

단일카메라 3차원 입자영상추적유속계-액적내부 유동측정

도덕희[†] · 성형진* · 김동혁** · 조경래*** · 편용범*** · 조용범***

Single Camera 3D-Particle Tracking Velocimetry-Measurements of the Inner Flows of a Water Droplet

Deog Hee Doh, Hyung Jin Sung, Dong Hyuk Kim, Kyeong Rae Cho,
Yong Beom Pyeon, Yong Beom Cho

Abstract

Single-Camera Stereoscopic Vision three-dimensional measurement system has been developed based upon 3D-PTV algorithm. The system consists of one camera (1k x 1k) and a host computer. To attain three-dimensional measurements a plate having stereo holes has been installed inside of the lens system. Three-dimensional measurements was successfully attained by adopting the conventional 3D-PTV camera calibration methods. As applications of the constructed measurement system, a water droplet mixed with alcohol was constructed on a transparent plastic plate with the contacted fluid diameter 4mm, and the particles motions inside of the droplet have been investigated with the constructed measurement system. The measurement uncertainty of the constructed system was 0.04mm, 0.04mm and 0.09mm for X, Y and Z coordinates.

Key Words : 단일카메라(Single Camera), 스테레오비전(Stereoscopic-vision), 3차원 입자영상추적유속계(3D-PTV), 액적(Droplet)

1. 서론

최근 컴퓨터기술의 발달에 따라 유체공학분야에서의 슈퍼컴퓨터를 이용한 수치직접모사(direct

numerical simulation)를 수행하는 연구가 늘어나고 있다⁽¹⁾. 이 연구에서는 표면조도가 난류경계층에 끼치는 영향을 보다 명확히 밝혀내는 것을 목표로 하고 있는데, 특히 표면조도가 난류 경계층에서의 표면마찰과 난류 구조에 끼치는 영향을 밝혔으며 Reynolds 수가 충분히 클 경우 표면조도가 난류구조에 미치는 영향은 표면조도의 2~5 배정도 높은 roughness sublayer까지로 제한된다는 Townsend⁽²⁾의 가설을 반증한 사례로 되어 있다.

직접수치모사에 의한 경계층내부 유동구조를

[†] 한국해양대

E-mail : doh@hhu.ac.kr

* KAIST 기계공학과

** 한국해양대 기계정보공학부

*** (주)티엔텍

파악결과에 대한 실험적 검증은 위해서는 기존의 PIV측정법으로는 벽면 가까이까지 측정하는 데에는 한계가 있는데 이를 극복하기 위해서는 측정법이 3차원적이어야 함과 동시에 마이크로스케일에 가까운 측정이 되어야 한다. 일반적으로 3차원 측정을 위해서는 2대 이상의 카메라를 이용하여야 하는데 이렇게 되면 카메라시스템이 차지하는 크기에 의하여 2대 카메라를 벽면가까이 설치하기는 용이하지 않다. 즉 벽면가까이의 유동을 상세히 측정할 경우 기존의 측정기법으로는 측정에 제약을 많이 받게 된다.

한편, Yoon과 Kim⁽³⁾은 Jean 등이 개발한 Defocusing 3차원측정법⁽⁴⁾기반의 아이디어를 마이크로스케일 형태로 구현함으로써 마이크로레벨에서의 3차원측정을 가능케 하였다. 마이크로 Defocusing 3차원측정법이란 3개의 구멍을 가진 핀홀을 마이크로현미경의 대물렌즈의 후부에 설치하여 이들에 의한 동일 표적물(추적입자)이 Defocusing된 형태로 나타나게 하여 이들의 기하학적 정보(3점이 이루는 원의 크기와 원의 중심)로부터 X, Y 및 Z를 측정하는 기법이다. 그런데 일반적으로 렌즈와 카메라의 CCD셀의 중심이 일치하지 않는 점, 유동장을 관찰하기 위한 투영창의 존재에 의한 굴절영향 등으로 측정영역내의 X, Y 위치에 따라서 Z의 위치가 항상 원의 직경에 의존한다고는 볼 수 없는 관계로 X, Y 위치별 Z정보에 대한 측정의 불확실성이 존재할 수 있다. 또한, 3개의 구멍에 의한 유동장 영상에 나타나는 입자수의 밀도가 실제 입자수의 3배가 되는 관계로 유동의 순간적 구조포착에는 한계가 있을 가능성이 높다.

본 연구에서는 굴절에 의한 영향을 고려함과 동시에 입자수의 밀도를 줄일 수 있는 측정시스템 개발하고자 하는 것을 연구의 주된 목적으로 삼고 있는데, Doh 등이 개발한 3차원 입자영상 유속계⁽⁵⁾ 기술의 캘리브레이션 기법을 활용한 2개구멍(스테레오비전)장착의 단일 카메라 3차원 측정시스템을 구현하고자 한다.

현재 구축된 측정시스템의 하드웨어사양은 미소스케일(수백 μm -수 mm)의 측정에 장점이 있는 바 본 연구에서는 나노 열유체 분야의 주요 유동 현상인 미소액적측정에 적용하였으며 이에 대한

측정의 일부를 보고하고자 한다.

2. 측정 시스템

2.1 카메라 교정

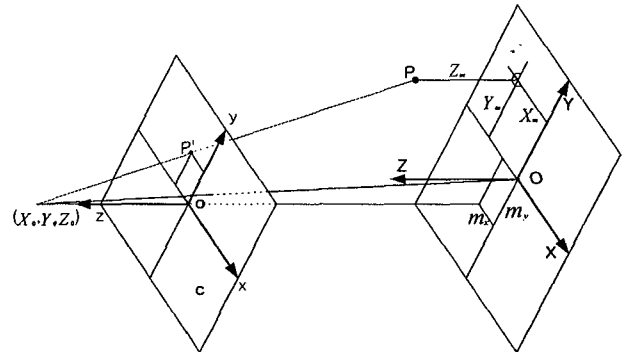


Fig. 1 Relations between absolute and camera's coordinate system

카메라를 이용하여 3차원 공간을 정량적으로 인식하기 위해서는 먼저 2대 이상의 카메라 혹은 2시선에 의한 렌즈 및 카메라 계에 대한 정보가 필요하게 되는데 이들 정보를 카메라파라미터라고 한다. 카메라파라미터와 카메라로부터 얻은 영상은 카메라 중심점에 대한 투영의 관계가 되는 원리로부터 Doh 등⁽⁶⁾은 카메라파라미터의 외부요소 ($dis, \alpha, \beta, \kappa, m_x, m_y$)와 내부요소 (c_x, c_y, k_1, k_2)의 10개의 요소파라미터법을 개발하였는데 본 연구에서는 이를 도입하였다. Fig. 1은 사진좌표계(x, y, z)와 절대좌표계(X, Y, Z)와의 관계를 나타낸다. 먼저 dis 는 절대좌표계 $O(0, 0, 0)$ 점으로부터 카메라 중심까지의 거리를 의미한다. 즉 O 점으로부터 카메라중심까지의 거리를 말한다. 사진좌표계와 절대좌표계를 일치시키기 위해 X, Y, Z축에 대한 회전각을 각각 α, β, κ 로 정의하면, 축에 대한 회전행렬은 $M_M = M_Z M_Y M_X$ 로 표시될 수 있다. 회전된 절대좌표값을 (X_m, Y_m, Z_m)로 표시하고 사진좌표계의 z축과 절대좌표계의 Z축을 일치시키기 위한 이동량을 m_x, m_y 로 표시한다. 절대좌표계의 대상점과 사진좌표계의 투영점이 일직선상에 있다

는 공선조건으로부터 식 (1)과 같은 관측방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} + \Delta x \\ y &= c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} + \Delta y \end{aligned} \quad (1)$$

단, c_x, c_y : 이미지그래버에 따른 장방비의 차이를 고려한 초점거리
 $\Delta x, \Delta y$: 이미지 중심으로부터의 거리에 따른 렌즈에 의한 굴절량

$$\left(\Delta x = \frac{x}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4), \quad \Delta y = \frac{y}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4), \right. \\ \left. r = \sqrt{x^2 + y^2} \right)$$

다음으로, 식 (1)과 같이 정의된 각 카메라 파라미터를 구하기 위해 이미 알고 있는 절대좌표값 (X_i, Y_i, Z_i)과 사진좌표값 (x_i, y_i)에 대해 관측방정식 F, G 는 식 (2)와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} F &= c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} - (x - \Delta x) = 0 \\ G &= c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} - (y - \Delta y) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

이러한 관측방정식 F, G 는 비선형 연립방정식이므로 이를 풀기 위하여 초기에 표정요소와 미지값을 가정하고 테일러 급수전개에 의한 최소자승법으로 보정량을 구하여 수렴될 때까지 근사치를 보정하는 수정 Gauss-Newton법을 사용하였다.

2.2 3차원 위치 계산

카메라의 표정요소가 구해지면 사진좌표 (x, y)와 절대좌표 (X, Y, Z)간에 식 (2)로부터 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$\begin{aligned} F &\Rightarrow \frac{c_x(X_m - m_x)}{d - Z_m} - (x - \Delta x) = 0 \\ G &\Rightarrow \frac{c_y(Y_m - m_y)}{d - Z_m} - (y - \Delta y) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

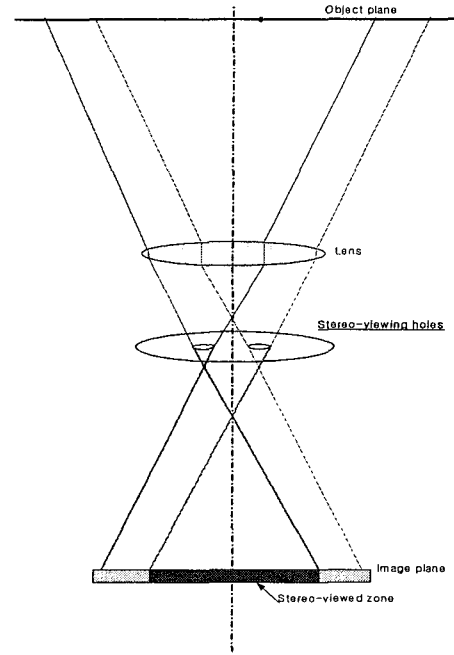


Fig. 2 Schematic of Stereoscopic Vision

$$\text{단, } d = \sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2}$$

여기서 $d - Z_m = t$ 라 두면

$$\begin{aligned} X_m &= \frac{x - \Delta x}{c_x} t + m_x \\ Y_m &= \frac{y - \Delta y}{c_y} t + m_y \\ Z_m &= d - t \end{aligned} \quad (4)$$

이 된다. 절대좌표계상에서의 사진좌표의 3차원 좌표는 다음 식(5)로 표시된다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M_M^{-1} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

한편, 카메라의 중심의 위치 (X_0, Y_0, Z_0)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X_0 &= B_{11}mx + B_{12}my + B_{13}d \\ Y_0 &= B_{21}mx + B_{22}my + B_{23}d \\ Z_0 &= B_{31}mx + B_{32}my + B_{33}d \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)으로부터 각 카메라(시선)에 대한 카메라중심 (X_0, Y_0, Z_0)과 입자의 중심을 지나는 하나의 직선의 방정식을 구할 수 있으며,

하나의 입자에 대한 두 대 이상의 카메라(시선)로부터 구해진 직선방정식을 교점이 구하고자 하는 3차원 위치가 된다.

즉, 공간상의 임의의 입자 P 점에 대해 각각의 카메라(시선)(Fig. 2)는 다음 식 (7)과 같은 직선의 방정식을 가지게 되고 두 직선(점 A와 점 B로 구성되는 직선)의 교점은 식 (8)의 최단거리의 중점으로 구해진다.

$$P(X, Y, Z) = P(a_1t + X_0, a_2t + Y_0, a_3t + Z_0) \quad (7)$$

$$A(X, Y, Z) = A(a_{11}t + b_{11}, a_{12}t + b_{12}, a_{13}t + b_{13}) \quad (8)$$

$$B(X, Y, Z) = B(a_{21}s + b_{21}, a_{22}s + b_{22}, a_{23}s + b_{23})$$

한편, 두 직선에 대한 최단거리를 가지는 t, s 를 최소자승법에 의하여 구하였다. 이로써 식(8)로부터 $A(X, Y, Z), B(X, Y, Z)$ 가 결정되면, 입자의 3차원 위치 $P(X, Y, Z)$ 는 다음 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \right\} \quad (9)$$

3. 액적 내부유동 측정

상온상태에서의 미소액적의 내부유동은 유동이 거의 정체상태인 관계로 물속에 알코올을 10%를 섞은 유체의 액적(바닥의 직경=4mm, 높이 3mm)을 형성한 다음 유동을 구축한 측정시스템으로 관찰하였다.

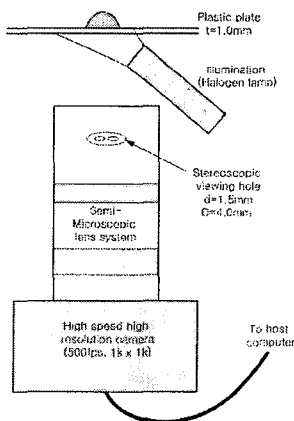


Fig. 3 Schematic of measurement setup

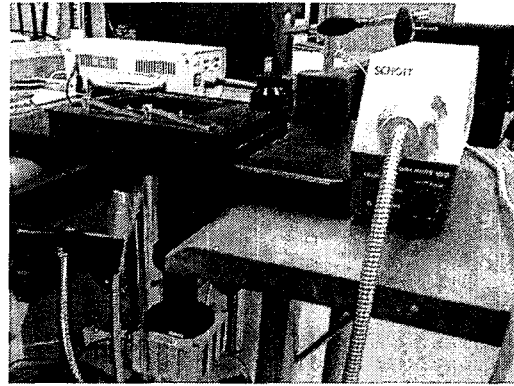


Fig. 4 Views over the experimental system

유동의 가시화를 위하여 직경 8~12 μ m, 밀도 0.4~0.9의 입자(glass hollow particle)를 사용하였다. 카메라는 고해상고속카메라(1,280 x 1,018 pixel, 500fps)를 사용하였다. Fig. 3은 액적내부의 유동을 3차원 측정하기 위한 측정시스템과 장치의 개요를 나타내며, Fig. 4는 실험장치의 사진을 나타낸다. 가시화를 위한 광원으로는 할로겐광원(150W)를 사용하였다. 3차원 측정을 위하여 카메라에 대한 카메라파라미터를 구하는 교정작업에는 절대좌표계상에서의 3차원의 기준점이 필요한데 기준점을 구성하기 위하여 두께 2mm의 유리(glass) 표면에 2차원 배열된 (직경 125 μ m, 간격 250 μ m, 크롬으로 코팅됨, 정밀도는 0.002mm) 기준점을 카메라 시선방향에 수직으로 이동시킴으로써 3차원 기준점을 구현하였다. 카메라의 이동은 카메라설치 축에 연동되어 작동하는 마이크로미터의 눈금의 변위량으로 확인하였다. 이 때, Z축의 정밀도는 측정자의 눈짐작 측정에 타당할 수 있도록 30회 이상 관찰하여 측정하였으므로 95%신뢰도에서 1/100mm정도로 볼 수 있다. 전술한 바와 같이 임의의 추적입자의 3차원 위치를 계산하기 위해서는 카메라에 대한 교정작업을 실시하여야 하며 이를 위해서는 기준점이 필요하게 되는데 Fig. 5는 두개의 구멍을 통하여 관찰된 교정기의 실제 영상을 나타낸다. 이 교정기의 기준점의 사진좌표와 기준점을 수직으로 평행이동 시켰을 때의 기준점의 3차원 위치정보로부터 카메라파라미터를 전술의 이론에 의거하여 구하였다. Fig. 6(a)과 (b)는 Fig. 3의 2개구멍 중 각각 오른쪽과 왼쪽에 의하여 관

촬영된 기준점의 영상을 나타내는데 이들 영상은 좌우 구멍을 인위적으로 번갈아 차단함으로써 취득하였다. 얻어진 총 574개의 기준점을 이용하여 카메라 파라미터를 구한 다음, 기준점의 사진좌표를 이용하여 기준점들에 대한 3차원 측정위치를 재차 복구한 다음 원래의 기준점 위치와의 측정 오차를 분석하였을 때, X, Y, Z에 대한 측정의 평균오차는 각각 0.04mm, 0.04mm 및 0.09mm였다. 이는 측정대상인 액적의 직경이 4mm인 것을 감안하면 X와 Y방향으로의 상대오차는 1%이며 X방향의 오차는 3%정도인 것으로 나타났다. 교정기로부터 반사되는 빛의 영향, 조명광원의 방향, 카메라 교정을 위한 기준점에 대한 상대적 변위를 위하여 카메라의 이동을 수동으로 수행한 점 등을 고려하여 최적의 조건을 구현한다면 측정오차는 측정영역대비 상대오차가 0.5% 이내에 들어갈 수 있을 것으로 사료된다. Fig. 7은 액적에 대한 실제 카메라의 영상을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 액적내부에 투입된 미소입자들이 두 개씩 보이고 있음을 알 수 있다. 즉, Defocusing image⁽³⁾⁽⁴⁾로 되고 있음을 알 수 있다. Defocusing 영상에서는 하나의 입자에 대하여 두개의 영상으로 나타나므로 각각의 시선(좌, 우)에 의한 동일입자영상을 찾아내어야 만이 3차원 정합을 할 수 있게 된다. 본 연구에서는 영상상에 나타난 입자의 수가 100개 이내인 관계로 Fig. 8과 같은 좌우 영상을 소프트웨어로 동일한 위치에 올린 다음 휴먼임베디드(human embedded) 작업으로 동일입자를 판별하였다.

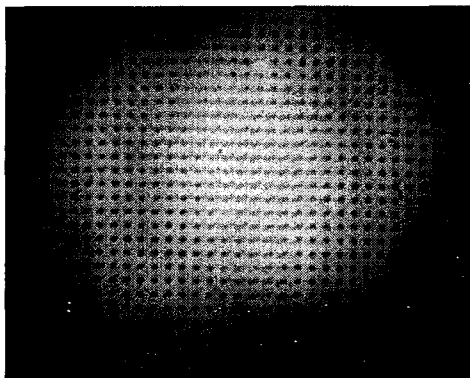
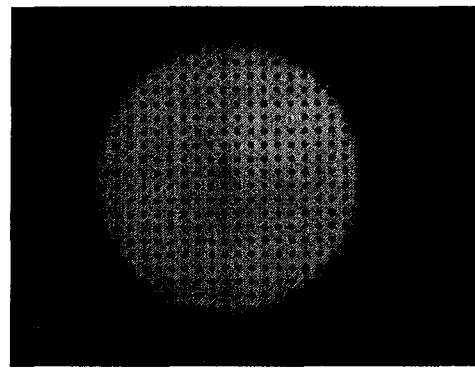
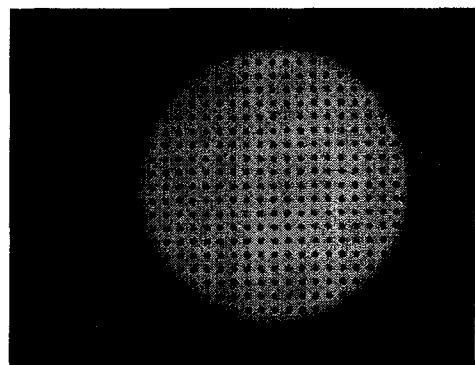


Fig. 5 Image of calibrator



(a) viewed by right hole



(b) viewed by left hole.

Fig. 6 Separated calibrator's images

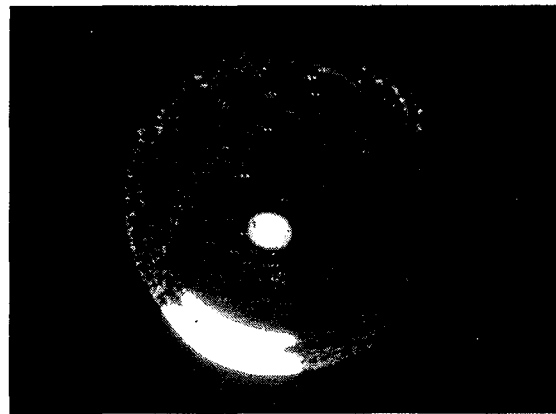


Fig. 7 Experimental image of the droplet

Fig. 9는 측정된 3차원 속도벡터의 분포를 나타낸다. 총 100개 정도의 입자영상으로부터 50개 정도의 순간 3차원 속도벡터를 얻었다. 측정된 속도벡터로부터 환산해 본 결과 액적내부의 유동의 최대속도는 10~15mm/sec 이내로 생각보다 비교적 빠른 유동을 보였다. 본 연구에서는 물에 알코올이 10%함유된 액체를 사용하였던바 유동의 양상도 매우 복잡하였으나 대체적 양상은

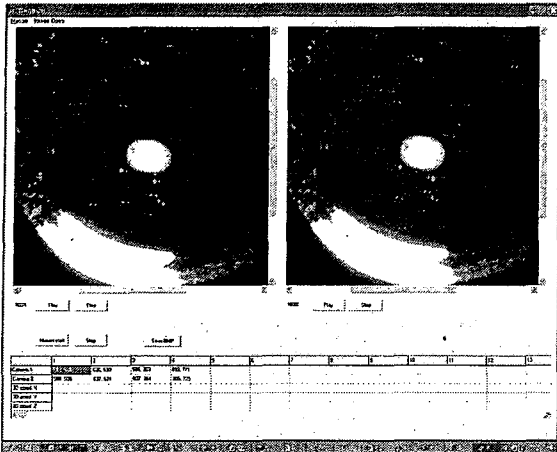


Fig. 8 Separations of same particles

그림의 화살표로 나타내었듯이 액적의 외측벽에서 상승하고 액적의 중심상부에서 하부로 하강하는 유동특성이었다. 그림의 점선은 측정된 속도 벡터를 1/125 sec 후에 유동이 변모하고 있는 양상을 나타내고 있는데 반시계방향으로 회전하는 유동특성을 지니고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 유동은 실험전반에 걸쳐 나타났는데, 이는 표면에서 증발하는 알코올성분에 의한 표면장력

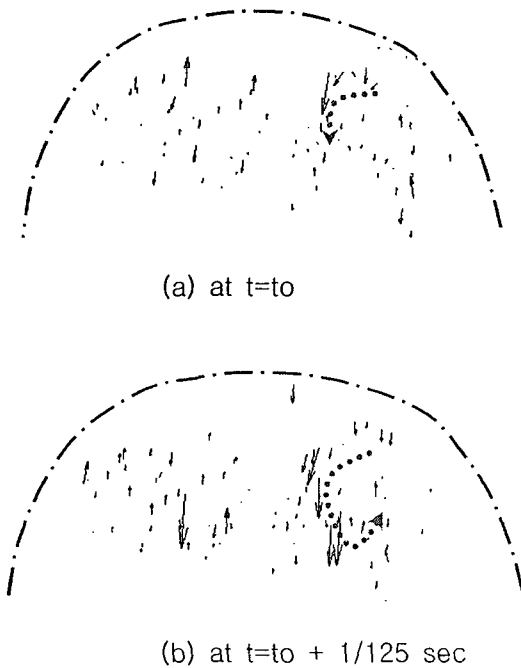


Fig. 9 Measured 3D instantaneous vectors

의 영향으로 이 부근의 강한 유동에 의한 영향으로 추론되었다.

4. 결론

단일 카메라 스테레오비전 미세유동 3차원 측정시스템을 개발하는 과정에서 다음과 같이 정리할 수 있었다. 측정시스템의 측정영역대비 상대 오차는 X, Y, Z방향으로 각각 1%와 3%이내였다. 이들 오차는 가시광원의 적절한 선택 및 배치와, 카메라교정을 위한 고정밀 자동 카메라이송장치 등의 적용에 따라 0.5%정도 이내일 것으로 사료된다. 구축된 측정시스템으로 액적내부의 3차원 유동특성을 고찰할 수 있었으며, 표면근처의 매우 강한 유동에 의하여 액적의 유동은 전반적으로 외측벽면 상승, 중앙부 하강의 양상을 보였다.

후 기

본 연구는 과기부(과학재단, 기초연구지원(특정기초, R01-2004-000-10521-0))의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Lee, S.H. and Sung, H.J., 2006, "Direct numerical simulation of turbulent boundary layer with rod-roughened wall", Journal of Fluid Mechanics, submitted.
- 2) Townsend, A.A., 1976, "The structure of turbulent shear flow, Cambridge University Press.
- 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., 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, Cho, Y.B. Cho, 2002, Development of genetic algorithm based 3D-PTV technique, Journal of Visualization, Vol.5, No.3, pp.243-254.