

Stereoscopic Miniature PIV (MPIV) 시스템의 개발

김상혁*·O.Chetelat**·김경천***

Development of a Stereoscopic Miniature PIV(MPIV) System

S.H. Kim*, O. Chetelat** and K.C. Kim***

Key Words : Stereoscopic PIV, Miniature Particle Image Velocimetry(MPIV), CMOS Camera

Abstract

Stereoscopic particle image velocimetry is a measurement technique to acquire of three dimensional velocity field by two cameras. With a laser sheet illumination, the third velocity component can be deduced by out-of-plane velocity components using a stereoscopic matching method. Industrial fluid flows are almost three dimensional turbulent flows, so it is necessary to use the stereoscopic PIV measurement method. However the existing stereoscopic PIV system seems hard to use since it is very expensive and complex. In this study we have developed a Stereoscopic Miniature PIV(MPIV) system based on the concept of the Miniature PIV system which we have already developed. In this paper, we address the design and some first experimental results of the stereoscopic PIV system. The Stereoscopic MPIV system features relatively modest performances, but is considerably smaller, cheaper and easy to handle.

The proposed Stereoscopic MPIV system uses two one-chip-only CMOS cameras with digital output. Only two other chips are needed, one for a buffer memory and one for an interfacing logic that controls the system. Images are transferred to a personal computer (PC) via its standard parallel port. No extra hardware is required (in particular, no frame grabber board is needed).

1. 서론

자연계에서의 유체유동은 대부분 3차원 난류유동이므로 유체 연구분야에서 3차원 유동장의 측정은 큰 관심거리가 되고 있다. 2차원 유동단면 내의 in-plane 속도성분을 순간적으로 측정하여 속도장을 구하는 2차원 속도장 측정기법을 확장하여 3차원의 유동형태를 파악하는 기법이 최근 활발히 연구되고 있는데 그중 stereoscopic PIV기법은 많은 연구가 이루어지고 있는 중요한 측정기법이다. 기존의 2차원 PIV측정기법에서는 먼저 레이저 평면 광으로 측정하고자 하는 유동영역 속에 seeding 된 입자를 조명한 다음 순간적으로 입자들의 영상을 획득하게 되는데 이 때 만일 유동이 3차원성을 가지게 되면 입자영상에는 out-of-plane 성분이 존재하게 되어 이들 성분이 2차원 속도장 분석 결과에서 에러요인으로 작용하게 된다. 이로 인해 2차원 PIV측정기법은 정확한 유동정보를 얻기에는 한계가 있다. 그러므로 보다 정확한 3차원 속도장 측정을 위해 3차원 PIV측정기법이 도입된 것이다. 또한 유체분야 연구에서 다루는 유동은 정도의 차이는 있지만 대부분 3차원 난류유동이다. 따라서, 난류유동의 3차원 속도장 정보를 얻기 위해 PIV속도장 측정기술을 적용하게 되었으며 많은 연구가 진행되고 있다. 실제적인 유동장에서의 적용 예로서

Prasad & Adrian(1993)은 2대의 카메라로 stereoscopic 시스템을 구성하여 회전디스크 주변의 3차원유동을 해석하였다.

본 논문은 위와 같이 최근 그 중요성이 증대되고 있고 또한 활발히 연구중인 stereoscopic PIV 시스템을 MPIV (Miniature Particle Image Velocimetry)시스템에 적용시킨 stereoscopic MPIV 시스템의 개발에 대한 내용이다. MPIV 시스템은 고가의 장치와 복잡한 실험과정을 가진 기존의 PIV시스템에 저가, 소형의 개념을 도입한 새로운 PIV시스템이다[1]. Stereoscopic MPIV 시스템은 MPIV 시스템의 장점은 살리면서 기존의 stereoscopic PIV 시스템의 기능을 수행할 수 있도록 설계되었다. Fig. 1에 stereoscopic MPIV시스템의 개략도를 나타내었다. Stereoscopic PIV시스템은 stereoscopic 접근 방법에 따라 translation 방법과 angular displacement 방법으로 나누어지는데 stereoscopic MPIV시스템에서는 angular displacement 방법을 사용하였다. 일반적인 stereoscopic MPIV시스템에서는 먼저 PC에서 strobe light pattern을 MPIV RAM으로 전달한다. 이 정보는 나중에 CPLD 칩에서 strobe light pattern과 카메라 작동을 동기화하기 위해 사용된다. 유동속에 포함된 입자는 laser point(또는 LED device)에 의해 만들어진 Strobe light로 조사된다. 조사광에 의해 획득된 입자영상은 dual CMOS camera chip에 의해 디지털 정보로 변환된다. 입자영상정보는 MPIV RAM으로 전송되어 strobe light pattern과 대체된다. 최종적으로 컴퓨터는 MPIV RAM으로부터 전송된 영상을 분석하여 속도장을 산출해 낸다.

* 부산대학교 대학원, guard129@pusan.ac.kr

** 부산대학교 기계공학부, chetelat@pusan.ac.kr

*** 부산대학교 기계공학부, kekim@pusan.ac.kr

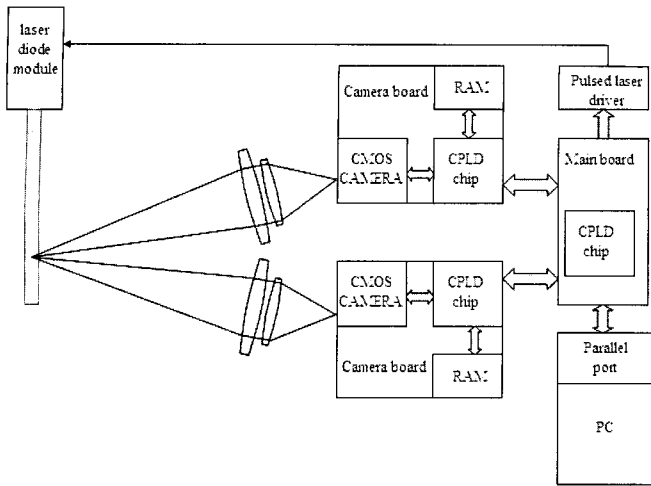


Fig. 1 Schematic diagram of the stereoscopic MPIV system

2. 설계 개요

2.1 CMOS 카메라

본 시스템에 사용된 one-chip progressive-scan camera는 8-bit digital 출력과 75Ω의 analog 출력을 가지며 최대 50 frames/s 로 이미지를 캡처할 수 있다. 최대 해상도는 384×288이고 픽셀 크기는 11μm이다. Right sensitive area의 크기는 4.2mm×3.2mm이다. CCD 카메라와 달리 CMOS 카메라는 현재 사용되는 digital 장치와 같은 특징을 가지므로 두 가지의 큰 장점을 가진다. 먼저 CMOS 카메라는 값이 매우 저렴하므로 stereoscopic MPIV 시스템의 단가를 획기적으로 절감시킬 수 있고 또 다른 장점은 ADC, RAM, CPU 등의 다른 complex logic circuits와 호환성이 우수하므로 위의 장치들을 쉽게 조합하여 작고 저렴한 시스템을 제작할 수 있다. PIV 시스템에서는 synchronous 셔터를 사용하는 CCD 카메라가 보다 우수한 성능을 보이지만 rolling 셔터를 사용하는 CMOS camera 또한 계속 발전되고 있으므로 보다 나은 성능을 기대할 수 있다. 본 시스템에 사용된 CMOS 카메라는 data와 address bus에 연결되어 있고 대부분의 매개변수는 레지스터에 의해 조절이 가능하다. 예를 들면 노출시간(셔터의 사이즈)과 gain은 자동모드로 설정하거나 또는 어떤 특정한 값을 임의로 지정할 수 있고 이미지 크기 또한 조절이 가능하다.

2.2 CPLD 보드

Stereoscopic MPIV 시스템은 하나의 메인보드와 2개의 카메라 보드로 구성되어 있는데 메인보드에는 CPLD(Complex Programmable Logic Device) 칩과 2개의 clock 발생기가 장착되어 2개의 카메라보드와 pulsed laser driver 보드를 제어하고 PC와의 통신을 담당한다. 카메라보드에는 각각 CPLD 칩과 SRAM(512K)이 탑재되어 있고 CMOS 카메라 칩을 통해 영상을 획득하여 메인보드로 전송한다. PC와의 통신은 parallel port를 이용하는데 ECP(Extend Capabilities Port) protocol을 적용하였다. 이 protocol의 전송속도는 2 Mbytes/s로 일반 PC에서 사용되는 다른 protocol인 SPP protocol(50 ~ 150kbytes/s)에 비해 월등히 빠른 전송속도를 가진다. 이로 인해 보다 빠른 데이터 전송과 시스템 동작이 가능하게 되었다.

2.3 Laser diode module

Pulsed light는 line generator를 이용하였는데 이것은 laser diode와 원통형 렌즈를 이용하여 평면광을 만드는 장치이다. 아주 소형이며 가격도 저렴하여 MPIV 시스템의 목적에 잘 부합한다. 크기는 지름 14 mm, 길이는 80 mm이다. 광은 적색광(637 nm)이며 2.5 mW의 출력을 가진다. 3-element 글래스 하우징 렌즈를 사용하며 원통형렌즈를 이용하여 두께조절이 가능한 평면광을 발생시킨다. Laser diode는 단색광을 발생시키므로 chromatic lens aberrations을 줄일 수 있다. 그래서 achromatic 렌즈 대신 저급의 렌즈를 사용할 수 있다. 그러나 achromatic 렌즈를 사용하면 반사광을 제한하고 빛의 손실을 최소화할 수 있다. 적색광이나 적외선은 MPIV 시스템에 사용되는데 왜냐하면 카메라와 레이저 다이오드는 그런 종류의 광에서 최고의 효율을 가지기 때문이다.

2.4 Camera objective

Camera objective는 두 쌍의 achromatic doublets으로 구성되어 있으며 다음과 같은 규격을 가진다. f-value $f_{\#}=1.4$ 이고 배율 $M=50/85$ 이며 렌즈와 측정영역과의 거리는 85mm 이다. 관측영역의 크기는 7.1 mm × 5.4 mm (image 384×288)이며 camera sensitive area의 1.7배이다. 렌즈의 f-value가 작을수록 더 많은 빛을 통과시킬 수 있다. 그러므로 f-value가 작아질수록 lens aberration은 상당히 증가한다(Jenkins and White,1981). 그러나 PIV system에서는 lens aberrations의 증가를 허용하는데 왜냐하면 그것은 회절, 브라운 운동과 유동운동에 의해 초점과 pixel sensitive area를 벗어나서 이미 흐려진 입자영상을 좀더 퍼뜨리는 효과만을 가지기 때문이다. lens aberrations은 광학설계에 있어서 중요한 의미를 가지는데 lens aberrations이 감소할수록 보다 정확한 결상이 되어 선명한 화상을 얻을 수 있다. Lens aberrations에는 chromatic aberrations와 geometrical aberrations(spherical aberration, coma, astigmatism)이 있는데 achromatic doublets은 chromatic aberrations을 최소화 할 수 있도록 제작되어 있으므로 lens aberration을 크게 감소시킬 수 있다. 광학시스템 설계를 할 때에는 ray tracing이라는 시뮬레이션 과정을 거쳐 lens aberration이 최소가 되고 용도에 적합한 시스템을 결정할 수 있다.

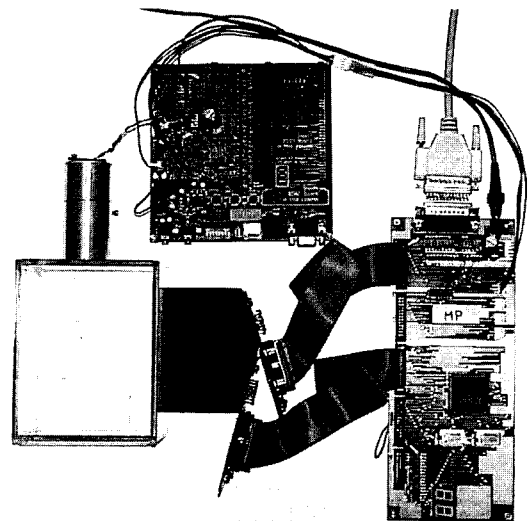
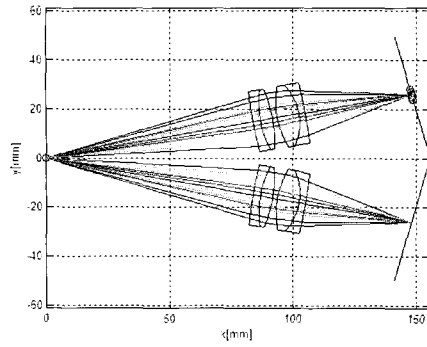
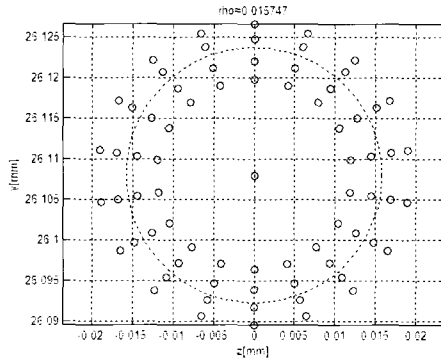


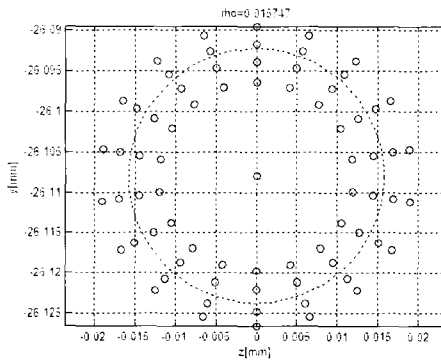
Fig. 2 Stereoscopic MPIV system



(a) Best focus plane of camera objective



(b) Upward camera lens aberration



(c) Downward camera lens aberration

Fig. 3 Ray tracing of a stereoscopic camera

Fig.

3에 표시된 ray tracing은 시스템에 사용된 2쌍의 achromatic doublets에 대해 시뮬레이션 하였다. Lens aberration이 최소가 되는 최적 sensor 평면의 결정을 위해 stereoscopic PIV 시스템의 설치방법을 적용하여 실행하였다. 수행결과에서 가장 좋은 결과는 광선의 분포가 가장 작게 발생할 때 최상의 focus를 나타낸다. 광선의 분포를 측정하기 위해 ray tracing 시뮬레이션에 의해 생성된 점들의 분포를 표준편차에 의해 계산하였다. 카메라 센서는 일반적으로 평면이지만 최상의 초점평면은 평면이 아니고 곡면으로 나타난다. 그래서 선형 fitting에 의해 최적 초점평면을 결정하였다. 그러므로 lens aberration을 최소화하는 데는 한계가 있다.

2.5 Stereoscopic MPIV의 구성

Stereoscopic PIV 시스템은 stereoscopic 접근방법에 따라 translation 기법과 angular displacement 기법으로 나뉜다. Translation 기법은 측정영역의 이미지 왜곡현상이 거의 발생하지 않으므로 입자영상좌표를 실제 입자좌표로 변환하는 과정이 복

잡하지 않으며 입자영상 전체에 걸쳐 배율이 일정하므로 속도벡터 산출과정이 간편하다. 그러나 측정각도의 제한으로 인해 out-of-focus 속도 성분 오차를 줄이는데 한계가 있다. Angular displacement 기법은 측정각도에 제한을 받지 않아 out-of-focus 속도 성분으로 인한 오차는 감소하지만 입자영상에 왜곡현상이 심하게 발생하므로 입자영상좌표와 실제입자좌표 사이의 상관함수를 구해야 한다. 또한 획득한 영상전체에 걸쳐 배율이 균일하지 않으나 이것은 렌즈의 tilting을 통해 Scheimpflug condition (Altenhofen 1952)을 만족시키면 해결 할 수 있다. Scheimpflug condition은 측정평면과 렌즈평면 그리고 이미지평면이 모두 측정평면 연장선상에서 만나게 되는 조건이다. Stereoscopic MPIV 시스템은 angular 기법을 적용하였으며 Scheimpflug condition을 만족하는 camera object를 설계하여 angular 기법의 장점을 최대한 이용하였다. 설치각은 중심축에 대해 10°이며 MPIV의 장점인 간단한 실험과정을 충족시키기 위해 카메라의 각과 초점거리는 고정시킴으로써 해서 별도의 카메라 설치과정이 필요 없게 되었다. 즉 렌즈는 tilting된 상태로 고정되어 있고 설치각 또한 변경이 불필요하므로 실험시 이미 결정되어 있는 초점거리 상에 대상영역을 위치시키기만 하면 된다.

2.6 Image buffer

7 MHz 이상으로 카메라에서 연속적으로 출력되는 pixel 정보는 buffer에 저장되는데 이는 PC의 전송률이 많이 느리기 때문이다. 논리회로에 의해 수행되는 작업은 다음과 같이 간단하게 요약된다.

1. RAM으로부터 현재 byte를 읽어 들인다.
2. 만약 그 값이 0이면 light 상태를 유지하고 그렇지 않으면 toggle 한다.
3. 카메라로부터 현재의 픽셀 값을 읽는다.
4. 그것을 현재의RAM location에 저장한다(현재 사용되는 strobe data를 대체함).
5. 카운터를 증가시킨다(현재 RAM address).

이 알고리즘을 수행하는데 필요한 논리회로로 가격이 저렴한 programmable CPLD 칩을 사용하였다. Stereoscopic MPIV 시스템에서는 이미지 전송속도의 증가와 strobe light pattern을 프로그래밍하기 위해 다른 과정을 고안했다. 거의 모든 RAM location이 PC로 picture byte가 전송된 직후 strobe light pattern을 위해 byte가 0으로 리셋 되므로 MPIV 회로는 별도의 처리과정 없이 자동

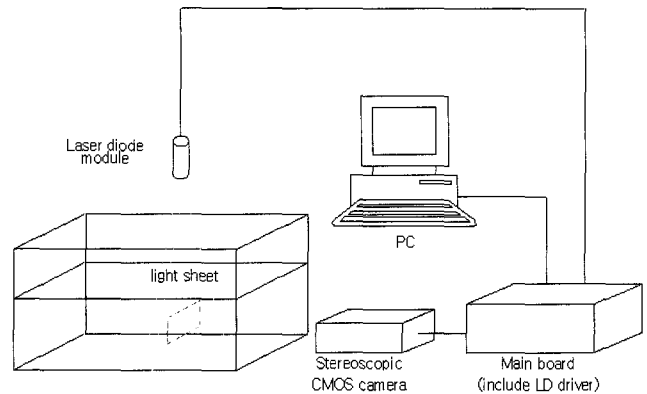


Fig. 4 Experimental setup for stereoscopic MPIV measurement

적으로 해당하는 RAM location을 0으로 리셋 하도록 설계했다.

3. 실험결과

3.1 실험장치와 방법

Stereoscopic MPIV 시스템을 이용하여 140 mm × 110 mm × 60 mm의 glass container 속에 담긴 물 속에 seeding 된 hollow ball glass(10 μm)를 측정하였다. Fig. 4에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험에 사용된 light sheet의 두께는 1.2mm이고 초점 거리는 83.7mm이며 Pulse duration은 0.1ms이다. 두 이미지 사이의 Δt는 20ms이다. 측정 가능한 영역의 크기는 7.1mm × 5.4mm 이다. Pulsed light는 측정영역에 수직으로 조사되며 stereoscopic CMOS 카메라와 직각을 이룬다. 카메라는 angular displacement 방법에 의해 제작된 stereoscopic MPIV 카메라를 사용하였다. Stereoscopic 상관함수를 구하기 위해 calibration target 영상을 획득하였고 Fig. 5 에 나타내었다.

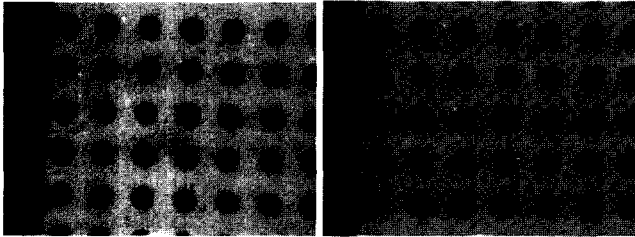


Fig. 5 Calibration target

3.2 실험결과

Fig. 6 에 stereoscopic MPIV 시스템에서 획득한 이미지를 나타내었다.



(a) First picture (left is camera 1, right is camera 2)



(b) Second picture (20ms later)

Fig. 6 Experimental result (image 384×288)

4. 결론

본 논문에서는 기존에 개발된 MPIV 시스템의 개념을 적용한 stereoscopic MPIV 시스템의 개발을 다루었다. 기존의 stereoscopic PIV 시스템에 비해 저렴한 가격과 간단한 장치와 실험방법을 가지므로 기존 stereoscopic PIV시스템의 고가의 장치와 복잡한 실험방법으로 인해 필요에 비해 많이 사용되지 못했던 stereoscopic PIV 실험기법을 보급할 수 있는 계기가 될 수 있다. 이번에 개발한 prototype stereoscopic MPIV 시스템은 완전한 작동은 가능하지만 느린 유동에서 측정 가능하다는 제한을 가진다. 다양한 실험조건에서 측정이 가능하도록 하기 위해 여러 가지 camera objective를 개발함으로써 응용과정에서 발생 가능한 제약조건을 최소화 할 수 있다. 아울러 획득한 이미지에 상관함수를 적용하여 속도벡터를 구할 수 있다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실(NRL)사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] O. Chatelat, S. Y. Yoon, K. C. Kim, "Design and construction of a miniature PIV(MPIV)system", The 6th asian symposium on visualization(2001).
- [2] R. J. Adrian "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", Ann. Rev. J. Fluid Mech., Vol.23(1999), pp.261-304
- [3] R. J. Adrian "Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry", Measurement science and technology Vol.8(1997), pp.1393-1398.
- [4] A. K. Prasad, "Stereoscopic particle image velocimetry", Experiments in Fluids, Vol.29(2000), pp.103-116.
- [5] A. Lecerf, B. Renou, "Stereoscopic PIV:validation and application to an isotropic turbulent flow", Experiments in Fluids, Vol.26(1999), pp.107-115.
- [6] C. D. Mainhart, R. J. Adrian "A CCD stereo camera design", (1995).
- [7] O. Chatelat, S. Y. Yoon, K. C. Kim, "Miniature PIV system(MPIV) with LED in-line illumination", 4th international symposium on particle image velocimetry(2001).
- [8] J. D. C. Jones, K. T. V. Grattan, "Special issue: Particle image velocimetry", Measurement Science and Technology, Vol8(1997), PP.1379.
- [9] D. H. Doh, G. R. Cho, W. J. LEE, "Development stereoscopic -PIV and its application to the Measurement of the near wake of a circular cylinder", Proceeding of the KSME, spring(2001), pp.555-559.