

단일카메라 마이크로 스테레오 4D-PTV[§]

도덕희* · 조용범** · 이재민* · 김동혁* · 조효제****†

* 한국해양대학교 기계정보공학부, ** ㈜LG 전자, *** 한국해양대학교 조선해양공학부

Single-Camera Micro-Stereo 4D-PTV

Deog Hee Doh*, Young Beom Cho**, Jae Min Lee*, Dong Hyuk Kim* and Hyo Jae Jo****†

* Division of Mechanical and Information Engineering, Korea Maritime Univ.

** Division of Naval Architecture & Ocean Systems Engineering, Korea Maritime Univ.

*** Digital Appliances, LG Electronics Co. Ltd.

(Received May 27, 2010 ; Revised October 19, 2010 ; Accepted October 19, 2010)

Key Words : Micro-Stereo(마이크로 스테레오), PTV(Particle Tracking Velocimetry) (입자추적유속계), Epipolar Concept(에피폴라 개념), Micro Backward Facing Step Channel(마이크로후향단 채널)

초록: 단일카메라 기반의 마이크로 스테레오 PTV 측정시스템을 구축하였다. 단일의 카메라에 부착되는 마이크로 대물렌즈 후부에 2 개의 핀을 가진 얇은 원판을 설치하여 한 장의 영상에 스테레오 영상을 얻을 수 있었다. 스테레오 영상간의 동일한 입자영상을 대응시키기 위하여(matching) 반복계산 기반의 PTV 알고리즘을 구축하였다. 계산시간을 줄이기 위하여 에피폴라선을 이용하였으며 스테레오 영상으로부터 얻어진 동일입자들의 3 차원 위치정보(X, Y, Z)의 시간 이동량을 계산함으로써 3 차원 속도벡터를 구하였다. 측정시스템은 광원레이저(Ar-ion, 500mW), 1 대 카메라(1028 x 1024 pixel, 500fps), 2 개의 핀홀을 지닌 원판 및 호스트컴퓨터로 구성된다. 가상영상을 이용하여 2 개의 핀홀 간격과 핀홀 직경의 크기변화에 대한 측정알고리즘의 오차와 속도벡터 회복률 특성을 구하였다. 구축된 시스템을 마이크로후향단채널(H x h x W: 36µm x 70µm x 3000µm) 유동의 측정에 적용하여 얻어진 결과를 수치계산 결과와의 비교로부터 정성적으로 일치한 결과를 얻었다.

Abstract: A micro 3D-PTV system has been constructed using a single camera system. Two viewing holes were created behind the object lens of the microscopic system to construct a stereoscopic viewing image. A hybrid recursive PTV algorithm was used. A concept of epipolar line was adopted to eliminate many spurious candidates. Three-dimensional velocity vector fields were obtained by calculating the three-dimensional displacements of particles that were identified as being identical. The system consists of a laser light source (Ar-ion, 500 mW), one high-definition camera (1028 × 1024 pixels, 500 fps), a circular plate with two viewing holes, and a host computer. The performance of the developed algorithm was tested using artificial images. The characteristic of the vector recovery ratio was investigated for the particle numbers. A micro backward-facing step channel (H × h × W: 36 µm × 70 µm × 3000 µm) was measured using the developed measurement system. The results were in good qualitative agreement with other results.

-기호설명-

- c_x, c_y : 렌즈초점거리
- dis : 물리좌표계 원점과 렌즈초점간 거리
- k_1, k_2 : 렌즈굴절률 계산 상수
- m_x, m_y : 카메라 CCD 소자중심의 이동량
- v_i, v_o : 순간속도벡터와 평균벡터
- x, y : 카메라 사진좌표

- $\Delta x, \Delta y$: 렌즈굴절률
- X, Y, Z : 물리좌표계상 임의의 입자 좌표
- X_m, Y_m, Z_m : 물리좌표계상 원점의 좌표

1. 서 론

유체유동에서 벽면 거칠기에 관한 연구는 오랜 세월 동안 많은 연구자들의 연구대상이 되어왔다. 난류경계층에서는 벽면으로부터 임의의 거리이상 이 되면 스케일(scaling)법칙이 성립한다고 알려져 왔다. Lee 와 Sung⁽¹⁾은 직접수치모사(direct numerical simulation, DNS)에 의하여 벽면경계 층 거칠기에

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 마이크로/나노공학부분 춘계학술대회(2010. 5. 7., 한국기계연구원) 발표논문임.

† Corresponding Author, hjjo@hhu.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

따른 TBL(turbulent boundary layer)의 영향을 조사하였다. 그들은 벽면 거칠기가 점성저층(viscous sublayer)과 외층(outer layer)에도 난류응력분포에 영향을 미침을 밝혔다. 저층과 외층간의 강한 상호작용이 있으며 외층은 바깥쪽 경계조건에 의한 영향을 받을 수 있음을 추정하였는데 이는 기존의 연구들과 다른 성과였다. 한편, TBL 내부의 거칠기에 따른 실험적 연구가 몇몇 있어왔으나⁽²⁾ 상세한 3 차원적 유동구조 측정 해석 및 거칠기에 따른 미시적 관찰에 관한 실험적 연구는 전무한 실정이다. 직접수치모사에 의한 경계층내부 유동구조를 파악한 결과에 대한 실험적 검증은 위해서는 기존의 PIV 측정법으로는 벽면 가까이까지 측정하는데에는 한계가 있는데 이를 극복하기 위해서는 측정법이 3 차원적이어야 함과 동시에 마이크로 스케일에 가까운 측정이 되어야 한다. 일반적으로 3 차원 측정을 위해서는 2 대 이상의 카메라를 이용하는 관례로 벽면 근처의 측정에 제약을 많이 받게 된다.

Yoon 과 Kim⁽³⁾은 Jean 등이 개발한 Defocusing 3 차원측정법⁽⁴⁾기반의 아이디어를 마이크로 스케일 형태로 구현함으로써 마이크로레벨에서의 3 차원 측정을 가능케 하였다. 마이크로 Defocusing 3 차원 측정법이란 3 개의 구멍을 가진 핀홀을 마이크로 현미경의 대물렌즈의 후부에 설치하여 이들에 의한 동일 표적물(추적입자)이 Defocusing 된 형태로 나타나게 하여 이들의 기하학적 정보(3 점이 이루는 원의 크기와 원의 중심)로부터 X, Y 및 Z 를 측정하는 기법이다. 그런데 일반적으로 렌즈와 카메라의 CCD 셀의 중심이 일치하지 않는 점, 유동장을 관찰하기 위한 투명창의 존재에 의한 굴절 영향 등으로 측정영역내의 X, Y 위치에 따라서 Z 의 위치가 항상 원의 직경에 의존한다고는 볼 수 없는 관계로 X, Y 위치별 Z 정보에 대한 측정의 불확실성이 존재할 수 있다. 또한, 3 개의 구멍에 의한 유동장 영상에 나타나는 입자수의 밀도가 실제 입자수의 3 배가 되는 관계로 유동의 순간적 구조 포착에는 한계가 있을 가능성이 높다.

본 연구에서는 굴절에 의한 영향을 고려함과 동시에 입자수의 밀도를 줄일 수 있는 측정시스템 개발하는 것을 연구의 주된 목적으로 삼고 있다. Doh 등이 개발한 3 차원 입자영상유속계기술⁽⁵⁾의 카메라교정기 기법을 활용한 2 개 핀홀이 장착된 단일 카메라 스테레오 4D-PTV 측정시스템을 구현하여 이를 마이크로 후향단 채널유동측정에 적용하였다.

2. 실험 및 측정장치

2.1 실험장치

Fig. 1 과 Fig. 2 는 실험장치와 측정대상인 마이크로 후향단 유동발생부의 사양을 나타낸다. 실험

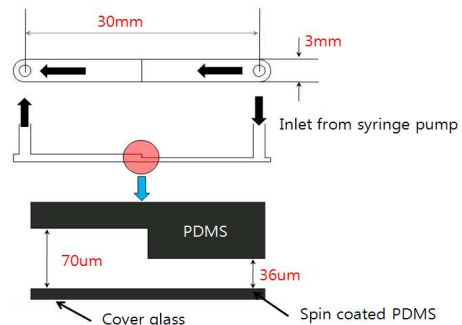
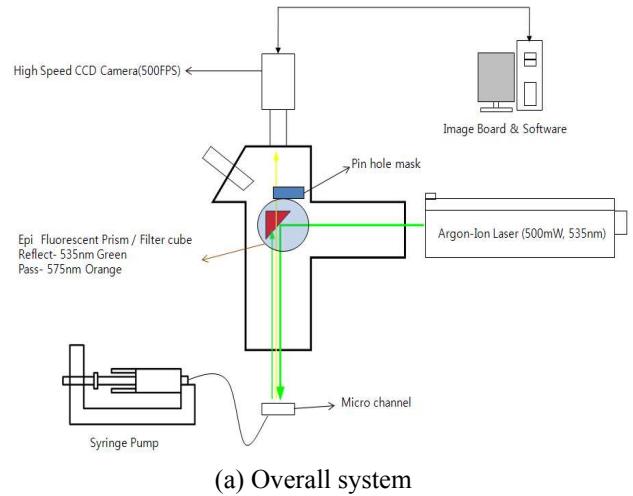


Fig. 1 Experimental apparatus

장치는 레이저(500mW, Argon), 카메라(1028 x 1024 pixel, 500frame/sec), 현미경(50x, NA=0.5), 마이크로 채널, 실린지 펌프로 구성되어 있다. 실험에 사용된 레이저의 주 파장은 535nm 의 녹색을 띠며 이 빛에 의하여 마이크로 채널내에 투입된 직경 1μm 의 Polymer Microspheres 형광입자를 여기 시키면 575nm 의 파장을 발하게 된다. Epi Fluorescent prism/ filter cube 를 이용하여 여기된 575nm 의 빛만을 통과시키게 된다. 통과된 형광입자로부터의 반사된 빛은 2 개의 pin hole 을 통하여 한대 카메라의 영상에 맺히게 되므로 궁극적으로는 한개 입자에 대하여 2 개의 분리된 입자영상이 카메라 영상에 맺히게 된다. 채널의 크기는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 폭 3mm 길이 30mm 를 가지는 후향단 채널이며 채널의 깊이는 큰 쪽이 70μm 이고 작은 쪽이 36μm 이다. 실린지 펌프로 3μl/min 의 유량을 주입하였으며 입구 유속은 약 463μm/sec 이며 Reynolds 수는 약 0.017 이다. 실험영상은 고속카메라(500fps, 1280 X 1024 pixel)로 Cover glass 를 통하여 획득하였다. 실험영상은 약 500~1000 개의 입자가 한 영상에 보일 수 있도록 조절하였다.

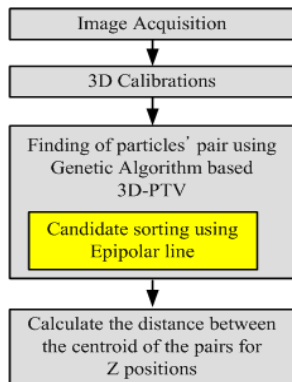


Fig. 2 Calculation procedure for particles' 3D vectors

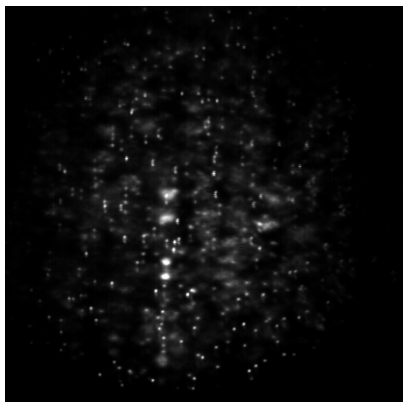
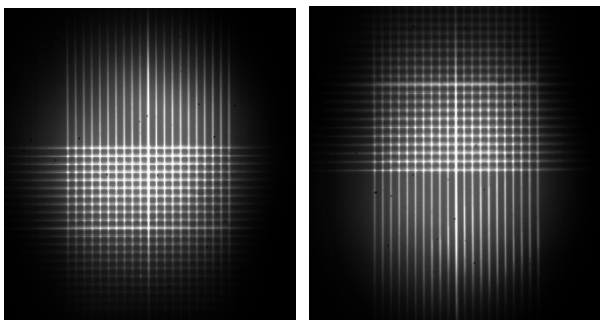


Fig. 3 Raw experimental image



(a) Viewed by left hole (b) Viewed by right hole

Fig. 4 Image of calibrator

2.2 측정원리 및 알고리즘

Fig. 2 는 입자들의 3 차원 벡터를 얻어내기 위한 전체흐름도를 나타낸다. 먼저 실제 실험영상의 획득(image acquisition) 및 3 차원 교정작업(3D calibration)과정을 거치게 된다. Fig. 3 은 핀홀을 통하여 얻어진 실제 실험영상을 나타내는데, 하나의 입자는 2 개의 핀홀(pin hole)을 통하여 얻어진 입자 영상인 관계로 2 개의 쌍으로 된 입자로 된다. 이와

같은 입자쌍으로부터 입자들의 3 차원 위치를 얻어내기 위해서는 물리좌표계(절대좌표계)에 대한 각 핀홀에 의하여 얻어진 입자영상좌표계와의 상관관계를 확보해야 한다. 즉, 핀홀에 대한 파라미터를 구해야 한다. 이를 위하여 수행되는 작업이 카메라 교정작업이다. 이 작업에서는 이미 알고 있는 3 차원 위치정보(여기서는 Fig. 4 에 있는 격자상의 교점 위치)를 가지고 핀홀의 물리좌표계에 대한 상대적 위치(파라미터)를 구하게 된다. 기존의 3 차원 정보를 얻기 위하여 Fig. 4 에 나와 있는 두께 1mm 의 유리 판위에 10µm 간격으로 형성된 격자상의 선(두께 2µm)가 형성되어 있는 교정판을 DOF(depth of focus)방향으로 1µm 씩 이동하였다. 각 위치마다 얻어진 영상을 교정작업에 사용하였다. 한편, 카메라 영상에는 좌우영상이 겹쳐서 나타나게 되는데 카메라 교정 작업시에는 동일 물체상에 생기는 좌우 영상의 분리를 위하여 Epi Fluorescent prism/ filter cube 후방에 설치된 pin hole mask 를 수작업으로 좌우 각각 폐색하여 얻었다. 얻어진 2 개의 pin hole 영상으로부터 3 차원 위치정보를 얻기 위한 카메라의 교정작업에는 Doh 등⁽⁵⁾이 적용한 10 개 파라미터법 기반의 다음의 식 (1)을 적용하였다.

$$x - \Delta x = c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m^2}},$$

$$y - \Delta y = c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m^2}} \quad (1)$$

단, $\Delta x = (x/r) \times (k_1 r^2 + k_2 r^4)$
 $\Delta y = (y/r) \times (k_1 r^2 + k_2 r^4), r = \sqrt{x^2 + y^2}$

여기서, c_x, c_y 는 이미지그래버 장방비의 차이를 고려한 초점거리, $\Delta x, \Delta y$ 는 이미지 중심으로부터의 거리에 따른 렌즈에 의한 굴절량을 나타낸다. 이어서, 카메라 교정작업후 얻어진 실제 실험영상으로부터 유전알고리즘기반의 3D-PTV 알고리즘기법⁽⁵⁾으로 입자들의 쌍을 찾아내며 다음 식 (2)는 유전알고리즘 계산에 적용된 적합도 함수를 나타낸다.

$$C = \frac{\sum_i^n |v_i - v_o|}{\sum_i^n v_i} \quad (2)$$

여기서, v_i 는 자신의 입자쌍 후보에 의하여 구성되는 속도벡터를 나타내고 v_o 는 자신을 포함한 일정 범위 내에 있는 주변입자들의 쌍에 의하여 구성되는 속도벡터들의 평균속도를 나타낸다. 이 적합방정식이 모든 입자들에 만족이 될 때까지 반

복계산을 수행하였다. 보다 상세한 계산방법은 참고문헌⁽⁶⁾에 의거한다.

한편, 많은 입자들 가운데 자신의 입자쌍을 찾아내는 관계로 계산량과 시간이 방대해 지게 된다. 이를 극복하기 위하여 Epipolar line⁽⁶⁾을 이용하였다. Fig. 5는 Epipolar line과 주변입자들의 상관관계를 나타낸다. S1, E1은 좌측 pin hole을 통하여 얻어진 입자영상의 2 시각분의 입자영상 사진좌표 위치를 나타내고 S2, E2는 우측 pin hole을 통하여 얻어진 입자영상의 2 시각분의 입자영상 사진좌표 위치를 나타낸다. Fig. 6(a)에 나타난 밝은 부분의 영역의 입자들 중 가장 맨 위의 영상은 제 1 시각에서의 left pin hole에 의한 자신의 입자(S1)을 나타내고 아래에 있는 입자들은 자신의 입자쌍으로 간주되는 동일 시각에서의 right pin hole에 의한 후보입자(S2)를 나타낸다. E1과 E2는 각각 제 2 시각에서의 S1과 S2의 속도벡터로 간주되는 후보입자를 나타낸다. 이들 (S1, E1)과 (S2, E2)로부터 유전 알고리즘 계산⁽⁶⁾을 수행하였다.

자신의 입자쌍이 구해진 다음, 이들 입자쌍들의 거리를 구함으로써 입자의 DOF(depth of focus)방향의 위치를 계산하였다. 이 때, DOF 방향에 따른 입자쌍의 거리는 교정작업 단계에서부터 기지의 목표점(target)간의 거리를 사전에 확보하여야 한다. 본 연구에서는 전술한 바와 같이 Fig. 4의 교정판상의 동일점에 대한 거리를 DOF 별로 계산하여 이

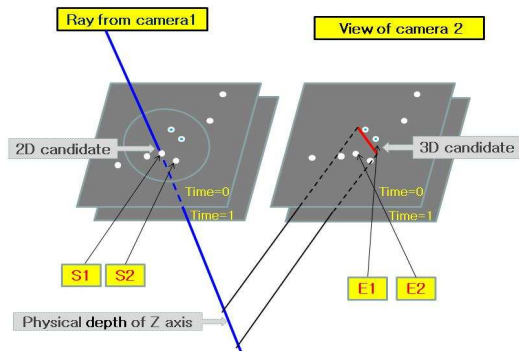
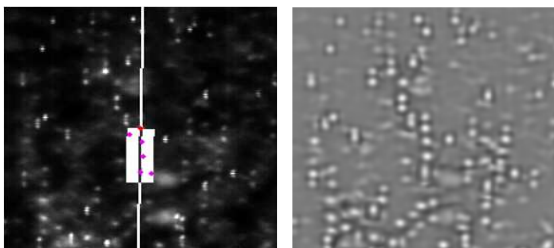


Fig. 5 Relations of the Epipolar line, (S1, E1) and (S2, E2)



(a) Raw image (b) Enhanced image

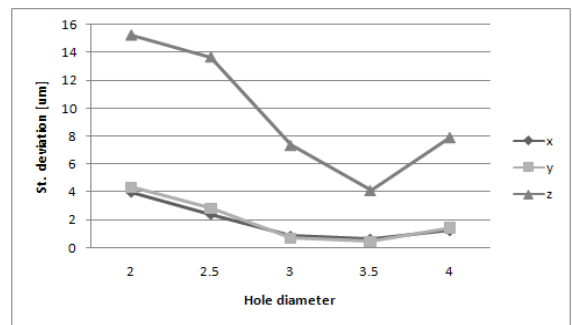
Fig. 6 Candidates with Epipolar line

들 데이터를 Z 정보로 활용하였다. Fig. 6(b)는 사진상의 입자상을 좌표로 변환하기 위하여 가우시안 필터를 활용한 영상을 나타낸다. 한편, 본 시스템으로 측정을 수행할 때의 측정오차에 대한 평가를 수행하였다. 이를 위하여 전술의 교정판(Fig. 4)을 사용하여 얻어진 핀홀에 대한 파라미터와 교정판상의 격자점들의 영상을 이용하여 계산된 3 차원 위치값과 이 교정판상의 격자점이 물리좌표계상에서 이송된 원래의 3 차원 위치값과의 비교로부터 그 차이를 측정오차로 보았다. 그 결과 측정오차는 X, Y, Z 방향으로 각각 0.083 μ m, 0.045 μ m, 0.083 μ m로 나타났다.

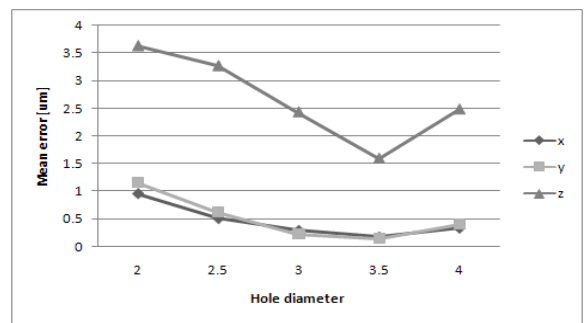
3. 결과 및 토의

Fig. 7(a)와 (b)는 2 개 핀홀의 형상(직경과 두 홀간의 거리)에 따른 측정오차를 나타낸다. 측정오차를 계산하기 위하여 전술의 교정판의 3 차원 위치 데이터와 교정판 영상을 사용하였다. 이들 그림에서 알 수 있듯이 홀의 직경이 3.5mm 이며 이들 두 개 홀의 간격이 5mm 일 때 측정오차가 가장 적음을 알 수 있다. 이는 렌즈의 종류에 따라서 최적의 직경과 간격이 존재함을 의미한다. 후술하는 실험에서는 이 조건에서 실시하였다.

한편, 실험상에 나타난 입자들의 개수변화에 대하여 얻어지는 속도벡터의 개수의 변화를 조사하



(a) 4.5mm hole spacing



(b) 5mm hole spacing

Fig. 7 The calibration performances for the configurations of the two holes

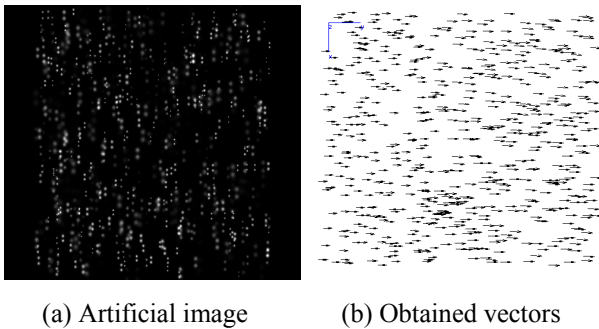


Fig. 8 Artificial image obtained by using the data⁽⁵⁾ on the cylinder wake and its velocity vectors (No.=600)

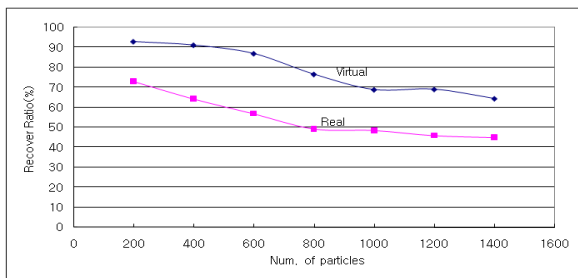
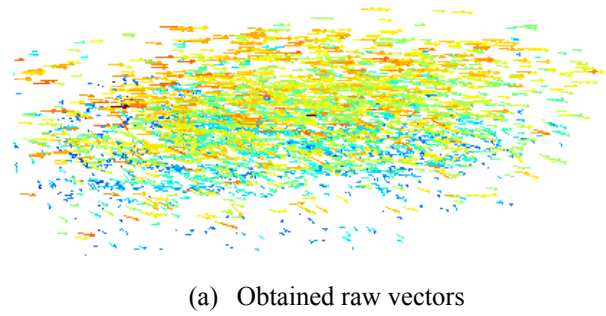
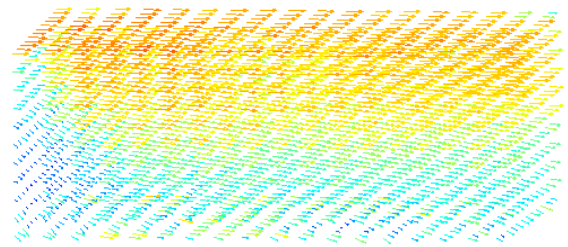


Fig. 9 The recovery ratio vs number of particles

였다. 이 때, 사용된 가상영상 작성을 위한 데이터로서는 Doh 등⁽⁵⁾의 실린더 후류에 대한 실험결과를 사용하였으며, 카메라 파라미터로서 진술의 핀홀에 대하여 얻어진 파라미터를 사용하였다. Fig. 8는 이 데이터를 이용하여 Okamoto 등⁽⁷⁾이 제시한 가상영상 작성법으로 얻어진 입자수가 600 개일 때 작성된 가상 실험영상을 나타낸다. 영상에 나타난 입자들이 쌍을 이루고 있음을 알 수 있는데 이는 Fig. 3 과 같이 실제 실험에서 얻어진 마이크로 입자영상이 쌍을 이루어 나타나고 있는 현상과 같은 관계로 구축된 가상영상은 구축된 알고리즘이 제대로 작동하고 있음을 의미한다고 볼 수 있다. 이와 같이 하여 얻어진 가상영상(artificial image) 이 Fig. 8(a)에 있으며 이를 이용한 측정 알고리즘으로 계산한 결과가 Fig. 8(b)에 나타나 있다. Fig. 9 는 입자개수 변화에 대하여 최종적으로 얻어진 속도벡터의 개수(즉, 속도벡터 회복률)의 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 입자개수가 증가함에 따라 얻어질 수 있는 속도벡터수가 점점 적어짐을 알 수 있으며 입자수가 800~1000 개에서는 속도벡터회복률의 변화가 완만함을 알 수 있다. 이는 측정을 위해서는 최적의 입자개수가 존재함을 의미한다. 본 연구에서 구축된 알고리즘의 경우 속도벡터회복률이 약 45% 전후임을 알 수 있었다.



(a) Obtained raw vectors



(b) Grid vectors

Fig. 10 Raw vectors and their grid vectors(28x25x15)

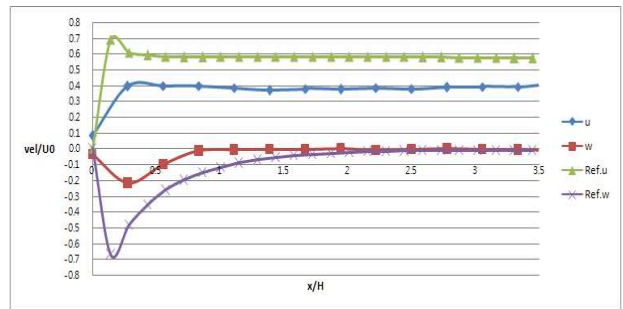


Fig. 11 Velocity profile discrepancies due to grid interpolations

Fig. 10(a)는 측정범위(X 축은 3.5H, Y 축 3.5H, Z 축 2H, H=36 μ m)내에 얻어진 3 차원 순시속도벡터들(15000 개)을 보이고 있다. 이들은 시간연속으로 얻어진 순간의 속도벡터(약 200 개 전후)를 합한 결과를 나타낸다. Fig. 10(b)는 이들을 격자상(28x25x15)에 보간한 속도벡터의 분포를 보인다. Fig. 11 은 중앙의 수직단면상에서 높이 Z=H(36 μ m)에서의 측정에서 얻어진 속도벡터와 CFD 계산결과에 의한 속도프로파일을 나타낸다.

다소 차이를 보이고 있는데 이는 한 순간에 얻어지는 3 차원속도벡터의 개수가 많지 않아(약 200 개) 격자상에 보간을 실시할 때 보간상의 오차 및 입자들의 겹침 등에 기인하는 것으로 나타났으며, CFD 계산결과와 정성적으로는 일치한다. 본 연구에서 구축한 측정시스템의 특성시간을 결정짓는 카메라의 시간해상도는 1/500sec 이다. 이 시간은 본 연구에서 측정된 후

향단채널유동(Re 수=0.017)이 층류에 해당되며 유동의 최소시간스케일($\tau = \nu / \varepsilon$)^{1/3}을 측정결과로부터 얻어진 변동성분으로 구해본 결과 약 50Hz 이었으며 이는 500Hz 보다 충분히 긴 시간인 관계로 본 연구에서의 측정시스템은 실질적으로는 공간(X, Y, Z)에 대하여 3차원 속도성분(u, v, w)을 특성시간보다 짧게 측정할 수 있는 4D-PTV 측정시스템⁽⁸⁾으로 볼 수 있다.

4. 결 론

단일 카메라 스테레오 4D-PTV 시스템을 개발하여 마이크로후향단 유동측정에 적용하는 과정에서 다음과 같이 정리할 수 있었다.

마이크로렌즈 후부에 설치되는 핀홀의 직경이 3.5mm 이며 이들 두 개 홀의 간격이 5mm 일 때 측정오차가 가장 적은 것으로 나타났는데 이는 여타 다른 렌즈의 경우에도 최적의 간격과 직경이 존재함을 의미한다. 또한 영상에 나타나는 입자의 개수가 800~1000 개 정도가 적절한 것으로 나타났다.

동일 실험조건에서의 CFD 계산결과와 비교해 본 결과 보간상의 오차가 영향을 많이 미치고 있는 것이 확인되었으며 이는 한 순간에 얻어지는 속도벡터가 적은 관계로 보간격자상 변환의 영향에 의한 것으로 나타났다. 하지만, 속도벡터 프로파일은 전형적인 후향단 유동특성을 잘 반영하고 있는 것으로 보아 보간상의 문제점을 해결하면 보다 좋은 정량적 데이터 확보가 가능할 것으로 판단되었다. 한편, 측정시스템의 교정단계에서의 측정오차는 X, Y, Z 방향으로 각각 0.083 μ m, 0.045 μ m, 0.083 μ m 로 나타났는데, 이는 측정영역내 최고, 최저 속도 및 시간해상도 (1/500sec)를 고려하면 속도성분상에는 X, Y, Z 방향으로 약 10%~20%의 상대오차에 해당되었다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 지역대우수과학자지원사업 (KRF-2007-313-D00107)과 도약과제(ROA-

2008-000-20069-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, S. H. and Sung H. J., 2007, "Direct Numerical Simulation of the Turbulent Boundary Layer over a Rod-Roughened Wall," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 584, pp.125~146.
- (2) Hyun, B. S., Suh, E. J., Kim M. R. and Choi, K. C., 2006, "Turbulent Flow over 2-D Rectangular-Shaped Roughness Elements with Various Spacings," *Journal of Korean Society for Marine Environmental Eng.*, Vol. 9, No. 2, pp.79~84.
- (3) Yoon, S. Y. and Kim, K. C., 2005, "Three Dimensional Particle Tracking Velocity Measurement in a Microchannel by Using an Aperture with Three Holes," *Proc. of 6th International Symp. on PIV*, Pasadena, California, USA, September 21-23, Paper No.S10-6.
- (4) Jean, D., Pereira, F. and Gharib, M., 2003, "Applications of Defocusing DPIV to Bubbly Flow Measurement," *Particle & Particle Systems Characterization*, Vol. 20, pp.193~198.
- (5) Doh, D. H. Kim, D. H., Cho, K. R. and Cho, Y. B. 2002, "Development of Genetic Algorithm based 3D-PTV Technique," *Journal of Visualization*, Vol.5, No.3, pp.243~254.
- (6) Fryer, J., 1996, *Camera Calibration-In 'Close-range Photogrammetry and Machine Vision*, Atkinson (Ed.), Whittles Publishing, UK, pp.156~179.
- (7) Okamoto, K., Nishio, S., Kobayashi, T., Saga, T. and Takehara, K., 2000, "Evaluation of the 3D-PIV Standard Images(PIV-STD project)," *Journal of Visualization*, Vol. 3, No. 2, pp. 115~123.
- (8) Hwang, T. G., Doh, D. H. and Okamoto, K., 2005 "4D-PTV; Measurements of an Impinged Jet with Time-Resolved 3D-PTV," *Journal of Visualization*, Vol. 8, No. 3, pp. 245~252.