

평행평판의 전극형상에 따른 ER유체의 유동특성 I

⁰장성철* · 염만오** · 김도태*** · 김태형**** · 배태열*****

The Flow Characteristics of ER Fluids According to the Electrode Shape of Two Parallel-Plate

S.C.Jang, M.O.Yum, D.T.Kim, T.H.Kim and T.Y.Bae

Key Words: Electro-Rheological fluid (ER유체), Flow rate(유량), Two parallel-plate(평행평판)
Electric field(전기장), Pressure drop(압력강하)

Abstract

Electro-Rheological(ER) fluid are suspensions which show an abrupt increase in rheological properties under electric fields. ER effects arise from electrostatic forces between the starch particles dispersed in the electrically insulating silicone oil, induced when an electric field is applied. Yield stress of the fluids were measured on the couette cell type rheometer as a function of electric fields. This paper presents performance analyses of four types of the two parallel-plate. Which have different electrode length and width but same electrode area. On the basis of the pressure drop and flow rate analysis. Four types of the two parallel-plate are designed and manufactured. Using ER fluid, it is possible to directly interface between electric signals and fluid power without moving parts.

기호설명

η : 점성
 Q : 유량
 τ : 전단응력
 $\dot{\gamma}$: 전단속도비
 ΔP : 압력강하

1. 서 론

1940년대말 W. M. Winslow⁽¹⁾가 전기적 임펄스를 기계적 힘으로 변환하는 방법과 수단으로 미투허를 획득한 이후, 전기점성유체(電氣誘變流體 또는 ER유체)

가 다방면에 응용되고 있다. ER유체는 전기 절연성 기름중에 유전성을 가진 고체 미립자를 분산시킨 현탁액이다. 전기장을 인가하면 고체 미립자가 (+)전극과 (-)전극의 간극내에서 사슬구조를 형성하기 때문에 유체의 걸보기 점도가 현저하게 증가하여 뉴턴유체에서 빙햄유체로 유동특성이 변화한다. 또한 전기장을 제거하면 원래의 점성으로 되돌아가는 가역성(可逆性)을 가지며, 전기장 인가시 응답성이 우수하기 때문에 자동차, 토목, 건축, 항공기 등의 진동 감쇠 및 제어분야에 이용될 것으로 기대된다. ER유체는 전기장의강도만을 변화시켜 전극에 인가하게 되므로 부가적인 운동장치가 필요없어 응용장치 설계의 단순화를 가져올 수 있다. 또한 상변화에 요구되는 전기장은 높지만, 전류는 매우 낮으므로 소비전력이 낮은 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 분산계 ER유체를 응용한 제어밸브를 개발하기 위한 전 단계로써, 전극형상에 따른 평행평판 간극내의 ER유체의 유동특성을 실험적으로 검토하였다. 동일한 전극 표면적은 같으나, 전극너비

* 경남대학교 대학원 기계공학과
** 경남대학교 기계자동화공학부
*** 경일대학교 기계공학부
**** 경남정보대학 기계계열
***** 창원전문대학 특수장비과

와 길이를 변화시킨 4종류 형태의 평행평판을 설계·제작하였으며, 평행평판의 상·하 부분은 전극으로 사용된다. ER벨트로 응용하기 위해서는 평행평판 간극내를 통과하는 유량과 압력강하 특성을 파악하는 것이 중요하다. 특히, 평행평판을 통과하는 유량에 의해 발생하는 미소한 압력강하를 계측하는 것은 중요한 기술적 과제이다. 본 연구에서는 스트레인지어를 이용한 미소 차압계를 개발하여 압력강하를 계측하였다. 실험은 정상유동상태에서, 전기장의 강도에 따른 ER유체의 유동특성을 검토하였다.

2. ER유체의 특성

ER유체는 외부에서 인가한 전기장에 의해 유체의 항복응력이 변화하는 기능성 유체로 잘 알려져 있으며, 입자 분산계와 균일계로 분류된다. 입자 분산계 ER유체는 $10^{-6}m$ 정도의 크기를 가진 분극성이 강한 미세입자 분말을 유전유체(誘電流體)속에 혼합하여 제조한 콜로이드형 현탁액이다. 균일계 ER유체는 전기장에 의해 분자의 클러스터 또는 분자의 방향이 지배되며, 액정(liquid crystal)이 잘 알려져 있으며 가격이 고가이다.

본 연구에서 사용된 ER유체는 입자 분산계 유체로서, 용매는 전기절연성이 우수한 실리콘 오일(KF96-50, Korea Shinetsu Silicone Co.)이, 분산된 미세입자는 특수처리된 전분 입자(Sigma Chemical Co.)를 사용하였다. 사용 이유로는 액정의 기본 점도보다는 분산계 ER유체의 기본점도는 다양하게 선택할 수 있고, ER효과의 변화범위가 넓기 때문이다.

Fig. 1은 분산계 ER유체에 전기장을 인가하지 않은 경우와 전기장을 인가한 경우에 대한 ER입

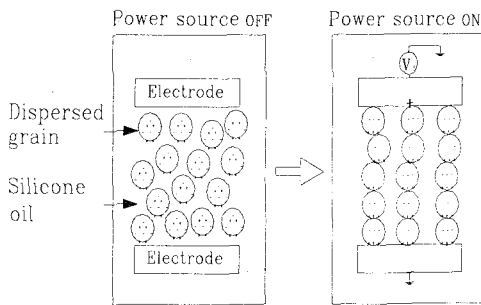


Fig. 1 Generation of clastic orientation ER fluids

자의 거동을 나타낸 것이다. 전기장이 인가되지 않은 상태에서 전기 절연성 오일중에 분산된 미세입자는 (+)전극과 (-)전극 사이에 균일하게 분포되어 전기적인 극성을 띄지 않으며 뉴턴유체의 특성을 나타낸다. 전기장이 인가되면, (+)전극과 (-)전극 사이에서 유전분극한 입자끼리 전기장 방향의 결합으로 인해 사슬모양의 클러스터(cluster)를 형성하게 되므로 항복응력을 갖는 병행유체의 특성으로 변화한다. 이러한 클러스터가 전기 절연성 오일의 유동을 저해함으로써 ER유체의 겔보기 점도가 증가하는 것으로 생각된다. 또한, 전기장이 제거되면 원래의 유체특성으로 돌아가는 가역성을 가지며, 전기장 인가에 대하여 응답성이 우수한 특징이 있다.

뉴턴유체는 유체가 흐를 때 전단응력과 전단속도비에 비례하며, 그 비례상수는 유체의 점도이다. 그래프에서 원점을 지나는 직선인 유체로서 다음 식과 같다.

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

여기서, τ 는 전단응력, η 는 절연유의 점도를 나타내며 $\dot{\gamma} (= du/dy)$ 는 전단속도비이다. du 는 전극간 간극사이의 유체의 속도이고 dy 는 전극방향으로의 길이이다. ER유체는 외부에서 가해진 전기장에 의해 유체의 점도가 변하는 것으로 표현하고 있지만, 입자 분산계 ER유체에서는 실제로 유체의 겔보기 점도(apparent viscosity)가 변하는 것이다. 유체의 전단력에 대한 항복응력이 변화하는 것, 즉 병행유체의 특성을 나타내는 것으로 다음 식으로 표현된다.

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

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

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

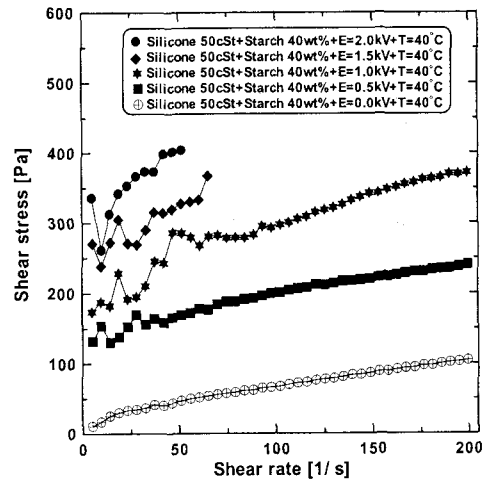
여기서, 계수 α , β 는 ER유체의 절연유 종류, 입자종류, 무게분율과 절연유의 점도등 ER유체의 조성조건에 영향을 받는 ER유체의 고유상수이다. 식(3)의 관계로부터 전기장에 대한 전체 전단응력의 증가 및 항복응력의 크기등을 예측할 수 있다.

본 연구에서 조성된 ER유체의 용매는 실리콘

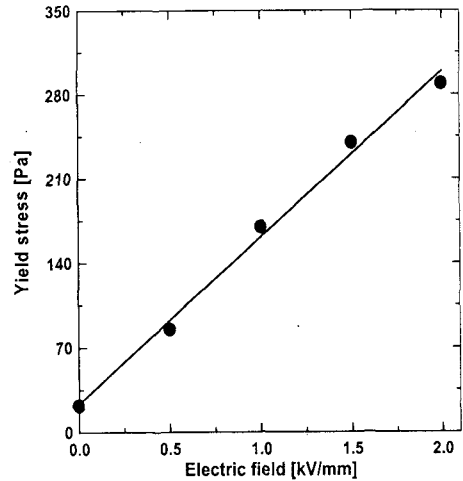
오일(점성 50cs)을 사용하였으며, 전도성의 입자는 특수 화학 처리된 전분입자를 사용하여 용매에 대한 무게분율을 40%가 되도록 ER유체를 조성하였다. ER유체의 특성을 고찰하기 위해서 사용된 점도측정장치(독일 Haake社, VT-500)는 동일한 중심축상에 있는 고정된 외부 원통(cup이라 함)과 회전하는 내부원통(bob이라 함)사이의 간극에 ER유체를 주입하고, 전단속도비를 변화시켜, 내부원통을 회전시키는데 필요한 토크를 측정하여 점도를 측정하는 점도계이다. 또한, bob과 cup을 전극으로 사용하여 전기장의 강도에 따른 ER효과의 영향도 검토할 수 있도록 제작되어 있다. 점도계와 PC가 연결되어, 전단속도비(bob의 회전속도) 변화에 따른 점성과 전단응력이 자동으로 측정되어, 출력되도록 구성되어 있다. 실험조건으로, bob과 cup 사이에 형성된 전극을 통하여 전기장을 0~2kV/mm까지 0.5kV/mm씩 단계적으로 변화시켰으며, 전단속도비를 0.0~200(s⁻¹)까지 2분 동안에 증가하도록 조건을 설정하였다.

본 연구에서는 ER유체를 자체 조성하고 이에 대한 빙행특성 실험을 수행하여 조성된 ER유체의 항복전단응력을 도출하였다. 일반적으로 ER유체의 항복전단응력은 유체가 유동을 일으키기 시작하는 순간의 전단응력을 의미하는데 유체의 유동은 매우 짧은 시간에 발생하고 또한 불규칙한 거동을 하므로 항복전단응력을 정확히 측정하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서 초기 항복전단응력값은 실험결과를 곡선적합(curve fitting)하여 전단속도비의 값이 영(zero)일 때의 전단응력축의 절편값을 설정하여 고찰하였다.

Fig. 2(a)는 온도 40℃, 전분입자의 무게분율 40%인 ER유체에 대해서, 인가전압을 0~2kV/mm까지 0.5kV/mm씩 단계적으로 변화시켜 실험한 결과이다. 전기장을 인가하지 않은 상태에서 ER유체는 뉴턴유체와 같이 거동함을 알 수 있고, 전기장이 인가되면 초기 항복응력이 발생하여 빙행특성을 나타낸다. 또한 인가된 전기장이 높아짐에 따라 항복전단응력도 증가하는 경향을 나타낸다. 전단속도비가 낮은 영역에서 전단응력이 불규칙하게 변하는 것은 점도계에서 bob(+전극)과 cup(-전극)에 전기장이 인가되면, 전극의 간극내에 채워진 ER유체가 정지된 상태에서 클러스터를 형성하게 되고, 초기상태에서



(a) Shear stress versus shear rate



(b) Yield stress versus electric field

Fig. 2 Bingham properties of ER fluids

bob이 회전하려는 순간에는 bob과 cup사이에 형성된 클러스터가 순간적으로 파괴됨으로서 큰 토크가 필요하게 되며, 또한 bob 축 지지부에 작용하는 미소한 마찰손실토크의 영향이 복합적으로 작용하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 또한 마찰손실 토크는 bob의 기동시에는 크고, 전단속도비의 증가와 함께 감소하는 경향을 나타내며, 전단속도비가 어느정도 커지게 되면 ER효과와 점성마찰 특성이 지배적으로 작용하게 된다. Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 전기장 증가에 따라 항복전단응력의 값이 지수함수적으로 증가하는 것을 알 수 있으며, 전기장의 강도가 0~

2kV/mm인 경우를 식(3)에서 전기장의 함수식으로 나타내면 다음과 같다

- i) $E=2kV/mm$: $\tau = 287.79E^{2.43} Pa$
- ii) $E=1kV/mm$: $\tau = 199.94E^{0.93} Pa \dots\dots (4)$
- iii) $E=0kV/mm$: $\tau = 22.41E^{0.42} Pa$

식 (4)에서 고찰한 바와 같이 ER유체의 특성변화에 영향을 미치는 인자로는 전기장의 크기가 매우 중요하다는 사실을 알 수가 있다.

3. 평행평판의 작동원리 및 제작

본 연구에서 평행평판에서의 유동상태의 메커니즘을 개략적으로 나타내면 Fig. 3과 같다. (+)전극과 (-)전극 사이에 형성된 클러스터는 전기장과 점도 및 ER유체의 무게분율이 높아질수록 전극에 부착하는 클러스터는 굽어지고 길어지며 ER유체의 흐름중에 형성된 클러스터 또는 클러스터의 결합력이 흐름의 저항이 되는 것을 알 수 있다. 이러한 (+)전극과 (-)전극의 간극 사이로 ER유체가 유입될 때 요구되는 전기장을 평행평판의 상·하 전극판에 인가하여 요구하는 압력강하 성능을 얻을 수 있다. 평행평판에 발생하는 전체 압력강하는 점성과 ER유체의 전기장에 따른 전단응력 변화에 의한 압력강하의 향으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = \Delta P_{ER} + \Delta P_{\eta} \dots\dots (5)$$

$$= \frac{2L\tau_y}{\delta} + \frac{12\eta LQ}{b\delta^3}$$

여기서 나타난 설계변수를 살펴보면 b 는 너비이고, δ 는 전극의 간극, L 은 평행평판 전극의 길이

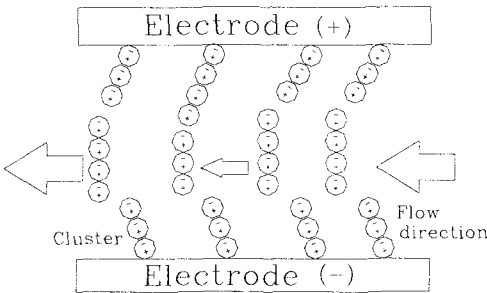


Fig. 3 Schematic representation of cluster ER fluids

Table 1. Electrode shape of two parallel-plate

| Parallel-plate | Electrode | | | |
|-----------------|-----------|---------------|-------------|-------------------------|
| | Shape | Diameter [mm] | Length [mm] | Area [mm ²] |
| Parallel-plate1 | | 2 | 189 | 18145 |
| Parallel-plate2 | | 2 | 187 | 18145 |
| Parallel-plate3 | | 2 | 186 | 18145 |
| Parallel-plate4 | | 2 | 152 | 18145 |

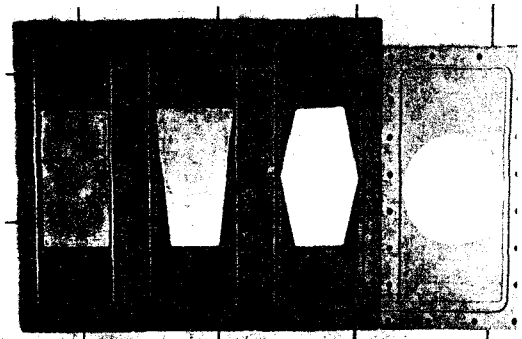


Fig. 4 Photograph of the electrode shape of two parallel-plate

이며 Q 는 유량을 나타낸다. 식(5)를 살펴보면, 전기장을 인가하지 않은 경우에는 전기장에 의한 항복전단응력 $\tau_y(E)$ 값이 없으므로 전체압력은 평행평판내의 ER유체의 점성에 의해서만 영향을 받는다. 그러나 전기장을 인가했을 경우에는 전체압력 ΔP 가 ΔP_{ER} 을 초과하지 않을 경우에는 유체의 흐름이 나타나지 않다가 전기장의 크기만큼 저항력을 초과하는 순간부터 유체의 흐름이 다시 발생되게 되는 것이다. 또한 식(5)로부터 알 수 있듯이, 평행평판의 성능은 전극의 너비와 길이 및 간극 등과 같은 설계변수와 전기장에 따른 항복응력의 크기에 따라 영향을 받는다. 특히, 전기장 강도에 따른 압력강하에 직접적인 영향을 주는 것은 ER유체의 항복응력으로서 이에 대한 정확한 실험적 빙햄모델이 필요하다.

Table 1과 Fig. 4는 제작된 평행평판의 전극형상을 나타낸다. 제작된 평행평판은 4종류로 동일

한 전극 표면적을 갖지만 전극너비와 길이를 4가지 형태로 변화시켜 가공하였다. ER유체가 흘러들어갈 수 있는 전극의 간극 δ 는 전부 1.0mm이다. 제작된 평행평판의 전극은 전기전도도가 좋은 구리를 사용하였으며, 평행평판은 알루미늄을 아노다이징 처리하여 고전압 인가시 상·하 평판을 절연되게 하였다. (+)전극과 (-)전극의 간극이 유체의 흐름에도 일정하게 유지되도록 하였다. 평행평판의 제작시 가장 중요한 것은 압력이 가해졌을 때 누유를 막는 것과 전극부에 고전압이 가한 상태로 단락현상없이 전기장이 유지되도록 하는 것이다. 누유를 방지하기 위해서 실링이 중요하고, 전극전체에 일정한 전기장이 유지되기 위해선 전극부의 조도가 고와야 한다. 따라서 본 연구에서는 (+)전극과 (-)전극의 구리를 표면처리하여 전극부를 제작하고, 두께 2mm의 오링(O'ring)으로 누유를 방지하였다.

4. 실험방법 및 고찰

Fig. 5는 본 연구에서 제안된 평행평판의 성능 실험을 위한 실험장치이다. 펌프에 구동된 ER유체가 간극내부로 유입됨에 따라 전극판에 요구되는 크기의 전기장을 인가함에 따라 ER효과가 발생한다. 실험에 사용된 입자의 크기는 유압회로내의 원활한 유동을 고려하여 $10\ \mu\text{m}$ 로 제한하였다. 탱크내에 저장된 전분 입자의 침전을 방지하고, 입자분포를 균일하게 하기 위해서 전동식 교반기로 교반하였다. 유량을 공급하기 위해 유압 펌프는 ER유체와 같이 유체내의 작은 입자들이 포함되어 있는 특수한 형태의 유체를 이송시키기에 적합한 트로코이드 펌프가 사용되었다.

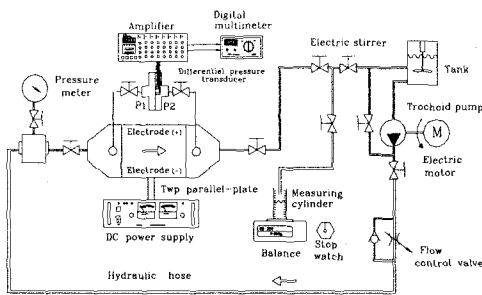


Fig. 5 Experimental apparatus for two parallel-plate

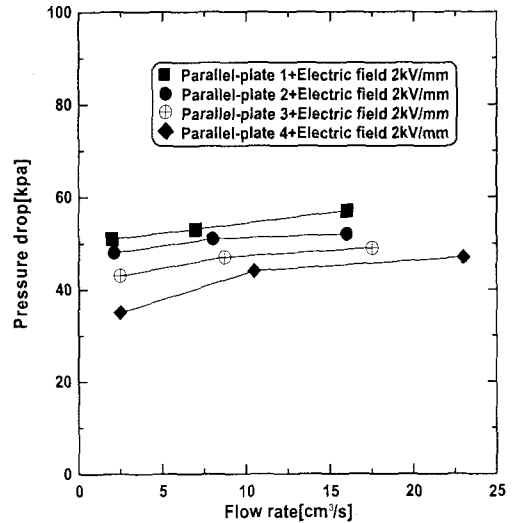


Fig. 6 Pressure drop variation with flow rate for two parallel plate at 0.5bar

모터의 정격회전수는 1000rpm이고 3상 교류 220V가 사용되었으며, 펌프의 최대 유량은 $4.5\ \ell/\text{min}$ 이다. 평행평판의 입·출구쪽에는 미소 차압계가 장착되어 펌프에서 구동된 ER유체가 평행평판에 입력 되기전의 압력과 전기장을 가한 후 ER효과에 의해 발생한 압력, 즉 강하된 압력을 측정하였다. 압력이 스트레인게이지의 반대면에 작용하면, 박막에 부착된 스트레인게이지는 미소한 변형을 받게된다. 변형량이 연산증폭기로 전달되면 디지털 전압계에서 전압을 읽어 압력강하를 계속하였다. 실험조건은 첫째, 압력을 0.5bar로 일정하게하여 유량을 변화시켜 직접 제조한 입자분산계 ER유체를 사용하였다. 둘째, 전기장을 0~2kV/mm까지 0.5kV/mm 씩 증가시켜 유량을 변화시켜, 전기장 강도에 따른 압력강하를 측정하였다.

Fig. 6은 압력 0.5bar, 전기장의 강도 $E=2\text{kV}/\text{mm}$ 인 상태에서, 동일한 전극 표면적을 갖지만 전극너비와 길이를 4가지 형태로 변화시킨 평행평판의 간극내에서 발생한 유량과 압력강하 특성을 나타낸 것이다. 평판4(parallel plate4)가 평판1(parallel plate1)에 비해 압력강하가 낮은 것을 알 수 있다. 이는 식 (5)의 수식에서 알 수 있듯이 평판4가 평판1에 비해서 전극길이 L 이 짧고 전극너비 δ 가 넓어 유체저항이 작아지

기 때문이다. 평행평판의 전극형상에서 전극길이의 감소는 전기장 무인가시의 압력강하 뿐 아니라 전기장 인가시의 압력강하향 ΔP_{ER} 도 감소시키게 한다. 전기장 $E=2kV/mm$ 인 경우, 전극형상에 따른 평행평판의 유동특성에서 평판1이 평판4보다 더 큰 압력강하가 나타났으며, 전극형상이 바뀌더라도 모든 평판의 압력강하는 기울기가 비슷한 것을 알 수가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 분산계 ER유체를 응용한 제어밸브를 개발하기 위한 전 단계로써, 전극형상에 따른 평행평판 간극내의 ER유체의 유동특성을 실험적으로 검토하였다. 동일한 전극 표면적은 같으나, 전극너비와 길이를 변화시킨 4종류 형태의 평행평판을 설계·제작하였으며, 평행평판의 상·하 부분은 전극으로 사용하였다. ER밸브로 응용하기 위해서 평행평판 간극내를 통과하는 유량과 압력강하 특성을 파악하였으며 평행평판을 통과하는 유량에 의해 발생하는 미소한 압력강하를 스트레인게이지를 이용한 미소차압계를 개발하여 계측하였다. 실험은 정상유동상태에서, 전기장의 강도에 따른 ER유체의 유동특성을 검토하였다. 향후 본 연구에서는 전극형상에 따른 평행평판내의 압력강하 및 유량특성을 분석한 후 유압 제어밸브에 응용할 예정이다.

참고문헌

- (1) W. M. Winslow, "Induced Fibration 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 Piston Cylinder-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, 염만오, 김도태, 김태형 "ER유체를 이용한 유압제어밸브의 개발", 한국유체공학 학술대회 논문집, pp.495-498, 2000.9
- (7) A.R.Johnson, W.A.Bullough, R.Firoozian, A.Hosseini-Sianaki, J.Makin and S.Xiao, "Testing on a high speed Electro-Rheological Clutch" Proceeding of the 3rd International Conference on ER fluids, Edited by R.Tao,pp.424-441, 1994