

## 직접수치모사를 이용한 난류경계층 내의 거대난류구조 연구

이 재 화\* · 성 형 진†

(2009년 7월 13일 접수, 2009년 8월 31일 수정, 2009년 11월 2일 심사완료)

### A Direct Numerical Simulation Study on the very Large-Scale Motion in Turbulent Boundary Layer

Jae Hwa Lee and Hyung Jin Sung

**Key Words :** Very Large-Scale Motion(거대난류구조), Turbulent Boundary Layer(난류경계층)

#### Abstract

Direct numerical simulation (DNS) of a turbulent boundary layer with moderate Reynolds number was performed to scrutinize streamwise-coherence of hairpin packet motions. The Reynolds number based on the momentum thickness ( $\theta_m$ ) and free-stream velocity ( $U_\infty$ ) was varied in the range  $Re_\theta=1410\sim 2540$  which was higher than the previous numerical simulations in the turbulent boundary layer. In order to include the groups of hairpin packets existing in the outer layer, large computational domain was used (more than  $50\delta_0$ , where  $\delta_0$  is the boundary layer thickness at the inlet in the streamwise domain). Characteristics of packet motions were investigated by using instantaneous flow fields, two-point correlation and conditional average flow fields in  $xy$ -plane. The present results showed that a train of hairpin packet motions was propagating coherently along the downstream and these structures induced the very large-scale motions in the turbulent boundary layer.

#### 1. 서 론

난류경계층(turbulent boundary layer) 유동은 다양한 공학적, 물리적 문제에 있어 매우 중요한 문제 중의 하나이다. 특히 자동차, 선박, 비행기 그리고 열 교환기 등과 같은 실제 응용분야에서 열과 운동량의 교환 등의 물리적 현상은 경계층 내에 존재하는 대규모의 조직적 구조(large scale organized structure)의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 난류경계층의 연구를 통한 난류구조에 대한 이해는 많은 중요한 응용분야

에서 난류 유동의 모델링과 성능을 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다.

기존 연구들을 통해, 말발굽(horseshoe) 또는 헤어핀(hairpin)과 같은 와 구조가 여러 개 모여 크기가 2~3  $\delta$ 정도인 헤어핀 다발(hairpin packet)이 존재하는 것이 보고되고 있다(여기서  $\delta$ 는 자유흐름속도의 0.99 배로 정의된 난류경계층 두께). Head & Bandyopadhyay<sup>(1)</sup>은 압력 구배가 없는 높은 레이놀즈 수의 난류경계층에서 연기에 광원을 이용하여 와의 형태를 가시화하였으며 낮은 레이놀즈 수에서 Zhou 등<sup>(2)</sup>은 채널유동에서 직접수치모사(DNS: Direct Numerical Simulation)를 수행하여 주 유동 방향으로 헤어핀 다발이 깊은 상관관계를 가지고 존재하는 것을 보였으며 또한 충분한 세기의 헤어핀이 주어졌을 때 여러 개의 헤어핀 다발이 상류와 하류에서 발생하는 것을 보여주었다. 최근에 Adrian 등<sup>(3)</sup>은 PIV(Particle Image Velocimetry)을 사용하여 난류경계층 내에

[이 논문은 2009년도 유체공학부문 춘계학술대회(2009. 5. 21-22., BEXCO) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hjsung@kaist.ac.kr

TEL : (042)350-3027 FAX : (042)350-5027

\* 한국과학기술원 기계공학과

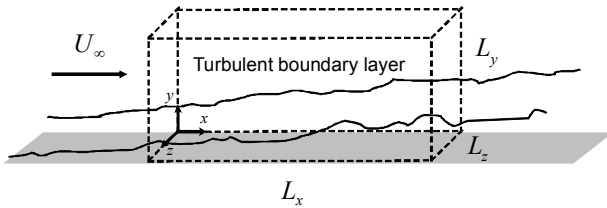


Fig. 1 Schematic of computational domain

존재하는 헤어핀 다발을 보여 주었으며 이러한 구조는 주 유동 방향으로 길게 존재하면서 균일한 속도분포를 갖는 영역(uniform momentum zone)을 만들어낸다는 것을 보고하였다. 또한 Christensen & Adrian<sup>(4)</sup>은 Adrian 등<sup>(3)</sup>의 결과를 뒷받침하기 위하여 linear stochastic estimation 을 이용하여 헤어핀 다발이 공간적으로 상관관계를 가지고 존재한다는 것을 증명하였다. Tomkins & Adrian<sup>(5)</sup>은 헤어핀 다발과 관련된 횡 방향의 구조에 대한 연구를 진행하여 이전의 결과들을 뒷받침 하였다.

최근의 실험 및 수치적 연구는 헤어핀 다발과 비교하여 기존의 대규모 조직적 구조보다 훨씬 긴 새로운 종류의 거대구조(very large-scale motion)의 존재를 보고하고 있다. Kim & Adrian<sup>(6)</sup>은 난류 파이프 유동에서 스펙트럼을 조사하여 두 개의 모드를 가지는 분포를 확인하였으며 이러한 모드는 큰 구조(large-scale motion)와 거대난류구조(very large-scale motion)를 각각 의미 한다고 주장하였다. 또한 Jimenez<sup>(7)</sup>는 DNS 를 이용하여 이러한 구조가 로그 영역에서 10~20  $\delta$ 의 크기를 가지는 것을 보여 주었다. 하지만 아직까지 이러한 구조가 어떠한 공간적 특성을 가지고 존재하는지 아직 불분명한 상태이다. 이는 주 유동 방향으로 짧은 PIV 촬영 영역과 DNS 의 긴 계산 도메인 문제에 기인된다.

본 연구에서는 입구 운동량 두께의 50 배에 해당되는 긴 주 유동 방향의 계산 도메인을 사용하여 거대난류구조에 대한 연구를 수행하였다. 하지만 큰 계산 도메인으로 인하여 3 차원 데이터의 경우 주 유동 방향으로 전체 계산 영역의 1/8 만 저장하였으며 벽 수직방향과 횡 방향의 몇 개의 위치에 대해 2 차원의 데이터로 전체 영역을 저장하였다. 여기에서는 헤어핀 다발들이 이루는 공간적 구조를 살펴보기 위하여 3 차원 데이터를 사용하여 순간유동장, 2 점 상관계수 그리고 조건부 평균된 유동장을 살펴 보기로 한다.

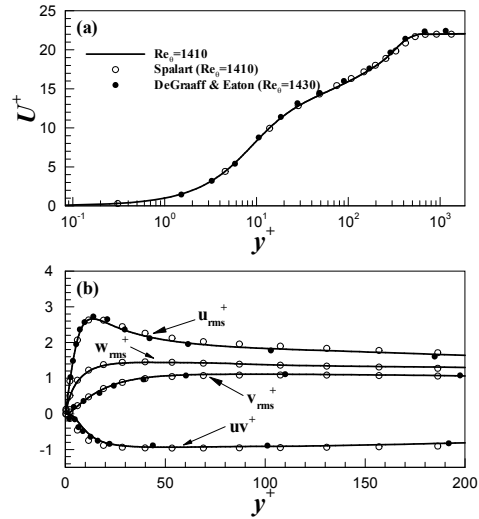


Fig. 2 Inflow profiles at  $Re_{\theta,m}=1410$

## 2. 수치적 방법

본 연구에서 사용된 무차원화 된 3 차원의 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0. \quad (2)$$

여기서  $x_i$ 는 직교 좌표를 나타내고,  $u_i$ 는 각각의 속도 성분들을 나타낸다. 모든 변수들은 자유흐름속도 ( $U_\infty$ )와 입구에서의 운동량 두께 ( $\theta_m$ )로 무차원화 되었으며 Re 는 Reynolds 수를 나타낸다. 지배방정식은 Kim 등<sup>(8)</sup>에 의해 제시된 부분 단계법(fractional step method)을 사용하여 속도와 압력 항으로 분리하였다. 지배방정식의 모든 항은 시간과 공간에 대해 각각 2 차의 중심차분법과 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 완전 내재적 방법으로 차분하였다. 보다 자세한 수치적 알고리즘은 Kim 등<sup>(8)</sup>을 참조할 수 있다.

Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 계산 영역을 보여 주고 있다. x, y, z 는 각각 주 유동, 벽 수직 그리고 횡 방향을 나타내며 u, v, w 등은 각각의 방향에 대한 속도를 나타낸다. 벽면에서는 경계조건으로 점착조건(No-slip condition)을 적용하였으며 윗면에서는  $u=U_\infty$ ,  $\partial v/\partial x=0$ ,  $\partial w/\partial y=0$  그리고 횡 방향으로는 주기적 경계조건을 사용하였다. 난류경

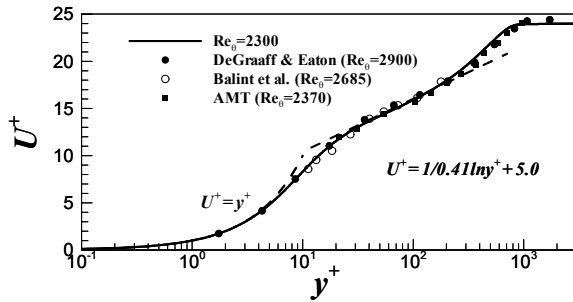


Fig. 3 Mean velocity profiles normalized by the friction velocity

계층은 주 유동 방향으로 공간적으로 발달하고 발달하고 있으므로 본 연구에서는 유동방향으로 주기적 경계조건을 사용하는 것이 불가능하여 Lund 등<sup>(9)</sup>이 제시한 방법을 바탕으로 하여 부가적인 계산을 수행하였다. 또한 결과의 정확성을 확인하기 위하여 Fig. 2에서 Spalart<sup>(10)</sup>와 DeGraaff & Eaton<sup>(11)</sup>의 결과와 비교하였으며 이를 통해 주 유동방향의 속도와 난류 응력이 기존의 실험값과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한 출구영역에서는 대류 경계 조건  $(\partial u / \partial t) + c(\partial u / \partial x) = 0$  을 사용하였다. 여기서  $c$ 는 출구에서의 평균속도이다.

주 유동 방향과 횡 방향으로 균일 격자계(uniform grid)를 사용하였고 벽면의 수직 방향으로 쌍곡선탄젠트함수(hyperbolic tangent function)를 이용한 비 균일 격자계(non-uniform grid)를 사용하였다. 본 연구에서는 거대난류구조를 조사하기 위하여 매우 큰 계산 영역과 격자 수를 사용하였다. 계산 영역의 크기는 입구 운동량 두께로 무차원화했을 경우 주 유동 방향, 벽 수직 방향 그리고 횡 방향으로  $(L_x, L_y, L_z) = (480, 40, 40)$  이며, 격자 수는  $(2049 \times 251 \times 513)$  으로 총 2 억 5 천만개 이상의 격자 수를 사용하였다. 계산 코드는 IBM 계산용 컴퓨터에 최적화된 openmp 로 병렬화하였으며 총 계산 횟수는 한국과학기술정보원의 슈퍼컴퓨터(IBM p595)를 사용하여 130,000 번  $(TU_\infty / \theta_m = 6500)$  이루어졌으며 마지막 80,000 번은 시, 공간적으로 속도의 평균을 얻기 위해 사용되었다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 평균 유동장

거대난류구조에 대한 조사에 앞서 먼저 본 연구에서 수행한 수치 결과에 대한 정확도를 확인하는 것이 필요하다. 난류 유동에서 기본적인 이론 중의 하나는 높은 레이놀즈 수에서 통계량을 적절한 속도와 길이 스케일로 무차원화 했을 때 레이놀즈

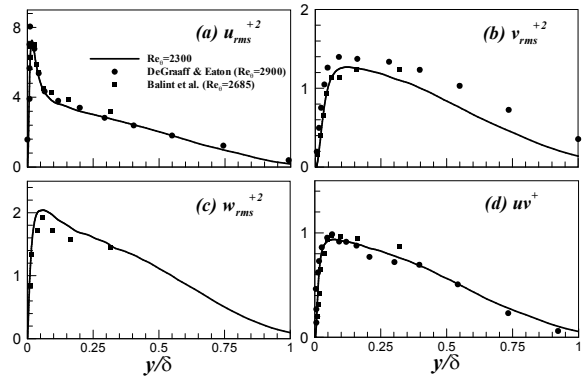


Fig. 4 Root-mean-square velocity fluctuations by the friction velocity in outer coordinates

수에 따라 달라지는 분포가 통계적으로 하나의 분포로 일치한다는 점이다. 주 유동 방향의 속도 분포가 가장 일반적인 하나의 예가 될 수 있다.<sup>(11)</sup> Fig. 3은 실험 데이터와 현재 계산 결과에 대한 주 유동 방향의 속도 분포를 비교하고 있다. 속도는 벽면속도(friction velocity)로 무차원 되었으며 벽 수직방향의 높이는 벽면길이스케일(viscous lengthscale)로 무차원화 되었다. 로그 영역(logarithmic layer)에서 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으며 또한  $y^+ = 4$  아래의 위치에서  $U^+ = y^+$ 와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 하지만 Balint 등<sup>(12)</sup>과 DeGraaff & Eaton<sup>(11)</sup>의 실험 결과가 다소 높은 레이놀즈 수를 가지므로 웨이크 영역(wake region)에서는 다소 차이를 보이고 있다.

Fig. 4는 벽면 속도로 무차원화된 근제곱평균을 Balint 등<sup>(12)</sup>과 DeGraaff & Eaton<sup>(11)</sup>의 실험 결과와 비교하여 바깥 스케일(outer coordinates)로 나타내었다. 비록 실험에서의 레이놀즈 응력의 최대치가 다소 높게 나타나지만 본 계산 결과는 전체적으로 실험치와 일치하는 결과를 보여주고 있다. 이러한 최대치의 차이는 최대치가 레이놀즈 수의 함수라는 Klewicki 등<sup>(13)</sup>과 DeGraaff & Eaton<sup>(11)</sup>의 연구결과와 일관된다.

#### 3.2 순간 유동장

난류경계층 내의 여러 실험 연구는 헤어핀 다발의 구조가 벽면 근처의 유동에서 매우 중요한 구조라는 것을 보여 주었으며 또한 낮고 높은 레이놀즈 수에서 매우 빈번하게 발생한다는 것을 확인시켜 주었다. 헤어핀 다발로 대표되는 대규모 조직적 구조는 거의 동일한 속도로 주 유동 방향으로 흘러가며 이러한 구조는 Meinhart & Adrian<sup>(14)</sup>에 의해 발견된 균일한 모멘텀 영역을 만들어내는 것이 확인되었다. 헤어핀 와 구조의 징후(hairpin

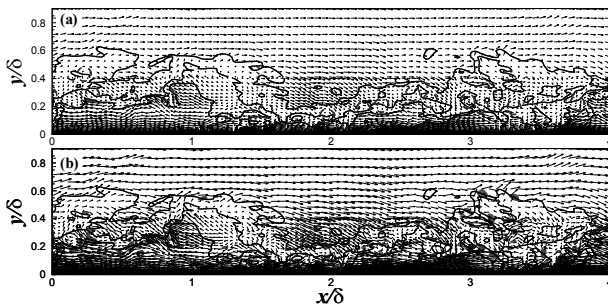


Fig. 5 Instantaneous flow field subtracted by convection velocity,  $U_c=0.8U_\infty$

vortex signature)는 Adrian 등<sup>(3)</sup>에 의해 제시되었는데 와 구조를  $xy$  평면에서 살펴보면 등근 속도 벡터 및 와 밀도로 Q2/Q4의 기울어진 영역이 존재하는 것을 특징으로 하고 있다. 하지만 실제로 헤어핀 구조는 한쪽만 존재하거나 지팡이 모양(cane-like) 또는 양쪽이 비대칭인 구조로서 많이 존재할 수 있기 때문에 위의 모델을 실제 유동에 완벽하게 적용할 수는 없지만 본 연구에서는 순간 유동장에서 헤어핀 구조를 파악하기 위해 Adrian 등<sup>(3)</sup>의 방식을 사용하기로 한다.

본 연구에서는 거대난류구조(very large-scale motion)와 관련된 헤어핀 다발의 그룹을 살펴보기 위하여 대류 속도(convection velocity),  $U_c=0.8U_\infty$ 을 이용한 Galilean decomposition을 순간유동장에 적용하였다. 와 구조는 스월 강도(swirling strength, 속도 구배 텐서의 복소 켈레 고유값의 허수 부분의 의미),  $\lambda_{ci}$ 의 양의 값을 사용하여 나타내었다.<sup>(2)</sup> Fig. 5는 대류속도를 제외한 순간유동장을 나타내고 있다. Fig. 5(a)에서 속도 벡터 성분을 알기 쉽게 표현하기 위하여 직접 등근 점선을 사용하여 나타내었으며 실선은 일정한 주 유동 방향의 속도를 나타낸다. 또한 Fig. 5(b)에서 폐곡선은 스월 강도를 나타낸다. Kline & Robinson<sup>(15)</sup>은 중심과 함께 일정하게 흘러가는 프레임에서 와 구조를 쳐다 보았을 때 와는 대략적으로 등근 유선 주위의 강한 소용돌이(vorticity)로 나타나는 영역이라고 정의하였다. 이 정의를 사용하여 순간유동장을 살펴보면 등근 점선으로 정의된 부분에서 거의 등근 유선과 함께 강한 스월 강도를 관찰할 수 있다. 또한 다른 실선에 걸쳐 이러한 강한 소용돌이가 존재하는 것을 확인할 수 있지만(Fig. 5(b)) 다른 대류속도로 인하여 등근 유선은 관찰되지 않는다. Fig. 6에서 보듯이 본 연구에서는 두 개의 헤어핀 다발이 관찰되고 있다. 하나는  $x/\delta < 1.8$ 의 영역에서 발견되는 성숙한 헤어핀 다발의 끝 부분이며 다른 하나는

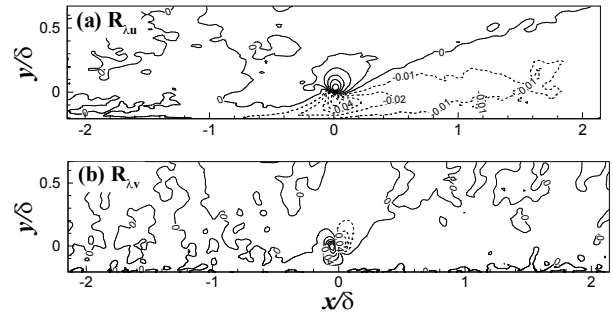


Fig. 6 Two-point correlation between swirling strength and velocity fluctuations

$x/\delta > 1.8$ 의 영역에서 전체 영역에 걸쳐 나타나는 헤어핀 다발로서 두 개의 헤어핀 다발이 함께 주 유동 방향으로 함께 흘러가고 있는 것을 나타내고 있다. 이러한 구조는 더욱 긴 헤어핀 다발과 균일한 모멘텀 영역을 만들어 그 길이가  $4\sim 5\delta$  이상인 것을 확인할 수 있다. 하류 부분의 다발은 주 유동 방향으로  $13\sim 15^\circ$ 의 기울기를 갖는 것을 확인할 수 있으며 이것은 Adrian 등<sup>(3)</sup> 결과와 일치한다. Fig. 5(b)는 와와 관련된 속도벡터와 스월강도가 일정한 주 유동 방향의 속도 곡선 위에 존재하는 것을 보여 준다. 이러한 결과는 Meinhart & Adrian<sup>(14)</sup> Adrian 등<sup>(3)</sup>의 결과와 일치하는 결과로서 그들은 주 유동 방향으로 공간적으로 분포하고 있는 여러 헤어핀에 의해 균일하게 느린 유동이 발견되며 이러한 균일한 지역은 매우 큰 속도 구배,  $\partial u/\partial y$ 에 의해 구분된다고 보고하였다.

### 3.3 Two-point correlations

지금까지 순간유동장을 사용하여 어떻게 헤어핀 다발이 다른 헤어핀 다발과 함께 흘러가는지 살펴 보았다. 그러나 이러한 구조가 과연 난류경계층에서 매우 빈번하게 발생하는 구조인지 아닌지 살펴볼 필요가 있다. 로그 영역에서 이러한 구조를 살펴보기 위하여 Fig. 6에서 먼저 속도성분과 스월 강도간의 공간적 상관관계를 살펴 보았다. 점선은 음의 값을 나타내며 실선은  $R_{uv}$ 의 경우  $-0.05$ 부터  $0.05$ 까지  $0.01$ 씩 변화하며  $R_{uv}$ 의 경우  $-0.1$ 부터  $0.1$ 까지  $0.02$ 씩 변화하도록 설정하였다. Christensen & Adrian<sup>(4)</sup>은 높은 레이놀즈 수에서 헤어핀 다발의 공간적 상관관계를 살펴보기 위하여 스월강도와 속도 섭동간의 상관관계를 조사하였다. 그들은 PIV를 사용하여 공간적 속도를 측정하였으며 그들이 측정된 영역은  $\delta$  정도로서 헤어핀 다발들로 이루어진 매우 거대한 응집구조를 조사하기에는 충분하지 않았다. 본 연구에서는 그들이 사용한

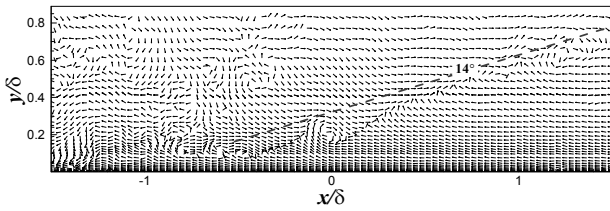


Fig. 7 Linear stochastic estimation based on spanwise swirl at  $y_{ref}/\delta=0.2$

방법을 이용하여 공간상의 응집구조를 조사하여 보았으며 주 유동방향으로 두 개의 헤어핀 다발이 포함될 수 있도록 충분히 큰 도메인을 사용하였다. 계산된 주 유동 방향, 벽 수직 방향의 상관계수는 채널 내에서 이루어진 Christensen & Adrian<sup>(4)</sup>의 결과와 거의 유사한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6의 상관계수는 기준이 되는 위치에서의 와 구조와 관련된 평균화된 속도 성분을 나타낸다. 공간적으로 긴 상관관계를 가지는 구조가 존재하는 것을 확인할 수 있으며 앞에서 살펴본 순간유동장의 난류 구조가 거의 흡사한 것을 확인할 수 있다. 즉, 상류의 복잡한 헤어핀 다발과 Christensen & Adrian<sup>(4)</sup>의 결과와 유사한 기울어진 헤어핀 다발로 구성되는 긴 구조가 존재하고 있다. 0으로 표시되는 기울어진 경계면은 헤어핀 다발에 의해 발생하는 균일한 모멘텀 지역에 의해 발생하는 평균화된 구조의 각도를 나타내고 있다.

### 3.4 Linear stochastic estimation

여기에서는 연속적인 헤어핀 다발로 구성되는 유동 구조를 조사하기 위하여 조건부 평균된 유동장을 조사하였다. 하지만 실제 조건부 유동장을 얻기 위해서는 많은 순간 유동장의 데이터가 필요하므로 본 연구에서는 Linear stochastic estimation을 이용하여 조건부 평균된 유동장을 얻기로 한다.<sup>(16)</sup> 일반적으로 조건부 평균 유동장은 다음과 같이 표현 된다.

$$\langle g(x') | E_1(x_1), E_2(x_2), \dots, E_N(x_N) \rangle \quad (3)$$

조건부 평균을 조건  $E=0$ 에서 먹급수로 전개하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\langle g_i | E \rangle = L_{il} E_l + N_{ilm} E_l E_m + \dots \quad (4)$$

미지수인  $L, N, \dots$ 은 실제 조건부 평균 값과 근사화된 값 사이의 평균계급오차가 최소가 되도록 하

면 구해 질 수 있다. 고차항의 영향이 무시할만하다고 가정하면 선형적 근사의 경우 오직 첫째 항만 남으므로 다음과 같은  $L_{il}$ 에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$\langle E_m(x_m) E_l(x_l) \rangle L_{il} = \langle g_i(x') E_m(x_m) \rangle \quad (5)$$

여기서  $l=1,2,3,\dots,N$ 이고  $m=1,2,3,\dots,N$ 이다.

Fig. 7은 조건부 평균된 유동장을 나타내고 있으며 실제 얻어진 유동장의 경우 기준 위치에서 강한 값을 가지고 상대적으로 떨어진 위치에서는 약한 값을 가지므로 벡터의 크기를 단위크기로 균일하게 나타내었다.<sup>(4)</sup> 헤어핀의 머리(head) 부분에 해당되는 횡 방향의 와 구조가 기준 위치뿐만 아니라 점선으로 이루어진 경사면을 따라 위치하고 있는 것을 확인할 수 있으며 또한 상류 부분에서도 복잡하지만 많은 와가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 점선은 벽면에 대해  $14^\circ$ 를 이루고 있으며 이것은 순간유동장과 비슷한 결과를 나타낸다. Guala 등<sup>(17)</sup>과 Balakumar & Adrian<sup>(18)</sup>은 속도 성분을 이용한 pre-multiplied 스펙트럼을 조사하여 거대난류구조(very large-scale motion)와 헤어핀 다발로 특징 지워지는 큰 구조(large-scale motion)를 구분하는 기준을 발견하였다. 그들은 큰 구조의 경우 그 길이의 최대값이 거의  $3\delta$ 로 제한되는 것을 확인하였으며 높이에 따른 스펙트럼의 특징을 조사하여 거대 구조와 큰 구조를 구분하는 기준이  $k_x \delta = 2$  ( $\lambda = \pi \delta$ )라고 주장하였다. 이러한 것을 근거로 한다면 본 연구에서 발견된 주 유동 방향의 긴 구조는  $4\delta$ 가 넘는 것으로서 거대난류구조에 속하게 되며 이러한 사실은 거대난류구조가 큰 구조의 연속적인 결합에 의해 만들어진다는 Kim & Adrian<sup>(6)</sup>의 추측을 뒷받침하는 결과라고 할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 주 유동 방향으로 길게 늘어진 헤어핀 다발들의 공간적 응집구조를 살펴보기 위하여 레이놀즈 수가  $Re_\theta=1410\sim 2540$ 로 변하는 난류 경계층 유동에 대한 직접수치모사를 수행하였다. 순간유동장과 공간적 상관계수 그리고 조건부 평균된 유동장에 대한 조사를 통해 이러한 구조가 주 유동 방향으로 깊은 상관관계를 가지고 길게 늘어져 있는 것을 확인할 수 있었으며 그 길이는

4~5 $\delta$  를 초과하는 것으로 파악되었다. 이러한 긴 구조는 기존의 거대난류구조의 영역에 해당되는 것으로서 이러한 구조가 주 유동 방향의 헤어핀 다발들의 연속적인 분포에 의해 형성된다는 것을 보여 준다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 세계수준의 연구중심대학육성사업(WCU, R31-2008-000-10045-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Head, M. R. and Bandyopadhyay, P., 1981, "New Aspect of Turbulent Boundary-Layer Structure," *J Fluid Mech*, Vol. 107, pp. 297~338.
- (2) Zhou, J., Adrian, R. J., Balachandar, S. & Kendall, T. M., 1999, "Mechanisms for Generating Coherent Packets of Hairpin Vortices," *J Fluid Mech*, Vol. 387, pp. 353~396.
- (3) Adrian, R. J., Meinhart, C. D. & Tomkins, C. D., 2000, "Vortex Organization in the Outer Region of the Turbulent Boundary Layer," *J Fluid Mech*, Vol. 422, pp. 1~54.
- (4) Christensen, K. T. & Adrian, R. J., 2001, "Statistical Evidence of Hairpin Vortex Packets in Wall Turbulence," *J Fluid Mech*, Vol. 431, pp. 433~443.
- (5) Tomkins, C. D. & Adrian, R. J., 2003, "Spanwise Structure and Scale Growth in Turbulent Boundary Layers," *J Fluid Mech*, Vol. 490, pp. 37~74.
- (6) Kim, K. C. & Adrian, R. J., 1999, "Very Large-Scale Motion in the Outer Layer," *Phys Fluids* 11, pp. 417~422.
- (7) Jimenez, J., 1998, "The Largest Scales of Turbulent Wall Flows," *Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs*, pp. 137~154.
- (8) Kim, K., Baek, S. -J. & Sung, H. J., 2002, "An Implicit Velocity Decoupling Procedure for the Incompressible Navier-Stokes Equations," *Intl J Numer Meth Fluids* 38, pp. 125~138.
- (9) Lund, T. S., Wu, X. & Squires, K. D., 1998, "Generation of Turbulent Inflow Data for Spatially-Developing Boundary Layer Simulation," *J Comput. Phys* 140, pp. 233~258.
- (10) Spalart, P. R., 1988, "Direct Simulation of a Turbulent Boundary Layer up to  $R_\theta=1410$ ," *J Fluid Mech*, Vol. 187, pp. 61~98.
- (11) Degraaff, D. B. & Eaton, J. K., 2000, "Reynolds-Number Scaling of the Flat-Plate Turbulent Boundary Layer," *J Fluid Mech*, Vol. 422, pp. 319~346.
- (12) Balint, J. -L., Wallace, J. M. & Vukoslavcevic, P., 1991, "The Velocity and Vorticity Vector Fields of a Turbulent Boundary Layer. Part 2. Statistical Properties," *J Fluid Mech*, Vol. 228, pp. 53~86.
- (13) Klewicki, J. C., Murry, J. A. & Falco, R. E., 1994, "Vortical Motion Contribution to Stress Transport in Turbulent Boundary Layer," *Phys Fluids* 6, pp. 277~286.
- (14) Meinhart, C. D. & Adrian, R. J., 1995, "On the Existence of Uniform Momentum Zones in a Turbulent Boundary Layer," *Phys Fluids* 7, pp. 694~696.
- (15) Kline, S. J. & Robinson, S. K., 1989, "Quasi-Coherent Structures in the Turbulent Boundary Layer, Part 1: Status Report on a Community-Wide Summary of the Data," In *Near Wall Turbulence*, pp. 218~247.
- (16) Adrian, R. J., 1996, "Stochastic Estimation of the Structure of Turbulent Fields," In *Eddy Structure Identification* (ed. Bonnet JP), Springer, pp. 145~196.
- (17) Guala, M., Hommema, S. E. & Adrian, R. J., 2006, "Large-Scale and Very-Large-Scale Motions in Turbulent Pipe Flow," *J Fluid Mech*, Vol. 554, pp. 521~542.
- (18) Balakumar, B. J. & Adrian, R. J., 2007, "Large- and Very-Large-Scale Motions in Channel and Boundary-Layer Flows," *Phil Trans R Soc. Lond. A* 365, pp. 665~681.