

## 표면 형상 변화에 따른 난류경계층 유동장 분석

이재화<sup>†</sup>

### Transition of Turbulent Boundary Layer with a Step Change from Smooth to Rough Surface

Jae Hwa Lee

**Abstract.** Direct numerical simulation (DNS) dataset of a turbulent boundary layer (TBL) with a step change from smooth to rough surface is analyzed to examine spatially developing flow characteristics. The roughness elements are periodically arranged two-dimensional (2-D) spanwise rods with a streamwise pitch of  $\lambda = 8k$  ( $= 12\theta_m$ ), and the roughness height is  $k = 1.5\theta_m$ , where  $\theta_m$  is the inlet momentum thickness. The step change is introduced  $80\theta_m$  downstream from the inlet. For the first time, full images from the DNS data with the step change from the smooth to rough walls is present to get some idea of the geometry of turbulent coherent structures over rough wall, especially focusing on their existence and partial dynamics over the rough wall. The results show predominance of hairpin vortices over the rough wall and their spanwise scale growth mechanism by merging.

**Key Words:** Direct Numerical Simulation (직접수치모사), Turbulent Boundary Layer (난류경계층), Surface Roughness (표면조도), Turbulent Coherent Structures (난류응집구조)

#### 1. 서론

새로운 표면조도에 의해 천이가 발생하는 난류경계층 유동은 실생활에서 흔히 볼 수 있는 유동 중의 하나로서, 바다에서 육지로 또는 사막에서 도시로 부는 바람 등이 하나의 예가 될 수 있다. 그 동안 많은 실험적 연구를 통하여 표면 형상 변화에 대한 난류경계층 유동의 반응 특성에 대한 다수의 연구 결과가 발표되었으며, 이는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 유체가 새로운 표면형상을 가지는 난류경계층을 만날 때, 표면조도 위에서 Internal boundary layer (IBL)이 발달하고, 특히 벽면 근처에서는 Equilibrium layer (EL)이 생겨난다. IBL은 유동에 미치는 영향이 큰 표면조도에 의해 그 특성이 결정되고<sup>(1)</sup>, 상류에 위치하는 표면조도보다 하류에 위치한 표면 형상에 의해 영향을 받는다<sup>(2)</sup>.

2) 유동이 새로운 표면조도를 만날 때, 천이 영역에서 레이놀즈 응력의 급격한 증가 (overshoot)이 발생한다<sup>(3,4)</sup>.

이러한 급격한 증가는 표면조도에 대하여 주 유동 방향의 측정 위치에 강한 의존성을 보인다<sup>(5)</sup>.

3) 새로운 표면조도를 만난 유동은 천이 과정을 거치면서 평형상태에 도달하게 되는데, 새로운 평형상태에 도달하기 위해서는 유동이 주 유동 방향으로 충분히 발달할 수 있도록 긴 도메인이 필요하며, 필요한 도메인 길이는 하류의 표면조도에 의해 영향을 받는다<sup>(6,7)</sup>.

매끈한 표면을 가지는 난류경계층 유동의 경우, 헤어핀 (hairpin) 형태의 난류 와 구조에 대한 연구가 많이 수행되어져 왔으며, 현재까지도 헤어핀 구조가 난류 에너지의 생성과 운동량의 교환 등에 미치는 영향에 대하여 찬반론적인 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>(8,9,10,11)</sup>. Wu & Moin<sup>(9)</sup>은 경계층의 직접수치모사를 통하여 층류유동에서 난류유동으로 천이가 발생할 때, 헤어핀 형태의 와 구조가 모든 영역에 걸쳐 발생하는 것을 확인하였으며, 특히 충분히 긴 도메인을 사용하여 수행한 직접수치모사 결과는 레이놀즈 수가  $Re_\theta=1950$ 에 달하는 난류경계층에서도

<sup>†</sup> 책임저자 소속 및 연락처

Corresponding Author: Mechanical and Nuclear Engineering, UNIST, UNIST-gil 50, Ulsan, 689-798, jhlee06@unist.ac.kr

헤어핀 구조가 난류에너지의 발생 (production) 및 소산 (dissipation)에 지배적인 역할을 함을 보여주었다. 하지만, 다른 연구 그룹에서는 낮은 레이놀즈 수의 난류유동에서 나타나는 헤어핀 구조가 높은 레이놀즈 수의 난류유동에서는 발견되지 않음을 보여주었다<sup>(11)</sup>. 또한, Adrian<sup>(12)</sup>는 헤어핀 구조가 응집성을 가지고 공간적으로 배열되어 새로운 헤어핀 패킷 구조를 만들어 뉘를 실험적으로 보여주었지만, Jimenez 등<sup>(10)</sup>은 직접수치모사 데이터를 사용하여 그러한 응집성이 존재하지 않는다고 주장하였다.

본 연구에서는 매끈한 표면에서 표면조도로의 표면 형상 변화가 존재하는 난류경계층의 직접수치모사를 통하여 헤어핀 구조의 공간적 특징 및 발생메커니즘에 대한 연구를 진행하고자 한다. 이를 위해 주 유동 방향으로 규칙적으로 배열된 2차원의 막대형 표면조도를 수치적으로 모사하였으며, 사용된 표면조도의 크기 ( $k$ )는 입구 운동량 두께 ( $\theta_m$ )의 1.5배이며 주 유동 방향의 간격은  $8k$ 이다. 계산된 난류경계층은 입구근처에서 매끈한 표면을 가지며, 입구로부터 주 유동 방향으로  $80\theta_m$  떨어진 위치에서 새로운 표면으로 형상 변화가 발생한다. 직접수치모사를 통하여 얻은 시간에 따른 순간유동장의 분석을 통하여 매끈한 표면 및 표면조도가 있는 난류경계층 위에서 나타나는 헤어핀 구조의 특징에 대하여 조사하였다.

## 2. 수치적 방법

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

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

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

여기서  $x_i$ 는 직교 좌표를 나타내고,  $u_i$ 는 각각의 속도 성분들을 나타낸다. 모든 변수들은 자유흐름속도 ( $U_\infty$ )와 입구에서의 운동량 두께 ( $\theta_m$ )로 무차원화 되었으며 Re는 레이놀즈 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 2차의 중심차분법과 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 완전 내재적 방법으로 차분하였다. 이를 통해 얻어진 행렬식은 계수행렬의 근사

적인 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 모델링 가진  $f_i$  항이 추가되었으며 힘이 가해지는 점이 가상의 경계와 일치하지 않는 경우 일차와 이차의 보간법을 사용하여 가상 경계에서의 점착 조건을 만족시켰다.

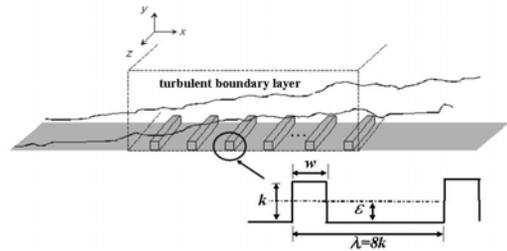


Fig. 1 Schematic of rod roughness.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 계산 영역과 표면조도의 형상을 보여 주고 있다. 계산 영역의 크기는 주 유동 방향, 벽 수직 방향 그리고 횡 방향으로 각각 ( $L_x, L_y, L_z$ ) = ( $768\theta_m, 60\theta_m, 80\theta_m$ )이며, 격자수는 (2049, 150, 257)이다. 주 유동 방향과 횡 방향으로 균일 격자계(uniform grid)를 사용하였고, 벽면의 수직 방향으로는 쌍곡선탄젠트함수(hyperbolic tangent function)를 이용한 비 균일 격자계(non-uniform grid)를 사용하였다. 입구에서는 Lund 등<sup>(15)</sup>이 제안한 방법을 사용하여 매끈한 표면의 난류유동장을 별도의 계산을 통하여 입구 유동 조건으로 부가하였고, 출구에서는 대류 경계조건을 사용하였다. 벽면에서는 점착조건(no-slip condition)을 적용하였고, 횡 방향으로는 주기적 경계조건을 사용하였다. 그리고 윗면에서는 자유흐름속도의 조건을 사용하였다. 계산과 관련된 보다 자세한 내용은 Lee & Sung<sup>(16)</sup>을 참고할 수 있다.

## 3. 연구 결과

벽면 난류구조를 이루는 하나의 단위로서, 헤어핀 와 구조에 대한 연구는 Theodorsen<sup>(17)</sup>에 의해 처음 이루어졌으며, 아직까지 연구가 활발히 이루어지고 있는 분야 중의 하나이다. 본 연구에서는 헤어핀의 와 구조를 가시화하기 위하여 스윙 강도(swirling strength)를 사용하였다<sup>(18)</sup>.

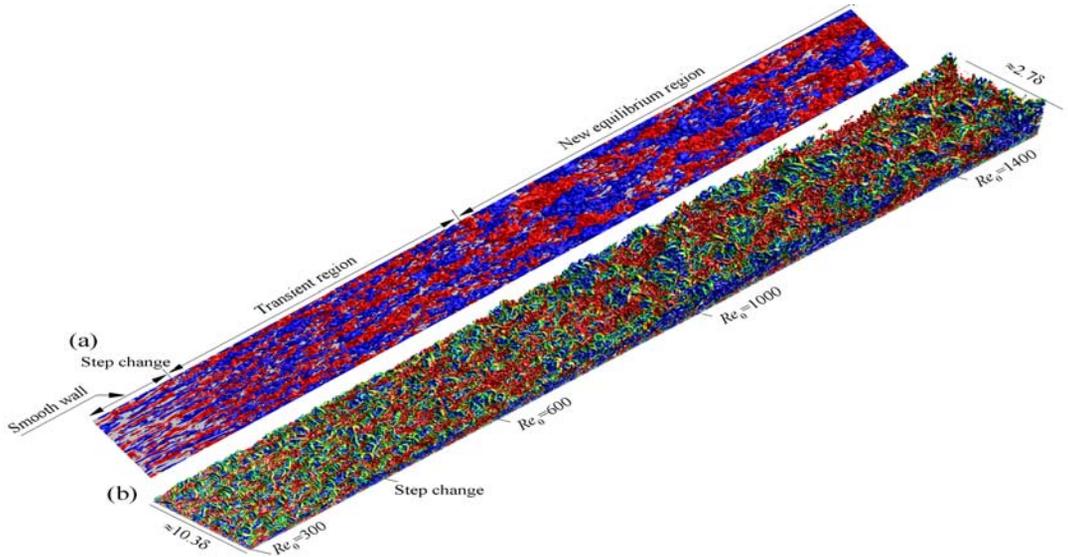


Fig. 2  $u/U_\infty$  (a) Streamwise velocity fluctuations,  $u/U_\infty = \pm 0.15$ .  
 (b) swirling strength,  $\lambda_{ci} \theta_{in} / U_\infty = 0.03$  coloured by the streamwise velocity fluctuations  $-0.05 \leq u/U_\infty \leq 0.05$ .

스윙 강도는 프레임에 무관하게 난류구조를 추출할 수 있으며, 또한 속도 평균에 의해 나타나는 와 구조의 성분을 제거하고 순수한 난류구조의 성분만을 계산할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 2는 전체 계산 도메인에 대해 (a) 주 유동 방향의 난류속도장 (streamwise velocity fluctuations)과 (b) 스윙 강도를 나타낸 그림이다. 입구에서 매끈한 표면을 가진 난류경계층을 확인 가능하며, 하류에서 발생하는 표면 형상 변화에 대해 난류구조의 반응특성을 이해할 수 있다. 여기에서는 전체도메인을 크게 세 가지의 영역으로 구분하였다. 매끈한 표면을 가진 난류경계층, 매끈한 표면에서 새로운 표면조도를 만나 발달하는 천이영역, 그리고 새로운 표면조도 위에서 완전 발달된 영역이다. 이전 연구 결과를 통하여, 천이영역과 완전 발달된 영역은 난류통계량을 기준으로 나눌 수 있다<sup>(16)</sup>.

Fig. 2를 통하여 이전의 연구결과<sup>(9,11)</sup>와 일관되게, 매끈한 표면 위의 낮은 레이놀즈 수에서 헤어핀 구조의 공간적 중요성을 확인할 수 있다. 하지만, 새로운 벽면 경계조건으로 인하여 매끈한 표면 위의 헤어핀 구조가 상당히 영향을 받고, 그 결과 비대칭적인 지평이 형태의 헤어핀 구조가 빈번하게 발생한다.

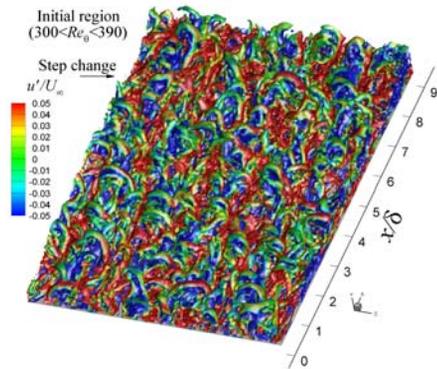


Fig. 3 Enlarged-view for isosurface of the swirling strength with magnitude of  $\lambda_{ci} \theta_{in} / U_\infty = 0.03$ . The contour is coloured by the local streamwise velocity fluctuations. The Reynolds number is varying in the range of  $300 \leq Re_\theta \leq 390$ . The axis in all directions are normalized by the outer length scale  $\delta$  estimated at the intermediate Reynolds number.

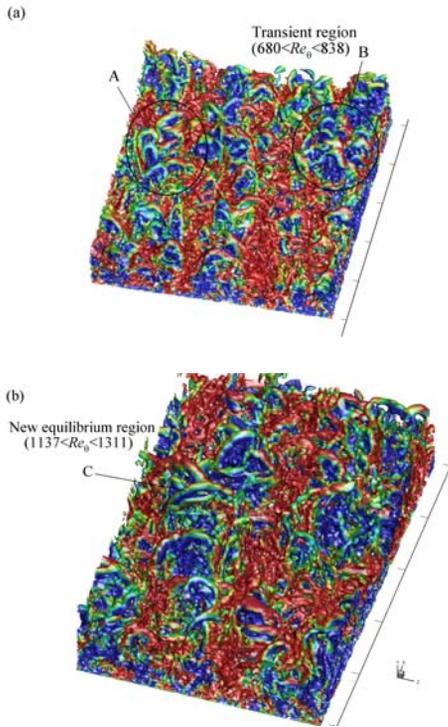


Fig. 4 As the same in Fig. 3, but (a)  $680 \leq Re_\theta \leq 838$  and (b)  $1137 \leq Re_\theta \leq 1311$ .

좀 더 면밀히 난류응집구조의 변화를 살펴보기 위하여 매끈한 표면, 천이영역, 그리고 새로운 평형 상태에서의 헤어핀 구조의 특징을 크게 가시화하여 Figs. 3~4에 나타내었다. 주 유동 방향의 난류속도 성분으로 표시된 스윙 강도는 헤어핀 구조의 운동학적인 특징을 보여준다. 즉, 헤어핀의 머리와 다리 부분의 연속적인 움직임에 의해 헤어핀 안쪽으로 음의 주 유동 방향의 운동량을 가진 영역(파란)이 만들어지고, 헤어핀 바깥 영역에서는 반대로 양의 값을 가지는 주 유동 방향의 영역(빨강)이 만들어진다. 이것은 기존의 헤어핀 구조 모델을 뒷받침하는 결과로서, 주 유동 방향으로 응집성을 가지고 배열된 헤어핀 다발이 헤어핀 패킷 구조로 자라고, 이 구조가 주 유동 방향으로 길게 늘어진 모멘텀 영역을 만들어낸다.

Fig. 4는 새로운 표면 형상에 의해 헤어핀 구조간의 상호작용이 상당히 활발히 발생하며, 횡 방향으로 구조의 길이스케일이 크게 증가하는 것을 보여준다. 하지만, 매끈한 표면위의 헤어핀 구조와 유사하게, 표면 조도위에서도 헤어핀 구조가 난류유동의 형성에 중요한 구조임을 알 수 있다.

Figs. 3 and 4의 비교를 통하여 새로운 표면조건에서 충분히 발달하여 새로운 평형 상태에 이른 헤어핀 구조는 매끈한 표면위의 구조와 비교하여, 횡 방향의 길이 스케일이 훨씬 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 여기에 나타내지는 않았지만, 주 유동 방향의 속도 성분을 사용하여 구한 주 유동 방향의 2점 상관계수의 분포는 통계적으로 이를 뒷받침한다. Fig. 4(a)에서 확인 가능하듯, 천이영역의 헤어핀 구조의 조사는 이러한 결과가 헤어핀 간의 상호작용(예: A, B in Fig. 4(a))에 의해 나타나는 결과임을 암시한다. 횡 방향의 길이 스케일 증가 메커니즘을 규명하기 위해서는 헤어핀 구조가 시간 연속적인 순간유동장을 통하여 어떻게 변화해 가는지 확인해 볼 필요가 있다.

Fig. 4(b)에서 확인할 수 있는 큰 스케일의 난류구조(C로 표시)의 생성 메커니즘을 규명하기 위하여 이전 시간 스텝에서 긴 스케일의 모멘텀 영역의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 또한, 그림 오른쪽에는 Fig. 5(a), (c), (e)의 모멘텀 영역에 해당하는 헤어핀 와 구조의 변화를 나타내었다. Fig. 5(e)에서 흰 실선으로 나타낸 모멘텀 영역은 Fig. 4(b)에서 C로 표시된 구조를 나타내며, Fig. 4(b)의 난류구조는 Fig. 5를 기준으로 시간  $tU_\infty/\theta_m = 240$ 에서 추출된 구조이다. 다시 실선을 따라 구조의 시간에 따른 변화를 살펴보면, 시간  $tU_\infty/\theta_m = 0$  (Fig. 5(a))에서 주 유동 방향으로 길게 늘어진 두 개 (패킷 1, 패킷 2)의 헤어핀 패킷 구조가 존재하고 있으며, 시간에 따라 하류로 흘러가면서 두 개의 구조가 상호작용함을 알 수 있다. 그 결과, 패킷 1의 상류 쪽 부분과 패킷 2의 하류 쪽 부분이 결합하여 이전 구조에 비해 횡 방향의 두께가 거의 2배인 새로운 형태의 구조가 발생된다. 반면에, 패킷 1의 하류 쪽 구조와 패킷 2의 상류 쪽 구조는 상대적으로 세기가 약해지면서 시간이 지남에 따라 거의 소멸된다. 이것은 표면조도가 존재하는 난류경계층위에서 큰 스케일의 헤어핀 구조가 헤어핀 구조간의 활발한 상호작용에 의해 나타나는 구조임을 의미한다.

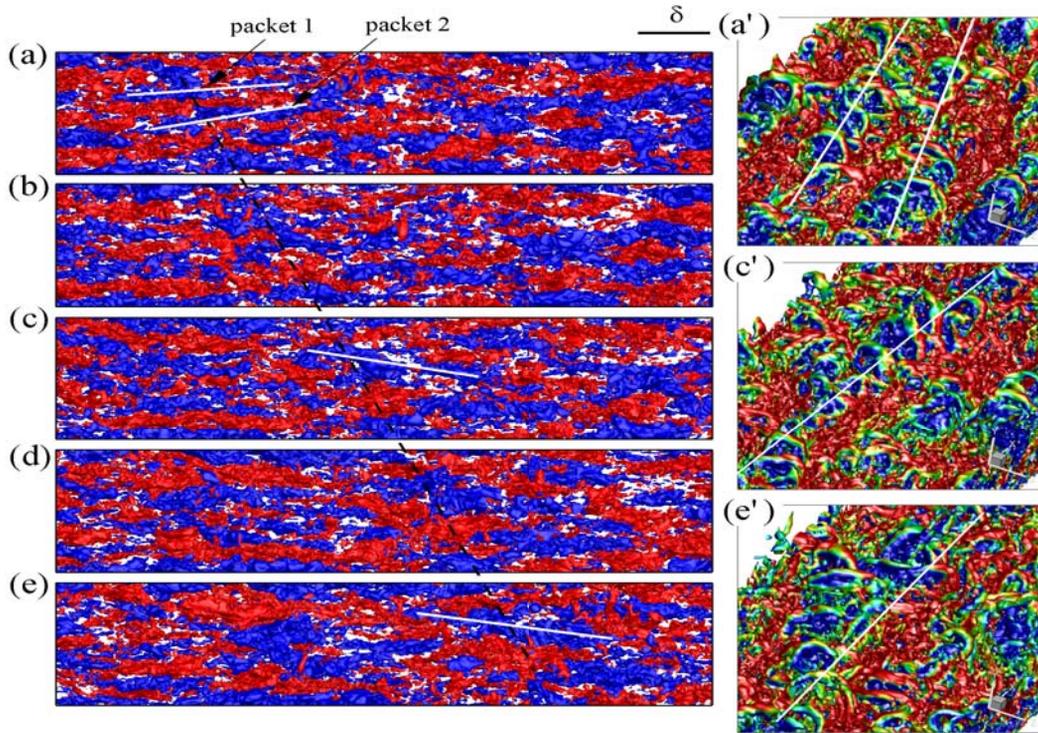


Fig. 5 Time-evolution of the instantaneous flow fields. High- and low-momentum regions with  $u / U_{\infty} = \pm 0.15$  are shown in the left column, and corresponding swirling strength with  $\lambda_c R / U_{\infty} = 0.03$  are drawn in the right column. In (a), two streamwise-elongated low-momentum regions are depicted by white solid lines. The dashed line is added to show the spanwise merging process of the structures, and the resulting structure is shown in (e). (a)  $tU_{\infty} / \theta_{in} = 0$ , (b)  $tU_{\infty} / \theta_{in} = 60$ , (c)  $tU_{\infty} / \theta_{in} = 120$ , (d)  $tU_{\infty} / \theta_{in} = 180$  and (e)  $tU_{\infty} / \theta_{in} = 240$ .

#### 4. 결론

매끈한 표면에서 막대형 표면조도로 표면형상이 변화하는 난류경계층을 직접수치모사하여 공간 발달하는 헤어핀 와 구조의 특징을 조사하였다. 시간 연속적인 순간유동장의 조사를 통하여 표면조도가 존재하는 난류경계층에서도 매끈한 표면의 경우와 비교해서 헤어핀 와 구조가 양과 음의 모멘텀 영역의 형성 및 이동에 밀접한 관련이 있는 구조임을 확인하였다. 이것은 헤어핀 구조가 표면조도가 존재하는 벽면 난류유동의 모든 현상을 설명할 수 있는 기본적인 구조임을 의미한다. 새로운 표면조도의 생성에 의해 나타나는 천이과정을 통하여 헤어핀 구조간의 활발한 상호작용을 확인하였고, 그 결과 완전 발달된 새로운 표면조도 위에서 더욱 큰 횡 방향의 길이 스케일을 가지는 헤어핀 구조를 생성되었다.

#### 후 기

이 논문은 2014년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2014R1A1A2057031).

#### 참고문헌

- 1) Jackson, P.S., 1976, "The propagation of modified flow downstream of a change in roughness," *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, Vol. 102, pp.924-933.
- 2) Bradley, E.F., 1968, "A micrometeorological study of velocity profile and surface drag in the region modified by a change in surface roughness," *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, Vol. 94, pp.361-379.
- 3) Pendergrass, W., Arya, S.P.S., 1984, "Dispersion in

- neutral boundary layer over a step change in surface roughness - I. Mean flow and turbulence structure," *Atmos. Environ.*, Vol.18, pp.1267-1279.
- 4) Andreopoulos, J., Wood, D.H., 1982, "The response of a turbulent boundary layer to a short length of surface roughness," *J. Fluid Mech.*, Vol.118, pp.143-164.
  - 5) Cheng, H., Castro, I.P., 2002, "Near-wall flow development after a step change in surface roughness," *Boundary layer Met.*, Vol.104, pp.229-259.
  - 6) Antonia, R.A., Luxton, R.E., 1971, "The response of a turbulent boundary layer to a step change in surface roughness," *J. Fluid Mech.*, Vol.48, pp.721-761.
  - 7) Lee, J.H., Seena, A., Lee, S.-H., Sung, H.J., 2012, "Turbulent boundary layers over rod- and cube-roughened walls," *J. Turbul.*, Vol.13, pp.1-26.
  - 8) Marusic, I., 2009, "Unravelling turbulence near walls," *J. Fluid Mech.*, Vol.630, pp.1-4.
  - 9) Wu, X., Moin, P., 2010, "Transitional and turbulent boundary layer with heat transfer," *Phys. Fluids*, Vol.22, 085105.
  - 10) Jimenez, J., Hoyas, S., Simens, M.P., Mizuno, Y., 2010, "Turbulent boundary layers and channels at moderate Reynolds numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 657, pp.335-360.
  - 11) Schlatter, P., Orlu, R., 2012, "Turbulent boundary layers at moderate Reynolds numbers: inflow length and tripping effects," *J. Fluid Mech.*, Vol.710, pp.5-34.
  - 12) Adrian, R.J., 2007, "Hairpin vortex organization in wall turbulence," *Phys. Fluids*, Vol.19, 041301.
  - 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. Fluids*, Vol.38, pp.125-138.
  - 14) Kim, J., Kim, D., Choi, H., 2001, "An immersed boundary infinite-volume method for 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) Lee, S.-H., Sung, H.J., 2007, "Direct numerical simulation of the turbulent boundary layer over a rod-roughened wall," *J. Fluid Mech.*, Vol.584, pp. 125-146.
  - 17) Theodorsen, T., 1952, "Mechanism of turbulence," In *Proc. Second Midwestern Conference on Fluid Mechanics*, Mar. 17-19. Ohio State Univ., Columbus, OH, USA.
  - 18) 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.