

벽와도 측정을 위하여 개발된 V형 열선 프로브의 성능특성

김성욱* · 류상진* · 유정열†
 (2000년 7월 26일 접수, 2001년 1월 17일 심사완료)

Performance Characteristics of a V-type Probe Developed for Wall Vorticity Measurement

Sungwook Kim, Sangjin Ryu and Jung Yul Yoo

Key Words: Wall Vorticity Fluctuation(벽와도 섭동), Hot-Wire on the Wall(벽면부착열선), V-Type Wall Vorticity Probe(V형 벽와도 프로브)

Abstract

In order to investigate the relation between wall vorticity and streamwise velocity fluctuations in a turbulent boundary layer, a wall vorticity probe has been developed, which consists of two hot-wires on the wall aligned in V configuration. Although the measured intensity of spanwise wall vorticity fluctuations is somewhat lower than previous results, the intensity of streamwise wall vorticity fluctuations is in good agreement with them. It has been shown that the measured intensity of spanwise wall vorticity fluctuations is affected by transverse length of the wall vorticity probe. Instantaneous streamwise and spanwise wall vorticity fluctuations are compared with the results of DNS. Probability density function of spanwise wall vorticity fluctuations shows good agreement with previous results and is different from that of streamwise wall vorticity fluctuations. Energy spectrum of streamwise wall vorticity fluctuations is lower than that of spanwise wall vorticity fluctuations in low frequency region.

기호설명

C_i : 열선의 검정식 계수
 d : 열선의 직경
 E : 열선유속계의 출력전압
 f : 주파수
 k : 열선에 평행한 성분에 의한 열전달 효과를 고려하는 상수
 l : 열선의 길이
 P : 확률밀도함수
 R_0 : 열선의 냉저항
 R_w : 열선의 작동저항

u_r : 전단속도 (friction velocity)
 U : 자유유동속도
 u : 유동방향 속도성분
 w : 횡방향 속도성분
 x : 주유동방향
 y : 벽에 수직인 방향
 z : 횡방향
 α : 열선의 수직방향과 주유동방향과의 각도
 δ : 경계층 두께
 Φ : 벽마찰력 섭동의 스펙트럼
 ν : 유체의 동점성계수
 τ_w : 벽마찰력
 ω_w : 벽와도

* 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부
 † 회원, 서울대학교 기계항공공학부
 E-mail : jyyoo@plaza.snu.ac.kr
 TEL : (02)880-7112 FAX : (02)883-0179

참치자

+ : 벽단위
 ' : 섭동량

- : 평균값

하첨자

- A : 열선 A
- B : 열선 B
- eff : 유효값
- rms : rms 값

1. 서 론

난류경계층의 구조를 밝히고자 하는 노력은 끊임없이 이루어지고 있으며, 이를 통해 난류경계층 내에 존재하는 응집구조(coherent structure)의 많은 부분이 알려지고 있다. 특히 벽에 수직인 방향으로의 속도구배가 벽근처 난류 거동에 미치는 영향에 대하여 많은 관심이 집중되고 있다. 이러한 속도구배는 벽마찰력(wall skin-friction)과 동일한 물리량이며, 벽에서의 와도(vorticity)로서 고찰할 수 있다.

지금까지 벽에서의 속도구배를 측정하기 위한 여러가지 방법이 개발되었고, 특히 열필름(hot film)이 많이 사용되었다. 또한 벽에서의 유동방향 속도구배 $\partial u/\partial y|_w$ 를 측정하기 위하여, 센서를 주유동방향에 대하여 수직으로 배열하였으며, 횡방향 속도구배 $\partial w/\partial y|_w$ 의 경우에는 센서를 주유동방향에 대하여 비스듬하게 배열하거나 두개의 센서를 평행하게 또는 V형상으로 배열하여 측정하였다.⁽¹⁾

Sirkar and Hanratty⁽²⁾는 전기화학 측정법(electro-chemical technique)을 이용한 센서를 V형상으로 배열하여 원관의 벽에서 속도구배를 측정하였다. 그들은 횡방향 속도구배 측정의 난류강도가 0.1이고, 에너지 스펙트럼은 유동방향 속도구배 측정의 그것과 유사함을 밝혔다.

Kreplin and Eckelmann⁽³⁾은 채널유동에서 V형상의 열필름 센서를 이용하여 벽에서의 속도구배를 측정하였고, 유동방향 속도구배 측정의 강도는 0.25, 횡방향 속도구배 측정의 강도는 0.065임을 제시하였다. 또한 그들이 개발한 센서는 Blackwelder and Eckelmann⁽⁴⁾과 Kreplin and Eckelmann⁽⁵⁾의 속도성분과 속도구배의 동시측정에 사용되었다.

Alfredsson *et al.*⁽⁶⁾은 여러 가지 작동유체에 대하여 여러 가지 측정방법을 이용하여 벽마찰력을 측정한 결과, 유동방향 벽마찰력 측정의 강도는 0.4임을 밝혔으며 횡방향 벽마찰력 측정의 강도는 0.2라고 추정하였다.

최근에 Sumer *et al.*⁽⁷⁾은 벽마찰력을 벡터량으로 측정하기 위하여 V형상의 열필름 프로브를 개발하였고, 요각검정(yaw calibration)을 통하여 벽마찰력의 순간적인 크기와 방향을 측정하였다.

그러나 위에 언급한 V형상의 열필름 프로브는 작동유체가 액체인 유동장에서 사용되었을 뿐 공기에서 사용하기 위한 V형상의 열선 프로브는 개발된 바가 없다.

본 연구의 목적은 난류경계층에서 벽와도(wall vorticity)를 측정함으로써 벽근처 영역에서의 유동방향 속도성분과의 상관관계를 구하는데 사용될 수 있는 벽와도 프로브를 개발하고 그 성능특성을 고찰하는데 있다.

2. 벽와도 프로브

2.1 V형 벽와도 프로브

본 연구의 벽와도 측정에는 자체 제작한 V형 벽면부착 열선 프로브(V-shaped hot-wire on the wall)를 사용하였다. Fig. 1에 제시한 바와 같이 V형 벽와도 프로브는 4개의 프롱(prong)과 2개의 열선으로 구성되어 있다. 각각의 열선은 주유동방향에 대하여 $90^\circ - \alpha$ 의 각도만큼 기울어져 있으며 하나의 프로브의 크기는 주유동방향으로 0.4 mm이며 횡방향으로는 1.3 mm이다. 사용된 열선의 직경은 $d=2.5 \mu m$ 이며, 열선 한 개의 길이는 벽단위(wall unit)로 $l^+ = 12$ 이다. 열선의 형상비는 $l/d=226$ 이다.

한편 벽면에서 마찰력이나 와도를 측정하기 위하여 열선센서를 사용할 때, 열선을 벽에 완전히 밀착시키면 벽면으로의 직접적인 열전도가 유동장으로의 대류열전달에 비해 매우 커지기 때문에 유동에 의한 전압신호의 크기는 매우 작아지며 이로 인해 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio)가 떨어져 측정결과에 많은 오차를 포함하게 되거나 측정이 불가능하다.

따라서 본 연구에서 제작된 벽와도 프로브의 열선은 벽에 완전히 밀착시키지 않고 벽으로부터

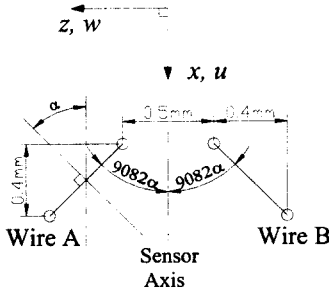


Fig. 1 Schematic diagram of a V-type wall vorticity probe

약간 떨어지도록 하였으며 열선과 벽과의 거리는 30~50 μm 정도가 되도록 하였다. 이 거리는 벽단위로 $\Delta t^+ = \Delta y u_\tau / \nu = 0.61 \sim 1.0$ 이다. 벽와도 프로브의 제작에는 1 μm 의 이송정밀도를 가지는 미세 이송장치가 장착된 측정현미경을 사용하였다.

V형 벽와도 프로브는 DANTEC STREAMLINE 정온도형 열선유속계에 연결하였으며, 사용된 과열비 ($R_w - R_0$)/ R_0 는 0.3이다. 여기서 R_w 는 열선의 작동저항이며, R_0 는 열선의 냉저항이다. 본 연구에서 사용된 과열비는 Alfredsson *et al.*⁽⁶⁾과 Wietrzak and Lueptow⁽⁸⁾의 연구에서 사용된 값으로서, 너무 큰 과열비는 두 개의 열선 사이의 열적 상호작용을 유발시킬 것이다. 이러한 열적 상호작용은 2.3절에서 논의하였다. 4각파에 의한 열선의 주파수 응답은 26~30 kHz이다.

모든 측정의 이전과 이후에는 V형 벽와도 프로브의 검정을 수행하였다. 검정에는 프레스톤관 (Preston tube)과 Patel⁽⁹⁾이 제안한 프레스톤관의 검정식을 이용하여 평균 벽마찰력을 측정하고, 이때의 V형 벽와도 프로브의 평균전압을 측정하였다. 검정식으로는 열선유속계의 출력전압 E 와 각 열선의 평균 유효 벽마찰력 $\overline{\tau_{w,eff}}$ 에 대하여 다음과 같은 4차의 다항식을 사용하였다.

$$\overline{\tau_{w,eff}} = C_0 + C_1 \overline{E} + C_2 \overline{E}^2 + C_3 \overline{E}^3 + C_4 \overline{E}^4 \quad (1)$$

여기서 C_i ($i = 0 \sim 4$)는 검정에 의하여 구해지는 상수이다.

모든 경우에 열선유속계의 출력전압은 16 bit A/D변환기를 이용하여 초당 10240개의 전압신호로 30초 동안 받아들였다. 각각의 전압데이터 간의 간격은 $\Delta t = 0.098 \text{ ms}$ 이며, 이는 벽단위로

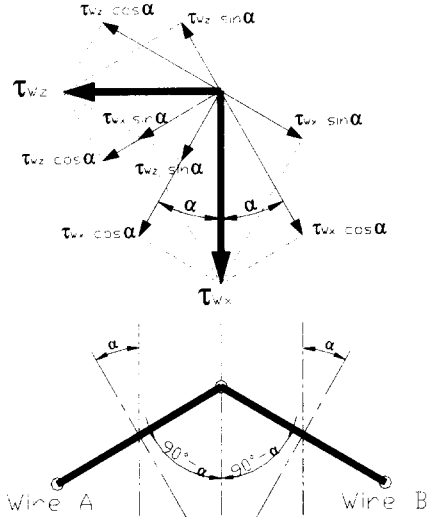


Fig. 2 Decomposition of wall shear stress vector

$\Delta t^+ = \Delta t u_\tau^2 / \nu = 0.61$ 이다.

2.2 벽와도의 계산

유동방향 와도와 횡방향 와도는 다음과 같이 정의된다.

$$\omega_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

한편, 벽에서의 와도는 다음과 같이 정리된다.

$$\omega_{wx} = \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_w = \frac{1}{\mu} \tau_{wz}$$

$$\omega_{wz} = -\frac{\partial u}{\partial y} \Big|_w = -\frac{1}{\mu} \tau_{wx} \quad (3)$$

이로부터 전단응력은 벽에서 와도와 같은 물리량이므로 벽전단응력을 측정하는 것은 벽와도를 측정하는 것과 같은 것임을 알 수 있다.

주유동방향과 열선에 대해 수직인 방향과의 각도를 α 라 하면, 프로브의 기하학적인 형상에 의해 벽마찰력 벡터의 성분은 열선의 축에 대해서 Fig. 2에서와 같이 분해된다. 각각의 열선이 측정하는 유효 벽마찰력은 다음과 같다.

$$\tau_{wA}^2 = (\tau_{wx} \cos \alpha - \tau_{wz} \sin \alpha)^2 + k^2 (\tau_{wx} \sin \alpha + \tau_{wz} \cos \alpha)^2$$

$$\tau_{wB}^2 = (\tau_{wx} \cos \alpha + \tau_{wz} \sin \alpha)^2 + k^2 (\tau_{wx} \sin \alpha - \tau_{wz} \cos \alpha)^2 \quad (4)$$

여기서 k 는 열선에 평행한 성분에 의한 열전달 효과를 고려하는 상수이다. 유효 벽마찰력에 대한 연립방정식의 해석하는 식 (5)와 같다 :

$$\tau_{Wz} = \frac{m+n}{2\sqrt{(1-k^2)\sin 2\alpha [1+k^2+(1-k^2)\cos 2\alpha]}}$$

$$\tau_{Wz} = \pm \frac{m-n}{2\sqrt{(1-k^2)\sin 2\alpha [1+k^2-(1-k^2)\cos 2\alpha]}} \quad (5)$$

여기서 $m = \sqrt{(\tau_{WA}^2 + \tau_{WB}^2)(1-k^2)\sin 2\alpha + |\tau_{WB}^2 - \tau_{WA}^2|\sqrt{(1+k^2)^2 - (1-k^2)^2\cos^2 2\alpha}}$
 $n = \sqrt{(\tau_{WA}^2 + \tau_{WB}^2)(1-k^2)\sin 2\alpha - |\tau_{WB}^2 - \tau_{WA}^2|\sqrt{(1+k^2)^2 - (1-k^2)^2\cos^2 2\alpha}}$

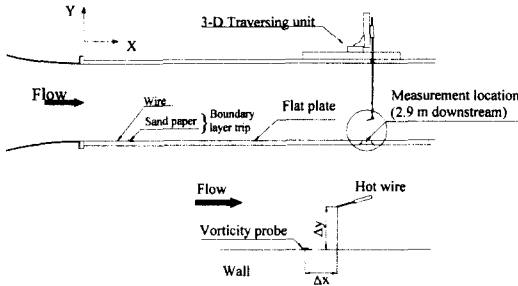


Fig. 3 Schematic of the flat plate and the probe arrangement in the simultaneous measurement

여기서 $\tau_{WB} > \tau_{WA}$ 일 때, $\tau_{Wz} > 0$ 이다.

본 연구에서 제작된 프로브의 형상에 의해 $\alpha = 45^\circ$ 로 하였으며, Champagne *et al.*⁽¹⁰⁾의 결과에 의하여 l/d 를 고려하여 $k = 0.2$ 로 결정하였다.

3. 벽와도 섭동의 측정

3.1 실험조건

본 연구에서 사용된 풍동은 개방형 아음속 축류 풍동으로, 시험부의 크기는 $430 \times 280 \times 3600$ mm 이다. 실험은 자유유동속도가 8 m/s 에서 수행하였으며, 자유유동속도가 5 m/s 인 경우 자유유동에서의 난류강도는 0.25% 미만, 비균일도는 0.4% 미만이다.

완전 발달된 난류경계층이 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 풍동 시험부의 바닥면을 이루고 있는 두랄루민 평판 위에 발생하도록 하였다. 평판은 수축부와 직접 연결되었으므로 선단이 없다. 철사

Table 1 Boundary layer parameters

$U_\infty = 8.0$ m/s
$\delta_{0.999} = 57.2$ mm
$\delta^* = 8.3$ mm
$\theta = 5.9$ mm
$H = 1.40$
$Re_\delta = U_\infty \delta / \nu = 30700$
$Re_\theta = U_\infty \theta / \nu = 3170$
$u_\tau = 0.3059$ m/s
$u_\tau / U_\infty = 0.0383$
$Re_\tau = u_\tau \delta / \nu = 1170$

와 사포를 이용하여 경계층이 빠르게 난류로 성장하도록 하였다.

V형 벽와도 프로브는 수축부 출구로부터 2.9 m 하류 지점에 설치하였다.

경계층이 완전 발달된 이후, 횡방향 압력계수의 분포와 측정위치에서 횡방향으로의 전단속도 (friction velocity)의 분포를 통하여 경계층의 2차원성을 확인하였다. 전단속도는 전술한 바와 같이 프레스톤관과 Patel이 제시한 프레스톤관의 검정식을 이용하여 측정하였다. 횡방향으로의 전단속도의 변화는 $-2 < z/\delta < 2$ 에서 3% 이내로, 발달된 난류경계층은 측정위치에서 2차원성을 만족하고 있음을 알 수 있었다.

측정위치에서의 실험조건은 Table 1에 나타나 있다. 프레스톤관을 이용하여 측정된 측정위치에서의 마찰계수 C_f 는 2.93×10^{-3} 으로 후류법칙 (law of the wake)에 의한 마찰계수,⁽¹¹⁾ 3.06×10^{-3} 과 잘 일치하였다.

3.2 열적 상호작용

V형 벽와도 프로브의 하나의 열선에 의해 발생한 열경계층(thermal boundary layer)이 다른 열선의 측정에 영향을 줄 수 있음을 예견할 수 있다.

때문에 V형 벽와도 프로브를 이용한 벽와도의 측정에 앞서, 하나의 열선의 작동이 다른 열선의 측정에 미치는 영향을 고찰하였다.

한쪽 열선에 의해 측정된 유효 벽마찰력의 평균값과 rms 값이 다른 열선의 작동에 의해 약간 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 열선이 측정된 유효 벽마찰력 섭동의 에너지 스펙트럼을 정규화하지 않은 경우와 정규화한 경우를 보여주고 있다. 정규화하지 않은 에너지 스펙트럼은 열선의 작동에

의해 에너지가 약간 감소함을 볼 수 있으나, 정규화하였을 때에는 어떠한 주파수 대역에서도 에너지의 감소나 증가를 관찰할 수 없었다. 이는 열선의 작동이 전 주파수 대역에서 측정된 유효 벽마찰력 섭동의 에너지에 거의 영향을 주지 않음을 나타낸다.

3.3 벽와도 섭동의 난류강도

벽와도 섭동의 난류강도 $\omega_{W,rms} \nu / u_\tau^2$ 는 벽마찰력 섭동의 난류강도 $\tau_{W,rms} / \overline{\tau_{W,x}}$ 와 동일한 양이다. 측정된 주유동방향 벽와도 섭동의 난류강도는 0.16이며, 횡방향 벽와도 섭동의 난류강도는 0.21이다. 이때, 10회 반복 측정결과로부터 구한 주유동방향과 횡방향 벽와도 섭동은 95% 신뢰도로 각각 1.52%와 1.14%의 오차범위를 나타내었다. 참고로 주유동방향과 횡방향 벽와도의 평균값에 대한 오차범위는 95% 신뢰도로 각각 18%와 2.5%이다. 여기서 주유동방향 벽와도의 오차범위가 큰 것은 주유동방향 벽와도의 평균값이 매우 작기 때문이다. Kim *et al.*⁽¹²⁾의 $Re_\tau = 180$ 에 대한 직접수치모사의 결과에서 주유동방향 벽와도

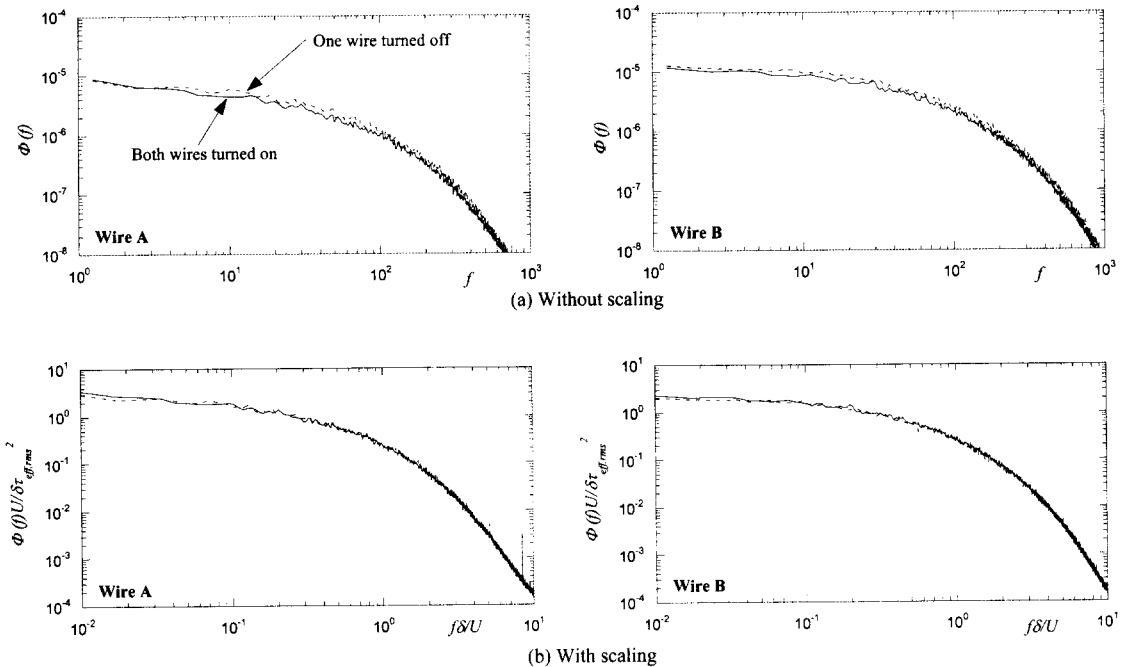


Fig. 4 Thermal cross-talk effect between wires

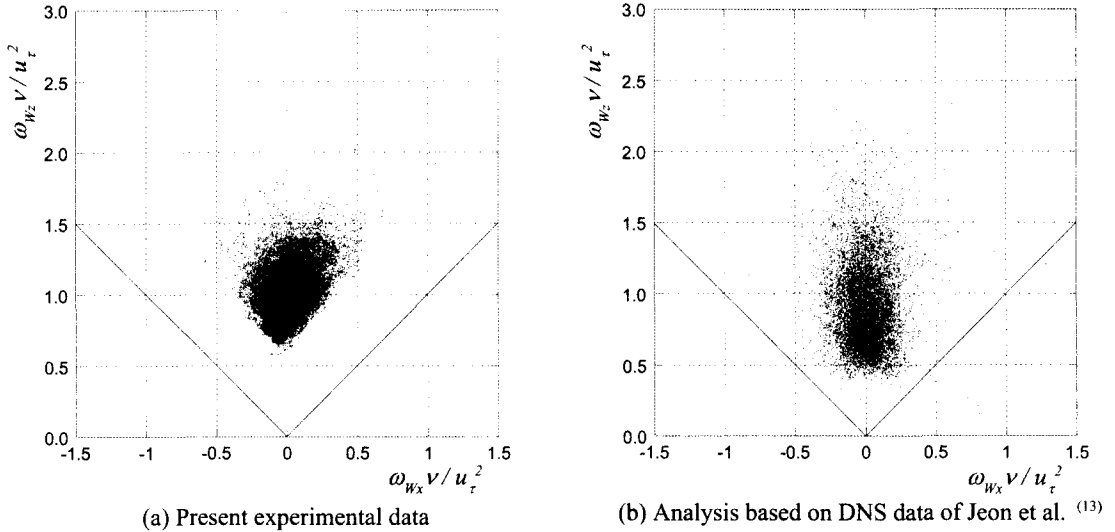


Fig. 5 Scatter plot of instantaneous streamwise and spanwise wall vorticities

섭동의 난류강도는 0.19이며, 이 값은 본 연구의 측정결과와 유사하다. 그러나 횡방향 벽와도 섭동의 난류강도는 이전의 많은 연구 결과들이 0.06에서 0.40까지 상당히 다른 값들을 보인다.⁽⁸⁾ 특히, Kim *et al.*⁽¹²⁾의 직접수치모사 결과는 벽마찰력 섭동의 난류강도가 0.36임을 제시하고 있다. 이 값의 변화가 큰 이유는 센서의 횡방향 길이, 벽면으로의 열전달, 센서의 주파수 응답의 영향 등이 있다.⁽⁸⁾ 또한, 기존의 많은 연구에서 벽마찰력을 측정하기 위한 센서로 열필름을 사용하였는데, 작동유체가 공기의 경우에는 벽마찰력의 난류강도가 낮게 나오는 경향이 있었다. 이에 대한 자세한 분석은 Alfredsson *et al.*⁽⁶⁾에 나타나 있다.

본 연구에서 측정된 횡방향 벽와도 섭동의 난류강도는 0.21이었는데, 이 값은 Kim *et al.*⁽¹²⁾의 $Re_\tau = 180$ 에서의 결과인 0.36이나 Wietrzak and Lueptow⁽⁸⁾의 $Re_\theta = 3050$ 에서의 결과인 0.32에 비해 낮은 값이다. 낮은 횡방향 벽와도 섭동의 난류강도는 프로브의 횡방향 크기에 기인하는 것으로 추정된다. Fig. 1에 제시된 바와 같이 각 열선의 횡방향 길이는 0.4 mm로 비교적 작지만, 전체 프로브의 횡방향 길이는 1.3 mm이며 이 길이는 벽단위로 27이다. V형 벽와도 프로브를 회전시켜 각각의 열선이 주유동방향에 대하여 수직이 되도록 하였을 때, 측정된 난류강도는 0.2

9~0.32의 값을 나타내었다. 이 값들은 회전시키기 이전의 값보다 크며, Wietrzak and Lueptow⁽⁸⁾의 결과와 유사하다.

한편, 주유동방향 벽와도 섭동의 난류강도가 기존의 결과들과 유사한 것은 프로브의 주유동방향의 길이가 벽단위로 8이며, 이 값이 횡방향 길이에 비해 매우 작기 때문으로 생각된다.

주유동방향 벽와도와 횡방향 벽와도의 순간값을 Fig. 5에 제시하였다. Fig. 5(a)는 본 연구의 실험 결과이며, 이와 함께 비교를 위하여 Jeon *et al.*⁽¹³⁾의 난류채널 유동의 직접수치모사에 근거한 해석결과를 Fig. 5(b)에 제시하였다. 측정된 벽와도의 순간값과 직접수치모사로부터 얻은 벽와도의 순간값 모두 주유동방향과 횡방향 벽와도의 상관관계가 거의 없음을 보여준다.

그러나 측정된 횡방향 벽와도의 분포가 직접수치모사에 의한 횡방향 벽와도의 분포에 비해 아주 작은 값을 갖지 않고 있으며 보다 밀집된 분포를 갖는 것을 볼 수 있는데 그 이유는 다음과 같다.

본 실험에서 사용한 V형 벽와도 프로브는 벽에 밀착할 경우 벽면으로의 열전도에 의해 신호의 크기가 감소하며 응답이 느려지는 것을 방지하기 위하여 벽에서 약간 떨어져 있으며, 이 때문에 횡방향 벽와도의 분포가 직접수치모사 결과로부터 구한 횡방향 벽와도의 분포보다 약간 큰

값을 가지게 된다.

또한 V형 벽와도 프로브는 자체의 형상으로 인해 주유동방향에 대해 $\pm 45^\circ$ 이내의 값만을 구할 수 있기 때문에 횡방향 벽와도 값보다 큰 주유동방향의 벽와도 값은 측정하지 못한다.

그러나 본 측정에서 주유동방향 벽와도가 횡방향 벽와도에 비해 큰 경우는 전체의 실험데이터의 1%에도 미치지 못하였으며 이것은 Fig. 5(b)에 제시한 직접수치모사의 결과에서도 확인할 수 있다.

또한 주유동방향과 횡방향 벽와도의 순간값으로부터 순간적인 벽와도 벡터가 주유동방향과 이루는 각도의 rms 값을 구하였으며 직접수치모사로부터 구한 그것과 비교하였다. 즉, 측정된 rms 각도는 $8.4^\circ \pm 0.5^\circ$ 인데 반해 직접수치모사 결과로부터 구한 rms 각도는 12.4° 로 측정값보다 큰 값을 갖는다.

이것은 물론 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)로부터도 예측이 가능하며, V형 프로브가 벽에서 일정 높이만큼 떨어져 있다는 것과 주유동방향에 대하여 $\pm 45^\circ$ 이내의 값만을 구할 수 있다는 점에 기인한다.

3.4 확률밀도함수

다른 연구 결과들과의 비교를 위하여 벽마찰력 섭동의 확률밀도함수를 Fig. 6에 제시하였는데 벽마찰력 섭동의 확률밀도함수는 가우스 분포와 차이를 나타내었다.

주유동방향 벽마찰력 섭동의 확률밀도함수는 비대칭임에 반해 횡방향 벽마찰력 섭동의 확률밀도함수는 보다 대칭에 가까우며, $|\tau_w'/\tau_{w,rms}|$ 가 작은 값을 가지는 영역에서는 완전한 대칭과는 차이가 있지만 $|\tau_w'/\tau_{w,rms}| > 1$ 인 영역에서는 대칭이었다.

평균 횡방향 벽마찰력 $\overline{\tau_{wz}}$ 는 $\overline{\tau_{wx}}$ 의 1.2%~4.8%로 매우 작은 값이었으며, 평균 벽마찰력 벡터가 주유동방향과 이루는 각도는 $0.7^\circ \sim 2.8^\circ$ 로 이는 V형 벽와도 프로브의 축이 주유동방향과 비교적 평행하게 정렬되어 있다는 것을 의미한다.

반면에 주유동방향 벽마찰력 섭동의 확률밀도함수는 양의 비대칭도(skewness)를 가지며, 이 값은 0.97로서 95% 신뢰도로 구한 오차범위는 3.0%이다. 벽에서 순간적인 역류가 없는 것이 확률밀

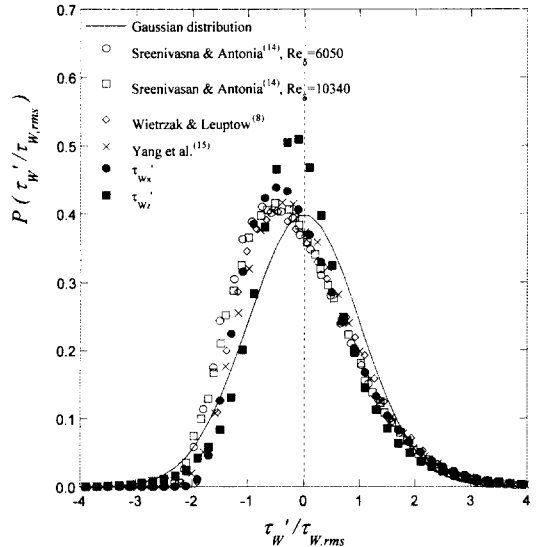


Fig. 6 Probability density function of the wall shear stress fluctuations

도함수에서 양수 쪽으로 더 넓은 분포를 갖게 하며, 이것이 양의 비대칭도를 갖게 한다.⁽⁸⁾

주유동방향 벽마찰력의 섭동의 편평도(flatness)는 4.57의 값을 가지며, 95% 신뢰도로 구한 오차범위는 3.2%이다. 주유동방향 벽마찰력 섭동의 편평도가 가우스 분포의 편평도인 3.0보다 큰 것 또한 양수 쪽으로 더 넓은 분포를 가지기 때문이다. 또한 주유동방향 벽마찰력 섭동의 확률밀도함수는 기존의 다른 연구결과들과도 잘 일치함을 볼 수 있다.

한편 횡방향 벽마찰력 섭동의 편평도는 7.73의 값을 가지고 95% 신뢰도로 구한 오차범위는 8.5%이다. 여기서 횡방향 벽마찰력 섭동의 편평도는 주유동방향 벽마찰력 섭동의 편평도보다도 더 크게 나타났는데, 그것은 횡방향 벽마찰력 섭동이 유동방향 벽마찰력 섭동과 양의 방향으로 비슷한 분포를 가지나, 음의 방향으로 더 폭넓은 분포를 보이기 때문이며, 비교적 큰 횡방향 벽마찰력 섭동이 간헐적으로 발생한다는 것을 말한다.

3.5 에너지 스펙트럼

벽마찰력 섭동의 1차원 에너지 스펙트럼을 Hanning window를 사용한 FFT(Fast Fourier Transform)을 통해 구하였다. 에너지 밀도함수

$\Phi(f)$ 는 다음과 같이 정의된다 :

$$\tau_{w,rms}^2 = \int_0^\infty \Phi(f) df \quad (6)$$

모든 데이터 세트는 2^{13} 개의 데이터로 이루어져 있으며, 250개의 데이터 세트가 앙상블 평균 (ensemble average)되었다. 경계층의 내층 변수 (inner variable)와 τ_w^2 으로 무차원화된 벽마찰력 섭동의 에너지 스펙트럼은 Fig. 7에 나타내었다.

비교를 위하여 기존의 다른 연구결과들을 함께 나타내었다. 여러 벽마찰력 섭동의 에너지 스펙트럼은 서로 일치하지 않는 것을 볼 수 있으며, 단지 레이놀즈수가 증가함에 따라 에너지 스펙트럼이 감소하는 경향을 볼 수 있는데 이같은 경향은 Jeon *et al.*⁽¹³⁾의 연구결과에 설명되어 있다. 본 연구결과 역시 그들의 주장과 부합하는데 Fig. 7의 정규화는 각 스펙트럼 아래 부분의 면적이 벽마찰력 섭동의 난류강도와 관계가 있으므로 레이놀즈수에 따라 벽마찰력 섭동의 난류강도가 감소하는 것으로도 생각할 수 있다. 그러나 벽마찰력 섭동의 측정은 센서의 크기와 유체의 종류에 따라 그 값의 차이가 매우 심한 것으로 미루어 앞으로 보다 정밀한 측정과 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

한편 Fig. 7에서 횡방향 벽마찰력 섭동의 에너지 스펙트럼은 저주파수 영역에서 주유동방향 벽마찰력 섭동의 스펙트럼보다 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 횡방향 벽마찰력과 연관된 유동구조의 크기가 주유동방향 벽마찰력과 연관된 구조의 크기보다 작음을 의미하며 Jeon *et al.*⁽¹³⁾의 결과와 일치한다.

4. 결론

난류경계층에서 벽와도와 유동방향 속도성분의 동시측정을 통한 상관관계의 분석을 위하여 벽면 부착 열선을 이용하여 V형 벽와도 프로브를 제작하였다. 난류경계층에서 벽와도를 측정된 결과, 측정된 물리량들은 기존의 연구 결과들과 잘 일치함을 알 수 있었다. 횡방향 벽와도 섭동의 난류강도는 기존의 연구 결과들에 비해 낮은 값을 보였는데, 이는 프로브의 횡방향 길이에 영향을 받은 것으로 확인되었다. 또한, 주유동방향과 횡방향 벽와도의 순간값을 난류채널 유동의 직접수치모사 결과와 비교함으로써 V형 벽와도 프로브

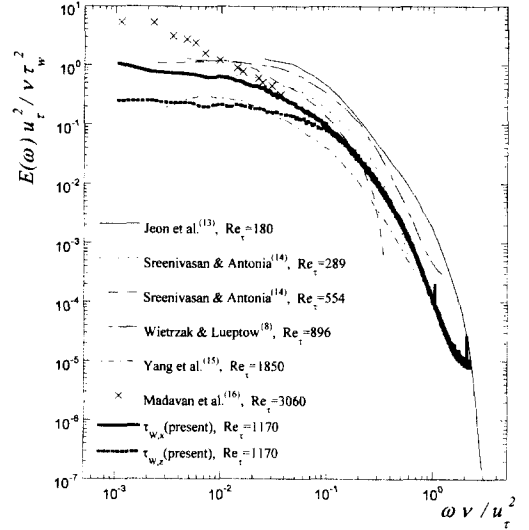


Fig. 7 Energy spectrum of the wall shear stress fluctuations

의 성능을 검증하였다. 한편, 횡방향 벽마찰력 섭동의 확률밀도함수는 대칭에 가까운 분포를 보였으며, 주유동방향 벽마찰력 섭동의 확률밀도함수는 낮은 *rms* 값에도 불구하고 기존의 연구 결과들과 잘 일치하였다. 에너지 스펙트럼을 통해 횡방향 벽마찰력 섭동과 연관된 구조의 크기가 주유동방향 벽마찰력 섭동과 연관된 구조의 크기보다 작음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 한·독 대형협력과제(KOSEF 96-0200-01-01-2)와 1999년도 두뇌한국 21사업의 지원으로 수행한 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

아울러, 본 연구를 위하여 깊이있는 토론과 조언을 함께 해주신 서울대학교 기계항공공학부 최해천 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Hanratty, T. J. and Campbell, J. A., 1996, "Measurement of Wall Shear Stress," in *Fluid Mechanics Measurements*, 2nd Ed. edited by Goldstein, R. J., Taylor & Francis, pp. 575 ~ 648.

- (2) Sirkar, K. K. and Hanratty, T. J., 1970, "The Limiting Behavior of the Turbulent Transverse Velocity Component Close to a Wall," *J. Fluid Mech.*, Vol. 44, Part 3., pp. 605~614.
- (3) Kreplin, H. and Eckelmann, H., 1979, "Behavior of the Three Fluctuating Velocity Components in the Wall Region of a Turbulent Channel Flow," *Phys. Fluids*, Vol. 22(7), pp. 1233~1239.
- (4) Blackwelder, R. F. and Eckelmann, H., 1979, "Streamwise Vortices Associated with the Bursting Phenomenon," *J. Fluid Mech.*, Vol. 94, Part 3, pp. 577~594.
- (5) Kreplin, H. and Eckelmann, H., 1979, "Propagation of Perturbations in the Viscous Sublayer and Adjacent Wall Region," *J. Fluid Mech.*, Vol. 95, Part 2, pp. 305~322.
- (6) Alfredsson, P. H., Johansson, A. V., Haritonidis, J. H. and Eckelmann, H., 1988, "The Fluctuating Wall-Shear Stress and the Velocity Field in the Viscous Sublayer," *Phys. Fluids*, Vol. 31(5), pp. 1026~1033.
- (7) Sumer, B. M., Arnskov, M. M., Christiansen, N. and Jørgensen, F. E., 1993, "Two-Component Hot-Film Probe for Measurements of Wall Shear Stress," *Exp. Fluids*, Vol. 15, pp. 380~384.
- (8) Wietrzak, A. and Lueptow, R. M., 1994, "Wall Shear Stress and Velocity in a Turbulent Axisymmetric Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 259, pp. 191~218.
- (9) Patel, V. C., 1965, "Calibration of the Preston Tube and Limitations on Its Use in Pressure Gradient," *J. Fluid Mech.*, Vol. 23, Part 1, pp. 185~208.
- (10) Champagne, F. H., Sleicher, C. A. and Wehrmann, O. H., 1967, "Turbulence Measurements with Inclined Hot-Wires. Part 1. Heat Transfer Experiments with Inclined Hot-Wire," *J. Fluid Mech.*, Vol. 28, Part 1, pp. 153~175.
- (11) White, F. M., 1991, *Viscous Fluid Flow*, 2nd Ed. McGraw-Hill, New York, p. 451.
- (12) Kim, J., Moin, P. and Moser, R., 1987, "Turbulence Statistics in Fully Developed Channel Flow at Low Reynolds Number," *J. Fluid Mech.*, Vol. 177, pp. 133~166.
- (13) Jeon, S., Choi, H., Yoo, J. Y. and Moin, P., 1999, "Space-Time Characteristics of the Wall Shear-Stress Fluctuations in a Low-Reynolds-Number Channel Flow," *Phys. Fluids*, Vol. 11, No. 10, pp. 3084~3094.
- (14) Sreenivasan, K. R. and Antonia, R. A., 1977, "Properties of Wall Shear Stress Fluctuations in a Turbulent Duct Flow," *J. Appl. Mech.*, Vol. 44, pp. 389~395.
- (15) 양준모, 유정열, 최해천, 1997, "난류경계층에서 벽마찰력과 유동방향 속도성분과의 상관관계 (I) -시간 평균된 공간-시간 상관관계의 분석-" 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제1호, pp. 140~152.
- (16) Madavan, N. K., Deutsch, S. and Merkle, C. L., 1985, "Measurements of Local Skin Friction in a Microbubble-Modified Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 156, pp. 237~256.