

막대형 표면조도가 난류경계층에 미치는 영향

이승현* · 김정훈** · 도덕희*** · 성형진†

(2008년 2월 4일 접수, 2008년 4월 3일 수정, 2008년 5월 8일 심사완료)

Effects of Rod-roughened Wall on a Turbulent Boundary Layer

Seung-Hyun Lee, Jung Hun Kim, Deog Hee Doh and Hyung Jin Sung

Key Words: Surface Roughness(표면조도), Turbulent Boundary Layer(난류 경계층), Particle Image Velocimetry(입자 영상 유속계)

Abstract

The effects of surface roughness on a turbulent boundary layer (TBL) were investigated using particle image velocimetry (PIV). The roughness elements used were periodically arranged two-dimensional spanwise rods, and the roughness height was $k/\delta = 0.025$. Introduction of the roughness elements increased the wake strength and the turbulent stress not only in the roughness sublayer but also in the outer layer. This indicates the existence of interaction between inner and outer layers for 2D rod-roughened wall. Roughness effects on a turbulence structure near the wall were obtained by PIV measurements. Iso-contours of mean velocities and Reynolds stresses in the roughness sublayer showed a very good agreement with previous DNS results.

기호설명

k : 표면조도 높이
 k_s : 유효사조도높이
 Re_θ : 레이놀즈수 $\left(= \frac{U_\infty \theta}{\nu} \right)$
 U : 주유동방향 평균속도
 U^+ : 무차원 속도 $\left(= \frac{U}{u_\tau} \right)$
 U_c : 대류속도
 U_∞ : 자유흐름속도
 $\langle u^{+2} \rangle$: 주유동방향 난류응력 $\left(= \frac{\overline{u'u'}}{u_\tau^2} \right)$

$\langle -u^+v^+ \rangle$: 난류전단응력 $\left(= \frac{-\overline{u'v'}}{u_\tau^2} \right)$

u_τ : 마찰속도

V : 벽수직방향 평균속도

$\langle v^{+2} \rangle$: 벽수직방향난류응력 $\left(= \frac{\overline{v'v'}}{u_\tau^2} \right)$

s : 무차원길이 $\left(= \frac{(x-x_0)}{k} \right)$

x : 표면조도 시작위치부터 주유동방향 거리

x_0 : 주유동방향 기준위치

y : 바닥부터의 벽수직방향 높이

y' : 가상원점부터 수직방향높이 $(= y - \epsilon)$

y^+ : 무차원 높이 $\left(= \frac{(y-\epsilon)u_\tau}{\nu} \right)$

ΔU^+ : 조도함수

δ : 경계층 두께

δ_0 : 표면조도 시작위치에서 경계층 두께

δ^* : 배제 두께

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
 E-mail : hjsung@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3027 FAX : (042)869-5027

* 한국과학기술원 기계공학과

** 현대중공업 선박저항추진 연구실

*** 한국해양대학교 기계정보공학부

- ϵ : 가상원점의 높이
- ζ : 표면조도의 두께
- θ : 운동량 두께
- λ : 두 표면조도 사이의 간격
- λ_{ci} : 스윙강도
- κ : von Karman 상수
- ν : 동점성계수

1. 서 론

난류경계층은 유체역학에서 가장 흔히 접하게 되는 문제 중 하나이며 많은 산업현장에서 접하게 되는 필수적인 요소 중 하나이다. 자동차, 선박, 항공기, 열교환기 등 실제 산업현장에서 이용되고 있는 표면은 매끄럽지 않고 어느 정도의 표면조도(surface roughness)를 가지고 있으며 이러한 표면조도는 표면저항과 열전달을 증가시키기 때문에 매우 중요한 설계인자 중 하나이다. 때문에 이러한 표면조도가 난류경계층에 미치는 영향에 대한 연구가 실험과 수치해석을 이용하여 지속적으로 이루어지고 있다.

표면조도가 난류유동에 어떠한 영향을 끼치며 이러한 영향이 표면조도로부터 얼마나 떨어진 영역까지 존재하는지에 대한 실험적 연구가 오래전부터 이루어져 왔으며 이를 통해 Perry 등,⁽¹⁾ Raupach 등⁽²⁾은 표면조도가 충분히 작고 레이놀즈수가 충분히 큰 경우 표면조도가 난류구조에 미치는 영향은 조도저층(roughness sublayer)에 국한되며 표면조도로부터 멀리 떨어진 바깥영역의 경우 매끄러운 표면을 가진 난류경계층과 난류구조의 차이가 크지 않다고 주장되어 왔다. 이를 'Townsend wall similarity' 가설⁽³⁾이라고 하는데 Flack 등,⁽⁴⁾ Schultz 등⁽⁵⁾은 크기가 매우 작은 3차원의 불규칙한 표면조도의 경우 레이놀즈 수가 매우 큰 난류유동에 대한 일련의 실험들을 통하여 기존의 'Townsend wall similarity' 가설이 잘 성립함을 보인바 있다.

반면, 2차원의 막대형상의 표면조도의 경우 비슷한 크기의 3차원의 불규칙한 표면조도에 비해 난류경계층에 미치는 영향이 더 크며 더 먼 영역까지 영향이 전파되는 것으로 보고된 바 있다. Krogstad 등⁽⁶⁾은 2차원 원형막대형상의 표면조도가 $\langle v^{+2} \rangle$ 및 $\langle -uv^+ \rangle$ 의 크기를 증대시키며 이러한 영향이 조도저층에 국한되지 않고 바깥 영역에도

존재함을 보고하였으며, Krogstad 등⁽⁷⁾은 이러한 표면조도의 영향이 표면조도의 기하학적 형상에 따라 미치는 영향과 크기가 다름을 보인 바 있다. 김경천 등⁽⁸⁾은 외벽에 2차원 막대형상의 표면조도가 있는 이중동심관 유동의 난류구조를 측정하여 표면조도가 채널 전체의 난류에너지 분포에 영향을 미치는 것을 확인하였으며 내외관 반경비가 커질수록 난류전단 응력의 변화가 심하게 나타난다고 보고한 바 있다.

이와 같은 기존의 실험결과들을 검증하고 표면조도가 난류유동에 미치는 영향을 보다 명확히 규명하기 위하여 최근 들어 직접수치모사를 이용한 수치적 연구가 활발히 이루어진 바 있다. Ashrafian 등⁽⁹⁾은 2차원 막대형상의 표면조도가 위아래에 대칭으로 존재하는 채널 내 난류유동을 직접수치모사하였으며 표면조도의 영향이 바깥영역까지 크게 전파되지 않는 결과를 보여주었다. 반면 Bhaganagar 등⁽¹⁰⁾은 3차원 계란관 형상의 표면조도가 아랫면에만 존재하는 채널 내 난류유동을 직접수치모사하여 난류응력에 대한 표면조도의 영향은 바깥영역에까지 존재하나 와도섭동(vorticity fluctuations)에 대한 영향은 바깥영역까지 전파되지 않음을 보고하였다. 기존 연구결과들 간의 이러한 차이점을 설명하기 위하여 Krogstad 등⁽¹¹⁾은 표면조도가 난류유동에 미치는 영향이 유동조건에 따라 달라질 수 있음을 주장하였는데 예를 들면, 유동이 경계층 유동인지 채널 유동인지, 채널의 윗면과 아랫면의 표면조도가 대칭적인지 비대칭적인지 등에 따라 표면조도에 의한 영향이 서로 다를 수 있다고 주장하였다.

난류경계층의 경우 기존의 많은 실험결과에 비하여 직접수치모사 결과가 보고되지 못하여 실험과의 비교검증이 이루어지지 못하여 왔는데 최근 들어 Lee and Sung⁽¹²⁾이 표면조도가 있는 난류경계층에서의 직접수치모사를 처음으로 수행하여 2차원 막대형상의 표면조도가 조도저층 바깥영역까지 난류응력의 크기를 변화시킴을 보인 바 있다. 이를 통해 난류경계층 내에서의 표면조도에 의한 길이 척도의 변화, 상사성 성립 여부, 조도저층 내 난류구조의 변화 등에 관한 다양한 정보를 제공하였다. 하지만 Lee and Sung⁽¹²⁾은 $k/\delta = 0.05$ 크기의 2차원 막대를 사용하였는데 이는 Jimenez⁽¹³⁾가 주장한 $k/\delta \leq 0.025$ 조건을 만

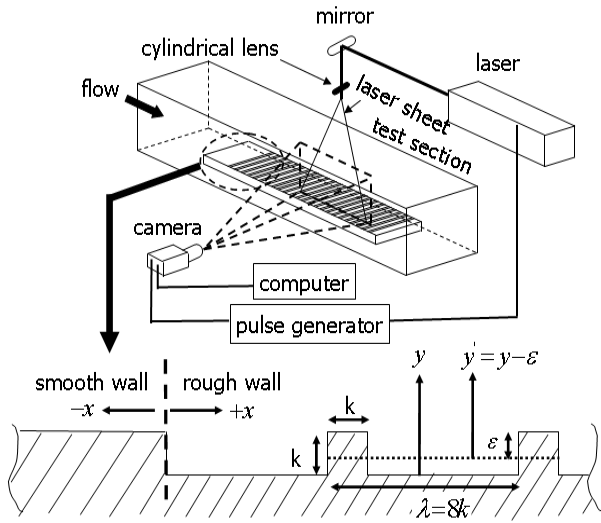


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

족하지 못하는 단점이 존재하였다. Jimenez⁽¹³⁾가 주장한 조건을 만족시킬만큼의 매우 작은 표면조도를 공간발달하는 난류경계층에서 직접수치모사하기 위해서는 필요한 계산량이 매우 방대해지는 문제점이 존재하여 현재까지 이러한 직접수치모사가 이루어지는데 어려움을 겪고 있다.

실험의 경우 수치해석과 달리 매우 작은 표면조도를 가진 난류유동에 대한 연구가 상대적으로 용이하다. 하지만 기존의 hot-wire나 LDV(Laser Doppler Velocimetry) 등의 한 점에서 측정하는 실험의 경우 공간적으로 매우 불균일성이 강한 표면조도 부근에서의 난류유동장을 명확히 측정하는 것이 어렵다는 단점이 있으며 난류유동의 공간적 변화를 규명하는데 한계점이 존재한다.

반면 입자유속영상계(PIV)의 경우 유동장의 공간적 분포를 쉽게 측정할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인하여 최근 들어 PIV를 활용하여 표면조도 내에서의 난류구조 변화를 규명하기 위한 연구가 매우 활발히 이루어지고 있다. Islam 등⁽¹⁴⁾은 한 쪽 벽에 2차원 막대($k/D_h = 0.1$)가 위치한 정사각형 채널 내에서의 레이놀즈수 변화 및 표면조도 사이의 간격의 변화에 따른 난류구조의 변화를 연구하기 위하여 PIV 측정을 수행한 바 있으며 Pokrajac 등⁽¹⁵⁾은 2차원 막대형상의 표면조도($k/H = 0.067 \sim 0.17$)가 있는 수로 내에서의 PIV 측정을 통해 사분면 해석(quadrant analysis)을 수행하여 표면조도에 의해 야기되는 난류섭동에 대한 연구를 수행한 바 있다. Volino 등⁽¹⁶⁾은 3차원 그물(woven mesh) 형태의 표면조도

Table 1 Boundary layer parameters.(flume)

Wall	U_∞ (m/s)	δ (mm)	u_τ (m/s)	Re_θ	k_s^+	k/δ	k_s/δ
Smooth	0.204	66.8	0.0100	1078	-	-	-
Rough	0.205	80.0	0.0133	1491	103	0.025	0.126

($k/\delta = 0.014$)가 있는 난류경계층 내에서의 PIV 측정을 통해 표면조도에 의한 난류섭동의 스펙트럼(spectrum), 상관계수(correlation) 등의 변화에 대한 연구를 수행한 바 있다. Wang 등⁽¹⁷⁾은 한 쪽 벽면에 2차원 막대 형태의 표면조도($k/H = 0.15$)가 있는 정사각형 채널 내에서 PIV를 이용하여 표면조도 후류에서 생성되는 와 구조, 와도 두께(vorticity thickness)의 성장 등에 대한 관찰을 수행한 바 있다. Djenidi 등⁽¹⁸⁾은 2차원 막대형태의 표면조도($k/\delta = 0.026$)가 있는 난류경계층에서의 PIV 측정을 통하여 표면조도 사이의 간격의 변화에 따른 난류응력, 난류에너지 생성의 변화 등에 대한 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 기존의 Lee and Sung⁽¹²⁾의 직접 수치모사 결과를 보완하기 위하여 두 배 더 작은 $k/\delta = 0.025$ 크기의 2차원 막대를 사용하여 표면조도가 난류경계층에 미치는 영향을 PIV를 사용하여 측정해보았으며 이를 통하여 직접수치모사 결과와의 비교 검증을 수행하였다. 특히 Jimenez⁽¹³⁾가 제안한 조건($k/\delta \leq 0.025$)을 만족시키는 작은 높이를 갖는 표면조도에서도 조도저층 바깥 영역에서의 표면조도 영향의 존재 유무를 규명하기 위하여 난류응력의 변화를 비교해 보았다. 또한 PIV와 DNS 결과의 비교검증을 통하여 PIV를 이용한 난류구조 해석의 정확도 및 타당성을 검증해 보았으며 2차원 막대 형상의 표면조도에 의해 발생하는 와구조(vortical structure)의 공간적 변화를 분석해 보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 수동 및 시험부

Fig. 1은 실험에 사용된 수동의 시험부, PIV 실험장치 및 2차원 막대형상의 표면조도에 대한 개략도를 보여주고 있다. 실험은 폭 0.25m, 깊이 0.275m, 길이 2m의 열린 수동에서 이루어 졌으며 시험부는 투명 아크릴로 제작되었다. 디퓨저와

노즐 부분은 스크린을 사용하여 난류강도를 감소시켰으며 시험부의 시작부분에 평판을 설치하고 평판의 전연(leading edge)으로부터 2cm 떨어진 부분에 난류유동의 완전발달을 돕기 위해 지름 3mm의 철사와 CC-80Cw의 사포를 부착하였다.

2.2 실험조건 및 표면조도

열린 형태의 수동 윗면에서의 free surface에서의 속도구배는 거의 무시할 정도로 작았으며 이곳에서의 속도를 U_∞ 로 정의하였다. δ 는 주유동 방향속도가 U_∞ 의 99%가 되는 지점의 높이로 정의하였다. 배제 두께(displacement thickness)와 운동량 두께(momentum thickness)는 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다.

$$\delta^* = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \tag{1}$$

$$\theta = \int_0^\infty \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \tag{2}$$

표면조도는 Fig. 1에서 보는 것 같이 높이(k)가 2mm이며 정사각형 단면을 가진 2차원 막대모양이며 표면조도 간의 간격(λ)는 높이의 8배로서 k 타입 표면조도에 해당한다. 평판의 전연으로부터 하류방향으로 700mm 되는 부분에서부터 1300mm 되는 부분까지 600mm의 표면조도를 가공한 아크릴 판을 설치하였다. Lee and Sung⁽¹²⁾의 경우 표면조도가 매끈한 면에 비하여 위로 솟아오른 형태의 2차원 막대를 사용하였지만 본 연구에서는 표면조도의 급격한 변화로 인한 영향을 줄이기 위하여 표면조도의 윗면의 위치가 상류의 매끈한 면과 일치하도록 Fig. 1과 같이 아랫쪽으로 공동을 파는 형태의 표면조도를 사용하였다. 주유동 방향 길이는 표면조도가 시작되는 부분을 $x=0$ 으로 정의하였으며 이때의 경계층 두께(δ_0)로 무차원화 하였다. 표면조도가 있는 난류경계층의 경우 $\delta_0 = 0.074m$ 이고 매끈한 벽면의 난류경계층의 경우 $\delta_0 = 0.067m$ 이다.

마찰속도(friction velocity)는 매끄러운 벽면의 경우 CPM(computational preston-tube method)⁽¹⁹⁾을 이용하여 계산되었다. 표면조도가 있는 경우에는 낮은 레이놀즈 수로 인하여 로그 영역이 짧기 때

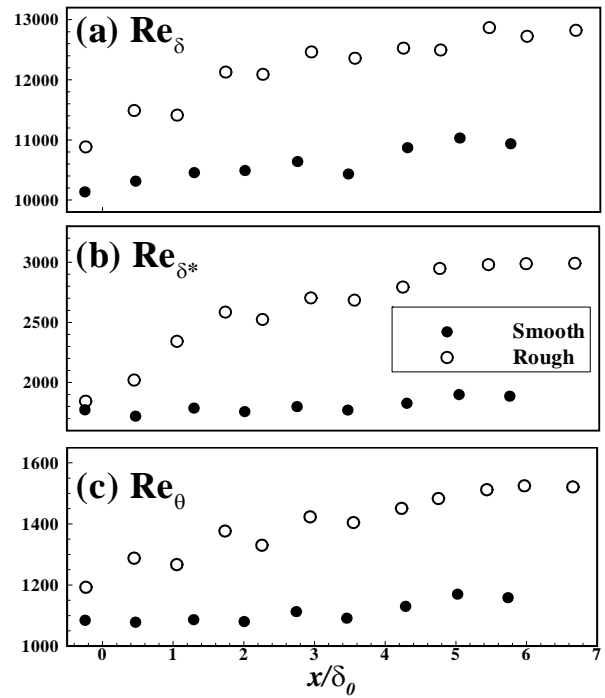


Fig. 2 Variations of length scales along the downstream. (a) boundary layer thickness; (b) displacement thickness; (c) momentum thickness

문에 modified Clauser chart 방법⁽²⁰⁾이나 Krogstad 등⁽⁷⁾이 제안한 fitting 방법을 사용하기가 어려운 문제점이 있다. 본 연구에서는 벽면 부근에서 전체응력(total stress, $\tau_w = \mu dU/dy - \rho \overline{uv}$)이 일정한 영역이 존재한다는 가정 하에 전체응력의 plateau 값을 외삽하여 벽면에서의 마찰속도를 계산하였다(5, 18) 가상원점(virtual origin, ϵ)의 위치는 계산된 마찰속도를 이용하여 Krogstad 등⁽⁷⁾이 제안한 defect form에 맞게 fitting하여 계산하였다. Table 1은 $x/\delta_0 \approx 5.4$ 인 지점에서의 유동조건을 요약하여 보여주고 있다.

2.3 PIV 시스템

PIV를 위한 CCD카메라는 1024×1024 해상도를 갖는 Kodak ES 1.0을 사용하였으며 이미지의 크기는 1008×1016픽셀을 사용하였다. 8ns 동안 30mJ의 레이저를 15Hz까지 발생시킬 수 있는 ND:YAG 레이저(Big Sky Laser, Ultra)와 85mm 렌즈(PC Micro Nikon)를 사용하여 3mm 두께의 수직방향 레이저 시트를 생성하였다. 레이저와 CCD 카메라는 pulse delay generator (Berkeley

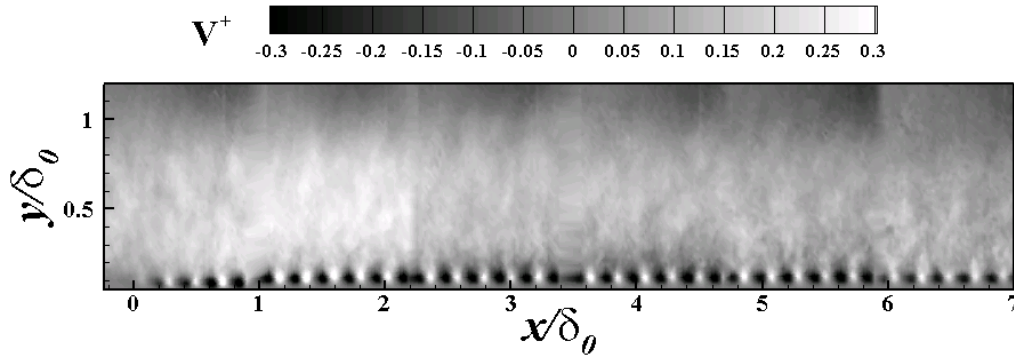


Fig. 3 Iso-contour of wall-normal mean velocity on a rough wall turbulent boundary layer

Nucleonics, BNC-555)에 의해 동기화 되었다.

화각(field of view)은 두 종류를 사용하였는데 경계층 전체의 유동장을 측정하기 위하여 105.5mm의 화각을, 조도저층 내에서의 유동장을 보다 정밀하게 측정하기 위하여 26.3mm의 화각을 사용하였다. 표면조도가 시작되는 부분부터 시험부의 끝까지 전체 유동장을 찍기 위해서 매끈한 면의 경우 5부분, 표면조도가 있는 경우 6부분으로 나누어 유동장을 측정하였다. 하나의 속도벡터를 구하기 위한 두 장의 사진 사이의 시간간격은 3ms이며 각 실험마다 6Hz의 촬영속도로 4800장의 사진을 측정하여 2400개의 속도장을 평균하여 통계량을 계산하였다. 이미지 처리 기법으로는 iterative multigrid 방법⁽²¹⁾과 CBC (Correlation based Correction) 기법⁽²²⁾을 사용하였으며 정확성을 향상시키기 위해 subpixel resolution으로 내삽하였다. 최종 상관영역은 전체 유동장을 측정하기 위한 105.5mm의 화각을 사용할 때에는 32×32 픽셀을 선택하였고 조도저층 내에서의 유동장을 보다 정밀하게 측정하기 위하여 26.3mm의 화각을 사용할 때에는 16×16 픽셀로 선택하였으며 50%의 오버랩을 사용하여 속도벡터를 추출하였다. 또한 에러벡터를 줄이기 위하여 local median filter correction 기법⁽²³⁾을 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1 길이 척도의 변화

Fig. 2는 매끈한 면과 표면조도가 존재하는 두 난류경계층에 대하여 주유동방향에 따른 레이놀즈 수들의 변화를 보여주고 있다. 각각의 레이놀

즈 수는 경계층 두께, 배제 두께, 운동량 두께로 무차원화 되었다. Fig. 2에서 보는 것과 같이 표면조도가 존재하는 경우 매끈한 면에 비하여 주유동방향에 따른 경계층 두께, 배제 두께, 운동량 두께의 증가율이 커지는 것을 볼 수 있다. Lee and Sung⁽¹²⁾의 DNS의 경우 표면조도가 시작되는 영역 부근에서 길이 척도의 급격한 변화가 나타났었는데 본 PIV 실험에서는 이러한 급격한 변화가 크게 나타나지 않았다. 이러한 차이는 Lee and Sung⁽¹²⁾의 경우 첫 번째 표면조도가 평판에 대해 위로 솟아오른 형태의 막대를 사용하였으며 첫 번째 표면조도 높이와 경계층 두께의 비가 $k/\delta_0 = 0.125$ 정도로 커서 하류에 비해서 표면조도가 상대적으로 영향을 많이 끼친데 반해, 본 PIV 실험에서는 첫 번째 표면조도가 평판에 대해 아래로 꺼진 형태의 막대를 사용하였으며 첫 번째 표면조도에 대한 경계층 두께의 비가 $k/\delta_0 = 0.027$ 로 작아서 DNS에 비해 상대적으로 표면조도의 급격한 변화에 의한 영향이 작게 나타난 것으로 생각된다.

3.2 평균유동장

Fig. 3은 표면조도가 있는 난류경계층에서의 벽수직방향 평균속도장의 분포를 보여주고 있다. 이 때 평균속도는 하류에서의 마찰속도로 무차원화 되었다. 주기적으로 배열된 표면조도에 따라 벽면 부근의 벽수직방향 평균속도가 주기적으로 변화하는 것을 확인할 수 있는데 주유동방향으로 3~4개의 막대만 지나도 거의 동일한 패턴의 유동장이 벽면 부근에서 형성되는 것을 볼 수 있다. 난류경계층이 처음으로 표면조도와 만나는 영역에서는 벽수직방향 속도가 크게 증대되어 바깥영역까지 영향이 크게 전파되는 것을 볼 수 있

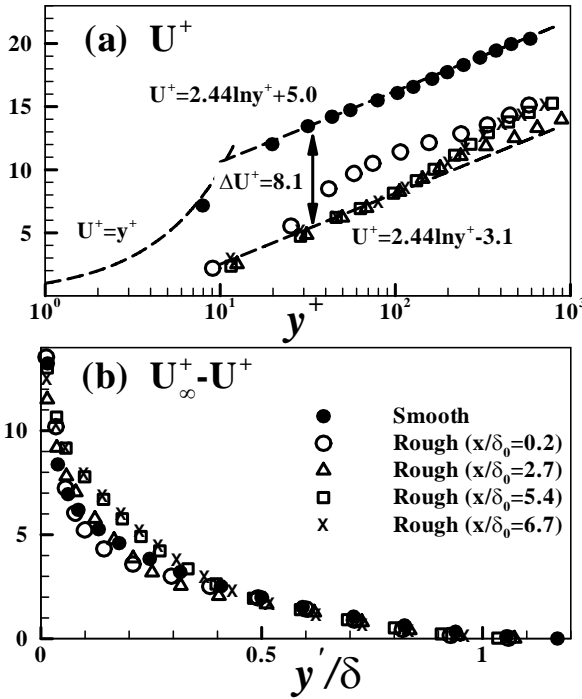


Fig. 4 Variations of streamwise mean velocity along the downstream. (a) log law; (b) defect form

며 이러한 증대는 하류로 갈수록 서서히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한 바깥 영역에서의 평균 유동장은 벽면 부근에 비해 상대적으로 수렴되는데 더 긴 거리를 필요로 하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향들은 Lee and Sung⁽¹²⁾의 표면조도가 있는 난류경계층에서의 직접수치모사 결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 4는 표면조도가 있는 난류경계층에서 주유동방향에 따른 주유동방향 평균속도의 변화를 보여주고 있다. 또한 이를 매끈한 벽면을 가진 난류경계층에서의 주유동방향 평균속도와 비교하여 보여주고 있다. Fig. 4 (a)에서 보는 것과 같이 표면조도가 있는 경우 주유동방향으로 진행함에 따라 표면조도의 영향을 받아 벽면 부근에서부터 새로운 경계층이 발달되는 것을 볼 수 있으며 표면조도의 급격한 변화로부터 $1 \sim 2\delta_0$ 진행하면 새로운 로그 법칙을 만족하는 것을 볼 수 있다. 표면조도가 있는 난류경계층에서의 로그 법칙은 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \log y^+ + B - \Delta U^+ \quad (3)$$

이 때, κ 는 von Karman 상수로 0.41, B 는 매끄러

운 난류경계층에서의 상수로 5.0의 값을 가진다. ΔU^+ 는 조도함수(roughness function)로서 표면조도가 있는 난류경계층의 로그영역에서 주유동방향 속도가 감소한 크기를 의미하는데 본 연구에서는 $\Delta U^+ = 8.1$ 로 측정되었다. 유효사조도높이 (effective sand roughness height)는 아래와 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\Delta U^+ = \frac{1}{\kappa} \log k_s^+ - 3.2 \quad (4)$$

$$k_s^+ = \exp(\kappa(\Delta U^+ + 3.2)) \quad (5)$$

본 연구에서는 $k_s^+ = 102.8$ 로서 $k_s^+ > 70$ 을 만족하기 때문에 표면조도가 있는 난류경계층이 완전 발달(fully rough)하기에 충분히 큰 것을 확인할 수 있다.⁽²⁴⁾

Fig. 4(b)는 주유동방향 평균속도를 defect form으로 보여주고 있는데 표면조도가 있는 경우 표면조도의 급격한 변화로부터 약 $x/\delta_0 > 5.4$ 정도 하류방향으로 진행한 후에 바깥 영역에서 상사성이 성립하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 4(a)에서 보는 것과 같이 표면조도가 있는 경우 후류강도(wake strength)가 매끈한 면에 비하여 증가하여 이로 인해 매끈한 면과 비교하였을 때 $y'/\delta < 0.5$ 영역에서 defect form의 차이가 존재하는 것을 볼 수 있다. 이러한 후류강도의 증가는 막대형 표면조도의 영향이 조도저층 내로 국한되지 않고 바깥영역의 후류 영역까지 영향을 주는 것을 의미하며 이는 Krogstad 등⁽⁷⁾의 주장과 일치하는 것을 보여준다.

3.3 난류응력 분포

Fig. 5는 표면조도가 있는 난류경계층에서의 난류전단응력($\langle -u^+v^+ \rangle$)의 분포를 보여주고 있다. 난류전단응력은 하류에서의 마찰속도로 무차원화되었다. 표면조도가 시작되는 $x=0$ 에서부터 하류로 진행함에 따라 표면조도로 인해 난류전단응력이 증가하여 점점 바깥 영역으로 전파되고 있는 것을 확인할 수 있다.

Lee and Sung⁽¹²⁾은 그들의 DNS 연구에서 표면조도가 있는 난류경계층의 경우 표면조도의 급격한 변화($k/\delta = 0.125$)로부터 약 $30 \delta_0$ 이상 충분히 하류 방향으로 진행되어야 표면조도의 영향이 충분히 전파되어 난류경계층이 완전 발달된 평형상

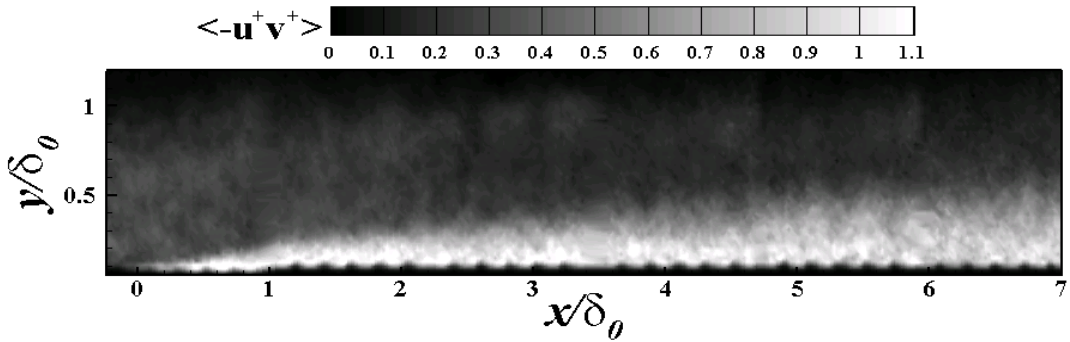


Fig. 5 Iso-contour of turbulent Reynolds shear stress on a rough wall turbulent boundary layer

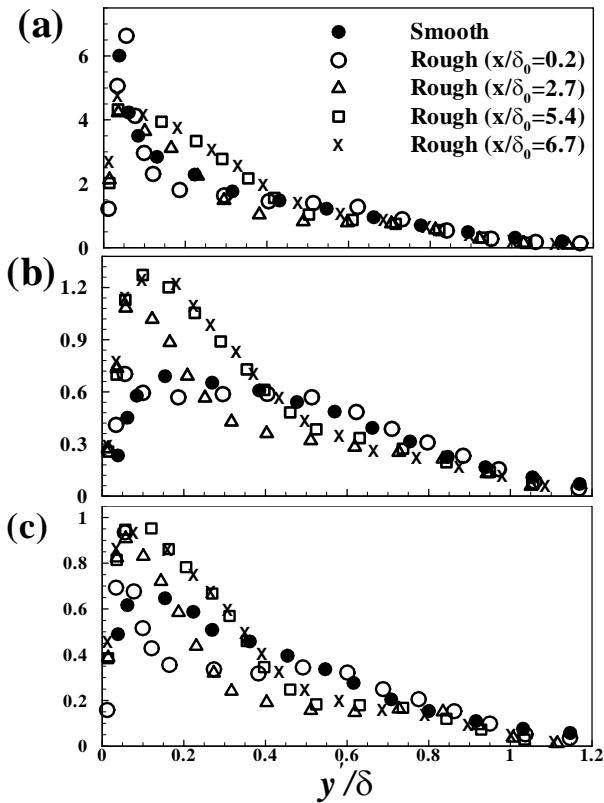


Fig. 6 Variations of turbulent Reynolds stresses along the downstream

태에 도달할 수 있으며 이 경우 바깥 영역에서 난류응력의 분포가 레이놀즈 상사성을 가짐을 보고한 바 있다. 또한 Antonia and Luxton⁽²⁵⁾은 본 연구와 비슷하게 아래로 꺼진 2차원 막대 ($k/\delta_0 = 0.067$)를 표면조도로 사용하였는데 난류응력이 레이놀즈 상사성을 갖는데 약 $18 \delta_0$ 가 필요하다고 보고한 바 있다. 또한 첫 번째 표면조도로 위로 솟은 형태와 아래로 꺼진 형태를 비교하여 아래로 꺼진 형태의 표면조도를 사용하는

것이 표면조도의 급격한 변화로 인한 영향을 최소화할 수 있다고 보고한 바 있다.

Fig. 6은 표면조도가 있는 난류경계층에서 하류 방향으로 진행함에 따라 난류응력의 변화를 매끈한 면에서의 난류응력과 비교하여 보여주고 있다. 첫 번째 표면조도로부터 하류 방향으로 약 $x/\delta_0 > 5.4$ 이상 지난 지점에서 바깥 영역에서의 난류응력 분포가 수렴되는 것을 볼 수 있으며 이는 레이놀즈 상사성이 성립되었음을 의미한다. 이를 통해, 본 연구의 경우 표면조도가 있는 난류경계층이 완전 발달하는데 필요한 거리는 약 $5 \sim 6 \delta_0$ 정도로 추정되는데 이는 Lee and Sung⁽¹²⁾이나 Antonia and Luxton⁽²⁵⁾에 비해 더 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 차이로 볼 때 레이놀즈 상사성이 성립하기 위해 필요한 거리를 줄이기 위해서는 첫 번째 표면조도가 매끈한 면에 비해 위로 솟아오른 형태 보다는 아래로 꺼지는 형태의 막대를 사용하는 것이 유리하며 첫 번째 표면조도에서의 k/δ_0 값이 작을수록 유리하다고 생각된다.

Lee and Sung⁽¹²⁾은 표면조도로 인한 공간적 불균일성이 존재하는 영역을 조도저층으로 규정하였을 때 조도저층의 높이(ζ)를 약 $5k$ 정도로 추정하였다. 동일한 정의를 본 실험에 적용하였을 때 조도저층의 높이는 $\zeta \approx 0.125\delta$ 에 해당한다. 표면조도의 유무에 따른 난류응력의 변화를 서로 비교하여 보면 표면조도로 인한 난류응력의 증가가 약 $y'/\delta < 0.5 \sim 0.6$ 영역까지 존재하는 것을 볼 수 있으며 이보다 바깥 영역에서는 실험오차 범위 안에서 일치하는 경향을 확인할 수 있다. 표면조도의 영향이 존재하는 범위는 벽면으로부터 약 $y \approx 20 \sim 30k$ 이내로서 조도저층의 높이의

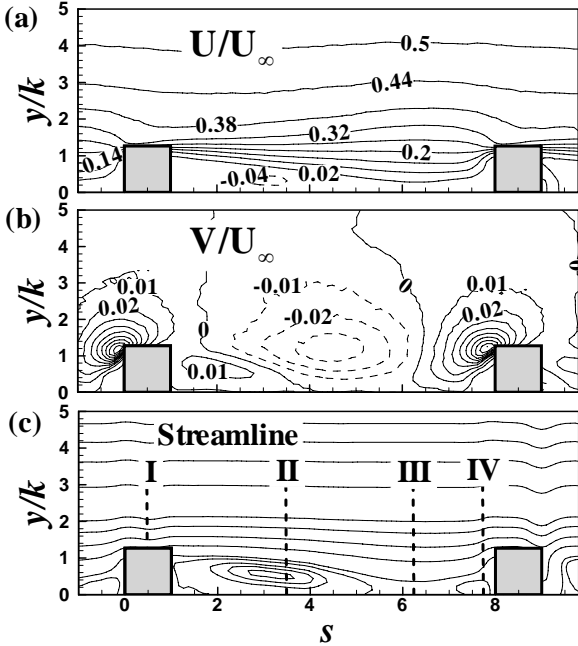


Fig. 7 2D iso-contours of mean quantities in the roughness sublayer (PIV, present)

4 ~ 5배 정도에 해당한다. 이는 조도저층 바깥의 영역까지 표면조도가 난류응력에 영향을 미치는 것을 의미하며 이는 막대형 표면조도를 사용한 Krogstad 등^(7,8) 및 Lee and Sung⁽¹²⁾의 결과와 일치하는 경향을 보여주고 있다.

Schultz 등⁽²⁶⁾은 표면조도가 미치는 영향의 범위를 정의할 때 k 대신 k_s 를 사용하는 것이 더 적절하며 조도저층 바깥영역에서의 난류응력의 증가는 $5k_s/\delta > 0.2$ 인 strong roughness를 사용하였기 때문이라고 주장한 바 있다. 일반적으로 막대 형태의 표면조도의 경우 k_s 가 k 에 비해 수 배 이상 큰 값을 가지기 때문에 Schultz 등⁽²⁶⁾이 제시한 $5k_s/\delta \leq 0.2$ 조건을 만족시키기 위해서는 매우 작은 크기의 표면조도를 사용해야 하는 어려움이 존재한다. Lee and Sung⁽¹²⁾의 경우 $5k_s \approx 1.59\delta$ 였으며 본 연구의 경우 $5k_s \approx 0.63\delta$ 로서 모두 strong roughness에 해당된다. 이를 고려하면 본 연구에서 표면조도에 의한 난류응력의 변화는 약 $y \leq 4 \sim 5k_s$ 영역에 해당하는데 이는 Schultz 등⁽²²⁾의 주장의 타당성을 뒷받침해주고 있다.

3.4 조도저층 내 난류 구조 영향

Fig. 7은 조도저층 내의 자유흐름 속도로 무차원화된 평균속도장과 유선(streamline)을 PIV를 이용

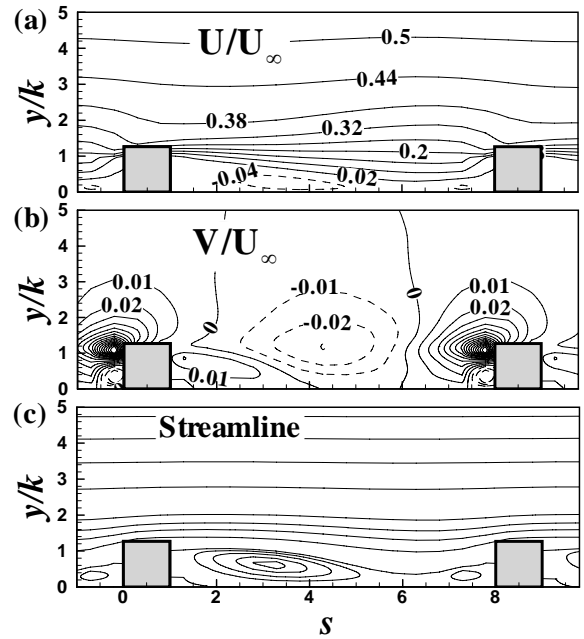


Fig. 8 2D iso-contours of mean quantities in the roughness sublayer (DNS⁽¹²⁾)

하여 측정된 것이다. 더 높은 해상도를 위하여 화각은 26.3mm를 사용하였다. 주유동방향 길이는 그림에서 보이는 첫 번째 막대의 위치(x_0)를 기준으로 $s = (x - x_0)/k$ 로 정의되었으며 벽수직방향 길이도 표면조도의 높이로 무차원화 되었다. Fig. 8은 Lee and Sung⁽¹²⁾의 DNS 결과에서 보여준 조도저층 내에서의 평균속도장이다. Fig. 7과 Fig. 8을 비교하여 보면 평균속도장의 크기와 분포 및 유선이 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 두 막대 사이의 공동(cavity)에서 벽수직방향 속도가 음의 값을 가지는 영역, 막대의 전연에서 벽수직방향속도가 크게 증가하는 영역, 두 막대 사이에 존재하는 재순환영역과 2개의 와(vortex)의 위치도 PIV와 DNS 결과 사이에 매우 높은 일치성을 보여준다.

Fig. 9는 조도저층 내의 자유흐름 속도로 무차원화된 난류응력장을 PIV를 이용하여 측정된 결과를 보여주고 있으며 Fig. 10은 Lee and Sung⁽¹²⁾의 DNS 결과를 비교하여 보여주고 있다. 난류응력에 대한 PIV 측정결과 역시 수렴정도가 부족하여 매끈한 결과를 보여주진 못하지만 전체적으로 난류응력의 크기 및 분포가 DNS 결과와 매우 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다. PIV의 경우 표면조도의 전연이나 윗면 등에서의 강한 난류강도의 크기를 DNS 보다 작게 예측하는 결과를 보여주었다. 하지만 전체적으로 볼 때 PIV는 표면조도 부근의 난류유동

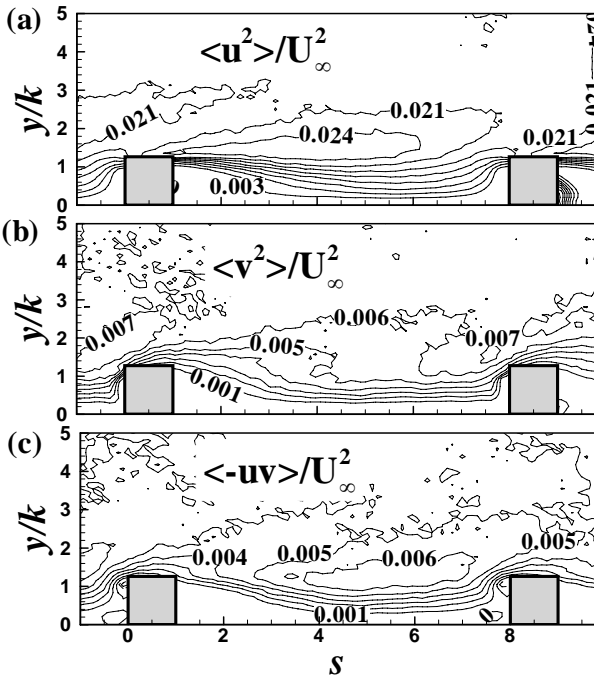


Fig. 9 2D iso-contours of turbulent Reynolds stresses in the roughness sublayer (PIV, present)

장의 분포를 측정함에 있어서 거의 DNS와 비슷한 정확도를 가질 수 있음을 알 수 있다. 또한 Figs. 7~10에서 PIV와 DNS는 서로 다른 크기의 표면조도를 사용하였음에도 불구하고 조도저층 내에서의 난류통계량의 분포 및 크기가 매우 잘 일치하고 있는데 이는 매끄러운 난류경계층 내 점성저층(viscous sublayer)에서 일반적으로 마찰속도와 점성 길이척도(ν/u_τ)를 속도 및 길이척도로 선택하는 것에 반해 조도저층 내에서는 자유흐름속도와 표면조도 높이가 상사성이 성립하기 위해 적절한 속도 및 길이 척도임을 보여주고 있다.

Fig. 11은 조도저층 내에서의 와구조의 변화를 보여주고 있다. Fig. 11(a)는 대류속도(convection velocity) $U_c = 0.7U_\infty$ 를 이용하여 Galilean decomposition을 수행한 순간유동장의 속도벡터와 스월강도(swirling strength, λ_{ci})⁽²⁷⁾를 보여주고 있다. 표면조도 윗면에서부터 하류방향으로 비스듬하게 발생한 와구조를 확인할 수 있으며 와구조의 머리에 해당하는 와(점선 표시)가 약 $y \approx 5k$ 정도 영역에 존재함을 확인할 수 있다. Fig. 11(b)는 좀 더 작은 대류속도 $U_c = 0.5U_\infty$ 를 이용하여 Galilean decomposition을 수행한 순간유동장의 속도벡터와 swirling strength를 보여주고 있으며 표면조도 윗부

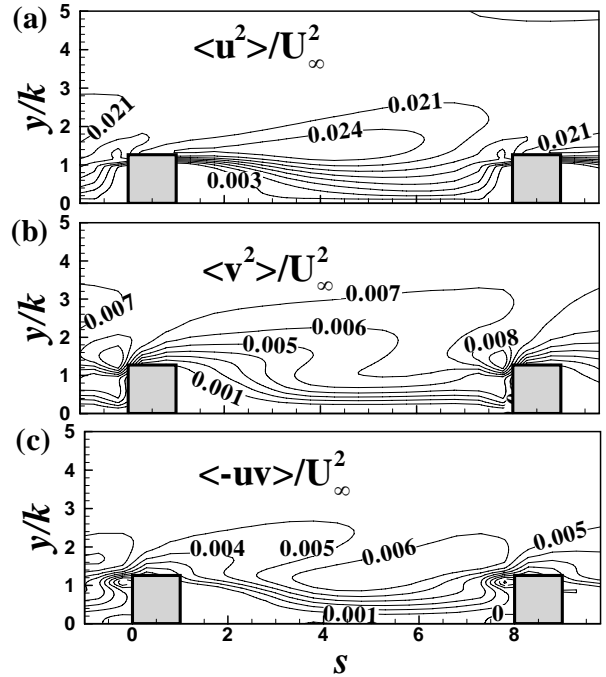


Fig. 10 2D iso-contours of turbulent Reynolds stresses in the roughness sublayer (DNS⁽¹²⁾)

분의 $y \approx 2k$ 정도 영역에 와구조(점선 표시)가 막 생성되어 있는 것을 볼 수 있다. Wang 등⁽¹⁷⁾도 표면조도 후류에서 생성된 연속된 와구조가 비스듬하게 생성되는 것을 관찰한 바 있다. 이러한 와구조는 표면조도 후류에서 떨어져나간 전단층(separated shear layer)으로 인해 발생하는 것으로 생각된다. 두 막대 사이의 공동 내에도 스월강도가 강한 영역을 확인할 수 있으며 이는 재순환으로 인하여 발생하는 와구조로 생각되며 이는 Wang 등⁽¹⁷⁾이 보고한 바 있는 공동 내로 유입되는 와구조와 일치된 경향을 확인할 수 있다. Fig. 11(c)는 순간유동장에서의 속도섭동(velocity fluctuation) 벡터를 보여주고 있다. 두 막대 사이의 공동 영역에서 위쪽의 빠른 속도를 가진 유동이 공동 내로 유입되는 Q4(sweep) event가 매우 활발히 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이는 표면조도로 인해 벽면 부근에서의 Q4 event가 증가한다는 기존 문헌 결과들과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

막대형 표면조도가 있는 난류경계층에 미치는 영향에 대한 PIV 실험이 이루어졌다. 특히 막대형

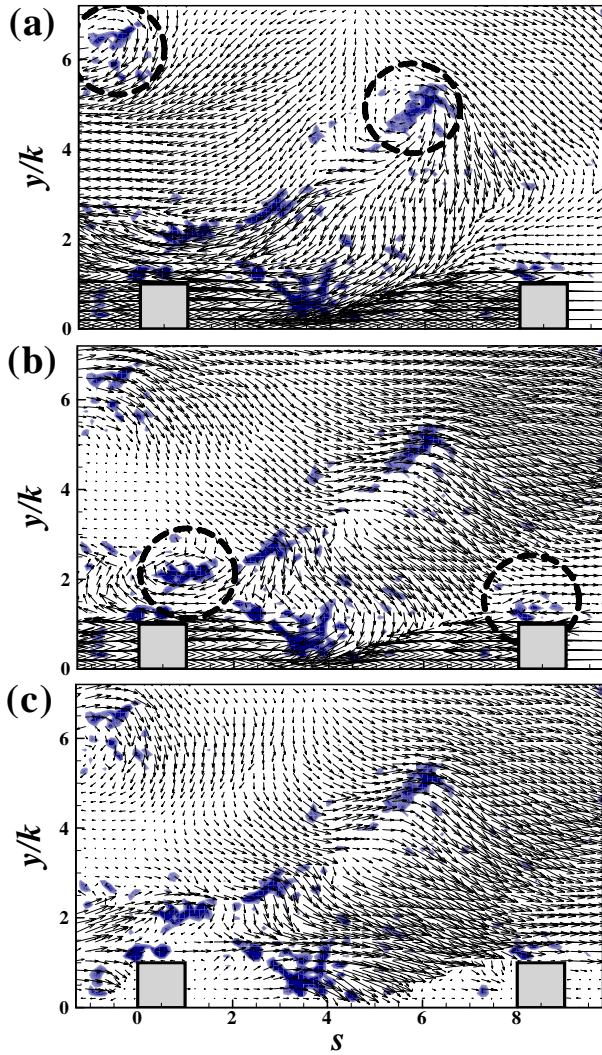


Fig. 11 Vortical structures near the roughness sublayer
 (a) Galilean decomposition with $U_c = 0.7U_\infty$;
 (b) Galilean decomposition with $U_c = 0.5U_\infty$;
 (c) Velocity fluctuations

표면조도가 난류경계층 내 난류응력과 난류구조에 미치는 영향에 대하여 기존의 난류경계층에서의 DNS 결과⁽¹²⁾와의 비교검증이 이루어졌다. Jimenez⁽¹³⁾가 제안한 $k/\delta \leq 0.025$ 조건을 만족하는 작은 막대형 표면조도에 의해서 조도저층 바깥영역($y > 20 \sim 30k$)에까지 후류강도 및 난류응력의 변화가 존재함을 확인하였다. 이는 2차원 막대형 표면조도의 경우 3차원의 불규칙한 표면조도에 비해 높이가 같더라도 상대적으로 더 큰 영향을 미치기 때문으로 생각된다. 본 연구의 경우 $5k_s/\delta = 0.63$ 정도로서 Schultz 등이 제안한 $5k_s/\delta \leq 0.2$ 조건을 만족하지 못하는 strong roughness에 해당하며 이로 인하여 조도저층 바깥

영역에서 난류응력의 영향이 존재하는 것으로 생각된다. 또한 본 연구에서 표면조도의 영향이 미치는 범위는 약 $y \leq 4 \sim 5k_s$ 정도로 Schultz 등⁽²³⁾이 주장한 effective sand roughness height를 이용한 조도저층의 범위 $y \leq 5k_s$ 와 일치하는 경향을 보이고 있으며 이는 표면조도의 높이(k) 보다는 effective sand roughness height (k_s)의 크기가 표면조도의 영향이 미치는 영역에서 더 중요한 길이 척도임을 뒷받침해준다.

PIV 측정에 의한 조도저층 내에서의 평균속도장 및 난류응력장의 분포는 DNS 결과와 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었으며 이는 공간적 불균일성이 매우 강한 조도저층 내에서의 난류구조의 변화를 규명하는데 있어서 PIV가 매우 효과적인 측정 기법임을 뒷받침하는 결과라 할 수 있다. 조도저층 내에서 표면조도에 의해 생성된 와구조를 순간유동장을 통해 확인할 수 있었으며 2차원 막대형 표면조도로 인해 공동 내로 유입되는 Q4(sweep) event가 매우 활발히 발생함을 볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 2007년 정부(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 한국과학기술정보연구원의 'Grand Challenge 지원 프로그램'의 도움으로 수행되었음. 컴퓨터 자원을 제공해 준 슈퍼컴퓨팅센터와 기술지원을 해 준 이상민 박사 및 Ali 연구원에게 감사함.

참고문헌

- (1) Perry, A. E., Lim, K. L. and 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.
- (2) Raupach, M. R., Antonia, R. A. and Bajagopalan, S., 1991, "Rough-wall Turbulent Boundary Layers," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 44, pp. 1~25.
- (3) Townsend, A. A., 1976, "The Structure of Turbulent Shear Flow," Cambridge University Press.
- (4) Flack, K. A., Schultz, M. P. and Shapiro, T. A.,

- 2005, "Experimental Support for Townsend's Reynolds Number Similarity," *Phys. Fluids*, Vol. 17, 035102.
- (5) 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.
- (6) Krogstad, P. -Å., Antonia, R. A. and 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. and Antonia, R. A., 1999, "Surface Roughness Effects in Turbulent Boundary Layers," *Exp. Fluids*, Vol. 27, pp. 450~460.
- (8) Kim, k. c., Ahn, s. h. and Lee, b. k., 1994, "Turbulence Structures of Flow in Concentric Annuli with Rough Outer Wall," *Trans. of the KSME*, Vol. 17, No. 9, pp. 2443~2453.
- (9) Ashrafian, A., Andersson, H. I. and Manhart, M., 2004, "DNS of Turbulent Flow in a Rod-roughened Channel," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 373~383.
- (10) Bhaganagar, K., Coleman, G. and Kim, J., 2004, "Effect of Roughness on Wall-bounded Turbulence," *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 72, pp. 463~492.
- (11) Krogstad, P. -Å., Andersson, H. I., Bakken, O. M. and Ashrafian, A., 2005, "An Experimental and Numerical Study of Channel Flow with Rough Walls," *J. Fluid Mech.*, Vol. 530, pp. 327~352.
- (12) Lee, S. -H. and Sung, H. J., 2007, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Boundary Layer Over a Rod-roughened Wall," *J. Fluid Mech.*, Vol. 584, pp. 125~146.
- (13) Jimenez, J., 2004, "Turbulent Flows Over Rough Walls," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 36, pp. 173~196.
- (14) Islam, M. S., Haga, K., Kaminaga, M., Hino, R. and Monde, M., 2002, "Experimental Analysis of Turbulent Flow Structure in a Fully Developed Rib-roughened Rectangular Channel with PIV," *Exp. Fluids*, Vol. 33, pp. 296~306.
- (15) Pokrajac, D., Campbell, L. J., Nikora, V., Manes, C. and McEwan, I., 2007, "Quadrant Analysis of Persistent Spatial Velocity Perturbations Over Square-bar Roughness," *Exp. Fluids*, Vol. 42, pp. 413~423.
- (16) Volino, R. J., Schultz, M. P. and Flack, K. A., 2007, "Turbulence Structure in Rough- and Smooth-wall Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 592, pp. 263~293.
- (17) Wang, L., Hejczyk, J. and Sunden, B., 2007, "PIV Measurement of Separated Flow in a Square Channel with Streamwise Periodic Ribs on one Wall," *J. Fluid Eng*, Vol. 129, pp. 834~841.
- (18) Djenidi, L., Antonia, R. A., Amielh, M. and Anselmet, F., 2008, "A Turbulent Boundary Layer Over a Two-dimensional Rough Wall," *Exp. Fluids*, Vol. 44, pp. 37~47.
- (19) Nitcher, W., Thunker, R. and Haberland, C., 1983, "A Computational Preston Tube Method," In: *Proceedings of the Fourth Symposium on the Turbulent Shear Flows*, pp. 261~276.
- (20) Perry, A. E. and Li, J. D., 1990, "Experimental Support for the Attached-eddy Hypothesis in Zero-pressure Gradient Turbulent Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 37, pp. 383~413.
- (21) Scarano, F. and Riethmuller, M. L., 1999, "Iterative Multigrid Approach in PIV Image Processing with Discrete Window Offset," *Exp. Fluids*, Vol. 26, pp. 513~523.
- (22) Hart, D. P., 2000, "PIV Error Correction," *Exp. Fluids*, Vol. 29, pp. 13~22.
- (23) Westerweel, J., 1994, "Efficient Detection of Spurious Vectors in Particle Image Velocimetry Data," *Exp. Fluids*, Vol. 16, pp. 236~247.
- (24) Nikuradse, J., 1933, "Laws of Flow in Rough Pipes," *NACA Tech. Memo.* 1292.
- (25) Antonia, R. A. and Luxton, R. E., 1971, "The Response of a Turbulent Boundary Layer to a Step Change in Surface Roughness Part 1. Smooth to Rough," *J. Fluid Mech.*, Vol. 48, pp. 721~761.
- (26) Schultz, M. P. and Flack, K. A., 2005, "Outer Layer Similarity in Fully Rough Turbulent Boundary Layers," *Exp. Fluids*, Vol. 38, pp. 328~340.
- (27) Zhou, J., Adrian, R. J., Balachandar, S. and Kendall, T. M., 1999, "Mechanism for Generating Coherent Packets of Hairpin Vortices," *J. Fluid Mech.*, Vol. 387, pp. 353~396.