

공학석사 학위논문

스테레오 PIV-PTV 성능검정을 위한
표준영상제작과 난류유동 측정성능 검정에 관한 연구

A Study on the Constructions of the Standard Images
for Stereoscopic PIV-PTV and Their Performance Tests
for Turbulent Flows

지도교수 김 의 간

2005년 12월 21일

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

이 재 민

본 논문을 이재민의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 김 정 렬 인

위 원 공학박사 황 광 일 인

위 원 공학박사 김 의 간 인

2005년 12월 21일

한국해양대학교 대학원

기 계 공 학 과

**A Study on the Constructions of the Standard Images
for Stereoscopic PIV-PTV and Their Performance Tests
for Turbulent Flows**

by
Jae Min, Lee

**Department of Mechanical Engineering
Graduate School Korea Maritime University**

Abstract

A set of standard images is constructed for the performance test on the Stereoscopic PIV and Stereoscopic PTV. The worldwide standard data that are provided by the website (<http://www.vsj.or.jp/piv>) on an impinged jet are used for the generation of the standard images. Two measurement algorithms, one for Stereoscopic PIV and the other for Stereoscopic PTV, are used for the performance test. The arrangement of the two cameras is based on angular position. Experimental camera parameters are used for the Stereoscopic PIV and Stereoscopic PTV measurements. The performance test has been carried out using the constructed standard images, and it is shown that the Stereoscopic PTV has better measurability on the turbulences than the Stereoscopic PIV and both show same performances on the time averaged physical properties of the flows.

목차

Abstract	i
List of Tables	iv
List of Figures	v
Nomenclature	vii
제 1 장 서론	
1.1 연구배경과 목적	1
1.2 연구내용	4
제 2 장 계측법의 원리	
2.1 스테레오 계측의 원리	5
2.2 스테레오 PIV의 원리	16
2.3 스테레오 PTV의 원리	18
제 3 장 스테레오 PIV/PTV 표준영상 및 성능검정	
3.1 성능검정의 원리	29
3.2 표준영상 제작원리	33
3.3 카메라 파라미터 획득 실험 및 스테레오 PIV/PTV 측정오차	37
3.4 스테레오 PIV/PTV의 유동장 측정 성능평가	48
제 4 장 결론	56
참고문헌	57

List of Tables

Table 2.1 Definition of chromosome with respect to camera.	20
Table 3.1 Plane calibrator's information for SPIV/SPTV.	42
Table 3.2 Error analysis of each calibrator for SPIV/SPTV.	46
Table 3.3 Result of camera parameter using each method.	47
Table 3.4 Uncertainty analysis of camera parameter for each virtual camera parameter.	47

List of Figure

Fig. 2.1 Two basic configurations for SPIV/PTV systems.	12
Fig. 2.2 Scheimpflug's lens array.	13
Fig. 2.3 Image plane rotation process.	13
Fig.2.4 Relations between absolute and camera's coordinate system.	14
Fig. 2.5 Definition of 3-D particle position.	15
Fig. 2.6 Schema of SPIV.	17
Fig. 2.7 Schema of SPTV.	25
Fig. 2.8 Definition of 3-D particle position.	26
Fig. 2.9 Concept of SPTV using GA Algorithm.	27
Fig. 2.10 Flowchart of 3D PTV using GA Algorithm.	28
Fig. 3.1 Procedure of the evaluation process using Stereoscopic Standard Images.	30
Fig. 3.2 Standard data of an impinged jet (VSJ: Visualization Society of Japan).	31
Fig. 3.3 Jet-flow 3-D velocity vector distribution(Okamoto.1995).	31
Fig. 3.4 Randomly selected 3D velocity vector distribution in the interested plane.	32
Fig. 3.5 Procedure of the construction process of Stereoscopic Standard Images.	32
Fig. 3.6 Stereoscopic arrangements of camera and virtual data sets. (LES on the website of ' www.vsj.or.jp/piv ')	35
Fig. 3.7 Generated Stereoscopic images.5000. (Camera viewing angle = 20°)	36
Fig. 3.8 Relation calibrator and camera.	41
Fig. 3.9 Image for camera calibration.	41

Fig. 3.10 Calibrator.	42
Fig. 3.11 Schema of mirror reflection system for calibration under the water.	43
Fig. 3.12 Plane calibrator 1 (air / camera angel 30°).	44
Fig. 3.13 Plane calibrator 1 (water / camera angel 30°).	44
Fig. 3.14 Plane calibrator 1 (air-mirror / camera angel 30°).	45
Fig. 3.15 Plane calibrator 1 (water-mirror / camera angel 30°).	45
Fig. 3.16 Obtained vectors by SPIV.	50
Fig. 3.17 Obtained vectors by SPTV.	51
Fig. 3.18 Interpolated vectors obtained by SPTV.	51
Fig. 3.19 Relative error(%).	51
Fig. 3.20 Turbulent kinetic energy distribution obtained by SPIV.	52
Fig. 3.21 Turbulent kinetic energy distribution obtained by SPTV.	52
Fig. 3.22 Turbulent kinetic energy distribution obtained by LES.	53
Fig. 3.23 Profiles of turbulent kinetic energy.	53
Fig. 3.24 Profiles of Reynolds stress (uv component).	54
Fig. 3.25 Profiles of Reynolds stress (wu component).	54
Fig. 3.26 Profiles of turbulent intensity (u component).	55
Fig. 3.27 Profiles of turbulent intensity (w component).	55

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	Distance from view point to imaging sensor of camera
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 to make a virtual image.
F	Equation of observation for x-direction
G	Equation of observation for y-direction
I	Intensity of particle to make a virtual image
I_0	Maximum intensity of particle to make a virtual image.
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
o	Original point of photographic coordinate system
O	Original point of absolute coordinate system
p	Particle on images
P	Particle in space

RUV	Reynolds shear stress($-\overline{u'v'}/U_0^2$)
RVW	Reynolds shear stress($-\overline{v'w'}/U_0^2$)
RWU	Reynolds shear stress($-\overline{w'u'}/U_0^2$)
S^*	Standard deviation
TKE	Turbulence kinetic energy($\frac{1}{2} \overline{q^2} / U_0^2$)
TIU	Turbulence intensity($\sqrt{\overline{u'^2}} / U_0$)
TIV	Turbulence intensity($\sqrt{\overline{v'^2}} / U_0$)
TIW	Turbulence intensity($\sqrt{\overline{w'^2}} / U_0$)
$\Delta X, \Delta Y$	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	Absolute coordinate system
X, Y, Z	Photographic 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
\bar{X}	Mean

Greek characters

α, ω	Tilted angle for X axis
β, ψ	Tilted angle for Y axis
γ, κ	Tilted angle for Z axis
-	Time averaged value

제 1 장 서 론

1.1 연구배경과 목적

유동장의 유체와 동일한 비중의 미소추적입자를 투입 하여 광원과 카메라로 가시화 한 후 디지털화상처리를 이용하여 이들 입자들의 운동을 정량적으로 추적하는 방법을 PIV(particle image velocimetry)법이다⁽¹⁾⁽²⁾. 이 방법은 동시 다점계측이라는 장점으로 부터 많이 이용되어 왔으나 대부분이 2차원적인 정보를 제공해 왔다. 그러나 산업현장에서 나타나는 대부분의 유동장이 3차원성이 강한 난류라는 점으로부터 3차원 PTV를 이용한 난류유동계측의 필요성은 있어왔으나 3차원 계측기술의 한계로 인하여 극히 제약적 유동조건에 대한 연구 성과들만이 보고 되어왔다⁽³⁾.

3차원 계측법 중의 하나로 스테레오 PIV(Stereoscopic Particle Image Velocimetry ; SPIV) 계측법⁽⁴⁾은 현재 시판되고 있는 PIV분야 계측장비들의 성능을 최대한 활용함으로써 유동의 상세 구조까지 제공할 수 있다는 점으로부터 최근 많이 이용되고 있다. 이 계측법은 보통 두 대의 카메라를 사용하여 측정한다. 이 시스템에서는 레이저 평면 광으로 조명된 유동 단면에서의 3가지 속도성분을 측정하게 되는데, 일반적으로 out-of-plane의 속도성분은 바로 측정되어지지 않고 두 대의 카메라로 측정한 평면 데이터로부터 도출하게 된다. SPIV 계측법에는 접근 방법에 따라 2대의 카메라렌즈를 유동가시영역에 대하여 평행으로 설치하여 계측하는 Translation 방법과 2대

의 카메라렌즈가 유동가시영역과 수직하지 못하고 조명의 평면과 소정의 각도를 이루게 하여 속도 장을 측정하는 Angular 방법이 있다⁽⁴⁾. Translation 법은 투시 방향에 대한 왜곡이 거의 없기 때문에 기록면의 좌표를 유체내부 입자좌표로 쉽게 변환할 수 있으며 확대율이 영상 기록면의 변위에 무관하므로 3차원 속도 성분을 쉽게 계산할 수 있는 장점이 있지만 카메라 측정각도가 제한되기 때문에 out-of-plane 속도성분의 오차를 줄이는데 한계가 있으며, 일반적으로 렌즈의 왜곡을 고려하지 않기 때문에 성능이 우수한 렌즈를 사용하여야 한다. 반면에 Angular 법은 측정각도에 거의 제약이 따르지 않으나 취득한 영상에 강한 투시왜곡에 발생하게 되므로 영상 기록면 좌표와 측정단면 좌표 사이의 상관 함수를 구하는 작업이 필요할 뿐만 아니라 유동장의 가시용 벽면에 의한 굴절의 영향으로 카메라렌즈의 설치를 가능하면 지상면을 기준으로 평행하게 설치해야 하는 단점이 있다⁽⁵⁾.

윤과 이⁽⁶⁾는 이와 같은 점을 고려하여 렌즈가 Tilting기능이 있는 카메라를 사용한 Scheimpflug방식의 SPIV법을 구축하였으며 도 등⁽⁷⁾은 Angular법의 장점을 살리고 유동계측의 제약을 주었던 카메라의 배치에 자유성을 부여할 수 있도록 영상의 기하학적 변환(Geometric transformation)을 통하여 굴절과 수차의 영향을 고려함으로써 Translation법과 Angular법의 단점을 극복한 SPIV법을 제시하였다. 그러나 PIV는 원리상 얻어지는 속도벡터가 격자상에서 얻어지는 결과이므로 격자보다 작은 유동속도성분을 얻어내기란 쉽지가 않다.

게다가 SPIV법은 PIV계산에 의거하고 있는 관계로 in-plane의 격자크기 이내의 속도성분 즉 난동성분에 대한 측정성능향상이 어려울 뿐만 아니라

out-of-plane의 속도성분에 대한 측정오차가 크게 나타나는 특징이 있다.

한편, 일반적으로 PTV계측법은 입자 하나 하나에 대한 운동정보를 가지고 있으므로 격자보다 작은 스케일의 입자운동측정에 적합하다. 도 등⁽⁸⁾은 PTV계측법의 장점을 살려 스테레오 PTV(Stereoscopic Particle Tracking Velocimetry ; SPTV)법을 개발하였다. 이들은 유전알고리즘을 이용한 3차원 PTV계측법⁽⁹⁾에 의거한 SPTV계측법 구축에 성공함으로써 out-of-plane의 속도성분에 대한 측정오차를 줄이면서 in-plane상에서 격자보다 작은 스케일의 측정가능성을 제시하였다.

SPIV법과 SPTV법에 대한 지금까지의 연구들은 각각이 가지고 있는 측정법의 성능을 향상시키는 방향으로 진행되어 왔는데 SPIV법에서의 속도벡터 계산상, 격자보다 작은 스케일에 대한 측정성능, 즉 난동성분에 대한 측정성능이 어느 정도이며, SPTV법이 난동성분에 대하여 얼마나 측정성능이 우수한 지에 대한 평가가 없는 관계로 연구자들은 SPIV 혹은 SPTV 측정시스템의 사용에 즈음하여 측정결과의 비교검토가 어려워왔다. 이는 각각의 연구 성과들에서 행해진 실험조건들이 다를 뿐만 아니라 동일한 실험조건이라 할지라도 사용자의 실험경험 및 방법에 따라 다르게 되므로 이들 측정법에 의한 측정결과들 간의 차이에 대한 원인분석 및 비교평가가 어려웠다.

본 연구에서는 수치적 표준데이터⁽¹⁰⁾를 이용함으로써 사용자의 실험경험 및 방법에 의존하지 않는 표준영상을 제작하고 이들 표준영상에 대하여 기존의 SPIV법과 SPTV법을 적용함으로써 유동장의 난동성분측정에 있어서 이들 측정법들의 성능을 비교 검증하는 것을 연구의 목적으로 삼고자 한다.

1.2 연구 내용

SPIV측정법과 SPTV측정법의 성능에 대한 비교평가를 위하여 기준이 될 수 있는 표준영상이 필요한데 이를 위하여 스테레오영상 제작법을 구축하였다. 특히 구축된 스테레오영상을 이용하여 SPIV 측정법에서 격자보다 작은 스케일에 대한 유동장의 난동성분측정에 있어서의 SPIV측정법과 SPTV측정법의 성능을 비교 검정하였다.

SPIV측정법과 SPTV측정법의 성능비교검정을 위해서는 이들 측정법에 대한 측정원리 정립이 선행되어야 하므로 이들 측정법에 대한 이론적 배경을 정리하고, 성능 검정을 위한 표준영상을 제작하게 되었으며, 또한 카메라 파라미터 획득 실험을 통해 SPIV/SPTV 측정오차를 알아내었다.

스테레오 표준영상제작에 필요한 원시데이터는 일본가시화정보학회(<http://www.vsj.or.jp/piv>)가 제공하고 있는 층돌분류유동에 대한 표준적 계산데이터(LES: large eddy simulation에 의한 결과)를 이용하여 표준 영상(standard artificial images)을 제작, 이에 대한 표준영상데이터 베이스를 구축하였다. 구축된 표준영상에 대한 성능시험결과와 원래의 수치계산데이터와의 비교를 통하여 이들 두 측정법에 대한 성능평가를 수행하였다.

제 2 장 계측법의 원리

2.1 스테레오 계측의 원리

스테레오 계측이란 2대의 카메라를 사용하여 측정공간에 대한 물체의 움직임을 3차원 측정하는 것을 말한다. SPIV계측법은 기존의 2차원 PIV계측법이 측정할 수 없었던 out-of-plane성분을 측정하기 위하여 2대의 카메라를 추가한 PIV측정시스템이다. SPIV측정법에는 2대의 카메라의 배치에 따라, Fig. 2.1와 같이 Translation법과 Angular법으로 나누어진다. (a)는 Translation법으로 카메라의 광학축(Optical axes)이 조명된 평면에 수직하여, 레이저 빔면(Object Plane)과 렌즈면(Lens Plane)과 카메라센서면(Image Plane)이 평행하게 설치되어진 시스템으로 Stereoscopic 효과가 카메라의 축으로부터 떨어진 거리에 바로 연관되어 진다. 카메라의 렌즈 배율 요소(magnification factor)와 카메라간의 사이각(Θ)을 가지고 기하학적 이동거리와 3차원 속도성분을 계산하는 방법이다. 여기서, M (렌즈배율요소) $= (d_i / d_o)$ 이다. (b) Angular displacement법은 2대의 카메라렌즈가 유동가시영역과 수직하지 못하고 조명평면과 소정의 각도를 이루게 하여 속도장을 측정하는 방법이다. 측정각도에 거의 제약이 따르지 않으나 취득한 영상에 강한 투시왜곡이 발생하게 되므로 영상 기록면 좌표와 측정단면 좌표사이의 상관함수를 구하는 작업이 필요할 뿐만 아니라 유동장의 가시용 벽면에 의한 굴절의 영향으로 카메라렌즈의 설치를 가능하면 지상면을 기준으로 평행하게 설치

해야하는 단점이 있다. 이 단점을 극복하기 위하여 틸팅렌즈(Tilting lens)를 이용하여 Fig. 2.2와 같은 Scheimpflug법⁽⁴⁾이 사용되었다. 본 연구에서 성능을 검정하고자 하는 측정법은 도 등⁽⁷⁾⁽⁸⁾이 제시한 Hybrid SPIV/PTV 측정법이다.

카메라를 통한 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 성립된다. 이러한 원리로부터 Kobayasi 등⁽¹¹⁾, Doh 등⁽¹²⁾은 외부요소 ($x_0, y_0, z_0, \omega, \psi, \kappa$)와 내부요소 (c, X_0, Y_0, k_1, k_2)등 11개 요소를 가지는 관측방정식을 사용하였으나, 본 논문에서는 Doh 등⁽⁹⁾이 제시한 외부요소 ($dis, \alpha, \beta, \gamma, m_x, m_y$)와 내부요소 (c_x, c_y, k_1, k_2)등 10개의 요소를 가지는 관측방정식 (2.1) 을 사용하여 유전알고리즘에 적용하였다.

Fig. 2.3 은 10개 표정요소를 이용하기 위해 절대 좌표계(x, y, z)에 대한 카메라 좌표계(X, Y, Z)의 관계를 보여 주고 있으며, dis 는 절대 좌표계 $O(0, 0, 0)$ 점으로부터 카메라 중심까지의 거리를 의미한다. 즉 O 점으로부터 카메라중심까지의 거리를 말한다. 카메라 좌표계와 절대 좌표계를 일치시키기 위해 x, y, z 축에 대한 회전각을 각각 α, β, γ 로 정의하면, 축에 대한 회전형렬은 $M_m = M_z M_y M_x$ 가 된다. 즉 x, y (α, β)축 회전에 의해 카메라 좌표계의 Z 축과, 절대 좌표계의 z 축이 평행하게 되며, 다시 z (γ)축 회전에 의해 카메라 좌표계의 X, Y 축과 절대좌표계의 x, y 축이 서로 평행하게 된

다. 이렇게 회전된 절대 좌표값을 (x_m, y_m, z_m) 으로 표시하고, 카메라의 Z 축과 절대좌표계의 z 축을 일치시키기 위한 이동량을 m_X, m_Y 으로 표시한다. 이렇게 카메라의 Z 축과 절대좌표계의 z 축을 일치시키면, Fig. 2.4 와 같은 카메라의 XY 평면과 절대 좌표계 사이의 투영관계가 성립된다. 즉 절대좌표계의 대상점과 사진좌표계의 투영점이 일직선상에 있다는 공선조건으로부터 다음과 같은 관측방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 X &= c_X \frac{x_m - m_X}{\sqrt{dis^2 - m_X^2 - m_Y^2 - z_m}} + \Delta X \\
 Y &= c_Y \frac{y_m - m_Y}{\sqrt{dis^2 - m_X^2 - m_Y^2 - z_m}} + \Delta Y
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

여기서 c_X, c_Y 는 이미지 그래버에 따른 장방비의 차이를 고려한 것이며, $\Delta X, \Delta Y$ 는 이미지 중심으로부터의 거리에 따른 렌즈에 의한 굴절을 고려하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned}
 \Delta X &= \frac{X}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4) \\
 \Delta Y &= \frac{Y}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4), \quad r = \sqrt{X^2 + Y^2}
 \end{aligned}$$

식 (2.1)과 같이 정의된 각 카메라의 표정요소를 구하기 위해 이미 알고

있는 3차원 좌표 (x_p, y_p, z_p) 와 사진좌표 (X_p, Y_p) 에 대해 F, G는 다음과 같은 식 (2.2)과 (2.3)으로 표현된다.

$$F = c_X \frac{x_m - m_X}{\sqrt{dis^2 - m_X^2 - m_Y^2 - z_m^2}} - (X - \Delta X) = 0 \quad (2.2)$$

$$G = c_Y \frac{y_m - m_Y}{\sqrt{dis^2 - m_X^2 - m_Y^2 - z_m^2}} - (Y - \Delta Y) = 0 \quad (2.3)$$

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

한편, 카메라의 표정요소가 구해지면 사진좌표 (X, Y) 와 절대좌표 (x, y, z) 간에 식 (2.2)와 (2.3) 으로부터 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$\frac{c_X(x_m - m_X)}{d - z_m} - (X - \Delta X) = 0 \quad (2.4)$$

$$x_m = \frac{(X - \Delta X)}{c_X} (d - z_m) + m_X$$

$$\frac{c_Y(y_m - m_Y)}{d - z_m} - (Y - \Delta Y) = 0 \quad (2.5)$$

$$Y_m = \frac{(Y - \Delta Y)}{c_Y} (d - z_m) + m_Y$$

여기서, $d = \sqrt{dis^2 - m_X^2 - m_Y^2}$ 이다. $d - z_m = t$ 라 두면,

$$\begin{aligned}
 x_m &= \frac{X - \Delta X}{c_X} t + m_X \\
 y_m &= \frac{Y - \Delta Y}{c_Y} t + m_Y \\
 z_m &= d - t
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

이 된다. 회전변환행렬을 M_m 이라 두고, 역행렬을 B 라 두면,

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = M_m \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = M_m^{-1} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix}$$

이므로 x, y, z 에 관해 정리하면,

$$\begin{aligned}
 x &= B_{11}x_m + B_{12}y_m + B_{13}z_m \\
 &= \left(B_{11} \frac{s_X}{c_X} + B_{12} \frac{s_Y}{c_Y} - B_{13} \right) t + (B_{11}m_X + B_{12}m_Y + B_{13}d) \\
 y &= B_{21}x_m + B_{22}y_m + B_{23}z_m \\
 &= \left(B_{21} \frac{s_X}{c_X} + B_{22} \frac{s_Y}{c_Y} - B_{23} \right) t + (B_{21}m_X + B_{22}m_Y + B_{23}d) \\
 z &= B_{31}x_m + B_{32}y_m + B_{33}z_m \\
 &= \left(B_{31} \frac{s_X}{c_X} + B_{32} \frac{s_Y}{c_Y} - B_{33} \right) t + (B_{31}m_X + B_{32}m_Y + B_{33}d)
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

이 되며, 카메라의 위치 (x_0, y_0, z_0) 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 x_0 &= B_{11}m_X + B_{12}m_Y + B_{13}d \\
 y_0 &= B_{21}m_X + B_{22}m_Y + B_{23}d \\
 z_0 &= B_{31}m_X + B_{32}m_Y + B_{33}d
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

여기서, $d = \sqrt{dis^2 - m_X^2 - m_Y^2}$ 이고, $s_X = X - \Delta X$, $s_Y = Y - \Delta Y$ 를 나타낸다. 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, Fig. 2.5 에서 보이는 바와 같이 P점에 대해 각각의 카메라는

$$P(x, y, z) = P(a_1t + x_0, a_2t + y_0, a_3t + z_0)
 \tag{2.9}$$

와 같은 직선의 방정식을 가진다.

두 개 직선의 방정식을 다음과 같이 표시하면

$$A(x, y, z) = A(a_{11}t + b_{11}, a_{12}t + b_{12}, a_{13}t + b_{13})
 \tag{2.10}$$

$$B(x, y, z) = B(a_{21}s + b_{21}, a_{22}s + b_{22}, a_{23}s + b_{23})
 \tag{2.11}$$

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

$$t = \frac{\gamma - \alpha\beta}{1 - \alpha^2}, \quad s = \frac{\gamma\alpha - \beta}{1 - \alpha^2} \quad (2.12)$$

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

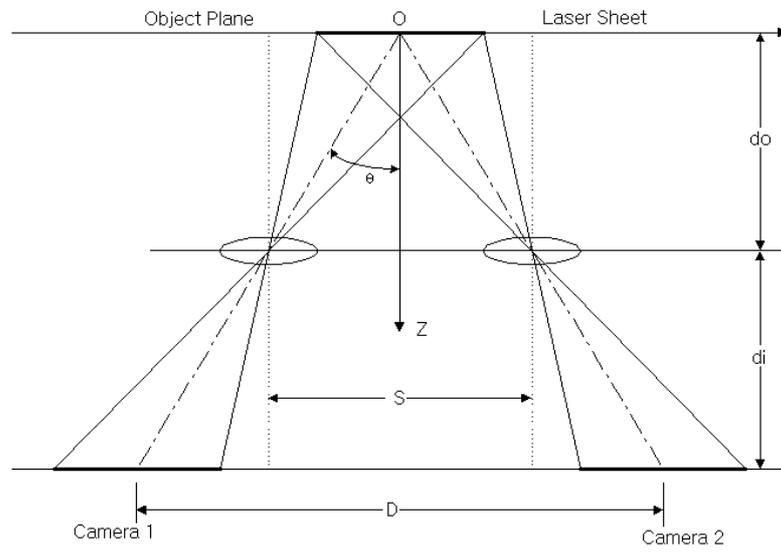
$$\beta = a_{11}(b_{11} - b_{21}) + a_{12}(b_{12} - b_{22}) + a_{13}(b_{13} - b_{23})$$

$$\gamma = a_{21}(b_{11} - b_{21}) + a_{22}(b_{12} - b_{22}) + a_{23}(b_{13} - b_{23}) \quad \text{이다.}$$

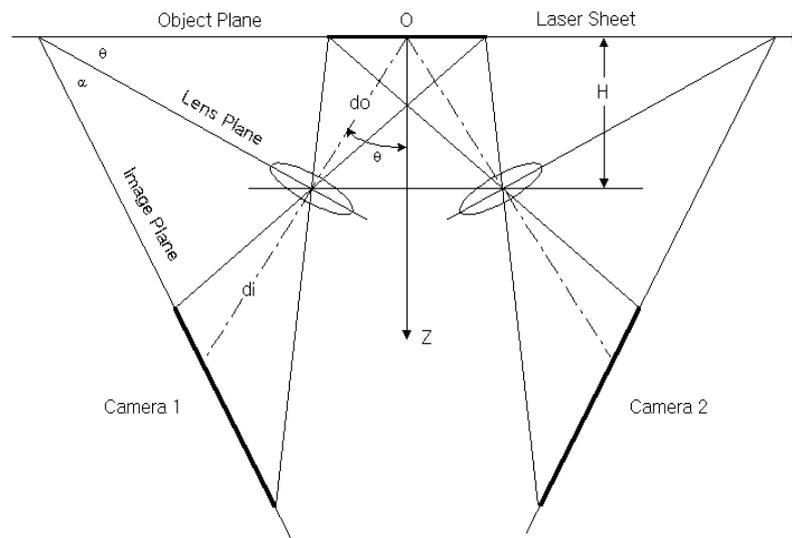
t, s 가 구해지면 $A(x, y, z), B(x, y, z)$ 가 결정되어 진다. 여기서, 실제 $A(x, y, z)$ 값은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} \right\} \quad (2.13)$$

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



(a) Translation system



(b) Angular displacement system

Fig. 2.1 Two basic configurations for SPIV/PTV systems.

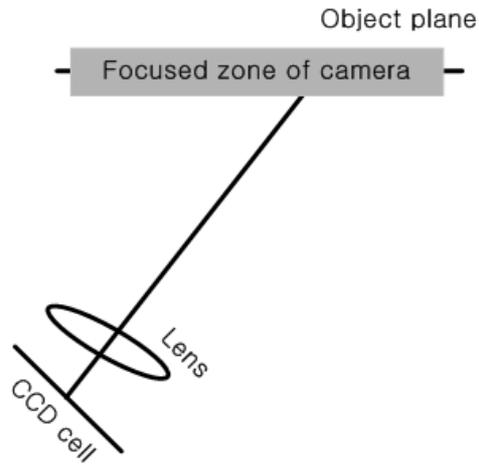


Fig. 2.2 Scheimpflug's lens array.

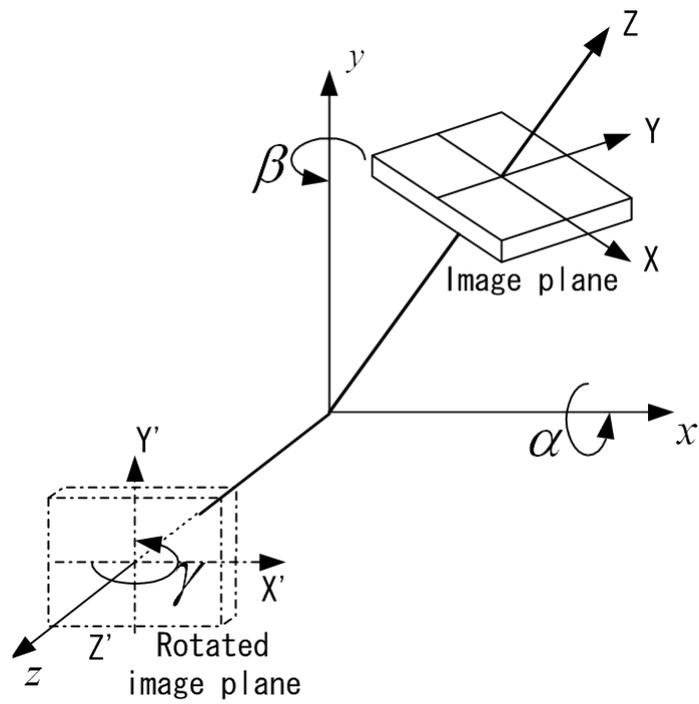
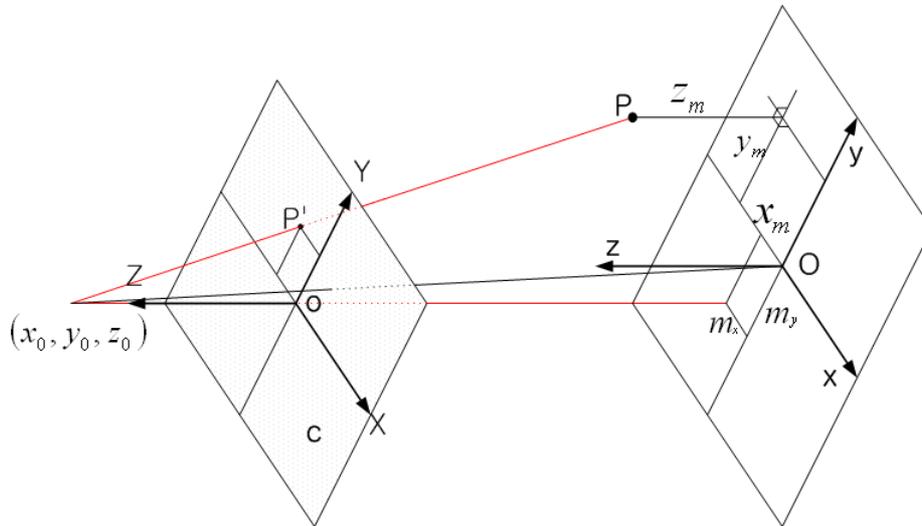


Fig. 2.3 Image plane rotation process.



X, Y, Z : 절대 좌표계

x, y, z : 사진 좌표계

m_x, m_y : 중심축의 이동량

(X_m, Y_m, Z_m) : X, Y, Z축에 의한 회전된 입자좌표

(X_0, Y_0, Z_0) : 카메라 중심의 위치(절대 좌표계)

c : 투영면(초점거리)

P : 공간상의 입자

P' : 카메라상의 입자

Fig. 2.4 Relations between absolute and camera's coordinate system.

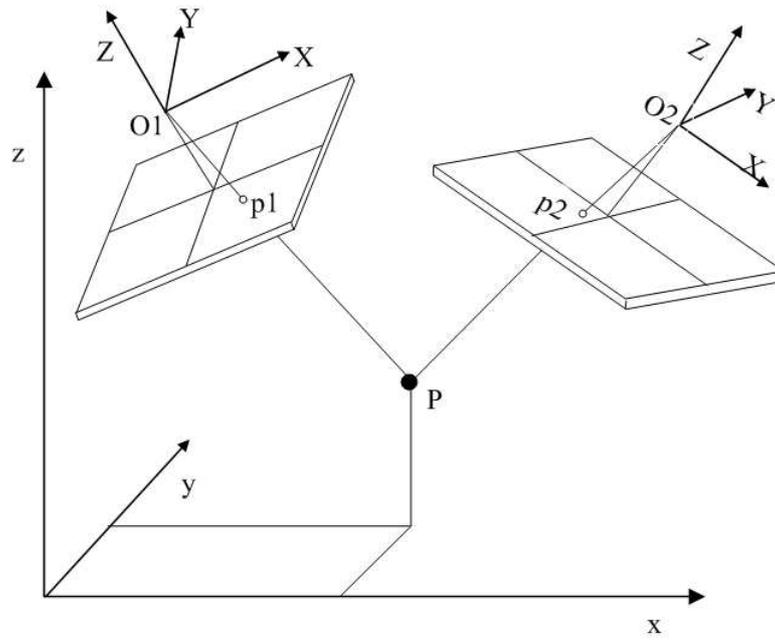


Fig. 2.5 Definition of 3-D particle position.

2.2 스테레오 PIV의 원리

SPIV의 경우는 Fig. 2.6에서처럼 격자상의 임의의 한 점을 시점으로 고정시킨 후 2D PIV기법을 사용하여 다음 시각에서 종점을 구하게 되며, 2대의 카메라에서의 2차원 시점과 종점을 이용하여 3차원 속도성분을 구하는 방식이다.

2차원 속도 벡터는 계조치 상호상관법에 의해 계산되어지며, 두 프레임 간의 추적 입자들의 농도분포에 대한 상관계수의 값이 최대치일 때의 점이 이동벡터의 종점이 된다. 3차원 속도 벡터를 구하기 위해서는 먼저, 구해진 2차원 속도 벡터의 시점과 종점을 각각의 카메라에서 공선의 조건(직선방정식)을 이용하여 최종적으로 3차원 속도 벡터를 구한다.

Stereoscopic PIV

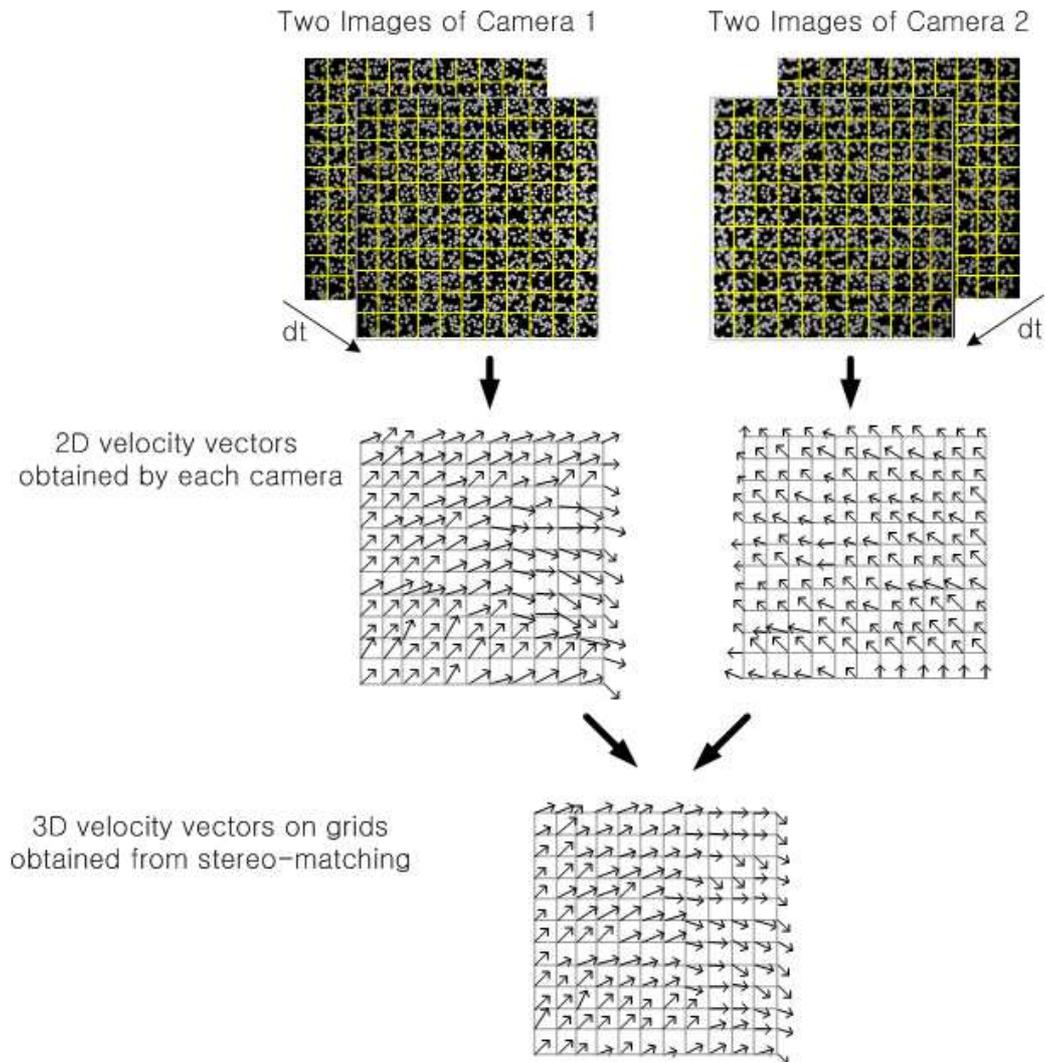


Fig. 2.6 Schema of SPIV.

2.3 스테레오 PTV의 원리

Fig. 2.7은 SPTV법의 측정원리를 나타내고 있다. SPTV의 경우는 2차원 PTV(particle tracking velocimetry)에서와 같이 2 시각 입자영상에 대하여 동일한 점(pair)을 찾아냄으로써 2차원 속도벡터를 얻어내는 방식과 같은 원리이지만 속도벡터의 2차원 단면상에서의 사영성분 즉 2차원 속도벡터성분 (u, v)만을 측정하는 것이 아니라 입의 두께로 가시화된 단면 내에서의 입자들의 3차원 운동, 즉 w 성분을 측정하는 점이 2차원 측정법과 다른 점이며, SPIV와 다른 점은 in-plane상에서의 격자점상에서 3차원 속도벡터가 아니라 in-plane내에서의 입자의 3차원적 거동까지도 측정할 수 있는 측정법이다.

즉 입자중심의 이동을 찾아내는 방식으로 2차원 속도벡터를 먼저 구한 다음, 이들 2차원 속도벡터를 3차원으로 재구성하는 방식으로 3차원 속도벡터를 얻어낸다. 하지만 2차원 속도벡터를 얻은 다음 3차원속도벡터로의 재구성을 하는 방식은 2 시각과 2 카메라 사이에서의 동일한 입자를 찾아내는 과정에서 사라지는 입자들이 많은 관계로 최종적으로 얻어지는 속도벡터의 밀도가 매우 낮다. 도 등⁽⁹⁾은 이를 개선하기 위하여 시간과 공간상에서 동시에 입자들의 후보군을 하나의 판별집단으로 보고, 이들 집단으로부터 동일입자를 판별해내는 방식의 유전알고리즘기반의 3D-PTV법을 개발하였다.

본 연구에서는 이들 방법 기반의 SPTV법⁽⁸⁾으로 충돌분류에 대한 LES계산결과⁽¹⁰⁾를 이용하여 표준영상을 제작한 다음 이 방법에 대한 성능을 검증하였다.

SPTV는 SPIV와 달리 단면 내에서 구해진 속도벡터 3차원 성분은 격자점상의 것이 아니므로 단면 내에 임의의 격자점상으로 보간한 후 정량적인 물리량을 획득하게 된다.

한편, 3차원 PTV(3D PTV : three dimensional particle tracking velocimetry)⁽¹¹⁾⁽¹²⁾의 경우는 볼륨형태의 광원을 사용하여 3차원 공간에 대한 3차원 속도성분을 구하지만 측정되는 속도벡터의 공간밀도가 많지 않은 관계로 정밀한 유동구조해석에는 다소 무리가 따르지만, PTV측정법의 원리상 유동장의 난동성분(fluctuation component)을 잘 반영할 수 있다는 점으로부터 3D PTV를 개선한 형태인 SPTV법이 대체 적용되고 있다. SPTV법은 Fig.2.8에서와 같이 얇은 두께의 단면광원(대개는 3~7mm 정도) 내에서의 입자들의 3차원 속도성분을 측정할 수 있는 장점이 있다.

이하의 유전알고리즘기반의 SPTV법의 계산과정을 기술한다. 3차원 속도벡터는 시점과 종점으로 구성되어 있으며, 시점과 종점 모두 카메라 두 대로부터 동일 입자로 인식되는 공간좌표이므로 카메라의 입장에서 2개의 시점과 2개의 종점을 가지게 된다. Table 2.1은 유전알고리즘기반의 SPTV 계산을 위한 카메라 입자영상의 시점과 종점간의 정의를 나타낸다.

3D Error는 공선의 조건식에서 두 직선간의 최단거리를 나타낸다. 즉 하나의 입자에 대한 3차원 위치 결정시 오차는 식 (2.14)와 같고, 3차원 속도벡터에 대한 위치 결정시 오차는 식 (2.15)와 같이 표현된다.

Table 2.1 Definition of chromosome with respect to camera.

Camera 1		Camera 2		Fitness Function	
Start Point	End Point	Start Point	End Point	3D Error	Continuity

$$D = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2} \quad (2.14)$$

$$3DE = [D_s + D_e] \quad (2.15)$$

단, D_s : 3차원 속도벡터의 시점의 오차

D_e : 3차원 속도벡터의 종점의 오차

각 카메라에서 획득한 입자의 시점과 종점은 전체 유동장의 최대 이동거리를 초과하지 못하므로, 시점을 기준으로 하여 카메라에 대한 2차원 벡터가 될 수 있는 후보들을 결정한 다음 초기에는 임의적으로 여러 개의 후보 중하나를 벡터로 선택하는 과정을 카메라 두 대에서 획득한 영상에 대해 실행한 후, 임의적으로 결정된 두 개의 2차원 벡터를 선택하여 3차원 벡터를 만든다. 이렇게 결정된 3차원 벡터는 시점과 종점에 대한 공간상의 3DE값을 가지게 되며, 이렇게 생성된 집단을 이용하여 여러 가지 유전연산자를 반복 적용함으로써 원하는 결과에 최적화시킨다.

유전알고리즘에서 목적함수는 해의 방향을 결정하는 것으로 가장 중요한 요소이며, 이를 위해 국소영역 안에서 유체는 연속의 식을 만족해야 한다는

조건으로부터 PIV에서의 오류벡터의 검출을 위해 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned}
 \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f &= \frac{-3u(i, j) + 4u(i+1, j) - u(i+2, j)}{2\Delta x} \\
 \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_f &= \frac{-3u(i, j) + 4u(i, j+1) - u(i, j+2)}{2\Delta y} \\
 \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b &= \frac{u(i-2, j) - 4u(i-1, j) + 3u(i, j)}{2\Delta x} \\
 \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_b &= \frac{u(i, j-2) - 4u(i, j-1) + 3u(i, j)}{2\Delta y}
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

PIV에서 구해진 속도로부터 식 (2.16)을 이용하여 하나의 속도벡터를 기준으로 한 주어진 4영역의 속도 발산치는 식 (2.17)와 같으며, 이러한 4개의 정보를 이용하여 오류벡터를 판정하게 된다.

$$\begin{aligned}
 D_1 &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_f \right| & D_2 &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right| \\
 D_3 &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right| & D_4 &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_f \right|
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

대칭인 2조의 영역속도 발산치 (D_1, D_3) 혹은 (D_2, D_4)는 임의의 역치 D_M 을 초과하게 되면 오류벡터라고 판단된다. 그러나 판정조건인 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 위

해 4영역 중에서 속도의 변화량이 최소로 되는 영역만을 고려하고 이 영역이 흐름의 연속성을 만족하는지의 여부를 판정하는 식 (2.18)와 같은 방법을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} &= \text{Min} \left\{ \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_f, \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_b \right\} \\ \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} &= \text{Min} \left\{ \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_f, \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right\} \\ \therefore D(i, j) &= \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} \right| \end{aligned} \quad (2.18)$$

즉 $D(i, j)$ 가 역치값 D_M 을 넘는 경우 오류벡터라고 판정하게 되며, 식 (2.18)를 식 (2.19)으로 수정하여 3차원에 적용하였다.

$$D(i, j, k) = \left| \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} + \left[\frac{\partial w}{\partial z} \right]_{\min} \right| \quad (2.19)$$

그러나, 유전알고리즘을 사용한 PTV 계측에서 초기에 모든 속도값이 임의적으로 가정되어지며, 일정한 격자를 갖지 않기 때문에 속도변화치가 상대적으로 컸으므로, 연속의 식을 적용하기 위해 판단하고자 하는 벡터의 시점과 종점이 가까운 주위의 10개의 벡터를 선택하였다. 이는 경험적으로 선택영역이 좁으면 알고리즘의 수렴에 충분한 영향을 주지 못하고, 선택영역이 넓으면 주위의 에러벡터 영향이 커짐을 확인하였기 때문이다.

PTV에서는 벡터와 벡터사이에 어떤 일정한 간격이 존재하지 않으므로

차분식은 1차식으로 표현하였으며, 최종적으로 적합도는 다음과 같이 정의하였다.

$$C = \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{\min} + \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{\min} + \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{\min} \quad (2.20)$$

의미상 주위 벡터와 속도 변화량이 제일 작은 즉 벡터가 연속의 식을 만족하는 정도에 따라 주위 벡터와 유사한 분포를 가지면 C는 작은 값을 가지며 상대적으로 그렇지 못한 개체들의 C는 높은 값을 가지게 된다.

아울러 3DE와 C가 낮은 개체들이 높은 적합도를 가지게 되며, 적합도는 유전연산자들에 의해 사용되어지고, 적합도를 둘로 나눈 것은 이러한 적합도가 서로 다른 역할을 하기 때문이다.

본 연구에서는 유전연산자로 격리(isolation), 이주(migration), 교배(crossover) 및 재생산(reproduction)을 사용하였다.

하나의 염색체는 각 이미지에 대한 1개의 입자 총 4개의 입자가 임의적으로 선택되어지고 이러한 선택에 대한 3DE 값을 가지게 된다. 이러한 3DE 값을 기준으로 유전 연산자중 격리(isolation)를 적용하게 된다. 격리는 열성인 개체를 집단에서 배제하는 연산자로서 주어진 최대 오차를 넘는 모든 개체를 집단으로부터 배제하게 된다.

격리 연산 후 다시 살아남은 개체들로부터 3차원 속도에 대한 연속성을 적용한 C 적합도를 계산하게 된다. 이러한 C를 기준으로 열성으로 판단된 벡터들에 대해서는 다시 재생산(reproduction)을 하게 된다. 재생산은 각 카메라에 대한 시점을 고정시켜두고 종점에 대한 임의적 선택을 수행한다.

위의 과정이 끝나면 개체간의 교배(crossover) 과정을 거친다. 교배는 카메라에 대한 2차원 벡터를 고정한 상태에서 3DE를 기준으로 하여 객체간의 대응되는 카메라간의 데이터를 바꿈으로서 이루어진다. 교배된 개체의 3DE가 한계값을 넘을 경우 이 입자 또한 배제하게 된다.

위의 과정동안 배제된 데이터들은 다시 초기 개체생성과 같은 과정을 수행하여 선택된 집단으로 되돌려 보내는데 이러한 과정이 이주(migration) 연산이다. Fig. 2.9은 3차원 PTV에 적용되어진 유전알고리즘의 개념도를 나타낸 것으로 그 내용은 앞에서 설명하였다. Fig. 2.10는 유전알고리즘의 순서도를 나타낸 것으로 크게 세대를 발생시킨 후 격리에 의해 그룹을 나누며, 재생산과 교배에 의해서 시간과 공간에 대해서 동시에 3차원 입자쌍을 매칭 시킨다. 충분한 수렴조건을 만족시키지 못하면 새로운 세대를 이주시켜서 동일한 과정을 거쳐 수렴할 때까지 반복 연산시킨다.

Stereoscopic PTV

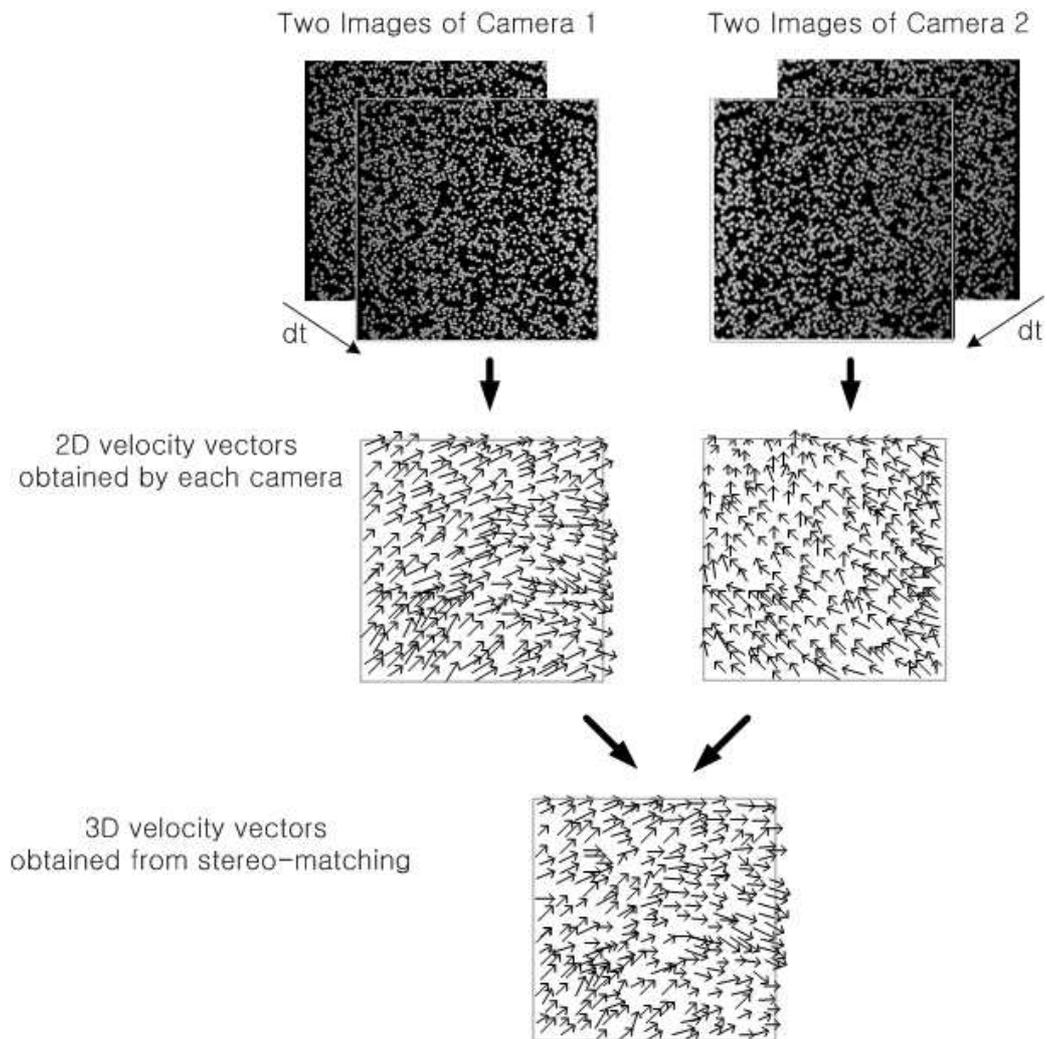


Fig. 2.7 Schema of SPTV.

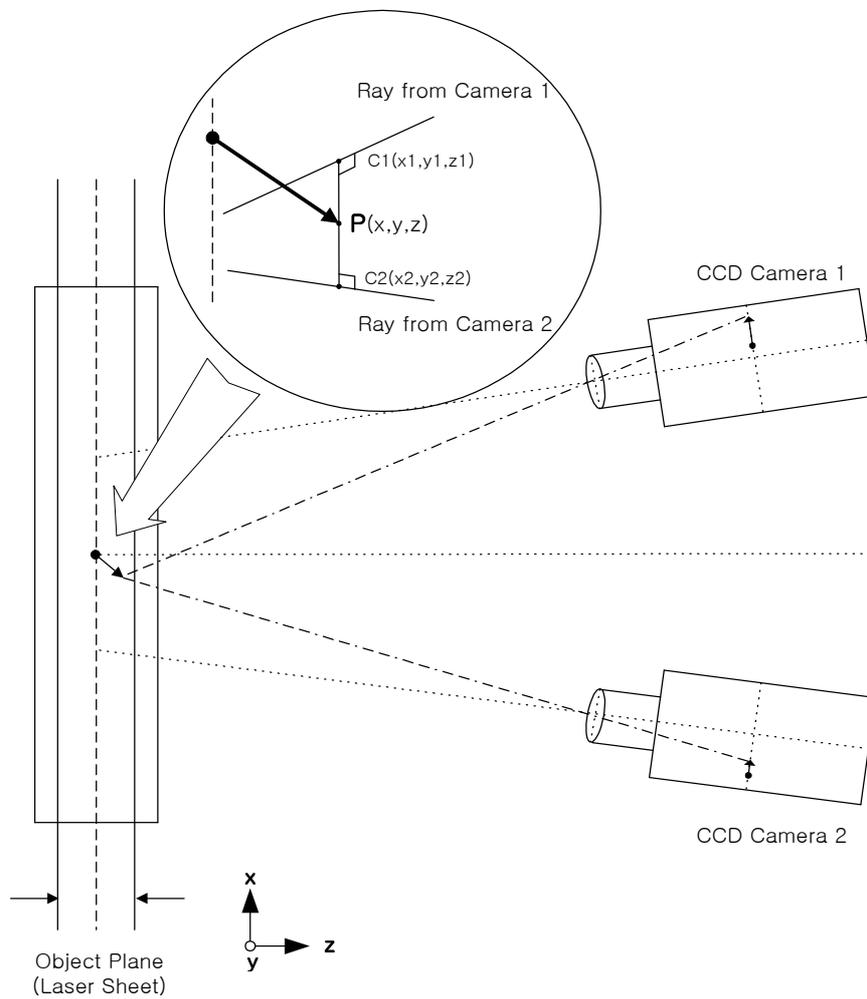


Fig. 2.8 Definition of 3-D particle position.

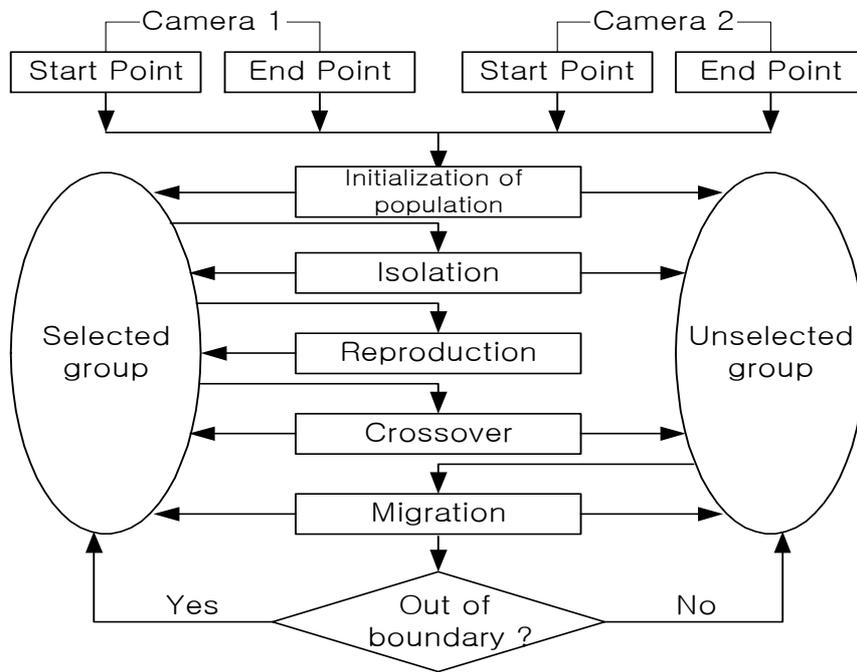


Fig. 2.9 Concept of SPTV using GA Algorithm.

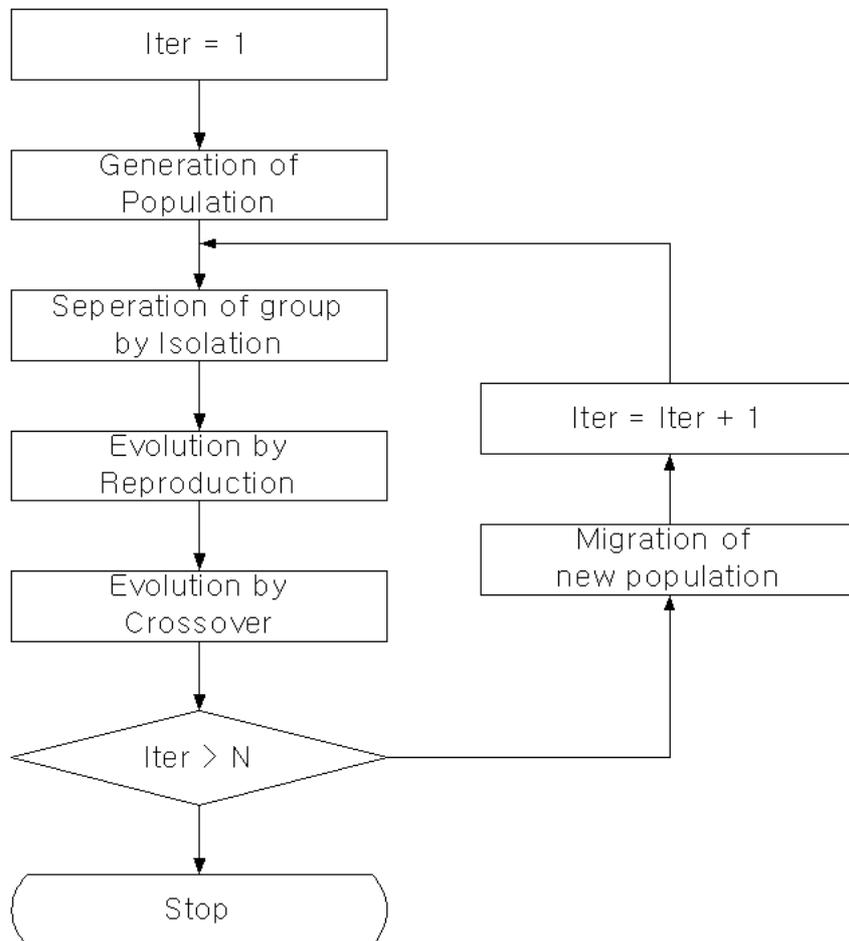


Fig. 2.10 Flowchart of 3D PTV using GA Algorithm.

제 3 장 스테레오 PIV/PTV 표준영상 및 성능검정

3.1 성능검정의 원리

Fig. 3.1은 스테레오 표준가상영상을 작성하기 위한 절차를 나타낸다. 먼저 충돌분류에 대한 LES(large eddy simulation) 계산결과를 표준데이터로서 제공(일본가시화정보학회)하고 있는 데이터를 다운 받는다. Fig. 3.2는 다운 받은 3차원 속도벡터데이터를 재현한 결과를 나타낸다. 이들 데이터는 격자상의 것이므로 실험영상으로서 사용될 수 없다. 따라서 이들 데이터의 중간단면의 데이터를 사용하여 난수발생기를 통한 랜덤 3차원 속도벡터를 발생시킨다. Fig. 3.3은 중앙단면상의 Y방향으로의 3격자, X 및 Z방향으로의 각각 9격자점상에서의 3차원 속도벡터를 나타낸다. 랜덤(random) 3차원 속도벡터는 이들을 이용하여 랜덤 공간상에 보간을 통하여 발생된다. Fig. 3.4는 이와 같이 하여 만들어진 랜덤 3차원 속도벡터의 일례를 나타낸다.

다음으로 이들 랜덤 속도벡터들의 시점과 종점을 각 카메라의 파라미터를 이용하여 각 카메라 사진좌표계로의 2차원 영상좌표로 변환하여 표준가상영상을 제작하였다. 제작과정은 Fig. 3.5에 나타나 있다.

제작된 표준가상영상을 이용하여 재차 동일한 카메라 파라미터로 전술의 SPIV 및 SPTV계산법에 의거하여 3차원속도벡터 3성분을 계산하였다. SPIV에 의하여 구해진 속도벡터는 격자상의 벡터이므로 그대로 정량적 평가에 활용될 수 있지만 SPTV에 의하여 구해진 속도벡터는 랜덤 공간상의 벡터이므로 이를 재차 격자상으로 데이터를 보간한 후 정량적 평가에 활용

하였다.

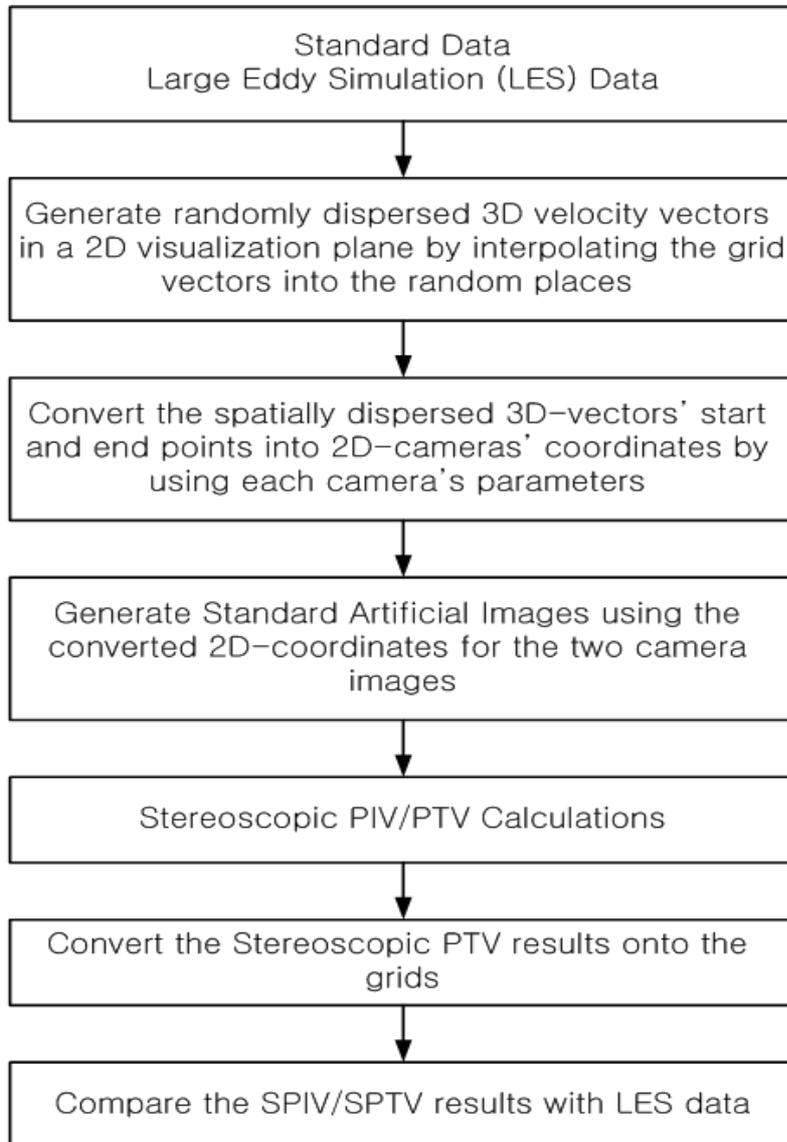


Fig. 3.1 Procedure of the evaluation process using Stereoscopic Standard Images.

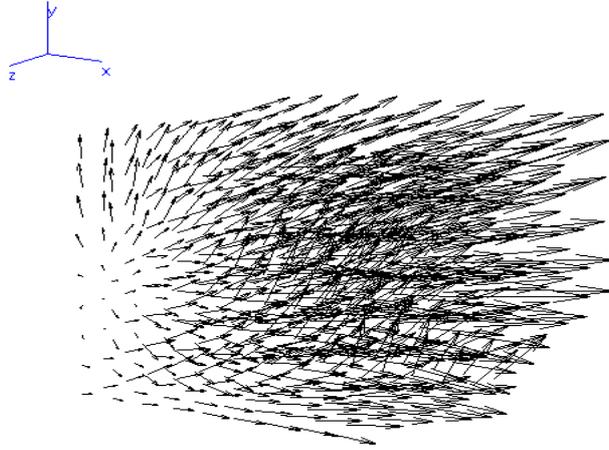


Fig. 3.2 Standard data of an impinged jet (VSJ: Visualization Society of Japan).

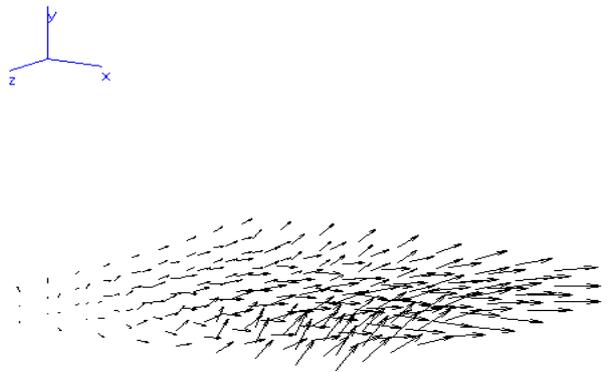


Fig. 3.3 Jet-flow 3-D velocity vector distribution(Okamoto.1995).



Fig. 3.4 Randomly selected 3D velocity vector distribution in the interested plane.

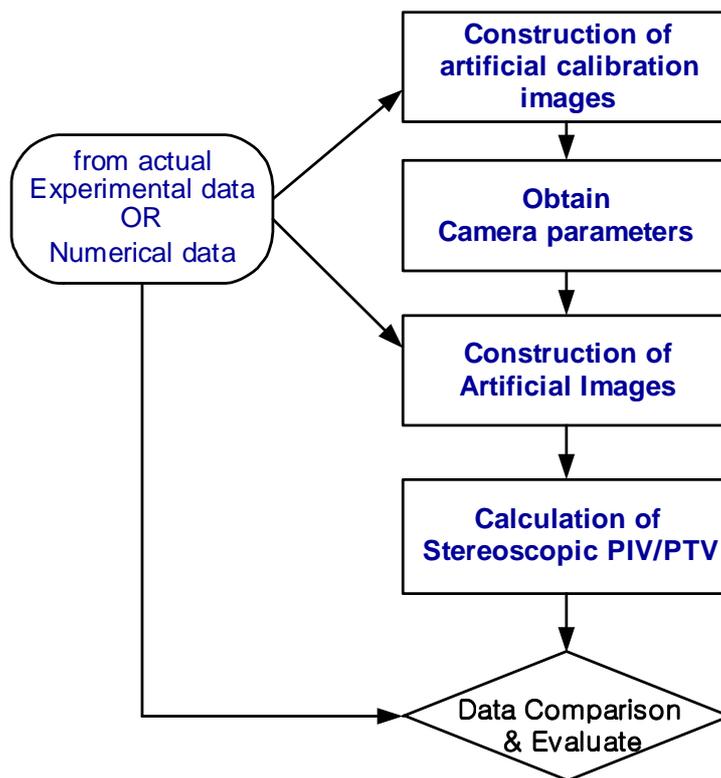


Fig. 3.5 Procedure of the construction process of Stereoscopic Standard Images.

3.2 표준영상 제작원리

PIV계측 알고리즘의 정량적 평가를 위하여 표준데이터를 이용한 가상 영상을 작성 후 이를 2차원 PIV 및 3차원 PIV 계측에 이용한다. Raffel등⁽¹³⁾은 DPIV(Digital PIV)기법의 평가를 위한 PIV 가상영상 (32 x 32 pixel의 상관 영역에서 11개 정도의 입자가 포함되어 있는 경우에 8 pixel의 변위에 대한 측정오차가 0.8 pixel)을 제시했으며, Okamoto 등⁽¹⁴⁾은 제트 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. 본 연구에서는 다음 장에서 설명하게 될 SPIV 및 SPTV 계측알고리즘에 대한 표준시험에 있어서 3차원 계측결과의 정확성에 영향을 주는 모든 요소를 고려하였다.

Fig. 3.6은 가상의 유동장과 가상으로 배치된 카메라와 가상유동장간의 관계를 보이고 있다. 먼저, 기지의 카메라의 배치정보를 이용하여 교정점들에 대한 각 카메라에 있어서의 3차원 가상영상을 작성하였다. 스테레오 측정을 위한 영상은 이들 가상으로 배치된 두 대의 카메라로부터 얻어진다. 카메라의 방향과 위치, 렌즈의 확대 및 수조벽에 의한 영향을 고려한 카메라의 교정작업⁽³⁾을 실시함으로써 카메라의 표정요소를 구하였다. 다음으로 LES (Large Eddy Simulation) 데이터공간상에 가상의 측정영역을 100mm x 100mm x 3mm로 설정한다.

이 측정영역 내에 무작위로 발생된 위치를 속도벡터의 시점으로 하였으며 LES 데이터 격자상에서 속도벡터 정보로부터 거리역수보간⁽⁷⁾으로 구해

진 점을 속도벡터의 종점으로 정의하였다. 이 때 데이터의 신뢰성 확보를 위하여 일본가시화정보학회에서 제시하고 있는 평면 충돌제트 유동에 대한LES 계산결과를 이용하였다.

Fig. 3.6과 같이 직경이 2cm인 노즐로부터 분출되는 레이놀즈수는 6000 이고 노즐로부터 하부에 100mm x 100mm x 100mm 의 체적영역에의 LES 계산결과를 표준데이터로 삼았다.

벡터의 시점과 종점으로 결정된 점에 있어서 아래의 식 (3.1)을 이용하여 입자영상을 발생시켰다⁽¹⁴⁾. 여기서, $I(X, Y)$ 는 입자의 위치(X, Y)에서의 농도치를 말하며 (X_p, Y_p) 는 공간상의 입자위치인 (x_p, y_p, z_p) 가 영상으로 투영되었을 때의 사진좌표이다. d_p 는 입자의 지름이고 I_0 는 입자의 위치에 따른 조명의 영향을 고려하기 위하여 원통형 광원이 조사된다고 가정한 식 (3.2)와 같이 된다.

$$I(X, Y) = I_0 \text{Exp}\left(\frac{(X - X_p)^2 + (Y - Y_p)^2}{-(d_p/2)^2}\right) \quad (3.1)$$

$$I_0 = 240 \text{Exp}\left(-\frac{z_p^2 + x_p^2}{\sigma_l^2}\right) \quad (3.2)$$

이때, σ_l 은 원통형 가상광원의 반경으로서 본 연구에서는 400mm로 하였다. 생성된 이미지의 해상도는 512×512 pixel이며, 각 pixel은 256(gray level, 8bit)이다.

Fig. 3.7은 기술한 방법으로 생성한 두 대의 카메라에 대한 스테레오 가

상영상을 나타낸다. 각 영상들의 시간 간격은 15msec로 정하였으며 난류 통계량을 얻기 위하여 총 1000장의 시간 연속적인 데이터를 사용하였다. 한편, 도 등⁽⁶⁾⁽⁷⁾에 의하면 SPIV를 위해서는 카메라간의 각도가 측정면을 향하여 40° 이고, 입자의 밀도가 한 화면 당 평균 2000개 이상이면서, 광원의 두께가 3mm일 때 최상의 조건을 유지하므로 본 연구에서도 이를 적용하였다.

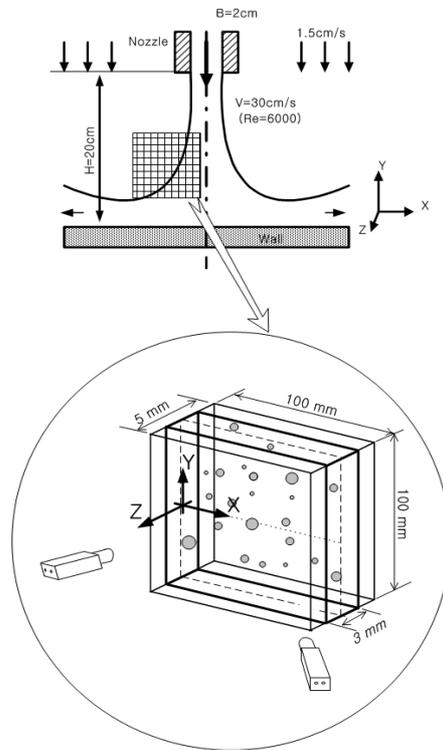
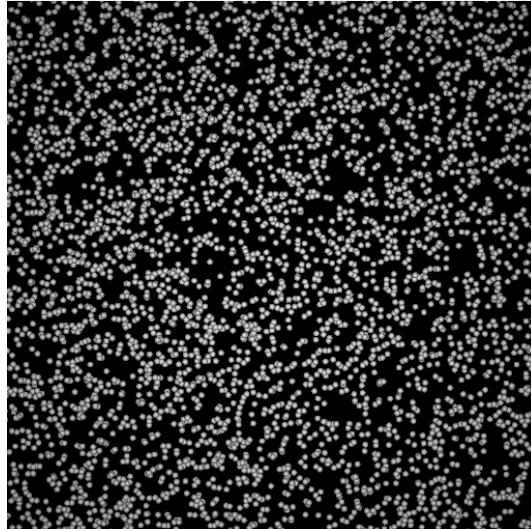
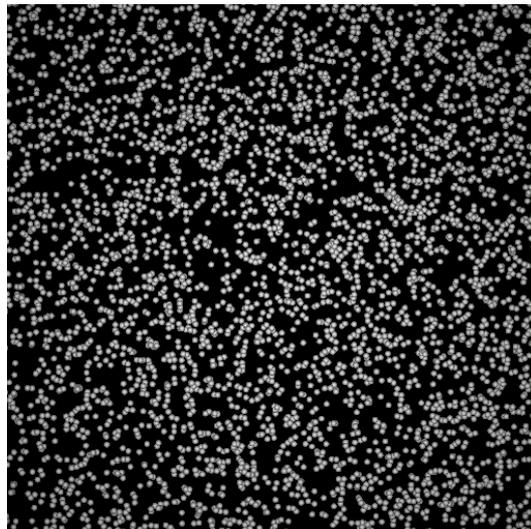


Fig. 3.6 Stereoscopic arrangements of camera and virtual data sets.

(LES on the website of 'www.vsi.or.jp/piv/')



Camera # 1



Camera # 2

Fig. 3.7 Generated Stereoscopic images.5000.

(Camera viewing angle = 20°)

3.3 카메라 파라미터 획득 실험 및 스테레오 PIV/PTV 측정오차

본 절에서는 3D PTV와 SPIV/SPTV에서의 카메라 교정에 따른 오차를 평가하고자 한다. PIV와 PTV의 경우 실험장비에 있어서 대동소이하므로, 장비에 대한 평가는 거의 차이가 없다고 해도 무방하다. 다만 3D PTV와 SPIV/SPTV는 기존의 PIV와는 달리 3차원 속도벡터를 구하게 되므로 2.1절에서 구술되어진 카메라의 표정요소(標定要素)가 필요하다. 이를 구하기 위해서는 Fig. 3.8과 같은 절대좌표를 알고 있는 교정기가 필요하며, 그림과 같은 카메라 배치가 이루어져야 한다. 교정기의 좌표값을 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 및 SPIV/SPTV에서의 계측오차의 불확실성과 직접적인 연관이 있다. 즉 이들 기법들은 비측정용 카메라를 이용하여 3차원 공간 혹은 단면상의 수직인 속도를 검출하기 위해서는 카메라에게 공간을 인식시키는 과정이 필요하며 이 과정이 바로 교정기를 이용한 교정 작업이다. 따라서 교정 작업이 정확하지 못하다면 카메라 자체의 r 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/SPTV의 경우는 공간의 제약이 있으므로 평판형태의 교정기를 z 축으로 일정 간격씩 이동하여 교정 작업을 수행한다.

SPIV/SPTV의 경우 3D PTV와는 달리 계측영역의 제약에 따라 핀 형태

의 교정기를 사용할 수 없으므로, 평판형태의 교정기를 만들어서 z 축 방향으로 일정간격으로 이동시켜 사용한다. 3D PTV의 경우 교정 작업이 공간 교정기에 의한 간단하게 이루어지나, 스테레오의 경우는 해당 단면에 대한 카메라의 표정요소를 각각 구한 후, 최종적으로 일정간격으로 움직여진 공간에 대한 카메라 표정요소를 구하게 된다. Fig. 3.9는 x 와 y 크기를 갖는 평판에 대해서 dz 만큼 z 방향으로 이동하는 교정기의 모습을 나타낸 것으로, 단면에 대한 정보를 이용하여 공간을 인식시키는 작업이다.

Fig. 3.10과 Table 3.1은 교정기에 따른 카메라의 교정 오차를 살펴보기 위하여 사용된 평판 교정기의 사진과 사양을 나타낸 것으로, 각각의 교정기에 대해 z 축 방향으로 3mm씩 총 15회 이동시켜 교정 작업을 수행하였으며, 교정 작업의 변수로써 두 카메라사이의 각을 30도와 40도, 교정영역의 매질을 물, 공기로 하였으며, 여기에 Fig. 3.11처럼 거울을 사용하여 각각의 매질 속에서의 거울 반사의 영향도 함께 고려하였다.

Fig. 3.12부터 Fig. 3.15까지는 상기 제시된 교정기중 1번에 해당하는 것으로 두 카메라 각이 30일 때, 매질별, 거울반사 유무에 따른 $z=0$ 축에서의 카메라 1과 2에서의 영상을 나타낸 것이다. 공기 중에서의 교정기의 영상이 가장 좋으며, 물속에서 거울의 반사를 통한 교정기의 영상이 가장 좋지 않음을 확인할 수 있으며, 이는 Table 3.2를 통해서 확인할 수 있다. 이 결과 두 카메라 사이각의 변화에 대해서는 30도와 40도의 두 각도로는 각에 대한 특징을 확연하게 구분하기 어려웠으나, 동일한 조건에 대해서는 교정기 2(x,y ; 간격 4mm)일 때 가장 오차가 적었으며, 동일매질에 대해서는 거울에 반사되지 않는 경우가 오차가 적었다. 또한 절대적이지는 않으나, 매질이

물보다는 공기일 때 보정오차가 다소 작음을 확인할 수 있었으며, x, y 평면 좌표의 오차보다 z축 오차가 상대적으로 약 2배정도 크게 됨을 확인할 수 있는데, 이는 Stereo 방식의 카메라 배치에 따른 두 카메라 사이의 각도에 기인한다. 즉, 광원면에 수직으로 나오는 w속도성분은 특정을 이루고 있는 카메라의 센서면에 투영되어서 2차원 사진 좌표계로 나타나게 되는데, 이때 투영에 따른 오차가 발생하기 때문에 Z축의 오차가 x, y 좌표보다 오차가 크게 된다.

따라서 SPIV/SPTV를 위한 최적의 교정기의 간격이 존재함을 확인하였으며, 본 실험에서는 4mm의 교정기가 최적임을 확인하였다. 또한 실험의 필요성에 따라서 매질을 물이나 공기 또는 거울의 반사를 이용할 수 있게 되는데 이들 결과 역시 공학적으로 허용할 수 있는 오차 범위에 있으므로 이들을 사용하는데 큰 문제가 없다고 사료된다.

한편, 가상 카메라에 의해 획득되어진 교정기 기준점들의 영상상의 도심을 구하기 위하여 두 가지 방법을 적용하였다. 하나는 기준점의 가상영상입자들에 대하여 식 (3.3)으로 표시되는 면적 모멘트법(Moment method of the area : MM)으로 입자의 도심을 구하였고 또 다른 하나는 기준점들의 3차원 절대좌표를 가상카메라 상으로 투영하였을 때의 얻어지는 2차원 사진좌표 그 자체를 도심으로 사용하였다. 후자는 교정기에 대한 가상카메라 영상을 작성과정을 거치지 않고 카메라를 교정한다는 의미를 지니므로 가상포인트(Virtual point : VP)법으로 명하였다.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3.3)$$

x_i, y_i : 입자를 구성하는 각 픽셀의 좌표

A_i : 각 픽셀의 면적

이들 두 방법에 의한 기준점의 사진좌표로 가상 카메라에 대한 표정요소를 재차 계산한 결과가 Table 3.3에 나타나있다. 두 방법 모두 가상 카메라에 대한 표정요소가 거의 일치함을 확인할 수 있었으며, 다만 굴절율에 해당하는 k_1 과 k_2 값에 있어서 가상 포인트 방법이 상대적으로 작음을 확인할 수 있었다. 이는 가상 포인트 방법의 경우 교정기의 절대좌표계를 이용하여 가상의 카메라 CCD센서면에 2차원으로 투영한 점을 바로 도심으로 사용하기 때문에 면적모멘트법을 이용하여 영상처리를 통해 구해진 도심에 비해 상대적으로 절대위치에서 벗어나는 정도가 작으므로 굴절율의 영향을 적게 받는 것으로 사료된다. Table 3.4는 상기 두 방법으로 구해진 카메라의 표정요소를 이용하여 구해진 기준점들의 3차원 좌표와 이들 점들의 원래 절대좌표 값과의 차이에 대한 통계처리결과를 나타낸다. z 위치오차가 상대적으로 큰 것은 2대의 가상 카메라가 그림 3에 나타나 있는 바와 같이 두 카메라간의 각이 작은데 따른 (y 축에 각각 15°) 카메라 센서면에 투영되는 투영오차에 의한 것임을 알 수 있다. 절대좌표계상으로 복원된 기준점들의 3차원 위치와 원래의 절대좌표간의 차(差)에 해당되는 오차는 면적 모멘트법에 의한 것이 가상 포인트법에 의한 것보다 약간 크게 나타남을 알 수 있는데 이는 타당한 결과로 볼 수 있다.

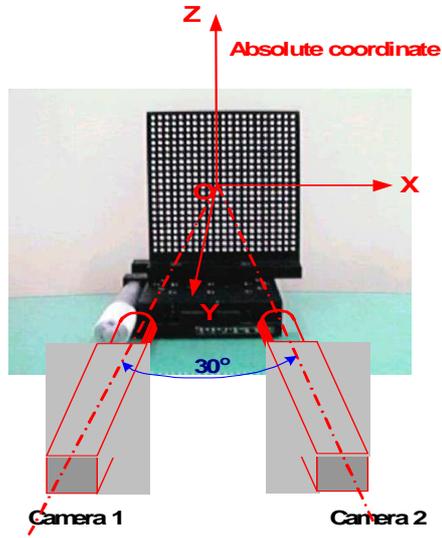


Fig. 3.8 Relation calibrator and camera.

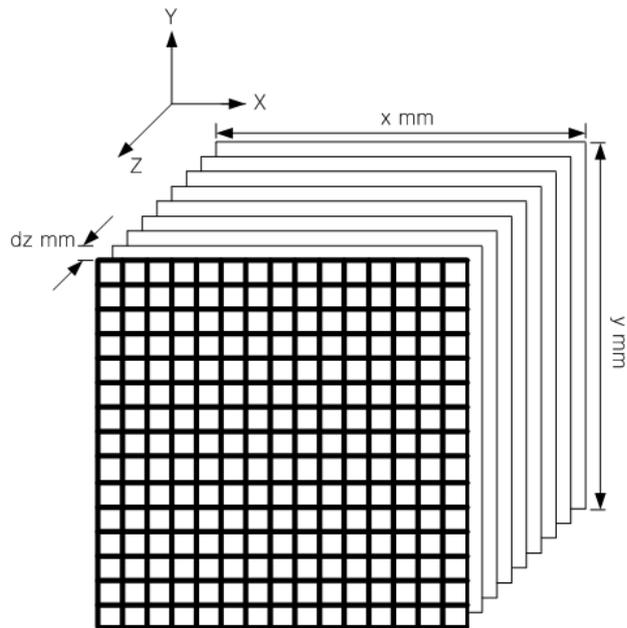


Fig. 3.9 Image for camera calibration.

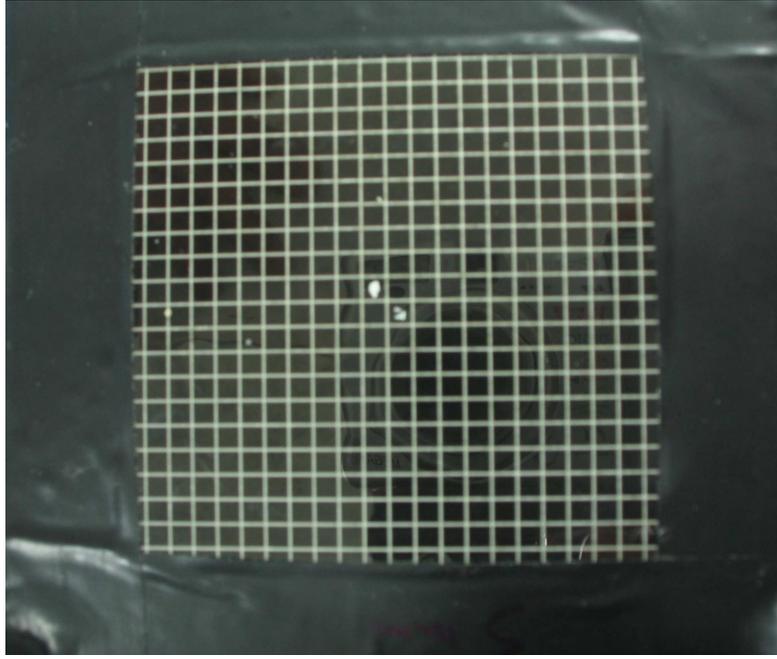


Fig. 3.10 Calibrator.

Table 3.1 Plane calibrator's information for SPIV/SPTV.

Calibrator No.	x	y	z	x,y grid Interval	z Interval / Count
1	-30mm~ 30mm	-30mm~ 30mm	-21mm~ 21mm	3mm	3mm / 15
2	-24mm~ 24mm	-28mm~ 28mm	-21mm~ 21mm	4mm	3mm / 15
3	-50mm~ 50mm	-40mm~ 40mm	-21mm~ 21mm	5mm	3mm / 15

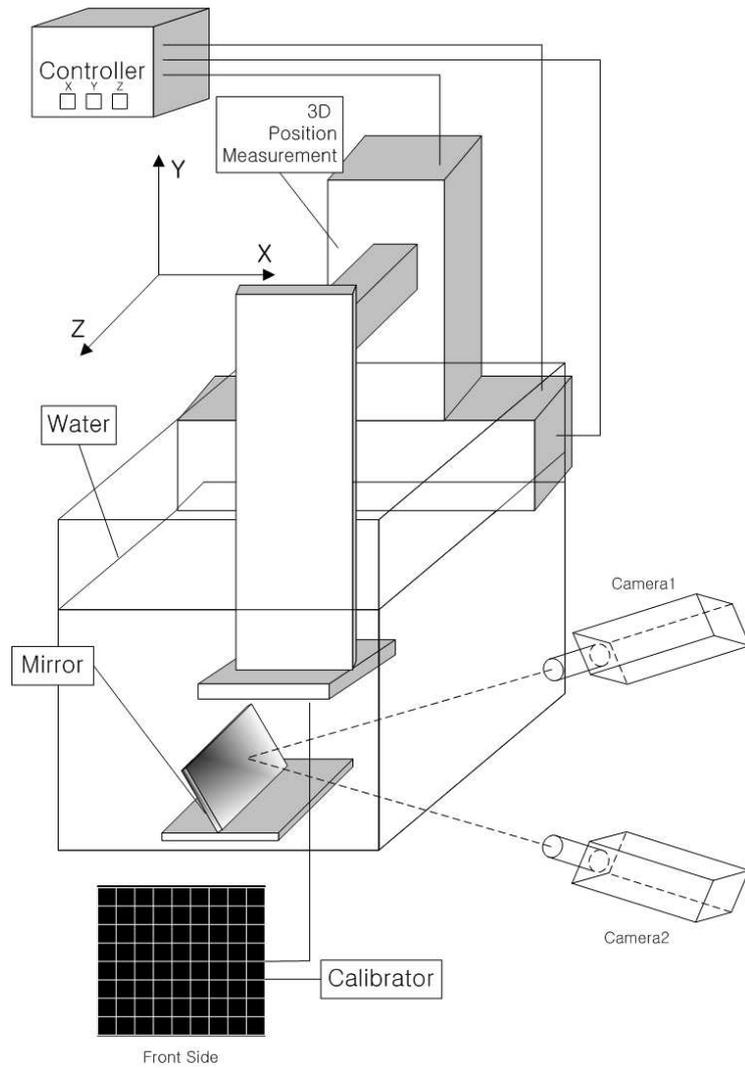
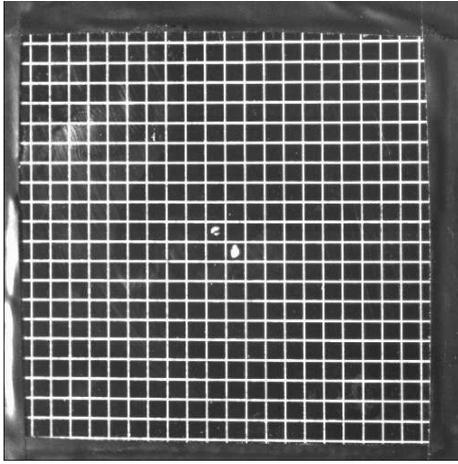
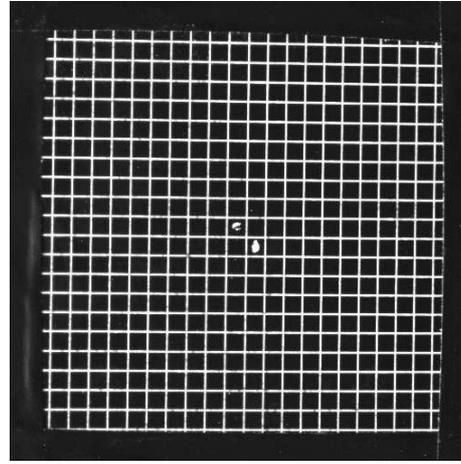


Fig. 3.11 Schema of mirror reflection system for calibration under the water.

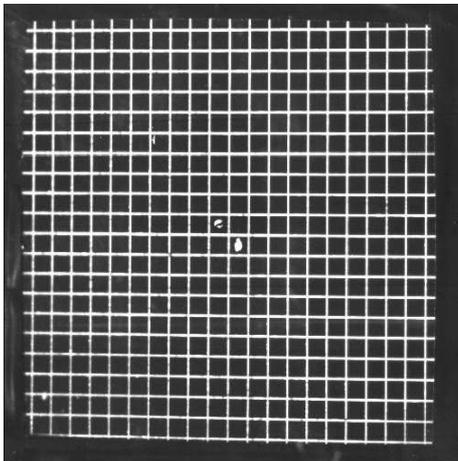


(a) Camera 1's image at $z=0\text{mm}$

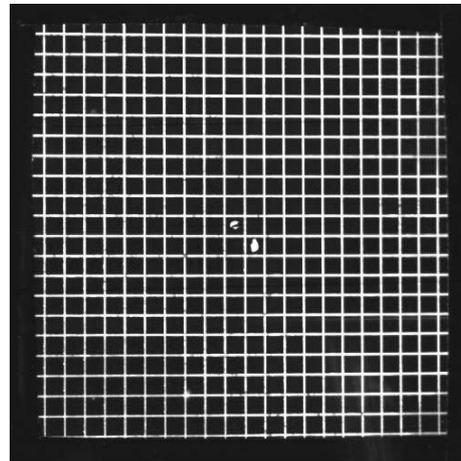


(b) Camera 2's image at $z=0\text{mm}$

Fig. 3.12 Plane calibrator 1 (air / camera angel 30).

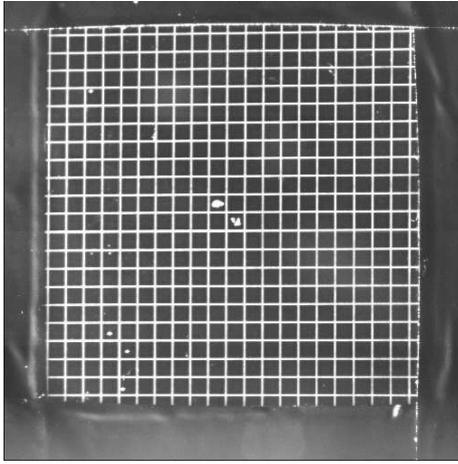


(a) Camera 1's image at $z=0\text{mm}$

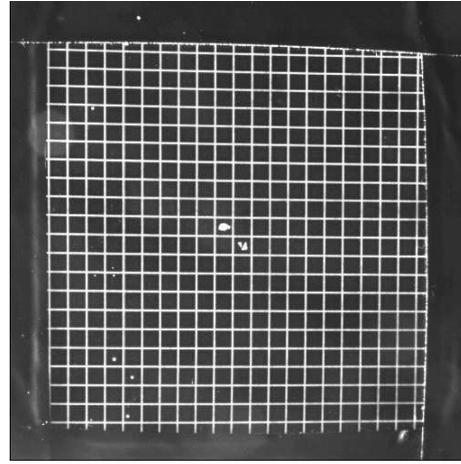


(b) Camera 2's image at $z=0\text{mm}$

Fig. 3.13 Plane calibrator 1 (water / camera angel 30).

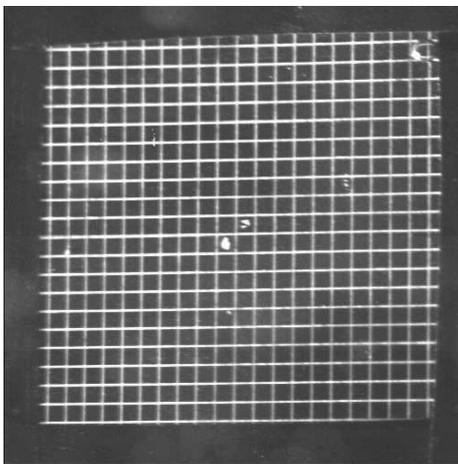


(a) Camera 1's image at $z=0\text{mm}$

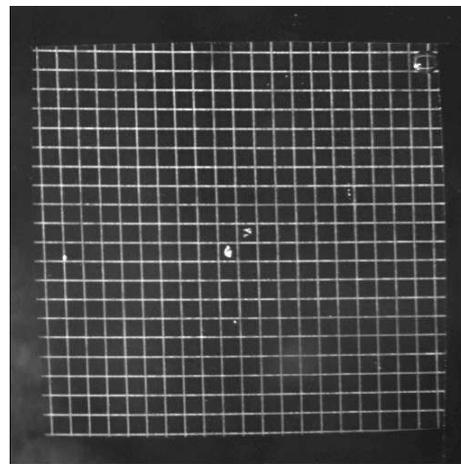


(b) Camera 2's image at $z=0\text{mm}$

Fig. 3.14 Plane calibrator 1 (air-mirror / camera angel 30°).



(a) Camera 1's image at $z=0\text{mm}$



(b) Camera 2's image at $z=0\text{mm}$

Fig. 3.15 Plane calibrator 1 (water-mirror / camera angel 30°).

Table 3.2 Error analysis of each calibrator for SPIV/SPTV.

	Air 3mm 30 deg			Air 3mm 40 deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0745	0.0561	0.1010	0.0795	0.0593	0.1199
St deviation	0.0904	0.0670	0.1194	0.0917	0.0723	0.1446
	Water 3mm 30 deg			Water 3mm 40 deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0638	0.0567	0.1744	0.0692	0.0582	0.1667
St deviation	0.0790	0.0689	0.2049	0.0832	0.0718	0.1992
	Air/Mirror 3mm 30 deg			Water/Mirror 3mm 30deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0705	0.0837	0.2290	0.1578	0.0946	0.7282
St deviation	0.0902	0.1032	0.3066	0.2122	0.1221	0.8450
	Air 4mm 30 deg			Air 4mm 40 deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0384	0.0300	0.0458	0.0372	0.0293	0.0442
St deviation	0.0483	0.0382	0.0586	0.0469	0.0373	0.0545
	Water 4mm 30 deg			Water 4mm 40 deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0541	0.0371	0.1486	0.0569	0.0332	0.1448
St deviation	0.0673	0.0488	0.1818	0.0705	0.0435	0.1743
	Air/Mirror 4mm 30 deg			Water/Mirror 4mm 30deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0695	0.0689	0.2121	0.0814	0.0904	0.3727
St deviation	0.0892	0.0916	0.2761	0.1065	0.1121	0.5116
	Air 5mm 30 deg			Air 5mm 40 deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0600	0.0685	0.0693	0.0543	0.0690	0.0577
St deviation	0.0679	0.0770	0.0871	0.0626	0.0776	0.0718
	Water 5mm 30 deg			Water 5mm 40 deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0920	0.0765	0.3287	0.0929	0.0783	0.3071
St deviation	0.1108	0.0915	0.4061	0.1130	0.0936	0.3788
	Air/Mirror 5mm 30 deg			Water/Mirror 5mm 30deg		
	x	y	z	x	y	z
Ave. Error	0.0767	0.0696	0.2976	0.0679	0.0564	0.3640
St deviation	0.0942	0.0855	0.3870	0.0865	0.0698	0.4617

Table 3.3 Result of camera parameter using each method.

Parameter	Centroid using Virtual Point		Centroid using Moment Method	
	Virtual Cam1	Virtual Cam2	Virtual Cam1	Virtual Cam2
dis (mm)	599.99957	600.00036	599.90973	600.05945
c_X (pixel)	4199.99658	4200.00244	4199.53955	4200.44629
c_Y (pixel)	4199.99658	4200.00292	4199.48975	4200.46387
ω (°)	1.97727E-8	-4.94805E-8	-9.50706E-6	4.9283E-7
Ψ (°)	0.26180	-0.26180	0.26179	-0.26180
κ (°)	-1.52469E-8	-2.80223E-8	6.70973E-6	2.07719E-6
m_X	-4.67221E-7	-2.52919E-6	-4.75010E-4	-1.04989E-4
m_Y	-10.00000	10.00000	-9.99936	9.99982
k_1	7.75179E-11	-0.00000	2.80433E-7	-3.96361E-8
k_2	-4.30000E-16	0.00000	-9.47270E-13	1.79650E-13

Table 3.4 Uncertainty analysis of camera parameter for each virtual camera parameter.

Virtual Point	x	Ave. Error	0.0000
		Standard Deviation	0.0000
	y	Ave. Error	0.0000
		Standard Deviation	0.0000
	z	Ave. Error	0.0001
		Standard Deviation	0.0001
Moment Method	x	Ave. Error	0.0008
		Standard Deviation	0.0010
	y	Ave. Error	0.0009
		Standard Deviation	0.0010
	z	Ave. Error	0.0036
		Standard Deviation	0.0042

3.4 스테레오 PIV/PTV의 유동장 측정 성능평가

Fig. 3.16, Fig. 3.17, Fig. 3.18는 충돌제트에 대한 LES계산결과를 이용하여 Fig. 1의 영역에 임의로 발생시킨 3차원 속도벡터와 계측 알고리즘들로 구해진 벡터를 보여주고 있다. 이 벡터들의 시점과 종점을 기준으로 가상영상을 만들었다. Fig. 3.16은 3차원 속도벡터를 구하기 위해 영상 변환 기법 등을 이용한 SPIV법⁽⁶⁾을 적용하여 얻어진 속도벡터를 보여주고 있으며, Fig. 3.17은 구축된 SPTV법⁽¹²⁾으로 계산한 순간속도벡터분포를 보여주고 있다. Fig. 3.18은 SPIV계측결과와 비교하기 위해 SPTV에 의해 구해진 결과인 Fig. 3.17의 결과를 Gaussian Window 보간법으로 구해낸 속도벡터를 보여주고 있다.

계측시스템의 성능은 VSJ(Visualization Society of Japan)가 제시하고 있는 벽면충돌제트에 대한 LES데이터를 이용한 가상영상을 입력영상으로 사용하여 평가하였다. Fig. 3.19은 3차원 SPIV와 SPTV계측시스템으로 얻어낸 속도벡터의 값을 LES데이터와 상대오차를 구하여 나타낸 표이다.

상대오차는 LES에 의한 충돌제트데이터와 각각 SPIV와 SPTV에 의하여 계측된 데이터와의 비를 나타내며 다음 식 (3.4)으로 정의하였다.

$$S = \frac{1}{N} \sum \frac{V_{les} - V_{mea}}{V_{mea}} \times 100\% \quad (3.4)$$

V_{les} 와 V_{mea} 는 각각 충돌제트에 대한 LES데이터와 각각 SPIV와 SPTV에 의한 계측데이터를 의미하며 N은 격자의 개수이다. 상대오차가 SPTV에 비해

SPIV의 오차가 큼이 알 수 있다. 특히 SPIV의 w성분에서 가장 크게 나타났으며 약 3%이내인 것을 알 수 있다. w성분의 오차가 큰 것은 카메라방향으로의 계측불확실성이 존재함을 의미하며 SPTV 보다 SPIV가 더 크게 계측불확실성의 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

SPIV와 SPTV 계측법에 의해 구해진 난류통계량과 LES에 의하여 구해진 난류통계량과의 비교를 하였다. 시간연속적으로 얻어진 데이터들을 정량적 비교평가를 위하여 Gaussian Window 보간법에 의거한 격자상의 데이터로 변환하였다. Fig. 3.20, Fig. 3.21, Fig. 3.22는 각각 SPIV와 SPTV와 LES의 난류 운동 에너지 분포를 보이고 있다. Fig. 3.23은 제트중앙단면상에서의 난류 운동 에너지의 프로파일을 보이고 있다. LES에 의하여 얻어진 결과와 스테레오PTV 계측시스템에 의하여 얻어진 각 SPIV와 SPTV와 LES의 난류 운동 에너지 분포를 보이고 있다. Fig. 3.23은 제트중앙단면상에서의 난류 운동 에너지의 프로파일을 보이고 있다. LES에 의하여 얻어진 결과와 스테레오PTV 계측시스템에 의하여 얻어진 결과가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 하지만 SPIV로 얻어진 결과는 SPTV와 LES 결과보다는 작게 얻어짐을 알 수 있었다. 이는 전절에서 언급한 것처럼 SPIV의 w성분에서 카메라방향으로의 계측불확실성에 관련되어 있음을 시사하고 SPTV 보다 SPIV가 더 크게 영향을 주는 것임을 알 수 있다. Fig. 3.24, Fig. 3.25는 레이놀즈 응력의 분포를 보이고 있다. Fig. 3.26 및 Fig. 3.27은 난류강도분포를 보이고 있다. SPIV와 SPTV 계측법으로 얻어진 결과를 LES결과와 실시간 난류통계량을 비교 하였을 때, 난류 운동에너지, 레이놀즈 응력, 난류 강도 SPTV 계측법으로 얻어진 결과치가 SPIV 계측법으로 얻어진 결과치보

다 LES에 의한 난류 통계량에 근접해 있음이 나타났다. 이것은 Fig. 3.19에서 보이는 것처럼 SPTV계측법보다 SPIV의 속도벡터의 w 성분의 에러율이 비교적 SPTV 계측법보다 상대적으로 큰 것에 관련되어 있음을 시사한다. 또한, 이는 카메라 방향의 계측불확실성이 SPTV 보다 SPIV가 더 크게 영향을 주는 것임을 알 수 있다.

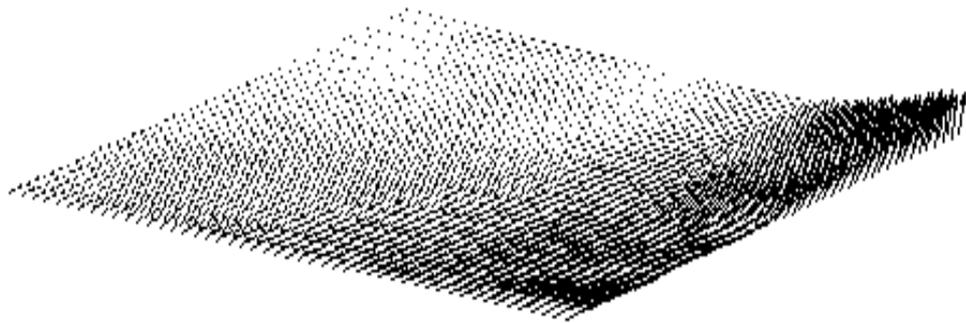


Fig. 3.16 Obtained vectors by SPIV.



Fig. 3.17 Obtained vectors by SPTV.



Fig. 3.18 Interpolated vectors obtained by SPTV.

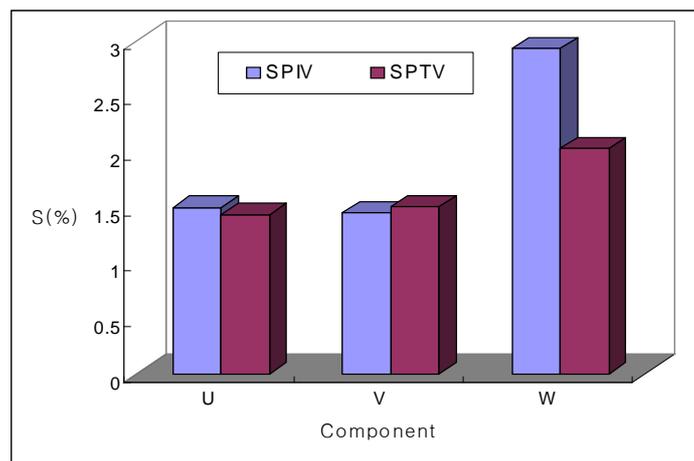


Fig. 3.19 Relative error(%).

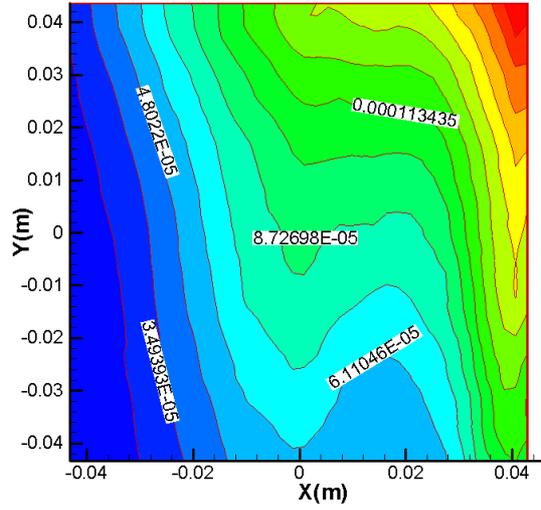


Fig. 3.20 Turbulent kinetic energy distribution obtained by SPIV.

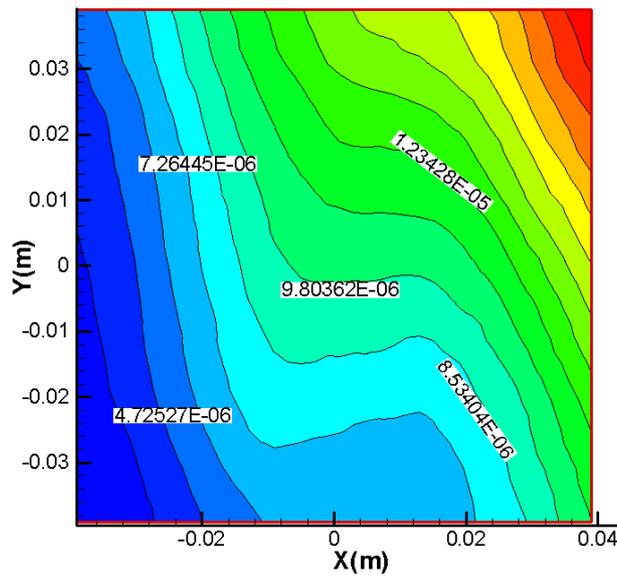


Fig. 3.21 Turbulent kinetic energy distribution obtained by SPTV.

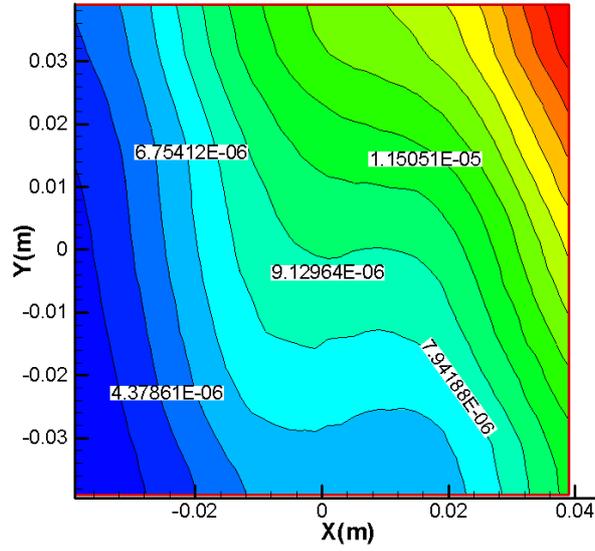


Fig. 3.22 Turbulent kinetic energy distribution obtained by LES.

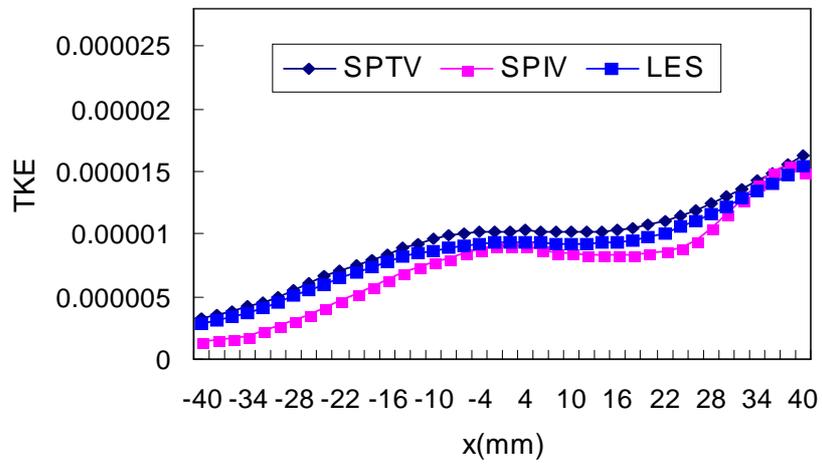


Fig. 3.23 Profiles of turbulent kinetic energy.

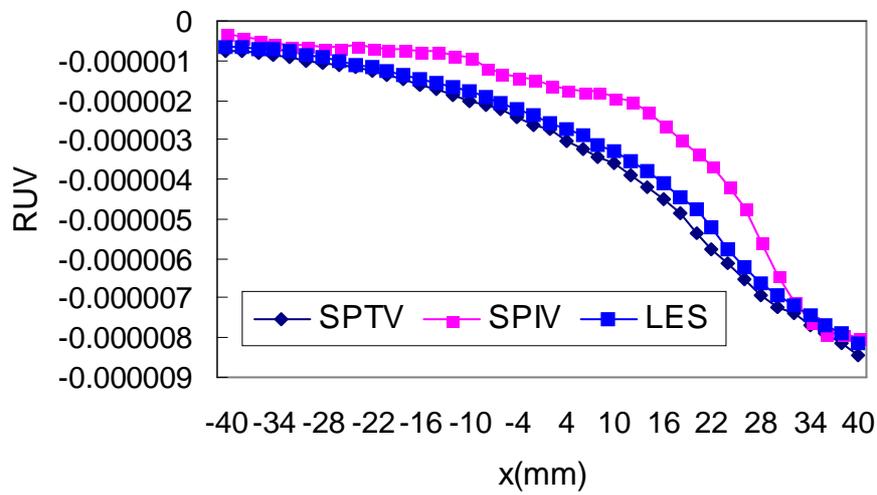


Fig. 3.24 Profiles of Reynolds stress (uv component).

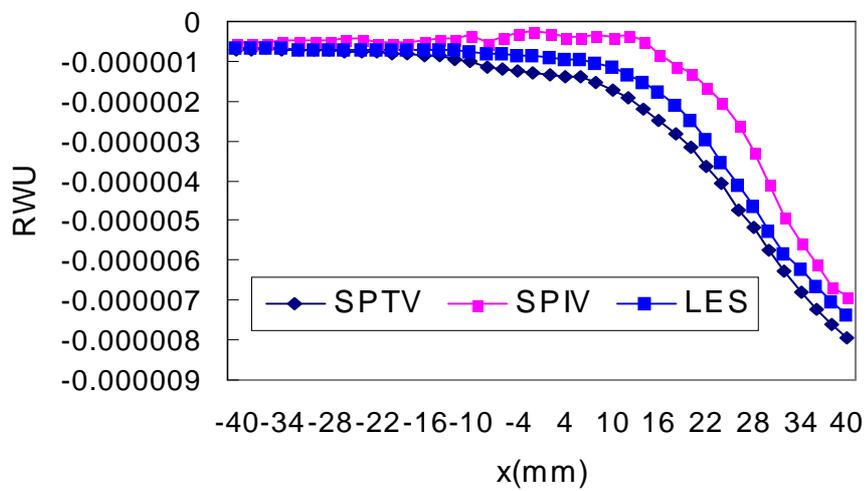


Fig. 3.25 Profiles of Reynolds stress (wu component).

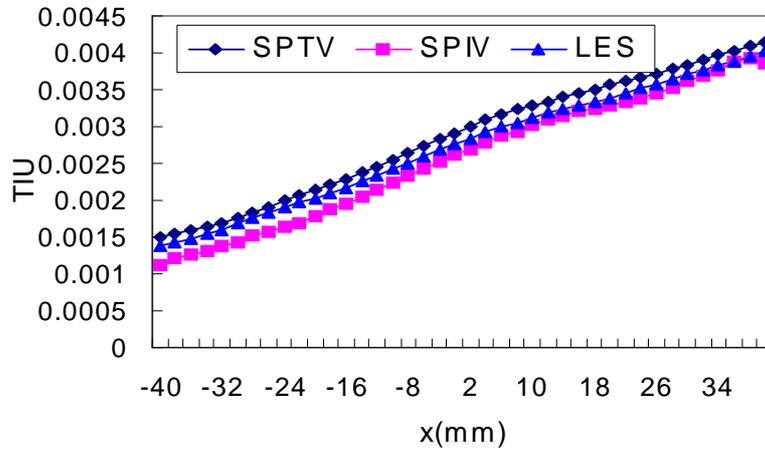


Fig. 3.26 Profiles of turbulent intensity (u component).

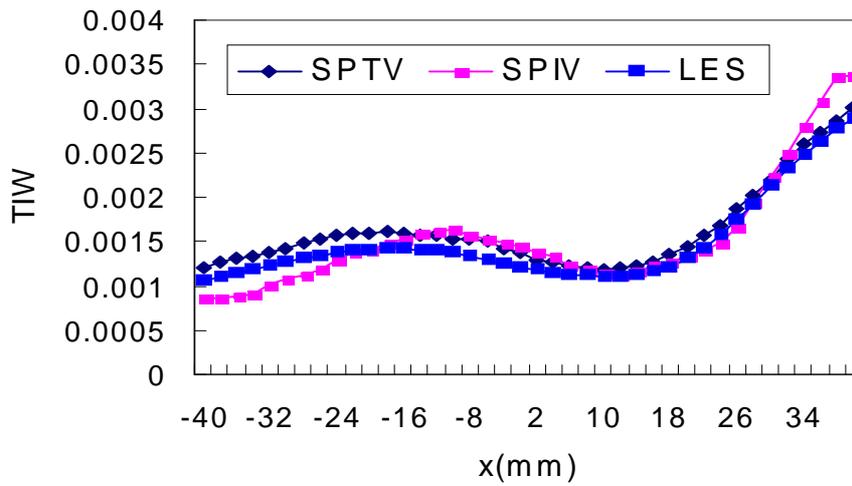


Fig. 3.27 Profiles of turbulent intensity (w component).

제 4 장 결론

본 연구에서는 유체 유동장에 대한 3차원 속도벡터 성분 (u , v , w)을 측정할 수 있는 3차원 속도장 측정법인 SPIV측정법과 SPTV 측정법의 성능 검정에 필요한 표준영상 제작법을 완성하였다.

완성한 표준영상 제작법으로 일본가시화정보학회(<http://www.vsj.or.jp/piv>)가 제공하고 있는 충돌분류유동에 대한 표준적 계산데이터(LES: large eddy simulation에 의한 결과)를 이용하여 표준 영상(standard artificial images)을 제작, 이에 대한 표준영상데이터베이스를 구축하여 3차원 속도장 측정법인 SPIV측정법과 SPTV측정법 성능 검정을 하였다.

작성된 표준영상에 대하여 SPIV알고리즘과 SPTV알고리즘을 적용하여 본 결과, 유동의 평균속도장 계산에 있어서는 SPIV와 SPTV에 의한 결과는 LES계산 결과와 동일한 수준을 보였으나, 난류 특성량 계산에 있어서는 SPIV에 의한 결과보다 SPTV에 의한 결과가 우수함을 알아낼 수 있었다. 즉, SPIV와 SPTV 계측법으로 얻어진 결과를 LES결과와 실시간 난류통계량을 비교 하였을 때, 난류 운동에너지, 레이놀즈 응력, 난류 강도에서 SPTV 계측법으로 얻어진 결과치가 SPIV 계측법으로 얻어진 결과치보다 LES에 의한 난류 통계량에 근접해 있음이 확인되었다.

SPIV에서의 계산시간은 SPTV측정법보다 계산시간이 적게 걸리는 장점이 있는 반면 난류통계량에 대한 오차는 상대적으로 컸다.

참고문헌

- (1) Adrian R. J., 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", *Ann. Rev. J. Fluid Mech.*, Vol.23, pp.261-304.
- (2) Doh D.H., 1998, "PIV measurement technique", *KSME Journal*, Vol.38, No.10, pp.36-41.
- (3) Doh D.H., 1999, "Three-dimensional measurements of flows using 3D-PIV," *Proc. KSME '99, Fluid Eng. Div. Spring Meeting*, Hanyang Univ. May, pp.41-49.
- (4) Prasad AK, Adrian RJ, 1993, "Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows", *Exp. Fluids* 15: 49-60.
- (5) Willert C., 1997, "Stereoscopic digital particle image velocitmetry for application in wind tunnel flows", *Meas. Sci. Technol.* Vol. 8, pp.1465-1479.
- (6) Yoon, J. H and Lee, S. J., 2002, "Development of Stereoscopic PIV Measurement Technique and Its Application to Wake behind an Axial Fan", *KSME(B)*, Vol.26(2), pp.362-373.
- (7) Doh D.H. Kim D.H., Lee W.J., 2001, "Stereo-PIV", *Proc. of KSME Fall Meeting*, Chunbuk Natl. Univ., pp.394-399.
- (8) 도덕희, 이원제, 조용범, 편용범, 스테레오 PTV법의 개발, 2001, 한국가시화정보학회지, 1권 1호, pp.92-97.

- (9) Doh D. H., Kim D. H., Cho Y. B., Lee W. J., "Development of genetic algorithm based 3-D PTV technique", Journal of Visualization, Vol.5, No. 3, pp.243-254.
- (10) VSJ, PIV Standard Project, <http://www.vsj.or.jp/piv>.
- (11) Kobayashi T., Saga T., Haeno T. and Tsuda N., 1991, "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. 28, pp. 9~14.
- (12) Doh, D. H. Kim, D. H., Choi, S. H., Hong, S. D., Kobayashi, T. and Saga, T., 2000, "Single-Frame 3D PTV for High Speed Flow", *Experiments in Fluids*, Vol. 29, pp. 85~98.
- (13) Raffel, M., Westerweel, J., Willert, C., Gharib, M., Kompenhans, J., 1996, Analytical and experimental investigations of dual-plane particle image velocimetry, Opt. Eng., Vol. 35, pp.2067-2074.
- (14) Okamoto, K., Nishio, S., Kobayashi, T., Saga, T., 1997, "Standard Images for Particle Imaging Velocimetry," Proc. PIV'97-Fukui, Fukui, pp.229-236.