

## 표면조도가 있는 난류경계층 내 난류구조

이재화\* · 이승현\* · 김경연\*\* · 성형진 †  
(2008년 2월 4일 접수, 2008년 4월 14일 심사완료)

### Organized Structure of Turbulent Boundary Layer with Rod-roughened Wall

Jae Hwa Lee, Seung-Hyun Lee, Kyoungyoun Kim and Hyung Jin Sung

**Key Words :** Direct numerical Simulation (직접수치모사), Turbulent Boundary Layer (난류경계층), Surface Roughness (표면조도), Turbulent Structure (난류구조)

#### Abstract

Turbulent coherent structures near rod-roughened wall are investigated by analyzing the database of direct numerical simulation of turbulent boundary layer. The surface roughness rods with the height  $k/\delta = 0.05$  are arranged periodically in  $Re_\delta = 9000$ . The roughness sublayer is defined as two-point correlations are not independent of streamwise locations around roughness. The roughness sublayer based on the two-point spatial correlation is different from that given by one-point statistics. Quadrant analysis and probability-weighted Reynolds shear stress indicate that turbulent structures are not affected by surface roughness above the roughness sublayer defined by the spatial correlations. The conditionally-averaged flow fields associated with Reynolds shear stress producing Q2/Q4 events show that though turbulent vortices are affected in the roughness sublayer, these are very similar at different streamwise locations above the roughness sublayer. The Reynolds stress producing turbulent vortices in the log layer ( $y/\delta = 0.15$ ) have almost the same geometrical shape as those in the smooth wall-bounded turbulent flows. This suggests that the mechanism by which the Reynolds stress is produced in the log layer has not been significantly affected by the present surface roughness.

#### 1. 서론

표면조도가 존재하는 난류경계층유동은 다양한 공학적, 물리적 문제에 있어 매우 중요한 문제 중의 하나이다. 이는 표면조도가 열 및 운동량의 전달과 같은 유동특성에 영향을 미치는 매우 중요한 디자인 변수 중의 하나이기 때문이다.

기존의 연구들을 통해, 난류경계층에서 표면조도는 유동의 표면마찰저항을 증가시킨다고 보고되었다. 이러한 경향은 roughness sublayer라고 불리는 영역으로 제한된다고 여러 연구자들에 의해 알려져 왔는데<sup>(1~3)</sup> 최근에 Flack 등<sup>(4)</sup>과 Schultz 등<sup>(5)</sup>은 fully rough flow인 난류경계층에서 경계층 두께와 equivalent sand roughness height ( $k_s$ )의 비가 40보다 크면 roughness sublayer 바깥 영역에서 velocity defect form 뿐만 아니라 Reynolds 전단응력 등의 고차 난류통계량 또한 표면조도가 존재하지 않는 난류경계층의 결과와 동일함을 보여주었다. 이러한 결과들은 Reynolds 수가 충분히 크고 표면조도의 크기가 충분히 작을 경우 roughness sublayer 바깥영역의 난류유동은 벽면의 표면조도에 영향을

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : hjsung@mail.kaist.ac.kr  
TEL : (042)869-3027 FAX : (042)869-5027

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 한국에너지기술연구원

받지 않는다는 것을 시사한다.

그러나 최근의 다른 연구 결과들을 통해 표면조도의 영향이 roughness sublayer에 국한된다는 가설에 의문이 제기되고 있다. Krogstad 등<sup>(6-7)</sup>은 표면조도가 있는 난류경계층 실험을 통하여 roughness sublayer 바깥영역에서도 sublayer 내부와 마찬가지로 Reynolds 전단응력이 표면조도의 영향을 받음을 확인하였다. 이것은 지금까지의 결과들과 다르게 벽면 근처의 roughness sublayer 내부와 그 바깥영역 사이에 난류구조들의 더욱 활발한 상호작용이 있다는 것을 암시하며 또한 표면조도의 존재 유무에 따라 큰 척도의 난류구조에 차이가 발생하는 것을 의미한다. 이 후 Mazouz 등<sup>(8)</sup>과 Tachie 등<sup>(9)</sup>도 Krogstad 등의 의견을 뒷받침하는 실험 결과를 보고하였으며 최근에 Lee & Sung<sup>(10)</sup>은 표면조도가 있는 난류경계층에 대한 직접수치모사 (DNS)를 최초로 수행하여 Krogstad의 주장을 지지하는 결과를 보여 주었다. Lee & Sung<sup>(10)</sup>의 결과는 roughness sublayer 바깥영역에서 표면조도의 영향이 난류통계량의 종류에 따라 서로 다르게 나타나는 것을 보여주었다. 즉, Reynolds 전단응력과 velocity triple product 등의 난류통계량에서는 roughness sublayer 바깥영역에서 표면조도의 영향이 존재하지만 Reynolds anisotropic tensor의 경우 roughness sublayer 바깥영역에서 표면조도의 영향이 거의 나타나지 않는다고 보고 하였다. 이와 비슷한 결과는 한 쪽 벽에만 표면조도가 존재하는 채널 난류 유동에서도 보고 된 바 있는데 Bhaganagar 등<sup>(11)</sup>은 난류통계량의 종류에 따라 표면조도의 영향이 roughness sublayer 바깥영역에서 다르게 나타난다고 주장하였다. 따라서 roughness sublayer의 바깥영역에서 표면조도의 영향에 대한 서로 다른 결과의 원인을 명확하게 규명하기 위해서는 보다 근원적으로 이러한 난류통계량을 발생시키는 벽면 근처의 난류구조에 대한 연구가 이루어져야 한다.

표면조도가 있는 난류경계층의 경우 지금까지 계산상의 복잡성과 입구경계조건 부과 등의 어려움으로 인해서 직접수치모사가 한 차례 이루어졌으며 대부분의 연구가 실험으로 이루어져 왔다. 기존의 실험 연구에서는 2 차원의 상관성 정보만을 사용한 유동 구조의 연구만이 이루어졌으며, 난류통계량과 밀접한 관련이 있는 벽면 근처의 3 차원 유동 구조에 대한 연구는 체계적으로 이루어지지 못했다. 따라서 본 연구에서는 Lee & Sung<sup>(10)</sup>의 직접수치모사 데이터를 사용하여 표면조도가 존재하는 난류경계층에서 표면조도의 영향에 의한 난류구조의 변화를 살펴보고자 한다. 직접수치모사의 경우 실험에서 얻기 힘든 3 차원의 속도 및 압력 정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 벽면 근처에서 표면조도에 의한 유동 구조의 변화를 조사하

기 용이하다는 장점이 있기 때문에 표면조도에 의한 난류구조의 변화를 자세히 살펴 볼 수 있다.

본 연구에서는 특히 표면조도의 영향이 벽면 근처의 난류구조에 미치는 영향을 살펴보고 표면조도의 영향이 존재하는 유동장의 범위를 난류구조의 관점에서 파악하였다. 이를 위해 3 차원의 상관성 정보를 사용하여 유동 구조의 관점에서 roughness sublayer의 영역을 살펴 보았으며 또한, Reynolds 전단 응력의 발생과 밀접한 관련이 있는 벽 근처의 유동 구조를 조건부 평균 유동장을 통해 조사하여 표면조도가 유동장 전체의 유동 구조에 주는 변화에 대해 살펴보았다. 최종적으로 표면조도가 없는 난류경계층과의 비교를 통해 논쟁이 되고 있는 roughness sublayer 바깥영역에서의 표면조도의 영향을 유동 구조의 관점에서 살펴보았다.

## 2. 수치적 방법

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

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

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

여기서  $x_i$ 는 직교 좌표를 나타내고,  $u_i$ 는 각각의 속도 성분들을 나타낸다. 모든 변수들은 자유흐름 속도 ( $U_\infty$ )와 입구에서의 운동량 두께 ( $\theta_m$ )로 무차원화 되었으며 Re는 Reynolds 수를 나타낸다. 지배방정식은 Kim 등<sup>(13)</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. 이를 통해 얻어진 행렬 식은 계수행렬의 근사적인 분해 (LU decomposition)를 통해서 속도와 압력을 분리하였으며 대류항의 내재적 처리로 인해 결합된 속도 성분들 또한 근사적인 분해를 통해 각각 분리하였다. 본 연구에서는 표면조도를 모사하기 위하여 Kim 등<sup>(14)</sup>이 제시한 가상경계기법을 이용하였다. 가상경계에서 경계조건을 만족시키기 위하여 운동량 방정식에 모멘텀 가진  $f_i$  항이 추가되었으며 힘이 가해지는 점이 가상의 경계와 일치하지 않는 경우 일차와 이차의 보간법을 사용하여 가상 경계에서의 점

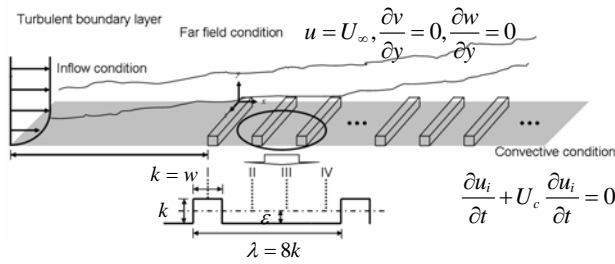


Fig. 1 Schematic diagram of computational domain and rod roughness

착 조건을 만족시켰다.

Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 계산 영역과 경계조건을 보여 주고 있다. 계산 영역의 크기는 주 유동 방향, 벽 수직 방향 그리고 횡 방향으로 각각  $(L_x \times L_y \times L_z) = (768\theta_m \times 60\theta_m \times 80\theta_m)$  이며, 격자수는  $(2049 \times 150 \times 257)$  이다. 주 유동 방향과 횡 방향으로 균일 격자계(uniform grid)를 사용하였고 벽면의 수직 방향으로로는 쌍곡선단젠트함수(hyperbolic tangent function)를 이용한 비 균일 격자계(non-uniform grid)를 사용하였다. 벽 단위로 무차원화된 각 방향의 격자 크기  $\Delta x^+ = 6.0$ ,  $\Delta y_{min}^+ = 0.2$ ,  $\Delta z^+ = 5.0$  이다. 입구에서는 Lund 등<sup>(15)</sup> 이 제안한 방법을 사용하여 표면조도가 없는  $Re_{\theta_m, in} = 300$ 의 난류 유동장을 별도의 계산을 통하여 입구 유동 조건으로 부가하였으며 출구에서는 대류 경계 조건  $(\partial u / \partial t) + c(\partial u / \partial x) = 0$  을 사용하였다. 여기서  $c$  는 출구에서의 평균속도이다. 벽면에서는 점착 조건을 적용하였고, 횡 방향으로로는 주기적 경계 조건을 사용하였다. 그리고 윗면에서는  $u = U_\infty$ ,  $\partial v / \partial x = 0, \partial w / \partial y = 0$  의 조건을 사용하였다. 입구의 유동장은 주 유동 방향으로  $80\theta_m$  떨어진 곳 ( $x = 0$ ) 에서 처음 표면조도를 만나도록 모사되었으며 2 차원의 사각형 표면조도의 크기( $k$ )는 입구 운동량 두께의 1.5 배이며 벽 단위로 32~45 의 크기를 가진다. 표면조도는 주 유동 방향으로  $8k$  의 간격으로 규칙적으로 배열 되었으며 본 연구에 사용된 벽면으로부터의 수직 방향 높이는 가상 원점 ( $\varepsilon$ ) 을 사용하여 나타내었다. 계산과 관련된 보다 자세한 내용은 Lee & Sung<sup>(10)</sup> 을 참고할 수 있다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 평균 유동장

표면조도가 있는 난류경계층의 연구에서 어려운 문제 중의 하나는 벽면마찰속도( $u_\tau$ )를 쉽게 구할 수 없다는 것이다. 일반적으로 표면조도가 없는 난류 채널이나 경계층 유동의 경우 Log-law 의 분

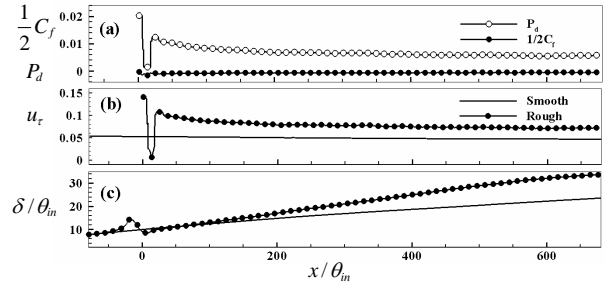


Fig. 2 Variations of spatially averaged (a) skin-frictional drag, form drag, (b) friction velocity, (c) boundary layer thickness

포가 벽면마찰속도를 구하는데 이용된다.<sup>(16)</sup> 하지만 Reynolds 수가 작고 표면조도가 있는 난류경계층에서는 Log-law를 만족하는 영역이 좁고 명확하지 않기 때문에 위와 같은 방법으로 벽면 속도를 구하기가 어렵다. Krogstad 등<sup>(6)</sup> 이 표면조도가 있는 난류경계층에서 벽면마찰속도를 구하기 위해 wake function을 고려한 방법을 제시하였지만 3 개의 최적화된 파라미터에 대한 정보를 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 반면에 실험과는 달리 직접 수치모사에서는 벽면 마찰 저항과 압력 저항을 사용해 비교적 쉽게 벽면마찰속도를 구할 수 있다. Ashrafian 등<sup>(17)</sup> 은 표면조도가 있는 난류 채널 유동에서 주 유동 방향의 압력구배를 계산하여 벽면 마찰속도를 구하였으며 Lee & Sung<sup>(10)</sup> 은 표면조도가 있는 난류경계층 유동에서 표면조도의 한 주기를 기준으로 표면 마찰 저항과 압력 저항의 평균을 계산해 그 값으로 벽면마찰속도를 구하였다. 본 연구에서는 Lee & Sung<sup>(10)</sup> 이 사용한 방법을 사용하여 벽면마찰속도를 구하였다. 유동이 처음의 표면조도를 만나 생기는 영향을 배제하기 위하여 벽면 속도가 주 유동 방향으로 일정하고 경계층 두께가 선형적으로 변하는 새로운 평형 상태(44 번째 표면조도,  $x = 516\theta_m$ ) 구간에서의 데이터를 사용하였다. Fig. 2(a)는 주 유동방향을 따라 표면조도 한 주기 동안 시간과 공간에 대해 평균된 벽면 마찰저항 ( $C_f$ )과 압력저항 ( $P_d$ )을 나타내고 있고 Fig. 2(b)는 벽면마찰속도를 나타내고 있다. 여기서 각각의 심볼은 표면조도 crest 위에서 한 주기의 평균을 나타내며 주 유동 방향의 원점,  $x = 0$  는 표면 조도를 처음 만나는 위치를 나타낸다. 표면 마찰 저항은 표면조도를 만나기 전까지 양의 값을 가지다 처음 만난 이후부터는 음의 값으로 바뀌는 것을 확인 할 수 있는데 이것은 공동 내에서 발생하는 재순환에 의해 생기는 결과이다. 하지만 압력 저항의 경우 표면조도 앞 뒷면에서 발생하는 큰 압력 차로 인해 매우 큰 양의 값을 가지게 된다. 따라서 벽면에서의 전체 저항은 큰 양의 값을 가지게 되므로 벽면마찰속도는 표면조도가 없는

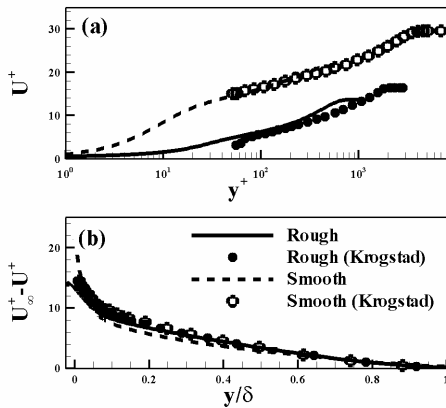


Fig. 3 Mean velocity profiles

벽면마찰속도에 비해 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 표면조도가 없는 난류경계층과의 비교를 위해 동일한  $Re_\delta$  ( $\delta$ 는 자유흐름속도의 0.99 배로 정의된 난류경계층 두께)를 가지는 지점에서 두 경계층을 서로 비교하였다. 표면조도에 의한 난류구조의 변화를 살펴 보기 위해 주 유동 방향의 서로 다른 4 개의 위치 (Fig. 1)에서 난류통계량과 난류구조를 조사하였다. 위치 I은 표면조도 상단의 중심 부분이며 II와 IV는 재순환영역의 중심부분, 그리고 III은 재순환영역 사이의 안장점 (saddle point)의 위치를 나타낸다.<sup>(10, 17)</sup>

Fig. 3은 표면조도의 유무에 따른 주 유동 방향의 평균속도분포를 나타내고 있으며, effective sand roughness height,  $k_s = 9.7mm$ 인 rods를 사용한 Krogstad 등<sup>(7)</sup>의 실험 결과와 비교하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 속도 분포는 Krogstad의 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있으며 이는 벽면마찰속도를 구하기 위해 Krogstad 등이 사용한 방법과 본 연구에서 사용한 방법의 결과가 잘 일치하는 것을 나타낸다. 또한 표면조도의 영향으로 평균 속도가 아래방향으로  $\Delta U^+ = 9.8$  (roughness function) 이동되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 속도 분포를 velocity defect form으로 나타낼 경우 표면조도의 유무에 상관없이 분포가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 Roughness sublayer의 높이

현재까지 표면조도가 있는 난류경계층의 연구는 표면조도의 영향이 난류통계량에 직접적으로 영향을 미치는 영역인 roughness sublayer와 그 영향이 나타나지 않는 바깥영역으로 구분되어 이루어졌다. 이는 난류통계량이 roughness sublayer를 기준으로 벽면으로부터의 높이에 따라 분명한 차이를 보이기 때문이다.

기존의 roughness sublayer의 높이에 대한 연구는 한 점에서의 난류통계량을 사용하여 대부분 이루어졌다. Bhaganagar 등<sup>(11-12)</sup>은 표면조도가 있는 채널 난류 유동에서 속도, 압력, 그리고 와도 (vorticity)의 근평균제곱을 이용하여 roughness sublayer의 높이를 살펴 보았다. 이를 통해 어떤 척도의 난류통계량을 사용하느냐에 따라서 바깥영역에서 표면조도의 영향이 서로 다르게 나타날 수 있는 것을 보고하였으며 압력 성분은 속도 성분과 서로 다른 특성을 가지고 있기 때문에 압력을 기준으로 한 roughness sublayer의 높이는 달라짐을 보고 하였다. 따라서 본 연구에서 난류통계량의 발생과 깊은 관련이 있는 벽면 근처에서의 와 구조 (vortical structure)의 변화를 살펴보기 위해서는 한 점에서의 난류통계량보다 난류구조의 변화를 반영하는 이점상관계수를 이용하여 roughness sublayer의 높이를 살펴 보는 것이 필요하다.

난류경계층에서 공간상의 상관 계수 (correlation coefficient)는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{ij}(\Delta x, y', \Delta z; x_{ref}, y_{ref}) \quad (3)$$

$$= \frac{\langle u_i(x_{ref}, y_{ref}, z)u_j(x_{ref} + \Delta x, y', z + \Delta z) \rangle}{\sqrt{\langle u_i^2(x_{ref}, y_{ref}) \rangle} \sqrt{\langle u_j^2(x_{ref} + \Delta x, y') \rangle}}, \quad i, j = 1, 2, 3$$

여기서  $x_{ref}, y_{ref}$ 는 기준이 되는 주 유동 방향과 벽면 수직 방향의 위치이다. Fig. 4-5은 각각 주 유동 방향( $R_{uu}$ )과 벽 수직 방향의 상관 계수( $R_{vv}$ )를 나타내며 roughness sublayer의 위치를 조사하기 위해 벽 수직 방향의  $y^+ = 20, 30, 50, 100$ 의 위치가 고려되었으며 공간상의 균일성을 살펴 보기 위해 Fig. 1에서와 같이 서로 다른 4 개의 표면조도 위치가 고려되었다. 각 성분 별로 살펴 보면 한 점에서의 난류통계량에서 구한 결과와 마찬가지로 각 위치에서의 상대 오차의 변화가 1% 미만인 영역을 속도 성분에 따라 구해 보면 roughness sublayer의 높이가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있는데  $R_{uu}$ 의 경우 표면조도의 아주 가까운 위치에서 표면조도의 위치에 상관없이 모든 분포가 잘 일치하는 경향을 나타낸다. 반면에  $R_{vv}$ 의 경우는 주 유동 방향과는 달리 벽면에서 더 멀리 떨어진 지점에서 모든 분포가 일치하는 것을 볼 수 있다. 여기서 나타내지 않았지만 횡 방향 성분 ( $R_{ww}$ )도  $R_{vv}$ 와 동일한 결과를 나타내었다. 즉,  $R_{uu}$ 는  $y^+ > 30$ 에서 주 유동 방향의 위치에 상관없이 일치된 분포를 보여주는 반면,  $R_{vv}, R_{ww}$ 는  $y^+ > 50$ 에서 하나의 곡선으로 겹쳐짐을 확인할 수 있다. 이는 공간상의 상관계수를 기준으로 하여

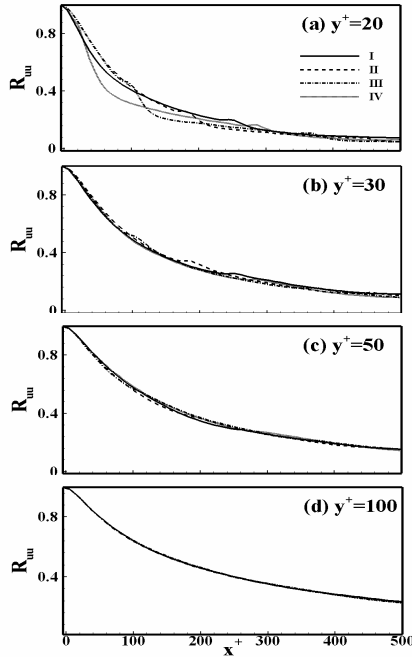


Fig. 4 Two-point correlations of streamwise velocity at various locations

roughness sublayer의 높이를 정의할 때 속도 성분의 종류에 따라 roughness sublayer의 높이가 다르게 나타나는 것을 보여준다. 이전의 연구 결과인 한 점에서의 난류통계량에 의해 정의된 roughness sublayer의 높이와 비교해 보면 난류구조의 관점에서 정의된 roughness sublayer( $0 < y^+ \leq 100$ )의 높이가 벽면에 더 가까이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이는 표면조도에 의해 벽면 근처의 난류구조보다 난류통계량들이 벽면에 수직인 방향으로 더 높게 영향을 받는다는 것을 뜻한다.

### 3.3 조건부 평균된 유동장

본 절에서는 roughness sublayer 내·외부에서 발생하는 표면조도에 의한 Reynolds 전단응력의 변화를 유동 구조의 관점에서 살펴 보기 위해서 Reynolds 전단응력에 가장 크게 기여하는 이벤트를 조건으로 삼아 조건부 평균된 유동장을 조사하였다.

#### 3.3.1 Linear stochastic estimation

임의의 조건하에서 조건부 평균된 유동장을 얻기 위해서는 많은 순간 유동장의 데이터가 필요하다. 표면 조도가 있는 난류경계층의 경우 벽면 근처에서 표면 조도에 의한 간섭(disturbance)이 불규칙적으로 강하게 발생하기 때문에 충분히 수렴된 조건부 유동장을 얻기 위해서는 더욱 많은 순간 유동장이 필요하게 된다. 특히 조건부 유동장을 얻기 위해 필요한 조건의 차원(dimension)이 높아지면 우리가 원하는 조건을 만족하는 유동장을 얻기가 더욱 어려워진다. 따라서 본 연구에서는

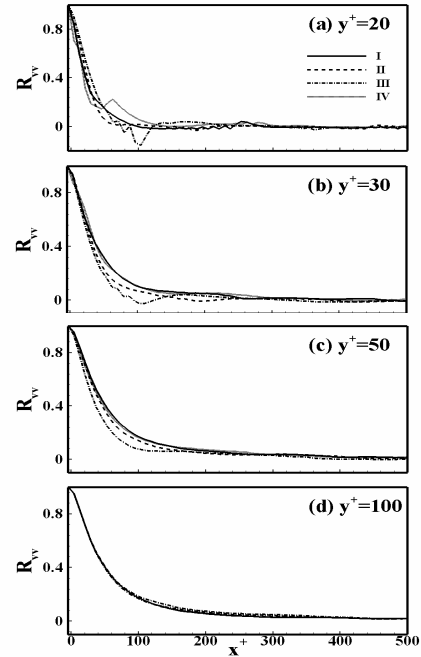


Fig. 5 Two-point correlation of wall-normal velocity at various locations

Linear stochastic estimation<sup>(18)</sup>을 사용하여 조건부 평균된 유동장을 얻기로 한다.

일반적으로 조건부 평균 유동장은 다음과 같이 표현된다.

$$\langle g(x') | E_1(x_1), E_2(x_2), \dots, E_N(x_N) \rangle \quad (4)$$

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

$$\langle g_i | E \rangle = L_{il} E_l + N_{ilm} E_l E_m + \dots \quad (5)$$

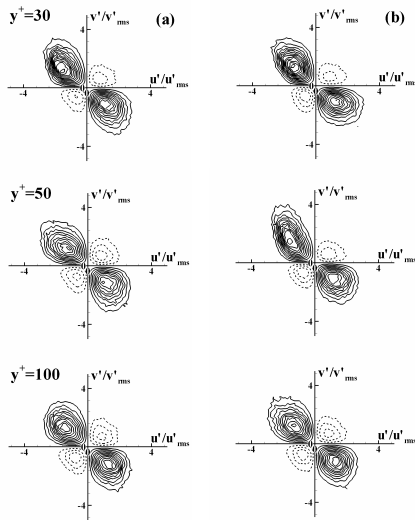
미지수인  $L, N, \dots$ 은 실제 조건부 평균 값과 근사화된 값 사이의 평균제곱오차가 최소가 되도록 하면 구해 질 수 있다. 고차항의 영향이 무시할만하다고 가정하면 선형적 근사의 경우 오직 첫째 항만 남으므로 다음과 같은  $L_{il}$ 에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$\langle E_m(x_m) E_l(x_l) \rangle L_{il} = \langle g_i(x') E_m(x_m) \rangle \quad (6)$$

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

#### 3.3.2 조건부 평균된 유동장

벽 근처의 와 구조는 Reynolds 전단응력의 발생과 깊은 관련이 있다고 잘 알려져 있다.<sup>(19)</sup> 따라서 roughness sublayer 바깥영역에서 표면조도에 의한 Reynolds 전단응력의 영향을 살펴 보기 위해서는 Reynolds 전단응력과 깊은 관련이 있는 벽 근처의



**Fig. 6** Contours of probability weighted Reynolds shear stress,  $-u'v'f_u(u',v')$ , (a) III, (b) IV locations

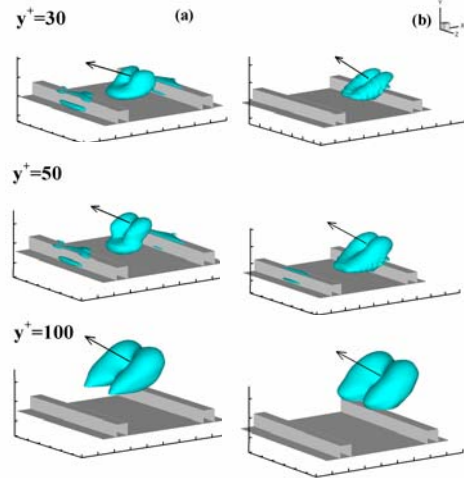
와 구조를 조사해 보아야 한다. 난류 채널 유동에서 Adrian 등<sup>(20)</sup> 과 Kim 등<sup>(21)</sup> 은 Reynolds 전단응력에 가장 크게 기여를 하는 조건을 사용하여 벽 근처의 와 구조에 대한 연구를 진행한 바 있다.

Fig. 6 은 표면조도의 위치 III, IV 에서 벽 수직 방향의 위치에 따라 Reynolds 전단 응력이 곱해진  $(u',v')$  의 joint weighted probability density function 분포를 나타내고 있다.

$$\iint -u'v'f_u(u',v')du'dv' = \overline{-u'v'} \quad (7)$$

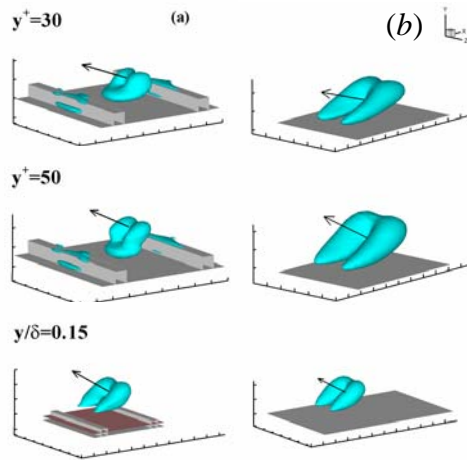
식 (7)에 의해서 우변의 Reynolds 전단 응력에 가장 크게 기여를 하는 이벤트는 좌변의 적분인자  $-u'v'f_u(u',v')$  를 최대로 하는 것이므로 벽 수직 방향의 각 위치에서의 contour 의 피크 위치에 해당하는  $(u',v')$  값이 Reynolds 전단 응력에 가장 크게 기여를 하게 된다. Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 표면조도가 있는 난류경계층의 경우 표면조도가 없는 경계층과 비슷하게 Q2/Q4 event 가 강하게 발생하고 Q1/Q3 event 는 음의 값을 가지면서 훨씬 약하게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7-8 은 서로 다른  $y$  위치에서 조건부 평균 유동장의 와 구조를 나타낸다. 와 구조는 속도구배 텐서의 고유치로부터 정의되는 swirling strength,  $\lambda_{ci}$  를 사용하여 가시화하였다.  $\lambda_{ci}$  는 속도 구배 텐서의 복소 고유치 중 허수 부분을 의미하며 평균 속도 구배에 의한 와도 성분을 배제한 vortical core 부분만을 추출할 수 있는 효과적인 방법으로 많은 연구에서 사용 되고 있다.<sup>(22-23)</sup> Fig. 7 은 표면조도의 위치 III, IV에서 표면조도에 의한 유동 구조의 변화를 살펴 보고자 Fig. 6 에서 제시한 조건을



**Fig. 7** Vortical structures associated with Q2 event at (a) III and (b) IV locations. The distance between ticks on each axis is 50 wall units

사용하여 Q2 event에 가장 크게 기여를 하는 와 구조의 변화를 벽면 수직 방향의 높이에 따라 나타내고 있다. 표면조도 근처에서 평균속도구배 (mean velocity gradient)에 의한 영향을 배제하기 위해 속도의 섭동 성분만을 고려한 swirling strength 를 나타내었으며 벽 수직 방향의 각 위치에서 swirling strength 최대치의 30% 에 해당하는 iso-surface를 나타내었다. 앞에서 구한 2 점 상관 계수의 결과와 마찬가지로  $y^+ = 50$  까지는 표면조도의 위치에 따라 와 구조의 차이가 발생하는 것을 볼 수 있지만  $y^+ = 100$  이상에서는 와 구조의 차이가 발생하지 않는 것을 알 수 있다. Roughness sublayer 내부에서의 난류구조의 변화를 살펴 보면 표면조도에 가까운 위치 IV에서는 표면조도의 직접적인 영향에 의해 Q2 event와 관련된 난류구조의 각도가 위치 III에서보다 더 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. Lee & Sung<sup>(10)</sup> 은 벽 수직 방향의 velocity triple product를 사용하여 위치 IV에서 벽 수직 방향의 강한 양의 피크가 발생함을 보여 주었으며 이는 표면조도의 영향에 의한 유출 (ejection)이 더 크게 발생하는 것을 의미한다. 그리고 roughness sublayer 내부에서 표면조도의 위치에 따라 주 유동 방향과 횡 방향의 길이 스케일의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 roughness sublayer 바깥 영역인  $y^+ = 100$  이상에서는 더 이상의 스케일 차이가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8 은 표면조도에 의한 난류경계층의 유동 변화를 표면조도가 없는 경우와 비교하기 위해 (a) 표면조도의 위치 III과 (b) 표면조도가 없는 경계층에서의 Q2 event의 Reynolds 전단응력에 가장 크게 기여를 하는 난류구조를 나



**Fig. 8** Vortical structures associated with Q2 event in the (a) rough wall boundary layer (at III location) and (b) smooth wall boundary layer. The distance between ticks on each axis is 50 wall units for  $y^+ = 30$  and 50 whereas it is  $0.1\delta$  for  $y/\delta = 0.15$

타내고 있다. Q4 event도 동일한 결과를 나타내므로 여기서 생략하였다. 표면조도가 없는 난류경계층의 경우 벽면 근처에서 Reynolds 전단응력에 가장 크게 기여를 하는 구조는 counter-rotating pair of streamwise vortices이며 벽면으로부터의 거리가 멀어지면서 hairpin structure가 가장 크게 Reynolds 전단응력에 기여를 하게 된다. 표면조도가 있는 난류경계층의 경우,  $y^+ = 30, 50$ 의 roughness sublayer에서는 표면조도의 영향에 의해 주 유동 방향의 길이 척도가 줄어들고 또한 난류구조가 벽면과 이루는 각도가 표면조도가 없는 경우에 비해서 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 이것은 Krogstad 등<sup>(24)</sup>과 Vesely 등<sup>(25)</sup>의 결과와 일치하는 결과이다. 반면에 outer scale로 무차원화한 roughness sublayer 바깥영역에서는 두 구조가 가지는 특성의 차이가 존재하지 않는다.  $y/\delta = 0.15$ 는 표면조도가 있는 경계층의  $y^+ = 100$ 에 해당한다.  $y/\delta = 0.15$ 에서 볼 수 있듯이 세 방향의 길이 스케일이 모두 동일하며 벽면과 이루는 각도 또한 큰 차이를 보이지 않는다. 이것은 표면조도의 유무에 관계없이 roughness sublayer 바깥영역에서 기하학적 형태가 동일한 난류구조가 존재하는 것을 뜻하며 이 영역에서의 Reynolds 전단응력이 발생하는 메커니즘은 표면조도로 인해 큰 영향을 받지 않음을 유추할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 roughness sublayer 바깥영역에서 난류통계량의 종류에 따라 서로 다르게 나타나는 표면조도의 영향을 조사하기 위해서 rod-roughness가 존재하며 공간 발달하는 난류경계층의 직접 수치모사 데이터를 사용하여 벽면 근처에서의 난류구조의 변화를 조사하였다. 2 차원의 표면조도는 주 유동 방향으로 규칙적으로 배열 되었으며 표면조도의 크기는 난류경계층 두께의 1/20을 사용하였다. 표면조도가 없는 난류경계층과 비교하기 위해 레이놀즈 수가  $Re_\delta = 9000$ 인 구간에서 난류구조를 서로 비교하였으며 유동이 처음 표면조도를 만나 발생하는 영향을 배제하기 위해 충분히 수렴한 구간에서의 데이터를 사용하였다.

난류통계량의 변화에 영향을 미치는 난류구조를 파악하기 위해 Reynolds 전단 응력에 가장 크게 기여를 하는 Q2와 Q4 event의 조건을 사용하여 조건부 평균된 유동장을 조사하였다. 표면조도의 위치에 따라 roughness sublayer 내부에서는 표면조도의 영향으로 인한 난류와 구조의 차이가 나타나지만 roughness sublayer 바깥영역에서는 난류와 구조의 길이 스케일과 속도 벡터 성분에서 큰 차이를 발견하지 못하였다. 이러한 결과는 벽 수직 방향의 높이에 따른 상관계수의 변화와도 일관됨을 확인하였다. 또한, 표면조도의 존재 유무에 따라 Reynolds 전단 응력이 roughness sublayer 바깥영역에서 차이를 보임에도 불구하고, Reynolds 전단 응력의 생성과 밀접한 관련이 있는 난류와 구조는 표면조도의 존재 유무와 관계없이 유사하게 관찰되었다. 이는 본 연구에서 사용된 레이놀즈 수와 무차원 변수가 Lee & Sung<sup>(10)</sup>에서 Reynolds 전단 응력을 나타내기 위해 사용한 것과 차이가 나기 때문으로 생각된다. 이러한 결과는 난류경계층의 log layer ( $y/\delta = 0.15$ )에서 Reynolds 전단 응력의 생성 메커니즘은 표면조도로 인해 크게 변화하지 않음을 시사한다.

#### 후기

본 연구는 2007년 정보(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받은 특정기초연구(No. R01-2004-000-10521-0) 및 도약연구지원사업(No. R17-2007-055-01000-0)의 지원으로 수행되었으며, 또한 한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨터센터(KSC-2007-S00-1017)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Raupach, M. R., Antonia, R. A. & Bajagopalan, S., 1991, "Rough-Wall Turbulent Boundary Layers," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 44, pp. 1~25.
- (2) Townsend, A. A., 1976, "The Structure of Turbulent Shear Flow," Cambridge University Press
- (3) Perry, A. E., Lim, K. L. & Henbest, S. M., 1987, "an Experimental Study of The Turbulence Structure in Smooth- and Rough-Wall Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 177, pp. 437~466.
- (4) Flack, K. A., Schultz, M. P. & Shapiro, T. A., 2005, "Experimental Support for Townsend's Reynolds Number Similarity," *Phys. Fluids*, Vol. 17, 035102.
- (5) Schultz, M. P. & Flack, K. A., 2007, "The Rough-Wall Turbulent Boundary Layer from The Hydraulically Smooth to the Fully Rough Regime," *J. Fluid Mech.*, Vol. 580, pp. 381~405.
- (6) Krogstad, P. -Å., Antonia, R. A. & Browne, L. W. B., 1992, "Comparison Between Rough- and Smooth-Wall Turbulent Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 245, pp. 599~617.
- (7) Krogstad, P. -Å. & Antonia, R. A., 1999, "Surface Roughness Effects in Turbulent Boundary Layers," *Exp. Fluids*, Vol. 27, pp. 450~460.
- (8) Mazouz, A., Labraga, L. & Tournier, C., 1998, "Anisotropic Invariants of Reynolds Stress Tensor in A Duct Flow and Turbulent Boundary Layer," *J. Fluids Eng.*, Vol. 120, pp. 280~284.
- (9) Tachie, M. F., Bergstrom, D. J. & Balachandar, R., 2000, "Rough Wall Turbulent Boundary Layers in Shallow Open Channel Flow," *J. Fluids Eng.*, Vol. 122, pp. 533~541.
- (10) Lee, S. -H. & Sung, H. J., 2007, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Boundary Layer Over a Rod-Roughened Wall," *J. Fluid Mech.*, Vol. 584, pp. 125~146.
- (11) Bhaganagar, Kiran., Coleman, Gary. & Kim, John., 2004, "Effect of Roughness on Wall-Bounded Turbulence," *Flow; Turbul. Combust.*, Vol. 72, pp. 463~492.
- (12) Bhaganagar, Kiran., Coleman, Gary. & Kim, John., 2007, "Effect of Roughness on Pressure Fluctuations in a Turbulent Channel Flow," *Phys. Fluids*, Vol. 19, 028103.
- (13) Kim, K., Baek, S. -J. & Sung, H. J., 2002, "an Implicit Velocity Decoupling Procedure for The Incompressible Navier-Stokes Equations," *Int. J. Numer. Meth. Fl.*, Vol. 38, pp. 125~138.
- (14) Kim, J., Kim, D. & Choi, H., 2001, "an Immersed Boundary Finite-Volume Method of Simulations of Flow In Complex Geometries," *J. Comput. Phys.*, Vol. 171, Pp. 132~150
- (15) Lund, T. S., Wu, X. & Squires, K. D., 1998, "Generation of Turbulent Inflow Data for Spatially-Developing Boundary Layer Simulation," *J. Comput. Phys.*, Vol. 140, pp. 233~258.
- (16) Bakken, O. M., Krogstad, P. -Å., Ashrafian, A. & Andersson, I., 2005, "Reynolds Number Effects in the Outer Layer of The Turbulent Flow in a Channel With Rough Walls," *Phys. Fluids*, Vol. 17, 065101.
- (17) Ashrafian, A., Andersson, H. I. & Manhart, M., 2004, "DNS of Turbulent Flow in a Rod-Roughened Channel," *Intl. J. Heat Fluid Flow.*, Vol. 25, pp. 373~383.
- (18) Adrian, R. J., "Stochastic Estimation of the Structure of Turbulent Files. in Eddy Structure Identification (Ed. J. P. Bonnet)," *Springer*, pp. 145~196.
- (19) Robinson, S. K., 1991, "Coherent Motions in the Turbulent Boundary Layer," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 601~639.
- (20) Adrian, R. J., Jones, B. G., Chung, M. K., Hasson, Yassin., Nithianandan, C. K. and Tung, A. T. -C., 1989, "Approximation of Turbulent Conditional Averages by Stochastic Estimation," *Phys. Fluids*, Vol. 1, pp. 992~998.
- (21) Kim, K., Li, C. -F., Sureshkumar, R., Balachandar, S. & Adrian, R. J., 2007, "Effects of Polymer Stresses on Eddy Structures in Drag-Reduced Turbulent Channel Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 584, pp. 281~299.
- (22) Zhou, J., Adrian, R. J., Balachandar, S. & Kendall, T. M., 1999, "Mechanism for Generating Coherent Packets of Hairpin Vortices," *J. Fluid Mech.* 387, 353~396.
- (23) Chakraborty, P., Balachandar, S. & Adrian, R. J., 2005, "on The Relationships Between Local Vortex Identification Schemes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 535, pp. 189~214.
- (24) Krogstad, P. -Å. & Antonia, R. A., 1994, "Structure of Turbulent Boundary Layers on Smooth and Rough Walls," *J. Fluid Mech.*, Vol. 277, pp. 1~21.
- (25) Vesely, L., Haigermoser, C., Lavecchia, M. & Onorato, M., 2007, "Turbulent Boundary Layers on Rough Walls: PIV Studies," *In Proc 2007 7th International Symposium Particle Image Velocimetry*, Sep.11-14, Roma.