

## 국소 벽면 진동에 의한 난류경계층 유동 변화

김철규\* · 전우평\*\* · 박진일\*\* · 김동주\* · 최해천\*\*,\*

(2000년 4월 3일 접수)

### Modification of Turbulent Boundary Layer Flow by Local Wall Vibration

Chulkyu Kim, Woo-Pyung Jeon, Jinil Park, Dongjoo Kim and Haecheon Choi

**Key Words:** Turbulent Boundary Layer(난류경계층), Wall Deformation Actuator(벽 변형 액추에이터), Flow Control(유동제어)

#### Abstract

In this study, the modification of turbulent boundary layer flow by local wall vibration is investigated. The wall is locally vibrated using a wall deformation actuator, which moves up and down at the frequencies of 100Hz and 50Hz. Simultaneous measurements of the streamwise velocities in the spanwise direction are performed at several wall-normal and streamwise locations using an in-house multi-channel hot wire anemometer and a spanwise hot-wire-probe rake. The mean velocity is reduced in most places due to the wall vibration and its reduced amount becomes small as flow goes downstream. Interestingly, the mean velocity is found to increase very near the wall and near the actuator. This is due to the motion induced by the streamwise vortices which are generated by the downward motion of the actuator. In case of the streamwise velocity fluctuations, their magnitude increases as compared to the unperturbed turbulent boundary layer, and the increased amount becomes small as the flow moves downstream. The modified flow field at the forcing frequency of 50Hz is not much different from that of 100Hz, except the reduced amount of modification.

#### 기호설명

$A$  : 액추에이터 진폭  
 $D$  : 액추에이터 지름  
 $f$  : 액추에이터 구동 주파수  
 $u$  : 주유동방향 순간속도  
 $u_\tau$  : 벽전단속도  
 $\bar{u}$  : 주유동방향 평균속도  
 $U_\infty$  : 자유유동 평균속도  
 $R_{uu}$  : 폭방향 상관계수

$x$  : 주유동방향 좌표  
 $y$  : 벽면수직방향 좌표  
 $y_{offset}$  : 보정된 벽면으로부터 수직거리  
 $z$  : 폭방향 좌표

#### 그리스문자

$\Delta$  : 변화량  
 $\delta$  : 경계층 두께  
 $\theta_{ref}$  : 교란이 없을 때의 운동량 두께

\* 서울대학교 대학원

\*\* 회원, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소  
 난류제어연구단

\*\*\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : choi@socrates.snu.ac.kr

TEL : (02)880-8361 FAX : (02)878-3662

#### 상첨자

+ : 벽좌표계

#### 하첨자

$f$  : 액추에이터에 의한 교란  
 $rms$  : 제곱평균근

## 1. 서론

난류경계층 유동 구조에 관한 이해가 증가하면서 최근 항력 감소, 열전달 증진, 유동소음 감소 등을 위한 경계층내 난류 제어에 대한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다. 효과적인 난류경계층 제어를 위해서 지금까지 다양한 방법이 시도되었는데<sup>(1)</sup> 제어에 필요한 입력에너지의 유무에 따라 크게 능동적인 제어와 수동적인 제어로 나눌 수 있다.

마찰항력 감소를 위한 수동적인 제어 방법에는 벽면근처에 폴리머(polymer)를 첨가하여 유체의 점성을 변화시키는 방법, 난류경계층의 외부영역(outer region)에 LEBU(Large Eddy Breakup Unit)를 설치하여 큰 에디를 제어하는 방법, 리블렛(riblet)을 벽에 설치하여 벽근처 작은 스케일 와류를 제어하는 방법 등이 있다. 이러한 수동적인 방법은 비교적 간단하지만 실제로 얻을 수 있는 항력 감소는 상대적으로 작다.

한편 난류경계층제어에 있어서 보다 효과적인 항력감소를 얻기 위해서는 난류 생성의 주원인인 벽근처 작은 스케일의 주유동방향 와류(streamwise vortex)를 선택적으로 능동 제어하는 것이 필요하다는 사실이 최근 직접수치모사에 의한 연구에서 제시된 바 있다. Choi 등<sup>(2)</sup>은 채널유동의 직접수치모사를 통해 선택적 분사/흡입으로 벽면에서 주유동방향 와류를 제어하여 약 30%의 항력 감소를 얻은 바가 있다. 이후 이러한 벽근처 작은 스케일의 능동제어를 실험으로 구현하려는 시도가 있어왔다. Jacobson과 Reynolds<sup>(3)</sup>는 벽면내에 공동(cavity)과 압전세라믹으로 구성된 'spring board' 액추에이터를 이용하여 작은 크기의 제어용 주유동방향 와류를 생성시킨 바 있다. 그들은 이를 이용하여 2개의 와류를 포함하는 층류경계층을 제어함으로써 벽 전단응력을 약 8% 감소시켰다. Smith와 Glezer,<sup>(4)</sup> Lorkowski 등<sup>(5)</sup>은 압전 소자와 공동으로 이루어진 제트(synthetic jet)를 개발하여 이 액추에이터로 생성된 와류가 난류경계층에 미치는 영향을 고찰한 바 있다. 액추에이터를 직접 벽면 바닥에 부착시켜 구동시킴으로써 경계층제어에 필요한 교란을 발생시키기도 한다. Tung 등<sup>(6)</sup>은 초소형 정밀기계기술을 이용하여 타원형 모양의 미소 액추에이터를 개발하

였으며 이를 이용하여 큰 스케일 와류가 포함된 층류경계층을 제어하고자 하였다. Jeon과 Blackwelder<sup>(7)</sup>는 델타형 압전세라믹 액추에이터를 난류경계층이 형성된 벽면에 부착시켜 전기신호를 이용하여 상하로 작동시켰을 때 교란되는 유동을 고찰한 바 있다.

난류경계층의 작은 스케일을 효과적으로 제어하려는 또 하나의 방법으로 국소벽면을 선택적으로 변형시키는 방법이 연구되고 있다. 이 방법은 유체의 낮은 온도나 오염으로 인한 분사/흡입 액추에이터 작동의 한계를 보완하고자 개발되고 있다. Carlson과 Lumley<sup>(8)</sup>는 직접수치모사를 통해 벽면이 국소적으로 상하로 움직일 때 난류경계층의 기동을 고찰하였는데 벽의 움직임으로 경계층내 벽면근처의 줄무늬 구조(streaky structure)의 낮은 속도의 영역을 증가시키면 항력을 감소시킬 수 있다고 보고하였다. Mito와 Kasagi<sup>(9)</sup>는 수치해석으로 벽을 자유유동의 폭방향으로 정현파(sine wave) 모양으로 변화시켜 유동을 제어하였으며, Endo 등<sup>(10)</sup>은 아래/위로 움직이는 두 개의 벽이 한 쌍을 이루는 액추에이터를 벽 전체에 배열하여 피드백제어로 약 10%의 항력 감소를 얻었다. Breuer 등<sup>(11)</sup>은 평판 층류경계층이 벽 변형 액추에이터로 인한 교란에 의해 천이 되는 현상을 실험적으로 고찰한 바 있다. 그러나 벽변형에 의한 난류경계층의 교란을 실험으로 고찰한 연구는 현재까지 보고되지 않았다.

한편 위에서 언급한 대부분의 실험에서 사용된 액추에이터는 상대적으로 작은 구동에너지가 소요되는 압전세라믹소자로 작동된다. 압전소자는 재료의 특성상 큰 공진 주파수 주위의 좁은 주파수 범위에서만 크게 변형되므로 난류제어에 필요한 다양한 특성의 교란을 생성하는데 한계가 있다. 특히 Blackwelder와 Haritonidis<sup>(12)</sup>의 연구에 의하면 완전 발달된 난류경계층 유동에서 벽근처 난류생성과 밀접한 관계가 있는 파열 주파수(bursting frequency)가 벽변수로 부차원화하였을 때 약  $f^+ \approx 0.004$ 의 낮은 주파수 영역에 해당하기 때문에 낮은 주파수 영역에서 큰 교란을 낼 수 있는 액추에이터의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 난류 경계층 유동의 실제 제어에 앞서 넓은 주파수 영역에서 안정적이며 상대적으로 큰 교란을 발생시킬 수 있는 벽 변형 저주파수 액추에이터를 개발하고, 이 액추에이터를

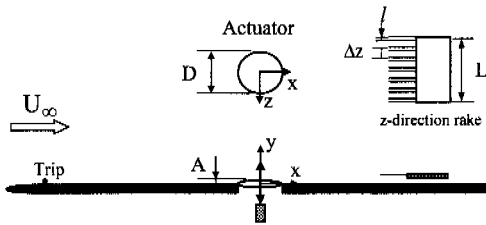


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

이용하여 벽면을 국소적으로 상하로 진동시켰을 때 평판위 난류경계층 유동의 변화를 실험적으로 고찰하였다. 이것은 앞으로 실제 난류경계층 유동제어용 미소 벽변형 액추에이터를 제작하기 전에 먼저 벽변형 액추에이터에 의해 발생하는 교란이 난류경계층 유동에 주는 영향을 정확히 파악할 필요가 있기 때문이다.

액추에이터에 의해 교란된 난류경계층 유동장을 고찰하기 위해 여러 위치에서 속도를 동시에 측정할 수 있는 동시 다측정 시스템을 개발하였다. 즉 다채널 열선유속계와 평판 폭방향으로 일정한 간격으로 배치된 rake 센서를 설계 제작하여 여러 위치에서의 순간 속도를 동시에 계측함으로써 교란된 하류 난류경계층의 유동 구조를 정밀하게 파악하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용된 풍동은 저속, 흡입식, 개방형으로써 경계층 측정용으로 설계 제작되었다. 사각 단면 시험부의 크기는 400 mm×300 mm×2000 mm 이며 시험부 내측 벽면에서 발달하는 경계층에 의해 하류로 갈수록 평균속도가 증가되어 평판의 압력이 감소하는 것을 보완할 수 있도록 양 벽면을 움직일 수 있게 제작하였다. 실험 속도인 자유유동속도 10 m/s에서 시험부의 주유동방향 평균속도 균일도와 난류강도는 각각 0.5%, 0.6% 이하였다. 풍동에 대한 제원과 특성은 신성호 등<sup>(13)</sup>에 상세히 소개되었다.

시험부 중앙에 위치한 평판은 길이 1500 mm, 폭 280 mm, 두께 12 mm의 알루미늄 합금판으로 제작되었고 자중으로 인한 휨을 방지하고자 폭방향이 풍동 바닥과 수직이 되도록 세워서 설치하였다.

Fig. 1에 평판, 벽변형 액추에이터, 열선레이

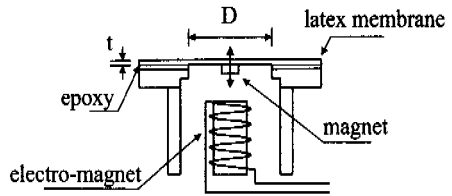


Fig. 2 Schematic of the electro-magnetic actuator

크 등의 실험장치와 좌표축을 나타내었다. 자유유동속도에서 액추에이터 하류에 완전 발달된 난류경계층을 만들기 위해 평판의 선단에서 6 cm의 위치에 지름 1.5 mm인 구들을 연결한 강선을 부착하였다. 예비실험에서 평판 폭방향(z)으로 중앙에서 ±85 mm 떨어진 2개의 압력공열로부터 정압을 측정한 결과 모든 주유동방향(x) 위치에서 압력 계수가 0.5%의 범위 내에서 일치하였다. 이 사실로 2차원 경계층이 형성됨을 알 수 있었다. 한편 0.6° 씩 양쪽 벽을 바깥쪽으로 벌렸을 때 선단 부근(x<0.1 m)을 제외한 나머지 평판 부분에서 주유동방향으로의 압력 변화가 0.4% 범위 안에 들어오는 영압력구배를 형성시킬 수 있었다.

액추에이터는 Fig. 2와 같이 알루미늄 합금으로 만든 케이스, 지름이 3 mm, 높이가 1.5 mm인 영구자석이 붙어있는 두께(t) 0.2 mm의 얇은 고무막으로 이루어진 동작용부, 그리고 전자석으로 이루어진 구동부분으로 되어 있다. 액추에이터가 실제로 움직이는 부분의 지름(D)은 20 mm이며, 이는 자유유동속도 10 m/s에서 벽변수로  $D^+ \approx 600$ 에 해당된다. 본 연구에서  $D^+ \approx 600$ 뿐만 아니라 여러 가지 다른 크기의 액추에이터를 제작 설치하여 그 영향을 시험해 보았다. 그러나 액추에이터의 지름이 작을 경우 액추에이터의 변위를 크게 하는 것에 한계가 있었으며, 열선 계측 결과 액추에이터로 인해 발생하는 교란이 상대적으로 작아서 유동장에 가시적인 변화를 줄 수 없었다. 액추에이터로 인해 발생하는 교란이 보다 먼 하류지역까지 영향을 미치게 하기 위해서는 액추에이터의 진폭이 커야 했고 따라서 액추에이터의 지름을 최종적으로  $D^+ \approx 600$ 으로 정하였다.

함수발생기로부터 발생된 ± 부호의 정현파(sine wave) 전압을 증폭기에서 증폭시켜 전자석에 가

해 주면, 전자석의 N극과 S극이 계속 바뀌게 되어 영구자석이 붙어있는 얇은 막이 움직인다. 이때 정현파의 전압과 주파수를 조절함으로써 액추에이터 표면의 진폭과 주파수를 조절할 수 있다. 본 액추에이터의 시간에 따른 동작특성을 레이저 변위측정기로 측정한 결과 1 Hz~200 Hz의 넓은 주파수 영역에서 큰 벽면 변형을 얻을 수 있는데, 이는 압전세라믹 액추에이터가 한정된 높은 주파수에서 최대 진폭을 낼 수 있는 것에 비해서 장점이라 할 수 있다. 본 연구에서 100 Hz와 50 Hz의 정현파를  $\pm 28$  V의 전압으로 흘려주었을 때 제작한 액추에이터의 최대진폭은 각각 약  $\pm 3$  mm ( $A^+ \approx 90$ ),  $\pm 2$  mm ( $A^+ \approx 60$ )이었다.  $x/D=0$ 에서 자유유동속도와 경계층의 운동량두께를 특성치로 한 레이놀즈수는 약 1800이다.

주유동방향 순간속도는 자체 제작한 다채널 열선유속계와 z-방향 열선레이크를 사용하여 측정하였다. Fig. 1에 도시한 자체 제작한 열선레이크의 형상은 프롱사이의 거리( $l$ )가 0.8 mm ( $\Delta z^+ \approx 24$ )인 7개의 프로우브가 평행하게 나열되어 있으며 각 프로우브 사이의 거리는 3 mm ( $\Delta z^+ \approx 90$ )이다. 지름이 2.5  $\mu$ m인 열선을 납땜의 방법으로 두 개의 프롱에 붙였으며 과일비를 1.2로 하였을 때 차단주파수는 약 25 kHz이었다.

계측된 아날로그 전압신호는 IBM호환PC에 내장된 16비트 A/D 변환기(DT2838)에서 디지털 값들로 바꾸어 하드디스크에 저장하였다. 열선유속계에서의 전압 신호는 7개의 채널에서 동시에 연속적(SSH: Simultaneous Sample & Hold)으로 19.53 kHz의 샘플링 주파수로 8초간 받아들였다.

유속계에서의 출력 전압의 검정은 피토크를 이용하여 풍동내의 시험부에서 수행하였으며 유속계의 전압과 피토크의 속도의 검정식은 널리 사용되고 있는 4차 다항식을 사용하였다. 실험 후 다시 자유유동속도에서 측정하여 검정식으로 계산된 속도의 값과 실제 피토크에서 측정된 속도의 차이가  $\pm 1\%$ 를 넘지 않도록 하였다.

난류경계층을 측정할 때 열선이 벽으로부터 떨어진 최초 거리를 보정하는  $y_{offset}$ 을 예측하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 액추에이터가 움직이지 않을 때 액추에이터 하류 유동이 완전 발달된 난류경계층 유동임을 실험으로 확인한 후 Clauser chart법<sup>(14)</sup>을 이용하여 벽근처 평균속도

( $y^+ < 150$ )로부터 벽전단속도  $u_\tau$ 와  $y_{offset}$ 을 구하였다. 예측에 필요한 벽법칙은 Spalding<sup>(15)</sup>의 식을 사용하여 오차들의 제곱의 합이 최소가 되도록  $u_\tau$ 와  $y_{offset}$ 을 결정하였다.

### 3. 실험 결과

액추에이터를 난류경계층의 과일주파수인 50 Hz와 그의 하모닉(harmonic)인 100 Hz로 각각 구동하였을 때 여러  $x$  위치에서 주유동방향 순간속도를 측정하였다. 측정 결과를 비교하면 전반적으로 50 Hz일 때의 유동장 변화는 100 Hz인 경우의 유동장 변화와 유사하나 그 변화량이 상대적으로 작고 하류로 멀리 지속되지 않았다. 이는 50 Hz로 구동시 액추에이터의 최대진폭이 100 Hz로 구동시보다 상대적으로 작기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 100 Hz의 경우에 대해서만 설명하기로 한다.

Fig. 3은 교란을 주지 않았을 때 액추에이터 바로 하류인  $x/D=0.55$ 에서 열선레이크의 각 폭방향위치에서 유동방향 평균속도 분포와 속도섭동 분포를 벽면수로 나타낸 것이다. 계측된 평균속도 분포는  $y^+ < 200$ 의 범위에서 잘 알려진 난류경계층의 벽법칙에 잘 일치하고 있다. 유동방향 속

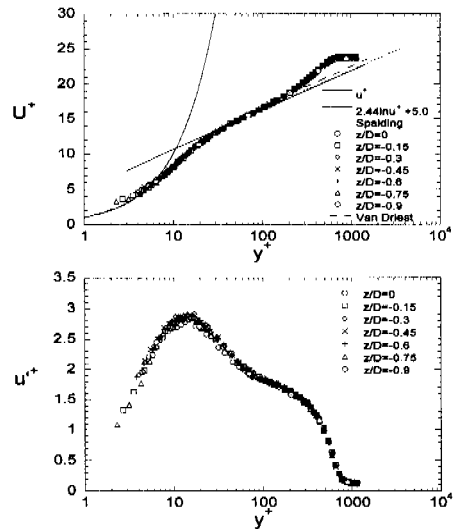


Fig. 3 Streamwise mean velocity and velocity fluctuation profiles at  $x/D=0.55$  without actuation

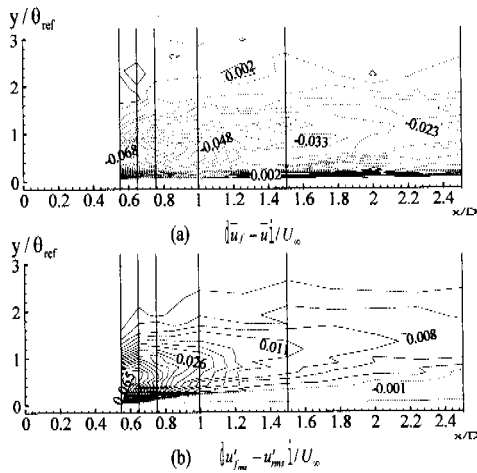


Fig. 4 Contours of the (a) mean velocity differences (contour levels are from -0.068 to +0.037 by increments of 0.005.) and (b) streamwise velocity fluctuation differences (contour levels are from -0.001 to +0.065 by increments of 0.003). Dashed lines denote negative contours

도섭동 분포의 전체적인 모양은 전형적인 완전 발달된 난류경계층의 분포를 보여주고 있다. 즉 벽 가까이에서 급격히 증가하여  $y^+ \approx 15$ 의 위치에서 최고치를 보인 후 다시 벽에서 멀어질수록 감소하여 경계층 밖에서 자유유동의 난류강도값을 보인다. 폭방향으로 7개의 위치에서 측정한 평균 속도 분포와 속도섭동 분포가 모두 일치하는 것으로 보아 액추에이터가 움직이기 전 액추에이터 하류의 경계층이 완전 발달된 2차원 난류경계층임을 알 수 있다. 이후의 모든 그림에서 평균속도와 속도섭동량은 자유유동속도로 부차원화하였으며 Fig. 1의  $x$ 와  $z$  좌표는 액추에이터의 지름  $D$ 로,  $y$ 좌표는 교란을 주지 않았을 때의 운동량두께  $\theta_{ref}$ 로 각각 부차원화하였다.

Fig. 4의 (a)와 (b)는  $z=0$  평면에서 제어를 할 때와 하지 않을 때의 평균속도의 차이와 유선방향 속도섭동의 차이를 등고선으로 나타낸 것이다. 유동장 대부분의 영역에서 평균속도가 감소하고 있다. 액추에이터 바로 뒤인  $x/D=0.55$ 와  $y/\theta_{ref}=0.5$ 에서 최고  $0.07 U_\infty$ 의 감소를 보이며 하류로 갈수록 그리고 벽에서 멀어질수록 평균속

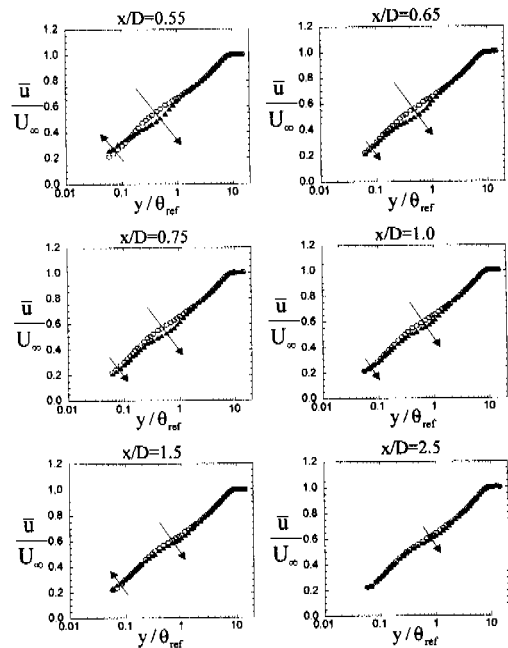


Fig. 5 Mean velocity profiles at six streamwise locations ( $z/D=0$ ):  $\circ$ , without actuation;  $\blacktriangle$ , with actuation

도의 차는 작아진다. 그러나  $0.55 < x/D < 0.65$ 와  $x/D > 1.2$  지역의 벽근처에서는 오히려 평균속도가 증가한다. 유선방향 속도섭동량의 경우 평균속도 감소가 가장 큰 액추에이터 하류에서 약  $0.065 U_\infty$  증가하였고 하류로 갈수록 점점 그 차이는 작아진다. 그러나 평균속도가 증가하는 벽근처에서는 속도섭동량은 작아진다.

Fig. 4에서 실선으로 표시된 여섯 개의  $x$  위치에서 액추에이터의 작동 유무에 따른  $y$  방향 평균속도와 속도섭동량 분포를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 도시하였다. 액추에이터의 작동으로  $x/D=0.55$ 에서 평균속도는 벽근처에서 증가하였으나,  $y/\theta_{ref} > 0.2$ 에서는 속도가 오히려 감소한다. 그러나  $x/D=0.65, 0.75, 1$ 에서는 벽근처에서도 속도가 다소 감소하다가 이후 다시 증가하며 하류로 갈수록 전체적인 교란양은 작아져  $x/D=2.5$ 의 평균속도는 액추에이터 움직임이 없을 때의 분포에 근접한다. 전체적으로 속도가 감소한 영역이 증가한 영역보다 더 넓게 나타나고 있다.

액추에이터의 작동으로  $x/D=0.55$ 에서 유선방향 속도섭동량(Fig. 6)은 벽근처에서 매우 크게 증가

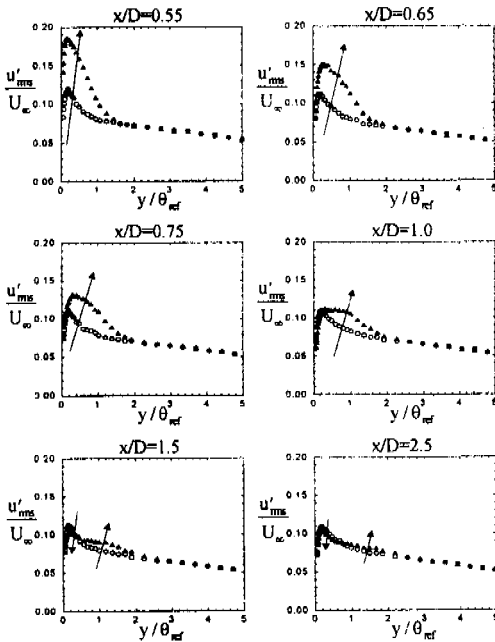


Fig. 6 Streamwise velocity fluctuation profiles at six streamwise locations ( $z/D=0$ ):  $\circ$ , without actuation;  $\blacktriangle$  with actuation

하며 하류로 갈수록 점차 감소하여 교란이 없을 때의 값에 접근한다. 특히  $0.55 < x/D < 0.75$ 에서 섭동량의 최대치가 발생하는  $y$ 의 위치가 하류로 갈수록 벽면에서부터 멀어지고 있음을 알 수 있다. 더욱이  $x/D=1.5$ 일 때 교란이 있을 경우의 섭동량의 최대치가 교란이 없을 경우보다 다소 감소한 것을 볼 수 있다. 이러한 평균속도 분포와 속도 섭동 분포는 Park과 Choi<sup>(16)</sup>의 균일분사(uniform blowing)에 의한 경계층 유동 변화와 유사한 경향을 나타내고 있다. 그들의 연구결과에 의하면 분사점 직후의 하류에서 평균속도가 감소하며 더 하류로 갈수록 그 차이가 작게 나타난다. 또한 속도섭동량은 분사점 직후 하류에서 벽근처 섭동량의 최대치가 더욱 크게 나타나지만 더 하류에서는 오히려 최대치가 감소하고 두 개의 피크가 나타나고 있다. 이러한 결과는 액추에이터 동작에 의해 평균속도 분포에서 로그 영역에서 속도가 감소하다가 하류로 갈수록 점차 회복되고 있는 것과 속도섭동량의 분포의 최대치가 처음에는 매우 크다가 하류로 갈수록 감소하여  $x/D=1.5$ 에서 액추에이터를 동작하지 않은 경우의 최대치보

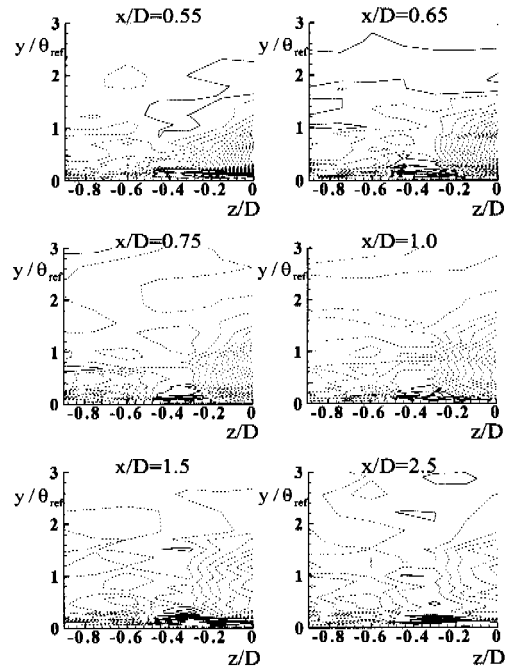
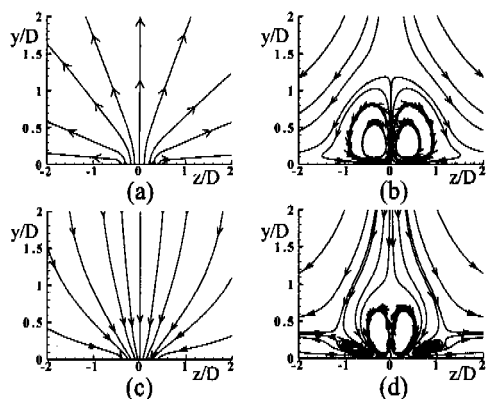


Fig. 7 Contours of the mean velocity difference ( $(\bar{u}_j - \bar{u})/U_\infty$ ) in  $yz$  planes. Dashed lines denote negative contours. The contour levels are the same as in Fig. 4(a)

다 감소하는 경향을 보이는 본 연구 결과와 매우 유사하다.

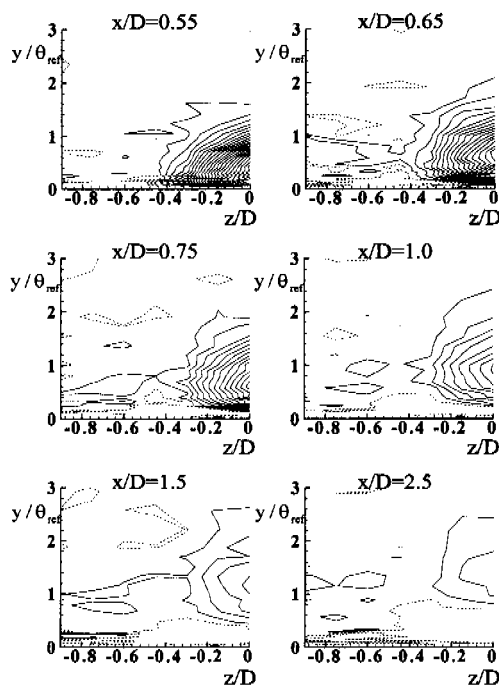
Fig. 7은 Fig. 4에서 실선으로 표시된 각  $x$ 의  $yz$  평면에서 액추에이터 작동으로 인한 평균속도의 차를 등고선으로 나타낸 것이다. 액추에이터 바로 뒤의 벽근처에서 평균속도는 증가하지만  $y/\theta_{ref} > 0.2$ 에서는 감소한다. 이러한 속도감소구간은 하류로 갈수록 벽에 수직인 방향으로 퍼져나감을 볼 수 있다. 또한 평균속도가 변화하는 지역의 대략적인 크기는 폭방향으로 액추에이터의 지름크기인 약  $1D$ 이다. 거의 모든 등고선에서 액추에이터 중심부 하류에서는 평균속도의 차이가 음(-)인 부분이 존재하고  $-0.5 < z/D < -0.2$  지역의 벽근처에서 평균속도의 차이가 양(+ )인 부분이 존재한다. 이것은 액추에이터의 상하 움직임으로 큰 와류(vortex)가 생성되기 때문이다. 즉 액추에이터가 위로 움직일 때 생성되는 속도성분으로 인해 유선방향의 와류쌍이 만들어지고, 이 와류의 움직임으로 인하여 벽근처 낮은 운동량이 위



**Fig. 8** Flow evolution due to blowing/suction on the wall (numerical simulation): (a)  $t=0$ ; (b)  $t=T/4$ ; (c)  $t=2T/4$ ; (d)  $t=3T/4$ .  $T$  is the forcing period

로 전달되어  $-0.2 < z/D < 0.2$ 에서 평균속도가 감소한다. 한편, 와류의 움직임으로 인하여  $-0.5 < z/D < -0.2$  지역에서는 벽을 향하는 속도성분이 발생되며, 이 운동은 벽면위의 높은 운동량을 가지고 옴으로 그 부근에서 속도가 증가하게 된다. 액추에이터가 아래로 움직일 때 또한 유사한 메커니즘으로  $-0.5 < z/D < -0.2$ 의 벽근처에서 아래로 향하는 와류의 속도성분으로 위쪽의 높은 운동량이 아래로 전달됨으로써 평균속도가 증가하는 것으로 해석할 수 있다.

이러한 현상을 확인하기 위하여 벽 표면이 움직이는 것을 벽면에서 수직으로 분사/흡입하는 것으로 모델링하여 2차원 층류유동을 수치해석하였다. 실제 실험에서 원호 형태로 움직이는 액추에이터의 표면을 보다 유사하게 모델링하기 위해 벽면에서의 분사/흡입을 지름방향으로 정현파의 반주기의 형태로 모사하였다. 수치해석 결과인 Fig. 8(a)~(d)는 분사에서 흡입까지를 한 주기로 보고 0, 1/4, 2/4, 3/4 주기에서 각각의 유선을 도시한 것이다. Fig. 8(a)는 최고 속도로 분사하는 상태, (b)는 분사를 멈춘 상태, (c)는 최고 속도로 흡입을 하는 상태, (d)는 흡입을 멈춘 상태를 나타낸 것이다. 이는 액추에이터가 벽면에 평행한 상태에서 최고 속도로 상승하는 상태, 완전히 상승하여 멈춘 상태, 최고 속도로 하강하는 상태 그리고 완전히 하강하여 멈춘 상태를 각각 모사한 것이다. Fig. 8(a)와 (c)와 같이 분사나 흡입을



**Fig. 9** Contours of the streamwise velocity fluctuation difference  $((u'_{rms} - u'_{rms})/U_\infty)$  in  $yz$  planes. Dashed lines denote negative contours. The contour levels are the same as in Fig. 4(b)

하고 있는 경우 와류가 생성되지 않으나, 분사를 하다가 멈춘 경우(Fig. 8(b)) 한 쌍의 와류가 생성되었으며, 흡입을 멈춘 경우(Fig. 8(d)) 중앙의 와류쌍 이외에 두 번째 와류쌍이 생성됨을 보여 주고 있다. 따라서 Fig. 8(b)의 와류는 낮은 운동량을 위로 전달시켜 중앙 부위에서 평균 속도를 감소시키며, 측면의 아래로 향한 유동에 의해 평균속도가 증가된다. Fig. 8(d)의 두 번째 와류쌍은 높은 운동량을 측면의 벽근처로 전달시켜 평균속도를 증가시킨다. Fig. 8은 비록 본 실험에서 사용한 액추에이터를 2차원 분사/흡입으로 수치적으로 모사한 결과이나, 액추에이터가 동작할 때 벽근처에서 속도가 감소하는 구간과 속도가 증가하는 구간이 존재하는 이유를 물리적으로 잘 설명해 주고 있다.

Fig. 9는 여러  $x$ 위치에서 액추에이터가 동작할 때와 동작하지 않을 때의 속도섭동량의 차를 등고선으로 나타낸 것이다. 액추에이터의 바로 뒤에서는 속도섭동량의 증가량이 매우 크다가 하류

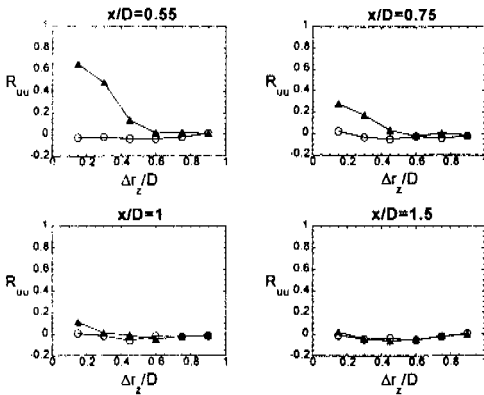


Fig. 10 Spanwise correlation coefficients of the streamwise velocity fluctuations at  $y/\theta_{ref}=0.22$ :  $\circ$ , without actuation;  $\blacktriangle$ , with actuation

로 갈수록 작아지고 증가되는 영역 또한 벽에서 부터 멀어지고 있다.  $x/D > 0.75$ 에서는 벽근처에서 속도섭동량이 감소된 영역이 넓게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

한편 본 연구에서는 폭방향으로 동시에 주유동 방향 속도를 측정하였기 때문에 다음과 같이 정의되는 폭방향 상관계수 ( $R_{uu}$ : spanwise correlation coefficient)를 구할 수 있다.

$$R_{uu}(x, \Delta r_z) = \frac{\overline{u'(x, z)u'(x, z + \Delta r_z)'}}{\overline{u_{rms}'(x, z)u_{rms}'(x, z + \Delta r_z)'}}$$

Fig. 10은  $y/\theta_{ref}=0.22$ 인 경우 여러  $x/D$ 에서의 상관계수 분포를 나타낸 것이다. 프로우브 사이의 간격이  $\Delta z^+ \approx 90$ 으로 난류경계층의 벽근처에 존재하는 작은 주유동방향 와류보다 상대적으로 크기 때문에 액추에이터를 동작하지 않았을 경우 각  $x$ 에서 폭방향으로 아무런 상관관계가 나타나지 않았다. 그러나 액추에이터를 동작하였을 경우 액추에이터의 바로 뒤( $x/D=0.55$ )에서 상관계수가 매우 크게 나타났으며, 하류로 갈수록 이러한 상관계수는 감소하여  $x/D=1.5$ 에서는 완전히 없어져서 액추에이터를 동작하지 않았을 경우와 일치하는 것을 알 수 있다. 또한  $x/D=0.55$ 에서 상관계수는  $\Delta r_z/D > 0.6$ 에서 거의 0이 되었는데 이는

액추에이터가 동작할 때 유동장내에는 폭방향으로 약 1D 크기의 유동 구조가 존재한다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 앞의 평균 속도와 속도섭동량 분포의 변화에서 선명한 것 과 잘 일치하고 있다.

#### 4. 결론

국소 벽면 진동에 의한 난류경계층의 유동장 변화를 자체 개발한 다채널의 열선유속계와 횡방향 열선 프로우브 레이크 등으로 구성된 동시 다측정시스템을 이용하여 고찰하였다. 액추에이터에 의해 교란된 난류경계층의 순간속도를 열선레이크를 이용하여 벽면으로부터 같은 높이에서 동시에 연속적으로 측정함으로써 유동구조를 용이하게 해석할 수 있었다.

액추에이터에 의해 교란된 유동장은 전체적으로 평균속도의 감소와 속도섭동량의 증가를 가져왔다. 한편 액추에이터 부근 벽면 가까이에서 평균속도의 증가가 국소적으로 발견되었는데 이는 벽면 운동으로 인해 생성된 와류의 영향으로 밝혀졌다.

유동 폭방향의 유동방향 속도 상관관계는 액추에이터의 바로 뒤에서 매우 크다가 하류로 갈수록 감소하였다. 또한 상관계수 분포의 분석을 통해 액추에이터 작동에 의해 벽면 위에 액추에이터 지름 크기의 유동구조가 형성됨을 알 수 있었다.

파일 주파수보다 몇 배 큰 주파수로 액추에이터를 구동시킬 때의 유동장 변화를 관찰하는 것은 매우 흥미로운 일이다. 본 연구에서 액추에이터를 높은 주파수로 구동시켜 계측을 시도하였다. 그러나 액추에이터가 고무로 제작되어 있어 어느 한계이상의 높은 주파수에서 작동되면 그 성능을 유지하지 못하고 피로 파괴되는 것을 확인하였다. 따라서 현재 제작한 액추에이터의 구조로는 200 Hz 이상의 높은 주파수에서 실험하는 것이 한계가 있다. 앞으로 액추에이터의 구조를 개선하여 보다 높은 주파수에서 연구를 수행할 예정이다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업과



교육부 기계분야 BK21사업의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Blackwelder, R. F., 1989, "Some Ideas on the Control of Near-Wall Eddies," *AIAA paper* 89-1009.

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

(3) Jacobson, S. A. and Reynolds, W. C., 1998, "Active Control of Streamwise Vortices and Streaks in Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 360, pp. 179~211.

(4) Smith, B. L. and Glezer, A., 1998, "The Formation and Evolution of Synthetic Jets," *Phys. Fluids*, Vol. 10, pp. 2281~2297.

(5) Lorkowski, R., Rathnasingham, R. and Breuer, K. S., 1997, "Small-Scale Forcing of a Turbulent Boundary Layer," *AIAA paper* 97-1792.

(6) Tung, S., Hong, W., Huang, J., Ho, C.-M., Liu, C. and Tai, Y.-C., 1995, "Control of a Streamwise Vortex by a Mechanical Actuator," *Turbulent Shear Flows X*, Penn. State Univ., August 14-16.

(7) Jeon, W. -P. and Blackwelder, R. F., 2000, "Perturbations in the Wall Region Using Flush Mounted Piezoceramic Actuators," *Exps. Fluids*, Vol. 28(6), pp. 485~496.

(8) Carlson, H. A. and Lumley, J. L., 1996, "Active Control in the Turbulent Wall Layer of a Minimal Flow Unit," *J. Fluid Mech.*, Vol. 329, pp. 341~371.

(9) Mito, Y. and Kasagi, N., 1998, "DNS Study of Turbulence Modification with Streamwise- uniform Sinusoidal Wall-oscillation," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 19, pp. 470~481.

(10) Endo, T., Kasagi, N., and Suzuki, Y., 1999, "Feedback Control of Wall Turbulence with Wall Deformation," *1st Int. Symp. Turbulence & Shear Flow Phenomena*, Santa Barbara, pp. 405-410.

(11) Breuer, K. S., Haritonidis, J. H. and Landahl, M. T., 1989, "The Control of Transient Disturbances in a Flat Plate Boundary Layer through Active Wall Motion," *Phys. Fluids A*, Vol. 1, pp. 574~582.

(12) 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.

(13) 신성호, 전우평, 강신형, 1998, "자유유동 난류강도 변화에 따른 평판위 천이 경계층의 유동 특성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집 B권, 제22권, 제9호, pp. 1335~1348.

(14) Clauser, F. H., 1954, "Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradient," *J. Aeronaut. Sci.*, Vol. 2, pp. 91~108.

(15) Hinze, J. O., 1975, *Turbulence*, 2nd Edn., McGraw-Hill.

(16) Park, J. and Choi, H., 1999, "Effects of Uniform Blowing or Suction from a Spanwise Slot on a Turbulent Boundary Layer Flow," *Phys. Fluids*, Vol. 11, pp. 3095~3105.