⊙ 速報研究論文

일반 광원을 이용한 PIV의 속도 측정

이 교 태*

Velocity Measurement of PIV Using a General Light Source

G. T. Lee*

Key words : PIV(Particle Image Velocimetry : 입자영상유속계), Image processing(영상처리), Cavity Flow(캐비티 유동), Particle Tracking(입자추적), General Light Source(일반 광원)

Abstract

A particle image velocimetry is the representative technique for measuring flow velocities at whole field simultaneously. The present study adopted the PTV method for the velocity acquisition in a square enclosure with initially isothermal fluid by using a general lamp-based sheet light source. The enclosure was composed of hot and cold vertical wall and was confined by two horizontal adiabatic walls. The drift velocities were measured, and the drift was visualized by PTV for a rayleigh number of 5.28×10^{8}. Obtained instant simultaneous velocity vectors show flow pattern and the result of horizontal velocity profile agree well with the numerical result.

Ⅰ. 서 론

유동장의 속도를 계측하기 위한 장치로서의 PIV(Particle Image Velocimetry)[1~3]는 1980년대 후반부터 LDV의 단점을 보완하기 위하여 유체역학의 여러 분야에서 적용되기 시작하였다. PIV는 내부 유동장을 훼손하지 않으면서도 동시에 전 영역의 유동속도를 정량적으로 측정할 수 있기 때문에 비정상유동, 이상유동해석 등에 유용한 계측기법으로 주목을 받고 있으며 많은 분야에 적용[4~8]이 활발히 진행되고 있다.

PIV는 영상밀도에 따라 PTV(저영상 밀도 : Particle Tracking Velocimetry)와 PIV(고영상밀도)로 분류[9]되며, 입자분포 농도에 있어서 입자의 겹침 정도(Source Density)에 따라 발생되는 스펙클(Speckle)[10]을 이용하여 속도를 계측하는 LSV(Laser Speckle Velocimetry)등의 기법도 영상을 이용한 속도 계측법이라는 점에서 PIV로 분류된다. 그러나 이러한 PIV를 적용하는 연구에 있어서 가장 큰 문제가 되는 것은 실험에 필요한 고

* 순천제일대학 차량기계과(원고접수일 : 99년 5월)
본 연구는 1998학년도 순천제일대학 교내학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

가의 실험장비이다. 특히 레이저 광원은 PIV시스템에서 가격 비중이 가장 큰 장비이다. 펄스레이저보다 비교적 가격이 낮은 연속광 레이저인 아르곤 이온레이저의 경우에도 독립 전원이 필요할 뿐만 아니라 핵심부품인 플라즈마 튜브 또한 소모품으로 일정시간을 이용 후 교체해야 하므로 장비를 유지하기 위한 제반 경비가 많이 소요되게 된다.

Cho[11]는 500W의 수은등을 이용하여 채널 캐비티의 내부유동속도를 PTV기법으로 계측하고 내부의 유동특성을 고찰하였다. 이때의 광원은 연속광이며 시이트 라이트의 폭은 5mm전후이다. 그러나 수은등에서 발생하는 열을 고려하지 않은 점이 지적된다.

Ban[12]은 좌우 면에 온도차가 있는 밀폐공간을 대상으로 사진기 후래쉬를 변형 설계 제작한 스트로보광원을 이용하여 반점사진을 기록하고 이를 판독하여 난류유동 속도측정을 하였다. 그러나 반점사진을 판독하는 과정에서는 출력이 낮은 He-Ne레이저(5mW)를 이용하였다.

가시화기법을 이용하여 신뢰성 있는 데이터를 얻기 위해서는 우선적으로 대상유동장의 영상을 선명하게 기록하는 것이 가장 중요하기 때문에 광원의 규격이 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 이 연구에서는 이러한 점에 착안하여 고속 유동장이 아닌 경우에 쉽게 이용할 수 있는 일반광원[12]을 설계 제작하여 PIV에 적용하기 위하여 대상 유동장이 상하면은 단열이고 좌우 면에 온도차가 있는 정방형 밀폐공간이며 Prandtl수 4.53이고 Rayleigh 수 5.28×10^8의 경우에 PTV 계측 실험결과와 수치해석결과를 비교 분석하고자 한다.

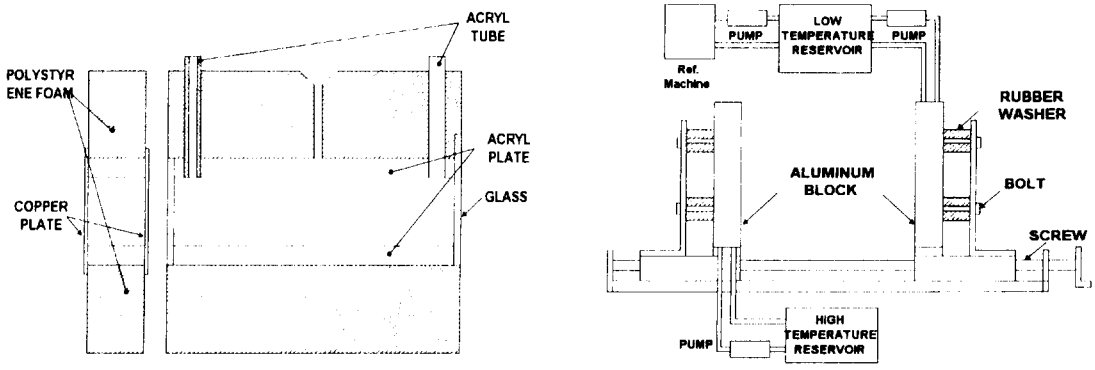
Ⅱ. 실험 및 방법

Fig. 1(a)은 본 연구에서 사용된 시험체적의 개략도로 100×100×300mm이며, 양쪽의 끝단에는 물주입구를 한 개씩 부착하였다. 열원이 접촉하는 좌우 벽면은 0.5mm의 동판을 이용하여 열전도가 잘 되도록 하였고, 내부는 광원의 입사 면과 촬영 단면을 제외한 모든 면을 무광택 흑색도료(3M Nextel 101−C10)를 칠하여 산란광의 영향을 최소화하였으며 상하면은 단열 처리하였다. 상면은 5mm의 폭을 갖는 "V"형의 홈을 가공하여 광원의 2차원 성을 최대로 유지하였다.

Fig. 1(b)는 온도차를 유지시키기 위해 설치된 냉동장치와 가열장치의 배치를 개략적으로 나타내고 있다. 알루미늄 불록은 두께 38mm에 10×33mm인 홈이 10mm간격으로 가공되었고, 온수와 냉수는 강제적으로 순환되었다.

Fig. 2는 이 연구에서 사용된 일반광원의 제어회로이다. 배압 정류회로를 채택하였고 가변저항(VR)으로 노출시간을 조절할 수 있도록 설계 제작하였다.

가시화실험을 위해서는 조명과 영상기록장치가 필요하다. 조명은 유동장이 충분히 발달하여 정상상태에 도달하였을 때 유동장의 상부에 자체 제작한 일반광원에 원통형 렌즈를 부착하여 얇은 두께



(a) Test section. (b) Experimental setup.

Fig. 1. Schematic Diagram of Experimental Apparatus.

(약 3mm의 전후)의 시이트 라이트를 계측단면에 조사하고 Hi－8mm카메라(Sony, Model : Pro5000)에 기록하였다. 유동장의 기록 및 재생은 NTSC방식이며 프레임간의 시간간격 Δt는 1/30초이다.

Fig. 3은 영상을 디지털방식으로 변환하기 위한 이미지 보오드(Data Translation사 DT3155, 640×480 픽셀, B&W)의 구성도를 보여주고 있다. 이미지 보오드는 내부의 LUT와 주 처리 컴퓨터 집

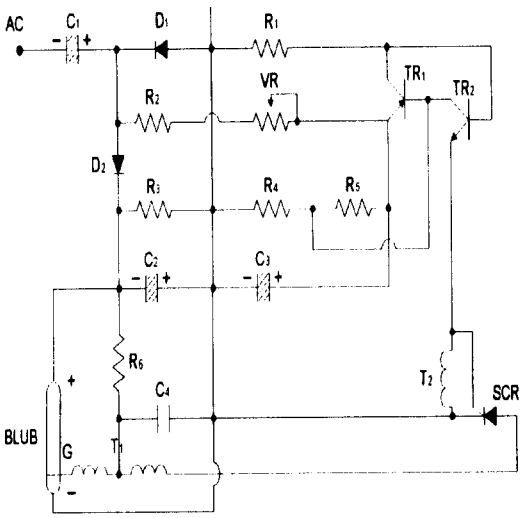


Fig. 2 Setup for power supply circuit.

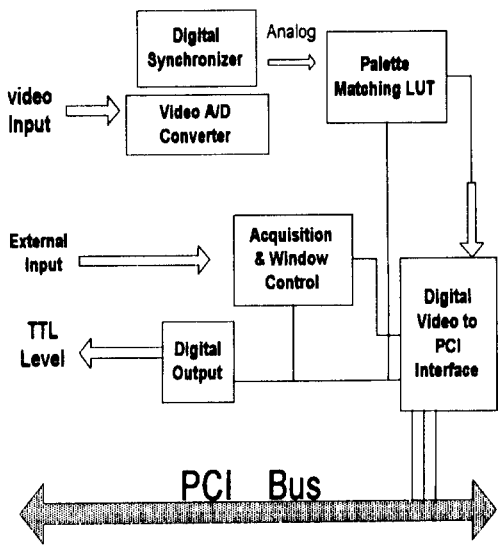


Fig. 3. Configuration of Image Board.

속 인터페이스 그리고 입출력을 위한 아날로그/디지털 및 디지털/아날로그 변환기로 구성되며 그 외에 외부동기신호 입력부분 등이 있다. 입력 영상은 고속 아날로그/디지털 변환기를 거쳐 640×480×8비트의 디지털영상으로 변환되며, 이 디지털 영상신호는 주 처리 컴퓨터의 RAM에 저장된다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

Fig. 4는 유동장이 충분히 발달하였을 때 직경 40 m 전후의 Pliolite 구형입자를 유동장에 주입하여 가시화 한 영상을 이미지 보오드에서 디지털 농담영상으로 변환한 결과이다. 속도계측의 알고리즘은 계측영역에서 촬영된 영상을 이용하여 속도분포를 구하도록 되어있으므로 이러한 부분은 하드웨어적 제한을 받게 된다. 일반광의 경우 레이저보다 직진 성이 떨어지므로 바닥 면에 근접할수록 입자의 선명도가 낮아지고 있다.

Fig. 5는 31×31픽셀의 영상을 확대한 것으로 입자의 밝기정보를 개괄적으로 볼 수 있다. 유동장의 속도를 계측하기 위해서는 미소시간간격 동안에 이동한 다수의 입자의 이동 변위를 자동적으로 추적하여야 한다. 미소시간 간격의 2프레임에 대해 입자의 분포 특성에 대한 상관계수를 구하여 동일입자를 판별한다. 단일입자를 구별하고 중심위치를 판별하기 위해서는 해상도에 따른 변환이 필요

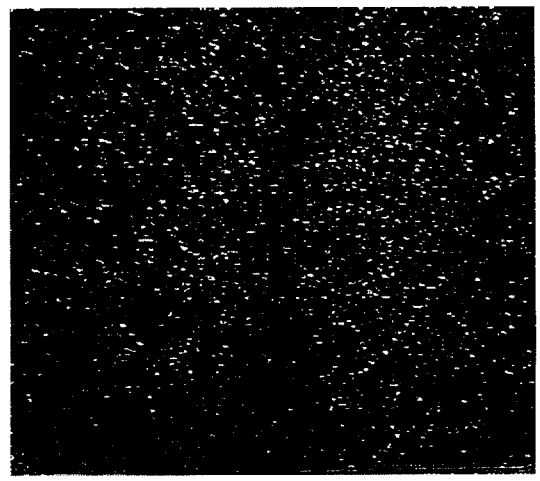


Fig. 4 Original Image.

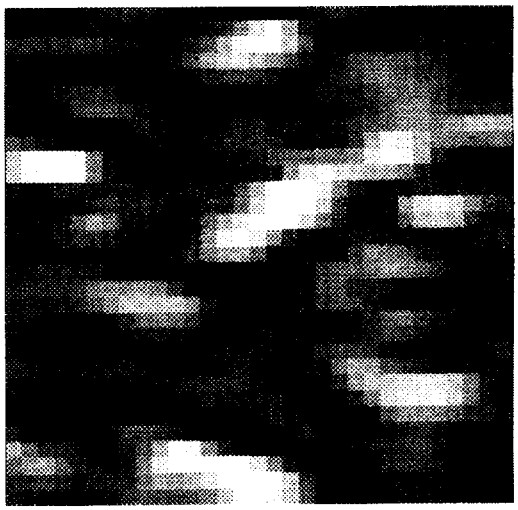


Fig. 5 Magnified Particle Image(31×31pixel).

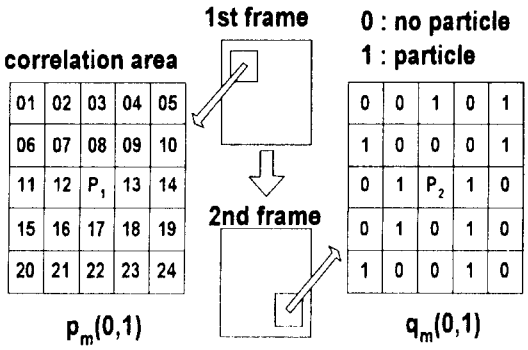


Fig. 6 PTV Identification.

하다. 이것은 영상처리에 의해 입자의 중심위치를 얻기 위해서는 모니터상의 픽셀위치로 변환되어야 하기 때문이다. 이 연구에서는 비디오입력장치의 해상도와 VGA모니터 해상도의 격차를 종횡비(Aspect ratio)를 보정하는 방식으로 처리하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 이 연구에서 채택한 동일입자의 확인방법인 2프레임의 도심좌표 상호상관법의 원리와 전체 입자추적과정을 도시하고 있다. 기본원리는 입자의 분포특성에 대한 상관계수를 구하여 동일입자를 판별하는 방법이다. 우선 제1프레임과 제2프레임의 모든 입자도심좌표에 1의 값을 부여한다. 이 때에 입자도심에는 큰 값을, 멀리 떨어질수록 작은 값을 부여하여 가중계수를 채택할 수도 있다. 다음으로 제1프레임에 존재하는 입자

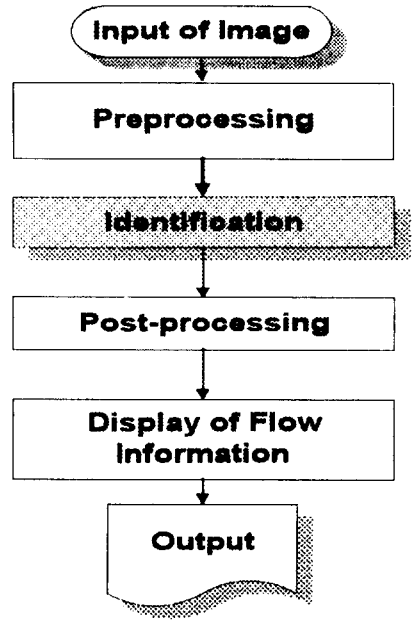


Fig. 7 Flowchart of PTV Procession.

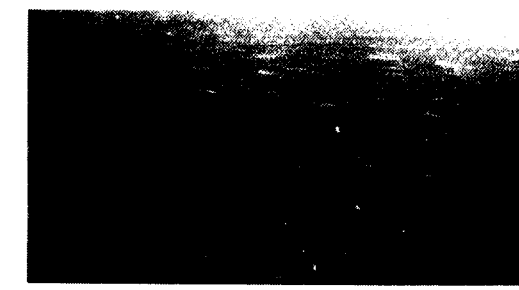


Fig. 8 Photo of Flow visualization.

가 이동할 수 있는 최대거리위치를 제2프레임에 설정한다. 각각의 입자위치를 중심으로 하여 상관계수의 계산영역을 설정한다. 같은 크기를 갖는 양쪽영역의 대응위치에서 이 값들을 곱한다. 따라서 대응하는 각각의 배열에서 1의 값을 갖는 경우에만 (1×1)=1의 상관 값을 갖게 된다. 이와 같은 조작을 상관영역 전체에 걸쳐 행하여 그 합을 구하고 이 값이 최대가 되는 입자위치를 동일입자의 이동위치로 결정하였다.

Fig. 8은 가시화 사진으로서 편의상 시험체적의 상부만을 촬영하였으며 노출 6ms, 노출간격은 500ms에서 다중 노출하여 촬영하였다. 우측상부의 밝게 보이는 부분은 상부의 아크릴에 반사되었

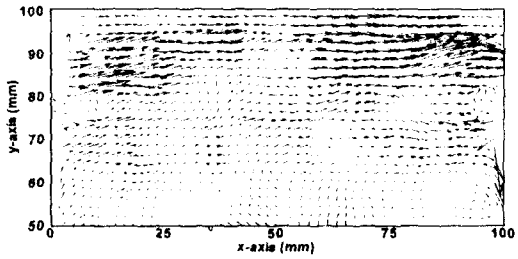


Fig. 9 Instantaneous Velocity Vectors by PTV.

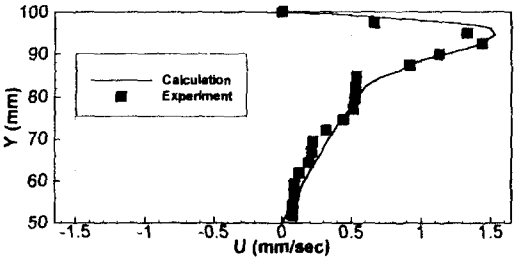


Fig. 10 Profiles of horizontal component of velocity in the middle section : X=50(mm).

기 때문이며 벽면 측이 다소 어둡게 나타나는 것은 원통형렌즈를 이용하여 2차원의 시이트 라이트로 만드는 과정에서 확산 각도에 따라 광양이 줄어들었기 때문이다. 유동장의 특성은 가시화 실험을 통하여 관찰한 결과 좌우 측 벽면의 수직방향 속도가 상하 면의 수평방향속도보다 매우 크게 나타남을 알 수가 있었다. 따라서 좌측벽면에서 빠른 속도로 상승하는 유동 중 일부는 상면을 따라 유동하지 못하고 실험유동장의 중간정도까지 하강하다가 다시 상승하는 현상이 나타났고, 우측벽면에서는 반대현상이 나타났다.

Fig. 9는 유동장이 완전히 발달한 상태에서 촬영하여 계측한 유동장의 순간속도분포이다. 일반 광을 이용한 PTV계측의 결과를 검증하기 위해서 속도 구배가 큰 캐비티 유동을 택하였다. 촬영된 영상을 관찰하여보면 좌우측 벽면에서의 수직방향의 속도가 상하 면의 수평방향에 비해 크게 나타나고 있으나, 계측결과에서는 이에 대한 결과가 잘 나타나고 있지 않다. 이것은 카메라의 해상도를 높여서 계측하면 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 10은 Prandtl 수 4.53이고, Rayleigh 수 5.28×108 인 경우의 동일 유동장에 대한 중앙단면의 수평속도분포를 수치해석의 결과와 실험 결과를 비교하여 검토한 결과 전체적으로 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다.

Ⅳ. 결 론

이 연구에서는 상하 면이 단열이고 좌우 면이 온도차가 있는 정방형 밀폐공간의 난류 유동에 대한 PIV계측에서 전체적인 유동속도를 비교적 간단하고 정밀하게 측정할 수 있는 저렴한 시스템의 구축을 목적으로 하였다.

원시영상을 얻는 실험장치중 고가의 레이저 대신에 펄스방식으로 설계 제작한 일반광원을 이용하여 시스템을 구축하였다. 유동장은 Prandtl 수 4.53이고, Rayleigh 수 5.28×10^{8}의 경우에 대하여 가시화 하였으며, PIV의 알고리즘 중 입자추적 법을 적용하여 전유동장의 속도를 계측하고 수치 해석한 결과와 비교하여 유사한 결과를 얻었다.

가시화 실험을 통하여 관찰한 결과 중요한 사실은 좌우 측 벽면의 수직방향 속도가 상하 면의 수평방향속도보다 매우 크게 나타나기 때문에 고온 벽면에서 빠른 속도로 상승하는 유동 중 일부는 상면을 따라 유동하지 못하고 시험체적의 중간 정도까지 하강하다가 소멸되는 현상이 나타났고, 저온 벽면에서는 반대로 빠른 속도로 하강하는 유동 중 일부는 밑면을 따라 유동하지 못하고 시험체적의 중간 정도까지 상승하다가 소멸되는 현상이 나타났다.

끝으로 실시간의 고속 유동장에 대한 속도분포를 계측하기 위해서는 CCD카메라와 광원 그리고 이미지 보오드를 동기 시키는 방법에 대한 연구와 광원의 밝기는 물론 짧은 펄스 간격의 설계에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

이 연구를 위하여 여러 가지 면에서 수고를 해준 목포해양대학교 기관공학부 조대환 교수에게 감사를 드립니다.

참고문헌

1. C. Gray, The Evolution of Particle Image Velocimetry, Proc. of Optical Methods & Data Processing in Heat and Fluid Flow, I. Mech. E., pp. 19~36, 1992.
2. R. J. Adrian, Limiting Resolution of Particle Image Velocimetry for Turbulent Flow, Proc. Advances in Turbulence Research, POSTEC Pohang Korea, pp. 1~19, 1995.
3. 이영호, PIV에서의 동시 다점 계측의 원리 및 적용, 대한기계학회 열 및 유체공학부문 학술강연 논문집, pp 30-44., 1996. 4. T. S. Kwon, H. J. Sung and J. M. Hyun, Experimental Investigation of Uniform-Shear Flow past a Circular Cylinder, ASME JFE Vol. 14, pp. 457~460, 1992.
5. Y. G. Kim, Digital Vector Image Processing of Lid-Driven Rotating Cavity Flow, J. of KSME Vol. 9, No. 2, pp. 187-196, 1995.
6. 김재원, 엄정섭, 임택규, 영상처리기법을 이용한 원통형 용기내의 회전유 속의 측정, 공기조화 · 냉동공학 논문집 제7권 제1호, pp. 13-19, 1995.
7. 이상준, 백승조, 윤정환, 도덕희, 화상처리기법을 이용한 온도장 및 속도장 동시측정기법 개발, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(2), pp. 653~658, 1996.
8. 이창식, 이기형, 전문수, 임경수, PTV시스템을 이용한 가솔린 기관의 실린더 내 정상유동 해석, 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp. 421~426, 1996.
9. R. J. Adrian, Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics, Annu. Rev. Fluid Mech, Vol. 23, pp. 261~304, 1991.
10. R. J. Adrian, Scattering Particle Characteristics and Their Effect on Pulsed Laser Measurements of Fluid Flow : Speckle Velocimetry vs Particle Image Velocimetry, Applied Potics Vol. 23, pp. 1690~1691, 1984.
11. 조대환, "2차원 평면 Poiseuille 흐름 구동 입방형 캐비티의 PIV 계측", 한국해양대학교 공학석사 학위논문, 1995.
12. 반민환, 이교태, 개선된 PIV를 이용한 자연대류 난류유동 속도측정에 관한 연구, 응용물리, Vol.9, No.1, pp. 1~5, 1996.

저 자 소 개

이교태(李敎泰)

1951년 9월 생. 1976년 전남대학교 기계공학과 졸업. 1984년 동 대학원 기계공학과 석사취득. 1990년 동 대학원 기계공학과 박사취득. 1980년~현재 순천제일대학 차량기계과 교수. 당 학회 회원.