

# 스테레오 PIV

도 덕희\* · 이 원제\*\* · 조 경래\*\* · 편 용범\*\*\* · 김 동혁\*

## Stereoscopic PIV

Doh, D. H., Lee, W. J., Cho, G. R., Pyun, Y. B., Kim, D. H.

**Key Words:** Stereoscopic PIV(스테레오 PIV), 3D-PTV(3차원 입자영상유속계), Virtual Image(가상영상)

### Abstract

A new stereoscopic PIV is introduced. The system works with CCD cameras, stereoscopic photogrammetry, and a 3D-PTV principle. Virtual images are produced for the construction of a benchmark testing tool of PIV techniques. The arrangement of the two cameras is based on angular position. The calibration of cameras and the pair-matching of the three-dimensional velocity vectors are based on 3D-PTV technique.

### 기호설명

- $u, v, w$  : x, y, z 방향의 속도 성분
- $I$  : Intensity of particle
- $I_0$  : maximum intensity of particle
- $d_p$  : diameter of particle
- $u_{ref}$  : reference velocity data(Jet-flow)
- $u_{meas}$  : measurement velocity data(S PIV)

### 1. 서론

산업현장 및 공업분야에서 나타나는 대부분의 유동현상은 3차원적인 유동현상이 많다. 공학적으로 2차원적으로 해석을 하여도 그다지 문제가 되지 않는 경우를 빼고는 3차원적인 해석

을 하는 것이 유용한 경우가 많다.

PIV계측기술<sup>(1)(2)</sup>을 이용한 유동장의 3차원적 해석기법에는 크게 2D3C, 3D3C로 구분된다. PIV계측을 하기 위하여 유동장에 레이저광원으로 조사(照査)된 가시영역이 2차원 단면형상으로 되어 있지만 그 단면도 좁은 폭(3mm 전후)을 가진 단면이기 때문에 레이저광원을 매우 빠르게 2회 이상 단절(斷絶)하면 그 단면내의 추적입자들은 3차원적 운동의 정보를 가지게 된다. 2D3C란 이와 같이 가시화 된 2차원(2-Dimensional) 단면을 향하여 설치된 2대의 카메라 영상으로부터 스테레오 사진기술<sup>(3)(4)</sup>을 이용하여 유동장의 3성분( $u, v, w$ )(3-Dimensional)을 얻어내는 계측법을 말한다. 3D3C란 레이저광원을 광학적 기구를 이용하여 3차원적(3-Dimensional)으로 형성한 후 이를 유동장의 공간에 조사(照査)함으로써 얻어진 계측영역에 대하여 2대 이상의 카메라를 이용하여 2시간 이상의 영상을 얻은 후 이들 영상에 대하여 스테레오사진기술 혹은 3차원 계측기술<sup>(5)(6)(7)</sup>을 이용하여 유동의 3성분(3-Component)을 측정 영역 전체에 걸쳐 동시에 얻어내는 계측법을 말

\* 정회원. 한국해양대학교 기계·정보공학부

\*\* 회원. 한국해양대학교 대학원

\*\*\* (주)티엔텍

한다. Stereoscopic PIV 계측법<sup>(8)</sup>은 현재 시판되고 있는 PIV계측장비들의 성능한계가 유동의 상세 구조까지 제공할 수 있는 수준까지 와 있다는 점으로 최근 많이 이용되고 있다. Stereoscopic PIV계측법은 보통 두 대의 카메라를 사용하여 측정한다. Stereoscopic 시스템에서는 레이저 평면 광으로 조명된 유동 단면에서의 3가지 속도성분을 측정하게 되는데, 일반적으로 out-of-plane의 속도성분은 바로 측정되어지지 않고 두 대의 카메라로 측정된 평면 데이터로부터 도출하게 된다. Stereoscopic 접근 방법에 따라 2대의 카메라 렌즈를 유동가시영역에 대하여 평행으로 설치하여 계측하는 Translation 방법과 2대의 카메라 렌즈가 유동가시영역과 수직하지 못하고 조명의 평면과 소정의 각도를 이루게 하여 속도 장을 측정하는 Angular 방법이 있다. Translation법(Prasad & Adrian, 1993) 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 카메라 렌즈의 설치를 가능하면 지상면을 기준으로 평행하게 설치해야 하는 단점이 있다. 또 다른 면에서 구분하면 "Non-calibration method" 와 "Calibration method"로 구별되는데 먼저 Non-calibration method (Prasad and Adrian (1993))<sup>(9)</sup>는 기록면의 좌표를 유체내부 입자좌표로 쉽게 변환과 유동장의 가시용 벽면에 의한 굴절량 등을 매개변수(parameter)로 주어지고 Calibration 없이 3차원벡터를 얻어낸다. 반면, Calibration method (Willert(1997), Adrian, and Liu(1997))<sup>(10)(11)</sup>은 situ calibrator에 의해 'mapping function methods'를 결정하는데 카메라와 평행한 Pixel

좌표구조를 기록면과 평행한 real 좌표구조로 변환시키는 방법이다. 이런 방법으론 굴절이나 수차에 영향을 고려하지 않았다.

본 연구에서는 Angular법의 장점을 살리고 유동계측의 제약을 주었던 카메라의 배치에 자유성을 부여할 수 있도록 영상의 기하학적 변환(Geometric transformation)으로 굴절과 수차의 영향을 고려하며, 3차원 PIV계측법(Nishno, Doh 등)에 적용되고 있는 카메라 교정 방법을 이용한 Stereoscopic PIV계측법을 구축하고자 한다.

그러나, 개별의 연구자들은 각자의 연구목적에 따라서 다양한 계측알고리즘으로 소기의 연구성과를 얻고 있으나 그 계측알고리즘에 대한 평가도구로서 객관적인 설정하는데 많은 어려움을 겪고 있다. 이와 같은 점을 고려하여 VSJ(Visualization Society of Japan)에서는 벽면 충돌제트유동에 대한 수치계산결과를 PIV여러 연구자들이 보유하고 있는 알고리즘에 대한 표준적 평가도구로서 활용할 수 있도록 제공하고 있다. VSJ에서 제공하고 있는 3차원 충돌제트유동의 계산결과를 가상영상 기법을 이용하여 새롭게 구축된 Stereoscopic PIV 계측기법의 성능평가를 통하여 그 유용성을 정리하고자 한다.

## 2. Stereoscopic PIV

### 2.1 카메라의 교정작업과 영상변환

카메라를 이용하여 3차원 공간을 정량적으로 인식하기 위해서는 먼저 2대 이상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 정보가 필요하다.

Fig.1에서처럼 얻어진 영상으로부터 Doh 등 (2000)<sup>(12)(13)</sup>이 사용한 10개의 표정요소를 가지는 관측방정식을 이용하여 카메라 정보를 구하였다.

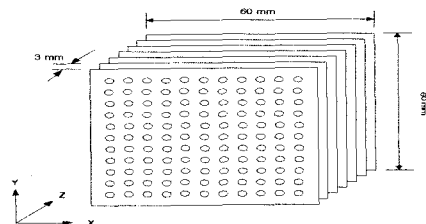


Fig. 1 Virtual image for camera calibration

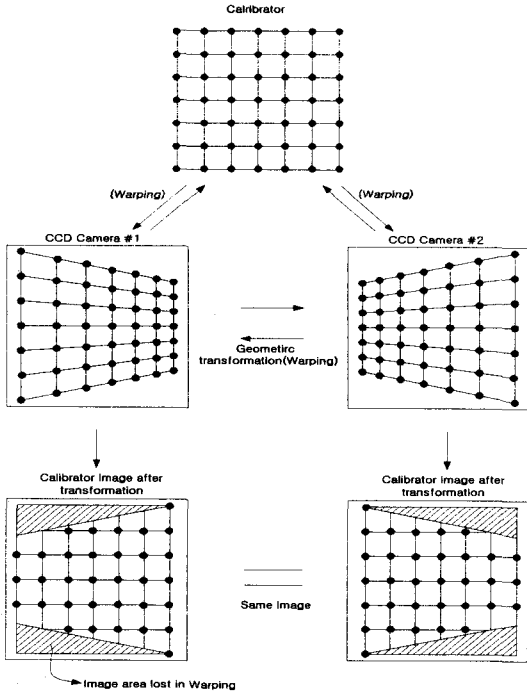


Fig. 2 Transformation between pixel and real coordinate planes

정사각형의 대상물을 두 대의 카메라에서 일정한 각도로 관측할 때 얻어진 영상은 Fig. 2.과 같이 정사각형의 영상이 아니라 사다리꼴의 일그러진 영상을 얻게 된다. 따라서 정확한 2차원 계산을 위해 기하학적 변환인 왜곡변환(Warping)을 이용하여 영상의 변환을 실시하였다.

본 연구에서는 계측하고자 하는  $Z=0\text{mm}$  지점의 영상을 기준으로 다음의 식을 이용하여 2차원 영상변환을 행하였다.

$$x = \frac{a_{11}x_s + a_{12}y_s + a_{13}}{a_{31}x_s + a_{32}y_s + 1} \quad \text{----- (1)}$$

$$y = \frac{a_{21}x_s + a_{22}y_s + a_{23}}{a_{31}x_s + a_{32}y_s + 1} \quad \text{----- (2)}$$

단,  $x, y$  : 변환전의 영상의 좌표 값  
 $x_s, y_s$  : 변환후의 영상의 좌표 값

왜곡변환을 할 때는 카메라의 표정요소를 이용하여 각각 Camera#1 과 Camera#2로 받아들인 영

상을 이동, 회전, 신축 등의 과정을 거쳐 Fig. 2의 하단과 같은 변환된 이미지가 된다. 가상의 교정기는 가로, 세로 각각 60mm이고, 5mm간격으로 입자들이 분포되어 있다. 기준 점의 절대 좌표 값과 계측된 좌표 값들 간의 오차의 평균값 및 분산값은 거의 0에 근접하였다.

## 2.2 Stereoscopic PIV 가상 영상 구현

PIV 가상영상의 구현의 목적은 PIV기술을 위한 평가도구를 구성하기 위한 것이다. 표준시험을 위한 가상 영상의 형성을 위해 고려되어야 점들은 입자의 밀도, 입자의 농도, 속도, 속도 기울기, 레이저 빔의 두께, 카메라의 방향과 위치, 렌즈의 확대 정도가 고려되어야 하며, 실제의 유동장이 수조내부에서 형성되므로 수조벽의 굴절, 평가를 위한 신뢰성을 가진 데이터를 가져야 한다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 모형크기는  $x, y, z$ 에 대해서  $100 \times 100 \times 8(\text{mm})$ 이며 실질적인 계측 영역인 빔의 두께를 5mm로 하였다. 계산을 위하여 정렬되는 격자는  $40 \times 40 \times 1$ 격자이다. 생성된 이미지의 해상도는  $512 \times 512$  pixel이며, 각 pixel은 256(gray level, 8bit)이다.

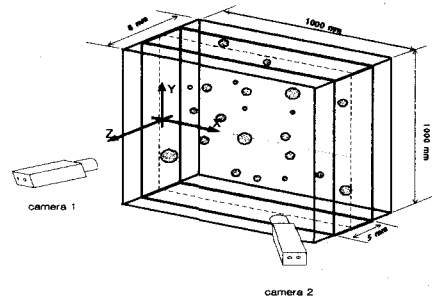


Fig. 3 Camera arrangement for the generation of virtual images.

시간간격은 입자의 최대 이동거리를 10pixel보다 작도록 설정하였고 이미지 상에서 입자의 이동은 제트유동의 속도 계산 결과로부터 얻어진 순시 3차원 속도 벡터를 이용하여 계산되었다. 다음 영상에서 입자의 가상 위치를 만들기 위하여 입자는 이동

되어진다. 이렇게 다음 시간 단계의 새로운 영상이 식(3)을 이용하여 생성된다.

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

$$I_0 = 200 \text{Exp}\left(-\frac{z_p^2 + x_p^2}{\sigma_l^2}\right) \text{----- (3)}$$

여기서 I는 광도(Intensity), 이미지 상에서 위치 (X, Y)에 대한 농도는 투사된 (X<sub>p</sub>, Y<sub>p</sub>)가 입자 (x<sub>p</sub>, y<sub>p</sub>, z<sub>p</sub>)로부터 산란되어진 빛 때문에 식(3)으로 표현된다. (X<sub>p</sub>, Y<sub>p</sub>)은 입자의 입자 중심 위치를 나타내며 빛은 계측영역에 대하여 평행하고 직선으로 조명했다. σ<sub>l</sub>은 원주형 빛의 반경으로 본 연구에서는 해상도를 높이기 위하여 500으로 하였다. 입자의 크기는 직경 0.5mm으로 하였다.

L : 카메라에서 피사체까지의 거리 (500mm)

ΔL : camera viewing angle 과 수평화각에 따라 변화는 거리이다.

기본적으로 전체의 광량(光量)을 늘리고 렌즈를 조절하여 피사계 심도(Depth of Focus)를 깊게 하면 소위 다중 초점이 되어 피사체와 카메라의 거리변화에 관계없이 선명한 화상을 얻을 수 있다.

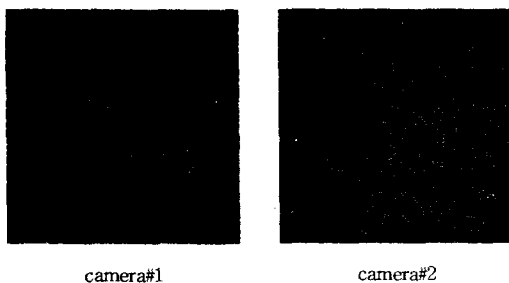


Fig. 4 Virtual image when number of particles are 5000.(Camera viewing angle = 20 °)

또, 광량이 많으면 그만큼 밝고 잡음도 두드러지지 않아 좋은 화상을 얻을 수 있다. 하지만 카

메라의 심도를 5cm로 고정시켰다. 영상영역 안으로 벗어나거나 새로 들어오는 입자를 고려했으며 가상영상을 구현 하때있어 실제 실험 상황과 같은 조건으로 하는 것을 원칙으로 하였다.

### 3. 시험결과 및 고찰

다음 세 가지 경우를 고려하여 가상영상을 구축한 뒤 이를 구축된 Stereoscopic PIV 계측범으로 계측 적용함으로써 그 성능을 평가하였다.

- 각 카메라의 사이 각을 10 °, 15 °, 20 °, 25 °, 30 °로 주어 카메라간의 최적배치 각도를 찾고자 함.
- 입자의 수에 변화에 따른 구축된 알고리즘의 성능을 파악하고자 함.
- beam 두께를 2~10mm를 해서 가장 좋은 beam 두께를 찾고자 함.

변환된 영상으로부터 상호상관 PIV기법을 이용하여 각각 카메라에 대한 2 차원 속도 벡터를 구하고, 구해진 속도 벡터를 식(1)과 식(2)를 이용하여 역 변환을 행하여 한 쌍의 2차원 벡터를 3차원 벡터로 변환하기 위해 원래 상태로 회복시켰다. 계산된 3차원 속도 장은 in-plane 속도 값에서는 비교적 정확하게 얻어지지만 out-of-plane의 속도는 많은 에러를 포함하고 있었다. 그래서 에러를 포함 속도 값을 보간(Gaussian Window 보간)처리를 했다. Fig.5.는 기존의 Okamoto등이 제시한 제트유동의 데이터를 사용하여 가상 영상을 구현하였는데 사용된 데이터들은 교정기의 영역을 기준으로 하여 확대 및 이동과정을 거쳤다. 데이터 속도 값을 동일하게 1/10로 축소하고 총 10 Grid로 구성된 데이터를 3 Grid 만큼 중앙단면(xy)를 추출하였다.

Fig.6은 본 연구에서 적용한 Stereoscopic PIV로 계산한 instantaneous 3-D velocity vector 를 나타낸 것이다. Fig.7.은 in-plane의 u, v 속도는 벡터

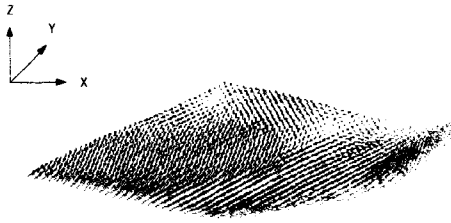


Fig.5 Velocity vector profile of Jet-flow(Reference)



Fig. 6 Velocity vector obtained by Stereoscopic-PIV

로 나타낸 것이고 out-of-plane의 w 속도는 contour로 나타낸 것이다. 가상영상을 구축한 뒤 이를 구축된 Stereoscopic PIV 측정법으로 측정 적용함으로써 그 성능 평가를 상대 오차(식4)로 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 E(\%) &= \frac{1}{N} \sum \frac{u_{ref} - u_{meas}}{V_{ref}} \quad (u\text{성분}) \\
 &= \frac{1}{N} \sum \frac{v_{ref} - v_{meas}}{V_{ref}} \quad (v\text{성분}) \\
 &= \frac{1}{N} \sum \frac{w_{ref} - w_{meas}}{V_{ref}} \quad (w\text{성분}) \quad \text{----- (4)}
 \end{aligned}$$

여기서

- $u_{ref}$  = reference velocity data(Jet-flow)
- $u_{meas}$  = measurement velocity data(S PIV)
- N = 계산된 벡터 갯수 × 계산된 벡터 파일수 (40×40×1×50)
- $\bar{V}_{ref}$  = reference velocity(Jet-flow)  
 $(\bar{V}_{ref} = \sqrt{u_{ref}^2 + v_{ref}^2 + w_{ref}^2})$

각 카메라간의 최적배치 각도를 찾아본 결과 카메라 사이 각은 20°일 때가 최적의 배치임을

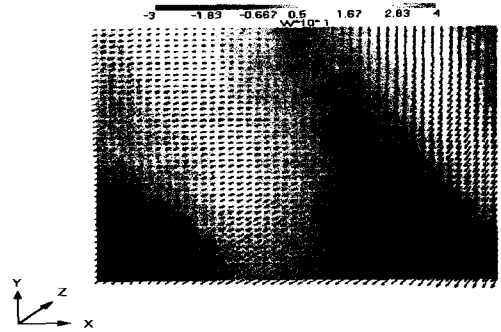


Fig. 7 Velocity vector & contour obtained by Stereoscopic PIV

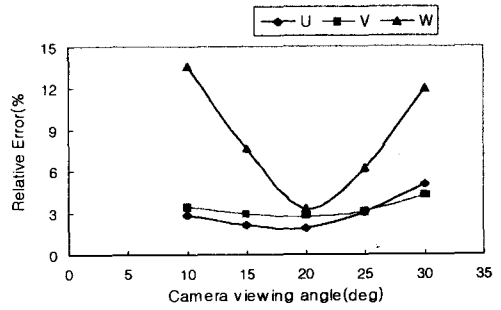


Fig. 8 Relative Error in Camera viewing angle

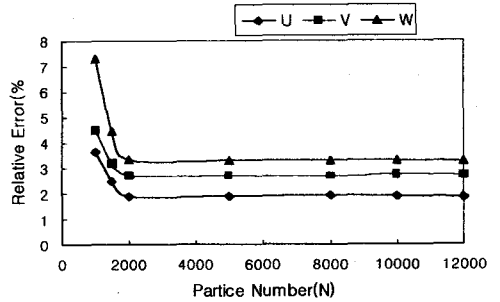


Fig. 9 Relative Error in Particle's Number(N)

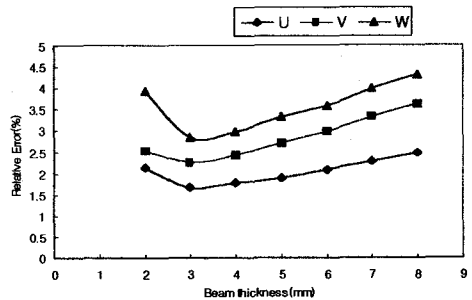


Fig. 10 Relative Error in Beam thickness(mm)

알 수 있었다. in-plane과 out-of-plane의 오차가 1.8%와 3.3%임을 알 수 있었다. 이것은 Walker<sup>(14)</sup>가 제시한 결과와 비교할 때 비슷한 오차량을 얻었다. Fig.9 와 Fig.10에 나타난 것처럼 입자의 수의 변화와 beam 두께의 변화에 따른 구축된 알고리즘의 최적성능은 입자의 수는 2000이상이며, 레이저 beam 두께는 입자들의 직경과 빔의 성능에 관련이 있겠지만 3~4mm 일 때 구현됨을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

이상의 연구에서 제트유동으로 Okamoto 등<sup>(15)</sup>이 제시한 데이터를 사용하여 가상영상을 구현하여 스테레오사진원리 및 3차원 PTV계측기술의 원리를 이용한 Stereoscopic PIV계측법을 구축 개발하여 결과를 비교해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻어내었다.

Translation법이나 Angular법에서 구현하기 힘든 카메라 배치의 제약점을 극복함으로써 계측에 있어서 유연성을 확보할 수 있음이 실험을 통하여 확인되었다.

구축된 알고리즘의 최적성능은 각 카메라간의 각이 20° 이고, 입자의 수는 2000이상이며, 레이저 beam 두께가 3~4mm 일 때 확보될 수 있음을 확인하였다.

out-of-plane(w)의 오차성분에 영향을 미치는 요인으로서 각 카메라에서의 2차원 속도벡터의 계측정확도로 볼 수 있는데 이에 대한 방안을 강구하면 보다 높은 계측정도를 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- (1) Adrian R. J., 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", *Ann. Rev. J. Fluid Mech.*, Vol.23, pp.261-304.
- (2) 도덕희, 1998, "PIV 계측기술", *기계저널*, 제38권 10호, pp.36-41.
- (3) Murai S, Nakamura H, Suzuki Y, 1980, "Analytical orientation for non-metric camera in the application to terrestrial photogrammetry", *Architecture XXIII. Commission V*, pp. 516-524.
- (4) Kobayashi T., Saga T., Sekimoto K., 1989, "Velocity measurement of three-dimensional flow around rotating parallel disks by digital image processing.", *ASME FED 85*, pp.29-36.
- (5) Nishino K., Kasagi N., Hirata M., 1989, "Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing", *ASME J. Fluids Eng.* Vol. 111 No.4, pp.384-391.
- (6) 도덕희, 1999, "3차원 PIV를 이용한 유동장의 3차원 계측", *대한기계학회 '99년도 유체공학부문 춘계학술강연회 강연집*, 한양대학교 백남학술정보관, 5월 14일, pp.41-49.
- (7) Doh D. H., Kim D. H., Choi S. H., Hong S. D., Saga T., Kobayashi T., 2001, "Single-Frame (Two-Field Image) 3D-PTV for high speed flows", *Exp. in Fluid*, Vol.7, pp.84-95.
- (8) Adamczyk A. A., Rimai L., 1988, "Reconstruction of a 3-Dimensional flow field from orthogonal views of seed track video images", *Exp. in Fluids*, Vol.6, pp.380-386.
- (9) Prasad AK, Adrian RJ, 1993, "Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows", *Exp. Fluids* 15: 49-60.
- (10) Soloff S. M., Adrian R. J., and Liu Z. C., 1997, "Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry", *Meas. Sci. Technol.* Vol. 8, pp.1441-1454.
- (11) Willert C., 1997, "Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows", *Meas. Sci. Technol.* Vol. 8, pp.1465-1479.
- (12) Doh D. H., Cho K. R., Baek T. S., Cho Y. B., 2000, "3D-PTV using a Genetic Algorithm", *Proc. of Winter Annual Conference, Society of Air-conditioning and Ref. Engineers of Korea*, Vol.2, pp.601-605.
- (13) Doh, D. H., Cho, K. R., Cho Y. B., Baek T. S., Ryu D. S., Hwang Y. C., Chang K. S., 2001, "Development of a new 3D-PTV using genetic algorithm", *Proc. of 3rd Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing, PSFVIP-3*, Maui, Hawaii, Mar. 18-21, pp.241-242, CD-ROM Proc. Paper No. F3134.
- (14) S. Walker "Large-scale three-dimensional particle image velocimetry" *NASA Ames Research Center Moffett Field, CA*
- (15) Okamoto, K., Nishio, S., Kobayashi, T., Saga, T., 1997, "Standard Images for Particle Imaging Velocimetry," *Proc. PIV'97-Fukui, Fukui*, pp.229-236.