論文

벌새의 비행메커니즘과 유동특성에 대한 2차원 수치해석 연구

이현도*, 김진호*, 김종암**

A Two-dimensional Numerical Study of Hummingbird's Flight Mechanisms and Flow Characteristics

Hyundo Lee*, Jin-Ho Kim* and Chongam Kim**

ABSTRACT

In order to understand flow characteristics and flight mechanism of hummingbird's flapping flight, two-dimensional numerical analysis is carried out on the flapping motion of hummingbird, *Selasphorus rufus*. Hummingbird's flapping wing motion is realistically modeled from wind tunnel experimental data to perform numerical analysis. Numerical simulation shows that, as freestream velocity changes, wing trajectory is also adjusted and it substantially affects lift and thrust generation mechanism. According to this tendency, flight domain is separated as "low speed" and "high speed" regime, and each flight domain is studied for physical understanding. As a result, the lift generation during downstroke can be explained by the well-known effects, such as leading edge vortex effect, delayed stall, wake capture and so on. In addition, the lift generation during upstroke, the unique character of hummingbird, is also examined by detailed flow analysis. The thrust generation mechanism is investigated by examining the hummingbird's wing bone structure, vortex generation pattern and the resulting pressure gradient.

초 록

벌새(Selasphorus rufus)의 날갯짓 운동에 의한 양력발생 및 추력발생 메커니즘을 이해하고자 2차원 수치해석을 수행하였다. 날갯짓 운동의 궤적은 풍동 실험에서 관찰된 결과를 모델링하여 해석하였다. 비행속도에 따라 날갯짓 운동 궤적이 달라지고, 그 결과 양력 및 추력의 발생 메커니즘이 변화하는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 이를 통하여 비행속도를 저속비행과 고속비행으로 구분하여 물리적인 이해를 하고자 하였다. 양력발생의 경우에는 기존의 날갯짓 비행의 주된 양력발생 메커니즘인 앞전와류효과(Leading Edge Vortex Effect), 실속지연(Delayed Stall), 후류포착(Wake capture)등의 메커니즘을 확인하였으며, 벌새에서 유일하게 관찰되는 Upstroke에서의 양력발생 메커니즘을 유동특성 분석을 통하여 확인하였다. 추력발생의 경우에는 벌새의 골격 구조, 와류형성 및 압력구배에 따른 합력 성분의 분해를 통하여 이해할 수 있었다.

Key Words : Selasphorus rufus(벌새), Hovering(제자리비행), Forward Flight(전진비행), Lift Generation(양력발생), Thrust Generation(추력발생), Computational Analysis(전산해석)

† 2009년 6월 16일 접수 ~ 2009년 7월 27일 심사완료

* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

교신저자, E-mail : chongam@snu.ac.kr

서울특별시 관악구 관악로 599번지

Ⅰ. 서 론

최근 날갯짓 비행은 초소형 비행체 개발과 관련하여 주목받고 있다. 고정익 비행방식에 비하여 자유로운 비행특성과 자유로운 이착륙 능력을 지닌 날갯짓 비행은 미국 국방고등연구기획청의 NAV(Nano Air Vehicle) 프로젝트, NASA의 화성탐사 프로젝트의 Entomopter 프로젝트 등에 적용되어 저속비행 및 희박대기조건의 비행에 응용되고 있다. 날갯짓 비행은 실제 생물체를 모방하는 '생체모방공학'을 통하여 발전하고 있으나, 복잡한 날갯짓 동작과 주변유동을 이해하여 이를 응용한 날갯짓 비행체를 개발하는 데에는 어려움이 있다.

본 연구의 해석대상인 벌새는 곤충과 조류의 중간적 특성을 나타낸다. 벌새의 독특한 비행방식은 척추동물 중 가장 높은 생체 효율을 갖는 것과 몸체에 대한 심장의 크기가 가장 큰 것과 관련이 있다. Vanhorn[1]은 인간이 만약 벌새와 같은 물질대사능력을 지닌다면, 심장 박동수는 분당 1,260회, 체온은 385 ℃까지 상승할 것이라고 언급했다. 이러한 벌새의 생물학적 특징은 벌새가 조류 중 유일하게 곤충과 같은 날갯짓 비행을 하는 것을 가능하게 해준다. 크기나 무게의 측면에서 보더라도 벌새는 곤충과 조류의 중간 정도로 너무 크거나 무겁지도, 혹은 너무 작거나 가볍지 않기 때문에 초소형 비행체의 모델로서 적합하여 벌새의 비행을 응용하고자 하는 관심이 높아지고 있는 것이다.

현재까지 벌새의 날갯짓 비행에 대한 연구는 주로 운동학적 관점의 관찰의 형태로 이루어져왔다. Greenewalt[2]는 벌새의 일반적인 특성과 함께 제자리비행, 전진비행, 후진비행을 관찰하였고, Chai *et al.*[3]은 2종류의 상대적으로 큰 크기의 벌새와 2종류의 작은 크기의 벌새의 제자리비행에 대한 연구를 수행하였다. Yoon-Joo Kim *et al.*[4]은 검은빰벌새(*Archilochus alexandri*)의 날갯짓 운동을 모사한 실험장치를 통하여 날개의 회전운동에 의한 공력특성을 분석하였고, 본 연구에서 벌새의 날갯짓 운동을 재현하기 위하여 참고한 Warrick *et al.*[5] 및 Tobalske *et al.*[6]의 연구에서는 풍동에서 벌새의 비행 속도에 따른 날개 및 몸통의 각도, 날갯짓 진폭 등을 관찰하였다.

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

본 연구는 Tobalske *et al.*[6] 의 실험에서 얻어진 벌새(*Selasphorus rufus*)의 제자리비행 및 전진비행의 날갯짓 비행 주변 유동에 대한 2차원 수치해석 연구이다. 날갯짓 비행에 대한 선행연구들을 바탕으로 벌새의 0~12 m/s 의 비행의 주변 유동현상에 대한 물리적 분석을 통하여 비행속도 영역에 따른 양력 및 추력발생 메커니즘을 이해하고자 하였다.

Ⅱ. 본 론

2.1 해석대상

Tobalske *et al.*[6]은 500 Hz의 고속 카메라를 이용하여 0~12 m/s 의 풍동실험을 통하여 그림 1과 같이 벌새의 3차원 날갯짓, 몸통 운동 궤적 및 받음각 등을 관찰하였다.

본 연구에서는 이 관찰 결과를 바탕으로 병진운동에 해당하는 x 좌표, y 좌표와 받음각을 Matlab을 이용하여 curve fitting, 푸리에 변환을 수행하여, 식(1)과 같이 푸리에 급수로 나타내어 이를 수치해석을 위한 운동모델로 사용하였으며, Tobalske et al.의 실험에 적용된 벌새에 대한 데이터를 이용하여 평균시위 길이에서의 날개궤적으로 보간하여 수치해석을 수행하였다. 푸리에 급수의 계수들은 참고문헌 7에서 확인할 수 있다.

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

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

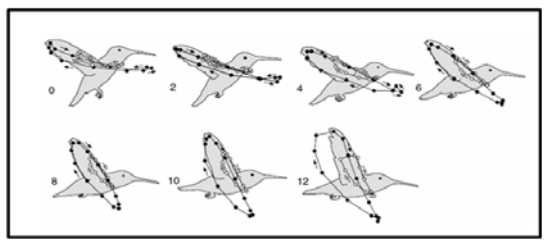

그림 1. 벌새의 날갯짓 운동 궤적 (Tobalske *et al.*[6])

2.2 지배방정식 및 수치기법

본 연구에서 다루는 지배방정식은 2차원 비정상/비압축성 Navier-Stokes 방정식이다. 과거 곤

충이나 조류의 비행에 대한 수치해석에는 순간적인 날개 속도와 받음각 등에 대하여 수치해석을 수행하는 정상상태 유동이 고려되었으나, Ennos[8], 이정상 등[9]의 연구를 비롯한 선행연구들을 통하여 낮은 레이놀즈 수의 공기역학 문제에 해당하는 곤충의 날갯짓 비행을 설명하는 데에는 유동을 정상상태로 고려하는 것이 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 수치해석자[10]를 이용하였다.

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

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} + \vec{v_a} \cdot \nabla \vec{v} + \nabla p = \nabla \cdot \sigma \qquad (2)$$

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

위 식(2)에서 σ는 전단응력 텐서를 나타내고, p는 압력을 나타내며, $\vec{v}$ 는 유체의 속도성분, $\vec{w}$ 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 기법을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석자는 다음 식(3)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = -\beta \nabla \cdot \vec{u} \qquad (3)$$

식(2)에서 τ는 pseudo 시간을 나타내며 β는 pseudo-compressibility 계수이다. 공간 차분 기법은 Osher's Upwind Scheme 이며, MUSCL이 적용되어 3차의 공간정확도를 나타낸다. 시간적 분기법은, Yoon과 Kwak 의 LU-SGS 기법이고, 비정상 계산을 위하여 이중시간 전진법이 적용되어 2차의 시간정확도를 나타낸다.[11]

적용대상인 벌새의 날개 주변 레이놀즈 수는 표 1과 같이 Tobalske et al.이 실험한 내용을 바탕으로, 벌새의 평균 날개 시위 및 평균 자유류 속도 (6m/s), 날갯짓 주파수 등의 정보를 이용하여 계산하였다. 이를 통해 계산한 레이놀즈 수가 약 4,800 정도이므로 전 유동을 층류로 가정하여 난류모델은 적용하지 않았다. 실제 벌새의 날개는 약간의 캠버와 깃으로 인하여 주름진 형태로 관찰되어 진다. 하지만, 날개 단면 형상의 차이에 따라 정성적인 유동현상에는 큰 차이가 없고, 정량적인 공력 계수 값에 약간의 차이를 보임을 밝힌 논문 결과[12]를 인용하여, 수렴성을 확보하고, 해석을 간단하게 하기 위하여 최대 두께가 시위의 5%인 얇은 타원형 에어포일을 적용하여 5주기 동안 반복계산을 수행하였다.

표 1. 참고문헌[6]의 실험 결과

자유류속도	U_∞	0~12m/s
날갯짓 진동수	f	41 Hz
평균시위	c_m	12 mm
회전중심	% of chord	약 10%
레이놀즈수	Re	4800
Reduced Frequency	$k=fc/U_m$	0.082

2.3 지배방정식 및 수치기법

수치해석 결과를 토대로 양력계수, 항력계수의 그래프 특성을 분석하여 보았다.

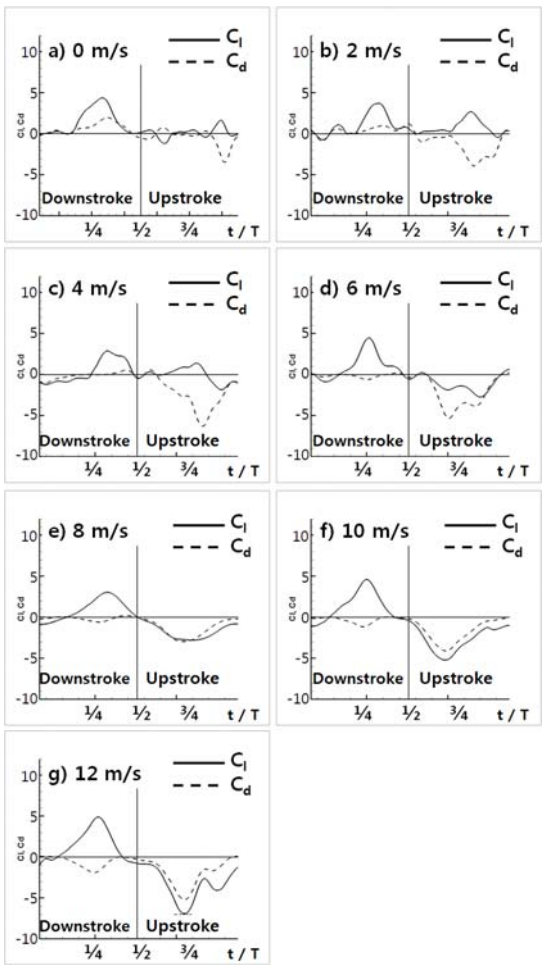

그림 2. 양력계수, 항력계수 그래프

그림 2는 자유류가 없는 조건에서의 양력계수 추력계수 그래프를 나타낸 것이다. 위 그래프와 같이 0, 2, 4 m/s 와 6, 8, 10, 12 m/s 의 양력계수, 항력계수 그래프 특성이 각각 유사한 것을 알 수 있었다. 두 비행속도 영역에서의 각각의 유사성을 확인하기 위하여 양력발생 및 추력발생에서 주요한 영향을 미치는 날갯짓 운동이 고려된 유효받음각을 아래의 식 (4) 과 같이 계산하여 그림 3과 같은 경향성을 확인할 수 있었다.[13]

$$\alpha_{eff} = \alpha - \tan^{-1}(-v'/(U_\infty - u')) \qquad (4)$$

식(4)에서 u', v'는 날개의 회전 중심인 10% 코드 지점에서의 순간 속도를 나타낸다.

이와 같이 양력계수 및 항력계수, 그리고 유효받음각의 경향성이 0, 2, 4 m/s 와 6, 8, 10, 12 m/s 의 두 집단으로 나누어지는 경향성을 고려하여, 본 연구에서는 양력발생 메커니즘과 추력발생 메커니즘을 저속비행 (0~4m/s)과 고속비행 (6~12m/s) 으로 나누어 정성적인 공력특성을 분석하여 보았다.

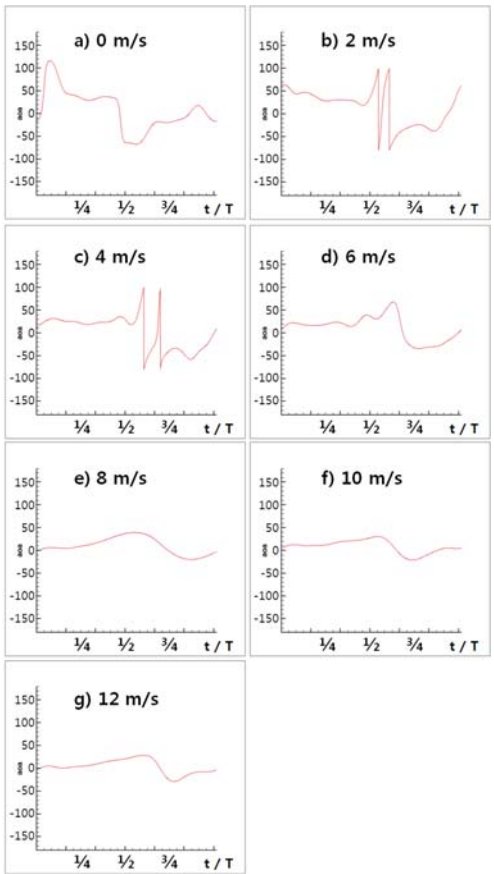

그림 3. 유효받음각 그래프

2.3.1 양력발생 메커니즘 분석

저속비행 (0~4m/s)과 고속비행 (6~12m/s)에서 공통적으로 나타나는 주된 양력발생 메커니즘은 Downstroke에서의 앞전와류효과(Leading Edge Vortex Effect)임을 확인하였다. 앞전와류효과는 곤충이나 새의 날갯짓 비행에서 나타나는 주된 양력발생 메커니즘으로 그림 4와 같이 Downstroke가 진행됨에 따라 날개의 앞전에서 와류가 발생하여 점차 발달하는 것을 확인하였다.

저속비행에서의 유동의 물리적 분석을 통하여 그림 5와 같이 Dickinson *et al.*[14]에 의하여 제안된 실속지연 (delayed stall), 회전순환 (rotational circulation) 그리고 외전운동 (supination)과 회내운동 (pronation) 에서의 후류포착과 같은 공력특성 메커니즘들을 그림 4에서처럼 확인할 수 있었다.

선행연구들을 통하여 그림 6과 같은 형태로 일반적인 새들은 Downstroke에서만 양력을 발생하나 벌새는 Upstroke에서도 양력을 발생한다는 사실이 알려져 있다. 선행연구들에서는 벌새의 해부학적 구조, 즉 Downstroke와 Upstroke에서 사용되는 근육 무게의 비율로부터 이러한 결론을 얻었지만 본 연구에서는 유동현상에 대한 물리적 분석을 통하여 이를 확인하고자 하였다.

Upstroke에서의 벌새의 양력발생은 큰 받음각의 형성과 관련이 있음을 알 수 있었는데, 이는 벌새의 구조적 특징과 연관이 있다. 그림 7과 같이 Greenewalt[2]의 벌새 날개 골격구조의 관찰을 바탕으로 이를 분석하여 보면, 벌새는 하나의 강체와 같은 날개를 가지지만 어깨 관절이 매우 유

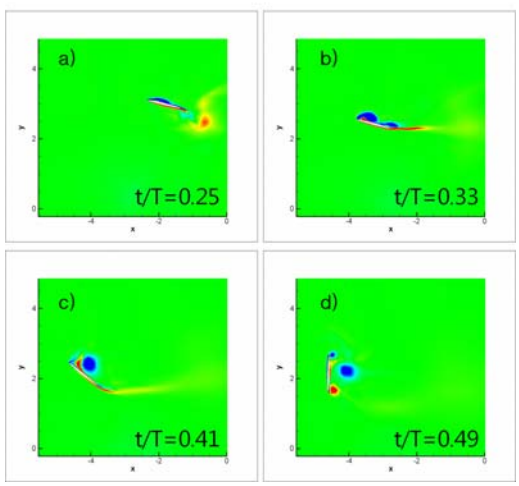

그림 4. Downstroke에서의 앞전와류 효과, 실속지연, 회전순환 그리고 후류포착

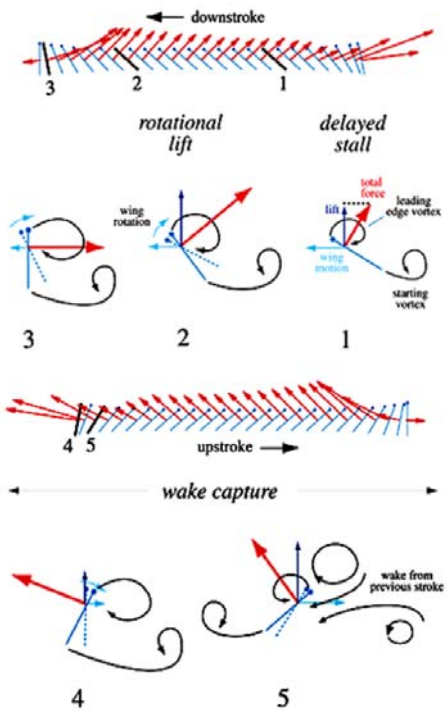

그림 5. Delayed Stall, Rotational Lift and Wake Capture (Dickinson *et al.*[14])

그림 6. Upstroke 에서의 양력발생 비율 (Richard Vines[15])

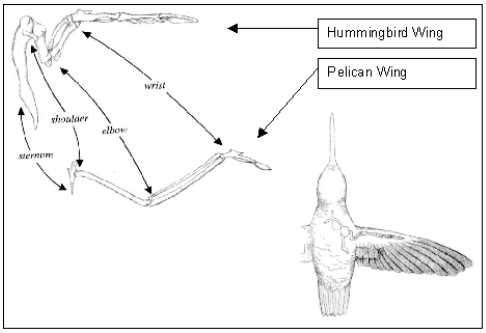

그림 7. 벌새의 날개 골격 구조 (Greenewalt[2])

연하여 ball-and-socket joint 와 같은 특성을 보임으로써 날개 길이방향으로의 큰 회전이 가능하한 것을 알 수 있다.

시계방향으로의 외전운동 (supination)에서의 Magnus effect, 후류포착과 같은 메커니즘은 Upstroke의 전반부에서의 양력발생을 도와주며, Upstroke가 진행됨에 따라 큰 받음각을 유지한 상태에서 날개가 뒤로 운동하면서 Downstroke와 대칭되는 형태로 양력을 발생시킨다는 것을 알 수 있었다.

저속비행과 고속비행의 양력계수 그래프 비교를 통하여 고속비행의 Upstroke에서의 양력발생 메커니즘을 이해하고자 하였다.

그림 8은 자유류 효과를 고려하여 계산하였을 때, 각 비행 속도에 대한 양력 그래프로, 그림에서 볼 수 있듯이, 고속비행에서는 Upstroke의 전

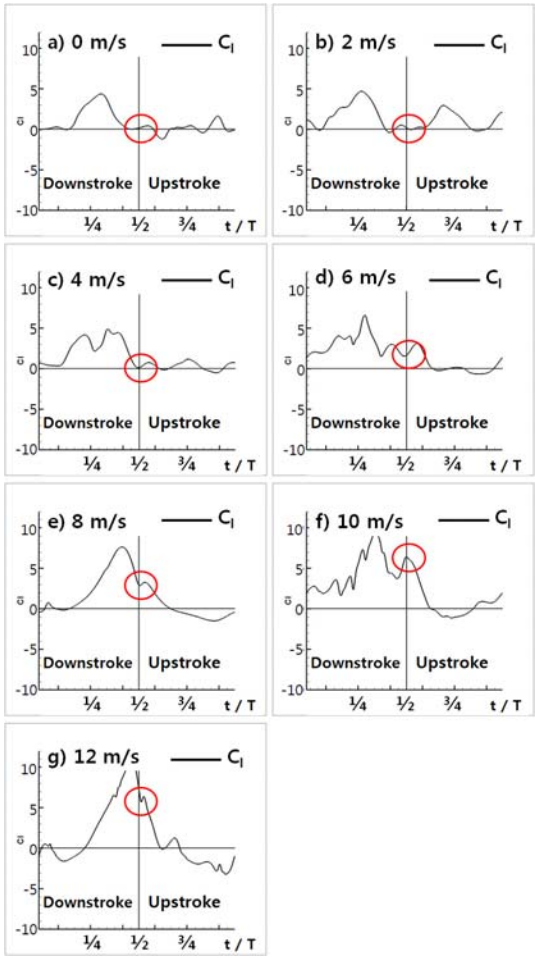

그림 8. 외전운동 (supination) 순간의 양력발생 비교

반부에도 Downstroke에서의 양력이 유지되고 있는 것을 알 수 있었다. 이로부터 유효받음각을 거의 일정한 수준으로 유지하여 Downstroke동안 발달한 앞전와류의 이류를 지연시킴으로써 양력을 유지시키는 것을 알 수 있다.

2.3.2 추력발생 메커니즘 분석

평균양력의 경우, 자유류 속도 7가지 경우 모두 양력 값이 일정한 값으로 나타날 것으로 예상하였고, 실제 수치해석에서도 7가지 경우가 비슷한 크기를 나타내는 결과를 얻을 수 있었다. 평균추력은 자유류의 속도가 증가함에 따라 유동저항이 증가하므로 추력도 함께 증가할 것으로 예상하였으나 수치해석 결과 모두 비슷한 크기가 관찰되었다.

이를 분석한 결과, Tobalske et al.[6]의 실험은 풍동 내에서 유동을 발생시켜 상대적 전진비행을 관찰한 것임을 생각할 수 있었다. 따라서 자유류에 의한 항력과 날갯짓에 의해 발생한 추력이 상쇄되어 평형을 이루는 상태임을 알 수 있다. 날갯짓 운동에 의해 발생하는 추력을 이해하기 위하여 자유류의 속도를 0 m/s 로 설정하여 수치해석을 수행하였다.

그림 9의 4 m/s의 저속비행에서의 추력계수 그래프와 같이 Upstroke의 후반부에서 추력이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 첫째, 그림 10과 같이 Upstroke 동안 유지되었던 큰 받음각에서의 대칭운동에 의한 합력이 추력의 방향으로 나타나는 것, 둘째, 이정상 등[16]의 곤충비행 연구에서 관찰된 것과 같이 날개의 앞전을 중심으로 회전하는 급격한 회내운동 (pronation)에 의하여 자유류의 방향으로 후류가 발생하는 것으로부터 확인할 수 있다. 큰 받음각에서 낮은 받음각으로 회복하는 빠른 회내운동 (pronation)에 의하여 공기를 뒤로 밀어내어 추력의 효과를 얻는 것이다.

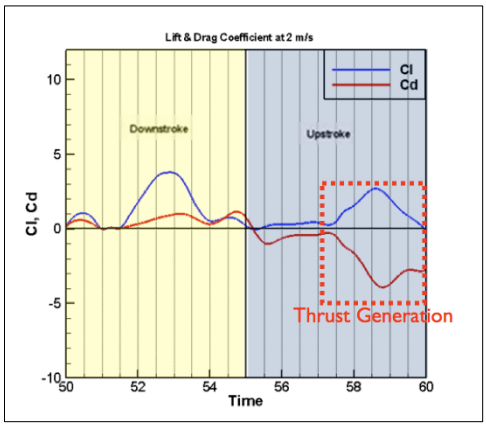

그림 9. 저속비행의 추력발생

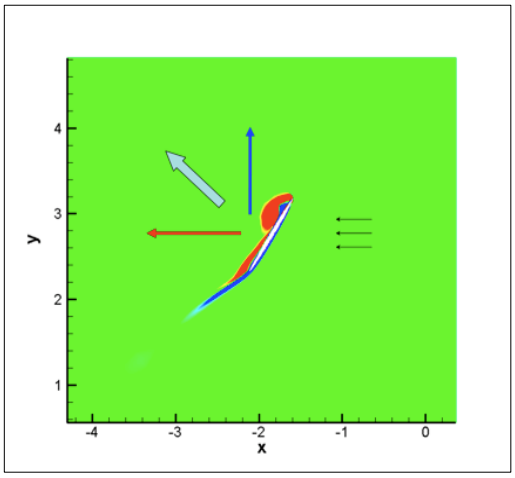

그림 10. 대칭운동에 의한 추력

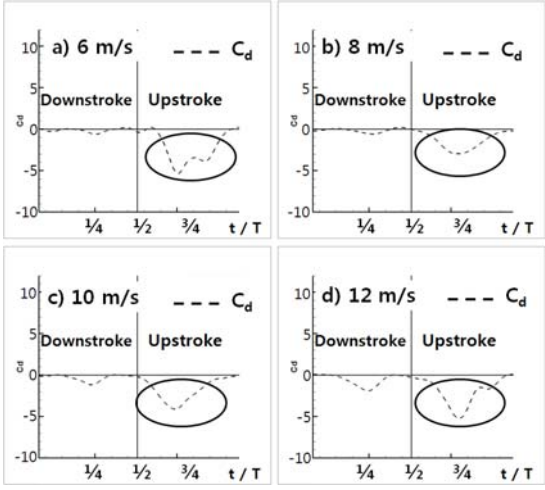

그림 11. 고속비행에서의 추력발생 경향성

그림 11에서와 같이 6, 8, 10, 12 m/s 의 4가지 고속비행에서의 추력은 Upstroke의 중반부에서 발생하였다. 고속비행의 Upstroke 중반부에서 공통적으로 나타나는 현상은 앞전과 뒷전에서의 와류발생이다. 그림 12과 같이 빠른 속도로 이동하는 날개의 앞전과 뒷전에서 날개의 아랫면 방향으로 와류장이 형성되고, 와류의 형성에 의하여 날개의 아랫면에는 저압영역이 형성된다. 따라서 날개 윗면과 아랫면의 압력구배 형성에 의한 합력이 추력으로 작용하는 것을 알 수 있다.

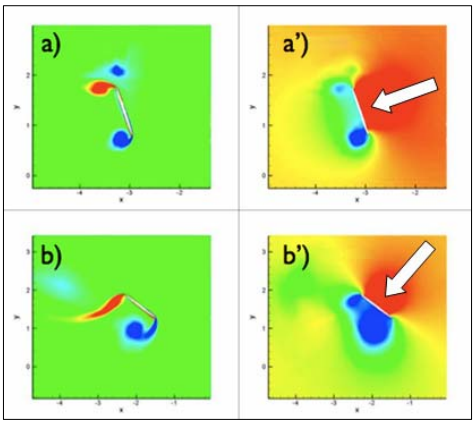

그림 12. 와류발달에 의한 압력장 형성과 추력발생

III. 결 론

벌새의 제자리비행의 경우에는 8자운동의 대칭운동을 통하여 Downstroke, Upstroke 동안 양력을 꾸준히 발생하며, 수평방향의 힘은 서로 상쇄되어 평형상태를 유지하는 것을 알 수 있다.

전진비행의 주된 양력발생은 Downstroke에서의 앞전와류효과임을 확인하였고, 다른 새들에서는 관찰되지 않는 Upstroke에서의 양력발생 메커니즘을 주변 유동특성을 분석함으로써 확인하였다. 저속비행 (0~4m/s)에서는 Downstroke에서 Upstroke로 전환하는 과정인 외전운동 (supinati -on)과 Upstroke의 큰 받음각 형성에 의한 Downstroke 와의 대칭운동에 의하여 양력을 발생하는 것을 알 수 있다. Upstroke에서의 대칭운동에 의한 합력방향이 추력의 방향으로 작용하며 Upstroke에서 Down stroke로 전환하는 과정인 회내운동 (pronation)에 의하여 추력이 발생하였다.

고속비행 (6~12m/s)에서는 유효받음각을 거의 일정한 수준으로 유지함으로써 앞전와류의 이류를 지연시켜 양력을 유지한다. Upstroke에서의 앞전과 뒷전의 와류형성에 따른 압력구배로 추력을 발생하는 것을 확인하였다.

벌새의 날갯짓 비행에서의 2차원 유동 분석을 통하여 벌새는 비행조건 및 비행속도에 따라 날갯짓 비행방식과 고정익 비행과 같이 비행속도에 대한 자유류를 이용하는 비행방식을 가변적으로 이용하여 비행에 필요한 양력과 추력을 발생시킨다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 한 단계 더 나아가기 위해서 날개 길이방향의 유동과 어깨관절을 중심으로 회전하는 3차원 유동특성 분석, 몸체 및 꼬리 등의 영향에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 항공우주신기술연구소, 한국과학 기술정보연구원의 국가 e-Science 구축사업의 지원과 국토해양부 건설기술혁신연구개발사업의 연구비지원(08기술혁신E01)에 의해 수행되었습니다. 또한 본 연구는 한국과학기술정보연구원의 [슈퍼컴퓨팅 응용연구 전략지원 프로그램]을 통해 수행되었습니다. 컴퓨팅 자원을 제공해 준 슈퍼컴퓨팅센터와 기술지원을 해 준 이상민 박사에게 감사합니다.

참고문헌

1) Vanhorn, M. (2004). Hummingbirds－Float Like a Butterfly, Pollinate Like a Bee. *Apologetics Press on the World Wide Web*.

2) Greenewalt, C. H. (1960). *Hummingbirds*. New York: Doubleday.

3) Peng Chai and David Millard. (1997). “Flight and Size Constraints : Hovering Performance of Large Hummingbirds under Maximal Loading”, *J. Exp. Biol.* 200, 2757-2763.

4) Yoon-Joo Kim, Hang-Cheol Choi and Kwang-Ho Kim. (2005). "A Study on Rotational Effect on Flapping Wing Motion", *AIAA Atmospheric Flight Mechanics conference and Exhibit.*

5) Warrick, D. R., Tobalske, B. W. and Powers, D. P. (2005). "Aerodynamics of the hovering hummingbird", *Nature*, 435, 1095-1097.

6) Tobalske, B. W., Warrick, D. R., Clark, C. J., Powers, D. R., Hedrick, T. L., Hyder, G. A. and Biewener, A. A. (2007). "Three-dimensional kinematics of hummingbird flight", *J. Exp. Biol.* 210, 2368.

7) 이현도, (2009) "날갯짓 비행체의 자유비행에 대한 2차원 수치해석 연구", 학위논문(학사), 서울대학교 공과대학 기계항공공학부.

8) Ronald Ennos. (1990). "Unconventional Aerodynamics", *Nature*, 344, 491.

9) 이정상, 김종암, 노오현, (2004) “저 레이놀즈수 유동에서 Flapping Airfoil의 수치적 공력특성 연구”, 한국항공우주학회지, Vol. 30(4), pp. 32 ~35.

10) J.S. Lee, J.H. Kim and C. Kim, (2008). "Numerical Study on the Unsteady-Force-Generation Mechanism of Insect Flapping Motion", *AIAA Journal*, 46, 1835-1848.

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

12) Jin-ho Kim, Chongam Kim and Kum Won Cho, "Numerical Investigation on the Geometric Factors of Insect's Wing Motion using e-Science Environment", Journal of the Korean Physical Society, Accepted.

13) 이정상, 김진호, 김종암, (2007) "갑작스런 추력발생의 공기역학적 원인 (Part 2) – 공기역학적 주요변수에 대한 연구", 한국항공우주학회지, Vol. 35(1), pp. 10~17.

14) Michael H. Dickinson, Fritz-Olaf Lehmann and Sanjay P. Sane, (1999). "Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight", *Science*, 284, 1954-1960.

15) Richard Vines, (2005). Ultra-Fast Camera Captures How Hummingbirds Hover. National Science Foundation (NSF) News. http://www.nsf.gov/news/new_summ.jsp?cntn_id=104263

16) 이정상, 김진호, 김종암, (2007) "곤충비행에서 갑작스런 추력발생의 공기역학적 원인 (Part 1) – 와류정지 및 와류 짝 현상", 한국항공우주학회지, Vol. 35(1), pp. 1~9.