

ER유체의 유동특성에 관한 실험적 연구

Experimental Investigation on the Flow Characteristics of ER Fluids

김도태(경일대 기계공학부), 장성철^{*}(경일대 대학원), 최윤대(육군3사관학교)

D. T. Kim (Kyungil Univ.), S. C. Jang (Graduate School, Kyungil Univ.), Y. D. Choi (Korea 3rd Mil. Acad.)

ABSTRACT

Electrorheological fluids (ERF) are suspensions which show an abrupt increase in rheological properties under electric fields. The rheological response is very rapid and reversible when the electric field is imposed and/or removed. Therefore, there are many practical applications using the ERF. The purpose of the present study is to examine the flow characteristics of ERF. First, the microscopic behavior of the ER suspension structure between two fixed parallel-plate brass electrodes applied dc high voltage for the stationary and flow of the ERF was investigated by flow visualization. The electrical and rheological properties of zeolite based ERF were reported.

1. 서론

ER유체(electrorheological fluid, 電氣誘變流體 또는 電氣粘性流體라 함)는 외부에서 전기장을 가하면 액체의 Rheology 특성이 변하는 현상을 나타내는 기능성 유체(機能性)流體)이고, 이러한 현상을 전기점성효과 또는 ER효과라 한다⁽¹⁾. ER유체는 입자 분산계(粒子分散系)와 균일계(均一系)로 대별할 수 있다. 입자 분산계 ER유체는 전기 절연성(電氣絶緣性) 기름중에 유전성(誘電性)을 가진 고체 미립자를 분산시킨 현탁액이고, 전기장을 인가하면 Newton유체에서 Bingham유체의 유동특성으로 변화한다. 한편 균일계 ER유체는 액정(液晶)으로 대표되는 ER유체이고, 전기장을 인가하면 유체의 점도가 변화하는 특성을 가지고 있다^{(2),(3)}.

유공압 시스템에 있어서도 ER유체의 특성을 응용함으로써, 전기적 신호만으로 직접 유체의 유동을 제어하는 것이 가능하기 때문에 가동부가 없는 단순한 구조로 고속 응답성과 고기능성을 가진 유공압 기기를 개발할 수 있을 것으로 예측된다. 따라서 종래에 없었던 새로운 기능을

가진 신속하고 간편한 유공압 시스템을 구축할 수 있는 가능성도 충분히 있기 때문에 ER유체를 응용한 유공압 기기의 연구 개발이 절실히 요구된다.

본 연구에서는 ER유체를 유공압 시스템에 응용하기 위한 기초적 연구로써, 전기 절연성이 양호한 실리콘 오일과 유압 작동유내에 Zeolite 입자를 첨가한 입자 분산형 ER유체를 대상으로 하여, ER효과가 탁월한 ER유체의 제조, 실리콘 오일의 점도와 Zeolite 입자의 무게분율에 따른 ER효과의 영향, 전기장 세기에 따른 ER효과 및 가시화 실험을 통하여 ER유체의 유동특성을 실험적으로 검토하는 것이다.

2. 입자 분산계 ER유체의 제조

본 연구에서 사용한 ER유체는 전기 절연유에 ER효과를 발생시키는 고체 미립자 (이하 ER입자라 함)를 혼합한 입자 분산계 ER유체를 사용하였다. 절연유는 ER입자의 비중을 고려하기 위하여 실리콘오일(한국신에츠실리콘社)을 사용하였다. 실리콘 오일은 온도나 주파수 변화에 따

큰 전기 절연성이 우수하고, 온도변화에 따른 점도변화가 작으며, 전단에 대한 저항성이 크고, 화학적 안정성과 열산화 안정성이 우수한 특징을 가지고 있기 때문에 ER유체의 절연유로써 적절하다고 생각된다. Table 1은 실험에 사용한 실리콘 오일(동점도 30cSt)의 특성을 나타낸 것이다. 또한 ER효과를 증대시키기 위한 입자의 종류에는 Zeolite, 실리카, 전분, 셀룰로이드 및 전용 ER입자로서 폴리머(polymer) 입자의 표면에 특수산화탄의 미립자를 피복한 무기·유기 복합입자 등이 개발되어 있지만⁽⁴⁾, 여기서는 Zeolite (Sigma Chemical Co.)를 사용하였다. Zeolite는 결정성 알루미늄 규산염으로, SiO_2 4면체와 AlO_2 4면체가 3차원 망목상으로 결합된 광물로서, 일반적으로 $M(x/n)[(\text{AlO}_2)_x(\text{SiO}_2)_y] \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 의 구조식을 갖는다. M은 n개의 양이온, x, y는 단위격자를 이루는 AlO_2 , SiO_2 의 개수를 나타낸다. y/x값은 Zeolite의 종류에 따라 1~∞값을 가지며, 결정중의 Si/Al의 비율을 나타낸다. SiO_2 는 전기적으로 중성이지만, AlO_2 의 음전하를 중화하기 위해 금속 양이온이 필요하다. 따라서 절연유중에 분산된 Zeolite 입자들은 외부에서 전기장이 인가되면, Zeolite 결정 구조상 분자크기에 상당하는 균일세공지름을 갖는 비교적 큰 공간 내에 존재하는 금속 양이온이 입자의 한쪽 끝으로 이동하게 되어 강한 유전성(誘電性)을 가지게 되어 ER효과를 나타내게 된다.

ER유체는 실리콘 오일에 대한 Zeolite의 무게분율을 0.04~3.00wt%로 혼합하여 제조하였다.

Table 1. Properties of the Silicone oil

동점도(25℃)cSt	30
비중(25℃)	0.955
점도-온도계수	0.58
비열(cal/g·℃)	0.38
열전도율(cal/cm·s·℃)	3.6×10^{-4}
절연파괴 강도(kV/2.5mm)	50.0 이상
유전율(50Hz)	2.71
유동점(℃)	-55.0 이하
인화점(℃)	260.0 이상

Zeolite 입자의 크기는 10 μm이하를 사용하였고, 실리콘 오일의 동점도는 20cSt~50cSt까지 변화시켜 입자 분산제 ER유체를 제조하였다. Zeolite (비중:1.5정도)의 입자가 실리콘 오일 (비중:0.955정도) 보다 무거워 침전될 우려가 있기 때문에, 실험시에는 자력 교반기를 이용하여 ER유체를 장시간 교반하여 사용하였다.

3. 실험

3.1 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실리콘 오일과 Zeolite 입자를 혼합한 ER유체의 유동특성을 가시화하기 위한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. ER유체가 정지된 상태와 유동상태를 분리하여 관찰할 수 있도록 설계·제작하였다. 제조한 입자 분산형 ER유체는 탱크내에 저장하고, Zeolite 입자의 침전을 방지하고 입자 분포를 균일하게 하기 위해 전동식 교반기로 교반하였다. ER유체는 탱크로부터 위치에너지 차이에 의해 평행한 두 평판간의 유로를 흐르며, 전자저울로 ER유체의 무게를 측정하여 유량으로 환산하였다. 유량은 평행평판 유로의 상류부와 하류부에 설치된 콕을 사용하여 조절하였다. 평행한 두 평판간의 유로의 크기는 300×20×1mm이며, 유로의 상하면에는 황동판을 사용하여 전극으로 사용하였고, 측면에는 관찰용 CCD카메라를 이용하여 가시화할 수 있도록 현미경용 슬라이드 유리판으로 제작하였다. 전극간의 간극은 0.5~12.0mm까지 단계적으로 변화시켜 전극간의 영향에 대하여 검토하였으며, 가시화 실험에서는 0.7mm로 설정하여 간극내의 ER유체의 거동을 관찰하였다. ER유체의 인가전압은 직류 고전압 발생장치 (DC High Voltage Power Supply)를 사용하였다. ER유체의 정지상태와 유동상태의 관찰은 현미경 영상처리 장치인 EPIPHOT200에 장착된 CCD 카메라를 사용하여 가시화 하였으며, 이미지 획득 및 처리는 PC의 이미지 프로그램을 사용하여, 입자 상호간의 거동과 유동특성을 모니터에서 관찰할 수 있다. 가시화 실험에서는 ER유체의 무게분율, 인가전압 및 유량 변화에 대한 유동특성을 관찰하였다. 특히, 실리콘 오일에 zeolite의 무게분율이

0.35wt%정도로 아주 희박한 경우의 영상이 가장 현명하게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 2는 본 연구에서 제조한 ER유체의 Bingham특성을 조사하기 위하여 사용한 회전식 점도계 (Haake社, VT-500)의 개략도이다. 이것은 동일한 중심축상에 있는 고정된 외부 원통 (cup이라 함)과 회전하는 내부원통 (bob이라 함) 사이의 간극에 ER유체를 주입하고, 일정한 각속도 또는 각속도를 변화시켜, 내부원통을 회전시키는데 필요한 토크를 측정하여 점도를 측정하는 점도계이다. Fig. 2는 bob과 cup의 간극이 1.45mm로 결합된 상태를 나타낸다. 또한 bob과 cup을 전극으로 사용하여 전기장의 강도에 따른 ER효과의 영향도 검토할 수 있도록 제작되어 있으며, 점도계와 PC가 연결되어, 전단속도비(bob의 회전속도)변화에 따른 점성계수와 전단응력이 자동으로 측정되어, 출력되도록 구성되어 있다.

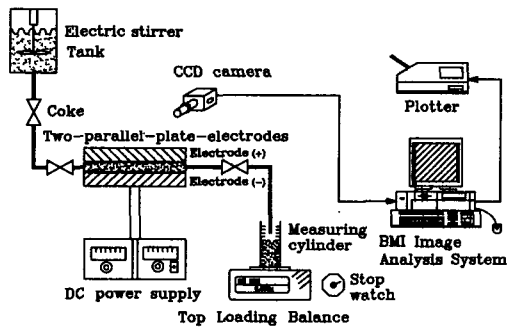


Fig. 1 Experimental apparatus

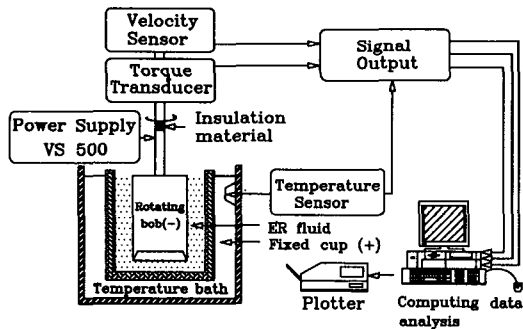


Fig. 2 Schematic of Viscotester (Haake VT500)

3.2 실험결과 및 고찰

3.2.1 실리콘 오일과 ER유체의 점도특성 (전압을 인가하지 않은 경우)

전기장이 인가되지 않은 상태에서 본 연구에서 제조한 입자 분산계 ER유체는 Newton유체와 같이 거동을 하게 된다.

Fig. 3은 앞에서 기술한 회전식 점도계(Haake社, VT-500)를 사용하여 zeolite 입자의 무게분율이 0.00wt%인 경우, 실리콘 오일만의 점도변화를 측정하여 나타낸 것이다. x축은 전단변형률, y축은 전단응력을 나타내며, 기울기가 실리콘 오일의 점성계수를 나타낸다. 전압이 인가되지 않은 상태에서, 순수한 실리콘 오일의 점도가 증가할수록 기울기가 증가하는 경향을 나타내며, 전단속도비 (bob의 회전속도)가 증가함에 따라 전단응력도 증가하며, Newton유체의 특성을 나타내고 있음을 실험을 통해 알 수 있다.

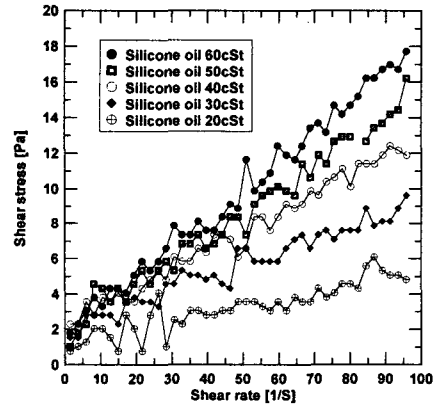


Fig. 3 Relationship between shear stress and shear rate for pure silicone oils

Fig. 4는 실리콘 오일에 대한 zeolite 입자의 무게분율을 5.0~45.0wt%까지 단계적으로 변화시킨 경우의 점도변화 특성을 나타낸 것이다. 실험에서는 전단 속도를 0[1/s]부터 100[1/s]까지를 2분 동안에 증가하도록 설정하여 수행하였으며, 같은 조건에서 7번씩 반복 측정하여 평균값을 도출한 것이다. 분산형 ER유체에 전압이 인가되지 않은 경우, ER입자의 무게분율의 증가에 따라 유체의 겔보기 점도가 증가함을 알 수 있다.

이것은 실리콘 오일내에 분산된 10 μm 이하의 zeolite 입자의 증가로 인하여 ER유체 내부의 유체마찰저항이 증가함으로써 나타나는 현상으로 생각되며, 분산입자의 무게분율이 ER유체의 특성변화에 크게 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

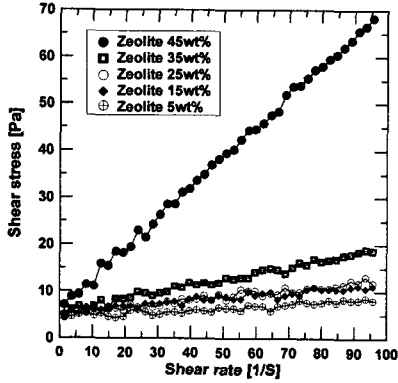


Fig. 4 Relationship between shear stress and shear rate for ER fluids (silicone oils+zeolite)

3.2.2 정지된 ER유체의 특성

ER유체는 외부에서 가해진 전기장에 의해 점도가 변하는 유체로 표현하고 있지만, 입자 분산계 ER유체에서는 실제적으로 유체의 점도가 변하는 것이 아니고 유체의 전단력에 대한 항복응력이 변화하는 것, 즉 Bingham유체의 특성을 나타내는 것이다.

Fig. 5는 분산계 ER유체에 전압을 인가하지 않은 경우와 인가한 경우에 대한 ER입자의 거동을 나타낸 것이다. Fig. 4의 실험결과에서 알 수 있듯이, 전압이 인가되지 않은 상태에서 실리콘 오일과 분산된 zeolite 입자는 전기적인 극성을 띄지 않으며 Newton유체의 특성을 나타낸다. 전기장이 인가되면, 절연성이 양호한 오일내

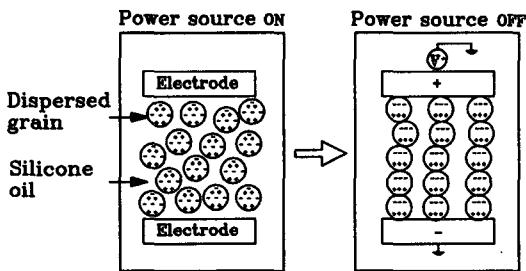
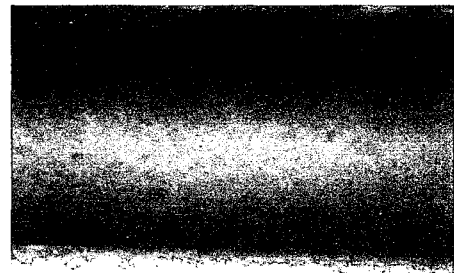


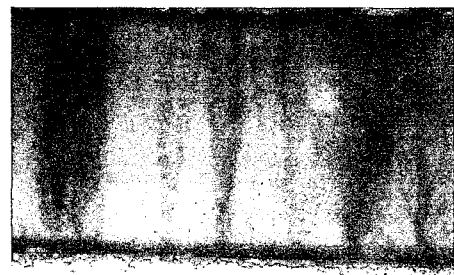
Fig. 5 Generation of clastic orientation

에 강한 유전성(誘電性)을 가진 Zeolite입자는 전극방향으로 배열되고, 전극간에는 사슬(鎖狀) 구조가 형성된다. 이것은 외부에서 전기장이 가해지면 유전분극(誘電分極)한 입자간에 전기적 인력이 발생하여 입자 주위에 전기장 방향으로 클러스터(cluster)를 형성하게 되므로 항복전단응력을 갖는 Bingham유체의 특성으로 변화한다. 또한, 전기장이 제거되면 원래의 유체특성으로 돌아가는 가역성(可逆性)을 가지며, 전기장 인가에 대하여 응답성이 우수한 특징이 있다⁽⁴⁾.

Fig. 6은 실리콘 오일내에 직경이 10 μm 이하인 Zeolite 입자를 무게분율 3.00wt%로 분산시켜 제조한 ER유체에 대하여, 정지한 상태에서 전압 6kV를 인가하지 않은 경우(a)와 인가한 경우(b)의 가시화 실험결과를 나타낸 것이다. 전압은 현미경용 슬라이드 유리판에 접촉된 황동전극에 인가되며, 전극간의 간극은 0.5mm이다. zeolite 입자의 거동은 화상처리 시스템을 통하여 출력



(a) Electric field 0 kV/mm 200 μm



(b) Electric field 12 kV/mm

Fig. 6 Effect of an DC electric field on the structure formation for stationary ER fluids

된다. 실험결과에서, 전압이 인가되지 않은 상태에서 zeolite 입자는 전극 사이에 균일하게 분포되어 있다. 전압을 인가하면 Fig. 4(b)에서와 같이 zeolite 입자들이 양쪽 전극방향으로 배열되어 전극사이에 사슬구조를 형성함을 관찰할 수 있다. 이와 같이 클러스터가 형성된 상태에서 전압을 제거하면 사슬구조도 없어지는 가역적 특성을 가진다.

3.2.3 ER유체의 유동특성

Fig. 6의 결과에서, ER유체가 정지된 상태에서 형성된 사슬구조에 전단응력이 가해지면 사슬구조를 통하여 ER유체가 유동하게 되므로 내부 점성마찰 효과가 증가하는 특성을 나타내게 된다. 이것이 ER유체의 겔보기 점성이 증가하는 효과로 나타나게 된다.

Fig. 7은 Zeolite 입자의 무게분율 0.35wt%인 ER유체에 대하여, 전극의 간극 0.7mm, 전압 8.57kV/mm로 인가한 상태에서, 현미경의 배율을 200배로 조절하고, 유량을 0~0.468cm³/min로 변화시킨 경우의 가시화 실험결과를 나타낸 것이다. 그림에서 (a)는 전압을 인가하지 않고, 밸브를 완전히 열어 간극내의 ER유체의 유속이 최대인 상태(Q=1.20cm³/min), (b)는 (a)상태에서 밸브를 닫아 ER유체에 전압을 인가한 상태를 나타낸 것이다. Fig. 6의 결과와 마찬가지로 전극사이에 zeolite 입자의 사슬구조가 큰 고리형상으로 형성됨을 알 수 있다. (c)는 ER유체가 정지된 상태 (b)에서 밸브를 조금 열어 초기유동이 시작되는 상태를 관찰한 것이며, 이 때 유량은 약 0.12cm³/min이다. (d), (e), (f)는 (c)상태에서 점차적으로 유량을 증가시킨 경우에 대한 가시화 사진이다. 유량이 작은 경우에는 전극 근방에서 형성된 사슬구조가 유로 중앙부근에까지 형성되며, 유량이 점차 증가함에 따라서 유로 중앙부의 사슬구조는 파괴되는 현상이 나타난다. 이것은 ER효과에 의해 형성된 zeolite 입자의 전기적 인력보다도 ER유체의 유량증가에 따른 관성력이 크기 때문에 사슬구조가 파괴되는 것으로 예측된다. 그러나 전극 부근에서는 ER유체의 점성효과와 zeolite 입자의 사슬구조에 작용하는 전기

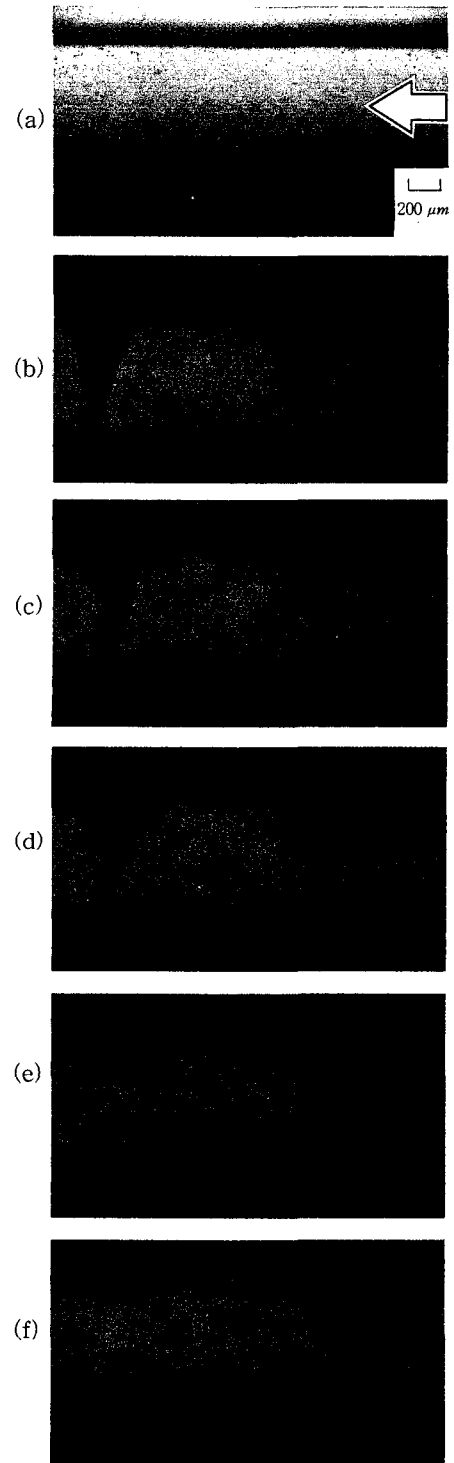


Fig. 7 Observation of flow pattern for ER fluids

력이 유체의 판성력보다도 상대적으로 클 것으로 예상되므로 전극부근에서는 사슬구조가 파괴되지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 유동상태의 메커니즘을 개략적으로 나타내면 Fig. 8과 같다. 전극사이에 형성된 사슬구조는 전기장과 점도 및 ER유체의 무게분율이 높아질수록 단일 사슬구조에서 복합 사슬구조로 형성되는 것을 볼 수 있다. 복합 사슬구조 형성과정은 단일 사슬구조가 형성된 후, 이들 단일 사슬구조가 상호작용으로 복합 사슬구조를 형성하거나, 주위의 불균일한 입자들이 이미 형성된 단일 사슬구조와 상호 작용하여 복합사슬구조를 형성한다. 전기장의 세기가 증가함에 따라 복합사슬구조가 지배적인 구조로 된다. 또한 전장강도의 증가에 따라서 전극에 부착하는 클러스터는 끊어지고 길어지며 ER유체의 흐름중에 형성된 클러스터 또는 클러스터의 결합력이 흐름의 저항이 되는 것을 알 수 있다.

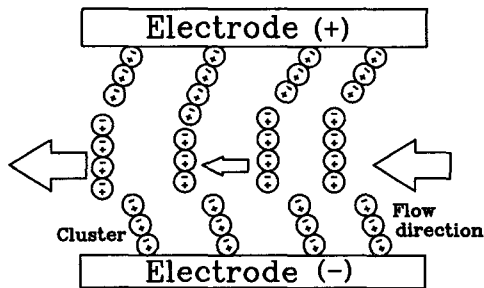


Fig. 8 Schematic representation of cluster in ER fluids

4. 결론

본 연구에서 실리콘 오일에 zeolite 입자를 분산시킨 ER유체를 유공압 시스템에 응용하기 위한 기초 연구로써, ER효과가 탁월한 ER유체

의 제조, 실리콘 오일의 점도와 Zeolite 입자의 무게분율에 따른 ER효과의 영향, 전기장 세기에 따른 ER효과 및 가시화 실험을 통하여 ER유체의 유동특성을 실험적으로 검토하였다. 향후 본 연구에서 제조한 입자 분산형 ER유체의 Bingham특성에 대하여 검토한 후, 유압제어밸브에 응용할 예정이다.

참고문헌

1. W. M. Winslow, " Induced Vibration of Suspension", J. of Applied Physics, 20, 1137, 1949
2. Kim, K. S., Jung, D. D., Lee, H. J., Choi, S. B. and Cheong, C. C., "Performance Investigation of a Cylindrical Valve Featuring Electro-Rheological Fluids". J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 11, No.4, pp.148-157, 1994.
3. Tetsuhiro Tsukiji, Jun Takahashi, Noboru Sugimoto, Hiroyasu Ikeda, "Flow Characteristics of ERF between Two Parallel-Plate Electrodes", 日本油壓と空氣壓學會志, 第 25卷 第4號 1996.
4. Jeon, Y. S., "Performance Investigation of Cylindrical-Type ER Valves with Different Electrode Length", J. of the Korean Society of Machine Tool Eng. Vol. 11, No.6, pp.1-11, 1998.
4. Kim, S. G., Jung, D. W., Choi, Y. D., "Construction and Evaluation of an Experimental Type Torque Converter by Adapting an Electrorheological Fluid as an Operating Medium" J. of the Korean Society of Precision Eng. 第18卷 第10號, pp.2706-2711, 1994.
5. 황인석, "전기유변유체의 물질구조 및 유변물성에 관한 연구," 박사논문집, 서울대학교 화학교공학과, 1994년 12월

