

하이브리드마운트를 이용한 빔 구조물의 능동진동제어

Active Vibration Control of a Beam Structure Using Hybrid Mount

김승환* · 홍성룡* · 최승복†

Seung-Hwan Kim, Sung-Ryong Hong and Seung-Bok Choi

(2003년 2월 27일 접수 : 2003년 6월 4일 심사완료)

Key Words : Hybrid Mount(하이브리드마운트), Elastic Rubber(탄성고무), Piezostack Actuator(적층형압전작동기), Active Vibration Control(능동진동제어)

ABSTRACT

This paper presents an active vibration control of a flexible beam structure using a hybrid mount which consists of elastic rubber and piezoelectric material. After identifying stiffness and damping properties of the rubber and piezoelectric elements, a mechanical model of the hybrid mount is established. The mount model is then incorporated into the beam structure, and the governing equation of motion is obtained in a state space. A sliding mode controller is designed in order to actively attenuate the vibration of the beam structure subjected to high frequency and small magnitude excitations. The controller is experimentally realized and control responses such as acceleration of the beam structure and force transmission through the hybrid mount are evaluated. In addition, a comparative work is done between the passive and hybrid mount systems.

1. 서론

기계류에서 발생하는 진동을 감소시키기 위해서는 성능이 우수한 마운트의 적용이 요구된다. 기계류의 진동 감쇠에 널리 적용되고 있는 고무마운트(rubber mount)는 강성과 댐핑을 갖고 있는 고무재료로 제작되어 정하중 지지와 진동감쇠특성을 동시에 지니고 있다. 또한, 댐핑이 작은 특성으로 인하여 비공진 주파수 대역에서 우수한 진동절연 성능을 보인다. 그러나, 공진주파수 대역에서는 효과적인 진동절연의 한계를 가지고 있다.⁽¹⁾ 이러한 기존 고무마운트의 댐핑이 작은 단점을 보완하기 위하여 제안된 유체봉입마운트(hydraulic mount)는 고무의 강성을 이용하여 정하중을 지지하고, 유체점성과 관성트랙의 형상을

조절하여 공진주파수 대역에서의 우수한 진동절연효과를 얻을 수 있다. 그러나, 비공진주파수 대역에서는 진동절연성능이 저하될 수 있다.⁽²⁾ 고무마운트나 유체봉입마운트와 같은 수동형 마운트는 특정 주파수영역에서만 효과적인 진동절연특성을 갖고 있기 때문에 성능한계를 극복하기 위한 여러 연구가 진행되고 있으며, 특히 지능재료를 이용한 능동진동제어에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다.

ER(electro-rheological)유체는 전기장 세기에 의하여 점성이 조절되는 특성을 갖는 재료로서, 이를 구조물 내부에 삽입하여 구조물의 강성과 댐핑을 연속적으로 변화시킴으로써 진동을 제어할 수 있다.⁽³⁾ 또한, 삽입형이 아닌 외부 부착형으로 댐퍼나 마운트 등을 설계하여 ER유체의 댐핑력 조절을 통하여 구조물의 변위나 전달률을 감쇠시키는 연구도 수행되었다.⁽⁴⁾ 지능재료 중의 하나인 형상기억합금(shape memory alloy)도 구조물의 진동제어에 많이 이용되고 있다.^(5, 6) 최근 널리 연구되고 있는 압전재료(piezoelectric material)는 전기장 부하를 통하여 변

† 책임저자, 정희원, 인하대학교 기계공학부
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
Tel : (032) 860-7319, Fax : (032) 868-1716
* 정희원, 인하대학교 대학원 기계공학과

위 및 힘 제어가 가능하며, 매우 빠른 응답특성을 가지는 능동재료이다. 압전재료를 이용한 진동제어 연구는 구조물의 표면에 직접 압전재료를 부착하거나 내부에 삽입하는 형식으로 이루어졌다.⁽⁷⁻¹⁰⁾ 그러나 이런 방법은 압전재료 자체의 정적 하중에 대한 보상이 필요하고, 비교적 큰 유연구조물시스템이나 엔진과 같은 이산시스템(discrete system)의 진동제어에는 부적합하다. 따라서, 부착이나 삽입이 아닌 큰 힘을 발생시킬 수 있는 적층형 압전작동기를 구성하여 능동마운트로 사용하기도 한다.⁽¹¹⁻¹³⁾ 압전작동기만을 이용한 마운트는 고주파수의 공진주파수 대역에서는 매우 우수한 진동제어 성능을 보이지만, 비공진주파수 대역에서의 진동제어 성능은 강성과 댐핑이 작은 고무마운트의 진동절연 성능보다 저하되는 단점을 가지고 있다. 또한 저주파수의 큰 가진입력에 대해서도 제어성능에 한계를 가지고 있다. 결국, 넓은 주파수 영역에서 우수한 진동제어 성능을 얻기 위해서는 각 마운트의 장점을 결합한 하이브리드마운트(hybrid mount)의 적용이 요구된다. 일례로, ER유체와 압전작동기의 장점을 이용한 하이브리드마운트를 제안하여 엔진의 진동제어에 효과적으로 적용된 보고가 있다.⁽¹⁴⁾

본 연구에서는 탄성고무재료와 압전재료를 적층한 압전작동기로 구성된 능동하이브리드마운트를 제안하였다. 하이브리드마운트는 압전작동기와 탄성고무재료는 직렬로 구성되어 하중을 지지하며, 압전작동기의 진동제어 효과와 고무마운트의 진동절연 효과를 동시에 갖게 된다. 탄성고무와 압전작동기의 동특성을 실험적으로 도출하였고, 하이브리드마운트가 고려된 빔구조물의 수학적 지배방정식을 유도하였으며, 효과적인 진동제어를 위해 슬라이딩모드제어기(sliding mode controller)를 설계하였다. 제어기의 실험적 구현을 통하여 빔 구조물의 진동제어 성능과 힘 전달률 등을 평가하였다.

2. 시스템 모델링

고무마운트와 압전작동기가 직렬로 구성된 하이브리드마운트의 개략도를 Fig. 1에 나타내었고, 하이브리드마운트의 지배방정식을 도출하기 위하여 고무와 압전작동기 각각에 대한 모델링을 수행하였다. 일반적으로 고무의 동특성은 지지하중, 가진조건 등에 의

하여 변동하는 특성을 갖고 있다. 본 연구에서 이용한 고무마운트의 동특성 도출을 위해 5 kg의 질량을 탑재하여 고무의 상단을 조화가진 하였다. 고무에 가해지는 힘(F)과 고무의 변형량(X)으로부터 동강성(dynamic stiffness)을 주파수영역에서 구하였다. Kelvin-Voigt 모델로 가정된 고무의 동강성($k_d(j\omega)$)은 다음 식으로 표현된다.

$$k_d(j\omega) = \frac{F(j\omega)}{X(j\omega)} = k_r + j\omega b, \quad (1)$$

여기서, k_r 과 b_r 은 고무의 강성과 댐핑을 나타낸다. 실험을 통하여 얻어진 동강성 값에 식 (1)을 적용하여 도출된 k_r 과 b_r 의 값은 각각 62 kN/m와 40 Nsec/m이다.

본 연구에서 적용한 압전재료는 폴링(poling)방향과 전기장방향이 동일하게 제작되었으며, 다음과 같이 압전재료의 전기적인 상태와 기계적인 상태를 나타내는 두 식으로 표현된다.⁽¹⁵⁾

$$D = \epsilon_{33}E + d_{33}T \quad (2)$$

$$S = d_{33}E + \frac{1}{c}T \quad (3)$$

여기서, D 는 전기변위(electric displacement), d_{33} 는 압전전하상수(piezoelectric charge constant), T 는 응력(stress), ϵ_{33} 는 유전상수(dielectric constant), E 는 전기장(electric field), S 는 변형률(strain), c 는 탄성계수(elastic modulus)를 나타낸다. n 개의 압전디스크를 적층한 작동기의 지배방정식은 압전재료의 기

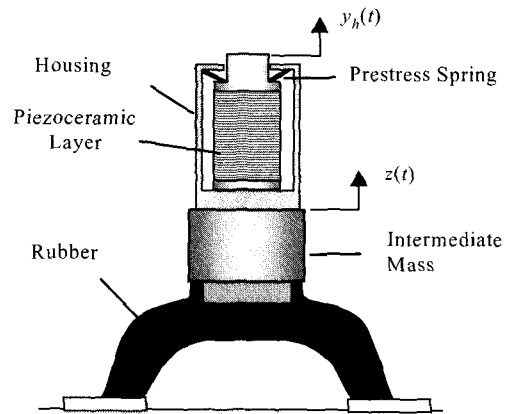


Fig. 1 Configuration of the hybrid mount

계적 상태를 나타내는 식 (3)을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 f_p &= AT = AcS - Acd_{33}E \\
 &= \frac{Ac}{l}(y_h - z) - Acd_{33} \frac{n}{l}V \\
 &= k_p(y_h - z) - \alpha V \\
 &= k_p(y_h - z) - f_a
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

여기서, f_p 는 적층압전작동기에 가해지는 힘을 의미하며, A 는 압전디스크의 단면적, l 은 압전작동기의 길이, V 는 부하전압, $k_p(=Ac/l)$ 는 압전작동기의 스프링상수, $\alpha(=Acd_{33}n/l)$ 는 작동기 계인, $f_a(=\alpha V)$ 는 부하전압 V 로 조절되는 힘을 나타낸다. $y_h(t)$ 와 $z(t)$ 는 압전작동기의 상단 및 하단의 변위를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 압전작동기의 k_p 와 α 의 값은 각각 66.4 MN/m와 2.4 N/V이다. 그리고 사용된 압전작동기는 기존의 unipolar형 압전작동기와 달리 bipolar형 압전작동기이다. Bipolar 압전작동기는 부하전압을 양과 음의 같은 크기로 가할 수 있고, 그에 따라 발생하는 스트로크도 거의 동일한 값으로 나타나게 된다.

고무마운트와 압전작동기로 구성된 하이브리드마운트의 기계적 모델은 식 (1)의 고무모델과 식 (4)의 압전작동기모델을 고려하여 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있으며, 이로부터 하이브리드마운트의 지배방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
 m\ddot{z}(t) + b_r\dot{z}(t) + k_r z(t) \\
 + k_p(z(t) - y_h(t)) + f_a(t) = 0
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

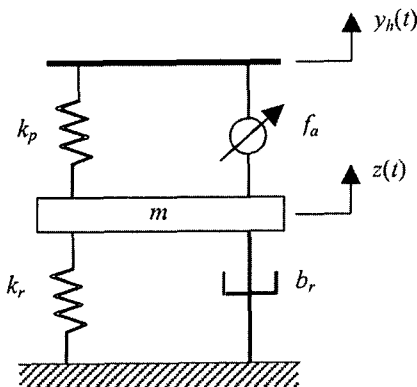


Fig. 2 Mechanical model of the hybrid mount

여기서, m 은 고무마운트 상부와 압전작동기 하부 강체부분의 질량이다. 이 강체는 매개질량(intermediate mass)이라고 명명한다. 이 질량은 압전작동기에서 발생하는 변위와 힘이 빔구조물로 효과적으로 작용될 수 있도록 하기 위한 것이다. 본 연구에서는 매개질량을 0.5 kg으로 설정하였다. 식 (5)의 $z(t)$ 는 매개질량의 변위를 나타내며, $y_h(t)$ 는 압전작동기 상단에 체결될 구조물의 변위를 의미한다

진동제어를 위해 도입된 빔 구조물 시스템을 Fig. 3에 나타내었다. 자유단형 빔은 하이브리드마운트와 고무마운트로 지지된다. 길이 L 인 Euler-Bernoulli 빔으로 가정된 빔구조물의 횡침점 $y(x, t)$ 에 대한 지배방정식과 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 EIy^{(iv)} + \rho y = 0 \quad (0 \leq x \leq l_1 \text{ or } l_3 \leq x \leq L) \\
 EIy^{(iv)} + \rho y = -F_p(x, t) - F_r(x, t) + F_{ex}(x, t) \\
 (l_1 \leq x \leq l_3)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 EIy''|_{x=0} = 0, \quad EIy''|_{x=L} = 0 \\
 EIy''|_{x=l_1} = 0, \quad EIy''|_{x=l_3} = 0 \\
 EIy'''|_{x=l_1^-} = (EIy''' + k_r y)|_{x=l_1^+}, \quad EIy'''|_{x=l_1^-} = EIy'''|_{x=l_1^+} \\
 EIy'''|_{x=l_3^-} = (EIy''' + k_r y)|_{x=l_3^+}, \quad EIy'''|_{x=l_3^-} = EIy'''|_{x=l_3^+} \\
 y(l_1^-, t) = y(l_1^+, t), \quad y'(l_1^-, t) = y'(l_1^+, t) \\
 y(l_3^-, t) = y(l_3^+, t), \quad y'(l_3^-, t) = y'(l_3^+, t)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 F_{ex}(x, t) &= \delta(x - l_{ex})f_{ex}(t) \\
 F_r(x, t) &= \delta(x - l_1)f_{b_{-1}}(t) + \delta(x - l_3)f_{b_{-3}}(t) \\
 F_p(x, t) &= \delta(x - l_2)f_p(t)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

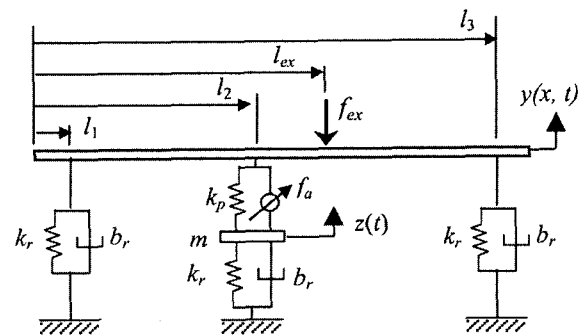


Fig. 3 Mechanical model of beam structure with hybrid mount

$$\begin{aligned} f_p(t) &= k_p(y(l_2, t) - z(t)) - f_a(t) \\ f_{b_j}(t) &= b_r \dot{y}(l_j, t), \quad j=1,3 \end{aligned} \quad (9)$$

상기 식에서, l_2 는 하이브리드마운트, l_1, l_3 는 고무 마운트의 위치이며, ρ 는 빔의 단위길이당 질량, EI 는 굽힘강성, $f_{ex}(t)$ 는 가진력, $f_p(t)$ 는 압전작동기의 힘, $f_{b_j}(t)$ 는 l_j 위치에서의 고무마운트의 댐핑력을 나타낸다. 식 (9)에서 $y(l_2, t)$ 는 빔구조물의 2번 위치에서의 변위로 식 (4)의 $y_h(t)$ 와 동일하다. i 번째 모드형상함수 $\phi_i(x)$ 와 일반화좌표 $q_i(t)$ 를 이용하여, 빔의 각 부분에서의 횡처짐을 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\begin{aligned} y(x, t) &= \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i^{(1)}(x) q_i(t) \quad (0 \leq x \leq l_1) \\ y(x, t) &= \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i^{(2)}(x) q_i(t) \quad (l_1 \leq x \leq l_3) \\ y(x, t) &= \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i^{(3)}(x) q_i(t) \quad (l_3 \leq x \leq L) \end{aligned} \quad (10)$$

Lagrange방정식을 통하여 얻어지는 상미분방정식과 식 (5)의 하이브리드마운트에 대한 지배방정식을 연계하여, 다음과 같이 빔구조물의 수학적모델을 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) &= \frac{Q_i(t)}{I_i} + \frac{Q_{ex}(t)}{I_i} \\ Q_i(t) &= -\phi_i(l_2) (k_p (y(l_2, t) - z(t)) - f_a(t)) \\ &\quad - \phi_i(l_1) f_{b_1}(t) - \phi_i(l_3) f_{b_3}(t) \\ Q_{ex}(t) &= \phi_i(l_{ex}) f_{ex}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} I_i &= \rho \left[\int_0^{l_1} (\phi_i^{(1)}(x))^2 dx + \int_{l_1}^{l_3} (\phi_i^{(2)}(x))^2 dx \right. \\ &\quad \left. + \int_{l_3}^L (\phi_i^{(3)}(x))^2 dx \right] \\ \ddot{z}(t) + \frac{b_r}{m} \dot{z}(t) + \frac{k_r}{m} z(t) \\ &\quad + \frac{k_p}{m} (z(t) - y(l_2, t)) + f_a(t) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, ω_i, ζ_i, I_i 는 각각 i 번째 모드의 고유진동수, 감쇠비, 일반화질량을 나타낸다. $Q_i(t)$ 와

$Q_{ex}(t)$ 는 마운트의 전달힘과 외란에 대한 일반화 힘을 나타낸다. 한편, l_j 에 위치한 마운트를 통한 베이스(base)로의 전달력 $F_{Tj}(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{T1}(t) &= k_r y(l_1, t) + b_r \dot{y}(l_1, t) \\ F_{T2}(t) &= k_r z(t) + b_r \dot{z}(t) \\ F_{T3}(t) &= k_r y(l_3, t) + b_r \dot{y}(l_3, t) \end{aligned} \quad (13)$$

3. 제어기 설계

본 연구에서는 제어 시스템의 파라미터 변화와 외란에 대하여 강건한 슬라이딩모드제어기를 설계하였다. Fig. 4는 하이브리드마운트에 제어입력이 인가되지 않을시, 빔구조물의 l_1 위치에서의 가속도응답을 나타낸 것이며, 빔구조물의 3, 4차 탄성공진 모드가 지배적임을 알 수 있다. 따라서, 빔구조물의 가장 큰 진동모드인 3차와 4차 탄성공진모드를 제어모드로 설정하면, 상태공간상에서 다음과 같은 시스템 모델을 얻을 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{\Gamma}d(t) \quad (14)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= [q_3(t) \quad \dot{q}_3(t) \quad q_4(t) \quad \dot{q}_4(t) \quad z_1(t) \quad \dot{z}_1(t)]^T \\ u(t) &= [f_a(t)] \\ d(t) &= [f_{ex}(t)] \\ \mathbf{A} &= [a_1 \quad \vdots \quad a_2 \quad \vdots \quad a_3 \quad \vdots \quad a_4 \quad \vdots \quad a_5 \quad \vdots \quad a_6] \end{aligned} \quad (15)$$

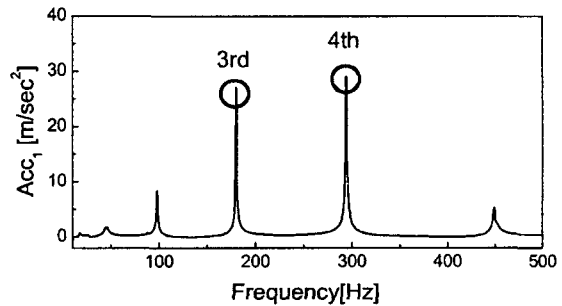


Fig. 4 Acceleration of beam structure without control input

$$a_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_3^2 - \frac{k_p}{I_3}(\phi_3^2(l_2)) \\ 0 \\ -\frac{k_p}{I_4}(\phi_4(l_2)\phi_3(l_2)) \\ 0 \\ \frac{k_r}{m}(\phi_3(l_2)) \end{bmatrix}, a_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -2\zeta_3\omega_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, a_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{k_p}{I_3}(\phi_3(l_2)\phi_4(l_2)) \\ 0 \\ -\omega_4^2 - \frac{k_p}{I_4}(\phi_4^2(l_2)) \\ 0 \\ \frac{k_r}{m}(\phi_4(l_2)) \end{bmatrix}$$

$$a_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -2\zeta_4\omega_4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, a_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_p}{I_3}(\phi_3(l_2)) \\ 0 \\ \frac{k_p}{I_4}(\phi_4(l_2)) \\ 0 \\ \frac{k_p + k_r}{m} \end{bmatrix}, a_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -\frac{b_r}{m} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\phi_3(l_2)}{I_3} & 0 & \frac{\phi_4(l_2)}{I_4} & 0 & -\frac{1}{m} \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\phi_3(l_{ex})}{I_3} & 0 & \frac{\phi_4(l_{ex})}{I_4} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

하이브리드마운트의 제어입력을 구하기 위하여 다음과 같이 슬라이딩서피스를 설정한다.⁽¹⁶⁾

$$s = \mathbf{G}\mathbf{x}(t) \quad (19)$$

여기서, $\mathbf{G}=[g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4 \ g_5 \ g_6]$ 는 슬라이딩서피스의 기울기를 나타내며, 슬라이딩모드가 존재하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s(t)^2 \leq -\eta |s(t)|, \quad (\eta : \text{strictly positive constant}) \quad (20)$$

식 (20)을 만족하는 슬라이딩모드제어기를 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$u(t) = -(\mathbf{GB})^{-1} (\mathbf{G}\mathbf{A}\mathbf{x}(t) + k \cdot \text{sgn}(s(t))), \quad k > |\mathbf{G}\mathbf{\Gamma} f_{ex_ub}| + \eta \quad (21)$$

여기서, k 는 불연속 계인을 나타내고, f_{ex_ub} 는 외부가진 f_{ex} 의 상한을 나타낸다. 식 (21)의 슬라이딩모드제어기는 다음과 같이 식 (20)의 슬라이딩모드조건을 만족한다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s(t)^2 = s(t)\mathbf{G}\dot{\mathbf{x}}(t)$$

$$\begin{aligned} &= s(t)\mathbf{G}(\mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{\Gamma}d(t)) \\ &= s(t)(\mathbf{G}\mathbf{A}\mathbf{x}(t) - \mathbf{GB}(\mathbf{GB})^{-1}\mathbf{G}\mathbf{A}\mathbf{x}(t) \\ &\quad - \mathbf{GB}(\mathbf{GB})^{-1}k \text{sgn}(s(t)) + \mathbf{G}\mathbf{\Gamma}d(t)) \\ &= s(t)(-k \text{sgn}(s(t)) + \mathbf{G}\mathbf{\Gamma}d(t)) \\ &\leq -\eta |s(t)| \end{aligned} \quad (22)$$

그러나 이와 같은 불연속 제어기는 채터링(chattering)을 발생시키므로 정해진 경계조건영역 (ϵ) 안에서 불연속 제어를 연속 제어로 근사화시키기 위해 다음과 같은 포화 함수로 대체한다.

$$\text{sat}(s(t)) = \begin{cases} s(t)/\epsilon, & |s(t)| \leq \epsilon \\ \text{sgn}(s(t)), & |s(t)| > \epsilon \end{cases} \quad (23)$$

본 연구에서는 시스템의 상태변수를 추정하기 위하여 전차수상태관측기(full-order state estimator)를 구현하였다.⁽¹⁷⁾

4. 결과 및 고찰

본 연구에서 고려한 구조물은 두 개의 고무마운트와 한 개의 하이브리드마운트에 의해 지지되는 빔(steel, 1500×60×15 mm)이며, 고무마운트는 빔의 좌단에서 각각 50 mm, 1450 mm지점에, 하이브리드마운트는 650 mm지점에 위치하였다. 하이브리드마운트가 설치된 위치는 3, 4차 탄성공진모드에서의 모드형상 값이 동시에 큰 지점이다. 정현파형 가진력의 진폭 F_0 는 1 N, 가진주파수 영역은 150~320 Hz로 설정하였다. 실험에 사용된 모델 변수와 제어기 게인 값을 Table 1에 나타내었고, 실험장치의 개략도는 Fig. 5에 나타내었다. 빔과 가진기 사이에 설치된 힘 센서로부터 출력되는 신호는 가진제어기로 입력되며, 가진제어기의 출력신호는 가진기 전력증폭기를 통하여 가진기에 입력되어 가진기는 일정한 크기의 힘으로 빔을 가진한다. 빔의 ② ($x = l_2$) 위치에 부착된 가속도계의 출력신호를 적분기에 통과시켜 얻은 속도는 상태변수의 관측에 이용하였으며, Fig. 5에서는 점선으로 표현하였다. AD변환기로 입력된 속도신호는 마이크로프로세서에서 상태변수의 관측과 슬라이딩모드 제어입력의 계산에 이용된다. 제어입력은 DA변환기에서 제어전압으로 출력된 후, 20배의 고전압증폭기를 통하여 증폭되어 하이브리드마운트에 부착된다.

빔의 탄성력이 각 마운트를 통하여 베이스로 전달되는 것을 측정하고자 각 마운트와 베이스 사이에 힘센서를 설치하였으며, 측정된 신호는 AD변환기를 통하여 마이크로 프로세서에 저장된다. 실험에 적용된 샘플링 주파수는 12.5 kHz이다.

수학적 모델과 제어기의 타당성을 입증하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 먼저 수행하였으며, Fig. 6에 빔 구조물의 ①, ② 위치에서의 가속도 응답을 나타내었다. Uncontrolled는 하이브리드마운트에 제어입력을 부하하지 않고 측정된 빔구조물의 가속도 응답이며, Controlled는 하이브리드마운트에 제어입력을 부하하면서 측정된 빔구조물의 가속도 응답이다. Fig. 7은 실험을 통하여 측정된 가속도의 주파수 응답이다.

Table 1 Model and control parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
ω_3 [rad/sec]	1163.5	α [N/V]	2.4
ω_4 [rad/sec]	1908.8	k_p [N/m]	66.4×10^6
ζ_3	0.00033	k_r [N/m]	61930
ζ_4	0.00058	b_p [Nsec/m]	40
I_3 [kg]	11.0942	m [kg]	0.5
I_4 [kg]	10.8508	g_1	200
$\phi_3(l_1)$	1.25823	g_2	2.9
$\phi_3(l_2)$	1.08839	g_3	120
$\phi_3(l_3)$	1.25818	g_4	1.7
$\phi_3(l_{ex})$	1.08847	g_5	150
$\phi_4(l_1)$	1.03928	g_6	0.14
$\phi_4(l_2)$	1.1916	k	45
$\phi_4(l_3)$	-1.03885	ϵ	0.019
$\phi_4(l_{ex})$	-1.19107		

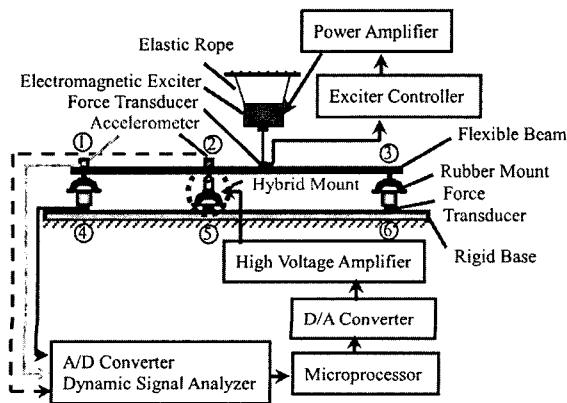


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

Fig. 6,7에서 나타난 바와 같이 두 결과가 매우 일치하며, 빔구조물의 진동이 효과적으로 감소되는 것을 확인할 수 있다. 실험으로 측정된 빔구조물의 각 위치에서의 변위는 Fig. 8에 나타내었다. 제어를 수행하

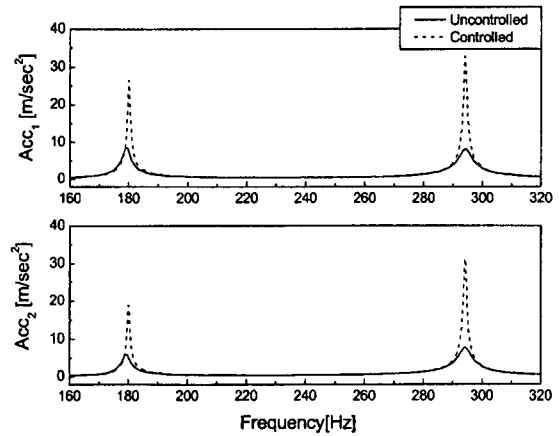


Fig. 6 Simulated acceleration of beam structure

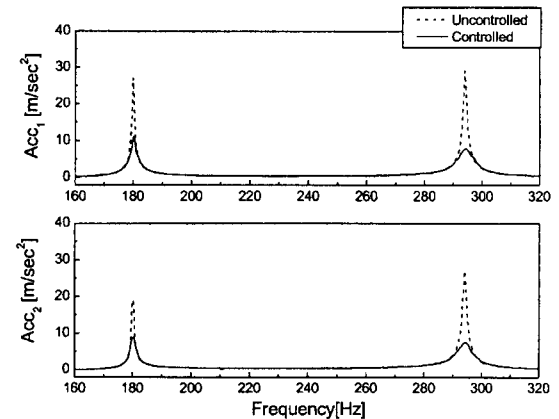


Fig. 7 Measured acceleration of beam structure

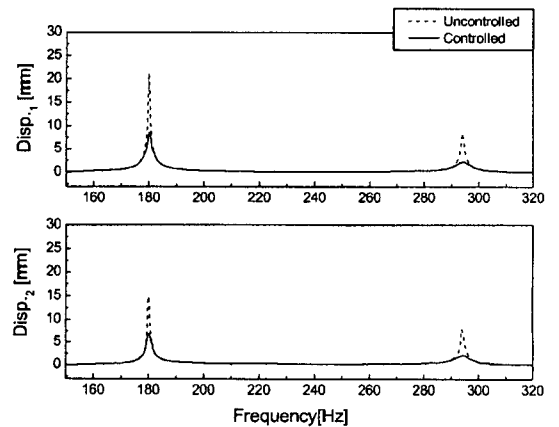


Fig. 8 Measured displacement of beam structure

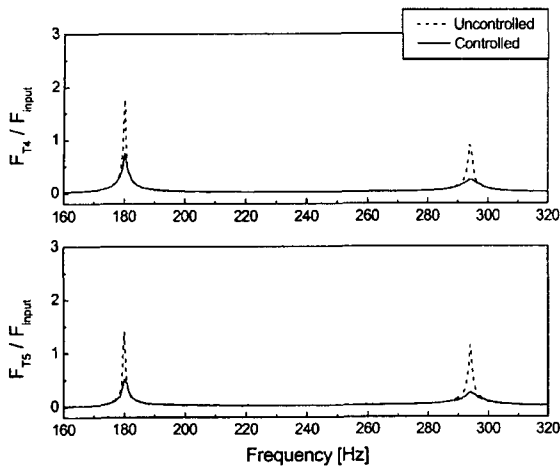


Fig. 9 Measured force transmissibility

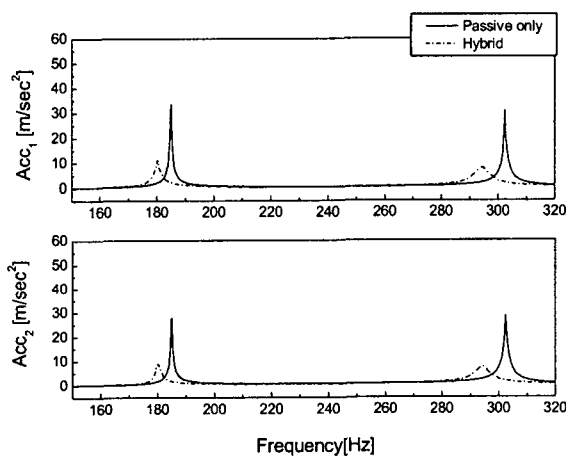


Fig. 10 Comparison of acceleration of beam structure

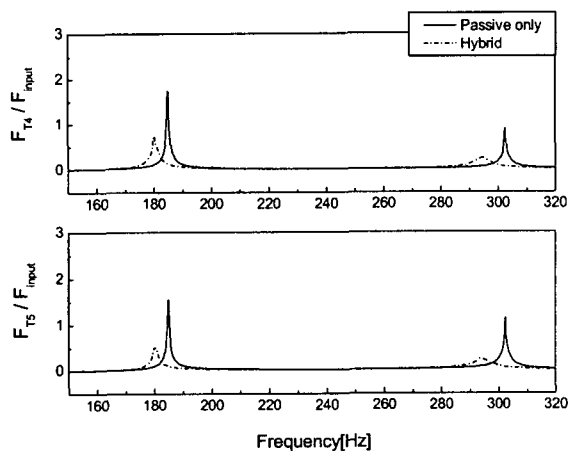


Fig. 11 Comparison of force transmissibility

지 않은 경우 4차 탄성공진모드에서 ①, ②위치의 변위는 8.5, 7.9 μm 이지만, 제어를 수행하면 2.2, 2.1 μm 로 감소하여 미소변위의 진동제어에 우수한 응답특성을 보이고 있다. Fig. 9는 각 마운트로의 힘전달률을 나타내는 것으로 하이브리드마운트뿐만 아니라 고무마운트로의 전달력 또한 효과적으로 감소됨을 확인할 수 있다. 결과에 나타난 바와 같이 하이브리드마운트를 이용하여 빔구조물의 고주파수에서의 미소변위 진동과 전달력을 비공진주파수에서의 악화현상 없이 효과적으로 감소시킬 수 있다.

하이브리드마운트를 고무마운트로 대체하여 빔구조물이 고무마운트로만 지지되는 수동마운트시스템의 주파수응답특성을 측정 후 하이브리드마운트 시스템의 성능과 비교하였다. Fig. 10은 ①, ②위치에서의 가속도를 나타내고, Fig. 11은 ④, ⑤위치에서의 힘전달률을 나타낸다. 시스템의 3, 4차 탄성공진주파수는 변동되지만, 진동레벨은 하이브리드마운트를 사용함으로써 수동시스템에 비해 현저히 감소되었음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 적층형 압전작동기와 고무를 이용한 하이브리드마운트를 제안하였다. 고무마운트와 압전작동기의 파라미터를 도출하였고, 하이브리드마운트의 지배방정식을 유도하였으며, 하이브리드마운트가 고려된 빔구조물의 동적모델링을 수행하였다. 빔구조물의 진동제어를 위하여, 외란에 강건한 슬라이딩모드제어기를 설계하였다. 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과와의 비교를 통해 수학적 모델링과 제어기의 타당성을 입증하였으며, 빔의 변위 및 가속도, 그리고 마운트의 힘전달률이 효과적으로 감소됨을 확인하였다. 또한 고무마운트만을 사용한 수동형마운트시스템과의 성능 비교를 통해 제안된 능동형 하이브리드마운트시스템의 우수한 효과를 입증하였다.

참고 문헌

- (1) Rivin, E. E., 1984. "Passive Engine Mounts : Some Directions for Further Development." SAE Technical Paper Series 940259.
- (2) Singh, R., Kim, G. and Pavindra P. V.,

- 1992, "Linear Analysis of Automotive Hydro-mechanical Mount with Emphasis on Decoupler Characteristics," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 158, No. 2, pp. 219~243.
- (3) Choi, S. B., Park, Y. K. and Cheong, C. C., 1996, "Active Vibration Control of Intelligent Composite Laminate Structures Incorporating an Electro-rheological Fluid," *Journal of Intelligent Material Systems and Structure*, Vol. 7, No. 4, pp. 441~419.
- (4) Choi, S. B., 1999, "Vibration Control of a Flexible Structure Using ER Dampers," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 121, No. 9, pp. 134~138.
- (5) Choi, S. B. and Cheong, C. C., 1996, "Vibration Control of a Flexible Beam Using SMA Actuators," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 19, No. 5, pp. 1178~1180.
- (6) Chen, Q. and Levy, C., 1996, "Active Vibration Control of Elastic Beam by Means of Shape Memory Alloy Layers," *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, No. 4, pp. 400~406.
- (7) Choi, S. B., Cheong, C. C. and Kim, S. H., 1995, "Control of Flexible Structures by Distributed Piezofilm Actuators and Sensors," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 6, pp. 430~435.
- (8) Choi, S. B., Cho, S. S. and Park, Y. P., 1999, "Vibration and Position Tracking Control of Piezoceramic-based Smart Structures via QFT," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 121, pp. 27~33.
- (9) Baily, T. and Hubbard, J. E. Jr., 1985, "Distributed Piezoelectric-polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 8, No. 5, pp. 605~611.
- (10) Han, J. H., Rew, K. H. and Lee, I., 1997, "An Experimental Study of Active Vibration Control of Composite Structures with a Piezo-ceramic Actuator and a Piezo-film Sensor," *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, pp. 549~558.
- (11) 김종선, 1992, "압전소자를 액츄에이터로 이용한 탄성보 진동의 능동제어," *한국소음진동공학회 논문집*, 제 2 권, 제 3 호, pp. 173~180.
- (12) 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.
- (13) Kamada, T., Fujita, T., Hatayama, T., Arikabe, T., Murai, N., Aizawa, S. and Tohyama, K., 1997, "Active Vibration Control of Frame Structures with Smart Structures Using Piezoelectric Actuators (Vibration Control by Control of Bending Moments of Columns)," *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, pp. 448~456.
- (14) Choi, S. H., Choi, Y. T., Choi, S. B. and Cheong, C. C., 1996, "Performance Analysis of an Engine Mount Featuring ER Fluids and Piezoactuators," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 10, pp. 3143~3157.
- (15) Sun, F. P., Liang, C. and Rogers, C. A., 1994, "Structural Modal Analysis using Collocated Piezoelectric Actuator/Sensors-an Electromechanical Approach," *Proceedings of SPIE*, Vol. 2190, pp. 238~249.
- (16) El-Ghezawi, O. M. E., Zinober, A. S. L. and Billings, S. A., 1983, "Analysis and Design of Variable Structure Systems Using a Geometric Approach," *International Journal of Control*, Vol. 38, No. 3, pp. 657~671.
- (17) Chen, C-T., 1999, *Linear System Theory and Design*, Oxford University Press, Oxford, New York.