

편광기법을 이용한 수직교차평면의 PIV 속도장 동시측정

김상문* · 윤상열* · 권성훈** · 김경천†

Simultaneous Measurements of Velocity Fields at Two Vertically Crossing Planes by PIV Systems Using Polarization Technique

Kyung Chun Kim, Sang Moon Kim, Sang Youl Yoon and Sung Hoon Kwon

Abstract

A new PIV technique was developed for decreasing optical error which was created during simultaneous measurements of velocity fields at a wall-normal plane and wall-parallel plane by a plane PIV and a Stereoscopic PIV system. The two Nd:Yag laser systems and three CCD cameras were synchronized to obtain instantaneous velocity fields at the same time. To avoid optical noise at the crossing line by the two laser light sheets, a new optical arrangement using polarization was applied. The obtained velocity fields show the existence of hairpin packet structure vividly and the idealized hairpin vortex signature is confirmed by experiment.

Key Words : Polarizing System(편광장치), Particle Image Velocimetry(입자영상유속계), Turbulent Boundary Layer(난류경계층), Hairpin Vortex Structure(헤어핀 와 구조)

1. 서론

주어진 유동의 순간 속도분포를 짧은 시간 내에 정량적으로 구할 수 있는 정량적 유동가시화 측정방법은 기존의 점측정 방식으로는 측정이 불가능 하였던 국부적인 유동의 공간변화를 정확하게 측정할 수 있게 하였다. 입자화상처리를 이용한 속도장 측정기술(PIV, Particle Image Velocimetry)은 현재 선진국에서도 활발하게 연구하고 있는 첨단 핵심기술로 매우 빠른 속도로 발전하고 있다.

PIV 기법으로는 크게 고전적인 2D PIV 기법, 2D3C 를 측정할 수 있는 Stereoscopic PIV 기법, 3D3C 를 측정할 수 있는 Holographic PIV(HPIV)기

법이 개발되어 있다. 조사면에 수직한 1 대의 카메라를 사용하는 고전적인 PIV 기법은 단지 2 차원 속도장의 측정이 가능하였고, 실제 3 차원 속도성분의 2 차원 투영성분을 측정할 수 있었다. Stereo-PIV 기법은 Soloff(1997)⁽¹⁾등이 제안한 방식이 가장 널리 사용되고 있으며, 2 대의 카메라를 사용하여 2 차원 평면내의 3 속도성분을 측정할 수 있다. 또한 HPIV 는 홀로그래피 기법을 응용하여 유동블룸의 3 차원 속도성분의 측정을 가능하게 하였다. 하지만 HPIV 기법은 그 설치과정이 매우 복잡하고 실험자재도 난해한 면이 있어 아직 널리 사용되어지고 있지는 못하다. 이러한 기본적인 기법들을 응용한 여러 PIV 기법들이 개발되어 오고 있다. High Speed 카메라를 이용하여 시간분해능을 높인 Cinematic PIV 기법이 개발되었고, Saga(2002)⁽²⁾ 등은 2 대의 Stereoscopic PIV 시스템과 편광을 응용하여 평행한 2 평면의 동시측정이 가능한 Dual-plane Stereoscopic PIV 기법을 개발하였다.

그러나 현재까지 수직, 수평면을 동시에 측정할

† 부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** LG 전자(주) 디지털 디스플레이 연구실

수 있는 기법이 시도되지 않은 바, 본 연구에서는 Stereoscopic PIV 기법과 기존의 2D PIV 기법을 이용하여 수직, 수평면의 동시측정이라는 새로운 기법을 개발함으로써 공간의 유동가시화에 대한 또 다른 방법을 제시하고자 하며 이를 적용하여 난류 경계층의 조직적 구조를 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 풍동장치

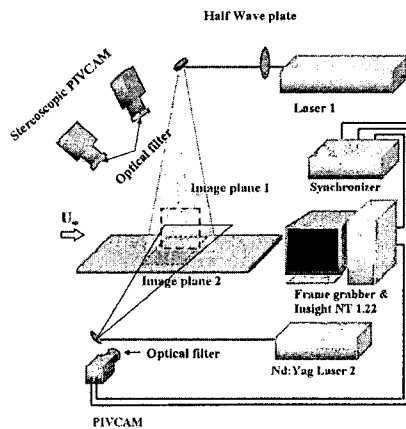


Fig. 1 The schematic of experimental setup

본 연구를 위해 제작된 풍동의 측정부는 단면이 직사각형이고 크기는 길이 2400mm, 폭 800mm, 높이 300mm 이다. 풍동 내부의 유동을 균일하게 만들기 위해 풍동 입구의 수축노즐에 Honeycomb Mesh 가 설치되었다. 횡방향(Spanwise)으로의 균일한 난류천이를 촉진시키고 천이지점의 하류위치를 안정화하기 위해서 직경 5mm 의 Trip-wire 가 선단으로부터 50mm 인 위치에 장착되었고, Trip-wire 의 뒷부분으로부터 길이방향으로 600mm 되는 곳까지의 바닥에는 사포(거칠기 80)가 설치되었다. 시험부는 풍동입구로부터 1.75m 떨어진 곳이다. Fig. 1 은 수직교차평면의 동시측정을 위한 실험장치의 개념도이다.

2.2 PIV 및 편광장치

본 실험을 실시하는 과정에서 광학적 오차가 있음을 발견하였다. Fig.2 에서 보듯이 수직과 수평의 두 평면이 부딪히는 지점에서 측정하려는 카메라에 원치 않는 부분의 광이 들어오게 되어 입자의 신뢰도가 떨어지게 되었다. 이 문제를 해결하기 위해 빛의 성질중의 하나인 편광을 이용하기로

하였다. 빛은 여러 방향으로 진동하는 파장으로 이루어져 있다. 편광은 이중에서 특정한 방향으로 진동하는 파장만을 통과시켜 얻는 것이므로 두 평면의 파장방향만 조절할 수 있으면 필터링을 통해 원하는 반사광만을 얻을 수 있다.

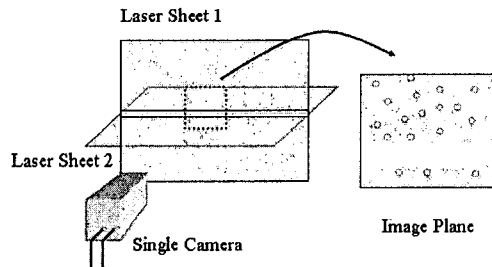


Fig. 2 Erroneous image in crossing of two light sheets

두 대의 Nd:Yag 레이저의 광이 위상이 다르다는 가정하에 카메라 앞에 편광필터를 설치하여 보았으나 두 평면이 거의 같은 위상을 가지고 있어 근본적인 해결책은 될 수 없었다. 이 문제를 해결하기 위해 같은 위상을 가진 두 개의 광평면중 하나의 위상을 바꾸어 보기로 했다. 레이저광의 위상을 90°까지 조절할 수 있는 Half Wave Plate 를 레이저 앞에 설치하고 측정을 실시하였다. Fig.3 은 이러한 광학설계에 대한 개념도를 나타낸다.

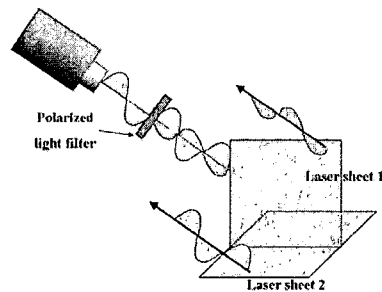
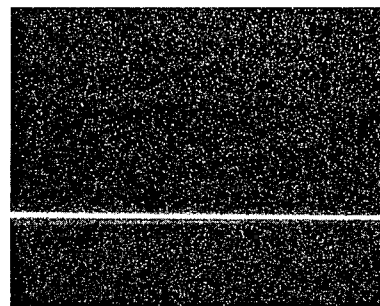
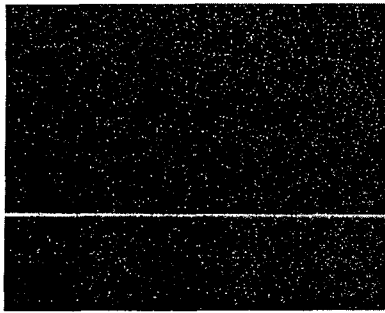


Fig. 3 The filtering of polarized lights

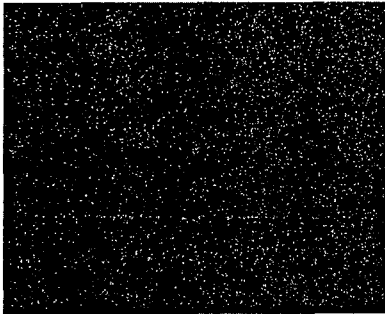
그 결과 Fig. 4 에 보이는 바와 같이, 2 개의 레이저 시트빔의 편광면의 각도차에 따라 교차면의 오차 성분이 현저히 작아지는 것을 확인할 수 있었다.



(a) the angular difference of 0°



(b) the angular difference of 45°



(c) the angular difference of 90°

Fig. 4 Comparison of the angular difference between two polarized lights

2.3 실험조건

본 실험에서는 압력을 영압력구배(ZPG : Zero Pressure Gradient)조건으로만 실시하였다. 레이놀즈 수(Reynolds Number)의 변화에 따른 경계층의 구조를 확인하기 위해 $Re_\theta = 514 (U_\infty = 1.48\text{m/s})$ 와 $Re_\theta = 934 (U_\infty = 2.87\text{m/s})$ 에서 실험을 실시하였다. 형상계수는 $Re_\theta = 514$ 일 때 약 1.242와 $Re_\theta = 934$ 일 때 1.226의 값을 가졌다. 이는 난류 촉진 장치를 이용하여 충분한 난류 경계층을 형성되었다고 판단된다. $Re_\theta = 514$ 인 경우의 경계층두께(δ)는 약 59mm이고, $Re_\theta = 934$ 의 경우에는 58mm로 측정되었다. Table 1은 이러한 실험조건을 나타낸다.

Table 1 Flow parameters

Case	$Re_\theta = 514$	$Re_\theta = 934$
U_∞	1.48 m/s	2.87 m/s
u_r	0.0755 m/s	0.1361 m/s
δ	59 mm	58 mm
θ	5.42 mm	5.08 mm
H	1.242	1.226
Re_δ	5597	10,671

3.3 난류경계층의 조직적 구조

본 연구에서 와(Vortex)란 Robinson⁽³⁾이 언급했듯

이 와중심 속도에 해당하는 대류속도를 빼고 난 뒤 속도장을 관찰할 때 유선의 모양이 원과 가까운 형태를 이루는 부분에서의 집중된 와(Concentrated Vortex)영역으로 정의한다. 대류속도는 와도장과 속도장에서 와의 위치가 일치되도록 결정되었다. 사용된 와의 식과 무차원 와는 아래와 같다.

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \omega_z^+ = \frac{\omega_z v}{u_*^2}$$

3.1 $Re_\theta = 934, y^+ = 43.62$ 에서의 속도장

Fig. 5는 헤어핀 와 구조의 일반적인 예로서, $Re_\theta = 934$ 인 ZPG(Zero Pressure Gradient)에서 대류속도가 0.9이고, 내부변수로 무차원화 하여 나타낸 순간 속도장(x-y)이다. 일반적인 난류유동을 해석하는 방법은 속도성분을 유동방향의 대류속도 성분과 섭동성분으로 구분하는 방법이다. 헤어핀 머리부분이 원형을 이루면서 마치 다발처럼 같은 속도로 이동하는 것(HVS : Hairpin Vortex Signature)이 나타난다. 또한 Q2/Q4의 경계선을 기준으로 VITA(Variable Interval Time Averaging) 이벤트가 나타나며, 전단층이 스케치되어 있다. 또한 이 그림에서 원으로 표시된 부분은 유선의 형태가 거의 원에 가깝다. 이는 본 연구에서 정의한 집중된 와를 나타낸다.

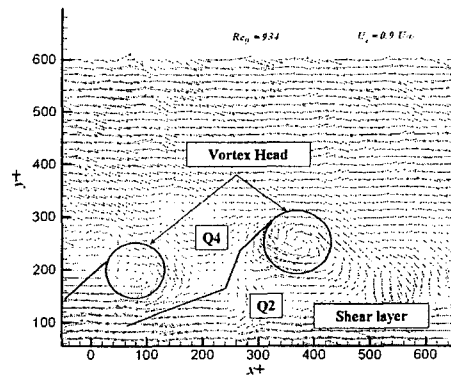


Fig. 5 The Galilean decomposed instantaneous velocity field($Re_\theta = 934$)

Fig. 6은 동시에 측정된 수직면과 수평면의 순간 속도장이다. 헤어핀 Head가 $x^+ = 400$ 의 x-y 평면에서 나타나고 있는데, x-z 평면과 비교해 볼 때 Streaky Structure Line이 모여지기 시작하는 부분과 일치한다. 즉 이 위치가 값이 40~50임을 감안하면 x-z 평면에서 나타나는 헤어핀의 다리(Legs)부분이 $x^+ = 300$ 근처에서 급격한 경사를 이루면서 x-z 평면의 헤어핀 머리의 모양을 갖추어 감을 알 수 있다.

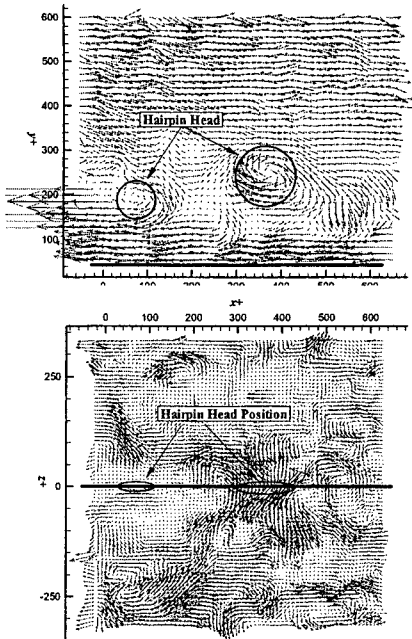


Fig. 6 3D instantaneous velocity vector field($Re_{\theta}=934$)

3.2 $Re_{\theta} = 514, y^+ = 48.4$ 에서의 속도장

Fig.7 은 $Re_{\theta} = 514$ 에서의 결과이다. 헤어핀 Head 는 $y^+ = 100 \sim 200$ 정도에서 관찰되고 있다.

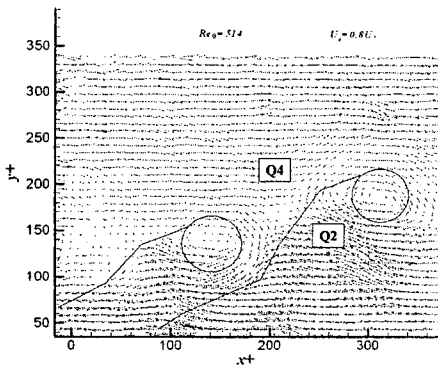


Fig. 7 The Galilean decomposed instantaneous velocity field($Re_{\theta} = 514$)

Fig.8 에서도 전반적으로 작은 와들이 산재되어 나타나고 있는데 이는 $Re_{\theta} = 514$ 에서 이 지점의 측정위치가 난류경계층이 완전 발달되기 직전이기 때문인 것으로 예상된다. 하지만 전반적인 분포가 앞의 실험결과들과 비교해 볼 때 일정한 Streaky Structure Line 주위로 모여 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 실험에서는 빛의 편광성질을 이용한 편광장치를 통해 두 평면의 동시 측정시 발생하는 광학

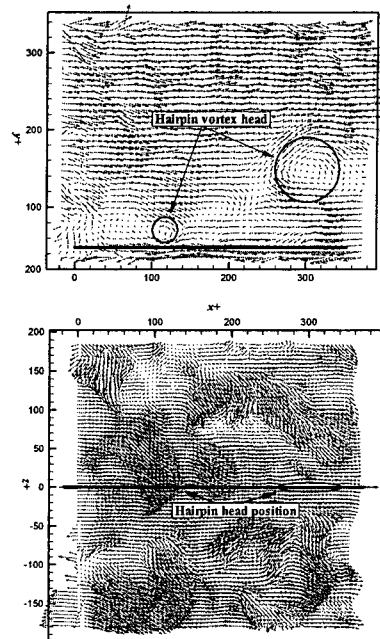


Fig. 8 3D instantaneous velocity vector field($Re_{\theta}=514$)

오차(Optical Error)를 최소화시킬 수 있는 새로운 측정기법을 고안하였다. 이는 PIV System 과 광학을 응용한 기법으로서 기존의 측정방식을 한단계 발전시켰다고 볼 수 있다. 또한 헤어핀 와다발 구조의 수직면과 수평면을 동시에 측정하고, 위치에 따른 와의 구조를 통해 Streaky Structure 의 형태로 Counter-Rotating Vortex Pair 구조가 있음이 확인되었다.

후 기

이 논문은 2003 년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구 되었음(KRF-2003-041-D20087).

참 고 문 헌

- 1) Soloff, S. M., Adrian, R. J. and Liu, Z. C., 1997, "Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry", Measurement Science and Technology, Vol.8, pp.1441~1454.
- 2) Saga, T., Hu, H., Kobayashi, T., Taniguchi, N., Yasuki, M. and Higashiyama, T. 2001, "Simultaneous Measurement of All the Three Components of Vorticity Vectors by Using a Dual-plane Stereoscopic PIV System", Proc. 4th Int. Symposium on Particle Image Velocimetry, paper no.1020.
- 3) Robinson, S. K., 1991, Coherent Motion in the Turbulent Boundary Layer, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 23, pp. 601~639.