잠자리 유형 날개에 대한 흐름 가시화

김송학[†]·김현석^{*}·장조원^{**}·부준홍^{***}

Flow Visualization for a Dragonfly Type Wing

Song Hak Kim, Hyun Seok Kim, Jo Won Chang and Joon Hong Boo

Key Words: Visualization(가시화), Flapping(플래핑), Phase Lag(위상차), Reduced Frequency(무차 원 진동수)

Abstract

Flow visualization experiments have been performed to investigate the effects of phase lag, reduced frequency qualitatively by examining wake pattern on a dragonfly type wing. The model was built with a scaled-up, flapping wings, composed of paired wings with fore- and hindwing in tandem, that mimicked the wing form of a dragonfly. The present study was conducted by using the smoke-wire technique, and an electronic device was mounted to find the exact positional angle of wing below the tandem wings, which amplitude is ranged from -16.5° to $+22.8^{\circ}$. Phase lag applied on the wings is 0° , 90° , 180° and 270° . The reduced frequency is 0.15, 0.3 and 0.45 to investigate the effect of reduced frequency. It is inferred through observed wake pattern that the phase lag clearly plays an important role in the wake structures and in the flight efficiency as changing the interaction of wings. The reduced frequency also is closely related to wake pattern and determines flight efficiency.

기호설명

с	= 날개 시위
f	= 날개짓 진동수
Κ	= 무차원 진동수
Re	= 레이놀즈 수
U_∞	= 자유흐름 속도

1. 서 론

†	한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
*	한국항공대학교 항공운항학과
**	한국항공대학교 항공운항학과
	E-mail : jwchang@hau.ac.kr
	Tel: 02) 300-0082 FAX : 02) 3158-1849
***	한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

과거부터 시작된 새나 작은 곤충의 비행에 관 한 연구는 아직까지 명석하게 원인을 발견하지 못하고 지금까지 계속된 연구가 진행되고 있다. 지금까지의 고정익 항공기의 공기역학적 특성은 Kutta-Joukowski 의 이론으로 설명이 가능하였 다. 하지만 곤충 즉 플래핑 운동을 하는 날개의 공기 역학적 특성을 규명하기에는 상당히 제한적 이다. 이러한 원인을 규명하기 위한 방법 중 하 나가 가시화 실험이며 그 중에서도 후류의 패턴 을 조사함으로써 후류의 형상이 공기 역학적 특 성과 어떤 상관관계가 있는지 알아보고자 함이 다.

일반적으로 잠자리는 독립적으로 움직이는 앞· 뒷날개를 이용하여 위상차(phase lag)를 두고서 날 개짓을 한다[1]. 그러나 직진·수평 비행의 경우 보다 확실히 더 큰 양력을 필요로 하는 이륙, 정 지비행, 그리고 여분의 추력이 필요한 급격한 방 향 전환 시에는 위상차가 없는 날개짓을 하게 된 다[2]. Mittal et al.[3]은 일반적인 정지비행에서





(k) 14°u, 14°u Fig. 1 Flow visualization of wake patterns (phase lag 0°)

한 쌍 날개(single wing)와 두 쌍 날개(paired wings)를 가진 플래핑 모델에 대한 전산수치해석 (Computational Numerical Analysis)을 수행하였고, 추력 생성과 효율에 대한 두 날개 사이의 위상차 영향에 대해서 연구하였다. 여기서 그들은 위상 차가 없는 날개가 비교적 더 높은 추력을 낸다는 사실을 밝혀내었다.

Kazuo et al.[4] 에 의하면 진동하는 에어포일 에서 발생하는 후류는 무차원 진동수가 변함에 따라서 후류의 형상이 변한다고 하였고, 그들은 무차원 진동수를 0.1, 0.5, 1.0 으로 바꿔가면서 실험을 하였다. Daniel et al.[5] 은 잠자리의 실 제 크기의 1대7의 모델을 가진 잠자리 모형으로 날개짓 진동수(wing beat frequency)를 0.57, 1.00, 1.59 3가지의 경우로 실험을 하였고, 이때 Re 값은 4000 이었다. 그들은 0.57, 1.00 의 날갯 짓 진동수를 차원해석을 해본 결과 실제 잠자리 의 진동수와 비슷한 범주에 들어간다고 설명하였 다. Michael et al.[6]에 의하면 downstroke 와 upstroke 의 반복 운동을 수행하면서 이전에 일 어난 운동이 현재 일어나고 있는 운동에 영향을 주어 후류의 변화를 준다고 말하고 있다.

본 실험의 궁극적인 목적은 플래핑 운동을 하 는 날개의 공기역학적 특성을 규명하기 위해 가 시화 실험으로서 앞뒤 날개의 위상차, 무차원 진 동수를 변화 시키면서 실험을 진행하였다.

2. 실험 방법 및 조건

본 실험은 Re=3,400 와 자유흐름 속도 1.0m/s를 고정시키고, 앞뒤 날개의 위상차를 0°, 90°, 180°, 270°의 4가지 위상차와 90°한 가지 위상차에 따른 무차원 진동수를 0.15, 0.30, 0.45 로 변화시 켜 실험을 진행하였다. 일반적으로 잠자리는 2쌍 의 날개를 가지고 있으며 뒷날개가 50°에서 100° 의 위상차를 가지면서 앞날개를 이끈다[7]. 본 실 험에서는 시험부 안에 와이어(wire) 에서부터 0.40m 떨어진 지점에 흰 종이 한 장을 부착하였 다. 이는 앞선 날개 위치 각도에서의 현재 위치 에서 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해서 정 확한 계산이 필요하기에 부착하였다. 또한 동기 화 조정 장치를 만들어 smoke wire 와 카메라셔 터에 공급되는 전류를 자동으로 공급시켰다[8].



(j) $10^{\circ}u$, $-15.5^{\circ}u$ (k) $14^{\circ}u$, $-14^{\circ}u$ (l) $20^{\circ}u$, $-8.5^{\circ}u$ Fig. 2 Flow visualization of wake patterns (phase lag 90°)

이 장치는 앞날개가 동기화 조정장치와 함께 0° 에서 접지되면smoke-wire에 전압이 공급되고 1.57초 후에 카메라 버튼이 눌러 져서 초당 3장 씩의 사진을 찍는다. 이러한 장비를 만들어 원하 는 각도에서의 실험을 진행할 수 있었다. 본 실 험에서의 날개위치 각도는 ±1°의 오차를 갖는다.

3. 결과 및 토론

가시화 사진에서 날개가 수직 위치에 있을 때 를 기준점 0°로 두고, 사진의 아래쪽으로 움직이 는 범위를 음(-)으로, 위쪽으로 움직이는 범위를 양(+)으로 표시하였다. 각도는 날개의 위치각도 (positional angle)를 의미하며, 각도 뒤에 붙은 d, u는 각각 날개 모델의 downstroke, upstroke를 의 미한다.

Fig. 1은 0°의 위상차를 갖는 날개 모델의 한 주기 날개짓 동안 위치 각도를 나타낸 것이다. Fig. 1d, 1g 는 각각 -8.5°, -10°에서의 downstroke, upstroke를 나타낸다. 이때 날개 주위에서의 유동 현상은 downstroke에서는 날개 윗면의 유맥선 (streak line)은 아래로 휘어지고, upstroke에서는 날개 아랫면의 유맥선이 위로 휘어진다. 이러한 이유로 같은 날개 위치 각도를 갖는다 하여도 날 개의 stroke 방향에 따라서 날개 주위의 유동 현 상이 틀려지며, 이러한 유동현상이 후류의 형상 을 변화 시키는 요인이 된다.

Fig. 2는 Fig. 1에서 위상차만 90°로 변경한 사 진이다. Fig. 2a, 2b에서 앞날개는 upstroke, 뒷날 개는 downstroke를 진행하여 앞날개 아랫면의 흐 름량은 증가하고, 뒷날개의 밑면은 압력이 작아 흐름을 suction하는 효과가 발생하게 된다. 따라서 흐름은 더욱 날개 표면에 붙게 되고, 이와 같은 현상은 뒷날개 전체에 걸쳐 발생한다. 또한 날개 의 위치 각도가 약 12°~ 22° 사이에 있으면서 캠버의 효과가 감소하고, 날개 전체에 걸쳐 윗면 과 아랫면에서 속도 차이가 거의 발생하지 않는 현상으로 인해 뒷날개 바로 뒤에서의 흐름은 거 의 교란이 발생하지 않는 것으로 보인다. Fig. 2e, 2i는 두 날개 사이의 간섭이 비교적 약하게 나타 나면서, 흐름이 앞날개의 양쪽 면에 완전히 부착 되어 흐르고 있다. Fig. 2i ~ 2k는 양쪽 날개 모두 upstroke 상태로서, 앞날개 아랫면의 흐름이 뒷날 개의 윗면으로 흐르면서 분리(separation)되는 것 2004

(k) $14^{\circ}u$, $-14^{\circ}u$ Fig. 3 Flow visualization of wake patterns (phase lag 90°)

을볼 수 있다.

(j) 10°u, −15.5°u

Fig. 3는 위상차 180°에서 한 주기의 날개짓 동 안 위치 각도를 나타낸 것이다. Fig 3a, 3b, 3g는 앞날개의 뒷전(trailing edge)으로부터 잘 뻗어나가 는 후류를 관찰할 수 있고, 이러한 흐름은 앞날 개 양쪽 면에 완전히 부착되어 흐른다. 후류는 다른 위치 각도보다 더 적게 교란된 흐름을 보이 면서, 잘 조직화된 vortex street을 형성한다. 이는 Saharon et al.[9]의 실제 잠자리 가시화 실험에서 나타난 현상과도 잘 일치한다. Fig. 3k는 뒷날개 가 앞날개의 후류에 영향을 받게 되고, 결합된 후류가 난류흐름으로 흩어지는 현상이 나타난다. 위상차가 180°인 경우에는 대부분 앞·뒤날개가 서로 간섭을 주는 경우가 적었고, 후류의 흐름이 더 적은 교란을 주면서 앞날개에서 잘 조직화된 vortex street를 형성했다.

 Fig. 4는 위상차 270°에서 한 주기의 날개짓 동

 안 날개의 위치 각도를 나타낸 것이다. 위상차

 270°는 위상차 90°와 비슷한 그림을 나타낸다. 하

 지만, (d)는 Fig 3의 위상차 90°의 (b)와 같이 앞

날개는 downstroke, 뒷날개는 upstroke를 진행하여 앞날개 아랫면의 흐름량은 증가하고, 뒷날개의 윗면은 압력이 작아 흐름을 suction하는 효과가 발생되나 위상차 90°에 비해 wake폭이 크다. 날 개 각도가 음(-)의 영역에 있을 때는 양(+)의 영 역에 있을 때 보다 상대풍(relative wind)과 만나는 날개면적이 크기 때문이다. 위상차가 90°인 Fig. 3의 (i) ~ (l)과 유사하게 Fig. 4(a), (b)에서는 양쪽 날개 모두 downstroke 상태로서, 앞날개 아랫면의 흐름이 뒷날개의 윗면으로 흐르면서 박리되는 것 을 볼 수 있다.

(1) $20^{\circ}u$, $-8.5^{\circ}u$

Fig. 5 는 무차원 진동수에 따른 비슷한 날개 위치 각도에서의 날개주위의 유동 현상, 후류의 형상을 보여주는 그림이다. (a),(b),(c)는 각각 무차 원 진동수가 0.15, 0.30, 0.45 이다. 무차원 진동수 가 0.15일때 받음각 효과로 앞날개에 분리된 유 맥선은 바로 후류의 두께를 증가 시킨다. 하지만 무차원 진동수가 0.30일 때는 앞날개에서 분리된 유맥선이 K 값의 증가로 인해 유맥선의 휘어지 는 효과가 생겨 뒷날개 뒷전에서 재부착 되려는

(j) 10°u, 22°d

2004

움직임이 보이고, 0.45에서는 휘어지는 각도가 K=0.30 보다 커져서 뒷날개 뒷전으로 재부착 되 는 현상처럼 보이고 있다. 무차원 진동수에 따라 서 재 부착이 나타나는 원인은 날개의 진행방향 에 따라서 날개 주위의 유동현상이 변화하기 때 문이다. 즉 날개 진행 방향의 날개 아랫면의 유 맥선은 직선방향을 향하고 윗면은 날개 진행 방 향으로 휘어지기 때문이다. 이러한 현상은 무차 원 진동수가 커질수록 뚜렷하게 나타난다.

Fig. 5d, 5e, 5f는 무차원 진동수가 각각 0.15, 0.30, 0.45 에서의 현상이다. 3가지 경우에서 가장 큰 차이점은 무차원 진동수가 0.15일 때는 뒷날 개 뒷전에서의 와류 생성이 없으나, 무차원 진동 수가 0.30, 0.45 일 때는 와류가 생성된다는 점이 다. 또한 무차원 진동수가 0.30, 0.45 일때는 후류 가 비슷한 형상을 가진다는 것이다.

Fig. 5g, 5h, 5i는 무차원 진동수가 각각 0.15, 0.30, 0.45에서의 앞날개 15.5°,16°, 뒷날개 -12°, -13° 의 모두 upstroke 과정이다. (a)의 경우 앞날 개에서 vortex street 가 나타나고 (h), (i) 의 경우 는 나타나지 않고 있다. (g)에서 vortex street 가

나타나는 이유는 앞날개에서 나타난 vortex street 가 뒷날개의 영향을 받지 않기 때문이다. (g)의 경우 무차원 진동수가 0.15로서 (g), (i)의 경우보 다 2~3배 작은 수치이다. 즉 뒷날개의 움직임이 느려서 앞날개에서 나타난 vortex street 에 영향 을 주지 않기 때문이다. 또한 앞날개 15.5°u, 뒷날 개 -12°u 에서만 나타나는 이유는 앞날개 뒷날개 모두 upstroke 과정이기 때문이다. 앞날개 뒷날개 의 stroke 방향이 틀릴 경우 나타나지 않는다. 뒷 날개의 영향을 받기 때문이다. (h), (i)의 경우는 뒷날개의 날개짓 진동수가 크기 때문에 뒷날개 영향으로 뒷날개 뒷전에서의 후류 폭을 크게 만 들어 vortex street 가 생기는 것을 막고 있다.

(l) 20°u, 15°d

4. 결 론

작자리 유형 날개 모델의 후류 가시화를 통해 위상차에 따른 후류 흐름의 변화를 관측하였고, 특히 위상차가 0°인 경우에 앞·뒤날개 상호간에 흐름 간섭이 줄어들어 더 안정된 후류 흐름이 발 생함을 알 수 있었다. Re = 3,400 에서 잠자리

(g) 15.5°u, -12°u, K=0.15

2004

(h) 16°u, -13°u, K=0.30 Fig. 5 Effect of reduced frequency

유형 날개의 무차원 진동수가 증가할수록 날개 주위의 유맥선은 휘어지는 각도가 커지며, 잠자 리 유형 날개의 무차원 진동수가 증가함에 따라 앞날개에서의 vortex street는 나타나지 않으며, 뒷 날개 뒷전 이후에서의 후류 두께는 증가한다. 또 한 잠자리 유형 날개의 후류는 날개의 무차원 진 동수가 증가할수록 3차원 현상이 심하게 나타난 다

참고문헌

- Alexander, D. E., 1982, "Studies on Flight Control and Aerodynamics in Dragonflies", Ph.D.dissertation. Duke University, Durham, NC.
- [2] Alexander, D. E., 1984, "Unusual Phase Relationships between the Forewings and Hindwings in Flying Dragonflies", The Journal of Experimental Biology, Vol. 109. pp. 379-383.
- [3] Mittal, R., Utturkar, Y. and Udaykumar, H. S., 2002 "Computational Modeling and Analysis of Biomimetic Flight Mechanisms", AIAA Papper 2002-0865.
- [4] Kazuo, O., Madeleine, C., Ta Phuoc, L. and Annine D.,1990, "Vortex Formation Around an Oscillating and Translating Airfoil at Large Incidences, "Journal of Fluid Mechanics, Vol. 211, pp. 37-60.

- [5] Daniel, C. and Sukumar, C. 2001, " Computational and Experimental Studies of Asymmetric Pitch/Plunge Flapping-The Secret of Biological Flyers, " AIAA-2001-0859
- [6] Michael, H. Dickinson, Fritz-Olaf L., Snajay,
 P. Sane, 1999, "Wing Rotation and the Aerodynamic Basic of Insect Flight," Science,
 Vol. 284, pp. 1954-1960.
- [7] R.Mittal, Y. Utturkar, H., Udaykumar, S. 2002,
 " Computational Modeling and Analysis of Biomimetic Flight Mechanism," AIAA 2002-0865.
- [8] Corke, T., Koga, D., Drubka, R. and Nagbib,
 H., 1974 "A New Technique for Introducing Controlled Sheets of Smoke Streak lines in Wind Tunnels," Proceedings of International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, pp. 74-80
- [9] Saharon, D. and Luttges, M., 1988,"Visualization of Unsteady Separated Flow Produced by Mechanically Driven Dragonfly Wing Kinematics Model", AIAA Papper 88-0569.