

두 쌍 날개를 가진 잠자리 모델의 공력 연구

Aerodynamic Study a Dragonfly Model with Two Pairs Wing

김송학*, 장조원(한국항공대학교)

1. 서론

일반적인 새나 곤충들은 그것들이 가지고 있는 날개로부터 자유로운 운동을 통하여 높은 양력과 추력을 생성한다. 이러한 양력이 발생하는 근본적인 원인으로서는 날개가 downstroke 운동을 수행하면서 날개 윗면에서 발생하는 leading-edge vortex의 재부착 현상으로 인해 높은 양력이 발생하기 때문이다[1]. 또한 날개는 단순히 상하 피칭 운동만을 하는 것이 아니라 외전작용(pronation), 내전작용(supination)을 병행하여 양력과 추력을 증가시키는 역할을 한다.

한 쌍의 날개를 갖는 곤충과 더불어 두 쌍의 날개를 갖는 잠자리의 경우도 위에서 언급한 피칭운동, 플러징운동, 내전작용 그리고 외전작용 운동을 병행한다. 또한 잠자리의 경우 한 쌍의 날개를 가진 곤충과는 달리 앞·뒤 날개의 위상차라는 변수가 존재한다. 1982년 Alexander[2]는 일반적으로 잠자리는 독립적으로 움직이는 앞·뒤 날개는 위상차를 두고서 날갯짓을 한다고 밝히고 있으며, 그는 또한 직진, 수평비행의 경우보다 확실히 더 큰 양력을 필요로 하는 이륙, 정지비행, 그리고 여분의 추력이 필요한 급격한 방향전환 시에는 위상차가 없는 날갯짓을 한다고 밝혔다[3]. 곤충이나 새들의 날개에서 발생하는 추력과 항력은 단순한 피칭운동을 하는 에어포일에서 발생하는 후류와 밀접한 관계가 있다. 진동하는 에어포일에서 발생하는 추력의 경우는 날개 뒷전 이후에서 발생하는 reverse Karman vortex 때문이며 항력의 원인은 후류의 구조가 Karman vortex의 구조를 형성하기 때문이다. 단순한 피칭운동에 의해 발생하는 추력 및 항력에 관한 연구는 이미 1910년대 초반에 Knoller 과 Betz 등에 의해 연구되었으며,

1935년에는 Karman 과 Birnbaum에 의해 실험적으로 추력 발생이 증명되기도 하였다[4]. 이러한 에어포일을 이용한 순수 피칭운동에서 발생하는 추력은 날갯짓을 하는 곤충이나 새들도 발생한다. 2002년 Mittal et al.[5]은 일반적인 정지비행에서 한 쌍 날개와 두 쌍 날개의 추력 생성과 효율에 대한 두 날개 사이의 위상차에 관한 연구를 수행하였고, 그 결과 한 쌍 날개에서는 reverse Karman vortex street이 생성되었고, 위상차가 없는 두 쌍 날개가 비교적 더 높은 추력을 낸다는 사실을 밝혀내었다. 2004년 Kim and Chang [6],[7]은 $Re = 3.4 \times 10^3$ 에서 잠자리 유형 날개의 가시화 연구를 수행하였다. 그들은 앞·뒤 날개의 위상차, 무차원 진동수에 따른 유동현상을 가시화하는 연구를 수행하였으며, 위상차에 따른 가시화 연구에서 후류에서 Karman vortex 구조가 생성된다는 것을 밝혔다. 또한 그들은 무차원 진동수가 증가할수록 leading-edge vortex의 재부착 현상이 더 심하게 나타난다고 하였다. 2001년 Chasman et al.[8]은 실제 잠자리의 7배 확대시킨 모델에서 날갯짓 진동수 0.56, 1.00은 실제 잠자리의 날갯짓 진동수에 범주에 들어간다고 설명하였다. 2004년 Kim and Chang[7],[8]은 가시화연구에서 실제 잠자리의 날갯짓 진동수 범주에 들어가는 날갯짓 진동수로 연구를 수행하였으며, 이때 $Re = 3.4 \times 10^3$ 에 고정시키고, 무차원 진동수 ($K=0.075, 0.15, 0.225$)와 위상차($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$) 변화에 관한 가시화 연구를 수행하였다.

따라서 본 연구는 이러한 잠자리 유형 날갯짓 비행체의 가시화 연구의 결과를 정량적으로 분석하기 위해 스팅 밸런스(sting balance)를 이용하여 양력과 항력, 추력성분 등을 측정하였다.

2. 실험 조건 및 방법

본 연구는 잠자리 유형 날갯짓에서 발생하는 양력과 항력, 추력성분을 스팅 밸런스를 이용하여 측정하였다. 실험 조건은 날갯짓 모델을 $Re = 3.4 \times 10^3$ 에 고정시키고 위상차 90° 에서 무차원 진동수를 0.075, 0.15, 0.225로 변화 시켜 가면서 공기역학적 힘들을 측정하였다.

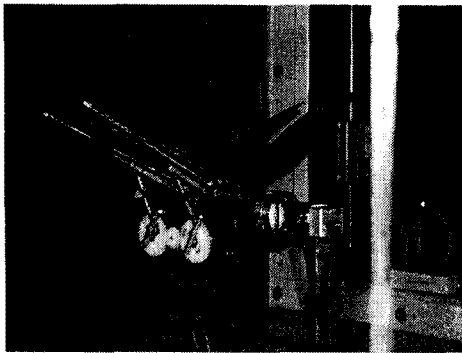


Fig. 1 Dragonfly Model

Fig. 1은 스팅 밸런스(sting balance)에 장착된 잠자리 모델을 나타낸 사진이다. 잠자리 모델의 앞·뒤 날개의 길이는 30cm이며, 앞·뒤 날개의 평균시위는 앞날개의 경우 3.76cm이고 뒷날개의 경우 5.35cm이다. 스팅형 밸런스에 장착된 로드셀은 2축(양력, 추력)을 측정할 수 있으며, 본 연구실에서 기본설계를 수행하여 [8-10] 업체에 제작 의뢰한 센서로 힘의 측정 범위(range)는 $-50N \sim +50N$ 이며 측정오차는 $\pm 0.5\%$ 이다.

Fejtek 와 Nehera[11]는 플래핑 날개의 양력과 추력에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 그들은 스팅 밸런스를 사용하여 양력과 추력에 관한 데이터를 획득하였는데 noise 제거와 input signal의 진동을 줄이기 위해 10Hz cut-off low pass filter를 사용하였으며, 한 주기(2.55Hz) 동안에 60개의 데이터를 얻었다. 본 연구에서는 FFT 변환을 하여 10Hz 이하의 주기가 일정한 것을 알 수 있었고, 10Hz의 low pass filter 기능이 있는 amplifier를 사용하여

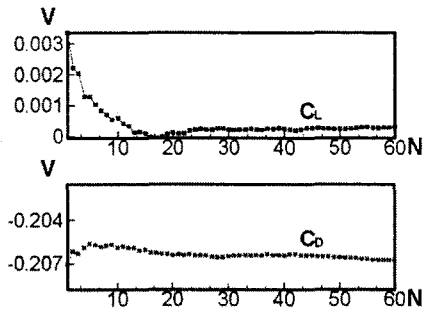
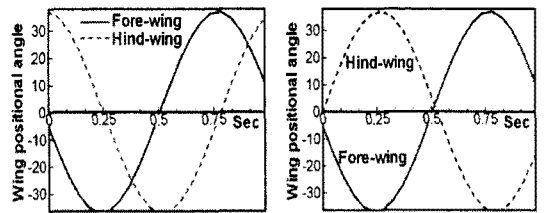


Fig. 2. Number of Ensemble average



(a) Phase difference of 90° (b) Phase difference of 180°
Fig. 3 Wing positional angle

데이터를 획득하였다.

Fig. 2는 측정된 공력데이터의 위상평균(ensemble average) 횟수 N에 따른 전압(voltage) 값을 나타낸 것이다. 그림에서 $N=40$ 이후부터 데이터 값이 수렴하는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서 제시한 공력데이터는 한주기 동안의 데이터를 55회 위상평균 하였다.

Fig. 3은 한주기 동안의 잠자리 모델의 앞·뒤 날개의 날개위치각도를 나타내는 그림으로 fig. 3(a)는 90° 의 위상차를 갖고, 3(b)는 180° 의 위상차를 갖는 그래프이다.

3. 결과 및 토론

본 연구는 $Re = 3.4 \times 10^3$ 에서 잠자리의 약 4배 확대된 모델로 공력측정을 하였다. Fig. 4는 앞·뒤 날개의 위상차가 90° 일 때 무차원 진동수의 변화에 따른 양력계수와 항력계수의 값을 보여주는 그래프이다. Fig. 4(a), 4(b), 4(c)는 양력계수 값을 보여주며, fig. 4(d), 4(e), 4(f)는 항력계수 값을 나타낸다. Fig. 4(a)에서 4(c)까지 무차원 진동수가 증가 할수록 양력계수 값도 증가 한다. 또한 fig. 4(a)에서 양력계수 값이 증가

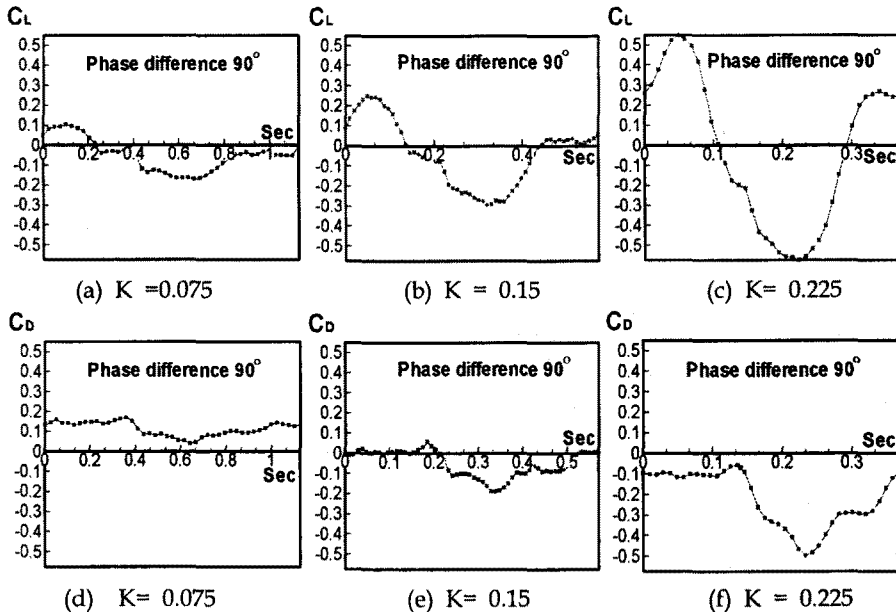


Fig. 4 C_L & C_D for the 1 cycle at the phase difference of 90°

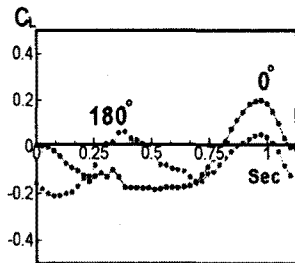


Fig. 5 Compare of the phase difference

하는 구간은 약 0s부터 0.25s까지이며 fig. 3(a)에서 0s부터 0.25s 구간은 앞·뒤날개 모두 downstroke 운동을 하는 과정이다. 2004년 Kim and Chang[7]은 잠자리 모델의 가시화 연구에서 날개가 downstroke 운동을 할 때 leading-edge vortex의 재 부착 현상이 일어난다고 밝혔으며, 무차원 진동수가 증가할수록 그 효과는 더욱 증가한다고 밝혔다. Leading-edge vortex의 재 부착 현상은 날개 윗면의 캠버를 효과적으로 증가시켜서 날개 윗면의 상대속도가 아랫면 보다 빨라져 날개 윗면의 압력을 감소시키고, 아랫면의 압력을 증가시켜 양력을 발생시킨다[1], [12].

Fig. 4(d), 4(e), 4(f)는 앞·뒤날개의 위상차가

90° 일 때 무차원 진동수의 변화에 따른 한주기 동안의 항력계수 값을 나타내는 그래프이다. $K=0.075$ 일 때는 한주기 동안 항력만 발생하지만, $K=0.15$ 일 때는 0.2s 이후 추력이 발생하고, $K=0.225$ 일 때는 추력만 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4(a), 4(b), 4(c)의 그래프와 비교해보면, 양력의 반대 방향으로 힘이 작용하면 추력이 발생하는 것을 알 수 있다. 양력 방향의 반대 방향으로 작용하는 힘은 upstroke 운동과정에서 발생하는 힘이다. 따라서 upstroke 운동시에 추력이 발생한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 $K=0.075$ 일 때 앞·뒤날개의 위상차가 0° , 90° 일 때 양력계수 값을 비교한 그래프이다. 위상차가 0° 일 때 더 높은 양력계수 값을 갖는 것을 알 수 있다. 위상차가 180° 인 경우에 양력은 한 주기 동안에 두 번 변하며, 위상차가 0° 일 때의 양력은 한 주기 동안에 한 번 변하는 것을 알 수 있다. 이러한 위상차가 0° 일 때의 양력 값은 위상차가 180° 인 경우보다 더 크다. 위상차가 180° 인 경우에 양력발생이 두 번 발생하는 이유는 앞날개가 downstroke운동을 할 때 한번, 뒷날개가 downstroke운동을 할 때 한번 발생하는 것이다. Fig. 3(b)의 그래프는 위상차 180° 인 경우에 앞·뒤 날개의 날개위치각도를 나타내는 그래프로 0.25s 와 0.75s에서 각각 앞·뒤날개가 downstroke 운동을 하는 것을 알

수 있다.

Alexander[2]는 일반적으로 잠자리는 위상차를 두고서 날갯짓을 하지만, 높은 양력이나 추력을 필요로 하는 이륙이나 정지비행 급격한 방향전환을 할 때는 위상차가 없는 비행을 한다고 밝혔다. 또한, Mittal et al.[5]은 수치적 연구를 수행한 결과 위상차가 없는 단일 날개의 경우 더 큰 양력과 추력이 발생한다고 밝혔다. 이외에도 Kim et al.[6]은 잠자리 유형 날개의 가시화 연구에서 위상차가 0°일 때 위상차가 존재하는 경우보다 더 큰 추력이 발생할 것이라고 추정하는데 본 연구를 통하여 정량적으로 증명할 수 있었다.

3. 결론

레이놀즈수 $Re=3.4 \times 10^3$ 에서 받음각이 0°인 잠자리 모델의 공력특성에 관한 연구를 수행하였다. 위상차 90°의 경우에 무차원 진동수가 0.075, 0.15, 0.225 로 증가할수록 양력발생이 증가하며, 양력은 downstroke 운동을 할 때 발생한다는 것을 알 수 있었다. 앞·뒤날개의 위상차가 없는 경우는 위상차가 있는 경우보다 더 큰 양력발생을 한다는 것을 알 수 있었고, 앞·뒤 날개가 모두 upstroke 운동을 하면 비행체에 걸리는 힘은 양력 방향의 반대방향으로 발생한다는 것을 알 수 있었다.

앞·뒤 날개의 위상차가 90°인 경우에 무차원 진동수가 증가 할수록 힘의 성분이 항력에서 추력으로 바뀌는 것을 알 수 있었다. 무차원 진동수가 증가 할수록 양력과 추력 모두 같이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 위상차가 0°인 경우에는 위상차가 있는 경우보다 양력발생이 커진다는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2004년도 한국 학술 진흥 재단의 선도연구자 지원에 의해 연구되었음.
(KRF-2004-041-D00145)

참고문헌

1) Willmott, A. P., Ellington, C. P. and Thomas, A. L. R. , " Flow visualization and unsteady aerodynamics in the flight of the hawkmoth, *Manduca sexta*", The Royal Society, 1997, vol. 352, pp. 303-316.

2) Alexander, D. E., "Studies on Flight Control and Aerodynamics in Dragonflies," Ph. D. Dissertation, Duke Univ., NC., 1982

3) Alexander, D. E., "Unusual Phase Relationships between the Forewings and Hindwings in Flying Dragonflies," The Journal of Experimental Biology, 1984, Vol. 109, pp. 379-383.

4) 이정삼, 김종암, 노오현, "저 레이놀즈수 유동에서 Flapping-Airfoil 의 수치적 공력특성 연구"한국항공우주학회지, 2002, vol.30, pp.44-52.

5) Mittal, R., Utturkar, Y. and Udaykumar, H. S., "Computational Modeling and Analysis of Biomimetic Flight Mechanism,"AIAA paper 2002-0865.

6) 김현석, 김송학, 장조원, "잠자리 유형 날개의 위상차에 대한 가시화 연구 ", 한국 추진 공학회지, 2004, vol. 8, pp. 43-53.

7) 김송학, 장조원, "잠자리 유형 날개의 무차원 진동수에 따른 가시화 연구", 한국가시화정보학회지, 2004, 제 2권 2호, pp.58-65.

8) Chasman, S. and Chakravarthy, S., "Computational and Experimental Studies of Asymmetric Pitch/Plunge Flapping-The Secret of Biological Flyers", AIAA paper 2001-0859

9) Kim, J.H., Kang, D.I., Shing, H.H. and Park, Y.K., "Design and analysis of a column type multi-component force/moment sensor", 2002, Elsevier Science Ltd., pp.

10) Kim, G.S., Kang, D.J., Jeoung, S.Y. and Joo, J.W., "Desing of sensing element for 3-component load cell using parallel plate structure", 1997, KSME, vol. 21, no. 11, pp. 1871-1884.

11) Fejtek, I. and Nehera, J., " Experimental study of flapping wing lift and propulsion", Journal of Aeronautical", 1980, vol.84, pp.28-33.

12) Van den Berg, C. and Ellington, C. P., " The three dimensional leading-edge vortex of a 'hovering' model hawkmoth", Phil. Trans. R. Soc. Lond., 1997, vol. 352, pp. 329-340.