

## 입자분산계 ER유체의 빙햄특성 고찰

장성철<sup>\*</sup> · 이선의<sup>\*</sup> · 김태형<sup>\*\*</sup> · 박종근<sup>\*\*\*</sup> · 염만오<sup>\*\*\*</sup>

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

### A Study on Bingham Characteristics of Particle Dispersive Electro-Rheological Fluid

Sung-Cheol Jang<sup>\*</sup>, Sun-Yee Lee<sup>\*</sup>, Tae-Hyung Kim<sup>\*\*</sup>, Jong-Keun Park<sup>\*\*\*</sup> and Man-Oh Yum<sup>\*\*\*</sup>

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

**KEY WORDS** : Electrorheological fluid 전기점성유체, Starch 전분, Yield stress 항복응력 Shear stress 전단응력, Shear rate 전단속도비, Electric field 전기장, Viscosity 점도

**ABSTRACT** : Electrorheological(ER) effect on the dispersive system of polarizable fine powder/dielectric oil has been investigated. The electrical and rheological properties of zeolite and starch based ER fluid were reported. The ER fluids were constructed by mixing zeolite and starch power with two different dielectric oils. 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.

## 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. 1947년 Winslow가 실리카 입자와 전분 입자를 미네랄오일에 분산시킨 후 전기장을 인가하여 전기장의 강도에 따라 유체의 점성이 변함을 발표하였고, 또한, 브레이크/클러치 시스템의 응용 예를 처음으로 발표하였기 때문에 Winslow 유체라고도 한다.

ER유체는 전기장을 인가하면 액체의 겔보기 점도(apparent viscosity)와 항복응력(yield stress)이 변하여, 반응시간이 매우 빠르고, 전기장 인가에 대하여 가역적인 반응을 나타내며, 인가되는 전기장의 크기에 따라 연속적이고 부분적으로 제어할 수 있는 특성을 갖고 있다. 또한, 전기장만을 유체에 인가하게 되므로 부가적인 운동장치가 필요

없어 응용 장치 설계의 단순화를 가져올 수 있으며, 상변화에 요구되는 전기장은 높지만, 전류는 매우 낮으므로 소비 전력이 낮은 장점을 갖고 있다.

유압제어 시스템에 있어서도 ER유체의 특성을 응용함으로써, 전기적 신호만으로 직접 유체의 유동을 제어하는 것이 가능하기 때문에 가동부가 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 연구개발이 절실히 요구된다.

본 연구에서는 실리콘 오일이 비교적 전기 절연성이 우수한 특징을 이용하여 절연유(絶緣油)로 사용하였으며, ER입자로서 제올라이트와 특수처리된 전분입자를 사용한 입자분산계 ER유체를 개발하여, ER입자의 무게분율, 점도, 항복응력, 전기장의 강도에 따른 빙햄특성의 변화와 전기점성효과(ER effect)에 대하여 실험적으로 검토하였다.

## 2. ER유체의 특성

ER유체는 전기절연성 오일중에 유전성을 가진 고체미립자를 분산시킨 현탁액이며, 전기장을 인가하면 액체의 걸보기 점도가 현저히 증가하여 Newton유체에서 Bingham유체 특성으로 변한다. ER유체의 입자는 분극력이 용매 오일에 비하여 높기 때문에 외부에서 가해진 전기장을 왜곡시킨다. 이 현상은 특히 입자와 입자사이에서 현저하게 나타난다. 입자들은 외부전기장에 의하여 이미 분극화 되었으므로 입자들은 입자와 입자 사이에서 부분적으로 형성되는 높은 전기장 강도 영역안으로 끌리게 된다. 구형 입자들 사이에 일어나는 현상은 Fig. 1에 나타낸 것과 같다. 그림에서 보는 K는 유전상수(dielectric constant)로서 물체의 유전율(permittivity)을 진공상태의 유전율( $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-14} C/V \text{ cm}$ )로 나눈 값이며 이는 커패시턴스 부분과 컨덕턴스 부분으로 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$K^* = K - \frac{\sigma}{\omega} j \quad (1)$$

여기서  $\sigma$ 는 전도능력(conductivity),  $\omega$ 는 각진동수(angular frequency)를 나타낸다. 커패시턴스는 전하를 저장할 수 있는 능력을 나타내며 컨덕턴스는 전하를 이동시킬 수 있는 능력으로 이는 시간, 온도 및 주파수 등의 함수이다.

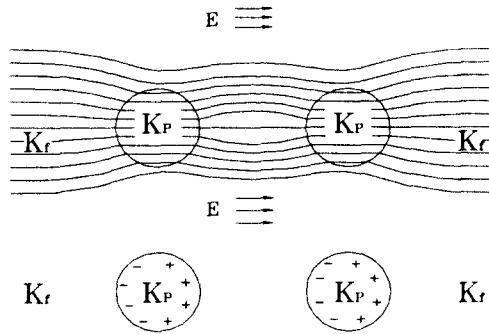


Fig. 1 Force between two dielectric particles in dielectric oil

입자들의 유전상수가 오일의 유전상수보다 높으므로 외부 전기장은 입자표면으로 끌리게 되어 그림에서 보는 바와 같이 전기장 선이 입자표면에 집중하게 된다. 이렇게 입자표면 주위에서 형성되는 전기장의 불균일성은 두 개 또는 그 이상의 입자들을 서로 끌어당기게 된다. 이러한 왜곡현상으로 높은 전

기장의 강도가 입자 사이에 형성됨으로써 입자들이 사슬구조(이하 클러스터라 함)를 형성하게 된다.

ER유체는 입자와 오일간의 유전상수차가 커야 입자주변의 전기장의 강도가 커져 입자간의 인력이 증대된다.

## 3. 실험

실험에 사용한 ER유체로서 용매는 25°C에서 동점도가 50cSt인 실리콘오일(ShinEtsu Silicone Korea Co.)이, ER입자로서 분산된 미세입자로는 800°C까지 가열하여 수분을 제거한 제올라이트와 특수처리된 전분입자(Sigma Chemical Co.)가 사용되었다. 제올라이트의 크기는 10  $\mu m$  이하이고, 전분입자는 5  $\mu m$  이하이다. 실리콘오일은 온도나 주파수 변화에 따른 전기절연성이 우수하고, 온도변화에 따른 점도변화가 작으며, 전단에 대한 저항성이 크고, 화학적 안정성과 열산화 안정성이 우수한 특징을 가지고 있기 때문에 ER유체의 절연유로서 적절하다고 생각된다. Table 1은 실리콘 오일의 물성치를 나타낸다.

Fig. 2는 실리콘오일에 ER입자를 첨가한 ER유체의 Bingham특성을 조사하기 위하여 사용한 회전식 점도계(Haake社, VT-500)의 개략도이다. 이것은 같은 중심축상에 설치된 고정된 외부원통(cup)과 회전하는 내부원통(bob), bob구동부, 온도제어가 가능한 항온조(temperature bath) 및 온도, 토크, 회전수 계측신호의 처리부로 구성되어 있다. 실험에서는 cup과 bob사이의 간극에 ER유체를 주입하고, bob을 일정한 각속도 또는 각속도를 변화시켜 bob을 회전시키는 데 필요한 토크와 각속도를 측정하여 점도를 계측한다. Fig. 2에서 bob과 cup사이의 간극은 1.45mm이다. 이 간극은 bob의 선택에 따라 변하게 된다. ER유체의 점도가 큰 경우에는 직경이 작은

Table 1 Properties of ER fluid lubricants

동점도(25°C)cSt	50
비중(25°C)	0.96
점도-온도계수	0.58
비열(cal/g·°C)	0.38
열전도율(cal/cm·s·°C)	$3.6 \times 10^{-4}$
절연파괴 강도(kV/2.5mm)	50.0 이상
유전율(50Hz)	2.71
유동점(°C)	-55.0 이하
인화점(°C)	260.0 이상

bob을 사용하고, 점도가 작은 경우에는 직경이 큰 bob을 사용하여 간극을 적절하게 조절할 수 있다. 또한 bob은 (-)전극, cup은 (+)전극으로 사용하여 전기장의 강도에 따른 ER효과의 영향도 검토할 수 있도록 제작되어 있다. 그리고 점도계와 마이크로 컴퓨터가 연결되어, 전단속도비(bob의 회전속도) 변화에 따른 ER유체의 점도와 전단응력을 측정하여 출력되도록 구성되어 있다.

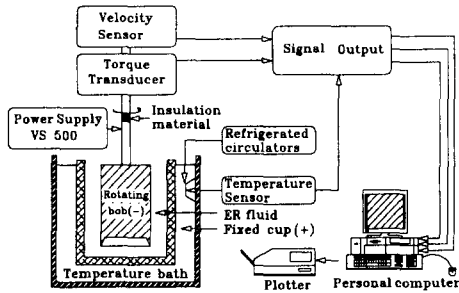


Fig. 2 Experimental setup Bingham test

실험방법은 직접 제조한 ER유체 10g을 bob과 cup사이의 간극에 주입한 후 전단속도비를 증가시키면서 ER유체의 점도와 전단응력을 측정하였다. 실험조건에 따라, 전기장의 강도는 0.0~2.0kV/mm까지 0.5kV/mm 단계로 증가시켰다. 전단속도비는 2분 동안에 0~200[s<sup>-1</sup>]까지 증가하도록 실험조건을 동일하게 설정하였다.

ER유체는 전기장 무인가시 뉴턴유체의 거동을 보이지만, 인가되는 전기장의 강도에 따라 항복응력이 증가되는 Bingham거동을 한다. 사용하는 용매와 입자의 종류, 입자의 모양 및 크기에 따라 Bingham거동은 다르며, 일반적으로 아래와 같이 나타낼 수 있다. 뉴턴유체에서 전단응력은 식 (2)와 같다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2)$$

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.

$$\tau = \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma} \quad (3)$$

여기서,  $\tau_y(E)$ 는 ER유체의 항복응력을 나타내며, 전기장의 강도( $E$ )와 더불어 지수적으로 증가한다. 따라서 식 (3)을 전기장의 함수로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \alpha E^\beta + \eta \dot{\gamma} \quad (4)$$

여기서, 계수  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 ER유체의 절연유 종류, 입자종류, 무게분율과 절연유의 점도등 ER유체의 조성조건에 영향을 받는 ER유체의 고유상수이다. ER유체의 구성요소에 따른 항복응력의 연계성을 고찰하기 위하여 Table 2에 나타낸 것과 같이 용매와 ER입자의 무게분율에 따라 ER유체를 2종류로 제조하고, 전기장 강도에 따른 역학적 거동을 회전식 점도계를 이용하여 측정하였다.

Table 2 Specification of ER fluid

Lubricant designation	Base liquid and ER fluids
ERF-S40	Silicone oil(50cSt)+Starch 40%
ERF-Z40	Silicone oil(50cSt)+Zeolite 40%

#### 4. 실험결과 및 고찰

일반적으로 실리콘오일의 점도는 분자 상호간의 운동량 교환에 의한 유체마찰과 분자간의 응집력에 기인한다. 즉 속도가 빠른 영역에 있는 분자와 속도가 낮은 영역에 있는 분자가 서로 분자력으로 결합하여 점착함에 따라 양 영역간에 저항력이 발생하게 된다. 액체의 온도가 상승하면, 열 운동에 의한 분자운동이 활발해지므로 분자간에 결합하는데 방해가 받게 된다. 이때 분자간에는 충돌이 발생하지만 결합하지 못하고 서로 떨어져버리기 때문에 응집력이 감소하여 점도가 감소한다. 이와 같이 온도변화는 분자운동과 응집력에 대하여 상반되는 효과를 미치고, 응집력 변화가 점도에 큰 영향을 준다.

Fig. 3은 실리콘오일에 전분 입자(이하 ERF-S40이라 함)와 실리콘오일에 제올라이트 입자(이하 ERF-Z40이라 함)의 무게분율이 40wt%에 따른 점도변화 특성을 나타낸 것이다. 종축은 전단속도비(shear rate), 횡축은 전단응력(shear stress)을 나타내며, 기호(●, ◆)로 표시된 된 실험결과와 기울기가 ER유체의 점도를 나타낸다. 실험은 ER유체에 전기장은 인가하지 않고, 온도를

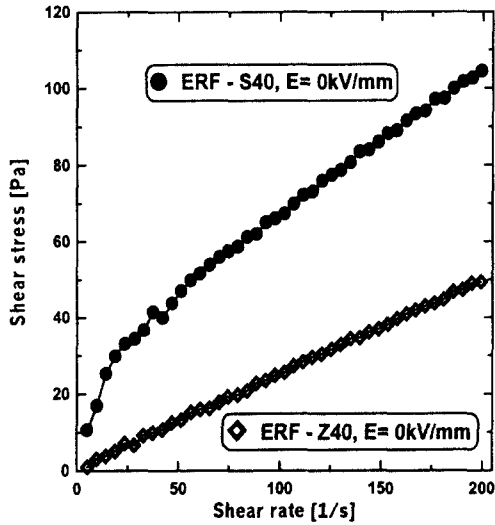


Fig. 3 Shear stress of ER fluids

40℃로 일정하게 유지한 상태에서, ERF-S40과 ERF-Z40의 점도특성을 비교하였다. ERF-Z40의 점도가 ERF-S40보다 3.5배정도 낮게 나타났다. 이것은 온도가 일정하고 전기장이 인가되지 않은 상태에서 ER유체의 점도는 주로 응집력에 크게 의존하기 때문에 실리콘오일중에 전분 입자의 첨가량이 많아지면 전분 입자와 실리콘오일 사이에 유체마찰이 증가하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 또한 이 경우에는 전분 입자의 운동량 교환작용에 의한 유체마찰의 영향도 무시할 수 없을 것으로 예측된다. Fig. 3에서 ERF-S40의 경우 항복응력이 발생함을 볼 수 있다. 이것은 ER유체에 전기장 인가시 나타나는 ER효과가 아니고, 실리콘오일중에 분산된 전분 입자가 제올라이트 입자보다 분산 안정성이 우수하여 전분 입자와 실리콘오일간의 응집력이 증가되기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다.

Fig. 4는 Fig. 3과 같은 실험조건에서, 전기장을 2kV/mm로 일정하게 인가한 경우의 실험결과이다. 실험결과에서, 전기장이 2kV/mm로 인가한 경우 항복응력 값도 증가하며, 또한 전기장을 인가하여 전기점성효과가 나타나면 초기 항복응력을 가지는 Bingham유체 거동으로 변하는 것을 볼 수 있다. 전단속도비가 20[s<sup>-1</sup>] 로 낮은 영역에서 전단응력이 불규칙으로 변하는 것은 회전식 점도계에서 전극으로 사용된 bob(-)과 cup(+) 전극에 전기장이 인가되면, 전극의 간극내에 채워진 ER유체가 정지된 상태에서 클러스터를 형성하게 되고, 초기상태에서 bob이 회전하려는 순간에는 bob과 cup 사이에 형성된 사슬구조가

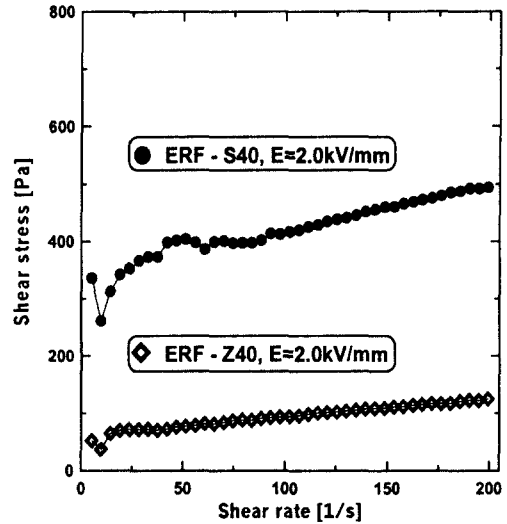


Fig. 4 Shear stress of ER fluids with E=2kV/mm

순간적으로 파괴됨으로 큰 토크가 필요하게 되며, 또한 bob 축 지지부에 작용하는 미소한 마찰손실 토크의 영향이 복합적으로 작용하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 또한 마찰손실 토크는 bob의 기동시에는 크고, 전단속도비의 증가와 함께 감소하는 경향을 나타내며, 전단속도비가 어느정도 커지게 되면 ER효과와 점성마찰특성이 지배적으로 작용하게 된다. ER유체의 항복응력은 유체에 유동이 일어나는 순간의 전단응력을 나타내는데, 유체의 유동은 매우 짧은 시간에 시작되며 매우 복잡한 거동을 하기 때문에 항복응력을 정확히 측정하는 것은 매우 어려운 문제이다. 따라서 본 연구에서는 초기의 항복응력 값은 실험결과를 곡선점합(curve fitting)하여 전단속도비의 값이 영(zero)일 때의 전단응력축의 절편값으로 설정하여 고찰하였다. 한편 전기장을 인가할수록 전단응력의 크기가 증가하며, 전기장이 일정한 경우 유동이 시작된 후에는 전기장을 인가하지 않은 경우와 유사한 비율로 증가함을 알 수가 있다. 전기장이 2kV/mm인 경우 큰 항복응력을 나타냄을 명확히 알 수가 있다.

전기장을 인가한 Fig. 4의 그래프에서는 ER유체의 이상적인 Bingham모델인 식(4)와는 약간 다른 경향을 나타낸다. 식(4)에서는 ER유체에 전기장이 인가되면 전단응력이 원점에 대하여 항복응력  $\tau_y(E)$  만큼 평행이동 되는 것으로 표현되어 있지만, 실험결과에서는 전단응력에 대한 전단속도비의 기울기 즉 겉보기 점도가 변하는 것을 나타낸다. ER유체는 외부에서 인가되

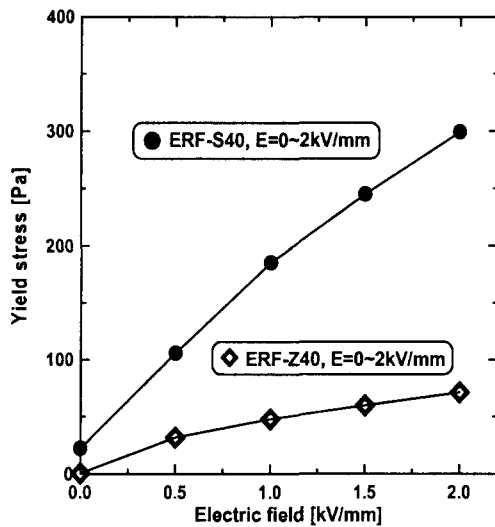


Fig. 5 Yield stress of ER fluids

는 전기장에 대하여 전하나 이온의 이동에 영향을 주는 ER입자의 결정구조, 절연유와 ER입자간의 유전율의 차이, ER입자내의 수분함유량 및 불순물 등에 큰 영향을 받기 때문에, 전단응력과 전단속도비는 전기장이 인가되지 않은 상태와 같은 기울기를 갖지 않는 것으로 추정된다.

Fig. 4의 전기장이 2kV/mm로 인가된 ERF-S40의 경우 Fig. 3의 전기장 무인가시보다 점도가 약 5배정도 증가한 것을 알 수가 있으며, ERF-Z40의 경우 점도가 약 3배정도 증가한 것을 알 수가 있다. 실험결과에서 고찰한 바와 같이 ER유체의 특성변화에 영향을 미치는 인자로는 전기장의 강도 및 ER입자의 무게분율이 중요한 것을 알 수가 있다.

Fig. 5는 전기장 강도에 따른 ER유체의 항복응력을 나타낸 것이다. 전기장의 강도가 증가함에 따라 항복응력 값도 증가하는 것을 알 수가 있다. ER유체는 조성에 사용된 용매와 입자의 유전상수의 차이가 클수록 전기장 인가에 따른 항복응력의 크기가 커지는 것으로 알려져 있다. 용매의 비극성이 높을수록 유전상수는 작기 때문에 동일한 입자에 대한 유전상수의 차가 커져 전기장 인가에 따른 항복응력은 크게 나타난다.

Fig. 5에서 ERF-S40과 ERF-Z40을 식(4)와 같은 전기장의 함수로 나타내면 ERF-S40은  $297E^{2.43}$ , ERF-Z40은  $60.19E^{1.3}$ 으로 나타낼 수가 있다. 전기장 인가시 ERF-S40이 ERF-Z40보다 점도가 약 15배 정도 증가한 것을 알 수가 있다. 또한, 전기장 무인가시의 그래프인 Fig. 3과 전

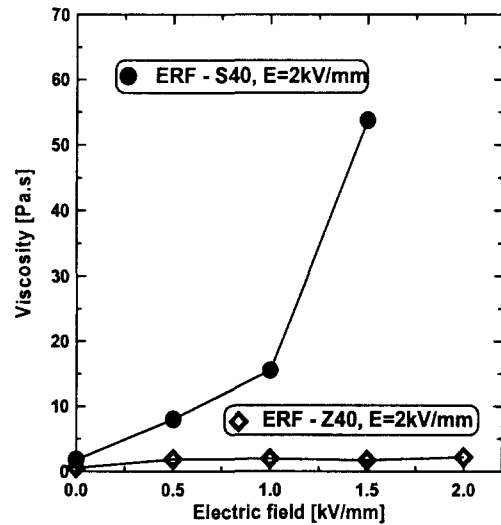


Fig. 6 Viscosity vs Electric field

기장 인가시의 그래프인 Fig. 5와 점도 특성을 비교해보면 전기장 인가시 ERF-S40은 전기장 무인가시보다 점도가 약 47배정도 증가했으며, ERF-Z40은 11배정도 증가되었다.

이는 ERF-S40의 ER입자로 사용된 전분입자가 ERF-Z40의 제올라이트 입자보다 실리콘오일중에 분산된 전분 입자가 제올라이트 입자보다 분산 안정성이 우수하여 전분 입자와 실리콘오일간의 응집력이 증가되기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 또한 ER입자의 크기가 제올라이트는  $10 \mu m$ 이고, 전분은  $5 \mu m$ 로 작기 때문에 ER효과가 뛰어나다고 생각된다.

Fig. 6은 ER유체의 온도가  $40^\circ C$ 로 일정한 상태에서, 전기장과 ER유체의 점도변화 특성을 나타낸 것이다. ERF-Z40은 전기장의 강도에 거의 비례하여 완만하게 점도가 증가하지만, ERF-S40은 전기장의 강도가  $1kV/mm$ 에서  $1.5kV/mm$ 에서 점도변화가 급격함을 알 수가 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 실리콘 오일이 비교적 전기 절연성이 우수한 특징을 이용하여 절연유(絶緣油)로 사용하였으며, ER입자로서 제올라이트와 특수처리된 전분 입자를 사용한 입자분산계 ER유체인 ERF-Z40과 ERF-S40을 개발하여, ER입자의 무게분율, 점도, 항복응력, 전기장의 강도에 따른 빙헴특성의 변화와 전기점성효과에 대하여

실험적으로 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) ER유체의 항복응력은 전기장의 강도, 무게분율에 큰 영향을 받는다. 또한 전기장이 가해지면, 전단응력과 전단속도비는 이상적인 Bingham 유체거동과는 상이한 경향을 나타내며, 전기장의 강도, ER입자의 결정구조, 절연유와 ER입자간의 유전율의 차이, ER입자내의 수분함유량 및 불순물 등에 큰 영향을 받는다.

(2) 전기장 인가시 ERF-S40은 전기장 무인가시보다 점도가 약 47배정도 증가했으며, ERF-Z40은 11배정도 증가되었다.

여기서 개발한 입자분산계 ER유체는 유압제어 시스템의 적정온도 범위인 40℃에서 점도변화가 비교적 적기 때문에 유압제어시스템에 응용할 수 있을 것으로 생각되며, 향후 ERF-PUMP에 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. 장성철, "ER유체를 이용한 유압제어밸브의 개발" 경일대학교 석사학위논문, 2000
6. 김도태, 장성철, "평행평판 간극내의 유량-압력강하 특성", 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, pp 399-404, 1999
7. 김도태, 장성철, 최윤대, "ER유체의 유동특성에 관한 실험적 연구", 한국공작기계학회 춘계학술대회 논문집, pp 216-221, 1999
8. 김도태, 장성철, "온도변화에 따른 빙햄 특성", 경일대학교 논문집
9. 김도태, 장성철, 최윤대, "분산계 ER유체의 점도-온도 특성", 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, pp 393-398, 1999
10. 장성철, 윤일로, 최기석, 염만오, 김태형, "ER유체를 이용한 평판형 밸브의 성능실험", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp 116-122, 2000