

아라빅 검 성분의 ER유체에 대한 내구성 평가

Durability Estimation for ER(Electro-Rheological) Fluids of Arabic Gum Components

김옥삼 · 박우철

O. S. Kim and W. C. Park

Key Words : Electro-Rheological Fluids(전기유동유체 : ER유체), Durability Estimation(내구성 평가), Arabic Gum Component(아라빅 검 성분), Electric Field(전기장), Dynamic Yield Stress(동적 항복응력), Surface Roughness(표면 거칠기)

Abstract : Electro-Rheological(ER) fluids undergo a phase-change when subjected to an external electric field, and this phase-change typically manifests itself as a many-order-of magnitude change in the rheological behavior. This paper presents experimental results on material properties for an ER fluids of arabic gum components subjected to electrical fatigues. As a first step, ER fluids are made of arabic gum 25% of particle weight-concentration. Following the construction of test mechanism for estimated durability of ER fluid, the dynamic yield stress, shear stress and current density of the ER fluids are experimentally distilled as a function of DC electric field. The durability estimation of operated ER fluids are distilled and compared with those of unused ER fluids. In addition, the surface roughness of the employed electrode for copper and aluminum are evaluated as a function of the number of the electric-field cycles.

1. 서 론

산업 현장에서 사용하고 있는 기존 유압시스템은, 기계적 장치에 의해 밸브를 개폐하기 때문에 시스템의 응답성능 저하가 불가피하다. 유압 시스템의 기본적 메카니즘에서 야기된 응답성능 저하는, 기계의 고속화와 고 정밀화에 걸림돌로 작용하고 있다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위한 노력의 일환으로, 기계요소의 설계변경이나 피드백(feedback) 제어와 연계된 서보시스템에 관한 연구가 수행되고 있다¹⁾. 아울러 새로운 개념의 유압 서보기구 모색과, 기능형 신 소재 재료인 전기유동(Electro-Rheological:ER) 유체를 이용한 유압 밸브 시스템에 관심이 모아지고 있다²⁾. 구체적인 예로 ER유체의 특성을 이용한 현가장치, 제진대, 엔진 마운트 등 자동제어가 가능한 가변 감쇠기구와 지능형 구조물(smart structure)들을 자동차 및 군수 산업분야에서 활발하게 개발하고 있다^{3~6)}.

Nakano⁷⁾ 등은 평판형 밸브를 통과하는 ER유체를 Hagen-Poiseuille흐름으로 해석하고, 전기장 부과 시 압력강하에 대한 과도응답과 ER유체의 압축성 효과를 연구하였다. Whittle⁸⁾ 등은 전기장 부과에 따른 압력강하 응답특성으로부터 선형 밸브시스템을 해석하였으며, 결과의 타당성을 실험으로 입증하였다. 국내에서도 ER댐퍼의 감쇄력에 미치는 ER유체 재료특성을 규명한 노력이 있었다⁹⁾. 그러나 기능성 소재인 ER유체를 산업현장에 활용되는 실용장치에 적용하기 위해서는 미세적 작동 메카니즘, 부과되는 전기장 강도와 상관성, 마모와 열화 및 침전현상 등 해결해야 할 문제점들이 산적해 있다.

따라서 본 연구는 아라빅 검(arabic gum) 성분의 ER유체를 지능형 구조물의 유압밸브에 적용하기 위하여, ER유체에 가하는 전기장의 사이클 수에 따른 역학적 특성 변화를 규명하고자 한다. 아울러 아라빅 검 성분 ER유체의 기계적 내구성 평가를 하고, 향후 응용장치의 설계에 필요한 제반 기초자료를 마련하고자 한다.

접수일 : 2001년 4월 21일

김옥삼 : 여수대학교 기계공학과

박우철 : 삼척대학교 자동차공학과

2. ER유체의 거동

ER유체의 특징은 전기장 무부과 상태에서는 액체로 존재하지만, 부과 시에는 반 고체상태로 상변화를 하는 것이다. 전기장을 부과하면 ER유체 중에 분산된 입자가 유도분극(induction polarization)을 일으켜 전기장과 평행한 방향으로 섬유상 구조의 체인을 형성함으로써, 유체의 이동이나 외부에서 가해지는 힘에 저항력을 보유하게 된다. ER유체는 부과되는 전기장 크기에 따라서 항복응력과 점성이 변하고, 응답속도는 1~5 ms 정도로 가역적 반응을 나타내며 연속적으로 제어할 수도 있다.

ER유체를 미시적 관점으로 보면 전기장을 부과하지 않을 때는, 입자가 양쪽 전극사이에서 자유로이 유동을 하기 때문에 뉴턴유체(Newton fluid) 같이 등방성(isotropic) 거동을 한다. 그러나 전기장을 부과하면 유체 중에 분산된 입자가 전극을 향하는 다수의 섬유상 조직과 같은 클러스터(cluster)를 형성하며, 클러스터 입자들의 결집으로 전극 직각방향으로 이방성(anisotropic) 유동성질을 갖게 된다. 전기장 부과 시에 형성된 클러스터들에 의해 항복응력 이하에서는 유동이 없으나, 외부에서 가해지는 전단력이 그 이상으로 커지면 Fig. 1과 같이 빙햄(Bingham)유체 유동을 한다.

3. 실험장치 구성

3.1 실험장치

ER유체 유동에 따른 클러스터의 거동, 전기장 크기 변화에 따른 입자들의 클러스터 형성과정 및 클러스터들의 모양을 관찰하기 위하여 Fig. 2와 같은 장치를 구성하였다. ER유체의 유동특성을 파악하기 위한 장치는 현미경, 자료를 저장할 수 있는 펜티엄급 컴퓨터, VCR, 캠코더 및 직류 전기장을 형성할 수 있는 평판 전극으로 구성하였다. 사용된 광학현미경은 일본 MEIJI사의 모델 RM-TH7-10 20223이다.

아라빅 검 성분의 ER유체에 대한 기계적 특성과 내구성 변화를 평가하기 위하여, Photo. 1과 같은 실험장치를 제작하였다. ER유체가 담겨져 있는 ER실린더는 ER댐퍼와 유사한 내부구조로 설계하였으나, 제작과 실험의 편의성을 위하여 가스실은 설치하지 않았으며, 양 로드형의 피스톤을 설치하여 ER유체의 유동성을 유발하였다. 내부 피스톤 운동은 크랭크 구동 방식을 채택하여, DC모터(reel motor, Sanyo)에 의한 회전운동을 피스톤의 직선

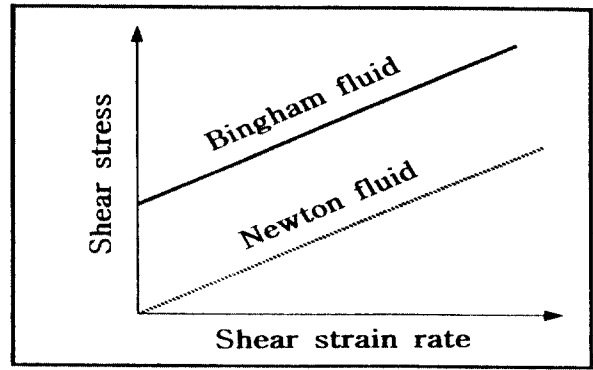


Fig. 1 A Bingham fluid model for isothermal constitutive behavior of a typical ER fluid

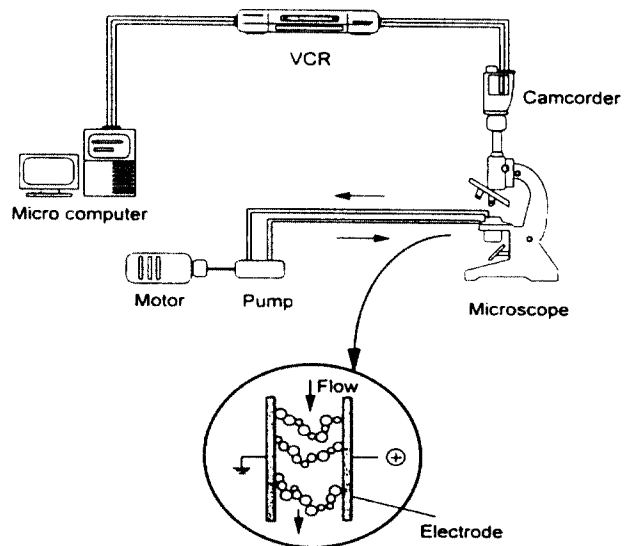


Fig. 2 Experimental apparatus for observation of initial flow of ER fluid

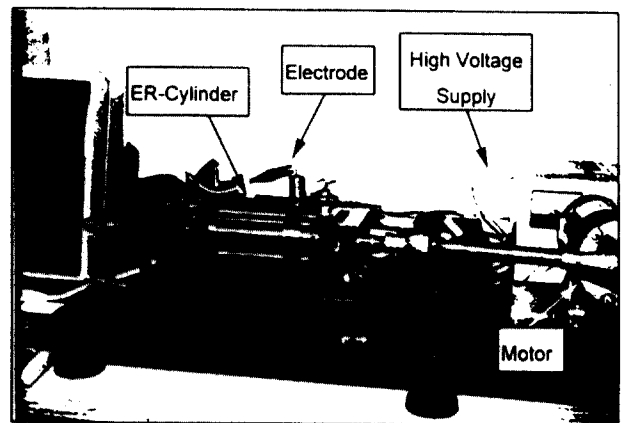


Photo. 1 The experimental apparatus for the mechanical durability test

운동으로 전환시켰다. 장치 운동부와 반복적인 전기장 부과의 영향을 살펴보기 위하여, 내부실린더

와 외부실린더 사이의 유로에 직류 전기장을 형성시켰다. 장치에 ER유체를 순환시키기 위하여 1회 전 당 1.7 cc 용량의 기어펌프를 설치하였다. 바깥쪽 실린더내경 $\Phi 23$ mm, 안쪽 실린더직경 $\Phi 21$ mm로 하여 유로의 역할과 ER유체에 전기장을 형성하기 위한 간극은 1mm이다.

3.2 아라빅 검 성분의 ER유체

실험에 사용된 아라빅 검 성분 ER유체는 분자량이 240,000 정도, 밀도는 1.35~1.49 g/ml(20°C)인 ITA25이며, 용매에 대한 입자의 중량비는 25%이다. 비전도성의 용매는 트랜스포머 오일(transformer oil)이고, 입도 분석기(Particle sizer analyzer 22, Fritsch)로 측정된 입자크기는 평균 22.4 μm 이다.

3.3 실험방법

60만 사이클이 부과되는데 약 55.6 시간이 소요되었다. 매회 지정된 사이클 이후 ER유체를 수거하여, 동적 항복응력 및 전류밀도 양상 등을 측정하였다. ER유체에 부과하는 직류 전기장은 0.5 kV/mm ~ 3 kV/mm까지 0.5 kV/mm씩 증가시켰고, ER유체에 외력을 가해주기 위하여 전단속도비는 0~700 s^{-1} 범위 내에서 안쪽실린더를 회전시켰다.

아울러 전극 재질은 구리와 알루미늄을 이용하였다. 전극표면의 거칠기 정도를 일정하게 하기 위하여 전극표면은 1200번 샌드페이퍼를 사용하여 전식으로 연마하였다. 실험을 완료한 후 사용된 전극을 회수하여, 전극표면의 형상변화와 표면의 중심선 평균거칠기(Ra)를 측정하였다. 전극표면의 외관 변화는 금속현미경으로 관찰하였고, 표면거칠기 측정기(Surftest 402, Mitutoyo)의 도움을 받아 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 온도에 따른 Bingham특성 변화

온도변화에 따른 아라빅 검 성분 ER유체의 동적 항복응력의 거동을 Fig. 3에 나타냈다. 동적 항복응력은 유체에 유동이 발생하는 순간의 전단력을 나타내는데, 복잡한 거동 때문에 정확히 측정하는 것은 어려운 문제이다. 따라서 많은 연구가⁷⁾ 들은 전단속도비에 대한 전단력의 값을 직선 보간하여, 전단속도비의 값이 영(zero)인 부근의 절편값을 사용하였다. 따라서 본 연구도 이 값을 동적 항복응력 값으로 취하였다. 그림에 도시된 바와 같이

온도가 상승함에 따라 동적 항복응력의 크기가 증가하고 있다. 전기장의 세기가 높을수록 온도변화에 따른 동적 항복응력 변화구배가 크게 나타나고 있다. 이는 ER유체의 온도가 상승함에 따라 입자의 움직임이 활성화되어, 부과하는 전기장의 세기가 커질수록 입자들의 분극화 정도가 증대하기 때문이다. 그러나 2.5kV/mm이하의 전기장을 부과하면 65°C이상으로 온도가 상승해도 동적 항복응력의 변화는 없거나 오히려 감소하고 있는 이유는, 아라빅 검의 화학구조 변화의 천이온도 이후에 전하와 이온의 이동이 제한되었기 때문이다.

Fig. 4는 -5°C에서 85°C까지 온도변화에 따른 아라빅 검 성분 ER유체의 전류밀도 변화양상을 나타낸 것이다. 실험에 사용한 아라빅 검계 ER유체 전류밀도의 변화는 온도가 상승함에 따라 미소하게 증가하는 경향을 보여준다. 1.5kV/mm이상의 직류 전기장을 부과하면 전류밀도가 65°C이상에서는 오히

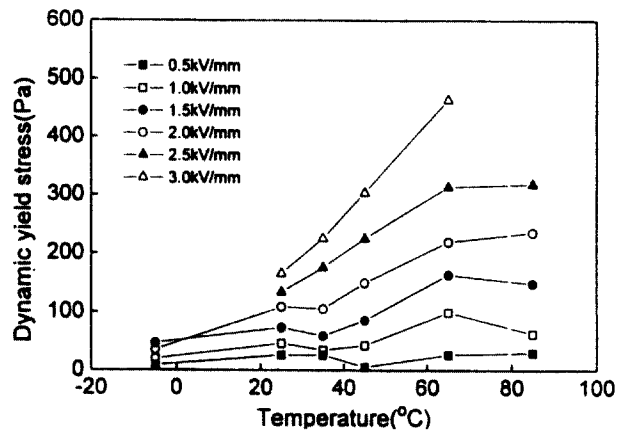


Fig. 3 Dynamic yield stress with temperature of ITA25

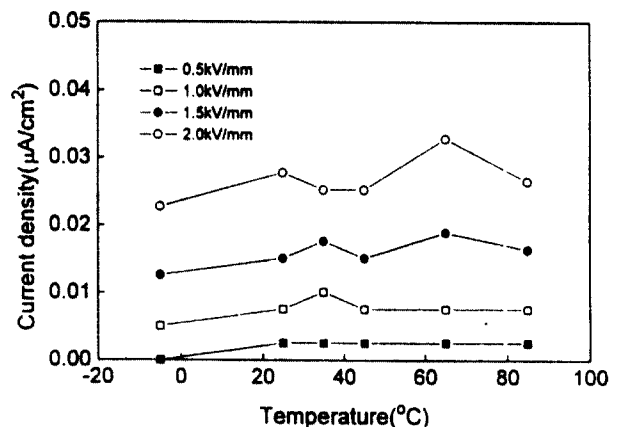


Fig. 4 Current density with temperature of ITA25

려 감소하는 현상은, 아라빅 검 성분 입자의 젤라틴화로 인하여 유동성이 감소하였기 때문으로 추측된다.

ITA25의 ER유체에 대하여 실험 이전과, 60만 사이클을 부과한 후의 전단응력 분포 양상은 Fig. 5와 같다. Fig. 5의 (a)는 사용하기 이전의 것으로, 전기장 세기가 증가함에 따라 전단응력이 비례하여 선형적으로 상승한다. 2.5 kV/mm 이상(Δ 표시)의 전기장을 부과한 경우는, 50 s^{-1} 이상의 전단속도 영역에서 전단응력의 증가하는 경향을 보여준다. 60만 사이클을 부과한 후, 실험 결과를 Fig. 5의 (b)에 나타냈다. 2.0 kV/mm 이하(\blacktriangle 표시)의 낮은 전기장에서는 실험을 하기 이전과 유사한 거동을 나타내지만, 이상의 전기장에서 전단응력 구배가 급속하게 상승하고 있다. 이와 같이 전기장 부과에 따른 전단응력 분포가 다르게 나타나는 이유는, 많은 사이클 부과에 의하여 입자들의 유도분극 세기와 입자들간 결합력이 변하였기 때문으로 사료된다.

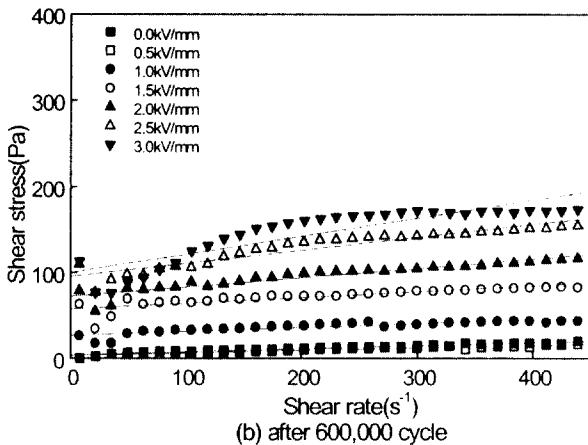
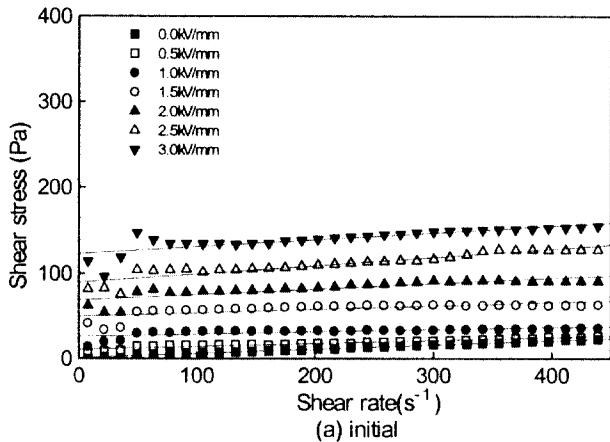


Fig. 5 Shear stress of ITA25 ER fluid for different mechanical durability test

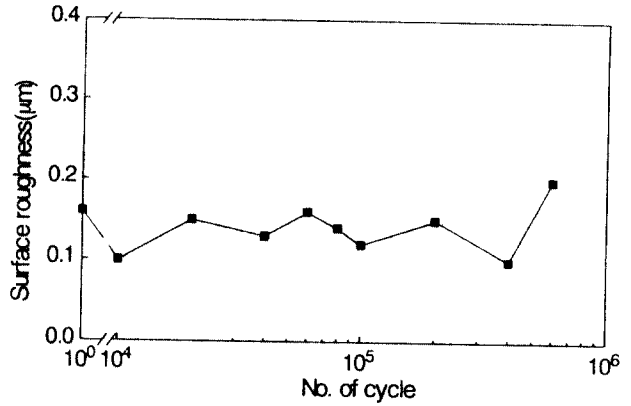


Fig. 6 Surface roughness with mechanical test of copper electrode for ITA25

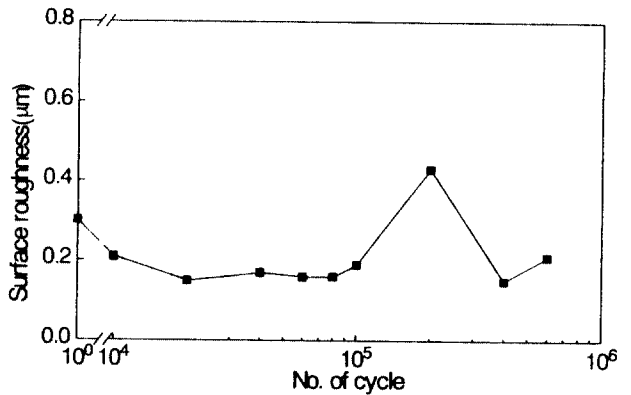


Fig. 7 Surface roughness with mechanical test of aluminum electrode for ITA25

4.2 전극의 영향

Fig. 6은 ITA25 ER유체에, 구리전극 표면의 중심선 평균거칠기(Ra) 분포를 보여주고 있다. ITA25를 사용한 경우, 전체공정에서 $0.1 \sim 0.22 \mu\text{m}$ 의 표면거칠기를 나타냈다. 40만 사이클 이후 구간에서도 표면거칠기의 요철변화가 $0.22 \mu\text{m}$ 이내로 적은 이유는 접착성이 높지 않은 ITA25가, 구리전극의 표면에 소착(燒着)되는 현상이 발생하지 않기 때문으로 사료된다.

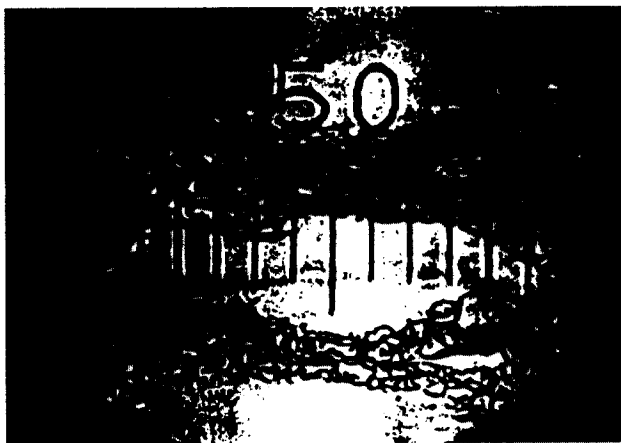
ITA25의 ER유체에 알루미늄 전극을 사용한 경우, 전극표면의 중심선 평균거칠기(Ra)는 Fig. 7과 같다. 전기장 부과 초기에는 $0.3 \mu\text{m}$ 의 표면 거칠기가 10만 사이클까지는 $0.2 \mu\text{m}$ 로 표면 거칠기가 감소하였다. 20만 사이클에서 40만 사이클의 사이클 구간에서 전기장을 반복적으로 부과하였을 때, 표면 거칠기의 요철 변화는 $0.13 \sim 0.45 \mu\text{m}$ 까지 크게 나타났다.

4.3 현미경 관찰

ITA25 ER유체의 실험 이전과 60만 사이클을 부과한 후의 현미경 사진은 Photo. 2와 같다. (a)사진에 나타난 바와 같이 전기장을 부과하지 않은 실험 이전의 아라빅 검 입자들은 22.4 μm 크기의 각이진 구형(球形)이다. 60만 사이클을 반복적으로 부과한 ER유체는 Photo. 2의 (b)와 같이 아라빅 검 성분의 입자가 분쇄되어 36~45% 감소한 크기인 평균 8~10 μm 정도로 나타났다. 이러한 입자에 3 kV/mm의 전기장을 부과하면, 실험 이전의 ER유체와 유사한 형태인 여러 개의 체인들이 모여 기동 모양의 클러스터 집단을 형성하며, 양쪽 전극에 많은 입자들이 균집하고 있다.



(a) No voltage of before the test



(b) 3kV/mm applied after 600,000 cycles

Photo. 2 The clusters of the ITA25

5. 결론

아라빅 검 성분의 ER유체에 부과되는 직류전기

장의 사이클 수에 따른 기계적 특성변화를 고찰하여, ER유체의 응용장치의 설계 및 제작 시 전극선택에 필요한 기초자료를 마련할 수 있었다.

동적 항복응력은 작동온도가 상승함에 따라 크기가 증가하며, 전기장의 세기가 클수록 항복응력의 변화가 크게 나타났다. 전류밀도는 온도가 상승함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 아라빅 검 성분의 화학구조 변화의 천이온도 이후에는 오히려 감소하고 있는데, 이것은 입자의 젤라틴화로 인하여 전하나 이온의 이동이 감소했기 때문이다. 전단응력 분포는 전기장 강도가 증가함에 따라, 선형적으로 비례 상승하는 거동을 한다. 전기장의 사이클 수에 따른 구리전극 표면의 중심선 평균거칠기 변화는 ITA25를 사용한 경우, 0.1~0.2 μm 이내에서 편차가 발생하였다. 알루미늄 전극을 사용한 경우, 20만 사이클에서 40만 사이클의 사이클 구간에서 0.13~0.45 μm 범위에서 중심선 평균거칠기의 요철 변화가 크게 나타났다. ER유체의 실험 이전의 아라빅 검 입자들은 22.4 μm 의 각이진 구형이지만, 60만 사이클을 반복적으로 부과한 후는 36~45% 크기가 감소한 결과를 나타냈다.

향후 부가가치가 높은 ER유체의 응용장치를 개발하기 위해서는, 전기장의 변화에 따라 ER효과가 보다 충실하게 반영되는 새로운 기능성의 ER유체에 관심이 요망된다.

참고문헌

1. A. R. Plummer and N. D. Vaughan, "Robust Adaptive Control for Hydraulic Servo-systems", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 118, pp. 237~244, 1996
2. D. L. Klass and T. W. Martinek, "Electroviscous Fluids II, Rheological Properties," J. Appl. Physics, Vol. 38, No. 1, pp. 75~80, 1967
3. T. G. Duclos, "An Externally Tunable Hydraulic Mount Which Uses Electro-Rheological Fluid", SAE Technical Paper Series 870963, 1987
4. T. C. Jordan and M. T. Shaw, "Electrorheology", IEEE Trans. on Electrical Insulations Vol. 24, No. 5, pp. 849~872, Oct. 1989
5. D. Carlson and T. G. Duclos, "ER Fluids Clutches and Brakes-Fluid Property and

- Mechanical Consideration," Proc. of the 2nd Int. Conf. on ER Fluids, edited by J. D. Carlson, et al. pp. 353~367, 1990
6. N. K. Petek, et al., "Demonstration of an Automotive Semi-Active Suspension Using Electrorheological Fluid", SAE Technical Paper Series 950586, 1995
 7. M. Nakano and T. Yonekawa, "Pressure Response of ER Fluid in a Piston Cylinder-ER Valve System", Proc. of the 4th Int. Conf. on Electrorheological Fluids, pp. 477~489, 1994
 8. M. Whittle, et al., "Decomposition of the Pressure in an ER Valve Control System", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, No. 1, pp. 105~111, 1994
 9. W. C. Park et al., "Material Characteristics of on ER fluid and its influence on damping force of an ER Damper, Part I : Material Characteristics" Material and Design, (20) pp. 317~323, 1999