論文

연속적 블로잉에 따른 NACA 0015 익형 공력특성 변화에 대한 수치적 연구

최성윤*, 권오준**

Numerical Study about the Effect of Continuous Blowing On Aerodynamic Characteristics of NACA 0015 Airfoil

Sung Yoon Choi* and Oh Joon Kwon**

ABSTRACT

The effects of continuous blowing on flow control and stall suppression for flows over a NACA 0015 airfoil at low Reynolds numbers were numerically investigated through its parameter variation on unstructured meshes. The aerodynamic force and moment variations due to flow control were examined, along with the stall angle-of-attack change for stall suppression. The results showed that blowing with relatively strong jet increases lift at the cost of drag increment below stall angle. Continuous blowing delays flow stall when it is implemented near the leading edge. When the blowing jet was aligned along the flow direction on the airfoil, the favorable flow control effect was most significant below the stall angle of attack.

초 록

본 연구에서는 연속적 블로잉 요소들의 변화가 낮은 레이놀즈 수를 가지는 유동장에서 NACA 0015 익형 주위의 유동제어 및 익형의 실속제어에 미치는 영향에 대하여 비정렬 격자계를 사용하는 수치적 기법을 이용하여 살펴보았다. 실속 이전의 받음각들에서 연속적 블로잉 요소들의 변화에 따른 공력계수 및 모멘트 계수의 변화를 통하여 각 요소들의 유동제어 효과를 살펴보았으며, 각 요소들의 변화에 따른 실속각의 변화를 통하여 실속제어 효과를 살펴보았다. 실속이전의 받음각에서 비교적 강한 세기의 블로잉을 수행하면 항력의 증가를 동반한 양력의 증가가 나타났다. 앞전부근에서의 적절한 세기의 연속적 블로잉은 실속이전의 각에서 양력의 증가를 나타내고, 실속제어 특성을 보였다. 블로잉 제트의 방향이 유동제어를 하지 않았을 때의 블로잉 슬롯 주변 유동의 방향과 일치하는 경우가 가장 좋은 유동제어 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

Key Words : Continuous Blowing(연속적 블로잉), Unstructured meshes(비정렬 격자), Aerodynamic characteristics(공력특성)

Ⅰ. 서 론

수동적 혹은 능동적 유동제어 기법을 이용한 익형의 공력특성 향상에 대한 연구는 지난 십수년간 공기역학 분야의 중요한 연구내용 중의 하나였으며, 현재까지도 활발한 연구가 진행되고

† 2006년 2월 17일 접수 ~ 2006년 4월 11일 심사완료
* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원
** 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
연락저자, E-mail : ojkwon@kaist.ac.kr
대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

있다. 익형의 형상을 변화시키거나 플랩(Flap) 혹은 슬랫(Slat)등의 외부 장착물을 추가하여 익형의 공기역학적인 성능을 향상시키는 수동적인 유동 제어기법은 유동제어를 위한 부가적인 에너지 투입이 요구되지 않으며, 구현이 용이한 장점을 가진다. 그러나 수동적인 유동제어 방법은 설계시에 고려된 유동조건 이외에서는 공력특성의 향상이 크게 나타나지 않고, 익형에 부착되는 외부 장착물로 인한 항력의 증가를 유발하는 단점을 가지고 있다. 이러한 수동적인 유동 제어기법의 한계를 극복하기 위하여 제시된 것이 능동적 유동제어 기법이다. 능동적 유동제어 기법은 수동적 유동제어 기법과는 달리 익형주위의 유동이 목적하는 거동을 할 수 있도록 경계층 내부에 인위적인 속도 교란을 발생시키기 위한 운동량과 에너지를 공급해 줌으로써 난류 혼합율을 향상시켜 주거나, 경계층 내부와 외부의 혼합율을 증가시키기 위하여 경계층 외부유동의 에너지를 내부로 유입시켜 박리를 지연시키는 것을 기본 개념으로 한다. 이러한 능동적 유동 제어기법의 방법으로 블로잉(Blowing), 흡입(Suction), 인조제트 구동장치(Synthetic jet actuator), 와유동 생성 제트(Air-jet vortex generator), Piezo-electric system 등을 들 수가 있다. 위에서 제시한 능동적 유동제어 기법들 중 고전적인 능동적 유동제어 기법에 속하는 연속적 블로잉 (continuous blowing)의 경우 간헐 제트(pulsed jet)를 이용한 유동 제어기법들에 비하여 에너지의 공급량이 많아 효율이 떨어지기는 하나, 이들 기법의 기초가 되는 방법이고 간헐 제트를 이용한 유동제어 기법들의 blowing phase에서 나타나는 유동제어 특성들이 연속적 블로잉과 유사하므로, 연속적 블로잉에 대한 연구는 능동적 유동제어 기법에 대한 기초연구로 중요하다고 할 수 있다.

Towne등[1]은 앞전 부근에서의 연속적 블로잉을 통하여 층류 유동장에서 동실속 발생을 지연시킬 수 있음을 수치적 해석결과를 통하여 보였다. Weaver등은[2,3] 연속적인 블로잉이 준 정상(quasi-steady) 상태의 VR-7익형의 양항비 증가와 낮은 받음각에서의 모멘트의 감소를 유발하며, 동실속의 발생을 지연시킬 수 있음을 실험을 통하여 보여 주었다. 하지만 이들의 결과는 유동제어 결과에 영향을 미치는 블로잉의 요소(parameter)들에 대한 다양한 고려가 이루어지지 않았다. Huang[4]등은 NACA 0012 익형의 실속이 발생하는 받음각 18도에서 연속적 블로잉의 요소(parameter)들의 변화에 따른 연속적 블로잉의 실속제어 특성의 변화에 관한 수치적 연구를 수행하였다. Huang의 연구에서는 실속이후의 하나의 받음각에 대한 실속제어 특성 연구만을 수행하여 실속각 이전의 받음각에서의 연속적 블로잉을 통한 유동제어 효과에 대하여 고려하지 못하였다. 이기영 등은[5,6] 일반적 익형과 다른 형상적 특징을 가지는 타원형 익형에서도 연속적 블로잉이 실속이전의 받음각에서 공력 특성의 향상을 나타내고, 실속을 지연시킬 수 있음을 보였다.

본 연구에서는 이전 연구자들에 의하여 공력특성이 비교적 잘 알려져 있는 NACA 0015 익형에 대하여 일반적으로 유동제어 특성에 영향을 미치는 것으로 알려진 연속적 블로잉의 요소인 블로잉 제트의 무차원 세기(c_μ), 블로잉 제트의 각도(A_j), 블로잉 제트 슬롯의 위치(L_j), 블로잉 제트 슬롯의 폭(W_j) 등을 체계적으로 변화시켜가며 이러한 요소들의 변화가 유동장 및 공력특성의 변화에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 살펴보았고, 이를 통하여 각 요소들의 유동제어 특성 및 실속제어특성에 대하여 조사하였다.

II. 지배방정식 및 수치해석 기법

2.1 지배방정식

이차원 에어포일 주위의 유동을 해석하기 위하여 비정상, 압축성 Navier-Stokes방정식을 이용하였고, 수치해석에 사용된 적분형태는 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V Q\,dV+\oint_{\partial V} F(Q,n)\,dS=\int_V G(Q,n)dV \qquad (1)$$

난류의 영향을 고려하기 위하여 1-방정식 모형인 Spalart-Allmaras 모형을 사용하였다.

2.2 수치해석 기법

수치해석을 위한 지배방정식의 공간적 차분을 위하여 비정렬 격자계에서의 격자점 중심의 유한체적법을 이용하였다. 비점성 유속의 계산을 위하여 Roe의 FDS 방법을 이용하였고, 점성 유속의 계산을 위하여는 2차 정확도의 중심 차분법으로 규칙적인 격자에서 뿐만 아니라 불규칙적인 격자에서도 positivity 조건을 보장해주며, 혼합격자를 사용하는 경우에도 격자 형상에 관계없이 계산이 가능한 방법[7]을 사용하였다. 시간적분을 위하여는 Gauss-Seidel 반복계산 기법을 이용한 2차 정확도의 내재적 방법을 사용하였다. 수렴성 증진 및 계산 효율의 증가를 위하여 정상 상태에서는 국소시간 전진기법을, 비정상 상태에서는

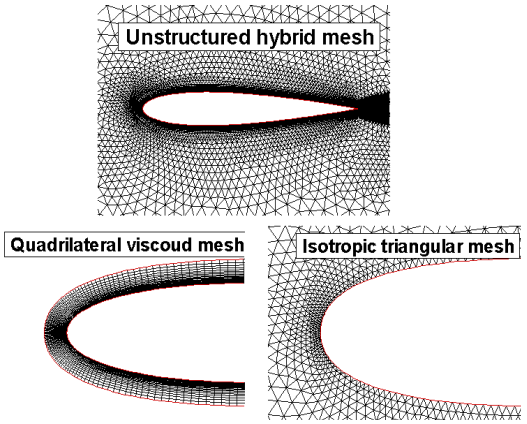


Fig. 1. Computational grid around the NACA 0015 airfoil

이중 시간 전진 기법을 각각 도입하였다. 익형상에서의 유동천이를 수치적으로 모사하기 위하여 Spalart-Allmaras 난류모형의 천이항을 이용하였으며, 유동조건과 받음각의 변화에 따른 익형상의 유동천이 점의 변화는 난류모형의 천이점에 대한 변수값을 변화시켜 고려하였다.

2.3 계산 격자

Fig. 1은 본 연구에 사용된 NACA 0015익형 주위의 혼합 격자계를 나타낸 것이다. 점성유동장의 경계층 내부에 대한 수치해석을 위하여 익형주위에 높은 가로세로비를 가지는 점성격자를 사용하여 수직방향으로 조밀한 격자계를 형성하고, 수치해석의 효율을 높이기 위하여 점성 격자계 이외의 수치해석 영역은 등방성의 삼각형 격자계를 이용하여 구성하였다. 격자계의 벽면에서의 초기두께는 2×10^{-5} 이고, 원방경계는 시위의 20배에 위치하였다.

2.4 경계조건

원방경계에서는 국소적인 1차원 유동으로 가정하여 Riemann 불변량을 이용하여 유입·유출 경계조건을 사용하였다.

블로잉 제트를 수치적으로 모사하기 위하여 블로잉 제트가 분사되는 익형의 벽면에 식 (2)를 이용하여 구한 무차원 속도를 경계조건으로 사용하였으며, 블로잉 제트가 고려되지 않은 익형의 벽면에서는 점착조건을 고려하여 벽면의 속도가 0이 되도록 하였다.

$$u = V_j\cos(\theta + A_j)\,,\; v = V_j\sin(\theta + A_j) \qquad (2)$$

여기서 u, v는 각각 x, y방향의 블로잉 제트의 무차원 속도성분이며, 이들 각각은 고려된 블로잉 제트의 무차원 세기(c_μ) 및 블로잉 제트 슬롯의 폭(W_j)과 익형 시위의 길이(c), 자유류의 밀도 및 동압력을 고려하여 구한 블로잉 제트의 전체 무차원 속도($V_j^2 = \frac{c_\mu q_\infty c}{\rho_\infty W_j}$)를 블로잉 제트가 구현되는 익형 벽면의 각도(θ) 및 고려한 블로잉 제트의 각도(A_j)를 이용하여 x, y방향 성분으로 나누어 준 것이다.

III. 계산 결과 및 분석

Fig. 2는 본 연구에 사용된 연속적 블로잉 제트의 요소들이 에어포일 상에 어떻게 적용되는지에 관해 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는바와 같이 블로잉 제트 슬롯의 위치(L_j)는 익형의 앞전에서 블로잉 제트가 적용되는 위치까지의 무차원 거리를 의미하며 시위의 백분율 값으로 나타내었다. 블로잉 제트 슬롯의 폭(W_j) 역시 시위의 백분율로 표기하였으며, 블로잉 제트가 고려되는 익형상의 무차원 길이를 의미한다. 블로잉 제트의 각도(A_j)는 블로잉 제트의 방향과 블로잉 제트가 분사되는 익형 벽면이 이루는 각도로 degree로 표기하였다.

본 연구에서 사용된 각 요소의 값들을 Table 1에 나타내었다. 2.4절에 언급한 바와 같이 블로잉 제트는 익형 벽면에 경계조건의 형태로 주어지므로 블로잉 제트의 적절한 모사를 위하여는 블로잉 제트 슬롯의 폭(W_j) 이내에 일정 수 이상의 벽면

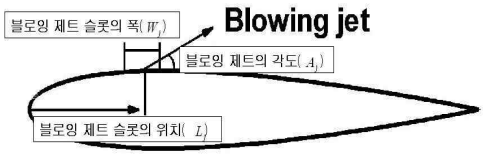


Fig. 2. Schematic of blowing parameters

Table 1. Continuous blowing parameters considered in the present study

L_j(%c)	A_j(deg)	C_μ	W_j(%c)
5	15	0.054	0.1
10	30	0.094	0.5
70	45	0.19	1.0

격자점이 요구되는데, 슬롯이 $L_j = 10\%c$ 혹은 $L_j = 70\%c$ 지점에 위치한 경우에 대해 $W_j = 0.1\%c$ 인 경우를 고려하기 위해서는 상당히 많은 격자점이 요구되어진다. 따라서 본 연구에서는 블로잉 슬롯의 폭(W_j)의 변화에 따른 유동제어 특성의 변화에 대한 연구에서만 Table 1에 제시된 세 가지 블로잉 슬롯 폭들에 대하여 고려하였고, 나머지 특성 연구에서는 블로잉 슬롯의 폭을 $W_j = 1\%c$ 로 고정하여 연구를 수행하였다. 3.3절 이후에서는 Table 1에 주어진 것과 같이 블로잉 슬롯의 폭을 제외한 3가지 요소당 3가지씩의 경우를 고려하였을때 나타난 27가지 경우 중 각 블로잉 제트 요소 값의 변화에 따른 유동제어 효과를 쉽게 확인할 수 있는 경우들을 결과들에 나타내었다.

3.1 수치해석 기법의 검증

낮은 레이놀즈수 유동장에 대한 수치해석 기법의 검증을 위하여 참고문헌[8]의 NACA 0015 익형에 대한 실험결과와 동일 유동조건인 $M_\infty = 0.1$, $Re = 3.6\times10^5$에 대하여 전체 유동장을 난류 유동장으로 가정하여 수치해석을 수행한 결과를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 대부분의 받음각에서 양력, 항력은 수치해석 결과가 실험결과와 비교적 잘 일치됨을 확인할 수 있으나, 1/4c에 대한 모멘트 계수에의 경우 실험치와 약간의 차이를 나타낸다. 이러한 모멘트 계수의 차이는 실험에서는 강제천이를 하지 않아 익형상에서 천이가 발생하는데 반하여 수치해석에서는 전체 유동장을 난류 유동장으로 가정하여 익형상에서 이러한 천이 현상이 거의 나타나지 않는것에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 낮은 레이놀즈수 유동장에서 연속적 블로잉을 이용한 유동제어의 수치모사의 정확성에 대한 검증을 위하여 참고문헌 [9]의 NACA 0015 익형에 대한 $\alpha = 22°$, $Re = 3\times10^5$에서의 실험결과와 동일한 유동 조건에 대한 수치해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 제시한 수치해석 결과들은 익형상의 유동천이를 고려하였을 경우의 결과들이다. 주어진 블로잉 제트의 무차원 세기에 대하여 수치해석 결과들이 실험치와 거의 일치하는 양력계수 값을 나타내며, 연속적 블로잉을 통한 실속제어가 나타나는 무차원 세기와 그 이후의 무차원 세기에 대한 양력곡선의 기울기까지 거의 일치하여 나타남을 확인할 수 있다. 위의 두 결과를 통하여 본 연구에 사용한 수치해석기법이 낮은 레이놀즈 수 유동장에서 연속적 블로잉을 이용한 NACA 0015 익형의 유동제어 특성에 대한 적절한 예측이 가능함을 확인할 수 있었다.

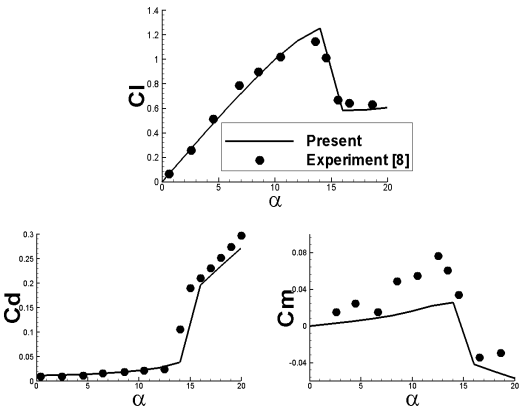


Fig. 3. Predicted aerodynamic force and moment coefficients compared with experimental results[8] ($M_\infty = 0.1$, $Re_c = 3.6\times10^5$)

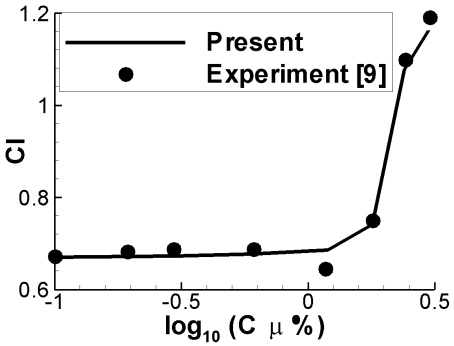


Fig. 4. Predicted lift coefficient compared with experimental results[9] ($M_\infty = 0.1$, $Re_c = 3.0\times10^5$, $\alpha = 22°$)

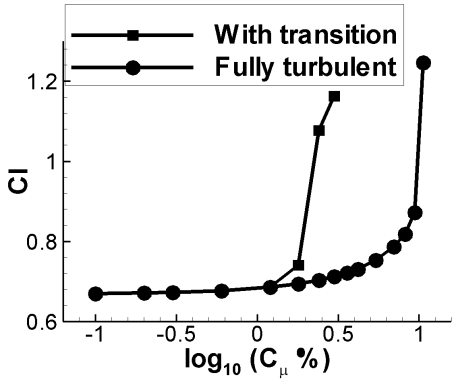


Fig. 5. Comparison of lift coefficient verse C_μ between with transition and fully turbulent cases($M_\infty = 0.1$, $Re_c = 3.0\times10^5$, $\alpha = 22°$)

Fig. 5는 익형 상에서의 유동의 천이를 고려해 준 경우와 주어진 수치해석 영역을 모두 난류 유동장이라고 가정한 경우 두 가지에 대하여 연속적 블로잉을 적용하였을때 나타나는 실속제어 특성에 대한 비교를 나타낸 것이다. 수치해석에 사용된 유동조건은 Fig. 4에서 고려한 것과 같다. 그림에서 확인할 수 있듯이 난류유동장의 경우가 유동천이를 고려한 경우에 비하여 더 높은 무차원 세기에서 실속제어 특성을 나타내는데, 이를 통하여 연속적 블로잉을 이용한 실속제어에서 난류 유동장의 경우 층류 유동장에 비하여 실속제어를 위해 더 높은 에너지가 투입되어야 함을 쉽게 짐작할 수 있다. 이러한 경향은 난류 유동장이 층류 유동장에 비하여 경계층에서 더 높은 운동량을 가지므로, 박리에 더 둔감해지고 박리 발생 후에는 박리 유동장에서의 에너지가 더 높아지기 때문인 것으로 판단된다[10].

익형에서의 천이는 익형주위 유동조건에 많은 영향을 받는다. 특히 경계층 내부에 에너지를 투입하는 연속적 블로잉의 경우 블로잉 제트 요소들의 변화에 따라 익형 상에서의 천이점의 변화는 더욱 복잡해질 것으로 예상된다. 현재까지 제시된 천이점 예측기법들을 이용하여 다양한 블로잉 요소들을 고려한 연속적 블로잉 하에서 정확한 천이점을 예측하는 것은 상당히 어려운 문제이다. 그러나 본 연구에서 수행하고자 하는 것이 연속적 블로잉의 요소의 변화에 따른 유동제어 특성에 관한 연구이고, Fig. 5에서 보여지는 것과 같이 난류 유동장에서 연속적 블로잉을 이용한 실속제어 결과가 천이를 고려한 유동장에서의 결과에 비하여 높은 무차원 세기쪽으로 평행 이동해있기는 하지만 거의 유사한 형태를 나타내므로, 난류 유동장과 천이를 고려한 유동장에서 연속적 블로잉의 요소 변화에 대한 유동제어 경향이 서로 유사하게 나타날 것이라 예상된다. 따라서 본 연구에서는 $M_\infty = 0.1$, $Re_c = 3.6\times10^5$인 유동조건에 대하여 유동장 전체를 난류로 가정하고 수치해석을 수행하였다.

3.2 블로잉 슬롯의 넓이 변화에 따른 유동제어 특성의 변화

연속적 블로잉의 요소 중 블로잉 슬롯 폭의 변화에 대한 유동제어 특성에 대하여 살펴보기 위하여 $W_j = 0.1\%c$, $W_j = 0.5\%c$, $W_j = 1.0\%c$의 세가지 블로잉 슬롯의 폭을 가지는 경우에 대하여 연구를 수행하였다. 계산에 사용된 유동조건은 $\alpha = 22°$, $M_\infty = 0.1$, $Re = 3.6\times10^5$이고, 연속적 블로잉 제트의 무차원 세기를 증가시켜가며 세 경우의 실속제어 특성에 대하여 살펴보았으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 블로잉 슬롯의 폭이 0.1%c인 경우 가장 낮은 무차원 세기에서 실속제어 특성을 나타내었으며, 블로잉 슬롯의 폭이 증가할수록 실속 제어를 위하여 요구되는 무차원 세기가 증가하였다.

연속적 블로잉을 통하여 실속제어가 이루어 지는 것으로 판단되는 양력계수의 값이 1 이상으로 높아지는 지점에서의 무차원 세기 및 그때의 연속적 블로잉 제트의 무차원 속도를 Table 2에 나타내었다. 식 (2)에서 나타낸 무차원 세기(c_μ)가 동일할 경우 경계층 내부에 투입되는 질량유량(mass flux)이 동일하게 나타난다. 따라서 동일 무차원 세기를 가지는 유동제어 제트에서는 블로잉 슬롯의 폭이 증가함에 따라 유동제어 제트의 속도가 감소하게 된다. 이러한 효과에 의하여 Table 2에서와 같이 $W_j = 0.1\%c$에서의 c_μ값이 가장 낮은데 반하여 가장 높은 속도를 가지며, $W_j = 1.0\%c$의 경우가 가장 높은 c_μ값을 가지는데 반하여 가장 낮은 무차원 속도를 가지게 된다. 위의 내용을 통하여 실속제어를 위하여 에너지를 잃은 경계층 내부에 빠른 속도의 적은 유량을 투입하거나 비교적 낮은 속도의 많은 유량을

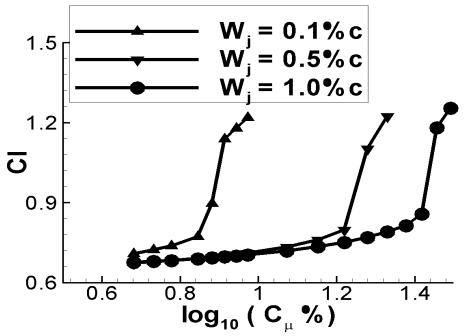


Fig. 6. Comparison of lift coefficient verse C_μ between different blowing jet slot width($M_\infty = 0.1$, $Re_c = 3.6\times10^5$, $\alpha = 22°$)

Table 2. Comparison of required control jet strength and non-dimensionalized control jet velocity for flow reattachment using different control slot width

W_j	0.1%c	0.5%c	1.0%c
c_μ	0.082	0.19	0.286
V_j	0.64	0.436	0.378

투입하여야 하는데, 유동제어 제트 슬롯의 폭을 감소시켜 경계층 내부에 투입되는 유동의 속도를 증가 시키는 것이 더 효율적인 실속제어 특성을 보일 것임을 쉽게 유추할 수 있다.

3.3 블로잉 제트의 세기에 따른 유동제어 특성의 변화

블로잉 제트의 세기에 따른 유동제어 특성의 변화를 확인하기 위하여 무차원 세기를 $c_\mu = 0.054$, $c_\mu = 0.094$, $c_\mu = 0.19$로 변화시켜주고, 다른 요소들은 $A_j = 15^\circ$, $W_j = 1.0$으로 고정하여 수치해석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 5% 지점에서의 연속적 블로잉 결과와 10%지점에서의 결과가 거의 유사한 경향을 나타내어 그림에서는 10%, 70%지점에서의 결과만을 도식하였다.

그림에서 보여지듯이 가장 낮은 $c_\mu = 0.054$의 세기로 앞전 부근에서 연속적 블로잉을 수행하였을 경우 실속이전의 받음각에서 유동제어를 수행하지 않은 경우에 비하여 주어진 받음각에서 더 낮은 양력 계수와 더 높은 항력 계수값을 나타내어 낮은 양향비 값을 가졌다. 즉, 유동제어를 수행하지 않은 경우에 비하여 좋지 않은 공력특성을 나타내었다. 연속적 블로잉의 무차원 세기가 $c_\mu = 0.094$가 되면 실속이전의 받음각에서 양력계수 및 항력계수의 값들이 유동제어를 수행하지 않은 경우의 값들에 비하여 약간 높은 정도의 수준을 나타내었고, 양항비의 특성 역시 유동제어를 하지 않은 경우에 비하여 거의 유사한 값들을 나타내었다. 무차원 세기를 계속적으로 증가시켜 $c_\mu = 0.19$가 되면 실속이전의 받음각에서 더 높은 양력계수와 유사한 정도 수준의 항력계수 값을 나타내어 양항비 특성이 향상된다. 위의 결과들에서 연속적인 블로잉의 경우 무차원 세기가 증가할수록 유동제어 특성이 좋아지는 것을 확인할 수 있다.

Table 3은 유동제어 슬롯에서의 무차원 속도를 유동제어를 하지 않았을 때 동일 위치를 지나는 유동장의 속도로 무차원화하여 나타낸 것이다.

Table 3. Comparison of non dimensional control jet velocity with different control jet strengths($V_j^* = \frac{V_{j,\,with\,control}}{V_{without\,control}}$)

c_μ	0	0.054	0.094	0.19
V_j	0.187	0.164	0.217	0.308
V_j^*	1	0.877	1.16	1.65

표에서 보여지는 결과들과 Fig. 7(a)에서의 결과들을 동시에 고려해보면 유동제어 제트의 속도가 유동제어를 수행하지 않은 유동장에서의 속도에 비하여 낮은 경우 유동의 흐름을 방해하는 역효과를 나타내어 유동제어를 하지 않은 경우에 비하여 좋지 않은 공력특성을 나타내므로, 연속적 블로잉을 통하여 공력특성의 향상을 나타내기 위하여는 유동제어를 하지 않은 경우에 비하여 더 높은 속도를 가지는 유동제어 제트를 분사해 주어야 함을 쉽게 알 수 있다.

실속이 발생하는 받음각 14도 이후의 받음각에서 $c_\mu = 0.054$와 $c_\mu = 0.094$의 경우 양력이 거의 일정한 수준으로 유지되어지고, 항력이 약간 증가하는 정도의 수준으로 실속이 지연되는 것을 확인할 수 있고, $c_\mu = 0.19$에서는 받음각 20도까지 실속이 지연되는 것을 양력, 항력 및 1/4c지점에 대한 모멘트 계수들의 변화를 통하여 확인할 수 있다. 특히 $c_\mu = 0.19$의 경우 받음각의 증가에 비례하여 모멘트 계수가 증가하는데, 이러한 모멘트 계수의 증가 원인은 앞전부근에서 빠른 블로잉 제트의 의해 앞전주위 유동의 더 많이 가속되는 것에 따른 것이라고 판단된다[2]. 이러한 실속 이후의 받음각에서의 연속적 블로잉을 통한 실속제어에 대한 본 연구에서의 결과들은 참고문헌[2][3]에서 제시한 결과들과 유사하고, 참고문헌[4]에서 언급한 결과들과는 약간 상이한 결과들인데, 이러한 결과의 차이는 참고문헌[2][3]과 본 연구에서는 비교적 높은 무차원 세기의 연속적 블로잉 제트를 사용하였고, 참고문헌[4]에서는 비교적 낮은 무차원 세기의 연속적 블로잉 제트를 사용하였기 때문인 것으로 판단된다.

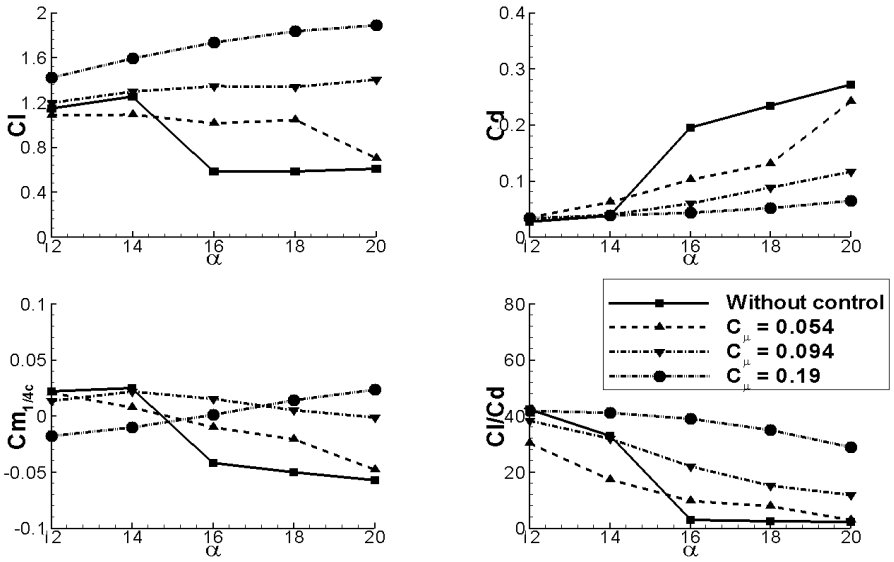
익형의 70%지점에서 연속적 블로잉을 수행한 경우 역시 10%지점에서와 마찬가지로 유동제어 제트의 무차원 세기가 증가할수록 동일 받음각에서 양력계수의 크기는 증가하였으나, 10%지점에서와는 달리 항력계수의 증가가 동시에 나타나 양항비 특성의 향상은 무차원 유동제어 제트의 크기에 관계없이 거의 유사하게 나타났다. 이 경우 연속적 블로잉에 의하여 모멘트 중심인 1/4c 이후에서 양력의 증가를 나타내어 고개 숙임 모멘트를 유발하게 되며, 무차원 세기가 증가할 수록 고개 숙임 모멘트 계수의 크기는 증가하여 나타났다.

3.4 블로잉 제트의 각도에 따른 유동제어 특성의 변화

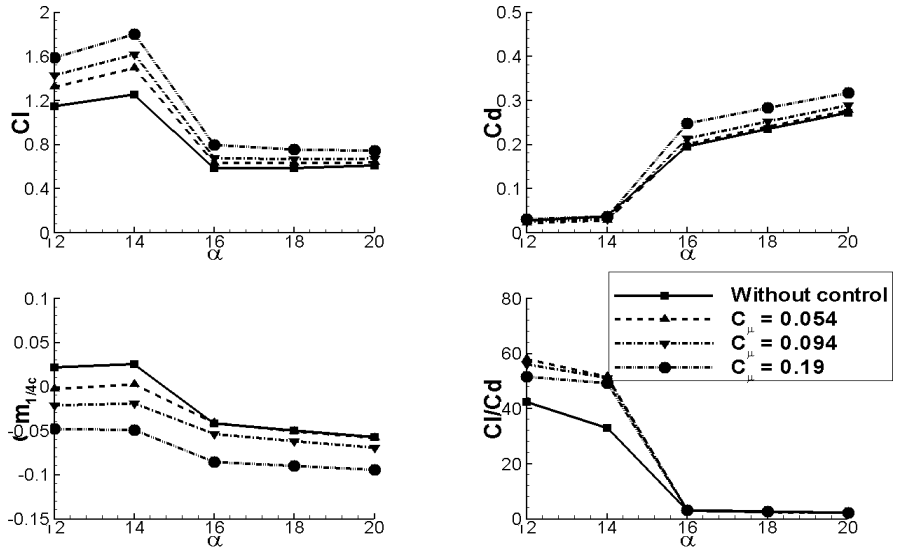
블로잉 제트와 익형의 벽면이 이루는 각도 변화에 따른 유동제어 특성의 변화를 확인하기 위

하여 5%, 10%, 70%지점에서 블로잉 제트의 각도를 $A_j = 15°$, , $A_j = 30°$, $A_j = 45°$로 변화시켜 주고, 나머지 요소들은 $c_\mu = 0.19$, $W_j = 1.0$으로 고정하여 수치해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

5%지점에서의 블로잉에서 블로잉 제트의 각도가 15도일 경우와 30도일 경우는 연속적 블로잉에 따라 실속 이전의 받음각에서 양력 특성의 향상이 나타남과 동시에 약간의 항력의 증가가 나타나 많은 양항비 특성의 향상을 나타내지는 못

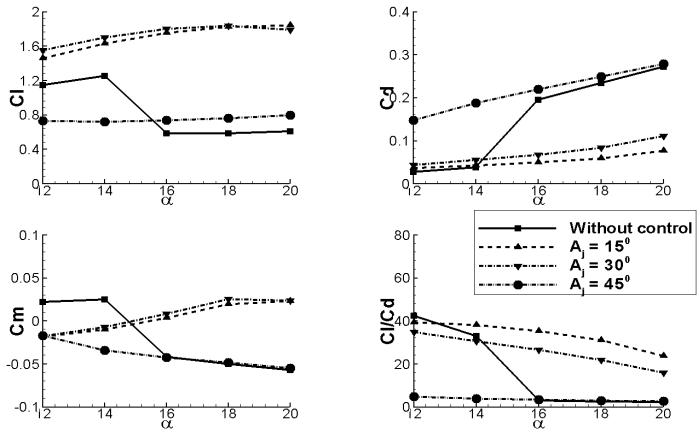


(a) $L_j = 10\%c$

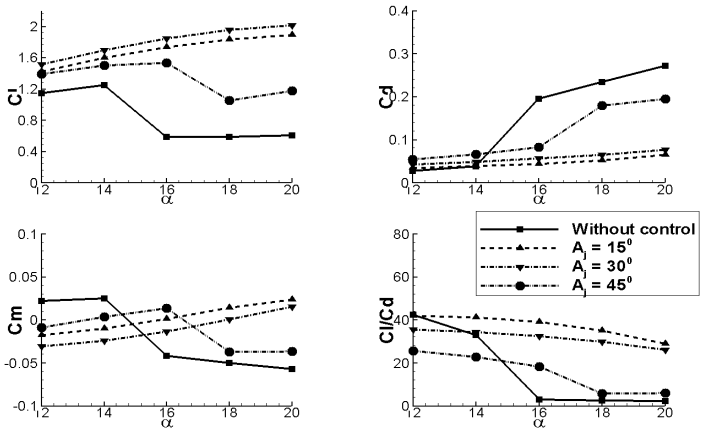


(b) $L_j = 70\%c$

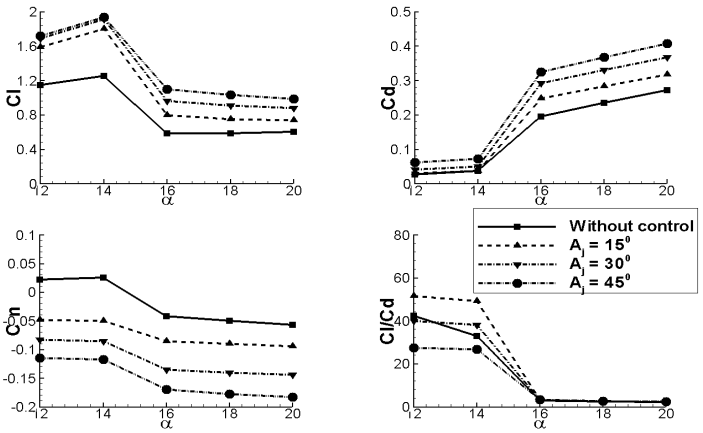
Fig. 7. Blowing jet strength effect on the aerodynamic force and moment coefficients at different blowing positions (A_j=15°, W_j= 1.0)



(a) $L_j = 5\%c$



(b) $L_j = 10\%c$



(c) $L_j = 70\%c$

Fig. 8. Blowing jet angle effect on the aerodynamic force and moment coefficients at different blowing positions ($c_\mu = 0.19$, $W_j = 1.0$)

하였다. 하지만 실속각 이후에서도 양력 계수값이 일정하게 유지되고, 실속에 따른 항력 계수값의 급격한 증가가 나타나지 않으며, 1/4c지점에 대한 모멘트 계수값의 급격한 감소가 나타나지 않는 것으로 미루어 본 연구에서 고려된 받음각 20도까지 실속은 지연되는 것을 확인할 수 있다. 블로잉 제트의 각도가 45도가 되면 실속 이전의 받음각에서 상당한 양력의 감소와 항력의 증가를 나타내어 그 결과 양항비의 값이 상당히 감소하여 유동제어를 하지 않은 경우에 비하여 더 낮은 값을 나타내는데, 이것의 원인은 블로잉 슬롯 직후의 유동장의 변화에 대하여 살펴본 Fig. 9를 통하여 찾을 수 있다.

Fig. 9는 받음각 14도에서 $L_j = 5\%c$, $c_\mu = 0.19$, $W_j = 1.0$로 고정하고, 유동제어 제트의 각도를 $A_j = 15°$, $A_j = 45°$, $A_j = 90°$로 변화 시켰을 경우 유동제어 슬롯 주위의 속도 벡터의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보여지듯이 블로잉 슬롯 주위의 유동장은 블로잉 제트의 방향과 같은 방향의 속도벡터를 나타낸다. 이러한 현상은 블로잉 제트에 의하여 블로잉 슬롯 부근에 가상의 벽면이 형성되고, 유동이 그 벽면 위를 지나가는 것과 유사한 현상이라고 할 수 있다. 따라서 앞전부근에서 익형 벽면에 평행한 방향으로 가속되어야 할 유동이 높은 각도의 블로잉 제트와 만나면서 수직방향의 속도 성분이 증가하여 에너지를 가진 유동이 경계층에서 멀어지면서 블로잉 슬롯 직후의 경계층에서는 급격하게 에너지가 감소하게 되고, 이에 따라 경계층 부근에는 정체된 유동장이 형성되어 유동 박리가 발생하게 된다. 그 결과로 높은 각도의 연속적 블로잉은 양력의 감소와 항력의 증가를 동반하게 된다.

10%지점에서의 블로잉에서도 제트의 각도가 증가할수록 양력계수의 값은 감소하고 항력계수의 값이 증가하여 양항비 특성이 나빠지는 것을 확인할 수 있다. $A_j = 15°$, $A_j = 30°$방향으로의 블로잉은 5%지점에서의 결과와 마찬가지로 실속제어 특성을 나타내었고, $A_j = 45°$방향으로의 블로잉에서는 5%지점의 결과와 다르게 실속이전의 받음각에서도 양력의 향상특성을 나타내었다. 10%지점에서는 세 경우 모두 정도의 차이는 존재하나 실속제어 특성을 나타내었다.

70%지점에서의 블로잉은 앞전부근에서의 블로잉과 양력계수에서 반대의 경향을 나타내었다. 즉, 블로잉 제트의 각도가 증가할수록 더 높은 양력계수의 증가를 나타내었다. 하지만 양력계수의 증가에 비례하여 항력계수의 증가가 나타나 양항비의 특성의 향상은 크게 나타나지 않았다.

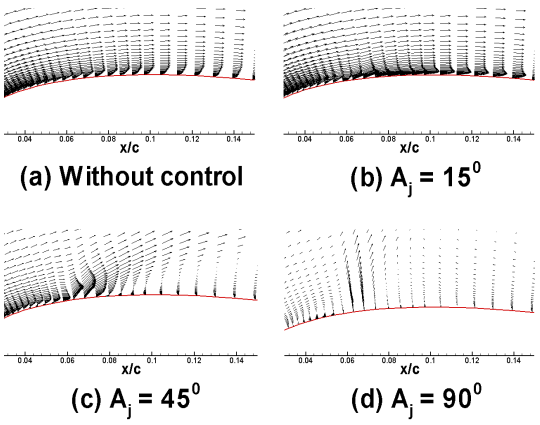


Fig. 9. Comparison of velocity vectors at different control jet angles ($L_j = 5\%c$, $\alpha = 14°$, $c_\mu = 0.19$, $W_j = 1.0$)

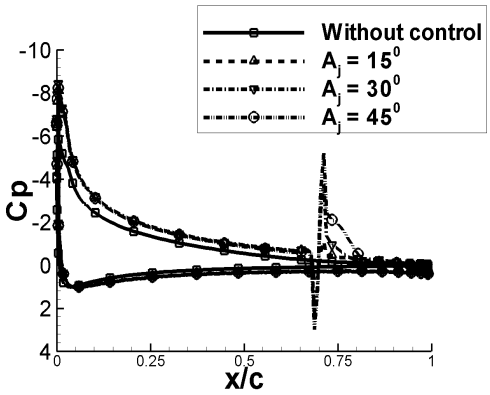


Fig. 10. Comparison of surface pressure distribution at different control jet angles ($L_j = 70\%c$, $c_\mu = 0.19$, $W_j = 1.0$)

이러한 경향은 Fig. 10에서 보여지는 표면 압력분포 그래프를 통하여도 설명할 수 있는데, 그림에서 보여지듯이 블로잉 슬롯 이전의 압력분포는 거의 유사하나 제트의 각도가 증가할수록 블로잉 슬롯 직후의 압력차이가 더 크게 나타나 양력값이 증가할 것임을 쉽게 유추할 수 있다. 70%지점에서의 블로잉의 경우 블로잉 제트의 각도가 증가할수록 고개숙임 모멘트의 증가량은 더 크게 나타나는데, 이러한 특징은 블로잉을 통하여 공급된 에너지가 유동제어를 수행하지 않았을 경우에 비하여 뒷전부근에 더 빠른 속도구배를 형성하여 Fig. 10에서와 같이 모멘트 중심 이후에서의 윗면과 아랫면의 압력차를 증가시켜 그 부분에서 양력의 증가를 가져오기 때문인 것으로

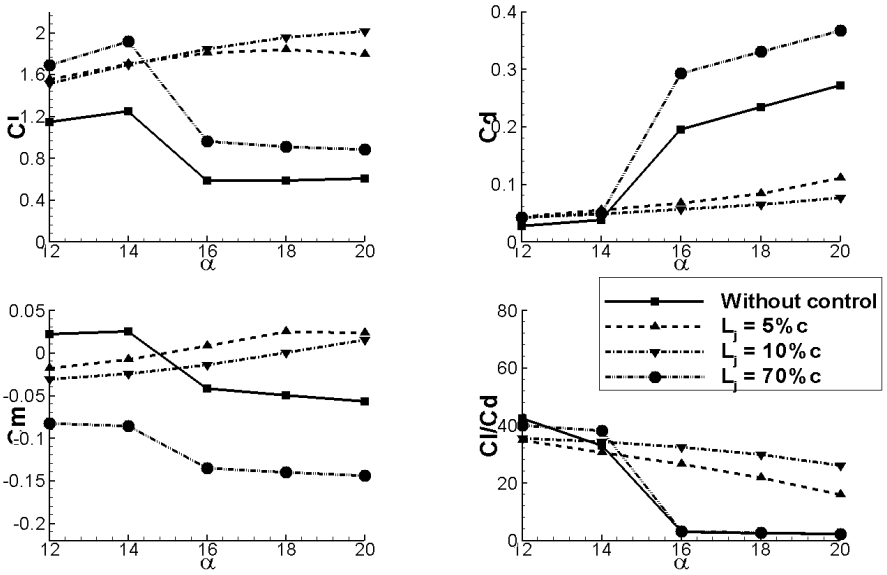


Fig. 11. Blowing jet position effect on the aerodynamic force and moment coefficients ($c_\mu = 0.19$, $A_j = 30°$, $W_j = 1.0$)

판단되어진다. 위의 결과들을 바탕으로 유동제어 제트의 각도는 유동제어가 이루어지지 않은 경우 익형 표면에서의 유동의 방향으로 이루어지는 것이 가장 좋은 유동제어 특성을 나타냄을 쉽게 유추할 수 있다.

3.5 블로잉 제트의 위치에 따른 유동제어 특성의 변화

블로잉 제트 슬롯의 위치에 따른 유동제어 특성의 변화를 확인하기 위하여 유동 제어슬롯의 위치를 5%, 10%, 70% 지점으로 변화시켜주고,유동제어 슬롯의 위치를 제외한 나머지 요소들은 $c_\mu = 0.19$, $A_j = 30°$, $W_j = 1.0$으로 고정하여 수치해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 블로잉 슬롯이 앞전쪽에 위치한 경우 실속이전의 각도에서의 양력계수의 향상 뿐만 아니라, 실속각 이후에서도 실속이 발생하지 않고 일정한 양력 계수값이 유지되는 것을 확인할 수 있다. 특히 10%지점에서의 블로잉의 경우 받음각에 대한 양력계수 곡선의 기울기의 감소가 거의 나타나지 않았다. 블로잉 슬롯이 뒷전쪽에 위치하면 실속이전의 받음각에서 앞전쪽에 슬롯이 위치한 경우에 비하여 더 높은 양력계수의 증가가 나타나기는 하나 유동제어를 하지 않은 경우와 유사한 실속특성을 나타내었다.

항력의 경우 앞전쪽에 블로잉 슬롯이 위치한 경우 약간의 항력의 증가가 나타나기는 하나 거의 대부분의 받음각에서 유사한 정도수준의 항력계수를 유지하였다. 하지만 블로잉 슬롯이 뒷전쪽에 위치한 경우 실속에 의한 항력의 급격한 증가가 받음각 16도에서 나타났다. 앞전쪽에서 블로잉을 수행한 경우 실속이전의 받음각에서 약간의 고개숙임 모멘트를 나타내었으나 실속제어 특성에 의하여 받음각의 증가에 따라 모멘트가 증가하는 형태를 나타내었다.

슬롯이 뒷전쪽에 위치한 경우 지속적인 고개숙임 모멘트를 나타내고, 실속각 이후에는 실속의 영향으로 인하여 더 높은 고개숙임 모멘트를 나타내었다. 양항비의 경우 실속각 이전에서는 양력의 증가와 더불어 항력의 증가가 나타나 양항비의 특성이 감소하는 것으로 나타났으나 실속각 이후에서는 앞전쪽에서 블로잉을 수행한 경우 실속지연에 따른 양력의 유지 혹은 증가에 의하여 블로잉을 수행하지 않은 경우에 비하여 더 높은 양항비를 나타내었다.

양항비의 증가 특성은 10%지점에서 블로잉을 수행한 경우가 가장 크게 나타나는데, 이것은 고려한 유동제어 제트의 각도가 30도여서 앞에서 언급한 바와같이 5%지점에서의 블로잉이 유동제어를 하지 않은 유동장의 가속을 방해하는 효과가 나타나 항력의 증가가 더 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 낮은 레이놀즈 수 유동장의 NACA 0015 익형에 대하여 연속적 블로잉을 수행한 경우, 블로잉 요소들의 변화에 따른 유동제어 특성에 대하여 살펴보았다. 실속 이전부터 실속 이후의 받음각까지를 고려하여 연속적 블로잉을 이용한 유동제어에 따른 공력특성의 향상 특성 및 실속제어 특성에 대하여 연구를 진행하였으며, 본 연구의 수치해석 결과를 바탕으로 아래의 결론들을 얻을 수 있었다.

1) 블로잉 슬롯의 폭이 작아질수록 동일 질량유량에서 더 높은 블로잉 제트의 무차원 속도가 나타나고, 더 낮은 무차원 세기에서 실속제어 특성이 나타났다.

2) 연속적 블로잉의 경우 블로잉 제트의 무차원 속도가 유동 제어를 하고자 하는 유동장의 속도에 비하여 높은 경우에 대하여만 공력특성의 향상이 나타나고, 그렇지 않은 경우는 오히려 유동의 흐름을 방해하여 유동제어를 하지 않은 경우에 비하여 더 좋지 않은 공력특성을 나타내었다.

3) 연속적 블로잉 제트의 각도는 유동제어가 없는 경우의 유동의 방향과 유사해질수록 더 좋은 유동제어 특성을 나타내었다.

4) 블로잉 슬롯이 앞전쪽에 위치하면 실속제어 특성이 좋아지고, 블로잉 슬롯이 뒷전쪽으로 이동하면 실속이전의 양력의 향상 특성이 좋아진다.

5) 블로잉의 세기를 증가시키면 더 높은 유동제어 특성을 나타낸다.

후 기

본 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구사업(스마트 무인기 기술개발)의 일환으로 수행되었습니다. 연구지원을 해주신 스마트 무인기 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1) Towne, M. C., and Buter, T. A.,"Numerical Study of Alternate Forms of Dynamic-Stall-Vortex Suppression", Journal of Aircraft, Vol. 32, No. 6, 1995, pp. 1405-1407.

2) Weaver, D, McAlister, K. W. and Tso, J., "Suppression of Dynaimc Stall by Steady and Pulsed Upper-Surface Blowing", AIAA Paper 98-2413, 1998.

3) Weaver, D, McAlister, K. W. and Tso, J.,"Control of VR-7 Dynamic Stall by Strong Steady Blowing", Journal of Aircraft, Vol. 41, No. 6, 2004, pp. 1404-1423.

4) Huang, L., Huang, P. G. and LeBeau, R. P., "Numerical Study of Blowing and Suction Control Mechanism on NACA0012 Airfoil", Journal of Aircraft, Vol. 41, No. 5, 2004, pp. 1005-1013.

5) 이기영, 손명환, 장영일, “브로잉에 의한 타원형 날개의 유동제어 Part I: 앞전과 뒷전에서의 블로잉 효과", 한국항공우주학회 춘계학술대회 논문집, 2004, pp. 102-106.

6) 이기영, 손명환, 장영일, “타원형 날개꼴의 유동제어에서 브로잉 제트 형태와 제트 각도의 영향", 한국항공우주학회지, 제 32권, 제 8호, 2004, pp. 47-52.

7) Haselbacher, A. C., McGuirkkk, J. J., and Page, G. J., "Finite-Volume Discretisation Aspect for Viscous Flows on Mixed Unstructured Grids", AIAA Paper 97-1946, 1997.

8) Sheldahl, R. E., and Klimas, P. C., "Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines", SAND80-2114, 1998.

9) Seifert, A., Darabi A. and Wygnanski, I., "Delay of Airfoil Stall by Periodic Excitation", Journal of Aircraft, Vol. 33, No. 4, 1996, pp. 691-698.

10) Gad-el-Hak, M.,"Control of Low-Speed Airfoil Aerodynamics", AIAA Journal, Vol. 28, No. 9, Sep, 1990, pp. 1537-1552.