

〈논 문〉

## 작동모드에 따른 ER마운트의 동특성 해석

### Dynamic Characteristics of ER Mounts with Different Operation Modes

홍성룡\* · 최승복\*\* · 정우진\*\*\* · 함일배\*\*\* · 김두기\*\*\*

Sung-Ryong Hong, Seung-Bok Choi, Woo-Jin Jung, Il-Bae Ham and Du-Ki Kim

(2000년 4월 28일 접수 : 2000년 8월 7일 심사완료)

**Key Words** : Electro-Rheological Fluid(전기유동 유체), ER Mount(ER마운트), Flow Mode(유동모드), Shear Mode(전단모드), Dynamic Stiffness(동강성), Transmissibility(전달률), Vibration Control(진동제어)

#### ABSTRACT

Dynamic characteristics of two different types of ER(electro-rheological) mounts : flow and shear mode types are analyzed and compared. As a first step, field-dependent Bingham models of a chemically treated starch/silicone oil-based ER fluid are empirically identified under both flow and shear mode conditions. The models are then incorporated to the governing equation of the corresponding mode ER mount. For the reasonable comparison between two ER mounts, electrode parameters such as electrode gap are designed to be same. Dynamic stiffness and displacement transmissibility of each ER mount are evaluated in frequency domain with respect to the intensity of electric field. In addition, vibration control capability of each ER mount is investigated in both frequency and time domains by employing the skvhook controller.

#### 1. 서 론

기계류에서 발생하는 진동의 차단과 정하중의 지지를 위해서는 성능이 우수한 마운트지지 시스템이 요구된다. 기계류의 진동이 지지구조로 이동되는 전달력을 감소시키기 위해서는 작은 강성과 댐핑을 갖는 마운트가 효과적이지만, 기계류의 움직임 제어와 마운트의 내구성 측면에서는 큰 강성의 마운트가 요구된다. 이러한 상반된 요구특성으로 인하여 마운트지지 시스템의 공진이 존재하는 저주파수 가진영역에서는 가진진폭과 충격력이 크기 때문에, 큰 강성으로 기계류의 과도한 움직임을 제한하고 큰 댐핑력으로 충격력을 감소시켜야 한다. 하지만, 가진빈위와 충격력이 작은 고주파수 가진영역에서는 작은 댐핑력으로 기계류의 진동을 지지구조와 절연

시켜야 한다.

기존 고무마운트의 강성과 댐핑은 탄성복원과 진동감쇠특성을 동시에 갖는 고무재료의 특성에 의하여 결정되며, 가진주파수와 가진폭에 따른 변화가 거의 없다. 이러한 고무마운트는 작은 가진폭의 고주파수 영역에서는 진동과 구조전달소음의 절연에는 매우 효과적이거나, 댐핑이 작으므로 큰 가진폭의 저주파수 영역에서의 진동절연성능의 저하를 피할 수 없다.<sup>(1)</sup> 이러한 고무마운트의 단점을 보완하여 두 주파수 영역 모두의 요구특성을 충족시키기 위하여 제안된 유체마운트는 고무의 강성을 이용하여 정하중을 지지하며, 유체의 점성과 관성트랙의 기하학적인 형상을 조절하여, 특정한 저주파수영역에서의 효과적인 진동절연효과를 얻을 수 있는 반면에 다른 주파수영역에서 진동절연성능이 저하되는 단점을 가진다.<sup>(2,3)</sup> 기존의 수동식 마운트가 갖는 한계를 극복하여 넓은 주파수 범위에서 진동절연 성능을 향상시키기 위하여 유체마운트에 솔레노이드밸브나 스텝모터를 적용하여 오리피스와 직경을 변화시켜 강성과 댐핑을 조절하는 반응동식 마운트와 전자기작동기나 서보밸브를 이용한 능동식 마운트가 제안되

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정희원, 인하대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\* 정희원, 국방과학연구소

있지만, 복잡한 구조의 기계적인 구동장치가 필요하며, 연속적으로 감쇠력을 얻기 어렵고 전력소모가 크며 고가인 단점이 있다.<sup>(4,5)</sup>

최근에는 유체마운트를 기본형으로 하여 ER유체를 적용한 반능동식 마운트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. ER유체는 부하 되는 전기장의 강도에 따라 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하며, 기본적으로 비전도성 응매에 전도성입자를 분산시킨 콜로이드 용액이다. ER유체는 전기장 무부하시 렌덤구조를 갖는 뉴토니안유체 특성을 갖지만, 전기장 부하시 항복전단응력을 갖는 빙햄(Bingham)유체로 변하게 된다.<sup>(6)</sup> ER유체는 액상이나 고상으로 빨리 변화하는 가역적인 유동성질을 가지고 있으며, 이러한 ER유체의 특성을 이용한 마운트(이후 'ER마운트'라고 표현)는 전기장의 세기에 따라 강성과 댐핑력의 크기를 연속적으로 조절할 수 있다. 또한 설계의 단순함, 무소음, 무진동, 빠른 응답특성, 작은 전력소모량, 낮은 제조단가의 장점을 가지고 있으며, ER유체의 작동모드에 따라 ER마운트의 작동메커니즘을 달리 설계할 수 있다.

기존 대부분의 연구에서 제안된 ER마운트는 유동모드형태로, 고정된 전극사이로 ER유체가 유동하며, 전기장이 부하되면 ER유체의 항복응력이 발생하여 유동저항이 부가되므로 마운트의 댐핑력이 증가된다.<sup>(7,8)</sup> 최영태<sup>(9)</sup> 등은 소형승용차에 적용할 수 있는 유동모드형 ER마운트를 설계하여 30Hz 이하의 가진주파수 범위에서 전기장에 따른 전달률(transmissibility)의 변화를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 고찰한 바가 있으며, Choi<sup>(10)</sup> 등은 전극의 상대운동에 저항하는 ER유체의 항복응력으로부터 가변댐핑력을 발생시키는 전단모드형 ER마운트를 제안하고, 슬라이딩모드제어기(sliding mode controller)를 설계하여 진동제어성능을 고찰하였다. 일반적으로 ER유체의 항복응력은 유동모드와 전단모드 하에서 다르게 나타나며, ER마운트의 작동모드 형태에 따른 가변댐핑력 발생메커니즘도 동일하지 않다. 그러나 기존의 연구는 단일 타입 ER마운트에 대한 성능해석이 개별적으로 수행되어, 작동모드에 따른 ER마운트 동특성의 차이를 명확히 비교 분석하기가 어려운 실정이다. 또한, 유동모드형 ER마운트에 대한 연구는 유체관성의 영향이 고려되지 않아 낮은 가진주파수 영역에서만 동특성해석이 수행될 수 있었으며, 전단모드형 ER마운트는 기본 성능 파악을 목적으로 지지할 수 있는 부하질량이 작은 실험실 차원의 소용량으로 설계되었다. 따라서, 본 연구의 목적은 실제 마운트지지 시스템에 적용될 수 있는 유동 및 전단모드 형태의 ER마운트를 설계하여 두 작동모드에 따른 진동절연성능을 기존보다 높은 주파수영역까지 확장하여 비교 고찰하며, 마운트 자체의 고유 특성을 나타내는 동강성계수(dynamic stiffness)에 대한 해석도 병행하여, 향후 시제품 설계 및 실용화에 유용한 데이터를

확보하는 것이다.

이를 위해 우선 유동 및 전단 모드에 따른 ER유체의 빙햄모델을 실험적으로 도출한 후, ER마운트의 작동모드에 따른 유체역학적 모델을 구성하여 ER유체의 빙햄효과가 고려된 동적지배방정식을 각각 유도하였다. ER마운트의 동특성에 가장 큰 영향을 미치는 전극을 동일한 기하학적 조건으로 설계한 후 컴퓨터시뮬레이션을 이용하여 가진조건과 전기장세기의 변화에 따른 동강성계수와 전달률을 해석하였으며, 상용 고무마운트의 동특성과도 비교하였다 또한, 반능동식 작동기에 효과적인 스카이훅제어기(skyhook controller)를 설계하여 각기 다른 모드로 작동되는 ER마운트의 진동제어성능을 주파수 및 시간영역에서 비교 고찰하였다.

## 2. ER유체의 빙햄특성

전단 및 유동모드에서의 ER유체의 거동은 일반적으로 다음과 같은 빙햄모델로 표현할 수 있다.<sup>(6)</sup>

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

여기서,  $\tau$ 는 ER유체의 전단응력을 나타내며,  $\eta$ 는 유체의 기본 점성계수,  $\gamma$ 은 전단비이다.  $E$ 는 ER유체에 부하 되는 전기장으로서, 전극간의 부하전압  $V$ 를 간극크기  $h$ 로 나눈 값이다.  $\tau_y(E)$ 는 ER유체의 항복응력을 표현하는 것으로서, 전기장  $E$ 의 증가와 더불어 증가한다. ER유체의 항복응력은 외부에서 전기장이 가해질 때 유체가 유동을 일으키는 순간의 전단응력을 나타낸다. 유체의 유동은 매우 짧은 시간에 시작되고 복잡한 거동을 하기 때문에 항복응력을 정확히 측정하는 것은 어렵다. 따라서, ER유체의 항복응력은 여러 전단비에서 얻어진 전단응력으로부터 구한 선형식에서 전단비가 영(zero)일 때의 값인 동적항복응력을 도출하여 사용하며,

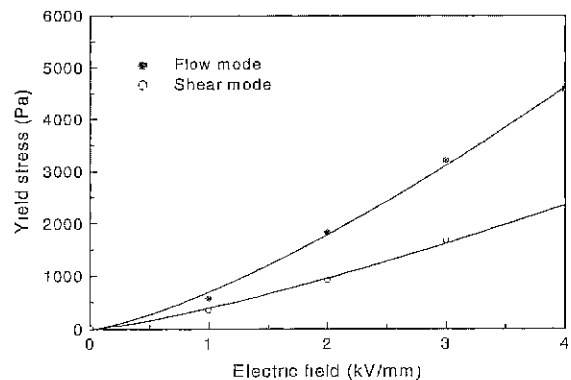


Fig. 1 Bringham properties of the ER fluid

전기장에 대한 지수함수로 표현된다. 이때 구하는  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 ER유체에 사용된 용매와 입자의 종류, 조성비, 조성환경, 작동온도 등에 의하여 결정되는 고유 특성치이다.

본 연구에서 사용된 ER유체는 실리콘 오일을 기본용매로 하여, 화학적으로 특수처리된 전분을 이용하여 자체조성하였다. 해석할 ER마운트의 작동모드는 전단모드와 유동모드이므로, 고유특성치 도출을 위한 실험설계는 자체 제작한 유동모드 전기점도계와 전단모드 전기점도계를 이용하여 각각의 모드에서 수행되었다.<sup>(11)</sup> Fig. 1은 ER마운트 해석에 사용될 ER유체의 실험설계결과를 나타낸 것이다. 30°C에서 수행된 실험설계결과를 수식 (1)을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\tau_{yf}(E) = 689E^{1.37}, \text{ under flow mode} \quad (2)$$

$$\tau_{ys}(E) = 386E^{1.31}, \text{ under shear mode} \quad (3)$$

여기서,  $\tau_{yf}$ 와  $\tau_{ys}$ 는 각각 유동모드와 전단모드 항복응력으로 단위는 Pa이며, 전기장  $E$ 의 단위는 kV/mm이다. 동일 전기장 부하 시 전단모드에 비하여 유동모드가 더 큰 항복응력을 나타내고 있으며, 전기장 무부하 시 ER유체의 기본점성계수는 0.42 Pa·s로 측정되었다.

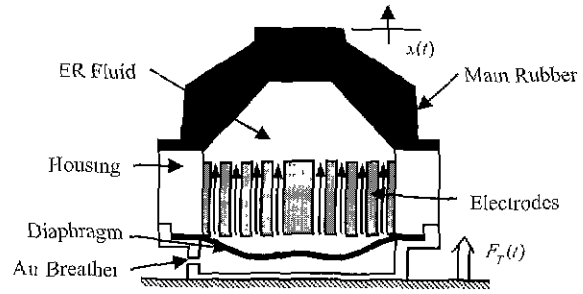
### 3. ER 마운트의 모델링

#### 3.1 유동모드형 ER마운트의 모델링

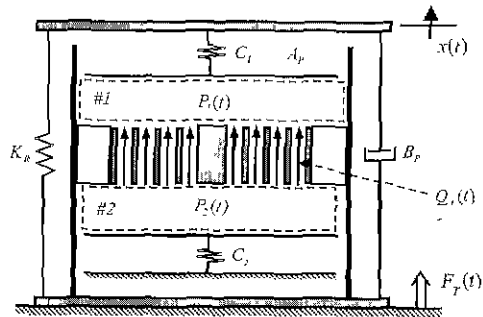
유동모드 ER마운트의 구조는 Fig. 2(a)와 같다. 내부는 ER유체가 봉입되어 있으며, 상하부챔버 사이에는 실린더 형태의 전극이 ER유체의 유동방향과 평행한 방향으로 일정간격으로 배열되어 강제하우징에 고정되어 있다. 상부챔버는 정하중을 지지하고 ER유체를 밀봉하기 위한 강성을 지닌 주 고무와 강제하우징으로 둘러싸여 있다. 외부 가진 입력에 의하여 상부챔버에 압력변화가 발생하면 ER유체는 간극을 통하여 상하부챔버로 유동하게 되며, 이때 유체의 점성으로 인한 유체댐핑력이 전극 사이에서 발생한다. (+)전원과 (-)전원이 병렬 연결되어 있는 전극에 전기장을 부하하면 ER유체의 항복응력이 증대되어 마운트는 더 큰 댐핑력을 발생시킨다. 따라서, 수동식 유체마운트와 달리 전기장의 세기에 따라 연속적으로 댐핑력을 제어할 수 있다. 간극을 통하여 밀려 내려온 ER유체는 다이어프램으로 둘러싸여 있는 하부챔버에 저장된다.

유동모드형 ER마운트의 해석을 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다. 마운트 설치조건 상 마운트에 작용하는 가진력은 대부분 수직방향의 상하분력이므로 마운트의 수직방향을만 고려하여 해석한다. 상하부챔버의 압력은 모든 방향으로 균일하게 작용하는 것으로 가정하며, 다이어프램의 강성

과 댐핑은 무시될 수 있도록 작으며, 하부챔버 내부의 압력



(a) Schematic diagram



(b) Hydraulic model

Fig. 2 Flow mode ER mount

은 대기압과 평형상태를 이룬다. 전극부의 양단에서의 발생하는 형상에 따른 압력강하는 간극에서 발생하는 압력강하에 비하여 작으므로 무시한다. ER유체는 비압축성이며, 밀도는 일정한 것으로 가정한다. 또한, 전기장 부하에 따른 항복응력의 시간응답은 수 msec로 상당히 빠르기 이에 대한 동적모델은 고려하지 않는다.

Fig. 2(b)에 도시한 유동모드형 ER마운트의 유체역학모델로부터 마운트의 윗단에서 변위가진에 의한 기저(base)로의 전달력  $F_T(t)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$F_T(t) = K_R x(t) + B_R \dot{x}(t) + A_P P_1(t) \quad (4)$$

여기서,  $K_R$ 과  $B_R$ 은 주고무의 수직강성과 댐핑,  $A_P$ 는 상부챔버의 등가피스톤 단면적,  $P_1(t)$ 는 상부챔버의 압력이다. ER유체가 간극을 통하여 유동할 때 발생하는 전체압력강하  $\Delta P_f(t)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.<sup>(12)</sup>

$$\Delta P_f(t) = P_2(t) - P_1(t) = \Delta P_f(t) + \Delta P_{ER}(t) \quad (5)$$

$$\Delta P_f = I_f \dot{q}_f(t) + R_f q_f(t) = \frac{\rho L_c}{A_f} \dot{q}_f(t) + \frac{12\eta L_c}{b_f h_c^3} q_f(t) \quad (6)$$

$$\Delta P_{ER}(t) = 2 \frac{L_c}{h_c} \tau_{yf}(E) \text{sgn}(q_f(t)) = P_{ERf} \text{sgn}(q_f(t)) \quad (7)$$

여기서,  $P_2(t)$ 는 하부챔버의 압력,  $\Delta P_f(t)$ 는 전기장무부하시의 압력강하,  $\Delta P_{ER}(t)$ 는 전기장부하시 ER효과에 발생에 의한 압력강하이다.  $q_f(t)$ 는 상하부챔버의 압력차에 의하여 발생하는 유체유량이며,  $I_f$ 는 유체관성,  $R_f$ 는 전기장 무부하시의 유체유동저항이다.  $A_f$ 는 전극간극에 의해 형성된 유로의 단면적,  $L_o$ 는 전극길이,  $b_o (= 2\pi \sum_{i=1}^N r_i)$ 는 전극너비,  $r_i$ 는 실린더 형태 전극의 반지름,  $h_p$ 는 간극크기.  $\rho$ 는 ER 유체의 밀도이다. 한편, 상부챔버와 하부챔버에서 발생하는 유체유동에 대한 연속방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$C_1 \dot{P}_1(t) = q_f(t) + A_p \dot{x}(t) = A_f \dot{x}_f(t) + A_p \dot{x}(t) \quad (8)$$

$$C_2 \dot{P}_2(t) = -q_f(t) = -A_f \dot{x}_f(t) \quad (9)$$

$C_1$ 과  $C_2$ 는 상부챔버와 하부챔버의 컵플라이언스,  $\dot{x}_f(t)$ 은 간극사이를 흐르는 유량의 체적평균속도를 의미한다. 식 (4)~(9)에서  $P_1(t)$ 와  $P_2(t)$ 를 소거하여 유동모드형 ER마운트의 전달력을 다음과 같은 두 식으로 표현할 수 있다.

$$F_T(t) = (K_R + K_{pp1})x(t) + B_R \dot{x}(t) - K_{fp1}x_f(t) \quad (10)$$

$$M_f \ddot{x}_f(t) = -B_f \dot{x}_f(t) - (K_{fp1} + K_{fp2})x_f(t) - K_{pp1}x(t) - F_{ERf}(t) \quad (11)$$

여기서  $K_{pp1} = \frac{A_p^2}{C_1}$ ,  $K_{fp2} = \frac{A_f A_p}{C_2}$ ,  $K_{fp1} = \frac{A_f A_p}{C_1}$ .

$$M_f = I_f A_f A_p, B_f = R_f A_f A_p, F_{ERf} = P_{ERf} A_p \operatorname{sgn}(\dot{x}_f(t))$$

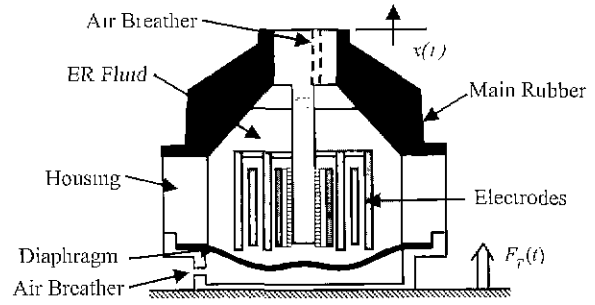
상부챔버와 하부챔버의 압력차가 ER유체에 의한 압력강하보다 작아지면 간극으로의 ER유체의 유동이 발생하지 않는 락업(lock-up)현상이 발생하게 된다. 이때, 식 (11)은 다음의 식으로 대체된다.

$$\dot{x}_f(t) = 0, \text{ if } |\Delta P_f(t)| < P_{ERf}(t) \quad (12)$$

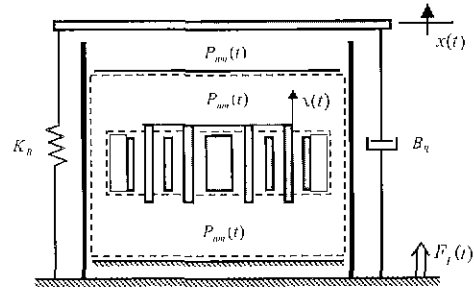
식 (10)~(12)를 이용하여 조화가진입력  $x(t) = X \sin(\omega t)$ 에 대한 출력  $F_T(t)$ 의 정상상태응답을 구하면 다음과 같이 나타난다.

$$F_f(t) = F_{T0} + F_{T1} \sin(\omega t + \phi_{f1}) + F_{T2} \sin(2\omega t + \phi_{f2}) + F_{T3} \sin(3\omega t + \phi_{f3}) + \dots \quad (13)$$

여기서,  $F_{T0}$ 는 중간값,  $F_{T1}$ ,  $F_{T2}$ ,  $F_{T3}$ 는 각각 가진주파수  $\omega$ 의 정수배에 해당하는 조화성분의 진폭이다. 기본주



(a) Schematic diagram



(b) Hydraulic model

Fig. 3 Shear mode ER mount

파수 조화성분의 진폭  $F_{T1}$ 과 가진진폭  $X$ 를 이용하여 등강성계수  $K_d$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_d = \frac{F_{T1}}{X} \quad (14)$$

한편, 부하질량  $M$ 이 탑재된 ER마운트시스템의 전달력을 구하기 위하여, 기저의 가진입력  $y(t) = Y \sin(\omega t)$ 에 따른 부하질량  $M$ 의 동적거동  $x(t)$ 를 표현하는 유동모드형 ER마운트시스템의 동적지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M \ddot{x}(t) = -K_p(x(t) - y(t)) - B_p(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) + A_p P_1(t) \quad (15)$$

식 (5)~(9), (15)를 이용하여 상하부챔버의 압력을 소거하면, 다음의 지배방정식으로 표현할 수 있다.

$$M \ddot{x}(t) = -(K_R + K_{pp1})(x(t) - y(t)) - B_R(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) + K_{fp1}x_f(t) \quad (16)$$

$$M_f \ddot{x}_f(t) = -B_f \dot{x}_f(t) - (K_{fp1} + K_{fp2})x_f(t) + K_{pp1}(x(t) - y(t)) - F_{ERf}(t) \quad (17)$$

식 (16), (17)을 락업조건상태의 식 (12)와 연계하여, 조화가진입력  $y(t)$ 에 대한 질량  $M$ 의 변위를 구하면 다음과 같다.

따라서, 기본주파수 조화성분의 진폭  $X_1$ 과 가진진폭  $Y$ 를 이용하여 전달률  $T_1$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_r = \frac{X_1}{Y} \quad (18)$$

$$x(t) = X_0 + X_1 \sin(\omega t + \phi_{x1}) + X_2 \sin(2\omega t + \phi_{x2}) + X_3 \sin(3\omega t + \phi_{x3}) + \dots \quad (19)$$

### 3.2 전단모드형 ER마운트의 모델링

본 연구에서 제안한 전단모드형 ER마운트의 구조는 Fig. 3(a)에 나타낸 바와 같이 실린더형태로 상하부에 전극을 형성하였으며 중심에는 선형베어링을 이용하여 전극의 간격을 일정하게 유지하도록 하였다. 또한 전기장부하시 유동모드에 의한 댐핑력은 발생하지 않고 실린더형 전극사이에서 ER유체의 전단모드 항복응력에 의한 댐핑력만의 발생을 구현하기 위해 하부전극 외측으로 바이패스를 고려하였다. 전단모드형 ER마운트의 해석을 위한 가정은 유동모드형 ER마운트와 동일하다.

Fig. 3(b)는 전단모드형 ER마운트의 유체역학모델을 도시한 것이며, 변위가진에 따른 전달력은 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>10)</sup>

$$F_T(t) = K_R x(t) + (B_R + \eta \frac{A_e}{h_c}) \dot{x}(t) + A_e \tau_{ys}(E) \text{sgn}(\dot{x}(t)) \\ = K_R x(t) + (B_R + B_S) \dot{x}(t) + F_{ERs}(t) \quad (20)$$

여기서,  $A_e (= b_e L_e)$ 는 전극의 면적,  $B_S$ 는 유체의 전단 저항에 의한 댐핑이며,  $F_{ERs}(t)$ 는 ER유체의 전단모드 항복응력에 의하여 발생하는 댐핑력이다. 기저가진에 대한 부하 질량  $M$ 의 동적거동을 고찰하기 위한 전단모드형 ER마운트 시스템의 수학적모델은 다음과 같다.

$$M\ddot{x}(t) = -K_R(x(t) - x(t)) - B_R(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) - F_{ERs}(t) \quad (21)$$

전단모드형 ER마운트의 동강성계수와 전달률은 식 (20)과 (21)을 이용하여 유동모드형에서와 동일한 방법으로 구할 수 있다[식 (13)~(19) 참고].

## 4. ER마운트의 동특성 해석

### 4.1 고무마운트

일반적인 마운트의 가진조건은 저주파수의 큰 가진진폭과 고주파수의 작은 가진진폭으로 구분할 수 있으며, 동일전기장이 입력되는 ER마운트의 응답특성은 가진진폭의 크기에 따라 달리 나타난다. 따라서, 본 연구에서는 마운트의 동특성 해석에 요구되는 가진조건을  $\pm 1.5$  mm와  $\pm 0.1$  mm 가진의 두 경우로 나누어 큰 가진입력과 작은 가진입력시의 ER마운트의 응답특성을 0~250 Hz 가진주파수 대역에서 컴퓨터시

Table 1 Design parameters of ER mounts

Parameter	Units	Flow mode ER mount	Shear mode ER mount
$K_R$	N/m	$3.9 \times 10^5$	
$B_R$	Nsec/m	1795	
$L_e$	m	0.03	
$N$	EA	6	
$h_c$	m	0.015	
$b_e$	m	121	
$C_1$	$m^5/N$	$4.0 \times 10^{-11}$	-
$C_2$	$m^5/N$	$4.6 \times 10^{-8}$	-
$I_f$	$kg/m^4$	$1.8 \times 10^4$	-
$R_f$	$Nsec/m^5$	$7.0 \times 10^4$	-
$A_b$	$m^2$	$5.5 \times 10^{-3}$	-
$A_f$	$m^2$	$1.8 \times 10^{-3}$	-
$B_S$	Nsec/m	-	1.95
$A_e$	$m^2$	-	$3.7 \times 10^{-2}$

물레이션을 통하여 해석하였다. ER마운트의 성능비교대상인 프랑스 Vibrachoc사에서 제작한 상용고무마운트(EIN101-04)의 동특성해석을 선행하였다. EIN101-04는 200 kg의 정하중을 지지하며, 약 7 Hz의 공진주파수에서  $\pm 1.5$ mm의 가진변위가 입력 시 전달률이 5이하가 되도록 제조되었다.<sup>13)</sup> 따라서, 고무마운트의 강성과 댐핑은 각각 386 kN/m, 1795 Nsec/m로 계산되며, 이러한 매개변수를 이용하여 구하여진 동강성계수와 전달률은 다음의 ER마운트의 동특성 해석결과와 함께 도시되어 비교된다.

### 4.2 유동모드형 ER마운트

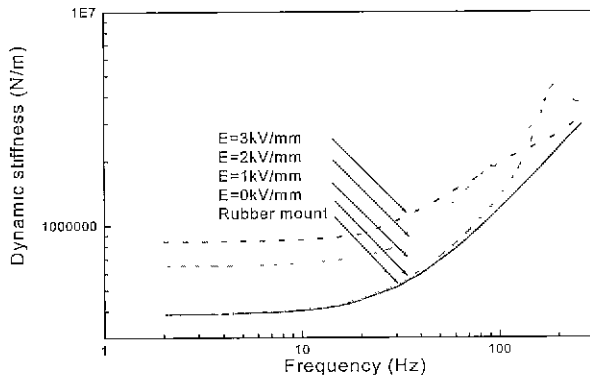
본 연구에서 제안된 유동모드형 및 전단모드형 ER마운트의 설계변수는 Table 1에 나타내었다. 고무마운트의 강성과 댐핑은 상용고무마운트와 동일한 값을 적용하였으며, 유동모드형 및 전단모드형 ER마운트의 합리적인 동특성 해석 및 비교가 용이하도록 전극길이 ( $L_e$ ), 간극수 ( $N$ ), 간극크기 ( $h_c$ ) 등은 동일하게 설계되었다.

Fig. 4(a)는 가진진폭이  $\pm 1.5$  mm인 경우의 전기장부하에 따른 동강성의 변화를 가진주파수영역에서 나타낸 것이다. 전기장 무부하시 일반적인 유체마운트에서 나타나는 노치주파수는 찾아 볼 수 없으며, 동강성이 가장 큰 피크주파수가 약 180 Hz에서 나타났다. 이 피크는 간극사이를 유동하는 유

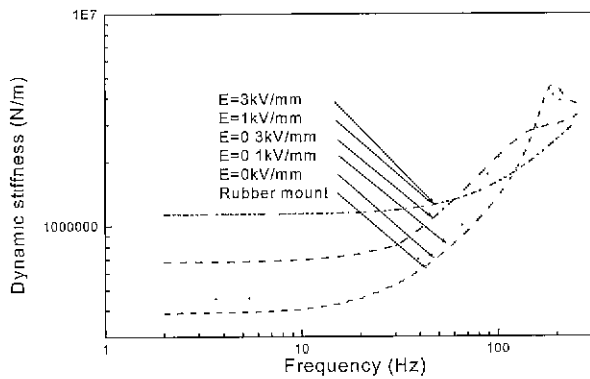
체관성에 의한 유체공진에 의한 것이며, 고주파수영역에서는 동강성이 낮아야 하는 마운트성능요구조건에 부합하지 못하고 있다. 전기장 세기의 증가에 따라 저주파수의 가진영역에서는 ER효과로 인한 댐핑력의 증가가 동강성의 증가로 나타났다. 피크주파수를 포함한 80 Hz이상의 주파수영역에서는 동강성이 감소하는 경향을 보이는데, 이는 유동저항의 증가가 유체관성질량의 공진을 억제하기 때문이다. 따라서, 마운트의 성능요구조건을 충족시키기 위하여 부하질량과 마운트의 강성에 의한 공진주파수가 존재하는 저주파수영역의 가진 입력 시 전기장을 부하하여 동강성을 증가시켜야 하며, 이보다 높은 고주파수의 가진 입력 시 동강성계수가 증가되지 않도록 140 Hz이하의 가진주파수영역에서는 전기장이 부하되지 않고, 140 Hz이상의 가진주파수영역에서는 전기장이 부하되어 동강성이 낮도록 하여야 한다. Fig. 4(b)는 가진진폭이  $\pm 0.1$  mm인 경우의 동강성을 도시한 것이다. 가진진폭이  $\pm 1.5$  mm인 경우와 비교하면, 전기장 부하에 따른 동강성의 변화경향은 유사하지만, 전기장 증가에 따른 동강성의 변화폭은 더 크게 나타났다. 이는 동일전기장 부하 시 ER효과에 의하여 발생하는 댐핑력의 크기는 동일하지만, 식(14)에 나타난 바와 같이 동강성은 가진진폭에 반비례하기 때문이다

전기장 1 kV/mm와 3 kV/mm 부하시의 동강성은 동일한 결과를 보인다. 이는 가진입력이 작아서 마운트 내부의 압력차가 ER유체의 항복응력으로부터 발생하는 압력차  $\Delta P_{ER}(t)$ 에 비하여 상당히 작아서 간극에서의 유체유동이 발생되지 않는 락업현상이 발생하였기 때문이다. 이때 마운트의 댐핑은 유체의 유동저항에 의한 댐핑이 발생하지 못하므로 주공무의 댐핑에만 의존하게 되며, 강성은 주공무의 강성과 상부챔버의 체적강성을 합한 것이 된다. 결국, 일정 한도 이상의 전기장 부하는 마운트의 동강성을 변화시키지 못함을 의미한다. 고무마운트와 비교하면, 전주파수영역에서 더 높은 동강성을 가지고 있으므로, 저주파수영역에서는 진동절연능이 다소 우수하고, 피크주파수를 포함한 고주파수영역에서는 진동절연효과가 저하된다.

Fig. 5(a)는 가진진폭이  $\pm 1.5$  mm인 경우의 전기장부하에 따른 전달률을 도시한 것이며, 전기장 무부하 시의 공진변위가 전기장을 증가 시킴에 따라 연속적으로 감소하였다. 또한, 공진주파수는 높은 주파수로 이동하였다. 이는 전기장에 의하여 발생된 ER효과가 마운트의 댐핑과 강성을 증가시키기 때문이다. 이와 같은 공진점의 이동은 시스템의 진동제어영

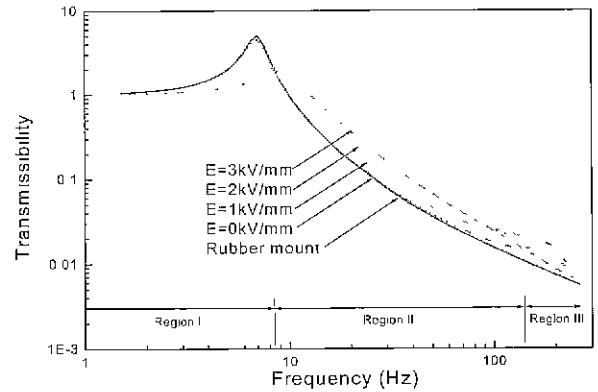


(a) Excitation amplitude :  $\pm 1.5$  mm

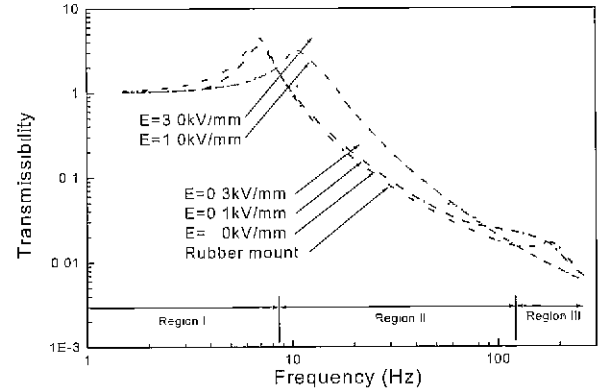


(b) Excitation amplitude :  $\pm 0.1$  mm

Fig. 4 Dynamic stiffness of flow mode ER mount



(a) Excitation amplitude :  $\pm 1.5$  mm



(b) Excitation amplitude :  $\pm 0.1$  mm

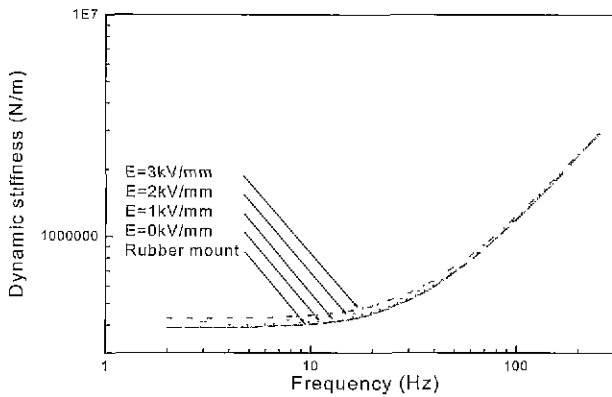
Fig. 5 Transmissibility of flow mode ER mount system

역의 증가를 의미한다. I영역(0~8.5 Hz)은 공진점이 존재하는 저주파수 대역으로 진동절연효과의 향상을 위해서는 강성과 댐핑이 높아져야 한다. 이러한 조건은 앞서 수행한 동강성의 해석에 나타난 바와 같이 전기장의 부하를 통하여 동강성을 높임으로써 충족시킬 수 있다. 전기장 무부하 시 공진주파수는 7 Hz, 전달률은 5이지만, 3 kV/mm 전기장 부하 시 8 Hz, 1.8로 공진점이 이동하였다. II영역(8.5~140 Hz)에서는 전기장을 부하시 진동절연성능이 저하되었다. 이러한 주파수 영역에서는 마운트의 강성과 댐핑이 작을수록, 즉 동강성계수가 작을수록 진동절연성능이 향상되지만, 전기장 부하는 마운트의 동강성을 증가시키므로, 진동절연효과가 저하된다. III영역(140~250 Hz)에서는 전기장 무부하 시 유체관성에 의한 2차공진이 180 Hz에서 발생하며, 전기장 부하 시 간극에서의 유동저항의 증가로 인하여 2차공진에서의 전달률이 낮아졌다. III영역에서는 동강성이 작도록 전기장을 부하하여야 전달률을 낮게 할 수 있다. 앞서 수행한 동강성을 통한 마운트의 진동절연성능의 예측과 전달률을 이용하여 확인한 진동절연효과가 잘 부합하였다. Fig. 5(b)는 가진진폭이  $\pm 0.1$  mm

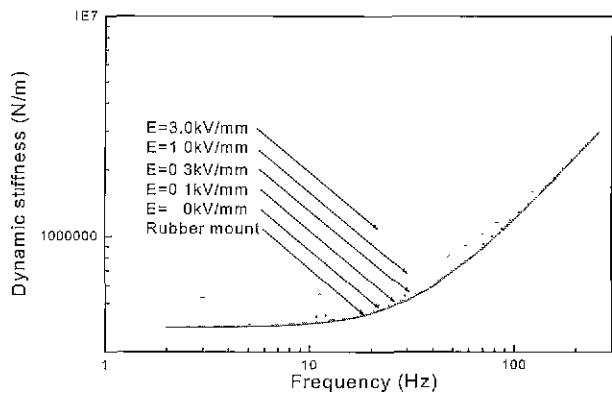
낮은 전기장을 부하하여도 ER효과에 의한 공진변위의 감소를 확인할 수 있다. 3 kV/mm 전기장을 부하하면 공진주파수가 고주파수 쪽으로 이동하여 공진변위 또한 급격히 증대된다 이는 작은 가진입력으로 인하여 락업상태의 특성을 보이기 때문이다. 전기장부하에 전달률은 가진진폭  $\pm 1.5$  mm의 경우와 같이, I영역(0~8.5 Hz), III영역(140~250 Hz)에서는 부하되는 전기장의 세기가 높을수록 진동절연성능이 향상되며, II영역(8.5~140 Hz)에서는 전기장 무부하 시의 응답특성이 오히려 우수하다. 고무마운트와 비교하면, 유동모드형 ER마운트는 전기장을 부하하여 I영역에서 우수한 진동절연효과를 얻는 것으로 나타났다. 하지만, 고주파수영역에서는 댐핑이 적은 고무마운트의 절연특성이 약간 우수함을 알 수 있다.

### 4.3 전단모드형 ER마운트

Fig. 6(a)는 가진진폭이  $\pm 1.5$  mm인 경우의 전단모드형 ER마운트의 동강성을 나타낸 것이다. 전기장 증가에 따른 동강성의 증가가 유동모드형에 비하여 작은 것을 알 수 있

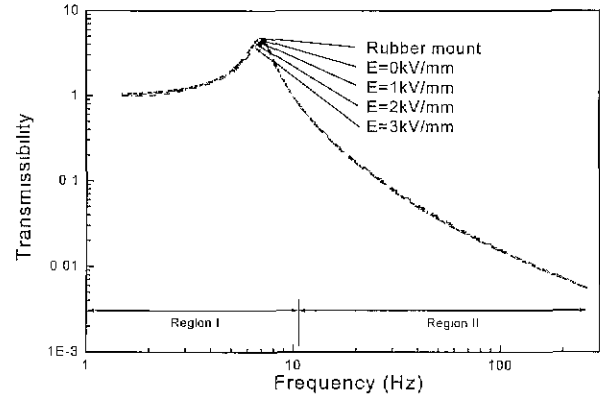


(a) Excitation amplitude :  $\pm 1.5$  mm

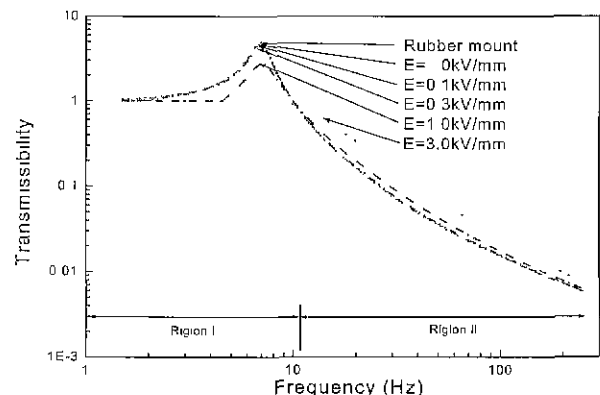


(b) Excitation amplitude :  $\pm 0.1$  mm

Fig. 6 Dynamic stiffness of shear mode ER mount 인 경우로서,  $\pm 1.5$  mm가진에 비하여 가진입력이 작으므로



(a) Excitation amplitude :  $\pm 1.5$  mm



(b) Excitation amplitude :  $\pm 0.1$  mm

Fig. 7 Transmissibility of shear mode ER mount system 다. 이는 전단모드댐핑력이 유동모드댐핑력 ( $F_{ERf}(t)$ )에 비

하여 작기 때문이다. 결국, 공진점이 존재하는 저주파수영역에서의 유동모드형보다 우수한 진동절연효과를 얻을 수 없다. Fig. 6(b)는 가진진폭이  $\pm 0.1$  mm인 경우의 동강성을 나타낸 것으로, 전기장 증가에 따른 동강성의 변화폭이  $\pm 1.5$  mm가진에 비해서 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 유동모드형 ER마운트와 마찬가지로 동일전기장 부하 시 발생하는 전단모드댐핑력의 크기는 동일하지만, 가진진폭이 작아졌기 때문이다. 작은 가진이 입력될 시 높은 전기장을 부하하면 저주파수영역에서의 진동절연성능은 우수하지만, 고주파수영역에서의 성능악화를 방지하기 위해선 전기장이 부하되지 않아야 할 것이다.

전단모드형 ER마운트는 고무마운트의 댐핑에 유체의 전단 저항으로 인한 댐핑이 부가되었으므로, 고무마운트보다 동강성이 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 7(a)는 가진진폭  $\pm 1.5$  mm인 경우의 전달률을 도시한 것이다. 전기장 무부하 시 공진주파수는 7 Hz, 공진변위는 5이지만, 전기장을 3 kV/mm까지 증가시키기에 따라 4.4로 감소하였으며, 이는 전단모드댐핑력의 증가에 의한 것이다. 전단모드형 ER마운트의 가변댐핑력은 유동모드형에 비하여 작으므로 공진변위의 감소도 미약한 것으로 나타났다. 전단모드형 ER마운트의 전기장 부하에 따른 동강성의 증가가 작으므로 전달률에서도 응답특성의 변화가 적은 것을 알 수 있다. 결국 I영역(0~11 Hz)에서는 높은 진기장이 부하될수록 응답특성이 향상되며, II영역(11~250 Hz)에서는 저하되었다. I영역에서의 진동절연효과를 향상시키려면, 전단모드 항복응력이 높은 ER유체를 사용하거나, 전극의 면적을 증대시켜야 하지만 전력소모량이 증가하게 된다. Fig. 7(b)에 도시한 바와 같이 가진진폭이  $\pm 0.1$  mm로 작아지면, 전기장증가에 따른 응답특성의 변화가  $\pm 1.5$  mm의 경우보다 뚜렷이 나타났다. 특히 3 kV/mm의 전기장 부하 시 저주파수영역에서는 전달률이 1인 강제거동을 보이며, 고주파수영역에서는 전기장 무부하 시보다 공진변위가 상당히 높아졌다. 이는 가진입력이 작아지면서 전단모드댐핑력의 영향이 상대적으로 커졌기 때문이다. 그러나 일반적으로 저주파수영역에서는 가진진폭이 크므로, 실제 적용시 우수한 진동절연효과를 기대하기 어렵다. 고무마운트에 비하여, 전단모드형 ER마운트는 공진주파수 대역에서 작은 가진이 입력될 시 진동절연성능을 향상을 얻을 수 있으며, 고주파수영역에서는 댐핑이 적은 고무마운트의 응답특성보다 약간 저하됨을 확인할 수 있다.

### 5. ER마운트의 진동제어성능

앞절에서 수행한 ER마운트의 동특성 해석을 통하여 살펴본 바와 같이 ER마운트에 전기장이 과다하게 부하되면, 과

도한 댐핑력으로 인하여 진동절연성능이 저하되는 주파수대역이 발생한다. 따라서, 여러 가진조건에 대하여 우수한 진동절연성능을 얻기 위하여 ER마운트에 부하될 전기장의 세기를 적절히 조절할 수 있는 제어알고리즘이 요구된다. 본 연구에서는 Karnopp에 의하여 제안된 스카이훅제어알고리즘을 적용하였다.<sup>(13)</sup> 스카이훅제어알고리즘은 시스템 위의 가상상에 절대고정변위와 시스템사이에 가상댐퍼를 설치하고 이때 발생하는 가상댐퍼의 댐핑력을 요구댐핑력으로 사용한다. 여기서 구해진 요구댐핑력은 ER마운트에 전기장을 부하하여 얻을 수 있는 가변댐핑력과 같으며 다음의 수식으로 표현할 수 있다.

$$u(t) = \begin{cases} c_{skvf} \dot{x}(t) = F_{ERf}(t), & \text{for flow mode ER mount} \\ c_{skvs} x(t) = F_{ERs}(t), & \text{for shear mode ER mount} \end{cases} \quad (22)$$

여기서,  $c_{skvf}$ ,  $c_{skvs}$ 는 각각 유동모드형 및 전단모드형 ER마운트의 스카이훅제어이득치이며, 물리적으로는 댐핑계수를 의미한다. ER마운트는 반능동식 작동기이므로 위의 수식에서 구해진 제어신호는 다음과 같은 반능동조건을 만족하여야 한다.

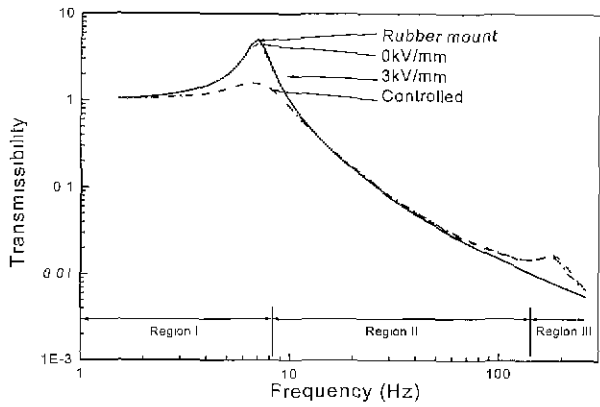
$$u(t) = \begin{cases} u(t) & \text{for } x(t)(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) > 0 \\ 0 & \text{for } x(t)(\dot{x}(t) - \dot{y}(t)) \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

식 (23)을 만족하는 요구댐핑력을 유동모드댐핑력 및 전단모드댐핑력과 함께 놓음으로써, 두 형태의 ER마운트에 요구되어지는 제어입력전기장을 다음과 같이 구할 수 있다.

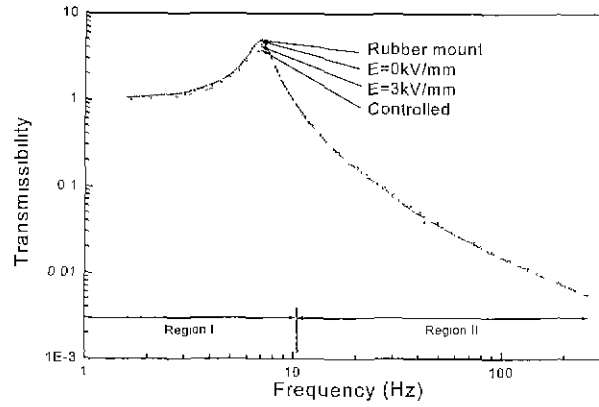
$$E(t) = \begin{cases} \left( \frac{h_e}{2\alpha_f L_c A_p} u(t) \right)^{\frac{1}{\beta_f}}, & \text{for flow mode ER mount} \\ \left( \frac{1}{\alpha_s A_c} u(t) \right)^{\frac{1}{\beta_s}}, & \text{for shear mode ER mount} \end{cases} \quad (24)$$

Fig. 8(a), (b)는 스카이훅 제어기를 이용한 유동모드형 ER마운트의 진동제어성능을 도시한 것이다. 입력가능한 전기장은 ER유체의 절연과파가 발생되지 않도록 3 kV/mm 이하로 제한하였으며, 스카이훅제어이득치는 5000으로 설정하여, 적절한 요구댐핑력이 발생되도록 하였다. 유동모드형 ER마운트는 가진변위  $\pm 1.5$  mm 와  $\pm 0.1$  mm의 두 경우 모두 I영역에서의 진동절연효과가 우수하다. 또한, 3 kV/mm의 전기장을 일정하게 부하한 경우 발생하는 II영역에서의 응답특성이 저하가 나타나지 않았다. III영역에서는 전기장을 부하하지 않은 경우와 유사한 응답특성을 보였으며, 3 kV/mm

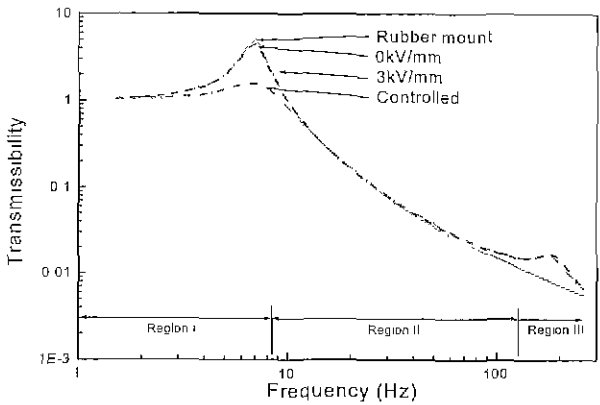




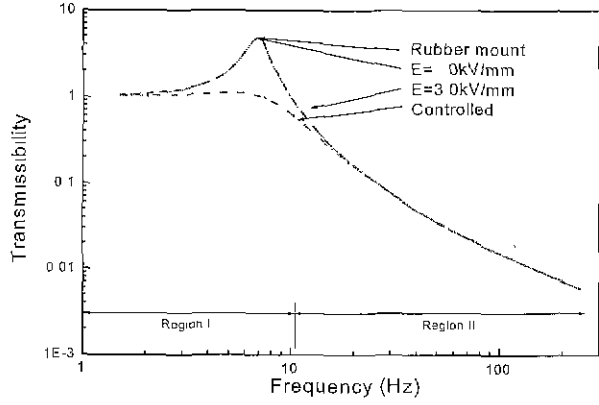
(a) Excitation amplitude :  $\pm 1.5$  mm



(a) Excitation amplitude :  $\pm 1.5$  mm



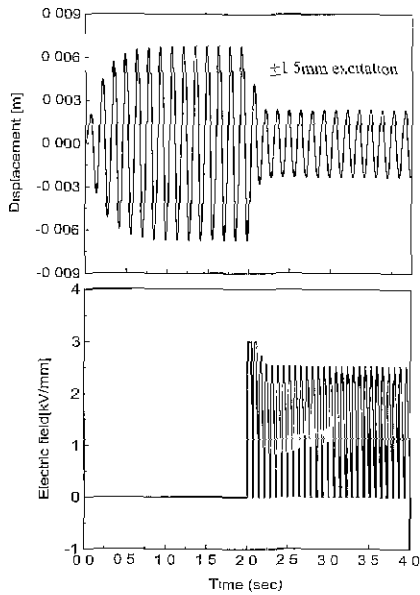
(b) Excitation amplitude :  $\pm 0.1$  mm



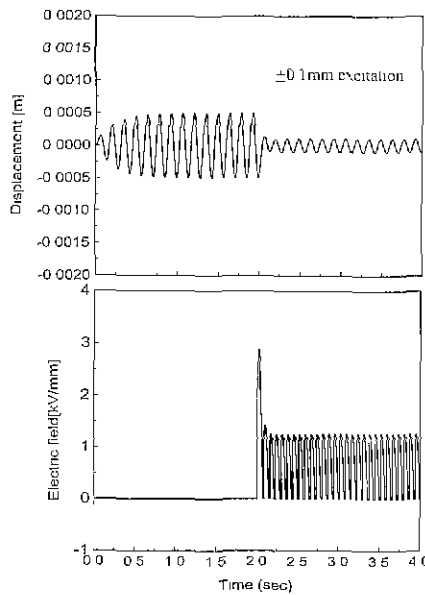
(b) Excitation amplitude :  $\pm 0.1$  mm

Fig. 8 Transmissibility of flow mode ER mount system with skyhook controller

Fig. 9 Transmissibility of flow mode ER mount system with skyhook controller



(a) Flow mode ER mount



(b) Shear mode ER mount

Fig. 10 Time responses of ER mount systems with skyhook controller

의 전기장을 일정하게 부하시 진동절연성능이 가장 우수하다. 이는 유체관성에 의한 2차공진 영역에서는 스카이훅 제어알고리즘이 효과적이지 못함을 의미한다.

Fig. 9(a), (b)는 전단모드형 ER마운트의 응답특성을 나타내었으며, 적용된 스카이훅제어제인  $c_{sky}$ 는 4000으로 설정하였다.  $\pm 0.1$  mm의 가진에는 우수한 응답특성을 보였지만,  $\pm 1.5$  mm의 가진에는 진동절연성능의 향상이 미약하였다. 이는 가진입력이 크면 요구댐핑력이 증가하지만, 전단모드형에서 발생가능한 가변댐핑력이 부족하기 때문이며, 이를 극복하기 위해서는 전극면적을 증대시켜야 한다. 두 형태의 ER마운트는 약 20 Hz이상의 가진주파수 대역에서는 우수한 진동절연효과를 기대하기 어려우며, 큰 진폭의 가진이 입력되는 저주파수영역에서는 유동모드형 ER마운트가 효과적이다.

Fig. 10(a)는 공진이 발생하는 7 Hz의 가진주파수에서 유동모드형 ER마운트의 스카이훅제어 결과를 시간영역에서 나타낸 것이다. 가진변위  $\pm 1.5$  mm로서 제어가 시작되는 2 sec부터 전기장이 적절히 입력되어 부하질량의 변위가  $\pm 7.4$  mm에서  $\pm 2.3$  mm로 감소하여, 진동제어가 효과적으로 수행됨을 확인할 수 있다. Fig. 10(b)는 전단모드형 ER마운트로써, 가진변위는  $\pm 0.1$  mm이며, 부하질량의 진폭은  $\pm 0.5$  mm에서  $\pm 0.1$  mm로 감소하는 것을 볼 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 유동, 전단모드에 따라 설계된 ER마운트의 동특성을 주파수영역에서 해석하였다. ER마운트의 모델링에 적용될 ER유체의 빙햄모델을 도출하기 위한 유동 및 전단모드 빙햄실험이 각각 수행하여 동일 전기장 부하 시 유동모드 하에서의 항복응력이 전단모드보다 2배정도 크게 발생됨을 확인하였다. 작동모드에 따른 ER유체의 항복응력이 가변댐핑력으로 작용할 수 있도록 유동모드형 및 전단모드형 ER마운트를 각각 설계하여 작동원리와 구조를 비교한 결과, 유동모드형의 구조가 전단모드형보다 간단하였다. 각 ER마운트의 유체역학적 모델을 각각 구성하여 가진입력에 의하여 기저로 전달되는 힘을 수학적으로 유도하였으며, 기저가진에 의한 부하질량의 동적거동을 표현하는 동적지배방정식을 도출하여, 가진입력 및 전기장에 따른 동강성과 전달률의 변화를 고찰하였다. 두 형태의 ER마운트 모두 저주파수 영역에서는 전기장 증가에 의하여 동강성이 증가하고 전달률이 낮아지는 특성을 보였다. 유동모드형은 고주파수영역에서 유체관성에 의한 2차공진이 발생하였으며 이는 전기장을 부하함으로써 공진변위를 낮게 수 있었으며, 전단모드형은 작은 가진이 입력 시에는 진동절연효과가 우수하지만, 큰 가진에는

댐핑력의 한계로 인하여 응답특성의 향상이 미비하였다. 스카이훅제어기를 사용하여 ER마운트의 댐핑력을 제어할 경우 일정전기장부하로 인한 과도한 댐핑력에 의해 발생될 수 있는 고주파영역에서의 진동절연성능저하를 방지할 수 있었다. 두 형태의 ER마운트 모두 전기장 부하에 의하여 진동제어 성능을 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있지만, 유동모드형은 고주파수영역에서 2차공진이 나타나며, 전단모드형은 작은 가진입력시에만 효과가 있는 단점을 내포하고 있다. 따라서, 유동모드형은 저주파수에서의 큰 공진을 억제하는 것에 효과적으로 적용될 수 있으며, 2차공진 대역에서의 진동제어를 위한 새로운 진동제어알고리즘이 개발되어야 한다. 전단모드형은 보다 큰 가변댐핑력을 발생시키기 위하여 항복응력이 높은 ER유체의 개발 및 전극면적의 확대가 요구된다.

향후 200 kg의 하중을 지지하는 유동모드형 ER마운트의 성능을 실험적으로 입증하고, 전주파수영역에서 우수한 진동절연효과를 확보할 수 있는 강건한 제어알고리즘의 개발에 대한 연구를 계속 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 위탁과제(UD990006BD)로 수행되었으며, 이에 관계자께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Rivin, E. I., 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) Vahdati, N., 1998, "A Detailed Mechanical Model of a Double Pumper Fluid Mount", Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 120, pp. 361~370.
- (4) Genesseeux, A., 1993, "Research for New Vibration Isolation Techniques : From Hydro-Mounts to Active Mounts", SAE Technical Paper Series 931324.
- (5) Miller L.R., Ahmadian, M., Nobles, C. M. and Swanson, D. A., 1995, "Modeling and Performance of an Experimental Active Vibration Isolator", Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 117, pp. 272~278.
- (6) Block, H. and Kelly, J. P., 1998, "REVIEW ARTICLE Electro-rheology", J. Phys. D : Appl. Phys. 21,

pp. 1661~1677.

(7) Petek, N. K., Goudie, R. J. and Kojima, H., 1988, "Actively Controlled Damping in Electrorheological Fluid-Filled Mounts", SAE Technical Paper Series 881785.

(8) Ushijima, T., Takano, K. and Noguchi, T., 1988, "Rheological Characteristics of ER Fluids and Their Application to Anti-Vibration Devices with Control Mechanism for Automobiles", SAE Technical Paper Series 881785.

(9) 최영태, 김기선, 최승복, 정재천, 전영식, 1994, "전기유동유체를 이용한 엔진마운트의 모델구성과 성능해석", 한국자동차공학회논문집, 제 2 권, 제 3 호, pp. 62~74.

(10) Choi, S. B. and Choi, Y. T., 1999, "Sliding Mode Control of a Shear-Mode Type ER Engine Mount", KSME

International Journal, Vol. 13, No. 1, pp. 26~33.

(11) 이호근, 최승복, 정재천, 1999, "작동모드에 따른 ER 유체의 특성비교", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 688~693.

(12) Philips, R. W., 1969, Engineering Applications of Fluids with a Variable Yield Stress. Ph. D Thesis. University of California at Berkeley, U.S.A.

(13) VIBRACHOC AND STOP-CHOC, 1999, "Vibrachoc Catalog".

(14) Karnopp, D and Crosby, M. J., 1974, "Vibration Control Using Semi-active Force Generators", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 96(2), pp. 619~626.