

# 글라이딩하는 제비나비 날개형상의 공력특성연구

이병도<sup>†</sup> · 박형민\* · 최해천\*\*

## Aerodynamic Property of Swallowtail Butterfly Wing in Gliding

Byoungdo Lee, Hyungmin Park and Haecheon Choi

**Key Words :** Swallowtail butterfly(제비나비), Gliding(활공), Aerodynamic performance(공력성능), Hairpin vortex(헤어핀 보텍스)

### Abstract

In nature, the swallowtail butterfly is known to be a versatile flyer using gliding and flapping efficiently. Furthermore, it has long tails on the hind-wing that may be associated with the enhancement of the gliding performance. In the present study, we investigate the aerodynamic property of swallowtail butterfly wing in gliding. We use an immersed boundary method and conduct a numerical simulation at the Reynolds numbers of 1,000 - 3,000 based on the free-stream velocity and the averaged chord length for seven different attack angles. As a result, we clearly identify the existence of the wing-tip and leading-edge vortices, and a pair of the streamwise vortices generated along the hind-wing tails. Interestingly, at the attack angle of 10°, hairpin vortices are generated above the center of the body and travel downstream.

### 1. 서론

고정의 타입의 초소형 비행체 설계에서 유한폭, 작은 가로세로비(aspect ratio)를 가지는 날개의 낮은 레이놀즈 수에서의 공력특성 연구는 매우 중요하다<sup>(1)</sup>. 다양한 나비 종 중에서 가로세로비가 작은 제비나비 (swallowtail butterfly)는 자연계에 존재하는 비행 생명체 중 비행능력이 뛰어난 종으로 관찰되어왔으며, 특히 글라이딩과 플래핑 비행을 모두 능숙하게 수행할 수 있어 흥미롭다<sup>(2)</sup>. 또한 제비나비는 뒷날개에 존재하는 꼬리가 제비나비의 글라이딩 능력을 향상시킨다고 연구된 바 있다<sup>(2)(3)(4)(5)</sup>. 최근에 Park *et al.*<sup>(3)</sup>은 제비나비의 뒷날개에 존재하는 꼬리가 나비의 글라이딩 성능에 미치는 영향을 힘 및 모멘트의 직접 측정

및 유동가시화를 통해 알아보았다. 꼬리의 존재로 인해 날개가 생성하는 양력이 증가하였으며, 이로 인해 글라이딩 성능 (양항비, lift-to-drag ratio)과 피칭 비행 안정성이 대부분의 받음각 영역에서 향상됨을 보였으며, 양력이 증가하는 메커니즘을 제시한 바 있다. 그러나 Park *et al.*<sup>(3)</sup>의 풍동실험 결과에서 사용된 레이놀즈 수는 실제 나비의 레이놀즈 수 (2,000 ~ 5,000) 보다는 다소 크고 받음각이 20° 경우의 나비날개 주위 유동장에 대해서 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 앞선 연구<sup>(3)</sup>에서 사용된 나비날개 모델과 동일한 실제 제비나비 (*Papilio Ulysses*)의 형상을 정확하게 본뜬 나비모델을 이용하여 수치해석을 통해 실제나비와 비슷한 레이놀즈수 (1,000 ~ 3,000)에서 양력, 항력, 피칭모멘트를 계산하고 여러 받음각에 대해 유동장을 분석하여 글라이딩하는 제비나비 날개형상의 공력특성을 연구하는 것이 목적이다.

---

<sup>†</sup> 서울대학교 대학원  
E-mail : debutlips@hotmail.com  
TEL : (02)880-1655

\* 서울대학교 대학원

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

## 2. 수치해석기법 및 나비모델

본 연구에서는 나비의 복잡한 형상 주위 유동장을 계산하는 방법으로 Kim *et al.*<sup>(6)</sup>에 의해 제안된 가상경계방법을 이용하여 비압축성 Navier-Stokes 식과 연속방정식을 풀었다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} - q = 0 \quad (2)$$

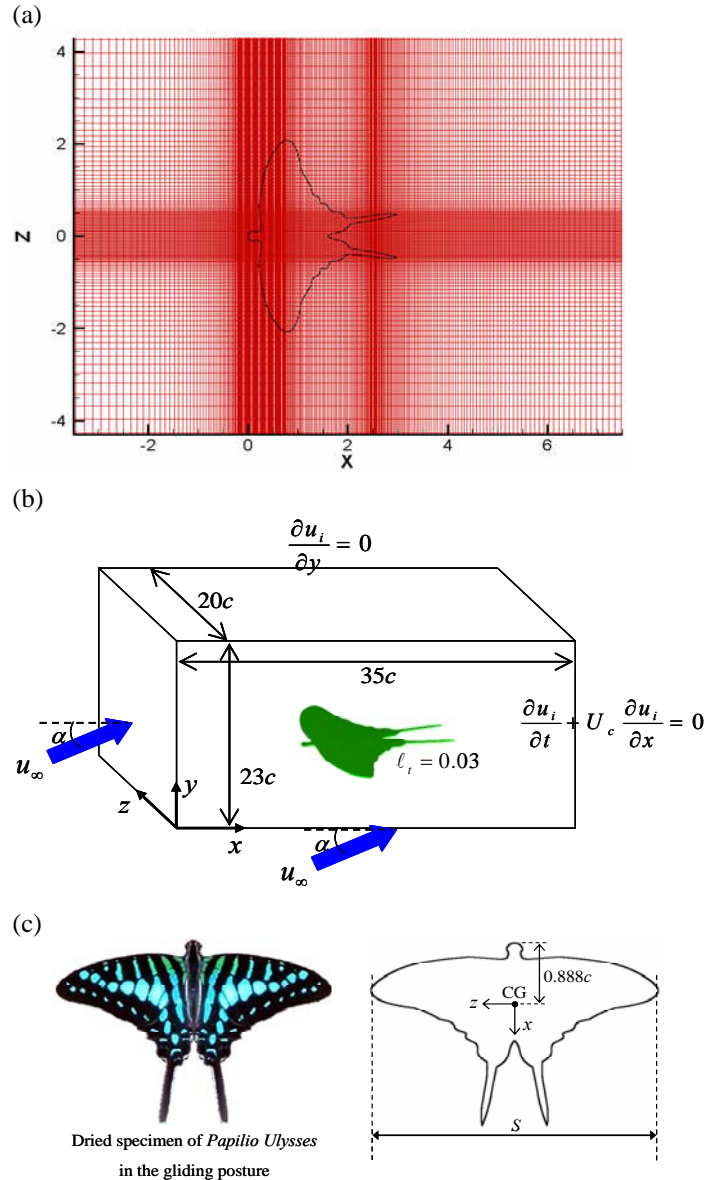
여기서  $t$ 는 시간,  $u_i$ 는 속도성분을 나타내며,  $x_i$ 는 직교 좌표계의  $(x, y, z)$ 의 위치성분이다.  $f_i$ 와  $q$ 는 각각 가상경계방법을 사용함에 따라 추가되는 운동량 부가와 질량부가를 나타낸다. 직교 좌표계에서 주어진 식을 풀이하기 위하여 본 연구에서는 시간에 대해 준 내재적 분할 단계 방법 (semi-implicit fractional step method)을 사용하였다. 즉, 준 내재적 차분(semi-implicit discretization)방법으로 대류항에는 3차 정확도의 Runge-Kutta (RK3) 방법이, 확산항에는 2차 정확도의 Crank-Nicolson (CN2) 방법이 사용되었으며, 압력 항 수정방법으로 분할단계방법(fractional step method)이 사용되었다. 공간에 대해서는 모든 항에 대해서 2차 정확도의 중앙 차분 방법이 사용되었다.

자유 유동속도와 평균코드길이를 정의된 레이놀즈 수는  $Re_c = u_\infty c / \nu = 1,000 \sim 3,000$ 이며, Fig. 1은 나비모델 주위의 주 유동방향 및 횡방향 격자 구성과 수치해석 영역의 개략도다. 사용된 격자의 수는 주 유동방향 ( $x$ ), 수직방향 ( $y$ ) 및 횡방향 ( $z$ )으로 각각  $369 \times 203 \times 145$ 이며, 나비형상을 자세히 구현하기 위해 나비형상 주위에 많은 격자를 구성하였다 (Fig. 1a). 계산영역은 주 유동방향, 수직방향, 횡방향으로  $35c \times 23c \times 20c$ 이며,  $c$ 는 평균코드길이를 의미한다. 경계조건은 계산영역의 입구와 하단은 자유류 조건, 출구는 convective 경계조건, 상단은 Neumann 경계조건을 사용하였다 (Fig. 1b).

본 연구에서는 Park *et al.*<sup>(3)</sup>의 풍동실험에서 사용한 제비나비 모델 (*Papilio Ulysses*)과 동일한 형상의 나비 날개를 고려하였으며, Fig. 1(c)에 나타난 바와 같이 *Papilio Ulysses*를 선택하여 실제 글라이딩하는 자세의 박제된 나비모델 형상을 정확히 모사하여 적용하였다. 나비 모델형상의 주요 변수들은 Table 1에 정리된 바와 같다. 여기서 날개의 가로세로비는  $AR = S^2/A$ , 날개두께는  $l_f$ 로 정의하였다.

**Table 1** Morphometric parameters of swallowtail butterfly model used in the present study

날개 면적 ( $A$ )	폭길이 ( $S$ )	평균코드 길이 ( $c$ )	가로세로비 (AR)	무게중심위치
4.609	4.149	1.111	3.73	0.888c



**Fig. 1** (a) Schematic diagram of the grid system; (b) computational domain; (c) swallowtail butterfly model considered in the present study.

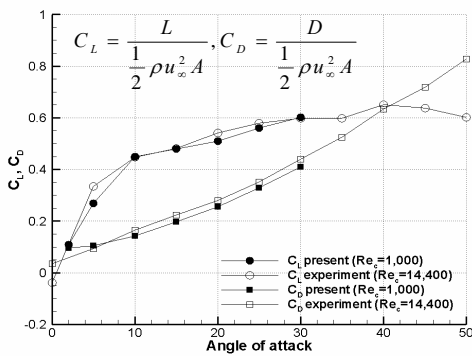
## 3. 결과

### 3.1 힘/모멘트 계산

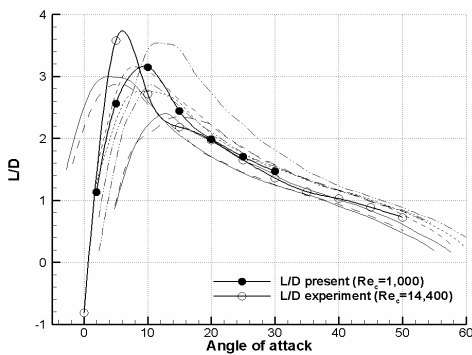
Fig. 2는 레이놀즈 수 1,000인 경우, 받음각에

다른 양력, 항력, 피칭 모멘트 계수 변화를 보여준다. 계산된 양력계수, 항력계수의 값이 Park *et al.*<sup>(3)</sup>의 풍동실험 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 2a). 이러한 양력, 항력의 변화로 인해 Fig. 2(b)에 도시된 바와 같이 받음각 10°에서 양항비 (lift-to-drag ratio)가 가장 크게 증가하며 이와 같은 양항비 추이는 Park *et al.*<sup>(3)</sup> 및 Nachtigall<sup>(7)</sup>이 측정된 다른 종의 나비, 나방에 대해서 측정된 값과 부합하는 것을 볼 수 있다.

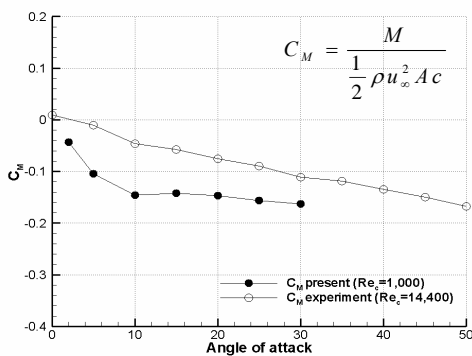
(a)



(b)



(c)



**Fig. 2** Variations of the lift ( $C_L$ ) and drag ( $C_D$ ) coefficients, lift-to-drag ratio ( $L/D$ ) and pitching moment coefficient ( $C_M$ ) with the attack angle: (a)  $C_L$  and  $C_D$ ; (b)  $L/D$  (other lines are from other eight species of butterflies and moths<sup>(7)</sup>); (c)  $C_M$ .

한편, Fig. 2(c)는 받음각에 따른 날개에 작용하는 무게중심에서의 피칭 모멘트의 변화를 보여주며, Park *et al.*<sup>(3)</sup>의 결과와 마찬가지로 피칭모멘트 곡선의 기울기가 받음각이 증가함에 따라 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이로부터 제비나비의 날개 형상이 글라이딩 비행 중 피칭 방향의 비행 안정성을 가지는 것을 알 수 있다<sup>(8)</sup>.

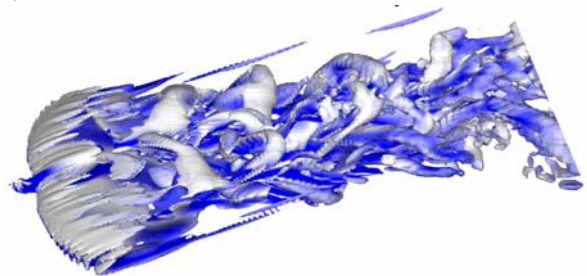
### 3.2 유동장 분석

Fig. 3은 레이놀즈 수가 1,000인 경우, 받음각이 10° 및 20°에서 제비나비 주위의 유동구조를 Jeong & Hussain<sup>(9)</sup>의  $\lambda_2$  방법을 이용하여 가시화한 것이다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 나비모델주위의 유동구조는 매우 복잡하지만 날개 양끝에서 발생하는 날개 끝 보텍스 (wing-tip vortex)와 날개 앞에서 발생하는 전단 보텍스 (leading-edge vortex)를 확인할 수 있다. 이 두 가지 보텍스는 일반적으로 가로세로비가 작은 날개의 공력 성능을 결정하는 지배적인 유동구조이다. 흥미롭게도, 받음각 10°에서 나비날개 중앙 부분에서 헤어핀 보텍스가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 헤어핀 보텍스는 시간에 따라 주 유동방향으로 이동하면서 그 형상을 유지하는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 3a). 이러한 헤어핀 보텍스의 생성은 기존의 연구들에서 제시되지 않은 것으로, 생성 원인 및 영향에서 대하여 분석 중에 있다. 하지만, 복잡한 유동구조로 인해, 기존 연구<sup>(5)</sup>에서 제시한 inboard vortex의 존재는 명확하게 확인할 수 없었다.

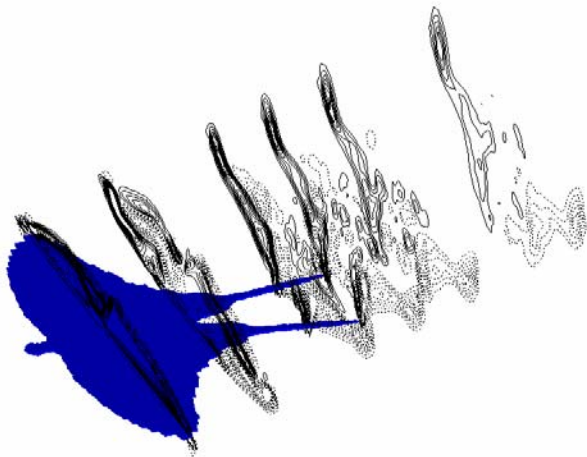
(a)



(b)



**Fig. 3** Vortical structures: (a) attack angle of 10°; (b) 20°.  $\lambda_2 = -1$ .



**Fig. 4** Contours of streamwise vorticity at several cross-planes. broken lines,  $(\omega_{x,min}, \omega_{x,max}, \Delta\omega_x) = (-3, -0.3, 0.3)$ ; full lines,  $(\omega_{x,min}, \omega_{x,max}, \Delta\omega_x) = (0.3, 3, 0.3)$

한편, Park *et al.*<sup>(3)</sup>은 스모크 와이어 유동 가시화를 통해 뒷날개 꼬리를 따라 발생된 한 쌍의 주 유동방향 보텍스가 나비 날개의 양력을 증가시키는 주요 원인으로 추론했었다. Fig. 4는 여러  $y$ - $z$ 평면에서 나비날개 주위 유동의 주 유동방향 와도 성분 ( $\omega_x$ )의 분포를 도시한 것으로, 뒷날개 꼬리에서 주 유동방향 와도 성분이 발생하여 날개 끝 보텍스 등과 상호작용을 하는 것으로 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 수치해석을 통해 글라이딩하는 체비나비 날개형상의 공력특성을 힘 및 모멘트 계산 및 유동장 분석을 통해 알아보았다. 나비의 복잡한 형상 주위 유동장을 계산하는 방법으로 가상 경계방법을 사용하였으며, 양력, 항력 및 피칭모멘트 계산 값이 이전의 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 유동장 분석을 통해 날개 끝 보텍스와 전단 보텍스를 명확히 확인할 수 있었으며, 뒷날개 꼬리를 따라 한 쌍의 주 유동방향 보텍스가 생성되는 것을 확인하였다. 받음각  $10^\circ$ 에서 나비날개 중앙 부분에서 발생하는 헤어핀 보텍스를 확인하였다.

본 연구결과는 고정익 타입의 초소형 비행체 설계에 있어서 낮은 레이놀즈수에서의 유한폭, 작은 가로세로비를 가지는 날개설계에서 높은 비행성능을 가지기 위한 나비의 꼬리와 유사한 장치의 개발에 유용할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업과 교육인적자원부의 BK21 Program 의 지원 하에 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Lian Y., Shyy W., Viieru, D. and Zhang, B., 2003, "Membrane wing aerodynamics for micro air vehicles," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 39, pp. 425~465.
- (2) Brodsky, A. K., 1994, *The Evolution of insect Flight*, Oxford University Press, New York, pp. 174~186.
- (3) Park, H., Bae, K., Jeon, W. -P. and Choi, H., 2006, "Aerodynamic effect of hind-wing tails on a gliding swallowtail butterfly," *Bulletin of the American Physical Society*, DFD 59, AA5, pp. 19.
- (4) Betts, C. R. and Wootton, R. J., 2002, "Wing shape and flight behavior in butterflies (Lepidoptera: Papilionoidea and Hesperioidea): a preliminary analysis," *J. Exp. Biol.*, Vol. 138, pp. 271~288.
- (5) Martin, L. J. and Carpenter, P. W., 1977, "Flow-visualization experiments on butterflies in simulated gliding flight," in *The Physiology of Movement: Biomechanics*, Fischer, Stuttgart, pp. 307~315.
- (6) Kim, J., Kim, D. and Choi, H., 2001, "An Immersed-Boundary Finite Volume Method for Simulations of Flow in Complex Geometries," *J. Comput. Phys.*, Vol. 171 (1), pp. 132~150.
- (7) Nachtigall, W., 1976, "Wing movements and the generation of aerodynamic forces by some medium-sized insects," in *Insect Flight*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 31~47.
- (8) Thomas, A. L. R. and Taylor, G. K., 2001, "Animal flight dynamics I. stability in gliding flight," *J. Theor. Biol.*, Vol. 212, pp. 399~424.
- (9) Jeong, J. and Hussain, F., 1995, "On the identification of a vortex," *J. Fluid Mech.*, Vol. 285, pp. 69~94.