난류경계층에서 벽와도와 유동방향 속도섭동과의 상관관계

류상진* • 김성욱* • 유정열†

(2000년 7월 26일 접수, 2001년 1월 5일 심사완료)

Correlation of Wall Vorticity and Streamwise Velocity Fluctuations in a Turbulent Boundary Layer

]Sangjin Ryu, Sungwook Kim and Jung Yul Yoo

Key Words : Near-Wall Turbulence (벽 근처 난류), Wall Vorticity Fluctuation (벽와도 섭동), Streamwise Velocity Fluctuation (주유동방향 속도섭동), Space-Time Correlation (공간-시간 상관관계), Tilting Angle (기울어진 각도), Convection Velocity (대류속도)

Abstract

A simultaneous measurement of wall vorticity and near-wall streamwise velocity fluctuations has been performed using a V-type wall vorticity probe and an I-type velocity probe to investigate the relation between them. Long-time averaged space-time correlations show that the wall vorticity is highly correlated with a turbulence structure which is tilted from the wall in the streamwise direction and that there is a streamwise vortex pair near the wall. It is shown that a structure correlated with the streamwise wall vorticity is smaller than and prior to a structure correlated with the spanwise wall vorticity. Tilting angles are obtained from the phase shift between the wall vorticity and streamwise velocity fluctuations. The tilting angle of the structure correlated with the streamwise wall vorticity is larger than that of the structure correlated with the spanwise wall vorticity. The convection velocity of the near-wall streamwise velocity fluctuations obtained from the space-time correlation is in good agreement with previous results.

기호설명

C_f : 마찰계수
C_p : 압력계수
d : 열선의 직경
F : 섭동신호의 편평도 (flatness factor)
H : 형상계수
l : 열선의 길이
R : 벽와도와 유동방향 속도섭동의 상관관계
R' : 벽와도와 유동방향 속도섭동의 상관계수
R_o : 열선의 냉저항
R_w : 열선의 작동저항
S : 섭동신호의 비대칭도 (skewness factor)
t : 시간
U : 주유동방향 평균속도
U_∞ : 자유유동속도
u' : 주유동방향 속도섭동
u_p : 대류속도
u_{rms} : 주유동방향 속도섭동의 rms 값
u_τ : 전단속도
x : 주유동방향
y : 벽에 수직한 방향
z : 횡방향

그리스문자

Δ : 변위
δ : 경계층 두께
δ^* : 배제 두께
θ : 운동량 두께
ν : 유체의 동점성 계수

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

ρ : 유체의 밀도
ω_w' : 벽와도섭동
ω_{wx} : 주유동방향 벽와도
ω_{wz} : 횡방향 벽와도
ω_{Wrms} : 벽와도섭동의 rms 값

상첨자
+ : 벽단위
' : 섭동량
— : 평균값

하첨자
1 : 벽와도 프로브 1
2 : 벽와도 프로브 2
ip : 등위상
rms : rms 값

1. 서 론

지난 수십 년간 난류경계층의 구조를 밝히기 위한 많은 실험적 및 수치해석적 연구가 수행되어 왔으며, 그 결과 난류경계층 내에 존재하는 응집구조(coherent structure)에 대한 많은 부분을 파악할 수 있게 되었다.[1] 특히 벽 근처의 난류구조(near-wall turbulence structure)에 대한 관심이 크게 고조되었는데, 이는 벽 근처의 난류구조가 경계층에 의하여 발생하는 항력의 감소에 직접적인 관계를 가지고 있기 때문이다. 또한 벽마찰력 섭동이나 벽에 수직한 방향으로의 속도구배에 대한 연구도 활발히 수행되었는데, 이를 통하여 벽 바로 위의 난류거동에 대한 많은 부분이 밝혀졌다. 이러한 벽마찰력이나 벽에 수직한 방향으로의 속도구배는 벽와도로 고찰될 수 있다.

최근 난류경계층에 있어서 난류제어에 의한 항력의 감소, 또는 열전달 촉진은 중요한 연구의 대상이 되고 있다.[2-4] 이는 벽와도와 유동 간의 상관관계를 통하여 벽 근처의 난류구조를 연구하는 것이 매우 중요한 의미를 지니고 있음을 뜻한다.

벽마찰력과 유동방향 속도섭동과의 상관관계를 구하고자 하는 노력은 Eckelmann[5]의 연구에서 찾아 볼 수 있다. 그는 비교적 낮은 레이놀즈수의 채널유동에서 실험을 수행하여, 벽마찰력과 유동방향 속도섭동의 변화 사이에 시간차가 존재함을 발견하였다.

Blackwelder and Eckelmann[6]은 열필름을 이용하여 주유동방향 속도성분 u 와 횡방향 속도성분 w, 그리고 이들의 벽에 수직한 방향으로의 구배를 측정하였고, 측정결과에 조건부 검출법(conditional sampling technique)을 적용하여 난류경계층의 벽 근처에서 회전방향이 반대인 주유동방향 와류쌍이 빈번하게 발생함을 확인하였다.

또한 Kreplin and Eckelmann[7]은 열필름을 이용하여 속도섭동성분 u 와 w 그리고 각 성분의 벽에 수직한 방향으로의 구배를 동시측정하였다. 이로부터 그들은 응집구조가 벽에 대하여 기울어져 있는 상태로 하류로 흘러감을 발견하였다.

Alfredsson *et al.*[8]은 여러 가지 작동유체에서 여러 가지 측정방법을 이용하여 벽마찰력의 섭동을 측정하였다. 또한 그들은 벽마찰력과 주유동방향 속도성분과의 상관계수를 측정하였다.

벽마찰력과 유동 간의 상관관계에 대한 비교적 자세한 분석은 축대칭 난류경계층(turbulent axisymmetric boundary layer)에서 Wietrzak and Lueptow[9]에 의하여 수행되었다. 그들은 시간 평균된 공간-시간 상관계수(space-time correlation coefficient)뿐 아니라 VITA 방법과 피크추출방법 등의 조건부 추출법을 이용하여 벽마찰력과 유동 간의 상관관계에 대한 자세한 분석을 수행하고, 유동에 수직한 방향의 곡면효과가 벽 근처 유동의 구조에 크게 영향을 미치지 않음을 알아내었으며, 또한 벽 근처 유동구조가 주유동방향에 대하여 188 기울어져 있음을 제시하였다.

Kravchenko *et al.*[10]은 직접수치모사를 통해 벽 근처 영역에 존재하는 주유동방향의 와류(streamwise vortex)가 벽마찰력과 직접적인 관계를 가지고 있음과 벽 근처에서 주유동방향에 대하여 68 기울어져 있음을 제시하였다.

양준모 등[11]은 평판경계층에서 벽마찰력과 유동방향 속도섭동을 동시측정하고, 시간 평균된 공간-시간 상관계수를 이용하여 벽마찰력이 벽에 대해 기울어져 있는 난류구조와 연관이 있음을 확인하였다. 또한 피크검출방법과 VITA 방법을 이용하여 높은 전단응력이 벽마찰력 섭동의 고주파수 성분과 연관되어있음을 밝혔다.

최근에 Lee *et al.*[4]은 경계층 제어입력으로서 횡방향 벽전단응력을 제안하였고, 벽 근처의 주유동방향 와류의 제어가 항력감소를 위한 경계층 제어의 핵심임을 밝혔다.

본 연구의 목적은 벽와도와 벽 근처 영역에서의 주유동방향 속도성분의 상관관계를 I 형 열선 프로브와 자체 제작한 V 형 벽와도 프로브의 동시측정을 통하여 알아보고, 벽와도와 직접적인 관계를 가지고 있는 벽 근처 유동구조에 대한 해석을 수행하는데 있다. 특히 본 연구에서는 시간 평균된 공간-시간 상관관계 및 상관계수를 통하여 난류경

계층에서의 벽와도와 주유동방향 속도섭동 간의 상관관계를 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 사용된 센서 및 측정방법

본 실험에 사용된 풍동 및 평판의 형상과 측정조건은 본 연구의 선행연구[12]에 자세히 제시하였다.

주유동방향의 평균속도와 속도섭동의 측정에는 두 가지의 I 형 열선 프로브를 사용하였다. 그 중 하나는 상용의 DANTEC 55P11 의 I 형 열선 프로브(HW1)이며, 다른 하나는 자체 제작한, 미니어처 I 형 열선 프로브(HW2)이다. HW1 의 열선은 d = 5 μm, 그리고 l = 1.25 mm 로 횡방향 길이(spanwise length)를 벽단위(wall unit)로 환산하면 $l^+ = lu_\tau/\nu = 26$ 이다. 반면 HW2 는 d = 2.5 μm, l = 0.7 mm 로 길이는 벽단위로 l^+ = 14 이다. HW1의 형상비 (aspect ratio : l/d) 는 250, HW2 의 형상비는 280으로 일반적으로 알려져 있는 기준인 $l/d \geq 200$ 을 충분히 만족한다.[13]

벽와도 섭동의 측정에는 참고문헌 (12)에서 설명된 V형 벽와도 프로브를 사용하였다. 이 프로브에 사용된 열선의 직경은 2.5 μm, 길이는 벽단위로 12 이고, 형상비는 226 이다. 동시측정에는 Fig. 1 과 같이 횡방향으로 정렬된 두 개의 V 형 벽와도 프로브가 사용되었다. 주유동방향에서 보았을 때 왼쪽의 프로브는 Probe 1 이고 오른쪽의 프로브는 Probe 2 이다.

모든 열선 프로브들과 V 형 벽와도 프로브는 DANTEC STREAMLINE 정온도형 열선유속계에 연결시켰다. 각 센서에 사용된 과열비, $(R_w - R_0)/R_0$ 는 HW1, HW2, 그리고 V형 벽와도 프로브에 대하여 각각 0.7, 0.5, 0.3 이다. 사각파에 의한 주파수응답특성은 각각의 프로브에 대하여 28 kHz, 37 kHz, 그리고 26~30 kHz 이다.

모든 측정 이전과 이후에는 열선 프로브와 V 형 벽와도 프로브의 검정을 수행하였다. 열선 프로브의 검정은 풍동의 자유유동 영역에서 자유유동 속도를 변화시켜 수행하였고, 자유유동 속도는 피토관과 MKS 120AD 압력계를 이용하여 측정하였다.

열선의 검정식은 4 차의 다항식을 이용하였다. V 형 벽와도 프로브에 대한 검정과정은 참고문헌 (12)에 제시하였다.

또한 열선의 벽으로부터 떨어진 거리는 측정한 평균속도를 벽법칙에 맞추어 알아내었다. 모든 경우에 열선유속계의 출력전압을 16 bit A/D 변환기

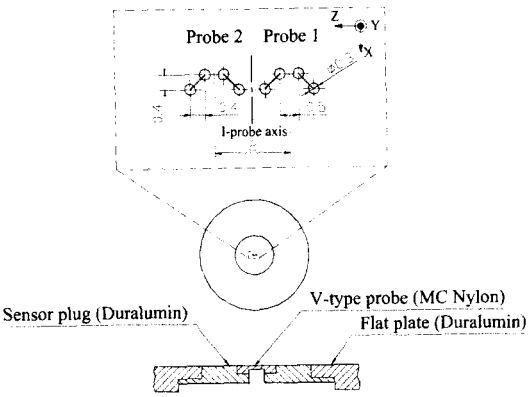


Fig. 1 Schematic of the V-type wall vorticity probe array

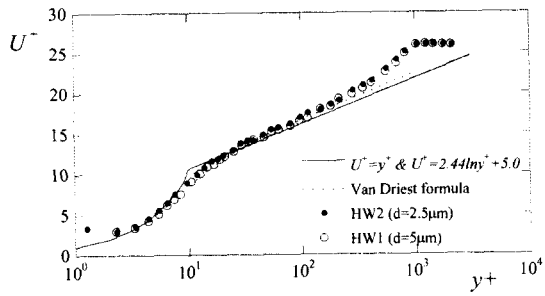


Fig. 2 Mean velocity profile in wall units

(DT2838)을 이용하여 5 kHz 의 속도로 30 s 동안 받아들였다. 각각의 전압데이터 간의 간격은 Δt = 0.2 ms 이며, 이는 벽단위로 $\Delta t^+ = \Delta t u_\tau^2/\nu = 1.22$ 이다. 모든 전압신호는 586PC 를 이용하여 하드디스크에 저장하고 후처리를 수행하였다.

3. 실험결과

3.1 주유동방향 속도섭동 측정

벽와도와 주유동방향 속도섭동과의 상관관계를 동시측정을 통하여 고찰하기 이전에 두 가지의 열선(HW1 과 HW2)를 이용하여 벽 근처 영역에서의 일반적인 난류량을 측정하였다.

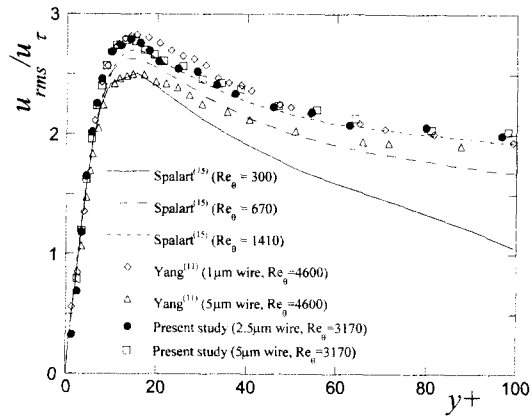
열선을 이용하여 측정한 평균 속도분포를 일반적인 벽법칙 ($U^+ = y^+$, $U^+ = (1/0.41)\ln y^+ + 5.0$)과 함께 Fig. 2 에 나타내었으며, 비교를 위하여 van Driest[14]가 제안한 식에 의한 평균 속도분포도 함께 나타내었다.

여기에서 볼 수 있듯이 HW1 과 HW2 의 측정결과는 잘 일치하며, 측정한 평균 속도분포는 일반

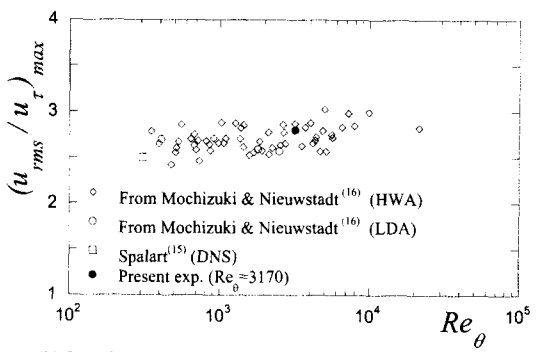
적인 벽법칙과 잘 일치한다. 그러나 벽 아주 가까운 영역인 $y^+ \approx 1$ 에서는 열선으로부터 벽으로의 과도한 열전달로 인하여 실제보다 큰 평균속도를 예측함을 볼 수 있다. 측정한 평균속도가 일반적인 벽법칙과 잘 일치함을 확인함으로써 측정위치에서 난류경계층이 완전 발달된 상태임을 알 수 있었다.

두 열선 프로브를 이용하여 측정한 벽 근처 영역에서의 주유동방향 속도섭동의 측정결과를 Fig. 3(a)에 나타내었으며, 비교를 위하여 Spalart[15]의 직접수치모사의 결과 및 양준모 등[11]의 열선을 이용한 측정결과를 함께 제시하였다. HW1 과 HW2 를 이용한 측정결과가 서로 잘 일치하고 있으며, 이전의 결과들과도 잘 일치한다.

Mochizuki and Nieuwstadt[16]은 기존의 비압축성 난류경계층과 채널 및 원관 내부유동에 대한 실험적, 수치해석적 연구결과들을 고찰하여, 전단속도로 무차원화된 최대 주유동방향 난류강도가 통계적인 오차 범위 내에서 레이놀즈수에 독립적임을 주장하였다. 그들은 경계층유동과 내부유동의 경우, 무차원화된 최대 주유동방향 난류강도가 각각 2.7160.14 와 2.7060.09 의 값을 가진다고 하였다. 본 연구의 결과, 최대 주유동방향 난류강도는 2.80 으로 그들이 제시한 범위에 포함된다. 여러 실험에서 측정된 최대 주유동방향 난류강도의 레이놀즈수에 따른 변화를 Fig. 3(b)에 나타내었다.



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



(b) Maximum turbulence intensity as a function of Re_θ

Fig. 3 Measured turbulence intensities

3.2 벽와도와 주유동방향 속도섭동의 공간-시간 상관관계

벽와도와 주유동방향 속도섭동을 동시에 측정하였다. 벽와도섭동을 측정하기 위한 V형 벽와도 프로브는 횡방향으로 정렬된 일정한 위치에 있으므로 이 두 개의 V 형 벽와도 프로브의 중간 위치에서 I 형 열선 프로브를 벽와도 프로브의 하류인 $\Delta x^+ = 0, 32, 64, 96$ 인 위치로 이동시키면서 동시측정을 수행하였다. 벽 근처에서의 정밀한 측정을 위하여 주유동방향 속도섭동의 측정에는 미니어처 I형 열선 프로브인 HW2 를 이용하였다.

Fig. 4 는 $\Delta x^+ = 0$ 인 경우 동시측정한 벽와도 섭동과 주유동방향 속도섭동의 시간에 따른 신호를 y 에 따라 나타내고 있다. 벽에 아주 가까운 영역에서는 주유동방향 속도섭동이 벽와도섭동과 매우 유사함을 알 수 있다.

특히 Probe 1 에서 측정된 주유동방향 벽와도의 경우, 주유동방향 속도섭동과 반대의 경향을 보이고 있으며, 이는 이들 사이에 음의 상관관계가 존재함을 의미한다. 횡방향 벽와도의 경우에도 주유동방향 속도섭동과 반대의 경향을 보이고 있다. 이는 참고문헌 (12)에서 정의된 바와 같이 횡방향 벽와도는 $-\partial u/\partial y|_{y=0}$ 이기 때문이다. 주유동방향 속도섭동과 벽와도 사이의 유사성은 벽으로부터 거리가 멀어짐에 따라 감소하는데, 이는 주유동방향 속도섭동의 고주파수 성분이 증가하여 상관관계가 감소하기 때문이다.[5, 11] 또한 벽으로부터 멀어짐에 따라 열선이 주유동방향 와류(streamwise vortex)의 머리부분을 지나므로 주유동방향 와도성분과 다른 형태의 신호가 검출된다.

벽와도섭동과 주유동방향 속도섭동 간의 상관관계, $R(\Delta t, \Delta x, y)$ 와 상관계수, $R'(\Delta t, \Delta x, y)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$R_x(\Delta t, \Delta x, y) = \overline{\omega_{tx}'(t, x)u'(t + \Delta t, x + \Delta x, y)} \quad (1)$$
$$R_z(\Delta t, \Delta x, y) = \overline{\omega_{tz}'(t, x)u'(t + \Delta t, x + \Delta x, y)}$$

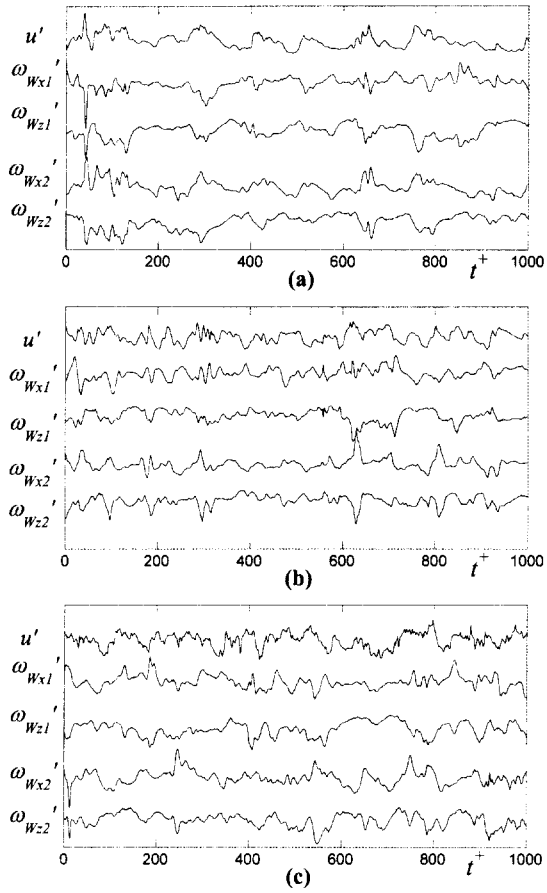


Fig. 4 Simultaneous time records of the wall vorticity fluctuations and the streamwise velocity fluctuations at various y+ positions of miniature I-type probe : (a) y^+=6.1, (b) y^+=10.4, (c) y^+=51.7

그리고

$$R_x'(\Delta t,\Delta x,y)=\frac{R_x(\Delta t,\Delta x,y)}{\omega_{Wx,rms}u_{rms}}$$
$$R_z'(\Delta t,\Delta x,y)=\frac{R_z(\Delta t,\Delta x,y)}{\omega_{Wz,rms}u_{rms}} \quad (2)$$

여기서 "——"은 시간에 대한 평균을 의미하며, x는 벽와도의 측정위치이다.

Fig. 5는 벽와도와 주유동방향 속도섭동 간의 공간 상관관계($\Delta t=0$ 인 경우)를 $\omega_{W,rms}\,u_{\tau}$로 무차원화한 결과를 나타내고 있다. Probe 1 로부터 구한 상관관계가 Probe 2 로부터 구한 상관관계와 비슷한 크기를 가지고 있다. 이는 횡방향으로 정렬된 두 개의 벽와도 프로브들의 중앙선과 HW2 의 축이 일치하고 있음을 의미한다. Fig. 5(b)와 5(d)에 나타난 바와 같이 열선 프로브를 벽와도의 측정위치에서 하류로 이동시킬수록 횡방향 벽와도와 주유동방향 속도섭동의 상관관계가 커지는 것을 볼 수 있는데, 이는 횡방향 벽와도가 하류의 유동구조와 큰 상관관계를 가지고 있음을 의미한다. Fig. 5(a), 5(c)와 같이 주유동방향 벽와도와 주유동방향 속도섭동의 상관관계에서 열선 프로브를 벽와도의 측정위치에서 하류로 이동시킬수록 상관관계의 절대치는 급격히 감소함을 볼 수 있는데 이는 주유동방향 벽와도가 횡방향 벽와도에 비해 하류의 유동구조와 적게 연관되어 있음을 보여주며, 주유동방향 벽와도와 연관된 유동구조가 하류로 이동하면서 빨리 소멸되는 것을 의미한다.

이와 아울러 Δx^+가 증가함에 따라 상관관계의 절대값이 최대인 위치가 벽으로부터 멀어지는 것을 볼 수 있는데, 이는 주유동방향에 대하여 기울어져 있는 유동구조가 벽 가까이에 존재하고 있다는 것을 의미한다. 이러한 기울어진 유동구조는 Kreplin and Eckelmann,[7] Kravchenko *et al.*[10]과 양준모 등[11]의 연구에서도 확인되었다.

Fig. 5(a)와 5(c)에 나타난 바와 같이 각각의 V 형 벽와도 프로브로부터 얻은 주유동방향 벽와도와 주유동방향 속도섭동의 상관관계는 서로 다른 부호의 값을 보인다. 이는 주유동방향 와류쌍 모델(streamwise vortex pair model)로 설명할 수 있다.

Fig. 6 에 주유동방향 와류쌍의 밀어내는 작용(pumping action)으로 인해 발생하는 sweep 현상과 ejection 현상을 나타내었다. Sweep 현상이 나타날 때, 주유동방향 속도섭동은 양(+)의 값을 가지고, Probe 1 과 Probe 2 에서 측정되는 주유동방향 벽와도는 각각 음(-)과 양(+)의 값을 가진다. 따라서 Probe 1 로부터 측정된 주유동방향 벽와도와 주유동방향 속도섭동의 상관관계는 음의 값을, Probe 2 로부터 측정된 상관관계는 양의 값을 갖게 된다. Ejection 의 경우에도 동일한 설명이 가능하다.

전술한 바와 같이 벽와도와 큰 상관관계를 가지고 있는 응집구조가 존재함은 명확하다. 공간-시간 상관관계를 고찰함으로써 이러한 구조의 시간의 변화에 대한 정보를 얻을 수 있다. 공간-시간 상관관계를 Fig. 7 과 8 에 나타내었다. $\Delta t^+=0$ 인 경우가 Fig. 5에 제시한 공간 상관관계를 나타낸다.

Fig. 7에서 주유동방향 벽와도섭동과 주유동방향 속도섭동 사이의 시간차(phase shift)가 존재함을 발견할 수 있다. $\Delta x^+=0$ 이며 $y^+>0$ 인 경우, 최대 상관관계는 항상 $\Delta t^+<0$ 에서 발생하며, 이는 벽와도 섭동이 언제나 주유동방향 속도섭동에 뒤쳐

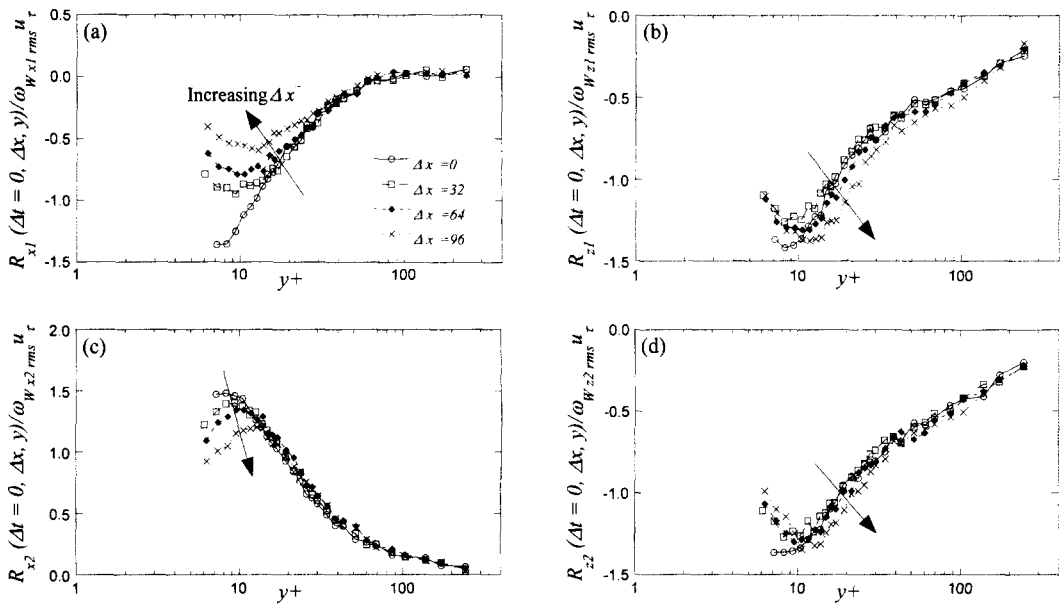


Fig. 5 Space correlations of the wall vorticity and the streamwise velocity fluctuations : (a) $R_{x1}/\omega_{x1,rms}u_\tau$, (b) $R_{z1}/\omega_{z1,rms}u_\tau$, (c) $R_{x2}/\omega_{x2,rms}u_\tau$ and (d) $R_{z2}/\omega_{z2,rms}u_\tau$

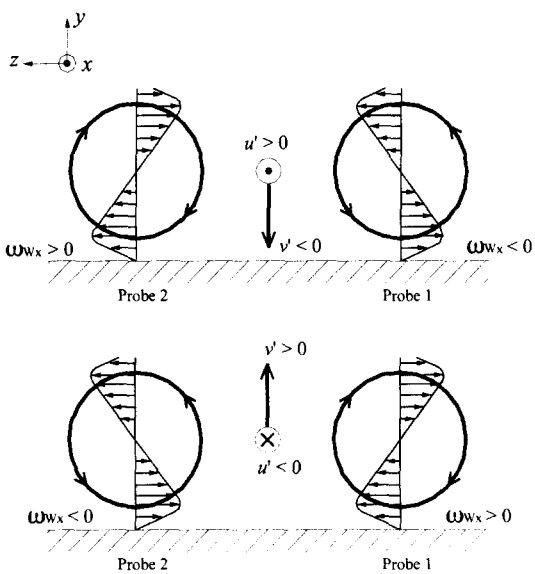


Fig. 6 Streamwise vortex pair model : (a) sweep ; (b) ejection

져 있음을 의미한다. 그러나 $\Delta x^+ > 0$ 인 경우, 최대상관관계는 벽 가까이에서 $\Delta t^+ > 0$ 일 때 발생한다. 이는 주유동방향 속도섭동이 벽와도 섭동에 뒤쳐지는 영역이 존재함을 뜻한다. 또한 열선 프로브 HW2 의 위치가 벽와도 측정위치의 하류로 이동할수록 벽와도의 변화가 주유동방향 속도섭동의 변화에 비해 앞서 나타나는 영역이 y 방향으로 늘어나고 있음을 볼 수 있다.[7,11]

다른 주목할만한 특징은 주유동방향 벽와도와 주유동방향 속도섭동의 공간-시간 상관관계가 $y^+ > 50$ 에서 횡방향 벽와도의 상관관계(Fig. 8)에 비해 낮으며, $y^+ > 100$ 에서 상관관계가 0 에 가깝다는 점이다. 이는 주유동방향 벽와도와 연관된 유동구조가 횡방향 벽와도와 연관된 구조보다 크기가 작다는 것을 의미하며, 참고문헌 (12)에서 논의한 벽마찰력 에너지 스펙트럼의 결과와 일치한다.

Fig. 9 에 $\Delta x^+ = 0$ 이고 $y^+ = 10.4$ 인 위치에서의 공간-시간 상관계수를 나타내었으며, 이로부터 최대 상관계수가 발생하는 시간이 벽와도의 성분에 따라 다름을 알 수 있다. 주유동방향 벽와도와 주유동방향 속도섭동 간의 시간차가 횡방향 벽와도와 주유동방향 속도섭동 간의 시간차보다 작다는 결과는 주유동방향 벽와도와 연관된 유동구조가 횡방향 벽와도와 연관된 유동구조에 앞서 있음을 의미한다. 이러한 결과는 류상진[17]의 VITA 방법에 의한 조건부 평균된 결과로부터도 확인할 수 있다.

Fig. 9 에서 구한 벽와도와 주유동방향 속도섭동

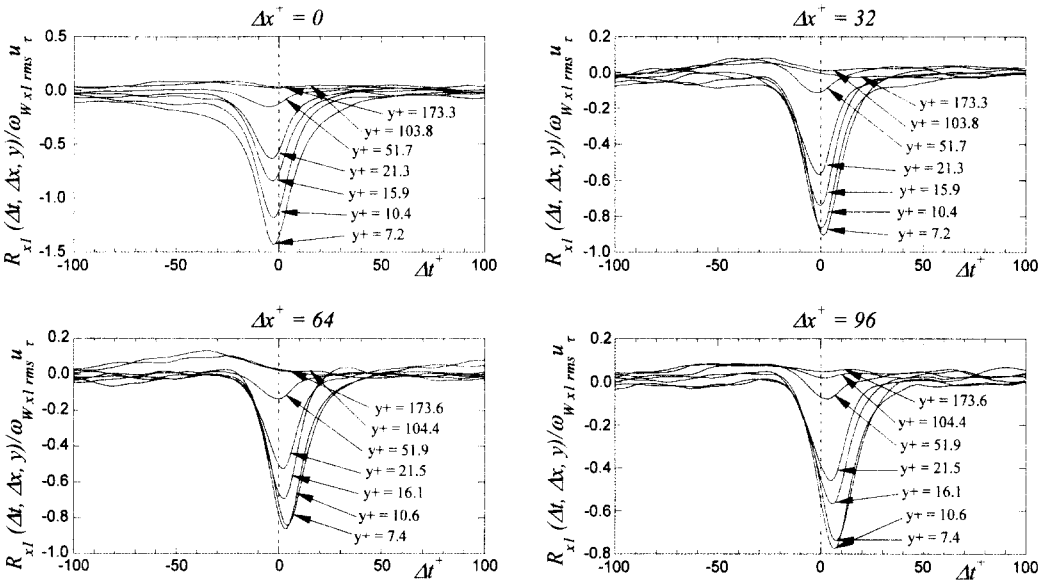


Fig. 7 Space-time correaltions of the streamwise wall vorticity and the streamwise velocity fluctuations

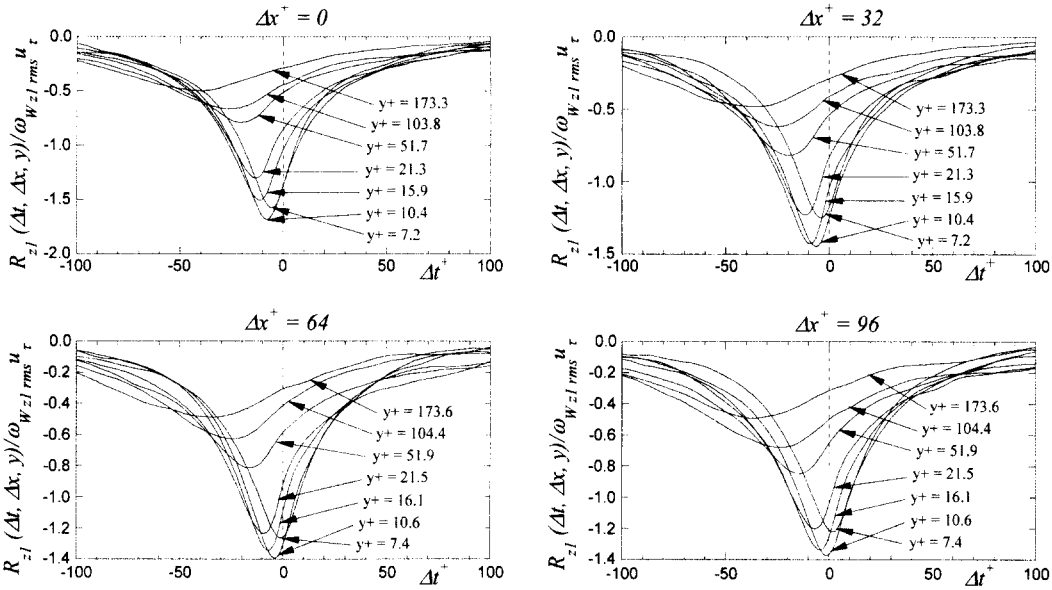


Fig. 8 Space-time correlations of the spanwise wall vorticity and the streamwise velocity fluctuations

사이의 시간차를 Fig. 10 에 나타내었다. Fig. 10 에서 실선으로 연결된 위치는 벽와도의 섭동과 주유동방향 속도섭동의 변화가 동시에 일어나는 지점들(in-phase locations)을 나타낸다. 각 Δx^+에서 시간차가 0 인 위치, 즉 y_{ip} 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\left.\frac{\partial R'}{\partial \Delta t}\right|_{\Delta t=0 \,\&\, y=y_{ip}} = 0 \tag{3}$$

본 연구에서 구한 등위상선(in-phase line)이 벽와도섭동의 주유동방향 성분과 횡방향 성분에 대하여 서로 다른 것을 알 수 있다. 주유동 방향 벽와도와 주유동방향 속도섭동의 등위상선은 주유동방

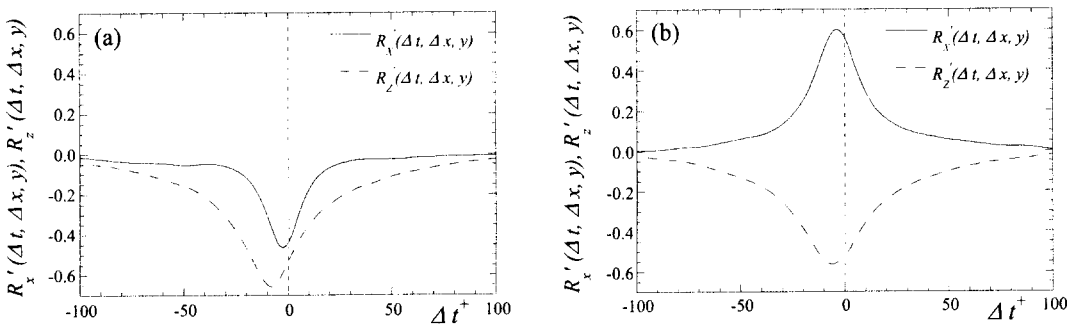


Fig. 9 R_x' and R_z' at $\Delta x^+=0$ and $y^+=10.4$: (a) correlations at probe 1 and (b) correlations at probe 2

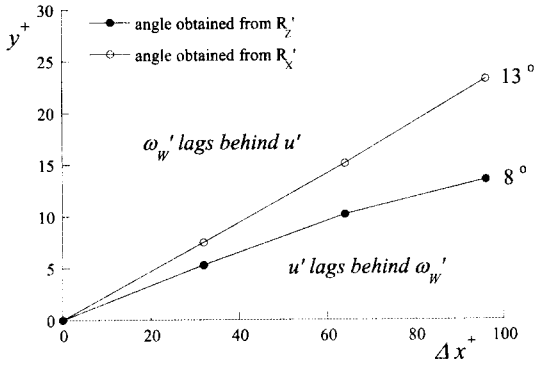


Fig. 10 Phase shift between the wall vorticity and streamwise velocity fluctuations obtained from Figs. 7 & 8

향에 대하여 13° 기울어져 있다. Robinson[18]은 그의 수치해석 결과로부터 주유동방향 와류가 주유동방향에 대하여 평균적으로 11.5° 기울어져 있다고 밝혔으며, 이는 본 연구의 결과와 유사한 값이다.

반면에 횡방향 벽와도와 주유동방향 속도섭동의 등위상선은 8° 기울어져 있으며, 이는 양준모 등[11]의 결과인 7°와 유사하다. 이러한 결과로부터 주유동방향 벽와도와 상관관계를 갖는 유동구조는 횡방향 벽와도와 연관된 유동구조보다 큰 기울기를 가지고 있는 것으로 판단된다.

여기서 한가지 고려하여야 할 것은 속도 프로브가 난류경계층에 횡방향으로 정렬된 두 개의 벽와도 프로브의 중심위치에 정렬되어 있다는 것이다. Fig. 6 을 보면 유동장에 서로 반대방향으로 돌고 있는 주유동방향 와류쌍이 존재하고 그것이 하류방향으로 통계적으로 정체되어(statistically frozen) 흘러가고 있다고 가정하면 와류는 벽면에 횡방향 마찰력 섭동을 야기하며 와류쌍의 중심부에서는 벽에 수직한 방향의 속도와 주유동방향의 속도 섭동을 야기한다. 즉, 횡방향 벽와도 섭동이 발생하는 위치와 속도 섭동이 발생하는 위치는 횡방향으로도 일정 거리만큼 차이가 있게 되며, 본 연구에서 구한 등위상선의 기울기가 Robinson[18]의 결과나 양준모 등[11]의 결과와 약간의 차이를 보이는 것은 본 연구에서 사용한 프로브들의 위치가 그들과 다르기 때문으로 판단된다.

유동구조의 기울기와 최대상관계수가 발생하는 시간이 벽와도의 성분에 따라 다르다는 결과는 주유동방향 벽와도와 연관된 유동구조와 횡방향 벽와도와 연관된 유동구조가 다름을 의미한다.

벽 근처 유동구조가 주유동방향에 대해 일정한 기울기를 가진다는 것은 벽와도와 연관된 벽 근처 구조가 하류로 이동하는 동안 통계적으로 정체되어(statistically frozen) 있는 것을 의미한다. 그러므로 유동이 정체되어 있다는 가정하에 대류속도를 정의할 수 있다.

3.3 벽 근처 영역에서의 대류속도 추정

대류속도는 난류제어를 위해서 뿐 아니라 응집구조의 동적인 특성을 해석하는데 있어서 매우 중요한 물리량이다. 그러나 대류속도를 실험적으로 구하기 위하여 두 개의 열선을 주유동방향으로 나란히 설치할 경우, 상류의 열선 프로브가 유동을 교란시켜 측정된 대류속도의 결과에 큰 오차를 유발시킬 가능성이 높다. 반면 본 연구에서 구한 벽와도와 주유동방향 속도섭동의 시간차를 이용하면 프로브의 유동에 대한 교란없이 대류속도를 구할 수 있게 된다.

열선 프로브가 $\Delta x^+=0$, 그리고 임의의 y^+위치에 있는 경우에, 최대상관계수가 나타나는 시간과

열선 프로브가 동일한 y^+ 위치에서 하류로 $\Delta x^+ = X^+$ 만큼 이동하였을 때, 최대상관계수가 나타나는 시간의 차이를 $\Delta\tau^+$ 라 하면 대류속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_p^+ = \frac{u_p}{u_\tau} = \frac{X^+}{\Delta\tau^+} \tag{4}$$

여기서 일정한 y^+ 위치에서의 $\Delta\tau^+$ 는 Fig. 8로부터 구한다.

이와 같은 방법으로 구한 대류속도의 결과를 Fig. 11 에 나타내었다. 비교를 위하여 Kim and Hussain[19]과 양준모 등[11]의 결과를 함께 제시하였다. Kim and Hussain 은 난류 채널유동에 대한 직접수치모사의 결과로부터 주유동방향 속도성분 간의 상호상관함수(cross-correlation)에 의하여 대류속도를 구하였으며, 양준모 등은 벽마찰력과 주유동방향 속도섭동과의 공간-시간 상관관계로부터 대류속도를 구하였다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 주유동방향 벽와도의 상관계수와 횡방향 벽와도의 상관계수로부터 구한 대류속도가 유사함을 알 수 있다. 벽 가까운 영역인 $y^+ < 10$ 에서의 대류속도는 평균속도에 비하여 매우 크며, 본 연구의 결과는 이전 연구들의 결과와 $y^+ < 20$ 의 영역에서 잘 일치하고 있다. 반면 벽에서 멀어질수록 본 연구에서 구한 대류속도의 값이 큰 오차를 보임을 알 수 있는데, 이는 벽에서 멀어질수록 벽와도와 주유동방향 속도섭동 간의 상관관계가 적어지기 때문이다.

Krogstad *et al.*[20]은 $y^+ < 10$ 에서 대류속도는 일정하며, 벽으로부터 멀어짐에 따라 대류속도는 유동구조의 크기에 의존한다는 결과를 제시하였다. 또한 그들은 작은 유동구조의 대류속도가 큰 유동구조의 대류속도보다 낮음을 주장하였고, 유동구조가 발달함에 따라 크기가 커지기 때문에 대류속도가 증가함을 보였다. 본 연구에서도 그들의 결과와 동일하게 $y^+ < 10$ 에서 대류속도가 거의 일정함을 알 수 있었고, y^+ 가 증가함에 따라 대류속도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 미니어쳐 I형 열선 프로브와 V형 벽와도 프로브의 동시측정을 통하여 난류경계층에서 벽와도와 주유동방향 속도섭동 간의 상관관계를 고찰하였다.

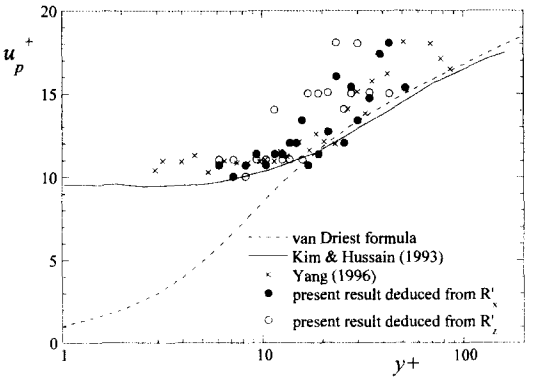


Fig. 11 The deduced convection velocities of the streamwise velocity fluctuations as a function of y^+

시간 평균된 벽와도와 주유동방향 속도섭동의 공간-시간 상관관계 및 상관계수의 측정결과는 벽 근처에 주유동방향 와류쌍이 존재함과 벽와도와 큰 상관관계를 가지고 있는 유동구조가 주유동방향에 대하여 기울어져 있음을 보여주었다. 유동구조의 기울어진 각도는 벽와도와 주유동방향 속도섭동의 변화 사이에 존재하는 시간차를 이용하여 알아낼 수 있었는데, 주유동방향 벽와도와 연관된 유동구조의 기울기는 13°였으며, 횡방향 벽와도와 연관된 유동구조의 기울기는 8°였다. 또한 공간-시간 상관관계로부터 주유동방향 벽와도와 연관된 유동구조가 횡방향 벽와도와 연관된 유동구조보다 크기가 작으며, 시간적으로 앞서 있음을 알 수 있었다.

공간-시간 상관계수에서 나타난 벽와도와 주유동방향 속도섭동 간의 시간차를 이용하여 난류경계층의 벽 가까운 영역에서의 대류속도를 추정할 수 있었는데, 그 결과는 기존의 결과들과 잘 일치하였다. 또한 벽와도의 성분에 따른 대류속도가 서로 유사함을 알 수 있었다.

후 기

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

아울러 본 연구를 위하여 깊이 있는 토론과 조언을 함께 해주신 서울대학교 기계항공공학부 최해천 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Robinson, S. K., 1991, "Coherent Motions in the Turbulent Boundary Layer," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 601~639.

(2) Gad-el-Hak, 1989, "Flow Control," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 42, No. 10, pp. 261~293.

(3) Choi, H., Moin, P. and Kim, J., 1994, "Active Turbulence Control of Drag Reduction in Wall-Bounded Flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 262, pp. 75~110.

(4) Lee, C., Kim, J. and Choi, H., 1998, "Suboptimal Control of Turbulent Channel Flow for Drag Reduction," *J. Fluid Mech.*, Vol. 358, pp. 245~258.

(5) 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.

(6) Blackwelder, R. F. and Eckelmann, H., 1979, "Streamwise Vortices Associated with the Bursting Phenomenon." *J. Fluid Mech.*, Vol. 94, Part 3, pp. 577~594.

(7) 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.

(8) 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.

(9) 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.

(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(12), pp. 3307~3309.

(11) 양준모, 유정열, 최해천, 1996, "난류경계층에서 벽마찰력과 유동방향 속도성분과의 상관관계 (I)-시간 평균된 공간-시간 상관관계의 분석," 대한기계학회논문집 B, 제 21 권, 제 1 호, pp. 140~152.

(12) 김성욱, 류상진, 유정열, 2000, "벽와도 측정을 위하여 개발된 V 형 열선 프로브의 성능특성," 대한기계학회논문집 B, 심사중.

(13) Hinze, J. O., 1975, *Turbulence*, 2nd Ed. McGraw-Hill, New York, pp. 98~100.

(14) van Driest, E. R., 1956, "On the Turbulent Flow Near a Wall," *J. Aero. Scien.*, Vol. 23, pp. 1007~1011.

(15) Spalart, P. R., 1988, "Direct Simulation of a Turbulent Boundary Layer up to Re_{υ} = 1410," *J. Fluid Mech.*, Vol. 187, pp. 61~98.

(16) Mochizuki, S. and Nieuwstadt, F. T. M., 1996, "Reynolds-Number-Dependence of the Maximum in the Streamwise Velocity Fluctuations in Wall Turbulence," *Exps. Fluids*, Vol. 21, pp. 218~226.

(17) 류상진, 1999, "난류경계층에서 벽와도와 유동방향 속도성분과의 상관관계," 서울대학교 대학원 공학석사학위논문.

(18) Robinson, S. K., 1991, "The Kinematics of Turbulent Boundary Layer Structure," *NASA TM* 103859.

(19) Kim, J. and Hussain, F., 1993, "Propagation Velocity of Perturbation in Turbulent Channel Flow," *Phys. Fluids* A, Vol. 5, pp. 695~706.

(20) Krogstad, P.-Å., Kaspersen, J. H. and Rimestad, S., 1998, "Convection Velocities in a Turbulent Boundary Layer," *Phys. Fluids*, Vol. 10, No. 4, pp. 949~957.