

ER유체를 이용한 댐퍼의 설계 및 성능에 관한 연구

박성태 · 양헌석
자동차공학과

<요 약>

본 논문에서는 ER(electrorheological)유체의 동역학적 특성치를 실험적으로 구하고, 그 특성치와 빙햄 플라스틱 모델을 이용한 ER댐퍼의 해석 방법을 제시하였다. 또한 실린더형상의 전극을 가지는 Poiseuille 유동형 ER댐퍼에 대하여 평판 모델에 의한 근사적 해석과 실린더 모델의 해석결과를 비교하였다. 그리고 실제 Poiseuille유동형 ER댐퍼의 설계 및 제작으로 그 성능에 대한 고찰과 이러한 모델의 타당성을 검증하였다. 동시에 속도뿐만 아니라 전기장의 제어로도 넓은 범위의 감쇠력이 제어 가능함을 알 수 있었다.

따라서 본 연구를 통해 ER댐퍼의 성능에 대한 고찰과 제시된 해석 방법은 ER댐퍼의 초기 설계에 직접 응용될 수 있을 것이다.

A Study on the Design and Performance of the Damper using Electrorheological Fluid

Sung-Tae, Park · Hun-Suk, Yang
school of Mechanical Automotive Engineering

<Abstract>

In this paper, the dynamic properties of ER(electrorheological) fluid and the analysis technique of ER damper using Bingham plastic model were presented. And approximation parallel plate model was introduced for Poiseuille flow ER dampers with cylindrical geometry. The approximation parallel plate model analysis compared with the cylindrical axisymmetric model analysis. To validate this analysis, the Poiseuille flow ER damper was designed, fabricated and tested. Also the result of test with ER damper showed

that the damping force of ER damper was varied with the piston velocity and the intensity of electric field.

Therefore the proposed analysis technique which is using Bingham plastic model can be used for initial development stage of ER damper.

Key Words : Bingham plastic model, ER(electrorheological) fluid, Poiseuille mode

1. 서론

자동차의 현가장치는 차체의 하중을 지지함과 동시에 노면의 불균일로 인한 차량의 진동의 완화와 흡수에 의한 승차감(ride comfort)의 개선 뿐만 아니라 운전자의 조종 안전성(handling) 즉 동적 성능을 개선하기 위하여 보다 고성능 연구 개발이 진행중이다. 그 예로 감쇠계수(damping)를 가변 하는 Kornopp에 의해 제안된 반능동 현가장치가 있다.^[14] 이와같은 반능동형 현가장치는 그 동작이 기계적 방식에 의존하므로 반응속도 및 감쇠특성이 제한적이어서 최근에는 이러한 기계적 복잡성을 해결하기 위하여 새로운 재료를 채용하는 연구가 진행되어지고 있다. 이러한 재료로는 빠른 응답속도, 폭넓은 제어범위와 함께 실시간에서 연속적인 힘을 발생시킬 수 있는 지능형(intelligent)재료인 ER(electrorheological)유체와 MR(magnetorheological) 유체가 개발되고 있다. 이들은 현가장치 외에도 간단한 유압 밸브(valve), 클러치(clutch), 브레이크(brake), 엔진 마운트(engine mount) 등의 진동 저감장치나 지능 구조물과 같은 분야에서 활발한 연구가 진행중이다.[15] ER유체란 가해지는 전기장(electric field)의 세기에 따라 유체의 역학적 특성이 변하는 유체로서 외견상 가장 두드러진 특징은 전기장 무부하 시에는 액체 상태로 존재하다가 전기장이 작용하면 고체 상태로 상변화(phase change)하는 것이다. 전기장이 가해지면 ER유체의 흐름에 대한 저항, 즉 겔보기 점도(apparent viscosity)뿐만 아니라 유체의 탄성(elastic module)또한 증가하는 경향을 보인다.

본 논문에서는 연속적으로 감쇠력(damping force)을 가변 할 수 있는 ER댐퍼(damper)를 제안하여 이론적 모델을 구성하고, 전기장의 크기에 따른 ER유체의 거동을 빙햄 플라스틱 모델(Bingham plastic model)을 사용하여 해석하였다. 해석에 있어 필요한 ER유체의 유동학적 특성은 회전 동심 실린더형(rotating concentric-cylinder)의 장치를 구성하여 실험을 통하여 구하였다. ER댐퍼의 실린더형 전극판(cylindrical electrode) 사이의 간격(electrode gap)이 유로 폭에 비해 아주 작으므로 평판(parallel plate)으로 가정하여 해석을 행하였다. 해석결과에 제안된 모델 변수를 근거로 ER댐퍼를 설계 및 제작하였다. 제작된 ER댐퍼의 성능을 시뮬레이션 결과와 비교하여 이론적 해석의 타당성을 입증하였다.

2. ER유체의 특성

2.1 ER유체의 개요

ER유체의 특성이 그림 1에 나타나 있다. 전기장을 가하지 않은 상태에서는 유체중의 입

자가 양극과 음극으로 자유로이 운동을 하는 뉴토니안(Newtonian) 유체와 같은 거동을 하지만 전기장이 가해지기 시작하면 입자가 서로의 인력으로 인하여 유동을 하지 않다가 유체의 전단응력이 항복 전단응력 이상이 되면 다음과 같은 전단응력식으로 표현되는 빙햄 플라스틱 유체(Bingham plastic fluid)와 유사한 거동을 한다.

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_y \cdot \operatorname{sgn}\left(\frac{du}{dr}\right) + \mu \frac{du}{dr} & |\tau| > |\tau_y| \\ \frac{du}{dr} &= 0 & |\tau| < |\tau_y| \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, μ 는 고분자 점도(plastic viscosity)를 나타내고, τ_y 는 유체의 항복 전단응력(yield shear stress)을 나타내는 것으로 다음과 같은 지수함수로서의 실험식으로 표현된다.^{[6],[13]}

$$\tau_y = aE^b \quad (2)$$

여기서, E 는 전기장의 크기, 상수 a , b 는 ER 유체의 고유 물성치이다. 이 값들은 ER 유체의 동특성 실험을 통하여 얻어진다.

ER유체의 특성을 정리하면 다음과 같다.^[5]

- 수 ms이하(1~5ms)의 빠른 응답속도를 가진다.
- 전류밀도가 낮아($15 \mu A/cm^2$ 이내) 요구되는 전력이 낮다.
- 겔보기 점도(apparent viscosity)의 변화가 큰 유체이다.
- 넓은 ER효과로 인해 제어범위가 넓다.
- 실시간에 연속적인 힘을 발생시킬 수 있다.

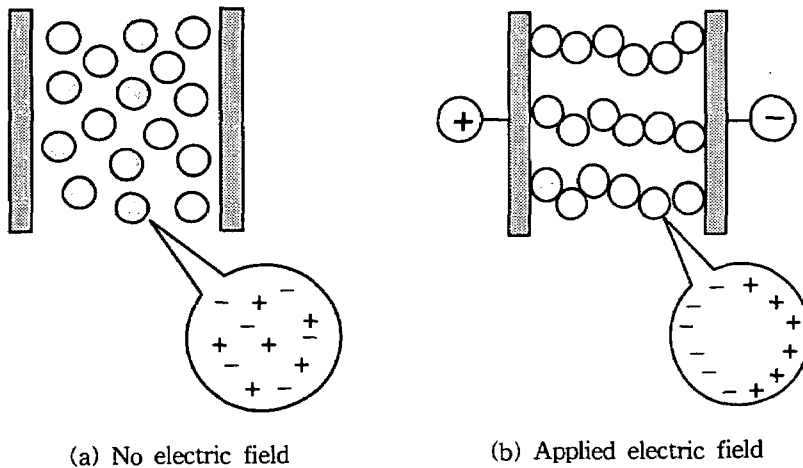


그림 1 ER 유체의 거동

2.2 ER유체의 동특성 실험

빙햄 플라스틱 모델에 있어서 요구되는 재료의 성질은 전기장의 크기에 따라 달라지는 ER유체의 항복 전단응력과 고분자 점도이다. 이 실험에서는 주어진 ER유체에 있어서 해석에 필요한 전기장 크기 함수로서의 항복 전단응력을 측정하였다. 회전 동심 실린더(rotating concentric-cylinder)형 실험장치의 구성으로 전기장의 크기에 따른 ER유체의 전단율과 전단응력과의 관계를 측정하여 전기장의 크기에 따른 ER유체의 항복 전단응력을 계산하였다.^[6] 회전 동심 실린더의 바깥쪽 전극에는 (-)전원을 안쪽 전극에는 (+)전원을 연결하여 고전압 발생장치로부터 고전압을 가하였다. 본 실험에 사용된 ER유체는 NIPPON SHOKUBAI사의 TX-ER8로서 0.115[Pa·sec]의 고분자 점도를 가진다.

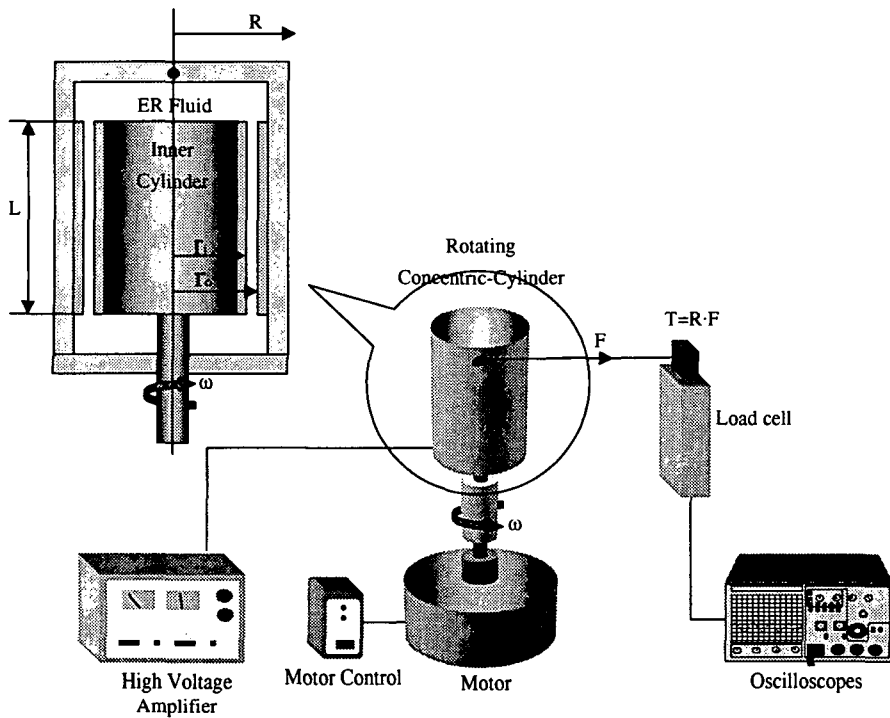


그림 2 회전 동심 실린더 실험 장치 개략도

그림 2에서 외부 실린더는 정지되어 있으며 토크(torque) 측정 장치에 연결되어 있고, 내부 실린더는 일정한 각속도(angular velocity), ω 로 구동된다. 만약 전극 사이의 간격 h 가 내부 실린더의 반지름에 비해 충분히 작다면, 회전하는 실린더 장치는 평행 평판계로 근사화 될 수 있고, 전극 사이(electrode gap)에서의 속도 분포는 선형(linear)으로 간주될 수 있다.

$$\frac{du}{dy} = \frac{r_i \omega}{h} \quad (3)$$

위 식에서 y 는 반지름 방향의 거리를 나타내고 $h \ll r_i$ 이라 가정했다.

토크 T 를 측정하면 유체의 전단응력은 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = \frac{T}{2\pi r_o^2 L} \quad (4)$$

이 실험에 사용된 회전 동심 실린더의 기하학적 치수는 다음과 같다.

r_i (Outer radius of inner electrode) : 19[mm]

r_o (Inner radius of outer electrode) : 20[mm]

L_r (Length of electrode) : 50[mm]

R (Radius of outer cylinder) : 35[mm]

h_r (Electrode gap) : 1[mm]

2.3 실험결과

그림 3은 실험에서 얻은 결과로서 전기장의 크기에 따른 ER유체의 전단율(Shear rate)과 전단응력(Shear stress)과의 관계와 함께 이 데이터에 대한 직선 보간식을 나타내었다. ER유체의 항복 전단응력은 유체가 유동을 일으키는 순간의 전단응력을 나타내는데 전단율을 변화시켜 구한 전단응력 값을 직선 보간 한 후 전단율의 값이 영(zero)에서의 전단응력 값을 항복 전단응력으로 고려한다.[10] ER유체의 항복 전단응력은 전기장의 크기에 대하여 지수함수의 관계를 갖는다.[13] 본 실험은 상온(25℃)에서 행해졌다. ER유체의 항복 전단응력 값을 전기장 (E) 크기의 지수함수로 표현하면 식(5)과 같다.

$$\tau_y = 835.68 E^{1.358} \quad (5)$$

그림 4는 전기장의 크기에 따른 전류밀도(current density, J)를 나타낸 그림이다. 전단율이 200[1/sec]일 때 밀도 값을 지수함수로 나타내면 식(6)과 같다.

$$J = E^{1.79} \quad (6)$$

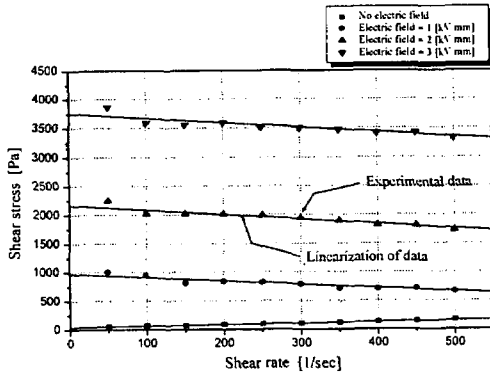


그림 3 전단율에 따른 전단응력의 변화

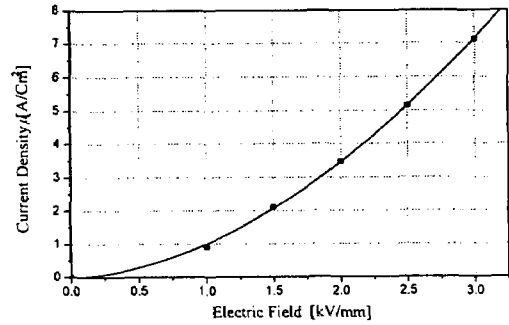


그림 4 전기장의 크기에 따른 전류밀도의 변화

3. ER댐퍼의 해석

3.1 실린더 모델을 이용한 ER댐퍼 해석

ER유체를 이용한 댐퍼의 작동은 전기장이 가해짐에 따라 실린더 형상을 가지는 전극사이에서 유동중인 ER유체의 항복 전단응력은 증가하게 되어 유체의 유동저항을 증가시킨다. 이것은 피스톤 상·하부사이의 압력차를 증가시키며, 이로 인하여 피스톤이 운동에 저항하는 방향의 감쇠력은 증가하게 된다. 결과적으로 ER댐퍼는 전기장이 가해지지 않을 때는 속도에 따른 유체점성으로 인한 감쇠력만을 발생하지만, 전기장이 가해짐으로서 유체점성에 의한 감쇠력과 함께 ER유체의 항복 전단응력으로 인한 감쇠력이 더해지므로 더 큰 감쇠력을 발생시킨다. 이것은 기존의 수동식 댐퍼와는 다르게 피스톤 속도에만 의존적이지 않고, 전기장에 따라 연속적이고 제어 가능한 감쇠력을 발생시킬 수 있다.

ER유체를 이용한 댐퍼의 종류로서는 크게 Coutte 유동형(shear mode), Poiseuille 유동형(flow mode) 및 이 두 종류의 혼합형으로서 혼합 유동형(mixed mode)으로 나눌 수 있다.

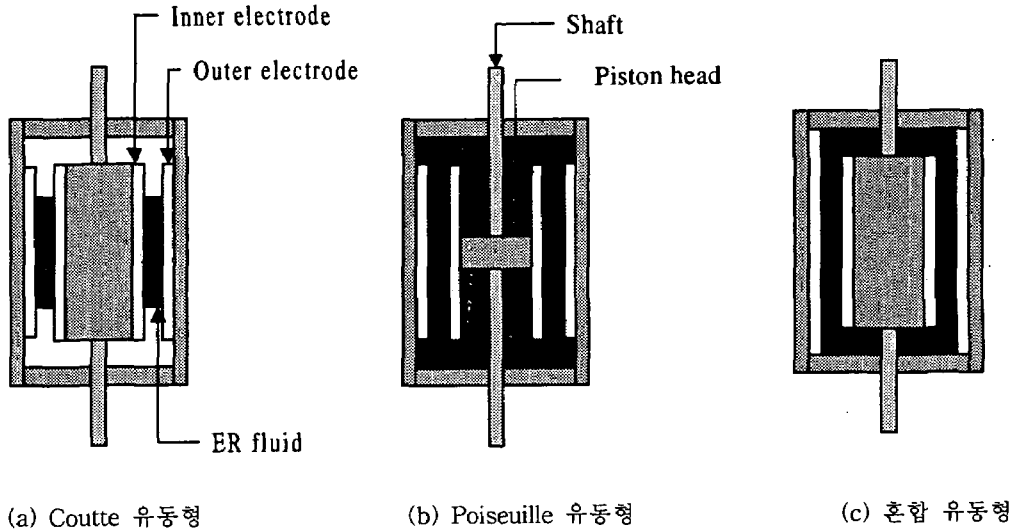


그림 5 ER댐퍼의 종류

ER댐퍼의 모델링을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- ER유체는 비 압축성 유체이다.
- 피스톤 링, 오일 셸 등 실린더에 작용하는 마찰은 무시한다.
- ER유체를 포함하여 댐퍼를 구성하는 요소들의 질량을 무시한다.
- ER유체의 온도는 일정하다.

지배방정식은 힘의 평형식(Navier-Stokes equation)으로부터 식(7)과 같이 얻어진다.^[11]

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \partial \frac{\tau}{\partial r} + \frac{\tau}{r} = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (7)$$

Poiseuille 및 혼합 유동형에 있어서 압력 구배(pressure gradient)는 전극판의 길이에 따라 선형적으로 변한다고 할 수 있다.

그림 6에 나타나 있는 것처럼 빙햄 플라스틱모델을 이용한 실린더형 두 전극 사이에서의 ER유체의 흐름은 세 구간으로 나누어 해석할 수 있다. 구간1, 3에서는 유체의 전단응력이 항복 전단응력보다 커서 재료가 흐르고 있는 부분이다. 이 구간을 post-yield 상태라 하며 마치 점성유체와 같은 성질을 가진다. 그러나 구간2에서는 유체의 전단응력이 항복 전단응력보다 작아서 고체와 같은 상태로 남아 있다. 이와 같은 상태를 pre-yield 상태라 한다. 이 부분을 플러그 유동(plug flow)으로 가정할 수 있다.

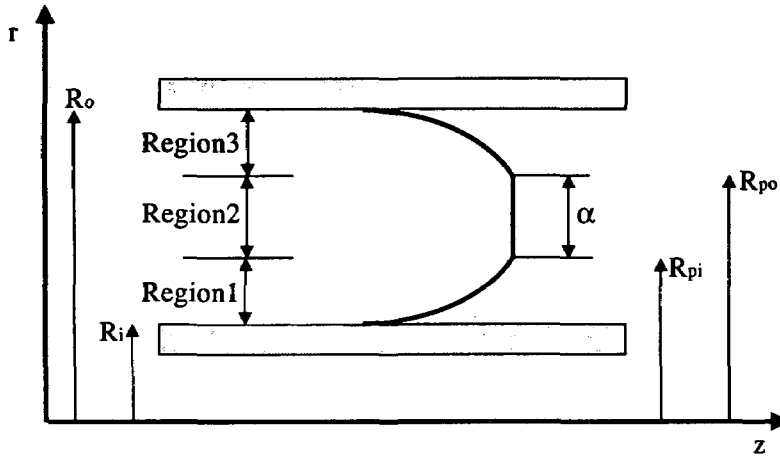


그림 6 실린더형 두 전극 사이에서의 속도 분포

표 1 ER댐퍼의 종류에 따른 지배방정식과 경계조건

Mode of Damper	Governing equation	Boundary conditions	
Couette 유동형 (Shear mode)	$\frac{d\tau}{dr} + \frac{\tau}{r} = 0$	pre-yield state	$u(r) = 0$
		post-yield state	$u(R_i) = -v_p$ $u(R_o) = 0$
Poiseuille 유동형 (Flow mode)	$\frac{d\tau}{dr} + \frac{\tau}{r} = \frac{\Delta P}{L}$	구간 1 (post-yield state) $R_i < r < R_{pi}$	$u(R_i) = 0$ $\left. \frac{du}{dr} \right _{r=R_{pi}} = 0$
		구간 2 (pre-yield state) $R_{pi} < r < R_{po}$	$\tau(R_{pi}) = \tau_y$ $\tau(R_{po}) = -\tau_y$
		구간 3 (post-yield state) $R_{po} < r < R_o$	$u(R_o) = 0$ $\left. \frac{du}{dr} \right _{r=R_o} = 0$
혼합 유동형 (Mixed mode)	$\frac{d\tau}{dr} + \frac{\tau}{r} = \frac{\Delta P}{L}$	구간 1 (post-yield state) $R_i < r < R_{pi}$	$u(R_i) = -v_p$ $\left. \frac{du}{dr} \right _{r=R_{pi}} = 0$
		구간 2 (pre-yield state) $R_{pi} < r < R_{po}$	$\tau(R_{pi}) = \tau_y$ $\tau(R_{po}) = -\tau_y$
		구간 3 (post-yield state) $R_{po} < r < R_o$	$u(R_o) = 0$ $\left. \frac{du}{dr} \right _{r=R_o} = 0$

표 1에 ER댐퍼의 종류에 따른 지배방정식과 해당되는 경계조건을 나타내었다. 여기서, 압력차 $\Delta P = -\frac{F_d}{A_p}$ 이며 A_p 는 피스톤의 단면적, F_d 는 피스톤에 가해지는 힘을 나타낸다.

Coutte 유동형, Poiseuille 유동형, 혼합 유동형 ER댐퍼 중 차량용 현가장치에 가장 적합하게 적용될 수 있는 Poiseuille 유동형 ER댐퍼에 대한 시뮬레이션을 행하였다. 해석에 사용된 ER유체는 TX-ER8로서 앞에서 행한 ER유체의 동특성 실험으로부터의 유체 물성치를 사용하였다. 그리고 사용된 ER댐퍼의 치수는 전극 사이의 간격을 1.5mm, 전극의 길이를 100mm, 안쪽 전극의 바깥 반지름을 29.5mm로 설정하였다. 이는 ER댐퍼에 가해지는 전기장으로 제어 가능한 소형 자동차의 감쇠력을 고려한 치수이다.

가해지는 전기장의 크기와 하중의 함수로서의 플러그 두께의 거동을 그림 7에 나타내었다. 전기장이 가해지지 않았을 때에는 ER유체는 뉴토니안 유체의 유동을 함으로써 플러그 두께는 존재하지 않지만 전기장의 크기가 증가할수록 전극 사이에서 차지하는 플러그 두께 또한 증가함을 보인다. 이는 가해지는 전기장으로 인해 ER유체가 상변화하기 때문이다. 두 전극 사이의 유동에 있어서 플러그 두께가 차지하는 비율이 클 수록 유체의 유동에 대한 저항력을 크게 하여 발생하는 감쇠력을 크게 한다. 반면에, 가해지는 하중이 증가할수록 플러그 두께는 감소하는 경향을 보인다. 이는 댐퍼에 있어서 감쇠계수의 감소로 나타난다.

그림 8, 9는 전기장의 함수로서 플러그 두께와 등가 점성 감쇠계수에 대한 시뮬레이션 결과이다. 일정하게 가해지는 하중에 있어서 플러그 두께와 등가 점성 감쇠계수가 전기장의 크기에 대해서 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그림 9에서 보듯이 낮은 부하에서는 전기장의 크기로서 제어 가능한 등가 점성 감쇠계수값의 영역이 높은 부하에서 보다 넓은 영역을 가짐을 알 수 있다.

그림 10은 Poiseuille 유동형 댐퍼에 있어서 전기장의 크기에 따른 감쇠력과 피스톤 속도와 관계를 나타낸 그래프이다. 가해진 전기장의 크기에 있어서 피스톤이 운동을 가지기 위해서는 가해지는 하중이 ER유체의 항복력(yield force)을 넘어서야 한다. 이러한 유체의 성질은 빙햄 플라스틱 유체의 특성을 나타낸다.

그림 11은 주어진 하중에 있어서 실린더형 전극간 간격의 변화가 등가 점성 감쇠계수에 미치는 영향을 보여준다. 전기장이 가해지지 않을 경우에는 등가 점성 감쇠계수는 ER댐퍼에 있어서 수동 감쇠계수를 나타낸다. 전기장이 가해졌을 때만 능동적으로 제어 가능한 감쇠계수를 가진다. 전기장이 가해지지 않았을 경우에는 가해지는 하중에 상관없이 등가 점성 감쇠계수는 일정한 값의 수동형 감쇠계수를 가진다. ER댐퍼의 설계 시 실린더형 전극간의 간격은 댐퍼의 성능에 있어 큰 비중을 차지한다. 그림에서 일정하게 가해지는 하중에 있어 실린더 전극간의 간격을 넓게 설계할 경우 ER댐퍼에 있어 전기장으로 제어 가능한 등가 점성 감쇠계수의 영역이 작아진다. 그림 12는 같은 시스템 변수를 가지는 Poiseuille 유동형과 혼합 유동형 ER댐퍼의 등가 점성 감쇠계수를 비교하였다.

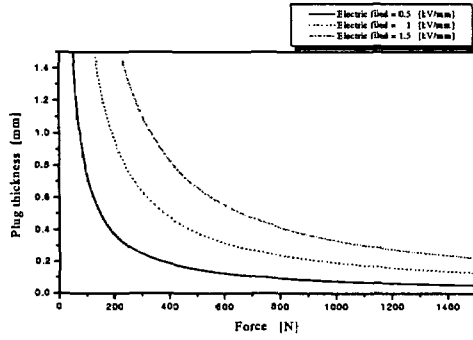


그림 7 가해지는 하중과 전기장의 크기에 따른 플러그 두께의 변화

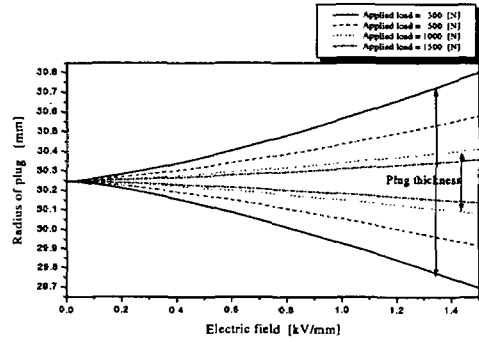


그림 8 전기장의 크기와 가해지는 하중에 따른 플러그 두께의 변화

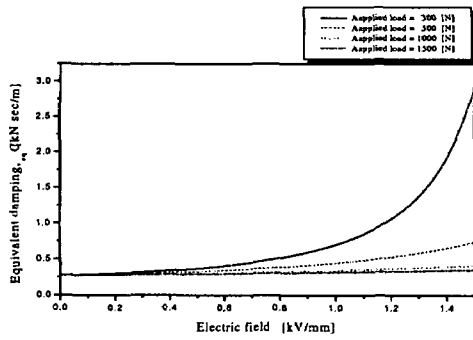


그림 9 전기장의 크기와 가해지는 하중에 따른 등가 점성 감쇠계수의 변화

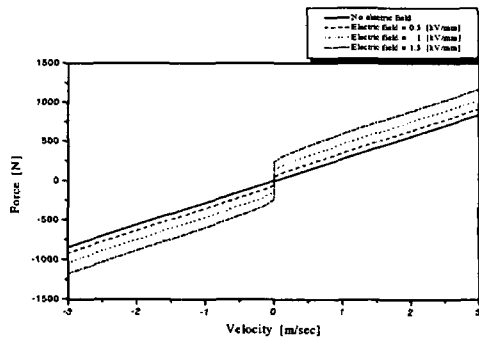


그림 10 전기장의 크기에 따른 피스톤의 속도와 감쇠력의 관계

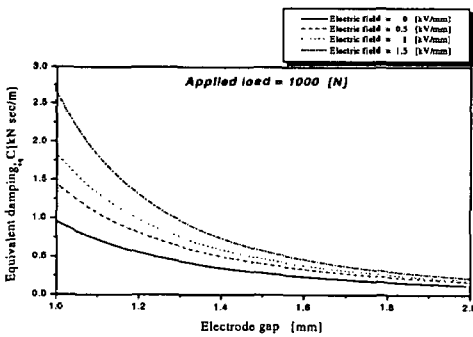


그림 11 1000[N]의 하중에 있어서 실린더형 전극 간격과 전기장의 크기에 따른 등가 점성 감쇠계수

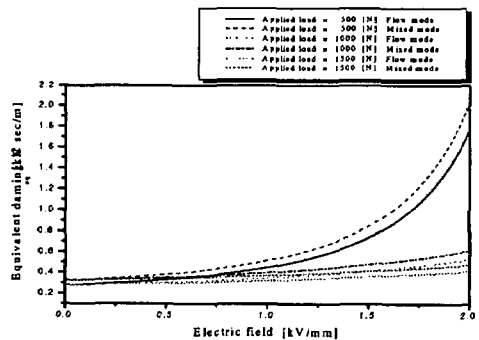


그림 12 전기장의 크기에 따른 Poiseuille 유동형과 혼합 유동형 댐퍼의 등가 점성 감쇠계수비교

3.2 평판 모델을 이용한 Poiseuille 유동형 ER댐퍼 해석

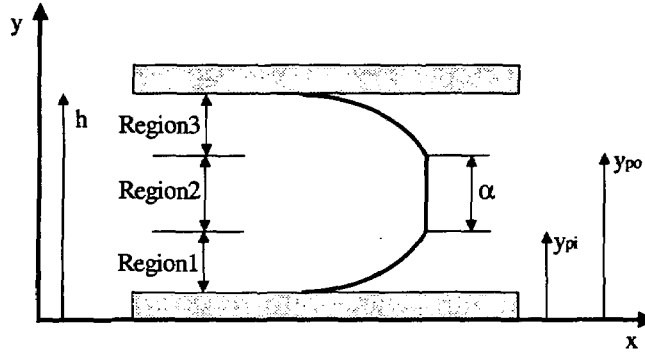


그림 13 평행한 두 전극사이에서의 속도 분포

Poiseuille 유동형 ER댐퍼에 있어서 실린더 형상인 전극 사이의 간격(h)이 유로 폭(w)에 비해 아주 작으므로 전극 사이에 있어서 ER유체의 흐름을 평행한 두 평판사이를 흐르는 유동으로 고려할 수 있다.

표 2 평판 모델을 이용한 Poiseuille 유동형 댐퍼의 지배방정식 및 경계조건

Mode of damper	Governing Equation	Boundary Conditions	
Poiseuille 유동형 (Flow mode)	$\frac{d\tau}{dy} = \frac{\Delta P}{L}$	구간 1 (post-yield state) $0 < y < y_{pi}$	$u(0) = 0$ $\left. \frac{du}{dy} \right _{v=v_w} = 0$
		구간 2 (pre-yield state) $y_{pi} < y < y_{po}$	$\tau(y_{pi}) = \tau_y$ $\tau(y_{po}) = -\tau_y$
		구간 3 (post-yield state) $y_{po} < y < h$	$u(h) = 0$ $\left. \frac{du}{dy} \right _{v=v_w} = 0$

표 2에 평판 모델을 이용한 Poiseuille 유동형 ER댐퍼의 지배방정식과 해당하는 경계조건을 나타내었다.

평판 모델을 이용한 Poiseuille 유동형 ER댐퍼가 가지는 감쇠력은 다음 식에서 보듯이 피스톤 속도에 비례하는 항과 전기장의 크기의 함수인 유체의 항복 전단응력에 비례하는 항으로 나뉘어진다.

$$F_d = \frac{12\mu LA_p^2}{wh^3} v_p + \frac{3LA_p}{h} \tau_y \quad (8)$$

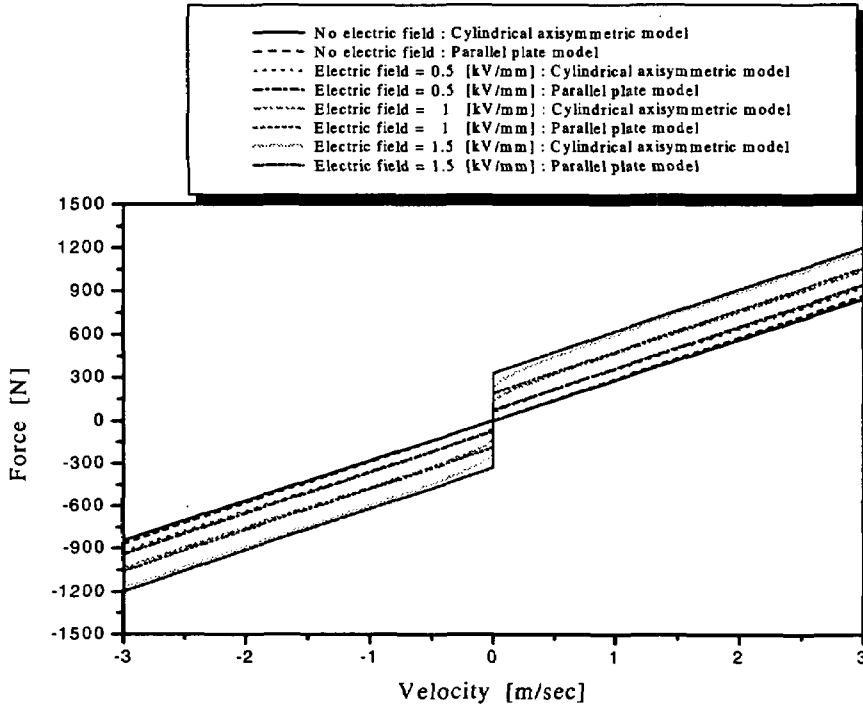


그림 14 실린더형 및 평판형 전극 모델을 이용한 전기장 크기에 따른 Poiseuille 유동형 ER댐퍼의 피스톤 속도와 감쇠력 비교

그림 14는 평판 모델을 이용한 Poiseuille 유동형 ER댐퍼의 감쇠력과 피스톤 속도와 관계를 전기장의 크기에 따라 나타내었다. 결과에서 보듯이 실린더형의 전극을 가지는 ER댐퍼에서 전극 사이의 간격이 유로 폭에 비해 아주 작으므로 실린더형상의 전극을 평행한 평판으로 가정하여 해석한 결과와 거의 같은 값을 가진다. 이러한 결과를 바탕으로 실린더형상의 전극을 가지는 ER댐퍼의 해석은 간단한 수식으로도 해석이 가능한 평판 모델로 가정할 수 있는 것으로 판단된다.

3.3 Poiseuille 유동형 ER댐퍼의 성능시험 및 비교

전기장의 크기에 따른 Poiseuille유동형 ER댐퍼의 감쇠력을 측정하기 위해 그림 15와 같은 시험장치를 구성하였다. 설계된 ER댐퍼의 변수들은 소형차량의 감쇠력을 기준으로 설계되었다. ER댐퍼의 전극은 순동으로 제작하여 높은 전압에 있어 전도성을 좋게 하였다. ER댐퍼의 안쪽 전극에는 (+)전원이, 바깥쪽 전극에는 (-)전원이 연결되어 전기장을 가하는 역할을 하였다. ER댐퍼에 가해지는 전기장의 크기와 가진 주파수를 변화시키면서 감쇠력을 측정하였다. ER댐퍼의 피스톤은 가진기(exciter)를 통해 사인 정현파(sine wave)로 가진 시켰다. 이때 가진 되는 진폭은 $\pm 4\text{mm}$ 로 하였다. 그리고 가진 주파수는 최대 40Hz 로

하였다. 신호 분석기를 통해 측정되는 가진부의 가속도 RMS값을 가진 주파수(f)로 나누어줌으로서 피스톤 속도에 대한 RMS값이 계산된다. 시험에 사용된 ER유체는 앞에서 행한 ER유체의 동특성 실험에 사용된 유체와 같은 TX-ER8을 사용하였다. 그리고 실험은 상온(25℃)에서 행하여졌다. Poiseuille 유동형 ER댐퍼의 설계 변수와 시험 장치에 대한 제원은 표 3, 표 4와 같다.

표 3 ER댐퍼의 시스템 변수

A_p (Area of Piston) [mm ²]	$\pi \times (20^2 - 60^2)$
L (Length of Electrode) [mm]	100
h (Electrode Gap) [mm]	1.5
R_i (Radius of Inner Electrode) [mm]	29.5
R_o (Radius of Outer Electrode) [mm]	31
W (Area of Inner Electrode) [mm ²]	$2 \times \pi \times 29.5$
Max stroke [mm]	70

표 4 ER댐퍼 성능 시험 장치 제원

Apparatus	Manufacture & Type
Exciter	MB C150HP
Vibration controller	MB DS2001
Signal analyzer	AND AD3525 FFT
Accelerometer	PCB 482B11
Amplifier	B&K 2635 PCM 482B11
Force transducer	B&K 8200

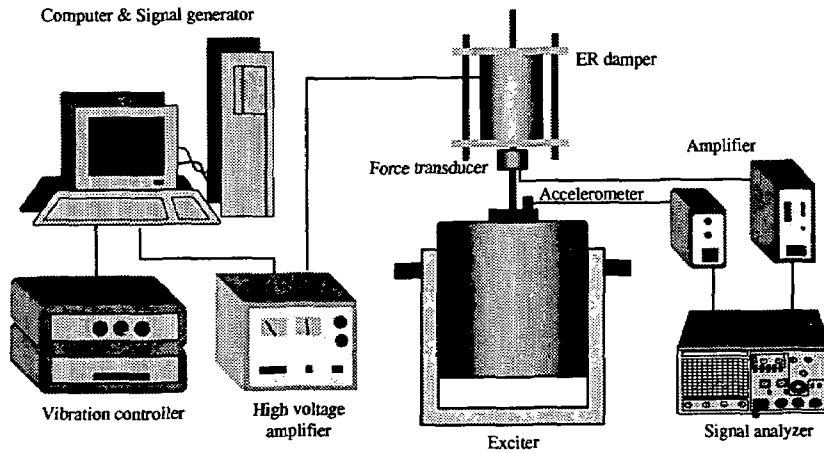


그림 15 ER댐퍼의 성능 시험장치 개략도

그림 16은 빙햄 플라스틱 모델을 이용한 Poiseuille 유동형 ER댐퍼에 대한 시뮬레이션 결과와 성능 시험의 결과를 비교하여 나타내었다.

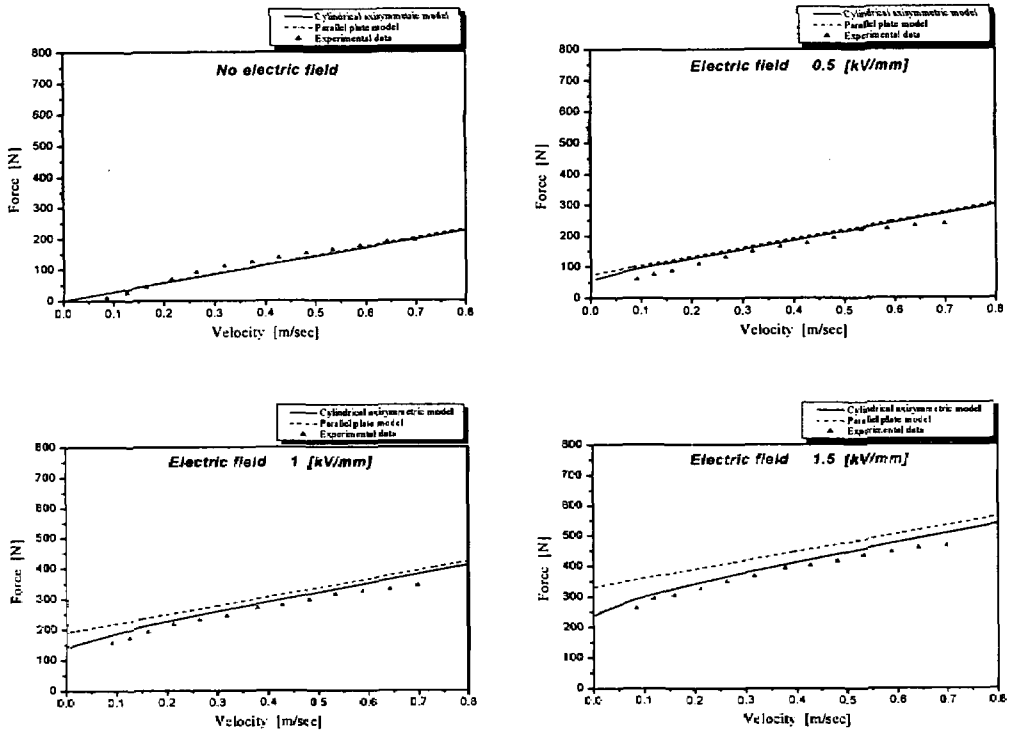


그림 16 실린더형 및 평판형 모델을 이용한 Poiseuille 유동형 ER댐퍼의 감쇠력 성능 비교

가해지는 전기장의 크기를 0, 0.5, 1, 1.5kV/mm로 증가시키면서 피스톤 속도에 따른 ER댐퍼의 감쇠력을 나타내었다. 전기장이 가해지지 않을 경우에는 피스톤의 속도가 0.08m/sec에서 9.9N의 감쇠력을, 0.7m/sec에서 193.9N의 감쇠력을 나타내었다. 그러나 1.5kV/mm의 전기장이 가해짐으로서 피스톤 속도가 0.08m/sec에서는 262.8N의 감쇠력을, 0.7m/sec에서 465.4N의 감쇠력을 나타내었다. 이는 기존의 수동형 댐퍼에서 피스톤 속도에만 의존하던 감쇠력을 피스톤의 속도뿐만 아니라 전기장의 제어만으로도 넓은 영역의 감쇠력을 제어할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 그림에서 보듯이 피스톤의 속도에 따라 시험을 통해 측정된 ER댐퍼의 감쇠력이 시뮬레이션 결과와 유사한 값을 가진다. ER유체가 흐르는 실린더 형상의 전극을 평판으로 가정하여도 전기장의 크기에 따른 피스톤 속도와 감쇠력의 관계가 시험 결과와 비슷한 경향을 가짐을 알 수 있다. 이로부터 제안된 ER댐퍼의 모델의 타당성을 검증할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 빙햄 플라스틱 모델을 이용하여 ER댐퍼의 수치적 해석을 행하였고 Poiseuille 유동형 댐퍼를 설계, 제작하여 수학적 모델의 타당성을 검증하였다. 그리고 ER댐퍼의 성능에 대한 고찰도 수행하였다. 해석에 필요한 ER유체의 유동 특성은 회전 동심

실린더형의 장치를 구성하여 실험적으로 구하였다. ER댐퍼의 실린더형 전극을 평판 모델로 가정한 ER댐퍼의 감쇠력은 실제 형상의 전극이 가지는 감쇠력과 허용오차 이내의 값을 가짐을 확인하였다. 그리고 ER댐퍼의 감쇠력은 피스톤의 속도뿐만 아니라 전기장의 크기에 따라 가변 범위가 크게 변함을 알 수가 있었다. 이를 바탕으로 ER유체를 이용한 반응동형 댐퍼가 기존의 수동형과 반응동형 댐퍼에 비해 구조의 단순화는 물론 넓은 범위에 걸친 감쇠력의 제어가 가능하다는 결론을 얻을 수가 있다.

후 기

본 연구는 울산대학교 해외 파견연구와 RRC의 지원에 의하여 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Jason Lindler and Norman M. Wereley, "Analysis and Testing of Electrorheological Bypass Damper", 1998.
2. Norman M. Wereley and Li Pang, "Nondimensional Analysis of Semi-Active Electrorheological and Magnetorheological Dampers Using Approximate Parallel Plate Models", 1997.
3. Gopalakrishna M. Kamath, Melanie K. Hurt and Norman M. Wereley, "Analysis and Testing of Bingham Plastic Behavior in Semi-Active Electrorheological Fluid Dampers". 1996.
4. 배종인, "ER유체를 이용한 반능동 현가장치의 제어", 1998.
5. 김기선, 정달도, 이효정, 최승복, 정재천, "전기유동유체를 이용한 실린더형 밸브의 성능 고찰", 한국정밀공학회지 제11권 제4호, pp.148~157, 1994, 8.
6. 박우철, 김기선, 정재천, 최승복, "전장 부하에 대한 전기유동유체의 역학적 특성 고찰", 한국정밀공학회 춘계학술대회집, pp.310~314, 1993.
7. 김기선, 장유진, 최승복, 정재천, 서문석, 여문수, "승용차용 연속가변 ER댐퍼의 성능연구", 한국자동차공학회논문집 제3권 제6호, pp.66~77, 1995.
8. 정원식, "ER댐퍼를 장착한 차량 현가장치의 모델링 및 제어", 1997.
9. 장유진, "ER댐퍼를 적용한 반능동형 현가장치의 진동제어", 1996.
10. W. S. Yen and P. J. Achorn, "A Study of the Dynamic Behavior of an Electrorheological Fluid", J. Rheol 35(7), pp1375~1384, October 1991, .
11. Joshep A. Schetz, "Boundary Layer Analysis", 1993 by Prentice-Hall, Inc.
12. 김창호 외16, "미니기전요소 설계기술", 한국과학기술연구원, 기전연구부, 1996.
13. H. P. Gavin, R. D. Hanson and F. E. Filisko, "Electrorheological Dampers, Part I: Analysis and Design", Journal of Applied Mechanics, Vol.63, pp669~675, September 1996.
14. D. Karnopp, "Active and Semi-Active Vibration Isolation", Transactions of the ASME, Vol. 117, June 1995, pp177~185.
15. Douglas Adolf, Robert Anderson, Terry Garino, Thomas C. Halsey, BardHance, Fames E. Martin, Judy Odinek, "Electrorheological fluids", 1996.