

# 회전식 점도계를 이용한 ERF의 겔보기 점도 특성

장성철<sup>\*</sup> · 이진우<sup>\*</sup> · 김태형<sup>\*\*</sup> · 박종근<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>경남대학교 대학원 · <sup>\*\*</sup>경남정보대학 기계계열 · <sup>\*\*\*</sup>경남대학교 기계자동차공학부

## Apparent Viscosity Properties of Electro-Rheological Fluid by Using Rotational Viscometer

Sung-Cheol Jang<sup>\*</sup>, Jin-woo Lee<sup>\*</sup>, Tae-Hyung Kim<sup>\*\*</sup> and Jong-Keun Park<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Graduate School of Kyungnam University · <sup>\*\*</sup>Kyungnam Information College · <sup>\*\*\*</sup>Kyungnam University

**KEY WORDS** : Electro-Rheological fluid 전기점성유체, Starch 전분, Automatic Transmission oil 자동변속기 오일  
Yield stress 항복응력 Shear stress 전단응력, Shear rate 전단속도비, Electric field 전기장, apparent Viscosity 겔보기 점도

**ABSTRACT** : Electro-Rheological(ER) fluids change their apparent viscosity according to the electric field strength. Therefore, there are many practical applications using the ER fluids. ER effect on the dispersive system of polarizable fine powder/dielectric oil has been investigated. The electrical and rheological properties of starch based ER fluid were reported. Yield stress of the fluids were measured on the couette cell type rheometer as a function of electric fields, particle concentrations, and temperatures. The electric field is applied by high voltage DC power supply. The outer cup is connected to positive electrode(+) and the bob becomes ground(-). And the temperatures the viscosity(or shear stress) versus shear rates were measured. In this experiment shear rates were increased from 0 to 200s<sup>-1</sup> in 2 minutes. This thesis presents Bingham properties of ER fluids subjected to temperature variations. The temperature dependence of the viscosity was determined for ER fluids consisting of 35 weight % starch particles in automatic transmission oil.

### 1. 서 론

ER유체(electrorheological fluid, 電氣誘變流體 또는 電氣粘性流體라 함)는 외부에서 전기장을 인가하면 액체의 Rheology 특성이 변하는 현상을 나타내는 기능성 유체(機能性流體)이고, 이러한 현상을 전기점성효과 또는 ER효과라 한다. 지능형 재료 또는 스마트 재료(smart material)로 불리는 ER유체는 전기장을 제거하면 원래의 점성으로 되돌아가는 가역성(可逆性)을 가진다. 기존의 액체가 기준 온도에서 하나의 점도만을 가지는데 비해, ER유체는 전기장의 강도에 따라 여러가지 점도로 변화하는 성질로 인해 여러 분야에서 그 응용성이 연구되고 있다.

ER유체는 입자분산계(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 고체 미립자가 (+)전극과 (-)전극의 간극내에서 사슬구조(이하 Cluster라 함)를 형성하기 때문에 겔보기 점도(apparent viscosity)가 현저하게 증가하여 Newton유체에서 Bingham유체로 점도 특성이 변화한다. 한편 균일계 ER유체는 액정(液晶)으로 대표되는 ER유체이고, 분산계 ER유체에 비하여 고가이며, 전기점성효과도 낮다. ER유체는 전기장의 강도만을 변화시켜 유체에 인가하게 되므로 부가적인 운동장치가 필요없어 응용장치 설계의 단순화를 가져올 수 있다. 또한 상변화에 요구되는 전기장은 높지만, 전류는 매우 낮으므로 소비 전력이 낮은 장점을 갖고 있다. 유압제어 시스템에 있어

서도 ER유체의 특성을 응용함으로써, 전기적 신호만으로 직접 유체의 유동을 제어하는 것이 가능부가 없는 단순한 구조로 고속 응답성과 고기능성을 가진 유압제어 기기를 개발할 수 있을 것으로 예측된다. 따라서 종래에 없었던 새로운 기능을 가진 신속하고 간편한 유압제어 시스템을 구축할 수 있는 가능성도 충분히 있기 때문에 ER유체를 응용한 유압제어 기기의 연구 개발이 절실히 요구된다. 지금까지 자동변속기 오일(이하 변속기 오일이라 함)의 온도변화에 따른 점도 변화 특성에 대해서는 실험적으로 많이 연구되었지만, 변속기 오일과 진분을 ER유체로 제조하여 온도변화 특성에 대하여 보고된 예는 아직 없다. 따라서 본 연구에서는 입자 분산계 ER유체를 대상으로 하여 ER효과가 탁월한 ER유체의 제조, ER유체 절연유의 점도 및 전도성 입자의 무게분율에 따른 ER효과와 영향, 전기장 강도에 따른 ER유체의 기본특성을 실험적으로 검토하였다.

점도 실험시 온도범위는  $-10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 까지 변화시켜, 전기장 무인가시와 전기장 인가시 ER유체의 점도변화 특성과 전기장 인가시 항복응력을 비교·분석하여 유압제어 시스템에 ER유체의 특성을 응용하기 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

## 2. ER유체의 역학적 특성

### 2.1 ER유체의 기본 특성

입자 분산계 ER유체는 인가한 전기장의 강도에 따라 겔보기 점도 변화의 범위가 넓고, 응답성이 양호하여 전기장의 강도만으로 유체의 제어가 가능하며, 전기장을 제거하면 원래의 성질을 순간적으로 회복하는 반면, 고체 미립자의 침전에 따라 성능이 저하되는 특징이 있다. 입자 분산계 ER유체의 점도 변화가 어떤 메커니즘으로 이루어지는가에 대한 연구는 ER유체가 발견된 이래로 계속 연구되고 있으나 현재까지 정량적으로 정립된 이론은 존재하지 않고, 다만 개념적으로만 어느 정도 밝혀져 있을 뿐이다. 절연유 중에 분산된 미립자를 전기장 내에 두면 유전분극을 일으켜 각 입자에 쌍극자가 생기고, 분극한 2개의 입자가 접근하면 쌍극자간의 상호작용에 의해 힘이 발생된다.

Fig. 1은 입자분산계 ER유체에 전기장 무인가시와 인가시 ER입자의 거동을 나타낸 것이다. 전기장 무인가시 유전성을 가진 고체 미립자는 (+)전극과 (-)전극에서 자유로이 분포되어있다. 그러

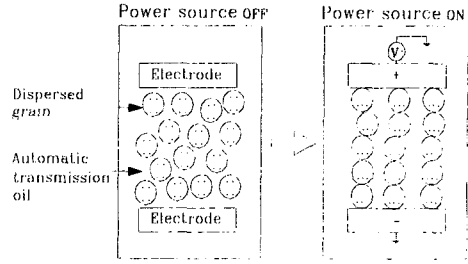


Fig. 1 Generation of clastic ER fluids

나 전기장 인가시 유전성을 가진 고체 미립자는 (+)전극과 (-)전극에서 전기장 방향과 나란한 입자는 인력이 작용하고 전기장에 수직방향의 입자간에는 서로 척력이 작용한다. (+), (-)전극 사이에서 유전분극한 입자끼리 전기장 방향의 결합으로 인해 사슬모양의 클러스터(cluster)를 형성한다. 이러한 클러스터가 절연유의 유동을 저해함으로써 ER유체의 겔보기 점도가 증가하는 것으로 생각된다. 이 때문에 강한 전기장 내에서는 입자끼리의 상호작용도 커져 점도의 변화가 커지게 된다. 이러한 입자분산계 ER유체를 제어하기 등에 응용하여 실제 적용하기 위해서는 전기장에 의해 발생하는 항복응력이 크며, 전기장을 인가하지 않을 때의 점도가 낮고, 사용가능 온도범위가 넓은 ER유체의 개발이 절실히 요구된다.

### 2.2 ER유체의 빙행 특성

뉴턴유체에서 전단응력은 식(1)과 같다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $\tau$ 는 전단응력,  $\eta$ 는 절연유의 점도를 나타내며  $\dot{\gamma} (= du/dy)$ 는 속도구배이다. ER유체는 외부에서 가해진 전기장에 의해 유체의 점도가 변하지만, 입자 분산계 ER유체에서는 실제적으로 유체의 겔보기 점도(apparent viscosity)가 변하는 것이다. 유체의 전단력에 대한 항복응력이 변화하는 것, 즉 빙행유체의 특성을 나타내는 것으로 다음 식으로 표현된다.

$$\tau = \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma} \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $\tau_y(E)$ 는 ER유체의 항복응력을 나타내며, 전기장의 강도( $E$ )와 더불어 지수적으로 증가한다. 따라서 식 (2)를 전기장의 함수로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \alpha E^{\beta} + \eta \dot{\gamma} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, 계수  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 ER유체의 절연유 종류, 입자종류, 무게분율과 절연유의 점도등 ER유체의 조성조건에 영향을 받는 ER유체의 고유상수이다. 전기장의 증가에도 불구하고 전단응력과 전단속도비의 관계가 전기장 무인가시와 동일한 기울기를 갖지 않고 전단력이 감소하는 경우도 있는데, ER유체가 전기장뿐만 아니라 전단속도비의 변화에 의해서도 ER유체의 전단력이 영향을 받기 때문이다. 식(3)과 같은 함수식으로부터 전기장의 증가와 외부에서 가해지는 전단속도비의 증가에 따른 유체의 전단응력의 증가 및 항복응력의 증가를 예상할 수 있으며, 이 함수식을 이용하여 응용장치 설계시 설계조건과 치수를 정하기 위한 이론해석을 할 수 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Table 1은 SV1 센서의 사양을 나타낸것이다. 바깥쪽 원통(cup)의 내경은 23.1mm이고, 안쪽 원통(bob)의 내경은 20.2mm이며, ER유체가 채워지는 bob과 cup의 간극은 1.45mm 이다. 그리고 안쪽 원통이 ER유체와 접하는 길이는 61.4mm이다. 또한 bob과 cup을 전극으로 사용하여 전기장의 강도에 따른 ER효과의 영향도 검토할 수 있도록 제작되어있다. 점도계와 PC가 연결되어, 전단속도비(bob의 회전속도)변화에 따른 점성과 전단응력이 자동으로 측정되어 출력되도록 구성되어 있다.

Table 1. Specifications of SV1 Sesor

Sensor System	SV1
Sensor No.	5
Inner Cylinder (Rotor)	
Radius $R_i$ (mm)	10.1
Hight L (mm)	61.4
Outer Cylinder (Cup)	
Radius $R_a$ (mm)	11.55
Radii Ratio $R_a/R_i$	1.14
Gap Width (mm)	1.45
Sample Volume V(cm <sup>3</sup> )	12.0
Temperature (°C)	-30~100
System Factors	
f	2530
M	890

Fig. 2는 연구에서 제조한 ER유체의 빙햄특성을 조사하기 위하여 사용한 회전식 점도계(Haake社,VT -500)의 개략도 이다.이것은 동일한 중심축상에 있는 고정된 외부원통(cup이라 함)과 회전하는 내부원통(bob이라 함)사이의 간극에 ER유체를 주입하고, 일정한 전단속도비 또는 전단속도비를 변화시켜, 내부원통을 회전시키는데 필요한 토크를 계측하여 점도를 측정하는 점도계이다.

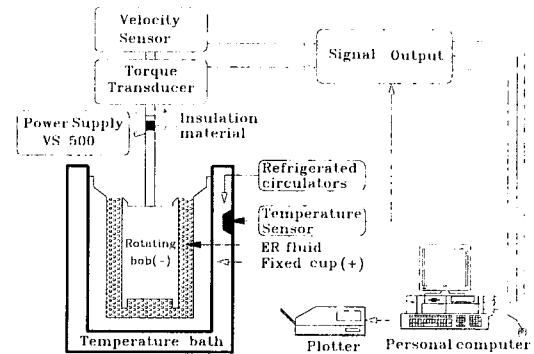


Fig. 2 Experimental setup Bingham test

ER유체에 인가되는 전기장  $E = 0.0 \sim 2.0 \text{ kV/mm}$ 까지  $0.5 \text{ kV/mm}$ 씩 단계적으로 변화시켰으며, 전단속도비를 2분 동안에  $0.0 \sim 200 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ 까지 증가하도록 조건을 설정하였다. 한편, 온도는  $-10 \sim 50^\circ\text{C}$ 까지 변화시켰다. 전기장이 인가되지 않은 상태에서 ER유체의 절연유는 뉴턴유체와 같이 거동을 하게 된다.

Table 2는 실험에 사용한 변속기 오일의 물성치를 나타낸 것이며, 현대자동차의 오일(ATF SP2)을 사용하였다. 변속기 오일은 온도변화에 따른 전기절연성, 화학적 안정성, 열산화 안정성이 우수하고 점도변화가 작으며, 전단에 대한 저항성이 큰 특징을 가지고 있기 때문에 ER유체로 적당하다. 변속기 오일은 내마모성, 수분 분리성, 방청성 등이 양호하다.

Table 2. Basic properties of ER fluid lubricant

Automatic transmission oil	
Specific weight	0.8613
Viscosity (cSt)	38.01 (at 40 °C) 7.56 (at 100 °C)
Permittivity (50Hz)	5.70
Pour point	-42.5 °C
Flashing point	204 °C

Fig. 3은 앞에서 기술한 회전식 점도계를 사용하여 전분 입자의 무게분율이 0.00wt(%)인 경우, 변속기 오일만의 점도변화를 측정하여 나타낸 것이다. x축은 전단속도비, y축은 전단응력을 나타내며, 기울기가 변속기 오일의 점도를 나타낸다. 전단속도비(bob의 회전속도)가 증가함에 따라 전단응력도 증가하며, 뉴턴유체의 특성을 나타내고 있음을 실험을 통해 알 수 있다. 그래프에서 온도가 내려갈수록 기울기가 증가하며, 점도가 증가하는 것을 알 수가 있다. 기호(●~⊕)로 표시된 실험결과의 기울기가 온도변화에 따른 변속기 오일의 점도를 나타낸다. 온도변화에 따라 전단응력이 전단속도비에 거의 선형적으로 변화하는 뉴턴유체로 거동함을 알 수 있다. 또한 온도가 -10~25℃의 범위에서 점도변화가 비교적 크고, 그 이상의 온도범위에서는 점도변화가 둔감함을 볼 수 있다. 유압 시스템에서는 변속기 오일의 온도범위를 가능한 40~60℃로 유지되도록 설계하기 때문에 변속기 오일 제조회사에서는 이 온도범위내에서 점도변화가 최대한 작도록 변속기 오일을 제조하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다.

Fig. 4는 온도 40℃에서 전분입자의 무게분율이 35.0wt%인 ER유체에 대하여, 전기장을 E=0.0~2.0kV/mm로 변화시켜 실험한 결과이다. 식(3)에서, ER유체의 항복응력은 유체가 변형을 일으키기 시작하는 순간의 전단응력으로서, 매우 짧은 시간에 비정상적으로 발생하여 불규칙적으로 거동하기 때문에 정확하게 예측하는 것은 어렵다. 이것은 Fig. 3의 회전 원통형 점도계에서 bob과 cup 전극에 전기장이 인가되면, 간극 1.45mm의 환상형(環狀形) 공간 내에 채워진ER

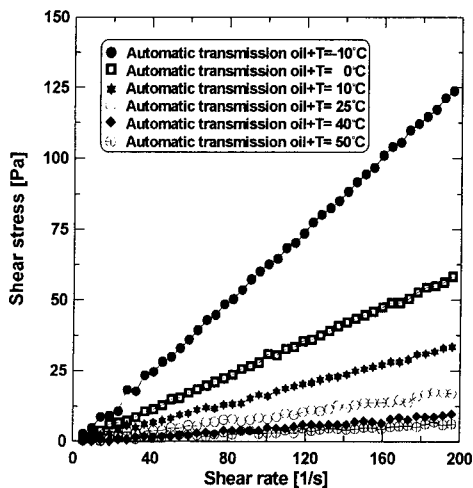


Fig. 3 Automatic transmission oil with temperature variation

유체는 정지된 상태에서 클러스터가 형성되고, bob이 회전하려는 순간에는 bob과 고정된 cup 사이에 형성된 클러스터가 순간적으로 파괴될 때 큰 토크가 필요하다. 또한 정지된 상태의 변속기 오일과 전분 입자를 초기에 가속시키는데 필요한 토크 및 bob 기동시 축 지지부에 작용하는 미소한 마찰손실토크의 영향이 복합적으로 작용하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다.

Fig. 5는 전기장 변화에 따른 항복응력의 크기를 나타낸 것이다. 전기장의 강도가 커질수록 항복응

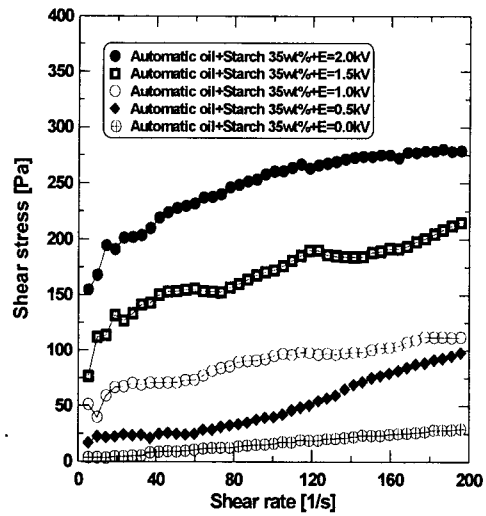


Fig. 4 Relationship between shear stress and shear rate

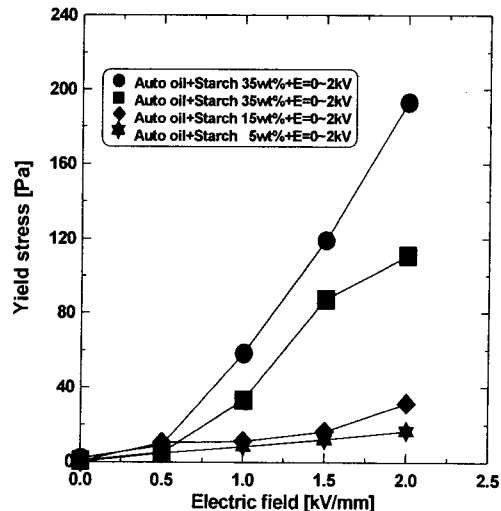


Fig. 5 Electric field dependent Bingham characteristics

력의 값이 증가한다는 것을 알수가 있다. 전기장을 인가하면 초기 항복응력이 발생하여 병행특성을 나타낸다. 이것은 회전 원통형 점도계 간극 내에 들어있는 ER유체의 입자는 인가된 전기장 강도가 높아짐에 따라 강한 복합 클러스터를 형성하게 되고, 이 복합 클러스터를 변형시키기 위해 초기에 많은 전단응력이 필요하기 때문이다. 전분 입자의 무게분율이 증가하고 전기장의 강도가 증가함에 따라 항복응력도 증가함을 알 수가 있다. 인가되는 전기장에 의하여 나타나는 ER유체의 항복응력을 식(3)과 같이 전기장에 대한 함수관계로 표현하면, 전분 입자의 무게분율이 35.0wt% 이고 전기장  $E=2\text{kV/mm}$  인 경우  $192.96E^{0.53}$  으로 나타낼 수가 있다.

Fig. 6은 온도가  $40^\circ\text{C}$ 로 일정한 상태에서 전기장 강도 및 전분 입자의 무게분율 변화에 따른 점도 변화 특성을 나타낸 것이다. Fig. 6은 온도가  $40^\circ\text{C}$ 로 일정한 상태에서 전기장 강도 및 전분 입자의 무게분율 변화에 따른 점도 변화 특성을 나타낸 것이다. 무게분율과 전기장의 강도가 증가함에 따라 점도가 증가함을 볼 수 있다. 전분 입자의 무게분율이 비교적 적은 경우는 전기장 강도에 거의 비례하여 완만하게 점도가 증가하지만, 무게분율이 25.0wt(%)이상에서는 전기장 강도에 따라 점도변화가 급격함을 알 수 있다. 그래프에서 (★~●)표시가 전기장 강도에 따른 점도변화를 표시한다. 전분 입자의 무게분율이 35.0wt(%)이고, 전기장의 강도  $E=2.0\text{kV/mm}$ 인 경우 무게분율이 5.0wt(%)와 비교해 보면 점도가 약 10배정도 증가한 것을 알 수가 있다. ER효과를 결정짓는 인자로는

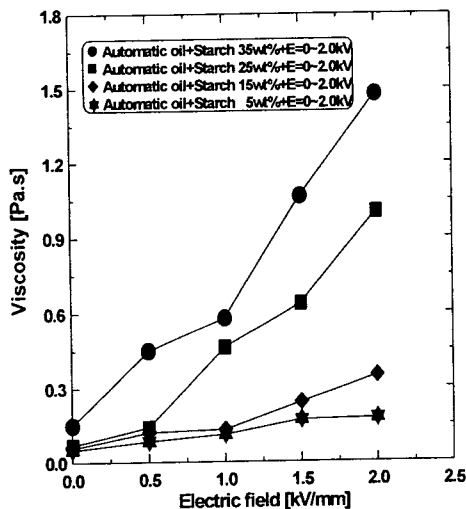


Fig. 6 Relationship between viscosico and electric field

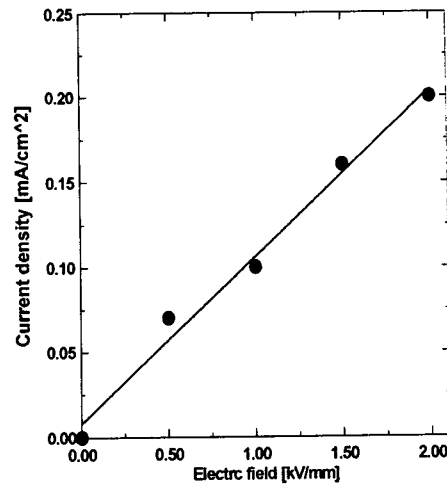


Fig. 7 Current density of ER fluid

전기장의 강도 및 ER입자의 무게이 중요하다는 것을 의미한다.

Fig. 7은 SV1 센서를 이용한 ER유체 측정 시 전기장의 변화에 따른 전류의 세기를 측정 한 것이나 전기장의 강도가 증가할수록 전류도 증가하는 선형관계임을 알 수 있다. 상변화시 요구되는 전기장은 높지만, 전류는 매우 낮으므로 소비전력이 낮은 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 입자분산계 ER유체를 대상으로 하여 ER효과가 탁월한 ER유체의 제조, ER유체 절연유의 점도 및 전도성 입자의 무게분율에 따른 ER효과에 영향을, 전기장 강도에 따른 ER유체의 기본특성을 실험적으로 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) ER유체의 항복응력은 전기장의 강도, ER입자의 무게분율에 큰 영향을 받는다. 또한 전기장이 인가되면, 전단응력과 전단속도비는 이상적인 병행유체 거동과는 상이한 경향을 나타낸다.

(2) 온도  $40^\circ\text{C}$ 이고, 전기장의 강도  $E=2.0\text{kV/mm}$ 이고 ER입자의 무게분율이 35wt%인 경우 무게분율이 0.0 wt%인 변속기 오일 보다 ER유체의 겔보기 점도가 20배정도 증가했다.

## 참고문헌

1. W. M. Winslow, "Induced Fibrillation Suspensions", J. Applied Physics, Vol.20, pp.1137-1140, 1949
2. A. J. Simmonds, "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit", IEE Proceeding-D, Vol. 138, No. 4, pp.400-404, 1991.
3. D. A. Brooks, "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices", Journal of Modern Physics, Vol. 6, pp.2705-2730, 1992
4. M. Nakano and T. Yonekawa, "Pressure Response of ER Fluid in a PistonCylinder-ER Valve System", Proc. of the 4th Int. Conf. on Electrorheological Fluid, pp.477-489, 1994
5. S. Yokota and Y. Kondoh, "A Control Valve by Making Use of an Electro-Rheological Fluid", 日本機械學會論文集, pp.93-100, 1996.9
6. 장성철, "ER유체를 이용한 유압제어밸브의 개발" 경일대학교 석사학위논문, 2000
7. 김도태, 장성철, "평행평판 간극내의 유량-압력강하 특성", 한국공작기계학회 추계 학술대회 논문집, pp 399-404, 1999
8. 김도태, 장성철, 최윤대, "ER유체의 유동 특성에 관한 실험적 연구", 한국공작기계학회 춘계학술대회 논문집, pp 216-221, 1999