

4절 링크를 이용한 플래핑 타입 날개의 개발

Development of a Flapping-type Wing by Using 4-Bar Linkage

한중섭*, 김송학, 장조원(한국항공대학교)

1. 서 론

MAV(Micro Air Vehicle)의 개발은 미군이 92년 걸프전을 통해 소형 무인정찰기의 성과를 거둔 이후 계속적으로 발전하고 있다. MAV 개발은 정찰 등의 군사용 목적은 물론, 재난 및 환경감시, 기상예측 등으로 그 활용도가 높을 것으로 예상되어 몇 년 전부터 대학 및 연구소를 중심으로 연구가 진행 중에 있다. MAV는 날개 형태에 따라 크게 세 가지로 나뉘게 되는데, 고정익(Fixed wing) 및 회전익(Rotary wing), 날갯짓(Flapping wing)형태가 그것이다. 그러나 고정익 형태의 MAV는 양력을 얻기 위한 전진속도가 빠르기 때문에 사진이나 영상을 촬영하는데 한계가 있고, 회전익 형상은 그 효율이 좋지 않은데다 기동성도 떨어져 현재는 제자리비행(Hovering)이 가능하고, 효율이 좋으며 고기동성을 가진 날갯짓 형태의 MAV개발에 그 초점이 맞추어져 있다[1].

슈퍼컴퓨터의 발달로 인해 그 응용범위가 넓어지고 있는 전산수치해석이 대부분을 차지하는 플래핑(Flapping) 날개 해석의 경우, 날개 주위 공간상의 유동장에 대한 상태량을 쉽게 알 수 있기 때문에 플래핑날개의 해석에 매우 빈번하게 사용되었다. 그러나 전산수치해석에는 그 결과를 뒷받침할 수 있는 실험적 연구가 선행되어야 한다. 이에 많은 연구자들이 실험적 연구를 수행할 모델을 만들기 위해 많은 노력을 하였음에도, 현재까지 나타나 있는 모델은 'Clap-fling mechanism'을 검증한 모델(Maxworthy[2], Sohn and Chang[3]), 또는 날개회전을 배제한 채 단순 플러징(Plunging)만을 수행하는 날개에 대한 실험을 수행한 경우가 대부분으로 날개의 Pitchingangle(Angle of attack)이 고정되어 있어 플래핑 운동이라고 보기 어렵다.

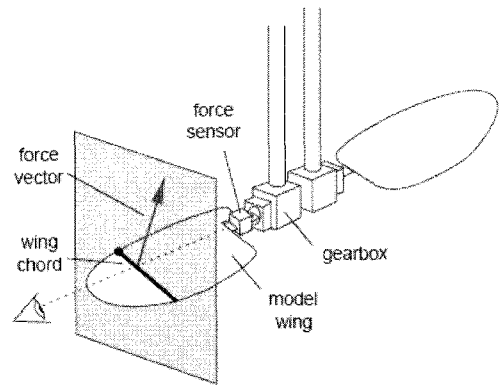


Fig. 1 Dickinson's experimental model, 'Robofly' (Ref. 4)

현재까지 복잡한 플래핑 운동이 가능하다고 알려진 모델은 6개의 서보모터로 제어되는 Dickinson[4]의 'Robofly', Maybury[5]의 잠자리 모델, Cam과 Pitch actuator의 기계적 메커니즘을 이용한 Singh[6]의 모델이 전부이며, 이러한 'Robofly'의 개략도가 Fig. 1에 제시되어 있다. 그렇지만 이러한 모델 역시 8자 운동과 막(Membrane)형태의 날개 탄성효과 등으로 알려진 곤충의 3차원 내 복잡한 날개 운동을 모두 묘사하지는 못하고 있다. 또한 위 모델이 가지고 있는 제어시스템의 복잡성으로 인해 작고 가벼워야 하는 플래핑 타입의 MAV날개로 활용하기에는 많은 제약이 따른다.

본 연구에서는 플래핑 타입의 MAV에 발생하는 현상을 실험적으로 연구하기 위하여 MAV에 적용 가능한 메커니즘을 설계하였다. 본 논문의 모델은 초파리를 대상으로 기하학적, 운동학적 상상성을 최대한으로 유지할 수 있도록 하였다.

2. 본 론

1973년 영국 캠브리지 대학의 Weis-Fogh[7] 교수는 제자리비행이 가능한 새와 곤충, 박쥐 등에 대한 무게, 날개 코드, 플러징 및 받음각 변화 등에 대한 자료를 정리하여 제시하였다. 그 자료를 바탕으로 한 초파리의 플러징 각은 약 120°이며, 본 논문에 제시한 모델은 비정상(Unsteady) 유동장에 놓이게 되므로 운동학적 상사를 위해 반드시 이와 동일한 값을 가져야 한다.

또한, 플러핑 날개의 운동은 크게 병진운동(Translation)과 회전운동(Rotation)으로 구분되는데, 이러한 날개의 운동을 구현하기 위해 Dickinson[4]의 모델은 하나의 날개에 6개의 서보모터와 C++로 작성된 제어프로그램을 이용하였다. 또한, Singh[6]의 모델은 Actuator가 병진운동이 끝나는 부분에 Ball을 설치하여 Actuator가 Ball과 부딪히는 순간, 날개의 회전운동이 시작되는 방식을 사용하였다.

현재까지 알려진 실험용 모델들은 앞서 설명한 바와 같이 Fig. 2처럼 병진과 회전운동이 완벽하게 구분되는데 반하여, 본 논문에서 제안된 모델은 날개의 앞전(Leading edge)과 뒷전(Trailing edge)이 약간의 위상차를 가지는 움직임을 보인다는 것에 주목하였다. 즉, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 2차원 플러핑 날개의 공력특성에 대한 데이터[8]에서 날개의 앞전과 뒷전의 위치를 체크하여 그 움직임이 사인파형으로 나타나는 것에 착안하여 설계되었다. 따라서 본 논문의 모델은 사인파형의 움직임을 나타내는

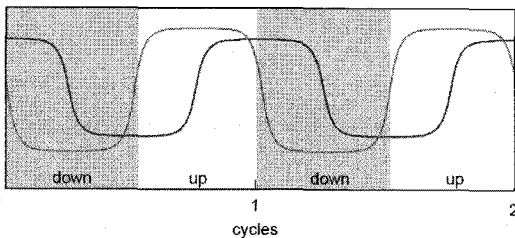


Fig. 2 Wing translation and rotational velocities for 'Robofly' in hovering phase (Ref. 4)

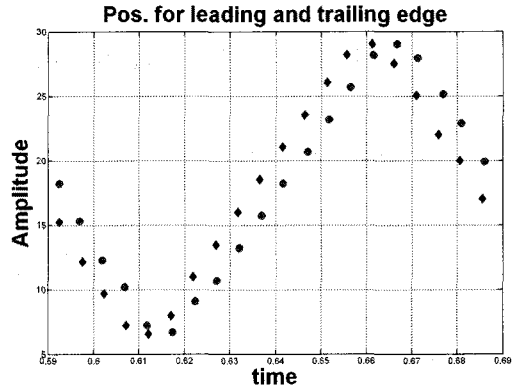


Fig. 3 Leading edge(circle) and Trailing edge(diamond) displacements based on 2-D flapping wing analysis (Ref. 8)

4절 링크 메커니즘 두 개를 이용, 위상차를 가지도록 제작하여 회전운동이 가능하도록 설계되었다. 또한 날개의 받음각을 제어하기 위한 Actuator를 양 크랭크의 끝에 연결하여 축방향의 병진 및 회전 자유도를 가지도록 하였다. Actuator는 피스톤과 비슷한 형상을 하고 있으며, 전진부에 날개가 설치되고 뒤축의 피스톤은 받음각의 제어를 담당한다. 이외에도 본 논문에서 제안한 모델은 두 개의 로커(Rocker)가 끝단에서 병진방향을 바꾸는 시점에 회전하므로 120°보다 큰 운동각이 필요하며, 4절 링크 메커니즘은 전달각이 140°이상이 될 경우 토크가 제대로 전달되지 않아 운동이 어려우므로 설계시에 이를 고려하여 130 ~ 140°의 값을 가지도록 설정되었다. 본 연구에서는 유동장의 흐름이 존재할 경우의 실험에 대비하여, 본 모델의 전진방향 축을 중심으로 회전해야 하는 기어를 옆으로 장착하여 공간링크장치(RSSR) 구조를 가지게 되었다.

3. 모델 해석

4절 링크가 평면상에서 움직일 때는 그 계산이 복잡하지 않으나, 본 논문에서 사용된 메커니즘은 공간장치구조로 공간 벡터를 사용하면 그 계산이 복잡해진다. 따라서 우리는 회전하는 기어가 플러징 방향으로 가지는 $\cos \omega t i$ 벡터를 평면으로 투영시켜 계산하는 방식을 사용하였다. 이렇게 해석하게 되면 공간링크 장치는 평

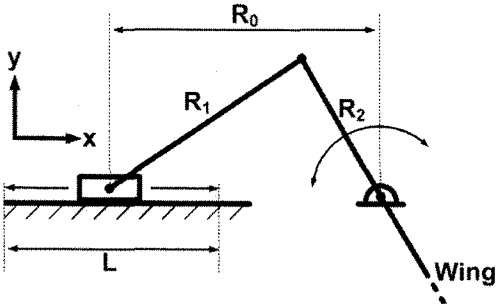


Fig. 4 Description for displacement analysis

면 내 슬라이더-크랭크 메커니즘과 같으며, 다만 슬라이더가 크랭크를 움직이는 방식이 되고, 슬라이더의 움직임은 사인파형으로 나타나게 된다.

Fig. 4는 하나의 슬라이더-크랭크 메커니즘의 개략적인 구조를 나타내며 변위해석을 위해 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{R}_0 &= -L\cos(\omega t)\vec{i} \\ \vec{R}_1 &= |R_1|(\vec{i}\cos\alpha + \vec{j}\sin\alpha) \\ \vec{R}_2 &= |R_2|(\vec{i}\cos\beta - \vec{j}\sin\beta) \end{aligned}$$

Fig. 5는 위상차를 가지는 두 개의 4절 링크를 개략적으로 나타낸 그림으로, 받음각의 해석은 위상차로 나타나는 δ 와 두 개의 4절 링크 사이의 거리관계를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta &= \beta_{lead} - \beta_{leg} \\ h &= C \times \sin\delta \\ \omega &= \tan^{-1} \frac{D}{h} \end{aligned}$$

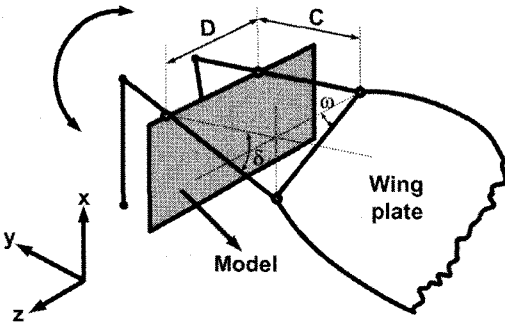
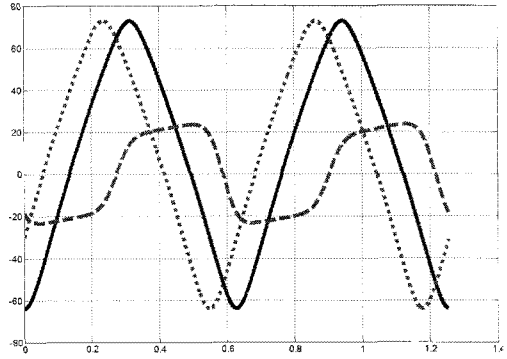


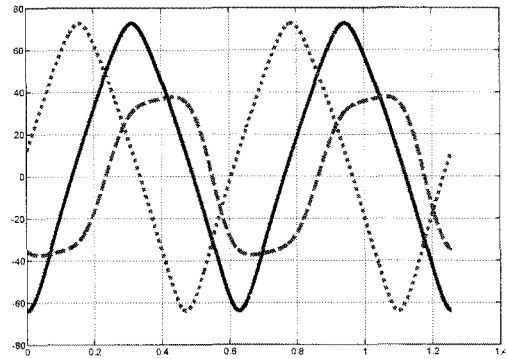
Fig. 5 Relation between phase difference and pitching angle

여기서 C는 크랭크축 중 조인트에서 시작하

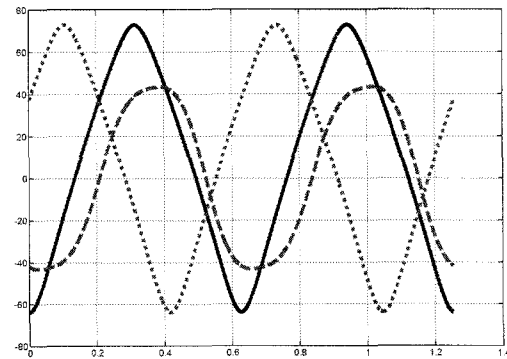
여 날개 뿌리까지 표현된 거리이고, D는 두 조인트 사이의 거리이다. 또한 h는 위상차로 인해 나타나는 높이차로서, x-y 평면으로 투영된 δ 각으로 나타난다.



(a) phase difference 45°



(b) phase difference 90°



(c) phase difference 120°

Fig. 6 Angular position of leading edge(solid line), trailing edge(dotted line) and pitching angle(dashed line) in two periods

모델의 날개는 고정된 길이의 두 크랭크 끝에 고정된 Actuator에 연결되어있기 때문에, 움직이

는 동안 x-축으로의 회전이 불가피하게 포함된다. 그러나 이 회전각은 두 조인트 사이의 거리가 가까워 무시할 수 있을 정도로 작은 값을 가지므로 해석에서 제외되었다.

Fig. 6은 모델의 크랭크축에 대하여 위상차를 달리하였을 때 날개의 앞전(Leading edge)과 뒷전(Trailing edge)에 대해 해석한 그래프이다. 해석은 MATLAB이 사용되었으며, 수치해석을 위해 간단한 코드도 사용되었다. 앞전과 뒷전은 사인과 형식으로 나타나고, 그에 따른 받음각의 변화는 위상차가 작을 때, 날개의 회전운동과 병진운동에 대해 거의 완벽하게 구분되어 나타난다. 다만 병진운동시 나타나는 약간의 받음각 변화는 공간링크 장치가 가지는 단점으로, Upstroke와 Downstroke시 병진운동의 속도변화가 생기기 때문에 나타나는 현상이다. 또한, 위상차가 커지게 되어 120°를 가질 때는 회전운동의 시간이 길어지면서 병진과 회전운동의 구분이 차차 사라지게 된다.

Fig. 7은 실제 초파리의 날개 움직임을 참고 문헌 [9]에 제시된 그래프를 인용하여 나타낸 것이다. 날개의 움직임은 사인파형으로 나타나며, 특히 날개의 받음각은 회전 초기에 급격한 각속도를 가지고 난 후, 부드럽게 변화하는 것을 보여준다. 이러한 운동은 막으로 이루어진 날개 탄성에 의한 효과로서, 본 모델이 위상차 90°를 가질 때와 비슷하나 Downstroke에서 Upstroke로 넘어가는 순간에는 그 각 변화율이 크지 못해 실제 초파리와는 다르다는 것을 알 수 있다.

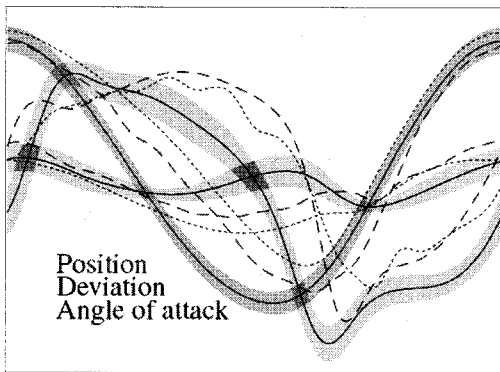


Fig. 7 Wing position graph for wasps, *Drosophila*

4. 결 론

본 연구에서는 4절 링크를 이용하여 플래핑 타입의 MAV용 날개 모델을 설계하고, 모델이

가진 운동학적 특성을 조사하였다. 작은 위상차를 가질수록 날개의 두 가지 운동현상을 뚜렷하게 구분하여 받음각을 나타내는 것을 알 수 있었다. 또한, 본 모델과 실제 초파리와의 운동과 비교를 통하여 날개 양 단의 크랭크와 커넥팅로드(connecting-rod)가 가지는 길이를 조절하여, 실제와 유사한 운동을 만들어 낼 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- 1) Ellington, C. P., "The Novel Aerodynamics of Insect Flight: Applications to Micro-Air Vehicles", J. Exp. Biol., 202, pp. 3439-3448
- 2) Maxworthy, T., "The Fluid dynamics of Insect Flight", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 13, pp. 329-350
- 3) 장조원, 손명환, "Fling-clapping운동을 하는 대칭평판날개의 비정상흐름연구", 한국항공우주학회지, 제 23권, 제 3호, 1995, pp. 25-32
- 4) Dickinson, M. H., Lehmann, F. O. and Sane, S., "Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight", Science, Vol. 284, pp. 1954-1960
- 5) Will J. Maybury and Fritz-Olaf Lehmann, "The fluid dynamics of flight control by kinematic phase lag variation between two robotic insect wings", J. Exp. Biol., 207, pp. 4707-4726
- 6) Singh, B., Ramasamy, M., Chopra, I., 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
- 7) Weis-Fogh, T., "Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production", J. Exp. Biol. 59, pp. 169-230.
- 8) Kurtulus, D. F., Farcy, A., Alemdaroglu, N., "Unsteady Aerodynamics of Flapping Airfoil in Hovering Flight at Low Reynolds Numbers," AIAA, 2005, pp. 2005-1356,
- 9) Steven N. Fryl, Rosalyn Sayaman, M. H. Dickinson, "The aerodynamics of hovering flight in *Drosophila*", J. Exp. Biol. 208, pp. 2303-2318