

3차원 PTV에 의한 원주후류 난류통계량 데이터베이스 구축

도덕희*, 조용범*, 황태규*, 편용범**, 백태실***

Construction of Database on Turbulent Properties of a Circular Cylinder with a 3D-PTV Technique

D. H. Doh*, Y. B. Cho*, Y. B. Pyeon** and T. S. Baek***

Key Words : Turbulent Properties(난류특성량), Wake of a Circular Cylinder(원주후류), GA-3D-PTV(유전 알고리즘 기반 3차원 입자영상유속계), Database(데이터베이스)

Abstract

Turbulent properties of the wake of a circular cylinder were measured. The diameter of the cylinder is 10mm and the Reynolds number is 420. A new 3D-PTV system was constructed and a genetic algorithm (GA) was introduced in order to increase the number of instantaneous three-dimensional velocity vectors. In the GA, two fitness functions were introduced in order to enhance the correspondences of the particles. The measurement system consists of three CCD cameras, Ar-ion laser, an image grabber and a host computer. More than 3000 instantaneous three-dimensional velocity vectors were obtained by the system. The database of the turbulent properties of the circular cylinder was constructed by the constructed 3D-PTV system.

1. 서론

유동장의 매질과 동일한 비중의 입자를 투입한 후 이들 입자들의 3차원적 운동을 2대 이상의 카메라로 촬영하여 얻어진 영상을 해석함으로써 유동장의 3차원 속도벡터분포에 대한 시간 연속적 정보를 얻어낼 수 있다면 산업 여러 분야의 열유체기기의 개발 및 개선에 큰 도움을 줄 수 있다. 본 연구의 목적은 입자영상유속계(PTV: Particle Tracking Velocimetry)[1][2]의 원리를 바탕으로 한 3차원 입자영상유속계를 구축하여 이를 공학적 의의가 있는 원주후류의 계측에 적용함으로써 제반 난류통계량의 구축함에 있다.

유동 속에 놓인 뭉툭한 물체 뒤의 후류는 오랜 동안 자연과학이나 공학적으로 의의가 있는 주제가 되어왔으며 이에 대한 연구에 많은 진전이 있었다. 특히 Roshko[3]에 의해 전단유동에 있어서의 와에 대한 거대구조가 밝혀진 이후로 뭉툭한 물체 후류에 있어 이의 응용과 연구가 활발하게 이루어져 왔다. 가시화에 의한 후류구조의 규명에서부터 열선(hot-wire)등에 의한 유동장의 계측 등 다양한 방식에 의해 수행되어 졌고, 또한 광범위한 레이놀즈수에 있어서의 유동에 대해 방대하게 연구가 수행되었다[4]. Williamson[5]은 그의 Review에서 넓은 범위의 레이놀즈수에서의 유동특성에 대하여 연구하였는데, 특히 레이놀즈수 190에서 1000까지를 후류전이(wake transition) 영역으로 적인 영역이 존재하고 불안정성이 증가하여 와류가 3차원 구조

분류하면서 레이놀즈수와 스트로할수의 관계에서 2개의 불연속 점을 가지고 있음을 보였다. 이러한 와 구조의 발달과정에 대한 정량적 계측해석은 실린더 후류 유동이 비정상적이며 자연 발생적이라는 점에서 매우 어려운 일이다. 또한, 와류 형태의 과도특성이 있어 기존의 열선유속계와 레이저 도플러유속계(LDV) 같은 점 측정방법으로는 전체적인 유동구조를 파악하기에 한계를 지니고 있다.

최근 PIV(입자영상유속계) 계측 기법의 발달과 함께 와 구조의 공간적 분포형태에 대한 연구가 이루어지고 있다. Chyu와 Rockwell[6]은 난류 유동에서의 주유동 방향 와의 형태를 제시하였고, Wu 등[7]은 종방향 와 구조를 계측하였다. 하지만, 이들의 연구는 모두 순간 유동장의 결과를 바탕으로 하였다. Lourenco 등 [8]은 처음으로 PIV데이터를 이용하여 위상평균 유동장을 측정하였다. 그들은 낮은 샘플링 주기로 인해 유동장 내의 순환과 시간 정보를 이용하여 Whittaker보간법으로 재구성된 속도장을 위상평균에 사용하였다. 또한 김 등[9]은 시간 정보에 의존하지 않고 랜덤 샘플링으로 얻은 속도장을 와 중심과 순환으로부터 위상을 추출하는 기법을 제시하였다. 그러나 2차원성이 강한 x-y 평면에서의 위상평균 유동장만 제시되어 3차원 와 구조를 파악하는데는 한계를 지닌다. 성과 유[10]은 레이놀즈수 360에 있어서의 2차원 PIV 계측을 실시하여 2차원에 대한 거동을 상세히 보고하였다. 그들은 2차 와류의 위치가 z-x 평면에서는 z축에 고정되어 있지 않고 불규칙적인 것을 고려하여, z축 방향의 와도 상관(vorticity correlation)에 의한 z축 방향의 위치 교정기법을 위상평균기법과 함께 도입함으로써 2차 와류의 3차원 공간적 및 시간적 특성을 파악하였다. 그러나, 그들은 2차원

* 한국해양대, 기계정보공학부, doh@hanara.kmaritime.ac.kr

** (주)티엔텍, bdt048@hanmail.net

*** 포항제1대학, 자동차학과

단면상에서 얻어낸 정보를 이용하여 이들 정보를 재구성함으로써 와구조의 공간적 시간적 특성을 파악하고자 하였기 때문에 와의 구조가 보다 3차원적으로 보다 복잡하게 발생할 경우에는 계측의 가능성이 희박하다. 즉, 와의 구조해명을 위해서는 얻어낸 속도정보에 대하여 유동장 3차원 공간에 걸친 시간 연속적인 계측이 필요함을 의미한다.

3차원 PTV는 이를 구현할 수 있는 유일한 계측법으로 간주되고 있다. 지금까지 3차원 PTV에 관련한 연구[11][12]가 많이 있어왔으나 순간에 얻어지는 3차원 속도벡터의 수가 적었던 관계로 평균 난류통계량에만 의존하여 왔다.

본 연구에서는 유동장의 순간의 난류통계량을 공간과 시간 연속적으로 얻어낼 수 있는 3차원 PTV계측법을 구축하고자 한다. 구축된 계측법을 원주후류의 난류통계량 계측에 적용하여 기존의 연구성과와 비교함으로써 얻어진 신뢰도 높은 난류통계량 데이터베이스를 구축하고자 한다.

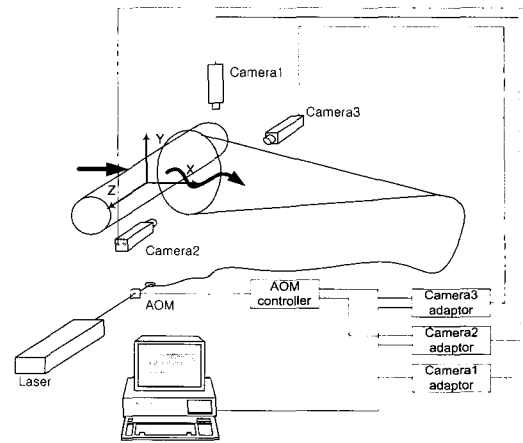


Fig. 1 3D-PTV system for the measurement of the wake of a cylinder.

2. 3차원 PTV계측시스템

2.1 계측시스템

Fig. 1은 직경이 10mm인 원주후류에 대하여 본 연구에서 구축된 3차원 PTV로 계측하기 위한 시스템을 나타낸다. 계측시스템은 3대의 CCD카메라(768×494 pixels), 이미지그래버(512×512 pixels, 256 gray levels), 레이저(500mW), 그리고 호스트컴퓨터로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용된 수조는 가로 수조로 250×75×2400mm이며 유동장의 입구로부터 1000mm 지점에 실린더를 설치하여 유동이 충분히 발달할 수 있도록 하였다. 실린더직경을 기준으로 한 레이놀즈 수는 $Re=420$ 이다. 측정 영역의 크기는 40mm x 40mm x 40mm 이다. 3대의 카메라로부터 받아들인 영상은 유동장에 투입된 입자상의 중심을 구하기 위하여 컴퓨터로 보내어진다. 각 카메라들의 영상으로부터 얻어진 입자들의 중심은 3차원 속도벡터를 얻는데 쓰여진다.

2.2 카메라교정 및 3D-PTV계측알고리즘

카메라를 이용하여 3차원 공간을 정량적으로 인식하기 위해서는 먼저 2대 이상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 정보가 필요하다. 이를 구하는 과정이 카메라교정이다. 지금까지는 카메라의 교정에서 구해지는 파라메타가 11개인 방법[12][13][14]을 써왔지만 이 방법은 카메라 정보를 얻는 과정이 복잡한 여러 가지 과정을 거쳐야 한다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위하여 등[15][16]이 적용한 10개 표정요소법을 도입하였다. 카메라의 교정을 위한 기준점으로서 42개의 3차원 위치정보를 가진 교정기를 사용하였다. 이 위치교정기는 원주후방에 상대위치를 계측한 후 설치된다. 카메라의 교정작업이 끝나면 카메라의 파라메타가 구해지게 되는데 이 값들과 실제 실험영상의 입자영상좌표만을 가지고 3차원 속도벡터가 구해지게 된다.

전술한 바와 같이 유동장의 구조를 얻어내기 위해서는 한 순간에 얻어지는 속도벡터의 수가 많아야 하는데 이를 위하여 유전알고리즘기반의 3차원 PTV기법을 도입하였다. Fig. 2는 도입한 유전알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 이 알고리즘에서는 초기개체의 생성, 격리, 재생산, 교배 및 이주와 같은 유전알고리즘(GA)연산자를 사용하였다. 각 카메라 1, 2의 시점과 중점의 위치는 염색체의 유전자로 사용하였다. 각 카메라에서의 공선의 조건식에서 두 직선간의 최단거리가 최소로 되는 염색체들을 골라서 배제된 집단으로 소속시킴 후 배제되지 않은 입자쌍의 집단들 중에서 연속개념에 의거한 식이 만족되는 염색체들을 골라

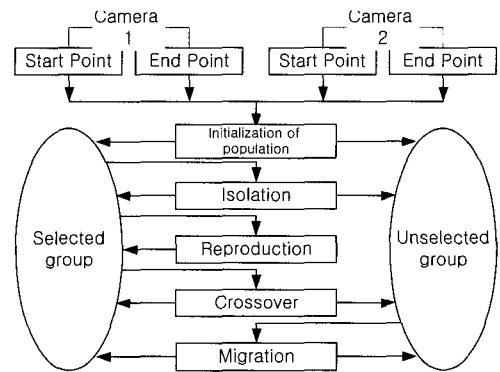


Fig. 2 Flow chart of the Used Genetic Algorithm.

서 선택된 집단으로 소속시키는 과정을 반복함으로써 시간 및 공간에 대응하는 입자쌍을 발견하게 된다. 3차원 속도벡터는 입자쌍들이 만드는 시점과 중점간의 이동거리에 시간간격을 나눔으로써 얻어지게 된다. 유전알고리즘기반 3차원 PTV계측알고리즘의 보다 자세한 내용은 참고문헌[15][16]에 기술되어 있다.

3차원 공간에서의 동일점 확인을 위하여 두 카메라간 입자쌍들로 구성되는 두 직선간의 최단거리의 한계값을 0.3mm로 주었다. 또한, 교배율은 10%를 주었으며, 입자의 개수에 따라 10~15세대(반복횟수)를 사용하였다. Fig. 3은 본 연구에서 3차원 PTV계측시스템의 입자개수에 따라 식 (1)로 표현되는 상대오차의 변화를 나타낸다.

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

VSJ(Visualization Society of Japan)가 제시하고 있는 벽면 충돌제트에 대한 LES데이터를 이용한 가상영상을 입력영상으로 사용하여 상대오차를 구하였다. V_{ref} 와 V_{mea} 는 각각 충돌제트에 대한 LES데이터와 3D-PTV에 의한 계측데이터를 의미하며 N은 회복된 속도벡터(올바르다고 판단된 벡터의 개수, LES데이터 값과 실제 계측된 값과의 차이가 0.05mm 이내인 벡터들)의 개수이다. 입자수가 2000개일 때에는 상대오차가 약 4% 이내인 것을 알 수 있다. 이 때 올바르게 판단된 속도벡터는 약 70% 전후이었다. 이러한 성능의 계측시스템으로 전술과 같은 실험조건으로 원주에 대한 난류통계량을 계측 확보하였다.

2.3 계측결과

Fig. 3은 Fig. 1의 실험장치에서 카메라 2로 잡은 순간 영상을 보인다. Fig. 4는 한 순간에 얻어진 약 2500개의 순간속도벡터를 격자상으로 보간한 결과를 보인다. 격자상의 데이터는 정해진 점에서의 센서가 얻어낸 속도벡터로 간주될 수 있다. 이들 격자점에서의 시계열데이터를 통계처리를 하게되면 시계열 난류 통계량으로 볼 수 있다. Fig. 5는 원주중심선상에서의 유동방향 성분 평균속도 프로파일을 보이고 있다. 다른 연구결과들[10][17]과 비교하여 볼 때 타당한 결과를 보이고 있다. 지금까지 3차원 PTV에 의한 결과가 없기 때문에 2D-PTV에 의한 결과들과 DNS에 의한 결과들과 비교하였으며 본 연구에서 구현된 실험의 레이놀즈수에 근접한 연구결과들이 확보되지 않은 관계로 유사 연구성과들과 비교하였다. Fig. 6은 하류방향으로 중심선 상의 유동방향속도성분의 프로파일을 보이고 있다. Lourenco 등[18]에 의한 결과와의 차이가 다소 있음을 알 수 있으나 경향은 동일한 것을 알 수 있다. 이들 결과는 레이놀즈수가 다르며 2차원 PIV에 의하여 얻어진 결과였다는 점을 감안하면 본 결과는 비교적 좋은 결과를 보이고 있다. Fig. 7은 레이놀즈응력의 분포를 보이고 있다. 다른 연구결과들과 비교한 결과 다소 차이가 있으나 실험조건이 다르다는 점과 2차원과 3차원에 의한 결과인 점을 고려한다면 다소 의의가 있는 결과를 보이고 있다. Fig. 8은 여타 다른 계측법으로 얻어낼 수 없는 w' 에 대한 난류강도분포를 보이고 있다. y/D 가 1.5-2.5사이에서 $x/D=1$, 3일 때 유사한 분포를 보이는 것은 흥미있는 결과를 보이며 이는 유동방향쪽으로 와구조가 나열되어 있음[20]을 암시한다고 볼 수 있다. Fig. 9는 순간 와도분포를 나타내고 있다. 이 결과는 여타 다른 PIV 혹은 PTV계측법으로 얻어 내기 힘든 물리량이나 본 연구에서 잘 재현하고 있음이 돋보인다. 종방향의 와구조가 유동방향으로 일정 간격(약 1.3D)으로 나열되어 대류되어 가고 있음이 뚜렷하게 보인다. Fig. 10은 순간 난류운동에너지분포를 보이고 있다. Fig. 9에서 보였던 종방향 와구조의 존재로 난류운동에너지가 종방향 형태로 나열되어 있으며 그 최대값은 와구조의 간격인 약 1.3D로 횡방향으로 분포되어 있었다.

3. 결론

원주후류에 대한 직접측정(direct probing)을 위하여 3차원 PTV계측시스템을 구축하였으며 이를 이용한 원주후류의 난류 통계량을 구축하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

본 연구에서 구축한 유전알고리즘기반 3차원 PTV계측시스템은 저해상카메라(0.5K x 0.5K)를 사용하여 순간속도벡터의 개수가 약 3000개이었으며 이는 지금까지의 3차원 PTV관련 연구성과 중 가장 좋은 결과로 평가된다.

벽면충돌제트에 대한 LES계산결과에 대하여 본 연구에서 구축한 계측시스템은 입자수가 2000개일 때 80%전후의 실제 계측에서는 70%전후의 올바른 속도벡터 회복률을 보였으며 얻어진 속도벡터들에 대한 상대오차도 약 4%이내였음이 밝혀졌다.

구축된 계측시스템으로 얻어진 난류통계량을 다른 연구성과들과 비교하여 볼 때 매우 합당한 결과를 보였다.

현재, 본 연구에서 얻어낸 원주후류에 대한 실험결과데이터를 이용하여 와구조에 대한 위상학적 해석을 진행하고 있는데 이 결과는 추후와의 발생 및 소멸에 관한 메커니즘규명에 지대한 영향을 미칠 것으로 사료된다.

본 계측시스템은 저해상카메라로 계측한 결과이므로 고해상의 카메라를 도입한다면 DNS(직접수치계산)수준의 계측결과를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

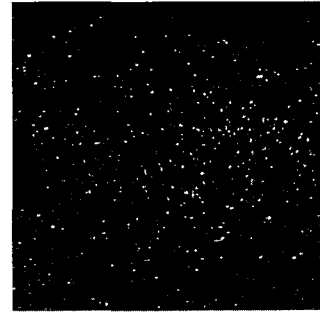


Fig. 3 Raw image viewed by camera 2.

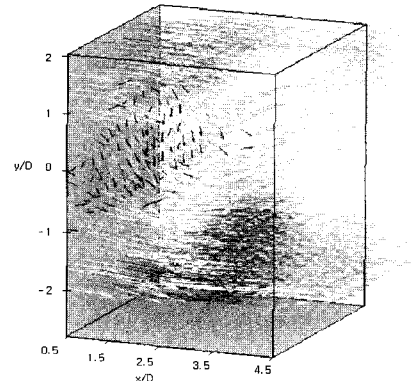


Fig. 4 Instantaneous 3D vector field on grids(11x13x12).

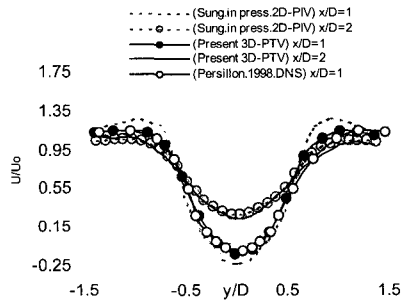


Fig. 5 Instantaneous 3D-velocity vectors.

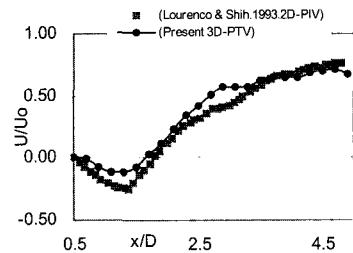


Fig. 6 Stream-wise time mean velocity profile along the centerline.

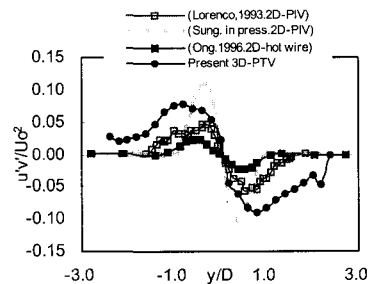


Fig. 7 Reynolds stress profile at $x/D = 3.0$.

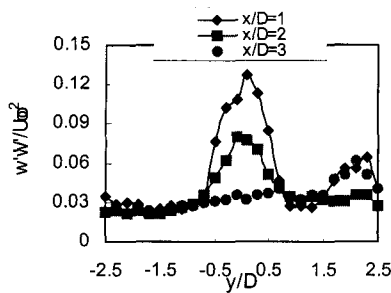


Fig. 8 Reynolds stress profile at different x/D ($w'w'/U_o^2$)

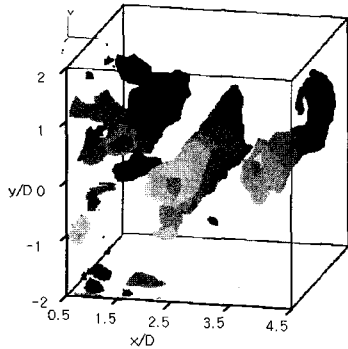


Fig. 9 3D-contour of an instantaneous vorticity.

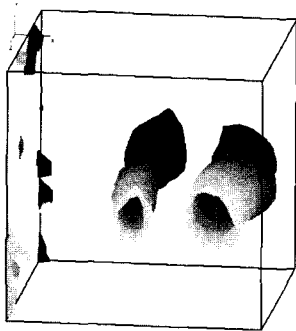


Fig. 10 Instantaneous RMS turbulent kinetic energy distribution.

참고문헌

[1] Adrian, R. J., Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.23, (1991), pp.261-304.
 [2] 도덕희, PIV 측정기술, *기계저널*, Vol.38, No.10, (1998), pp.36-41.
 [3] Roshko, A., On the development of turbulent wakes from vortex streets, NACA 1191, 1954.
 [4] Mansy, H., Yang, P. M., Williams, D. R., Quantitative measurement of three-dimensional structure in the wake of a circular cylinder, *J. Fluid Mech.*, Vol. 270, (1994), pp.277-296.
 [5] Williamson, C. H. K., Three-dimensional wake transition, *J. Fluid Mech.*, Vol. 328, 1996, pp. 345-407.
 [6] Chyu, C., Rockwell, D., Evolution of patterns of streamwise vorticity in the turbulent near wake of a circular cylinder, *J. Fluid Mech.*, Vol.320, (1996), pp.117-137.

[7] Wu, J., Sheridan, J., Welsh, M. C., Hourigan, K., Thompson, M., Longitudinal vortex structures in a cylinder wake," *Phys. Fluids*. Vol.6, (1994), pp.2883-2885.
 [8] Lourenco, L., Subramanian, S., Ding, Z., Time series velocity field reconstruction from PIV data, *Meas. Sci. Technol.*, Vol.8, (1997), pp.1533-1538.
 [9] 김경천, 윤상열, 김상기, 외추적 위상평균 기법을 이용한 원주후류의 PIV측정, *대한기계학회 유체공학부분 추계학술대회 논문집*, (1999), pp.55-60.
 [10] Sung J., Yoo J.Y., Near-wake vortex motions behind a circular cylinder at low Reynolds number," *Journal of Fluids and Structures*, (2002), in press.
 [11] Mass, H. G., Gruen, A., Papantoniou, D. A., Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows, *Exp. in Fluids*. Vol.15 (1993), pp.133-146.
 [12] Doh, D. H., Kim, D. H., Choi, S. H., Hong, S. D., Kobayashi, T., Saga, T., Single-Frame 3-D PTV for high speed flows, *Exp. in Fluids*, Vol.29, Suppl., (2000), pp.85-98.
 [13] Nishino, K. Kasagi, N., Hirata, M., Three-dimensional particle tracking velocimetry based on automated digital image processing, *ASME J. Fluids Eng.* Vol.111, No.4, (1989), pp.384-391.
 [14] Kobayashi, T., Saga, T., Sekimoto, K., "Velocity measurement of three-dimensional flow around rotating parallel disks by digital image processing, *ASME FED* Vol.85, (1989), pp.29-36.
 [15] Doh, D. H., Cho, K. R., Cho Y. B., Baek T. S., Ryu D. S., Hwang Y. C., Chang K. S., Development of a new 3D-PTV using genetic algorithm, *Proc. of 3rd Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing, PSFVIP-3*, Maui, Hawaii, Mar. 18-21, Paper No. F3134, (2001), pp.241-242.
 [16] 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, (2002), in press.
 [17] Persillon H., Braza M., Physical analysis of the transition to turbulence in the wake of a circular cylinder by three-dimensional N-S simulation, *J. Fluid Mech.*, Vol.365, (1998), pp.23-88.
 [18] Lourenco L. M. and Shih, C., Characteristics of the plane turbulent near wake of a circular cylinder, *A particle image velocimetry stud*, (1993), (extracted from Mittal (1996)).
 [19] Ong L. and Wallace J., The velocity field of the turbulent very near wake of a circular cylinder, *Exp. in Fluids*, Vol.20, (1996), 441-453.
 [20] Brede, M., Eckelmann, H., Rockwell, D., On secondary vortices in the cylinder wake", *Phys. Fluids*, Vol.8, (1996), pp.2117-2124.