

합수계와 비수계 ER유체의 온도-점도 특성

Temperature-Viscosity Characteristics of Hydrus and Anhydrous Electro-Rheological Fluids

이진우¹, 장성철¹, 염만오², 김도태³, 박재범⁴

1. 경남대학교 대학원 기계공학과(055-249-2587, erfuid@yahoo.co.kr, sccjang@hanmail.net)
2. 경남대학교 기계자동화공학부(055-249-2615, moyum@kyungnam.ac.kr)
3. 경일대학교 기계공학부(053-850-7126, dtkim@bear.kyungil.ac.kr)
4. 경남대학교 유공압제어연구소, 부산인력개발원 강사(055-249-2587, pjb971@hanmail.net)

Abstract

This paper describes the properties of Temperature-Viscosity characteristics of hydrus and anhydrous ER fluids containing starch and titanium particle in silicone oil. ER effects arise from electrostatic forces between the starch particles and titanium particles dispersed in the electrically insulating silicone oil induced when electric field is applied. ER fluids under electric field have been found to provide reasonable estimates of ER fluid viscosity variation characteristics. Yield shear stress of the ER fluids were measured on the couette cell type rheometer as a function of electric fields. The outer cup is connected to positive electrode(+) and bob becomes ground(-). The electric field is applied by high voltage DC power supply. In this experiment shear rates were increased from 0 to 200 s⁻¹ in 2 minutes.

Key words: Electro-Rheological Fluid ER유체, 전기점성유체, Temperature-Viscosity Characteristics 온도-점도 특성, Yield Shear Stress 항복전단응력, Electric Field 전기장, Starch 전분, Titanium 티타늄, Hydrus 합수계, Anhydrous 비수계

1. 서론

전기점성유체(이하 ER유체라 함)는 전기장의 강도에 따라 현탁액의 유동성질이 변화하는 기능성 유체

이다⁽¹⁾. ER유체의 구성요소는 전기 전도성의 고체 미립자, 전기 절연성의 오일, ER효과를 증대시키기 위한 첨부제(additive) 등으로 구성되어진다. ER효과를 증대시키기 위한 조건으로 전기절연성의 오일은 물과의 친화력이 없어야 하고, 유전율이 낮아야 한다. 전기전도성의 고체 미립자는 적당한 양의 수분흡수를 위해서 물과의 친화력이 있어야 하고, 유전율이 높아야 하며, 다공성이어야 한다.

ER유체가 극성을 가지며 온도변화에 의한 유전율의 변화는 Birmingham⁽²⁾에 의해 보고된 바 있다. 또한, 국내에서도 합수계 ER유체의 온도변화에 따른 점도변화가 보고된 예가 있다⁽³⁾⁽⁴⁾. 그러나 온도변화에 따른 합수계와 비수계 ER유체는 연구된 바가 거의 없는 것으로 조사되었으며 ER유체가 온도에 따라 미치는 영향이 꼭 고찰되어야 할 분야이다.

본 연구에서는 합수계와 비수계 ER유체를 온도변화에 따라 고찰하였다. 합수계와 비수계 ER유체의 전기절연성 오일은 실리콘 오일을 사용하였으며, 합수계 ER유체의 고체미립자는 전분 입자, 비수계 ER유체는 티타늄 입자를 무게분율 35wt%로 조성하여 사용하였다. 실험시 온도범위는 0℃~100℃까지 25℃ 간격으로 변화시켜 전기장 강도에 따른 ER유체의 병행특성을 실험적으로 고찰하였다.

2. 합수계와 비수계 ER유체의 특징

ER유체의 거동은 전기장 무인가시에는 유체입자의 양극 또는 음극으로 자유로이 운동을 하는 액체 상태에서, 전기장 인가됨에 따라 사슬구조(이하 클러

스터라 함)를 형성하게 되어 고체 상태로 변화하는 것이다. 또한, ER유체는 인가되는 전기장에 의하여 항복전단응력이 증가하는 병행거동을 한다. 사용하는 절연유와 ER입자의 종류, 입자의 모양 및 크기에 따라 병행거동은 다르며, 일반적으로 다음과 같이 표현할 수 있다⁽⁶⁾.

$$\tau = \tau_y(E) + \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서 τ 는 유체의 전단응력을 나타내고, μ 는 절연유의 점도를 나타내며 $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비를 나타낸다. $\tau_y(E)$ 는 유체의 항복전단응력을 표현하는 것으로 전기장(E)의 증가에 따라 증가한다. 따라서 식 (1)을 전기장의 함수로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \alpha E^\beta + \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

여기서 상수 α 와 β 값은 절연유의 종류, 절연유의 점도, 무게분율, 입자의 크기 및 모양, 입자의 수분함유량 그리고 ER유체의 사용 온도등 ER유체의 조성조건 및 사용조건에 따라 달라지는 ER유체의 고유상수이다. 전기점성효과를 설명할 수 있는 미시적 모델과 이에 따른 이론적 배경이 아직 미흡하기 때문에 α 와 β 는 실험을 통하여 결정한다. 이렇게 구해진 항복전단응력은 ER유체를 이용한 응용장치 개발에 있어서 가장 중요한 설계 요소가 된다.

ER유체는 크게 2종류로 나눌 수 있는데, 분산입

Table 1 Designation of hydrous and anhydrous ER fluids

ER fluids	Base liquids and ER particle
ERF 1	Silicone oil + Starch(35wt%)
ERF 2	Silicone oil + Titanium(35wt%)

자 표면에 수분을 포함한 함수계 ER유체와 분산입자 표면에 수분을 전혀 포함하지 않는 비수계 ER유체가 있다⁽⁶⁾. 함수계와 비수계 ER유체의 고체 미립자에서는 모두 전기분극현상이 나타나지만 함수계와 비수계 ER유체에서 발생하는 분극현상의 메커니즘은 각각 다르게 나타난다.

함수계 ER유체의 메커니즘은 전기 이중층설로 설명 가능하다. 전기장 무인가시 입자표면에 이온이 흡착한 상태로 존재하며, 전기 이중층을 구성하여 전기장을 인가하면 전하의 치우침이 생겨서 정전하 중심과 부전하 중심이 어긋나고 전기 쌍극자를 구성하여 Fig. 1(a)와 같이 된다. 이에 비해 비수계 ER유체는 전기장을 인가하면 입자 자신이 분극하여 Fig. 1(b)와 같은 클러스터를 형성한다. 함수계 ER유체는 비수계 ER유체보다 더 큰 ER효과를 낼 수 있는 장점이 있으나 고온 상태에서 수분의 증발로 인한 온도변화에 따라 성능변화가 생기는 것으로 보고되고 있다.

3. 실험장치 및 방법

Fig. 2는 본 연구에서 조성한 함수계와 비수계 ER유체의 병행특성을 조사하기 위하여 사용한 회전식 점도계(Haake社, VT-500)의 개략도이다. 이것은 동일한 중심축상에 있는 고정된 외부원통(cup)과 회전하는 내부원통(bob), bob구동부, 온도제어가 가능한 항온조, 토크, 회전수 계측신호의 처리부로 구성되어 있다. 실험에서는 cup과 bob사이의 간극에 ER유체를 주입하고, 전단속도비를 변화시켜 내부원통을 회전시키는데 필요한 토크를 계측하여 점도를 측정하는 점도계이다. 또한 bob과 cup을 전극으로 사용하여 전기장의 강도에 따른 ER효과와 영향도 검토할 수 있도록 제작되어 있다. 점도계와 PC가 연결되어, 전단속도비 변화에 따른 점도와 전단응력이 자동으로 측정되어, 출력되도록 구성되어 있다.

ER유체에 인가되는 전기장 $E=0.0\sim 2.0\text{kV/mm}$ 까

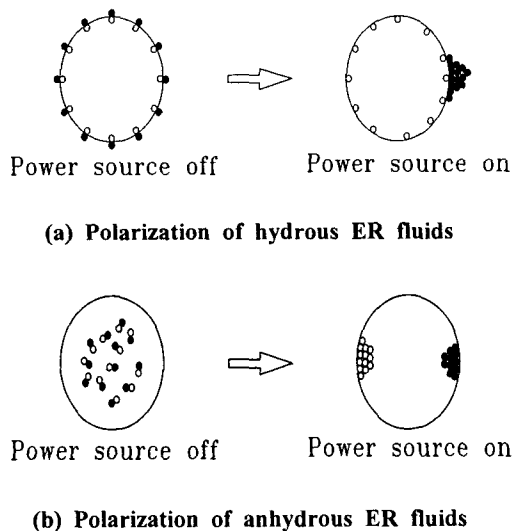


Fig. 1 Polarization of hydrous and anhydrous ER fluids

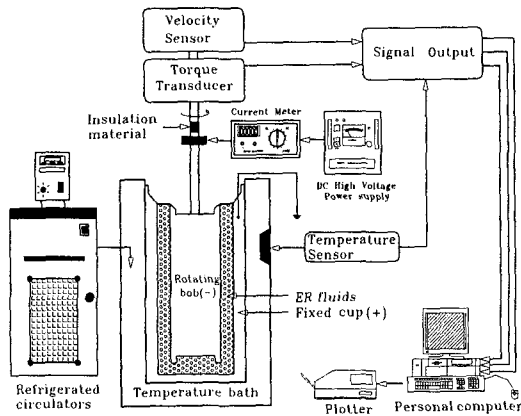


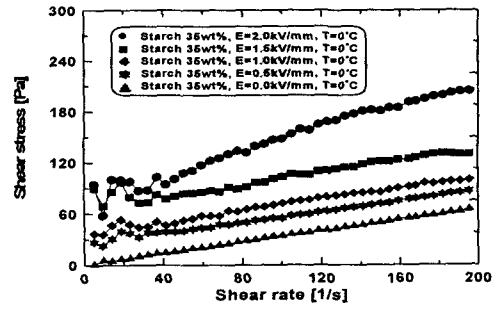
Fig. 2 Experimental setup Bingham test

지 0.5kV/mm씩 단계적으로 변화시켰으며, 전단속도비를 2분 동안에 0.0~200[s⁻¹]까지 증가하도록 실험 조건을 설정하였다.

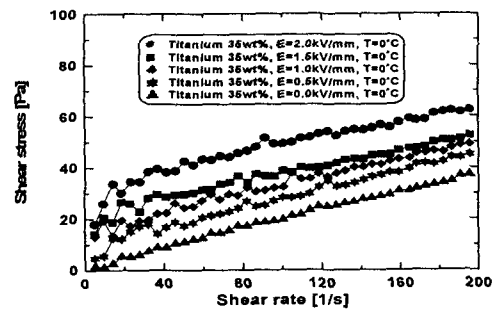
합수계와 비수계 ER유체의 온도변화에 따른 항복 전단응력의 연계성을 고찰하기 위해 Table 1에 나타낸 것과 같이 전기 절연유는 물과 친화력이 없고 유전율이 낮은 실리콘 오일을 사용하였다. 합수계 ER유체의 고체 미립자인 전분은 적당한 양의 수분 함유 및 물과 친화력을 가진다. 비수계 ER유체의 고체 미립자인 티타늄은 전분과는 다른 성질을 가지며, 높은 주파수의 AC 전기장에서 ER효과를 나타낸다고 보고되고 있으나⁽⁷⁾, DC 전기장에서의 ER효과를 실험적으로 고찰해 보고자 한다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 ER유체의 무게분율이 35wt%, 온도 0°C인 경우, 전기장의 강도에 따른 전단응력과 전단속도비의 실험결과이다. Fig. 3(a)는 합수계 ER유체인 ERF 1의 실험결과로서 전기장 무인가시(▲) 뉴턴유체의 특성을 나타내고 있다. 전기장 E=0.5~1.5kV/mm인 경우(★~■) 전단속도비 증가에 따라 전단응력이 일정하게 증가하는 것을 알 수가 있다. 전기장 E=2.0kV/mm인 경우(●) 전단속도비 증가에 따라 전단응력이 증가되어 항복전단응력이 크게 발생되는 것을 알 수 있다. 그러나 낮은 전단속도비 20[s⁻¹]부근에서 살펴보면 E=1.5kV/mm와 E=2.0kV/mm인 경우 항복전단응력의 증가가 비슷하게 나타난다. 이는 전분

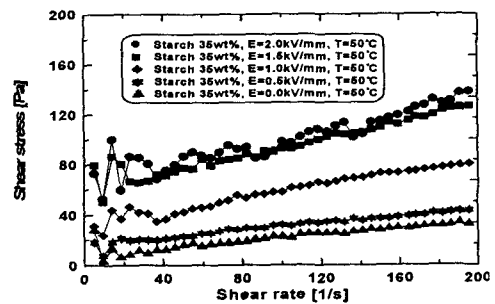


(a) ERF 1 (0°C)

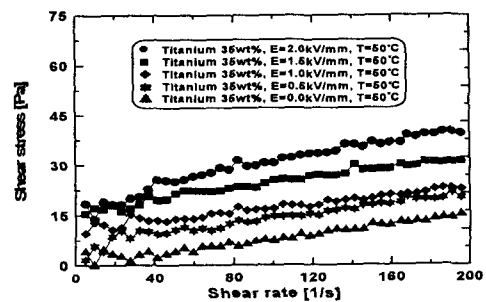


(b) ERF 2 (0°C)

Fig. 3 Shear stress vs. shear rate with temperature (0°C)



(a) ERF 1 (50°C)



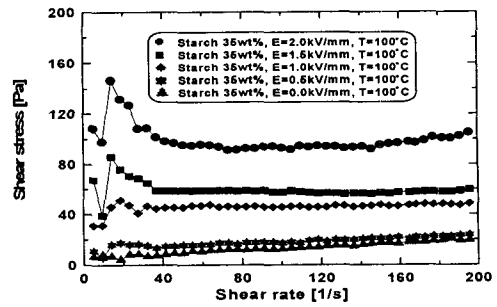
(b) ERF 2 (50°C)

Fig. 4 Shear stress vs. shear rate with temperature (50°C)

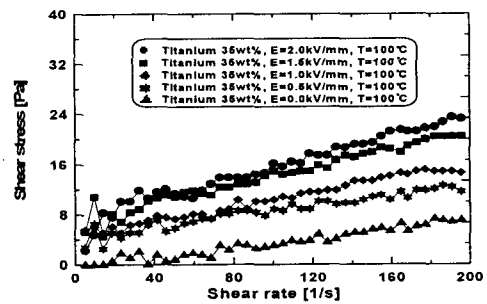
입자내에 함유되어 있는 수분이 빙결되어 입자들이 서로 접촉하거나, Fig. 2의 회전식 점도계에서 내부원통인 bob과 외부원통인 cup의 벽면에 달라붙어 전단속도비에 따른 전단응력의 변화가 불규칙하게 나타나기 때문이다. Fig. 3(b)는 비수계 ER유체인 ERF 2의 실험결과로서 ERF 1과 유사하게 전단응력이 증가하는 것을 알 수 있으며 전기장 강도에 따라서 일정한 기울기를 갖는 것을 알 수 있다. 실험시 수분을 포함하지 않는 비수계 ER유체인 ERF 2는 입자들이 빙결되어 엉겨 붙는 현상이 거의 나타나지 않았다.

Fig. 4는 Fig. 3과 같은 조건에서 온도가 50°C인 경우 전단응력과 전단속도비의 실험결과이다. Fig. 4(a)는 전기장 E=0.0~1.0kV/mm에서는 전단속도비 증가에 따라 전단응력이 일정하게 증가하며 비슷한 기울기를 가지는 것을 알 수가 있다. 전기장 E=1.5~2.0kV/mm에서는 높은 전기장에 의해서 전분 입자가 과도하게 뭉쳐지기 때문에 나타나는 현상이라고 생각된다. Fig. 4(b)는 전기장의 강도에 따라 전단응력이 일정하게 증가하며, 기울기도 거의 비슷한 것을 알 수가 있다.

Fig. 5는 앞의 실험과 동일한 조건에서 온도 100°C인 경우의 전단응력과 전단속도비의 실험결과이다. Fig. 5(a)는 Fig. 3(a)와 Fig. 4(a)보다 온도가 증가하였지만 전단속도비 증가에 따른 전단응력이 크게 증가하는 것을 알 수가 있다. 이것은 온도가 증가함에 따라 전분 입자내의 전하나 이온의 움직임이 활발해지기 때문에 나타나는 현상이라고 생각된다. 전기장 E=0.0~1.0kV/mm를 인가한 경우 전단응력이 서서히 증가하는 경향을 나타낸다. 전기장 E=1.5~2.0kV/mm인 경우 유동이 시작되는 낮은 전단속도비 부근에서 높은 전단응력을 나타낸 후, 전단속도비의 증가에 따라서 급격한 전단응력의 감소를 나타낸 후 전단응력이 일정한 것을 알 수가 있다. 이와 같은 경향을 나타내는 것은 전기장의 강도가 증가하면 회전식 점도계내의 내부원통인 bob과 외부원통인 cup 사이의 전극 간극내에 채워진 ER유체가 정지된 상태에서 클러스터를 형성하게 되고, 초기 상태에서 bob이 회전하려는 순간에는 bob과 cup 사이에 형성된 클러스터가 순간적으로 파괴됨으로서 큰 토크가 필요하기 때문이다⁽⁸⁾. 또한, 전기장의 강도가 크고, 온도가 증가하면 정지된 상태

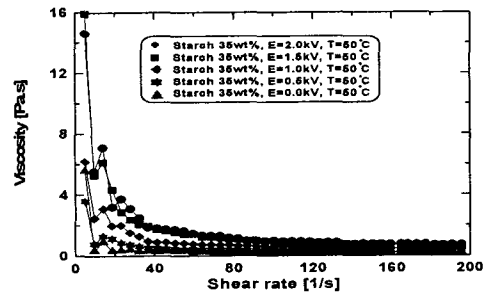


(a) ERF 1 (100°C)

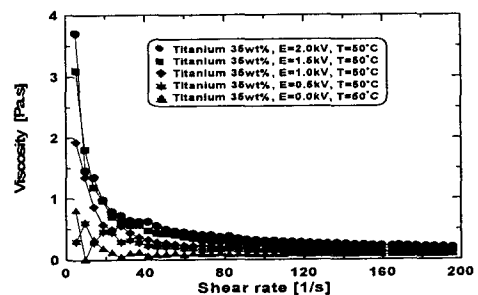


(b) ERF 2 (100°C)

Fig. 5 Shear stress vs. shear rate with temperature (100°C)



(a) ERF 1 (50°C)



(b) ERF 2 (50°C)

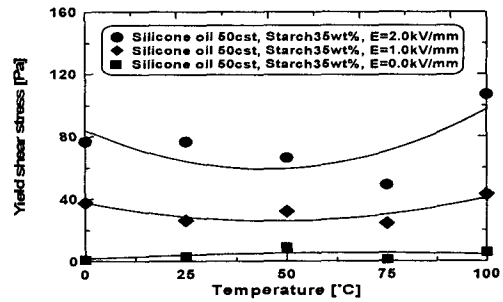
Fig. 6 Viscosity vs. shear rate with temperature (100°C)

에서 bob과 cup 사이의 전극 간극내에서 전분 입자들간의 결합력이 증가하지만, ER유체에 유동이 발생하면 전분 입자들간의 이동이나 회전이 발생하고, 전분 입자들간의 움직임에 의해서 쌍극자 모멘트의 크기가 변화를 일으켜 전분 입자들간의 결합력이 약해져 쉽게 클러스터가 파괴되기 때문이다.

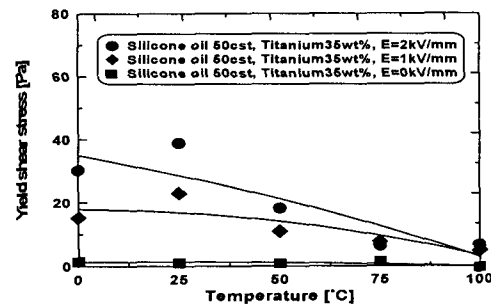
Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)와 동일한 상태에서 ERF 1의 실험결과이다. Fig. 3(a), Fig. 4(a)보다 전단응력이 감소하는 것을 알 수가 있다. 이는 비수계 ER유체의 고체 미립자인 티나늄 입자가 온도에 영향을 받기 때문이다. Fig. 5(a), (b)에서 고찰한 바와 같이 ER유체의 특성변화에 영향을 미치는 인자로는 전기장의 강도 및 온도가 매우 중요한 것을 알 수가 있다.

Fig. 6(a), (b)는 온도 50℃인 경우, ER유체의 점성과 전단속도비 관계에 관한 그래프이다. 전기장 무인가시에는 겔보기 점성이 일정한 뉴턴유체의 거동을 나타내고 있다. 전기장의 강도가 증가됨에 따라 낮은 전단속도비 부근에서는 ER유체의 항복전단응력 증가에 따라 급격한 기울기의 변화를 보이고 있다. 전단속도비가 증가함에 따라 기울기가 점차적으로 완만하게 되어 전기장 무인가시의 기울기와 유사한 기울기로 감소하고 있다.

Fig. 7(a), (b)는 전기장 인가 유·무와 온도변화에 따른 점도변화 특성을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에서 전기장 E=0.0kV/mm인 경우, 온도가 50℃ 일 경우 항복전단응력이 높으며, 50℃보다 높은 온도와 낮은 온도는 항복전단응력이 일정한 것을 알 수 있다. 전기장 E=1.0kV/mm인 경우, 항복전단응력이 40[Pa]로 일정한 것을 알 수가 있다. 전기장 E=2.0kV/mm인 경우, 0℃~75℃까지는 항복전단응력이 완만하게 감소하다가 100℃인 경우 항복전단응력이 급격히 증가하는 것을 알 수가 있다. 이것은 전기장의 강도가 크고, 온도가 상승하면 입자의 회전이나 이동에 의한 쌍극자 모멘트의 변화에 대하여 활성화된 전하나 이온의 재배치가 빠르게 이루어져 쌍극자 모멘트의 평형상태를 지속적으로 유지하기 때문이다. 온도가 높고, 전기장의 강도가 클수록 온도변화에 따른 항복전단응력이 큰 것을 알 수가 있다.



(a) ERF 1 (0℃~100℃)



(b) ERF 2 (0℃~100℃)

Fig. 7 Yield shear stress vs. temperature (0℃~100℃)

Table 2 Yield shear stress of ER fluid with temperature

ER fluids	Temp.	Electric field	Yield Shear Stress
ERF 1	0 ℃	0.0 kV/mm	$1.2 E^{0.3}$ [Pa]
		1.0 kV/mm	$38 E^{0.7}$ [Pa]
		2.0 kV/mm	$76 E^{1.2}$ [Pa]
	50 ℃	0.0 kV/mm	$9 E^{0.5}$ [Pa]
		1.0 kV/mm	$31 E^{0.75}$ [Pa]
		2.0 kV/mm	$66 E^{1.2}$ [Pa]
	100 ℃	0.0 kV/mm	$6 E^{0.7}$ [Pa]
		1.0 kV/mm	$42 E^{0.8}$ [Pa]
		2.0 kV/mm	$107 E^{1.4}$ [Pa]
ERF 2	0 ℃	0.0 kV/mm	$1.5 E^{0.2}$ [Pa]
		1.0 kV/mm	$15 E^{0.53}$ [Pa]
		2.0 kV/mm	$30 E^{0.62}$ [Pa]
	50 ℃	0.0 kV/mm	$0.84 E^{0.2}$ [Pa]
		1.0 kV/mm	$11 E^{0.6}$ [Pa]
		2.0 kV/mm	$18 E^{0.7}$ [Pa]
	100 ℃	0.0 kV/mm	$0.44 E^{0.2}$ [Pa]
		1.0 kV/mm	$4.8 E^{0.42}$ [Pa]
		2.0 kV/mm	$6.6 E^{0.63}$ [Pa]

Fig. 7(b)에서 전기장 $E=0.0\text{kV/mm}$ 인 경우, 온도가 증가하여도 항복전단응력이 일정한 것을 알 수가 있다. 전기장 $E=1.0\sim 2.0\text{kV/mm}$ 인 경우, 온도가 증가할수록 항복전단응력이 감소하지만, 온도 25°C 일 경우 항복전단응력이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 티타늄 입자의 이동이 자유로워져 입자내 운동에너지가 증가하기 때문이라고 생각한다. Table 2는 식 (2)에서 논의한 항복전단응력 값을 온도변화에 따라 나타낸 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 합수계와 비수계 ER유체를 온도변화에 따라 고찰하였다. 합수계와 비수계 ER유체의 전기절연성 오일은 실리콘 오일을 사용하였으며, 합수계 ER유체의 고체미립자는 전분 입자, 비수계 ER유체는 티타늄 입자를 무게분율 35wt%로 조성하여 사용하였다. 실험시 온도범위는 $0^\circ\text{C}\sim 100^\circ\text{C}$ 까지 25°C 간격으로 변화시켜 전기장 강도에 따른 ER유체의 병행특성을 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 합수계와 비수계 ER유체는 전기장의 강도가 클수록 항복전단응력이 큰 것을 알 수가 있었다.
- (2) 전기장이 2kV/mm 인 경우 합수계 ER유체의 항복전단응력은 온도가 증가함에 따라 감소하다가 100°C 일때 항복전단응력이 증가하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 비수계 ER유체는 온도가 증가할수록 항복전단응력이 감소하지만 25°C 일 때 항복전단응력이 증가하는 것을 알 수 있었다.
- (4) 합수계와 비수계 ER유체의 온도변화에 따른 점도특성에서 합수계 ER유체가 병행특성이 우수한 것을 알 수가 있었다.

참고문헌

- (1) W. M. Winslow, "Induced Fibration Suspension -s", J. Applied Physics, Vol.20, pp.1137-1140, 1949.
- (2) Birmingham et al. 1992, "Rheological Compositions Including an Amine-Terminated Polyester Steric Stabilizer" U.S.Patent
- (3) 김도태, 장성철, 최윤대, "분산계 ER유체의 점도-온도 특성", 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, 1999, pp.393-398
- (4) 박우철, "ER유체의 병행특성이 ER댐퍼의 댐핑력에 미치는 영향", 인하대학교 박사학위논문, 1997.
- (5) Bonnecaze. R. T., "Yield stress in Electrorheologica -l Fluids", J. of Rheology. 1992, Vol.36, pp 73 ~115.
- (6) Hartnett. J. P., "The Yield stress-An Engeering Reality", J. of Rheology. 1989, Vol.33, pp 671.
- (7) F. E. Filisko and A. Schubring, "The Anomalou -s Dispersion and Rheological Response of ER Material", Proc. of 5th Int.
- (8) 장성철, 염만오, 김도태, 김태형, 배태열, "평행판의 전극형상에 따른 ER유체의 유동특성 I", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 2001, pp.207-212.
- (9) 김도태, 장성철, "분산계 ER유체의 점도변화 특성 II", 경일대학교 논문집 제 16집, pp.127-133.
- (10) Stangroom. J. E. . "Electrorheological Fluid", ER Fluid Developments Limits, 1992, pp 22~23.
- (11) 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, 1996年. 第 25卷 第4號.
- (12) D. A. Brooks, "Design and Developmnet of Flow Based Electro-Rheological Devices", Journal of Modern Physics, Vol. 6, 1992, pp.2705-2730.
- (13) Instruction manual Viscotester VT500/501