

ER유체의 유동특성에 관한 실험적 연구 II (분산계 ER유체의 점도-온도특성)

Experimental Investigation on the Flow Characteristics of ER Fluids II (2nd Report, Viscosity-Temperature Characteristics of Dispersive ER Fluids)

김도태(경일대 기계공학부), 장성철*(경일대 대학원), 최윤대(육군3사관학교)
D. T. Kim (Kyungil Univ.), S. C. Jang (Graduate School, Kyungil Univ.), Y. D. Choi (Korea 3rd Mil. Acad.)

ABSTRACT

The temperature dependence of the viscosity was determined for an electrorheological(ER) fluid consisting of 35 weight % zeolite particles in hydraulic oil 46cSt. Thermal activation analysis were performed by changing the ER fluid's temperature from -10°C to 50°C at fixed electric field. According to the analysis, the activation energy for flow was about 79.64kJ/mole at $E=0\text{kV/mm}$. Generally, the hydraulic oil 46cSt will be operated at the temperature of about 40°C , the ER fluid's electric field dependence of viscosities were investigated at this temperature. Also, the influence of adding the dispersant(Carbopl 940) on electrorheological effect of the ER fluid was discussed

Key words : Electrorheological fluid (전기유변유체), Viscosity-Temperature characteristics (점도-온도특성), Activation energy (활성화에너지), Dispersant(Carbopl 940) (분산제)

1. 서론

전기유변유체(electrorheological fluid:ER 유체, 전기점성유체)는 분극성이 강한 미세입자 분말을 유전유체속에 분산시켜 제조한 현탁액이며 외부에서 전기장을 인가하면 현탁액의 레올러지(rheology) 특성이 변하는 기능성 유체이다. ER유체는 입자분산계(粒子分散系) ER유체와 균일계 ER유체로 대별할 수 있다. 입자분산계 ER유체는 전기장을 인가하면 액체의 겔보기 점도(apparent viscosity)이 현저하게 증가하여 Newton유체에서 Bingham유체로 그 유동특성이 변한다. 외부로부터의 인가된 전기장의 크기에 따라 점도가 달라지므로 전기장의 제어에 의해 유동 특성 제어가 가능하다. 한편 균일계 ER유체는 액정(液晶)으로 대표되는 ER유체이고, 전기장을 인가하면 유체의 점도가 변화하는 특성을 가지고 있다

유공압 시스템에 있어서도 ER유체의 특성을

응용함으로써, 전기적 신호만으로 직접 유체의 유동을 제어하는 것이 가능하기 때문에 가동부가 단순한 구조로 고속 응답성과 고기능성을 가진 유공압 기기를 개발할 수 있을 것으로 생각된다.

지금까지 석유계 유압작동유 #46의 온도변화에 따른 점도 변화 특성에 대해서는 실험적으로 많이 연구되었지만, 유압작동유 #46을 미세입자 분말과 혼합하여 제조한 ER유체로 제조하여 온도변화 특성에 대한 연구는 보고된 바가 없었다.

본 연구에서는 제올라이트 입자(직경 $10\ \mu\text{m}$ 이하)를 유압작동유 #46 속에 분산시킨 입자분산계 ER유체를 직접 제조하여, 온도변화에 따른 ER유체의 점도변화 특성에 대하여 고찰하였다. ER유체는 40°C 에서 동점도 46cSt를 갖는 석유계 유압 작동유 #46 속에 제올라이트 입자(직경 $10\ \mu\text{m}$)를 무게분율 35wt%로 제조하여 사용하였다. 실험시 온도범위는 $-10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 까

지 변화시켜, 전기장을 인가하지 않은 상태와 전기장을 인가한 상태의 ER유체의 점도변화 특성을 검토한 후 활성화에너지에 대해서 비교·분석하였다. 또한 ER유체에 분산제(Carbopl 940)를 첨가한 경우의 방범특성도 실험적으로 조사하였다.

2. ER유체의 거동

Fig. 1은 전기장 인가에 의하여 제올라이트 입자분말이 사슬구조를 형성함을 시각적으로 보이기 위하여 직경이 $10\ \mu\text{m}$ 인 제올라이트 입자를 실리콘 오일내에 분산시켜 제조한 콜로이드 용액을 전극이 부착된 슬라이드 글라스 위에 위치시킨 후 약 $2\text{kV}/\text{mm}$ 의 전기장을 인가하면서 미세입자 분말들이 전극사이에서 사슬구조를 형성하기 전·후의 모습을 현미경으로 관찰한 사진이다.



(a) $E=0\text{kV}/\text{mm}$



(b) $E=2\text{kV}/\text{mm}$

Fig. 1 Effect of DC electric field on the structure formation of an ER fluid. ER fluids is $10\ \mu\text{m}$ Zeolite in silicone oil 20cSt

ER유체에 가해진 인가전압은 직류 고전압 발생기를 사용하였다. 정지상태에서의 관찰은 현미경 영상처리 장치인 EPIPHOT200에 장착된 CCD카메라를 사용하여 가시화 하였으며, 이미지 획득 및 처리는 PC의 이미지 처리 프로그램을 사용하여, 미세입자 상호간의 거동특성을 모니터에서 관찰하였다. Fig. 1(a)에서, 전압이 인가되지 않은 상태에서 제올라이트 입자는 전극 사이에 균일하게 분포되어 있다. 전압을 인가하면 Fig. 1(b)에서와 같이 제올라이트 입자들이 양쪽 전극방향으로 배열되어 전극사이에서 사슬구조(cluster라 함)를 형성함을 관찰할 수 있다. 이와 같이 클러스터가 형성된 상태에서 전압을 제거하면 사슬구조도 없어지는 가역적 특성을 가진다.

3. 실험

3.1 시료준비

본 실험에 사용된 ER 유체는 제올라이트 미세 입자를 유압작동유 46cSt에 분산시켜 제조하였다. 이때 제올라이트 입자의 양은 무게 비율로 35wt%이다. 제올라이트 입자는 시그마 화학(Sigma Chemical Co.)제품을 사용하였다. 제품 설명서에 의하면 입자의 밀도는 $2\text{g}/\text{cm}^3$ 이고, 크기는 평균 입자직경이 $10\ \mu\text{m}$ 이하이다.

한편 유전유체로서 사용한 유압작동유 #46의 점도특성은 마찰손실, 열발생, 마모, 누설, 시동성, 효율 등에 직접적인 관계가 있고, 내마모성, 수분 분리성, 방청성, 및 소포성이 양호하다.

Table 1은 실험에 사용한 유압 작동유 #46의 물성치를 나타낸 것이다.

Table 1 Properties of Hydraulic oil 46cSt

specific weight	0.875
viscosity (at 40°C)	46.0 [cSt]
(at 100°C)	6.5 [cSt]
viscosity index	105
flashing point	228 [$^\circ\text{C}$]
pour point	-35 [$^\circ\text{C}$]
anti-emulsion	10

3.2 실험 장치

Fig. 2는 본 연구에서 제조한 ER유체의 Bingham특성을 조사하기 위하여 사용한 회전식 점도계 (Haake社, VT-500)의 개략도이다. 이것은 동일한 중심축상에 있는 고정된 외부 원통(cup이라 함)과 회전하는 내부원통 (bob이라 함) 사이의 간극에 ER유체를 주입하고, 일정한 각속도 또는 각속도를 변화시켜, 내부원통을 회전시키는데 필요한 토크를 측정하여 점도를 측정하는 점도계이다. Fig. 2는 bob과 cup의 간극이 1.45mm로 결합된 상태를 나타낸다. bob은 ER 유체의 점도에 따라 크고 작은 것을 선택하여 사용하는데 점도가 큰 경우 작은 bob을 사용하고, 점도가 작은 경우에는 큰 bob을 사용한다. 또한 bob과 cup을 전극으로 사용하여 전기장장의 강도에 따른 ER효과의 영향도 점토할 수 있도록 제작되어 있으며, 점도계와 PC가 연결되어, 전단속도비(bob의 회전속도)변화에 따른 점성계수와 전단응력이 자동으로 측정되어, 출력되도록 구성되어 있다.

3.3 실험 방법

먼저 ER 유체 10g을 채취하여 bob이 잠길 정도로 장입 한 후, 전단 변형률을 증가시키면서 점도를 측정한다. 다음에는 전기장장을 0.0~2.0kV/mm로 고정하고, 온도를 변화시키면서 온도 변화에 따른 점도 변화를 같은 방법으로 측정하였다. 측정시 전단 변형률은 0[1/s] 부터 200[1/s] 까지를 2분 동안에 증가하도록 조건을 설정하였다.

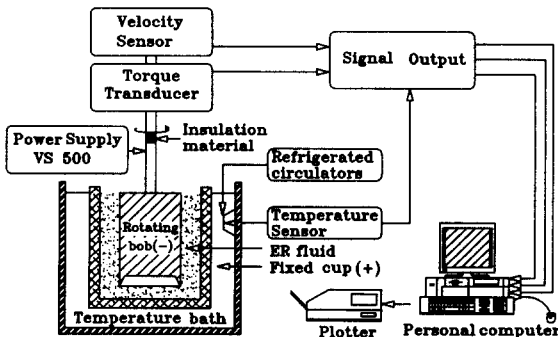


Fig. 2 Experimental setup for Bingham test (Haake VT 500)

4. 결과 및 분석

4.1 ER유체의 온도 의존성

일반적으로 액체의 유동도는 Boltzmann 인자에 따라서 온도에 의존한다. 그리고 점도 η 는 유동도에 반비례하므로 식(1)과 같이 표시할 수 있다. 식(1)에서, 점도는 온도가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 식(1)을 Arrhenius 식이라 한다.

$$\eta = A e^{E_a/RT} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 A:상수, R:기체상수, T:절대온도 (K)이며, E_a :활성화에너지(Activation Energy)로서, E_a 의 크기는 점도에 의해 좌우된다. Fig. 3(a)는 전기장장을 2kV/mm로

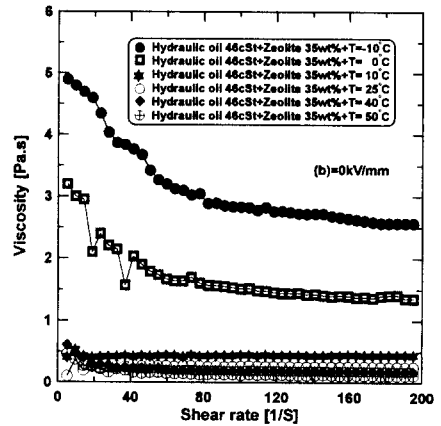
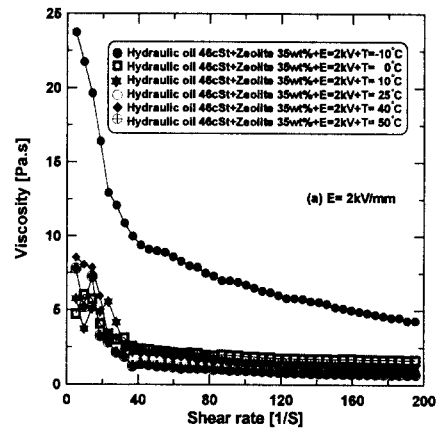


Fig. 3 Relationship between Viscosity and shear rate

인가하였을 때, (b)는 전기장을 인가하지 않았을 때 온도 변화에 따른 점도 특성을 나타낸 것이다. 인가 전압이 동일한 경우, 온도가 낮으면 점성도가 증가함을 알 수 있다. Fig.3에서, 전단 변형률이 200[1/s]일 때의 점도 값을 선택하여, 온도변화에 따른 영향을 나타내면 Table. 2와 같다.

다음, 식(1)에서 활성화 에너지를 구하기 위하여, 양변에 ln을 취하면, 다음과 같다.

$$\ln \eta = \ln A + \frac{E_a}{RT} \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 4는 종축에 ln η , 횡축에 1/T로 하여 온도-점도변화특성을 나타낸 것이다. Fig.4에서 기울기를 구하면, 약 9.58×10^3 이고, $9.58 \times 10^3 = E_a/R$ 이다. 여기서 $R = 8.314J/molK$ 이므로, $E_a = 79.64 \times 10^3$ 이다. 이 값이 ER유체에 전기장을 인가하지 않았을 때 활성화 에너지 값이다. 그리고 전기장을 2kV/mm 인가하였을 경우에는 ER효과와 온도영향이 복합되어 식(1)의 결과와는 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 2 Viscosity versus temperature

temperature [C]	-10	0	10	25	40	50
viscosity E=0kV at 200[1/S]	2.7	1.3554	0.6200	0.2522	0.1772	0.1164
viscosity E=2kV at 200[1/S]	4.3	1.65	1.130	0.71	0.77	0.57

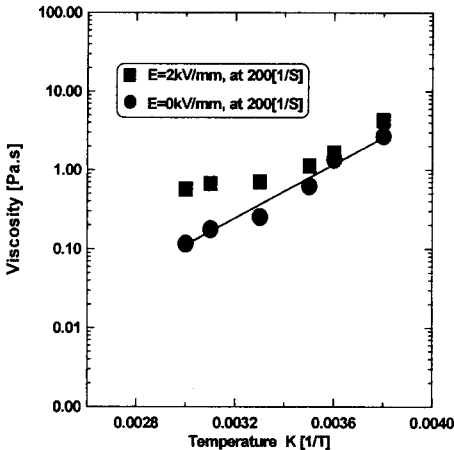


Fig. 4 ln η versus 1/T

4.2 전기장 변화에 따른 점도 분석

Fig. 5는 ER유체의 온도를 -10°C ~50°C로 변화시키고, 전기장을 인가하지 않은 상태의 전단응력과 전단변형을 그래프이다. 온도가 -10°C 정도로 낮은 경우, 항복 전단응력이 발생한다. 이것은 온도가 낮아짐에 따라 제올라이트와 유압 작동유가 침강 및 분산 안정성이 뛰어나서 분자간의 응집력이 좋아지기 때문이라고 생각된다.

Fig. 6은 Fig.5와 같은 실험조건에서, 전기장을 2kV/mm로 일정하게 인가한 경우의 실험결과

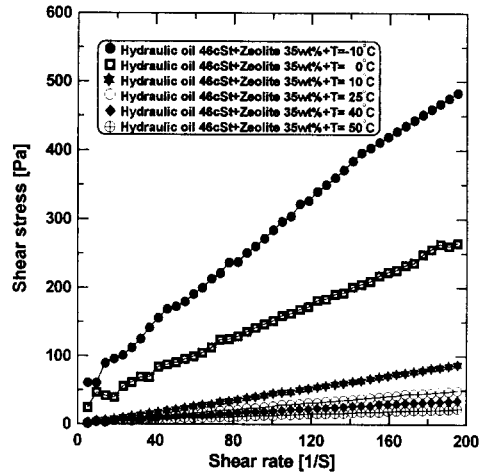


Fig. 5 Relationship between shear stress and shear rate at E=0kV/mm

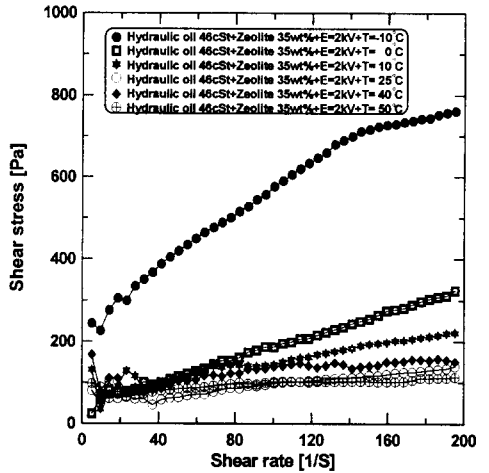


Fig. 6 Relationship between shear stress and shear rate at E=2kV/mm

이다. 그림에서 보는 바와 같이 전기장이 증가함에 따라 항복 전단응력도 증가함을 알 수 있으며, ER효과가 발생되면 Bingham 유체 거동으로 변하는 것을 볼 수 있다. 전단변형률이 10[1/S] 일때까지는 전단응력이 불규칙한 것을 볼 수 있는데, 이것은 회전 원통형 점도계에서 bob과 cup 전극에 전압이 인가되면, 간극 내에 채워진 ER유체는 정지된 상태에서 클러스터가 형성되고, bob이 회전하려는 순간에는 bob과 고정된 cup 사이에 형성된 클러스터가 순간적으로 파괴됨으로 큰 토크가 필요하며, 축 지지부에 작용하는 미소한 마찰손실 토크의 영향이 복합적으로 작용하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 한편 전기장의 크기가 증가할수록 전단응력의 크기가 증가하는 것을 알 수 있으며, 일정한 전기장에 대하여 유동이 시작된 후에는 전기장을 인가하지 않은 경우와 유사한 비율로 증가함을 알 수가 있다. 전기장의 크기가 증가할수록 큰 항복응력을 나타냄을 명확히 알 수가 있다. 실험에서 고찰한 바와 같이 ER유체의 특성변화에 영향을 미치는 인자로는 전기장의 크기 및 온도가 매우 중요한 것을 알 수가 있다.

Fig. 7은 40°C 부근의 온도조건에서 분산제를 첨가하지 않은 경우 전기장 변화에 따른 ER 유체의 점성도 변화 특성을 조사한 결과로서 전기

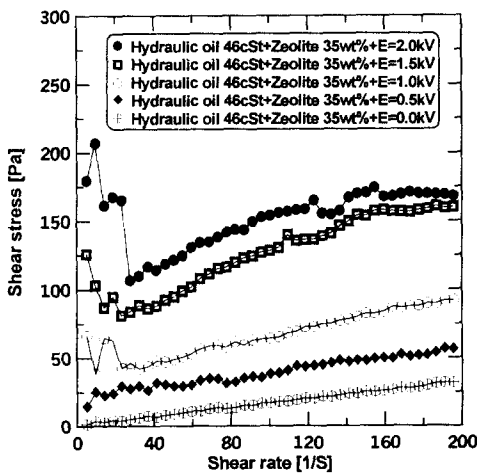


Fig. 7 Relationship between shear stress and shear rate without Carbopli 940

장을 가하지 않은 경우 항복 전단응력 값은 1.1Pa이었으나, 2kV/mm의 전기장을 인가한 경우에는 약 90Pa까지 증가하였다. 이 때 항복 전단응력 값은 전단변형률이 0일 때의 전단응력 값으로 정의하였다.

4.3 분산제(Carbopli 940) 첨가에 따른

전기 유변효과 고찰

Fig. 8은 분산제 첨가에 따른 전기 유변 효과를 고찰하기 위하여 그린 그래프이다. 앞서 Fig. 7에서 언급한것처럼 분산제를 첨가하지 않을 경우 전기장 변화에 따른 항복응력 값은 인가된 전기장이 증가함에 따라 현저히 증가하였으나, 분산제 첨가시는 전기유변효과가 현저히 감소함을 알 수 있다. 이것은 입자가 끌고루 분산되어 전기장을 인가하지 않은 경우 마찰저항이 증가하기때문에 전단응력이 증가하지만, 전기장 인가시에는 분극성이 강한 미세입자사이에서 분산제가 전기적으로 절연작용을 하여 ER효과를 방해하는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 분산제를 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우에 대한 항복 전단응력과 전기장과의 관계를 나타내는 그래프이다. 분산제를 첨가하지 않은 경우에는 항복 전단응력이 전기장의 제곱에 비례하는 형태로 증가하지만, 분산제를 첨

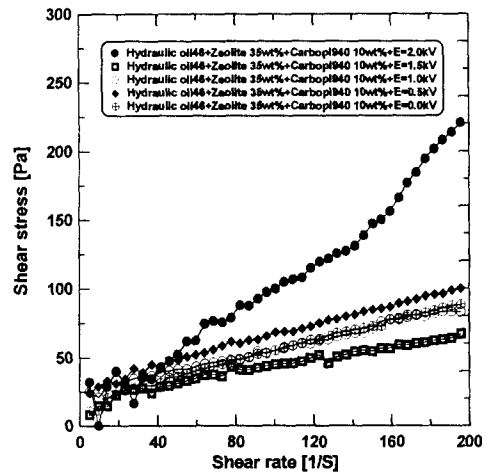


Fig. 8 Relationship between shear stress and shear rate with Carbopli 940

가한 경우에는 전기장의 크기가 증가할수록 항복 전단응력은 오히려 감소하는 것을 알 수가 있다.

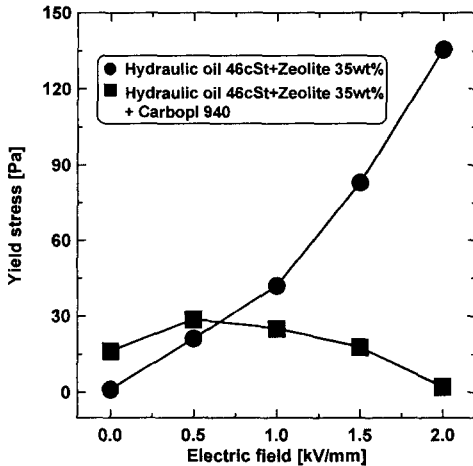


Fig. 9 Relationship between yield shear stress and shear rate

5. 결론

본 연구에서는 제올라이트 입자를 유압작동유 내에 분산시킨 입자분산계 ER유체에 대하여, 온도변화에 따른 ER유체의 점도변화 특성에 대하여 고찰하였다. ER유체는 40°C에서 동점도 46cSt를 갖는 석유계 유압 작동유 #46속에 제올라이트 입자(직경 10 μm)를 무게분율 35wt%로 분산시켜 제조하였다.

온도범위는 -10°C ~ 50°C 까지 변화시켜, 유압 작동유, 전기장을 가하지 않은 상태에서의 ER유체, 전기장을 가한 상태의 ER유체에 대하여 점도변화 특성을 검토한 후 활성화 에너지 값을 구하였다. 또한 ER유체에 분산제(Carbopl 940)를 첨가한 경우의 빙핵특성을 점도변화에 대하여 실험적으로 조사하였다.

연구 결과는 다음과 같이 3가지로 요약 할 수 있다.

(1) ER유체의 점도에 대한 온도 의존성을 Arrhenius 식을 사용하여 분석한 결과, 이 유체

의 흐름에 대한 활성화 에너지(Ea)는 인가된 전기장이 E=0kV/mm 일때 79.64kJ/mole이며, 전기장이 E=2kV/mm인 경우에는 전기유변효과와 온도에 의한 효과가 복합되어 Arrhenius 식을 따르지 않는 것으로 관찰되었다.

(2) 40°C 근처의 온도조건에서 전기장 변화에 따른 ER 유체의 점도 변화 특성을 조사한 결과, 전기장 미 인가시 항복응력 값은 1.1Pa이었으며, 전기장이 2kV/mm일 때 항복응력 값은 90Pa까지 증가하였다.

(3) 분산제로 사용되는 Carbopl 940를 ER 유체에 첨가한 경우 입자의 분산도는 증가하였으나 전기유변효과는 현저히 감소하였다.

참고 문헌

1. 김도태, 장성철, 최윤대, ER유체의 유동특성에 관한 실험적 연구, 한국공작기계학회 춘계 학술대회논문집, pp 216-221, 1999
2. Kim, K. S., Jung, D. D., Lee, H. J., Choi, S. B. and Cheong, C. C., "Performance Investigation of a Cylindrical Valve Featuring Electro-Rheological Fluids". Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 11, No.4, pp.148-157, 1994.
3. Kim, S. G., Jung, D. W., Choi, Y. D., "Construction and Evaluation of an Experimental Type Torque Converter by Adapting an Electrorheological Fluid as an Operating Medium" Journal of the Korean Society of mechanical Engineering, 第 18卷 第 10 號, pp.2706-2711, 1994.
4. Tetsuhiro Tsukiji, Jun Takahashi, Noboru Sugimoto, Hiroyasu Ikeda., "Flow Characteristics of ERF between Two Parallel-Plate Electrodes", 日本油壓と空氣壓學會志, 第 25卷 第4號 1996年 7月
5. Shinichi Yokota, Yutaka Kondoh, "A Control valve by Making use of an Electro-rheological Fluid", 日本機械學會論文集, 第 62卷 601號 1996年 9月