

2차원 표면조도가 있는 난류 평면 Couette-Poiseuille 유동에 대한 직접수치모사

김정현 · 이영모 · 이재화[†]

Turbulent plane Couette-Poiseuille flow over a 2-D rod-roughened wall

Jeong Hyun Kim, Young Mo Lee and Jae Hwa Lee[†]

Abstract Direct numerical simulation of a fully developed turbulent plane Couette-Poiseuille flow with a two-dimensional (2-D) rod-roughened wall is performed to investigate the impacts of the surface roughness. It is shown that the logarithmic region in the mean velocity profile over the rough wall Couette-Poiseuille flow is significantly shortened by the surface roughness compared to that over a turbulent Couette-Poiseuille flow with smooth wall. The Reynolds shear stress over the rough wall Couette-Poiseuille flow is decreased compared to that for a smooth case in the outer layer. These results are attributed to weakened turbulence activity or roll-cell mode over the rough wall Couette-Poiseuille flow near the channel centerline due to suppressed development of u' -structure on the top wall, as documented through spanwise energy spectra of the streamwise velocity fluctuations. Inspection of congregation motion near the bottom wall and time evolution of u' -structure reveal weakened co-supporting cycle for the rough wall case.

Key Words : Couette-Poiseuille flow(Couette-Poiseuille유동), Roughness(표면조도), Large-scale motions (큰 난류구조), Co-supporting cycle(상보적 관계)

1. 서론

난류 Couette-Poiseuille 유동은 일상에서 흔히 볼 수 있는 유동이며 Poiseuille 유동에 비해 높은 확산 효율 및 낮은 저항을 가진다고 알려져 있다. 이러한 공학적 이점은 난류 Couette-Poiseuille에 대한 연구의 필요성을 대두시킨다. 그러나 표면조도가 존재하는 유동에 대한 실험적 환경은 구축하기 어려워 표면조도가 존재하는 Couette-

Poiseuille에 대한 연구는 많이 이루어져 있지 않다.

표면조도가 벽면 난류유동에 미치는 영향에 대한 연구는 오래 전부터 수행되어 왔으며, 대표적인 연구 주제는 Townsend의 가설의 성립유무이다. Townsend⁽¹⁾는 충분히 큰 레이놀즈 수의 유동에서 표면조도의 크기가 충분히 작을 때 표면조도에 대한 영향은 표면조도 주변의 roughness sublayer에 국한되며, 표면조도와 멀리 떨어진 바깥영역 (outer layer)에서는 표면조도에 의한 영향은 무시할 수 있다고 가정하였다. Townsend 가설의 성립 유무를 확인하기 위하여, Flack 등⁽²⁾은 3차원 불규칙한 형태의 표면조도에 대해 실험을 진행하였으며, 표면조도 높이와 무관하게 roughness

[†] Department of Mechanical Engineering, UNIST,
50 UNIST-gil, Bldg.112
E-mail: jhlee06@unist.ac.kr

sublayer의 높이는 표면조도 높이 (k)의 5배 또는 effective sand grain roughness (k_s)의 3배 이내로 제한된다고 보고하였다. 또한, Ashrafian & Andersson⁽³⁾는 평면 채널 유동에서 아랫 벽면과 윗 벽면에 2차원 막대 형태의 표면조도가 존재할 때, 바깥영역에서 레이놀즈 응력 및 비등방성 텐서의 변화가 존재하지 않는 것을 확인하여 Townsend의 가설의 성립을 지지하였다. 하지만, Bhaganagar 등⁽⁴⁾은 난류 채널 유동에서 아랫 벽면에 3차원 egg carton 형상의 표면조도가 존재할 때, 표면조도에 의한 영향이 바깥영역까지 존재하는 것을 확인하였다. 반면에, Aydin 등⁽⁵⁾은 평판 Couette 유동에서 아랫 벽면과 윗 벽면에 구형의 표면조도가 존재할 때 두 벽에서의 레이놀즈 응력이 표면조도가 없는 유동과 비교하여 상당한 차이를 보이는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 아랫 벽면에 존재하는 2차원 막대형 표면조도가 Couette-Poiseuille 유동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 직접수치모사 (direct numerical simulation)을 진행하였다. 특히, Couette-Poiseuille 유동 특성은 채널 중간에 존재하는 거대한난류구조 (very-large-scale motion)에 상당한 영향을 받는 것으로 알려져 있으므로⁽⁶⁾, 본 연구에서는 표면조도가 채널 중간 유동에 어떠한 영향을 미치는지에 초점을 맞춰 분석을 진행하였다. 먼저 주 유동 방향 평균 속도 분포, 레이놀즈 전단응력으로 대표되는 통계량 분석으로 표면조도가 존재하는 Couette-Poiseuille 유동의 특성을 확인하였다. 또한, 시간 평균된 난류 구조 및 pre-multiplied 에너지 스펙트럼 (energy spectra) 분석으로 채널 중간에 존재하는 거대한 난류구조의 특성을 분석하였다. 마지막으로, 응집 거동 (congregation motion) 및 주 유동 방향 섭동 성분에 대한 순간유동장 분석으로 표면조도가 벽면 및 바깥영역 난류구조의 상보적 관계 (co-supporting cycle)에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 수치적 방법

본 연구에서 사용된 비압축성 비정상 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

여기서 x_i 는 직교 좌표를 나타내고, \tilde{u}_i 는 각각의 속도 성분을 나타낸다. x, y, z 는 각각 주 유동방향, 벽면에 수직인 방향 그리고 횡 방향을 나타내며 $\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}$ 는 각 방향에 대한 속도를 의미한다. 벽면에서는 점착조건 (No-slip condition)을 경계조건으로 사용하였으며, 주 유동 방향과 횡 방향은 주기적 경계조건을 적용하였다. 모든 변수들은 층류중심 속도 (U_{co})와 채널 중간 높이 (h)로 무차원화 되었으며 Re 는 레이놀즈 수를 나타낸다. 지배방정식의 차분화는 속도항과 압력항을 분리하는 부분단계법을 이용하였으며, 분리된 모멘텀 방정식의 모든 항들을 Crank-Nicolson 방법을 사용하여 완전 내재적인 방법으로 시간과 공간을 차분하여 행렬식을 구성하였다⁽⁷⁾. 구성된 행렬식의 계수 행렬은 block LU decomposition을 이용하여 시간에 대하여 2차의 정확도를 유지하도록 분리하였으며, 모멘텀 방정식에 해당하는 행렬식의 계수행렬 또한 근사적인 block LU decomposition을 이용하여 내재적으로 결합된 대류항의 속도 성분을 차분하였다. 표면조도는 가상경계기법 (immersed boundary method)을 사용하여 직교 좌표계에서의 표면조도를 구현하였으며, discrete-time momentum forcing항인 f 를 시간에 대하여 외재적으로 계산하여 가상경계에 점착조건을 부여하였다. 레이놀즈 수 $Re=7200$ 에서 직접수치모사를 수행하였으며, 표면조도의 크기는 채널 절반 높이의 0.12배 ($k=0.12h$)로 구성하였다. 이때 표면조도는 주 유동방향으로 동일한 주기 ($\lambda=8k$)를 갖도록 구성하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 표면조도가 있는 평면 Couette-Poiseuille 유동의 개략도를 나타낸다. 계산영역 크기 (L_x, L_y, L_z)=($40 \pi h, 2h, 6 \pi h$), 격자수 (N_x, N_y, N_z)=(4096, 179, 1024)으로 공간 분해능은 ($\Delta x^+, \Delta y_{\min}^+, \Delta z^+$)=(8.2, 0.2, 5.2)이며, 시간 분해능은 $\Delta t=0.02$ 이다. Couette-Poiseuille 유동을 구현하기 위하여 아랫 벽면은 고정하였으며, 윗 벽면은 $\tilde{u}_M/U_{co}=1.3$ 로 이동하도록 하였다.

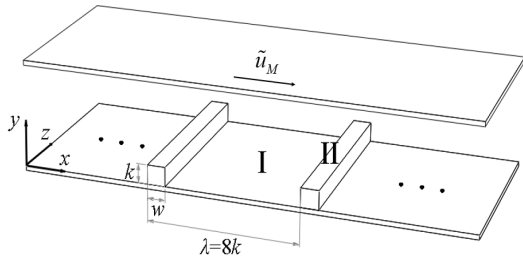


Fig. 1. Schematic of the present computational domain for turbulent plane Couette-Poiseuille flow with a 2-D rod-roughened wall.

주 유동 방향의 위치 변화에 따른 통계량을 비교하기 위하여 표면조도 간의 중간위치 (I)과 표면조도의 중앙위치 (II)를 따로 표기하였다. 아래 첨자 S 와 M 은 각각 아랫 벽면과 움직이는 윗 벽면을 의미하며, 윗 첨자 $+$ 는 아랫 벽면의 마찰 속도 (friction velocity)로 무차원화한 값을 나타낸다. 괄호 $\langle \cdot \rangle$ 와 $\langle \cdot \rangle_t$ 는 각각 공간-시간 평균과 시간 평균 통계량을 의미한다. U 는 주 유동 방향의 평균 속도를 나타내며, u' , v' , w' 는 각 방향에 대한 섭동 성분을 나타낸다.

3. 결과 및 토의

3.1 평균속도 및 레이놀즈 전단응력

Fig. 2(a)는 마찰 속도로 무차원화한 주 유동 방향의 평균 속도 분포를 나타낸다. 여기서 C-type과 CR-type은 각각 매끄러운 표면을 가진 Couette-Poiseuille 유동과 표면조도가 있는 Couette-Poiseuille 유동을 의미한다. 표면조도가 존재하는 유동의 원점으로 가상 원점 ($\varepsilon/k \approx 0.5$)을 도입하였으며⁽⁸⁾, 가상 원점으로부터의 벽면에 수직한 거리를 y' ($\Rightarrow y - \varepsilon$)로 나타내었다. C-type의 경우 낮은 레이놀즈 수임에도 불구하고 채널 중간 영역까지 상당히 긴 log-law 영역이 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나, CR-type은 아랫 벽면에서 나타나는 log-law가 C-type보다 훨씬 짧게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 표면조도에 의한 유동 저항 증가로 CR-type은 C-type보다 log-law 영역이 아랫방향으로 이동하는 것을 알 수 있다.

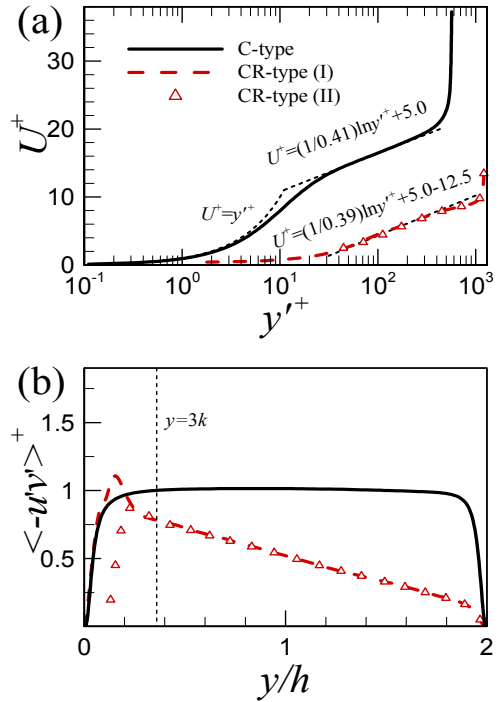


Fig. 2. (a) Mean streamwise velocity profiles and (b) Reynolds shear stress profiles normalized by the local friction velocity on the bottom wall. Dashed vertical line in (b) is marked to indicate the upper limit of the roughness sublayer ($y=3k$). Two streamwise locations (I and II) are considered to examine the streamwise variation of the profiles.

Fig. 2(b)는 레이놀즈 전단응력 분포를 나타낸다. C-type의 경우 레이놀즈 전단응력이 채널 중간 부분에서 큰 값을 가지며 거의 일정한 것을 확인할 수 있다. CR-type에서는 위치 (I)에서 측정된 레이놀즈 전단응력이 표면조도 근처에서 매우 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 주 유동 방향의 변화에 따른 레이놀즈 전단응력이 $y=3k$ 이상부터 일치하는 것을 확인할 수 있으며 이는 Bhaganagar 등⁽⁴⁾이 제시한 roughness sublayer의 높이와 동일하다. 바깥영역에서 전단응력이 C-type에 비해 크게 감소한 것을 확인할 수 있으며, 이는 표면조도가 존재하는 평면 채널 유동과 상반된 결과를 나타낸다⁽⁹⁾.

3.2 시간 평균 난류구조

C-와 CR-type에서 나타나는 레이놀즈 전단응력 변화를 분석하기 위하여 아랫 벽면의 마찰 속도 ($u_{\tau S}$)로 무차원화한 시간 평균된 $\langle u \rangle_t$ 를 Fig. 3에 나타내었다. 또한, 시간 평균된 $\langle v \rangle_t$ 와 $\langle w \rangle_t$ 를 사용하여 yz -평면에서 속도 벡터를 구성하였다. 이전 연구 결과⁽¹⁰⁾와 일치하게, C-type에서 거대 스케일을 갖는 high- and low-momentum 구조가 나타나는 것을 확인할 수 있다. high- and low-momentum 구조에 각각 대응하는 하강 및 상승 유동이 존재하며, 이러한 벡터장이 채널 전반에 걸쳐 쌍을 이루며 회전하는 roll-cell mode를 구성한다. CR-type에서도 동일한 양상이 관측되나 C-type에 비해 거대난류구조와 roll-cell mode의 세기가 매우 약화된 것을 확인할 수 있다. 또한, C-type에서는 high- and low-momentum 구조가 각각 윗 벽면과 아랫 벽면에 타워 (tower) 구조로 존재하나, CR-type은 high-momentum 구조가 윗 벽면으로부터 분리되어 존재한다. 앞선 연구를 통해 채널 중간 부분에 위치하는 거대 스케일 모멘텀 구조와 roll-cell mode가 레이놀즈 전

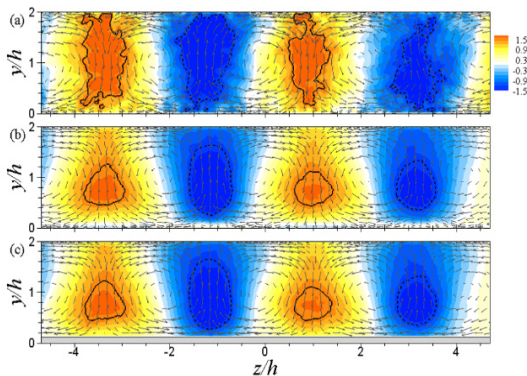


Fig. 3. Temporally averaged u' -structures ($\langle u \rangle_t / u_{\tau S}$) on the yz -plane: (a) C-type, (b) CR-type(I) and (c) CR-type(II). In each Fig., vectors are depicted by time averaged wall-normal ($\langle v \rangle_t / u_{\tau S}$) and spanwise velocities ($\langle w \rangle_t / u_{\tau S}$). Part of entire spanwise domain is presented. Line contours of $\langle u \rangle_t / u_{\tau S} = 1.5$ (solid lines) and -1.5 (dashed lines) are visible to highlight the strong u' -motions.

단응력의 생성에 중요한 역할을 하는 것이 알려져 있으므로⁽⁶⁾, 표면조도의 존재에 의해 약화된 거대 난류구조와 roll-cell mode로 인해 바깥영역의 레이놀즈 전단응력이 감소함을 알 수 있다.

3.3 Energy spectra

CR-type에서 약화된 거대 스케일의 모멘텀 난류구조 및 roll-cell mode의 원인을 심도 있게 분석하기 위하여 횡 방향 파장 (wavelength) 변화에 따른 주 유동 섭동 성분 에너지 스펙트럼을 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 one-sided 파수 스펙트럼 (Φ_{uu})은 횡 방향 파수 (k_z)에 의해 pre-multiplied 되어 나타내었다. 또한, 분석의 편의를 위해 새로운 수직 방향 좌표 (η)를 채널 중간을 기준으로 정의하였다.

$$\begin{aligned} \eta &= y \quad \text{where } 0 \leq y \leq h \\ \eta &= 2h - y \quad \text{where } h < y \leq 2h. \end{aligned} \quad (3)$$

Fig. 4(a)은 C-type의 에너지 스펙트럼을 나타낸다. 두 개의 안쪽 고점 (inner peak)들이 각각 아랫 벽면 및 윗 벽면에서 관측되며 이 고점들의 형태는 기존 난류 Poiseuille flow에서 관측되었던 안쪽 고점과 매우 유사한 것을 알 수 있다⁽¹¹⁾. C-type에서 가장 눈에 띄는 부분은 채널 중간에서 파장 $\lambda_z/h=4.6$ 를 갖는 바깥 고점 (outer peak)의 발생이다. 이러한 바깥 고점의 존재는 C-type에서 큰 에너지를 가지는 거대규모의 난류구조가 채널 중간에 존재함을 의미한다. C-type과 비교하여, CR-type의 경우 (Fig. 4b) 아랫 벽면 근처 안쪽 고점의 세기가 상당히 약화된 것을 확인할 수 있으며, 이것은 표면조도에 의한 주 유동 방향 와류 (streamwise vortices)의 억제에 의해 나타난다⁽¹²⁾. 특히, CR-type의 윗 벽면 근처 안쪽 고점은 C-type과 비교하였을 때 거의 존재하지 않는 것을 확인할 수 있으며, 표면조도에 의한 영향이 윗 벽면에서의 주 유동 방향 난류구조 발달을 완전히 억제함을 의미한다. Kim & Lee⁽¹³⁾는 C-type의 채널 중간 영역에 존재하는 상당히 큰 레이놀즈 응력이 아랫 벽면 및 윗 벽면 근처의 난류구조가 각각 반대쪽 벽으로 발달

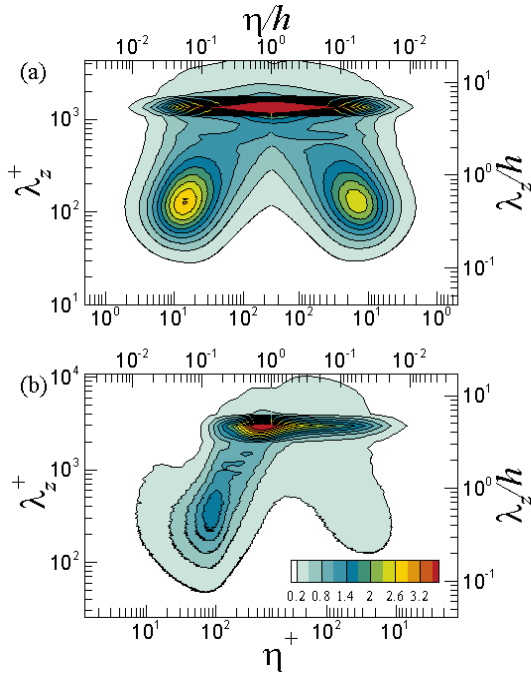


Fig. 4. Pre-multiplied 2-D spanwise energy spectra of the streamwise velocity fluctuations ($k_z \Phi_{uu}/u \tau_s^2$): (a) C-type and (b) CR-type. The contour level for all types is shown in (b).

하기에 나타난다고 보고하였다. 따라서, CR-type에서 억제된 윗 벽면 근처 난류구조는 채널 중간 부분에서 약화된 큰 스케일 난류구조를 형성하며, 이에 따라 채널 중심 부분에서 약화된 레이놀즈 전단응력을 야기함을 알 수 있다.

3.4 Congregation motion

바깥 영역에 존재하는 큰 (large) 또는 거대 (very-large) 스케일의 난류구조와 벽면 근처에 존재하는 작은 스케일 난류구조는 난류 채널유동에서 상보적 관계 (co-supporting cycle)를 가진다고 알려져 있다. Toh & Itano⁽¹⁴⁾는 바깥영역에 존재하는 거대 스케일의 roll-cell mode에 의해 벽면 근처 작은 스케일 난류 구조에 횡 방향의 순환 (circulation)이 유도되며, 작은 스케일 난류구조의 횡 방향 응집 거동 (congregation motion)을 유발한다고 설명하였다. Hwang 등⁽¹⁵⁾은 벽면 근처의 작은 스케일 난류구조의 응집 및 상승

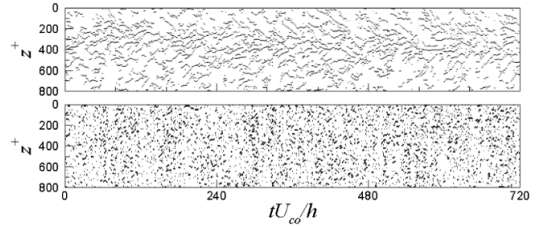


Fig. 5. The time evolution of the spanwise location of low speed u' for C-(top) and CR-type (bottom) at $y^+=5$.

(eruption)이 거대난류구조 형성에 기여하는 것을 순간유동장 및 조건부 평균을 통해 확인하였다. 형성된 거대난류구조는 roll-cell mode를 유지 및 강화시키는 역할을 한다. Lee 등⁽¹⁶⁾은 채널 유동에서 단순화된 헤어핀 구조를 적합직교분해 (proper orthogonal decomposition)를 통해 얻어진 배열로 나열했을 때 로그 영역에서 roll-cell과 매우 유사한 유동이 발생하는 것을 확인하였다. 즉, 채널 유동에 존재하는 거대난류구조가 roll-cell mode와 운동학적 (kinematics) 연관이 있음을 밝혀내었다. 본 연구에서는 벽면에 존재하는 작은 스케일 난류구조의 응집 거동 및 바깥영역에 존재하는 거대 스케일 난류구조에 대한 순간유동장을 통해 C-type에서 상보적 관계가 존재함을 확인하고, 표면조도에 의한 상보적 관계 변화에 대해 살펴보았다.

Fig. 5는 아랫 벽면 근처 ($y^+=5$)에서 관측한 작은 스케일 난류구조의 응집 거동을 나타낸다. 응집 거동은 다음과 같이 $u' < 0$ 을 만족하는 작은 스케일 난류구조의 국소 최저점 (local minima)이 횡 방향으로 시간 (t)에 따라 이동하는 것으로 정의하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u'^{2D}}{\partial z}(t, y, z) &= 0, \quad \frac{\partial^2 u'^{2D}}{\partial z^2}(t, y, z) > 0, \\ |u'^{2D}(t, y, z)| &> 0.1U(y), \end{aligned} \quad (4)$$

where $u'^{2D}(t, y, z) = \frac{1}{L'_x} \int_0^{L'_x} u'^{2D}(t, x, y, z) dx$
and $L'_x \approx 3h$

C-type의 경우 연속된 응집 거동으로 인한 맥 (branch)이 형성되는 것을 확인할 수 있으며 또

한, $z^+ \approx 350$ 부근으로 맥이 합쳐지는 것을 확인할 수 있다. 합쳐진 맥은 횡 방향 위치를 유지하며 매우 긴 시간동안 지속됨을 알 수 있으며, C-type에서 응집 거동이 매우 활발히 일어남을 알 수 있다. 이는 fig. 3에서 나타나는 roll-cell mode에 의해 나타나는 결과이다. CR-type에서는 C-type과는 다르게 뚜렷한 형태의 응집 거동이 발견되지 않으며 이는 CR-type에서 표면조도의 영향으로 인하여 응집 거동이 영향을 받으며, 주 유동 방향을 따라 흘러가는 응집 거동이 표면조도에 의해 물리적으로 차단되고 있음을 의미한다.

3.5 Instantaneous streamwise fluctuations

약화된 응집 거동이 거대난류구조 형성에 주는 영향을 살펴보기 위하여 yz -평면에서 시간에 따른 순간유동장을 fig. 6에 나타내었다. C-type에서 아랫 벽면에 존재하는 강한 섭동 성분이 시간이 지남에 따라 응집하는 것을 확인할 수 있다. 응집 성분은 $z/h=0$ 부근에서 점차 스케일이 커지면서 fig. 3(a)에서 관측되었던 타워 구조를 형성한다. 형성된 타워 구조는 앞서 언급했던

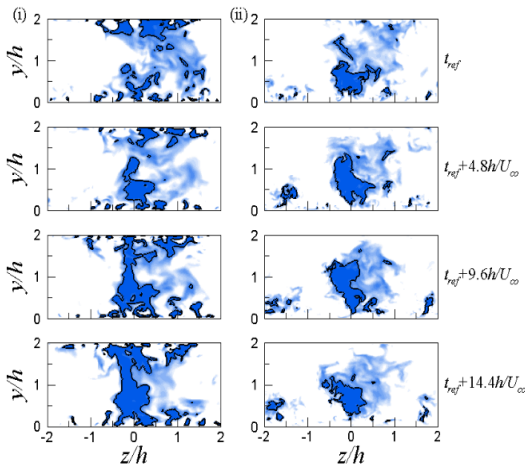


Fig. 6. The instantaneous low speed $u'/u_{\tau S}$ fields for C-(left) and CR-type(right) in yz -plane. Color contour represent the $u'/u_{\tau S}$ of -3.4 to -1.0 with the increments of 0.2. Black solid lines indicate strong fluctuations with the value of $u'/u_{\tau S}=-3.0$.

상보적 관계에 따라 거대난류구조를 유지 및 강화시킨다. Lee 등⁽¹⁶⁾의 결과에 따라, 거대난류구조의 순수 kinematics에 의해 roll-cell mode가 형성되므로 C-type에서 벽면 근처 작은 스케일 난류구조와 채널 중간에 존재하는 거대 스케일의 구조가 기존 채널 연구들^(14,15)에서 관측되었던 상보적 관계를 형성하고 있음을 알 수 있다. CR-type에서는 벽면 근처 작은 스케일 난류구조의 횡 방향 응집이 약해지는 것을 알 수 있다. CR-type에서는 약화된 응집 거동으로 인하여 전반적인 상보적 관계가 약화되며, 약화된 상보적 관계로 인하여 채널 중간 부분에 존재하는 거대 난류구조 및 roll-cell mode의 세기가 약해지는 것을 알 수 있다. 그 결과, 바깥영역에서 레이놀즈 전단응력의 감소가 나타난다.

4. 결론

본 연구에서는 난류 평면 Couette-Poiseuille 유동에서 2차원 막대형 표면조도가 미치는 영향을 살펴보았다. 2차원 막대형 표면조도가 있는 Couette-Poiseuille 유동은 표면조도가 없는 Couette-Poiseuille 유동보다 짧은 log-law가 나타났으며, 레이놀즈 응력 분포를 통해 표면조도가 있는 Couette-Poiseuille 유동은 바깥영역에서 표면조도가 없는 Couette-Poiseuille 유동보다 레이놀즈 응력이 감소함을 확인할 수 있었다. C-type에서는 high- and low- momentum 구조가 타워 구조를 이루며 채널 전반에서 거대한 roll-cell mode가 형성었으나, CR-type에서 채널 중앙에 존재하는 거대난류구조 및 roll-cell mode가 약화되었음을 확인하였다. 약화된 거대난류구조 및 roll-cell mode의 원인을 파악하기 위하여 pre-multiplied 에너지 스펙트럼을 분석하였으며, 표면조도가 있는 Couette-Poiseuille 유동에서 윗 벽면에 존재하는 난류구조가 억제되었으며, 이에 따라 바깥영역에서 약화된 거대난류구조를 형성함을 알 수 있었다. 거대난류구조 및 작은 스케일 난류구조와의 상보적 관계에 표면조도가 미치는 영향을 파악하기 위하여 시간에 따른 응집거동 및 yz -평면에서의 순간유동장을 분석하였으며, 매끈한 표

면을 갖는 Couette-Poiseuille 유동에서는 기존 채널 유동에서 보고되었던 상보적 관계가 존재함을 확인하였다. 그러나, 표면조도가 있는 Couette-Poiseuille 유동에서는 표면조도에 의해 아랫 벽면 근처의 응집 거동이 물리적으로 차단되었으며, 이로 인해 약화된 상보적 관계가 유도됨을 확인하였다. 약화된 상보적 관계는 바깥영역에서 약화된 거대난류구조를 유발하였고, 이는 바깥영역에서의 감소된 레이놀즈 전단응력을 나타내었다.

후 기

본 연구는 2019년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다 (2019R1A2C1083858).

REFERENCE

- 1) Townsend, A. A., 1976, *The structure of turbulent shear flow*, Cambridge University Press.
- 2) Flack, K. A., Schultz, M. P. and Connelly, J. S., 2007, "Examination of a critical roughness height for outer layer similarity," *Phys. Fluids*, Vol.19, 095104.
- 3) Ashrafian, A. and Andersson, H. I., 2006, "The structure of turbulence in a rod-roughened channel," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol.27, pp.65~79.
- 4) Bhaganagar, K., Kim, J., and Coleman, G., 2004, "Effect of roughness on wall-bounded turbulence," *Flow, Turbul. Combust.*, Vol.72, pp.463~492.
- 5) Aydin, E. M., and Leutheusser, H. J., 1991, "Plane-Couette flow between smooth and rough walls," *Experiments in Fluids*, Vol.11, pp. 302~312.
- 6) Avsarkisov, V., Hoyas, S., Oberlack, M., and Garcia-Galache, J. P., 2014, "Turbulent plane Couette flow at moderately high Reynolds number," *J. Fluid Mech.*, Vol.751, pp.534~563.
- 7) Kim, K., Baek, S. -J., and Sung, H. J., 2002, "An implicit velocity decoupling procedure for the incompressible Navier-Stokes equations," *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, Vol.38, pp.125~138.
- 8) Jackson, P. S., 1981, "On the displacement height in the logarithmic profiles," *J. Fluid Mech.*, Vol. 111, pp.15~25.
- 9) Lee, Y. M., Kim, J. H., and Lee, J. H., 2018, "Direct numerical simulation of a turbulent Couette-Poiseuille flow with a rod-roughened wall," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol.72, pp.288~303.
- 10) Pirozzoli, S., Bernardini, M., and Orlandi, P., 2011, "Large-scale motions and inner/outer layer interactions in turbulent Couette-Poiseuille flows," *Phys. Fluids*, Vol.30, 105101.
- 11) Del Álamo, J. C., Jiménez, J., Zandonade, P., and Moser, R. D., 2004, "Scaling of the energy spectra of turbulent channels," *J. Fluid Mech.*, Vol.500, pp.135~144.
- 12) Schultz, M. P., and 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.
- 13) Kim, J. H., and Lee, J. H., 2018, "Direct numerical simulation of a turbulent Couette-Poiseuille flow: Turbulent statistics," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol.72, pp.288~303.
- 14) Toh, S., and Itano, T., 2005, "Interaction between a large-scale structure and near-wall structures in channel flow," *J. Fluid. Mech.*, Vol. 524, pp.249~262.
- 15) Hwang, J., Lee, J., Sung, H. J., and Zaki, T. A., 2016, "Inner-outer interactions of large-scale structures in turbulent channel flow," *J. Fluid. Mech.*, Vol. 790, pp.128~157.
- 16) Lee, J. H., Sung, H. J., and Adrian, R. J., 2019, "Space-time formation of very-large-scale motions in turbulent pipe flow," *J. Fluid. Mech.*, Vol.881, pp.1010~1047.