

Miniature Stereo-PIV 시스템의 개발과 응용

김경천[†] · Olivier Chetelat^{*} · 김상혁^{**}
(2003년 7월 15일 접수, 2003년 9월 1일 심사완료)

Development and Application of a Miniature Stereo-PIV System

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

Key Words: Stereoscopic PIV(스테레오 입자영상유속계), Miniature PIV(소형 입자영상유속계), CMOS Camera

Abstract

Stereoscopic particle image velocimetry is a measurement technique to acquire three dimensional velocity field by two cameras. With a laser sheet illumination, the third velocity component can be deduced from out-of-plane velocity components using a stereoscopic matching method. Most industrial fluid flows are 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 Miniature Stereo-PIV(MSPIV) system based on the concept of the Miniature PIV system which we have already developed. In this paper, we address the design and some primitive experimental results of the Miniature Stereo-PIV system. The Miniature Stereo-PIV system features relatively modest performances, but is considerably smaller, cheaper and easy to handle.

The proposed Miniature Stereo-PIV 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).

기호설명

σ : RMS 오차
 X : 이미지상의 위치
 x : 물리적인 공간 위치
 F : mapping 함수
 $F_{i,j}$: $\partial F_i / \partial x_j$

1. 서론

자연계에서의 유체유동은 대부분 3차원 난류유동이므로 유체연구분야에서 3차원 유동장의 측정 은 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 평면광으로 측정하고자 하는 유동영역 속에 seeding 된 입자를 조명한 다음 순간적으로 입자들의 영상을 획득하게 되는데 이 때 만일

[†] 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2324 FAX : (051)512-5236

^{*} CSEM, Switzerland

^{**} 부산대학교 대학원 기계공학과

유동이 3차원성을 가지게 되면 입자영상에는 out-of-plane 성분이 존재하게 되어 이들 성분이 2차원 속도장 분석 결과에서 에러요인으로 작용하게 된다. 이로 인해 2차원 PIV 측정기법은 정확한 유동정보를 얻기에는 한계가 있다. 그러므로 보다 정확한 3차원 속도장 측정을 위해 3차원 PIV 측정기법이 도입된 것이다. 또한 유체분야 연구에서 다루는 유동은 정도의 차이는 있지만 대부분 3차원 난류유동이다. 따라서, 난류유동의 3차원 속도장 정보를 얻기 위해 PIV 속도장 측정기술을 적용하게 되었으며 많은 연구가 진행되고 있다. 실제적인 유동장예의 적용 예로서 Prasad & Adrian⁽¹⁾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 Miniature Stereo-PIV (MSPIV) 시스템의 개발에 대한 내용이다. MPIV 시스템은 고가의 장치와 복잡한 실험과정을 가진 기존의 PIV 시스템에 저가, 소형의 개념을 도입한 새로운 PIV 시스템이다.⁽²⁾ Miniature Stereo-PIV 시스템은 MPIV 시스템의 장점은 살리면서 기존의 stereoscopic PIV 시스템의 기능을 수행할 수 있도록 설계되었다. Fig. 1에 Miniature Stereo-PIV 시스템의 개략도를 나타내었다. Stereoscopic PIV 시스템은 stereoscopic 접근 방법에 따라 translation 방법과 angular displacement 방법으로 나누어지는데 Miniature Stereo-PIV 시스템에서는 angular displacement 방법을 사용하였다. 일반적인 Miniature Stereo-PIV 시스템의 작동원리를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 PC에서 strobe light pattern을 MSPIV RAM으로 전달한다. 이 정보는 나중에 CPLD(Complex Programmable Logic Device) 칩에서 strobe light와 카메라 작동을 동기화하기 위해 사용된다. 유동 속에 포함된 입자는 laser diode 모듈(또는 LED device)에 의해 만들어진 strobe light로 조사된다. 조사광에 의해 획득된 입자영상은 dual CMOS camera chip에 의해 디지털 정보로 변환된다. 이 디지털 입자영상 정보는 MSPIV RAM으로 전송되어 strobe light pattern과 대체된다. 최종적으로 MSPIV RAM으로부터 입자영상이 PC로 전송이 되어 후처리과정을 거쳐 3차원 속도 벡터장을 산출해 낸다.

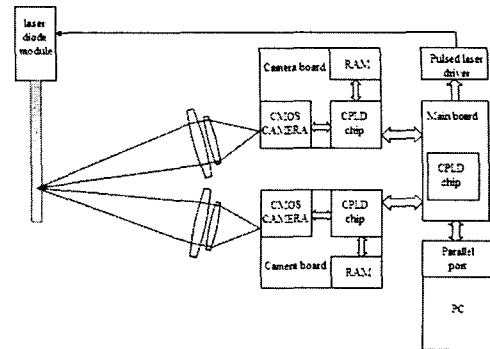


Fig. 1 Schematic diagram of MSPIV system

2. 설계 개요

2.1 CMOS 카메라

본 시스템에 사용된 one-chip progressive-scan 카메라는 8-bit 디지털 출력과 75Ω의 아날로그 출력을 가지며 최대 50 frames/s 로 이미지를 캡처할 수 있다. 최대 해상도는 384×288이고 픽셀 크기는 11 μm이다. Light sensitive area의 크기는 4.2mm×3.2mm이다. CCD 카메라와 달리 CMOS 카메라는 현재 널리 사용되는 디지털 소자와 같은 특징을 가지므로 두 가지의 큰 장점을 가진다. 먼저 CMOS 카메라는 값이 매우 저렴하므로 Miniature Stereo-PIV 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 카메라 또한 계속 발전되고 있으므로 보다 나은 성능을 기대할 수 있다.⁽³⁾ CMOS 카메라의 rolling 셔터와 펄스광의 동기화는 Kim 등⁽³⁾이 MPIV 시스템에 사용한 기법을 적용하였다. 본 시스템에 사용된 CMOS 카메라는 데이터와 어드레스 버스에 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

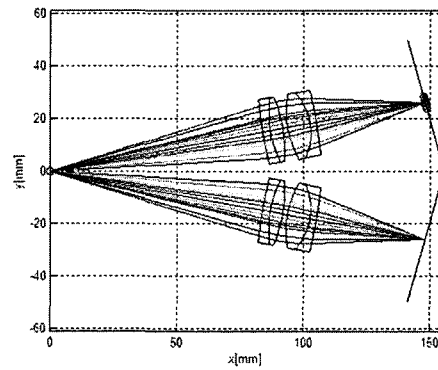
Miniature Stereo-PIV 시스템은 하나의 메인보드와 2개의 카메라 보드로 구성되어 있는데 메인보드에는 CPLD 칩과 2개의 clock 발생기가 장착되어 2개의 카메라보드와 pulsed 레이저 드라이버 보드를 제어하고 PC와의 통신을 담당한다. 카메라 보드에는 각각 CPLD 칩과 SRAM(512K)이 탑재되어 있고 CMOS 카메라 칩을 통해 영상을 획득하여 메인보드로 전송한다. PC와의 통신은 parallel port를 이용하는데 ECP(Extend Capabilities Port) protocol을 적용하였다. 이 protocol의 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 펄스 광원

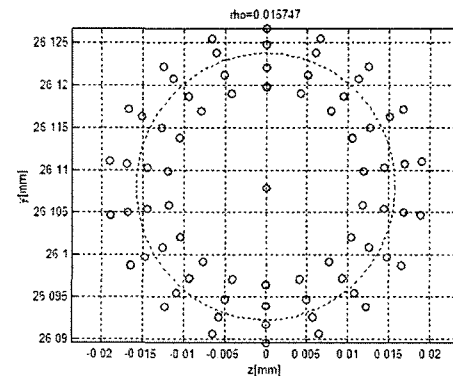
펄스광원으로는 선발생기(line beam generator) 모듈을 이용하였는데 이것은 레이저 다이오드와 원통형 렌즈를 이용하여 평면광을 만드는 장치이다. 아주 소형이며 가격도 저렴하여 MSPIV 시스템의 목적에 잘 부합한다. 크기는 지름 14 mm, 길이 80 mm이다. 펄스광은 적색광(660 nm)이며 13 mW의 출력을 가진다. 3-element 글래스 하우징 렌즈를 사용하며 원통형렌즈를 이용하여 두께 조절이 가능한 평면광을 발생시킨다. 레이저 다이오드는 단색광을 발생시키므로 색 수차(chromatic aberration)를 줄일 수 있다. 그래서 색 지움(achromatic) 렌즈 대신 저급의 렌즈를 사용할 수 있다. 그러나 색 지움 렌즈를 사용하면 반사광을 제한하고 빛의 손실을 최소화할 수 있다. 레이저 다이오드는 일반적으로 적색광이나 적외선을 방출하며 MPIV 시스템에 사용된 CMOS 카메라는 그 파장영역에서 최고의 효율을 가진다.⁽⁴⁾

2.4 카메라 광학계

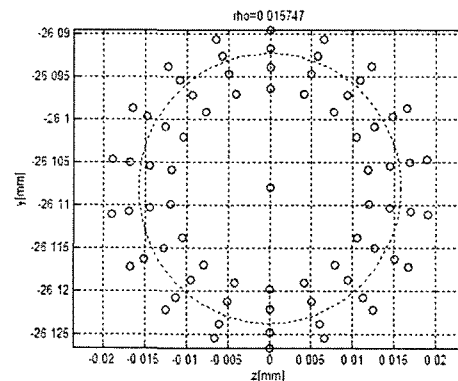
카메라 광학계는 두 쌍의 색 지움 이중접합렌즈로 구성되어 있으며 다음과 같은 사양을 가진다. f-value $f\# = 1.4$ 이고 배율 $M = 50/85$ 이며 렌즈와 측정영역과의 거리는 85mm 이다. 관측영역의 크기는 $7.1 \text{ mm} \times 5.4 \text{ mm}$ (image 384×288)이며 카메라 센서 감광 영역의 1.7배이다. 렌즈의 f-value가 작을수록 더 많은 빛을 통과시킬 수



(a) Best focus plane of camera objective



(b) Upward camera lens aberration



(c) Downward camera lens aberration

Fig. 2 Ray tracing of a stereoscopic camera

있다. 그러므로 f -value가 작아질수록 렌즈 수차 (lens aberration)는 상당히 증가한다. 그러나 PIV 시스템은 미소한 렌즈 수차의 증가에 별 영향을 받지 않는데 그 이유는 렌즈 수차의 증가가 회절, 브라운 운동과 유동운동에 의해 초점과 pixel sensitive area를 벗어나 흐려진 입자영상을 더 퍼져 보이게 하는 효과를 가지기 때문이다.⁽⁵⁾ 렌즈 수차는 광학설계에 있어서 중요한 의미를 가지는데 렌즈 수차가 감소할수록 보다 정확한 결상이 되어 선명한 화상을 얻을 수 있다. 렌즈 수차에는 색 수차와 기하 수차(spherical aberration, coma, astigmatism)가 있는데 색 지움 이중접합렌즈는 색 수차를 최소화 할 수 있도록 제작되어있으므로 렌즈 수차를 크게 감소시킬 수 있다. 광학시스템 설계를 할 때에는 광선추적(ray tracing)이라는 시뮬레이션 과정을 거쳐 렌즈수차가 최소가 되고 용도에 적합한 시스템을 결정할 수 있다. Fig. 2에 표시된 광선추적은 시스템에 사용된 2쌍의 색 지움 이중접합렌즈에 대해 시뮬레이션 하였다. 렌즈 수차가 최소가 되는 최적 센서 평면의 결정을 위해 stereoscopic PIV 시스템의 설치방법을 적용하여 실행하였다. 수행결과에서 가장 좋은 결과는 광선의 분포가 가장 작게 발생할 때 최상의 초점 상태를 나타낸다. 광선의 분포를 측정하기 위해 광선추적 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 렌즈 수차를 최소화하는데는 한계가 있다.⁽⁶⁾

2.5 Stereoscopic PIV 배치기법

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 복잡하지 않으며 입자영상 전체에 걸쳐 배율이 일정하므로 속도벡터 산출과정이 간편하다. 그러나 측정각도의 제한으로 인해 out-of-focus 속도성분 오차를 줄이는데 한계가 있다. Angular displacement 기법은 측정각도에 제한을 받지 않아 out-of-focus 속도 성분으로 인한 오차는 감소하지만 입자영상에 왜곡현상이 심하게 발생하므로 입자영상좌표

와 실제입자좌표 사이의 상관함수를 구해야 한다. 또한 획득한 영상전체에 걸쳐 초점상태가 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.⁽⁷⁾ Miniature Stereo-PIV 시스템은 angular displacement 기법을 적용하였으며 Scheimpflug condition을 만족하는 stereoscopic 카메라를 설계하여 angular displacement 기법의 장점을 최대한 이용하였다. 설치각은 중심축에 대해 10° 이며 MPIV의 장점인 간단한 실험과정을 충족시키기 위해 카메라의 각과 초점거리는 고정시킴으로 해서 별도의 카메라 설치과정이 필요 없게 되었다. 즉 렌즈는 tilting된 상태로 고정이 되고 설치각 또한 변경이 불필요하므로 실험시 이미 결정되어 있는 초점거리 상에 대상영역을 위치시키기만 하면 된다.

2.6 오차분석

2.6.1 각 방향성분에 대한 RMS 오차 분석

완성된 MSPIV 시스템의 정확성을 검증하기 위해 인공입자영상을 이용한 오차분석을 시행하였다. 오차분석을 위해 사용된 인공입자는 MSPIV 시스템의 측정에 사용되는 일반적인 입자크기인 $20\mu\text{m}$ 정도의 크기를 가지며 입자 밀도 또한 MSPIV 시스템의 측정에 적합한 입자밀도를 적용하였다. 제작된 인공입자영상을 x,y,z 3축 미세이송장치에 부착하여 실험을 수행하였고 시간항

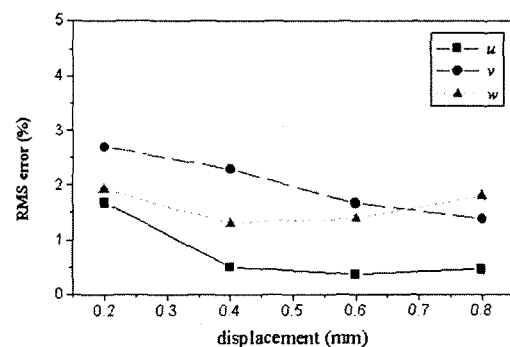


Fig. 3 RMS error graph of each displacement component

을 소거하여 실험결과가 변위에 대해 산출될 수 있도록 하였다. 각 방향 성분인 x, y, z 성분에 대해 각각 0.2mm에서 최대 양호 초점 두께인 0.8mm 까지 변위를 증가시켜 가며 실험을 수행하였고 미세 이송장치를 이용해 이송된 실제 이송변위 d_{ref} 와 후처리 과정을 통해 산출된 이송변위 d 에 대한 RMS 오차분석을 시행하였다. RMS 오차 σ 를 계산하기 위한 수식은 다음과 같다.

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (d - d_{ref})^2}{N} \right)^{1/2} \quad (1)$$

식 (1)에 의해 계산된 RMS 오차 σ 를 d_{ref} 를 이용하여 normalize 한 값을 이용하여 Fig. 3에 각 방향성분에 대한 오차 그래프를 나타내었다. 인공입자영상을 이용하여 각 방향성분에 대한 오차 분석을 시행한 결과 최대 양호 초점 두께 이내에 서 각 성분에 대해 일반적인 PIV 시스템에서 발생하는 오차범위와 비슷한 결과인 3% 이내의 양호한 오차범위를 가짐을 알 수 있었다. MSPIV 시스템의 실험결과는 Lawson & Wu⁽⁸⁾의 실험결과와 달리 z 성분의 변위가 작게 나타남을 알 수 있다.

2.6.2 전체 측정영역에 대한 상대오차 분석

다음으로 전체 측정영역 전체에 대한 상대오차 분석을 수행하였다. x, y, z 방향성분에 대해 초점 영역의 중심인 0.4mm 까지 이송했을 때 획득 이미지 전체에 대한 실제 이송변위 d_{ref} 와 후처리 과정을 통해 산출된 이송변위 d 에 대한 상대오차 분석을 수행하였다. d 는 평균변위가 아닌 순간 변위이며 상대오차 분석에 사용된 수식은 다음과 같다.

$$Relative\ error = \left(\frac{d - d_{ref}}{d_{ref}} \right) \times 100 \quad (2)$$

상대오차 분석 결과 x, y, z 각 방향성분에 대해 획득 영역 전체에 걸쳐 3%이내의 양호한 오차범위를 가짐을 알 수 있었다. Fig. 4 부터 Fig. 6 까지 각 방향성분에 대한 측정영역 전체의 상대오차의 그래프를 나타내었다. 그래프 상에 등고선으로 나타낸 것은 각 방향성분에 대한 상대오차 분포를 나타내고 있다.

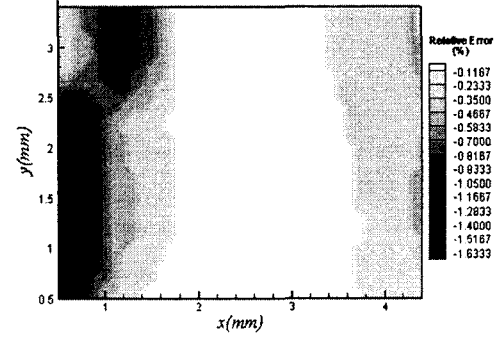


Fig. 4 Relative error field of x axis displacement(0.4mm)

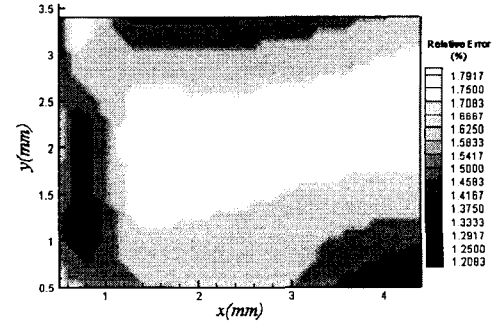


Fig. 5 Relative error field of y axis displacement(0.4mm)

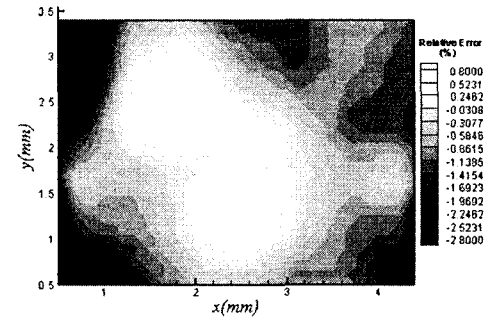


Fig. 6 Relative error field of z axis displacement(0.4mm)

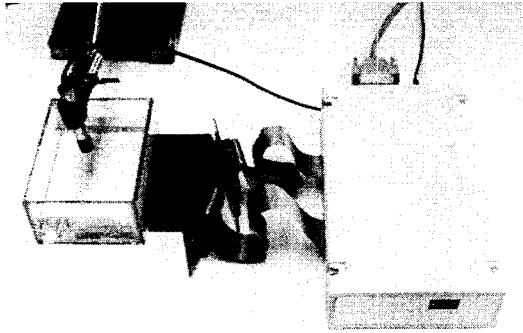


Fig. 7 Miniature Stereo-PIV system

3. 실험장치 및 방법

MSPIV의 3차원 유동에 대한 적용실험으로 원형제트에 대한 실험을 수행하였다. 원형제트유동은 수중펌프를 이용하여 발생시켰으며 본 실험에 사용된 수중펌프는 일반적으로 수족관이나 소형 분수에 사용되고 있으며 220V에서 작동을 하고 최대유량은 4 l/min이다. 실험에 사용된 원형제트출구의 직경은 2.2mm이다. 실험방법으로는 물이 담겨있는 40 mm × 110 mm × 60 mm의 glass container의 한쪽 벽면에 제트 출구를 설치하고 반대편 유리벽 뒤에서 전방으로 전진해 오는 저속의 제트 유동을 속도를 변화시키며 측정하였다. 3차원성을 보다 강하게 나타내기 위해 수평에서 1cm 정도 위에 카메라를 설치하여 비스듬하게 내려다보는 관점에서 실험을 수행하였다. 가시화 입자는 hollow glass ball을 사용하였으며 입자의 크기는 약 10 μm 정도이다. 카메라는 angular displacement 방법에 의해 제작된 Miniature Stereo-PIV 카메라를 사용하였다. 측정영역은 7.1mm × 5.4mm이며 측정영역과 카메라렌즈의 거리는 83.7mm이다. 광원은 선발생기 LD 모듈을 사용하였고 파장은 660nm이고 출력은 13mw이며 펄스광은 측정영역에 수직으로 조사된다. 펄스광은 프레임 노출시간인 20ms 동안 지속되었다. Fig. 7에 실험에 사용된 시스템의 이미지를 나타내었고 Fig. 8은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 보여주고 있다.

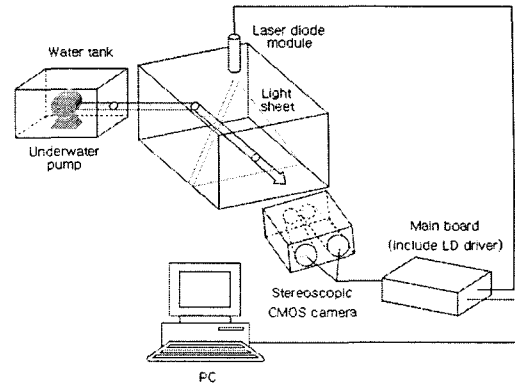


Fig. 8 Experimental setup for MSPIV measurement

3차원 속도값의 추출과 왜곡에 대한 속도의 보정을 위해 Soloff⁽⁹⁾ 등이 제안한 calibration 기법을 이용하였으며 관계식을 식 (3), (4)에 나타내었다. Calibration에는 0.2mm의 간격을 가지는 5개의 target 이미지가 사용되었으며 calibration에서의 각 축에 대한 보정 오차는 0.3픽셀 미만이었다. 식 (3)에 의한 실제 세 방향의 속도성분을 구하기 위해 최소자승법이 사용되었다.

$$\overline{\Delta X_i^{(c)}} \approx F_{i,j}^{(c)}(x_i) \overline{\Delta x_j} \quad (i=1,2 \quad j=1,2,3 \quad c=1,2) \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \overline{\Delta X_1^{(1)}} \\ \overline{\Delta X_2^{(1)}} \\ \overline{\Delta X_1^{(2)}} \\ \overline{\Delta X_2^{(2)}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{1,1}^{(1)} & F_{1,2}^{(1)} & F_{1,3}^{(1)} \\ F_{2,1}^{(1)} & F_{2,2}^{(1)} & F_{2,3}^{(1)} \\ F_{1,1}^{(2)} & F_{1,2}^{(2)} & F_{1,3}^{(2)} \\ F_{2,1}^{(2)} & F_{2,2}^{(2)} & F_{2,3}^{(2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{\Delta x_1} \\ \overline{\Delta x_2} \\ \overline{\Delta x_3} \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서 X 는 이미지상의 위치를 나타내고 x 는 실제 물리적인 위치를 나타낸다. 그리고 인덱스 i 는 이미지에서의 위치를 나타내고 j 는 실제 물리적인 공간상의 각 축을 의미한다. $F_{i,j}$ 는 $\partial F_i / \partial x_j$ 를 의미하며 c 인덱스는 좌우 카메라를 나타낸다. 위 식들에서 함수 F 는 아래 식 (5)와 같으며 계산된 벡터를 보정하기 위해 사용된 이미지 mapping 함수를 나타내며, 세 개의 방향 성분에 대해 각각 3차 다항함수를 사용하였다.

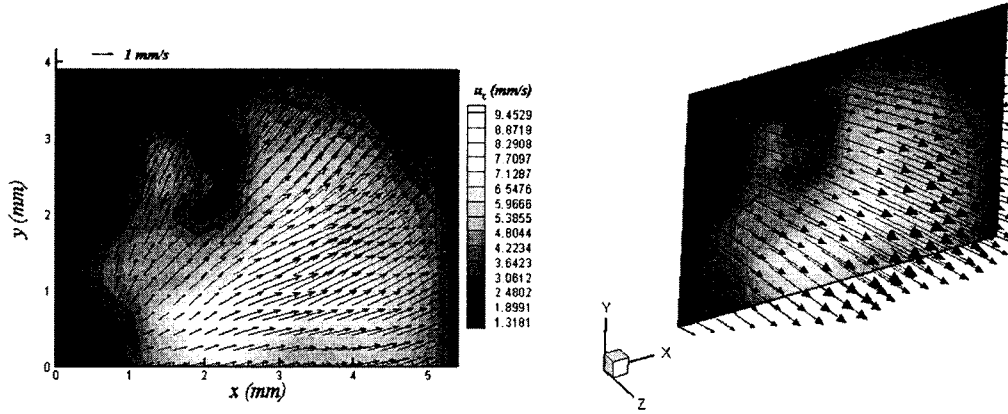


Fig. 9 3D velocity vector field of low speed jet flow

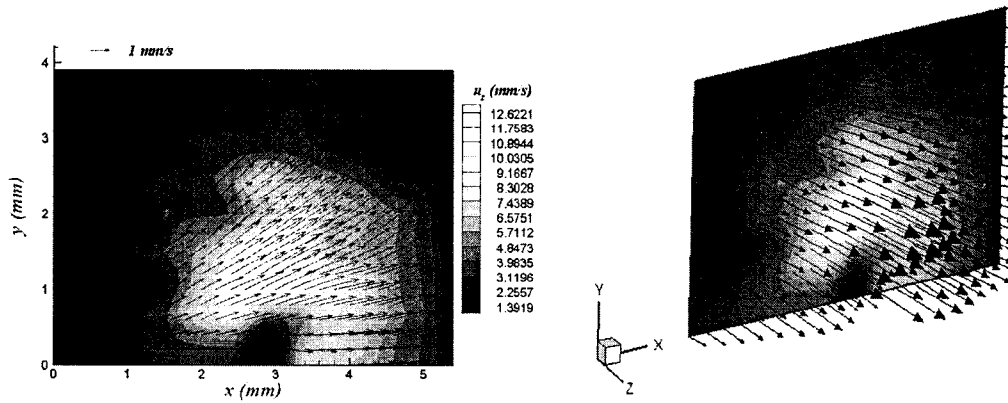


Fig. 10 3D velocity vector field of high speed jet flow

$$F = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 a_{ijk} x_1^i x_2^j x_3^k \quad (5)$$

속도장의 계산은 two-frame cross correlation 기법을 사용하여 속도 추출을 하였다.

4. 결과 및 고찰

MSPIV 시스템을 이용하여 3차원 속도 벡터장을 구할 수 있었다. Fig. 9에 보여지는 벡터장은 저속의 제트유동을 보여주고 있다. 우측중앙 지점에 위치한 제트 출구에서 나오는 제트가 주변의 유체를 교란하여 z 방향의 유동을 발생시키고

있다. 그러나 현 단계에서는 제트의 강도가 강하지 않아 주변의 유동이 제트를 향해 흡입되진 않는다. 하지만 제트의 속도가 증가한 Fig. 10에서는 제트 출구 주변에 있는 유체가 제트유동의 영향으로 조금 강하게 흡입되고 있음을 제트 주변의 z 성분 유동을 분석해보면 알 수 있다. Fig. 9와 Fig. 10의 오른쪽의 속도벡터장은 z방향 유동을 보다 자세히 나타내기 위해 비스듬히 표현한 그래프이다. 본 실험을 수행해 본 결과 MSPIV 시스템을 이용하여 3차원 유동을 성공적으로 측정할 수 있음을 알 수 있었고 차후에 펄스주기를 단축시킬 경우 고속의 유동에도 적용 가능함을 알 수 있었다.

5. 결 론

참고문헌

본 연구에서는 디지털 소자들을 이용하여 전자회로 설계기술을 적용하여 새로운 개념의 stereoscopic PIV 시스템인 Miniature Stereo-PIV (MSPIV) 시스템을 개발하였다. 본 시스템에는 저가의 CMOS 카메라 모듈과 CPLD 칩, 그리고 RAM이 사용되었다. PCB 기판을 설계하여 전자제어가 가능한 시스템을 제작하였으며 렌즈 설계기술을 적용하여 시뮬레이션을 통해 렌즈수차가 최소화된 stereoscopic 카메라를 제작하였다. Stereoscopic 카메라는 angular displacement 방식으로 제작되었으며 설치과정의 간소화를 위해 각도와 초점거리를 고정시켜 초점영역에 목표물을 위치시키는 방식을 채택하였다. 시스템의 정확성을 검증하기 위해 인공입자영상을 이용한 오차분석을 수행하였다. 수행결과 x, y, z 각 방향성분에 대해 3% 이하의 양호한 오차상태를 나타내었다. MSPIV 시스템의 3차원 속도장 측정을 검증하기 위해 저속의 원형제트 유동에 대한 3차원 유동을 측정하였다. 측정한 입자영상에 매핑함수를 적용하여 보정한 후 3차원 속도 벡터장으로 나타내었다. 보정오차는 0.3 픽셀 미만으로 일반적인 PIV 시스템의 결과와 비슷함을 알 수 있었다. 실험결과 3차원 유동을 잘 측정할 수 있음을 알 수 있었다. MSPIV 시스템은 하드웨어 개발과 병행하여 시스템의 운용 소프트웨어와 후처리 소프트웨어도 개발되었으며 차후에 상품화할 경우 stereoscopic PIV 기법의 보급과 아울러 기존의 stereoscopic PIV 기법으로 측정이 어려운 유동현상에도 적용이 가능할 것으로 기대한다.

후 기

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

- (1) Prasad, A. K. and Adrian, R. J., 1993, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry Applied to Liquid Flow," *Exp. In Fluids*, 15, pp. 49~60.
- (2) Chetelat, O. and Kim, K. C., 2002, "Miniature Particle Image Velocimetry System with LED In-Line Illumination," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 13, No. 7, pp. 1006~1013.
- (3) Chatelat, O., Yoon, S. Y. and Kim, K. C., 2001, "Design and Construction of a Miniature PIV(MPIV) System," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 12, pp. 1775~1783.
- (4) Chetelat, O. and Kim, K. C., 2002, "Design of a Particle Image Velocimetry Objective Maximizing the Image Signal-to-Noise Ratio," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 13, No. 5, pp. 667~682.
- (5) Jacquot, P. and Rastogi, P. K., 1981, "Influence of Out-of-Plane Deformation and Its Elimination in White Light Speckle Photography," *Opt. Lasers Eng.*, Vol. 2, pp. 33~55.
- (6) Prasad, A. K., 2000, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *Exp. In Fluids*, 29, pp. 103~116.
- (7) Prasad, A. J. and Jensen, K., 1995, "Scheimpflug Stereocamera for Particle Image Velocimetry in Liquid Flows," *Appl. Opt.*, 34, pp. 7092~7099.
- (8) Lawson, N. J. and Wu, J., 1997, "Three-Dimensional Particle Image Velocimetry: Experimental Error Analysis of a Digital Angular Stereoscopic System," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 8, pp. 1455~1464.
- (9) Soloff, S. M., R. J. Adrian, Liu, Z.-C., 1997, "Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 8, pp. 1441~1454.