

무인항공기 임무장비용 압전 마운트 시스템의 진동 제어 성능 평가

Evaluation of Vibration Control Performance of Camera Mount System for UAV

오 종 석*·손 정 우*·최 승 북†

Jong-Suk Oh, Jung Woo Sohn and Seung-Bok Choi

(2009년 9월 21일 접수 ; 2009년 10월 15일 심사완료)

Key Words : Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어기), Unmanned Aero Vehicle(무인항공기), Piezostack Actuator(압전작동기), Vibration Control(진동 제어)

ABSTRACT

In the present work, vibration control performance of active camera mount system for unmanned aero vehicle(UAV) is evaluated. An active mount featuring inertia type of piezostack actuator is designed and manufactured. Then, vibration control performances are experimentally evaluated. A camera mount system with four active mounts is constructed and mechanical model is established. The governing equation for the camera mount system is obtained and control model is constructed in state space model. Sliding mode controller which has inherent robustness to external disturbance is designed and implemented to the system. Vibration control performances are evaluated at each mount and center of gravity point. Effective vibration performances are obtained and presented in time and frequency domains.

1. 서 론

무인항공기는 조종사가 직접 항공기에 탑승하지 않고 임무를 수행하는 항공기로서 항공우주기술이 재래 수송의 협의적 개념을 뛰어넘어 지식 정보 서비스 등의 미래 지향적 기술 분야로 변모해가고 있음을 의미한다. 이러한 무인기 기술은 정보화 시대에 있어서 성장 가능성이 매우 높은 미래의 유망 기술로 인식되게 되었으며 큰 부가가치와 타 산업에의 막대한 파급 효과를 미친다고 할 수 있다⁽¹⁾. 무인 항공기의 주요 목적은 유인 정찰기의 단점인 조종사의 인명 손실을 없애고, 원하는 지역 또는 물체를 정찰하는데 있다. 임무를 수행하기 위해 필요한 것이 임무장비인데, 조종사의 눈 역할을 할 수

있는 카메라 또는 물체에서 나오는 적외선 에너지(온도) 차이를 검출하여 영상화하는 장비인 열상장비 같은 것을 지칭한다⁽²⁾. 특히 현재 무인항공기용 임무장비는 이미지 정보의 획득과 제공이 많은 비중을 차지한다. 무인항공기에서 정찰, 감시를 위한 장비로서 가장 많이 사용되고 있는 것이 EO/IR(electro-optical/infrared) 센서이다. 최근의 EO/IR 센서는 보다 긴 원격측정거리를 위하여 높은 안정성의 짐벌(gimbal)이 요구된다⁽³⁾. 무인항공기의 블레이드 회전 가진력은 기체의 진동의 원인이 된다. 이러한 진동은 EO/IR 센서 영상의 정밀도를 악영향을 미칠 수 있기에 EO/IR 센서 시스템을 진동으로부터 차단 할 수 있는 성능이 우수한 마운트의 적용은 무인항공기 기술에 있어서 필수적이라 할 수 있다.

마운트의 종류로는 크게 수동 마운트, 반능동 마운트와 능동 마운트로 구분 지을 수 있다. 수동 마운트에는 고무 마운트와 유체 마운트가 대표적이다.

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
Tel : (032)860-7319, Fax : (032)868-1716
* 인하대학교 기계공학과

전통적으로 널리 쓰인 고무 마운트는 합리적인 가격과 유지보수가 없는 장점이 있다. 반면에 고무의 동강성은 저주파수 영역에서보다 고주파수 영역에서 큰 특징이 있다. 이러한 특징으로 인해 마운트 설계 시 모두 주파수 영역에서 만족하기는 매우 어려워진다. 이런 고무 마운트의 단점을 보완하기 위해 제안된 유체 마운트는 고무 마운트 보다 저주파수 영역에서 나은 성능을 보이지만 고주파수 영역에서는 진동절연 성능이 저하될 수 있다. 일부 주파수영역에서만 효과적인 진동절연 성능을 보이는 이러한 수동 마운트의 단점으로 인해 제안된 것이 반능동 마운트와 능동 마운트이다. 최근에는 댐핑 같은 시스템 매개변수들을 제어하는 반능동 마운트와 시스템에 제어력을 인가해주는 능동 마운트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽⁴⁾. 또한, 기존의 수동형 고무 마운트를 기본으로 하여 진동 및 소음에 따라 지능재료를 통해 능동적으로 적절한 제어력을 부하하여 진동 및 소음 저감성능을 크게 향상시키는 능동 하이브리드 마운트 시스템이 연구되고 있다^(5,6). 지능재료 중 하나인 압전재료는 전압 인가에 따라 변위 및 힘 제어를 가능케 하며, 수 마이크로초 단위의 빠른 응답특성을 가지고 있는 능동재료이다. 그 중에서, 큰 힘을 발생시킬 수 있는 직층형 압전작동기를 이용하여 능동 마운트에 제어력을 부가할 수 있는 작동기로 사용하기도 한다⁽⁷⁻⁹⁾.

이 연구에서는 고무와 압전작동기로 이루어진 능동 마운트를 이용하여 효과적인 진동 제어 성능을 평가하였다. 먼저, 능동 마운트 단품을 제작하고 실험을 통해 제어 성능을 확인하였다. 이를 바탕으로 독립적인 4개의 능동 마운트를 가지는 전체 카메라 마운트 시스템을 모델링하고 전체 시스템의 운동방정식을 도출하였다. 운동방정식을 바탕으로 상태공간 방정식을 구성하고 외란에 강건한 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다. 카메라 마운트 시스템의 진동 제어 성능을 시간과 주파수 영역에서 평가하였다.

2. 능동 마운트

이 논문에서는 능동 마운트의 구성을 압전작동기와 고무부분으로 구성하였다. 압전작동기는 작은 변위의 고주파수 영역에 대한 진동 제어를 수행하였

다. 고무부분은 정하중의 지지기능을 위한 것이다. 또한 미리 예상한 진동 외에 예상치 못한 큰 진동이 들어와 압전 작동기가 파괴될 경우를 대비하여 마운트가 일반 고무 마운트의 진동 절연 특성을 가질 수 있도록 압전 작동기를 관성질량과 체결하는 관성형 작동기를 제안하였다. Fig. 1에는 마운트의 구성을 Fig. 2에는 마운트의 기계적 모델을 나타내었다⁽¹⁰⁾. 능동 마운트의 시스템 변수들은 Table 1에 열거하였다. α 는 압전 작동기의 게인값이다. 앞에서 제작된 능동 마운트에 대한 진동 제어 성능을 슬라이딩 모드

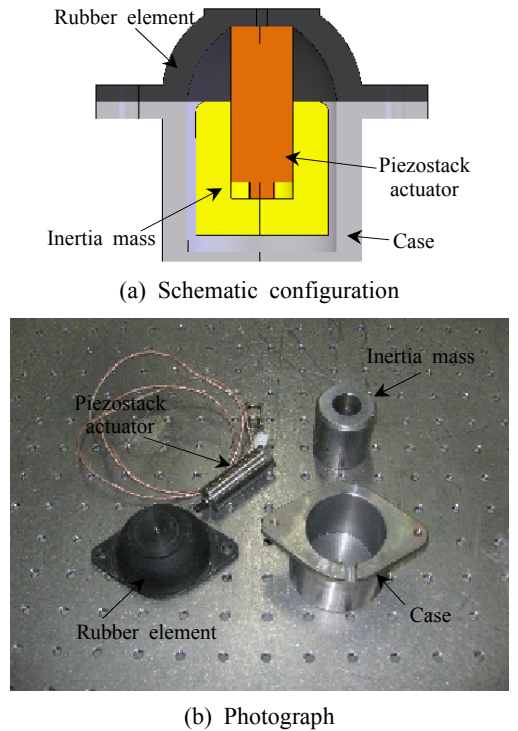


Fig. 1 Configuration of the active mount

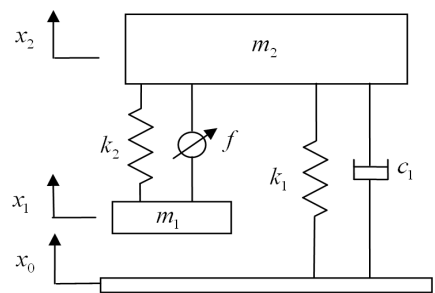


Fig. 2 Mechanical model of the active mount

Table 1 Parameters of active mount

Parameter	Value
Stiffness of rubber (k_1)	86877 N/m
Damping of rubber (c_1)	18 Nsec/m
Stiffness of piezostack (k_2)	75 MN/m
Constant of piezostack (α)	3.75 N/V

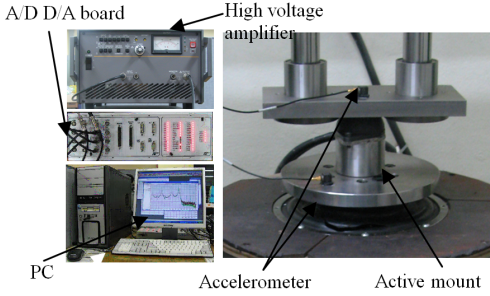


Fig. 3 Experimental apparatus for vibration control

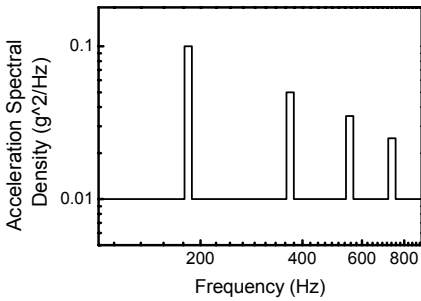
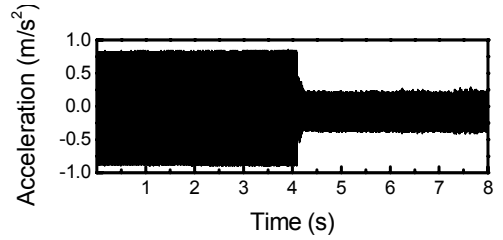
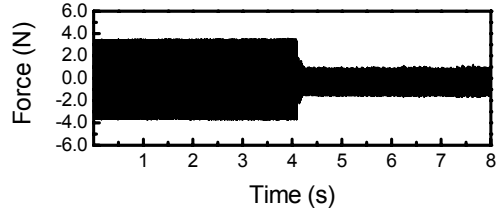


Fig. 4 Vibration exposure

제어기를 이용하여 평가하였다. Fig. 3에는 능동 마운트 실험장치의 구성이 나타내었다. 능동 진동 제어 마운트에 인가되는 가진 가속도는 MIL-STD-810F(무인항공기 카메라 마운트 가진 조건)을 기준으로 산정하였으며, Fig. 4에 도시하였다. Fig. 5는 슬라이딩 모드 제어기를 사용하여 마운트 상부의 진동에 대한 능동 제어 성능을 실험을 통해 나타내었다. 4초 이후 압전작동기에 부하된 입력에 의하여 가속도가 감소함을 볼 수 있다. 주파수 영역에서의 진동 제어 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 120 Hz에서 54.8%, 180 Hz에서 71.1%, 300 Hz에서 92.2%, 360 Hz에서 71.39%, 480 Hz에서 93.3%, 540 Hz에서 66.82%, 720 Hz에서 64.3% 등 평균 89.3%의 진동감쇠 효과가 있음을 알 수 있다.



(a) Acceleration



(b) Transmitted force

Fig. 5 Control response of the active mount under 180 Hz excitation

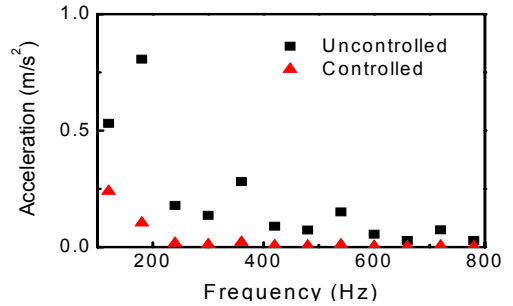


Fig. 6 Control response of the active mount in frequency domain

3. 능동 마운트 시스템

앞에서 설계한 능동 마운트를 바탕으로 4개의 마운트를 가지는 전체 시스템을 모델링하였다. 이 시스템의 기계적 모델은 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다. 이 연구에서는 카메라는 강체로 가정하며 카메라의 무게중심점에서의 1개의 병진운동 (x_g)과 2개의 회전운동 (ϕ, θ)을 하고 마운트 하부에서는 수직 방향의 가진 (x_j)이 들어온다고 가정하였다. 전체 시스템은 4개의 마운트에 제어력 (F_{ij})을 부과하기 위한 관성질량 (m_j)의 4개의 자유도 (x_{ij})를 포함하는 7 자유도의 강체운동을 하게 된다. 이를 바탕으로 시스템의 운동방정식을 유도하면 다음과 같다.

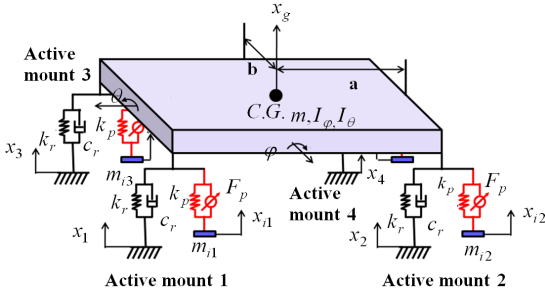


Fig. 7 Mechanical model of camera mount system

$$m\ddot{x}_g = -f_1 - f_2 - f_3 - f_4 - f_{i1} - f_{i2} - f_{i3} - f_{i4} + F_{p1} + F_{p2} + F_{p3} + F_{p4} \quad (1)$$

$$I_\phi\ddot{\phi} = -af_1 + af_2 - af_3 + af_4 - af_{i1} + af_{i2} - af_{i3} + af_{i4} + aF_{p1} - aF_{p2} + aF_{p3} - aF_{p4} \quad (2)$$

$$I_\theta\ddot{\theta} = -bf_1 - bf_2 + bf_3 + bf_4 - bf_{i1} - bf_{i2} + bf_{i3} + bf_{i4} + bF_{p1} + bF_{p2} - bF_{p3} - bF_{p4} \quad (3)$$

$$f_j = k_r(z_j - x_j) + c_r(\dot{z}_j - \dot{x}_j), \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

$$f_{ij} = k_p(z_j - x_{ij}), \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

$$m\ddot{x}_{ij} = -F_{pj} + f_{ij}, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x_g \\ \phi \\ \theta \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1/a & -1/a & 1/a & 1/a \\ -1/b & 1/b & -1/b & 1/b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 f_j ($j=1,2,3,4$)는 마운트의 고무부분의 탄성력과 댐핑력을 뜻하며, f_{ij} ($j=1,2,3,4$)는 적층형 압전작동기의 탄성력을 나타내며, F_{pj} ($j=1,2,3,4$)는 적층형 압전 작동기의 제어력을 뜻한다. 각각의 마운트의 상부의 변위 (z_j)는 식 (7)을 통해 변환될 수 있다. 이로부터 14개의 상태변수를 가지는 상태공간방정식을 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + \Gamma d \\ x &= [x_g \dot{x}_g x_{i1} \dot{x}_{i1} x_{i2} \dot{x}_{i2} x_{i3} \dot{x}_{i3} x_{i4} \dot{x}_{i4} \phi \dot{\phi} \theta \dot{\theta}]^T \\ u &= [F_{p1} F_{p2} F_{p3} F_{p4}]^T \\ d &= [x_1 \dot{x}_1 x_2 \dot{x}_2 x_3 \dot{x}_3 x_4 \dot{x}_4]^T \end{aligned} \quad (8)$$

A는 시스템 행렬, B는 제어입력 행렬이고 Γ 는 외란 행렬이다.

4. 제어기 설계

이 연구에서는 제어 시스템의 불확실성과 파라미터 변화, 마운트 하부 가진 등의 외란에 대해 강건한 제어기 확보를 위해 슬라이딩 모드 제어기를 설계하여 이 연구의 마운트에 적용하였다. 슬라이딩 모드 제어를 실행하기 위해서는 슬라이딩 서피스의 설계에 상태변수에 대한 모든 정보가 필요하지만 관성형 작동기의 상태변수를 직접 측정할 수는 없으므로 상태변수 값을 추정하기 위하여 full-order Luenberger observer를 다음과 같이 도입하였다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (9)$$

여기서 L은 게인 행렬이다.

식 (9)에 의해 추정한 상태 $\hat{x}(t)$ 를 이용하여 다음과 같이 슬라이딩 서피스를 설정한다.

$$s = G\hat{x}(t) \quad (10)$$

여기서 G는 슬라이딩 서피스의 기울기를 나타내는 벡터이며, 슬라이딩 모드가 존재하기 위한 조건 ($ss < 0$)을 만족하는 슬라이딩 모드 제어기를 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned} u(t) &= -(GB)^{-1}(GA\hat{x}(t) + k \cdot \text{sgn}(s(t))), (k>0) \\ \text{sgn}(s(t)) &= \begin{cases} -1, & s(t) < 0 \\ 1, & s(t) > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 k는 불연속 계인을 나타내고, 식 (11)의 슬라이딩 모드 제어기는 슬라이딩 모드 조건을 만족한다. 그러나, 이와 같은 불연속 제어기는 채터링을 발생시키므로 정해진 경계조건 ϵ 안에서 불연속 제어기를 연속 제어기로 근사화하기 위하여 부호함수를 다음과 같은 포화함수로 대체한다. 따라서 제어기를 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} u(t) &= -(GB)^{-1}(GA\hat{x}(t) + k \cdot \text{sat}(s(t))), (k>0) \\ \text{sat}(s(t)) &= \begin{cases} s(t)/\epsilon, & |s(t)| \leq \epsilon \\ \text{sgn}(s(t)), & |s(t)| > \epsilon \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

5. 진동 제어 성능 평가

앞 절에서 설계된 슬라이딩 모드 제어기를 사용하여 카메라 마운트 시스템의 진동 제어 성능을 평가

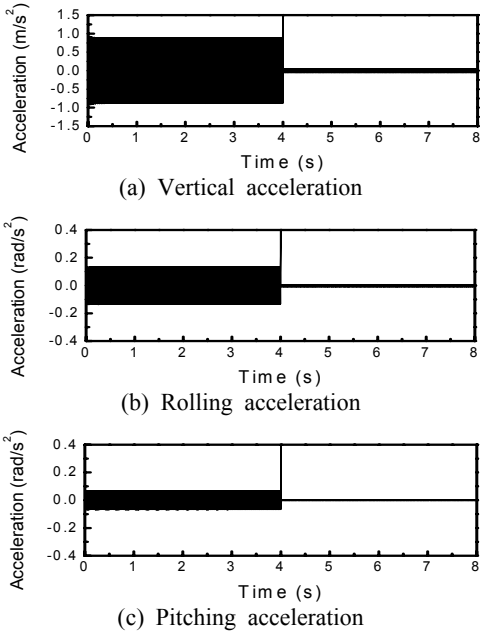


Fig. 8 Time response of the proposed camera mount system under 180 Hz excitation

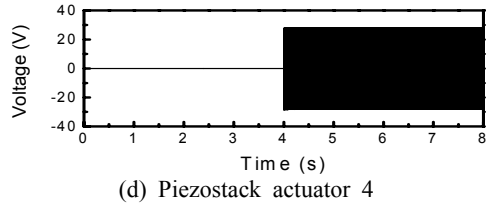
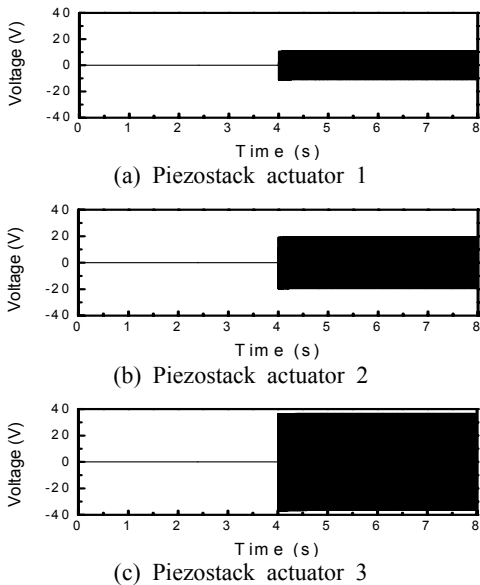


Fig. 9 Control input of proposed system under 180 Hz excitation

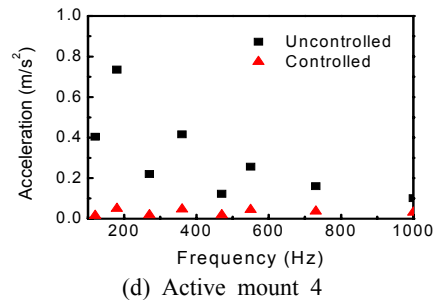
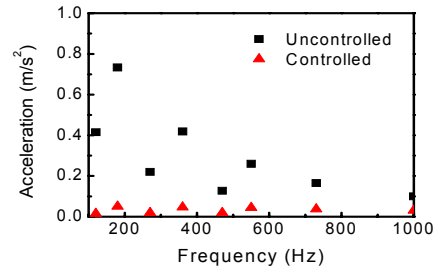
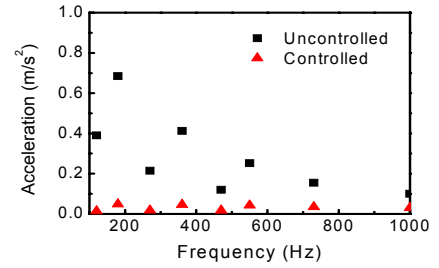
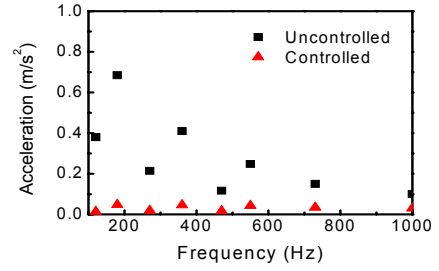


Fig. 10 Vibration control results at each mount

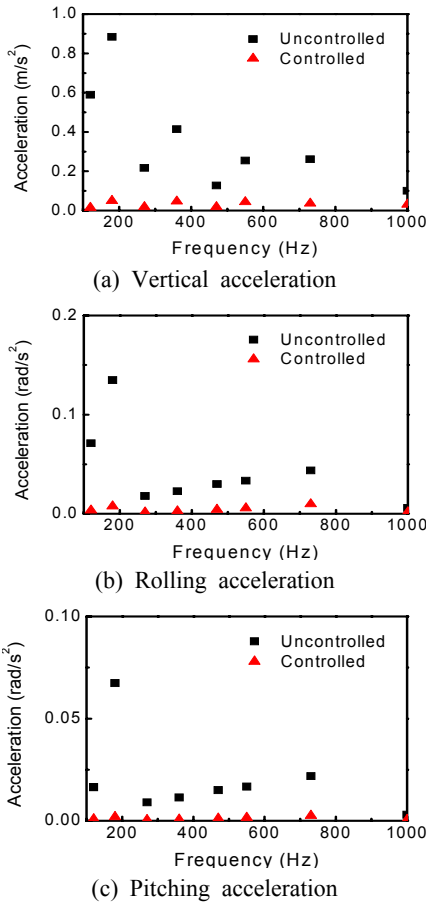


Fig. 11 Vibration control results at C.G. point

가하였다. 그 결과는 Fig. 8에서 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 8과 Fig. 9에는 정형파형의 가진에 대한 카메라 무게중심점에서의 제어 성능을 시간 영역에서 나타내었다. Fig. 8에서 수직방향, 롤링 방향과 피칭 방향에서 가속도는 180 Hz에서 평균 81% 감소한 것을 확인할 수 있다. Fig. 9에는 정형파형(180 Hz)의 가진시 압전작동기에 들어간 각각의 제어 입력을 나타내었다. Fig. 10에는 4개의 마운트 상부에서의 수직방향의 제어 성능을 나타내었다. Fig. 11에는 카메라의 무게 중심점에서의 수직 방향과 회전 방향의 제어성능을 나타내었다. Fig. 10의 결과를 보면 마운트 상부에서의 가속도는 능동 마운트 1에서는 평균 89.6%, 능동 마운트 2에서는 평균 85.7%, 능동 마운트 3에서는 평균 85.7% 그리고 능동 마운트 4에서는 평균 85.6% 감소한 것을 확인할 수가 있다. 또한 Fig. 11의 결과를 살펴보면 카메라

의 무게중심점에서의 수직방향은 평균 87%, 롤링 방향은 평균 85.7%, 피칭방향은 평균 92.5% 감소한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 넓은 주파수대역에서 능동 마운트 시스템의 진동이 슬라이딩 모드 제어를 통해 효과적으로 감소함을 확인할 수 있다.

6. 결 론

이 연구에서는 적층형 압전작동기를 사용한 능동 마운트를 이용하여 무인항공기의 카메라 시스템의 모델링 및 능동 진동 제어를 수행하였다. 마운트 단품만의 성능을 실험을 통해 수행한 후 이를 바탕으로 4개의 독립적인 마운트로 이루어지는 전체 마운트 시스템의 모델을 구성하고 지배방정식을 도출하였다. 진동 제어성능을 외란에 강건한 슬라이딩 모드 제어를 통해 평가하였다. 여러 주파수 범위에서 우수한 진동절연 성능을 확인할 수 있었다.

후 기

이 연구는 BK 21산학공동연구(대한항공) 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Hwang, S. J. and Choi, I. H., 2003, "State-of-Art of Development and Technology for UAV," Current Industrial and Technological Trends in Aerospace, Vol. 4, No. 2, pp. 55~67.
- (2) Kim, J. W., 2007, "The Requirements of Payload for the UAV," Current Industrial and Technological Trends in Aerospace, Vol. 6, No. 2, pp. 245~249.
- (3) Jang, S. W. and Kim, J. W., 2004, "Survey of Electro-optical Infrared Sensor for UAV," Current Industrial and Technological Trends in Aerospace, Vol. 6, No. 1, pp. 124~134.
- (4) Yu, Y., Naganathan, N. G. and Dukkupati, R. V., 2001, "A Literature Review of Automotive Vehicle Engine Mounting Systems," Mechanism and

Machine Theory.

(5) Kim, S. H., Hong, S. L. and Choi, S. B., 2002, "Active Vibration Control of a Beam Structure Using Hybrid Mount," Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 440~445.

(6) Choi, S. B. and Hong, S. R., 2004, "Dynamic Modeling and Vibration Control of Electrorheological Mounts," ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 126, No. 4, pp. 537~541.

(7) Kim, J. S., 1992, "Active Vibration Control of Flexible Beam Using Piezoelectric Actuator," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 173~180.

(8) Takayoshi, K., Takafumi, F., Takayoshi, H., Takeo, A., Nobuyoshi, M., Satoru, A. and Kohtaro, T.,

1997, "Active Vibration Control of Frame Structure with Smart Structure Using Piezoelectric Actuators (Vibration Control by Control of Bending Moment of Columns)," Smart Material and Structures, Vol. 6, pp. 448~456.

(9) Young, A. J. and Hansen, C. H., 1996, "Control of Flexural Vibration in Stiffened Structures Using Multiple Piezoceramic Actuators," Applied Acoustics, Vol. 49, No. 1, pp. 17~48.

(10) Park, D. H. and Choi, S. B., 2008, "Active Vibration Control of UAV EO/IR Sensor Mount Using Piezoelectric Actuator," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 12, pp. 1278~1285.