

전기장 싸이클 수에 따른 MC성분 ER유체의 기계적성질

김옥삼 · 박우철 *

여수대학교 기계공학과, * 삼척대학교 자동차공학과
(2001년 7월 11일 접수)

Mechanical Properties for Methyl Cellulose(MC) Ingredient ER Fluids According to the Numbers of the Electrical Field Cycles

Ok-Sam Kim and Woo-Cheul Park*

Yosu National University, * Samchok National University
(Received July 11, 2001)

Abstract

Electro-Rheological(ER) fluids belong to a class of colloidal suspensions whose global characteristics can be controlled by the imposition of an appropriate external electrical field upon the fluid domain. The ER fluids for smart hydraulic system are a class of colloidal dispersion which exhibit large reversible changes in their rheological behavior when subjected to external electrical fields. This paper presents experimental results on mechanical properties of an ER fluids subjected to electrical fatigues. As a first step, ER fluid is made of methyl cellulose(MC) ingredient choosing 25% of particle weight-concentration. Following the construction of test for mechanical properties of ER fluid, the shear stress, dynamic yield stress and current density of the ER fluids are experimentally distilled as a function of electric field cycles. The mechanical properties test of operated ER fluids are distilled and compared with those of unused ER fluids.

서론

유압시스템은 다른 동력전달 장치와 비교할 때 부피에 비해 무 단계적으로 큰 힘을 낼 수 있어, 인력난에 직면해 있는 수산업의 어로현장에서 많이 이용되고 있다. 최근 어로조업 기계가 고속, 고용량화되는 추세에 따라, 선박용 보조기계들도 성능향상이 요구되고 있다. 그러나 기존의 유압시스템의 경우, 기계적 이동장치에 의해 밸브를 개폐하기 때문에 이에 따른 응답성능 저하가 불가피하다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 일환으로,

기계요소의 설계변경이나 피드백(feedback) 제어와 연계된 유압시스템에 관한 연구가 수행되고 있다⁽¹⁾. 유량제어를 위한 기본적 메카니즘에 의해 야기된 응답지연과 비선형성은, 유압시스템 자동화의 걸림돌이 되고 있다. 이러한 이유로 지능형 신소재를 이용한 새로운 차원의 서보 유압기구인, 전기유동(Electro-Rheological, ER) 유체를 이용한 유압밸브 시스템에 대한 필요성이 대두되고 있다^(2,3,4). 아울러 자동화 제어기술의 발달과 더불어 전기장 발생할 수 있는 장치와 소재들이 개발됨에 따라, ER유체의 특성을 이용한 선박용 엔진마운

트의 가변 감쇠기구 및 지능구조물에 대한 수요가 박용기계 업계를 비롯한 다양한 산업분야에서 형성되고 있다^(5,6,7,8).

Simmonds⁽⁹⁾는 평판형의 ER밸브를 제안하여 전기장에 따른 압력강하를 고찰하였고, 이를 바탕으로 실용화를 위한 문제점과 해결방향을 제시하였다. ER밸브를 이용한 유압회로를 Brooks⁽¹⁰⁾가 구성하여 성능시험을 수행하였으며, Nakano⁽¹¹⁾ 등은 평판형 밸브를 통과하는 ER유체를 하겐-포아젤(Hagen-Poiseuille)흐름으로 해석하였다.

Whittle⁽¹²⁾ 등은 전기장 부과에 따른 압력강하의 응답특성으로부터 선형 2차 밸브시스템을 모델링하였으며, 실험적으로 타당성을 입증하였다. 그러나 실용적으로 ER유체 응용장치에 적용하기 위해서는 반복 사용시 전기장의 사이클 수에 따른 미세적인 작동거동의 규명, 전기장과 기계적 성질에 대한 관계성, 마모와 피로현상 해석 등 해결해야 할 문제들이 많다.

본 연구에서는 유기성 물질인 메틸 셀룰로오즈(methyl cellulose, MC)성분의 ER유체의 유압회로 실험장치를 구성하여 ER유체에 가하는 전기장의 사이클 수에 따른 ER유체의 전단응력(shear stress), 동적 항복응력(dynamic yield stress) 및 전류밀도(current density) 등의 기계적성질 변화를 고찰하였다. 또한 MC계 ER유체 클러스터(cluster)의 현미경 사진과 구리 및 알루미늄 전극의 표면거칠기 변화양상을 측정하여, ER유체를 이용한 응용장치의 설계 및 제작 시 전극선택의 기초 자료를 제시하고자 한다.

ER유체의 일반적 거동

ER유체는 부과되는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 성질이 변하는 유체를 총칭하는 것이며, 기본적으로 비전도성의 용액에 전도성 입자를 분산시킨 서스펜션(suspension) 용액이다. 특성은 전기장 무부과 시에는 액체상태로 존재하지만, 전기장 부과 시에는 반 고체상태로 상변화를 한다.

Fig. 1과 같이 ER유체에 전기장을 부과하면, 유체 중에 분산된 입자가 유도분극(induction polarization)을 일으켜 양쪽의 전극을 향하여 전기장과 평행한 섬유상 구조의 고리를 형성함으로써 유체이동이나 외부에서 가해지는 힘에 대하여 저항

력을 보유하게 된다. ER유체는 부과되는 전기장 세기에 따라서 항복응력과 점성이 변하며, 연속적이고 국부적으로 제어할 수 있다.

전기장을 인가하면 유체 중에 분산된 전도성 입자가 유도분극을 일으켜 전극을 향하는 다수의 섬유상 조직의 클러스터를 형성하고, 이와 같이 형성된 클러스터내의 입자들의 결합력에 의하여 이방성(anisotropic)의 흐름거동을 갖게 된다.

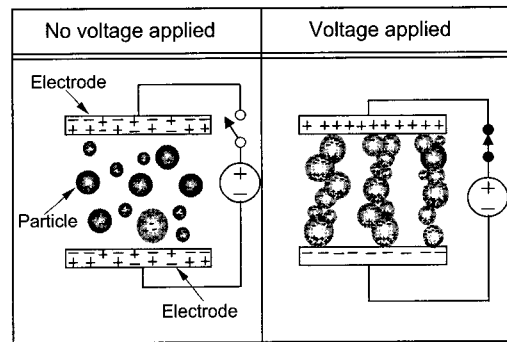


Fig. 1. Micro structure for functions of the ER fluids.

ER유체의 항복응력은 전기장에 대해 지수함수의 관계가 성립되므로 다음 식으로 표현할 수 있다⁵⁾.

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

여기서 α 와 β 는 ER유체의 용매, 입자종류, 입자 중량비와 용매의 점성 등 조성조건에 영향을 받는 고유상수이다. τ_y 는 유체의 항복응력을 표현하는 것으로 전기장(E)과 더불어 증가한다. 그리고 τ 는 유체의 전단응력, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비이며 η 는 유체의 점도를 나타낸다. 식(1)과 같이 ER유체는 외부에서 부과되는 전기장에 대하여 함수관계가 있기 때문에 전하(electric charge)나 이온(ion)의 이동에 영향을 미치는 입자의 결정구조, 용매와 입자사이의 투과율(permeability)의 차이, 입자 내의 불순물 및 입자 내의 수분함유량과 같은 인자들에 많은 영향을 받는다. 이 식의 의미는 전기장과 외부에서 가해지는 전단속도비의 증가와 더불어 유체의 항복응력의 증가로 인해 전단응력 상승을 예상할 수 있다.

MC계 ER유체의 기계적성질 분석실험

1. 실험장치

ER유체를 작동매체로 유압회로를 구성하면 밸브장치의 이동기구 복잡성에서 벗어나 압력과 유량을 조절하기 위한 전극(electrode)이 필요하며, 작동기(actuator) 및 밸브가 하나의 단일 구조로 형성되어 있어 설계의 단순화를 도모할 수 있다. 기존의 유압시스템에 ER유체를 적용하기 위해 유압펌프와 유량조절 밸브, 오일탱크 등을 설치하였다. 유압시스템 내에서 반복적인 전기장 부과에 의한 ER유체의 기계적 특성변화를 고찰하기 위하여 실험장치¹³⁾를 설계·제작하였다. ER유체 순환을 위해서 1회전 당 1.7cc의 용량을 갖는 기어펌프(gear pump)를 사용하였으며, 분당 2 l의 유량을 순환시킬 수 있도록 직류모터(DC reel motor, SANYO)를 이용하여 펌프 회전수를 일정하게 하였다. ER유체에 직류(DC) 전기장을 부과하기 위한 전극부는 단일 평판(16×10mm) 구조를 갖는 밸브형태이고, 유로의 역할과 ER유체에 전기장을 형성하기 위한 전극의 간격은 1mm이다. 또한, 전극의 재질에 따른 영향을 살펴보기 위하여 전기분야에서 많이 쓰이는 구리와 알루미늄의 전극을 이용하였고, 전극 표면거칠기 조건을 일정하게 하기 위하여 #1200번의 사포로 실험 전에 연마하였다.

2. 실험방법

전기장은 on-off형태로 3Hz의 주기이며, ER밸브의 양단에 압력센서를 부착시켜 지정된 반복사이클에서 다양한 기계적성질을 관찰하였다. ER유체의 전기장의 세기에 따른 점도 측정은 Seal형의 상용 점도계(VT500, HAKKE)를 사용하였다. 바깥쪽 실린더의 내경은 23mm, 안쪽 실린더의 직경은 21mm이며 ER유체가 채워지는 간극은 1mm이다. ER유체에 부과하는 전기장은 0.5kV/mm~3kV/mm까지 0.5kV/mm씩 상승시켰으며, ER유체에 외력을 부과하기 위하여 전단속도비를 0~700s⁻¹까지 변화시켰다. 전극표면의 거칠기 변화는 금속현미경을 사용하여 관찰하였으며, 표면거칠기(surface roughness)는 표면거칠기 측정기(Surfstest 402, MITUTOYO)를 이용하였다.

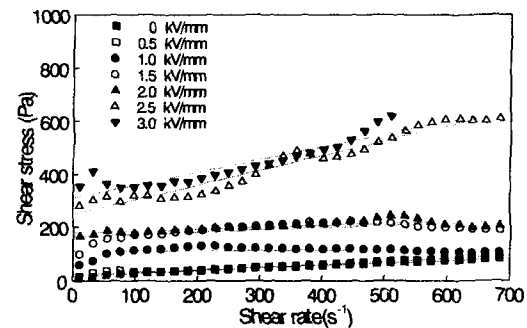
3. MC계 ER유체의 조성

사용된 MC계 ER유체는 유기성 전도성 입자이며, 메틸 셀룰로이드를 사용한 ITMC25이다. ITMC25의 용매에 대한 입자의 중량비는 25%로 하였다. 비전도성의 용매는 트랜스포머 오일(transformer oil)을 사용하였으며, 점도는 10cs이고, 절연계수는 12kV/mm이다. 입자는 100 μ m이며 입도분석기(PARTICLE SIZER ANALYSETTE 22, FRITSCH)로 측정하였고, 실험은 상온에서 이루어졌다.

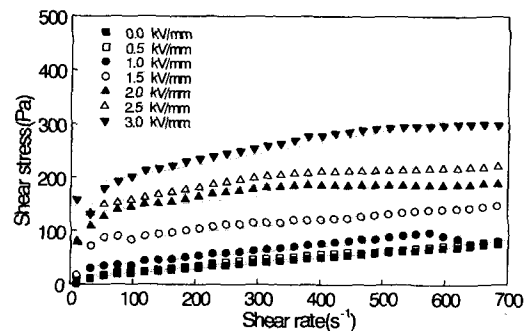
MC계 ER유체의 기계적성질 평가

지속적이고 반복적으로 직류 전기장을 부과할 수 있는 실험장치를 사용하여, MC계 ER유체의 기계적성질을 평가한 결과는 다음과 같다.

ITMC25 ER유체의 전단속도비에 대한 전단응력 분포변화는 Fig. 2에서 알 수 있다. 기계적 성질



(a) Initial state



(b) After 600,000 cycle

Fig. 2. Shear stress of ITMC25 ER fluid (different electric durability test).

실험을 하기 이전 거동은, Fig. 2의 (a)와 같으며, $2.0kV/mm$ 까지 전기장을 인가했을 경우 횡축의 전단속도가 증가하여도 종축의 전단응력은 거의 변하지 않았다. 다만 $2.5kV/mm$ 이상 전기장을 인가하면 보다 급격한 기울기를 형성하면서 상승하였다. 60만 사이클을 반복한 후, ITMC25의 전단응력 실험 결과를 Fig. 2의 (b)에 나타냈다. $1.5kV/mm$ 이하 낮은 전기장에서 실험을 하기 이전 ER유체의 경우와 유사한 거동이지만, $2.0kV/mm$ 이상은 큰 전단응력 값으로 변화하는데 구배는 비슷한 양상을 보여준다. 그리고 $2.0kV/mm$ 이상 전기장을 인가하면 2차원적인 곡선의 형태를 형성하지만, 표준편차의 평가치가 오차한계 이내이므로 직선으로 판단하여도 무리가 없을 것으로 사료되었다.

ITMC25의 동적 항복응력과 전류밀도 변화를 세미로그(semi-log) 좌표계로 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3의 (a)는 10만 사이클까지 동적 항복응력이 높은 값으로 증가하는 양상을 알 수 있고, 40만 사이클 이후는 10만 사이클의 $1/2$ 크기인 $450Pa$ 이하를 보여준다. MC계 ER유체의 항복응력 도출을 위해 최적의 특성매개 변수인 전류밀도는 각종 요소들의 설계에서 동력의 소비를 정확하게 예측하는데 매우 중요한 역할을 한다.

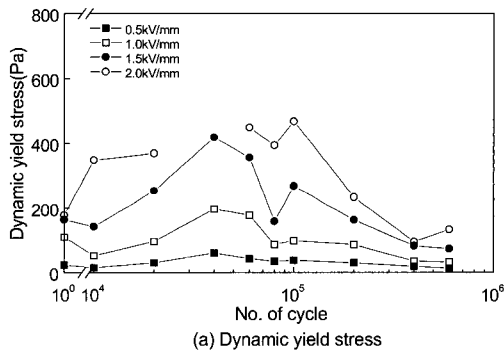


Fig. 3. Dynamic yield stresses of ITMC25 with different electric durability test.

인가되는 사이클 수와의 관계는 Fig. 4와 같이 $2.0kV/mm$ 의 전기장에서 6만 사이클까지는 전류밀도가 $0.08\mu A/cm^2$ 정도로 증가하지만, 이후는 감소하고 있다. 이와 같이 6만 사이클 이전에 높은 전

류밀도를 나타내는 것은 이때 입자의 크기가 ER효과를 나타내기 위한 전하이동이 활발한 크기였으며, 40만 사이클 이후에 낮은 전류밀도는 입자들이 분쇄되어 분극화 에너지 소요가 적기 때문이다.

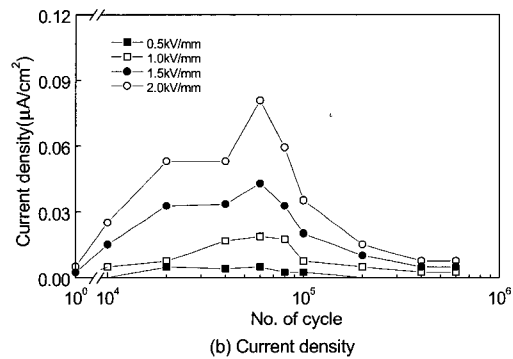
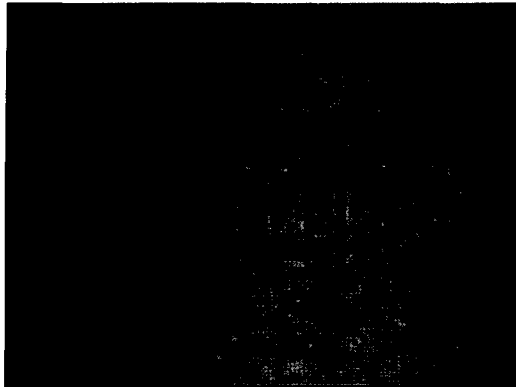


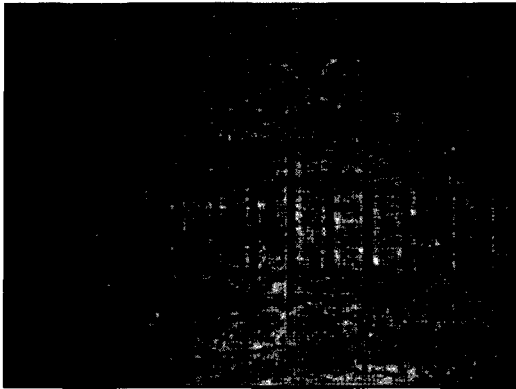
Fig. 4 Current density of ITMC25 with different electric durability test.

MC 성분의 분산제로 조성한 ITMC25 ER유체의 내구성 실험 전후, 입자형상과 클러스터 변화 모습의 현미경 관찰사진이 Photo. 1이다. ITMC25 ER유체는 투명한 성질로 인하여 현미경 사진로는 구별하기 쉽지 않으나 (a) 사진과 같이 실험을 하기 이전 입자들은 구형이며, 양쪽전극을 향하여 체인모양의 클러스터를 형성하고 있다. 60만 사이클의 전기장을 인가한 ER유체는 Photo. 1의 (b)와 같이 입자가 분쇄되어 매우 작게 나타나고 있다. $3kV/mm$ 의 전기장을 인가하면, 다수의 체인들이 모여 기둥형태의 클러스터 집단을 형성하고 있다.

Fig. 5는 실험결과의 타당성을 검증하기 위하여 아라빅검 성분25%의 ITA25와 ITMC 25의 ER유체에 구리전극으로 사용한 경우, 전기장의 사이클 수에 따른 전극의 표면거칠기 분포를 보여주고 있다. ITA25를 사용한 경우, 전체공정에서 $0.1 \sim 0.2\mu m$ 의 표면거칠기를 나타냈다. 반면 ITMC25는 $0.1 \sim 0.3\mu m$ 까지 표면거칠기의 편차가 발생하여, 같은 조건하에서도 작동 ER유체의 화학적 성분에 따른 차이가 야기되는 것을 알 수 있었다. 또한 ITMC25에서는 40만 사이클의 전기장 사이클부터 그을린 부분이 나타나지만, ITA 25는 60만 사이클을 부과한 경우에도 부식은 발생하지 않았다.



(a) Before the test



(b) After 600,000 cycles

Photo. 1. The clusters of the ITMC25 at 3kV/mm.

이것은 접착성이 높은 MC 성분의 ITMC25와는 달리 아라빅검 성분의 ITA25는 구리전극의 표면에 소착(燒着)되는 현상이 발생하지 않기 때문에 사료된다.

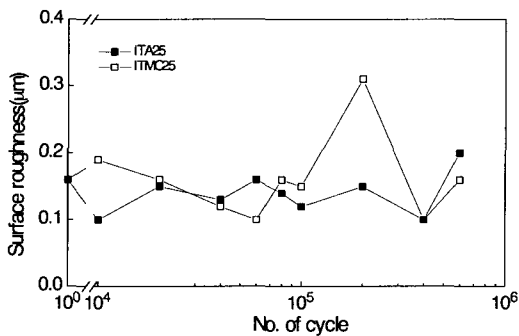


Fig. 5. Surface roughness with copper electrode.

ITA25와 ITMC25의 ER유체에 알루미늄 전극을 사용한 경우 전극 표면거칠기는 Fig. 6과 같다. 전기장 부과 초기에는 0.3 μm 의 표면 거칠기가 10만 사이클까지는 0.2 μm 로 표면 거칠기가 감소하였으나, 20만 사이클에서 40만 사이클의 사이클 구간에서 전기장을 반복적으로 부과하였을 때 거칠기의 요철 변화가 크게 나타났다. 이와 같이 요철이 큰 것은 산화피막 부분을 측정하였기 때문이며, 산화피막 이외의 부분에서는 다른 전기장 부과 사이클에서 측정한 표면 거칠기와 유사한 크기를 나타내고 있다. 아울러 알루미늄은 강도와 경도가 다른 재질에 비하여 매우 연하기 때문에 다른 전극 재질들과 동일한 조건에서 비교하기 위한 작업이 매우 어려운 문제였다.

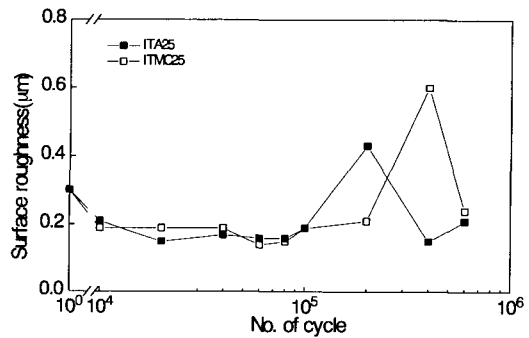


Fig. 6. Surface roughness with aluminum electrode.

결 론

기존의 솔레노이드 밸브는 전자부품에 기계적 운동요소를 포함하여 비선형성을 내포하고 있으나, MC 성분의 ER유체를 이용하면, 유동체의 통과부분을 전기장 제어를 통하여 솔레노이드 밸브 기능을 대신할 수 있는 메카니즘을 구현할 수 있을 것으로 사료된다. 유기성인 MC성분 ER유체를 유압시스템에 솔레노이드 밸브 역할에 적용하기 위해, 부과하는 직류 전기장의 사이클 수에 따른 기계적특성에 대한 평가는 다음과 같다.

MC성분 ER유체의 전단속도비에 대한 전단응력 분포변화는 2.0kV/mm까지 전기장을 인가했을 경우, 횡축의 전단속도가 증가하여도 종축의 전단응력은 거의 변하지 않았다. 60만 사이클을 반복

한 후 ITMC25의 전단응력 실험결과, $2.0kV/mm$ 이상 전기량을 인가하면 2차원적인 곡선의 형태를 형성하지만 표준편차의 평가치가 오차한계 이내 이므로 직선으로 판단하여도 무리가 없을 것으로 사료되었다. 구리 전극으로 전기장을 부과한 경우 MC 성분의 ER유체는 $0.1\sim 0.3\mu m$ 까지의 표면거칠기를 나타냈고, 알루미늄 전극을 사용한 경우 는 전기장 부과 초기에 $0.3\mu m$ 의 표면거칠기가 $0.2\mu m$ 로 감소하였으나 40만 사이클의 전기장 부과 이 후는 약간의 요철변화가 있었다.

참고문헌

- (1) Plummer, A. R. and Vaughan, N. D.(1996) : Robust Adaptive Control for Hydraulic Servosystems, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 118, 237~244.
- (2) Klass, D. L., Martinek, T. W. (1967) : Electroviscous Fluids. II. Rheological Properties, J. Appl. Physics, Vol. 38, No. 1, 75~80.
- (3) Duclos, T. G. (1987) : An Externally Tunable Hydraulic Mount Which Uses Electro-Rheological Fluid, SAE Technical Paper Series 870963.
- (4) Jordan, T. C. and Shaw, M. T. (1989) : Electrorheology, IEEE Trans. on Electrical Insulations Vol. 24, No. 5, 849~872.
- (5) Carlson, D. and Duclos, T. G. (1990) : ER Fluids Clutches and Brakes-Fluid Property and Mechanical Consideration, Proc. of the 2nd Int. Conf. on ER Fluids, 353~367.
- (6) Petek, N. K., Romstadt, D. J., Lizell, M. B. and Weyenberg, T. R. (1995) : Demonstration of an Automotive Semi-Active Suspension Using Electrorheological Fluid, SAE Technical Paper Series 950586.
- (7) Petek, N. K. (1992) : An Electronically Controlled Shock Absorber Using Electro-Rheological Fluid, SAE Technical Paper Series 920275.
- (8) Morishita, S., Mitsui, J. and Kuroda, Y. (1990) : Controllable Shock Absorber as an Application of Electro-Rheological Fluid, JSME, Vol. 56, No. 524, 78~84.
- (9) Simmonds, A. J. (1991) : Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit, IEE Proceeding -D, Vol. 138, No. 4, 400~404.
- (10) Brooks, D. A.(1992) : Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices, Journal of Modern Physics, Vol. 6, 2705~2730.
- (11) Nakano, M. and Yonekawa, T. (1994) : Pressure Response of ER Fluid in a Piston Cylinder-ER Valve System, Proc. of the 4th Int. Conf. on Electrorheological Fluids, 477~489.
- (12) Whittle, M., Firoozian, R. and Bullough, W. A. (1994) : Decomposition of the Pressure in an ER Valve Control System, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, No. 1, 105~111.
- (13) Park, W. C., Choi, S. B. and Suh, M. S. (1999) : 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, 317~323.