

날갯짓 비행체의 비행 동역학적 진동 Vibrations in Flight Dynamics of Ornithopter

이준성* · 한재홍†
Jun-Seong Lee and Jae-Hung Han

1. 서 론

날갯짓 운동을 통해 비행하는 새, 곤충, 박쥐의 비행 방식을 공학적으로 모사한 날갯짓 비행체는 최근 자연계 비행체와 같이 정지 비행 및 고기동 특성을 갖게 하거나, 저 레이놀즈 수 영역에서 안정적인 효율적인 비행을 할 수 있도록 초점이 맞춰져 개발되고 있다^(1,2). 수평 평형 비행 상태에서 날갯짓 비행체의 주기-평균 비행 상태 변수 값은 다른 비행체와 같이 일정하게 유지되지만, 피치 자세각, 비행 고도 및 속도 등의 영-평균 시변 비행 상태 변수에서는 날갯짓 운동 주파수를 주 진동 주파수로 갖는 비행 동역학적 진동 현상이 관찰된다^(3,4). 날갯짓 비행체의 유연한 날개는 날갯짓 운동 패턴 및 주변 유동장과의 상호작용을 통해 복잡한 다물리 연계 특성을 보이는데, 특히 날개의 유체-구조 연성은 날갯짓 비행체의 비행동역학적 진동이 제한-주기 진동 특성을 가지는데 중요한 역할을 한다⁽⁴⁾. 날갯짓 주파수를 일정하게 유지한 채로 비행을 하면 비행 동역학적 진동의 제한-주기 특성에 의해 날갯짓 비행체는 외부교란에 대해 일정 수준의 강건성을 지니고 안정된 비행을 하게 된다. 하지만 감시/정찰 임무를 수행하기 위해 동체에 광학카메라를 장착할 경우 동체 피치 방향의 제한주기 진동에 의해 영상품질이 크게 저하되기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다. 본 연구에서는 새의 목 관절 (Neck flexion)이 비행 중 주기적으로 움직이는 점^(5,6)에서 아이디어를 얻어 날갯짓 비행체 동체의 피치방향 진동을 절연할 수 있는 절연기를 설계하고 안정된 시야각을 확보할 수 있도록 한다.

2. 본 론

2.1 목 관절 절연기 모델링

새는 날갯짓 비행체보다 더 많은 자유도를 갖고 복

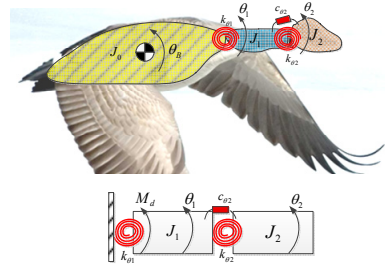


Fig. 1 Modeling of neck flexion for line-of-sight isolation of trimmed ornithopter

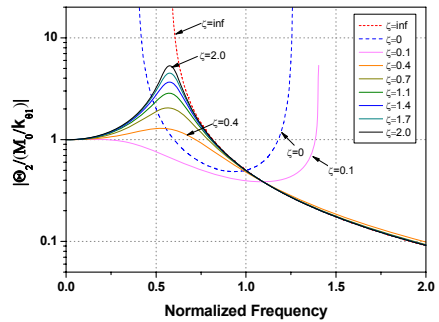


Fig. 2 Transfer function of neck flexion isolator with various damping coefficients

잡한 날갯짓 운동을 하지만 여전히 날갯짓 비행체와 비슷한 양상의 주기적인 진동현상이 관찰된다⁽⁷⁾. 몸통의 피치방향 진동을 저감하기 위해 꼬리를 능동적으로 움직이기도 하지만⁽⁸⁾, 기본적으로 안정된 시야각을 확보하기 위해 목의 관절에 의해 몸통과 머리가 절연되어 있는 것으로 알려져 있다^(5,6). 이러한 물리적 현상을 모델링 하기 위해 (Fig. 1) 및 다음 식(1)과 같이 수학적 으로 나타낼 수 있다. 절연기의 설계는 진동원 M_d 에 대한 시야각 θ_2 의 전달함수(식(2))를 유도하여 그 크기 (식(3))가 최소가 되도록 절연기의 변수를 결정해주면 된다.

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + c_{\theta_1} (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + k_{\theta_1} (\theta_1 - \theta_2) + k_{\theta_2} \theta_1 = M_d = M_0 e^{j\omega t} \quad (1)$$

$$J_2 \ddot{\theta}_2 + c_{\theta_2} (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + k_{\theta_2} (\theta_2 - \theta_1) = 0$$

† 교신저자; KAIST 항공우주공학과

E-mail : jaehunghan@kaist.edu

Tel : (042)350-3723, Fax : (042)350-3710

* KAIST 항공우주공학과

여기서 $\alpha = \omega_2/\omega_1 = 0.5$, $\beta = \omega/\omega_1$, $k_{\theta 1} = k_{\theta 2}$, $\omega_1^2 = k_{\theta 1}/J_1$, $\omega_2^2 = k_{\theta 2}/J_2$, $\zeta = c_{\theta 2}/2J_2\omega_1$, $\mu = J_2/J_1 = 2$ 와 같이 주요 변수가 정의된다.

$$\frac{\Theta_2}{M_0} = \frac{(k_{\theta 2} + j\omega c_{\theta 2})}{\left[(k_{\theta 1} - J_1\omega^2)(k_{\theta 2} - J_2k_{\theta 2}\omega^2) - J_2k_{\theta 2}\omega^2 \right] + j\omega c_{\theta 2}(k_{\theta 1} - (J_1 + J_2)\omega^2)} \quad (2)$$

$$\left| \frac{\Theta_2}{M_0/k_{\theta 1}} \right|^2 = \frac{(2\zeta\beta)^2 + \alpha^4}{\left[\{(2\zeta\beta)((1+\mu)\beta^2 - 1)\}^2 + \{\mu\alpha^2\beta^2 - (\beta^2 - 1)(\beta^2 - \alpha^2)\}^2 \right]} \quad (3)$$

목 관절 절연기는 절연 비 ζ 에 의해 그 특성이 (Fig. 2)와 같이 변화하며(본 연구에서 절연 비는 0.4 로 가정하였다) 절연 비가 0 인 경우와 무한의 크기를 갖는 두 가지 극한의 경우를 식(4)와 같이 고려하여 목 관절 절연기는 $\beta=1$, 즉, 날갯짓 운동주파수와 첫 번째 관절의 고유진동수가 일치($\omega = \omega_1$)할 때 최적의 성능을 가지며, 그 때 절연성능은 $|\Theta_2/(M_0/k_{\theta 1})|_{\beta=1} = 1/\mu$ 으로 결정된다.

$$\lim_{\zeta \rightarrow 0} |\Theta_2/(M_0/k_{\theta 1})| = \lim_{\zeta \rightarrow \infty} |\Theta_2/(M_0/k_{\theta 1})| \quad (4)$$

2.2 진동원: 동체 피치 방향 제한주기운동

날갯짓 운동 주파수에 따른 날갯짓 비행체 비행체의 피치 자세각을 주파수 분석하여 (Fig. 3)에 나타내었으며, 동체 피치 방향 제한주기운동은 절연기를 설계하는 관점에서 진동원에 해당된다. X 축은 날갯짓 운동 주파수로 정규화한 것으로 주 진동 주파수 이외에 정수 배의 고주파 성분을 포함하고 있어 영상 품질을 향상 시키기 위해서는 주 진동 주파수뿐만 아니라 고주파 성분까지 절연을 해야 한다.

2.3 안정된 시야각 확보를 위한 진동 절연 특성

절연 비를 0.4 로 선택한 경우, 주 진동 주파수 성분은 50% 정도의 절연 효과를 갖지만, 주 진동 주파수의 정수 배 고주파 성분들은 (Fig. 4)에서와 같이 대부분 절연되는 것을 확인할 수 있다.

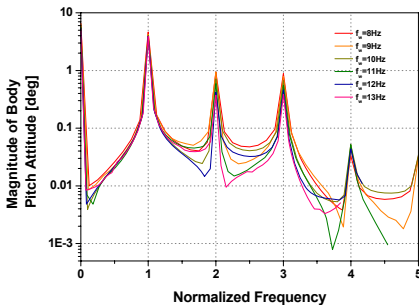


Fig. 3 Magnitude of body pitch attitude in frequency domain (frequency normalized by flapping frequency)

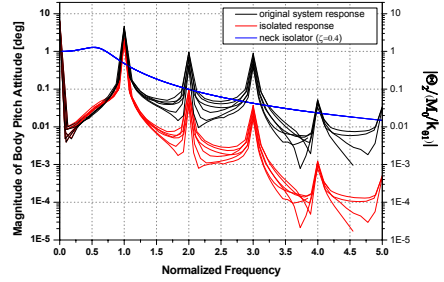


Fig. 4 Isolation characteristics of neck flexion isolator in frequency domain. Body pitch attitude (black), Line-of-sight (red), Isolator (blue).

3. 결론

본 연구에서는 날갯짓 비행체의 감시/정찰 임무 수행을 위해 동체에 광학카메라를 장착하는 경우, 날갯짓 비행체 고유의 비행동역학적 진동현상을 절연하여 영상 품질을 높이기 위해 새의 목 관절로부터 아이디어를 얻어 이에 대한 모델링을 수행하고, 목 관절 절연기가 안정된 시야각 확보를 위한 진동절연에 효과가 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소(계약번호 UD090082JD)의 연구비 지원에 의한 연구결과이며, 제 1 저자는 두뇌한국(BK21) 사업의 대학원생 지원 프로그램에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Han, J.-H., Lee, J.-S. and Kim, D.-K., 2009, "Bio-inspired flapping UAV design: A university perspective," *Proc. SPIE*, Vol. 7295 (Keynote Paper).
- (2) Nano hummingbird, Aerovironment Inc., Nano Air Vehicle Program (DARPA), <http://www.avinc.com/nano>.
- (3) Grauer, J. A. and Hubbard Jr., J. E., 2009, "Inertial measurements from flight data of a flapping-wing ornithopter." *J. Guid. Control. Dynam.* 32(1), 326-331.
- (4) Lee, J.-S., Kim, J.-K., Kim, D.-K. and Han, J.-H. 2011, Longitudinal flight dynamics of bio-inspired ornithopter considering fluid-structure interaction. *J. Guid. Control. Dynam.* (Accepted for publication).
- (5) K.P. Dial, 1994, "An inside look at how birds fly: experimental studies of the internal and external processes controlling flight," *Proc. Soc. Exp. Test Pilots*, 38, 1-13.
- (6) Bilo, D. and Bilo, A., 1983, "Neck flexion related activity of flight control muscles in the flow-stimulated pigeon," *J. Comp. Physiol.* 153, 111-122.
- (7) Hedrick, T. L., Usherwood, J. R. and Biewener, A. A., 2004, "Wing inertia and whole-body acceleration: an analysis of instantaneous aerodynamic force production in cockatiels (*Nymphicus hollandicus*) flying across a range of speeds." *J. Exp. Biol.* 207, 1689-1702.