

## 편광기법을 이용한 수직교차평면의 PIV 속도장 동시측정

권성훈\* · 윤상열\* · 김경천

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

S. H. Kwon, S. Y. Yoon, and K. C. Kim

**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 Stereo-PIV systems. For experimental study, two different Reynolds number based on momentum thickness,  $Re_\theta=514$  and  $934$  were generated in a blowing type wind tunnel under the condition of zero pressure gradient. 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)

#### 기호설명

$U_c$ : 대류속도(Convection Velocity)

$U_\infty$ : 자유흐름속도

$\delta$ : 경계층두께

$\theta$ : 운동량두께

$Re_\theta$ : 레이놀즈수(=  $U_\infty \theta / \nu$ )

$H$ : 형상계수(=  $\delta / \theta$ )

$u^*$ : 벽마찰속도

(+):  $u^*$ 와  $\nu$ 를 이용한 무차원변수

$\omega_z$ : 와도

#### 1. 서 론

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.

PIV기법으로는 크게 고전적인 2D PIV기법, 2D3C를 측정할 수 있는 Stereoscopic PIV기법, 3D3C를 측정할 수 있는 Holographic PIV(HPIV)기법이 개발되어 있다. 조사면에 수직한 1대의 카메라를 사용하는 고전적인 PIV 기법은 단지 2차원 속도장의 측정이 가능하였고, 실제 3차원 속도성분의 2차원 투영성분을 측정할 수 있었다. Stereo-PIV기법은 Soloff (1997)<sup>(1)</sup>등이 제안한 방식이 가장 널리 사용되고 있으며, 2대의 카메라를 사용하여 2차원 평면내의 3속도성분을 측정할 수 있다. 또한 HPIV는 홀로그래피 기법을 응용하여 유동불류의 3차원 속도성분의 측정을 가능하게 하였다. 하지만 HPIV 기법은 그 설치과정이 매우 복잡하고 실험자체도 난해한 면이 있어 아직 널리 사용되어 지고 있지는 못하다. 이러한 기본적인

†부산대학교 공과대학 기계공학부

\*부산대학교 대학원 기계공학과

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

기법들을 응용한 여러 PIV 기법들이 개발되어 오고 있다. High Speed 카메라를 이용하여 시간분해능을 높인 Cinematic PIV 기법이 개발되었고, Saga(2002)<sup>(2)</sup> 등은 2대의 Stereoscopic PIV 시스템과 편광을 응용하여 평행한 2평면의 동시측정이 가능한 Dual-plane Stereoscopic PIV 기법을 개발하였다.

그러나 현재까지 수직, 수평면을 동시에 측정할 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 난류경계층의 조직적 구조를 파악하고자 하였다. 2차원 PIV 측정에 의해 발견된 헤어핀 와류구조가 과연 3차원적으로도 분명히 존재하는가에 대한 직접적인 증거가 없어 헤어핀 또는 헤어핀 다발구조의 3차원적 토폴로지 규명은 많은 연구자들의 초미의 관심사이다(Theodorson (1952)<sup>(3)</sup>, Head et al.(1981)<sup>(4)</sup>, Ohya(2001)<sup>(5)</sup>, Meinhart and Adrian(1995)<sup>(6)</sup>).

따라서 본 연구에서는 편광의 원리, 2차원 평면 PIV 측정기법과 3차원 Stereoscopic PIV 기법을 동시에 적용한 새로운 실험기법을 통하여 난류경계층의 조직적 구조로 알려진 헤어핀 와 다발구조의 3차원적 구조를 파악하고자 한다. 본 연구를 통하여 순간 속도장들을 비교함으로써 난류경계층의 구조를 이해하고자 한다.

## 2. 실험방법 및 조건

### 2.1 풍동장치

PIV를 이용한 속도장 측정과 압력변화에 대한 난류 경계층의 변화를 측정하기 위해 이에 적합한 투명한

아크릴 풍동을 제작하였다. 풍동 내부의 유동을 균일하게 만들기 위해 풍동 입구의 수축노즐(Contraction) 안에 Honeycomb Mesh를 넣어 설치하였다. 또한 수직, 수평면의 경계층 유동을 CCD 카메라로 관찰하기 위해 측정부의 평판은 유리로 제작되었으며, 폭 800 mm, 높이 300 mm인 아크릴 풍동을 제작하였다. 가변형 원심팬에서 공급되는 공기는 정체실과 단면비 2.67:1의 2차원 수축노즐을 통과한 후 그물망을 거쳐 시험부로 유입된다. 송풍기의 입구면에서 최대속도는 40 m/s로 이때 유량은 75.4 m<sup>3</sup>/min이다. 가변형 원심팬을 이용한 이 송풍기는 가변기(Converter)를 사용하여 원하는 속도를 얻을 수 있다.

실험조건으로는 횡방향(Spanwise)으로 균일한 천이를 촉진시키고, 천이지점의 하류위치를 안정화하기 위해서 직경 5 mm의 Trip-wire가 선단으로부터 50 mm인 위치에 장착되었고, Trip-wire의 뒷부분으로부터 길이방향으로 600 mm 되는 곳까지의 바닥에는 사포(거칠기 80)가 설치되었다. 시험부는 풍동입구로부터 1.75 m 떨어진 곳이다. Fig. 1은 수직교차평면의 동시측정을 위한 실험장치의 개념도이다.

### 2.2 광학장치

본 실험을 실시하는 과정에서 광학적 오차가 있음을 발견하였다. Fig. 2에서 보듯이 수직과 수평의 두 평면이 부딪히는 지점에서 측정하려는 카메라에 원치 않는 부분의 광이 들어오게 되어 입자의 신뢰도가 떨어지게 되었다. 이 문제를 해결하기 위해 빛의 성질 중의 하나인 편광을 이용하기로 하였다. 빛은 여러 방향으로 진동하는 파장으로 이루어져 있다. 편광은 이 중에서 특정한 방향으로 진동하는 파장만을 통과시켜 얻는 것이므로 두 평면의 파장방향만 조절할 수 있으면 필터링을 통해 원하는 반사광만을 얻을 수 있다.

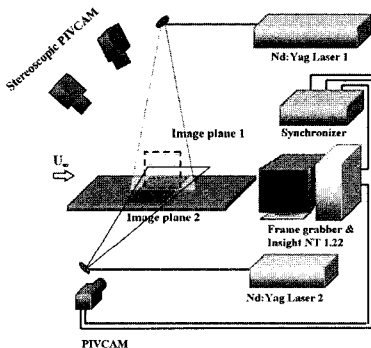


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

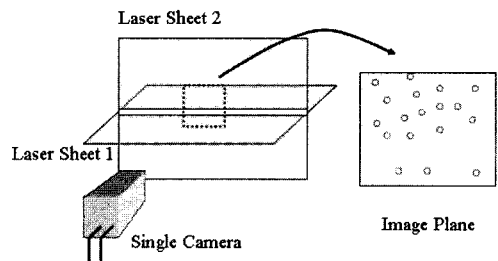


Fig. 2. Increasing noise of image on crossing two light sheets.

실험에 앞서 두 대의 Nd:Yag레이저의 광이 위상이 다르다는 가정하에 카메라 앞에 편광필터를 설치하여 보았다. 하지만 직교되는 광에서의 산란은 어느 정도 막을 수 있었으나 두 평면이 거의 같은 위상을 가지고 있어 근본적인 해결책은 될 수 없었다. 이 문제를 해결하기 위해 같은 위상을 가진 두 개의 광평면 중 하나의 위상을 바꾸어 보기로 했다. 레이저광의 위상을 90°까지 조절할 수 있는 Wave Plate를 사용하여 레이저 앞에 설치하고 측정을 실시하였다. Fig. 3은 이러한 광학설계에 대한 개념도를 나타낸다.

2.3 실험조건

본 실험에서는 수평면과 수직면의 동시측정 가능성을 보기 위해 압력을 영압력구배(ZPG:Zero Pressure Gradient)조건으로만 실시하였다. 레이놀즈수(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( $\delta$ )는 약 59 mm이고,  $Re_\theta=934$ 의 경우에는 58 mm로 측정되었다. Table 1은 이러한 실험조건을

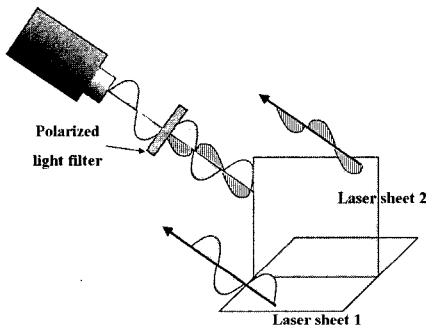


Fig. 3. Filtering of polarized lights.

Table 1. Flow Parameter

CASE	$Re_\theta = 514$	$Re_\theta = 934$
$U_\infty$	1.48 m/s	2.87m/s
$u^*$	0.0755 m/s	0.1361 m/s
$\delta$	59 mm	58mm
$\theta$	5.42 mm	5.08 mm
$H$	1.242	1.226
$Re_\delta$	5597	10671

나타낸다.

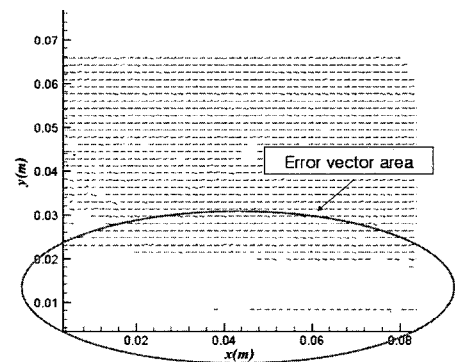
3. 편광을 이용한 광학적 설계

편광을 이용한 PIV System의 가능성을 보기 위해 Wave Plate의 각을 변화시키면서 이미지 광의 노이즈 테스트를 실시하였다. Fig. 4~Fig. 7은 Image Panel, 즉 수직평면에서 측정된 영상 이미지이다. Fig. 4와 Fig. 5는  $Re_\theta=514 (U_\infty = 1.48 \text{ m/s})$ 의 조건으로 측정된 그림이다. Fig. 4는 두 평면의 위상각이 거의 같을 때 촬영되어진 영상과 속도데이터인데 속도벡터가 1950개중 557개의 Bad Vector를 가짐(약 29%의 에러율)을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5에서 보듯이 두 평면의 위상차가 약 90°에 가까워짐에 따라 속도벡터의 에러값이 10개 미만, 즉 0.5%이하가 됨을 알 수 있다.

추가적으로 동시측정했을 때와 수직평면만 측정했을때의 비교를 위해  $Re_\theta=934(U_\infty = 2.87 \text{ m/s})$ 에서 속

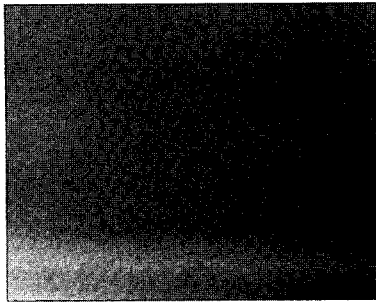


(a)Instantaneous image at vertical plane

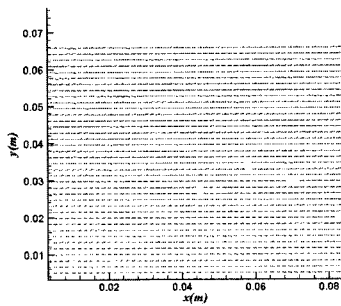


(b)Instantaneous velocity vector field

Fig. 4. Non-polarized light sheets.



(a) Instantaneous image at vertical plane



(b) Instantaneous velocity vector field

Fig. 5. Polarized light sheets.

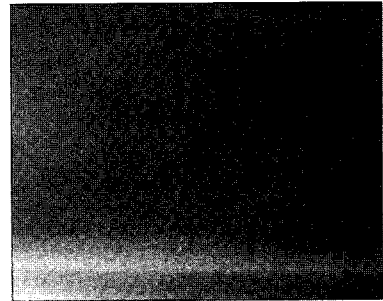
도벡터 비교를 해 보았다. Fig. 6과 Fig. 7의 이미지가 그것인데 두 이미지의 빛강도 차이가 보이는 것은 편광필터와 Wave Plate를 지나면서 빛손실이 생겼기 때문이다. 두 그림의 속도벡터 데이터에서 알 수 있듯이 두 이미지에 대한 유속 Profile이 유사함을 확인할 수 있고, 또한 0.5%이하의 에러율을 가짐을 알 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9는 동시측정했을 때와 수직평면만 측정했을 때 순간속도장 200장에 대해 앙상블 평균한 값이다. 두 데이터의 값이 잘 일치함을 확인할 수 있다. 이로써 광학적 오차율을 현저히 감소시켰고 그 타당성도 얻을 수 있었다.

#### 4. 난류 경계층의 조직적 구조

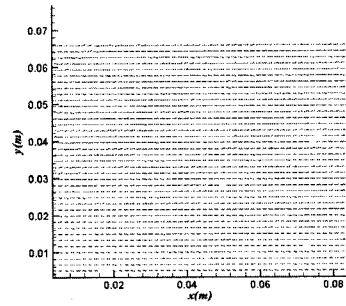
##### 4.1 $Re_0=934$ , $y^+=43.62$ 에서의 속도장

###### 4.1.1 x-y 평면에서의 속도장

본 연구에서 와(Vortex)란 Robinson<sup>(7)</sup>이 언급했듯이 와중심 속도에 해당하는 대류속도를 빼고 난 뒤 속도장을 관찰할 때 유선의 모양이 원과 가까운 형태를 이루는 부분에서의 집중된 와(Concentrated Vortex) 영역으로 정의한다.



(a) Instantaneous image at vertical plane

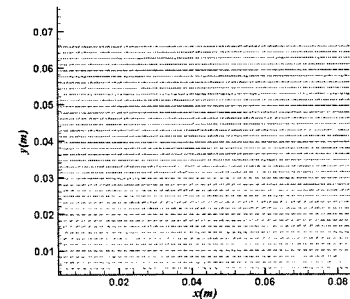


(b) Instantaneous velocity vector field

Fig. 6. Vertical plane data with crossing light sheets.



(a) Instantaneous image at vertical plane



(b) Instantaneous velocity vector field

Fig. 7. Vertical plane data with a single light sheet.

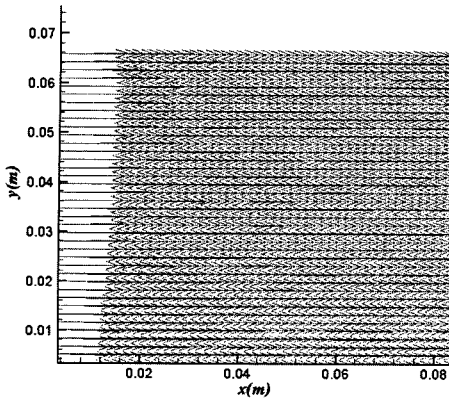


Fig. 8. Ensemble averaged velocity field with crossing light sheets.

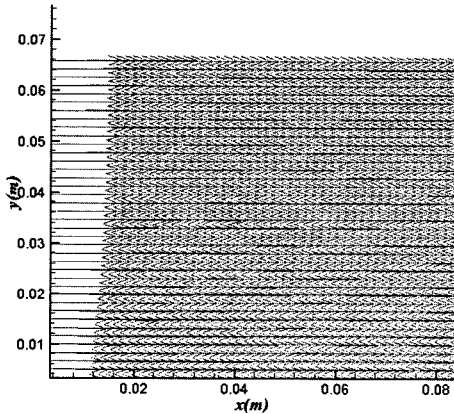


Fig. 9. Ensemble averaged velocity field with a single light sheet.

대류속도는 와도장과 속도장에서의 와의 위치가 일치되도록 결정되었다.

사용된 와의 식과 무차원 와는 아래와 같다.

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

Fig. 10은 헤어핀 와 구조의 일반적인 예로서,  $Re_\theta = 934$ 인 ZPG(Zero Pressure Gradient)에서 대류속도가  $0.9 U_\infty$ 이고, 내부변수로 무차원화 하여 나타낸 순간 속도장이다. 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

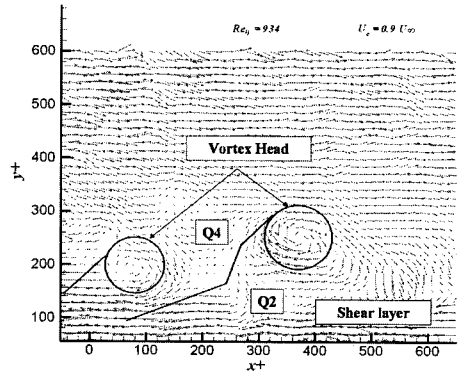
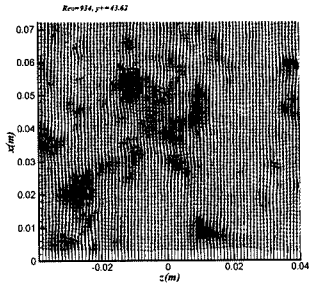


Fig. 10. Near-wall at  $Re_\theta = 934$  showing hairpin vortex signatures aligned in the streamwise direction. Instantaneous velocity vectors are viewed in a frame-of-reference moving at  $U_c = 0.9 U_\infty$  and scaled with inner variables. Vortex head and inclined shear layers are indicated schematically, along with the elements triggering a VITA event.

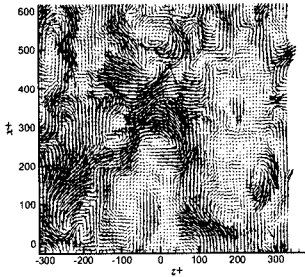
Time Averaging) 이벤트가 나타나며, 전단층이 스케치되어 있다. 또한 이 그림에서 원으로 표시된 부분은 유선의 형태가 거의 원에 가깝다. 이는 본 연구에서 정의한 집중된 와를 나타낸다. 하지만 첫 번째 원으로 표시된 영역은 와도장에서는 집중된 와를 가지지만, 유선의 형태가 유동방향으로 두 번째 와에 비해 약간 찌그러짐을 알 수 있다. 이는 집중된 와의 대류속도가 두 번째 와의 대류속도에 비해 약 10% 가량 작기 때문이다. 만약 대류속도를 적절히 변화시킨다면 첫 번째 와의 유선도 원의 형태로 나타나고, 그 중심은 최대값을 가지는 와중심과 일치할 것이다.

#### 4.1.2 x-z 평면에서의 3차원 속도장

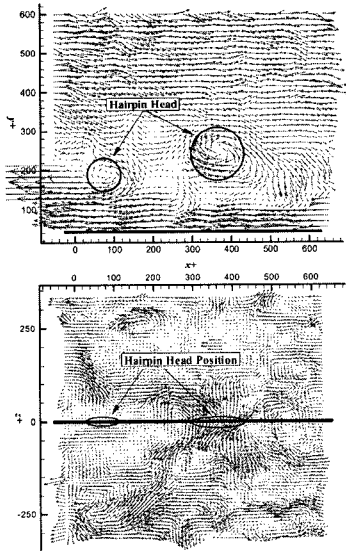
Fig. 11(a)는  $Re_\theta = 934$ ,  $y^+ = 43.62$ 에서의 x-z평면의 속도장을 나타낸다. 이때 시간평균(Ensemble Average)한 평균속도는 2.08 m/s이다. x-y평면의 시간평균속도와 비교 해 볼 때 이 속도와 거의 일치함을 알 수 있다. Fig. 11(b)를 보면  $z^+ = 0$ 를 중심으로 Counter-Rotating Vortex Pair가 형성되고 있음을 알 수 있다. 이러한 Counter-Rotating Vortex Patterns은 수직평면으로 기울어진 와의 아랫부분(Vortex Legs)을 레이저의 광 평면(Light Sheet)으로 단면을 잘라 봄으로써 나타나게 된 것이다.  $z^+ = 100, -100$  부분에서 약 200의 폭을 가지면서 Streaky Structure가 나타난다. 3차원 속도분포장을 확인해본 바, Streaky Structure의 부분이



(a) Instantaneous velocity vectors



(b) Vectors viewed in a frame at  $U_c = 0.65 U_\infty$



(c) 3D Instantaneous velocity vector field

Fig. 11. 3D Instantaneous velocity vector field at  $y^+ = 43.62$ .

주위에 비해 y방향으로의 속도가 높음을 알 수 있었다.

Fig. 11(c)에서 헤어핀 Head가  $x^+=400$ 의 x-y평면에서 나타나고 있다. x-z평면과 비교해 볼 때 Streaky Structure Line이 모여지기 시작하는 부분과 일치한다.

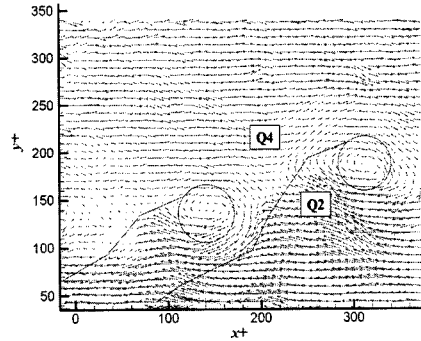


Fig. 12. Streamwise wall-normal velocity vector field at  $Re_\theta=514(U_c=0.8U_\infty)$ .

즉 이 위치가  $y^+$  값이 40~50임을 감안하면 x-z평면에서 나타나는 헤어핀의 다리(Legs)부분이  $x^+=300$  근처에서 급격한 경사를 이루면서 x-z평면의 헤어핀 머리의 모양을 갖추어 감을 알 수 있다.

#### 4.2 $Re_\theta=514, y^+=48.4$ 에서의 속도장

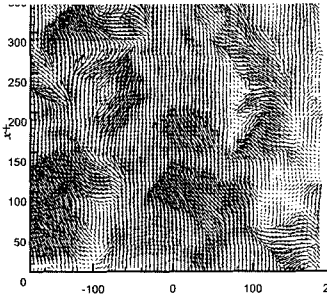
##### 4.2.1 x-y 평면에서의 속도장

Fig. 12는  $Re_\theta = 514$ 에서의 결과이다. 유동방향의 속도 성분에서 대류속도의 0.9배를 뺀 난류경계층의 구조를 확인할 수 있다. 헤어핀 Head는  $y^+=100\sim 200$  정도에서 관찰되고 있다. 여기서도 마찬가지로 헤어핀의 경사각이 약  $45^\circ$ 를 이루고 있음을 확인할 수 있다. Q2/Q4의 경계선을 기준으로 VITA 이벤트가 나타나고 있으며 바닥쪽으로 전단층을 관찰할 수 있다.

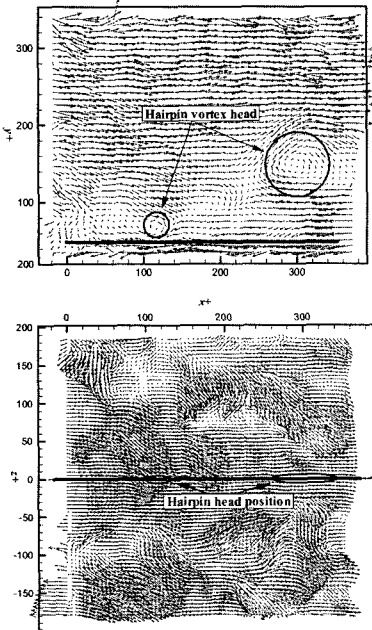
##### 4.2.2 x-z 평면에서의 3차원 속도장

Fig. 13은  $Re_\theta = 514, y^+ = 48.4$  에서의 x-z평면의 속도장을 나타내고 있다.  $z^+ = -100, 100$ 에서 Streaky Structure를 확인할 수 있으며 이는  $Re_\theta = 934, y^+ = 43.62$ 에서의 간격과 비슷함을 알 수 있다. Fig. 13(a)에서 y방향 속도를 확인해본 바,  $x^+ = 100$ 과  $300$ 에서 높게 나타났으며 이는 Fig. 13(b)에서 x-z평면의 헤어핀 머리부분과 연결되어진다.

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. 이는 Fig. 13(b)에서 확실히 관찰되어진다.



(a) Vectors viewed in a frame at  $U_c = 0.65 U_\infty$



(b) 3D Instantaneous velocity vector field

Fig. 13. 3D Instantaneous velocity vector field at  $y^+ = 48.4$ .

### 5. 결 론

본 실험에서는 빛의 편광성질을 이용한 편광장치를 통해 두 평면의 동시 측정시 발생하는 광학오차(Optical Error)를 최소화시킬 수 있는 새로운 계측기법을 고안하였다. 이는 PIV System과 광학을 응용한 기법으로서 기존의 측정방식을 한단계발전시켰다고 볼 수 있다.

또한 레이놀즈수 변화에 따른 각 위치별 헤어핀 와 다발 구조의 수직면과 수평면을 측정하고 스테레오 PIV를 통해 수평면의 단면에 대한 3차원 형상을 만들어 낼 수 있었다. 위치에 따른 와의 구조를 통해 Streaky Structure의 형태로 Counter-Rotating Vortex

Pair구조가 있음이 확인되었다.

$y^+$  값이 증가함에 따라 Streaky Structure의 사이 간격이 줄어들음을 확인했고, 이는 45°정도의 기울기를 가지는 헤어핀 형상이 어느 정도 맞게 이루어져 가고 있음을 말한다.

본 실험은 광학을 응용한 PIV측정기법뿐만 아니라 앞으로 보다 다양한 기법을 응용함으로써 쉽고 정확한 실험결과를 도출해 낼 수 있음을 확인할 수 있는 실험이었다.

### 후 기

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

### 참고문헌

- 1) Soloff, S.M., Adrian, R.J. and Liu, Z.C., 1997, "Disortion Compensatin 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 Volicity Vectors by Using a Dual-plane Stereoscopic PIV System", Proc. 4th Int. Symposium on Partivel Image Velocimetry, paper no.1020.
- 3) Theodorsen, T., 1952, "Mechanism of Turbulence", Proc. the Second Midwestern Conference of Fluid Mech., Vol.123.
- 4) Head, M.R. and Bandyopadhyay, P., 1981, "New Aspects of Turbulent Boundary-Layer Structure", J. Fluid Mech., Vol. 107, pp. 297-338.
- 5) Ohya, Y., Uchida, T. and Karasundani, T., 2000, "Wind Tunnel Study of Various Stable Boundary Layers: The Effect of Temperature Profiles on SBL Flow Structures", Boundary Layers and Turbulence, pp.614-617.
- 6) Meinhart, C.D. and Adrian, R.J., 1995, "On the Existence of Uniform Momentum Zones in a Turbulent Boundary Layer", Physics of Fluids, Vol.7 no.4, pp.694.
- 7) Robinson, S.K., 1991, "Coherent Motion in the Turbulent Boundary Layer", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.23, pp.601-639.