

論文

평판에서 압전 세라믹 액추에이터에 의한 유동제어

김동하*, 한종섭**, 장조원***, 김학봉****

Flow Control by Piezoceramic Actuator in a flat plate

Dong-Ha Kim*, Jong-Seob Han**, Jo-Won Chang*** and Hak-Bong Kim****

ABSTRACT

An actuator using piezoceramic material was designed in order to perform a flow control for flat plate flow. Boundary layer measurements were carried out to explore the flow disturbances by the designed actuator that was activated at low excitation frequency(15Hz). The mean velocity and fluctuation in the boundary layers were measured at $x/\delta^*=31.9$ downstream from the actuator tip by a one-dimensional hot-wire probe(55P14). Results reveal that low- and high-velocity regions were observed in the vicinity of the actuator center and in the outer area of the actuator respectively, and the formation of counter-rotating streamwise vortices was predicted. The fluctuations were persistently found in the outer part of the actuator and an inflection point in the spanwise gradient of the streamwise velocity was observed. Boundary layer instability was amplified at both the actuator excitation frequency and the T-S wave frequency when the actuator was excited at low frequency.

초 록

평판 유동에서 유동을 제어하기 위하여 압전 세라믹을 이용한 액추에이터가 설계되었다. 액추에이터가 15Hz의 낮은 가진 주파수로 구동할 때, 설계된 액추에이터에 의해 발생된 유동 교란을 알아보기 위해 경계층 측정이 수행되었다. 경계층에서의 평균 유동속도와 섭동량은 액추에이터 끝단에서 $x/\delta^*=31.9$ 떨어진 하류위치에서 1축 열선프로브(55P14)로 측정되었다. 측정 결과, 속도가 느린 영역과 빠른 영역이 각각 액추에이터의 중심부근 및 바깥부분에서 관찰되었으며, 이것으로 서로 마주보며 회전하는 한 쌍의 유동방향 와류의 발생이 예측되었다. 섭동량은 액추에이터의 바깥부분에서 크게 나타났으며, 벽면근처에서 유동방향 속도의 스펜방향 변화에서 변곡점이 관찰되었다. 액추에이터가 낮은 주파수에서 구동하는 경우에는 경계층 불안정성이 액추에이터의 가진 주파수와 T-S 파동에 해당하는 주파수에서 함께 증폭된다.

Key Words : Piezoceramic actuator(압전 세라믹 액추에이터), Flow control(유동제어), Boundary layer(경계층), Flat plate(평판)

† 2009년 8월 13일 접수 ~ 2009년 10월 26일 심사완료

* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

** 정회원, 한국항공대학교 항공운항관리학과 대학원

*** 정회원, 한국항공대학교 항공운항학과

교신저자, E-mail : jwchang@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 항공대길 100

**** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

1. 서 론

평판 유동이나 유선형 물체에서 항력 감소, 천이 및 분리의 지연, 실속각 지연 등을 효과적으로 실현하기 위해 많은 유동제어 기법이 연구되어 왔다[1]. 유동제어 기법은 크게 수동제어

(passive control)와 능동제어(active control)로 나눌 수 있으며, 능동 유동제어의 한 예로, 에어포일 임의의 위치에서 이루어지는 흡입(suction)이나 용출(blowing)[2,3]을 들 수 있다. 이러한 경우 흡입이나 용출을 일정하게(steadily) 하는 것 보다는 주기적인(periodic) 형태로 하는 것이 유동제어에 더 큰 효과가 있다고 알려져 있으며[4], 이때 흡입이나 용출의 위치, 가진 주파수(excitation frequency), 흡입이나 용출되는 유동의 운동량(fluid momentum)등은 매우 중요한 요소이다.

주기적인 가진(periodic excitation)을 이용한 유동제어 방법 중 하나는 압전 세라믹(piezoceramic)을 이용한 액추에이터이다[5]. 압전 세라믹을 이용한 액추에이터는 빠른 동적 특성을 나타낼 수 있기 때문에 작은 스케일로 빠른 동적 특성을 갖고 있는 난류경계층(turbulent boundary layer)이나 층류에서 난류로의 천이(transition)를 제어하는데 매우 유리하다. 또한 이것은 경계층 내부 유동만을 이용하여 경계층을 제어하기 때문에 흡입이나 용출과 같이 외부로부터 유입이나 용출되는 유동의 운동량이 없다는 특성이 있다. 따라서 압전 세라믹을 이용한 경계층 유동제어에서 제어되기 직전의 경계층 내부의 유동 특성과 액추에이터 끝단의 변위(tip deflection), 가진 주파수 등은 유동제어에 매우 중요한 변수가 된다.

일반적으로 압전 세라믹을 이용한 액추에이터는 공동(cavity)을 포함한 형태(spring board type[6,7])와 플랩 형태(flap type[8,9])로 구분될 수 있으며, 이것은 압전 세라믹과 액추에이터 형상과의 배열에 따라 달라진다. 그 예로, Jacobson and Reynolds[6]은 압전 세라믹과 공동을 이용하여 유동방향 와류(streamwise vortices)를 발생시켜 천이지연을 수행하였고, 실린더에서 발생하는 유동방향 와류를 액추에이터에서 발생하는 와류를 이용하여 제어하였다. 또한 Seifert *et al.*[7]은 에어포일의 41% 위치에 공동을 포함한 액추에이터를 스펠방향으로 설치하고, 액추에이터 사이의 위상(phase)을 같게 하거나(2차원) 다르게(3차원)함으로써 유동을 제어하였다. 그들은 이러한 제어를 통하여 최대 양력의 20~22% 증가와 2°~4°의 실속각 지연, 항력 감소 등을 결과로 제시하였다. 한편, Jeon and Blackwelder[8]은 장착이 용이한 삼각형 플랩 형태의 압전 세라믹 액추에이터를 제작하고, 그것에 의해 발생하는 유동 교란을 평판 유동에서 조사하였다. 그들은 유동방향 평균유속의 스펠방향 변화를 관찰함으로써 항력 감소의 가능성을 예측하였으며 또한 Choi *et*

al.[9]은 Jeon and Blackwelder[8]이 사용한 액추에이터를 에어포일에 장착함으로써 분리 지연을 유도하여 최대양력을 증가시켰다.

압전 세라믹을 이용한 유동제어에 있어서 간과할 수 없는 중요한 사실은 경계층 불안정성(boundary layer instability)에 관한 것이다. 이것은 벽면근처에서 유동방향 와류에 의해 발생하는 수직방향 및 스펠방향 유속분포가 변곡점(inflexion point)을 갖는 경우에 경계층 불안정성이 크게 증가한다는 것이다[10, 11, 12]. Swearingen and Blackwelder[11]은 곡률을 갖는 시험부에서 발생하는 유동방향 와류를 가시화하고 측정하는 연구를 수행하였다. 그들은 유동방향 와류에 의해서 유동방향 유속의 수직방향 및 스펠방향 분포에서 변곡점이 나타난다는 것을 보고하였다. 또한 Choi *et al.*[13]은 난류경계층에서 항력감소를 위해 DNS(direct numerical simulation)기법을 이용하여 능동제어를 수행하였고, 스펠방향 유속(유동방향 와류제어)을 통한 유동제어가 효과적임을 제시하였다.

경계층 내부에서 이루어지는 유동제어에서 액추에이터에 의해 교란된 경계층은 교란되지 않은 경계층과 비교하여 유동방향 유속의 스펠방향 분포가 변화한다. 이러한 속도 분포는 액추에이터에 의해 교란되지 않은 경계층의 속도가 증가하거나 감소하는 것으로 나타나며, 이것으로 유동방향 와류가 발생한다. 더욱이 유동방향 유속의 스펠방향 변화는, 즉 유동방향 와류의 발생은 경계층 내부에서 불안정성과 매우 밀접하게 관계하여 난류 생성(turbulent production)에 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 유동방향 와류의 성장과 소멸을 제어함으로써 효과적으로 경계층의 천이 및 난류경계층을 제어할 수 있다.

본 연구에서는 평판에서의 경계층을 능동적으로 제어하기 위하여 압전 세라믹을 이용한 액추에이터를 설계하고 제작하였다. 액추에이터는 공동을 포함한 형태와 플랩 형태를 기본 개념으로 하여 설계, 제작되었으며 액추에이터에 의한 유동 교란을 파악하기 위해 평판에 액추에이터를 설치하고 액추에이터 끝단에서부터 일정 하류 위치에서 경계층을 측정하였다. 경계층은 압전 세라믹을 가진(excitation) 시키기 전과, 가진 시킨 후에 측정되었으며 본 논문에서는 그 차이를 연구결과로 제시하고 분석하였다.

II. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 한국항공대학교 아음속 풍동은 흡입 개방형으로 시험부 크기는

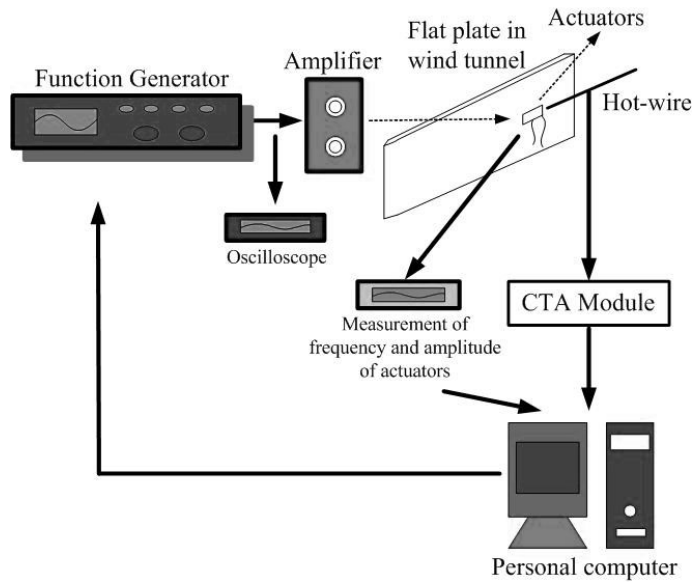


Fig. 1. Schematics of experimental setup

0.5m(H)× 0.5m(W)×1.4m(L)이며, 본 연구를 위해 길이가 1m이고 두께가 0.015m인 평판을 제작하였다. 평판은 경계층 생성에 영향을 미치는 직진성이나 표면 거칠기의 효과를 제거하여 위해서 표면 연마처리 되었으며, 3차원 유동 특성 최소화하기 위해서 양단에 끝판(end-plate)을 0.140m 높이로 부착하였다.

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로 함수발생기에서 발생된 정현파(sine wave)는 증폭기를 통해서 증폭되며, 증폭된 정현파는 -30V에서 +30V까지 변화하고 이것은 평판에 부착된 액추에이터를 구동시킨다. 이때 액추에이터 끝단의 변위(tip displacement)는 비접촉식 변위센서(HA-80S, SENTEC社)와 변환기(Transducer, LS-500-2A, SENTEC社)에 의해서 측정되었다. 본

실험에서 사용된 비접촉식 변위센서는 거리 0~2mm사이에서 0~2V까지 선형적인 전압을 출력하며, 실험 중에 액추에이터 끝단의 변위는 오실로스코프로 관찰되었다.

Fig. 2는 본 연구에서 설계, 제작된 압전 세라믹 액추에이터를 나타내고 있다. 이러한 액추에이터는 평판에서 장착 및 탈착을 쉽게 할 수 있도록 모듈형식으로 제작되었다. 압전 세라믹은 PI社의 Multilyaer Piezo Bender Actuators(PL128.10)를 이용하였으며, 크기는 35.5mm(L)×6.3mm(W)×0.75mm(T)이다. 이것은 입력 전압에 따라 단방향(uni-morf) 또는 양방향(bi-morf)으로 움직임이 가능한 압전 세라믹으로 본 연구에서는 양방향으로 움직일 수 있도록 전압을 입력하였다. 액추에이터 윗면에 0.1mm의

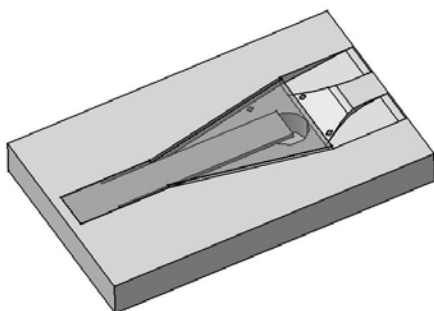


Fig. 2. Piezoceramic actuator

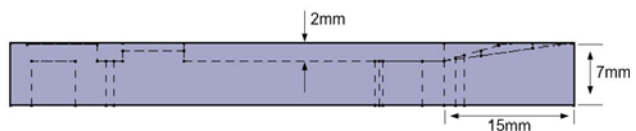


Fig. 3. Side view of piezoceramic actuator

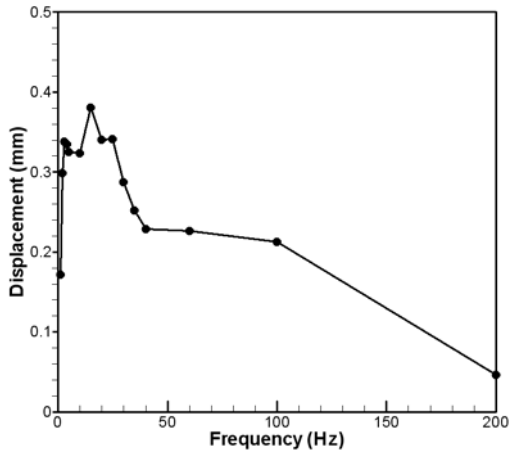


Fig. 4. Tip displacement of the Piezoceramic actuator vs actuator frequency

강판을 부착하였고 액추에이터의 총 두께(강판+압전 세라믹+접착제)는 약 1.0mm 정도이다. 이러한 형태의 압전 세라믹 액추에이터는 외팔보(cantilever) 형태로 정현파를 입력해 주면 액추에이터가 1차 진동모드로 움직이게 된다. 전체적인 액추에이터 모듈의 형상은 경계층 내부에서 평균 속도와 섭동량이 스펙방향으로 변화할 수 있도록 간단한 유동 해석 프로그램을 이용하여 예측하고 설계하였다. 액추에이터의 모듈은 아크릴로 3차원 정밀 가공하였으며, 강판과 액추에이터의 모듈 사이의 간격은 0.6mm로 설계하였지만 제작 결과 0.5mm~0.6mm 사이가 되었다. Fig. 3은 액추에이터의 측면도를 나타내고 있다. 액추에이터 끝단의 위치는 평판 앞전(leading edge)부터 0.635m 위치에 장착되었다. 본 연구에서 시험부 자유흐름 속도는 4.0m/s이며, 이 때 액추에이터 끝단의 위치에 대한 레이놀즈수는 약 1.6×10^5 이다.

Fig. 4는 제작된 액추에이터에서 진동수에 따른 액추에이터 끝단의 변위를 나타낸 것이다. 액추에이터 끝단의 변위는 약 15Hz 부근에서 390 μm 로 가장 크게 나타났으며, 진동수가 증가할수록 끝단의 변위는 감소하는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서 액추에이터는 15Hz에서 구동되도록 하였다.

본 연구에서는 액추에이터의 유동 교란을 측정하기 위해서 Dantec社의 1축 열선풍속계(Hot-wire anemometer, 55P14)가 이용되었다. 샘플링 주파수는 10KHz이며, 65,536개의 데이터를 샘플링 하였다. 경계층 측정은 액추에이터 끝단부터 약 60mm 위치에서 수행되었으며, 스펙방향

(z-방향)으로 2.5mm간격의 13위치, 수직방향(y-방향)으로 $0 < y \leq 3.0$ 에서 0.1mm 간격, $3.0 < y \leq 5.0$ 에서 0.2mm 간격, $5.0 < y \leq 10.0$ 에서 0.5mm 간격, $10.0 \leq y \leq 15.0$ 에서 1.0mm 간격으로 측정하였다. 따라서 유동방향 속도는 y-방향으로 총 56곳이 측정되었으며, 측정 단면에서 총 728곳이 측정되었다. 열선풍속계의 1축 열선의 이송은 최대 정밀도가 0.01mm인 2축 자동이송장치를 이용하여 수행되었다.

본 연구에서는 낮은 속도 범위에서 발생하는 열선프로브의 불확실성을 줄이고자 반복교정을 하였으며, 실험속도를 중심으로 17~19개의 속도 위치에서 교정하여 4차 다항식으로 피팅(fitting)하였다. 열선풍속계를 이용해서 경계층을 측정할 때 열선프로브 프롱(prong)의 두께로 인하여 처음 측정위치는 벽면에서 얼마간 떨어지게 된다. 본 연구에서 그 높이는 약 0.2mm이었으며, 이것은 결과에서 보정되었다. 또한 $y \leq 0.4\text{mm}$ 구간에서 측정된 데이터는 벽면근처에서 발생하는 열선프로브(Hot-wire probe)의 열전달 효과와 낮은 속도 때문에 데이터의 불확실성이 크므로 본 논문의 연구결과로 제시되지 않았다. 본 논문의 결과로 제시된 데이터에서 1축 열선프로브의 불확실성은 3.2% 미만이다. 본 연구에서 사용된 아음속 풍동에서 자유흐름속도에서의 난류강도는 0.4% 미만이고, 실험이 진행되는 동안 자유흐름 속도의 변화량은 1% 미만이었다. 본 연구에서 1축 열선프로브의 위치오차는 1% 미만이다.

III. 결과 및 검토

압전 세라믹을 이용한 액추에이터에 관한 연구에서 압전 세라믹은 작은 진폭과 상당히 큰 진동수의 조건에서 구동함으로써, 벽면근처의 작은 스케일로 이루어진 평균 유동장 및 섭동량을 제어한다. 사실, 액추에이터는 평균 유동장을 비롯하여 섭동량에도 영향을 미치게 된다. 즉 평균 유동장은 액추에이터에 의해 발생된 와류와 같이 큰 스케일의 유동 구조에 의해서 영향을 받게 되고 유동의 섭동량은 액추에이터의 가진에 의해서 영향을 받게 된다. 그러므로 액추에이터가 없을 때 측정된 유동을 평균 유동과 섭동량으로 나누어 $u_1 = \bar{U} + u'$ 라 한다면 액추에이터가 구동되었을 때의 속도는 압전 세라믹 액추에이터에 의해 교란된 유동을 포함하여 $u_2 = \bar{U} + \Delta \bar{U}_{pertu} + u' + \Delta u'_{pertu}$ 라 정의할 수 있다[6,8]. 따라서 액추에이터에 의해 교란된 유동을 관찰하기 위해 측정

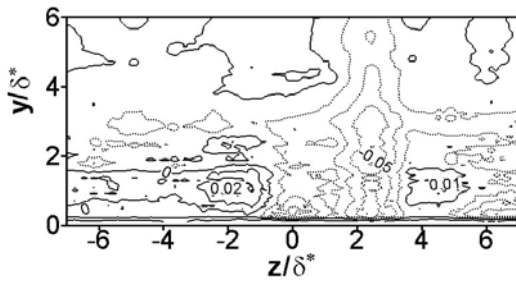


Fig. 5. $\Delta \bar{U}/U_{\infty}$ at $x/\delta^* = 31.9$

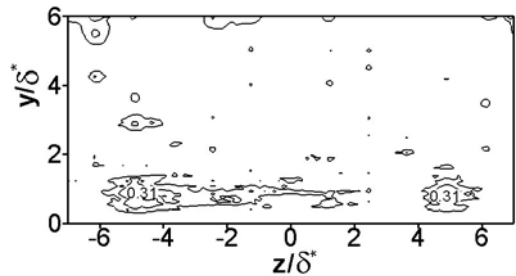


Fig. 6. $\Delta u'_{rms}/U_{\infty}(\%)$ at $x/\delta^* = 31.9$

된 두 유동장의 차를 $u_2 - u_1 = \Delta \bar{U}_{pertu} + \Delta u'_{pertu}$ 과 같이 구하였다. 유동은 먼저 액추에이터가 장착되지 않은 상태에서 액추에이터 끝단의 위치에서 측정 되었으며, 이때 경계층 두께 (boundary layer thickness)는 약 8.5mm, 배제 두께(displacement thickness)는 약 $\delta^* = 2.04\text{mm}$ 이었고, 이것은 본 논문에서 제시된 결과에서 측정 위치를 무차원화 하는 기준으로 사용되었다[6].

Fig. 5와 6은 각각 액추에이터 끝단에서부터 $x/\delta^* = 31.9$ 떨어진 위치에서 액추에이터에 의해 교란된 평균 유동의 변화($\Delta \bar{U}/U_{\infty}$)와 섭동량($\Delta u'_{rms}/U_{\infty}(\%)$)의 변화를 등고선 형태(contour)로 표현한 것이다. 그림에서 벽면에서부터 수직 방향인 y와 스펙방향인 z는 액추에이터 끝단에서의 배제 두께(δ^*)로 무차원화 되었다. 각 그림에서 평균 유동과 섭동량의 변화는 액추에이터의 제작 오차로 인하여 비대칭적인 속도분포를 나타내고 있다.

Fig. 5는 액추에이터에 의해서 교란된 평균 유동의 변화($\Delta \bar{U}/U_{\infty}$)를 나타낸 것으로 액추에이터의 중심부근에서는 기존 경계층과 비교하여 속도가 감소하는 구간이 발생되었으며 이것의 크기는 최대 5% 정도이다. 또한 액추에이터의 바깥 부분에서는 속도가 최대 2% 만큼 증가하는 구간

이 관찰되었다. 이러한 속도분포는 공동을 이용한 액추에이터를 제작하고 LDV를 이용하여 경계층 속도분포를 측정된 Jacobson and Reynolds[6]의 결과와 유사하다. 이때 감소된 속도 구간에서의 흐름은 벽면에서 멀어지며, 증가된 속도 구간에서의 흐름은 벽면으로 가까워지게 된다. 이것은 하나의 흐름맥(streak)을 형성하며 본 연구에서는 서로 마주보며 회전하는 유동방향 와류(counter-rotating vortices)가 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 경계층 내에서 액추에이터의 의해 변화된 유동의 섭동량(fluctuations, $\Delta u'_{rms}/U_{\infty}(\%)$)을 나타낸 것이다. 섭동량은 액추에이터가 장착되지 않은 경우와 비교했을 때 벽면 가까운 부근에서 최대 0.3% 정도 증가하였으며, 특히 액추에이터 스펙방향 양 끝단에서 크게 나타난 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 압전 세라믹 윗면에 장착된 강판의 유연성(flexibility)으로 인해 액추에이터 끝단의 변위가 스펙방향을 기준으로 중심부근보다 양 끝단에서 더 크게 나타나기 때문이다. Fig. 5와 6에서 평균속도의 증가와 섭동량의 증가는 비슷한 위치, 즉 액추에이터 바깥부분에서 이루어지고 있으며, 평균속도가 감소한 영역에서는 섭동량의 증가량도 크지 않음을 관찰할 수 있다. 본 연구에서 액추에이터가 구동한 후에 유속의 신호형태는 액추에이터가 구동되기 전의 신호에서 정현파의 형태가 중첩되어 나타났으며, 이것은 액추에이터의 가진에 의해 유동이 정현파의 형태로 변화한다는 것을 의미한다. 본 논문에서는 액추에이터의 끝단 변위가 상대적으로 큰 양 끝단에서, 중첩된 정현파에 의해서 섭동량이 증가하였고 액추에이터의 형상과 발생된 와류에 의해서 평균유동이 변화한 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 섭동량은 액추에이터의 변위와 진동수가 크지 않기 때문에 큰 에너지를 갖지 못하므로 액추에이터 후방의 가까운 하류에서 경계층 유동의 점성에 의해서 빠르게 소멸된다. 이러한 결과는 Jacobson and Reynolds[6]와 Jeon and Blackwelder[8]의 연구 결과에서도 관찰할 수 있다. 그러나 섭동량이 갖는 에너지는 액추에이터의 진동수와 끝단 변위에 따라 달라질 수 있기 때문에 실제 에어포일에 적용하기 위해서는 액추에이터의 변위가 상당히 커야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 나타나는 유동방향 속도 및 섭동량의 변화는 매우 최소한 결과로 볼 수 있다. 그것은 액추에이터에 의해 교란된 유동이 여러 가지 요소(액추에이터의 배열, 진동 진폭, 진동 주

파수, 초기 유동 특성, 측정된 하류 위치 등)에 의해 영향을 받기 때문이다. Jacobson and Reynolds[6]의 결과에서는 유동방향 속도 및 섭동량의 변화량은 최대 $\Delta \bar{U}/U_\infty=0.2$ (증가부분), -0.4 (감소부분)이고 $\Delta u'_{rms}/U_\infty(\%)=4\%$ 정도였으며 이것은 본 논문의 결과에 비해 10배 정도 크다. 이것은 본질적으로 본 논문에서 액추에이터의 진동수가 그들의 조건에 비해 매우 작기 때문이다. 액추에이터 끝단의 속도는 $u_{A,V} = \omega A = 2\pi f A$ (A : 끝단 진폭; peak to peak)[7]과 같이 정의할 수 있는데 그들의 연구에서 진폭은 $130\mu m$, 진동수는 330Hz로 액추에이터 끝단의 속도는 약 0.135m/s이다. 그러나 본 연구에서는 약 0.019m/s로 그들의 결과에 비해 약 1/7 정도로 작다. 또한 액추에이터에 의해 교란된 유동은 하류로 가면서 경계층의 점성에 의해 소산되는데 본 논문에서 제시된 결과의 측정 위치는 Jacobson and Reynolds[6]($\Delta \bar{U}/U_\infty$ 는 $x=10.8mm$ 에서, $\Delta u'_{rms}/U_\infty(\%)$ 는 $x=27mm$ 이내)의 경우보다 먼 하류이고 이것은 그들의 결과와 비교하여 본 논문의 결과 크기가 작다는 것을 의미한다. 따라서 본 논문의 결과는 이미 발표된 연구결과를 통해 신뢰성을 확인할 수 있으며, 또한 액추에이터의 끝단 속도가 평균 유동과 섭동량의 변화에 매우 중요한 요소임을 알 수 있다. Fig. 7은 $x/\delta^*=31.9$, $z/\delta^*=4.9$ 위치에서 난류강도(turbulence intensity, $u'_{rms}/U_\infty(\%)$)를 액추에이터를 구동시켰을 때와 구동시키지 않았을 때로 구분하여 나타낸 것이고, y 축은 벽면에서부터 실제 높이를 나타낸다. 액추에이터를 구동하지 않은 경우에 난류강도는 1mm~2mm에서 피크치

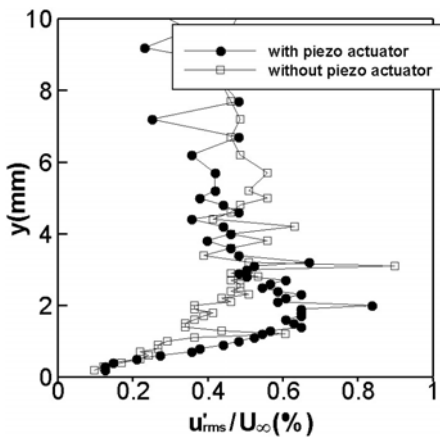


Fig. 7. Turbulence intensity($x/\delta^*=31.9$, $z/\delta^*=4$)

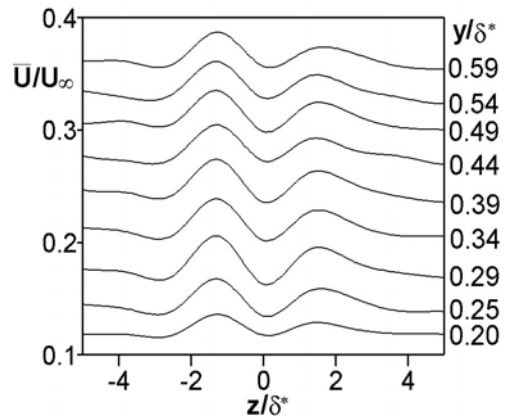


Fig. 8. Variation of \bar{U}/U_∞ along z -direction(with piezo actuator)

가 발생하고 3mm~5mm에서 데이터의 흩어짐(scatter)이 발생하는 것으로 보아 층류에서 난류로 천이 되는 과정에 있는 것을 알 수 있다. 사실 이것은, 액추에이터를 구동시키지 않았을 때 액추에이터 후방 쪽에 놓인 형상에 의해 유동이 교란되기 때문이다(Figs. 2와 3 참조). 액추에이터가 구동된 후에 난류강도는 2mm 부근에서 최대 0.8%까지 증가하였으며, 벽면 가까운 위치에서 피크치를 나타낸 것으로 보아 경계층이 액추에이터를 구동시키지 않았을 때보다 난류경계층에 가까운 유동 특성을 나타낸다고 볼 수 있다. 이것은 액추에이터의 가진에 의해 섭동량이 국부적으로 증가하였음을 보여주고 있으며, 속도 분할(velocity decomposition)에서 나타난 $\Delta u'_{pertu}$ 의 크기를 나타내고 있다.

Fig. 8은 액추에이터가 구동되고 있는 경우에 벽면근처에서 유동방향 속도의 스펙트럼 방향 변화를 나타낸 것이다. Fig. 8에서는 액추에이터 의한 유동 교란이 작고 열선프로브의 측정 위치 오차에 의해서 유동방향 속도의 스펙트럼 방향 변화의 크기 작고 비대칭적인 특성을 나타내고 있다. Fig. 8에서 나타낸 유동방향 속도의 스펙트럼 방향 변화는 벽면에서부터 y/δ^* 가 증가하면서 서서히 증가하다가 $y/\delta^*=0.3$ 부근에서 최대가 되며, 다시 y/δ^* 가 증가하면서 유동방향 속도의 스펙트럼 방향 변화는 감소한다. 이것은 유동방향 속도의 스펙트럼 방향 변화가 y -방향을 따라서 변화할 때, 유동방향 와류의 중심으로 가면서 증가하고 다시 중심부근에서 멀어질수록 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 유동방향 속도의 스펙트럼 방향 변화를 토대로 벽면에서부터 유동방향 와류의 중심이 약 y/δ^*

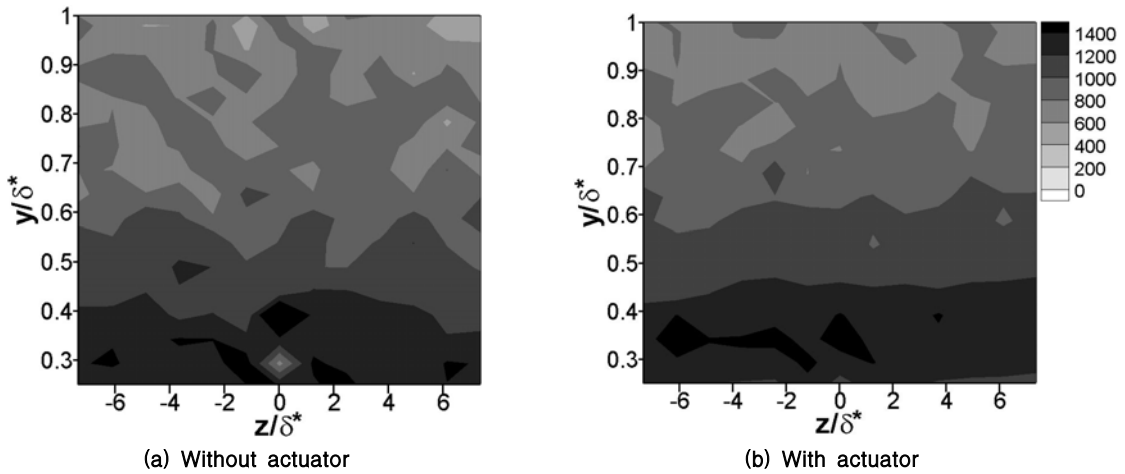


Fig. 9. Streamwise velocity gradient in the y -direction ($d\bar{U}/dy$)

$=0.3$ 부근임을 예측할 수 있다. 또한 유동방향 속도의 스펠방향 변화는 액추에이터의 중심부근에서 속도가 감소하고 바깥부분에서 증가함으로써 $-2 < z/\delta^* < 2$ 사이에서 변곡점(inflexion point)을 갖는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 변곡점의 발생은 경계층 내에서 불안정성을 증폭시키는 역할을 하게 된다[11].

Fig. 9는 유동방향 속도의 y -방향으로의 변화 ($d\bar{U}/dy$)를 액추에이터가 구동하지 않을 때(Fig. 9a)와 액추에이터가 구동했을 때(Fig. 9b)를 나타낸 것이다. 각 그림에서 $d\bar{U}/dy$ 의 크기는 Fig. 9b의 오른쪽 상단에 나타난 바와 같이 적용되었다. 본 연구에서 열선프로브로 경계층을 측정할 때 벽면근처에서 정확한 데이터를 획득하기 위해 많은 노력을 기울였으나 실제로 벽면($y=0$)에서부터 $y=0.4\text{mm}$ 까지의 데이터는 불확실성이 상당히 크다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 Fig. 9에서 나타내고 있는 $d\bar{U}/dy$ 는 벽면에서 평균속도를 0이라고 가정한 후 $y=0.5\text{mm}$ 에서부터 측정된 데이터를 이용하였다.

Fig. 9a에서 액추에이터가 구동하는 않는 경우에 $d\bar{U}/dy$ 의 크기는 벽면근처에서 1200~1400정도이며 이것은 Blasius Profile로부터 도출된 크기(850 at $y=0$)보다 크며 난류경계층에서 도출된 크기(2415 at $y=0$)보다는 작다. 이것은 경계층이 평판 내에서 천이 과정에 있음을 보여주고 있다. 특히 액추에이터가 구동하지 않더라도 유동은 액추에이터 형상에 의해서 교란되기 때문에 Fig. 9a에서와 같이 스펠방향의 변화에서 데이터의 흠여짐이 관찰된다. 액추에이터가 구동하는 경우를

나타내는 Fig. 9b에서는 액추에이터가 구동하지 않은 경우에 비해, 전단력의 스펠방향 변화가 상대적으로 안정되어 있다. 또한 전체적으로 전단력이 크게 작용하는 구간(high shear rate region)이 벽면에서부터 멀어진 것을 볼 수 있다. 일반적으로 $C_f \approx (d\bar{U}/dy)_{y=0}$ 이고 $(d\bar{U}/dy)_{\max}$ 인 y 가 증가하였다는 것은 정성적으로 C_f 가 감소하였음을 의미한다. Choi *et al.*[13]은 스펠방향 유속을 제어함으로써 유동제어 결과를 보였는데, 이때 전단이 큰 구간이 벽면에서 멀어짐으로써 항력을 감소시킬 수 있다고 하였다. 본 연구에서도 유사한 결과가 관찰되었고 이것은 전단력이 큰 구간이 유동방향 와류에 의해서 벽면에서 멀어진 것으로 판단된다.

Fig. 10은 액추에이터를 구동하였을 때와 구동

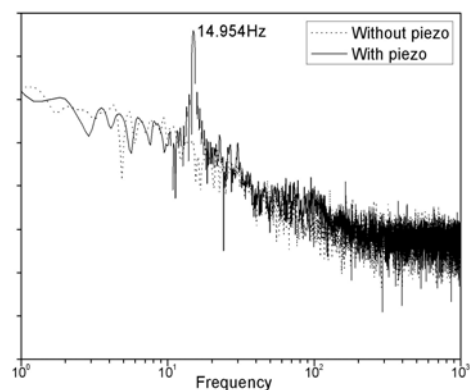


Fig. 10. Power spectrum at $x/\delta^*=31.9$, $y/\delta^*=0.83$, and $z/\delta^*=-4.9$

하지 않았을 때, 섭동량의 변화량이 가장 큰 위치($x/\delta^*=31.9$, $y/\delta^*=0.83$, $z/\delta^*=-4.9$)에서 섭동량의 파워 스펙트럼(power spectrum)을 나타낸 것이다. 액추에이터를 장착하지 않았을 때의 파워 스펙트럼은 전체 주파수 영역에서 뚜렷한 불안정성은 관찰되지 않았고 전반적으로 층류 유동의 특성과 유사하게 나타났다. 그러나 15Hz로 액추에이터를 구동했을 경우에 15Hz 부근에서 유동의 특성주파수가 검출되는 것을 볼 수 있으며, 또한 15Hz 부근 이외에 약 100Hz 부근에서 스펙트럼이 증가하는 것을 관찰 할 수 있다. 100Hz 부근에서 스펙트럼의 증가는 경계층 내부의 존재하는 T-S 파동(Tollmien-Schlichting wave)에 해당하는 것으로 판단된다. 이것은 T-S 파동보다 낮은 주파수로 교란 될 때, 가진 주파수 이외에 T-S 파동에 해당하는 주파수에서도 불안정성이 증폭된다는 것을 의미한다. 그러나 대부분의 선행연구[6,8]에서는 T-S 파동 이상에서 액추에이터를 가진 하였는데 이 경우에는 T-S 파동 부근에서의 불안정성은 나타나지 않았다. 이것은 T-S 파동보다 크게 액추에이터를 구동시켰을 경우에는 T-S 파동에 해당하는 주파수에서 불안정성은 나타나지 않았음을 의미한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 압전 세라믹을 이용하여 액추에이터 모듈을 설계, 제작하고 평판 유동에 적용한 후, 액추에이터에 의해 발생하는 유동 교란을 파악하기 위해서 액추에이터의 끝단에서부터 $x/\delta^*=31.9$ 떨어진 하류위치에서 경계층을 측정하였다.

본 연구를 수행한 결과, 속도 변화의 크기가 작지만 액추에이터의 중심부근에서 속도가 감소하고 액추에이터의 바깥부분에서는 속도가 증가하는 구간이 관찰되었으며, 이것은 서로 마주보며 회전하는 한 쌍의 유동방향 와류의 발생을 의미한다. 이때 벽면근처에서 유동방향 속도의 스펙트럼 방향 변화에서 변곡점이 관찰되었고, 교란된 유동에서 섭동량은 전반적으로 액추에이터의 스펙트럼 양 끝단에서 크게 나타났다. T-S 파동(Tollmien-Schlichting wave)보다 낮은 주파수로 액추에이터를 진동시킬 경우, 액추에이터의 가진 주파수(excitation frequency) 이외에 경계층 고유의 T-S 파동에서 불안정성이 증가하였다.

향후 액추에이터를 다양한 진동수에서 구동시킨 결과를 관찰하고 분석할 예정이며 또한 에어

포일에 적용하여 항력 및 양력의 변화를 조사할 예정이다.

후 기

이 논문은 2007년도 한국항공대학교 교비지원 연구비에 의하여 지원된 연구의 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사를 표합니다.

참고문헌

- 1) Gad-el-Hak, M., "Modern developments in flow control", *Appl. Mech. Rev.* Vol. 49, 1996, pp. 365-379.
- 2) Seifert, A., Bachar, T., Koss, D., Shepshelovich, M., and Wygnanski, I., "Oscillatory Blowing: A Tool to Delay Boundary-Layer Separation", *AIAA Journal*, Vol. 31, 1993, pp. 2052-2060.
- 3) Seifert, A., Darabi, A., and Wygnanski, I., "Delay of Airfoil Stall by Periodic Excitation", *Journal of Aircraft*, Vol. 33, 1996, pp. 691-698.
- 4) Greenblatt, D. and Wygnanski, I. J., "The control of flow separation by periodic excitation", *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 36, 2000, pp. 487-545.
- 5) Wiltse, J. M. and Glezer, A., "Manipulation of free shear flows using piezoelectric actuators", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 249, 1993, pp. 261-285.
- 6) Jacobson, S. A., and Reynolds, W. C., "Active control of streamwise vortices and streaks in boundary layers", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 360, 1998, pp. 179-211.
- 7) Seifert, A., Eliahu, S., and Wygnanski, I., "Use of Piezoelectric Actuators for Airfoil Separation", *AIAA Journal*, Vol. 36, 1998, pp. 1535-1537.
- 8) Jeon, W. P., and Blackwelder, R. F., "Perturbations in the wall region using flush mounted piezoceramic actuators", *Experiments in Fluids*, Vol. 28, 2000. pp. 485-496.
- 9) Choi, J., Jeon, W. P., and Choi, H. C., "Control of Flow Around an Airfoil Using Piezoceramic Actuators", *AIAA Journal*, Vol. 40, 2002, pp. 1008-1010.
- 10) Orlandi, P., and Jimenez, J., "On the generation of turbulent wall friction", *Physics of*

Fluids, Vol. 6, 1994, pp. 634-641.

11) Swearingen, J. D., and Blackwelder, R. F., "The growth and breakdown of streamwise vortices in the presence of a wall", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 182, 1987, pp. 255-290.

12) Blackwelder, R. F., "Analogies between

transition and turbulent boundary layers", *Physics of Fluids*, Vol. 26, 1983, pp. 2807 -2815.

13) Choi, H, Moin, P., and Kim. J., "Active flow control for drag reduction in wall-bounded flows", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 262, 1994, pp. 75-110.