

## 잠자리 유형 날개의 가시화 연구 : 무차원 진동수

김송학<sup>†</sup>, 장조원<sup>\*</sup>

### Visualization Study of Dragonfly Type Wing : Reduced Frequency

Song Hak Kim<sup>†</sup>, Jo Won Chang<sup>\*</sup>

#### Abstract

A purpose of this visual experiment is to investigate the effect of reduced frequency qualitatively by examining wake pattern change for insect flying motion. Insect is composed of two pair wing with forewing and hindwing, flying motion of insect is performed pitching and plunging so it makes a separation over the wings. The separation affects at the wake pattern and changed wake pattern has an influence on lift, drag and propulsion. This experiment is conducted by using a smoke wire technique and a camera is fixed at hindwing to take a photograph of wake. An electronic device is mounted below test section to find exact the mean positional angle of wing. The reduced frequency in experiment is 0.15, 0.3 and 0.45. We obtained the result which that reduced frequency is closely related to wake pattern that determines flight efficiency.

**Key Words** : Visulization(가시화), Flapping(플래핑), Reduced Frequency(무차원 진동수)

#### 1. 서론

과거부터 시작된 새나 작은 곤충의 비행에 관한 연구는 아직까지 명석하게 원인을 발견하지 못하고 지금까지 계속된 연구가 진행되고 있다. 실제 새나 비행하는 곤충의 날개는 길이가 유한하기 때문에 날개 주위의 공기 흐름은 2차원 유동과는 달리 3차원 유동이다. 따라서 날개길이가 무한히 긴 2차원 유동과는 여러 가지 면에서 다른 유동형태를 보인다. 지금까지의 고정익 항공기의 공기역학적 특성은 Kutta-Joukowski 의 이론으로 설명이 가능하였다. 그러나 곤충 즉 플레

핑 운동을 하는 날개의 공기 역학적 특성을 규명하기에는 상당히 제한적이다.

Kazuo et al.[1] 에 의하면 진동하는 에어포일에서 발생하는 후류는 무차원 진동수가 변함에 따라서 후류형태가 변한다고 하였고, 그들은 무차원 진동수를 0.1, 0.5, 1.0 으로 바꿔가면서 실험을 수행 하였다. Daniel과 Sukumar[2] 는 잠자리의 실제 크기의 1대7의 모델을 가진 잠자리 모형으로 날개짓 진동수(wing beat frequency)를 0.57, 1.00, 1.59 3가지의 경우로 실험을 수행 하였고, 이때 Re 값은 4,000 이었다. 그들은 0.57, 1.00 의 날개짓 진동수를 차원해석을 해본 결과 실제 잠자리의 진동수와 비슷한 범주에 들어간다고 설명하였다. Michael et al.[3]에 의하면 downstroke 와 upstroke 의 반복 운동을 수행하면서 이전에 일어난 운동이 현재 일어

<sup>†</sup> 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

<sup>\*</sup> 한국항공대학교 항공운항학과  
E-mail: jwchang@hau.ac.kr

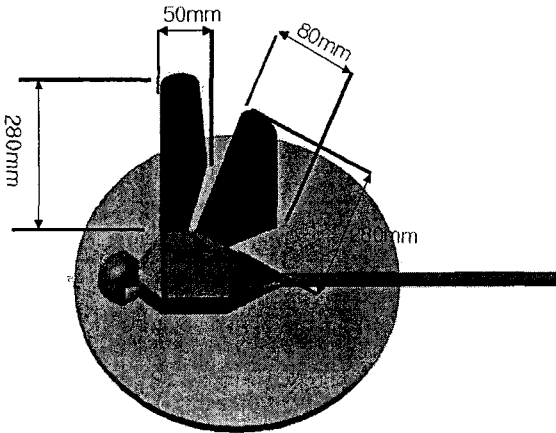


Fig. 1 Dragonfly type wings

나고 있는 운동에 영향을 주어 후류의 변화를 준다고 말하고 있다.

플래핑 날개의 공기역학적 특성을 규명하기 위해서 실험적인 방법이 활발히 진행되고 있지만 정확한 원인은 발표되고 있지 않다. 이러한 원인을 규명하기 위한 방법 중 하나가 가시화 실험이며 그 중에서도 후류형태(wake pattern)를 조사함으로써 후류형태가 공기역학적 특성과 어떤 상관관계가 있는지 알아보고자 한다.

본 연구의 궁극적인 목적은 플래핑 운동을 하는 날개의 공기역학적 특성을 규명하기 위함이고, 그 특성과 상관관계가 있는 후류 형태를 무차원진동수의 변화로서 관찰하였다. 즉 플래핑 운동을 하는 곤충들은 고정익을 가진 항공기와는 달리 플래핑 운동을 하면서 후류의 형태가 변화하는 것을 알 수 있었고, 이 변화하는 후류의 형태가 공기역학적 특성과 상관관계가 있는 것이다. 이 후류의 형태를 변화 시키는 요인으로는 무차원 진동수(reduced frequency)  $K$ , 위상차(phase difference), 받음각 그리고 진폭(amplitude) 등 여러 가지 파라메타들이 있을 수 있으나 본 연구에서는 무차원 진동수에 대해서만 연구를 진행하였다.

## 2. 실험 방법 및 조건

본 연구는  $Re=3,400$ 과 자유흐름속도  $1.0m/s$ 를 고정시키고 무차원 진동수의 변화를 날개진동수의 변화로 실험을 하였다. 즉  $K=0.15, 0.30, 0.45$ 의 3가지 조건에서 같

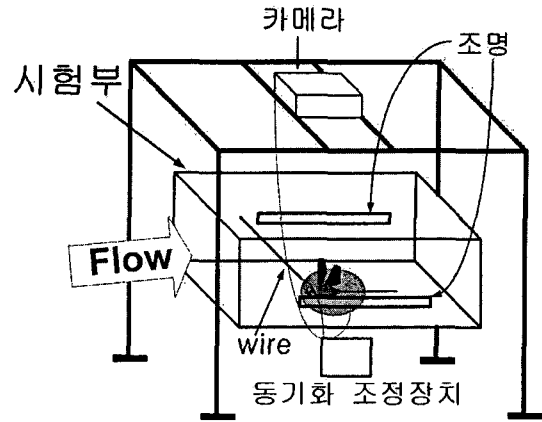


Fig. 2 Experimental set-up

은 날개위치각도(wing position angle)에 따른 후류의 변화를 가시화 실험을 통해서 분석하였다.

일반적으로 잠자리는 2쌍의 날개를 가지고 있으며 뒷날개는  $50^\circ$ 에서  $100^\circ$ 의 위상차를 가지면 앞날개와 동시에 움직인다[4]. 또한 위상차가 없는 경우 위상차가 있을 때 보다 훨씬 좋은 추력을 낸다고 알려져 있다. 즉 다시 말하면 앞날개에 의해 발생된 후류는 마지막으로 뒷날개에 영향을 미쳐 최종적인 후류를 만들어 낸다.

본 연구에서는 두 쌍의 날개를 가진 잠자리 유형 날개모형을 사용하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 모형을 나타낸다. 모형은 앞날개의 경우 날개길이가  $280mm$ , 평균시위는  $43mm$ , 뒷날개의 경우 날개길이가  $280mm$ , 뒷날개의 평균시위  $C$ 가  $59.8mm$ 이다.

본 연구는 위상차  $90^\circ$ 인 경우로 고정하고 실험을 수행하였다. 이러한 위상차를 변수로 하여 여러 가지 위상차로 나눌 수 있으나 본 연구는 무차원 진동수인  $K$ 값의 변화를 보기 위한 것이므로 위상차를  $90^\circ$ 로 한 가지 경우에 한해서 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 시험부 안에 연선(smoke-wire)에서부터  $0.40m$  떨어진 지점에 흰 종이 한 장을 부착하여 가시화 사진에 나타나도록 하였다. 이는 앞선 날개위치 각도에서의 현재 위치에서 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위해서 정확한 계산이 필요하기에 부착한 것이다. 또한 본 연구에서는 동기화 조정장치를 만들어 smoke-wire와 카메라 셔터에 공급되는 전류를 자동으로 공급될 수 있도록 하였다[5]. Fig. 2는 아음속풍동 시험부(test section)와 실험 장치를 보여주는 그

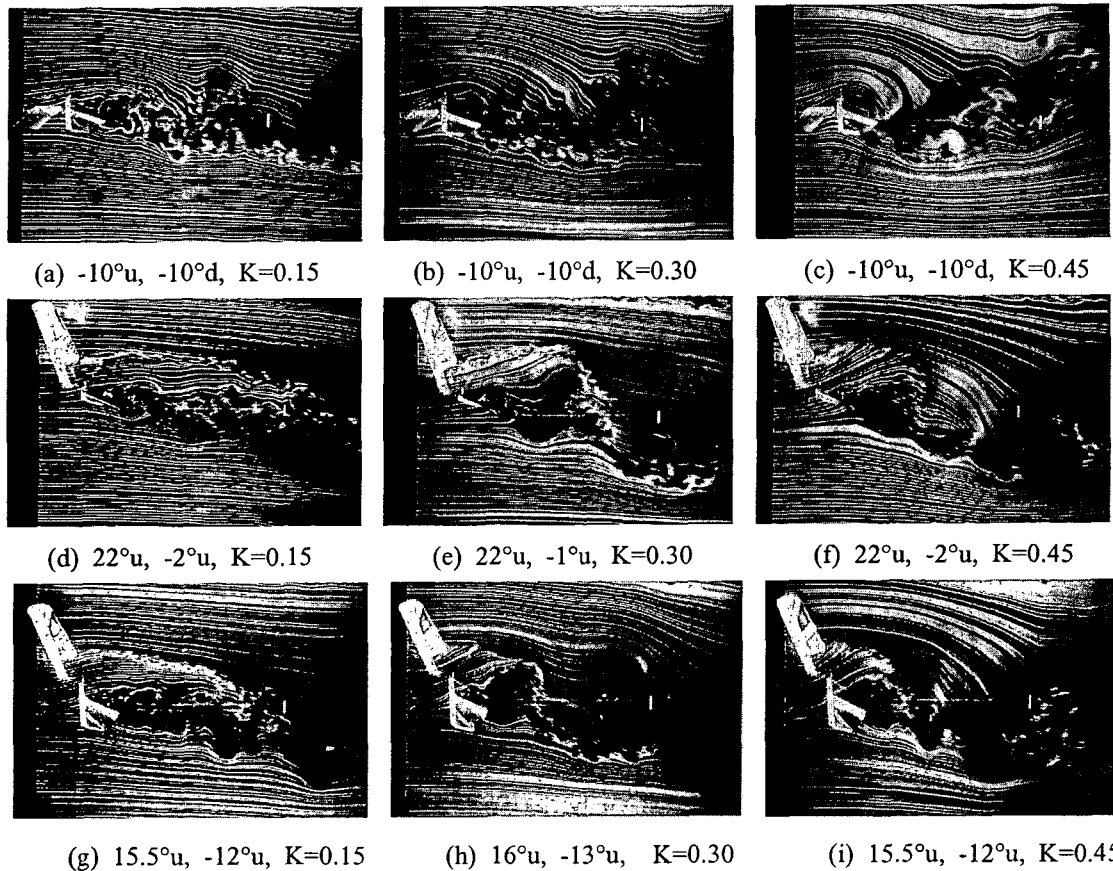


Fig. 3 Effect of reduced frequency

림으로 0.5(폭)×0.5(높이)×2.5(길이)m 시험부 안에 실험 모델을 고정시키고, 가시화 사진을 촬영을 위해 카메라를 사각기둥의 지지대에 고정시켰다. 또한 동기화 조정장치를 사용하여 모델, 카메라 그리고 smoke-wire를 전선으로 서로 연결시켜 작동되도록 하였으며, 본 연구에서 사용되어진 동기화 조정장치는 일정한 간격의 날개 위치 각도를 찾는 데 사용되었고, 이때 날개 위치 각도는 ±1°의 불확실성(uncertainty)을 갖는다. 좀더 자세한 정보는 참고문헌[6]을 참조하기 바란다.

### 3. 실험 결과 및 토론

Fig. 3은 무차원 진동수(K)에 따른 비슷한 순간 날개 위치 각도에서의 날개 주위의 흐름 형태를 보여주는 그림이다. 그림에서 숫자는 날개 위치 각도를 의미하며, 숫자 뒤의 d와 u는 각각 downstroke, upstroke 운동을 의미한다.

Fig. 3a, 3b, 3c는 각각 K=0.15, 0.30, 0.45이다. K=0.15일 때 뒷날개의 장착각으로 인하여

뒷날개 앞전에서 분리된 유맥선(streak line)은 바로 후류의 두께를 증가시킨다. 그러나 K=0.30일 때는 뒷날개에서 분리된 유맥선이 K 값의 증가로 인해 유맥선의 휘어지는 효과가 증가하여 뒷날개 뒷전에서 재 부착 되려는 움직임이 보이고, K=0.45에서는 휘어지는 각도가 K=0.30 보다 커져서 뒷날개 뒷전에 재 부착 되고 있다. 1997년 Ellington et al.[7]은 날개 윗면에서 분리되어 재 부착 되는 경우 날개 윗면과 날개 아랫면과의 압력 차이로 인해 양력의 증가를 유발한다고 밝혔다. 본 연구에서 재 부착 되는 현상은 같은 날개 위치 각도에서 무차원 진동수가 증가할수록 현상이 뚜렷하게 나타나고 있다. 이러한 효과로 인해 무차원 진동수가 증가할수록 양력이 증가하리라 추정할 수 있다.

이와 같이 무차원 진동수에 따라 재 부착이 발생하는 원인은 날개의 진행 방향에 따라 날개 진행 방향의 아랫면에 있는 유맥선이 직선 방향을 향하고, 윗면에 있는 유맥선이 날개 진행 방향으로 휘어지기 때문이다. Fig. 3c는 K=0.45인 경우

뒷날개가  $-10^\circ$ 에서 downstroke운동중일 때의 가시화 사진을 나타낸 것이다. 뒷날개가 아랫방향으로 향하고 있기 때문에 뒷날개 윗면의 유맥선이 아랫방향으로 휘어져, 뒷날개 뒷전에서 재 부착이 되고 있다. 이러한 현상은 무차원 진동수가 증가할수록 뚜렷하게 나타난다.

Fig. 3d, 3e, 3f는  $K=0.15, 0.30, 0.45$ 인 경우 앞날개가 순간 날개위치각도가  $22^\circ$ 에서 upstroke운동, 뒷날개가  $-2^\circ$ 에서 downstroke운동중일 때 잠자리유형 날개의 후류를 가시화한 사진을 나타낸 것이다. 3d, 3e, 3f는 앞날개와 뒷날개의 후류가 겹치지 않은 상태를 나타내고 있으며, 앞날개의 후류와 뒷날개 후류두께가 상반되게 나타나고 있다. 이것은 앞날개의 장착각은  $0^\circ$ 이므로 앞날개의 후류두께가 얇고, 뒷날개의 장착각은  $10^\circ$ 이므로 뒷날개에서 흐름 분리가 발생하여 후류두께가 두껍기 때문이다. 또한 앞날개는 양(+)의 순간 날개위치각도에서 upstroke운동을, 뒷날개는 음(-)의 날개 위치 각도에서 upstroke운동하여 흐름을 부착하거나 분리시키는 역할을 하기 때문으로 추정된다. 후류위치  $0.5 < X/C < 1.5$ 에서 후류두께는 3d에서 가장 얇은 현상을 나타내고 있다. 3e, 3f는 앞날개가  $22^\circ$ 이고, upstroke과정이기 때문에  $K$ 값이 증가하는 경우 앞날개 아랫면의 유맥선은 날개 진행방향으로 휘어지는 각도가 증가하므로 뒷날개 뒷전부터  $X/C=1.5$ 까지의 후류의 두께를 증가시키고 있다.

Fig. 3g, 3h, 3i는  $K=0.15, 0.30, 0.45$ 에서 앞뒤 날개 모두 upstroke과정으로 앞날개가  $15.5^\circ, 16^\circ$ , 뒷날개가  $-12^\circ, -13^\circ$ 인 경우에 가시화 사진을 나타낸 것이다. 3g는 앞날개에서 발생한 후류가 뒤쪽으로 잘 뺏어나가는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 앞날개의 후류는 잘 조직화된 vortex street를 형성하는데, 이것은 Saharon과 Luttges[8]의 실제 잠자리 가시화 실험에서 나타난 현상과도 일치한다. 3h, 3i의 경우는 Karman vortex는 나타나지 않는데, 이것은  $K$ 값의 증가로 유맥선의 휘어지는 각도가 증가하여 Karman Vortex와 뒷날개의 후류가 서로 간섭하기 때문이다. 또한 뒷날개에서의 후류두께가 두꺼운 것을 관찰할 수 있다. 이것은 앞날개에서 진행된 유맥선의 휘어지는 각도가 증가하고 뒷날개의 높은 장착각( $10^\circ$ )이므로 뒷날개에서 흐름분리(flow separation)가 발생하였기 때문이다.

#### 4. 결론

$Re = 3,400$ 에서 잠자리 유형 날개 주위의 유맥선(streak line)은 날개의 무차원 진동수가 증가할수록 휘어지는 정도가 심하며, 앞날개에서 후류에서의 Karman Vortex는 날개의 무차원 진동수가 증가함에 따라 나타나지 않는다. 또한 잠자리 유형 날개의 후류는 날개의 무차원 진동수가 증가할수록 3차원 흐름현상이 심하게 나타나며, 뒷날개 뒷전 이후에서의 후류 두께는 증가한다

#### 참고 문헌

- 1) 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.
- 2) Daniel, C. and Sukumar, C., 2001 "Computational and Experimental Studies of Asymmetric Pitch/Plunge Flapping-The Secret of Biological Flyers," *AIAA-2001-0859*.
- 3) Michel, H.D., Fritz-Olaf, L., Snajay, P. S., 1999, "Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight," *Science*, Vol. 284, pp.1954-1960.
- 4) R. Mittal, Y., Utturkar, H., Udaykumar, S., 2002 "Computational Modeling and Analysis of Biomimetic Flight Mechanism," *AIAA 2002-0865*.
- 5) 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.
- 6) 김현석, 장조원, 2004,12 "잠자리 유형 날개의 위상차에 대한 가시화 연구," *한국추진공학회지*
- 7) Ellington, C.P., Willmott, A.P. and Thomas, A.L.R., 1996, "Leading-Edge Vortices in insect flight," *NATURE*, Vol. 384, pp.626-630.
- 8) Saharon, D. and Luttges, M., 1988. "Visualization of Unsteady Separated Flow Produced by Mechanically Driven Dragonfly Wing Kinematics Model", *AIAA Paper 88-0569*.