

## 합성제트를 이용한 타원형 익형 유동제어

김성훈<sup>1</sup>, 김철완<sup>\*2</sup>

### FLOW CONTROL ON ELLIPTIC AIRFOILS USING SYNTHETIC JET

S.H. Kim<sup>1</sup> and C.W. Kim<sup>\*2</sup>

*In the present work, the aerodynamic characteristics of elliptic airfoils which have a 12% thickness ratio are numerically investigated based on Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and a transition SST model at a Reynolds number  $8.0 \times 10^5$ . The numerical simulation of a synthetic jet actuator which is a well-known zero-net-mass active flow control actuator located at  $x/c = 0.00025$ , was performed to control massive flow separation around the leading edge of the elliptic airfoils. Four cases of non-dimensional frequencies were simulated at an angle of attack of 12 degree. It is found that the size of the vortex induced by synthetic jets was getting smaller as the jet frequency becomes higher. Comparison of the location of synthetic jets between  $x/c = 0.00025$  (around the leading edge) and  $x/c = 0.9$  (near the separation) shows that the control near the leading edge induces closed recirculation flow regions caused by the interaction of the synthetic jet with the external flow, but the control applied at 0.9c (near the trailing edge) induces a very small and weak vortex which quickly decays due to weak intensity.*

**Key Words :** 능동유동제어(Active Flow Control), 타원형 익형(Elliptic Airfoil), 합성제트(Synthetic Jet), 유동박리(Flow Separation)

### 1. 서 론

능동유동제어기술(active flow control technique)은 경계층 내부에 인위적으로 교란을 발생시켜 모멘텀(momentum)과 에너지(energy)를 직접 전달하거나 경계층 내부에 외부유동을 유입시켜 박리(separation)를 지연시켜 공력특성을 향상시키는 것이 목적이다. 특히, 1990년대 중반부터 MEMS(Micro Electro-Mechanical Systems) 제조기술의 향상으로 능동유동제어기술에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다. 박리된 유동을 제어하기 위해서 외부에서 유량을 주입하거나 흡입하는 흡입/송출(steady blowing/suction) 유동제어기술법 연구되었으나 항공기에 실제로 설치하여 사용하기엔 소모되는 동력이 많이 필요할 뿐 아니라, 항공기 추진계통에도 불이익을 주는 단점

을 가지고 있다. 하지만, 흡입송출 유동제어기술과 달리 최근에 각광받고 있는 합성제트(synthetic jet) 유동제어기술은 유동의 송출(blowing)과 흡입(suction)을 한 장치를 통해 동시에 하여 추가적인 유량의 주입이 없고 합성제트 제어장치를 구동하기 위해선 상대적으로 아주 작은 양의 전력만 있으면 되는 장점을 가지고 있다.

1975년 Collins와 Zelenvitz[1]가 유동장에 주기적인 음향 가진(acoustic excitation)을 이용하여 송출 유동제어법과 같은 전통적인 유동제어장치없이 유동 표면 근처의 유동에 모멘텀이 전달되는 것을 발견한 이후, 유동의 추가적인 주입이 없는 합성제트에 대한 연구가 활발하게 진행되어 오고 있다. A. Glezer[2,3]는 Fig. 1과 같은 장치를 이용하여 합성제트에 의한 유동이 외부유동과의 간섭하면서 와류(vortex)가 생성하는 것을 발견하였으며, J.L. Gilarranz[4,5]은 피스톤을 이용하여 합성제트 유동제어장치를 설계 및 제작하여 합성제트의 유동제어특성을 관찰하였으며, NACA0015에 합성제트 유동제어장치를 설치하여 ( $x/c = 0.12$ ) 박리가 지연되는 것을 확인하였지만, 박리가 지연되는 메커니즘을 알아내지 못하였다. 박리가 지연되는 메커니즘을 확인하기 위해서 D. You[6]는 J.L. Gilarranz

접수일: 2010년 10월 5일, 심사완료일: 2010년 11월 26일,  
게재확정일: 2010년 12월 3일

1 정회원, 과학기술연합대학원대학교 항공기시스템공학과

2 정회원, 한국항공우주연구원 첨단공력구조팀

\* Corresponding author, E-mail: cwkim@kari.re.kr

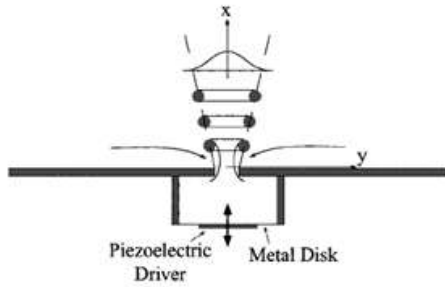


Fig. 1 Synthetic jet actuator

의 실험과 동일한 조건에서 LES(Large Eddy Simulation)를 수행하였으며, 합성제트의 송출과 흡입의 주기적인 운동으로 익형의 경계층에 모멘텀과 에너지를 전달을 통해 유동박리가 지연되는 것을 확인하였다. B. Günther과 T. Höll은 RANS 방정식 (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations)을 통한 수치 해석을 통하여 고양력장치가 장착된 익형에 합성제트를 이용하여 익형에서 발생하는 박리를 지연시켜 공력특성을 향상시킨 결과를 얻었다[7,8]. 게다가, 레이놀즈 수  $Re = 2.0 \times 10^6$  에서 NACA0012에 합성제트의 주파수, 위치, 각도, 속도에 대한 최적화를 수행하였으며[9,10], NACA23012 익형에 합성제트를 단일로 설치한 것에 비해 합성제트를 두 개와 세 개를 나란히 배열하여 합성제트의 상(phase)을 반대로 하였을 때 양력과 항력계수의 진동하는 폭이 줄어드는 것을 확인하였다 [11].

타원형 익형은 기존의 익형의 형상과 다르게 앞전과 뒷전이 동일한 형상을 지니며 받음각이 없을 때에도 뒷전 부근에서 박리현상이 생긴다. 특히, 받음각이 없을 때에도 발생하는 유동 박리현상은 익형 뒷전에서의 압력 회복을 방해하여 압력저항을 증가시키는 원인이 된다[12,13]. 낮은 받음각에서도 발생하는 유동박리로 인해 합성제트의 유동박리에 대한 유동 제어 특성을 알아보는데 타원형 익형은 좋은 예가 될 수 있을 것이다. 이번 연구에서는 뒷전과 앞전에서 발생하는 유동 박리를 제어하기 위해 12 %와 15 %의 두께비를 가지는 타원형 익형의 앞전과 뒷전에 합성제트를 설치하여, 레이놀즈 수  $Re = 8.0 \times 10^5$  (Re: Reynolds number based on chord)에서 RANS 방정식을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

## 2. Synthetic Jet 전산해석

### 2.1 격자생성

$Re = 8.0 \times 10^5$  에서 “ $y^+ < 1$ ”을 만족시키도록 경계층 격자를 형성하였으며, 경계층 외부의 격자는 삼각격자를 이용

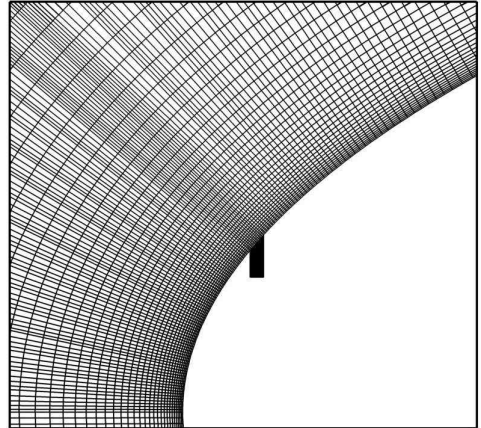


Fig. 2 Grids for synthetic jet actuators installed near leading edge

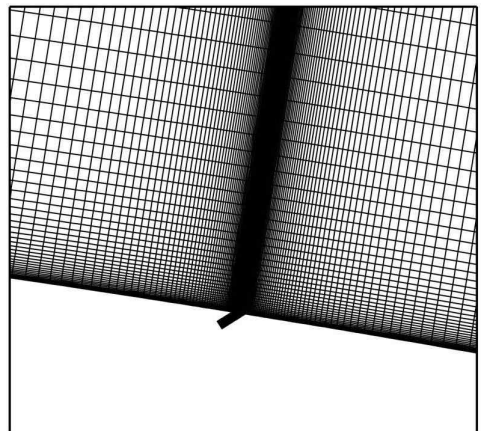


Fig. 3 Grids for synthetic jet actuators installed near trailing edge

하여 생성하였다. 기존의 연구[14]에 따르면, 오리피스(orifice)의 깊이가 폭의 0.5배 이상이 되면 오리피스에 의한 합성제트의 공동효과(cavity effect) 묘사가 가능하므로 이를 활용하여 합성제트와 외부유동간의 간섭에 의해서 생기는 와류가 전단응력(shear stress)를 증가시키는 현상을 수치적으로 묘사하여 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. Fig. 2,3은 각각 12 % 두께비를 가지는 타원형 익형의 앞전( $x/c = 0.00025c$ )와 뒷전( $x/c = 0.9c$ )에 위치한 합성제트 구동장치를 묘사한 것이다. 합성제트 구동장치와 익형의 표면과 이루는 각도는  $48.8^\circ$ 이며 공동효과를 구현하기 위해 오리피스의 깊이는 오리피스 폭의 약 2배가 되도록 하였다. 수치해석을 위하여 사용된 계산 격자는 약 100,000개의 삼각 격자와 사각격자를 이용하여 구성하였으며, 익형에서의 원방 경계(far field)까지의 거리는 앞전으로부터 10배, 뒷전으로부터 15배이며 위아래는 10배의 길이를 가지도록 격자를 구성하였다.

2.2 난류모델

$Re = 8.0 \times 10^5$ 의 영역에서는 층류에서 난류로의 천이현상이 매우 중요하기 때문에 SST k- $\omega$  방정식과 transport 방정식(the transport equation for the intermittency, the transport equations for the transition onset criteria)이 결합된 Transition SST 난류모델을 사용하였다[15]. 수치해석에서 사용된 난류의 강도는 항공우주연구원 아음속풍동(KARI-LSWT)의 조건인  $I = 0.07\%$ ( $I$ : turbulence intensity)을 사용하였다.

2.3 Synthetic jet modeling

합성제트의 주기적인 경계조건은 L. Kral[16]이 제시한 top-hat방식의 주기적인 경계조건을 사용하였다. 합성제트의 주기적인 운동은 사인함수를 이용하여 식 (1)과 같이 근사하였다.

$$u_{jet} = u_{peak} \sin(2\pi ft) \tag{1}$$

이 때,  $u_{jet}$ 은 합성제트의 속도이며,  $u_{peak}$ 는 최고 속도, 그리고  $f$ 는 주파수이다. 합성제트의 중요 인자들(parameters)을 무차원화(non-dimensional)된 값으로 나타내면 식 (2)-(3)과 같다.

$$c_{\mu} = \left(\frac{u_{peak}}{U}\right)^2 \left(\frac{h}{c}\right) \tag{2}$$

$$F^{+} = \frac{fc}{U} \tag{3}$$

$c_{\mu}$ 는 모멘텀 계수(momentum coefficient)이며,  $F^{+}$ 는 무차원 주파수(non-dimensional frequency)다.  $U$ 는 외부유동의 속도이며  $U = 60.0$  m/s로 설정하였으며,  $h$ 는 오리피스 폭이며  $h = 0.1$  mm로 설정하였다. 이번 연구에서 사용된 모멘텀 계수는  $c_{\mu} = 0.0005$ 을 사용하였으며, 다양한 무차원 주파수( $F^{+} = 0.5, 1.0, 2.0, 5.0$ )에 대해서 수치해석을 수행하였다.

3. 해석결과

3.1 타원형 익형의 공력특성

실험을 통한 연구[12]에 따르면, Fig. 5,6에서처럼 타원형 익형은 낮은 받음각에서는 양력 곡선의 기울기가  $2\pi$ 보다 크고, 특정 받음각 이상에서는 양력 곡선의 기울기가  $2\pi$ 보다 작은 것을 볼 수 있었다. 본 연구에서도 수치해석 결과도 실험을 통한 연구의 결과[12]와 같은 물리적인 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 4에서와 같이 받음각이 증가하면

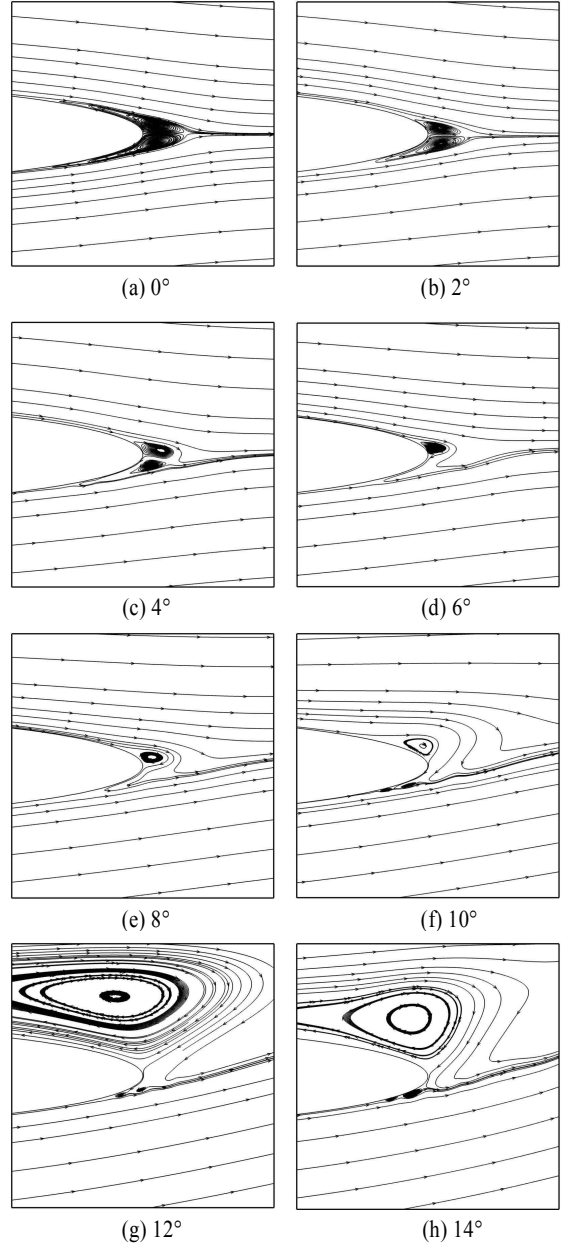


Fig. 4 Streamlines for 12% elliptic airfoil

서 익형 흡입면(suction side)의 경계층 박리지점이 서서히 익형 뒷전으로 이동하는 반면, 압력면(pressure side)의 박리지점은 변화가 없었다. 그로 결과로 인해 익형 흡입면에서 생기는 순환(circulation)이 더 작아지게 되는 것을 볼 수 있었으며, 이는 낮은 받음각에서 높은 양력계수의 기울기를 가지게 되는 원인이라 할 수 있다. 즉, 받음각  $4^{\circ}$  이전의 영역에서는 익형의 끝단에서 생기는 압력면에 생기는 순환에 비해 흡입면에

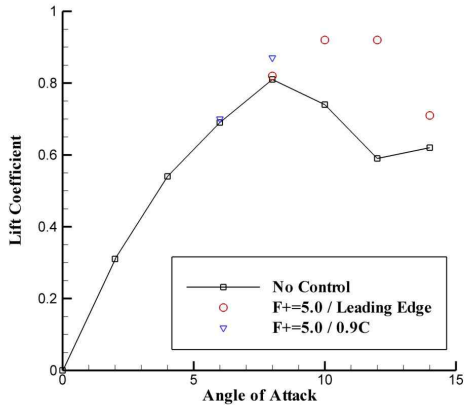


Fig. 5 Lift coefficient for 12 % thickness elliptic airfoils with and without synthetic jet actuators

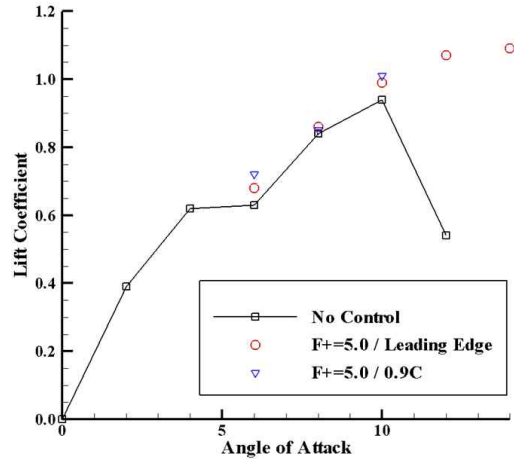


Fig. 7 Lift coefficient for 15 % thickness elliptic airfoils with and without synthetic jet actuators

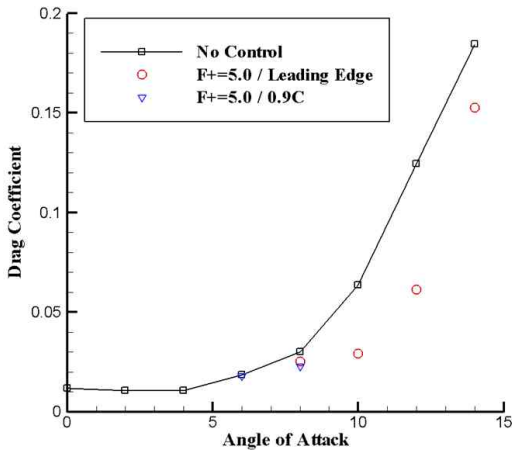


Fig. 6 Drag coefficient for 12 % thickness elliptic airfoils with and without synthetic jet actuators

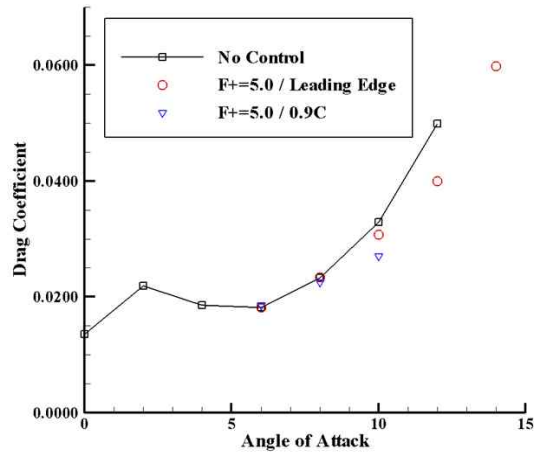


Fig. 8 Drag coefficient for 15 % thickness elliptic airfoils with and without synthetic jet actuators

서 생기는 순환의 크기가 작아지는 현상으로 생기는 캠버 (camber) 효과에 의해  $2\pi$  높은 양력계수를 가지게 된다. 하지만, 12%의 두께비를 가지는 타원형 익형의 받음각이  $4^\circ$  이후에서는 익형 흡입면의 앞전에서 천이거품(transitional bubble)이 발생하여 층류(laminar flow)에서 난류(turbulent flow)로의 천이(transition)가 발생하였고, 이로 인해 양력계수의 기울기가  $2\pi$ 보다 작아지는 것을 볼 수 있다. 또한, 흡입면의 앞전에서 층류에서 난류로의 천이로 인하여 마찰저항이 증가하여 전체적인 항력계수가 증가하는 것을 볼 수 있다.  $10^\circ$  이후의 받음각에서는 앞전에서 생기는 박리거품이 더 이상 재부착(reattach)되지 않고 앞전박리(leading edge separation)로 발달하여 실속(stall)이 일어나 양력계수의 감소와 항력계수의 급격한 증가가 발생한다.

### 3.2 $F^+$ 에 따른 vortex의 크기

Fig. 9는 12% 두께비의 타원형 익형에서 받음각이  $12^\circ$ 일 때 익형의 앞전 부근( $x/c = 0.00025$ )에 합성제트를 설치하여  $F^+ = 0.0333, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0$ 에서 양력계수와 항력계수를 비교한 결과이다. 주파수가 높아질수록 항력계수는 감소하고 양력계수는 증가할 뿐만 아니라 항력 및 양력 계수의 진동(oscillation)폭도 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 10은 주파수별 유선(streamline)을 그린 그림이다. Fig. 10에서와 같이 합성제트가 익형의 앞전에 위치하였을 경우, 합성제트의 송출과 흡입의 주기적인 운동으로 발생하는 유동과 외부 유동의 간섭으로 인해 와류가 생기는 것을 볼 수 있다. 특히, 외부유동과의 간섭시간이 상대적으로 가장 짧은  $F^+ = 5.0$ 에서 작은 크기의 와류가 생성되는 것을 볼 수 있었으며, 외부유동과의

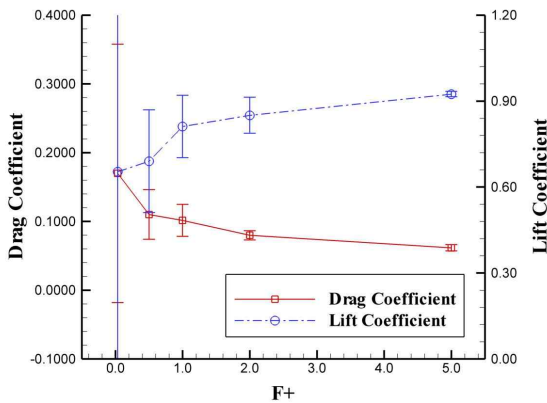


Fig. 9 Drag and Lift coefficient in terms of F+ at 12 degrees of angle of attack, 12 % thickness elliptic airfoil

간섭시간이 가장 긴  $F^+ = 0.0333$ 에서는 합성제트의 주파수가 너무 작아서 와류가 생성되지 않고 유동박리를 제어하는 장치가 아닌 가진(excitation)만 주는 유동 가진장치(flow excitation device)인 것으로 볼 수 있다.  $F^+ = 0.0333$ 에 비해 상대적으로 주파수가 큰  $F^+ = 0.5, 1.0, 2.0$ 의 경우에는 와류의 크기는 감소하지만 다수의 와류가 생성된다. 따라서 합성제트가 익형의 앞전에 위치하는 경우 합성제트의 주파수가 높을수록 외부유동과 간섭으로 생기는 와류의 크기는 감소하지만 와류의 강도는 증가하며 보다 많은 수의 와류를 생성하여 합성제트 자체의 모멘텀 전달과 함께 외부유동과 간섭으로 인해 발생한 와류가 외부유동의 에너지와 모멘텀을 익형 주변으로 유입하여 익형에서 발생하는 앞전박리를 지연하는 것을 볼 수 있다.

### 3.3 Synthetic jet의 위치에 따른 유동 특성

무차원 주파수  $F^+ = 5.0$ 와 모멘텀 계수  $c_\mu$ 는 2절에서 언급했던 것 같이  $c_\mu = 0.0005$ 로 설정하고, 합성제트를 앞전 부근과 뒷전 부근에 위치시켜 수치해석을 통해 결과를 비교하였다. Fig. 11은 합성제트를 익형의 뒷전에서 박리가 일어나는 근처 지점인  $x/c = 0.9$ 에 위치시켜서 얻은 결과이다. 합성제트의 전체적으로 주입해주는 유량은 없지만 주변 유동을 흡입과 송출을 통해서 모멘텀을 전달하였다. 그 결과, Fig. 5,6에서와 같이 익형의 항력계수는 줄어들고, 양력계수는 상승하는 것을 볼 수 있었다. 하지만, 앞전에 합성제트를 설치하였을 경우와 달리 외부유동과 간섭으로 인해 생기는 와류는 크기가 매우 작고, 와도(vorticity)의 크기도 매우 작으며 매우 빠르게 사라지는 것을 볼 수 있었다. 그와 달리 앞전에 위치한 합성제트는 외부유동과 간섭으로 인해 생기는 와류의 크기가 상대적

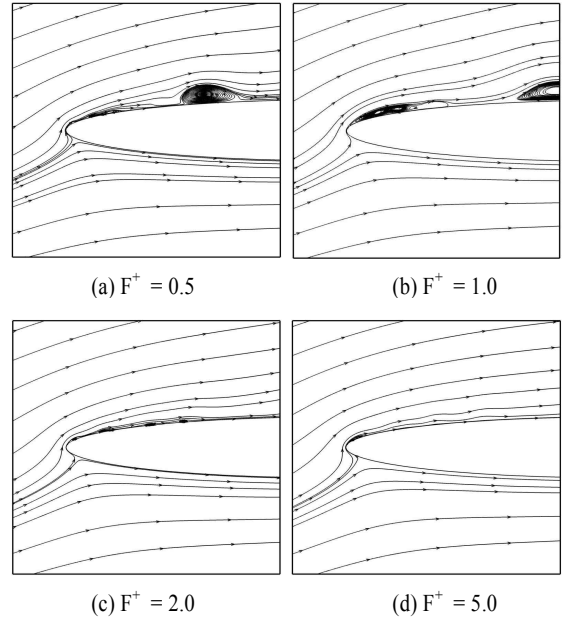


Fig. 10 Streamlines for 12 % elliptic airfoil at 12 degrees of angle of attack in terms of frequency

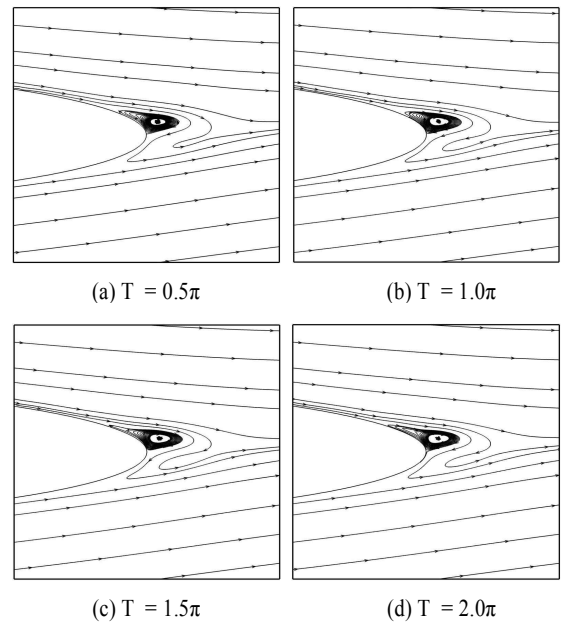


Fig. 11 Streamlines for 12 % elliptic airfoil with a synthetic jet actuator near trailing edge(0.9c)

으로 컸으며 뒷전에 위치한 합성제트에 비해서 더 멀리까지 전파된다. 앞전에 위치한 합성제트는 외부유동과의 간섭에 의해 와류를 발생시켜 외부유동의 모멘텀을 경계층 내부로 전달하여 유동박리를 지연시키는데 큰 효과가 있는 것으로 판단

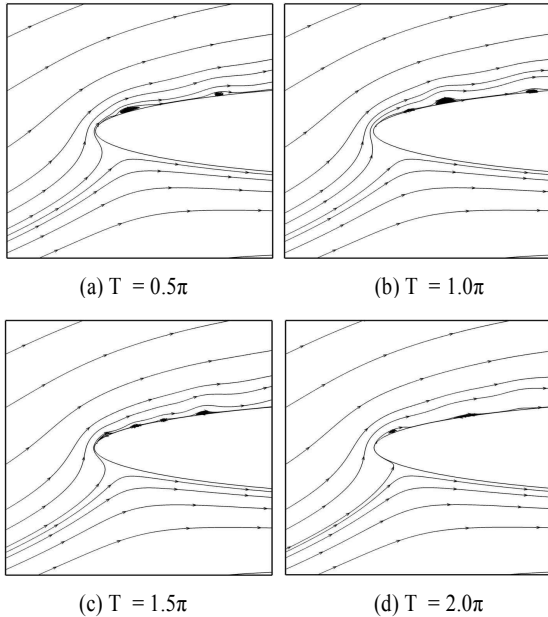


Fig. 12 Streamlines for 12 % elliptical airfoil with a synthetic jet actuator near leading edge

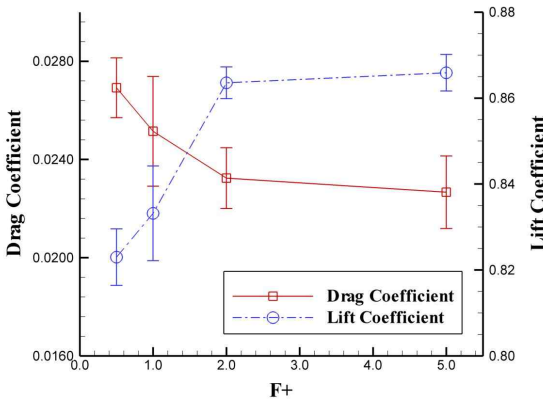


Fig. 13 Drag and Lift coefficient in terms of  $F^+$  at 8 degrees of angle of attack, 12 % thickness elliptical airfoil

된다. Fig. 13은 받음각이 8°일 때, 타원형 익형의 뒷전 ( $x/c = 0.9$ )에 합성제트가 위치하였을 때, 무차원 주파수에 따른 양력계수와 항력계수를 나타낸 것이다.  $F^+ = 0.5$ 일 때 비해 무차원 주파수가 높을수록 항력계수는 감소하고, 양력계수는 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 항력계수와 양력계수의 진동하는 폭은 Fig. 9에서처럼 무차원 주파수가 높아질수록 줄어드는 것은 볼 수 없었다. 합성제트 유동제어장치가 앞전에 위치했을 때에는 외부유동과의 간섭으로 인해 와류가 생기지만, 합성제트가 뒷전에 위치했을 때에는 와류가 거의

생기지 않기 때문이다. 그 원인은 앞전 부근에 위치했을 때에는 합성제트 주변의 외부유동이 빠르기 때문에 외부유동과의 간섭이 더 강력하게 발생하여, 간섭으로 인해 발생하는 와류의 세기가 더 강하지만, 뒷전에 위치했을 경우에는 외부유동이 상대적으로 느리기 때문에 외부유동과의 간섭효과가 작은 것으로 볼 수 있다. 뿐만 아니라, 앞전에 비해 뒷전에 합성제트 유동제어장치가 위치하는 경우가 경계층이 발달하여 경계층의 두께가 상대적으로 많이 두껍기 때문에 외부유동과의 간섭효과가 작아, 간섭으로 인해 발생하는 와류가 거의 생기지 않는 것으로 생각된다.

### 3.4 타원형 익형의 유동박리 제어결과

Fig. 5,6은 12 % 두께비를 가지는 타원형 익형의 공력해석 결과와  $F^+ = 5.0$ 인 합성제트 유동제어장치를  $x/c = 0.00025$ 에 위치했을 때와  $x/c = 0.9$ 에 위치했을 때의 수치해석결과다. 낮은 받음각에서는 합성제트가 박리점 근처인  $x/c = 0.9$ 에 위치했을 때, 공력성능이 더 많이 향상되지만, 받음각 10° 이후에서는 앞전에서 박리가 생겨 합성제트가 박리 이후의 영역에 위치하기 때문에 더 이상 유동제어 효과는 없었다. 그에 비해 합성제트가  $x/c = 0.00025$ 에 위치했을 때에는  $x/c = 0.9$ 에 위치했을 때에 비해서는 적지만 낮은 받음각에서도 공력성능이 향상되었고, 앞전에서 발생하는 박리도 제어하여 실속 받음각을 약 4° 정도 지연시키는 것을 확인하였다.

Fig. 7,8은 15 %의 두께비를 가지는 타원형 익형의 양력계수와 항력계수이며, 12 %의 두께비를 가지는 타원형 익형과 마찬가지로  $x/c = 0.00025, 0.9$ 에 각각 위치시켜 동일한 조건으로 합성제트를 수치적으로 구현하여 얻은 결과다. 12 % 두께비의 타원형 익형과 마찬가지로 낮은 받음각에서는 합성제트 유동제어장치가 뒷전에 위치했을 때 더 많은 공력성능이 향상되었지만, 높은 받음각에서 앞전에 발생하는 박리를 제어하지 못하였으며,  $x/c = 0.00025$ 에 위치하였을 때 앞전에서 발생하는 박리를 제어하여 실속 받음각을 지연시키는 것을 확인 할 수 있었다.

## 4. 결론

$Re = 8.0 \times 10^5$ 에서 12 %와 15 % 두께비를 가지는 타원형 익형에 타원형을 수치해석하고 합성제트를  $x/c = 0.00025, 0.9$ 에 위치시켜 각 경우 무차원 주파수에 따른 수치해석을 수행하였다.

- (1) 해석을 수행했던 레이놀즈 수에서 낮은 받음각에서는 압력면에 비해 흡입면의 작은 순환의 크기로 인한 캠버효과가 생겨 양력계수의 기울기가  $2\pi$ 보다 크지만, 특정 받음각 이후에서는 양력계수의 기울기가  $2\pi$ 보다 작아진다.

- (2) 합성제트를 앞전에 위치시켜 무차원 주파수에 따라 합성제트의 유동특성을 살펴본 결과, 주파수가 높아질수록 외부유동과의 간섭으로 인해 생기는 와류의 크기가 작아졌으며, 작아지는 와류의 크기로 인해 공력계수의 진동폭이 작아진다.
- (3) 뒷전에 합성제트가 위치하였을 경우, 외부유동의 속도가 앞전에 비해 상대적으로 느릴 뿐 아니라 경계층의 두께도 상대적으로 두꺼워 외부유동과의 간섭으로 인해 발생하는 와류가 거의 발생하지 않는다.

### 참고문헌

- [1] 1975, Collins, F.G. and Zelenvitz, J., "Influence of sound upon separated flow over wing," *AIAA Journal*, Vol.13, No.3, pp.480-410.
- [2] 1988, Smith, B.L. and Glezer, A., "The formation and evolution of synthetic jets," *Physics of Fluids*, Vol.10, No.9, pp.2281-2297.
- [3] 2002, Smith, B.L. and Glezer, A., "Jet vectoring using synthetic jets," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.458, pp.1-34.
- [4] 2005, Gilarranz, J.L., "A new class of synthetic jet actuators - Part I: design, fabrication and bench top characterization," *J. Fluids Engineering*, Vol.127, pp.367-376.
- [5] 2005, Gilarranz, J.L., "A new class of synthetic jet actuators - Part II: application to flow separation control," *J. Fluids Engineering*, Vol.127, pp.377-387.
- [6] 2008, You, D. and Moin, P., "Active control of flow separation over an airfoil using synthetic jets," *Journal of Fluids and Structures*, Vol.24, pp.1349-1357.
- [7] 2007, Günther, B., Thiele, F., Petz, R., Nitsche, W., Sahner, J., Weinkauff, T. and Hege, H.-C., "Control of Separation on the Flap of a Three-Element High-Lift ConFigureation," *AIAA-2007-265*.
- [9] 2006, Duvigneau, R. and Visonneau, M., "Optimization of a synthetic jet actuator for aerodynamic stall control," *Computer & Fluids*, Vol.35, pp.624-638.
- [8] 2009, Höll, T., Günther, B. and Thiele, F., "Numerical Investigation of segmented actuation slots for active separation control of a high-lift conFigureation," *AIAA-2009-887*.
- [10] 2007, Duvigneau, R., Hay, A. and Visonneau, M., "Optimal location of a synthetic jet on an airfoil for stall control," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.129, pp.825-833.
- [11] 2009, Kim, S.H. and Kim, C., "Separation control on NACA23012 using synthetic jet," *Aerospace Science and technology*, Vol.13, pp.172-182.
- [12] 2005, Kwon, K.J., "Aerodynamic characteristics of an elliptic airfoil at low Reynolds Number," *Journal of aircraft*, Vol.42, No.6, pp.1642-1644.
- [13] 2008, Choi, S.Y. and Kwon, O.J., "Aerodynamic Characteristics of elliptic airfoils at high Reynolds numbers," *Journal of Aircraft*, Vol.45, No.2, pp.641-650.
- [14] 2007, Hong, W., "Study of flow control character using synthetic jet," *MS thesis*, Seoul national university, Seoul.
- [15] 2004, Menter, F.R., Langtry, R.B., Likki, S.R., Suzen, Y.B., Huang, P.G. and Volker, S., "A correlation based transition model using local variables Part 1. Model formulation," *ASME-GT2004-53452*.
- [16] 2000, Kral, L.D., Donovan, J.F., Cain, A.B. and Cary, A.W., "Numerical simulation of synthetic jet actuators," *AIAA-2000-2697*.