

論文**잠자리 유형 날개의 비정상 양력 측정**

김송학*, 장조원**

Unsteady Lift Measurements of the Dragonfly-type Wing

Song-Hak Kim*, Jo-Won Chang**

ABSTRACT

Unsteady lift measurements were carried out in order to investigate the effects of phase difference and reduced frequency of a dragonfly-type model with two pairs of wing. A load-cell was employed to measure the lift generated by a plunging motion of the dragonfly-type model with the incidence angles of 0°. Experimental conditions are as follows: phase differences between fore- and hind-wings are 0°, 90°, 180° and 270°, and reduced frequencies are 0.075, 0.15 and 0.225, respectively. The freestream velocity was 1.43 m/sec and corresponding chord Reynolds number was 3.4×10^3 . The variation of phase-averaged lift coefficients during one cycle of the wing motion is presented. Results show that the total value of the positive lift coefficient during one cycle of the wing motion is the largest at the phase difference of 90°, and that the maximum lift coefficient and lift coefficient per unit of time increases with reduced frequency.

Key Words : Flapping motion(플래핑 운동), Dragonfly type wing(잠자리 유형 날개), Incidence angle(불임각), Lift coefficient(양력계수), Phase difference(위상차), Reduced frequency(무차원 진동수)

I. 서 론

새나 곤충들은 플래핑 운동을 하면서 양력과 추력을 발생시켜 비행을 한다. 플래핑 운동은 플런징(Plunging)과 피칭(Pitching)운동이 복합적으로 발생하는 운동이다. 플래핑 운동을 하는 곤충들 중에는 잠자리와 같이 두 쌍의 앞·뒤날개를 갖는 경우가 있다. 이러한 잠자리에 관한 연구초기에는 양력이나 추력을 발생시키는 날개의 연결부위 즉 근육 연결조직같은 생물학적 특징에 관한 연구가 많은 부분을 차지하였으나, 현재는 공력특성에 관한 연구에 집중을 하고 있다.

Alexander[1]는 잠자리는 일반적으로 90°의 위상차를 두고 비행을 하고, 경우에 따라서는 180°의 위상차를 갖고서 비행을 한다고 밝혔다. 또한 순간적인 방향전환 또는 급전진 비행 중에는 앞·뒤날개의 위상차가 없는 비행을 한다고 밝히고 있다. 이와 같이 두 쌍의 날개를 가진 잠자리 형태의 곤충은 앞·뒤날개에서 발생하는 흐름특성을 이용하여 효율적인 비행을 한다는 것을 알 수 있다. Saharon and Luttges[2]는 잠자리 날개에 관한 가시화 연구를 수행하였으며, 잠자리는 한주기 동안 피칭, 플런징, 스크롤의 복합적인 운동을 하면서 크게 8개의 와류(vortex)구조를 발생시킨다고 설명하였다. 이러한 연구결과에 이어서 Kim et al.[3]은 플런징 운동만을 수행하는 잠자리 유형 모델의 가시화 연구에서 위상차의 변화에 따른 와류(vortex)의 구조를 관찰하였으며, 앞·뒤날개의 날개위치각도 차이에 따라서 Karman vortex의 구조가 관찰된다고 하였다. 이러한 Karman vortex의 구조는 와류의 구조형태

* 정회원, 한국항공대학교 대학원 항공우주공학과

** 정회원, 한국항공대학교 항공운항학과 부교수

연락처자, E-mail : jwchang@hau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화천동 200-1

에 따라서 추력 또는 항력의 원인이 된다. 또한, Kim and Chang[4]은 잠자리 유형 날개에 대하여 앞·뒤날개의 위상차가 90° 인 경우에 무차원 진동수를 증가시키면서 가시화 연구를 수행하였다. 그 결과 무차원 진동수가 증가 할수록 앞전 와류의 재부착 효과가 증가한다는 것을 가시화 사진으로 증명하였다. 가장 최근의 잠자리의 공력특성에 관한 연구결과는 Okamoto 등[5]에 의해 발표되었다. 그러나 그들은 플래핑 운동을 하지 않는 잠자리 날개의 캠버, 두께 등 주로 날개 형상에 관한 연구를 수행하였다.

또한 본 연구에서 사용된 모델은 단순히 풀런징 운동만을 수행하도록 구동메커니즘이 장착되어 있다. 한 쌍의 플래핑 날개에 관한 연구에서도, 초기에는 풀런징 운동만을 수행하는 연구부터 시작되어 피칭운동을 포함하는 플래핑 운동을 하는 연구로 발전되어 왔다. Feijtek and Nehera[6]는 풀런징 운동을 수행하는 에어포일의 공력특성에 관한 연구를 통하여, 양력계수와 항력계수를 획득하였으며, Vest and Katz[7]도 역시 단순히 풀런징 운동만을 수행하는 비둘기 모델에 관한 공력 데이터를 획득하였다. 이러한 연구가 수행된 이후 피칭운동과 풀런징 운동이 결합된 플래핑 운동을 수행하는 날개의 공력 특성에 관한 연구가 활발히 이루어 졌다.

이와 같이 두 쌍 날개를 가진 잠자리에 관한 연구가 수행되고 있지만, 지금까지 공력특성에 관한 실험적 연구 결과는 가시화 및 전산연구에 비해 미흡한 편이다. 따라서 본 연구에서는 가시화 및 전산연구를 뒷받침할 수 있는 공력측정에 관한 실험적 연구를 수행하여 두 쌍 날개의 풀런징 운동에 대한 공력 데이터를 획득하고자 한다. 또한 실제 잠자리의 경우 앞날개는 0° 의 불임각을 갖고 있는 반면에 뒷날개는 약 $5^\circ \sim 10^\circ$ 의 불임각을 가지고 있다. 본 연구에서는 앞·뒤날개 모두 0° 의 불임각을 갖는 잠자리 유형 플래핑 날개에 관한 연구를 수행하여 이미 수행되었던 0° 의 불임각을 갖는 한 쌍 플래핑 날개의 공력 연구와 비교·분석 하였다.

II. 본 론

2.1 모델 및 실험방법

<fig. 1>은 본 연구에서 사용된 잠자리 유형 날개의 실험 모델로 풍동 시험부에 장착된 모습을 보여주고 있다. 아음속 풍동의 제원은 시험부

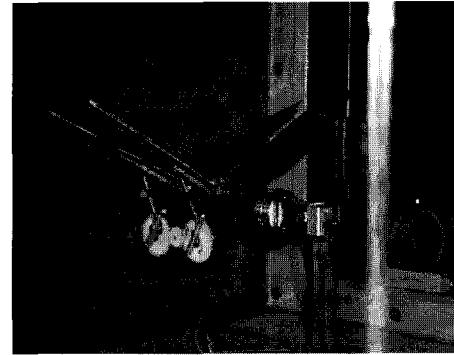


fig. 1 Dragonfly type model

의 크기가 $1.0\text{m}(폭) \times 1.0\text{m}(높이) \times 3.5\text{m}(길이)$ 이며, 최대풍속은 45.1 m/sec 이다. 시험부안에 장착된 모델의 날개는 실제 잠자리 날개를 약 3.5배 확대시킨 모델이며, 앞·뒤날개의 평균 시위는 각각 3.76cm , 5.35cm 이다. 날개의 진폭은 $+38^\circ \sim -38^\circ$ 로 상하대칭을 이루고 있으며, 날개를 구동시키는 기어와, 날개와 기어를 연결시켜주는 커넥팅로드를 사용하여 앞뒤 날개의 위상차를 변화시켜 줄 수 있도록 제작되었다. 또한 본 연구에 사용된 날개는 실제 잠자리의 날개를 모방하기 위하여, 날개의 재질은 알루미늄 중착 필름을 사용하였다. 날개의 골격을 유지하기 위해 2mm 의 탄소봉을 사용하여 앞전의 스파(spar) 역할을 수행하도록 하였으며, 앞전에서 뒷전 방향으로 1mm 의 탄소봉을 사용하여 뼈대를 유지하였다. Singh et al.[8]은 제자리 정지 비행을 하는 플래핑 날개에 관한 실험적 연구를 수행하였으며, 날개 뒷전의 프레임(frame) 유무에 따라서 추력의 변화가 생긴다는 결과를 도출하였다. 이러한 결과는 유연성의 효과로 추측할 수 있지만, 그 유연성의 정도는 측정하지 않았다. 본 연구에서도 날개의 유연성 정도는 구체적으로 측정하지 않았지만, 날개의 골격은 참고문헌 [4]에 제시된 바와 같다.

본 연구는 두 쌍 날개를 가진 잠자리 모델의 공력특성에 관한 연구로 자유흐름속도 1.43m/sec 에서 수행하였으며, 이를 근거로 한 레이놀즈수 $Re = 3.4 \times 10^3$ 이다. 실험은 무차원 진동수 $K=0.15$ 일 때 앞·뒤날개의 위상차가 0° , 90° , 180° 그리고 270° 의 경우에 대하여 조사하고, 위상차가 90° 인 경우 무차원 진동수를 0.15 , 0.30 , 0.45 로 바꾸어 가면서 총 7가지 경우에 관한 연구를 수행 하였다.

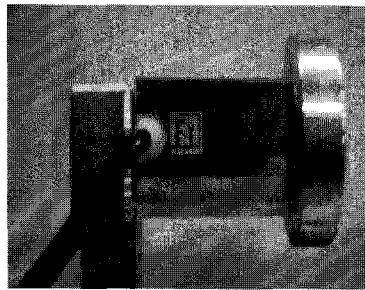


fig. 2 Load-cell

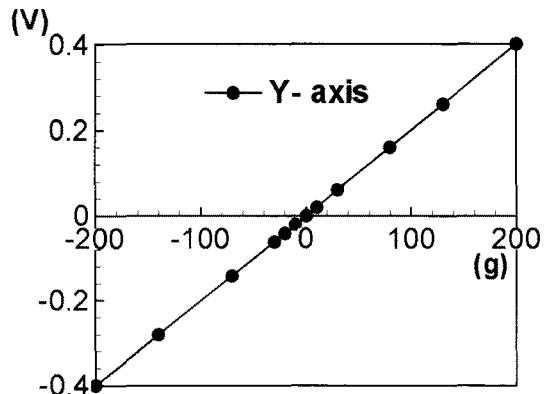


fig. 3 Calibration of load-cell

<fig. 2>는 모델에 작용하는 힘을 측정하기 위한 2축 로드 셀(load-cell)을 나타낸 사진이며, <fig. 3>은 로드 셀의 교정(calibration) 데이터를 보여주는 그래프로 선형성을 유지하는 것을 알 수 있으며, 이러한 로드 셀의 수직력(양력)에 대한 비선형성(non-linearity)은 약 0.014%이다.

<fig. 4>는 풍동 실험부에 장착된 잠자리 모델의 개략도로 앞날개뿐만 아니라 뒷날개도 불임각이 0°인 경우를 나타내고 있다. 로드 셀에 작용하는 Y-축 방향의 힘인 수직력은 불임각이 0°인 경우 날개에 작용하는 양력 성분과 같아진다. 따라서 본 연구에서 획득한 양력을 로드 셀에서 직접 측정한 값으로 사용하였다.

<fig. 5>는 모델에서 발생되는 힘을 데이터로 획득하기까지의 과정을 보여주는 그림으로 모델에서 측정된 힘은 10Hz 저역필터(low pass filter)가 장착된 증폭기(amplifier)를 통하여 National Instrument사의 데이터 획득시스템을 사용하였다. Fejtek and Nehera[6]는 플래핑 날개에 관한 공력 측정연구에서 노이즈(noise)제거를

위해 10Hz 저역필터를 사용하였다. 본 연구에서도 FFT(Fast Fourier Transform)변환을 통하여 10Hz 이후의 데이터는 노이즈라는 것을 확인하였고, 10Hz 저역필터를 사용하여 노이즈를 제거하였다. 또한 날갯짓 운동의 주기를 알아내기 위한 트리거 신호(trigger signal)는 모델을 구동시키는 기어에 레이저 신호를 보내 반대편에서 수신되는 순간에 5V의 전압이 흐르도록 하여 얻을 수 있었다. 그리고 잠자리 유형 모델의 날갯짓을 구동시키는 모터는 DC 전원 공급장치를 사용하였으며, 모델의 무차원 진동수를 변화시키기 위한 모터의 회전수는 DC 전원을 6.3~20.5V 범위로 변경시켰다.

<fig. 6>은 풍동에서 얻은 데이터와 진공챔버에서 얻은 데이터의 양상을 평균(ensemble average)을 보여주는 그래프이며, 그래프에서 데이터의 개수가 50회 이상부터 수렴하는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 데이터는 55회 양상을 평균값을 사용하였다.

<fig. 7>은 풍동에서 얻은 데이터, 진공챔버에

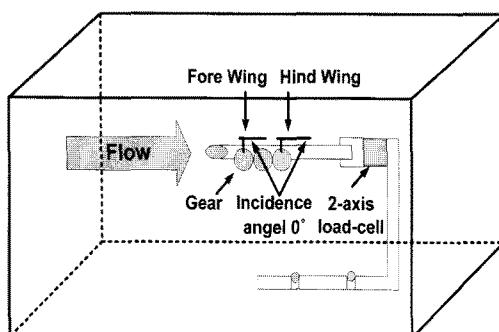


fig. 4 Schematic of Experimental set-up

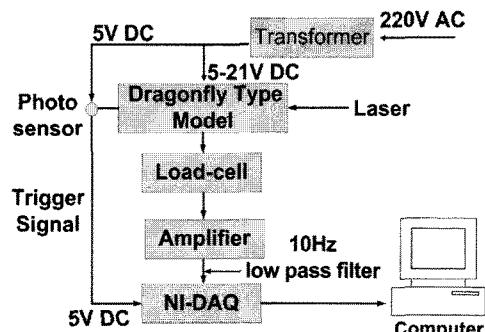


fig. 5 Data acquisition system

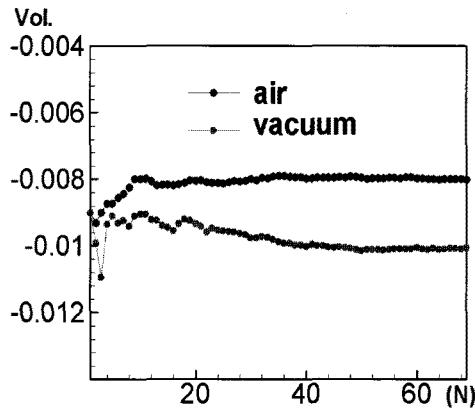


fig. 6 Ensemble Average

서 얻은 데이터, 그리고 풍동에서 얻은 데이터에서 진공챔버에서 얻은 데이터를 빼준 값 등을 나타낸 것이다. 따라서 본 연구에서 제시된 양력계수는 날개에 작용하는 순수한 공기력만을 나타낸 것이다. Singh 등[8]은 기계적으로 작동하는 플래핑 날개의 순수 공력을 측정하기 위해서는 관성력을 제거하여야 한다고 밝혔으며, 그들은 90% 진공상태에서 관성력을 제거하였다. 본 연구에서 사용된 진공챔버는 한국항공대학교 응용공기역학 연구실에서 설계하여 외주 제작한 장비로 99.99%의 진공상태를 유지할 수 있다.

본 연구에서와 같이 순수 공기력만을 얻기 위해서는 풍동에서 얻은 한주기 동안의 데이터 개수와 진공챔버에서 얻은 데이터 개수가 일치해야 한다. 이러한 데이터 개수를 일치시키기 위해 풍동에서 모델을 작동시키기 위한 전압과 진공챔버에서 모델을 작동시키기 위한 전압 사이에 전압 차이를 두어 조절하여야 한다. 이러한 이유는 진공챔버에서는 날개의 비틀림과 탄성굽힘 효과가 없기 때문이다.

2.2 결과 및 토론

본 연구는 $Re=3.4\times10^3$ 에서 불임각 0° 를 갖는 앞·뒤날개의 위상차와 무차원 진동수 변화에 따른 양력 데이터를 획득하기 위한 실험적 연구이다. 본 연구에서 획득된 공력데이터는 단 순한 플런징 운동만을 수행하는 2쌍의 날개를 갖는 모델에 관한 것이며, 이러한 데이터는 잠자리의 비행원리를 규명하기 위한 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것이다.

<fig. 8>은 무차원 진동수가 0.15일 때 위상차

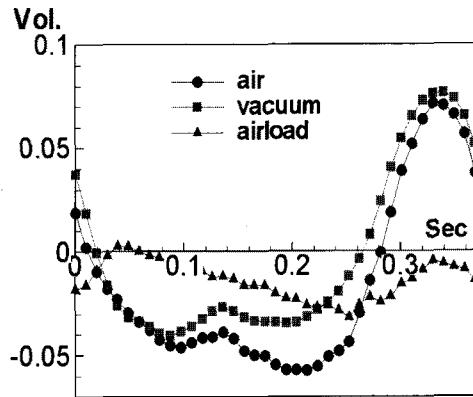


fig. 7 Airload

변화에 따른 한주기동안의 양력계수를 보여주는 그래프이다. <fig. 8>의 (a)는 위상차가 0° 일 때 한 주기 동안의 양력계수를 나타내고 있으며, 그 래프 아랫부분에 표시된 down, up 등은 한주기 동안 날개의 downstroke 운동과정, upstroke 운동과정을 나타낸다. <fig. 8>의 (a)는 앞·뒤날개의 위상차가 없기 때문에 앞뒤 날개 모두 같은 운동을 수행하고 있으며, 한주기 동안 날개가 downstroke 운동과정에서는 양력계수가 증가하고, upstroke 운동과정에서는 양력계수가 감소하는 경향을 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 모델은 단순히 플런징 운동만을 수행하기 때문에 날개의 upstroke 운동과정에서는 양력방향의 반대 방향으로 힘이 발생한다. 또한 downstroke 운동과정에서 양력계수가 증가하는 원인은 앞전와류의 재부착 현상 때문이며[10][11][12], 이러한 앞전와류의 재부착 현상은 이미 가시화 현상으로 밝혀진 바 있다[4][9]. 이외에도 공력 특성에 관한 연구에서도 이와 비슷한 현상이 발생함을 알 수 있었다. Fejtek and Nehera[6]는 플런징 운동을 수행하는 애어포일 날개에 관한 양력데이터를 획득하였다. 그들의 결과를 분석하여 보면, 날개의 downstroke 운동 중간지점에서 최대 양력이 발생하고 이후 양력계수가 감소하다 upstroke 중간지점에서 양력계수가 가장 낮게 나타나고 있다. 이것은 downstroke 운동 과정에서 날개 윗면에 앞전와류가 발생하고, upstroke 운동과정에서는 약하지만 날개 아랫면에서 앞전와류가 발생하기 때문이다. Kim and Chang[4]은 가시화 두 쌍 날개를 갖는 잠자리 모델의 가시화 연구로 앞전와류 현상을 관찰 하였으며, 또한 downstroke 운

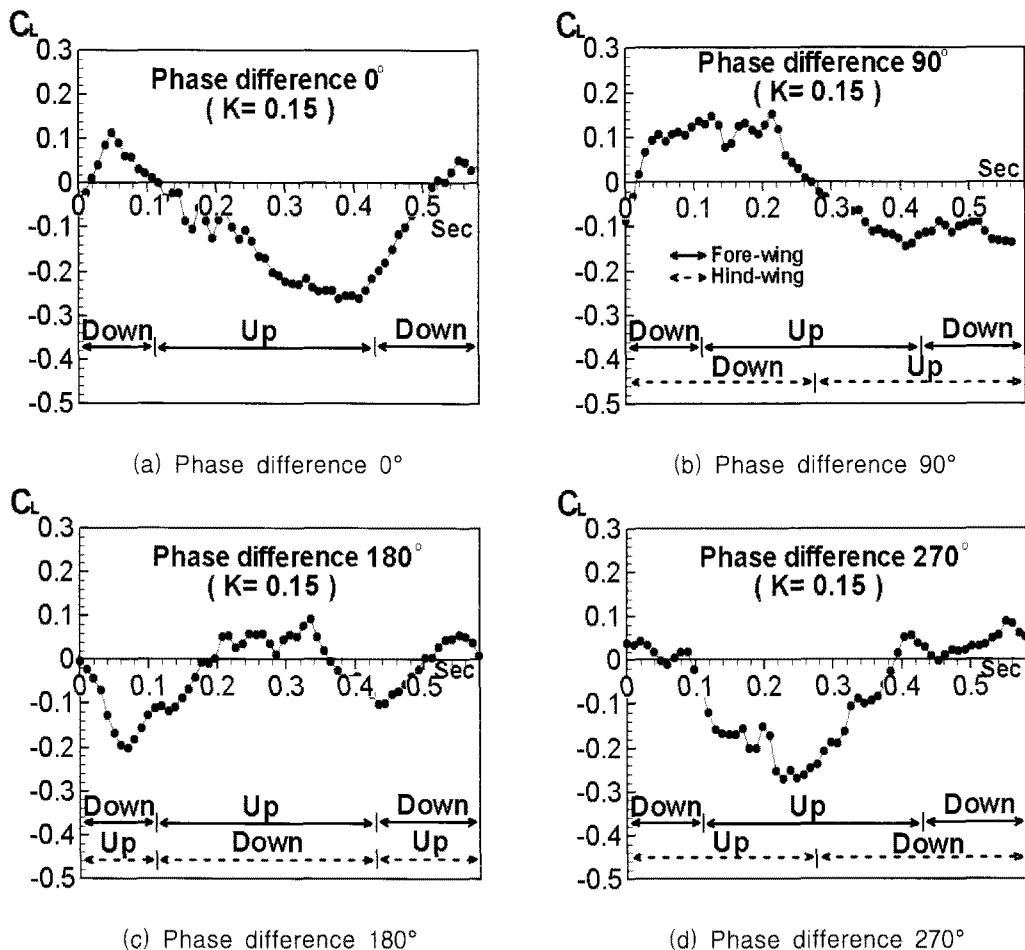


fig. 8. Lift coefficient of the dragonfly type wing with incidence angle 0°

동 중간 지점에서 가장 큰 앞전와류의 발생을 관찰 한 바 있다.

<fig. 8>의 (b)는 위상차 90° 인 경우 한주기 동안의 양력계수의 변화를 보여주는 그래프이다. 앞 · 뒤날개 위상차 0° 인 경우와는 달리 앞날개가 upstroke 운동과정에서도 양력계수는 증가하고 있다. 이것은 비록 앞날개가 upstroke 운동과정에 있어도 뒷날개는 downstroke 운동과정중이기 때문이다. 본 연구에서 사용된 모델은 실제 잠자리 날개를 약 3.5배 확대시킨 모델로 뒷날개가 앞날개보다 크게 제작되어졌다. 따라서 뒷날개에서 발생된 양력성분이 앞날개에서 발생된 양력반대 방향의 성분보다 크기 때문에 양력계수가 계속 증가하고 있는 원인이 된다. 앞날개와 뒷날개 모두 upstroke 운동과정에서는 양력계수가 감소하고 있으며, 앞날개가 downstroke 운동과정을 시작하는 부분에서 다시 양력계수가 증가하는 경향을 보이다가 앞뒤 날개가 동시에 downstroke

운동을 하면 양력계수가 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다.

<fig. 8>의 (c)는 앞 · 뒤날개 위상차 180° 인 경우 한주기동안의 양력계수를 나타내고 있다. 위상차 180° 의 경우에는 앞날개가 upstroke 운동일 경우 뒷날개는 downstroke 운동과정을 앞날개가 downstroke 운동과정일 경우에는 뒷날개는 upstroke 운동과정을 보이면서 서로 상반된 운동과정을 보이고 있다. 이러한 과정에서 발생하는 결과를 살펴보면 날개의 면적이 큰 뒷날개가 downstroke 운동과정일 때 양력계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 날개의 downstroke 운동과정의 끝 부분에서는 Fejtek and Nehera[6]의 결과처럼 양력 계수가 감소하는 경향을 보이고 있는데 이것은 날개의 각속도와 연관이 있다. 기어와 커넥팅로드에 의해 움직이는 날개는 각 stroke 끝 부분에서 날개의 각속도가 가장 작고, 중간 지점에서 각속도가 가장 크다. 따라서

stroke 중간지점에서 가장 큰 앞전와류가 발생된다[4]. 본 연구와 마찬가지로 Fejtek and Nehera의 연구[6]에서 사용된 날개도 단순한 플런징 운동이지만, 실제 잠자리의 경우는 downstroke운동과정의 끝 부분에서 양력이 증가하지 않으므로 피칭운동을 통하여 받음각을 증가시키는 것으로 알려져 있다.

마지막으로 <fig. 8>의 (d)는 위상차 270°인 경우 한주기동안의 양력계수를 나타내는 그래프이다. 이 경우는 위상차 90°인 경우처럼 양력계수가 한번 씩 증가·감소하고 있다. 이러한 현상은 위상차 90°의 경우처럼 뒷날개가 downstroke 운동을 하면 양력계수는 증가하고, 뒷날개가 upstroke 운동을 하면 양력계수는 감소하는 특징을 나타낸다. 그러나 효율적인 측면에서는 위상차 90°인 경우가 270°인 경우보다 우수한 것으로 나타나고 있다.

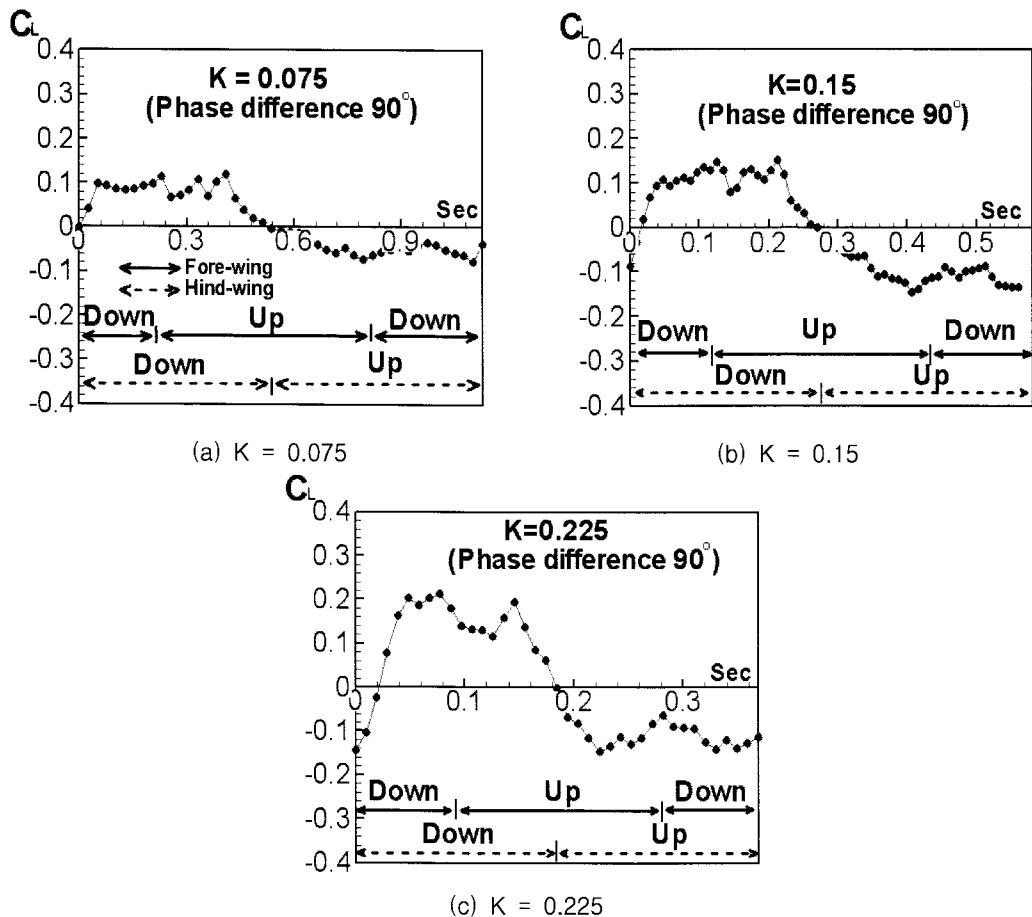
<fig. 8>의 (a), (b), (c), (d) 그래프에 대해서 한주기 동안의 양력계수 값의 크기를 조사하였다. 그 결과 <fig. 8>의 (a)는 -0.052, (b)는 -0.005, (c)는 -0.015, (d)는 -0.031로 나타나고 있다. 실제 한주기 동안 발생된 양력성분의 크기는 아주 작은 값으로 나타나고 있는데, 이러한 원인은 크게 2가지 경우로 나눌 수 있다. 첫 번째는 앞·뒤날개의 불임각이 0°인 날개의 운동특성 때문이다. 본 연구는 자유흐름속도가 있고, 플런징 운동을 수행하는 날개에 대한 양력성분을 측정한 연구이다. 따라서 upstroke 운동과, downstroke 운동이 서로 상하 대칭적으로 운동하기 때문에 양력 성분과 양력 반대 방향의 성분이 서로 비슷하게 발생한다. 두 번째는 날개의 탄성효과이다. 본 연구에서 사용된 날개표면의 재질은 알루미늄 중착필름을 사용하였고, 뼈대는 단소봉을 사용하였다. 따라서 날개의 진동수에 따라 날개는 유연성(flexibility)이 존재한다. 이러한 유연성은 상하 대칭적으로 운동하는 날개를 비대칭성으로 만들어 줄 수가 있다. 이러한 두 가지 이유 때문에 한주기 동안 발생된 양력 성분은 정확히 0이 아니고 약간의 값을 갖게 된다.

또한 <fig. 8>의 4가지 경우에 대하여 실제 양력이 발생하는 downstroke 운동과정에서 발생된 양(+)의 양력계수만의 면적을 계산하여 한주기동안의 양력계수의 값을 조사하였다. <fig. 8>의 (a)는 0.0073, (b)는 0.0247, (c)는 0.0109 (d)는 0.0099이다. 이와 같이 계산된 결과를 분석하면 위상차가 90°인 경우에 양력계수가 가장 큰 것을 알 수 있고, 위상차가 0°인 경우에 양(+)의 양력

계수의 크기가 가장 작은 것을 알 수 있다. 그러나 <fig. 8>의 4개의 그래프를 모두 살펴보면, 한주기 동안 순간적인 최대 양력계수는 위상차가 90°인 경우가 가장 크며, 그 다음 위상차가 0°인 경우로 나타나고 있다. <fig. 8>의 (a)와 (b)의 그래프를 살펴보면, (b)의 경우는 뒷날개가 downstroke 운동을 중에 발생하는 양(+) 방향의 양력계수가 시간에 따라서 어느 정도 일정한 반면에, (a)의 그래프는 양력계수가 일정하지 않고, 날개가 downstroke 운동을 할 때 양력계수가 급격하게 증가하는 경향을 볼 수가 있다. Alexander[1]은 실제 잠자리의 경우 일반적으로 90°의 위상차로 비행을 하면서 순간적인 방향전환이나 급 전진비행 중에는 위상차가 없는 비행을 한다고 밝힌 바 있다. 이와 같이 본 연구의 결과에서 두 가지 경우에 대하여 분석을 하면, 지속적인 양력을 필요로 하는 경우 즉 일반적인 비행을 하는 경우에는 90°의 위상차로 비행을 하고, 순간적인 힘을 필요로 할 때에는 위상차가 0°인 비행을 수행한다고 예측할 수 있다.

<fig. 9>는 위상차 90°인 경우에 대하여 무차원 진동수 $K=0.075, 0.15, 0.225$ 로 증가할 때 한주기 동안 양력계수를 나타내는 그래프이다. <fig. 8>의 그래프에서 큰 양력계수를 갖는 앞·뒤날개 위상차 90°인 경우에 대하여 무차원 진동수의 효과를 알아보기 위해 연구를 수행하였다. <fig. 9>의 (a), (b), (c)의 그래프는 3가지 모두 그래프의 형태는 비슷하지만 최대양력계수가 다른 것을 알 수 있다. 즉 무차원 진동수 K 가 0.075에서 0.225로 증가할수록 최대 양력계수가 증가하는 것을 관찰 할 수 있다. 양력발생의 원인인 앞전와류의 재부착 현상이 무차원 진동수가 증가할수록 그 효과가 더 크게 발생한다는 것을 예측할 수 있으며, 이는 Kim and Chang[4]의 잠자리 유형 날개의 무차원진동에 대한 가시화 연구에서도 잘 나타나고 있다. 그들은 무차원 진동수가 증가할수록 앞전와류의 재부착 현상이 확대되며, 이러한 재부착 현상이 확대되는 원인은 플래핑 날개의 날갯짓 진동수가 증가할수록 날개 주위의 유액선(streak line)이 휘어지는 각도가 커지기 때문이라고 설명하였다. 또한 플런징 운동만을 적용한 Vest and Katz[7]의 연구에서도 무차원 진동수가 증가 할수록 최대 양력계수가 증가하는 결과를 제시한 바 있다.

<fig. 9>의 3가지 경우에 대하여 한주기 동안의 양력계수의 크기를 조사하였다. 그 결과 <fig. 9>의 (a)는 0.013, (b)는 -0.005, (c)는 0.000 이다.

fig. 9. Lift coefficient of the dragonfly type wing with incidence angle 0°

역시 <fig. 8>의 경우처럼 잠자리 유형 날개의 불임각이 0° 인 경우 상하 대칭운동을 수행 하는 데에도 불구하고, 정확히 0이 아니고 약간의 값을 갖게 된다. 이것은 이미 앞에서 설명한 바와 같이 한주기 동안 발생된 양력 성분은 날개의 탄성효과와 풀린징 운동을 수행하는 날개의 특성 때문이다. 또한 <fig. 9>에서 실제 양력이 발생하는 downstroke 운동과정에서 발생된 양(+)의 방향 양력계수 부분의 면적을 계산하여 한주기동안의 양력계수의 크기를 비교하였다. 역시 음(-)의 방향 양력계수는 계산에서 제외 하였다. 한주기 동안 계산된 결과를 살펴보면 <fig. 9>의 (a)는 0.0396, (b)는 0.0247, (c)는 0.0231의 결과 값을 얻었으며, 이와 같은 한주기 동안 발생한 양력성 분은 무차원 진동수가 증가 할수록 오히려 감소하는 경향을 알 수 있다. 이것은 <fig. 9>의 3가지 그래프에서 나타나듯이 무차원 진동수가 증가 할수록, 주기가 짧아지기 때문이다. 다시 말하면,

<fig. 9>의 (a)는 주기가 약 1.12초, (b)는 0.56초, (c)는 0.37초이다. 이 값을 비교하기 위해 일정한 단위시간(1초)당 발생된 양력계수의 값을 구해보면, (a)는 0.0354, (b)는 0.0442, (c)는 0.0620으로 무차원 진동수가 증가할수록 단위시간당 양력계수는 증가한다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 앞·뒤날개의 불임각이 0° 의 잠자리 유형 날개에서 위상차와 무차원 진동수에 따른 효과에 대해 연구를 수행한 결과, 무차원 진동수가 일정하고 위상차를 변화시킨 경우에 음(-)의 값을 제외한 한주기 동안의 양력계수값은 앞·뒤날개의 위상차가 90° 인 경우에 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 앞·뒤날개의 위상차를 고정하고 무차원 진동수를 변화시킨 경우에 최대 양력계수는 무차원 진동수가 증가할수록 증가하는 경향을 나타낸다. 이것은 무차원 진동수가 증가할수록 앞전와류의 재부착 현상이 확대되고 뚜렷하게 나타나기 때문이다[4].

III. 결 론

본 연구에서는 $Re=3.4\times10^3$ 에서 불임각 0° 의 두 쌍 날개를 갖는 잠자리 앞·뒤날개의 위상변화 ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$)와 무차원 진동수 변화 ($K=0.075, 0.15, 0.225$)에 따른 비정상 양력 성분을 로드 셀을 이용하여 측정하였다.

앞·뒤날개 불임각이 모두 0° 인 잠자리 유형 모델의 한주기 동안의 양력을 날개가 상하 대칭 운동을 수행하는 데에도 불구하고 한주기 동안의 양력을 계산한 값이 정확히 0이 아니고 약간의 값을 갖게 된다. 이것은 한주기 동안 발생된 양력 성분은 날개의 탄성효과와 플런징 운동을 수행하는 날개의 특성 때문이다.

또한 잠자리 유형 날개에서의 비정상 양력은 downstroke 운동과정에서 앞전와류의 재부착 현상으로 인해 발생한다. 이와 같이 양력이 발생하는 downstroke 운동과정에서 발생된 양(+)의 방향 양력계수 부분의 면적을 계산하여 한주기동안의 양력계수의 값을 조사한 결과 앞·뒤날개의 위상차가 90° 인 경우에 한주기 동안 가장 큰 양력계수가 발생하였다. 이외에도 앞·뒤날개의 위상차가 90° 로 일정하고 무차원 진동수를 변화시킨 경우에는, 최대 양력계수 뿐만 아니라 단위시간당 양(+)의 양력계수도 무차원 진동수 $K=0.075, 0.15, 0.225$ 로 증가 할수록 증가하는 경향을 알 수 있었다.

향후 앞날개는 0° , 뒷날개는 약 $5^\circ\sim10^\circ$ 의 불임각을 갖는 실제 잠자리처럼 뒷날개가 불임각이 있는 경우에 대한 연구를 수행할 것이다.

후 기

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 선도 연구자 지원(KRF-2004-041-D00145)에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

1) Alexander, D.E., "Unusual phase relationship between the forewings and hindwings in flying dragonflies," Journal of Experimental Biology, Vol. 109, 1984, pp. 379-383.

2) Saharon, D. and Luttges, M. W., "Visualization of unsteady separated flow produced by mechanically driven dragonfly wing kinematics model," AIAA paper, 88-0569.

3) 김현석, 김송학, 장조원, "잠자리 날개의 위상차에 대한 가시화 연구," 한국추진공학회지, 제8권 제4호, 2004, pp. 43-54.

4) 김송학, 장조원, "잠자리유형 날개의 무차원 진동수에 따른 가시화 연구," 한국가시화정보학회지, 제2권 제2호, 2004, pp. 59-65.

5) Okamoto, M., Yasuda, K. and Azuma, A., "Aerodynamic characteristics of the wings and body of a dragonfly," Journal of Experimental Biology, Vol. 199, 1996, pp. 281-294.

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

7) Vest, M. S., and Katz, J., "Aerodynamic study of a flapping-wing Micro-UAV," AIAA paper, 99-0994.

8) Singh, B., Ramasamy, M., Chopra, I. and Leishman, J. G., "Insect-based flapping wings for micro hovering air vehicles: experimental investigations," American Helicopter Society International Specialists Meeting on Unmanned Rotorcraft, 2005.

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

10) Dickinson, M. H. and Gotz, K. D., "Unsteady aerodynamic performance of model wings at low Reynolds number," Journal of Experimental Biology, Vol. 174, 1993, pp. 45-64.

11) Sunada, S., Kawachi, K., Watanabe, I. and Azuma, A., "Fundamental analysis of three-dimensional 'near fling,'" Journal of Experimental Biology, Vol. 183, 1993, pp. 217-248.

12) Willmott, A. P., Ellington, C. P. and Thomas, A.L.R., "Flow visualization and unsteady aerodynamics in the flight of the hawkmoth, Manduca sexta," Phil. Trans. R. Soc. Land. Vol. 352, 1997, pp. 303-316.