

〈논 문〉 SAE NO. 96370129

## 연속가변 ER댐퍼의 제어 및 응답특성

### Control and Response Characteristics of a Continuously Variable ER Damper

최 승 복\*, 최 영 태\*\*, 박 우 철\*\*, 정 재 천\*, 서 문 석\*\*\*, 여 문 수\*\*\*  
S. B. Choi, Y. T. Choi, W. C. Park, C.C. Cheong, M. S. Suh, M. S. Yeo

#### ABSTRACT

This paper presents control and response characteristics of a continuously variable ER(electro-rheological) damper for small-sized vehicles. The ER damper is devised and its governing equation of motion is derived from the bond graph model. The field-dependent yield shear stresses are distilled from experimental investigation on the Bingham property of the ER fluid. The distilled data are incorporated into the governing system model and, on the basis of this model, an appropriate size of the ER damper is manufactured. After evaluating the field-dependent damping performance of the proposed ER damper, the skyhook control algorithm is formulated to achieve desired level of the damping force. The controller is then experimentally implemented and control characteristics of the ER damper are presented in order to demonstrate superior controllability of the damping force. In addition, response characteristics of the damping force with respect to the electric field with fast on-off frequency are provided to show the feasibility of practical application.

주요기술용어 : Electro-Rheological fluid (전기유동유체), ER damper (ER댐퍼), Bingham behavior (빙햄거동), Electric field (전기장), Skyhook control (스카이훅 제어), Control and response characteristics (제어 및 응답특성)

#### 1. 서 론

ER(electro-rheological)유체는 부하되는 전

기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 것으로, 일반적으로 비전도성 유체속에 강한 전도성 입자들을 분산시킨 콜로이드 용액이다. 1949년 Winslow가 부하되는 전기장에 의해 실리카를 입자로 한 유체의 점성이 변함을 처음으로 발표하였으며, 따라서 Winslow유체라고도 불리운다.)<sup>1)</sup> 그후 많은 연구자들에 의해

\* 정회원, 인하대학교 기계공학과

\*\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 국방과학연구소

ER유체의 메카니즘과 응용장치에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. ER유체의 두드러진 장점은 매우 빠른 응답속도와 폭 넓고 연속적인 힘을 발생시킬 수 있는 점이다. 또한 단지 전기장만을 유체에 부하하면 되므로 응용장치 설계의 단순화를 가져올 수 있으며, 상변화에 요구되는 전기장은 높지만 전류는 매우 낮으므로 소비전력이 낮은 장점을 갖고 있다. 이러한 특징으로 인해 ER유체를 이용한 많은 응용장치가 연구되고 있으며, 특히 자동차 관련장치인 댐퍼<sup>2)~7)</sup>와 엔진마운트<sup>8)~10)</sup>를 비롯하여 스쿼즈 필름 댐퍼<sup>11)</sup>, 클러치 및 브레이크 시스템<sup>12)</sup>등, 다양한 산업분야에서 활발한 투자와 연구가 진행되고 있다.

ER댐퍼의 연구로서 Petek<sup>2)</sup>은 기존의 상용댐퍼와 같은 수준의 댐핑력을 발생시키는 단일 튜브 형태의 ER댐퍼를 제작하여 그 성능을 실험적으로 고찰하였다. 그 결과, 전기장 증가에 따라 댐핑력이 증가됨을 입증하였고, 4W이하의 낮은 전력 소모가 필요함을 고찰하였다. 또한, ER댐퍼를 자동차 뒤쪽 현가장치에 장착하여 도로 노면시험과 범프(bump)시험시, 전기장 부하에 의해 진동절연 성능이 향상됨을 발표하였다. 그러나, 이 결과는 단지 제어기의 적용없이 전기장 부하시의 댐핑 성능변화만을 고찰한 것이다. 그 후 Petek<sup>4)</sup>은 실제 자동차의 앞쪽과 뒤쪽 모두 ER댐퍼를 장착한 현가장치 시스템을 구성한 후, 차체의 피치(pitch), 히브(heave) 그리고 롤(roll)운동이 고려된 스카이훅 제어알고리즘을 통하여 현가장치의 성능향상을 고찰하였다. Sturk 등<sup>3)</sup>은 자동차 전원에서 작동이 가능한 ER댐퍼용 고전압공급장치를 제안하고, 이것의 실현가능성을 실험적으로 고찰하였다. 이를 위해 실험실 수준의 ER댐퍼를 제작하고, 1/4차량 모델의 현가장치에 적용하여 그 성능을 고찰하였다. 제어 알고리즘으로 스카이훅(skyhook)과 on-off 제어방식을 사용하여, 진동절연성능이 향상됨을 고찰하였다. 한편, 국내에서도 전기장 부하에 따라 댐핑력을 연속적으로 가변할 수 있는 ER댐퍼를 제작하여 기초적 성능시험을 수행한 연구가 있다.<sup>7)</sup>

ER댐퍼를 장착한 성공적인 현가장치를 개발

하기 위해서는, ER댐퍼 자체의 정확한 댐핑력 제어특성에 대한 심도있는 연구가 반드시 선행되어야 한다. 그러나, 기존 대부분의 연구에 있어서는 이에 대한 고찰없이, 단지 현가장치의 진동절연 성능만을 고찰하였다. 따라서, 본 논문에서는 참고문헌[7]의 계속된 연구로 ER댐퍼의 제어특성과 응답특성을 고찰하는데 목적이 있다. 연속적으로 댐핑력을 가변 할 수 있는 ER댐퍼를 제안하여 이론적 모델을 구성하고, 전기장에 따른 ER유체의 빙행거동특성과 연계된 지배방정식을 본드 그래프 방법으로 도출하였다. 이를 위해 먼저, 사용된 ER유체의 빙행 거동 특성을 couette형 상용 점도계를 사용하여 실험적으로 고찰하였다. 여기서 도출된 ER유체의 항복응력값을 ER댐퍼의 지배방정식에 도입하여 시스템 성능을 분석한 후, 이를 근거로 ER댐퍼를 설계, 제작하였다. 전기장 증가에 따른 ER댐퍼의 성능을 시험하고, 성능시험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 그리고, 요구댐핑력을 얻기 위해 사용된 스카이훅 제어알고리즘을 제어 입력 변수인 전기장에 대하여 구성하였으며, 제안된 제어기의 실험적 구현을 통해 ER댐퍼의 제어 특성을 시간영역에서 고찰하였다. 나아가서, ER댐퍼의 장점중에 하나로 인식되어 오고 있는 전기장에 따른 빠른 응답특성을 입증하기 위해 비교적 높은 주파수의 전기장을 공급한 후 ER댐퍼의 댐핑력 반응 정도를 시험하였다.

## 2. ER유체의 역학적 특성

ER유체의 특성은 일반적으로 전기장이 가해짐에 따라 유체의 전단응력이 변화되는 것으로 Fig.1에서 보는 바와 같이 전기장 부부하시에는 유체입자가 양극 또는 음극으로 자유로이 운동을 하는 뉴토니안(Newtonian) 유체 상태에서 전기장 부부하시에는 유체 중에 분산된 입자가 체인형 구조를 형성하여 유체가 항복응력을 갖는 빙행(Bingham)유체 상태로 변화하게 된다. 따라서 외부에서 가해지는 전단력에 대하여 전기장 부부하시 ER유체는 저항을 갖게 된다. 입자의 종류로는 전분, 셀룰로이드, 실리카 등으로부터 전용으

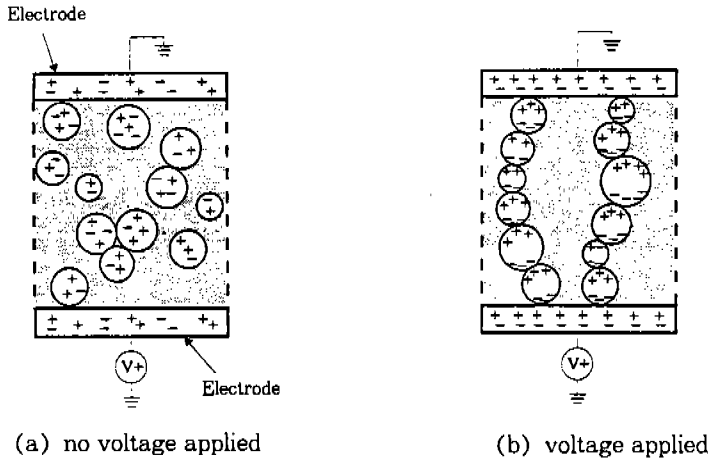


Fig.1 Phenomenological behavior of an ER fluid

로 합성된 입자에 이르기까지 많은 종류가 사용되고 있다.

ER유체의 전기장 부하시 병행유체성질에서 도출된 전단거동식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_s(E) \tag{1}$$

여기서  $\tau$ 는 유체의 전단응력(shear stress)을 나타내고,  $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비(shear rate)이며,  $\eta$ 는 ER유체의 점성계수를 나타낸다.  $\tau_s(E)$ 는 ER유체의 항복응력을 표현한 것으로 전기장  $E$ 의 함수가 된다.

ER유체의 항복응력은 유체가 유동을 일으키는 순간의 전단응력을 나타내는데, 유체의 유동은 매우 짧은 시간에 시작되고 또한 복잡한 거동을 하기 때문에 항복응력을 정확히 측정하기 어렵다. 따라서 많은 연구자들은 전단속도비를 변화시켜 구한 전단응력값을 직선보간 한 후, 전단속도비의 값이 영(zero)인 부근에서의 절편값을 항복응력으로 고려하여 이를 동적 항복응력(dynamic yield stress)이라 부른다. 일반적으로 동적 항복응력값이 ER유체의 항복응력으로서 취급되며, 전기장  $E$ 의 크기에 대하여 지수함수의 관계를 갖는 것으로 알려져 있다.<sup>13)</sup> 따라서 이로부터 식(1)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \alpha E^\chi \tag{2}$$

여기서 상수  $\alpha$  및  $\chi$ 값은 ER유체의 용매 종류, 용매의 점도, 입자 종류, 입자중량비, 입자의 크기 및 모양, 입자의 수분함량 등 ER유체의 조성 조건에 따라 달라지는 ER유체의 고유치이다. 병행거동특성으로 인한 전단응력식(2)로부터 외부에서 가해지는 전단속도비의 증가에 따라 유체 전단응력이 증가됨과 전기장의 증가에 따라 항복응력이 증가됨을 알 수 있다.

한편, 본 연구에서 조성된 ER유체의  $\alpha$  및  $\chi$  값을 측정하기 위해 사용된 전기점도계(electroviscometer)는 couette형태로 독일HAAKE사의 모델VT500이다. 사용된 ER유체는 트랜스포머 오일(transformer oil)을 용매로하여 조성하였고, 입자의 중량비는 35%로 하였으며, 그 이름을 "ITA35 ER유체"라 칭하였다.

Fig.2는 본 연구에서 조성되어 ER덤퍼에 사용된 ITA35 ER유체의 전기장 강도 증가에 따른 항복응력을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 전기장 강도가 증가할수록 항복응력의 값은 지수 함수적으로 증가함을 알 수 있다. Fig.2에 도시된 병행특성 곡선으로부터 ITA35 ER유체의 항복응력을 식(2)와 같이 표현하면,  $97.42E^{1.36}$ Pa의 관계식으로 표현할 수 있다.

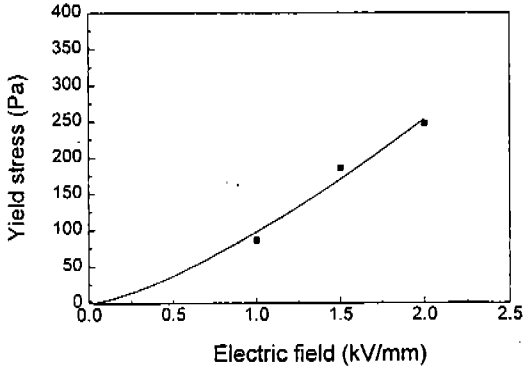


Fig.2 Yield stress of the ITA35 ER fluid

3. ER댐퍼의 모델링 및 설계

본 연구에서 제안된 ER댐퍼의 구조가 Fig.3에 도시되었다. 피스톤을 중심으로 위쪽을 상부 챔버, 아래쪽을 하부 챔버로 정의하였고, 이 두 챔버에 ER유체는 완전히 채워지게 된다. 노면 등의 가진에 따른 피스톤 로드(rod)의 상하 운동에 의해 한쪽 챔버의 유체는 바깥쪽 실린더와 안쪽 실린더 사이에 구성된 원형 덕트(duct)를 통해 다른쪽 챔버로 유동되게 된다. 이 원형 덕트의 바깥쪽 실린더에는 고전압 공급장치의 (-)전원이, 안쪽 실린더에는 (+)전원이 연결되어 있어 ER유체에 전기장을 가하는 전극판으로도 작동하게 된다. 하부 챔버쪽에 구성된 가스 챔버는 피스톤 로드의 운동과 열팽창에 따른 유체유동을 수용하는 어큐뮬레이터(accumulator)로 작동하게 된다. 또한, 이 가스챔버는 챔버안의 급격한 압력변화의 흡수와 이때 발생하는 기포 등의 영향을 방지하는 역할도 하게 된다.

전기장이 이 원형 덕트사이에서 형성되면, ER유체는 순간적으로 뉴토니안에서 비뉴턴특성을 나타내게 된다. 즉 전기장이 부하됨에 따라 ER유체의 전단응력은 증가하게 되어 원형 덕트사이의 유체 유동저항을 증가시킨다. 이것은 피스톤 상하의 압력차를 증가시키며, 이로 인하여 피스톤의 상하 운동에 소요되는 힘은 증가하게 된다. 결국, ER댐퍼는 전기장 무부하시에는 유체점성으로 인한 댐핑력을 발생시키게 되나, 전기장 부하시에는 유체점성으로 인한 댐핑력에 ER유

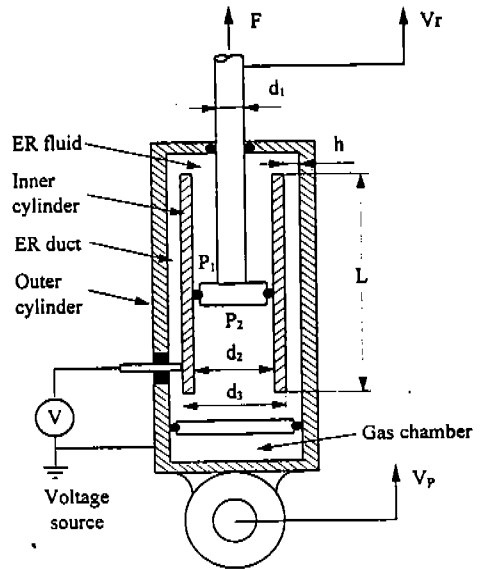


Fig.3 Schematic diagram of the ER damper

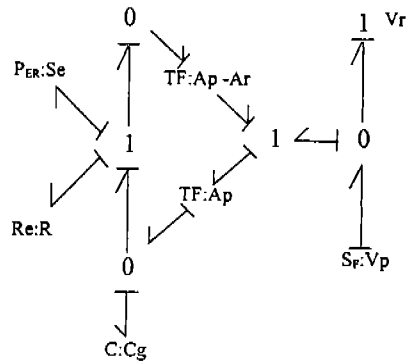


Fig.4 Bond graph model of the ER damper

체의 항복응력으로 인한 댐핑력이 가해지므로 더 큰 댐핑력을 발생시키게 된다.

ER댐퍼의 이론적 해석을 위하여 ER유체는 비압축성 유체로 가정하였고, 동일 공간 내에서의 압력은 모든 방향으로 균일하게 작용한다고 가정하였다. 또한 덕트 형상에 따른 압력 손실과 유체 관성력은 없다고 가정하였다.

모델링 방법으로 본드 그래프(bond graph) 방법을 사용하였으며, 제안된 ER댐퍼의 본드 그

래프 모델은 Fig.4에 도시되었다. 이 본드 그래프 모델의 구성요소중,  $R_c$ 는 ER유체가 원형 덕트사이로 유동될 때 발생하는 유체저항으로 다음과 같이 주어진다.

$$R_c = \frac{12\eta L}{bh^3} \quad (3)$$

또한,  $C_r$ 는 가스 챔버에서 가스의 압축성으로 인하여 발생하는 컴플라이언스로 단일변화로 가정하여 선형화하여 얻었다.<sup>7)</sup> 전기장 부하시 ER유체의 전단응력 증가에 따른 압력강하  $P_{ER}$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{ER} = 2 \frac{L}{h} \alpha E^2 \quad (4)$$

여기서  $P_{ER}$ 는 유체유동에 저항하는 압력이므로 유체의 유동방향에 따라 부호가 바뀌게 된다.

Fig.4에 도시된 본드 그래프 모델로부터 ER댐퍼의 동적 지배방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{q}_1 = A_r (V_p - V_r) \quad (5)$$

$$F = \frac{A_r}{C_g} \dot{q}_1 + (A_p - A_r)^2 R_c (V_p - V_r) + (A_p - A_r) P_{ER} \quad (6)$$

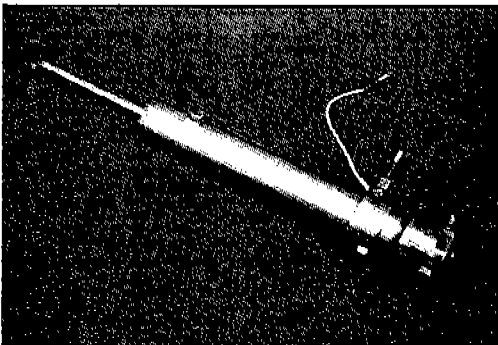


Fig.5 Photograph of the proposed ER damper

여기서  $A_r$ 는 피스톤 로드의 단면적이고,  $A_p$ 는 피스톤 단면적을 나타낸다. 또한,  $q_1$ 은 하부챔버의 부피,  $F$ 는 ER댐퍼의 댐핑력,  $V_p (= \dot{x}_1)$ 는 피스톤 속도, 그리고  $V_r$ 은 피스톤 로드의 속도이다. 본 연구의 경우 피스톤 로드는 고정되어 있으므로  $V_r = 0$ (zero)이다.

위에서 제안된 모델을 근거로하여 설계변수에 따른 댐핑력의 크기를 분석한 후, Fig.5와 같이 ER댐퍼를 설계, 제작하였다. 댐핑력의 크기는 소형 승용차용 댐퍼를 기준으로 설계하였으며, ER댐퍼의 행정거리(stroke)는  $\pm 92\text{mm}$ , 그리고 바깥쪽 실린더의 외경은  $50\text{mm}$ 로 하였다. ER댐퍼의 성능은 피스톤 및 피스톤 로드 직경, 전극의 너비, 길이, 전극 간격 등의 설계조건에 의해 영향을 받으며, 특히 전극 간격은 ER댐퍼의 성능에 큰 영향을 미치는 중요한 설계인자이다. 제안된 ER댐퍼의 전극은 실린더형태로 전극의 길이는  $190\text{mm}$ 이고, 전극 간격은  $0.75\text{mm}$ 로 설계하였다.

#### 4. ER댐퍼의 성능시험

ER댐퍼의 전기장 증가에 따른 댐핑력 시험과 제어특성시험을 위해 사용된 시험장치가 Fig.6에 도시되었다. 가진변위와 댐핑력을 각각 LVDT와 로드셀을 이용하여 측정하고 가진 속도는 수치미분을 통하여 구하였다. 또한, 가스챔버의 가스압력을  $10\text{bar}$ 로 설정하였으며, 사용된 가스는

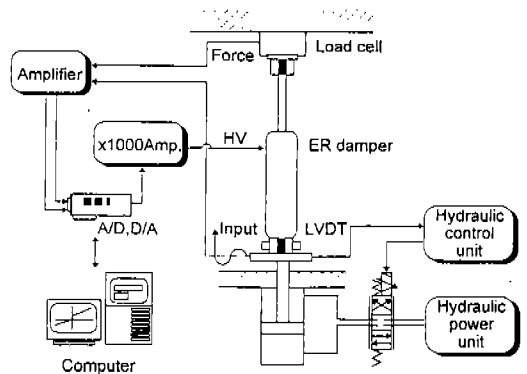


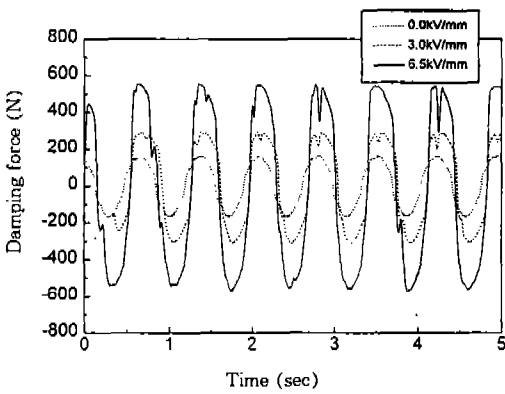
Fig.6 Experimental apparatus for the ER damper testing and control

질소가스이다.

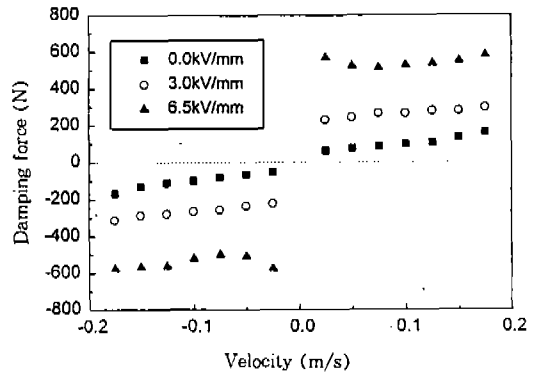
Fig.7은 가진변위  $\pm 20\text{mm}$ , 가진주파수  $1.4\text{Hz}$ 로 가진하였을 때, 전기장 증가에 따른 ER댐퍼의 성능변화를 나타낸 것이다. Fig.7(a)는 전기장 증가에 따른 ER댐퍼의 시험측정결과로 전기장이 증가할수록 댐퍼의 댐핑력이 증가함을 알 수 있다. 이는 ER유체가 전기장 부하로 항복응력을 갖게되어 피스톤 로드의 상하운동이 발생되기 위해서는 더 많은 힘이 필요하기 때문이다. 이 시험조건인 경우, 최대 피스톤 속도는  $0.176\text{m/s}$ 로 전기장 무부하시 최대  $158\text{N}$ 의 댐핑력이 발생되었으나,  $6.5\text{kV/mm}$ 의 전기장 부하시  $553\text{N}$ 의 댐핑력이 발생되어  $395\text{N}$ 의 댐핑력 변화가

발생되었다. 이로부터 ER댐퍼는 피스톤 속도와는 무관하게 단지 전기장만의 제어로 댐핑력이 조절됨을 알 수 있다. 한편, 높은 전기장 부하시 댐핑력의 peak근처에서 notch형태로 댐핑력 하강이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 전기장 부하시 발생하는 ER유체내의 입자의 체인구조가 높은 유체유속에서 일시적으로 끊어지기 때문으로 사료된다. Fig.7(b)는 전기장 증가에 따른 ER댐퍼의 시뮬레이션 결과로서, Fig.7(a)의 성능과 유사하게 전기장 증가에 따라 댐핑력이 증가됨을 알 수 있다. 이로부터 식(5)~(6)의 동적 지배방정식이 타당함을 알 수 있다.

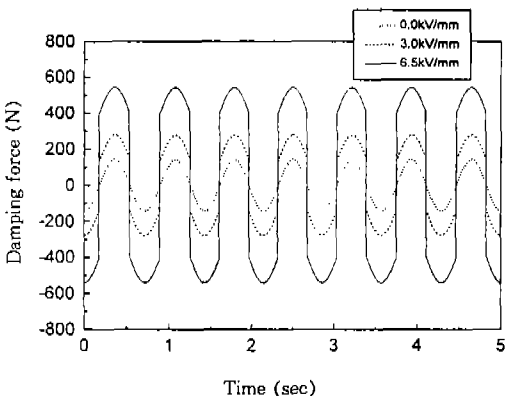
Fig.8은 전기장 증가에 따른 ER댐퍼의 댐핑



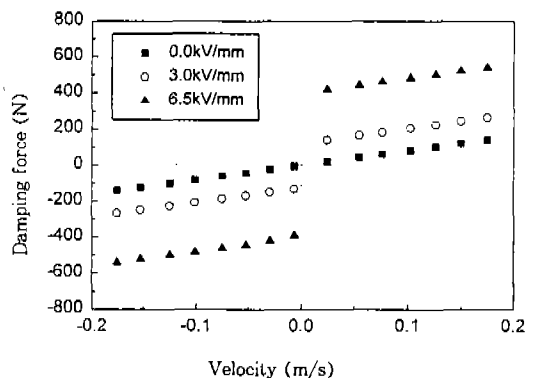
(a) measured



(a) measured



(b) simulated



(b) simulated

Fig.7 Field-dependent damping force

Fig.8 Damping force vs. piston velocity

력 변화를 피스톤 속도 증가에 따라 나타낸 것이다. Fig.8(a)는 시험측정 결과로, 전기장 무부하시 피스톤 속도가 증가됨에 따라 댐퍼의 댐핑력이 증가됨을 알 수 있다. 이는 식(6)에서 알 수 있듯이 피스톤 속도 증가에 따라 유체 저항으로 인한 댐핑력이 증가되기 때문이다. 또한, 전기장 (6.5kV/mm) 부하시 ER댐퍼의 댐핑력이 전기장 무부하시의 댐핑력보다 3.5배 정도 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 자동차의 현가장치에 장착될 경우, 도로 노면상태에 따라 댐퍼가 소프트(soft) 모드와 하드(hard) 모드로 조절해야 되는 설계방향을 단지 전기장만의 제어로 연속적으로 조절할 수 있는 것을 의미한다.

## 5. ER댐퍼의 댐핑력 제어

ER댐퍼는 기존 댐퍼와는 달리 전기장의 변화에 따라 연속적으로 댐핑력을 발생시킬 수 있다. 따라서, ER댐퍼에 공급되는 전기장을 적절히 제어한다면 원하는 댐핑력  $F_d$ 를 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 ER댐퍼에 알맞는 전기장을 공급하였을 때, ER댐퍼가 요구댐핑력  $F_d$ 를 발생시킬 수 있는가를 실험적으로 고찰하였다. 모델링을 통하여 도출된 ER댐퍼 수식으로부터 요구댐핑력  $F_d$ 에 해당되는 전기장  $E$ 를 결정하여 이를 ER댐퍼에 공급하여 요구댐핑력을 발생시키도록 하였다. 여기서, 요구댐핑력  $F_d$ 는 차량의 승차감 제어를 위해 일반적으로 많이 사용되는 스카이훅 제어알고리즘을 통하여 결정된다.<sup>14)</sup>

ER 댐퍼에서 발생하는 댐핑력  $F$ 는 식 (5)~(6)으로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F = K_e \dot{x}_p + C_e \ddot{x}_p + F_{ER} \quad (7)$$

여기서,

$$K_e = \frac{A_p^2}{C_e}, \quad C_e = (A_p - A_r)^2 R_o$$

$$F_{ER} = (A_p - A_r) P_{ER}$$

ER댐퍼를 스카이훅 제어알고리즘에서의 이상적 댐퍼(ideal damper)로, 차체의 가진을 댐퍼의 피스톤 운동으로 생각하여 ER댐퍼가 요구댐핑력을 발생시키도록 전기장  $E$ 를 알맞게 결정한다. 결국, 요구댐핑력이 스카이훅 제어알고리즘을 통하여 결정되면, 식(4)와 (7)로부터 ER댐퍼에 공급되는 전기장  $E$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$E = \left[ \frac{F_d - K_e x_p - C_e \dot{x}_p}{(A_p - A_r)} \cdot \left( \frac{h}{2L\alpha} \right) \right]^{1/2} \quad (8)$$

여기서, ER댐퍼의 요구댐핑력은  $F_d = C_e \dot{x}_p$ 로 정의되고,  $C_e$ 는 스카이훅 제어이론에서의 이상적인 댐퍼의 제어게인이다. 이는 물리적으로 ER댐퍼의 댐핑계수를 나타낸다. 따라서, A/D변환기를 통하여 변위와 속도의 정보를 얻고 컴퓨터를 통하여 식(8)의 수식을 매순간 계산하여 결정된 전기장  $E$ 를 고정압 공급장치를 통하여 ER댐퍼에 공급하면 요구댐핑력  $F_d$ 를 얻을 수 있다.

Fig.9는 요구댐핑력을 얻기위한 제어전기장  $E$ 를 ER댐퍼에 공급하였을 때 얻은 댐핑력 성능곡선을 나타낸 것이다. 가진진폭은  $\pm 20\text{mm}$ 이고 가진주파수는 0.4Hz이며, 스카이훅 제어알고리즘의 제어게인  $C$ 는 10200으로 설정하였다. Fig.9(a)의 그림에서 보듯이, 제어하지 않을 경우(0kV/mm의 전기장 공급시), ER댐퍼는 요구댐핑력  $F_d$ 의 성능을 발생시키지 못했다. 그러나 제어기 실행시, ER댐퍼의 댐핑력이 요구댐핑력  $F_d$ 와 잘 일치함을 알 수 있다. Fig.9(b)는 입력된 제어 전기장을 도시한 것으로, 요구댐핑력과 유사한 형태의 제어전기장이 ER댐퍼에 공급되는 것을 알 수 있다.

Fig.10은 시험조건인 가진주파수를 0.4Hz에서 1.4Hz로 증가시킨 경우의 댐핑력 제어성능을 시간영역에서 나타내고 있다. 이때, 가진 진폭은  $\pm 20\text{mm}$ 이고 스카이훅 제어알고리즘의 제어게인  $C$ 는 3429로 설정하였다. Fig.10(a)의 그림에서 보듯이, 가진주파수가 증가하여도 ER댐퍼의 댐핑력이 요구댐핑력 곡선과 잘 일치함을 알 수 있다. Fig.10(b)는 제어전기장을 도시한 것

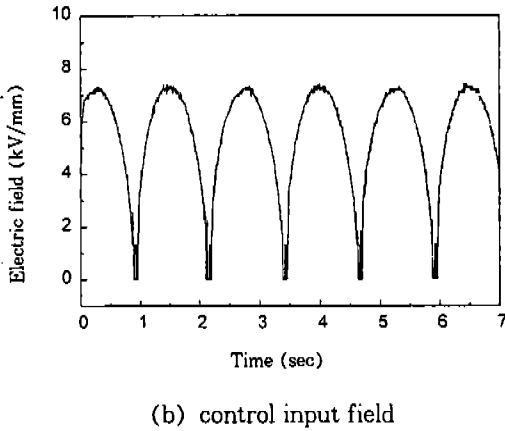
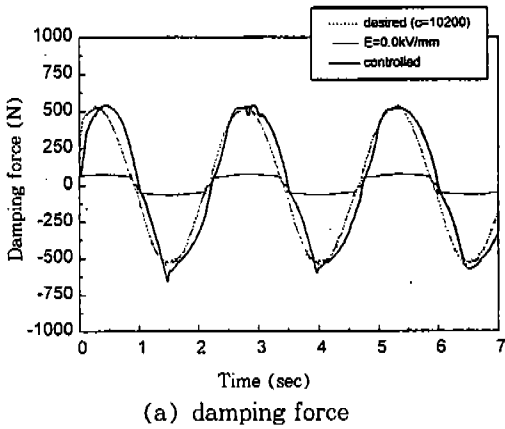


Fig.9 Measured damping force control in time domain (excitation frequency : 0.4Hz)

으로 가진주파수가 증가됨에 따라 공급되는 제어 전기장의 주파수도 증가됨을 알 수 있다.

일반적인 댐퍼의 설계조건은 댐핑력에 방향성을 부여하여 자운스(jounce)운동일 때 보다 리바운드(rebound)일 때 큰 댐핑력을 발생시키게 한다. 따라서, 기존 수동식 댐퍼는 체크(check) 밸브를 댐퍼에 구성하여 리바운드 일때는 닫히고 자운스 일 때는 열려 방향성을 타나냈지만, ER 댐퍼는 공급되는 제어 전기장을 조절함으로써 이러한 효과를 얻을 수 있다. 따라서, ER 댐퍼의 댐핑력에 방향성을 부여하기 위하여 ER 댐퍼가 리바운드 운동일 경우는 식(8)에 의해 결정된 전기장을 공급하고, 댐퍼의 운동이 자운스일 경

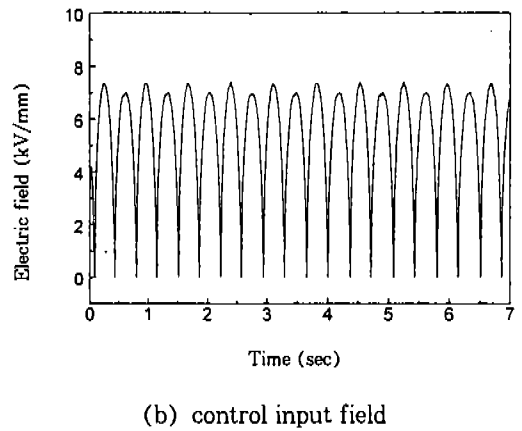
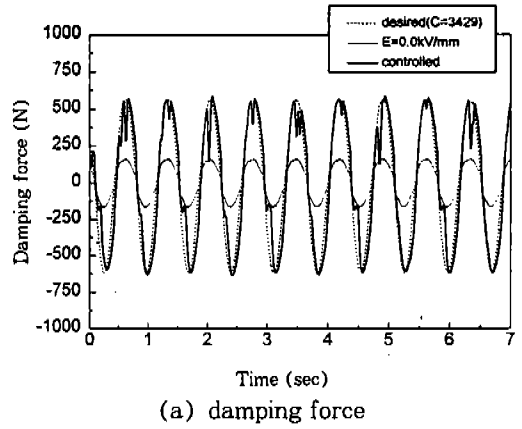
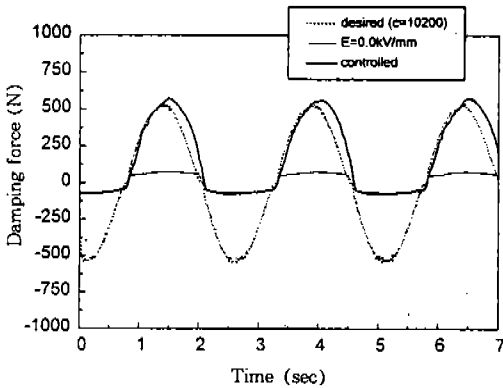


Fig.10 Measured damping force control in time domain (excitation frequency : 1.4Hz)

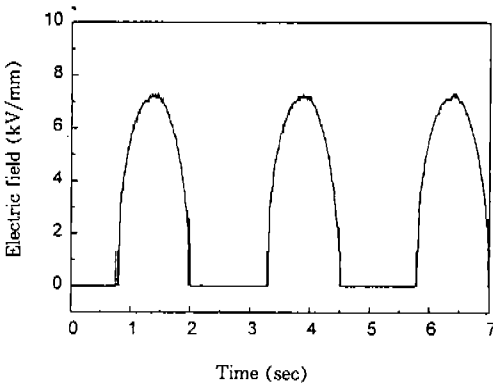
우는 0의 전기장을 공급하였다.

Fig.11은 방향성을 갖도록 전기장을 제어했을 때의 ER 댐퍼의 성능곡선을 시간영역에서 나타내고 있다. 시험조건으로 가진진폭은  $\pm 20\text{mm}$  이고 가진주파수는 0.4Hz이며, 스키야훅 제어알고리즘의 제어게인 C는 10200으로 설정하였다. Fig.11(a)의 그림에서 보듯이 리바운드 운동일 때 ER 댐퍼가 요구댐핑력을 발생시키나 자운스 운동일 때는 0의 전기장이 공급되어 낮은 댐핑력이 발생됨을 알 수 있다. 즉, 피스톤의 운동 방향에 따라 댐핑력의 하드 모드와 소프트 모드를 알맞게 제어할 수 있음을 알 수 있다. Fig.11(b)는 제어전기장을 도시한 것으로 자운스 운동





(a) damping force

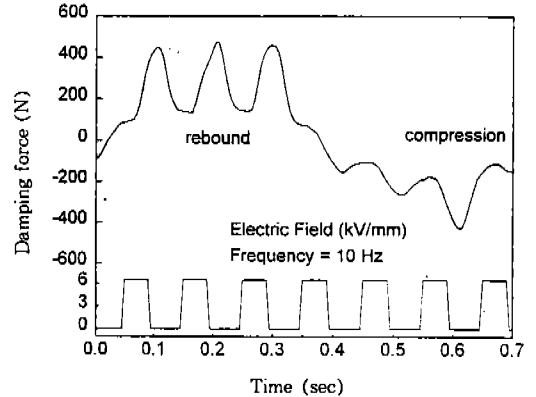


(b) control input field

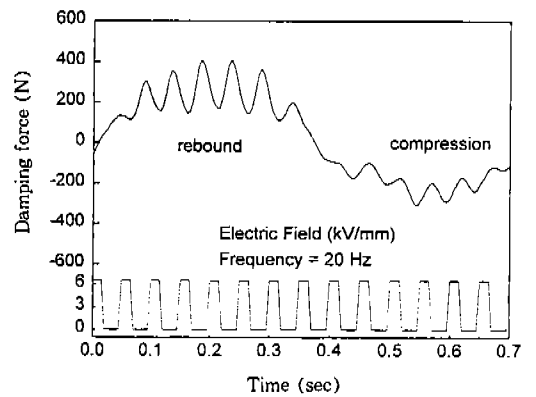
Fig.11 Hard and soft mode control response

일 때 제어전기장이 0가 됨을 알 수 있다. 이와 같이 ER댐퍼를 사용할 경우, 단지 전기장만으로 댐핑력 제어가 가능하므로 댐퍼 설계의 단순화를 가져올 수 있다.

한편, ER댐퍼의 응답특성에 영향을 미치는 인자로는 댐퍼의 설계변수, 사용되는 ER유체의 종류, 온도 그리고 부하되는 전기장의 크기등이 있다. 본 연구에서는 사각파(square wave) 형태의 전기장 주파수를 점차 증가시켜 이를 ER댐퍼에 공급하고 이때에 반응하는 ER댐퍼의 댐핑력을 측정하여 ER댐퍼의 응답특성을 고찰하였다. 응답특성은 전기장 무부하시 일정한 가진에 의해 발생되는 ER댐퍼의 댐핑력이, 부하되는 사각파



(a) 10Hz



(b) 20Hz

Fig.12 ER damper responses to square wave control voltage

전기장 형태에 따라 유사한 형태로 증가되는가로 고찰하였다.

Fig.12는 사각파형태의 전기장 주파수 증가에 따른 ER댐퍼의 댐핑력 곡선을 시간영역에서 나타낸 것이다. 시험조건으로 가진주파수는 1.4Hz 이고 가진 진폭은  $\pm 20\text{mm}$ 이며, 부하되는 전기장의 세기는  $6.5\text{kV/mm}$ 이다. Fig.12(a)는 부하되는 전기장의 주파수가 10Hz인 경우로 부하되는 전기장에 따라 시간지연없이 댐핑력이 유사한 형태로 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig.12(b)는 부하되는 전기장의 주파수가 20Hz로 증가된 경우의 댐핑력 곡선이며, Fig.12(a)의 성능과 같이 전기장 주파수에 따른 댐핑력 변화가 확연히

발생됨을 알 수 있다. 이로부터 ITA35 ER유체를 사용한 ER댐퍼를 현가장치에 적용할 경우, 현가장치의 첫 번째 공진주파수인 1~2Hz는 물론 두 번째 공진주파수인 10~13Hz까지의 진동도 제어가 가능함을 제시하고 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 연속적으로 댐핑력을 가변 시킬 수 있는 ER댐퍼를 제안하여 이론적 모델을 구성하고, 본드 그래프 방법을 통하여 지배방정식을 도출하였다. 그리고 제안된 모델을 근거로 ER댐퍼를 설계, 제작하여 댐퍼의 성능시험과 제어특성을 고찰하였다. 전기장 증가에 따라 ER댐퍼의 댐핑력이 증가됨을 알 수 있었으며, 6.5kV/mm의 전기장 부하시 전기장 무부하시의 댐핑력보다 3.5배 정도 증가됨을 확인하였다. ER댐퍼의 댐핑력 제어실험 수행결과, 전기장을 알맞게 제어함으로써 요구하는 댐핑력을 정확히 발생시킬 수 있었다. 또한, ER댐퍼의 응답특성을 고찰하고자, 10Hz 및 20Hz의 주파수를 갖는 사각파 형태의 전기장을 ER댐퍼에 공급하고 이때에 반응하는 ER댐퍼의 댐핑력을 측정한 결과 매우 잘 반응하는 것을 확인하였다. 따라서, ER댐퍼만이 가지고 있는 연속적 가변성, 빠른 응답특성 등의 장점을 실험적으로 규명하였다. 향후 본 연구에서 제작된 ER댐퍼를 장착한 현가장치의 진동제어에 대한 시험연구가 계속 수행될 예정이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 위탁연구과제(UD950011CD)로 수행되었으며, 이에 관계자께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. W. H. Winslow, "Induced Fibration suspension", Journal of Applied Physics, Vol. 20, pp. 1137~1140, 1949.
2. N. K. Petek, "An Electronically Con-

- trolled Shock Absorber Using Electro-Rheological Fluid", SAE Technical Paper Series 920275, 1992.
3. M. Sturk, X. M. Wu and J. Y. Wong, "Development and Evaluation of a High Voltage Supply Unit for Electrorheological Fluid Dampers", Vehicle System Dynamics, Vol. 24, pp. 101~121, 1995.
4. 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.
5. K. S. Kim, S. B. Choi, C. C. Cheong, M. S. Suh, M. S. Yeo, I. S. Han and Y. J. Jang, "A Semi-Active Suspension System Featuring Electro-Rheological Fluid-Based Dampers", Proceedings of the 6th Asia-Pacific Vibration Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 852~857, 1995.
6. 최승복, 정재천, 최용빈, 허승진, 서문석, "ER유체를 이용한 반능동식 가변댐퍼의 성능해석", 한국자동차공학회논문집, 제1권, 1호, pp. 90~100, 1993.
7. 김기선, 장유진, 최승복, 정재천, 서문석, 여문수, "승용차용 연속가변 ER댐퍼의 성능연구", 한국자동차공학회논문집, 제3권, 16호, pp. 69~77, 1995.
8. S. Morishita and J. Mitsui, "An Electronically Controlled Engine Mount Using Electro-Rheological Fluid", SAE Technical Paper Series 922290, 1992.
9. S. H. Choi, Y. T. Choi, S. B. Choi and C. C. Cheong, "Performance Analysis of an Engine Mount Featuring ER Fluids and Piezoactuators", International Journal of Modern Physics B, 1996(to appear).
10. 최영태, 김기선, 최승복, 정재천, 전영식, "전기유동유체를 이용한 엔진마운트의 모델구성과 성능해석", 한국자동차공학회논문집, 제2권, 3호, pp. 62~74, 1994.

11. S. Y. Jung and S. B. Choi, "Short Squeeze Film Damper Analysis Operating with Electro-Rheological Fluids", Society of Tribologists and Lubrication Engineers (STLE) Tribology Transaction, Vol. 38, No. 4, pp. 857~862, 1995.
12. D. Carlson and T. G. Duclos, "ER Fluids Clutches and Brakes-Fluid Property and Mechanical Considerations", Proceedings of the 2nd International Conference on ER Fluids, pp. 353~367, 1990.
13. T. C. Jordan and M. T. Shaw, "Electro-rheology", IEEE Transaction of Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, pp. 849~878, 1989.
14. D. Karnopp, M. J. Crosby and R. A. Harwood, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators", Journal of Engineering for Industry, Transaction of the ASME, pp. 619~626, 1974.