

4 차원 입자영상유속계(다이나믹 3 차원 입자영상유속계)에 의한 충돌분류측정

도덕희[†] · 황태규* · 조용범** · 편용범** · Okamoto Koji***

4D-PTV(Dynamic 3D-PTV) Measurement on an Impinged Jet

Deog-Hee Doh, Tae-Gyu Hwang, Yong-Beom Cho, Yong-Beom Pyeon and Okamoto Koji

Key Words : GA-3D-PTV(유전알고리즘기반 3 차원 입자영상유속계), High-speed-high-definition camera(고속고해상카메라), Impinged jet(충돌분류유동)

Abstract

A 4D-PTV system was constructed. The measurement system consists of three high-speed high-definition cameras, Nd-Yag laser(10mJ, 2000fps) and a host computer. The GA-3D-PTV algorithm was used to extract three-dimensional velocity vectors in the measurement volume. A horizontal impinged jet flow was measured with the constructed system. The Reynolds number is about 40,000. Spatial temporal evolution of the jet flow was examined in detail and physical properties such as spatial distributions of vorticity and turbulent kinetic energy were obtained with the constructed system.

기호설명

D: 제트노즐 직경 [mm]
 S_{ij} : 대칭텐서
 R_{ij} : 비대칭텐서
 u_{ij} : 속도텐서
 x, y, z: 절대좌표계

1. 서론

3D-PTV 측정법은 HPIV (Holographic PIV)보다는 공간해상도가 떨어지나 유동장 공간에 걸친 순간의 많은 속도벡터를 얻어내므로 난류통계량의 공간분포 및 공학적 응용에 쉽게 적용될 수 있는 순

간의 거시적 물리량(속도프로파일 등)들에 대하여 공학적으로 타당한 결과를 제공할 수 있게 되었다⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾. 학술적으로는 HPIV 측정법이 유동장의 해석에 가장 이상적인 방법으로 추론할 수 있으나 현 상황에서는 Hologram 필름에 쓰이게 되는 소재와 사용되는 레이저의 성능 한계 및 측정 원리상 데이터처리의 난점과 같은 문제점을 극복하기 위하여 최근에는 고해상 디지털카메라를 이용한 HPIV 측정법이 등장되고 있다⁽⁴⁾. 즉, 최근의 HPIV 측정법에서는 현실적으로 미해결의 기술이 많은 관계로 고해상 디지털카메라를 도입함으로써 그 성능을 향상시켜 가고 있는 실정에 있다.

한편, 3D-PTV 측정법에서는 측정알고리즘이 이상적이라 할 때, 카메라의 해상도가 향상된다면 얻어 지는 순간속도벡터수는 해상도의 멱승으로 증가하는 관계에 있으므로⁽⁵⁾, 고해상 디지털카메라를 사용하여 HPIV 측정법의 성능을 향상시키는 3D-PTV 측정법의 성능향상과 동일한 맥락에 있다고 볼 수 있다. 그러므로, HPIV 측정법 완성을 위하여 첨단분야의 기술(나노재료기술, 나노광학 기술 등)을 기다리는 것보다 시간 및 공간해상도

[†] 한국해양대 기계정보공학부

E-mail : doh@hanara.kmaritime.ac.kr

* 한국해양대 대학원

** (주)티엔텍

*** Tokyo Univ., 원자력연구소

를 향상시킨 3D-PTV 측정법(이른 바 4 차원 PTV 측정법, 일명 다이나믹 3D-PTV 측정법으로도 불리울 수 있음)의 구축이 공학적으로는 의의가 크다고 하겠다.

본 연구에서는 이와 같은 관점에서 4D-PTV 측정법(Dynamic 3D-PTV)을 구축하였으며 이를 공학적 응용가치가 높은 충돌분류의 측정에 적용하고자 한다. 3D-PTV 측정법이 4D-PTV 측정시스템으로 확장되기 위해서는 유동장의 라그랑주주파수(Lagrange Frequency)보다 빠른 속도로 고해상의 3 차원 측정이 이루어져야 한다. 측정대상이 되는 충돌분류의 최대 라그랑주주파수⁽⁶⁾가 실험조건(레이놀즈수 약 40,000)에서 약 20Hz ~ 100Hz 사이이므로 이 주파수의 10 배 이상인 2000Hz 의 고해상 카메라(1k x 1k)로 구성된 4D-PTV 시스템으로 구축하였으며 이로부터 충돌분류의 시간연속적 유동 구조변화 및 물리량 변화를 얻고자 하였다.

2. 실험

Fig. 1 은 충돌분류측정을 위한 4D-PTV 측정시스템의 실험개요도를 나타낸다. 노즐의 직경(D)은 20mm 이며 직경대비 레이놀즈수는 40,000 이다. 측정시스템은 고해상카메라 (1k x 1k, 2000fps), Nd-YAG 레이저(10mJ, 2000Hz), 호스트컴퓨터로 구성되어 있으며 동일한 시각의 영상을 받기 위하여 모든 시스템은 동기화 시켰다. 또한, 카메라 3 대는 추적입자들에 대한 선명한 영상을 얻기 위하여 레이저광원에 대하여 전방산란이 되도록 설치하였다. 측정영역은 노즐출구와 충돌판 사이 약 (100mm x 100mm x 100mm)이다. 노즐출구는 평판으로부터 7D 에 설치하였다.

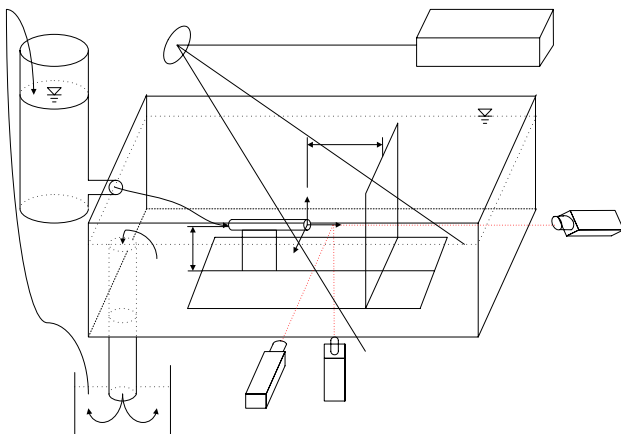


Fig. 1 4D-PTV system for the impinging jet flow.

측정의 기준점은 Fig. 2 와 같이 노즐의 중심선상에 정의하였다. 측정알고리즘은 유전알고리즘기반의 3 차원 PTV 알고리즘⁽²⁾이다. 이 알고리즘은 순간에 얻어지는 속도벡터의 개수가 최대 7000 개 이상으로 획득이 가능하므로 유동의 3 차원 구조 및 난류통계량을 확보함에 있어서 타당성이 입증된 바 있다. 4 차원 입자영상유속계 시스템을 구현하기 위해서는 측정대상의 물리적 시간스케일보다 짧아야 하는 관계로 해석해야 할 영상수가 많다는 점과 고해상으로 측정해야 하는 점으로부터 계산시간은 해상도의 멱승으로 증가하게 된다. 이를 극복하기 위하여 3 차원 공간상에서 다분할 처리를 하였다.

3. 실험 결과 및 검토

Fig. 2 는 본 연구에서 구축한 4D-PTV 시스템으로 측정한 순간유동장의 속도벡터분포를 보이고 있으며 Fig. 3 은 $x/D=6$, $y/D=-2.0$, $z/D=0.0$ 에서의 속도벡터의 각 성분의 시간이력을 나타내고 있다. 각 성분 공히 진동유동을 나타내고 있음이 보인다. U 성분과 V 성분은 크기가 비슷한 수준이며 속도 프로파일도 유사한 경향을 보이고 있다. 하지만, W 성분은 다른 성분에 비하여 미약한 것으로 보아 이 점에서는 상하방향으로의 진동이 발생하고 있음을 추론할 수 있다. 카메라의 용량제약(2 초)으로 인한 장시간 실험데이터의

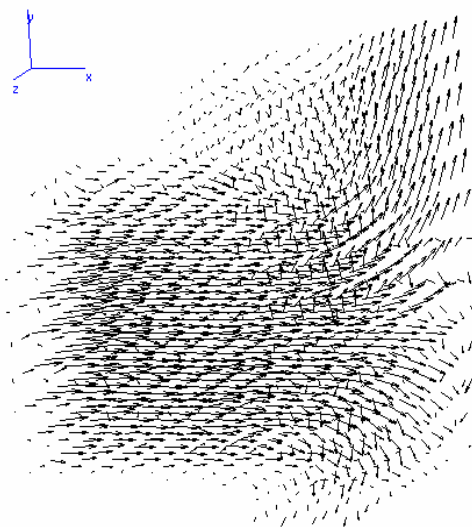


Fig. 2 Instantaneous spatial vectors.

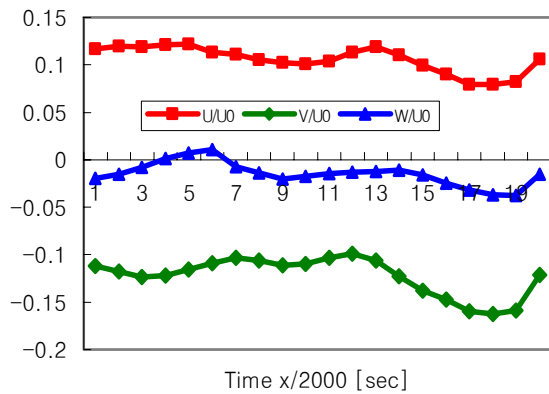


Fig. 3 Temporal history of 3D-velocity vectors. (x/D=5.6, y/D=-2.0, z/D=0.0).

확보는 하드웨어시스템의 제약상 불가능하였으나 장시간에 걸친 측정 데이터상에서는 와류유동의 불안정성에 기인하여 좌우진동(z 축 방향)도 확인될 수 있을 것으로 사료된다. 즉, 회전형 섭동이 존재할 것으로 사료된다.

공간에 걸친 순간의 와류동구조를 파악하기 위하여 Jeong 과 Hussain 의 고유치해석법⁽⁷⁾(일명 λ_2 법이라고도 함)을 적용하였다.

4D-PTV 로부터 얻어지는 순간의 3 차원 속도벡터로부터 속도구배텐서($\nabla \vec{u} = u_{i,j}$) 로 구성되는 특성 방정식은 다음 식과 같이 표시될 수 있다.

$$\sigma^3 - P\sigma^2 + Q\sigma - R = 0 \tag{1}$$

여기서,

$$P = u_{i,i}$$

$$Q = \frac{1}{2}(u_{i,j}^2 - u_{i,j}u_{j,i})$$

$$R = Det(u_{i,j}) \text{ 이다.}$$

Vortex core 는 이 특성방정식의 고유치가 복소고유치를 가질 때 존재하게 되는데 이 방정식이 복소근을 가지기 위한 판별식인 다음 식 (2)가 양수일 때 Vortex core 가 존재한다고 할 수 있다.

$$\Delta = \left(\frac{1}{3}Q\right)^3 + \left(\frac{1}{2}Q\right)^3 > 0 \tag{2}$$

4D-PTV 시스템으로부터 얻어진 순간의 3 차원 속도벡터를 가지고 계산한 결과 측정영역 전반에 걸쳐 복소근이 존재하였으며 이는 유동장 전체가

Table 1 Relations between vortex core and λ_2 .

λ_1	λ_2	λ_3	$\sum \lambda_i$	Negative λ_2
+	-	-	-	Vortex Core
+	-	-	+	Vortex Core
+	+	-	-	Not Vortex Core
+	+	+	+	Not Vortex Core

매우 복잡한 와류동구조로 되어 있었음을 추론할 수 있었다. 이들 복소물리량 (복소고유치)으로 정량적 평가가 어렵기 때문에 특성방정식을 아래의 식(3)과 같은 대칭텐서와 비대칭텐서로 구성되는 새로운 텐서 $A_{i,j} = S_{i,j}S_{i,j} + R_{i,j}R_{i,j}$ (대칭텐서)로 전환함으로써 얻어지게 되는 실근을 평가함으로써 유동장의 와구조를 정량적으로 평가하고자 하였다.

$$S_{i,j} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$$

$$R_{i,j} = \frac{1}{2}(u_{i,j} - u_{j,i}) \tag{3}$$

Table 1 은 새롭게 구성된 특성방정식의 실근의 고유치와 vortex core 간의 관계⁽⁷⁾를 나타낸다. Fig. 4 는 이를 바탕으로 하여 λ_2 의 값이 5%일 때의 와구조를 나타내는데 그림에서와 같이 특징적인 와구조가 존재함을 알 수 있었다. 이 와환(vertical loop)의 중심원은 충돌벽면으로부터 약 0.9D 에 존재함이 확인되었다.

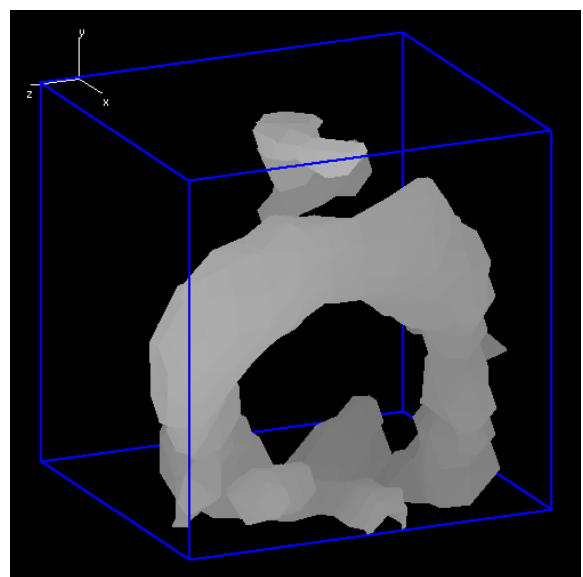


Fig. 4 Instantaneous spatial distribution of enginvalue at 5% vs the whole λ_2 ranges. (t=t0)

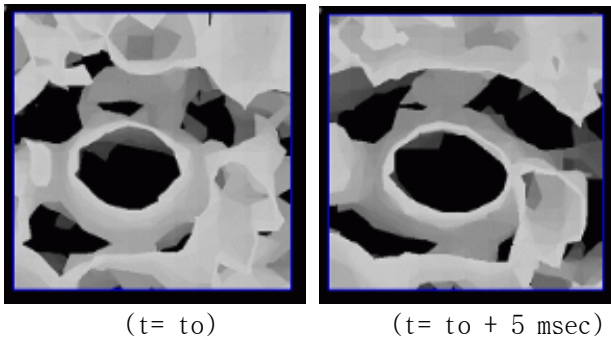


Fig. 5 Time history of vorticity distribution.

또한, 이 와환은 Fig. 5의 와도분포에 나타낸 바와 같이 시간에 따라서 시계방향으로 회전함이 확인되었으나 수차례에 걸쳐 얻어진 실험영상의 관찰로부터는 반시계방향회전도 확인되었다.

Fig. 6과 Fig. 7에 시간변화에 따른 λ_2 값 공간분포를 보이고 있다. 10msec에서는 이 와환이 분리되어 몇 개의 조각으로 나뉘어 지나 20msec에서는 다시 합쳐지고 있음이 확인되었다. 이와 같은 현상에 대하여는 기존의 측정방법(2차원 PIV, 스테레오 PIV 등)으로는 측정데이터로부터의 직접적 확인이 불가능하나 4차원 PTV는 직접적 확인이 가능하다는 강점을 지니고 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 7에는 노즐의 상류측으로부터 노즐로부터 발생한 소규모 응집와구조들이 충돌판을 향하고 있음이 보인다. 이들 와구조는 충돌판에 부딪치는 상황에 따라서 Fig. 4와 같이 와환으로 성장할 수도 있으며 Fig. 6과 같이 와환으로 발전하지 못한 상태의 응집와구조로서 남아 있게 될 수 있음을 추론할

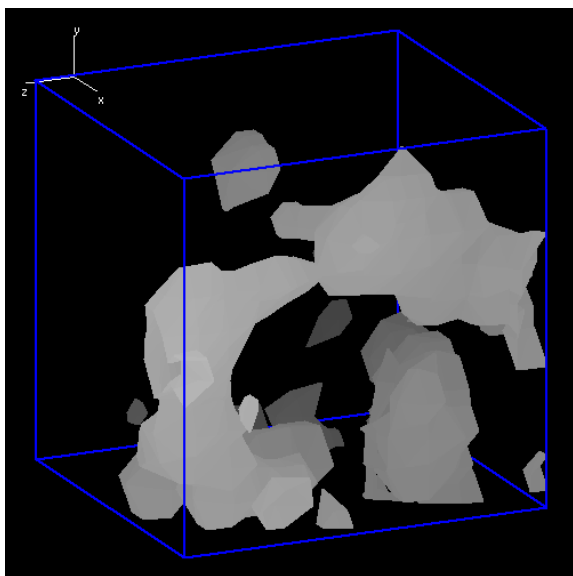


Fig. 6 Instantaneous spatial distribution of enginvalue at 5% vs the whole λ_2 ranges. ($t=t_0+10\text{msec}$)

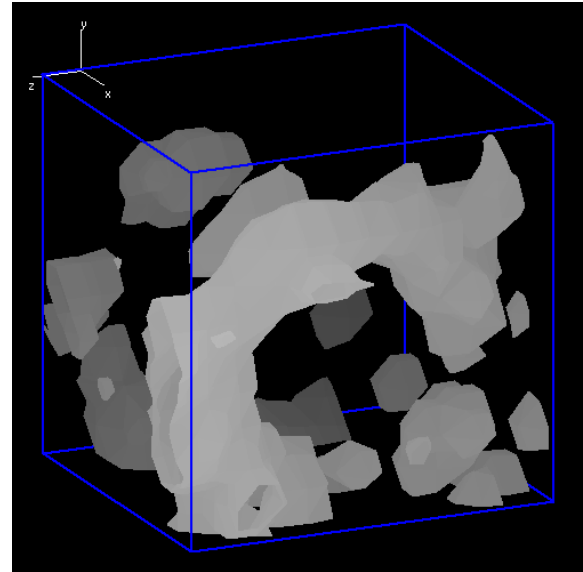


Fig. 7 Instantaneous spatial distribution of enginvalue at 5% vs the whole λ_2 ranges. ($t=t_0+20\text{msec}$)

수 있었다.

4. 결 론

4차원 입자영상유속계(4D-PTV, 일명 다이나믹 3D-PTV)시스템을 구축하였으며 이를 이용한 충돌분류 측정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

4D-PTV의 시스템으로부터 얻어진 속도벡터텐서에 대하여 고유치해석법(λ_2)을 적용함으로써 분류의 노즐로부터 나온 응집와구조는 충돌판을 향하여 일정간격으로 대류되어 가다가 충돌판에 부딪치는 상태에 따라서 부딪친 후 와환으로 발전하거나 부딪지기 전의 응집구조의 형태로 발전하기도 함을 확인할 수 있었다.

충돌판 근처 0.9D의 위치에 와환이 존재함이 확인되었다.

기존의 측정방법(2차원 PIV, 스테레오 PIV 등)으로부터 얻어진 데이터로부터 유동장의 구조를 파악하기 위해서는 이들 방법으로부터 얻어진 데이터를 위상평균 등을 통한 데이터의 가공과정이 필요하나, 4D-PTV는 유동장을 직접 Probing 하므로 특징적 와유동구조의 시간적 변화와 추이를 정량적으로 평가가 가능함을 충돌분류의 측정실험으로부터 확인하였다.

4D-PTV 시스템으로 얻어진 방대한 데이터는 직접수치계산(DNS)에 필적하는 것으로, 추후 이를

이용하여 유동의 현상학적 규명에 발판을 마련하고자 한다.

Acknowledgements

The authors would like to express sincere thanks to Dr. M. Ishikawa for his helps for the experiments.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Doh, D. H., Kim, D. H., Cho, Y. B. and Lee, W. J., 2002, "Development of genetic algorithm based 3-D PTV technique," *Journal of Visualization*, Vol.5(3), pp.243-254.
- (3) Mass, 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.
- (4) Ikeda, K., Okamoto, K. and Murata, S., 2003, "Development of dynamic digital holographic particle velocimetry,," Prof. of PIV03, Busan, Korea, Paper No. 3103.
- (5) Doh, D. H. , Cho, Y. B. Lee, W. J. , Kim, D. H., Saga, T., Segawa, , S., and Kobayashi, T., 2002, "Measurements of a round jet with a High-resolution 3D-PTV, Proc. of 10th ISFV, Kyoto, Paper No.F0313.
- (6) Tenneks, H., Lumley, J. L., A first course in turbulence, The MIT Press, 13th Printing, 1990.
- (7) Jeong, J. and Hussain, F., 1995, "On the identification of a vortex," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 285, p. 69.