

전기유동유체의 역학적 특성 고찰 및 진동 제어 응용

박우철 · 김기선 · 최승복 · 정재천

인하대학교 공과대학 기계공학과
(1993년 10월 21일 접수)

An Experimental Investigation on Mechanical Properties of Electro-Rheological Fluids with the Application to Vibration Control

Woo-Cheul Park, Key-Sun Kim, Seung-Bok Choi and Chae-Cheon Cheong

Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-752, Korea
(Received October 21, 1993)

요 약

본 논문에서는 실리콘 오일을 용매로 사용하여 조성된 전기유동유체의 전기장 부하 변화에 따른 역학적 특성을 고찰하였으며 그 응용성에 대하여 연구하였다. 유체에 가해지는 전기장은 0~2.5 kV/mm까지 변화시켰고, 외부에서 가해지는 회전력은 0~500 rpm까지의 범위로 설정하였으며, 용매의 점성계수 및 각각의 용매에 대한 입자 중량비를 달리하여 자체 조성한 4종류의 전기유동유체에 대하여 특성을 고찰하였다. 각각의 전기유동유체는 부하되는 전기장에 대하여 전단력과 전단속도비의 관계가 선형적으로 증가하였고, 전기유동유체의 항복응력도 부하되는 전기장의 함수로 증가함을 알 수 있었다. 또한 부하되는 전기장의 크기 뿐만 아니라 입자의 중량비, 용매의 점성계수도 전기유동유체의 거동에 많은 영향을 미침을 알 수 있었다. 또한, 전기유동유체를 이용한 응용 예로서 지능 구조물을 제작하여 전기장에 따른 진동특성변화를 고찰하였다. 실험결과 부하되는 전기장의 강도가 증가함에 따라 구조물의 고유진동수가 점차적으로 증가하였으며, 입자의 중량비가 증가할수록 증가폭이 커 넓은 범위의 제어영역을 가짐을 알 수 있었다. 전기유동유체의 진동 제어 이용 가능성을 입증하기 위하여 시간영역에서 구조물의 전기장에 대한 과도 진동 제어 응답과 강제 진동 제어 응답을 실험하였다.

Abstract—In this paper, the mechanical properties of electro-rheological fluids (ERF) which undergo a phase-change when subjected to applied electric fields are evaluated. Four types of different particle concentrations and two types of different liquid viscosities of base oil(silicone oil) are adopted to study the relationship between the shear rate and the shear stress with respect to the increment of the electric field. The electric field applied to the ERF varies from 0 to 2.5 kV/mm and the revolution of the outer cylinder, employed to give the rotation force to the ERF, ranges from 0 rpm to 500 rpm. It is observed that the shear rate and the shear stress have a linear relation and that the yield stress of the ERF increases as a function of the electric field. Furthermore, the feasibilities of using ERF as an actuator for vibration control are also observed through the construction of intelligent cantilever beams featuring the ERF. The field-dependent capability of damping and stiffness properties of the beams makes the beams avoid a resonance phenomenon. In both the time and the frequency domains, the effects of vibration control are examined to demonstrate this capability.

Keywords: Electro-rheological fluid, bingham behavior, shear stress, shear rate, yield stress, natural frequency, damping ratio, vibration control

1. 서 론

전기유동유체 혹은 ER(electro-rheological)유체라 함은 가해지는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 것으로, 기본적으로 보통 비전도성 용액 중에 강한 전도성을 갖는 입자들을 분산시킨 콜로이드 용액이다. 1949년 Winslow[1]가 가해지는 전기장에 의해 실리카를 입자로 한 유체의 점성이 변함을 처음으로 발표하였고, 또한 그 응용 예를 보고하였기 때문에 Winslow 유체라고도 칭한다. 그 후 많은 연구자들에 의해 전기유동유체의 메커니즘과 응용성에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.

전기유동유체의 특성을 파악하기 위한 실험방법에는 미시적인 실험과 거시적 실험의 두가지 방법으로 구분되고 있다[2, 3]. 미시적인 실험은 현미경 관찰에 의하여 전기장 부하에 대한 입자들의 움직임 을 고려하는 것으로 현재까지 확실하게 정립된 이론은 없으나, Winslow, Block, Shulman[4], Brooks[5], McLeish[6] 등에 의하면 Fig. 1에서와 같이 전기장 무부하시에는 유체에 분산된 입자가 자유운동을 하여 등방성(isotropic)의 특성을 보이지만 전기장을 전기유동유체에 가하면 유체 중에 분산된 입자가 유도분극을 일으켜 전극을 향하는

다수의 섬유상 조직을 형성함으로써 비등방성(anisotropic)의 거동을 갖게 되어 유체의 유동이나 외부에서 가해지는 전단력에 대하여 저항을 나타낸다는 이론과 분산된 입자들 사이의 수소결합에 의하여 ER효과가 나타난다는 등의 이론이 제시되고 있다[7]. 입자의 종류로는 전분, 셀룰로이드, 실리카 등으로부터 전용으로 합성된 입자에 이르기까지 많은 종류의 입자가 사용되고 있다. 그러나, 이러한 유체를 사용하여 자동차의 현가장치, 엔진 마운트, 제진대 등의 응용장치에 적용하기에는 미세적인 메커니즘의 규명, 전기유동유체의 전기장 강도에 대한 관계성, 응용시 유체의 안정성 및 마모와 피로현상의 규명등 여러가지 해결해야 할 문제점들이 많다. 특히 온도 상승으로 인한 수분의 증발이나 온도강하로 인한 동결 현상을 그 예로 들 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Xu[8], Ostubo[9] 등은 수분을 제거시킨 입자를 사용하여 보고한 예가 있다. 이러한 미시적인 방법에 의하여 ER유체의 특성을 파악하는 것 이외에 실제의 기계장치에 응용하기 위해서는 유체의 전단응력, 전단속도비, 점성계수 등의 역학적 특성에 관한 연구가 병행 혹은 선행되어야 한다. 전기유동유체는 전기장 무부하시에는 Newtonian 유체의 특성을 나타내지만 부하되는 전기장의 크기에 따라 유체의 항복응력이 증가하는 특성을 보이며, 그 거동은 매우 복잡하지만 ER유체의 거의 공통적인 특징은 식 (1)로서 표현할 수 있는 Bingham 거동을 하는 것으로 알려져 있다.

$$\tau = \tau_0(E) + \eta \dot{\gamma}, \tau_0(E) \propto aE^b \quad (1)$$

여기서 τ 는 유체의 전단응력을 나타내고, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비이며 η 는 유체의 점성계수를 나타낸다. τ_0 는 유체의 항복응력(yield stress)을 표현하는 것으로 전기장(E)의 증가와 더불어 E^b 의 관계로 증가하는 것으로 알려져 있다. 전기장 증가에도 불구하고 전단응력과 전단속도비의 관계가 전기장 무부하시와 동일한 기울기를 갖지 않고 그 기울기가 감소하는 경우도 있다. 이러한 경우 점성계수가 감소함을 뜻하는 것은 아니고, 전기유동유체가 전기장 뿐만 아니라 전단속도비에 의해서도 그 특성이 변하기 때문인 것으로 알려져 있다[10, 11, 12]. 식 (1)과 같은 함수식으로부터 전기장의 증가와 외부에서 가해지는 전단속도비의 증가에 따른 유체의 전단응력의

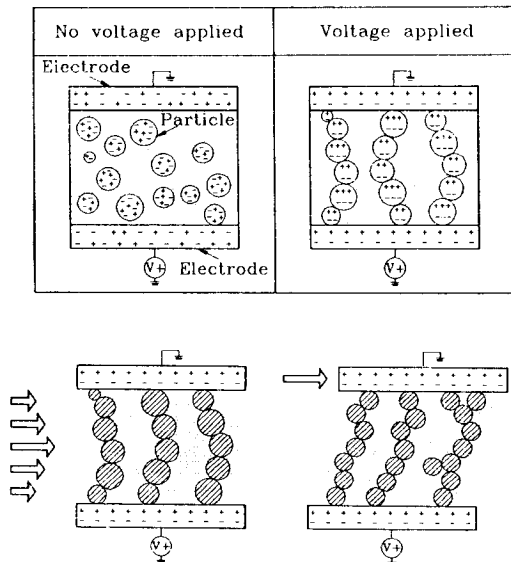


Fig. 1. Relationship between particles and electrodes.

증가 및 항복응력의 증가를 예상할 수 있으며, 본 실험의 궁극적인 목적도 이러한 관계식을 유출하는데 있다고 할 수 있다. 이러한 부하되는 전기장에 대하여 가점성(apparent viscosity)이 변하는 성질을 이용하여 자동차용 현가장치, 제진대, 엔진 마운트 등의 제어가 가능한 가변감쇠기구등 그 응용성에 대한 연구가 진행되어 오고 있다[13, 14]. 본 연구에서는 용매의 점성 계수와 용매에 대한 입자의 중량비를 달리하여 자체 조성한 4종류의 전기유동유체를 사용하였으며, 유체에 가해지는 전기장과 외부에서 가해지는 회전력을 변화시켜 부하되는 전기장과 전단속도비와의 상관관계와 용매의 점성계수 및 입자 중량비의 영향에 의한 ER유체의 역학적 특성변화를 고찰하여 전기유동유체의 항복응력과 가점성의 변화 등 응용장치 개발에 필요한 자료를 제시하고자 하였다. 또한 전기유동유체의 전장 부하에 따른 가변성을 이용한 응용 예로서 ER유체를 특징으로 하는 지능외팔보에 대해서 전기장에 따른 동탄성 변화를 실험적으로 고찰하고 그 특성을 이용하여 구조물의 진동제어에 응용한 실험을 행하였다.

2. ER유체의 역학적 거동

2.1 실험장치 및 유체 조성

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 동축실린더의 couette형으로 구성하여 자체 제작하였다. 안쪽 실린더의 직경은 20 mm이고 길

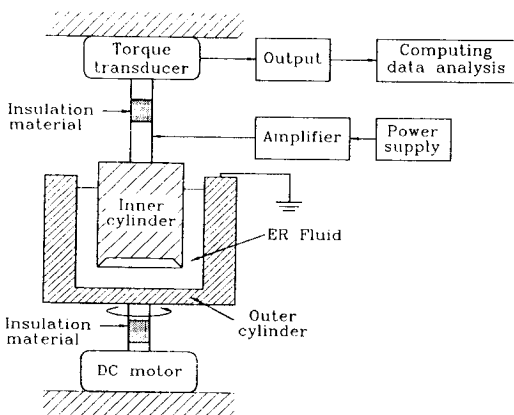


Fig. 2. Schematic diagram of the apparatus for electro-rheological measurements.

이는 45 mm이다. 바깥쪽 실린더의 내경은 22 mm 이고 길이는 50 mm로 하였다. 전기유동유체가 채워질 간극은 1 mm로 하였으며, 유체가 접하는 부분의 길이는 45 mm로 하였다. ER유체로부터 전달되는 토크를 측정하기 위하여 안쪽실린더의 상부에 스트레인게이지를 부착하였는데 순수 비틀림이 작용하는 것으로 가정하여 휘스톤브리지를 형성하였다. 또한 전기장 부하시 전기장의 스트레인 게이지에 대한 영향을 없애기 위하여 안쪽실린더의 중간 부분에 고장력FRP를 사용하여 절연하였다. ER유체에 전기장을 가하기 위하여 안쪽 실린더의 절연체 아래 부분과 바깥쪽 실린더에 전극부를 만들어 전기장을 형성할 수 있게 하였다. 또한, 주변기기에 대한 전기장의 영향을 고려하여 모터와 바깥쪽 실린더 사이에도 절연을 시켰고, ER유체에 회전력을 가하기 위하여 DC 모터를 사용하였다. 형성된 전극을 통하여 0~2.5 kV/mm의 전기장을 가하면서 바깥쪽 실린더를 회전시켜 간극사이에 채워진 ER 유체로부터 전달되는 토크를 측정하여 유체의 전단력으로 환산하였다. 자체제작한 실험장치의 신뢰성을 검토하기 위하여 전기장 무부하시에 대하여 기존의 상용 viscometer(VT500, HAAKE)와 비교 실험하여 그 결과를 보정하였다.

본 실험에서는 비전도성의 실리콘 오일을 용매로 하여 전도성의 입자를 용매에 대한 중량비를 달리한 ER11, ER12, ER21, ER22의 4가지의 전기유동유체를 자체 조성하여 실험을 행하였다. ER유체에 있어 입자의 영향 및 용매의 점성계수 영향을 고려하기 위하여 용매에 대한 입자의 중량비를 다르게 하였으며, 용매의 점성도 달리하였다. 각각의 조성내역은 Table 1에 나타내었다.

실험 조건으로써 전기장은 0~2.5 kV/mm까지 0.5 kV/mm씩 증가시켰으며, 바깥쪽 실린더를 0~500 rpm까지 50 rpm씩 단계별로 증가시켜 ER유체의 역학적 특성을 고찰하였다. 또한, 실험의 오차를

Table 1. ER fluid specifications

Viscosity of solvents(cs)	100		50	
Classification	ER11	ER12	ER21	ER22
Particle concentration (w/o)	30	40	30	50

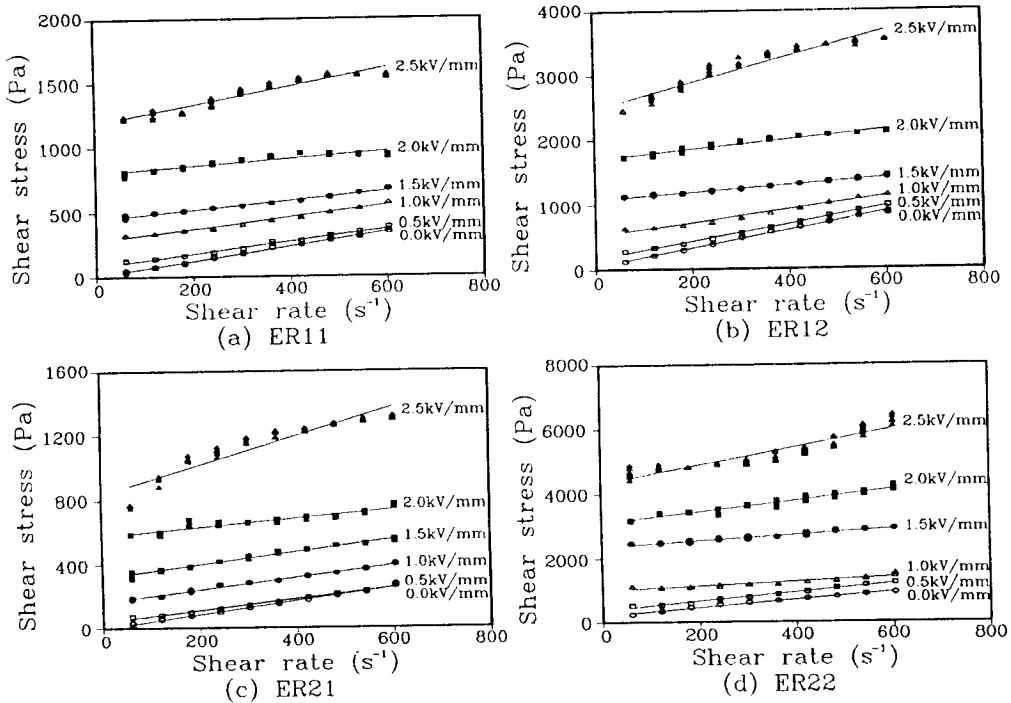


Fig. 3. Shear stress vs. shear rate.

줄이기 위하여 같은 조건에 대하여 6번씩 반복 측정하였고 그 평균값을 이용하여 직선보간하였다.

2.2. 실험결과 및 고찰

자체조성한 ER유체의 역학적 거동을 비교하기 위하여 부하되는 전기장의 크기와 가해지는 전단속도비의 크기를 변화시켜 가면서 그 현상을 고찰한 내용은 다음과 같다. 전기장의 크기를 변화시켰을 때 전기유동유체의 전단속도비와 전단응력의 관계를 Fig. 3에 도시하였으며 전기유동유체 ER11의 경우를 Fig. 3의 (a)에 도시하였다. 그림에서 보듯이 0 ~ 2 kV/mm까지는 전기장의 크기가 증가할수록 ER유체의 동일한 전단속도비에 대한 전단응력의 크기가 증가하는 것을 알 수가 있으며, 일정한 전기장의 크기에 대하여 유동이 시작된 후에는 전단응력과 전단속도비와의 크기가 전기장 무부하시의 경우와 유사한 비율로 증가함을 나타내고 있다. 그러나 2.5kV/mm의 전기장의 경우에는 전단응력과 전단속도비의 비가 약간 다른 양상을 나타내고 있다. 이는 낮은 전단속도비 영역에서의 높은 전기장에 의한 유체의 모서리부 영향(edge effect)의 증대와,

높은 전기장에 의하여 입자가 과도하게 뭉쳐지는 현상에 기인한다고 생각된다. ER11의 경우 식 (1)과 같이 표현하면 이때의 항복응력은 전기장 E 에 대하여 $E^{1.69}$ 의 비례관계를 갖고 증가하며 각각의 전기장에 대한 전단력과 전단속도비의 평균적인 기울기는 0.47의 값을 나타낸다. 전기장 증가에 따른 전단력의 분포는 무부하시의 ER유체의 특성과 거의 유사하지만 전단속도비가 증가함에 따라 기울기가 감소함을 볼 수 있는데 이는 전기유동유체가 전기장만의 함수가 아니고 전단속도비에도 영향을 받음을 나타내고 있다. Fig. 3의(b)는 Fig. 3의 (a)와 동일한 점성을 갖는 용매에 대하여 입자의 중량비가 40%인 ER12에 대하여 동일한 조건으로 실험한 결과를 도시한 것이다. Fig. 3의 (a)에서와 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. 이 경우에도 역시 2.5 kV/mm에서는 기울기가 다른 양상을 나타내고 있다. ER12의 경우는 전기장에 대하여 $E^{1.64}$ 의 비율로 항복응력이 증가하고 각 전기장에 대한 전단력과 전단속도비와의 기울기는 평균적으로 1.17의 크기를 나타내고 있으며 입자의 중량비가 증가함으로써 항복응력이 증가함을 알 수 있다. ER11과 ER12의 실

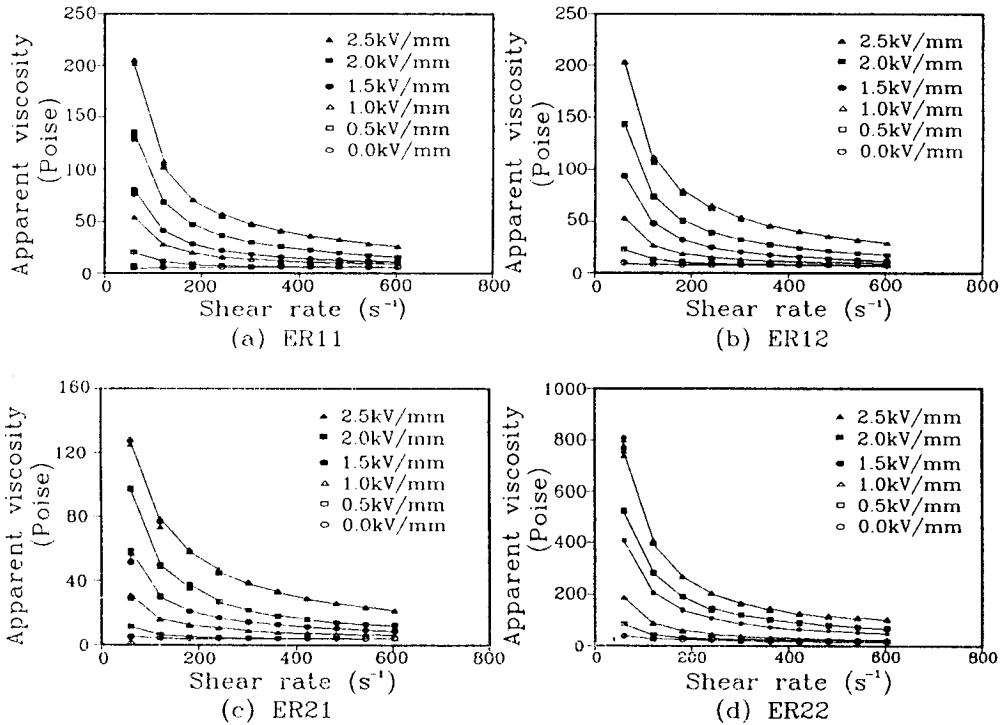
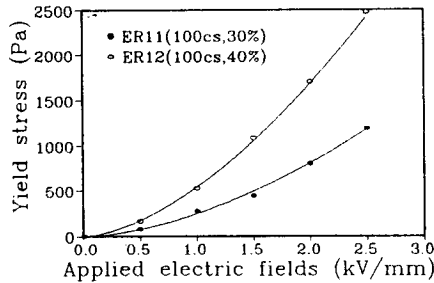


Fig. 4. Apparent viscosity.

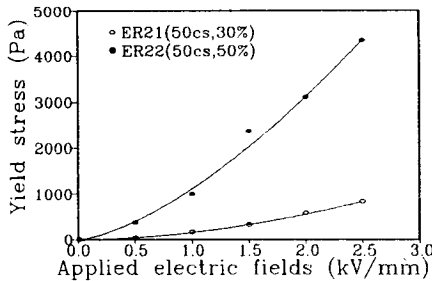
험결과에서 나타난 바와 같이 같은 용매라 할지라도 입자 중량비의 값이 클수록 큰 기울기를 가지며, 동일한 전단속도비에 대하여 큰 전단응력의 분포를 갖게 됨을 알 수 있다. Fig. 3의 (c)는 앞서 고찰한 경우와는 용매의 점성이 다른 ER21에 대하여 전단력과 전단속도비를 도시한 것이다. 그림에서 보듯이 ER11, ER12의 경우와 유사하게 전기장 부하의 증가와 더불어 항복응력이 증가함을 나타내고 있으며, 일단의 유동이 시작된 후에는 거의 같은 비율로 증가함을 알 수 있다. ER21의 경우는 전기장 E에 대하여 항복응력이 $E^{1.85}$ 의 비율로 증가하며, 각각의 전기장에 대한 평균기울기는 약 0.46이다. ER11과 비교하여 볼 때 각각의 전기장에 대하여 나타나는 항복응력의 크기는 작지만 그 증가율은 훨씬 크다. ER22의 전단력과 전단속도비의 관계는 Fig. 3(d)에 도시하였다. ER22의 경우도 부하 전기장의 증가에 따라 전단응력과 전단속도비의 관계가 선형적으로 증가함을 나타내고 있다. 이 경우 ER유체의 전기장에 대한 항복응력의 관계는 식 (1)과 같이 표현할 경우 전기장 E에 대하여 $E^{1.62}$ 의 관계로 전단력이 증가한다. 전단력에 대한 전단속도비의 평균적인

기울기는 약 1.44 정도이다. ER21과 ER22도 앞서의 경우와 같이 입자의 중량비가 커질수록 유체의 전단응력이 증가함을 알 수 있다. 또한, 용매의 점성보다는 입자의 중량비가 ER유체의 역학적 거동에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

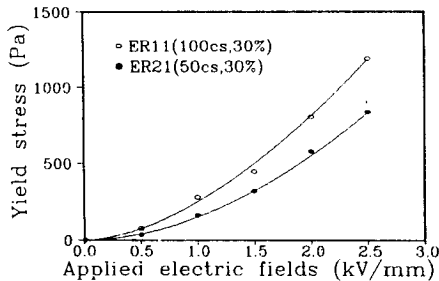
전기유동유체의 전단응력을 전단속도비로 나누어 가점성(apparent viscosity)과 전단속도비와의 관계를 Fig. 4에 도시하였다. 그림에 도시된 바와 같이 전기장 무부하 시에는 가점성이 일정한 Newtonian의 거동을 보이지만 부하되는 전기장의 강도가 증가됨에 따라 낮은 전단속도비의 영역에서는 전기유동유체의 항복응력 증가에 따라 급격한 기울기의 변화를 보이고 있다. 전단속도비가 증가함에 따라 기울기가 점차적으로 완만하게 되어 전기장 무부하 시의 기울기와 유사한 기울기로 감소하고 있다. Fig. 4에 도시된 바와 같이 실험에 사용된 모든 전기유동유체가 이제까지 알려져 온 ER유체의 Bingham 거동을 매우 잘 표현하고 있다. 전기유동유체의 전기장의 크기와 항복응력과의 관계를 Fig. 5에 도시하였다. 같은 용매에 대하여 유체에 분산되는 입자의 중량비가 다른 경우 Fig. 5의 (a)와 (b)에 도



(a) different particle concentration(100cs)



(b) different particle concentration(50cs)



(c) different viscosity of base oil (30%)

Fig. 5. Comparison of yield stress.

시하였다. 입자의 중량비가 30%인 ER11의 경우보다는 40%의 중량비를 갖는 ER12가 큰 항복응력을 나타냄을 알 수가 있다. Fig. 5의 (b)는 용매의 점성이 50 cs이고 입자의 중량비가 각기 다른 경우에 대하여 전기장과 유체의 항복응력과의 관계를 도시한 것이다. 이 경우 역시 용매에 대한 입자의 중량비가 증가할수록 같은 강도의 전기장의 부하에 대하여 큰 항복응력을 나타냄을 고찰할 수 있다. 동일한 입자 중량비를 가지나, 용매의 점성이 다른 ER11과 ER21의 부하되는 전기장과 항복응력의 관계를 Fig. 5의 (c)에 도시하였다. 그럼에 나타난 바와 같이 용매의 점성이 큰 ER11(100 cs)이 용매의 점성이 낮은 ER21(50 cs)보다 동일한 전기장에 대하여 높은 항복응력을 보임을 알 수가 있다. Fig. 5에서

Table 2. Relationships between the applied electric field and the yield stress

Type	Liquid viscosity (cs)	Particle concentration (w/o)	Yield stress
ER11	100	30	$\tau_y(E) = 250E^{1.69}$
ER12	100	40	$\tau_y(E) = 544E^{1.64}$
ER21	50	30	$\tau_y(E) = 151E^{1.85}$
ER22	50	50	$\tau_y(E) = 1064E^{1.62}$

보는 바와 같이 용매의 점성 보다는 입자 중량비가 ER유체의 특성변화에 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 실험에서 얻은 각각의 전기유동유체에 대하여 전기장의 크기 변화에 따른 항복응력의 관계를 Table 2에 나타내었다.

이상에서 고찰한 바와 같이 ER유체의 특성 변화에 영향을 미치는 인자로는 전기장의 크기 뿐만 아니라 입자의 농도, 용매의 점성 등도 매우 중요하다는 사실을 알 수가 있다. 따라서 향후 ER유체를 이용한 응용장치 개발시 전장에 따라 요구되는 ER유체의 항복응력 도출을 위해 최적의 특성매개변수를 적절히 조합해야 할 것으로 판단된다.

3. 구조물 진동제어 응용

앞서 고찰한 전기장의 크기에 따른 전단력의 가변 특성은 자동차 관련 산업분야와 항공산업분야 등에 있어서 잠재적 응용성을 제시해 주고 있다. 이러한 연구에 대하여 이미 1980년대 초반부터 미국, 일본, 영국, 러시아를 비롯한 여러 선진국에서 활발한 투자가 이루어지고 있는 실정으로, 그 응용성에 기초하여 구체적으로 실험된 시스템을 살펴 보면 클러치, 브레이크 등의 토르크 트랜스미션 부분과 자동차용 현가장치, 엔진 마운트, 유압밸브 시스템 등이 있으며, 특히 자동차 부품 관련 분야에서 많은 진전을 이루고 있다. 이러한 응용 예로서 본 연구에서는 ER유체를 특징으로 하는 지능외팔보에 대하여 전기장 변화에 따른 진동응답특성의 변화와 제어성에 대하여 실험하였다.

3.1. 시편제작 및 실험장치

전기유동유체의 진동제어 응용에 대한 가능성을 입증하기 위하여 본 연구에 사용된 지능구조물은

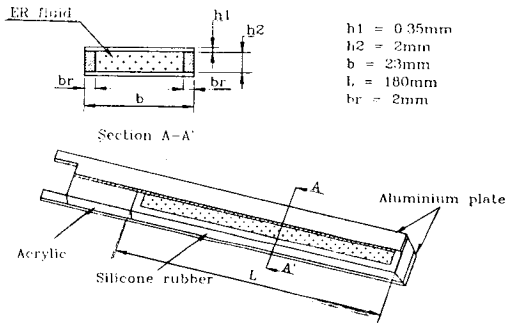


Fig. 6. Schematic diagram of the beam specimen.

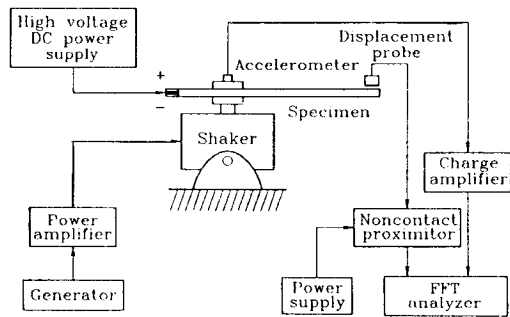


Fig. 7. Experimental setup for vibration control.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 두 개의 알루미늄판과 실리콘 고무, 아크릴로 이루어져 있다. 알루미늄판은 전도체로서 전극의 역할을 하고 실리콘 고무는 ER 유체를 담아두는 봉입체의 역할을 한다. 또한 아크릴은 구조물을 고정구에 지지시켜주기 위하여 사용하였다. 실험에 사용된 구조물의 외형치수는 다음과 같다. 전기유동유체가 채워진 길이는 180 mm로 하였고, 구조물의 폭은 23 mm, 전기유동유체가 담겨지는 두께는 2 mm로 하였다. ER유체의 체적비는 50%로 하였다. 여기서 체적비는 알루미늄판을 포함한 구조물 전체 체적에 대해서 ER유체가 차지하는 비를 뜻한다. 실험방법은 Choi[15] 등이 행한 것과 동일한 방법을 사용하여 Fig. 7과 같이 구조물을 셰이커 위에 고정시키고, 셰이커를 진동시켜 이때 발생하는 구조물의 변위를 비접촉식 변위기를 통하여 측정하였다. 이 변위기로부터 나오는 신호는 주파수 분석기(FFT analyzer)를 사용하여 주파수 영역에서 분석하였다. 구조물을 셰이커에 고정시킨 후 전기장을 0.5와 1.5 kV/mm 두가지로 변화하여 구조물에 전기장을 형성시키고 랜덤가진(random ex-

tation)에 의해서 나타나는 주파수 영역을 분석하여 각 전기장 강도에 해당하는 감쇠고유진동수(damped natural frequency) 변화를 고찰하였다. 구조물의 진동제어를 위한 제어기를 설계하기 위하여 우선 제안된 외팔보의 경우 첫번째 모드가 지배적인 것으로 가정하여 1자유도계로 모델상사하였다. 자유진동상태에서의 지배방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$m_e \ddot{x} + c\dot{x} + k_e x = 0 \tag{2}$$

여기서 x 는 변위, m_e 는 등가 질량(effective mass), c 는 점성 계수, k_e 는 등가 스프링 강성 계수(effective stiffness)이다. 본 연구에서 제시된 외팔보의 경우는 저감쇠계이므로 식 (2)의 해는

$$x(t) = x_0 e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) \tag{3}$$

가 된다. 여기서 $\xi = c/c_c$, $\omega_n^2 = k_e/m_e$, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$ 이다.

지배방정식 (2)를 현상학적으로 전기장 부하시 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{x}(t) + 2\xi(E)\omega_n(E)\dot{x}(t) + \chi_0^2 x(t) = -2\xi(E)\omega_n(E)\dot{x}(t) - \omega_n^2(E)x(t) \tag{4}$$

여기서 ξ_0 와 ω_n 는 전기장 무부하시 감쇠비 및 고유주파수이며, $\xi(E)$ 와 $\omega_n(E)$ 는 전기장 부하시 이들 변수의 변화된 값을 나타낸다. 식 (4)는 기존의 비례미분제어계와 동일한 형태로서 오른쪽 항을 가제어력(pseudo-control force)으로 하여 임의의 전기장이 가해진 상태에서의 진동특성을 예측할 수 있다. 가제어력을 전기장의 크기 E 의 함수로 나타내기 위한 구조물의 강성 및 댐핑의 증가와 부하되는 전기장 사이의 관계는 실험을 통하여 구할 수 있으며, 전기장 무부하시에 대한 전기장 부하시의 고유주파수와 감쇠비의 증가를 분석하여 식 (4)의 가제어력을 아래와 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{\xi(E)\omega_n(E)}{\xi_0\omega_n} = \alpha_1 E$$

$$\frac{\omega_n^2(E)}{\omega_n^2} = \alpha_2 E \tag{5}$$

여기서 α_1 과 α_2 는 전기장 무부하시와 전기장 부하시 구조물의 전기장에 의한 특성변화에 대한 상수로서

실험을 통하여 구할 수 있다. 따라서 식 (5)를 식 (4)에 대입하여 그 결과를 상태방정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2\xi_0\omega_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (6)$$

여기서

$$\begin{aligned} u &= -\beta Kx_1 - Kx_2 \\ K &= 2\alpha_1\xi_0\omega_0 E \\ \beta &= \alpha_2\omega_0/2\alpha_1\xi_0 \end{aligned} \quad (7)$$

전기장의 함수로 표현된 피이드 백 게인 K를 적절히 이용함으로써 원하는 진동응답을 나타내는 시스템을 얻을 수 있다. 원하는 시스템의 지배방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{d1} \\ \dot{x}_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{dn}^2 & -2\xi_d\omega_{dn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{d1} \\ x_{d2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

시스템(6)의 특성은 실제적으로 시스템에 공급되는 전기장의 크기에 의하여 좌우된다.

3.2 실험결과 및 고찰

Fig. 8은 전기유동유체에 분산된 입자의 중량비가 각기 다른 구조물에 대하여 전기장의 크기를 변화시켰을 경우 구조물의 주파수 응답 특성을 도시한 것이다. 전체적으로 전기장의 크기가 증가함에 따라 고유진동수의 크기가 증가하고 데시벨(dB)의 크기는 감소함을 볼 수 있다. 입자중량비가 30%인 구조물의 경우 전기장 무부하 시에는 15.25 Hz의 첫 번째 고유진동수를 나타내지만 전기장을 0.5 kV/mm로 증가시켰을 경우 고유진동수는 작은 증가를 보이나 데시벨(dB)의 변화는 거의 나타나지 않고 있다. 전기장의 크기를 1.5 kV/mm로 증가시키면 첫 번째 고유진동수는 15.75 Hz로 증가하며 데시벨의 크기도 감소한다. 첫 번째 모드에서의 감쇠비(damping ratio)를 살펴보면, 전기장 무부하시의 0.01695 감쇠비에서 1.5 kV/mm에서는 0.09649로 증가한다. 두 번째 고유진동수도 무부하시에는 55.75 Hz이고 0.5 kV/mm에서는 56.25 Hz로, 1.5 kV/mm에서는 57 Hz로 증가한다. 그러나 전체적인 변화는 매우 작아 ER효과가 매우 적음을 알 수 있다. Fig. 8의 (b)는 입자 중량비가 50%인 ER22 전기유동유

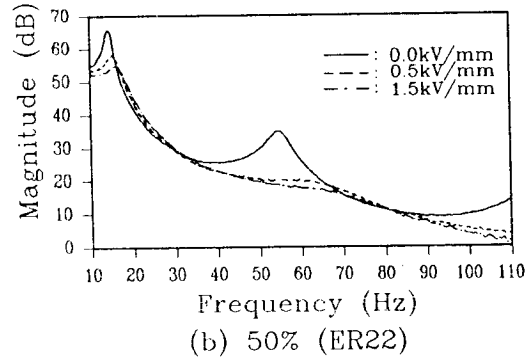
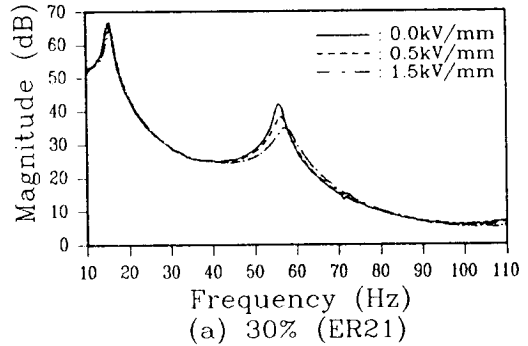
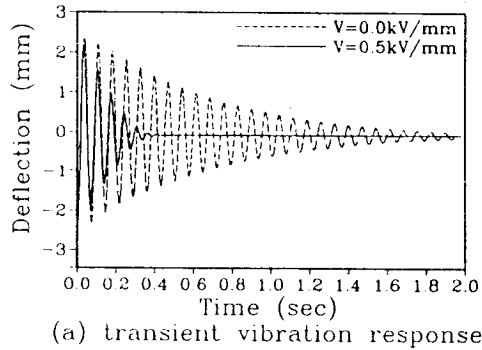


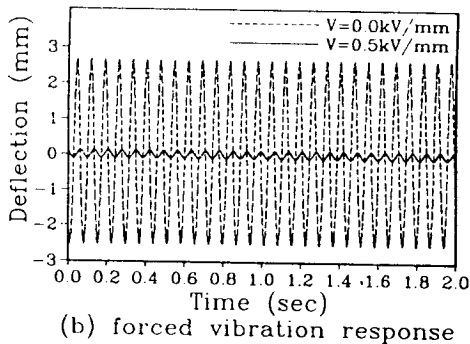
Fig. 8. Comparison of frequency variations.

체를 사용한 지능 구조물의 감쇠고유진동수 변화율도 시한 것이다. 전기장의 무부하시에는 14.25 Hz의 고유진동수가 전기장의 강도를 0.5 kV/mm로 증가시키면 첫 번째 고유진동수는 15.25 Hz로 증가하고 두 번째 모드의 변화는 매우 커 모드점을 분별할 수 없게 된다. 1.5 kV/mm의 전기장 강도에 대해서도 0.5 kV/mm의 경우와 거의 유사한 양상을 보이며 첫 번째 고유진동수는 16 Hz 정도로 증가한다. ER 유체를 구성하는 입자의 중량비가 커질수록 전기장 부하에 대한 고유주파수의 증가율이 커져 넓은 범위의 제어 영역을 줄 수 있음을 알 수 있다.

이와 같이 부하되는 전기장의 크기에 따라 구조물의 고유진동수 및 감쇠계수 등의 진동특성이 변하는 성질과 식 (6)~(8)을 이용하여 구조물의 진동 응답을 우리가 원하는 특성으로 제어할 수 있다. Fig. 9는 구조물의 과도 진동 응답과 강제 진동 응답의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 9의 (a)에 도시된 바와 같이 과도 진동의 경우 전기장 무부하시 구조물이 감쇠하여 정상상태로 되는데는 약 2초 이상의 시간이 소요되는데 반하여 식 (6)에서 제어기 u에



(a) transient vibration response



(b) forced vibration response

Fig. 9. Vibration responses of the beam (ER22).

포함된 피이드 백 게인 K 를 단지 전기장의 크기만으로 조절할 수 있으므로 0.5 kV/mm 의 전기장을 부하시키면 정상상태로 되는데는 약 0.4 초 이내의 시간이 소요됨을 알 수 있다. 부하되는 전기장의 증가에 따라 반응 시간을 더욱 짧게 할 수 있다. Fig. 9의 (b)는 강제 진동 응답의 경우를 도시한 것으로서 전기장 무부하시 구조물 끝단에서 2.54 mm 의 변위를 갖도록 가진력을 가한 경우와 0.5 kV/mm 의 전기장을 형성시킨 후 동일한 가진 주기로 가진한 경우를 비교한 것이다. 전기장을 가함에 따라 구조물의 댐핑과 강성이 증가하여 구조물 끝단에서의 변위는 0.2 mm 정도로 감소하였다. 이와 같이 부하되는 전기장의 강도를 변화시킴으로써 구조물의 진동변위를 조절할 수 있음을 알 수 있다. 전기유동유체의 이러한 성질을 이용하여 외부의 가진 주파수에 따라 알맞은 혹은 최적의 on-off 형태의 전기장을 공급함으로써 구조물의 공진 현상을 피할 수 있는 진동 제어 효과를 얻을 수 있다.

4. 결 론

본 실험을 통하여 자체조성한 전기유동유체가 부하되는 전기장의 크기에 따라 전단력이 증가하는 Bingham 거동의 양상을 보임을 확인할 수 있었으며, 각 ER유체에 대하여 전기장에 대한 전기유동유체의 항복응력 관계식을 도출할 수 있었다. 그리고 전기장의 증가 뿐만이 아니라 입자의 중량비, 용매의 점성계수도 ER유체의 역학적 거동에 많은 영향을 미침을 알 수 있었다. 또한, 전기유동유체의 가변특성을 이용한 구조물 진동 제어 응용의 실험 결과를 통하여 전기장의 증가와 더불어 감쇠 고유진동수와 댐핑이 증가함을 살펴보고, 고유진동수와 감쇠계수가 변하는 특성을 이용하여 구조물의 진동을 매우 빠른 응답속도로 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 가해지는 외부의 가진 조건에 따라 적절한 전기장을 공급함으로써 진동제어 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 본 연구결과를 토대로 좀 더 많은 경우에 대한 ER유체의 역학적 특성 연구가 수행되어야 할 것이며, 이와 병행하여 전기장 부하에 대하여 전단응력이 변하는 성질을 이용한 많은 응용제어장치의 개발이 연구되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구의 일부는 1993년도 인하대학교 학술연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

기 호

c	: damping coefficient
c_c	: critical damping coefficient
E	: electric field
k_e	: effective stiffness
K	: feedback gain
m_e	: effective mass
u	: controller
x	: displacement
x_1, x_2	: state variable
x_{d1}, x_{d2}	: desired state variable
x_o	: amplitude
α_1, α_2	: experimentally determined constant
$\dot{\gamma}$: shear rate
ξ	: damping ratio
ξ_d	: desired damping ratio

- ξ : damping ratio in the absence of the electric field
 $\xi(E)$: damping ratio variation due to the imposed electric field
 η : viscosity of solvent
 η : shear stress
 $\tau_y(E)$: yield stress
 ϕ : phase angle
 ω_d : damped natural frequency
 ω_{dn} : desired (undamped) natural frequency
 ω_n : undamped natural frequency
 ω_n : undamped natural frequency in the absence of the electric field
 $\omega_n(E)$: natural frequency variation due to the imposed electric field

참고문헌

1. W.H. Winslow, *J. Applied Physics*, **20**, 1137 (1949).
2. H. Block and J.P. Kelly, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **21**, 1661 (1988).
3. T.C. Jordan, *IEEE Transaction on Electrical Insulation*, **24**(5), (1989).
4. Z.P. Shulman, B.M. Khusid, E.V. KorobKo, and E.P. Khizhinsky, *J. of Non-newtonian Fluid Mechanics*, **25**, 329 (1987).
5. D.A. Brooks, J. Goodwin, C. Hjelm, L. Marshall, and C. Zukosky, *J. Collid. Sur.*, **18**, 293 (1986).
6. T.C.B. McLeish and M.T. Shaw, *J. Rheology*, **35**, 427 (1991).
7. W.Wong and M.T. Shaw, Proceedings of the Second International Conference on ER Fluids, pp. 191~195, 1990.
8. Y.Z. Xu and R.F. Liang, *J. Rheology*, **35**(7), 1355 (1991).
9. Y. Otsubo, M. Sekine, and S. Katayama, *J. Rheology*, **36**(3), 479 (1992).
10. D.A. Brooks, Proceedings of the Second International Conference on ER Fluids, pp. 371~401, 1990.
11. T.C. Halsey and W. Toor, *Phys. Review L.*, **65**, 2820 (1990).
12. M. Seed, G.S. Hobson, and R.C. Tozer, Proceedings of the Second International Conference on ER Fluids, pp. 214~230, 1990.
13. S. Morishita and J. Mitsui, *J. JSME*, **58**, 2045 (1991).
14. S. Morishita and J. Mitsui, *J. JSME*, **58**, 1748 (1991).
15. S.B. Choi, B.S. Thompson, and M.V. Gandhi, *Composites*, **2**(5), 543 (1992).