

## 論文

## 잠자리 유형 모델의 앞·뒤 날개 위상차에 대한 공력연구

김송학\*, 장조원\*\*, 송병흠\*\*

Aerodynamic Study on Phase Difference of Fore-and Hind-wing  
of a Dragonfly-type Model

Song-Hak Kim\*, Jo-Won Chang\*\* and Byung-Heum Song\*\*

## ABSTRACT

Unsteady aerodynamic force measurements were carried out in order to investigate the effects of phase difference of a dragonfly-type model with two pairs of wing. A load-cell was employed to measure the aerodynamic force generated by a plunging motion of the dragonfly-type model. The dragonfly-type model has a dynamic similarity with real one, and incidence angles of fore- and hind-wing are  $0^\circ$  and  $10^\circ$ , respectively. Other experimental conditions are as follows: The freestream velocity was 1.6 m/sec and corresponding chord Reynolds number was  $2.88 \times 10^3$ , and phase differences of fore- and hind-wing were  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  and  $270^\circ$ . The variation of aerodynamic coefficients during one cycle of the wing motion is presented. Results show that the lift is generated during the downstroke motion and the drag generated during the hind-wing's downstroke motion with the lift generation.

## 초 록

비정상 공기력 측정이 두 쌍의 날개를 갖는 잠자리 유형 모델의 위상차에 따른 효과를 조사하기 위하여 수행되었다. 잠자리 유형 모델의 플러징 운동에 의하여 발생된 공기역학적 힘을 측정하기 위하여 로드셀을 사용하였다. 본 잠자리 유형 모델은 실제 잠자리와 동역학적으로 상사하며, 앞·뒤날개는 각각  $0^\circ$ 의  $10^\circ$ 의 불임각(incidence angle)을 가지고 있다. 다른 실험 조건은 다음과 같다. 자유류의 속도는 1.6 m/sec이고, 이와 관련된 시위 레이놀즈수  $2.88 \times 10^3$ 이며, 앞·뒤날개의 위상차는 각각  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ , 그리고  $270^\circ$ 이다. 잠자리 유형 날개의 한 주기 동안 공기역학적 계수의 변화가 제시되었다. 연구 결과는 잠자리 유형 모델의 양력은 앞·뒤날개가 downstroke 운동을 수행할 때 발생되며, 뒷날개가 downstroke 운동과정을 수행하면 양력 발생과 함께 항력도 발생한다는 것을 보여준다.

**Key Words** : flapping(플래핑), dragonfly(잠자리), incidence angle(불임각), lift(양력), drag(항력), phase difference(위상차)

## I. 서 론

고정된 날개에서 양력을 발생시키는 항공기와 달리 새나 곤충들은 플래핑 운동(flapping motion)을 통하여 추력과 양력을 발생시켜 비행을 한다. 일반적으로 플래핑 운동은 플러징 운동과, 피칭

† 2006년 6월 1일 접수 ~ 2006년 8월 16일 심사완료

\* 정희원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\* 정희원, 한국항공대학교 항공운행학과  
연락처자, E-mail : jwchang@hau.ac.kr  
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

운동이 복합적으로 발생하는 운동 메커니즘으로, 플레핑 운동에 관한 연구를 수행하기 위해 관심을 갖은 모델은 주로 초파리, 나방처럼 한 쌍 날개를 갖는 작은 곤충이었다. 이러한 곤충들에 관한 연구를 수행하기 시작한 연구 초기에는 주로 날개의 연결근육조직 같은 생물학적 연구가 주류를 이루었으며, 그 후 공기역학적인 연구가 시작되었다. 공기역학적인 연구과정은 초파리 타입의 작은 곤충들의 제자리 비행(hovering)에 관한 연구와 더불어, 에어포일 또는 곤충보다 크기가 큰 새들의 전진비행에 관한 연구가 수행되고 있다.

초기에 시작된 플레핑 운동에 관한 연구는 모델 제작의 어려움으로 인해 유속이 있는 상태에서의 플러징 운동을 수행하는 연구였다. Fejtek 와 Nehera[1]는 플러징 운동을 수행하는 에어포일 (NACA 8331)에 관한 연구를 수행하였다. 그들은 날개가 downstroke 운동 중간과정에서 가장 큰 양력과 추력이 발생한다는 사실을 공력측정을 통하여 밝혔다. Dickinson 과 Gotz[2]는 13.5°의 받음각을 갖는 플레핑 날개는 순간적인 움직임으로 인해 앞전와류(leading-edge vortex)가 발생하며, 이러한 앞전와류는 재부착 되는 위치에 따라 양력 성분의 크기가 달라진다고 하였다. Willmott 등[3]은 날개 와류가 발생하는 앞전과 재부착 되는 뒷전 사이에 분리기포가 존재하며, 이러한 분리 기포는 날개의 유효캠버를 증가시킨다고 설명하였다. 날개의 유효캠버가 증가하면, 날개 윗면의 속도는 증가하고 날개 아랫면의 속도는 감소하여 양력이 발생하는 원리이다. Van den Berg 와 Ellington[4]은 플레핑 운동을 하는 날개에서는 downstroke 운동과정에서 앞전와류의 재부착 현상이 발생한다는 것을 연선-가시화(smoke-wire visualization) 기법으로 밝혔으며, Liu 등[5]은 나방의 제자리 비행(hovering)에 관한 연구에서 나방 날개는 downstroke 운동을 수행할 때 양력이 발생된다는 사실을 전산연구를 통하여 밝혔다. 이처럼 한 쌍 날개에 대한 플러징 운동과 플레핑 운동에 관한 연구는 활발히 진행되어져 왔다.

잠자리처럼 두 쌍 날개를 갖는 플레핑 날개에 대한 연구는 상당히 미흡한 편이다. 두 쌍 날개를 갖는 잠자리의 연구에 있어 초기에는 날개의 운동메커니즘에 초점이 맞추어져 있었으며, 이를 바탕으로 공력연구가 진행 중에 있다. Alexander [6]는 잠자리의 앞·뒤날개에 대한 위상차에 따라 비행 상태가 다른 것에 대해서 연구를 수행하였다. 급격한 방향전환이나 빠른 속도로 비행을 하는 경우에는 앞·뒤날개의 위상차가 없이, 즉

앞·뒤날개를 동시에 움직이며, 일반적인 비행을 하는 경우에는 앞·뒤날개의 위상차 90°로 비행을 한다고 설명하였다. 또한 제자리 비행시에는 180°의 위상차를 두고서 비행을 한다고 밝혔다. 이처럼 한 쌍 날개를 갖는 초파리와는 달리 두 쌍 날개를 갖는 잠자리는 앞·뒤날개의 움직임에 따른 유동특성을 이용하기 위해 날개의 위상차를 바꾸어 가며 비행을 수행한다.

Kim 등[7]은 앞·뒤날개의 위상차에 따른 잠자리 모델의 가시화 연구를 수행하였다. 그들은 0°, 90°, 180° 그리고 270°의 총 4가지 경우에 해당하는 위상차에 대한 가시화 연구를 수행하였으며, 위상차가 180°인 경우에 앞날개에서 Karman vortex의 구조가 가장 잘 관찰된다고 밝혔다. 이러한 와류의 구조는 추력 또는 항력의 원인이 된다. 이어서 Kim and Chang[8]은 잠자리 모델의 공력측정에 관한 연구를 수행하였다. 그들은 앞날개, 뒷날개 모두 붙임각이 없는 모델에 대한 양력 성분을 측정된 결과, 위상차 0°에서는 downstroke 운동과정 중간에서 양력이 최대로 증가하며, upstroke 운동과정 중간에서 양력이 가장 작게 발생한다는 사실을 얻었다. 이러한 결과는 Fejtek 와 Nehera의 연구 결과[1]와 상당히 흡사하다. 붙임각이 없는 날개에서 upstroke 운동과 downstroke 운동과정에서 발생되어지는 양력 성분이 상하 대칭적으로 발생한다는 사실을 알 수가 있었다. 그러나 실제 잠자리는 앞날개는 붙임각이 없는 반면에 뒷날개는 약 5~10°의 붙임각을 갖고 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 잠자리처럼 뒷날개의 면적이 더 크고 앞날개는 0°, 뒷날개는 10°의 붙임각을 갖는 두 쌍의 날개를 갖는 잠자리 유형 모델의 앞·뒤날개 위상차에 따른 효과를 조사하기 위하여 공력측정 연구를 수행하였다.

## II. 본 론

### 2.1 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 잠자리 유형 모델의 앞·뒤날개 위상차에 대한 공기력을 측정하기 위해 사용된 모델의 앞·뒤날개 형상 및 구조를 보여주는 그림이다. 앞·뒤날개의 평균 시위는 각각 0.027m, 0.037m이며, 앞·뒤날개의 최대로 가까운 거리는 0.01m이다. 날개의 앞전부분과 앞전에서 뒷전 방향으로 1mm 카본 봉을 사용하여 뼈대를 유지하였으며, 날개 표면은 알루미늄 증착필름을 사용하였다. 날개는 실제로 유연성이

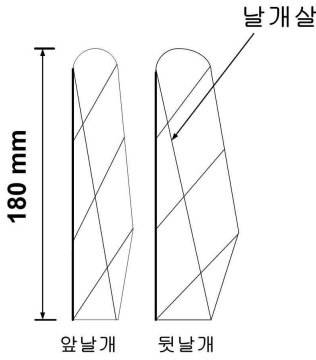


Fig. 1. Wing shape and structure

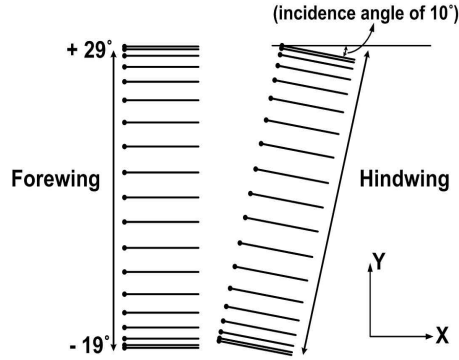


Fig. 3. Schematics of wing motion



Fig. 2. Dragonfly type model

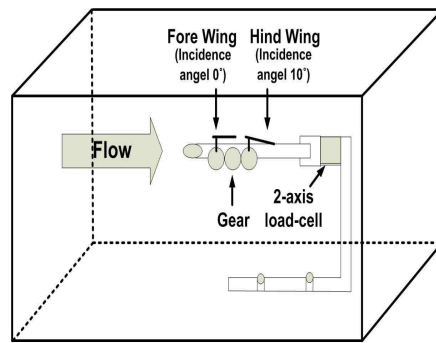


Fig. 4. Schematics of Experimental set-up

있으며, 유연성으로 인한 양력 또는 추력이 증가하는 효과가 발생하게 된다. Singh 등[9]은 플레핑 운동을 하는 날개에 대한 공력 실험을 수행하였으며, 날개 뒷전의 프레임(frame)의 유무에 따라서 추력의 변화가 생긴다는 결과를 도출하였다. 그들은 상기와 같은 결과를 날개의 유연성의 효과로 추측하였음에도 불구하고 유연성 정도는 측정하지 않았다. 본 연구에서도 날개의 유연성 정도는 측정하지 않았으며, 향후 연구를 수행해야 할 항목으로 생각된다.

Fig. 2는 아음속 풍동내부에 장착된 모델을 나타내는 사진이다. 풍동의 제원은 시험부의 크기가 1.0m(W) × 1.0m(H) × 3.5m(L)이며, 최대풍속은 45.1m/sec이다. 풍동 시험부 안에 장착된 잠자리 유형 모델은 실제 잠자리 크기를 약 3배 정도의 일정한 비율로 확대하였으며, 앞날개와 뒷날개의 붙임각도 실제 잠자리와 마찬가지로 유동 방향에 대하여 0°, 10°로 장착하여 기하학적 유사성을 갖도록 하였다. 또한 본 실험 모델은 실제 잠자리의 레이놀즈 범주( $2.0 \times 10^3 \sim 8.0 \times 10^3$ )내에서 실험을 수행함으로써 동역학적 유사성을 유지시켰다. 본 실험을 수행한 자유흐름속도는 1.6

m/sec이며, 이를 근거로 한 시위길이에 대한 레이놀즈수는  $Re=2.88 \times 10^3$ 이다. 또한 날갯짓 진동수는 4.2Hz이며, 이를 근거로 한 무차원 진동수 K는 0.225이고 전진비(advance ratio) J는 0.88이다. 또한 자유흐름속도 1.6m/sec는 ±3.13%의 오차를 수반하고 있다.

Fig. 3은 잠자리 유형 날개의 운동 메커니즘을 보여주는 그림으로 날개는 +29.0° ~ -19.0° 까지 작동하며, 앞날개와 뒷날개의 진폭은 각각 48°이다. 이러한 날개는 피칭운동을 수행하지 않고 단순히 구동축을 중심으로 상하운동만을 수행하는 모델이다.

Fig. 4는 풍동 시험부에 장착된 실험장치의 개략도로 자유흐름방향과 날개의 붙임각을 나타내고 있다. 본 연구에서의 실험모델은 앞날개는 0°의 붙임각, 뒷날개는 약 10°의 붙임각을 갖는다. 또한 본 연구에서는 자유흐름방향을 음(-)의 X축으로 정하고, X축에 수직인 방향을 Y축으로 정의하였다. 앞날개에 작용하는 수직력은 로드셀에 작용하는 Y축방향의 힘으로 직접 측정할 수 있으며, Y축 방향의 힘을 양력으로 정의하였다.

Fig. 5는 본 연구에서 모델에 작용하는 공기력

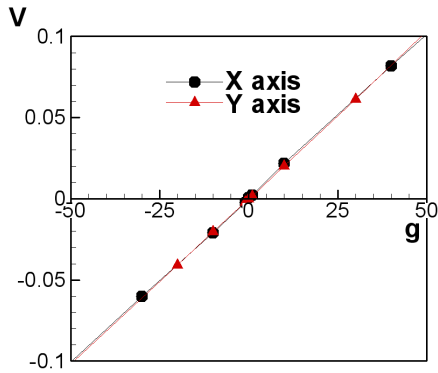


Fig. 5. Calibration of load-cell

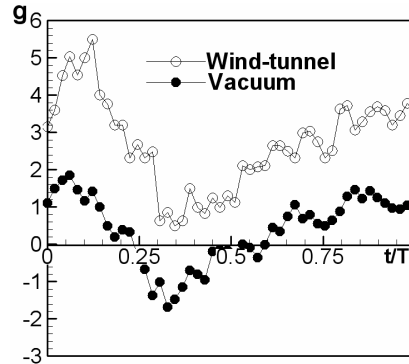


Fig. 7. load in wind tunnel and vacuum

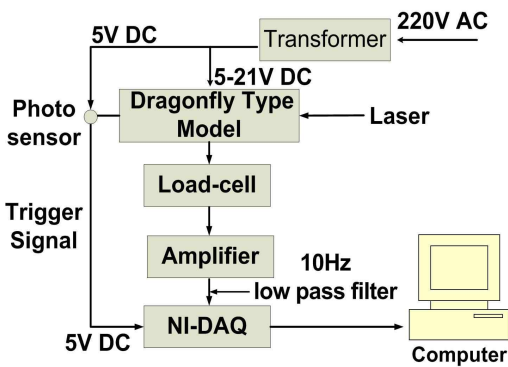


Fig. 6. Data acquisition system

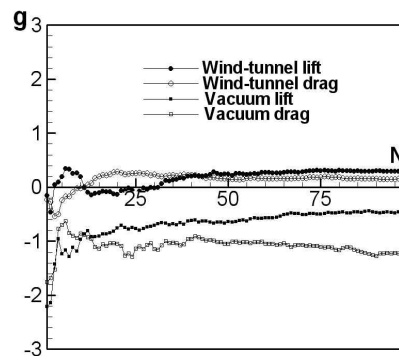


Fig. 8. Ensemble average

을 측정하기 전에 수행된 로드셀의 교정(calibration) 결과를 나타내는 데이터이다. 로드셀의 X축 방향 축력과 Y축 방향 수직력과의 상호 간섭오차는 각각 0.58%와 2.40%이다.

Fig. 6은 모델에 발생하는 공기력을 획득하기까지의 과정을 보여주는 블록선도로 모델에서 측정된 힘은 10Hz 저역필터(low pass filter)가 장착된 증폭기(amplifier)를 통하여 데이터를 획득하였다. 또한 날갯짓 운동의 주기를 찾기 위해 트리거 신호(trigger signal)를 사용하였다. 이것은 모델을 구동시키는 기어에 레이저 신호를 보내 모델의 반대편에서 수신되는 순간에 5V의 전압이 흐르도록 하여 신호를 얻는 방법이다.

Fig. 7은 순수공기력을 얻기 위하여 측정한 결과를 나타내는 그래프로, 각각 풍동에서 얻은 데이터 및 진공챔버에서 얻은 데이터 값을 나타낸다. 본 연구에서 사용된 모델은 기어, 모터 그리고 커넥팅로드로 만들어진 모델이므로 모델이 작동하게 되면 관성력이 발생된다. 이러한 관성력을 제거하고 순수 공기력만을 얻기 위하여 진공 챔버에서 실험을 수행하여야 한다. 본 연구에서

제시한 순수 공기력 데이터는 풍동에서 얻은 데이터에서 진공챔버에서 얻은 데이터 값을 차감하여 구한 값이다.

Singh 등[9]은 기계적으로 작동하는 플래핑 날개의 순수 공기력을 측정하기 위해 90% 진공상태에서 관성력을 제거하였다. 본 연구에서 사용된 진공챔버는 한국항공대학교 응용공기역학 연구실에서 자체 설계하여 외주 제작한 장비로 99.99% 진공상태를 유지할 수 있다. 본 연구는 이러한 진공챔버 속에서 관성력 측정실험을 수행하였다. Fig. 7의 데이터를 비롯한 본 실험을 통하여 획득된 데이터는 진공상태에서 측정한 데이터에서 조차도 변동이 심하게 나타난다. 이것은 주로 날갯짓 구동장치의 진동에 의해 유발된 것으로 추정되며, 이외에도 힘을 측정하는 로드셀의 측정 범위에 비해 실제 측정되는 힘의 크기가 너무 작기 때문이라 생각된다.

Fig. 8은 진공 챔버와 풍동에서 얻은 데이터의 앙상블 평균(ensemble average)을 보여주는 그래프이다. 그래프에서 데이터의 개수가 95회 이상부터 수렴하는 것을 볼 수 있으며, 본 연구에서

사용된 데이터는 95회 앙상블 평균값을 사용하였다.

2.2 결과 및 토론

Fig. 9의 (a)와 (b)는 앞·뒤날개 위상차 0°에서 각각 한주기 동안 날개위치각도와 공력계수를 보여준다. Fig. 9 (a)에서 단지 하나의 곡선만 나타난 것은 위상차 0°에서 앞·뒤날개의 위상차가 나지 않고 겹쳐졌기 때문이며, 이러한 두 쌍의 날개를 갖는 모델의 공력특성은 플러징 운동을 수행하는 단일 날개의 공력특성과 아주 유사하다. 그래프에서 시간을 무차원화 시킨  $t/T=0$  즉 그래프의 시작점은 날개가 downstroke운동 중일 때 중간과정에 있는 위치이다.

Fig. 9 (b)의 그래프를 살펴보면,  $t/T=0$  부근에서 양력계수가 가장 큰 것을 확인할 수가 있다. 이것은 날개가 downstroke운동 과정을 수행할 때에 앞날개의 앞전에서 발생한 앞전와류가 뒷날개의 뒷전 부근에서 재부착 현상이 이루어지면서 날개의 유효캠버를 증가시키기 때문이다[2][3][4]. Kim and Chang[8]은 뒷날개의 불임각이 없는

잠자리 유형 모델의 공력특성에 관한 연구를 수행하였다. 그들은 앞·뒤날개의 위상차가 0°인 경우, 날개의 downstroke운동 과정에서 양력이 증가하고 날개의 upstroke 운동과정에서 양력이 감소하는 데이터를 획득하였다. 그들이 발표한 데이터는 Fig. 9 (b)에 인용된 바와 같이 본 연구 결과와 아주 유사한 경향을 갖고 있으나 절대값의 크기는 서로 다르다. 또한 Fejtek and Nehera[1]은 자유흐름속도가 있고, 에어포일 날개가 플러징 운동을 수행하는 경우 날개가 downstroke운동 중간지점에서 가장 큰 양력과 추력이 발생한다고 하였다. 그러나 본 연구에서는 양력과 항력이 동시에 증가하는 경향을 확인할 수가 있는데 이것은 뒷날개의 불임각 10°에 의한 것으로 추정된다. 양력이 발생하는 현상은 날개가 downstroke운동과정을 수행할 때 날개 윗면에서 발생한 앞전와류의 재부착 현상 때문인데, 불임각을 가진 뒷날개에서는 앞전와류의 재부착 현상이 기울어지게 된다[10]. 따라서 양력성분이 자유흐름 방향에 수직방향으로 발생하지 않고 뒷날개의 불임각에 수직방향으로 발생하게 된다. 이러한 힘이 자유흐름방향에 수직방향 성분과 평행방향 성분으로 분해되어 항력이 크게 발생하게 된다. 이와같은 뒷날개의 불임각 효과에 의한 항력은 뒷날개에 작용하는 수직력이 증가함에 따라 항력도 증가하게 된다.

Fig. 9 (b)의 그래프에 제시된 바와 같이 본 연구 결과와 Kim and Chang[8]의 연구결과를 분석하면, 뒷날개의 불임각이 10°인 양력성분은 뒷날개의 불임각이 0°인 양력성분[8]에 비해 더 크게 나타나고 있다. 뒷날개의 불임각 10°인 경우 날개가 upstroke 운동과정이어도 양력 성분이 뒷날개의 불임각 0°인 경우에서와 달리 음(-)의 성분으로 발생되지 않는다. 이러한 원인은 날개가 upstroke운동 중일 때 날개 아랫면에 앞전와류의 재부착 현상이 발생하고, 이로 인해 양력 반대방향의 성분으로 힘이 발생하여야 하지만, 날개의 불임각으로 인해 뒷날개에서는 앞전와류의 재부착 현상이 크게 발생하지 않기 때문이다. 이러한 현상은 Kim and Chang의 가시화 연구[10]에서도 관찰할 수 있다. 한편, 한주기 동안의 추력데이터는 위상차 0°에서 모두 항력으로 발생한다는 사실을 fig. 9 (b)를 통해 관찰할 수 있으며, 양력계수와 비교해 볼 때 양력이 증가하면 항력도 증가하고 양력이 감소하면 항력도 감소하는 경향을 알 수가 있다. 이러한 현상 역시 뒷날개의 불임각으로 인한 효과로 추정된다.

Fig. 10의 (a)와 (b)는 앞·뒤날개 위상차 90°에

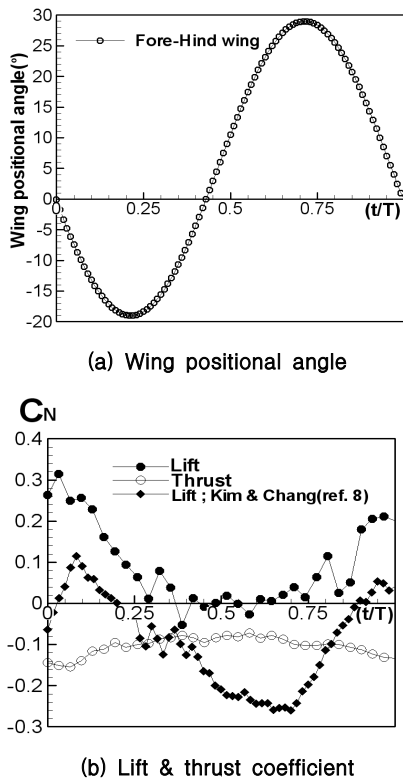
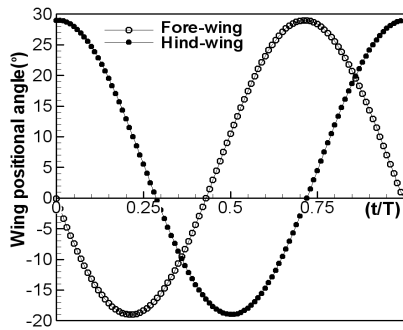
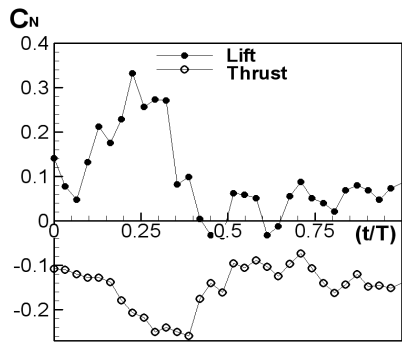


Fig. 9. Wing positional angle and aerodynamic data at phase difference 0°



(a) Wing positional angle



(b) Lift & thrust coefficient

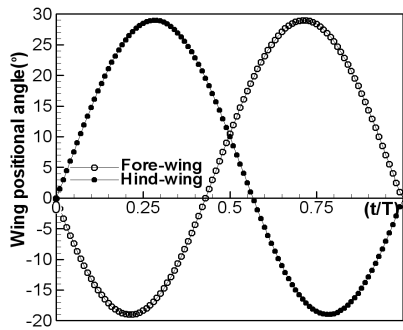
Fig. 10. Wing positional angle and aerodynamic data at phase difference 90°

서 각각 한주기 동안 날개위치각도와 공력 데이터를 보여준다. Fig. 10 (b)의 그래프에서 최대 양력계수는  $t/T=0.2$  부근에서 발생되고 있다. 이러한 현상은 앞날개가  $t/T=0.15$ 에서 downstroke 운동과정이 끝나더라도 날개의 면적이 더 큰 뒷날개는  $t/T=0.15$ 에서 downstroke운동을 하고 있기 때문이다. 다시 말하면, 앞날개에서 양력성분이 줄어들더라도 뒷날개는 downstroke운동을 수행하면서 뒷날개 윗면에서 앞전와류의 재부착 현상이 발생하여[4] 양력 성분을 증가시키기 때문이다. 또한 앞·뒤날개의 위상차가 0°인 Fig. 9 (b)의 경우에는  $t/T=0.5$  부근에서 가장 작은 양력성분을 나타내고, 그 이후부터 점점 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 앞·뒤날개의 위상차가 90°인 Fig. 10 (b)의 경우에는  $t/T=0.5$  부근에서 양력계수가 작게 나타나고 있으며, 그 이후 위상차 0°인 경우와 달리 양력계수는 들쭉날쭉하면서 증감현상이 뚜렷하지 않은 경향을 보이고 있다.

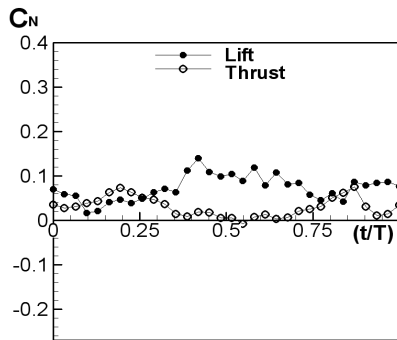
잠자리 유형 모델의 무차원 시간  $t/T=0.5$  이후 날개위치를 보면, 앞날개는 upstroke운동 중간지

점, 뒷날개는 upstroke운동 시작지점에 해당된다.  $t/T=0.5$  부근에서 불임각이 없는 앞날개는 가장 작은 양력 성분을 발생시키며, 그 이후부터는 양력 성분이 다시 증가하는 시점이다. 그러나 불임각이 있는 뒷날개는  $t/T=0.5 \sim 1.0$  까지 upstroke 운동과정을 수행하면서 양력성분의 반대 방향으로 가장 큰 힘이 발생할 것으로 예상되나, 불임각으로 인해 뒷날개의 아랫면에서 앞전와류의 재부착 현상이 downstroke운동과정 일 때처럼 크게 발생하지 않는다. 따라서 양력 반대방향의 성분으로 힘 발생이 크지 않으며, 이러한 원인으로 인하여 위상차 0°인 경우에서와 달리 양력성분이 증가하지 않는다. 실제 불임각을 가지고 있는 잠자리의 경우도 일반적인 비행 상태에서는 앞·뒤날개의 위상차가 90°인 경우로 비행을 하며, 순간적인 힘을 필요로 하는 경우에는 위상차가 0°인 비행을 하고 있다[10]. 앞·뒤날개의 위상차가 90°인 경우에도 0°인 경우처럼 양력이 증가하면, 항력도 증가하는 경향을 보이고 있으며, 역시 불임각으로 인한 양력 성분의 벡터 분해에 의해 항력이 발생하는 것으로 예측된다.

Fig. 11은 위상차 180°인 경우, 한주기 동안의 날개위치각도와 양력과 추력데이터를 보여주고 있다. 위상차 180°에서는 앞·뒤날개의 운동과정이 서로 상반되는 운동과정을 보이고 있다. 한주기 동안 양력성분은 증감현상이 뚜렷하지 않은 것을 관찰할 수 있다. 이러한 이유는 앞날개가 upstroke 운동을 수행하면 뒷날개는 downstroke 운동을 수행하고, 앞날개가 downstroke운동을 수행하면 뒷날개는 upstroke 운동을 수행하기 때문이다. 이러한 운동은 앞·뒤날개 중 어느 한쪽의 날개가 양력을 발생시키면, 다른 한 날개는 양력 반대 방향의 성분으로 힘을 발생시켜 양력 발생이 앞·뒤날개의 위상차가 0°, 90°의 경우보다 크지 않게 된다. 무차원 시간  $t/T=0.5$  부근에서 양력이 다소 증가하는 것은 날개의 면적이 더 큰 뒷날개가downstroke운동과정을 수행하기 때문이다. 한주기 동안의 추력계수는 0°, 90°의 경우 모두 항력으로 발생하는 것과 다르게 한주기 동안 추력으로 발생되고 있다. 그러나 추력 성분은 급격한 증가나 감소하는 경향을 보이지 않고 있다. 이와 같이 양력 성분의 증감현상이 뚜렷하지 않고 추력도 크지 않아 잠자리 유형 모델 자체의 무게만을 지탱한다면 180°의 위상차에서 제자리비행(hovering)을 수행할 수 있으리라 추정된다. 실제 잠자리의 경우도 참고문헌 [6]에 제시된 바와 같이 180°의 위상차에서 제자리비행을 수행하는 것으로 알려져 있다. 물론 본 연구는

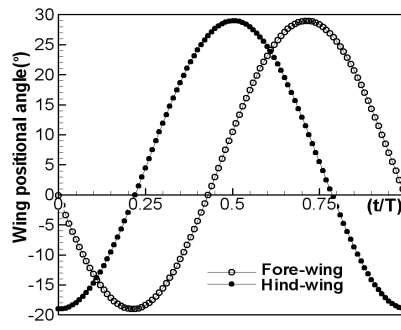


(a) Wing positional angle

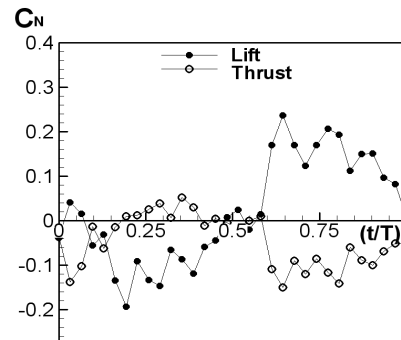


(b) Lift & thrust coefficient

Fig. 11. Wing positional angle and aerodynamic data at phase difference 180°



(a) Wing positional angle



(b) Lift & thrust coefficient

Fig. 12. Wing positional angle and aerodynamic data at phase difference 270°

실제 잠자리처럼, 유입되는 자유흐름의 크기나 방향에 따라 앞·뒤날개의 위상차를 변화시키지 않고 일정한 유속에서 앞·뒤날개의 위상차만을 변경하여 실험을 수행하였다. 따라서 본 연구는 실제 잠자리의 경우와 동일하다고 단정 짓기 어려우나, 향후 이에 관한 연구를 수행하는데 있어 기초적인 데이터로 활용될 수 있다고 판단된다.

Fig. 12는 앞·뒤날개의 위상차가 270°인 경우 한주기 동안의 날개위치각도와 공력계수를 보여주는 그래프이다. Fig. 12는 앞·뒤날개의 위상차 90°인 Fig. 10의 공력데이터와 비교하면, 그래프의 경향은 비슷하지만, 증가하고 감소하는 현상이 상반된 위치에서 나타난다. 이러한 원인은 공력데이터가 날개의 면적이 앞날개에 비하여 큰 뒷날개가 downstroke 운동중일 때의 위상각이 다르기 때문이다. 다시 말하면 앞·뒤날개의 위상차 90°, 270°인 경우에, 뒷날개의 운동방향은 180°의 위상차를 갖고 있으므로 공력데이터가 증가하는 downstroke 운동중일 때의 위상각이 서로 상반된 위치에서 나타난다. 또한 최대 양력계수와 양력 반대 방향의 성분, 즉 음(-)의 성분계

수는 차이가 발생하고 있다. 이러한 원인은 앞날개와 뒷날개의 유동의 상호 간섭과 관련이 있을 것으로 예측된다. 한편, 한주기 동안의 항력계수는 위상차 90°의 경우처럼 양력이 증가하면, 항력도 증가하는 경향을 보인다.

이상에서 Fig. 9에서 Fig. 12까지 앞·뒤날개의 위상차를 0°, 90°, 180°, 270°로 변경하여 측정된 양력 및 추력 데이터에 대하여 결과를 분석하였다. 이러한 데이터를 한 주기 동안의 양력계수 값으로 적분하여 전체크기를 조사하였으며, 그 결과 위상차 0°인 경우 0.096, 90°인 경우 0.100, 180°인 경우 0.076, 270°인 경우 0.024이었다. 그러므로 각각의 위상차에 대한 양력계수 중에서 위상차 90°인 경우의 양력이 크게 발생하며, 잠자리는 앞·뒤날개의 위상차에 따라 양력 크기를 조절하여 비행할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한 본 연구와 같이 날개가 유연성이 있을 뿐만 아니라 붙임각이 있는 경우 단순히 상하 운동을 수행하더라도 실제 한주기 동안 발생된 양력 성분은 양(+)의 값으로 실제 양력이 발생하게 된다는 것을 알 수 있었다.

### III. 결 론

본 연구는  $Re = 2.88 \times 10^3$ 에서 두 쌍 날개를 갖는 잠자리 유형 모델에 대하여 앞·뒤날개의 위상차를  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 로 바꾸어 가며, 위상차 변화에 따른 공력특성을 조사하였다.

본 연구에서와 같은 잠자리 유형 날개는 자유 흐름속도가 존재하고, 구동축을 중심으로 상하운동을 수행하는 경우 downstroke 운동중일 때 양력이 크게 발생한다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 한주기 동안 발생한 양력계수는 앞·뒤날개의 위상차  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 에 따라 각각 0.096, 0.100, 0.076, 0.024의 값을 가지며, 잠자리가 앞·뒤날개의 위상차에 따라 양력 크기를 조절한다는 것을 정량적으로 조사하였다. 그리고 각각의 위상차에 대한 양력계수는 위상차  $90^\circ$ 인 경우 양력이 크게 발생하게 된다. 이외에도 뒷날개의 붙임각으로 인해 양력성분의 벡터 분해로 인한 항력성분이 발생하며, 양력이 증가함에 따라 항력도 증가하는 것을 알 수 있었다.

향후 잠자리 유형 모델에 관한 연구로 날개의 유연성 정도뿐만 아니라 피칭운동이 포함된 플레핑 운동을 수행하는 경우에 발생하는 공력특성에 대하여 조사하여야 한다.

### 후 기

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

### 참고문헌

1) Fejtek, I. and Nehera, J., "Experimental study of flapping wing lift and propulsion", Journal of Aeronautical, Vol. 84, 1980, pp. 28-33.  
 2) 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.

3) Willmott, A. P., Ellington, C. P. and Thomas, A. L. R., "Flow visualization and unsteady aerodynamics in the flight of the hawkmoth, *Manduca sexta*", Philosophical Transaction of the Royal Society Biological Sciences London, Vol. 352, 1997, pp. 303-316.  
 4) Van den berg, C. and Ellington, C. P., "The three dimensional leading-edge vortex of a 'hovering' model hawkmoth", Phil. Trans. R. Soc. Land., Vol. 352, 1997, pp. 329-340.  
 5) Liu, H., Ellington, C. P., Kawachi, K., Van den berg, C. and Willmott, A. P., "A computational fluid dynamic study of hawkmoth hovering", Journal of Experimental Biology, Vol. 201, 1998, pp. 461-477.  
 6) Alexander, D. E., "Studies on Flight Control and Aerodynamics in Dragonflies", Ph. D. Dissertation, Duke University, Durham, NC, 1982.  
 7) Kim, H. S., Kim, S. H., Chang, J. W., "Visualization Study on the Phase Difference of a Dragonfly-type Wing", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 8, No. 4, 2004, pp. 43-54.  
 8) Kim, S. H., Chang, J. W., "Unsteady Lift measurements of the Dragonfly-type Wing", Journal of the Korean Society for Aeronautical Science and Flight Operation, Vol. 14, No. 2, 2006, pp. 1-8.  
 9) Singh, B., Ramasamy, M., Chopra, I. and Leishman, J. G., "Insect-based flapping wings for micro hovering air vehicle: experimental investigations," American helicopter society international specialists meeting, Arizona, Jan. 18-20, 2005.  
 10) Kim, S. H., Chang, J. W., "Visualization Study on a Reduced Frequency of a Dragonfly-type Wing," Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 2, No. 2, 2004, pp. 58-96.