

## ER 유체를 이용한 반능동형 엔진마운트의 진동제어

### Vibration Control of a Semi-Active Engine Mount Using an ER Fluid

전 영 식\*

Young-Sik Jeon

(1997년 8월 25일 접수, 1997년 12월 12일 채택)

#### ABSTRACT

This paper presents the vibration control of an engine mount featuring an ER(electro-rheological) fluid. The Bingham properties of the ER fluid to be employed to the ER engine mount are experimentally obtained through Coeutte type viscometer. The ER engine mount is devised ant its governing equation is derived. After evaluating the performance of the ER engine mount on the basis of the mathematical model, the novel type of the ER engine mount is then designed and manufactured. The electric field-dependent transmissibility of the ER engine mount is evaluated by changing the particle concentration and the electrode gap size. To investigate the control performance of the ER engine mount, neuro-control algorithm is adopted. It is shown that the proposed ER engine mount has prominent capabilities of controlling the damping force by tuning the electric fields and excellent vibration isolation performance.

#### 1. 서론

산업혁명 이후 동력원은 비약적으로 발전했으며, 특히 오늘날 자동차산업이 발전하면서 동력원인 엔진의 출력은 증가하고 차체의 무게가 감소하는 추세를 보이고 있다. 이때 엔진의 구동에 의해 발생하는 소음 및 진동문제가 자동차의 안락한 승차감에 큰 영향을 미치게 된다. 따

라서, 엔진에 의해 발생하는 소음과 진동을 방지하고자 엔진마운트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

엔진의 구동에 의해 발생하는 진동과 소음은 가진 진폭이 큰 저주파수 영역과 가진 진폭이 작은 고주파수 영역으로 구분할 수 있다. 고주파수 영역의 가진과 비교하여 상대적으로 가진 진폭이 큰 30 Hz이하의 저주파수 영역의 가진은

\* 유한전문대학 금형설계과

차체로 전달되는 충격력이 크기 때문에 승차감에 큰 영향을 준다. 그러므로 승차감 향상을 위하여 저주파수 영역의 진동은 우선적으로 절연되어야 한다. 또한 높은 엔진의 회전에 의해 발생하는 30 Hz 이상의 고주파수 영역의 가진 진폭과 충격력이 작아 주로 소음문제를 유발시킨다. 이와같이 엔진마운트의 성능요구조건은 가진 주파수에 따라 변하게 된다. 저주파수 영역에서는 엔진의 가진 변위와 충격력이 크고 엔진과 엔진마운트로 구성되는 시스템의 공진이 존재한다. 따라서, 엔진의 급격한 움직임을 제한하기 위하여 큰 강성이 필요하고 차체로 전달되는 충격력을 줄이기 위하여 큰 감쇠력이 필요하다. 반면에 가진 변위와 충격력이 작은 고주파수 영역에서는 보다 작은 강성과 감쇠력이 필요하다.

고무 엔진마운트는 고주파수 영역의 진동 절연에는 효과적이거나, 강성과 감쇠력이 거의 일정하기 때문에 저주파수 영역에서의 성능요구조건을 만족하지 못한다<sup>1,2)</sup>. 이러한 단점을 보완하기 위하여 유체봉입 엔진마운트가 제안되었으며, 이는 고무의 강성을 이용하여 엔진을 지지하며 유체가 흐를 수 있는 관성트랙(inertia track)을 설치하여 큰 유체 감쇠력을 발생시키도록 한 것이다. 여기에 분리기(decoupler)를 장착하여 고주파수 영역에서 감쇠력이 크게 발생하지 않도록 하였다. 그러나 저주파수 영역인 엔진마운트 시스템의 공진점 부근에서만 효과적인 진동 절연 효과를 볼 수 있으며, 시스템의 비선형성이 크기 때문에 그 특성을 정확히 판단하기가 어렵다<sup>3,4)</sup>.

넓은 범위의 주파수 영역에 대한 엔진의 진동과 소음을 절연하기 위하여 솔레노이드 밸브(solenoid valve) 등을 이용하여 오리피스(ori-fice)의 직경을 변화시키는 반능동식(semi-active) 엔진마운트나 서보밸브(servo valve)를 작동시켜 다양한 크기의 유체 감쇠력을 얻는 능동식(active) 엔진마운트가 제안되었다. 그러나 이러한 엔진마운트는 별도의 기계적 구동장치가 필요하며, 연속적인 감쇠력을 얻기 어렵고 전력소모가 크며 고가이다<sup>5,6)</sup>.

최근 지능 재료(smart material)의 하나인 ER(electro-rheological)유체를 적용한 엔진마운트

(이후 'ER 엔진마운트'라고 표현)에 대한 이론적 연구와 실험적 해석이 미국, 일본, 영국 등 선진국을 중심으로 이루어지고 있다. ER엔진마운트는 부하되는 전기장의 크기에 따라 강성과 감쇠력이 연속적이며 가역적으로 조절되는 마운트이다. 또한, 별도의 액튜에이터가 필요없으므로 장치의 소형화를 이룰 수 있고 시스템의 응답성이 매우 우수하며 전력소모가 매우 적다는 장점을 가지고 있다<sup>7~10)</sup>.

본 연구에서는 연속적이며 가역적으로 감쇠력을 가변할 수 있고 실시간으로 제어가 가능한 ER엔진마운트를 구성하여 진동 제어를 수행하였다. 이를 위하여 제안된 모델을 이론적으로 해석한 후, 이를 토대로 중요설계변수를 결정하여 ER엔진마운트를 제작하고 그 성능을 실험적으로 평가하였다. ER엔진마운트의 성능은 ER유체의 입자중량비와 전극 간극의 변화에 따른 주파수 영역의 전달률(transmissibility)로서 고찰하였다. 또한 실시간 제어가 가능하며 외란에 대하여 강건한 뉴로 제어기(neuro-controller)를 구축하고, 이를 ER엔진마운트에 적용하여 진동 절연성능의 향상을 고찰하였다.

## 2. ER엔진마운트의 구성

### 2.1 ER유체의 역학적 특성

ER유체는 비전도성 용매 중에 강한 전도성 입자들을 분산시킨 콜로이드 용액으로서, 부하되는 전기장의 크기에 따라 항복전단응력과 가점성 등의 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭한다. 또한 ER유체의 반응속도는 수 ms정도로 매우 빠르며 전기장의 부하에 대하여 연속적이고 가역적인 반응을 나타낸다. 이러한 ER유체의 특성을 이용한 여러가지 응용장치들, 예를들면 현가장치 등의 가변감쇠기구와 밸브 시스템<sup>12)</sup>과 클러치 및 브레이크<sup>13)</sup> 등 제어가 가능한 지능 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 ER유체는 전기장 증가에 따라 유체의 항복전단응력이 증가하는 특성을 보이며, 그 거동은 매우 복잡하지만 다음 식으로 표현될 수 있는 빙햄 거동(Bingham behavior)을 하는 것으로 알려져 있다.

$$\tau = \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma} = \alpha E^\chi + \eta \dot{\gamma} \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $\tau$ 는 유체의 전단응력을 나타내고  $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비이며  $\eta$ 는 유체의 점도를 나타낸다.  $\tau_y$ 는 유체의 항복전단응력을 표현하는 것으로 전기장( $E$ )의 증가와 더불어  $\alpha E^\chi$ 의 관계로 증가하는 것으로 알려져 있다.  $\alpha$ 와  $\chi$ 는 ER유체의 제조에 사용되는 용매의 종류와 점도, 전도성 입자의 종류와 중량비, 입자의 수분 함유량, 그리고 ER유체의 온도 등 ER유체의 조성 조건에 따른 특성값이며, 실험에 의하여 구할 수 있다.

본 연구에서 조성된 ER유체의  $\alpha$ 와  $\chi$ 값을 얻기위해 사용된 전기점도계(electro-viscometer)는 독일 HAAKE사의 모델 VT-500이다. 사용된 ER유체는 트랜스퍼머 오일(transformer oil)을 용매로하고 전도성 입자로는 전분계(starch) 입자를 사용하였다. 입자중량비를 달리하여 두 종류의 ER유체가 조성되었으며, 입자중량비가 35%인 ER유체를 ITS35라 칭하였고, 45%인 ER유체는 ITS45라 칭하였다. Fig. 1은 본 연구에서 조성되어 ER엔진마운트에 사용된 ITS35와 ITS45 ER유체의 전기장 증가에 따른 항복전단응력을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와같이 전기장 증가에 따라 항복전단응력의 값이 지수함수적으로 증가함을 알 수 있다. 이를 전기장에 대한 함수식으로 나타내면 ITS35의 경우  $\alpha$ 는 152.47,  $\chi$ 는 1.45이고, ITS45의 경우  $\alpha$ 는 226.58,  $\chi$ 는 1.45이다.

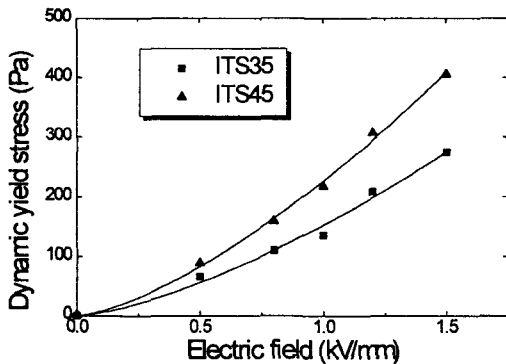


Fig. 1 Dynamic yield stress of the ER fluid

## 2.2 ER엔진마운트의 모델링

본 연구에서 제안된 ER엔진마운트의 구조가 Fig. 2에 도시되었다. 격자모양의 전극판이 유동 방향에 평행한 방향으로 병렬 배열된 형태의 전극부가 마운트 내부의 중심에 위치하고, 그 윗부분을 상부액실(upper chamber), 아랫부분을 하부액실(lower chamber)로 구분하며 내부는 ER유체로 완전히 채워진다. 또한 전극에 (+)전원과 (-)전원이 교대로 배치되어 ER효과를 나타내도록 하였다. 외부 가진에 의해 주고무 부분과 강체 케이스의 상대 운동이 발생되고 주고무 부분이 압축되어 상부액실의 체적 변화가 생긴다. 이에 의해 ER유체가 전극판 사이를 통과하여 하부액실로 흐르는 유동이 발생하게 된다. 전기장 무부하시 ER유체가 평행한 전극판 사이를 흐르면서 유동 저항이 발생하며, 이에 의하여 소모되는 힘이 유체의 감쇠력으로 작용하게 된다. 전기장 부하시 (+)전원과 (-)전원이 공급된 전극에서 유체의 유동을 제한하는 ER효과가 발생하여 ER엔진마운트의 감쇠력이 변화하게 된다. 상부액실로 부터 밀려온 ER유체는 하부액실의 다이어프램(diaphragm)에 저장된다. 일정한도 이상의 전기장 부하시 ER효과에 의하여 전극판에서의 유동이 발생하지 않는 락업(lock-up)현상이 발생할 수 있으며, 이 경우 전달률이 급격히 증가하여 진동 절연 성능이 악화될 수 있다. 이를 방지하고자 전기장이 부하되지 않는 유로를 유동 방향과 평행하게 설치하였으며, 락업이 발생하여도 일부유동이 발생되어 전달률이 크게 증가하지 않도록 하였다.

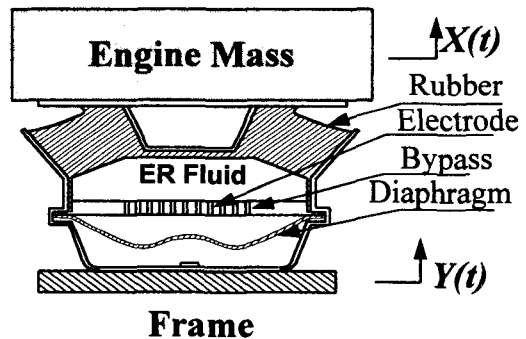


Fig. 2 ER fluid-filled engine mount

ER엔진마운트의 해석을 위하여 ER유체는 비압축성 유체로 가정하였고 모든 방향으로 균일

하게 내부 압력이 작용한다고 가정하였다. 또한 유체의 관성력과 유로의 형상에 따른 압력 손실을 무시하였다.

ER엔진마운트에 대한 동적 지배방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M\ddot{X}(t) + K_R(X(t) - Y(t)) + B_R(\dot{X}(t) - \dot{Y}(t)) - A_P P_1(t) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $M$ 은 엔진의 질량,  $K_R$ 은 주고무 부분의 강성,  $B_R$ 은 주고무의 감쇠계수,  $X$ 는 엔진질량의 변위,  $Y$ 는 가진변위,  $A_P$ 는 상부액실의 단면적,  $P_1$ 은 상부액실의 압력이다. 그리고 상, 하부액실에서 일어나는 유체유동에 대해 연속방정식을 적용하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$Q_i + Q_h - A_P(\dot{X} - \dot{Y}) = C_1 \dot{P}_1 - (Q_i + Q_h) = C_2 \dot{P}_2 \dots\dots (3)$$

여기서  $C_1$ 과  $C_2$ 는 각각 상부와 하부액실의 컴플라이언스(compliance)를 나타낸다.

전극판 틈새로 ER유체가 흐를 때 발생하는 전체 압력강하는 유체의 유동에 의한 압력강하  $\Delta P$ 와 전기장 부하시 ER유체의 항복응력에 의한 압력강하  $\Delta P_{ER}$ 의 합이며, 다음과 같이 표시

된다.

$$P_2 - P_1 = \Delta P_{ER} + \Delta P = 2 \frac{L}{h} \tau_y + R_i Q_i = R_h Q_h \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $P_2$ 는 하부액실의 압력,  $\Delta P_{ER}$ 는 전기장 부하시 ER유체의 항복응력에 의한 압력강하,  $\Delta P$ 는 유체유동에 의해 발생하는 압력강하,  $L$ 는 전극의 길이,  $h$ 는 전극 사이의 간극,  $R_i$ 는 전기장이 부하되는 유로에서의 유체저항,  $R_h$ 는 전기장이 부하되지 않는 유로에서의 유체저항,  $Q_i$ 는 전기장이 부하되는 유로에서의 유체유동,  $Q_h$ 는 전기장이 부하되지 않는 유로에서의 유체유동이다.

따라서 식(2)~식(4)의 지배 방정식을 다음과 같은 상태 변수를 도입하여 표현하면 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} Z_1 &= X - Y, Z_2 = \dot{X} - \dot{Y}, Z_3 = X_i, Z_4 = X_h \\ \{Z\} &= [Z_1 \ Z_2 \ Z_3 \ Z_4]^T, \{W\} = [\ddot{Y}], \{U\} = [F_{ER}] \\ \{\dot{Z}\} &= [A]\{Z\} + [B]\{U\} + [D]\{W\} \\ F_{ER} &= A_P \Delta P_{ER} \operatorname{sgn}(\dot{Y} - \dot{X}) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

1)  $|F(t)| > F_{ER}$ 인 경우 :

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ -\frac{(K_R + K_T)}{M} & -\frac{B_R}{M} & \frac{K_T}{M} & \frac{K_T}{M} \\ \frac{K_T}{B_i} & 0 & -\frac{(K_R + K_T)}{B_i} & -\frac{(K_R + K_T)}{B_i} \\ \frac{K_T}{B_h} & 0 & -\frac{(K_R + K_T)}{B_h} & -\frac{(K_R + K_T)}{B_h} \end{bmatrix}$$

$$[B] = \left[ 0 \ 0 \ -\frac{1}{B_i} \ 0 \right]^T \quad [D] = [0 \ -1 \ 0 \ 0]^T \dots\dots\dots (6)$$

2)  $|F(t)| \leq F_{ER}$ 인 경우(lock-up mode) :

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{(K_R + K_T)}{M} & -\frac{B_R}{M} & \frac{K_T}{M} & \frac{K_T}{M} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_T}{B_h} & 0 & -\frac{(K_R + K_T)}{B_h} & -\frac{(K_R + K_T)}{B_h} \end{bmatrix}$$

$$[B] = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad [D] = [0 \ -1 \ 0 \ 0]^T \dots\dots\dots (7)$$

### 2.3 설계 및 제작

앞에서 유도된 ER엔진마운트의 수학적 모델을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 후 ER엔진마운트의 중요설계변수를 결정하여 제작하였다. ER엔진마운트의 주고무 부분과 강제 케이스 부분, 그리고 다이아프램은 중형 차량에 장착되는 상용엔진마운트 부품을 사용하였다. Fig. 3은 본 연구에서 설계, 제작된 ER 엔진마운트의 내부구조사진이다. 전극 간극의 변화에 대한 ER엔진마운트의 성능을 해석하기 위하여 전극판 사이의 간극을 0.9mm와 1.2mm로 변화시킬 수 있도록 전극판 지지대를 두 종류로 제작하였다. 전극판의 폭은 50mm, 길이는 15mm이며, 전극판 갯수는 30개로 병렬 배치되었다. 전극의 재료로는 두께가 0.7mm인 스테인레스강(SUS 304)을 사용하였으며, 방전현상을 줄이기 위하여 표면을 매끄럽게 다듬질하였다. 또한 일정 한도 이상의 전기장 부하시 발생할 수 있는 락업 현상을 방지하기 위하여 전기장이 부하되지 않는 유로를 1개 설치하였으며, 그 간극은 1mm이다.

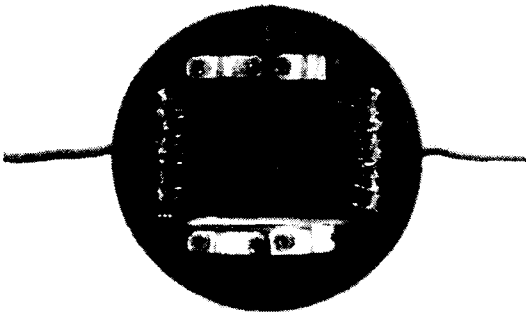


Fig. 3 Photograph of the inner structure of the ER engine mount

### 3. ER엔진마운트의 성능해석

본 장에서는 전기장 세기 변화에 따른 ER엔진마운트의 동특성을 주파수 영역에서의 전달률로 고찰하였다. 이때 전달률은 가진 입력 변위에 대한 엔진 질량 변위의 비로 정의된다. ER엔진마운트의 성능에 중요한 영향을 미치는 변수인 ER유체 입자의 중량비와 전극 간격 변화에

따른 영향을 고찰하였다.

Fig. 4는 ER엔진마운트의 성능시험을 위해 사용된 시험장치의 개략도이다. 편심 캠에 의하여 일정한 진폭으로 ER엔진마운트의 주고무 부분을 가진시키면서 가진부의 변위를 측정하는 동시에 ER엔진마운트를 통해 전달되는 엔진질량의 진동 변위를 측정하여 전달률을 계산하였다. 가진 주파수와 부하되는 전기장을 변화시키면서 실험을 수행하여 각 조건에 따른 전달률을 계산하여 ER엔진마운트의 성능을 평가하였다. ER엔진마운트에 부하되는 고전압은 컴퓨터(486CPU)를 이용하여 발생한 낮은 전압을 전압 증폭기(Trek 609A)로 1000배 증폭하여 공급하였다. ER엔진마운트의 전달률을 측정하기 위하여 실험에 사용된 센서는 변위측정장치(LVDT: Linear Variable Differential Transducer)이다. 2개의 변위측정장치를 이용하여 가진부의 변위와 엔진 질량의 변위를 동시에 측정하였다. 센서에서 발생하는 변위신호는 A/D 변환기(DAS-1800)를 통하여 컴퓨터에 입력되고 신호 분석기(dynamic signal analyzer; HP35665A)를 사용하여 저장하였다.

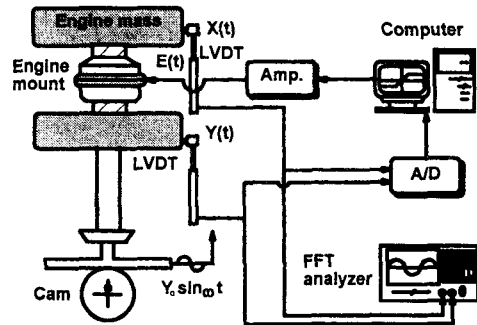


Fig. 4 Experimental apparatus for ER engine mount tester

#### 3.1 입자 중량비 변화에 따른 영향

입자 중량비의 변화에 따른 ER엔진마운트의 성능 변화를 고찰하기 위하여 입자 중량비를 35%와 45%로 변화시켜 성능시험을 수행하였고, 이를 상호 비교하였다. Fig. 5는 입자중량비가 35%인 ITS35의 경우의 전기장 증가에 따른 ER엔진마운트 시스템의 전달률 특성을 나타내고

있다. 이때의 시험조건으로 가진 변위는  $\pm 0.85$  mm이고, 전극사이의 간극은 0.9 mm이다. 그림에서 보는 바와 같이 전기장 무부하시에 가장 큰 공진 변위를 나타내지만 부하되는 전기장의 세기가 증가함에 따라 공진변위가 연속적으로 크게 감소됨을 알 수 있다. 또한 공진주파수가 전기장 무부하시 7.6 Hz였으나 3 kV/mm의 전기장이 부하됨에 따라 8.4 Hz로 이동하는 현상을 관찰할 수 있다. 이는 전기장이 증가함에 따라 ER효과에 의하여 ER엔진마운트의 감쇠력의 증가와 동시에 강성의 증가가 발생되기 때문이다.

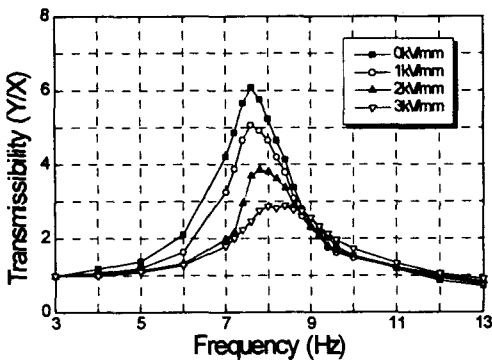


Fig. 5 Transmissibility with ITS35 ER fluid

Fig. 6은 사용된 ER유체의 입자중량비가 45% (ITS45)인 경우의 전기장 증가에 따른 ER엔진마운트 시스템의 전달률 특성을 나타내고 있다. 시험조건은 Fig. 5와 동일하게 가진 진폭은 0.85 mm이며 전극사이의 간극은 0.9 mm이다. 그림에서 보듯이 전기장 무부하시의 공진 변위가 Fig. 5의 경우에 비하여 작음을 알 수 있는데, 이는 입자 중량비의 증가로 인하여 유체의 점도가 증가하여 엔진마운트의 기본적인 감쇠력이 증가하였기 때문이다. 한편 전기장 부하시 Fig. 5에 비해 동일한 전기장 증가에 대하여 공진 변위가 더욱 크게 감소함을 알 수 있다. 그 이유는 ITS35보다 입자 중량비가 큰 ITS45가 동일한 전기장 부하에 대하여 더욱 큰 항복전단응력을 갖기 때문이다. 또한 전기장 무부하시 7.8 Hz의 공진주파수가 3 kV/mm의 전기장이 부하됨에 따라 9 Hz로 이동함을 고찰할 수 있는데, 이는 Fig. 5의 경우에 비하여 항복전단응력이 증가하여 시스템의 감쇠력뿐 아니라 강성도 더욱 증가

하였기 때문이다. 공진주파수 이후의 보다 높은 주파수 영역에서는 전기장 세기가 증가함에 따라 ER엔진마운트의 진동 절연 성능이 저하되는 경향을 고찰할 수 있다. 이것은 입자 중량비 증가로 인하여 동일 전기장에 대해 ER유체의 항복전단응력이 증가하여 Fig. 5의 경우보다 더욱 빨리 락업현상이 발생하기 때문이다. 그러나, 전기장이 부하되지 않는 유로를 설치함으로써 락업현상에 의한 진동 절연 성능의 저하가 크지 않음을 알 수 있다.

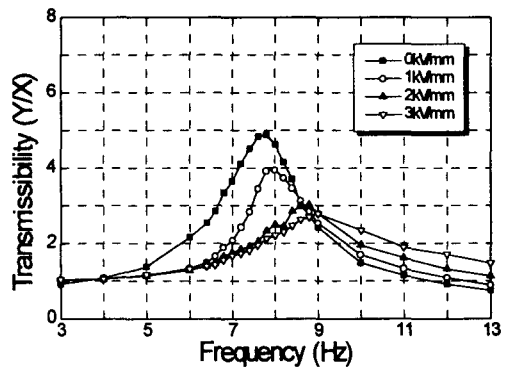


Fig. 6 Transmissibility with ITS35 ER fluid

### 3.2 전극 간극 변화에 따른 영향

전극 간극 변화에 따른 ER엔진마운트의 성능 변화를 고찰하기 위하여 전극 간극을 0.9 mm와 1.2 mm로 변화시켜 성능시험을 수행하였다. Fig. 7은 전극 간극의 크기가 0.9 mm인 경우의 ER엔진마운트 시스템의 응답 특성이다. 이 때의 시험조건으로 가진 변위는  $\pm 0.85$  mm이고 ITS35 ER유체가 사용되었다. 그림에서 보는 바와 같이 부하되는 전기장의 세기가 증가함에 따라 공진 변위가 연속적으로 감소됨과 공진주파수가 비교적 높은 주파수 대역으로 이동됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 전극간극의 크기가 1.2 mm로 증가될 경우의 시스템 응답이다. 이때 시험조건은 Fig. 7과 동일하다. 전극 간극의 크기가 0.9 mm인 Fig. 7과 비교하여 볼때, 전기장 무부하시 큰 공진 변위를 고찰 할 수 있는데 이는 전극 간극의 증가로 인하여 전극에서의 유체 저항이 감소하여 시스템의 감쇠력이 감소하기 때문이다. 또한 전기장의 세기를 증가시킴에 따라 공진 변위는

Fig. 7의 경우와 같은 쪽으로 감소되었다. 이로부터 전극 간극을 증가시켰을 경우, 전기장 무부하시의 공진변위 증가외에는 ER효과에 별다른 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

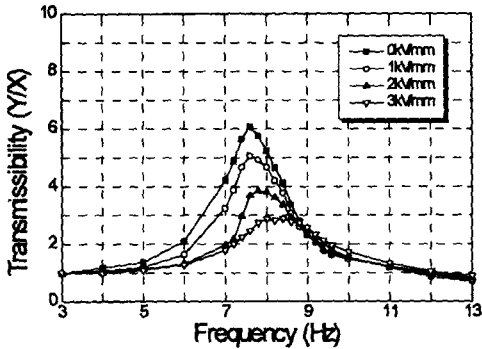


Fig. 7 Transmissibility of the ER engine mount (Gap size: 0.9 mm)

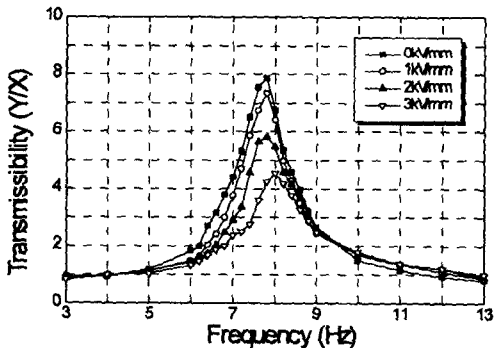


Fig. 8 Transmissibility of the ER engine mount (Gap size: 1.2 mm)

#### 4. 제어기 설계 및 진동 제어 결과

##### 4.1 제어기 설계

ER 엔진마운트의 동적 지배방정식에서 보듯이 ER효과에 의하여 발생하는 감쇠력을 적절히 제어함으로써 진동을 효과적으로 제어할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 제안된 ER엔진마운트 시스템은 끊임없이 외란 입력에 의하여 영향을 받으며, 시스템 파라미터의 비선형성에 기인하는 불확실성을 갖는다. 그러므로 시스템 파라미터 변동 및 외란 등에 대하여 강건하며 실시간 제어가 가능하고 실험적 구현이 용이한 강건

제어기(robust controller)의 설계가 필요하다. 그러나 현재 널리 사용되고 있는 PID제어기는 비교적 우수한 제어 성능을 보이지만 시스템 파라미터의 변동에 대하여 강건하지 못하다. 또한 최근 들어 활발히 연구가 진행되고 있는, 등과 같은 강건 제어 기법은 외란 변동에 대하여 강건하나 복잡한 제어 구조로 인하여 실시간 제어(real time)와 실험적 구현이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 외란 입력과 불확실한 시스템 변수 변동에 대하여 강건하며 실시간 제어가 용이한 뉴로 제어기를 설계하여 ER엔진마운트 시스템의 진동 제어에 적용하였다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 제안된 뉴로 제어 기법은 강건성과 안정성을 특징으로 하는 슬라이딩 모드 제어 기법과 학습 능력을 갖는 신경망 제어 기법이 혼합된 제어 기법이다. 신경망의 학습 알고리즘으로는 역전파(back propagation) 학습 알고리즘이 사용되었다.

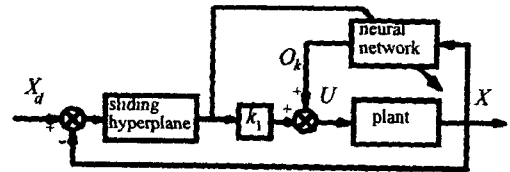


Fig. 9 Neuro-control scheme

본 연구에서 진동 절연을 극대화하는 최적의 감쇠력은 뉴로 제어기를 통하여 결정된다. 제안된 뉴로제어기의 신경망은 다층 신경망으로 2개의 입력층과 5개의 중간층, 그리고 1개의 출력층으로 구성되어 있다. 입력층과 출력층은 선형 활성화함수를 가지는 반면, 중간층에 사용된 활성화함수는 비선형 모델에 적합한 시그모이드(Sigmoid) 함수를 사용하였다. 중간층에서 뉴런(neuron)의 입력층과 출력층 사이의 관계는 다음과 같다.

$$net_j = \sum_{i=1}^n w_{ji} O_i + \theta_j$$

$$O_j = f(net_j) = \frac{2}{1 + \exp(-net_j)} - 1 \dots \dots \dots (8)$$

여기서  $w_{ji}$ 는  $i$ 번째 뉴런과  $j$ 번째 뉴런 사이의 연결 가중치이며,  $O_i$ 는  $i$ 번째 뉴런의 출력이며,  $\theta_j$ 는  $j$ 번째의 뉴런의 바이어스(bias)이다. 또한

$net_j$ 는  $i$ 번째의 뉴런의 가중된 출력의 합이며,  $O_j$ 는  $j$ 번째의 뉴런의 출력이다. 입력층에서 각 뉴런으로의 입력은 상태 벡터(state vector)이고, 출력층에서 각 뉴런으로의 출력은 엔진 마운트에 부하되는 제어 입력이 되며 다음과 같다.

$$U = \sum_{j=1}^n w_{kj} O_j + k_j S$$

$$S = C_e + \dot{e} \dots\dots\dots (9)$$

여기서  $w_{kj}$ 는  $j$ 번째 뉴런과  $k$ 번째 뉴런의 연결 가중치이며,  $S$ 는 슬라이딩 초평면이다. 그리고  $k_j$ 과  $C$ 는 각각 양의 상수이며,  $e$ 는 엔진마운트의 요구 변위  $X_d$ 와 실제 변위  $X$ 의 차로 표현하였다. 본 연구에서 요구변위  $X_d$ 는 0(zero)이다.

본 논문에서는 오차 방정식  $S$ 와 그 도함수인  $\dot{S}$ 가 가능한 빨리 점근적으로 0에 수렴하도록 학습 알고리즘을 설계하였다. 중간층과 출력층 사이의 연결 가중치는 다음과 같다.

$$\Delta w_{kj} = \eta \delta_k O_j, \delta_k = S + k_2 \dot{S} \dots\dots\dots (10)$$

그리고 입력층과 중간층 사이의 연결 가중치는 다음과 같다.

$$\Delta w_{ji} = \eta \delta_j O_i, \delta_j = f'(net_j) \sum_{k=1}^n \delta_k w_{kj} \dots\dots\dots (11)$$

위에서  $\eta$ 는 학습율이며  $k_2$ 는 양의 상수, 그리고  $f'( )$ 는 활성화함수(activation function)의 1차 미분 함수이다.

제안된 뉴로 제어기에 의하여 ER엔진마운트 시스템에 부하되는 제어입력을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$E = \left[ U \cdot \left( \frac{h}{2A_p L \alpha} \right) \right]^{1/x} \dots\dots\dots (12)$$

4.2 진동 제어 결과

Fig. 10은 제안된 뉴로 제어기를 이용하여 제어를 수행했을 때의 ER엔진마운트 시스템의 엔진진량 변위를 도시한 것이다. 이 경우 ITS45 ER유체를 사용하였고 진극 간극은 0.9 mm이며, 가진주파수는 시스템의 공진 주파수인 7.8 Hz이다. 그림에서 보는 바와 같이 제어수행시 엔진진량의 변위가 빠르게 감소됨을 확인할 수 있다. 이때 뉴로 제어기에 의해 ER엔진마운트에 공급되는 제어전압입력을 Fig. 11에 나타내었다.

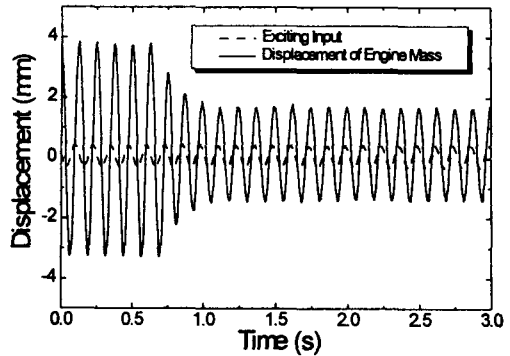


Fig. 10 Time response of the ER engine mount using the neuro-controller

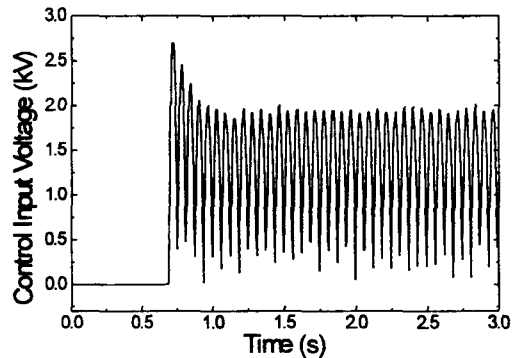


Fig. 11 Control input voltage

Fig. 12는 ER유체로 ITS35를 사용하고 제어를 수행했을 때의 ER엔진마운트 시스템의 전달률 특성을 나타내고 있다. 시험조건으로 진극 간극은 0.9 mm이고 가진변위는 0.85 mm일 때이다. 그림에서 보듯이 공진 주파수에서의 공진 변위가 크게 감소하였음을 알 수 있으며, 시험된 전 주파수영역에서 진동절연이 효과적으로 이루어짐을 고찰할 수 있다.

Fig. 13은 ER유체로 ITS45를 사용하고 제어를 수행했을 때의 ER엔진마운트 시스템의 전달률 특성을 나타내고 있다. 이 경우의 시험조건은 Fig. 6과 동일하다. 그림에서 보는 바와 같이 넓은 주파수 영역에서 전달률이 감소하며 우수한 진동 절연 성능을 나타낸다. Fig. 6의 경우와 비교하여 볼 때, 일정 전기장 부하시의 공진 이후의 비교적 높은 주파수 영역에서 전달률이 무부하시보다 증가되는 경향을 보이나 뉴로 제어기를 적용하여 제어를 수행한 경우는 전달률이



증가하지 않음을 확인하였다.

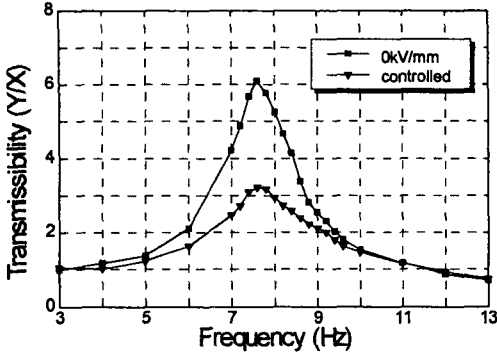


Fig. 12 Transmissibility with ITS35 using neuro-controller

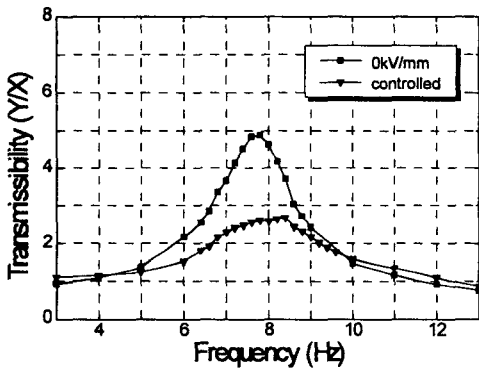


Fig. 13 Transmissibility with ITS45 using neuro-controller

### 5. 결론

본 연구에서는 ER유체를 이용한 반능동형 엔진마운트를 설계, 제작하여 실험적으로 ER엔진마운트의 성능을 평가하였으며 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 제안된 ER엔진마운트에 적용할 ER유체의 역학적 특성을 고찰하고자 전기점도계에 의한 실험을 수행하였고 이로부터 전기장에 따른 ER유체의 빙함모델을 도출하였다.
- 2) ER엔진마운트의 성능에 중요한 영향을 미치는 ER유체의 입자 중량비와 전극 간극의 변화에 따른 ER엔진마운트의 동특성을 실험적으로 평가하였다.

- 3) 입자중량비가 높은 ITS45 ER유체를 사용할 경우, 전기장 부하시 공진부근의 저주파수 영역에서는 전달률이 전기장 증가에 따라 점차 감소되나, 공진이후의 비교적 높은 주파수 영역에서는 전기장 증가에 따라 전달률이 약간 상승됨을 확인하였다.
- 4) 전극 간극변화는 전기장 무부하시의 성능만을 변화시켰을 뿐 ER효과에는 별 영향을 미치지 않음을 확인하였다.
- 5) 실시간 제어가 용이하며 외란과 시스템 변수 변동에 강건한 뉴로 제어기를 사용할 경우 ER엔진마운트에 일정 전기장을 부하한 경우보다 ER엔진마운트의 진동절연성능이 향상됨을 확인하였다.

향후 ER엔진마운트에 적합한 ER유체의 개발과 최적의 제어 알고리즘에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

본 연구는 유한전문대학의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자께 깊은 감사드립니다. 또한, 실험준비와 자료정리에 많은 도움을 준 대우중공업(주)의 박인환군과 인하대학교 대학원의 최영태, 김희준군에게 감사의 뜻을 전합니다.

### 참 고 문 헌

- 1) E.I. Rivin, "Passive Engine Mounts-Some Directions for Further Development", SAE Technical Paper Series 850481, 1985.
- 2) M. Bernuchon, "A New Generation of Engine Mounts", SAE Technical Paper Series 840259, 1984.
- 3) W.C. Flower, "Understanding Hydraulic Mounts for Improved Vehicle Noise, Vibration and Ride Qualities", SAE Technical Paper Series 850975, 1985.
- 4) R. Singh, G. Kim and P. V. Ravindra, "Linear Analysis of Automotive Hydro-Mechanical Mount with Emphasis on Decoupler Characteristics", Journal of Sound and Vibration, Vol.158, No.2, pp.

- 219~243, 1992.
- 5) P.L. Graf and R. Shoureshi, "Modeling and Implementation of Semi-Active Hydraulic Engine Mounts", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 110, pp. 422~429, 1988.
  - 6) S.E. Smith and J.F. Hoying, "Electronic Motor Mount with Rotary Flow Control Valve", United States Patent, Patent Number 4,789,143, 1988.
  - 7) T.G. Duclos, "An Externally Tunable Hydraulic Mount which Uses Electro-Rheological Fluid", *SAE Technical Paper Series 870963*, 1987.
  - 8) S. Morishita and J. Mitsui, "An Electronically Controlled Engine Mount Using Electro-Rheological Fluid", *SAE Technical Paper Series 922290*, 1992.
  - 9) 최영태, 김기선, 최승복, 정재천, 전영식, 전기유동유체를 이용한 엔진마운트의 모델구성과 성능해석, 한국자동차공학회논문집, 제 2권, 3호, pp. 62~74, 1994.
  - 10) E.W. Williams, S.G. Rigby, J.L. Sproston and R. Stanway, "Electrorheological Fluids Applied to an Automotive Engine Mount", *J of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 47, pp. 221~238, 1993.
  - 11) N.K. Petek, D.J. Romstadt, M.B. Lizell and T.R. Weyenberg, "Demonstration of an Automotive Semi-Active Suspension Using Electrorheological Fluid", *SAE Technical Paper Series 950586*, 1995.
  - 12) S.B. Choi, C.C. Cheong, J.M. Jung and Y.T. Choi, "Position Control of an ER Valve-Cylinder System Via Neural Network Controller", *Mechatronics*, Vol. 7, No. 1, pp. 37~52, 1997.
  - 13) S.B. Choi, C.C. Cheong and G.W. Kim, "Feedback Control of Tension in a Moving Tape Using an ER Brake Actuator", *Mechatronics*, Vol. 7, No. 1, pp. 53~66, 1997.
  - 14) Z.M. Yeh, "An Adaptive Neural Net Controller Design", *Proceedings of IEEE Int. Conf. on Neural Networks*, pp. 2586~2591, 1994.
  - 15) H. Miyamoto, M. Kawato, T. Setoyama and R. Suzuki, "Feedback-error-learning Neural Network for Trajectory Control of a Robotic Manipulator", *Neural Networks*, Vol. 11, pp. 251~265, 1988.