

工學博士 學位論文

한 대 카메라를 이용한 마이크로 3D-PTV  
개발에 관한 연구

*A Study on Development of Micro 3D-PTV using Single Camera*

指導教授 都 德 熙

2008年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機 械 工 學 科

趙 溶 範

本 論 文 을 조 용 범 의 工 學 博 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

위 원 장      공 학 박 사      조   효   제      인

위    원      공 학 박 사      이   연   원      인

위    원      공 학 박 사      백   태   실      인

위    원      공 학 박 사      김   유   택      인

위    원      공 학 박 사      도   덕   희      인

2007년 12월 22일

한 국 해 양 대 학 교      대 학 원

## 목 차

Abstract	III
Nomenclature	VI
Greek characters	VIII
List of Figures	IX

제 1 장 서론 .....	1
제 2 장 3D/4D측정 이론 .....	9
2.1 3D 측정법 개요 .....	9
2.2 3D-PTV 측정법 .....	10
2.3 3D-PTV 측정법과 유전알고리즘 .....	21
2.4 고해상 4D-PTV측정법 .....	27
제 3 장 <i>Single camera Micro 3D-PTV system</i> .....	30
3.1 측정시스템 구성과 측정원리 .....	30
3.2 오차해석 .....	47
3.3 가상영상에 의한 성능평가 .....	54

제 4 장 후향단 <i>Micro</i> 채널 실험 및 고찰 .....	62
4.1 실험 장치 및 방법 .....	62
4.1 실험 결과 .....	74
제 5 장 결론 .....	98

참고문헌

*A Study on Development of Micro 3D-PTV using Single  
Camera*

*by  
Yong Bum Cho*

*Department of Mechanical Engineering  
Graduate School Korea Maritime University*

*Abstract*

In this paper, a micro-stereoscopic PTV system is developed using single camera system. Two viewing holes are installed just behind the object lens of the microscopic system to construct a stereoscopic viewing. The system consists of one high-definition camera (1028 x 1024 pixel, 500fps), a plate of two-viewing holes and the host computer. Since two image pair for one tracer particle exists on the same image, it is not so easy to find the same particle pairs among many particles in the images.

Two calculation methods have been introduced to calculate three-dimensional positions of the particles. One is to introduce a hybrid genetic algorithm (GA) to calculate three-dimensional vector fields. The

other one is to utilize the distances between the two image centers of the particles made by the two viewing holes. As for the first calculation, the hybrid genetic algorithm (GA) has been used to find the same particles' image pairs seen on the experimental images. An epipolar line was used to reduce the number of candidates for one particle. In the genetic algorithm, crossover operation, mutation operation and reproduction operation are introduced. Percentile values of these three values are changed to find the most optimal pairing conditions.

In order to make a performance test for the constructed algorithm, the camera parameters obtained in the process of camera calibrations have been used for generating a set of virtual image. Using the constructed virtual images the optimal calculation conditions have been found. That is, it has been empirically verified that optimal percentile values for the GA algorithm are crossover 100%, mutation 20%, Reproduction 50%, respectively. Further, the optimal diameter of the two holes were 3.5mm and the distance between the two holes were 5mm. The measurement errors for X, Y and Z coordinates could be estimated using the results of camera calibration as 0.083 $\mu$ m, 0.045 $\mu$ m and 0.083 $\mu$ m, respectively. And the deviations of the measurement error could be estimated as 0.725 $\mu$ m, 0.452 $\mu$ m, 4.108 $\mu$ m.

As for the second calculation method for the calculation of three-dimensional vector fields, the distance between the photographic centers of the two images that have been constructed by the two holes. A relation between Z-positions and the distances are calculated before the

main experiment so that the  $Z$  positions of any unknown particles can be predicted. The center points of the distance have been regarded as the photographic coordinates on  $X$  and  $Y$  axes.

The constructed micro-stereoscopic PTV(a 3D-PTV) has been used to measure the velocity fields of a micro-back-step channel flow. The height of the back-step is  $36\ \mu\text{m}$  and the height of the channel is  $60\ \mu\text{m}$  with a width of  $3\text{mm}$ . The Reynolds number is  $0.017$ . The data obtained by the constructed system have been compared with those of CFD. It has experimentally verified that the velocity profiles shows a good agreement quantitatively and qualitatively. The constructed micro measurement system is planed to be used for the measurements of the wall boundary layers in turbulent flows.

## Nomenclature

$3DE$	: Fitness for 3-D position of particle
$A_i$	: Coefficient of area moment
$B, B_{ii}$	: Inverse matrix of $M$
$C$	: Fitness for continuous fluid of vector
$c, c_x, c_y$	: Plane distance from lens center
$D, D_s, D_e$	: Error of calculated 3-D position of particles
$D_i$	: Divergence of velocity
$dis$	: Distance of projection
$D_M$	: Thresholding value of $D_i$
$d_p$	: Diameter of particle
$F$	: Equation of observation for x-direction
$G$	: Equation of observation for y-direction
$I$	: Intensity of particle
$I_0$	: Maximum intensity of particle
$k_1, k_2$	: Lens coefficient
$M_M, M_X, M_Y, M_Z$	: Rotation matrix
$m_x, m_y$	: Movement value of principle point Movement value of principle point
$Re_H$	: Reynolds number of a half of depth
$RES$	: Reynolds shear stress
$R_R$	: Recovery ratio

$o$	: Original point of photographic coordinate system
$O$	: Original point of absolute coordinate system
$p$	: Particle on images
$P$	: Particle in space
$S_x, S_y, S_z$	: Standard deviation of 3-D position
$TKE$	: Turbulence kinetic energy( $\frac{1}{2} \overline{u^2} / U_0^2$ )
$T_u$	: Turbulence intensity( $\sqrt{\overline{u^2}} / U_0$ )
$T_v$	: Turbulence intensity( $\sqrt{\overline{v^2}} / U_0$ )
$T_w$	: Turbulence intensity( $\sqrt{\overline{w^2}} / U_0$ )
$V_G$	: Generated vector by random
$V_R$	: Recovered vector less than 0.1mm in error
$\Delta x, \Delta y$	: Lens distortion value
$\bar{x}, \bar{y}$	: Center point of particle
$x_0, y_0$	: Deviation of the principal point from the center of image
$x_p, y_i$	: Value of the photographic position of particle
$x, y, z$	: Photographic coordinate system
$X, Y, Z$	: Absolute coordinate system
$X_0, Y_0, Z_0$	: Center of projection
$X_p, Y_p, Z_i$	: Value of the 3-D position of particle
$X_m, Y_m, Z_m$	: Rotated absolute coordinate system

## *Greek characters*

$\alpha, \omega$	: Tilted angle for X axis
$\beta, \psi$	: Tilted angle for Y axis
$\kappa$	: Tilted angle for Z axis
$\sigma_l$	: Radius of cylindrical light
-	: Time averaged value

## *List of Figure*

- Figure 2.1      Classification of PIV measurements.
- Figure 2.2      Camera calibrator for 3D-PTV measurement
- Figure 2.3      Captured calibrator image by three cameras
- Figure 2.4      Rotation by X, Y and Z axis.
- Figure 2.5      Relations between absolute and camera's coordinate system.
- Figure 2.6      Definition of 3-D particle position.
- Figure 2.7      Comparison of the conventional 3D-PTV vs. 4D-PTV.
- Figure 3.1      Pin hole plate Image.
- Figure 3.2      Ray tracing when apertures are not located same plane with a lens.
- Figure 3.3      Defocusing Raw Image.
- Figure 3.4      Gaussian mask method.
- Figure 3.5      Centroid Image using Gaussian mask
- Figure 3.6      Selecting 2D Candidate in GA.
- Figure 3.7      Selecting 3D Candidate in GA.

- Figure 3.8      Selecting Candidate in GA.
- Figure 3.9      Flowchart of GA in Micro PTV.
- Figure 3.10     Schematic image of GA.
- Figure 3.11     Scheme of depth determination
- Figure 3.12     Image for camera calibration.
- Figure 3.13     Calibration data at 4mm hole spacing
- Figure 3.14     Calibration data at 4.5mm hole spacing
- Figure 3.15     Calibration data at 5mm hole spacing
- Figure 3.16     Virtual Image with Real camera information
- Figure 3.17     Virtual Image
- Figure 3.18     Reference vector
- Figure 3.19     Recovery vector
- Figure 3.20     Recovery ratio
- Figure 3.21     Selecting 3D Candidate in GA.
- Figure 4.1      Schematic illustration of experiment setup

- Figure 4.2 Raw Image of experiment
- Figure 4.3 Schematic illustration of Micro channel
- Figure 4.4 Figure 4.4 Scheme of Calibrator.
- Figure 4.5 Image of Calibrator
- Figure 4.6 Processing of Centroid Tracking at Calibration
- Figure 4.7 Processing of Centroid Matching at Calibration
- Figure 4.8 Experiment position & basic axis
- Figure 4.9 Raw Vector using GA
- Figure 4.10 Grid Vector using GA
- Figure 4.11 Raw Vector using depth parameter
- Figure 4.12 Grid Vector using depth parameter
- Figure 4.13 X-Z plane Grid Vector using depth parameter
- Figure 4.14 CFD 3D vector result
- Figure 4.15 CFD Slice result at  $y = \text{center position}$
- Figure 4.16 CFD result at  $Z = 0.5H$
- Figure 4.17 CFD result at  $Z = H$

- Figure 4.18      CFD result at  $Z= 1.5H$
- Figure 4.19      Figure 4.18 Result of X-Z Plane at Iteration 20  
(crossover 150%, mutation 10%, reproduction 150%)
- Figure 4.20      Figure 4.19 Result of X-Z Plane at Iteration 50  
(crossover 150%, mutation 10%, reproduction 150%)
- Figure 4.21      Figure 4.20 Result of X-Z Plane at Iteration 100  
(crossover 150%, mutation 10%, reproduction 150%)
- Figure 4.22      Figure 4.21 Result of X-Z Plane at Iteration 20  
(crossover 150%, mutation 20%, reproduction 150%)
- Figure 4.23      Figure 4.22 Result of X-Z Plane at Iteration 50  
(crossover 150%, mutation 20%, reproduction 150%)
- Figure 4.24      Figure 4.23 Result of X-Z Plane at Iteration 100  
(crossover 150%, mutation 20%, reproduction 150%)
- Figure 4.25      Figure 4.24 Result of X-Z Plane at Iteration 20  
(crossover 150%, mutation 20%, reproduction 200%)
- Figure 4.26      Figure 4.25 Result of X-Z Plane at Iteration 50  
(crossover 150%, mutation 20%, reproduction 200%)
- Figure 4.27      Figure 4.26 Result of X-Z Plane at Iteration 100  
(crossover 150%, mutation 20%, reproduction 200%)

- Figure 4.28      Result of X-Z Plane at Iteration 20  
                    (crossover 200%, mutation 20%, reproduction 150%)
- Figure 4.29      Result of X-Z Plane at Iteration 50  
                    (crossover 200%, mutation 20%, reproduction 150%)
- Figure 4.30      Result of X-Z Plane at Iteration 100  
                    (crossover 200%, mutation 20%, reproduction 150%)
- Figure 4.31      Result of X-Z Plane using depth parameter

## *List of Table*

Table 2.1	Definition of chromosome with respect to camera.
Table 3.1	Plane calibrator's information for Single Camera Micro 3D-PTV.
Table 4.1	Calibration error analysis

## 제1장 서론

본 논문은 난류경계층 내의 점성저층과 같은 미세유동의 내부 거동구조를 파악할 수 있는 측정시스템의 개발에 관한 내용을 담고 있다. 즉, 거시유동(macro scale flows)상태에서의 난류경계층의 벽면 근처의 마이크로스케일유동(micro scale flows)에 대한 조사는 유체공학적으로 큰 의의를 지닌다고 할 수 있다.

한편, 난류경계층은 유체역학에서 가장 흔히 접하게 되는 문제 중 하나이며 많은 산업현장에서 접하게 되는 필수적인 요소이다. 이제까지 이러한 난류경계층에 관하여 국내외적으로 많은 실험과 수치해석이 연구되어졌으며 이로 인해 난류경계층의 특성과 구조, 난류경계층의 유동제어를 이용한 항력(drag) 감소 등 많은 발전이 이루어졌다. 난류경계층에 대한 연구에서 가장 중요한 요소 중 하나는 바로 표면마찰계수(skin friction coefficient)를 계산하는 것이다. 대부분의 난류경계층의 표면의 경우 매끄러운 표면을 가정하여 연구가 이루어져왔는데 이 경우 유동방향 평균속도가 Log-law를 만족한다는 사실을 이용하여 실험에서 측정된 평균속도를 Log-law에 맞게 fitting하여 손쉽게 표면마찰계수나 벽마찰속도(wall friction velocity) 등을 구할 수 있으며 이를 이용하여 물체 표면에서의 항력이 얼마나 발생할지를 예측할 수 있게 해준다. 정확한 표면마찰계수를 구하기 위한 대부분의 난류 모델 역시 이러한 매끄러운 표면을 가정하여 개발되어 왔으며 이를 이용하여 많은 산업현장에서 이용하고 있다.

그러나 실제 산업현장에서의 사용되고 있는 제품 혹은 기구의 표면은 매끄럽지 못하고 어느 정도의 표면조도가 존재하고 있다. 이러한 표면조도는 복잡한 기하학적 형상으로 인해 질량교환과 열교환이 활성화 되며 이로 인해 표면 저항과 열전달을 촉진시키기 때문에 자동차, 선박, 항공기, 열교환기 등의 설계에서 고려해야 할 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 육안으로 보기에 표면조도를 무시할 만큼 매끄

러운 표면이라도 레이놀즈수(Reynolds number)가 매우 크면 난류 경계층의 두께가 얇아져서 매우 작은 표면조도라도 난류 경계층에 큰 영향을 끼칠 수가 있기 때문에 표면조도가 난류 유동에 끼치는 영향에 대한 연구는 매우 중요하다.

기존의 표면조도에 대한 연구는 주로 실험에 의해 이루어져 왔는데 표면조도가 있는 난류경계층의 경우 매끄러운 표면에 비하여 물체 표면에서의 항력의 크기를 예측하는데 많은 어려움이 있어왔다. 표면 근처의 강한 난류강도와 공간적 불균일성으로 인하여 측정상의 오차가 증가하게 되며 또한 매끄러운 표면과 달리 Log-law를 만족하지 않기 때문에 속도를 무차원화 하는데 필요한 벽마찰속도(wall friction velocity)를 정의하기 위해 매끄러운 표면과는 다른 방법을 필요하게 되었다.

Hama (1954)는 표면조도가 있는 난류경계층에서 표면마찰계수를 계산하기 위하여 표면조도로 인하여 발생하는 Log-layer에서 일정한 크기의 유동방향 속도의 감소량을 fitting을 통하여 표면마찰계수를 계산하는 방법을 제시하였다.

Clauser (1954), Hama (1954)는 주 유동방향 평균속도를 velocity defect form으로 그릴 경우 표면조도로부터 멀리 떨어진 바깥영역에서 표면조도가 없는 경우와 그래프가 일치함을 보였다. 때문에 이를 이용하여 표면조도가 있는 난류경계층에서 측정된 유동방향 평균속도를 매끄러운 난류경계층에서 측정된 유동방향 평균속도와 비교하여 fitting함으로써 표면마찰계수와 벽마찰속도를 구하는 방법을 사용하였다.

Townsend (1976)와 Perry 등(1977)은 표면조도의 5배정도 높이까지 roughness sublayer가 존재하며 표면조도가 난류 경계층에 끼치는 영향은 roughness sublayer 안으로 제한된다고 주장하였다. 즉 roughness sublayer 바깥 영역에서는 표면조도가 난류 경계층에 영향을 끼치지 못하며 난류 구조가 표면조도가 없는 경우와 동일하다고 주장하였는데 이를 'Townsend wall similarity 가설'이라 한다.

Raupach (1991)는 표면조도가 있는 난류경계층에서 난류 강도를 측정하여

roughness sublayer 밖의 영역에서는 난류 강도가 표면조도가 없는 경우와 동일함을 확인하였다. 또한 많은 실험들이 ‘Townsend wall similarity 가설’을 지지하는 결과를 보여주었으며 때문에 오랫동안 이 가설은 사실로 받아들여져 왔으며 때문에 대부분의 경우 표면조도가 있는 난류경계층에서의 표면마찰계수와 난류모델들은 Townsend의 가설을 근거로 하여 구해져왔다.

그러나 Krogstad 등 (1992)은 이러한 가설에 대해 의문을 제기하였는데 표면조도가 있는 난류 경계층에 대해 열선풍속계를 이용한 실험을 통하여 roughness sublayer 밖에서도 난류유동이 매끄러운 난류경계층과 차이점이 존재한다는 것을 발견하였다. 이들은 표면조도가 있는 난류경계층에서의 표면마찰계수를 구하는 기존의 방법이 실제 측정 결과와 차이가 있음을 주장하였으며 표면조도로부터 멀리 떨어진 바깥영역에서도 표면조도로 인하여 매끄러운 난류경계층과는 다른 방법으로 wake strength를 정의하여야만 보다 정확한 표면마찰계수를 얻을 수 있음을 보였다.

또한 Acharya 등 (1987)이 언급한바와 같이 표면조도부근의 강한 난류강도와 비등방성으로 인하여 기존의 X-probe를 이용하여 측정할 경우 X-probe의 유효응답각 (effective response angle)이 작을 경우 벽면 수직방향 난류강도를 실제보다 작게 측정될 수 있음을 실험을 통하여 보였으며 충분히 큰 유효응답각을 가진 X-probe로 측정할 경우 표면조도로부터 멀리 떨어진 바깥영역에서의 난류강도가 매끄러운 난류경계층과 큰 차이가 있음을 보였다. 즉 표면조도가 난류경계층의 바깥영역에도 큰 영향을 끼치며 이는 기존의 Townsend의 가설이 옳지 않음을 주장하였다.

이 후 Mazouz 등 (1998), Tachie 등 (2000)도 실험을 통하여 이러한 Krogstad 등의 의견을 뒷받침하였으며 Krogstad 와 Antonia(1999)는 표면조도의 기하학적 형상에 따라 바깥영역에서의 난류구조가 큰 차이점이 존재한다는 것을 보여주었다. 위와 같은 ‘Townsend wall similarity 가설’에 위배되는 여러 연구 결과들로 인하여

현재는 이 가설의 진위 여부를 밝히는 것이 표면 조도가 있는 난류유동에 대한 연구에 있어서 매우 중요한 issue가 되었다. 실험을 통해 표면조도의 영향을 조사할 때에는 표면 근처에서 발생하는 강한 난류 강도와 비 균일성으로 인한 속도의 부정확성과 이로 인해 벽면 마찰속도를 측정하는데 어려움이 있다. 또한 고차원의 난류 통계량들을 얻는 것이 힘들기 때문에 표면조도를 고려한 난류 모델을 개발하는데 있어 충분한 자료를 공급하기 힘들다. 때문에 최근에는 이러한 문제를 컴퓨터를 이용하여 수치적으로 계산하려는 노력이 이루어져 왔다.

Miyake 등(2001)은 직접 수치모사와 가상경계기법을 이용하여 표면조도가 있는 난류채널에서의 유동장과 온도장을 해석하였다.

Ashrafian 등(2003)은 직접수치모사를 이용하여 양쪽 벽 모두 표면조도가 있는 채널에서의 난류 유동장을 계산하였으며 바깥 영역에서 난류 강도의 차이가 거의 없어서 Townsend wall similarity 가설을 지지하였다. Lee (2002) 역시 표면조도가 있는 난류채널에서 LES를 이용하여 계산하였는데 마찬가지로 바깥 영역에서 난류 강도의 변화가 거의 없다고 주장하였다.

반면에 Leonardi 등 (2003)은 직접수치모사와 가상경계기법을 이용하여 한쪽 벽에만 표면조도가 있는 난류채널에서의 유동장을 계산하였다. 양쪽 벽 모두 표면조도가 있는 Ashrafian의 결과에 비해 한쪽 벽에만 표면조도가 있는 Leonardi의 경우 난류 강도의 변화가 바깥 영역에서도 크게 나타났다. 이러한 차이점은 표면조도가 있는 벽의 반대쪽 벽의 표면조도의 유무로 인한 바깥영역에서의 표면조도의 영향으로 생각될 수 있다. 하지만 Leonardi의 경우 표면조도의 크기가 채널 폭의 20%로 너무 커서 표면조도로 보기 힘든 면이 있다.

이제까지의 대부분의 DNS, LES 계산은 난류채널에서의 결과로 제한되어 있다. 이는 채널의 경우 주유동방향으로 주기적이라는 경계조건을 줄 수 있기 때문에 난류경계층에 비하여 경계조건 처리가 간단하며 fully developed 되었다고 가정하고

주유동방향으로 평균을 취할 수 있기 때문에 developing flow인 난류경계층에 비하여 계산시간이 크게 줄어들기 때문이다. 하지만 표면조도에 대한 대부분의 실험은 난류경계층에서 이루어졌으며 이로 인하여 실험에 대한 검증이 제대로 이루어지지 못하고 있다. 매끄러운 표면을 가진 난류유동의 경우 벽면근처에서의 난류구조는 채널과 난류경계층이 큰 차이가 없다고 알려져 있다.

하지만 Teital (1991)은 실험을 통하여 벽면에서 멀리 떨어진 바깥영역(outer layer)에서의 난류구조는 채널과 난류경계층에 차이점이 존재함을 보여주었는데 이는 채널의 경우 난류경계층과 달리 맞은편에 존재하는 표면으로 인하여 벽면에 수직방향의 속도성분에 영향을 끼치게 되며 반대부호를 가지는 Reynolds shear stress의 존재로 인하여 이러한 차이가 발생한다고 주장하였다.

또한 Mazouz 등 (1998)은 난류채널과 난류경계층에서 표면조도의 유무에 따른 난류구조의 변화를 비교하였는데 난류채널과 난류경계층이 바깥 영역에서의 표면조도의 영향이 반대로 나타나는 것을 보여주었다.

또한 Bakken 등(2003))은 표면조도가 있는 난류채널에서의 실험을 통하여 표면조도에 의한 난류강도의 변화가 난류경계층의 경우에 비해 매우 작은 것을 보여주었는데 이는 앞서서의 Ashrafian이나 Lee 등의 수치해석 결과와 일치하는 경향을 나타내었다.

이러한 이유로 난류채널에서의 표면조도의 영향이 난류경계층에서의 표면조도의 영향과 같다고 생각하기 힘들며 채널에서의 수치해석 결과로 난류경계층에서의 실험을 검증하기도 어렵게 된다. 때문에 표면조도가 난류경계층에 끼치는 영향을 DNS를 이용하여 밝혀내기 위해서는 난류채널이 아닌 난류경계층에서 직접 계산할 필요성이 존재하게 된다. 난류경계층은 채널과 달리 매 순간 실제 난류유동과 같은 입구경계조건(inflow boundary condition)을 필요로 하며 유동방향으로 발달하는 유동이기 때문에 채널에 비해 계산이 어려우며 계산량도 크게 증가하는 어려움이 있어

왔다.

최근 Lee와 Sung(2007)은 난류경계층에 대한 DNS계산을 통하여 경계층 내부의 거칠기에 따라 내부유동(inner flow)은 외부유동(outer flow)에 지대한 영향을 미침을 밝혔다. 이는 벽면에 동일한 형상의 거칠기를 난류채널유동에 대한 DNS계산결과들과 대치되는 결과로 매우 의의가 깊은 연구성과이다. 이는 벽면상사법칙은 모든 유동형태에 적용될 수 없음을 의미하며 표면거칠기에 의한 외층으로의 영향은 외층 경계조건에도 의존함을 의미한다. 이들은 이러한 벽면상사법칙의 위배가 계산상 제약으로 채널크기 대비 벽면거칠기가 상대적으로 컸다는 점, 기하학적 형상 또는 낮은 레이놀즈수 등에 의한 것으로 풀이된다고 기술하고 있다. 그리하여 벽면거칠기에 따른 경계층유동의 메커니즘규명을 위해서는 보다 작은 높이의 거칠기와 높은 레이놀즈수에 대한 계산필요성이 있음을 언급하고 있다.

지금까지의 난류경계층 내부유동의 거동구조를 실험적으로 파악하기 위한 실험적 기법으로는 전술의 열선유속계법(Acharya, 1987), LDV법(Bolton, 1992), PIV법(Cicca et al., 2002)이 있어 왔는데, 열선유속계법과 LDV는 점계측이라는 점으로부터 유동의 거동구조를 파악하기 어렵다는 점이 있어왔으며, PIV법은 대부분이 매크로(macro)스케일이었다는 점으로부터 벽면거칠기의 상세한 거동구조의 메커니즘 규명에는 제약을 받아왔다.

본 연구는 높은 레이놀즈수의 경우에 벽면경계층 내부의 거칠기에 따른 유동구조변화를 조사하기에 앞서, 이를 위한 마이크로스케일 수준에서의 3차원 측정시스템을 개발하는데 그 목적으로 삼고 있다. 이를 달성하기 위하여, 벽면거칠기의 가장 기본으로 간주될 수 있는 마이크로후향단 유동(micro back-step flows)에 대한 측정실험을 통하여 개발 구현된 측정시스템의 측정오차 추정 및 측정알고리즘의 성능을 평가하고자 하였다.

한편, 최근의 광학 및 전자기술의 발달에 힘입어 종래의 측정법(probe 등)의 한

계인 센서의 크기 제약 및 공간분해능제약을 극복한 형태의 마이크로/나노 스케일 유동장 측정법이 개발되고 있다. Meinhart 등(1999)에 의하여 마이크로채널에 대한 유동장을 정량화 할 수 있는 기술인 마이크로-PIV법이 처음으로 개발된 이후로 이를 이용한 미소유동장의 정량적 해석에 직접수치모사에 의한 경계층내부 유동구조를 파악결과에 대한 실험적 검증을 위해서는 기존의 PIV측정법으로는 벽면 가까이 까지 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 이를 위해서는 초점거리가 일반 현미경 렌즈에 비해 상당히 긴(180mm이상) 렌즈를 사용하게 되며, 그 장치는 일반 SPIV와 크게 다르지 않고 단지 찍는 대상의 스케일이 매우 작다. 그러나 찍는 스케일이 작다는 것은 실험적으로 많은 제약을 야기한다. 두 대의 카메라가 정확히 200 um 이내의 유동영역의 촬영해야 하며 특히, SPIV 측정법으로는 마이크로 스케일영역을 촬영하기란 쉽지 않다. Long focus를 가지는 렌즈의 배율에는 한계가 있다. 또한 렌즈의 배율 문제가 해결된다 하더라도 원거리에서 마이크로 영역을 측정하기에는 기계적 안정성이 보장되어야 흔들림 없이 원하는 영역을 두 대의 카메라에 담아낼 수 있다.

따라서 높은 배율의 렌즈로 수 mm 떨어진 대상체를 찍는 것이 사실상 가장 좋은 방법이지만 이렇게 되면 카메라시스템이 차지하는 크기에 의하여 2대의 카메라를 서로 간섭 없이 벽면가까이 설치하기는 용이하지 않다. 즉 벽면가까이의 유동을 상세히 측정할 경우 기존의 측정기법으로는 계측에 제약을 많이 받게 된다.

한편, Yoon과 Kim(2005)은 Jean 등(2003)이 개발한 Defocusing 3차원측정법 기법의 아이디어를 마이크로스케일 형태로 구현함으로써 마이크로레벨에서의 3차원 측정을 가능케 하였다. 마이크로 Defocusing 3차원측정법이란 3개의 구멍을 가진 핀홀을 마이크로현미경의 대물렌즈의 후부에 설치하여 이들에 의한 동일 표적물(추적

입자)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 투명창의 존재에 의한 굴절영향 등으로 측정영역내의 X, Y위치에 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 입자영상유속계 기술의 캘리브레이션 기법을 활용한 2개구멍(스테레오비전)장착의 단일 카메라 3D-PTV 측정시스템을 구현하고자 한다.

## 제 2 장 3D/4D측정 이론

### 2.1 3D 측정법 개요

서론에서 진술한 바와 같이 PIV(Particle Image Velocimetry)란 입자영상유속계의 통칭이다. 즉 이미지를 디지털화하여 컴퓨터를 이용하여 유속을 계산하는 모든 방식을 말한다. 3차원 PIV에는 대표적으로 3차원 PTV(Particle Tracking Velocimetry)와 3차원 PIV가 있다. 3차원 PTV와 대치되는 방식이 3차원 PIV이다. 즉, 각각의 방식은 2차원 PTV와 2차원 PIV가 비교 되는 것과 같다. 2차원 PTV가 각각의 입자를 직접 추적하는 것처럼 3차원 PTV 방식은 공간상의 입자 하나하나를 추적 하는 것이며, 3차원 PIV는 2차원 PIV와 같이 correlation 방식에 의해 2차원 벡터를 구한 뒤 각각의 벡터의 결과로부터 3차원의 결과를 구하는 것이다. 용어의 혼돈을 피하기 위해 이후 3차원 PTV는 3D-PTV로 부르고 3차원 PIV는 SPIV(Stereo PIV)로 부르기로 한다.

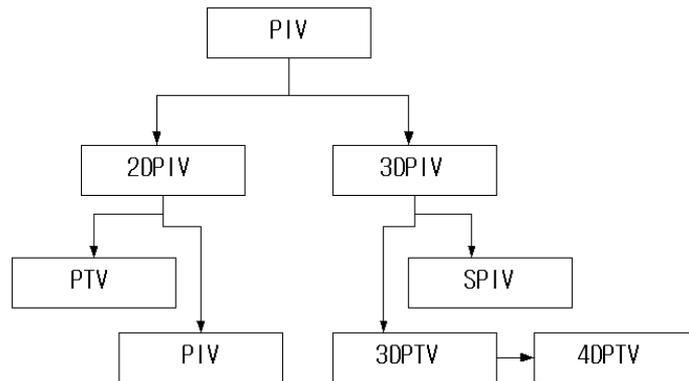


Figure 2.1 Classification of PIV measurements.

## 2.2 3D-PTV 측정법

영상을 이용하여 3차원 공간의 정량적인 인식을 위해서는 2대 이상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 정보가 필요하며, 이 카메라의 정보를 결정하는 것을 단사진 표정이라 한다.

카메라 정보와 카메라로부터 얻은 영상은 카메라 중심점에 대한 투영의 관계가 성립한다. 이러한 원리로부터, Kobayasi 등(1989, 1990, 1991)과 Doh 등(1991, 1995, 1997, 1998, 1999)은 2대 이상의 카메라를 이용하여 3차원 공간을 보다 정량적으로 인식하기 위해 외부요소 ( $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \psi, \kappa$ )와 내부요소 ( $c, x_0, y_0, k_1, k_2$ ) 등 11개의 표정 요소를 가지는 관측방정식을 사용하였으나 본 논문에서는 Doh 등(2001)이 제시한 외부요소( $d_i, \alpha, \beta, \kappa, m_x, m_y$ )와 내부요소 ( $c_x, c_y, k_1, k_2$ ) 등 10개의 요소를 가지는 새로운 관측방정식(2.2)을 사용한 유전알고리즘을 이용하였다.

Figure 2.4 은 10개 표정요소를 이용하기 위해 절대 좌표계(X, Y, Z)에 대한 사진 좌표계(x, y, z)의 관계를 보여 주고 있다. 먼저  $d_i$ 는 절대 좌표계  $O(0, 0, 0)$ 점으로부터 카메라 중심까지의 거리를 의미한다. 즉  $O$ 점으로부터 카메라중심까지의 거리를 말한다. 사진 좌표계와 절대 좌표계를 일치시키기 위해 X, Y, Z축에 대한 회전각을 각각  $\alpha, \beta, \kappa$ 로 정의하면, 축에 대한 회전 행렬은  $M_M = M_Z M_Y M_X$ 가 된다. 즉 X, Y( $\alpha, \beta$ )축 회전에 의해 사진 좌표계의 z축과, 절대 좌표계의 Z축이 평행하게 되며, 다시 Z( $\kappa$ )축 회전에 의해 사진 좌표계의 x, y축과, 절대 좌표계의 X, Y축이 서로 평행하게 된다. 이렇게 회전된 절대 좌표값을 ( $X_m, Y_m, Z_m$ )으로 표시한다. 여기서 사진 좌표계의 z축과 절대 좌표계의 Z축을 일치시키기 위한 이동량을  $m_x, m_y$ 로 표시한다. 이러한 과정을 거치면, Figure 2.5와 같은 사진 좌표계의 xy평면과 절대 좌표계의 X, Y, Z 사이의 투영관계가 성립된다. 즉 절대 좌표계의 대상점과 사진 좌표계의 투영점이 일직선상에 있다는 공선

조건으로부터 식(2.1)과 같은 관측방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x &= c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} + \Delta x \\
 y &= c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} + \Delta y
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

단,  $c_x, c_y$  : 이미지 그래버에 따른 장방비의 차이를 고려한 초점거리

$\Delta x, \Delta y$  : 이미지 중심으로부터의 거리에 따른 렌즈에 의한 굴절량

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

$$\begin{aligned}
 F &= c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} - (x - \Delta x) = 0 \\
 G &= c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} - (y - \Delta y) = 0
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

식 (2.1)같이 정의된 각 카메라의 표정요소를 구하기 위해 이미 알고 있는 절대 좌표 값( $X_p, Y_p, Z_p$ )과 사진 좌표값( $x_p, y_p$ )에 대해 관측방정식  $F, G$ 는 식 2.2와 같이 표시된다.

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

카메라의 표정요소가 구해지면 사진좌표( $x, y$ )와 절대좌표( $X, Y, Z$ )간에 식 (2.2)로부터 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$\begin{aligned}
 F &\Rightarrow \frac{c_x(X_m - m_x)}{d - Z_m} - (x - \Delta x) = 0 \\
 &\Rightarrow X_m = \frac{(x - \Delta x)(d - Z_m) + m_x}{c_x} \\
 G &\Rightarrow \frac{c_y(Y_m - m_y)}{d - Z_m} - (y - \Delta y) = 0 \\
 &\Rightarrow Y_m = \frac{(y - \Delta y)(d - Z_m) + m_y}{c_y}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

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

여기서  $d - Z_m = t$  라 두면

$$X_m = \frac{x - \Delta x}{c_x} t + m_x \quad (2.4)$$

$$Y_m = \frac{y - \Delta y}{c_y} t + m_y$$

$$Z_m = d - t$$

이 된다.

회전변환행렬을  $M_M$ 이라 두고, 역행렬을  $B$ 라 두면

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = M_M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M_M^{-1} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

이 되며, 카메라의 위치( $X_0, Y_0, Z_0$ )는 다음과 같다.

$$X_0 = B_{11}mx + B_{12}my + B_{13}d \quad (2.6)$$

$$Y_0 = B_{21}mx + B_{22}my + B_{23}d$$

$$Z_0 = B_{31}mx + B_{32}my + B_{33}d$$

이로부터 각 카메라에 대한 카메라중심( $X_0, Y_0, Z_0$ )과 입자의 중심을 지나는 하나의 직선의 방정식을 구할 수 있으며, 하나의 입자에 대한 두 대 이상의 카메라로부터 구해진 직선방정식을 공선의 조건을 이용하여 구하게 된다.

즉, Figure 2.6에서와 같이 공간상의 입자  $P$ 점에 대해 각각의 카메라는

$$P(X, Y, Z) = P(a_1t + X_0, a_2t + Y_0, a_3t + Z_0) \quad (2.7)$$

와 같은 직선의 방정식을 가진다. 즉 두 대의 카메라로부터의 직선방정식은

$$A(X, Y, Z) = A(a_{11}t + b_{11}, a_{12}t + b_{12}, a_{13}t + b_{13}) \quad (2.8)$$

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

와 같다. 이 두 직선에 대한 최단거리를 가지는  $t, s$ 는 다음과 같다.

$$t = \frac{\kappa - \alpha\beta}{1 - \alpha^2}, \quad s = \frac{\kappa\alpha - \beta}{1 - \alpha^2} \quad (2.9)$$

$$\text{단, } \alpha = a_{11}a_{21} + a_{12}a_{22} + a_{13}a_{23}$$

$$\beta = a_{11}(b_{11} - b_{21}) + a_{12}(b_{12} - b_{22}) + a_{13}(b_{13} - b_{23})$$

$$\kappa = a_{21}(b_{11} - b_{21}) + a_{22}(b_{12} - b_{22}) + a_{23}(b_{13} - b_{23})$$

식(2.9)을 이용하여  $t, s$ 가 구해지면  $A(X, Y, Z)$ ,  $B(X, Y, Z)$ 가 결정되어 진다. 여기서 입자의 위치,  $A(X, Y, Z)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \right\} \quad (2.10)$$

각 입자에 대해 위와 같은 과정을 거치면 대응하는 카메라간의 입자와 하나의 3차원 위치를 결정할 수 있게 된다.

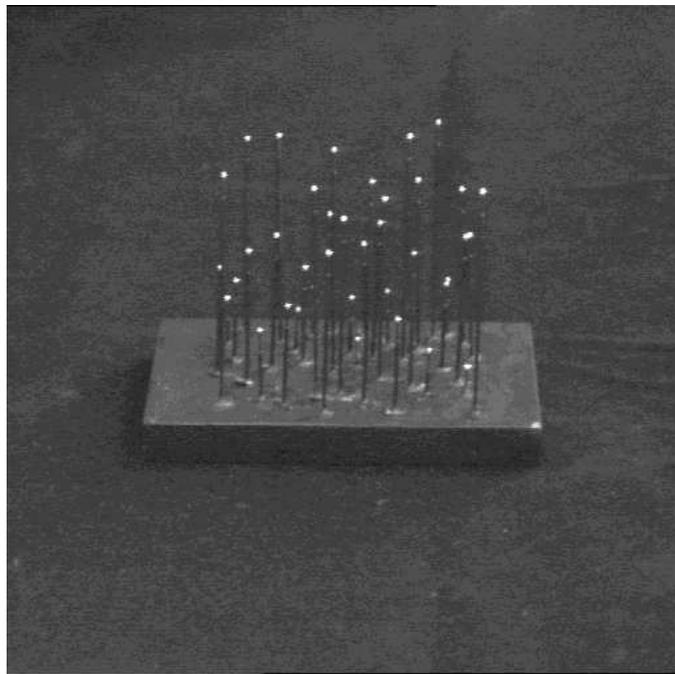
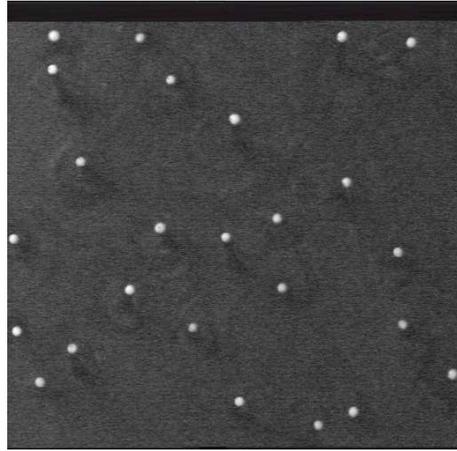
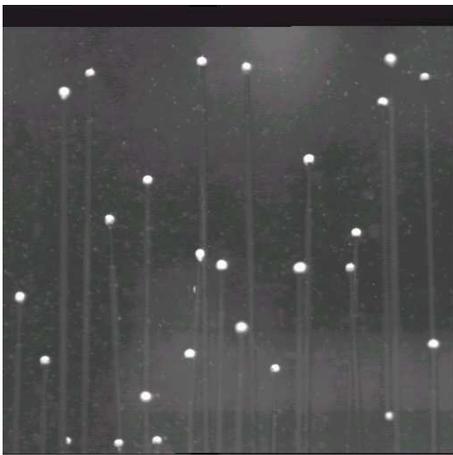


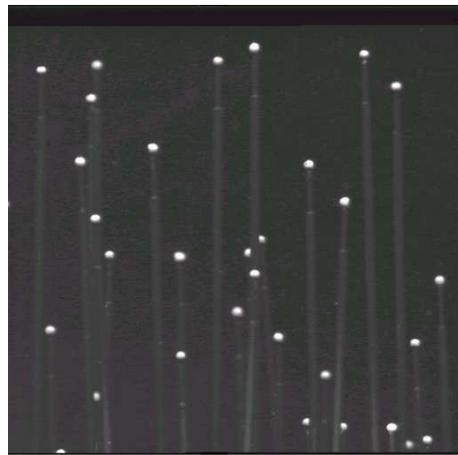
Figure 2.2 Camera calibrator for 3D-PTV measurement



(a) by camera 1



(b) by camera 2



(c) by camera 3

Figure 2.3 Captured calibrator image by three cameras

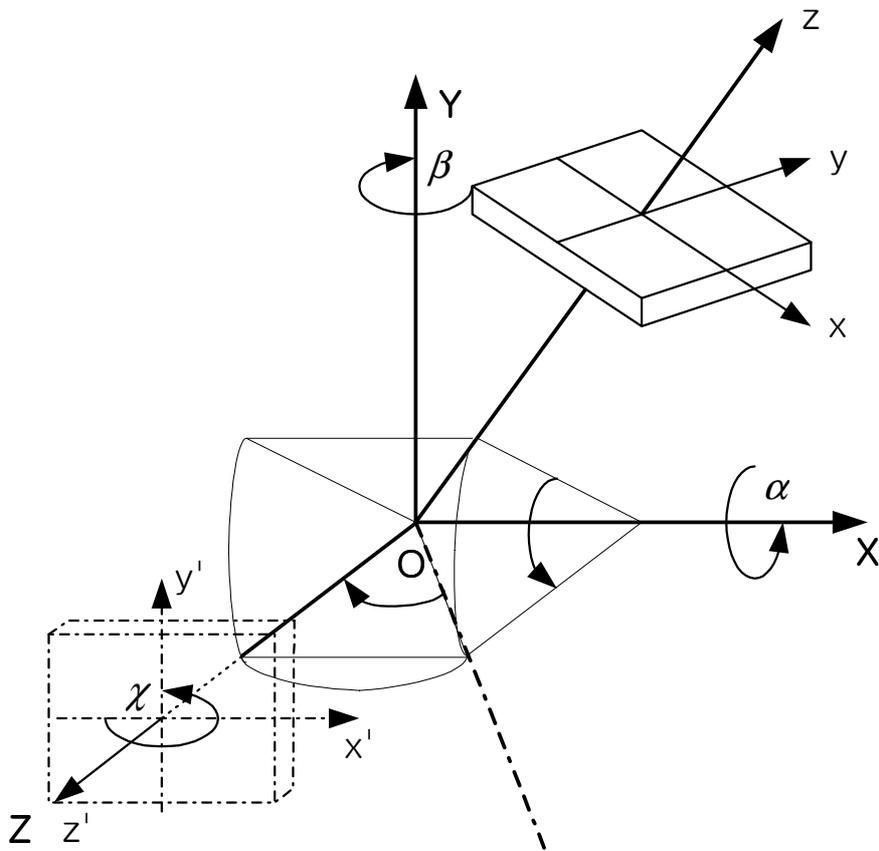


Figure 2.4 Rotation by X, Y and Z axis.

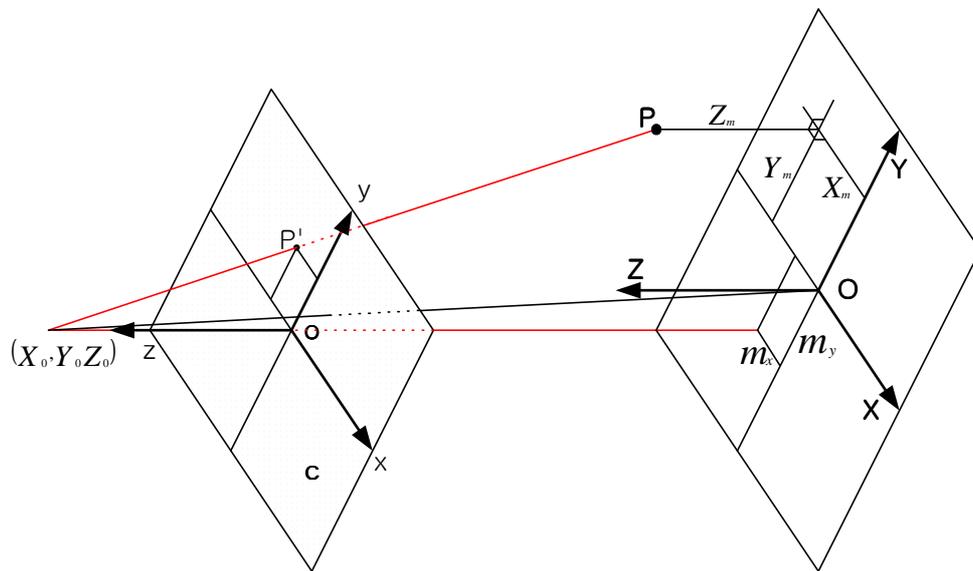


Figure 2.5 Relations between absolute and camera's coordinate system.

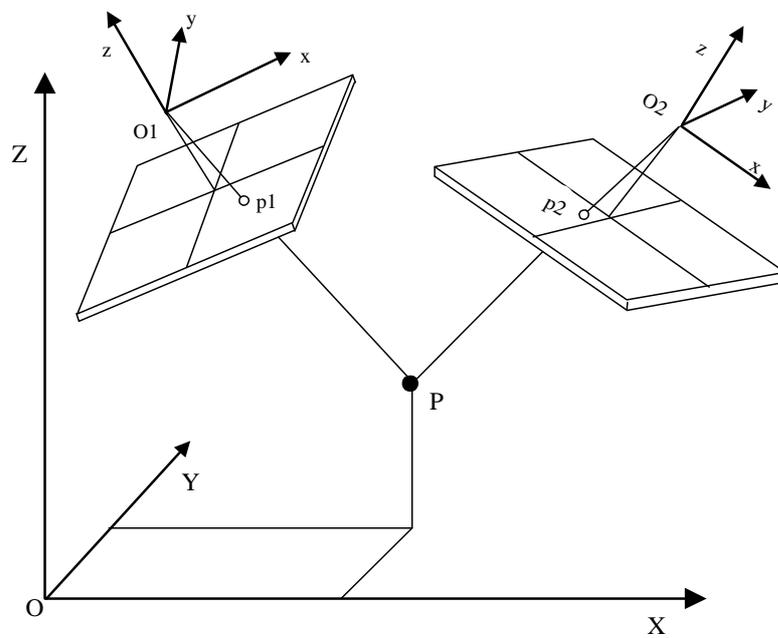


Figure 2.6 Definition of 3-D particle position.

### 2.3 3D-PTV 측정법과 유전알고리즘

GA(Genetic Algorithm)를 사용하기 위해서 주어진 문제의 특성을 잘 반영할 수 있는 일정한 형태의 자료 구조가 필요하게 되는데 일반적으로 유전자(gene)는 하나의 비트로, 염색체(chromosome)는 유전자들로 구성되는 집합, 염색체로 이루어진 집합을 집단(population), 그리고 조상과 자손을 나타내는 세대(generation)등이 있다. GA에서 각 염색체는 후보해나 잠재해를 의미하며 개체(individual)라고도 한다.

주어진 문제가 추구하는 목표는 목적 함수(object function)로 나타내어지며 이를 적합도 함수(fitness function)또는 평가 함수라고도 하며, 이러한 목적함수에 의해 각 염색체 또는 개체들의 우성과 열성을 판단하게 된다. 초기 개체 집단으로부터 최종해에 접근시키기 위해 수행되는 과정을 유전연산자라 하는데 유전연산자에는 대표적으로 선택, 교배, 돌연변이가 있고, 그 이외에 이주, 격리, 재생산 등을 사용하기도 한다.

주어진 문제에 대해 GA를 적용하기 위해 다음과 같은 5가지 요소를 정해야만 한다.

1. 문제의 해가 될 가능성이 있는 것의 유전자적 표현 방법
2. 해가 될 가능성이 있는 것들의 초기 개체집단을 만들어 내는 방법
3. 환경의 역할을 수행하는, 즉 “적합도”에 의해 해를 평가하는 목적 함수
4. 자손의 합성을 변화시키는 유전 연산자들
5. 유전자 알고리즘이 사용하는 여러 가지 매개변수의 값  
(개체집단의 크기, 유전 연산자를 적용시키는 확률 등)

기존의 방법에서는 3차원 위치 결정시 두 대의 카메라로부터 입력된 영상을 기준으로

하여 입자에 대한 공선의 조건식에서 오차가 제일 작은 입자들을 같은 입자라고 인식하게 된다. 이러한 사실을 입자의 수가 비교적 적을 때 잘 들어맞음을 알 수 있었다. 그러나, 실질적으로 입자가 많아질 경우 입자에 대한 카메라 중심으로부터의 직선은 다른 카메라에서 하나의 직선으로 나타나게 되고, 이 직선과 만나는 입자들의 개수도 증가하게 되면서, 이러한 방식은 조그만 입자중심의 오차에도 완전히 다른 결과를 얻게 된다.

이런 잘못된 결과를 수정하기 위해 같은 입자를 인식하는 과정에 유전알고리즘을 적용하였다. 3차원 속도 벡터는 시점과 종점으로 구성되어 있으며, 시점과 종점 모두 카메라 두 대로부터 동일 입자로 인식되는 입자로부터 얻어진 공간 좌표이다. 따라서 3차원 속도 벡터는 카메라의 입장에서 2개의 시점과 2개의 종점을 가지게 된다. 이것으로부터 다음과 같은 염색체를 정의한다.

Table 2.1 Definition of chromosome with respect to camera.

Camera 1		Camera 2		Fitness	
Start point	End point	Start point	End point	3D Error	Continuity

여기서 카메라에 대한 시점과 종점은 각 영상에 대한 입자의 중심값을 나타내는 정수 값 이고, 3D Error는 공선의 조건식에서 두 직선간의 최단거리를 나타낸다. 즉 하나의 입자에 대한 3차원 위치 결정 시 오차는 식(2.11)과 같고, 3차원 속도 벡터에 대한 위치 결정 시 오차는 식(2.12)와 같이 표현된다.

$$D = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2} \quad (2.11)$$

$$3DE = \left[ \overline{D_s + D_e} \right] \quad (2.12)$$

단,  $D_s$  : 3차원 속도벡터의 시점의 오차

$D_e$  : 3차원 속도벡터의 종점의 오차

각 카메라에서 획득한 입자의 시점과 종점은 전체 유동장의 최대 이동거리를 초과하지 못한다. 따라서 시점을 기준으로 하여 카메라에 대한 2차원 벡터가 될 수 있는 후보들을 결정한 다음 초기에는 임의적으로 여러 개의 후보 중 하나를 벡터로 선택한다. 이러한 과정을 카메라 두 대에서 획득한 영상에 대해 실행한다. 다음 과정은 임의적으로 결정된 두 개의 2차원 벡터를 선택하여 3차원 벡터를 만든다. 이렇게 결정된 3차원 벡

터는 시점과 종점에 대한 공간상의 3DE값을 가지게 된다. 이렇게 생성된 집단을 이용하여 여러 가지 유전연산자를 반복 적용함으로써 원하는 결과에 접근시키게 된다.

유전알고리즘에서 목적함수는 해의 방향을 결정하는 것으로 가장 중요한 요소라 할 것이다. 본 연구에서는 국소영역안에서 유체는 연속의 식을 만족해야 한다는 조건으로부터 PIV에서의 오류 벡터의 검출은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_f &= \frac{-3u(i,j) + 4u(i+1,j) - u(i+2,j)}{2\Delta x} \\ \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_f &= \frac{-3v(i,j) + 4v(i,j+1) - v(i,j+2)}{2\Delta y} \\ \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_b &= \frac{u(i-2,j) - 4u(i-1,j) + 3u(i,j)}{2\Delta x} \\ \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_b &= \frac{v(i,j-2) - 4v(i,j-1) + 3v(i,j)}{2\Delta y} \end{aligned} \quad (2.13)$$

PIV에서 구해진 속도로부터 식(2.13)을 이용하여 하나의 속도 벡터를 기준으로 한 주어진 4영역의 속도 발산치는 식(2.14)와 같으며, 이러한 4개의 정보를 이용하여 오류벡터를 판정하게 된다.

$$\begin{aligned}
D_1 &= \left| \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_f + \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_f \right| & D_2 &= \left| \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_f + \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right| \\
D_3 &= \left| \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_b + \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right| & D_4 &= \left| \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_b + \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_f \right|
\end{aligned} \tag{2.14}$$

대칭인 2조의 영역속도 발산치 ( $D_1, D_2$ ), 혹은 ( $D_2, D_4$ )는 임의의 역치  $D_M$ 을 초과하게 되면 오류벡터라고 판단된다. 그러나 판정조건의 성질상 복수의 정보를 사용하기 때문에 오류벡터에 인접한 정상벡터를 이상치로 오판하거나, 와류가 발생하는 부분 등과 같이 흐름의 변화가 큰 곳에서는 정상벡터를 이상치라고 오판할 가능성이 높다. 이러한 오판정을 최대한 줄이기 위해 4영역 중에서 속도의 변화량이 최소로 되는 영역만을 고려하고 이 영역이 흐름의 연속성을 만족하는지의 여부를 판정하는 식(2.15)와 같은 방법을 사용한다.

$$D(i, j) = \left| \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} + \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} \right| \tag{2.15}$$

$$\begin{aligned}
\text{단, } \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} &= \text{Min} \left\{ \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_f, \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_b \right\} \\
\left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} &= \text{Min} \left\{ \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_f, \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right\}
\end{aligned}$$

즉,  $D(i, j)$ 가 역치값  $D_M$ 을 넘는 경우 오류벡터라고 판정하게 된다. 식(2.16)를 3차원에 적용하면 식(2.16)과 같이 표시할 수 있다.

$$D(i, j; \theta) = \left| \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} + \left[ \frac{\partial u}{\partial y} \right]_{\min} + \left[ \frac{\partial u}{\partial z} \right]_{\min} \right| \quad (2.16)$$

그러나, 일반적으로 유전알고리즘을 사용한 PTV 계측에서 초기에 모든 속도 값이 임의적으로 가정되었고, 일정한 격자를 가지지 않았기 때문에 속도 변화치가 상대적으로 변화가 크다.

## 2.4 고해상 4D-PTV 측정법

Figure 2.9는 일반적인 3D PTV와 4D PTV의 차이를 그림으로 간략히 표현한 것이다. 실제 자연현상이나 유동장은 비정상(unsteady)적이므로, 그림에서와 같이 기존의 3D PTV의 경우는 시간에 불연속적인 결과를 얻게 되어, 관측 및 측정의 공백기가 존재하게 된다. 반면에 4D PTV의 경우 기존의 3D PTV보다 높은 시간해상도를 지니므로, 시간의 불연속에 의한 관측 및 측정의 공백기를 줄일 수 있는 장점이 있다. 현재 고해상도 고속카메라의 경우 1024×1024 pixel의 영상을 1초에 3000장 이상 찍는 고속도 카메라가 생산되어지고 있는 실정이다. 따라서 4D PTV의 경우 시간에 연속적인 자연현상과 유동장의 해석이 가능해진다. 기존의 3D PTV의 경우 그 순간의 순시변화를 관찰할 수 있으며, 1000장 이상의 순시치를 앙상블 평균(ensemble average)함으로써 평균 유동장 해석에 유용하게 사용할 수 있다.

난류운동(turbulent motions)에 있어서 거대 스케일(large-scale) 난류운동은 대략적으로 점성에 독립적이고, 미소 스케일(small-scale) 운동은 점성에 의해서 제어되어진다. 또한 미소 스케일(small-scale) 운동들은 통계적으로 거대 스케일(large-scale) 난류 요동(fluctuations)과/또는 평균 운동(mean motions)에 독립적이다.

Kolmogorov의 일반적인 형평 이론(universal equilibrium theory)은 다음과 같다. 미소 스케일 난류는 거대 스케일에 관계없이 평형하고 오로지 소산율( $\epsilon$ )과 점성( $\nu$ )에 제어되어진다. 또한 Kolmogorov scale은 다음과 같은 식(2.17), (2.18), (2.19)으로 정리되어진다.

앞서 3D PTV가 시간해상도를 향상시킨 4D PTV 시스템으로 확장되기 위해서는 유동장의 라그랑지 주파수(Lagrange frequency)보다 빠른 속도로 고해상의 3차원 측정이 이루어져야 한다고 진술하였다. 이는 무조건 빠른 고속도카메라만 있으

면 된다는 의미이기도 하나, 실험목적외의 필요이상의 고속도카메라는 불필요하다는 뜻을 포함한다. 즉, 4D PTV를 위한 시간해상도 조건이 존재한다는 의미이며, 구속 난류 이론(frozen turbulence hypothesis) 전제에서 이 조건은 식 (2.20)로 정의된다. 이 식 (2.20)는 시간간격  $\Delta t$ 가 구속난류이론의 가정하에서 대류 시간 스케일보다 길게 기대되는 난류 시간 스케일 보다 짧아야 한다는 것을 암시한다.

$$\text{Length Scale} \quad \eta \equiv \left( \frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.17)$$

$$\text{Time Scale} \quad \tau \equiv \left( \frac{\nu}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

$$\text{Velocity Scale} \quad \tau \equiv (\nu\epsilon)^{\frac{1}{4}} \quad (2.19)$$

$$\Delta t \ll \frac{D}{U_0} < \tau \quad (2.20)$$

$\Delta t$  : Image sampling time

$\frac{D}{U_0}$  : Convection time scale

$\tau$  : Turbulence time scale (Kolmogorov time scale)

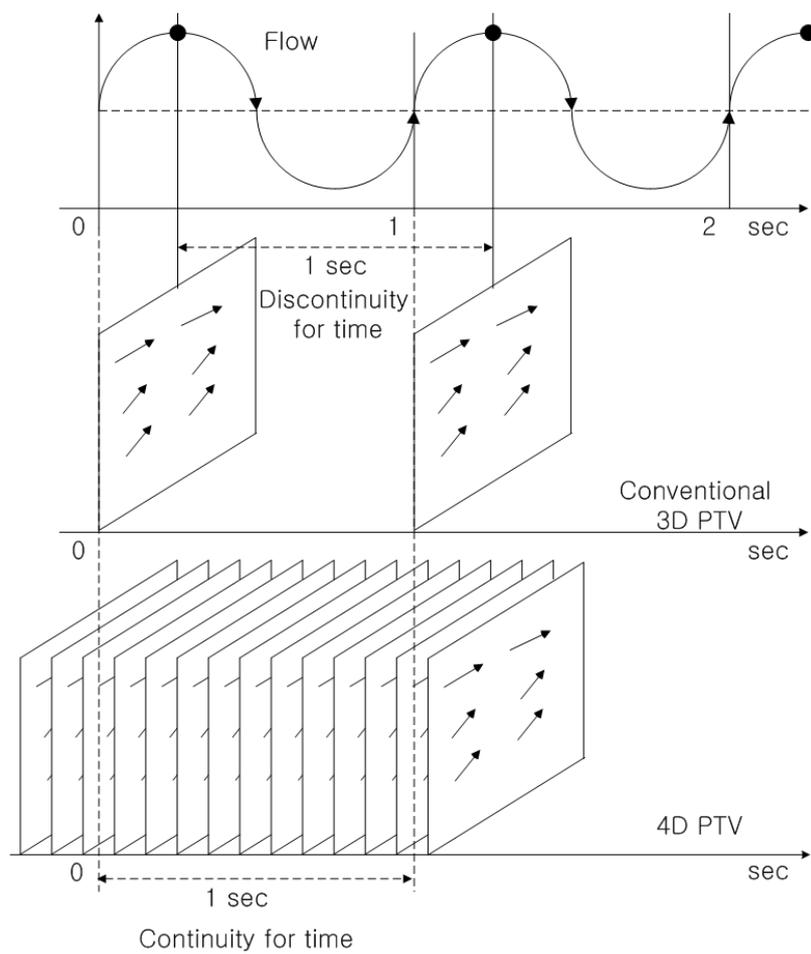


Figure 2.7 Comparison of the conventional 3D-PTV vs. 4D-PTV.

## 제 3 장 *Single Camera Micro 3D-PTV system*

### 3.1 측정시스템 구성과 측정원리

현재 구축된 측정시스템의 하드웨어사양은 미소스케일(수백 $\mu\text{m}$ -수 $\text{mm}$ )의 측정에 장점이 있는 바 본 연구에서는 나노 열유체 분야의 주요 유동현상인 마이크로 채널 측정에 적용하였으며 채널내 후향단이 존재한다. 본 실험에서 가장 중요한 요소 중 하나인 Figure 3.1의 Pin hole plate가 Filter cube를 통해 걸러진 빛을 다시 2개의 pin hole 영상으로 나누는 역할을 한다. 이 영상은 하나의 입자를 2개로 보이게 함으로써 Figure 3.3과 같이 마이크로 채널 내 입자의 영상을 2개로 나누어 보여준다. Single camera를 이용한 마이크로 시스템은 이렇게 나누어진 이미지를 분석하여 calibration을 하고 이 정보를 이용하여 입자의 위치와 속도를 얻게 된다.

전술한 바와 같이 Single camera micro 3D-PTV는 pin hole plate에 의한 영상의 defocusing 현상을 이용한다고 하였다. 이를 좀더 자세히 살펴보면 Figure 3.2의  $\delta A$  가 0 이라면 중심점  $(X_0, Y_0)$  는 선행연구에서 언급한 바대로  $(X', Y')$  와  $(X'', Y'')$  사이의 중심과 일치 되어야 한다. 그러나 장치가 렌즈면 으로부터 멀어질 때는  $\delta A \neq 0$ , 이며 점 $(X_0, Y_0)$ 는 점 $(X_2', Y_2')$  과  $(X_2'', Y_2'')$ 사이의 중심과 일치하지 않고 입자영상은 공식에 의한 것과는 다소 차이가 생긴다. 이러한 광선 추적은 렌즈의 중심으로부터 다른 거리를 가지는 A, B에 대한 광선추적의 결과와 같다. 따라서 렌즈로부터 장치의 거리가 0 이 아니면 이러한 가정은 사용할 수 없다.  $(X_0, Y_0)$  와  $(X_2', Y_2')$ ,  $(X_2'', Y_2'')$ 의 중심 사이의 차는 광학적인 축으로부터 소스 점이 멀어지는 것처럼 증가 한다. 덧붙여 말하면, misalignment와 장비의 제조결함은 같은 방법으로 생각할 수 있다.

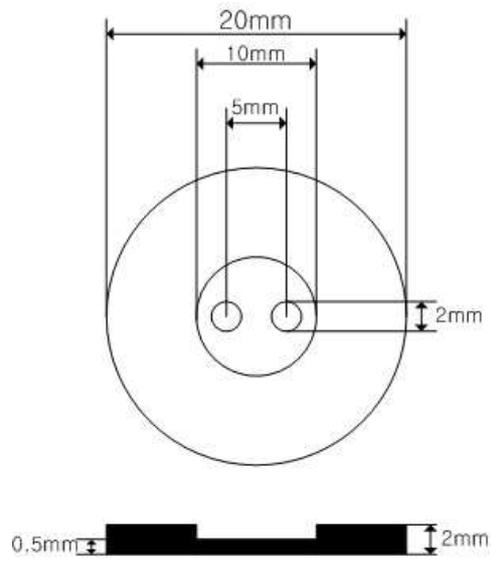


Figure 3.1 Pin hole plate Image.

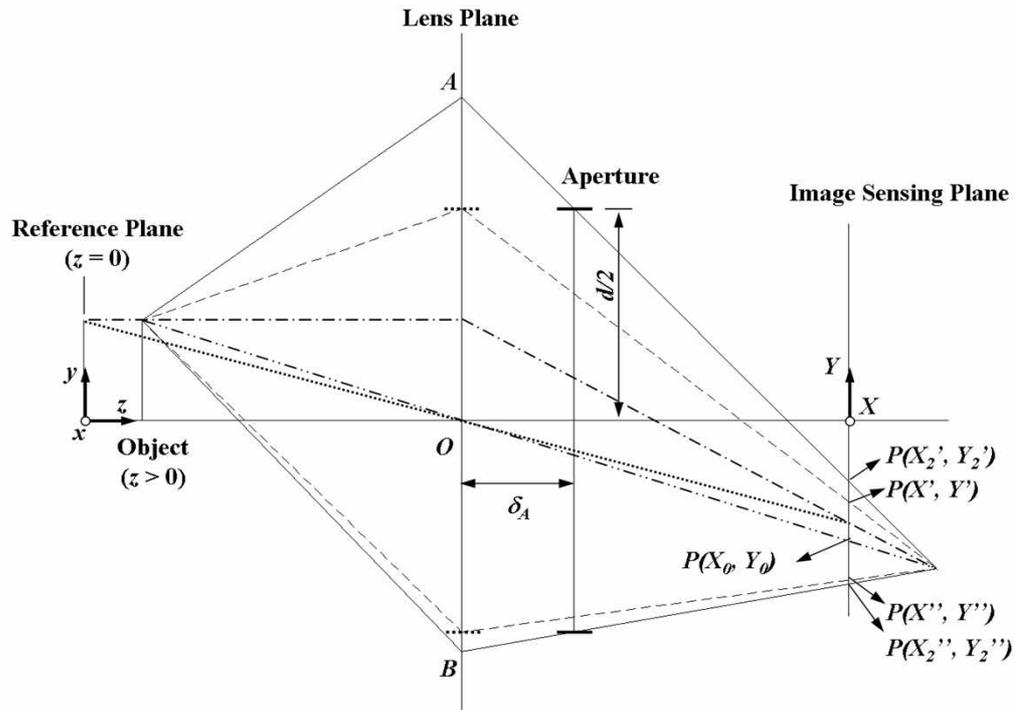


Figure 3.2 Ray tracing when apertures are not located same plane with a lens.

본 연구에서는 공간의 입자추적을 위하여 3D-PTV에 적용되었던 Genetic Algorithm(이하 GA)을 micro scale의 실험에 적합하도록 개선시킨 GA 알고리즘을 사용하였다.

먼저 GA 알고리즘의 유전자는 각각의 입자의 centroid를 중심으로 결정되는데 defocusing 된 이미지에서 centroid를 구하기는 일반적인 이미지 계조치에 의한 도

심 추출법과는 차이가 있다. Figure 3.3 와 같이 defocusing 된 영상을 Figure 3.4 의 (b)와 같은 gaussian mask을 이용하여 Figure 3.4 (a)의 원영상과 correlation 한 것이 Figure 3.4의 (c) 이다. 이것을 다시 계조치(Threshold value)에 의해 이치화 (계조치 이상의 값을 “1”, 이하 값을 “0” 으로 함) 시킨 영상이 Figure 3.4의 (d) 이며, 최종적으로 이 영상을 이용하여 면적 모멘트 법에 의해 centroid 위치를 구하게 된다. 이렇게 구해진 입자의 centroid 영상이 Figure 3.5의 붉은색 점들로 표시된 것이다.

Micro 시스템에서 주어진 centroid 영상만을 가지고 기존의 GA를 이용하여 영상의 입자를 추적하기란 쉽지 않다. Micro 시스템의 단점중 하나인 얇은 심도 즉 렌즈의 초점이 아주 작은 영역에서만 맞는 현상은 본 시스템이 공간상의 3차원 PTV 이면서 마치 SPIV와 같은 실험영상을 제공하게 된다. 그러나 SPIV의 경우 정도 높은 공간상의 벡터를 구할수 있지만, 단면의 정보에 국한되기 때문에 공간상의 모든 영역에 대한 벡터를 추적하기 위해서는 3D-PTV법을 이용하지 않으면 안된다. 기존의 PTV법은 4장의 영상을 이용하여 시간과 공간에 대한 후보군을 이미지 영역 전체에 걸쳐 수행 하였지만 Micro 시스템에 맞게 적용된 PTV는 전술한 바와 같이 얇은 심도로 인하여 한정된 이미지 후보군을 적용하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 GA를 적용하기 위해서 먼저 각각 좌, 우 이미지에 의해서 calibration 과정을 행한 후 이 이미지에 의한 각각 3차원 카메라 정보를 기준으로 Figure 3.5에서 처럼 추적된 centroid를 중심으로 유전자 (Gene)를 랜덤하게 생성하게 되는데 유전자의 성분은 S1, E1, S2, E2, Fit 5가지의 성분을 가진다.

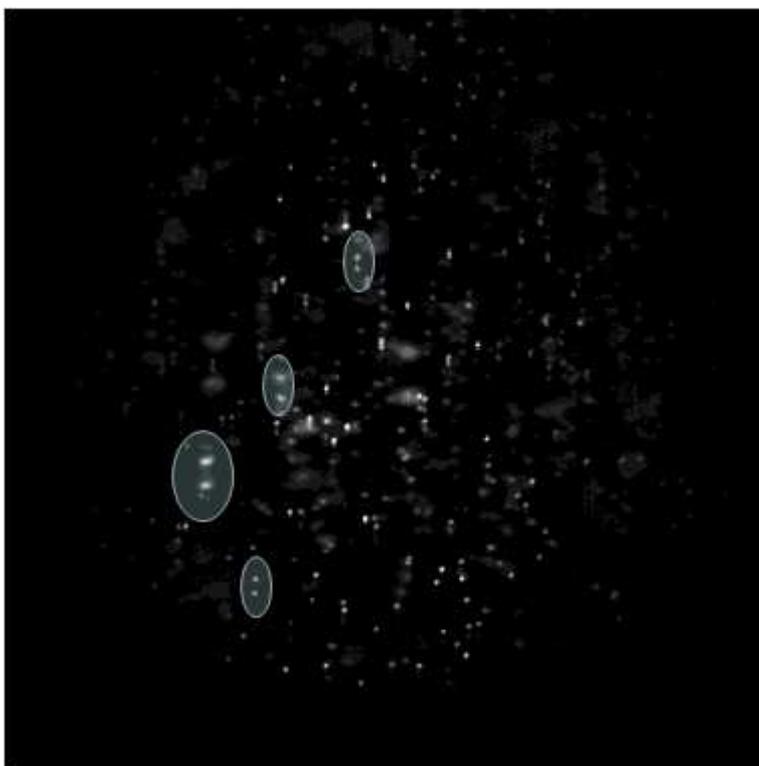
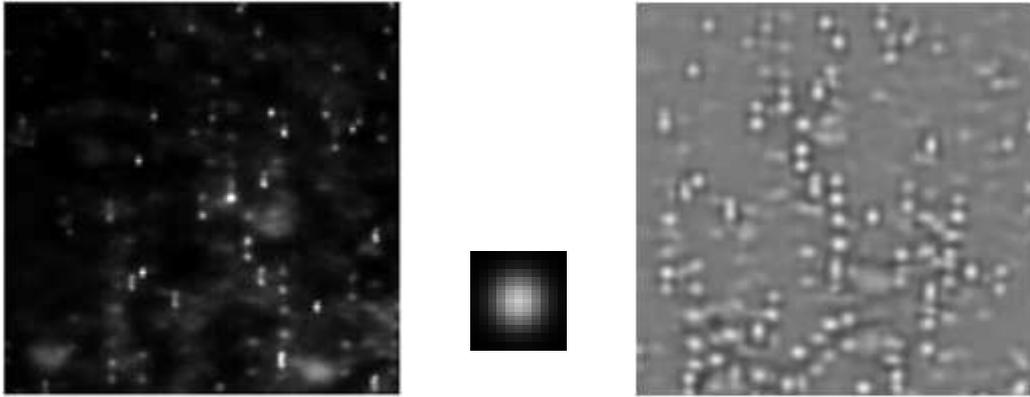


Figure 3.3 Defocusing Raw Image.



(a) raw image

(b) mask image

(c) transformed image



(d) binary image

Figure 3.4 Gaussian mask method.

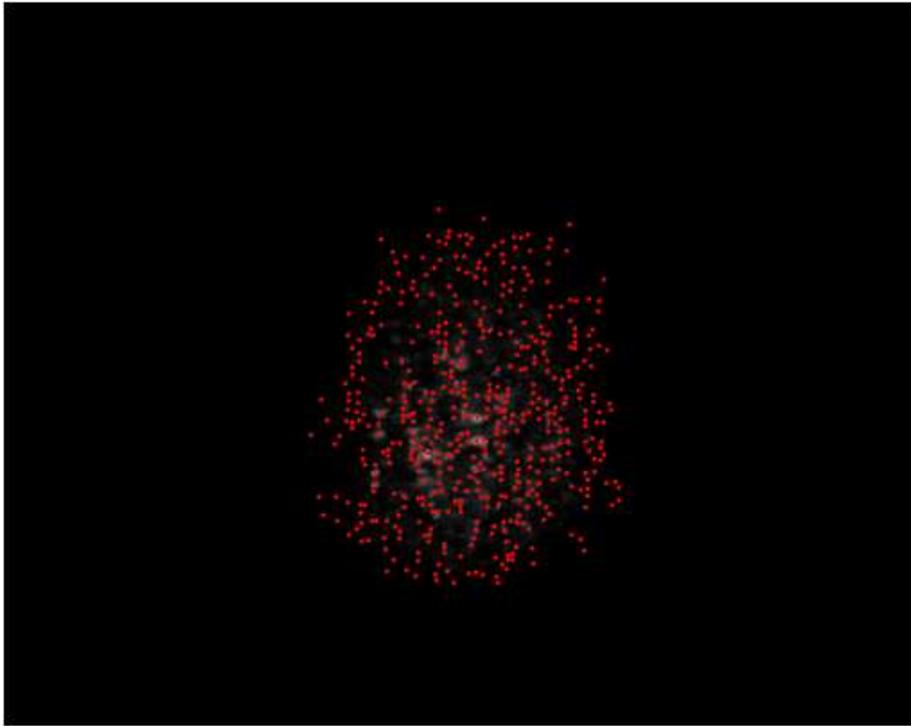


Figure 3.5 Centroid Image using Gaussian mask

여기서, S1은 첫 번째 카메라에 해당하는 카메라 교정정보 이미지의 centroid 좌표로서 이점을 기준으로 나머지 4개의 유전자 후보가 결정된다. E1은 Figure 3.10의 dt 즉, 다음 시각의 이미지에서 입력된 range 안의 centroid 좌표이다. 따라서 S1과 E1은 하나의 pin hole 을 통해서 본 입자의 궤적이라고 할수 있다. S2는 Figure 3.10에서 카메라1(Hyo1) 과 입자의 중심을 연결한 직선을 카메라2 에서 보면 Figure 3.7의 (a)와 같은 직선의 방정식에 의한 직선이 나오게 되고 자신보다 높은 위치에서 최대 Z값을 기준으로 직선과의 일정한 거리 영역은 Figure 3.7의 (b)와 같게 된다. 따라서 3차원 후보군은 Figure 3.7 (b)의 흰색영역안의 자신을 제외한 모든 입자가 된다. 즉, Figure 3.7 (c)의 붉은 점을 제외한 5개의 점이 3차원 후보군이 된다. 여기서의 range 안의 후보 중 선택되어진 것이 S2 가 되며 S2를 중심으로 dt 이후의 이미지에서 2D 영역안의 후보중의 하나가 중점이 E2가 된다. 그리고 마지막 유전자 성분 Fit는 3.1과같다.

$$\text{유전자의 적합(fitness) 함수는} \quad C = \frac{\sum_i^n |v_i - v_0|}{\sum_i^n v_i} \quad 3.1$$

여기서,  $v_0$  는 Range 속도 평균임

3.1 식에서 평균속도 대비 속도성분차가 많이 나는 벡터가 높은 값을 가지게 된다. 모든 유전자의 성분은 초기에 랜덤하게 발생하게 되는데 본 시스템에서는 2번

째 카메라에 해당하는 카메라 교정 정보에 의해 Figure 3.8와 같이 앞서 이야기 한 바와 같이 유전자를 생성하여 해집합 (Population)을 생성하게 된다. GA의 계산 과정은 Figure 3.9과 같이 초기 해 집합을 생성 한 뒤 해집합을 계속 해서 발전 시켜 나가는 것이다. 물론 이 해 집합 속의 객체의 유전자는 전술한 바와 같은 S1, S2, E1, E2, Fit 와 같다. 이때 해 집합은 두 개를 만든다. 즉 하나는 교정 정보 1을 중심으로 만든것 이고, 다른 하나는 교정정보 2를 중심으로 만든다. 해집합의 객체는 이미지의 centroid에 의해 무작위로 발생 시킨 후 유전 변위(Mutation)를 일으켜 다시 S1과 E1의 후보를 뒤 석는다. 그리고 Crossover을 통하여 유전자 자체를 다른 유전자 즉 교정정보 1과 2 사이에 교환을 한다. 이 과정이 끝나면 재생산 (Reproduction) 을 통하여 해집합 1과 2의 유전자를 다시 생산하게 된다. 이러한 과정 Mutation, Crossover, Reproduction에는 항상 Fit 유전자가 관여를 하게 되는데 이것의 적합도를 기준으로 항상 낮은 객체만을 교환하거나 재생산 하게 된다. 그러나 해집합이 국소해에 이르는 것을 방지하기 위해 Mutation 과정만은 Fit 유전자에 별 영향을 받지 않고 행한다. 위와 같은 과정을 정해진 반복수로 해집합을 발전시킨 후 최종적으로 해를 선택할 때는 해집합1과 해집합2에서 공통적인 유전자를 찾아서 Fitness 함수가 원하는 범위내에 들어오는 것만 선택하게 된다.

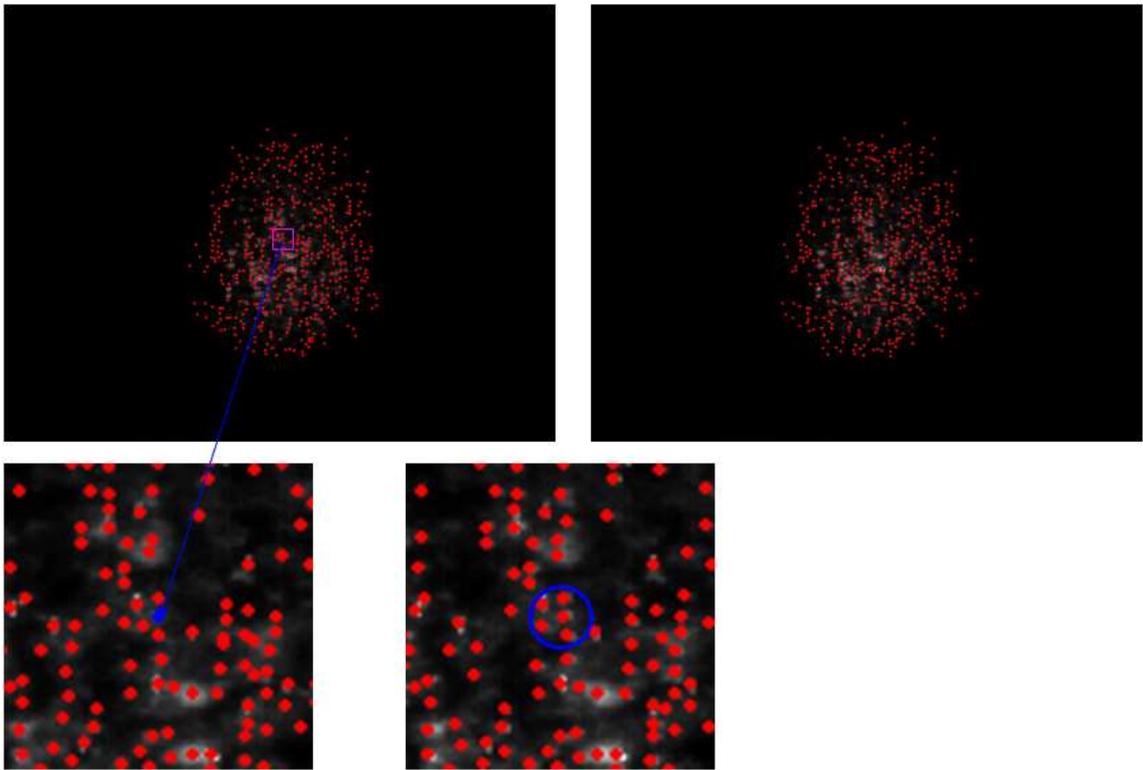
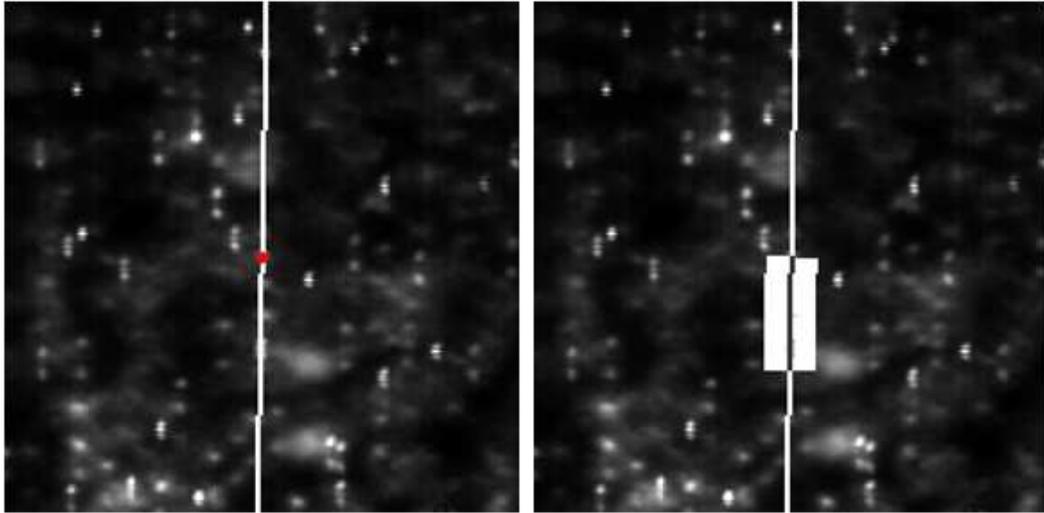
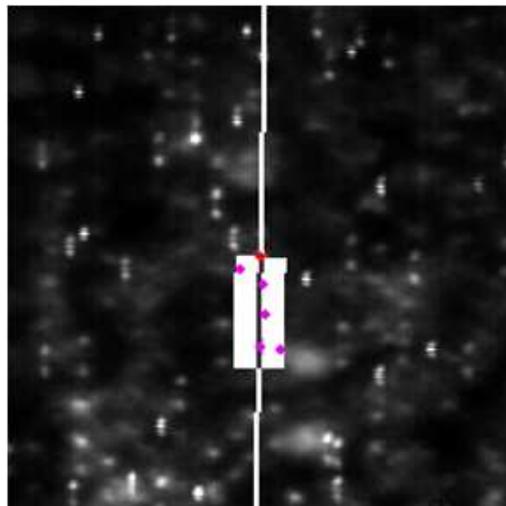


Figure 3.6 Selecting 2D Candidate in GA.



(a)

(b)



(c)

Figure 3.7 Selecting 3D Candidate in GA.

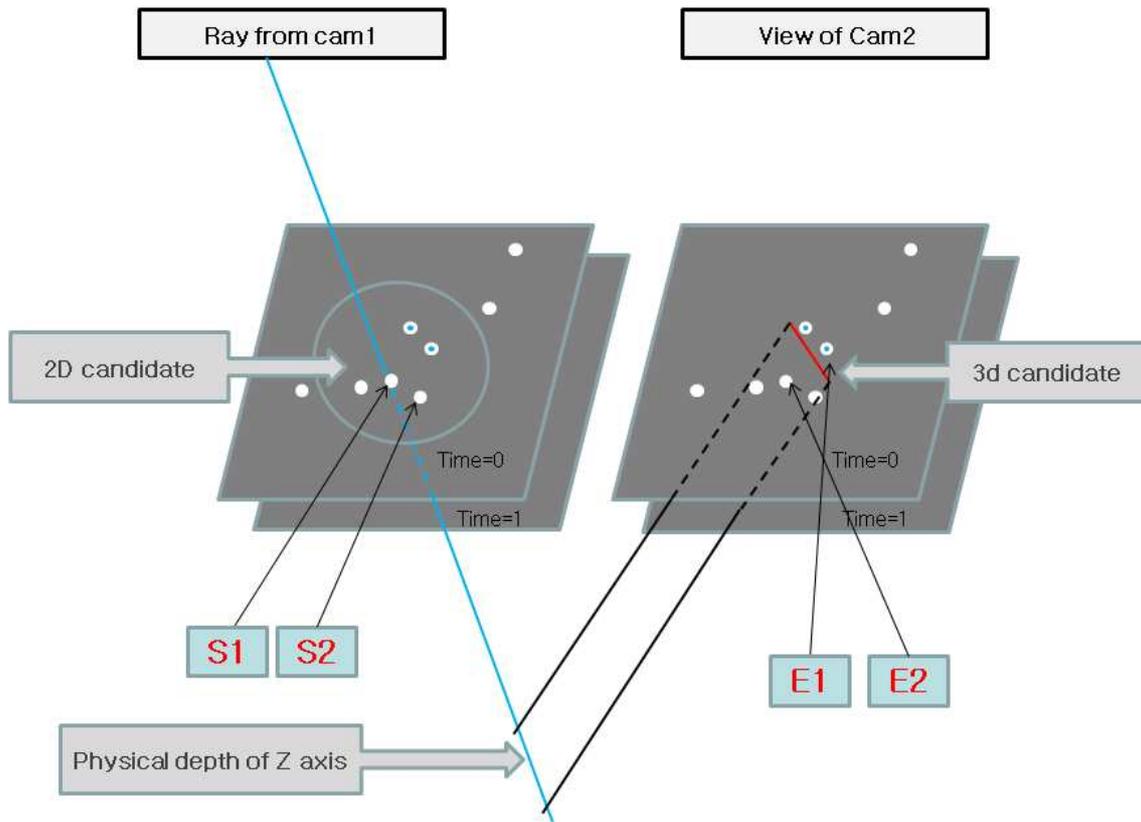


Figure 3.8 Selecting Candidate in GA.

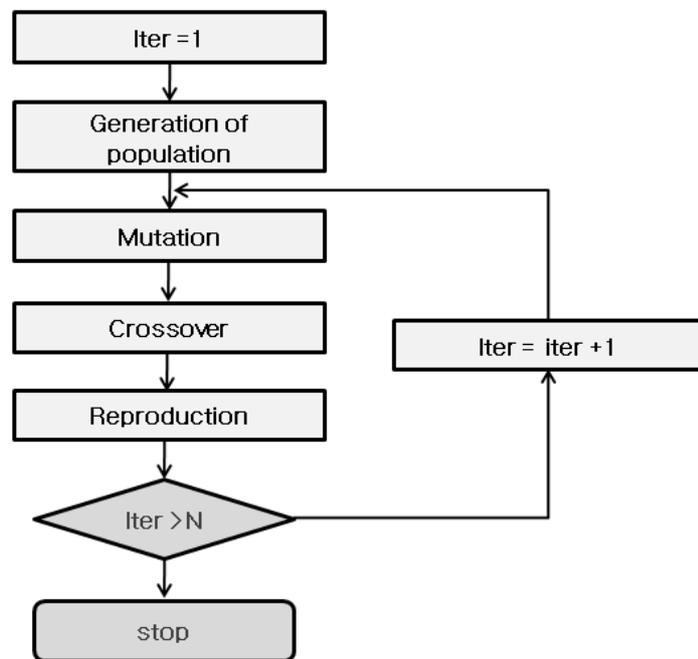


Figure 3.9 Flowchart of GA in Micro PTV.

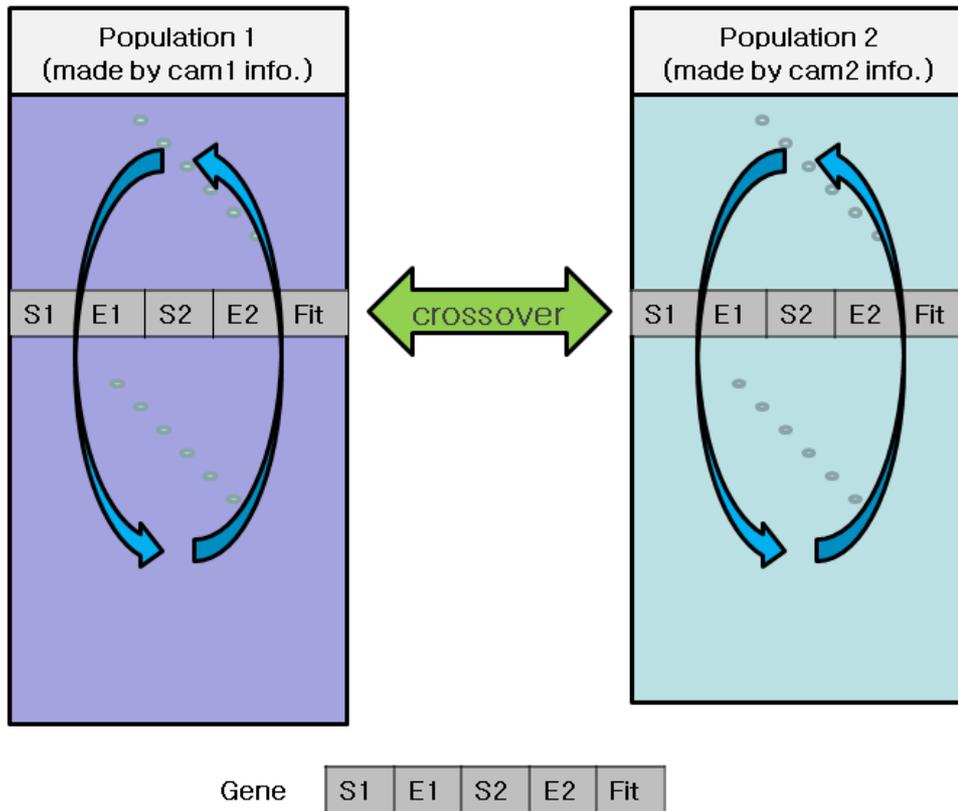


Figure 3.10 Schematic image of GA.

그러나 위의 알고리즘은 카메라의 교정 값의 오차가 거의 없는 경우에 적합한 방법이라 할 수 있다. 실제 Micro 채널 실험에서는 카메라 교정 작업 시에 교정 값

의 오차를 줄이기가 쉽지 않다. 이것의 가장 큰 원인은 동시에 두 개의 pin hole에 맺힌 영상을 얻어야만 한다. 그러나 이것은 광학적으로 상당한 딜레마를 가지고 있다. 정도 높은 교정 값을 위해서는 pin hole을 통하여 동시에 영상을 획득 하면서, Z축의 변화에 대하여서는 2D 상의 변화가 상당히 커야 된다. 이는 통상의 SPIV에서는 2대 카메라 사이의 각도가 일정 수준(최소 15도 이상)을 유지 하는 것과 같다. 그러나 핀 홀 사이의 간격을 멀리 하면 각 핀 홀 을 통해 공유되는 이미지 면적이 작아진다. 서로 공유 되는 면적의 축소는 교정 작업 시 공유되는 교정 점의 감소를 유발하게 되고, 최종적으로 교정 오차의 증가를 초래 한다.

또한, 광원의 차이는 교정영상과 실제 실험영상과의 차이를 유발 한다고 볼 수 있다. 다시 말하면 교정 작업 시 사용되는 광원은 일반적으로 교정판을 식별 할 수 있는 할로겐 라이트를 사용하는데 반하여, 실험 시 에는 535nm의 레이저 광을 사용한다. 두 광원의 파장의 차이는 복잡한 현미경 렌즈계 속에서 굴절의 차이를 일으켜 서로 미묘한 차이의 영상을 보여 주게 된다. 이는 위에서 설명한 바와 같이 Z축의 이동 량에 비해 상대적으로 작은 변화량을 보이는 2D의 이미지변화에 영향을 주어 이동 량에 의한 변화량과 굴절에 의한 영향이 상대적으로 크게 미치게 된다.

마지막으로 실제 실험 조건의 차이 인데, 실제 실험은 마이크로 채널 속에 물에 희석된 입자의 움직임을 관찰하는 반면 교정판은 단순히 공기 중에 노출됨으로서 원천적으로 교정과 실험과의 차를 야기한다. 그러나 아직까지 이것을 해결하기 위해서 마이크로 교정판을 실제 마이크로 채널 속에 삽입하기에는 무리가 있다. 만약 그렇게 한다 하더라도 막대한 비용에 비하여 효과를 확신할 수 없는 실정이다.

위에서 설명한 원천적인 차이를 조금이나마 해소하기 위해서 본 논문에서는 GA 이외에, 실 실험에서 Z축의 변화에 따라 입자의 간격이 2D 상에서 변화 하는 것에 착안하여 Figure 3.11과 같이 입자의 후보군을 탐색 시는 Figure 3.6, Figure 3.7, Figure 3.8에서 설명한것 처럼 먼저 2D 후보군 탐색 후, Z값의 한계에 따른 3D 후

보를 결정하는 것은 기존의 GA 와 같지만 3D 후보에 들지 않는 2D상의 후보는 제외시킨 후 후보와 정해진 점과 거리 계산을 통하여 Figure 3.11과 같이 미리 계산된 거리대비 높이 factor를 이용하여 Z값을 구한다. 물론, 이때 계산된 Z값이 범위를 초과하면 다음 후보를 이용하여 Z값을 구한다. 후보의 순위는 거리 차가 아닌 정점과의 각도 와 2D 이미지의 유사성 이다.

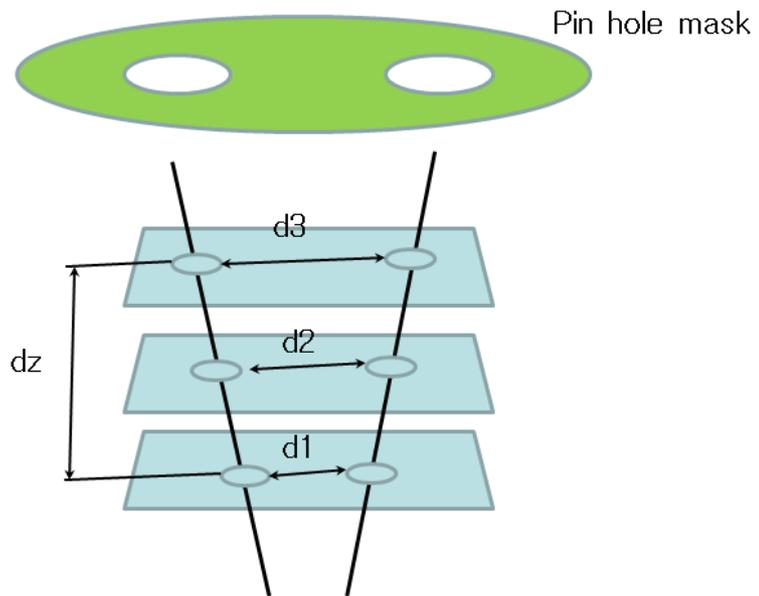


Figure 3.11 Scheme of depth parameter

### 3.2 오차 해석

Single Camera Micro 3D-PIV system에서 카메라 교정에 따른 오차를 평가하고자 한다. PIV와 PTV의 경우 실험장비에 있어서 별 차이가 없으므로, 장비에 대한 평가는 거의 차이가 없다고 해도 무방하다. 다만 3D PTV, SPIV 와 Single camera Micro 3D-PTV는 기존의 PIV와는 달리 3차원 속도벡터를 구하게 되므로 2.2절에서 구술되어진 카메라의 표정요소가 필요하며, 이를 구하기 위해서는 절대좌표를 알고 있는 교정기가 필요하다. 교정기의 좌표 값을 이용하여 구하게 된 카메라의 표정요소를 이용하여, 교정기의 사진좌표계에 대해서 원래의 3차원 값으로 복원시켰을 때의 오차를 카메라의 교정오차라고 정의한다. 또한 이 카메라의 교정오차가 바로 3D PTV, SPIV와 Single Camera Micro 3D-PTV에서의 계측오차의 불확실성과 직접적인 연관이 있다. 즉 이들 기법들은 비측정용 카메라를 이용하여 3차원 공간 혹은 단면상의 수직인 속도를 검출하기 위해서는 카메라에 공간을 인식시키는 과정이 필요하며 이 과정이 바로 교정기를 이용한 교정 작업이다. 따라서 교정 작업 정확하지 못하다면 카메라 자체의 교정오차의 증가에 따른 불확실성의 증가를 초래하게 된다.

카메라의 교정을 위해서 사용되는 교정기의 제약은 없으나, 3D PTV의 경우 교정 작업의 편의성을 위해 핀 형태의 공간 교정기를 사용하며, SPIV, Single Camera Micro 3D-PTV의 경우는 공간의 제약이 있으므로 평판형태의 교정기를 Z축으로 일정 간격씩 이동하여 교정 작업을 수행한다. 이는 3D PTV의 교정에 사용되는 일반적인 핀 형태의 교정기가 약 30~50 개의 교정 좌표를 가지는데 비하여 계측 목적에 따라서는 최소 1000개에서 20000이상의 교정좌표를 설정 하는 것이 가능하다. 즉, 실험공간에서 비교 할 수 있는 입자의 수가 증가 한다는 것은 교정에 따른 오차율을 획기적으로 줄일 수 있음을 시사하며, 이것은 곧 system의 성능 향상으로 이어진다. 물론 이를 위해서는 기본적으로 교정기가 Z축으로 정밀하게 움직인다고 가정을 했을 경우이다. 오히려 위와 같은 방법을 사용하더라도 Z축의 이동 량이 부

정확 하다면, 역으로 기준이 되는 입자들의 3D 좌표값이 달라짐으로 인한 교정값의 오차를 증가시킬 위험이 존재한다. 따라서 평판의 이동에 의한 캘리브레이션은 항상 많은 주의가 요구된다.

Single Camera Micro 3D-PTV의 경우 3D PTV와는 달리 계측영역의 제약에 따라 핀 형태의 교정기를 사용할 수 없으므로(완전히 불가능 하진 않지만, micro 단위의 핀 교정기를 만들어야 하며, 그 핀들의 정확한 3차원 위치좌표측정이 선행되어야 한다. 또한 평판의 이동에 의한 결과보다 좋을 확률이 극히 작다.), 평판형태의 교정기를 만들어서 Z축 방향(본 논문에서는 현미경의 높낮이 조절방향)으로 일정간격으로 이동시켜 사용한다. 3D PTV의 경우 교정작업이 공간 교정기에 의한 간단하게 이루어지나, Single Camera Micro 3D-PTV경우는 각 단면에 대한 카메라의 표정요소를 각각 구한 후, 최종적으로 일정간격으로 움직여진 공간에 대한 카메라 표정요소를 구하게 된다. Figure 3.12 은 x와 y 크기를 갖는 평판에 대해서 dz만큼 Z방향으로 이동하는 교정기의 모습을 나타낸 것으로, 단면에 대한 정보를 이용하여 공간을 인식시키는 작업이다.

Table 3.1 과 Figure 3.12은 교정기에 따른 카메라의 교정 오차를 살펴보기 위하여 사용된 평판 교정기의 사양과 사진을 나타낸 것으로, 각각의 교정기에 대해 Z축 방향으로 1um씩 총 40회 이동시켜 교정작업을 수행하였으며, 교정작업의 변수로써 핀 홀 마스크의 내의 핀 홀의 크기와 핀 홀 간의 거리를 변화하였다. Figure 3.13, Figure 3.13 Figure 3.15의 결과와 같이 핀 홀의 직경  $d=3.5\text{mm}$  홀 간의 거리 5mm 에서 가장 좋은 교정 값을 구할 수 있었다.

X, Y 평면좌표의 오차보다 Z축 오차가 상대적으로 약 4~5배정도 크게 됨을 확인할 수 있는데, 이는 Single Camera Micro 3D-PTV방식의 카메라 원리에 따른 두 핀 홀 영상 사이의 각도에 기인한다. 즉, 광원면에 수직으로 나오는 w속도성분은 각각의 핀 홀을 통하여 카메라의 센서면에 투영되어서 2차원 사진 좌표계로 나타나게 되는데, Stereo 카메라의 원리상 투영면에 수직인 Z축의 움직임에 비해 투영된 2차원 사진 좌표의 이동량이 u,v 성분보다 w 성분이 훨씬 작다. 따라서 Z축의 오차가 X, Y 좌표보다 오차가 크게 된다.

Single Camera Micro 3D-PTV를 위한 최적의 핀 홀의 크기와 간격이 존재함을 확인하였으며, 본 실험에서는 직경3.5mm의 홀에 간격 5mm의 핀 홀 마스크가 최적임을 확인하였다.

Table 3.1 Plane calibrator's information for Single Camera Micro 3D-PTV.

Calibrator No.	X	Y	Z	X,Y grid Interval	Z Interval / Count
1	-200um~ 200um	-300um~ 300um	0um~ 40um	10um	1um / 40
2	-200um~ 200um	-300um~ 300um	0um~ 40um	50um	2um / 40

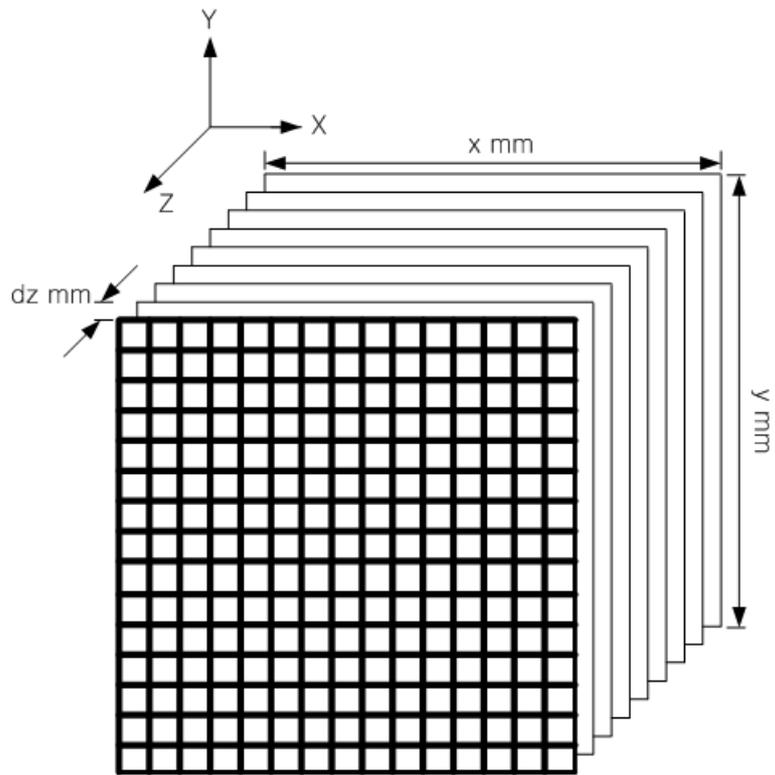


Figure 3.12 Image for camera calibration.

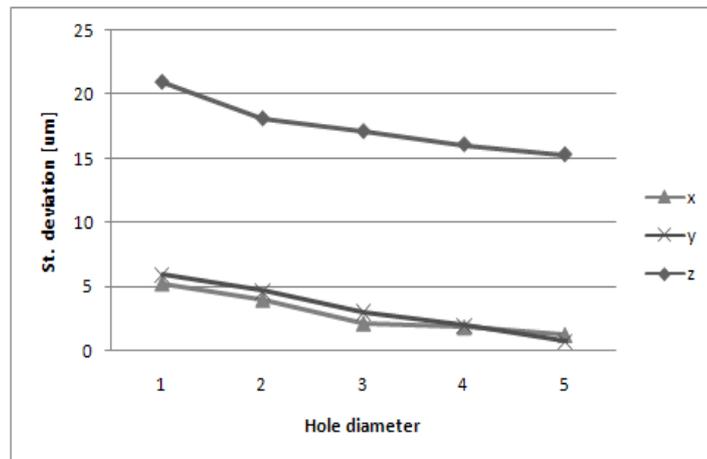
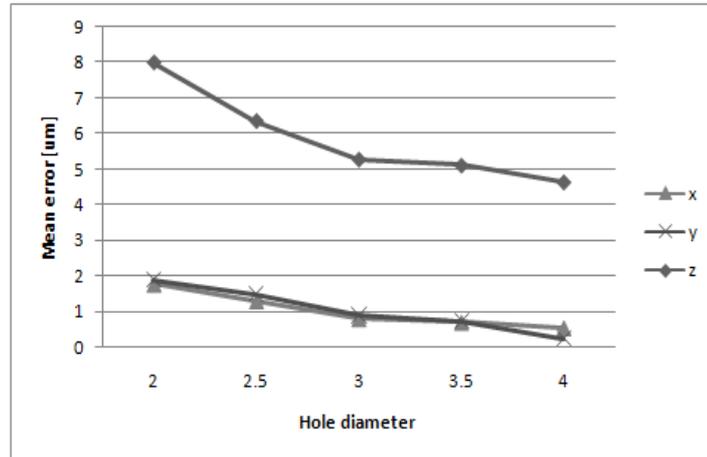


Figure 3.13 Calibration data at 4mm hole spacing

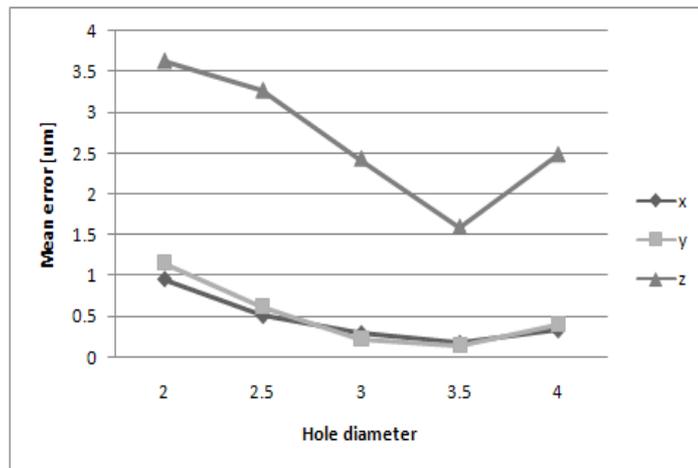
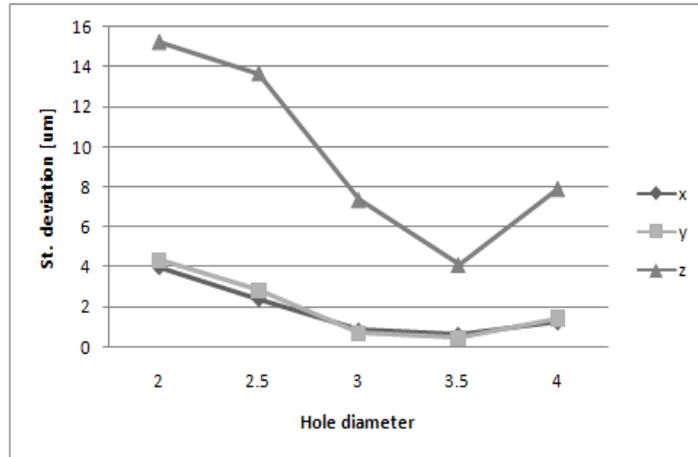


Figure 3.14 Calibration data at 4.5mm hole spacing

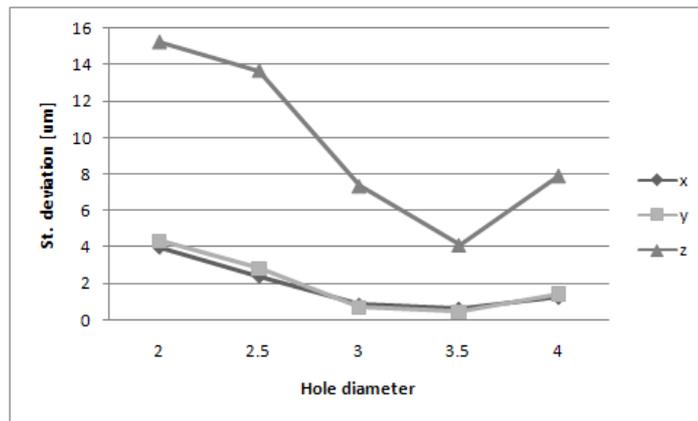
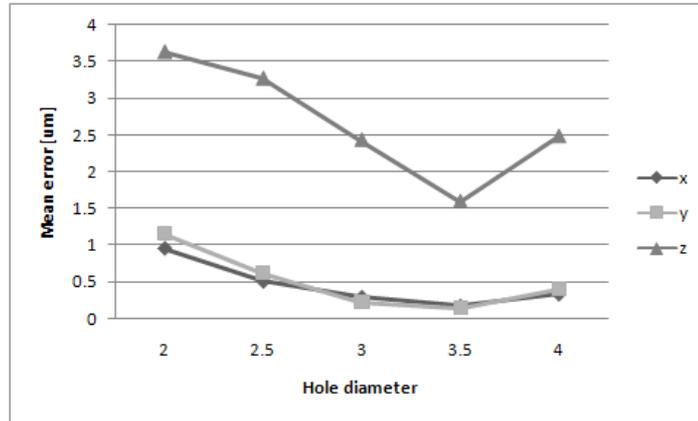


Figure 3.15 Calibration data at 5mm hole spacing

### 3.3 가상 영상에 의한 성능평가

일반적으로 연구자들은 각자의 연구목적에 따라서 다양한 계측알고리즘으로 소기의 연구성과를 얻고 있으나 그 계측알고리즘 자체에 대한 평가는 나름대로의 실시하고 있다. 이는 PIV를 이용한 유동장의 3차원 계측법에 상대적 평가기준을 마련하기가 어려움을 의미한다.

하나의 표준 실험장치에 대하여 개별의 연구자들이 각자의 계측알고리즘으로 계측을 한 후 자신의 계측알고리즘의 성능이나 계측오차평가를 할 수도 있다. 그러나, 표준 실험장치가 설치되는 환경이나 실험조건이 계측결과에 다양하게 영향을 미치게 되므로 이 또한 계측알고리즘에 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 알고리즘에 대한 표준적 평가도구로서 활용할 수 있도록 Web site (<http://www.vsj.or.jp/piv>)를 통하여 제공하고 있다. 그런데 화상의 해상도나 영상의 밝기정보 등은 표준화상을 구현과정에 따라 표준화상자체에 대한 오차를 포함할 수 있음을 배제할 수 없을 뿐만 아니라 그 자체에 대한 정보가 필요하기 때문에 본 연구자의 연구실에서 현재 개발되어 있는 3차원 계측알고리즘(1-Frame 3-D PTV)에 대한 평가를 보다 정확히 하기란 어려운 실정이다.

본 연구에서는 카메라 교정 정보를 이용하여 이미 행해진 3D 실험을 기준 해로 생각하고 이에 대하여 다양한 개수의 가상영상 이미지를 생성 한다. 사용된 3D 실험은 채널 내 원주 후류의 결과이다.

진행 순서는 다음과 같다.

- ① 먼저 카메라에 대한 교정 파일과 3D Grid vector 를 이용하여 입자 개수 별로 다양한 가상 영상이미지를 생성한다.

- ② 생성된 가상영상을 계산한다.
- ③ 입자 개수별 회복율을 산출한다.

가상실험영상은 사진좌표를 중심으로 한 입자의 농도분포를 Gaussian 분포에 의해 발생시켰다. 입자주변의 위치(  $x, y$ )에서의 농도치는 입자의 공간상에서의 위치, 입자의 최대 지름은 5 Pixel 표준편차 0.5, 입자의 최대밝기는 240이다.

실제 카메라 교정 파일을 이용하여 만든 가상영상의 이미지는 Figure 3.16와 같이 이미지의 중심을 기점으로 상당히 왜곡 되어 있음을 알 수 있다. 이 이미지를 이용하여 가상영상 실험 평가를 할 수 있지만, 기본적으로 Z축의 오차를 포함하고 있는 영상을 가지고, 성능 평가를 하기에는 무리가 있다고 생각되어, 하나의 홀의 교정성분을 중심으로 교정 parameter 중 카메라 각도 성분만 변화하여 Figure 3.17와 같은 가상영상을 구현하였다. 이것을 입자 개수 별로 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400 개의 가상영상을 생성하였다. 생성된 가상영상을 계산한 것이 Figure 3.17의 결과이다. Figure 3.18의 결과는 실제 입자의 도심추적 작업을 거치지 않고 순수 Reference 데이터를 가지고 계산한 결과이며, 입자의 도심 추적 후 이를 계산한 결과가 실제 Recovery vector 이며 이는 Figure 3.19에 결과로 알 수 있다. Figure 3.20에서와 같이 GA 알고리즘의 특성상 입자가 개수가 800개 이후로는 회복율이 서서히 감소함을 알 수 있다. 이는 GA 알고리즘이 후보군을 탐색하는 알고리즘의 특성에 의한 결과로 볼 수 있다.

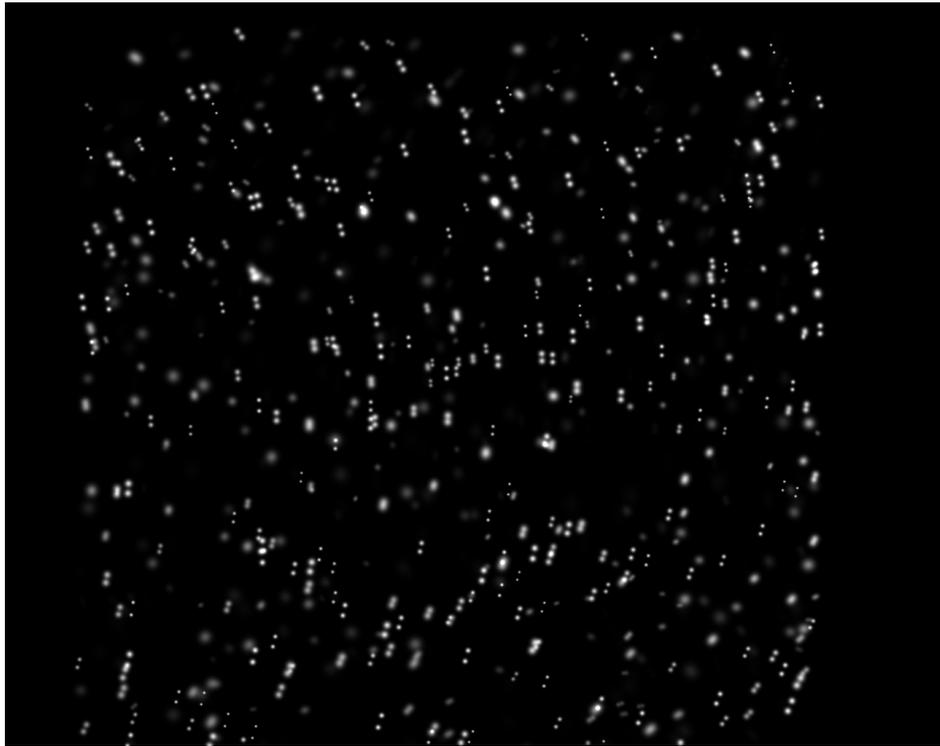
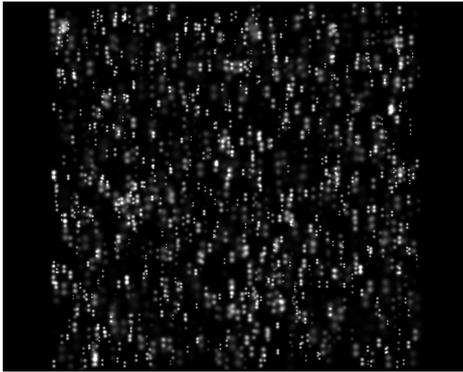
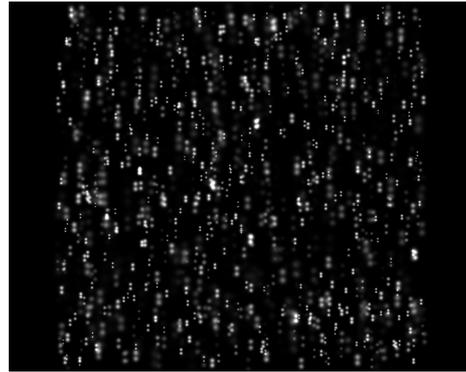


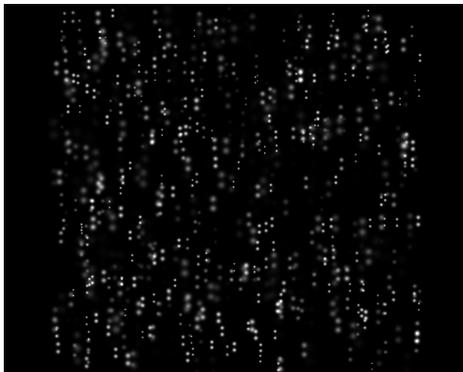
Figure 3.16 Virtual Image with Real camera information



(a) Reference vector (1400)



(b) Reference vector (1000)

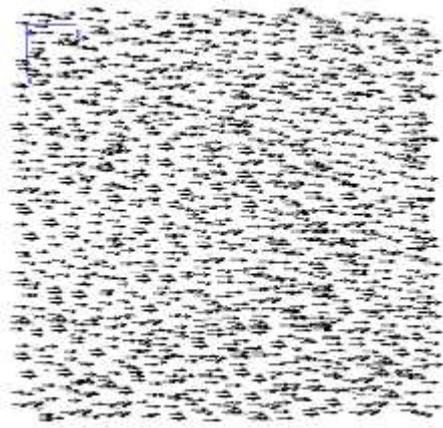


(c) Reference vector (600)

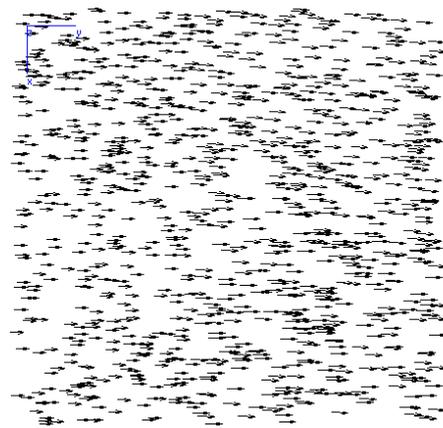


(d) Reference vector (200)

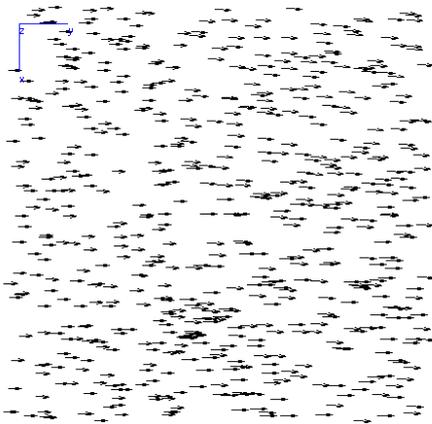
Figure 3.17 Virtual Image



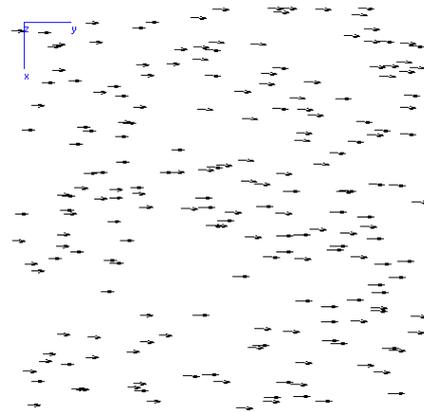
(a) Reference vector (1400)



(b) Reference vector (1000)

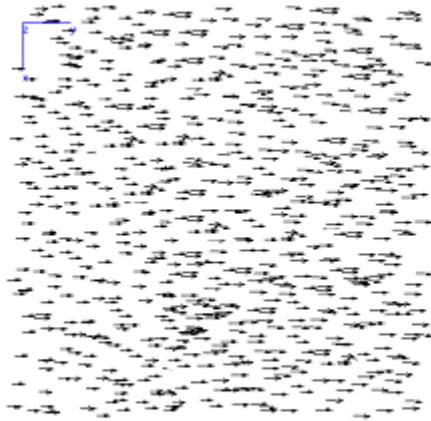


(c) Reference vector (600)

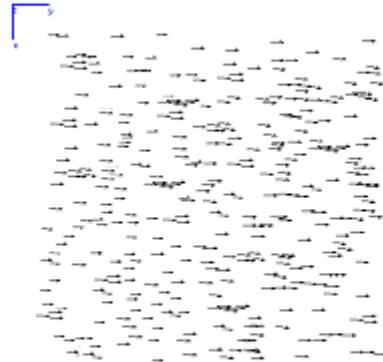


(d) Reference vector (200)

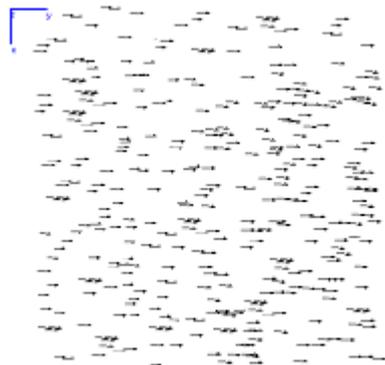
Figure 3.18 Reference vector



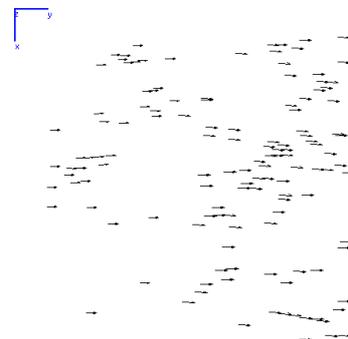
(a) Recovery vector (1400)



(b) Recovery vector (1000)



(c) Recovery vector (600)



(d) Recovery vector (200)

Figure 3.19 Recovery vector

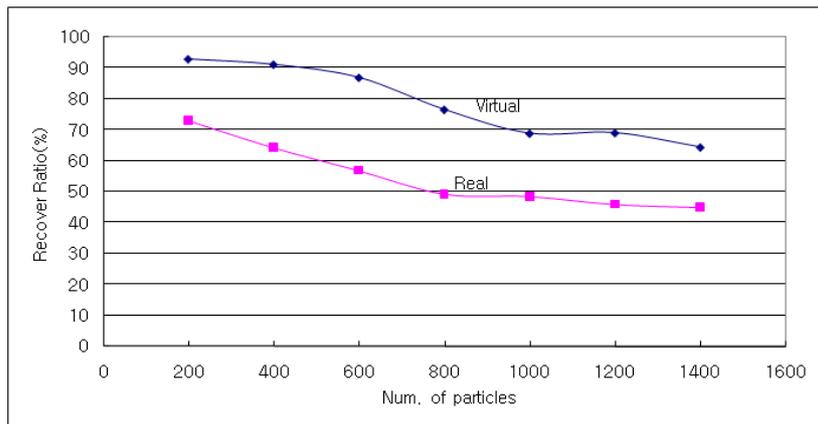


Figure 3.20 Recovery ratio

앞서 가상 영상에 대한 성능 평가를 수행하였다. 이 후 GA 알고리즘의 crossover , Mutation, Reproduction의 3가지 항의 parameter에 성능 평가를 실시하였다. GA 알고리즘의 특성상 세대의 반복수에 상관없이 벡터의 회복 율은 대동소이 하였다. Figure 3.19에서 회복 율이 그리 낮은 범의가 아닌 600개 구간에서 입자를 발생하여 알고리즘의 parameter에 따른 시스템의 성능 평가를 수행 하였다.

## 4장 후향단 *Micro* 채널 실험 및 고찰

### 4.1 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 3장에서 소개한 Single micro 4D-PTV를 적용하기 위해서 유체 유동의 기본적인 현상인 후향단 micro 채널에 대한 실험을 수행 하였다.

먼저 전체적인 실험 구성은 Figure 4.1에서 보여주는 바와 같이 레이저, 카메라, 현미경, 마이크로 채널, 실린지 펌프로 구성되어 있다. 마이크로 scale의 유동의 경우는 작은 충격에도 민감하여 실험에 영향을 주기 때문에 반드시 기기간의 간섭이 없도록 해야 한다.

Figure 4.1의 구성에서 가장 중요한 부분이 레이저와 현미경의 위치 선정이다. 현미경 렌즈는 정확한 위치에서 레이저빛이 들어와야 그 초점이 대상 실험체에 조사되어 산란 된 레이저빛이 카메라에 상이 맺게 한다. 실험에 사용된 레이저는 500mW Argon-Ion 레이저 이며 주 파장이 약 535nm 의 그린색을 띠는 빛을 조사한다. 레이저에서 조사된 535nm의 빛은 마이크로 채널내의 직경 1um 의 Polymer Microspheres 형광입자를 여기 시키게 되면 여기된 빛은 575nm의 파장을 가지는 오렌지 빛깔을 띠게 된다. Figure 4.1에서 현미경 내의 Epi Flourscent prism/filter cube 는 형광입자에서 여기된 575nm의 빛만을 통과시키고 535nm의 빛은 차단시켜서 보다 입자 중심의 영상을 만들게 된다. 이 빛은 pin hole 을 통하여 카메라까지 도달하게 되며 pin hole을 거치는 동안 2개의 상으로 분리되어 두 개의 상이 겹치면서 카메라에 영상을 맺는다. Figure 4.2는 현미경 내의 filter를 통과한 입자의 영상이다.

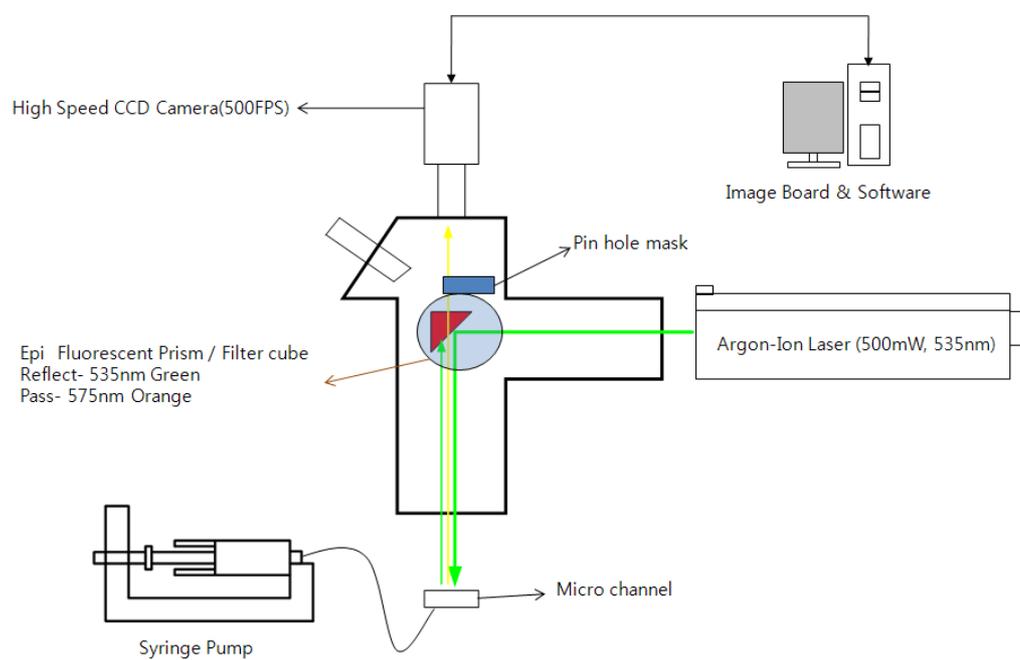


Figure 4.1 Schematic illustration of experiment setup

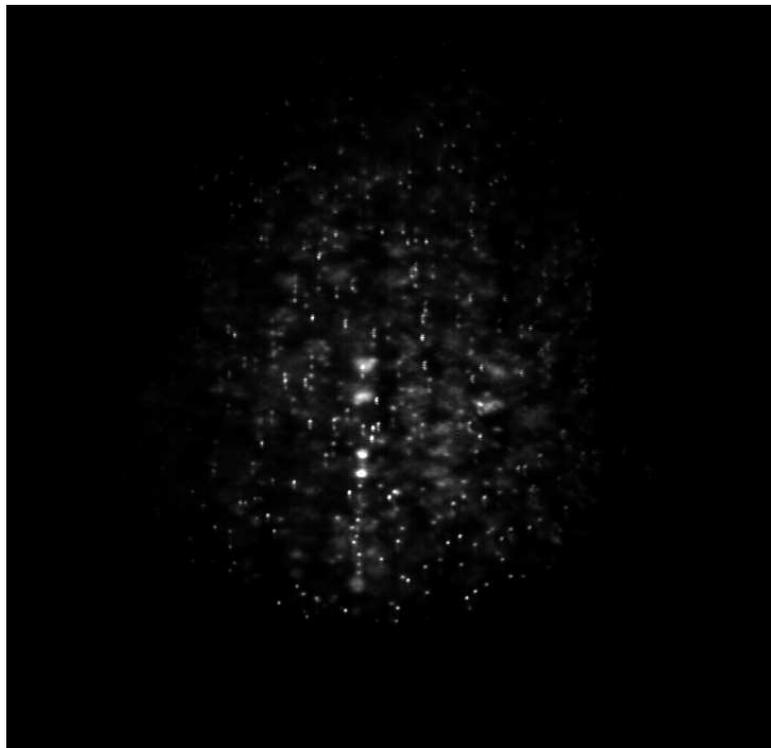


Figure 4.2 Raw Image of experiment

마이크로 채널내의 입자의 유속은 시간당 채널을 통과하는 유량에 의해 간접적으로 구할수 있다. 채널내에 일정한 유량을 주입하기 위하여 Figure 4.1의 Syringe pump를 사용하였다. 분당 3ul 의 유량을 주입하여 stream 방향의 후향단 입구 유속은 약 463um/sec 이며 Reynolds 수는 약 0.017의 층류 유동이다. 본 실험에서의 입자는 특수 형광입자이며, 이것을 물에 희석하여 입자의 농도를 조절하게 된다. 실험의 특성상 입자의 농도가 지나치게 많을 경우는 입자 개개의 추적이 힘들고, 농도가 작을 경우 시간당 얻는 입자의 개수가 작기 때문에 본 실험에서는 3장에서 행해진 가상영상과 성능 시험 평가를 토대로 약 500~1000 개의 입자가 한 이미지에 보일 수 있도록 조절하였다.

마이크로 채널의 제조공정은 본 실험 범위를 초과 하므로 생략 하겠다. 실험하고자 하는 채널의 크기는 Figure 4.3에 나타난 바와 같이 폭이 3mm 길이 30mm를 가지는 후향단 채널이며 채널의 깊이는 큰쪽이 70um 이고 작은쪽이 36um 이다. 실제 실험에서는 Figure 4.3의 아래쪽이 위로 되어 Cover glass 를 통하여 영상을 보게 된다.

마이크로 채널내의 유속은 463um/sec로 느린 유속이지만 현미경을 통하여 약 200배 정도 확대가 되기 때문에 카메라를 통하여 보는 유속은 예상보다 느리게 움직이지 않는다. 따라서 2장 2.4에서 설명한 바와 같이 유체의 현상을 완벽히 이해하고자 한다면 고속의 카메라가 필요하다. 이를 위해 최대 초당 500 프레임으로 촬영 가능한 CCD 카메라를 사용하였으며 고속에서도 1280 X 1024 pixel 의 고해상도 유지가 가능하다.

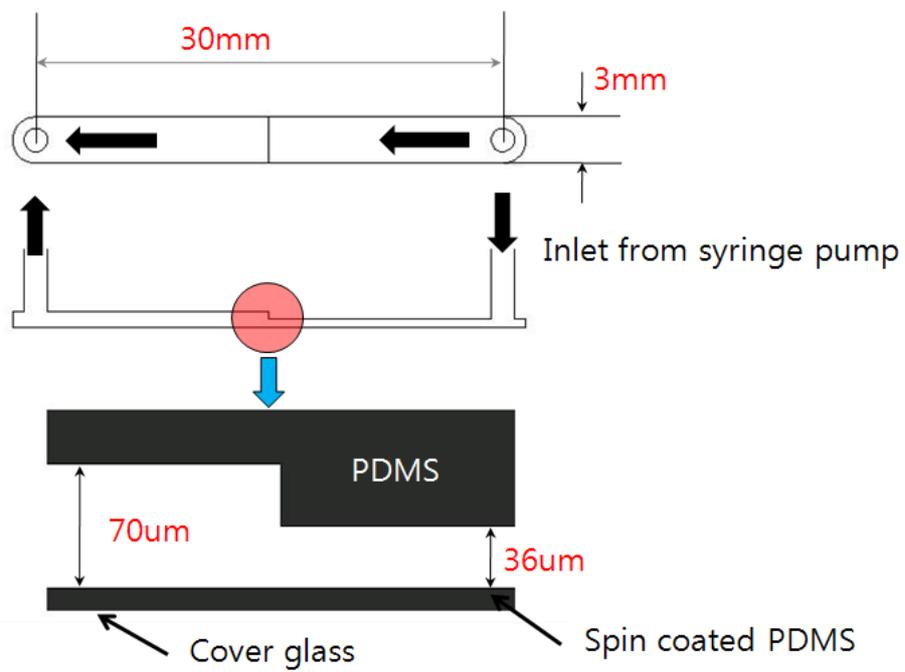


Figure 4.3 Schematic illustration of Micro channel

실험 방법은 크게 두가지로 나눌수 있다. 카메라 교정 과정과 유동영상을 얻는 과정이다.

먼저 캘리브레이션 작업은 카메라의 보정 정보를 얻는 것으로서 본 실험에서는 하나의 카메라를 사용하고 있으나 , 원리적으로는 2개의 카메라를 하나의 영상을 통해서 겹쳐 보는 것과 같기 때문에 카메라 보정 정보 파일도 2개를 얻는다. 이를 위해서 Figure 4.4와 같은 캘리브레이터를 이용하게 된다. 본 실험에 사용된 캘리브레이터는 두께 1mm의 2차원 캘리브레이터이며 가로 세로 방향으로 21개의 선이 있으며 선의 두께는 5um이하이며 간격은 10um 이다. 중심선은 약간 두껍게 그려져 보정 작업 시 용이하게 되어있다.

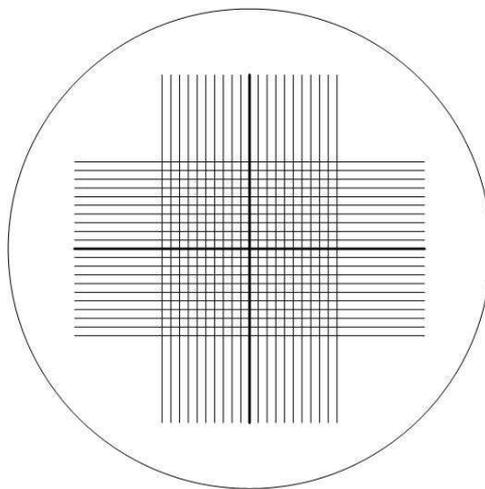


Figure 4.4 Scheme of Calibrator.

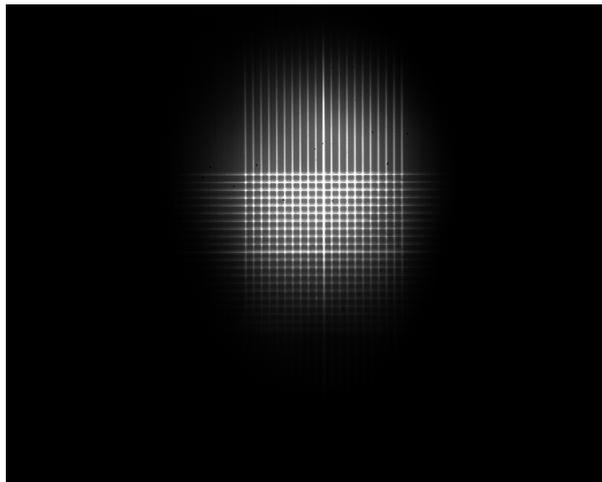
Figure 4.5는 Figure 4.6의 pin hole의 각각의 hole을 통하여 카메라에 찍힌 영상이다. 이러한 영상을 현미경 기준으로 보았을 때 아래위 방향으로 1um 간격으로 이동 하면서 40장의 영상을 획득하였다. 같은 요령으로 다른 hole을 통한 영상도 획득하였다.

이렇게, 획득된 영상은 Figure 4.7과 같이 먼저 이미지 변환(smooth)과 Gaussian 분포에 의한 입자 추적 알고리즘에 의해 영상의 “+” 표시를 검출하게 된다. 검출된 도심은 그림에서 노란점으로 표시된다. Figure 4.8의 (a) 기준 좌표의 영점을 setting 하는 과정이고 (b)는 노란점으로 인식된 2차원 영상의 도심의 좌표는 기준 좌표에 의해 matching 하는 작업이다. 이것을 전체 캘리브레이션 영상 40장에 대해 수행한다.

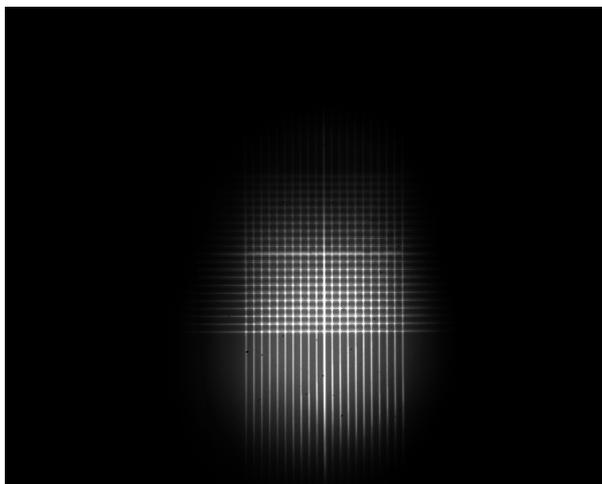
위의 과정에서 인식된 Z축에 대한 각각의 기준 좌표들은 하나로 합성되어 40장의 평면의 좌표들이 공간의 좌표를 이루게 된다. 이것에 대하여 하나의 카메라 보정 정보 파일을 얻게 되고 전체 과정을 다른 카메라 영상에 대해 (편의상 pin hole의 영상을 각각의 카메라로 생각하기로 함) 수행하여 결과적으로 2개의 카메라 보정 정보 파일을 얻는다. 이것에 대하여 캘리브레이션 오차 정도를 수행한 결과가 Table 4.1과 같이 X축에 대한 분산치가 0.725um, Y축에 대한 분산치 0.452um, Z축에 대한 분산치 4.108um 이다. Z축에 대한 분산치가 X,Y축보다 큰 이유는 캘리브레이터를 이동할 때 수동으로 이동하므로 이에 대한 오차와 눈금을 읽는 오차 사람의 오차등이 포함되어 나타난다. 그러나 가장 큰 영향을 주는 오차는 제 3장 3.1절에서 설명한 바와 같이 Z축 의 이동량에 따른 2D 영상의 변화량이 미미 함으로 주로 발생한다. Figure 4.9는 Z축 방향에 대한 캘리브레이터의 이동 단위에 따른 오차율을 나타낸다. 이동단위가 커질수록 Z방향에 대한 분산치가 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

모든 캘리브레이션 과정이 끝나면 카메라의 초점이동이나 움직임 없이 그대로 마

이크로 채널 내 유동 실험을 행한다. 유량 3 $\mu$ l/min을 유지하면서 초당 125 frame의 속도로 500장의 영상(4초)을 시간 차를 두어 2번 획득 하였다. 획득된 영상은 먼저 Background 영상 즉, 평균영상을 만들어 순시영상에 섞여 있는 입자가 아닌 부분을 제거 한다. 이후 입자의 도심 좌표를 추적하게 되며, 좌표 추적 이후에는 GA 알고리즘에 의한 속도벡터를 추적하게 된다.



(a) Left hole view



(b) Right hole view

Figure 4.5 Image of Calibrator

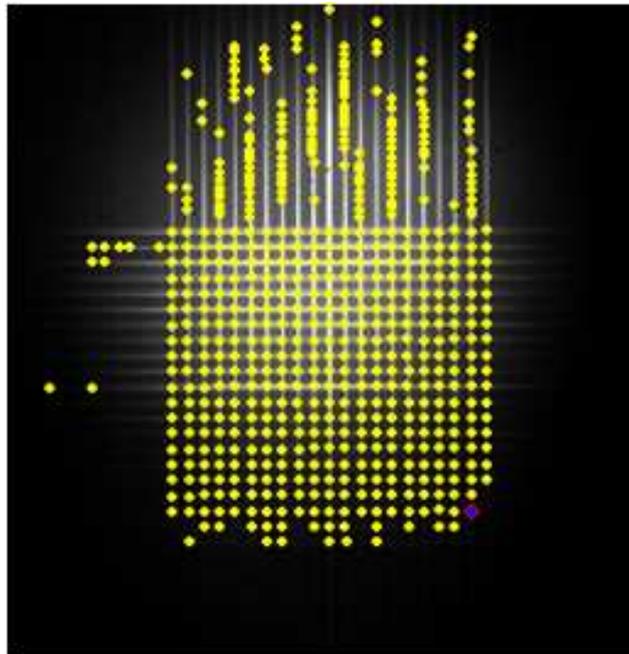
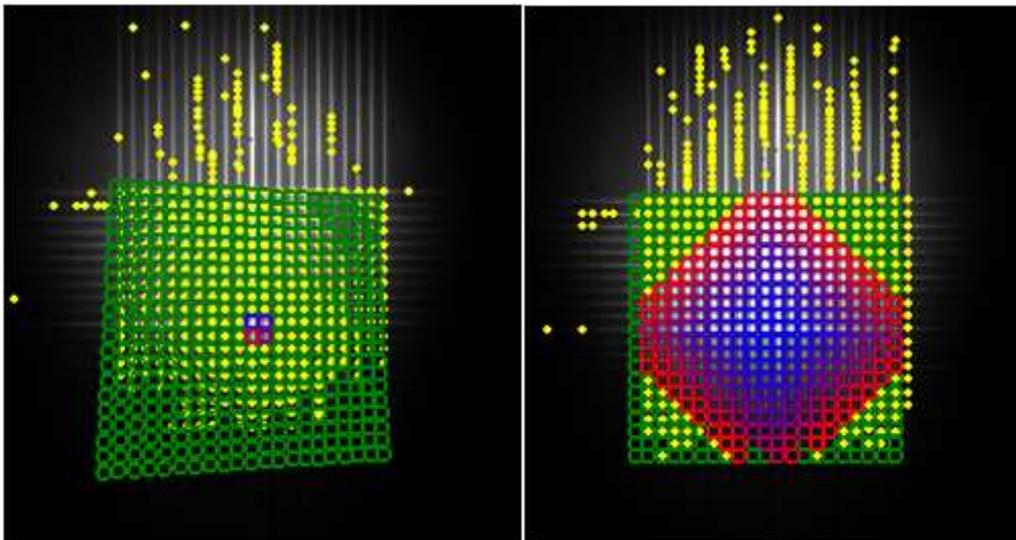


Figure 4.6 Processing of Centroid Tracking at Calibration



(a) Center setup

(b) Centroid matching

Figure 4.7 Processing of Centroid Matching at Calibration



## 4.2 실험 결과

본 실험에서는  $dt = 1/125$  의 간격으로 벡터를 계산하였으며 총 8초간의 데이터를 이용하여 각 순시 속도데이터를 시간 평균한 벡터가 Figure 4.9이며 이것은 PTV에 의해 공간상에 분포된 벡터를 Grid화 시키기 위하여 평균한 데이터가 Figure 4.10이다. 데이터의 기준이 되는 좌표는 Figure 4.8 와 같이 후향단 sudden expansion의 가장 아래 부분이 된다. 후향단의 계측된 범위는 X축은  $3.5H$  Y축  $3.5H$  Z축  $2H$  범위의 데이터를 측정하였다. 여기서  $H$ 는 후향단의 단차로써 길이는  $36\mu m$ 이다.

Fig 4.10의 Grid vector의 격자는  $28 \times 25 \times 15 = 10500$  개의 Grid에 보간된 벡터이다. 후향단에서 확장되는 부분에서의 CFD에 의한 결과는 Figure 4.14과 같다. CFD에 의한 결과는 전형적인 층류의 모습을 보이고 있다. 또한, Figure 4.11은 depth parameter를 이용하여 계산된 벡터이며 보간된 결과가 Figure 4.12이다. 앞서 언급된 Figure 4.12의 결과를 Stream 방향에 주목하기 위해 Figure 4.8의 좌표계에서  $y=0$  인 부분에서 잘라낸 단면의 유동을 보면 Figure 4.13 와 같은 유동 흐름을 볼 수 있다. CFD의 결과를 Reference 로 보았을 때 Figure 4.13의 결과는 CFD의 결과와 유동 현상이 많이 비슷함을 관찰 할 수 있다.

CFD에 의한 결과 Figure 4.15는 주 유동 방향에 수직인 Y 축 의 중심을 따른 단면의 벡터분포이다.  $X=0$ 인 지점의 유속은 Z 축 높이에 따라 점점 커짐을 알 수 있다. 이것은 후향단의 영향으로 Figure 4.16, Figure 4.17, Figure 4.18의 그래프 결과를 보면 좀 더 명확히 알 수 있다. Figure 4.19~4.30은 GA에 의한 계산결과를 CFD 결과와 비교한 것이다. GA에 의한 파라미터중 Crossover, Mutation, Reproduction의 변활에 대한 속도 성분의 변화와 세대 반복 회수에 대한 변화를 주었을때의 속도 성분의 변화를 관찰 하였으며 이중 Crossover 200%, Mutation 20%, Reproduction 150%, 세대 반복수 100 회에서 가장 유사한 유동 패턴이 나오는것을

확인 하였다. Figure 4.31의 그래프는 depth parameter에 의한 결과이다. 이는 GA에 의한 결과보다 좀 더 Reference 에 가까운 결과를 보여 주고 있다.

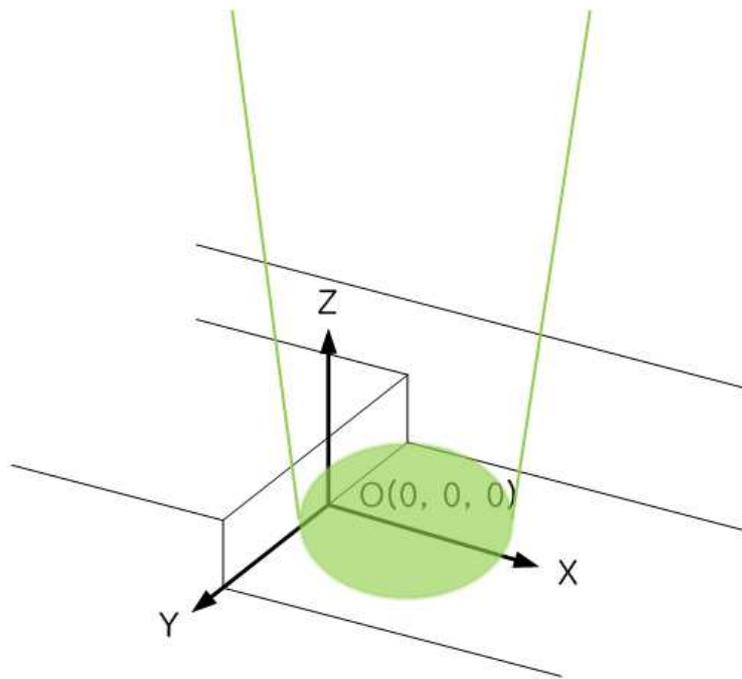


Figure 4.8 Experiment position & basic axis.

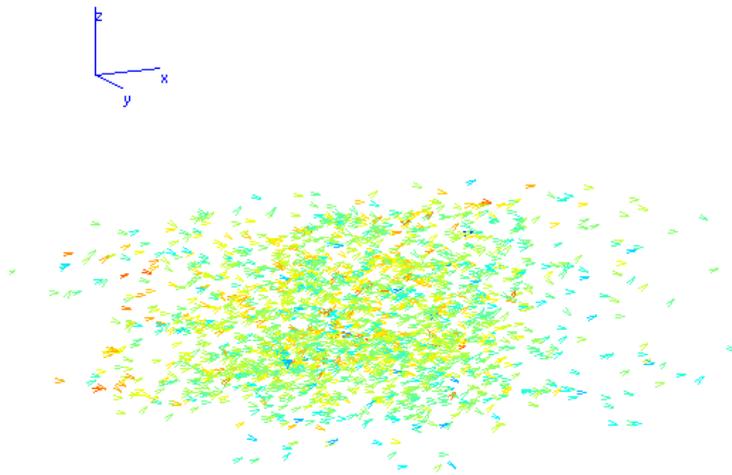


Figure 4.9 Raw Vector using GA

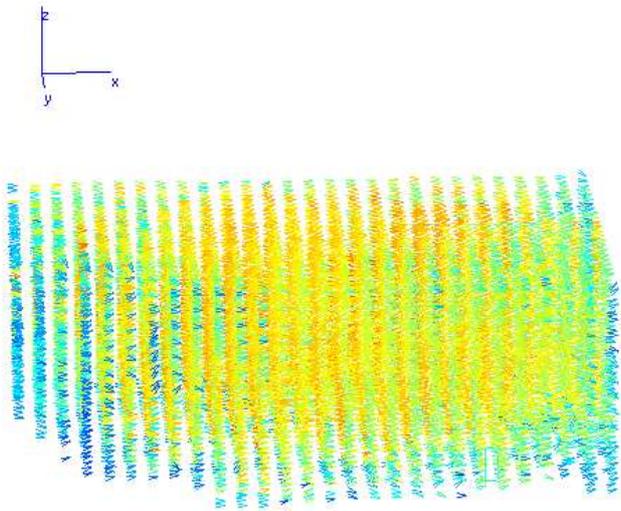


Figure 4.10 Grid Vector using GA

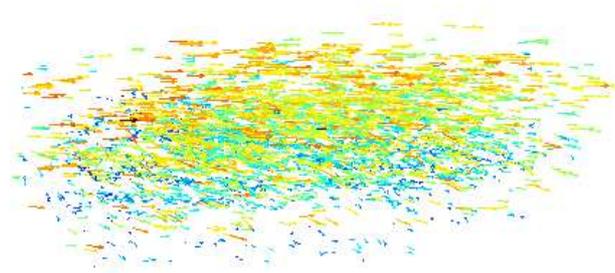
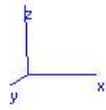


Figure 4.11 Raw Vector using depth parameter

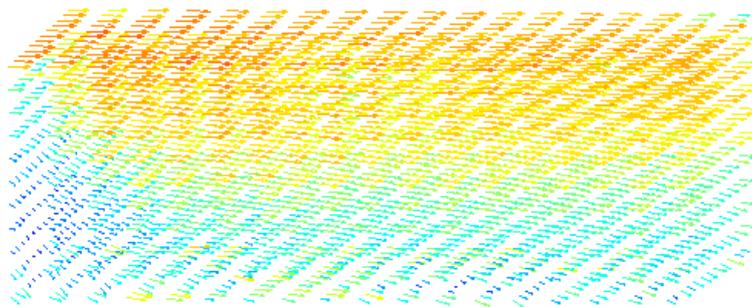
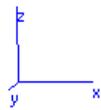


Figure 4.12 Grid Vector using depth parameter

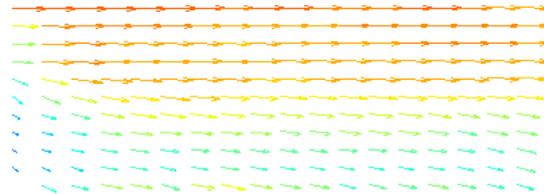


Figure 4.13 X-Z plane Grid Vector using depth parameter

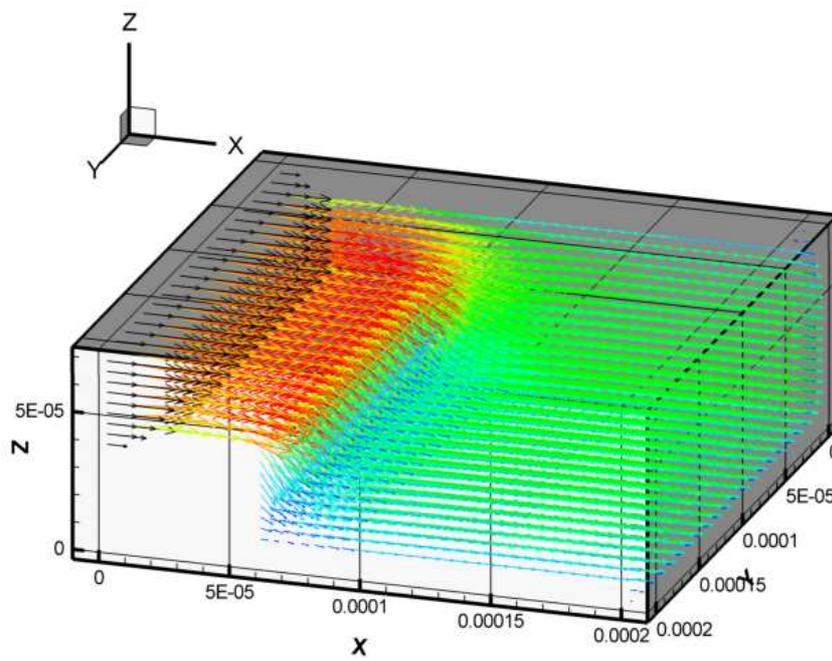


Figure 4.14 CFD 3D vector result

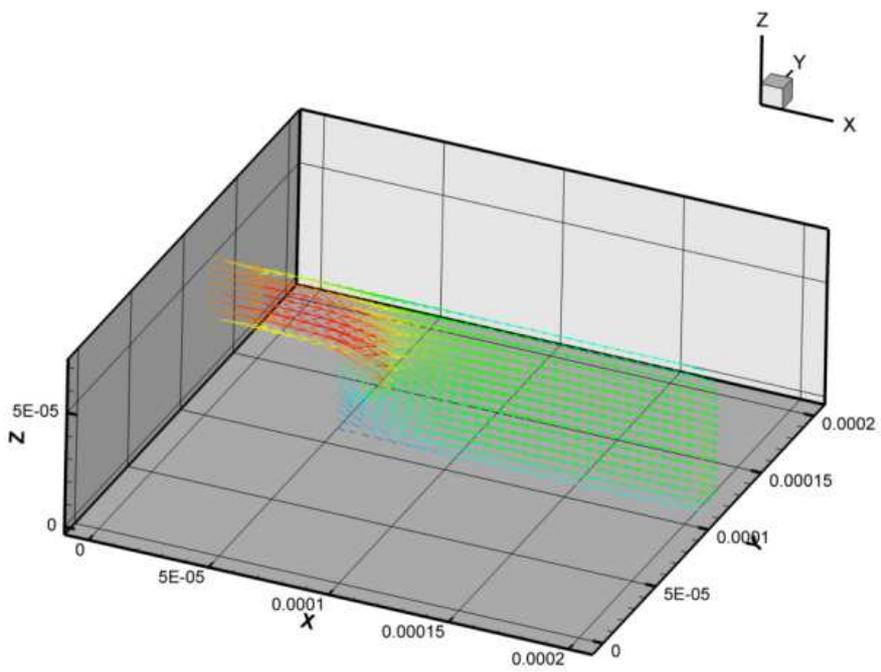


Figure 4.15 CFD Slice result at y= center position

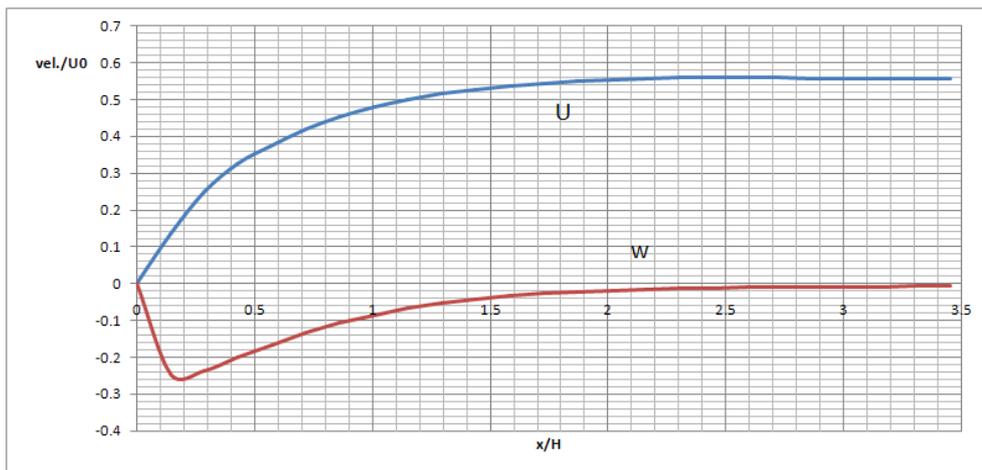


Figure 4.16 CFD result at  $Z= 0.5H$

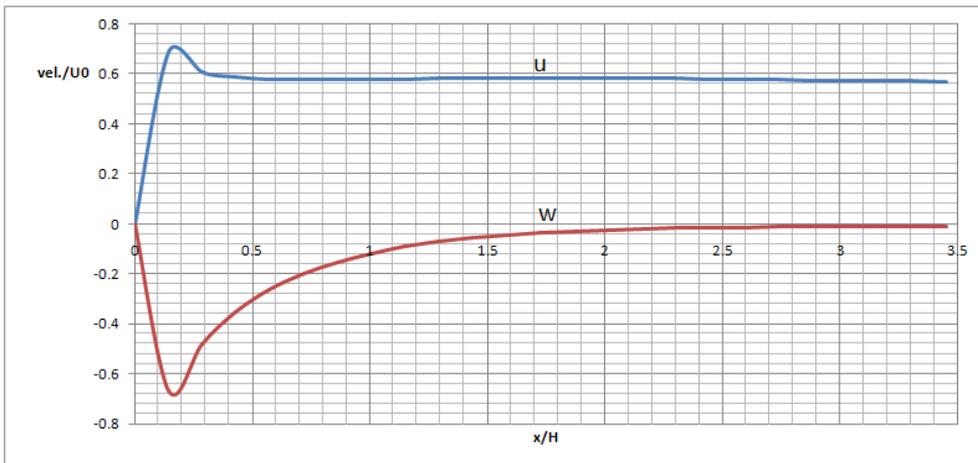


Figure 4.17 CFD result at  $Z= H$

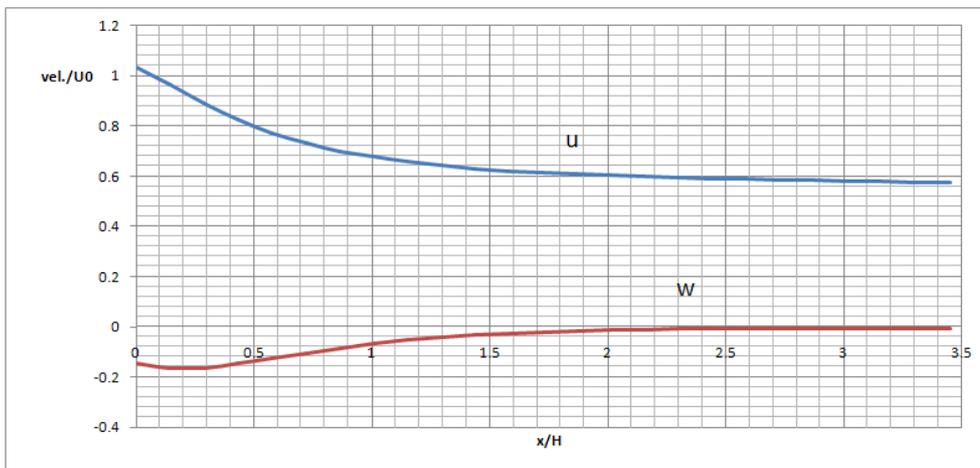
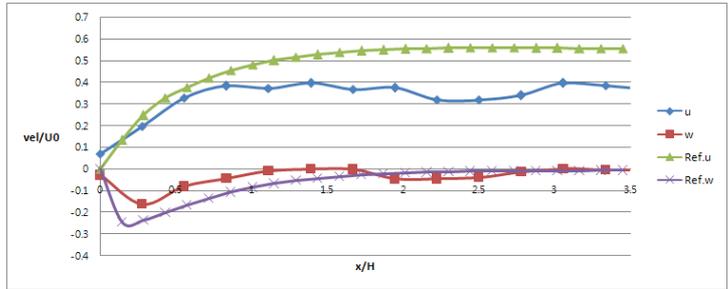
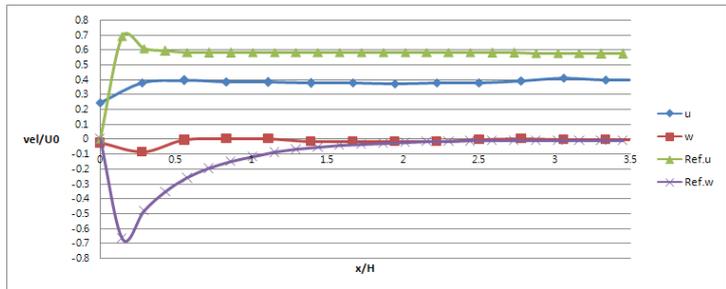


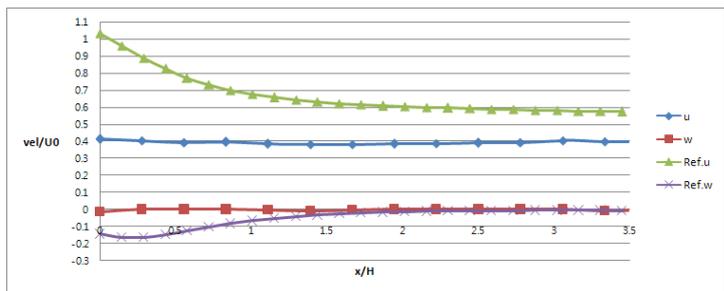
Figure 4.18 CFD result at  $Z= 1.5H$



(a)  $z = 0.5H$

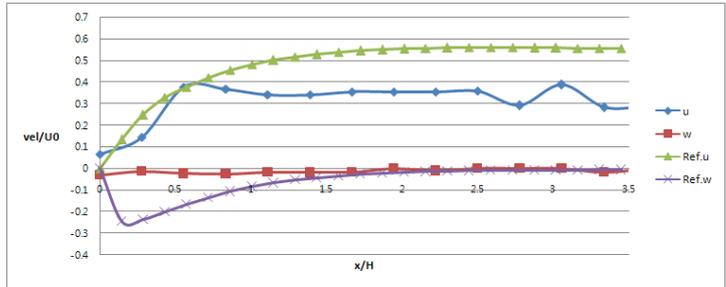


(b)  $z = H$

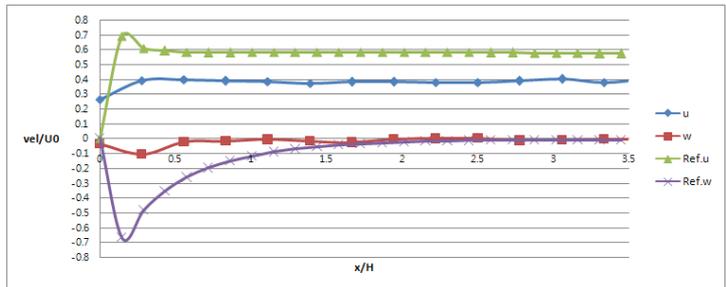


(c)  $z = 1.5H$

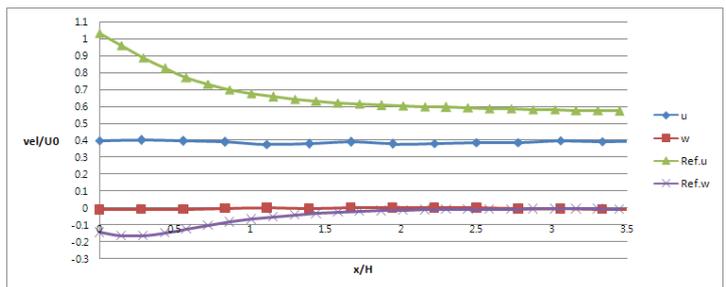
Figure 4.19 Result of X-Z Plane at Iteration 20  
(crossover 150%, mutation 10%, reproduction 150%)



(a)  $z = 0.5H$

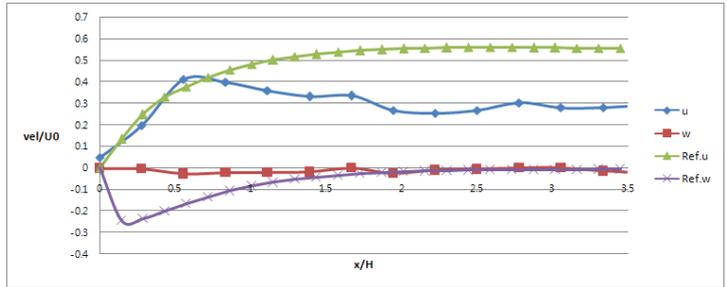


(b)  $z = H$

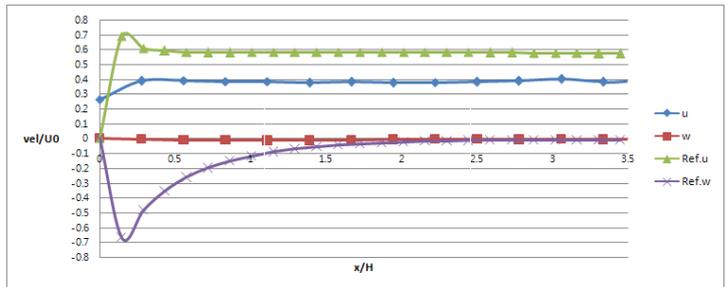


(c)  $z = 1.5H$

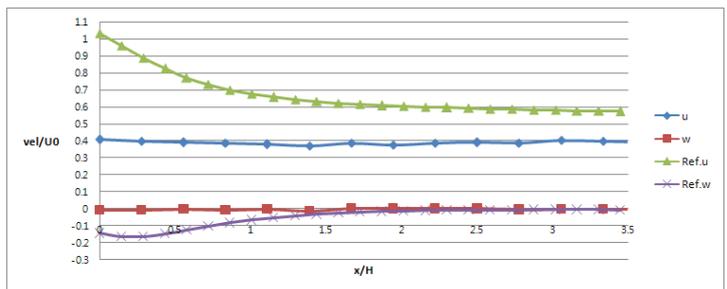
Figure 4.20 Result of X-Z Plane at Iteration 50  
(crossover 150%, mutation 10%, reproduction 150%)



(a)  $z = 0.5H$

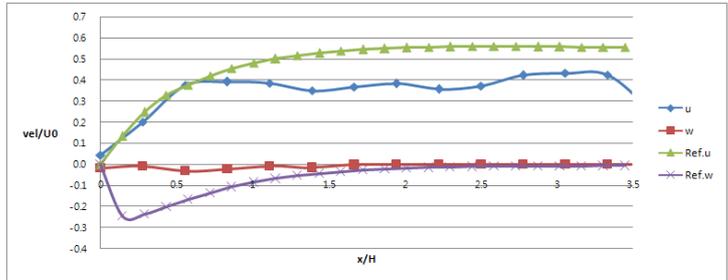


(b)  $z = H$

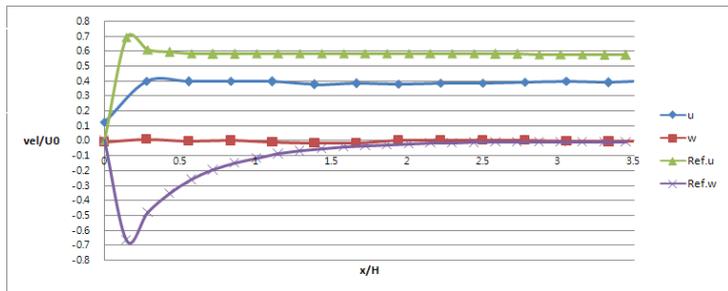


(c)  $z = 1.5H$

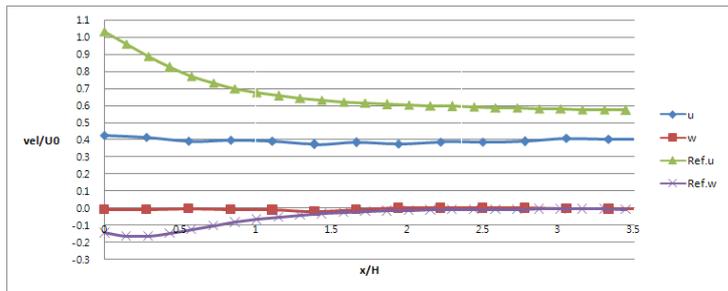
Figure 4.21 Result of X-Z Plane at Iteration 100  
(crossover 150%, mutation 10%, reproduction 150%)



(a)  $z = 0.5H$

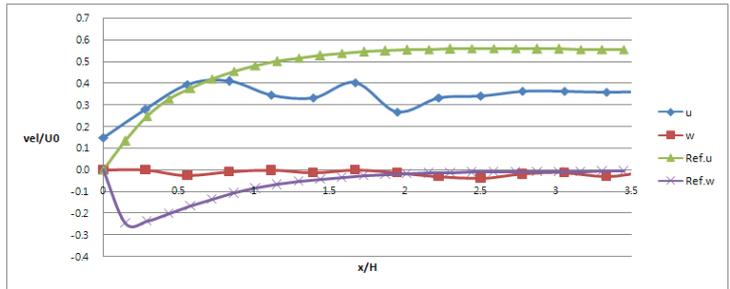


(b)  $z = H$

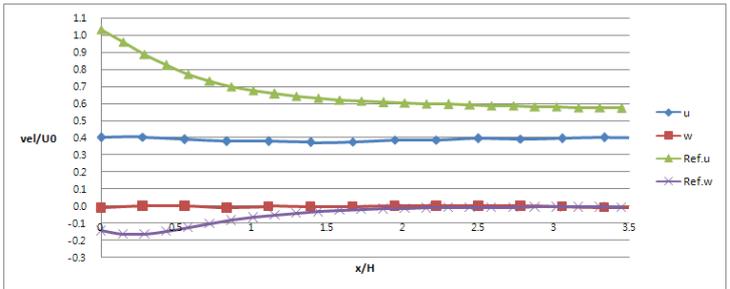


(c)  $z = 1.5H$

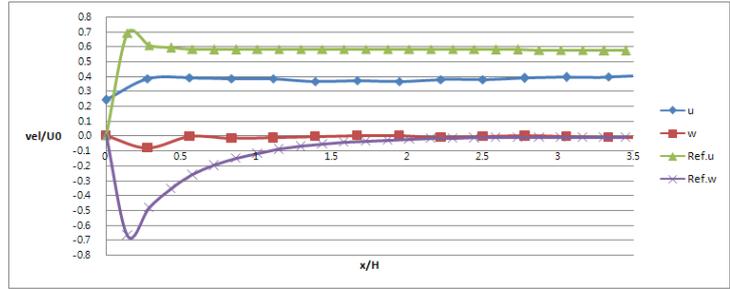
Figure 4.22 Result of X-Z Plane at Iteration 20  
(crossover 150%, mutation 20%, reproduction 150%)



(a)  $z = 0.5H$

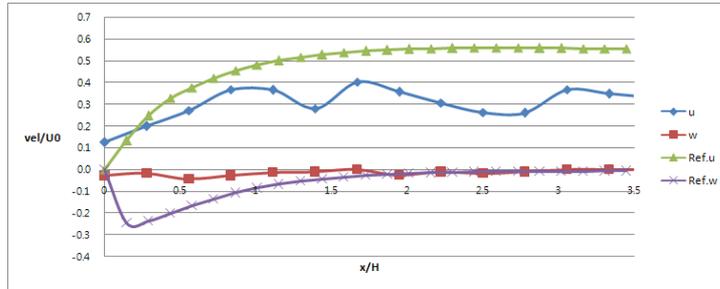


(b)  $z = H$

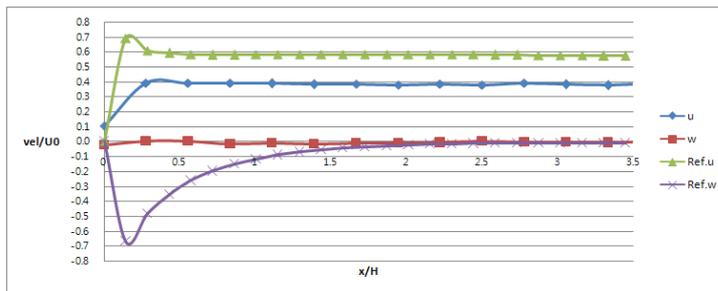


(c)  $z = 1.5H$

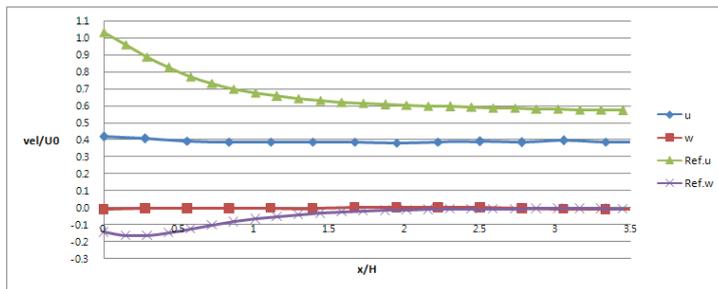
Figure 4.23 Result of X-Z Plane at Iteration 50  
(crossover 150%, mutation 20%, reproduction 150%)



(a)  $z = 0.5H$

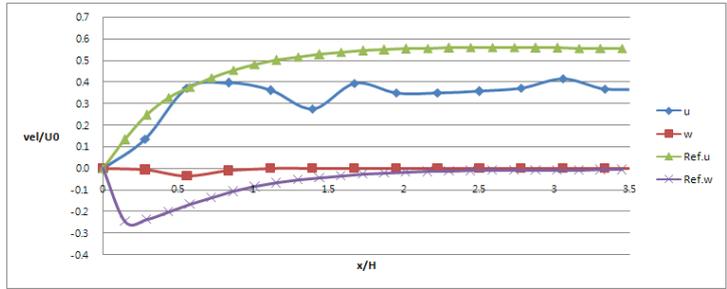


(b)  $z = H$

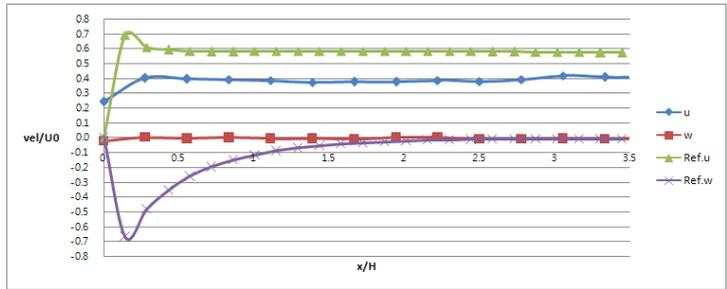


(c)  $z = 1.5H$

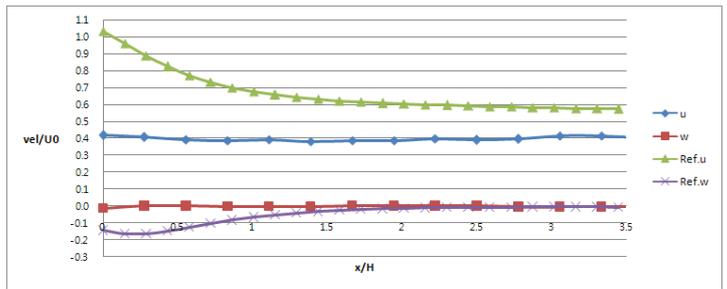
Figure 4.24 Result of X-Z Plane at Iteration 100  
(crossover 150%, mutation 20%, reproduction 150%)



(a)  $z = 0.5H$

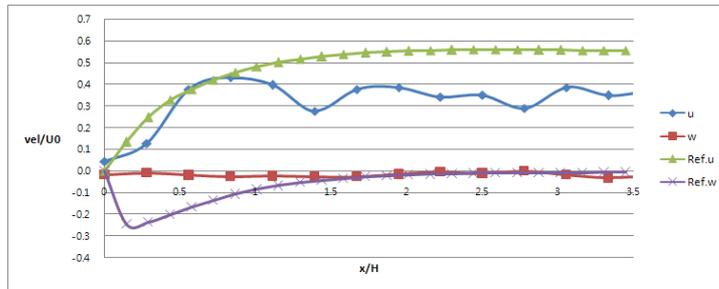


(b)  $z = H$

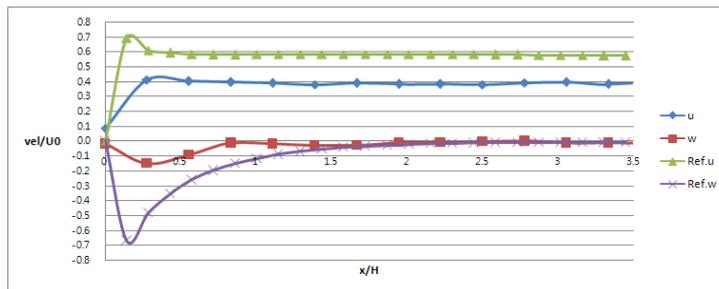


(c)  $z = 1.5H$

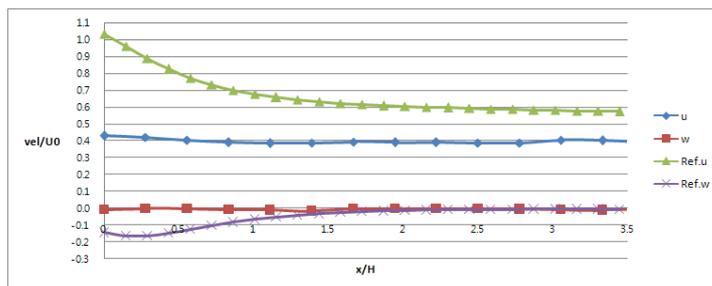
Figure 4.25 Result of X-Z Plane at Iteration 20  
(crossover 150%, mutation 20%, reproduction 200%)



(a)  $z = 0.5H$

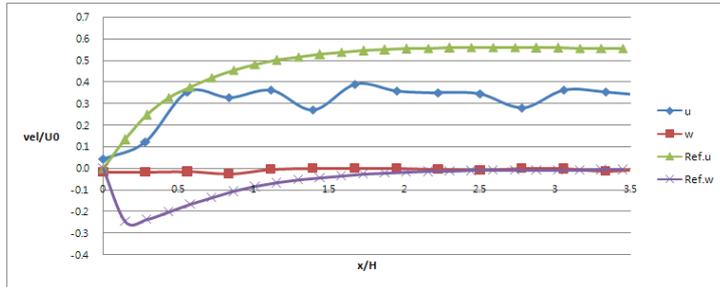


(b)  $z = H$

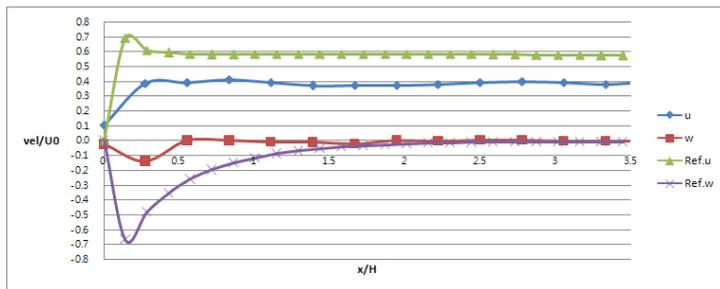


(c)  $z = 1.5H$

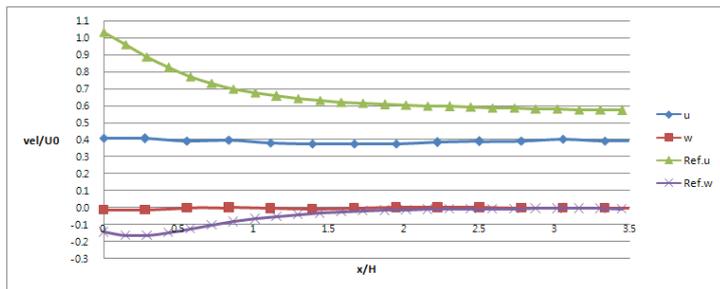
Figure 4.26 Result of X-Z Plane at Iteration 50  
(crossover 150%, mutation 20%, reproduction 200%)



(a)  $z = 0.5H$

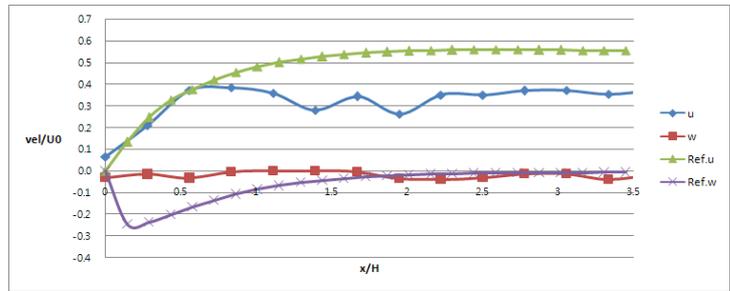


(b)  $z = H$

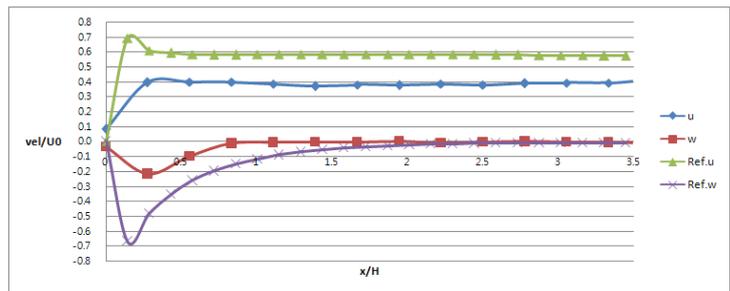


(c)  $z = 1.5H$

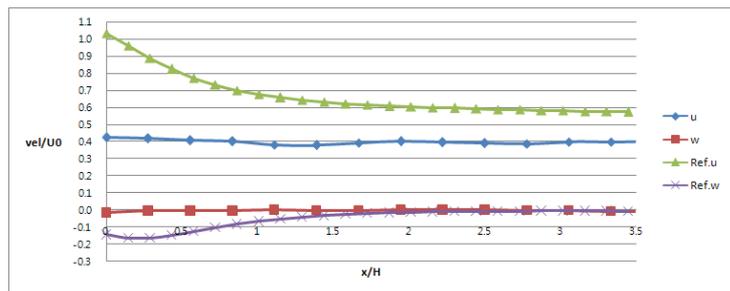
Figure 4.27 Result of X-Z Plane at Iteration 100  
(crossover 150%, mutation 20%, reproduction 200%)



(a)  $z = 0.5H$

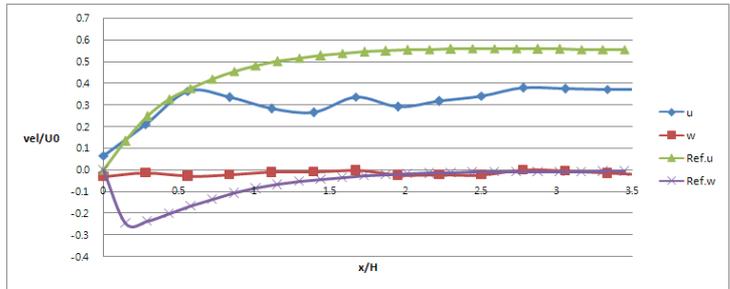


(c)  $z = H$

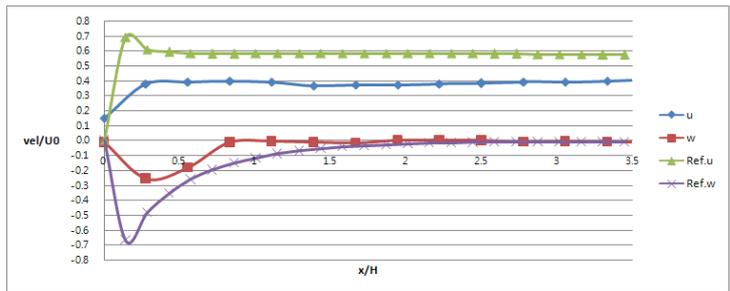


(c)  $z = 1.5H$

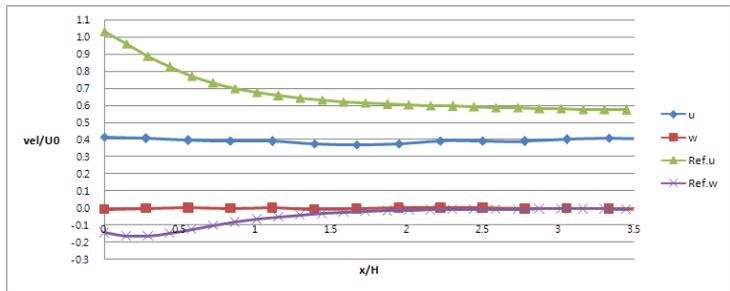
Figure 4.28 Result of X-Z Plane at Iteration 20  
(crossover 200%, mutation 20%, reproduction 150%)



(a)  $z = 0.5H$

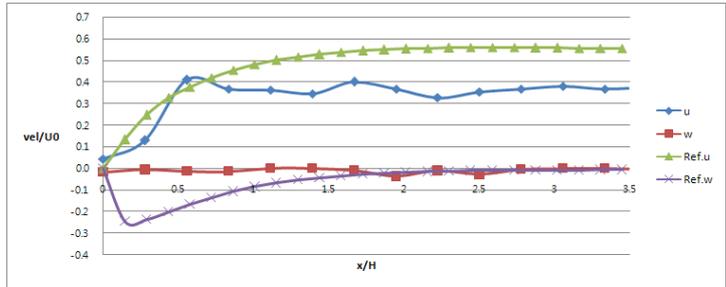


(b)  $z = H$

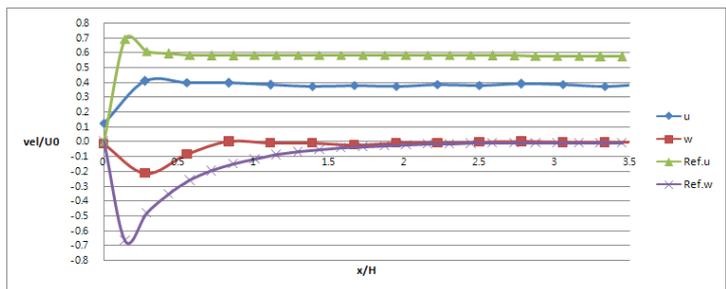


(c)  $z = 1.5H$

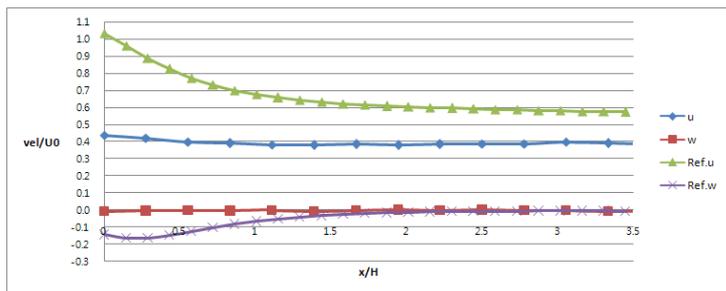
Figure 4.29 Result of X-Z Plane at Iteration 50  
(crossover 200%, mutation 20%, reproduction 150%)



(a)  $z = 0.5H$

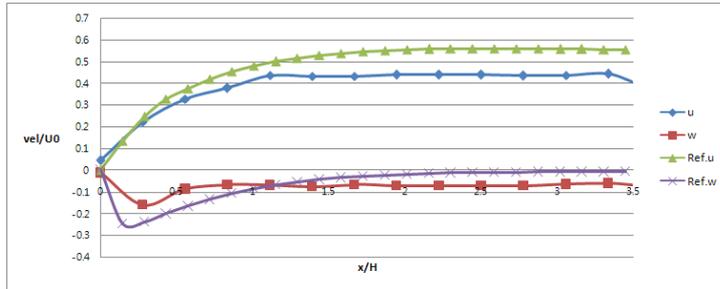


(b)  $z = H$

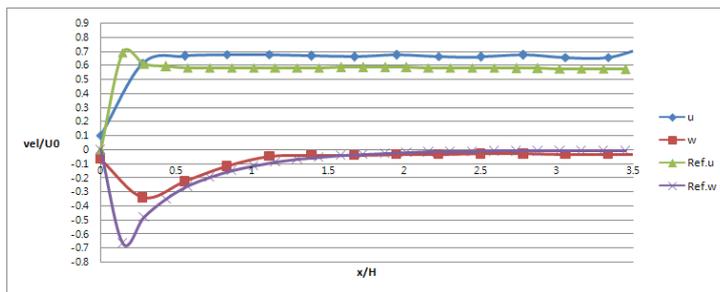


(c)  $z = 1.5H$

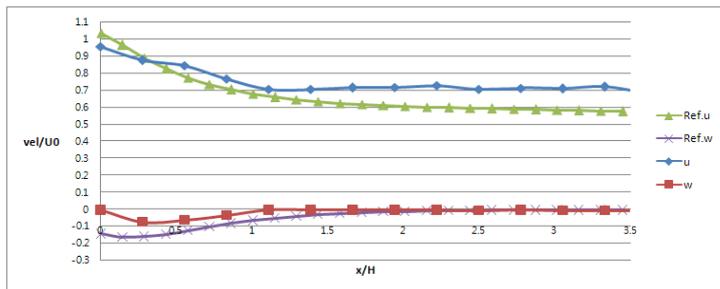
Figure 4.30 Result of X-Z Plane at Iteration 100  
(crossover 200%, mutation 20%, reproduction 150%)



(a)  $z = 0.5H$



(b)  $z = H$



(c)  $z = 1.5H$

Figure 4.31 Result of X-Z Plane using depth parameter

## 5장 결론

본 연구에서는 한 대 카메라를 이용하여 마이크로 스케일(depth 70um)의 채널 내 유체의 유동을 500mW Ar-Ion 레이저와 고속 카메라를 이용하여 가시화 하였고, 가시화된 영상을 GA를 통하여 마이크로 채널내 유체 거동을 고찰 하였다. GA의 검증을 위해서 별도의 한 대 카메라를 이용한 마이크로 실험 전용의 가상영상을 구현 하였으며 GA에 의한 성능은 입자수 1400에서 50%의 회복율을 보였다.

또한 마이크로 스케일의 실험 영상을 3차원적으로 해석하기 위해서 요구되어지는 핀 홀의 최적의 사이즈와 홀 간의 간격을 찾아냈다.

GA성능평가를 통해 crossover 200%, mutation 20%, Reproduction 150%에서 가장 좋은 결과가 형성됨을 확인하였다.

한 대 카메라에 두 개의 입자 영상이 맺히는 defocusing 현상으로 수많은 입자 중 한쌍의 입자를 선택하는 것의 어려움으로 인해(사실, 완벽히 한 쌍의 입자를 찾는다면 depth parameter법에 의해 쉽게 depth를 구할 수 있다) GA를 이용해 적합도를 기준으로 카메라 교정정보에 맞는 입자의 쌍을 동시에 추적 하였다. 결국 본 연구에 적용된 GA는 입자 쌍을 찾는 과정이라 해도 과언이 아니다. 기존의 PTV에서 사용된 GA와는 유전자의 후보를 선정하는 방법에 차이가 있다. GA를 PTV에 적용과정에 있어서 소외되는 입자들을 배제하지 않기 위하여 참조집단(reference group)을 형성함과 동시에, 유체의 연속체 개념에 근거한 적합도를 적용함으로써 계측영역내의 입자의 속도를 측정 할 수 있었다. 또한, depth parameter법에 의해 방법에서는 자기 상관에 의해 주위의 입자 중 자신을 검색하여 defocusing 되는 각을 구함으로써 GA보다 정도 높은 속도 프로파일을 구할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 GA를 이용한 3D-PTV계측법을 후향단유동장에 계측을 하여 평균속도분포, 정성적으로 타당한 결과를 얻어내었다.

본 계측법으로부터 얻어지는 마이크로 채널내 속도 벡터들은 아직 까지 개선점이 많으나, 유체 유동에 있어서 표면 조도에 따른 유동의 현상을 규명하는데 도움이 될 것으로 사료 된다.

## REFERENCE

- Acharya, M. and Escudier, M., Turbulent flow over mesh roughness, In *Turbulent Shear Flows 5*, Springer, pp.176-185, 1987.
- Ashrafian. A and Andersson H.I., Roughness effects in turbulent channel flow, *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, pp.425-432, 2003.
- Bakken O.M. and Krogstad P.A., Stress measurements in a rough wall channel flow using a variable angle method of calibration for x-probes, 3rd *Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Sendai, Japan, Vol.1, pp.105-110, 2003.
- Bolton, B.L., Bogard, D.G., Detection of coherent structures in a turbulent boundary layer using a scanning LDV system, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 5, No. 3, 1992, pp.274-280.
- Clauser, F.H., Turbulent boundary layers in adverse pressure gradients, *J. Aeronaut. Sci.*, Vol.21, pp.91-108, 1954.
- Di Cicca, G. M., Luso, G., Spazzini, P. G., Onorato, M., PIV study of the influence of large-scale streamwise vortices on a turbulent boundary layer, *Experiments in Fluids*, Vol. 33, No. 5, 2002, pp.663-669.
- Hama, F.R., Boundary layer characteristics for smooth and rough surfaces, *Trans. Soc. Naval Archit. Mar. Eng.*, Vol.62, pp.333-358, 1954.
- Jean, D., Pereira, F., Gharib, M., 2003, Applications of defocusing DPIV to bubbly flow measurement, *Particle & Particle Systems Characterization*, Vol. 20, pp.193-198.
- Kim K., Baek S.-J., and Sung H.J., An implicit velocity decoupling procedure for

- the incompressible Navier–Stokes equations, *Int. J. Numerical Method in Fluids*, Vol.38, Issue.2, pp.125–138, 2002
- Krogstad, P.A., Antonia, R.A. and Browne, L.W.B., Comparison between rough- and smooth-wall turbulent boundary layers, *J. Fluid Mech.*, Vol.245, pp.599–617, 1992.
- Krogstad P.A. and Antonia R.A., Surface roughness effects in turbulent boundary layers, *Exp. Fluids*, Vol.27, pp.450–460, 1999.
- Lecordier B. and Cui L.C., Advanced PIV algorithm with image distortion, *Proc. of CD-ROM, 5th Intl. Symp. on PIV, Busan, 2003.*
- Lee C. Large-eddy simulation of rough-wall turbulent boundary layers, *AIAA J.*, Vol.40, pp.2127–2130, 2002.
- Lee, S.-H. and Sung, H.J., "Direct numerical simulation of the turbulent boundary layer over a rod-roughened wall, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.584, pp.125–146, 2007.
- Leonardi S., Orlandi P., Smalley R.J., Djenidi L., and Antonia R.A., Direct numerical simulations of turbulent channel flow with transverse square bars on one wall, *J. Fluid Mech.*, Vol. 491, pp 229–238, 2003.
- Lund T.S., Wu X., and Squires K.D., Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulation, *J. Comp. Physics*, Vol. 140, pp 233–258, 1998.
- Mazouz, A., Labraga, L. and Tournier, C., Anisotropy invariants of Reynolds stress tensor in a duct flow and turbulent boundary layer, *J. Fluids Eng.*, Vol.120, pp.280–284, 1998.

- Meinhart, C. D., Wereley, S. T., and Santiago, J. G., PIV measurements of a microchannel flow, *Exp. in Fluids* Vol.27, 1999, pp.414-419.
- Miyake, Y., Tsujimoto, K. and Nakaji, M., Direct numerical simulation of rough-wall heat transfer in a turbulent channel flow, *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol.22, pp.237-244, 2001.
- Perry, A.E. and Abell, C.J., Asymptotic similarity of turbulence structures in smooth- and rough-walled pipes, *J. Fluid Mech.*, Vol.79, pp.785-799, 1977.
- Raupach M.R., Rough-wall turbulent boundary layers, *Appl. Mech. Rev.*, Vol.44, pp.1-25, 1991.
- Scarano F. and Riethmuller M., Advances in iterative multigrid PIV image processing, *Exp. Fluids Supplement* 29, pp.953-962, 2002.
- Stanislas M., Okamoto K., Kaehler C., Main results of the first international PIV Challenge, *Meas. Sci. & Tech.* Vol.14, R63-R89, 2003.
- Susset A., Most J.M and Honore D., A novel architecture of super-resolution PIV algorithm for the improvement of large velocity gradient resolution, *Proc. of CD-ROM, 5th Intl. Symp. on PIV, Busan*, 2003.
- Tachie, M.F., Bergstrom, D.J. and Balachandar, R., Rough wall turbulent boundary layers in shallow open channel flow, *J. Fluids Eng.*, Vol.122, pp.533-541, 2000.
- Teital M. and Antonia R.A., Comparison between outer region of turbulent boundary layer and channel flows, *Exp. Fluids*, Vol.11, pp.203-204, 1991.
- Townsend, A.A., *The structure of turbulent shear flow*, Cambridge University Press, 1976.
- 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.

## 감사의 글

모두가 잠든 이른 새벽 바다에 비친 달빛을 보며 문득 명심보감의 시 구절이 생각납니다.

少年易老學難成(소년이노학난성)

一寸光陰不可輕(일촌광음불가경)

未覺池塘春草夢(미각지당춘초몽)

階前梧葉已秋聲(계전오엽이추성)

소년은 늙기 쉽고 학문은 이루기 어려우니

짧은 시간이라도 가벼이 여기지 말라.

아직 못가의 봄풀은 꿈에서 깨어나지 못했는데

계단 앞의 오동나무는 벌써 가을 소리를 내는구나!

유동가지화 실험실에 처음 들어와서 열심히 실험실에서 밤 새 실험하며 공부한지도 어느새 10여년이 훌쩍 지났습니다. 그동안 소년은 결혼을 하고 귀여운 딸은 두 돌이 다 되었습니다. 소년은 간데없고 이젠 눈가에 잔주름이 하나씩 늘어 가고 있습니다. 아직 못다 이룬 것이 너무 많은데, 그동안 무심히 지나가 버린 시간이 야속할 뿐입니다. 사실은 그동안 시간의 소중함을 몰랐던 제가 한없이 싫어서 핑계를 대는 것이겠지요. 만일 후배들이 이 글을 본다면 좀 더 분발해 주길 바라는 마음입니다. 모든 시간에 의미를 가지고 공

부하거나 놀때도 지금 자신이 사용하는 시간의 가치를 느끼길 바랍니다.

늘, 옆에서 일하며, 살림하며 항상 내조에 신경을 써준 사랑하는 아내와 존재 하는것 만으로 힘을 준 공주 규진이, 언제나 무한한 사랑을 주시는 부모님께 감사를 드립니다.

끝으로, 학문적으로나 인생 선배로써 조언과 격려를 아끼지 않았던 지도교수님께 감사드리고, 실험실을 거쳐 갔던 모든 선,후배에게도 감사드립니다. .