

압착모드형 ER마운트를 이용한 보 구조물의 진동저감 해석

Vibration Reduction of Beam Structure using Squeeze Mode ER Mount

정우진* · 김두기* · 정의봉** · 홍성룡*** · 최승복***

Woo-Jin Jung, Du-Ki Kim, Weui-Bong Jeong, Sung-Ryong Hong, Seung-Bok Choi

Key Words : ER Mount(ER마운트), Squeeze Mode(압착모드), Vibration Reduction(진동저감), State Space Equation(상대공간 방정식), Optimal Control(최적 제어)

ABSTRACT

To reduce unwanted vibrations in war ship which may be transmitted through underwater path, it is required to use high damping mounts to isolate the vibration. In this work, the beam structure with squeeze mode ER mount is proposed and response characteristics such as acceleration and force transmissibility of beam with constant voltage and optimal controller are experimentally analyzed. The controller is empirically realized and control responses are evaluated in frequency domains. Experiments show vibration reduction capability of squeeze mode ER mount.

1. 서 론

함정탑재 기계류들에서 발생하는 진동, 구조전달소음을 차단하고 충격으로부터 보호하기 위해서 일반적으로 탄성 마운트 시스템을 사용하고 있다. 탑재된 기계류의 진동에 의하여 선체로 전달되는 진동을 감소시키기 위해서는 작은 강성과 댐핑을 갖는 마운트가 효과적이지만, 기계류 거동과 마운트 내구성 측면에서는 큰 강성의 마운트가 요구된다. 이러한 요구특성으로 인하여, 탄성 마운트 시스템의 공진이 존재하는 저주파수 영역에서는 가진진폭과 충격력이 크기 때문에, 큰 강성으로 기계류의 과도한 움직임을 제한하고 큰 댐핑력으로 충격력을 감소시켜야 한다. 한편, 가진변위와 충격력이 작은 고주파수 가진영역에서는 작은 댐핑력을 이용하여 기계류에 의한 전달되는 진동을 감소시켜야 한다. 이럴 경우 고주파수 가진영역에서 마운트의 성능악화를 초래할 가능성이 높다.

탄성 마운트 시스템에 사용될 수 있는 마운트의 종류로는 고무마운트(수동형), 유체마운트(수동형 혹은 반능동형), 능동형 마운트등이 있다. 이중 가장 많

이 쓰이는 것이 고무마운트이다. 그러나 고무마운트는 고주파수 영역의 진동절연에는 효과적이거나, 감쇠력이 작기 때문에 저주파수 영역에서의 큰 진폭의 진동은 절연시키지 못한다. 이러한 단점을 보완하고자 유체마운트가 제안되었다. 그러나 유체마운트는 10~20(Hz)대역의 주파수영역에 존재하는 마운트 시스템의 공진점에서만 효과적인 진동절연성을 나타낸다. 따라서 보다 넓은 주파수영역에서의 진동절연을 위하여 능동형 마운트가 제안되었으나, 별도의 기계적 구동장치와 제어시스템이 필요하며, 전력소모가 크고 고가이며 특히 충격에 약하다는 단점이 있다. 따라서 충격문제 및 안전성을 위하여 기존의 고무마운트를 이용한 반능동/능동 마운트가 필요하다.

최근에 고무마운트를 기본으로 지능재료의 하나인 ER(electro-rheological) 유체를 이용한 ER유체 마운트(이하 ER마운트 라함)에 대한 연구가 수행되고 있다.^(1~4) 댐핑력이 전기장에 의하여 조절되는 ER마운트는 전기장의 강도에 따라 강성과 감쇠력을 연속적으로 조절할 수 있으며 별도의 액츄에이터가 필요없어 장치의 소형화가 가능하다. 또한, 시스템의 응답특성이 빠르며 전력소모가 작다는 장점을 갖고 있다. 그러나 이들 ER마운트들은 비교적 변위가 크게 일어나는 10(Hz)내외의 저주파에서 유용한 전단모형과 유동모드형 ER마운트들이다. 그러나 탑재된 기계류들이 정상작동을 시작하면 진동변위가 최대 0.1(mm)이하이다. 따라서 작은변위의 진동에도 사용할 수 있는

* 국방과학연구소
E-mail : wjjung@add.re.kr
Tel : (055) 540-6154, Fax : (055) 542-3737

** 부산대학교

*** 인하대학교

ER마운트가 필요하다. 한편 탄성 마운트 시스템에 사용되는 받침대 구조물의 유연성(flexibility)으로 인한 공진모드가 존재하게 된다. 이들 공진모드에 의해서 탄성 마운트 시스템의 진동감소 성능이 악화된다. 특히 최근에는 음향탐지 센서들의 성능발달로 수십 Hz의 저주파 대역까지 탐지할 수 있는 능력의 센서가 출현하게 되었다. 그런데 탄성 마운트 시스템의 받침대는 보통 20~30(Hz)에서 1차 탄성 공진모드가 발생한다. 따라서 합정에서 저주파 방사소음은 탄성 마운트 시스템받침대의 저주파 공진모드와 깊은 연관이 있다. 그러므로 탄성 마운트 시스템 받침대의 저주파 모드 제어도 필요하다. 이를 위하여 저자들은 압착모드형 ER마운트를 제안하였고, 이를 보 구조물과 프레임 구조물의 진동제어에 적용하였다.⁽⁵⁾ 이 연구에서는 변위와 속도성분을 이용하여 보 구조물과 프레임 구조물의 가속도 응답을 이용하여 진동제어성능을 고찰하였다. 그런데 합정용 마운트들은 전달되는 힘도 감소시켜야 하므로 마운트를 통한 전달력의 응답특성도 고찰하여야 한다.

따라서 본 논문에서는 100(Hz) 영역이내에서 구조물의 탄성모드 제어와 진동저감을 목적으로 제안된 소형 압착모드형 ER마운트를 보(Beam) 구조물에 적용하고 전달력과 속도성분을 이용한 제어로직을 구성하여 전달력과 가속도 응답을 이용하여 진동저감 성능을 실험적으로 고찰하였다. 또한 ER마운트의 위치 변화에 따른 진동저감 성능도 실험적 방법을 이용하여 수행하였다.

2. 이론적 배경

진동하고 있는 제어대상계의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M_s]\ddot{w}(x, t) + [C_s]\dot{w}(x, t) + [K_s]w(x, t) = [B_s]u(t) + [D_s]f(t) \quad (2-1)$$

$[M_s]$, $[C_s]$, $[K_s]$ 는 $n \times n$ 크기의 질량, 감쇠, 강성행렬이며, $w(t)$ 는 $m_1 \times 1$ 크기의 제어력벡터, $f(t)$ 는 $m_2 \times 1$ 의 외력벡터이다. $[B_s]$ 는 $n \times m_1$, $[D_s]$ 는 $n \times m_2$ 이다. 식(1)을 질량 정규화(Mass Normalization)된 모드행렬 $[\phi]$ 와 일반화 좌표 $\{q(t)\}$ 및 $\{w(x, t)\} = [\phi]\{q(t)\}$ 를 이용하여 정리하면,

$$[I]\{\ddot{q}(t)\} + \text{diag}[2\xi\omega_n]\{\dot{q}(t)\} + \text{diag}[\omega_n^2]\{q(t)\} = [\phi]^T[B_s]u(t) + [\phi]^T[D_s]f(t) \quad (2-2)$$

$[\phi]^T[M]\phi = [I]$ 이며, $\text{diag}[2\xi\omega_n] = [\phi]^T[C_s]\phi$, $\text{diag}[\omega_n^2] = [\phi]^T[K_s]\phi$ 에 대한 대각행렬이다. 식(2-2)에서 질량 정규화된 모드행렬 $[\phi]$ 와 $[\phi]^T[B_s]$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$[\phi] = \begin{bmatrix} \phi_1(l_1) & \phi_2(l_1) & \cdots & \phi_n(l_1) \\ \phi_1(l_2) & \phi_2(l_2) & \cdots & \phi_n(l_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_1(l_j) & \phi_2(l_j) & \cdots & \phi_n(l_j) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_1(l_n) & \phi_2(l_n) & \cdots & \phi_n(l_n) \end{bmatrix}, \quad \begin{array}{l} l_1, l_2, \dots, l_n = \\ \text{각 절점의 좌표값} \\ \phi_j(l_k) = \text{절점 } l_k \\ \text{에서의 } j \text{ 번째} \\ \text{고유 모드} \end{array}$$

$$[\phi]^T[B_s]u(t) = \begin{bmatrix} \left[\sum_{j=1}^n \phi_1(l_j)B_{j1} \right] u_1(t) & \cdots & \left[\sum_{j=1}^n \phi_1(l_j)B_{jm} \right] u_m(t) \\ \left[\sum_{j=1}^n \phi_2(l_j)B_{j1} \right] u_1(t) & \cdots & \left[\sum_{j=1}^n \phi_2(l_j)B_{jm} \right] u_m(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \left[\sum_{j=1}^n \phi_n(l_j)B_{j1} \right] u_1(t) & \cdots & \left[\sum_{j=1}^n \phi_n(l_j)B_{jm} \right] u_m(t) \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

$[\phi]^T[B_s]u(t)$ 의 i 번째 열의 값은

$$\left[\sum_{j=1}^n \phi_i(l_j)B_{j1} \right] u_1(t) + \left[\sum_{j=1}^n \phi_i(l_j)B_{j2} \right] u_2(t) + \cdots + \left[\sum_{j=1}^n \phi_i(l_j)B_{jm} \right] u_m(t) \quad (2-4)$$

이며, $[\phi]^T[D_s]f(t)$ 의 i 번째 열의 값은

$$\left[\sum_{j=1}^n \phi_i(l_j)D_{j1} \right] f_1(t) + \left[\sum_{j=1}^n \phi_i(l_j)D_{j2} \right] f_2(t) + \cdots + \left[\sum_{j=1}^n \phi_i(l_j)D_{jm} \right] f_m(t) \quad (2-5)$$

이다. 식(2)에서 i 번째 항에 대한 수식을 나타내면,

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i(t) + 2\xi_i\omega_{ni} \dot{q}_i(t) + \omega_{ni}^2 q_i(t) = & \left[\sum_{j=1}^n \phi_i(l_j)B_{j1} \right] u_1(t) + \left[\sum_{j=1}^n \phi_i(l_j)B_{j2} \right] u_2(t) \\ & + \cdots + \left[\sum_{j=1}^n \phi_i(l_j)B_{jm} \right] u_m(t) + \\ & \left[\sum_{j=1}^n \phi_i(l_j)D_{j1} \right] f_1(t) + \left[\sum_{j=1}^n \phi_i(l_j)D_{j2} \right] f_2(t) \\ & + \cdots + \left[\sum_{j=1}^n \phi_i(l_j)D_{jm} \right] f_m(t) \end{aligned} \quad (2-6)$$

식(2-6)을 이용하여 필요한 상태공간(State space) 방정식을 구성하고 제어기를 설계하게 된다.

3. ER마운트가 설치된 보구조물 진동저감

3.1 중앙부에 ER마운트가 설치된 보구조물

Fig. 1과 같이 스프링 마운트와 압착모드형 ER마운트 각 2개씩 이용하였다. 이때 보구조물 재질은 SM40C, 제원은 1500(mm)x60(mm)x15(mm)이며, 스프링 마운트 강성은 4000(N/m)이다. 그리고 $l_1 = 50(\text{mm})$, $l_2 = 450(\text{mm})$, $l_4 = 1050(\text{mm})$, $l_5 = 1450(\text{mm})$, $l_{ex} = 650(\text{mm})$ 이다.

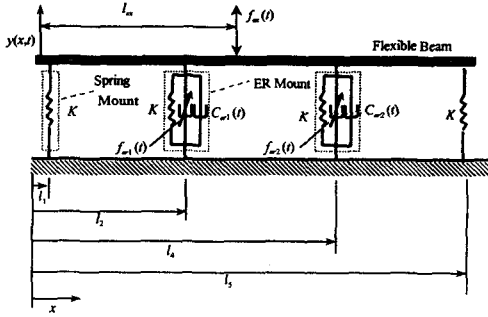


Fig. 1 Beam structure with ER mount in the vicinity of center

보 구조물의 진동저감을 위하여 ER마운트의 가변댐핑력을 적절히 조절할 수 있는 최적제어 알고리즘을 설계하였다. 최적제어기는 물리적 구속조건을 만족시킴과 동시에 성능지수가 최소화 또는 최대화가 되도록 제어입력을 결정한다. 위의 모델에서 제어력은 \$l_2, l_4\$에 위치한 2개의 ER마운트이며 외력은 \$l_{ex}\$에 위치한 1개이다. 본 논문에서는 100(Hz)이내에 존재하는 1, 2차 탄성모드의 제어를 통한 진동저감이 목적이므로 식(2-6)을 이용하여 상태공간 방정식을 구하면,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \Gamma d(t), \quad y(t) = Cx(t) \quad (3-1)$$

$$x(t) = [q_1(t) \quad \dot{q}_1(t) \quad q_2(t) \quad \dot{q}_2(t)]^T$$

$$u(t) = [f_{er2}(t) \quad f_{er4}(t)]^T, \quad d(t) = [f_{ex}(t)]^T$$

$$y(t) = [y_2(t) \quad y_4(t)]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\omega_1^2 & -2\zeta_1\omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\omega_2^2 & -2\zeta_2\omega_2 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \Phi_1(l_2) & \Phi_1(l_4) \\ 0 & 0 \\ \Phi_2(l_2) & \Phi_2(l_4) \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi_1(l_{ex}) \\ 0 \\ \Phi_2(l_{ex}) \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \Phi_1(l_2) & 0 & \Phi_2(l_2) & 0 \\ \Phi_1(l_4) & 0 & \Phi_2(l_4) & 0 \end{bmatrix}$$

\$q_1(t), q_2(t) = 1, 2\$차 탄성 모드의 일반화 좌표값

\$\Phi_1(\cdot) = 1\$차 탄성 모드, \$\Phi_2(\cdot) = 2\$차 탄성 모드

제어변수로 변위와 속도를 가장 많이 이용하고 있으나, 마운트 시스템의 경우에는 마운트를 통한 전달력제어도 중요하므로 마운트 전달력이 가장 클 것으로 예상되는 양단에서의 마운트 전달력과 ER마운트가 설치된 두 지점에서의 속도를 고려한 상태공간 방정식을 도출하였다.

$$\dot{z}(t) = A^*z(t) + B^*u(t) + \Gamma^*d(t) \quad (3-2)$$

$$z(t) = [F_1(t), \dot{y}_2(t), \dot{y}_4(t), F_5(t)]^T = Px(t)$$

$$u(t) = [f_{er2}(t) \quad f_{er4}(t)]^T, \quad d(t) = [f_{ex}(t)]^T$$

$$A^* = PAP^{-1}, \quad B^* = PB, \quad \Gamma^* = P\Gamma$$

$$P = \begin{bmatrix} k\Phi_1(l_1) & 0 & k\Phi_2(l_1) & 0 \\ 0 & \Phi_1(l_2) & 0 & \Phi_2(l_2) \\ 0 & \Phi_1(l_4) & 0 & \Phi_2(l_4) \\ k\Phi_1(l_5) & 0 & k\Phi_2(l_5) & 0 \end{bmatrix}$$

여기서, \$A^*\$는 시스템 행렬, \$B^*\$는 입력행렬, \$\Gamma^*\$는 외란입력 행렬, \$P\$는 상태변환행렬이다. 이때 성능지수(performance index) \$J\$를 다음과 같이 정의하였다.

$$J = \min \int_0^\infty \{z^T(t)Qz(t) + u^T(t)Ru(t)\} dt \quad (3-3)$$

여기서, \$Q\$는 상태변수(State Variable) 가중행렬로 양의 반한정 대칭행렬이고, \$R\$은 양의 제어력 가중치이다. 식(3-2)로 표현된 동적 시스템은 제어가능(controllable)하므로 다음의 리카티 방정식을 만족시키는 해 \$F\$를 얻을 수 있다.

$$Q - FB^*R^{-1}B^{*T}F + FA^* + A^{*T}F = 0 \quad (3-4)$$

최적제어이론을 통하여 얻어진 제어신호는 다음과 같다.

$$u(t) = -R^{-1}B^{*T}Fz(t) = Kz(t) \quad (3-5)$$

식(3-5)로부터 ER마운트의 제어댐핑력은 다음과 같다.

$$u_j(t) = f_j(F_1(t), \dot{y}_2(t), \dot{y}_4(t), F_5(t)) \\ = k_{j1}F_1(t) + k_{j2}\dot{y}_2(t) + k_{j3}\dot{y}_4(t) + k_{j4}F_5(t) \quad (3-6)$$

단, \$j=2, 4\$이다. 여기서, \$F_1(t), F_5(t)\$는 힘센서를 이용하여 직접 측정된다. 그러나 2번에 위치한 ER마운트의 간극크기만 1개의 변위센서를 이용하여 측정하므로, 4번에 위치한 ER마운트의 간극크기는 추정되어야 한다. 이렇게 측정이 가능하지 않은 상태변수 및 물리량을 추정하는 것을 관측(observation)이라고 한다. 본 연구에서는 시스템의 모든 상태변수를 추정하는 전차수 상태관측기(full-order state observer)를 구현하였다. 관측기 설계문제에는 실제 상태 \$x(t)\$와 추정상태 \$\hat{x}(t)\$사이의 오차가 최소화되는 방향으로 추정하는 것이다. 행렬 \$A, B\$가 관측가능(observable)이면 관측기는 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y'(t) - C\hat{x}(t)) \quad (3-7)$$

$$\hat{x}(t) = [\hat{q}_1(t) \quad \hat{q}_1(t) \quad \hat{q}_2(t) \quad \hat{q}_2(t)]^T$$

$$y'(t) = [y_2(t)]^T, \quad C = [\Phi_1(l_2) \quad 0 \quad \Phi_2(l_2) \quad 0]$$

여기서, \$L(\in R^{4 \times 1})\$은 관측기 게인행렬로서 \$[A - LC]\$의 고유치는 \$A\$의 고유치보다 충분히 작은 음의 실수값을 갖도록 \$L\$을 선정한다. 식(3-7)을 이용하여 \$\dot{y}_2(t), \dot{y}_4(t)\$에 대한 추정값 \$\hat{y}_2(t), \hat{y}_4(t)\$를 구하게 되며, 이를 식(3-6)에 대입하면 제어입력은 다음과 같이 관측된 변수를 이용하여 표현할 수 있다.

$$u_j(t) = f_j(F_1(t), \hat{y}_2(t), \hat{y}_4(t), F_5(t)) \\ = k_{j1}F_1(t) + k_{j2}\hat{y}_2(t) + k_{j3}\hat{y}_4(t) + k_{j4}F_5(t) \quad (3-8)$$

단, \$j=2, 4\$이다. 보 구조물에 적용된 ER마운트는 반응동형 작동기이므로 식(3-8)의 제어신호에 보의 속도와 제어댐핑력의 방향이 같을 때에만 제어입력이 부하되는 반응동조

건을 고려해야 한다.

$$u_j(t) = \begin{cases} u_j(t) & \text{for } u_j(t)y(j, t) > 0 \\ 0 & \text{for } u_j(t)y(j, t) \leq 0 \end{cases}, j=2,4 \quad (3-9)$$

ER마운트에 부하될 전압은 다음의 식에 의하여 결정된다.

$$V_j(t) = E_j(t)(h_0 + y_j(t)) \quad (3-10)$$

$$= \left[\frac{3}{4} \frac{(h_0 + y_j(t))}{\pi R^3 \alpha} u_j(t) \right]^{1/\beta} (y_j(t)), j=2,4$$

위의 식들과 양단의 스프링마운트 하부에 설치된 힘측정기와 첫 번째 ER마운트 위치에서 레이저 센서로 측정된 변위 신호를 이용하여 진동제어를 수행하였다. 먼저 ER마운트에 일정전압을 가하는 경우에 대한 실험을 수행하였다.

Fig. 2는 0.5N으로 가진할 때 보의 가속도를 측정하는 것으로 31.6(Hz)와 83.6(Hz)에서 1차, 2차 모드가 나타나고 있다. 이때 1kV의 전압을 가하면 진동모드가 사라지는 현상을 확인할 수 있다. 1차 탄성 공진주파수에서 첫 번째 스프링마운트의 가속도는 0, 0.5kV, 1kV의 전압을 부하함에 따라 9.5 m/s²에서 2.5, 0.17 m/s²로 감소하였으며, 2차 탄성 공진주파수에서는 3.5 m/s²에서 0.04, 0.03 m/s²으로 감소하였다.

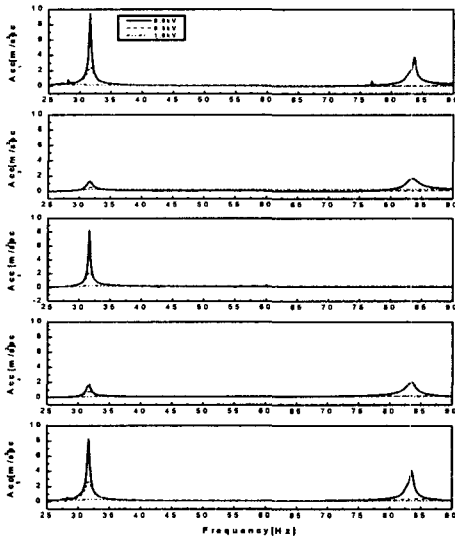


Fig. 2 Acceleration of beam with constant voltage (Ex. force : ±0.5N)

Fig. 3은 0.5N으로 가진한 경우 각 마운트에서 힘전달률을 도시한 것으로, 전압을 0, 0.5kV, 1kV로 부하함에 따라 1차 탄성 공진주파수에서 첫 번째 스프링마운트의 힘전달률은 1.9에서 0.4, 0.1로 감소되며, 2차 탄성 공진주파수에서는 0.27에서 0.04, 0.02로 감소하였다. 첫 번째 ER마운트 힘전달률은 1차 탄성 공진주파수에서는 0.78에서 0.95, 0.86으로 다소 변동하였다.

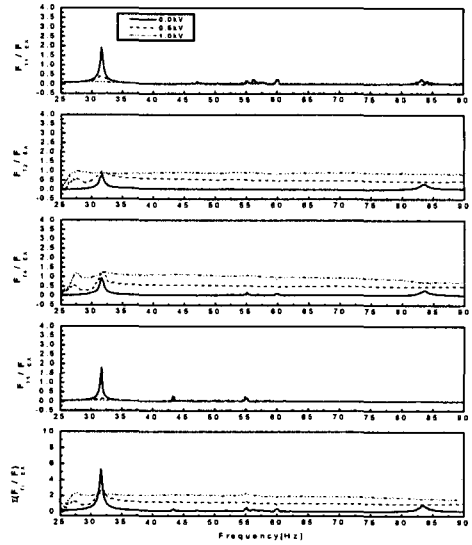


Fig. 3 Force transmissibility of beam with constant voltage (Ex. force : ±0.5N)

2차 탄성 공진주파수에서는 0.27에서 0.37, 0.75로 증가하는 경향을 보였다. 전체 마운트의 힘전달률을 합산한 전달률은 1차 공진주파수에서 전압 무부하 시 5.5에서 0.5kV 부하 시 2.5로 감소하지만, 비공진 주파수 대역에서는 약 2로 증가하였다. 한편 Fig. 4 와 Fig. 5는 속도와 전달력을 제어할 경우의 응답을 도시한 것이다.

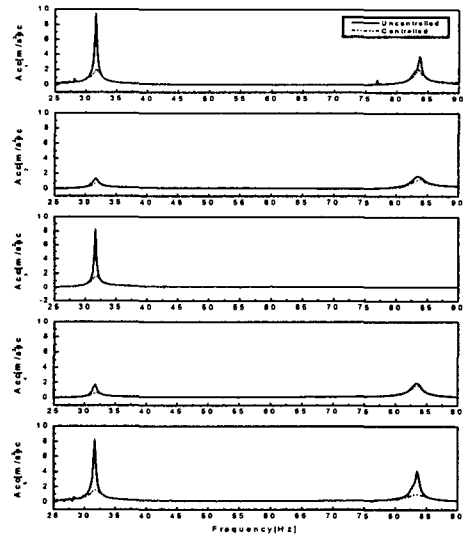


Fig. 4 Acceleration of beam with force/velocity feedback optimal control(Ex. : ±0.5N)

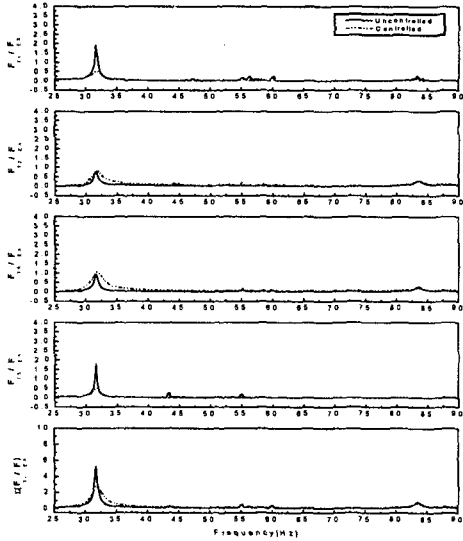


Fig. 5 Force of beam with force/velocity feedback optimal control (Ex. force : $\pm 0.5N$)

Fig. 4는 $0.5N$ 으로 가진한 경우의 보 가속도를 측정 한 것으로서, 1위치에서의 보의 가속도는 1차 탄성 공진주파수 $9.5 m/s^2$ 에서 $2 m/s^2$, 2차 탄성 공진주파수에서는 $3.8 m/s^2$ 에서 $2.0 m/s^2$ 로 가속도가 감소하였다.

Fig. 5는 $0.5N$ 으로 가진한 경우의 보의 힘전달률 선도로서, 1에 위치한 스프링마운트 힘전달률은 1차공진주파수에서 2.0에서 0.5로 감소하였으며, 2차공진주파수에서는 0.25에서 0.13으로 감소하였다. 2번에 위치한 ER마운트의 힘전달률은 1,2차 탄성 공진주파수에서 거의 변화가 나타나지 않았다. 전체 힘전달률은 1차 탄성 공진 주파수에서는 5.3에서 2.9로 감소하였으며, 2차 탄성 공진주파수에서는 0.9에서 0.7로 나타났다.

3.2 양단에 ER마운트가 설치된 보구조물

ER마운트의 위치변화에 따른 진동저감 효과를 살펴보기 위하여 Fig. 6과 같이 ER마운트를 양단에 설치하였다. 이때 입력제어력의 위치와 ER마운트 전달력이 동일한 위치이므로 상호연성이 되어 상태공간 방정식을 도출하는 것이 매우 어렵다. 따라서 ER마운트의 가변뎀핑력을 적절히 조절할 수 있는 제어계인값을 실험적으로 구하였다. 제어변수로는 양단에서의 힘과 속도를 이용하였으며, 성능지수 J 를 다음과 같이 정의하였다.

$$J = \int_0^{\infty} \{F(t)^T Q F(t) + \dot{y}(t)^T R \dot{y}(t)\} dt \quad (3-11)$$

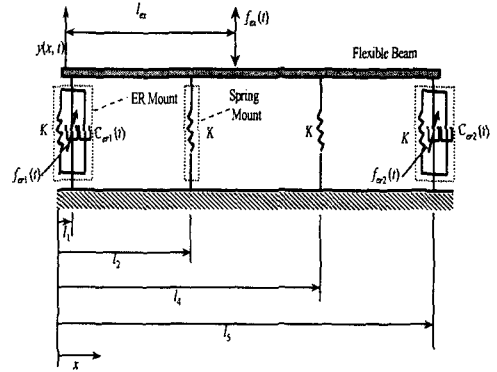


Fig. 6 Beam structure with ER mount in the both ends

여기서,

$$F(t) = [F_1(t) \ F_5(t)]^T, \quad \dot{y}(t) = [\dot{y}_1(t) \ \dot{y}_5(t)]^T$$

따라서 ER마운트의 제어뎀핑력은 다음과 같이 설정하였다.

$$u_j(t) = f_j(F_j, \dot{y}_j) = k_{j1} F_j(t) + k_{j2} \dot{y}_j(t), \quad j=1,5 \quad (3-12)$$

본 보구조물에 적용된 ER마운트는 반능동형 작동기이므로 식(3-9)와 같은 반능동조건을 고려하여야 한다. ER마운트에 부과된 전압은 위의 식(3-10)를 이용하여 결정할 수 있는데 다만 $j=2,4$ 대신 $j=1,5$ 를 이용한다. 실험시 양단 ER마운트 하부에 힘검출기를 설치하여 필요한 힘신호(Force Signal)를 측정하여 사용하였으며, 동일한 위치에 가속도계를 설치하여 가속도 신호를 측정하였다. 설치된 가속도계 신호로부터 신호증폭기(B&K2635)에 내장된 적분기능을 이용하여 적분을 수행하여 필요한 속도성분 구하였다.

Fig. 7는 $0.5N$ 으로 가진한 경우의 보 구조물의 가속도를 측정 한 것으로 1차 탄성 고유진동수는 $31.6(Hz)$ 이며, 2차 탄성 고유진동수는 $87.6(Hz)$ 로 중앙부에 ER마운트가 설치된 보 구조물보다 2차 탄성모드에서 약간 높게 나타났다. 제어로직 적용시 가속도가 전체적으로 감소하였으며, 1번 위치에서의 보의 가속도는 1차 탄성 공진주파수에서는 $7.3 m/s^2$ 에서 $0.8 m/s^2$, 2차 탄성 공진주파수에서는 $3.5 m/s^2$ 에서 $0.9 m/s^2$ 으로 가속도가 감소하였다.

Fig. 8은 $0.5N$ 으로 가진한 경우의 보 구조물의 힘전달률 선도이다. 힘전달률이 가장 큰 1차 탄성 공진주파수 대역에서 ER마운트의 힘전달률이 1.4에서 0.6로 감소하며, 비공진 주파수 대역에서 ER마운트 전달력의 증가가 미약한 것으로 나타나, 진동제어가 효과적으로 수행된 것을 알 수 있다.

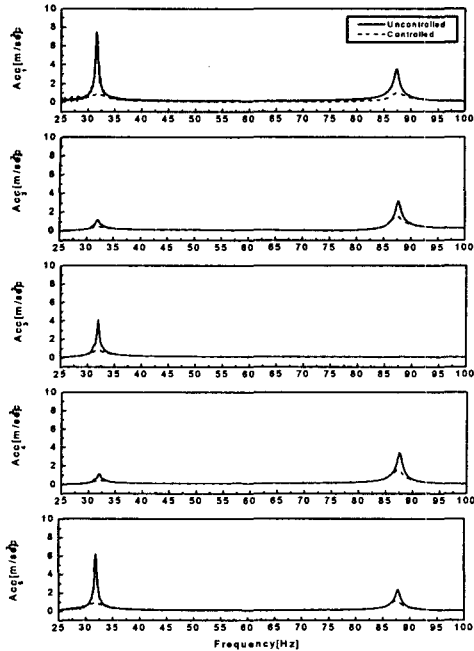


Fig. 7 Acceleration of beam with force/velocity feedback control(Ex. force : $\pm 0.5N$)

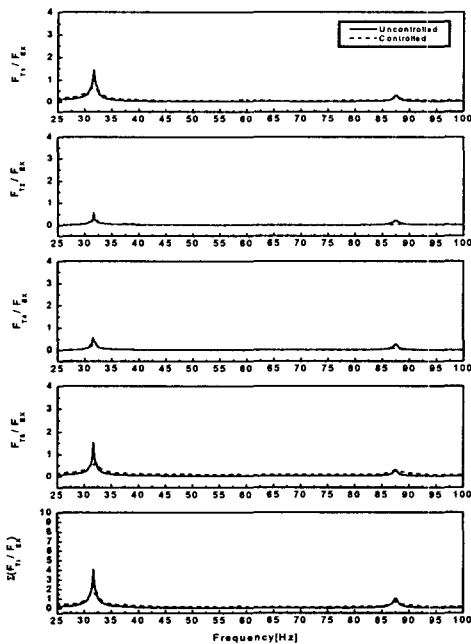


Fig. 8 Force of beam with force/velocity feedback control(Ex. force : $\pm 0.5N$)

4. 결론

ER마운트가 적용된 보조조물과 관련 시험장치를 이용하여 고전압 부하에 따른 보의 가속도와 보조조물의 힘전달률을 주파수 영역에서 해석하였다. 보조조물의 가속도는 ER마운트에 부하되는 전압이 높을수록 많이 감소되는 특성을 보였으며, 이에 따른 스프링마운트의 힘전달률도 함께 감소되었다. 하지만, 고전압부하로 인한 가변댐핑력의 증가는 ER마운트의 힘전달률을 비공진 주파수대역에서 상승시키는 결과를 초래하였다. 이는 보조조물의 진동을 감소시키기 위한 적절한 제어알고리즘이 필요함을 의미한다. 따라서, 보의 진동저감을 목적으로 마운트의 전달력과 보의 진동을 동시에 고려한 제어알고리즘을 설계하여 보조조물의 진동저감 효과를 실험적으로 고찰하였다. 결국, 보의 진동과 각 마운트의 힘전달력 측면에서 우수한 진동저감 성능을 보였다.

참고문헌

- (1) Williams, E. W., Rigby, S. G., Sproston, J. L., Stanway, R., 1993, "Electrorheological fluids applied to an automotive engine mount", Journal of non-newtonian fluid mechanics 47, pp221-238
- (2) Choi, S. B. and Choi, Y. T., 1999, "Sliding mode control of shear-mode type ER engine mount", KSME International Journal 13, pp26-33
- (3) 홍성룡, 최승복, 정우진, 함일배, 김두기, 2000, "작동 모드에 따른 ER마운트의 동특성 해석", 한국소음진동공학회 논문집 제10권 제5호, pp. 819~829
- (4) Hong, S. R., Choi, S. B., Jung, W. J., Ham, I. B., Kim, D. K., 2001, "Vibration control of an ER mount subjected to high static loads", Journal of sound and vibration 242, pp740-748
- (5) Hong, S. R., Choi, S. B., Jung, W. J., Jeong, W. B., 2001, "Vibration isolation of structural systems using squeeze mode ER mount", 8th International conference on ER fluid and Magnetic Rheological(MR) suspensions
- (6) Meirovitch, L., 1990, Dynamics and Control of Structures, John Wiley and Sons, chap. 6