

곤충비행에서 추력발생에 관한 2차원 유동장 특성 - 와류정체 및 와류 짝 현상

이정상¹, 김진호¹, 김종암²

TWO-DIMENSIONAL FLOW PROPERTIES OF INSECT FLIGHT ABOUT THRUST GENERATION -VORTEX STAYING AND VORTEX PAIRING PHENOMENA

Jung-Sang Lee¹, Jin-ho Kim¹ and Chongam Kim²

Many researchers have made an effort to explain flight mechanism of flapping insects. As a result, several unsteady mechanisms about lift generation in insect flight have been proposed. But it has a limits to elucidate insect's forward flight and abrupt thrust, because most of these are about insect's hovering flight. For this reason, the objective of this paper is to simulate "figure-of-eight motion" of insect's wing during tethered flight for comprehending aerodynamic property in insect's forward flight.

Key Words: 곤충비행(Insect Flight), 비정상유동(Unsteady Flow), 와류(Vortex)

1. 서론

과거 곤충비행의 해석에는 일반적인 항공기에 적용되는 정상상태 공기역학[2]이 이용되었지만, 정상상태 공기역학은 곤충비행을 설명하기에 부적합한 것으로 알려지게 되었다.[2-4] 그러나 최근 곤충의 날갯짓을 모사할 수 있는 다양한 실험적/수치적 해석기법 등의 발달로 양력증가(lift enhancement)를 설명할 수 있는 비정상(unsteady) 메커니즘을 발견하게 되었다.[3] 여러 연구자들에 의해 제안된 비정상 메커니즘은 곤충의 양력발생에 관해 과거 알지 못했던 사실들을 알려주지만, 대부분이 제자리비행에서 양력증가에 관한 것이므로, 전진비행이나 곤충비행의 특징인 급격한 기동을 설명하기에는 제한적이다.

이에 본 연구는 Nachtigall[9]의 실험에서 얻어진 검정금파리(Phormia Regina)의 날개운동을 2차원 비정상/비압축성, Navier-Stokes 방정식을 통해 해석하여, 양력과 추력발생에 관계된 물리적 현상을 유동장의 형태로 이해하는데 주력하였다.

2. 해석 기법

2.1 지배방정식과 수치기법

지배 방정식은 2차원 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식으로, "8자 운동"을 모사하기 위해 동적격자 기법을 도입하였다. Pseudo-compressibility 기법을 적용하였다. 공간 차분은 Osher's Upwind Scheme과 MUSCL을, 시간 적분은 LU-SGS 기법을 사용하였으며, 비정상 계산을 위하여 이중시간전진법(dual time stepping)을 사용하였다. 적용된 수치해법의 자세한 내용은 참고문헌[10]에 잘 나와 있다.

본 연구에서 사용된 해석코드는 Lee et al.[11]에 의해 pitching운동을 하는 에어포일의 실험결과와 비교되어 검증되었다. 검정금파리의 chord 레이놀즈수의 크기가 102 정도이므로, 전 유동을 층류로 가정하였다.

2.2 검정금파리 날개의 운동모델

곤충날개의 움직임을 측면에서 관찰하면 날개 끝(wing tip) 궤적은 "8자"처럼 보이는데, 이와 같은 운동을 "8자 운동"(figure-of-eight motion)이라 하며, 많은 종류의 곤충들이 제자리 및 전진비행에 이를 이용한다.[1,6]

Nachtigall은 초속 2.7m의 자유류 앞에 검정금파리를 붙여

1 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

2 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

* Corresponding author E-mail: chongam@snu.ac.kr

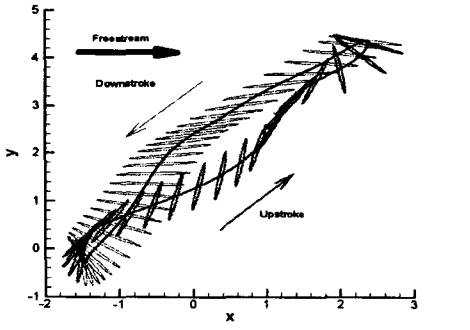


Fig. 1 Position of wing element of Phormia-Regina tethered flight during one stroke, Downstroke phase(red solid), upstroke phase(green solid)

놓고, 고속촬영을 통해 날개운동의 3차원 궤적을 얻어내었다.[9] 본 연구에서는 Nachtigall이 관찰한 결과를 Fourier 급수로 나타낸 식(1)을 운동 모델로 사용하였다. Fourier 급수의 계수들은 참고문헌[12]에서 확인할 수 있다.

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^m a_n \cos(nkt) + b_n \sin(nkt) \quad (1)$$

$$F(t) = [x(t), y(t), \alpha(t)]^T$$

여기서 t는 무차원화 된 physical time을 뜻하고, k는 reduced frequency($k = 2\pi fc / U_\infty$), f는 날갯짓 frequency, U_∞ 는 자유류 속도, c는 시위길이를 나타낸다. 식(1)에 따라 검정 금파리 날개는 Fig. 1과 같이 "8자" 형태로 나타내어진다. 그림에서 보듯이 "8자 운동"은 스패ن방향을 축으로 하는 rotation($\alpha(t)$)과 수직방향으로의 translation($y(t)$) 그리고 날개를 앞뒤로 흔드는 lagging($x(t)$)으로 구성된다.

3. 해석 결과

3.1 "8자 운동"에 따른 운동장 해석

Nachtigall의 실험으로 부터 운동해석에 필요한 무차원수를 계산해 보면 table 1과 같다.

Table 1. Experimental data from Ref.[9]

자유류속도	U_∞	2.7m/s
날갯짓 진동수	f	130 Hz
평균시위	c	3.8 mm
회전중심	% of chord	약 10%
레이놀즈수	Rec	684
Reduced Frequency	$k=2\pi fc/U_\infty$	1.155

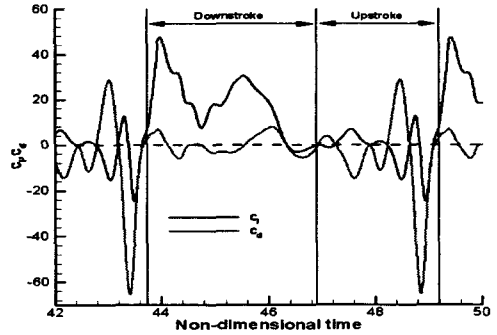


Fig. 2. Time-dependent aerodynamic coefficients, lift coefficient(red line), drag coefficient(green line)

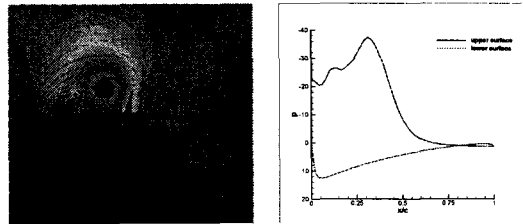


Fig. 3. Leading edge vortex at $t=44.122$, (a) pressure and velocity vector field, (b) pressure distribution on the wall

실제 곤충날개는 유연하고 단면이 얇고 다양하지만, 해석을 간단히 하기 위해 최대 두께가 시위에 5%인 얇은 타원형 에어포일을 이용하였다. 벽면에서 첫 번째 격자점 간격이 5×10^{-3} 인 201×85 크기인 O-격자를 사용했다.

Fig. 2는 무차원 시간에 따른 공력계수의 변화를 보여준다. 여기서 음(-)의 항력계수 값은 추력계수를 의미하며, downstroke와 upstroke영역을 각각 표시하였다. 양력과 항력계수의 시간에 따른 변화는 매우 복잡한 양상을 보여주며, 순간적으로 매우 큰 값(순간 최대양력계수; 47.52, 순간 최대추력계수; 64.66)을 나타내었다. 식(2)를 이용하면 양력/추력계수의 시간평균값이 9.898과 2.632로 각각 구해졌다.

$$\bar{c} = \frac{1}{T} \int_0^T c(t) dt \quad (2)$$

식(2)에서 T는 한 stroke동안의 시간이고, c(t)는 순간적인 공력계수들(양력, 항력)을 뜻한다. Fig. 2를 보면 양력은 downstroke중에 주로 나타나고, 추력은 upstroke 끝에서 갑작스럽게 발생하고 있음을 알 수 있다.

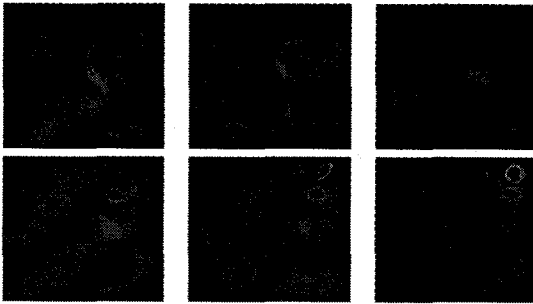


Fig. 4 Vorticity contours during upstroke, (a) $t=48.583$, (b) $t=44.122$, (c) $t=44.394$, (d) $t=44.666$, (e) $t=45.482$, (f) $t=45.972$.

3.2 downstroke시의 공력특성

앞전와류의 효과를 살펴보기 위해 압력장과 표면압력 분포를 관찰해 보았다. Fig. 3(a)는 최대 양력이 발생할 때의 압력장과 속도벡터를, Fig. 3(b)는 이때 시위에 따른 벽면압력분포를 보여준다. Fig. 3(a)의 앞전와류중심과 Fig. 3(b)의 suction 위치가 일치하며, upper와 lower의 벽면압력분포 차이로부터 앞전와류가 양력증가의 결정적 원인임을 보여주고 있다.

앞전 와류는 Ellington[4,7]과 Dickinson[8]의 제자리비행(normal hovering)실험에서 이미 관찰되었으며, 날개가 높은 받음각을 유지하면서 translation을 할 때 발생한다. 하지만, Fig. 1,3을 보면 이들의 결과와는 다르게 받음각이 크지 않음에도 불구하고 앞전와류가 발달하며 이것이 양력증가에 기여하고 있음을 알 수 있다. 이는 제자리비행과 전진비행에서의 날개운동이 근본적으로 다르기 때문에 앞전와류의 발생방법도 다를 수 있다는 것을 의미한다. Normal hovering의 날개운동은 참고문헌[2,3,5]에 나와 있듯이 날개가 높은 받음각을 유지하며 translation하게 되지만, 이를 전진비행에 그대로 적용시키면 양력발생에 기여하던 날개 뒷면의 앞전와류로 인해 과도한 항력을 유발시키게 될 것이다. 따라서 Fig. 3의 앞전와류는 높은 받음각 대신 에어포일의 운동 속도를 이용한 유효받음각의 증가에 따른 결과라고 생각된다. 유효받음각은 quasi-steady 개념으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{eff} = \alpha - \tan^{-1}(v' / (U_{\infty} - u')) \tag{3}$$

여기서 v' 은 translation 속도이고, u' 는 lagging 속도이다. 식 (3)로부터 유효받음각은 downstroke시 translation과 lagging운동의 속도가 증가할수록 커지게 됨을 알 수 있다.

3.3 Upstroke시의 공력특성

Fig. 2는 무차원 시간 $t=48.6-49.1$ 에서 갑작스럽게 발생하

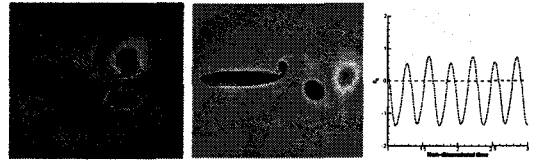


Fig. 5 (a) Vortex pairing and jet flow in the wake, (b) Inverse Kármán vortex, (c) Variation of drag coefficient with non-dimensional time $Re=12000$, pitching amplitude=10o, $k=10$, maximum thickness is 12% of chord length

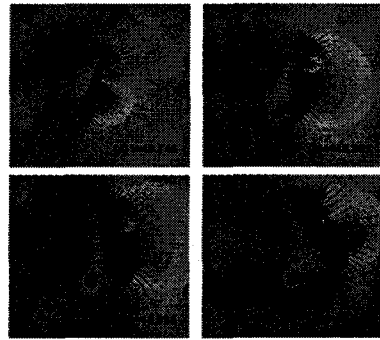


Fig. 6 Pressure and velocity vector field, (a) $t=48.746$, (b) $t=48.801$, (c) $t=48.855$, (d) $t=48.910$

는 큰 추력을 보여준다. Fig. 4의 (a)-(e)는 이때의 와도장을 나타내고, (f)는 다음 주기 downstroke 시작부분에 해당된다. 에어포일은 Fig. 4(a)에서 반시계방향으로 급격하게 rotation을 시작한다.(a) 이후 뒷면(그림에서 에어포일의 뒷면) 전단층으로부터 시계방향으로 회전하는 와류가 떨어져 나가고 있다.(b) 이 와류는 완전히 떨어져 나가서(c) 에어포일 아래에 위치하게 된다.(d) Rotation이 끝나게 되면 에어포일 밑면 전단층으로부터 반시계방향의 새로운 와류가 발달하고(e), 이들 두 와류는 수직방향으로 짝을 이루어 후류 쪽으로 동시에 떨어져 나가고 있다.(f) Fig. 5(a)는 Fig. 4(f)의 후류부분을 확대한 것으로, 두 와류사이에 존재하는 유동방향의 jet을 속도벡터를 통해 보여준다.

두 와류가 한 쌍으로 존재할 때 주위 속도장은 두 와류에 의해 유도되는 속도의 중첩결과로 나타난다.[13]. Fig. 5(a)를 보면 위쪽에 있는 와류는 반시계방향, 아래쪽의 와류는 시계방향으로 회전하고 있으며, 자유류 방향에 대해 거의 수직으로 정렬되어 있기 때문에 와류사이의 속도중첩은 자유류 방향과 나란하게 형성되는 jet의 형태로 나타나게 된다. Jet은 주위유동에 운동량을 공급해주는 것이 되므로 이를 통해 추력발생을 입증할 수 있다.

이와 비슷한 후류 구조로 inverse Kármán vortex에 의해 유도되는 jet-like flow가 있다. Inverse Kármán vortex는 수직방향

으로 짝을 이루지 못하므로, Fig. 5-(a)과 같은 jet이 보이지 않는다.[14] Fig. 5-(b),(c)는 주기적으로 pitching운동을 하는 타원형 에어포일에서 inverse Kármán vortex의 형성과 항력(-추력) 계수의 시간적 변화를 각각 보여준다. 추력발생은 Fig. 2와는 달리 주기적인 특성을 나타낸다.

Fig. 6은 최대추력이 발생하는 $t=48.85$ 부근에서 에어포일 주위의 압력장과 속도장을 나타낸 것이다. 그림을 보면 에어포일 뒷면 전단층으로부터 시계방향의 와류가 뒷전부근에서 발달하고 있으며, 앞면에서도 작은 와류가 생성되고 있다. 여기서 뒷전와류는 나중에 와류 짝 현상을 이루게 된다. Fig. 7-(a)는 Fig. 6에서 에어포일의 뒷면(upper surface), (b)는 앞면(lower surface)에 작용하는 압력분포를 시간 순으로 나타낸 것이다. 우선 뒷면을 살펴보면 $t=48.746$ 에서 $t=48.801$ 까지 압력이 증가하고 있다. 그러나 최대추력이 발생하는 $t=48.855$ 와 $t=48.801$ 의 압력분포는 큰 차이가 없다. Fig. 6-(d)에 해당되는 $t=48.910$ 에서는 압력이 다시 낮아졌다. 뒷면의 압력이 증가하는 반면 앞면의 압력은 지속적으로 낮아지고 있다. 특히, $t=48.910$ 에서 뒷면의 압력이 증가를 끝내고 다시 낮아지고 있음에도 앞면의 저압영역은 $t=48.855$ 에서와 거의 비슷하게 유지되고 있다. 이는 앞면에서 생성된 와류가 후류로 이동하지 못하고 비슷한 위치에서 발달하고 있기 때문에 지속적인 저압영역을 유지시켜 주고 있는 것이다. 이러한 와류의 거동은 한번 떨어져 나간 와류를 이용한다는 점에서 Dickinson et al.[8]이 제시했던 “wake capture”와 비슷하나, 유동의 방향을 바꿔주는 것이 아니라 지속적으로 저압영역을 만들어준다는 점에서 새롭다고 할 수 있다.

뒷전와류의 정체 현상으로부터 와류 짝 현상을 좀 더 자세히 설명할 수 있다. 정체된 뒷전와류는 Fig. 4-(e)에 보인 에어포일 밑면의 전단층으로부터 발생하게 된 와류와 속도장에서 상호 간섭을 일으켜 와류 시스템으로써 같이 병진운동을 하고 있는 것이었다.

4. 결 론

검정금과리 날개의 “8자 운동”에 대한 2차원 비정상 유동장을 해석하였다. 해석결과 downstroke에서는 주로 양력이, upstroke 끝에서는 대단히 큰 추력이 갑작스럽게 발생하였다. 유동장의 분석을 통해 양력발생은 유효반음각의 증가에 따른 앞전와류의 발생과 관련되어 있으며, 추력발생은 upstroke 끝에서 발생하는 뒷전와류가 지대한 역할을 하는 것으로 나타났다. 뒷전와류는 에어포일 앞면에서 형성된 저압 영역을 지속적으로 유지시켜 압력 차이에 의한 추력을 유도한다. 또한 후류에서 나타나는 와류 짝 현상과 강력한 jet은 유동장의 형태로 갑작스러운 큰 추력발생을 설명해 준다. 이 같은 결과는

곤충들의 급격한 기동을 설명해 줄 수 있는 단초가 될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 두뇌한국21(BK21)과 서울대학교 비행체특화연구센터의 연구비 지원에 의한 연구결과입니다.

참고문헌

- [1] Brodsky, A. K., "The Evolution of Insect Flight," Oxford Univ. Press, 1994.
- [2] Dickinson, M. H., "Solving the Mystery of Insect Flight," Scientific American, 2001, p. 49-57.
- [3] Sane, S. P., "The Aerodynamics of Insect Flight," *J. Exp. Biol.*, Vol.206, 2003, p. 4191-4207.
- [4] Willmott, A. P., Ellington, C. P., and Thomas, A. R., "Flow Visualization and Unsteady Aerodynamics in the Flight of the Hawk-moth, *Manduca Sexta*," *Phil. Trans. R. Soc. Land. B*, Vol.3 52, 1997, p. 303-316.
- [5] Lehmann, F., "The Mechanism of Lift Enhancement in the Insect Flight," *Naturwissenschaften*, Vol.91, 2004, p. 101~122.
- [6] Ward-smith. A. J., "Biophysical Aerodynamics and the natural Environment," John Willy & Sons, 1984.
- [7] Ellington, C. P., Berg, C. van dan, Willmott, A. P., and Thomas, A. L. R., "Leading-edge Vortices in Insect Flight," *NATURE*, Vol. 384, 1996, p. 626-630.
- [8] Dickinson, M. H., Lehmann, F., and Sane, S. P., "Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight," *SCIENCE*, Vol.284, 1999, p. 1954-1960.
- [9] Nachtigall, W., "Insects in Flight," *McGraw-Hill*, 1974.
- [10] Kim, C., "Sensitivity Analysis for the Navier-Stokes Equations with Two-Equation Turbulence Models and Its Applications," PH. D. Dissertation, Dep's of Aerospace Eng., Seoul Nat'l Univ., Seoul, Korea, Feb. 2001.
- [11] Lee, J. S., Kim C., and Kim K. H., "A Design of Flapping-Airfoil for Optimal Aerodynamic Performance in Low-Reynolds Number Flows," *AIAA Journal*, Vol. 44, No. 9, September 2006.
- [12] <http://www.people.virginia.edu/~bhc3d/research>
- [13] Lugt, H. J., "Vortex Flow in Nature and Technology," John Wiley & Sons, 1983.
- [14] 이정상, 김종암, 노오현, “저 레이놀즈수 유동에서 Flapping-Airfoil의 수치적 공력특성 연구,” 한국항공우주학회지, 제30권, 제4호, 2002, p. 44-52.