한국추진공학회 2007년도 추계학술대회 논문집 pp.311~314 2007 KSPE Fall Conference

곤충 모방 플래핑 날개의 공력 특성

한종섭* · 장조원* · 최해천** · 강인모*** · 김선태***

Aerodynamic Characteristics of an Insect-type Flapping Wings

Jong-seob Han* · Jo-won Chang* · Hae-cheon Choi** · In-mo Kang*** · Sun-tae Kim***

ABSTRACT

Aerodynamic characteristics of an insect-type flapping wings were carried out to obtain the design parameters of Micro Hovering Air Vehicle. A pair of wing model was scaled up about 200 times and applied two pairs of 4-bar linkage mechanism to mimic the wing motion of a fruit fly(*Drosophila*). To verify the Weis-Fogh mechanism, a pair of wings revolved on the 'Delayed Rotation'. Lift and drag were measured in conditions of the Reynolds number based on wing tip velocity of about 1,200 and the maximum angle of attack of 40°. Inertia forces of a wing model were also measured by using a 99.98% vacuum chamber and subtracted on measured data in air. In the present study, high lift effect of Weis-Fogh mechanism was appeared in the middle of upstroke motion.

초 록

곤충의 날갯짓을 모방한 공력특성 연구가 초소형 비행체의 설계 파라미터를 구하기 위하여 수행되었다. 한 쌍의 날개 모델은 초파리(*Drosophila*) 날갯짓을 모방하기 위하여 200배 확대하였으며, 두 쌍의 공간 4절 링크를 적용하였다. Weis-Fogh 메커니즘을 검증하기 위해 한 쌍의 날개모델은 후행회전(Delayed Rotation)의 움직임을 가지도록 설계되었다. 또한 양력 및 항력은 날개 끝 속도 기준 레이놀즈수 약 1200, 최대 받음각 40°에서 측정되었다. 모델의 관성력은 99.98%의 진공 챔버로 측정되고 공기 속에서 측정된 데이터에서 제거되었다. 본 연구에서 Weis-Fogh 메커니즘의 고양력 효과는 날개의 업스트로크 과정에서 나타났다.

Key Words : Flapping wing, Weis-Fogh mechanism, Unsteady(비정상), MAV(초소형 비행체)

1. 서 론

곤충의 날갯짓 및 그 비행 특성은 생체모방공학(Bio-mimic mechanism)에서 응용하는 일반적인 자연계 생물과는 다르게 현재까지 그 정확한

* 한국항공대학교 항공운항학과
연락저자, E-mail: jwchang@kau.ac.kr
** 서울대학교 기계항공공학부
*** 국방과학연구소

물리적 특성이 설명되지 못하고 있으며, 이에 따라 항공선진국에서는 곤충의 비행방식에 대한 타당한 물리적 이해를 도출하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다.

1973년 Weis-Fogh[1]는 정상상태 이론을 이용하여 곤충의 날갯짓을 해석한 후, 그 결과가 곤충이 비행하는데 필요한 양력을 충분하게 생성하지 못한다고 언급하였다. 그리하여 Weis-Fogh는 날개가 박수치듯 부딪혀 앞전부터 다시 열리는 움직임으로 비정상적 공력을 얻는 'Clap-fling mechanism'을 보이고 이것이 곤충의 고양력(Enhanced Lift) 메커니즘이라고 설명하였다. 현재 이러한 메커니즘은 자연계 생물의 비행메커니즘에 관한 다른 연구에도 잘 나타나 있으며, 말벌, 나비 등의 곤충은 물론 비둘기 같은 조류의 이·착륙에도 나타나는 하나의 고양력 메커니즘으로 알려져 있다.

곤충 날갯짓에 의해 발생하는 또 다른 비정상 메커니즘은 날개가 스트로크 끝단에서 회전하는 경우에 나타나는 것으로 알려져 있으며, 각각 회전 순환(Rotational Circulation)과 후류포획(Wake-capturing mechanism)으로 불린다. 회전순환은 날개가 각 스트로크 끝단에서 받음각이 증가하는 방향으로 회전하면서 생기는 마그누스 효과(Magnus effect)로 설명하고 있으며, 후류포획은 날개의 병진운동에 의해 생긴 후류가 스트로크 후 방향을 바꾼 날개의 아랫면에 부딪치면서 생기는 메커니즘으로 알려져 있다. 후류 포획은 1994년 Dickinson[2]의 2차원 실험 결과에서 처음 언급되었으며, 이후 3차원 모델인 'Robofly'의 가시화 실험을 통해 후류 포획 메커니즘에 대한 유동구조를 설명하였다.

Weis-Fogh 메커니즘이 한 쌍 날개의 상호효과에 대한 메커니즘인데 반해, 이를 제외한 다른 메커니즘들은 높은 받음각 변화를 보이는 단일 날개에 대한 것임을 알 수 있다. 또한 후류포획 메커니즘인 Dickinson et al.[3]의 연구결과는 Sun and Tang[4], Wu and Sun[5] 등의 전산 해석결과와 차이를 나타내고 있어 현재까지 논란이 지속 되고 있다.

본 연구에서는 Weis-Fogh 메커니즘과 각 날개간의 상호효과에 대한 공력특성을 검증하기 위해 실제 초파리의 약 200배 확대모델을 설계하고, 로드셀을 활용하여 공력특성에 관한 실험 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 모델은 두 쌍의 4절 링크(SRRS)가 활용되었으며, 각 4절 링크에 위상차를 주어 스트로크 및 회전이 가능하도록 하였고, Fig. 1에 제시하였다. 날개의 받음각을 제어하기 위해 슬라이드 메커니즘을 활용한 제어기를 양 크랭크의 끝에 연결하였고, 기어의 각속도를 유지하기 위해 높은 토크를 가지는 MABUCHI社 RF-300EA 기어드 모터(Geared Motor)를 사용하였다. 날개는 Dickinson et al.[3]의 실험에 사용된 초파리 날개와 상사하도록 설계되었다. 평균시위길이는 약 104mm, 스팬길이는 200mm이며 아크릴로 제작되었다.

정지 비행을 하는 경우, 레이놀즈수는 날개의 스팬길이와 평균 시위 길이, 플래핑 각과 주기 등으로 계산 할 수 있으며 일반적으로 초파리의 레이놀즈수 범위는 약 100~200내외로 알려져 있다. 그러나 본 연구에서의 레이놀즈수 범위는 약 1,200인데 이것은 실제 초소형 비행체의 레이놀즈수가 초파리보다 높은 영역에 있을 것으로 추정되기 때문이다. 또한 Wu and Sun[5]은 초파

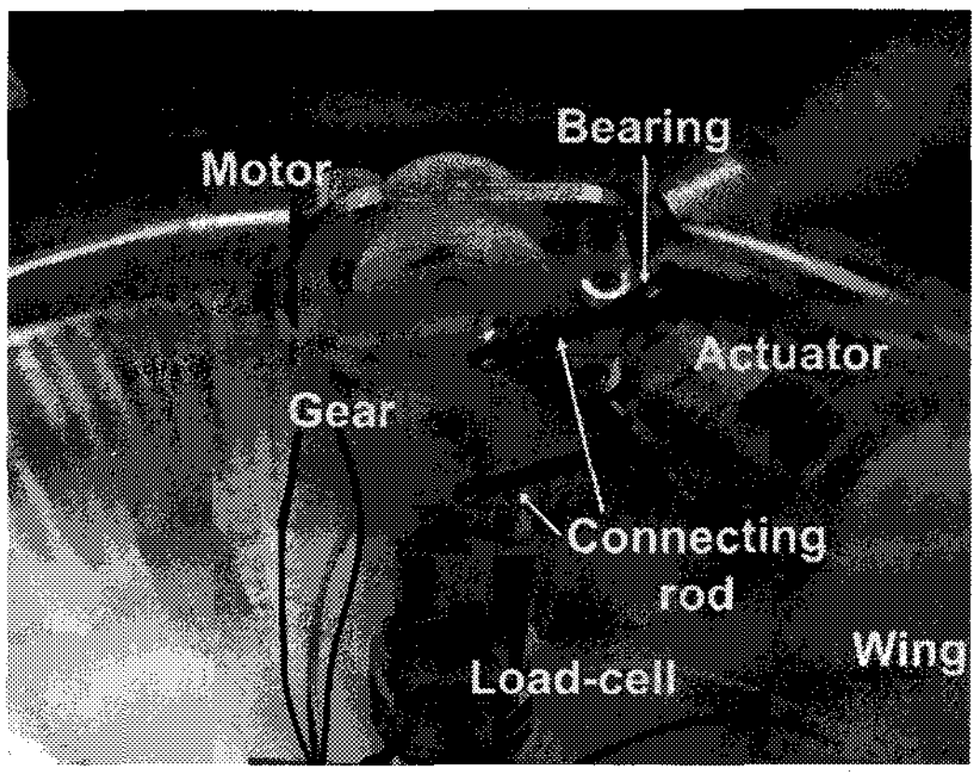

Fig. 1 Model parts

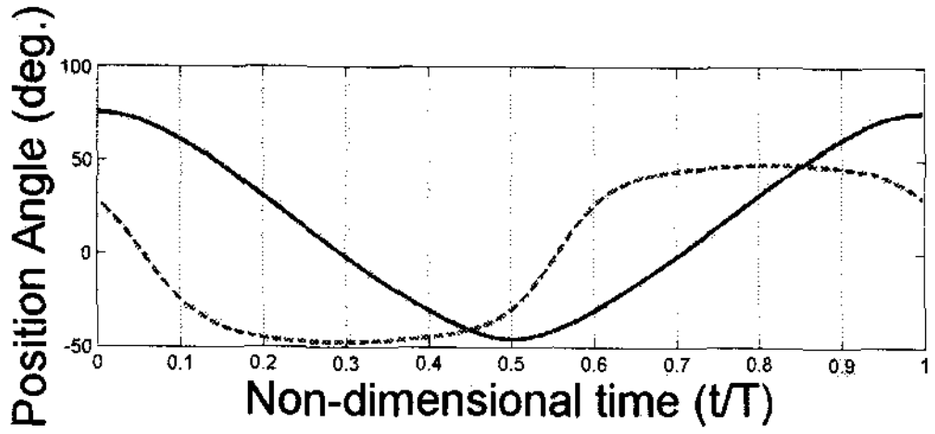

Fig. 2 Motion of the present model

리 날개에 대한 전산연구를 수행하면서, 레이놀즈수가 600이상으로 증가할 경우 양/항력계수가 수렴함을 보였는바, 수렴후의 레이놀즈수 범위에서 나타나는 비정상 메커니즘은 유사하게 나타날 것이라고 예상하였기 때문이다.

Fig. 2는 구동모터가 일정한 각속도를 갖는다는 가정 하에 계산된 날개의 움직임을 보여준다. 모델의 날갯짓 각은 약 125°이며 최대 받음각은 약 40°이다. 날개 회전은 후행회전으로서, 이는 앞전이 먼저 부딪친 후, 박수치듯 접고 다시 앞전부터 벌어져 날갯짓이 이루어지는 Weis-Fogh 메커니즘에 기초하여 설계함으로서 나타난 결과이다.

Fig. 3은 공력 측정방법에 대한 순서도이다. 공력측정에는 2축 1kg$_f$ 로드셀이 적용되었으며 모델의 밑에 장착되어 날개의 추력(양력)과 항력을 측정한다. 측정된 데이터는 증폭기와 10Hz 저역필터를 통과한 후 PC에 저장된다.

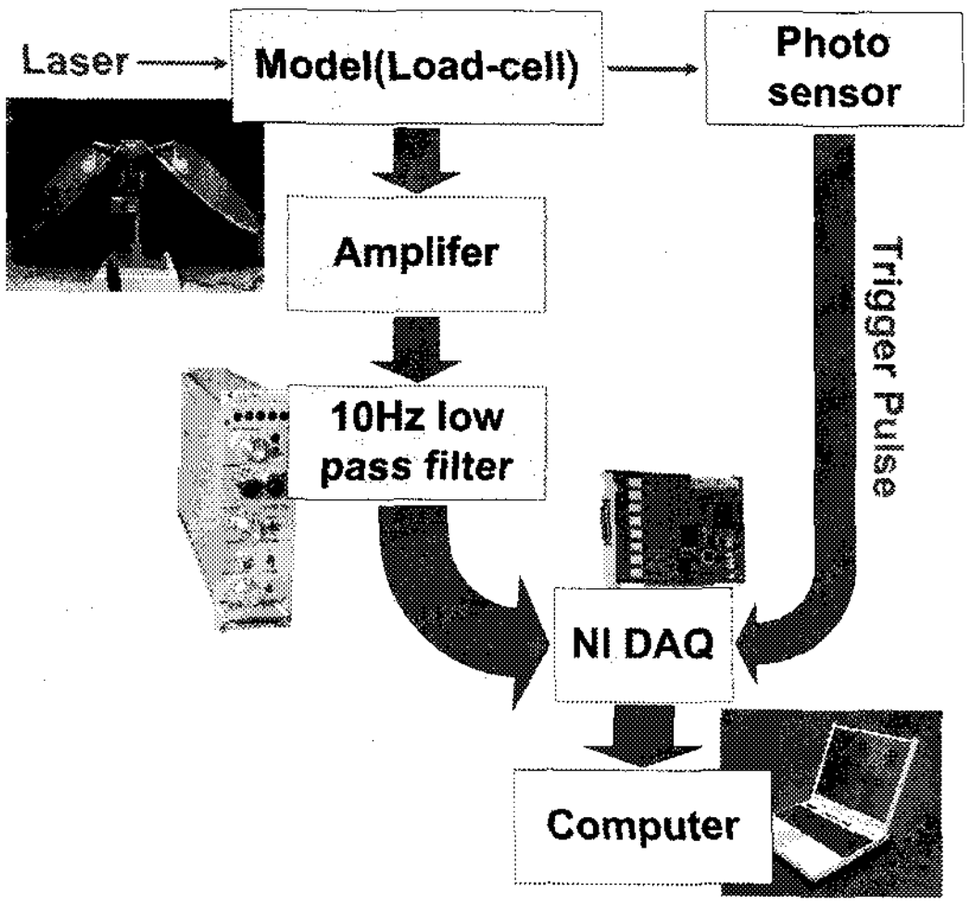

Fig. 3 Flowchart for measurement procedure

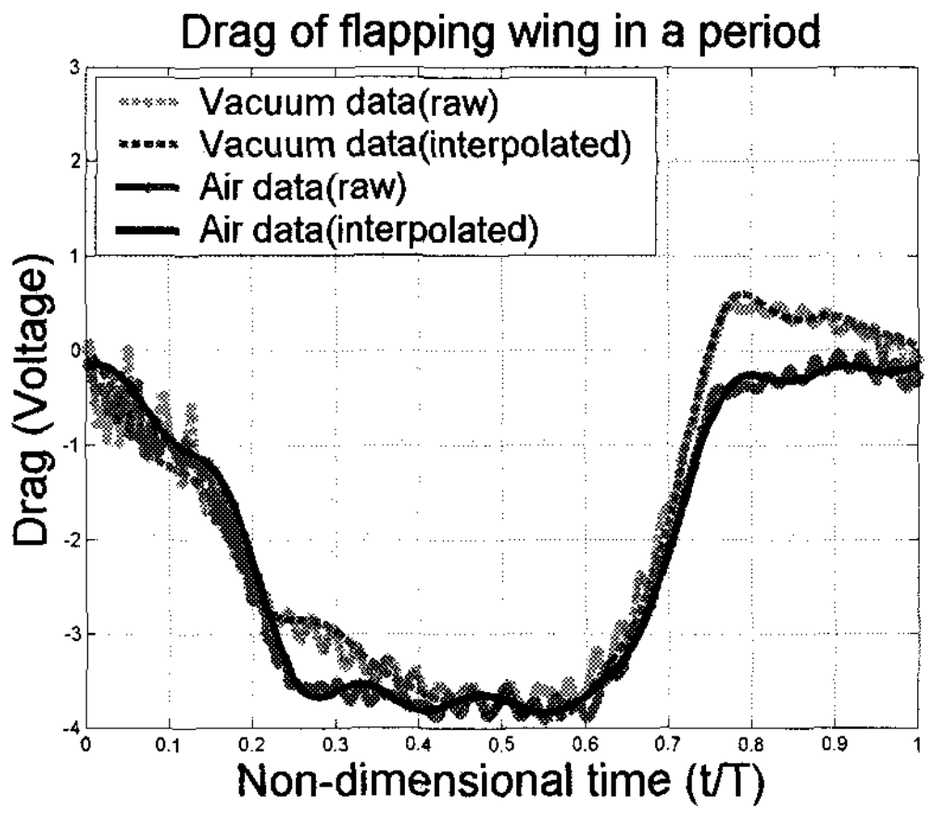

Fig. 4 Air and vacuum data

본 연구에서는 실제 공기 중에서 측정 중에 포함된 관성력을 제거하기 추가적인 측정이나 해석 등을 필요로 한다. Singh et al.[6]은 약 90%를 유지할 수 있는 진공 챔버를 사용하여 관성력을 직접 측정하였다. 본 연구에서는 99.98%의 진공을 유지할 수 있는 챔버를 활용하여 관성력을 측정/제거하였다. Fig. 4는 공력과 관성력을 겹쳐 나타낸 데이터로, 두 데이터의 차이가 순(純) 공력임을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

공력특성 측정값의 불확실성(Uncertainly)을 줄이기 위해, 측정한 데이터를 앙상블 평균하였다. Fig 5는 양력에 대한 앙상블 평균을 나타낸 것으로 50주기 이상에서 일정하게 수렴하는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서의 데이터는 120주기 이상을 앙상블 평균하여 제시된 것이다.

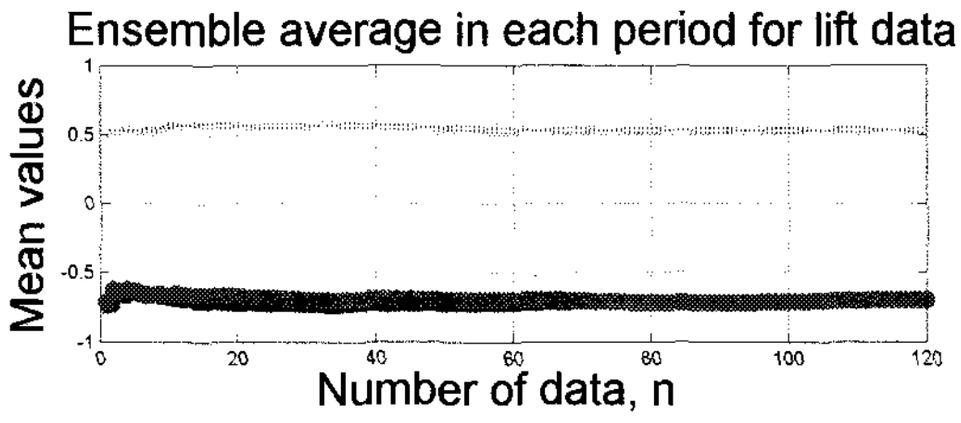

Fig. 5 Ensemble average for Lift

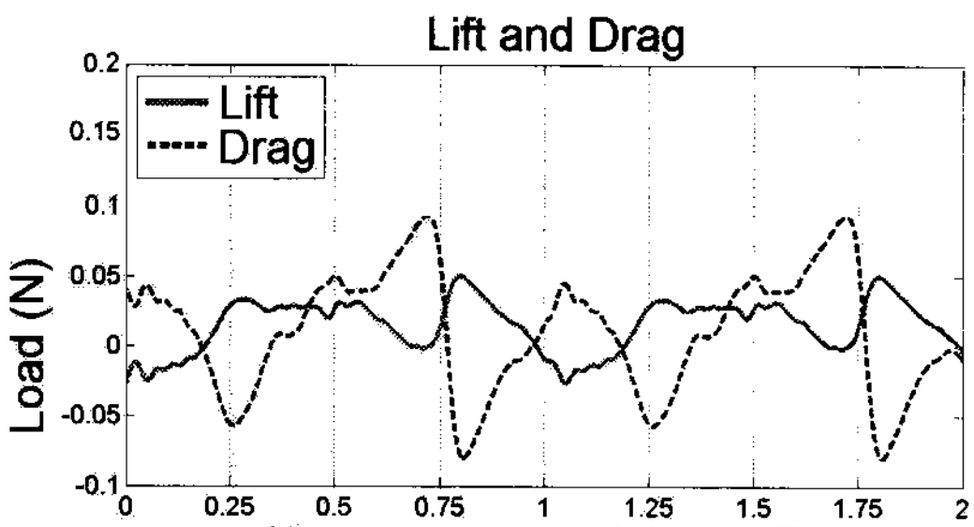

Fig. 6 Lift and Drag in two-period

Fig. 6은 양력 및 항력데이터의 결과를 두 주기 동안 나타낸 것이다. 항력은 플래핑 평면에서 측정된 y-축 값으로서 일반적으로 활용하는 항력 표현과는 차이가 있으나, z-축에서 작용하는 힘이 크지 않음을 고려해 볼 때 실제 항력과 큰 차이가 없다고 판단된다. 또한 항력 데이터는 날개의 스트로크 방향을 기준으로 하기 때문에 각 스트로크에 따라 그 부호가 달라지는데, Fig. 6에서는 그에 따른 추가적인 계산을 포함하지 않았다. 현재 날개의 면적중심에 대한 움직임을 조사하는 중이며, 추후 이를 적용하여 항력의 방향을 수정할 계획이다.

한편, 양력의 변화는 두 날개가 가까워지는 업스트로크 끝단에서 크게 증가하나, 이후 날개가 회전하여 다운스트로크로 넘어가는 과정에서는 어떠한 양력증가도 나타나지 않으며, 오히려 두 날개가 가까이 마주하지 않는 다운스트로크 끝단에서 양력이 유지되는 현상이 나타난다. 추후 유동장 가시화를 통해 본 연구 결과를 좀 더 자세히 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서 두 쌍의 공간 4절 링크를 응용한 모델이 제작되었으며, 후행회전으로 날개를 회전시키는 한 쌍 날갯짓을 활용하였다. 날개 끝 기준 레이놀즈수는 약 1,200이며, 최대 받음각 40°에서 곤충의 날갯짓에 대한 기초적인 공력특성 연구가 수행되었다. 모델의 관성력(Inertia Force)을 제거하기 위해 99.98%의 진공 챔버를 활용함으로써 순수 양력 및 항력을 조사할 수 있었다. 향후, 준 정상상태 예측 양/항력 계수결과와의 비교를 통해 비정상 효과를 확인할 계획이며, 날개주위 가시화를 통해 본 연구에 대한 물리적인 현상을 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 기초연구과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다.(계약번호 UD060027AD)

참 고 문 헌

1. Weis-Fogh, T., "Quick Estimates of Flight Fitness in Hovering Animals, Including Novel Mechanisms for Lift Production", J. Exp. Biol. 59, pp. 169-230
2. Michael H. Dickinson, "The Effects of Wing Rotation on Unsteady Aerodynamic Performance at Low Reynolds Numbers", J. exp. Biol. 192, pp. 179-206
3. Michael H. Dickinson, Fritz-Olaf Lehmann, Sanjay P. Sane, "Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight", SCIENCE, Vol. 284, pp. 1954-1960
4. Sun, M. & Tang, J., "Unsteady aerodynamic force generation by a model fruit fly wing in flapping motion", J. Exp. Biol., Vol. 205, pp. 55-70, 2002.
5. Jiang Hao Wu and Mao Sun, "Unsteady aerodynamic forces of a flapping wing", J. Exp. Biol. 207, pp. 1137-1150
6. Singh, B., Ramasamy, M., Chopra, I., and Leishman, J. G., “"Insect based flapping wings for Micro Hovering Air Vehicles: experimental investigations,”" American Helicopter Society International Specialists meeting on Unmanned rotorcraft, Chandler, AZ, January 18-20, 2005.