

〈논 문〉

난류경계층에서 벽마찰력과 유동방향 속도성분과의 상관관계(Ⅱ) -조건부 검출에 의한 분석-

양 준 모* · 유 정 열** · 최 해 천**

(1996년 9월 3일 접수)

Correlation of the Wall Skin-friction and Streamwise Velocity Fluctuations in a Turbulent Boundary Layer (Ⅱ) -Analysis of Conditionally Averaged Results-

Joon Mo Yang, Jung Yul Yoo and Haecheon Choi

Key Words : Wall Skin-Friction Fluctuation(벽마찰섭동), Streamwise Velocity Fluctuation(유동방향 속도섭동), Conditional Sampling(조건부 검출), Peak Event Detection(피크검출방법), VITA Event Detection(VITA 검출방법), Threshold Level(하한 레벨)

Abstract

Conditional sampling techniques are utilized to investigate the relation between the wall skin-friction and streamwise velocity fluctuations in a turbulent boundary layer. Conditionally averaged results using a peak detection and the VITA (variable-interval time-averaging) technique show that a high skin friction is associated with high frequency components of the wall skin-friction fluctuations. The conditionally averaged wall skin-friction fluctuations obtained by using the VITA technique have a positively-skewed characteristics compared with the conditionally averaged streamwise velocity fluctuations. It is confirmed that there exists a phase shift between the wall skin-friction and streamwise velocity fluctuations, which was also found from the long-time averaged space-time correlations. The amount of phase shift between the wall skin-friction and streamwise velocity fluctuations is the same as that from the long-time averaged space-time correlations and does not change despite the variation of the detection threshold.

기 호 설 명

D_{peak} : 피크검출방법에서의 검출함수
 D_{VITA} : VITA 방법에서의 검출함수
 N : 조건부 검출방법에서 검출된 이벤트수
 N_{peak} : 피크검출방법에서 검출된 이벤트수
 N_{pos} : VITA 방법에서 양의 구배기준이 포함된 경우 검출된 이벤트수

N_{total} : VITA 방법에서 검출된 총 이벤트수
 k : 조건부 검출시의 하한레벨
 R' : 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 상관계수
 Q' : 임의의 섭동신호
 Q'_{rms} : Q' 의 시간 평균된 rms 값
 T : 단시간 분산에서의 평균시간
 t : 시간
 t_j : 검출시간
 u_{rms} : 유동방향 속도섭동의 rms 값

*회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

**회원, 서울대학교 기계공학과

u_r	: 전단속도
u'	: 유동방향 속도섭동
var	: 섭동신호의 단시간 분산
x	: 주유동방향
y	: 벽에서 수직방향

그리스문자

Δ	: 변위
ν	: 유체의 동점성계수
τ	: 조건부 평균에서 검출시간과의 시간차
τ^+	: $\tau u_r^2 / \nu$
τ_w'	: 벽마찰 섭동
τ_w, rms	: 벽마찰 섭동의 rms 값

상첨자

*	: 조건부 평균을 $k^{1/2}$ 와 rms 값의 곱으로 무차원화한 결과
-	: 벽단위

1. 서 론

난류경계층에서 벽마찰력과 유동간의 상관관계를 파악하는 일은 난류제어(turbulence control)에 의한 항력감소(drag reduction)를 위한 연구나 난류경계층 유동의 모델링에 기본적인 자료를 제시한다는 점에서 매우 중요한 의미를 지니고 있다. 양준모 등⁽¹⁾(본 연구의 제1부)은 시간 평균된 공간-시간 상관관계를 통하여 난류경계층에서 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 상관관계에 대한 분석을 수행하였다. 이를 통하여 벽마찰력과 큰 상관관계를 가지는 유동구조가 주유동방향에 대하여 기울어져 있음을 확인하였고, 벽근처영역과 로그영역에서 유동구조의 기울어진 각도를 각각 구하였다. 또한, 벽마찰력과 유동방향 속도섭동간의 공간-시간 상관계수(space-time correlation coefficient)로부터 벽근처 영역에서의 대류속도(convection velocity)를 추정하였다.

이렇듯 시간 평균된 상관관계의 분석을 통하여, 난류경계층에서 벽마찰력과 유동간의 상관관계에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다. 그러나, 벽마찰력과 유동간의 상관관계에 대한 좀더 자세한 분석을 위해서는 어떠한 응집구조(coherent structure)에 대한 고찰이나 벽마찰 섭동 또는 유동방향 속도섭동 신호 중 특히 관심의 대상이 되는 부분만을 검

출하여 이에 대한 분석을 수행하여야 하며, 이는 조건부 검출방법(conditional sampling technique)의 적용을 필요로 한다.⁽²⁾

난류경계층에서 조건부 검출방법을 이용하여 벽마찰 섭동에 대한 분석을 수행한 결과는 Brown and Thomas⁽³⁾에서 찾아볼 수 있다. 이들은 벽마찰 섭동신호를 고주파수 성분과 저주파수 성분으로 분리하고 분석을 수행하여, 순간적으로 발생하는 큰 벽마찰력은 벽마찰섭동의 고주파수 성분과 관련되어 있음을 밝혔으며, 벽근처 영역에서의 난류의 생성(turbulence production)이 큰 벽마찰력을 발생시킴을 보였다. Shah and Antonia⁽⁴⁾는 VITA 방법을 벽마찰섭동에 적용함으로써, 벽근처에서의 난류 거동에 대한 스케일링 법칙(scaling law)에 대하여 고찰한 바 있다.

Wietrzak and Lueptow⁽⁵⁾는 축대칭 난류경계층에서 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 거동 및 상관관계를 파악하기 위하여 각각의 섭동신호에 피크 검출방법과 VITA 방법을 적용하여 두 성분 사이에 존재하는 시간차에 대한 정보를 확인하고, 이를 통하여 벽마찰력과 상관관계를 가지고 있는 유동구조의 기울어진 각도를 추정하였다.

또한, Kravchenko 등⁽⁶⁾은 직접수치모사로부터 얻은 난류채널유동의 데이터로부터 벽마찰력과 유동방향의 와도섭동(streamwise vorticity fluctuation)간의 상관관계를 고찰하였다. 그들은 피크검출방법을 이용한 분석을 수행하여, 순간적으로 발생하는 큰 벽마찰력과 상관관계를 가지는 유동구조가 벽에 매우 근접한 영역에 국한되어 나타남을 보인 바 있다.

본 연구에서는 열선과 열필름의 동시측정을 통하여 얻은 난류경계층에서의 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 데이터에 조건부 검출방법을 적용하여, 조건부 평균(conditional average)된 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 상관관계에 대한 분석을 수행하고자 한다. 본 연구에서 사용한 조건부 검출방법은 피크검출방법과 Blackwelder and Kaplan⁽⁷⁾에 의하여 개발된 VITA(variable-interval time-averaging)방법으로, 특히 벽마찰 섭동신호에 두 가지의 검출방법을 적용하여, 검출이 일어난 순간의 벽마찰력의 변화와 벽근처 영역의 유동방향 속도섭동의 변화를 고찰하는데 중점을 두었으며, 조건부 검출에 있어서 가장 중요한 인자인 하한레벨(threshold level)의 변화에 따른 영향을 알아보았다.

본 연구에서 사용된 열선 및 열필름, 실험장치 및 방법은 양준모,⁽⁸⁾ 양준모 등⁽²⁾(본 연구의 제1부)에 자세히 나와 있다. 2절에서는 피크검출방법과 VITA 방법에 대하여 설명하며, 3절에서는 두 가지 검출방법을 이용하여 얻은 벽마찰력의 특성 및 벽마찰력과 유동방향 속도성분의 관계에 대한 결과를 제시하고, 4절에서는 결론이 주어진다.

2. 검출함수의 정의

피크검출방법은 임의의 섭동신호(Q')의 진폭이 일정한 기준을 넘게 될 경우에 검출하는 방법으로, 다음과 같이 검출함수(detection function)를 정의한다.

$$D_{peak}(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } Q'(t) > kQ_{rms} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

이 때, k 는 하한레벨(threshold level)을 의미한다. 결국, 식 (1)에서와 같이 피크검출방법을 벽마찰섭동에 적용할 경우, 이는 순간적으로 발생하는 큰 마찰력을 검출한다는 의미이다.

반면, VITA 방법에서는 검출함수를 정의하기 위하여 먼저 섭동신호의 단시간 분산(short-time variance : var)을 구한다. 난류경계층에서의 유동가시화 결과를 보면, 순간적으로 발생하는 큰 난류의 생성은 강한 유동방향 속도섭동과 함께 나타나기 때문에,⁽⁹⁾ 검출은 이러한 기준을 참고로 하여 설정한다.⁽⁷⁾ 임의의 섭동신호(Q')에 대한 단시간 분산은 다음과 같이 정의한다.

$$var(t, T) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^{t+T} Q'^2(s) ds - \left[\frac{1}{T} \int_{t-T}^{t+T} Q'(s) ds \right]^2 \quad (2)$$

여기서 T 는 평균시간을 의미하며 조건부 검출의 결과는 T 에 의해 많이 좌우된다. 그 예로, Johansson and Alfredsson⁽¹⁰⁾은 평균시간이 증가할수록 더욱 느린 변화를 가지는 섭동신호를 검출함을 보였다. 검출함수는 단시간 분산을 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$D_{VITA}(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } var > kQ_{rms} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, Q_{rms} 는 Q' 의 시간 평균된 rms 값이다. 결국, VITA 방법은 난류의 생성이 크게 일어나는

순간을 검출하는 것이 된다.

식 (1) 또는 식 (3)에 의하여 정의된 검출함수에서 그 값이 연속적으로 1이 되는 경우를 하나의 이벤트(event)로 정의한다(Fig. 1). 특히, VITA 검출방법에서는 식 (3) 이외에 일반적으로 추가의 검출기준을 사용한다. 즉, 이벤트가 발생한 때의 섭동신호의 구배를 검출의 기준으로 사용하게 되는데, 구배가 양(+)이 되는 경우를 양의 VITA 이벤트(positive VITA event), 음(-)이 되는 경우를 음의 VITA 이벤트(negative VITA event)라고 한다. 본 연구에서는 양의 VITA 이벤트만을 검출하였다.⁽¹¹⁾

각각의 검출함수를 결정한 이후에, 노이즈에 의한 효과를 제거한다. 즉, 이웃한 두 이벤트 간의 시간차가 정해진 기준(본 연구에서는 $10\nu/u_r^2$ 으로 정함)보다 작은 경우, 두 이벤트를 하나로 가정하며, 한 이벤트가 무시할 수 있을 정도의 짧은 시간(본 연구에서는 $1.1\nu/u_r^2$) 동안만 발생한 경우, 이는 외부 노이즈의 영향으로 생각하고 제거한다.⁽¹²⁾

피크검출방법과 VITA 방법에 의하여 검출되는 섭동신호의 특성을 알아보기 위하여 각각의 방법을 벽마찰 섭동신호에 적용하였다. Fig. 1은 피크검출방법과 VITA 방법에 의하여 구한, $T^+ = Tu_r^2/\nu = 15$ 인 경우의 단시간 분산과 각각의 검출함수를 나타내고 있다. 여기서, 하한레벨은 피크검출방법의 경우 2.5, VITA 방법의 경우 1.0이다. 피크검출방법은 단순히 섭동신호의 진폭을 기준으로 하여 검출함수가 결정되나, VITA 방법의 경우 섭동신호의 구배가 순간적으로 큰 경우를 검출하고 있음을

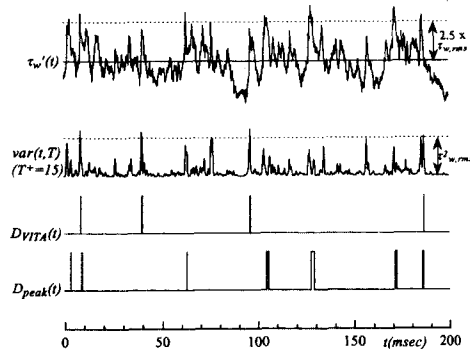


Fig. 1 Time history and short-time variance of τ_w' and the detection functions associated with VITA and peak detection techniques.

볼 수 있다.⁽¹³⁾ 따라서, 두 검출방법에 의하여 나타나는 각각의 이벤트는 동일하지 않다. 결국, VITA 방법(식 (3))에 양의 구배기준을 포함한 이후 결정된 검출함수는 순간적으로 강하게 가속되는 유동을 검출하게 됨을 알 수 있다.

검출함수를 결정한 이후, 검출시 섭동신호의 시간에 따른 변화를 고찰하기 위하여 조건부 평균을 구하게 되는데, 이는 다음과 같이 정의한다.

$$\langle Q'(\tau) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Q'(t_j + \tau) \quad (4)$$

여기서, t_j 는 검출된 시간을 의미하는데, 본 연구에서는 검출함수가 1이 되기 시작하는 시간과 다시 0이 되기 시작하는 시간의 중간시간으로 정하였다. 또한, τ 는 t_j 를 기준으로 하는 시간간격이다.

3. 결 과

3.1. 검출된 이벤트의 수

조건부 평균에 의한 분석을 수행하기 전에 조건부 검출에 포함되어 있는 각각의 인자에 따라 검출되는 이벤트수의 변화를 알아보고자 한다. 피크검출방법과 VITA 방법에서 가장 중요한 인자는 하한레벨(k)이며, VITA 방법의 경우 추가 인자인 평균시간(T)에 의한 영향을 살펴볼 필요가 있다. VITA 방법에서 하한레벨과 평균시간의 영향 및 각각의 인자에 대한 물리적 의미는 Johansson and Alfredsson⁽¹⁰⁾에 의하여 자세히 연구된 바 있다.

Fig. 2와 Fig. 3은 피크검출방법과 VITA 방법을 벽마찰 섭동신호에 적용한 경우 검출되는 이벤트수를 각 인자의 변화에 따라 나타내고 있다. 하한레벨이 증가함에 따라 검출되는 이벤트수는 두 방법

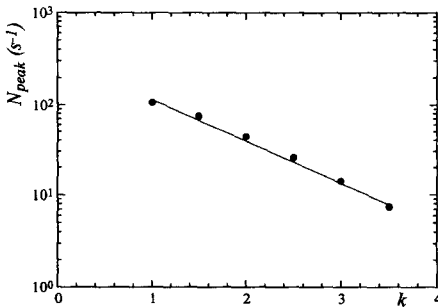


Fig. 2 Number of peak events of τ_w' per unit time as a function of threshold level, k .

에 대하여 모두 지수적으로(exponentially) 감소함을 볼 수 있다. 특히, VITA 방법의 경우 하한레벨이 증가할수록 전체의 이벤트수(N_{total})와 양의 구배기준이 포함된 경우의 이벤트수(N_{pos})가 같아지는 것으로 보아, 강한 VITA 이벤트는 유동의 강한 가속과 관련되어 있음을 예상할 수 있으며, 이는 Johansson and Alfredsson⁽¹⁰⁾의 결과와 일치한다.

VITA 방법에서 하한레벨이 1.0으로 고정되어 있는 경우, 평균시간(T)의 변화에 따라 검출되는 이벤트수의 변화를 Fig. 3(b)에 나타내었다. $T^+ > 20$ 인 경우, 검출되는 이벤트수, 특히 양의 VITA 이벤트수는 평균시간에 관계 없이 거의 일정함을 볼 수 있다.^(5,10)

3.2 조건부 평균된 벽마찰 섭동

본 절에서는, 피크검출방법, 그리고 VITA 방법과 양의 구배기준을 벽마찰 섭동에 적용한 경우 벽마찰섭동 자체의 변화를 조건부 평균을 이용하여 살펴보고자 한다.

피크검출방법(식 (1))에 있어서 하한레벨의 변화에 따른 조건부 평균(식 (4))된 벽마찰섭동의 변화

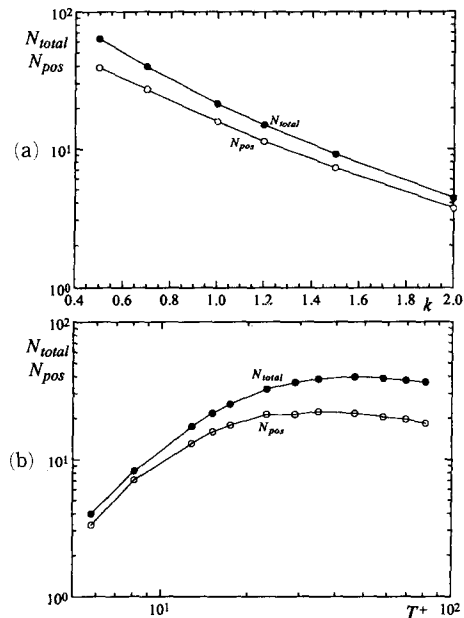


Fig. 3 The number of VITA events of τ_w' per unit time : (a) as a function of threshold level when $T^+=15$; (b) as a function of averaging time when $k=1$.

를 Fig. 4에 나타내었는데, 여기서 조건부 평균의 결과는 $\tau_{w,rms}$ 로 무차원화하였다. 하한레벨을 증가시킬수록, 조건부 평균의 최대 진폭이 커진다는 사실은 당연한 결과라고 볼 수 있으나, 여기서 주목해야 할 점은 하한레벨이 증가할수록 벽마찰 섭동의 진폭이 빠르게 변화하고 있다는 사실이다. 이는 순간적으로 발생하는 큰 벽마찰력이 벽마찰 섭동 고주파수 성분과 관련되어 있음을 밝힌 Brown and Thomas⁽³⁾ 및 Thomas and Bull⁽¹⁴⁾의 결과와 일치한다.

이러한 결과는 벽마찰 섭동에 VITA 방법을 적용한 경우에도 관찰된다. Fig. 5는 $T^+=15$ 인 경우, VITA 방법과 양의 구배기준을 이용하여 조건부 평균된 벽마찰 섭동을 하한레벨의 변화에 따라 나타내고 있다. Blackwelder and Kaplan⁽⁷⁾은 VITA 검출방법을 사용함에 있어서 하한레벨(k)이

검출된 이벤트수나 조건부 평균의 결과에 큰 영향을 미치지만, 조건부 평균을 $k^{1/2}$ 과 시간 평균된 rms 값의 곱으로 무차원화할 경우 하한레벨의 변화에 상관 없이 조건부 평균의 결과가 한 선 위에 올라감을 보인 바 있다. 이런 형태의 조건부 평균은 일반적으로 $\langle \rangle^*$ 로 표시하며, VITA 방법에 의하여 조건부 평균된 이후의 모든 결과는 $\langle \rangle^*$ 의 무차원화를 이용하여 나타내었다. Blackwelder and Kaplan이 제시한 바와 같이, 벽마찰 섭동에 대한 조건부 평균을 $k^{1/2}\tau_{w,rms}$ 로 무차원화하였을 경우, 하한레벨의 변화에 관계 없이 조건부 평균은 한 선 위에 올라감을 볼 수 있다. 각각의 무차원화에 $k^{1/2}$ 이 포함되어 있음을 감안할 때, 하한레벨의 증가에 따라 조건부 평균된 벽마찰 섭동이 점점 빠른 변화를 보이고 있음을 알 수 있다.

VITA방법에서는 하한레벨 이외에 평균시간의 영향에 대한 고찰이 필요하다. Johansson and Alfredsson⁽¹⁰⁾은 VITA 방법에서 각 인자의 영향 및 그 의미에 대하여 자세히 고찰한 후, 평균시간이 증가할수록 VITA 검출방법은 더욱 느린 변화를 가지는 섭동신호를 검출하고 있음을 알아내었다. Fig. 6은 $k=1.0$ 인 경우, 평균시간의 변화에 따른 벽마찰 섭동의 조건부 평균결과를 나타내고 있다. 평균시간이 감소할수록, 즉 좀 더 빠른 변화를 가지는 벽마찰 섭동을 검출할수록 조건부 평균의 진폭이 증가하고 있다는 사실을 볼 수 있는데, 이는 순간적으로 발생하는 큰 벽마찰력이 벽마찰 섭동신호의 고주파수 성분과 관련되어 있음을 의미하며, 이는 피크검출방법에서의 결과(Fig. 4)나 VITA 방법에서 하한레벨의 변화에 따른 결과(Fig. 5)에서 나타난 특성을 보여주고 있다.

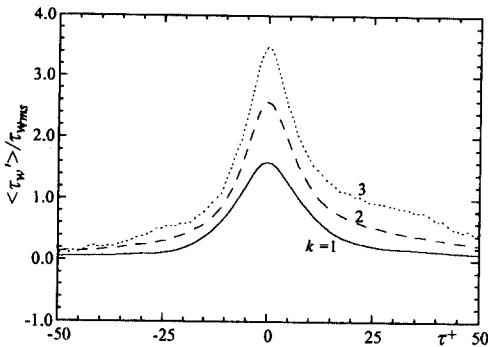


Fig. 4 Conditionally averaged peak events of the wall skin-friction fluctuations as a function of threshold level, k . $\tau^+ = \tau u \tau / \nu$

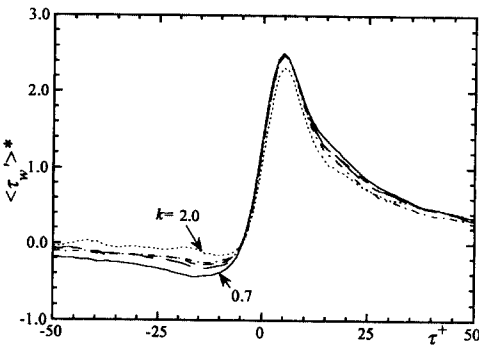


Fig. 5 Conditionally averaged positive VITA events of the wall skin-friction fluctuations as a function of threshold level, k ($k=0.7, 1.0, 1.2, 1.5$ and 2.0) for $T^+=15$.

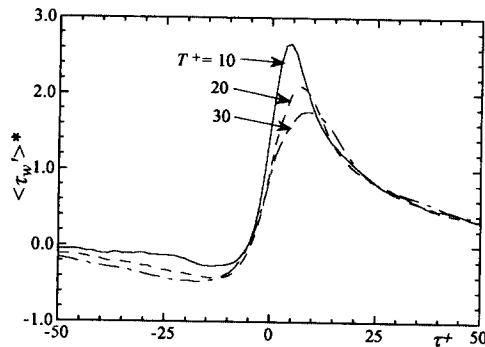


Fig. 6 Conditionally averaged positive VITA events as a function of averaging time, T for $k=1.0$.

VITA 방법과 양의 구배기준에 의하여 조건부 평균된 벽마찰 섭동의 특성을 유동방향 속도섭동의 특성과 비교하기 위하여 VITA 방법과 양의 구배 기준을 벽마찰 섭동뿐 아니라, 벽근처 영역에서의 유동방향 속도섭동에 적용하여 이의 조건부 평균을 구하였다. 그 결과를 Fig. 7에 나타내었는데, 여기서 $k=1$ 그리고 $T^+=15$ 이다. Shah and Antonia⁽⁴⁾와 Wietrzak and Lueptow⁽⁵⁾는 벽마찰 섭동에 대하여 본 연구에서와 거의 같은 인자들을 사용하여 조건부 평균을 구하였는데, 그들의 결과를 Fig. 7(a)에 함께 나타내었다. 본 실험의 결과는 이들의 결과와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

유동방향 속도섭동의 조건부 평균결과가 유동의 감속에 이은 강한 가속으로 나타나면서, 벽에 가까와질수록 감속이 줄어드는 것을 볼 수 있는 반면, 벽마찰 섭동의 조건부 평균의 결과의 경우, 감속을 거의 볼 수 없다. 이는 벽근처 영역에서 유동방향 속도섭동의 비대칭도(skewness factor)가 큰 양의 값을 가지고 있다는 지금까지의 여러 실험들과 잘 일치하며,⁽⁶⁾ 이러한 조건부 평균의 결과는 Wietrzak and Lueptow⁽⁵⁾가 축대칭 난류경계층에서 수행한 실험에서도 볼 수 있다.

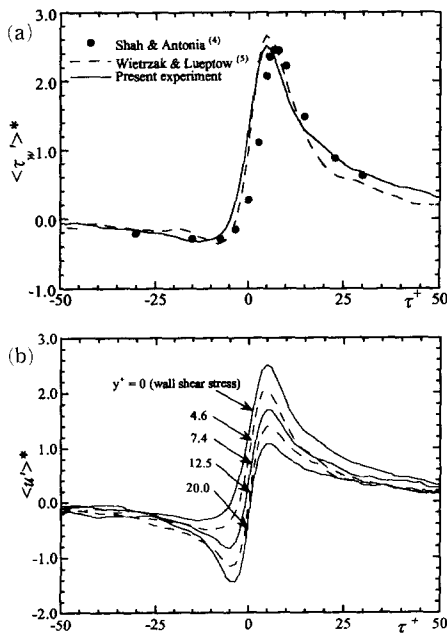


Fig. 7 Conditionally averaged positive VITA events: (a) wall skin-friction fluctuations; (b) streamwise velocity fluctuations.

3.3 피크검출방법을 이용하여 조건부 평균된 벽마찰력과 유동방향 속도섭동

순간적으로 큰 벽마찰력이 발생하는 경우, 벽 가까운 영역에서 유동방향 속도섭동의 변화를 살펴보기 위하여, 동시측정된 벽마찰력 $\tau_w(x_0, y=0, z_0, t)$ 과 유동방향 속도섭동 $u(x_0+\Delta x, y, z_0, t)$ 신호에서 벽마찰력에 피크검출방법을 적용하고, 그 순간 유동방향 속도섭동의 조건부 평균을 구하였다. 이때 (x_0, z_0) 는 벽마찰력 측정위치이다. Fig. 8은 $\Delta x^+ = \Delta x u_{\tau}^+ / \nu = 0, 29, 58$ 그리고 87인 경우, 조건부 평균된 유동방향 속도섭동을 y^+ 에 따라 나타내고 있다. 이때, 검출의 기준은 $\tau_w' \geq \tau_{w, rms}$ (식 (1)에서 $k=1$ 인 경우)이다.

Fig. 8의 결과는, 벽마찰력과 유동방향 속도섭동 간에 시간차(phase shift)가 존재함을 보여준다. 조건부 평균의 최대 진폭이 나타나는 시간을 보면, $\Delta x^+=0$ 인 경우는 유동방향 속도섭동의 변화가 벽마찰력의 변화에 비하여 항상 앞서서 나타나고 있는 반면, Δx^+ 가 증가할수록 유동방향 속도섭동의 변화가 벽마찰력의 변화에 비하여 앞서 나타나고 있는 영역이 벽에서 멀어지고 있음을 볼 수 있다. 벽마찰력과 유동방향 속도섭동간에 존재하는 이러한 시간차는 순간적으로 발생하는 큰 벽마찰력과 상관관계를 가지고 있는 유선방향의 보텍스가 주유동방향에 대하여 기울어져 있음을 의미하며, 이러한 결과는, 양준모 등⁽¹⁾이 시간 평균된 공간-시간 상관계수로부터 얻은 결과를 뒷받침해 주고 있다.

양준모 등⁽¹⁾은 시간 평균된 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 공간-시간 상관계수에서 나타난 시간차를 이용하여, 벽근처 영역과 로그영역에서의 등위상선(유동구조의 기울어진 각도: in-phase line)을 예측하였으며, 벽근처 영역에서의 대류속도를 추정하였는데, 벽마찰력과 유동방향 속도섭동간의 시간차는 공간-시간 상관계수가 최대값을 보이는 위치로부터 판단하였다. 같은 방법으로, 피크검출방법에 의한 조건부 평균의 진폭이 양의 최대값을 나타내는 시간으로부터 등위상선을 판단할 수 있다. 시간 평균된 공간-시간 상관계수로부터 얻은 시간차와 피크검출방법에 의하여 나타나는 시간차의 비교가 Fig. 9에 나타나 있다. Fig. 9에서 열선의 위치는 $\Delta x^+=0$ (Fig. 9(a)), $\Delta x^+=58$ (Fig. 9(b)) 그리고 $y^+=12.5$ 이다. 또한, 각 그림에서의 파선은 시간 평균된 공간-시간 상관계수로부터 얻은 시간차를 나타내며, 피크검출방법은 $k=1, 2$ 및 3의 세

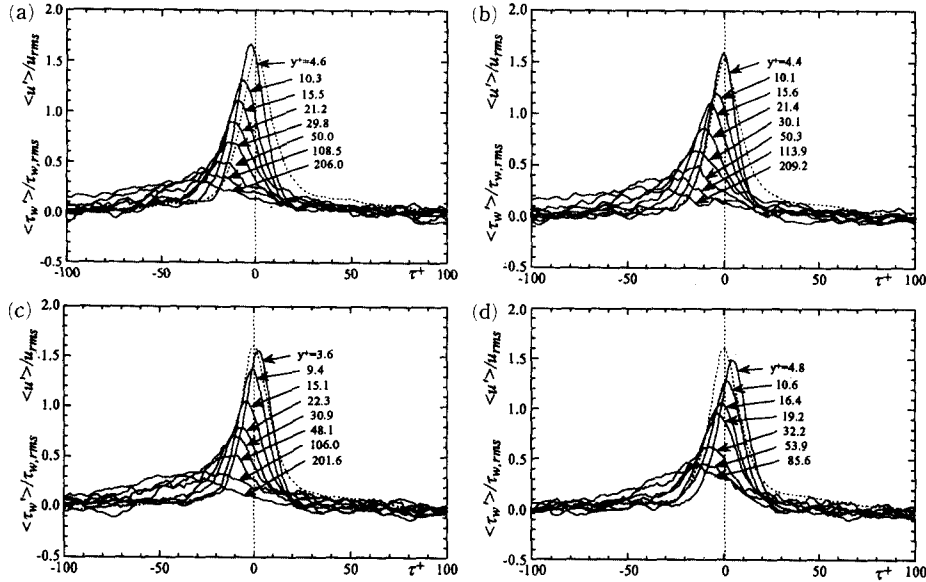


Fig. 8 Conditionally averaged streamwise velocity fluctuations with the peak detection of the wall skin-friction satisfying $\tau_w' \geq \tau_{w,rms}$ at four streamwise separation distances : (a) $\Delta x^+ = 0$; (b) $\Delta x^+ = 29$; (c) $\Delta x^+ = 58$; (d) $\Delta x^+ = 87$. Dashed lines denote the conditionally averaged wall skin-friction fluctuations.

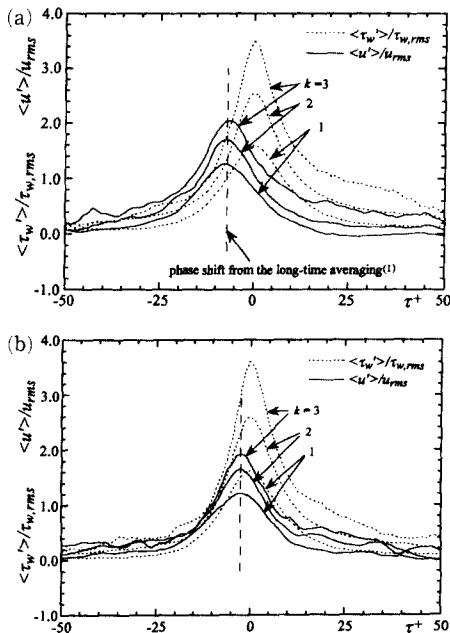


Fig. 9 Conditionally averaged streamwise velocity fluctuations with the peak detection of the wall skin friction as a function of threshold level, k : (a) $\Delta x^+ = 0$, $y^+ = 12.5$; (b) $\Delta x^+ = 58$, $y^+ = 12.5$.

가지 경우에 대하여 나타내었다.

양준모 등⁽¹⁾에 제시된 벽마찰력과 유동방향 속도 섭동 사이에 존재하는 시간차에 대한 결과는 조건부 평균에서도 정성적으로, 그리고 정량적으로도 일치되게 나타남을 볼 수 있다. 즉, 피크검출방법에 의하여 구하여진 벽마찰력과 유동방향 속도섭동 사이의 시간차와 시간 평균된 공간-시간 상관계수⁽¹⁾에 의하여 구한 시간차가 서로 같다. 이는 조건부 평균으로부터의 시간차를 이용하여 등위상선이나 대류속도를 구하더라도 양준모 등⁽¹⁾이 시간 평균된 공간-시간 상관계수로부터 얻은 결과와 같을 것이라는 사실을 예상할 수 있게 해 준다. 특히 주목해야 할 점은, 하한레벨의 증가에도 불구하고 벽마찰력과 유동방향 속도섭동 사이에 존재하는 시간차가 일정하다는 사실이다. 위의 결과는 열선이 다른 위치에 있는 경우의 시간차를 고찰하여도 같았다.

Johansson 등⁽¹⁵⁾은 순간적으로 큰 벽압력 섭동 (wall-pressure fluctuation)이 발생하는 경우의 유동의 변화를 피크검출방법을 이용하여 고찰한 바 있다. 그들의 결과를 보면, 순간적으로 큰 벽압력 섭동이 발생하는 경우, 벽근처 영역에서의 유동방향 속도섭동은 감속에 이은 강한 가속(ejection-

sweep)의 형태를 보이며, 이는 Fig. 7(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 VITA 방법에 의하여 조건부 평균된 유동방향 속도섭동의 형태이다. 그러나, Fig. 8이나 Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이 순간적으로 큰 벽마찰력이 발생하는 경우, 유동방향 속도섭동은 단순히 강한 가속의 형태만을 보일뿐 감속에 이은 가속의 거동은 보이지 않고 있다. 이러한 유동방향 속도섭동의 거동은 축대칭 난류경계층에서 수행한 Wietrzak and Lueptow⁽⁵⁾의 결과에서도 볼 수 있다.

조건부 평균된 유동방향 속도섭동(Fig. 8)은 Fig. 10에 제시된 시간 평균된 공간-시간 상관계수와 비교해 볼 때, 매우 유사한 형태의 결과를 보여주고 있으나, 조건부 평균된 유동방향 속도섭동이 더 빠르게 변화하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 순간적으로 발생하는 큰 벽마찰력이 유동방향 속도섭동의

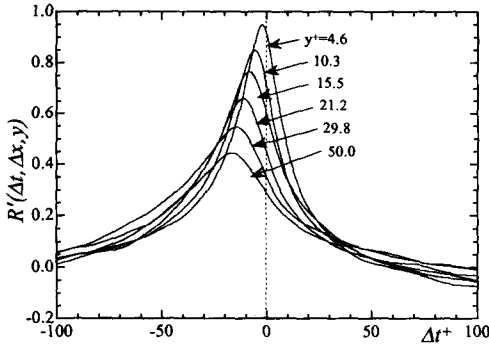


Fig. 10 Long-time averaged space-time correlation of the wall skin-friction and streamwise velocity fluctuations when $\Delta x^+ = 0$ (from Yang et al.⁽¹¹⁾).

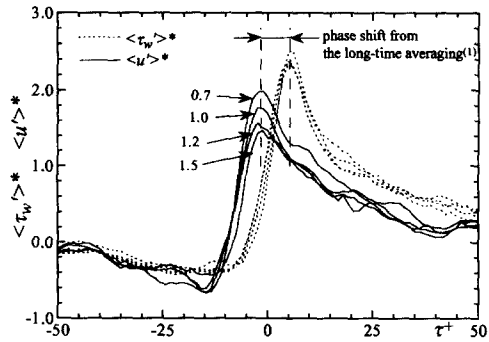


Fig. 11 Conditional averages of the streamwise velocity fluctuations at $y^+ = 12.5$ and $\Delta x^+ = 0$ and the positive VITA detection of the wall skin-friction fluctuations as a function of the threshold level, k for $T^+ = 15$.

고주파수 성분과 관련되어 있음을 의미한다. 하한 레벨을 증가시킬수록 유동방향 속도섭동의 조건부 평균은 더욱 빠른 변화를 나타낸다.⁽⁸⁾

3.4 VITA 방법을 이용하여 조건부 평균된 벽마찰력과 유동방향 속도섭동

VITA 방법과 양의 구배기준을 벽마찰 섭동에 적용하게 되면 조건부 평균된 유동방향 속도섭동에서는 감속에 이은 강한 가속의 변화가 나타나게 되는데, 이는 Fig. 11에 제시되었다. Fig. 11은 벽마찰 섭동에 VITA 검출방법과 양의 구배기준을 적용하여, $\Delta x^+ = 0$, $y^+ = 12.5$ 에서의 유동방향 속도섭동의 변화를 조건부 평균을 통하여 고찰한 결과를 제시하고 있다. 여기서, $T^+ = 15$ 이다. 이미 Fig. 9에서 보인 바와 같이, 벽마찰력과 유동방향 속도섭동 사이에 존재하는 시간차는 시간 평균된 공간-시간 상관계수와 피크검출방법에서 같은 결과를 보여주었으며, 시간차가 하한레벨의 변화에 관계 없이 일정하였는데, 이러한 특성은 VITA 검출방법에서도 찾아볼 수 있다. 벽마찰력과 유동방향 속도섭동간의 무차원화된 시간차($\Delta \tau^+$)는 약 7로 이는 피크 검출방법이나 공간-시간 상관계수로부터 구한 시간차와 같다(Fig. 9(a)). 다만, 여기서 주의해야 할 점은, 벽마찰력에 VITA 방법을 적용하고 각각의 검출된 시간에서 유동방향 속도섭동을 조건부 평균하였을 때, $k^{1/2} u_{rms}$ 에 의한 무차원화에도 불구하고 모든 조건부 평균의 결과가 한 선 위에 올라가지 않는다는 사실이다.

4. 결론

벽마찰 섭동에 피크검출방법과 VITA 검출방법을 적용하여 벽마찰 섭동과 유동방향 속도섭동 변화의 특성을 살펴보았다.

순간적으로 발생하는 큰 벽마찰력은 벽마찰섭동의 고주파수 성분과 함께 발생한다는 사실을 알 수 있었고, 조건부 평균된 벽마찰 섭동은 양의 비대칭도를 보였다. 특히, 벽마찰력과 유동방향 속도섭동 사이에 존재하는 시간차는 시간 평균된 공간-시간 상관계수로부터 얻은 시간차와 같았으며 하한레벨의 변화에 관계 없이 일정하였다.

따라서, 벽마찰력과 큰 상관관계를 가지고 있는 벽근처 영역에서의 유동방향의 보텍스를 조건부 검출방법을 이용하여 알아낼 경우, 시간 평균된 공간-

시간 상관관계로부터 파악될 수 있는 난류구조의 특징, 즉 보텍스의 기울기, 유동방향속도의 대류속도, 벽마찰력과 유동방향속도 간의 최대 상관관계를 가지는 위치 등이 유사하게 예측될 것이다.

참고문헌

- (1) 양준모, 유정열, 최해천, 1997, "난류경계층에서 벽마찰력과 유동방향 속도섭동간의 상관관계 (1) 시간 평균된 공간-시간 상관관계의 분석," 대한기계학회논문집, 제21권, 제1호, pp. 140~152.
- (2) Antonia, R. A., 1981, "Conditional sampling in turbulence measurement," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 31, pp. 131~156.
- (3) Brown, G. L. and Thomas, A. S. W., 1977, "Large structure in a turbulent boundary layer," *Phys. Fluids*, Vol. 20, pp. 243~252.
- (4) Shah, D. A. and Antonia, R. A., 1987, "Scaling of wall shear stress fluctuations in a turbulent duct flow," *AIAA J.*, Vol. 25, pp. 22~29.
- (5) 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.
- (6) Kravchenko, A. G., Choi, H. and Moin, P., 1993, "On the relation of near-wall streamwise vortices to wall skin friction in turbulent boundary layer," *Phys. Fluids A*, Vol. 5, pp. 3307~3309.
- (7) Blackwelder, R. F. and Kaplan, R. E., 1976, "On the wall structure of the turbulent boundary layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 76, part 1, pp. 89~112.
- (8) 양준모, 1996, "난류경계층에서 벽마찰력과 유동방향 속도섭동과의 상관관계," 서울대학교 공학박사학위 논문.
- (9) Kim, H. T., Kline, S. J. and Reynolds, W. C., 1971, "The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 50, part 1, pp. 133~160.
- (10) Johansson, A. V. and Alfredsson, P. H., 1982, "On the structure of turbulent channel flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 122, pp. 295~314.
- (11) Chen, C. P. and Blackwelder, R. F., 1978, "Large-scale motion in a turbulent boundary layer : a study using a temperature contamination," *J. Fluid Mech.*, Vol. 89, part 1, pp. 1~31.
- (12) Murlis, J., Tsai, H. M. and Bradshaw, P., 1982, "The structure of turbulent boundary layer at low Reynolds numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 122, pp. 13~56.
- (13) Morrison, J. F., Tsai, H. M. and Bradshaw, P., 1989, "Conditional sampling scheme for turbulent flow, based on the variable-interval time averaging (VITA) algorithm," *Exps. Fluids*, Vol. 7, pp. 173~186.
- (14) Thomas, A. S. W. and Bull, M. K., 1983, "On the role of wall-pressure fluctuations," *J. Fluid Mech.*, Vol. 128, pp. 283~322.
- (15) 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.