

난류 채널 유동 내부의 레이놀즈 전단 응력 분포

김 경 연*†

* 한밭대학교 기계공학과

Reynolds Shear Stress Distribution in Turbulent Channel Flows

Kyoungyoun Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

(Received February 29, 2012 ; Revised May 25, 2012 ; Accepted May 29, 2012)

Key Words: Turbulent Channel Flow(난류 채널 유동), Direct Numerical Simulation(DNS 직접수치모사), Reynolds Shear Stress(레이놀즈 전단 응력), Conditional Average(조건부 평균), Large-Scale Structure (대형 유동 구조)

초록: 벽면 난류의 항력과 밀접한 관련이 있는 유동구조를 조사하기 위해 $Re_\tau = 180, 395, 590$ 의 난류채널유동에 대한 직접수치모사를 수행하였다. 확률밀도함수를 조사하여 레이놀즈 전단응력에 가장 큰 기여를 하는 Q2 이벤트를 파악하였으며 Q2 이벤트의 각도의 변화가 $y^+ < 50$ 에서는 벽 단위로 스케일링되며, $y/h > 0.5$ 에서는 채널의 높이로 스케일링 됨을 확인하였다. Q2 이벤트를 조건으로 하는 조건부 평균 유동장을 조사하여 레이놀즈 전단응력의 발생과 관련이 있는 유동구조는 주 유동방향의 보텍스 및 헤어핀 형상의 보텍스임을 보였다. 또한, 순간 유동장을 관찰하여 높은 레이놀즈 전단 응력의 분포가 이러한 보텍스 구조와 관련이 있으며 $1.5 \sim 3h$ 의 크기를 갖는 대형유동구조를 구성함을 확인하였다.

Abstract: Direct numerical simulations were carried out for turbulent channel flows with $Re_\tau = 180, 395$ and 590 to investigate the turbulent flow structure related to the Reynolds shear stress. By examining the probability density function, the second quadrant (Q2) events with the largest contribution to the mean Reynolds shear stress were identified. The change in the inclination angle of Q2 events varies with wall units in $y^+ < 50$ and with the channel half height in $y/h > 0.5$. Conditionally averaged flow fields for the Q2 event show that the flow structures associated with Reynolds shear stress are a quasi-streamwise vortex in the buffer layer and a hairpin-shaped vortex in the outer layer. Three-dimensional visualization of the distribution of high Reynolds shear stress reveals that the organization of hairpin vortices in the outer layer having a size of $1.5 \sim 3h$ is associated with large-scale motions with high Reynolds shear stress in the outer layer.

- 기호설명 -

1. 서론

- h : 채널 높이의 절반
- u_τ : 벽면마찰속도
- ν : 동점성계수
- Re_τ : 레이놀즈수($u_\tau h / \nu$)
- λ_{ci} : 속도구배텐서 고유치의 허수부
- U_c : 채널 중심 평균 속도
- U_m : 평균속도($\int U dy / 2h$)

평판이나 관내를 흐르는 벽면 주위의 난류 유동장은 다양한 공학적인 문제에서 발견되는 기본적인 유동장이며, 간단한 기하학적 형상에 수반되는 유동임에도 불구하고 복잡한 난류유동의 현상을 포함하고 있으므로 이에 대한 연구는 학문적으로도 매우 중요하다고 할 수 있다. 그 간의 연구를 통해 벽면 난류 유동에는 마찰저항을 발생시키는 유동구조가 존재함이 발견되었으며 그와 관련된 유동 현상을 심도 있게 파악하여 난류유동장의 이해를 높이고^(1,2) 궁극적으로 항력감소와 같은 난류 유동의 제어를 목표로 하는 연구들이 이루어지고

† Corresponding Author, kkim@hanbat.ac.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

있다.^(3,4)

이론적으로, 완전 발달된 난류 채널의 유동에서는 식 (1)과 같이 각 응력의 합이 벽면으로부터 떨어진 거리에 비례하여 변화하게 된다.

$$-\overline{u^+v^+} + \frac{dU^+}{dy^+} = 1 - \frac{y}{h} \quad (1)$$

위 식으로부터 동일한 압력 구배에 대해, 레이놀즈 전단 응력이 증가하면 점성 응력이 감소하게 된다. 이는 평균 속도 구배의 감소로 이어져 채널 중심부분의 평균 속도가 감소하고, 결론적으로 유량의 감소를 초래한다. 따라서 레이놀즈 전단 응력은 난류 항력 발생에 직접적인 물리량이라고 할 수 있으며, 이와 관련된 유동 구조를 정확히 파악하는 것은 난류 항력을 감소시킬 수 있는 고 효율 수송 시스템의 개발에 매우 중요하다.

레이놀즈 전단 응력은 벽면 난류 유동장에 존재하는 다양한 보텍스 구조들과 밀접한 관련이 있다고 밝혀졌다. 버퍼 영역에 존재하는 주 유동방향의 보텍스(QSV; quasi-streamwise vortex) 및 로그 영역에서 관찰되는 헤어핀 보텍스들(hairpin vortex)에 의해 유도되는 스윙과 이젝션 모션에 의해 레이놀즈 전단응력이 발생하게 되며, 이는 항력의 증가로 이어진다.⁽²⁾ 이러한 난류 유동 구조에 대한 이해를 바탕으로 난류 항력을 감소시키는 성공적인 사례들이 보고된 바 있다.^(3,5,6) 항력감소를 목적으로 하는 기존의 수치적인 유동제어의 연구는 주로 레이놀즈 수가 낮은 유동장에 대해서 수행되었다.^(3,4) 레이놀즈 수가 낮은 유동장에서 발견되는 보텍스 구조의

대부분은 버퍼 영역에서 존재하는 주 유동 방향의 보텍스 구조이며 이를 억제시킴으로써 25% 정도의 항력을 감소시킬 수 있었다.⁽³⁾ 그러나 버퍼 영역의 구조의 변화를 통한 항력 감소 기법은 레이놀즈 수가 증가할 수록 그 효율이 감소한다고 보고되었다.^(7,8)

높은 레이놀즈 수의 유동에서는 버퍼층 위의 영역에서도 난류 보텍스 구조가 존재하며 이러한 구조 또한 레이놀즈 전단응력의 발생과 밀접한 관련이 있다.⁽⁹⁻¹²⁾ 따라서 레이놀즈 수가 높은 유동장에서 효과적인 유동 제어 기법을 고안하기 위해서는 버퍼층 및 외부층(outer layer)에서 존재하는 레이놀즈 전단응력과 관련 있는 유동 구조를 효과적으로 제어해야 하며, 이를 위해선 이러한 유동구조에 대한 이해를 높이는 것이 매우 중요하다.

최근 10 여 년간 외부영역에 존재하는 유동구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Adrian 등⁽⁹⁾은 난류경계층 유동에 대한 PIV 실험을 수행하여 외부 영역에서 헤어핀 보텍스들이 공간상으로 조직적으로 발생하여 이동하는 hairpin vortex packet 구조 발견하였다. Wu & Christensen⁽¹³⁾은 외부 영역에서 빈번히 발생하는 횡 방향 보텍스의 빈도를 통계적으로 조사하고 평균 전단응력에 대한 기여를 파악하였다. Guala 등⁽¹⁴⁾은 파이프 내부 유동에 대한 실험을 수행하여 로그 영역에서 레이놀즈 전단응력의 50%

Table 1 Computational parameters

Re_τ	L_x	L_z	N_x	N_y	N_z	Δx^+	Δz^+	Δy_c^+
180	$4\pi h$	$4/3\pi h$	128	129	128	17.7	5.9	4.4
395	$2\pi h$	πh	256	193	192	9.7	6.5	6.5
590	$2\pi h$	πh	384	257	384	9.7	4.8	7.2

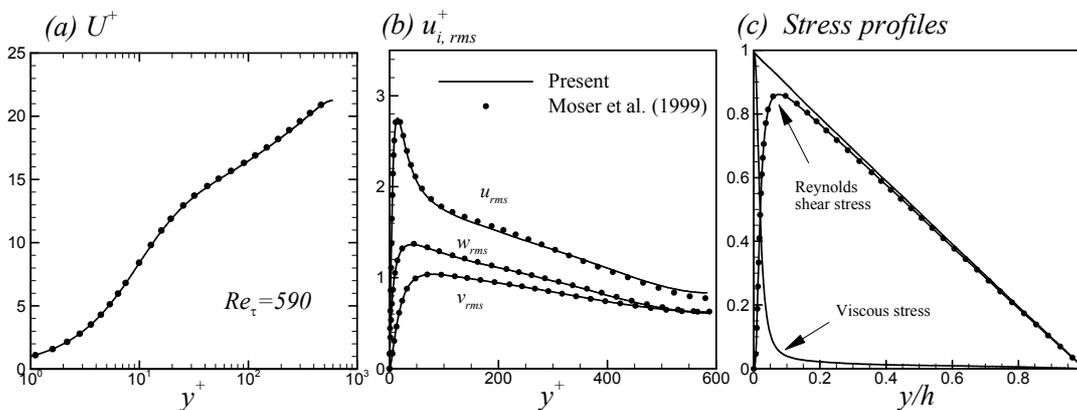


Fig. 1 Profiles of (a) mean velocity, (b) turbulent intensities and (c) mean shear stresses at $Re_\tau = 590$

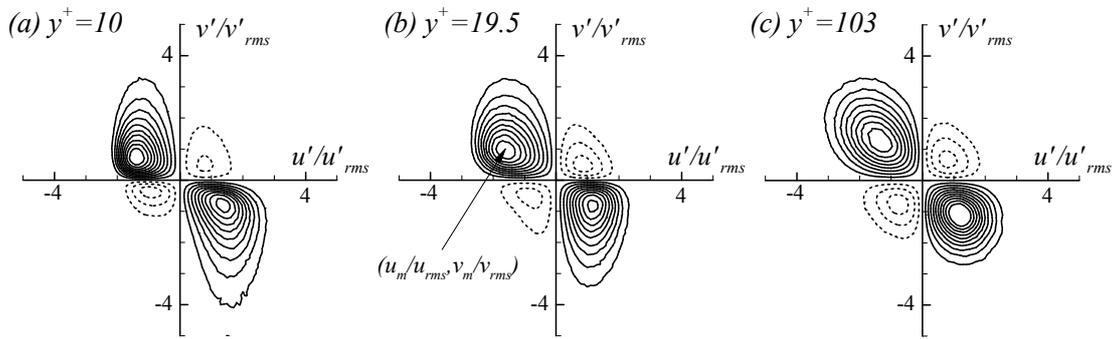


Fig. 2 Contours of probability weighted Reynolds shear stress ($Re_\tau = 590$). Contour levels are from -0.03 to 0.1 with increments of 0.01. Negative contour are dashed and zero contours are not drawn

이상이 유동 방향의 길이 척도가 파이프 반경의 5 배 이상에 달하는 초대형 유동구조와 연관된다고 보고하였다. 또한, Hoyas & Jimenez⁽¹⁵⁾는 $Re_\tau = 2000$ 인 채널 유동에 대한 직접수치모사를 수행하여, 레이놀즈 전단응력에 가장 큰 기여를 하는 유동구조의 길이척도가 버퍼 영역에서는 벽단위로 일정하나, 로그 영역에서는 벽면으로부터의 거리에 따라 선형적으로 증가함을 확인하였다.

대부분의 기존 연구는 외부 영역에 존재하는 유동구조의 특성을 파악하는데 집중되어 있으며, 외부 유동구조가 레이놀즈 전단응력의 발생에 미치는 직접적인 기여에 대한 분석은 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 외부 영역에서 발생하는 높은 레이놀즈 전단응력의 분포를 조사하고 그와 관련된 유동구조를 파악하고자 한다. $Re_\tau = 180, 395, 590$ 의 난류 채널유동에 대한 직접 수치 모사를 수행하여 마찰 항력과 밀접한 관련이 있는 레이놀즈 전단응력의 분포를 조사하였다. 우선 레이놀즈 전단 응력 발생에 큰 기여를 하는 유동구조를 조사하기 위해, 속도 섭동 성분의 확률밀도 함수를 조사하여 레이놀즈 전단 응력의 발생과 관련 있는 이벤트를 분석하였다. 아울러 이러한 이벤트를 조건으로 하는 조건부 평균 유동장의 보텍스 구조를 조사하여 레이놀즈 수의 효과를 살펴보았다. 마지막으로 순간 유동장에서 레이놀즈 전단 응력의 분포를 조사하고 그와 연관된 유동 구조를 파악하였다.

2. 수치해석 방법

난류 채널 유동의 직접 수치 모사의 지배 방정식은 3 차원 비정상, 비압축성 Navier-Stokes 방정식이며, 아래와 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re_\tau} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \tag{3}$$

여기서, u_i 는 속도, p 는 압력을 나타내며,

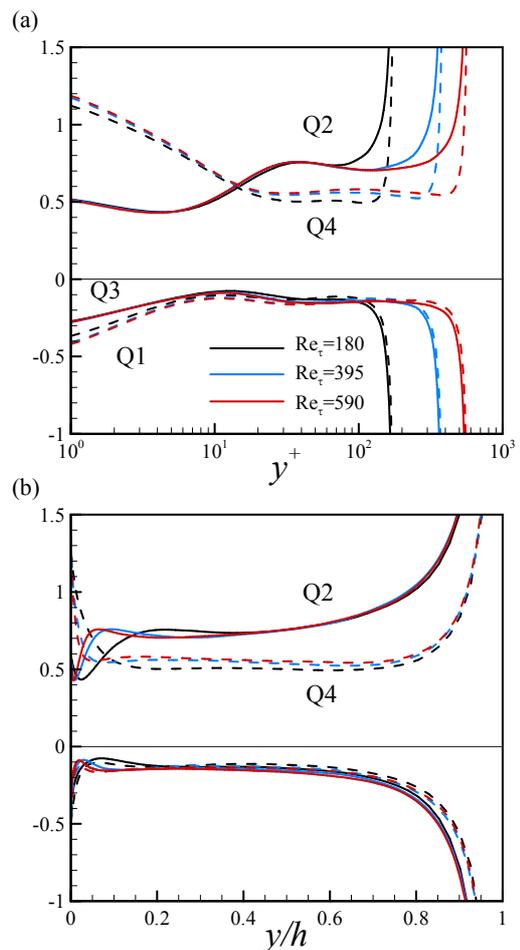


Fig. 3 Reynolds shear stress from each quadrant normalized by the local mean Reynolds shear stress

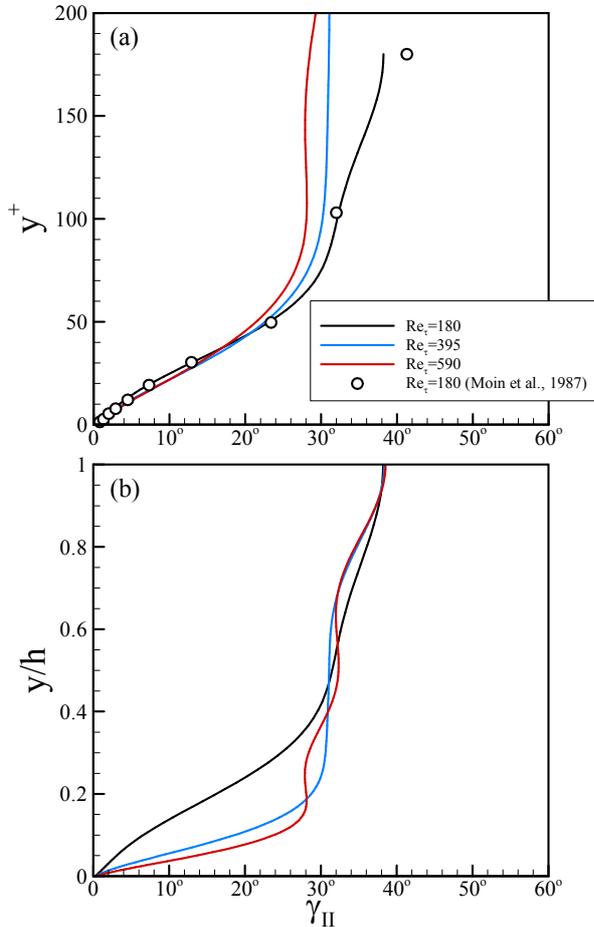


Fig. 4 Angle of the second quadrant event vector making maximum contribution to the mean Reynolds shear stress. Filtered profiles are shown using first 15 Chebyshev coefficients

지배방정식은 벽면 마찰속도 u_τ 및 채널 높이의 절반 h 로 무차원화 되었다. 레이놀즈 수는 $Re_\tau = u_\tau h / \nu$ 로 정의되며 ν 는 동 점성계수 이다. 위의 지배 방정식의 시간 전진은 점성 항에 대해서는 내재적인 방법인 Crank-Nicolson 기법을 사용하였고, 나머지 항들은 Adams-Bashforth 방법을 사용하는 준내재적(semi-implicit) 기법을 적용하였다. 공간상으로는 주 유동방향 및 횡 방향으로 푸리에 계수, 벽면 수직방향으로는 Chebyshev 계수를 사용하는 스펙트럴 기법을 사용하였다. 지배방정식의 경계조건은 벽면에서는 점착조건을 사용하였으며, 주 유동 및 횡 방향으로 주기적인 경계조건을 사용하였다.⁽¹⁶⁾ 본 연구에서 수행한 DNS 의 계산영역의 크기, 격자 수 등에 대한 정보는 Table 1 에서 나타내었다. 본 연구에서 수행한 DNS 결과에 대한 정확도를 검증하기 위해서 기존의 문헌 결과와 기본적인 난류 통계량을 비교하여

Fig. 1 에 나타내었다. 평균 및 난류 강도의 분포가 기존의 문헌 결과⁽¹⁷⁾와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있으며 이로부터 본 DNS 결과에 대한 신뢰성을 확인하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 확률밀도함수

난류 유동장에서 매우 불규칙적으로 변화하는 속도 성분들이 레이놀즈 전단 응력에 미치는 기여를 파악하기 위해 아래와 같이 정의되는 확률밀도함수를 조사하였다.

$$Prob(u \leq u < u+du \text{ and } v \leq v < v+dv) = f(u,v) dudv \quad (4)$$

$$-\overline{uv} = \iint -uv f(u,v) dudv \quad (5)$$

Fig. 2 는 위 식에서 적분인자 $-uv f(u,v)$ 를 여러 위치에서 나타낸 것으로 이 교차확률밀도함수는 각 속도 섭동의 이벤트들이 평균 레이놀즈 전단응력에 기여하는 정도를 정량적으로 보여준다. Fig. 3 에서 각 사분면에 해당하는 속도 섭동이 평균 레이놀즈 전단응력에 미치는 기여도를 파악하기 위해 아래와 같이 사분면 해석(quadrant analysis)을 수행한 결과를 나타내었다.

$$Q_i = \frac{\int_{Q_i} -uv f(u,v) dudv}{-\overline{uv}} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

여기서는 나타내지 않았지만 $Re_\tau = 180$ 의 분포는 Kim 등⁽¹⁸⁾의 결과와 잘 일치한다. Q2, Q4 가 Q1, Q3 에 비해 큰 값을 가지며, 아주 가까운 벽면에서는($y^+ < 15$) Q4 가 Q2 보다 크나, 그 이외의 대부분의 영역에서는 Q2 의 기여가 더 크다. 벽면 근처에서 Q4 는 QSV 주위에서 발생하는 스윙 모션, Q2 는 이젝션 모션에 의해 주로 발생한다.⁽¹⁸⁾ 본 연구결과는 서로 다른 레이놀즈 수에 대하여 Q2 와 Q4 가 거의 동일한 기여를 갖는 위치가 $y^+ \approx 15$ 로 일치함을 보여준다(Fig. 3(a)). 이는 본 연구에서 조사한 유동장에 대해서 QSV 의 중심 위치가 벽 단위로 거의 동일한 사실과 연관이 있으며, 벽면의 아주 가까운 부분에서 레이놀즈 전단응력의 발생은 QSV 와 밀접한 관련이 있음을 보여준다. 벽면으로부터의 거리를 채널 높이의 절반으로 무차원화 할 경우(Fig. 3(b)), $y/h > 0.5$ 의 외부층

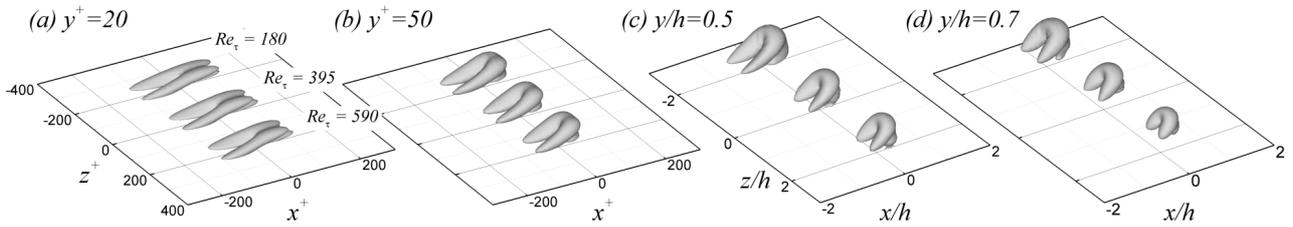


Fig. 5 Vortical structures of the linearly estimated flow field for the Q_2 event vector at different y locations. The structures corresponding to the $Re_\tau = 180, 395$ and 590 are displayed in ascending order of Re_τ in the spanwise direction. The vortices are visualized with an isosurface of non-dimensional swirling strength: (a, b) $\lambda_{ci} v/u_\tau^2 = 0.02$; (c, d) $\lambda_{ci} h/U_m = 0.1$

영역에서 서로 다른 레이놀즈 수의 유동에 대해 각 사분면의 기여가 거의 동일하게 나타남을 확인할 수 있다.

또한, 불규칙하게 변화하는 난류 속도 섭동 중, 레이놀즈 전단응력에 가장 큰 기여를 하는 이벤트는 식 (5)의 적분인자 $-uvf(u,v)$ 가 최대가 되는 이벤트이다. 각 y 위치에서 $-uvf(u,v)$ 가 최대가 되는 Q_2 이벤트 (u_m, v_m)를 조사하고 그 Q_2 이벤트 벡터의 경사각을 벽면으로부터의 거리에 따라 Fig. 4 에서 나타내었다. 벽면으로부터의 거리를 벽단위로 무차원화하여 살펴보면(Fig. 4(a)), $y^+ < 50$ 에서는 서로 다른 레이놀즈 수에 대해서도 Q_2 이벤트의 경사각의 분포가 거의 동일하게 나타난다. 반면, 벽면으로부터의 거리를 h 로 무차원화하여 살펴보면(Fig. 4(b)), $y/h > 0.5$ 인 외부 영역에서는 Q_2 이벤트 경사각의 분포가 외부 길이 척도(h)로 스케일링이 가능함을 보여준다. Fig. 3 과 Fig. 4 의 결과는 레이놀즈 전단응력 발생에 큰 기여를 하는 Q_2 이벤트 특성은 벽면으로부터의 거리에 따라 벽단위 혹은 외부 길이 척도로 적절히 스케일링될 수 있음을 시사한다.

3.2 조건부 평균 유동 구조

레이놀즈 전단응력에 가장 큰 기여를 하는 Q_2 이벤트 벡터와 관련 있는 유동구조를 파악하기 위해 Q_2 이벤트를 조건으로 부과한 조건부 평균 유동장을 조사하였다. 다수의 이벤트가 주어지는 경우, 또는 이벤트의 구간의 좁은 경우에는 주어진 이벤트가 발생하는 데이터 샘플의 수가 상대적으로 줄어들게 되어, 통계적으로 수렴된 조건부 평균을 얻기 위해선 매우 많은 수의 샘플이 요구되며 이는 막대한 계산 시간의 증가로 이어진다. 이에, 본 연구에서는 조건부 평균을 직접적으로 구하지 않고, 선형 통계 예측 기법(LSE, linear stochastic estimation)을 사용하여

조건부 평균을 근사적으로 구하였다.⁽¹⁹⁾

$$\begin{aligned} & \langle f(\mathbf{x}') | E_1(\mathbf{x}_1), E_2(\mathbf{x}_2), \dots, E_m(\mathbf{x}_m) \rangle \\ &= L_{fE_i} E_i + Q_{fE_i E_j} E_i E_j + \dots \\ &\approx L_{fE_i} E_i \end{aligned} \quad (7)$$

위의 근사식의 평균자승오차(mean square error)가 최소가 되기 위한 L_{fE_i} 는 아래와 같이 조건부 평균되는 물리량과 조건으로 주어지는 물리량 사이의 2 점 교차상관계수로 표현이 된다.

$$\langle E_i(\mathbf{x}_i) E_k(\mathbf{x}_k) \rangle L_{fE_i} = \langle f(\mathbf{x}') E_k(\mathbf{x}_k) \rangle \quad (8)$$

교차상관계수는 상대적으로 조건부 평균 보다 적은 수의 데이터만으로 수렴된 결과를 얻을 수 있으므로, 복잡한 조건에 대한 조건부평균은 LSE 을 통해 효율적으로 계산될 수 있으며 그 결과 또한 매우 정확하다고 보고되었다.⁽²⁰⁾ 이에 본 연구에서는 아래와 같이 Q_2 이벤트에 대한 조건부 평균 유동장을 LSE 을 통해 계산하였다.

$$\langle u_i | u = u_m, v = v_m \rangle = L_{i1} u_m + L_{i2} v_m \quad (9)$$

Fig. 5 는 Q_2 이벤트에 대한 조건부 평균된 유동장 내의 보텍스 구조를 나타낸다. 보텍스 구조는 속도구배텐서의 복소 고유치의 허수부분(λ_{ci})으로 가시화 되었다.⁽²¹⁾

$$\nabla \langle \mathbf{u} | Q_2 \rangle \mathbf{x} = (\lambda_{cr} + i\lambda_{ci}) \mathbf{x} \quad (10)$$

$y^+ = 20$ 에서는 Q_2 이벤트와 관련된 보텍스 구조는 QSV 쌍으로 나타났다. 참고로 동일 위치에서($y^+ = 20$) Q_4 이벤트로 조건부 평균한 유동장의 보텍스 구조 또한 QSV 의 쌍으로 Q_2

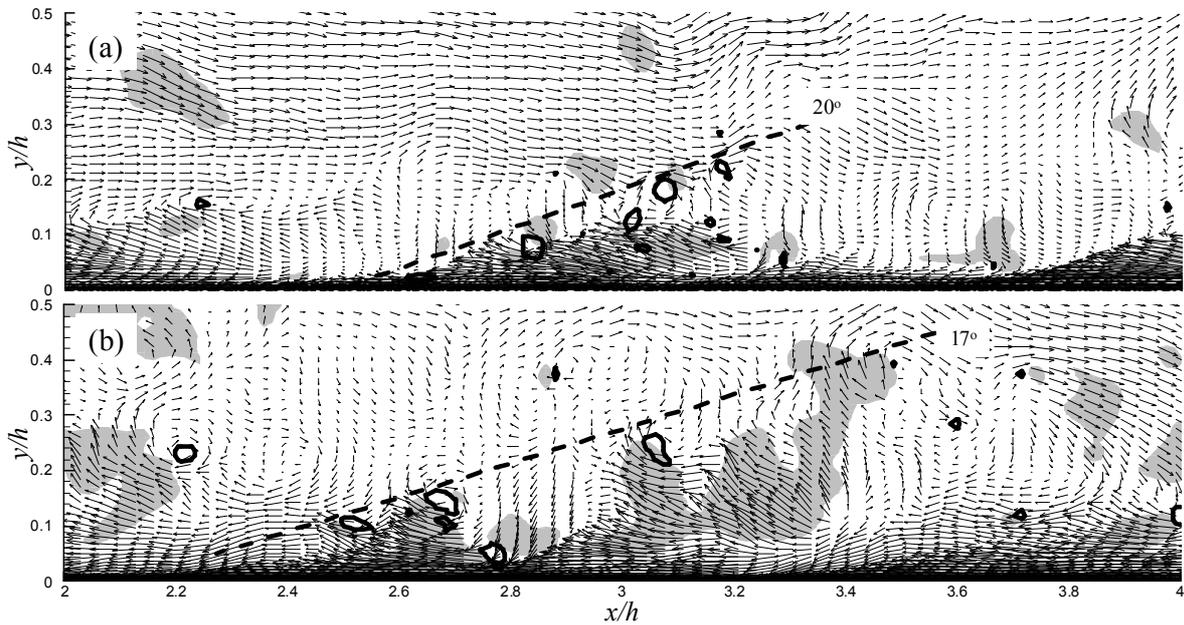


Fig. 6 Instantaneous velocity vector fields with a convection velocity $0.85U_c$ removed ($Re_\tau = 590$). Solid contour lines of swirling strength are shown to highlight the location of vortex cores. Gray contours represent the region having large Reynolds shear stress, $-u'v' > 2$

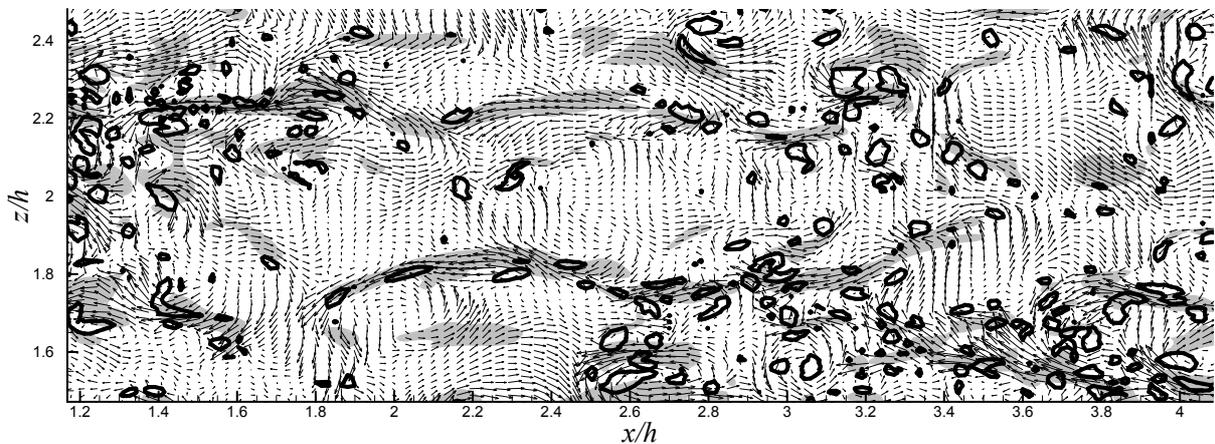


Fig. 7 Instantaneous fluctuating velocity vector field in the horizontal plane at $y^+ = 50$ ($Re_\tau = 590$). Solid contour lines of swirling strength are shown to highlight the location of vortex cores. Gray contours represent the region having large Reynolds shear stress, $-u'v' > 2$

이벤트의 경우와 거의 동일하게 나타났다. 이는 Fig. 3의 사분면 해석에서 유추한 결과와 일관되는 것으로 이를 통해 이 영역에서($y^+ = 20$) 레이놀즈 전단응력의 발생에 대한 Q2 및 Q4 이벤트의 기여가 거의 동일하며, 모두 QSV 구조와 연관되어있음을 확인할 수 있다. $y^+ > 20$ 영역에서는 Q2 이벤트와 관련된 보텍스 구조는 잘 알려진 헤어핀(또는 말발굽) 형태를 보여준다. 이 영역은 Q2의 기여가 Q4의 기여보다 큰

경우로, 본 연구 결과는 이러한 외부 영역에서 레이놀즈 전단응력과 관련된 중요한 유동구조는 헤어핀 보텍스임을 통계적으로 제시하고 있다.

$y^+ < 50$ 영역에서는 보텍스 스월 강도를 벽단위로 무차원화 할 경우, 동일한 값의 등표면($\lambda_{ci} \nu u_\tau^2 = 0.02$)으로 추출된 보텍스는 레이놀즈 수에 관계없이 모양과 크기가 거의 동일하게 나타났다(Fig. 5(a), (b)). 이를 통해 버퍼영역의 보텍스 구조는 그 크기 및 강도 또한 난류 척도로 스케일링 됨을

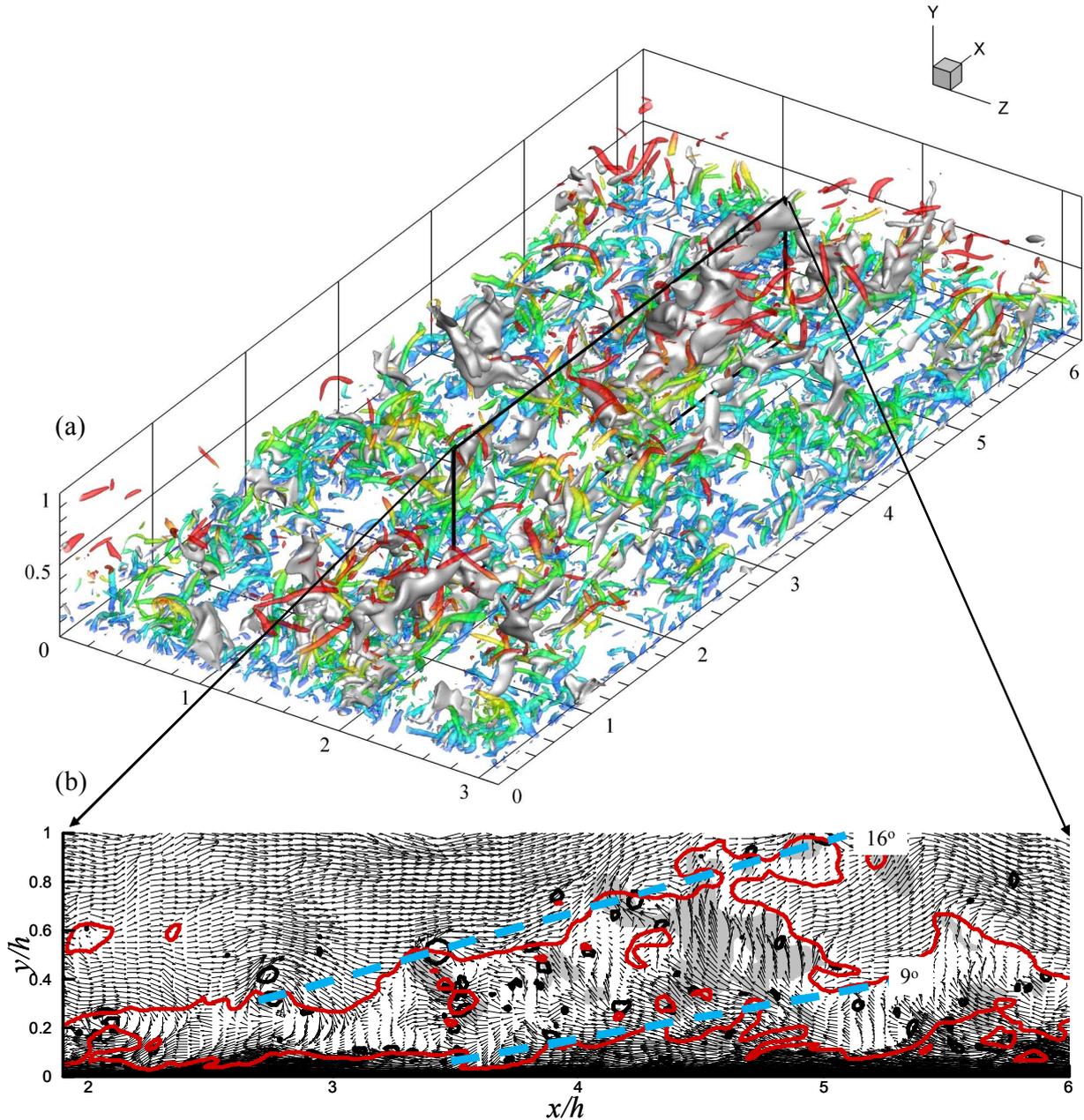


Fig. 8 (a) Illustrative example of large-scale structures associated with high Reynolds shear stress in the outer layer at $Re_\tau = 590$ ($y/h > 0.1$). The vortices are shown as colored isosurface plots of swirling strength (redder away from the wall) and gray isosurfaces represent the region having large Reynolds shear stress, $-u'v' > 4$. (b) The velocity field has $0.85U_c$ subtracted and black contour lines indicate swirling. Gray contours represent the region having large Reynolds shear stress, $-u'v' > 4$. The red lines are contours of constant streamwise velocity at 70% and 90% of the channel center line velocity

확인하였다. 반면, $y/h > 0.5$ 의 영역에서는 스윙 강도를 외부 영역의 시간척도 즉, 평균속도(U_m) 및 채널의 높이의 절반(h)으로 무차원화하여 나타내었다(Fig. 5(c), (d)). 동일한 값의 등표면 ($\lambda_c h/U_m = 0.1$)으로 보텍스를 추출하였으며, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 헤어핀 보텍스의 다리 부분이 짧게 나타난다. 보텍스 머리 부분의 형 방향의

크기는 $Re_\tau = 180$ 의 경우 $0.8h$ 이며 $Re_\tau = 590$ 에서는 $0.7h$ 로 다소 감소하였다.

3.2 대형유동구조

조건부 평균을 통해 파악된 외부 영역에서 레이놀즈 전단응력의 발생과 밀접한 관련이 있는 유동구조는 헤어핀 보텍스이며 이는 통계적으로

평균된 유동 구조이다. 실제 유동장에서 이러한 헤어핀 보텍스 및 레이놀즈 전단 응력의 분포를 파악하고자 순간 유동장을 조사하였다. Fig. 6 은 어느 한 순간에서 x - y 평면에서의 속도 벡터장을 나타내며 보텍스 구조를 가사화하기 위해 대류 속도($0.85U_0$)를 뺀 성분을 나타내었다. 또한, 헤어핀 보텍스의 머리 부분을 구별하기 위해 $\lambda_{ci,z}$ 를 등고선으로 함께 표시하였다. 헤어핀 보텍스의 머리 부분들이 주 유동방향으로 기울어진 분포를 가지며 발견된다. Fig. 6 에서 점선으로 나타낸 헤어핀 보텍스들이 이루는 경사각은 대략 $17^\circ \sim 20^\circ$ 로 파악되었으며 이는 Christensen & Adrian⁽²²⁾이 채널 유동($Re_\tau = 547$)의 PIV 실험을 통해 관측한 값(17°)과 유사하다. 헤어핀 보텍스들은 대략 $1 \sim 2h$ 의 길이를 가지는 영역 내에 모여서 분포하게 되며, 이는 헤어핀 보텍스 패킷이라고 일컬어진다.⁽⁹⁾ 이러한 헤어핀 보텍스 패킷은 외부 영역에서의 레이놀즈 전단응력의 발생과 매우 밀접한 관련이 있음이 실험적으로 보고되었다.⁽²³⁾ Fig. 6 에서 회색 부분으로 나타낸 높은 레이놀즈 전단 응력의 분포가 헤어핀 보텍스 패킷 내부에서 발견된다. 따라서 외부 영역에서의 레이놀즈 전단응력의 발생 원인, 즉 난류 항력의 원인을 규명하기 위해선 이러한 $O(h)$ 의 구조 즉, 대형 유동 구조(LSM; large-scale motion)에 대한 분석이 반드시 필요하다. Fig. 7 은 벽면과 평행한 x - z 평면에서의 속도 분포를 나타낸다. 레이놀즈 전단응력이 큰 값을 가지는 부분을 회색으로 강조하였다. 레이놀즈 전단응력이 큰 영역 가운데 $u' < 0$ 인 영역은 $u' > 0$ 인 영역에 비해 주 유동방향으로 길게 늘어서 있다. 헤어핀 보텍스의 중심에서 유도되는 강한 이척선 모션으로 높은 레이놀즈 전단응력을 유발하며, 이러한 헤어핀 보텍스들이 주 유동방향으로 이어져 있는 패킷을 구성할 경우, $u' < 0$ 를 가지며 높은 레이놀즈 전단응력의 영역이 주 유동방향으로 길게 늘어짐을 유추할 수 있다.

마지막으로, 레이놀즈 전단 응력과 관련 있는 유동 구조의 분포를 3 차원 공간에서 파악하기 위해 Fig. 8 에서 $Re_\tau = 590$ 의 순간 유동장을 조사하였다. 높은 레이놀즈 전단 응력을 가지는 영역($-u'v' > 4$)은 회색으로 표시되었으며, 외부 영역의 구조를 보다 명확하게 살펴보기 위해 $y/h > 0.1$ 의 영역에 대해서만 도시하였다. 높은 레이놀즈 전단 응력을 가지는 영역은 채널 중심

근처까지 분포하고 있으며 주 유동 방향으로 $3h$ 정도의 큰 크기를 가짐을 확인할 수 있다. 이러한 대형 유동 구조 주위로 보텍스들이 밀집되어 발견되며, 특히, 외부 영역에서 다수의 보텍스들이 존재한다. 높은 레이놀즈 전단응력을 수반하는 대형 유동 구조와 관련된 보텍스의 구조를 자세히 살펴보기 위해 Fig. 8(b)에서는 높은 레이놀즈 전단 응력의 분포를 나타내는 영역의 중심 단면에서 속도 벡터 및 보텍스의 분포를 도시하였다. 아울러 붉은 색으로 표시한 선들은 각각 채널 중심에서의 평균 속도의 70%와 90%를 나타내며 선형적인 램프 모양의 패턴을 보여준다. 이는 Adrian 등⁽⁹⁾의 난류 경계층 유동에 대한 입자영상속도계(PIV) 실험 결과에서도 관찰된다. 속도 등고선 주위로 다수의 횡 방향 와류들이 검출되어 헤어핀 보텍스들이 공간상으로 응집된 보텍스 패킷을 구성함을 확인할 수 있다. 그리고 이러한 응집구조는 주 유동 방향으로 대략 $1.5 \sim 3h$ 정도의 크기를 같은 대형유동구조이다. $x/h = 2 \sim 5$ 및 $y/h = 0.2 \sim 1.0$ 의 범위에서 관측되는 큰 보텍스 패킷은 대략 16° 의 경사각을 가지며, 그 아래 부분인 $y/h < 0.4$ 에서는 보다 작은 크기의 패킷이 9° 의 경사각을 가지며 발견된다. Adrian 등⁽⁹⁾은 큰 패킷과 벽면 근처의 작은 패킷의 동시 발생은 로그 영역에서의 중요한 특성이라고 보고하였다. 본 연구에서는 외부 영역에서 발견되는 높은 레이놀즈 전단 응력을 가지는 대형유동구조가 이러한 보텍스 패킷과 연관되어 있음을 직접적으로 보여준다.

4. 결론

난류 채널 유동에서 레이놀즈 전단응력에 큰 영향을 미치는 유동구조를 파악하기 위해 $Re_\tau = 180, 395$ 및 590 의 난류 채널 유동장에 대한 직접수치모사를 수행하였다. 속도 섭동량의 확률밀도함수를 조사하여 레이놀즈 전단응력 발생에 대한 사분면 해석을 수행하였다. 벽면에서 매우 근접한 영역을 제외한 대부분의 영역에서($y^+ > 15$), Q2 이벤트들에 의한 레이놀즈 전단 응력 발생이 다른 이벤트들에 비해 큰 것으로 확인되었다. 또한, 레이놀즈 전단응력에 가장 큰 기여를 하는 Q2 이벤트 벡터의 경사각은 벽면 근처에서는 벽단위, $y/h > 0.5$ 에서는 외부영역의 길이척도에 따라 변화하는 것으로 파악되었다. Q2 이벤트를 조건으로 하는 조건부 평균 유동장을

조사하여 레이놀즈 전단응력의 발생과 관련이 있는 유동구조는 QSV 및 헤어핀 형상의 보텍스임을 보였다. 이러한 유동구조의 공간상의 분포를 파악하기 위해 순간 유동장을 관찰하여 레이놀즈 전단응력이 크게 발생하는 영역을 조사하였다. 낮은 운동량 영역 내부에서 높은 레이놀즈 전단 응력이 주 유동방향으로 길게 늘어져 분포함을 확인하였고 이는 헤어핀 보텍스 패킷과 연관이 있음을 확인하였다. 마지막으로 3 차원 순간 유동장을 조사하여 큰 헤어핀 보텍스 패킷과 그 아래 존재하는 다소 작은 헤어핀 보텍스 패킷의 주위에서 높은 레이놀즈 전단 응력이 외부 영역까지 분포하고 있으며 주 유동 방향으로 $3h$ 정도의 대형 유동 구조를 형성함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임(No. 2010-0007901).

참고문헌

- (1) Adrian, R.J., 2007, "Hairpin Vortex Organization in Wall Turbulence," *Phys. Fluids*, Vol. 19, pp. 041301.
- (2) Robinson, S.K., 1991, "Coherent Motions in the Turbulent Boundary Layer," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, No. 1, pp. 601~639.
- (3) Choi, H., Moin, P. and Kim, J., 1994, "Active Turbulence Control for Drag Reduction in Wall-Bounded Flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 262, pp. 75~75.
- (4) Chung, Y.M. and Talha, T., 2011, "Effectiveness of Active Flow Control for Turbulent Skin Friction Drag Reduction," *Phys. Fluids*, Vol. 23, No. 2, pp. 025102-10.
- (5) Hammond, E.P., Bewley, T.R. and Moin, P., 1998, "Observed Mechanisms for Turbulence Attenuation and Enhancement in Opposition-Controlled Wall-Bounded Flows," *Phys. Fluids*, Vol. 10, pp. 2421.
- (6) Pamiès, M., Garnier, E., Merlen, A. and Sagaut, P., 2007, "Response of a Spatially Developing Turbulent Boundary Layer to Active Control Strategies in the Framework of Opposition Control," *Phys. Fluids*, Vol. 19, pp. 108102.
- (7) Chang, Y., Collis, S.S. and Ramakrishnan, S., 2002, "Viscous Effects in Control of Near-Wall Turbulence," *Phys. Fluids*, Vol. 14, p. 4069.
- (8) Iwamoto, K., Suzuki, Y. and Kasagi, N., 2002, "Reynolds Number Effect on Wall Turbulence: Toward Effective Feedback Control," *Int. J. Heat Fluid Fl.*, Vol. 23, No. 5, pp. 678~689.
- (9) Adrian, R.J., Meinhart, C.D. and Tomkins, C.D., 2000, "Vortex Organization in the Outer Region of the Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 422, pp. 1~54.
- (10) Ganapathisubramani, B., 2008, "Statistical Structure of Momentum Sources and Sinks in the Outer Region of a Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 606, No. -1, pp. 225~237.
- (11) Ganapathisubramani, B., Longmire, E.K. and Marusic, I., 2003, "Characteristics of Vortex Packets in Turbulent Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 478, pp. 35~46.
- (12) Jiménez, J., 2012, "Cascades in Wall-Bounded Turbulence," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 44, pp. 27~45.
- (13) Wu, Y. and Christensen, K.T., 2006, "Population Trends of Spanwise Vortices in Wall Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 568, No. 1, pp. 55~76.
- (14) Guala, M., Hommema, S. and Adrian, R., 2006, "Large-Scale and Very-Large-Scale Motions in Turbulent Pipe Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 554, No. 1, pp. 521~542.
- (15) Hoyas, S. and Jiménez, J., 2006, "Scaling of the Velocity Fluctuations in Turbulent Channels up to $Re=2003$," *Phys. Fluids*, Vol. 18, pp. 011702.
- (16) Kim, K., Sung, H.J. and Adrian, R.J., 2008, "Effects of Background Noise on Generating Coherent Packets of Hairpin Vortices," *Phys. Fluids*, Vol. 20, pp. 105107.
- (17) Moser, R.D., Kim, J. and Mansour, N.N., 1999, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow up to $Re=590$," *Phys. Fluids*, Vol. 11, p. 943.
- (18) Kim, J., Moin, P. and Moser, R., 1987, "Turbulence Statistics in Fully Developed Channel Flow at Low Reynolds Number," *J. Fluid Mech.*, Vol. 177, pp. 133~166.
- (19) Adrian, R.J., 1994, "Stochastic Estimation of Conditional Structure: a Review," *Applied Scientific Research*, Vol. 53, No. 3, pp. 291~303.
- (20) Adrian, R.J., 1979, "Conditional Eddies in Isotropic Turbulence," *Phys. Fluids*, Vol. 22, pp. 2065.
- (21) Chakraborty, P., Balachandar, S. and Adrian, R.J., 2005, "On the Relationships Between Local Vortex Identification Schemes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 535, pp. 189~214.
- (22) Christensen, K.T. and Adrian, R.J., 2001, "Statistical Evidence of Hairpin Vortex Packets in Wall Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 431, pp. 433~443.
- (23) Ganapathisubramani, B., Hutchins, N., Hambleton, W.T., Longmire, E.K. and Marusic, I., 2005, "Investigation of Large-Scale Coherence in a Turbulent Boundary Layer Using Two-Point Correlations," *J. Fluid Mech.*, Vol. 524, pp. 57~80.