論文

곤충비행에서 갑작스러운 추력발생의 공기역학적 원인 Part 2: 공기역학적 주요 변수에 대한 연구

이정상*, 김진호*, 김종암**

The Aerodynamic Origin of Abrupt Thrust Generation in Insect Flight (Part 2: Study on Primary Aerodynamic Parameters)

Jung-Sang Lee*, Jin-ho Kim* and Chongam Kim**

ABSTRACT

Numerical results from the "figure-of-eight" motion of *Phormia-Regina* in Part 1 indicate that vortical structure and vortex dynamics do play a critical role in lift and thrust generation. The aerodynamic force generation of insects' wing could be governed by aerodynamic parameters such as Reynolds number; kinematic parameters such as frequency, amplitude, and component of the figure of eight motion; and morphological parameters such as wing shape and the number of wing. In the present work, the effects of Reynolds number, reduced frequency and motion component are investigated in detail to clarify aerodynamic characteristics of insect wing. Through numerical results and their physical interpretation, the mechanism of aerodynamic force generation is presented more clearly. Rotation turns out to be the most important component in thrust generation and subsequent counterclockwise rotational circulation is closely related with thrust generation.

초 록

Part 1에서 수행된 검정금파리의 "8자 운동"에 대한 해석결과는 와류들이 양력과 추력 발생에 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 곤충날개에서 발생되는 공기역학적 힘은 레이놀즈수와 같은 공기역학적 요소와 더불어 진동수, 운동진폭, 운동성분 등과 같은 운동학적적 요소들 또 날개의 형태 및 개수등과 같은 형태학적 요소들에 따를 것으로 생각된다. 본 연구에서는 레이놀즈수, 진동수 그리고 운동성분에 따른 양력과 추력발생을 고찰함으로써 이들이 공기역학적으로 어떤 영향을 미치는가를 조사하였다. 이로써 part 1의 결과를 물리적으로 좀 더 상세하게 설명할 수 있는 근거를 찾고자 하였다. 해석결과 "8자 운동"을 구성하는 운동성분 중 회전운동이 추력발생에 지배적인 역할을 하고 있었으며, 또한 추력발생은 반시계 방향의 회전순환과 깊은 관련이 있었다.

Key Words : Insect Flight(곤충비행), Rotational Circulation(회전순환), Parametric Study (매개변수 연구)

† 2006년 9월 14일 접수 ~ 2006년 11월 24일 심사완료
* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원
** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부
연락저자, E-mail : chongam@snu.ac.kr
서울시 관악구 신림동 산 56-1

Ⅰ. 서 론

Part 1에서 수행한 검정금파리의 "8자 운동"에 대한 유동 해석은 양력 및 추력발생과(혹은 양력

과 추력의 증가) 관계된 유동장의 형태를 보여주었다. 양력은 다른 많은 연구자들의 제자리비행에 대한 연구결과와 비슷하게 앞전와류에 의한 것이었으나, 이의 생성은 그들이 지적한 기하학적으로 높은 받음각에 의한 효과라기보다 유효받음각의 증가에 따른 것으로 생각된다[1,2,3]. 또한 upstroke 끝에서 발생하는 매우 큰 추력의 갑작스러운 발생은 와류정지 현상에 의한 에어포일 앞면의 지속적인 저압형성이 직접적인 원인이며, 또한 후류 유동장에서 와류 짝 현상에 의해 유도되는 강력한 제트로 설명될 수 있다[4].

Part 2에서는 앞선 part 1의 결과를 바탕으로 양력과 추력의 발생에 관계된 메커니즘을 물리적으로 좀 더 명확하게 포착하기 위해 파라메트릭 연구를 수행하였다. 곤충날개에서 발생되는 공기역학적 힘은 많은 변수들에 지배될 것이다. 여기에는 레이놀즈수와 같은 공기역학적 요소와 더불어 진동수, 운동진폭, 운동성분 등과 같은 운동학적적 요소들 또 날개의 형태 및 개수 유연성 등 형태학적 요소들이 있을 것으로 생각된다[5]. 그러나 이러한 모든 경우들에 대한 연구는 상당히 방대하므로 본 연구에서는 레이놀즈수, 진동수, 그리고 운동성분에 대한 영향을 고찰하도록 하였다. 제자리비행에 관한 파라메트릭 연구는 여러 연구자들에 의해 수행한바 있다.

Dickinson et al.[6]은 normal hovering을 모사한 실험에서 "Rotational Circulation"에 대한 효과를 알아보기 위해 "robofly"의 rotation을 translation에 대해 선행, 중립, 후행 등으로 나누어 실험하였다. 세 가지 경우에서 발생되는 양력의 크기를 조사함으로써 "Rotational Circulation"에 의한 양력증가를 제시할 수 있었다. Miller와 Peskin[7]은 레이놀즈수에 따른 양력발생과 와류의 거동을 알아보기 위해 Re=8~128의 영역에서 날개운동에 대한 전산해석을 수행하였다. 그들의 결과에 의하면 Re>64에서는 앞전과 뒷전와류의 떨어져나감으로 인해 Karman vortex가 생성되었으며, Re<32에서는 앞전 및 뒷전와류가 부착되어 있음을 발견하였다. Wang[8,9]도 레이놀즈수에 따른 양력발생에 관해 연구하였는데, 2차원 계산에서 양력은 특정 레이놀즈수(Re=314) 이상부터 더 이상 증가하지 못함을 보여주고 있다. 날개운동에 따른 영향은 Sane and Dickinson[10]이 "robofly"를 이용하여 실험한 바 있다. 이들은 곤충들이 날개에서 발생시키는 힘을 어떤 방식으로 제어하는지를 알아보기 위해 191개의 서로 다른 케이스를 선택하여 실험하였다. 또한 Wang[11]은 inclined hovering과 normal hovering의 차이점을 분석하기 위해 날개운동을 간단한 삼각함수를 이용하여 2차원으로 모델링하고 이를 전산해석 하였다.

날개운동의 파라메트릭 연구는 곤충비행의 양력과 추력발생에 관계된 유동현상을 물리적으로 좀 더 명확하게 이해할 수 있는 근거를 제시할 수 있으며, 그 결과 자체로도 초소형비행체의 설계에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 해석방법은 part 1의 결과에 part 2에서 계산한 결과를 비교하는 방식으로 진행하였다. 해석결과 "8자 운동"을 구성하는 운동성분 중 rotation이 추력발생에 지배적인 역할을 하는 것으로 나타났으며, 이와 관련된 반시계방향의 회전순환이 추력발생에 있어서 중요한 역할을 하고 있는 것으로 드러났다.

II. 수치 기법

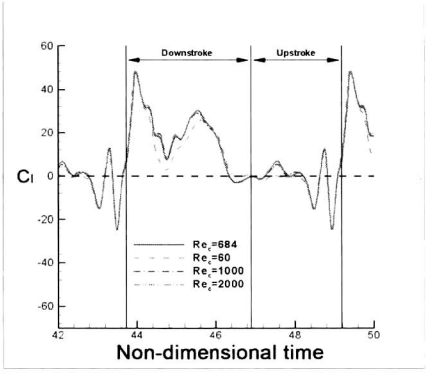
지배방정식 및 수치기법은 part 1에서와 동일하다.

III. 해석 결과

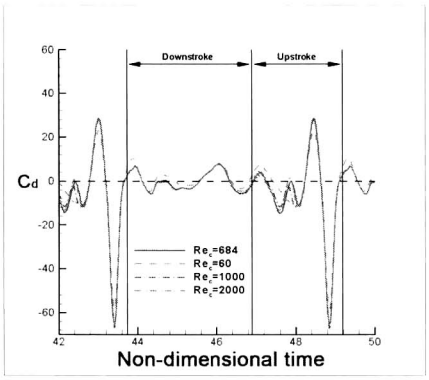
3.1 레이놀즈수의 영향

곤충비행에서 레이놀즈수를 정하는 방법은 몇 가지가 있다[12]. 이중 코드를 특성 길이로 선택하게 되면 곤충들은 $10^1<Re_c<10^4$ 영역에서 비행하게 된다[13]. Part 1의 표 1을 보면 검정금파리의 tethered flight도 이 영역에 포함된다. 레이놀즈수에 따른 유동장 및 공기역학적 힘의 발생에 대한 영향을 알아보기 위해 다른 조건들은 part 1에서와 같게 하고, Re_c=60, 1000, 2000에 대해 해석하여, Re_c=684의 결과와 비교하였다.

그림 1-(a)는 양력계수, (b)는 항력계수의 시간적 변화를 보여준다. 그림에서 Re_c=60을 제외하고, 레이놀즈수에 따른 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 공력계수들의 시간적 변화 말고도 이들의 시간 평균한 값으로도 레이놀즈수에 따른 영향을 살펴볼 수 있다. 표 1에 한 stroke동안 계산된 공력계수들을 시간 평균하여 나타내었다. 특징적인 것은 레이놀즈수가 684이상에서는 양력과 추력계수의 시간평균값이 그다지 큰 차이를 나타내고 있지 않다는 것이다. 이는 Wang[8]의 2차원 계산결과와 비슷하다. Wang은 잠자리의 inclined hovering을 모델링한 2차원 계산에서 314 이상의 레이놀즈수에서는 양력이 더 이상 증가하지 않고 일정한 값으로 수렴하는 것을 보여



(a)



(b)

그림 1. 레이놀즈수에 따른 효과, (a) 양력계수, (b) 항력계수

표 1. 평균 공력 계수(레이놀즈수에 따른 효과)

	C_l	C_t	L/D
Re_c = 60	8.177	1.064	7.685
Re_c = 684	9.898	2.632	3.761
Re_c = 1000	9.971	2.679	3.722
Re_c = 2000	10.231	2.678	3.820

주었다. 시간 평균된 값으로 등속수평비행을 한다고 가정하면 항력은 추력과 같기 때문에 추력계수를 이용하여 양항비를 구할 수 있다. 표 1을 보면, Re_c=684이상에서는 양항비가 3.7~8 정도로 계산되었다. 참고문헌[12]에 의하면 레이놀즈수 2000에서 검정금파리와 함께 같은 검정파리과에 속하는 큰검정파리(*Calliphora*)의 양항비가 3:1 이므로 해석조건이 같지는 않지만, "8자 운동"을 2차원 에어포일의 강체운동으로 단순화시킨 본 연구의 해석도 타당한 것으로 보인다. 각 레이놀즈수에 따른 유동장의 형태는 그림 1에 나타낸 양력과 추력계수의 패턴이 비슷한 만큼, 큰 차이는 없었다.

3.2 Reduced Frequency의 영향

주기적으로 진동하는 에어포일 주위의 유동장 특성은 레이놀즈수 외에도 Strouhal 수의 영향을 받는다[14]. 따라서 곤충비행에서도 Strouhal 수는 중요한 무차원 수가 될 것이며 이의 정의는 식(1)과 같다.

$$St = kh_{te}/\pi \tag{1}$$

여기서 h_{te}는 flapping 에어포일 연구에서 통상적으로 에어포일 끝단의 최대 수직변위를 사용하는데, 본 연구의 h_{te}는 "8자 운동"으로 주어졌기 때문에 Strouhal수는 reduced frequency에 의해서만 영향을 받는다. 해석 대상으로 k=0.5 와 0.82를 택하여 k=1.155의 결과와 비교하였다.

표 2는 한 stroke 동안 공력계수들의 시간 평균된 값을 나타낸다. Reduced frequency의 값이 작을수록 양력과 추력계수의 시간평균값은 감소하고, k=0.5일 때 추력계수는 음(-)이 되므로 항력을 발생시키고 있다. 그림 2는 k=0.5에서 양력과 항력계수의 시간적 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보면 양(+)의 양력은 그림 1과 비슷하게 대부분 downstroke에서 발생된다. 본 논문에 나타내지는 않았지만, downstroke시의 앞전와류가 여전히 양력발생에 기여하고 있는 것으로 나타났다. 다음으로 항력계수를 살펴보면 전체적으로 대단히 많은 항력을 허용하고 있을 볼 수 있는

표 2. 평균 공력 계수 (reduced frequency에 따른 효과)

	C_l	C_t
k = 0.50	2.615	-0.810
k = 0.82	5.867	0.230
k = 1.155	9.898	2.632

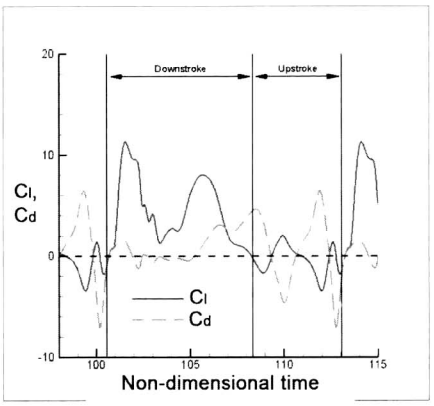


그림 2. k=0.5일 때, 시간 의존적 공력 계수, 양력계수(선), 항력계수(점선)

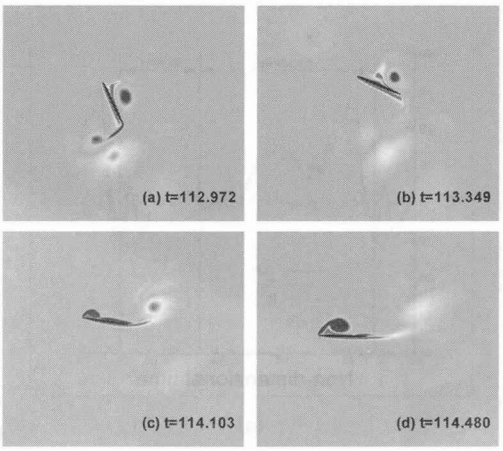


그림 3. Upstroke에서의 와도분포 (k=0.5), (a) t=112.972, (b) t=113.349, (c) t=114.103, (d) t=114.480

데, 특히 downstroke와 upstroke사이의 rotation 구간에서 많은 항력이 발생되며, upstroke 끝에서 발생되는 추력도 그림 1의 Re_c=684와 비교했을 때 대단히 작아 앞서 발생된 항력을 상쇄시키지 못하고 있다. 추력발생의 이 같은 특성은 그림 3에 보인 와도장으로 이해될 수 있을 것이다. 그림 3은 k=0.5일 때 upstroke 끝에서 최대추력이 발생할 때의 와도장을 보여준다. Part 1의 그림 5와는 달리 후류에서 와류 짝 현상이 뚜렷하게 보이지 않는다. 이로써 part 1에서 언급했던 와류 짝 현상이 갑작스런 큰 추력발생의 유동장 형태가 됨을 재차 확인할 수 있다.

Part 1에 나타난 와류 짝 현상을 3차원으로 생각한다면 유동방향에 수직으로 생성되는 와환(vortex ring)의 단면으로 생각될 수 있고, 그러면 part 1의 그림 6은 와환중심에 있게 되는 제트가 된다. Brodsky[12]는 3차원 와환구조가 chain형태라고 설명했지만, Grodnitsky and Morozov[15]와 Dickinson and Gőtz[16]는 단일 와환이 독립적으로 형성된다고 하였다. 또한 Willmott et al.[17]은 수직방향의 와환과 수평방향의 와환이 생성된다고 하였다. 이처럼 tethered flight를 이용한 가시화 실험에서도 날개의 형태나 종에 따라 다양한 형태의 와환구조를 보여주기 때문에 어떤 형태가 일반적이라고는 단정할 수는 없다. 따라서 검정금파리가 Dickinson의 초파리나 Willmott등이 실험했던 박각시나방과 같이 기능적으로 두 개의 날개를 갖는 곤충(functionally two winged insect)이지만, 앞서 언급한 연구자들의 결과와는 다른 와환구조를 발생시킬지도 모르며 그 예가 유동방향에 수직으로 분포하는 와환일 수도 있을 것이다. 표 3은 k=0.5에서 레이놀즈수에 따른 양력과 추력계수의 시간평균값을 나타내는데, 추력계수의 값이 음(-)이므로 항력을 발생시키고 있음을 알 수 있고 표 1과 마찬가지로 Re_c = 684이상에서는 양력 및 항력의 크기가 레이놀즈수에 따라 크게 차이나지 않고 있다.

표 3. k=0.5일 때의 평균 공력 계수 (레이놀즈수에 따른 효과)

	C_l	C_t
Re_c = 60	2.054	-1.487
Re_c = 684	2.615	-0.810
Re_c = 1000	2.685	-0.852
Re_c = 2000	2.799	-0.868

3.3 운동성분의 영향

"8자 운동"은 part 1에서 언급하였듯이 translation, lagging, 그리고 rotation으로 구성된다. 각각의 운동성분이 양력과 추력발생에 어떤 역할을 하는지를 알아보았다. 그림 4는 rotation만으로 해석한 결과와 "8자 운동" 해석에서 얻어진 양력과 추력계수의 시간적 변화를 비교한 것이다. 그림에서 TLR(Translation+Lagging+Rotation)은 "8자 운동"을, R은 rotation만을 뜻한다. 우선 양력계수를 보면 rotation만으로 발생되는 양력은 "8자 운동"에 비해 대단히 적음을 알 수 있다. 더구나 전체적인 양력계수의 패턴은 upstroke 끝을 제외하면 downstroke에서는 전혀 다른 특성을 보인다. 반면 추력계수는 "8자 운동"의 결과와 비교했을 때 downstroke와 upstroke사이에서만 차이를 보일뿐 전반적으로 비슷하다. 따라서 "8자 운동"의 rotation은 양력발생에는 큰 영향을 끼치지 못하지만, 추력발생에는 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다.

그림 4에 나타난 공기역학적 힘의 발생에 있어 rotation의 효과는 그림 5에서 유동장의 형태로 확인할 수 있다. (a)에서부터 rotation을 시작하는 에어포일은 (b)와 (c)에서 시계방향으로 회전하는 와류를 뒷전에서부터 떨어져 나가게 한다. 이 와류는 급격하게 rotation을 시작할 때 발생되는 것이므로 참고문헌[18]에 기술된 것처럼 RSV(Rotating Starting Vortex)가 된다. 이 RSV는 part 1의 그림 5와 같이 에어포일 앞에 머무르며 와류정지 현상을 일으키고 있다. ((b)~(d)) 이는 에어포일 앞면을 지속적으로 저압영역에 있도록 하여, 상대적으로 고압인 뒷면과의 압력차이로 추력을 생성시키고 있다. 그 다음 (e)를 보면 에어포일 윗면에서 새로운 와류가 생성되는데, 이는 에어

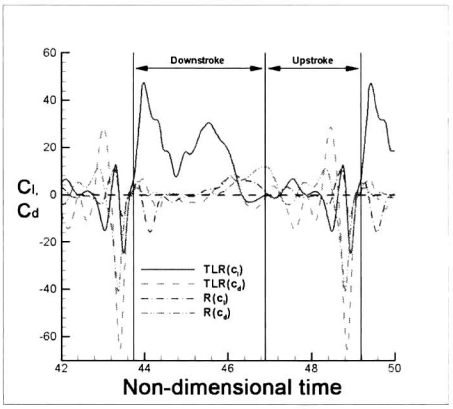


그림 4. 시간 의존적 공력계수(회전 효과), TLR: 8자 운동, R: 회전운동

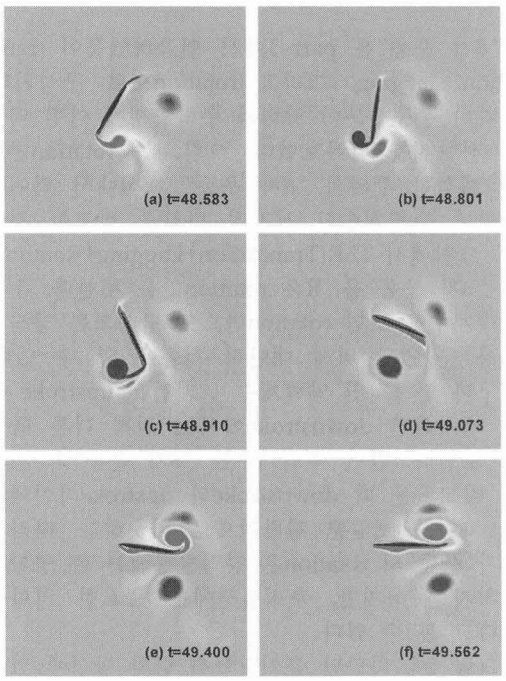
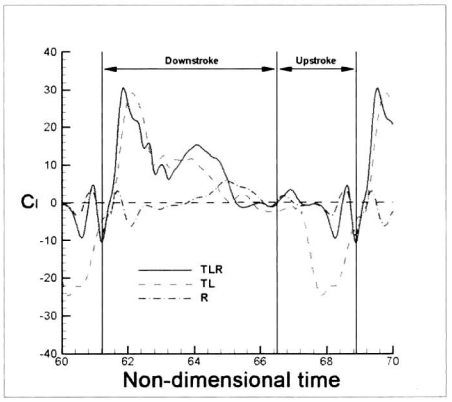
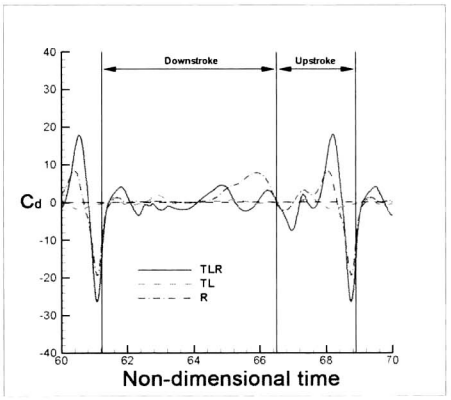


그림 5. 회전운동에서의 와도 분포, (a) t=48.583, (b) t=44.122, (c) t=44.394, (d) t=44.666, (e) t=45.482, (f) t=45.972

포일이 rotation을 멈추면서 발생하는 것으로 stopping vortex로 볼 수 있다. 이 두 와류는 (f)에서 짝(pairing)을 형성하는데, 이것은 part 1에서 설명한 와류 짝 현상과 같은 것이며, 와류 사이에 강한 제트가 발생함을 통해 추력발생을 확인할 수 있었다. 이로써 rotation이 "8자 운동"에서 갑작스러운 추력발생에 중요한 메커니즘을 제공한다는 사실을 유동장으로 부터도 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 6. 운동 성분에 따른 효과, k=0.82일 때의 (a) 양력계수, (b) 항력계수, TLR: 8자 운동, TL: 병진운동, R: 회전운동.

Rotation 이외에 translation과 lagging 운동이 공력특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 "8자 운동"에서 rotation만 제거한 후 계산을 수행하였다. 해석 시 k=1.155에서는 양력과 추력계수가 주기적인 특성을 보이지 않아 공력특성이 비슷한 k=0.82에 대해 수행하였다. 그림 6에 "8자 운동"(TLR)과 translation과 lagging의 합성(TL) 그리고 이 둘과 비교를 위해 계산한 rotation(R)의 결과를 각각 나타낸다. 그림 6-(a)에서 downstroke 중 양력계수의 패턴은 TL의 경우 "8자 운동"의 양력계수 패턴과 거의 흡사하지만, upstroke 중에는 음(-)의 양력을 발생시키는 것으로 나타났다. 이때 R은 그림 4와 같이 양력발생에 기여하지 못하고 있다.

추력발생에 대해서 그림 6-(b)을 보면 TL에서는 추력이 거의 발생되지 않고, rotation에 의한 추력계수가 전체 "8자 운동"의 결과와 거의 비슷한 패턴을 보이고 있다. 따라서 reduced frequency

가 낮아지더라도 rotation에 의한 효과는 그림 4와 같음을 알 수 있다. 또 그림 6-(a)에서 보듯이 TL의 조합으로는 upstroke 구간에서 과도한 음의 양력이 발생하고 있는데, 이를 rotation이 전체 "8자 운동"에서 상당부분 회복시켜 주고 있음을 알 수 있다. 따라서 앞전에서 발생하는 동적 실속에 의한 앞전와류의 생성은 전적으로 translation과 lagging 운동의 조합에 의한 효과라고 볼 수 있고, 추력발생의 대부분은 rotation 운동에 기인한다고 할 수 있을 것이다. 이미 Part 1에서 앞전와류의 발생은 유효받음각에 의한 효과라고 지적한바 있다. Part 1의 식(5)를 보면 유효받음각은 transaltion, lagging의 속도와 관계되므로 유효받음각에 의한 앞전와류가 생성된다고 한 part 1의 결과를 확인할 수 있다.

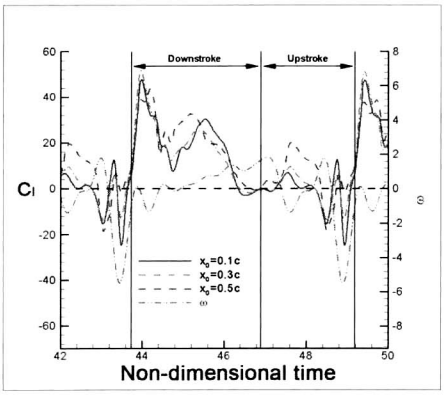
3.4 Rotation의 영향

그림 4, 5, 6에서 rotation이 추력발생의 지배적인 운동인 것으로 나타났다. Rotation하는 에어포일은 각속도(ω)를 갖고 있으며, 각속도는 회전순환(rotational circulation)과 관계된다. 곤충날개와 같이 얇은 에어포일의 회전순환은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다[1].

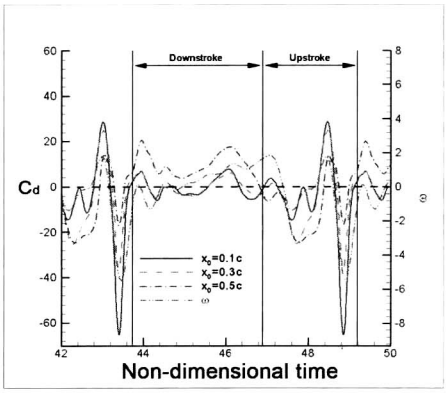
$$\Gamma_r = \pi\omega c^2(0.75 - x_0) \qquad (2)$$

여기서 c는 에어포일 시위길이, x_0는 앞전으로부터 rotation 중심까지의 무차원 거리이며, 각속도는 시계방향을 양(+)으로 하였다. 회전순환의 크기는 각속도뿐만 아니라 rotation 중심도 변수가 되므로 x_0=0.3c, 0.5c의 경우를 계산하여 x_0=0.1c의 경우와 비교 하였다.

그림 7은 rotation 중심에 따른 양력과 추력계수 변화를 보여준다. 먼저 그림 7-(a)에서 양력계수와 각속도의 패턴을 비교해 보면, upstroke 끝을 제외하고 전반적으로 일치하지 않는다. 그러나 그림 7-(b)의 추력계수와 각속도의 패턴은 매우 비슷함을 알 수 있다. 따라서 추력의 발생은 회전순환과 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다. Part 1에서 그림 1, 2, 5 그리고 그림 5를 보면 최대추력이 발생될 때 에어포일은 반시계방향으로 rotation한다. 식(2)에서 회전순환과 각속도의 방향은 같기 때문에 결국 추력발생에 관여하는 순환의 방향은 반시계 방향임을 알 수 있다. 회전순환(Γ_r)은 출발와류에 의해 생성되고 양력발생과 관계된 시계방향의 순환(Γ_t)과 방향이 틀리기 때문에 서로 반대되는 경향을 나타낼 것이다. 이를 구체적으로 살펴보기 위해 그림 7과 표 4를 보기로 하자.



(a)



(b)

그림 7. 회전순환 효과, (a) 양력계수, (b) 항력계수

표 4. 평균 공력 계수(회전순환 효과)

	C_l	C_t
x_0 = 0.1c	9.898	2.632
x_0 = 0.3c	10.220	2.435
x_0 = 0.5c	13.930	-2.180

표 4에서는 시간 평균된 공력계수들을 보여준다. Rotation 중심이 멀어질수록 시간 평균된 양력계수는 증가하지만 추력계수의 시간평균값은 작아지고 있다. 추력은 반시계방향의 회전순환에 의해 관계되고, 양력은 시계방향의 순환과 관계된다면, 회전순환에 의해서는 음(-)의 양력이 유발되려는 특성을 보일 것이다. 식(2)에서 회전순환은 각속도가 주어질 때, 앞전에서 회전중심이 가까울수록 절대값이 커지는 것을 알 수 있다. 본 계산에 이용된 reduced frequency가 모두 같기 때문에 회전순환에 따른 영향은 전적으로 회전중심의 거리에 따른다. 그러므로 x_0=0.1c의 경우가 x_0=0.5c 보다 매순간 회전순환의 절대값이

크다. 이러한 유추를 바탕으로 한다면 그림 7-(a)에서 upstroke 끝의 음(-)의 양력은 x_0=0.1c의 경우가 가장 크게 되는 것을 이해할 수 있을 것이다. 마찬가지로 시간 평균된 양력계수도 x_0=0.1c에서 가장 작고 반시계 방향의 회전순환을 가장 작게 유도하는 x_0=0.5c의 경우가 가장 큰 값을 갖게 된다. 같은 방식을 적용 한다면 그림 7-(b)도 이해될 수 있다. 즉, x_0=0.1c의 경우가 동일한 각속도가 주어졌을 때, 가장 큰 회전순환을 발생시키기 때문에 최대 추력이 가장 크고 이에 따라 시간 평균된 추력계수가 가장 커지게 되는 것이다.

그림 8은 양력과 추력발생에 관계된 물리적 현상을 그림으로 설명해 놓은 것이다. 양력은 downstroke 초기 TSV(Transaltion Starting Vortex)가 후류쪽로 떨어져 나가면서 생성된 순환에 의해 형성되고, 앞전와류에 의한 양력증가가 이에 더해지게 된다. 그에 반해 추력은 식(2)에 나타난 회전순환과 관계된다. 급격하게 rotation을 하게 되면 회전순환과는 반대로 시계방향으로 회전하는 RSV(Rotating Starting Vortex)가 날개뒷전에서 생성되는 것은 충분히 이해될 수 있을 것이다. 결과적으로, 양력은 TSV에 의해 유도되는 에어포일 주위의 시계방향의 순환으로 발생되고, 추력은 회전순환과 관계되는데, 이와 반대로 날개뒷전에서 생성되는 RSV가 part 1에서 나타났던 와류정지 현상 및 와류 짝 현상을 유도하게 되는 것이다. 따라서 검정금파리는 downstroke에서 TSV에 의한 Γ_t의 형성으로 양력을 얻고, upstroke에서 Γ_r을 이용하여 추력을 얻고 있는 것이었다.

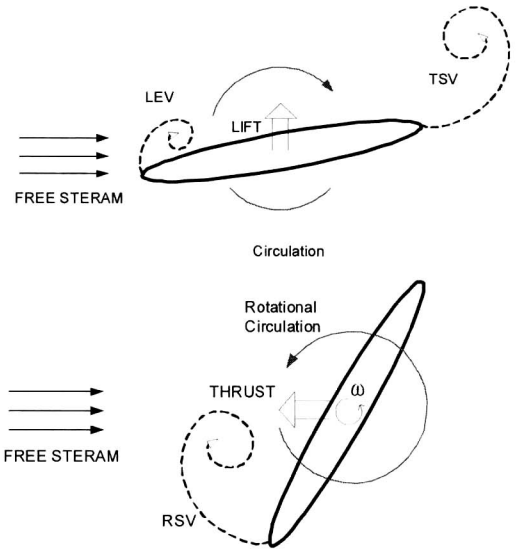


그림 8. 공기역학적 힘과 순환의 관계, (a) 양력 발생 (b) 추력 발생

IV. 결 론

검정금파리의 "8자 운동"에서 생성되는 양력과 추력발생 원리를 물리적으로 좀 더 자세하게 이해할 수 있도록 파라메트릭 연구를 수행하였다. 레이놀즈수에 관해서는 특정 레이놀즈수 이상에서 양력이나 추력의 큰 증가는 없었다. 추력의 발생에 있어 rotation의 영향이 매우 크다는 점을 밝혀내었고, 에어포일의 각속도는 회전순환과 관계되므로 이에 대해 고찰해 보았다. 추력발생은 반시계방향의 회전순환과 밀접한 연관성을 나타내었고 이는 양력발생에 관여하는 순환의 방향과 반대이기 때문에 음(-)의 양력을 발생시키는 요인이 되었다. 따라서 검정금파리는 양력과 추력을 유도함에 있어 서로 다른 방향의 순환을 이용하고 있음이 밝혀졌다. 이에 따라 upstroke 끝에서 나타나는 갑작스러운 추력발생이 회전순환으로 설명되었으며, 이는 초소형 비행체의 설계에 있어 매우 흥미롭고 유용한 물리적 근거가 될 것이다.

후 기

이 논문은 2005년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었으며, 국방과학연구소, 서울대학교 비행체 특화센터 및 서울대학교 항공우주신기술연구소의 연구비 지원에 의한 연구결과입니다.

참고문헌

1) Lehmann, F., "The Mechanism of Lift Enhancement in the Insect Flight", *Naturwissenssenschaften*, Vol. 91, 2004, pp. 101~122.

2) Birch, J. M., Dickson, W. B., and Dickinson, M. H., "Force Production and Flow Structre of Leading Edge Vortex on Flapping Wings at High and Low Reynolds Numbers", *J. Exp. Biol.* Vol. 207, 2004, pp. 1063~1072.

3) Berg, C. van dan, and Ellington, C. P., "The Three-Dimensional Leading-Edge Vortex of a 'Hovering' Model Hawkmoth", *phil. Trans.R. Soc. Land.* B, Vol. 352, 1997, pp. 329~340.

4) 이정상, 김종암, "곤충비행의 급격한 추력발생에 관한 2차원적 연구", 한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집, 2006, pp. 423~426.

5) Grodnitsky, D. L., "Form and Function of Insect Wings", *The Johns Hopkins University press*, 1999.

6) Dickinson, M. H., Lehmann, F., and Sane, S. P., "Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight", *SCIENCE*, Vol. 284, 1999, pp. 1954~1960.

7) Miller, L. A., and Peskin, C. S., "When Vortices Stick: An Aerodynamic Transition in Tiny Insect Flight", *J. Exp. Biol.* Vol. 207, 2004, pp. 3073~3088.

8) Wang, Z. J., "Two Dimensional Mechanism for Insect Hovering", *Phy. Rev. lett.*, Vol. 85, 2000. pp. 2216~2219.

9) Wang, Z. J., "Dissecting Insect Flight", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 37, 2005. pp. 183~210.

10) Sane, S. P., and Dickinson, M. H., "The Control of Flight Force by a Flapping Wing: Lift and Drag Production", *J. Exp. Biol.* Vol. 204, 2001, pp. 2607~2626.

11) Wang, Z. J., "The Role of Drag in Insect Hovering", *J. Exp. Biol.* Vol. 207, 2004, pp. 4147~4155.

12) Brodsky, A. K., "The Evolution of Insect Flight," *Oxford Univ. Press*, 1994.

13) John B. Anders, "Biomimetic Flow control", AIAA paper, 2000-2543.

14) Anderson, J. M., Streitlien, K., Barrett, D. S., and Triantafyllou, M. S., "Oscillating foils of high propulsive efficiency", *J. Fluid Mech.*, Vol. 360, 1998, pp. 41~72.

15) Grodnitsky, D. L., and Morozov, P. P., "Vortex Formation During Tethered Flight of Functionally and Morphologically Two-Winged Insects, Including Evolutionary Considerations on Insect Flight", *J. Exp. Biol.* Vol. 182, 1993, pp. 11~40.

16) Dickinson, M. H., and Gőtz, K. G., "The Wake Dynamics and Flight Forces of the Fruit Fly *Drosophila Melanogaster*", *J. Exp. Biol.* Vol. 199, 1996, pp. 2085~2104.

17) Willmott, A. P., Ellington, C. P., and Thomas, A. R., "Flow Visualization and Unsteady Aerodynamics in the Flight of the Hawkmoth, *Manduca Sexa*", *Phil. Trans. R. Soc. Land.* B, Vol. 352, 1997, pp. 303~316.

18) Birch, J. M., and Dickinson, M. H., "The Influence of Wing-Wake Interation on the Production of Aerodynamic Force in Flapping Flight", *J. Exp. Biol.* Vol. 206, 2003, pp. 2257~2272.