KSAS09-1023

날갯짓 비행의 2차원 유동특성에 대한 수치적 연구 : 벌새의 제자리비행 및 전진비행

Study on Two-dimensional Flow Characteristics of Flapping Wing by Numerical Analysis : Hovering and Forward Flight of *Selasphorus rufus*

이현도*, 김진호, 김종암(서울대학교)

1. 서 론

고정익 비행체에 비하여 날갯짓 비행체는 자유로운 비행이 가능하다. 고정익 비행체는 이착륙시 활주거리를 필요로 하고, 비행상태를 유지하기 위해 속도를 필요로 하는 반면, 날갯짓 비행체는 이착륙이 자유롭고, 스스로 속도 조절이 가능하다는 장점이 있다. 또한 제자리비행, 후진비행도 가능하다. 이러한 이점을 가진 날갯짓 비행에 관한 연구는 실제 곤충 또는 조류를 모방하는 '생체모방공학'을 중심으로 이루어지고 있다. 하지만 복잡한 날갯짓 동작으로 인하여 비행동작이나 유동특성을 이해하고, 이를 응용하여 비행체를 개발하는 데에는 많은 어려움이 있다.

본 연구에서 다루는 벌새의 비행이 갖는 이점은 곤충과 조류의 중간적 특성을 나타내는 독특한 비행방식이라고 할 수 있다. 벌새는 전체가 하나의 단단한 구조인 날개를 가졌지만, 어깨는 매우 유연하게 움직인다. 또한 척추동물 중 가장 높은 생체 효율을 보이며, 동물 중 몸체에 대한 심장의 상대적인 크기가 가장 크다. Vanhom[1]은 인간이 만약 벌새와 같은 물질대사 능력을 지닌다면, 심장 박동수는 분당 1,260회, 체온은 385 ℃까지 상승할 것이라고 언급했다. 이러한 생물학적 특징은 벌새가 조류 중 유일하게 곤충과 같은 날갯짓 비행을 하는 것을 가능하게 해 준다. 크기나 무게의 관점에서 보더라도 벌새는 곤충과 조류의 중간 정도로 너무 크거나 무겁지도, 혹은 너무 작거나 가볍지도 않기 때문에 초소형 비행체 개발과 관련하여 주목을 받고 있는 것이다.

지금까지의 벌새의 날갯짓 비행에 대한 연구는 주로 운동학적 관점에서 이루어져 왔다. 본 연구에서 벌새의 날갯짓을 재현하기 위하여 참고한 Tobalske et al.[2]의 연구에서는 비행속도에 따른 날개, 몸통의 각도, 날갯짓 진폭 등을 관찰하였고, Tobalske 의 선행 연구에서는 벌새의 이륙운동과 관련한 관찰이 이루어졌다.

벌새의 날갯짓 비행에 대한 운동학적 분석을 통하여 날갯짓 비행을 모방하는 것도 초소형 비행체 연구에 있어서 하나의 시작이라고 할 수 있지만, 날갯짓 비행시 날개 주변 유동의 공기역학적 특성을 이해하고, 이 유동현상들을 응용할 수 있다면, 단순한 모방에 그치지 않고 한층 더 발전된 형태의 날갯짓 비행체를 개발하거나 쉽게 이해되지 않는 문제점들을 해결할 수 있는 실마리가 될 수 있을 것이라 생각된다.

본 연구는 Tobalske et al.[2]의 실험에서 얻어진 벌새(*Selasphorus rufus*)의 날갯짓 비행에 대한 2 차원 수치해석 연구이다. 벌새의 0~12m/s 의 비행에 대한 2 차원 수치해석 결과를 바탕으로 날갯짓 비행의 기본현상들을 이해하고, 공기역학적 관점에서 유동특성을 분석하고자 한다.

2. 지배방정식 및 수치 기법

본 연구에서 다루는 지배방정식은 2 차원 비정상/비압축성 Navier-Stokes 방정식이다. 과거 곤충이나 조류의 비행에 대한 수치해석에는 순간적인 날개 속도와 받음각 등에 대하여 수치해석을 수행하는 정상상태 유동이 고려되었으나, 선행 연구들에 의해서 낮은 레이놀즈 수의 공기역학 문제에 해당하는 곤충의 날갯짓 비행을 설명하는 데에는 유동을 정상상태로 고려하는 것

이 부적합한 것으로 알려졌다. 날갯짓 주변에서의 공기는 압축성 효과를 무시하는 것이 가능하므로 비압축성 유동으로 고려하였다. 또한, 벌새의 날갯짓 동작을 모사하기 위해서 상대 운동이 있는 동적 격자 기법이 적용된 수치해석자를 이용하였다. [3]

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0$$

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} + \vec{v}_a \cdot \nabla \vec{v} + \nabla p = \nabla \cdot \sigma$$

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{w} \cdot \nabla \vec{v}$$

위 식에서 σ는 전단응력 텐서를 나타내고, p는 압력을 나타내며, $\vec{v}$는 유체의 속도 성분, $\vec{w}$는 격자속도를 나타낸다. 또, $\vec{v}_a = \vec{v} - \vec{w}$로 유체의 속도와 격자속도의 차이를 나타낸다.

위의 지배방정식은 유한체적법에 근거하여 이산화되었다. 비압축성 방정식에서는 속도와 압력에 관한 식의 분리가 가능하므로, pseudo-compressibility 기법이 적용된 수치해석자를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 이용한 수치해석자는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = -\beta \nabla \cdot \vec{u}$$

여기서 τ 는 pseudo 시간을 나타내며 β 는 pseudo-compressibility 계수이다. 공간 차분 기법은 Osher's Up wind Scheme 이며, MUSCL(Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws)이 적용되어 3 차의 공간정확도를 나타낸다. 시간 적분 기법은, Yoon 과 Kwak 의 LU-SGS 기법이고, 비정상 계산을 위하여 이중시간 전진법(dual time stepping)이 적용 되어 2 차의 시간정확도를 나타낸다.[4]

3. 벌새의 날갯짓 비행 운동모델

Tobalske et al. 은 500Hz 의 고속 카메라를 이용하여, 풍동에서 0~12m/s 에서 벌새의 3 차원 날개, 몸체의 운동을 살펴보았다 (그림 1). 이 실험 결과를 바탕으로 수평방향 운동에 해당하는 날개 궤적의 x 좌표, y 좌표와 pitch angle 을 각각 Fourier 급수로 구하여 수치해석을 위한 운동 모델로 사용하였다.

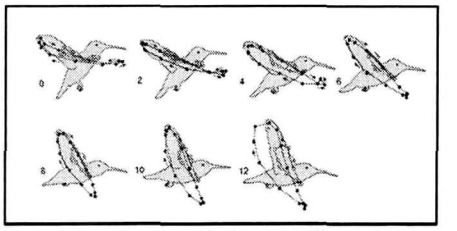

그림 1. 벌새의 날갯짓 궤적

4. 해석 결과

날개 주변의 유동이 주기적 특성이 나타나도록 5 주기에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 마지막 주기에서는 100 개의 시점에서 속도, 와류, 압력의 분포를 시간과 공간에 대하여 계산하여 유동특성을 관찰하였다.

양력계수, 항력계수의 수치해석 결과는 아래 그림 2 와 같으며, 날개궤적의 형상과 유효받음각의 계산결과를 고려해 본 결과 0, 2, 4m/s 와 6, 8, 10, 12m/s 가 각각 유사함을 관찰할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 각각을 저속비행과 고속비행으로 나누어 고찰하기로 한다.

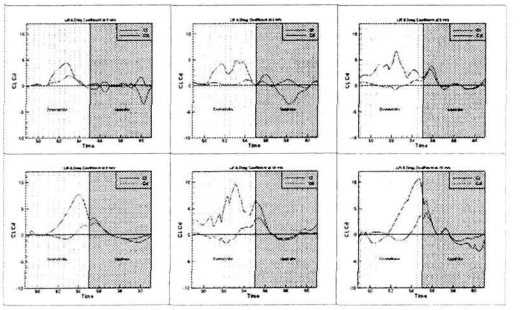

그림 2. 양력계수와 항력계수의 해석 결과

4.1. 유동특성을 통한 양력발생의 이해

수치해석 결과, 벌새의 저속비행과 고속비행의 Downstroke 에서의 양력발생 메커니즘은 곤충이나 조류의 양력발생과 마찬가지로, 그림 3 과 같이 앞전와류(LEV, Leading Edge Vortex)에 의한 것임을 확인할 수 있다[5].

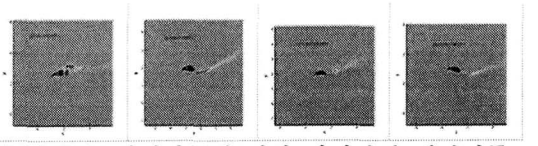

그림 3. 앞전와류에 의한 양력발생 메커니즘

일반적인 새들의 경우에는 비행에 필요한 양력의 90% 이상을 Downstroke 에서 발생시키는 반면, 벌새는 Upstroke 에서도 최대 25%의 양력을 발생시키는 독특한 특성이 선행 연구들에 의하여 알려져 있다[6]. 본 연구에서는 Upstroke 에서의 양력발생 메커니즘을 이해하고자 순간적으로 큰 양력이 발생하는 구간의 유동특성을 관찰하였다.

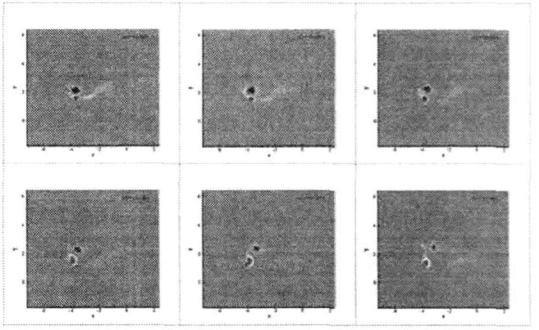

그림 4. 외전운동에 의한 양력발생 메커니즘

위의 그림 4 는 Upstroke 에서 가장 큰 양력이 발생하는 순간의 와도분포를 나타내고 있다. Upstroke 에서의 양력발생 메커니즘으로 고려되는 것들은 Downstroke 에서 Upstroke 로 전환되는 외전운동(supination)의 순간에 Downstroke 동안 발달한 앞전와류가 이류되는 현상과 '8 자운동'에 의한 Downstroke 와 Upstroke 의 대칭운동이다. 급격한 외전운동에 의해서 앞전와류가 떨어져나가는 그림 4 의 경우에는 Magnus 효과와 관련이 있음을 알 수 있으며 [7], 그림 5 와 같이 Upstroke 동안 자유류보다 빠른 날개의 움직임과 90° 이상의 큰 받음각으로부터 Downstroke 에서와 같이 앞전와류에 의해 양력을 발생시킨다는 사실을 이해할 수 있다. 그러나 이 앞전와류는 양력발생에서 중요한 역할을 하지만 유동을 방해하여 항력에도 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다.

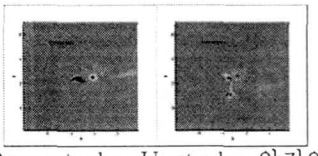

그림 5. Downstroke, Upstroke 앞전와류 발달

저속비행과 구별되는 고속비행에서의 양력발생은 그림 6 과 같이 Downstroke 에서 Upstroke 로 전환되는 과정에서 앞전와류의 이류가 발생하지 않고 유지되는 현상이다. 이것은 고속비행에서는 날개 궤적의 운동이 '8 자운동'이 아닌 '타원운동'을 하는 것과 관련이 있다. 저속비행에서는 Downstroke 에서 Upstroke 의 전환시에 받음각의 변화가 크게 나타나지만, 고속비행에서는 받음각의 변화가 적기 때문에 앞전와류가 유지될 수 있는 것이다.

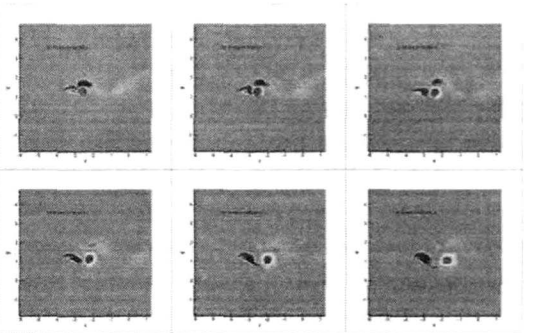

그림 6. 고속비행에서의 앞전와류 유지

비행 속도에 따른 양력발생의 경향으로부터, 저속비행에서는 날갯짓에 의한 양력발생이, 고속비행에서는 자유류에 의한 양력발생이 우세함을 알 수 있다. 따라서 벌새는 곤충과 조류의 중간적인 특징을 통해 비행에 필요한 양력을 효과적으로 발생시킨다는 것을 추측해 볼 수 있다.

4.2. 유동특성을 통한 추력발생의 이해

저속비행에서의 벌새의 추력발생 메커니즘은 Upstroke 에서 Downstroke 로 전환되는 회내운동(pronation)과 관련이 있음을 알 수 있다. 회내운동은 외전운동의 반대의 과정으로 외전운동에 비해 짧은 시간에 이루어진다. 빠른 회내운동에 의한 날개의 회전이 강한 후류를 유도하여 추력이 발생하는 것이다(그림 7).

고속비행에서는 날개궤적의 운동이 '타원운동'을 하며 받음각의 변화가 상대적으로 적기 때문에 회내운동에 의한 추력발생 효과는 적다. 그러나 저속비행에서와는 다른 추력발생 메커니즘을 관찰할 수 있다.

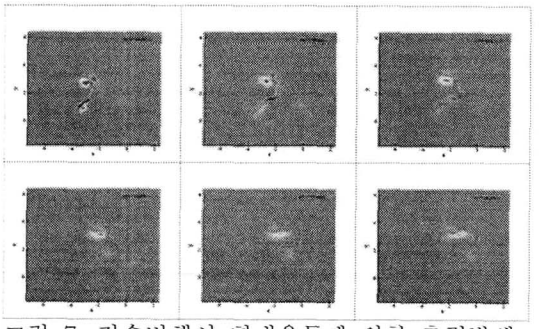

그림 7. 저속비행시 회내운동에 의한 추력발생

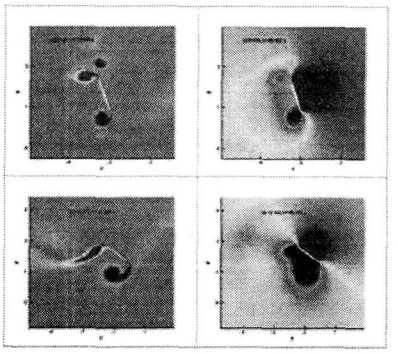

그림 8. 고속비행시 압력구배에 의한 추력발생

고속비행에서 순간추력이 최대가 되는 순간의 와류분포와 압력분포는 그림 8 과 같다. 그림 8 에서 볼 수 있듯이, 앞전과 뒷전에서 날개 아랫면에 2 개의 와류가 발달한다. 이러한 와류에 의한 추력발생은 양력발생 메커니즘인 앞전와류(LEV)의 효과와 같은 맥락으로 파악이 가능한데, 날개의 아랫면에서 와류가 형성이 되면 윗면에 비해 상대적으로 낮은 압력이 유도된다. 따라서 앞전과 뒷전에서 동시에 발생한 와류에 의하여 날개를 경계로 압력구배가 형성되어 추력이 발생하는 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 벌새의 자유비행에 대한 2 차원 수치해석을 수행하여, 제자리비행 및 전진비행에서의 양력 및 추력 발생의 메커니즘을 날개 주변의 유동특성을 이용하여 분석하였다. Downstroke 동안의 앞전와류의 생성과 발달, 외전운동에서 발생하는 와류에 의한 Magnus 효과, Upstroke 에서 큰 받음각을 형성 또는 앞전와류의 유지가 양력 발생의 메커니즘임을 알 수 있다. 또한 앞전을 중심으로 이루어지는 회내운동에 의해 유도된 강한 후류와 Upstroke 동안 앞전과 뒷전에서 발생하는 와류에 의한 압력구배가 추력을 발생하는 것을 알 수 있다.

벌새는 이러한 공기역학적 특성을 비행속도에 따라 가변적으로 사용함으로써 안정성과 조종성을 확보하였음을 알 수 있었다. 이러한 벌새의 독특한 비행특성은 추후 날갯짓 비행에 대한 3 차원 유동특성 연구, 날갯짓 비행체를 모방한 초소형 비행체 개발에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 기계항공공학부 BK21 사업과 항공우주신기술연구소, 한국과학기술정보연구원의 국가 e-Science 구축 사업의 지원으로 수행되었습니다. 또한 본 연구는 한국과학기술정보연구원의 [슈퍼컴퓨팅 응용연구 전략지원 프로그램]을 통해 수행되었습니다. 컴퓨팅 자원을 제공해 준 슈퍼컴퓨팅센터와 기술지원을 해 준 이상민 박사에게 감사합니다.

참고 문헌

[1] Vanhorn, M. (2004). Hummingbirds—Float Like a Butterfly, Pollin ate Like a Bee. *Apologetics Press on the World Wide Web.* http://www.apologeticspress.org/modules.php?name=Read&itemid=2533&cat=11

[2] Tobalske et al. (2007). Three-dimensional kinematics of hummingbird flight. *J. Exp. Biol.* 210, 2368-2382.

[3] J.S. Lee, J.H. Kim and C. Kim, "Numerical Study on the Unsteady-Force-Generation Mechanism of Insect Flapping Motion," AIAA Journal 2008, Vol.46 no.7, pp.1835-1848.

[4] K.A. Hoffman, S.T. Chiang. (1993). *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Wichita, Kansas.

[5] Willmott, A. P., and Ellington, C. P. (1997). The Mechanics of Flight in the *Hawkmoth Manduca Sexta. J. Exp. Biomech.* 21 200, 2705–2722.

[6] Greenewalt, C. H. (1960). *Hummingbirds.* New York: Doubleday.

[7] W. Nachtigall. (1974). *Insect in Flight*. New York: McGraw- Hill.