

## 論文

## 이차원 타원형 날개꼴의 실속제어에서 간헐제트 브로잉의 효과

이기영\*, 손명환\*\*, 정형석\*\*

## Effects of Pulsating Jet Blowing on Stall Control of Two Dimensional Elliptic Airfoil

Ki-Young Lee\*, Myong-Hwan Sohn\*\* and Hung-Seok Jeong\*\*

## ABSTRACT

This paper explored the effects of separation control through the use of pulsating jet blowing on a two dimensional elliptical airfoil. To develop an active control technique of flow separation, a flow control actuator utilizing continuous/pulsed jet of pressurized air was designed and installed in a wind tunnel testing model of elliptic wing. PIV measurement and flow visualization of the wing near field were conducted to access the feasibility and effectiveness of the pulsed jet blowing on controlling the stall of the elliptical wing in subsonic flow. PIV experimental results show that separation control can provide significant reduction in turbulent flow wake and separation bubbles by jet blowing. The pulsating jet blowing is more effective on the separation control than continuous one. Increased jet frequency suppressed the turbulent separated flow wake effectively at even higher AOAs.

## 초 록

이차원 타원형 날개꼴에서 펄스제트 브로잉에 의한 박리 제어 효과에 대하여 연구하였다. 박리 유동의 능동제어기술 개발을 위하여 압축공기를 사용하는 연속제트/간헐제트 액츄에이터를 설계·제작하여 타원형 날개 풍동 실험 모델에 장착하였다. 아음속 유동에서 날개 주위 유동장의 PIV 측정과 유동의 가시화를 통하여 간헐제트 브로잉의 타원형 날개의 실속제어 효과와 실용성에 대해 실험연구를 수행하였다. PIV 실험 결과 제트 브로잉에 의해 난류 후류 영역과 박리 버블의 크기를 현저하게 감소시킴으로써 박리제어가 가능함을 보였다. 간헐제트는 연속제트보다 박리제어에 보다 효과적이었다. 간헐제트의 주파수를 증가시키면 보다 높은 받음각에 이르기까지 난류 박리 후류를 효과적으로 억제할 수 있었다.

**Key Words :** Stall Control(실속 제어), Flow Separation(유동 박리), Pulsating Jet(간헐 제트), Reduced Jet Frequency(제트 여기주파수), Separation Bubble(박리 버블)

## 1. 서 론

† 2005년 4월 14일 접수 ~ 2005년 7월 29일 심사완료

\* 정회원, 공군사관학교 기계공학과

\*\* 정회원, 공군사관학교 항공우주공학과

연락처, E-mail : kylee@afa.ac.kr

충북 청원군 남일면 쌍수리 사서함 335-2

날개에서의 유동 박리로 인한 실속은 양력중심 위치를 변화시켜 비행체의 안정성과 조종성에 큰 문제를 야기할 뿐 아니라 박리유동의 불안정성으로 인한 진동현상으로 비행체의 구조적 문제

를 수반하게 한다. 특히 예측하기 어려운 조건에서 발생하는 동적실속은 비행체에 아주 치명적인 결과를 초래하게 된다. 따라서 유동의 박리와 이에 따른 실속 제어에 대한 연구는 최근의 항공역학 분야에서 매우 집중적이고 종합적으로 이루어지고 있는 연구 주제이다. 실속의 제어는 유동의 박리가 발생하는 날개면 근처 경계층 내에 유동 방향 유체의 운동량을 증가시키거나 운동량을 재배치하는 하는 방법을 사용한다. 즉, 경계층 내로 높은 운동량의 유체를 부가하거나, 유동의 박리를 유발하는 낮은 운동량의 유체를 제거하여 유동의 박리를 억제하거나 지연시키게 된다[1]. 초기의 실속 제어 방법 연구는 날개꼴의 기하학적 형상을 변형하여 압력구배를 조정하는데 중점을 두었다. 이러한 방법 중에는 와류발생기(vortex generator), high camber airfoil, supercritical airfoil 등이 대표적인 예이다. 이와 같은 수동 제어 방법은 조종면의 추가 등으로 인한 구조적인 복잡성의 증가와 날개꼴 형상 특성에 따라 실속 제어 효과가 제한된다. 이에 대한 대안으로 경계층 발달을 제어할 수 있도록 소량의 에너지를 경계층 내로 주입시키는 능동제어 방식이 제안되어 활발하게 연구되고 있다. 능동제어는 국부적으로 소량의 에너지를 투입하여 보다 큰 공력성능 이득을 얻는 유동장 변화 방법이다. 최근의 미소전자센서와 액츄에이터 기술 및 MEMS, piezo-ceramic 과 같은 신물질의 개발로 연구에 더욱 탄력을 받고 있다[2-7].

본 연구는 실제 날개에의 적용 가능한 방법 중의 하나인 제트 브로잉에 의한 실속제어 대한 연구이다. 많은 연구결과들에 의하면 브로잉은 날개면 압력분포를 능동적으로 변형시킴으로써 가상적인 날개꼴 변형(dynamic virtual shaping)에 이르게 하는 것으로 알려져 있다. 특히 연속 제트 브로잉보다는 간헐제트 브로잉 방식의 비정상 브로잉(unsteady blowing)이 실속 억제에 보다 효과적임을 보고하고 있다[8, 9]. 하지만 유동 특성과 날개꼴의 기하학적 특성에 따른 최적의 브로잉 각도, 제트 슬롯 모양과 크기, 제트 운동량계수, 제트 여기주파수 등 해결돼야 할 많은 과제들이 남아있다[1].

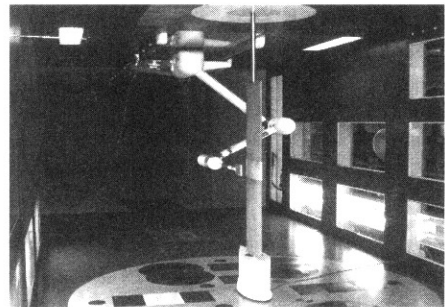
본 논문에서는 압축공기를 사용하는 제트 액츄에이터를 설계·제작하여 타원형 날개꼴에서의 실속제어 적용에 대한 연구 결과를 제공하였다. 실험 변수들은 제트 브로잉 방식(연속제트와 간헐제트)과 간헐제트 주파수이다. 실험은 PIV를 사용하여 날개 주위의 유동장(속도장)을 측정하였다. PIV에 의한 속도장 자료는 실속제어를 위

한 정량적인 자료를 제공하기 보다는 유동장 형태 분석에 의한 실속제어 개념의 정성적인 이해를 제공하는 데 중점을 두었다.

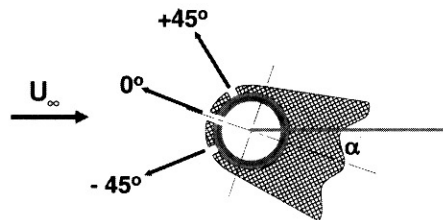
## II. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험모델 및 액츄에이터

본 연구에 사용된 실험 모델은 시위선과 중앙스팬에 대하여 상하좌우 모두 대칭인 타원형 단면의 날개꼴로 장축과 단축의 비는 8:1이다(Fig. 1a). 날개의 시위 및 스패는 각각 400mm, 1500mm이고, 가로세로비는 3.75이며, 최대 두께는 시위의 12.5%인 50mm이다. 날개의 앞전과 뒷전에는 Fig. 1(b)와 같은 제트슬롯 블록을 날개 스패 중앙에 위치시켰다. 제트슬롯 블록은 탈·부착이 가능하며, 시위선을 기준으로 각각 0°, +45°, -45°의 3가지 위치로 조절할 수 있다. 제트슬롯의 크기는 폭이 1mm, 길이 100mm이다. 브로잉 제트는 압축공기를 사용하며, 연속 혹은 간헐제트 방식으로 분출할 수 있도록 제트 액츄에



(a) Experimental model in the test wind section of tunnel



(b) changeable jet slot block

Fig. 1. Experimental model in the test section of wind tunnel and changeable jet slot block

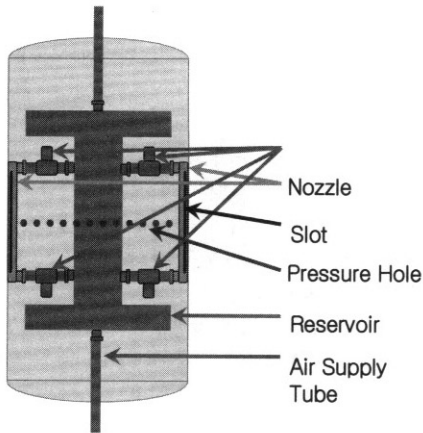
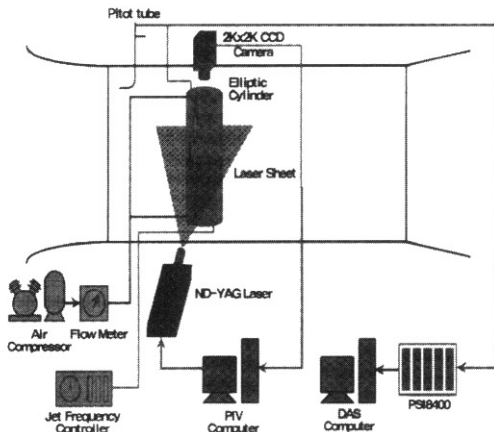


Fig. 2. Compressed air jet actuator

이터를 제작하였다(Fig. 2). 간헐제트의 주파수는 전자적으로 제어되는 솔레노이드 밸브에 의해 0~40Hz 범위 내에서 조절할 수 있다. 제트 유속은 압축공기의 공급압력에 의해  $(V_j)_{rms}=9.9\text{m/s} \sim 50\text{m/s}$ 의 속도 범위에서 제어된다.

### 2.1 실험장치 및 실험조건

본 연구에 사용된 PIV 시스템은 Fig. 3에 보인 바와 같이 광원인 레이저와 CCD 카메라 그리고 시스템간의 동기화와 실험제어, 데이터의 획득 및 후처리를 위한 소프트웨어(LaVision GmbH의 DaVis Flow Master)를 탑재한 PC로 구성되어 있다. 레이저는 이중 펄스 Nd-Yag 레이저인 Vlite-200을 사용하였으며 펄스에너지는 200mJ이고 repetition rate가 15Hz이다. CCD카메라는 2048×2048 화소의 Kodak ES/4.0 12비트 디지털



카메라를 사용하였다. 유동입자는 DEHS (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat;  $C_{26}H_{50}O_4$ )로서 Laskin 노즐형의 에어로졸 발생기를 사용하여 풍동 내에 균일하게 분포시켰다.

모든 실험은 공군사관학교의 중형 아음속 풍동을 이용하여 수행하였다. 공사 아음속 풍동은 시험부가 2.45m(H)×3.5m(W)×8.7m(L)인 폐쇄회로식 풍동으로 작동유속은 5~92m/s이다. 실험 유속(U)은 에어포일 주위 전 유동장을 PIV에 의해 측정할 있도록 10m/s로 하였으며, 날개 시위선(c)을 기준으로 한 레이놀즈수는  $Re_c=3.13 \times 10^5$ 이다. 이는 무인기의 비행조건과 유사한 크기 ( $Re_c=10^5 \sim 10^6$ )의 레이놀즈수이다[1]. PIV에 의한 속도장 측정은 동일 실험모델에 대해 압력장 분포를 측정된 참고문헌 [10]의 연구결과를 토대로 실속 전후의 유동장 특성을 비교 분석할 수 있도록 받음각 14°부터 20°까지 1°씩 증가시켜 측정하였다. 제트 평균유속  $(V_j)_{rms}$ 는 20m/s로 제트 슬롯 출구를 따라 열선풍속계로 측정된 유속분포에 의해 계산된 값이다. 제트 평균유속 20m/s에서의 제트운동량 계수  $[C_p = \rho_j b (V_j)_{rms}^2 / \rho U^2 c]$ 는 0.02이다. 여기서, b는 제트슬롯의 길이이다. 제트운동량계수 0.02는 유사한 실험 연구를 수행한 연구자들(Rullan et al[11], Jones and Englar[12] 등)이 제시한 값( $C_p=0.005 \sim 0.05$ )을 참고로 하였다. 간헐제트 주파수(f)는 각각 10Hz, 20Hz, 30Hz, 및 40Hz로 무차원 제트주파수( $f^+ = f_c/U$ )로는 0.4~1.6이다. 브로잉은 앞전에서만 실시하였으며, 제트 위치는 본 실험모델에서 실속제어에 효과가 가장 큰 +45°(시위선으로부터 날개 윗면 방향, Fig. 1 참조)로 하였다[10]. PIV로 측정된 모든 속도장 벡터는 레이저의 repetition rate를 고려하여 15개 frame으로부터 획득한 유동장 자료를 평균한 값이다.

## III. 실험결과 및 검토

### 3.1 타원형 날개꼴의 정적실속 특성

Fig. 4는 본 연구와 동일한 모델에 대해 유동 제어 없이  $Re_c=8.22 \times 10^5$ 에서 받음각 변화에 따른 날개 윗면의 시위방향 압력계수 분포를 측정된 것을 보인 것이다[10]. 받음각 12°~14°에서는 받음각 증가와 함께 흡입압력계수가 증가하며 앞전 부근에서 국소피크치를 갖는 전형적인 압력분포를 보인다. 이러한 압력분포는 받음각 16°에서 국소피크치가 저하되기 시작하여 받음각 20°에서는 전 시위영역에서 압력장이 붕괴되는 완전한

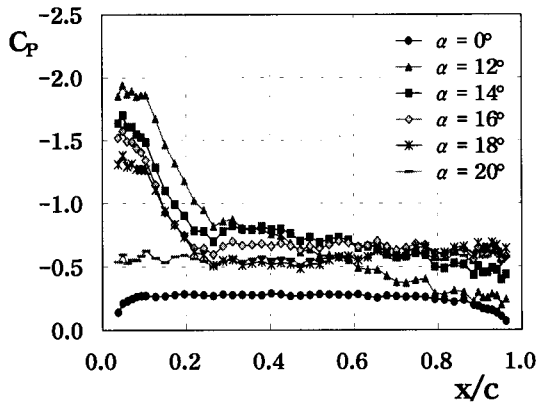


Fig. 4. Upper-wing-surface pressure distribution at  $Re_c=8.22 \times 10^5$  for elliptical airfoil[10]

실속상태의 압력분포를 보이고 있다. 따라서 타원형 날개끝은 받음각  $16^\circ$ 에서 실속에 진입함을 알 수 있다.

Fig. 5는 레이놀즈수  $3.13 \times 10^5$ 에서 받음각 변화에 따른 타원형 날개 주위 시간평균 속도장을 비교하여 보인 것이다. 그림에서 유동은 좌측에서 우측으로 흐르고 있으며, 속도벡터와 함께 유동장의 정성적 특성을 표현하기 위하여 속도등치선도(equi-velocity contour)를 gray scale로 병행하여 나타내었다. 밝은 영역이 자유유동 속도 크기의 유속이고 어두울수록 저속의 유동 영역이다.

브로잉이 없는 경우에 받음각  $\alpha=10^\circ$ 과  $\alpha=14^\circ$ 에서는 전 날개 영역에서 부착유동 특성을 보여주고 있다. 받음각  $10^\circ$ 의 경우 뒷전 부근에서 시작되는 뒷전 박리에 의한 작은 규모의 저속 영역이

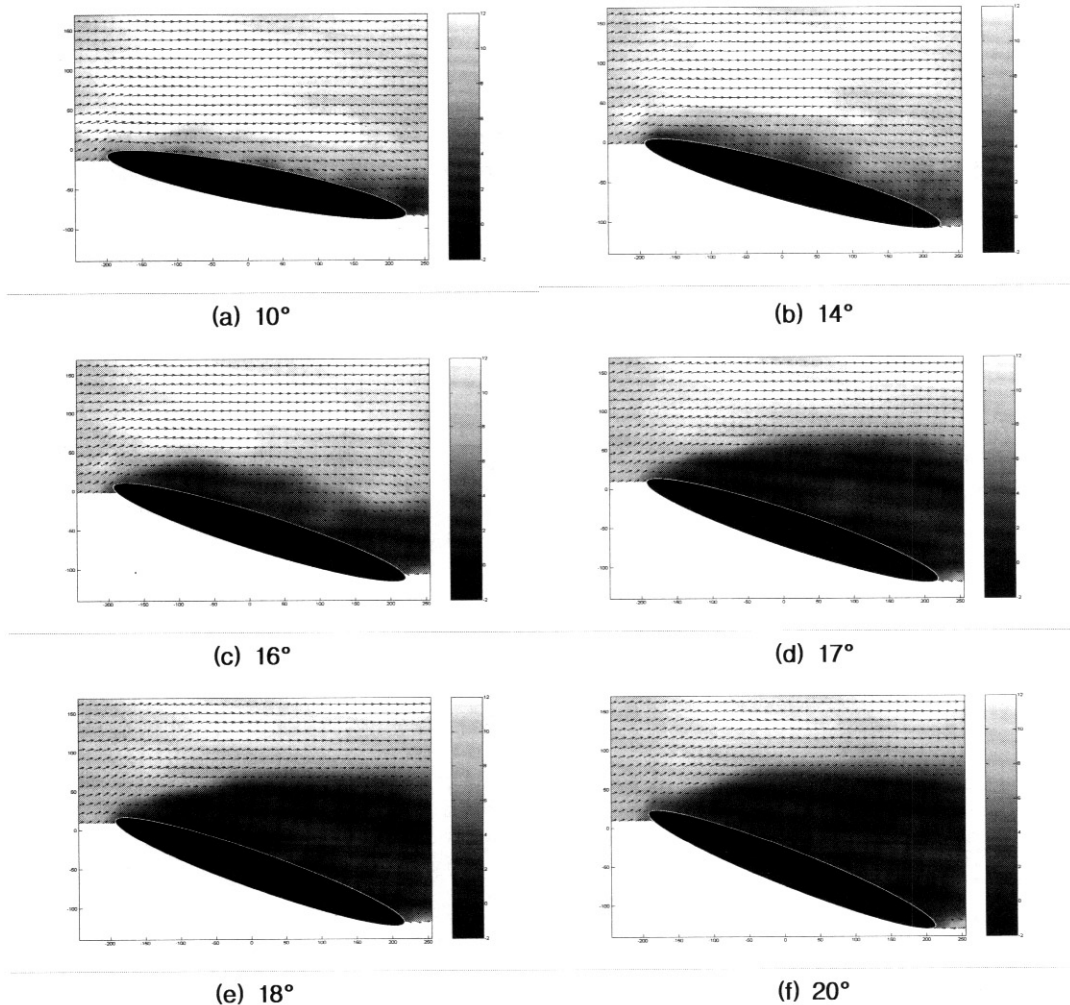


Fig. 5. Characteristics of velocity vector field of elliptical airfoil with AOA (No blowing)

생성되는 것 이외에는 전 날개면에 걸쳐 부착유동을 관찰할 수 있다(Fig. 5a). 이러한 부착유동 특성은 받음각 증가와 함께 뒷전 박리 영역의 확대와 앞전에서 유동의 박리가 시작된다. 즉, 받음각  $\alpha=14^\circ$ 의 경우 매우 작은 규모(길이 10%C 이내)이기는 하지만 박리버블이 앞전에서 생성되기 시작하며, 뒷전 박리에 의한 저속 유동 영역이 확대된다. 받음각  $\alpha=16^\circ$ 에서는 앞전부근에서 생성된 박리버블이 날개두께의 크기로 성장한다. 또한, 뒷전 박리 영역이 날개 전방 쪽으로 확대되는 가벼운 실속 (light stall) 상태를 나타내는 유동장 특성을 보여주고 있다.

받음각  $17^\circ$ 에서는 받음각  $16^\circ$ 의 경우와는 현저한 유동장 특성 차이를 보여준다. 즉, 받음각  $\alpha=17^\circ$ 에서

는 앞전부근에서 박리된 시위크기의 난류 유동이 전 날개를 덮는다. 이 받음각으로부터 날개의 공력특성이 급격히 저하되는 완전 실속(complete stall) 상태로 진입한 것으로 판단된다. 따라서 본 타원형 날개 모델의 경우 받음각  $16^\circ$ 는 완전 실속 상태로 진입하는 받음각으로 판단된다. 이는 동일한 실험모델에 대해 레이놀즈수가 다소 큰  $8.22 \times 10^5$ 에서의 압력장 측정 결과와도 비교적 잘 일치하고 있다(Fig. 4). 난류 박리에 의한 후류 영역의 크기는 받음각 증가와 함께 더욱 증가함을 관찰 할 수 있다(Fig. 5d, e, f). 이러한 정적실속에서의 유동장 특성은 동적실속에서 보여주는 강한 와류교란 특성을 보여주는 깊은 실속(deep stall)과 대비되는 유동장 특성을 보이고 있다[13].

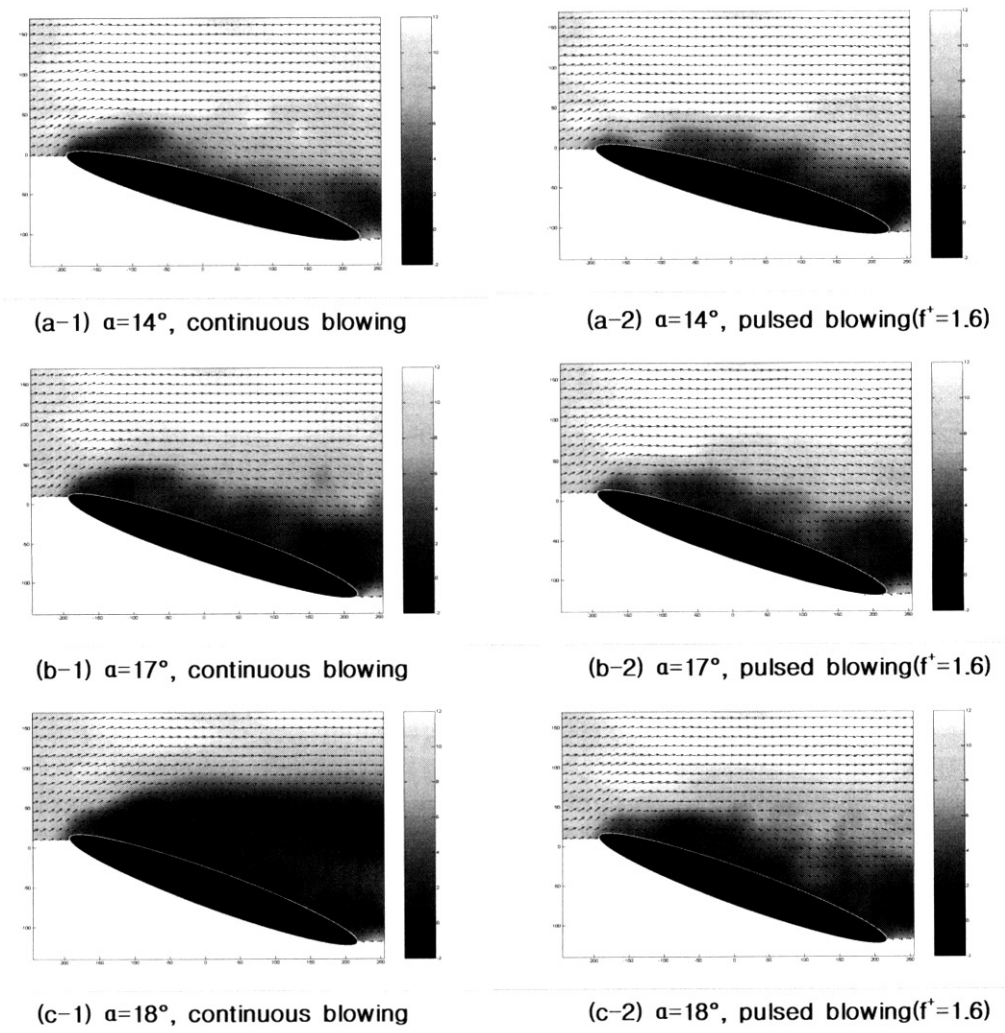


Fig. 6. Velocity vector field for different type of jet blowing

### 3.2 브로잉의 실속억제 효과

Fig. 6은 정적 실속 전·후 받음각에서 연속제트 브로잉( $f^+=0.0$ )과 간헐제트 브로잉( $f^+=1.6$ )에 의한 속도장 특성 변화를 비교하여 보인 것이다. Fig. 6a-1 및 Fig. 6a-2에서와 같이 정적실속 전 받음각에서의 제트 브로잉은 앞전 혹은 뒷전에서의 유동 박리를 촉발시킴을 관찰 할 수 있다. 앞전부근에서의 미소 박리버블(Fig. 5b)이 연속제트 브로잉에 의해 25°C의 크기로 성장되며, 뒷전 실속 영역도 확대됨을 관찰할 수 있다(Fig. 6a-1). 간헐제트 브로잉의 경우는 앞전에서의 박리버블이 소멸되기는 하지만 뒷전실속 영역은 오히려 확장되는 유동장 특성을 보이고 있다(Fig. 6a-2). 따라서 정적실속 전 받음각에서의 브로잉은 연속제트와 간헐제트 모두 공력특성 향상에 기여하지 못하는 것으로 판단된다.

정적실속 전 받음각과는 달리 정적실속 후 받음각에서의 브로잉은 연속제트와 간헐제트 모두 유동의 박리를 억제할 수 있음을 보여주고 있다(Fig. 6b-1, b-2). 브로잉이 없는 경우 앞전에서 박리된 유동에 의해 전 시위영역에 걸쳐 발달된 강한 난류박리 유동영역(Fig. 5d, e)이 브로잉에 의해 현저하게 축소됨을 관찰할 수 있다. 이러한 유동장 특성의 변화는 앞전에서의 브로잉에 의해 완전한 실속상태의 유동장 특성이 가벼운 실속상태의 유동장 특성으로 변화됨을 의미한다. 동일 받음각에서 연속제트 브로잉과 간헐제트 브로잉의 효과를 Fig. 6b-1과 Fig. 6b-2를 비교를 통하여 알 수 있다. 즉, 제트 주파수 40Hz( $f^+=1.6$ )의 간헐제트 브로잉의 경우에는 연속제트 브로잉에 비하여 앞전에서의 유동 박리가 현저하게 약화될 뿐 아니라 뒷전 박리 영역도 축소된 유동장을 관찰 할 수 있다.

앞전에서의 제트 브로잉은 앞전의 유효 캠버 증가로 앞전 박리를 억제하며, 브로잉에 의해 증가된 유체의 운동량이 경계층 박리를 지연시키는 효과로 분석된다. 특히, 간헐제트 브로잉은 유동의 여기작용으로 경계층 안 유동과 경계층 밖 유동의 상호작용에 의한 경계층 밖의 높은 운동량의 유동을 경계층 내로 유입시킨다. 경계층 내로 유입된 높은 운동량의 유체는 하류로부터 생성되는 부압력 구배를 효과적으로 대항함으로써 뒷전 박리도 억제하는 것으로 판단된다. 브로잉에 의한 유동 박리 억제 효과는 받음각 18° 이상에서는 저하된다. 연속제트 브로잉의 경우에는 받음각 18°에서 브로잉의 없는 경우와 유사한 완전실속 상태의 유동장 특성을 보인다(Fig. 6c-1, Fig. 5d). 간헐제트 브로잉의 경우에는 받음각 18°에

서도 완전한 실속상태로 진입하지 않으며(Fig. 6c-2), 받음각 19°(not shown)에서도 난류박리 영역이 축소되는 유동장 특성을 보인다.

이를 종합하면, 정적실속 전 받음각에서의 브로잉은 날개의 공력특성을 오히려 악화시킨다. 정적실속 받음각 이후에는 연속제트와 간헐제트 모두 실속억제 효과를 보였다. 연속제트는 약 1°의 실속지연 효과를, 간헐제트는 약 2°의 실속억제 효과를 보인다. 그러나 난류후류가 지배적인 20°이상의 높은 받음각에서는 브로잉의 실속제어 효과가 상실된다. 이와 같은 결과는 동일 모델에 대한  $Re_c=8.22 \times 10^5$ 에서의 압력장 측정 결과와도 잘 일치하고 있다[10]. NACA 0012에 대해 브로잉에 의한 실속제어효과를 수치모사한 권오준[14]에 의하면 유동의 박리가 시작되는 바로 앞에 날개면에 접선방향으로의 브로잉이 가장 효과적임을 보이고 있다. 따라서 브로잉 위치와 브로잉 각도를 변화시키면 본 실험 연구의 경우보다 높은 받음각까지 실속억제가 가능할 것으로 생각된다.

### 3.3 제트여기주파수의 영향

Fig. 7은 동일 받음각( $\alpha=17^\circ$ ), 동일 제트 운동량( $C_F=0.02$ )에 대하여 무차원 제트주파수에 따른 유동장 변화를 비교하여 보인 것이다. 그림에서와 같이 제트주파수를 증가시키면( $f^+=0.4 \rightarrow 0.8 \rightarrow 1.2 \rightarrow 1.6$ ) 난류 박리 영역이 축소됨을 관찰할 수 있다. 즉, 상대적으로 낮은 제트주파수의 경우( $f^+=0.4$ )에는 20°C 근처에 비교적 큰 규모의 박리버블(45°C의 길이)의 생성에 이어 강한 뒷전 실속에 의한 난류 박리 영역이 존재한다(Fig. 7a). 제트 주파수를 증가시키면 이러한 박리버블의 크기가 축소됨과 아울러 뒷전 실속영역과 강도가 현저하게 감소함을 관찰할 수 있다.

손명환[15]의 동일 실험모델에 대한 스모크 가시화 결과( $Re_c=1.37 \times 10^5$ ,  $f^+=0.48$ )에 의하면 제트 주파수가 낮은 경우에는 새로운 간헐제트 브로잉 사이클이 시작되기 전에 유동이 박리됨을 보여주고 있다. 이와 같이 낮은 제트 주파수의 브로잉은 실속제어 효과를 저하시키므로 제트 브로잉 주파수가 유동의 박리 이전에 브로잉이 시작될 수 있도록 충분히 높은 것이 유리할 것으로 판단된다. Munday & Jacob[7]의 NACA 4415에 대한 실험과 수치모사 결과에 의하면 브로잉 제트주파수를 증가시키면 평균 유동박리 위치가 뒷전 쪽으로 이동하는, 즉 실속의 억제를 보고하고 있다. 본 연구에서는 제트유동의 박리위치의 이동을 명확하게 관찰할 수는 없지만 제트주파수를 증가시키면 박리 버블의 크기와 난류박리 영역이 축소

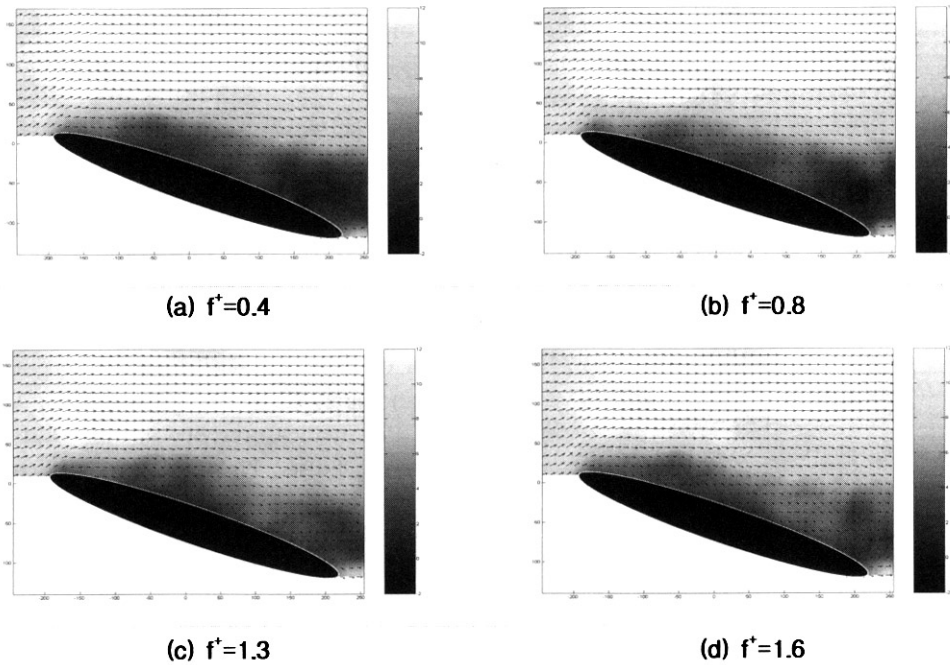


Fig. 7. Effects of jet frequency on the velocity vector field at  $\alpha=17^\circ$

되므로 제트 주파수의 증가가 실속억제에 효과적임을 유추할 수 있다.

Wang & Corke[16]의 NACA 63<sub>3</sub>-018 날개꼴의 수치모사 결과는 300Hz 이상의 높은 주파수에서 날개윗면에서의 재순환 유동의 변화가 없어짐을 보고하고 있어 충분히 높은 제트 주파수가 실속제어에 보다 효과적임을 보여주고 있다. 한편, Rullan[11]의 동적 실속제어에 관한 연구결과에 의하면 박리유동 제어는 간헐제트 주파수가 와류유출 주파수(vortex shedding frequency) 근처에서 가장 효과적임을 보고하고 있다. 이와 같은 정적실속 제어 결과를 실속 유동장 특성이 상이한 정적실속과 직접적인 비교는 어려운 일이다. 따라서 정적실속 제어를 위한 최적 여기주파수는 유동특성(자유유동속도, 브로잉제트 속도 등)과 날개의 기하학적 형상에의 영향 등을 고려하여 추가적인 연구가 필요한 부분이다.

### III. 결 론

이차원 타원형 날개꼴 모델에 대하여 제트 브로잉에 의한 실속제어 효과를 PIV를 이용한 속도 벡터장 측정으로 다음의 결과를 획득하였다.

(1) 타원형 날개의 정적실속은 받음각 증가와 함께 경계층 박리에 의한 뒷전 박리가 앞전 쪽으

로 진행되는 유동장 특성을 나타내었다.

(2) 브로잉은 연속제트와 간헐제트 모두 정적 실속 받음각 이상에서만 실속제어 효과를 나타내며, 실속받음각을 1~2° 증가시키는 효과를 보였다.

(3) 간헐제트는 경계층 내외 유동간의 여기작용으로 박리유동 영역과 박리버블의 크기를 현저하게 감소시킴으로써 연속제트보다 효과적인 실속지연을 보였다.

(4) 난류박리 유동이 지배적인 받음각 20° 이상에서는 연속제트 및 간헐제트 브로잉 모두 실속억제 효과가 없었다.

(5) 간헐제트 주파수의 증가는 본 실험조건 범위 내에서 실속억제 효과를 증가시켰다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부 스마트 무인기 기술개발 사업단의 지원연구비(G-5-1)와 한국과학재단 목격기초연구(R01-2003-000-10744-0) 지원에 의해 수행된 연구의 일부이며, 이에 연구비를 지원해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) Gad-el-Hak, M, Flow Control, Cambridge

University Press, 2000.

- 2) Watson, M., Jaworski, A. J., & Wood, N. J., "The Development of Synthetic Jets for Enhanced Control of Separated Flow", AIAA 2003-3716.
- 3) Bons, J. P., Daniel, M. G., Franke, M. E., Borgenson, D. M., & Cowan, W. D., "Composite Metal-Polysilicon MEMS Actuators for Flow Control", AIAA 2003-0784.
- 4) Dancila D. S., & Vasilescu, R., "Development of a wing Section with Piezoelectrically Modulated Vectored Blowing", AIAA-2002-1634.
- 5) Sinha, S. K., "Flow Separation Control with Micrflexural Wall Vibrations", Journal of Aircraft, Vol. 38, No. 3, pp. 496-503, 2001.
- 6) Patel, M. P., Tilmann, C. P., & Ng, T. T., "Active Transparent Stall Control System for Air Vehicles", Journal of Aircraft, Vol. 40, No. 5, pp. 993-997, 2003.
- 7) Munday, D., & Jacob, J. D. "Experimental & Numerical Investigation of Aerodynamic Flow Control Using Oscillating Adaptive Surfaces", AIAA 2001-2837.
- 8) Liu, Y., Sankar, N., Englar, R. J., Ahuja, K. K., & Gaeta, R. "Computational Evaluation of the Steady and Pulsed jet Effects on the Configuration by Periodically Pulsating Jet", ICAS 2004.
- 9) Petz, R., & Nitsche, W., "Active Separation Control on a High-Lift Performance of a Circulation Control Wing Section", AIAA Paper 2004-56.
- 10) 이기영, 손명환, 장영일, "타원형 날개꼴의 유동제어에서 브로잉 제트 형태와 제트 각도의 영향", 한국항공우주학회지, 제32권 제8호, pp. 47-53, 2004.
- 11) Rullan, J., Vlachos, P. P. Telionis, D. P., and Zeiger, M. D., "Post-Stall Flow Control of Sharp-Edged Wings via Unsteady Blowing", AIAA Paper 2003-0062.
- 12) Jones, G. S. and Englar, R. J., "Advanced in Pneumatic-Controlled High Lift Systems Through Pulsed Blowing", AIAA 2003-3411.
- 13) Carr, L. W., "Progress in Analysis and Prediction of Dynamic Stall", J. of Aircraft, Vol. 25, No. 1, pp. 6-17, 1988.
- 14) 권오준, "능동실속제어 기술개발 및 실험", 스마트무인기기술개발사업 1단계 연구결과 발표회 자체평가 발표자료집, 4분과/추진·공력, 서울, 2005.
- 15) 손명환, "능동실속 제어기술의 실험적 연구", 스마트무인기기술개발사업 1단계 최종보고서, 사업자원부, 2005.
- 16) Wang, Z., and Corke, T. C., "Behavior of Synthetic Jet on Stalled Airfoil Flows", AIAA Paper 2003-222.