

표준영상을 이용한 스테레오 PIV와 스테레오 PTV의 성능비교

도덕희[†]·황태규^{*}·조용범^{**}·편용범^{**}

Performance Tests on Stereoscopic PIV and Stereoscopic PTV using Standard Images

Doh D. H., Hwang T. G., Cho Y. B. and Pyun Y. B.

Key Words: Stereoscopic PTV(스테레오 PTV), Stereoscopic PIV (스테레오 PIV), Impinged Jet(충돌분류), LES(대규모와수치모사), Turbulent Properties(난류통계량)

Abstract

The performances of the newly constructed Stereoscopic PTV and Stereoscopic PIV which had been completed based on a 3D-PTV principle are tested using the Standard Images. Virtual images were produced for the benchmark tests of the constructed two Stereoscopic techniques. 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 Genetic Algorithm based 3D-PTV technique. The Standard data of LES are on the impinged jet proposed by VSJ. It is shown that the results obtained by Stereoscopic PTV have better reliability than those by Stereoscopic PTV.

기호설명

x, y : 사진좌표 [pixel]
 X, Y, Z : 절대좌표 [mm]
 d_p : Diameter of particle
 I : Intensity of particle
 I_0 : Maximum intensity of particle
 u, v, w : Velocity component of x, y, z axis

1. 서론

유동장의 유체와 동일한 비중의 미소추적입자를 투입 하여 광원과 카메라로 가시화 한 후 디지털화상처리를 이용하여 이들 입자들의 운동을 정량적으로 추적하는 방법을 PIV법 이다⁽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 연구성과 들만이 보고되어 왔다⁽³⁾. 한편, 3차원 계측법 중의 하나로 Stereoscopic PIV 계측법⁽⁴⁾은 현재 시판되고 있는 PIV분야 계측장비들의 성능을 최대한 활용함으로써 유동의 상세 구조까지 제공할 수

[†] 정회원. 한국해양대학교 기계정보공학부
 doh@hanara.hhu.ac.kr, Tel:051-410-4364

^{*} 학생회원. 한국해양대 대학원

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

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 측정된 평면 데이터로부터 도출하게 된다. Stereoscopic PIV 계측법에는 접근 방법에 따라 2대의 카메라렌즈를 유동가시영역에 대하여 평행으로 설치하여 계측하는 Translation 방법과 2대의 카메라렌즈가 유동가시영역과 수직하지 못하고 조명의 평면과 소정의 각도를 이루게 하여 속도 장을 측정하는 Angular 방법이 있다⁽⁵⁾. Translation법은 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. 도 등⁽⁶⁾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 Stereoscopic PIV법을 제시하였다. 그러나, PIV는 원리상 얻어지는 속도벡터가 격자상에서 얻어지는 결과이므로 격자보다 작은 유동 속도성분을 얻어내기란 쉽지가 않다. 따라서, 본 연구에서는 유전알고리즘을 이용한 3차원 PTV 계측법⁽⁷⁾⁽⁸⁾에 의거한 Stereo-PTV 계측법을 구축함과 동시에 기존의 3차원 계측법인 Stereoscopic PIV법이 지니고 있는 단점을 극복하고자 하였으며 서로의 계측법으로 얻어낸 실시간 난류 통계량의 비교 평가를 하면서 결과를

정리하고자 한다. 본 연구에서는 VSJ (Visualization Society of Japan)에서 제공하고 있는 충돌제트유동에 대한 LES 계산결과를 이용한 가상영상에 대하여 구축된 Stereo PIV 계측기법과 Stereo PTV 계측기법의 성능평가를 실시함으로써 계측법의 유용성을 확인하였다.

2. 스테레오 PIV/PTV 계측을 위한 표준화상

2.1 표준가상영상 생성

PIV계측 알고리즘의 정량적 평가를 위하여 표준데이터를 이용한 가상영상을 작성 후 이를 2차원 PIV 및 3차원 PIV 계측에 이용한다. Gharib 등⁽⁹⁾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⁽¹⁰⁾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 스테레오 PIV 및 스테레오 PTV 계측알고리즘에 대한 표준시험에 있어서 3차원 계측결과의 정확성에 영향을 주는 모든 요소를 고려하였다.

Fig. 1은 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 격자상에서의 속도벡터 정보로부터 거리역수보간⁽⁷⁾으로부터 구해진 점을 속도벡터의 종점으로 정의하였다. 이 때 데이터의 신뢰성 확보를 위하여 일본가시화정보학회에서 제시하고 있는 평면

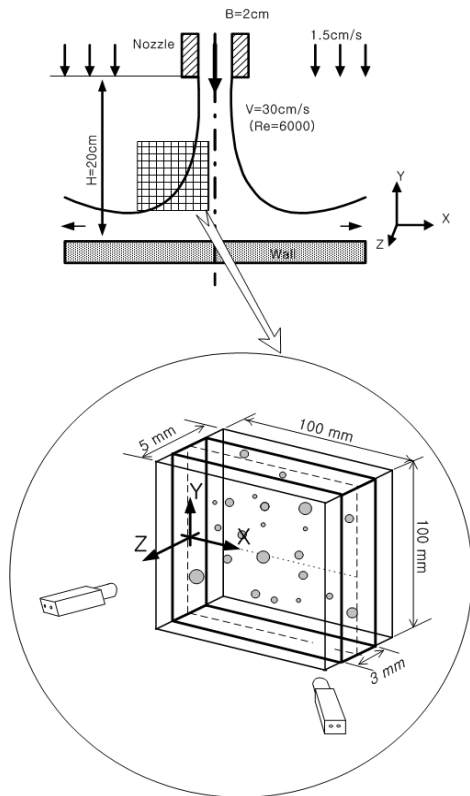


Fig. 1 Stereoscopic arrangements of camera and virtual data sets (LES on the website of 'www.vsj.or.jp/piv')

충돌제트 유동에 대한 LES 계산결과를 이용하였다. 그림에 나타나 있는 바와 같이 직경이 2cm인 노즐로부터 분출되는 레이놀즈수는 6000이고 노즐로부터 하부에 100mm x 100mm x 100mm 의 체적영역에의 LES계산결과를 표준데이터로 삼았다.

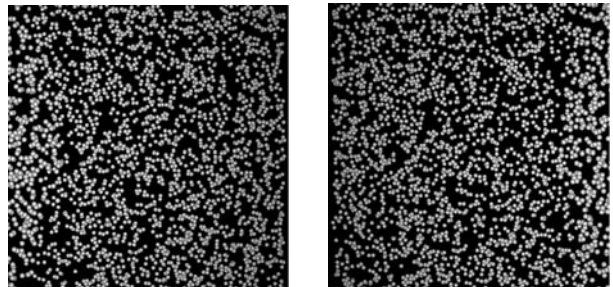
벡터의 시점과 종점으로 결정된 점에 있어서 아래의 식 (1)을 이용하여 입자영상을 발생시켰다⁽¹¹⁾. 여기서, $I(X, Y)$ 는 입자의 위치(X, Y)에서의 농도치를 말하며 (X_p, Y_p) 는 공간상의 입자 위치인 (x_p, y_p, z_p) 가 영상으로 투영되었을 때의 사진좌표이다. d_p 는 입자의 지름이고 I_0 는 입자의 위치에 따른 조명의 영향을 고려하기 위하여 원통형 광원이 조사된다고 가정한 식 (2)와 같이 된다.

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

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

이때, σ_i 은 원통형 가상광원의 반경으로서 본 연구에서는 400mm로 하였다. 생성된 이미지의 해상도는 512x512 pixel이며, 각 pixel은 256(gray level, 8bit)이다. 보다 상세한 3차원 공간에서의 가상영상 생성법은 Okamoto 등⁽¹⁰⁾과 도 등⁽¹¹⁾의 연구성과에 잘 기술되어 있다.

Fig. 2는 기술한 방법으로 생성한 두 대의 카메라에 대한 스테레오 가상영상을 나타낸다.



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

Fig. 2 Stereoscopic virtual images.

각 영상들의 시간간격은 15msec로 정하였으며 난류통계량을 얻기 위하여 총 1000장의 시간 연속적인 데이터를 사용하였다. 한편, 도 등⁽⁶⁾에 의하면 스테레오 PIV를 위해서는 카메라간의 각도가 측정면을 향하여 40° 이고, 입자의 밀도가 한 화면당 평균 2000개 이상이면서, 광원의 두께가 3mm일 때 최상의 조건을 유지하므로 본 연구에서도 이를 적용하였다.

3. 스테레오-PIV 와 스테레오-PTV 계측시스템

3.1 계측알고리즘

입자들의 3차원 위치계산에는 LES 3차원 벡터의 시점과 종점을 2차원 좌표로 변환시킨 입자중심과 이들 입자중심 데이터를 이용하여 생성한 가상입자에 대한 영상처리(2치화)를 실시하여 얻어낸 입자중심의 좌표값을 이용하여 3차원 속도벡터를 복원하였다. 3차원 속도벡터를 구하기 위한 알고리즘으로는 도 등이 사용한 유전알고리즘 기반의 3D-PTV법⁽⁸⁾과 Stereoscopic PIV법⁽⁶⁾을 적용하

였다.

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 충돌제트에 대한 LES 계산결과를 이용하여 Fig. 1의 영역에 임의로 발생시킨 3차원 속도벡터와 계측 알고리즘들로 구해진 벡터를 보여주고 있다. 이 벡터들의 시점과 종점을 기준으로 가상영상을 만들었다. Fig 3은 3차원 속도벡터를 구하기 위해 영상 변환 기법 등을 이용한 Stereoscopic PIV⁽⁶⁾을 적용하여 얻어진 속도벡터를 보여주고 있으며, Fig 4는 구축된 Stereoscopic-PTV⁽¹²⁾법으로 계산한 순간속도벡터 분포를 보여주고 있다. Fig 5는 Stereoscopic PIV 계측결과와 비교하기 위해 Stereoscopic PTV에 의해 구해진 결과인 Fig. 4의 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. 6은 3차원 스테레오 PIV와 스테레오 PTV계측시스템으로 얻어낸 속도벡터의 값을 LES데이터와 상대오차를 구하여 나타낸 표이다.

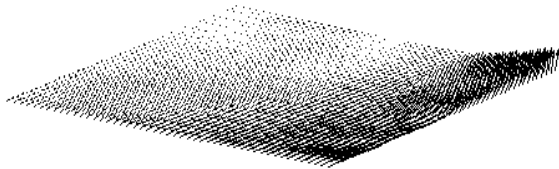


Fig. 3 Obtained vectors by Stereoscopic-PIV.



Fig. 4 Obtained vectors by Stereoscopic-PTV.



Fig. 5 Interpolated vectors obtained by Stereoscopic-PTV.

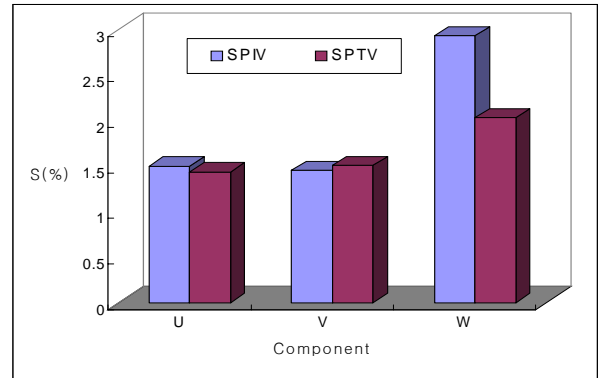


Fig. 6 Relative error (%).

상대오차는 LES에 의한 충돌제트데이터와 각각 스테레오 PIV와 스테레오 PTV에 의하여 계측된 데이터와의 비를 나타내며 다음 식 (3)으로 정의하였다.

$$S = \frac{1}{N} \sum \frac{V_{les} - V_{mea}}{V_{mea}} \times 100\% \quad (3)$$

V_{les} 와 V_{mea} 는 각각 충돌제트에 대한 LES데이터와 각각 스테레오 PIV와 스테레오 PTV에 의한 계측 데이터를 의미하며 N은 격자의 개수이다. 상대오차가 스테레오 PTV에 비해 스테레오 PIV의 오차가 큼이 알 수 있다. 특히 스테레오 PIV의 w성분에서 가장 크게 나타났으며 약 3%이내인 것을 알 수 있다. w성분의 오차가 큰 것은 카메라방향으로의 계측불확실성이 존재함을 의미하며 스테레오 PTV 보다 스테레오 PIV가 더 크게 계측불확실성의 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

3.2 성능비교

스테레오 PIV와 스테레오 PTV 계측법에 의해 구해진 난류통계량과 LES에 의하여 구해진 난류통계량과의 비교를 하였다. 시간연속적으로 얻어진 데이터들을 정량적 비교평가를 위하여 Gaussian Window 보간법에 의거한 격자상의 데이터로 변환하였다. Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 각각 스테레오 PIV와 스테레오 PTV와 LES의 난류 운동 에너지 분포를 보이고 있다. Fig. 10은 제트중앙단면상에서의 난류 운동 에너지의 프로파일을 보이고 있다. LES에 의하여 얻어진 결과와 스테레오PTV 계측시스템에 의하여 얻어진

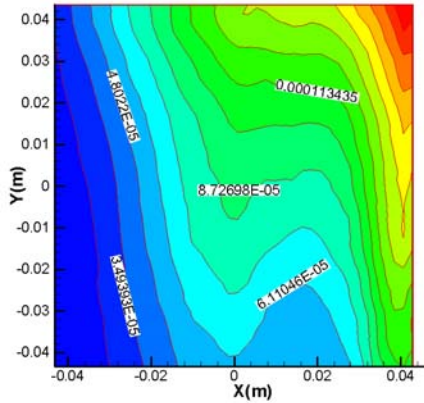


Fig. 7 Turbulent kinetic energy distribution obtained by Stereoscopic PIV.

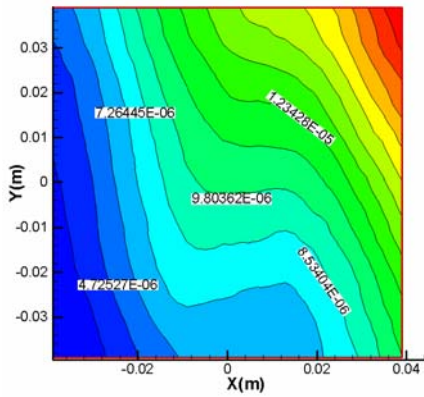


Fig. 8 Turbulent kinetic energy distribution obtained by Stereoscopic PTV.

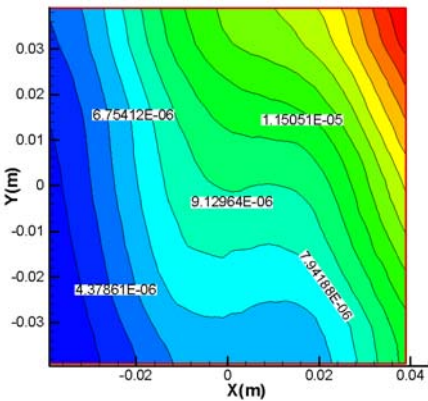


Fig. 9 Turbulent kinetic energy distribution obtained by LES.

각 스테레오 PIV와 스테레오 PTV와 LES의 난류 운동 에너지 분포를 보이고 있다. Fig. 10은 제트중단면상에서의 난류 운동 에너지의 프로파일을 보이고 있다. LES에 의하여 얻어진 결과와 스테레오PTV 계측시스템에 의하여 얻어진 결과가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 하지

만 스테레오 PIV로 얻어진 결과는 스테레오 PTV와 LES 결과보다는 작게 얻어짐을 알 수 있었다. 이는 전절에서 언급한 것처럼 스테레오 PIV의 w성분에서 카메라방향으로의 계측불확실성에 관련되어 있음을 시사하고 스테레오 PTV 보다 스테레오 PIV가 더 크게 영향을 주는 것임을 알 수 있다. Fig. 11, Fig. 12는 레이놀즈응력의 분포를 보이고 있다. Fig. 13 및 Fig. 14는 난류강도분포를 보이고 있다. 스테레오 PIV와 스테레오 PTV 계측법으로 얻어진 결과를 LES결과와 실시간 난류통계량을 비교 하였을 때, 난류 운동에너지, 레이놀즈 응력, 난류 강도 스테레오 PTV 계측법으로 얻어진 결과치가 스테레오 PIV 계측법으로 얻어진 결과치보다 LES에 의한 난류 통계량에 근접해 있음이 나타났다. 이것은 Fig. 6에서 보이는 것처럼 스테레오 PTV계측법보다 스테레오 PIV의 속도벡터의 w 성분의 에러율이 비교적 스테레오 PTV 계측법보다 상대적으로 큰 것에 관련되어 있음을 시사한다. 또한, 이는 카메라 방향의 계측불확실성이 스테레오 PTV 보다 스테레오 PIV가 더 크게 영향을 주는 것임을 알 수 있다.

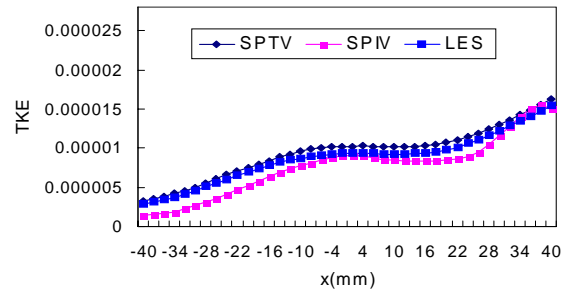


Fig. 10 Profiles of turbulent kinetic energy.

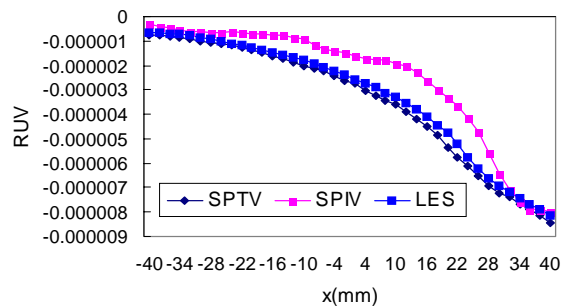


Fig. 11 Profiles of Reynolds stress (uv component).

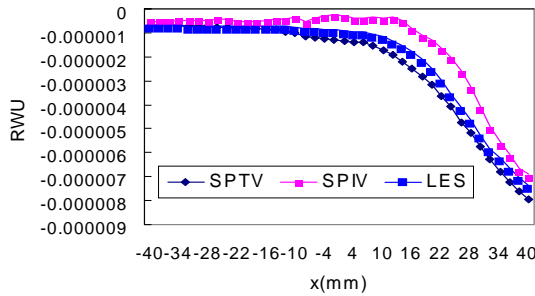


Fig. 12 Profiles of Reynolds stress (wu component).

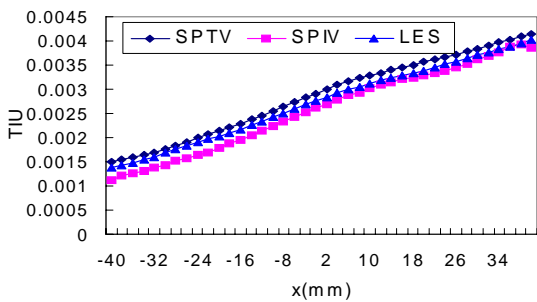


Fig. 13 Profiles of turbulent intensity (u component).

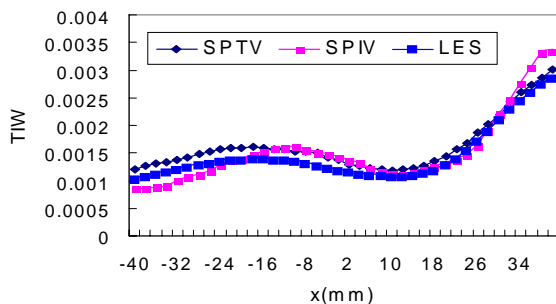


Fig. 14 Profiles of turbulent intensity (w component).

4. 결론

본 연구와 관련된 일련의 연구과정에서 구축된 스테레오 PTV와 스테레오 PIV 계측법으로 얻어진 실시간 난류통계량의 비교 분석하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

평균장 및 난류통계량의 비교를 통하여 스테레오 PTV와 스테레오 PIV 계측법이 난류유동장의 계측에 유효함을 알 수 있었다. 스테레오 PIV보다는 스테레오 PTV 계측법이 더 LES값에 근접함이 확인되었다. 스테레오 PTV에 의한 결과는 LES데이터를 이상적인 해로 기준으로 하였을 때

난류통계량에 있어서 최대 약 10%이내 임을 알 수 있었다. 스테레오 PIV에서의 계산시간은 스테레오 PTV측정법보다 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) Doh D.H. Kim D.H., Lee W.J., 2001, "Stereo-PIV", *Proc. of KSME Fall Meeting, Chunbuk Natl. Univ.*, pp.394-399.
- (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, Suppl. Vol.7*, pp.84-95.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Okamoto, K., Nishio, S., Kobayashi, T., Saga, T., 1997, "Standard Images for Particle Imaging Velocimetry," *Proc. PIV'97-Fukui, Fukui*, pp.229-236.
- (11) Doh, D. H., Hong, S. D., Cho, K. R., Okamoto, K., 2000, "Construction of Virtual Images for a Benchmark Test of 3D-PTV Algorithm for Unsteady Turbulent Flow," *CD-ROM Proc. ISFV9, Edinburgh, No.369*.
- (12) Doh D.H., Lee W.J., 2003, "Development of Stereoscopic PTV," *Journal of Korean Society of Visualization*, Vol. 1, No. 1, pp.92-97.