

論文

Synthetic jet을 이용한 스마트 무인기(SUAV) 유동제어 Part 2 : 천이 비행 모드에서 synthetic jet을 이용한 유동제어

김민희*, 김상훈*, 김우례*, 김종암**, 김유신***

Flow Control of Smart UAV Airfoil Using Synthetic Jet Part 2 : Flow control in Transition Mode Using Synthetic Jet

Min Hee Kim*, Sang Hoon Kim*, Woore Kim*, Chongam Kim** and Yushin Kim***

ABSTRACT

In order to reduce the download around the Smart UAV(SUAV) at Transition mode, flow control using synthetic jet has been performed. Many of the complex tilt rotor flow features are captured including the leading and trailing edge separation, and the large region of separated flow beneath the wing. Based on the results of part 1 of the present work, synthetic jet is located at $0.01c$, $0.95c_{flap}$ and it is operated with the non-dimensional frequency of 0.5, 5 to control the leading edge and trailing edge separation. Consequently, download is substantially reduced compared to with no control case at transition mode using leading edge jet only. The present results show that the overall flight performance and stability of the SUAV can be remarkably improved by applying the active flow control strategy based on synthetic jet.

초 록

스마트 무인기 익형 주위의 유동 구조를 파악하고 이를 바탕으로 synthetic jet을 이용하여 천이 비행 모드에서의 수익하중 감소 여부를 파악하였다. 스마트 무인기의 실제 비행 모드에서의 유동 구조를 분석하여 앞전 및 뒷전에서 발생하는 와류에 의해서 수익하중이 크게 증가함을 밝혔다. 이에 앞전과 뒷전에서 발생하는 유동의 박리를 효과적으로 제어하기 위하여 Part 1의 결과를 바탕으로 $0.01c$, $0.95c_{flap}$ 지점에 jet을 위치시키고 각각 무차원 주파수(F+)를 0.5, 5로 작동시켜 그에 따른 유동구조 변화와 항력 감소율을 알아보았다. 그 결과 천이 비행 모드에서의 유동 제어를 위해서는 앞전에 위치한 jet만을 작동시킬 경우 가장 효과적으로 수익하중을 감소시킬 수 있음을 밝혔다. 이에 정지 비행 모드에서 뿐만 아니라 천이 비행 모드에서 synthetic jet을 이용하여 유동을 제어한다면 스마트 전 비행 모드에서의 비행성과 안정성을 동시에 향상시킬 수 있을 것이다.

Key Words : Smart UAV(스마트 무인기), Flow Control(유동제어), Synthetic Jet (Synthetic 제트), wing loading(수익하중), Transition Mode(천이비행)

† 2009년 8월 28일 접수 ~ 2009년 11월 19일 심사완료

* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부
교신저자, E-mail : chongam@snu.ac.kr
서울시 관악구 신림9동 산 56-1

*** 정회원, 한국 항공우주연구원

1. 서 론

틸트로터(Tilt-rotor) 항공기인 스마트 무인기는 고정익 항공기와 회전익 항공기의 장점만을 하나로 통합한 새로운 개념의 항공기로서, 고정익 항

공기 수준의 비행 고도와 속도, 항속거리를 갖으며 회전익 항공기의 제자리 비행과 수직 이착륙의 편리성을 갖고 있다. 하지만, 수직이착륙 및 천이비행 모드에서는 로터에 의한 내리흐름에 날개가 넓은 면적으로 맞서고 있어 거대한 박리유동을 발생시키게 된다. 이것은 익형의 아랫면에 저압부를 생성시키고 이로 인하여 로터 내리흐름 방향으로의 항력이 증가하게 되고 이는 수익하중의 증가로 나타나게 된다. 수익하중의 증가는 payload에 막대한 영향을 끼치게 될 뿐만 아니라 성능과 안정성 저하의 원인이 된다.

이에 Part 1에서는 국내에서 개발하고 있는 틸트로터 항공기인 스마트 무인기의 정지 비행 모드에서 익형 주위의 유동 구조를 파악하고 synthetic jet을 이용하여 앞전과 뒷전에서 발생하는 박리를 제어하였다. 스마트 무인기의 정지 비행 모드에 대하여 유동 구조를 분석한 결과 앞전 및 뒷전에서 발생하는 와류에 의해서 수익하중이 크게 증가함을 밝혔다. 이에 뒷전에서 발생하는 유동의 박리를 제어하기 위하여 $0.3C_{flap}$, $0.95C_{flap}$ 위치에 jet을 위치시켜 유동 구조 변화와 항력 감소율을 알아보았다. 그 결과, 플랩 코드길이의 95%에 위치한 jet을 $F+=5$ 로 작동시킬 때 항력 감소율이 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 앞전 박리를 제어하기 위해서는 $0.01c$ 에 위치한 jet을 $F+=0.5$ 로 구동할 경우 앞전에서 발생하는 와류의 크기를 가장 효과적으로 감소시켜 익형의 아랫면에 부착되는 유동 구조를 변화시키기 때문에 가장 큰 항력 감소를 보임을 밝혔다.

Part 2에서는 part 1의 결과를 바탕으로 실제 스마트 무인기 천이 비행모드에서의 유동 구조를 파악하고 $0.95C_{flap}$ jet과 $0.01c$ jet을 이용하여 이때 발생하는 수익하중의 감소 여부를 확인하였다.

II. 본 론

2.1 지배방정식 및 수치기법

지배 방정식 및 수치 기법과 synthetic jet actuator 경계 조건은 part 1에서와 동일하다.

2.2 계산 결과 및 분석

2.2.1 스마트 무인기 천이 비행 모드에서의 유동 구조 특성

실제 스마트 무인기에 대해 작성된 천이 비행 경로 중 대표적인 비행 조건은 다음과 같이 나타난다[1]. 로터 후류 속도는 스마트 무인기의 실제

disk loading (T/A) = $670N/m^2 \sim 770N/m^2$ 을 이용하여 결정하였으며, momentum theory를 이용하면 로터 후류 속도는 $17m/s$ 로 예측된다. 유속과 받음각은 예측된 로터 후류 속도와 전진 비행 속도의 합에 의해서 결정하였다(Table 1 참조).

천이 비행 시 항력 분포는 Fig. 1과 같이 각 비행 모드에 따라 주기적인 형태를 보이며 로터의 내리흐름의 방향이 90° 에 가까울수록 항력의 크기가 커지게 되며 정지 비행 모드에서의 항력 분포와 유사한 형태를 가지게 된다. 또한 로터의 내리흐름의 방향이 앞쪽으로 바뀔때 따라 유동 구조가 변화하며 틸트각이 15° , 플랩각이 25° 인 천이 비행 6에서는 유동의 박리가 발생하지 않게 된다. 이에 스마트 무인기의 정지 비행 및 천이 비행 모드에서의 비행 모드에서 틸트각이 90° 에 가까울수록 수익하중이 증가하며 항력이 커지게 됨을 알 수 있다.

천이 비행 모드 1~2 에서의 유동 구조는 정지 비행 모드에서와 유사하게 나타난다. 정지 비행

Table 1. Flight condition

모 드	틸트각 (deg)	플랩각 (deg)	유속 (m/s)	받음각 (deg)	Re
정지 비행	H	90	17	-90	9.0×10^5
천이 비행	T1	90	23.80	-79.50	1.2×10^6
	T2	80	40.66	-65.21	2.1×10^6
	T3	60	54.91	-48.96	2.9×10^6
	T4	45	58.62	-38.72	3.1×10^6
	T5	30	62.36	-26.56	3.3×10^6
	T6	15	25	66.38	-13.15

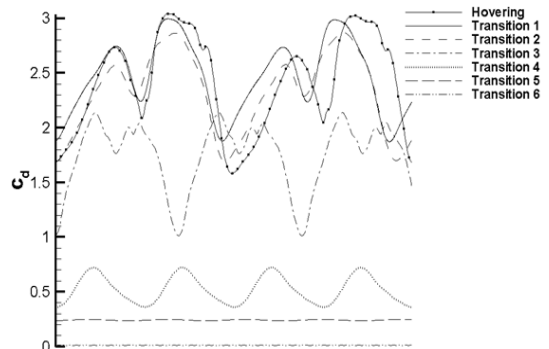


Fig. 1. Drag histories at SUAV flight mode

1은 Fig. 2와 같은 항력 분포를 가지며 그 때의 유동 구조는 Fig. 3과 같다. 로터의 내리흐름으로 인하여 유동이 앞전에서 박리된 유동은 익형 앞쪽의 아래면에 부착되며 항력이 증가하게 된다 (1). 익형 앞쪽의 박리유동은 그 크기가 증가되다가(2) 유동의 방향으로 떨어져 나가게 되며 항력은 감소한다. 이 때 플랩 윗면에서는 유동의 박리가 발생하게 되고 이는 플랩 표면을 따라서 흐르다가 플랩 아래면에서 큰 와류를 생성하고 이로 인하여 항력이 증가한다(3). 익형의 아래면에 부착된 뒷전 와류는 크기가 증가하다가 유동장의 방향으로 떨어져 나가면서 항력이 감소하게 된다 (4). 정지 비행 모드에서와 동일하게 익형 앞쪽과 뒤쪽에서 순차적으로 발생된 와류가 익형 아래면에 부착된다. 즉, 앞전 와류와 뒷전 와류의 생성 및 소멸이 주기적으로 반복되어 틸트각이 90°에 가까울수록 익형 아래면에 부착된 와류로 인하여 수익 하중이 크게 증가함을 알 수 있다.

천이비행 모드 3은 틸트각이 60°, 플랩각 25° 일 때의 비행조건으로 항력 분포는 Fig. 4와 같

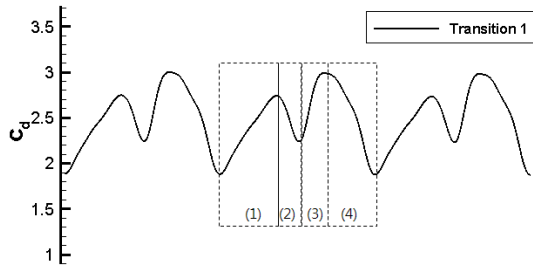


Fig. 2. Drag history at Transition1 mode

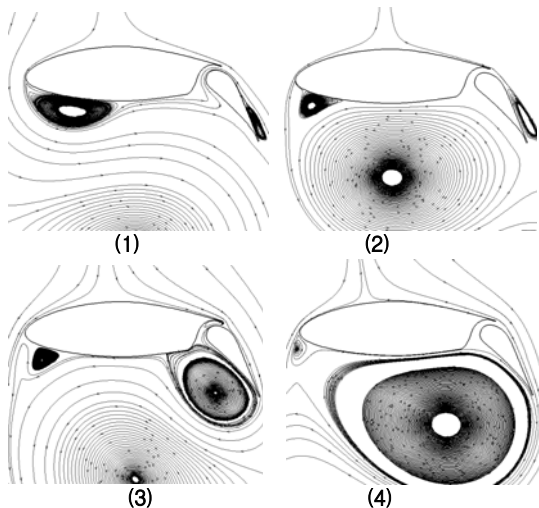


Fig. 3. Streamlines at transition mode(T1)

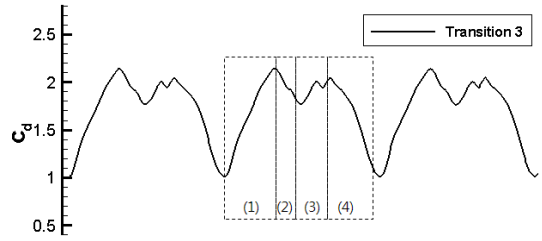


Fig. 4. Drag history at Transition3 mode.

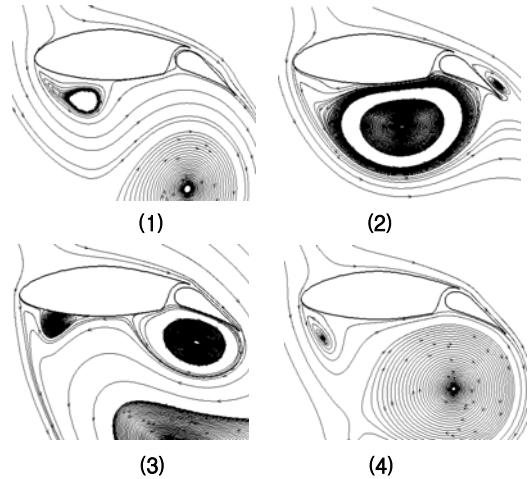


Fig. 5. Streamlines at transition mode(T3).

이 나타난다. 정지 비행모드와 천이 비행 1,2에서의 항력 분포는 앞전에서 생긴 와류보다 뒷전에서 발생하는 와류에 의한 항력의 최대값이 더 크게 된다. 하지만 천이 비행 3의 항력 분포를 보면 앞전 와류 및 뒷전 와류에 의해 항력이 크게 증가하기는 하지만 뒷전 와류 보다 앞전 와류에 의한 수익하중의 증가가 더 커지게 됨을 알 수 있다. 이때의 유동 구조는 Fig. 5와 같다. 앞전 와류의 생성(1) 및 소멸(2), 뒷전와류의 생성(3) 및 소멸(4)이 반복되게 되지만 뒷전 와류는 그 크기가 일정정도 커지다가 더 이상 증가하지 않고 이탈하기 때문에 뒷전 와류에 의해서 수익하중이 크게 증가하지 않게 된다. 이로 인하여 유동의 방향이 앞쪽으로 변화함에 따라 수익하중을 감소시키기 위해서는 앞전에 위치한 와류의 유동 구조를 변화시켜야 함을 알 수 있다.

천이 비행모드 4는 틸트각이 45°, 플랩각이 25°이며, Fig. 6에서와 같은 항력 분포를 갖는다. 유동의 방향이 천이 비행 3에서보다 앞쪽으로 변화함에 따라 뒷전에서 발생하는 와류에 의한 항력의 증가는 발생하지 않고 앞전에서 발생하는 와류에 의해서만 항력이 증가하고 감소하는 유동

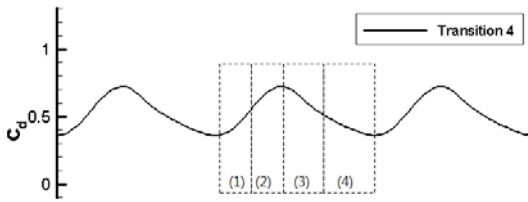


Fig. 6. Drag history at Transition 4 mode

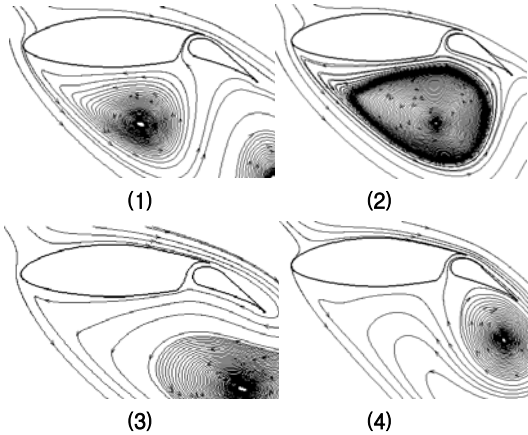


Fig. 7. Streamlines at transition mode(T4)

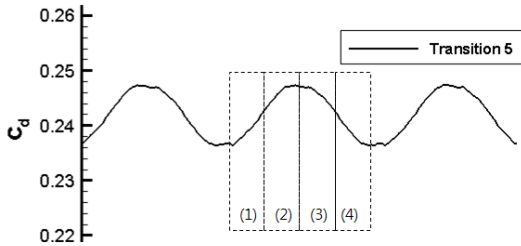


Fig. 8. Drag history at Transition 5 mode.

구조를 갖게 된다. Fig. 7에서와 같이 앞전에서 와류가 발생하고(1) 그 크기가 증가하여 항력이 증가하게 된다(2). 앞전에서 발생한 와류가 이탈하며 항력은 감소하게 되고(3) 이후 뒷전 와류가 발생하게 되지만 유동이 앞쪽에서 불어오기 때문에 익형 아랫면에 부착하지 않고 생성 후 바로 이탈하게 된다(4).

천이 비행모드 5는 Fig. 8에서와 같은 항력 분포를 가지며 익형 아랫면에 부착되는 와류는 짧은 시간 내에 부착되었다가 이탈하게 된다. 이때의 유동구조는 Fig. 9와 같이 나타난다. 천이 비행 4에서와 같이 유사한 유동 구조를 갖지만 뒷전 와류가 생성된 후 익형의 아랫면으로 부착되지 않고 유입류의 방향으로 이탈하는 것을 살펴볼 수 있다.

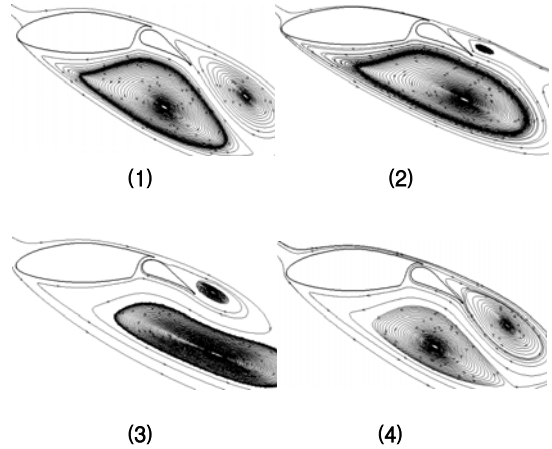


Fig. 9. Streamlines at transition mode(T5)

천이 비행 모드 1~5의 각각의 천이 비행 모드에서 발생하는 유동 구조를 분석한 결과, 틸트각이 90°에 가까울수록 정지 비행 모드에서와 유사한 유동 구조를 갖는다. 앞전 와류가 생성하며 익형의 앞전에 부착되고 그 크기가 커져 이탈한다. 이후 플랩을 따라 흐르는 유동에 의해 뒷전 와류가 생성되어 익형의 뒷전에 부착되고 이탈하는 앞전 및 뒷전 와류의 생성과 소멸을 통하여 익형 아랫면에 와류가 부착되는 유동 구조를 갖게 됨을 알 수 있었다. 또한 로터의 내리흐름의 방향이 앞쪽을 바뀔 때 따라 뒷전 와류는 생성되었다가 익형의 아랫면에 부착되지 않고 유동장의 방향으로 이탈하고 이에 따라 뒷전에서 발생한 와류보다 앞전에서 발생한 와류 의해 수익하중이 증가함을 밝혔다.

2.2.2 스마트 무인기 익형의 박리 제어

스마트 무인기의 실제 천이 비행경로 중 대표적인 비행 모드에서의 유동 구조 분석을 통하여 앞전과 뒷전에서 발생하는 와류에 의해서 수익하중이 크게 증가함을 밝혔다. 또한 Part 1 에서 앞전과 뒷전에서의 유동 제어를 통하여 뒷전에서는 무차원 주파수가 증가 할수록 jet의 주기가 짧아지게 되어 플랩 끝 쪽에서 유동을 효과적으로 교란시켜 익형의 뒷전에서 와류가 형성하는 것을 억제시키게 되어 $F+ = 5.0$ 0.95 C_{flap} jet을 구동할 경우 가장 효과적으로 항력을 감소시킬 수 있음을 알았다. 또한 앞전에 위치한 jet을 구동하여 유동을 제어할 경우 무차원 주파수의 크기가 작을수록 jet에 의해서 발생하는 와류의 크기가 커지기 때문에 앞전에 부착되는 와류의 유동구조를 효과적으로 변화시켜 $F+ = 0.5$ 인 0.01 C jet이 가장

효과적임을 밝혔다.

이에 천이 비행 모드에서 발생하는 유동을 제어하기 위하여 앞전에 위치한 0.01c jet과 뒷전에 위치한 0.95c_{flap} jet을 각각 무차원 주파수 F+=0.5, 5로 작동시켰다. synthetic jet의 익형 표면과의 사이 각은 Part 1 과 마찬가지로 앞전에 위치한 jet의 경우 90°, 플랩에 위치한 jet은 32°가 되도록 하였다. 무차원 주파수는 플랩 코드 길이(c_f/c=0.32)를 기준으로 하였다. Part 2에서는 Part 1의 스마트 무인기 정지비행 모드에서 앞전과 뒷전에서의 유동을 제어하기 위해서 가장 효과적인 무차원 주파수의 synthetic jet을 천이 비행 모드에서 또한 효과적으로 적용하는데 그 목적이 있으므로 jet의 최대 속도는 Part 1에서와 동일하게 80m/s로 일정하게 유지하였으며, 익형 앞전과 뒷전의 jet 위치 및 각도 또한 고정하였다. 시간에 따른 항력 분포는 Fast Fourier Transformation (FFT)의 low- path filter를 이용하여 분석하였다.

2.2.2.1 뒷전 및 앞전 박리 제어

항력 계수가 상대적으로 낮은 천이 비행 모드 5~6을 제외하고 천이 비행모드 1~4에 대해서 발생하는 박리를 제어하기 위하여 앞전과 뒷전에 synthetic jet을 작동시켜 그에 따른 수익하중의 감소를 알아보았다. F+=5인 0.95c_{flap} jet을 이용한 뒷전의 박리 제어와 F+=0.5인 0.01c jet을 이용한 앞전의 박리 제어를 수행하고 각각의 비행 모드에 따라 항력 분포 및 유동장의 변화를 분석하였다.

틸트각이 90°, 플랩각이 50°인 천이 비행모드 1에서 뒷전 및 앞전의 박리를 제어했을 때의 항력 분포는 Fig. 10과 같다. 뒷전의 박리를 제어했을 경우보다 앞전의 박리를 제어했을 경우에 전체적으로 큰 항력 감소를 보이며 앞전에 위치한

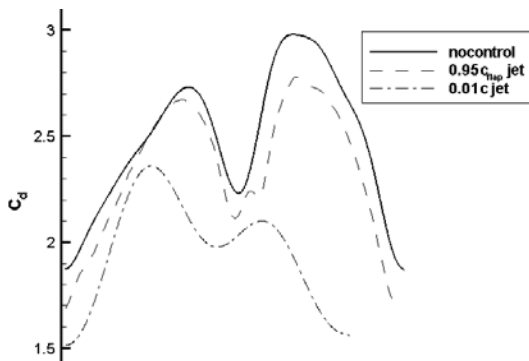


Fig. 10. Drag histories at flow control(T1)

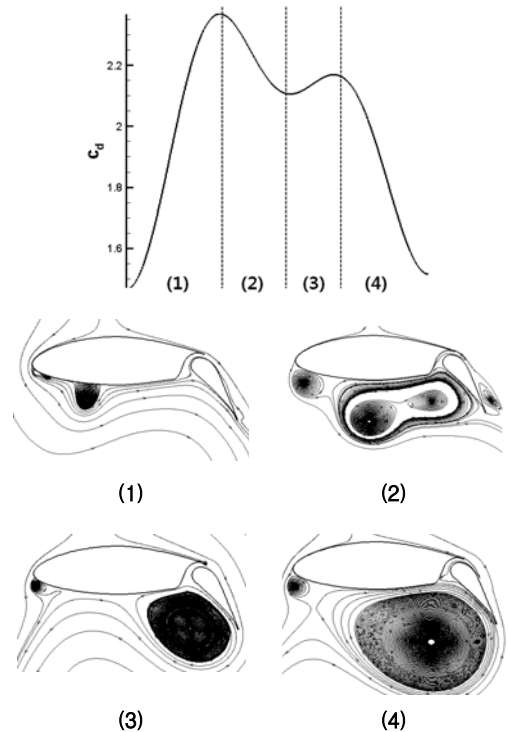


Fig. 11. Streamlines of SUAV at L.E. flow control(T1)

0.01c jet을 구동했을 때의 유동 구조는 Fig. 11과 같다. 정지 비행 모드에서 앞전 박리를 제어했을 경우와 유사하게 앞전와류의 생성 및 이탈, 뒷전 와류의 생성 및 이탈에 따라서 항력의 크기가 증가 및 감소를 반복하게 된다. 또한 앞전에 위치한 jet에 의해서 발생하는 유동에 의해익형의 아랫면에 부착되는 와류의 유동 구조가 변하게 되며 이는 뒷전 와류의 생성에도 영향을 끼치기 때문에 전체적인 수익 하중이 감소하게 된다.

천이 비행 모드 2에서 유동제어를 했을 경우의 항력 분포는 Fig. 12에서와 같이 나타나며 앞전에서만 jet을 구동시킬 경우 가장 큰 항력 감소를 보인다. 천이 비행모드 1에서 0.01c jet만을 구동했을 경우의 항력 분포와 비교해보면 앞전 와류 및 뒷전 와류에 의해 항력이 증가하는 형태가 아닌 항력이 증가하고 감소하는 항력 분포를 가지며 Fig. 13과 같은 유동 구조를 갖는다. 천이 비행모드 1에서와 같이 틸트각이 90°이지만 플랩각이 25°이다. 이 때문에 플랩각이 50°인 천이 비행모드 1보다 0.01c jet에 의해서 발생하는 와류가 유동의 방향으로 이동하는 것이 용이하다. 이는 뒷전에서 발생하는 와류가 익형의 아랫면에

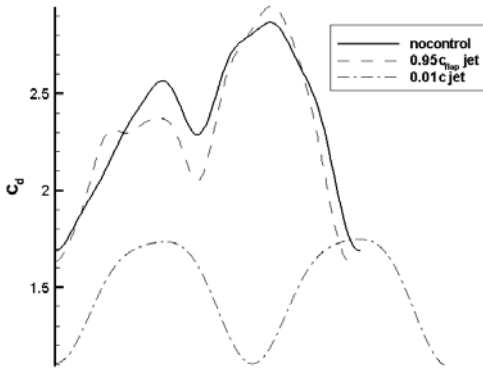


Fig. 12. Drag histories at flow control(T2)

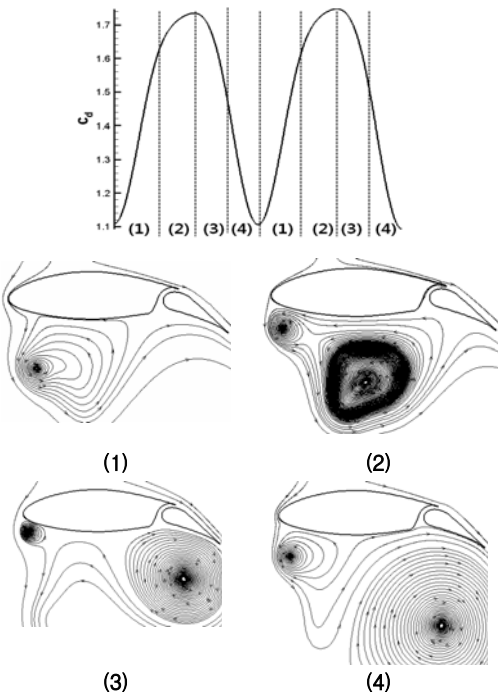


Fig. 13. Streamlines of SUAV at L.E. flow control(T2)

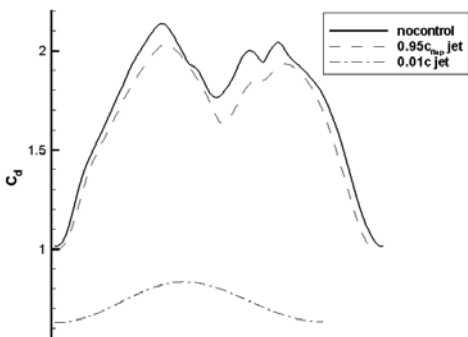


Fig. 14. Drag histories at flow control(T3)

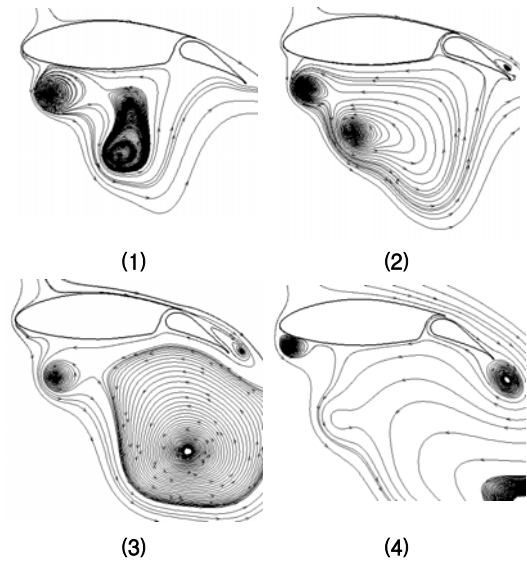
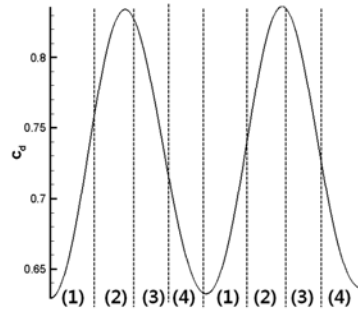


Fig. 15. Streamlines of SUAV at L.E. flow control(T3)

부착되지 않고 유입류의 방향으로 떨어져 나가도록 하기 때문에 뒷전 와류에 의해서 항력이 증가하는 것을 막는다. 따라서 익형의 앞쪽에 생성된 와류(1)는 그 크기가 증가하며 항력이 증가(2)하고 앞전와류의 이탈과 동시에 뒷전 와류가 생성(3) 및 이탈(4)하며 항력이 감소하게 된다.

천이 비행 모드 3은 틸트각이 60°, 플랩각이 25°인 형상으로 앞전 및 뒷전에서 synthetic jet을 구동하여 유동을 제어할 경우의 항력 분포는 Fig. 14와 같다. 천이 비행 모드 2에서와 같이 0.01c jet만을 구동시킨 경우 항력감소율이 가장 높으며 로터의 내리흐름의 방향이 좀 더 앞쪽으로 이동하기 때문에 앞전에 위치한 jet을 이용할 경우 Fig. 15와 같이 앞전에 위치한 와류가 생성(1)하면서 항력이 증가하고 이탈(2)하면서 항력이 감소하게 된다. 이 때 뒷전에서 와류가 발생(3)하는 하지만 익형의 아랫면에 부착되지 않고 이

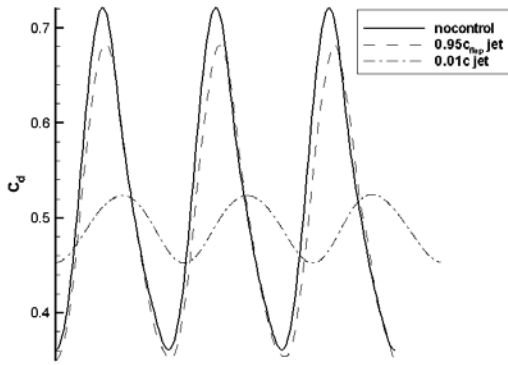


Fig. 16. Drag histories at flow control(T4)

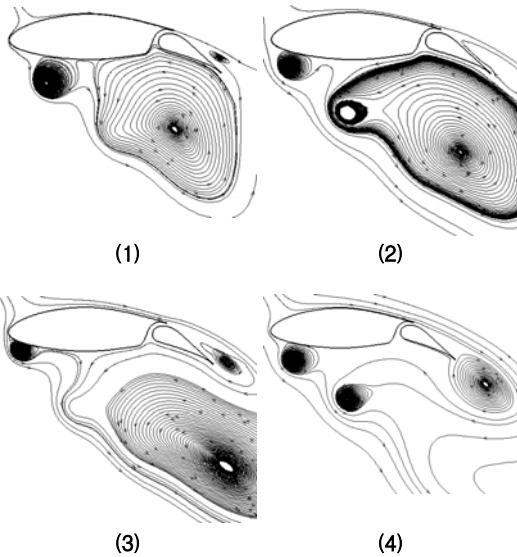
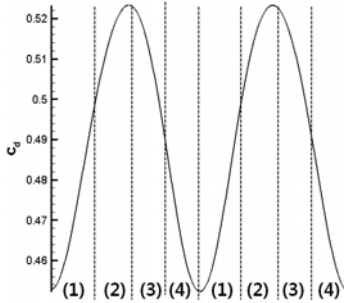


Fig. 17. Streamlines of SUAV at L.E. flow control(T4)

탈(4)하는 유동장을 가진다. 이에 로터의 내리흐름의 방향이 변함에 따라 앞전에 위치한 jet을 구동할 경우 익형의 아랫면에 부착되는 것을 효과적으로 방지할 수 있게 된다.

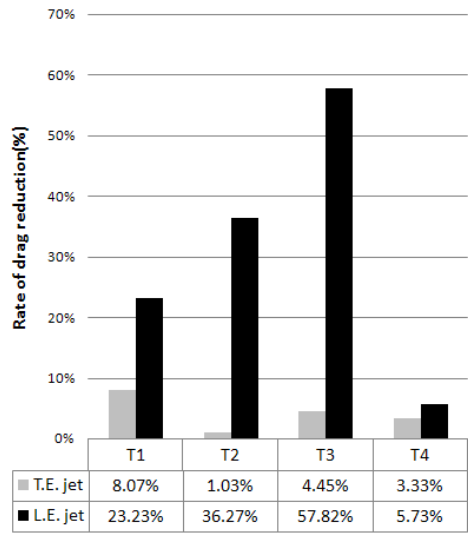


Fig. 18. Rate of drag reduction vs. transition flight condition at flow control

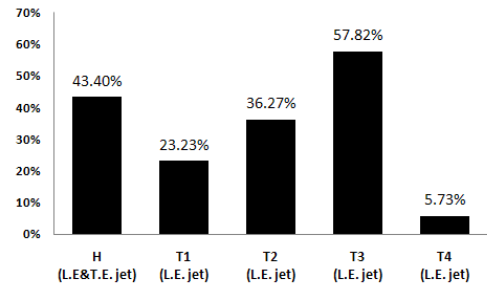


Fig. 19. Rate of drag reduction vs. overall flight condition at flow control.

천이 비행 모드 4의 경우, Fig. 16과 같은 항력 분포를 가지며 앞전에 위치한 jet을 사용하여 유동 제어할 경우 항력의 진동 폭이 감소함과 동시에 그 크기 또한 작아지는 것을 볼 수 있다. 이때의 유동 구조는 Fig. 17과 같이 나타난다. 틸트 각의 크기가 작아짐에 따라 유입류의 방향은 앞쪽으로 바뀌게 된다. 이에 천이 비행 모드 3의 경우와 유사한 유동 구조를 가지며 앞전 와류에 의해서 수익하중이 증가하게 되고 뒷전 와류는 생성되었다가 유입류의 방향으로 이탈하게 됨을 알 수 있다.

뒷전에 위치한 $F+ = 5$ 인 $0.95c_{flap}$ jet을 구동했을 경우와 앞전에 위치한 $F+ = 0.5$ 인 $0.01c$ jet을 구동했을 경우 각각의 천이 비행 모드에서의 항력 감소율은 다음과 같다. Fig 18에서와 같이 천이 비행 모드에서는 뒷전에 위치한 jet을 구동할 경우 보다 앞전에 위치한 $0.01c$ jet만을 구동했을 경우

항력 감소율이 높게 된다. 이에 정지 비행 모드에서는 앞전과 뒷전에 위치한 jet을 동시에 구동시키고 천이 비행 모드에서는 앞전에 위치한 jet만을 구동시킨다면 Fig 19와 같은 항력 감소율을 얻을 수 있으며 이로 인하여 스마트 무인기 전 비행 모드에서 로터의 내리흐름에 의해서 발생하는 수익하중을 감소시켜 항공기의 비행 성능과 안정성을 동시에 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

III. 결 론

Part 1에서의 결과를 바탕으로 실제 스마트 무인기 천이 비행모드에서의 유동 구조를 파악하고 앞전과 뒷전에 위치한 jet을 이용하여 이 때 발생하는 수익하중의 감소 여부를 확인하였다. 스마트 무인기의 실제 천이 비행경로 중 대표적인 비행 모드에서의 유동 구조 분석을 통하여 틸트각이 90°에 가까울수록 정지 비행 모드에서와 유사하게 앞전 및 뒷전 와류의 생성과 소멸을 통하여 익형 아랫면에 와류가 부착되는 유동 구조를 갖으며 로터의 내리흐름의 방향이 앞쪽을 바꿈에 따라 뒷전 와류보다 앞전 와류에 의해 수익하중이 증가함을 밝혔다. 이에 천이 비행 모드에서의 유동제어를 위해 Part 1의 결과에 따라 $F+=5$ 인 $0.95c_{flap}$ jet과 $F+=0.5$ 인 $0.01c$ jet을 구동시켜 그에 따른 항력 감소율을 알아보았다. 그 결과 천이 비행 모드에서는 로터의 내리흐름의 방향이 앞쪽으로 바뀌고 플랩각이 작기 때문에 앞전에 위치한 synthetic jet만을 구동시킬 경우 앞전에

서 발생하는 와류의 크기를 효과적으로 감소시키고 뒷전에서 발생하는 와류가 익형의 아랫면에 부착하는 것을 방지하게 되므로 항력 감소율이 가장 큰 것으로 나타났다.

따라서 Part 1의 결과에 따라 정지 비행 모드에서는 $F+=0.5$ 인 $0.01c$ jet 과 $F+=5$ 인 $0.95c_{flap}$ jet을 동시에 구동시키고 천이 비행 모드에서는 앞전에 위치한 synthetic jet만을 구동시킴으로써 수익하중을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 밝혔다. 이는 synthetic jet을 이용하여 스마트 무인기 전 비행모드에서 발생하는 거대한 박리유동 제어할 경우 효과적으로 수익하중을 감소시켜 항공기의 성능과 안정성을 동시에 향상시킬 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 기술개발사업(스마트무인기기술개발) 및 방위사업청과 국방과학연구소의 지원 (계약번호 UD0700 41AD)과 한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅센터 (KSC-2007- S00-1016), BK 21 사업의 지원을 통해 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 최성욱, 김재무, "스마트무인기 파워 전기체 비정상 유동해석", 한국전산유체공학회, 2007.