

## ER댐퍼의 동특성 해석 및 성능연구

이육형\*, 박명관\*\*

### The Analysis of Dynamic Characteristics and Performance Investigation of a ER Damper

Yuk Hyung Lee\*, Myeong Kwan Park\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, the analysis of dynamic characteristics and performance investigation of the ER damper are investigated. The ER damper is based on a double rod actuator and an electric field are applied to the moving electrode composed of cylinder and piston. The performance of the ER damper is length of piston electrode field and its velocities. The experimental and calculated results show that the characteristic of the ER damper varies with the magnitude of the electric field.

**Key Words** : ERF (Electro-Rheological Fluid : ER유체), Double Rod Actuator(양로드 액츄에이터), ER Damper (ER댐퍼), Moving Electrode(이동전극), Damping Force(감쇠력)

#### 1. 서론

최근 산업현장에서의 기계장치나 진동제어에 사용되는 액츄에이터는 제어장치의 정도에 따라 수동 및 능동 제어를 함으로써 기계자체의 성능을 유지 및 향상시키는 역할과 전체 시스템의 정밀도에도 많은 영향을 주는 매체로 대두되고 있다. 또한 보다 다양한 외부조건에 대응이 가능하고 정밀하게 제어 될 수 있는 고성능의 제품이 요구되고 있다. 이에 따라 미래의 액츄에이터는 어떠한 기계장치나 진동제어장치 등에도 쉽게 제작이 용이하고 간단한 구조이면서 다른 외부조건이나 다양한 기기들의 요

구조건에도 만족하는 더욱 고성능화 되고 제어가능하며 경량화된 제품의 개발이 필수적이다. 따라서 기존의 기계적인 메카니즘을 이용한 액츄에이터에 비해 그 구조가 보다 간단하고 제어 가능하며 오랜 작동에서도 부품의 마모 및 진동 등의 문제를 해결할 수 있는 미래형 고성능 댐퍼의 개발이 요구된다. 일반적으로 지능유체로 알려져 있는 전기점성 유체(이하 ER유체라 칭함)는 부하되는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 것으로, 일반적으로 비전도성 유체 속에 강한 전도성 입자를 분산시킨 콜로이드 용액이며, 1949년 Winslow가 부하되는 전기장에 실리카를 입자로

\* 부산대학교 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

한 유체가 점성이 변함을 처음으로 발표하였으며, Winslow 유체라고도 한다<sup>(1)</sup>. ER유체는 외관상 점성 등의 역학적 성질이 수 ms이내 빠른 응답과 가역적인 성질을 가지며 전기장 부하시 유체의 겉보기 점도가 변화하는 ER효과의 특성을 가지는 점성변화가 큰 유체이다<sup>(2,4)</sup>. 본 연구에서는 양 로드 액츄에이터를 이용하여 ER 댐퍼의 동특성 해석 및 새로운 개념의 ER댐퍼를 설계, 제작하고 그 성능을 분석함으로써 기계장치나 진동제어에 있어서 연속적으로 감쇠력을 가변 할 수 있는 새로운 액츄에이터를 제안하였다. 따라서 기존의 기계적 메카니즘을 이용한 액츄에이터에 비해 그 구조가 간단하고 부품의 마모 및 진동 등의 문제를 해결할 수 있는 댐퍼의 개발이 기대된다.

### 1.1 연구동향

ER유체는 전기장 부하시 그 점성에 대한 역학적 성질이 빠르게 반응하고, 가역적이며, 점성변화가 큰 유체이다. 현재 이와 같은 성질을 나타내는 유체에는 크게 나누어서 입자계와 균일계의 두 종류가 있다. 첫째로 입자계 ER유체를 최초로 알아낸 것은 1940년대 말 미국의 Winslow가 알아내었다. 그후 1967년에 Klass와 Matinek<sup>(5)</sup>가 전기점성효과와 계통적 검토를 한 논문을 발표한 후로 세계각국에서 ER유체가 주목 받게 되었다. 1980년대 말, 수분을 필요하지 않는 유체<sup>(6)</sup>가 발견되어, 실용화의 기틀이 마련되었다. 둘째는 입자를 이용하지 않는 균일계, 즉 액정계로서 전기장 부하에 따른 점성변화는 이미 1890년대에 글리세린, 파라핀 유에 대해서도 1930년대에는 어느 정도의 극성 및 비극성유기 액체에 대해서 상세히 검토되어 있다. 1970년대 말 다시 극성액체에 이온성 물질을 첨가한 비극성 액체에 대해서 검토한 것을 보면 세배 정도의 변화가 있었다. 1980년대 후반 입자 분산계의 ER유체 연구가 성행하게 됨과 동시에 균일계 연구도 개선되어, 최근에는 액정을 중심으로한 폴리머 용액, 콜로이드 용액 등을 이용한 ER유체에 관한 학회보고나 특허가 증가하고 있는 실정이다. 현재 ER유체에 관한 국외연구 활동은 일본, 영국을 비롯하여 미국, 러시아에서 연구가 진행중이며 영국에서는 몇몇 대학을 중심으로 연구 그룹이 형성되어 활발한 연구를 진행하고 있다. 미국에서는 여러 기업들이 대학과 공동으로 연구하고 있다. 일본에서의 개발상황을 특허정보로부터 보면, 얼마 안되는 기간에 ER유

체에 관련한 특허신청 건수가 급격히 증가하고 있으며 많은 기업이 개발경쟁을 하고 있다. 응용분야에 관한 내용도 다양하며 주로 엔진마운트<sup>(7)</sup>, 클러치<sup>(8)</sup>, 밸브<sup>(9)</sup>, 가변dumper<sup>(10)</sup>등이며 특히 진동제어에 관한 응용 연구가 많다. 이와 같이 국외에서는 큰 가능성을 내재하고 있는 신기능 재료인 ER유체를 이용한 응용연구와 실용화를 위해 더욱 안정성 있는 유체 개발에도 많은 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 국내에서도 최근 ER유체에 대한 관심이 커져서 ER관련된 기초연구 및 댐퍼<sup>(11-12)</sup>, 클러치, 브레이크등 여러 분야에 연구를 시작하려는 연구단체가 많이 생기고 있는 실정이다.

## 2. ER유체 물성치 실험

### 2.1 유동해석

ER유체는 전기장 부하시 빙햄유체와 같은 항복 전단응력이 생성되고 ER유체가 유동시 빙햄유체와 거의 흡사한 특성을 가지기 때문에 ER유체를 빙햄유체 모델로 제시하여 유동해석에 관한 기초식을 제시하면 다음과 같다<sup>(13)</sup>. 유로 높이  $h$ 에 비해 유로 폭  $b$ 가 충분히 큰 경우 ( $b/h \gg 1$ )로, 전기점성효과가 유로의 상하면에 작용하므로 관내로의 유동장을 2차원의 단순 전단유로 근사하고, 좌표계를 Fig. 1과 같이 놓았다. 구성 방정식의 전단응력  $\tau$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_y - \eta_b \frac{du}{dy} \\ &\approx y \frac{\Delta P}{l} \end{aligned} \quad (1)$$

$\tau_y$ 는 항복응력,  $\eta_b$ 는 겉보기점도,  $\Delta P$ 는 차압측정 거리  $l$ 의 압력강하이다. 따라서 전단응력  $\tau$ 는 직선적인 변화이므로, 전단응력은  $y=0$ 에서  $\tau=0$ , 관벽  $y=h/2$ 곳에서 최대치  $\tau_w$ 를 갖는다. 그리고  $y=h_y$ 인 곳에서  $\tau_y$ 는 항복응력을 가지므로 비프러그 높이  $h_y$ 와 항복응력과 관계식은 다음과 같다.

$$\tau_y = h_y \frac{\Delta P}{l} \quad (2)$$

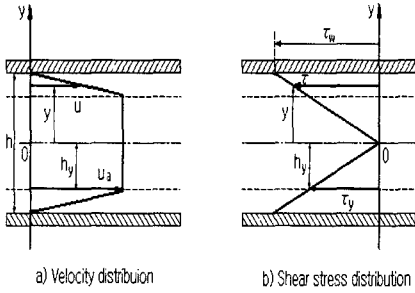


Fig. 1 Flow profile of Bingham fluid

여기서 무차원 수를 다음과 같이 정의한다.

$$a = \frac{2h_y}{h}, y^* = \frac{2y}{h} \quad (3)$$

여기서,  $h$ 는 유로 높이,  $a$ 는 무차원 비프러그 반경(Relative Plug Radius) 높이를 말하며,  $0 \leq a \leq 1$ 의 범위를 가진다. 유로의 단위 폭당의 유량  $q$ 는

$$q = u_m h = \frac{h^2 \tau_y}{\eta_b} f(a) \quad (4)$$

로 표시된다. 여기서 ER 효과가 적어, 결국 무차원 비프러그 높이  $a$ 가  $a \gg a^3$ 의 조건을 근사적으로 만족한다고 가정하고 식(4)은, 식(3)과 Fig.1에 도시적으로 구하면  $a = \tau_y / \tau_w$ 의 관계를 이용하여

$$q \approx \frac{h^2 \tau_y}{\eta_b} \frac{2-3a}{12a} \quad (5)$$

$$= \frac{h^2}{6\eta_b} \tau_w - \frac{h^2 \tau_y}{4\eta_b} \quad (6)$$

로 바꿀 수 있다. 다시한번 식(6)을  $\tau_w$ 에 대해서 정리하면 아래와 같다.

$$\tau_w = \eta_b \gamma + \frac{3}{2} \tau_y \quad (7)$$

혹은,  $\gamma$ 는 겉보기 전단속도에 있어서, 유로의 단위 폭당의 유량  $q$ 와 유로 높이  $h$ 를 이용하면

$$\gamma = \left. \frac{du}{dy} \right|_{y = +\frac{h}{2}} = \frac{6q}{h^2} \quad (8)$$

로 나타내어진다.

## 2.2 실험장치 및 방법

ER유체의 기본 물성치에 대한 전체 실험장치의 개략도는 Fig. 2와 같다. 전극 유로의 치수는 길이

가  $L=240\text{mm}$ , 폭이  $b=30\text{mm}$ 으로 제작되었으며, 높이는  $h=1\text{mm}$ , 유로의 상하벽면 간의 전극 두께는  $t=1.5\text{mm}$ 의 동극판을 사용하였다. ER 장치부의 구멍의 위치는 입구의 조리개부에 의한 흠어지는 영향들을 고려하여 유로입구에서 50mm 안쪽 양단에 설치하였다. 실험방법은 유동장은 단순전단유 조건에서 ER유체에 대해 실험하였다. ER유체를 이용한 실험에서는 NIPPON SHOKUBAI사의 ER유체를 사용하여 실험하였다. 유체의 점도는  $25^\circ\text{C}$ 에서  $115\text{mpa} \cdot \text{s}$ , 밀도는  $25^\circ\text{C}$ 에서  $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ , 체적탄성계수  $8.3 \times 10^{-4} \text{cc}/\text{cc}/^\circ\text{C}$ 이다. 측정은 에어 콤프레셔로부터 압축된 압축공기는 압력조절 밸브를 통해 ER 유체가 넣어진 메인탱크로 보내어지고 메인탱크내의 압력은 각 실험하고자 하는 압력을 일정하게 유지한다. 메인탱크 내의 ER유체는 압축공기에 의한 배압에 있어서 유로에 보내어져 섞이고 전기장 및 유속에 따라 압력센서로부터 압력차를 얻어 데이터를 획득하는 ER 장치부를 통과 후 중량법에 의해 유량을 측정한다. 유체가 ER 장치부를 통과시 고전압 발생기에서 입력 전압을 부하한다.

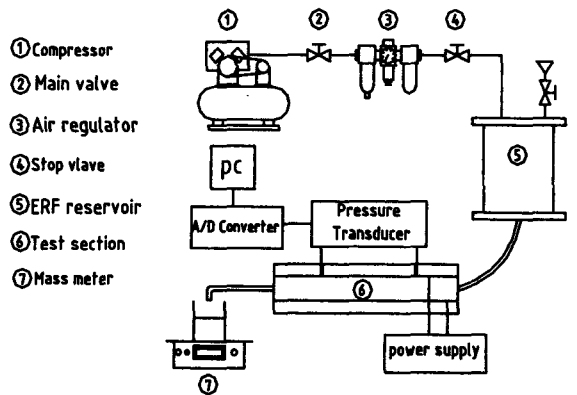


Fig. 2 Schematics of the experimental setup

전단속도  $\dot{\gamma}$ 는 식(8)에 의해 구하고, 벽면 전단응력  $\tau_w$ 는 압력구배  $\Delta p/l$ 과 유로높이  $h$ 를 이용하면

$$\tau_w = \frac{h}{2} \frac{\Delta p}{l} \quad (9)$$

로 되며, 각각 실험결과에 의해 구했다. Fig. 3은 전단속도  $\dot{\gamma}$ 와 벽면 전단응력  $\tau_w$ 를 나타내었다. 이 그래프를 보면 전단속도에 대한 전기장 증가로 부

터 항복응력을 가지며, 빙햄(bingham) 유체의 유동 특성을 나타내는 것을 알았다. 그리고 낮은 전단속도에서의 겔보기 점도 또한 항복응력과 더불어 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서 말한 항복응력은 실험결과에서 단순하게  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ 에서 구한 동적 항복응력을 의미한다. 또한 전장강도  $E=0\text{kv/mm}$ 의 경우에서도 항복응력의 크기가 뚜렷하게 나타남이 관찰되었다. 이는 ER유체의 원액을 사용하여 전장을 걸지 않은 상태에서도 크게 빙햄 성질이 나타남이 아닌가 생각된다(즉, ER유체 제조방법에 따라 나타나는 현상).

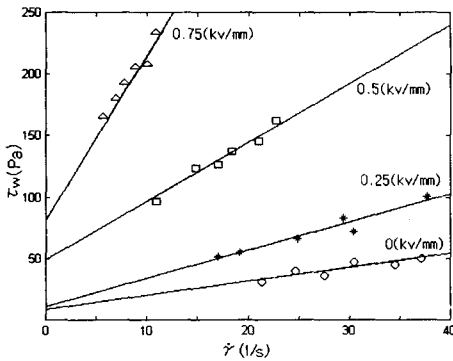


Fig. 3 Shear stress  $\tau_w$  versus shear rate  $\dot{\gamma}$  at various electric field strengths

### 3. ER댐퍼 모델링

Fig. 4에 ER댐퍼의 해석 모델을 나타내었다<sup>(14)</sup>. 해석에 앞서 ER유체는 비 압축성이고, 간극 형상에 의한 손실은 없으며, ER유체의 제어역 만을 평가하기 위해서 피스톤 이동시 실린더와의 마찰도 무시하였다. 양 실린더실 압력  $P_1$ ,  $P_2$ 는 환형 전극에서 제어된다. ER댐퍼내의 유체관성과 유동저항, 혹은 피스톤과 전극간의 유동저항을 고려하면, 피스톤간의 압력차  $P_1 - P_2$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$P_1 - P_2 = \frac{m}{A_V} \frac{du}{dt} + P_L(E, u) \quad (10)$$

여기서,  $m$ 은 피스톤 전극과 실린더튜브 전극 내의 질량, 즉 전극 간 관로 내의 전 질량( $=\rho LA_V$ )이고,  $A_V$ 는 전극간 유로 단면적이며,  $u$ 는 전극간 유속,  $E$ 는 전압강도(Kv/mm)이다. ER댐퍼의 전극간

의 유동저항에 있어서의 압력강하  $P_L(E, u)$ 은 다음과 같다.

$$P_L(E, u) = \Delta P_o + \Delta P_{ER} \quad (11)$$

여기서,  $\Delta P_o$ 는 피스톤 전극과 실린더튜브 전극간의 간극 틈새로 인한 압력강하(유로 단면적 급격한 변화)이고,  $\Delta P_{ER}$ 은 전기장 부하시 나타나는 압력강하(ER효과에 대한 압력강하)이다. 이상에서 피스톤에 작용하는 제어력  $F_d$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_d &= A_1 P_1 - A_2 P_2 \\ &= A \Delta P \\ &= A \left( \frac{m}{A_V} \frac{du}{dt} + P_L(E, u) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)에서  $F_d$ 는 ER댐퍼에서 발생하는 감쇠력,  $P_1$ 은 인장실(rebound chamber)의 압력,  $P_2$ 는 압축실(compression chamber)의 압력 그리고  $A$ 는 피스톤의 단면적이다.

## 4. ER댐퍼의 설계 및 제작

### 4.1 ER댐퍼의 설계사양

본 연구에서는 ER유체를 이용한 기계장치 및 진동제어장치 부분에 적용되는 새로운 개념의 이동전극형 양로드 ER댐퍼로서 피스톤 양단면에 작용하는 힘은 곧 댐퍼의 감쇠력이 된다. 따라서 전기장 부하시 최대의 감쇠력을 발생시키기 위해서 피스톤전극과 실린더전극사이의 간격은 최적설계의 사양을 채택하였고, 이때 전극으로 사용되는 피스톤은 이동전극을 적용시켰다. 그리고 ER댐퍼 피스톤전극의 길이는 감쇠력의 영향을 미치는 설계 파라메타 인자인 피스톤전극길이를 두 가지 타입인 35mm, 50mm로 제작되었다. 설계 파라메타 제원은 로드 외경  $\phi 13$ , 피스톤 외경  $\phi 25$ , 피스톤 길이 50mm, 35mm, 실린더 내경  $\phi 27$ , 전극 간격 1mm이다.

### 4.2 ER댐퍼 장치의 제작

ER유체를 이용한 댐퍼 실험용 장치의 개략도는 Fig.5에 나타내었고, 실제 ER댐퍼 시작품을 Fig. 6에 나타내었다. 기존의 기계적인 메카니즘으로 작동되는 진동제어 액츄에이터보다 그 구조가 간단하고, 기계요소들에 의한 마찰, 마모 및 진동등의 문제가 거의 없는 구조를 가진 양 로드 실린더형 ER

컴퍼로서 피스톤(1)에 전극이 붙어있는 타입으로 피스톤로드가(2)가 이동하게되면 피스톤전극은 진구간 실린더 튜브전극(3) 사이에서 전기장의 세기 및 유로 형상에 대한 감쇠력을 발생하도록 제작되었다.

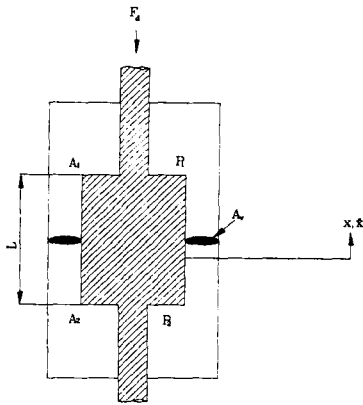


Fig. 4 Schematic representing analytical model of ER damper

ER댐퍼의 전극부는 피스톤과 실린더 부분으로 구성되어 있고, 피스톤형 전극은 입력전압을 (+)전원이 연결되기 있으며 전기가 잘 통하는 황동으로 제작되었다. 또한 이동시 피스톤 전극의 이탈을 막기위해서 스냅링(5)로 체결되어 있다. 그리고 그리운드와 연결되는 실린더 튜브 전극은 STKM11종으로 되어있다. 또한 가진 시 ER유체의 누유를 막기 위해 실린더 양측에 오일씰(6)을 설치하였다. 전원 공급시 입력 전압은 고전압으로 들어오기 때문에 감전의 위험이 있다. 따라서 실험장치의 외부 실린더 튜브 (4)를 절연체인 아크릴 합성수지로 제작하였다.

## 5. ER댐퍼의 성능실험

### 5.1 ER댐퍼의 실험장치 및 방법

성능실험은 자동차용 충격흡수기 전용 시험장기인 MTS 850에서 수행되었다. ER유체를 이용한 ER댐퍼의 감쇠성능이 구해지는 경로는 데이터 획득을 먼저 컴퓨터에서 제어 입력된 변위 및 속도에 대한 정현파(sine wave)입력신호를 테스터링크 인터페이스를 통해 유량에 대한 유압제어를 수행하는 마이크로본솔이 유압공급장치에서 유압을 여러

방향의 유로로 제작된 메니폴드(Manifold)를 통해 액츄에이터로 전달된다. 액츄에이터에 입력 신호에 따라 작동하면 메인 테이블이 이미 ER댐퍼와 체결된 상태에서 액츄에이터 로드(2)가 움직여 원하는 인장, 압축 스트로크까지 1싸이클에서 4싸이클까지 반복 작동하게된다. 액츄에이터가 작동을 시작할 때 고전압 발생장치에서 고전압을 부하하게 된다. 제작된 ER댐퍼에 대한 감쇠력 측정시 전기장 부하를 0, 0.75, 1.25, 1.5, 1.75KV/mm일 때 각속도는 0.052, 0.13, 0.26, 0.39, 0.52, 0.78, 1.04 m/s로 수행하였다.

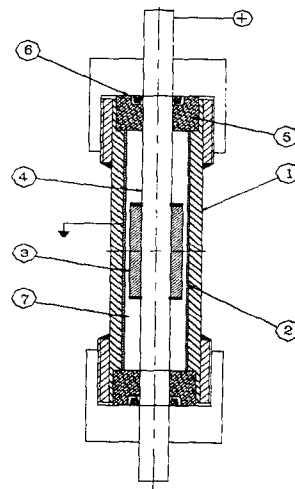


Fig. 5 Schematic of the ER damper

### 5.2 실험결과 및 시뮬레이션

본 연구를 위하여 제작된 실험장치를 이용하여 ER댐퍼에 정현파(sine wave)를 입력으로 가진하여 실험한 데이터와 ER댐퍼에서 인장행정과 압축행정에 관한 유량방정식으로 부터 각 유량에 따른 압력 변화율을 유도하여 변화된 압력을 감쇠성능을 구하는 식(11)에 대입하면 전체적으로 변위에 따라 변화는 감쇠운동 방정식을 얻게된 것을 시뮬레이션 하였다. Fig.7부터 Fig.10까지와 Fig.16는 전극길이가 50mm일 때 실험한 결과 그래프이다. Fig.7과 Fig.8는 전기장과 속도에 대한 감쇠력으로 전기장이 일정할 때 속도를 증가시키면 감쇠력이 증가하며 전기장을 더 부가하면 감쇠력은 더욱더 증가함을 알 수 있다. Fig.16은 전기장과 속도에 따라 감쇠력이 증하지만 특히 고속구간 보다 저속 구간에

서 더 많은 감쇠력이 발생함을 알 있다. 이러한 결과는 전기장을 걸었을 때 유동속도가 빨라지면 ER유체내에 형성된 클러스트가 일부 파괴됨에 따라 생기는 현상으로 추측된다. Fig.11부터 Fig.15까지는 전극길이가 35mm일 때 실험한 결과 그래프이다. 여기서 나타난 그래프들의 경향은 앞에서 설명한 전극길이가 50mm일 때 와 유사하다. 그러나 전기장에 대한 감쇠력은 전극길이를 조정하면 감쇠력을 높일 수 있는 것이 확인 되었다. 또한 본 연구의 실험 결과로 실험한 값과 시뮬레이션한 값과의 비교를 통해서 실험한 값의 감쇠력 효과를 검증하였다. 이에 따라 기계장치나 진동제어에 적용이 가능하다고 본다.

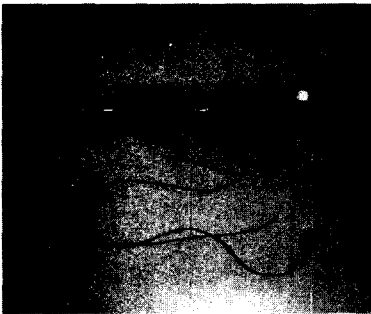


Fig. 6 Photograph of the ER damper

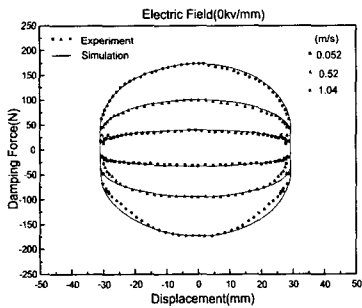


Fig. 7 Damping force according to displacements of ER damper , E=0 kv/mm (Length=50mm)

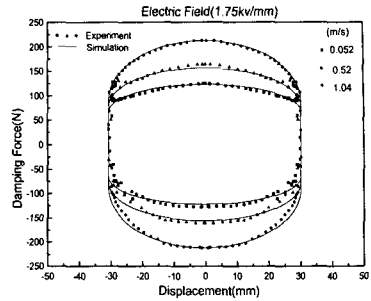


Fig. 8 Damping force according to displacements of ER damper, E=1.75kv/mm (Length=50mm)

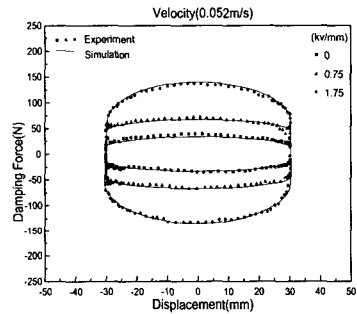


Fig. 9 Damping force according to displacements of ER damper, Vmax=0.052m/s (Length=50mm)

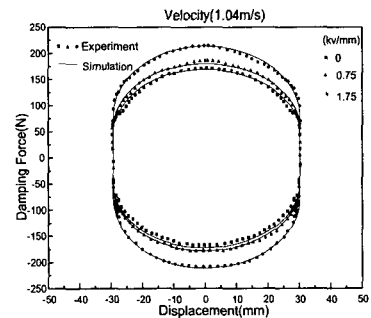


Fig. 10 Damping force according to displacements of ER damper, V=1.04m/s (Length=50mm)

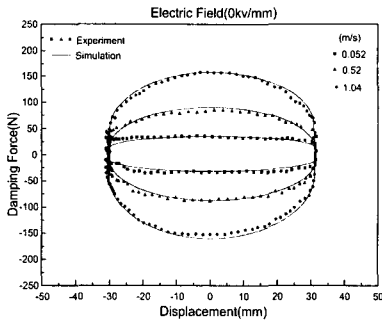


Fig. 11 Damping force according to displacements of ER damper,  $E=0\text{kv/mm}$ (Length=35mm)

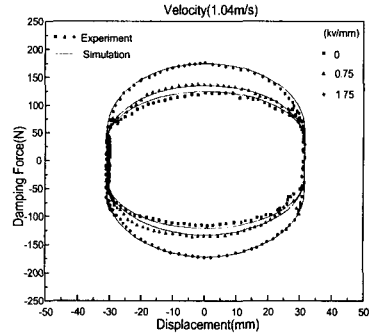


Fig. 14 Damping force according to displacements of ER damper,  $V_{\text{max}}=1.04\text{m/s}$  (Length=35mm)

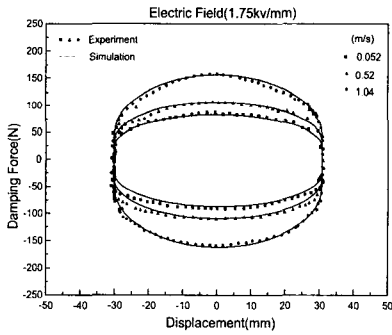


Fig. 12 Damping force according to displacements of ER damper,  $E=1.75\text{kv/mm}$  (length=35mm)

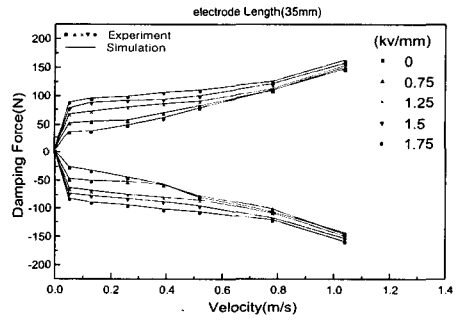


Fig. 15 Damping force according to velocity of ER damper

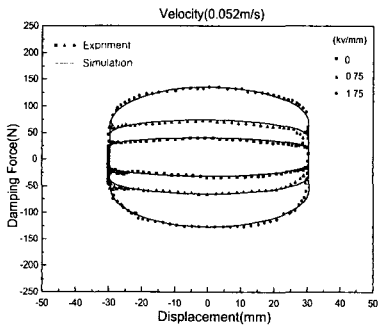


Fig. 13 Damping force according to displacements of ER damper,  $V_{\text{max}}=0.052\text{m/s}$  (Length=35mm)

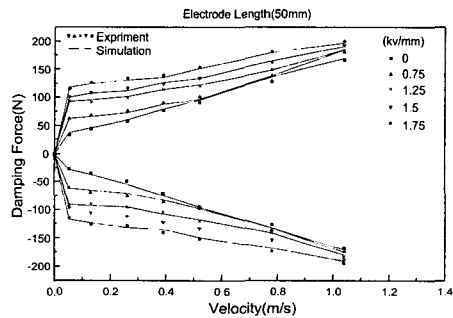


Fig. 16 Damping force according to velocity of ER damper

## 6. 결론

본 연구에서는 기존의 기계적인 메카니즘으로 된 기계장치나 진동제어에 사용되는 액츄에이터의 문제점인 기기 작동시 마찰이나 마모 그리고 소음 등의 원인들을 대처할 수 있는 양 로드 액츄에이터를 이용한 새로운 ER댐퍼를 제안하여 설계 및 제작을 하였다. 또한 성능을 평가하기 위하여 새로 제작된 ER댐퍼를 시뮬레이션과 ER댐퍼 성능 실험으로 비교하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 ER 물성 실험에서 전기장이 증가하면 증가할수록 항복응력과 걸보기 점도의 변화가 확연히 변함을 확인할수 있었다. 또한 전기장 세기가  $E=0\text{kv/mm}$ 의 경우에서도 항복응력을 가지는 것이 확인되었다. 그리고 제작된 ER댐퍼를 가진함에 따라 발생하는 감쇠력은 전기장의 세기와 댐퍼의 가진속도 및 전극길이에 따라 그 영향을 미친다는 것이 판명되었다. 특히 설계 파라메타의 하나인 전극길이는 그 변화에 따라 감쇠력에 대한 효과가 다를 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 ER댐퍼의 가진속도와 전기장 및 전극길이와의 관계를 적절히 이용하면, 차량이나 기계장치의 진동제어 요소에 ER댐퍼가 활용 될 수 있으리라 기대된다.

## 참고문헌

1. Winslow, W. M., Induced Vibration Suspensions, *Journal of Applied Physics*, Vol. 20, pp. 1137-1140, 1949.
2. 小山, "ER流體の開發と應用," *シ-エムシ-*, 1994.
3. *エレクトロレオロジ-特集号, 日本レオロジ-學會誌*, Vol. 20, No. 2, 1992.
4. 小田,井上, "電氣粘性流体の開發と動向," *靜電氣學會誌*, Vol. 18, No. 6, pp. 485-490, 1988.
5. D. L. Klass and T. M. Martinek, "Electro Viscous Fluids," *J. Appl. Phys.*, Vol. 38, No. 1, pp. 67-74, 1967.
6. H.Block and J.P.Kelly, "Electro-Rheology," *J. phys .D.* Vol. 21, No. 12, pp. 1661-1667, 1988.
7. E. W. Williams, S. G. Rigby, J. L. Sproston and R.Stanway, *Electrorheological Fluids Applied to and Automotive Engine Mount*, *J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 47, pp. 221-238, 1993.
8. Carison, J. D. and Duclos, T. G., "ER Fluid Clutches and Brakes," *Proc. 2nd Int. Conf. Electrorheological Fluids*, Technomic Publ. Co., pp. 353-367, 1989.
9. M. Whitte, P. Firoozian, D. J. Peel and W. A. Bullough, "Decomposition of the Pressure Response in and ER Valve Control System," *J. of Intelligent Material System and Structures*, Vol. 5, January, pp. 105-111, 1994.
10. N. K .Petek, "An Electronically Controlled Shock Absorber Using Electrorheological Fluid," *SAE Paper No. 920275*, 1992.
11. 이육형, 박명관, "ER댐퍼의 동특성 해석 및 성능연구," *한국정밀공학회 추계학술회의 논문집(I)*, pp. 183-186, 1999.
12. 최승복, 최영태, 박우철, 정재천, 서문석, 여문수, "연속가변 ER댐퍼의 제어 및 응답특성," *한국자동차공학회논문집. 제4권, 제6호*, pp. 164-174, 1996.
13. M. Nakano and T. Yonekawa, *Trans. of JSME., Series B*, Vol. 61, No. 166, 1995.
14. MasamiNAKANO and Takuya YONEKAWA, "Active Damper Using Electrorheological Suspension and Its Application to Vibration Isolation Control," *JSME., Series C*, Vol. 62, No. 593, 1996.