

# 난류경계층의 3차원 헤어핀 다발구조에 대한 실험적 연구

권성훈\*·윤상열\*·김경천†

(2004년 2월 5일 접수, 2004년 4월 23일 심사완료)

## Experimental Study on the Three-Dimensional Topology of Hairpin Packet Structures in Turbulent Boundary Layers

Seong Hun Kwon, Sang Youl Yoon and Kyung Chun Kim

**Key Words:** Turbulent Boundary Layer(난류경계층), Hairpin Vortex Structure(헤어핀 와 구조), Particle Image Velocimetry(입자영상유속계), Streaky Structure(줄무늬 구조)

### Abstract

Experimental study on the three-dimensional topology of hairpin packet structures in turbulent boundary layers were carried out. 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. Simultaneous measurements of velocity fields at a wall-normal plane and wall-parallel plane by a plane PIV and a Stereo-PIV systems. 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. Two counter-rotating vortex pair which reflects the cutting plane of hairpin legs are found both side of a strong streaky structure when the wall-normal plane cuts the hairpin head.

### 기호설명

- $U_c$  : 대류속도
- $U_{avg}$  : 평균속도
- $\delta$  : 경계층두께
- $\theta$  : 운동량두께
- $Re_{\theta}$  : 레이놀즈수( $= U_{\infty}\theta/\nu$ )
- $H$  : 형상계수( $= \delta^*/\theta$ )
- $u_{\infty}$  : 벽마찰속도

### 1. 서론

난류 경계층은 비행기, 자동차, 고속열차등 수송기계의 항력, 양력, 소음 및 열전달에 관련된 중요한 연구분야이다. 특히 운동량 및 열전달에서 가장 큰 영향을 주는 물리적 현상은 난류 경계층에 나타나는 대규모의 조직적 구조(Large scale organized structure)이다. 난류경계층에 대한 가장 기본적인 이해는 난류가 단지 평균값에 대하여 임의의 섭동성분으로 이루어진 것이 아니라, 유동전반에 걸쳐 동적구조를 지배하는 조직적인 거동으로 이루어졌다는 것이다. 근래의 연구에 따르면, 조직적 구조를 뒷받침하는 말발굽(horseshoe) 또는 헤어핀(hairpin)

† 책임저자, 회원, 부산대학교 공과대학 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2324 FAX : (051)515-7866

\* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

과 같은 와가 난류 경계층의 동적구조에 중심적인 역할을 하는 것으로 밝혀졌다.

헤어핀의 존재를 제안한 Theodorson(1952)<sup>(1)</sup>의 모델은 벽면에 대해 경사진 말발굽 형태의 와로 구성되어 있으며, Head 등(1981)<sup>(2)</sup>은 압력구배가 없는 난류경계층에서 연기에 광원을 이용하여 와의 형태를 가시화 하였고, Smith(1984)<sup>(3)</sup>는 낮은 레이놀즈 수에서 수소 기포 법으로 헤어핀 루프를 가시화 하였다. 그리고 Irwin(1981)<sup>(4)</sup>은 풍동에서 경계층 형성을 위한 spires을 디자인 하였고 Iyengar(1992)<sup>(5)</sup>는 대기경계층 풍동에서 spires와 레고 블록을 이용하여 도시의 대기경계층을 형상화 시켰고, Ohya(2001)<sup>(6)</sup>는 체인에 의한 거친표면의 대기경계층 풍동에서 열선유속계(hot-wire)와 냉선유속계(cold-wire)를 사용함으로써 열성층 분포에 따른 경계층을 연구하였다. 최근에는 DNS(Direct Numerical Simulation)와 LES(Large Eddy Simulation)등의 수치적 방법과 입자영상유속계(PIV)와 같은 실험적 방법의 도입으로 이 분야에 현격한 발전이 이루어지고 있다. Meinhart와 Adrian(1995)<sup>(7)</sup>은 PIV를 이용하여, 압력구배가 없는 평판에서 속도성분 U, V를 측정하였다. 그들은 유동방향으로 정렬된 속도패턴들이 자주 나타남을 관찰하였는데, 이러한 와 다발(vortex packet)이 경계층 유동에 중요한 역할을 한다고 보았다.

하지만 2차원 PIV 계측에 의해 발견된 헤어핀 와 구조가 과연 3차원적으로도 분명히 존재하는가에 대한 직접적인 증거가 없어 헤어핀 또는 헤어핀 다발구조의 3차원적 토폴로지 규명은 많은 연구자들의 초미의 관심사이다. 본 연구에서는 2차원 평면 PIV 계측기법과 3차원 스테레오 PIV 기법을 적용하여 난류경계층의 조직적 구조로 알려진 헤어핀 와 다발구조의 3차원적 구조를 파악하고자 한다.

## 2. 실험방법 및 조건

풍동 내부의 유동을 균일하게 만들기 위해 풍동 입구의 수축노즐(contraction) 이전에 honeycomb-mesh를 설치하였다. 측정부의 평판은 유리로 제작되었으며, 폭 800mm, 높이 300mm인 아크릴 풍동을 제작하였다. 가변형 원심팬에서 공급되는 공기는 정체실과 단면비 2.67 : 1의 2차원 수축노즐을 통과한 후 그물망을 거쳐 시험부로 유입된다.

실험조건으로는 횡방향(spanwise)으로 균일한 천이를 촉진시키고, 천이지점의 하류위치를 안정화하기 위해서 직경 5mm의 Trip-wire가 선단으로부터 50mm인 위치에 장착되었고, Trip-wire의 뒷부분으로부터 길이방향으로 60되는 곳까지의 바닥에는 사포(거칠기 80)가 설치되었다. 시험부는 풍동입구로부터 1.75m 떨어진 곳이다. Fig. 1은 실험장치의 개념도이다. 수평방향의 측정은 스테레오 PIV기법을 수직방향의 측정은 2D-PIV 측정을 적용하였다. 그러나 각각의 동시에 독립된 측정을 하려면 반드시 다른 측정면의 입자산란광은 차단되어야 한다. 본 연구에서 사용된 방법은 각각의 레이저를 수직되게 각각 편광시키고 편광필터로 원하는 방향의 면만을 획득하는 방식을 개발하여 사용하였다. 또한 수평면과 수직면의 동시측정 가능성을 보기 위해 압력을 영압력구배(zero- pressure)조건으로 실시하였다. 레이놀즈 수의 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. 또한, 경계층 내부의 3차원 속도측정을 위해 바닥에서 5mm 지점과 10mm 지점을 측정위치로 선정하였다. 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 59mm 이고,  $Re_\theta=934$ 의 경우에는 58mm로 측정되었다. Table 1은 이러한 실험조건을 나타낸다.

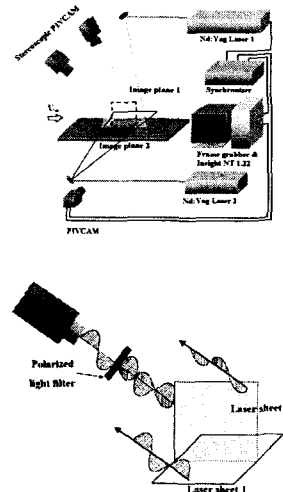


Fig. 1 Schematic of experimental setup

3. 실험결과

Fig. 2는 대수층 분포를 가정, Clauser(1956)<sup>(6)</sup>의 선도법(Chart method)을 이용하여 마찰속도를 추정 한 것이다. 마찰속도를 직접 측정하는 방법에는 Stanton tube를 이용하여 측정하기도 하나 많은 연구에서 밝혀졌듯이 마찰속도의 추정값과 실제 측정값의 차이는 10%내외이며, 또한 Stanton tube를 이용하였을 때는 그 기기 자체가 유동을 교란하기 때문에 마찰속도의 추정치가 실제값과 거의 일치 한다고 밝히고 있다. 그러므로 본 연구에서도 마찰속도를 실측하지 않고 Clauser 선도법을 이용하여 추정하였다. 이 기법은 대수영역과 중복층에서 유효하며 영 압력 구배가 아닐때는 정확한 마찰속도를 구하지 못한다. 그러나 본 실험은 영 압력 구배에서 이루어 졌으며 두 가지 레이놀즈 수의 경우 모두 선행 연구결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

$$U^+ = 2.44 \ln y^+ + 5.1$$

$$(U^+ = \frac{U}{u_*}, y^+ = \frac{yu_*}{\nu})$$

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

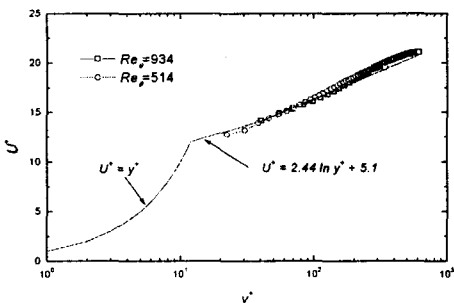


Fig. 2 Mean streamwise variable

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

3.1.1 x-y 평면에서의 속도장

본 연구에서 와(vortex)란 Robinson<sup>(9)</sup>이 언급했듯이 와중심 속도에 해당하는 대류속도(convection velocity :  $U_c$ )를 빼고 난 뒤 속도장을 관찰 할 때 유선의 모양이 원과 가까운 형태를 이루는 부분에서의 집중된 와(concentrated vortex)영역으로 정의한다.

사용된 와의 식과 무차원 와는 아래와 같다.

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$\omega_z^+ = \frac{\omega_z \nu}{u_*^2}$$

Fig 3은 헤어핀 와 구조의 일반적인 예로서,  $Re_\theta = 934$ 인 ZPG에서 대류속도가  $0.9 U_\infty$ 이고, 내부변수로 무차원화 하여 나타낸 순간 속도장이 다. 일반적인 난류유동을 해석하는 방법은 속도 성분을 유동방향의 대류속도 성분과 섭동성분으로 구분하는 방법이다. 헤어핀 머리부분이 원형을 이루면서 마치 다발처럼 같은 속도로 이동하는 것(HVS)이 나타난다. 또한 Q2/Q4의 경계선을 기준으로 VITA 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 유동 방향으로 두 번째 와에 비해 약간 찌그러짐을 알

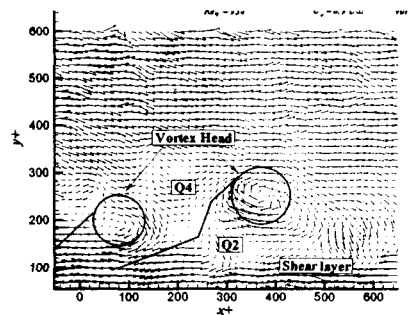


Fig. 3 Instantaneous velocity vectors at the near-wall ( $Re_\theta = 934, U_c = 0.9U_\infty$ )

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.

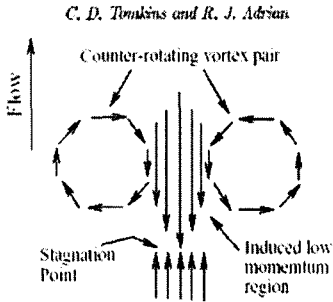
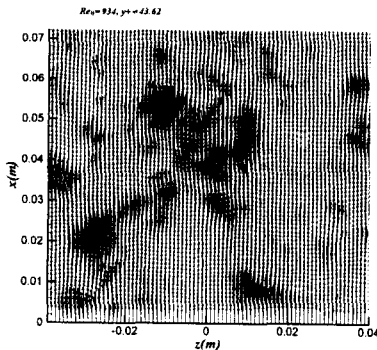


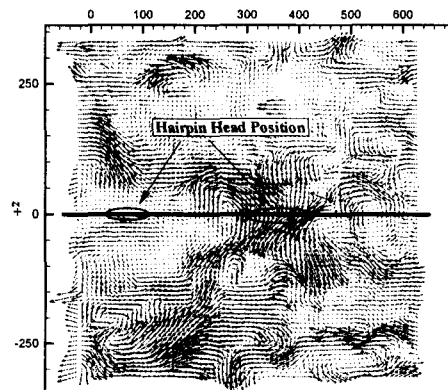
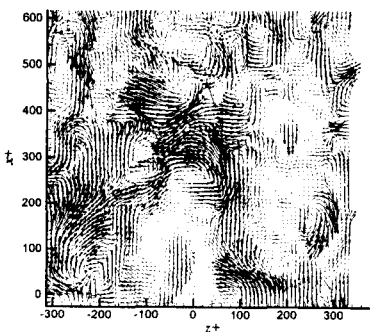
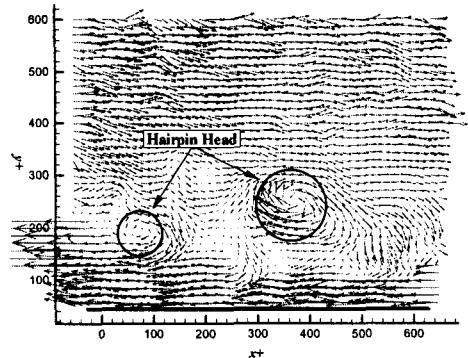
Fig. 4 Idealized streamwise-spanwise hairpin vortex signature

3.1.2 x-z 평면에서의 3차원 속도장

Fig. 5(a)는  $Re_\theta = 934$ ,  $y^+ = 43.62$  에서의 x-z 평면의 속도장을 나타낸다. 이때 시간평균(ensemble average)한 평균속도는 2.08m/s이다. x-y 평면의 시간평균속도와 비교 해 볼 때 이 속도와 거의 일치함을 알 수 있다.  $z^+ = 100, -100$  부분에서 약 200의 폭을 가지면서 streaky structure가 나타난다. 3차원 속도분포장을 나타낸 Fig. 5(c)와 비교해 보면 streaky structure의 부분이 주위에 비해 y 방향으로의 속도가 높음을 알 수 있다. Fig. 5(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. Fig. 4는 이를 도식화하여 나타낸 그림이다.<sup>(14)</sup>



(a) Instantaneous velocity vectors



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

(c) 3D Instantaneous velocity vector field

Fig. 5 3D Instantaneous velocity vector field at  $y^+ = 43.62$

Fig. 5(c)에서 헤어핀 head가  $x^+=400$ 의 x-y평면에서 나타나고 있다. x-z평면과 비교해 볼 때 streaky structure line이 모여지기 시작하는 부분과 일치한다. 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.

3.2  $Re_\theta = 934, y^+ = 87.24$ 에서의 속도장

3.2.1 x-y 평면에서의 속도장

Fig. 6은  $y^+ = 87.24$ 에서의 헤어핀의 구조를 파악하기 위해 Fig. 3과 같은 조건하에서 측정된 x-y평면의 속도장을 대류속도로 뺀 후의 데이터를 나타내고 있다. Q2/Q4의 경계선을 기준으로 VITA 이벤트를 확인할 수 있으며 헤어핀의 머리 부분은  $150 < y^+ < 300$ 에 위치한다. 이는 앞의 결과와 비교해 볼 때 거의 흡사한 경향을 띠고 있음을 알 수 있다.

3.2.2 x-z 평면에서의 3차원 속도장

Fig. 7은  $Re_\theta = 934, y^+ = 87.24$ 에서의 x-z평면의 스테레오 PIV측정 데이터를 나타내고 있다. 이 때 이 평면의 시간평균 속도값은 2.21m/s이다. Streaky structure가  $z^+ = 0$ 를 중심으로 폭이 약 100보다 작게 모여져 있음을 확인할 수 있다. 이는  $y^+$ 가 90근처이기 때문에 거의 헤어핀의 머리 쪽이라고 볼 수 있다. 그러므로 3차원 구조상 streaky structure가 Fig. 4에 비해 많이 좁게 나

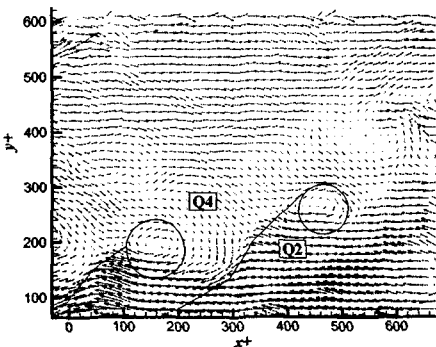
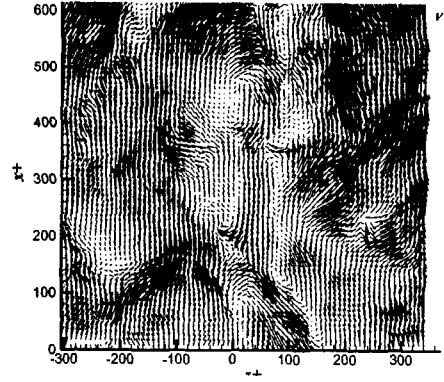
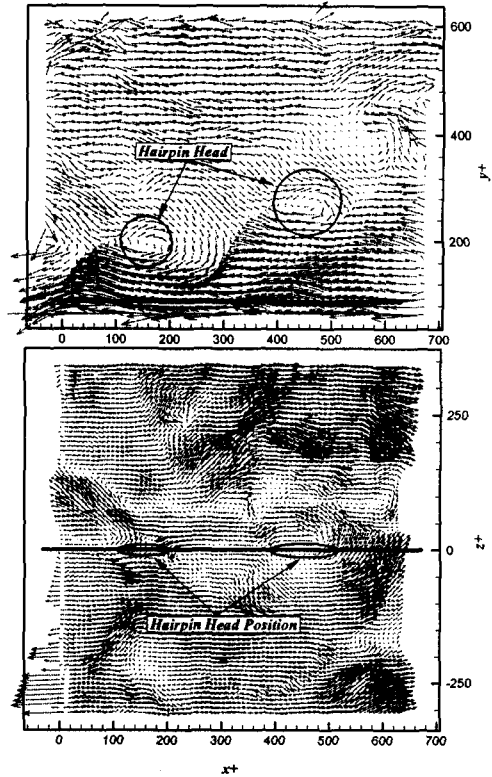


Fig. 6 Streamwise wall-normal velocity vector field at  $Re_\theta = 934 (U_c = 0.9 U_\infty)$

타나고 있다. Fig. 7(b)를 보면  $x^+ = 500$ 부근에서 헤어핀의 머리가 관찰되고 있으며 그 부분에서 y 방향의 속도가 크게 나타나고 있음을 알 수 있



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



(b) 3D Instantaneous velocity vector field

Fig. 7 3D Instantaneous velocity vector field at  $y^+ = 87.24$

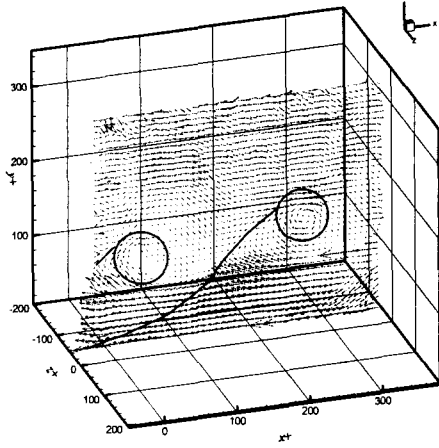


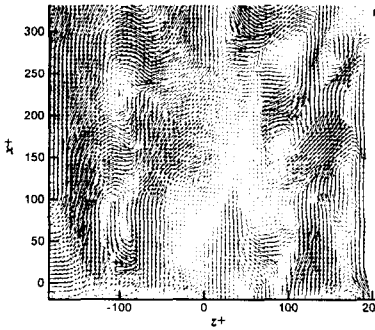
Fig. 8 Streamwise wall-normal velocity vector field ( $U_c = 0.8 U_\infty$ )

다. Fig. 7(a)에서  $x^+=100$ 과 500에서 streaky structure가 약간 끊어 졌다가 다시 생성됨을 알 수 있는데 Fig. 7(b)에서 확인되는 두 번째 헤어핀 구조의 크기와 같다.

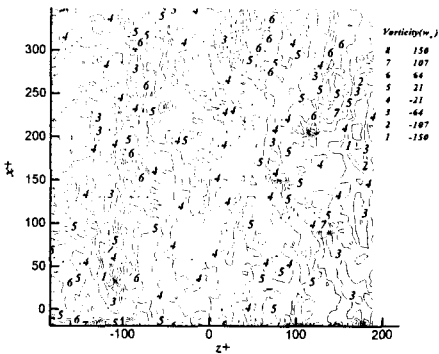
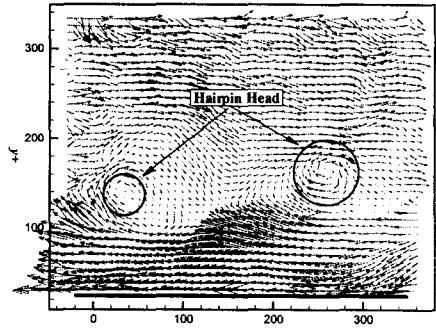
3.3  $Re_\theta = 514, y^+=24.2$ 에서의 속도장

3.3.1 x-y 평면에서의 속도장

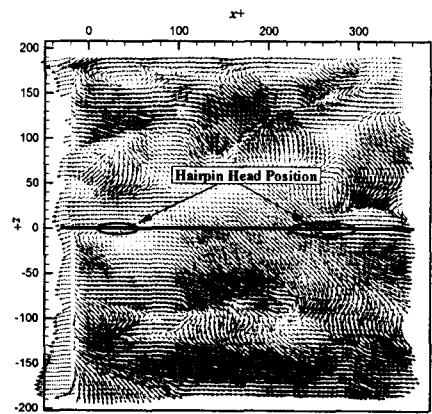
Fig. 8은 유동방향의 속도가 1.48m/s일 때 측정된 PIV 데이터이다. 앞의  $Re_\theta = 934$ 일 때 측정된 구조와 비교해 볼 때 헤어핀 head의 위치가  $y^+ = 100 \sim 200$ 정도로 다소 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. Q2/Q4의 경계선을 기준으로 VITA 이벤트를 뚜렷이 확인 할 수 있으며 전단층도 확인되고 있다. 경사각은 약 45°로 선행연구와 일치한다. 헤어핀 와는 시계방향으로 돌고 있으므로



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



(b) Contour of vorticity( $w_y$ ) to direction y



(c) 3D Instantaneous velocity vector field

Fig. 9 3D Instantaneous velocity vector field at  $y^+ = 24.2$

와도(vorticity)값이 음의 값으로 측정되었고  $z^+ = 0$ 의 전후의 위치에서 헤어핀이 오른손의 회전방향으로 돌고 있음을 예측할 수 있다.

3.3.2 x-z 평면에서의 3차원 속도장

Fig. 9는  $Re_\theta = 514$ ,  $y^+ = 24.2$  에서의 x-z평면의 와도장을 나타내고 있다. 점성저층영역과 가까운 위치여서 헤어핀 다리의 폭이 앞의 실험과 비교해 볼 때 약  $z^+ = -130 \sim 130$  정도로 넓게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 9(a)의 벡터장을 보면 streaky structure line을 따라 counter-rotating vortex pair가 뚜렷이 관찰되고 있다. Fig. 9(b)에서  $x^+ = 200$ 에서 y방향의 속도가 크게 나타나고 이를 따라  $x^+ = 300$ 부근에서 헤어핀 머리가 관찰됨을 알 수 있다.  $x^+$ 방향을 따라 와도(vorticity) contour가 안쪽으로 양의 값을 가지고 바깥쪽으로 음의 값을 가지므로 앞에서 예측했듯이 오른손의 회전방향으로 돌고 있음을 알 수 있다. 또한 헤어핀의 형태는  $15^\circ \sim 30^\circ$ 에서 시작해서 head가 가까운 위치에서 약  $45^\circ$ 의 각을 가지게 된다.

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

3.4.1 x-y 평면에서의 속도장

Fig. 10은 Fig. 8과 조건이 같은  $Re_\theta = 514$ 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

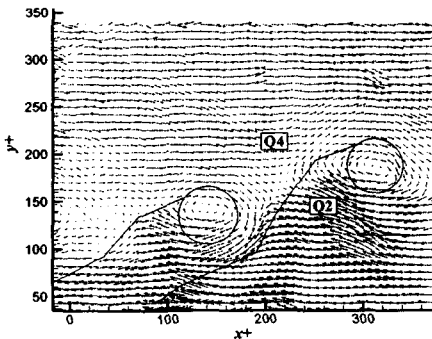
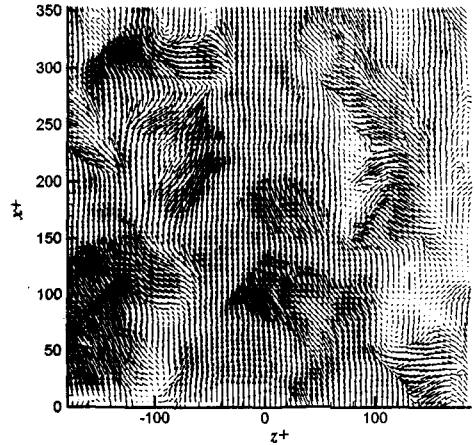
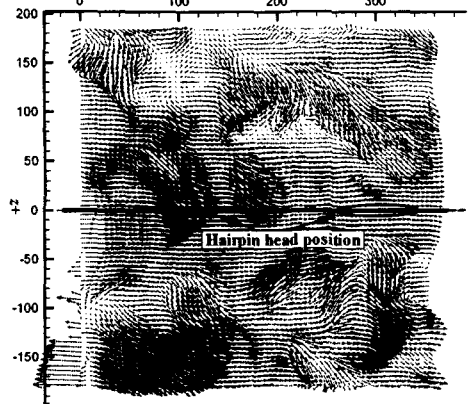
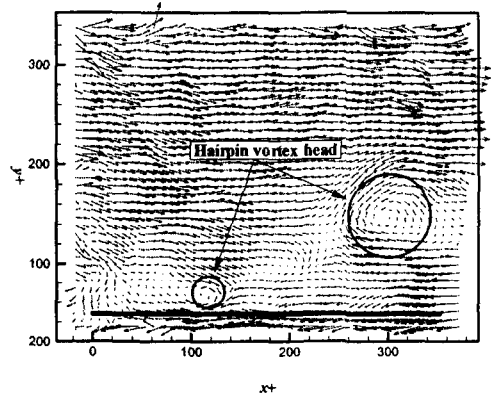


Fig. 10 Streamwise wall-normal velocity vector field at  $Re_\theta = 741$  ( $U_c = 0.8 U_\infty$ )



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



(b) 3D Instantaneous velocity vector field

Fig. 11 3D Instantaneous velocity vector field at  $y^+ = 48.4$

경계선을 기준으로 VITA 이벤트가 나타나고 있으며 바닥쪽으로 전단층을 관찰할 수 있다.

3.4.2 x-z 평면에서의 3차원 속도장

Fig. 11은  $Re_\theta = 514$ ,  $y^+ = 48.4$  에서의 x-z평면의 와도장을 나타내고 있다.  $z^+ = -100, 100$ 에서 streaky structure를 확인 할 수 있으며 이는  $Re_\theta = 934$ ,  $y^+ = 43.62$ 에서의 간격과 비슷함을 알 수 있다. Fig. 11(a)에서 y방향 속도가  $x^+ = 100$ 과 300에서 높게 나타남을 확인할 수 있으며 이는 Fig. 11(b)에서 x-z평면의 헤어핀 머리부분과 연결되어진다.

전반적으로 작은 와들이 소산되어 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. 11(b)에서 확실히 관찰되어진다.

4. 결론

본 실험에서는 PIV 기법을 이용하여 영압력 구배를 가지는 평판의 난류 경계층의 구조를 평균 유동장과 순간 유동장을 통해 비교하였다. 또한, 편광장치를 이용한 PIV 시스템을 통해 수직된 두 평면의 동시 측정시 발생하는 광학오차(optical error)를 최소화시킬 수 있는 새로운 계측기법을 고안하였다.

레이놀즈수 변화에 따른 각 위치별 헤어핀 와 다발 구조의 수직면과 수평면을 측정하고 스테레오 PIV를 통해 수평면의 단면에 대한 3차원 형상을 만들어 낼 수 있었다. 또한 위치에 따른 와의 구조를 통해 streaky structure의 형태로 counter-rotating vortex pair구조가 있음이 확인되었다. 이는 기존의 2차원적인 하나의 단면에서 측정하여 유추하는 것과는 구분되며, 명확하게 3차원적인 형상을 확인할 수 있었다.

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

앞으로 좀더 정확한 구조 파악을 위해서 압력 변화에 따른 동시측정이 이루어져 압력 구배에

따라 헤어핀 와 구조가 어떻게 변하는지 알아볼 필요가 있다. 이러한 실험을 통해 난류경계층 구조의 3차원적 형상을 완성하고 그 특성과 성장 메카니즘을 이해하는 것이 이 실험의 최종 목표가 될 것이다.

후 기

이 논문은 2002년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구 되었음(KRF-2002-041-D00087).

참고문헌

- (1) Theodorsen, T., 1952, "Mechanism of Turbulence," *Proceeding from the Second Midwestern Conference of Fluid Mech.*, Vol. 123.
- (2) Head, M. R. and Bandyopadhyay, P., 1981, "New Aspects of Turbulent Boundary-Layer Structure," *J. Fluid Mech.*, Vol. 107, pp. 297~338.
- (3) Smith, C. R., 1984, "A Synthesized Model of the Near-Wall Behavior in Turbulent Boundary Layers," *In Proc. of 8th Symp. on Turbulence (ed. J. Zakin and G. Patterson)*, Univ. MissouriRolla, Rolla, Missouri, pp. 299~325.
- (4) Irwin, H. P. A. H., 1981, "The Design of Spires for Wind Simulation," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, Vol. 7, pp. 361~366.
- (5) Iyengar, A. K. S., 1992, "Simulation of a Neutral Urban Atmospheric Boundary Layer at the Saffl Boundary Layer Wind Tunnel," *master thesis in Minnesota University*.
- (7) Adrian, R. J., Meinhart, C. D. and Tomkins, C. D., 2000, "Vortex Organization and Structure in the Outer Region of the Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 240, pp. 1~55.
- (8) Clauser, F., 1956, "Turbulent Boundary Layer," *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 4, pp. 1~51.
- (9) Robinson, S. K., 1991, "Coherent Motion in the Turbulent Boundary Layer," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 601~639.
- (10) Spalart, P. R., 1988, "Direct Simulation of a Turbulent Boundary Layer up to  $Re_\theta = 1410$ ," *J. Fluid Mech.*, Vol. 19, pp. 563~572.