

# 전기장으로 제어되는 ER유체의 유동특성에 관한 연구

윤신일\*, 장성철<sup>+</sup>, 이해수<sup>++</sup>  
(논문접수일 2005. 4. 26, 심사완료일 2005. 5. 26)

## Study on Flow Characteristics of Electro-Rheological Fluids with Electric Field Control

Shin-Il Yun\*, Sung-Cheol Jang<sup>+</sup>, Hae-Soo Lee<sup>++</sup>

### Abstract

An experimental investigation was performed to study the characteristics of Electro-Rheological fluid flow in a horizontal rectangular tube with or without D.C electric field control. First, the microscopic behavior of the ER suspension structure between rectangular tube brass electrodes for the stationary ER fluid and flow of the ER fluid was investigated by flow visualization. The flow of the ER fluid between fixed rectangular tube was solved experimental using the constitutive equation for a Bingham fluid. ER fluid is made silicon oil mixed with 0.2wt% starch having hydrous particles. Velocity distributions of the ER fluids were obtained by particle image velocimetry measuring those of the clusters using an image processing technique.

**Key Words** : Electro-Rheological Fluid(전기점성유체), Particle Image Velocimetry(PIV, 입자영상유속계), Rectangular Tube(사각튜브), Electric Field Control(전기장 제어)

## 1. 서론

ER유체는 비전도성의 절연성 오일속에 강한 전도성의 고체 미립자를 분산시킨 현탁액이며, 전기장의 강도에 따른 유변학적 특성이 뛰어나고, 응답시간이 수 내지 수십 ms 정도로 매우 빠르기 때문에 밸브와 클러치를 포함하여 로봇

분야에 응용되고 있다. 그러므로 새로운 응용분야의 적용 가능성을 넓히는 응용연구와 ER유체의 유동특성과 관련된 메커니즘을 규명하는 기초연구가 중요한 연구과제로 부상하고 있다. 그러나 ER유체의 유동상태에 관한 연구는 현재까지 매우 적고, ER유체를 사용한 기기·시스템의 성능향상을 위해서 ER유체의 유동상태를 아는 것은 매우 중요하다.

\* 경남대학교 기계자동화공학부 (kugf72@kyungnam.ac.kr)

주소: 631-701 경남 마산시 월영동 449번지

+ 경남대학교 기계자동화공학부

++ 경남대학교 대학원 기계자동화공학부

ER유체의 유동상태에 관한 연구로서 Wang<sup>(1)</sup>등은 실험적인 고찰 없이 수치해석 기법만으로 ER유체의 유동특성을 설명하였고, Tsukiji<sup>(2)</sup>는 ER유체를 병행유체로 가정한 기초식을 이용해서 이론계산을 수행하였다. 한편, 국내에서도 좁은 평행평판 전극사이에서 ER유체의 유동가시화 실험이 수행된 경우가 있다<sup>(3)</sup>. 그러나 유동장에서 ER유체의 복잡한 유변현상을 발생시키는 메커니즘 및 기초 연구는 부족한 상태이다.

본 연구에서는 PIV(particle image velocimetry)를 이용하여 전기장의 강도에 따라 제어되는 ER유체의 유동 가시화 실험을 수행하였으며, 가시화 결과에 화상입력장치를 이용하여 입자의 변위를 계측함으로써 속도분포를 얻었다.

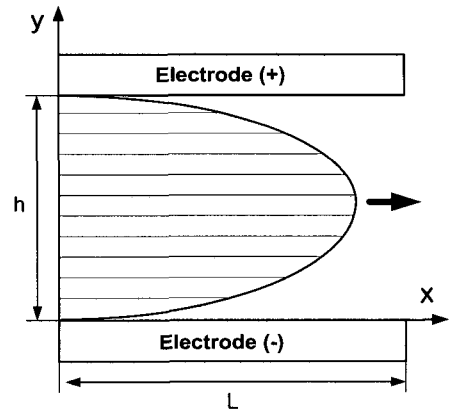
## 2. ER유체의 유동특성

ER유체에 전기장이 인가된 상태에서 유체의 유동에 의한 관성력이 작음하게 되면 유체는 저항을 하게 된다. 관성력보다 전기장에 의한 입자들의 결합력이 작은 경우에 ER유체는 항복을 일으켜 유동하며, 유동이 시작되는 부근에서 매우 복잡한 변화를 일으킨다. 이러한 현상에 대하여 정확히 설명할 수 있는 이론은 제시되어 있지 않다. 이러한 현상은 ER유체의 조성에 사용된 입자의 크기, 입자의 형상, 절연유의 종류, 온도 및 전기장의 강도에 따라 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 또한 유동속도 변화 및 전기장의 강도에 따라 형성되는 클러스터(cluster)의 형태는 달라지며, 이에 따라 전단력의 크기도 달라지게 된다. 이와 같이 유동속도 및 전기장 강도 변화에 따른 클러스터의 형성과정과 거동을 직접 관찰하고 이에 대한 자료를 구축한다면, 전기장 강도와 유동속도 변화에 따른 ER유체의 기초자료로 활용될 수 있다.

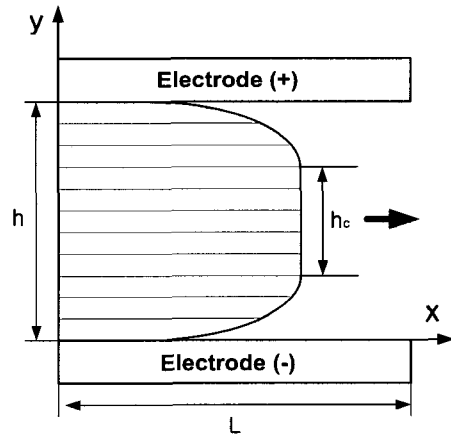
Fig. 1 (a) (b)는 Fig. 2의 사각튜브 유로 내에서 전기장을 인가하지 않은 경우와 전기장을 인가한 경우의 유동특성을 나타낸 것이다. 전기장을 인가하지 않을 경우 압력강하는 ER유체의 점성에만 영향을 받으며, 층류흐름에서는 유량에 비례한다. 따라서 이 경우의 유량과 압력강하는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>(4)</sup>.

$$\Delta P_{\mu} = \frac{12\mu LQ}{b h^3} \quad (1)$$

여기서,  $b$ 는 사각튜브의 폭,  $h$ 는 사각튜브 사이의 간극,  $L$ 은 사각튜브에서 전극의 길이,  $Q$ 는 전기장이 인가되지 않



(a) Voltage off



(b) Voltage on

Fig. 1 Flow of ER fluid in rectangular tube

은 경우의 통과유량을 나타낸다. 전기장을 인가하지 않은 경우 사각튜브의 유로내에서 ER유체는 점성만으로 유동하여, 전극부분에서 유속이 영(zero)이고 나머지 부분에서는 포물선 형태의 속도 성분을 가진다. 그러나 ER유체에 전기장이 인가되면 ER유체의 항복전단응력  $\tau_y(E)$ 로 인해 압력강하가 커지며, Fig. 1 (b)와 같이 전극사이의 간극이  $h_c$ 인 플러그(plug) 유동으로 생각할 수 있다.  $\tau_y(E)$ 에 의한 압력강하  $\Delta P_{ER}$ 이 추가적으로 발생되며 다음 식 (2)로 나타낼 수 있다<sup>(5)</sup>.

$$\Delta P_{ER} = \frac{2L\tau_y(E)}{h} \quad (2)$$

따라서 사각튜브의 전극사이에서 발생하는 전체 압력강하( $\Delta P$ )는 ER유체의 점성과 ER유체의 전기장에 따른 항복 전단응력 변화에 의한 압력강하의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = \Delta P_{\mu} + \Delta P_{ER} \quad (3)$$

$$= \frac{12\mu L Q_{ER}}{bh^3} + \frac{2L\tau_y(E)}{h}$$

$$= \frac{12\mu L Q_{ER}}{bh^3} + \frac{2L\alpha E^{\beta}}{h}$$

여기서  $Q_{ER}$ 은 전기장 인가 시 사각튜브의 전극사이를 통과하는 유량을 나타낸다. 전기장을 인가할 경우 전체압력강하  $\Delta P$ 가  $\Delta P_{ER}$ 보다 적을 경우 유체의 유동은 발생되지 않는다. 그러나 전기장의 크기보다 전체압력강하  $\Delta P$ 가 클러스터의 저항력보다 클 경우, 유체의 유동은 다시 발생하게 된다. 따라서 Fig. 1의 경우처럼 유동속도와 전기장의 강도 변화에 따른 클러스터의 형성과정 및 거동을 PIV로 측정하여 ER 밸브 설계에 기초자료를 제시하고자 한다.

### 3. 실험

Fig. 3은 ER유체의 유동특성을 가시화하기 위한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. ER유체가 정지된 상태와 유동상태를 분리하여 관찰할 수 있도록 실험 장치를 제작하였

다. 실험에 사용된 ER유체는 실리콘 오일(KF96-50cSt)과 전분 입자(180 $\mu$ m)를 혼합한 분산계 ER유체이며, 자체 조성하였다. 조성한 분산계 ER유체는 탱크내에 저장하고, 전분 입자의 침전을 방지하고 입자 분포를 균일하게 하기 위해 전동식 교반기로 교반하였다. ER유체는 탱크로부터 위치에너지 차이에 의해 사각튜브의 유로를 흐르게 설계하였다. 유량은 사각튜브 유로의 상류부와 하류부에 설치된 폭을 사용하여 조절하였다. 사각튜브내에서 입자의 침전을 방지하기 위해서 15도 방향의 각을 주어 흐르게 하였다. 완전발달된 유동장을 형성하기 위해 X방향의 유동장 길이는 유동장이 충분히 발달할 수 있도록 주어져야 하는데 본 실험에서  $x/b=60$ 을 부여하였으며, 입구부의 영향이 최소화 되도록 하였다. 사각튜브의 상부 쪽과 출구 쪽에는 CCD 카메라와 광원을 설치하여 ER유체의 유동을 가시화할 수 있도록 하였다. 광원은 공랭식 500mW Ar-ion 레이저를 사용하였다. 광원의 이동을 용이하게 하기 위해 광케이블로 빛을 이동시킬 수 있는 LLSP(Laser Light Sheet Probe)를 사용하였다. 또한 LLSP는 레이저 층의 두께 즉 레이저 빔 투과 사이즈를 약 1mm 정도 조절을 할 수도 있다. 광케이블의 길이는 약 10m이다. 펄스화 된 광원을 얻기 위해서 AOM(Acousto Optical Modulator)을 사용하였다. 유동장의 획득을 위해서 1초에 30장의 이미지를 획득할 수 있는 CCD 카메라(Panasonic Co. WV3P310)를 사용하였으며, 영상의 기록을 위해 디지털 레코더가 사용되었다. 그리고 획득된 이미지를 컴퓨터로 0에서 255단계의 Gray레벨로 전송하는 DT3155 (640 $\times$ 480 pixel) 보드를 사용하였다.

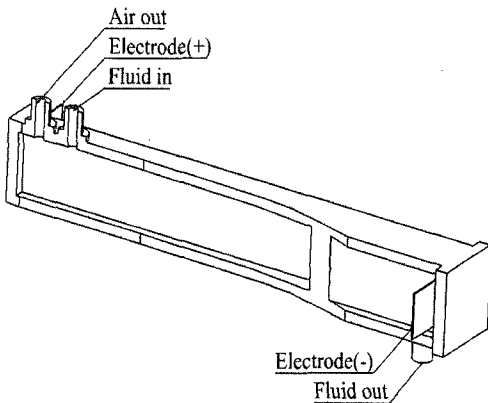


Fig. 2 Geometry of Rectangular tube

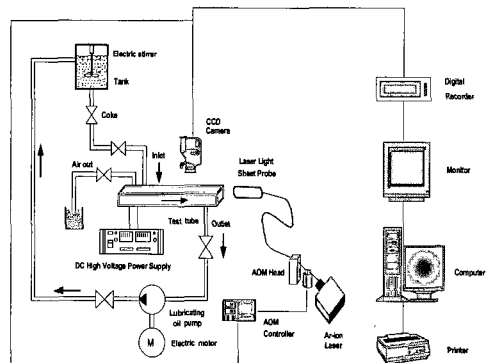


Fig. 3 Experimental apparatus

### 4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4에서 Fig. 7은 유량을  $2.834 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 로 일정한 상태에서 전기장의 강도  $E=0.0 \sim 0.8\text{kV}/\text{mm}$ 로 변화시킨 경우의 PIV 측정 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 (a)는 ER유체를 촬영한 영상이며, (b)는 속도벡터, (c)는 속도분포를 나타낸 것이다.

Fig. 4는 전기장을 인가하지 않고, 밸브를 열어 사각튜브 유로내에서 ER유체의 유속이 최대인 상태이고, Fig. 5, 6, 7은 Fig. 4의 상태에서 전기장의 강도를 0.27, 0.54, 0.8kV/mm로 변화시킨 경우이다.

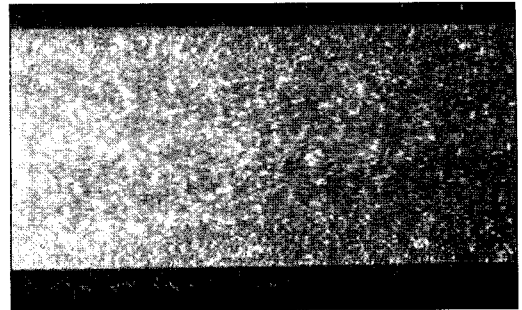
사각튜브의 유로내에 Fig.5와 같이 전기장 강도  $E=0.27\text{kV}/\text{mm}$ 로 인가할 경우, 전극부분에 클러스터의 형성을 관찰할 수가 있다. 이것은 전기적인 인력이 ER유체의 유속증가에 따른 관성력보다 크기 때문에 클러스터가 파괴되지 않은 것으로 생각한다.

Fig. 6의 전기장 강도  $E=0.54\text{kV}/\text{mm}$ 로 인가한 경우, 유체의 유속이 가장 낮은 전극 부근에서 작은 양이지만 클러스터가 형성된 것을 확인할 수 있다. Fig. 7의 전기장 강도  $E=0.8\text{kV}/\text{mm}$ 로 인가한 경우, 입자의 결합력이 커져 양쪽의 전극에 띠 형태의 클러스터가 많이 형성된 것을 확인할 수가 있다. 이와 같이 형성된 클러스터에 의해 ER유체의 속도분포가 바뀌게 되며, 입구와 출구에서의 압력강하가 발생하게 된다.

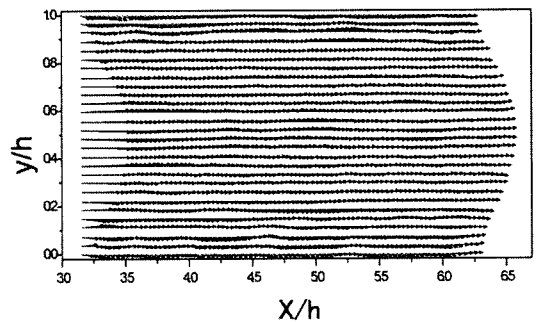
유로 내에 형성된 띠 형태의 클러스터는 한번 형성된 후 그 형태를 지속적으로 유지하는 것이 아니고, 파괴와 생성의 과정을 짧은 주기로 반복하게 되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7의 경우 전기장 강도의 증가에 따라서 전극에 부착하는 클러스터는 굵어지고 길어지며 ER유체의 흐름중에 형성된 클러스터 또는 클러스터의 결합력이 유동저항이 되는 것을 알 수 있다.

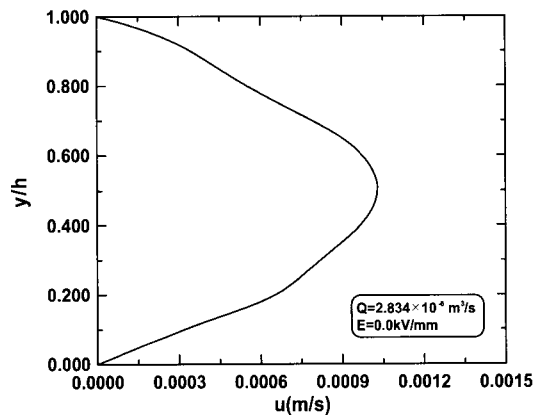
실험결과에서 알 수 있듯이 전기장 무인가시에는 전극부분에서 유속이 영(zero)이고 나머지 부분에서는 포물선 형태의 속도 성분을 갖던 ER유체가, 전기장에 의하여 형성된 클러스터 때문에 유속의 변화를 나타내어, 유로 중앙부에서 플러그(plug flow) 영역이 생기는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 이와 같이 형성된 클러스터에 의하여 유로를 통과하는 유량이 변화하거나, 사각튜브의 입·출구에서 압력강하가 생기며, (+), (-) 전극에 생성되는 클러스터의 양이 변화게 되는 것을 알 수 있었다.



(a) Visualized image

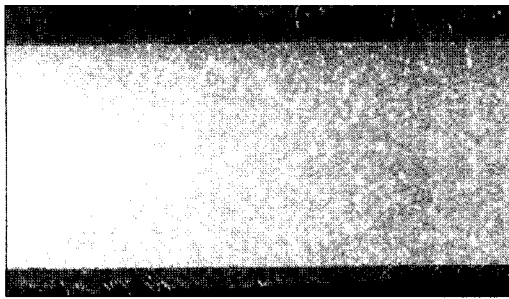


(b) Velocity vector

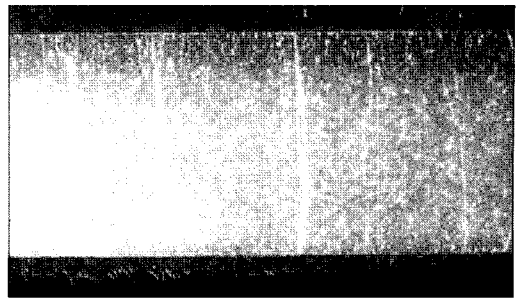


(c) Velocity distribution

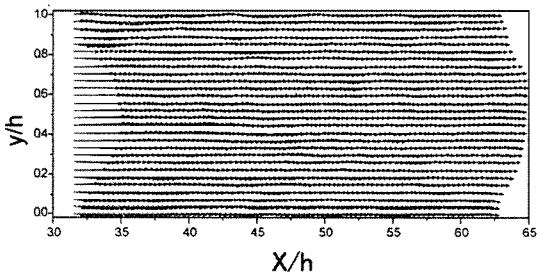
Fig. 4 Flow between rectangular tube ( $E=0\text{kV}/\text{mm}$ )



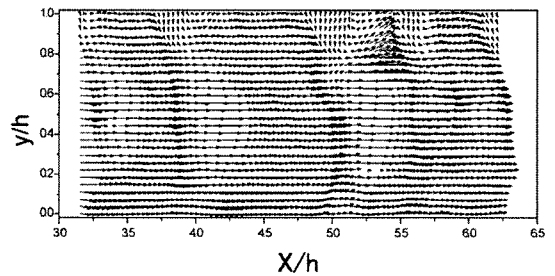
(a) Visualized image



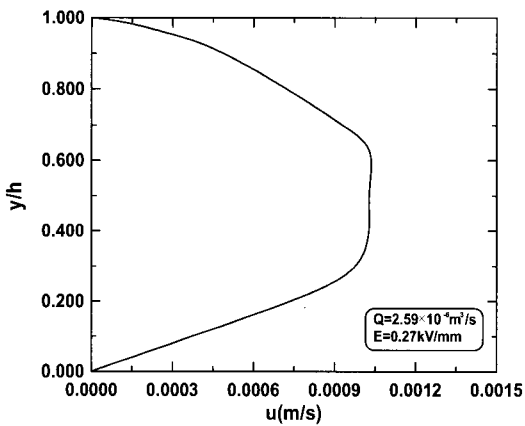
(a) Visualized image



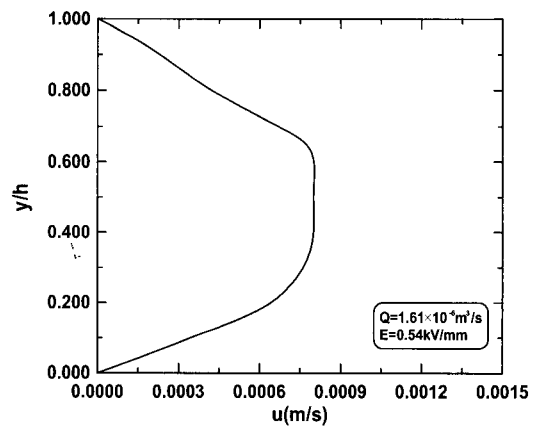
(b) Velocity vector



(b) Velocity vector



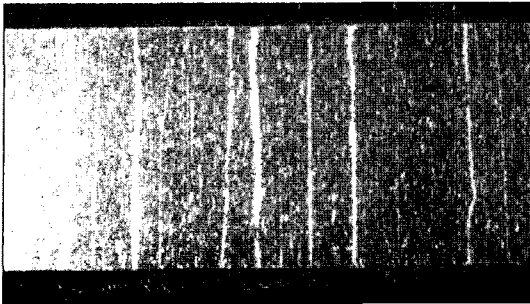
(c) Velocity distribution



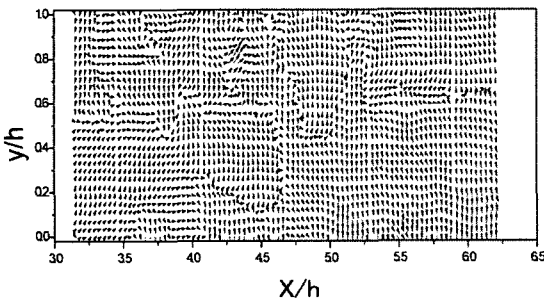
(c) Velocity distribution

Fig. 5 Flow between rectangular tube ( $E=0.27$  kV/mm)

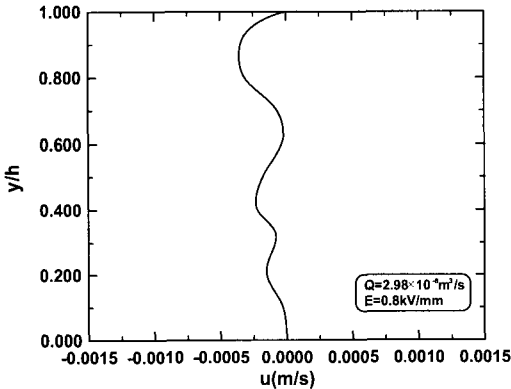
Fig. 6 Flow between rectangular tube ( $E=0.54$  kV/mm)



(a) Visualized image



(b) Velocity vector



(c) Velocity distribution

Fig. 7 Flow between rectangular tube ( $E=0.8$  kV/mm)

## 5. 결론

본 연구에서는 전기장으로 제어되는 ER유체의 유동 가시화 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전기장의 강도에 따라서 전극에 부착하는 클러스터는 끊어지고 길어지며, ER유체의 흐름 중에 형성된 클러스터 또는 클러스터의 결합력이 유동 저항이 되는 것을 알 수 있었다.
- (2) 전기장에 의하여 형성된 클러스터 때문에 유속의 변화를 나타내어, 유로 중앙부에서 플러그 영역이 생기는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 사각튜브의 (+), (-) 전극에 형성된 클러스터에 의하여 유로를 통과하는 유량이 변화하는 것을 알 수 있었다.
- (4) 유로 내에 형성된 띠 형태의 클러스터는 한번 형성된 후 그 형태를 지속적으로 유지하는 것이 아니고, 파괴와 생성의 과정을 짧은 주기로 반복하는 것을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

- (1) Wang, K. C., McLay, R., and Carey, G. F., 1989, "ER Fluid Modelling," *Proceedings of the Second International Conference on ER Fluids*, pp. 41 ~ 52.
- (2) Tsukiji, T., Takahashi, J., Sugimoto, N., and Ikeda, H., 1996, "Flow Characteristics of ERF between Two Parallel-Plate Electrodes," *JSME*, Vol. 25, No. 4, pp. 556 ~ 561
- (3) Kim, D. T., Jang, S. C., and Choi, Y. D., 1999; "Experimental Investigation on the Flow Characteristics of ER Fluids," *Proceedings of the KSMTE Spring conference*, pp. 216 ~ 221.
- (4) Brooks, D. A., 1992, "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices," *Journal of Modern Physics*, Vol. 6, pp. 2705 ~ 2730.
- (5) Yokota, S., and Kondoh, Y., 1996, "A Control valve by Making use of an ER Fluid," *JSME*, Vol. 62, No. 601, pp. 93 ~ 100.
- (6) Jang, S. C., Yum, M. O., and Kim, D. T., 2003, "Flow Rate-Pressure Drop Characteristics of Dispersive ER Fluid According to Change of Electric Field Strength in Clearance between Parallel Plates," *KSMTE*, Vol. 12, No. 1, pp. 78 ~ 83.