

<논 문>

난류경계층에서 벽마찰력과 유동방향 속도성분과의 상관관계 (I) — 시간 평균된 공간-시간 상관관계의 분석 —

양준모* · 유정열** · 최해천**

(1996년 7월 9일 접수)

Correlation of the Wall Skin-Friction and Streamwise Velocity Fluctuations in a Turbulent Boundary Layer (I) — Analysis of Long-Time Averaged Space-Time Correlation —

Joo Mo Yang, Jung Yul Yoo and Haecheon Choi

Key Words : Near-Wall Turbulence(벽근처 난류), Wall Skin-Friction Fluctuation(벽 마찰섭동), Streamwise Velocity Fluctuation(유동방향 속도섭동), Correlation(상관관계), Tilting Angle(기울어진 각도), Convection Velocity(대류속도)

Abstract

A simultaneous measurement of the wall skin-friction and near-wall streamwise velocity fluctuations is performed using hot film and hot wire anemometers to investigate the relation between them. Near-wall turbulence statistics measured with a hot-wire probe are in good agreement with previous results. Turbulence properties of the wall skin-friction fluctuations measured with a hot film also show fairly good agreements with those measured by others except that rms level is lower in the present study. Long-time averaged space-time correlations show that the wall skin friction is highly correlated with a turbulence structure which is tilted from the wall in the streamwise direction. Tilting angles are obtained from the phase shifts between the wall skin-friction and streamwise velocity fluctuations. The convection velocity of the near-wall streamwise velocity obtained from the space-time correlation is in good agreement with that from the direct numerical simulation database.

기 호 설 명

C_f : 마찰계수
 C_t : 압력계수
 a : 열선의 직경
 E : 열선유속계의 평균 출력전압 또는 유동방향 속도섭동의 스펙트럼
 F : 섭동신호의 편평도 (flatness factor)

j : 주파수
 i : 열선의 횡방향 길이
 l_z : 열필름의 횡방향 길이
 P : 확률 밀도 함수
 R : 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 상관관계
 R' : 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 상관계수
 R_0 : 열선의 냉저항
 R_w : 열선의 작동저항
 Re : 레이놀즈수

*회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

**회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

- S : 섭동신호의 비대칭도(skewness factor)
- T : 샘플링 시간
- t : 시간
- U : 주유동방향 평균속도
- U_{∞} : 자유유동속도
- u' : 유동방향 속도섭동
- u_p : 대류속도
- u_{rms} : 유동방향 속도섭동의 rms값
- u_{τ} : 전단속도
- x : 주유동방향
- y : 높이방향
- z : 횡방향

그리스문자

- Δ : 변위
- \emptyset : 벽마찰섭동의 스펙트럼
- δ : 경계층두께
- δ^* : 경계층의 배제두께
- θ : 경계층의 운동량두께
- ν : 유체의 동점성계수
- ρ : 유체의 밀도
- $\bar{\tau}_w$: 평균 벽마찰력
- τ_w' : 벽마찰섭동
- $\tau_{w,rms}$: 벽마찰섭동의 rms값
- ϕ : 등위상선의 기울어진 각도
- $\omega_{x'}$: 유동방향 와도섭동

상첨자

- + : 벽단위

하첨자

- ip : 등위상

1. 서 론

지난 30여년간, 난류경계층의 구조를 밝히고자 하는 노력은 실험적으로 그리고 수치해석적으로 활발히 진행되어 왔다. 이에 대한 지금까지의 활발한 연구는 난류경계층내에 존재하는 응집구조(coherent structure)에 대한 많은 부분을 파악할 수 있게 해 주었다.⁽¹⁾ 특히, 벽근처의 난류구조(near-wall

turbulence structure)에 대한 관심이 크게 고조되고 있는데, 이는 벽근처의 난류구조가 경계층에 의한 항력(drag)뿐 아니라, 열전달현상과도 직접적인 관계를 가지고 있기 때문이다. 또한, 벽마찰력의 섭동(wall skin-friction fluctuation)에 대한 연구도 활발히 진행되어 왔는데, 이를 통하여 벽 바로 위의 난류거동에 대한 많은 부분을 밝혀 왔다.

최근 난류경계층에 있어서 난류제어에 의한 항력의 감소^(2,3) 또는 열전달촉진은 중요한 연구의 대상이 되고 있다. 이는 결국, 벽마찰력과 유동간의 상관관계를 밝히는 일이 매우 중요한 의미를 지니고 있음을 의미한다.

벽마찰력과 유동방향 속도섭동과의 상관관계를 구하고자 하는 노력은 Eckelmann⁽⁴⁾에서 찾아볼 수 있다. Eckelmann은 비교적 낮은 레이놀즈수의 채널유동에서 실험을 수행하여, 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 변화간에는 시간차가 존재함을 알아내었으나, 더 이상의 자세한 분석을 하지 않았다.

Brown and Thomas⁽⁵⁾는 여러 개의 열선과 열필름의 동시측정을 통하여 난류경계층내에 벽마찰력과 큰 상관관계를 가지고 있는 큰 유동구조(large structure)가 존재함을 보였고, 이 유동구조는 주 유동방향에 대하여 18°의 각도로 기울어져 있음을 알아내었다. 그들의 결과도 벽마찰력과 유동간에 시간차가 존재함을 밝혔다. 이후에 Thomas and Bull⁽⁶⁾은 벽마찰섭동, 벽압력섭동 그리고 유동의 변화 사이에 존재하는 위상차에 대한 정보를 제시하였다.

Alfredsson 등⁽⁷⁾은 여러 가지 작동유체에서 여러 가지의 측정방법을 이용하여 벽마찰력의 섭동을 측정하였다. 그들의 실험결과 중에 벽마찰력과 유동방향 속도성분과의 상관계수 측정결과가 나타나 있으나, 그에 대한 분석은 이루어지지 않았다.

벽마찰력과 유동간의 상관관계에 대한 비교적 자세한 분석은, 축대칭 난류경계층(turbulent axisymmetric boundary layer)에서 Wietrzak and Lueptow⁽⁸⁾에 의하여 수행되었다. 그들은 시간 평균된 공간-시간 상관계수(space-time correlation coefficient)뿐 아니라, VITA 방법과 Peak 추출 방법 등의 조건부 추출방법(conditional sampling technique)을 이용하여 벽마찰력과 유동간의 상관관계에 대한 자세한 분석을 수행하여 유동에 수직방향의 곡면효과가 벽근처 유동의 구조에 크게 영향을 미치지 않음을 알아내었으며, 그들 또한 주유

동방향에 대하여 18° 기울어져 있는 유동의 구조를 밝히고 있다.

위에서 언급한 많은 실험의 결과들은 벽마찰력과 유동간에 존재하는 시간차와 주유동방향에 대하여 기울어져 있는 유동의 구조의 존재에 대한 일치된 결과들을 보여주고 있다. 그러나, 대부분의 실험은 벽근처영역에서보다는 경계층의 외부영역(outer region) 또는 로그영역(log region)에서 이루어졌다. 벽마찰력과 벽근처 영역의 유동구조간의 상관관계에 대한 연구는 Rajagopalan and Antonia⁽⁹⁾에 의하여 수행되었다. 그들의 실험결과는 벽마찰력과 상관관계를 가지고 있는 벽근처영역의 유동구조가 18° 보다 작은 각도로 기울어져 있음을 보인다. 뿐만 아니라, 최근에 Kravchenko 등⁽¹⁰⁾의 직접수치모사(direct numerical simulation : DNS)의 결과는 벽근처 영역에 존재하는 주유동방향의 와류(streamwise vortex)가 벽마찰력과 직접적인 관계를 가지고 있음을 밝히고 있다.

본 연구의 목적은 벽마찰력과 벽근처영역에서의 유동방향 속도성분의 상관관계를 열선과 열필름의 동시측정을 통하여 알아보고, 벽마찰력과 직접적인 관계를 가지고 있는 벽근처영역의 유동구조에 대한 정량적인 해석을 수행하는데 있다. 특히, 본 연구의 제1부에서는 시간 평균된 공간-시간 상관관계 및 상관계수를 통하여, 난류경계층에서의 벽마찰력과 유동방향 속도성분간의 상관관계를 분석하였으며, 조건부 추출방법에 의한 결과는 제2부에 제시

되어 있다. 제1부의 2절에서는 실험장치 및 방법에 대하여 언급되어 있으며, 3절에서 벽근처영역에서의 열선에 의한 측정결과와 열필름을 통하여 측정된 벽마찰력의 성분성분에 대한 측정결과를 제시하였다. 또한, 3절에서는 공간-시간 상관계수를 통하여 얻은 벽마찰력과 유동방향 속도성분과의 상관관계의 결과와 유동구조와 관련된 정보를 보였으며, 4절에서 결론을 제시하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 풍동 및 평판

실험에 사용된 풍동은 폐순환형의 아음속 풍동으로, 시험부의 크기는 $900 \times 900 \times 3600\text{mm}$ 이다. 실험은 자유유동속도 10.7m/s 에서 수행하였으며, 자유유동에서의 난류강도는 0.12% , 비균일도는 0.3% 이다.

완전발달된 난류경계층을 발생시키기 위하여, Fig. 1에 나타난 바와 같이 아크릴평판을 풍동의 시험부에 설치하였다. 평판의 길이는 3.2m 이고 폭은 0.9m 로, 평판은 시험부의 폭과 같은 크기로 제작하였다. 평판은 T형의 알루미늄 앵글과 9개의 받침대를 이용하여 평판이 바닥으로부터 약 0.3m 의 높이에 고정시켜 설치되도록 하였다. 평판의 선단은, 유동의 박리가 일어나지 않도록, 타원형으로 제작되어 있으며, 선단으로부터 0.2m 지점에 샌드페이퍼를 부착하여 경계층이 빨리 난류로 성장하도록

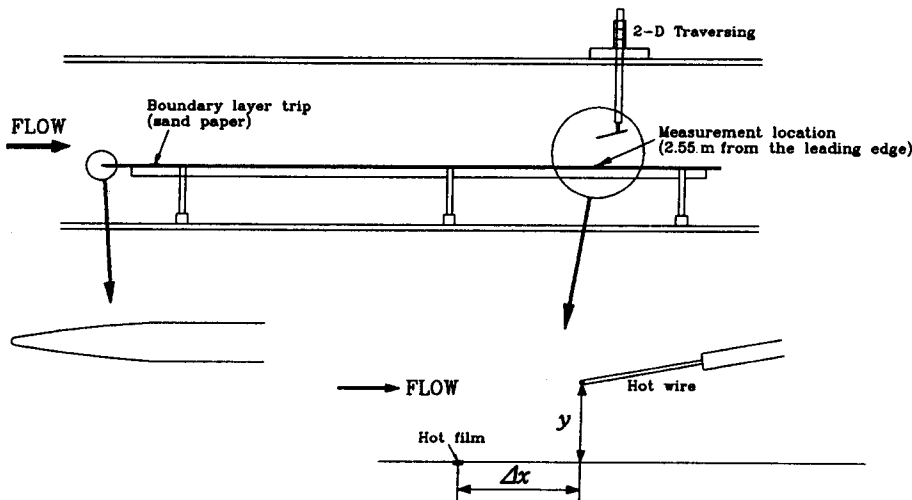


Fig. 1 Schematic diagram of the flat plate placed in the wind tunnel and the probe arrangement in the simultaneous measurement.

Table 1 Boundary layer parameters

$U_\infty=10.7\text{m/s}$
$\delta^*=8.6\text{mm}$
$\theta=6.3\text{mm}$
$H=1.37$
$Re_\theta=U_\infty\theta/\nu=4,600$
$u_\tau=0.4118\text{m/s}$
$u_\tau/U_\infty=0.0385$
$Re_\tau=u_\tau\delta/\nu=1,850$

록 하였다. 대부분의 측정은 평판 선단으로부터 2.55m 지점에서 이루어졌다.

경계층이 완전 발달된 이후, 평판의 중심을 따른 압력계수(C_p)의 변화는 1% 이하이다. 경계층의 2차원성을 확인하기 위하여 측정위치에서의 폭방향에 따른 전단속도(friiction velocity)를, 프레스톤 튜브와 Patel⁽¹¹⁾이 제시한 프레스톤 튜브의 검정식을 이용하여 측정하였다. 폭방향으로의 전단속도의 변화는 $-2 < z/\delta < 2$ 에서 2% 이내, $-4 < z/\delta < 4$ 에서 3% 이내로, 발달된 난류경계층은 측정위치에서 2차원성을 만족하고 있음을 알 수 있었다.

평판의 선단으로부터 2.55m 지점인 측정위치에서의 실험조건은 Table 1에 나타나 있다. 프레스톤 튜브를 이용하여 측정한 측정위치에서의 마찰계수(skin-friction coefficient : C_f)는 2.97×10^{-3} 으로 7승근 멱법칙(one-seventh power law)에 의하여 구한 마찰계수,⁽¹²⁾ $C_f=0.0356Re_\theta^{-1/4}=3.11 \times 10^{-3}$ 과 잘 일치된 값을 보였다.

2.2 사용된 센서 및 측정방법

주유동방향의 평균속도와 속도섭동은 두 가지의 1형 열선을 이용하여 측정하였다. 그 중 하나는 일반적으로 구입할 수 있는 DANTEC 55P15의 1형 열선센서(HW1)이며, 또 한 가지는 Petar Vukoslavcvić에 의하여 제작된 작은 열선센서(HW2)이다. HW1은 $d=5\mu\text{m}$ 그리고 $l=1.25\text{mm}$ 로 횡방향 길이(spanwise length)를 벽단위(wall unit)으로 환산하면 $l^+=lu_\tau/\nu=35$ 이다. 반면, HW2는 $d=1\mu\text{m}$, $l=0.25\text{mm}$ 로 길이는 벽단위로 $l^+=7$ 이다. 두 열선 모두, 열선의 두께에 대한 길이의 비(aspect ratio : l/a)가 250으로 일반적으로 알려져 있는 기준인 $l/d \geq 200$ ⁽¹³⁾를 충분히 만족한다.

벽마찰 섭동성분의 측정을 위해서는 DANTEC 55R47 열필름센서를 사용하였다. 이 열필름센서는 크기가 $0.1 \times 0.9\text{mm}^2$ 인 직사각형의 니켈필름으로, 폭방향의 길이(l^+)는 벽단위로 $l^+=25$ 이다. 열필름은 3M 접착제를 이용하여 평판에 부착시켜 사용하였다.

HW1과 열필름은 DANTEC 55C01/55C17의 정온도형 열선유속계에 연결시켰으며, HW2의 경우 KANOMAX 1010의 정온도형 열선유속계로 신호를 받아들였다. 이때, 각센서에 사용된 과열비($(R_w - R_0)/R_0$)는 HW1, HW2 그리고 열필름에 대하여 각각 0.5, 0.3, 0.4이다. 사각파에 의한 주파수응답특성은 각각의 센서에 대하여 28kHz, 35kHz 그리고 11kHz이다.

모든 측정 이전과 이후에 열선과 열필름의 검정을 수행하였다. 열선의 검정은 풍동의 자유유동영역에서 수행하였고, 자유유동속도는 피토판과 Validyne의 압력계를 이용하여 측정하였다. 열선의 검정식은 4차의 다항식을 사용하였다. 열필름을 검정할 때에는, 프레스톤 튜브와 Patel⁽¹¹⁾이 제안한 검정식을 이용하여 평균 마찰력을 측정하고, 이때의 열필름의 평균전압을 측정하였다. 열필름에 대하여 사용된 검정식은, 열선유속계의 출력전압(E)과 평균 벽마찰력(\bar{u}_τ)에 대하여 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$E^2 = A + B\bar{u}_\tau^{1/n} \tag{1}$$

여기서, A , B 그리고 n 은 열필름의 검정에 의해 구해지는 상수이다. 벽에 부착된 열필름의 경우, n 은 일반적으로 3이다. 모든 실험 이전과 이후에 각각의 센서에 대한 검정을 수행하고, 만일 두 검정의 결과가 2% 이상의 오차를 보이면, 그때의 측정결과는 버렸다.

또한, 모든 실험 이후에 프레스톤 튜브를 이용하여 실험시의 전단속도를 측정하였으며, 열선의 벽으로부터 떨어진 거리는 측정한 평균속도를 일반적인 벽법칙에 맞추어 알아내었다.

열선과 열필름에서의 전압 신호는 정온도형 열선유속계를 이용하여 받아들인 이후, DC 성분과 AC 성분으로 분리하였다. DC 성분의 경우는 HP3457 A digital multimeter를 이용하여 받아들이고, AC 성분의 경우, 8-bit LeCroy digital oscilloscope를 이용하여 10 kHz의 속도로 1초 동안의 전압신호세트(data set)를 받아들였다. 10 kHz는 각각의 전

압데이터 간의 간격이 $\Delta t = 0.1$ ms임을 의미하며, 본 실험의 측정조건을 고려해 볼 때, 이는 벽단위로 $\Delta t = \Delta t u_{\tau}^2 / \nu = 1.159$ 이다. 또한, 1초의 시간은 $TU_{\infty} / \delta = 163$ 그리고 $Tu_{\tau}^2 / \nu = 11590$ 에 해당된다. 각각의 전압신호세트는 10000개의 데이터로 이루어져 있으며, 실제 실험시에는 15~20개의 세트를 받아들이어 앙상블평균하였다. 모든 전압신호는 486 IBM PC와 GPIB를 이용하여 하드디스크에 저장하고 후처리를 수행하였다.

3. 실험결과

3.1 주유동방향 속도섭동 성분의 측정

벽마찰력과 유동방향 속도성분과의 상관관계를 동시측정을 통하여 고찰하기 이전에 먼저 두가지의 열선(HW1과 HW2)을 이용하여 벽근처영역에서의 일반적인 난류량을 측정하였다.

Fig. 2는 열선을 이용하여 측정한 평균속도분포를 일반적인 벽법칙 ($U^+ = y^+$ 그리고 $U^+ = (1/0.41) \ln y^+ + 5.0$)과 함께 나타내었으며, 비교를 위하여 van Driest⁽¹⁴⁾가 제안한 식에 의한 평균속도분포도 함께 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이, HW1과 HW2의 측정결과는 잘 일치하며, 측정된 평균속도분포는 일반적인 벽법칙과 잘 일치한다. 그러나, 벽 아주 가까운 영역 ($y^+ \approx 1$)에서는 열선으로부터 벽으로의 과도한 열전도로 인하여 실제보다 큰 평균속도를 예측함을 볼 수 있다.^(15,16) 측정된 평균속도가 일반적인 벽법칙과 잘 일치함을 확인함으로써, 측정위치에서 난류경계층이 완전발달된 상태임을 알 수 있었다.

두 열선을 이용하여 측정한 벽 근처 영역에서의 유동방향 속도섭동의 측정 결과를 Fig. 3(a)에 나타내었으며, Spalart⁽¹⁷⁾의 직접수치모사의 결과와 Johansson 등⁽¹⁸⁾의 열선에 의한 측정결과를 함께 제시하였다. HW1과 HW2를 이용한 측정결과는 큰 차이를 보이고 있음을 볼 수 있는데, 이는 두 열선의 횡방향 길이가 다르기 때문이다. 특히, 본 실험의 결과중, HW2를 이용한 경우와 Johansson 등의 결과가 잘 일치함을 볼 수 있는데, 이는 두 실험의 측정조건이 거의 같기 때문이다. 즉, Johansson 등은 $Re_{\theta} = 4940$ 인 난류경계층에서 $l^+ = 7$ 인 열선을 이용하여 측정하였으며, 본 실험의 난류경계층은 $Re_{\theta} = 4600$ 이고 HW2는 $l^+ = 7$ 이다.

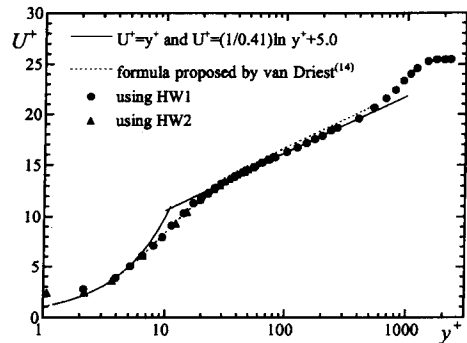


Fig. 2 Measured profiles of the mean velocity in wall units.

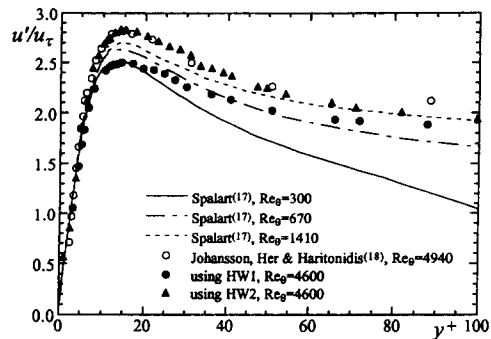


Fig. 3(a) Streamwise turbulence intensities near the wall normalized by the friction velocity

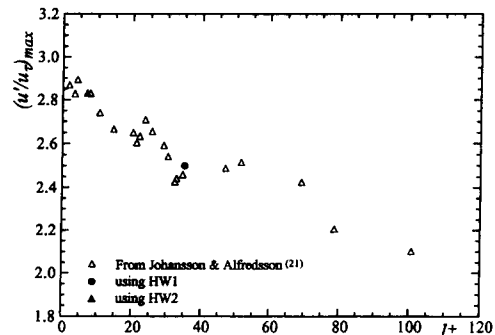


Fig. 3(b) Maximum turbulence intensity as a function of the probe length in wall units.

한편, Spalart의 직접수치모사 결과는 레이놀즈수에 크게 의존하는 결과를 보이고 있다. 레이놀즈수의 영향에 대한 연구는 난류채널 유동에서 Wei and Willmarth⁽¹⁹⁾에 의하여, 난류경계층에서 Ching 등⁽²⁰⁾에 의하여 연구되었는데, 그들은 모두 LDV를 이용하여 측정을 수행하였다. 그들의 결과는 저레이놀즈수의 영역에서 벽단위에 의한 무차원

화가 타당하지 않음을 보이고 있다.

Johansson and Alfredsson⁽²¹⁾은 열선의 횡방향 길이가 측정결과에 미치는 영향을 자세히 고찰하여, 열선의 횡방향 길이가 길어질수록 측정된 주유동방향의 난류강도가 크게 감소됨을 알아낸 바 있다. Fig. 3(b)에는 열선의 길이(l)에 따른 주유동방향 난류강도 최대값의 변화를, Johansson and Alfredsson에 나타난 결과와 함께 제시하였다. 본 실험의 결과는 Johansson and Alfredsson에 나타난 결과의 경향과 잘 일치함을 볼 수 있으며, 벽 가까이에서의 정밀한 주유동방향 난류강도의 측정(5% 이내의 오차)을 위해서는 $l^+ \leq 10$ 이어야 함을 볼 수 있다. Blackwelder and Haritonidis⁽²²⁾은 벽 가까이에서의 정밀한 측정을 위해서는 $l^+ \leq 20$ 가 되어야 함을 제시한 바 있다.

3.2 벽마찰력 섭동성분의 측정

벽마찰 섭동성분을 DANTEC 55R47 열필름을 이용하여 측정하였다. 벽마찰 섭동을 측정할 지금까지의 모든 결과는 Wietrzak and Lueptow⁽⁸⁾ 그리고 양준모⁽²³⁾에 정리되어 있다. 지금까지 측정된 벽마찰 섭동성분의 상대적인 rms값($\tau_w, rms \sqrt{I_w}$)은 0.06에서 0.40에 이르는 넓은 범위의 결과를 보여주고 있으며, 본 실험의 결과는 비교적 낮은 0.121이다. Alfredsson 등⁽⁷⁾과 Cook⁽²⁴⁾은 본 실험에서 사용된 열필름과 같은 종류의 센서(DANTEC 55R47)를 사용하여 벽마찰섭동의 rms값을 구하였는데, 그를 통하여 본 실험의 결과와 거의 같은 0.16 그리고 0.122의 값을 각각 얻었다. Alfredsson 등⁽⁷⁾은 여러 가지 작동유체에서 여러 종류의 프로브로 벽마찰 섭동성분의 rms값을 측정하였는데, 벽마찰 섭동성분의 상대적인 rms값은 0.4임을 제안한 바 있으며, Kim 등⁽²⁵⁾의 직접수치모사의 결과는 0.36임을 보인다. 이렇듯 넓은 범위의 rms값을 나타내는 이유는 센서의 횡방향 길이, 센서로부터 벽으로의 열전도, 센서의 주파수 응답특성 등이 각 실험조건 및 방법에 따라 크게 다르기 때문이다. 특히, 센서로부터 벽으로의 열전도는 센서의 평균값에 대한 검정(static calibration)과 동특성 검정(dynamic calibration)간의 차이로 나타난다.⁽⁷⁾

Fig. 4는 벽마찰 섭동성분의 확률밀도함수를 나타낸다. 또한, Fig. 4에는 정규분포와 Sreenivasan and Antonia,⁽²⁶⁾ Wietrzak and Lueptow⁽⁸⁾의 결과를 함께 나타내었다. 벽마찰 섭동성분은 정규 분포

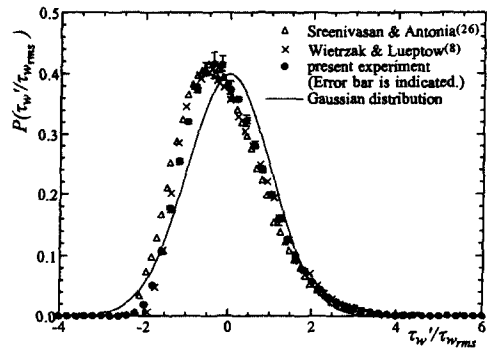


Fig. 4 Probability density distribution of the wall skin-friction fluctuations.

와는 큰 차이를 보이고 있으며, 간헐적으로 큰 벽마찰력이 발생하고 있음을 보여준다. 본 실험의 결과는 $S(\tau_w')=0.70$, $F(\tau_w')=3.74$ 이다. 또한, 벽마찰력의 시간에 따른 변화를 관찰해 봄으로써, 벽에서의 순간적인 역류는 발생하고 있지 않음을 알 수 있었는데, 이는 Eckelmann⁽⁴⁾이나 Wietrzak and Lueptow⁽⁸⁾에서 이미 언급된 바 있다. 벽마찰력의 rms값이 각 실험에 따라 큰 차이를 보이고 있음^(8,23)에도 불구하고, 확률밀도함수는 잘 일치하는 모순된 결과를 보여주고 있는데, 이에 대한 설명은 Alfredsson 등⁽⁷⁾에서 볼 수 있다: 센서로부터 벽으로의 열전도는 측정된 벽마찰 섭동성분의 rms값을 크게 감소시키는 원인이 되지만, 그러한 감소는 벽마찰섭동의 전체 주파수성분에 걸쳐 고르게 일어나기 때문에, 벽마찰 섭동신호의 기본적인 형태에는 변화를 주지 않는다.

3.3 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 공간-시간 상관관계

벽마찰력과 유동방향 속도섭동을 동시에 측정하였다. 벽마찰섭동을 측정하기 위한 열필름은 한 위치에 고정시키는 반면, 열선은 열필름의 하류인 $\Delta x^+=0, 29, 58, 87$ 그리고 $\Delta x^+=0$ 인 위치로 이동시키면서 동시측정을 수행하였다. 벽근처 영역에서의 정밀한 측정을 위하여, 동시 측정시의 유동방향 속도섭동의 측정은 HW2를 사용하였다.

Fig. 5는 $\Delta x^+=0$ 인 경우 동시측정한 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 시간에 따른 전압신호를 y 에 따라 나타내고 있다. 벽 아주 가까운 영역에서는 두 전압신호가 거의 같은 형태를 보여주고 있는 반면, 두 전압신호의 유사성은 열선이 벽으로부터 멀

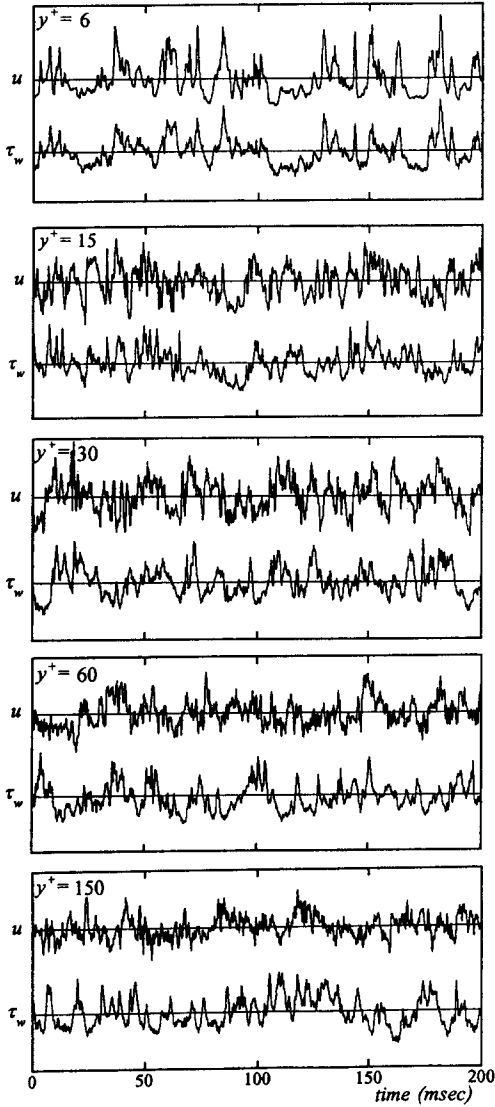


Fig. 5 Simultaneous time records of the wall skin friction and the streamwise velocity at various y^+ positions. Note that the vertical scales of u and τ_w are adjusted. Solid lines denote the mean values of u and τ_w , respectively.

어질수록 작아지는데, 특히 유동방향 속도섭동의 고주파수 성분의 증가가 나타나고 있다.⁽⁴⁾ 이러한 고주파수 성분의 증가는 Fig. 6에 보이고 있는 스펙트럼의 결과로 뚜렷이 알 수 있다. $y^+ \leq 5$ 에서 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 스펙트럼이 동일한 선 위에 올라가고 있다는 사실은 $\tau_w' = (\partial u' / \partial y)|_{wall}$ 임을 감안하면 당연한 결과라고 볼 수 있

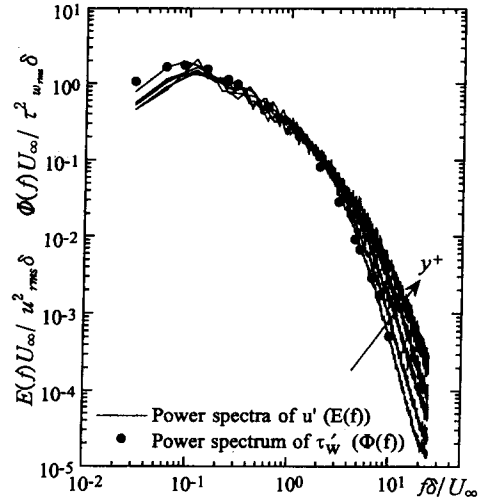


Fig. 6 Power spectra of the wall skin-friction fluctuations and the streamwise velocity fluctuations at various y^+ positions: $y^+ = 5, 10, 15, 23, 43, 108$.

다. y^+ 가 증가할수록 u' 의 고주파수 성분이 증가한다는 사실은 벽으로부터 멀어질수록 난류성분이 작은 스케일 (small scale)을 많이 포함하고 있으며, 벽으로부터 멀어질수록 유동의 구조가 주유동 방향으로 작게 뻗어 있음 (less elongated)을 의미한다.

벽마찰력 섭동과 유동방향 속도섭동간의 상관관계 ($R(\Delta t, \Delta x, y)$)와 상관계수 ($R'(\Delta t, \Delta x, y)$)는 다음과 같이 정의된다.

$$R(\Delta t, \Delta x, y) = \overline{\tau_w'(t, x) u'(t + \Delta t, x + \Delta x, y)} \quad (2)$$

$$R'(\Delta t, \Delta x, y) = \frac{R(\Delta t, \Delta x, y)}{\tau_{w,rms} u_{rms}} \quad (3)$$

여기서, “—”은 시간(t)에 대한 평균을 의미하며, x 는 벽마찰력의 측정위치를 의미한다.

Fig. 7(a)는 벽마찰력과 유동방향 속도섭동간의 공간상관관계 ($\Delta t = 0$ 인 경우)를 $\tau_{w,rms}$ 와 u_r 로 정규화 (normalization) 한 결과를 나타내고 있다. 만약 두 성분이 완전한 상관관계 (perfectly correlated)를 보이는 경우, 각 결과는 y^+ 위치에서의 주유동 방향의 난류강도를 전단속도로 무차원화한 Fig. 3(a)의 값을 나타내게 된다. 벽마찰력의 측정위치에서 열선을 하류로 이동시킬수록 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 상관관계가 커지는 것을 볼 수 있는데, 이는 벽마찰력이 후류의 유동구조와 큰 상관관계를 가지고 있음을 의미한다. 뿐만 아니라, 최

대 상관관계를 가지는 y^+ 의 위치가 벽으로부터 조금씩 멀어지는 것을 볼 수 있다. $\Delta x^+ = 87$ 인 경우, 최대 상관관계는 $y^+ \approx 12.5$ 에서 나타나며, 열선이 그보다 상류로 이동하면 그 위치는 점점 벽으로 가까워진다. 이러한 사실은 벽마찰력과 큰 상관관계를 가지는 유동의 구조가 주유동방향에 대하여 기울어져 있음을 의미한다. 각 Δx^+ 의 위치에서, 벽으로 가까와질수록 상관관계가 감소하는 것은 단순히 벽조건(no-slip boundary condition)에 의하여 나타나는 결과이다.

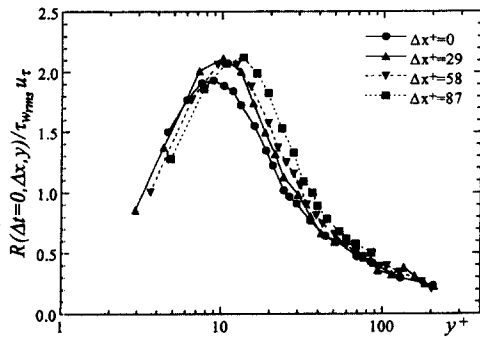
공간 상관계수(space correlation coefficient)를 Fig. 7(b)에 나타내었다. $\Delta x^+ = 0$ 인 경우, 벽으로 가까와질수록 상관계수는 1.0의 값을 향해 수렴하고 있음을 볼 수 있으며, 열선이 열필름의 후류로 이동할수록 상관계수의 최대값이 발생하는 위치가 벽으로부터 멀어지는 것을 볼 수 있다. 반면, 열선이 후류로 이동할수록 최대상관계수 값은 작아지는데, 이는 벽마찰력과 속도성분을 측정하는 위치가 서로 멀어질수록 두 성분의 시간차의 섭동(phase jitter)이 커지기 때문이다. 이는 Fig. 9에서 볼 수

있듯이 $\Delta t^+ \neq 0$ 인 경우는 해당되지 않는다.

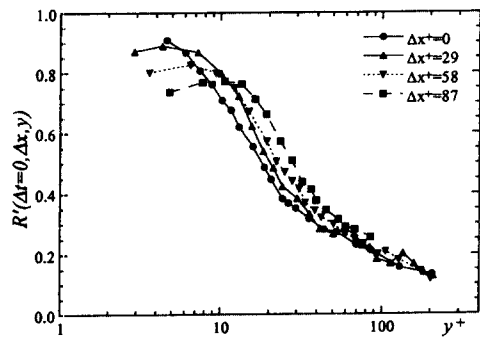
공간상관관계와 공간상관계수의 결과는 주유동방향에 대하여 기울어져 있는 유동구조가 벽 가까이에 존재하고 있음을 보이고 있는데, 이러한 기울어진 유동의 구조는 Kravchenko 등⁽¹⁰⁾이 수행한 직접수치모사의 분석으로부터도 확인할 수 있다. Kravchenko 등은 난류채널유동에서의 직접수치모사로부터 얻은 데이터를 이용하여 벽마찰 섭동성분과 유동방향의 와도섭동(streamwise vorticity fluctuation)간의 상관관계를 고찰한 바 있다.

벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 상관관계와 상관계수가 최대가 되는 위치를 Fig. 8에 나타내었다. 또한, Kravchenko 등이 제시한 벽마찰력과 유동방향 와도섭동간의 상관관계를 나타내는 등상관계곡선을 함께 나타내었다. Fig. 8(a)에서, 본 실험은 $\Delta z^+ = 0$ 에서의 결과를 나타내며, Kravchenko 등의 결과는 $\Delta z^+ \approx \pm 18$ 에서의 상관관계를 나타낸다. Kravchenko 등의 결과는, $\Delta x^+ = 0$ 에서 $y^+ \approx 13$, $\Delta x^+ = 300$ 에서는 $y^+ \approx 30$ 에서 최대 상관관계가 나타나고, 이로부터 유동구조의 기울어져 있는 각도가 약 3° 임을 알 수 있다(Fig. 8(a)의 파선). 반면, 본 실험의 결과를 보면, 상관관계의 최대값 위치로부터는 약 2.5° , 상관계수의 최대값 위치로부터는 약 7° 의 각도를 구할 수 있다.

본 실험에서 구한 최대 상관관계는 Kravchenko 등에서 볼 수 있는 최대 상관관계와 비슷한 위치에서 발생하나, 본 실험의 결과가 좀더 벽 가까운 위



(a) $R(\Delta t=0, \Delta x, y) / \tau_{w,rms} u'_t$



(b) $R'(\Delta t=0, \Delta x, y)$

Fig. 7 Space correlations of τ'_w and u'

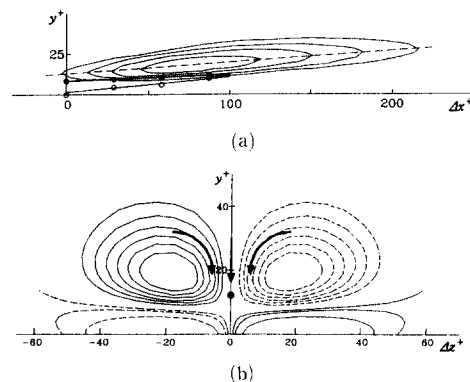


Fig. 8 Locations of the maximum correlation of τ'_w and u' : (a) A $(\Delta x, y)$ plane at $\Delta z^+ = 0$; (b) A $(\Delta z, y)$ plane at $\Delta x^+ = 87$. Contours of the two-point correlation between τ'_w and ω'_x at (a) $\Delta z^+ \approx 18$ (b) $\Delta x^+ = 90$ (Kravchenko *et al.*⁽¹⁰⁾) are also shown

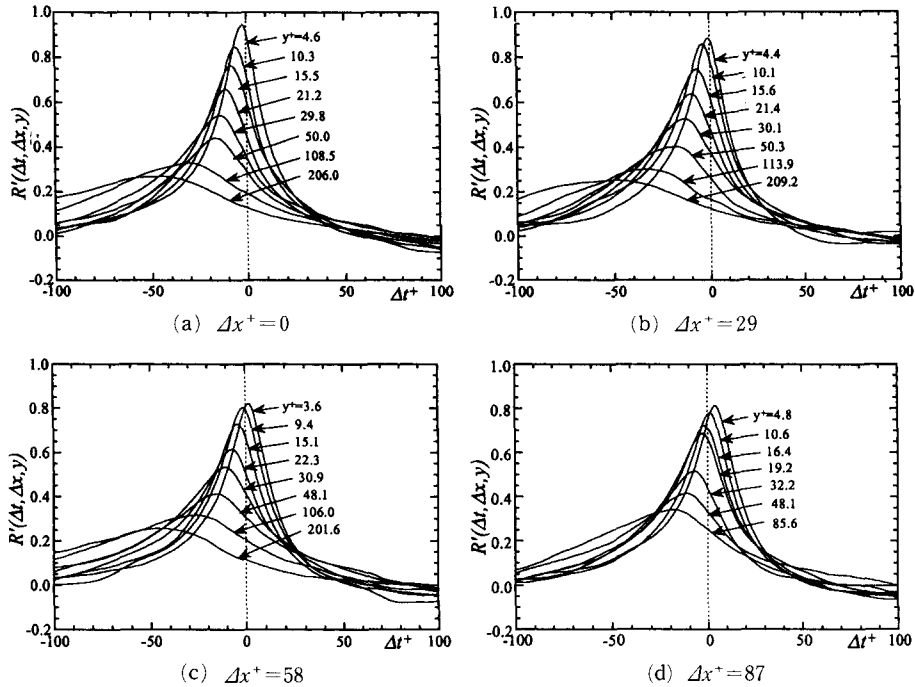


Fig. 9 Space-time correlation coefficients of $v'w'$ and u' at four different streamwise separation distances

치에서 최대 상관관계를 가진다. 즉, Kravchenko 등의 결과는 벽마찰력과 유동방향 와도섭동간의 상관관계가 $\Delta x^+ = 90$, $y^+ = 20$ 그리고 $\Delta z^+ = \pm 18$ 에서 최대값을 보이나, 본 실험의 결과는 $\Delta x^+ = 87$ 에서 최대의 상관관계를 가지는 위치는 $y^+ = 12.5$ 이다. 이러한 차이는 Fig. 8(b)에서 설명될 수 있다. 중심이 $y^+ = 20$, $\Delta z^+ = \pm 18$ 에 위치한 유동방향의 와류는 그 사이에 강한 가속효과(sweeping motion)을 발생시켜 유동방향 속도섭동의 최대값이 $y^+ = 12.5$ 에서 나타나는 것으로 해석할 수 있고, 따라서 본 실험의 결과와 Kravchenko 등의 결과는 잘 일치함을 알 수 있다. 결국, 벽마찰력과 유동방향 속도성분의 상관관계가 최대가 되는 위치는 유동방향 와류의 벽을 향한 유동 쪽(downwash side)에서 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8의 결과는, 벽마찰력과 큰 상관관계를 가지고 있는 응집구조가 벽 가까이 존재하고 있음을 보여준다. 여기서, 공간-시간 상관관계를 고찰함으로써, 이러한 구조의 시간에 따른 변화에 대한 정보를 알아보려 한다. Fig. 9는 마찰력과 유동방향 속도섭동간의 공간-시간 상관계수를 나타낸

다. 여기서, $\Delta t = 0$ 인 경우가 Fig. 7(b)에 나타난 공간 상관계수를 나타낸다. Fig. 9의 결과를 보면, 벽마찰력과 유동방향 속도섭동간에는 시간차가 존재함을 알 수 있다. 최대 상관계수가 나타나는 시간을 보면, $\Delta x^+ = 0$ 인 경우는 유동의 변화가 벽마찰력의 변화에 비하여 항상 앞서서 나타나고 있는 반면, 열선의 위치가 열필름의 후류로 이동할수록, 벽마찰력의 변화가 유동의 변화에 비하여 앞서 나타나는 영역이 y 방향으로 늘어나고 있음을 볼 수 있다. 벽마찰력과 유동방향 속도섭동간에 존재하는 시간차는 Eckelmann⁽⁴⁾에 의해서도 밝혀진 바 있으나, 그의 측정은 $\Delta x^+ = 0$ 에서만 수행되었다.

벽마찰력과 유동방향 속도섭동간에 존재하고 있는 시간차를 Fig. 9으로부터 구하여 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 실선으로 나타낸 위치는 벽마찰력의 섭동과 유동방향 속도섭동의 변화가 동시에 일어나는 지점들(in-phase locations)을 나타낸다. 각 Δx^+ 에서 시간차가 0인 위치(y_{ip})는 다음과 같이 정의할 수 있다:

$$\left. \frac{\partial R'}{\partial \Delta t} \right|_{\Delta t=0, y=y_{ip}} = 0 \quad (4)$$

Fig. 10에서 볼 수 있는 바와 같이, 본 실험에서 구한 등위상선(in-phase line)은 주유동방향에 대하여 7° 기울어져 있음을 볼 수 있는데, 이 각도는 Fig. 8에 나타나 있는 공간 상관계수의 최대값이 나타나는 위치들이 이루는 각도와 일치한다. 등위상선의 결과는 Brown and Thomas⁽⁶⁾에서도 찾아볼 수 있다. 하지만, 그들의 실험은 난류경계층의 외부영역 또는 로그영역에서만 이루어졌다. 그들이 동시측정을 수행한 벽에서 가장 가까운 위치는 $y/\delta=0.05$ ($y^+ \approx 170$)였으며, 벽 가까운 영역에서의 측정은 이루어지지 않았다. 그들의 결과는 등위상선의 각도가 주유동방향에 대하여 18°로 기울어져 있음을 보이고 있다.

본 실험에서 얻어진 벽 가까이에서의 7°의 각도와 Brown and Thomas에 의해 구해진 18°는 그 정량적인 값에 있어서 큰 차이를 보인다. 이러한 차이는 Fig. 9에 나타나 있는 공간-시간 상관계수의 형태로부터 설명될 수 있다. 즉, 공간-시간 상관계수의 형태는 벽근처영역($y^+ < 30$)과 로그 영역($y^+ = 100 \sim 200$)에서 다른 형태를 보이고 있는데, 이는 로그영역에서의 등위상선이 벽 가까이에서의 등위상선과는 다른 각도를 보이리란 사실을 예상할 수 있게 해준다. 이에 따라, Fig. 10에서 구한 등위상선과는 다른 방법으로 로그 영역까지의 등위상선을 구하고자 한다. 등위상선을 구하는 방법을 Fig. 11에 나타내었다. 여기서, Δt_{max} 는 각 Δx 와 y 의 위치에서 공간-시간 상관계수의 최대값이 나타나는 시간의 절대값을 의미하며, 그 값은 Fig. 9로부터 구한다. 만약, 유동이 통계적으로 정체(statistically frozen)되어 있다면, 각 y 위치에서의 등위상점(x_{ip})와 등위상선의 각도(ϕ)는 다음과 같이 구할 수 있다:

$$x_{ip} = \Delta x + u_p \Delta t_{max} \quad (5)$$

그리고

$$\phi = \tan^{-1} \frac{y}{\Delta x + u_p \Delta t_{max}} \quad (6)$$

여기서, u_p 는 대류속도이다. Kim and Hussain⁽²⁷⁾이 직접수치모사의 결과로부터 구한 대류속도(Fig. 13)를 식 (5)에 적용하면, 등위상점의 위치를 구할 수 있다. 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이, 등위상선은 벽 가까이에서는 7°를, 로그영역에서는 18°의 각도를 가지고 있음을 볼 수 있다. 따라서, Brown and Thomas의 결과

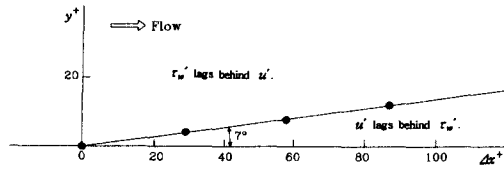


Fig. 10 Phase shift between the wall skin-friction and streamwise velocity fluctuations obtained from Fig. 9.

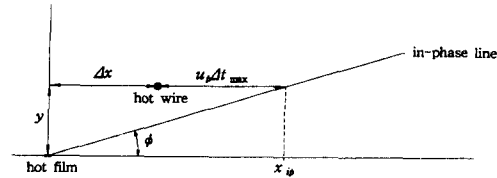


Fig. 11 Method of determining the in-phase location

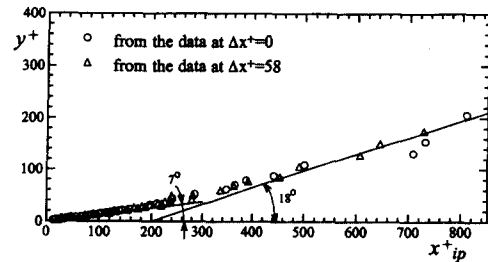


Fig. 12 In-phase curves determined from Eq. (5)

는 로그영역에서 본 실험의 결과와 잘 일치한다. 뿐만 아니라, 완충 영역(buffer region)에서 등위상선의 각도는 7°와 18° 사이에서 연속적으로 변하고 있는데, 이는 등위상선의 각도가 벽 가까이에서는 일정하지 않음을 의미하며, 이는 Rajagopalan and Antonia⁽⁹⁾의 결과로부터도 알 수 있다. 여기서, Fig. 10에 나타난 등위상선의 각도와 Fig. 12를 통하여 구한 등위상선의 각도 벽 가까이에서 모두 7°를 나타내고 있다는 사실을 통하여, 유동이 정체되어 있다는 가정이 타당했음을 알 수 있다.

3.4 벽근처 영역에서의 대류속도의 추정

대류속도는 난류제어를 위해서뿐만 아니라, 응집구조의 동적인 특성을 해석하는데 있어서 매우 중요한 물리량이다. 그러나, 대류속도를 실험적으로 구하기 위하여 두 개의 열선을 주유동방향으로 나란히 설치할 경우, 상류의 열선이 유동을 교란시켜 측정된 대류속도의 결과에 큰 오차를 유발시킬 가

능성이 높다. 반면, 본 실험에서 구한 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 시간차를 이용하면, 센서의 유동에 대한 교란 없이 대류속도를 구할 수 있게 된다.

열선이 $\Delta x=0$ 그리고 임의의 y 위치에 있는 경우에, 공간-시간 상관계수의 최대값이 나타나는 시간과 열선이 같은 y 위치에서 $\Delta x=X$ 만큼 후류로 이동한 경우 공간-시간 상관계수의 최대값이 나타나는 시간이 $\Delta \tau$ 만큼의 차이를 보인다고 하면, 대류속도(u_p)는 다음과 같이 구할 수 있다:

$$u_p^+ = \frac{u_p}{u_\tau} = \frac{X^+}{\Delta \tau^+} \quad (7)$$

여기서, $\Delta \tau$ 는 Fig. 9로부터 구한다.

이와 같은 방법으로 구한 대류속도의 결과를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13에서 실선으로 나타난 결과는 Kim and Hussain⁽²⁷⁾에 의해서 구해진 대류속도로, 그들은 난류 채널 유동에 대한 직접수치모사의 결과로부터, 유동방향 속도성분간의 상호상관함수(cross-correlation)에 의하여 대류속도를 구하였다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이, 벽 가까운 영역($y^+ < 10$)에서의 대류속도는 평균속도에 비하여 매우 크며, 본 실험의 결과는 Kim and Hussain의 결과와 잘 일치하고 있다. 반면, 벽에서 멀어질수록($y^+ > 30$) 본 실험에서 구한 대류속도의 값이 큰 오차를 포함하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 벽에서 멀어질수록 벽마찰력과 유동간의 상관관계가 적어지기 때문이다. Brown and Thomas⁽⁵⁾과 Wietrzak and Lueptow⁽⁸⁾도 본 실험에서와 비슷한 방법으로 대류속도를 추정하였는데, 그들의 결과도 Fig. 13에 표시되어 있다. 그들이 로그영역에서 구한 대류속도 역시 직접수치모사에

서 구한 결과와 잘 일치하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 열필름과 열선의 동시측정을 통하여 난류경계층에서 벽마찰력과 유동방향 속도섭동간의 상관관계를 알아보았다.

벽 가까운 영역에서의 난류량의 측정을 통하여, 주유동방향 난류강도의 측정결과가 열선의 횡방향 길이에 크게 의존하고 있음을 확인할 수 있었고, 열필름에 의한 벽마찰 섭동성분의 측정결과는 열필름으로부터 벽으로의 열전도에 의하여 영향받고 있음을 알 수 있었다.

시간 평균된 벽마찰력과 주유동방향 속도섭동의 공간-시간 상관관계 및 상관계수의 결과는, 벽마찰력과 큰 상관관계를 가지고 있는 유동구조가 주유동방향에 대하여 기울어져 있음을 보여주었다. 유동구조의 기울어져 있는 각도를, 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 변화 사이에 존재하는 시간차를 이용하여 알아낼 수 있었는데, 로그영역에서는 기존의 연구결과와 같은 18°의 각도가, 벽 가까운 영역에서는 그보다 작은 7°의 각도가 구해졌으며, 완충영역에서는 이 두 각도 사이에서 연속적으로 변하고 있음을 알아내었다. 본 실험의 결과와 Kravchenko 등⁽¹⁰⁾의 결과를 비교해 보면으로써, 벽마찰력은 벽 가까이에서 발생하는 주유동방향의 와류와 큰 상관관계를 가짐을 알 수 있었다.

공간-시간 상관계수에서 나타난 벽마찰력과 유동방향 속도섭동간의 시간차를 이용하여, 난류경계층의 벽 가까운 영역에서의 대류속도를 추정할 수 있었는데, 그 추정값들은 기존의 결과와 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 국제공동연구 지원과제(Contract No. 965-1000-005-2)로 수행된 연구결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분에게 감사드립니다. 또한, 열선센서를 제작해준 Dr. Petar Vukoslavcević에게도 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Robinson, S. K., 1991, "Coherent Motions in

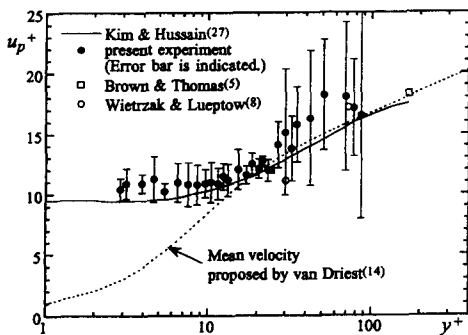


Fig. 13 The deduced convection velocities of u^+ as a function of y^+ .

- the Turbulent Boundary Layer," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 601~639.
- (2) Bushnell, D. M. and Hefner, J. N., 1990, "Viscous Drag Reduction in Boundary Layers," *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 123, AIAA, Inc.
- (3) Choi, H., Moin, P. and Kim, J., 1994, "Active Turbulence Control for Drag Reduction," *J. Fluid Mech.*, Vol. 262, pp. 75~110.
- (4) Eckelmann, H., 1974, "The Structure of the Viscous Sublayer and the Adjacent Wall Region in a Turbulent Channel Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 65, part 3, pp. 439~459.
- (5) Brown, G. L. and Thomas, A. S. W., 1977, "Large Structure in a Turbulent Boundary Layer," *Phys. Fluids*, Vol. 20, pp. 243~252.
- (6) Thomas, A. S. W. and Bull, M. K., 1983, "On the Role of Wall-Pressure Fluctuations," *J. Fluid Mech.*, Vol. 128, pp. 283~322.
- (7) 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, pp. 1026~1033.
- (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) Rajagopalan, S. and Antonia, R. A., 1979, "Some Properties of the Large Structure in a Fully Developed Turbulent Duct Flow," *Phys. Fluids*, Vol. 22, pp. 614~622.
- (10) Kravchenko, A. G., Choi, H. and Moin, P., 1993, "On the Relation of Near-Wall Streamwise Vortices to Wall Skin Friction in Turbulent Boundary Layers," *Phys. Fluids A*, Vol. 5, pp. 3307~3309.
- (11) 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.
- (12) Schlichting, H., 1979, *Boundary Layer Theory*, 7th Edn., McGraw-Hill.
- (13) Hinze, J. O., 1975, *Turbulence*, 2nd Edn., McGraw-Hill.
- (14) van Driest, E. R., 1956, "On Turbulent Flow Near a Wall," *J. Aero. Scien.*, Vol. 23, pp. 1007~1011.
- (15) Wills, J. A. B., 1962, "The Correction of Hot-Wire Readings for Proximity to a Solid Boundary," *J. Fluid Mech.*, Vol. 12, pp. 388~396.
- (16) Bhatia, J. C., Durst, F. and Jovanovic, J., 1982, "Corrections of Hot-Wire Anemometer Measurements Near Walls," *J. Fluid Mech.*, Vol. 122, pp. 411~431.
- (17) Spalart, P. R., 1988, "Direct Simulation of a Turbulent Boundary Layer up to $Re_\theta=1410$," *J. Fluid Mech.*, Vol. 187, pp. 61~98.
- (18) Johansson, A. V., Her, J. and Haritonidis, J. H., 1987, "On the Generation of High-Amplitude Wall-Pressure Peaks in Turbulent Boundary Layer and Spots," *J. Fluid Mech.*, Vol. 175, pp. 119~142.
- (19) Wei, T. and Willmarth, W. W., 1989, "Reynolds-Number Effects on the Structure of a Turbulent Channel Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 204, pp. 57~95.
- (20) Ching, C. Y., Djenidi, L. and Antonia, R. A., 1995, "Low-Reynolds-Number Effects in a Turbulent Boundary Layer," *Exps. Fluids*, Vol. 19, pp. 61~68.
- (21) Johansson, A. V. and Alfredsson, P. H., 1983, "Effects of Imperfect Spatial Resolution on Measurements of Wall-Bounded Turbulent Shear Flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 137, pp. 409~421.
- (22) Blackwelder, R. F. and Haritonidis, J. H., 1983, "Scaling of the Bursting Frequency in Turbulent Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 132, pp. 87~103.
- (23) 양준모, 1996, "난류경계층에서 벽마찰력과 유동방향 속도성분과의 상관관계," 서울대학교 공학박사 학위논문.
- (24) Cook, W. J., 1994, "Response of Hot-Element Wall Shear Stress Gages in Unsteady Turbulent Flows," *AIAA J.*, Vol. 32, pp. 1464~1471.
- (25) 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.
- (26) Sreenivasan, K. R. and Antonia, R. A., 1977, "Properties of Wall Shear Stress Fluctuations in a Turbulent Duct Flow," *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, Vol. 44, pp. 389~395.
- (27) Kim, J. and Hussain, F., 1993, "Propagation Velocity of Perturbation in Turbulent Channel Flow," *Phys. Fluids A*, Vol. 5, pp. 695~706.