

표면조도가 난류구조에 미치는 영향

이재화*, 이승현*, 김경연**, 성형진***

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 structure near rod-roughened wall are investigated by analyzing the database of direct numerical simulation of turbulent boundary layer. 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 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 유동 특성에 영향을 미치는 매우 중요한 디자인 변수 중의 하나이기 때문이다.

기존의 연구들을 통해, 난류경계층에서 표면조도는 유동의 표면 마찰 저항을 증가시킨다고 보고되었다. 이러한 경향은 roughness sublayer라고 불리는 영역으로 제한된다고 여러 연구자들에 의해 알려져 왔는데⁽¹⁻³⁾ 최근의 Flack 등⁽⁴⁾ 과 Schultz 등⁽⁵⁾ 은 Reynolds 수가 충분히 크고 표면조도의 크기가 충분히 작을 경우 roughness sublayer 바깥영역의 난류 유동은 벽면의 표면조도에 영향을 받지 않는다는 것을 보여주었다.

그러나 최근의 다른 연구 결과들을 통해 표면조도의 영향이 roughness sublayer에 국한된다는 가설에 의문이 제기되고 있다. Krogstad 등⁽⁶⁻⁷⁾ 은 표면조도가 있는 난류경계층 실험을 통하여 roughness sublayer 바깥영역에서도 sublayer 내부와 마찬가지로 Reynolds 전단응력이 표면조도의 영향을 받음을 확인하였다. 따라서 roughness sublayer의 바깥영역에서 표면조도의 영향에 대한 서로 다른 결과의 원인을 명확하게 규명하기 위해서는 보다 근원적으로 이러한 난류 통계량을 발생시키는 벽면 근처의 난류구조에 대한 연구가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 표면조도의 영향이 벽면 근처의 난류구조에

미치는 영향을 살펴보고 표면조도의 영향이 존재하는 유동장의 범위를 난류구조의 관점에서 파악하였다. 이를 위해 3차원의 상관성 정보를 사용하여 유동 구조의 관점에서 roughness sublayer의 영역을 살펴보았으며 또한, Reynolds 전단 응력의 발생과 밀접한 관련이 있는 벽 근처의 유동 구조를 조건부 평균유동장을 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 3차원의 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 자유흐름속도 (U_∞)와 입구에서의 운동량 두께 (θ)로 무차원화 되었으며 Re는 Reynolds 수를 나타낸다. 지배방정식은 Kim 등⁽⁸⁾에 의해 제시된 부분 단계법

* 한국과학기술원 기계공학과, jhlee06@kaist.ac.kr

** 한국에너지기술연구원, kyoungyoun@kaist.ac.kr

*** 한국과학기술원, hjsung@kaist.ac.kr

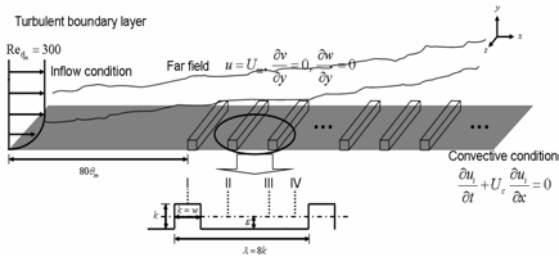


Fig. 1. Schematic diagram of computational domain and rod roughness

(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. 본 연구에서는 표면조도를 모사하기 위하여 Kim 등⁽⁹⁾ 이 제시한 가상경계기법을 이용하며 가상경계에서 경계조건을 만족시키기 위하여 운동량 방정식에 모멘텀 가진 f_i 항이 추가되었다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 계산 영역과 경계조건을 보여주고 있다. 계산 영역의 크기는 주 유동 방향, 벽 수직 방향 그리고 횡 방향으로 각각 $(L_x \times L_y \times L_z) = (768\theta \times 60\theta \times 80\theta)$ 이며, 격자수는 $(2049 \times 150 \times 257)$ 이다. 주 유동방향과 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. 벽 단위로 무차원화된 각 방향의 격자 크기는 $\Delta x^+ = 6.0, \Delta y_{min}^+ = 0.2, \Delta z^+ = 5.0$ 이다. 입구에서는 Lund 등⁽¹⁵⁾ 이 제안한 방법을 사용하여 표면조도가 없는 $Re_\theta = 300$ 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 방향으로는 주기적 경계 조건을 사용하였다. 그리고 윗면에서는 $u = U_\infty, \partial v / \partial y = 0, \partial w / \partial y = 0$ 의 조건을 사용하였다. 입구의 유동장은 주 유동 방향으로 80 θ 떨어진 곳 ($x=0$)에서 처음 표면조도를 만나도록 모사되었으며 2차원의 사각형 표면조도의 크기 (k)는 입구 운동량 두께의 1.5배이며 벽 단위로 32~45의 크기를 가진다. 표면조도는 주 유동 방향으로 $8k$ 의 간격으로 규칙적으로 배열되었으며 본 연구에 사용된 벽면으로부터의 수직 방향 높이는 가상 원점 (e)을 사용하여 나타내었다. 계산과 관련된 보다 자세한 내용은 Lee & Sung⁽¹⁰⁾을 참고할 수 있다.

2. 연구 결과

2.1 Roughness sublayer의 높이

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

기존의 roughness sublayer의 높이에 대한 연구는 한 점에서의 난류 통계량을 사용하여 대부분 이루어졌다. Bhaganagar 등

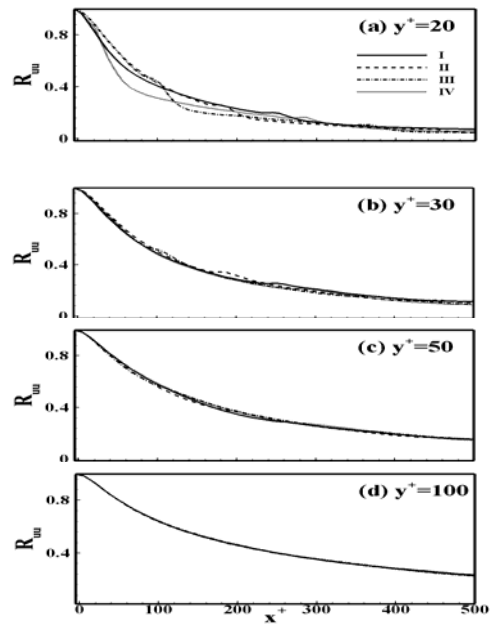


Fig. 2. Two-point correlations of streamwise velocity at various locations

⁽¹¹⁻¹²⁾은 표면조도가 있는 채널 난류 유동에서 속도, 압력, 그리고 와도 (vorticity)의 제곱평균제곱근을 이용하여 roughness sublayer의 높이를 살펴 보았다. 이를 통해 어떤 스케일의 난류 통계량을 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 난류 통계량의 발생과 관련이 있는 벽면 근처에서의 와 구조 (vortical structure)의 변화를 살펴보기 위해서는 한 점에서의 난류 통계량에서 얻은 서로 다른 roughness sublayer의 높이를 사용하기 보다는 난류구조의 관점에서 roughness sublayer의 높이를 살펴보는 것이 필요하다. 난류경계층에서 공간상의 상관 계수 (correlation coefficient)는 다음과 같이 정의 된다.

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

여기서 x_{ref}, y_{ref} 는 기준이 되는 주 유동 방향과 벽면 수직 방향의 위치이다. Fig. 2-3은 각각 주 유동방향(R_{uu})과 벽 수직 방향의 상관 계수(R_{vv})를 나타내며 roughness sublayer의 위치를 조사하기 위해 벽 수직 방향 $y^+ = 20, 30, 50, 100$ 의 위치가 고려되었으며 공간상의 균일성을 살펴 보기 위해 Fig. 1에서와 같이 서로 다른 4개의 표면조도 위치가 고려되었다. 위치 I은 표면조도 상단의 중심 부분이며 II와 IV는 재순환 영역의 중심부분, 그리고 III은 재순환영역 사이의 안장점 (saddle point)의 위치를 나타낸다.^(10, 13) 각 성분 별로 살펴 보면 한 점에서의 난류 통계량에서 구한 결과와 마찬가지로 속도 성분에 따라 roughness sublayer의 높이가 다르게 나타나는 것을 확인할

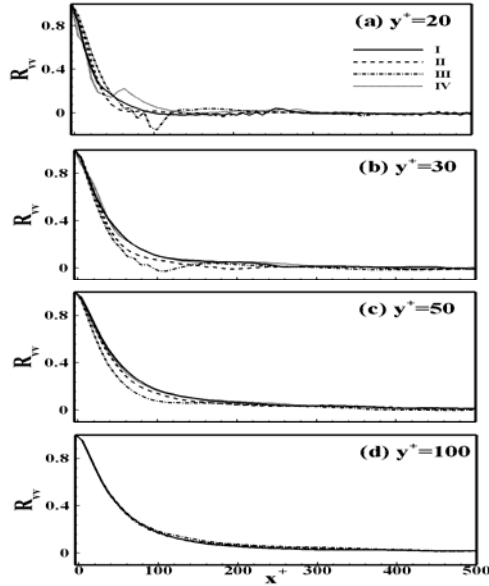


Fig. 3. Two-point correlations of wall-normal velocity at various locations

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 나타나지 않았지만 횡 방향 성분도 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 roughness sublayer의 높이를 정의할 때 속도 성분의 종류에 따라 roughness sublayer의 높이가 다르게 나타나는 것을 보여준다. 이전의 연구 결과인 한 점에서의 난류 통계량에 의해 정의된 roughness sublayer의 높이와 비교해 보면 난류구조의 관점에서 정의된 roughness sublayer의 높이가 벽면에 더 가까이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이는 표면조도에 의해 벽면 근처의 난류구조보다 난류 통계량들이 벽면에 수직인 방향으로 더 높게 영향을 받는다는 것을 뜻한다.

2.2 조건부 평균된 유동장

벽 근처의 와 구조는 Reynolds 전단응력의 발생과 깊은 관련이 있다고 잘 알려져 있다.⁽¹⁴⁾ 따라서 roughness sublayer 바깥영역에서 표면조도에 의한 Reynolds 전단응력의 영향을 살펴보기 위해서는 Reynolds 전단응력과 깊은 관련이 있는 벽 근처의 와 구조를 조사해 보아야 한다. 난류 채널 유동에서 Adrian 등⁽¹⁵⁾은 Reynolds 전단응력에 가장 크게 기여를 하는 조건을 사용하여 벽 근처의 와 구조에 대한 연구를 진행한 바 있다.

Fig. 4은 표면조도의 위치 III, IV에서 벽 수직 방향의 위치에 따라 Reynolds 전단 응력이 곱해진 (u', v') 의 joint weighted probability density function 분포를 나타내고 있다.

$$\iint -u'v'f_u(u',v')du'dv' = \overline{-u'v'} \quad (4)$$

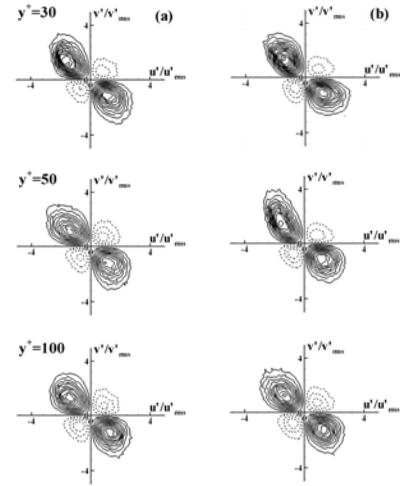


Fig. 4. Contours of probability weighted Reynolds shear stress, $-u'v'f_u(u',v')$, (a) III, (b) IV locations

식 (4)에 의해서 우변의 Reynolds 전단 응력에 가장 크게 기여를 하는 이벤트는 좌변의 적분인자 $-u'v'f_u(u',v')$ 를 최대화하는 것이므로 벽 수직 방향의 각 위치에서의 contour의 피크위치에 해당하는 (u', v') 값이 Reynolds 전단 응력에 가장 크게 기여를 하게 된다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 표면조도가 있는 난류경계층의 경우 표면조도가 없는 경계층과 비슷하게 Q2/Q4 event가 강하게 발생하고 Q1/Q3 event는 음의 값을 가지면서 훨씬 약하게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5은 표면조도에 의한 난류경계층의 유동 변화를 표면조도가 없는 경우와 비교하기 위해 (a) 표면조도의 위치 III과 (b) 표면 조도가 없는 경계층을 Fig. 4에서 제시한 조건을 사용하여 Reynolds 전단응력에 가장 크게 기여를 하는 난류구조를 벽면 수직 방향의 높이에 따라 나타내고 있다. Q4 event도 동일한 결과를 나타내므로 여기서 생략하였다. 와 구조는 속도구배 텐서의 고유치로부터 정의되는 swirling strength, λ_{α} 를 사용하여 가시화하였으며 swirling strength 최대치의 30%에 해당하는 iso-surface를 나타내었다. 앞에서 구한 2점 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. 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⁽¹⁶⁾와 Vesely 등⁽¹⁷⁾의 결과와 일치하는 결과이다. 반면에 outer scale로 무차원화한 roughness sublayer 바깥영역에서는 두 구조가 가지는 특성의 차이가 존재하지 않는다. $y/\delta = 0.15$ 에서 볼 수 있듯이 세 방향의 길이 스케일이 모두 동일하며 벽면과 이루는 각도 또한 큰 차이를 보이지 않는다. 이것은 표면조도의 유무에 관계없이 roughness

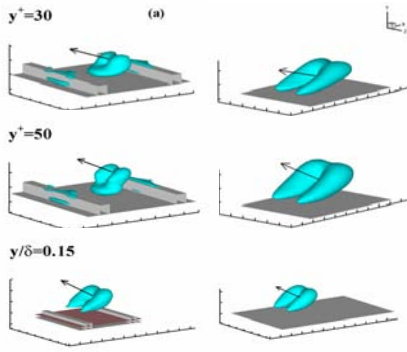


Fig. 5. Vortical structures associated with Q2 event in the (a) rough wall boundary layer (at III location) and (b) smooth wall boundary layer. The distance between ticks on each axis is 50 wall units for $y^+ = 30$ and 50 whereas it is 0.1δ for $y/\delta = 0.15$

sublayer 바깥영역에서 기하학적 형태가 동일한 난류구조가 존재하는 것을 뜻하며 이 영역에서의 Reynolds 전단응력이 발생하는 메커니즘은 표면조도로 인해 큰 영향을 받지 않음을 유추할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 roughness sublayer 바깥영역에서 난류 통계량의 종류에 따라 서로 다르게 나타나는 표면조도의 영향을 조사하기 위해서 rod-roughness가 존재하며 공간 발달하는 난류경계층의 직접수치모사 데이터를 사용하여 벽면 근처에서의 난류구조의 변화를 조사하였다.

난류 통계량의 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 난류 와 구조의 차이가 나타나지만 roughness sublayer 바깥영역에서는 난류 와 구조의 길이 스케일에서 큰 차이를 발견하지 못하였다. 또한, 표면조도의 존재 유무에 따라 Reynolds 전단 응력이 roughness sublayer 바깥영역에서 차이를 보임에도 불구하고, Reynolds 전단 응력의 생성과 밀접한 관련이 있는 난류 와 구조는 표면조도의 존재 유무와 관계없이 유사하게 관찰되었다. 이러한 결과는 난류경계층의 log layer에서 Reynolds 전단 응력의 생성 메커니즘은 표면조도로 인해 크게 변화하지 않음을 시사한다.

참고문헌

[1] Raupach, M. R., Antonia, R. A. & Bajagopalan, S., Rough-wall turbulent boundary layers, *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 44 (1991), pp. 1~25.
 [2] Townsend, A. A., The structure of turbulent shear flow (1976), Cambridge University Press

[3] Perry, A. E., Lim, K. L. & Henbest, S. M., An experimental study of the turbulence structure in smooth- and rough-wall boundary layers, *J. Fluid Mech.*, Vol. 177 (1987), pp. 437~466.
 [4] Flack, K. A., Schultz, M. P. & Shapiro, T. A., Experimental support for Townsend's Reynolds number similarity, *Phys. Fluids*, Vol. 17 (2005), 035102.
 [5] Schultz, M. P. & Flack, K. A., The rough-wall turbulent boundary layer from the hydraulically smooth to the fully rough regime," *J. Fluid Mech.*, Vol. 580 (2007), pp. 381~405.
 [6] Krogstad, P. -Å., Antonia, R. A. & Browne, L. W. B., Comparison between rough- and smooth-wall turbulent boundary layers, *J. Fluid Mech.*, Vol. 245 (1992), pp. 599~617.
 [7] Krogstad, P. -Å. & Antonia, R. A., Surface roughness effects in turbulent boundary layers, *Exp. Fluids*, Vol. 27 (1999), pp. 450~460.
 [8] Kim, K., Baek, S. -J. & Sung, H. J., An implicit velocity decoupling procedure for the incompressible Navier-Stokes equations, *Int. J. Numer. Meth. Fl.*, Vol. 38 (2002), pp. 125~138.
 [9] Kim, J., Kim, D. & Choi, H., An immersed boundary finite-volume method of simulations of flow in complex geometries, *J. Comput. Phys.*, Vol. 171 (2001), pp. 132~150
 [10] Lee, S. -H. & Sung, H. J., Direct numerical simulation of turbulent boundary layer over a rod-roughened wall, *J. Fluid Mech.*, Vol. 584 (2007), pp. 125~146.
 [11] Bhaganagar, Kiran., Coleman, Gary. & Kim, John., Effect of roughness on wall-bounded turbulence, *Flow, Turbul. Combust.*, Vol. 72 (2004), pp. 463-492.
 [12] Bhaganagar, Kiran., Coleman, Gary. & Kim, John., Effect of roughness on pressure fluctuations in a turbulent channel flow," *Phys. Fluids*, Vol. 19 (2007), 028103.
 [13] Ashrafian, A., Andersson, H. I. & Manhart, M., DNS of turbulent flow in a rod-roughened channel, *Intl. J. Heat Fluid Flow.*, Vol. 25 (2004), pp. 373~383.
 [14] Robinson, S. K., Coherent motions in the turbulent boundary layer, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, (1991), pp. 601~639.
 [15] Adrian, R. J., Jones, B. G., Chung, M. K., Hasson, Yassin., Nithianandan, C. K. and Tung, A. T. -C., Approximation of turbulent conditional averages by stochastic estimation," *Phys. Fluids*, Vol. 1 (1989), pp. 992~998.
 [16] Krogstad, P. -Å. & Antonia, R. A., Structure of turbulent boundary layers on smooth and rough walls," *J. Fluid Mech.*, Vol. 277 (1994), pp. 1~21.
 [17] Vesely, L., Haigermoser, C., Lavecchia, M. & Onorato, M., Turbulent boundary layers on rough walls: PIV studies, *In Proc 2007 7th international symposium particle image velocimetry*, Sep.11-14 (2007), Roma