

# 압전세라믹 액추에이터를 이용한 익형 후류 제어

최진\* · 전우평\*\* · 최해천\*\*,\*  
(2000년 3월 24일 접수)

## Control of Flow Around an Airfoil Using Piezo-Ceramic Actuators

Jin Choi, Woo-Pyung Jeon and Haecheon Choi

**Key Words:** Piezo-Ceramic Actuator(압전세라믹 액추에이터), Airfoil(익형), Lift(양력), Drag(항력), Figure of Merit(성능비)

### Abstract

The objective of this study is to increase lift and decrease drag of an airfoil at high angles of attack by delaying flow separation with piezo-ceramic actuators. The airfoil used is NACA 0012 and its chord length is 0.3m. An experiment is performed at the freestream velocity of 15m/s at which the Reynolds number based on the chord length is  $3 \times 10^5$ . Seven rectangular actuators are attached to the airfoil surface and move up and down based on the electric signal. Drag and lift are measured using an in-house two-dimensional force-balance and the surface pressures are also measured. At the attack angle of  $16^\circ$ , the separation point is delayed downstream due to momentum addition induced by the movement of the actuators. Lift is increased by 10%, drag is reduced by 37%, and the efficiency is increased up to 170%. The flow fields with and without control are visualized using the smoke-wire and tuft techniques.

### 기호설명

$A$  : 익형의 평면도 면적  
 $C$  : 익형의 코드 길이  
 $C_D$  : 항력계수  
 $C_E$  : 에너지 부차원 수  
 $C_L$  : 양력계수  
 $C_p$  : 압력계수  
 $D$  : 항력  
 $FM$  : 성능비  
 $L$  : 양력

$Re$  : 레이놀즈 수  
 $U_\infty$  : 자유유동 속도  
 $W$  : 액추에이터 구동 에너지  
 $x$  : 주유동 방향 좌표

그리스문자  
 $\alpha$  : 영각  
 $\eta$  : 성능  
 $\rho$  : 밀도

### 1. 서론

\* 회원, 서울대학교 대학원  
\*\* 회원, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소  
난류제어연구단  
\*\*\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부  
E-mail : choi@socrates.snu.ac.kr  
TEL : (02)880-8361 FAX : (02)878-3662

익형 주위의 유동은 유체역학의 응용에 있어서 가장 중요한 유동 중 하나로 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔다. 그리고 익형의 유체역학적 성능을 향상시키고자 익형 주위 유동 제어에 관한 많은 시도가 있었는데 1990년 Gad-el-Hak<sup>(1)</sup>은 난류 발생기, 와류발생기, 리블렛 등을 이용한 다

## 2. 실험 장치 및 방법

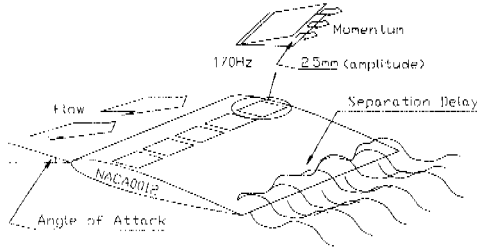


Fig. 1 Schematic of the experiment

양한 익형 유동제어 방법을 정리, 제시하였다.

이러한 방법 이외에 많이 쓰이는 방법은 익형 위에 형성되는 경계층 유동에 운동량을 공급하여 유동박리를 방지하거나 박리점을 지연시키고자 하는 것인데 Wygnanski<sup>(2)</sup>는 정상상태의 분사 방식(steady blowing)보다 주기적 상태의 분사 방식(oscillatory blowing)이 경계층 유동의 제어에 더 큰 효과를 준다고 주장하였으며 현재 이에 따른 연구가 많이 수행되고 있다. Seifert 등<sup>(3)</sup>은 주기적 분사를 생성하는 액추에이터를 이용하여 익형 성능 향상의 가능성을 보여주었다. 그러나 그들이 사용한 액추에이터는 구동 에너지가 많이 소요되었으며 또한 익형의 내부에 액추에이터를 설치해야만 하는 불편함이 있었다. Smith 등<sup>(4)</sup>은 작은 입력에너지로 작동되는 압전세라믹을 이용하여 합성제트(Synthetic Jet)를 개발하였으며 이를 익형 유동 제어에 사용하였다. 제어결과 약 50% 이상의 양력 증가를 얻었으나 실험에 사용된 익형이 실제 형상과는 크게 다른 단순화된 모델이었기 때문에 실제 응용상의 한계를 보여주었다. Seifert 등<sup>(5)</sup>도 압전세라믹을 이용하여 익형유동을 제어하였는데 여전히 액추에이터 설치시에 익형을 가공해야 한다는 단점이 있다. 즉 기존의 익형에 2차원 흡을 가공해야하는 불편함이 있고, 익형의 제작시에 미리 이를 감안하여 만든다고 하여도 익형의 구조역학상에 문제점을 야기할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 적은 에너지를 소모하는 압전세라믹 액추에이터를 직접 익형 표면에 부착하여 구동시킴으로써 보다 용이하게 익형의 성능을 향상시키고자 한다. 특히 큰 양력을 얻을수 있는 임계각 부근의 큰 영역에서 유동제어 효과를 극대화하는 것이 본 실험의 주된 목적이다.

본 실험에서는 압전세라믹 액추에이터를 익형 표면에서 작동시킴으로써 박리전 경계층에 운동량을 부가함으로써 유동 박리를 지연시키고자 한다. 실험장치의 개요도는 Fig. 1과 같다. 익형 흡입면의  $x/C=0.4$ 에 압전세라믹 액추에이터를 부착한 후 정현파의 전기적 신호로 구동시키면 운동량이 경계층내부에 전달된다. 액추에이터 자체에서 나오는 운동량은 크지 않지만 역압력구배로 보다 작아진 벽근처 경계층의 운동량에 비하면 큰 양이므로 유동 박리를 지연시키는 역할을 한다. 압전세라믹 액추에이터는 익형에 부착시 접촉체로 단순히 접촉할 수 있어 설치가 쉽고 입력 에너지 또한 작다는 장점이 있다.

### 2.1 풍동

본 연구에 사용된 풍동은 저속, 분출식, 개방형 풍동이다. 사용된 송풍기는 원심형으로 11kW의 전동기에 의해 구동되며 정격 회전수는 1150rpm 이고 최대 속도는 25m/s이다. 실험은 자유유동속도 15m/s에서 실행되었으며 이 속도에서 평균속도 균일도와 주유동 난류강도는 각각 0.5%, 0.1% 이하였다. 실험부의 크기는 가로 0.6m, 세로 0.3m, 길이 3m이다.

### 2.2 익형

익형은 폭 0.29m, 코드길이 0.3m의 NACA0012로 알루미늄 합금으로 제작하였다. 제작시 NC-공작기계를 이용하였는데 이를 위하여 250여개의 좌표를 사용하였다. 익형은 양력과 항력의 측정을 용이하게 하고 차폐효과를 줄이기 위하여 시험부에 수직으로 세워져 설치하였다. 설치시에는 풍동시험부의 벽면과의 간섭을 줄이기 위해서 익형과 위 아래 벽면 사이에 각각 5mm의 간격을 두었다. 익형표면의 압력을 측정하기 위하여 익형의 중앙부에 지름 0.5mm의 압력공을 제작하였다. 모든 압력공은 익형의 표면에 수직으로 가공하였다. 총 49개로 되어 있는 중앙 압력공은 주유동 방향으로  $x/C=0, 0.0033, 0.01, 0.02, 0.033, \dots$  등에 위치하며, 익형선단(leading edge) 부근에서는 급격한 국소압력변화를 정밀하게 측정하기 위하여 압력공의 간격을 촘촘히 하였다.

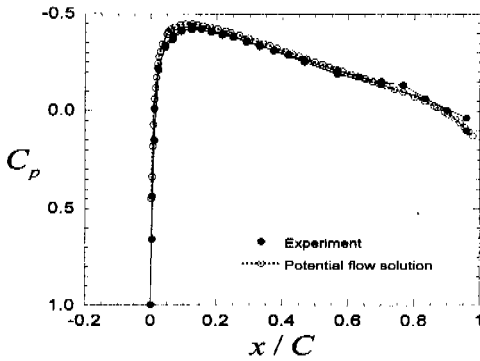


Fig. 2 Pressure coefficients at  $\alpha=0^\circ$

가공된 익형 형상의 정밀도를 알아보기 위하여 영각  $0^\circ$ 에서 측정된 압력과 시험부 양쪽 벽의 차폐효과를 고려하여 패널방법으로 계산한 포텐셜 유동에서의 압력을 Fig. 2와 같이 비교하였다. 측정된 값이 계산값과 잘 일치하는 것으로 보아 익형 형상이 정밀하게 가공되었으며 익형이 영각  $0^\circ$ 로 정확하게 풍동 시험부에 설치되었음을 확인할 수 있었다.

한편 본 실험이 실시된 레이놀즈수  $3 \times 10^5$ 에서는 영각이  $6 \sim 10^\circ$ 일 경우 층류경계층은 역압력구배를 이기지 못하고 층류박리를 일으켜 선단박리기포(leading-edge separation bubble)를 형성한다. 그러나 영각이  $10^\circ$ 이상일 경우 선단에서부터 실속(stall)이 발생하여 액추에이터에 의한 제어가 효과를 볼 수 없게 된다. 따라서 익형에 후단박리(trailing-edge separation)를 발생시키기 위하여 목걸이 모양의 체인으로 구성된 트립(trip)을 익형 선단 부근에 설치하여 난류경계층이 발생하게 하였다. 트립(trip) 높이는 2mm이며 설치위치는 압력면의  $x/C = 0.003$ 에 설치하였다.

### 2.3 2차원 힘 측정장치

본 실험의 목적은 익형의 유체역학적 성능을 향상시키고자 하는 것이므로 익형이 받는 양력과 항력을 정밀하게 측정하는 것이 중요하다. 이들의 측정을 위하여 2차원 힘 측정장치를 자체 설계, 제작하였다. 양력과 항력은 로드셀(BCL-20L, Cass)에서 나오는 신호를 strain amplifier(2310, Measures Group)에서 증폭한 다음 컴퓨터로 읽어서 측정하였다. 로드셀 자체의 오차 범위는 0.03% 이하이며, 양력과 항력의 상호 간섭을 줄이

기 위해 마찰계수가 매우 작은(0.0006~0.0012) 베어링을 사용하여 각 로드셀이 매우 작은 마찰로 원하는 방향으로만 변위를 일으킬 수 있도록 설치하였다. 측정된 양력과 측정된 익형 표면 압력을 적분하여 구한 값과의 오차는 모든 영역에서 1% 이내였다. 그러나 항력의 경우 그 값이 양력에 비해 1/30~1/5배가 되므로, 베어링 마찰을 고려하면 로드셀에 의한 항력 측정의 오차는 3%~0.5%로 추산된다.

### 2.4 액추에이터

사용된 액추에이터는 Piezo System 회사의 제품으로 크기  $38\text{mm} \times 38\text{mm}$ , 두께 0.13mm의 강철판에 유니모프(uni-morf) 압전세라믹판이  $38\text{mm} \times 19\text{mm}$ 의 크기로 부착되어 있다. 양과 음전압이 반복되는 정현파의 전기신호가 세라믹판에 입력되면 액추에이터의 끝단은 외팔보처럼 진동을 가지고 정현파의 형태로 움직인다.

한편 일정한 제곱평균근(root mean square) 입력 전압에서 주파수에 따른 액추에이터의 변위특성은 액추에이터의 설치방법에 따라 달라질 수 있다. 액추에이터의 변위특성은 세라믹 바닥면이 벽면에 부착된 면적과 액추에이터와 바닥면과의 거리, 그리고 접촉계의 종류에 따라 민감하게 달라진다. 액추에이터와 바닥면의 거리가 클 경우는 그 진동폭이 6mm에 이른다고 알려져 있다. 그러나 바닥면과 액추에이터 사이의 거리가 가까워질수록 액추에이터의 진폭은 작아진다. 또 접촉시에 그 접촉단면을 크게 하면 공진주파수가 더욱 커지지만 그만큼 진동 폭은 줄어든다.

한편 액추에이터를 익형 면에 견고히 부착하여 오랜 시간동안 그 작동 특성이 유지되도록 하는 것이 중요하다. 또한 손상되기 쉬운 고가의 액추에이터를 다시 사용하기 위해서는 쉽게 이탈시킬 수 있는 방법이 요구된다. 여러번의 예비실험을 통해 본 연구자들은 Elmer's Glue라는 접촉제와 다공성 종이 가 가장 효과적이라는 것을 알게 되었다. 본 실험에서는 세라믹 선단에서 5mm 길이 만큼을 두께가 0.5mm되는 종이에 부착하였으며 이 종이의 다른 면을 익형 표면에 부착하였다. 액추에이터의 끝부분은 익형면으로부터 수직으로 1.2mm 떨어져 있다. 액추에이터는 함수발생기와 증폭기에서 발생하는 정현파로 동작된다.

Fig. 3은 액추에이터를 익형 표면에 설치한 후

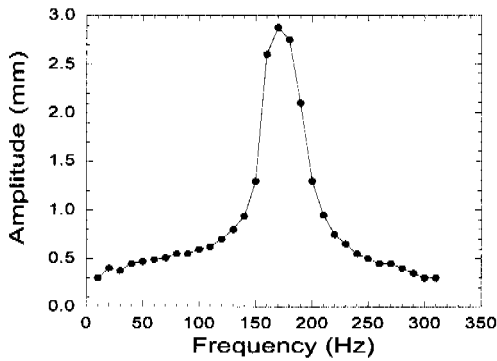


Fig. 3 Amplitude of the actuator vibration with respect to the frequency

레이저 변위 측정기로 주파수 변화에 따른 액추에이터 진동의 진폭을 계측한 결과이다. 압전세라믹 액추에이터는 공진주파수로 구동될 경우 가장 큰 진폭을 보이는데 본 실험조건에서 공진주파수는 약 170Hz였다. 본 실험에서는 제이시에 많은 운동량을 경계층에 부가하기 위해 가장 큰 진폭(2.5~3.0mm)을 가지는 공진주파수 170Hz로 액추에이터를 작동시켰다. 이때 입력 전압은 30V 이고 7개의 액추에이터를 구동하는데 필요한 전류는 21mA였다.

2.5 가시화

액추에이터에 의한 유동 제어 효과를 더욱 확실히 파악하기 위하여 본 실험에서는 두 가지 가시화 방법을 채택하였다. 터프트(tuft)를 익형에 부착하여 유동 박리가 일어나는 대략의 위치를 파악하였으며 또한 연선(smoke-wire) 방법을 이용하여 공간 가시화를 시도하였다. 니크롬선에 가시화를 위한 기름을 바르면 기름은 표면장력에 의하여 염주와 같은 모양을 형성한다. 이때 선의 양단에 전압을 가해주면 열이 발생하고 기름으로부터 연기가 발생한다. 이때 발생하는 연기의 단면과 레이저 단면이 겹치도록 레이저를 설치한 후 이를 카메라로 촬영하였다. 니크롬선은 직경이 0.1mm 이고 이때 전기저항이 50Ω이었다. 선의 양단에 걸리는 전압은 직류 60V이며, 릴레이를 이용하여 전류를 제어하여 카메라와 동기화하여 촬영하였다.

3. 결 과

Fig. 4는 영각에 따른 양력의 변화를 액추에이

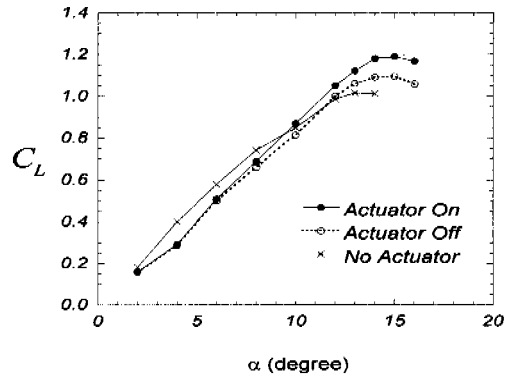


Fig. 4 Variation of the lift coefficient due to control

터가 없는 경우, 액추에이터를 설치하여 작동하지 않은 경우 그리고 작동한 경우를 각각 나타낸 것이다. 영각이 작은 범위( $\alpha < 10^\circ$ )에서는 액추에이터를 설치하였을 경우 액추에이터가 없는 경우에 비해 양력이 작아졌다. 이는 액추에이터가 유동의 흐름을 방해하였기 때문에 흡입면의 압력이 액추에이터가 없는 경우에 비해 증가하기 때문이라고 예상된다. 그러나 후단 유동 박리가 일어나는  $\alpha > 10^\circ$ 에서는 액추에이터의 설치만으로도 양력이 오히려 증가하였다.

흡입면에 설치된 액추에이터가 구동하면  $\alpha < 10^\circ$ 에서는 양력의 변화가 거의 없지만, 후단 유동 박리가 일어나는  $\alpha \geq 10^\circ$ 에서는 양력의 증대 효과가 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있다. 액추에이터 작동으로 양력은 액추에이터가 없을 경우보다 최대 20%증가하였으며 액추에이터가 구동하지 않았을 경우보다도 최대 10%증가하였다.

액추에이터의 구동은 경계층에 운동량을 공급하여 역압력구배를 이길 수 있게 하며 유동 박리를 하류로 지연시킨다. 유동박리지연은 박리점 전의 익형 흡입면 위의 속도를 증가시켜 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 압력을 감소시킨다. 따라서 액추에이터의 구동으로 익형의 압력면과 흡입면의 압력차는 커지고 결국 양력은 증가하게 된다.

Fig. 6은 항력 변화에 대한 양력 변화를 보여준다. 이것은 같은 항력을 받을 때 (즉 익형을 구동하기 위한 일정한 입력에너지에서) 얼마나 큰 양력을 받을 수 있는가를 나타내는 것이다. 제어에 의한 효과는 유동 박리가 일어나는  $10^\circ$ 이상에서 많이 나타났다. 액추에이터를 구동하면 액추에이

터가 있지만 구동하지 않는 경우에 비해 항력이 영각 16°에서 약 37% 가량 감소하였다. 이는 익형 흡입면 중반부에 생기는 후단 유동 박리점을 하류로 지연시킴으로써 Fig. 5와 같이 흡입면 후반부의 압력이 증가하였기 때문으로 해석된다.

Fig. 7은 양력에 대한 양력 대 항력 비를 그린 것이다. 양력 대 항력 비는 익형의 성능을 보여주는 중요한 지표인데 이 양 또한 영각이 큰 범위( $\alpha > 10^\circ$ )에서 제어시 증가하였음을 알 수 있다.

Fig. 8은 제어시의 성능비율을 보여 준다. FM (figure of merit)은 익형의 성능비로서 제어시 얼마나 그 성능이 향상되었는가를 보여주는 지표이다.<sup>(5)</sup>

$$FM = \frac{\eta(\text{control})}{\eta(\text{no control})} \quad (1)$$

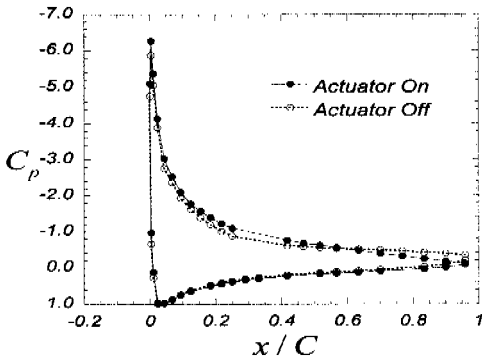


Fig. 5 Pressure coefficients at  $\alpha=15^\circ$

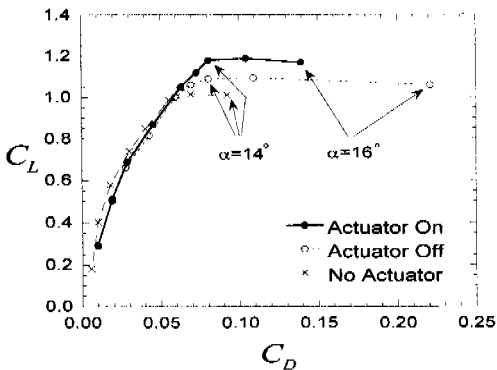


Fig. 6 Lift versus drag

여기서 성능  $\eta$ 는 일정 양력에 해당하는 동력소요 에너지로 나눈 개념으로서 익형의 성능을 의미한다. 따라서

$$\eta = \frac{LU_\infty}{DU_\infty + W} = \frac{C_L}{C_D + C_E} \quad (2)$$

이때  $C_E = W / (\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 A)$ 이고,  $W$ 는 액추에이터에 제공되는 입력 에너지로 제공평균근 (rms) 입력 전압(30V)과 제공평균근 전류(21mA)의 곱이다. 즉,  $C_E$ 는 액추에이터를 구동하였을 때 필요한 에너지를 자유유동의 운동에너지로 무차원화한 계수이다. 액추에이터 구동에 필요한 값은 0.0037로 아주 낮은 값을 갖는다.

Fig. 8을 보면, 영각 14°미만에서는 에너지 소모가 양력 증가분에 비하여 더 크지만 14°이상에서는 액추에이터 구동에 의해 효율이 크게 증가하

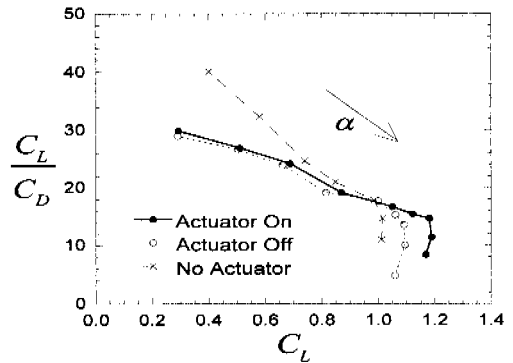


Fig. 7 Lift/drag versus lift

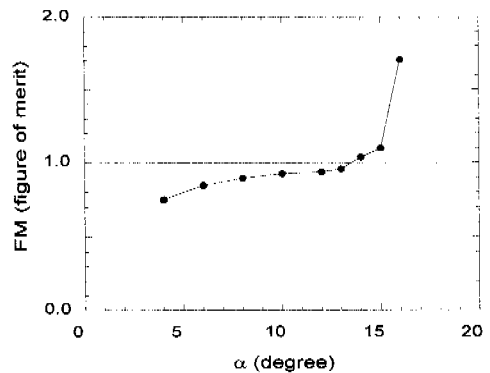


Fig. 8 FM versus  $\alpha$

였음을 알 수 있다.  $16^\circ$ 에서 가장 큰 효과를 보이며 이때 170%의 효율을 보였다. 이것은 양력 증가와 더불어 항력의 감소에 따른 효과가 같이 작용했기 때문이다.

터프트는 익형 주위 유동의 방향을 간단하게 알아보기 위한 장치로서 익형면 위에 실을 붙이는 방법이다. 유동박리의 지연은 익형에 부착한 터프트를 이용한 가시화로 더욱 확실하게 알 수 있다. 박리가 일어나지 않는 지역에서는 모든 터프트가 주유동 방향으로 향하지만, 박리가 일어나는 지역에서는 터프트가 진동을 하고 박리가 더욱 확연히 일어난 지역에서는 주유동의 반대방향으로 터프트가 향한다.

Fig. 9는 영각이  $15^\circ$ 일 때 터프트를 이용한 유동형태를 보여준다. 제어를 하지 않은 경우, 박리 지점은 영각이  $12^\circ$ 일 때 익형의 흡입면 후반부에서부터 서서히 상류로 올라왔고  $15^\circ$ 에서는  $x/C=0.5$  부근에서 발생하였다.(Fig. 9(a)) 그러나 제어를 한 경우 박리가 지연됨을 볼 수 있다.(Fig. 9(b))

양력과 항력 그리고 압력분포로부터 확인된 제어의 효과를 연선을 이용한 공간가시화로 다시 확인하였다. Fig. 10(a)를 보면 제어하지 않았을 경우 유동이 익형 표면을 따라 흐르지 못함을 볼 수 있다. 또한, 익형 중반부( $x/C=0.75$ )에 설치된 연선에서는 오히려 유동이 익형 표면 부근에서 역류하는 것을 보여준다. 이것은 박리가 생겼음을 보여준다. 익형 벽면 근처 유동이 카메라에 찍히지 않은 이유는 박리가 일어나는 영역에서는 연기가 발생하자마자 산란을 일으키기 때문이다. 제어하였을 경우(Fig. 10(b))는 유동이 비교적 익형 표면에 접근하여 형성되는 것을 볼 수 있다.

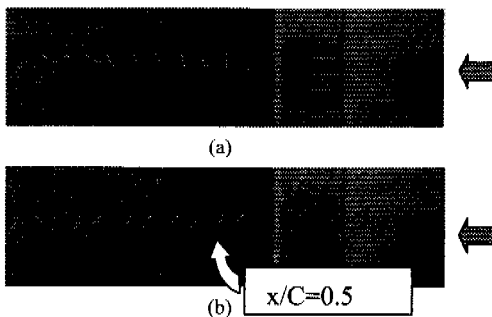


Fig. 9 Flow visualization using tufts at  $\alpha=15^\circ$ : (a) without control; (b) with control

익형 표면 부근의 유동은 가시화가 되지 못하였는데, 이는 제어로 인한 산란으로 연기가 흩어졌기 때문이다. 익형 중반부에 있는 연선에서도 유동이 전체적으로 주유동 방향으로 형성됨을 알 수 있다. 즉 연선이 설치된 영역의 앞에서는 박리현상이 일어나지 않고 있다.

레이놀즈수가 다른 경우라도 액추에이터의 작동으로 인하여 경계층에 유동방향 운동량을 주는 효과는 본 레이놀즈수의 경우와 정성적으로 같기

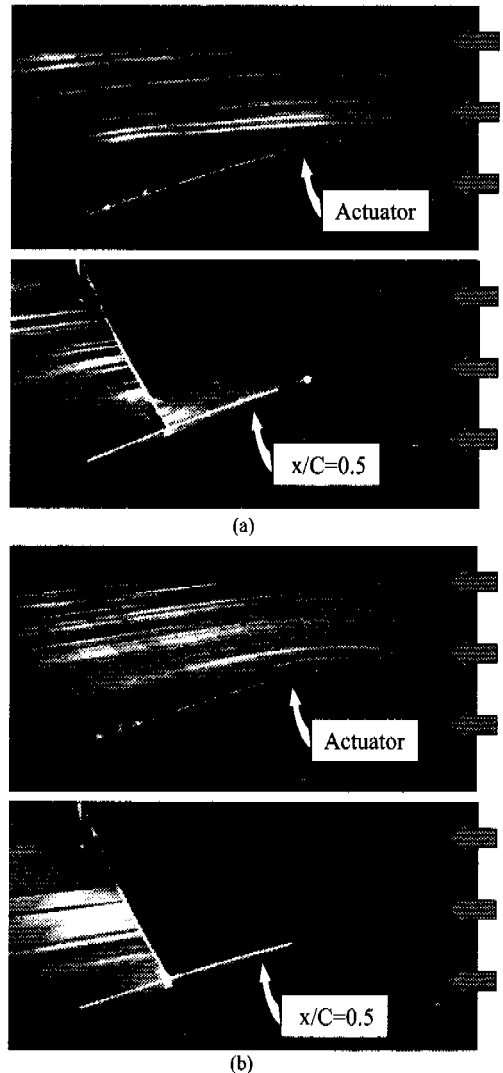


Fig. 10 Flow visualization using smoke-wires at  $\alpha=15^\circ$ : (a) without control; (b) with control

때문에 박리를 지연시킬 수 있을 것이라고 예상된다. 따라서 다른 레이놀즈수에서도 액추에이터의 구동으로 양력증가, 항력감소 그리고 *FM*의 증대 효과가 기대된다.

#### 4. 결 론

압전세라믹 액추에이터를 이용하여 레이놀즈수  $3 \times 10^5$ 에서 익형 주위의 유동을 제어하였다. 액추에이터는 익형 표면의  $x/C=0.4$  위치에 설치되었으며 그 진동폭은 약 2.5mm이고 170Hz의 주파수로 구동되었다. 제어한 결과 익형 주위에 발생된 유동 박리가 지연되었다. 이러한 사실은 터프트 가시화와 연선 방법을 이용한 가시화를 통하여 알 수 있었다. 익형이 받는 힘을 로드셀을 이용하여 측정한 결과 양력은  $15^\circ$ 에서 최대 10% 증가, 항력은  $16^\circ$ 에서 최대 37% 감소, 효율은  $16^\circ$ 에서 최대 170%의 효과가 있었다.

이후의 연구로는 영각이 작을 경우에도 익형의 성능을 저해하지 않는 보다 효율적인 액추에이터의 설치 위치와 액추에이터의 형상, 그리고 진동폭 등을 조절하여 보다 효과적인 성능을 얻고자 한다. 아울러 NACA0012뿐만 아니라 NACA4412 또는 그 밖의 익형 모델을 이용하여 제어의 효과를 관찰하고자 한다.

#### 후 기

본 연구에서 사용된 풍동은 서울대학교 기계항

공공학부 전달현상 실험실에서 보유하고 있는 풍동입니다. 이의 사용을 허락해주신 이준식 교수님께 감사드립니다.

본 연구는 과학기술부 창의적연구진흥사업과 교육부 기계분야 BK21사업의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Gad-el-Hak, M., 1990, "Control of Low-Speed Airfoil Aerodynamics," *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 9, pp. 1537~1552.
- (2) Wygnanski, I., 1997, "Boundary Layer and Flow Control by Periodic Addition of Momentum," AIAA Paper 97-2117.
- (3) Seifert, A., Darabi, A., and Wygnanski, I., 1996, "Delay of Airfoil Stall by Periodic Excitation," *Journal of Aircraft*, Vol. 33, No. 4, pp. 691~698.
- (4) Smith, D., Amitay, M., Kibens, V., Parekh, D., and Glezer, A., 1998, "Modification of Lifting Body Aerodynamics Using Synthetic Jet Actuators," AIAA Paper 98-0209.
- (5) Seifert, A., Eliahu, S., Greenblatt, D., and Wygnanski, I., 1998, "Use of Piezo Actuators for Airfoil Separation Control," *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 8, pp. 1535~1537.