잠자리 모사 모형 주변의 유동가시화 실험

윤준용* · 엄상진* · 지영무** · 박준상†

Flow Visualization on the Bio-Mimic Model of Dragonfly

Jun Yong Yun, Sang-Jin Uhm, Young Moo Ji and Jun Sang Park

Abstract. A flow visualization has been conducted to investigate unsteady flight characteristics of a model of dragonfly. The mechanism of lift generation by flapping wings is analyzed using smoke-wire and high speed camera. The experimental results of flow visualization show a discernible sequential dynamics that three mechanisms and high incidence angle of the wings are responsible for the lift generation. The leading edge vortex by the rapid acceleration of leading edge of the wing during initial stage of stroke causes a strong lift enhancement. Delayed stall during the stroke, fast supination and pronation of the wing near the end of each stroke are also responsible for the lift generation.

Key Words: Dragonfly(잠자리), Flapping(플래핑), Flow Visualization(유동 가시화), Insect Flight(곤충 비행)

1. 서 론

라이트 형제의 1903년 첫 동력비행 성공을 시작으로 수백 명의 승객을 태운 여객기가 대륙과 대륙을 횡단하고 있는 현재에 이르기 까지 항공분야는 눈부신 발전을 거듭해 오고 있다. 고정된 날개와 엔진에서 추력과 양력을 각각 발생시키는 항공기와는 달리 곤충은 플래핑(Flapping)하는 날개로부터 추력과 양력을 모두 얻는다. 곤충의 비행원리를 규명하고자 하는 연구는 오래전부터 관심을 받아온 연구 주제로서 실험분야와 전산해석분야에서 활발히 진행되어져왔다. Willmott 등⁽¹⁾은 앞전와류가 시작되는 날개의 앞전과 재부착점 사이에 Separation Bubble이 발생하며 이는 곧 날개의 유효캠버를 증가 시켜 양력이 발생한다고 하였다. Van den Berg와 Ellington⁽²⁾은 플래핑하는 날개의 Down Stroke 과정에서 앞전와류의 재부착현상이 발생함을 유동가시화 실험을 통해 설명하였다. Liu 등⁽³⁾은 제자리 비행을 하는 나방의 날개 주변유동을 수치적 연구

를 통해 알아보았으며 그 결과로 Down Stroke 과정에서 양력이 발생한다는 것을 밝혀냈다. Dickson과 Gotz^(4, 5)는 특정 받음각을 갖는 플래핑 하는 날개는 날개의 빠른 움직임으로 인해 앞전와류(Leading Edge Vortex)가 발생하며, 이러한 앞전와류는 날개와 다시 만나는 위치(재부착점)에 따라 공력특성이 달라진다고 하였다. 또한 곤충 날개가 양력을 발생시키는 과정을 (1) 실속지연(Delayed Stall), (2) 회전 와류(Rotational Circulation), (3) 후류 포착(Wake Capture)의 세 과정으로 구분하였다. 이 과정을 Fig. 1-3에 도시하였다. 실속지연은 날개의 주기적인 상하운동 중 발생하는 앞전 박리과류(leading edge vortex)가 날개에 재부착하여 양력증가를 가져오는 형태로 진행된다(Fig. 1). 회전와

Fig. 1. Delayed Stall

†한라대학교 기계자동차공학부

E-mail : jspark@halla.ac.k

*한라대학교 기계자동차공학부(학부)

**한국과학기술원 기계공학과(원)

Fig. 2. Rotational Circulation

Fig. 3. Wake Capture

류는 날개의 운동이 비틀기운동을 하면서 발생시키는 와류를 의미하며, 이것이 날개 주변 circulation의 증가를 가져와 양력을 증가시키는 요인으로 작용한다(Fig. 2). 후류포착은 날개의 주기적인 운동에 의해 전단계에서 발생한 후류가 날개쪽으로 유입되는 현상을 의미한다(Fig. 3). 보다 자세한 설명은 참고문헌^(4, 5)을 참조하기 바란다.

현재 비행체가 극복하지 못한 잠자리의 비행에 대해 연구가 있었으나 완벽한 구현을 못한 한계로, 많은 연구와 그에 따른 기술이 필요하다. 본 연구에서는 잠자리 비행에 대한 기본적인 이해를 위해 자체 제작한 풍동을 이용한 Smoke Wire 가시화 실험을 통해 잠자리 모방 모델의 비행원리를 정성적으로 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

실험에서 제작한 풍동은 팬(Fan)과 아크릴판을 이용한 자체 제작한 풍동(Fig. 4)이고 흡입식이며 시험부 규격이 300×300×300 mm 이다. 챔버와 시험부의 유동을 개선하기 위해 시험부 상류에 플라스틱 빨대를 허니컴(Honeycomb) 대신 사용하였으며 RPM을 제어할

Fig. 4. Experimental Apparatus

수 있는 네 개의 팬을 장착하여 유속 제어가 가능하게 제작되었으며 자체 제작한 풍동이므로 정확한 공력측정 및 세밀한 가시화 등의 실험을 실시하는 데는 다소 무리가 있지만 본 연구에서 수행하려고 하는 잠자리 모방 모델의 비행원리를 정성적으로 살펴보는 데는 충분하다고 생각된다. 최대한 풍동의 벽면효과를 줄이기 위해 대칭면을 기준으로 모형의 1/2에 대한 실험을 수행했다. 모형크기 대비 풍동크기의 비가 2/3로 다소간의 벽면효과가 발생할 것으로 예상되나 본 연구의 목적인 정성적인 유동패턴을 알아보는 데는 무리가 없는 것으로 판단된다.

실험 모델로는 잠자리 모델(High Tech사의 Dragonfly)을 선정하였다. 날개스팬 0.2 m, 평균 Chord 길이 0.08 m의 RC(Radio Controlled)이 사용되었다. 날개는 동일한 축에서 각각 반대의 위상을 가지고 플레핑 하는 두 쌍의 날개로 이루어져 있으며 Fig. 5에 나타내었다. 날개는 25°의 불임각(Incidence Angle)을 가지며 각 날개의 진폭은 42.5°이다. 또한 플레핑의 진동수는 5.2 Hz이다.

실험은 위에 언급한 풍동 안에 잠자리 모델 몸체를 유동의 흐름방향과 평행하게 고정하고 풍동상류에서 전체 날개 길이의 50%에 해당하는 위치에 hot wire 방식으로 Smoke를 발생시키면서 고속 카메라를 이용하여 모델의 날갯짓에 의한 유동의 변화를 관찰하였다.

기본적인 가시화 단면은 날개의 뿌리(root)로부터

(a) front view

(b) plane view

(c) side view

Fig. 5. Dragonfly Type Model

span의 40%에 해당하는 위치이다. 필요에 따라 span 방향 가시화 단면 위치를 변화시켜 날개의 3차원 효과를 고찰했다. 날개사이의 최대각도는 위 사진에 정의한 θ 각도로 60° 이다. 촬영한 영상을 바탕으로 한 주기에 따른 날개의 움직임과 날개 주변에 생기는 유동현상을 분석하였다. 날갯짓 분석을 위한 사진은 고속 카메라를 이용하여 640×480 pixel, 200 FPS으로 촬영하였다. 풍동 내의 자유흐름속도는 0.6 m/s 이며 이 속도를 근거로 한 Chord 길이에 대한 Reynolds 수는 3.18×10^3 이다.

(a) Translation I

(b) Rotation

(c) Translation II

(d) Clapping

Fig. 6. Sequence of wing shape variation

실제 잠자리의 경우 날개의 크기는 3 cm내외이고, 날개짓을 초당 40~50번 정도한다. 따라서 본 연구에서 행한 실험영역이 실제와 매우 유사한 Reynolds 수에 대한 것으로 볼 수 있다.

3. 결과 및 검토

잠자리 모델 날개짓의 한 주기를 Translation I, Rotation, Translation II, Clapping의 네 단계로 구분하였다. 한 주기 동안 날개의 움직임을 살펴보기 위하여 날개 표면에 테이핑을 하고 실험을 실시하였다. 지금 설명할 것은 날개의 움직임과 테이핑한 것으로 비틀림, 추력이 발생될 것이라는 예측 등을 하기 위한 실험이다. 자세한 현상은 Fig. 8에서 설명한다.

Fig. 6(a)는 Translation I 단계의 후반부를 나타내며 앞서 지나간 앞전을 따라 날개의 나머지 부분이 주변의 공기를 가르며 Circulation의 초반부에 진입하고 있다. θ 각도는 최대 60° 까지 날개를 벌릴 수 있다.

Fig. 6(b)는 윗날개의 시계방향 회전인 Pronation과, 아랫날개의 반시계방향 회전인 Supination을 각각 나타낸다. 앞에서 설명한 바와 같이 윗날개는 Wake Capture단계, 아랫날개는 Rotational Circulation단계에 속하고 날개 주변에서 발생하는 Circulation이 Magnus 효과에 의해 양력이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 6(c)는 Translation II 단계의 과정을 나타내며 앞전에서 먼저 다음 단계로 움직이기 때문에 뒷전에서는 자연스럽게 따라가며 Fig. 7(a)의 날개 형상을 유지하며 Translation된다.

Fig. 6(d)는 각도가 작아지면서 두 날개가 가장 가까워 붙어 있을 때의 현상을 나타낸 것이다. 그것을 정확히 알기 위해서는 Fig. 7(a)와 (b)를 보면 알 수가 있다. Translation II 단계가 끝나면 (a)의 상태에서 뒷전이 Clapping하면서 날개 사이의 있는 공기를 뒷전방향으로 날개가 밀어내며 추력이 발생하게 된다. Fig. 7(b)에서 뒷전의 위아래날개가 맞닿을 때 앞전은 날개가 이미 Translation이 시작되고 있는 것을 볼 수 있다.

사진에서 살펴 본 바와 같이 테이핑하여 빠른 날개의 비틀림을 쉽게 볼 수 있어 더 확실한 날개의 움직임을 알 수 있다.

Fig. 8은 유동가시화 실험을 통해 위아래 반대 방향으로 날개짓하는 두 쌍의 날개를 가진 모델의 특성상 각각의 Stroke에서 윗날개와 아랫날개의 분석을 동시

(a) Clapping process I

(b) Clapping process II

Fig. 7. Wing shapes before the clapping(a) and after the clapping(b)

에 진행해야 한다.

Fig. 8(a)에 Translation I 단계를 나타내었다. 위아래 날개가 각각 Up Stroke와 Down Stroke를 하는 과정으로, 이때 윗날개는 일정 받음각에 의해 양력과 추력을 동시에 발생시켜 Stroke의 끝부분에서 날개를 비틀기(Pronation)전까지 계속된다. 반면 아랫날개는 Down Stroke를 하며 날개 앞전에 전단와류를 발생시킨다. 발생한 전단 와류가 날개의 윗면에 다시 재 부착되며 유효 캠버를 증가시켜 양력을 얻게 되며 Stroke의 끝부분에서 날개를 비틀기(Supination)전까지 계속된다.

Fig. 8(b)는 Rotation단계를 보여주고 있다. Stroke의 마지막 부분에서 위아래 날개 각 Pronation과 Supination을 하게 된다. 이 과정에서 윗날개는 Wake Capture단계에 속하며 아랫날개는 Rotational Circulation단계에 속한다. 아랫날개 주위에 발생한 Circulation을 확인할 수 있으며

(a) Translation I

(b) Rotation

(c) Translation II

(d) Clapping

Fig. 8. Four Process of Dragonfly Model

이는 Magnus효과에 의해 양력이 발생함을 보여준다.

Fig. 8(c)에는 Translation II 단계를 나타내었다. 위아래 날개가 각각 Up Stroke와 Down Stroke를 하는 과정으로, 뒷날개에서는 전단와류가 발생함에 따라 앞서 설명한 내용과 같이 양력을 얻게 되며(Fig. 9), 아랫날개는 주변의 공기를 뒤로 밀어내며 추력을 발생시킨다.

Fig. 8(d)는 Clapping 단계를 보여주고 있다. 한 주기의 마지막인 두 날개가 다시 만나는 과정으로 불임각은 양력을 유지할 수 있게 해주며, 또한 두 날개 사이의 공기를 강하게 뒤로 밀어내며 양력과 추력을 동시에 얻을 수 있게 해준다. 두 날개가 포개지면서 앞전 근처의 공기가 추력과 반대방향으로 분사되며 항력이 발생하지만 추력의 크기와 비교 했을 때 무시할 수 있는 크기이며 분사된 공기에 의해 전단와류가 발생하여 유효캠버를 증가시키는 결과를 가져온다.

앞서 진행된 연구에서 설명하고 있는 곤충 날개 양력을 발생시키는 과정 즉, (1) 실속 지연(Delayed Stall), (2) 회전 와류(Rotational Circulation), (3) 후류 포착(Wake Capture)의 세 과정이 잠자리 모방 모델에서도 유사하게 나타남을 알 수 있다. 또한 실제 잠자리와는 달리 다소 큰 불임각을 가지고 있는 실험모델은 한 주기를 4단계로 구분 모든 과정에서 양력을 얻을 수 있다.

잠자리 모방 모델의 기본적인 비행원리를 고찰한 후 날개 Span길이의 20%에 해당하는 0.04 m만큼 Root방향(CASE 1)과 Tip방향(CASE 2)으로 Smoke Sheet를 각각 옮겨가며 추가적인 실험을 실시했다(Fig. 10).

Fig. 9. Leading Edge vortex on the Upper wing

(a)case 1 전단와류, Pronation

(b)case 2 전단와류, Pronation

Fig. 10. Results on the case study

양력발생에 영향을 미치는 전단와류가 CASE 1의 경우가 CASE 2의 경우보다 작게 나타남을 볼 수 있다. CASE 1의 경우 Translation axis에서 가깝기 때문에 유동을 가로지르는 특정 받음각의 크기가 작고 날개의 빠른 움직임 또한 CASE 2에 비해 작다. 따라서 앞전와류의 크기가 작고 결과적으로 공력특성의 차이를 보인다.

Rotational Circulation단계에 속하는 Down Stroke의 마지막 부분에서의 아랫날개 근처 유동 또한 차이를 보이고 있다. 날개의 앞전과 뒷전이 모두 고정되어 Rotation 움직임이 없는 Root와 가까운 CASE 1과 달리 날개의 앞전과 뒷전이 비교적 자유로운 Tip 부분(CASE 2)의 경우 Supination 과정에서 큰 Circulation을 만들어 내는 것을 확인 할 수 있다. 이는 Magnus 효과에 의한 양력발생이 Tip 부분에서 더 크게 나타나는 것을 보여준다.

위에서 살펴본 바와 같이 날개의 Root 근처에서 보다 Tip 근처에서 더 많은 양력이 발생함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 잠자리 모방 모델의 비행원리를 분석하고 날갯짓을 통해 비행특성을 알아내는 연구이다. 자체 제작한 풍동을 이용한 Smoke Wire 가시화 실험을 통해 Reynolds 수 3.18×10^3 에서 잠자리 모방 모델의 비행원리를 정성적으로 살펴보았다.

이미 잘 알려진 바와 같이 곤충 날개가 양력을 발생시키는 세 과정 실속 지연(Delayed Stall), 회전 와류(Rotational Circulation), 후류 포착(Wake Capture))이 잠자리 모방 모델에서도 유사하게 나타남을 직접 확인할 수 있었으며, 잠자리 모형 모델은 실제 잠자리에겐 없는 25°의 붙임각(Incidence Angle)에 의해 모든 과정(Process)에서 양력이 발생하고 있을 것을 예상하여 실험 한 결과 양력이 모두 발생했다.

각 주기에 발생하는 현상들을 연구해 봄으로써 생체모방으로 비행체의 날개부분 연구를 위한 자료가 되었다.

모델 날개에 테이핑을 통하여 잠자리의 비행특성과 날개의 움직임을 더 쉽게 알아 낼 수 있었다. Tip방향(Case2)의 경우 Supination 과정에서 큰 Circulation을 생겨 Magnus 효과에 의한 양력발생이 Root방향(Case1)일 때 보다 Tip 부분에서 더 크게 양력이 발생하는 것을 확인하였다.

하지만 향후 양력을 얻기 위한 붙임각의 효율적인 각도, 날개의 진동주기 그리고 자유흐름속도의 변화에 따른 연구와 현재 비행체가 극복하지 못한 잠자리의 비행에 대해 연구가 있었으나 완벽한 구현을 못한 한 계로, 많은 연구와 그에 따른 기술이 필요한 시점에서 앞으로 그러한 현상을 구현 할 수 있도록 앞서 실험한 것과 실제곤충을 비교 분석하여 잠자리의 비행을 더욱 유사하게 만드는 연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 2008년 교육인적자원부의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-521-D00061)

참고문헌

- 1) Willmott, A. P., Ellington, C. P. and Thomas, A. L., 1997, "Flow Visualization and Unsteady Aerodynamics in the Flight of the Hawkmoth, *Manduca sexta*," *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, Vol. 352, No.1351, pp.303-316.
- 2) Van den berg, C. and Ellington, C. P., 1997, "The Three-Dimensional Leading-Edge Vortex of a 'Hovering' Model Hawkmoth," *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, Vol. 352, No.1351, pp.329-340.
- 3) Liu, H., Ellington, C. P., Kawachi, K., Van den berg, C. and Willmott, A. P., 1998, "A Computational Fluid Dynamics Study of Hawkmoth Hovering," *Journal of Experimental Biology*, Vol.201, pp.461-477.
- 4) Dickinson, M. H. and Gotz, K. D., 1993, "Unsteady Aerodynamics Performance of Model Wings at Low Reynolds Number," *Journal of Experimental Biology*, Vol.174, pp.45-64.
- 5) Dickinson, M. H., Lehman, F. O. and Sane, S. P., 1999, "Wing Rotation and the Aerodynamics Basis of Insect Flight," *Science*, Vol.284, pp.1954-1960.