

論文

곤충비행에서 갑작스런 추력발생의 공기역학적 원인

Part 1: 와류 정지 및 와류 짹 현상

이정상*, 김진호*, 김종암**

The Aerodynamic Origin of Abrupt Thrust Generation in Insect Flight (Part 1: Vortex Staying and Vortex Pairing Phenomena)

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

ABSTRACT

Numerical simulation is conducted to investigate aerodynamic force generation mechanism for the "figure-of-eight" motion of *Dipteran* fly, *Phormia-Regina*. Wing trajectory is referred to experimental result, which was observed from the tethered flight under freestream condition. Numerical simulation shows that the lift is mainly generated during downstroke motion and the large amount of thrust is generated abruptly at the end of upstroke motion. In the present work, vortical structure in the wake and the pressure field around the airfoil are examined to understand the generation of lift and thrust. Consequently, the lift generation is related with the leading edge vortex which is developed by an effective angle of attack. And the thrust generation can be explained by vortex pairing in the flow field and by vortex staying in the pressure field.

초 록

검정금파리 날개의 “8자 운동”에 의한 공기역학적 힘의 발생에 관해 수치해석을 수행하였다. 날개운동은 자유류가 있는 tethered flight 실험에서 관찰된 결과에서 인용하였다. 해석결과 양력은 downstroke 중일 때 주로 발생하였고 추력은 upstroke 끝에서 갑작스럽게 발생하였다. 본 연구에서는 양력과 추력 발생의 이러한 특성을 후류에서의 와류구조와 에어포일 주위의 압력장을 통해 물리적으로 이해하고자 하였다. 결과적으로 양력발생은 유효반음각의 증가에 따른 앞전와류와 관계있었으며, 추력발생은 유동장 형태의 측면에서 와류 짹(vortex pairing)현상과 압력장 측면에서 와류정지 현상으로 설명할 수 있었다.

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

I. 서 론

† 2006년 9월 14일 접수 ~ 2006년 11월 24일 심사완료

* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

연락처자, E-mail : chongam@snu.ac.kr

서울시 관악구 신림동 산 56-1

곤충비행은 형태학, 진화생물학, 해부학, 공기역학 등 매우 다양한 분야에서 연구되고 있다[1]. 특히 날갯짓(flapping)의 공기역학은 곤충비행의 연구에서 가장 기본적인 의문일 뿐만 아니라 초소형비행체(MAVs, Micro-Aerial Vehicles)에 대

한 적용가능성으로 최근 주목받고 있다[2].

과거 곤충비행의 해석에는 일반적인 항공기에 적용되는 정상상태 공기역학이 이용되었다[3]. 즉 날개운동을 여러 개의 정적인 순간들로 나누고, 매 순간 날개의 속도와 반음각을 이용하여 정상 상태로 해석하는데, 이를 날개운동 전체에 걸쳐 적용하면 시간 평균된 양력을 얻을 수 있다[4]. 이러한 quasi-steady 가정은 사막메뚜기에 한해 성공적이었지만, 곤충비행에 필요한 충분한 크기의 양력을 얻어내지 못했다[3-5,6]. 따라서 정상상태 공기역학은 곤충비행을 설명하기에 부적합한 것으로 알려지게 되었다.[3-7] 그러나 근래 들어 곤충들의 날갯짓을 모사할 수 있는 기계장치나, 고속카메라 및 유동가시화 기법, 그리고 전산유동해석기법 등의 발달에 힘입어 양력증가(lift enhancement)를 설명할 수 있는 여러 가지 비정상(unsteady) 메커니즘들이 제안되었다[4,8].

가장 먼저 알려진 비정상 메커니즘은 Weis-Foggh가 말벌(*Encarsia forsonoma*)에게서 발견한 "clapping" 이다[9,10]. 날개가 양쪽으로 벌어질 때 양 날개사이에 와류가 생성되어 큰 양력이 발생되는데 이는 말벌, 나비 등의 곤충에서는 물론 비둘기 같은 조류에서도 관찰되고 있다[10]. 또 다른 비정상 메커니즘으로 앞전와류(LEV, Leading Edge Vortex)에 의한 실속지연(delayed stall)이 있다. 날개가 높은 반음각으로 translation 할 때 앞전에서 와류가 형성되고, 이것이 양력증가에 기여하게 된다. Ellington et al.[11]은 박각시나방(*Manduca sexta*)을 모사한 "flapper"와 smoke 가시화 기법으로 이를 발견했으며, Dickinson et al.[12]과 Birch and Dickinson[13]은 미네랄 오일을 채운 수조 속에 과일파리(*Drosophila melnogaaster*)의 제자리비행(normal hovering)을 모사한 "robofly"와 DPIV를 이용해 이를 관찰하였다. 또한 Liu and Kawachi[14]는 제자리비행 중인 박각시나방에서 앞전와류의 존재를 3차원 전산해석을 통해 확인하였고, Wang[6]은 잠자리의 제자리비행(inclined hovering)을 모사한 에어포일의 2차원 운동을 전산해석 하였다. Dickinson et al.[12]은 앞전와류 이외에도 날개가 upstroke 와 downstroke 사이에서 rotation 할 때 많은 양력이 발생된다는 점에 주목하여 "Rotational Circulation"과 "Wake Capture"를 양력증가 메커니즘으로 제시하였다. 날개가 스팬방향을 축으로 회전할 때 Magnus effect처럼 발생되는 양력이 "Rotational Circulation"에 의한 효과이며, 이전 stroke에서 회전하면서 떨어져 나간 앞전와류와 뒷전와류의 상호작용으로 하향방향의 유동을 생성시켜 양

력을 얻는 것이 "Wake Capture"에 의한 효과이다.

여러 연구자들의 노력으로 밝혀진 이러한 비정상 메커니즘들은 곤충들의 양력발생에 관해 과거에는 알지 못했던 많은 사실들을 알려주지만, 대부분이 제자리비행 중인 곤충들의 양력증가에 관한 연구들 이므로 전진비행이나 곤충비행의 특징인 급격한 기동을 설명하기에는 제한적이다.

본 연구는 Nachtigall[15]의 실험에서 얻어진 검정금파리(*Phormia regina*)의 날개운동을 2차원 비정상/비압축성, Navier-Stokes 방정식을 통해 해석하였다. Nachtigall의 실험은 엄밀한 의미에서 자유비행은 아니지만 자유류가 있는 상태에서의 tethered flight(곤충을 고정된 위치에 붙여놓고 자유류를 불어주어 날갯짓을 유도하는 방법)를 관찰한 것이기 때문에 전진비행을 모사한 것으로 볼 수 있다.

Part 1에서는 공기역학적 힘의 발생과 비정상 유동장을 비교하여, 양력과 추력발생에 관계된 물리적 현상을 유동장의 형태로 이해하는데 주력하였다.

II. 해석 기법

2.1 지배 방정식

지배 방정식은 2차원 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식으로 "8자 운동"을 모사하기 위해 동적격자 기법을 도입하였으며, 이때 격자의 운동속도를 고려하여 보존형식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{v} &= 0 \\ \frac{\vec{D}\vec{v}}{Dt} + \vec{v}_a \cdot \nabla \vec{v} + \nabla p &= \nabla \cdot \sigma \quad (1) \\ \frac{\vec{D}\vec{v}}{Dt} &= \frac{\vec{\partial v}}{\partial t} + \vec{w} \cdot \nabla \vec{v} \end{aligned}$$

여기서, σ 는 전단응력 텐서를 나타내고, p 는 압력을 나타내며, $\vec{v}_a = \vec{v} - \vec{w}$ 로 \vec{v} 는 유체의 속도성분을 나타내며, \vec{w} 는 격자속도를 나타낸다.

2.2 수치 기법

지배 방정식은 유한체적법에 근거하여 이산화되었다. 비압축성 방정식은 속도장과 압력장이 연결되어 있지 않으므로, 식(2)에 나타낸 pseudo-compressibility 기법을 적용하여, 수치해를 구할 수 있도록 하였다.

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = -\beta \nabla \cdot \vec{u} \quad (2)$$

여기서 τ 는 pseudo 시간을 나타내며 β 는 pseudo-compressibility 계수 값이다. 공간 차분 기법으로 Osher's Upwind Scheme을 적용하였으며, MUSCL을 이용하여 3차의 공간정확도를 나타내도록 하였다. 시간 적분은 코드 적용이 간편하고 경제적인 Yoon과 Kwak의 LU-SGS 기법이 사용되었으며, 비정상 계산을 위하여 이중시간진진법(dual time stepping)을 사용하여 2차의 시간 정확도를 갖도록 하였다. 적용된 수치해법의 자세한 내용은 참고문헌[16]에 잘 나와 있다.

본 연구에서 사용된 해석코드는 Lee et al.[17]에 의해 pitching운동을 하는 에어포일의 실험결과[18,19]와 비교되어 검증되었다. 해석대상인 검정금파리의 chord 레이놀즈수의 크기가 10^2 정도 이므로 전 유동을 층류로 가정하여 난류모델은 적용하지 않았다.

2.3 검정금파리 날개의 운동모델

곤충날개의 움직임을 측면에서 관찰하면 날개 끝(wing tip) 궤적은 “8자”처럼 보인다. 이러한 날개운동을 “8자 운동”(figure-of-eight motion)이라 하며 1869년 프랑스의 생리학자 Marey에 의해 최초로 관찰 되었고 많은 종류의 곤충들이 제자리 및 전진비행에 이를 이용한다[1,6,10].

Nachtigall은 초속 2.7m의 자유류 앞에 검정금파리를 붙여놓고 초당 6400번의 고속촬영을 통해 날개운동의 3차원 궤적을 얻어내었다[15]. 본 연구에서는 Nachtigall이 관찰한 결과를 Fourier 급수로 나타낸 식(3)을 운동 모델로 사용하였다.

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^m a_n \cos(nkt) + b_n \sin(nkt) \quad (3)$$

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

표 1. Rotation 운동성분의 Fourier 급수 계수

$$\alpha(t) = a_0 + \sum_{n=1}^9 a_n \cos(nkt) + b_n \sin(nkt)$$

n	a _n	b _n
0	-0.861541	0
1	-0.125457	1.19783
2	0.023281	0.121446
3	-0.104797	0.147708
4	-0.00966422	0.195751
5	0.0893901	0.101695
6	0.0502607	0.0403302
7	0.0398828	0.063436
8	0.0377409	0.0409973
9	0.0227059	0.0170409

표 2. Translation 운동성분의 Fourier 급수 계수

$$y(t) = a_0 + \sum_{n=1}^5 a_n \cos(nkt) + b_n \sin(nkt)$$

n	a _n	b _n
0	1.9644	0
1	1.78602	0.774526
2	0.336707	-0.0279567
3	0.193598	0.0930125
4	0.0691315	0.0407612
5	0.0133928	0.000363924

표 3. Lagging 운동성분의 Fourier 급수 계수

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^5 a_n \cos(nkt) + b_n \sin(nkt)$$

n	a _n	b _n
0	-0.165315	0
1	1.67324	0.223941
2	0.40178	-0.10526
3	0.100234	0.0153683
4	-0.0114894	0.0313691
5	0.0109935	0.0354995

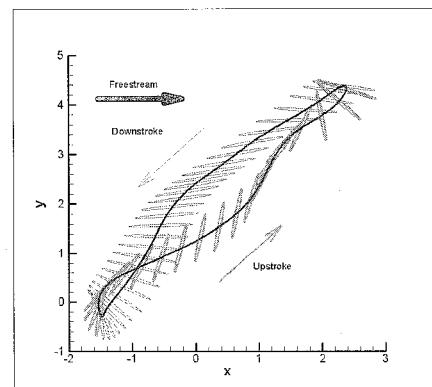


그림 1. Tethered flight에서 검정금파리의 날개 위치 (8자 운동)

여기서 t 는 무차원화 된 physical time을 뜻하고, k 는 reduced frequency($k = 2\pi f c / U_\infty$), f 는 날갯짓 frequency, U_∞ 는 자유류 속도, c 는 시위길이를 나타낸다. 식(3)에 따라 검정금파리 날개는 그림 1과 같이 “8자” 형태로 나타내어진다. 그림에서 보듯이 “8자 운동”은 스팬방향을 축으로 하는 rotation($a(t)$)과 수직방향으로의 translation($y(t)$), 그리고 날개를 앞뒤로 흔드는 lagging($x(t)$)으로 구성된다. 그림에 표시된 에어포일 간격은 동일

한 시간으로 나타내었기 때문에 각 부분에서의 빠르기를 짐작할 수 있다. 특히, upstroke 끝을 자세히 살펴보면 먼저 시계방향으로 각을 벌린 다음 반시계 방향으로 급격하게 rotation하고 있다. 자유류가 X-축으로 불고 있기 때문에 양력과 추력의 방향은 각각 Y-축의 양(+)과 X-축의 음(-)의 방향과 같다.

III. 해석 결과

3.1 “8자 운동”에 따른 유동장 해석

Nachtigall의 실험으로부터 유동해석에 필요한 무차원수를 계산해 보면 표 4와 같다.

표 4. 참고문헌[15]의 실험 결과

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

실제 곤충날개는 유연하며 그 단면은 매우 얇고 종에 따라 약간의 켈버 및 주름진 형태가 관찰되지만, 해석을 간단히 하기 위해서 최대 두께가 시위에 5%인 얇은 타원형 에어포일을 이용하였다. 벽면에서 첫 번째 격자점 간격이 5×10^{-3} 인 201×85 크기의 O-격자를 사용하였으며, 10주기 동안 반복계산을 수행하였다. 그림 2는 무차원 시간에 따른 공력계수의 변화를 보여준다. 여기서 음(-)의 항력계수 값을 추력계수를 의미하며, downstroke와 upstroke 영역을 각각 표시하였다. 계산결과 양력과 항력계수의 시간에 따른 변화는 매우 난잡한 양상을 보여주며, 순간적으로 매우 큰 값(순간 최대양력계수; 47.52, 순간 최대 추력계수; 64.66)을 나타내었다. 또 식(4)를 이용하면 양력과 추력계수의 시간평균값이 9.898과 2.632로 각각 구해졌다.

$$\bar{c} = \frac{1}{T} \int_0^T c(t) dt \quad (4)$$

식(4)에서 T는 한 stroke동안의 시간이고, $c(t)$ 는 순간적인 공력계수들(양력, 항력)을 뜻한다.

그림 2를 보면 양력은 downstroke 중에 주로 나타나고 upstroke 끝에서 매우 큰 추력이 갑작스럽게 발생하고 있음을 알 수 있다. 이에 따라, 유동현상의 물리적인 특성과 공력계수와의 관계

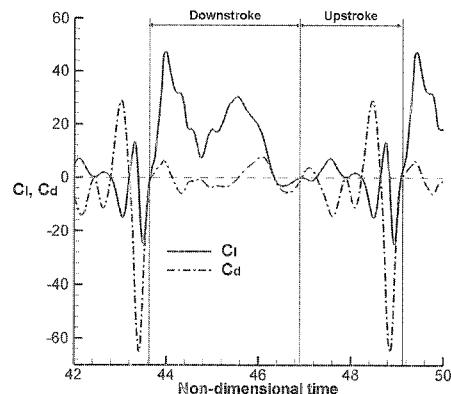


그림 2. 시간 의존적 공력계수, 양력계수(실선), 항력계수(일점쇄선)

를 downstroke와 upstroke로 구별하여 고찰하였다.

3.2 Downstroke시의 공력특성

그림 3은 downstroke시 형성되는 에어포일 주위의 와도장을 시간순서대로 보여주고 있다.

Downstroke 초기에 발달한 앞전와류가((a),(b)), 후류로 떨어져 나가면서 새로운 앞전와류와 함께 뒷전부근에서도 와류가 생성되고 있다((c),(d)). 이렇게 생성된 와류들도 (e)와 (f)에서 모두 떨어져 나간다.

먼저 앞전와류의 효과를 살펴보기 위해 압력장과 표면압력분포를 관찰해 보았다. 그림 4-(a)는 최대 양력이 발생하는 그림 3-(a)을 확대하여 앞전와류를 압력장과 속도벡터로 나타낸 것이고, 그림 4-(b)는 이때 시위에 따른 익형표면 압력분포를 보여준다. 그림 4-(a)의 앞전와류중심과 그림 4-(b)의 suction 위치가 일치하며, upper와 lower surface들의 벽면압력분포 차이로부터 앞전와류가 양력증가의 결정적 원인임을 보여주고 있다.

앞전와류는 Ellington[7,11]과 Dickinson[12,13]의 제자리비행(normal hovering)실험에서 이미 관찰되었으며, 대표적인 양력증가 메커니즘으로 알려져 있다. 이들은 날개가 높은 받음각을 유지하면서 translation을 할 때 앞전와류가 발생한다고 하였다. 하지만, 그림 1, 3, 4를 보면 이들의 주장과는 다르게 받음각이 크지 않음에도 불구하고 앞전와류가 발달하며 이것이 양력증가에 기여하고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이의 원인은 제자리비행과 전진비행에서의 날개운동이 근본적으로 다르기 때문에 앞전와류의 발생방법도 다를 수 있다는 것을 의미한다. Normal hovering의

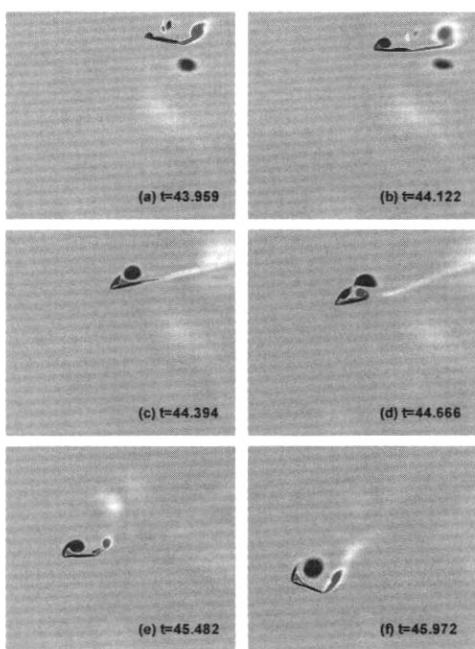


그림 3. Downstroke에서의 와도분포, (a) $t=43.959$,
(b) $t=44.122$, (c) $t=44.394$, (d) $t=44.666$,
(e) $t=45.482$, (f) $t=45.972$

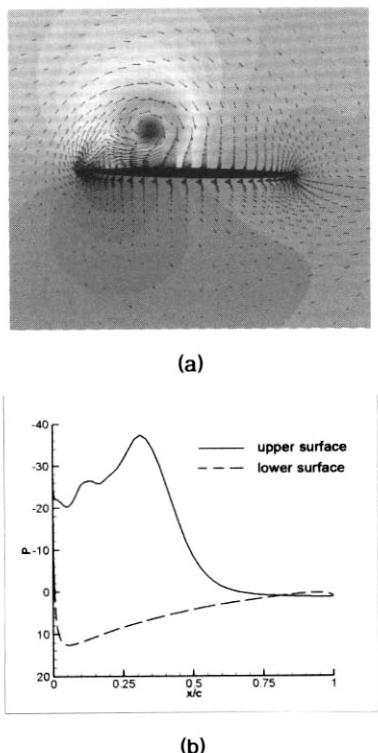


그림 4. $t=44.122$ 일 때의 앞전와류, (a) 압력, 속도벡터장, (b) 날개 표면에서의 압력분포

날개운동은 참고문헌[3,4,8]에 나와 있듯이 날개를 높은 받음각을 유지하며 translation하게 되면 날개앞전에서 앞전와류가 생기고, 이로 인해 양력이 발생하게 된다. 하지만, 이를 전진비행에 그대로 적용시키면, 양력발생에 기여하던 날개앞전의 앞전와류는 전진비행 방향을 기준으로 볼 때 날개 뒷면에 위치하기 때문에 이로 인해 과도한 유도항력을 유발시키게 될 것이다. 따라서 그림 3의 앞전와류는 높은 받음각 대신 에어포일의 운동 속도를 이용한 유효받음각의 증가에 따른 결과라고 생각된다. 유효받음각은 quasi-steady 개념으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{eff} = \alpha - \tan^{-1}(v' / (U_\infty - u')) \quad (5)$$

여기서 v' 은 translation 속도이고, u' 는 lagging 속도이다. 식(5)로부터 유효받음각은 downstroke 시 translation과 lagging운동의 속도가 증가할수록 커지게 됨을 알 수 있다.

앞전와류와 양력발생이 밀접한 관계에 있으므로 downstroke중에 나타난 양력계수의 난잡한 변화는 그림 3에 나타난 와류의 발달과 떨어져나감에 따른 것으로 생각된다. 제자리비행의 연구결과들에 따르면 와류들의 이러한 거동은 2차원 해석의 특징인 것으로 알려져 있다[4,8,13]. 3차원 해석에서는 downstroke 초기에 뒷전으로부터 TSV(Translational Starting Vortex)가 떨어져나가면서 Kutta 조건을 만족하여 순환을 형성하고 앞전와류 또한 안정적으로 부착하게 된다. 이 때문에 3차원 해석에서는 그림 2의 양력계수처럼 난잡한 특성이 나타나지 않는다[4,8]. 현재 안정적인 앞전와류 부착은 여러 가지로 이해되고 있으며, 레이놀즈수가 클 경우에는 span방향의 흐름이[11], 레이놀즈수가 작을 경우에는 날개 끝 와류에 의한 downwash의 효과라고 여겨지고 있다[13]. 앞전와류의 이러한 차이에도 불구하고 2차원과 3차원 해석은 그다지 많은 차이를 보이지 않는데, Wang et al.[20]은 3차원 실험과 2차원 계산 결과의 유동장을 비교하여 이들이 서로 잘 일치함을 보였고, Sun and Lan[21]은 3차원 계산에서 얻어진 수직방향의 힘이 2차원 계산결과와 비교했을 때 20%정도 낮게 계산됨을 보였다. 따라서 이러한 연구결과들을 참고로 한다면 본 연구의 2차원 해석도 그 타당성을 크게 훼손 받지 않는 것처럼 보인다. 하지만 이들의 결과들은 제자리비행에 관한 것이므로 전진비행에서도 유용한지는 추가적인 연구를 수행해야만 알 수 있을 것이다. 따라서 향후 3차원 tethered flight에 대한 전산해석을 수행하여 앞전와류의 안정적 부

착이 가능한지, 또 가능하다면 그 메커니즘은 무엇인지에 대한 추가적인 연구를 수행할 계획이다.

3.3 Upstroke시의 공력특성

그림 2는 무차원 시간 $t=48.6\sim49.1$ 에서 갑작스럽게 발생하는 큰 추력을 보여준다. 그림 5의 (a)~(e)는 이때의 와도장을 나타내고, (f)는 다음 주기 downstroke 시작부분에 해당된다.

에어포일은 그림 5-(a)에서 반시계방향으로 급격하게 rotation을 시작한다(a). 이후 윗면(그림에서 에어포일의 윗면) 전단층으로 부터 시계방향으로 회전하는 와류가 떨어져 나가고 있다(b). 이 와류는 완전히 떨어져 나가서(c), 에어포일 아래에 위치하게 된다(d). Rotation이 끝나게 되면 에어포일 밑면 전단층으로 부터 반시계방향의 새로운 와류가 발달하고(e), 이들 두 와류는 수직방향으로 짹을 이루어 후류 쪽으로 동시에 떨어져 나가고 있다(f). 그림 6은 그림 5-(f)의 후류부분을 확대한 것으로, 두 와류사이에 존재하는 유동방향의 제트를 속도벡터를 통해 뚜렷하게 보여준다.

두 와류가 한 쌍으로 존재할 때 주위 속도장은 두 와류에 의해 유도되는 속도의 중첩된 결과로 나타나게 된다[22]. 그림 6을 보면 위쪽에 있는 와류는 반시계방향으로 회전하고 있으며, 아래쪽의 와류는 시계방향으로 회전하고 있다. 더구나 자유류 방향에 대해 거의 수직으로 정렬되어 있기 때문에 와류사이의 속도중첩은 자유류 방향과 나란하게 형성되는 제트의 형태로 나타나게 된다. 제트는 주위유동에 운동량을 공급해주는 것이 되므로, 이를 통해 추력발생을 입증할 수 있다.

이와 비슷한 후류 구조로 inverse Kármán vortex에 의해 유도되는 jet-like flow가 있다. 에어포일이 주기적으로 진동(pitching, plunging 또는 둘을 합친 flapping)하여 추력을 발생시킬 때, 한 주기 동안 와류는 후류의 중심선을 기준으로 윗면과 아랫면에서 교대로 떨어져 나가 inverse Kármán vortex를 이루게 된다[18,19]. 이때 후류로 떨어져 나간 와류는 수직방향으로 짹을 이루지 못하기 때문에, 그림 6과 같은 순간적인 속도장에서 제트가 뚜렷하게 보이지 않고 시간 평균된 속도장에서만 관찰될 수 있다[19,23,24]. 그림 7-(a),(b)는 주기적으로 pitching운동을 하는 타원형 에어포일에서 inverse Kármán vortex의 형성과 항력(-추력)계수의 시간적 변화를 각각 보여준다. 추력발생은 그림 2와는 달리 순간적으로 강력하게 이루어 지지 않고 와류처럼 주기적인 특성을 나타낸다. 따라서 그림 6의 와류 짹 현상을

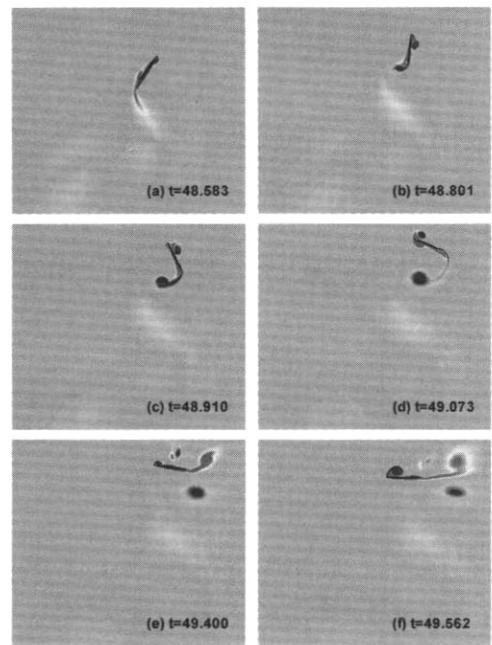


그림 5. Upstroke에서의 와도분포, (a) $t=48.583$, (b) $t=48.801$, (c) $t=48.910$, (d) $t=49.073$, (e) $t=49.400$, (f) $t=49.562$

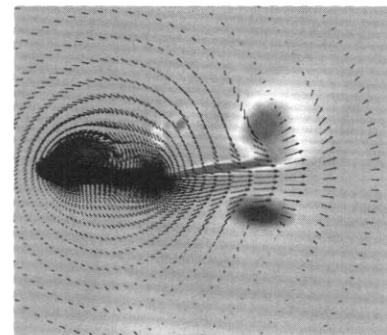


그림 6. 와류 짹 현상과 후류의 제트

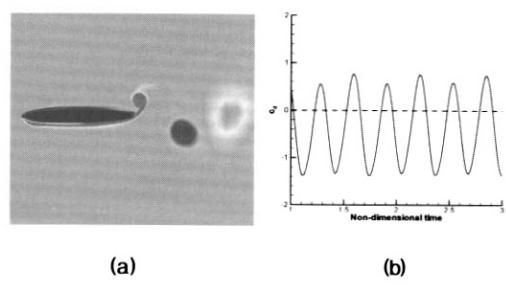


그림 7. 진동하는 에어포일, (a) Inverse Kármán vortex, (b) 레이놀즈수 12000에서의 항력계수 변화, 진동진폭=10°, $k=10$, 최대 두께는 코드의 12%

그림 2에 나타난 추력발생의 특성을 후류 유동장의 형태로 설명할 수 있을 것이다.

앞서 살펴본 그림 5와 6의 와류 짹 현상은 갑작스러운 추력발생 이후 나타난 유동장의 반응이다. 검정금파리의 tethered flight 실험에서 유동가시화를 적용한다면 3차원 날개의 스팬방향 단면 유동장에서 와류 짹 현상을 관찰할 수 있을 것이다. 하지만 살아있는 곤충을 대상으로 하는 tethered flight에서는 6자유도의 힘과 모멘트를 추정하기가 상당히 어렵기 때문에 가시화로 나타난 유동장의 형태와 힘의 발생을 연관 짓기란 쉬운 일이 아니다[8]. 즉, 그림 6에 나타난 와류 짹 현상이 실험에 의해 관찰될 때, 정량적으로 큰 추력의 발생을 유추할 수는 있겠지만, 실제 추력을 만들어 내는 에어포일 표면의 압력과 유동장의 형태에 관해서는 어떤 정보도 주지 못한다. 본 연구에서는 전산유체역학의 장점을 이용하여 추력발생과 관계된 압력장이 어떤 방식으로 형성되는지를 살펴보았다.

그림 8은 최대추력이 발생하는 $t=48.85$ 부근에서 에어포일주위의 압력장과 속도장을 나타낸 것이다. 그림을 시간순서대로 살펴보면 에어포일 윗면 전단층으로부터 시계방향의 와류가 뒷전부근에서 발달하고 있으며, 속도벡터에 가려 보이지는 않지만 앞전에서도 작은 와류가 생성되고 있다. 여기서 뒷전와류는 나중에 와류 짹 현상을 이루게 된다. Rotation을 하는 동안 에어포일 앞부분에서의 속도벡터 길이가 점차 증가하므로 유동이 점차 가속되고 있음을 알 수 있다. 또한 앞전과 뒷전부근의 유동도 에어포일 쪽으로 빨려 들어가고 있다. 이에 따라 에어포일 앞부분에 저 압영역이 광범위하게 분포되어 있고, 뒷부분의 압력은 상대적으로 높게 형성된다. 그림 2에 보이는 양력과 추력계수에서 전단응력에 의한 영향은 거의 없고 압력에 의한 영향이 대부분이므로 추력은 앞면과 뒷면의 압력차로 결정되는 것임은 자명하다[24]. 이 같은 압력차이가 발생되는 원인은 에어포일의 급격한 rotation으로 뒤쪽 유동은 상대적으로 압축되고 앞쪽은 팽창되어 나타나는 것으로 생각된다. 좀 더 자세한 고찰을 위해 표면 압력분포를 이용하였다.

그림 9-(a)는 그림 8에서 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 발생되는 $t=48.855$ 와 $t=48.801$ 의 압력분포는 큰 차이가 없다. 그림 8-(d)에 해당되는 $t=48.910$ 에서는

압력이 다시 낮아졌다. 뒷면의 압력이 증가하는 특성과는 달리 앞면의 압력은 지속적으로 낮아지고 있다. 특히, $t=48.910$ 에서 뒷면의 압력이 증가를 끝내고 다시 낮아지고 있음에도 불구하고 앞면의 저압영역은 $t=48.855$ 에서와 거의 비슷하게 유지되고 있다. 이는 앞면의 뒷전 부근에 나타난 와류의 영향인 것으로 보여진다. 즉, 앞면에서 생성된 와류가 후류로 이동하지 못하고 거의 비슷

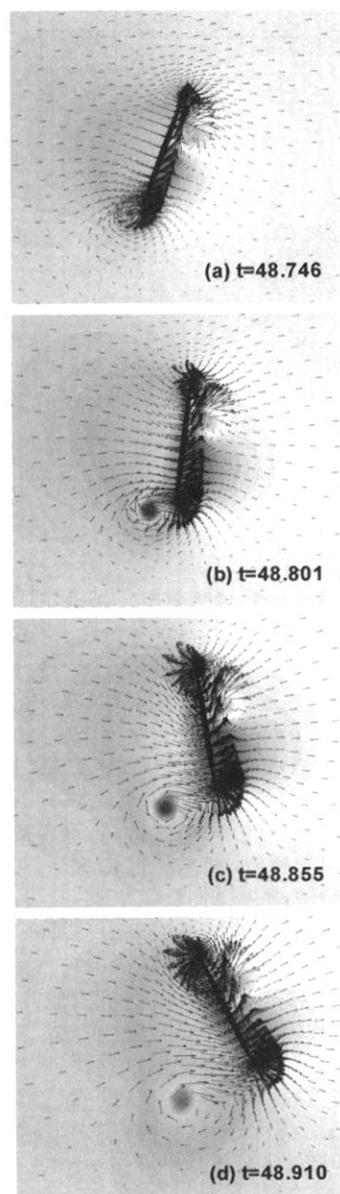


그림 8. 추력계수가 최대가 되는 시점에서의 압력, 속도벡터장, (a) $t=48.746$, (b) $t=48.801$, (c) $t=48.855$, (d) $t=48.910$

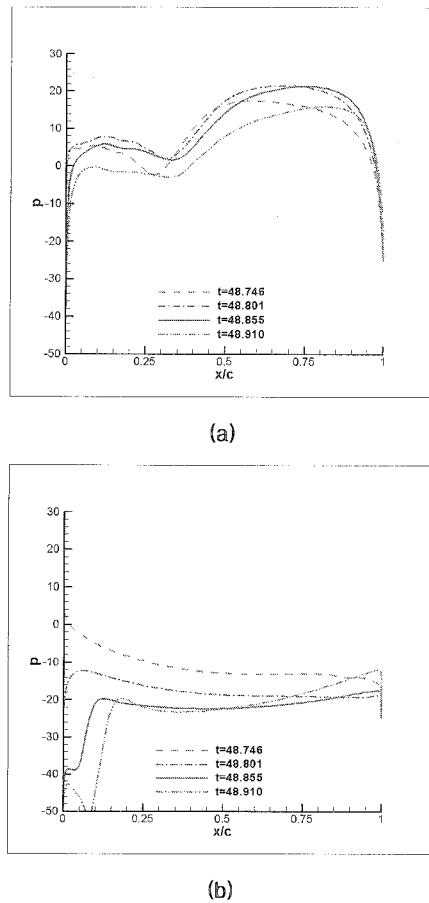


그림 9. 표면 압력분포, (a) 날개윗면,
(b) 날개 아랫면

한 위치에서 빨달하고 있기 때문에 지속적인 저압영역을 앞면에 유지시켜 주고 있는 것이다. 결론적으로, 앞면과 뒷면의 압력분포로부터 앞면의 압력강하가 뒷면의 압력증가보다 좀 더 강하게 이루어지고 있고 더군다나 와류의 정지로 인해 앞부분의 저압영역이 지속되고 있는 것이다. 이러한 와류의 기동은 한번 떨어져 나간 와류를 이용한다는 점에서 Dickinson et al.[12]이 제시했던 "wake capture"와 비슷하나, 유동의 방향을 바꿔주는 것이 아니라 지속적으로 저압영역을 만들어 준다는 점에서 새롭다고 할 수 있을 것이다.

뒷전와류의 정지 현상으로부터 와류 짹 현상이 좀 더 자세히 설명 될 수 있다. 즉, 정지된 뒷전와류는 그림 5-(e)에 보인 에어포일 밑면의 전단층으로부터 발생하게 된 와류와 속도장에서 상호 간섭을 일으켜 와류 시스템으로써 같이 병진 운동을 하고 있는 것이다.

제자리비행과 함께 급격한 기동은 곤충비행의 가장 큰 특징이다. 본 연구에서 관찰된 와류 짹

(vortex pairing)현상과 와류정지 현상은 곤충들이 관성을 이기고 짧은 시간에 급격한 운동량의 변화를 초래할 수 있는 큰 힘을 공기역학적으로 어떻게 발생시키는지를 보여 주는 예라고 여겨진다.

IV. 결 론

Nachtigall의 실험으로부터 관찰된 검정금파리 날개의 "8자 운동"에 대한 비정상 유동장을 해석하였다. 해석결과 downstroke에서는 주로 양력이, upstroke 끝에서는 대단히 큰 추력이 갑작스럽게 발생하였다. 유동장의 분석으로부터 앞전와류는 양력증가와 관련되어 있으며 이는 유효발음각의 증가에 따른 것으로 보였다. 추력발생은 upstroke 끝에서 발생되는 뒷전와류가 지대한 역할을 하는 것으로 나타났다. 뒷전와류는 에어포일 앞면에서 형성된 저압 영역을 지속적으로 유지시켜 압력 차이에 의한 추력을 유도한다. 또한 후류에서 나타나는 와류 짹 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

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

참고문헌

- 1) Brodsky, A. K., "The Evolution of Insect Flight", *Oxford Univ. Press*, 1994.
- 2) Dickinson, M. H., "Come Fly with Me", *ENG. & SCI.*, No. 3, 2003, pp. 10~19.
- 3) Dickinson, M. H., "Solving the Mystery of Insect Flight", *Scientific American*, Vol. 284(6), 2001, pp. 48~57.
- 4) Sane, S. P., "The Aerodynamics of Insect Flight", *J. Exp. Biol.* Vol. 206, 2003, pp. 4191~4207.
- 5) Alexander, R. M., "Smokescreen Lifted on Insect Flight" *NATURE*, Vol. 384, 1996, pp. 609.
- 6) Wang, Z. J., "Two Dimensional Mechanism for Insect Hovering", *Phy. Rev. lett.*, Vol. 85, 2000, pp. 2216~2219.

- 7) Willmott, A. P., Ellington, C. P., and Thomas, A. R., "Flow Visualization and Unsteady Aerodynamics in the Flight of the Hawk-moth, *Manduca Sexa*", *Phil. Trans. R. Soc. Land. B*, Vol. 352, 1997, pp. 303~316.
- 8) Lehmann, F., "The Mechanism of Lift Enhancement in the Insect Flight", *Naturwissenschaften*, Vol. 91, 2004, pp. 101~122.
- 9) Ennos, R., "Unconventional Aerodynamics", *NATURE*, Vol. 344, 1990, pp. 491.
- 10) Ward-smith, A. J., "Biophysical Aerodynamics and the Natural Environment", *John Wiley & Sons*, 1984.
- 11) 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, pp. 626~630.
- 12) 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.
- 13) Birch, J. M., and Dickinson, M. H., "Spanwise Flow and the Attachment of the Leading-edge Vortex on Insect Wings", *NATURE*, Vol. 412, 2001, pp. 729~733.
- 14) Liu, H., and Kawachi, K., "A Numerical Study of Insect Flight", *J. Comp. Phy.*, Vol. 146, 1998, pp. 124~156.
- 15) Nachtigall, W., "Insects in Flight", *McGraw-Hill*, 1974.
- 16) Kim, C., "Sensitivity Analysis for the Navier-Stokes Equations with Two-Equation Turbulence Models and Its Applications", PH. D. Dissertation, Dept. of Aerospace Eng., Seoul Nat'l Univ., Seoul, Korea, Aug. 2006.
- D. Dissertation, Dept. of Aerospace Eng., Seoul Nat'l Univ., Seoul, Korea, Feb. 2001.
- 17) Lee, J. S., Kim C., and Kim K. H., "Design of Flapping Airfoil for Optimal Aerodynamic Performance in Low-Reynolds Number Flows", *AIAA Journal*, Vol. 44, No. 9, 2006, pp. 1960~1972.
- 18) 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.
- 19) Koochesfahani, M. M., "Vortical Patterns in the Wake of an Oscillating Airfoil", *AIAA Journal*, Vol. 27, No. 9, 1989, pp. 1200~1205.
- 20) Wang, Z. J., Birch, J. M., and Dickinson, M. H., "Unsteady Force and Flows in Low Reynolds Number Hovering Flight: Two-Dimensional Computation vs Robotic Wing Experiments", *J. Exp. Biol.* Vol. 207, 2004, pp. 449~460.
- 21) Sun, M., and Lan, S. L., "A Computation Study of the Aerodynamic Forces and Power Requirements of Dragonfly(*Aeshna Juncea*) Hovering", *J. Exp. Biol.* Vol. 207, 2004, pp. 1887~1901.
- 22) Lutz, H. J., "Vortex Flow in Nature and Technology", *John Wiley & Sons*, 1983.
- 23) 이정상, 김종암, 노오현, "저 레이놀즈수 유동에서 Flapping-Airfoil의 수치적 공력특성 연구", 한국항공우주학회지, 제30권, 제4호, 2002, pp. 44~52.
- 24) Lee, J. S., "Numerical Study on Flapping-Airfoil Design and Unsteady Mechanism of Two-Dimensional Insect Wing", PH. D. Dissertation, Dept. of Aerospace Eng., Seoul Nat'l Univ., Seoul, Korea, Aug. 2006.