

200 kg급 압착모드형 ER 마운트의 진동제어성능 고찰

Investigation on Vibration Control of Squeeze Mode ER Mount Subjected to 200 kg of Static Load

정우진[†] · 정의봉* · 홍성룡** · 최승복**

Woo-Jin Jung, Weui-Bong Jeong, Sung-Ryong Hong and Seung-Bok Choi

(2002년 7월 31일 접수 : 2002년 9월 27일 심사완료)

Key Words : ER Mount(ER 마운트), Squeeze Mode(압착 모드), Bingham Model(빙햄 모델), Damping Force(감쇠력), Sky-hook Control(스카이훅 제어), 200 kg of Static Load(200 kg 정하중)

ABSTRACT

This paper presents vibration control performance of a squeeze mode ER mount for high static load. After experimentally investigating the field-dependent damping force under the squeeze mode motion, a squeeze mode ER mount which can support 200 kg of static load is designed and manufactured. Displacement transmissibility of the proposed ER mount is experimentally evaluated in frequency domain with respect to the intensity of the electric field, and a sky-hook control algorithm is designed to attenuate unwanted vibration. Vibration isolation capabilities of the flow mode ER mount and rubber mount are compared to those of the proposed squeeze mode ER mount.

1. 서 론

동적 시스템(dynamic system)에서 발생하는 원하지 않는 진동이나 주요 전달경로를 통해서 하부 구조로 전달되는 진동을 감소시키기 위한 여러 가지 방안들이 연구되고 있으며, 이들 방안 중 하나가 부하되는 전기장의 강도에 따라 유변학적 성질(rheological property)이 순간적으로 변하는 전기유동유체(electro-rheological fluid, ER 유체)를 이용하는 것이다. 지금까지의 ER 마운트는 주로 일반 소형승용차에 사용될 수 있는 엔진용 ER 마운트가 연구되어 왔다.^(1~5) 현재까지 연구된 ER 마운트는 주로 유동모드(flow mode)형 ER 마운트이며, 허용하중이 최대 70 kg 정도이다. 70 kg급의 유동모드형 ER 마운트는 작

은 수의 전극들과 짧은 전극길이를 이용하는 것이 가능하므로 상대적으로 제작이 용이하다. 유동모드형 ER 마운트의 가장 큰 장점은 동적 거동이 발생하는 동안에도 전극 간극(electrode gap)이 일정하게 유지되는 것이다. 유동모드형 ER 마운트는 변위가 크게 발생될수록 큰 힘을 발휘하는 특징이 있다.⁽⁶⁾ 따라서 큰 변위가 발생하는 저주파 대역에서 유용하게 사용될 수 있다. 한편 ER 마운트의 허용하중이 증대될수록 여러 가지 요인들로 인하여 제작시 어려움이 증가하는데, 저자들은 200 kg급 유동모드형 ER 마운트를 제안하고 진동제어성능을 고찰하였다.⁽⁷⁾

일반 기계류 및 합정 탑재기계류들은 정상작동을 시작하면 일반적으로 진동변위가 20 Hz 이상에서 최대 0.1~0.2 mm 이하이다. 따라서 20 Hz 이상 주파수 대역에서는 작은변위의 진동이 발생하므로 유동모드형 ER 마운트의 적용이 어렵다. 한편 기계류에서 발생되어 하부구조로 전달되는 진동감소가 중요한 설계 요소로 대두됨에 따라 큰 진동원이 존재하는 경우, 2단 탄성 마운트 시스템을 채택하는 추세이며, 특히 합정에서는 엔진등의 주요 진동원에는 2단 탄성마운

[†] 책임저자, 정회원, 국방과학연구소
E-mail : wjjung@add.re.kr
Tel : (055) 540-6154, Fax : (055) 542-3737
^{*} 정회원, 부산대학교 기계공학부
^{**} 정회원, 인하대학교 기계공학과

트 시스템의 사용이 필수적이다. 탄성 마운트 시스템의 핵심요소는 마운트 및 이를 설치할 수 있는 받침대 구조물이다. 이때 받침대 구조물의 유연성(flexibility)으로 인한 공진모드가 존재하며, 이들 공진모드에 의해서 탄성 마운트 시스템의 진동감소 성능이 악화된다. 그리고 합정에서 발생하는 방사소음의 저주파 대역성분은 주로 탄성 마운트 시스템 받침대의 저주파 공진모드와 깊은 상관성이 존재한다. 그러므로 탄성 마운트 시스템 받침대의 저주파 공진모드 제어가 필요하다. 이를 위하여 저자들은 3 kg급 압착모드형 ER 마운트를 제안하고, 이를 보 구조물과 프레임 구조물의 진동제어에 적용하였다.⁽⁸⁻⁹⁾

본 논문에서는 100 Hz 이내에서 구조물의 탄성 공진모드 제어와 진동저감을 목적으로 200 kg급 압착모드형 ER 마운트를 제안하고, 진동제어 성능을 실험적으로 고찰하였다. 이를 위하여 마운트의 수학적 모델로부터 운동방정식을 구성하고, 이를 이용하여 200 kg급 압착모드형 ER 마운트를 설계/제작하였다. 제작된 200 kg급 압착모드형 ER 마운트와 실험장치를 이용하여 변위 응답을 기준으로 진동저감 성능을 실험적으로 고찰하였으며, 스카이훅 제어알고리즘을 적용하여 200 kg급 유동모드형 ER 마운트 및 200 kg급 고무마운트와의 진동저감 성능을 비교하였다.

2. 압착모드에서의 ER 유체 거동

압착모드형 ER 마운트에서 발생하는 ER 유체의 거동은 식 (1)과 같이 빙햄(Bingham)모델로 표현할 수 있다.

$$\tau = \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma}, \quad \tau_y(E) = \alpha E^\beta \quad (1)$$

이때 τ 는 전체 전단 응력(shear stress)이며, E 는 전기장(kV/mm), $\tau_y(E)$ 는 전기장 강도에 따른 항복 응력(yield stress), η 는 전기장 무부하 시 ER 유체의 점성계수, $\dot{\gamma}$ 는 변형률(stain rate)이다. 식 (1)로 표현되는 빙햄모델에 나타난 α , β 는 실험을 통해서 결정되는 ER 유체 상수값들이다. 이를 위하여 Fig. 1과 같이 압착모드 유체유동이 나타나도록 실험장치를 설계하였으며, ER 유체는 화학 처리된 전분을 전도성 입자로, 기본용액으로는 실리콘 오일을 이용하여 조성하였다.

압착모드에서 ER 유체에 작용하는 전체 압착력은

전기장에 의한 가변 감쇠력(F_{er})과 전기장 무부하 시의 감쇠력(F_η)로 구성되며⁽⁹⁾, 이들은 Fig. 1에 나타난 load cell에 의해서 측정된다. 본 논문에 사용된 실험장치 전극의 지름은 30 mm이며, 전극간의 간극은 3 mm이다.

압착모드 빙햄 실험장치에서 측정되는 압착력은 다음과 같다.

$$F_A(t) = F_\eta(t) + F_{er}(t) \\ = -\frac{3}{2} \pi \eta R^4 \frac{\dot{h}}{h^3} - \frac{4}{3} \pi \eta R^3 \tau_y \left(\frac{V}{h} \right) \frac{\text{sgn}(\dot{h})}{h} \quad (2)$$

여기서, $F_A(t)$ 는 Fig. 1의 압착모드 빙햄 실험장치에서 두 원관형태의 전극이 상대운동 시에 발생하는 압착력이며, 전기장 무부하 시의 압착력 $F_\eta(t)$ 와 전기장 부하 시의 압착력 $F_{er}(t)$ 의 합으로 표현된다. R 은 전극반지름, h 는 전극간격, \dot{h} 는 전극간 상대속도, V 는 전극에 부하되는 전압의 세기이다. 전기장 무부하 시 측정된 압착력 $F(t)$ 는 $F_\eta(t)$ 가 되므로 이미 알고 있는 전극반지름 R , 전극간격 h , 전극간 상대속도 \dot{h} 의 값들을 이용하면 $F_\eta(t)$ 로부터 전기장 무부하 시 ER 유체의 점성 η 를 추정할 수 있다. 전극간극 h 는 초기간극 h_0 와 정현파 형태의 가진변위 $h_{ex} (= h_{ex0} \sin(2\pi ft))$ 의 합으로 구성되며, h_{ex0} 는 가진 진폭을 나타낸다. 다음으로 ER 유체에 전기장 E 나 전압 V 를 일정하게 부하한 후 전체 압착력 $F_A(t)$ 의 측정결과와 식 (2)를 이용하면 항복응력 $\tau_y(E)$ 를 도출할 수 있다. 본 논문에서는 일정한

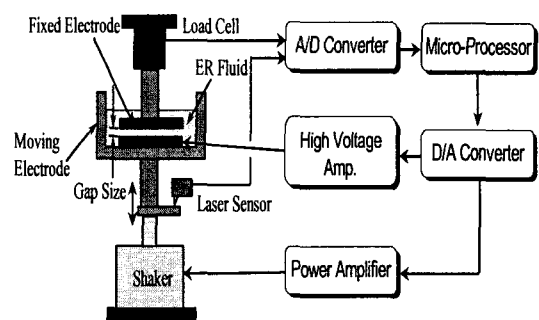


Fig. 1 Schematic diagram of squeeze mode Bingham test apparatus

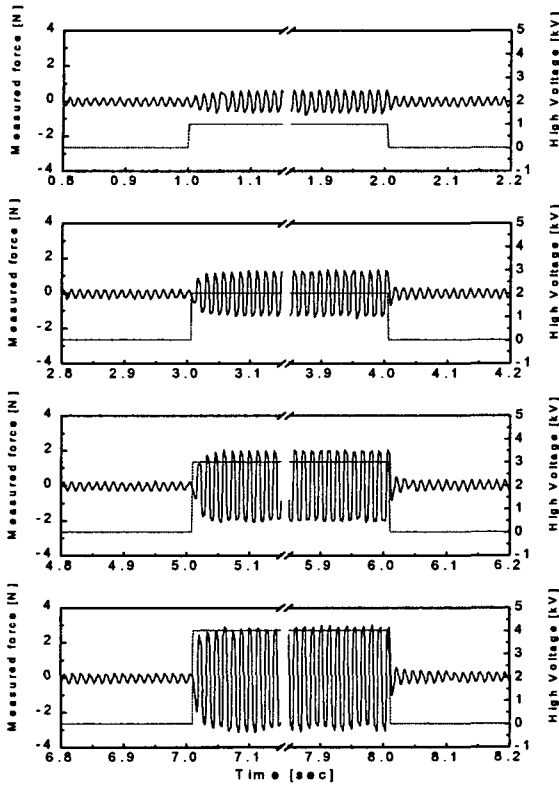


Fig. 2 Time response of damping force of ER fluid under squeeze flow (excitation : $\pm 40 \mu\text{m}$, 75 Hz)

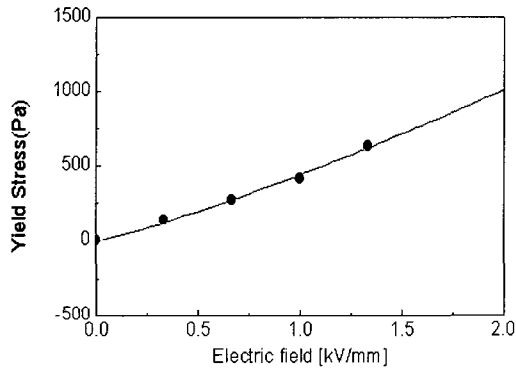


Fig. 3 Bingham property of ER fluid under squeeze mode

전압 V 를 부하하여 전체 압착력을 측정하며, 시간에 따라 변하는 전극간극 h 가 초기간극 h_0 와 동일한 순간에서의 전기장 ($E = V/h_0$)에 대한 항복응력을 도출하였다. 결국, 여러 세기의 전기장에 대한 항복응력을 구하면, Fig. 3과 같이 나타나며, 항복응력을 전기

장에 대한 지수함수로 표현하면 ER 유체의 고유특성치인 α 와 β 를 구할 수 있다.

Fig. 2에는 Fig. 1의 실험장치를 이용하여 75 Hz 주파수 및 진폭 $\pm 40 \mu\text{m}$ 가진시 load cell로 측정된 전체 압착력에 대한 시간응답을 나타낸 것이다. 이때 1 kV에서는 0.55 N, 4 kV에서는 2.8 N으로 측정되었다.

Fig. 3에는 ER 유체가 압착모드 거동을 하는 동안에 측정된 전체 압착력의 시간응답 결과인 Fig. 2와 식 (2)를 이용하여 추출한 ER 유체의 항복 응력을 도시하였다.

Fig. 2와 Fig. 3으로부터 전기장이 증가할수록 항복 응력이 증가하고 있음을 알 수 있다. 위의 측정결과로부터 ER 유체의 상수값들과 전기장 무부하 시의 점성감쇠계수는 $\alpha = 437$, $\beta = 1.20$, $\eta = 0.08$ 로 측정되었다.

3. 압착모드형 ER 마운트의 동적 모델

본 논문에서 제안한 200 kg급 압착모드형 ER 마운트의 형상과 수학적 모델을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 이때 200 kg의 정하중을 지지하는 부분은 상용 고무 마운트(E1N101-04, Paulstra사, 프랑스)를 사용하였다. 하부전극은 base에 고정되었으며, 상부전극은 상하거동이 자유롭게 이루어질 수 있도록 하였다. 이로부터 상부전극의 상하운동에 따라서 압착유동이 발생된다.

제안된 ER 마운트 하부를 통한 전달력과 운동방정식은 Fig. 5의 수학적 모델로부터 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$F(t) = K_s(x(t) - y(t)) + B_f(t)(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) + F_{er}(t) \quad (3)$$

$$\text{단, } B_f(t) = B_s + B_{er}(t) = B_s + \frac{3\pi\eta R^4}{2[h_0 + (x(t) - y(t))]^3}$$

$$F_{er}(t) = \frac{4}{3} \pi R^3 \tau_y(E) \frac{\text{sgn}(\dot{x}(t) - \dot{y}(t))}{[h_0 + (x(t) - y(t))]}$$

$$M\ddot{x}(t) = -F(t)$$

$$= -K_s(x(t) - y(t)) - B_f(t)(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) - F_{er}(t) \quad (4)$$

이때 B_s , K_s 는 고무마운트의 감쇠 및 강성계수, $B_{er}(t)$ 는 전기장 무부하시 ER 유체의 감쇠계수,

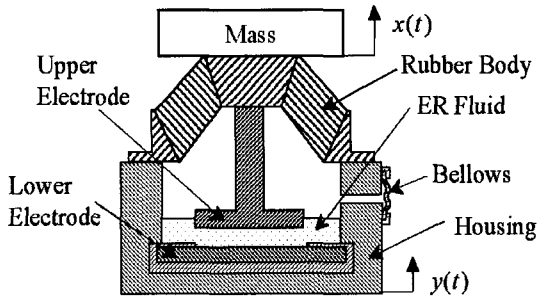


Fig. 4 Configuration of the squeeze mode ER mount

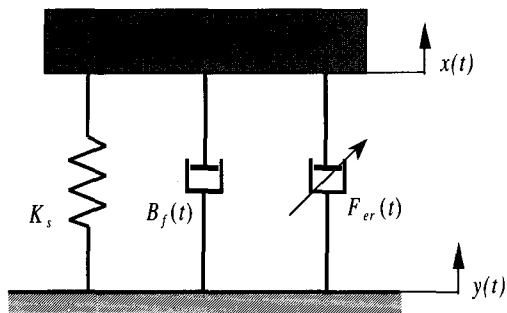


Fig. 5 Mathematical model of the squeeze mode ER mount

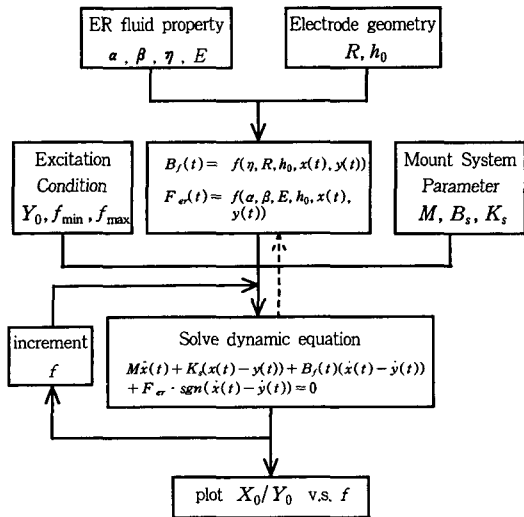


Fig. 6 Flow chart for the dynamic analysis of the squeeze mode ER mount

$x(t)$ 는 질량의 변위, $y(t)$ 는 입력 가진 변위, h_0 는 초기 전극간격, R 은 전극지름, $F_{er}(t)$ 는 전기장에 의한 제어가능한 감쇠력이다. 식 (3)으로부터 초기 전극간격 h_0 와 상대변위 $x(t) - y(t)$ 가 작아질수록

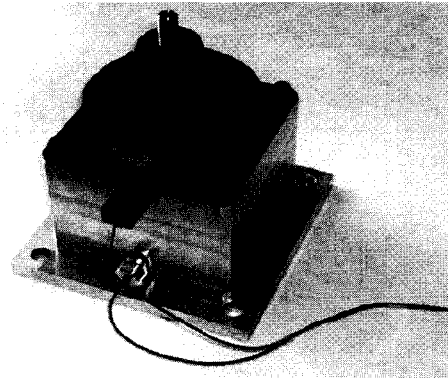


Fig. 7 Assembly of the squeeze mode ER mount

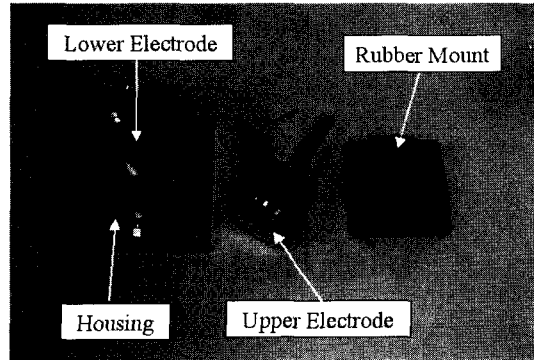


Fig. 8 Components of the squeeze mode ER mount

감쇠력이 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 압착모드형 ER 마운트의 감쇠력은 전기장 세기에 의해서 제어할 수 있음도 알 수 있다.

식 (4)를 이용하여 200 kg급 압착모드형 ER 마운트를 설계/제작하였으며, 해석 흐름도를 Fig. 6에 나타내었다.

200 kg급으로 설계/제작된 압착모드형 ER 마운트는 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

제한된 압착모드형 200 kg급 ER 마운트의 외곽크기는 W220 mm × L220 mm × H250 mm이며, 초기 전극간격 h_0 는 3 mm이고, 전극지름은 100 mm이다.

4. 200 kg급 ER 마운트의 진동제어 성능

4.1 실험장치 구성

200 kg급 압착모드형 ER 마운트의 진동감소효과를 시험하기 위한 실험장치 개략도가 Fig. 9에 도시되었다.

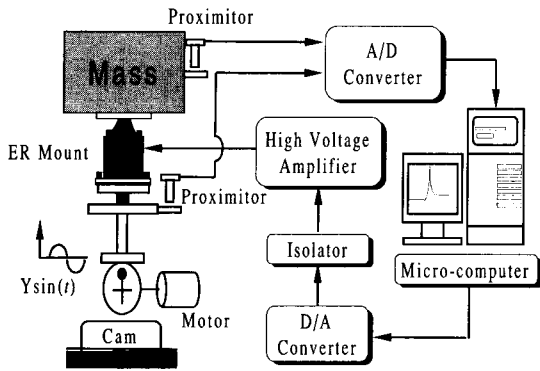


Fig. 9 Schematic diagram of experimental apparatus for ER mount

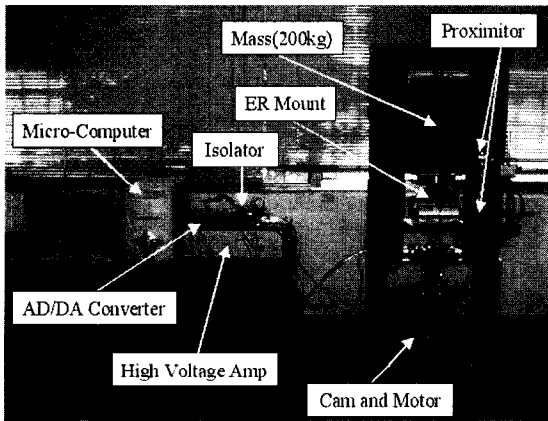


Fig. 10 Photograph of experimental apparatus for ER mount

$\pm 100 \mu\text{m}$ 의 정현파를 발생시킬 수 있도록 설계된 편심캠을 이용하여 ER 마운트 하부를 가진시키면서 가진부의 변위를 측정하는 동시에 부하질량(200 kg)의 진동변위를 측정하였다. 부하질량은 시험장치 구조물의 상단에 위치한 선형가이드에 의하여 수직방향으로만 운동할 수 있도록 구속된다. 가진변위는 전기모터(3 phase AC motor, 25 HP)의 회전축에 편심캠을 장착한 후 이 편심캠을 회전시켜 정현파 가진을 발생시켰다. 부하질량의 변위와 편심캠으로부터의 가진변위는 비접촉 센서(proximitior)를 이용하였다. 이 센서들에서 발생된 변위신호들은 신호변환기를 통하여 컴퓨터에 입력, 저장되며, 이를 이용하여 변위 전달률을 구할 수 있다.

D/A변환기에서 출력된 제어입력전압은 고전압 증폭기(high voltage amplifier, Trek-10/10A)를 통하여, 1000배 증폭된 후 ER 마운트 전극에 부하된다.

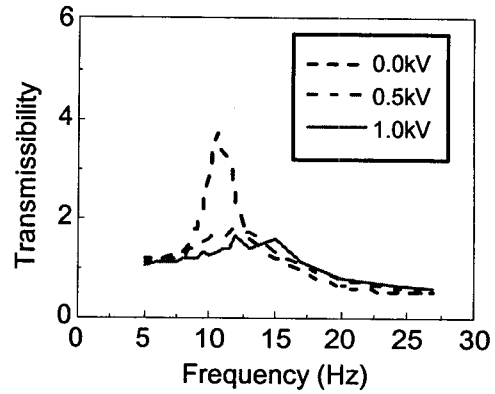


Fig. 11 Measured displacement transmissibility with constant voltage

그리고, 고전압의 역류를 방지하기 위한 전기절연기(isolator)가 사용되었다.

본 실험에 사용된 제어기의 샘플링 주파수는 2000 Hz이다. 실험장치에 대한 전경을 Fig. 10에 나타내었다.

4.2 일정전기장에서의 진동제어 성능

Fig. 11에 일정전압 부하시 200 kg급 압착모드형 ER 마운트의 변위응답에 대한 실험결과를 도시하였다. 이때 가진변위는 $\pm 100 \mu\text{m}$ 이다.

전압 무부하시 공진주파수 10.5 Hz에서 전달률은 3.7로 측정되었으며, 전압을 증가시킴에 따라, 공진점에서의 전달률이 점진적으로 낮아져서, 1 kV 전압 부하시 공진점 대역에서의 전달률이 1.3으로 낮아져 진동감소효과가 나타나고 있다. 이는 전압 부하로 인하여 감쇠력이 증대된 결과이다. 한편 공진점 대역을 벗어난 15 Hz이상의 주파수 영역에서는 전압 무부하시보다 진동감소성능이 악화되었다. 부하전압이 높을수록 ER 유체 입자들의 결합력이 강하게 되어, ER 유체의 유동저항이 커져서, 감쇠력이 증대되었기 때문이며, 이로 인하여 공진주파수의 $\sqrt{2}$ 배 이상의 주파수 영역에서는 진동절연효과가 저하되었다.

본 연구에서 ER 마운트를 구성하는 고무마운트는 변형량에 따라 강성값이 변화하는 비선형적 특성을 가지고 있어서, 고무마운트의 변형량이 작은 경우의 고무마운트 강성값이 변형량이 큰 경우보다 큰 특성을 보인다. 전기장을 부하하면, ER 마운트의 감쇠력이 증가하게 되며, 공진주파수에서의 전달률은 전기장을 부하하지 않은 경우보다 낮아지게 된다. 결국 전

달률이 낮아지면서 고무마운트의 상대 변형량도 작아지게 되어 고무마운트의 강성이 커지게 되는 결과를 보이게 된다. 따라서, 고무마운트의 강성값을 변형량에 대한 함수인 $1.35E6 - 1.52E9 \times |x(t) - y(t)|$ (N/m)로 표현하여 시뮬레이션에 적용하였다.

Fig. 12에는 0 kV, 0.5 kV, 1.0 kV의 일정전압 부하시 변위응답에 대한 실험결과와 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 공진주파수 이전에서는 차이가 발생하고 있으나, 전반적인 경향은 일치하고 있으며, 시뮬레이션에 사용된 해석모델(Fig. 5)의 타당성을 확인할 수 있다. 또한 합정용 마운트는 전달력 감소성능이 매우 중요한 요소이므로 ER 마운트의 전달력 감소성능을 반드시 확인하여야 하나, 200 kg급 ER 마운트의 전달력 측정은 여러 가지 문제점으로 인하여 매우 어렵다. 따라서 해석모델과 식 (3), 식 (4)를 이용하여 전달력 (F_r)에 대한 시뮬레이션을 실시하고, 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 이 결과 15 Hz 이상에서 전달력이 전압 무부하시보다 증가되고 있다.

Fig. 11과 Fig. 13으로부터 일정전압 부하시 공진주파수 대역이상에서는 진동성능이 나쁘게 나타나고 있으므로 적절한 제어알고리즘의 적용이 필요하다는 것을 알 수 있다.

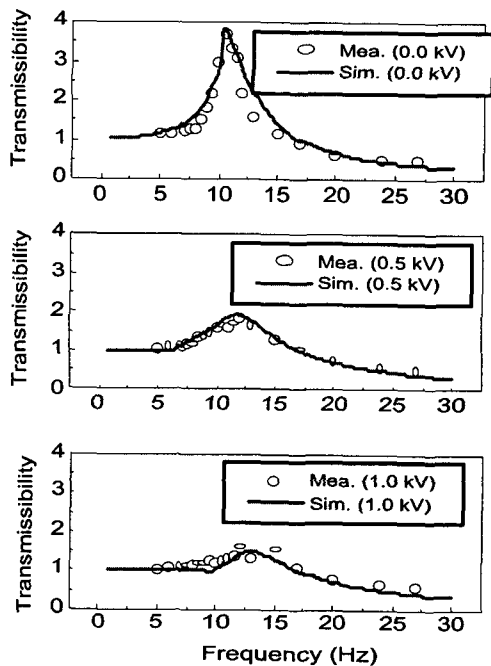


Fig. 12 Comparison between measured and simulated results with constant voltage

4.3 제어알고리즘을 적용한 진동제어 성능

본 논문에서는 제어 알고리즘으로 반능동 제어 (semi-active control)에 효과적인 스카이훅(skyhook) 알고리즘을 적용하였다.⁽¹⁰⁾ ER 마운트의 제어 시험에 적용된 스카이훅 제어기는 다음의 수식으로 표현될 수 있다.

$$u(t) = c_{sky}\dot{x}(t) = F_{er}(t) \quad (5)$$

여기서, c_{sky} 는 ER 마운트의 스카이훅 제어이득치이며, 물리적으로는 감쇠계수를 의미한다. 본 논문에서는 $c_{sky} = 4000$ 을 적용하였다. ER 마운트는 반능동식 작동기이므로 위의 수식에서 구해진 제어신호는 ER 마운트의 상/하부간의 상대변위를 고려한 다음과 같은 반능동조건을 만족하여야 한다.

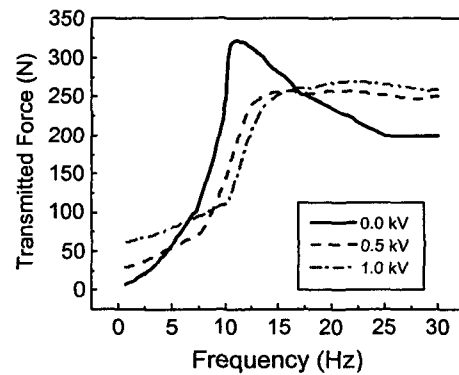


Fig. 13 Simulated transmitted forces of the squeeze mode ER mount with constant voltage

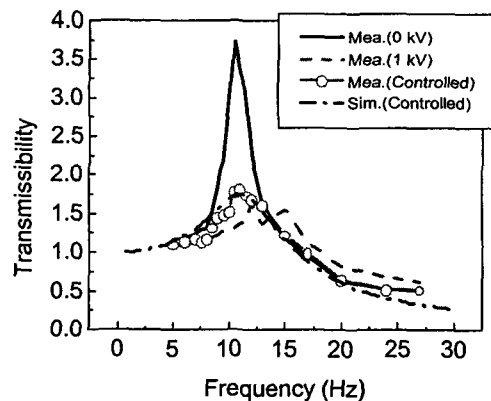


Fig. 14 Comparison between measured and simulated results with constant voltage and skyhook controller

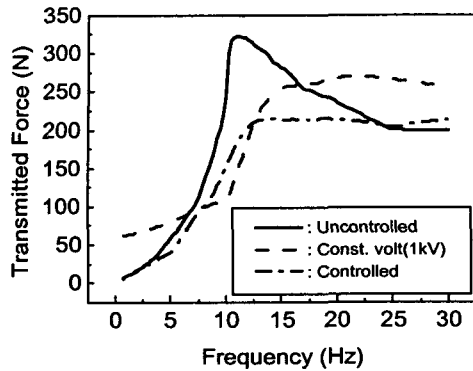


Fig. 15 Simulated results of transmitted forces of the squeeze mode ER mount with skyhook controller

$$u(t) = \begin{cases} u(t) & \text{for } \dot{x}(t)(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) > 0 \\ 0 & \text{for } \dot{x}(t)(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

이는 물리적으로 안정된 시스템에서 에너지를 소모하는 방향만으로 제어기가 작동된다는 것을 의미한다. 식 (6)을 만족하는 $u(t)$ 가 결정되면, 압착모드형 ER 마운트에 부하되어야 할 입력 전압을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V(t) = (h_o + x(t) - y(t)) \left(\frac{1}{a} \frac{3}{4} \frac{h_o + x(t) - y(t)}{\pi R^3} u(t) \right)^{1/3} \quad (7)$$

Fig. 14에서는 일정전압을 부하한 경우와 스카이훅 알고리즘을 적용한 진동제어결과를 변위응답을 이용하여 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 이 결과 스카이훅 알고리즘을 적용한 진동제어 성능이 일정전압을 부하한 경우보다 공진주파수 대역에서는 약간 저하되지만, 전체 주파수대역에서는 비교적 양호한 성능을 보이고 있다. 그리고 시뮬레이션 결과도 실험 결과와 비교적 잘 일치하고 있다.

Fig. 15에는 전압 무부하시, 일정 전압(1 kV) 부하시 및 스카이훅 제어기 적용시 ER 마운트의 전달력에 대한 시뮬레이션 결과를 도시하였다. 이로부터 공진 주파수대역이상에서는 스카이훅 제어기를 적용한 경우가 전달력 측면에서도 양호한 결과를 보이고 있다. 그러나 24 Hz 이상에서는 비제어시 보다 전달력이 커지는 현상을 보이고 있어 스카이훅 제어기로 전달력까지 제어하기에는 어려움이 있음을 알 수 있다.

Fig. 16은 가진변위가 $\pm 100 \mu\text{m}$ 인 경우에 대하여,

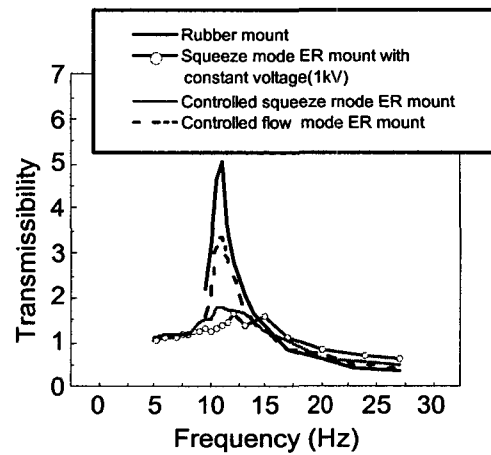


Fig. 16 Measured displacement transmissibility of ER mount of different operation modes with skyhook controller

스카이훅 제어기를 적용하여 얻은 압착모드형 ER 마운트의 변위 전달률과 고무 및 유동모드형 ER 마운트의 응답특성⁽⁷⁾을 함께 도시한 것이다. 압착모드형 ER 마운트에 스카이훅 제어를 적용함으로써, 공진 주파수대역에서 양호한 진동감소효과를 얻을 수 있었으며, 1kV의 고전압을 일정하게 부하하는 경우에 발생한 비공진 주파수에서의 진동감소성능 악화가 다소 작게 나타나고 있다. 전체 주파수 영역을 고려한 진동감소성능을 비교하면, 압착모드형 ER 마운트가 가장 우수한 성능을 보이고 있다.

5. 결론

하중이 200 kg인 동적시스템을 지지할 수 있는 압착모드형 ER 마운트를 제안하고, 이에 대한 진동제어 성능을 실험적으로 고찰하였다. 스카이훅 제어기를 적용하여 공진 주파수 근처에서 양호한 진동제어 성능을 실현하였다. 또한 비공진 주파수대역에서 진동제어 성능이 저하되는 현상도 감소시켰다.

작은 변위의 진동가진시 고려된 전체 주파수 영역의 진동감소 성능에서는 유동모드형 ER 마운트보다 압착모드형 ER 마운트가 더 우수한 진동감소 성능을 보이는 것으로 나타났다.

이로부터 200 kg급 압착모드형 ER 마운트의 유용성을 확인하였다. 본 논문에서 제안된 방법을 적용하면 200 kg급 이상의 고하중용 압착모드형 ER 마운트

의 설계 및 제작도 가능할 것으로 생각된다. 한편 ER 마운트의 기본성질이 감쇠력 증대를 통한 진동감소성능 향상이므로 변위응답 감소성능이 높을수록 ER 마운트의 전달력도 증가된다. 따라서 변위(또는 속도)와 전달력을 동시에 제어할 수 있는 적절한 제어알고리즘의 적용이 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

(1) Duclos, T. G., 1987, "An Externally Tunable Hydraulic Mount which uses Electro-rheological Fluid", SAE Technical Paper Series 870963.

(2) Morishita, S. and Mitsui, J., 1992, "An Electrically Controlled Engine Mount Using Electro-rheological Fluid", SAE Technical Paper Series 922290.

(3) Williams, E. W., Rigby, S. G., Sproston, J. L. and Stanway, R., 1993, "Electrorheological Fluids Applied to an Automotive Engine Mount", *Journal of Non-newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 47, No. 221, pp. 221~238.

(4) Choi, S. B. and Choi, Y. T., 1999, "Sliding Mode Control of Shear-mode Type ER Engine Mount", *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 26, pp. 26~33.

(5) Choi, S. B., Choi, Y. T., Cheong, C. C. and

Jeon, Y. S., 2000, "Performance Evaluation of a Mixed Mode ER Engine Mount via HILS", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 10, pp. 671~677.

(6) 홍성룡, 최승복, 정우진, 함일배, 김두기, 2000, "작동모드에 따른 ER 마운트의 동특성 해석", *한국소음진동공학회지(현 논문집)*, 제 10 권 제 5 호, pp. 819~829.

(7) Hong, S. R., Choi, S. B., Jung, W. J., Ham, I. B. and Kim, D. K., 2001, "Vibration Control of an ER Mount Subjected to High Static Loads", *Journal of sound and vibration*, Vol. 242, No. 4, pp. 740~748.

(8) Hong, S. R., Choi, S. B., Jung, W. J. and 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, France.

(9) 정우진, 김두기, 정의봉, 홍성룡, 최승복, 2002, "압착모드형 ER 마운트를 이용한 보 구조물의 진동저감 해석", *한국소음진동공학회논문집*, 제 12 권 제 7 호, pp. 557~564.

(10) Karnopp, D. and Crosby, M. J., *Vibration Control Using Semi-active Force Generator*, 1974, *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 96, No. 619.