

벽근방의 3각주에 의하여 교란받는 난류경계층에 관한 연구

Study on the Turbulent Boundary Layer Disturbed by a Triangular Prism near the Wall

심우건,* 이강주,** 조용철***
W. G. Sim, K. J. Lee, Y. C. Cho

Key Words : Disturbed Turbulent Boundary Layer (교란된 난류경계층)
Hot-wire Anemometer (열선풍속계), Fluctuating Velocity (요동속도)
Turbulent Kinetic Energy (난류운동에너지)

ABSTRACT

This paper presents the results of some measurement of the fluctuating velocity field in the turbulent boundary layer disturbed by a triangular prism and discusses the discovery of the disturbed boundary layer. A prism of height 8mm was used for experiments. The streamwise location of the prism was fixed at 1200mm downstream from the leading edge and the space between the prism center and the wall was set at three different values, 6, 15 and 33.5mm.

The results show that the near-wall region of the disturbed boundary layer recovers original state much more quickly than the outer region. In the case $h=6\text{mm}$ the recovery is faster than the other cases. Moreover, it was found that peak of fluctuating velocities moves outwards somewhat rapidly with increasing x mainly due to the turbulent diffusion of the fluctuating velocity.

기 호 설 명

h : 벽면에서 3각주 중심축까지의 거리
 $K=1/2(u'^2+v'^2+w'^2)$: 난류운동에너지
 ρ : 난류의 생성항
 $u'=\sqrt{\bar{u}^2}$, $v'=\sqrt{\bar{v}^2}$, $w'=\sqrt{\bar{w}^2}$: 요동속도의 각 성분
 U : 평균류의 속도

$-\bar{uv}$: 난류전단응력
 U_∞ : 주류의 평균속도
 X, Y, Z : 흐름방향, 평판과 직각방향, X - Y 면과 직각방향의 좌표
 Y_{peak} : K 의 극대값이 존재하는 점의 Y 좌표
 ρ : 유체의 밀도
 δ_0 : 주류경계층 두께
 δ' : 난류경계층 두께
 ε : 난류의 소산항

* McGill대(캐나다) 기계과
 ** 정회원, 인하공업전문대학 기계과
 *** 인하대학교 기계과

1. 서 론

본 연구에서는 평판상의 난류경계층안에 정 3각주를 흐름과 직각으로 평판과 나란하게 소정의 위치에 설치하였을 때 교란에 의하여 야기된 난류의 특성과 교란되기 전의 원상태로 회복되는 과정을 실험적으로 조사 검토하였다.

일반적으로 벽면에 따라 형성된 난류유동장안에 어떤 형태의 물체가 놓임으로써 교란이 일어나고 그로 말미암아 압력의 분포에 변화를 가져올 뿐 아니라 물질-열전달 효과에 영향을 미치는 등 중요한 의미를 갖게 된다.

사카모토 등¹⁾은 벽면상에 존재하는 정 4각주에 대하여 물체에 작용하는 항력을 측정하여 이를 물체로 인하여 형성된 난류경계층의 특성과 연계시켜 유동장을 설명하고 있다. 그러나 난류강도, 난류운동에너지 등 난류 그 자체의 특성과 교란된 난류상태가 원상태로 회복하는 과정에 대하여는 언급을 하지 않았다. 원주에 의한 교란효과를 다룬 것으로는 Clauser²⁾의 연구를 들 수 있으나 그는 원주하류의 속도분포를 측정하는데 그쳐 난류에 대한 세부적인 연구에까지는 이르지 못하였다. 다만 이와 같은 유동장에서는 원주의 위치나 지름을 변화시킴으로써 원주 후류에서 발생하는 난류의 길이 척도비를 용이하게 변화시킬 수 있기 때문에 다른 양식의 회복과정을 관찰함에 있어 참고가 된다. 원주를 벽 근방의 경계층에 설치한 경우의 후류의 난류특성을 통계적으로 다룬 것으로 Marumo 등^{3~4)}의 별도 연구가 있다. 그들은 속도의 난류성분, 난류운동에너지 및 일차원 스펙트럼의 측정결과를 대비시켜 난류장의 구조와 특성을 밝히는데 크게 기여하였다. 여기서 저자는 원주 대신 정 3각주를 설치하였을 경우 정성적으로 원주의 경우와 어떠한 차이가 나타날 것인가 하는 점에 주목하여 본 연구를 시도하기에 이른 것이다. 원주는 면이 둥글고 축대칭인데 비하여 3각주는 평면과 평면의 교선으로 이루어진 형태상의 차이 때문에 난류특성치의 분포나 크기의 차이가 나타날 것으로 예상할 수 있다.

2. 실 험

실험에 사용한 풍동은 전장이 6,000mm 인 개회로 흡입식 풍동으로서 시험부의 길이가 3,000mm 단면적이 300mm×400mm이다. 송풍기 출력은 5.5kw이며 최고속도 30m/sec를 얻을 수 있다. 변속은 송풍기 모터의 회전수를 변화시킴으로써 가능하다.

Fig.1은 풍동을 나타내고 있다. 실험부는 밑면으로부터 20mm의 위치에 바닥과 나란히 아크릴판(평판)을 고정하고 높이 8mm인 정 3각주를 평판으로부터 단면중심까지의 거리 $h=6, 15, 33.5$ mm의 거리를 두고 평판 선단으로부터 1,200mm의 위치에 설치하였다. 3종의 h 값은 3각주의 위치가 경계층의 내층, 중간층 및 외층에 오도록 배려한 것이다.

실험에 있어서는 주류의 평균속도를 14m/sec로 일정히 유지하고 평판상에서 난류가 조기에 정착하도록 평판의 선단에서 400mm까지의 구간에 사포(沙布)를 부착하였다. 3각

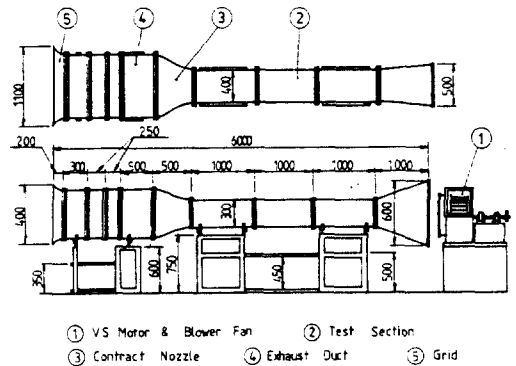


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

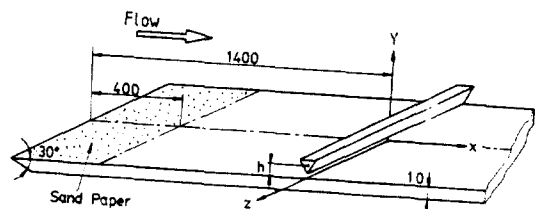


Fig.2 Test section and coordinate system

주에 의한 교란이 배제될 경우 풍속 14m/sec에서의 난류강도 $\sqrt{\bar{u}^2}/u_\infty = 0.002$ 난류경계층 두께 $\delta_0 = 36\text{mm}$ 임을 확인하였다. Fig.2는 시험부와 좌표계를 나타낸 것이다.

난류의 계측에는 정온도형 열선풍속계(K-ANOMAX MODEL 27224)를 사용하였다. 센서는 텅스텐열선의 X프로브로서 열선의 지름이 0.02mm 길이가 1mm, 과열비가 1.5이며 작동저항은 1.5옴(ohm)이다. 열선의 보정에는 KANOMOX제 프로브교정기를 사용하였다.

프로브이송장치로는 2차원 이송이 가능한 장치를 제작하여 사용하고 센서의 위치는 망원확대경으로 투시하여 정확한 측정위치에 있도록 조절하였다.

측정위치는 3각주 중심으로부터 흐름방향으로 X=20, 37, 87, 387, 640mm로 정하고 프로브에서 검출된 난류성분의 데이터는 오실로스코프로 확인하면서 A/D변환기, DC 볼트미터, RMS 미터를 거쳐 기록하였다.

Fig.3은 열선풍속계에 의한 데이터 처리 과정을 보인 것이다.

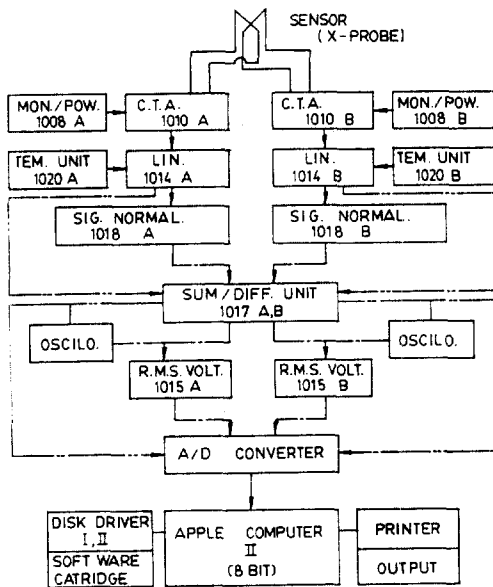


Fig.3 Block diagram of hot-wire anemometer system and data acquisition

3. 실험결과 및 고찰

Fig.4는 난류운동에너지의 분포를 나타낸 것이다. 난류운동에너지 K 는 속도의 요동 성분 $u' = \sqrt{\bar{u}^2}$, $v' = \sqrt{\bar{v}^2}$, $w' = \sqrt{\bar{w}^2}$ 로부터 $K = 1/2(u'^2 + v'^2 + w'^2)$ 에 의하여 구하였다. 그림에서 3각주의 위치 h 에 관계없이 K 값의 극대점이 존재하며 값의 크기는 h 가 증가할수록 또 상류일수록 증가하는 경향이 있다. K 값의 극대점은 3각주의 중심위치보다 약간 윗쪽에서 형성되고 경우에 따라서는 2개의 극대점이 공존한다. 이것은 3각주가 놓여 있는 상태가 내측(벽측)은 예측적인 돌기형이고 외측은 평면이기 때문에 후류는 양측의 영향으로 매우 복잡한 전단층이 형성되어 경우에 따라서는 삼각주 상하 양측에 대응하는 위치에 별도의 전단층이 형성됨으로써 2개의 극대점이 나타날 수 있을 것으로 생각된다.

Fig.5는 운동에너지의 극대점 값의 분포를 나타낸 것으로서 $h=33.5\text{mm}$ 의 경우는 X 의 증가와 더불어 점차적으로 감소하고 있음에 비하여 $h=6, 15\text{mm}$ 의 경우는 특히 $X=100\text{mm}$ 를 전후하여 다소 불규칙한 분포를 나타내고 있다.

극대점의 위치는 X 의 증가와 더불어 외측을 향하여 이동함을 볼 수 있는데 이 극대점 위치의 이동율은 경계층 배제 두께의 변화율보다 큰 것을 감안할 때 평균류의 대류효과에 의한 이동이라고만은 볼 수 없다. 일반적으로 K 값은 경계층 외측의 영역에서보다 벽면에 가까운 영역에서 빠른 속도로 원상태로 회복되는 경향을 나타내며 또한 K 값은 하류로 갈수록 감소하나 원상태로 회복되기까지는 아직도 상당한 거리를 요할 것으로 예상된다. K 값은 원주를 설치하였을 경우³⁾와 비교하면 3각주의 경우가 1.3배 정도로 큰 값을 보이거나 분포의 형태에 있어서는 큰 차가 없다. 일반적으로 난류운동에너지 K 의 보존식을 경계층내의 Y 방향으로 적분하면

$$\frac{\partial}{\partial X} \int_0^{y'} \rho U K dY = \int_0^{y'} (\rho - \epsilon) dY$$

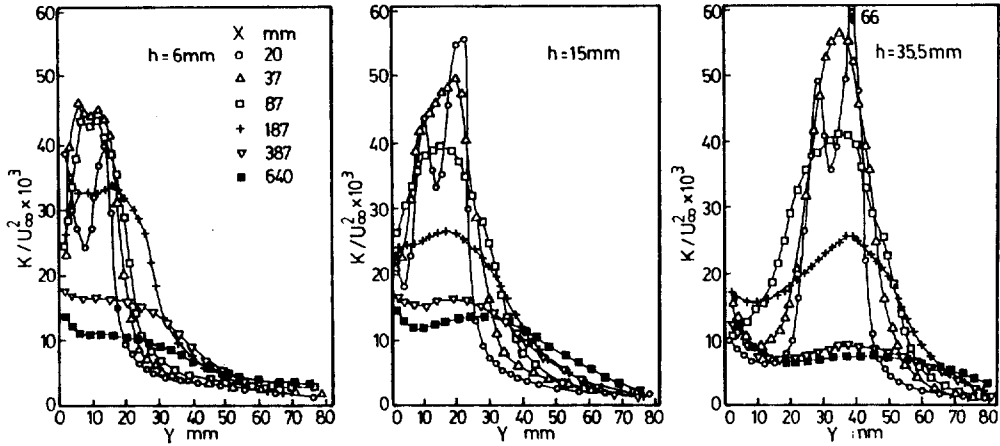


Fig. 4 Distributions of turbulent kinetic energy K

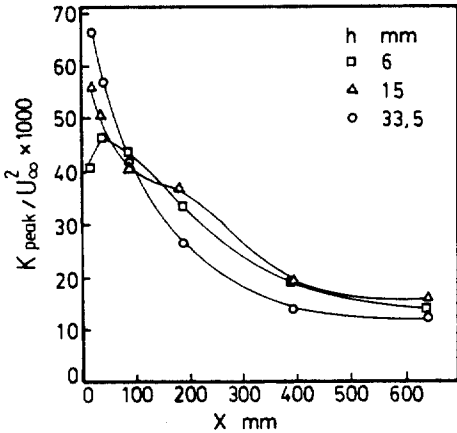


Fig. 5 Distributions of peak value of turbulent kinetic energy K

가 된다. 여기서 ρ 및 U 는 유체의 밀도와 평균류의 속도, p 및 ϵ 는 K 의 생성항과 소산항을 나타내고 δ' 는 K 가 주류의 값에 도달하기까지의 위치를 나타낸다. 교란을 받지 않은 평판 난류경계층에서는 p 와 ϵ 은 벽 근방에서 현저히 크고 크기가 거의 같으므로 윗식의 우변은 영에 접근한다. Fig. 4에서 X 가 작은 영역에서의 K 값의 분포는 곡선 하부의 면적을 비교할 때 단면마다 현저히 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 이는 이 영역에서 p 와 ϵ 이 서로 다르다는 것을 의미한다. 즉 국소적으로 p 와 ϵ 이 현저히 상이한 영역이 존재하므로 K 의 증감이 생긴다. K 의 극대값의

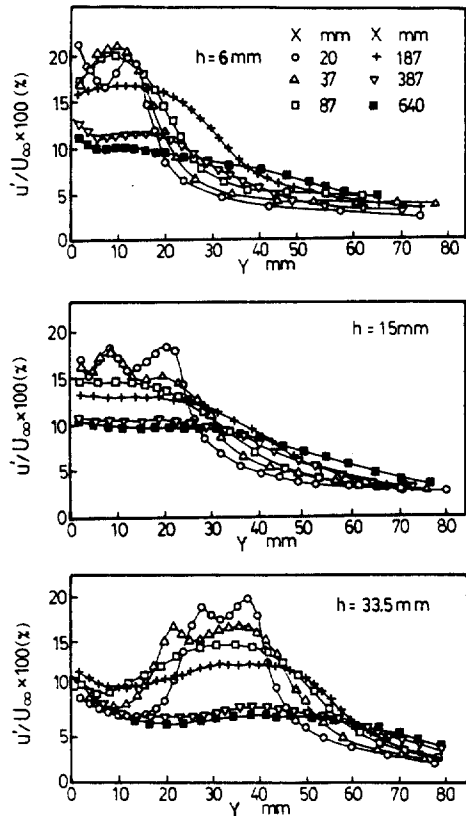


Fig. 6 Distributions of turbulent intensity of u'

이동은 K 의 증감을 통하여 나타난 이동과 난류확산에 의한 요인이 복합적으로 작용하여 나타난 결과라 할 수 있으며 여기에 3각주 직후의 후류에 형성된 와류의 주기적 변동이 영

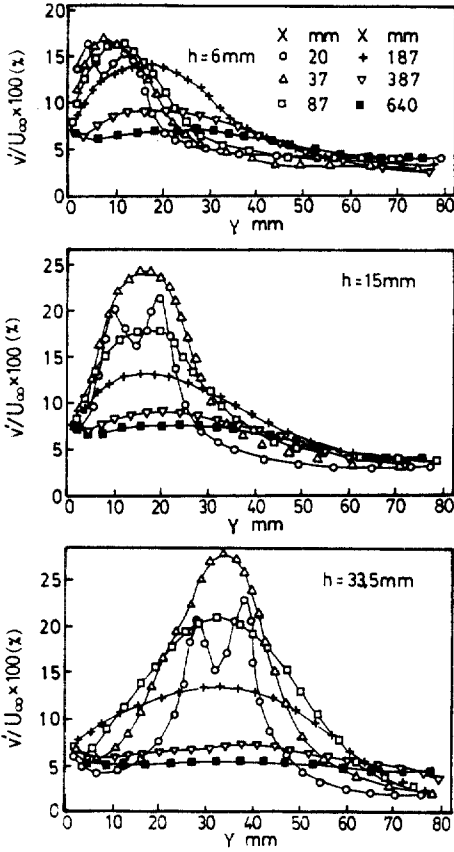


Fig.7 Distributions of turbulent intensity v'

향을 미칠 것으로 생각된다.

Fig.6은 u' 의 분포를 나타낸 것이다. 3각주에 가까운 후류에서는 역시 두개의 극대점이 나타난 것을 볼 수 있는데 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 3각주 내외의 부위에 대응하는 위치에 별개의 전단층이 형성되기 때문이며 하류로 가면서 양층간의 운동량 교환으로 하나의 극대점으로 합쳐지게 된다. u' 의 극대점 값 역시 X 의 증가와 더불어 난류확산이 강한 외측으로 이동하고 있음을 볼 수 있다.

Fig.7~8은 v' 및 w' 의 분포를 나타낸 것이다. X 가 작은 위치에서는 대체로 $h=6$ mm에서 $u' > w' > v'$ 의 대소관계를 $h=15.0, 33.5$ mm에서 대체로 $v' > u' \approx w'$ 의 대소관계를 보이고 있다. 그러나 어느 h 에 대해서도 $X=387$ 의 후류에서는 $u' \approx w' > v'$ 의 관계가 인정되고 이들의 값은 후류로 갈수록 서로 접근하게 된다.

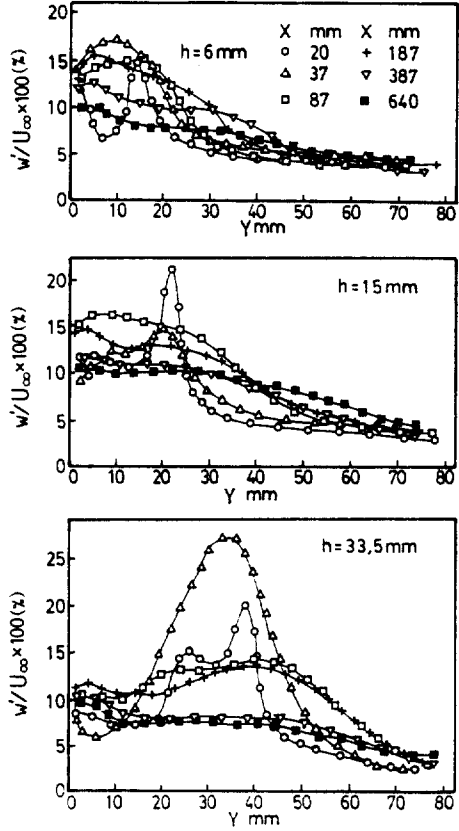


Fig.8 Distributions of turbulent intensity w'

Table 1 Comparisons of turbulent intensity values at peak point ($X=37$ mm)

Cases	hmm	Y_{peak}	$u'/u_{\infty} \times 10^{-3}$	$v'/u_{\infty} \times 10^{-3}$	$w'/u_{\infty} \times 10^{-3}$
Triangle	6	10.0	21	16.5	17.0
Circle		11.0	15.54	14.2	12.1
Triangle	15	22.0	18.5	24.0	14.5
Circle		16.0	18.0	27.4	12.9
Triangle	33.5	38.0	17.5	28.0	27.5
Circle		33.9	19.6	24.4	13.9

Table 1은 $X=37$ mm에서의 극대점의 Y 좌표와 난류성분의 값을 비교한 것으로 원주에 대한 값은 Marumo et al³⁾의 자료를 옮긴 것이다.

표에서 Y_{peak} 는 일반적으로 Marumo et al³⁾의 원주의 경우보다 3각주의 경우의 값이 큰 것으로 미루어 3각주의 경우가 보다 먼 외측에서 활발한 난류가 조성된다는 것을 알

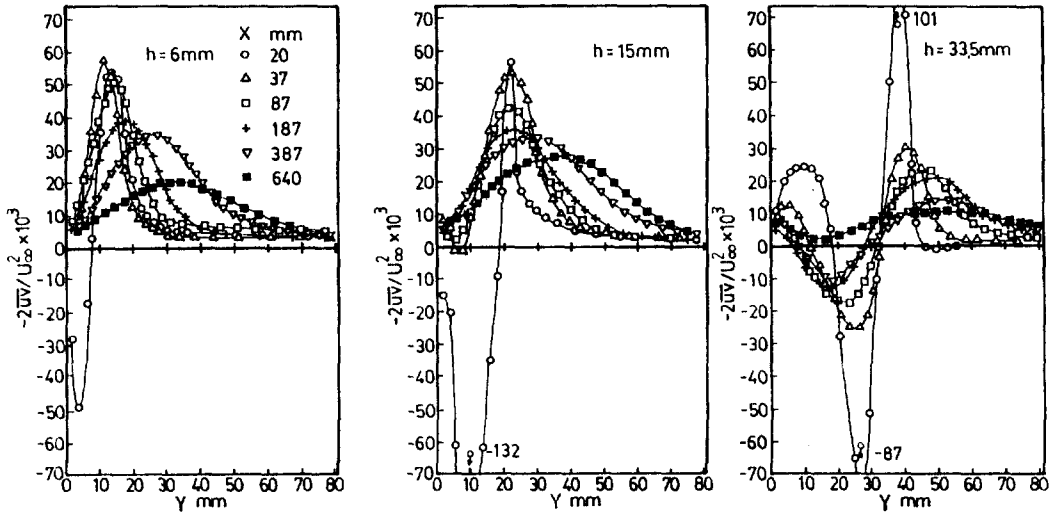


Fig. 9 Distributions of turbulent shear stress $-\bar{uv}$

수 있다. 난류에너지강도는 3각주의 경우가 대체로 원주의 경우보다 크다. 특히 w' 에 있어 원주의 경우보다 3각주의 경우가 현저하게 큰 값을 나타낸다는 것은 그만큼 3차원적 거동이 활발하다는 것을 반영한 결과라 할 수 있을 것 같다.

Fig. 9는 전단응력 $-\bar{uv}$ 의 분포를 나타낸 것이다.

$h=6, 15\text{mm}$ 에서는 비슷한 경향을 보이고 있으나 $h=33.5\text{mm}$ 에서는 S자형 분포로서 그 경향이 특이하다. S자형 분포에 주목하면 동일 단면내에서 $(-\bar{uv}) > 0$ 의 영역과 $(-\bar{uv}) < 0$ 의 영역이 공존함을 알 수 있다. 전자의 영역에서는 운동량이 벽면을 향하여 전달되는데 반하여 후자의 영역에서는 경계층의 외측을 향하여 이동한다는 사실을 감안할 때 $-\bar{uv}$ 의 두 영역이 공존할 수 있다는 것을 쉽게 납득할 수 있다. 또 $-\bar{uv}$ 의 극대값은 X의 증가에 따라 $(-\bar{uv}) < 0$ 의 경우는 급속히 감소하는데 반하여 $(-\bar{uv}) > 0$ 의 경우는 비교적 완만하게 변한다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

경계층 내에 설치한 3각주에 의하여 교란된 후류의 난류특성과 난류가 원상태로 회복

되는 과정을 조사하기 위하여 난류의 요동속도성분 u', v', w' , 전단응력 $-\bar{uv}$ 및 난류운동에너지 K 를 구하여 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 3각주의 위치 h 에 관계없이 K 의 극대점 값이 존재한다. 그 값은 h 가 클수록 그리고 상류로 갈수록 증가하며 특히 상류에서는 두개의 극대점이 존재한다. 또 K 의 극대점의 이동은 K 의 증감을 통하여 나타난 이동과 난류확산 및 후류에서 형성된 와류의 주기적 변동 등 복합적 요인으로 이루어진 것으로 생각된다.

(2) 교란된 경계층은 외측에서보다 내측에서 더욱 빠른 속도로 회복되고 $h=6\text{mm}$ 의 경우가 다른 경우보다 빨리 회복한다.

(3) 근접 후류에서 $h=6\text{mm}$ 일 때 $u' > w' > v'$, $h=15, 33.5\text{mm}$ 일때 대체로 $v' > u' \approx w'$ 의 대소관계가 인정된다.

(4) $(-\bar{uv})$ 의 분포에 있어서 $(-\bar{uv}) > 0$ 와 $(-\bar{uv}) < 0$ 의 영역이 공존하며 S자형 분포를 나타낸다. 이와 같은 분포의 경향은 $h=33.5\text{mm}$ 에서 분명하게 나타난다.

(5) 본 실험결과를 Marumo et al³⁾의 원판의 경우와 비교하면 특성값의 분포형태는 유사하나 난류의 척도는 대체로 1.3배 크기를 갖는다.

참 고 문 헌

1. 坂本外, 1978, “亂流境界層の中にある正方形周邊流れに関する研究”, 日本機械學會論文集, 46卷 408號, pp.1437~1448.
2. Clauser, F.H., 1956, *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 4, Academic Press (New York), pp. 49-61.
3. E. Marumo et al., 1978, “A Turbulent Boundary Layer Disturbed by a Cylinder”, *J. Fluid Mechanics*, Vol. 87, pp. 121-141.
4. 丸茂外, 1978, “壁近の圓柱によりかく亂を受ける亂流境界層”, 日本機械學會論文集, 4卷 407號, pp.1211~1219.
5. P.W. Bearman et al., 1978, “Flow around a Circular Cylinder near a Plane Boundary”, *J. Fluid Mechanics*, Vol. 87, pp. 33-47.
6. J.O. Hinze, 1975, *Turbulence*, McGraw-Hill (New York), pp. 15-30.
7. J.S. Bendat, 1991, *Random Data*, Wiley (New York), pp. 10-36.
8. S.C. Kacker et al., 1991, “Turbulent Characteristics of Two Dimensional Wall-Jet and Wall Wake Flows”, *J. Applied Mechanics*, pp. 239-252, March.
9. J.C. Han et al., 1978, “An Investigations of Heat Transfer and Friction for Rib-Roughened Surface”, *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 443-1156.
10. 李東鎬, 1980, “熱線風速計의 原理와 應用”, 한국과학기술원, 강좌 A, pp.1~8.