

구조 유연성을 고려한 2차원 곤충 날갯짓 비행의 파라메트릭 연구

A Parametric Study in Two-dimensional Insects' Flapping Flight Considering Structural Flexibility

이근배^{1*}, 김진호², 김종암²

서울대학교 협동과정 계산과학전공¹, 서울대학교 기계항공공학부²

초 록

곤충 날갯짓 비행에서 날개와 주위 유체 간의 상호작용은 공력특성을 결정짓는 매우 중요한 요소 중 하나이다. 본 논문에서는 검정금파리의 전진모사 비행에 대하여 2차원 유체-구조 연성 해석을 수행하였다. 날갯짓 곤충의 전진 비행 시 날개의 구조 변형이 공력에 미치는 영향을 살펴보고, 다양한 유동조건에 따른 파라메트릭 연구를 통하여 각각의 유동장 및 공력특성을 분석하였다. 이를 위하여 유체와 구조 해석 모듈을 각각 독립적으로 구성하였고, 구조 변형으로 인한 유체 격자의 변형을 모사하기 위하여 동적격자 변형기법을 적용하였다. 또한 유체와 구조 격자 경계면에서 물리적 정보 전달을 위하여 Common refinement 기법을 적용하였다. 그 결과, 유연한 날개가 더 높은 공력특성을 나타냈으며, 파라메트릭 연구를 통해 다양한 유동조건하에서도 유사한 물리현상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

Interaction between a flexible flapping wing and the ambient fluid is of considerable importance in insects' flapping flight. In this paper, two-dimensional FSI (Fluid-Structure Interaction) simulations are conducted to examine aerodynamic change due to structural flexibility of insect wing and to investigate flow features of insects' flapping motion under various flight conditions. The fluid module and solid module are developed separately. A dynamic grid deformation technique based on Delaunay graph mapping is used to deform computational grids. Also, in order to exchange physical information to each module, the common refinement method is employed. Through these simulations, the flexible airfoil generate more aerodynamic forces than the rigid airfoil and it is observed that key physical phenomena are still observed in various flow conditions.

Key Words : Fluid-Structure Interaction (유체-구조 연성), Insect Flapping Flight (곤충 날갯짓 비행), Unsteady Flow (비정상 유동), Propulsive Efficiency (추력 효율성)

1. 서 론

곤충비행은 형태학, 진화생물학, 해부학, 공기역학 등 매우 다양한 분야에서 연구되고 있다. 그 중에서도 날갯짓 비행 (flapping flight)은 곤충비행 연구에서 가장 기본적인 의문일 뿐만 아니라 상대적으로 느린 속도에서도 충분한 양력과 추진력을 낼 수 있다는 장점 때문에 미래형 초소형비행체 (MAVs, Micro-Aerial Vehicles)에 대한 적용가능성으로 주목받고 있다. 실제로 항공우주분야에

서는 파리와 같이 작으면서도, 뛰어난 비행특성을 가진 곤충의 비정상 (unsteady) 비행 메커니즘에 대한 이해를 통하여, 보다 효율적이고 안정적인 비행성능을 가진 초소형 비행체를 설계하려는 노력을 기울여 왔다.

과거 곤충비행의 해석에는 일반적인 항공기에 적용되는 정상상태 (steady) 공기역학이 이용되었지만, 이를 통해서는 곤충비행에서 발생하는 충분한 크기의 양력과 추력을 설명할 수 없었고, 이러한 이유로 새로운 비정상 공력 발생 메커니즘에 대한 규명이 요구되었다. 선행 연구자들의

노력으로 밝혀진 비정상 메커니즘은 곤충의 양력과 추력발생에 관해 과거에는 알지 못했던 많은 사실들을 알려주지만, 대부분이 곤충의 날개를 강체 (rigid)로 가정하여 해석하였기 때문에 실제 곤충날개에서 발생하는 유동 현상을 모사하기에 한계를 갖는다.

따라서 최근에는 실제 곤충의 날개와 같이 유연성 (flexibility)을 갖는 날개에 대하여 실험과 수치 해석을 수행하는 연구들이 진행되고 있다. Heathcote와 Gursul은 시위방향으로 유연한 에어포일 주위의 유동현상 및 공력특성에 대한 실험을 수행하였고, Tang et al.는 유체-구조 연성해석 (FSI, Fluid-Structure Interaction)을 바탕으로 수치 해석을 수행하였다. 그밖에 많은 연구자들의 연구 결과를 통해, 날개에 유연성을 고려하는 것은 공력특성 향상 및 무게 감소와 같은 장점을 갖는다는 것이 밝혀지고 있다. 그러나 아직까지 유연성이 갖는 공기역학적인 이점과 그러한 이점을 발생시키는 메커니즘에 대하여 명확하게 밝혀지지 않은 것이 사실이다. 특히, 상하왕복운동 하는 유연한 에어포일에 대한 연구에 비해 실제 곤충날개에 유연성을 고려한 연구는 상대적으로 거의 진행되지 않았다.

본 연구에서는 Nachtiell⁽¹⁾의 실험에서 얻어진 검정금파리 (Phormia Regina)의 날개운동을 2차원 유체-구조 연성해석을 통하여 해석하였다. 이를 통해 유연한 날개와 강체 날개 주위의 유동장 해석 결과를 비교하여 유연성이 공력특성에 미치는 영향을 비교 분석하였으며, 특히 Reynolds 수 및 reduced frequency와 같은 무차원 파라미터의 변화에 따른 공력 특성을 고찰하였다.

2. 지배방정식 및 수치기법

2.1 유체 해석 모듈

유체 해석을 위한 지배방정식은 2차원 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식으로서, 날개 운동을 모사하기 위해 동적격자 기법을 도입하였으며, 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} + \nabla p = \nabla \cdot \sigma \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (2)$$

여기서 $p = p/\rho$ 이며, 속도성분은 $\vec{v} = \vec{v}_a + \vec{w} + \vec{v}_r$ 로 구성된다. \vec{v}_a 는 대류속도, \vec{w} 는 격자속도, \vec{v}_r 는 구조 변형에 의한 격자의 상대속도를 나타낸다. 비압축성 방정식은 속도장과 압력장이 연결되어 있지 않으므로 각 sub-iteration 마다 연속방정식을 만족시키는 pseudo compressibility 방법을 적용하였다.

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

여기서 τ 는 pseudo-time, β 는 pseudo compressibility parameter를 나타낸다. 비정상 유동장을 해석하기 위하여 이중시간 전진법(dual time stepping)을 사용하였으며 공간 차분은 Osher's Upwind Scheme과 MUSCL을, 시간 적분은 LU-SGS 방법을 사용하였다. 또한 수렴가속화를 위해 Multi-grid 기법을 적용하였다. 적용된 수치기법의 자세한 내용은 참고문헌⁽²⁾에 잘 나와 있다.

2.2 구조 해석 모듈

구조 해석을 위한 지배 방정식은 2차원 동적 유한요소방정식으로서 직접시간적분법(Direct time integration method)을 적용하였다.⁽³⁾

동적 유한요소방정식은 다음 식 (4)와 같이 구성된다.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (4)$$

여기서 $[M]$ 은 질량행렬, $[C]$ 는 감쇠행렬, $[K]$ 는 강성행렬이며, $\{U\}$ 는 절점의 변위를 나타낸다. 식 (4)를 중앙차분을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{1}{(\Delta t)^2}[M] + \frac{1}{2\Delta t}[C]\right)\{U_{n+1}\} = \{F_n\} - [K]\{U_n\} + \frac{1}{(\Delta t)^2}[M](2\{U_n\} - \{U_{n-1}\}) + \frac{1}{2\Delta t}[C]\{U_{n-1}\} \quad (5)$$

따라서 식 (5)에 대해 원하는 시간만큼 Δt 를 전진시켜 적분을 수행한다.

2.3 유체-구조 격자 간 데이터 전달 및 동적 격자 변형 기법

유체-구조 격자 간 서로 일치하지 않는 상 경계면에서의 데이터 전달을 위하여, 정보 전달의 보존성을 보장하는 common refinement 기법을 사용하였다.

일반적으로 유체 격자와 구조 격자는 격자의 밀집도가 다르기 때문에 서로 어긋나는 영역이 발생한다. 이를 해결하기 위해 두 격자 경계면 사이에서 선형 결합을 통해 common refinement라 불리는 가상 경계면을 정의하고, 이 경계면 위에서 적분을 수행하여 두 격자 간에 압력과 변위를 주고받는다.

한편, 구조 해석으로 인해 형상의 변형이 발생한 후, 기존의 유체 격자를 변형된 형상에 맞게 동적으로 변형시키기 위하여 Delaunay graph mapping 기법을 적용하였다.

먼저 변형 전의 형상에 대한 Delaunay graph를 생성하고 그 좌표를 저장한 뒤, 변형된 형상에 따라 이동한 Delaunay graph에 대해서도 좌표를 저장한다. 그 후에 기존 Delaunay graph와 변형 후의 Delaunay graph 간의 면적계수를 유지하도록 하는 새로운 격자점의 위치를 정한다. 이 방법은 기존 격자의 topology와 밀도 분포를 보장하며, 반복계산(iterative method)을 하는 것과 다르게 한번의 계산으로 격자를 변형시키기 때문에 계산 효율적인 측면에서 유리하다.

2.4 해석자 검증

해석자 검증은 세 가지 해석자에 대하여 각각 수행하였다. 유체 해석자의 경우 상하왕복운동하는 NACA0012 에어포일의 공력 특성에 대하여 검증하였으며, 구조 해석자의 경우 내부 압력으로 인해 실린더에 발생하는 변위에 대하여 검증하였다. 유체-구조 해석자의 경우, Heathcote와 Gursul이 제안한 teardrop/plate 형상의 에어포일에 대하여 상하왕복운동을 수행할 때의 공력 특성에 대하여 검증하였다. 자세한 내용은 참고문헌⁽⁴⁾에 잘 나와 있다.

3. 해석 결과

3.1 전진 모사비행 (Tethered flight)

3.1.1 검정금파리 날개의 “8자 운동”

본 연구에서는 해석 대상으로 날갯짓 비행을 하는 곤충 중에서 뛰어난 비행 능력을 갖고 있는 검정금파리를 선택하였다. Nachtigall⁽¹⁾은 초속 2.75m/s의 자유류 앞에 검정금파리를 고정시켜 놓고 초당 6400번의 고속촬영을 통해 날개운동의 3차원 궤적을 얻어내었다. Nachtigall이 관찰한 결과를 Fourier 급수로 나타낸 다음 식을 운동 모델로 사용하였다.

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^m a_n \cos(nkt) + b_n \sin(nkt) \quad (6)$$

$$F(t) = [x(t), y(t), \alpha(t)]^T \quad (7)$$

여기서 t 는 무차원 시간을 뜻하고, k 는 reduced frequency, f 는 날갯짓 frequency를 나타낸다. Figure 1은 이러한 모델링을 통해 얻은 검정금파리 날개의 8자 운동 (figure-of-eight)의 궤적을 나타내며, 크게 세 가지 요소로 나타낼 수 있다. ($x(t)$:horizontal motion, $y(t)$:vertical motion, $\alpha(t)$:rotation)

Nachtigall의 실험으로부터 유동해석에 필요한 조건은 Table 1과 같다. 여기서 Reynolds 수와 reduced frequency는 다음과 같이 계산된다.

$$Re = \frac{U_{max} f}{\nu} \quad (8)$$

$$k = \frac{fc}{U_{max}} \quad (9)$$

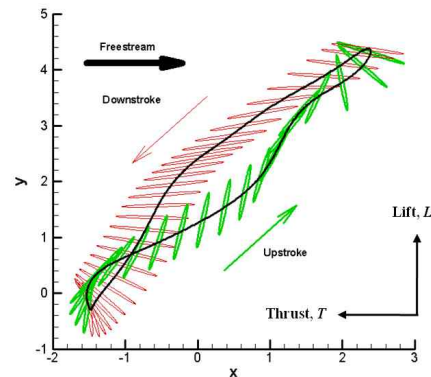


Figure 1. Non-dimensional position of a blowfly's wing element during tethered flight.

3.1.2 검정곰파리의 날개형상 모델링

본 연구에서 검정곰파리의 에어포일 형상은 실제 검정곰파리의 날개 형상을 바탕으로 모델링하였다. Nachtigall의 실험에서 측정된 두께를 바탕으로 하여 앞전과 뒷전의 형태를 원형으로 가정하여 모델링하였다.⁽⁵⁾ 실제 검정곰파리의 날개에서는 약간의 캠버 및 주름진 형태가 발견되고, 날개의 형태를 지지하는 시맥으로 인하여 단면 형태가 날개 길이 방향 (spanwise direction)에 따라 달라지는 특징을 갖고 있지만, 해석을 간단히 하기 위하여 Fig. 2와 같은 형상으로 단순화 하였다.

구조 해석을 수행하기 위해서 유연한 날개의 구조 물성치를 Fig. 3(b)와 같이 선형으로 가정하였다. 구조 물성치는 Rees et al.⁽⁶⁾의 실험을 통하여 측정된 Phormia 계열 곤충 날개의 탄성계수 $6.1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 과, 밀도 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 을 적용하였다.

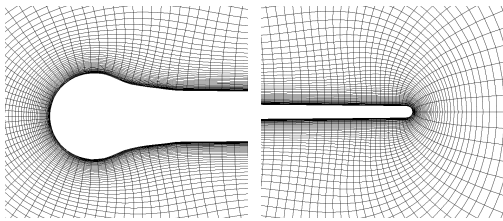


Figure 2. Tadpole type of the wing sectional shape.

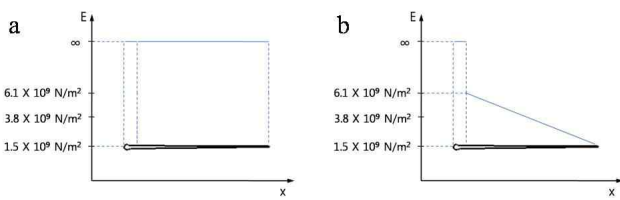


Figure 3. Structural modeling of two airfoils. (a : rigid airfoil, b : flexible airfoil)

Table 1. Flapping motion data from Nachtigall⁽¹⁾

Airspeed	U_∞	2.75 m/s
Maximum speed	U_{\max}	9.96 m/s
Chord length	c	3.8 mm
Reynolds number	Re	2523.92
Rotational point		10% of chord
Flapping frequency	f	130.6 Hz
reduced frequency	k	0.049318

3.2 날개 유연성 유무에 따른 공력특성 분석

본 연구에서는 강체와 유연한 에어포일에 대하여 유체-구조 연성해석을 수행하였다. Figure 4는 두 주기 동안 두 에어포일에서의 양력, 추력 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 것과 같이 두 에어포일에서 양력은 주로 downstroke에서 발생하였고, 추력은 주로 upstroke에서 발생하였다. 또한, 앞전와류 (leading edge vortex), 와류 짝 현상 (vortex pairing), 와류 정체 현상 (vortex staying) 등과 같은 대표적인 유동현상이 거의 유사하게 나타난다. 이러한 결과는 검정곰파리 날개를 NACA0012 강체 에어포일로 가정하여 해석한 선행 연구의 결과⁽⁷⁾에서도 나타났던 현상들이며, 결론적으로 두 에어포일에서 전진 모사비행의 대표적인 유동현상은 거의 유사하게 나타난다는 것을 확인할 수 있다.

그러나 Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 양력, 추력 값은 강체 에어포일과 유연한 에어포일에서 국부적으로 다르게 나타난다. 본 논문에서는 대표적인 케이스에 대한 유동장을 분석하였다.

먼저 downstroke 초기에 유연한 에어포일의 양력 계수 값이 강체 에어포일보다 더 크게 나타난다. Figure 5(a)는 이 구간에서 두 에어포일 주위의 압력장과 압력분포를 나타낸다. 에어포일 형상 변형은 에어포일이 캠버 효과를 갖게 하며, 이로

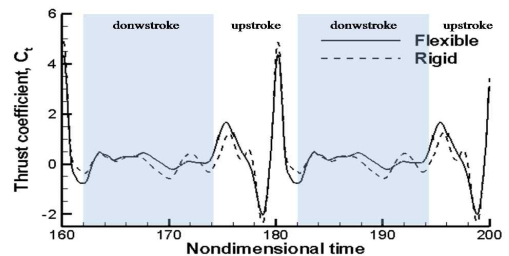
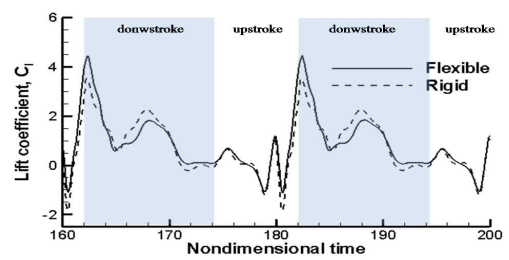
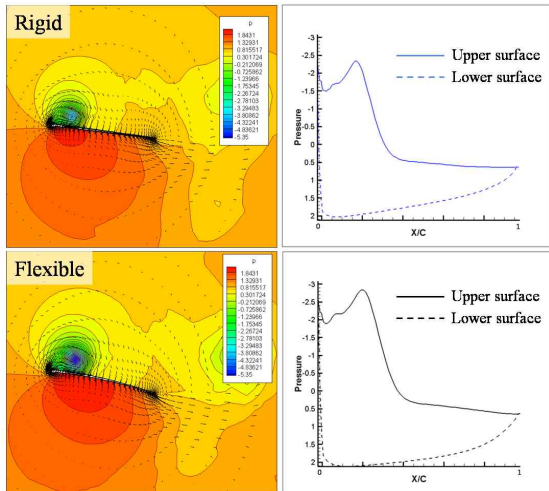


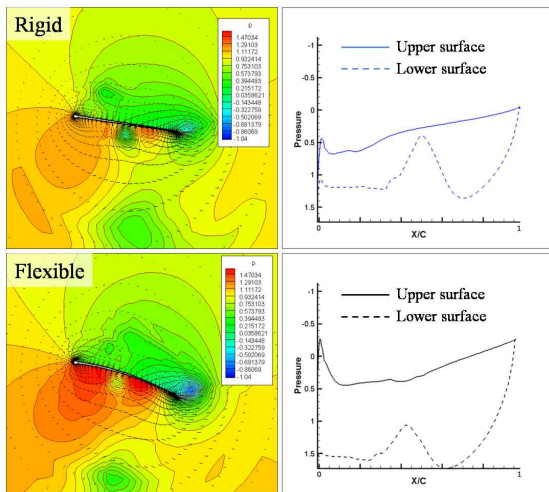
Figure 4. Histories of instantaneous lift (up) and thrust (down) coefficients.

인해 유효받음각의 크기는 증가하게 된다. 유효 받음각의 크기 증가는 곧 앞전와류의 크기와 강도가 커지는 것을 의미하며, 이로 인해 선형 분포 에어포일 앞전 부근의 윗면에 발생하는 저압 영역이 더 크고 강하게 나타나는 것이다.

한편, downstroke 초기에는 유연한 에어포일이 강체 에어포일에 비하여 추력계수 값이 감소한 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 형상 변형으로 인한 캠버효과로 유효 받음각의 크기가 증가하게 되어 Figure 5(b)의 압력분포 그래프에서와 같이 항력 성분이 상대적으로 증가했기 때문이다.



(a)



(b)

Figure 5. Pressure and velocity vector fields (left) and pressure distribution on the wall (right).

3.3 공력 파라미터에 따른 파라메트릭 연구

김정근과리의 8자운동에서 앞전와류, 와류 짝 현상, 와류 정체 현상은 충분한 양력과 항력 발생을 설명할 수 있는 주요한 물리 현상이며, 강체와 유연한 에어포일에서 모두 나타났다. 따라서 다양한 유동 조건하에서 대표적인 물리 현상이 유사하게 나타나는지를 살펴보는 것은 곤충비행의 급격한 기동 성능을 이해하는 중요한 단서이다.

일반적으로 곤충 날갯짓 비행의 frequency는 약 5~300 Hz이며, Reynolds 수는 $O(10^2)$ ~ $O(10^4)$ 정도이다.⁽⁸⁾ 본 연구에서는 앞서 언급한 비행 조건하에서 Reynolds 수와 reduced frequency를 변화시켜가며 파라메트릭 연구를 수행하였다. Reynolds 수는 500~4500, reduced frequency는 0.04~0.09 (frequency는 약 20~235 Hz) 범위에서 유체-구조 연성해석을 수행하였다.

Figure 6은 reduced frequency가 0.04일 때, 다양한 Reynolds 수에 대한 양력 및 추력 계수 그래프를 나타낸다. 양력 및 추력 발생의 전체적인 패턴은 정성적으로 유사하게 나타났지만, 국부적으로는 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Figure 7, 8, 9는 다양한 조건에 따른 앞전와류, 와류 짝 현상, 와류 정체 현상을 나타낸다.

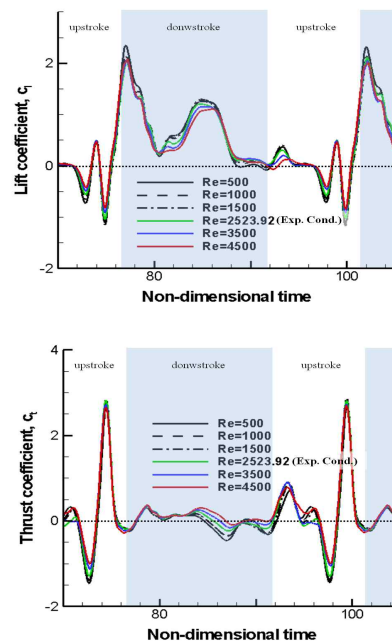


Figure 6. Histories of lift (up) and thrust (down) coefficients under various flight conditions, $k=0.04$

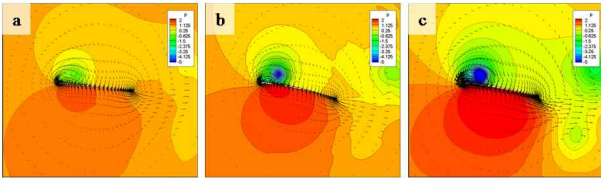


Figure 7. LEV (a)Re=2523.92, k=0.04, (b)Re=2523.92, k=0.049813, (c)Re=2523.92, k=0.07.

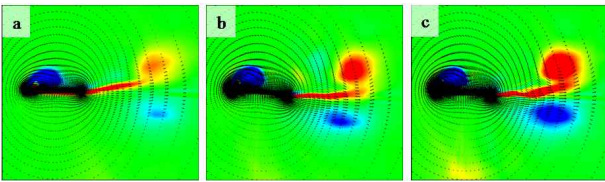
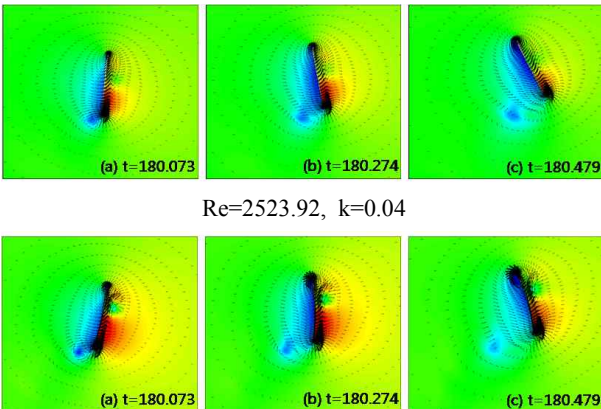


Figure 8. Vortex pairing (a)Re=2523.92, k=0.04, (b)Re=2523.92, k=0.049813, (c)Re=2523.92, k=0.07.



Re=2523.92, k=0.04
Re=2523.92, k=0.07
Figure 9. Vortex staying.

Reduced frequency가 변함에 따라 vortex의 크기와 강도는 다르나 유사한 물리현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 검정금파리의 전진비행에 대한 2차원 유체-구조 연성 해석을 수행하였고, 다양한 유동조건에 따른 공력특성 및 물리현상의 변화를 살펴보았다. 그 결과, 구조 변형에 따른 유효 받음각의 변화와 에어포일 표면에 작용하는 힘 벡터의 방향 변화에 의해 두 에어포일 사이에 양력과 추력의 크기 변화가 발생하였다. 또한 다양한

유동 조건하에서 대표적인 물리 현상이 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 곤충비행의 급격한 기동 성능에 중요한 단서이며, 향후 초소형 비행체의 설계에 적용할 수 있는 가능성을 보여준다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab, 과제번호 20090091724)의 지원 및 국토해양부 건설기술혁신연구개발 초장대교량 사업의 연구비지원(08기술혁신E01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Nachtigall, W., 1974, *Insects in flight*, McGraw-Hill.
- [2] Rogers, S., and Kwak, D., 1990, "Upwind Differencing Scheme for the Time-Accurate Incompressible Navier- Stokes Equations," *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 2, pp. 253-262.
- [3] Cook, R., 2007, *Concepts and Applications of Finite Element*, Wiley India Pvt. Ltd.
- [4] 이근배, 김진호, 김종암, 2010, "FSI를 활용한 2차원 곤충날개 주위 유동장 해석", 추계전산유체공학회.
- [5] Kesel, A. B., Philippi, U., Nachtigall, W., 1998, "Biomechanical aspects of the insect wing: an analysis using the finite element method," *Computers in Biology and Medicine*, Vol. 28, pp. 423-437.
- [6] Wainwright, S., 1982, *Mechanical design in organisms*, Princeton Univ Press.
- [7] Lee, J. S., Kim, J. H. and Kim, C., 2008, "Numerical Study on the Unsteady-Force-Generation Mechanism of Insect Flapping Motion," *AIAA Journal*, Vol. 46, pp. 1835-1848.
- [8] David, N., Stephen, L, and Hayward, G., 1988, "Relationship between Wing Loading, Wingbeat, Frequency and Body Mass in Homopterous Insects," *Journal of Experimental Biology*, Vol 135, pp 9-23.