가시화정보학회지, 제1권, 제1호, (2003) 92~97
<논 문>

스테레오 PTV법의 개발

도덕희† · 이원제* · 조용범* · 편용범**

Development of a Stereoscopic PTV

Deog Hee Doh† · Won Je Lee* · Yong Beom Cho* and Yong Beom Pyeon**

Abstract. A new Stereoscopic PTV was developed using two CCD cameras, stereoscopic photogrammetry based on a 3D-PTV principle. Virtual images were produced for the benchmark test of the constructed Stereoscopic PTV technique. The arrangement of the two cameras was based on angular position. The calibration of cameras and the pair-matching of the three-dimensional velocity vectors were based on the Genetic Algorithm based 3D-PTV technique. The constructed Stereoscopic PTV technique was tested on the standard images of the impinged jet proposed by VSJ. The results obtained by the constructed system showed good agreements with the original data.

Key Words : Stereoscopic PTV(스테레오 PTV), 3D-PTV(3차원 입자영상유속계), Virtual Image(가상영상), Genetic Algorithm(유전알고리듬), Impinged Jet(충돌제트)

1. 서 론

유동장의 유체와 동일한 비중의 미소추적입자를 투입 하여 광원과 카메라로 가시화 한 후 디지털화상처리를 이용하여 이들 입자들의 운동을 정량적으로 추적하는 방법이 PIV법 이다.[1,2] 이 방법은 동시 다점 계측이라는 장점으로부터 많이 이용되어 왔으나 대부분이 2차원적인 정보만을 제공한다. 산업현장에서 나타나는 대부분의 유동장이 3차원성이 강한 난류라는 점으로부터 유동장의 공간에 걸친 벡터 속도 3성분에 대한 계측의 필요성으로부터 3차원 PTV법이 개발되었으나 범용적으로 사용하기 위해서는 사용자에게 많은 경험을 요한다.[3]

3차원 계측법 중의 하나로 Stereoscopic PIV 계측법[4,5,6]은 현재 시판되고 있는 PIV분야 계측장비들의 성능을 최대한 활용함으로써 유동의 상세 구조까지 제공할 수 있다는 점으로부터 최근 많이 이용되고 있다. 이 시스템에서는 레이저 평면 광으로 조사된 유동장 단면을 향하여 설치된 두 대의 카메라의 2차원 영상정보패턴으로부터 속도분포를 구하는 관계로 angular displacement기법에서의 out-of-plane의 속도성분 측정오차는 측정평면의 법선과 카메라 렌즈 축과 이루는 각이 45도 이내일 때 in-plane에서 보다 크게 나타난다.

한편, Stereoscopic PIV 계측법에는 접근 방법에 따라 2대의 카메라렌즈를 유동가시영역에 대하여 평형으로 설치하여 계측하는 Translation 법과 2대의 카메라렌즈가 유동가시영역과 수직하지 못하고 조명의 평면과 소정의 각도를 이루게 하여 속도 장을 측정하는 Angular 법이 있다.[4,5,6] Translation법은 투시 방향에 대한 왜곡이 적기 때문에 기록면의 좌표를 유체 내부 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 투시왜곡이 발생하게 되므로 영상 기록면 좌표와 측정단면 좌표

*한국해양대 대학원
**㈜티엔텍
†한국해양대 기계정보공학부
E-mail : doh@hanara.kmaritime.ac.kr

사이의 상관 함수를 구하는 작업이 필요할 뿐만 아니라 유동장의 가시용 벽면에 의한 굴절의 영향으로 카메라렌즈의 설치를 가능하면 지상면을 기준으로 평행하게 설치해야 하는 단점이 있다. 윤과 이[7]는 이와 같은 점을 고려하여 렌즈가 Tilting기능이 있는 카메라를 사용한 Scheimpflug방식의 Stereoscopic PIV법을 구축하였다.

Stereoscopic PIV 계측법은 원리상 얻어지는 속도벡터가 격자상에서 얻어지는 결과이므로 out-of-plane의 속도성분에 대한 측정오차가 크게 나타날 뿐만 아니라 정해진 해상도를 지닌 카메라시스템으로 격자보다 작은 스케일의 유동을 정량화 하기란 측정원리상 어려운 일이다. 일반적으로 PTV계측법은 입자 하나 하나에 대한 운동정보를 가지고 있으므로 격자보다 작은 스케일의 입자운동측정에 적합하다. 본 연구에서는 Stereoscopic PIV 계측법이 가지고 있는 문제점을 극복하기 위하여 유전알고리듬을 이용한 3차원 PTV계측법[8,9]에 의거한 Stereoscopic PTV계측법을 구축하였으므로 이에 보고하고자 한다. VSJ (Visualization Society of Japan)에서 제공하고 있는 충돌제트유동에 대한 LES 데이터를 이용한 가상영상시험[10]을 통하여 구축된 Stereoscopic PTV 계측법의 성능평가를 실시함으로써 그 유효성을 확인하였다.

2. 스테레오 PTV 시스템

2.1 가상 영상 구현

PIV 및 PTV 계측법과 계측 알고리듬의 성능 평가를 위하여 VSJ에서는 인터넷을 통하여 표준가상영상과 이를 형성하는데 쓰인 원래의 LES데이터를 제공하고 있다. VSJ에서는 이 데이터를 이용하여 제작한 영상을 배포하고 있지만(표준영상이라고 함) 정해진 입자개수에 대한 영상을 제공하고 있으므로 다양한 입자개수의 영상이 필요할 경우에는 제작의뢰를 해야 하는 제약이 있다. 본 연구에서는 가상영상의 효용성을 향상시키기 위하여 VSJ가 제공하고 있는 충돌제트에 대한 LES데이터를 이용하여 자체적으로 가상영상을 제작하였다. 이때, VSJ의 표준가상영상제작에 적용된 Okamoto 등[11]이 제시한 것처럼 입자의 밀도, 입자의 농도, 속도, 속도 기울기, 레이저 빔의 두께, 카메라의 방향과 위치, 렌즈의 확대 정도 등을 고려하였다. 가상영상의 제작과정은 다음과 같다. 먼저, LES 속도벡터데이터를 이용하여 측정용적 내에 무작위로

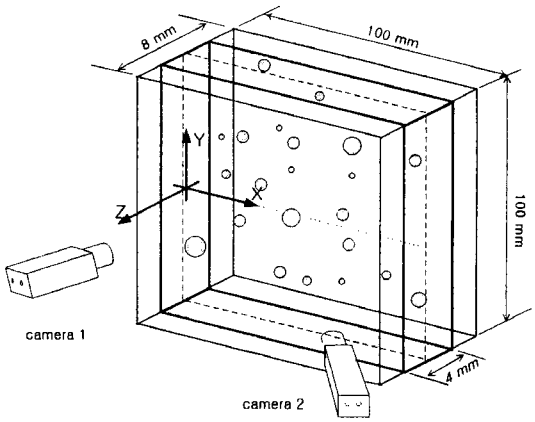

Fig. 1. Camera arrangement for the generation of virtual images.

새로운 속도벡터 데이터를 발생시킨다. 이 때, 발생되는 속도벡터의 크기는 격자점상의 LES데이터를 보간하여 구하였다. 발생된 속도벡터의 시점과 종점을 입자영상의 중심위치로 보아 식 (1)에 의거 가상영상을 작성하였다.

$$I(X,Y) = I_o \times \mathrm{Exp}\left(\frac{(X-Xp)^2+(Y-Yp)^2}{-(dp/2)^2}\right)\times\frac{L_c}{L_a}$$

$$I_o = 240\times\mathrm{Exp}\left(-\frac{z_p{}^2+x_p{}^2}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

단, I_o: 광도(Intensity)

L_c: 카메라에서 피사체까지의 거리(500 mm)

L_a: 카메라각과 수평 화각에 따라 변화는 거리

X_p, Y_p: 임의의 입자 중심 위치

$I\ (X,\ Y)$는 영상좌표$(X,\ Y)$에서의 농도를 의미한다. $(X_p,\ Y_p)$는 영상좌표$(X,\ Y)$가 절대공간상에 투시되었을 때의 좌표를 나타내고 $(x_p,\ y_p,\ z_p)$는 입자의 절대좌표를 의미한다. σ는 원통형 광원의 반경을 의미한다. 입자의 크기는 평균 직경 0.5 mm으로 하였으며 입자의 최대밝기를 240계조치로 하였다. 2차원 단면광원내의 입자들을 구현하기 위하여 Fig. 1과 같은 가상의 2차원 단면형상의 공간(100×100×8 mm)내에 두께 4 mm의 2차원 가시광원을 조사한 상황의 가상영상을 작성하였다. 즉, 이 영역내에 있는 입자영상만을 사용하였다. 또한, 영상영역 안으로 벗어나거나 새로 들어오는 입자들도 존재함을 고려함으로써 실제 실험 상황과 같도록 입자영상을 발생시켰다. 생성된 이미지의 해상도는

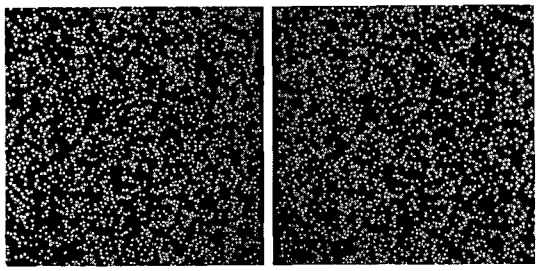

Fig. 2. Virtual image (Particles number=3000). (Camera viewing angle between two cameras=20°)

512×512 pixel이며, 각 pixel은 256계조치를 가진다. 시간간격은 입자의 최대 이동거리가 10 pixel보다 작도록 설정하였다. 이들 입자영상들의 공간상으로 변환을 위하여 이미 알고 있는 카메라의 파라메타(절대좌표계에 대한 상대위치 및 카메라렌즈의 왜곡수차 등을 고려한 요소)를 사용하였다. 영상상의 입자의 개수는 50에서 3000개를 사용하였다. Fig. 2는 위와 같이 하여 생성된 입자수가 3000일 때의 영상을 나타낸다. 이들 시간연속적인 영상을 이용하여 3차원 계측을 실시하게 된다.

2.2 스테레오 PTV원리

Fig. 3은 스테레오 PTV 계측법의 원리를 나타낸다. 두 대의 카메라의 입자영상 사진좌표, $p_1(x, y)$, $p_2(x, y)$를 이용하여 스테레오매칭법[12]에 의거하여 3차원 절대좌표, P(X, Y, Z)를 구할 수 있다. 식 (2)는 각 카메라의 입자영상의 사진좌표와 절대좌표와의 관계를 나타내고 있다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}a_{12}a_{13} \\ a_{21}a_{22}a_{23} \\ a_{31}a_{32}a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{pmatrix} \tag{2}$$

여기서, c는 카메라의 초점거리(pixel 단위), x, y는 사진좌표, X_o, Y_o, Z_o 는 카메라의 원점, a_{ij}(i=1, 2, 3, j=1, 2, 3)는 카메라교정작업으로부터 얻어지는 회전행렬이다. 이론적으로는 Fig. 3과 같이 두 대의 카메라(1, 2)의 입자영상 사진좌표를 통과하는 직선은 한 점 P에서 만나야겠지만 실제 좌표의 위치에서는 반드시 그렇지 못하므로 P점의 3차원 위치는 식 (3)과 같이 (2)에서 구한 각 카메라의 절대좌표의 평균을 취하였다. X_1, Y_1, Z_1과 X_2, Y_2, Z_2는 식 (2)로 표현되는 각 카메라(1, 2)에서의 절대좌표를 나타낸다.

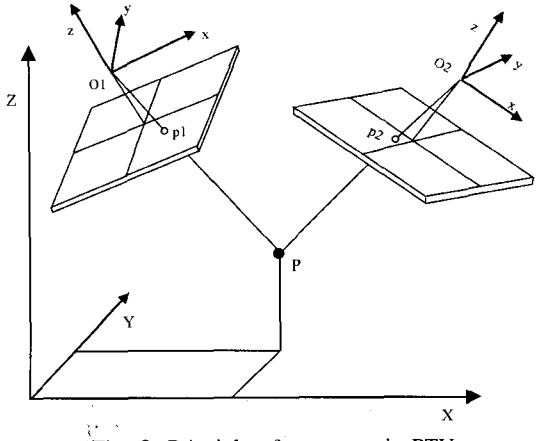

Fig. 3. Principle of stereoscopic PTV.

$$\begin{matrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{matrix} = \frac{1}{2}\left\{ \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} \right\} \tag{3}$$

한편, 카메라교정은 도 등[8,9,12]이 사용한 방법을 적용하였다. 이들 방법에서는 렌즈왜곡과 측정 유동장의 벽면에 대한 굴절율을 고려하고 있으며 그들에 의하면 측정영역크기 대비 위치측정오차가 약 0.3%정도임이 확인되었다.

Fig. 4는 본 연구에서 적용된 유전알고리듬 (GA)기반의 스테레오 PTV법의 계산원리를 나타낸다. 3차원 속도벡터를 구하기 위한 두 시각간의 동일입자 판별 알고리듬으로서는 도 등이 사용한 유전알고리듬 기반의 3D-PTV법[8,9]을 적용하였으며 2차원 단면광원이 존재하는 영역을 한정하여 계산함으로써 원시벡터에 있어서의 오류벡터를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 속도벡터 회복률도 향상시킬 수 있었다.

GA계산을 위한 연산자로서는 초기개체 생성 (Initialization), 격리(Isolation), 재생산 (Reproduction), 교배(Crossover) 및 이주(Migration)를 적용하였다. 초기개체생성에는 각 카메라(1, 2)의 입자들의 시점과 종점의 사진좌표를 사용하였다. GA계산을 위한 목적함수로서는 유체의 연속체 개념에 의거한 수정연속식과 두 카메라의 공선이 형성하는 두 직선간의 최단거리 식[8,9]을 적용하였다. 보다 상세한 GA의 계산과정은 참고문헌[9]에 기술되어 있다.

2.3 성능평가

전 절에서 얻어진 LES표준데이터에 대한 가상영상을 이용하여 본 연구에서 구축된 스테레오 PTV법의

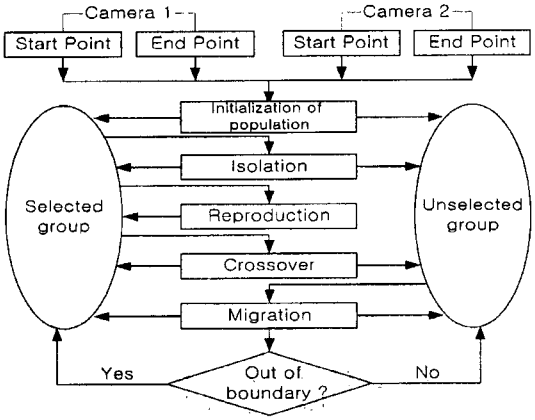

Fig. 4. Principle of particle tracking using GA.

Fig. 5. Recovered 3D vectors.

성능을 평가하였다. 원래의 LES의 속도벡터 데이터와 이를 이용하여 얻어진 가상영상에 대한 계측된 속도벡터 데이터와의 오차가 0.05 mm보다 작은 벡터를 회복된 속도벡터(Recovered vector)로 정의하였으며 사용된 벡터수와 회복된 속도벡터수와의 비를 속도벡터 회복률(Recovery ratio)로 정의하였다.

Fig. 5는 입자수가 500개일 때 얻어진 속도벡터분포의 한 예를 보이고 있다. Fig. 6은 두 카메라간의 사이 각의 변화에 대한 상대오차의 변화를 보이고 있다. 두 카메라간의 각에 따른 속도벡터회복률의 변화가 없음을 알 수 있다. Fig. 7은 2차원 단면광원의 두께 변화에 따른 속도벡터회복률의 변화를 보인다. 두께 변화에 따른 변화가 그다지 없음을 알 수 있다. Fig. 8은 가상영상 입자수에 따른 속도벡터회복률의 변화를 보인다. 입자수가 증가함에 따라 속도벡터회복률이 떨어지는 경향을 보이나 입자수가 3000개일 때에도 여전히 회복률이 70% 정도를 유지하고 있음을 알 수 있다. 입자수의 증가에 따라 회복율이 떨어지는 이유는 3차원 공간의 데이터가 카메라 영상의 2차원 평면으로 변환될 때 입자들의 겹침으로 인하여 사라지

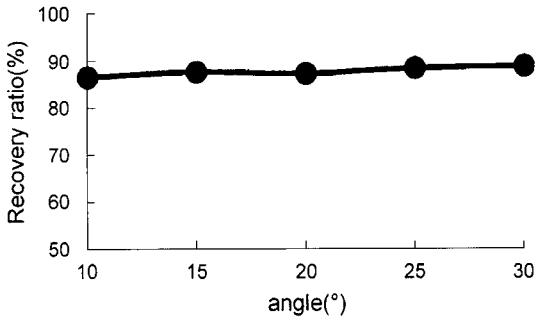

Fig. 6. Recovery ratio versus camera angles.

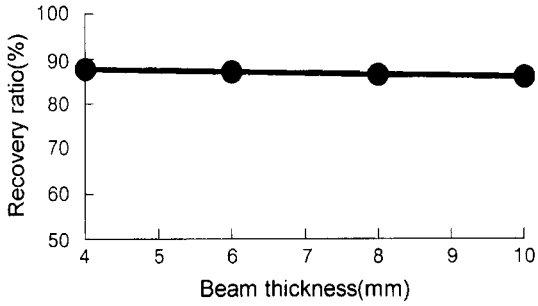

Fig. 7. Recovery ratio versus light beam thickness.

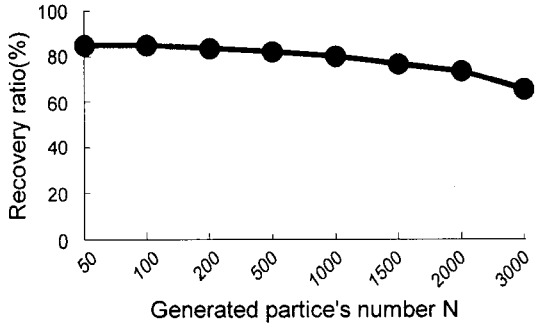

Fig. 8. Recovery ratio versus particle numbers.

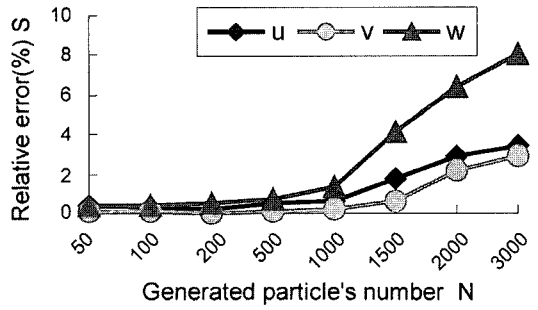

Fig. 9. Relative error(S) versus particle numbers.

거나 이로 인한 입자중심 값 자체에 오차를 가지기 때문이다. 한편, 본 계측법의 오차를 평가하기 위하여

식 (4)로 표현되는 상대오차(S)를 정의하여 입자수의 증가에 따른 오차를 평가하였다.

$$S = \frac{1}{N}\sum \frac{|V_{ref} - V_{mea}|}{V_{ref}} \times 100\ \% \qquad (4)$$

V_{ref}와 V_{mea}는 각각 전술한 바와 같이 표준LES 속도벡터 데이터(충돌제트)와 이를 이용하여 작성된 가상영상에 대하여 계측한 결과의 속도벡터를 나타낸다. Fig. 9는 입자개수에 따른 상대오차의 변화를 나타내고 있다. 입자수가 1000개 이내일 때는 u, v, w성분 모두 상대오차가 2%이내였지만 1000개 이상부터 급격히 증가하는 추세를 보이고 있다. 하지만, 입자수가 3000개 정도부터는 더 이상 증가하지 않음을 보인다. 이는 계측알고리듬의 특성상 입자수가 많을수록 대응되는 입자에 대한 계측정도가 상승됨을 의미한다. w성분에 대한 오차가 u, v성분보다 상대적으로 큼을 알 수 있다. 대체로 상대오차는 입자수가 3000개일 때 최대 8% 전후임을 알 수가 있다.

2.4 계측 결과

전절에서 구축한 충돌제트에 대한 LES표준데이터를 이용하여 작성된 가상영상을 이용하여 본 계측법으로 각종 물리량을 계측하여 이를 표준데이터와 비교하여 보았다. 시간연속적으로 얻어진 데이터들을 정량적 비교평가를 위하여 Gaussian Window 보간법[13]에 의거한 격자상의 데이터로 변환하였다.

Fig. 10(a) 및 Fig. 10(b)는 전술한 바와 같이 측정영역(10 cm×10 cm×0.4 cm)내에서의 LES표준데이터 및 계측에 의하여 얻어진 난류운동에너지, $q^2 = 1/2(\overline{u'^2}+\overline{v'^2}+\overline{w'^2})/U_o^2$, 분포를 를 보이고 있다. (U_o: 충돌제트 노즐출구 평균속도). Z방향으로 0.4 cm의 폭에 대한 계측을 실시하였으므로 Z방향으로 3차원 분포를 보이고 있다. 또한, 두 분포가 매우 유사한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 구축된 계측법이 타당한 결과를 얻고 있음을 의미한다. Fig. 11은 Fig. 10의 중앙 단면선상에서의 X방향 프로파일을 나타낸다. 계측에 의한 값이 LES데이터 값보다 다소 높게 나타나지만 그 차이는 그림의 값에서 알 수 있는 바와 같이 매우 작다. Fig. 12는 동일한 선상에서의 레이놀즈응력, $\overline{u'v'}/U_o^2$, 프로파일을 나타낸다. LES데이터를 이용하여 얻어진 레이놀즈응력의 값이 계측법으로 얻어진 값보다 전반적으로 약간 크게 나타나 보인다. 이는 난류운동에너지 계산에 사용된 w'성분의 계측오차가 컸던 것에 기인한 것으로 사료된다. Fig. 13은 중앙 단면선상에서의 순간와도에 대한 X방향 프로파일을 나타낸다. 구축된 계측시스템은 대규모 와(Large Eddy)를 전반적으로 잘 재현하고 있으나 국소적 소규모와(Small Eddy)에 대해서는 다소 불일치함이 보인다. 그러나, 이 값은 순간값이므로 w성분에 대한 계측불확실성을 향상시키기만 한다면 정도 높은 난류통계량을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

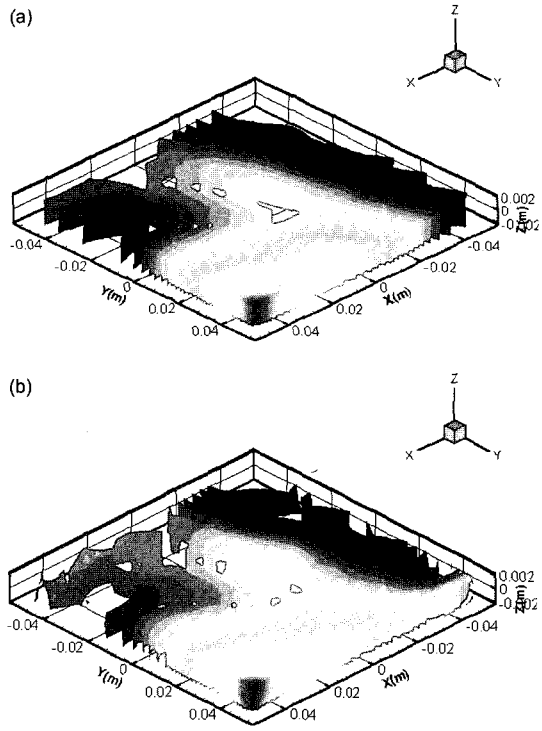

Fig. 10. (a) Turbulent kinetic energy distribution. (by LES), (b) Turbulent kinetic energy distribution. (by Stereoscopic PTV)

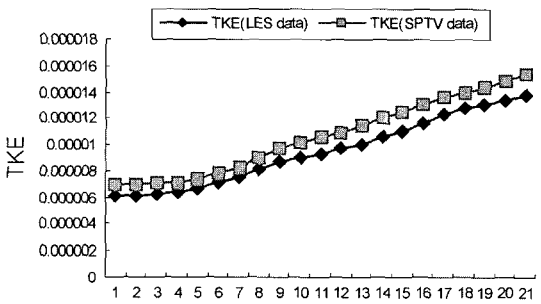

Fig. 11. Turbulent kinetic energy profiles on the center line of the field.

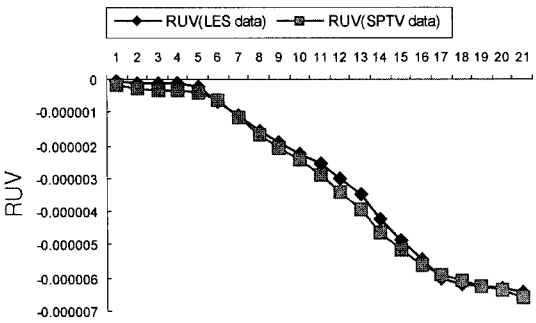

Fig. 12. Reynolds stress profiles on the center line of the field.

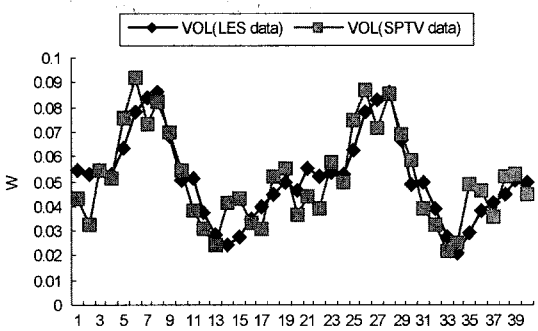

Fig. 13. Vorticity profile on the center line of the field.

3. 결 론

Stereoscopic PTV 계측법을 구축하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

충돌제트에 대한 LES표준데이터를 이용하여 본 연구에서 구축한 계측법의 성능평가를 위한 가상영상을 구축하였다.

속도벡터회복률은 구축된 계측법은 두 대의 카메라가 이루는 각과 광원의 두께에는 크게 영향을 받지 않으며 입자수에 영향을 받음을 성능평가를 통하여 알게 되었다.

구축된 계측법의 속도벡터회복률은 입자수가 3000개일 때 70% 이상을 유지하였으며 이 때, LES데이터와 구축한 계측법으로 계측한 결과와의 상대오차가 u, v성분에 대하여는 3% 정도이며 w성분에 대하여는 8% 전후이었다.

LES데이터와 구축된 계측법으로 얻어진 제반 난류통계량에 대한 정량적 비교를 통하여 구축한 계측법이 난류유동장의 계측에 유효함을 확인하였다.

본 계측법은 미세난류 계측의 적용에도 가능할 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) Doh, D.H., 1998, "PIV Techniques", Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.40(10), pp.36~41.
3) Doh, D.H., 1999, "Three-Dimensional Measureents of Flows using Three-Dimensional Particle Image Velocimetry", Proc. KSME Fluid Engineering Division Spring Conference, pp.41~49.
4) Adamczyk, A.A. and 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.
5) Prasad, A.K. and Adrian, R.J., 1993, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry Applied to Liquid Flows", Exp. in Fluids, Vol.15, pp.49~60.
6) Willert, C., 1997, "Stereoscopic Digital Particle Image Velocitmetry for Application in Wind Tunnel Flows", Meas. Sci. Technol. Vol.8, pp.1465~1479.
7) 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.
8) Doh, D.H., Cho, K.R., Cho Y.B., Baek T.S., Ryu D. S., Hwang Y.C. and Chang K.S., 2001, "Development of a New 3D-PTV Using Genetic Algorithm", Proc. 3rd Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing, PSFVIP-3, Maui, Hawaii, Mar. 18~21, CD-ROM Proc. Paper No. F3134, pp.241~242.
9) Doh, D.H., Kim, D.H., Cho, Y.B. and Lee, W.J., 2002, "Developmemt of Genetic Algorithm Based 3D-PTV Technique", Journal of Visualization, Vol. 5(3), pp.243~254.
10) VSJ(Visualization Society of Japan), http://www.vsj.or.jp/piv
11) Okamoto, K., Nishio, S., Kobayashi, T. and Saga, T., 1997, "Standard Images for Particle Imaging Velocimetry", Proc. PIV'97-Fukui, Fukui, pp.229~236.
12) Doh, D.H., Kim, D.H., Lee, W.J., Cho, K.R. and Pyeon, Y.B., 2001, "Stereoscopic PIV", Proc. KSME Annual Spring Conference (B), pp.394~399.
13) Agui, J.C. and Jimenez, J., 1987, "On the Performance of Particle Tracking", J. Fluid Mech., Vol.185(447).