

초소형 비행체 개발에의 적용을 위한 곤충 날갯짓 비행의 비정상 공력 특성에 대한 수치적 연구

요 약

날갯짓형 초소형 비행체 개발에의 적용을 위해, 날갯짓 곤충의 전진 비행 시 공력 특성에 대해 알아보기 위해 검정금파리의 전진모사 비행에 대해 2차원 및 3차원 수치해석을 수행하였다. 검정금파리 날개 운동의 2차원 해석 결과를 통해, Downstroke 중에는 주로 양력이 발생하였고, upstroke의 끝부분에 급격한 추력이 발생함을 확인할 수 있었다. 2차원 날개 운동 및 날개 단면형상의 파라메트릭 연구를 통해 8자 운동이 추력 발생에 유리함과 곤충 날개의 시뮬 효과를 고려한 날개 형상이 추력 발생에 유리한 형상임을 관찰할 수 있었다. 검정금파리 날개 운동의 3차원 해석 결과를 통해 날개 길이방향 유동의 존재를 확인할 수 있었으며, 이로 인해 앞전와류의 분리가 지연됨을 확인할 수 있었다. 또한 와류의 구조가 와류환의 형태로 나타남을 확인할 수 있었으며, 와류의 구조는 복잡하나 전체적인 물리 현상은 2차원 3차원 결과가 유사함을 확인할 수 있었다.

I. 서 론

최근 세계 각국에서는 곤충과 같은 생물체의 산업적, 경제적, 과학적 측면에서 관심이 고조되면서 다양성이 풍부한 곤충을 하나의 자원으로 인식하고 활용하려는 경쟁이 치열해지고 있으며, 이러한 일환으로 곤충의 가치를 재평가하고 이용하려는 연구가 활발히 진행 중에 있다. 특별히 항공우주분야에서는 곤충이나 새의 비행 메커니즘 밝혀내고, 이를 실제 비행기에 적용하고자 하는 노력을 기울여왔다. 곤충이나 새의 날갯짓 비행은 상대적으로 느린 속도에서도 충분한 양력과 추진력을 낼 수 있다는 장점 때문에 향후 개발될 미래형 날갯짓형 초소형 개발에의 적용가능성으로 주목받고 있다. 파리와 같이 작으면서도, 뛰어난 비행특성을 가진 곤충의 비행 메커니즘에 대한 이해를 통하여, 효율적이고 안정적인 비행성을 가진 초소형 비행체를 설계할 수 있을 것이다.

과거 곤충비행의 해석에는 일반적인 항공기에 적용되는 정상상태 공기역학이 이용되었지만, 이를 통해서 곤충비행에서 발생하는 충분한 크기의 양력을 얻어내지 못했다. 따라서 정상상태 공기역학은 곤충비행을 설명하기에 부적합한 것으로 알려지게 되었다. 그러나 근래 들어 곤충들의 날갯짓을 모사할 수 있는 기계장치나, 고속카메라 및 유동가시화 기법, 그리고 전산유동해석기법 등의 발달로 양력증가를 설명할 수 있는 여러 가지 비정상(unsteady) 메커니즘들이 제안되었다[1].

곤충비행의 해석과 관련하여 가장 먼저 알려진 비정상 메커니즘은 1970년대에 들어서

Weis-Fogh가 말벌(*Encarcia forsoma*)에게서 발견한 "clap-fling"이었다[2]. 80년대 이후 실험과 수치해석을 통하여 기존의 quasi-steady 가정의 한계가 밝혀졌고[1][3], 또 다른 비정상 메커니즘으로 앞전와류(LEV, Leading Edge Vortex)에 의한 실속 지연(delayed stall)을 제시하였다[4]. 90년대 이후 실험 장치 및 전산 유동해석기법의 발달로 Dickinson[5], Wang[6], Liu and Kawachi[7] 등의 연구자들은 실험 및 수치해석을 통해 "LEV", "rotational circulation"과 "wake capture" 등과 같은 비정상 메커니즘을 제시하였다. 여러 연구자들의 노력으로 밝혀진 이러한 비정상 메커니즘들은 곤충들의 양력발생에 관해 과거에는 알지 못했던 많은 사실들을 알려주지만, 대부분이 제자리비행 중인 곤충들의 양력증가에 관한 연구들이므로 전진비행이나 곤충비행의 특징인 급격한 기동을 설명하기에는 매우 제한적이다.

본 연구에서는 곤충 비행의 비정상 현상을 이해하기 위하여 2차원 해석을 통해 와류생성의 경향과 유동 패턴을 이해하고, 2차원 파라메트릭 연구를 통해 추력 발생에 유리한 곤충 날개 운동의 기하학적 요소(날개 운동 궤적, 날개 단면 형상)에 대한 탐구를 수행하며, 3차원 해석을 통해 와류의 복잡한 구조와 와류-와류 및 와류-날개의 상호작용을 분석한다.

II. 해석 기법

1. 지배방정식

지배 방정식은 2차원 및 3차원 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식으로, 날개운동을 모사하기 위해 동적격자 기법을 도입하였다. 비압축성 효과를 고려하기 위해 Pseudo-compressibility 기법을 적용하였으며, 공간 차분은 Osher's Upwind Scheme과 MUSCL을, 시간 적분은 LU-SGS 기법을 사용하였으며, 비정상 계산을 위하여 이중시간 전진법(dual time stepping)을 사용하였다. 또한 수렴가속화를 위해 Multi-grid 기법을 적용하였다. 적용된 수치해법의 자세한 내용은 참고문헌[8]에 잘 나와 있다.

본 연구에서 사용된 해석코드는 Lee et al.[9]에 의해 pitching운동을 하는 에어포일의 실험결과와 비교되어 검증되었다. 검정금파리의 레이놀즈수의 크기가 $10^2 \sim 10^3$ 정도이므로, 전 유동을 층류로 가정하였다.

2. 검정금파리의 2차원 날개운동 모델

본 연구에서는 날갯짓 곤충 중에서 특별히 탁월한 비행 능력을 보여주는 검정금파리를 선택하였다. 검정금파리는 제자리비행, 전진비행 및 급격한 거동을 보여주며, 몇몇 선행 연구자에 의해 실험적으로 날개 운동이 관찰되었다. 검정금파리의 2차원 날개 운동은 Nachtigall[10]이 전진 비행 모사 실험을 통해 얻은 날개의 8자 운동 궤적을 Fourier 급수로 나타낸 식(1)을 운동 모델로 사용하였다. 일반적으로 검정금파리의 비행속도는 2~5m/s이며 실험조건에서의 자유류의 속도 2.75 m/s는 검정금파리의 평균 비행속도라 가정할 수 있다. Fourier 급수의 계수와 운동 모델의 구성요소는 지면관계상 생략하나 참고문헌[11]에서 확인할 수 있다. 검정금파리 2차원 날개 궤적은 그림 1과 같이 나타난다.

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

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

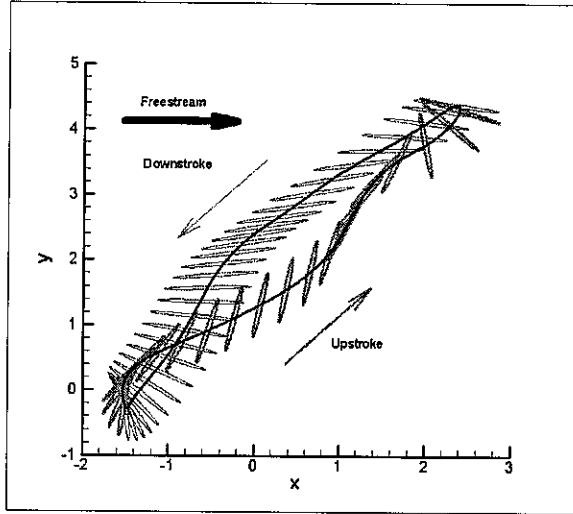


그림 1. 검정금파리 날개의 8자 운동

3. 2차원 날개 운동의 파라메트릭 연구(운동 궤적, 피치각)

날개 운동 궤적에 따른 공력 특성의 변화를 분석하기 위하여, 날개의 운동궤적이 확연히 다른 두 가지 곤충, 검정금파리와 잠자리 날개 운동을 선택하였다. 검정금파리 날개 운동은 앞에서 언급한 바와 같이 전진 모사 비행 실험을 통해 얻은 실제 비행 궤적이며, 8자 운동의 형태를 나타낸다[그림 1]. 또한 날개 움직임에 따른 피치각은 Downstroke와 Upstroke 끝단에서 급격한 변화를 이루는 특징을 가진다.

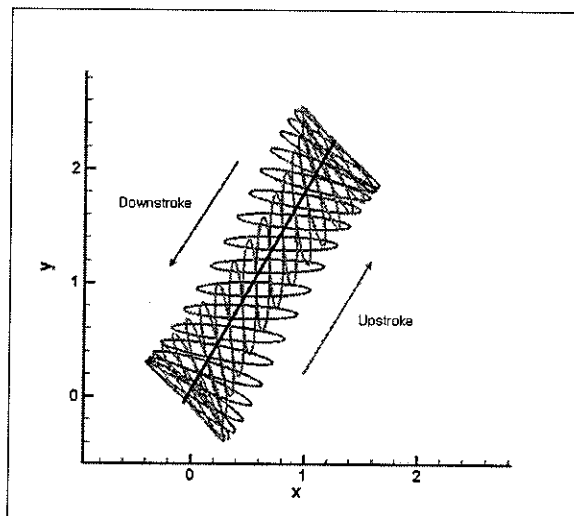


그림 2. 잠자리 날개의 왕복 운동

잠자리의 날개운동은 경사 정지비행(Inclined Hovering)시의 날개 운동을 모사한 것이며[6], 날개운동은 경사진 방향의 왕복운동으로 구성되어 있다[그림 2]. 날개의 피치각은 사인함수로 구성되어, 완만한 변화를 이루는 특징을 나타낸다. 잠자리의 날개 운동 모델은 다음과 같은 식(2)와 같이 나타내어진다[6].

$$x(t) = \frac{A_0}{2} \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \beta \sin(2\pi ft)$$

파라메트릭 연구를 위한 날개 운동의 파라미터로, 날개 궤적과 피치각을 선택하고, 이를 이용하여 파라메트릭 연구를 수행하였다. 8자운동과 왕복운동의 두 가지 날개 운동과 급격한 변화의 피치각과 완만한 변화의 피치각의 두 가지의 피치각 변화를 이용하여 4가지의 날개 움직임을 조합하였으며, 그림 3에서 이를 보여준다.

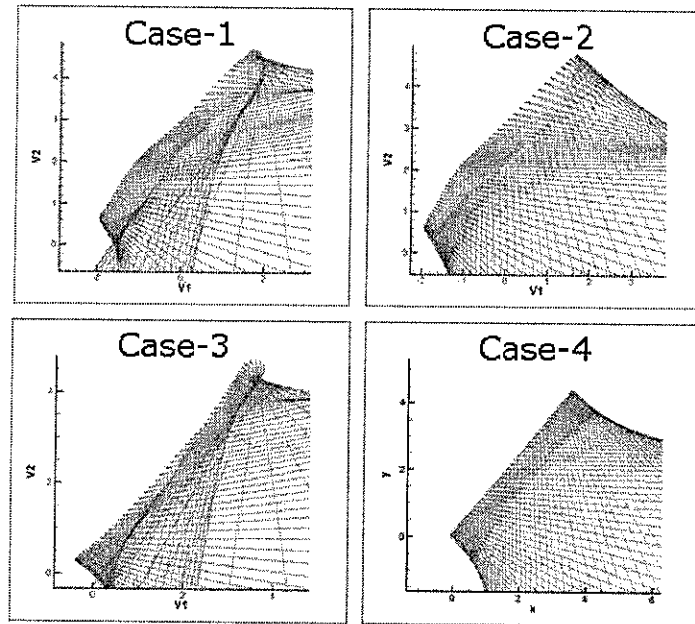


그림 3. 날개 운동 효과 연구를 위한 4 가지의 날개 움직임

4. 2차원 날개 단면 형상의 파라메트릭 연구

날개 단면 형상에 의한 효과만을 알아보기 위하여, 날개의 운동 궤적 및 유동 조건을 모두 동일하게 하고 날개의 형상만을 변화하여 수치해석을 수행하였다. 날개의 운동 모델 및 유동 조건은 검정금파리의 날개 운동에 맞추어 설정하였다. 날개 단면 형상은 선행 연구자들이 실험적 연구를 수행하였던 단면 형상들과 검정금파리 날개의 형상을 보고 직관적으로 제안한 3가지 형태의 날개 형상에 대해 수치해석 하였다. 날개 단면 형상은 그림 4에 잘 나타나 있다. 날개 단면 형상으로는 기본적인 기하학 형상을 바탕으로 만들어진, Elliptic airfoil(5%), Circular arc(4%, 9%), Flat plate와 잠자리 날개 단면 형상을 나타

내는 Dragonfly 타입, 그리고 검정금파리 날개 형상을 보고 새로 제안한 3가지 형태의 날개 단면 형상이 있다. 새로 제안한 3가지 형태의 날개 단면은 검정금파리의 날개를 지탱하기 위한 날개 줄기의 두께를 고려한 형태이다. New type 1은 날개 앞전에 존재하는 가장 두꺼운 하나의 줄기만을 고려하고, 뒷전은 날카롭게 형상화한 날개이며, New type 2는 앞전은 New type 1과 동일하지만, 뒷전은 부드럽게 한 형태이다. New type 1, 2는 극단적인 형태의 Tadpole type의 격자라 할 수 있으며, 두 가지 결과의 비교를 통해 날개 뒷전 형상에 대한 효과를 알아볼 수 있을 것이다. New type 3은 날개에 존재하는 여러 개의 줄기 두께를 고려한 형태의 날개이며, New type 1과 마찬가지로 날개 뒷전을 날카롭게 처리하였다.

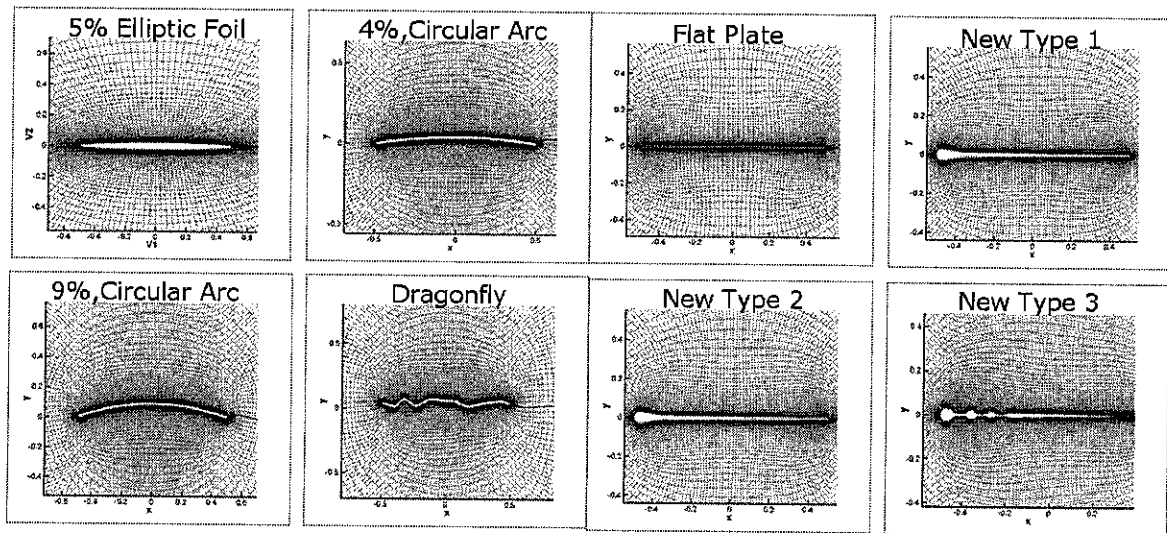


그림 4 날개 단면 형상 효과 연구를 위한 8 가지의 날개 단면 형상

5. 검정금파리의 3차원 날개운동 모델

3차원 수치해석 역시 Nachtigall이 전진 비행 모사 실험을 통해 얻은 날개 궤적 데이터를 사용하였다. Nachtigall은 실험을 통해 그림 5와 같이 XY, YZ, ZX 평면에서의 날개의 움직임은 초고속 카메라를 이용하여 촬영하였다. 그림 6은 실험을 통해 측정된 날개의 움직임 각을 시간에 따라(또는 주기에 따라) 나타낸 그림이며, 이를 2차원 계산에서와 마찬가지로 식 (3)와 같이 Fourier 급수로 표현할 수 있다. Fourier 급수의 계수는 지면판 계상 생략한다.

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

$$F(t) = [\beta(t), \gamma(t), \delta(t), \alpha(t)]^T$$

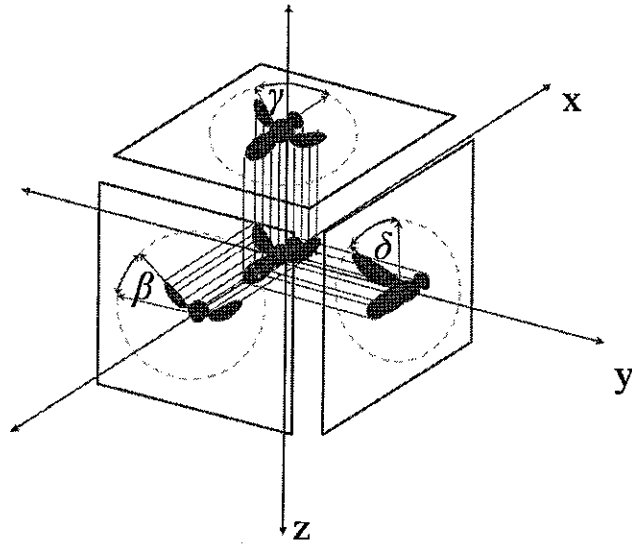


그림 5. 검정금파리 날개의 움직임을 XY, YZ, ZX 평면에 투영(촬영)

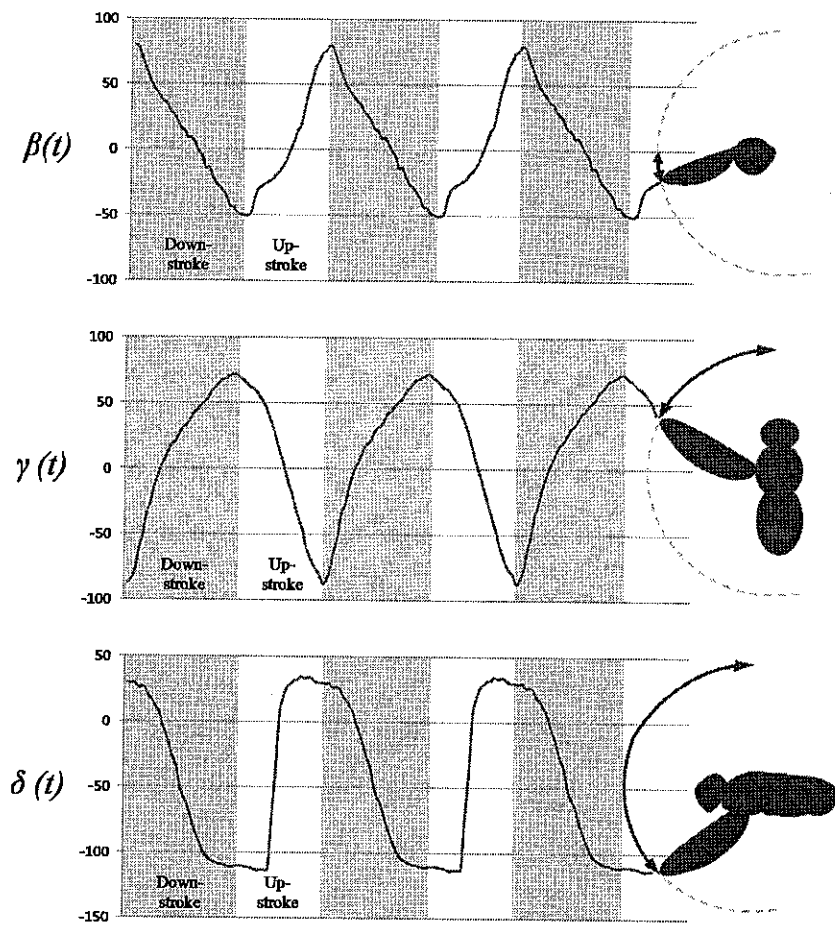


그림 6. XY, YZ, ZX 평면에서 촬영한 시간에 따른 날개의 움직임 각

6. 격자계의 구성

실제 곤충날개는 유연하며 그 단면은 매우 얇고 종에 따라 약간의 캠버 및 주름진 형태가 관찰되지만, 해석을 간단히 하기 위해서 2차원 해석에서는 최대 두께가 시위에 5%인 얇은 타원형 에어포일을 이용하였다. 벽면에서 첫 번째 격자점 간격이 5×10^{-3} 인 225×97 크기의 O-격자를 사용하였으며, 10주기 동안 반복계산을 수행하였다. 3차원 해석의 경우, 격자계의 구성을 용이하게 하도록 하기 위하여, 날개 표면 형상의 경우 그림 7과 같은 수정을 통해 형태를 간략화 하였다. 날개의 단면은 두께가 평균 시위에 5%인 평판으로 가정하였다.

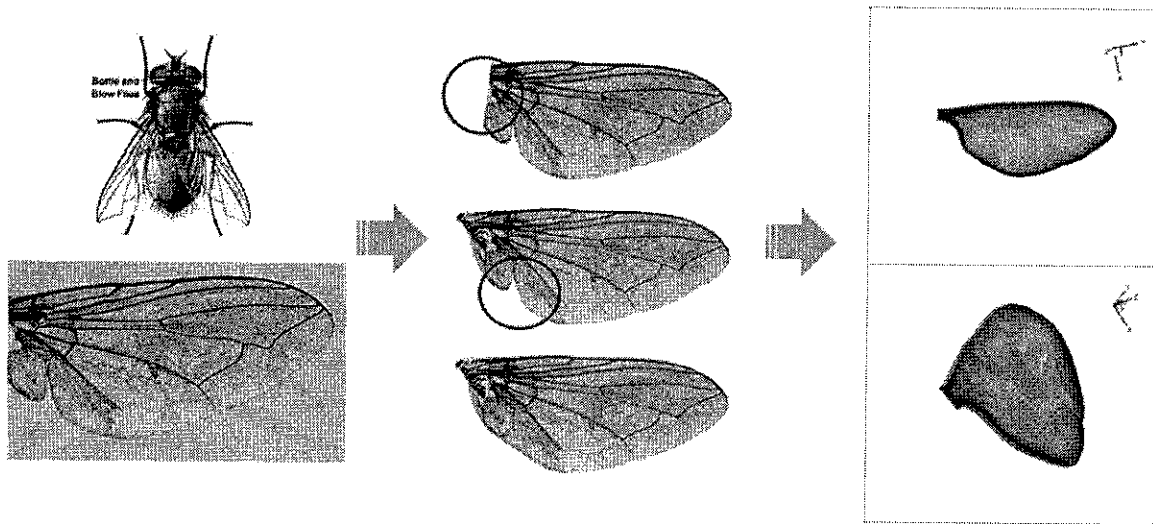


그림 7. 검정금파리 날개의 모델링 과정

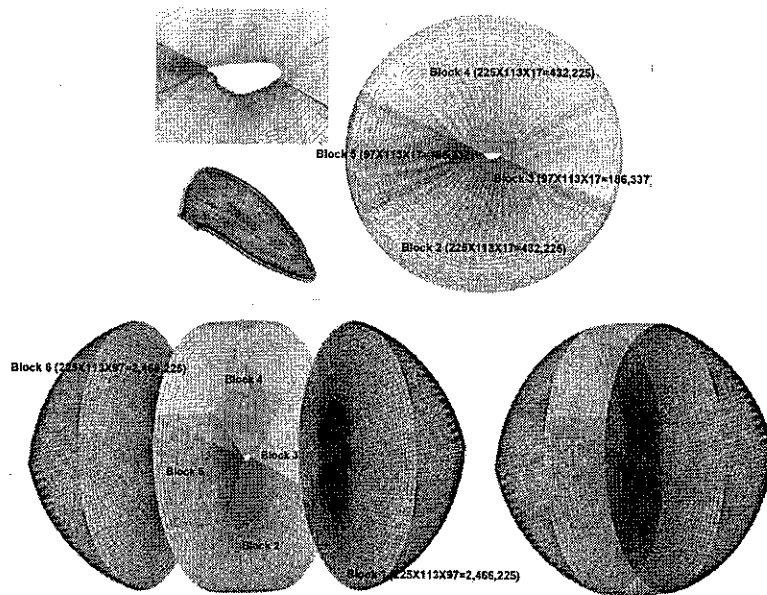


그림 8. 검정금파리 날개의 3차원 격자계

벽면에서 첫 번째 격자점 간격이 5×10^{-3} 인 격자를 사용하였으며, 유동 패턴의 주기성이 나타나도록 5주기 동안 반복계산을 수행하였다. 3차원 해석을 위한 격자계는 격자점이 약 610만개 정도로 구성되어 있고, 격자계는 그림 8과 같이 총 6개의 블록으로 구성되어 있다.

III. 해석 결과

1. 검정금파리 날개 운동의 2차원 해석 결과

그림 9, 10은 두 주기 반 동안 검정금파리의 날개 운동에서의 양력, 추력 곡선을 타나낸 것이다. 그림을 보면, Downstroke중에는 주로 양력이 발생함을 확인할 수 있고, Upstroke 중에는 주로 추력이 발생함을 확인할 수 있다[12]. 주목할 점은 양력의 경우 두 번의 피크값이 존재한다는 점과 추력은 Upstroke 끝단에서 매우 큰 피크 값을 나타낸다는 점이다. 많은 선행 연구에서 알려진 바대로, Downstroke 시 양력 발생은 날개 앞전에서 발생하는 와류에 의해 저압영역이 형성되고 이로 인한 압력차이로 인한 것이다.

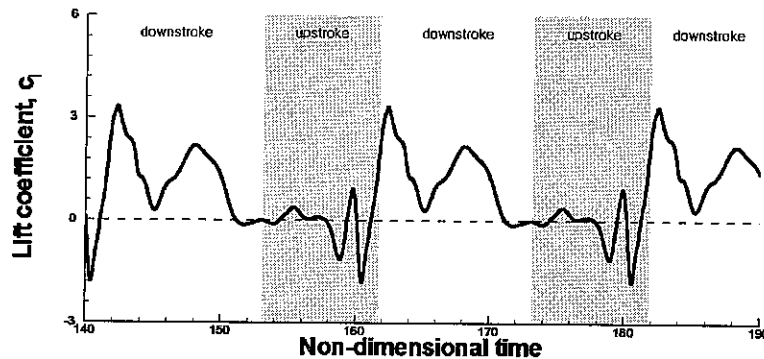


그림 9. 검정금파리 2차원 날개운동의 양력곡선

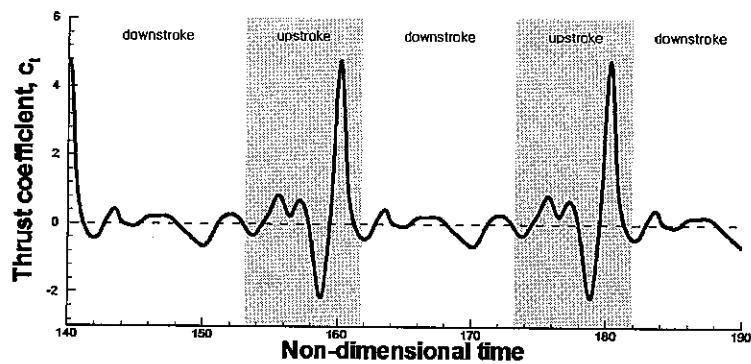


그림 10. 검정금파리 2차원 날개운동의 추력곡선

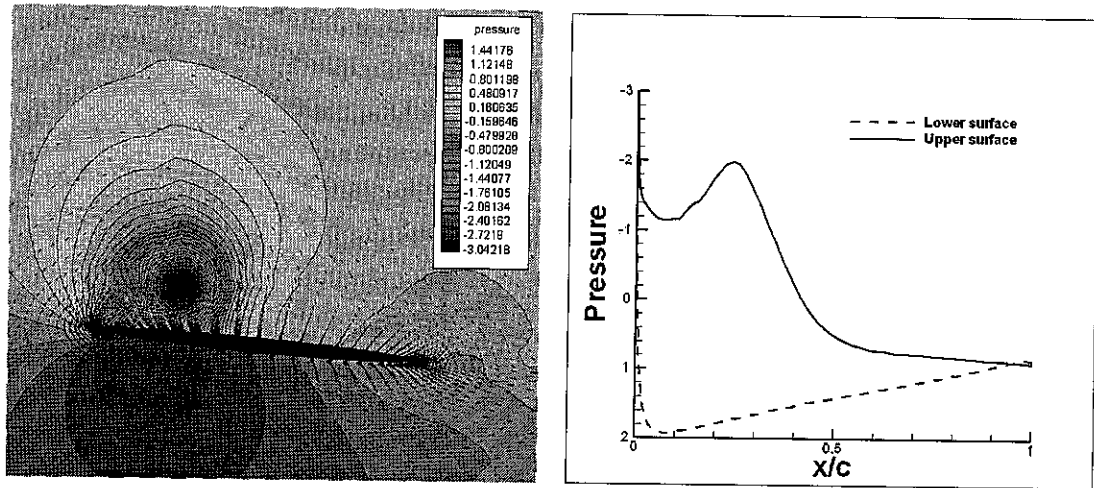


그림 11. Downstroke 시 앞전와류, 압력과 속도장, 날개 표면에서의 압력분포

그림 11에서 이러한 특성을 잘 보여주고 있다. 그림을 보면, 압력 및 속도장 그림에서의 앞전와류의 위치와 날개 표면에서의 압력분포 그림에서의 압력의 피크값의 위치가 동일함을 확인할 수 있다. Downstroke 시의 유동장의 특성을 보면, 강한 크기를 가진 와류가 차례로 두 번 떨어져 나가는 것을 확인할 수 있는데, 이는 강한 크기의 와류가 두 차례 발생하면서 강한 양력을 두 번 발생 시킨 것으로 이해할 수 있다. 2차원 해석에서 나타난 와류의 분리 현상은 알려진 바와 같이 2차원에서만 나타나는 현상이므로, 3차원 해석을 통해 어떠한 차이가 나타나는 지는 3차원 해석 결과의 분석을 통해 고찰하도록 하겠다.

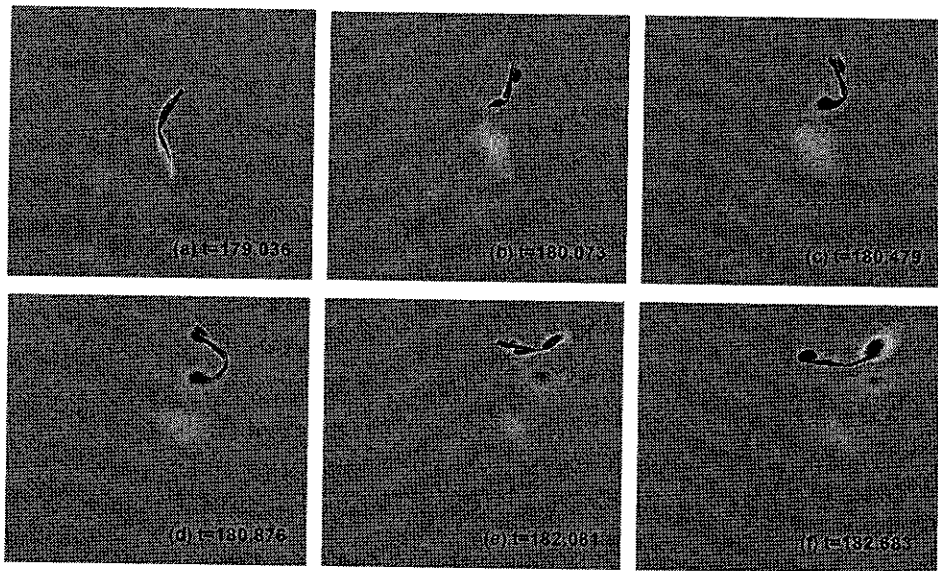


그림 12. 점정금파리의 Upstroke 시의 와도분포

그림 10을 보면 Upstroke 끝부분에서 강한 추력이 발생함을 확인할 수 있다. 강한 추력 발생의 원인을 와류의 생성 및 상호작용과 관련이 있을 것으로 보고, 이를 분석하기 위하여 그림 12와 같이 Upstroke 끝부분에서 와도장의 변화를 분석하였다. 에어포일은 그림 12-(a)에서 반시계방향으로 급격하게 rotation을 시작한다(a). 이후 윗면(그림에서

에어포일의 뒷면) 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 전단층으로부터 반시계방향의 새로운 와류가 발달하고(e), 이들 두 와류는 수직방향으로 짝을 이루어 후류 쪽으로 동시에 떨어져 나가고 있다(f). 그림 13은 그림 12-(f)의 후류부분을 확대한 것으로, 두 와류사이에 존재하는 유동방향의 jet을 속도벡터를 통해 뚜렷하게 보여준다.

두 와류가 한 쌍으로 존재 할 때 주위 속도장은 두 와류에 의해 유도되는 속도의 중첩된 결과로 나타나게 된다.[13] 그림 13을 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 jet의 형태로 나타나게 된다. Jet은 주위유동에 운동량을 공급해주는 것이 되므로 추력발생을 입증하게 있다.

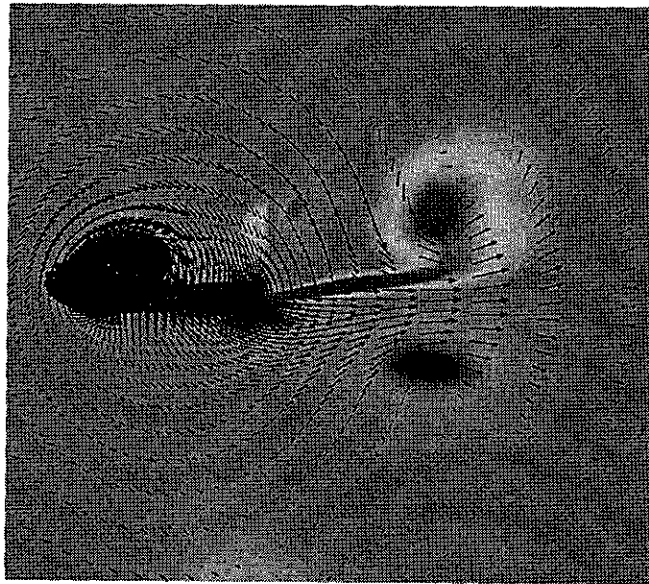


그림 13. 와류 짝 현상

이와 비슷한 후류 구조로 inverse kármán vortex에 의해 유도되는 jet-like flow가 있다. 에어포일이 주기적으로 진동(pitching, plunging 또는 들을 합친 flapping)하여 추력을 발생시킬 때, 한 주기 동안 와류는 후류의 중심선을 기준으로 윗면과 아랫면에서 교대로 떨어져 나가 inverse Kármán vortex를 이루게 된다.[14,15] 이때 후류로 떨어져 나간 와류는 수직방향으로 짝을 이루지 못하기 때문에, 그림 13과 같은 순간적인 속도장에서 jet이 뚜렷하게 보이지 않고 시간 평균된 속도장에서만 관찰될 수 있다.[15,16] 그림 14-(a),(b)는 주기적으로 pitching운동을 하는 타원형 에어포일에서 inverse Kármán vortex의 형성과 항력(-추력)계수의 시간적 변화를 각각 보여준다. 추력발생은 그림 10과는 달리 순간적으로 강력하게 이루어 지지 않고 와류처럼 주기적인 특성을 나타낸다. 따라서 그림 13의 와류 짝 현상은 그림 10에 나타난 추력발생의 특성을 후류 유동장의 형태로 설명할 수 있을 것이다.

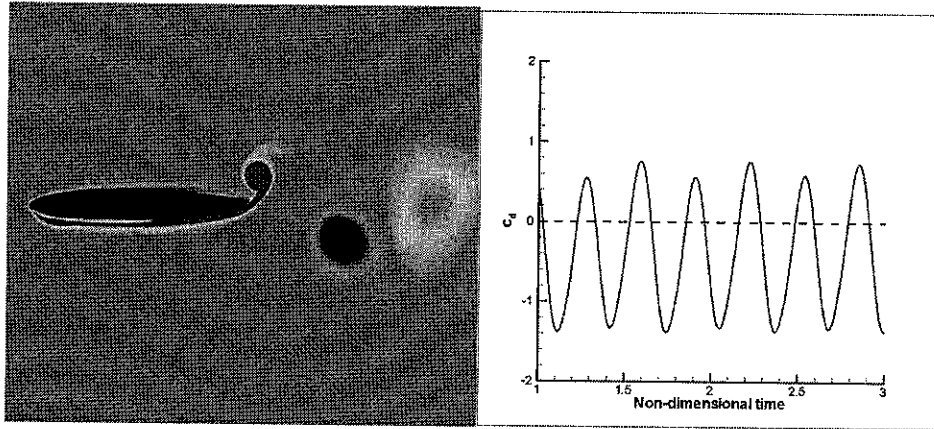






그림 14. Pitching 운동하는 하는 타원형 에어포일에서 inverse Kármán vortex의 형성 ($Re=12000$, pitching amplitude= 10° , $k=10$, maximum thickness is 12% of chord length)

날개의 운동 중심으로 이러한 패턴을 이해해본다면, Upstroke에서 날개의 급격한 회전이 추력발생에 큰 영향을 미친다는 것을 예측할 수 있겠다. 즉, 검정금파리의 비행에서 나타나는 고기동성은 날개 운동으로 인해 나타난 급격한 추력 발생으로 인한 것이라 할 수 있다. 검정금파리의 날개 운동에서 나타난 공력 특성은 양력과 추력이 한 두 번의 큰 피크 값에 의해 지배된다는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 특성은 기동성과 순간적인 조정성이 뛰어난 검정금파리의 비행 특성과 깊은 관련이 있음을 시사한다.

2. 날개 운동 궤적에 따른 공력 계수 비교

아래의 표 1은 날개 네 가지의 날개 운동에 따라 공력 계수 값이 어떻게 나타내는지 보여준다. 표 1을 보면, 날개 운동에 따라 특징적인 현상이 나타남을 확인할 수 있다. 먼저 Case 1, 2와 3, 4를 비교해보면, 전자는 평균 추력 계수가 높게 나타나고, 후자는 평균 양력 계수가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 양력은 주로 Downstroke시에, 추력은 주로 Upstroke에서 일어남을 고려해 본다면, 8자운동은 Upstroke 시의 추력 성능이 우수하고, 왕복운동은 Downstroke시에 양력 성능이 우수함을 확인할 수 있다. Case 1, 3에서 최대 공력 계수 값이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 피치각이 급격히 변화할 때 즉, 날개가 급격히 회전할 때 나타나는 현상임을 확인할 수 있다.









표 1 날개 운동에 따른 공력 계수 비교

Type	Average Cl	Average Ct	Maximum Cl	Maximum Ct
	0.69247	0.14845	3.3308	4.7688
	0.66039	0.15790	2.4719	2.3213
	0.91140	0.08106	3.3038	2.8435
	0.75938	0.04452	2.8044	1.1011

3. 날개 단면 형상에 따른 공력 계수 비교

아래의 표 2는 날개 단면 형상에 따른 공력 계수 값의 변화를 나타내어준다. 표를 보면, 날개의 단면 형상에 따라 평균 양력/추력 계수 값이 타원형 익형을 기준으로 했을 때, 적게는 10%에서 많게는 70% 까지 공력 값이 향상됨을 확인할 수 있었다. 타원형 익형을 기준으로 삼은 이유는, 대부분의 선행 연구자들이 실험과 수치해석의 편의를 위해 타원과 같은 단순화된 모델을 사용했기 때문이다. 계산 결과를 보면, Circular arc와 같이 캠버 효과가 있는 익형의 경우에는 양력 성능이 향상된 것을 확인할 수 있다. 양력 값이 증가한다는 점은 제자리 비행에는 유리하지만, 양력의 증가로 인해 공력 성능값은 오히려 작아지는 효과를 얻게 된다. 따라서, 캠버효과가 있는 날개의 경우는 제자리 비행에 유리하다고 결론지을 수 있다. 8가지의 단면 형상 중 가장 뛰어난 공력 계수 값을 나타낸 것은 New Type 3으로 평균 양력과 추력, 그리고 최대 양력, 추력 값이 거의 대부분 가장 높게 나타났다. New Type 1~3은 날개의 시맥을 고려한 날개 단면 형상으로, 세 가지 경우 모두 양력, 추력 성능이 고르게 향상된 것을 확인할 수 있고, 양력에 비해 추력의 향상이 월등하여, 공력 성능 향상에 큰 이점이 있는 것으로 결론지을 수 있다. Flat plate도 비교적 고르게 뛰어난 성능을 나타내었다. 9% Circular arc는 양력과 관련하여 가장 나은 성능을 나타내었고, 대체로 뒷부분이 얇은 단면 형상이 추력에서 뛰어난 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. New Type 1, 2를 비교해보면, 뒷전부분이 날카롭게 된 형상이 최대 추력 값이 크게 나타나는데, 이는 뒷전 부분이 오목하고 날카롭게 되어 있을 때 더 나은 공력 성능이 나타난다는 것을 보여 준다.

표 2 날개 단면 형상에 따른 공력 계수 비교

Type	Geometry	Average Cl	Average Ct	Maximum Cl	Maximum Ct
5% Elliptic airfoil		0.69247	0.14845	3.33083	4.76885
4% Circular arc		0.66732	0.14387	3.40386	4.77370
9% Circular arc		0.82182	0.15198	3.70694	4.61072
Dragonfly		0.63269	0.080766	3.66583	4.57700
Flat plate		0.77612	0.19462	3.54686	4.98754
New type1		0.71180	0.18492	3.50117	5.23994
New type2		0.70195	0.18562	3.44544	4.77108
New type3		0.78378	0.23212	3.66242	5.03808

단면 형상 연구에서 나타난 특이한 점은 잠자리 날개의 경우 검정금파리의 날개 운동에서는 양력과 추력에 큰 이점이 없었다는 점이다. 표에서 나타난 바와 같이 잠자리 날개는 양력, 추력 계수가 가장 낮게 나타나 공력 성능이 낮게 나타난다고 할 수 있지만, 이는 다른 곤충과 달리 두 쌍 날개로 이루어졌고, 각 날개의 상호작용을 통해 비행하기 때문에 단일한 날개의 공력 계수만으로는 날개의 성능을 판단할 수 없다.

4. 검정금파리 날개 운동의 3차원 해석 결과

검정금파리 날개의 2차원 해석 결과 2차원적인 와류의 생성 구조와 양력과 추력 발생의 기본적인 패턴을 확인할 수 있었다. 와류의 복잡한 구조와 상호 작용에 대해 더욱 자세한 분석을 위해 3차원으로 확장하여 계산을 수행하였다. 그림 15, 16은 3차원 해석을 통해 얻은 두 주기 동안의 양력 추력 곡선 분포를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 2차원 결과와 비교했을 때, 큰 변화는 나타나지 않았으나, 그림 9와 15의 양력 곡선을 비교해보면, 3차원 해석 결과가 2차원 해석 결과에 비해 더욱 완만한 곡선을 그린다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 선행연구자들이 실험을 통해 제기한 날개 길이방향 유동의 존재와 깊은 관계가 있을 것으로 판단된다.

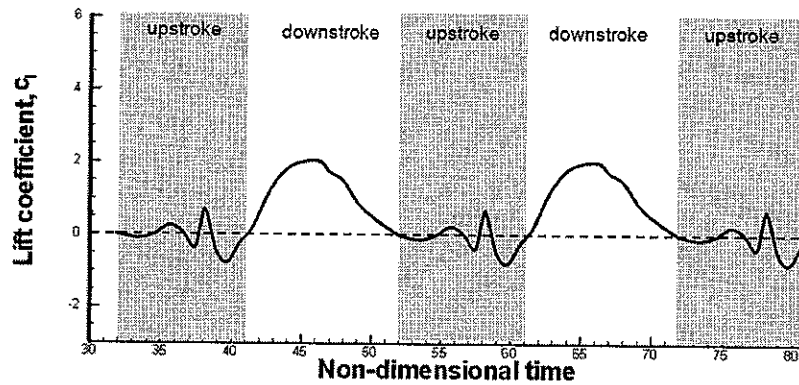


그림 15. 검정금파리 3차원 날개운동의 양력곡선

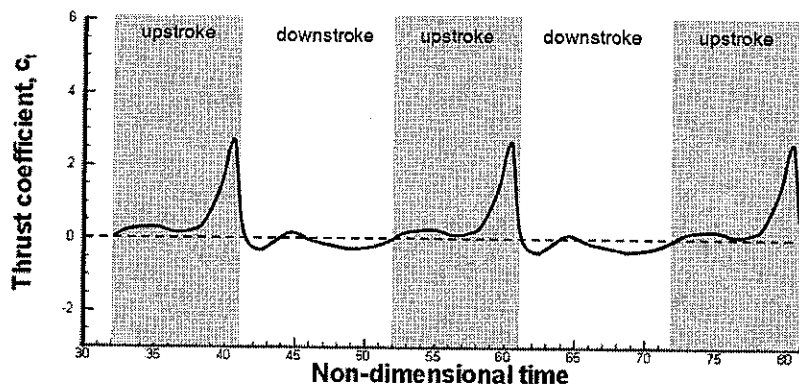


그림 16. 검정금파리 3차원 날개운동의 추력곡선

날개 길이 방향 유동의 존재를 확인하기 위하여 Downstroke 중간 부분에서의 와도장 및 유선을 확인하여 보았다. 그림 17을 보면, 날개의 앞전에 앞전와류가 생성된 것을 확인할 수 있으며, 이는 날개 끝 와류와 결합되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 날개 표면에서의 유선 분포를 통해 날개 길이 방향 유동을 확인할 수 있다. Downstroke 동안의 유동장을 분석해보면, 3차원 해석의 경우 2차원의 경우보다 와류의 분리가 지연되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 그림 17을 통해 관찰 할 수 있는 바와 같이 날개 길이 방향 유동이 앞전와류와 날개 끝 와류를 결합하게 하며, 이렇게 결합된 와류는 분리가 지연되게 되고, 이 결과로 양력 곡선의 더욱 완만하게 나타나게 된다는 결론을 얻을 수 있다.

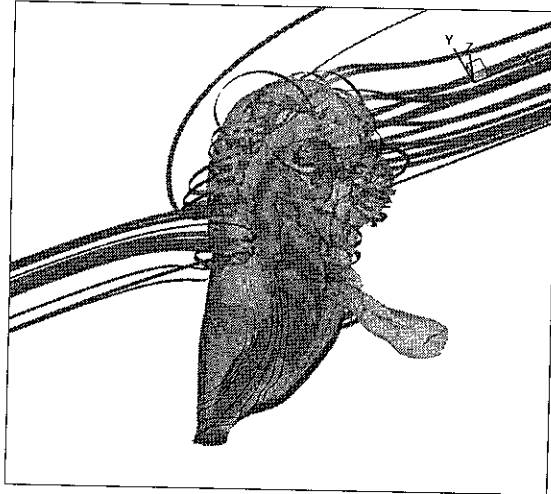


그림 17. 날개 길이 방향 유동

3차원 수치해석을 통해 와류의 3차원 구조인 와류 환을 관찰할 수 있었다[17]. 와류 환은 날개 주변의 세 가지 와류, 즉 앞전와류, 날개 끝 와류, 뒷전 와류가 결합되어 나타나는 것으로, 와도 밀 유선의 분석을 통해 두 가지 종류의 와류 환을 관찰할 수 있었다. 그림 18-(a)의 와류 환은 '완전' 와류 환으로, 주로 병진운동이 주를 이룰 때 나타나게 된다. 주로, Upstroke와 Downstroke의 중간이 여기에 속한다고 할 수 있다. 여기서 '완전'의 의미는 와류 환을 이루는 세 가지 와류의 방향이 모두 일치할 때 생성되는 것을 의미하며, 이 세 가지의 와류가 결합을 이루어 완전한 하나의 와류 환을 구성하게 된다. 그림 18-(b)는 '불완전' 와류 환을 나타내는 그림으로, '불완전' 와류 환은 Upstroke와 Downstroke의 끝 부분과 같이 날개의 회전 운동이 주를 이룰 때 생성되게 된다. '불완전' 와류 환은 와류환을 이루는 세 가지 와류의 방향이 일치하지 않을 경우를 의미한다.

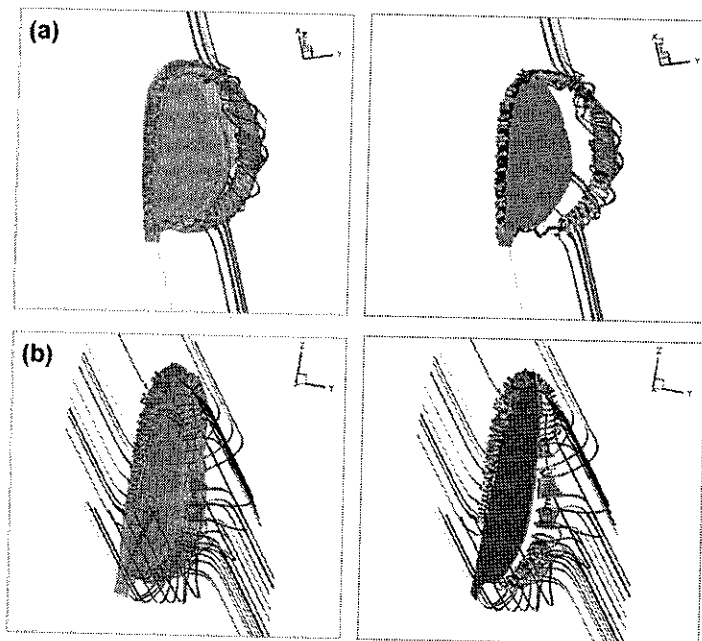


그림 18. 와류 환의 구조 (a) '완전' 와류 환 (b) '불완전' 와류 환

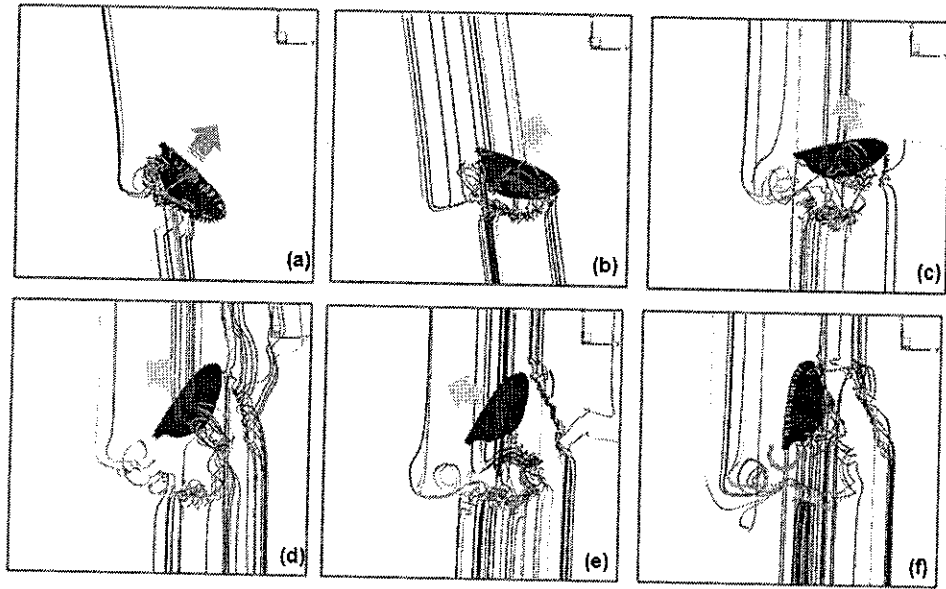


그림 19. 와류 환의 생성과 소멸 과정

그림 19는 Upstroke 과정에서의 두 가지 종류의 와류 환의 생성과 소멸 과정을 나타낸다. 그림 19-(a)를 보면 병진운동으로 인해 '완전' 와류 환이 생성된 것을 확인할 수 있다. (b)~(d)에서는 전단 방향의 병진 운동으로 인해 와류 환이 점차로 떨어져 나가는 것을 확인할 수 있다. (e)에서는 와류 환이 완전히 떨어져 나간 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 Upstroke의 끝부분인 (f)에서는 날개의 회전 운동으로 인해 불완전 와류 환이 생성된 것을 확인할 수 있다. 2차원에 비해 3차원에서는 와류 환이 지속적으로 생성, 소멸하기 때문에 곤충 비행의 양력 및 추력 발생 메커니즘을 분석하기 위해서는 와류 환의 생성 및 소멸, 그리고 와류 환과 날개 간의 상호 작용에 대해 자세히 분석해볼 필요가 있다.

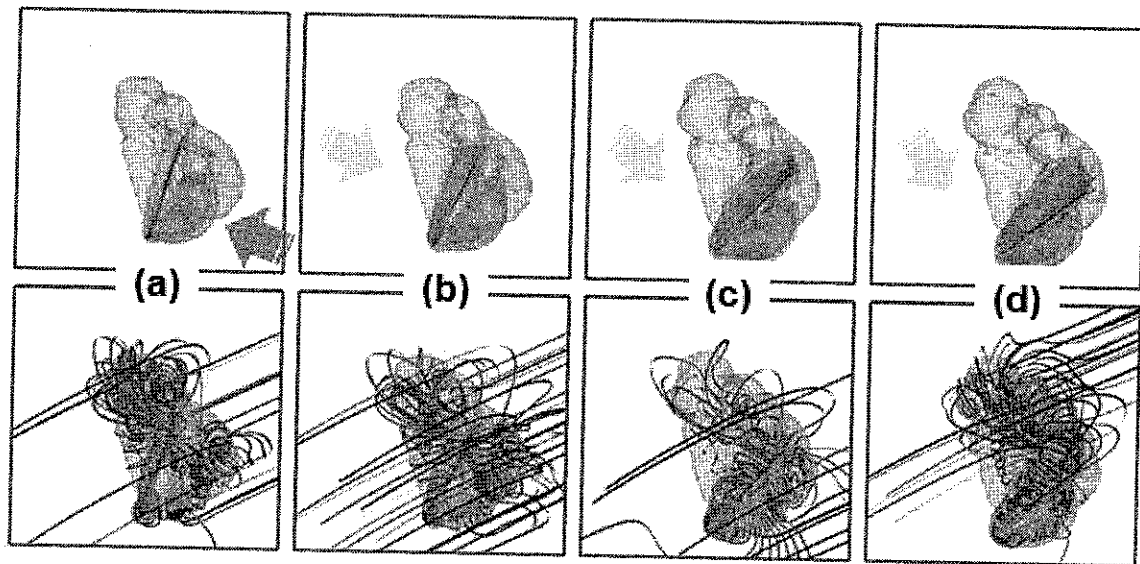


그림 20. 3차원 와류 짝 생성 과정

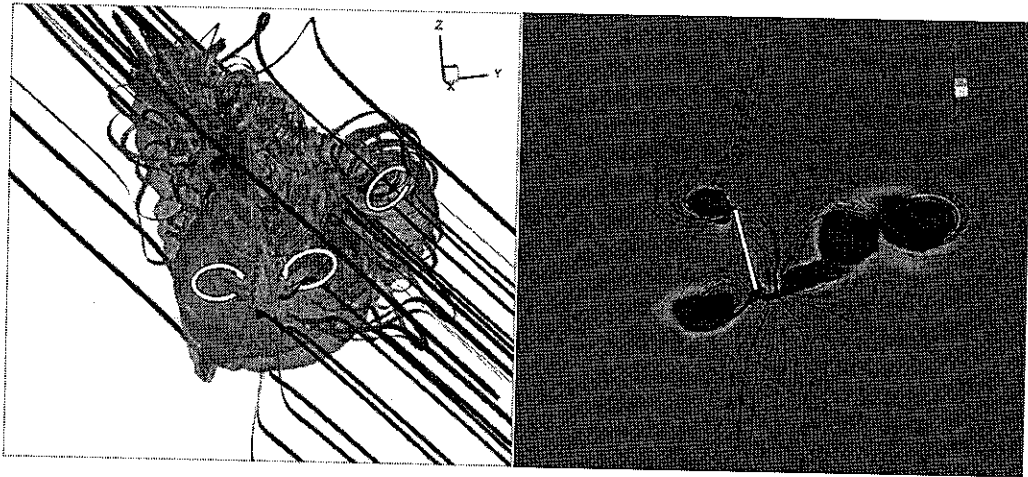


그림 21. 3차원 와류 짝 현상, 와류 환 구조 및 와도, 유선 분포

그림 20은 날개의 뒤쪽에서 관찰한 그림으로 3차원 와류 짝 현상을 이루는 과정을 나타낸다. 2차원 결과와 마찬가지로 3차원 결과에서도 와류 짝 현상이 관찰되었는데, 3차원의 경우 이전 날개 움직임에서 떨어져 나간 와류 환이 새로 생성된 와류와 짝을 이루어 와류 짝 현상을 이루는 것으로 관찰되었다. 그림 20-(a)를 보면, 오른쪽 그림의 파란 영역이 이전의 날개 움직임에서 떨어져 나간 반시계 방향의 와류 환이며, (b)~(c)는 반대 방향의 날개 움직임으로 인해 시계방향 와류가 날개 뒷전에 생긴 것을 확인할 수 있다. (d)에서는 최종적으로 반대 방향의 와류가 짝을 이루는 것을 확인할 수 있다. 이를 더욱 자세히 관찰하기 위하여 그림 21을 보면, 날개의 뒷부분에 서로 다른 방향의 와류가 짝을 이루는 것을 확인할 수 있고, 유선을 분포를 통해 2차원 결과와는 약간 다르나, 두 개의 와류 사이에서의 후류 방향의 유동의 흐름을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

본 논문에서는 검정금파리의 전진 모사 비행의 수치해석을 통해 비정상 공력 발생 메커니즘을 이해하고자 하였다. 이를 위해 2차원 및 3차원 수치해석을 수행하였으며, 공력 발생 메커니즘의 패턴과 공력 발생에 영향을 미치는 기하학적 요소와 자세한 와류 구조를 확인할 수 있었다. 계산 결과를 통해 양력은 Downstroke 중에 앞전와류의 발생으로 인해 주로 발생하고, 추력은 Upstroke 끝부분에서의 날개의 급격한 회전과 이를 통해 나타난 와류 짝 현상으로 인해 발생함을 확인할 수 있었다. 또한 곤충날개 운동의 8자 운동이 추력 발생에 유리한 날개 궤적을 확인할 수 있었고, 날개의 단면 형상에 대한 연구에서, 캠버효과를 고려한 단면은 제자리 비행에 유리하고, 날개의 시맥 효과를 고려한 날개 단면의 경우 전진 비행에 유리하다는 결론을 내릴 수 있었다. 3차원 해석을 통해 날개 길이 방향 유동의 존재와 역할, 그리고 복잡한 3차원 와류, 즉 와류 환의 구조를 파악할 수 있었다. 2차원 및 3차원 해석 결과를 통해 기본적인 물리적 패턴은 유사함을 확인할 수 있었으나, 3차원 해석을 통해 날개 길이방향 유동이나 와류 환 구조의 존재와 와류 환과 날개의 상호 작용 등 더욱 복잡한 물리적 현상이 나타남을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과를 통해 관찰된 와류 짝 현상과 이로 인한 급격한 추력의 발생은 검정금파리의 급격한 기동성과 조종성을 설명할 수 있는 중요한 단서가 될 것으로 생각된다. 또한 검정금파리의 비정상 공력 발생 메커니즘과 주요 기하학전 변수 효과에 대한 고찰은 향후 날갯짓형 초소형 비행체의 개발에 필요한 이론적 바탕이 될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 기계항공공학부 BK21 사업과 항공우주신기술연구소, 한국과학기술정보연구원의 국가 e-Science 구축 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Sane, S. P., "The Aerodynamics of Insect Flight," J. Exp. Biol. Vol. 206, 2003, pp.4191~4207.
- [2] Ennos, R., "Unconventional Aerodynamics," NATURE, Vol. 344, 1990, pp.491.
- [3] Dickinson, M. H., "Solving the Mystery of Insect Flight." Scientific American, 2001, pp.49~57.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Wang, Z. J., "Two Dimensional Mechanism for Insect Hovering," Phy. Rev. Lett., Vol. 85, 2000. pp.2216~2219.
- [7] Liu, H., and Kawachi, K., "A Numerical Study of Insect Flight," J. Comp. Phy., Vol. 146, 1998, pp.124~156.
- [8] 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, Feb. 2001.
- [9] 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.
- [10] Nachtigall, W., "Insects in Flight," McGraw-Hill, 1974.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] Lugt, H. J., "Vortex Flow in Nature and Technology," John Wiley & Sons, 1983.
- [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] Koochesfahani, M. M., "Vortical Patterns in the Wake of an Oscillating Airfoil," *AIAA Journal*, Vol. 27, 1989, pp.1200~1205.
- [16] 이정상, 김종압, 노오현, "저 레이놀즈수 유동에서 Flapping-Airfoil의 수치적 공력 특성 연구," *한국항공우주학회지*, 제30권, 제4호, 2002, pp.44~52.
- [17] J. Kim and C. Kim, "Unsteady Flowfields Characteristics Around Two- and Three-dimensional Flapping Flight," 26th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Honolulu, Hawaii, Aug. 18-21, 2008.