KSAS10-1106

Synthetic jet을 이용한 박리 제어 성능 연구

Flow Control Capability of Synthetic Jet for the Separated Flow

김민희*, 김우례, 김종암(서울대학교)

1. 서 론

유동제어는 고성능, 고효율 항공기 개발에 전제되는 핵심기술이고, 동시에 성능, 안전성 등의 요구를 만족시킴으로써 차세대 항공기의 패러다임의 변화를 앞당길 수 있는 선도적 기술로 평가되고 있다. 이에 유동 박리를 효과적으로 제어하는 것이 항공기의 성능 향상에 직접적인 영향을 미치기 때문에 유동 제어 기법 및 장치에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 그 중 능동 유동 제어 기법 중 하나인 synthetic jet에 대한 연구가 최근 활발하게 수행되고 있다.

Synthetic jet에 대한 연구는 TAU(Tel-Aviv Univ.)의 A. Seifert 등에 의해 제안되어 가시적인 연구가 수행되었다[1]. 그들은 얇은 슬롯을 통해 주기적으로 진동하며 분출되는 jet을 이용하여 날개에서의 박리를 효과적으로 제어는 것을 보였다. 그리고 DARPA에서는 MEMS를 이용한 sensor와 actuator를 능동제어 기술과 접목하여 실제 항공기에 적용하는 프로젝트를 진행한 결과 XV-15 tilt rotor 항공기의 정지 비행 모드 중의 항력을 유동제어를 통해 14%나 감소하는 성과를 보였다[2].

수치적 연구로는 L. Kral 등은 2차원 비압축성 RANS 방정식을 이용하여, synthetic jet 내부 cavity를 해석하지 않고 흡입/분출에 대한 경계조건을 제안하여 A. Glezer 등의 실험 데이터와 상당히 유사함을 보여줌으로써 RANS 방정식을 이용하여 MEMS장치로 인한 유동의 해석 가능성을 보였다[3-4]. 이처럼 선진국의 여러 학계와 연구기관에서는 synthetic jet을 이용하여 항공기의 공력성능을 향상시키려는 연구가 활발히 수행되고 있으며 최근에 국내에서도 활발한 연구가 수행되고 있다[5-9].

본 연구에서는 synthetic jet을 이용하여 박리 유동을 제어할 경우 항공기의 성능 향상 여부를 판단한다. 이를 위하여 고 받음각에서 발생하는 익형의 박리 유동 제어와 틸트 로터 항공기의 정지 비행 모드에서 발생하는 수익하중을 감소시키기 위한 박리 유동 제어에 대해서 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 지배방정식 및 수치기법

본 연구에서는 2차원 비정상 비압축성 Reynolds-Averaged Navier-Stokes 방정식을 이용하였으며, 비압축성 유동 해석을 위하여 pseudo compressibility 방법을 적용하였다. 비정상 유동장을 해석하기 위하여 이중시간 전진법을 사용하였으며 비점성항은 flux difference splitting 방법에 기초한 풍상차분법을, 점성항은 중앙 차분하였다. 또한 MUSCL을 이용하여 고차 정확도로 계산하였다. 난류 유동장 해석을 위해서 k-ω SST난류 모델을 사용하였으며 난류 천이 과정에서의 유동을 모사하기 위하여 Total stress limitation을 사용하였다. 시간 전진은 LU-SGS 방법을 사용하였다. 계산에 사용된 코드는 in-house 코드로 충분히 검증되었다[5-8].

2.2 Synthetic jet actuator 경계 조건

Synthetic jet은 orifice를 통하여 외부의 공기를 흡입하고 그 유체를 그대로 분출하는 방식으로 외부로 부터의 질량공급 없이 유동을 제어한다. Fig. 1은 오리피스 중심에서의 출구방향의 속도 분포를 나타낸 것으로 실험 데이터와 비교하여 잘 일치하는 것을 알 수 있다[9].

Synthetic jet actuator를 모델링하기 위해서 흡입/분출 형태의 경계조건을 사용하였으며, Jet의 속도 크기는 다음과 같다[10].

$$u_{jet}(\xi, \eta = 0, t) = A_j f(\eta) \sin(wt) \qquad (4)$$

여기서 ξ는 synthetic jet의 속도 방향을 나타내고, η는 그 방향에 수직 방향을 나타낸다. $f(\eta)$는 jet 출구에서의 속도 분포를 나타내는 함수로 L. Kral 등의 연구에 의하여 제안된 top-hat 형태($f(\eta)$=1)의 속도 분포를 사용하였다.

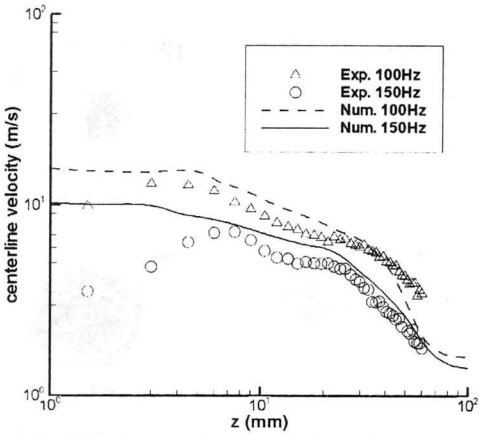

Fig. 1. Centerline velocity profile

2.3 박리 유동 제어

2.3.1 고 받음각에서 익형의 박리 유동 제어

Synthetic jet의 동작 특성을 파악하기 위하여 jet의 속도는 자유류의 1-3배로, 진동수는 무차원 시간 기준으로 1-5로 계산하였다. 유입류 운동량에 따른 synthetic jet의 운동량비와 무차원 주파수는 다음과 같다.

$$F^+ = \frac{F\,c}{U_\infty} \qquad (1)$$

$$c_\mu = \left(\frac{V_{\max}}{U_\infty}\right)^2 \left(\frac{h}{c}\right) \qquad (2)$$

여기서 $V_{\max}$는 synthetic jet peak 속도, U_∞는 유입류 속도, h는 slot 넓이, c는 익형 코드 길이, F는 synthetic jet의 진동수이다.

레이놀즈수는 2.19×10^6이며, NACA23012의 양력 계수 곡선은 Fig. 3과 같다. 결과로부터 synthetic jet을 이용한 경우 앞전 박리를 제어하여 stall 특성을 개선할 수 있음을 확인할 수 있다. 먼저 동일한 진동수로 작동 시켰을 경우 jet 운동량이 증가할수록 양력 향상이 더 크게 일어남을 알 수 있다. 또한 F+=1일 경우 다른 F+에 비하여 양력 향상이 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있는데 이를 통하여 F+=1일 경우 상대적으로 작은 jet 운동량으로 유동 박리 제어에 효과적인 것을 알 수 있다.

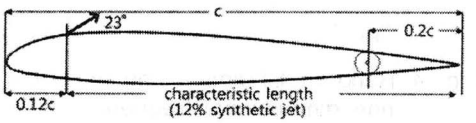

Fig. 2 Geometry of NACA23012

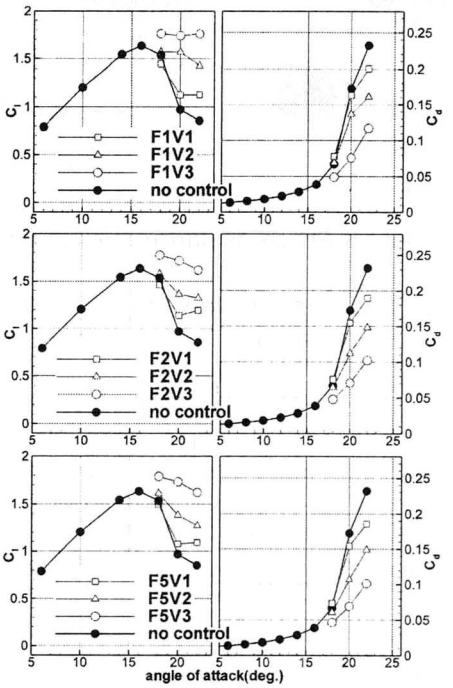

Fig. 3 Aerodynamic coefficients

Synthtic jet이 앞전 12%에 위치해있을 경우 받음각 22도에서 synthetic jet과 박리점이 일치하게 되는데 Fig. 4에서와 같이 박리점과 synthetic jet이 일치할 경우 양력 향상이 가장 큰 것으로 나타난다. 또한 Fig. 5로부터 받음각이 20도 이후 익형의 앞전으로부터 박리된 유동이 익형에 완전히 부착되지는 않았지만 synthetic jet으로 인하여 박리가 상당히 지연되어 발생하는 것을 확인할 수 있다.

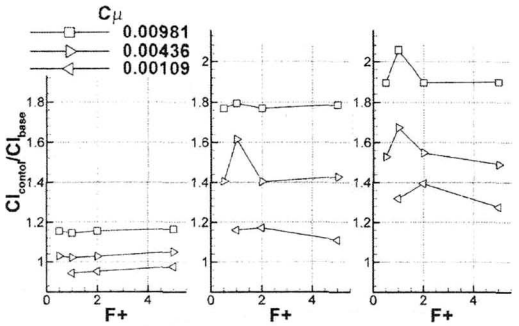

Fig. 4 Ratio of lift coefficients in terms of non-dimensional frequency

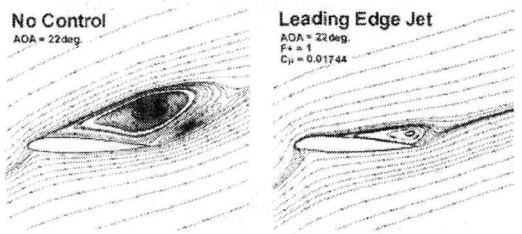

Fig. 5 Phase averaged streamlines

2.3.2 정지 비행 모드에서 틸트로터 항공기의 박리 유동 제어

틸트 로터 항공기의 익형은 주 에어포일과 플랩으로 구성되어 있으며, 레이놀즈수는 9.0×10^5이다. 본 논문에서는 로터의 내리흐름에 대해서 유동 방향에 의해 틸트로터 항공기 익형이 받는 힘 중 수평으로 작용하는 힘을 항력으로 간주한다. 이에 틸트로터 항공기의 수익하중 감소여부를 확인하기 위하여 항력 계수 분포를 살펴보았다.

정지 비행 시 항력분포에 따른 유동 구조는 Fig. 6과 같다. 앞전 와류의 생성으로 로터 내리흐름 방향으로의 힘이 증가하고(1) 앞전 와류가 이탈하면서 항력이 감소한다.(2) 뒷전 와류 또한 생성(3)과 소멸(4)의 순서를 거치게 된다. 이와 같은 유동 구조의 반복으로 앞전 와류와 뒷전 와류의 생성 및 소멸이 주기적으로 반복되며 익형 아랫면에 부착된 와류로 인하여 수익 하중이 크게 증가한다.

앞전에서 발생하는 와류 및 플랩에서 발생하는 박리 유동을 제어하기 위하여 앞전과 뒷전에 synthetic jet을 위치시킨다. 익형 표면과의 사이각은 앞전에 위치한 jet의 경우 90°, 플랩에 위치한 jet은 32°가 되도록 하였다. 무차원 주파수는 플랩 코드 길이를 기준으로 하였다. 또한 synthetic jet 운동량 비 c_μ=0.0692, 무차원 주파수 F+=1로 고정하였다.

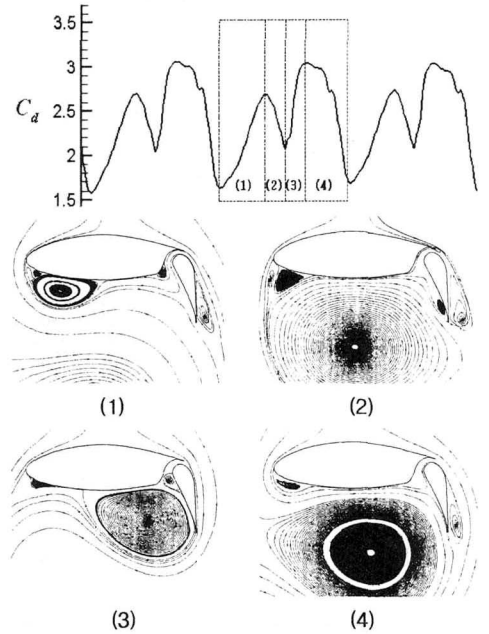

Fig. 6. Drag history and streamline in hover.

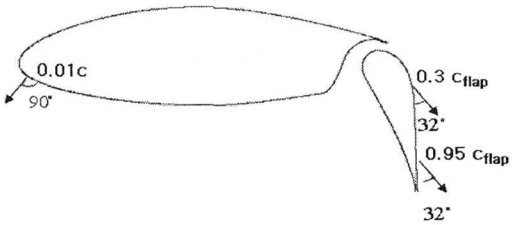

Fig. 7. Geometry of tiltrotor airfoil with synthetic jet

뒷전에 위치한 jet의 경우 무차원 주파수가 동일 할 때, 박리점에 위치한 $0.3c_{flap}$ jet보다 $0.95c_{flap}$ jet이 유동에 교란을 일으켜 더 효과적으로 뒷전 박리가 익형의 아랫면에 부착되는 것을 억제시키게 된다. 또한 0.01c jet은 앞전 와류의 유동 구조를 변화시킴으로써 익형 아랫면에 앞전 와류가 생성하는 것을 억제시키게 된다. 이에 앞전과 뒷전에 동시에 jet을 동시에 구동 시킨 결과 case1과 2에서와 같이 항력 감소율뿐만 아니라 항력 분포 또한 전체적으로 감소

한 것을 보였다. 이를 통하여 틸트로터 항공기의 수익하중을 감소시키기 위해서 synthetic jet을 구동 시킬 경우 유동 구조를 변화시켜 항력을 크게 감소시키는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1. Jet condition and drag reduction rate

case	Jet condition	Rate of drag reduction
1	$0.01c + 0.3c_{flap}$	19.49%
2	$0.01c + 0.95c_{flap}$	27.01%

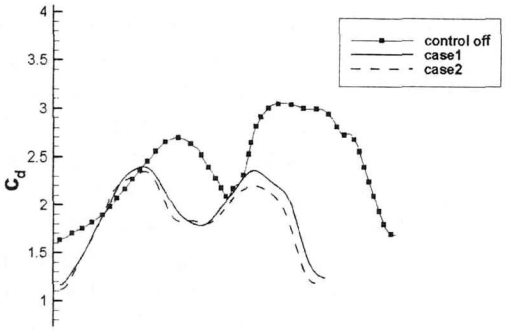

Fig. 8. Drag histories at flow control

3. 결 론

Synthetic jet을 이용하여 박리 유동을 제어할 경우 항공기의 성능 향상 여부를 판단하였다. 이를 위하여 고 받음각에서 발생하는 익형의 박리 유동 제어와 틸트 로터 항공기의 정지 비행 모드에서 발생하는 수익하중을 감소시키기 위한 박리 유동 제어에 대해서 연구를 수행하였다. 그 결과 NACA23012 익형에 대해서 무차원 주파수와 jet 속도의 변화에 따라서 공력 계수를 비교해본 결과 무차원 주파수가 1일 경우, synthetic jet이 박리점에 위치할 경우, synthetic jet의 운동량이 클수록 양력을 증가시킬 수 있고 stall 특성을 개선할 수 있음을 확인하였다. 그리고 틸트로터 항공기의 앞전과 뒷전에 synthetic jet을 위치시킴으로써 익형 아랫면에 부착되는 와류의 유동 구조를 변화시켜 항공기의 항력을 효과적으로 감소시키는 것을 확인할 수 있었다. 이에 능동 유동 제어 장치인 synthetic jet을 이용할 경우 항공기의 공기역학적 성능을 향상시켜 항공기의 비행 성능과 안정성을 동시에 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 서울대학교 기계항공공학부 BK 21사업, 항공우주신기술연구소의 지원으로 수행되었습니다. 또한 한국과학재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab)으로부터 지원받아 수행되었습니다(과제번호 20090091724).

참고문헌

[1] A. Seifert, T. Bachar, I. Wygnanski, D. Koss and M. Shepshelovich "Oscillatory blowing, a tool to delay boundary layer separation", AIAA Journal, Vol.31, 1993.

[2] H. Nagib, "DARPA XV-15 Tiltrotor Micro Adaptive Flow Conntrol(MAFC) Flight Presentation",URL:http://fdrc.iit.edu/research/nagibResearch.php [cited 31 Oct. 2005]]

[3] L. D. Kral, J. F. Donovan, A. B. Cain and A. W. Cary, "Numerical Simulation of Synthetic Jet Actuators", AIAA paper 97-1824.

[4] J. F. Donovan, L. D. Kral and A. W. Cary, "Active Flow Control Applied to an Airfoil", AIAA paper 98-0210.

[5] S. H. Kim, C. Kim, "Separation Control on NACA23012 using Synthetic Jet", Aerospace Science and Technology, 2008.

[6] Woore Kim, Sanghoon Kim, Kwangwoo Choi and Chongam Kim, "Experimental and Computational Study on Flow Characteristics by Synthetic Jets Configuration", 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 4-7 January 2010.

[7] 김민희, 김상훈, 김우례, 김종암, 김유신, "Synthetic jet을 이용한 스마트 무인기 유동제어 Part 1 : 정지 비행 모드에서 synthetic jet을 이용한 유동제어", 한국항공우주학회지, Vol37, pp1173-1183, 2009.

[8] 김민희, 김상훈, 김우례, 김종암, 김유신, "Synthetic jet을 이용한 스마트 무인기 유동제어 Part 2 : 천이 비행 모드에서 synthetic jet을 이용한 유동제어", 한국항공우주학회지, Vol37, pp1184-1191, 2009.

[9] 김우례, 김상훈, 최광우, 김종암, "synthetic jet 유동 특성 연구", 2008 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2008.

[10] L. D. Kral, J. F. Donovan, A. B. Cain and A. W.Cary, "Numerical Simulation of Synthetic Jet Actuators", AIAA paper, pp1824, 1997.