

효율적인 유체-구조 연계 해석을 고려한
 날갯짓 비행체의 세로방향 비행 시뮬레이션
Ornithopter Longitudinal Flight Simulations
Considering an Efficient Fluid-structure Interaction Analysis

한재홍* 이준성 Andreas T. Peiffer

Jae-Hung Han Jun-Seong Lee Andreas T. Peiffer

한국과학기술원 기계항공우주시스템학부 항공우주공학 전공, 대전 305-701

(TEL: +82-42-350-3723, e-mail: jaehunghan@kaist.edu)

ABSTRACT

Ornithopter is an engineering realization of nature's flyers such as birds, bats, and insects. Most of present ornithopters have thin membrane wings with patterned stiffeners like rigid vane of insect wing and electrical motors with mechanical linkages like bird's muscular-skeleton actuators. Especially, ornithopter wing has anisotropic wing-flexibility along the wing span and chord and the wing flexibility plays important roles to generate desired aerodynamic forces. However, ornithopter developers have been designed based on the flight experiences, trial-and-error approach, or statistically accumulated morphological data of nature's flyers. Therefore, we cannot systematically develop an ornithopter which is able to carry the extra payloads such as camera, chemical detection sensors for typical military surveillance and reconnaissance missions. To overcome these problems efficiently, our research group constructed an integrative simulation environment for flexible ornithopter wing design combining flexible multi-body dynamics, a refined ornithopter aerodynamic model, and their mutual interactions. Because complex mutual interaction among wing deformation, wing kinematics and unsteady aerodynamic loads, make those ornithopters barely flyable and controllable, we investigated on the characteristics of flight dynamics of ornithopter by using the efficient integrative simulation tool. Moreover, we performed the nonlinear flight simulations of longitudinal trimmed flight of a model ornithopter considering the fluid-structure interaction of main-wing, and specified the relationships between flight speed, and main- and tail-wing kinematics of model ornithopter to trimmed flight conditions.

1. 서론

날갯짓 비행체는 새나 박쥐, 곤충과 같은 자연계 비행체로부터 공학적인 방법을 통해 그 특성을 모방하여 제작된 비행체를 의미한다. 그림 1 과 같이 세계 주요 항공 선진국에서는 날갯짓 비행체의 높은 비행 효율, 고 기동성, 위장성 등에 주목하여, 다양한 환경 및 임무에 적용 가능한 차세대 소형 무인 비행체 개념으로 연구 중에 있다.

최근 개발된 날갯짓 비행체의 대부분은 곤충의 날개와 같이 얇은 막에 패턴화된 구조체로 이루어진 날개를 가지고 있으며, 새의 근골격계 모사를 위해 전기모터에 날갯짓 운동을 생성할 수 있는 메커니즘이 연결되어있

다 (그림 2, 3). 특히, 날갯짓 비행체의 날개는 날개의 길이 및 시위 방향에 따라 비등방 날개-유연성을 가지며 이는 날갯짓 비행체가 날갯짓 운동을 통해 필요한 공력을 발생하는데 중요한 역할을 한다. 하지만 날갯짓 비행체 개발자는 설계 단계에서 이러한 특징을 일일이 고려하여 반영하기보다는 경험, 시행착오, 혹은 통계학적으로 축적된 자연계 비행체의 데이터를 바탕으로 날갯짓 비행체를 설계해왔다. 따라서 현 기술 수준에서 우리는 전형적인 국방 감시, 정찰 임무 수행에 있어 필요한 카메라나 화학물 감지센서와 같은 추가적인 탑재체를 장착할 수 있는 날갯짓 비행체의 체계적인 개발이 어려운 실정이다. 그림 2-(a), (b)의 상용화된 날갯짓 비행체의 경우 약 10g 정도의 탑재체를 추가로 탑재 후



그림 1. 세계 주요 항공 선진국의 날갯짓 비행체 운용 개념도 (a) NASA, US, Entomopter Concept [1], (b) NASA, US, Solid-state Aircraft Concept [1], (c) EPFL, CH, Swarm-intelligent Concept [2], (d) ONERA, FR, REMANTA Program [3].



그림 2. 상용화된 완구용 날갯짓 비행체 (a) Neuros Inc., KR, *Cybird*, (b) HobbyTechnik, US, *Slowhawk*, (c) Interactive Toy Concepts Ltd, US, *i-fly VAMP*, (d) WowWee Group Ltd, US, *Dragonfly*.

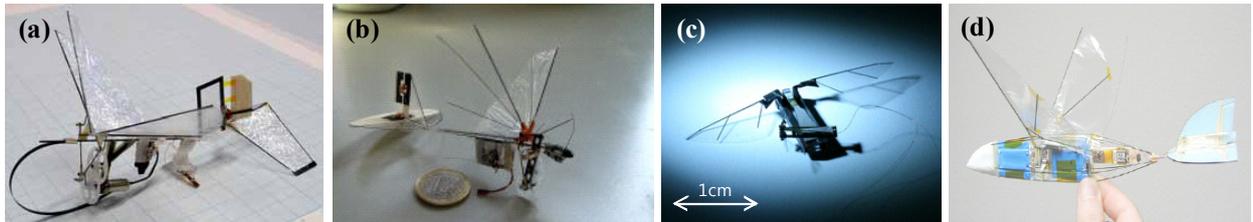


그림 3. 세계 주요 연구 그룹의 초소형 날갯짓 비행체 (a) Kawamura Lab., Fukuoka Institute of Technology, JPN, (b) Micro Delfly, TU Delft, NL, (c) Microfly, Harvard Microrobotics Lab., US, (d) Microbat, UCLA-Aerovironment Inc., US.

비행이 가능하나, 비행 안정성 및 조종성이 크게 바뀌게는 문제가 있으며, 무인 비행체 임무 수행을 위해서는 초소형, 고성능 전자 부품 개발에 의존하게 된다. 그림 3 은 날개 길이 10cm 미만의 실험실에서 제작된 초소형 날갯짓 비행체로 실내 비행이 가능하지만 카메라, 화학센서, 통신 모듈 등 임무 장비가 1g 미만을 만족해야 비행이 가능하다. 차세대 무인 비행 플랫폼으로 날갯짓 비행체를 활용 하기 위해서는, 이러한 문제점을 초소형, 초경량, 고성능 전자 부품 개발에 의존하지 않고, 주어진 탑재 장비를 가지고 비행 가능한 날갯짓 비행체를 설계, 개발, 운용하는 것이 바람직하다.

새나 곤충, 박쥐와 같은 자연계 비행체는 그들의 삶의 주기 동안 다양한 이륙중량 변화를 겪게 되며, 날개의 크기 및 운동학적 변수들을 그에 맞게 조절함으로써 비행 가능하도록 한다. 하지만 현재까지 개발된 날갯짓 비행체는 탑재체의 무게에 따라 날개의 크기, 유연성, 기구학적 특성 변화를 고려하지 못하였으며, 이러한 고려가 날갯짓 비행체의 공력 및 비행 동역학적 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 많은 연구가 이루어지지 않았다.

우리 연구 그룹은 날개의 형상학적 변수, 구조 동역학적 변수, 기구학적 변수를 체계적으로 고려하여, 특정 무게를 싣고 날 수 있는 날갯짓 비행체의 설계를 위해 유연 다물체계 동역학, 정교한 날갯짓 비행체 공력모델, 그리고 그 상호작용을 통합하여 날갯짓 비행체의 유연 날개를 효율적으로 설계할 수 있는 통합 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 또한, 이를 이용하여 유연 날개를 장착한 날갯짓 비행체의 비행 동역학적 특성 파악에 대한 연구가 본 논문에서 수행되었다.

2. 유체-구조 연계를 고려한 날갯짓 비행체 설계 관련 연구 동향

날갯짓 비행체의 날개는 고정익이나 회전익 비행체와는 달리 주 날개의 익형 형상뿐만 아니라 비행 유지 및 비행 제어에 충분한 공력이 생성되도록 날개의 운동학적 변수, 그에 따른 구조 동역학적 변형이 적절하게 일어나도록 설계되어야 한다. 특히, 얇은 막을 갖는 패턴화된 구조체의 형태를 갖는 날갯짓 비행체의 날개는 공력과 날개 운동에 의해 생성되는 관성력이 민감하게 연계되어 그 특성을 결정짓기 때문에 유체-구조 연계를 고려하여야 한다.

날갯짓 비행체의 공기역학적 특성은 저 레이놀즈 수 비정상 유동으로 날갯짓 운동에 의한 앞전 와류의 생성과 안정화와 관련된 많은 연구가 수행되고 있다[4]. 전산유체역학적 기법(CFD)은 과실과리, 벌, 박각시나방과 같은 다양한 곤충의 자중을 들어올릴 수 있을 만큼 공력을 모사할 수 있는 수준이 되었으나, 특정 곤충의 강체 날개의 4 주기 운동에 의해 생성되는 공력을 계산하기 위해서는 10 시간 정도 소요된다[5]. 유연한 날갯짓 비행체 날개의 유체-구조 연계를 고려한 설계를 위해서는 날갯짓 비행체의 공력특성을 비교적 정확하게 예측하고, 계산 자원 소모가 적은 저 차의 공력 모델을 필요로 한다. 또한, 날갯짓 비행체의 구조 동역학적 특성은 전산구조동역학(CSD) 기법을 통해 날갯짓 비행체의 날개를 구성하는 얇은 막, 대 변형 패턴 구조체를 모델링 하여 이에 대한 정적/동적 해석을 할 수 있어야 한다. 날개 구조의 비선형성과 복잡한 구속조건에 의해 상용 전산구조해석 소프트웨어를 사용하여 해석하기는 어려움이 있으며, 일부 유한요소모델링을 통해 in-house 프로그램을 개발 해석한 사례가 있다[6]. 날갯짓 비행체의 날개와 같이 복잡한 시스템의 구조 동역학적 주요 특성을 파악하기 위해 실제 구조 모드 실험을 통해 저차의 구조 모델을 수립하여 날개의 운동에 따른 변형을

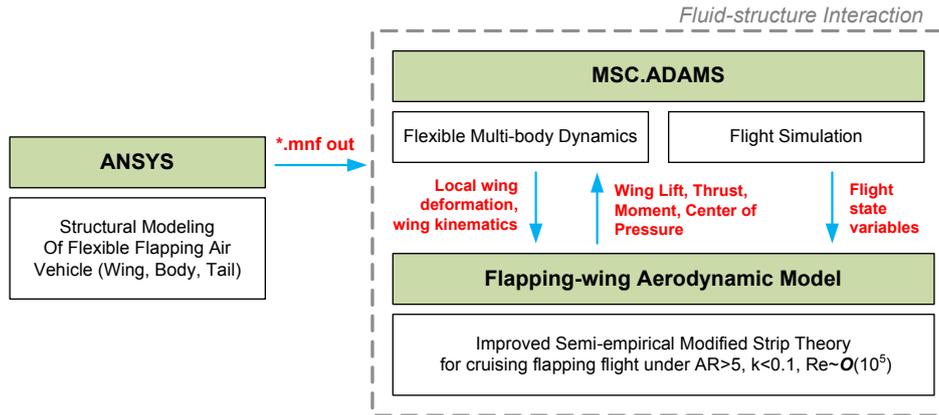


그림 4. 효율적인 유체-구조 연계를 고려한 날갯짓 비행체 통합 비행 시뮬레이션 환경 구성도.

살펴볼 수 있다 [7]. 날갯짓 비행체의 유연 날개 유체-구조 모델이 아직까지 각각 활발히 진행되고 있는 연구 분야이며, 유체-구조 연계를 고려하여 날갯짓 비행체의 주 날개 공력특성을 날갯짓 비행체 비행 운용 조건에 따라 살펴보거나, 비행 동역학적 특성을 살펴보는 연구는 아직까지 수행되지 않았다[8].

3. 효율적인 유체-구조 연계 해석을 고려한 날갯짓 비행체 통합 비행 시뮬레이션 환경 개발

그림 4 는 본 논문에서 제시하는 효율적인 유체-구조 연계 해석을 고려한 날갯짓 비행체 통합 비행 시뮬레이션 환경 구성도를 나타낸 것이다. 상용 동역학 해석 소프트웨어인 MSC.ADAMS 는 Craig-Bampton 의 부 구조물 합성법을 적용하여, 유한요소해석 소프트웨어로부터 해석 대상 구조의 모드 형상을 추출하게 되면 이를 이용하여 유연 다물체계 해석을 할 수 있게 한다.

ANSYS 를 사용하여 얇은 막과 같은 요소를 모델링 하는 경우 ADAMS 에서 사용할 구조 모델을 수립하는 과정에서 문제가 발생하기 때문에, fictitious mass 를 패터화된 구조에 분포시켜 실험적으로 얻어진 날개의 모드 특성과 일치하도록 하였다. 날갯짓 비행체 유체-구조 연계

해석에서 가장 핵심이 되는 날갯짓 비행체 공력모델은 날갯짓 비행체 공력모델로 DeLaurier 에 의해 개발된 Modified Strip Theory 를 저 레이놀즈 수 영역에서 큰 날갯짓 운동에 의해 생성되는 공력을 좀 더 정확히 모델링 하기 위해 개선하여 사용하였다. 특히 저 레이놀즈 수 영역에서 확보된 날갯짓 비행체의 유한 날개 정적 공력데이터를 바탕으로 동적 공력데이터를 추출할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이는 풍동 실험을 통해 검증되었으며[9], 날개의 종횡비가 5 이상, 무 차원 진동수(k) 0.1 미만, 레이놀즈 수(Re) 10,000 ~ 100,000 사이에서 사용 가능하다.

곤충이나 벌새와 같이 제자리 비행이 가능한 날갯짓 비행체보다는 까치나 비둘기, 매 정도 크기의 수평 순항 비행이 가능한 형태에 적용이 용이하다. 본 논문에서는 그림 2-(a), (b)와 같은 형태의 날갯짓 비행체를 모델링 하여 주 날개의 공력특성을 날갯짓 운동 주파수, 비행속도, 비행체의 평균 피치 자세각에 따라 살펴보았으며 그림 5 와 같다. 그림 5 의 데이터 한 점을 계산하는데 있어 transient-state 에서 steady-state 로 수렴된 10 주기의 날갯짓 운동의 평균값을 사용하였으며, 계산시간은 10 분 미만이다. 비행체의 자중을 상쇄시키기 위한 평균 수직력은 비행체의 평균 피치 자세각에 비례하여

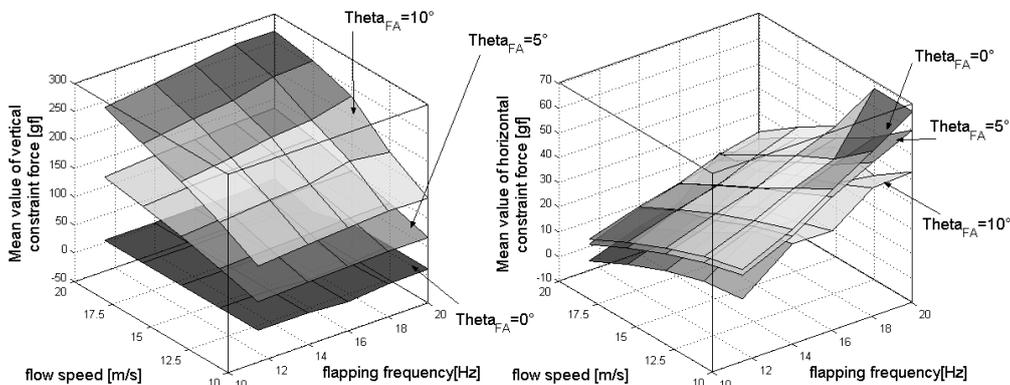


그림 5. 효율적인 유체-구조 연계 해석을 통해 설계된 날갯짓 비행체 주 날개의 비행속도, 날갯짓 운동 주파수, 비행체 평균 피치 자세각에 따른 수직/수평 방향 힘 특성.

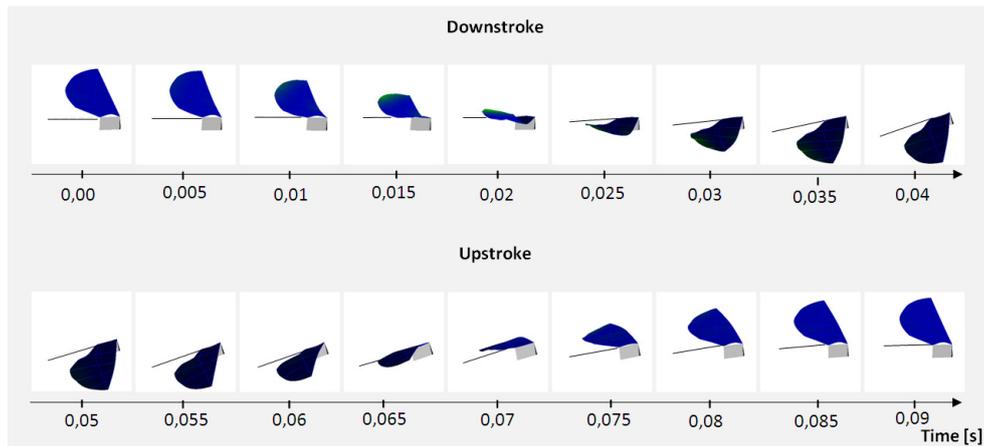


그림 6. 효율적인 유체-구조 연계를 고려한 날갯짓 비행체의 세로 방향 비행 시뮬레이션.

커지며, 날갯짓 운동 주파수, 비행속도가 높을수록 커지는 것을 확인할 수 있다. 비행체가 앞으로 나아가기 위해 필요한 평균 추진력의 경우 기체의 평균 피치 자세각이 커짐에 따라 항력으로 작용하여 감소하게 되며, 순항 비행에 필요한 수직력과 수평력 사이의 임의의 조건에서 평형상태를 이루게 된다. 또한 날갯짓 운동 주파수가 높을수록, 비행 속도가 낮을수록 수평력이 커지는 것을 확인할 수 있다.

유체-구조 연계를 고려하여 설계된 유연 날개는 날갯짓 비행체에 부착되어 ADAMS 내에서 비행 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 날갯짓 비행체의 꼬리 날개의 공력 모델은 Prandtl의 lifting line theory를 이용하였으며, 단 순화를 위해 강체로 가정하였다.

날갯짓 비행체는 고정익이나 회전익 비행체와는 달리 trim condition에서 비행체의 state가 일정한 값에 수렴하지 않고, 날갯짓 운동 주파수를 가지로 제한 주기 진동을 하게 된다. 본 논문에서 수립된 날갯짓 비행체의 순항비행조건을 찾기 위해 날갯짓 운동 주파수, 초기 비행 속도, 꼬리날개 trim 각을 변화시켜가며 비행체의 모든 state가 발산하지 않고 진동 혹은 수렴하는 조건을 탐색하였다. 그 결과 그림 6과 같이 날갯짓 운동 주파수 12Hz, 꼬리 날개 trim 각 11.85도, 비행속도 10.8m/s에서 순항 비행 조건을 얻을 수 있었다. 이 경우 비행체의 고도, 비행체의 피치 자세각이 날갯짓 운동 주파수 성분과 동일한 주파수로 진동하는 것을 관찰할 수 있었다.

그림 2-(b)와 같은 상용 날갯짓 비행체에 비행 데이터 수집 장치를 장착하여, 날갯짓 비행체의 순항 비행시 비행 데이터를 획득하는 실험이 최근 보고 되었다[10]. 여기서도 날갯짓 비행체의 수평 비행 시 꼬리날개의 trim 각이 일정하게 유지되면서, 비행체의 피치 자세각이 날갯짓 운동 주파수와 같은 주파수로 진동하는 것을 확인할 수 있었으며, 본 연구에서 수행된 통합 시뮬레이션 환경에서 수행된 날갯짓 비행체 비행 시뮬레이션이 날갯짓 비행체의 비행특성을 효율적으로 모사할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 효율적인 유체-구조 연계를 고려한 날갯짓 비행체 통합 비행 시뮬레이션 환경을 구축하였으며, 날갯짓 비행체의 세로 비행 안정성이 확보된 비선형 비행 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 날갯짓 비행체의 순항비행 시 피칭 자세각의 제한 주기 진동 현상을 확인하였다. 이를 바탕으로 향후 날갯짓 비행체의 비행 제어 알고리즘을 통합 시뮬레이션 환경에 포함할 수 있도록 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2009년 KAIST Institute for Design of Complex Systems의 기초연구과제의 지원에 의한 연구 결과이며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] A. Colozza, G. Landis, and V. Lyons, NASA/TM-2003-212459 (2003).
- [2] S. Hauert, J.-C. Zufferey, and D. Floreano, Autonomous Robots, 26(1) pp. 21-32 (2009).
- [3] T. Rakotomamonjy, M. Ouladsine, and T. LeMoing, Journal of Aircraft, 44(1), pp.217-231, (2007).
- [4] F.-O. Lehmann, The Journal of Experimental Biology 211, pp.224-233 (2008).
- [5] H. Liu, Journal of Computational Physics 228, p.439-459, (2009).
- [6] A. Barut, M. Das and E. Madenci, AIAA 2006-1662, 25pages, (2006).
- [7] D.-K. Kim, J.-S. Lee, J.-Y. Lee and J.-H. Han, Proc. SPIE 6928, 69281O (2008).
- [8] W. Shyy, Y. Lian, J. Tang, D. Viieru, and H. Liu, Cambridge University Press, New York, (2008).
- [9] J.-S. Lee, D.-K. Kim, J.-Y. Lee, and J.-H. Han, Proc. SPIE 6928, 69281P (2008).
- [10] J. A. Grauer, and J. E. Hubbard, Jr., Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 32, 1, pp.326-331 (2009).