

<논문> SAE NO. 943731

## 전기유동유체를 이용한 엔진마운트의 모델구성과 성능해석

### Model Synthesis and Performance Analysis of an Engine Mount Using Electro-Rheological Fluids

최영태,\* 김기선,\* 최승복,\* 정재천,\* 전영식\*\*  
Y. T. Choi, K. S. Kim, S. B. Choi, C.C.Cheong, Y. S. Jeon

#### ABSTRACT

This paper addresses on the model synthesis and performance analysis of an engine mount featuring electro-rheological(ER) fluids which undergo a phase change when subjected to electric fields. A novel type of ER fluid-filled engine mount is devised and its hydraulic model is constructed. An equivalent mechanical model is subsequently obtained from the governing equation of the hydraulic model. The model parameters associated with the ER fluids are distilled from experimental investigations on the Bingham properties of the fluids. The distilled data are then incorporated into the governing model to undertake feasible work through computer simulations. It is shown that the proposed engine mount has an inherent capability of controlling both the damping force and the resonance frequency. Other superior performance characteristics accrued from the proposed methodology are also evaluated.

주요기술용어 : Engine Mount(엔진 마운트), Electro-Rheological Fluid(전기유동유체), Bingham Behavior(빙햄 거동), Damping Force(댐핑력), Transmissibility(전달률), Electric Field(전기장)

#### 기 호 실 명

<p><math>A_p</math> : 상부챔버(Chamber)의 피스톤 단면적</p> <p><math>b</math> : 전극판 넓이</p> <p><math>B_1</math> : ER 유체유동으로 발생하는 댐핑계수</p> <p><math>B_R</math> : 고무의 댐핑계수</p> <p><math>C_1</math> : 상부챔버의 컴플라이언스(Compliance)</p> <p><math>C_2</math> : 하부챔버의 컴플라이언스</p> <p><math>E</math> : 전극판에 가해지는 전기장의 크기</p> <p><math>F_{ER}</math> : 전기장에 의해 가변되는 댐핑력</p>	<p><math>F(t)</math> : 차체를 통해 엔진마운트에 가해지는 힘</p> <p><math>h</math> : 전극판 간극틈새</p> <p><math>K_R</math> : 고무의 수직강성계수</p> <p><math>K_T</math> : 상부챔버의 팽창효과로 인한 수직강성</p> <p><math>K_B</math> : 하부챔버의 팽창효과로 인한 수직강성</p> <p><math>L</math> : 전극판 길이</p> <p><math>M</math> : 엔진질량</p> <p><math>P_1</math> : 상부챔버의 압력</p> <p><math>P_2</math> : 하부챔버의 압력</p> <p><math>Q_1</math> : 전극판 사이로 흐르는 ER 유체의 유량</p>
--	---

\* 정회원, 인하대학교 기계공학과  
\*\* 정회원, 유한전문대학 금형설계과

- $R_f$  : 전기장 비인가시 전극판에 발생하는 유체 저항(Fluid Resistance)  
 $X(t)$  : 차체에 대한 유체의 상대적인 변위  
 $Y(t)$  : 차체를 통해 엔진마운트에 입력되는 가진 변위( $Y(t) = Y_0 \sin \omega t$ )  
 $\tau$  : 유체의 전단응력(Shear Stress)  
 $\tau_s(E)$  : ER 유체의 항복응력  
 $\eta$  : ER 유체의 점성 계수  
 $\dot{\gamma}$  : 전단속도비(Shear Rate)

## 1. 서 론

최근 자동차 기술개발 경향의 특징을 보면 계속적인 신소재 개발로 인한 자동차의 경량화와 엔진의 고출력화 및 터보화 등에 따라 종전보다 현격히 높은 소음 진동 및 승차감의 개선을 요구하고 있고, 또한 이와 병행하여 에너지 효율을 위한 연비의 개선은 물론 대기 정화를 위한 유해배출 가스의 절감에도 관심을 기울이고 있다. 이러한 자동차의 소음, 진동 및 승차감의 개선 방법으로는 엔진에서 발생하는 가진력을 차체와 절연시키는 방법과 차량의 주행시 노면에서 전달되는 가진력들이 엔진에 미치는 영향을 효과적으로 차단하는 방법이 있다. 따라서, 이 방법들은 자동차의 현가장치와 엔진마운트 등과 같은 방진 부품의 기능과 성능을 향상시켜 더욱 안락한 승차감을 주행자에게 제공하기 위한 것이다.

엔진의 진동과 소음을 발생시키는 가진원은 30 Hz이하의 저주파수 범위대와 30Hz이상의 고주파수 범위대로 나누어진다. 저주파수 범위대의 가진은 가진 진폭이 크기 때문에 엔진 현가계에 전달되는 충격력이 상대적으로 매우 높으며 차체에 급격한 흔들림과 승차감에 큰 영향을 준다. 따라서, 자동차의 승차감 개선을 위해서는 우선적으로 고려되어야 한다. 고주파수 범위대의 가진은 가진 진폭이 작아 충격력은 작으며 주로 소음문제를 야기시킨다. 저주파수 범위대의 가진원으로는 엔진 공진(6-12Hz), 엔진을 시동할 때나 정지할 때 발생하는 차체의 급격한 요동, 엔진의 급속한 가속이나 감속으로 인한 진동, 차량 주행시 타이어 회전의 불균형력에 의한 차

체의 진동, 노면의 불균일과 요철에 의한 충격(10 Hz 전후), 엔진 점화의 불균일로 인한 엔진 셰이크(Engine Shake) 현상(20Hz 전후), 그리고 엔진의 아이들링(Engine Idling) 현상(20-30Hz) 등이 있다. 한편, 30Hz이상의 고주파수 범위대에는 엔진의 높은 회전으로 발생하는 차체의 진동과 소음 등이 있다.<sup>1-12)</sup>

엔진의 진동이 차체로 이동되는 전달력을 줄이기 위해서는 일반적으로 엔진마운트의 강성이 낮을수록 좋지만 엔진의 움직임을 제어하고 마운트의 내구성을 좋게 하기 위해서는 마운트의 강성은 커야한다. 이러한 상반된 요구특성을 만족시키기 위해 엔진마운트는 30Hz이하의 저주파수 범위대에 있는 큰 가진에 대해서 보다 큰 댐핑과 강성으로 엔진의 특이변위를 규제해야 하고, 고주파수 범위대의 작은 가진에 대해서는 작은 댐핑과 강성으로 엔진의 진동을 차체와 절연시켜야 한다. 기존 고무마운트는 고주파수 범위대의 엔진진동 절연에는 좋으나 큰 댐핑을 발생시키지 못하므로 저주파수 범위대의 큰 가진에 대해서 저하된 성능을 나타내므로 두 주파수 범위대의 특성을 충족시키기 위한 유체봉입 마운트가 출연하게 되었고 80년대 초부터 실제 자동차에 장착되기 시작하였다. 수동식 유체봉입 마운트의 진동제어 구조는 저주파수 범위대에서 큰 댐핑을 발생시키기 위하여 길고 단면적이 작은 오리피스 모양의 관성트랙(Inertia Track)을 갖고 있으며 또한 작은 가진의 고주파수 범위대에서 큰 댐핑이 발생되지 않게 하기 위하여 분리기(Decoupler)를 장착한 것으로 단지 엔진 공진 근처에 있는 저주파수 범위대의 진동만을 효과적으로 제어할 수 있다.<sup>1-8)</sup> 이후, 더 넓고 범위의 엔진 진동과 소음 제어 성능을 향상시키기 위하여 유체봉입 마운트에 솔레노이드 밸브(Solenoid Valve)를 사용하여 오리피스를 열고 닫아 진동을 제어하는 방식<sup>9)</sup>과 외부에서 마이크로 컴퓨터를 이용하여 서보밸브(Servo Valve)를 작동시켜 가진이 들어올 때에 마운트에 유체를 주입시켜 진동을 제어하는 방식<sup>10-12)</sup>의 반응동식 엔진마운트가 제안되어 자동차의 승차감을 더욱 향상시켰다.

최근들어 전기장의 변화에 따라 유체의 유동

성질이 급변하는 특성을 지닌 ER(Electro-Rheological) 유체를 이용한 마운트(이후 'ER 엔진마운트'라고 표현)에 대한 연구가 출연하게 되었다. ER 엔진마운트는 전기장의 크기에 따라 시스템의 강성과 댐핑이 조절되는 마운트로서 일반 고무마운트보다 성능이 우수함은 물론 기존에 기계적으로 오리피스스의 직경을 변화시켜 댐핑을 가하는 반응동식 엔진마운트보다 응답성이 우수하고 댐핑조절을 위해 전기장을 가하기 위한 전극판만을 첨가시키면 되므로 장치의 소형화가 가능하다. 또한 폭 넓고 연속적인 댐핑력을 발생시키며 전력 소비도 낮고 공진 영역도 이동시킬 수 있는 장점이 있다. 이러한 특징으로 인해 ER 유체를 이용한 응용장치로는 엔진마운트의외 자동차관련 장치인 스텝 업소버, 스쿠즈 필름 댐퍼, 클러치 및 브레이크 시스템 등이 있으며 활발한 투자와 연구가 진행되고 있다.<sup>13-15)</sup>

ER 엔진마운트의 연구로서 Duclos<sup>16)</sup>가 제시한 마운트는 전기장의 On-Off 제어에 의하여 관성트랙 끝에 부착된 ER밸브를 개폐하는 방식으로 외부 가진 조건에 따라 시스템의 유체관성력을 변화시켜 외란을 제어하였다. 시스템 해석은 에너지 흐름을 연결하여 상태 방정식을 표현하는 본드 그래프 방법(Bond Graph Method)으로 수행되었다. Ushijima<sup>17)</sup>는 실린더 모양의 적극판을 사용한 ER 엔진마운트를 제안하였고 수학적 해석없이 강성과 ER 유체로 인한 댐핑이 병렬로 연결되어 있는 1 DOF(Degree-of-Freedom)로 시스템 모델을 단순화하여 실험하였다. 또한 Petek<sup>18)</sup>은 평판모양의 전극판을 갖는 ER 엔진마운트를 제시하여 전기장 인가시 공진 주파수의 이동이 가능함과 기존 유체봉입 마운트보다 성능이 우수함을 실험적으로 증명하였으며, 온도변화에 따른 영향과 전기장을 가했을 때 2Watt이하의 낮은 전력이 소비되었음을 발표하였다. Morishita<sup>19)</sup>는 ER 엔진마운트의 특성을 고찰하기 위해 평판모양의 전극판을 갖는 엔진마운트를 제작하여 실험을 수행하였고 이 결과로부터 시스템 모델을 대략적으로 제시하였다. Genesseeux<sup>20)</sup>는 길고 단면적이 작은 관성트랙을 구성하여 저주파수범위의 엔진 공진을 제어하고 전극판이 양

면에 부착된 짧은 길이의 관성트랙을 구성하여 엔진 공진 주파수보다 상대적으로 높은 주파수 범위의 아이들링 진동을 제어하는 ER 엔진마운트를 제안하였다. 또한 평판모양을 갖는 여러장의 전극판을 병렬로 배치하여 만든 분리기를 제안하여 큰 가진 진폭시에는 전기장을 가해 유체가 분리기로 흐르지 못하게 하고 관성트랙으로 유체를 흐르게 하였으며, 작은 가진 진폭시에는 분리기로 유체를 흐르게 하여 큰 댐핑을 발생시키지 않게 하였다.

이와 같은 대부분의 기존 ER 엔진마운트에 대한 연구에서는 논리적 시스템 모델 구성과 이론 방법을 통한 시스템의 수학적 해석없이 실험만을 통한 성능 고찰을 수행하였다. 따라서, 본 논문에서는 전기장의 증가에 따라 유체의 상태가 변화되는 ER 유체 특성이 마운트에 미치는 영향을 수학적으로 모델링 하고 이것으로부터 마운트의 역학적 시스템 모델을 도출하여 그 성능을 해석하는데 연구 목적을 두었다. 이를 위해 마운트의 성능해석시에 필요한 ER 유체의 고유특성치인 점성과 전기장 증가에 따른 항복응력값은 자체 제작한 Viscometer를 이용하여 실험적으로 얻었다. 본 연구에서 제안된 ER 엔진마운트는 평판모양의 전극판을 여러장 갖는 마운트로 전기장 인가시 큰 댐핑을 발생시켜 진동을 제어하는 것으로 구성되었으며, ER 엔진마운트의 성능 특성은 주파수 영역에서 전기장 증가에 따른 전달률(Transmissibility)개념을 통하여 해석하였다. 그리고 전기장 증가에 따른 성능 해석의 결과로부터 ER 엔진마운트에 영향을 미치는 설계 매개변수를 결정하여 보다 우수한 성능의 마운트 설계와 능동식 제어알고리즘을 적용할 수 있는 이론 해석을 제시하였다.

## 2. ER 유체의 역학적 특성실험

ER 유체는 부하되는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 것으로, 일반적으로 비전도성 유체 속에 강한 전도성 입자들을 분산시킨 콜로이드 용액이다. 1949년 Winslow가 가해지는 전기장에 의해 실리카를 입자

로 한 유체의 점성이 변함을 처음으로 발표하였으며 Winslow 유체라고도 불리운다.<sup>21)</sup> 그후 많은 연구자들에 의해 ER 유체의 메카니즘과 응용성에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.

ER 유체 특성은 일반적으로 전기장이 가해짐에 따라 유체에 전단응력이 변화하는 것으로 Fig.1에서 보는 바와 같이 전기장 비인가시 유체입자가 양극 또는 음극으로 자유로이 운동을 하는 Newtonian 유체 상태에서 전기장 인가시에는 유체 중에 분산된 입자가 체인형 구조를 형성하여 유체가 항복응력을 갖는 Bingham 유체 상태로 변화하게 된다. 따라서 외부에서 가해지는 전단력에 대하여 전기장 인가시 ER 유체는 저항을 갖게 된다.<sup>22)</sup> 입자의 종류로는 전분, 셀룰로이드, 실리카 등으로부터 전용으로 합성된 입자에 이르기까지 많은 종류가 사용되고 있다. 이렇게 전기장 비인가시의 등방향(Isotropic) 성질에서 전기장 인가시의 이방향(Anisotropic) 성질로의 상변화에 필요한 전기장의 크기는 약 1~3kV/mm이나 전류밀도(Current Density)가 약 10 $\mu$ A/cm<sup>2</sup> 이하이기 때문에 요구되는 전력은 매우 낮으며 ER 유체의 반응시간은 1ms 이하이고 최대반응 주파수는 약 12kHz로 알려져 있다.

ER 유체의 전기장 인가시 Bingham 유체성질

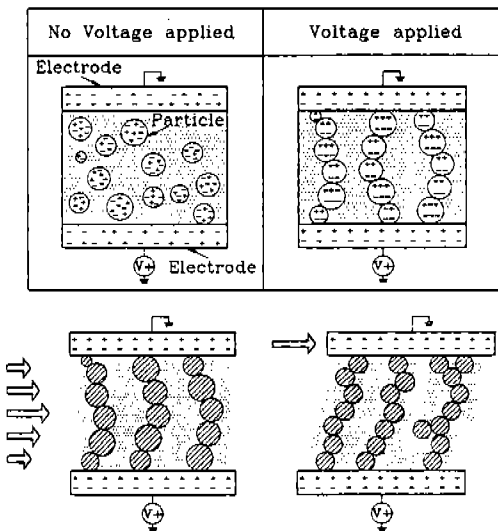


Fig.1 Phenomenological Behavior of an Electro-Rheological Fluid

에서 도출된 전단거동식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서  $\tau_y(E)$ 는 ER 유체의 항복응력을 표현한 것으로 전기장  $E$ 의 함수가 되는데 일반적으로  $\tau_y(E)$ 는 전기장 함수  $E$ 의 지수적 비례관계를 갖고 있는 것으로 입증되었다. 따라서, 식 (1)을 전기장의 Explicit 함수로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \alpha E^x \quad (2)$$

여기서 상수  $\alpha$  및  $x$ 값은 각각 ER 유체들의 입자 농도와 전기장의 크기에 대한 고유특성치로서 일반적으로 실험을 통해 얻어진다.

Bingham 거동특성으로 인한 전단식 (2)로부터 외부에서 가해지는 전단속도비의 증가에 따른 유체 전단응력의 증가와 전기장의 증가에 따른 항복응력의 증가가 발생됨을 알 수 있다. 이것을 마운트에 적용하여 생각하면, 마운트의 전극판 간격틈새로 흘러가는 ER 유체의 유량 증가에 따른 압력강하와 전기장 증가시 항복응력 증가로 인한 압력강하를 발생시켜 마운트에 큰 댐핑이 발생됨을 알 수 있으며  $\tau_y(E)$ 는 전기장의 함수이므로 전기장의 크기에 따라 마운트의 댐핑이 조절됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 같은 용매에 입자 중량비가 다른 2종류의 ER 유체를 자체조성하여 이들 유체의 Bingham 거동 실험을 수행하였다. 실험에서 도출된  $\alpha$ 와  $x$ 값을 갖는 모델 (2)를 엔진마운트 모델에 연계하여 마운트의 댐핑 성능 특성을 고찰하였다.

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig.2에서 보는 바와 같이 동축실린더의 Couette형으로 구성하여 자체 제작하였다. 안쪽 실린더의 직경은 20mm이고 길이는 45mm이다. 바깥쪽 실린더의 내경은 22mm이고 길이는 50mm로 하였다. ER 유체가 채워질 간극은 1mm로 하였으며, 유체가 접하는 부분의 길이는 45mm로 하였다. ER 유체로부터 전달되는 토크를 측정하기 위하여 안쪽실린더의 상부에 스트레인게이지를 부착하였는데 순수

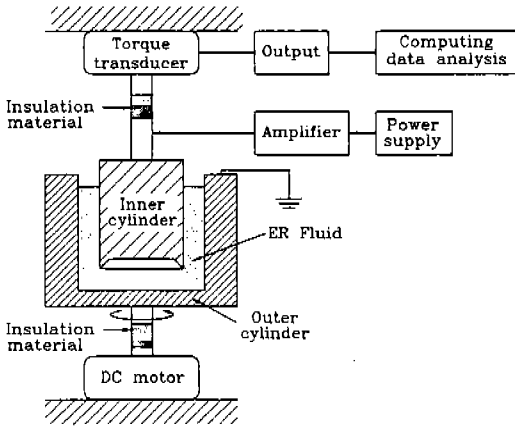
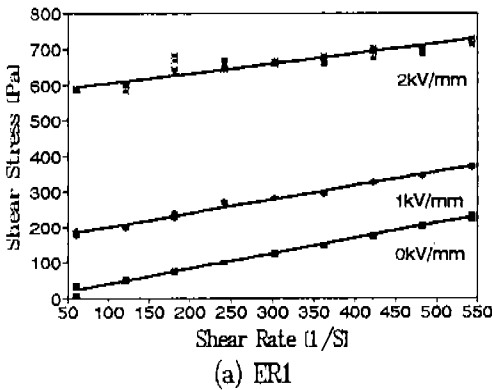
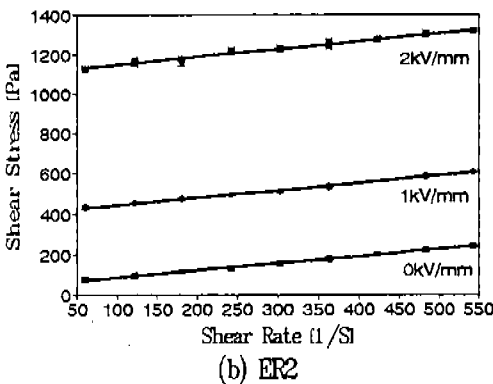


Fig.2 Schematic Diagram of the Apparatus for Electro-Rheological Measurements.



(a) ER1



(b) ER2

Fig.3 Shear Stress vs. Shear Rate

비틀림이 작용하는 것으로 가정하여 킷스톤브리지를 형성하였다. 또한 전기장 인가시 전기장의 스트레인 게이지에 대한 영향을 없애기 위하여 안쪽실린더의 중간 부분에 고장력 FRP(Fiber-Reinforced Plastic)를 사용하여 절연하였다. ER 유체에 전기장을 가하기 위하여 안쪽 실린더의 절연체 아래 부분과 바깥쪽 실린더에 전극부를 만들어 전기장을 형성할 수 있게 하였다. 또한, 주변기에 대한 전기장의 영향을 고려하여 모터와 바깥쪽 실린더 사이에도 절연을 시켰고, ER 유체에 회전력을 가하기 위하여 DC 모터를 사용하였다. 형성된 전극을 통하여 0~2kV/mm의 전기장을 가하면서 바깥쪽 실린더를 회전시켜 간극사이에 채워진 ER 유체로부터 전달되는 토오르크를 측정하여 유체의 전단력으로 환산하였다. 자체제작한 실험장치의 신뢰성을 검토하기 위하여 전기장 비인가시에 대하여 기존의 상용 Viscometer(VT500, HAAKE)와 비교 실험하여 그 결과를 보정하였다.

본 실험에서는 ER 유체중의 입자농도에 따른 영향을 고려하기 위하여 비전도성의 실리콘 오일(50cs)을 용매로 하고 전도성 입자의 중량비를 달리한 ER1(30%), ER2(40%)의 2가지 ER 유체를 자체 조성하여 실험을 행하였다. 실험 조건으로써 온도는 실온(20°C)으로 고정하였으며, 전기장은 0~2kV/mm까지 1kV/mm씩 증가시켰고 바깥쪽 실린더를 0~540rpm까지 60rpm씩 단계별로 증가시켜 ER 유체의 역학적 특성을 고찰하였다. 또한 실험의 오차를 줄이기 위하여 같은 조건에 대하여 6번씩 반복 측정하였고 그 평균값을 이용하여 직선 보간 하였다.

전기장의 크기를 변화시켰을 때 ER 유체의 전단속도비와 전단응력의 관계를 Fig.3에 도시하였다. 그림에서 보듯이 0~2kV/mm까지 전기장의 크기가 증가할수록 동일한 전단속도비에 대한 전단응력의 크기가 증가하는 것을 알 수가 있으며, 일정한 전기장의 크기에 대하여 유동이 시작된 후에는 전단응력이 전단속도비에 대하여 전기장 비인가시의 경우와 유사한 비율로 증가함을 나타내고 있다. ER1과 ER2의 실험결과에서 나타난 바와 같이 ER 유체속에 입자 중량비의

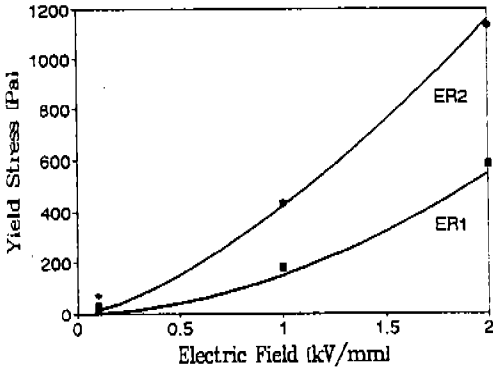


Fig.4 Yield Stress vs. Electric Field

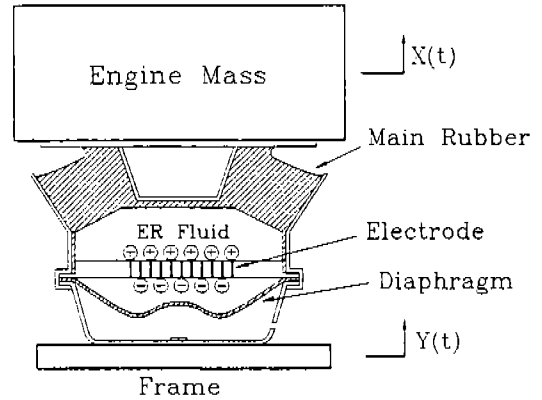


Fig.5 ER Fluid-Filled Engine Mount

값이 클수록 큰 기율기를 가지며, 동일한 전단 속도비에 대하여 큰 전단응력의 분포를 갖게 됨을 알 수 있다. Fig.4는 ER 유체의 전기장의 크기와 항복응력과의 관계를 도시한 것으로 입자의 중량비가 30%인 ER1의 경우보다는 40%의 중량비를 갖는 ER2가 동일한 강도의 전기장 부하에 대하여 큰 항복응력을 나타냄을 알 수가 있으며 항복응력을 식 (2)와 같이 표현하면 전기장 E에 대하여 ER1은  $151E^{1.66}$ , ER2는  $421E^{1.46}$ 의 관계를 갖는다.

실험에서 고찰한 바와 같이 ER 유체 특성 변화에 영향을 미치는 인자로는 전기장의 크기 뿐만 아니라 입자의 중량비도 매우 중요한 인자임을 알 수 있었고 전기장 증가에 따라 ER 유체의 항복응력이 전기장 E에 대하여 지수비례적으로 증가됨을 알 수 있었다. 이러한 특성으로부터 전기장 증가에 따라 ER 엔진마운트의 댐핑이 조절 혹은 제어될 수 있음을 예측할 수 있다.

### 3. ER 엔진마운트의 구성 및 모델링

본 연구에서 제안된 ER 엔진마운트의 구조는 Fig.5와 같다. ER 유체는 전극판으로 나누어진 상부챔버(Top Chamber)와 하부챔버(Bottom Chamber)에 채워져 있고, ER 유체의 유출방지를 위해 상부와 하부 챔버는 고무부분으로 둘러싸여져 있다. 이 고무부분은 수직강성을 갖기 때문에 엔진무게를 지지하며 또한 가진에 의해서

눌려진 상부챔버의 ER 유체를 하부 챔버로 내려가게 하는 역할도 수행한다. 하부챔버의 다이어프램(Diaphragm)은 전극판 간격틈새로 흘러내려온 ER 유체를 쌓아두는 역할을 한다. ER 유체에 전기장을 가하는 전극판은 직사각형 모양의 평판으로 일정한 간격을 갖으며, 고전압 공급장치를 사용하여 한쪽 전극판에는 (+)전원을 반대쪽 전극판에는 (-)전원을 병렬 연결하여 각각의 전극판 간격에 일정한 크기의 전기장이 발생되도록 구성하였다. 따라서 전기장 비인가시에는 유체 점성으로 인한 유체 댐핑력만을 발생시키고 전기장 인가시에는 ER 유체에 항복응력을 증가시켜 마운트에 더 큰 댐핑력을 발생시킨다.

ER 엔진마운트 해석을 위한 가정으로 ER 유체는 비압축성유체로 가정하였고 해석의 단순화를 위해 마운트의 수직방향만을 고려하였으며, 상부와 하부챔버의 피스톤 단면적은 동일하다고 가정하였다. 또한 전극판 간격 형상에 따른 압력손실, 유체 관성력 그리고 다이어프램의 댐핑은 무시하였고 동일 공간에서의 내부압력은 모든 방향으로 균일하게 작용하며 ER 유체의 유동 및 고무의 탄성 변형에 따른 열역학적 사항은 고려하지 않았다.

ER 엔진마운트의 유체 특성을 고려한 유체 역학적 모델이 Fig.6에 도식되었다. 그림에서 강성으로 표시된 상, 하부챔버의 컴플라이언스는 유체의 컴플라이언스와 고무변형으로 인한 컴플

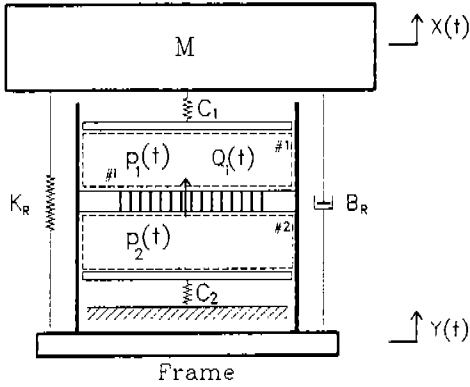


Fig. 6 Hydraulic Model of ER Fluid-Filled Engine Mount

라이언스의 합으로 표현된다. 그러나 ER 유체를 비압축성으로 가정하였고 실제로 압축된다하더라도 매우 작으므로 유체의 컴플라이언스는 없다고 보았다. 차체를 통해 마운트에 입력되는 가진은 일정한 진폭을 갖는 정현파 함수인  $Y(t) = Y_a \sin \omega t$ 의 입력형태로 보았고 이 모델로부터 다음과 같은 지배 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} M \ddot{X}(t) + K_R(X(t) - Y(t)) + B_R(\dot{X}(t) - \dot{Y}(t)) - A_p P_1(t) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ER 유체가 전극판 간격틈새로 흐를 때 발생되는 전체 압력강하는 전극판 간격틈새로 인한 압력강하  $\Delta P_i$ 와 전기장 인가시 항복응력에 의한 압력강하  $\Delta P_{ER}$ 의 합으로 표현된다.

$$\begin{aligned} P_2(t) - P_1(t) &= \Delta P_i + \Delta P_{ER} \\ &= R_i Q_i(t) + 2 \frac{L}{h} \tau_y(E) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

$$R_i = \frac{12\eta L}{bh^3}$$

그리고 상부챔버와 하부챔버에서 일어나는 유체

유동에 대하여 연속방정식을 적용하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$Q_i(t) - A_p(\dot{X}(t) - \dot{Y}(t)) = C_1 \dot{P}_1(t) \quad (5)$$

$$-Q_i(t) = C_2 \dot{P}_2(t) \quad (6)$$

식 (3)-(6)으로부터  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ 를 소거하고  $K_T \equiv A_p^2/C_1$ ,  $K_B \equiv A_p^2/C_2$ ,  $B_i \equiv A_p^2 R_i$ ,  $F_{ER} \equiv 2A_p \frac{L}{h} \tau_y(E)$ ,  $Q_i(t) \equiv A_p \dot{X}_i(t)$ 로 정의하여 식 (3)을 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} M \ddot{X}(t) + K_R(X(t) - Y(t)) + B_R(\dot{X}(t) - \dot{Y}(t)) - F(t) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$-K_B X_i(t) + F(t) = B_i \dot{X}_i(t) + \text{sgn}(X_i(t)) F_{ER} \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} F(t) &= K_T(X(t) - Y(t) - X_i(t)) \\ \text{sgn}(X_i(t)) &= \begin{cases} 1, & X_i(t) > 0 \\ 0, & X_i(t) = 0 \\ -1, & X_i(t) < 0 \end{cases} \end{aligned}$$

따라서 식 (7)과 (8)로 표현되는 역학적 모델을 Fig.7과 같이 구성할 수 있다. 고무자체의 수직강성( $K_R$ )과 댐핑( $B_R$ )은 Voigt모델과 같이 차체와 엔진질량사이에 병렬로 연결되어 있으며, ER 유체 댐핑( $B_i$ )과 하부챔버의 팽창으로 인한 수직강성( $K_B$ )이 병렬로 연결되고, 이것이 상부챔버의 팽창으로 인한 수직강성( $K_T$ )과 직렬로 연결되어 있는 1DOF 시스템이다. ER 엔진마운트는 전기장 비인가시에 전극판에서 발생하는 가변댐핑력  $F_{ER}$ 이 없으므로 유체 저항으로 인한 유체댐핑만을 발생시킨다. 그러나 전기장 인가시에는 차체를 통해 가해지는 힘  $F(t)$ 가 가변댐핑력  $F_{ER}$ 보다 커서 전극판 사이로 유체가 흘러 유체저항으로 인한 유체댐핑을 발생시키는 경우와 가해지는 힘

$F(t)$ 가 가변댐핑력  $F_{ER}$ 보다 작아 유체가 전극판 사이로 흐를 수 없게 되어 유체댐핑을 발생시키지 않는 경우의 두가지 시스템 특성을 갖는다.<sup>13)</sup> 이 시스템 특성에 따라 상태변수를  $X(t)-Y(t) \equiv Z_1$ ,  $X(t)-Y(t) \equiv Z_2$ ,  $X_1(t) \equiv Z_3$ 로 정의하여 식 (7)과 (8)을 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\{Z\} = [Z_1 \ Z_2 \ Z_3]^T, \{\omega\} = \dot{Y}(t) \tag{9}$$

$$\dot{\{Z\}} = [A]\{Z\} + [D]\{\omega\} + [B]$$

여기서 시스템 행렬  $[A]$ , 차체에서 들어오는 입력행렬  $[D]$ , 그리고 전기장에 의해 조절되는 댐핑 입력행렬  $[B]$ 는 시스템 특성에 따라 다음과 같이 주어진다.

①  $|F(t)| > F_{ER}$ 일 경우 ;

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K_R+K_T}{M} & -\frac{B_R}{M} & \frac{K_T}{M} \\ \frac{K_T}{B_i} & 0 & -\frac{K_B+K_T}{B_i} \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$[D] = [0 \ -1 \ 0]^T,$$

$$[B] = \left[ 0 \ 0 \ -\frac{\text{sgn}(X_1(t))F_{ER}}{B_i} \right]^T$$

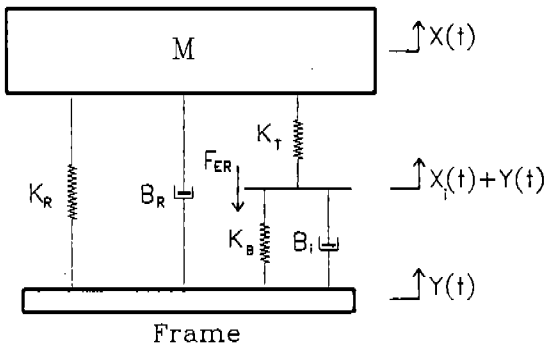


Fig.7 Mechanical Model of ER Fluid-Filled Engine Mount

②  $|F(t)| \leq F_{ER}$ 일 경우 :

전극판 간격틈새로 흘러 내려가는 유량이 발생하지 않으므로  $Z_3$ 인  $X_1(t)$ 는 0이다. 따라서,

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K_R+K_T}{M} & -\frac{B_R}{M} & \frac{K_T}{M} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$[D] = [0 \ -1 \ 0]^T, [B] = [0 \ 0 \ 0]^T$$

#### 4. 성능해석 및 고찰

일반적으로 엔진마운트에 입력되는 가진의 경우, 저주파수의 큰가진 진폭은  $\pm 1.0\text{mm}$ 로 보고 고주파수의 작은 가진은  $\pm 0.1\text{mm}$ 로 본다. 따라서, 본 논문에서는 저주파수의 큰 가진 진폭( $\pm 1.0\text{mm}$ )과 고주파수의 작은 가진 진폭( $\pm 0.1\text{mm}$ )의 두가지 경우로 나누어 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 여기에 사용된 대개변수값은 가솔린 엔진을 갖는 소형 승용차에 장착된 유체봉입 엔진마운트값을 사용하였고 전극판의 크기는 마운트의 전체크기에 맞추어 적절한 값을 선택하였으며 그 값들은 다음과 같다.

$$M = 58.6\text{kg}, B_R = 116\text{N} \cdot \text{s/m},$$

$$K_R = 144\text{N/mm}, K_T = 122\text{N/mm}, K_B = 0.2\text{N/mm},$$

$$A_p = 50\text{cm}^2, b = 4\text{cm}, L = 1\text{cm}$$

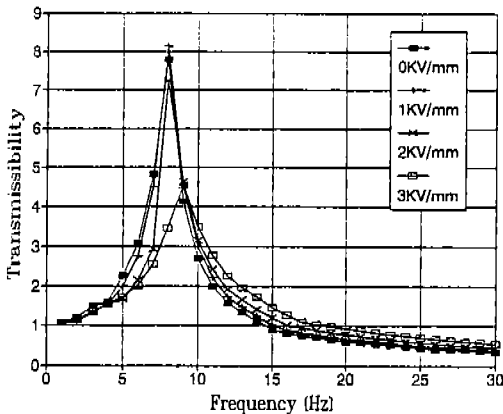
Fig.8(a)는 입자 농도가 30%(ER1)이고 전극판 간격틈새( $h$ )가  $1\text{mm}$ 인 조건에 가진 진폭이  $\pm 1.0\text{mm}$ 일때 전기장 증가에 따른 성능 응답을 나타낸 것이다. 이는 실험으로 얻은 ER 유체의 고유특성치인 상수  $\alpha$ 와  $x$ 를 갖고 주파수 영역에서 전기장  $E$ 를 변화시켜 가면서 전달률로 ER 엔진마운트의 성능 특성을 고찰한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전기장 비인가시에 가장 큰 공진



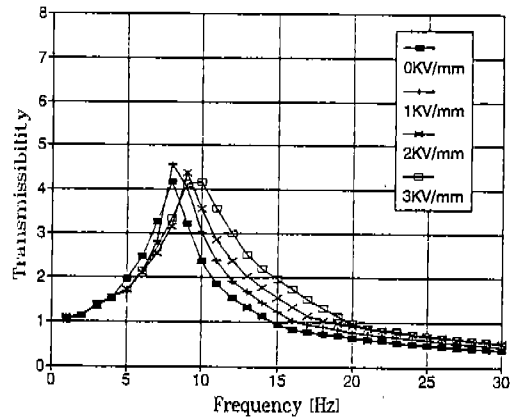
변위를 갖다가 전기장 증가에 따라 공진 변위가 연속적으로 크게 감소됨을 알 수 있다. 또한 공진 주파수가 전기장 비인가시 8Hz인 것이 3kV/mm로 증가됨에 따라 9Hz로 이동되었는데 이것은 전기변화에 따라 댐핑력의 변화뿐 아니라 감성도 변화되기 때문이다.<sup>18-19)</sup> 그리고 10Hz이상의 범위에서는 전기장을 가하지 않는 것이 더 좋은 성능을 나타내었는데 이것은 상대적으로 높은 주파수범위대에서는 댐핑이 작은 것이 더 좋은 성능을 나타내기 때문이다. Fig.8(b)는 Fig.8(a)와 같은 조건에 가진 진폭이 ±0.1mm일때 가진 입력 주파수 변화에 따른 성능 특성을 나타낸 것이다. 0kV/mm에서 1kV/mm까지는 Fig.8(a)와 비교하여 볼때 동일한 전기장 크기에 대하여 더 큰 공진 변위의 감소를 나타내나 전기장이 더욱 증가되자

전기장 비인가시 보다 더 큰 공진 변위의 증가를 볼 수 있다. 이것은 가진입력이 작아 전체를 통해 엔진마운트에 가해지는 힘  $F(t)$ 가 작아졌기 때문으로 Fig.8(a)보다 빨리  $|F(t)| \leq F_{ER}$ 인 시스템 상태로 되어 차체 시스템 댐핑이 감소하기 때문이다. 물리적으로 설명한다면 외부압력이 전기장에 의해 발생되는 ER 유체의 전단응력보다 작아서 유체 유동이 발생되지 않게 되고 유체 유동 저항으로 인한 에너지 손실이 발생되지 않기 때문이다. 그리고 공진주파수는 전기장이 증가됨에 따라 더욱 증가되어 3kV/mm일 때에 10Hz로 이동되었다.

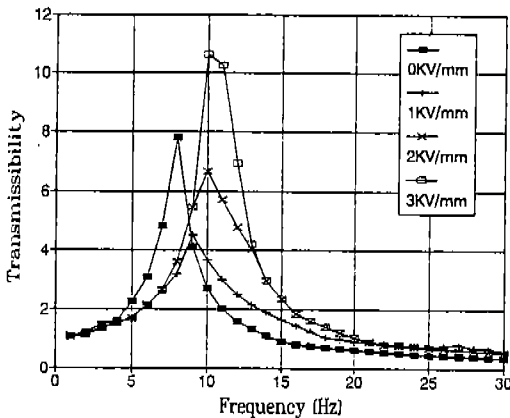
Fig.9(a)는 입자 농도가 40%(ER2)이고 Fig.8(a)와 동일한 전극판 간격특성에 전기장을 증가시켰을 때의 시스템 응답으로서, 거의 모든 전기



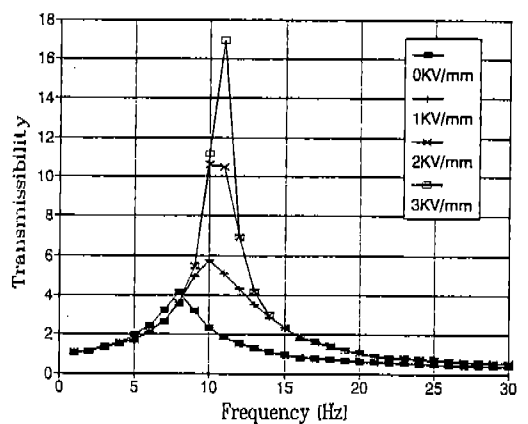
(a) Exciting Amplitude : ± 1.0mm



(a) Exciting Amplitude : ± 1.0mm



(b) Exciting Amplitude : ± 0.1mm



(b) Exciting Amplitude : ± 0.1mm

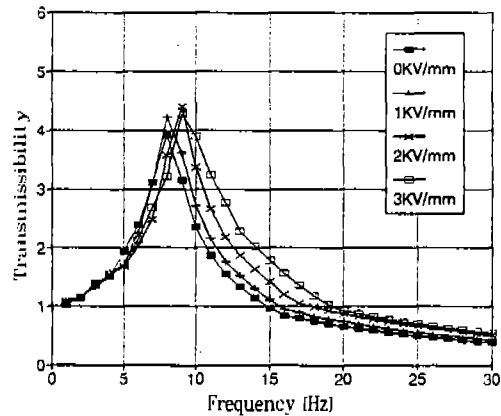
Fig.8 System Responses(ER1, h=1mm)

Fig.9 System Responses(ER2, h=1mm)

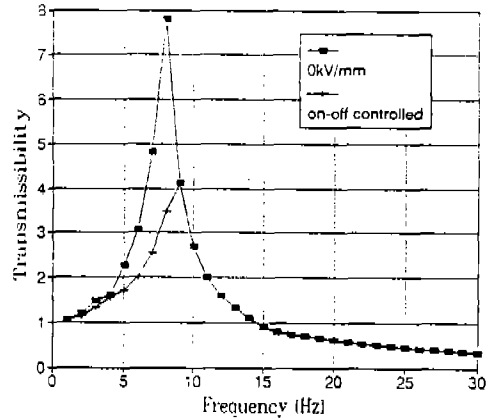
장하에서 공진 변위는 감소하지 않았고 3kV/mm인가시 공진 주파수만이 8Hz에서 10Hz로 Fig. 8(a)보다 조금 더 이동하였다. 이것으로부터 ER 유체중의 입자농도가 증가되어 항복응력을 증가 되면 동일한 전기장 크기에 대해 시스템의 강성도 증가됨을 알 수 있다. 이와 같은 공진 영역의 이동은 시스템의 제어 영역(Bandwidth)의 증가를 의미하는 것으로 외부 가진주파수가 전기장 비인가시 공진 주파수로 가진 되어 들어올때 전기장을 가해 공진 주파수를 이동시켜 외부 가진 진동을 제어하는 능동식 제어(Active Control) 방법도 가능하다는 것을 의미한다. Fig.9(b)는 Fig.9(a)와 같은 조건에 가진 진폭이  $\pm 1.0\text{mm}$ 일때의 성능 응답으로 전기장 증가에 따라 공진 변위가

연속적으로 매우 크게 증가되었다. 이것은 가해지는 힘  $F(t)$ 의 감소와 입자 농도 증가로 동일 전기장 인가시 ER 유체의 항복전단응력이 크게 증가되어 더욱 빨리 식 (11)의 시스템 상태로 되기 때문이다.

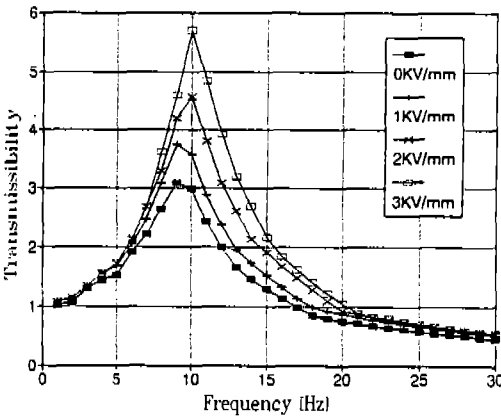
Fig.10(a)는 입자 농도가 30%이고 전극판 간격 틈새가 0.7mm인 조건에 가진 진폭이  $\pm 1.0\text{mm}$ 일때의 시스템 응답이다. 전기장 비인가시 Fig.8(a)와 비교하여 매우 작은 공진 변위를 고찰할 수 있는데 이는 식 (4)에서 알수 있듯이 전극판 간격틈새가 좁아지면 유체 저항의 증가로 유체 땀 평이 증가하기 때문이다. 한편 전기장 증가에 따라 공진 변위는 약간 증가하였으며 공진 주파수는 3kV/mm의 전기장 인가시 8Hz에서 9Hz로



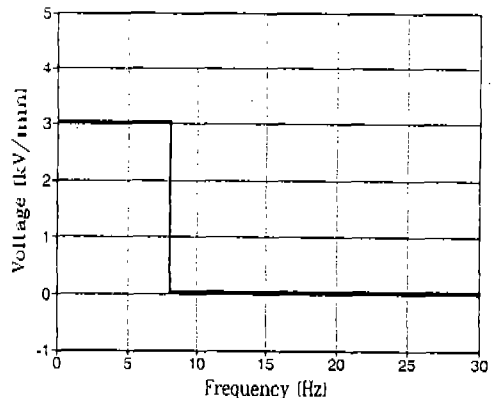
(a) ERI



(a) System Response Curve



(b) ER2



(b) Control Voltage

Fig.10 System Responses(Exciting Amp =  $\pm 1.0$ )

Fig.11 Controlled System Responses(ER1, Exciting Amp =  $\pm 1.0\text{mm}$ ,  $h = 1\text{mm}$ )

이동되었다. 이것은  $F_{ER} \equiv 2A_p \frac{L}{h} \tau_r(E)$ 의 식에서 알 수 있듯이 동일한 전기장 인가시 전극판 간격틈새  $h$ 의 감소에 따른 ER 유체 댄핑력  $F_{ER}$ 이 증가되어 Fig.8(a)보다 더욱 빨리 식 (11)의 상태로 된 것이다. Fig.10(b)는 입자 농도가 40%이고 Fig.10(a)와 같은 조건으로 전기장 증가에 따른 성능 응답이다. 전기장이 증가됨에 따라 공진 변위가 점차 증가되어 3kV/mm에서는 0kV/mm일 때 보다 약 2배 가량 증가되었으며 공진 주파수는 9Hz에서 10Hz로 이동되었다. 이것은 전극판 간격틈새 감소와 전기장 증가에 따른 ER 유체의 항복전단응력이 매우 증가하여 Fig.9(a)보다 더욱 빨리 식 (11)의 시스템 상태로 된 것이다.

시뮬레이션을 통한 성능 특성에서 고찰한 바와 같이 ER 유체 특성이나 설계매개변수( $h$ ) 및 가진 변위등을 고려하지 않고 전기장 크기를 크게 하는 것이 ER 엔진마운트에 좋은 성능을 가져오지는 않는다. 따라서 전기장 증가에 따른 ER 엔진마운트의 성능 특성을 토대로하여, 차체를 통해 마운트에 가진되는 주파수가 임의로 변화하더라도 전기장 부하를 능동적으로 변화시켜 ER 엔진마운트의 공진 주파수를 피하고 공진 변위를 최소화하는 능동식 제어알고리즘 구성이 필요하다. 능동식 제어알고리즘의 기본개념은 시스템의 성능 특성을 고찰한 후에 시스템의 성능 특성이 최대로 향상되는데 요구되는 주파수 대역 설정 및 그에 대응하는 전압을 설정하여 공급하는 것이다. 그 일례로, Fig.8(a)에 나타난 전기장 증가에 따른 성능 특성을 토대로하여, 주파수 영역에서 전달률을 최소화하기 위해 상응하는 전압을 ER 엔진마운트에 가하는 것으로 이를 논리적인 제어알고리즘으로 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

IF  $0\text{Hz} \leq \omega \leq 8\text{Hz}$  THEN  $V=3\text{kV/mm}$

IF  $\omega > 8\text{Hz}$  THEN  $V=0\text{kV/mm}$

Fig.11(a)는 이 능동식 제어알고리즘을 사용하였을 때의 시스템 응답으로 전기장 비인가시의

공진 변위가 제어알고리즘 적용후 크게 감소됨을 알 수 있으며 제어에 요구되는 전압은 Fig.11(b)에 나타내었다. 이 능동식 제어알고리즘은 ER 유체 중의 종량비, ER 엔진마운트의 전극판 간격틈새 그리고 전기장 크기 및 가진 변위등의 여러 조건에 따라 시스템 성능 특성이 변화하므로 제어 알고리즘에 적용되는 주파수 대역과 가해지는 전압의 크기는 달라질 수 있으며 최적 전압 선택이 가능하다. 실제 엔진마운트에서와 같이 매 순간마다 변화되는 외란의 크기에 대하여 효과적으로 적용하기 위해서는 실험을 통한 여러 가진 Level 하에서의 시스템 Identification과 이와 연계된 제어 알고리즘이 필요하다. 일례를 들어 설명하면, 우선 실험을 통하여 가능한 한 여러 가진 크기에 따라 시스템의 주파수 분석을 전기장 변화에 따라 수행한다. 이 정보로부터 적절한 전기장의 크기가 가진크기 및 주파수의 함수로 표현되는 관계식을 얻을 수 있으며 실험되지 않은 가진 크기의 경우는 Fuzzy Rule 등을 통하여 가진 Level과 전기장을 결정한다. 따라서, 시간에 따라 변화되는 외란의 경우 그 크기를 측정하고 FFT (Fast Fourier Transform) 알고리즘을 통해 지배적인 주파수를 계산하여 미리 저장된 정보와의 비교를 통해 알맞은 전기장 공급을 결정할 수 있다. 그러나, 이 경우 얼마나 빠르게 주파수 분석이 이루어지는가등의 문제점이 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 평판 형태의 전극판을 갖는 ER 엔진마운트의 역학적 모델을 구성하였고 시뮬레이션을 수행하여 그 성능 특성을 주파수 영역에서 고찰하였다. ER 엔진마운트의 성능변수인 ER 유체의 점성, ER 유체중의 입자중량비 변화, 그리고 전기장의 변화에 따른 항복전단응력식을 얻기 위하여 자체제작한 Viscometer를 통해 실험을 수행하였다. 이 실험 결과로부터 입자중량비와 전기장에 따른 ER 유체의 방형 특성 모델을 도출하였다. 전기장에 따라 변화하는 ER 유체 특성을 고려한 수학적 해석을 통하여 ER 엔진마운트의 역학적 모델은 ER 유체 댄핑( $B_v$ )과

하부챔버의 팽창으로 인한 수직강성( $K_B$ )이 병렬로 연결되고, 이것이 상부챔버의 팽창으로 인한 수직강성( $K_T$ )과 직렬로 연결되어 있는 1DOF 시스템으로 제시하였다. 그리고 이 역학적 모델에 실험을 통해 얻은 ER 유체의 고유특성치를 사용하여 ER 엔진마운트의 성능을 예측하였다. 시뮬레이션을 통하여 전극판 간격특성에 가해지는 전기장의 크기 변화에 따라 ER 엔진마운트의 댐핑이 변화함을 알 수 있었고, 동시에 강성도 변화하여 공진 영역이 이동됨을 고찰할 수 있었다. 이것을 이용하여 외부가진에 따라 능동적으로 공진 영역을 이동시킬 수 있는 능동식 제어알고리즘을 구성하여 적용하였을 때에 ER 엔진마운트의 성능 특성이 크게 향상됨을 알 수 있었다. ER 엔진마운트에 영향을 미치는 인자로는 ER 유체의 항복응력 뿐 아니라 ER 유체층의 입자충량비, 그리고 전극판 간격특성 및 가진 변위가 매우 중요함을 확인하였다. 실제로 ER 엔진마운트가 사용될 때의 어려운 점으로는 자동차의 낮은 건전지 전원으로부터 작동되어 1kV이상의 전압을 발생시키는 고전압 공급장치의 구현, 작은 간격특성을 갖는 전극판 제작, 그리고 온도에 따른 ER 유체 특성 변화등을 들 수 있다. 또한, 고전압 공급장치로부터 ER 엔진마운트의 전극판에 전기장 형성을 위한 전기배선과 이에 따른 ER 유체의 유출방지(Sealing)등의 문제도 발생할 우려가 있다.

향후 구체적이고 논리적인 능동식 제어알고리즘 개발과 실험적 구현에 대한 연구가 계속 수행되어야 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

1. M.Bernuchon, "A New Generation of Engine Mount", SAE Paper No.840259.
2. P.E.Corcoran and Gerd-Heinz Ticks, "Hydraulic Engine Mount Characteristics", SAE Paper No.840407.
3. R.A.Muzechuk, "Improved Engine Isolation", SAE Paper No.840410.
4. W.C.Flower "Understanding Hydraulic Mounts

for Improved Vehicle Noise, Vibration and Ride Qualities", SAE Paper No.850975.

5. T.Ushijima, T.Dan, "Nonlinear B.B.A. for Predictiong Vibration of Vehicle with Hydraulic Engine Mount", SAE Paper No.860550.
6. M.Sugino and E.Abe, "Optimum Application for Hydroelastic Engine Mount", SAE Paper No. 861412
7. M.Clark, "Hydraulic Engine Mount Isolation", SAE Paper No.851650.
8. R.Singh, G.Kim and P.V.Ravindra, "Linear Analysis of Automotive Hydro-Mechanical Mount with Emphasis on Decoupler Characteristics", J.of Sound and Vibration, 158(2), pp.219-243, 1992.
9. M.Mizuguchi, T.Suda, S.Chikamori and K.Kobayashi, "Chassis Electronic Control Systems for the Mitsubishi 1984 Galant", SAE Paper No.840258.
10. R.Shoureshi, P.L.Graf and T.L.Houston, "Adaptive Hydraulic Engine Mounts", SAE Paper No.860549.
11. S.Bouchillon, R.Shoureshi, T.Knurek and P.Schilke, "Optimal Tuning of Adaptive Hydraulic Engine Mounts", SAE Paper No.891160.
12. P.L.Graf and R.Shoureshi, "Modeling and Implementation of Semi-Active Hydraulic Mounts", J.of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 110, pp.422-429, 1988.
13. 최승복, 정재천, 최용빈, 허승진, 서문석, "ER 유체를 이용한 반능동식 가변댐퍼의 성능해석", 한국자동차공학회논문집 제1권, 1호 pp. 90-100, 1993.
14. 김기선, 이효정, 최승복, 정재천, "전기유동유체를 이용한 자동차용 가변댐퍼의 연구동향", 한국자동차공학회 1993년도 춘계학술대회논문집 pp.77-81, No.933810.
15. 최승복, 민수홍, 정재천, "자동차 산업관련 전기점성 유체 이용기술", 한국자동차공학회지 제13권, 제4호 pp.1-10, 1991.
16. Theodore G.Duclos, "An Externally Tunable

- Hydraulic Mount which Uses Electro-Rheological Fluid”, SAE Paper No.870963.
17. T.Ushijima, K.Takano, and H.Kojima, “High Performance Hydraulic Mount for Improving Vehicle Noise and Vibration”, SAE Paper No. 880073.
  18. Nicholas K.Petek, Robert J.Goudie and Frederick P.Boyle, “Actively Controlled Damping in Electrorheological Fluid-Filled Engine Mounts”, SAE Paper No.881785.
  19. Shin Morishita and Ju'nichi Mitsui, “An Electrically Controlled Engine Mount Using Electro-Rheological Fluid”, SAE Paper No.922290.
  20. A.Gennesseaux, “Research for New Vibration Isolation Techniques : From Hydro-Mounts to Active Mounts”, SAE Paper No.931324.
  21. W.H.Winslow, “Induced Fibration Suspensions”, J.of Applied Physics, Vol.20, pp.1137-1140, 1949.
  22. T.C.Jordan and M.T.Shaw, “Electrorheology”, IEEE Transaction of Electrical Insulation, Vol. 24, No.5, pp.849-878, 1989.