박각시 나방 유연날개의 반실험적 공력 모델링을 위한 연구

A study on semi-empirical aerodynamic model with hawkmoth-like flexible wings

류영균[1]*, 한종섭[2], 장조원[1], 정준[3]
한국항공대학교[1], 한국과학기술원[2], 라이어슨대학교[3]

초 록

본 연구는 박각시 나방 유연날개의 준정상 공력 모델링을 위한 공력측정실험을 진행하였다. 두 개의 서보모터로 이루어진 동역학적 로봇 모델은 3톤 수조 내부에서 날갯짓 운동을 구현하였고, 6축 센서가 날개 모델의 뿌리에 장착되어 공력 측정을 시행하였다. 날개 모델은 다른 두께의 폴리카보네이트 평판으로 제작되었고, 3mm 두께의 강체날개와 0.8mm 두께의 유연날개로 구성되었다. 공력측정은 각 날개 모델별 받음각을 -5도에서 95도까지 5도씩 변경하여 진행하였고, 이를 바탕으로 준정상 공력 모델링을 시도하였다. 날개 두께별 준정상 공력 모델링을 통해 특정 두께를 가진 유연날개는 강체날개보다 높은 공력효율을 가짐을 알 수 있었고, 날개 유연도 역시 준정상 가정을 기반으로 모델링 할 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서 론

생물학적 비행체(biological flyer)는 새와 박쥐, 곤충 등 자연계에서 날갯짓 운동으로 비행을 하는 생물체를 통칭하며, 제자리 비행(hovering)을 비롯해 고기동(high maneuverability) 특성을 가져 MAV(Micro Air Vehicle, 초소형 비행체) 개발에 주 타겟 모델로 연구되어 왔다. 특히 날갯짓 비행을 하는 곤충들은 특유의 비행 메커니즘으로 많은 연구자들에게 MAV의 다양한 임무 및 적용 범위들을 제시해 왔다. 현재까지 AV社의 Nano-hummingbird[1]와 Harvard University의 Robobees[2] 등 다수의 프로토타입의 곤충 모방 초소형 비행체들(insect-inspired MAVs)이 보고되고 있다.

곤충 날개는 고받음각으로 왕복 날갯짓 운동을 하므로 일반 비행기에 적용하는 공기역학 해석 방법으로는 곤충 특유의 비정상 특성을 해석할 수 없다. 저받음각 날개에 적용하는 포텐셜 흐름 이론(potential flow theory)보다 와류-지배적 유동장(vortex-dominate flow fields)을 고려하여 공기역학 특성을 해석해야한다. 이와 같이 곤충 날갯짓 운동은 와류 효과를 포함한 비정상 공력특성을 나타내지만 몇몇 가정을 통해 여전히 공력 모델링을 하고 있으며, 특히 준정상(quasi-steady) 가정을 거쳐 상당부분 공력변화를 추정하는 연구결과가 발표된바 있다[3, 4].

준정상 공력모델(quasi-steady aerodynamic model)은 일반적인 항공기뿐만 아니라 곤충날개에서 생성하는 공력생성량과 제어력을 추정하기 위해서도 주로 쓰인다. 본 연구에서는 곤충날개의 날갯짓 운동을 반실험적 준정상 공력 모델링(semi-empirical quasi-steady aerodynamic modeling)을 통해 날개형상과 날갯짓 함수만을 이용하여 공력의 시계열 변화를 추정하였다. 이는 날갯짓 비행 시 빠른 공력 추정이 가능하다는 장점을 가졌으나, 실제 날갯짓 비행에서 나타나는 복잡한 비정상항들을 수반하지 않는다는 단점 또한 가진다. 또한, 지금까지의 연구들은 강체날개(rigid wing)를 포함한 단순화된 날개형상과 제자리 비행에 집중되어있어 유연날개(flexible wing)의 공력특성변화는 반영되지 않았다. 따라서 본 연구팀은 유연날개의 준정상 공력 모델링를 위한 공력측정 실험을 진행하였다.

본 연구팀은 과거 곤충모방날개의 스팬방향 유연도에 대한 연구를 진행한 바 있다[5]. 이번 반실험적 공력 모델링에서는 과거 연구를 통해 측정했던 공력특성을 바탕으로, 총 2개의 서로 다른 두께를 갖는 날개를 선정하여 각 날개에 작용하는 공력 및 모멘트를 직접 측정하였다. 측정된 값들은 대표위치를 선정하여 추출한 뒤 커브피팅(curve-fitting)을 수행했다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 방법

본 연구는 박각시 나방(hawkmoth, Manduca Sexta) 날개를 모방한 단순화한 모델을 제작하여 실험을 진행하였다. 본 실험에 사용된 날개 모델은 가로세로비(AR) 3.09를 가지고 스팬길이(b) 200mm와 평균 시위길이($\bar{c}$) 67.5mm로 제작했다. 공력측정 실험에 사용된 날개모델들은 각각 두께가 3mm와 0.8mm이며, 3mm 두께의 날개를 강체날개로 가정하여 0.8mm 두께 유연날개의 공력측정 결과와 비교하였다.

Fig 1은 본 실험에서 사용한 서보모터 두 개를 가진 2차원 날갯짓 모션 모델을 수조상사기법을 이용하여 공력측정을 진행하였다. 실험에 사용된 수조는 길이 3m, 폭 1m, 높이 1m를 가지며, 공력측정에 사용된 센서는 6축 센서로 날개 뿌리 부분에 달아 힘을 측정하였다[5].

반실험적 준정상 공력 모델링을 하기위해 본 연구팀은 공력 측정 시 받음각(α)을 −5도에서 95도까지 5도 간격으로 변경하였고, 날갯짓 운동은 각 케이스 별 25번 반복측정을 수행하였다. 이는 랜덤 노이즈를 제거했을 뿐만 아니라 첫 1~2회의 공력측정 결과를 제외함으로써 불완전 발달된 후류(under−developed wake)로 인한 효과를 제거했다.

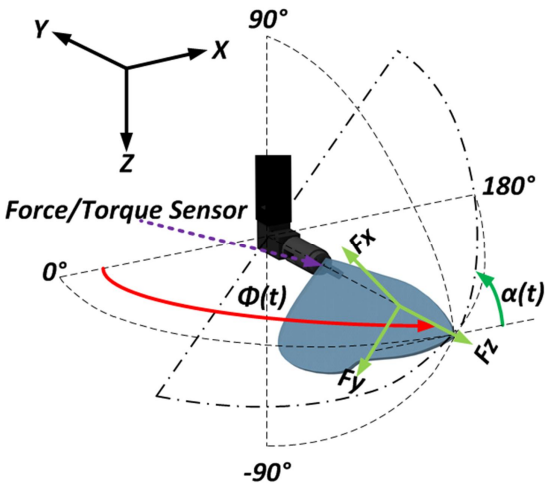

Fig 1. Schematic of the motion model

2.2 실험결과

2.2.1 강체날개 공력측정

공력 모델링을 하기 위해서는 공력생성량이 수렴해야하므로 상당한 스트로크 기간이 필요하다. 본 연구에서는 이를 위한 스트로크 영역을 약 180도로 결정하였고, 공력이 수렴하는 영역의 값들을 평균하여 준정상 공력 모델링에 이용했다.

Fig 2는 강체날개의 준정상 공력 모델링을 위한 공력측정 실험결과를 보여준다. 그래프에서 두꺼운 검은색 실선은 −5도, 두꺼운 빨간색 쇄선은 45도, 두꺼운 녹색 점선은 95도일 때의 양력계수를 나타내며, 얇은 파란색 실선은 10도, 20도, 30도, 얇은 파란색 파선은 60도, 70도, 80도일 때의 양력계수를 나타낸다. 받음각이 −5도에서 45±5도 영역까지 증가할수록 공력 생성량이 증가하는 반면, 받음각이 그 영역 이상으로 증가할수록 공력 생성량이 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 곤충들이 특정 고받음각 영역 내에서 날갯짓을 하는 이유를 간접적으로 보여준다. 공력들이 일정부분 수렴하는 부분으로부터 각 받음각별 평균 공력들을 얻을 수 있었다.

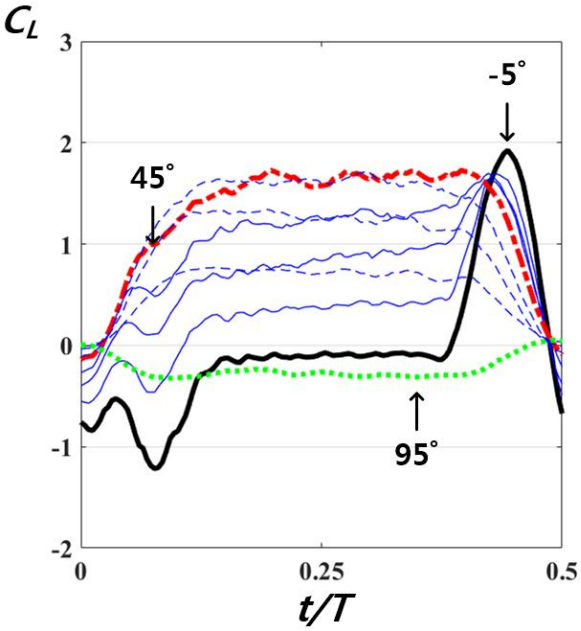

Fig 2. Lift coefficient of 3mm-thick wing depending on the angle of attack for half-cycle

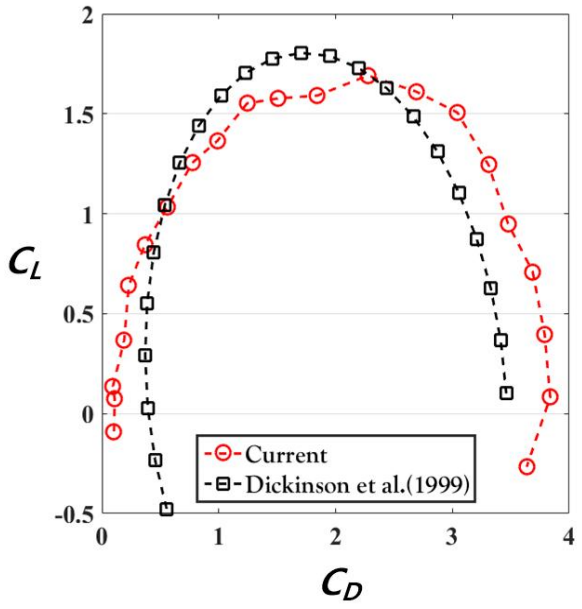

Fig 3. Comparison of aerodynamic coefficients between current and past results

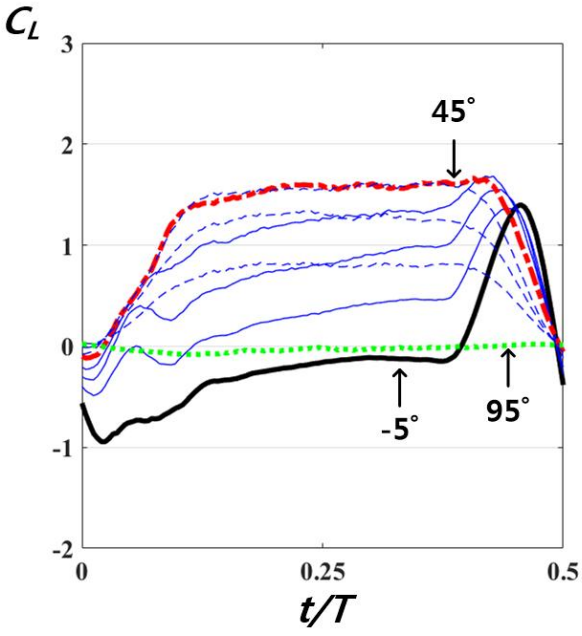

Fig 4. Lift coefficient of 0.8mm-thick wing depending on the angle of attack for half-cycle

Fig 3은 본 실험 결과와 과거 Dickinson et al.[6]의 연구결과를 비교한 그래프다. 각 그래프가 보여주는 경향은 비슷하나 값의 차이가 보였다. 이는 다른 받음각 측정 범위(Dickinson; −9도에서 90도까지 4.5도씩 증가)와 날개모델(Dickinson; 초파리 모방 강체날개 모델), 실험환경(Dickinson; 2톤 수조에 미네랄 오일 사용) 등에 기인한 것으로 추정된다. 이는 각 날갯짓 모델이 다른 레이놀즈수(Re)를 제공하므로 그에 따른 공력특성 변화가 예측된다.

2.2.2 유연날개 공력측정

본 연구에서는 유연날개의 공력을 측정할 때 공력생성량의 수렴 유무를 중점적으로 확인했다. Fig 4는 본 실험에 사용된 0.8mm 두께 유연날개의 공력측정 실험결과다. 유연날개는 강체날개와 달리 날갯짓 운동 시 날개가 점진적으로 휘어지고 최대변형이 일어나는 구간까지 공력이 지속적으로 성장함을 보여준다. 특히 받음각이 −5도에서 45도까지 영역과 50도에서 95도까지의 영역에서 보여주는 공력수렴 경향에 차이가 보였다. 첫 번째 영역에서는 0.8mm 두께 날개가 날갯짓 방향 전환(wing reversal)할 때 날개의 변형(wind deformations)이 커 공력수렴 구간까지 도달하기 시간이 상대적으로 길었다. 반면에 두 번째 영역에서는 날개회전 폭이 좁기 때문에 공력수렴이 앞의 영역보다 빨리 이루어졌다. 본 실험 결과는 구조적 시계열 변형에 대한 모델을 추가한다면 유연날개에 대한 준정상 공력 모델링의 가능성을 제시한다.

2.2.3 준정상 공력 모델링

준정상 공력 모델링을 위해 과거 Sane and Dickinson[3]은 공력측정 결과들을 단순한 시누소이드에 관한 공식(sinusoidal equation)으로 정리하여 제시하였다. 이때 공력 모델링 범위는 날갯짓 방향 전환 시 발생하는 후류영향(e.g. wake effect)을 제외한 측정공력들이 수렴하는 영역의 공력들을 평균하여 공력 모델링 하였다. 본 연구팀 또한 그들과 같이 간단히 시누소이드에 관한 공식으로 준정상 공력 모델링을 하였다.

강체날개를 포함한 유연날개의 준정상 공력 모델링을 비교한 결과 유연날개의 양력계수(C_L)는 중간 받음각 영역에서 강체날개보다 더 높은 값을 가지고, 항력계수(C_D)는 고받음각 영역에서

그 값이 줄어들었다. 본 연구결과는 특정 유연도를 가진 날개에서 높은 공력 효율을 가짐을 반증해준다.

3. 결 론

본 연구에서는 날갯짓 시 유연날개의 공력변화를 추정할 수 있는 반실험적 공력 모델링을 수립하기 위한 공력측정 실험을 진행하였다. 총 2개의 날개모델들을 받음각을 5도 간격으로 변경하여 공력 측정을 수행하였다. 높은 유연도를 갖는 날개는 비정상도가 강체날개보다 두드러지게 나타났으나, 고받음각에서 스트로크가 진행됨에 따라 준정상 상태로 수렴하였다. 또한, 특정 유연도를 갖는 날개는 강체날개보다 높은 양력 및 적은 항력을 가짐으로 공력효율이 높은 것을 알 수 있었다. 이러한 실험 결과는 날개의 구조적 특성을 포함한 준정상 공력 모델링의 가능성을 제시한다.

후 기

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and future Planning (NRF-2015R1A2A2A01002536)

참고문헌

[1] Keennon, M., Klingebiel, K., Won, H., Andriukov, A., 2012, Development of the Nano Hummingbird: A Tailless Flapping Wing Micro Air Vehicle, 50th AIAA Aerospace Science Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Nashville, Tennessee, Jan. 09-12.

[2] Duhamel, P.-E. J., P.-A., N. O., Barrows, G. L., and Wood, R. J., 2013, Biologically Inspired Optical-Flow Sensing for Altitude Control of Flapping-Wing Microrobots, IEEE/ASME Transactions of Mechatronics, vol. 18, no. 2.

[3] Sane, S. P. and Dickinson, M. H., 2002, The aerodynamic effects of wing rotation and a revised quasi-steady model of flapping flight, Journal of Experimental Biology, vol. 205, pp. 1087-1096.

[4] Han, J.-S., Kim, J.-K., Chang, J. W., and Han, J.-H., 2015, An improved quasi-steady aerodynamic model for insect wings that considers movement of the center of pressure, Bioinspiration & Biomimetics, vol. 10, 046014.

[5] Kim, D.-W., Han, J.-S., and Chang, J. W., 2014, Influence of Spanwise Flexibility of an Insect-like Flapping Wing on the Aerodynamic Characteristics, The Korean Society for Aeronautical & Space Science (KSAS) Conference, pp. 145-148.

[6] Dickinson, M. H., Lehmann, F.-O., and Sane, S. P., 1999, Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight, Science, vol. 284, pp. 1954-1960.