한국마린엔지니어링학회지 제29권, 제4호, pp. 453~460, 2005. 5 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

영압력 구배 난류 경계층에서 표면조도가 미치는 영향

김동건† · 김문경* · 윤순현**

(원고접수일 : 2005년 3월 2일, 심사완료일 : 2005년 4월 20일)

The Effect of Surface Roughness on the Zero Pressure Gradient Turbulent Boundary Layers

Dong-Keon Kim† · Moon-Kyung Kim* · Soon-Hyun Yoon**

Abstract : Experiments were conducted to investigate the effect of the surface roughness on the flat plate turbulent boundary layer. The square rods were installed at the leading edge to make surface roughness. The particle image velocimetry was used to measure the mean velocities and velocity fluctuation component. All measurements were made over a range of w/k=1, 2, 5 and Re_x=80,000~360,000. Friction velocity was measured by using Clauser plot method. The level of turbulent intensities on roughness surface appears more strongly than that of turbulent intensities on flat plate. A correlation of boundary layer thickness in term of Re_x and w/k are presented.

Key words : Turbulent boundary layer(난류 경계층), Surface roughness(표면조도), Friction velocity(마찰속도), Particle image velocimetry(입자 영상 유속계)

기호설명

C_f : 표면마찰계수, $\left(=\frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2}\right)$
k : 트리핑 구조물의 높이
L : 트리핑 구조물의 길이
Re_x : 레이놀즈수, $\left(=\frac{Ux}{\nu}\right)$
U : 자유흐름속도
u : x 방향의 속도
u^+ : 무차원속도, $\left(=\frac{U}{u_\tau}\right)$
u_s : x 방향의 R.M.S
u_τ : 마찰속도, $\left(=\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}\right)$
v : y 방향의 속도
v_s : y 방향의 R.M.S
w : 트리핑 구조물 사이의 간격
x : 유동 방향의 좌표
y : 유동 직각 방향의 좌표
y^+ : 무차원거리, $\left(=\frac{u_\tau y}{\nu}\right)$
$\delta_{0.99}$: 경계층두께

† 책임저자(부산대학교 대학원 기계공학과), E-mail:kdkkim@empal.com, Tel: 051)510-1528
* 창원전문대학 기계설계과
** 부산대학교 기계공학부

δ^* : 배제두께
θ : 운동량두께
ρ : 공기의 밀도
ν : 공기의 동점성계수
τ_w : 벽면전단응력

1. 서 론

급속한 산업화가 진행되면서 대도시의 건물들이 고층화, 대형화됨에 따라 이들 고층건물 주변에서 발생하는 풍환경 문제가 관심사가 되기 시작하였다. 이에 따라 건물 주위의 풍환경을 조사하는 실험이 대기경계층을 모사하는 풍동에서 이루어지고 있다. 이를 위하여 풍동 내에서 실험조건에 부합하는 경계층을 생성해야 할 필요가 있다.

풍동내부의 경계층을 제어하는 방법으로는 난류경계층 내에 역압력 구배를 형성시키는 방법과 트리핑 구조물(tripping structure) 또는 거친 표면을 설치하는 방법, 그리고 유동 하부에 발열부를 설치하는 방법 등이 있다. 경계층이 발달하기 시작하는 부분에 트리핑 와이어를 부착하거나 표면을 인위적으로 거칠게 하는 방법은 경계층을 조기에 천이시켜서 증폭시키는 방법이다. 트리핑 구조물은 실린더 형태의 와이어, 입자, 2차원 돌출부, 삼각주 모양, 거친 표면, 구 등 다양한 형태가 있다. 또한 물체 표면의 거칠기가 변화할 때 표면에서 발달되는 경계층의 과도적 특성은 유체공학에서 중요한 관심대상이 되어 왔다. 또한 급격한 조도 변화를 수반하는 과도 지역에서의 난류경계층은 벽면 근처에서 급격한 조도 변화에 따른 새로운 내부 경계층이 생성되고 이 내부 경계층은 하류로 가면서 회복되어 새로운 벽 조건에 맞게 완전히 발달된 난류 경계층을 형성하게 된다. 이 과도 경계층 과정에서 벽상사성(Wall similarity)이 파괴되고 일반적으로 알려진 벽법칙이 성립되지 않는다. Townsend[1]는 유동 방향으로 압력구배가 없을 때 과도 경계층을 이론적으로 분석하여 보통의 대수법칙이 적용되지 않는다고 주장하였고, Anotonia 와 Luxton[2]은 압력구배가 없는 평판에서 과도경계층의 실험적 연구를 통해 Townsend의 주장을 뒷받침하였다. 그리고 Schofield[3]는 압력구배의 유무에 관계없이 불연속 조도점 이후 성장되는 새로운 내부 경계층은 벽면 자체의 특성에 의해서 결정된다고 하였다. Taylor 등[4]은 급격한 표면 변화에서의 난류경계층을 연구하였다. 그 결과 국소 레이놀즈수에 따라 부드러운 면에서 표면마찰계수 C_f값은 거의 일정하고, 거친 면과 부드러운 면이 혼합된 면의 C_f 값은 부드러운 면 경우의 값으로 수렴해간다는 사실을 밝혔다. Dubief 등[5]은 리블릿 표면(riblet surface)에서 난류 경계층의 속도분포를 측정하여 그 표면의 거칠기에 따른 효과를 보았다. 그 결과 리블릿에 의해 형성한 거친 면이 부드러운 면보다 상대적으로 유동의 직각방향의 와도(vorticity)가 축소되는 것을 확인하였다.

선행연구에서나 난류 경계층 발달에 관한 연구에서 경계층을 발달시키기 위한 트리핑 구조물에 대한 조도변화에 따른 연구는 미흡하였다. 그래서 본 연구에서는 평판의 선단에 트리핑 구조물을 설치하여 조도 변화에 따른 난류 경계층의 발달과 특성을 조사하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 풍동 및 시험부

본 실험에 사용된 풍동은 개방형 저속 풍동으로 유량이 $3m^3/s$, 압력상승은 0.786kPa이며, 노즐 출구에서의 난류강도는 0.6%이다. 풍동의 구성은 송풍기(blower), 확대부(diffuser), 정류실(settling chamber), 축소노즐(contraction nozzle)로 이루어져 있으며, 전체 길이는 6m이다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 풍동의 개략도를 나타낸 것이다. 송풍기 는 용량이 7.5kW인 교류 3상 전동기에 의해 구동되며, 축소 노즐 출구의 속도를 0~33m/s까지 가변할 수 있도록 주파수 변화기(inverter)를 설치하였다. 노즐 출구에서 균일류를 얻기 위하여 스크린(# 10)을 설치하였고, 송풍기에서의 진동이 시험부에 전달되는 것을 방지하기 위하여 유연한 고무판을 설치하였다. 시험부의 크기는 0.3m × 0.3m × 3m이고, 시험부

입구에서 1.2m 떨어진 지점에 유연한 판으로 이루어진 윗면 곡면부를 부착 설치하였으며 그 길이는 1.8m이다. 이 유연한 판을 상부에 설치된 나사로 윗면의 곡률을 조절하여 실험자가 원하는 압력 구배를 얻을 수 있다. 또한 시험부의 옆면에는 0.05m 의 등 간격으로 지름 1.0mm 의 정압공을 뚫고 마이크로 마노미터를 연결하여 벽면 정압을 측정하였다. 윗면의 곡률을 조정함으로써 압력구배를 변화시키고, 정압홀을 통해 압력을 확인하면서 압력구배를 맞추었다.

2.2 실험조건 및 조도

평판 상부 자유흐름의 속도는 5m/s로 하였으며, 흐름방향 압력구배는 영압력구배로 선택하였다. 조도의 기하학적인 형상을 결정하는데는 특별한 기준이 없었다. 그래서 본 연구에서는 선행 연구자들이 가장 널리 정의하였던 대로 Fig. 2의 조도벽에 대해 Table 1과 같은 치수의 조도벽을 설정하였다. Fig. 2에서 w/k가 1보다 크면 k형, 1 이하이면 d형으로 분류하였다. 실험에 사용된 조도벽은 Table 1과 같이 d형 1개와 k형 2개인데, 유리평판의 선단에서 70mm까지 정사각형 알루미늄 사각로드를 이용하여 적절한 배열을 사용하여 표면조도를 구성하였다.

2.3 PIV 시스템

평균속도 및 난류성분을 측정하기 위하여 PIV (particle image velocimetry) 시스템을사용하였고, 개략도는 Fig. 3에 나타내었다. Nd:Yag 레이저, CCD카메라(TSI, PIVCAM 10-15) 동기화장치(syncronizer, TSI 610032), 화상처리 보드(TSI, frame grabber 610066) 및 구동형 컴퓨터로 구성되어 있다. 사용된 레이저 원은 미니 Nd:Yag 레이저로 파워는 120mJ/pulse이며, 532mm의 파장을 가진다. CCD 카메라는 2K×2K 픽셀의 고해상도와 12bit의 gray-resolution을 가지고, 속도 추출 시 정확도를 높일 수 있으며, 최소 200ns 까지 시간간격을 조절할 수 있다. 렌즈는 50mm 니콘 렌즈가 사용되었으며 화상 전체의 초점을 맞추기 위해 렌즈틸팅이 이루어졌다. 레이저 시트의 두께는 2mm로써 측정에 적합한 크기이다. 본 실험에 사용된 추적입자는 비유독성, 비부식성, 비연마성, 비휘발성이며, 화학적으로 불활성인 올리브기름의 액적을 적용하였다. 입자의 평균직경은 2㎛로서 공기 중 유동의 PIV계측에 적당한 크기이다. PIV 측정영역의 면적은 140mm × 140mm이다. 각각의 화상에 한 번의 레이저 펄스를 노출시켜 화상을 얻은 다음 두개의 화상을 비교하는 2화상 상호상관기법을 사용하였고, 이 때 두 레이저의 펄스 간격은 50㎲이다. 이러한 화상들의 쌍은 카메라의촬영속도가 15Hz이므로 초당 7.5개가 얻어진다. 화상 획득은 2600장(속도장 1300개)을 획득하여 난류값의 평균이 일정한 값으로 유지되도록 하였다. 속도벡터는 FFT 방식의 상호상관법으로 계산되었으며, 상관영역은 32×32로 하고 50%의 오버랩(overlap)을 사용하여 6724개의 벡터를 얻었다.

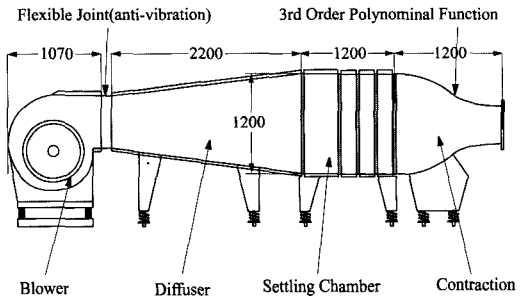


Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel

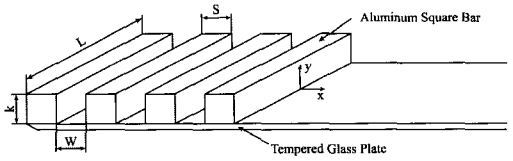


Fig. 2 Schematic of rod-roughness geometry

Table 1 Roughness dimensions

No.	k(mm)	w(mm)	s(mm)	L(mm)	Type
Ⅰ	10	10	10	290	d
Ⅱ	10	20	10	290	k
Ⅲ	10	50	10	290	k

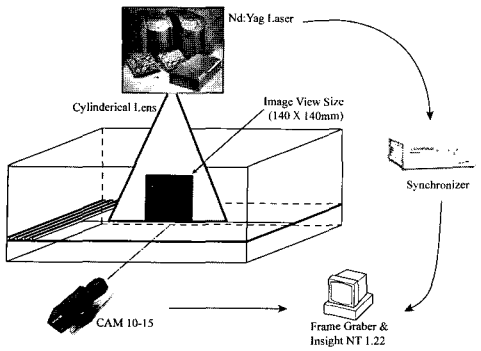


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus setup

3. 실험 결과

본 연구에서는 평판 선단에 트리핑 구조물을 배열로 설치하여 조도변화에 따른 난류경계층의 특성을 입자영상 유속계를 이용하여 조사하였다.

3.1 유동변수의 계산

마찰속도는 난류 경계층에 있어서 주요한 변수이다. 마찰속도를 구하는 방법에는 Stanton tube를 사용하여 직접 측정하는 방법과 Clauser 도표법[6]을 이용하여 추정하는 방법이 있다. 많은 경계층 연구에서 마찰속도의 추정값의 오차는 실제 측정값에 10%내외이며, 이것은 Stanton tube를 이용하여 측정할 때 그 기기 자체가 유동에 교란을 줌으로써 발생하는 오차보다 더 작다는 것을 밝혔다[7]. 그러므로 본 연구에서는 마찰 속도를 직접 측정하지 않고, 매끈한 면의 경우에는 실험으로 얻은 속도 분포를 식(1),(2)로 도시하고, 표면마찰 계수 C_f를 조정하여 도표와 일치했을 때 마찰속도를 결정하였다.

$$\frac{u}{U}=\sqrt{\frac{C_f}{2}}\left[5.5\log_{10}\left(Re_x\sqrt{\frac{C_f}{2}}\right)+5.4\right] \quad (1)$$

$$\frac{u}{u_\tau}=\sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (2)$$

거친 면의 경우에는 Clauser 도표법을 수정한 Perry와 Joubert[8]의 방법을 사용하여 마찰속도를 구하였다. 경계층 두께는 자유 흐름 속도 대비 99% 되는 지점으로 정의하였고, 배제 두께와 운동량 두께는 식(3),(4)를 이용하여 각각 구하였다.

$$\delta^*=\int_0^{\delta_{0.99}}\left(1-\frac{u}{U}\right)dy \quad (3)$$

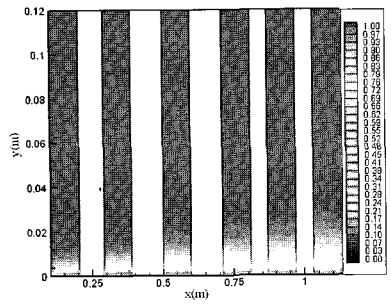
$$\theta=\int_0^{\delta_{0.99}}\frac{u}{U}\left(1-\frac{u}{U}\right)dy \quad (4)$$

3.2 평균속도 분포

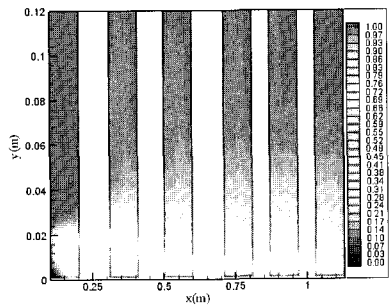
Fig. 4는 매끈한 면과 표면조도의 변화에 따른 평균속도 분포를 나타낸 것이다. 매끈한 면의 경우는 경계층이 하류방향으로 갈수록 발달해가는 것을 볼 수 있으며, 자유흐름속도의 분포를 보았을 때 균일 유동장임을 알 수 있다. 표면조도가 있는 경우는 층류경계층 유동이 조도의 불연속점 이후 재부착된 다음 경계층 유동으로 발달하고 있다. 이는 후방 계단의 흐름 형태와 그 유동장이 매우 흡사함을 알 수 있다. 그리고 재부착점 이전 영역에서 재순환 유동이 존재하며, 재부착길이는 표면조도에 상관없이 X=0.6m정도이다.

Fig. 5는 매끈한 면과 표면조도의 변화에 따른 경계층두께, 배제두께, 운동량두께를 유동방향에 대해 나타낸 것이다. 매끈한 면과 조도면에서는 경계층, 배제, 운동량 두께가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있지만, 조도 변화에 따른 즉, w/k=1과 w/k=5에서는 각각의 두께 변화가 있지만 매끈한 면에 비해 극히 미미하게 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

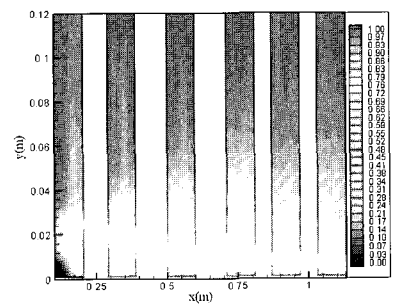
Fig. 6은 매끈한 면과 표면조도의 변화에 따른 평균속도를 무차원속도(u^+)와 무차원거리(y^+)를 이용하여 나타내었다. Fig. 6(a)는 매끈한 면의 경우로, Re_x에 관계없이 일반적인 대수법칙에 잘 맞고 있음을 관찰할 수 있다. 이것은 본 실험에서 사용한 마찰속도를 구하기 위해 사용한 Clauser 도표법이 비교적 정확하다는 것을 알 수 있다. Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)는 각각 w/k=1, w/k=5의 경우로 Re_x가 180,000 이후 에서는 대수법칙에 잘 맞지만, Re_x가 비교적 가까운 80,000과 110,000에서는 대수법칙이 전혀 맞지 않는다. 이것은 선단에 설치된 트리핑 구조물의 영향으로 트리핑 구조물이 끝나는 부분에서 유동의 재부착으로 인해 재순환이 발생하기 때문이다.



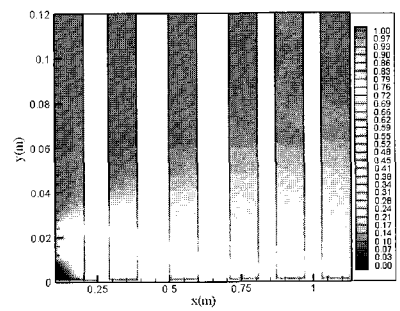
(a) smooth wall



(b) w/k=1

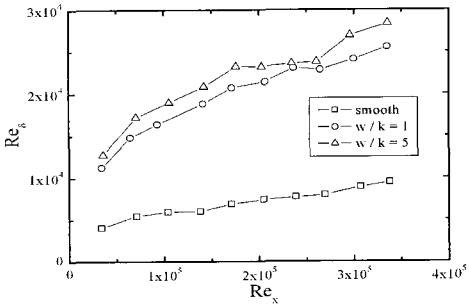


(c) w/k=2

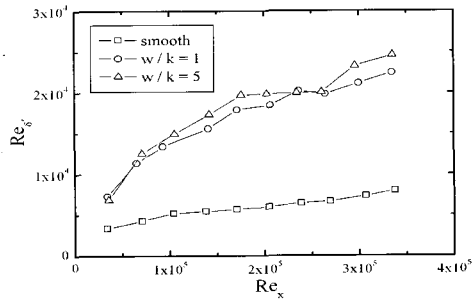


(d) w/k=5

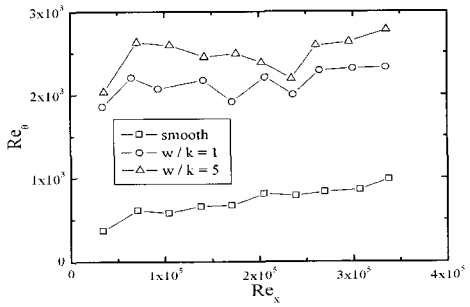
Fig. 4 Ensemble averaged velocity fields for various surface roughness



(a) boundary layer thickness



(b) displacement thickness

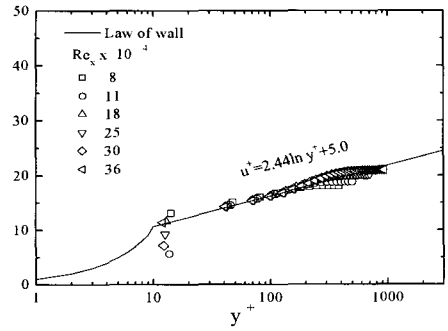


(c) momentum thickness

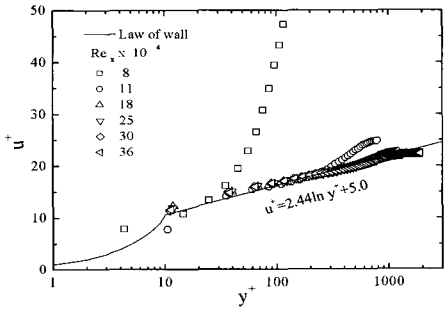
Fig. 5 Distribution of boundary layer, displacement and momentum thickness with smooth and rod-roughness wall

Fig. 7은 조도 변화에 따른 y방향에서의 속도 구배 분포를 나타낸 것이다. Re_x=80,000에서는 속도구배는 층류에서 난류영역 사이에 분포하는 것이 아니고, 재순환 유동에 의해 발생되는 역압력 구배의 형태로 속도 분포가 나타나는 것을 알 수 있고, Re_x=110,000에서는 층류에서 난류로의 천이가 되는 영역임을 관찰할 수 있다. 이 결과는

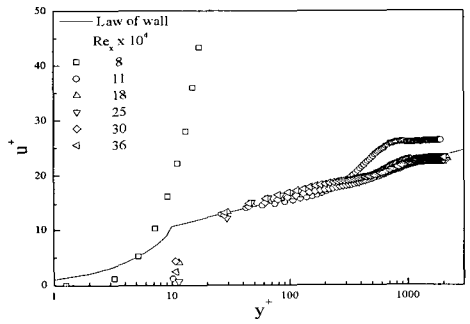
Fig. 6(b), Fig. 6(c)의 결과에서 나타난 Re_x가 비교적 작은 영역에서 대수법칙이 맞지 않는 이유를 뒷받침할 수 있다.



(a) smooth wall



(b) w/k=1

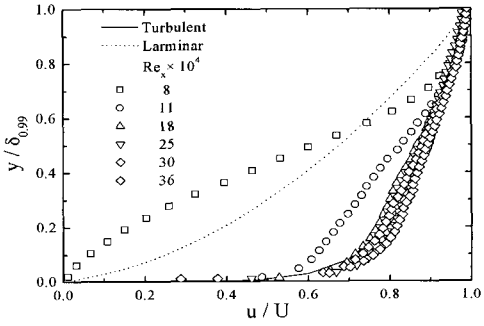


(c) w/k=5

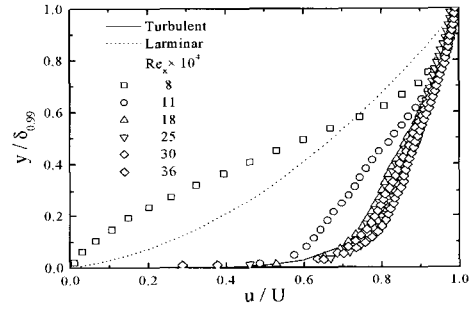
Fig. 6 Distribution of mean velocity with variation of roughness

3.3 난류강도 분포

Fig. 8은 매끈한 면에서 x, y방향의 속도 섭동 성분의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 x방향의 속도 성분으로, 대수법칙이 맞지 않는 Re_x=80,000은 비교적 작은 값을 가지고 있으며 그 외의 영역에서는 Nagano[9]의 실험결과와 비교하였을 때 비교적 잘 일치하는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 속도섭동 성분의 최대값은 $y/\delta_{0.99}=0.3$에서 나타나고 경계층이 끝나는 영역이 $y/\delta_{0.99}=1$인 영역에서 최소값을 가지는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 8(b)는 y방향의 속도섭동 성분으로, x방향의 속도섭동 성분의 경우와 마찬가지로 대수법칙이 맞지 않는 Re_x=80,000은 비교적 낮은 값을 가지고 있으며 그 외의 영역은 Nagano[9]의 실험결과와도 잘 일치하고 있으며, $y/\delta_{0.99}=0.2$에서 최대 피크치를 가지는 것을 관찰할 수 있다.



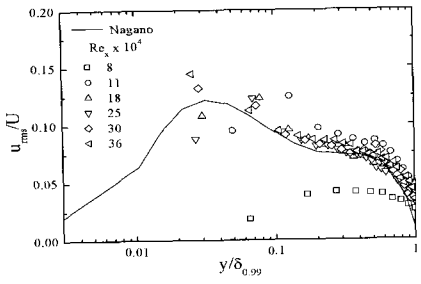
(a) w/k=1



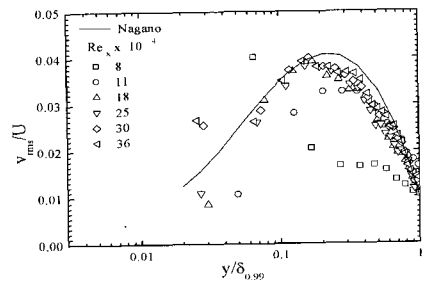
(b) w/k=5

Fig. 7 Distribution of turbulent velocity at w/k=1 and w/k=5

Fig. 9는 w/k=5일 때 x, y방향의 속도섭동 성분을 보인 것으로 조도 불연속이 끝나는 지점에서 속도섭동성분의 분포가 평판에서의 속도섭동성분의 분포에 비해 상당히 다름을 관찰할 수 있다.

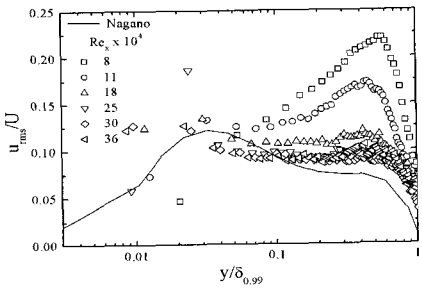


(a) x-direction

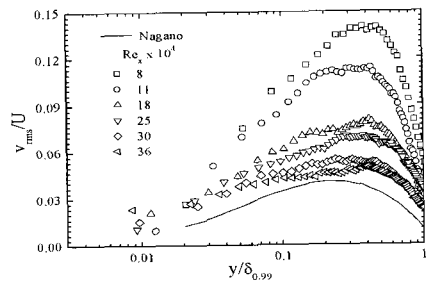


(b) y-direction

Fig. 8 Turbulent intensities of fluctuation velocity component at smooth wall



(a) x-direction



(b) y-direction

Fig. 9 Turbulent intensities of fluctuation velocity component at w/k=5

x, y방향의 속도성분이 높게 나타나는 것은 조도의 영향으로 조도 불연속이 끝나는 지점에서 재부착이 일어나서 재부착점을 기점으로 유동방향으로 역류(reverse flow)가 발생하고, 이 유동은 재순환 영역(recirculation region)을 형성하여 강한 혼합(mixing)이 일어나기 때문이다.

3.4 경계층 상관관계

지금까지의 결과를 바탕으로 하여 경계층에 영향을 미치는 주요 인자를 다음과 같은 함수 관계로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta}{x} = f(w/k\ ,\ Re_x) \tag{5}$$

$$\frac{\delta}{x} = -0.015 \times (w/k)^{0.04} (Re_x)^{-0.65} \tag{6}$$

즉, 무차원 경계층 파라미터를 각각 무차원 표면 거칠기 상수와 유동 방향의 국소 Reynolds 수와의 함수 관계로 유도하여 식(6)과 같이 상관관계식을 제시하여 Fig. 10에 나타내었다. 이 상관관계식은 무차원 경계층두께가 표면조도와 국소 Re_x에 관한 상관식을 제시함으로써 경계층을 제어하거나 특정목적을 위하여 원하는 경계층을 형성하는데에 응용이 가능하게 하고자 하는 것이다.

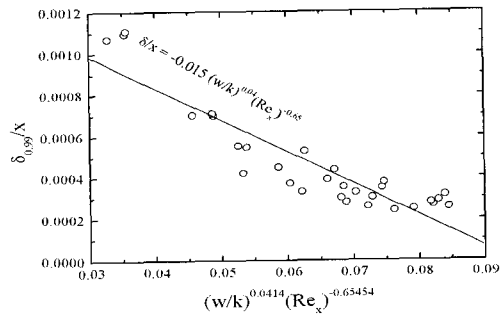


Fig. 10 Correlation of boundary layer thickness in term of w/k and Rex

4. 결 론

본 연구에서는 매끈한 면과 표면 조도가 있는 면에서 국소 Re_x에서의 경계층 발달과정에 미치는 영향을 PIV 기법을 도입하여 실험을 수행하였

고 다음과 같은 결론을 얻었다.

〔1〕 PIV기법을 통해 측정된 매끈한 면에서의 속도분포와 속도섭동성분을 선행연구와 비교하여 잘 일치하는 것을 확인하였다.

〔2〕 표면조도의 영향으로는 표면조도가 커질수록 경계층, 배제 및 운동량 두께가 매끈한 면에 비해 300%정도 증가하였다.

〔3〕 매끈한 면에서는 대수법칙을 만족하고 있지만, 표면조도가 있는 면에서는 대수법칙이 만족하지 않는다. 이것은 조도 불연속 이후에 발생하는 재부착점을 기점으로 역류가 발생하기 때문이다.

〔4〕 표면조도에 대한 속도섭동성분의 영향은 매끈한 면에 비해 조도 불연속 이후에서 급격히 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 역류에 의한 재순환 유동으로 인해 강한 혼합이 일어나기 때문이다.

〔5〕 경계층 두께를 거칠기 상수와 국소 레이놀즈수에 대한 상관관계식으로 나타내었다.

참고문헌

[1] Townend, A.A., "The Flow in a Turbulent Boundary Layer after a Change in Surface Roughness," J. of Fluid Mech., Vol. 26, pp. 255-266. 1966.

[2] Anotonia, R.A., and Luxton, R.E., "The Response of a Turbulent Boundary Layer to a Step Change in Surface Roughness. Part2. Smooth to rough," J. of Fluid Mech., Vol. 53, pp. 737-757, 1971.

[3] Schofield, W.H., "Measurement in Adverse Pressure Gradient Turbulent Boundary Layers with a Step Change in Surface Roughness," J. of Fluid Mech., Vol.70, pp. 573-593. 1975.

[4] Y. Dubief, L. Djennidi, and R. A. Antonio, "The Measurement of in a Turbulent Boundary Layer over a Riblet Surface", Int. J. of Heat and Fluid Flow, Vol 18, pp. 183-187, 1997.

[5] M. H. Hosni, H. W. Coleman and R. P. Taylor, "Measurement and Calculation of Fluid Dynamic Characteristics of Rough- Wall Turbulent Boundary Layer Flows". J. of Fluids Engineering, Vol. 115, pp. 383, 1993.

[6] Clauser, F . H., "Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients", J.of Aeronautical Sciences, Vol. 21, pp. 91-108, 1954.

[7] Joseph A., Schetz, "Boundary Layer Analysis", 1993.

[8] Perry, A. E. and Joubert, P.N., "Rough-Wall Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients," J. of Fluid Mech., Vol.17, pp.193-211. 1963.

[9] Nagano, Y. Tsuji, T. and Houra, T., "Structure of Turbulent Boundary Layer Subjected to Adverse Pressure Gradient", Int. J. of Heat and Fluid Flow, Vol. 19, Issue 5, October, pp. 563-572. 1998.

저 자 소 개

김동건 (金東建)

1970년 12월생. 1996년 동아대학교 기계공학과 졸업, 1998년 부산대학교 대학원 기계설계공학과 졸업(석사), 1998년~현재 부산대학교 기계공학과 대학원 재학중, 당학회 종신회원

김문경 (金文經)

1964년 8월생. 1998년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1992년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1998년 부산대학교 대학원 생산기계공학과 졸업(박사), 1997년~현재 창원전문대학 자동차기계계열 조교수, 당학회 정회원

윤순현 (尹惇鉉)

1950년 8월생. 1977년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1979년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사), 1992년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사), 현재 부산대학교 기계공학부 교수, 당학회 종신회원