

고속 전단유동에서 ER유체의 전기유변 특성

김영춘*(두산중공업 기술연구원), 김경웅(한국과학기술원)

Electrorheological Properties of ER Fluid under High Shear Flow

Y. C. Kim (Doosan Heavy Industries & Construction Co., LTD)
K. W. Kim (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

ABSTRACT

As electrorheological fluid(ER fluid) has a characteristic that apparent viscosity varies when electric field applied, so rheological characteristic(yield stress & viscosity) changes in proportion to the electric field applied and the response time is very short within a few miliseconds. In case of using ER fluid for journal bearing as lubricant, it is estimated that it's possible to realize very effective journal bearing system that is not complicate and has a very quick response time. It is necessary to examine the influence of rheological characteristic that varies with electric field applied on bearing characteristic to apply ER fluid to journal bearing, however there are few studies for about that. As for the journal bearing, it comes under high shear flow mode that has shear rate range of $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ because rotational speed is very high and clearance is small. But most of the studies for about ER fluid issued until now is about the range of $10 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$. So, there are a lot of difficulties to understand the characteristic of high shear flow mode and furthermore it is restricted to make an experiment for about the characteristic of ER fluid because of the limitation of experimental equipment. The equipment was prepared to make an experiment for high shear flow mode that has the range of $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ using ER fluid that is composed of silicon oil with dispersed particle of starch. Using the above system, the fluid characteristic of ER fluid was studied.

Key Words : Electrorheological fluid (ER fluid, ER유체), ER effect(ER 효과), electric field strength(전기장 세기), rotational viscometer(원통형 회전식 점도계), high shear flow(고속 전단 유동)

1. 서론

ER유체(electrorheological fluid)는 전기장을 인가하면 유체의 가점성(apparent viscosity)이 변화하는 특별한 성질을 가진 유체로서[1], 인가하는 전기장의 세기에 따라 그 유변학적 특성(항복응력, 점도 등)이 변화하며 변화에 소요되는 시간도 수백~수천분의 일 초 이내로 반응시간이 매우 짧은 특징을 가진 유체이다.[2]

ER효과는 1939년경 W. M. Winslow에 의해 처음 발견된 이후 1947년 그의 보고에 의해 처음으로 알려지게 되었다. Winslow는 처음으로 ER유체로 동작되는 클러치를 개발하고, 발생하는 항복응력이 인가한 전압의 제곱에 비례한다고 보고하였다. 그러나 이 보고에서는 ER유체의 유변성에 대해 정확하게 밝혀 내지는 못하였다. Klass 등[3]은 원통마찰형 점도계 실험장치를 이용한 여러 가지 실험 결과를 비교하였는데,

그들은 전단률, 입자의 농도, 전기장의 세기 등에 대하여 많은 실험을 수행함으로써 전단속도와 전단응력 사이의 관계가 빙햄모델(Bingham model)로 표현될 수 있음을 밝혔다.[1~5]

현재까지의 연구에 의하면 ER유체가 외부 전기장 하에 놓이면 Fig. 1에서와 같이 입자들이 전극 사이에서 전기장 방향으로 사슬과 같이 정렬하여 전극과 평행한 방향으로 유체가 흐르는 것을 방해하는 효과에 의해 겔보기 점도가 증가하며, 유체의 점성이 변화하는 것이 아니라 입자의 배열구조가 바뀜에 따라 ER효과가 발생한다.

ER유체가 외력에 의해 연속적인 변형이 일어나 흐르는 경우 입자의 사슬이 파괴되지만 전기장이 유지되면 계속 재형성되며, 유변학적 거동은 빙햄 모델을 따른다. 외부 전기장을 제거하면 ER유체의 전단응력은 사라지고 뉴턴 모델(Newtonian model)을 따른다.(Fig. 1, 2)

ER유체의 특성에 영향을 주는 인자는 구성

입자 및 오일의 종류, 인가하는 전기장의 세기, 입자의 농도, 사용 온도 및 인가 주파수, 친수성 ER유체의 경우 수분의 함량 등이다.

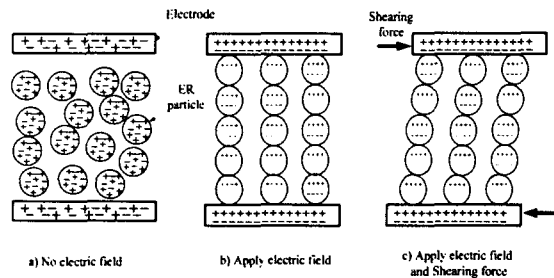


Fig. 1 Mechanism of ER effect under shear

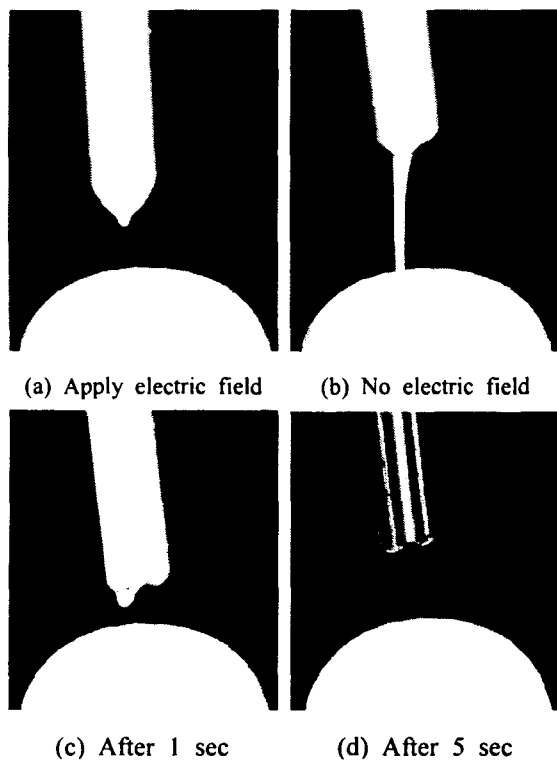


Fig. 2 Photos of ER effect test

ER유체를 실제로 응용하기 위해서는 ER유체가 그 적용 형태에 따라 여러 가지 유체역학적인 거동을 보이므로, 적용대상에 따라 해당 그 유동형태에 맞는 ER유체의 유동 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다.

ER유체를 윤활에 적용하는 경우, 저널베어링에 ER유체를 윤활제로 이용하면 같은 크기로서 복잡하지 않으며 추가적인 설치 공간을 필요치 않고 구성장치가 간단하며 반응시간이 짧은 때

우 효과적인 저널베어링 시스템을 구현할 수 있을 것으로 예측된다. 그러나 ER유체를 저널베어링에 적용하기 위해서는 전기장 인가에 따라 변화하는 유변학적인 특성이 베어링의 특성에 미치는 영향에 대한 규명이 필수적이라고 할 수 있으나, 현재까지 이에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

실제 적용에 있어서 저널베어링 등과 같은 경우에는 사용하는 속도의 범위가 높고 틈새가 작기 때문에 전단 속도의 범위가 수천~수만 s^{-1} 정도로 고속 전단 유동에 해당되지만, 현재까지의 ER유체의 유동 특성에 대한 많은 연구[2, 7~10]들은 전단 속도의 범위가 수십~수백 s^{-1} 정도이어서 고속 전단 유동에 대한 특성을 파악하는데 많은 어려움이 있다. 또한, ER유체의 특성을 실험하기 위한 상용 장비들의 한계성 등에 의해서도 제한되고 있다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 2에서 보여주고 있는 바와 같이 실리콘 오일에 전분계열의 입자를 분산시킨 ER유체를 이용하여 전단 속도의 범위가 수천~수만 정도의 고속 전단 유동의 경우에 대하여 실험이 가능하도록 실험장치를 설계 제작하고, 이를 이용하여 ER유체의 전기장 인가시의 유동 특성을 알아보려고 한다.

2. ER 유체의 특성

ER유체는 분극성(polarizability)이 강한 미세한 입자(보통 직경이 $0.01 \sim 100 \mu m$)를 비교적 점도가 낮은 유전유체 속에 분산시킨 유체이며, 외부 전기장 인가에 따라 유변학적 특성이 변화하는 유체이다. 인가하는 전기장은 보통 $0.2 \sim 5 \text{ kV/mm}$ 정도의 직류 또는 교류이고, 유체를 통과하는 전류 밀도는 0.03 A/m^2 보다 작다.

ER유체의 유변학적 특성은 ER 재료입자의 조성, 입자의 농도, 온도와 전기장의 세기 등에 의해 좌우되며 ER효과를 증대시키거나 단점을 극복하기 위하여 첨가제를 추가하기도 한다. 이러한 ER유체 특성은 실험적인 방법을 통해 결정할 수 있다.

많은 연구에 의해 ER유체의 유변학적 거동은 빙행유체로 모델링될 수 있다고 알려져 있으며, 전기장의 세기에 따라 발생하는 항복응력은 다음식과 같이 ER유체의 항복응력은 전기장의 크기에 대하여 지수함수의 관계를 갖는 것으로 알

려져 있다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_v, \quad \tau_v = \alpha E^\beta \quad (1)$$

where, τ Shear stress of ER fluid
 η Apparent viscosity of ER fluid
 $\dot{\gamma}$ Shear rate
 τ_v Dynamic yield stress of ER fluid
 E Electric field strength
 α, β Parameters of ER fluid

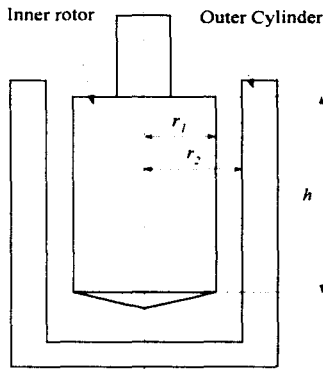


Fig. 3 Schematic of inner rotor & outer cylinder

Fig. 3과 같은 장치에서 전달 토크는 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$T = 2\pi\eta r^2 h \tau \quad (2)$$

따라서 전단응력과 전단속도는 다음식과 같이 표현된다.

$$\tau = \frac{T}{2\pi\eta r^2 h} \quad (3)$$

$$\tau_1 = \frac{T}{2\pi\eta r_1^2 h}, \quad \tau_2 = \frac{T}{2\pi\eta r_2^2 h} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= r \frac{\partial \omega}{\partial r} \\ &= r \frac{\partial (v_\theta / r)}{\partial r} \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)를 식(1)에 대입하면 정리하면 다음식과 같이 표현된다[10].

$$\partial \left(\frac{v_\theta}{r} \right) = \frac{1}{\eta r} (\tau_r - \tau_v) \partial r \quad (6)$$

식(6)를 적분하면 다음식과 같다.

$$\frac{v_\theta}{r} - \omega = \frac{1}{2\eta} (\tau_r - \tau_v) + \frac{\tau_v}{\eta} \ln \left(\frac{r_1}{r} \right) \quad (7)$$

바깥쪽 컵이 정지해 있으므로 $r = r_2$ 일 때 $v_\theta = 0$, $\tau_r = \tau_2$ 이므로 식(4)를 이용하면 식(7)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$-\omega = \frac{1}{2\eta} (\tau_2 - \tau_v) + \frac{\tau_v}{\eta} \ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \eta &= \left(\tau_1 - \tau_2 - 2\tau_v \ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \right) / 2\omega \\ &= \left(\frac{T}{2\pi\eta r_1^2 h} - \frac{T}{2\pi\eta r_2^2 h} - 2\tau_v \ln \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \right) / 2\omega \end{aligned} \quad (9)$$

where, r_1 Inner radius of rotor
 r_2 Outer radius of cylinder

따라서 식(9)를 식(2)에 대입하면 다음과 같이 토크 관계식이 완성되며, 토크는 회전속도의 함수임을 알 수 있다.

$$T = 4\pi h r_1^2 \left(\frac{\eta}{1 - \ln(r_2/r_1)^2} \omega^2 + \frac{\ln(r_1/r_2)}{1 - \ln(r_2/r_1)^2} \tau_v \right) \quad (10)$$

식(10)에 $\omega = 0$ 조건을 대입하면 동적 항복토크 (dynamic yield torque)를 구할 수 있다.

$$T_{dy} = 4\pi h r_1^2 \left(\frac{\ln(r_1/r_2)}{1 - \ln(r_2/r_1)^2} \tau_v \right) \quad (11)$$

T_{dy} 는 실험데이터(토크-회전속도)로부터 외삽법에 의해 구해지므로 식(11)을 이용하여 τ_v 를 구하고, 이를 이용하여 ER 특성계수 η , α , β 를 구할 수 있다.[10]

3. 실험

3.1 실험 장치 및 방법

ER유체의 유변학적 특성실험을 위해서는 한 쪽 방향으로 전단흐름(shear flow)이 형성되는 원통형 회전식 점도 실험장치(rotational type viscometer)를 많이 사용한다. 일반적으로 ER유체는 원하는 유변학적 특성에 맞추어 제조되기 보다는, 만들어진 ER유체를 사용자가 특성을 분석하여 목적에 적합하게 사용한다. 원통형 회전식 점도 실험장치는 비교적 높은 전단속도에서 점도를 측정하는데 널리 사용된다.

점도계(viscometer)의 원통형 컵과 로터로 구성되어 있으며, Searle type과 Couette type이 있다. Searle type은 바깥쪽 원통형 컵은 고정되어 있고 안쪽에 로터가 위치한다. 컵과 로터 사이에 측정하고자 하는 유체를 넣은 다음에 로터를 회전시켜 전단속도에 따라 발생하는 토크를 컵에 부착된 센서를 통해 측정하는 방식이며, Couette type은 Searle type과 동일하나 외부 컵을 회전시키고 로터는 고정되어 있으며 유체에 의해 전달되는 토크를 로터에 설치된 센서를 통해 측정하는 방식이다. 본 논문에서는 Fig. 4 에서와 같이 Searle type의 점도계를 사용하여 실험을 수행하였다.

고속 전단 모드에 대한 실험을 위하여 내측 로터의 직경을 100 mm 정도로 하고 간극을 0.5 mm, 회전수를 100 ~ 2,500 rpm 으로 변화시켜서 전단속도가 $1.0 \times 10^3 \sim 26 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 정도로 고속 전단 모드가 되도록 하였다. 인가전압은 0.5 ~ 3.5 kV/mm 로 변화 시키면서 점성 마찰 토크를 측정하였다.

유체의 점도가 온도에 따라 변화하므로 점도 실험장치는 일정한 온도 유지를 위한 온도조절 장치를 부착한다. 안쪽 로터에는 슬립링(slip-ring)을 이용하여 한 극을 연결하고 바깥쪽 원통에 다른 한 극을 설치하여 전기를 공급하였으며, 바깥쪽 원통형 컵에 센서를 설치하여 전달되는 토크를 측정한다.

전체 실험장치는 Fig. 4, Fig. 5 에 나타난 바와 같다. 로드셀에서 측정된 토크 신호는 증폭기를 거쳐 오실로스코프를 사용해 측정을 수행하고, 동시에 디지털레코더에 저장된다. 실험에 사용된 주요 장비는 Table 1에 표기하였다.

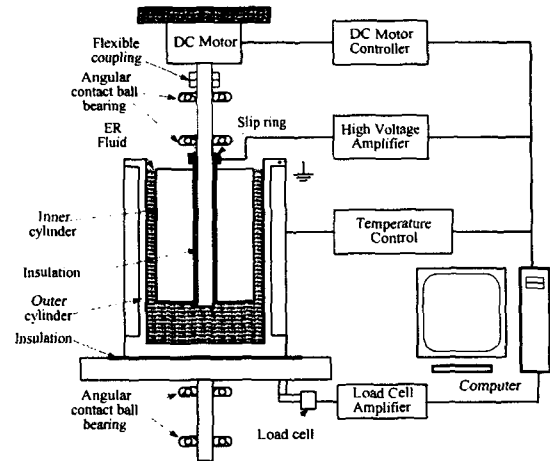


Fig. 4 Schematic of ER viscometer

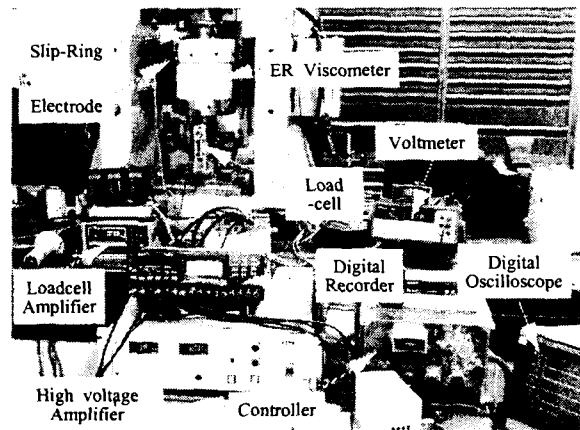


Fig. 5 Mechanism of ER effect under shear

3.2 실험용 ER유체

본 연구에 사용한 ER유체는 비전도성 용매인 점도가 20 cSt 인 실리콘 오일 (Shin-Etsu Silicon Co.)에 전분(starch) 계열의 전도성 입자를 중량비 30 % 로 조성하였으며, 유동성 개선을 위하여 소량의 계면활성제(Brij-30)를 첨가하였다. 입자는 곱게 갈아서 사용하였으며, 조성된 입자의 평균 직경은 14 μm 이다. 조성시 입자의 함수율은 건조로를 이용 조절하였다.[7]

조성된 ER유체의 간극이 1 mm인 구형 전극에서의 방전실험에서 14 kV/mm의 절연 특성을 보였다. 전극 함수율이 높으면 ER 효과는 상승하는 경향을 보이나 전류 밀도가 증가하여 온도 상승을 유발하고 증기가 발생하여 절연이 파괴되어 순간 방전이 발생하기 쉬워지며, 방전시 발생한 탄화물 입자들이 ER입자와 함께 유동하면

서 점차 방전 영역이 넓어지게 되므로 ER유체의 특성이 나빠진다. 방전시 상대 운동면에 탄화물이 고착되는 경우는 고착된 탄화물을 통해 연속적인 방전을 촉발하여 실험이 불가능하게 될 수도 있다.

Table 1 Specification of experimental equipments

No.	Equipments	Model
1	ER fluid	Inha Univ. ERF
2	High voltage amplifier	KSC HV5K
3	Digital Oscilloscope	LeCroy 9314M
4	Digital Recorder	Sony PC-216Ax
5	Spindle motor	Yaskawa
6	Loadcell	CAS BCA-20L
7	Loadcell amplifier	CAS CI-5010A
8	Inner dia. of outer cylinder	101.0 mm
9	Outer dia. of inner rotor	100.0 mm

3.3 실험 결과

실험 결과는 Fig. 6 ~ Fig. 7 에 나타난 바와 같다. 회전수 변화에 따른 경향을 살펴보기 위해 $100 \sim 2,500$ rpm 으로 변화시켜서 전단속도가 $1.0 \times 10^3 \sim 26 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 정도로 고속 전단 모드가 되도록 하였으며, 인가전압은 $0.5 \sim 3.5 \text{ kV/mm}$ 로 변화 시키며 점성 마찰력을 측정하였다.

Fig. 6는 인가전압의 증가에 따른 점성 마찰력의 변화를 보여주는 그림이다. 인가전압이 증가함에 따라 점성 마찰력도 증가하는 경향을 보이고 있으며, 전단속도가 높아짐에 따라 점성 마찰력의 증가율이 감소하고 있음을 알 수 있다.

순수한 전기장 인가에 따른 ER효과를 보기 위해 전기장 인가시 각각의 결과와 전기장 미인가시의 결과와의 차를 계산하여 Fig. 7에 나타내었다. 전기장 세기의 증가에 따라 ER효과도 증가하지만 전단 속도가 점차 증가함에 따라 ER효과가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 전단속도가 $10 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 이상의 경우에는 점차 순수 ER효과가 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 3 kV/mm 의 경우에 전단속도가 $40 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 이상에서는 ER효과가 전혀 나타나지 않게 됨을 볼 수 있다.

고속 전단 유동의 경우에는 저속 전단 유동에 비해 ER효과가 상대적으로 작으며, 한계속도 이상에서는 ER효과가 전혀 나타나지 않을 수도 있

음을 알 수 있다.

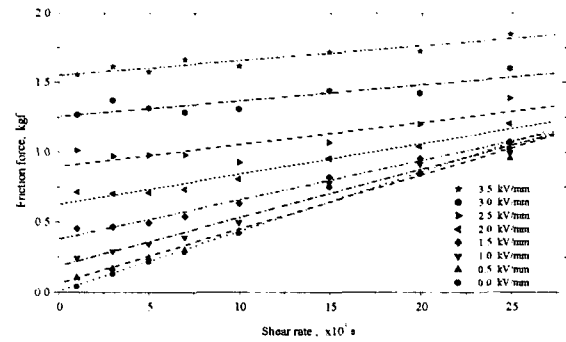


Fig. 6 Comparison of friction force increasing the apply voltage

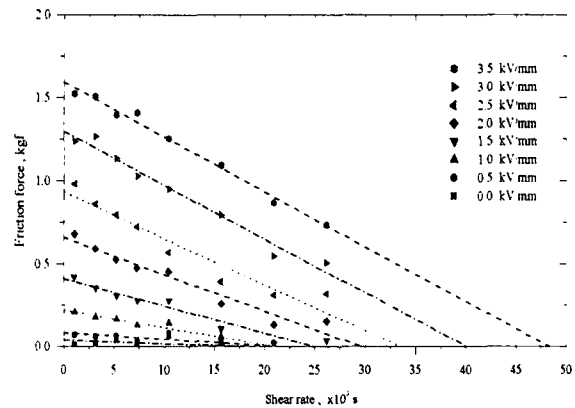


Fig. 7 Comparison of difference of predicted friction force between with and without electric field

비 유동시의 절연내압이 14 kV/mm 이었으나 실험시에는 4 kV/mm 이상의 경우 부분방전이 발생하여 실험이 곤란하였다. 이것은 유동에 의해 정지상태에 비해 절연성에 영향을 주는 요소가 있음을 알 수 있으며, 전단 속도가 높아질수록 더 낮은 전압에서 절연이 파괴되는 경향을 보였다. 그 이유는 고속 운전시 전단속도가 증가하여 간극내에 유동하지 않는 코어가 발생하고 이에 따라 간극이 점차 좁아져서 결국은 방전이 발생하는 것으로 추정된다.

따라서 전단 모드를 이용하는 응용기기를 설계하고자 할 경우에는 가능하면 저속 전단 모드에서 사용이 되도록 하여야 하며, 고속 전단 모드의 경우에는 다른 방법을 강구하거나 고속 전단모드에서 특성이 우수한 다른 ER유체를 찾아야 할 것으로 보인다.

고속 전단 모드에서 운전되는 저널베어링의 경우에는 본 ER유체를 적용하는 것은 곤란하며, 고속 전단 모드에서의 특성이 우수한 다른 유체를 사용하는 것이 바람직할 것이다.

4. 결론

이상의 결과로부터 본 ER유체에서 고속 전단 유동시 전기장 인가 및 전단속도 변화에 따른 ER효과의 변화에 대하여 다음과 같이 결론을 얻었다.

- 1) 고속 전단 모드의 실험을 위해 설계, 제작된 실험장치가 적절하게 설계되었음을 실험을 통해 확인하였다.
- 2) 전단 속도가 증가함에 따라 점성 마찰력은 증가하는 경향을 나타낸다. 인가전압이 증가함에 따라 ER효과는 증가하며, 한계 전압은 전단 속도에 영향을 받는다.
- 3) 전단 속도에 의해 인가 한계 전압이 낮아지는 것은 전단속도가 증가함에 따라 간극내에 유동하지 않는 코어가 발생하고 성장하여 점차 간극이 점차 좁아져서 생기는 현상으로 추정된다.
- 4) 전기장 세기의 증가에 따라 ER효과도 증가하지만 전단 속도가 점차 증가함에 따라 ER효과가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 전단속도가 $10 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 이상의 경우에는 점차 순수 ER효과가 나타나지 않는 것을 알 수 있다.
- 5) 전단 모드를 이용하는 응용기기를 설계하고자 할 경우에는 가능하면 저속 전단 모드에서 사용이 되도록 하여야 한다.
- 6) 고속 전단 모드에서 운전되는 저널베어링의 경우에는 본 ER유체를 적용하는 것은 무리가 있으며, 고속 전단 모드에서 우수한 특성을 가지는 ER유체의 개발된다면 좋은 적용대상이 될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. T. C. Jordan, M. T. Shaw, "Electrorheology," IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, pp. 849~878, 1989.
2. T. C. Halsey, "Electrorheological Fluids - Structure and Dynamics," Advanced Materials,

- Vol. 5, No. 10, pp. 711~718, 1993.
3. D. L. Klass, T. W. Martinek, "Electroviscous Fluids. I. Electrical Properties," Journal of Applied Physics, Vol. 38, No. 1, pp. 75~80, 1967.
4. S. Morishita, Y. Kuroda, "Controllable Dynamic Damper as an Application of Electrorheological Fluid," Proc. of PVP Conf., ASME, PVP-211, pp. 1~6, 1991.
5. J. E. Stangroom, "Electrorheological Fluids," Physical Technology, Vol. 14, pp. 290~296, 1983.
6. O. Reynolds, "On the Theory of Lubrication Experiments, Induced an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil," Phil. Trans. Royal Society, London, Vol. 177, pp. 157~234, 1886.
7. H. G. Lee, Performance Evaluation of Some Application Devices with Different Characteristics of Electro-Rheological Fluids, Ph.D Dissertation, Inha Univ., 2000.
8. B. G. Ahn, U. S. Choi, O. K. Kwon, T. J. Moon, "Electrorheological Properties of Anhydrous ER Suspensions Based on Phosphated Cellulose," Journal of KSTLE, Vol. 14, No. 2, pp. 1~9, 1998.
9. Y. K. Ahn, Shin Morishita, B. S. Yang, "Evaluation of Apparent Viscosity Properties for Electrorheological Fluids," Journal of KSTLE, Vol. 14, No. 2, pp. 42~48, 1998.
10. S. Oka, "The Principles of Rheometry." Rheology-Theory and Application, Ed. Eirich, F. R., Academic Press, Vol. 3, 1960.