

난류채널유동에서 움직이는 벽면에 대한 수치연구

황준혁 · 이재화[†]

Numerical Investigation of the Moving Wall Effects in Turbulent Channel Flows

Jun Hyuk Hwang and Jae Hwa Lee[†]

Abstract Direct numerical simulations of turbulent channel flows with moving wall conditions on the top wall are performed to examine the effects of the moving wall on the turbulent characteristics. The moving wall velocity only applied to the top wall with the opposite direction to the main flow is systematically varied to reveal the sustained-mechanism for turbulence. The turbulence statistics for the Couette-Poiseuille flow, such as mean velocity, root mean square of the velocity fluctuations, Reynolds shear stress and pre-multiplied energy spectra of the velocity fluctuations, are compared with those of canonical turbulent channel flows. The comparison suggests that although the turbulent activity on the top wall increases with increasing the Reynolds number, that on the bottom wall decreases, contrary to the previous finding for the canonical turbulent channel flows. The increase of the turbulent energy on the top wall is attributed to not only the increase of the Reynolds number but also elongation of the logarithmic layer due to increase of the wall layer on the top wall. However, because the logarithmic layer is shortened on the bottom wall due to the decrease of the wall layer, the turbulence energy on the bottom wall decreases despite of the increase of the Reynolds number.

Key Words : Turbulent channel flow(난류채널유동), Direct numerical simulation(직접수치모사)

1. 서론

난류채널유동은 기하적 형상과 경계조건이 간단하여 실험적 방법 또는 수치적 방법을 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다 (Lee & Moser 2015; Chin et al. 2014). 그 동안 수치적 방법은 상대적으로 낮은 레이놀즈 수에서 연구가 많이 이루어졌으나, 최근 컴퓨터 성능이 향상되면서 높은 레

이놀즈 수의 난류채널유동에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다 (Hoyas & Jimenez 2006; Bernardini et al. 2014; Lee & Moser 2015). Lee & Moser (2015)는 레이놀즈 수가 증가할 때, 평균속도분포에서 로그영역이 확대되고, 벽면 난류강도가 연속적으로 증가한다고 보고하였다.

평면 Couette 유동은 난류채널유동에 비해 큰 난류에너지에 의해 에너지 확산이 더 활발하게 발생하며, 항력이 더 낮은 것으로 알려져 있다 (Orlandi et al. 2015). 또한, Orlandi et al. (2015)은 비교적 작은 레이놀즈 수를 가지는 평면 Couette 유동이 높은 레이놀즈 수를 가지는 난류채널유동의 특징을 잘 보여주며, 이러한 특징은 평면 Couette 유동의 연구

[†] School of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology
E-mail: jhlee06@unist.ac.kr

를 통하여 높은 레이놀즈 수의 난류유동제어, 난류 모델링 그리고 일반적인 난류채널유동의 난류 구조에 대한 많은 정보를 얻을 수 있음을 의미한다. 평면 Couette유동은 주 유동 방향으로 움직이는 위 벽면의 영향으로 인하여 채널중심에서 난류강도가 상당히 커지는 것으로 알려져 있으며 (Pirozzoli et al. 2011; Orlandi et al. 2015), 일반적으로 낮은 레이놀즈 수에서도 채널중심에 위치한 큰 스케일의 난류구조가 아래 벽면과 위 벽면 근처에 존재하는 작은 스케일의 난류구조의 amplitude modulation을 야기하는 것으로 알려져 있다 (Pirozzoli et al. 2011).

본 연구에서는 평면 Couette 유동과 상반되게 위 벽면에서 주 유동방향과 반대방향으로 일정속도조건을 부과하여 Couette-Poiseuille 유동을 직접수치 모사하였다. 위 벽면속도의 변화를 통해, Couette-Poiseuille 유동의 레이놀즈 수 변화에 따른 난류통계량 변화를 조사하였으며, 또한 일반적인 난류채널유동과의 비교를 통해 난류생성메커니즘에 대한 연구를 심도있게 진행하였다. 즉, Couette-Poiseuille 유동은 레이놀즈 수의 증가와 더불어, 채널중심에서 난류구조의 성장이 제한된 일반적인 난류채널유동과 상반되게 벽면으로부터 속도구배가 일정한 부호를 가지는 wall layer가 아래 벽면으로 길게 형성되므로 이러한 wall layer의 길이 변화가 벽면 난류 생성에 어떠한 영향을 미치는지 연구하기에 적합하다고 할 수 있다. 벽면 높이에 따른 평균속도, 난류강도 분포를 통해 레이놀즈 수와 wall layer의 변화가 난류 에너지의 생성에 미치는 영향을 살펴 보았으며, 난류전단응력에 대한 quadrant 분석과 energy spectra 분석을 통해 난류에너지 생성에 영향을 미치는 난류구조에 대한 연구를 진행하였다.

2. 수치적 방법

비압축성 난류채널유동의 지배방정식으로 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 사용하여 직접수치 모사를 수행하였으며, 지배방정식은 층류 채널 중심 평균속도 (U_{co})와 채널 절반 높이 (h)로 무차원화하였다. 지배방정식의 시간 전진은 모든 항들에 대해 Crank-Nicolson 기법을 사용하는 완전 내재적 기법을 적용하였으며, 공간적으로는 엇갈림 격자

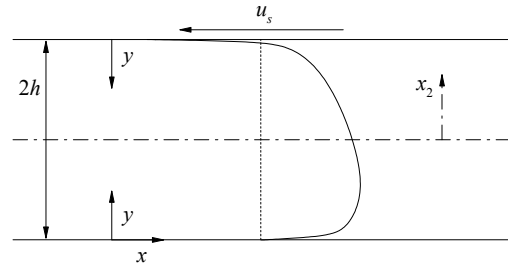


Fig. 1. Schematic of Couette-Poiseuille flows.

와 중심차분법을 적용하였다. 지배방정식의 경계 조건은 주 유동 및 횡 방향으로 주기적인 경계 조건, 아래 벽면은 점착조건, 위 벽면은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 주 유동 방향과 반대 방향으로 일정속도조건 (\tilde{u}_s)을 부과하여 Couette-Poiseuille 유동을 모사하였다.

본 연구에서 사용한 계산 도메인은 주 유동 방향, 벽면 수직인 방향 그리고 횡 방향으로 각각 $L_x=12\pi h$, $L_y=2h$, $L_z=3\pi h$ 이며, 격자수는 $N_x=1792$, $N_y=179$, $N_z=768$ 을 사용하였다. 주 유동방향과 횡 방향으로는 균일 격자계를 이용하였고 벽면에 수직인 방향으로는 쌍곡선 탄젠트함수를 사용한 비균일 격자계를 이용하였다. 레이놀즈 수 $Re_{co} (=U_{co}h/\nu)=7200$ 에서 완전 발달된 난류채널유동을 모사하였으며, 이를 활용하여 위 벽면에서 일정속도 (\tilde{u}_s)로 움직이는 Couette-Poiseuille 유동을 모사하였다. 본 연구에서 사용된 일정벽면속도 (\tilde{u}_s) 변화에 따른 위 아래 벽면 마찰 레이놀즈 수 ($Re_{r,b}$)의 변화를 Table 1에 기술하였다. 위 아래 벽면 근처에서 난류통계량 비교를 위해 벽면으로부터 떨어진 거리 y 를 좌표계로 설정하였다 (Fig. 1). 대문자 (e.g., U)와 괄호 < > 는 시간과 공간에 대해 평균된 통계량을 의미하며, 속도섭동 (u)은 순간속도와 평균속도의 차이 $u = \tilde{u} - U$ 로 정의된다.

Table 1. List of the parameters for the Couette-Poiseuille flows.

\tilde{u}_s / U_{co}	$Re_{r,b}$	$Re_{r,t}$
0	283	283
0.5	314	438
1.0	345	595

3. 결과 및 토의

3.1 평균속도

Fig. 2에서 주 유동방향의 평균속도분포를 아래 벽면마찰속도 ($u_{\tau,b}$)와 위 벽면마찰속도 ($u_{\tau,t}$)로 무차원화하여 나타내었다. Table 1을 통해, \tilde{u}_s 가 증가할 때 위 아래 벽면의 레이놀즈 수가 연속적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있는데, 일반적인 난류채널유동에서는 레이놀즈 수가 증가할 때, 로그영역 (Logarithmic layer)이 확대되는 것으로 알려져 있다 (Lee & Moser 2015; Chin et al. 2014). 하지만, Couette-Poiseuille 유동에서는 \tilde{u}_s 가 증가하면서 아래 벽면 근처에서 로그영역이 축소되는 반면, 위 벽면 근처에서는 로그영역이 확대되는 것을 확인할 수 있다. 로그영역의 증가는 벽면으로부터 난류

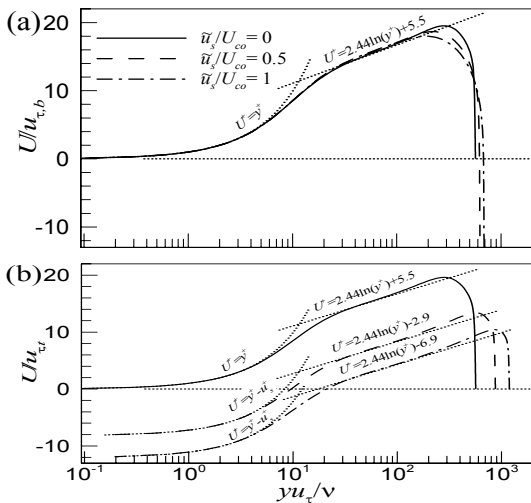


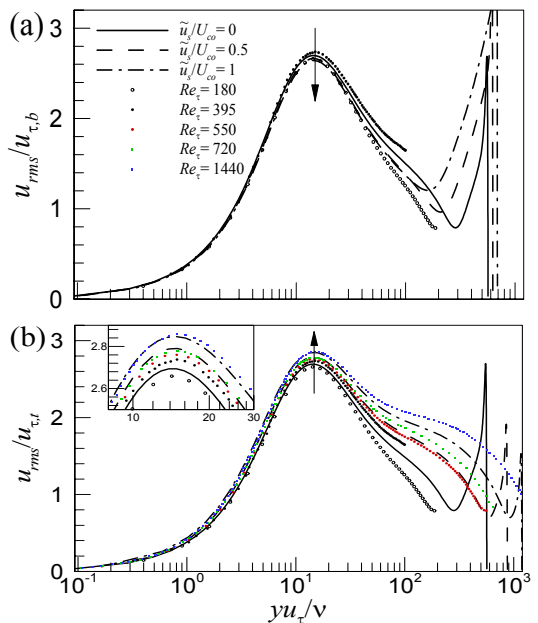
Fig. 2. Mean velocity profiles scaled by the local friction velocities at (a) the bottom wall and (b) the top wall units.

구조의 선형적 증가를 의미하므로 아래 벽면 근처에서 로그영역의 감소는 난류 구조가 아래 벽면으로부터 충분히 자라지 못함을 의미한다. 하지만, 위 벽면의 경우 로그영역이 비슷한 레이놀즈 수를 가지는 난류채널유동에 비하여 더 크게 자라남으로 위 벽면으로부터 난류구조가 아래 벽면으로 크게 자라는 것을 예상할 수 있다.

3.2 난류강도

Fig. 3은 벽면 높이에 따른 Couette-Poiseuille 유동의 난류강도 변화를 나타내고 있다. 비슷한 레이놀즈 수의 난류채널유동과의 직접 비교를 위해 레이놀즈 수 ($Re_{\tau} = u_{\tau}h/\nu$)가 180과 550 (Hoyas & Jimenez 2006), 395 (Moser et al. 1999), 720과 1440 (Hu et al. 2006)인 직접수치모사 데이터 (symbols)를 함께 나타내었다. 위 벽면 속도 \tilde{u}_s 가 증가하면서 위 아래 벽면 레이놀즈 수가 증가하지만, 아래 벽면 근처에서 난류강도는 계속해서 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만, 위 벽면에서는 레이놀즈 수 증가함에 따라 난류강도 또한 연속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있고, 이것은 일반적인 난류채널유동과 비교하였을 때 더 큰 증가를 보여준다.

Fig. 3b의 확대된 그림을 보면, $\tilde{u}_s / U_{co} = 1$ 인 Couette-Poiseuille 유동에서, 위 벽면에서 난류강도의 최대값이 벽면 레이놀즈 수가 1440을 가지는 일반적인 난류채널유동의 난류강도 최대값과 비슷한 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 바깥 영역에서는 Couette-Poiseuille 유동의 난류강도가 다소 작게 나타난다. 레이놀즈 수가 증가할 때 나타나는 아래 벽면 근처의 난류강도 감소는 \tilde{u}_s



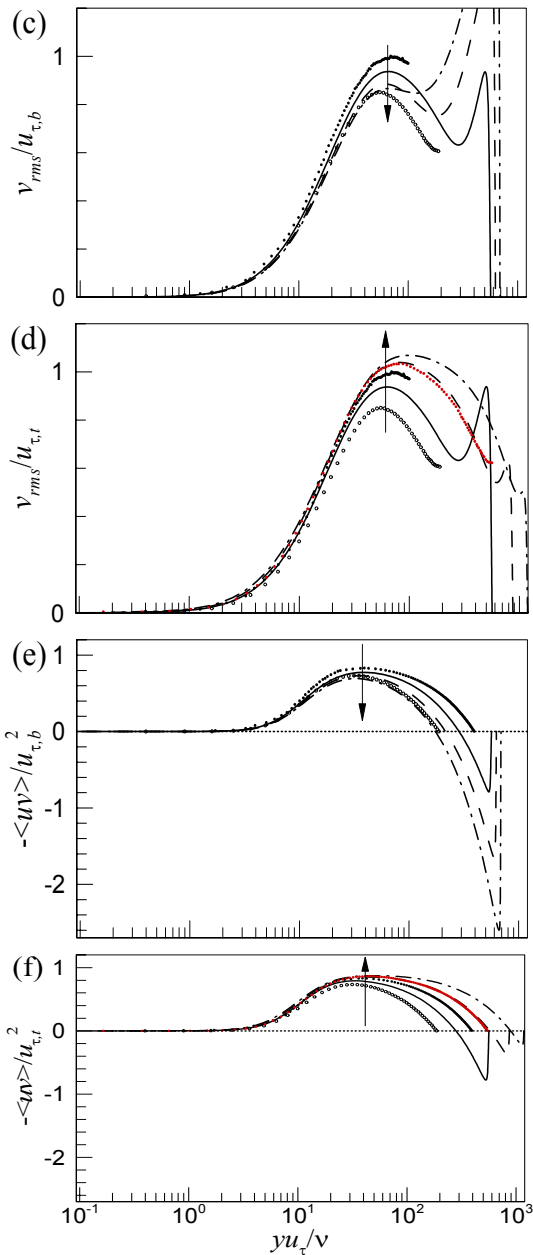


Fig. 3. (a-d) Root mean square of the velocity fluctuations and (e-f) Reynolds shear stress throughout the entire wall layer. Symbols correspond to the previous DNS data for canonical turbulent channel flows. The quantities are normalized by the local friction velocities on (a, c, e) the bottom wall and (b, d, f) the top wall.

가 증가할 때 나타나는 로그 영역의 감소와 일관되는 결과이다.

$\tilde{u}_s / U_{\infty} = 0$ 인 난류채널유동에서 평균속도구배가 0이 되는 지점이 채널중심에서 나타나지만, \tilde{u}_s 가 증가하면서 평균속도구배가 0인 지점은 아래 벽면으로 점점 이동하게 된다 (not shown here). 평균속도구배가 0이 되는 지점은 아래 벽면 난류강도 분포에서 최소값을 나타내는 지점으로 (Fig. 3a, c, e), \tilde{u}_s 가 증가할 때 난류강도가 계속해서 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 Quadrant 분석

레이놀즈 전단응력에 대한 Quadrant 분석은 난류에너지의 생성과 소멸에 기여하는 조건에 대한 자세한 정보를 제공해 주는 것으로 알려져 있다 (Wallace 2016). Q1 조건 ($u > 0, v > 0$)은 빠른 속도를 가지는 유체의 바깥방향 작용을 나타내며, Q2 조건 ($u < 0, v > 0$)은 느린 속도를 가지는 유체의 바깥방향 작용을 의미하는 ejection motions을 보여준다. 레이놀즈 전단응력에 대한 Quadrant 분석은 난류에너지의 생성과 소멸에 기여하는 조건에 대한 자세한 정보를 제공해 주는 것으로 알려져 있다 (Wallace 2016). Q1 조건 ($u > 0, v > 0$)은 빠른 속도를 가지는 유체의 바깥방향 작용을 나타내며, Q2 조건 ($u < 0, v > 0$)은 느린 속도를 가지는 유체의 바깥방향 작용을 의미하는 ejection motions을 보여준다. Q3 조건 ($u < 0, v < 0$)은 느린 속도의 유체에 의한 안쪽방향 작용을 나타내며, Q4 조건 ($u > 0, v < 0$)은 빠른 속도의 유체에 의해 안쪽방향 작용하는 sweep events를 보여준다. Q2와 Q4 조건은 난류전단응력을 발생시키는 역할을 하며, Q1과 Q3 조건은 난류전단응력을 소멸시키는 역할을 한다.

Fig. 4는 벽면 높이에 따른 Quadrant 분석결과를 나타내고 있다. 벽면 속도 \tilde{u}_s 가 증가할 때, 아래 벽면 근처의 모든 전단응력 성분들의 크기가 감소하고, 위 벽면 근처의 난류 전단응력은 크기가 증가하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 Figure 3의 레이놀즈 전단응력의 경향과 일치한다. 특히, Q2와 Q4 레이놀즈 전단응력은 벽면속도변화에 대해 크

게 변화하였지만, Q1과 Q3 조건은 상대적으로 작은 변화를 보여준다 (not shown here). 이는 \tilde{u}_s 증가에 따른 난류전단응력의 변화의 대부분이 Q2와 Q4 조건의 변화로 인해 나타나는 것을 의미한다. Q2와 Q4 레이놀즈 전단응력의 크기 증가와 감소는 벽면 난류 구조의 성장 및 소멸과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다 (Robinson 1991). 벽면 속도 \tilde{u}_s 가 증가하면서 발생하는 로그영역의 증가로 인하여 활발한 난류구조의 성장이 발생하며 이로 인하여 Q2와 Q4 성분의 레이놀즈 전단응력의 증가가 발생한 것으로 예상된다. 이러한 난류구조의 성장은 벽면 헤어핀 구조의 성장으로 인하여 나타나는 결과이며, 헤어핀 구조가 성장하여 헤어핀 패킷 구조를 생성할 때, 강한 Q2와 Q4 성분의 레이놀즈 전단응력이 발생한다.

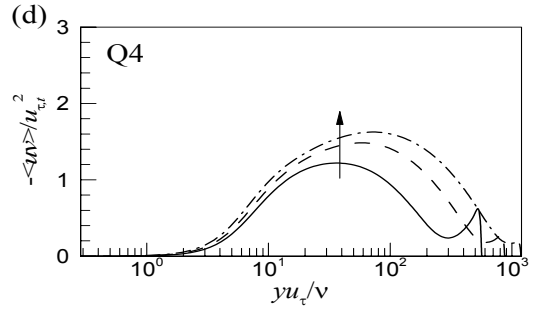
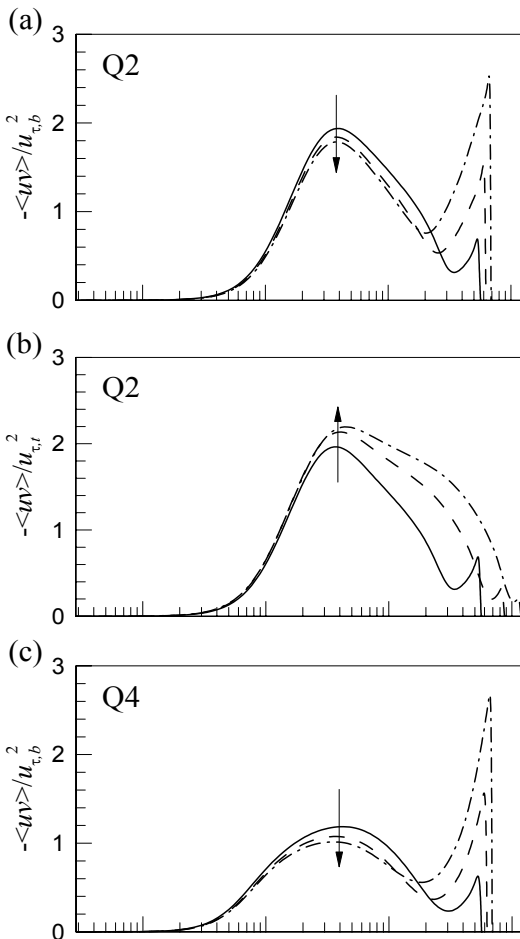


Fig. 4. Reynolds shear stress profiles from each quadrant scaled by the local friction velocity at each wall. (a-b): Q2 event; (c-d): Q4 event. The quantities are normalized by the local friction velocities on (a, c) the bottom wall and (b, d) the top wall.

벽면속도 \tilde{u}_s 변화에 따른 난류강도의 증가 및 감소 원인을 파악하기 위하여 파장에 따른 주 유동방향의 pre-multiplied energy spectra를 Figure 5에 나타내었다. Fig. 5에서 하얀색 십자 표시된 곳은 $\tilde{u}_s / U_{\infty} = 1$ 일때의 inner peak의 위치 ($y^+ = 13.5$)와 해당하는 길이 스케일 ($\lambda x^+ = 1000$)을 나타낸다. \tilde{u}_s 크기 변화와 상관없이 inner peak의 위치와 길이 스케일은 거의 일정한 것을 확인할 수 있으며 이것은 벽면속도변화에 대해 위 아래 벽면에서 발생하는 self-sustained process가 영향을 받지 않음을 의미한다. 하지만, \tilde{u}_s 가 증가할 때, 바깥 영역에서 난류 에너지의 변화가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, \tilde{u}_s 가 증가하면서 평균속도구배가 0이 되는 지점을 중심으로 에너지의 증가가 관찰되며 이러한 증가는 위 벽면으로부터 전해져 오는 큰 스케일의 난류에너지로부터 기인하는 것을 확인할 수 있다. 비록 아래 벽면 근처에서 벽면속도 변화에 따른 inner peak의 변화는 없지만 높은 벽면 위치에서 큰 스케일의 에너지가 많이 약해지는 것을 확인할 수 있으며, 이것은 벽면 로그영역의 감소로 인한 큰 스케일의 벽면 난류구조의 억제로 인해 나타나는 결과이다.

3.4 Energy spectra 분석

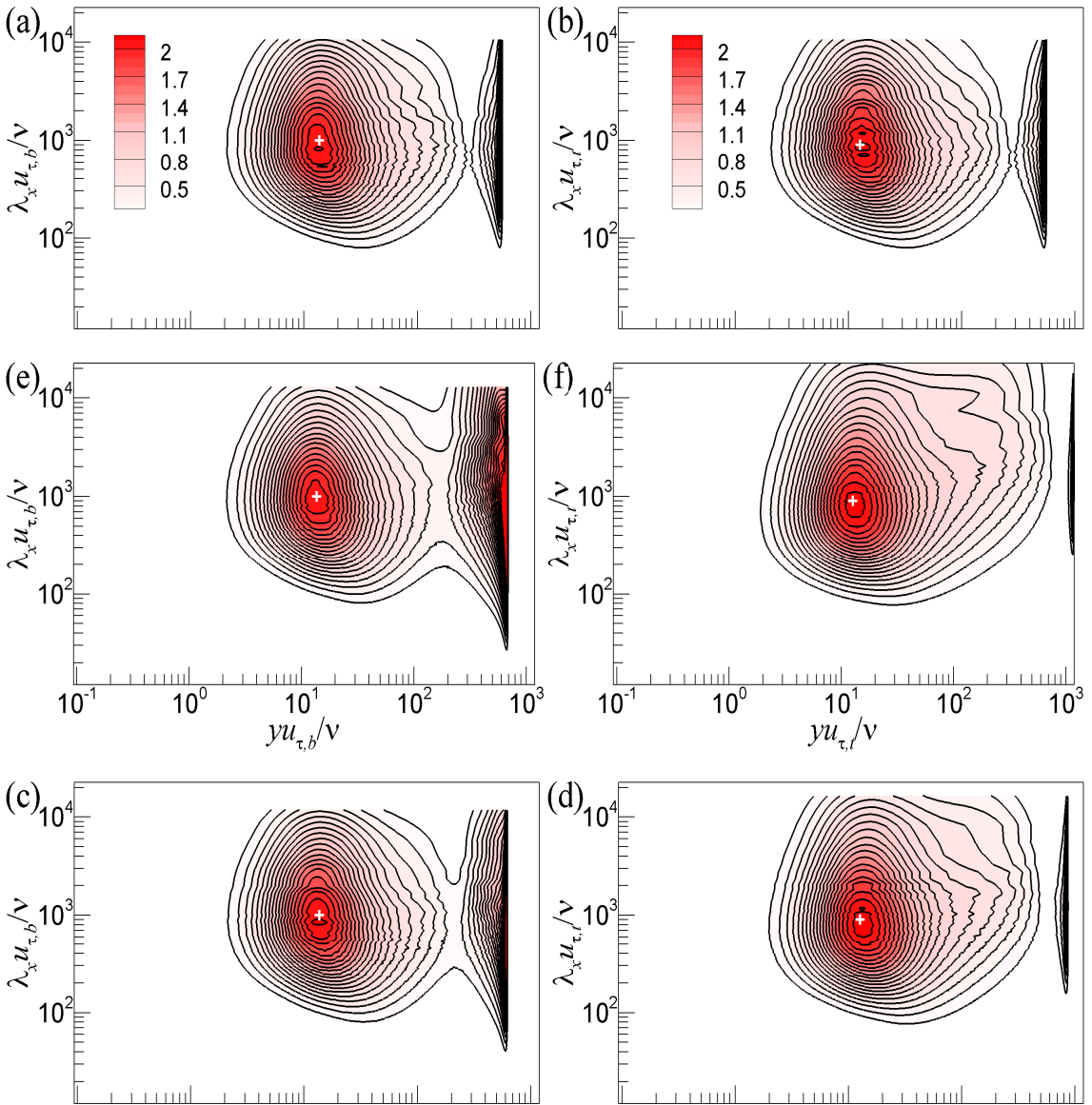


Fig. 5. Pre-multiplied streamwise spectra of the streamwise velocity fluctuations ($kxEuu/u\tau^2$) scaled by the local friction velocities at the bottom (left) and top (right) wall units. (a-b): $\tilde{u}_s/U_{co}=0$; (c-d): $\tilde{u}_s/U_{co}=0.5$; (e-f): $\tilde{u}_s/U_{co}=1$. White cross symbols depict the position of the inner peak for $\tilde{u}_s/U_{co}=1$.

4. 결 론

본 연구에서는 평면 Couette 유동과 상반되게 위 벽면에서 주 유동방향과 반대방향으로 일정 속도 조건을 부과하여 Couette-Poiseuille 유동을 직접 수치모사하였다. 난류채널유동은 속도구배가 일정한 부호를 가지는 wall layer가 벽면으로부터 채널 중심까지 형성되지만, Couette-Poiseuille 유동은 위 벽면속도 \tilde{u}_s 가 증가하면서 wall layer가 아래 벽면 확장되면서, 위 벽면에서 로그영역의 증가가 발생하였다. 이는 위 벽면 근처에서 활발한 난류구조의 성장을 의미하며, 이로 인해 난류에너지가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만, 아래 벽면에서는 \tilde{u}_s 가 증가하면서 레이놀즈 수가 증가하였지만, wall layer의 축소로 인해 로그영역이 감소하였고 이로 인해 난류구조의 성장 억제, 난류에너지의 감소가 관찰되었다.

후 기

본 연구는 2017년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (NRF-2017R1A5A1015311, NRF-2017R1D1A1A09000537).

REFERENCE

- 1) Hoyas, S. and Jiménez, J., 2006, "Scaling of the velocity fluctuations in turbulent channels up to $Re\tau=2003$," *Physics of fluids*, Vol. 18(1), pp. 011702
- 2) Bernardini, M., Pirozzoli, S. and Orlandi, P., 2014, "Velocity statistics in turbulent channel flow up to $Re\tau=4000$," *J. Fluid Mech.*, Vol. 742, pp.171~191.
- 3) Lee, M. and Moser, R. D., 2015, "Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re\tau=5200$," *J. Fluid Mech.*, Vol. 774, pp.395~415.
- 4) Orlandi, P., Bernardini, M. and Pirozzoli, S., 2015, "Poiseuille and Couette flows in the transitional and fully turbulent regime," *J. Fluid Mech.*, Vol. 770, pp.424~441.
- 5) Pirozzoli, S., Bernardini, M. and Orlandi, P., 2011, "Large-scale motions and inner/outer layer interactions in turbulent Couette-Poiseuille flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 680, pp.534~563.
- 6) Moser, R. D., Kim, J. and Mansour, N. N., 1999, "Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re\tau=590$," *J. Fluid Mech.*, Vol. 11(4), pp.943~945.
- 7) Abe, H., Kawamura, H. and Matsuo, T., 2001, "Direct numerical simulation of a fully developed turbulent channel flow with respect to the Reynolds number dependence," *J. Fluids Engineering*, Vol. 234(2), pp.382~393.
- 8) Hu, Z. W., Morfey, C. L. and Sandham, N. D., 2006, "Wall pressure and shear stress spectra from direct simulations of channel flow," *AIAA journal*, Vol. 44(7), pp.1541~1549.
- 9) Wallace, J. M., 2016, "Quadrant analysis in turbulence research: history and evolution," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.48, pp.131~158.
- 10) Robinson, S. K., 1991, "Coherent motions in the turbulent boundary layer," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp.601~639.
- 11) Guala, M., Hommea, S. E. and Adrian, R. J., 2006, "Large-scale and very-large-scale motions in turbulent pipe flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 554, pp.521~542.
- 12) Hutchins, N. and Marusic, I., 2007, "Evidence of very long meandering features in the logarithmic region of turbulent boundary layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 579, pp.1~28.
- 13) Mathis, R., Hutchins, N. and Marusic, I., 2009, "Large-scale amplitude modulation of the small-scale structures in turbulent boundary layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 628, pp.311~337.
- 14) Monty, J. P., Hutchins, N., Ng, H. C. H., Marusic, I. and Chong, M. S., 2009, "A comparison of turbulent pipe, channel and boundary layer flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 632, pp. 431~442.
- 15) Chin, C., Monty, J. P. and Ooi, A., 2014, "Reynolds number effects in DNS of pipe flow and comparison with channels and boundary layers," *Intl J. Heat Fluid Flow*, Vol.45, pp.33~40.