

<연구논문>

전극재질 및 간극에 따른 ER유체의 특성실험

이호근* · 최승복* · 정재천* · 강윤수** · 서문석**

*인하대학교 기계공학과

**국방과학 연구소

(1998년 7월 30일 접수)

Characteristics of ER Fluids with Different Electrode Gaps and Materials

H. G. Lee*, S. B. Choi*, C. C. Cheong*, Y. S. Kang** and M. S. Suh**

*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

**ADD(Agency for Defence Development)

(Received July 30 1998)

요 약

본 논문에서는 전기장 부하에 따라 유동성질이 변화하는 ER(electro-rheological)유체의 빙햄(Bingham)특성을 실험적으로 연구하였다. 특히 ER유체의 빙햄특성에 영향을 주는 여러 인자 중 전극 간격 및 재질에 따른 ER유체의 항복전단응력과 전류밀도의 변화를 온도에 따라 고찰하였다. 이를 위하여 전극 간격을 가변시킬 수 있는 전기 점도계를 세가지 재질로 자체 제작하였다. 전극 간격은 0.75 mm, 1.00 mm 및 1.25 mm로 설정하였으며, 전극 재질은 스테인레스 스틸(stainless steel), 동(brass) 그리고 기계 구조용 탄소강(SM45C)을 사용했다. 한편, 실험에 사용된 ER유체는 자체 조성한 수계 ER유체인 ERF-1과, 외국의 우수하다고 알려진 비수계 ER유체인 ERF-2 두 가지를 선택하였다. 실험은 25°C와 70°C 및 100°C에서 수행하였으며, 전기장은 0~4 kV/mm 범위에서 온도 및 ER유체의 종류에 따라 부하 가능한 전압까지 공급하였다. 전단변형률 50, 100, 150, 200, 400, 600, 800, 1000 및 1200 s⁻¹ 에서 얻은 전단응력 실험결과로부터 최소오차선형법을 이용하여 전단변형률 영(zero)에서의 (동적)항복전단응력 값을 도출하였으며, 그 결과로부터 전극 간격 및 재질에 따른 ER효과의 변화를 고찰하였다. 또한 상온과 100°C에서 4 kV/mm의 전기장을 부하하며, 전기장에 대한 ER유체의 응답특성 실험을 수행했다.

Abstract— This paper presents experimental results on Bingham characteristics of ER fluids with respect to two principal influence factors ; electrode gaps and electrode materials. An experimental apparatus which is adaptable to change the gaps and materials is established inhouse. The electrode gaps are adapted by 0.75 mm, 1.00 mm and 1.25 mm, while the stainless steel, brass and carbon steel are used for the electrode materials. As for the ER fluids, a water-based arabic gum ER fluid (ERF-1) and a dry-based Bayer ER fluid (ERF-2) are employed to be tested. The shear stresses and hence field-dependent yield shear stresses are obtained under operating temperatures of 25°C, 70°C and 100°C at various electric fields ranging from 0 to 4 kV/mm. In addition, response times of the ER fluids to the electric field are experimentally investigated at voltage on and off states.

Keywords: ER fluid, Bingham property, Electrode gap, Electrode material, Response time

1. 서 론

ER(electro-rheological)유체는 부하되는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 것으로, 일반적으로 비전도성 유체속에 약한 전도성 입자들을 분산시킨 콜로이드 용액이다. 1949년 Winslow가 부하되는 전기장에 의해 실리카를 입자로 한 유체의 점성이 변함을 처음으로 발표하였으며, 따라서 Winslow유체라고도 불리운다[1]. ER유체의 특성은 일반적으로 전기장이 가해짐에 따라 유체의 전단응력이 변화되는 것으로 전기장 무부하시에는 유체입자가 양극 또는 음극으로 자유로이 운동을 하는 뉴토니안(Newtonian) 유체 상태

에서, 전기장 부하시에는 유체 중에 분산된 입자가 체인형 구조를 형성하여 유체가 항복응력을 갖는 빙햄(Bingham)유체 상태로 변화하게 된다. 즉 외부에서 가해지는 전단력에 대하여 전기장 부하시 ER유체는 저항을 갖게 된다. 따라서, 외부 조건에 따라 ER유체에 부하 되는 전기장의 크기만을 변화시켜 연속적인 제어가 가능하며, 이러한 ER유체의 특성을 이용한 응용 장치는 설계가 단순화되는 장점을 갖게 된다. 또한, 응용 장치의 단가는 저렴하게 될 수 있다[2]. 이러한 응용장치들은 ER유체와 전극 사이의 상대 운동에 따라 세가지 형태로 분류할 수 있다. 첫번째 형태는 전단 모드(shear mode) 혹은 회전 전단모드(rotational shear mode)로 평행한 두개의 평판 중 한쪽

의 전극은 고정 되어 있고, 다른 한쪽이 회전이나 이동을 하는 형태이다. 유체의 이동과 전극의 움직임이 평행하게 일어나는 클러치 및 브레이크 시스템이 이 형태에 속한다[3,4]. 두 번째 형태는 두 전극은 고정되어 있고, 고정된 전극 사이로 유체가 이동하는 형태로 유동모드(flow mode)라 한다. 이 형태는 밸브, 댐퍼 혹은 엔진마운트 등과 같이, 일반적으로 유체가 흐르는 관 내에서 유체의 압력 변화와 유량 변화가 동시에 일어나는 형태이다[5,6]. 세 번째 형태는 유체의 유동과 전극의 움직임이 수직 한 방향으로 일어나는 압착모드(squeeze mode)이다. 이 형태는 전극과 유체의 유동은 매우 적게 일어나지만, 엔진마운트, 스마트 구조물 등에 응용하려는 연구가 수행되고 있다[7,8].

전단모드 하에서 ER유체의 빙행거동식은 다음과 같이 표현 될 수 있다[9].

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y(E) \tag{1}$$

여기서 τ 는 유체의 전단응력(shear stress)을 나타내고, $\dot{\gamma}$ 는 전단변형률(shear rate)이며, η 는 ER유체의 걸보기점도를 나타낸다. $\tau_y(E)$ 는 ER유체의 항복응력을 표현한 것으로 전기장 E의 함수가 된다. ER유체의 항복응력은 유체가 유동을 일으키는 순간의 전단응력을 나타내는데, 유체의 유동은 매우 짧은 시간에 시작되고 또한 복잡한 거동을 하기 때문에 항복응력을 정확히 측정하기는 어렵다. 따라서 많은 연구자들은 전단변형률을 변화시켜 구한 전단응력값을 직선보간 한 후, 전단변형률의 값이 영(zero)인 부근에서의 절편값을 항복응력으로 고려하여 이를 동적 항복응력(dynamic yield stress)이라 부른다. 일반적으로 동적 항복응력값이 ER유체의 항복응력으로서 취급되며, 전기장 E의 크기에 대하여 지수함수의 관계를 갖는 것으로 알려져 있다[10]. 따라서 이로부터 식 (1)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \alpha E^\chi \tag{2}$$

여기서 상수 α 및 χ 값은 ER유체에 사용된 용매의 종류, 용매의 점도, 입자 종류, 입자 중량비, 입자의 크기 및 모양, 입자의 수분함량 등 ER유체의 조성 조건에 따라 달라지는 ER유체의 고유치이다. 빙행거동특성으로 인한 전단응력식 (2)로부터 외부에서 가해지는 전단변형률의 증가에 따라 유체의 전단응력이 증가됨과 전기장의 증가에 따라 항복응력이 증가됨을 알 수 있다.

또한, ER효과를 나타내기 위해 전기장이 부하될 경우 소요되는 전류밀도(J)를 측정하여 전력소모량을 예측할 수 있는데, 이러한 전류밀도는 부하되는 전기장에 대하여 다음의 식과 같이 지수 함수적으로 비례하는 것으로 알려져 있다.

$$J = \alpha_1 E^{\chi_1} \tag{3}$$

α_1 과 χ_1 은 식 (2)의 α 및 χ 값과 마찬가지로 ER유체 조성에 사용된 용매의 종류 및 점성, 그리고 입자의 종류와 중량비 등 ER유체의 조성 조건 및 사용 조건에 영향을 받는 ER유체의

고유 상수이다. 그리고, 식 (2)에서 나타난 바와 같이 ER유체는 외부에서 부하되는 전기장에 대하여 함수 관계를 갖기 때문에, 전하나 이온의 이동에 영향을 미치는 입자의 결정 구조, 용매와 입자 사이의 투자율(permittivity)의 차이, 입자 내의 불순물 및 입자 내의 수분 함유량과 사용온도 등에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

전기 점도계를 사용하여 측정된, 식 (2)와 (3)으로 표현되는 빙행특성식은 응용장치에 적용시 ER효과 발현에 의한 응용장치의 성능 예측에 사용되는 것으로 매우 중요하다. 이러한 빙행 특성식은 위에서 언급한 용매 및 입자의 조건 외에도, 응용장치에 사용된 전극의 너비, 전극 간격, 전극 길이 그리고 전극 재질에 따라 영향을 받는 것으로 생각된다. 그러나, 기존 대부분의 연구는 상용화된 전기 점도계를 사용하여 실험을 수행했기 때문에, 입자 및 용매의 조건에 대한 영향 고찰에만 국한되어 왔다. 따라서 본 논문에서는 전극과 관련된 여러 변수 중에서 전극 간격 및 전극 재질에 따른 빙행특성에 관해 고찰하고자 한다. 물론 이론에 의하면 전극재질의 차이가 ER효과에 영향을 미치지 못한다. 그러나 각 전극재질이 갖고 있는 전기적 및 기계적 특성이 다르므로 전극재질에 따라 부하할 수 있는 최대 전기장의 세기는 달라질 것이고, 이로 인해 발현 가능한 최대 항복응력의 크기도 달라질 것이다. 따라서 ER특성 실험에 있어서 부하 가능한 최대 전기장의 크기를 도출하는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서는 전극재질 변화실험을 통해 이론적으로 알고 있는, 전극재질의 변화가 ER효과에 영향을 미치지 못한다는 사실을 실험적으로 확인하는 것과 각 전극재질마다 최대 몇 kV/mm의 전기장을 부하할 수 있는가를 도출하고자 한다. 이를 위해 전극 간격이 0.75 mm, 1.00 mm 그리고 1.25 mm로, 전극 재질이 stainless steel, brass 및 SM45C의 세가지로 변화되는 전기 점도계를 자체 제작하여 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 제작

2.1. 실험장치 제작

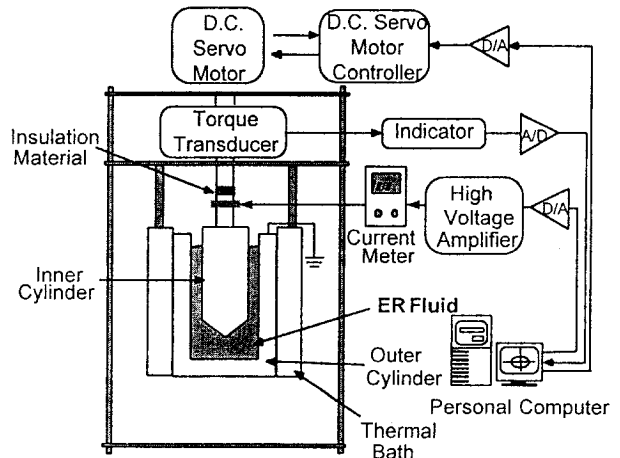


Fig. 1. Bingham characteristics measurement apparatus.

전극 간격 및 재질의 변화에 따른 ER 효과 및 전류밀도의 차이를 살펴보기 위해 Fig. 1과 같은 실험장치를 자체 제작하였다. 안쪽의 실린더가 회전을 하고 바깥쪽의 실린더는 고정되어 있는 형태로, 전기장의 부하에 의해 발생하는 토오크가 모터와 직렬로 연결된 토오크 미터를 통해 측정된다. 사용된 토오크 트랜스듀서는 2 kgf · cm, 즉 19.6 N · cm의 용량을 갖는 스트레인 게이지타입(strain gage type)의 회전형 센서이다. 점도계의 회전운동은 200와트(W)용량의 DC서보(servo)모터에 의해 구동된다. 모터의 구동 및 토오크 측정에 사용된 DSP 보드는 분해능(resolution)이 12Bits이며 16개의 A/D 입력 단자를 갖는 WIN-30DA이다. 시스템은 "C" 언어로 짜여진 프로그램으로 작동되며, 실험은 9초당 10,000개 이상의 데이터를 받도록 수행되어, 토오크 변화량은 1 ms미만의 시간에서 측정된다. 따라서, 기존의 상용점도계로는 측정이 불가능했던 ER유체의 응답 특성 실험을 수행할 수 있도록 제작되었다. 전극재질은 stainless steel, brass 및 SM45C의 세 종류로 제작되었다. 재질에 따른 가공성의 차이로 표면조도가 달라지는 것을 방지하고자 선반 가공 후 동일한 거칠기의 사포로 마무리 작업을 수행하여, 재질별 표면 거칠기의 차이를 최소화하였다.

전극의 치수를 결정하고자 DIN(독일 공업 표준 규격)의 점도계에 대한 자료를 참고하였다[11]. 동심축을 갖는 실린더형 측정장치에 있어서, 전단응력과 전단변형률의 분포가 실린더 반경에 대해 선형으로 증가한다고 가정한다. 이를 위해선 측정 장치의 내부실린더와 외부 실린더의 반경비율이 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\delta = \frac{R_0}{R_i} \leq 1.1 \quad (\text{가급적 } 1.0847) \quad (4)$$

여기서 R_0 는 외부 실린더의 반경을 나타내고, R_i 는 내부 실린더의 반경을 나타낸다. 또한 Fig. 2에 도시한 실린더형 측정 장치의 각 부위에 대한 치수는 다음의 조건을 만족하도록 설계되었다.

$$\frac{L}{R_i} \geq 3: \text{가급적 } \frac{L}{R_i} = 3$$

$$\frac{L'}{R_i} \geq 1: \text{가급적 } \frac{L'}{R_i} = 1$$

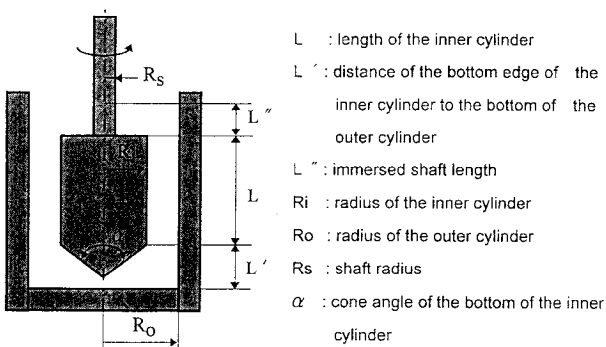


Fig. 2. Geometry of the cylindrical measuring system.

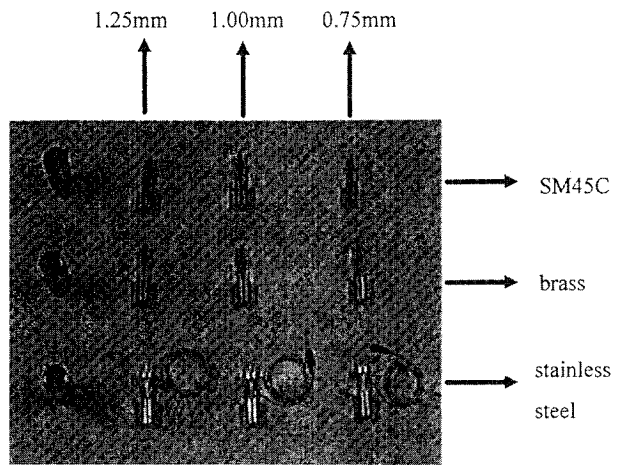


Fig. 3. Photograph of bobs and cylinders.

$$\frac{L''}{R_i} = 1 \quad (5)$$

$$\frac{R_s}{R_i} \leq 0.3$$

$$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ: \text{가급적 } \alpha = 120^\circ \pm 1^\circ$$

이러한 조건을 만족시키도록 외부실린더의 내경은 28 mm, 내부 실린더의 높이는 40 mm, 내부 실린더의 외경은 전극 간격이 0.75 mm, 1.00 mm 및 1.25 mm가 되도록 26.5 mm, 26 mm 그리고 25.5 mm로 결정하여 제작하였다. Fig. 3에 내부 및 외부 실린더의 사진을 나타냈다.

2.2. 실험방법

실험은 일정한 전단변형률에 대해 전기장 증가에 따른 토오크의 변화량을 측정하는 방법으로 수행되었다. Fig. 4에 나타난 결과와 같이 시간영역에 대해 1초 간격으로 전기장의 크기를 변화시켜가며 토오크값을 측정했다. 그림에서 알 수 있듯이 점선으로 표시된 전기장이 0~4 kV/mm까지 1 Hz 간격으로 증가함에 따라, 실선으로 표시된 토오크값이 변화하고 있다. 실린더의 치수가 식(4)와 (5)를 만족하도록 제작될 경우, 내부실린더와 외부실린더 사이에서 발생하는 전단응력은 영(zero)에서부터 최대값 까지 거의 선형적으로 변한다. 따라서 전단응력

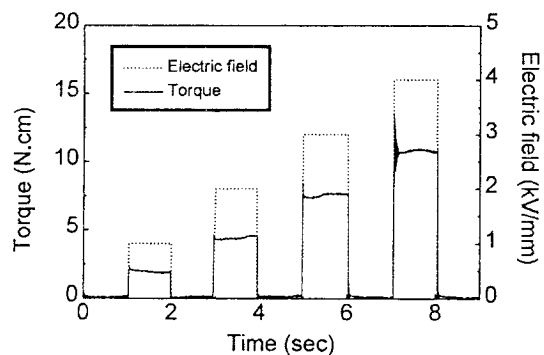


Fig. 4. Field-dependent torque of ER fluid.

을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\tau_{rep} = \frac{\tau_i + \tau_o}{2} \tag{6}$$

여기서 τ_i 는 내부 실린더 표면의 전단응력을, τ_o 는 외부 실린더 표면의 전단응력값을 나타낸다. 따라서, 전단응력은 다음과 같이 얻어진다.

$$\tau = \tau_{rep} = \frac{1 + \delta^2}{2\delta^2} \cdot \frac{T}{2\pi \cdot L \cdot R_i^2 \cdot C_L} = G_z \cdot T \tag{7}$$

여기서 C_L 은 표면 보정을 위한 저항계수로, 경험에 의해 상기와 같은 형태의 측정 장치에는 1.10을 사용한다. T는 측정된 토오르크 값을 나타내며, G_z 는 측정 시스템 상수로 L, R_i, R_o 및 C_L과 관계 있는 값이다. 식 (7)을 이용하여 Fig. 4의 토오르크값을 전단응력 값으로 환산한 그림이 Fig. 5이다. 이때 모터의 회전수로부터 전단변형률을 결정하기 위해 다음과 같은 식이 사용되었다.

$$D_{rep} = \frac{D_i + D_o}{2} \tag{8}$$

여기서 D_i는 내부 실린더 표면의 전단변형률, D_o는 외부 실린더 표면의 전단변형률을 표시한다. 따라서 전단변형률은 다음과 같이 얻어진다.

$$D = D_{rep} = \omega \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} = \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} \frac{2\pi}{60} n \tag{9}$$

여기서 ω (rad/s)는 각속도를, n(min⁻¹)은 회전수를 나타낸다. 실험은 전단변형률을 50, 100, 150, 200, 400, 600, 800, 1000 및 1200 s⁻¹의 9단계로 변화시켜 상온과 70°C 및 100°C에서 수행했으며, Fig. 5에 도시한 바와 같이 전단변형률 영역에 대한 전단응력의 결과로 나타났다. 그림을 살펴보면 전기장 증가에 따라 전단응력의 크기가 증가하는 전형적인 빙햄특성을 보이고 있다. 이러한 결과로부터 최소오차-선형법을 이용하여 전단변형률 영(zero)에서의 동적항복전단응력값을 도출할 수 있다. 이러한 실험방법으로 도출한 결과와 기존의 상업용 couette 전기점도계(Physica, VT1000)로 얻은 실험 결과를 Fig. 6에 나타냈다.

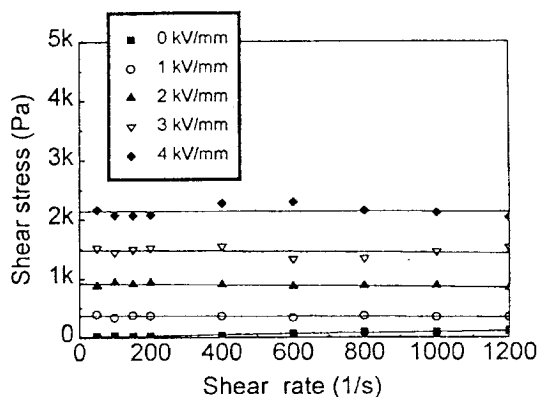


Fig. 5. Shear stress of ER fluid.

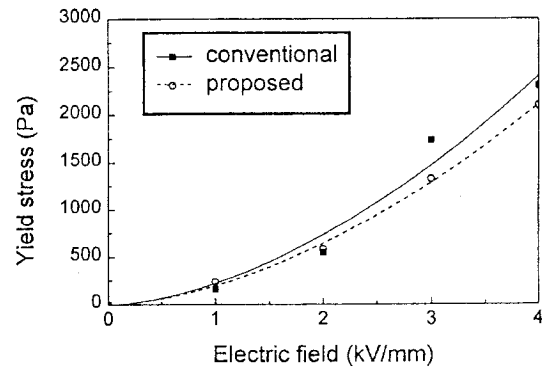


Fig. 6. Comparison of yield shear stress with different two test methods.

기존 전기점도계로 실험한 결과가 약간 큰 값을 보이고 있으나, 그 차이는 실험 오차범위 이내 값이라 무시할 수 있다. 게다가 기존의 방법은 실험에 소요되는 시간이 길어 침전에 의한 영향 등으로 인하여 매번 실험을 수행할 때마다 경향의 차이가 매우 크다. 그러나, 새로 제안된 방법은 실험시간이 짧기 때문에 입자의 침전에 의한 영향이 적어 여러번 반복 실험을 수행해도 일치된 경향을 보이고 있어, 결과의 신뢰성이 보다 높다고 생각된다. 또한 모터의 회전수를 높이면 측정 가능한 전단변형률 영역을 최대 2,500 s⁻¹ 정도까지 확장할 수 있으며, 실린더 치수를 변경하면 보다 높은 항복전단응력을 갖는 ER 유체에 대한 실험도 수행할 수 있다. 그리고, 전기장 부하시간을 조절하면 여러 조건에 따른 응답 특성 실험을 동시에 수행할 수도 있어, 기존 전기점도계에 의한 방법에 비해 매우 효율적이라 생각된다.

3. 실험결과 및 고찰

실험에는 두 종류의 ER유체가 사용되었다. 자체 조성한 수계 ERF-1과, 외국의 우수하다고 알려진 상용화 단계의 비수계 ERF-2를 이용하여 온도에 따른 실험을 수행했다. ERF-1은 분산 입자로 아라빅 검(arabic gum)을 사용하였으며, 용매에 대한 입자 중량비는 30%로 조성하였다. 비전도성 용매로는 트랜스포머 오일(transformer oil)을 사용하였으며, 오일의 점도는 10 cs 정도이고, 절연과피 전압은 12 kV/mm 이상이다. ERF-2는 ER 효과를 발생시키기 위한 유용성 금속 이온이 함유된 폴리우레탄(polyurethane) 입자를 실리콘 오일(silicone oil)에 분산시킨 것으로 비수계이기 때문에 넓은 가용 온도 범위를 갖고 있다.

3.1. 전극 간격에 따른 Bingham특성

2절에서 제안된 방법으로 전단응력값을 측정할 경우, 전극 간격이 0.25 mm씩 증가하는데 따라 전단응력과 전단변형률이 어떻게 변하는지 알아보려고, 다음과 같은 계산을 수행했다. 전극간격에 따른 반경비율은 다음과 같다.

$$\delta_{0.75} = \frac{14}{13.25} = 1.056604, \quad \delta_{0.75}^2 = 1.116412$$

$$\delta_{1.00} = \frac{14}{13} = 1.076923, \quad \delta_{1.00}^2 = 1.159763 \quad (10)$$

$$\delta_{1.25} = \frac{14}{12.75} = 1.098039, \quad \delta_{1.25}^2 = 1.205690$$

이 반경비율을 이용하여 전단응력과 전단변형률을 구하는데 필요한 계산을 다음과 같이 전개했다.

$$\frac{1 + \delta_{0.75}^2}{2\delta_{0.75}^2} = 0.947863$$

$$\frac{1 + \delta_{1.00}^2}{2\delta_{1.00}^2} = 0.931123 \quad (11)$$

$$\frac{1 + \delta_{1.25}^2}{2\delta_{1.25}^2} = 0.91470$$

$$\frac{1 + \delta_{0.75}^2}{\delta_{0.75}^2 - 1} = 18.180359$$

$$\frac{1 + \delta_{1.00}^2}{\delta_{1.00}^2 - 1} = 13.518543 \quad (12)$$

$$\frac{1 + \delta_{1.25}^2}{\delta_{1.25}^2 - 1} = 10.723370$$

식 (10)을 식 (7)에 대입하여 측정된 토크 값과 전단응력값의 관계를 살펴보면 다음과 같다.

$$\tau_{0.75} = 0.947863 \frac{T}{2\pi \cdot L \cdot R_i^2 \cdot C_L} = 0.000020T$$

($R_i = 13.25$)

$$\tau_{1.00} = 0.931123 \frac{T}{2\pi \cdot L \cdot R_i^2 \cdot C_L} = 0.000020T$$

($R_i = 13$)

$$\tau_{1.25} = 0.9147 \frac{T}{2\pi \cdot L \cdot R_i^2 \cdot C_L} = 0.000020T$$

($R_i = 12.75$)

따라서 측정된 토크의 크기가 같을 경우, 전극 간격과 상관없이 동일한 전단응력값을 나타낸다고 할 수 있다.

식 (11)을 식 (9)에 대입하여 모터 회전수에 대한 전단변형률을 구해 보면 아래와 같다.

$$D_{0.75} = 1.903843 \text{ n}$$

$$D_{1.00} = 1.415659 \text{ n} \quad (14)$$

$$D_{1.25} = 1.122949 \text{ n}$$

즉, 동일한 전단변형률로 회전할 경우 전극간격이 넓을수록 모터의 회전속도가 빨라지게 된다. 따라서 ER 입자의 연결로 형성된 사슬형 구조는 전극간격이 넓을수록 보다 쉽게 끊어질 것으로 생각된다. 이러한 이유로 인하여 전극간격이 좁을수록 전단응력값이 크게 측정될 것으로 예상된다.

ERF-1을 이용한 병행특성 실험결과를 Fig. 7에 도시했다.

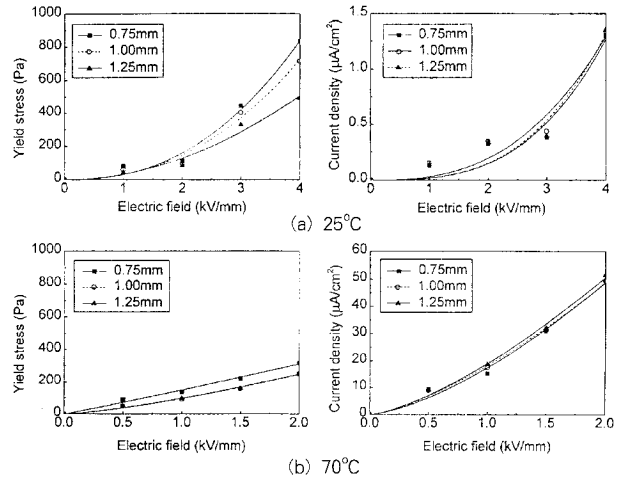


Fig. 7. Bingham characteristics of ERF-1 with different gaps.

Fig. 7(a)에 나타난 상온에서 항복전단응력의 크기를 살펴보면 간극이 1.25 mm인 경우 4 kV/mm 부하시 항복전단응력의 크기가 429 Pa를 나타내고 있으며, 간극이 1.00 mm인 경우 714 Pa 그리고 0.75 mm의 경우 830 Pa로 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 간극이 좁을수록 ER입자가 상대적으로 커지게 되며, 사슬구조의 길이도 짧아져 보다 강한 입자간 결합력을 갖게 되는 것이 원인으로 생각된다. 전류밀도의 크기를 살펴보면 전극 간격에 따라 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 전극간격이 좁을수록 보다 효율적이라고 생각된다. Fig. 7(b)는 ERF-1을 70°C에서 실험한 결과이다. 상온의 경우와 유사한 특징을 보이며, 전극간격이 가장 좁은 0.75 mm에서 가장 높은 항복전단응력값을 나타내고 있다. 이 경우의 전류밀도 또한 상온에서와 마찬가지로 전극간격에 따라 큰 차이는 없으나, 간극이 가장 넓은 1.25 mm에서 약간 큰 값을 나타내고 있다. 그러나, ERF-1의 경우 70°C에서 입자가 일부 녹기 시작하며 동일한 전기장 부하시 상온의 경우보다 높은 항복전단응력값을 나타내고, 또한 급격한 전류밀도의 증가를 보이고 있다. 상온에 비해 100배 정도 큰 전류밀도를 나타내고 있으며, 이로 인해 부하 가능한 전기장이 2 kV/mm로 제한되고 있다. 따라서, 같은 2 kV/mm 부하시 항복전단응력값은 상온의 경우보다 크지만, 발생 가능한 최대 항복전단응력은 오히려 작은 것을 알 수 있다.

ERF-2를 이용하여 동일한 조건으로 상온에서 실험한 결과를 Fig. 8(a)에 나타냈다. ERF-1의 경우와 마찬가지로, 0.75 mm의 경우 4 kV/mm 부하시 1,611 Pa를 나타내며, 전극 간격이 좁을수록 보다 높은 항복전단응력값을 보이고 있다. 이 경우 전류밀도의 변화를 알아보면 Fig. 8(a)에 도시한 것과 같이 전극 간격이 좁아질 수록 전류밀도가 조금씩 크게 나오고 있다. 즉 항복전단응력의 크기와 전류 밀도의 크기가 비례한다는 것을 알 수 있다. Fig. 8(b)에 도시한 70°C 실험 결과를 살펴보면 상온의 경우와 마찬가지로 전극 간격이 가장 좁은 0.75 mm에서 가장 높은 항복전단응력값을 보이고 있다. 그러나 70°C의 경우 동일한 전기장에 대해 항복전단응력의 크기는 상온에 비해 약간 큰 반면, 전류밀도의 크기는 10배 이상

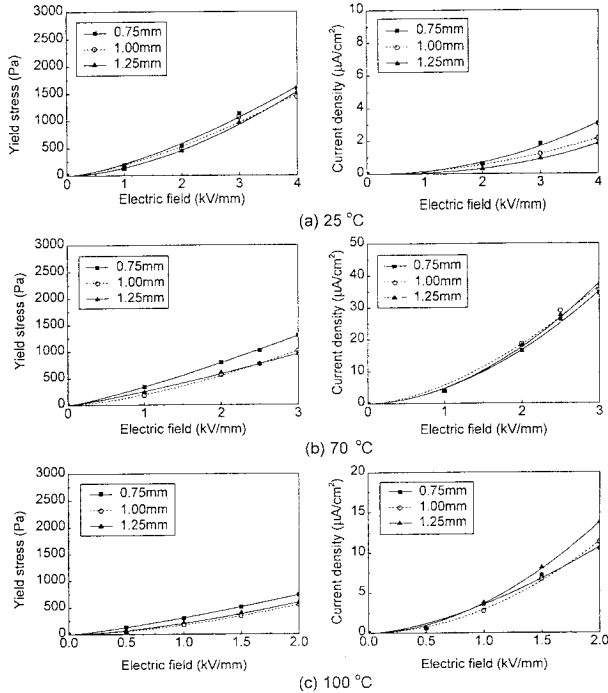


Fig. 8. Bingham characteristics of ERF-2 with different gaps.

큰 값을 보이고 있다. 따라서, 전력 소모량 대 항복전단응력의 크기를 비교해보면 70°C에서 효율이 떨어진다는 것을 알 수 있다. 100°C 실험결과를 Fig. 8(c)에 나타냈다. 상온 및 70°C의 경우와 마찬가지로 0.75 mm 간극에서 가장 우수한 효과를 보이고 있다. 100°C의 경우 2.0 kV/mm 이상의 전기장을 부하할 수 없어, 실제 나타낼 수 있는 항복전단응력의 크기는 이 실험 장치의 경우 735 Pa 정도로 제한된다. 이 경우 전류밀도의 크기를 살펴보면 2 kV/mm 부하 시 10~12 μA/cm² 정도로, 동일한 전기장에 대해 70°C의 값과 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 이는 고온에서도 ER 입자 표면이 녹거나 화학적 특성이 변하지 않는다는 증거로, 온도에 대해 화학적 물리적으로 안정하다고 말할 수 있다. 그러나, 간극 변화에 따른 전류밀도의 경향은 상온의 경우와는 반대로 70°C, 100°C 실험에선 오히려 간극이 가장 넓은 1.25 mm에서 높은 전류밀도 값을 나타낸다. 이러한 사실은 ERF-1에서도 확인될 수 있다. 이는 고온에서 전기저항이 급격히 감소하는 non-Ohmic conductivity 때문으로 실제 부하된 전위차에 비례하여 전류밀도가 증가하는 것이다.

3.2. 전극 재질에 따른 Bingham 특성

전극 재질의 변화에 따른 ER 효과의 차이 및 전류밀도의 변화를 살펴보기 위한 실험결과를 Fig. 9, 10에 나타냈다. Fig. 9는 ERF-1을 실험한 결과이다. Fig. 9(a)에 도시한 상온에서의 항복전단응력의 결과를 살펴보면 3 kV/mm 미만의 전기장 영역에서는 그 차이가 거의 없는 것을 알 수 있으며, 3 kV/mm 부하 시 전극 재질이 stainless steel일 경우 약간 큰 값을 보이고 있으나, 그 차이가 매우 적어 실험오차 범위 이내라 할 수 있

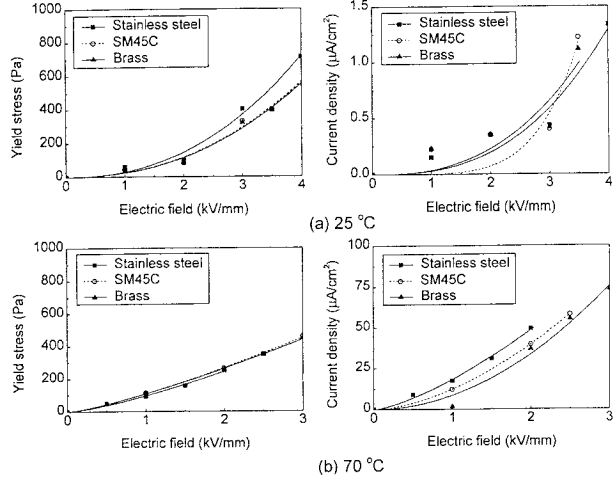


Fig. 9. Bingham characteristics of ERF-1 with different electrode materials.

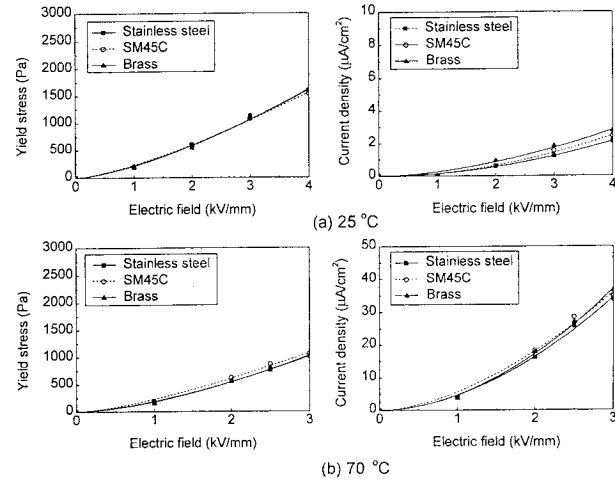


Fig. 10. Bingham characteristics of ERF-2 with different electrode materials.

다. 따라서 전극 재질의 변화에 따른 항복전단응력의 크기 변화는 없는 것으로 생각된다. 전류밀도의 크기를 살펴보면 전극 재질에 따라 거의 유사한 크기를 나타내고 있다. 단지 stainless steel의 경우 4 kV/mm 까지 부하 가능했던 전기장의 크기가 SM45C 및 brass를 전극으로 사용하여 실험한 경우 3.5 kV/mm로 제한되는 것을 알 수 있다. 이는 재질에 따라 표면 조도 등의 가공조건에서 발생한 차이로 판단된다. ERF-1을 70°C에서 실험한 결과를 Fig. 9(b)에 나타냈다. 항복전단응력의 크기는 상온의 경우와 마찬가지로 재질에 따라 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나, 전류밀도의 크기는 stainless steel이 가장 큰 값을 보이고 있다. 이러한 경향은 그 차이는 매우 작지만 상온의 결과에서도 확인된 것이다. 이는 전기영동의 발생이 온도에 따라 다르게 나타나는 것이 원인으로 생각된다.

ERF-2를 이용 상온에서 실험한 결과를 Fig. 10(a)에 나타냈다. ERF-1의 경우와 마찬가지로 재질에 따른 항복전단응력의 크기는 차이가 거의 없는 것으로 확인되었다. 그러나, 전류밀

도의 경우는 ERF-1과 반대로 stainless steel을 전극으로 사용한 경우 가장 작게 나타나고 있다. 이는 ER유체의 종류에 따라 각기 다른 전극 재질에서 가장 큰 전기영동 현상을 보이기 때문인 것으로 생각되며, 각 ER유체의 고유특성으로 볼 수 있다. 70°C 결과를 나타낸 Fig. 10(b)를 살펴보면, 상온의 경우와 마찬가지로 재질에 따른 효과의 차이는 없는 것을 알 수 있다. 또한 이 경우의 전류밀도 결과를 보면 stainless steel이 가장 작은 값을 보이고 있어, 상온의 결과에서 예측했던 바와 같이 전극 재질과 ER유체의 종류에 따라 전기영동 현상이 다르게 나타나는 고유특성이라고 생각된다.

3.3. ER유체의 응답특성

ER 유체의 전기장에 대한 응답특성 실험을 25°C와 100°C에서 수행했다. 4 kV/mm의 전기장을 10 Hz로 부하하며, 토오크 센서로부터 측정된 토오크 변동값이 정상 상태의 63.2%에 도달하는 시간을 응답시간으로 정의했다. 전극 간격은 1.00 mm로 고정시켰으며, 모터는 전단변형률이 200 s⁻¹이 되도록 141 rpm으로 일정하게 회전시켰다. 데이터는 1초당 4,100개를 받아 응답시간을 0.244 ms 단위로 측정할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 고전압 공급용 앰프는 전기장 부하시 0.58 ms, 전기장 제거시 0.74 ms의 응답성능을 나타냈다. ERF-1을 이용 상온에서 실험한 결과를 Fig. 11에 도시했다. 4 kV/mm의 전기장 부하시 응답시간이 5.9 ms로 나타나고 있으며, 전기장 제거시의 경우엔 4.8 ms를 보이고 있어, 전기장 부하시 응답시간이 전기장 제거시의 경우 보다 느린 것으로 확인되었다.

Fig. 12에 ERF-2의 실험 결과를 나타냈다. 전기장 부하시 및 제거시 응답시간이 각각 4.5 ms와 4.3 ms로 ERF-1과 유사한 경향을 보이고 있으며, 전반적으로 ERF-1에 비해 약간 빠른 성능을 보이고 있다. 두 ER유체 모두 전기장이 변한 직후 1.5 ms 정도의 시간 지연 후 토오크가 증가하고 있다. 이는 실험 장치의 하드웨어(hardware)적인 지연시간을 나타내는 것으로, 용

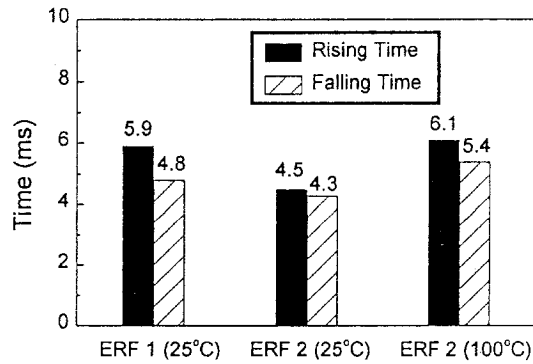


Fig. 13. Comparison of response time (4 kV/mm).

용장치에 적용시 보다 큰 값을 보일 것으로 예측된다.

이들 각 ER 유체의 반응시간을 Fig. 13에 막대 그래프로 보기 쉽게 나타냈다. ERF-2의 경우 온도가 상승하며 응답시간이 다소 늦어지는 것으로 나타났으나, 그 증가율이 작기 때문에 응용장치에 적용시 문제가 발생하지는 않을 것으로 생각된다. 그러나, 이들 응답시간은 전극간극 및 온도에 따라 경향이 변할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 향후 이들 조건에 대한 추가실험을 수행할 계획이다.

4. 결론 및 향후 연구계획

본 논문에서는 전기장 부하에 따라 유동 특성이 변하는 ER 유체의 비행특성에 영향을 주는 여러 인자 중 전극 간격 및 재질의 변화에 따른 ER유체의 항복전단응력과 전류밀도의 변화를 온도 변화에 따라 고찰하였다. 이를 위해 전극 간격 및 전극 재질을 변화시킬 수 있는 점도계를 자체 제작하여 실험을 수행하였다.

전극 간격에 따른 실험결과를 살펴보면 ERF-1의 경우, 실험을 실시한 상온 및 70°C 영역에서 전극 간격이 좁아질수록 보다 큰 항복전단응력값을 보이고 있다. 이 경우 전류 밀도의 크기는 상온에서 전극 간격과 상관없이 유사한 크기를 보이던 것이, 70°C에서는 전극 간격이 가장 넓은 1.25 mm에서 가장 큰 값을 나타내고 있다. 그러나, 그 차이가 매우 적어 전극 간격의 변화에 따라 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. ERF-2의 경우 모든 온도 범위에 걸쳐 전극 간격이 가장 좁은 0.75 mm에서 가장 큰 ER효과를 보여주고 있으며, 전류밀도의 경향도 이와 유사한 것을 알 수 있다. 그러나 전류 밀도의 변화는 온도가 상승하며 그 경향이 점차 달라져, 상온의 경우 전극 간격이 좁아질수록 증가하던 전류밀도가 온도가 상승하면 반대 경향을 보이고 있다. 이는 상온의 경우 공급된 전기에너지가 대부분 ER 효과 발생에 소모되어, 항복전단응력의 크기와 비례하지만, 온도가 상승하여 입자내 전하의 이동이 용이해지면 공급된 전기에너지는 ER 효과 발생뿐 아니라 높은 전압을 유지하는데 많은 부분이 소모되기 때문인 것으로 판단된다. 전극 재질의 변화에 대한 ERF-1의 실험 결과에 따르면, 상온 및 70°C에서 전극 재질에 따라 항복전단응력의 크기가 거의 일정

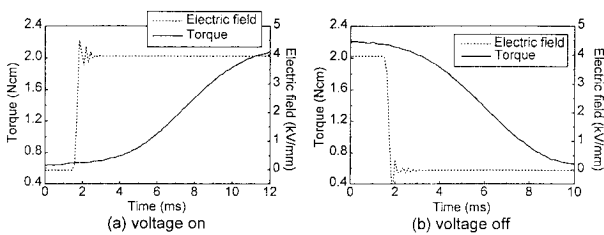


Fig. 11. Response time of ERF-1 (25°C).

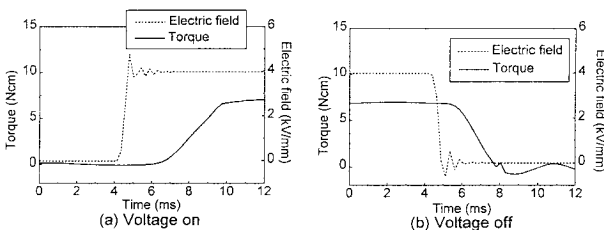


Fig. 12. Response time of ERF-2 (25°C).

함을 알 수 있다. 그러나, 전류밀도의 변화를 살펴보면, 상온의 경우 stainless steel을 전극으로 사용한 결과가 조금 큰 값을 보이고 있으며, 70°C에서는 그 차이가 보다 크게 나타나고 있다. ERF-2를 사용 실험을 수행한 결과에서는, 항복전단응력의 크기는 앞선 ERF-1의 결과와 마찬가지로 전극 재질의 변화에 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 그러나, 전류밀도의 변화를 살펴보면, ERF-1의 경우와는 다르게 stainless steel 전극이 가장 작은 값을 보이고 있다. 이는 ER유체와 전극 재질 간의 친화력 때문인 것으로 생각된다. 온도에 따른 응답특성 실험 결과에 따르면 두 ER유체 모두 상온에서는 큰 차이 없이 우수한 성능을 보이고 있으며, 온도가 상승함에 따라 응답특성이 다소 느려지는 것으로 나타났다.

본 실험을 통하여 ER유체를 이용하는 응용장치 제작시 전극 간격은 절연 및 조립 등의 문제만 없다면 가공정밀도가 허락하는 범위 내에서 가급적 작게 하는 것이 바람직하며, 전극 재질의 변화는 ER효과에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 가공성, 부식성, 내구성 등을 고려한 선택이 보다 중요하다는 것을 확인했다. 또한 ER유체는 적용할 응용장치의 작동 및 환경특성 등을 고려하여 개발할 때에 가장 우수한 빙햄특성 및 응답특성을 기대할 수 있을 것으로 생각된다. 향후 전극 너비 및 길이에 대한 실험을 통하여 그 영향을 고찰할 예정이다. 또한, ER유체의 침전에 따른 영향을, 실험을 통해 고찰하여 보다 실용적인 설계 자료로 제시할 것이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 위탁연구과제(UD970048CD)로 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

1. W. H. Winslow, *Journal of Applied Physics*, **20**, 1137-1140 (1949).
2. D. A. Brooks, *Proc. XIth int. Cong. on Rheology*, (1992).
3. A. R. Johnson, W. A. Bullough, R. Firoozian, A. Hosseini-Sianaki, J. Makin and S. Xiao, *Proc. of the Int. Conf. on ER-fluids*, 424-441 (1991).
4. S. B. Choi, C. C. Cheong and G. W. Kim, *Mechatronics* **7**(1), 53-66 (1997).
5. S. H. Choi, Y. T. Choi, S. B. Choi and C. C. Cheong, *Int. J. Mod. Phys. B*, **10**(23), 3143-3157 (1996).
6. M. Nakano, R. Aizawa and Y. Asako, *Proc. of the 5th Int. Conf. on ER-fluids*, 132-139 (1995).
7. J. L. Sproston, A. K. El Washed, E. W. Williams and R. Stanway, *Proc. of the 5th Int. Conf. on ER-fluids*, 259-269 (1995).
8. E. W. Williams, S. G. Rigby, J. L. Sproston and R. Stanway, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **47**, 221-238 (1993).
9. T. C. Jordan and M. T. Shaw, *IEEE Transaction of Electrical Insulation*, **24**(5), 849-878 (1989).
10. H. Block and J. P. Kelly, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **21**, 1661-1677 (1988).
11. DIN 53 019