

압착모드하에서 ER 유체의 빙햄특성 및 댐핑력 제어

홍성룡*, 최승복**

Bingham Properties and Damping Force Control of an ER Fluid under Squeeze Mode

Sung-Ryong Hong* and Seung-Bok Choi**

ABSTRACT

This paper presents the field-dependent Bingham characteristics and damping force control of an electro-rheological (ER) fluid under squeeze mode operation. The squeeze force of the ER fluid due to the imposed electric field is analyzed and an appropriate size of the disk-type electrode is devised. On the basis of the theoretical model of the ER fluid under squeeze mode operation, the yield stress and response speed of the ER fluid are distilled from the time responses of squeeze force to the step electric potentials. Measured squeeze forces under various excitation conditions are compared with the predicted ones from Bingham model and time constant obtained at the transient response test. In addition, the controllability of the field-dependent damping force of the ER fluid under squeeze mode is experimentally demonstrated by implementing simple PID controller.

Key Words : Electro-rheological Fluid(ER 유체), Squeeze Mode(압착모드), Bingham Model(빙햄모델), Yield Stress (항복응력), Damping Force Control(댐핑력제어)

1. 서론

ER 유체는 부하 되는 전기장의 강도에 따라 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하며, 기본적으로 비전도성 용매에 전도성입자를 분산시킨 콜로이드 용액이다. ER 유체는 전기장 무부하 시 랜덤 구조를 갖는 뉴토니안유체 특성을 갖지만, 전기장 부하 시 항복전단응력을 갖는 빙햄(Bingham)유체로 변하게 된다⁽¹⁾. ER 유체는 전기장 부하에 따라 액상이나 고상으로 빨리 변화하는 가역적인 유동성질을 가지고 있으며, 이러한 특성을 이용하여

지능구조물, 진동제어용 댐퍼, 엔진마운트, 클러치, 브레이크, 밸브 등 여러 분야에 응용이 시도되고 있다^(2,3). ER 응용장치 들은 ER 유체와 전극의 상대 운동에 따라 유동모드(flow mode)^(4,5), 전단모드(shear mode)⁽⁶⁻⁸⁾ 그리고 압착모드(squeeze mode)⁽⁹⁻¹¹⁾의 형태로 분류할 수 있다.

지금까지 전극간격이 일정한 전단 및 유동모드에 대한 연구는 활발히 수행되어 왔으나, 전극간격이 변하는 특성을 지닌 압착모드에 대한 연구는 다른 두 모드에 비하여 상대적으로 적으며, 다음과 같은 연구만이 수행되었다. Stanway 등⁽⁹⁾은 원판형태의 전극 사이에 함유된 ER 유체의 유동특

2001년 8월 14일 접수

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과

성을 Bi-viscous 모델로 설정하여 실험결과와 잘 부합됨을 증명하였으나, 이 모델은 복잡한 수학적 연산을 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 또한, 압착모드 형태의 승용차용 ER 엔진마운트를 제작하여 전압의 On/off 에 따른 진동절연특성 변화를 연구하여 진동제어작동기로의 가능성을 확인하였다⁽¹⁰⁾. Wang 등⁽¹¹⁾은 전단모드와 압착모드의 복합형태인 콘(cone)형상의 스퀴즈필름댐퍼를 제안하고, 빙햄모델에 기초한 수학적모델링과 성능시험을 수행하였다. 최근의 연구⁽⁸⁾에서 유동모드와 전단모드에서 측정된 동일한 ER 유체의 빙햄특성이 상이하다는 것이 증명 되었는데, 이는 ER 응용장치의 설계에 이용될 ER 유체의 빙햄특성 데이터는 ER 응용장치와 동일한 작동모드에서 구하여야 함을 의미한다. 따라서, 압착모드에서 도출되어진 ER 유체의 빙햄특성치와 다른 작동모드에서 얻어진 것과의 비교해석에 대한 연구가 필요하다. 또한, 압착모드 하에서의 ER 유체의 유변학적 특성과 ER 응용장치의 동특성에 대한 기존의 연구는 비교적 낮은 가진주파수(30Hz 이하)에서 정상상태 응답해석에 국한되었는데, 전기장 입력에 따른 ER 유체의 과도응답에 대한 실험적 고찰이나 이론적 모델이 제시된 바 없다. 한편, 압착모드에서는 전극간격이 변하기 때문에 압착력의 추적제어가 용이하지 못하므로 이에 대한 연구가 수행된 보고가 없다. 따라서, 본 연구의 목적은 압착모드 하에서의 ER 유체의 빙햄특성을 실험적으로 도출한 후 전단모드에서 측정된 항복응력 및 전류밀도와 비교하며, 기존연구보다 높은 가진주파수를 비롯한 다양한 가진 조건에서의 압착력을 고찰하며, 전기장 변화에 따른 ER 유체의 과도응답특성을 고찰하는 것이다. 또한, 압착력(댐핑력) 추적제어특성의 고찰을 통하여 압착모드형 ER 응용장치의 설계와 제어를 위한 기초 결과를 확보하는 것이다.

이를 위하여 압착모드 하에서의 ER 유체의 과도응답을 표현할 수 있도록 시정수가 고려된 압착력에 대한 수학적 모델을 구축한 후, 압착모드에서 ER 유체의 빙햄특성을 측정할 수 있는 상용시험장치는 아직 없으므로 ER 유체의 유변학적 특성 변화로부터 발생한 압착력을 측정할 수 있는 시험장치를 자체 제작하여, 전기장 부하에 따른 압착력의 측정치와 수학적모델로부터 ER 유체의 빙햄특성치와 응답속도를 도출하였으며, 상용 전기점도계로부터 측정된 전단모드에서의 빙햄특성치와

비교하였다. 또한, 도출된 ER 유체의 항복응력과 시정수를 이용하여 다양한 가진 조건하에서의 압착력을 예측하여 실험결과와 비교하였다. 그리고, 압착모드 하에서 PID 제어기를 이용한 댐핑력의 우수한 제어 성능을 실험적으로 고찰하였다.

2. 압착모드 모델

압착모드 하에서 ER 유체의 빙햄특성치를 도출하기 위하여 전기장 부하에 따른 압착력의 수학적 모델을 도출하였다. Figure 1은 ER 유체의 압착모드가 구현되는 전극 운동의 기하학적 형상을 나타낸 것이다. 원판형태의 두 전극판 사이는 ER 유체로 충전되어 있으며, ER 유체는 전극간극이 작아질 때 전극사이에서 유출되며, 전극간극이 커지면 전극사이로 유입된다. 이때 전극의 상대운동에 수직방향으로 유동하는 ER 유체의 점성에 의하여 발생된 유동저항은 전극 운동방향으로의 압착력을 발생시킨다. Figure 1에서 h 는 전극간격, R 은 원판형 전극의 반지름, F_T 는 전기장 무부하 시의 ER 유체의 기본점성에 의한 압착력 F_η 와 전기장 부하 시 변화하는 항복응력을 통하여 연속적으로 조절 가능한 가변압착력 F_{ER} 의 합으로 표현되는 전체압착력이다. ER 유체의 유변학적 거동을 빙햄 모델로 표현함으로써, 압착력 모델링을 수행할 수 있다. ER 유체의 빙햄특성은 다음과 같은 수식으로 표현된다⁽¹⁾.

$$\tau = \tau_y + \tau_v = \eta\dot{\gamma} + \alpha E^\beta \quad (1)$$

여기서, τ 는 ER 유체의 전단응력으로서, 기본점성

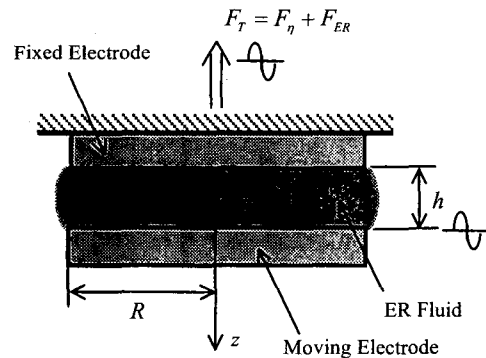


Fig. 1 Dynamic motion of the ER fluid under squeeze mode

계수 η 와 전단비 $\dot{\gamma}$ 로 표현되는 전기장 무부하시의 전단응력 τ_η 와 전기장 E 에 대한 지수함수로 표현되는 동적항복응력 τ_y 의 합으로 표현된다. 여기서, 전기장 E 는 간극에 부하되는 전압 V 를 전극간격 h 로 나눈 값이며, 전단 및 유동모드와 달리 압착 모드에서는 전극간격이 변하기 때문에 시간에 대한 함수이다. 전극간격 h 는 초기간극 h_0 와 가진변위 $h_{ex}(t)$ 의 합으로 구성된다. α 와 β 는 ER 유체에 사용된 용매와 입자의 종류, 조성비, 조성환경 등에 의하여 결정되는 고유 특성치이다.

ER 유체의 압착력은 ER 유체의 질량효과에 따른 관성력, ER 유체의 컴플라이언스에 의한 강성력, 전기장 무부하시의 유체점성으로 인한 압착력, 전기장 부하에 따른 항복응력의 증가에 의한 가변 압착력으로 구성될 수 있다. 본 연구에서는 ER 유체의 관성력과 강성력이 다른 두 힘에 비하여 무시될 수 있을만큼 작으므로 이를 압착력 모델에 고려하지 않는다.

먼저, 전기장 무부하 시의 전단응력 τ_η 에 의하여 발생하는 압착력의 모델링을 수행한다. 미소유체요소에 대한 r 방향의 운동량 방정식을 적용하면, r 방향 압력구배와 z 방향 전단응력 구배에 대한 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dP_\eta}{dr} = \frac{\partial \tau_\eta}{\partial z} = \frac{\partial(\eta \dot{\gamma})}{\partial z} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2)$$

여기서, P_η 는 미소유체요소 중앙에서의 압력이며, u 는 유체의 반경방향 속도분포이다. 식(2)를 z 에 대하여 적분하고, $z = -h/2, h/2$ 에서 $u=0$ 인 경계조건을 적용하여 구한 속도분포는 다음과 같다.

$$u(t) = \frac{1}{2\eta} \left(z^2 - \frac{h^2}{4} \right) \frac{dP_\eta}{dr} \quad (3)$$

한편, 반경좌표 r 에서의 원주와 유체속도의 간극 크기에 대한 적분값의 곱으로부터 ER 유체의 유량을 얻을 수 있으며, 이는 전극의 속도 \dot{h} 와 원판형 적극의 단면적의 곱과 동치되며, 다음의 질량보존 식으로 표현된다.

$$Q = 2\pi \int_{-h/2}^{h/2} u(t) dz = -\pi r^2 \dot{h} \quad (4)$$

여기서, Q 는 반경방향 유량이다. 식(4)에 $r=0$ 에

서 $dP_\eta/dr=0$ 인 경계조건을 적용하여 다음의 압력구배를 구할 수 있다.

$$\frac{dP_\eta}{dr} = \frac{6\eta}{h^3} \frac{dh}{dt} r \quad (5)$$

압력구배를 전극반지름에 대하여 적분하여 얻은 압력을 전극면적에 대하여 적분함으로써, 전기장 무부하 시의 압착력 (F_η) 을 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$F_\eta = -2\pi \int_{r=0}^{r=R} P_\eta r dr = -2\pi \int_{r=0}^{r=R} \frac{3\eta}{h^3} \dot{h} r^3 dr = -\frac{3}{2} \pi \eta R^4 \frac{\dot{h}}{h^3} \quad (6)$$

전기장 부하 시의 압착력을 도출하기 위하여, 다음과 같이 압착유동이 발생될 수 있는 최소 반경방향 압력구배를 근사화 할 수 있다⁽¹²⁾.

$$\frac{dP_{ER}}{dr} = \frac{2\tau_y}{h} \text{sgn}(\dot{h}) \quad (7)$$

식(7)로부터 전기장 부하에 의하여 발생하는 가변 압착력 F_{ER} 은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} F_{ER} &= -2\pi \int_{r=0}^{r=R} P_{ER} r dr = -2\pi \int_{r=0}^{r=R} \frac{2\tau_y}{h} \text{sgn}(\dot{h}) r^2 dr \\ &= -\frac{4}{3} \pi R^3 \tau_y \frac{\text{sgn}(\dot{h})}{h} \end{aligned} \quad (8)$$

일반적으로 ER 유체의 항복응력은 전기장 입력에 대하여 시간지연을 갖는 1 차시스템의 거동을 보인다⁽⁷⁾. 따라서, 계단입력전기장이 부하된 후 증가하는 가변압착력이 정상상태 값의 63.2%에 도달하는 것에 소요되는 시간을 시정수 c 로 정의할 수 있으며, 시정수 c 가 고려된 ER 유체의 항복응력 τ_y 에 대한 동적모델과 연계된 전체 압착력 F_T 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F_T = F_\eta + F_{ER} &= -\frac{3}{2} \pi \eta R^4 \frac{\dot{h}}{h^3} - \frac{4}{3} \pi R^3 \tau_y \frac{\text{sgn}(\dot{h})}{h} \\ c \dot{\tau}_y + \tau_y &= \alpha(E)^\beta = \alpha \left(\frac{V}{h} \right)^\beta \end{aligned} \quad (9)$$

실험을 통하여 측정된 전체압착력으로부터 ER 유체의 빙햄특성을 다음과 같이 도출할 수 있다. 먼저, 식(6)에서 알고 있는 변수가 전극의 반지름 R , 전극간격 h , 전극간 상대속도 \dot{h} 이면, 전기장 무부하 시 측정된 압착력 F_η 로부터 기본점성 η 를

추정할 수 있다. 전극간격 h 는 초기간극 h_0 와 정현파 형태의 가진변위 $h_{ex}(=h_{exo} \sin(2\pi ft))$ 의 합으로 구성된다. h_{exo} 는 가진 진폭을 나타낸다. 다음은 ER 유체에 전기장 E 나 전압 V 를 일정하게 부하한 후 정상상태에 도달한 전체압착력 F_r 의 측정으로부터 식(9)의 항복응력 τ_r 를 도출할 수 있다. 본 연구에서는 일정한 전압 V 를 부하하여 전체 압착력을 측정하며, 시간에 따라 변하는 간극크기 h 가 초기간극 h_0 와 동일한 순간에서의 전기장 ($E=V/h_0$)에 대한 항복응력을 도출한다. 결국, 여러 세기의 전기장에 대한 항복응력을 전기장 E 에 대한 지수함수로 표현하면 ER 유체의 고유특성치인 α 와 β 가 구하여 진다. 또한, ER 유체의 응답속도는 ER 유체의 기본점성, 병행특성이 도출된 후, 전압 V 의 계단입력에 대한 전체압착력의 과도 응답으로부터 식(9)에 나타낸 시정수 c 를 얻을 수 있다.

식(9)에 근거하여 원판형태의 전극을 설계하였는데, 반지름은 15mm이며, 재질은 전기전도성이 높은 두랄루민이다. 전극간의 초기간극크기는 2mm로 설정하였으며, 수십 μm 의 작은 변위가 가진 입력과 125Hz의 비교적 높은 가진주파수 조건하에서의 ER 유체의 병행특성을 고찰하였다. ER 유체는 특수화학처리된 셀룰로스 전분계열의 전도성입자와 비전도성 용매인 실리콘오일을 이용하여 입자중량비 50%로 특수화학처리하여 자체 조성된 것을 사용하였다.

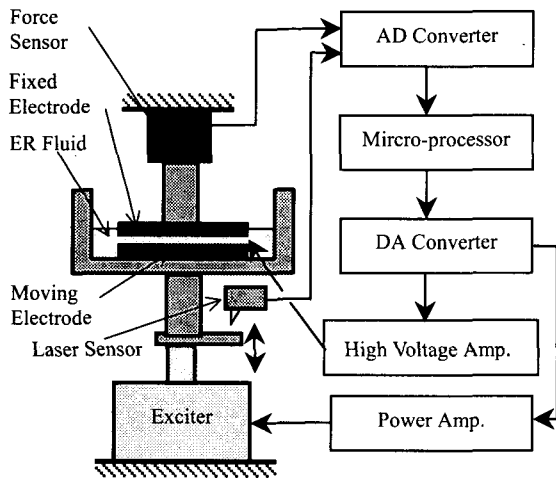


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

3. 압착력 및 항복응력

압착모드 하에서 ER 유체의 전기장 부하에 따른 동특성변화를 고찰하기 위해 Figure 2와 같은 실험장치를 구성하였다. 하부 전극은 전자기식 가진기(MB, PM25)에 부착되어 있다. 하부 전극의 위치를 측정하는 레이저센서(Keyence, LC-2430)로부터 출력된 신호는 측정가진변위 ($h_{ex}(t)$)를 의미하며, 이 신호는 AD 변환기(Keithley, DAS-1800)를 통하여 마이크로프로세서에 입력되며, 마이크로프로세서는 정현파형 요구가진변위와 측정가진변위의 차를 이용한 PID 제어를 수행하며, 이로부터 결정된 가진기 제어전압은 DA 변환기(Keithley, DAS-1800)를 통하여 가진기 전력공급장치에 입력된다.

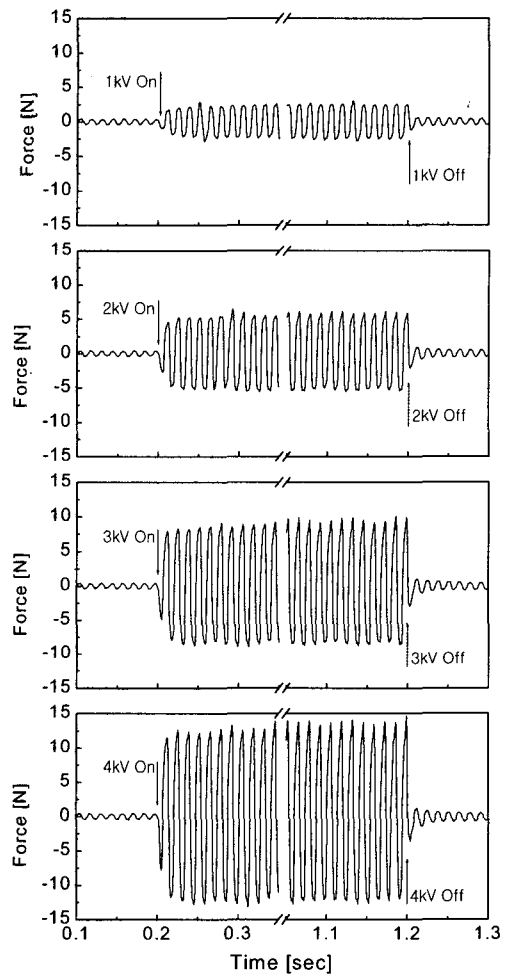


Fig. 3 Time responses of the measured squeeze force

상부전극은 힘센서(MMF, KF24)에 고정되며, 힘센서에서 출력되는 신호는 ER 유체의 압착력이다. 압착력과 가진변위는 AD 변환기를 통하여 마이크로 프로세서에 저장된다. 전극간에 전기장을 부하하기 위하여 전압증폭기(Trek, 10/10A)를 이용하였다.

Figure 3 은 2mm 초기간극, $\pm 40\mu\text{m}$, 75Hz 의 가진조건에서 계단압력 전압을 4kV 까지 1kV 씩 증가 시켜 부하할 때의 압착력변화를 측정하여 나타낸 것이다. 압착력의 증가는 ER 유체의 항복응력의 증가를 나타내며, 정상상태에 도달하는 시간은 ER 유체의 반응속도를 의미한다. 전압 무부하 시 ER 유체의 기본점성에 의한 압착력 만이 발생되지만, 전압을 부하하면 ER 효과가 발생되어 압착력이 증가하는 것을 알 수 있다. 한편, 측정된 압착력의 (+)영역과 (-)영역에서의 전달력의 크기가 다소 차이를 보이고 있다. 이는 ER 유체가 인장되거나 압축될 때의 전달응력이 달리 나타나는 특성에 기인한다. 전압을 0kV 에서 1kV 씩 4kV 까지 증가시키면, 약 1.6, 4.8, 7.9, 12.2N 의 가변압착력이 증가하며, 4kV 의 전기장 부하 시에 측정된 전류값은 약 $0.048\mu\text{A}$ 로서 상당히 작게 나타났다.

$\pm 40\mu\text{m}$, 75Hz 가진 시험에서 얻은 압착력 측정결과와 동일한 가진변위와 가진주파수에 대한 압착력의 수학적 모델(식(9))을 이용하여 전기장 세기에 따른 ER 유체의 항복응력을 도출하여 Figure 4 (a)에 나타내었다. 전기장 2kV/mm 에서의 항복응력은 1720Pa 로 구하여 졌다. Figure 4 (b)에 나타낸 전기장 세기에 대한 전류밀도를 나타내었다. 전극에 부하되는 전류를 원판형 전극의 면적으로 나눔으로써 전류밀도를 얻을 수 있다. 도출된 전류밀도는 수 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 작은 값으로 나타났다. Figure 4 (a)에 압착모드 하에서의 항복응력과 함께 도시한 전단모드에서의 항복응력은 실린더 형태의 전극이 회전하는 타입인 상용점도계(MC120, Physica)를 이용하여 측정된 것으로서, 압착모드의 경우보다 작게 도출되었다. MC120 은 전단비에 따른 유체의 전달응력을 측정하는 장치로서, 전기장부하에 따른 전달응력의 변화도 측정이 가능하다. 전기장 무부하 시 ER 유체의 전달비가 증가함에 따라 전달응력이 선형적으로 증가하지만, 전기장 부하 시에는 식(1)의 빙햄모델과 같이 전기장 무부하 시의 전달응력과 전기장 부하에 따른 항복응력이 합하여진 전달응력이 측정된다. 따라서, 얻어진

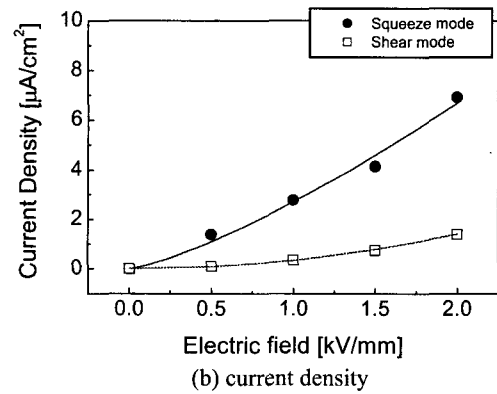
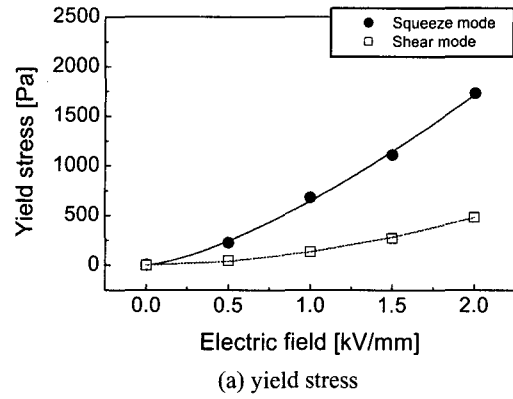


Fig. 4 Bingham properties of the ER fluid

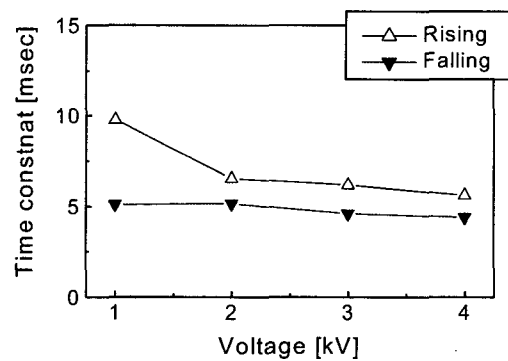


Fig. 5 Response time of the ER fluid

전달응력의 선형맞춤을 통하여 전달비가 0 인 경우의 전달응력을 외삽하여 항복응력을 구하였다. 전류밀도는 전극에 부하되는 전류를 측정후 실린더형태 전극의 면적을 나눔으로써 얻을 수 있었

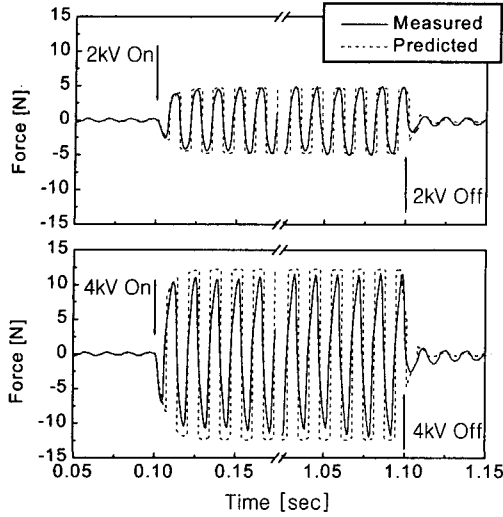


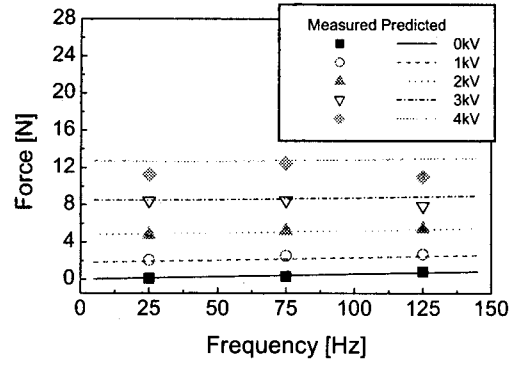
Fig. 6 Squeeze force in the time domain

으며, 전류밀도도 압착모드의 경우보다 작게 나타났으며 Figure 4 (b)에 도시하였다.

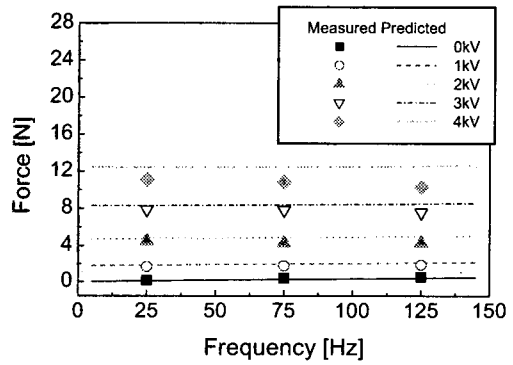
압착모드 하에서 ER 유체의 항복응력을 전기장에 대한 지수함수로 표현하면, $760 E^{1.3} \text{Pa}$ 로 구하여 졌으며, 전류밀도는 $2.7 E^{1.3} \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 으로 도출되었다. 또한, 전단모드의 경우 $130 E^{1.9} \text{Pa}$, $0.33 E^{2.0} \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 으로 도출되었다. 따라서, ER 응용 장치의 설계 시에는 동일한 작동모드에서 구하여진 빙햄특성데이터를 이용해야 정확한 성능해석이 가능하며, 요구성능에 따른 각종설계변수가 알맞게 결정됨을 알 수 있다.

Figure 5는 Figure 3에 나타난 압착력과 식(9)를 이용하여 구한 시정수를 나타낸 것이다. 높은 전압이 부하 될수록 응답이 빨라지는 경향을 보였으며, 제거 시에는 거의 유사한 응답속도를 나타냈다. 시정수는 전압 부하 시(rising) 5.5~10msec, 제거 시(falling) 4.5~5msec 로서 전압 제거 시의 시정수가 전압 부하 시 보다 작게 나타났는데, 이는 전압 부하 시 ER 유체의 전도성입자 들이 전극 내부에서 유동하면서 체인형 구조를 형성하는 것에 소요되는 시간이 전압 제거 시 체인형 구조가 사라지는 경우보다 더 큰 특성에 기인한다. 모든 시정수의 산술평균치는 약 6.5msec 이므로, 수 msec 의 빠른 응답특성을 보였다.

Figure 6, 7 은 다양한 가진조건에서 측정치와



(a) excitation amplitude : $\pm 40 \mu\text{m}$



(b) excitation amplitude : $\pm 20 \mu\text{m}$

Fig.7 Squeeze force in the frequency domain

예측치를 함께 도시한 것이다. 예측치는 특정한 가진조건($\pm 40 \mu\text{m}$, 75Hz)에서 도출된 ER 유체의 빙햄특성이 적용된 식(9)에 $h_{\text{exo}}=40 \mu\text{m}$, $f=25, 125 \text{Hz}$ 및 $h_{\text{exo}}=20 \mu\text{m}$, $f=25, 75, 125 \text{Hz}$ 를 적용함으로써, 다른 가진변위 및 가진주파수에서 각 고전압의 세기에 따른 압착력 크기를 계산한 것이다. 한편, 측정치는 예측치를 얻을 때와 동일한 고전압과 가진조건을 실험장치에 구현하여 얻은 압착력을 나타낸다.

Figure 6 은 $\pm 20 \mu\text{m}$, 75Hz 의 가진조건의 압착력을 시간영역에서 함께 도시한 것으로서, 실험치와 예측치의 피크 값이 비교적 잘 부합하는 것을 알 수 있다. Figure 7 (a), (b)는 각각 가진변위 $\pm 40 \mu\text{m}$, 가진주파수 25, 125Hz 와 가진변위 $\pm 20 \mu\text{m}$, 가진주파수 25, 75, 125Hz 의 시험조건 하에서의 최대압

착력을 나타낸 것으로서, 전압 무부하 시 가진주파수가 높아지면 전극의 가진속도가 커지므로, ER 유체의 유동저항력이 증가하여 기본점성에 의한 압착력도 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 부하 전압의 세기가 높을수록 큰 가변압착력을 발생시키는 것을 알 수 있다. 결국, 부하 전압 세기가 높아짐에 따라 전체압착력이 증가하는 경향을 보이므로, 앞서 수행한 압착력의 수학적 모델의 물리적 개념을 잘 나타내고 있다. 한편, 가진변위 $\pm 40\mu\text{m}$, 고전압 4kV 에서 125Hz 에서 측정된 압착력은 11.0N 으로 나타나 75Hz 의 12.2N 보다 작게 측정되었다. 또한, Figure 7 (b)에 나타난 바와 같이 가진변위 $\pm 20\mu\text{m}$ 에서는 고전압 4kV 에서 75, 125Hz 의 가진주파수에 따라 각각 10.8, 10.4N 으로 나타나 가진주파수를 증가시킴에 따라 압착력이 감소하였다. 이러한 특성은 다른 ER 응용장치에서도 나타나며, ER 유체의 유동량에 따라 입자들 간의 이동이나 회전에 의하여 결합력이 다소 변동한 것에 기인한다⁽¹³⁾. Figure 7 에서 예측치와 측정치의 최대오차((예측값-측정값)/측정값 $\times 100$)는 18 %이다.

4. 댐핑력 제어

압착모드 하에서 전압 부하에 따라 유변학적 특성이 변화하는 ER 유체의 특성을 댐퍼나 마운트와 같은 진동절연을 목적으로 한 ER 응용장치에 적용하면, ER 유체로부터 발생하는 압착력은 댐핑력으로 작용하게 된다. Figure 8 은 가진변위에 대하여 가진변위 $\pm 40\mu\text{m}$ 에서의 가진변위에 대한 압착력을 도시한 것으로서, 전압 무부하 시 압착력

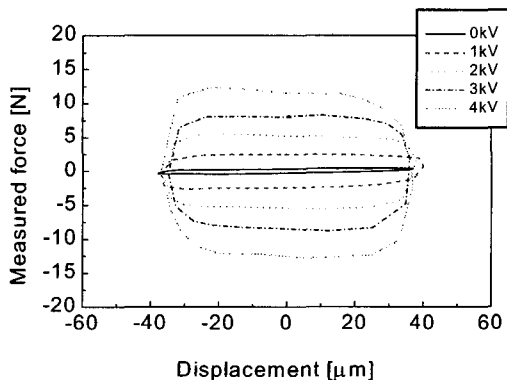


Fig. 8 Damping force vs. displacement

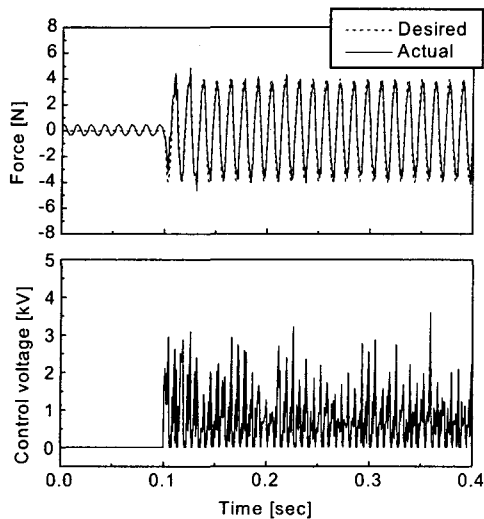
은 작은 타원형 폐곡선을 나타내지만, 전압 세기가 증가함에 따라 폐곡선의 면적이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 측정된 압착력에서 강성력이 주요하게 작용할 시에 나타나는 폐곡선의 형상이 기울어지는 현상이 나타나지 않으므로, ER 유체의 강성의 증가가 미약함을 알 수 있다. 이는 측정된 압착력의 대부분이 댐핑력으로 이루어져 있으므로, 본 연구에 적용된 ER 유체를 이용한 ER 응용장치를 진동절연시스템에 적용 시 진동에너지를 댐핑 에너지로 발산시킬 수 있음을 의미하며, 폐곡선 면적이 넓을수록 압착모드 하에서의 ER 유체로부터 발생된 댐핑력을 이용하여 발산시킬 수 있는 에너지가 커짐을 의미하므로, 동일한 가진조건 하에서 부하 전압을 높이면 진동에너지의 발산량이 커짐을 확인할 수 있다.

ER 유체의 댐핑특성을 이용한 ER 댐퍼나 ER 마운트를 이용하여 진동시스템의 우수한 진동절연 효과를 얻기 위해서는 크거나 작은 댐핑을 요하는 여러 조건에 맞추어 가변댐핑력이 적절히 조절될 수 있어야 한다⁽²⁾. 결국, 여러 가진입력에 대하여 원하는 댐핑에너지를 발산시킬 수 있어야 하며, 이는 가변댐핑력을 조율함으로써 가능하다. 한편, 전단 및 유동모드형 ER 응용장치의 전극간격이 일정한 것에 반하여 압착모드하에서는 전극간격이 시간에 따라 연속적으로 변하는 특성을 가지고 있으므로, 개회로(open-loop)제어를 통해서도 우수한 댐핑력 제어 성능을 구현하기 어렵다. 또한, ER 유체의 기본점성과 항복응력은 온도와 같은 실험환경의 변화에 따라 다소 변동하는 특성을 가지고 있다. 따라서, 측정된 댐핑력을 피드백하여 부하 전압을 결정하는 폐회로(closed-loop)제어를 수행하여야 우수한 댐핑력 제어효과를 얻을 수 있다. 본 절에서는 간단한 PID 제어기를 이용하여 댐핑력의 폐회로제어를 수행하였다. 전극간에 부하할 전압 V 는 다음의 PID 제어기로부터 얻어진다.

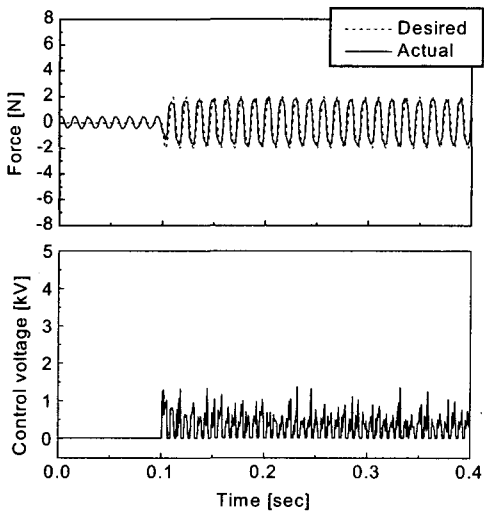
$$E = K_p e + K_I \int edt + K_D \dot{e}, e = F_{desired} - F_{measured} \quad (10)$$

$$V = \begin{cases} Eh_o, & \text{for } E > 0 \\ 0, & \text{for } E \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

여기서, e 는 추적오차로서 요구댐핑력 $F_{desired}$ 과 측정된 댐핑력 $F_{measured}$ 의 차이이며, 제어계인 K_p , K_I , K_D 는 추적오차를 감소시킬 수 있도록 각각



(a) desired force amplitude : $\pm 4\text{N}$



(b) desired force amplitude : $\pm 2\text{N}$

Fig. 9 Time response of controlled damping force

6.1, 0.001, 0.01 로 실험적으로 튜닝되었다. 또한, 이다. 식(11)은 음의 전기장이 ER 유체에 부하되면 ER 효과에 의한 댐핑력이 증대되기 때문에 PID 제어기에 의한 전기장이 음의 값으로 계산된 경우에는 전압이 부하되지 못하도록 하기 위한 조건을 나타낸다.

추적하고자 하는 요구값은 각각 4, 2N 의 진

폭, 75Hz 의 주파수 성분의 정현파이며, 추적제어 시험결과는 Figure 9 에 나타내었다. 측정된 댐핑력이 요구댐핑력을 잘 추적하고 있으며, 4N 의 요구 댐핑력을 추적 시 2N 의 경우보다 더 높은 전압이 적절히 부하되는 것을 관찰할 수 있다. 한편, 정현파형태의 요구댐핑력을 추적하기 위한 전압의 크기가 변하면서 적절히 입력되는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 간단한 PID 제어기를 이용하여 전압을 조절함으로써 압착력을 제어할 수 있으며, 이는 진동제어를 목적으로 한 압착모드형 ER 응용장치의 댐핑력을 제어할 수 있음을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 압착모드 하에서 ER 유체의 병행특성과 제어특성을 비롯한 여러 동특성을 고찰하였다. ER 유체의 동적거동을 나타내는 수학적 모델을 유도하였으며, 전기장 부하에 따른 압착력을 측정할 수 있는 시험장치를 구성한 후 압착모드 하에서 유도된 ER 유체의 수학적모델과 측정된 압착력으로부터 항복응력을 도출하였다. 상용 전기점도계를 이용하여 측정한 진단모드 항복응력과 전류밀도는 압착모드에서 도출한 것과 큰 차이를 보이므로, ER 응용장치 설계 시에는 동일한 작동모드에서 얻어진 병행특성데이터를 이용하여야 함을 확인하였다. 한편, ER 유체의 응답시간은 수 msec로 나타나 빠른 응답특성을 보였다. 도출된 ER 유체의 항복응력과 응답시간으로부터, 다양한 가진 조건하에서의 압착력을 예측할 수 있었으며, 측정치와 잘 부합하였다. 요구댐핑력 추적시험을 수행하였는데, 전극간극이 변하는 압착모드의 단점을 극복하기 위하여 PID 제어기를 이용한 폐회로제어를 통하여 ER 유체에 부하 되는 전기장을 조절함으로써 우수한 댐핑력제어특성을 입증하였다. 향후 본 연구에서 얻어진 압착모드 하에서 ER 유체의 병행특성을 비롯한 여러 데이터를 이용하여 ER 응용장치의 설계 및 응용에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구의 일부는 국가지정연구실(NRL) 프로그램 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ginder, M. and Ceccio, S. L., "The Effect of Electrical Transients on the Shear Stresses in Electrorheological Fluids," *Journal of Rheology*, Vol. 39, pp. 211-234, 1995.
2. Choi, S. B., "Control Characteristics of ER Devices," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 13, pp. 2160-2167, 1999.
3. Brooks, D. A., "Design and Development of Flow Based Electrorheological Devices," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 6, pp.2705-2730, 1992.
4. Park, W. C., Choi, S. B. and Suh, M. S., "Material Characteristics of an ER Fluid and Its Influence on Damping Forces of an ER Damper, Part I : Material Characteristics," *Materials and Design*, Vol. 20, pp. 317-323, 1999.
5. Park, W. C., Choi, S. B. and Suh, M. S., "Material Characteristics of an ER Fluid and Its Influence on Damping Forces of an ER Damper, Part II : Damping Forces," *Materials and Design*, 1999, Vol. 20, pp. 325-330, 1999.
6. Choi, S. B., Hong, S. R., Cheong, C. C. and Park, Y. K., "Comparison of Field-Controlled Characteristics Between ER and MR Clutches," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 10, pp. 615-619, 1999.
7. Choi, S. B., Lee, H. G., Kim, S. L., Cheong, C. C. and Han M. S., "Position Tracking Control of a Moving Table Using ER Brake/Clutch," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 208-217, 1998.
8. Lee, H. G., Choi, S. B., Han, S. S., Kim, J. H. and Suh, M. S., "Bingham and Response Characteristics of ER Fluids in Shear and Flow Modes," *Proceedings of the 7th International Conference on Electro-rheological and Magneto-rheological Suspensions and Their Applications*, pp. 523-530, 1999.
9. Stanway, R., Sproston, J. L. and Wahed, A., "Adaptive Vibration Control Using an Electrorheological Squeeze-flow Damper," *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 2715, pp. 110-120, 1996.
10. Williams, E. W., Rigby S. G., Sproston, J. L. and Stanway, R., "Electrorheological Fluids Applied to an Automotive Engine Mount," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 47, pp. 221-238, 1993.
11. Wang, X., Zhang, P., Tang, X. and Tao, R., "Testing and Modeling a Cone-shaped Squeeze-film Mode Electrorheological Damper," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 10, pp. 748-752, 1999.
12. Philips, R. W., "Engineering Applications of Fluids with a Variable Yield Stress," Ph. D. Thesis. University of California, Berkeley, 1969.
13. 주동우, 이은준, 박명관, "전기점성유체를 이용한 동력전달 장치에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, 제 15 권, 제 10 호, pp. 81-87, 1998.