

두쌍 플래핑 날개의 앞·뒤 날개 위상차에 대한 가시화 연구

A Visualization Study on the Phase Difference Between the Fore- and Hind-Wings in a Double Flapping Wing

김현석*, 장조원 (한국항공대학교)

1. 서론

오랫동안 새나 곤충의 비행은 많은 학자들의 흥미를 유발시켜왔고, 그들의 복잡한 비행 메커니즘을 밝혀내기 위해 다양한 연구가 진행되었다. 최근 플래핑 운동을 이용하여 정지비행(hovering)이 가능하고, 비행 방향을 자유자재로 바꿀 수 있는 잠자리에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다. 일반적으로 잠자리는 독립적으로 움직이는 앞·뒤 날개를 이용하여 위상차(phase difference)를 두고서 날개짓을 한다[1]. 그러나 직진·수평 비행의 경우 보다 확실히 더 큰 양력을 필요로 하는 이륙, 정지비행, 그리고 여분의 추력이 필요한 급격한 방향 전환시에는 위상차가 없는 날개짓을 하게 된다[2].

Mittal et al.[3]은 일반적인 정지비행에서 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 위상차가 없는 날개가 비교적 더 높은 추력을 낸다는 사실을 밝혀내었다. Soms and

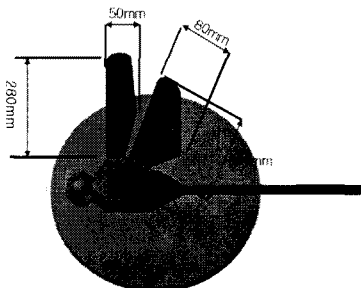


Fig. 1 Double flapping wing

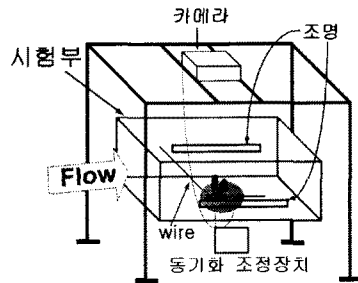


Fig. 2 Experimental set-up

Luttges[4]는 실제 잠자리를 이용한 실험을 통하여 더 큰 양력은 비정상 흐름과 날개의 상호작용에 의해서 나타난다는 것을 밝혔다. 본 연구에서는 잠자리 유형 날개 모델의 공력 특성을 예측하기 위해 가시화를 통해서 위상차의 변화에 따른 후류의 변화를 관찰하였다.

2. 실험 방법 및 조건

본 연구에 사용된 모델은 실제 잠자리 날개를 1:8로 확대시킨 두 쌍의 플래핑 날개 모델이다. 날개 주위의 유동장의 대칭성을 고려하여 한 쪽에만 앞날개(forewing)와 뒷날개(hindwing)를 제작하였다. 앞날개는 장착각이 0°인 반면, 뒷날개는 모델의 몸체 축을 기준으로 10°의 장착각이 주어져 있다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 모델을 나타낸 그림으로 앞날개의 경우 날개길이가 280mm, 평균시위는 43mm, 뒷날개의 경우 날개길이가 280mm, 평균시위가 59.8mm이다.

Fig. 2는 시험부(test section)와 실험 장치를 나타낸 그림으로 0.5(W)×0.5(H)×2.5(L)m 시험

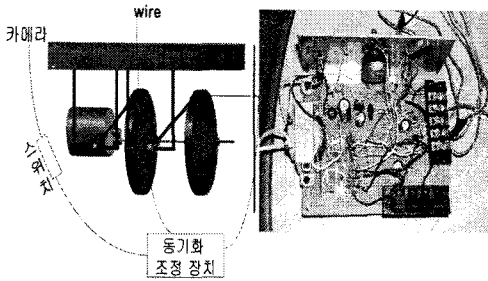


Fig. 3 Synchronization control equipment

부에 실험 모델을 고정시키고, 가시화 사진촬영을 위해 카메라를 사각기둥의 지지대에 고정시켰다. 또한 동기화 조정장치를 사용하여 모델, 카메라 그리고 smoke-wire를 전선으로 서로 연결하여 원하고자하는 사진을 촬영 할 수 있도록 하였다.

Fig. 3은 동기화 조정장치와 기어의 연결 부분을 나타낸 것으로 정확한 날개 위치 각도를 찾기 위한 메커니즘과 동기화 조정장치의 사진을 나타낸 것이다. Fig. 2의 동기화 조정 장치는 장치에서 나오는 전선과 모델의 앞날개 기어의 커넥팅 로드가 접지면, smoke - wire에 전류가 공급되어 1.57초 후에 카메라 셔터가 눌러져 초당 3장을 촬영하는 자동 장치이다. 또한 본 연구에서 날개위치각도는 약 $\pm 1^\circ$ 의 불확실성(uncertainty)을 갖고 있다.

본 연구는 풍동의 자유흐름 속도 $U_\infty = 1m/s$, 날개짓 주파수(wingbeat frequency)는 0.477로 고정시키고, 레이놀즈수는 3400, 무차원 진동수(reduced frequency) $K = 2\pi fc/U_\infty = 0.15$ 가

된다. 실험은 위상차를 변수로 두고 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 로 변화시켜 가면서 수행하였다. 위상각의 변화는 모델의 하부에 위치한 기어에 장착된 앞·뒤 날개를 연결하는 커넥터간의 위상차를 뜻한다. 날개 위치각도는 -16.5° 에서 $+22.8^\circ$ 까지 변하고, 각각의 위상에 따라서 약 5° 단위로 촬영하여 서로 비교가 가능하도록 하였다.

3. 결과 및 검토

가시화 사진에서 날개가 잠자리 몸체를 기준으로 수직 위치에 있을 때를 기준점 0° 로 두고, 그 변위각을 양(+)과 음(-)으로 표시하였고, 2개

의 숫자는 앞·뒤 날개의 순간 날개위치 각도를 나타낸다. 양(+)은 기준점보다 위쪽에 있을 때, 음(-)은 기준점보다 아래쪽에 있다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 위상차가 90° 인 경우 잠자리유형 날개의 후류를 가시화한 사진이다. 4(a), 4(b)는 앞날개는 downstroke, 뒷날개는 upstroke 운동을 하여 앞날개 아랫면의 흐름량은 증가하고, 뒷날개의 윗면은 흐름을 부착하는 효과가 발생하게 된다. 따라서 흐름은 더욱 날개 표면에 붙게 되고, 이와 같은 현상은 뒷날개 전체에 걸쳐 발생한다. 또한 4(a)에서 4(b)로 진행되는 동안 앞날개의 순간날개위치각도가 20° 에서 12° 로 변하면서 날개위치각도(wing position angle) 효과가 감소하고, 장착각이 큰 뒷날개에서조차도 날개면 경계층 분리가 거의 발생하지 않아 후류두께가 작은 것을 볼 수 있다. Fig. 4(d)의 후류는 뒷날개의 downstroke 운동은 흐름을 날개면에서 분리시키므로 두께가 두꺼운 것을 알 수 있다. Fig. 4(e)에서 공기의 흐름은 앞날개를 지나면서 와류를 생성하고 이는 뒷날개가 downstroke운동을 하는 동안 날개 아랫면의 유동에 영향을 미친다. 이와 같이 앞날개에서 발생된 와류는 뒷날개의 날개 밑을 통과함으로써 뒷날개의 양력발생을 방해하는 역할을 하리라 추정된다. 또한 뒷날개 이후에서의 후류는 장착각 10° 의 장착각과 위상지연으로 인해 후류 두께가 두꺼운 것을 관찰할 수 있다. 4(f)에서는 앞날개에서 생성된 와류가 뒷날개의 후류와 겹치는 과정으로 뒷날개의 아랫방향에 앞날개의 후류가 나타나고 있다. 4(g)는 90° 의 위상차를 가진 날개짓은 서로 교차하는 시점에서 장착각 0° 인 앞날개에 의해 Karman Vortex가 현저히 발생하리라 추정되지만, 뒷날개 후류에 묻혀 나타나지 않고 있다. Fig.4(i) ~ 4(l)는 앞날개는 양(+)의 날개위치각도에서 모두 upstroke 운동, 뒷날개는 음(-)의 날개위치각도에서 모두 downstroke 운동과정으로서 앞날개 아랫면의 흐름이 뒷날개의 윗면으로 흐르면서 분리되는 것을 볼 수 있다. 4(j)에서 앞날개와 뒷날개의 위상차는 두 날개 사이를 자유흐름이 통과함으로써 뒷날개의 후류두께를 줄여주는 역할을 한다. Fig. 4(k)는 앞날개와 뒷날개의 후류가 겹치지 않은 상태를 나타내고 있으며, 앞날개의 후류와 뒷날개 후류두께가 상반되게 나타나고 있다. 이것은 앞날개의 장착각은 0° 이고 뒷날개의

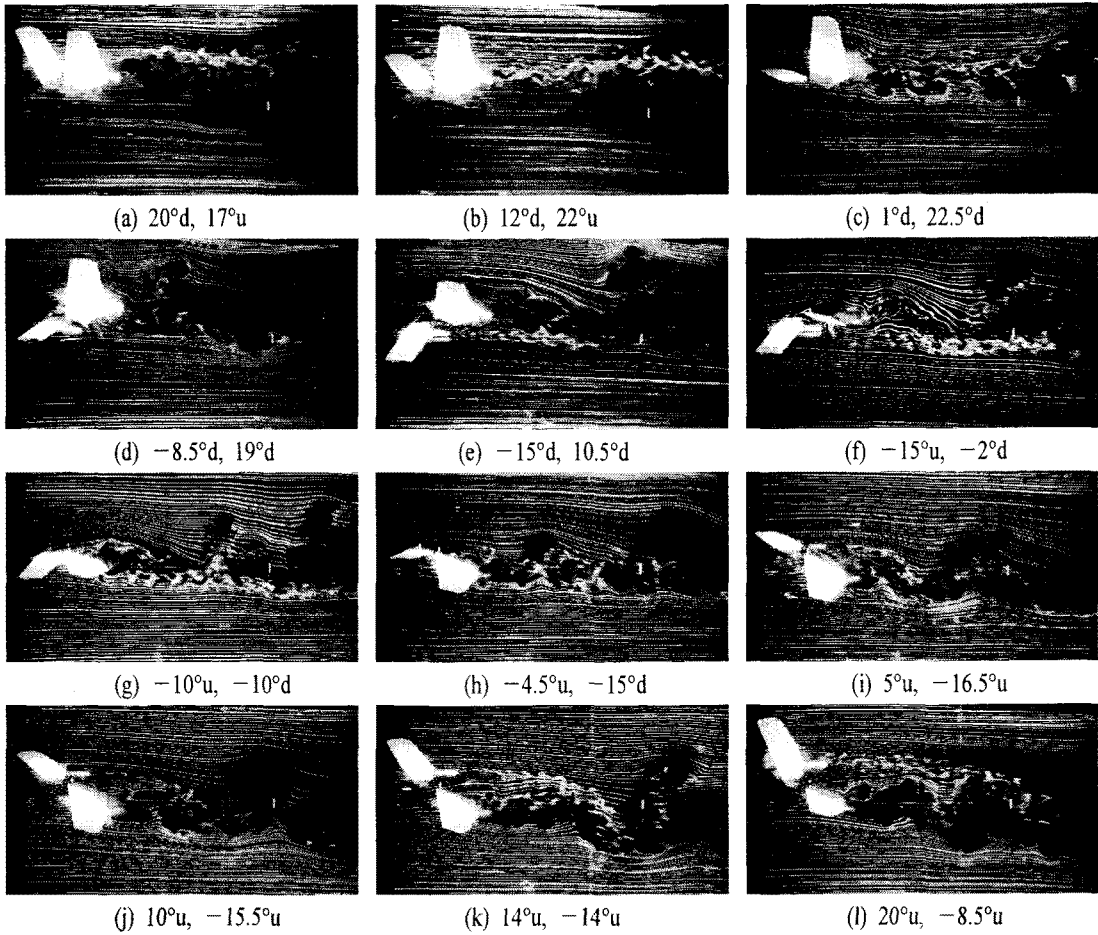


Fig. 4 Flow visualization of wake patterns (phase difference 90°)

장착각은 10°이기 때문에 흐름분리가 발생하기 때문이다. 또한 앞날개는 양(+)의 날개위치각도에서 upstroke운동을, 뒷날개는 음(-)의 날개 위치 각도에서 upstroke 운동하여 흐름을 분리시키는 역할을 하기 때문으로 추정된다. Fig. 4(l) 두 날개 사이의 간섭이 비교적 약하게 나타나면서, 앞날개의 흐름이 양쪽 면에 완전히 부착되어 흐르고 있다. 앞날개의 한 사이클이 완료 되었을 때의 유동이며, 뒷날개에서 분리 현상이 발생하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 현상도 뒷날개가 약 10°의 장착각을 가지고 있기 때문에 날개의 높은 장착각으로 인해 분리 현상이 발생한 것으로 추정된다. Fig. 5는 위상차 180°에서 한 주기 동안의잠자리 유형날개 주위의 유동을 가시화 하여 나타낸 것이다.

5(a), 5(b), 5(g)는 앞날개에서 발생한 후류가 뒤 쪽으로 잘 뺏어나가는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 앞날개 후류는 잘 조직화된 vortex street 을 형성한다. 이는 Saharon and Luttes[5]의 실제 잠자리 가시화 실험에서 나타난 현상과도 잘 일치 한다. Fig. 5(d)에서 뒷날개의 양(+)의 날개 위치각도에서의 upstroke효과에 의해 후류 두께가 비교적 얇은 특성을 보인다. 5(f)는 뒷날개의 양(+)의 위치각도에서 downstroke 운동과 장착각 효과로 인해 흐름이 분리되어 뒷날개 후류가 두꺼운 것을 관찰할 수 있다. 5(j)는 두 날개사이의 간섭이 비교적 약하게 나타나면서, 앞날개의 흐름이 양쪽 면에 완전히 부착되어 후류 두께가 얇다. 5(k)도 뒷날개가 앞날개의 후류에 영향을 받아 결합된 후류를 나타내고 있다.

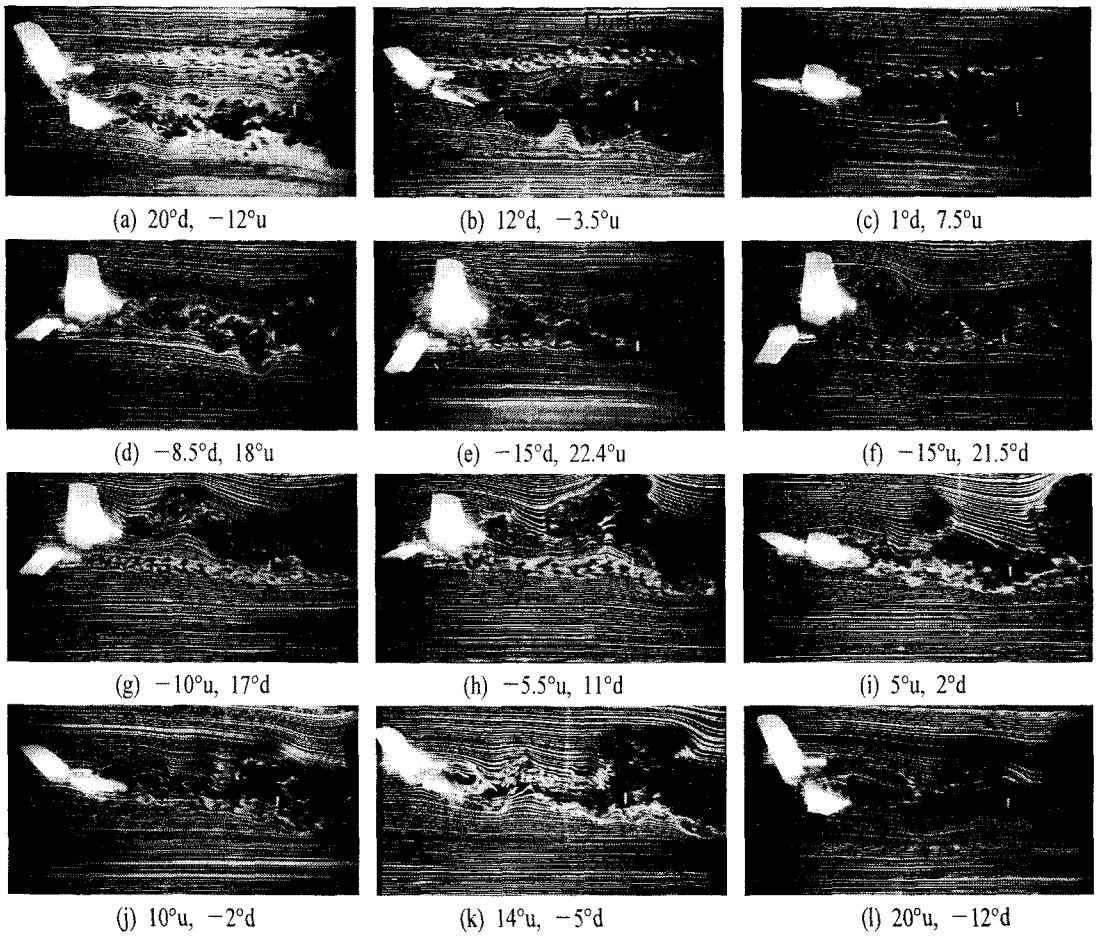


Fig. 5 Flow visualization of wake patterns (phase difference 180°)

4. 결론

잠자리 유형 날개 모델의 후류 가시화를 통해 위상차에 따른 후류 흐름의 변화를 관측하였다. 위상차가 90°, 270°는 앞날개 아랫면의 흐름이 뒷날개의 윗면으로 흐르면서 분리현상을 관찰할 수 있었다. 180° 위상차의 경우 큰 상대적 위상차로 간섭이 적어 작은 후류두께를 관찰할 수 있었으나, 위상차가 0°인 경우 앞·뒤 날개의 간섭이 없어 가장 안정된 후류흐름이 발생함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Alexander, D. E., "Studies on Flight Control and Aerodynamics in Dragonflies," Ph.D Dissertation Duke Univ., NC 2002
- [2] Alexander, D. E., "Unusual Phase Relationship between the Forewings, and Hindwings in Flying Dragonflies", The Journal of Experimental Biology, Vol. 109, 1984, pp. 379-383.
- [3] Mittal, R., Utturkar, Y. and Udaykumar, H. S., "Computational Modeling and Analysis of Biomimetic Flight Mechanisms", AIAA Paper 2002-0865, 2002.
- [4] Soms, C., and Luttges, M., "Dragon Flight: Novel Uses of Unsteady Separated Flows", Science, Vol. 228, 1985, pp. 1326-1328.
- [5] Saharon, D. and Luttges, M., "Visualization of Unsteady Separated Flow Produced by Mechanically Driven Dragonfly Wing Kinematics Model", AIAA Paper 88-0569. 1988.