

# 비정상/비압축 Navier-Stokes 방정식을 이용한 2차원 곤충날개 운동의 수치적 연구

## A NUMERICAL STUDY OF 2-D INSECT WING MOTION USING UNSTEADY/INCOMPRESSIBLE NAVIER-STOKES EQUATION

이정상<sup>1</sup>, 김종암<sup>1</sup>

1) 서울대학교 기계항공공학부, 서울 151-742

교신 저자: 김종암, chongam@snu.ac.kr

### 요약

곤충 날개의 2차원적 운동인 “8자 운동”을 전산유체역학으로 해석하였다. 날개 운동의 모델은 Nachtigall[1]이 검정금과리(phormia regina)에 대한 tethered flight 실험에서 얻은 결과를 이용하였다. 곤충 날개 주위의 유동은 와류의 복잡한 거동과 같은 비정상(unsteady)적인 특성을 지니며 또한 유동의 속도도 음속에 비해 매우 낮기 때문에 지배방정식은 비정상/비압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 날개 운동의 궤적은 Fourier 급수로 나타낼 수 있다. 해석 결과 나타난 유동장에서는 매우 복잡한 와류들이 보여지며, 이는 양력과 추력의 발생에 있어 물리적으로 비정상적인 메커니즘을 제공한다는 사실을 알 수 있었다. 특히 upstroke의 마지막에서 발생하는 추력의 갑작스러운 생성은 순환(circulation)과 밀접한 연관이 있을 것으로 보여진다.

### 해석 기법

지배 방정식은 2차원 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식으로 격자의 운동 속도를 고려하여 보존 형식으로 나타내면 다음과 같다.

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

여기서,  $\sigma$ 는 전단응력 텐서를 나타내고,  $p$ 는 압력,  $\vec{v}_a = \vec{v} - \vec{w}$ 에서  $\vec{v}$ 는 유체의 속도 성분이며,  $\vec{w}$ 는 격자 속도를 나타낸다.

### 수치 해법

지배 방정식은 유한 체적법에 근거하여 이산화 되었다. 비압축성 방정식은 유동의 속도장과 압력장이 연결되어 있지 않으므로, 식(2)에 근거한 pseudo-compressibility 기법[2]을 적용하여, 해를 구할 수 있도록 하였다.

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

여기서  $\tau$  는 pseudo 시간을 나타내며  $\beta$  는 pseudo-compressibility 계수 값 이다. 공간 차분 기법으로 Osher's Upwind Scheme을 적용하였으며, MUSCL을 이용하여 3차의 공간정확도를 나타내도록 하였다. 시간 적분에 있어서는 코드 적용이 간편하고 경제적인 Yoon과 Kwak의 LU-SGS 기법[3]이 사용되었으며, 비정상 계산을 위하여 이중시간전진법(dual time stepping)을 사용하여 2차의 시간 정확도를 갖도록 하였다.

### 운동 모델

Nachtigall은 초속 2.7m의 자유류 앞에 검정금파리를 붙여놓고 초당 6400번의 고속 촬영을 통해 날개 운동의 3차원 궤적을 얻어내었다.[1] 본 연구에서는 Nachtigall이 얻어낸 데이터를 바탕으로 Fourier급수로 나타낸 식(3)을 운동 모델로 사용하였다. 여기서  $k$ 와  $t$ 는 각각 무차원 진동수와 시간을 나타낸다.

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

### 해석 결과

그림 1-(a)는 무차원 시간에 따른 공력 계수들의 변화를 보여준다. 여기서 음(-)의 항력계수는 추력계수를 의미한다. 그림을 보면 downstroke 중에는 주로 양력이 발생하며 upstroke 의 마지막 단계에서 대단히 큰 추력이 급격하게 발생되고 있음을 알 수 있다. 양력의 발생에 관해서는 앞전와류(LEV, Leading Edge Vortex)가 downstroke 시에 관찰됨으로써 기존의 많은 연구자들에 의해 밝혀진 현상과 비슷하다고 할 수 있다. 그림 2 는 upstroke 의 끝부분에서 추력이 발생될 때의 유동장의 모습을 와도장으로 나타낸 것이다. 일반적으로 주기적인 에어포일에서 추력이 발생될 때 나타나게 되는 inverse Kármán-vortex 와는 다르게 후류에서 와류가 수직으로 쌍을 이루고 있음을 볼 수 있다. 쌍으로 존재하는 두 와류의 사이에는 강력한 jet 이 뚜렷이 관찰되며, 이는 그림 1-(a)에 나타난 급격한 추력 발생을 유동장의 측면에서 이해할 수 있도록 해준다.

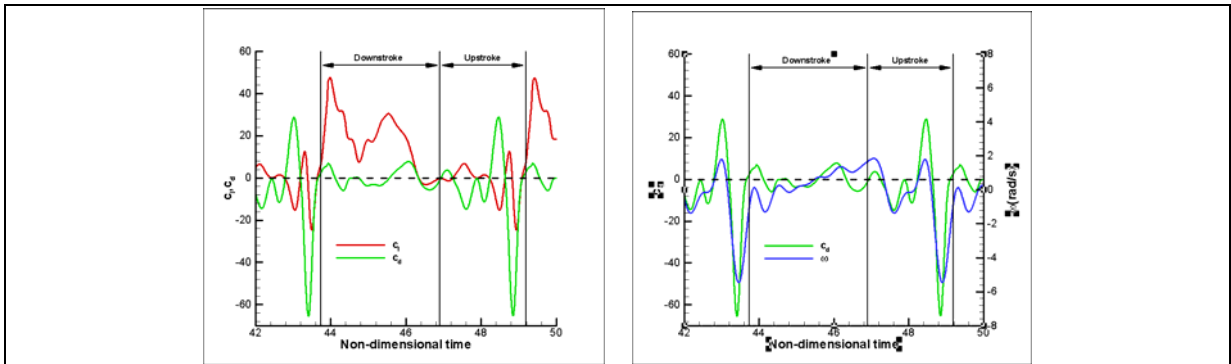
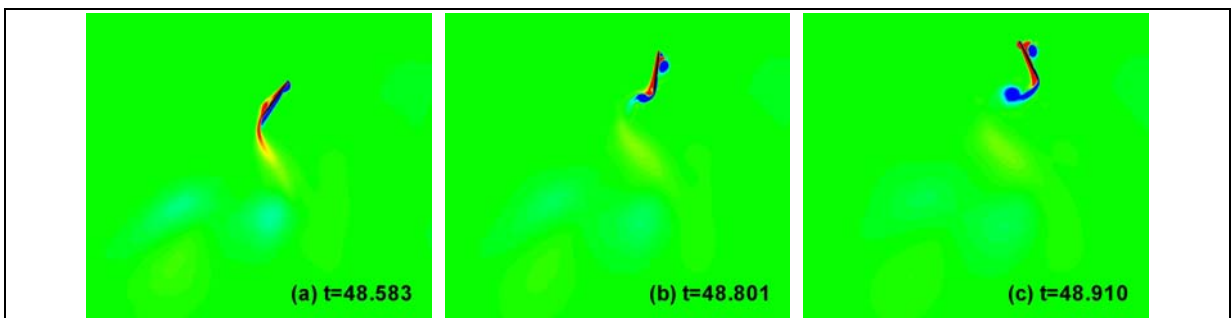


그림 1. (a)왼쪽: 양력과 추력 계수의 시간적 변화, (b)오른쪽: 추력 계수와 각속도의 비교



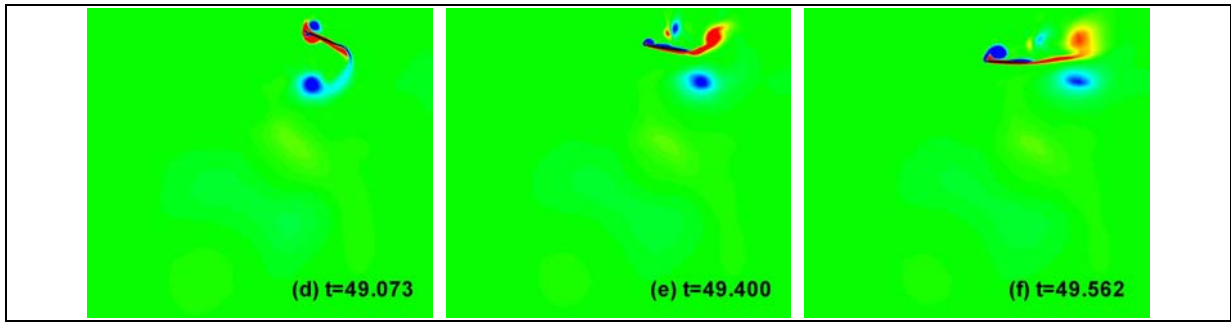


그림 2. Upstroke 끝부분에서의 와도장의 시간적 변화

이 같은 추력 발생의 물리적인 원인을 규명하기 위해 레이놀즈수, 진동수, 또 “8 자 운동”의 운동 성분에 대한 영향을 조사하였다. 결과적으로 살펴보면 추력 계수의 시간적 변화는 그림 1-(b)에 나타난 바와 같이 “8 자 운동”을 구성하고 있는 rotation의 각속도의 변화와 거의 비슷한 경향을 갖고 있음을 알 수 있다. 더구나 “8 자 운동”을 구성하고 있는 rotation만을 따로 분리하여 해석하였을 때는 추력이 발생되지만, 나머지 두 개의 성분(수직 방향의 translation과 수평 방향의 lagging)에 의해서는 추력이 발생되지 않았다. 이로써 검정금과리의 추력 발생에는 rotation이 지배적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 에어포일에서 rotation에 의한 각속도는 물리적으로 식(4)에 나타난 순환과 관계된다. 여기서  $c$ 는 에어포일의 chord 길이,  $\hat{x}_0$ 는 rotation 운동의 중심이 된다. 식(4)는 rotation 운동을 하는 얇은 에어포일 주위에서의 순환의 크기를 나타내는 것으로 Dickinson[4]은 제자리비행을 하는 곤충(과일파리)에서 양력 발생의 비정상 메커니즘(“Rotational lift”)과 연관된다고 하였다. 하지만, 본 연구는 자유류가 있는 전진비행을 모사하고 있으므로 Dickinson의 제자리 비행 연구와는 다르다. 순환은 일반적으로 양력 발생과 관계되는 것으로 알려져 있지만, 본 연구에서는 양력보다 추력의 발생에서 매우 중요한 역할을 하고 있음을 보여주었다. 발표 내용에는 이 같은 물리적인 내용을 좀더 상세히 설명할 예정이다.

$$\Gamma = \pi \alpha c^2 (0.75 - \hat{x}_0) \quad (4)$$

#### 참고문헌

1. Nachtigall, W., *Insects in Flight*, McGraw-Hill, 1974.
2. Rogers, S. E., and Kwak, D., “Upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations,” *AIAA Journal*, Vol. 28, 1990, pp. 253-262
3. Yoon, S. and Kwak, D., “Three-dimensional incompressible Navier-Stokes solver using lower-upper symmetric-Gauss-Seidel algorithm,” *AIAA Journal*, Vol. 29, 1991, pp. 874-875.
4. 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.
5. Lee, J. S., Kim, C., and Kim, K. H., “A design of flapping-airfoil for optimal aerodynamic performance in low-Reynolds number flow,” *AIAA Journal* accepted, 2006.

