

<논 문>

ER 유체를 이용한 반능동 완충장치의 동적 특성 Dynamic Characteristics of Semi-Active Shock Absorber Using Electrorheological Fluid

김도형* · 조기대** · 정용현*** · 이 인**** · Nobuo Oshima***** · Takehito Fukuda*****
Do-Hyung Kim, Ki-Dae Cho, Yong-Hyun Jung, In Lee, Nobuo Oshima and Takehito Fukuda

(2000년 12월 16일 접수 : 2001년 6월 11일 심사완료)

Key Words : ElectroRheological Fluid(전기유변유체), Moving Electrode(미끄럼 전극), Variable Damper(가변
댐퍼), Drop Test(낙하 시험)

ABSTRACT

Electrorheological(ER) fluid is a kind of smart material with variable shear stress and dynamic viscosity under various electric field intensity. Electric field can control the damping characteristics of ER damper. The objective of this study is the analysis of the performance of ER damper and its application to shock absorber. Idealized nonlinear Bingham plastic shear flow model is used to predict the velocity profile between electrodes. Cylindrical dashpot ER damper with moving electrode is constructed and tested under various electric fields. The analytic and experimental results for damping force are compared and discussed. Drop test system using ER damper is prepared to identify transient vibration characteristics. The rebound is eased as the applied electric field increases. When semi-active control algorithm is applied, rebound phenomenon disappears and vibration energy level decays faster than the case of zero electric field.

1. 서 론

80년대 이후로 전기유변유체(ER 유체)의 가변성과 가제어성을 이용한 밸브, 클러치, 브레이크, 엔진 마운트, 현가 장치 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 완충장치, 현가장치, 방진장치 등

폭 넓게 적용 가능한 실린더형 댐퍼에 대한 연구가 많은 연구소와 기업체에 의해 수행되어왔다. ER 댐퍼는 ER 효과를 최대한 활용하기 위해 여러 가지 형상으로 제작될 수 있으며, 전극이 고정되어 있고, 그 사이를 ER 유체가 지나가는 고정 전극형과 한쪽 전극이 움직이는 미끄럼 전극형으로 구분할 수 있다. 고정 전극형의 경우는 흐름모드(flow mode), 미끄럼 전극형의 경우는 흐름모드와 전단모드(shear mode)가 동시에 생기게 된다. 전극의 면적이 동일할 경우에는 흐름모드와 전단모드가 동시에 생기는 미끄럼 전극형 ER 댐퍼가 보다 큰 감쇠력을 발생하게 되는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ ER 댐퍼의 성능을 예측하기 위한 방법들은 여러가지 형태로 제안되었다. 김기선 등은⁽²⁾ 본드선도(bond-graph)를 이용하여 고정 전극형 ER 댐퍼의 모델링을 통한 성능 해석 및 실험을 수행하였고, Makris 등은⁽³⁾ 점성(viscous), 점소성(viscoplastic), 탄점소성(elastic-viscoplastic) 유동 모

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

** 국방과학연구소

*** 고등기술연구원

**** 정희원, 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

E-mail : inlee@asdl.kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3717, Fax : (042) 869-3710

***** Department of Intelligent Materials Engineering, Osaka City University

델을 이용하여 ER 댐퍼의 성능 해석 및 실험을 수행하였다. Kamath 등⁽¹⁾은 ER 유체를 빙햄(Bingham plastic) 유체로 고려하여 전극 사이의 유동과 감쇠력을 추정하고 실험을 통한 비교를 수행하였다. 실험으로 얻은 데이터를 이용하여 성능 변수들을 추정하는 방법으로 Yao 등⁽⁴⁾ 회귀 최소 자승법(recursive least square)을 이용하여 점성 감쇠 계수(viscous damping coeff.)와 쿨롱 마찰 계수(coulomb friction coeff.)를 추정하여, 점성과 마찰을 고려한 운동방정식을 제안하였고, Kamath 등⁽⁵⁾ 항복전과 항복후 거동을 형상 함수(shape function)를 이용하여 모델링한 후 두 부분을 결합하여 변위 입력에 대해 힘을 출력하는 모델로 실험 결과에 부합하는 힘과 피스톤 속도간의 히스테리시스(hysteresis) 궤적을 찾는 방법을 사용하였다. 이러한 ER 댐퍼를 최승복 등⁽⁶⁾ 유연구조물의 진동제어에 적용하였고, 차량 좌석용 댐퍼에 적용한 다수의 연구들이 수행되었다.

기존의 연구에서는 조화 가진에 대한 시스템의 거동에 초점을 두었지만 본 연구에서는 낙하 시 충격에 의한 과도응답 특성의 향상에 초점을 맞추어 반능동 완충장치의 충격 후 특성에 대해 연구하였다. 우선 미끄럼 전극형 ER 댐퍼를 제작하고 전극 사이의 유동으로부터 피스톤에 작용하는 힘을 계산해보고 실험으로 측정하였다. 이를 통해 ER 댐퍼의 감쇠력의 가변성을 확인하고 낙하시험 시 Karnopp 등⁽⁷⁾ 제안한 반능동 알고리즘을 적용하여 충격 후의 과도 응답 특성향상을 실험적으로 수행하였다. 이러한 연구는 항공기의 랜딩기어나 조종사 좌석에 들어가는 완충장치에 응용될 수 있을 것이다.

2. ER 댐퍼의 성능 해석

2.1 전극 사이의 속도장

본 연구에서 고려한 미끄럼 전극형 ER 댐퍼는 Fig. 1과 같이 외부 실린더는 접지되어있고, 내부의 피스톤 헤드에 (+)전극을 설치하여 전기장을 부가하는 형상이다. 피스톤 반경에 비해 전극 사이의 간격이 좁으므로, 전극 사이의 유동을 움직이는 평판 사이의 1차원 유동으로 가정하였다. 이때 양단에 압력차가 있는 경우의 비 뉴토니안(Non-Newtonian) 유체의 모멘텀 식은 다음과 같다.

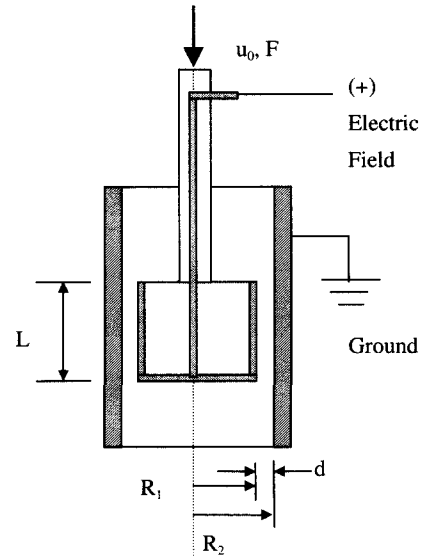


Fig. 1 Dashpot damper with sliding electrode

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\tau}{r} = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1)$$

여기서 u 는 유체의 속도, τ 는 전단응력, r 은 반경방향 좌표, z 는 축방향 좌표, p 는 피스톤 헤드의 움직임으로 인해 발생하는 압력이다.

준 정상(quasi-steady) 상태의 유동으로 가정하여, 관성(inertia)의 영향은 무시하고, 양단의 압력 변화가 축 방향에 대해 선형적이라고 하면 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d\tau}{dr} + \frac{\tau}{r} = \frac{\Delta P}{L} \quad (2)$$

여기서, ΔP 는 피스톤 헤드 양단의 압력차이고, L 은 전극의 길이이다.

ER 유체의 거동은 빙햄 유체(Bingham plastic fluid)의 거동과 유사하므로 전단 응력을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau = \tau_y \operatorname{sgn}\left(\frac{du}{dr}\right) + \mu \frac{du}{dr} + |d| |\tau_y|, \text{ post-yield} \quad (3a)$$

$$\frac{du}{dr} = 0, \quad |d| |\tau_y|, \text{ pre-yield} \quad (3b)$$

여기서, τ_y 는 항복응력(dynamic yield stress)이고, ER 유체의 경우 전기장의 함수로 표현된다. μ 는 소성 점성 계수(plastic viscosity)로 전기장에 따라 약간의 변화는 있으나 항복응력 τ_y 의 변화에 비하여 미소하다.

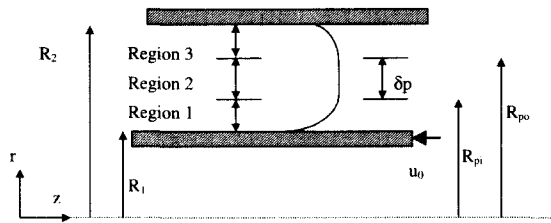


Fig. 2 Velocity profile of a Bingham fluid through an annular electrode gap in the presence of an axial linear pressure gradient

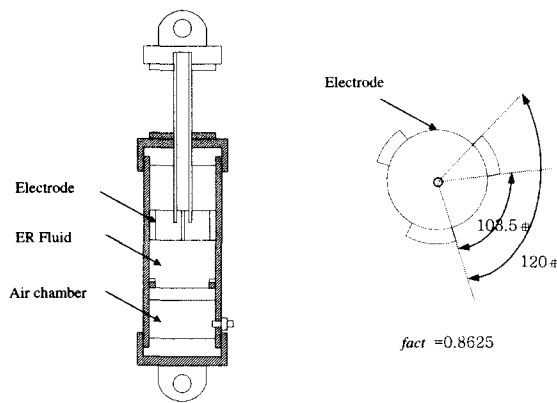


Fig. 3 Schematic of the ER damper and piston head

유동장을 분석하기 위해 먼저 평행 판 사이의 유동을 Fig. 2와 같이 3개의 영역으로 나누었다. 영역 1과 3은 전단응력이 항복응력을 초과하는 영역으로, 항복 후(post-yield) 상태이고, 점성유동의 경계층(boundary layer)에 해당한다. 영역 2는 전단응력이 항복응력보다 작은 영역으로 항복 전(pre-yield) 상태이고 균일한 속도로 강제운동을 하는 영역이다. 실제 속도장은 입구쪽에서부터 경계층이 점차적으로 증가하지만, 본 연구에서는 양 전극 사이에서 Fig. 2와 같은 속도장이 균일하게 형성된다고 가정하였다. Fig. 2에서 R_1 , R_2 는 내부와 외부 전극까지의 반경이고, R_{pi} , R_{po} 는 항복 전 영역의 내·외부 반경을 표시한다. 각 영역에서의 속도 장은 식 (2), (3)과 경계 조건으로부터 구할 수 있다. 경계 조건은 양쪽 벽면에서의 속도는 전극면과 동일한 속도이고 유동의 중앙 부분은 일정한 속도이고, 각 영역이 이어지는 부분에서 속도장의 연속성을 유지하며 항복이 시작된다. 이러한 경계 조건으로부터 각 영역의 속도장을 구하면 다음과 같다.

$$u_1(r) = \frac{\Delta P}{4\mu L} \left[r^2 - R_1^2 - 2R_{pi}^2 \ln\left(\frac{r}{R_1}\right) \right] \quad (4a)$$

$$- \frac{\tau_y}{\mu} \left[r - R_1 - R_{pi} \ln\left(\frac{r}{R_1}\right) \right] - u_0$$

$$u_2(r) = \text{constant} = u_p \quad (4b)$$

$$u_3(r) = \frac{\Delta P}{4\mu L} \left[r^2 - R_2^2 - 2R_{po}^2 \ln\left(\frac{r}{R_2}\right) \right] \quad (4c)$$

$$+ \frac{\tau_y}{\mu} \left[r - R_2 - R_{po} \ln\left(\frac{r}{R_2}\right) \right]$$

영역 2의 양쪽 경계에서는 항복 영역이 시작되므로, 식 (2)로부터 다음과 같은 전단 항복응력 식을 구할 수 있다.

$$\tau_y = \frac{\Delta P}{2L} (R_{pi} - R_{po}) = - \frac{F}{2LA_p} (R_{pi} - R_{po}) \quad (5)$$

2.2 피스톤에 작용하는 힘

본 절에서는 2.1절에서 구한 속도장을 바탕으로 피스톤이 u_0 의 속도로 움직일 때 피스톤에 작용하는 힘을 유도하였다. 우선 R_1 , R_2 , L 은 펌퍼 형상에 의해 결정 되고, τ_y , μ 는 ER 유체의 특성이므로 앞에서 유도한 식들의 미지 변수는 R_{pi} , R_{po} , ΔP 이다. 여기서 $\Delta P = -F/A_p$ 이므로, R_{pi} , R_{po} , F 세 개의 미지수를 동시에 구해야 한다. 세 개의 미지수가 모두 포함된 식은 영역 2에서 구한 식 (5) 이므로, 추가적인 식이 필요하다. 우선 영역 2에서는 속도가 균일하므로, 영역 1과 3이 영역 2와 접하는 부분의 속도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_1(R_{pi}) = u_3(R_{po}) = u_p \quad (6)$$

다음으로 피스톤 운동으로 인한 피스톤 상부의 ER 유체 체적 변화율이 두 전극 사이의 유량과 동일하다고 고려할 수 있으므로 다음과 같은 식을 구성할 수 있다.

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (7)$$

여기서, Q_p 는 피스톤의 운동으로 인한 피스톤 상부의 ER 유체 체적 변화율, Q_1, Q_2, Q_3 는 각 영역을 통과 해서 흐르는 유량으로 다음과 같다.

$$Q_p = \pi(R_2^2 - R_1^2)u_0 \quad (8a)$$

$$Q_i = \text{fact} \times \int u_i(r) 2\pi r dr \quad (i=1,2,3) \quad (8b)$$

여기서, R 은 피스톤 로드의 반경 fact 는 피스톤 헤

Table 1 Parameters of ER damper configuration

Parameters	Dimension
Inner electrode radius (R_1)	16.5 mm
Outer electrode radius (R_2)	17.5 mm
Piston rod radius (R_r)	5 mm
Electrode length (L)	40 mm
Portion of electrode area ($fact$)	0.8625
Stroke of piston	60 mm

드의 바깥 면적에 대한 전극 면적의 비이다. 식 (5), (6), (7)의 3 개의 비선형 방정식을 Newton Iteration 방법으로 계산하여 피스톤이 u_0 의 속도로 움직일 때 피스톤에 작용하는 힘 F 를 구할 수 있다.

이상과 같은 방법을 적용하기 위해서 필요한 ER 유체 특성은 점성과 전단항복응력에 대한 데이터이다. 본 연구에 사용된 ER 유체는 Bayer사에서 제조한 RHEOBAY[®] TP AI 3566으로 본 연구에서는 제조사에서 공개한 전단 응력과 점성 데이터를 사용하였다. 전단 변형도의 변화율에 대한 전단 응력 그래프에서 일차 직선으로 커브피팅 시 y 축과 만나는 점을 항복응력으로 사용하였고, 점성의 경우 전기장 변화에 따라 큰 변화를 보이지 않으므로 상온에서의 점성 값($\mu=50 \times 10^{-3}$ Pa.sec)을 사용하였다.

2.3 미끄럼 전극형 ER 댐퍼의 제작 및 해석

본 연구에서 제작한 미끄럼 전극형 ER 댐퍼와 피스톤 헤드의 개략도는 Fig. 3과 같다. 전극에 연결된 전선은 피스톤 로드 안쪽을 통해 밖으로 돌출되어 있으며 주요 파라미터들은 Table 1에 나타내었다.

(1) 전기장 변화에 따른 ER 댐퍼의 성능 해석

앞에서 제시한 Table 1의 형상에 대한 파라미터와 ER 유체의 특성을 사용 하여 피스톤 속도에 대한 감쇠력을 전기장이 0 kV/mm, 1 kV/mm, 2 kV/mm인 경우에 대하여 계산해 보았다. 계산 결과는 Fig. 4에 정리하였다. 전기장 증가에 따른 감쇠력의 증가를 살펴볼 수 있다. 또한 전기장에 의한 감쇠력의 증가는 피스톤 속도가 커질수록 효과가 크다는 것을 관찰할 수 있다. 속도장의 형상이 전기장에 따라 변화하는 양상은 피스톤 속도가 10 mm/s인 경우와 50 mm/s인 경우에 대해 Fig. 5에 나타내었다. 피스톤 속도가 클 경우 전극 사이의 유동 속도 또한 큰 값을

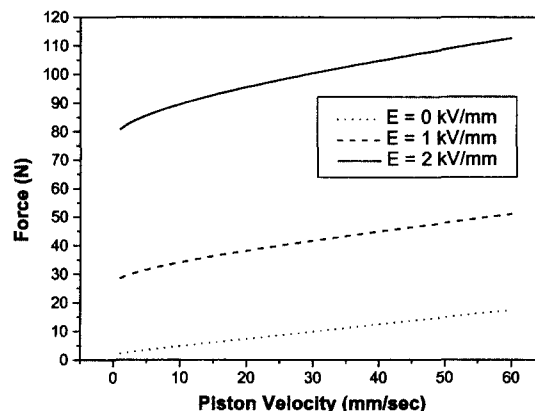


Fig. 4 Damping force vs. piston velocity (analysis)

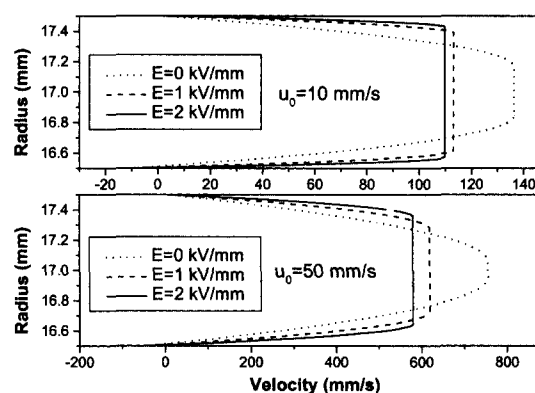


Fig. 5 Velocity profile (analysis)

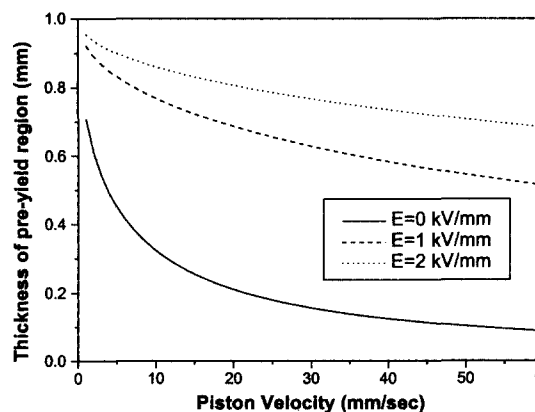


Fig. 6 Thickness of pre-yield region vs. electric field (analysis)

가지나 그 형상은 피스톤 속도가 작은 경우와 비슷하다. 또한 전기장이 증가함에 따라 항복 전(pre-yield) 영역이 차지하는 부분이 증가함을 알 수 있다. 항복

전(pre-yield) 영역이 전기장에 따라 증가하는 양상은 Fig. 6에 나타내었다. 피스톤 속도가 작을수록 항복 전 영역이 차지하는 부분이 큰 것을 알 수 있고, 부가 전기장이 증가하면 ER 유체 입자들의 체인구조 결합력이 증가하여 항복 전 영역이 차지하는 부분이 증가되는 것을 알 수 있다.

(2) 전극 간격 변화에 따른 ER 댐퍼의 성능 해석

앞 절에서는 제작된 ER 댐퍼의 성능을 예측해 보았다. 보다 큰 감쇠력을 발휘하기 위해서 우리가 조절할 수 있는 파라미터들은 여러 가지가 있다. 우선 전단 항복 응력이 큰 ER 유체를 사용하면 더 큰 감쇠력을 낼 수 있다. 그러나 ER 유체를 직접 제작하여 사용하지 않으므로 ER 유체 자체에 대해서는 본 연구에서 배제하였다. 다른 방법으로는 댐퍼의 형상을 바꾸는 것이다. 본 연구에서 제작된 미끄럼 전극형 ER댐퍼의 경우 피스톤 헤드 부분을 바꿈으로써 전극 간격의 변화를 줄 수 있다. 그래서 본 연구에서 사용한 파라미터들 중에서 R_1 값을 변화 시켜 전극 간격이 0.2 mm ~ 3 mm의 범위에서 변할 때 감쇠력을 계산 하였다.

Fig. 7에 나타내었듯이 전극 간격이 줄어들수록 감쇠력은 지수적으로 증가함을 알 수 있다. 간격이 2 mm 인 경우에 비해 1 mm인 경우는 전기장을 부가하지 않았을 경우 감쇠력이 약 4.5 배, 전기장이 2 kV/mm인 경우 감쇠력이 2.5 배 증가하였다. 전극 간격이 좁은 경우 유도가 좁아져서 전기장을 부가하지 않은 경우와 전기장을 부가한 경우 모두 전체적인 증가를 보이므로 원하는 감쇠력 범위에 맞는 전극 간격을 선택하여 설계하여야 할 것이다.

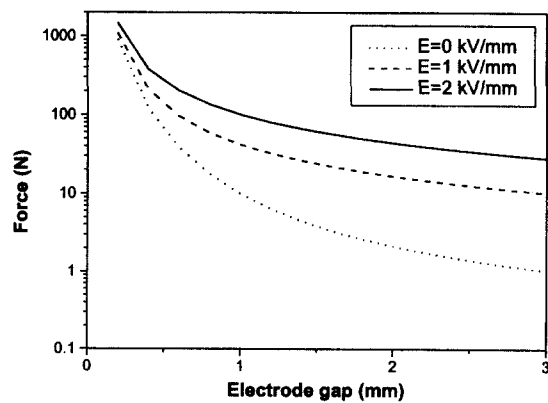


Fig. 7 Damping force vs. electrode gap (analysis)

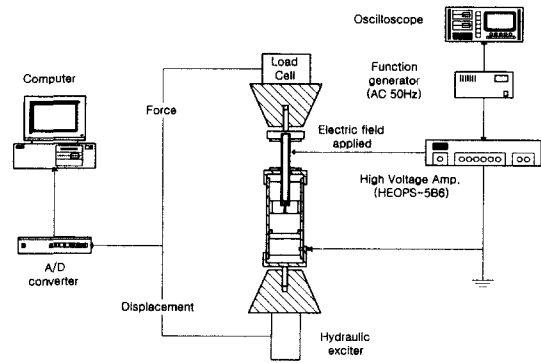


Fig. 8 Experimental setup for damping force measurement

3. ER 댐퍼의 감쇠력 특성 실험

제작된 ER 댐퍼의 성능을 실험적으로 확인하기 위하여 인장 시험기에서 변위를 반복적으로 부가하면서 변위와 하중을 측정하였다. 전체적인 실험 장치의 개략도는 Fig. 8과 같다. 반복 변위를 부가하는 피로시험 모드로 인장시험기를 설정하여 사인파 형태로 5.0 mm의 변위를 2 Hz로 부가하였으며 실제 측정된 값은 4.26 mm, 2.13 Hz이다. 인장 시험기에 장착된 로드셀(load cell)은 10,000 kgf의 범위를 가지지만 실제 측정값은 아주 작은 값이므로 측정값은 전기적 잡음(noise) 등에 민감하게 된다. 그러므로 측정된 데이터를 2차의 버터워스 저주파 통과 필터(Butterworth low-pass filter)를 사용하여 60 Hz(cutoff frequency) 이상의 신호는 차폐(cutoff)하였다.

Fig. 9에 실험 결과와 2장에서 수행한 해석 결과를 나타내었다. 전기장을 부가하지 않은 경우에 비해 전기장을 2 kV/mm 부가한 경우 감쇠력이 최대 5배

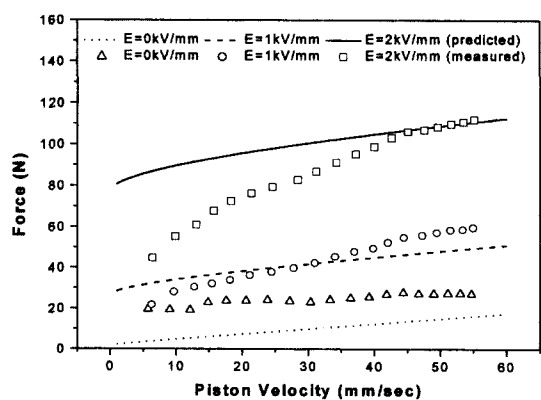


Fig. 9 Measured and predicted damping forces

정도 증가함을 실험을 통해 관찰할 수 있었다. 피스톤 속도가 낮은 경우 측정 값이 해석 결과보다 작은 양상을 보인다. 이는 ER 유체의 특성을 충분히 반영하지 못한 것과 준 정상상태로 가정하여 전극 사이의 유동장을 해석하였기 때문에 유체의 비선형성을 충분히 고려하지 못한 것이 주요 원인으로 사료된다. 타 연구 사례에서도, 여러 가지 방법으로 감쇠력을 해석적으로 구하고, 실험을 통해 비교를 했지만, 대부분의 경우 실험 결과와 해석 결과간의 차이가 나타났다. Kamath등은⁽¹⁾ 이와 같은 결과로부터 해석과 실험의 일관성을 맞추기 위해 전단 항복 응력과 점성계수를 보정해서 해석 결과를 실험 결과로부터 보정하는 방법을 제안하였다. 이는 ER 유체의 정확한 물성치의 측정이 어렵고 오차가 발생할 확률이 크기 때문이다. 본 연구의 해석 방법은 정확하게 감쇠력을 예측하지는 못하는 실정이지만, 본 연구의 주된 관점은 ER 댐퍼의 충격 특성을 실험적으로 확인하고자 하는 것이므로, 본 논문에서 사용된 해석적인 접근은 전기장에 따른 감쇠력 변화 특성을 살펴보고자 하는 방법으로 사용하였다.

4. 반응동 완충장치

본 장에서는 항공기 착륙장치와 같이 지상에서의 지지 능력과 착륙 시 충격을 흡수하는 장치로서 현재 제작된 ER 댐퍼가 사용될 수 있는지를 확인해 보고자 한다. 현재 제작된 ER 댐퍼를 착륙장치에 적용하는 것은 아직은 기술적 어려움이 많지만 조종사 좌석에 장착되는 감쇠장치로서의 적용 가능성은 크다고 생각된다. 본 장에서는 이와 같은 충격 흡수 장치에 대한 기초연구로서 스프링(4.6 kN/m), 질량(10.8 kg, 15.5 kg), 댐퍼(ER 댐퍼) 시스템의 낙하에 의한 충격 후 거동을 실험을 통해 관찰하였다.

균일한 전기장을 부가하는 경우와 상부 질량체와 댐퍼 몸체에 부착된 가속도계의 신호로부터 부가 전기장의 세기를 결정하는 반응동 제어 두 가지 경우에 대해 실험을 실시하였다. 사용된 반응동 알고리즘은 Karnopp이 제안한 반응동 제어 알고리즘이다. 지지구조의 운동(support motion)이 있는 2자유도 시스템에서 Karnopp은⁽⁷⁾ 시스템의 운동 상태에 따라 댐퍼의 감쇠비를 바꿔 줌으로써 스프링 상질량(sprung mass)의 가속도를 최소화하기 위한 반응동 알고리즘을 제안하였고, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$F_d = \begin{cases} F_{d,hard}, & (\dot{x}_1)(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \geq 0 \\ F_{d,soft}, & (\dot{x}_1)(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

위 식을 살펴보면, 스프링 상질량의 절대속도와 스프링 상하질량의 상대 속도가 같은 부호일 때는 큰 감쇠력(hard-mode)을 주어 스프링 상질량의 운동 방향에 위상이 반대인 감쇠력을 작용하여 가속도를 줄이는 효과를 얻을 수 있고, 스프링 상질량의 절대속도와 스프링 상하질량의 상대 속도가 다른 부호일 때는 작은 감쇠력(soft-mode) 상태가 되도록 하여 스프링 하질량(unsprung mass)으로부터의 진동 전달이 최소화 되도록 가변 댐퍼의 상태를 바꿔주는 것을 의미한다.

낙하시험에서는 스프링 상질량의 가속도, 댐퍼의 가속도와 접촉면의 로드셀(load cell)에서 측정된 힘을 살펴보았다.(Fig. 10) 부가 전기장을 0, 2 kV/mm로 변화시키고 또한 반응동 제어 알고리즘을 적용하였을 경우에 대해 응답 특성을 살펴보았다. 스프링 상질량의 무게는 10.8 kg과 15.5 kg 두 가지를 사용하였다. 가속도계는 Fig. 10에 나타내었듯이 스프링 상질량(a₁)과 댐퍼 몸체(a₂)에 각각 부착하였다. 충격면에는 로드셀을 설치하여 충격력을 측정하도록 제작하였다. 로드셀 위 부분에는 철 구조물(100×100×20)을 설치하여 낙하 시 접촉 면적을 확보하였다. 설치된 철 구조물이 로드셀에 작용하는 힘은 38.5 N으로 측정되었고, 실험 시 높이 h=100 mm에서 낙하

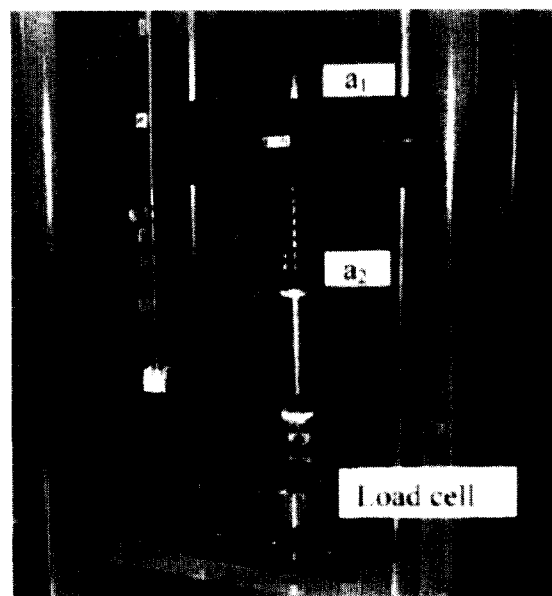


Fig. 10 Photograph of drop test equipment

시켜 측정된 충격력에서 그만큼의 힘을 감산하였다. 실험에 사용된 가속도계는 ENDEVCO 2225로 측정 가능 범위는 10,000 g (g : 중력가속도) 이고, 충격 제한 값(shock limit)은 20,000 g이다. 정전 용량형(charge type) 가속도계이므로 전하 증폭기(charge amp.)를 통해 중력 가속도 값으로 환산하고 다시 m/s^2 단위로 환산하였다. 반능동 알고리즘을 적용하기 위해서는 식(9)를 이용하여 감쇠력을 결정해야 한다. 따라서, 측정된 가속도 신호를 적분하여 속도 신호를 구하고 전기장의 부가 유무를 결정한다. 신호의 획득과 처리, 전기장 부가에 관한 모든 연산은 Matlab Simulink로 프로그래밍 하였고, DSP 보드(DS1102, dSPACE)에서 0.0002 sec (5 kHz) 마다 한번씩 전체 과정을 수행하도록 하였다. 고전압 앰프는 HEOPS-5B6 (Mathusada precision)을 사용하였다.

먼저 스프링 상질량이 10.8 kg인 경우를 살펴보면, 우선 스프링 상질량의 가속도 신호를 Fig. 11, 댐퍼의 가속도를 Fig. 12, 접촉면의 충격력 신호를 Fig. 13에 나타내었다. 전기장을 부가하지 않았을 경우에는 초기

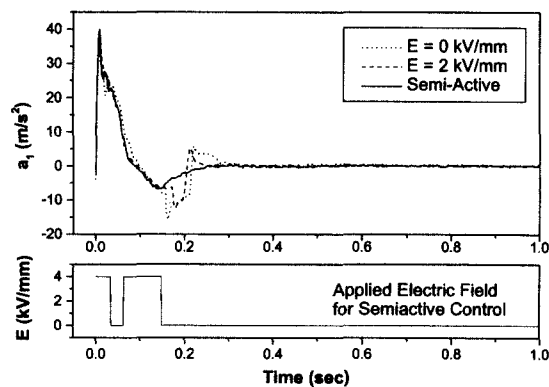


Fig. 11 Acceleration of sprungmass($m=10.8$ kg)

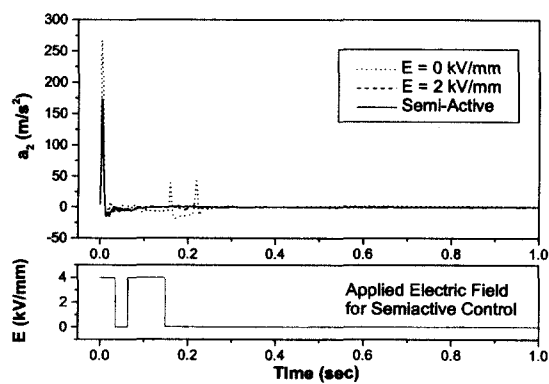


Fig. 12 Acceleration of damper($m=10.8$ kg)

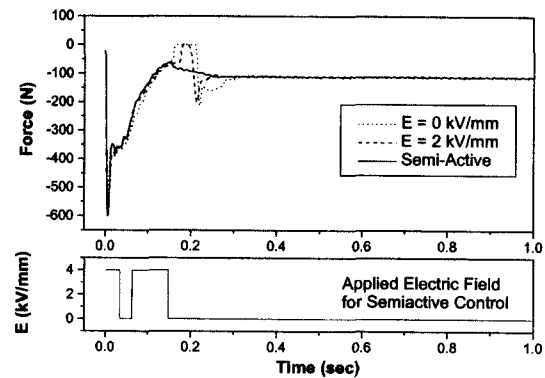


Fig. 13 Impact force ($m=10.8$ kg)

충격 후 0.16초 정도가 지나면 되튀는(rebound) 현상이 발생함을 알 수 있다. 스프링 상질량의 신호는 0.16초 정도에서 $16 m/s^2$, 댐퍼 자체에서는 $40 m/s^2$ 정도로 급격히 변화된 가속도가 검출되었다. 로드셀에서 측정된 신호를 보면 되튀는 현상을 보다 명확히 알 수 있다. 전기장을 2 kV/mm 부가한 경우에는 되튀는 현상이 약해지기는 했지만 여전히 존재하고 있다. 그러나, 반능동 제어 알고리즘을 적용한 경우에는 되튀는 현상이 없어지고, 가속도의 급격한 변화가 완화되었음을 관찰할 수 있다. 이 경우 초기 충격 순간에 전기장이 4 kV/mm로 가해지므로 댐퍼의 감쇠력이 큰 상태(hard-mode)가 되고, 따라서 충격 시 스프링 상질량에 가해지는 강성력과 감쇠력의 합이 전기장을 부가하지 않은 경우 보다 크므로 충격 순간의 스프링 상질량의 가속도의 첨두치는 다소 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 그러나, 실제 시스템의 경우에는 댐퍼가 직접 충격을 받는 경우보다는 타이어와 같은 매개체를 통해 충격이 전달되므로 이러한 현상은 완화될 수 있을 것으로 판단된다. 반능동 제어 알고리즘 적용 시 감쇠력이 큰 상태를 4 kV/mm의 전기장이 부가된 상태로 한 것은 보다 빠른 효과를 얻기 위함이다. 균일하게 4 kV/mm의 전기장을 부가한 경우에도 반능동 제어와 유사한 효과를 얻을 수 있으나, 에너지 효율 측면에서는 반능동 알고리즘을 적용한 경우가 2 kV/mm의 균일한 전기장을 부가한 경우보다도 효율적임을 살펴볼 수 있다.

지금까지 가속도와 충격력신호를 시간 축에서 살펴 보았는데, 주파수 영역에서 살펴보는 것도 시스템의 거동을 살펴보는 데 도움이 된다. 그러나 충격과 같은 과도응답 신호나 주기성이 적고 일관성이 없는(non-stationary)신호는 일반적인 푸리에 변환으로는

그 주파수 특성을 살펴보기가 어렵다. 이러한 신호는 시간에 따른 주파수 특성을 구하는 것이 효과적이다.⁽⁸⁾ 이러한 신호처리 방법으로 몇 가지가 있지만, 그 중에서 Wigner-Ville Transform을 사용하면 순간적인 스펙트럼 밀도 함수(instantaneous spectral density function)를 얻을 수 있고 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi_{xx}(\omega, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t-\tau/2)x(t+\tau/2)e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (10)$$

식 (10)은 하나의 획득된 시계열 신호에 대해 적용할 수 있고, $\Phi_{xx}(\omega, t)$ 는 시계열 신호 $x(t)$ 에 대한 시간과 주파수의 함수가 되고, 위그너 분포(Wigner distribution)라 불린다.

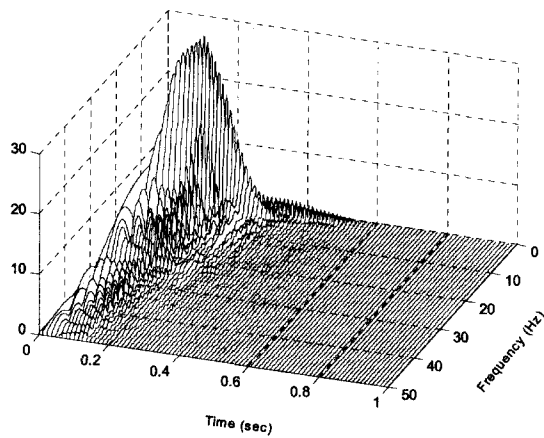


Fig. 14 Wigner distribution of sprungmass acceleration ($E=0$ kV/mm, $m=15.5$ kg)

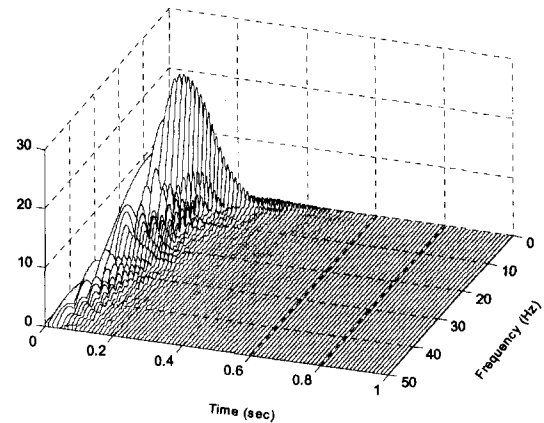


Fig. 15 Wigner distribution of sprungmass acceleration ($E=2$ kV/mm, $m=15.5$ kg)

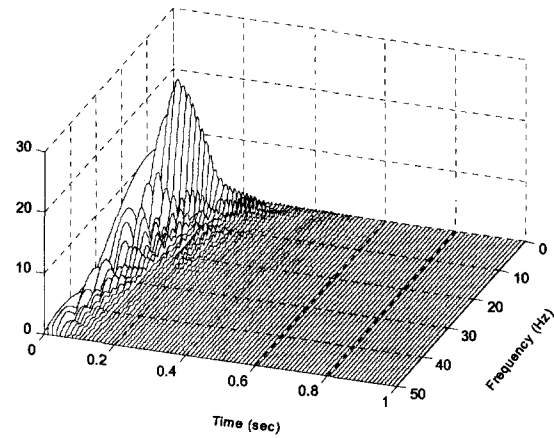


Fig. 16 Wigner distribution of sprungmass acceleration (Semi-Active, $m=15.5$ kg)

본 연구에서 스프링 상질량이 다른 두 경우에 대해서도 충격 저감 효과가 있는지를 실험적으로 살펴보았고, 두 가지 경우 모두 시간과 주파수에 따른 변화 양상은 동일하고 가속도나 충격력의 크기만 다른 것으로 관찰되었다. 그래서 위그너 분포는 스프링 상질량이 15.5 kg 인 경우의 스프링 상질량의 가속도 신호에 대해서만 신호처리 하여 3차원으로 표현 하였다. Fig. 14~16을 살펴보면 전기장을 부가하지 않은 경우에 비해 전기장을 2 kV/mm로 부가한 경우와 반능동 제어를 적용한 경우 전체적인 주파수 범위에서 에너지 레벨이 낮아지면서 빨리 소산되는 것을 알 수 있다. 전기장을 부가하지 않은 경우에 비해 반능동 제어를 적용할 경우 0.2초 정도 빨리 에너지가 소산되는 것을 알 수 있다. 이상과 같이 반능동 제어를 수행한 경우 충격 후 되튀는 현상도 사라지고 보다 빨리 에너지를 소산 시킴으로써 시스템의 안정성을 증가시킨다는 것을 실험적으로 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 ER 유체를 이용하여 반능동적으로 감쇠력을 변화시킬 수 있는 가변 댐퍼에 대한 성능 예측을 수행하였고, 미끄럼 전극형 ER 댐퍼를 제작하여 전기장에 따라 감쇠력의 변화가 있음을 실험적으로 확인하였다. 또한 시스템에 적용 시 충격 후 과도 응답특성을 실험을 통해 살펴 보았고, 반능동 제어 알고리즘을 적용하여 충격 후 과도응답 특성을 향상 시켰다.

ER 댐퍼의 감쇠력 특성을 해석적으로 예측하는 부

분은 다소 미비하지만 전기장에 따른 변화의 경향은 살펴볼 수 있었고, 실험으로는 비교적 쉽게 측정 가능하였다. 낙하 시험을 통해 전기장 부가시 감쇠력의 증가로 인해 초기 충격후의 되튀는 현상이나 잔류진동을 억제할 수 있었고, 반능동 제어 알고리즘을 사용하여 충격 후 시스템의 거동을 보다 효과적으로 향상시킬 수 있었다. 균일한 전기장을 부가하는 경우에 비해 10~30 %의 부가 전기장으로 충격 후 과도 응답을 보다 효과적으로 향상시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Kamath, G.M., Hurt, M.K., and Werely, N.M., 1996, "Analysis and Testing of Bingham Plastic Behavior in Semi-active Electrorheological Fluid Dampers," *Smart Mater. & Struct.*, Vol. 5, No. 5, pp. 576~590.
- (2) 김기선, 장유진 외 3명, 1995, "승용차용 연속가변 ER 댐퍼의 성능 연구," *한국자동차공학회지*, Vol. 3, No. 6, pp. 69~77.
- (3) Makris, N., Burton, S.A., and Taylor, D.P., 1996, "Electrorheological damper with annular ducts for seismic protection applicaions," *Smart Mater. & Struct.*, Vol. 5, No. 5, pp. 551~564.
- (4) Yao, G.Z., Meng G., and Fang, T., 1997, "Parameter Estimation and Damping Performance of Electro-rheological Dampers," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 204, No. 4, pp. 488~497.
- (5) Kamath, G.M., and Werely, N.M., 1997, "Nonlinear Viscoelastic-Plastic Mechanisms-Based Model of an Electrorheological Damper," *AIAA J. Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 20, No. 6, pp. 1125~1132.
- (6) 최승복, 이재홍, 1998, "ER 댐퍼를 이용한 유연 구조물의 진동제어," *한국소음진동공학회지*, 제 8권, 제 2 호, pp. 313~323.
- (7) Karnopp, D., Crosby M.J., and Harwood, R.A., 1974, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators," *ASME J. of Engineering for Industry*, Vol. 96, pp. 619~626.
- (8) Newland, D.E., 1994, *An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis*, Longman Scientific & Technical, pp. 218~219.