

표준영상을 이용한 2차원 PIV와 3차원 PIV 성능시험

황 태 규* · 도 덕 희†

(2004년 2월 11일 접수, 2004년 9월 8일 심사완료)

Performance Test on 2-Dimensional PIV and 3-Dimensional PIV Using Standard Images

Tae Gyu Hwang and Deog Hee Doh

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 test. It has been shown that the results obtained by 2D-PIV on average values are slightly 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 속도벡터 개수가 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.^(4,14)

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

† 책임저자, 회원, 한국해양대학교 기계정보공학부
E-mail:doh@mail.hhu.ac.kr
TEL:(051)410-4364 FAX:(051)405-5991

* 한국해양대학교 대학원 기계공학과, (주)티엔텍

체적내의 속도 3성분의 분포를 얻는 반면에 비하여 2차원 단면상에서 3차원 속도 3성분을 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 유체 내부 입자좌표로 쉽게 변환할 수 있으며 확대율이 영상기록면의 변위에 무관하므로 3차원 속도 성분을 쉽게 계산할 수 있는 장점이 있지만 카메라 측정각도가 제한되기 때문에 out-of-plane 속도 성분의 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^(6,13)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. 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 정량

적 판단기준이 있어야 한다. 즉, 3차원 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 것이라라는 막연한 관점으로부터 3차원 계측을 선호하여 왔을 뿐 이에 대한 정량적 비교검토가 필요한 단계이다.

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

2. 표준영상을 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 제트 유동의 3차원적 운동을 고려한 PIV 표준영상의 구성과 PIV 표준 계획 (PIV-STD)을 제시했다. 그러나, 초점길이, 렌즈의 굴곡, 영상의 중심으로부터의 원점의 이동과 같은 카메라의 내부요소가 언급되지 않았다. 본 연구에서는 상호상관 2차원 PIV 및 Hybrid Angular 3차원 PIV 계측알고리즘⁽¹²⁾의 표준시험을 위해서 2차원 및 3차원 계측의 최종 정확도에 영향을 주는 모든 요소를 고려하였다.

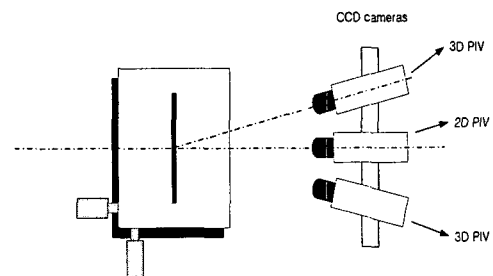


Fig. 1 Configuration of cameras for 2D and 3D PIV measurement

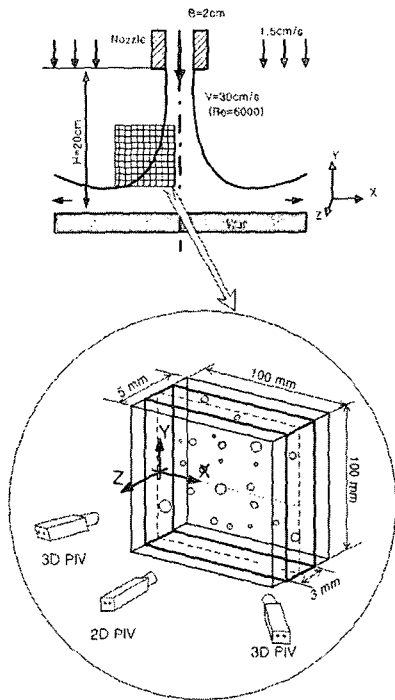


Fig. 2 Standard data sets (LES on the website of 'www.vsj.or.jp/piv')

Fig. 1은 가상의 유동장과 가상으로 배치된 카메라의 관계를 보이고 있다. 먼저, 기지의 카메라의 배치정보를 이용하여 교정점들에 대한 각 카메라에 있어서의 2차원 가상영상을 작성하였다. 이때, 2차원 PIV를 위한 영상은 Fig. 1에서 중앙에 가상으로 설치되어 있는 카메라로부터 얻어지며 3차원 PIV를 위한 영상은 Fig. 1의 카메라 배열에서 상.하에 가상으로 설치되어 있는 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 평면충돌제트 유동에 대한 LES 계산결과를 이용하였다.

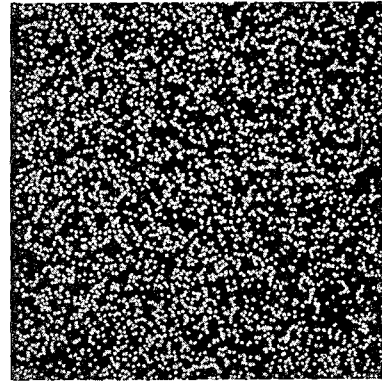


Fig. 3 Generated virtual image for 2D-PIV

Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이 직경이 2cm인 노즐로부터 분출되는 레이놀즈수는 6000이고 노즐로부터 하부에 100mm x 100mm x 100mm의 체적영역에의 LES계산결과를 표준데이터로 삼았다.

벡터의 시점과 종점으로 결정된 점에 있어서 아래 식 (1)을 이용한 입자영상을 구현하였다.^(8,9) 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 원통형광원이 조사된다고 가정한 식 (2)와 같이 된다.

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

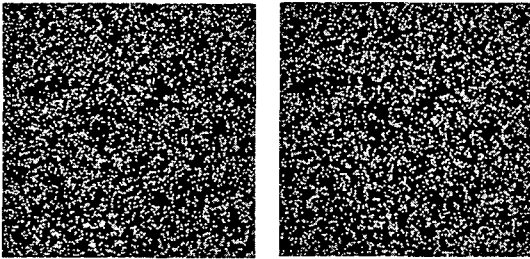
$$I_0 = 240 \text{Exp} \left(-\frac{z_p^2 + x_p^2}{\sigma_r^2} \right) \quad (2)$$

이때, σ_r 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 도 등⁽⁸⁾과 Okamoto 등⁽⁹⁾의 연구 성과에 잘 기술되어 있다.

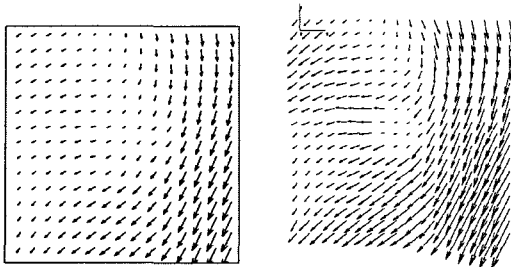
Fig. 3은 기술한 방법으로 생성된 2D-PIV계측을 위하여 생성된 가상영상을 나타내며 Fig. 4(a) 및 4(b)는 3차원 PIV를 위하여 생성된 2대의 좌우 카메라에 대한 가상영상을 나타낸다.

2차원과 3차원 PIV계산을 위한 각 영상들의 시

간격은 15msec로 정하였으며 난류통계량을 얻기 위하여 총 1000장의 시간 연속적인 데이터를 사용하였다. 한편, 도 등⁽⁶⁾에 의하면 3차원 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.



(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

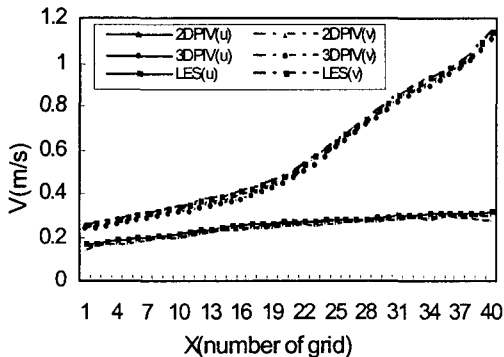


Fig. 6 Ensemble averaged velocity profiles obtained by 2D-PIV and 3D-PIV

2.2 2차원 PIV와 3차원 PIV 계측 및 성능비교

위에서 구한 가상입자영상을 이용하여 2차원 및 3차원 PIV계측을 실시하였다. 2차원 PIV계측을 위해서는 계조치상호상관법^(6,11)을 적용하였고 3D-PIV계측을 위해서는 하이브리드 Angular 방식의 스테레오 PIV계측법을 적용하였으며, 이 때 사용된 상관영역(Interrogation Window)은 32x32로 하였다. 하이브리드 Angular 방식은 카메라에 대한 교정방법이 3D-PTV측정법⁽³⁾과 같으나 3차원 벡터가 두 카메라로부터 얻어진 2차원 속도벡터를 격자상에서 매칭(matching)시킴으로써 얻어지게 되는 것인데 자세한 과정은 이⁽¹²⁾의 논문에서 상술되어 있다.

Fig. 5(a) 및 5(b)는 각각 2차원 PIV와 3차원 PIV에 의하여 계측한 순간속도벡터분포 결과를 나타낸다. 3차원 PIV측정에 의한 결과가 2차원 PIV측정에 의한 결과보다 와류동에 대하여 민감하게 잘 나타내 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 이들의 평균속도벡터분포에 있어서 단면 중심선상에서의 수평방향으로의 u와 v속도프로파일을 나타내고 있다. 이 때, 두 측정법의 계산비교를 위하여 측정영역의 중심단면상에 40 x 40 x 1 격자를 적용하였다. 그림에서의 x축은 측정영역(100mm x 100mm)에서의 격자점 번호를 나타낸다. Fig. 6의 속도크기와 Fig. 2의 노즐속도크기와 다르게 나타난 것은 적용된 가상영상의 시간간격을 달리하였기 때문이다.

평균속도장에 있어서는 2차원 PIV에 의한 결과나 3차원 PIV에 의한 결과는 모두 LES의 결과와 그다지 차이가 나지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 7(a)와 (b)는 2차원 PIV에 의하여 얻어진 u 성분과 v성분의 난류강도분포를 나타내고 7(c)와 7(d)는 3차원 PIV에 의하여 얻어진 u성분과 v성분의 난류강도분포를, 7(e)와 7(f)는 u성분과 v성분에 대한 원래의 LES데이터의 난류강도분포를 나타내고 있다. 이들 분포들로부터 알 수 있듯이 3차원 PIV에 의한 결과분포가 2차원 PIV에 의한 결과분포보다 LES에 근접한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 2차원 PIV와 3차원 PIV 그리고 LES 데이터로부터 얻어낸 단면의 중심선상에서의 난류강도 (u^2/U_0^2)의 프로파일을 나타내고 있다. 3차원 PIV와 LES 데이터는 서로 근접한 결과를 보이고 있으나 2차원 PIV에 의한 결과는 LES 결

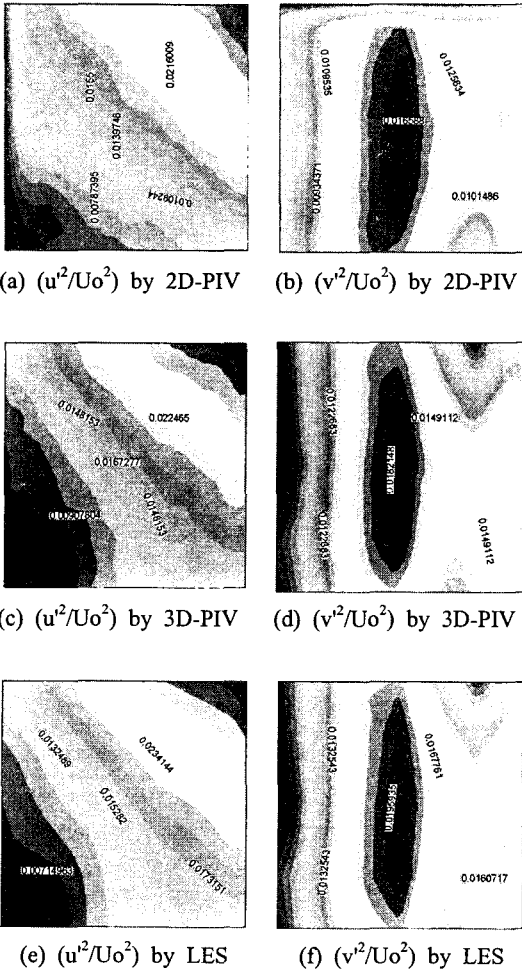


Fig. 7 Distribution of turbulent intensity

과와는 다소 차이가 있음이 나타난다. 2차원 PIV에 의한 결과는 LES데이터 대비로 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 LES대비로 최대 15% 정도, 2차원 PIV에 의한 결과는 LES대비로 최대 30% 정도까지 차이가 있음이 보인다. 또한, v' 성분의 난류통계량보다 u' 성분의 난류통계량이 보다 LES값에 근접해 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 3차원 PIV와 LES 데이터로부터 얻어낸 난류강도 (w'^2/U_0^2)분포를 나타내고 있다.

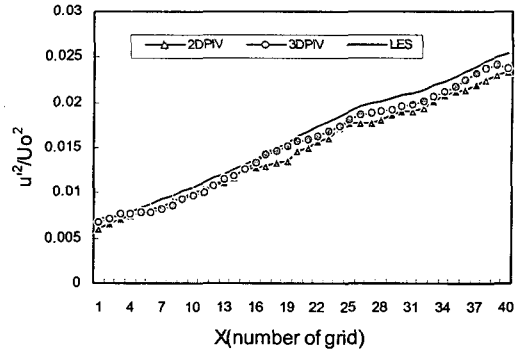


Fig. 8 Profiles of turbulent intensity for u' component (u'^2/U_0^2)

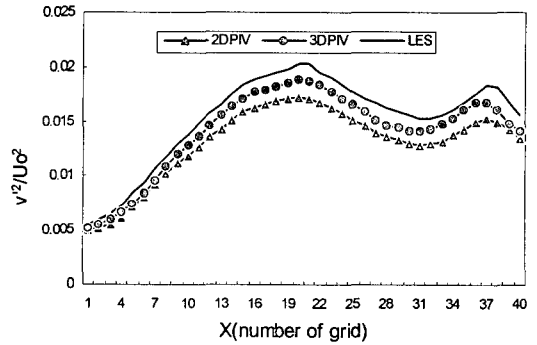


Fig. 9 Profiles of turbulent intensity for v' component (v'^2/U_0^2)

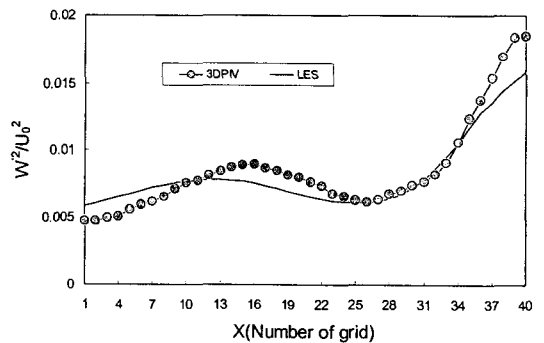


Fig. 10 Profiles of turbulent intensity for w' component (w'^2/U_0^2)

3차원 PIV에 의한 결과는 LES 결과대비로 최대 20% 정도까지 차이가 있음이 보인다. 주의해야 할 사항으로서, LES대비 최대 30% 정도의 차

이라는 것은 실제 주유동속도 U_0 를 기준으로 하여 계산하였을 때의 30%와 다르다는 점에 유의해야 한다.

3. 결론

표준영상에 대한 2차원 PIV 및 3차원 PIV(스테레오 PIV) 계측을 통한 성능비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

인터넷(<http://www.vsj.or.jp/piv>)에 올려져 있는 벽면층돌제트에 관한 LES계산 결과인 표준데이터를 이용하여 2차원 PIV와 3차원 PIV간의 알고리즘간의 정확한 성능 시험을 수행하기 위하여 실험에서 발생할 수 있는 제반 오차를 완전히 배제한 표준영상을 구축하였다.

구축된 표준영상을 이용하여 2차원 PIV 계측법의 대표적 알고리즘인 계조치상호상관법에 대한 성능평가를 실시함으로써 표준 LES데이터와의 상대적 오차를 정량화 하였다. 이는 향후 2차원 PIV 계측법에 대한 성능평가기준이 될 것으로 사료된다.

표준영상을 이용한 하이브리드 Angular 3차원 PIV 계측법의 성능평가를 통하여 표준데이터와의 상대적 오차를 정량화 하였다. 이는 향후 3차원 PIV 계측법에 대한 성능평가 기준이 될 것으로 사료된다.

2차원 PIV의 경우 Z축 방향으로의 perspective error(원근오차)로 인하여 3차원 PIV 결과보다 정도가 다소 떨어지나, 2차원 PIV에 의한 결과와 3차원 PIV에 의한 결과 모두 평균값에 있어서는 LES의 결과와 그다지 차이가 나지 않는 것으로 보아 평균속도장 결과를 얻고자 하는 실험에서는 어느 쪽이든 상관없이 적용하여도 유사한 결과를 낼 것으로 판단된다.

한편, 난류통계량에 있어서는 LES데이터를 기준으로 하였을 때 2차원 PIV에 의한 결과는 최대 30% 정도 3차원 PIV에 의한 결과는 최대 15% 정도의 오차를 보였다. 이 결과는 매우 크게 여겨질지 모르나 일반적으로 난류통계량을 구할 때 적용되는 주유동속도(여기서는 제트의 노즐출구속도, U_0)를 기준으로 환산하여보았을 때 심각한 오차는 아니다. 다만, 난류통계량을 구함에 있어서 3차원 PIV에 의한 결과가 2차원 PIV에 의한 결과보다는 보다 정확한 결과를 낼 수 있음을 알

수 있다. 2차원 PIV측정결과가 3차원 PIV측정결과보다 오차가 크게 되는 원인으로서, 2차원 PIV 측정에서는 2차원 광원두께 내의 두께방향으로의 동일선상의 입자들의 u, v 성분이 하나의 영상단면에 투영한 형태의 계산(계조치상관계산)을 하게 되는 결과이므로 u' 및 v' 에 대한 특성량에 있어서 정확도가 떨어지기 때문으로 정리될 수 있으며 또한, 두 영상간의 시간간격인 dt 가 입자의 광원의 두께방향(out-of-plane) 방향으로 빠져나가는 속도보다 충분히 짧지 못하면 입자추적상상의 원인이 되어 결국은 두 영상간의 상관량 계산에 오차를 부여하게 되는 원인이 될 수 있다. 이와 같은 문제점 해결을 위하여 dt 간격을 매우 짧게 함과 동시에 카메라의 해상도를 향상시키면서 두께방향의 성분을 측정할 수 있는 3차원 PIV측정법을 사용하게 된다.

본 연구에서는 2차원 PIV와 3차원 PIV측정에서의 벡터추출 알고리즘에 대한 결과를 다루었는데 3차원 PIV측정에 있어서는 카메라에 대한 calibration정도에 따라 w 성분 및 w' 성분에 대한 오차의 크기가 달라질 수 있으나 이 성분이 2차원 PIV측정에서는 측정될 수 없는 성분이라는 점, 상기의 u', v' 성분에 대한 정도가 상대적으로 향상된다는 점을 감안하면 본 연구에서 얻어진 결론은 유용할 것으로 사료된다.

또한, 본 연구에서 구해진 제트유동에 대한 2차원 PIV 및 3차원 PIV측정에 의한 정량화된 오차세트들은 다른 유동장에 있어서는 그 값들이 반드시 동일한 값을 유지한다고는 볼 수 없지만 그 경향에 있어서는 3D-PIV에 의한 결과가 2D-PIV에 의한 결과보다 난류특성량들에 있어서는 LES에 가깝다는 경향은 일관성 있게 유지된다고 볼 수 있다.

후 기

이 논문은 2004년도 한국표준협회의 민간표준화사업과 두뇌한국21사업의 일부로 지원되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Maas, H. G., Gruen, A. and 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. and 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. and 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. and Adrian, R. J., 1993, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry Applied to Liquid Flows," *Exp. in 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. and 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) VSI, 2002, PIV Handbook, Morikita Co. Ltd., pp. 120~121.
- (8) Doh, D. H., Hong, S. D., Cho, K. R., Okamoto, K. and 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.
- (9) Okamoto, K., Nishio, S., Kobayashi, T. and Saga, T., 1997, "Standard Images for Particle Imaging Velocimetry," *Proc. of PIV'97-Fukui*, pp. 229~236.
- (10) Utami, T. and Blackwelder, R., 1991, "A Cross Correlation Technique for Velocity Field Extraction from Particulate Visualization," *Exp. in Fluids*, Vol. 10, pp. 213~223.
- (11) Doh, D. H., Choi, S. H., Hong, S. D., Baek, T. S., Kobayashi, T. and 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.
- (12) Lee, W. J., 2002, "Study on a Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *Master Thesis*, Korea Maritime University.
- (13) Yoon, J. H. and Lee, S. J., 2002, "Development of Stereoscopic PIV Measurement Technique and Its Application to Wake Behind an Axial Fan," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 26 No. 2, pp. 362~373.
- (14) Lecerf, A., Renou, B., Allano, D., Boukhalfa, A. and Trinite M., 1999, "Stereoscopic PIV: Validation and Application to an Isotropic Turbulent Flow," *Exp. in Fluids*, Vol. 26, pp. 107~155.