

## 지면이륙하는 나비의 날개짓 분석

장영일\* · 이상준\*\*

### Experimental Analysis of the Ground Take-off Flight of a Butterfly

Young Il Jang\* and Sang Joon Lee\*\*

**Keywords :** Butterfly Flight(나비 비행), Flapping Motion(날개짓), Ground Take-off(지면 이륙)

#### Abstract

In the present work, high-speed video images of the ground take-off flight of a live butterfly were captured and their dynamic motions during the first full-stroke were analyzed. To capture the dynamic images of the take-off motion, the experimental setup consisted of a high-speed camera, a Xenon lamp as a light source and a transparent chamber of  $15^W \times 15^L \times 17^H$  cm<sup>3</sup> in physical size. The ambient temperature and supplementary lighting devices were precisely controlled. The weight and wing span of the butterfly tested in this study was 104 mg and 63.14 mm, respectively. The ground take-off images were captured with 4000 fps with a spatial resolution of (1024×512) pixels. The period of the first full-stroke was 80.5ms and the flapping speed of downstroke was 2 times faster than that of upstroke. As a result, butterflies used the fling and near-clap motion to generate lifting force and an interesting take-off behavior of early pronation and downstroke was observed.

#### 1. 서론

연구자들은 날개짓 곤충들이 높은 추진력(또는 양력)을 발생시키기 위해 Wagner effect, clap and fling, delayed stall and LEV, Kramer effect, wake capture 등을 이용한다는 것을 밝혀왔다[1-3]. 활주(taxing)가 필요하거나 일정 높이의 발디딤대에서 뛰어오르는 이륙이 아닌 지면에서 바로 이륙이 가능한 MAV의 제작이라는 실용적인 중요성에도 불구하고 다양한 비행형태중에서 날개짓 지면이륙 비행에 관한 연구는 매우 제한적으로 수행되어 왔다[4,5]. 이륙하는 곤충의 날개 주위 유동현상을 이해하기 위해서는 선행연구로서 이륙비행의 정확한 kinematics를 상세하게 측정하고 분석해야 한다. 본 연구는 지면이륙하는 나비를 고속카메라로 촬영하여 동적(dynamic) 분석이 가능한 선명한 사진들을 획득하여 지면이륙비행의 kinematics를 분석하고자 한다.

#### 2. 나비 및 측정장치

실험에 사용된 나비는 흰줄표범나비(*Argyronome laodice*)이며, weight는 104mg, wing span은 63.14mm, max wing chord는 27.64mm이다. 실험장치는  $15^L \times 15^W \times 18^H$  cm<sup>3</sup> 크기의 flight chamber, 고속 카메라(Photron Ultima APX), 두대의 Xenon lamp(300 watt)로 구성된다. 나비가 이륙하는 순간을 4000 fps의 frame rate과 1024×512 pixel resolutions 조건으로 촬영하였다.

#### 3. First full-stroke kinematics

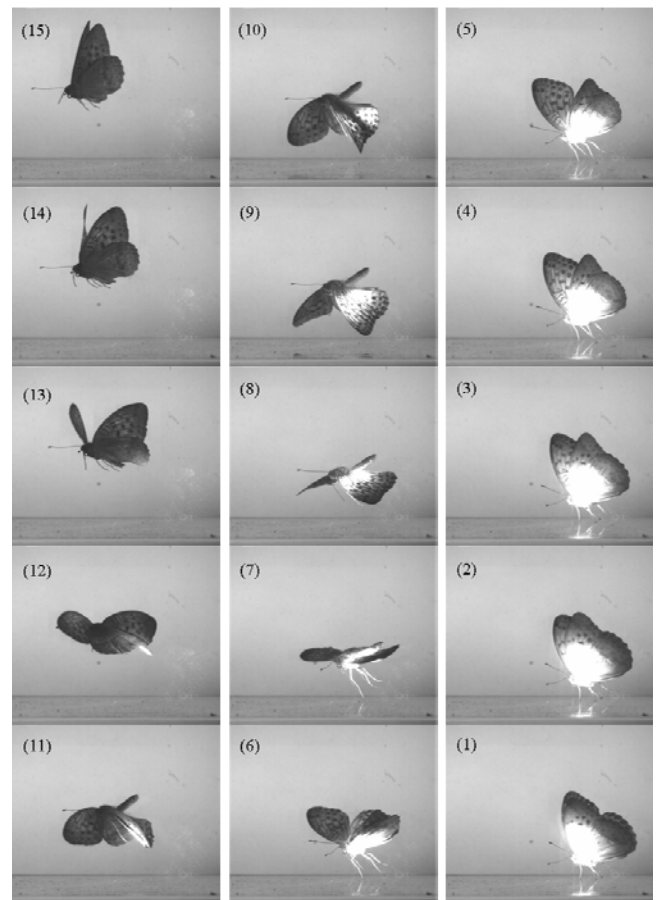


Fig. 1 Sequential images of the 1<sup>st</sup> full-stroke of a butterfly in ground take-off flight

Fig. 1은 나비의 전형적인 지면이륙 비행 event의 first full stroke(downstroke+upstroke) 동안의 이미지들로 near-clap[6] position부터 순서대로 동일한 시간간격으로 보여주고 있다.

\* 포항공과대학교 기계공학과, yijang@postech.ac.kr

\*\* 포항공과대학교 기계공학과, sjlee@postech.ac.kr

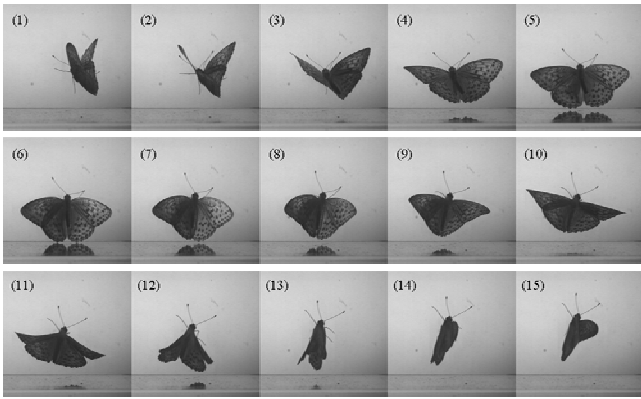


Fig. 2 Fling and near-clap motion

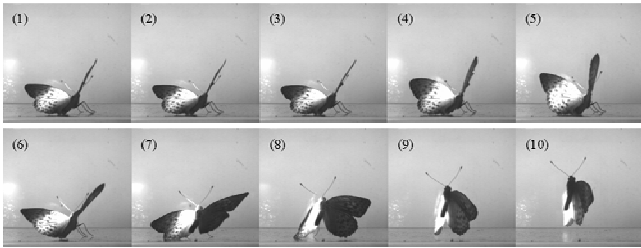


Fig. 3 Early pronation and downstroke

비행 event 사이의 시간간격은 5.75ms로서 (1)에서 (15)까지 full stroke동안의 period는 80.5ms이다. 이것은 12Hz의 flapping frequency에 대응하며, cabbage white butterfly의 평균 flapping frequency와 유사하다. (1)에서 (9)까지가 downstroke이며, (10)에서 (15)까지가 upstroke에 해당한다. 시간 점유비를 보면 downstroke시의 날개짓 속력이 upstroke시의 속력보다 약 2배 정도 빠름을 알 수 있다. 나비는 양날개의 leading edge쪽이 약간 벌어진채 위로(dorsally) 맞닿은 상태인 near-clap position에서 앞쪽 leading edge가 stroke를 lead하며 fling motion으로 downstroke을 진행한다. upstroke과정은 (10)에서 앞쪽 leading edge 방향을 reverse시키며 전환과정인 supination을 하고, 이어 clap motion으로 진행한다. 이륙 비행동안 antennae, head 및 thorax는 지면과 수평하게 일정한 자세를 유지하고, abdomen은 downstroke 중간부터 upstroke 중간까지 위로 치켜 올리며, leg 들은 지면을 지지했던 쪽이 abdomen 방향으로 젖혀지는 모습을 보여주고 있다.

#### 4. Fling and near-clap motion

Fig. 2는 나비가 지면에서 부양한 후 fling and near-clap motion을 진행하는 장면을 선명하게 포착한 (1)에서 (15)까지의 연속 이미지들을 보여주고 있다. 이미지들 사이의 시간간격과 전체시간은 각각 6.75ms 및 94.5ms이다. Fig. 2의 (1)에서 (5)까지는 날개가 leading edge쪽부터 벌어지며 downstroke하는 fling motion이고, (6)-(8)동안 spination이 진행된다. 그리고, (9)에서 (13)까지는 날개가 leading edge쪽부터 맞붙으며 upstroke하는 clap motion이 관찰되고, 이어서 전환과정인 pronation으로 진행하게 된다.

Clap and fling mechanism은 Weis-Fogh [7]가 wing span이 약 1.4mm인 온실가루이좀벌(*encarsia formosa* wasp)의 정지(hovering)비행중 발생하는 높은 양력계수( $C_L$ )을 설명하는 비행 mechanism으로 제시하였다. 나비 비행의 경우, Brackenbury [5]는 30종의 나비들이 이륙과 상승비행에서 대부분 clap and fling motion을 보인다고 보고하고, 각 phase에서 획득한 제한적인

연속 사진을 제시하였다. 최근들어 Srygrey와 Thomas [8]는 나비(*Vanessa atalanta*)가 풍동 측정부에 설치된 golf tee위에서 뛰어오르는 순간을 촬영하여 clap and fling motion을 관찰하였다.

#### 5. Early pronation and downstroke

Fig. 3은 나비가 early pronation을 진행하고 downstroke하며 지면이륙하는 모습이 포착된 (1)에서 (10)까지의 연속 이미지들을 보여주고 있다. 이미지들 사이의 시간간격과 전체시간은 각각 7.75ms 및 69.75ms이다. Fig.3의 (1)에서 나비는 near-clap position까지 날개를 올리지 않고, 'V'자 형태의 양날개 배치 위치에서 날개짓 방향을 reverse시키는 pronation 과정을 빠르게 하고 downstroke하며 이륙한다. 이 과정에서 leading edge의 순간적인 방향전환에 따라 날개 윗면에서 vortex가 발생해 trailing edge쪽으로 흐르면서 negative pressure 조건을 형성하여 lifting force가 발생하는 것으로 예측된다. Downstroke중에는 여러 연구[1,2]에서 제시된 LEV가 작용하여 lifting force가 발생되어 지는 것으로 판단된다.

#### 6. 결론

나비가 지면이륙하는 1-cycle을 고속카메라를 이용하여 0.25ms의 시간간격으로 연속적으로 촬영하였다. 이륙을 시작하는 first full-stroke의 주기는 80.5ms이고, downstroke시의 날개짓 속력이 upstroke시 속력보다 약 2배 정도 빠른 것으로 나타났다. 나비는 fling and near-clap motion으로 날개짓하며 이륙하였다. 또한, 나비가 양날개를 clap position까지 올리지 않고, 'V'자 형태의 날개 배치에서 빠른 pronation과 downstroke를 진행하며 이륙하는 흥미로운 비행형태가 관찰되었다.

#### 후기

본 연구는 과기부(과학재단)의 국가지정연구실(NRL) 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Ellington CP, Berg CVD, Willmott AP and Thomas ALR, Leading-edge Vortices in Insect Flight, Nature, Vol.384 (1996), pp.626-630.
- [2] Dickinson MH, Lehmann FO and Sane SP, Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight, Science, Vol.284 (1999), pp.1954-1960.
- [3] Sane SP, The Aerodynamics of Insect Flight, J Exp Bio, Vol.206 (2003), pp.4191-4208.
- [4] Sunada S, Kawachi K, Watanabe I and Azuma A, Performance of a Butterfly in Take-off Flight, J Exp Bio, Vol.183 (1993), pp.249-277.
- [5] Brackenbury JH, Kinematics of Take-off and Climbing Flight in Butterflies, J Zool Lond, Vol.224 (1991), pp.251-270.
- [6] Ellington CP, The Aerodynamics of Hovering Insect Flight. III. Kinematics, Phil Trans R Soc Lond, Vol.305 (1984), pp.41-78.
- [7] Weis-Fogh T, Quick Estimates of Flight Fitness in Hovering Animals, including Novel Mechanisms for Lift Production, J Exp Bio, Vol.59 (1973), pp.169-230.
- [8] Srygrey RB and Thomas ALR, Unconventional Lift-generating Mechanisms in Free-flying Butterflies, Nature, Vol.420 (2002), pp.660-664.