOM으로 부름)가 있다. 이것은 레이저에서 나온 직진 광에 대하여 음향격자(acoustical grating)를 직각방향으로 고주파수로 진동시킬 때에 발생하는 음파의 회절작용에 의하여 레이저광의 진행각도가 미소하게 변하는 성질을 이용한 것으로 외부에서의 인가신호에 대하여 빛의 경로가 바뀌므로 이 신호를 영상기록장치와 동기를 이루도록 하여 보다 정밀한 제어가 가능하다.

본 연구에서는 AOM을 이용한 고속유동장의 속도를 계측하기 위하여 PTV를 이용한 속도계측기법을 개발하고 이를 이중원관의 하류부에 혼합흐

름을 대상으로 속도를 계측 하였다. 그 결과 이중원관에서 제트류의 출구 측으로부터 약 180mm 떨어진 곳에 위치한 계측영역 90×90mm에서 1.0m/sec 전후의 최대속도를 얻을 수 있었다.

2. 가시화 실험

그림1은 본 연구에서 채택한 실험장치의 구성도이다. 가로, 세로, 높이가 각각 1m인 입방체의 형상을 갖는 물탱크를 두께 20mm인 투명 아크릴로 제작하였다. 노즐은 내경 30mm의 스테인레스관이며 외통은 내경 90mm의 투명 아크릴관으로 제작하였다. 작동 유체는 상온의 수도수이며 유량은 디지털 유량계에 의해 계측하였다.

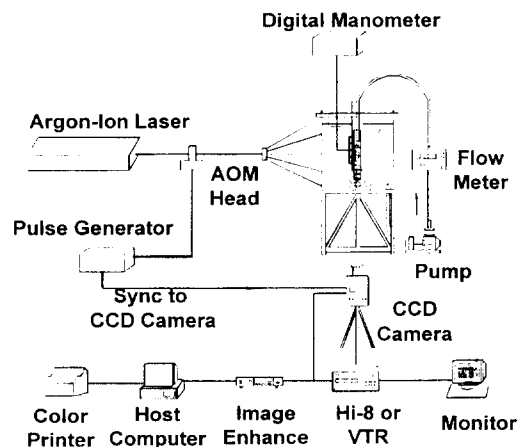


Fig. 1. Schematic arrangement of PIV

조명용 레이저로서는 5W출력의 수냉식 연속광 Argon-Ion레이저를 사용하였고 원통형렌즈를 설치하여 2차원의 시이트라이트를 계측단면에 조사하여 가시화 하였다. 유동장 기록은 CCD카메라(XC77RR, B&W, HxV = 768x493pixel)와 AOM(Acoustio Optical Modulator, Kanomax, set time:10μsec)를 사용하였으며 설정된 펄스간격에 따라 Hi-8mm 카메라에 연속으로 기록되도록 하였다.

그림2는 이중원관에서의 자세한 계측영역의 위치 및 크기를 나타내고 있다. 전체 길이는 427mm

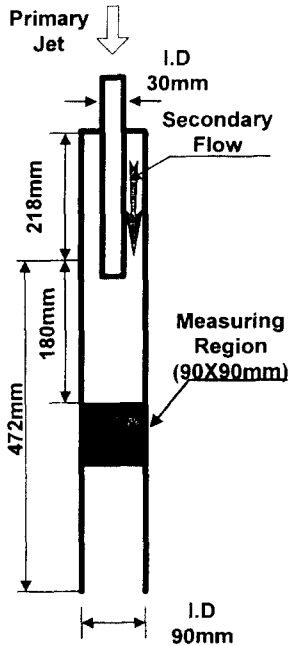
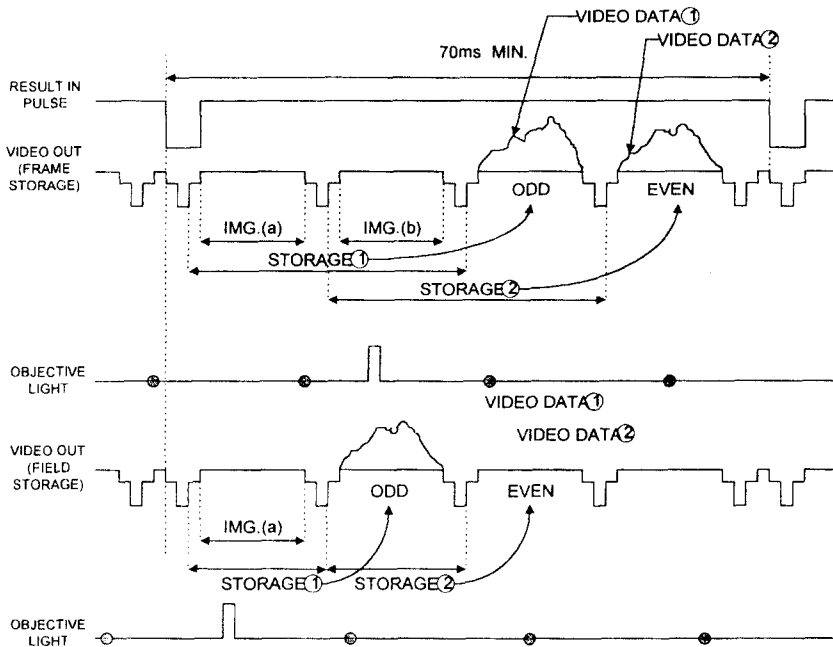


Fig. 2. Arrangement of measuring region

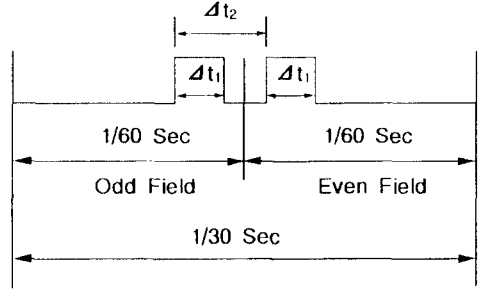
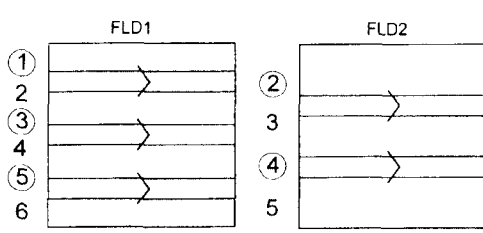
이때 계측영역은 가로세로가 90x90mm의 정방형이다. 유동장의 가시화를 위해서는 추종성이 우수하고 빛의 산란성이 좋은 입자가 필요하다. 입자의 크기는 계측유동장의 공간스케일을 충분히 재현할 수 있도록 작은 것이 이론적으로 바람직하나 입자가 작을수록 충분한 입자산란광을 얻기 위하여 보다 강력한 조명용 광원이 필요하다. 본 실험에서 채택한 입자는 비중이 1.02전후인 PVC 입자로서 주입 전에 작은 비이커를 이용하여 수도수와 잘 섞이도록 교반하고 정전기의 작용을 방지하기 위하여 가정용 세제를 극소량 첨가하여 사용하였다. 유동장에 주입된 입자는 순환유체에 섞이어 곧바로 내부수조의 전 영역에 균일하게 분포되며 이들 중 계측영역으로 설정된 부분에서는 2차원의 레이저 시이트라이트에 의해 입자의 표면에서 산란효과에 의해 매우 밝은 빛을 반사하게 된다.

그림3은 비디오방식의 영상기록장치에서의 영상구분과 펄스조명관계를 나타내고 있다. 그림3은 AOM에 의한 PTV시스템에서 프레임방식과 필



(a) Relation between storage and video output

Fig. 3. Timing chart of AOM



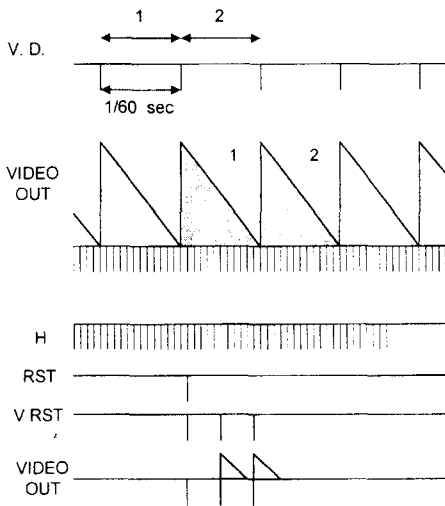
$$\Delta t_1 = 0.5\text{ms} \quad \Delta t_2 = 1.2\text{ms}$$

Fig.4 Pulse arrangement of AOM

스가 공급되어 CCD카메라의 한 프레임의 영상에는 홀수 및 짝수필드에서의 펄스조명에 따른 입자의 영상이 기록된다. 이 영상은 연속적으로 Hi-8mm 캠코오더에 녹화하여 PTV해석에 사용하였다.

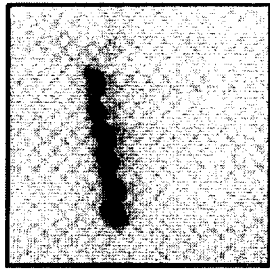
그림4는 본 연구에서 유동장의 특성을 고려하여 AOM 컨트롤러에 설정한 두 펄스간격을 나타내고 있다. 펄스 폭을 조절하게 되면 광량이 대소가 결정되게 된다. 실험에서는 Δt_1 을 0.5msec로 하였으며 속도벡터를 구하기 위한 시간간격인 Δt_2 는 1.2 msec로 하였다. CCD카메라는 필드축적(field integration) 및 비월주사(interlace scanning)방식으로 설정하였고 카메라의 조리개는 최대 값인 1.4로 고정하였다. AOM컨트롤러는 이와 같이 설정된 펄스간격 및 펄스폭으로 레이저 출력부 전방에 위치한 AOM 유니트에 인가된 100MHz의 높은 주파수의 신호를 이용하여 레이저에서 출력된 직진광을 미소각도(1-2도)로 편향시킨다. 이 때에 밝기의 강도가 약 50%정도로 감소된 제1차(first-order)의 편향광과 편향각이 더 큰 고차의 편향광이 동시에 방출되며 실험에서는 조리개를 이용하여 제1차 편향 광만을 원통형렌즈를 통과하게 하여 2차원의 시이트 광을 계속영역에 비추었다.

그림5는 PTV 시스템의 데이터 신뢰성을 확인하기 위한 시간간격 및 성능을 예측하기 위해 예비적으로 원판디스크가 시계방향으로 회전할 때 AOM의 설정치를 조작하여 두 펄스를 발생시킬 경우를 촬영한 결과이다. 그림5(c)는 비디오 카메라

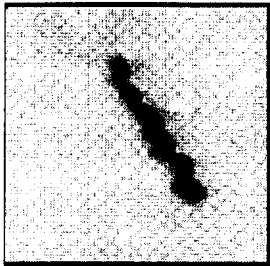


(b) Trigger and field storage signal
Fig. 3. Timing chart of AOM

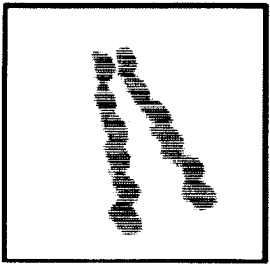
드방식의 두 가지 경우에 대하여 시간에 따른 저장간격과 비월주사의 개념적인 내용을 보여주고 있다. 프레임방식은 인접한 두 개의 필드를 합하여 저장되며 필드기준의 경우에는 1/60초의 시간간격으로 독립된 영상이 저장되므로 AOM을 이용하여 고속유동을 계측하고자 하는 경우 필드방식보다 유용함을 알 수 있다. 비월주사방식은 1초간 30프레임의 연속화면으로 구성되어 있고 이 영상은 우수필드와 기수필드로 분리된다. 따라서 프레임간의 시간간격은 1/30초이며 짝수필드와 홀수필드의 시간간격은 1/60초이다. AOM에서 각 필드의 수직동기신호(V.D.)를 기준으로 1/30초간격의 신호가 펄스의 형태로 발생한다. 따라서 홀수필드와 짝수필드에는 AOM에서 교호로 펄



(a) Odd field



(b) Even field



(c) Raw Image

Fig.5 Original image by AOM(2 pulse, field)

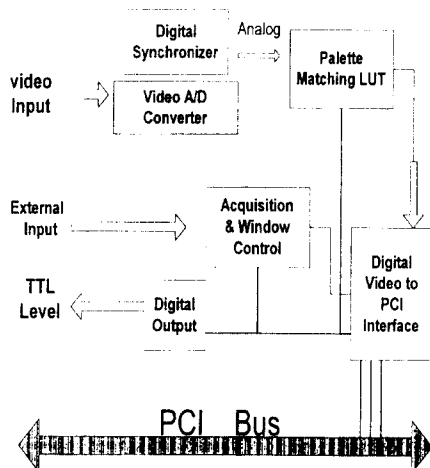


Fig.6 Block diagram of imageboard

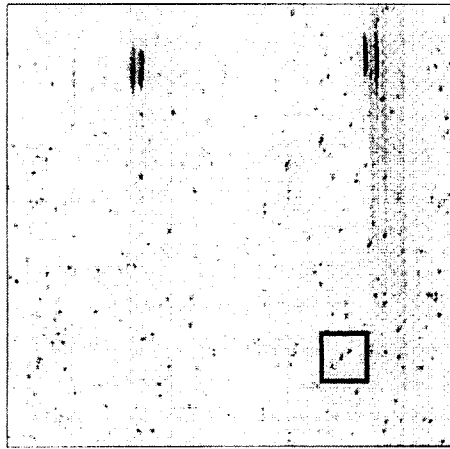
라에 녹화되어 이미지보드에서 A/D 변환된 원래의 영상이며 이를 프로그램 상에서 각 필드별로 분리하여 비월주사에 따른 공백을 보간 하여 보간한 결과 영상이 그림5(a)와 그림5(b)이다. CCD카메라로 촬영된 영상은 Hi-8mm캠코더에 기록되고 저장된 유동장은 다시 재생과정을 거쳐 영상처리장치로 입력된다.

그림6은 영상처리장치로서는 범용 PC에 내장 가능한 영상처리장치(이미지보드, Data Translation사, DT3155, H×V=640×480, 흑백)의 개략도를 나타내고 있다. 촬영된 영상은 한 픽셀당 256단계의 밝기정보(계조치, grey level)를 갖고 있으며 이미지보드에 의해 각 픽셀은 2차원의 위치정보와 이들 위치에서의 계조치의 공간분포값의 정보를 갖는 파일로 변환된다. 배경영상 제거에 의한 잡음처리는 입자주입 전 실제 유동장을 이용해 단순가감하는 방법이 이상적이나 본 실험에서는 단계별로 유동장의 조명강도가 변화하고 시행착오적으로 펄스간격과 폭을 조정하므로 유용하지 못하다고 판단하였다. 100개의 원시영상에 계조치를 산술 평균한 다음 실제로 처리하고자 하는 순간유동장으로부터 감산하는 방법을 택하고 움직이지 않는 부분을 제거하여 영상처리에 불필요한 부분을 최소화하였다. 이 영상에 대하여 윤곽선 추적을 통하여 단일 입자를 검출하고 입자의 중심위치를 구하였다. 이때의 입자의 좌표는 유동장을 촬영 할 때 정확히 수평이 유지되지 않아 일정 각도로 회전되어 있는 상태이다. 따라서 수직이 되는 기준좌표를 구하여 이를 보정하여야 한다. 실험결과영상을 처리한 도심좌표는 아핀변환을 통하여 회전보정 하였다.

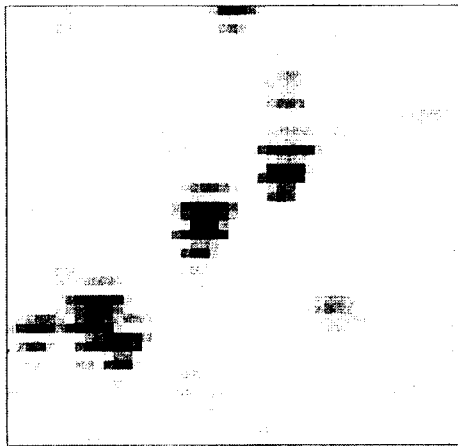
그림7은 가시화 실험에서 얻어진 영상과 이를 확대한 영상을 보이고 있다.

3. 속도계측

전처리과정 다음으로 이들 정보를 이용하여 속도벡터를 추출하는 작업(identification)이 필요하게 된다. 속도벡터의 추출을 위하여 홀수파일드와 짝수파일드의 영상에서 도심좌표를 구하고 이들의 상관관계를 이용하는 도심좌표 상호상관법을



(a) Original image on imageboard



(b) Magnified particle image

Fig.7 Image of flow field

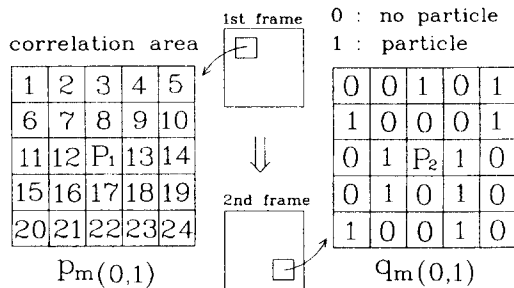


Fig.8 Two-frame identification

택하였다.

그림8은 이 원리를 도식적으로 보여주고 있다.

미소시간 간격의 2프레임을 데이터 처리하여 동일 입자를 확인하는 방식에는 몇 가지의 기법이 제안되어 있으며, 어느 경우에도 입자의 분포특성에 대한 상관계수를 구하여 동일입자를 판별한다.

즉, 1프레임에 존재하는 입자가 이동할 수 있는 최대거리의 중심을 제 2프레임에 설정하고, 각각의 입자 중심을 중앙으로 하여 상관값의 계산영역을 다시 설정한다. 입자의 중심점이 위치하는 픽셀은 1의 값을, 존재하지 않는 픽셀은 0의 값을 부여하고 같은 크기를 갖는 양쪽의 상관값 계산 영역의 대응위치에서 이 값들을 곱한다. 따라서 대응하는 각각의 배열에서 1의 값을 갖는 경우에만 (1 x 1)=1의 상관값을 갖게 된다. 이와 같은 조작을 상관영역전체에 걸쳐 행하여 그 합을 구하고 아래의 식을 평가함수로 그 값이 최대가 되는 입자위치를 동일입자의 이동위치로 결정한다.

$$C = \sum_{m=1}^{24} p_m \times q_m \quad (1)$$

이 경우에 제2프레임으로의 최대이동거리, 상관값 계산영역 등은 유동장의 여러 조건에 따라 최적 값을 부여할 수 있다. 다음으로, 부적합한 상관값에 의한 이상치를 통계적인 기법 또는 대화형의 화면처리로 제거하여 유효한 동일입자만을 남긴다.

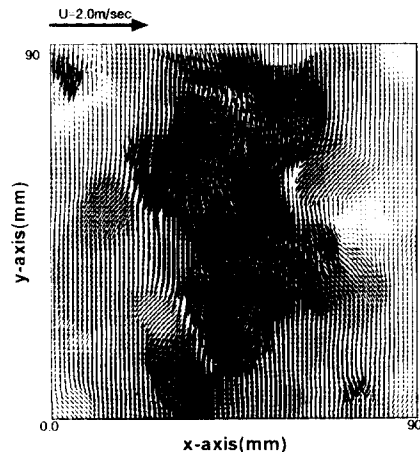


Fig.9 Instantaneous velocity vector by PIV-AOM

그림9는 그림8의 영상을 PTV에 의해 계측한 노즐하부 180mm 위치에서의 순시속도벡터의 분포이다. 1차노즐구동류의 직진성이 크게 약화되어 약 1.0m/sec전후의 속도를 보이고 있으며 흡입되는 2차류의 성분과 혼합되는 유동혼합현상이 나타나고 있다. 전단혼합층은 축을 중심으로 약간 비대칭의 형상을 유지하고 있으며 속도구배도 비교적 크게 나타나고 있다. 또한 노즐 구동류로의 엔트레인먼트에 의한 주기적인 전단혼합와류가 존재함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 광음향의 특성을 이용한 AOM을 이용하여 고속유동장에서 이동 변위가 매우 큰 추적입자에 대해 짧은 시간 간격으로 영상을 기록하고 이를 PTV시스템에 적용하여 전유동장에 대해 순간의 속도를 계측하였다. 대상유동장은 이중원관의 혼합흐름이며 계측영역은 노즐 출구 축으로부터 약 180mm 떨어진 곳에 위치한 90×90mm의 정방형이다. 계측결과 최대속도는 1.0m/sec 전후였으며 얻어진 속도벡터는 유동패턴을 잘 보여 주었다.

후기 : 실험과 자료정리를 도와준 한국해양대학교 유동정보연구실의 서민식씨에게 사의를 표합니다.

참고문헌

1. Visualization Society of Japan, Handbook of Flow Visualization, Asakura Book Co. 1986 (Japanese).
2. W,J,Yang, Handbook of Flow Visualization, Hemisphere Pub. Co. 1989.
3. R.J.Adrian, "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics," Annu. Rev. Fluid Mech., pp.261-304, 1991
4. P.Buchhave, "Particle Image Velocimetry-Status and Trends," Exp.Themal and Fluid Sci. Vol.5, pp.586-604, 1992
5. C.Gray, "The Evolution of Particle Image Velocimetry," IMechE Workshop-Optical Method & Data Processing in Heat and Fluid Flow, pp.19-36, 1992
6. D.Rockwell, et.al., "High Image-Density Particle Image Velocimetry Using Laser Scanning Techniques," Exp. in Fluids Vol.14, pp.181-192, 1993
7. R.D.Keane and R.J.Adrian, "Optimization of Particle Image Velocimeters. Part 1 : Double Pulsed Systems," Meas. Sci. Technol. Vol.1, pp.1202-1215, 1990