전단 유동을 하는 전기유변 유체의 동적 응답에 입자 응집이 미치는 영향

최병하† · 남윤주* · 박명관**

Effect of Particle Aggregation on Dynamic Response of An Electrorheological Fluid in Shear Mode

Byung-Ha Choi, Yun-Joo Nam and Myeong-Kwan Park

Key Words : Concentric Cylinder-Type Rheometer(실린더형 점도계), Dynamic Response (동적 응답), Electrorheological Fluid(전기유변 유체), Particle Aggregation(입자 응집)

Abstract

In this study, the effect of particle aggregation on dynamic response time of Electrorheological (ER) fluid is investigated. The particle aggregation time is defined as the time interval between the application of the field and the formation of the first chain bridging the two electrodes. The dynamic response times of an ER fluid sheared between two concentric cylinders have been obtained under two different experimental conditions: the one is that the electric field is induced before shearing, and the other is that the electric field is induced after shearing. From the difference between two response times, the particle aggregation times are determined under various electric fields and shear rates. The experimental results show that the aggregation rate is decreased with an increase of shear rate, while electric field has little effect on it. Therefore, it is verified that the hydrodynamic force hinders the formation of chain-like structures.

1. 서 론

ER 유체는 가해지는 전기장(Electric Field)의 세기에 따라 그 역학적 특성, 즉 겉보기 점도가 변하는 지능형 유체로, 기본적으로 비전도성의 용매에 약한 전도성 입자를 분산시킨 현탁액(Suspensions)이다. 전기장을 능동적으로 변화시켜 다양한 점도를 얻을 수 있으며, 이를 ER 효과 또는 Winslow 효과[1]라고 부른다. 또한 ER유체는 전기장 인가 시 액상에서 준 고상으로의 상 변화(Phase transition)가 수 msec단위로 가역적으로 일어난다.

빠른 응답 특성과 함께 상 변화 과정에서의 ER 유체의 동적 응답특성(Dynamic response)에 대한 해석은 엔지니어들이 ER 유체를 기반으로 한 엑추에이터(Actuator)를 설계하고 이를 효과적으로 제어함에 있어 매우 중요하다. ER 유체에 전기장 및 유동장을 가했을 때의 상 변화 과정(Phase Transient Process)은 다음과 같이 분류된다.

① 입자의 불규칙적 분산상태(Random Configuration)
② 분극화(Polarization)
③ 전기장에 의한 클러스터(Cluster) 형성
④ 전기장과 유동에 의한 클러스터 파괴와 재형성

분극화된 입자는 사슬(Chain)모양으로 전극간에 배열하는 준 안정상태를 거쳐 사슬구조간의 인력으로 인해 기둥(Column)을 형성하는 안정상태에 이른다. 여기서 사슬 또는 체인구조를 클러스터(Cluster)라고 한다. 안정된 클러스터 구조는 유체역학적 힘(Hydrodynamic force, 이하 유동장)에 의해 파괴되기 시작하고, 입자간 상호작용력에 의해 재결합되는 과정을 반복적으로 나타낸다. 이와 같은 상 변화 과정에서 나타나는 ER 유체의 동 특성에 대한 조사는 ER 효과의 원리에 대한 이해와 함께 ER 유체의 시간에 따른 유변학적 모델을 설립하는데 중요한 요인이다.

† 부산대학교 기계공학부
E-mail : bhchoi@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3054 FAX : (051)514-0685
* 회원, 부산대학교 기계공학부
** 회원, 부산대학교 기계공학부

ER유체의 동적 응답특성에 관한 기존의 연구들은 다양한 방법으로 시도되었다. 이는 크게 실험을 통해 전단응력(Shear stress)의 응답속도를 측정하는 방법(Experiment researches), 가시화 또는 시뮬레이션을 통해 클러스터 형성과정을 살펴보는 방법(Optical techniques), 이론적인 연구(Theoretical researches)등으로 나누어 진다. Peel[2,3]등은 밸브를 이용한 ER 유체의 동적 응답을 해석하기 위해 유동모드(Flow mode)에서 클러스터구조의 상태 변화 과정을 조사하였고, 여기서 생기는 압력강하를 통해 응답시간을 측정했다. Yu Tian[4,5] 등은 평행평판 사이의 두 전극 간의 전단응력을 측정하여 응답시간에 대해 조사하였다. 이때, 얻어진 전단응력이 전단속도(Shear rate)에 반비례한다는 것을 밝혔다. 위 연구들은 압력강하 또는 전단응력의 응답시간을 통해 ER유체의 동적 응답 특성에 대해 조사하였다. C. W. Wu, Tetsuhiro Tsuhiro[6,7] 등은 부하한 전기장을 DC와 AC로 구분하여 이때 발생하는 현상을 나타내었다. 또한 응답시간의 온도와 체적 분율(Volume fraction)에 의한 영향에 대한 실험도 이루어 졌다. 이 때 응답시간은 온도가 15℃~ 50℃까지 증가함에 따라 약간 감소하며, 체적 분율이 증가함에 따라 응답시간은 감소하는 것으로 밝혀졌다. Zuowei Wang[8]등은 시뮬레이션을 통해 전단영역에서의 ER유체의 응답시간에 관해 조사하였다. 기본적으로 응답시간은 체적 분율과 전단속도에 반비례하며, 전단속도가 작을 때는 입자응집속도(Aggregation rate)가 전단 변형율(Strain rate)보다 크고 전단속도가 큰 영역에서는 입자응집속도 보다 전단 변형율이 크게 나타난다고 하였다. 즉, 전단속도가 작은 영역에서는 비교적 클러스터 구조가 생성되기 쉽고 이미 응집된 입자는 유동에 의해 변형되지만, 전단속도가 큰 영역에서는 유동이 클러스터 구조의 생성을 방해하기 때문에 입자응집이 힘들어진다. 또한 Weijia Wen[9]등은 ER효과에 따라 클러스터 구조가 성장하는 과정을 가시화를 통해 조사하였으며, 인가된 전기장의 세기에 따른 클러스터 구조형성의 차이를 나타내었다.

ER 유체의 동적 응답 특성에 대해 조사한 기존 연구들에서는 유동장에 따른 클러스터 구조와 형성, 파괴 및 재형성 과정에 대한 구분이 명확하게 제시되지 않았다. 또한 이러한 상 변화 과정은 전기장과 유동장의 복합적인 형태로 나타난다. 따라서 ER 입자의 상 변화에 따른 클러스터 형성과정에 대한 명확한 구분이 필요하다. 본 연구에서는 입자 응집과정(Aggregation Process)을 분극화된 입자가 최초의 안정된 클러스터 구조를 형성할 때까지의 과정으로 정의하였다. 그리고 최초의 안정된 구조는 유동장에 의해 파괴되기 시작하여 전기장에 의한 입자간의 상호작용력과 유동장에 의해 재형성하는 과정을 되풀이 한다. 여기서 유동장과 전기장의 상호작용에 의한 클러스터 구조의 재형성과정을 입자조밀화과정(Densification Process)으로 정의한다. 이때 생기는 클러스터의 구조적인 변화 과정이 동적 응답에 미치는 영향을 조사하기 위해 전기장과 유동장의 인가 순서에 따라 두 가지의 실험조건을 설정하였다. 전기장이 인가되면 분극화된 입자의 응집과정이 나타나며, 이후 유동장을 인가하면 입자 조밀화가 나타난다. 또한 유동장을 먼저 준 상태에서 전기장을 걸어주었을 때는 입자 응집과 조밀화과정이 동시에 일어날 것으로 추측된다.

두 조건에서의 반응 차이를 보기 위해 응답 시간, 즉 전단 응력의 상승시간의 차이를 시상수(Characteristic time constants)를 통해 측정하였고, 실험을 위해 동심 실린더형 점도계를 제작하였다. 실험에서 얻어진 전단응력 반응 시간을 통해 ER 유체의 클러스터 형성, 파괴, 재형성과정에서의 동적 응답을 알아보고자 한다.

2. 본 론

2.1 장치의 구성

본 연구에서는 ER유체의 전단응력 응답 시간을 측정하기 위해 Nippon Shokubai사의 TX-ER8 을 사용하였다. TX-ER8 은 불소와 실리콘 오일의 혼합용매에 술폰산화 중합체 입자를 분산시킨 것으로, 실내온도(25℃)에서 115 mPa·s 의 점도와 1.6 g/cm^3 의 밀도를 가진다. 본 실험은 실내에서 이루어졌다. 실험장치의 개략도는 Fig. 1 과 같다. 고전압 발생기를 사용하여 전압의 세기 및 인가시기를 조절하였다. 또한 모터 드라이브로부터 모터의 회전속도(RPM)를 조절하여 전단속도를 변화시켜 주었다. Fig. 2 에서 보는 바와 같이 ER유체의 전단응력의 상승시간 측정을 위해 동심 실린더형 점도계가 제작되었다. Ryoichi Hanaoka[10]등은 전극 간격의 조절과 내부 실린더의 극성에 따른 ER효과에 대해 연구하였고, 내부 실린더가 양극(Cathode)이며 전극 사이의 간극이 좁을 때 ER효과가 커진다는 제안을 하였다. 따라서 본 실험에서는 내부 실린더와 외부 실린더의 간극을 1.5 mm로 설계하였으며, 내부 실린더에 양극 전압을 걸어주었다. 그리고 전단영역의 길이는 70 mm로 설정하였다.
간극을 일정하게 유지하고 유격을 최소화하기 위해 내부 및 외부 실린더는 함께 축에 연결되었으며 외부 실린더는 축과 절연되도록 하기 위해 공학용 플라스틱으로 제작된 연결부위로 체결하였다.

내부 실린더는 관성부하를 줄이기 위해 안쪽을 파낸 형상으로 제작되었으며, 반경은 30 mm 로 제작되었다.

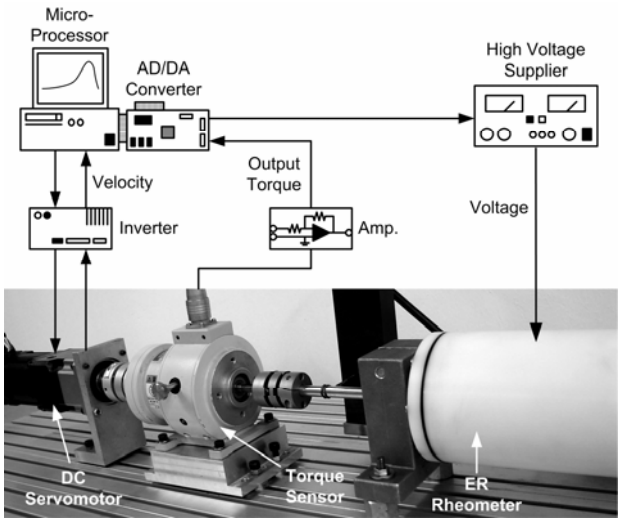

Fig. 1 Schematic of the test system of ER fluid sheared between two concentric cylinders

2.2 실험 방법

전기장의 세기는 0 kV ~ 3 kV까지 1 kV간격으로 부하하였고, 전단속도는 4 s^{-1}~ 125 s^{-1}까지 변화시켜 주었다. 외부 실린더는 정지되어 있고, 내부 실린더는 토크 측정장치에 연결되어 있으며 일정한 각속도로 구동 된다. 여기서 전극 사이의 간극이 내부 실린더의 반지름에 비해 충분히 작다면 회전하는 실린더 장치는 평행 평판계로 근사화될 수 있고, 전극 사이의 속도 분포는 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$\frac{du}{dy} = \frac{r\omega}{h} \tag{1}$$

여기서 ω 는 모터의 각속도, r 은 내부 실린더의 반지름 그리고 h 는 전극 사이의 간극을 나타낸다. Fig. 1 의 토크 센서에서 측정된 토크로부터 ER 유체의 전단응력을 산출하는 식은 다음과 같다.

$$\tau = \frac{T}{2\pi r^2 L} \tag{2}$$

T 는 모터의 회전에 의한 토크, L 은 내부실린더와 외부실린더 사이의 전단영역 길이를 나타낸다. 응집속도(Aggregation Rate)측정을 위한 두 가지 실험 조건은 앞서 밝힌 바와 같이 다음과 같다.

① 전기장을 먼저 인가해준 상태에서 유동을 시작하는 경우
② 유동이 있는 상황에서 전기장을 인가하는 경우

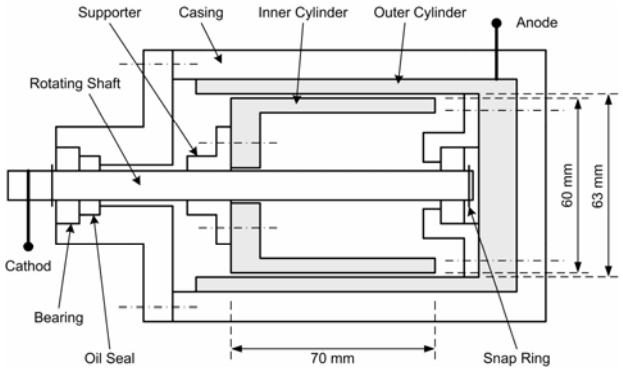

Fig. 2 A cross section of the two concentric cylinder type rheometer

서론에서 정의한 응집 과정과 조밀화 과정의 전기장과 유동장에 의한 영향을 실험을 통해 조사함으로써 ER 유체의 상 변화 과정에 따른 동적 응답차이에 대한 연구가 이루어졌다.

2.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 5 는 점도계의 두 실린더간에서 발생하는 전단속도에 따른 전단응력을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 전단응력은 전기장의 강도에 비례하여 증가하였다. 또한 전단속도가 증가함에 따라 전달되는 토크는 거의 일정하지만, 높은 전단영역에서 약간 감소하는 경향을 보였다. 이는 전단에 의한 클러스터구조의 변화에서 볼 때, 큰 전단영역에서는 작은 입자구조가 강한 입자구조로 성장하기 힘들기 때문에 나타나는 현상으로 보인다. 시간에 따른 전단응력변화는 지수함수적인 상승곡선을 그리며 정상상태에서의 전단응력과 함께 다음과 같이 표현된다.

$$\tau(t) = \tau_s(1 - \exp(\frac{t_0 - t}{T_c})) \tag{3}$$

여기서 τ_s 는 정상상태에서의 전단응력, t_0 는 초기시간 그리고 T_c 는 전단응력 상승시간의 시상수를 나타낸다. 본 실험에서는 전단응력이 초기상태에서 정상상태까지 상승하는 시간을 시상수를 통해 측정하였다. 전기장과 유동장의 인가 순서에 따른 전단응력의 상승시간은 Fig. 3, Fig. 4 와 같다. 결과로부터 전단응력의 응답시간은 전단속도가 증가함에 따라 감소하는 것을 확인하였다. 그리고 두 그래프의 비교에서 나타나듯 유동장과 전기장의 인가 순서에 따라 응답시간이 뚜렷한 차이를 보였다. Fig. 3 에서 보이는 응답시간은 전기장을 먼저 인가한 상태에서 유동장을 준 것이다.

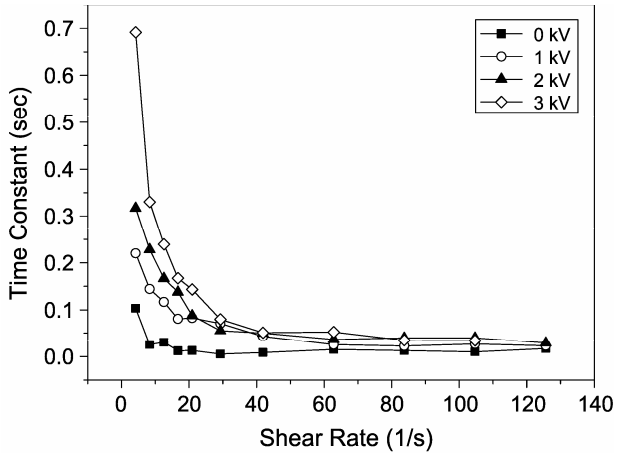

Fig. 3 Rising time constant of ER fluids where Electric field is induced before shearing

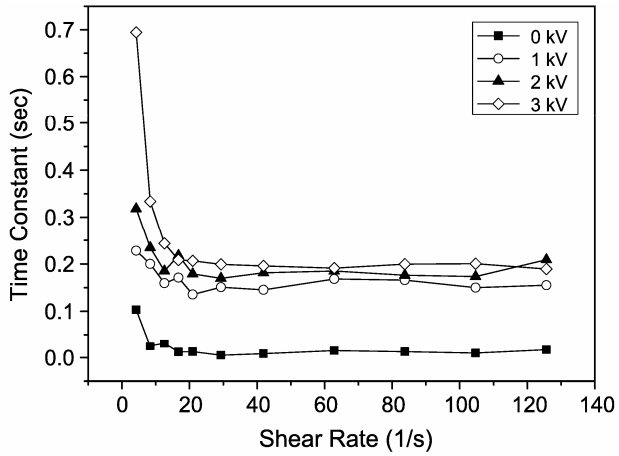

Fig. 4 Rising time constant of ER fluids where Electric field is induced after shearing

전기 장을 인가하는 순간 ER 입자의 분극화가 일어나고, 사슬/기둥 형태의 클러스터 구조를 형성하여 안정된 구조(Stable column)를 취한다. 이 때 가해진 유동장에 의해 클러스터 구조는 파괴되기 시작하며 전기장과 유동장에 의한 입자 간의 상호작용력에 의해 클러스터 구조를 재형성하며, 이 같은 과정을 반복한다.

이러한 파괴와 재형성을 반복하는 과정에서의 구조를 준 안정 상태(Metastable column)로 볼 수 있으며, 이 과정을 거쳐 전단응력은 정상상태에 이른다. 여기서 최초의 안정된 구조를 형성하기까지의 과정을 입자응집과정, 그리고 파괴와 재형성을 반복하여 준안정상태에 이르는 과정을 입자 조밀화과정이라 정의하였다. 반대로 Fig. 4 는 유동장을 가해준 상태에서 전기장을 걸어 주었을 때의 응답시간을 측정한 그래프이다. 이 때 분극화된 입자는 입자 응집과정과 입자 조밀화과정이 동시에 일어나며 클러스터 형성과 파괴의 절충점에서 전단응력은 정상상태에 이른다.

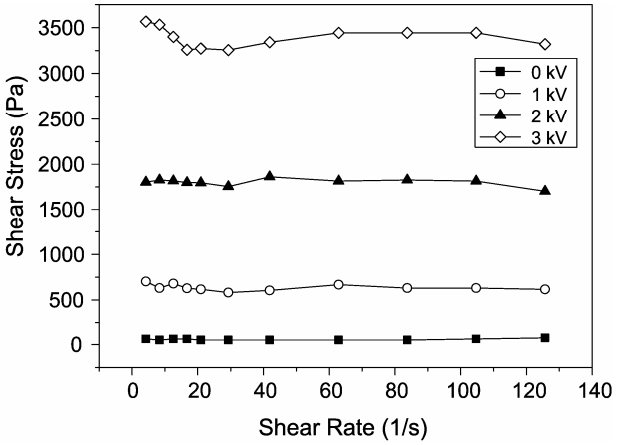

Fig. 5 Shear stress of ER fluids under different conditions

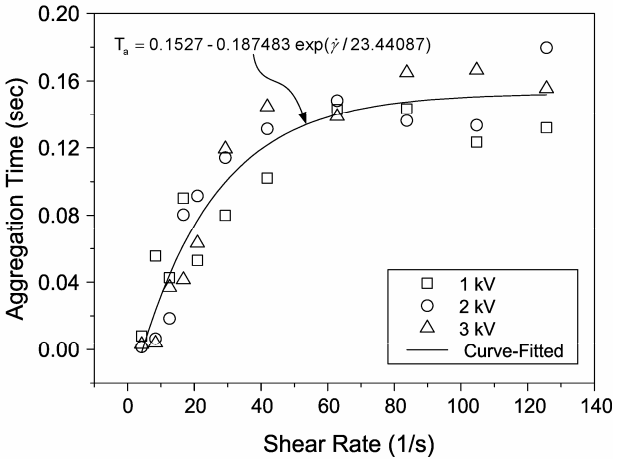

Fig. 6 Aggregation time under different conditions

따라서 두 실험조건의 전단응력 상승시간 차이를 통해 입자 응집시간을 측정할 수 있다.

두 실험조건으로부터 측정된 전단응력의 응답시간을 차감함으로써 얻어진 입자응집시간의 그래프는 Fig. 6 과 같다. 그래프에서 입자응집시간은 전단속도가 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있다. 전단속도와 입자응집시간과의 관계는 결과로부터 다음의 식으로 표현된다.

$$T_a = 0.15 - 0.19 \exp(\frac{\dot{\gamma}}{23.44}) \qquad (4)$$

여기서 T_a 는 입자 응집시간(Aggregation time), $\dot{\gamma}$ 는 전단속도를 나타낸다.

그래프에서, 낮은 전단속도 영역에서는 입자 응집시간이 매우 짧지만, 전단속도가 높아질수록 입자 응집시간이 길어지는 경향을 보였다. 이로부터 유동이 클러스터구조를 형성하는 과정에 방해요인으로 작용함을 알 수 있다.

또한 전단속도가 증가함에 따라 입자 응집시간

이 증가하지만 전달되는 토크의 상승시간은 감소한다. 따라서 입자 응집과정보다 입자 조밀화과정이 전단응력의 상승시간에 더 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 즉, 유동은 입자 응집을 방해하지만 입자간 충돌 횟수 증가에 의해 입자 조밀화를 촉진시킨다. 그리고 클러스터의 파괴와 재구성을 반복하는 과정, 즉 입자 조밀화를 통해 전달되는 토크가 정상상태의 토크라 볼 수 있다.

3. 결 론

전단유동을 하는 ER 유체의 동적 응답에 입자응집과정이 미치는 영향을 알아보기 위한 연구가 이루어 졌다. ER 유체의 응답 특성은 입자 구조형성과 밀접한 관련이 있다. 입자 응집시간을 측정하기 위해 다양한 실험조건하에서 ER 유체의 응답시간을 측정하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 전달되는 토크는 전기장의 세기에 비례하여 커지지만, 전단속도의 증가에 따른 영향은 거의 일정하고 높은 전단영역에서 약간 감소하는 경향을 보였다.
(2) ER 유체의 동적 응답시간은 전단속도가 증가함에 따라 감소하였고, 전기장에 의한 영향은 거의 없었다.
(3) 전기장이 가해졌을 때 최초의 안정된 클러스터구조가 형성되기까지의 시간을 입자응집시간이라고 하며, 입자 응집시간은 전단속도가 증가함에 따라 길어진다. 즉, 입자 응집은 유체 유동에 의한 힘에 의해 방해를 받는다.
(4) 전기장과 유체 유동이 가해지면 클러스터 구조는 파괴와 재형성의 과정을 반복하는데 이를 입자 조밀화과정이라고 한다. 이 과정 중에 전달되는 토크는 정상상태에 이른다.
(5) 유체의 유동에 의한 힘은 최초 입자 응집을 방해하지만, 입자간 충돌횟수 증가에 의해 입자 조밀화를 촉진시킨다.

참고문헌

(1) Winslow, W. M., 1949, *"Introduced Vibration of Suspension," J. Appl. Phys.*, Vol. 20, pp. 1137~1140.

(2) Peel, D. J., Bullough, W. A., 1993, "*Effect of Flow Rate, Excitation Level and Solids Content on the Time Response in an Electrorheological Valve*," J. Intell. Mat. Sys. And Struc., pp. 54~64

(3) W. A. Bullough, J. Makin, R. Firoozian, A. Hosseini-Sianaki, *"The Effect of solid fraction concentration on the time domain performance of an ER fluid in the shear mode," Int. J. Mod. Phys.* B 8 (1994)2885

(4) Yu Tian, Y. G. Meng, Wen, Shizhu Wen, 2004, "*Dynamic Responses of Zeolite-based ER fluid Sheared Between Two Concentric Cylinder*", *J. Intell. Mater. Syst. Struct*, Vol. 15, pp. 621~626

(5) Yu Tian, Chihong Li, Minliang Zhang, Yonggang Meng, Shizhu Wen, 2005, "*Transient response of an electrorheological fluid under square-wave electric excitation*", *J. Colloid and Intell. Science*, Vol. 288, pp. 290~297

(6) Tsukiji, T. Hori, K. I., 1997, "*Flow Characteristics of Electrorheological Fluid*," *Rheology and Fluid Mechanics of Nonlinear Materials ASME*, FED-Vol. 243/MD-Vol. 78, pp. 197~205

(7) Wu, C. W. and Conrad, H., 1997, "*Theoretical and Experimental Considerations of Electrorheological with DC and AC Fields*," *Rheology and Fluid Mechanics of Nonlinear Materials ASME*, FED-Vol. 243/MD-Vol. 78, pp. 185~196

(8) Weijia Wen, D. W. Zheng, K. N. Tu, 1999 "*Chain/Column and Corresponding Electrorheological Effect*, *Journal of Applied Physics*, Vol. 85, No. 1, pp. 530~533

(9) Zuowei Wang, Zhifang Lin, Haiping Fang, 1998, "*Dynamic Response times of Electrorheological fluids in steady shear*", *Journal of Applied Phys*ics, Vol. 83, No. 2, pp. 1125~1131

(10) Ryoichi Hanaoka, Koji Hotta, Hidenobu Anzai, Koji Sakurai, Shinichi Kuroda, "*Internal Structure and ER Properties in ER Suspensions of Disperse System under dc Electric Field*," 2000, *Electric Eng. In Japan*, Vol. 132, No. 4, pp. 9~18