KSAS07-2119

곤충비행에서 기하학적 요소(날개움직임, 날개단면형상)가 공력 발생에 미치는 영향

The Effect of Geometric Factors(Wing Motion, Wing Section Shape) on Aerodynamic Force Generation of Insect Flight

김진호*, 이근배, 이정상, 이병준, 김종암(서울대학교)

1. 서 론

최근 세계 각국에서는 곤충과 같은 생물체의 산업적, 경제적, 과학적 측면에서 관심이 고조되면서 다양성이 풍부한 곤충을 하나의 자원으로서 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 초소형 개발에의 적용가능성으로 주목받고 있다. 파리와 같이 작으면서도, 뛰어난 비행특성을 가진 곤충의 비행 메커니즘에 대한 이해를 통하여, 효율적이고 안정적인 비행성능을 가진 초소형 비행체를 설계할 수 있을 것이다. 이러한 곤충의 날갯짓 비행에서 공력 성능에 영향을 미치는 변수는 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 기하학적인 요소, 즉 날개의 궤적과 피치각, 그리고 날개의 단면 형상의 영향에 대해 초점을 두었다.

곤충 비행의 공력 특성에 대해 많은 선행 연구가 있었지만, 대부분의 연구자들은 특정한 곤충의 특정 날개 움직임에 대한 연구에 초점을 맞춰왔다[1,2]. 하지만, 실제 곤충의 날개 움직임은 종에 따라 다르고, 비행 모드에 따라서 달라지는 특징이 있어 날개 움직임이 공력 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 두 가지 종류의 날개 움직임에 대하여 공력 특성이 어떻게 나타나는지에 대한 연구를 수행하였다. 대부분의 선행 연구에서는 수치 계산의 효율과 편의를 위해 날개 단면을 단순화하여 연구를 수행하였다. 하지만, 곤충 날개의 단면은 해석을 위해 가정한 단면 형상보다 훨씬 복잡하며, 이러한 복잡한 구조에 따라 공력 특성이 다르게 나타난다는 것은 몇몇 선행 연구자들은 연구에 의해 밝혀졌다[3]. 따라서 본 연구에서는 날개 움직임효과를 고려함과 동시에 날개 단면 형상에 따른 공력 특성 및 공력 계수 변화를 알아보기 위하여, 날개 단면에 따라 실제 비행 궤적을 이용한 수치해석을 수행하였다.

2. 해석기법

2.1 지배 방정식

지배 방정식은 2차원 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 이중시간전진법(dual time stepping)을 사용하였다. 또한 수렴가속화를 위해 Multi-grid 기법을 적용하였다. 적용된 수치해법의 자세한 내용은 참고문헌[4]에 잘 나와 있다. 본 연구에서 사용된 해석코드는 Lee et al.[5]에 의해 pitching운동을 하는 에어포일의 실험결과와 비교되어 검증되었다. 검정금파리의 chord 레이놀즈수의 크기가 10^2~10^3정도이므로, 전 유동을 층류로 가정하였다.

2.2 날개 운동의 구성(운동 궤적, 피치각)

날개 운동 궤적에 따른 공력 특성의 변화를 분석하기 위하여, 두 가지 곤충, 검정금파리와

잠자리의 날개 운동을 선택하였다. 검정금파리 날개 운동은 전진 모사 비행 실험[6]을 통해 얻은 실제 비행 궤적이며, 8자 운동의 형태를 나타낸다[그림 1]. 또한 날개 움직임에 따른 피치각은 Downstroke와 Upstroke 끝단에서 급격한 변화를 이루는 특징을 가진다. 수치해석을 위해 검정금파리의 날개 운동을 다음과 같은 푸리에 급수로 나타낸 식(1)을 운동 모델로 사용하였다. Fourier 급수의 계수들은 지면관계상 생략하나 참고문헌[7]에서 확인할 수 있다.

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

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

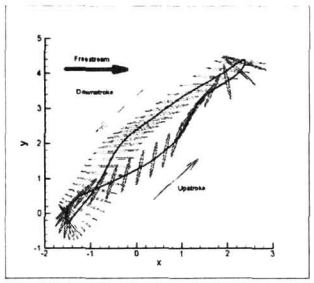


그림 1 검정금파리 날개의 8자 운동

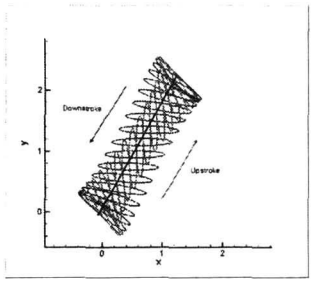


그림 2 잠자리 날개의 왕복 운동

잠자리의 날개운동은 경사 정지비행(Inclined Hovering)시의 날개 운동을 모사한 것이며[2], 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[2].

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

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

본 연구에서는 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.

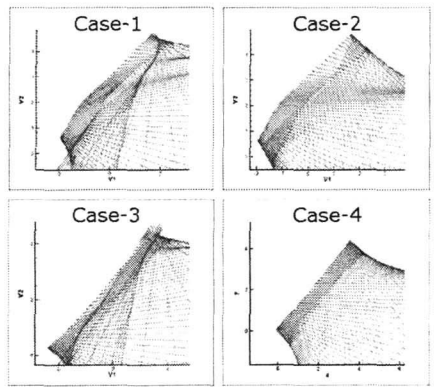


그림 3 날개 운동 효과 연구를 위한 4 가지의 날개 움직임

2.3 날개 단면 형상

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 형상들[3]과 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 foil(5%), Circular arc(4%, 9%), Flat plate와 잠자리 날개 단면 형상을 나타내는 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 날카

롭게 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.

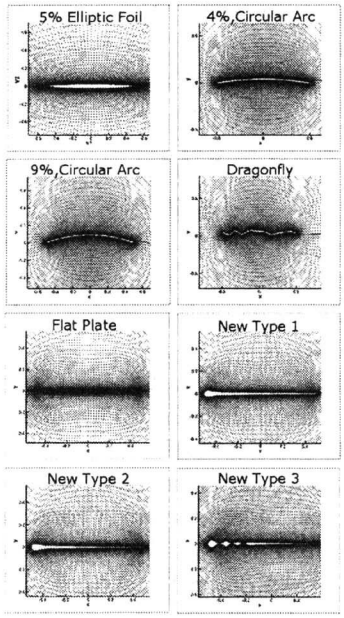


그림 4 날개 단면 형상 효과 연구를 위한 8 가지의 날개 단면 형상

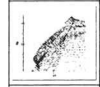
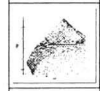
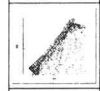
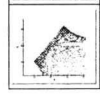
3. 해석 결과

본 연구에서는 날개의 움직임과 날개 형상에 따른 공력 특성을 공력 계수 값을 산출하여 비교, 분석하였다. 날개의 궤적변화나 형상 변화에 따른 유동장의 물리적 특성은 추후 수행할 연구에서 다뤄질 것이다.

3.1 날개 운동에 따른 공력 계수 비교

아래의 표 1은 날개 네 가지의 날개 운동에 따라 공력 계수 값이 어떻게 나타내는지를 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 Dwonstorke시에 양력 성능이 우수함을 확인할 수 있다. Case 1, 3에서 최대 공력 계수 값이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 피치각이 급격이 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

3.2 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. 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 나타났고, 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 비교해 보면, 뒷전부분이 날카롭게 된 형상이 최대 추력 값이 크게 나타나는데, 이는 참고문헌[5]에서 지적했던 바와 같이, 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	Average Cl	Average Ct	Maximum Cl	Maximum Ct
	0.69247	0.14845	3.33083	4.76885
	0.66732	0.14387	3.40386	4.77370
	0.82182	0.15198	3.70694	4.61072
	0.63269	0.080766	3.66583	4.57700
	0.77612	0.19462	3.54686	4.98754
	0.71180	0.18492	3.50117	5.23994
	0.70195	0.18562	3.44544	4.77108
	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. 결론

본 연구에서는 곤충의 날갯짓 비행에서 기하학적 요소인 날개의 움직임, 날개 단면 형상의 효과에 대해 수치해석 연구를 수행하였다. 날개 움직임 효과 연구를 통해 날개 움직임에 따른 양력, 추력 특성을 확인하였으며, 이는 추후에 날개 운동에 대한 설계를 할 때에 유용한 기초자료가 될 것으로 생각된다. 또한 다양한 날개 단면 형상에 대해 수치해석 함으로써, 날개 단면 효과에 의한 공력 특성의 변화를 확인할 수 있었고, 날개 단면 요소가 공력 특성에 큰 영향을 미치는 요소임을 확인할 수 있었다. 본 연구는 초소형 비행체를 실제 개발함에 있어 필요한 날개움직임요소(날개 궤적, 피치각) 설계와 날개 단면형상의 선정 및 설계 연구의 기초가 될 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 서울대학교 기계항공공학부 BK21 사업과 항공우주신기술연구소의 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] Lee, J. S. and Kim C. A Numerical study of aerodynamic force generation mechanism for 2-D insect wing motion. AIAA paper 2006-3210.

[2] Wang, Z. J., "Two Dimensional Mechanism for Insect Hovering," Phy. Rev. lett., Vol. 85, 2000. pp.2216~2219.

[3] Okamoto, M., Azuma, A.,"An Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of Unsteady Wings in Low Reynolds Number Flows," AIAA Journal, Vol.43, pp.2526~2536

[4] 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.

[5] 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.

[6] Nachtigall, W., "Insects in Flight," McGraw-Hill, 1974.

[7] 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.