

〈논문〉 SAE NO. 933739

# ER 유체를 이용한 반능동식 가변댐퍼의 성능해석

## Performance Analysis of a Semi-Active Variable Damper Featuring Electro-Rheological Fluids

최 승 복\*, 정 재 천\*, 최 용 빈\*\*, 허 승 진\*\*\* 서 문 석\*\*\*\*  
S. B. Choi, C. C. Cheong, Y. B. Choi, S. J. Heo, M. S. Suh

### ABSTRACT

This paper presents some inherent characteristics of a semi-active variable damper featuring an electro-rheological (ER) fluid. The damping force of the damper can be selectively adjusted or controlled by employing electric field to the ER fluid domain. This is possible owing to the pressure drop across the piston occurred by field-dependent variable yield stress of the ER fluid. This is fundamentally different than the performance of a conventional adjustable viscous damper. To demonstrate the effectiveness and superiority over the conventional one, the proposed damper is incorporated with a suspension system. A quarter car model with the suspension system is formulated and represented by a state equation. By choosing numerical values based on realistic package size, power requirements and suitable ER properties, the performance characteristics of the suspension system are obtained and evaluated in both frequency and time domains. The effects of constant electric field and on-off controlled electric field which relates to the damping force are also examined.

주요기술용어 : Electro-Rheological Fluid(ER 유체), Semi-Active Variable Damper(반능동식 가변댐퍼), Suspension System(현가장치)

### 1. 서 론

능동형, 반능동형 현가장치는 승차감과 안정성을 동시에 개선하는 이점으로 인하여 수년간 많은 연구가 행해져왔다.<sup>1)</sup> 스피링과 댐퍼로만 구성되어 있는 시스템과는 달리 능동형 현가장

치는 유·공압 및 전기적 힘 작동기로 에너지 흐름을 연속적으로 공급하고 조절하여, 절대변수와 자동조정을 포함하는 임의의 변수의 함수로 나타내어지는 힘을 조정할 수 있다. 더욱이, 능동형 현가장치는 센서로 작동상태를 파악하여 특성을 순간적으로 적절히 적용할 수 있다. 한편,

\* 정회원, 인하대학교 기계공학과

\*\* 두원정공 기술연구소

\*\*\* 정회원, 국민대학교 자동차공학과

\*\*\*\* 국방과학연구소

능동형 현가장치의 비경제성을 고려하여 반능동형 현가장치가 제안되었는데<sup>2)</sup> 이것은 능동형에서 직접 에너지를 가하는 개념 대신에 순간적인 운동 상태에 대하여 에너지 분산율을 변화시키는 가변댐퍼 개념을 적용한 것이다. 즉, 반능동식 가변댐퍼 시스템(semi-active variable damper system)은 거의 실시간의 피드백 제어방식에 의하여 각 가변댐퍼에 적합한 감쇠특성이 독립적으로 결정되며, 이러한 작동이 1~10ms 정도에서 매우 빠르게 반복된다. 제어주파수 영역은 대체적으로 차체 및 차축의 각 고유진동수 범위를 포함하고 있다. 그런데 가변댐퍼의 제작방식에 따라 감쇠특성을 이산적(discrete) 또는 연속적(continuous)으로 가변시킬 수 있다. 이산적 반능동식 가변댐퍼의 경우 3~4개의 특정한 가변 감쇠 특성을 보유하고 있는 반면에, 연속적 가변댐퍼의 경우 힘-속도 관계도의 첫째와 셋째 사분면 내에서 임의의 감쇠력을 발생시킬 수 있다.

최근 들어 기존의 반능동식 가변댐퍼 시스템과 구성 및 특성면에서 전혀 다른 ER 유체를 이용한 연속형 가변댐퍼 시스템 개발이 미국 및 일본을 비롯 여러 선진국에서 활발히 연구되고 있다. 소위 스마트 유체(smart fluid)라고 불리는 ER 유체를 이용하여 자동차산업관련 엔진마운트, 클러치 시스템, 속업저버를 비롯 지능구조물 개발 등 신생하는 첨단기술에 부단한 노력과 투자가 증대되고 있다.<sup>3)~7)</sup> ER 유체의 외면상 가장 두드러진 현상은 전기장 무부하시 액체 상태가 전기장 부하시 고체상태로 변화하는 것이다. 전기장 무부하시 유체입자의 전하는 양극 혹은 음극이 될 수 있으며 자유로이 운동을 한다. 이때 유체는 등방향(isotropic)의 물리적 및 기계적 성질을 갖게 된다. 그러나 전기장 부하시 유체입자의 전하는 체인형 구조를 형성하게 되며 이방향(anisotropic)의 물리적 및 기계적 성질을 갖게 된다. 이 체인형 구조로 인해 유체의 운동이 제한되며 따라서 유체의 모든 유동성질이 변화한다. 전기장이 무부하상태로 될 때 유체는 다시 본래의 램덤(random) 구조를 갖게 된다. 일반적으로 ER 유체의 상변화(phase change)를 위해 요구되는 전기장의 크기는 약 1~3kV/mm(유체두께)이나

전류밀도(current density)가 약 $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$  이하이기 때문에 상변화를 위해 요구되는 전력은 매우 낮다. 그리고 전장에 대한 유체의 반응속도는 1ms 이하이며 최대반응 주파수는 약 12kHz이다.

이러한 특징을 갖고 있는 ER 유체를 이용한 가변댐퍼(혹은 완충기)의 연구개발은 1980년대 중반부터 본격적으로 시작되었다. ER 유체 자체가 갖고 있는 몇가지 문제점으로 인하여 아직 상용화된 것은 없으나 최근 미국과 일본 및 유럽 등지에서는 승용차에 실제로 적용시켜 그 효율성과 우수성을 증명하고 있는 중이다. 그러나 ER 유체 메카니즘의 복잡성 때문에 이를 이용한 댐퍼의 모델링 기법과 제어기법이 아직 정립되어 있지 않은 상태이다. 이에 본 연구에서는 ER 유체를 이용한 연속형 반능동식 가변댐퍼(이후 ER 가변댐퍼라고 칭함)를 제안하여 이론적 모델링과 제어기법을 기술하므로써 기존의 것과는 전혀 다른 새로운 차원의 댐퍼에 대한 정량적 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 댐퍼는 ER 유체가 채워진 실린더 형태로서 속도대 힘의 관계는 전기장의 부하에 의해서만 제어되는 것으로 고려하였다.<sup>7)~9)</sup> 시뮬레이션에 사용된 현가장치는 차체의 질량과 바퀴의 질량을 고려한 2DOF 시스템을 설정하였고, 타이어의 강성이 지면과 바퀴 질량사이에 적용되고 ER가변댐퍼와 기존의 스프링과 점성(viscous)댐퍼가 차체질량과 바퀴 질량사이에 병렬로 연결되어 있는 것으로 모델링하여 해석하였다. 조화입력(harmonic input)의 존재시, 전기장 부하의 증가에 따라 현가장치의 상대변위의 크기가 현격히 감소하고, 공진주파수도 증가함을 알 수 있었다. 또한 단일 bump 입력의 존재시, 차체 및 타이어의 변위, 그리고 이들에 대한 피스톤의 상대변위를 측정하므로써 댐핑력을 계산하고 댐핑력 크기에 따라 제어된 전기장을 공급하므로써 매우 우수한 감쇠 성능을 얻었으며 나아가서 실시간 제어의 가능성도 확인하였다.

## 2. ER 가변 댐퍼

역학적인 관점에서 현재 사용되고 있는 일반

적인 ER유체의 유동성질을 보면 Fig.1과 같다. 전기장(E) 무부하시 ER유체는 Newtonian 유체로 간주되지만, 전기장으로 인한 ER유체의 거의 공통적인 현상은 Bingham거동이며 항복응력( $\tau_y$ )은 전기장의 증가에 따라 증가한다(일반적으로  $\tau_y \propto E^2$ ). 따라서 유체에 전기장 부하시 전단응력( $\tau$ )의 전단율( $\dot{\gamma}$ )에 대한 의존도로부터 전기장으로 인한 전단응력의 증가 및 어느 정도의 항복응력이 발생하였는지를 알 수 있다. Bingham거동의 경우 유체가 고체상태로 상변화했다고 말할 수 있지만  $\tau < \tau_y$ 시 이 고체가 느린 크립(creep)현상, 혹은 탄성(elastic)현상을 가지고 있는지, 그리고 이러한 조건하에서 어느 정도의 경화(hardening)현상이 발생하는지는 현재까지 잘 알려져 있지 않다.  $\tau = \tau_y$ 시 유체의 흐름이 시작되며 고정된  $\dot{\gamma}$ 에서  $\tau(E) > \tau(0)$ 인 영역으로 흐름은 계속된다. 어느 특정한 ER유체의 경우 낮은  $\dot{\gamma}$ 영역에서 유체흐름이 시작된 직후  $\tau(E)$ 의 급강하와 같은 매우 복잡한 현상이 발생하기도 한다. 이와 같은 ER 유체에 대한 메카니즘은 매우 복잡하여 아직 그 이론이 정립되어 있지 않으나 본 연구에서는 실험적 고찰을 통하여 일반적으로 잘 알려진 전기장 부하에 따른 Bingham 거동성질<sup>10)</sup>을 이용하여 가변댐퍼를 해석한다. 이러한 ER 유체의 성질을 가변댐퍼에 적용하면 기존의 점성댐퍼에 비해 간단한 구조설계가 가능하여 생산가 감소와 신뢰성 증가를 가져오며, 반발댐퍼력의 크기를 조절할 수 있고 반응시간이 빠르므로(1ms이하) 순간적인 제어효과가 좋다. 또 적은 소모동력으로 제어가 가능하다.

Fig.2는 이러한 유체의 성질을 이용하여 구상된 ER 가변 댐퍼의 개략적인 구조로서 기존점성댐퍼의 형태와 유사하나 그 원리에 있어 전혀 다르다. 피스톤의 움직임에 의하여 ER유체가 고정되어 있는 전극과 실린더 사이의 틈새로 흘러 들어가게 된다. 전극에 전기장이 부하되면, ER 유체는 순간적으로 Newtonian에서 Bingham-plastic의 거동을 하게 된다. 즉 전기장의 부하에 의하여 전단응력이 증가하게 되고 틈새 사이의 흐름저항을 증가시킨다. 이것은 피스톤 상하의 압력차를 증가시키며, 이로 인하여 피스톤을 운동

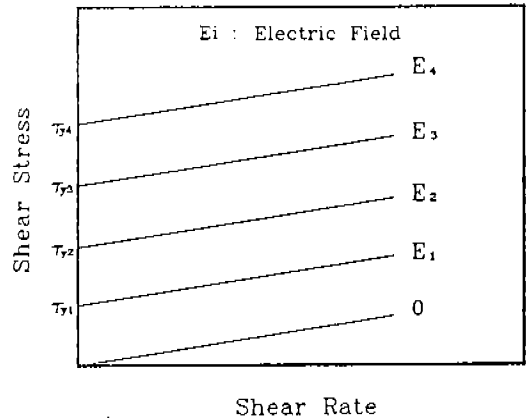


Fig. 1 Field-Induced Behavior of ER Fluid.

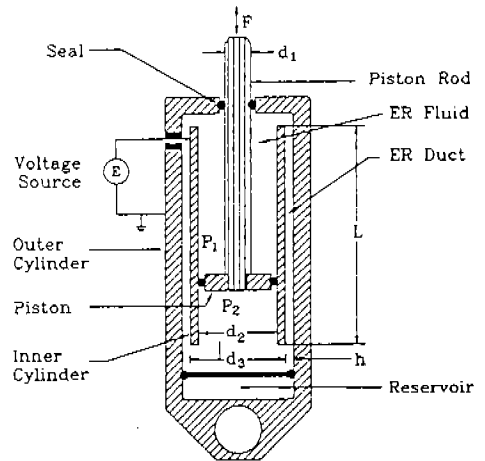


Fig. 2 ER Fluid-Filled Variable Damper.

시키는 필요한 힘은 증가하게 된다.<sup>7, 9)</sup> 전기장 무부하시의 댐퍼는 전적으로 유체의 점성에 기인하며, 틈새를 통과하는 유량에 비례한다. 즉 전기장 무부하시 틈새에 걸친 압력 강하  $\Delta P_n$ 는 다음과 같다.

$$\Delta P_n = 12\eta \frac{L}{bh^3} Q \quad (1)$$

여기서  $Q$ 는 유량,  $b$ 는 duct의 너비,  $L$ 은 duct의 길이,  $h$ 는 duct와 벽사이의 간격, 그리고  $\eta$ 는 ER 유체의 점성계수를 각각 나타낸다.

ER유체에 전기장이 가해지면, ER유체의 항복

전단응력  $\tau_y$ 는 피스톤 속도와는 무관하게 일정한 양까지 댐핑력을 증가시킨다. 이점이 기존의 점성댐퍼와 다른 점이다. 따라서 전기장부하시 ER유체의 전단력 증가에 의한 압력강하는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta P_{ER} = 2 \frac{L}{h} \tau_y \quad (2)$$

식(2)는 ER 유체의 거동을 단순화한 것이다. 반발(rebound)시의 댐핑력을 계산하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다. 피스톤을 통과하는 유체의 흐름은 없고, 틈새의 형상에 의한 저항 손실은 없다고 가정한다. 따라서 틈새에서의 전제압력강하는 점성과 ER유체의 전단응력변화에 의한 압력강하의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_1 - P_2 = \Delta P_{ER} + \Delta P_v \quad (3)$$

유량은 피스톤 속도  $V_p$ 에 비례하므로

$$Q = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) V_p \quad (4)$$

이고, duct의 너비는 다음과 같다.

$$b = \pi d_3 \quad (5)$$

식(1), (2), (4) 및 (5)를 식(3)에 대입하면 다음 관계식을 얻는다.

$$P_1 = 2 \frac{L}{h} \tau_y + 3 \frac{L}{d_3 h^3} (d_2^2 - d_1^2) V_p \eta + P_2 \quad (6)$$

이러한 관계에 의하여 댐핑력  $F$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$F = \frac{\pi}{2} \frac{L}{h} (d_2^2 - d_1^2) \tau_y + \frac{3\pi}{4} \frac{L}{d_3 h^3} (d_2^2 - d_1^2)^2 V_p \eta - \frac{\pi}{4} d_1^2 P_2 \quad (7)$$

상기식에서 첫번째 항은 전기장에 의한 댐핑력 변화를 나타내며, 두번째 항은 피스톤 속도에 따른 유체의 점성저항에 의한 댐핑력을 나타내고, 마지막 항은 피스톤 주위의 압력이 대기압 이하로 강화되는 것을 방지하기 위한 댐핑력으로 볼 수 있다. 즉, 피스톤의 움직임에 의하여 발생하는 압력  $P_2$ 는 급격한 압력 변화시에 발생하는 기포 등의 영향을 방지하기 위하여 설치된 reservoir의 움직임에 의해 상쇄되므로, 마지막 항을 고려하지 않는다면 식 (7)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F = F_e + C_2 \dot{a} \quad (8)$$

여기서

$$F_e = \frac{\pi}{2} \frac{L}{h} (d_2^2 - d_1^2) \tau_y \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{3\pi}{4} \frac{L}{d_3 h^3} (d_2^2 - d_1^2)^2 \eta \quad (10)$$

$$\dot{a} = V_p \quad (11)$$

한편 식(9)의 항복응력( $\tau_y$ )은 전기장( $E$ )의 제곱에 비례한다고 볼 수 있으므로 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$\tau_y = \beta E^2 \quad (12)$$

여기서 상수  $\beta$ 값은 각 ER 유체들의 고유치로서 일반적으로 실험을 통하여 얻는다. 식(8)을 도식적으로 표현하면 Fig.3과 같이 나타낼 수 있다<sup>8)</sup>. 댐핑력  $F$ 의 크기와 전기장에 의한 댐핑력의 크기  $F_e$ 에 따라 피스톤속도와 댐핑력과의 관계가 세 가지 형태로 표현됨을 알 수 있다(3장참조). 전기장을 가하지 않았을 경우, 전기장에 의한 댐핑력  $F_e$ 값이 없으므로 댐핑력  $F$ 의 값은 댐퍼 내의 ER 유체의 점성에 의해서만 영향을 받는다. 그러나, 전기장을 가했을 경우에는 댐핑력  $F$ 값이  $F_e$ 값을 초과하지 않는 경우는 피스톤이 움직이지 않다가  $F_e$ 값을 초과하는 순간부터 피스톤의 속

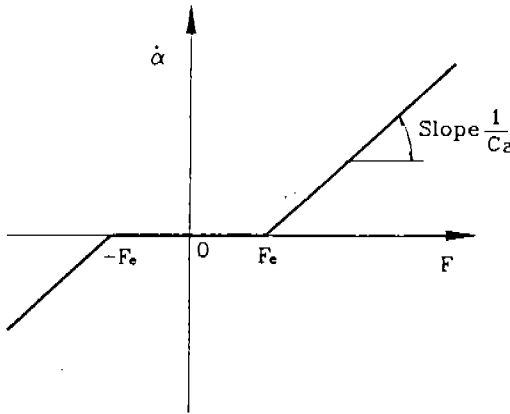


Fig. 3 Damper Characteristics.

도가 발생하게 되는 것이다. 따라서  $F_e$ 는 피스톤의 속도가 발생되기 위한 일종의 break force라고 할 수 있다.

### 3. 현가장치 모델

해석에 사용된 현가장치의 모델은 Fig4에서 보는 바와 같이 1/4(quarter) 모델을 택하였다<sup>1)</sup>. 현가장치의 응답을 살펴보는데 있어서 입력되는 길(road)의 형태는 조화입력형태(harmonic input type), 임의로 설정된 길의 형태(randomly profiled input type), 순간적인 단일 bump형태(single bump type)의 세가지로 구분할 수 있는데 조화입력형태나 임의로 설정된 길의 형태에 대한 응답은 응답폭의 최대치의 변위를 고찰하는데 반해, bump시에는 입력에 대한 응답의 폭의 줄어듦과 영으로 감쇠하는 시간을 보는데 목적이 있다. 본 연구에서는 입력형태를 조화입력과 bump시에 대한 현가장치의 응답으로 살펴보았다. 실제의 현가장치들이 갖는 특성들을 이 모델로서 완전하게 표현하기는 어렵지만 입력형태나 전기장 변화에 의하여 일어나는 변위와 이에 영향을 미치는 비선형 ER 가변댐퍼( $C_2, F_e$ )와의 상관관계를 알아보는데 매우 유용하다. 해석에 사용된 모델은 두 개의 질량을 갖는 모델, 즉 차체의 질량과 휠과 바퀴를 더한 질량(이하 바퀴 질량)을 생각하여

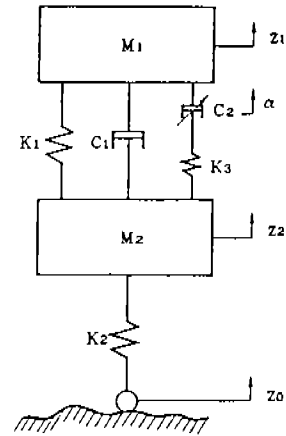


Fig. 4 Vehicle System Model.

2차원적으로 고려하였다. Fig4에서 보는 바와 같이 지면과 바퀴 질량사이의 스프링과, 차체질량과 바퀴질량 사이에 스프링과 직렬로 연결된 ER유체를 사용한 댐퍼를 포함하는 링크와 또다른 기존의 점성댐퍼, 그리고 스프링이 병렬로 연결된 현가장치를 모델로 하였다.

모델로 선정된 그림으로부터 다음과 같은 시스템의 지배방정식을 도출할 수 있다.

$$M_1 \ddot{z}_1 + C_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + K_1(z_1 - z_2) + F = 0$$

$$M_2 \ddot{z}_2 + C_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + K_1(z_2 - z_1) + K_2(z_2 - z_0) + F = 0 \tag{13}$$

여기서

$$F = K_3(z_1 - z_2 - \alpha) \tag{14}$$

이며  $z_1$ 는 차체의 변위,  $z_2$ 는 바퀴의 변위,  $z_0$ 는 지면으로부터 들어오는 입력 변위이고  $\alpha$ 는 댐퍼의 실린더에 대한 피스톤의 상대변위이다. 한편 Fig3을 참고하여 지배방정식에 필요한 댐핑력과 피스톤 속도에 대한 식을 구하면 다음과 같다.

1)  $F > F_e$  일 경우

$$C_2 \dot{\alpha} = F - F_c \quad (15)$$

$$B = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

2)  $-F_c < F < F_c$  일 경우

3)  $F < -F_c$  일 경우

$$\dot{\alpha} = 0 \quad (16)$$

$$B = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{F_c}{C_2}]^T$$

3)  $F < -F_c$  일 경우

$$C_2 \dot{\alpha} = F + F_c \quad (17)$$

입력행렬 B의 5행의 성분은 식 (15)~(17)의 조건에 적용되어 세가지 형태로 나타나 있음을 알 수 있다.

따라서, 상태 벡터 (18)을 사용하여 식 (13)~(17)을 상태방정식 (19)로 표현할 수 있다.

$$X = [z_1 \ \dot{z}_1 \ z_2 \ \dot{z}_2 \ \alpha]^T, \ z_0 = w \quad (18)$$

$$\dot{X} = AX + Dw + B \quad (19)$$

여기서 시스템 행렬 A, 지면에서 들어오는 입력행렬 D, 그리고 전기장에 의해 조절되는 댐핑력의 입력행렬 B는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{(K_1+K_3)}{m_1} & -\frac{C_1}{m_1} & \frac{(K_1+K_3)}{m_1} & -\frac{C_1}{m_1} & \frac{K_3}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{(K_1+K_3)}{m_2} & -\frac{C_1}{m_2} & \frac{(K_1+K_3+K_2)}{m_2} & -\frac{C_1}{m_2} & -\frac{K_3}{m_2} \\ \frac{K_3}{C_2} & 0 & -\frac{K_3}{C_2} & 0 & -\frac{K_3}{C_2} \end{bmatrix}$$

$$D = K_2 \cdot [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T \quad (20)$$

1)  $F > F_c$  일 경우

$$B = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -\frac{F_c}{C_2}]^T$$

2)  $-F_c < F < F_c$  일 경우

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 해석에서 적용된 ER 유체의 특성은 실험을 통하여 얻은 것에 기초를 두었다. 즉, 식(12)로 나타내어지는 ER 유체의 특성에서  $\beta = 0.113$ ,  $\beta = 0.375$ ,  $\beta = 0.825$ 의 값을 갖는 3가지의 ER 유체를 시뮬레이션에 적용하였다<sup>12,13</sup>. Fig.5는 이 세가지 ER 유체의 특성을 전기장과 항복전단응력과의 관계로 도시한 것이다. 각 ER 유체의 특성에 따라 부하되는 전기장에 대하여 항복전단응력이 2차 곡선의 형태로 각각 나타남을 볼 수 있다.

시뮬레이션을 위한 댐퍼의 치수는 Fig.2를 참고하여 가공방법 및 크기제한 등의 실제적인 한계와 댐핑력의 크기를 나타내는 식 (7)을 사용하여 대략적으로 구하였으며, 모델 각 부의 치

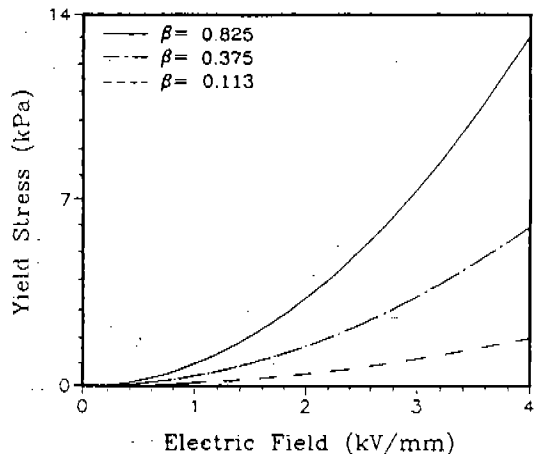


Fig. 5 Yield Stress as a Function of Electric Field.

수는 다음과 같이 설정하였다.

- $d_1=12.0\text{mm}$
- $d_2=45.0\text{mm}$
- $d_3=47.0\text{mm}$
- $L=65.0\text{mm}$
- $h=0.5\text{mm}$

입력의 크기를 변화시켜가면서 시간과 주파수 영역에서 시스템의 영향을 고찰하기 위해 다음과 같은 매개변수들을 사용하였다. 자동차의 경우, 수직 리바운드(rebound) 상태에서의 고유진동수는 차체의 경우 약 1Hz, 바퀴의 경우 약 10Hz 근처에서 발생한다고 가정하고 각각의 매개변수들은 실제 자동차에서 적용되는 값들을 고려하여 선정하였다.

$$\frac{M_2}{M_1} = 0.08$$

$$\frac{K_1}{M_1} = 36 \left[ \frac{N}{m \cdot kg} \right]$$

$$\frac{K_2}{K_1} = 7$$

$$\frac{K_3}{K_1} = 20$$

$$\frac{C_1}{M_1} = 1 \left[ \frac{N \cdot s}{m \cdot kg} \right]$$

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{2}{3}$$

$M_1$ 은 차체 질량의 1/4을 나타내고  $M_2$ 는 한쪽 축에서의 바퀴의 질량이다.  $K_1$ 은 장착된 현가장치 탄성계수이고,  $C_1$ 은 기존의 점성 댐핑계수이다.  $K_2$ 는 바퀴의 탄성계수이고  $C_2$ 는 선정된 가변댐퍼의 형상과 ER 유체가 갖는 점성계수를 고려한 댐핑계수이다. 이러한  $K_1$ ,  $K_2$  그리고  $C_1$ ,  $C_2$ 값들은 고정하여 계산하였고, ER 유체 고유의 성질값인 상수  $\beta$ 와 전기장  $E$ 를 변화시켜 가면서

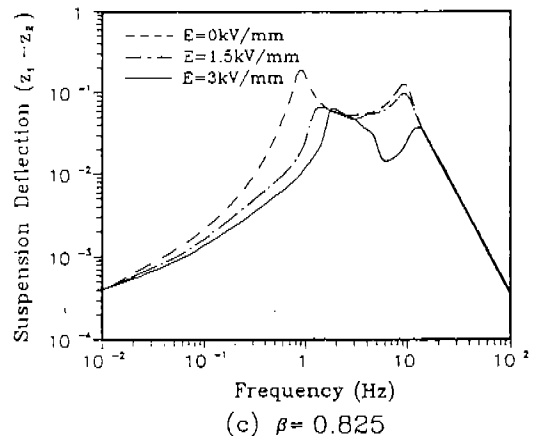
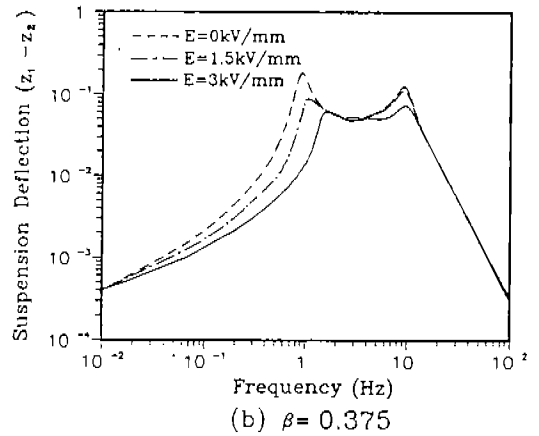
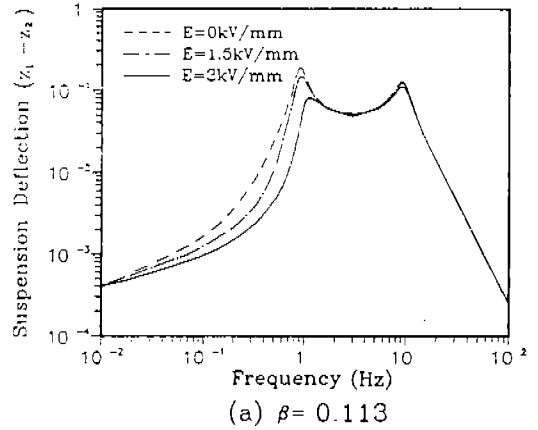


Fig. 6 Suspension Deflection.

주파수 및 시간 영역에서 이에 따른 현가장치의 응답을 고찰하였다.

Fig6은  $\beta$ 값이 다른 각각의 ER 유체의 대한 외력 주파수와 현가장치 변위( $z_1 - z_2$ )의 변화를 부하된 전기장의 변화에 따라 나타낸 그림이다. 지면으로부터 들어오는 외력은 정현파 함수인  $z_0(t) = Z \sin \omega t$ 를 사용하였다. 그림에서 첫번째 공진점에서의 주파수는 차체의 고유 주파수를 나타내고 두번째 공진점에서의 주파수는 바퀴의 고유 주파수를 나타낸다. Fig6 (a)는  $\beta$ 값이 0.113인 경우에 전기장을 0, 1.5, 3, kV/mm로 가한 경우를 나타낸 그림이다. 여기에서 첫번째 공진점에서의 변위가 감소함을 볼 수 있는데 반해 두번째 공진점에서의 변위는 큰 차이가 없음을 볼 수 있다. 이는 바퀴의 변위에 비해 차체 변위가 크게 감소하였음을 나타내는 것으로 바퀴의 상하 흔들림은 줄어들어 거의 없었지만 차체의 흔들림이 줄어든 현상, 즉 승차감(ride comfortability)이 향상되었음을 나타낸다. Fig6 (b)는  $\beta$ 값이 0.375인 경우에 전기장을 위와 같이 3개의 크기로 가했을 경우를 나타낸 그림이다. 첫번째 공진점의 변위와 두번째 공진점의 변위가 모두 감소함을 볼 수 있는데, 이는 승차감과 안정성(stability)이 동시에 개선되었음을 나타낸다. Fig6 (c)는  $\beta$ 값이 0.825인 경우에 전기장을 마찬가지로 가했을 경우를 나타낸 그림이다. 1.5 kV/mm를 가한 경우와 3.0 kV/mm를 가한 경우를 비교하면 3 kV/mm를 가했을 경우 1.5 kV/mm를 가한 경우에 비해 첫번째 공진점의 크기는 비슷한데 비해 두번째 공진점의 변위가 크게 감소함을 볼 수가 있다. 이러한 현상은  $\beta$ 값이 0.375인 경우에도 매우 높은 전기장의 부하시 발생될 수 있음을 예측할 수 있다. 이는 바퀴가 지면에 닿는 시간이 매우 큰 현상, 즉 안정성이 크게 향상되었음을 나타내는데 만약 전기장을 3.0 kV/mm 이상으로 가하면 첫번째 공진점의 변위가 오히려 전기장을 낮게 공급한 경우보다 더 높게 나타나는 양상을 보인다. 이는 ER 유체의 흐름이 매우 둔감해져서 ER 가변댐퍼의 피스톤의 움직임이 원활하지 못하게 되고 이 때문에 기존의 스프링  $K_s$ 과 ER 가변댐퍼와 수직으로 연결된 스프링  $K_0$ 와의 상호작용

으로 인하여 차체의 변위가 오히려 커지는 경향을 보이기 때문이다. 이로써 적절한 전기장의 크기로써 승차감을 필요로 할 경우에는 승차감 위주의 전기장을 가하고, 안정성이 중요할 경우에는 안정성 위주로 조절이 가능함을 알 수 있다. 한편 Fig6에 있어서 (a), (b)의 경우 전기장 부하의 증가에 따라 차체의 공진(고유) 주파수는 증가하였지만 바퀴의 공진 주파수는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 ER 유체의 특성과 제안된 댐퍼의 설계 변수가 기인하는 현상으로서 만일 안정성 위주가 목적이라면 다른 유체(예를 들어  $\beta=0.825$ 인 경우)를 사용하거나 혹은 댐퍼의 각 부품 재설계를 해서 요구하는 우수한 성능을 얻

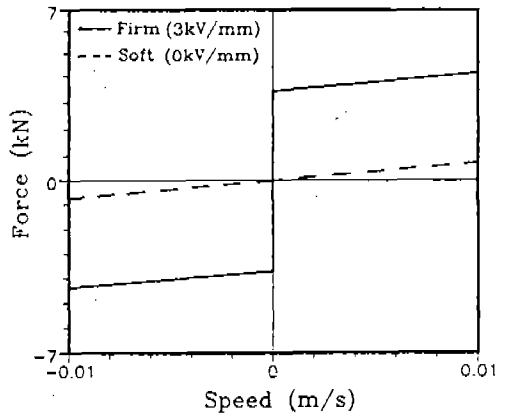


Fig. 7 Damping Force vs Piston Speed ( $\beta=0.375$ )

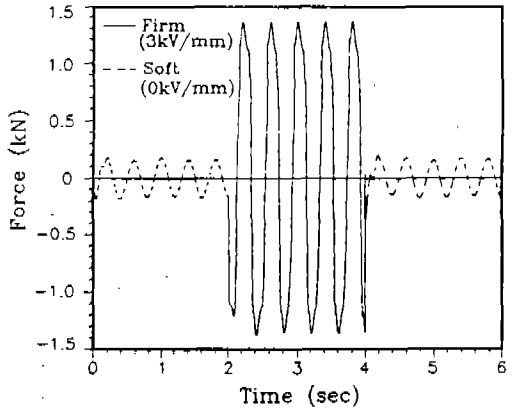


Fig. 8 Damping Force vs Time ( $\beta=0.375, \omega=2.5\text{Hz}$ )

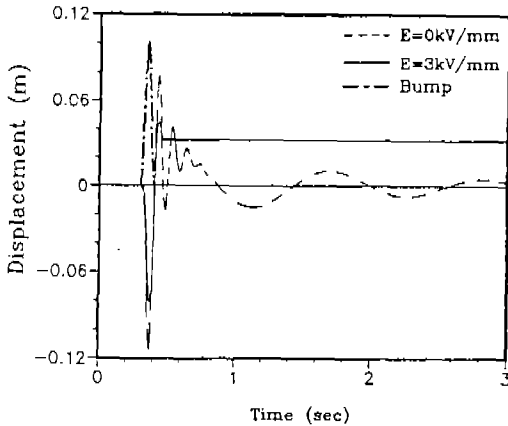


어야만 한다. 이상의 결과에서 알 수 있는 것은 향후 실용성에 입각한 연구 수행시 연구 목적에 따른 최적 성능을 성취하기 위해서는 최적의 ER 특성을 갖는 유체 개발은 물론 주어진 메카니즘에 대해 최적의 전기장 공급 결정이 매우 중요하다는 사실이다.

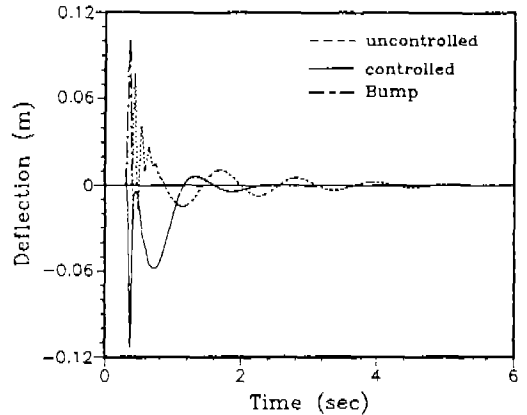
Fig.7은  $\beta$ 값이 0.375일 경우 전기장 부하에 대한 댐핑력의 변화를 고찰하기 위하여 피스톤에 가해지는 댐핑력  $F$ 와 피스톤의 속도  $V_p$ 를 나타낸 것이다. 전기장을 가하지 않았을 경우를 soft mode, 전기장을 가했을 경우를 firm mode로 놓았다. 댐퍼에 임의의 외란이 작용할 경우 이때

전기장을 가하면 soft mode에서 firm mode로 바뀌어 부하되는 전기장에 의하여 댐핑력이 증가하게 된다. 전기장의 부하를 변화시키면  $F$ 값이 증가하여  $F_c$ 의 범위는 커지고 속도  $V_p$ 의 범위는 작아지게 된다. Fig.8은 시간에 대하여 댐핑력  $F$ 의 변화를 나타낸 것으로 전기장 부하시에 댐핑력  $F$ 가 매우 증가되었음을 볼 수 있다. 물론 댐핑력  $F$ 의 증가량은 외란 주파수의 함수이다.

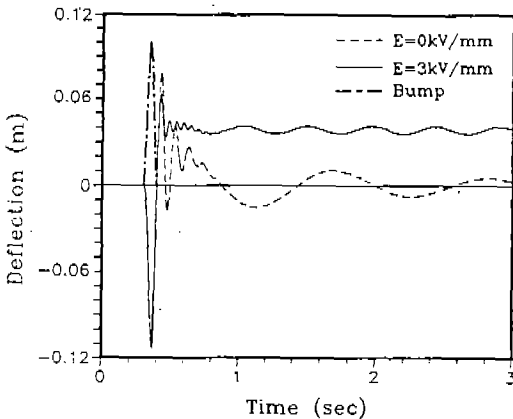
Fig.9(a)는 단일 bump 형태의 외란 존재시 시간에 대한 ER 가변댐퍼의 실린더에 대한 피스톤의 상대변위를 나타낸 그림이다. Bump시의 입력  $z_0(t)$ 는 다음과 같이 설정하였다.



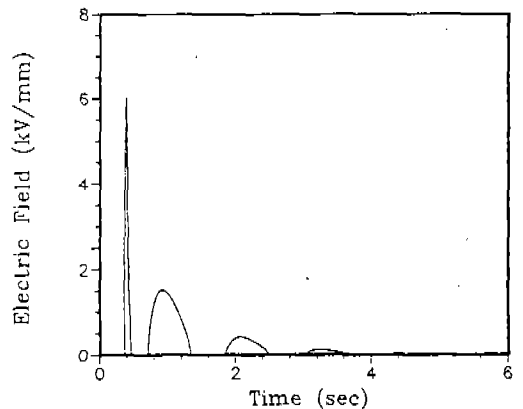
(a) piston displacement



(a) suspension deflection



(b) suspension deflection



(b) controlled electric field

Fig. 9 Suspension Characteristics Over Bump with Constant Electric Field( $\beta=0.375$ )

Fig.10 Controlled Suspension Characteristics Over Bump( $\beta=0.375$ )

$$z_0(t) = \begin{cases} Z[1 - \cos 20\pi(t-0.3)] & \text{for } t \in [0.3, 0.4] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

전기장을 3kV/mm를 계속 가할 경우 부하된 전기장에 의한 댐핑력  $F_e$ 는 일정한 값으로 존재하므로 bump 순간부터  $F_e$ 보다 컸던 댐핑력  $F$ 가 점차 줄어들면서  $F$ 가  $F_e$ 보다 작아지는 점에서 피스톤이 멈춰지게 되고, 이 때 전기장이 계속 일정하게 유지되어 변화가 없으면 피스톤의 변위는 멈춘 순간의 값으로 계속 유지된다. 이 피스톤의 변위로 인하여  $K_1$ 과  $K_2$ 와의 반발에 의한 상호작용이 발생하고 이에 의하여 댐핑효과는 상대적으로 작아지게 되는데 이러한 영향을 시간에 대한 현가장치의 변위로서 나타내면 Fig.9 (b)에서 보는 바와 같이 현가장치의 변위가 영으로 가지 않고 일정한 크기를 유지하는 정상상태로 존재하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 다음과 같은 피드백 개념의 제어 알고리즘을 제안한다. 만일 가속도 센서 등으로 차체 및 바퀴변위  $z_1$ 과  $z_2$ 를 측정할 수 있고 피스톤의 상대변위  $\alpha$ 를 측정할 수 있다면 순간순간 변화하는 댐핑력을 계산할 수 있다. 따라서 전기장에 의한 댐핑력  $F_e$ 의 크기를  $F$ 에 비례하도록 하고 실제 댐퍼의 경우 압축을 받은 경우에는 큰 영향을 주지 못하므로 인장력의 작용시에만 전기장을 부하하는 것으로 고려하면 다음과 같은 제어입력 전기장을 얻을 수 있다.

$$E = 0 \text{ kV/mm}, \quad \dot{\alpha} < 0$$

$$E = \sqrt{\frac{kF}{\alpha_0}} \text{ kV/mm}, \quad \dot{\alpha} > 0 \quad (22)$$

여기서

$$\alpha_0 = \frac{\pi}{2} \frac{L}{h} (d_2^2 - d_1^2) \beta$$

$$k = \frac{F_e}{F}$$

식 (22)로부터 만일 댐핑력  $F$ 를 측정할 수 있다면 연속형의 전기장  $E$ 를 계산할 수 있음을 알 수 있다. 입력계인 상수  $k$ 는 실제로 적용될 수 있는 최대전기장과 현가장치 시스템의 특성에 따라 결정되는 중요한 제어매개변수이다. Fig.10 (a)는  $k$ 가 0.9인 경우 Fig.9에 가해진 bump 적용시 제어된 현가장치의 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 제어 알고리즘 적용시 현가장치의 변위가 빠르게 영으로 감쇠되었음을 볼 수 있고 이때에 공급된 전기장은 Fig.10 (b)에서 보는 바와 같이 연속적인 on-off 형태임을 알 수 있다. 제안된 시스템의 경우 duct와 벽 사이의 두께를 0.5mm로 선정하였기 때문에 최대 6kV/mm 전기장 즉, 3kV의 전압은 일반 전압증폭기로 쉽게 제공할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 ER 유체를 이용한 반능동식 가변댐퍼를 제안하여 현가장치에 적용시 일어나는 여러 성능특성을 고찰하였다. 시뮬레이션을 통하여 부하되는 전기장에 대한 여러 ER 유체의 특성치가 현가장치에 미치는 영향을 고찰하였고 전기장에 대한 ER 가변댐퍼의 응답을 살펴본 결과 기존의 수동형 점성댐퍼에 비해 ER 유체를 이용한 가변댐퍼 사용시 구조의 단순화는 물론 현가장치의 높은 효율성과 우수성을 나타내었다. 외부입력 형태중 bump시에 전기장을 일정하게 가하는 경우 영이 아닌 정상상태의 변위가 존재함을 볼 수 있었는데 이러한 문제점을 없애고자 on-off 형태의 피드백 제어 알고리즘 개념을 도입하여 좋은 감쇠효과를 얻을 수 있음을 제시하였다. 본 해석에서 사용된 모델은 실제의 현가장치를 단순화한 것으로 자동차의 실제 조건들에 대하여 정확하게 적용될 수는 없다. 그러나, 본 연구를 통하여 실제 자동차의 승차성능을 향상 시키기에 충분한, 제안된 ER가변댐퍼의 댐핑력과 제어성을 해석하여 그 효율성을 입증하는데는 문제점이 없다고 생각된다. 해석을 통하여 얻은 결과는 ER유체를 사용한 가변댐퍼의 제작과 실

힘에 필요한 기초자료로서 충분히 이용될 수 있으며, 이와 더불어 실제 댐퍼에서의 압력범위, 전단비 등에 대한 매개변수 설정을 위한 참고자료로 활용될 수 있다. 이러한 댐퍼의 실용화를 위한 금후의 과제로서는, 이상적인 제어알고리즘의 적용 및 실험을 통한 ER 가변댐퍼의 효율성을 입증하고 아울러 성능이 우수한 ER 유체의 개발과 더불어 반복성 및 신뢰성에 대한 정확한 해석 등이 병행연구되어야 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

1. 허승진, "자동차의 능동형 샤시시스템 개발 동향", 대한기계학회지, Vol.32, No.10, pp.847-857, 1992.
2. D.C. Karnopp, M.J. Crosby and R.A. Harwood, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators", ASME J. of Engineering for Industry, Vol.96, No.2, pp.619-626, 1974.
3. 최승복, 민수홍, 정재천, "자동차 산업관련 전기점성 유체 이용기술", 한국자동차공학회지, 제13권, 제4호, pp.1-10, 1991.
4. N.G. Stevens, J. L. Sproston and R. Stanway, "An Experimental Study of Electro-Rheological Torque Transmission", ASME J. of Mechanisms, Transmission and Automation in Design, Vol.110, pp.182-188, 1988.
5. T. G. Duclos, "Electro-Rheological Fluids and Devices", Automotive Engineering, Vol.96, pp. 45-48, 1988.
6. S. B. Choi, B. S. Tompson and M. V. Gandhi, "An Experimental Investigation on Smart Laminated Composite Structures Featuring Embedded Electro-Rheological Fluid Domains for Vibration-Control Applications", Composites Engineering, Vol.2, pp.543-549, 1992.
7. K. H. Hägele, K. Engelsdorf, M. Mettner, M. Panther, Q. N. Tran and E. Rubel, "Continuously Adjustable Shock Absorbers for Rapid-Acting Ride Control Systems", SAE Paper No. 905125.
8. W. A. Bullough and M. B. Foxon, "A Proportionate Coulomb and Viscously Damped Isolation System", J. of Sound and Vibration, Vol. 56(1), pp.35-44, 1978.
9. R. W. Phillips, "Engineering Application of Fluids with a Variable Yield Stress", Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, 1969.
10. T. C. Jordan and M. T. Shaw, "Electrorheology", IEEE Transaction of Electrical Insulation, Vol.24, No.5, pp.849-878, 1989
11. A. Hac, I. Youn, "Optimal Semi-Active Suspension with Preview Based on a Quarter Car Model", ASME J. of Vibration and Acoustics, Vol. 114, pp.84-92, 1992.
12. K. D. Weiss, J.P. Coulter and J.D. Carlson, "Electro-Rheological Materials and Their Usage in Intelligent Material Systems and Structures Part I : Mechanisms, Formulations and Properties", Recent Advances in Sensory and Adaptive Materials and Their Applications, C.A. Rogers, ed., Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, PA, 1992.
13. K. D. Weiss, J.P. Coulter and J.D. Carlson, "Electro-Rheological Materials and Their Usage in Intelligent Material Systems and Structures, Part II : Mechanisms, Formulations and Properties", Recent Advances in Sensory and Adaptive Materials and Their Applications, C.A. Rogers, ed., Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, PA, 1992.