

표준화상을 이용한 2차원 PIV와 3차원 PIV계측 및 성능비교검정

도덕희[†]·황태규^{*}·송주석^{**}·백태실^{**}·편용범^{***}

Performance Test of 2-Dimensional PIV and 3-Dimensional PIV using Standard Images

Doh D. H., Hwang T. G., Song J. S., Baek, T. S. and Pyun Y. B.

Key Words: 2D-PIV & 3D-PIV Measurement(2D와 3D PIV계측), LES data(LES 데이터).

Abstract

Quantitative performance test on the conventional 2D-PIV and the hybrid angular 3D-PIV (Stereoscopic PIV) was carried out. LES Data sets on an impinging jet which are provided on the webpage(<http://www.vsj.or.jp/piv>) for the PIV Standard Project were used for the generation of virtual images. The generated virtual images were used for the 2D-PIV and 3D-PIV measurements. The measurement results showed that the results obtained by 2D-PIV on average values are closer to the LES data than those obtained by 3D-PIV, but the turbulent properties obtained by 2D-PIV are largely underestimated than those obtained by 3D-PIV.

기호설명

d_p	: 입자직경	[pixels]
I	: 입자밝기	[255계조]
I_0	: 최대입자밝기	[255계조]
x_a, y_a	: 좌표변화후 사진좌표	[pixel]
x_b, y_b	: 좌표변화전 사진좌표	[pixel]
u, v	: x, y방향 속도벡터성분	[m/sec]
U_0	: 입구속도	[m/sec]

1. 서론

산업분야에서 유용한 유동장의 대부분이 3차원 성이 강하다는 점으로부터 3차원 계측에 대한 필요성이 1990년대 중반부터 강조되어져 왔다. 가장 바람직한 3차원 계측법으로서는 유동장 전체에 걸친 속도 3성분을 동시에 계측할 수 있는 3차원 PTV (Particle Tracking Velocimetry)계측법이다⁽¹⁾⁻⁽³⁾. 그러나, 3차원 PTV에 의하여 얻어지는 순간의 속도벡터개수가 유동의 시간적 거동구조를 파악할 수 있을 정도의 양이 아니라는 점으로부터 이를 보완하기 위하여 개발된 계측법이 3차원 PIV (Particle Image Velocimetry, 일명 Stereoscopic PIV, SPIV라 함) 계측법이다⁽⁴⁾.

3차원 PIV 계측시스템은 가시화 된 2차원 평면상의 작은 영역내에 속도 3성분을 동시에 계측하는 방법을 말한다. 이 방법은 3차원 PTV가 3차원 체적내의 속도3성분의 분포를 얻는 반면에

^{*} 정회원. 한국해양대학교 기계·정보공학부
doh@hanara.hhu.ac.kr, Tel:051-410-4364

^{**} 정회원. 포항제1대학, 자동차과

^{***} (주)티엔텍
flowtech@tientech.com, Tel:051-403-2691

비하여 2차원 단면상에서 3차원 속도3성분을 얻어내므로 2차원 단면상에서 고해상의 3차원 속도 3성분의 정보를 얻어낼 수 있다. 3차원 PIV 계측법은 카메라의 렌즈가 유동장을 향하여 설치되는 방식에 따라 Translation법⁽⁴⁾과 Angular법⁽⁵⁾이 있다. Translation법은 2대의 카메라렌즈를 유동가시영역에 대하여 평행으로 설치하여 계측하는 방법을 말하며 Angular법은 2대의 카메라렌즈가 유동가시영역을 향하여 소정의 각으로 설치하여 계측하는 방법이며 Translation법은 카메라렌즈가 유동가시영역을 향하여 평행이 되도록 설치하여 계측하는 방법을 말한다. 이 방법은 투시방향에 대한 왜곡이 거의 없기 때문에 기록면의 좌표를 유체내부 입자좌표로 쉽게 변환할 수 있으며 확대율이 영상기록면의 변위에 무관하므로 3차원 속도성분을 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 영상기록면 좌표와 측정단면 좌표 사이의 상관함수를 구하는 작업이 필요할 뿐만 아니라 유동장의 가시용 벽면에 의한 굴절의 영향으로 카메라렌즈의 설치를 가능하면 지상면을 기준으로 평형하게 설치해야하는 단점이 있다. 이를 보완하여 개발된 3차원 PIV 계측법이 Hybrid Angular 3차원 PIV법⁽⁶⁾이다.

전술한 바와 같이 산업의 많은 분야에서 볼 수 있는 유동장의 대부분이 3차원성이 강하기 때문에 유동장의 해석을 위해서는 3차원 PIV법이 가장 이상적이라 할 수 있겠으나, 이 방법보다 기술의 실용적 측면에서 2차원 PIV 및 3차원 PIV가 현장에서 많이 사용되고 있는 추세에 있다 하겠다. 또한, 실험현장에서의 사용이 보다 간편한 것이 2차원 PIV 시스템이지만 유동장의 2차원 단면상에서의 3차원 정보가 중요하다고 판단되는 경우에는 3차원 PIV(스테레오 PIV) 시스템을 사용한다. 시간과 비용이 허용한다면 3차원 PIV 시스템으로 유동해석을 하는 쪽이 좋은 결과를 내는 것이 당연하지만 어떤 관점에서 3차원 PIV 시스템이 2차원 PIV 시스템보다 유리한 것인지를 정량적 판단기준이 있어야 한다. 즉, 3차

원 PIV가 2차원 PIV보다 유동의 물리량 계측의 관점에서 어느 정도 개선이 되는지를 정량적으로 비교 검토의 데이터가 마련되어야 한다. 지금까지는 이러한 기준이 없는 상태에서 3차원 계측이 2차원 계측보다 난류통계량 계측의 관점에서 좋을 것이라든가 막연한 관점으로부터 3차원 계측을 선호하여 왔을 뿐 이에 대한 정량적 비교검토사례는 없었다.

본 연구에서는 이에 관한 정립을 유동의 난류통계량 계측을 통하여 실시하고자 하는 것을 연구의 목적으로 삼고자 한다.

2. 표준화상을 이용한 2D-PIV와 3D-PIV계측

2.1 표준가상영상 생성

PIV계측 알고리즘의 정량적 평가를 위하여 표준데이터를 이용한 가상영상을 작성 후 이를 2차원 PIV 및 3차원 PIV 계측에 이용한다. Gharib 등⁽¹⁾은 DPIV(Digital PIV)기법의 평가를 위한 PIV 가상영상 (32 x 32 pixel의 상관영역에서 11개 정도의 입자가 포함되어 있는 경우에 8 pixel의 변위에 대한 측정오차가 0.8 pixel)을 제시했으며, Okamoto 등⁽²⁾은 젯트 유동의 3차원적 운동을 고려한 PIV 표준영상의 구성과 PIV 표준 계획 (PIV-STD3D)을 제시했다. 그러나, 초점길이, 렌즈의 굴곡, 영상의 중심으로부터의 원점의 이동과 같은 카메라의 내부 요소가 언급되지 않았다. 본 연구에서는 상호상관 2차원 PIV 및 Hybrid Angular 3차원 PIV 계측알고리즘의 표준시험을 위해서 2차원 및 3차원 계측의 최종정확도에 영향을 주는 모든 요소를 고려하였으며, 생성과정을 다음과 같이 하였다.

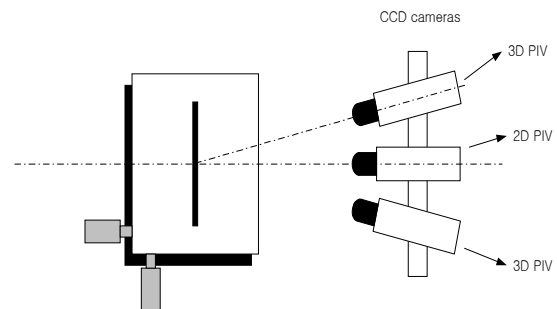


Fig. 1 Configuration of cameras for 2D and 3D PIV measurement.

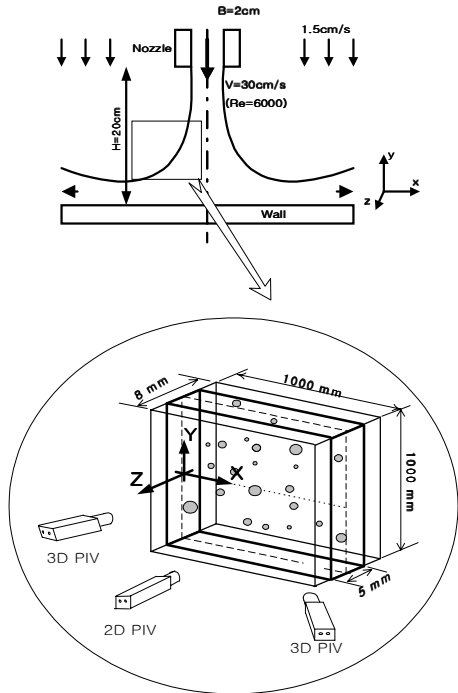


Fig. 2 Standard data sets (LES on the website of 'www.vsj.or.jp/piv').

이 때 데이터의 신뢰성을 위하여 일본가시화정보학회에서 제시하고 있는 평면충돌제트 유동에 대한 LES 계산결과를 이용하였다. Fig. 1은 가상의 유동장과 가상으로 배치된 카메라의 관계를 보이고 있다. 먼저, 기지의 카메라의 배치정보를 이용하여 교정점들에 대한 2차원 가상영상을 작성하였다. 이때, 2차원 PIV를 위한 영상은 Fig. 1에서 중앙에 가상으로 설치되어 있는 카메라로부터 얻어내었다. 3차원 PIV를 위한 영상은 Fig. 1에서 상하에 가상으로 설치되어 있는 두 대의 카메라로부터 얻어내었다. 카메라의 방향과 위치, 렌즈의 확대 및 수조벽에 의한 영향을 고려한 카메라의 교정작업⁽³⁾을 실시함으로써 카메라의 표정요소를 구하였다. 다음으로 LES (Large Eddy Simulation) 데이터를 이용하여 측정 영역내에 무작위로 보간을 실시하여 발생된 3차원 벡터의 시점과 종점의 위치정보를 이용하여 가상입자영상을 발생시켰다. LES의 데이터는 Fig. 2와 같이 일본가시화정보학회가 제안하고 있는 실험조건에서의 계산결과를 이용하였다. 직경이 2cm인 노즐로부터 분출되는 레이놀즈수는 6000이고 노즐로부터 하부에 1 cm x 1cm x 1cm 의 체적영역에의 계산결과를 표준데이터로 삼았다.

3차원의 상세한 가상영상 생성법은 도 등⁽⁷⁾과

Okamoto 등⁽⁸⁾의 연구성과에 잘 기술되어 있다. 식 (1)과 (2)는 가상영상을 발생시키는데 쓰여진 식을 나타낸다.

$$I(X, Y) = I_0 \text{Exp}\left(\frac{(X - X_p)^2 + (Y - Y_p)^2}{-(d_p/2)^2}\right) \quad (1)$$

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

$I(X, Y)$ 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 좌표를 말한다. d_p 는 입자의 지름이고 I_0 는 입자의 최대 밝기 농도치를 말하며 식(2)로 표시된다. σ_l 은 원주형 가상의 빛의 반경으로 해상도를 높이기 위하여 400으로 하였다. 한편, 스테레오 계측법을 위해서는 단면상의 조명 슬릿(slit)이 필요한데 본 연구에서는 3mm두께로 하였다.

Fig. 3은 기술한 방법으로 생성된 2D-PIV계측을 위하여 생성된 가상영상을 나타내며 Fig. 4(a) 및 4(b)는 3D-PIV를 위하여 생성된 각 카메라에 대한 가상영상을 나타낸다.

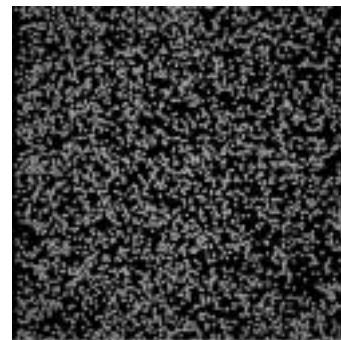
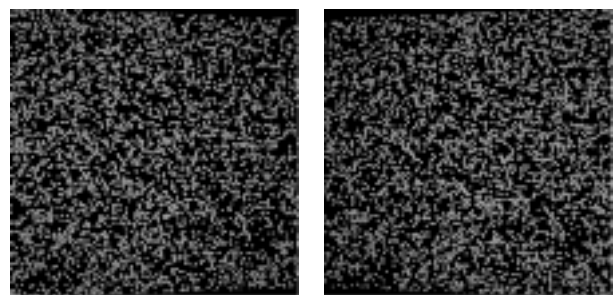
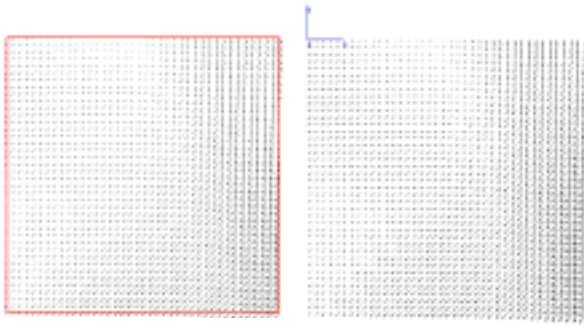


Fig. 3 Generated virtual image for 2D-PIV.



(a) viewed by camera 1 (b) viewed by camera 2

Fig. 4 Generated virtual image for 3D-PIV.



(a) by 2D-PIV (b) by 3D-PIV
Fig. 5 Obtained instantaneous vector fields.

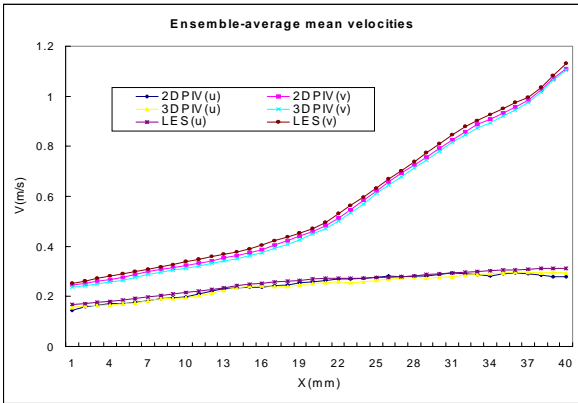


Fig. 6 Obtained velocity profiles obtained by 2D-PIV and 3D-PIV.

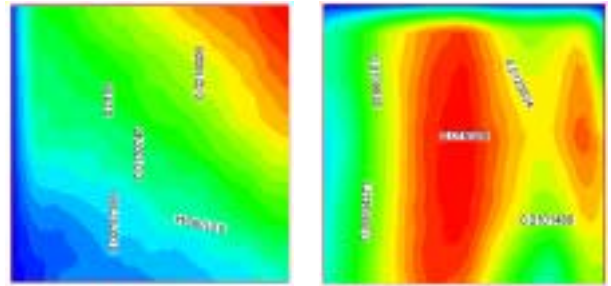
2.2 2D-PIV와 3D-PIV계측 및 성능비교

위에서 구한 가상입자영상과 카메라표정요소를 이용하여 2차원 및 3차원 PIV계측을 실시하였다. 2차원 PIV계측을 위해서는 계조치상호상관법⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾을 적용하였고 3D-PIV계측을 위해서는 하이브리드 Angular 방식의 스테레오 PIV계측법⁽¹¹⁾을 적용하였다.

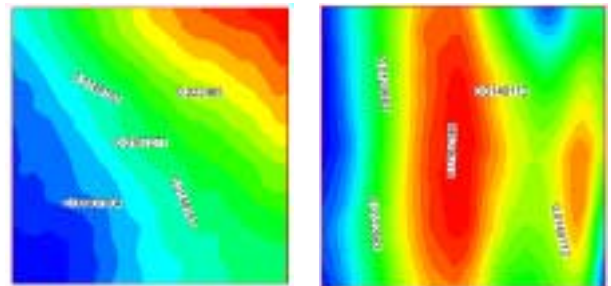
Fig. 5(a) 및 5(b)는 각각 2D-PIV와 3D-PIV에 의하여 계측한 순간속도벡터분포 결과를 나타낸다. Fig. 6은 이들의 양상을 평균분포단면의 수평방향으로의 중심선상 u와 v속도프로파일을 나타내고 있다.

두 결과 모두 LES의 결과와 그다지 차이가 나지 않는 것으로 보아 평균장 계측의 결과를 얻는 실험에서는 2차원 PIV에 의한 결과나 3차원 PIV에 의한 결과의 차이에 대하여는 그다지 염려를 하지 않아도 될 것으로 사료되었다.

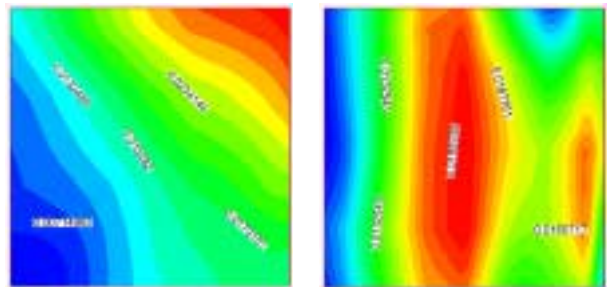
Fig. 7(a)와 (b)는 2차원 PIV에 의하여 얻어진 u성분과 v성분의 난류강도분포를 나타내고 7(c)와 7(d)는 3차원 PIV에 의하여 얻어진 u성분과



(a) (u'^2/U_0^2) by 2D-PIV (b) (v'^2/U_0^2) by 2D-PIV



(c) (u'^2/U_0^2) by 3D-PIV (d) (v'^2/U_0^2) by 3D-PIV



(e) (u'^2/U_0^2) by LES (f) (v'^2/U_0^2) by LES

Fig. 7 Distribution of turbulent intensity.

v성분의 난류강도분포를, 7(e)와 7(f)는 u성분과 v성분에 대한 원래의 LES데이터의 난류강도분포를 나타내고 있다.

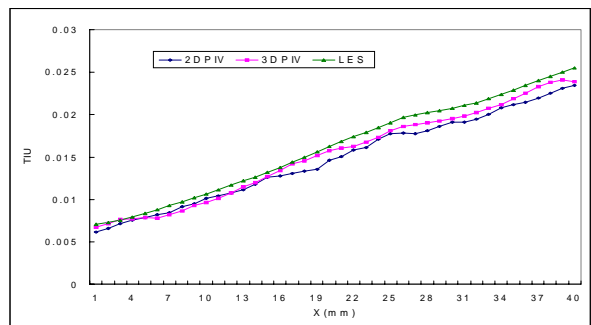


Fig. 8 Profiles of turbulent intensity for u' component(u'^2/U_0^2).

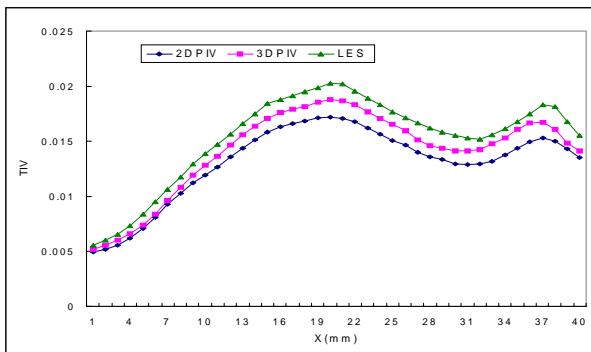


Fig. 9 Profiles of turbulent intensity for v' component (v'^2/U_0^2).

이들 분포들로부터 알 수 있듯이 3차원 PIV에 의한 결과분포가 2차원 PIV에 의한 결과분포보다 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 2차원 PIV와 3차원 PIV 그리고 LES 데이터로부터 얻어낸 난류강도 (u'^2/U_0^2)와 의 분포를 나타내고 있다. 3차원 PIV와 LES 데이터로부터 얻어낸 결과는 유사한 분포를 보이고 있으나 2차원 PIV에 의한 결과는 LES결과와는 다소 차이가 있음이 보인다. 2차원 PIV에 의한 결과는 LES보다 최대 8%정도 차이가 났다.

Fig. 9는 2차원 PIV와 3차원 PIV 그리고 LES 데이터로부터 얻어낸 난류강도 (v'^2/U_0^2)분포를 나타내고 있다. 2차원 PIV와 3차원 PIV에 의한 결과는 LES에 의한 것과 다소 차이가 있음이 보였으나, 3차원 PIV에 의한 결과는 LES보다 최대 20%정도 2차원 PIV에 의한 결과는 LES보다 최대 50%정도까지 차이가 있음이 보인다. 이는 v' 성분의 난류통계량보다 u' 성분의 난류통계량보다 LES값에 근접해 있음을 알 수 있었다.

3. 결 론

표준화상에 대한 2차원 PIV 및 3차원 PIV(스테레오 PIV) 계측을 통한 성능비교검정을 위한 연구과정에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

인터넷(<http://www.vsj.or.jp/piv>)에 올려져 있는 벽면충돌제트에 관한 LES계산 결과인 표준데이터를 이용하여 표준화상을 구축하였다.

구축된 표준화상을 이용하여 2차원 PIV 계측법의 대표적 알고리즘인 계조치상호상관법에 대한 성능평가를 실시함으로써 표준데이터와의 상대오차를 정량화 하였다. 이는 향후 2차원 PIV

계측법에 대한 성능평가기준이 될 것으로 사료된다.

구축된 표준화상을 이용하여 하이브리드 Angular 3차원 PIV 계측법의 성능평가를 통하여 표준데이터와의 상대오차를 정량화 하였다. 이는 향후 3차원 PIV 계측법에 대한 성능평가 기준이 될 것으로 사료된다.

2차원 PIV에 의한 결과와 3차원 PIV에 의한 결과 모두 평균값에 있어서는 LES의 결과와 그다지 차이가 나지 않는 것으로 보아 평균장 계측의 결과를 얻는 실험에서는 2차원이나 3차원이나 별로 무리가 없는 것으로 판명되었다. 그러나, 난류통계량에 있어서는 2차원 PIV에 의한 결과는 최대 50%정도 3차원 PIV에 의한 결과는 최대 20%정도의 오차를 보였다. 이는 2차원 PIV에 의하여 얻어지는 난류통계량의 결과는 제고되어야 할 것임을 의미한다.

제반 난류통계량에 대한 3차원 PIV 계측법에 의한 결과는 2차원 PIV 계측법에 의한 결과보다 상대적으로 오차가 적음을 표준화상을 이용한 성능평가를 통하여 알 수 있었으며 이는 난류통계량은 3차원 PIV에 의한 결과에 의존해야 함을 의미한다.

참고문헌

- (1) Maas H. G., Gruen A., Papantoniou D. A., 1993, "Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows, Part 1 Photogrammetric determination of particle coordinates," *Exp. in Fluids*, Vol.15, pp.133-146.
- (2) Kasagi, N., Nishino, K., 1991, "Probing turbulence with three dimensional particle tracking velocimetry." *Exp. Thermal and Fluid Sci.* Vol. 4, pp.601-612.
- (3) Doh, D. H., Kim, D. H., Cho, K. R., Cho, Y.B., Saga, T., Kobayashi, T., 2002, "Development of Genetic Algorithm based 3D-PTV Technique," *Journal of Visualization*, Vol. 5, No.3, pp.243-254.
- (4) Prasad A. K., Adrian R. J., 1993, "Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows," *Exp. Fluids*, Vol.

- 15, pp.49-60.
- (5) Willert, C., 1997, "Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows," *Meas. Sci. Technol.* Vol. 8, pp.1465-1479.
- (6) Doh, D. H., Cho, Y. B., Lee, W. J., Pyeon, Y. B., 2002, "Measurement of turbulent properties of a circular cylinder with a new Stereoscopic PIV," *Proc. of 2nd National Congress on Fluid Eng., Muju*, pp.471-474.
- (7) Doh, D. H., Hong, S. D., Cho, K. R., Okamoto, K., Lee, Y. W., 2000, "Construction of virtual images for a benchmark test of 3D-PTV algorithm for unsteady turbulent flow," *CD-ROM Proc. of the Millennium 9th Int'l Symp. on Flow Visualization, Edinburgh, August 22-25*, paper No.369.
- (8) Okamoto, K., Nishio, S., Kobayashi, T., Saga, T., 1997, "Standard images for particle imaging velocimetry," *Proc. of PIV'97-Fukui*, pp.229-236.
- (9) Utami, T., Blackwelder, R., 1991, "A cross correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization," *Exp. in Fluids*, Vol.10, pp.213-223.
- (10) Doh, D. H., Choi, S. H., Hong, S. D., Baek, T. S., Kobayashi, T., Saga, T., 1998, "Quantitative real time measurement of an acoustic energy flow by PIV," *CD-ROM Proc. of VSJ-SPIE98, Paper No. S3-9-4*, Yokohama, pp.268-269.
- (11) Doh, D. H., Lee, W. J., Cho, K. R., Kim, D. H., 2001, "Stereoscopic PIV," *Proc. of KSME Fall Meeting, Chonbuk National Univ.*, pp.394-399.