

압전세라믹 액추에이터를 이용한 익형 후류 제어

최진* · 전우평** · 최해천***

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 Control(익형 제어), Lift(양력), Drag(항력), Efficiency(효율)

Abstract

The objective of this study is to increase lift and decrease drag of an airfoil by delaying flow separation with piezo-ceramic actuators. The airfoil used is NACA 0012 and the chord length is 30cm. An experiment is performed at the freestream velocity of 15m/s at which the Reynolds number is 3×10^5 . Seven rectangular actuators are attached to the airfoil surface and move up and down based on the electric signal. At the attack angle of 16° , the separation point is delayed downstream due to momentum addition induced by the movement of the actuators. Drag and lift are measured using an in-house 2-dimensional load cell and the surface pressures are also measured. Lift is increased by 10%, drag is reduced by 50%, and the efficiency is increased to 170%. The flow fields with and without control are visualized using the smoke-wire and tuft techniques.

1. 서론

익형 주위에서의 유동은 실제 유체역학의 응용에 있어서 가장 중요한 유동 중 하나로 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔다. 그리고 익형의 유체역학적 성능을 향상시키고자 익형 주위 유동 제어에 관한 수많은 시도가 있었으며 1990년 Gad-el-Hak⁽¹⁾은 익형의 성능향상에 대하여 난류 발생기, 와류발생기, 리블렛 등을 이용한 많은 방법을 정리, 제시하였다.

이러한 방법 이외에 가장 많이 쓰이는 방법이

익형 위 경계층 유동에 운동량을 공급하여 박리를 막고자 하는 것인데 1997년 Wygnanski 등⁽²⁾은 정상상태의 분사 방식(steady blowing)보다 주기적 상태의 분사 방식(ocsillatary blowing)이 경계층 유동의 제어에 더 큰 효과를 준다고 주장하였으며 현재 이에 따른 연구가 많이 수행되고 있다. 1996년 Seifert 등⁽³⁾은 주기적 여기 액추에이터를 이용하여 익형의 성능을 향상시키고자 하였다. 그러나 이때는 입력 에너지가 많이 들고 익형의 내부에 장치를 해야 하므로 설치상 불편하다는 단점이 있으나 일단 익형 성능 향상의 가능성을 보여주었다. 1998년 Smith 등⁽⁴⁾이 실행한 실험에서는 작은 에너지로 가동되는 압전 세라믹을 이용한 Synthetic Jet을 개발하여 익형 유동 제어에 적용하였다. 그러나 큰 효과가 있음에도 불과하고 실제 사용하는 익형이 아닌 단순화된 모델을 사용하였기 때문에 실제 응용상의 한계를 보여주

* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소
난류제어연구단

** 서울대학교 기계항공공학부

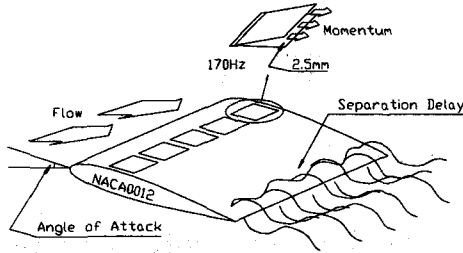


Fig. 1 Schematic of the experiment

었다. 1998년 Seifert 등⁽⁵⁾이 실행한 실험에서는 에너지상의 효율은 좋으나 여전히 액추에이터 설치시에 익형을 가공해야 한다는 단점을 안고 있다. 즉 기존의 익형에 2차원 홈을 가공을 해야하는 단점이 있고 익형의 제작시에 미리 이를 감안하여 만든다고 하여도 익형의 구조역학상에 문제점을 야기할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 작은 에너지를 소모하는 압전세라믹 액추에이터를 직접 익형 표면에 부착하여 구동시킴으로써 보다 용이하게 익형의 성능을 향상시키고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

유동 박리를 방지하기 위하여 본 실험에서는 압전세라믹 액추에이터를 익형 표면에 부착하여 박리전 경계층에 운동량을 가함으로써 박리를 지연시키고자 한다. 실험장치의 개요도는 Fig. 1과 같다. 익형의 흡입면에 압전세라믹 액추에이터를 부착하고 이것을 정현파의 전기적 신호로 구동시키면 운동량이 경계층내부에 전달이 된다. 액추에이터 자체에서 나오는 운동량은 크지 않지만 계속되는 역압력구배로 인하여 더욱 작아진 경계층 내부의 운동량에 비하면 매우 큰 양이고 이는 유동 박리를 지연시키는 역할을 한다. 이러한 액추에이터는 익형에 부착시에 접촉제로 단순히 접촉하면 되고 에너지 소모가 작다는 장점이 있다.

2.1 풍동

본 연구에 사용된 풍동은 저속, 분출식, 개방형으로 제작된 풍동이다. 사용된 송풍기는 원심형으로 11kW의 전동기에 의해 구동되며 정격 회전수 1150rpm이고 최대 속도는 25m/s이다. 실험은 자유유동속도 15m/s에서 실행되었으며 이 속도에서 평균속도 균일도와 주유동 난류강도는 각각

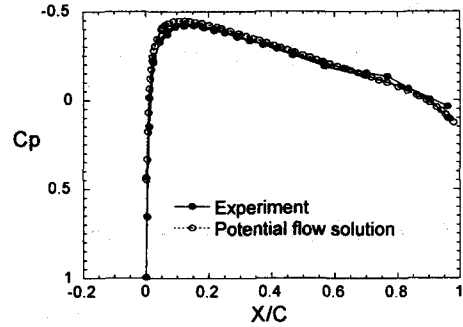


Fig. 2 Pressure coefficients at $\alpha=0^\circ$

0.5%, 0.1%이하였다. 실험부의 크기는 가로 60cm, 세로 30cm, 길이 3m이다.

2.2 익형

익형은 폭 0.29m, 코드길이 0.3m의 NACA0012로 알루미늄 합금으로 제작하였다. 제작시 NC-공작기계를 이용하였는데 이를 위하여 250여개의 좌표표를 사용하였다. 익형은 양력과 항력의 측정을 용이하게 하고 차폐효과를 줄이기 위하여 시험부에 수직으로 세워서 설치하였다. 설치시에는 양쪽 벽면과의 간섭을 줄이기 위해서 각각 5mm의 간격을 두었다. 익형의 가공상 정밀도를 알아보기 위하여 영각이 0° 인 상태에서 측정한 압력과 패널 방법을 이용하고 차폐효과를 고려한 포텐셜 유동에서의 압력을 비교하였으며 그 결과는 Fig. 2와 같다. 두 곡선은 잘 일치하고 있으며 이로써 익형의 정밀도를 확보하였다.

익형표면의 압력을 측정하기 위하여 익형의 중앙부에 지름 0.5mm의 압력공을 제작하였다. 모든 압력공은 익형의 표면에 수직으로 가공되었다. 총 49개로 되어 있는 중앙 압력공은 주유동방향으로 $X/C=0, 0.0033, 0.01, 0.02, 0.033, \dots$ 등으로 되어 있으며 익형의 앞부분은 급격한 압력변화를 정밀하게 측정하기 위하여 간격을 촘촘히 하였다.

층류박리를 방지하고 난류경계층을 얻기 위하여 익형의 상단에 트립을 설치하였다. 본 실험이 실시된 영역에서는 영각이 $6\sim 10^\circ$ 일 경우 층류경계층은 역압력구배를 이기지 못하고 층류박리를 일으켜 전연박리기포를 형성한다. 그러나 영각이 10° 이상일 경우 전연에서부터 실속이 발생하여 액추에이터에 의한 제어가 아무런 효과를 볼 수

가 없게된다. 따라서 익형에 후연박리를 발생시키기 위하여 목걸이 모양의 체인으로 구성된 트립을 설치하였다. 트립의 높이는 2mm이고 압력면의 $X/C=0.003$ 부근에 설치하였다.

2.3 2차원 힘 측정장치

본 실험의 목적은 익형의 유체역학적 성능을 향상시키고자 하는 것이므로 C_L 과 C_D 의 측정이 가장 중요하다. 이들의 측정을 위하여 2차원 힘 측정장치를 설치하였다. 양력과 항력은 로드셀(load cell)에서 나오는 신호를 증폭기에서 증폭한 다음 컴퓨터로 읽어들이어서 측정하였다. 이때 양력이 항력에 미치는 간섭을 줄이기 위해서 마찰계수가 0.0006~0.0012로 매우 작은 베어링을 사용하여 각 로드셀이 힘을 측정할 경우 매우 작은 마찰로 원하는 방향으로만 변위를 일으켜서 정확한 값을 얻을 수 있도록 설치하였다. 항력의 경우 주된 실험 범위에서 그 크기가 양력의 1/10 정도이나 마찰계수를 고려해 볼 때 오차가 충분히 작음을 알 수 있다.

2.4 액추에이터

액추에이터는 0.13mm 두께의 강철판에 Piezo System 회사 제품인 유니모프(uni-morf) 압전세라믹판이 부분적으로 부착되어 있는 제품을 사용하였다.

압전세라믹에 전기를 가하면 전압의 부호에 따라 외부에 노출된 면은 팽창 또는 수축을 하며 같은 순간 강철판과 접한 면은 반대로 수축 또는 팽창한다. 따라서 양과 음전압이 반복되는 정현파가 세라믹에 입력되면 액추에이터의 끝단은 외팔보처럼 큰 진동을 가지고 정현파의 형태로 움직인다. 한편 일정한 제곱평균근(root mean square) 입력전압에서 주파수에 따른 액추에이터의 변위특성은 고정된 액추에이터의 고유진동특성에 따라 달라진다. 액추에이터의 고유진동특성은 세라믹 바닥면이 벽면에 부착된 면적과 액추에이터와 바닥면과의 거리, 그리고 접촉체의 종류에 따라 매우 민감하게 달라진다. 액추에이터와 바닥면의 거리가 클 경우는 그 진동폭이 6mm에 이른다고 알려져 있다. 그러나 바닥면과 거리가 가까워질수록 액추에이터의 진폭은 작아진다. 또 접촉시에 그 접촉단면을 크게 하면 공진주파수가 더욱 커지지만 그만큼 진동 폭은 줄

어든다.

본 실험에서는 세라믹 선단에서 5mm 길이 만큼을 두께가 0.5mm되는 종이에 부착하였으며 접착제로는 Elmer's Glue-All이라는 제품을 사용하였다. 액추에이터의 끝부분은 익형면으로부터 1.5mm 떨어져 있다. 액추에이터는 함수발생기와 증폭기에서 발생하는 정현파 전압으로 동작된다. 제곱평균근 입력 전압 30V에서 공진주파수(170Hz)로 작동하고 최대 변위는 약 3mm였다.

2.5 가시화

액추에이터에 의한 유동 제어 효과를 더욱 확실히 파악하기 위하여 본 실험에서는 두가지 가시화 방법을 채택하였다. 티프트을 익형에 부착하여 유동 박리가 일어나는 지점을 예측하였으며 공간 가시화를 위하여 smoke-wire 방법을 이용하였다.

니크롬선에 가시화를 위한 기름을 바르면 기름은 표면장력에 의하여 염주와 같은 모양을 형성한다. 이때 선의 양단에 전압을 가해주면 열이 발생하고 기름으로부터 smoke가 발생한다. 이때 발생하는 smoke-sheet와 laser-sheet를 겹치도록 설치한 후 이를 카메라로 찍었다. 니크롬선은 직경이 0.1mm이고 이때 저항이 50Ω 이었다. 선의 양단에 걸리는 전압은 직류 60V이며 릴레이를 이용하여 전류를 제어하여 카메라와 동기화 하여 촬영하였다.

3. 결과

Fig. 3은 영각에 따른 양력의 변화를 액추에이터로 제어하였을 경우와 하지 않았을 경우에 따라 나타낸 것이다. 모든 범위에 대하여 제어한 경우가 양력이 영각 12°이상에서는 그 제어 효과가 더욱 큰 것을 알 수 있다. 15°에서는 양력이 약 10% 증가하였다. 액추에이터는 경계층에 운동량을 공급하여 역압력 구배를 이길 수 있는 힘을 주며 이것은 박리를 하류로 지연시켜 속도를 증가시켜 흡입면에서의 중간부분 압력이 더욱 작아지기 때문이다 (Fig. 5). 모든 영역에 대하여 양력이 크게 나온 것은 액추에이터 자체에서 익형에 주는 운동량이 주위 유동 속도를 보다 증가시켜 압력이 작아지는 것이 그 원인으로 보인다.

Fig. 4는 양력 변화에 대한 항력 변화를 보여주

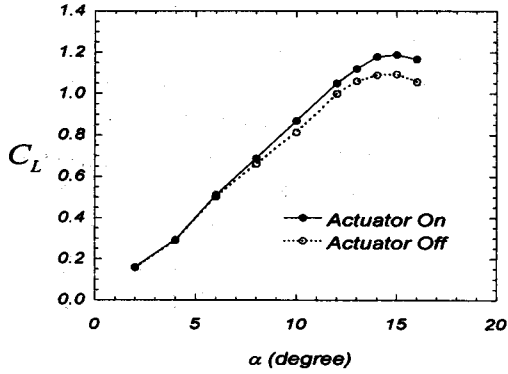


Fig. 3 Variation of the lift coefficient due to control

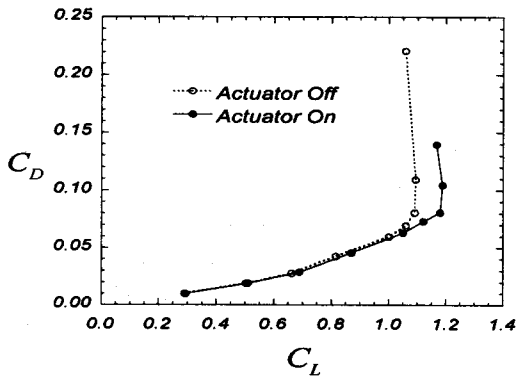


Fig. 4 Drag versus lift

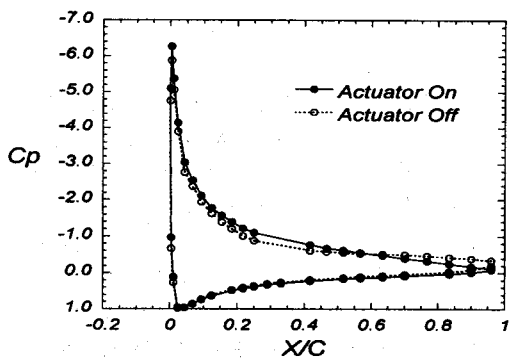


Fig. 5 Pressure coefficients at $\alpha=15^\circ$

고 있다. 영각 16° 에서 항력이 약 50% 가량 감소하였음을 알 수 있다. 이것 역시 익형 흡입면 후반부에 생기는 박리를 지연시킴으로써 익형 흡

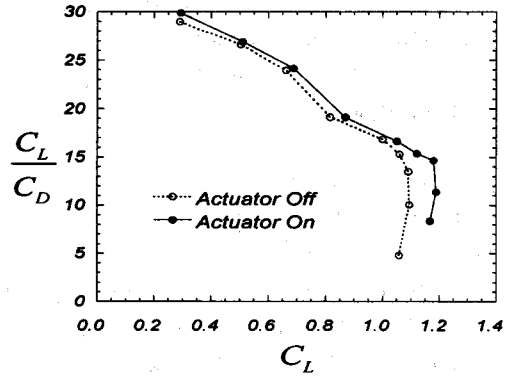


Fig. 6 Lift/drag versus lift

입면 후반부의 압력을 증가시키는 효과가 큰 것으로 보인다 (Fig. 5). 제어에 의한 항력의 감소량은 양력의 증가량에 비하여 현저하게 큰데 이것은 항력을 좌우하는 익형 흡입면 후반부의 압력이 커졌기 때문이다. 제어에 의해 익형의 흡입면 중간부분의 압력은 더 작아지지만 항력을 받는 면이 작기 때문에 그 영향이 적고 익형의 흡입면 후반부는 면의 각이 항력을 받는 면이 크기 때문에 그 영향이 큰 것으로 보인다. 영각이 16° 일 경우 항력이 50% 감소한 것은 터프트 가시화 실험을 한 결과 익형의 후반부에 차지하고 있는 박리를 현저히 감소시켰기 때문인 것으로 보인다.

Fig. 6는 양력에 대한 양력 대 항력 비를 그린 것이다. 양력 대 항력 비는 익형의 성능을 보여주는 중요한 지표인데 이것 또한 제어시에 증가하였음을 알 수 있다.

Fig. 7은 제어시의 성능비를 보여 준다. FM (figure of merit)은 익형의 성능비로서 제어시 얼마나 그 성능이 향상되었는가를 보여주는 지표라고 할 수 있다⁽²⁾.

$$FM = \frac{\eta_{wI}}{\eta_{w/o}} \quad (1)$$

여기서 효율 η 는 일정 양력을 소요 에너지로 나눈 개념으로서 익형의 효율을 의미한다. 따라서

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

이때 $C_E = W_i / (\frac{1}{2} \rho A U_\infty^2)$ 이고 W_i 는 제어 입

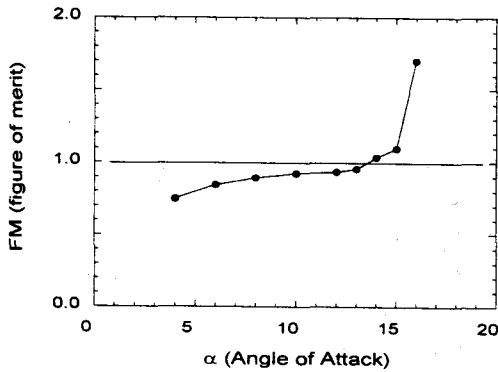


Fig. 7 FM versus α

력 에너지, A 는 익형의 평면도 면적을 나타낸다. 즉, C_L 는 액추에이터를 구동하였을 때 필요한 에너지를 무차원화한 것이다. 액추에이터에 필요한 이 값은 0.0037로 아주 낮은 값을 갖는다.

영각 14° 미만에서는 에너지 소모가 양력 증가분에 비하여 더 크지만 14° 이상에서는 액추에이터 구동에 의해 효율이 크게 증가하였음을 알 수 있다. 16° 에서 가장 큰 효과를 보이며 이때 170%의 효율을 보였다. 이것은 양력 증가와 더불어 항력의 감소에 따른 효과가 같이 작용했기 때문이다.

유동박리의 지연은 익형에 부착한 터프트를 이용한 가시화로 더욱 확실하게 알 수 있다. 터프트는 익형 주위 유동의 방향을 간단하게 알아보기 위한 장치로서 익형에 실을 직접 붙이는 방법이다. 터프트를 보면서 실험을 수행할 경우 익형 주위의 유동 형태를 가장 빨리 파악할 수 있다. 박리가 일어나지 않았을 경우는 모든 터프트가 자유유동 방향으로 향하지만 박리가 일어난 이후에는 터프트가 진동을 하였고 박리가 더욱 확연히 일어난 지역에서는 자유유동의 반대방향으로 터프트가 향하였다. 이것은 그 부근의 주위의 유동이 반대방향으로 향하고 있음을 보여주고 이것은 곧 박리 영역임을 보여주는 것이다.

박리 지점은 영각이 12° 일 때 익형의 흡입면 후반부에서부터 서서히 상류로 올라왔고 15° 에서는 $X/C=0.5$ 부근에서 발생하였다 (Fig. 8). 그러나 제어를 했을 경우 이러한 박리가 지연되었다 (Fig. 9). 이러한 사실은 압력 분포를 보면 더욱 잘 알 수 있는데 박리지연으로 인한 익형 흡입면 후반부 압력의 증가에서 알 수 있다.

양력과 항력 그리고 압력으로부터 예측된 제어의 효과를 smoke-wire를 이용하여 다시 확인하였다. Fig. 8을 보면 제어하지 않았을 경우 유선이 익형에 접근하지 못하고 익형 후반부에 설치된 smoke-wire에서는 오히려 유선이 반대방향으로

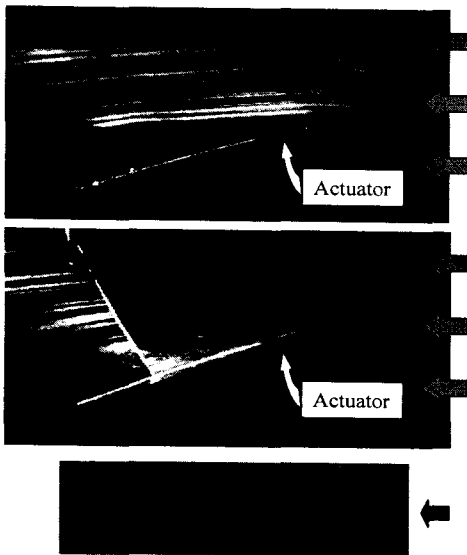


Fig. 8 Flow visualization at $\alpha = 15^\circ$
(without control)

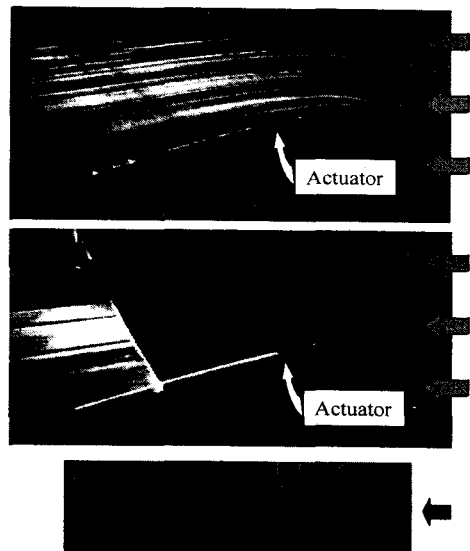


Fig. 9 Flow visualization at $\alpha = 15^\circ$
(with control)

역류하는 것을 알 수 있다. 이것은 박리가 생겼음을 보여주는 것이다. 익형의 근처 유동이 카메라에 찍히지 않은 이유는 박리가 일어나는 영역에서는 smoke가 발생하자마자 산란을 일으키기 때문이다. 제어하였을 경우는 유선이 비교적 익형에 접근하여 형성되었다. 하지만 익형에 접근하여 흐르는 스모크는 촬영을 하지 못하였는데 이것은 경계층내 운동량이 작은 것이 그 첫 번째 이유이고 또 제어로 인한 산란으로 smoke가 흩어진 것이 그 두 번째 이유이다. 익형 후반부에 있는 smoke-wire에서도 유선이 자유유동속도 방향으로 흐름을 알 수 있다. 즉 이 smoke-wire가 설치된 영역의 앞에서는 박리현상이 일어나지 않는 것으로 보인다. 그러나 이러한 smoke가 빠르게 흩어지며 smoke-wire의 밑 부분으로부터는 smoke가 유동방향으로 진행하지 않고 정체되어 있는 것으로 보아 이 이후의 영역에서 박리의 가능성을 보여 준다.

4. 결론

압전세라믹 액추에이터를 이용하여 익형 주위의 유동을 제어하였다. $Re=3 \times 10^5$ 유동에서 실험이 실행되었다. 액추에이터는 익형의 $X/C=0.4$ 위에 설치되었으며 그 진동폭은 약 3mm이고 170Hz로 구동되었다. 제어한 결과 익형의 후반부에 발생한 유동 박리가 지연되었다. 이러한 사실은 터프트 가시화와 smoke-wire 방법을 이용한 가시화를 통하여 알 수 있었다. 익형이 받는 힘을 로드셀을 이용하여 측정하였고 양력은 15° 에서 최대 10% 증가, 항력은 16° 에서 최대 50% 감소, 효율은 16° 에서 최대 170%의 효과가 있었다.

본 실험의 이후로는 보다 효율적인 액추에이터의 설치 위치와 액추에이터의 형상, 그리고 그 진동폭 등을 조절하여 보다 효과적인 성능을 얻고자 한다. 아울러 NACA0012뿐만 아니라 NACA4412나 그 밖의 모델을 이용하여 제어의 효과를 관찰하고자 한다.

후기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구진흥사업의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

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