工學碩士 學位論文

3차원 PTV기법의 표준시험을 위한 3차원 가상영상의 구현에 관한 연구

A Study on a Construction of 3-Dimensional Virtual Images for Benchmark Test of 3-D PTV Techniques

指導敎授　都 德 凞

2000 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

機械工學科　洪 性 大

工學碩士 學位論文

3차원 PTV기법의 표준시험을 위한 3차원 가상영상의 구현에 관한 연구

A Study on a Construction of 3-Dimensional Virtual Images for Benchmark Test of 3-D PTV Techniques

指導教授 都 德 熙

2000 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

機械工學科 洪 性 大

本 論文을 洪性大의 工學碩士 學位論文으로 認准함

主 審 工學博士 金 東 赫 印

副 審 工學博士 鄭 亨 鎬 印

副 審 工學博士 都 德 熙 印

2000 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

機械工學科 洪 性 大

목 차

A Study on a Construction of 3-Dimensional Virtual Images for Benchmark Test of 3-D PTV Techniques

by

Hong Seong Dae

Department of Mechanical Engineering Graduate School

Korea Maritime University

Abstract

Virtual images are produced for the construction of a benchmark testing tool of PIV techniques. Camera parameters obtained by an actual experiment which had already been carried out for the measurement of three-dimensional positions of particles using a 3-D PIV are used to construct the virtual images. LES(Large Eddy Simulation) data sets of a channel flow are used for generating the virtual images. Using the virtual images and the camera's parameters, three-dimensional velocity vectors are obtained for the channel flow. The capabilities of a 3-D PIV algorithm called "1-Frame 3-D PTV" are investigated by comparing the results obtained by the virtual images and those by an actual measurement for the channel flow. The obtained virtual images constructed in this study can be used for the benchmark test of any 3-dimensional PTV algorithm.

사용기호

Nomenclatures

a_{ij}	:	rotation matrix
c	:	plane distance from lens center
d_p	:	radius of particle
I	:	intensity of particle
I_0	:	maximum intensity of particle
i, j	:	variables
IH	:	ideal calibration process
IK	:	ideal three dimensional coordinate
k_1, k_2	:	lens coefficient
P	:	target particle
r	:	radius
$Re_{d/2}$	:	Reynolds number with the channel's half depth "d/2"
RH	:	actual calibration process using threshold value
RK	:	actual three dimensional coordinate calculated by using threshold value
t_1, t_2	:	variables used for the calculation of 3-D position
U	:	average velocity
X_0, Y_0, Z_0	:	center of projection
x, y	:	photographic coordinate system
X, Y, Z	:	absolute coordinate system
$\triangle x$, $\triangle y$	:	lens distortion value

$\overline{x}$, $\overline{y}$: distance between photographic coordinate and deviated point of principle point of camera

x_0, y_0 : deviations of principle point of camera

Greek characters

ω : tilted angle for X axis

ϕ : tilted angle for Y axis

χ : tilted angle for Z axis

σ_l : radius of cylindrical light

Superscript

$-$: time averaged value

제 1장 서 론

1. 1 연구배경 및 목적

디지털 화상처리를 이용하여 유체유동을 연구하는 PIV(Particle Imaging Velocimetry) 계측기법(Adrian, 1991)은 동시에 다점계측이 가능하다는 이점으로부터 기존의 유체유동계측법인 Hot wire, LDV(Laser Doppler Velocimetry) 등을 이용하여 얻어내는 연구성과들 보다도 계속해서 증가 추세에 있다. PIV의 공학응용분야로의 적용도 건축환경관련유동(도덕희 등, 1998), 음향류유동(도덕희 등, 1998), 오일펜스유동(도덕희 등, 1998), 혈류유동(서상호 등, 1999) 등을 포함한 유동현상뿐만 아니라 고체의 운동해석(도덕희 등, 1997)에 이르기까지 그 응용분야가 아주 다양해지고 있다. 이처럼 PIV는 유체유동해석에 도움을 줄 뿐만 아니라 공학분야로의 응용에 있어서 많은 이점을 제공한다.

산업분야에서 많이 보이는 유체유동장의 대부분은 3차원성이 강하며 공학적 응용가치가 있는 유동장들이 3차원적인 경우가 대다수이기 때문에 최근 3차원 PTV (Particle Tracking Velocimetry)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(도덕희, 1999). 그러나, 3차원 계측법 자체를 평가할 수 있는 표준적 도구가 없기 때문에 3차원 계측법에 의하여 얻어진 결과에 대한 오차평가나 신뢰성평가는 계측자 개인적인 경험에 의하거나 다른 계측법에 의한 계측결과물들과의 비교에 의하여 이루어지고 있는 실정이다.

Chang and Tatterson(1983)과 Chang et al.(1984)들은 Bolex stereoscopic lens를 장비한 16mm 율동사진카메라를 이용하여 다중사진기법으로 실용적인 속도계를 처음으로 고안하였다. 그들의 속도계는 수조내부에 혼합된 3차원 난류 유동계측에 아주 유용한 방법으로 알려졌다. 그러나 이 기법의 커다란 단점은 사진기법

에 있어서 작은 시선각으로부터 얻어진 3차원 좌표에서 깊이방향의 정확도가 떨어진다는 것이다. 이를 증대시키기 위해서 넓게 확산된 점들로부터 유동장의 관찰이 요구되어진다. 두 직각방향에서 유동장을 관찰하는 방법으로 3차원 입자의 위치를 계산하는 과정은 간단하게 해결할 수 있다. 이런 기법의 고안은 Yamakawa and Iwashige(1986), Racca and Dewey(1988), Adamczyk and Rimai(1988), 그리고 Kobayashi et al.(1989) 등에 의해서 이루어졌으나, 이들 기법들 또한 단순유동장의 계측에만 적용되었다. 따라서 복잡한 유동장에서는 다양한 시각의 구성이 가능한 속도계가 필요하게 되는데 Kasagi et al.(1987), Nishino et al.(1989), 그리고 Papantoniou and Dracos(1989)등은 고속으로 데이터를 처리하며 섬세한 카메라 배치를 구현한 뒤 3대의 카메라를 사용하여 위에서 언급한 요구를 충족시키는 3차원 PTV를 개발하였다. Kasagi et al.(1991)은 2차원 채널유동에 3대의 CCD(Charge Coupled Device) 카메라를 이용하여 3차원 속도 분포를 얻을 수 있었다. Kent(1993) and Trigui et al.(1995)등은 연소가 없는 상태의 연소실에 3차원 PTV를 적용하였다. Hassan et al.(1992, 1997)과 Murai(1997)은 기포유동의 계측에 3차원 PTV를 적용하였다. Nishino et al.(1995, 1998)은 로켓트에서 미소중력유동장의 계측에 3차원 PTV를 적용시켰다.

3차원 PTV와 관련된 대부분의 연구들이 NTSC(National Television System Committee) 표준 CCD 카메라를 사용하고 있기 때문에 시간해상이 1/60초로 제한되어있었다. 하지만 이러한 기법들로는 속도가 상대적으로 빠르고 비교적 조사영역이 작은 경우에는 속도분포를 계측하기란 어렵다. 이러한 연유로 고속카메라를 사용하기도 하지만 장비의 가격이 비싼 단점이 있다.

Kobayashi et al.(1991)은 이 두가지 문제를 해결하기 위하여 AOM(Acousto-Optical Modulator)이라 불리우는 광학장치를 이용하여 4-Frame PTV 계측법을 구축하였다. 그러나, 결과가 2차원 계측에 한정되었고 동일 입자를 찾는 회복률이 Baek and Lee(1996)의 2-Frame PTV알고리듬 보다 상대적으로 낮았다. Baek and Lee가 작은 시간 간격에 의해서 분리된 이미지로부터 확률적으로 일치점을 이용하는 것에 의해서 95%이상의 벡터를 회복하였지만 이도 역시 2차원적 계측에

국한되었다. 가장 최근에 발표된 D. H. Doh et al.(Sep, 1999)의 연구에서는 1-Frame 3-D PTV 알고리듬이 개발되었는데 Baek and Lee(1996)의 일치확률법을 적용하고 NTSC Standard CCD 카메라의 Field 간격의 제한을 극복하기 위해서 AOM장치를 이용하여 근본적인 3-D PTV의 단점을 극복하였다.

PIV 및 PTV 계측법은 2차원적인 것에서부터 3차원적인 계측법으로의 전환을 맞고 있다. 그러나 각 계측법 자체에 대한 계측의 성능 등과 관련된 평가는 체계적이지 않기 때문에 PIV / PTV 계측법을 이용하고자하는 연구자들의 신뢰를 완전하게 정착시키지 못하고 있는 실정이다. 따라서 PIV / PTV 계측법이 유체공학 분야의 계측법으로서 확고한 도구로서 활용되기위해서는 계측법 자체에 대한 평가기준이 마련되어져야 한다.

개별의 연구자들은 각자의 연구목적에 따라서 다양한 계측알고리듬으로 소기의 연구성과를 얻고 있으나 그 계측알고리듬 자체에 대한 평가를 연구자 스스로가 실시하고 있다. 이는 PIV를 이용한 유동장의 3차원 계측법에 상대적인 평가기준을 마련하기가 어려움을 의미한다.

하나의 표준실험장치에 대하여 개별의 연구자들이 각자의 계측알고리듬으로 계측을 한 후 자신의 계측알고리듬의 성능이나 계측오차평가를 할 수도 있다 (Okamoto et al., 1999). 그러나, 표준실험장치가 설치되는 환경이나 실험조건이 계측결과에 다양하게 영향을 미치게 되므로 이 또한 계측알고리듬에 대한 평가도구로서 설정하기에는 많은 어려움이 따를 수 있다. 이와 같은 점을 고려하여 VSJ(Visualization Society of Japan)에서는 벽면 충돌제트에 대한 수치계산결과를 이용하여 Virtual Image를 구현한 뒤 이를 PIV여러 연구자들이 보유하고 있는 알고리듬에 대한 표준적 평가도구로서 활용할 수 있도록 Web site(http:// www.vsj .or.jp/piv/)를 통하여 제공하고 있다.

그런데 화상의 해상도나 영상의 밝기정보 등은 표준화상의 구현과정에 따른 표

준화상자체에 대한 오차를 포함할 수 있음을 배제할 수 없을 뿐만 아니라 그 자체에 대한 정보가 필요하기 때문에 현재 개발되어 있는 3차원 계측알고리듬에 대한 평가를 보다 정확히 하기란 어려운 실정이었다.

따라서, 본 연구의 목표는 표준화상에 대한 보다 구체적이고 용이한 데이터 취급을 위하여 독자적인 표준화상을 구현함에 있다.

본 연구에서는 3차원 PIV(PTV)계측법의 원리를 카메라의 교정에서부터 3차원 속도벡터를 구하는 일련의 과정을 살펴보고 3차원 PTV의 보편화를 위한 표준화의 기초작업으로 3차원 채널유동에 대한 표준영상을 구현하고 이를 이용하여 가장 최근에 개발되어 발표된 1-Frame 3-D PTV 알고리듬을 검증하며 실제의 실험장치를 구성하여 채널유동에서의 실험을 실시하고 도출된 결과와 비교분석한 후 구현된 3차원 가상영상으로 3차원 PTV를 정확하고 효과적으로 평가할 수 있는 표준도구로서의 적용 가능성을 제시하는 것을 목적으로 한다.

제 2장 본 론

2. 1 3차원 PTV의 원리

2. 1. 1 카메라 교정의 원리

우리가 3차원 공간을 정량적으로 인식하려면 최소한 2개 이상의 눈이 필요하듯 카메라를 이용한 계측의 세계에서도 2대 이상의 카메라가 필요하다. 우리의 두 눈이 안면에 고정되어 있으면서 두 눈간의 상대적 운동이 순간적으로 신경세포로 전달되므로 우리는 공간을 실시간으로 인식할 수 있다. 이처럼 카메라를 이용하여 3차원 공간을 인식하기 위해서는 카메라간의 상대적 운동을 인식시킬 필요가 있는데 이를 3차원 계측에서는 카메라 교정이라 한다. 다시말하면, 카메라의 교정작업은 절대좌표계(지상좌표계)에서 측정영역내에 기지의 값으로 3차원적으로 배치되어 있는 점들을 추적입자로 가정하여 이들의 기준점들과 카메라의 사진좌표와의 상관관계를 나타내는 식인 공선의 조건식(2.1)을 이용하여 카메라의 외부 파라메타 $(X_0,\ Y_0,\ Z_0,\ \omega,\ \phi,\ \kappa)$와 내부 파라메타 $(c,\ x_0,\ y_0,\ k_1,\ k_2)$를 구하는 작업이다.

$$x = -c\,\frac{a_{11}(X-X_0)+a_{12}(Y-Y_0)+a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0)+a_{32}(Y-Y_0)+a_{33}(Z-Z_0)} + \triangle x$$

$$y = -c\,\frac{a_{21}(X-X_0)+a_{22}(Y-Y_0)+a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0)+a_{32}(Y-Y_0)+a_{33}(Z-Z_0)} + \triangle y \qquad (2.1)$$

$a_{11} = \cos\phi\cos\kappa,$

$a_{12} = -\cos\phi\sin\kappa,$

$a_{13} = \sin\phi,$

$$a_{21} = \cos\omega\sin\varkappa + \cos\omega\sin\phi\cos\varkappa,$$

$$a_{22} = \cos\omega\cos\varkappa - \sin\omega\sin\phi\sin\varkappa,$$

$$a_{23} = -\sin\omega\cos\phi,$$

$$a_{31} = \sin\omega\sin\varkappa - \cos\omega\sin\phi\cos\varkappa,$$

$$a_{32} = \sin\omega\cos\varkappa + \cos\omega\sin\phi\sin\varkappa,$$

$$a_{33} = \cos\omega\cos\phi$$

Fig. 2.1은 카메라교정의 원리를 나타내는 그림이다. 여기서, (X, Y, Z)는 대상물 P의 절대좌표, (X_0, Y_0, Z_0)는 투영중심의 절대좌표, c는 화면거리, (x, y)는 대응하는 사진상의 사진좌표이며, a_{ij} 는 사진 좌표와 절대좌표와의 상관관계로부터 구해지는 회전행렬의 요소이다. 또한 실제의 카메라에 의한 촬영에서는 렌즈 및 필름의 상태에 의해 사진좌표의 위치에 영향을 미치게 되는데 카메라렌즈의 왜곡에 의한 수정량을 $\triangle x$, $\triangle y$로 두었으며 식(2.2)으로 표시된다.

$$\begin{aligned}
\triangle x &= x_0 + \overline{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\
\triangle y &= y_0 + \overline{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\
r^2 &= (\overline{x^2} + \overline{y^2}) / c^2 \\
\overline{x} &= x - x_0, \quad \overline{y} = y - y_0
\end{aligned} \tag{2.2}$$

여기서, (x_0, y_0)는 주점위치의 이동량을 나타내며, $(k_1 r^2 + k_2 r^4)$의 항은 방사방향의 왜곡수차에 의한 카메라 렌즈의 왜곡을 나타낸다.

2. 1. 2 3차원 위치 결정의 원리

카메라의 교정작업을 통하여 절대좌표계에 대한 카메라들의 위치 및 자세가 구해지면 이번에는 역으로 3차원 공간상에서의 놓여진 미지의 점에 대하여 각 카메라들로부터의 직선들의 교점을 구하면 미지의 점에 대한 3차원 위치가 결정되게 된다. Fig. 2.2는 위치와 기울기가 서로 다른 2대의 카메라로 촬영한 경우의 원리도를 나타내고 있다. 지상좌표계의 좌표가 (X, Y, Z)인 표적 P를 투영중심이 $O_1(X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$이고, 3축의 기울기 각도가 $(\omega_1, \phi_1, \kappa_1)$인 카메라 1과 투영중심의 지상좌표계 좌표가 $O_2(X_{02}, Y_{02}, Z_{02})$이고, 3축의 기울기 각도가 $(\omega_2, \phi_2, \kappa_2)$인 카메라 2로 촬영했을 때 입력된 상은 투영중심으로부터 화면거리만큼 떨어진 평면상에 투영된 것과 같다. 전절에서 카메라의 파라메타가 구해지면, 투영중심, 사진좌표, 피사체간의 공선조건식이 결정되므로 이것을 이용하여 피사체의 3차원좌표는 다음과 같이 결정된다.

즉, 식(2.1)를 변형하면 대응하는 한 조의 사진좌표계 (x, y)로부터 절대좌표계 (X, Y, Z)로의 변환은 식(2.3)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{pmatrix} \tag{2.3}$$

카메라 1과 2의 입자화상에 대응하는 사진좌표 $p_1(x_1, y_1)$, $p_2(x_2, y_2)$는 식(2.3)에 의해 사진좌표계로부터 절대좌표계로 변환되며 이들 점과 카메라들이 형성하는 3차원 좌표에 대한 관측방정식은 식(2.4)으로 표시되며 이 식은 각각의 카메라가 형성하는 2개의 직선들이 교차하는 3차원 교점을 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} = \frac{1}{2}\left[\begin{pmatrix} X_{01} + X_{02} \\ Y_{01} + Y_{02} \\ Z_{01} + Z_{02} \end{pmatrix} + t_1 \begin{pmatrix} X_{p1} - X_{01} \\ Y_{p1} - Y_{01} \\ Z_{p1} - Z_{01} \end{pmatrix} + t_2 \begin{pmatrix} X_{p2} - X_{02} \\ Y_{p2} - Y_{02} \\ Z_{p2} - Z_{02} \end{pmatrix}\right] \tag{2.4}$$

이때 $(X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi})(i = 1,2)$는 제 1카메라, 제 2카메라의 좌표변환 후의 사진상이며, 미지수 t_1, t_2는 매개변수로서 최소자승법에 의하여 구해지게 된다.

2. 1. 3 3차원 속도 결정의 원리

3차원 속도를 구하기 위해서는 추적 대상물이 공간상에서 적어도 두 시각 이상에서 인식되어져야 한다. 다시 말하면, 3차원 속도는 임의의 시간동안 동일한 추적 대상물이 공간상에서 움직인 공간좌표의 이동량을 알기만 하면 구해지게 된다. 그러나, 유동장 속에 수많은 추적 입자들이 들어있기 때문에 동일입자를 어떻게 인식하느냐가 문제가 되는데 이는 전술의 3차원 위치를 결정함에 있어서 각 카메라와 각 카메라의 화상에 나타난 수많은 입자들의 사진좌표들이 형성하는 직선들간의 거리가 가장 작은 쌍을 동일한 입자로 판정하여 해결한다.

두 시각사이에서 입자의 이동량을 알아야 만이 속도가 구해지므로 최소한 두 장 이상의 화상이 존재하여야만 한다. 화상위에 존재하는 입자들의 도심좌표를 구한 다음 이를 사진좌표로 하여 전술의 3차원 위치결정법에 의하여 입자들의 3차원 좌표를 구한다. 같은 방법으로 다음 시각에서의 3차원 좌표를 구한 뒤 두 화상사이의 시각차로 나누면 3차원 속도가 구해지게 된다. 추적입자의 도심좌표는 어떤 기준 농도치로부터 화상의 농도를 이진화 한 뒤 그 입자들의 형상에 대한 면심을 계산함으로써 구해진다.

3차원 속도계측을 위한 계측의 알고리듬에는 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 하나는 시간·공간대응법이고 또 다른 하나는 공간·시간대응법이다. 전자는 복수대의 각 카메라의 화상으로부터 구해지는 입자의 2차원 유적을 먼저 구한 뒤에 2차원 유적선끼리 공간상에서 대응시킴으로써 3차원 속도를 구하는 방법이며 후자는 직접 3차원 공간상에서 입자의 위치를 먼저 대응시킨 다음 시간상에서 동일의 입자를 찾아서 시계열상에서 대응시키는 방법이다.

본 연구에서 적용하는 알고리듬은 후자의 기법으로 공간상에서 한 시각에서의 3

차원 위치를 계산한 다음 그 다음 시각에서의 공간상의 동일한 입자를 찾아내는 방법이다. 이때 동일의 입자추적은 일치확률방식을 공간상에 확장하여 공간상에서 추적할 수 있도록 하였다. 이 기법은 2장의 연속된 디지털화상내에 있는 입자의 가능한 모든 변위벡터를 고려한 후 각 변위들에 대한 일치확률을 정의하고 불일치확률과 함께 반복 계산함으로써 일치확률밀도가 가장 높은 것을 변위벡터로 결정하는 방식이다. 즉 이 기법은 먼저 카메라의 교정작업을 끝낸 후 입자들의 3차원 위치를 계산하여 움직인 3차원 벡터에 두 시각차를 나누면 3차원 속도가 얻어지게 된다.

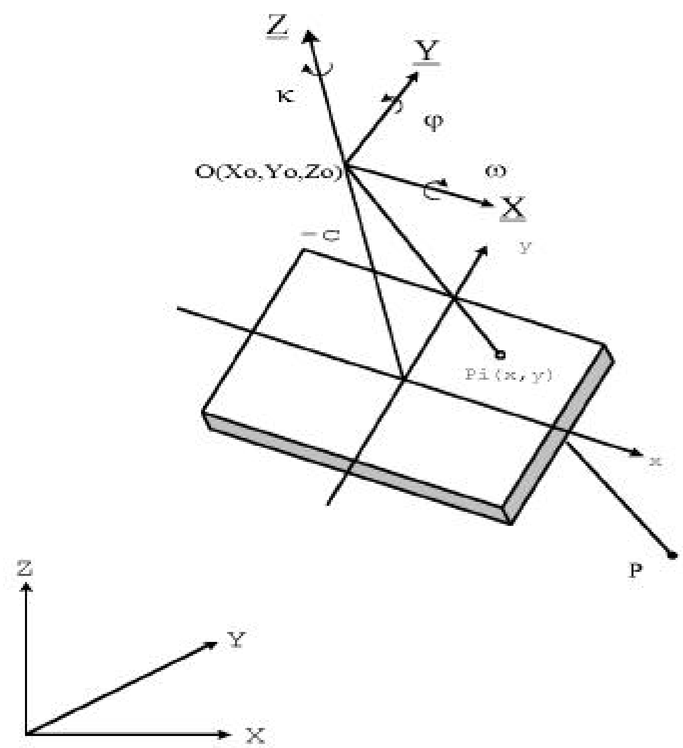

Fig. 2.1 Relations between absolute and camera's coordinate system.

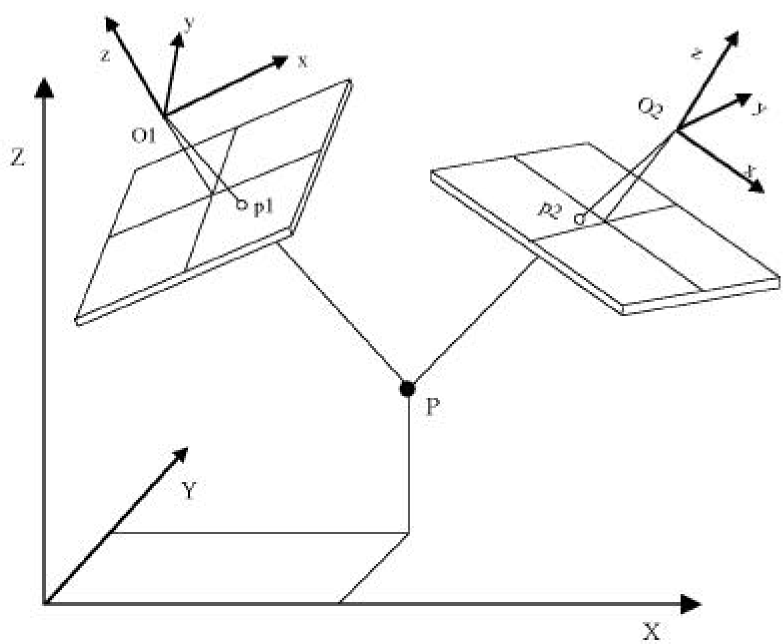

Fig. 2.2 Definition of 3-D position of particle.

2. 2 가상영상의 구현

2. 2. 1 가상영상의 구현을 위한 파라메타

Willert와 Gharib등은 DPIV(Digital PIV)기법의 평가를 위한 PIV 가상영상(32 × 32 pixel의 상관영역에서 11개 정도의 입자가 포함되어 있는 경우에 8 pixel의 변위에 대한 측정오차가 0.8 pixel)을 제시했으며, Okamoto등은 젯트 유동의 3차원적 운동을 고려한 PIV 표준영상의 구성과 PIV 표준 계획(PIV-STD3D)을 제시했다. 그러나, 초점길이, 렌즈의 굴곡, 영상의 중심으로부터의 원점의 이동과 같은 카메라의 내부요소가 언급되지 않았다.

PIV 가상영상의 구현의 목적은 PIV기술을 위한 평가도구를 구성하기 위한 것이다. 표준시험을 위한 가상영상의 형성을 위하여 고려되어야할 가장 기본이 되는 요소들을 나열하여 보면 다음과 같다.

첫째, 입자 밀도, 입자의 농도, 속도, 속도 기울기, 레이저 빔의 두께 등등은 PIV 영상의 구성에 있어서 반드시 고려되어 설계되어야 한다.

둘째, 순간적으로 변화하는 유동과 3차원적 유동등과 같이 활동적인 유동장을 위한 재생성, 가장 중요한 처리과정의 하나인 입자 위치의 결정과정을 비롯하여 카메라의 방향과 위치, 렌즈의 확대 정도가 고려되어야 하며, 실제의 유동장이 수조내부에서 형성되므로 수조벽의 굴절을 감안해야한다.

셋째, 평가를 위한 신뢰성을 가진 데이터 즉, 각 PIV기법의 성능을 검증하기 위하여 비교할 수 있는 믿을 만한 데이터가 제공되어야 한다.

넷째, 일반적으로 모든 연구자들이 개발한 알고리듬의 평가을 위하여 가상 영상

에 쉽게 접근할 수 있도록 구성되어야 한다.

본 연구에서는 1-Frame 3-D PTV 알고리듬의 표준시험을 위해서 3차원 계측의 최종정확도에 영향을 주는 모든 요소를 고려하였으며, 그 생성과정을 다음에서 논의 하기로한다.

2. 2. 2 채널유동에 대한 가상영상의 생성

먼저 데이터의 신뢰성을 위하여 채널유동에 대한 LES의 계산결과를 이용하였는데 그림 2.3에 그 채널유동의 가상 유동장의 개략도를 보이고 있다. 레이놀즈수($Re_{d/2}$)는 3300이며 모형의 크기는 x, y, z에 대하여 각각 3.2H × 1.0H × 1.6H 이다. Fig. 2.4는 LES의 계산을 위하여 정렬된 64 × 32 × 32격자의 volume이다. 데이터의 시간간격은 0.5msec로 총 750msec이다.

절대 좌표계는 Fig. 2.3에 보여지는 것처럼 카메라의 위치와 방위백터를 고려한 절대좌표가 카메라 좌표계로 변환되는 것에 의해서 얻어진 사진좌표계의 입자위치에 의해서 결정된다. 카메라는 Fig. 2.5에 보여지는 것처럼 채널 유동장에 대하여 상, 좌우로 배치하여 실제의 실험에서의 조건과 일치하도록 하여 3차원 PIV 알고리듬의 표준시험을 구현하기 위하여 배치하였는데, 가상영상의 생성을 위하여는 카메라의 거리를 500mm로, 방위를 각각의 카메라에 대하여 span-wise로 -2, 8, -2를 부여하였다.

또한, 본 연구에서 굴절에 대한 영향은 카메라의 가시각이 유동장의 벽에 대하여 거의 직각을 이루고 있으므로 스넬의 법칙에 의하여 고려하였다. 참고로 물의 굴절률은 1.33이며 아크릴의 굴절률은 1.51이다.

생성된 이미지의 해상도는 512 × 512 pixel이며, 각 pixel은 256(gray level, 8bit) 이다. 입자의 이미지는 각 카메라 영상에 대하여 생성되었다. 이미지상에서 위치 (X, Y)에 대한 농도는 투사된 (X_p, Y_p)가 입자 (x_p, y_p, z_p)로부터 산란되어진 빛 때문에 식(2.5)로 표현된다.

$$I(X, Y) = I_0 \, \mathrm{Exp}\left(\frac{(X - X_p)^2 + (Y - Y_p)^2}{-(d_p/2)^2}\right) \qquad (2.5)$$

최대 농도 (I_0)는 레이져 조명을 묘사하기 위하여 입자위치를 고려한 식(2.6)로 결정되어진다. 빛은 계측영역에 대하여 평행하고 원주형으로 조명되는 것으로 가정한다.

$$I_0 = 240 \, \mathrm{Exp}\left(- \frac{z_p^2 + x_p^2}{\sigma_l^2}\right) \qquad (2.6)$$

여기서, σ_l은 원주형 빛의 반경으로 본 연구에서는 해상도를 높이기 위하여 500으로 하였다. 최초의 상태에서 입자는 임의로 일정한 영역안에서 생성되는데, 입자의 반경은 입자의 표준 거리와 평균을 고려하여 실제의 실험에서 사용되어진 입자들을 획득된 영상을 통하여 확인했을 때 입자의 크기가 유니폼하였기에 가상영상에서의 초기에 임의로 생성된 입자 수를 50개부터 2000개로 하였을 때의 입자밀도를 고려하여 2.5pixel로 통일하였다.

하나의 시험영역에서의 순시 3차원 속도 분포는 매 15msec 간격으로 하였으며 이미지상에서 입자의 이동은 LES의 계산 결과로부터 얻어진 순시 3차원 속도 벡터를 이용하여 계산되었다. 다음 영상에서 입자의 가상위치를 만들기 위하여 입자의 위치는 이동되어진다. 이렇게 다음 시간 단계의 새로운 영상이 식(2.5)과 식(2.6)를 이용하여 생성된다. 이러한 과정이 필요한 어떤 시간동안 계속되어진다. 여기서 입자의 수를 증가시키면 겹치는 입자의 수가 따라서 증가하기에 입자의 겹침의 정도를 줄이고 정확한 입자의 도심을 얻기 위해서 초기에 생성되는 이미지를 512 × 512 pixel의 5배로 하였다.

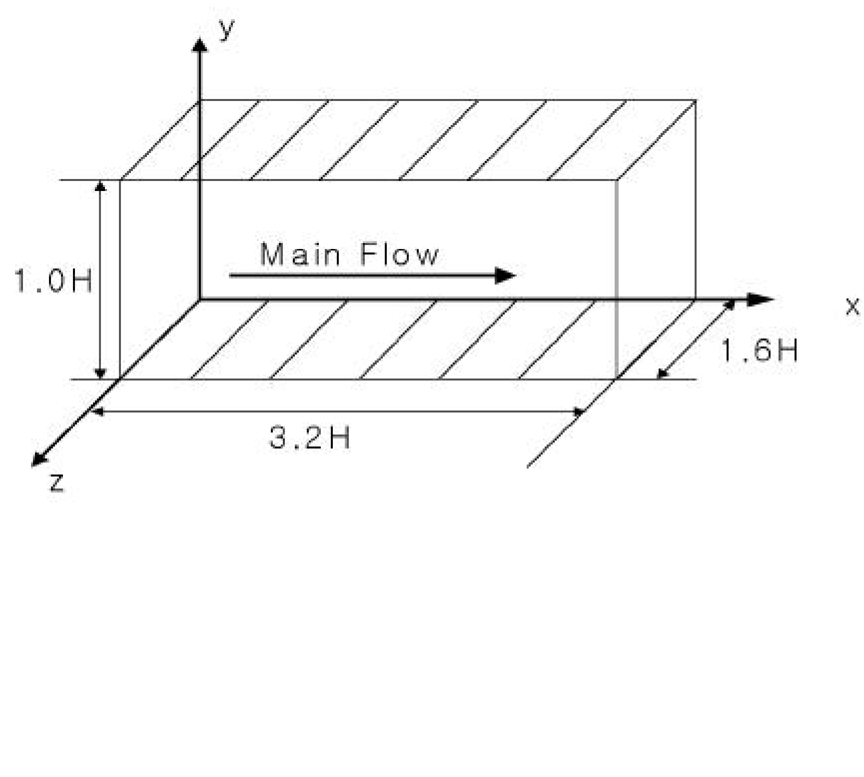

Fig. 2.3 Schematic of the target flow field.

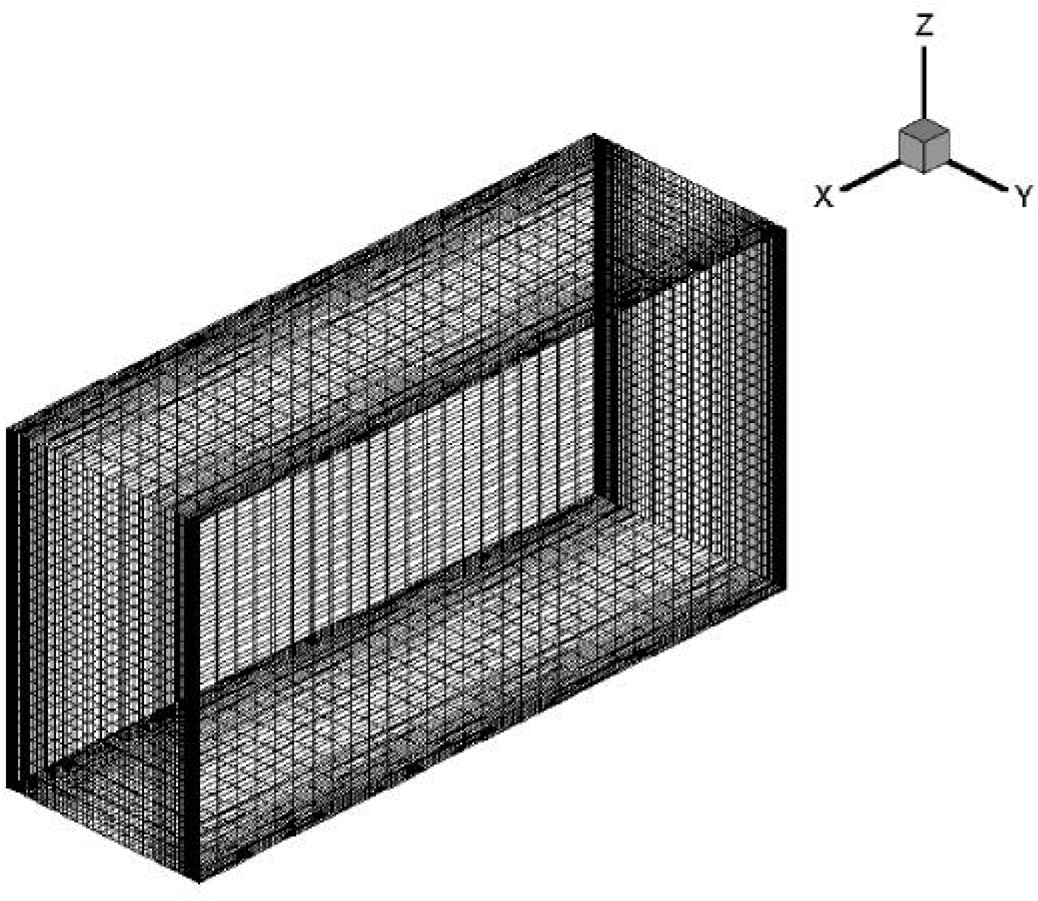

Fig. 2.4 LES volume mesh for channel flow field.

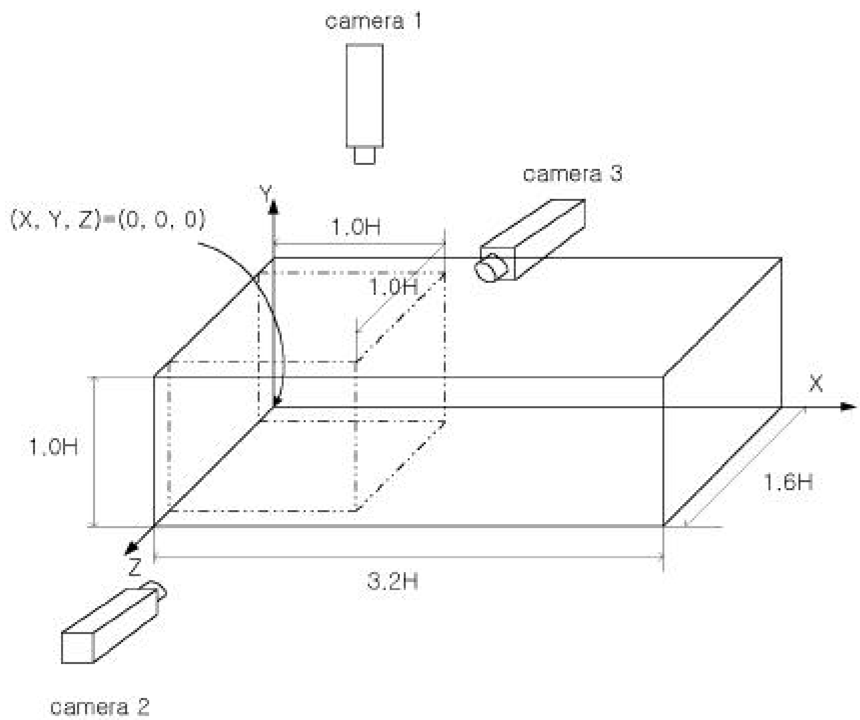

Fig. 2.5 Camera arrangement for the generation of virtual images.

2. 3 1-Frame 3-D PTV 알고리듬의 표준시험

유동장의 3차원속도를 계측하기 위하여 카메라의 교정작업이 이루어져야한다. Fig. 2.5에서처럼 설치된 카메라의 배치에 의해서 보여진 실제 교정기의 3차원 위치정보와 식(2.5) 및 식(2.6)를 이용하여 계산한 결과에 의해서 생성된 가상 교정기의 영상을 Fig. 2.6a, Fig. 2.6b, Fig. 2.6c에 보이고 있다. 또한, Fig. 2.7은 실제 실험에서 교정작업시 사용되어진 교정기의 사진이다. 실제 교정기는 Fig. 2.8에 보이는 것과 같은 채널유동의 속도계측 실험에 이용하기 위하여 제작되었다. 제작된 교정기의 절대좌표를 Table 1에 나타내고 있다. 실 실험에서의 카메라 파라메타를 계산하는 방법으로 가상영상을 이용하여 가상으로 배치된 3대의 카메라의 파라메타를 계산하였으며 각각의 파라메타들을 Table 2에 나타내었고, Table 3은 가상의 교정기를 이용한 교정작업의 결과를 보이고 있다. Table 4는 실험에 의해서 획득된 교정기의 영상을 이용한 3대의 카메라에 대한 파라메타들을 보이며, Table 5는 실험에 의해서 획득된 영상을 이용한 교정작업의 결과를 보이고 있다.

또한, 본 연구에서는 512 × 512 pixel의 이미지와 이를 5배로 확대한 이미지를 이용하여 각각에 대하여 교정작업을 실시하고 이 두 경우의 결과차이를 Table 6.에 보였다.

채널유동의 평균속도 U는 0.5m/sec이다. 다른 시각에서의 동일 입자를 추적하는 알고리듬은 공간 확률일치의 1-Frame 3-D PTV알고리듬을 적용하였다.

가상 실험의 표준시험 결과와 비교하기 위하여 3대의 카메라는 각각 채널에 대하여 직각을 이루고 있다. 계측장비는 3대의 CCD 카메라(768 x 494 pixel)와 3대의 카메라 아답터, 이미지 그래버(512 × 512 pixels, 256 gray levels), Ar-ion 레이져(5W) 그리고 32-bit 호스트 컴퓨터로 구성되었다.

실험에 있어서 조사영역내 입자들의 이동은 AOM과 동기된 카메라에 의해서 관찰된다. AOM(Acousto-Optical Modulator)은 입자들에 비추어지는 레이져의 빛의 주기를 조절하여 추적가능한 Dynamic range를 증대시키기 위하여 이용된다. 3대

의 카메라에 의해서 기록된 영상은 이미지 그래버(Ditect, DT64)로 저장된다. 이렇게 저장된 이미지 신호들은 동시에 디지털로 변환되어 호스트 컴퓨터(256 gray levels)에 저장된다. 이와같은 일련의 과정은 1/60s 간격으로 반복된다.

이미지 획득과정이 마쳐지면 잡음제거, 임계값처리등의 입자의 3차원 좌표를 계산하기 위한 입자의 도심을 구하는 일련의 과정을 거치게 된다. 이 계산과정은 카메라의 교정작업과 동일 입자를 구하는 과정을 포함한다. 앞에서 언급된 카메라의 교정작업이 마쳐지면 추적입자(나일론 12, 비중 1.02)를 투입한 후 AOM을 거친 레이져 조명을 조사영역에 비추어 유동장을 가시화시킨다. 입자의 3차원 좌표는 계산된 카메라 파라메타와 3대의 카메라에 의해서 저장된 2쌍의 이미지에 드러난 입자의 도심을 구하므로써 계산된다.

조사영역내(1.0H × 1.0H × 1.0H)에 임의로 생성된 입자의 수가 100개일때의 속도 벡터의 시점이 시간간격과 LES 데이터를 선형보간하여 표현된 가상영상이 Fig. 2.9a, Fig. 2.9b, Fig. 2.9c에 각각 보여지며, Fig. 2.10a, Fig. 2.10b, Fig. 2.10c은 실제의 실험에서 획득된 3대의 카메라에 의하여 획득된 영상을 보여주고 있다.

본 연구에서는 가상영상에 대하여 이상적인 교정작업(IH), 이상적인 3차원 좌표(IK), 임계값을 이용하여 도심을 구한 교정작업(RH)과 임계값을 이용하여 구한 3차원 좌표(RK)를 각각 계산한 후 IHIK, IHRK, RHIK 및 RHRK 각각에 대하여 1-Frame 3-D PTV 알고리듬을 적용하여 속도벡터를 계산해보았다. 1-Frame 3-D PTV 알고리듬을 이용한 속도벡터의 획득과정은 가상영상의 초기에 생성된 입자의 수를 50개부터 2000개까지 증가시키면서 실행되었고 이들 경우중에서 생성된 입자의 수가 100개일 때 입자의 밀도를 확인하기 위하여 유동장의 상부에서 보여진 영상을 Fig. 2.11에 보이며 계산된 3차원 속도벡터를 Fig. 2.12(IHIK)과 Fig. 2.13(RHRK)에, 500개일 때의 영상을 Fig. 2.14에 보이며 그 결과를 Fig. 2.15(IHIK)과 Fig. 2.16(RHRK)에, 1000개일 때의 영상을 Fig. 2.17에 보이며 그 결과를 Fig. 2.18(IHIK)과 Fig. 2.19(RHRK)에, 2000개일 때의 영상을 그림 2.20에 보이고 그 결과를 Fig. 2.21(IHIK)과 Fig. 2.22(RHRK)에 나타내었으며, 또한, 실 실

험에 의하여 획득된 영상에 대하여 도심좌표를 약 500개 찾은 경우에 있어서 계산된 3차원 속도벡터를 Fig. 2.23에 나타내었다. 임의로 생성된 입자의 개수를 50-2000개까지 증가시키면서 회복되는 벡터의 수를 비교하여 생성된 입자의 개수와 회복된 3차원 속도벡터수의 관계를 Fig. 2.24에 나타내었다. 여기서 회복된 3차원 속도벡터의 수는 연속하는 두 이미지상에 시점과 종점이 모두 존재하는 경우의 수를 말한다. 그림에서 알 수 있듯이 IHIK의 경우에는 입자의 수에 무관하게 99%이상을 회복하였고 RHRK의 경우에는 생성된 입자의 수가 증가할수록 벡터의 회복율은 현저히 감소함을 보이고 있는데 이는 조사영역의 크기에 따른 입자의 밀도가 어떤 최적의 값을 가지고 있기 때문이며 그 최적의 값을 넘어서면 입자의 겹침의 정도가 증가하여 속도벡터의 회복율이 감소하는 것이다. 실제의 실험에서도 이 효과가 속도벡터의 회복에 있어서 크게 작용하고 있는 것을 알 수 있었다. 또한 IHRK와 RHIK의 경우를 비교해보면 IHRK의 경우에서 회복율이 양호함을 알 수 있는데 이는 3차원 PTV에 있어서 교정작업의 중요함을 말해주고 있다.

따라서, 가상영상을 이용한 표준시험을 통하여 최적의 입자의 개수를 결정할 수 있었다.

본 연구에서 생성된 입자의 수를 500개로 하였을 때 가상영상을 이용하여 계산된 3차원 벡터의 회복율이 57%(RHRK)정도이며 실 실험에서 계산된 3차원 벡터의 회복율은 44%정도로 가상영상을 이용한 경우에서 더 높음을 알 수 있었으며 이는 가상영상의 해상도가 실제 실험에서의 이미지 해상도보다 양호하기 때문이다.

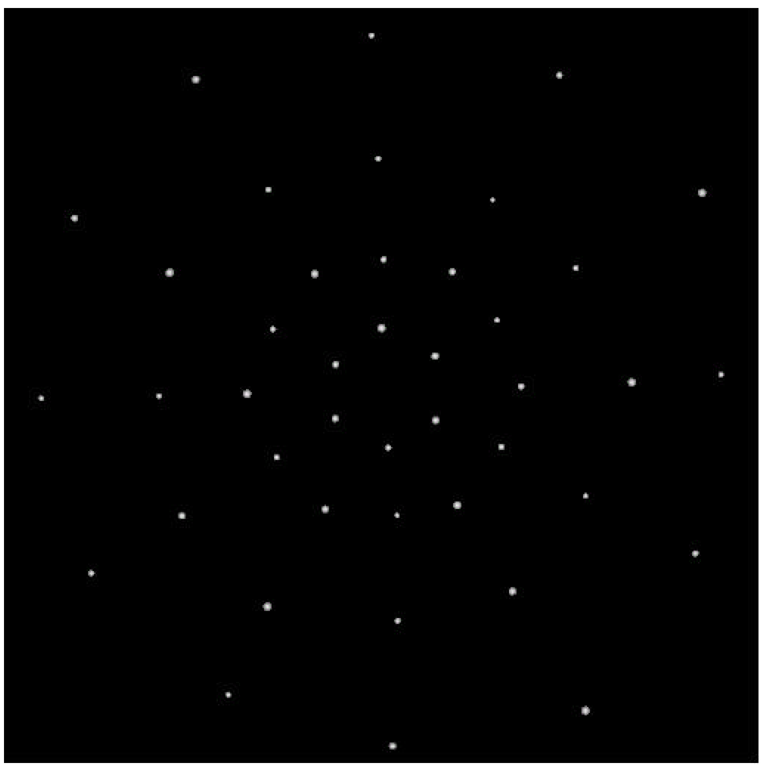

Fig. 2.6a Virtual image of calibrator viewed by camera 1.

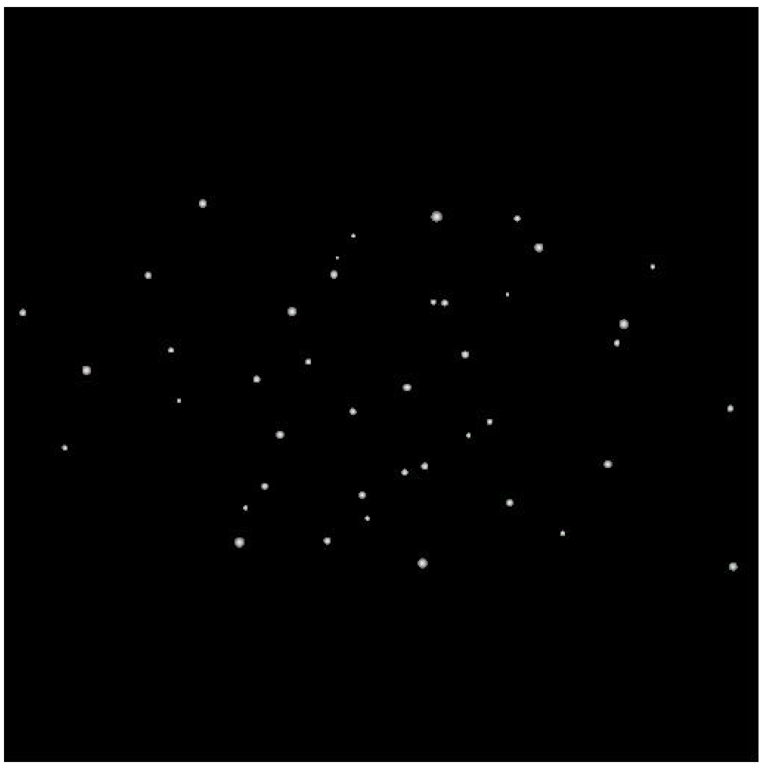

Fig. 2.6b Virtual image of calibrator viewed by camera 2.

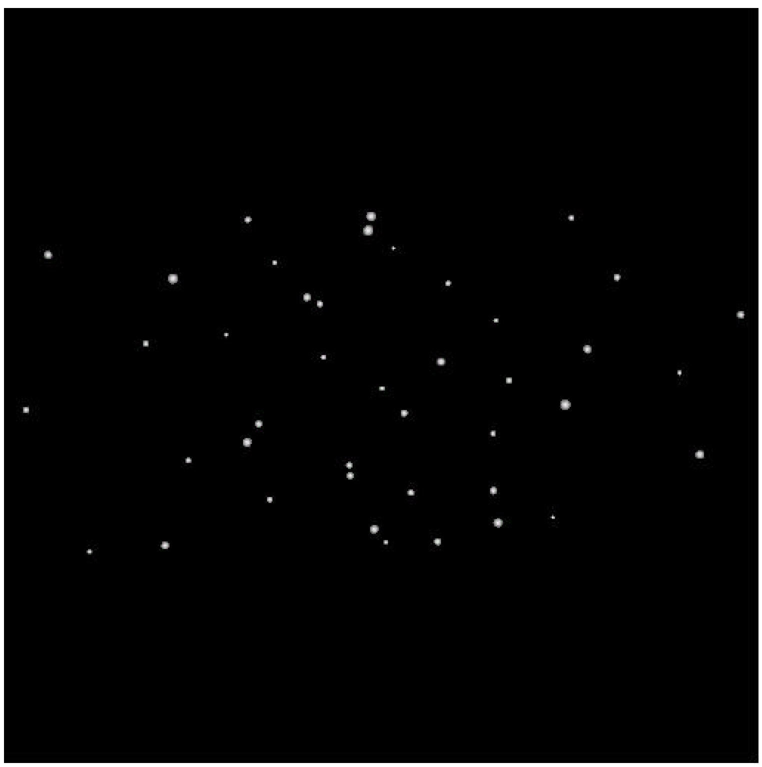

Fig. 2.6c Virtual image of calibrator viewed by camera 3.

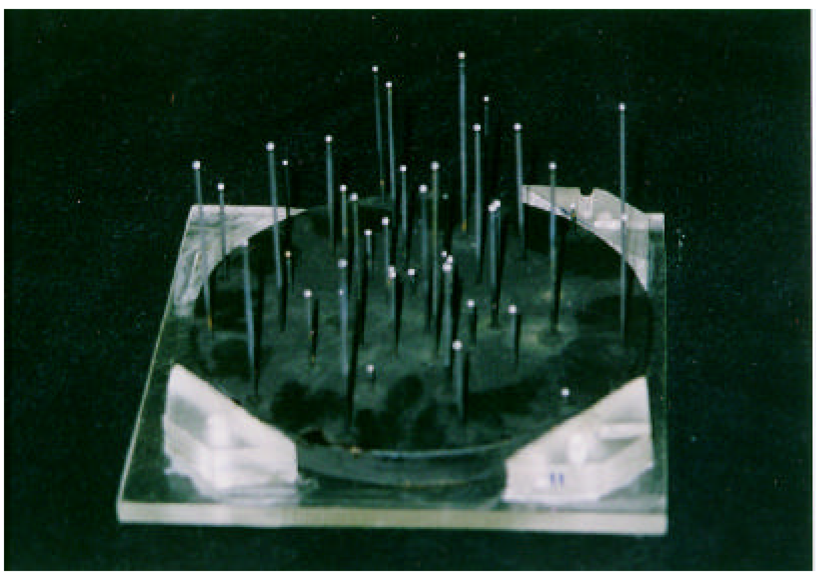

Fig. 2.7 Picture of calibrator.

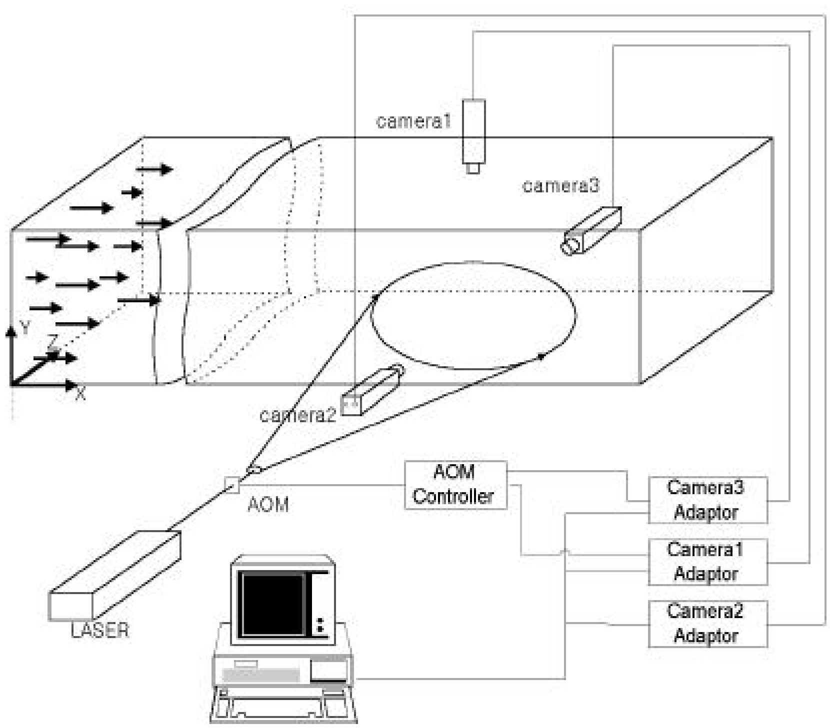

Fig. 2.8 Experimental arrangement for 3-D velocity measurement of a channel flow.

No.	X	Y	Z
1	0.2000	- 7.7516	6.5188
2	7.3386	- 3.8389	13.0829
3	7.1826	4.8918	17.0283
4	0.5809	8.7543	39.7021
5	- 6.5406	4.1629	15.9084
6	- 6.3076	- 3.2634	24.5248
7	0.8383	- 17.7463	29.0704
8	10.2142	- 15.4834	21.4611
9	16.9448	- 8.9227	43.1246
10	19.4009	0.6626	27.9001
11	16.5258	9.0808	32.3592
12	9.5821	16.4280	12.0234
13	1.5498	18.9168	51.5761
14	- 8.4680	16.7006	22.9841
15	- 15.4715	9.6417	40.2301
16	- 18.1874	0.4146	8.9176
17	- 15.0978	- 8.5400	31.5309
18	- 8.5938	- 15.6116	13.8650
19	0.6080	- 32.7680	43.4187
20	17.1421	- 26.7340	52.5382
21	28.1973	- 15.8846	37.8964
22	33.3205	0.5987	4.9782
23	28.9298	16.9216	46.4743
24	16.8530	28.6673	17.4736
25	1.0476	33.2205	34.1831
26	- 16.4029	28.8808	6.6368
27	- 28.1422	16.8719	20.8206
28	- 32.6023	0.2917	50.4479
29	- 28.1175	- 16.3255	10.1926
30	- 15.1312	- 28.3268	33.2271
31	0.2715	- 50.0334	38.2043
32	26.4238	- 42.7926	30.1636
33	43.8331	- 24.4106	8.3207
34	49.4580	0.0109	49.4652
35	43.6475	25.3076	36.0622
36	25.5517	44.0473	3.8494
37	- 0.3152	49.9450	24.9162
38	- 23.8146	43.8323	45.7507
39	- 42.7111	25.3380	42.0268
40	- 49.5878	0.0228	47.8234
41	- 42.0264	- 24.9213	25.8710
42	- 24.1197	- 43.0299	19.1620

Table 1. Absolute coordinate of calibrator.

Parameter	Camera1	Camera2	Camera3
X_o(mm)	0.0353	-69.2532	-17.3393
Y_o(mm)	-0.1120	492.6178	-497.4963
Z_o(mm)	-499.3234	0.9994	0.9509
ω(°)	-0.1781	-90.4848	90.3707
Ψ(°)	-0.0428	0.0022	-0.0096
κ(°)	452.0121	-7.7524	1.7944
c(pixel)	-2.7470	-10.9281	8.1297
x_o(pixel)	7.7393	-19.4852	-14.9000
y_o(pixel)	2421.5827	-2409.5362	2409.1930
k1	0.0502	-0.1149	0.1435
k2	-4.9895	4.4630	-14.5734

Table 2. Camera parameters calculated by virtual calibration.

NO	CalcX	-	KjnX	CalcY	-	KjnY	CalcZ	-	KjnZ	dx	dy	dz
1	-7.77	-	-7.75	0.15	-	0.20	6.51	-	6.52	0.02	0.05	0.01
2	-3.84	-	-3.84	7.41	-	7.34	13.09	-	13.08	0.00	0.07	0.01
3	4.91	-	4.89	7.18	-	7.18	17.02	-	17.03	0.02	0.00	0.01
4	8.76	-	8.75	0.59	-	0.58	39.74	-	39.70	0.01	0.01	0.04
5	4.17	-	4.16	-6.55	-	-6.54	15.87	-	15.91	0.01	0.01	0.04
6	-3.27	-	-3.26	-6.34	-	-6.31	24.51	-	24.52	0.01	0.03	0.01
7	-17.72	-	-17.75	0.89	-	0.84	29.06	-	29.07	0.03	0.05	0.01
8	-15.46	-	-15.48	10.28	-	10.21	21.47	-	21.46	0.02	0.07	0.01
9	-8.94	-	-8.92	16.94	-	16.94	43.11	-	43.12	0.02	0.00	0.01
10	0.69	-	0.66	19.32	-	19.40	27.91	-	27.90	0.03	0.08	0.01
11	9.09	-	9.08	16.51	-	16.53	32.35	-	32.36	0.01	0.02	0.01
12	16.41	-	16.43	9.62	-	9.58	12.03	-	12.02	0.02	0.04	0.01
13	18.91	-	18.92	1.51	-	1.55	51.59	-	51.58	0.01	0.04	0.01
14	16.71	-	16.70	-8.50	-	-8.47	23.00	-	22.98	0.01	0.03	0.02
15	9.64	-	9.64	-15.40	-	-15.47	40.22	-	40.23	0.00	0.07	0.01
16	0.40	-	0.41	-18.26	-	-18.19	8.94	-	8.92	0.01	0.07	0.02
17	-8.56	-	-8.54	-15.17	-	-15.10	31.55	-	31.53	0.02	0.07	0.02
18	-15.61	-	-15.61	-8.58	-	-8.59	13.90	-	13.87	0.00	0.01	0.04
19	-32.79	-	-32.77	0.59	-	0.61	43.42	-	43.42	0.02	0.02	0.00
20	-26.72	-	-26.73	17.19	-	17.14	52.56	-	52.54	0.01	0.05	0.02
21	-15.89	-	-15.88	28.15	-	28.20	37.90	-	37.90	0.01	0.05	0.00
22	0.60	-	0.60	33.33	-	33.32	4.96	-	4.98	0.00	0.01	0.02
23	16.89	-	16.92	28.88	-	28.93	46.46	-	46.47	0.03	0.05	0.01
24	28.66	-	28.67	16.83	-	16.85	17.47	-	17.47	0.01	0.02	0.00
25	33.25	-	33.22	1.02	-	1.05	34.19	-	34.18	0.03	0.03	0.01
26	28.88	-	28.88	-16.36	-	-16.40	6.66	-	6.64	0.00	0.04	0.02
27	16.86	-	16.87	-28.10	-	-28.14	20.81	-	20.82	0.01	0.04	0.01
28	0.27	-	0.29	-32.61	-	-32.60	50.44	-	50.45	0.02	0.01	0.01
29	-16.32	-	-16.33	-28.17	-	-28.12	10.21	-	10.19	0.01	0.05	0.02
30	-28.33	-	-28.33	-15.37	-	-15.13	33.24	-	33.23	0.00	0.24	0.01
31	-50.03	-	-50.03	0.14	-	0.27	38.21	-	38.20	0.00	0.13	0.01
32	-42.79	-	-42.79	26.63	-	26.42	30.16	-	30.16	0.00	0.21	0.00
33	-24.42	-	-24.41	43.88	-	43.83	8.30	-	8.32	0.01	0.05	0.02
34	0.01	-	0.01	49.56	-	49.46	49.46	-	49.47	0.00	0.10	0.01
35	25.30	-	25.31	43.64	-	43.65	36.05	-	36.06	0.01	0.01	0.01
36	44.04	-	44.05	25.57	-	25.55	3.86	-	3.85	0.01	0.02	0.01
37	49.96	-	49.95	-0.31	-	-0.32	24.93	-	24.92	0.02	0.01	0.01
38	43.84	-	43.83	-23.77	-	-23.81	45.74	-	45.75	0.01	0.04	0.01
39	25.35	-	25.34	-42.74	-	-42.71	42.04	-	42.03	0.01	0.03	0.01
40	0.05	-	0.02	-49.59	-	-49.59	47.76	-	47.82	0.03	0.00	0.06
41	-24.95	-	-24.92	-41.85	-	-42.03	25.87	-	25.87	0.03	0.18	0.00
42	-43.04	-	-43.03	-23.96	-	-24.12	19.16	-	19.16	0.01	0.16	0.00

Average error : 0.01 0.05 0.01

Standard deviation : 0.02 0.08 0.02

Table 3. Result of virtual calibration.

Parameter	Camera1	Camera2	Camera3
X_o(mm)	134.4010	-157.8486	22.1553
Y_o(mm)	-754.4446	749.1842	20.3357
Z_o(mm)	11.6936	4.2269	788.2363
ω(°)	-99.7936	100.2695	-13.2251
Ψ(°)	-0.2073	-0.3569	0.5581
κ(°)	-9.7519	-12.4261	262.0316
c(pixel)	9.1856	-28.4042	97.7833
x_o(pixel)	497.6334	476.9488	675.6194
y_o(pixel)	3504.5886	-3393.4831	3386.5111
k1	0.4285	0.4731	0.2787
k2	-9.5176	-10.6668	-3.8815

Table 4. Camera parameters calculated by experimental calibration.

NO	CalcX	-	KjnX	CalcY	-	KjnY	CalcZ	-	KjnZ	dx	dy	dz
1	0.27	-	0.29	-32.69	-	-32.60	50.49	-	50.45	0.02	0.09	0.04
2	18.96	-	18.92	1.51	-	1.55	51.57	-	51.58	0.04	0.04	0.01
3	-26.78	-	-26.73	17.20	-	17.14	52.59	-	52.54	0.05	0.06	0.05
4	-0.00	-	0.02	-49.59	-	-49.59	47.75	-	47.82	0.02	0.00	0.07
5	43.87	-	43.83	-23.54	-	-23.81	45.85	-	45.75	0.04	0.27	0.10
6	0.04	-	0.01	49.44	-	49.46	49.43	-	49.47	0.03	0.02	0.04
7	16.95	-	16.92	28.89	-	28.93	46.55	-	46.47	0.03	0.04	0.08
8	-32.86	-	-32.77	0.67	-	0.61	43.46	-	43.42	0.09	0.06	0.04
9	9.61	-	9.64	-15.49	-	-15.47	40.28	-	40.23	0.03	0.02	0.05
10	8.77	-	8.75	0.55	-	0.58	39.67	-	39.70	0.02	0.03	0.03
11	-50.14	-	-50.03	0.41	-	0.27	38.22	-	38.20	0.11	0.14	0.02
12	-15.88	-	-15.88	28.23	-	28.20	37.88	-	37.90	0.00	0.03	0.02
13	25.35	-	25.31	43.51	-	43.65	36.04	-	36.06	0.04	0.14	0.02
14	33.20	-	33.22	1.06	-	1.05	34.15	-	34.18	0.02	0.01	0.03
15	-28.33	-	-28.33	-15.15	-	-15.13	33.25	-	33.23	0.00	0.02	0.02
16	9.07	-	9.08	16.46	-	16.53	32.38	-	32.36	0.01	0.07	0.02
17	-8.51	-	-8.54	-15.21	-	-15.10	31.47	-	31.53	0.03	0.11	0.06
18	-17.72	-	-17.75	0.72	-	0.84	29.03	-	29.07	0.03	0.12	0.04
19	0.68	-	0.66	19.35	-	19.40	27.89	-	27.90	0.02	0.05	0.01
20	-24.86	-	-24.92	-42.14	-	-42.03	25.81	-	25.87	0.06	0.11	0.06
21	49.97	-	49.95	-0.22	-	-0.32	24.87	-	24.92	0.02	0.10	0.05
22	-3.27	-	-3.26	-6.35	-	-6.31	24.50	-	24.52	0.01	0.04	0.02
23	16.68	-	16.70	-8.45	-	-8.47	22.96	-	22.98	0.02	0.02	0.02
24	16.85	-	16.87	-28.01	-	-28.14	20.92	-	20.82	0.02	0.13	0.10
25	-15.43	-	-15.48	10.21	-	10.21	21.39	-	21.46	0.05	0.00	0.07
26	-43.01	-	-43.03	-24.09	-	-24.12	19.16	-	19.16	0.02	0.03	0.00
27	28.63	-	28.67	16.85	-	16.85	17.52	-	17.47	0.04	0.00	0.05
28	4.88	-	4.89	7.13	-	7.18	17.04	-	17.03	0.01	0.05	0.01
29	4.16	-	4.16	-6.52	-	-6.54	15.99	-	15.91	0.00	0.02	0.08
30	-15.58	-	-15.61	-8.67	-	-8.59	13.92	-	13.87	0.03	0.08	0.05
31	-3.83	-	-3.84	7.32	-	7.34	13.00	-	13.08	0.01	0.02	0.08
32	16.42	-	16.43	9.57	-	9.58	12.03	-	12.02	0.01	0.01	0.01
33	-16.30	-	-16.33	-28.17	-	-28.12	10.24	-	10.19	0.03	0.05	0.05
34	0.42	-	0.41	-18.10	-	-18.19	8.89	-	8.92	0.01	0.09	0.03
35	-24.37	-	-24.41	43.96	-	43.83	8.36	-	8.32	0.04	0.13	0.04
36	-7.71	-	-7.75	0.16	-	0.20	6.48	-	6.52	0.04	0.04	0.04
37	28.79	-	28.88	-16.25	-	-16.40	6.59	-	6.64	0.09	0.15	0.05
38	44.02	-	44.05	25.45	-	25.55	3.79	-	3.85	0.03	0.10	0.06
									Average error :	0.03	0.07	0.04
									Standard deviation :	0.04	0.09	0.05

Table 5. Result of experimental calibration.

SIZE	512 X 512		2560 X 2560	
1	0.85816956	0.81031799	0.19149780	0.14364624
2	0.49099731	0.96804810	0.15765381	0.30137634
3	0.04351807	0.49114990	0.04351807	- 0.00885010
4	0.29925537	0.11831665	0.29925537	0.11831665
5	0.27879333	0.67898560	- 0.05453491	0.01232910
6	0.85568237	0.35923767	0.18901062	0.02590942
7	0.44235229	0.50823975	- 0.05764771	0.50823975
8	0.97207642	0.32557678	0.47207642	0.32557678
9	0.21575928	0.27966309	- 0.28424072	0.27966309
10	0.29547119	0.57223511	- 0.20452881	0.07223511
11	0.53613281	0.62268066	- 0.13052368	- 0.04397583
12	0.62927246	0.88754272	0.12927246	- 0.11245728
13	0.26480103	0.15634155	0.26480103	0.15634155
14	0.12039185	0.25070190	0.12039185	- 0.24929810
15	0.13464355	0.30761719	0.13464355	0.30761719
16	0.11703491	0.20794678	0.45036316	- 0.12539673
17	0.63047791	0.08078003	0.13047791	0.08078003
18	0.10389709	0.905 10559	0.10389709	0.40510559
19	0.02258301	0.73449707	0.02258301	0.23449707
20	0.58410645	0.83148193	- 0.41589355	- 0.16851807
21	0.06558228	0.70964050	0.06558228	0.20964050
22	0.02371216	0.37130737	- 0.30963135	0.03797913
23	0.45867920	0.09719849	- 0.04132080	0.09719849
24	0.06433105	0.41891479	- 0.26901245	- 0.24774170
25	0.92590332	0.55990601	- 0.07409668	0.05990601
26	0.47917175	0.30465698	- 0.02082825	- 0.19534302
27	0.04960632	0.66244507	0.38294983	- 0.00421143
28	0.74386597	0.86315918	0.24386597	- 0.13684082
29	0.74319458	0.64874268	0.24319458	0.14874268
30	0.85755920	0.89727783	0.19088745	0.23062134
31	0.51242065	0.29914856	0.01242065	0.29914856
32	0.14001465	0.55874634	0.14001465	0.55874634
33	0.54776001	0.44308472	- 0.11889648	0.10974121
34	0.55548096	0.47909546	- 0.44451904	0.47909546
35	0.99902344	0.00683594	- 0.00097656	0.00683594
36	0.47384644	0.61996460	- 0.02615356	- 0.38003540
37	0.52825928	0.76321411	0.02825928	- 0.23678589
38	0.84727478	0.35577393	- 0.15272522	- 0.64422607
39	0.77603149	0.95712280	0.77603149	- 0.04287720
40	0.77095032	0.31738281	0.77095032	0.31738281
41	0.39254761	0.71176147	0.39254761	0.21176147
42	0.97726440	0.74702454	0.47726440	0.74702454
average dx :	0.47209278		0.09114002	
average dy :	0.52116358		0.09259287	
standard deviation x :	0.30505496		0.26942873	
standard deviation y :	0.26293138		0.26258197	

Table 6. Difference of coordinate according to the resolution.

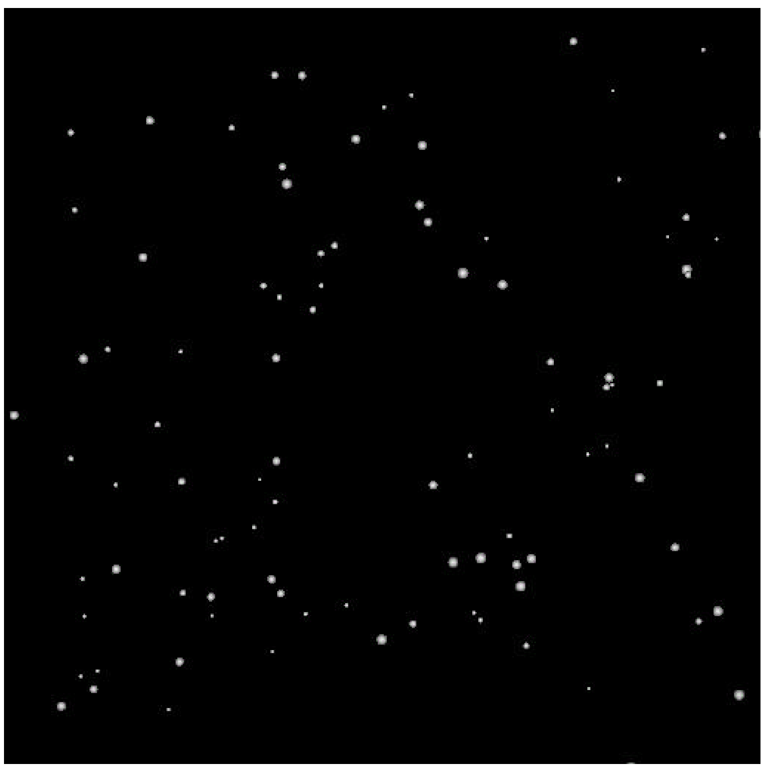

Fig. 2.9a Virtual image viewed by camera 1.

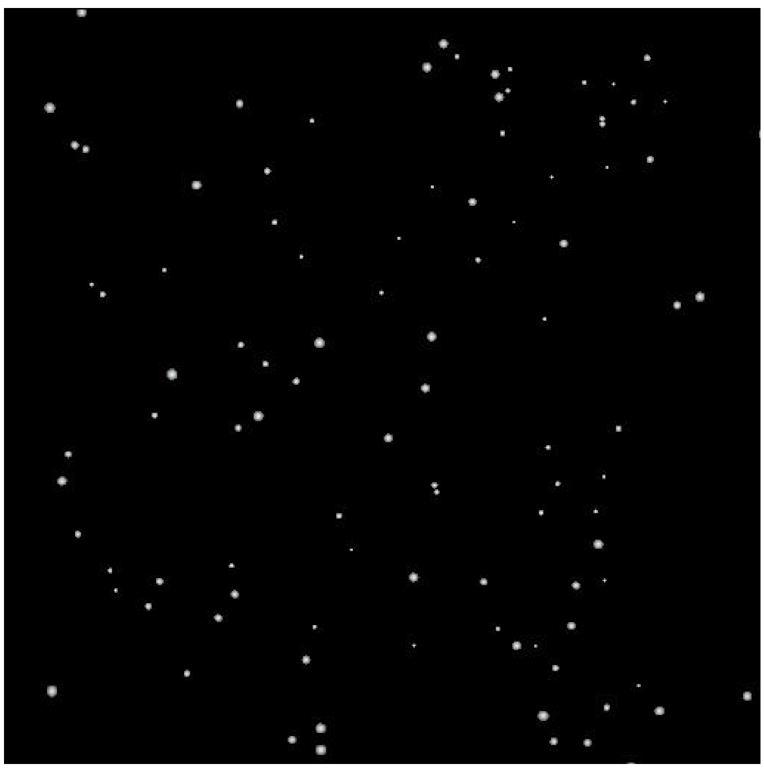

Fig. 2.9b Virtual image viewed by camera 2.

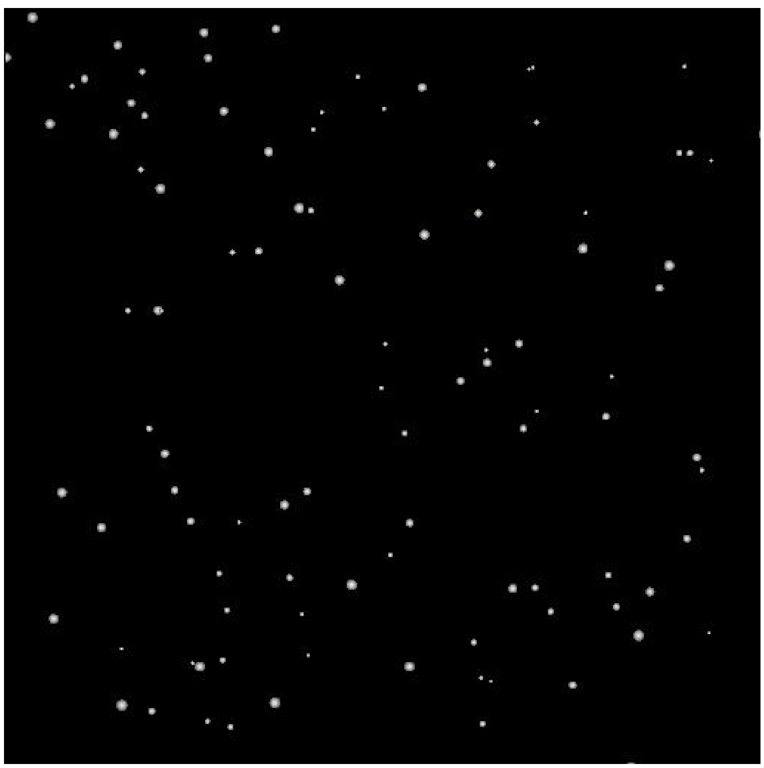

Fig. 2.9c Virtual image viewed by camera 3.

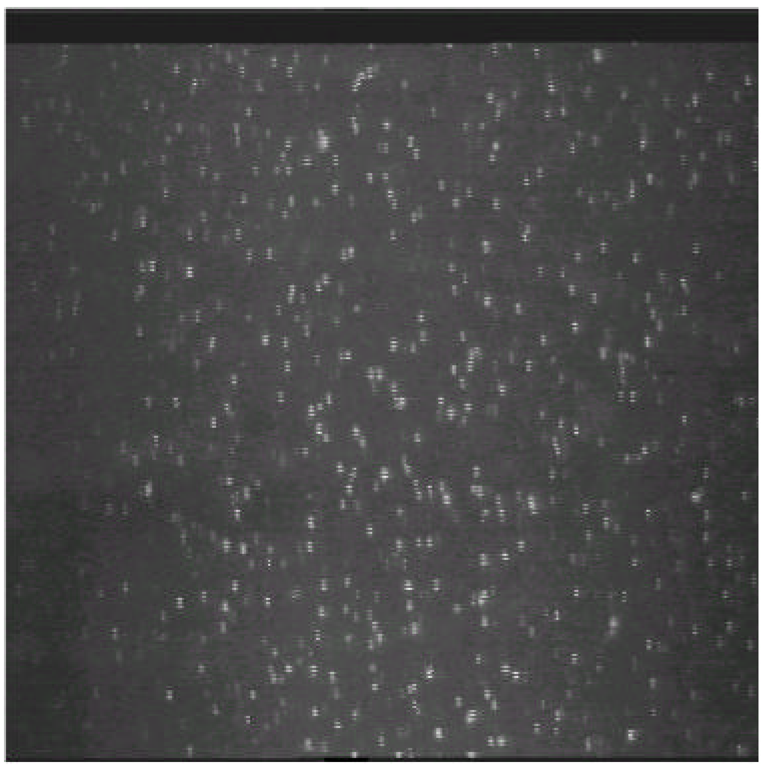

Fig. 2.10a Experimental image viewed by camera 1.

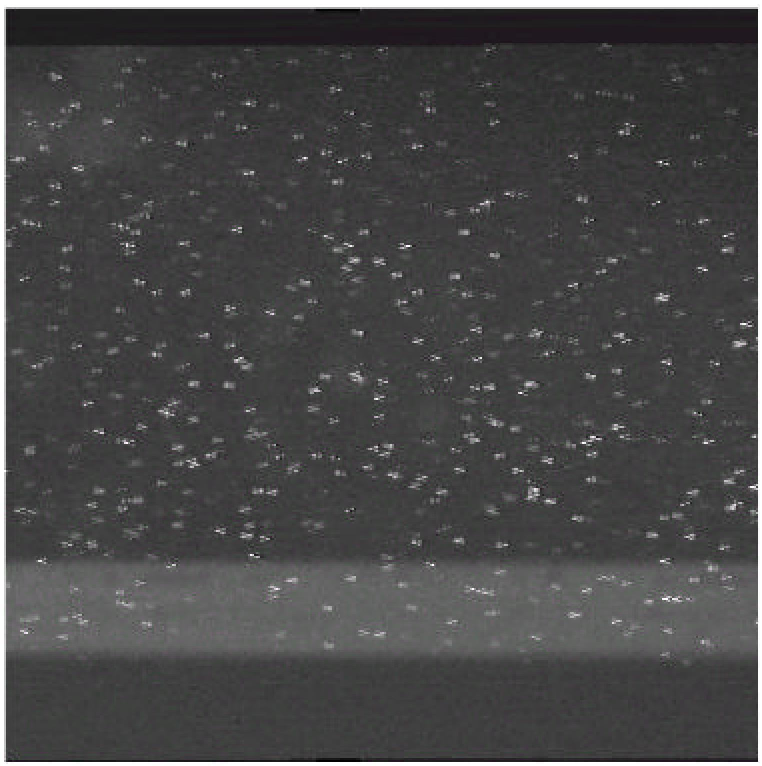

Fig. 2.10b Experimental image viewed by camera 2.

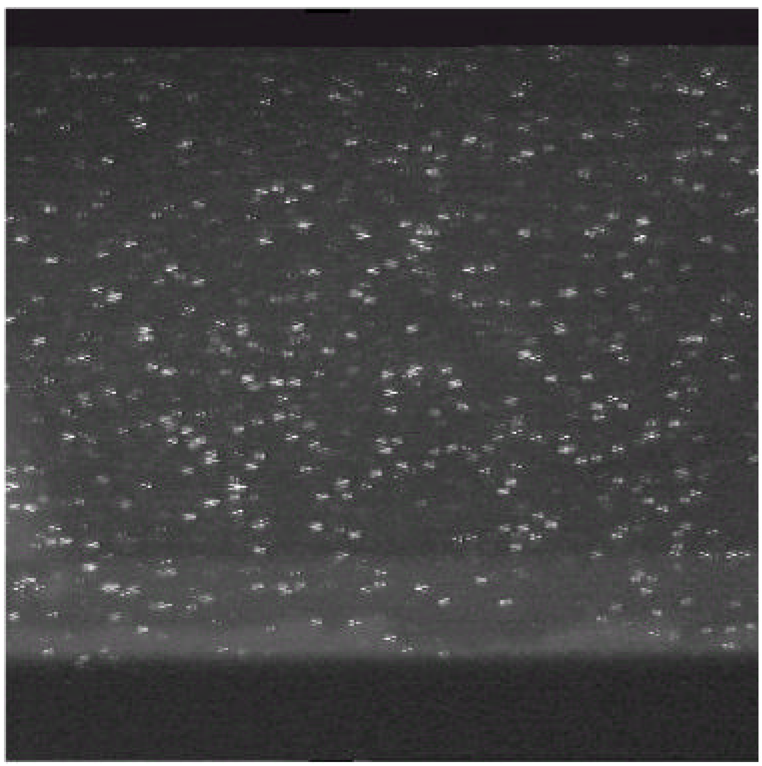

Fig. 2.10c Experimental image viewed by camera 3.

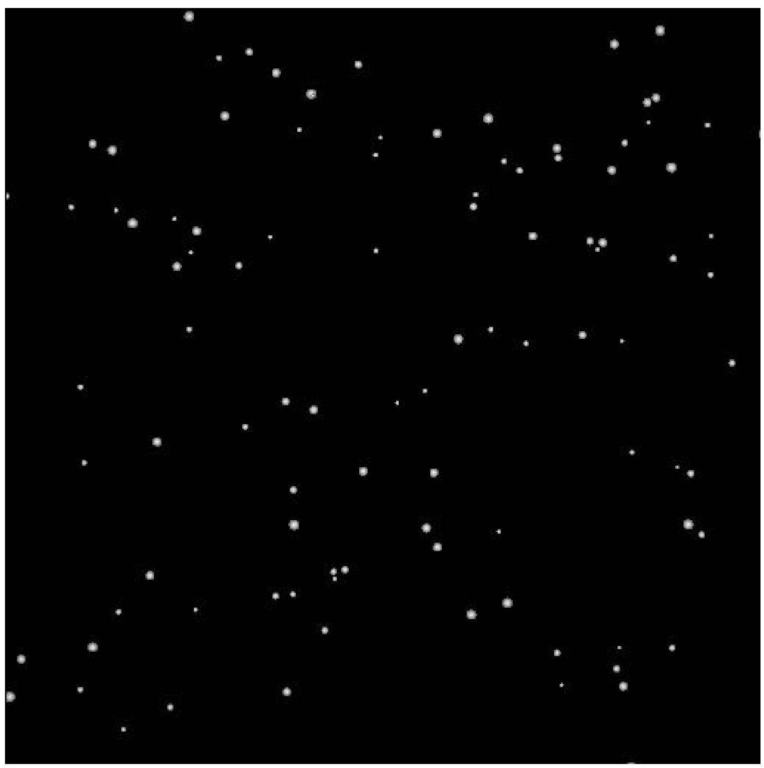

Fig. 2.11 Virtual image when number of particles are 100.

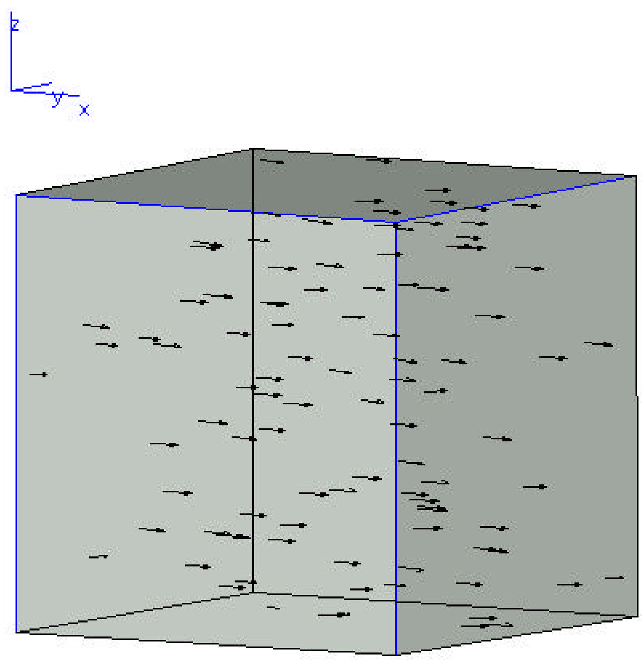

Fig. 2.12 3-D velocity vector distribution(100, IHIK).

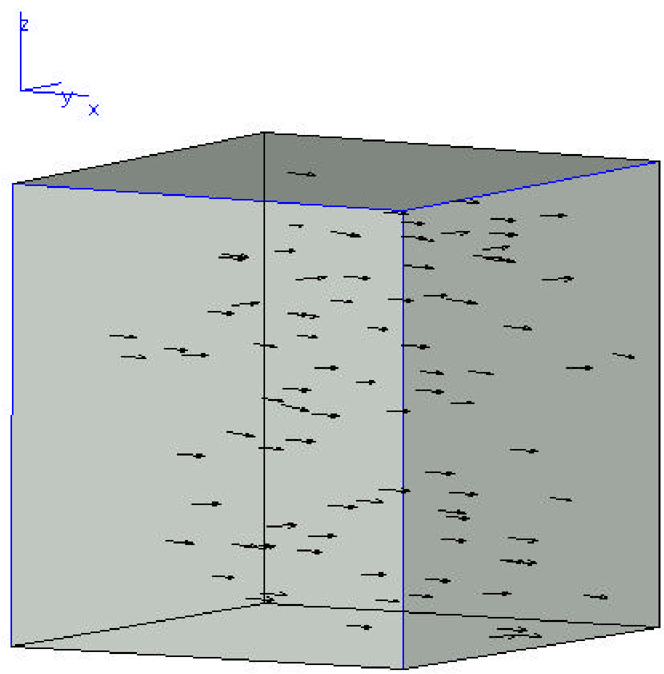

Fig. 2.13 3-D velocity vector distribution (100, RHRK).

Fig. 2.14 Virtual image when number of particles are 500.

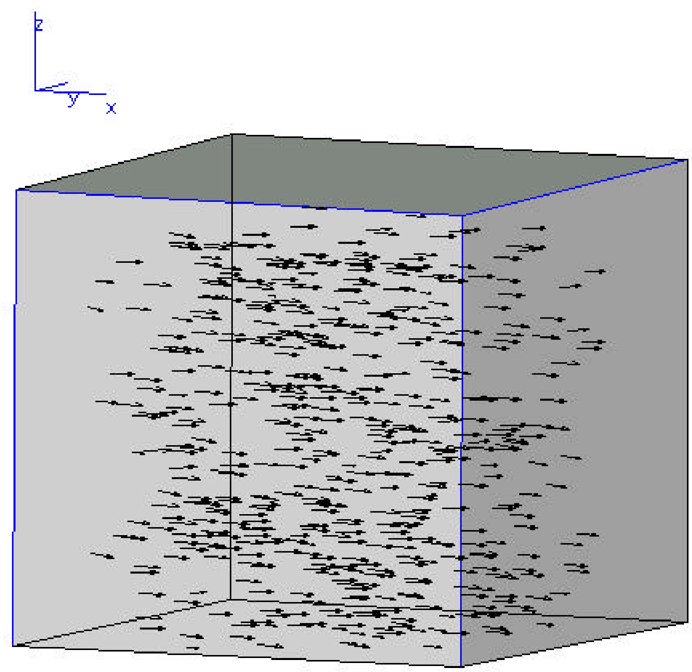

Fig. 2.15 3-D velocity vector distribution (500, IHIK).

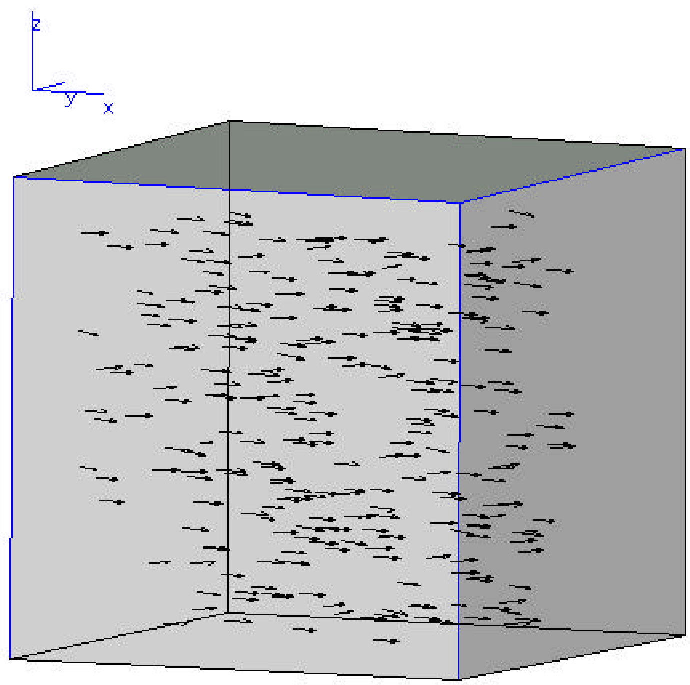

Fig. 2.16 3-D velocity vector distribution(500, RHRK).

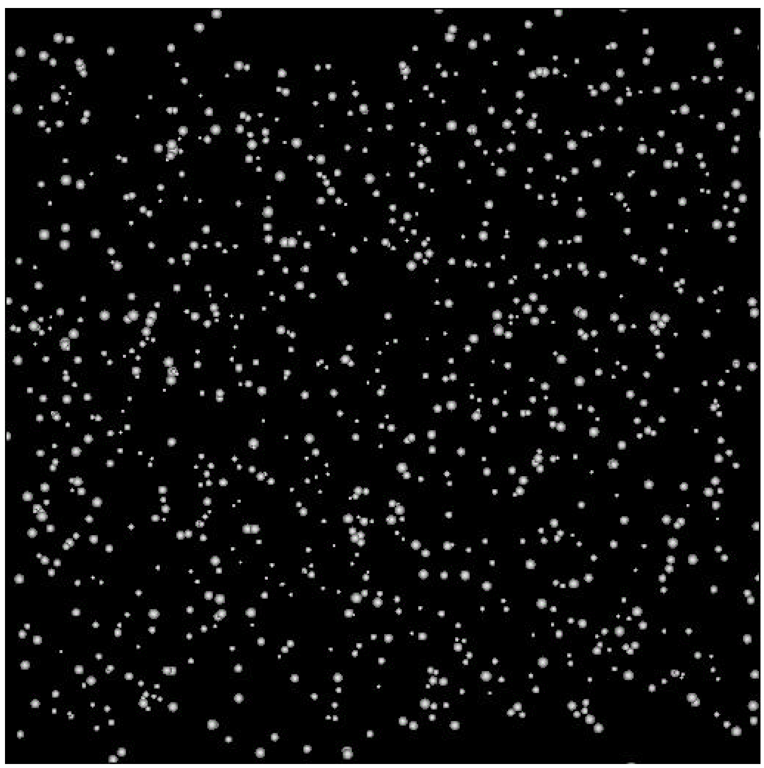

Fig. 2.17 Virtual image when number of particles are 1000.

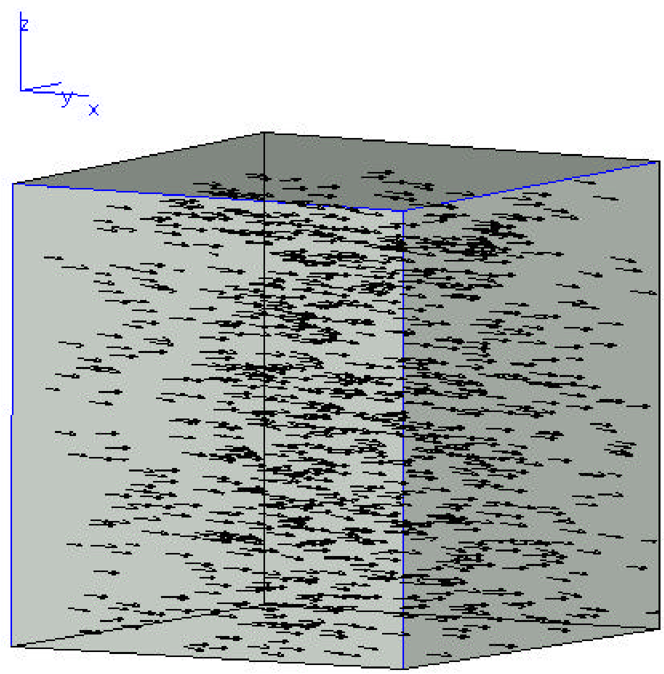

Fig. 2.18 3-D velocity vector distribution (1000, IHIK).

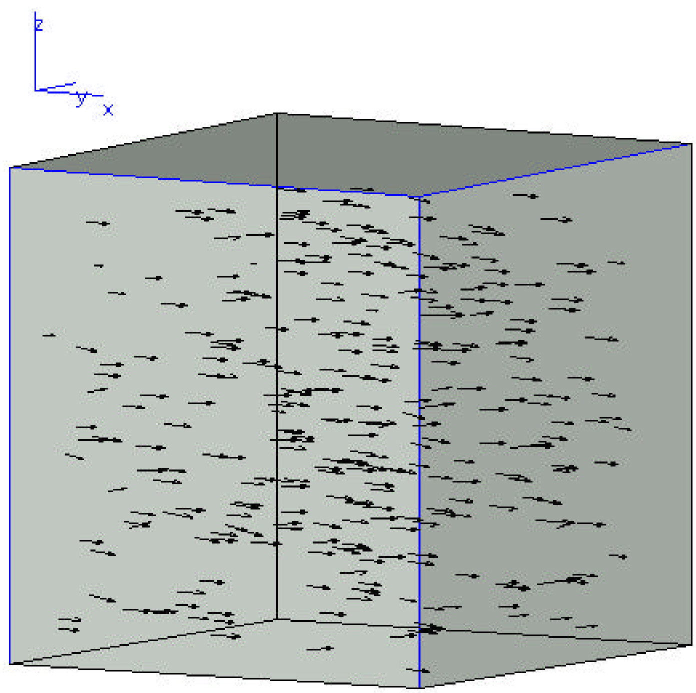

Fig. 2.19 3-D velocity vector distribution (1000, RHRK).

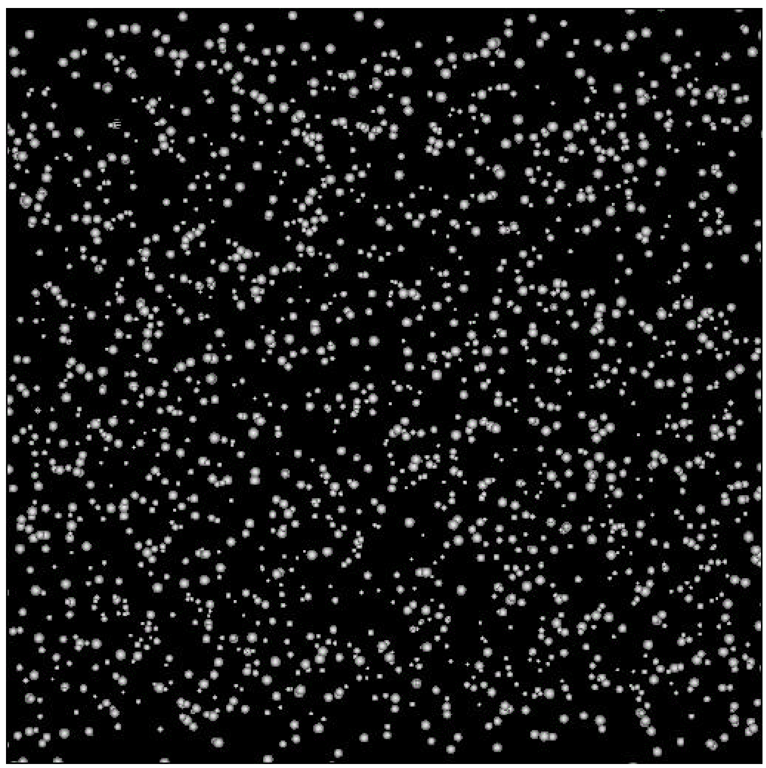

Fig. 2.20 Virtual image when number of particles are 2000.

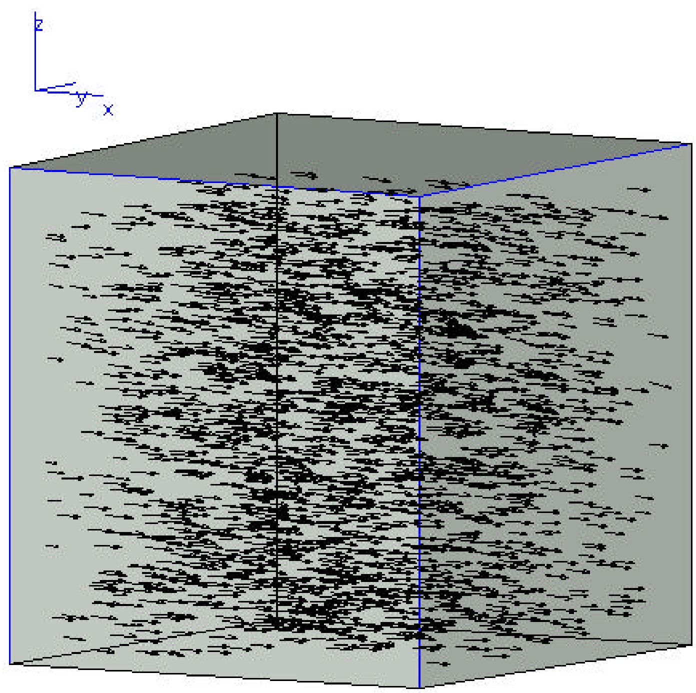

Fig. 2.21 3-D velocity vector distribution (2000, IHIK).

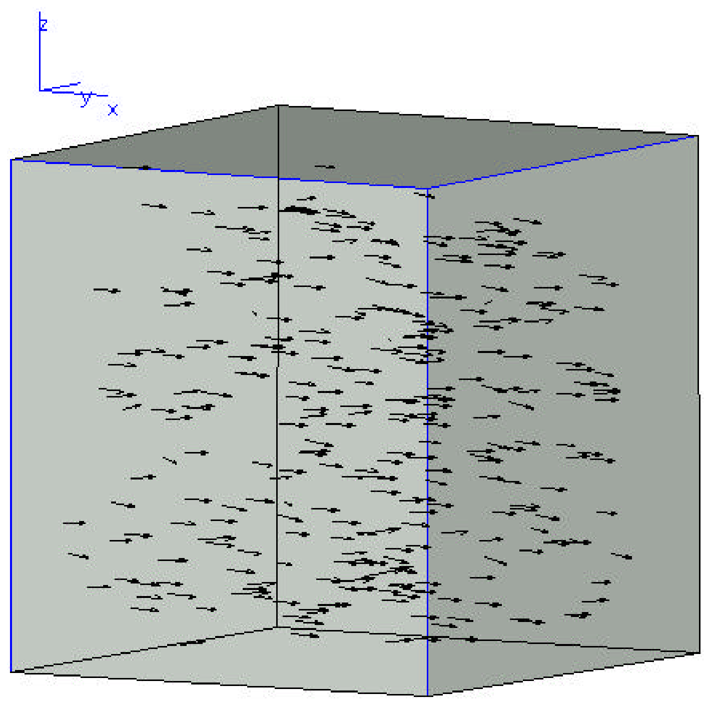

Fig. 2.22 3-D velocity vector distribution (2000, RHRK).

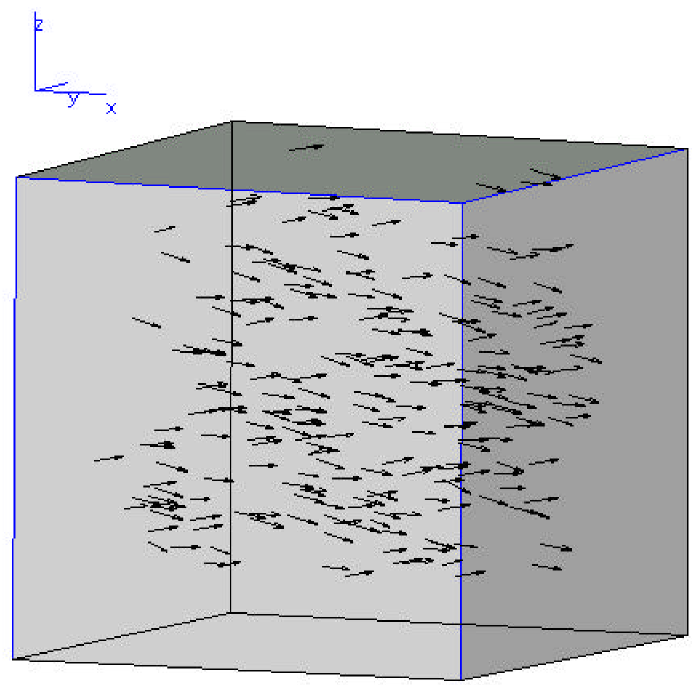

Fig. 2.23 3-D velocity vector distribution for real channel flow.

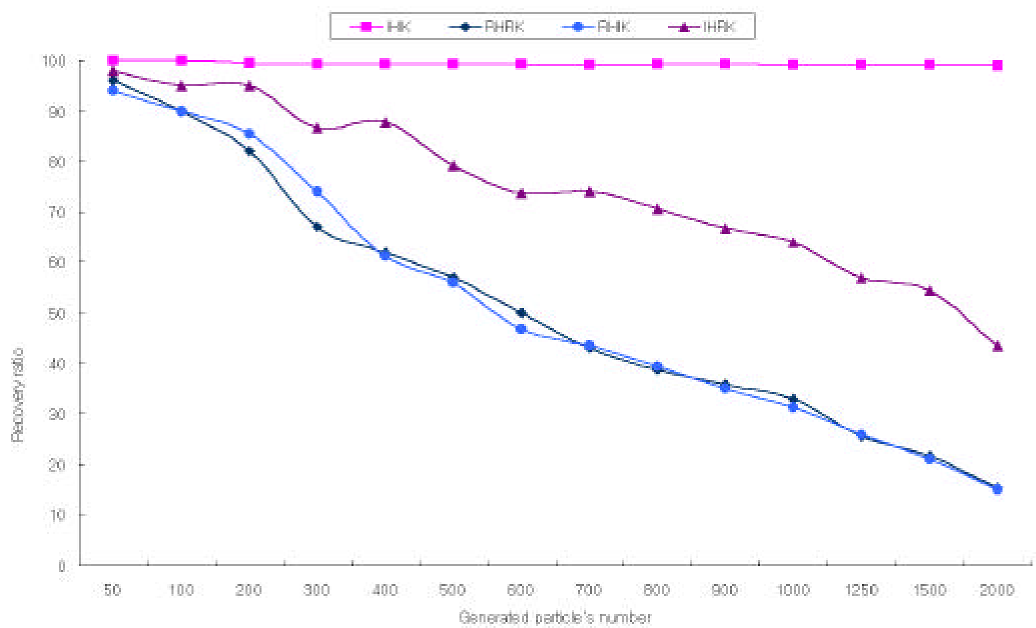

Fig. 2.24 Relationship between the recovery ratio and the number of particles generated virtually.

제 3장 결 론

이상의 연구에서 LES 데이터를 이용하여 가상영상을 구현하고 구현된 가상현실영상을 1-Frame 3-D PTV 알고리듬에 적용하여 실 실험에서의 결과와 비교해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 3차원 LES 데이터를 이용하여 구현된 가상현실영상을 3차원 PTV기법의 평가도구로 사용할 수 있었다.

둘째, 채널유동에 대한 1-Frame 3-D PTV기법의 표준시험을 통하여 속도벡터의 회복률은 입자의 밀도와 관련되어 있으며 그 최적의 밀도를 가상영상의 표준시험을 통하여 구할 수 있었다.

셋째, 3차원 PTV를 연구하는데 있어서 이미지의 해상도에 따라서 3차원 속도벡터의 회복율이 현저하게 차이가 있음을 알 수 있었다.

넷째, 카메라의 교정작업이 최종적인 3차원 속도 벡터를 회복하는데 커다란 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다.

이상과 같은 결론에서 LES나 DNS등의 데이터를 이용하여 구현된 가상영상을 3차원 PTV 기법의 평가를 위한 도구로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

Adrian RJ, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.23, pp.261-304, 1991.

Adamczyk AA; Rimai L, "Reconstruction of a 3-Dimensional flow field from orthogonal views of seed track video images", Exp. in Fluids, Vol.6, pp.380-386, 1988.

Baek SJ; Lee SJ, "A new two-frame particle tracking algorithm using match probability", Exp. in Fluids, Vol.22 pp.23-32, 1996.

Chang TP; Tatterson GB, "An automated analysis method for complex three-dimensional mean flow fields", Proc. Third Int. Symp. Flow Visualization, pp.266-273, 1983.

Chang TP; Wilcox NA; Tatterson GB, "Application of image processing to the analysis of three-dimensional flow fields", Opt. Eng., Vol.23(3), pp.283-287, 1984.

Choi Seong-hwan, "A Fundamental Study on Three-Dimensional Velocity Measurement Technique Using Image Processing", Master Thesis, The Korea Maritime Univ, 1997.

Doh Deog-Hee, "A Study on three-dimensional particle imaging thermometry and velocimetry using liquid crystal", Ph.D. Thesis, The Univ. of Tokyo, 1995.

Doh DH; Jo HJ; Kobayashi T; Saga T, "A study on motion tracking of a floating vessel using 3-D PTV", Proc. 2nd International Workshop on PIV `97-Fukui, Japan, pp.63-68, 1997.

Doh DH; Choi SH; Hong SD; Baek TS; Lee YW, "Investigation technique for ventilation characteristics in a building by PIV", Proc. of the Society of Air-conditioning and Refrigeration of Korea, Annual Winter Meeting, Institute for Korea Science and Technology, Vol.2, pp.474-481, 1998.

Doh DH; Choi SH; Hong SD; Baek TS; Kobayashi T; Saga T, "Quantitative real time measurement of an acoustic energy flow by PIV", Proc. of International Conf. on Optical Tech and Image Processing in Fluid, Thermal, and Combustion Flow, VSJ-SPIE98, Yokohama, Japan, The Visualization Society of Japan, The International Society for Optical Engineering, pp. 268-269, 1998.

Doh DH; Hyun B S; Choi SW; Hong SD; Baek TS, "Panoramic-PIV system and its application to tandem oil fences", Proc. of 3th International Workshop on Particle Image Velocimetry, Univ. of California-Santa Barbara, USA, pp.613-618, 1999.

Doh DH; Kim DH; Choi SW; Lee YW; Saga T; Kobayashi T, "Development of noncontact velocity tracking algorithm for 3-D high speed flows using digital image processing technique(1-Frame 3-D PTV)", Proc. The Third International Workshop on PIV'99-Santa Barbara, pp.483-492, 1999.

Hassan YA; Blanchat TK; Seeley CHJr; Canaan RE, "Simultaneous velocity measurement of both components of a two-phase flow using particle image velocimetry", Int. J. Multiphase Flow. Vol.18, pp.371-395, 1992.

Hassan YA, "Multiphase flow measurement using three-dimensional PIV", Proc. Intl. Conference on Fluid Eng. Tokyo Jpn., Vol.3, pp.813-818, 1997.

Kasagi N; Hirata M; Nishino K; Ninomiya N; Koizumi N, "Three-dimensional velocity measurement via digital image processing technique", J. flow Visualization Soc. Jpn., Vol.7(26), pp.283-288, 1987.

Kasagi, N; Nishino K, "Probing turbulence with three dimensional particle tracking velocimetry", Exp. Thermal and Fluid Sci., Vol.4, pp.601-612, 1991.

Kent JC; Trigui N; Choi WC; Guezennec YG; Brodkey RS, "Photogrammetric calibration for improved three-dimensional particle tracking velocimetry", Proc. SPIE Int. Symp. on Optical Diagnostic in Fluid and Thermal Flows, San Diego, July 1993.

Kobayashi T; Saga T; Sekimoto K, "Velocity measurement of three-dimensional flow around rotating parallel disks by digital image processing", ASME FED Vol.85, pp.29-36, 1989.

Kobayashi T; Saga T; Segawa S, "Multi-point velocity measurement for unsteady flow field by digital image processing"In: Flow Visualization V (Ed. Reznicek R)., Washington D. C.: Springer-Verlag, pp.197-202, 1990.

Kobayashi T; Saga T; Haeno T; Tsuda N, "Development of a real-time velocity measurement system for high Reynolds fluid flow using a digital image processing design", In: Experimental and Numerical Flow Visualization (Ed Khalighia B et al.)., ASME FED Vol.128, pp.9-14, 1991.

Murai Y; Watanabe S; Yamamoto F; Matsumoto Y, "Three-dimensional measurement of bubble motions in bubble", In: Workshop on PIV (Ed. Kobayashi T; Yamamoto H)., Fukui: Visualization Society of Japan, pp.13-18, 1997.

Nishino K; Kasagi N; Hirata M, "Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing", ASME J. Fluids Eng. Vol.111(4), pp.384-391, 1989.

Nishino K; Yamawaki T; Masakazu T, "Application of 3-D PTV to microgravity fluid experiments", In: Workshop on PIV (Ed. Kobayashi T; Yamamoto H)., Fukui: Visualization Society of Japan, pp.49-58, 1995.

Nishino K; Emori T; Kawamura H; Kawasaki K; Makino K; Yoda S; Kawasaki H, "Three-dimensional PTV measurement of marangoni convection in a sounding rocket experiment", In: Optical Tech. and Image Processing in Fluid, Thermal, and Combustion Flow., VSJ-SPIE., (Ed. Kobayashi T)., Yokohama.: Visualization Society of Japan, pp.254-256, 1998.

Okamoto K. et al., "Evaluation of the 3D-PIV Standard Images(PIV-STD Project)", Proc. The Third International Workshop on PIV'99-Santa Barbara, pp.31-36, 1999.

Panantoniou D; Dracos T, "Analyzing 3-D turbulent motions in open channel flow by use of stereoscopy and particle tracking", Advances in Turbulence 2 (Ed. Fernholz HH; Fiedler HE)., Berlin: Springer-Verlag, pp.278-285, 1989.

Racca RG; Dewey JM, "A method for automatic particle tracking in a three-dimensional flow field", Exp. in Fluids, Vol.6, pp.25-32, 1988.

Hong SD; Choi SH; Baek TS; Doh DH, "Development of Panoramic-PIV", Proc. of Korean Society of Mechanical Engineers, Spring Meeting, Collage of Science and Technology Education, pp.26-30, 1999.

Suh SH; Choi Y; Roh HW; Doh DH, "Flow analysis in the bifurcated duct with PIV system and computer simulation", J. of Korean Society of Mechanical Engineers(KSME:B), Vol.23, No.1, pp.123-130, 1999.

Trigui N; Guezennec YG; Brodkey RS, "Fully automated three-dimensional particle tracking velocimetry", theory, implementation, and validation., In: Workshop on PIV (Ed. Kobayashi T; Yamamoto H)., Fukui: Visualization Society of Japan, pp.59-70, 1995.

Willert CE; and Gharib M, "Digital particle image velocimetry", Exp. in Fluids, Vol.10, No.4, pp.181-193, 1991.

Yamakawa M; Iwashige K, "On-line velocity distribution measuring system applying image processing", J. Flow Visualization Soc. Jpn., Vol.6(20), pp.50-58, 1986.

감사의 글

진정한 학문의 길이란 쉽지 않아서 앞서 계시는 많은 연구자님들께 먼저 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 그 깊이 있는 학문의 길을 열어주시지 않았다면 지금의 위치에서 제가 감히 감사함을 표하는 것도 어려운 일이라 하겠습니다. 지난 2년, 길게만 느껴지던 그 세월이 벌써 작은 결실로 제게 다가와 있습니다. 이 결실이 있기까지 불철주야 학문과 생활의 부분에서 늘 가르침으로 애써주신 도 덕희 지도교수님께 감사를 드립니다. 그리고, 본 논문이 완성되기까지 부족한 부분들을 다듬어 주시고 심사에 열의를 다해주신 김 동혁 교수님과 정 형호 교수님께 고개숙여 감사를 드립니다.

평소에 학문적인 깊이를 더할 수 있도록 지도편달에 애써주신 많은 교수님들께 진심으로 감사를 드립니다.

무엇보다도 연구실의 선배로써 또 한편으로 친구로써 어려울때마다 옆에서 지도와 조언을 해주었던 최 성환 박사에게 고맙운 마음을 전합니다. 그리고, 어려운 여건에서도 후배들에게 조언을 아끼지않으신 백 태실교수님께 감사하며, 매일을 변함없이 스스로들의 자리에서 협조를 아끼지 않은 후배 조 경래군과 문 지섭군을 비롯하여 학부에서부터 열심을 내고있는 모든 연구실의 후배들과 이 작은 결실의 기쁨을 함께하고 싶습니다.

마지막으로, 지금까지 늘 저의 정신적인 지주가 되어주신 소중한 어머님과 고인이 되신 아버님, 그리고 형제들에게 감사함을 전하며, 유년시절 삶의 바른 길을 일러주신 숙부님과 목사님께 감사를 드립니다. 오늘도 아이를 돌보며 한결같은 마음으로 연구에 충실할 수 있도록 도와준 정우엄마에게 이 작은 결실을 드립니다.

2000년 1월 홍 성 대 배상