

<연구논문>

## 높은 압력차의 유동모드 하에서 ER유체의 유변특성

이호근\* · 최승복\* · 정재천\* · 강윤수\*\* · 서문석\*\*

\*인하대학교 기계공학과  
\*\*국방과학 연구소  
(1998년 8월 21일)

### Rheological Characteristics of ER Fluids at High Pressure-Driven Flow Mode

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

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

\*\*ADD(Agency for Defence Development)

(Received August 21, 1998)

#### 요 약

본 논문은 높은 압력차의 유동모드 하에서의 정상전단거동을 고찰하였다. ER유체 조성에 사용된 비전도성 용매는 10cS의 점도를 갖는 트랜스포머 오일이 사용되었으며, 전도성 입자의 중량비를 20 wt%와 30 wt%로 조절하여 입자 중량비에 대한 영향을 고찰하였다. 두 가지로 조성된 수계 ER유체를 ERF 1과 ERF 2로 칭하였으며, 성능 비교를 위하여 외국의 우수하다고 알려진 비수계 ER유체인 ERF 3를 사용한 실험도 실시하였다. 높은 압력차의 유동모드를 발생시키기 위해, 양방향 유압 실린더를 이용하여 고압의 질소 가스로 작동되는 실험 장치를 자체 제작하였다. 전극 앞에 장착된 압력 센서를 통해 전극 양단의 압력차를 구하고, 실린더 로드와 부착된 변위센서로부터 측정된 피스톤 속도를 유량 계산의 기초 자료로 사용하였다. 유동모드에 대한 유체역학적 해석을 통해 유도된 수식을 인용했으며, 위의 기초 자료와 수식을 이용하여 유동모드형 응용 장치에 적용하기 위한 전단변형률에 대한 전단응력의 결과를 도출하였다.

**Abstract**—This paper experimentally investigates the steady shear behaviors of electro-rheological(ER) fluids under flow mode at high pressure level. As for the ER fluid to be tested, two types of ER fluids are employed; water-based ER fluids (ERF 1, ERF 2) and water-free ER fluid(ERF 3). The water-based ER fluids are composed inhouse, and the concentrations of dispersed particles are 20 wt% and 30 wt% for ERF 1 and ERF 2, respectively. To generate the flow mode at high pressure, an experimental apparatus operated by two-way hydraulic cylinder is constructed and utilized. The pressure difference is measured by the pressure sensor, while the flow rate is calculated using the measured data of the displacement sensor(LVDT). Consequently, the shear stress and shear rate are distilled by incorporating the measured data; the pressure difference and the flow rate.

**Keywords:** ERF(Electro-Rheological Fluid), Electric field, Flow mode, High shear rate

#### 1. 서 론

전기유동유체 혹은 ER유체(electrorheological fluid)라 함은 부하 되는 전기장의 강도에 비례하여 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 것으로, 기본적으로 비전도성의 용매에 약한 전도성의 입자를 분산시킨 현탁액이다. ER유체에 전기장을 부하하면 액상에서 고상으로 바뀌며, 이 과정은 가역적으로 매우 빠르게 일어난다. 따라서, 외부 조건에 따라 ER유체에 부하 되는 전기장의 크기만을 변화시켜 연속적인 제어 가 가능하며, 이러한 ER유체의 특성을 이용한 응용 장치는 설계가 단순화되는 장점을 갖게 된다. 또한, 응용 장치의 단가는 저렴하게 될 수 있다 [1]. 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 한쪽의 전극은 고정되어 있고, 다른 한쪽이 회전이나 이동을 하는 형태이다. 유체의 이동과 전극의 움직임이 평행하게 일어나는 클러치 및 브레이크 시스템이 이 형태에 속한다[2,3]. 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 관내에서 유체의 압력 변화와 유량 변화가 동시에 일어나는 형태이다[4,5]. 세 번째 형태는 유체의 유동과 전극의 움직임이 수직인 방향으로 일어나는 압착 모드(squeeze mode)이다. 이 형태는 전극과 유체의 유동은 매우 적게 일어나지만, 엔진마운트, 스마트 구조물 등에 응용하려는 연구가 수행되고 있다[6,7].

이러한 세 가지 형태의 모드를 갖는 응용 장치를 설계하는 경우에는 각각의 모드에 맞는 실험장치에서 구한 전단 변형률에 대한 전단응력의 관계, 부하되는 전기장의 변화에 대한 항복응력의 변화, 전기장 변화에 대한 전류 밀도의 변화 등과 같은 ER유체의 병행특성에 관한 자료가 필요하다. 전단모드 형태의 실험장치는 전단변형률을 영(zero)에서부터 서서히 증가시킬 수 있기 때문에 동적 상태의 항복 전단응력을 측정할 수 있다. 실험장치의 구조가 간단하고 제작이 용이하며 실험장치의 검증이 쉽게 이루어질 수 있어 상용화되어 있는 장비들이 많으며, 주로 동축형 실린더 형태의 쿠에트(couette)형을 사용하고 있다. 그러나, 유동모드 형태의 실험장치는 구조가 복잡하고 유체의 유동을 직접 측정하기가 곤란하기 때문에 상용화 되어 있는 것이 없다. 이러한 이유 때문에 대부분의 응용장치 제어에 필요한 ER유체의 물성치( $\tau_y$  및  $\tau$ )는 전단모드 형태의 실험장치에서 측정된 값을 사용하고 있다. 그러나, 전단모드와 유동모드에서 측정된 항복응력( $\tau_y$ ) 값은 차이가 있다는 것이 최근 연구에 의해 밝혀졌다[8]. 또한, 전단모드 형태의 실험장치는 그 구조상  $1,000 \text{ s}^{-1}$  이상의 높은 전단변형률을 발생시킬 수 없으나, 현가장치 등의 응용장치에서 계산된 전단변형률은  $20,000 \text{ s}^{-1}$  이상의 큰 값을 나타낸다. 이 때문에 높은 전단변형률에 대한 항복응력의 크기는 수식에 의해 예측된 값을 사용하고 있다. 그러나 예측치와 실제 측정값이 차이가 클 것으로 예상되기 때문에, 본 논문에서는 자체 제작한 높은 압력차를 갖는 유동모드형 병행특성 실험장치를 이용하여 그 차이를 밝히고자 한다.

2. ER유체의 유동모드 해석

ER유체에 전기장을 부하하면 액상에서 고상으로 바뀌며, 이 과정은 가역적으로 일어난다. ER유체는 전기장 무부하시에는 용매속에 분산된 입자가 자유로이 이동하며 외부의 힘이나 유동에 대해 등방성의 성질을 나타내지만, 전기장을 부하하면 입자들이 양쪽의 전극을 향하여 전기장과 평행하게 고리 모양의 구조를 형성하게 된다. 이러한 고리 형태의 섬유상 구조물에 의하여 외부에서 가해지는 전단력이나 유동에 대해 저항하는 이방성의 성질을 나타내게 된다. 전극에 전기장이 부하되면, ER유체는 순간적으로 Newtonian에서 Bingham-plastic의 거동을 하게 된다. 즉 전기장의 부하에 의하여 전단응력이 증가하게 되고 틈새 사이의 흐름저항을 증가시킨다.

전극 사이에 흐르는 ER유체에 작용하는 압력차와 전단응력과의 관계식을 유도하기 위하여, Fig. 1을 고려한다[9]. Fig. 1은 피스톤의 틈새  $h$ 를 통과하는 유체의 흐름에서의 압력을 일차원적으로 나타낸 것이다. 각 힘들을 더하면 다음과 같다.

$$P \delta z - \tau \delta x + (\tau + \frac{\partial \tau}{\partial z} dz) \delta x - (P + \frac{\partial P}{\partial x} dx) \delta z = 0 \quad (1)$$

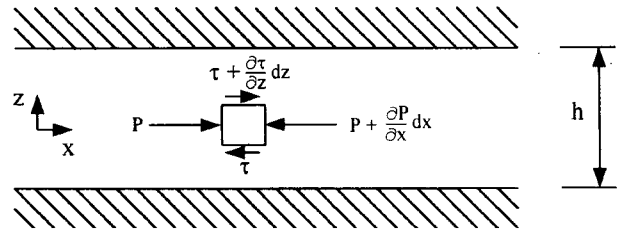
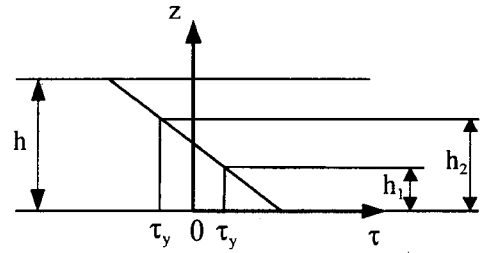
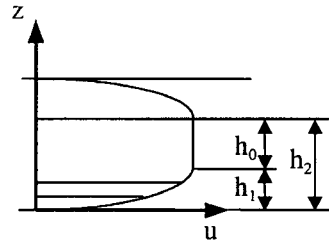


Fig. 1. Pressure contribution of flow.



(a) yield stress contribution



(b) velocity contribution

Fig. 2. Yield stress and velocity contribution of flow.

이 식을 정리하면 아래와 같이 된다.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (2)$$

여기서 x방향의 압력변화는 전극의 길이 방향에 대해 선형적으로 변한다고 가정하면, 압력강하  $P'$ 을  $-\frac{\Delta P}{L}$ 로 쓸 수 있다. 음의 부호의 도입은 압력이 낮은 방향으로 유동 흐름이 발생한다는 것을 뜻한다. 따라서 식 (2)는  $P' = -\frac{d\tau}{dz}$ 로 나타낼 수 있으며, 이를 적분하면 다음과 같다.

$$\tau = C_1 - P'z \quad (3)$$

식(3)은 전단응력이 판막사이에서 선형적으로 변한다는 것을 의미한다.

Fig. 2는 유체의 흐름에서 발생하는 전단력과 속도의 분포를 나타낸 그림이다. 고정된 판막에 있어서 흐름 중앙( $z = \frac{h}{2}$ )에서의 전단응력( $\tau$ )은 영(zero)이 되므로, Fig. 2(a)에서 볼 때 경계조건은 다음과 같다.

$$C_1 = \frac{P' \cdot h}{2} \quad (4)$$

유량 흐름의 중간부에서는 전단응력이 유체의 항복응력보다 작은 영역이 있다. 이곳은 속도구배가 없다. 즉, 속도가 일정하므로 core 영역에 대칭하여 그 외 영역의 유체 흐름은 벽면을 기점으로 선형적으로 비례하여 흐른다. 전단응력이 유체의 항복응력( $\tau_y$ )과 같아지는 곳을  $h_1$ 으로 본다면 식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$\tau_y = C_1 - P' h_1, \quad C_1 = \tau_y + P' h_1 \quad (5)$$

따라서, 식 (4)와 (5)로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$h_1 = \frac{h}{2} - \frac{\tau_y}{P'} \quad (6)$$

그리고, Fig. 2(b)를 참고하여 core의 높이를 나타내면,  $h_c = \frac{2\tau_y}{P'}$  이다. 이제 다른 표현으로 전단응력에 관한 방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$\tau = \tau_y + P'(h_1 - z) \quad (7)$$

한편,  $z=0$ 인 벽 근처에서 전단응력은 양의 값을 갖고 항복응력보다 크며, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{du}{dz}; \quad \frac{du}{dz} > 0 \quad (8)$$

식 (8)을 식(7)에 대입하면  $z$ 가  $h_1$ 에 접근함에 따라, 속도구배는 core의 가장자리에 균일하게 영으로 감소한다. 그러므로 core 영역에서 속도구배의 불연속이 생긴다. 이 식을 다시 적분하면 벽 근처의 전단 영역에서의 속도를 구할 수 있다.

$$u = \frac{P'(2h_1z - z^2)}{2\eta} + C_2, \quad z \leq h_1 \quad (9)$$

그러나,  $z=0$ 인 벽면에서의 no-slip condition에 의하여 벽면에서의 속도가 영이므로  $C_2=0$ 이 된다. 그러므로, 속도는 다음과 같이 된다.

$$u = \frac{P'(2h_1z - z^2)}{2\eta}, \quad z \leq h_1 \quad (10)$$

Core의 속도를 구하기 위하여 식 (10)에  $z=h_1$ 을 대입하면, core의 속도  $U_c$ 는 다음과 같다.

$$U_c = \frac{P'h_1^2}{2\eta} \quad (11)$$

이제 식 (6)을 식 (11)에 대입하면 다음을 구할 수 있다.

$$U_c = \frac{(P'h - 2\tau_y)^2}{8P'\eta} \quad (12)$$

직사각형  $lw$ 에 의하여 경계된 포물선의 면적  $S$ 는  $(2/3)lw$

가 된다. 전단영역에서의 속도구배는  $h_1$ 과  $U_c$ 를 경계로 한 포물선이므로, 단위폭  $b$ 당 유량  $Q$ 를 계산한 후, 식 (6)과 (12)를 대입하여 압력강하에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$P'^3 - \left[ \frac{12Q\eta}{bh^3} + 3 \left( \frac{\tau_y}{h} \right) \right] P'^2 + 4 \left( \frac{\tau_y}{h} \right)^3 = 0 \quad (13)$$

전기장 무부하시의 흐름은 Newtonian 유동형태로 축소되어  $\tau_y=0$ 을 식 (13)에 대입하면  $P'_N = \frac{12Q\eta}{bh^3}$ 이 된다. 즉 전기장 무부하시의 댄핑은 전적으로 유체의 점성에 기인하며, 틱새를 통과하는 유량에 비례한다. 그러므로, 전기장 무부하시 틱새에 걸친 압력 강하  $\Delta P_\eta$ 는 다음과 같다.

$$\Delta P_\eta = 12\eta \frac{L}{bh^3} Q \quad (14)$$

여기서  $Q$ 는 유량,  $b$ 는 duct의 너비,  $L$ 은 duct의 길이,  $h$ 는 duct와 벽 사이의 간격, 그리고  $\eta$ 는 ER 유체의 점성계수를 각각 나타낸다.

반면, core의 높이를 나타내는 식  $h_c = \frac{2\tau_y}{P'}$ 에서 보면 압력구배가 줄어들 때 core는 틱새구간 전체를 채울 정도로 확장하고, core속도는 식 (11)로부터 영으로 감소한다. Core의 높이 식에  $h_c=h$ 를 대입하고 틱새의 길이  $L$ 을 고려하면, 초기유동에 필요한 임계압력구배가 다음과 같이 주어진다.

$$P'_c = \frac{2\tau_y}{h} \quad (15)$$

이것은 고정된 평판 사이에서 흐름이 발생할 때 존재할 수 있는 가장 작은 압력구배이다. 즉, ER유체에 전기장이 가해지면, ER유체의 항복전단응력  $\tau_y$ 는 피스톤 속도와는 무관하게 일정한 양까지 댄핑력을 증가시킨다. 이것이 기존의 점성댄핑과 다른 점이다. 따라서 전기장 부하시 ER 유체의 전단력 증가에 의한 압력강하는 다음과 같이 표현할 수 있다.

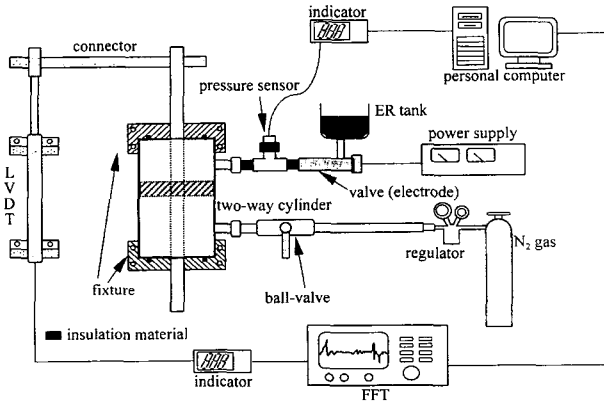
$$\Delta P_{ER} = 2 \frac{L}{h} \tau_y \quad (16)$$

### 3. 실험장치 제작 및 실험절차

높은 압력차의 유동모드 하에서 ER유체의 역학적 특성 변화를 살펴보기 위해 본 실험에서는 수계 ER유체로 ERF 1과 ERF 2가 사용되었으며, 또한 비교 분석을 위해 외국의 우수하다고 알려진 ER유체 중 비수계인 ERF 3를 이용하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 ERF 1은 아라빅 점(arabic gum) 입자를 트랜스포머 오일(transformer oil)에 입자 중량비 20 wt%로 혼합하여 조성한 것이다. 사용된 오일의 점도는 10cS이고, 절연과괴 전압은 12kV/mm 이

**Table 1.** Specification of employed ER fluids

Name	Particle	Base liquid	Remark
ERF 1	Arabic gum	Transformer oil	20 wt%
ERF 2	Arabic gum	Transformer oil	30 wt%
ERF 3	Polyurethane	Silicone oil	TP AI 3565 (Bayer)



**Fig. 3.** Experimental apparatus for the Bingham property of flow mode at high shear rate.

상이다. ERF 2는 ERF 1과 동일한 조건에 입자 중량비만을 30 wt%로 조절하여 조성한 것이다. ERF 3는 독일 베이어(Bayer)사에서 조성한 것으로, 폴리우레탄(polyurethane) 입자를 실리콘 오일(silicone oil)에 분산시킨 것이다.

높은 압력차의 유동모드 하에서 전단응력 측정을 위해 Fig. 3과 같은 실험장치를 제작하였다. 고압의 질소가스 레귤레이터(regulator)를 통해 필요한 압력으로 조절한 후, 솔레노이드밸브(solenoid valve)를 이용하여 빠른 속도로 피스톤을 밀어준다. 양방향 피스톤의 다른 한쪽에 채워진 ER유체가 피스톤의 운동으로 인하여 좁은 전극 사이를 통과하며 높은 압력차를 발생시킨다. 전극의 바로 앞에 압력 센서를 장착하여 전기장 무부하시와 부하시의 압력차를 구하며, 피스톤에 부착된 변위센서(LVDT)를 통해 유

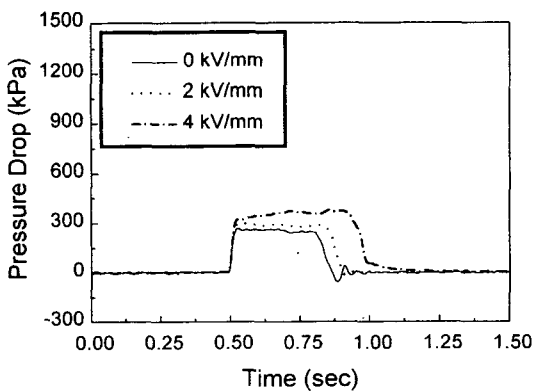
량을 측정 후, 이들 데이터를 기초로 하여 2절에서 유도한 수식을 이용 필요한 데이터를 얻게 된다.

실험에 사용된 양방향 실린더의 행정은 170.4 mm이고 단면적은 505.8 mm<sup>2</sup>이다. 전극은 길이 200 mm, 간격 1 mm 그리고 너비 59.7 mm의 원통형 밸브를 사용하였다. 전기장은 0 kV/mm, 1 kV/mm, 2 kV/mm, 3 kV/mm, 4 kV/mm 및 5 kV/mm를 부하 하였으며, 질소압은 10 bar, 15 bar, 18 bar, 20 bar, 22 bar, 25 bar, 30 bar로 조절하여 실험을 수행하였다.

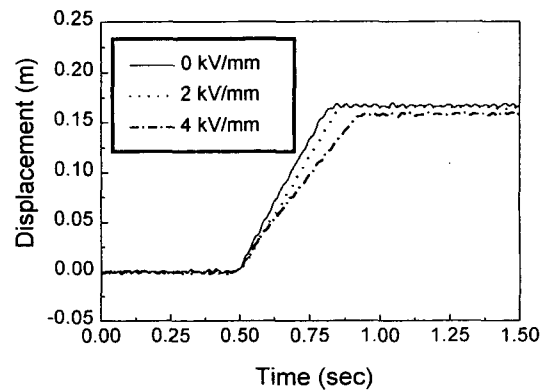
## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 전기장에 따른 압력차의 변화

입자 중량비가 20 wt%인 ERF 1을 질소 압력 10 bar로 실험한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4(a)는 압력센서로부터 얻은 압력차를 나타내고, (b)는 변위센서로부터 얻은 신호로 이의 기울기로 부터 피스톤의 속도를 알 수 있다. 그림은 0 kV/mm, 2 kV/mm 그리고 4 kV/mm에 대해 결과만을 도시하였다. 압력센서를 통해 얻은 신호를 살펴보면, 부하되는 전기장이 증가함에 따라 압력차가 커짐을 알 수 있다. 즉 ER효과로 인해 저항이 발생한다는 것을 나타낸다. 변위센서로부터 얻은 그래프를 살펴보면 전기장이 증가함에 따라 피스톤의 속도가 점차 느려짐을 알 수 있는데, 이 또한 앞의 결과와 마찬가지로 ER효과를 증명하는 것이다. 질소압을 15 bar, 20 bar로 올린 실험 결과에서도, Fig. 4와 유사한 경향을 관찰할 수 있었다. 또한 사용한 질소 압력의 증가로 인하여 전체적인 압력차가 크게 나타나고 있으며, 변위센서로부터 측정된 피스톤의 속도가 빨라진 것을 알 수 있다. 10 bar 실험 결과와 마찬가지로 전기장 증가에 따른 압력차의 증가와 피스톤 속도의 감소가 확인되었다. Fig. 5는 25 bar로 실험한 결과이다. 앞선 실험 결과와 동일한 현상을 관찰할 수 있었으며, 질소압이 높아짐에 따라 변위센서의 신호에 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 또한, 전기장의 증가에 따른 압력차의



(a) pressure drop



(b) displacement of piston rod

**Fig. 4.** Field-dependent pressure drop and displacement of ERF 1(10 bar).

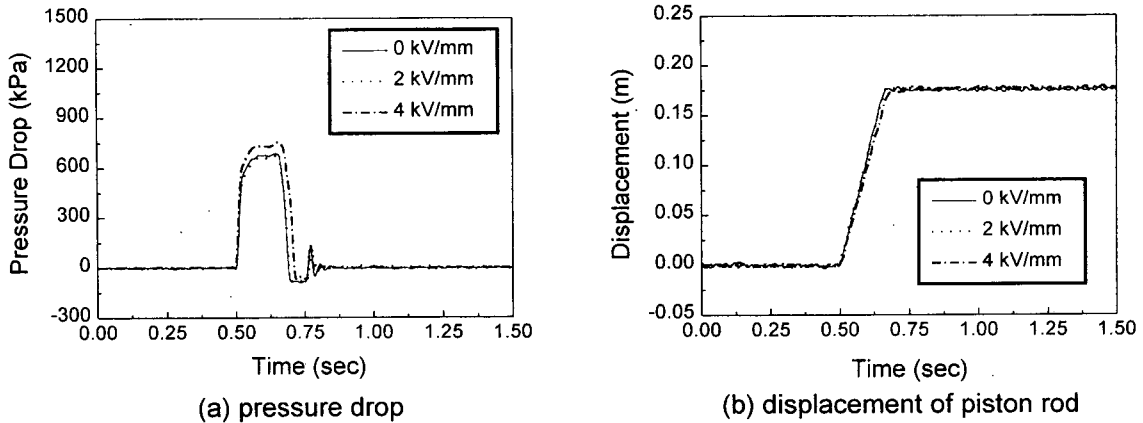


Fig. 5. Field-dependent pressure drop and displacement of ERF 1(25 bar).

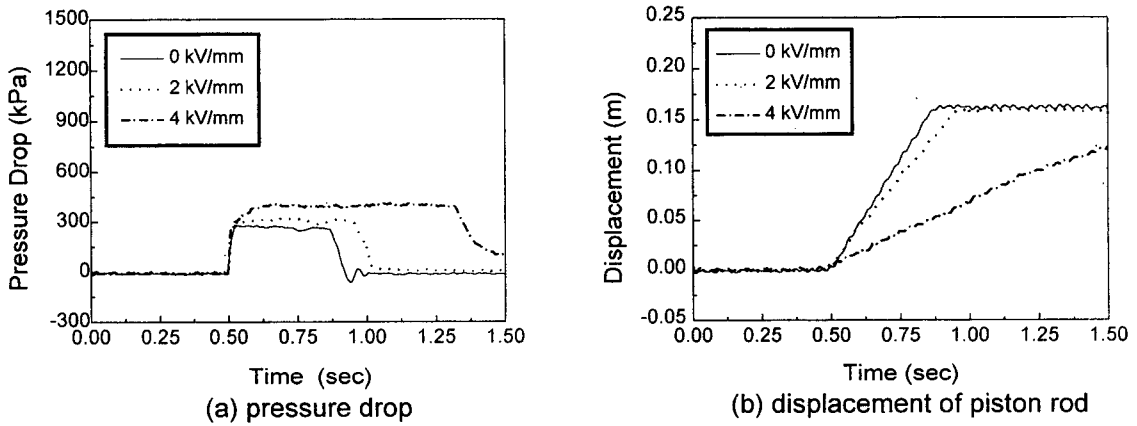


Fig. 6. Field-dependent pressure drop and displacement of ERF 2(10 bar).

변화는 압력이 떨어지는 부분을 제외하고는 그 형상이 거의 유사함을 알 수 있다.

Fig. 6은 입자 중량비가 30 wt%인 ERF 2를 10 bar의 질소압으로 실험한 것이다. 전기장의 증가에 따라 압력차가 증가하고, 피스톤의 속도가 느려지는 현상을 ERF 1과 마찬가지로 관찰할 수 있다. 그러나, ERF 2는 입자 중량비

가 30 wt%로 ERF 1에 비해 높기 때문에 보다 큰 ER효과를 발생시켜, 같은 전기장 부하시 ERF 1의 경우보다 높은 압력차와 느린 피스톤 속도를 나타내고 있다. ERF 2를 15 bar, 20 bar, 25 bar의 질소압으로 실험하였고, 그 중에서 25 bar 실험 결과를 Fig. 7에 도시했다. 앞선 ERF 1의 경우와 마찬가지로 결과를 확인할 수 있었다.

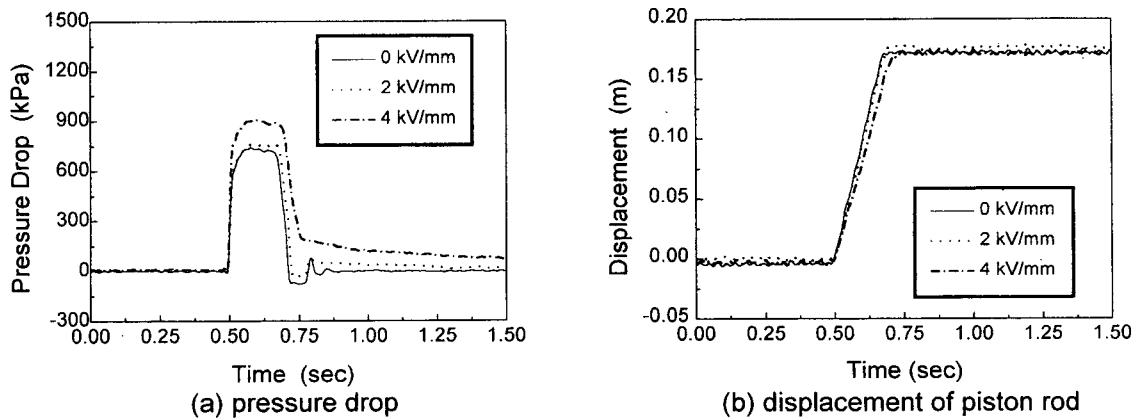


Fig. 7. Field-dependent pressure drop and displacement of ERF 2(25 bar).

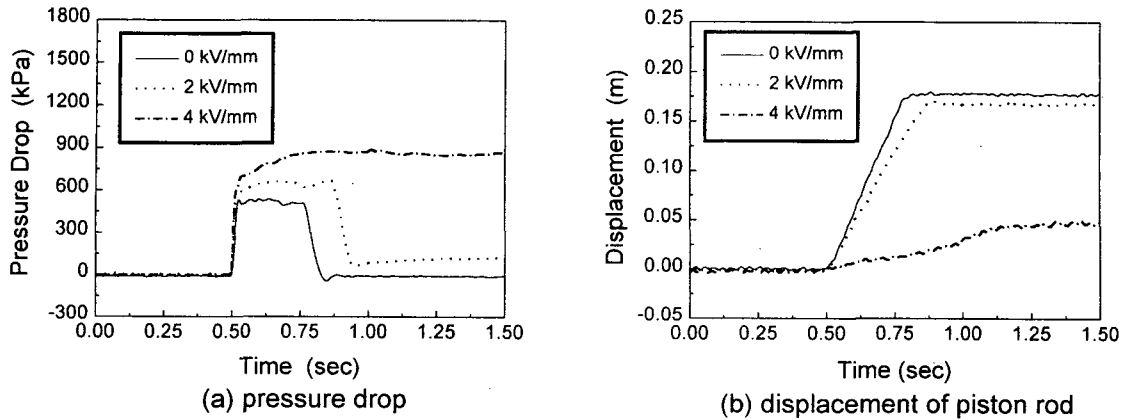


Fig. 8. Field-dependent pressure drop and displacement of ERF 3(15 bar).

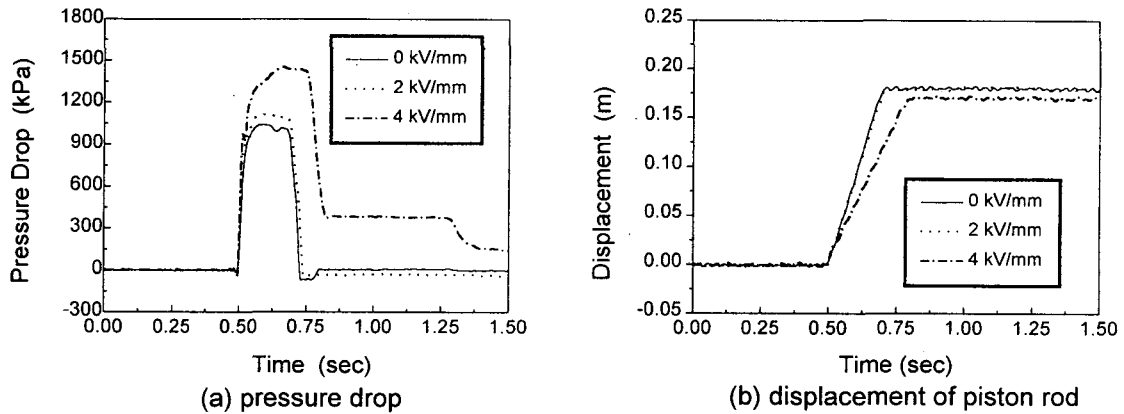


Fig. 9. Field-dependent pressure drop and displacement of ERF 3(30 bar).

비수계 ER유체인 ERF 3를 15 bar의 질소압으로 실험한 결과를 Fig. 8에 나타냈다. ERF 3는 우수한 ER효과로 인하여 10 bar의 경우는 전기장 부하시 유체의 흐름이 발생하지 않아 15 bar 이상에서 실험을 수행하였다. 앞선 ER유체들과 유사한 경향을 보이고 있다. 한 가지 다른 점은 4 kV/mm를 부하한 경우 증가한 압력이 계속 유지되는 것을 볼 수 있는데, 이는 높은 ER효과로 인하여 유동이 발생하지 않았기 때문이다. 변위센서로부터 얻은 결과를 살펴보면 이와 같은 사실을 확인할 수 있는데, 4 kV/mm의 경우 피스톤이 끝까지 이동하지 않은 것을 관찰할 수 있다. 질소압을 20 bar, 22 bar, 25 bar 그리고 30 bar로 높여 실험을 수행하였다. 이 경우도 앞선 결과와 동일한 경향을 보이고 있으며, 25 bar까지는 5 kV/mm 부하시 유동이 발생하지 않아 실험을 수행할 수 없었다. Fig. 9는 30 bar로 실험한 결과를 도시한 것이다. 앞선 결과와 동일한 경향이 관찰되었으며, ERF 3가 가장 우수한 ER효과를 발생시킨다는 사실을 확인할 수 있었다.

4.2. 전단변형률에 대한 전단응력

4.1절에서 얻은 실험데이터를 2절에서 유도한 수식에 대입하여 얻은 결과를 Table 2, 3, 4에 나타냈다. Table

Table 2. Calculated pressure drop of ERF 1 ( $\eta=0.030 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

Field (kV/mm)	$\Delta P$ (Pa)	$\Delta t$ (ms)	$\dot{\gamma}$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$\tau$ (Pa)	$\tau_y$ (Pa)
0	253,736	338	22,185.9	654.6	0
1	286,832	348	18,097.8	1,808.6	1,270
2	308,896	358	18,401.5	1,867.5	1,319.9
3	353,024	382	19,205.5	2,025.6	1,454.1
4	375,088	466	18,106.1	2,015.4	1,476.5
5	408,184	578	17,139.7	2,040.6	1,530.5

(a) 10 bar

Field (kV/mm)	$\Delta P$ (Pa)	$\Delta t$ (ms)	$\dot{\gamma}$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$\tau$ (Pa)	$\tau_y$ (Pa)
0	683,984	162	57,460.3	1,710.0	0
1	695,016	174	39,745.9	4,103.1	2,920.3
2	706,048	184	39,072.9	4,090.7	2,927.9
3	728,112	192	38,958.8	4,139.0	2,979.7
4	772,240	206	38,932.1	4,247.8	3,089.2
5	838,432	216	39,809.5	4,465.5	3,280.8

(b) 25 bar

2는 ERF 1의 결과를 질소압에 따라 나타낸 것으로, 전기장이 증가함에 따라 압력차와 전단응력이 증가하는 것을

**Table 3.** Calculated pressure drop of ERF 2 ( $\eta=0.039 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

Field (kV/mm)	$\Delta P$ (Pa)	$\Delta t$ (ms)	$\dot{\gamma}$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$\tau$ (Pa)	$\tau_y$ (Pa)
0	286,832	400	20,707.7	808.6	0
1	297,864	406	15,871.6	2,097.5	1,477.8
2	330,960	488	15,631.4	2,195.3	1,584.9
3	353,024	658	14,439.4	2,215.5	1,651.7
4	408,184	1,201	11,898.0	2,216.9	1,752.3

(a) 10 bar

Field (kV/mm)	$\Delta P$ (Pa)	$\Delta t$ (ms)	$\dot{\gamma}$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$\tau$ (Pa)	$\tau_y$ (Pa)
0	717,080	184	48,663.0	1,900.3	0
1	728,112	194	34,540.8	4,627.1	3,278.3
2	750,176	216	33,419.7	4,598.0	3,293.0
3	816,368	230	33,985.7	4,817.6	3,490.5
4	904,624	234	35,631.8	5,180.1	3,788.7
5	1,014,944	254	36,484.9	5,539.0	4,114.3

(b) 25 bar

**Table 4.** Calculated pressure drop of ERF 3 ( $\eta=0.066 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

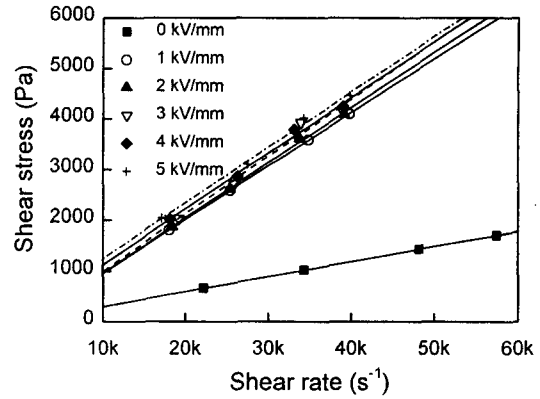
Field (kV/mm)	$\Delta P$ (Pa)	$\Delta t$ (ms)	$\dot{\gamma}$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$\tau$ (Pa)	$\tau_y$ (Pa)
0	540,568	318	20,513.7	1,351.4	0
1	551,600	306	17,570.3	3,694.0	2,536.5
2	650,888	312	18,576.6	4,244.3	3,020.5
3	761,208	560	16,922.5	4,375.6	3,260.8
4	Lock-up	Lock-up	Lock-up	Lock-up	Lock-up

(a) 15 bar

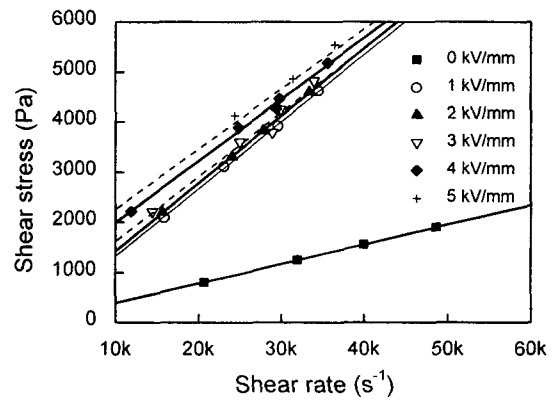
Field (kV/mm)	$\Delta P$ (Pa)	$\Delta t$ (ms)	$\dot{\gamma}$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$\tau$ (Pa)	$\tau_y$ (Pa)
0	1,103,200	218	41,864.6	2,758.0	0
1	1,037,000	192	30,655.8	6,631.7	4,612.1
2	1,103,200	210	30,442.6	6,769.1	4,763.5
3	1,268,700	274	29,066.0	7,001.4	5,086.5
4	1,445,200	288	31,429.5	7,970.8	5,900.3
5	1,621,700	386	30,119.0	8,540.2	6,556.0

(b) 30 bar

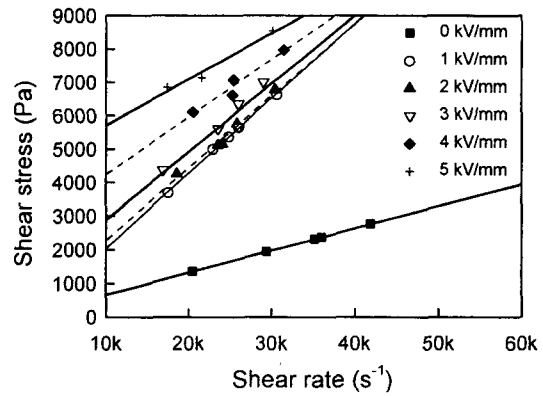
알 수 있다. 또한 피스톤의 속도는 느려지며, 전단변형률이 감소하는 것이 확인되었다. 질소압의 증가에 따라 압력차는 전반적으로 증가하며, 피스톤의 속도가 느려지는 것을 수치적으로 확인할 수 있다. Table 3은 ERF 2에 대한 결과를 나타낸 것이다. 4.1절에서 살펴본 바와 동일한 경향을 나타내며, 한 가지 다른 점은 점성계수가 ERF 1의 경우 0.029759에서 ERF 2의 경우 0.0390494로 증가한 것이다. 이는 입자 중량비의 증가로 인하여 유체의 점성이 증가했기 때문이다. 비교를 위해 실험을 수행한 ERF 3의 결과를 Table 4에 나타냈다. 앞선 두 ER유체와 동일한 경향을 보이고 있다. 15 bar의 경우 4 kV/mm 이상의 전기장 무부하시 유동이 발생하지 않았기 때문에 실험을 수행할 수



(a) ERF 1



(b) ERF 2



(c) ERF 3

**Fig. 10.** Measured shear stress with respect to electric field (pressure-driven flow mode).

없었다.

Table 2를 이용하여 전단변형률에 대한 전단응력의 그림을 도시한 것이 Fig. 10(a)이다. 전기장 증가에 따라 전단변형률에 대한 전단응력의 곡선이 각각 일정한 기울기를 갖고 증가하는 것을 알 수 있다. 전기장 무부하시 그래프의 기울기와 차이를 보이는 것은 전하가 커질수록 가구조(pseudostructure)의 강도가 증가하기 때문이다. 수식의 검토를 통한 보정이 필요한 부분이다. Fig. 10(b)는 Table

3에 나타난 결과를 이용하여, 전단변형률에 대한 전단응력의 결과를 도시한 것이다. Fig. 10(a)와 유사한 경향을 보이고 있으며, 전기장 증가에 대한 전단응력의 증가율이 보다 큰 것을 알 수 있다. 높은 전기장 부하시 기울기가 ERF 1의 경우보다 완만하게 되는 경향이 보이고 있다. Fig. 10(c)는 Table 4에 나타난 결과를 이용하여 ERF 3의 전단변형률에 대한 전단응력의 그림을 도시한 것이다. 앞선 결과와 유사한 경향을 보이고 있으며, 전기장 증가에 따른 전단응력의 증가율이 보다 큰 것을 알 수 있다. 또한 높은 전기장 부하시 기울기의 감소 경향이 ERF 2의 경우보다 큰 것으로 나타나고 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 높은 압력차의 유동모드 하에서 정상전단거동을 고찰하였다. 이를 위해, 고압의 질소가스로 구동되며 실린더 형태의 전극을 갖는 실험장치를 자체 제작하였다. 전극 앞에 부착된 압력 센서를 통하여 전기장 무부하시와 부하시의 압력차를 구하고, 피스톤에 부착된 변위 센서(LVDT)를 통해 유량을 측정하였다. 실험에는 자체 조성한 입자 중량비 20 wt%의 ERF 1과 30 wt%의 ERF 2, 그리고 외국의 우수하다고 알려진 비수계의 ERF 3를 비교 분석을 위해 사용했다. ERF 1과 ERF 2에 대한 실험을 통해 입자 중량비에 따른 ER효과의 상승을 확인했다. 이들 실험을 통해 높은 압력 흐름 하에서 ER유체의 전단특성이 전기장에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 실험장치는 매우 높은 압력차 영역까지 실험을 수행할 수 있기 때문에 많은 유량 변화를 수반하는 유동모드 형태의 응용장치에 적용될 기초자료를 제시할 수 있

었다. 이러한 자료는 낮은 전단변형률 영역에서 측정된 결과를 바탕으로 직선보간법에 의해 높은 전단변형률 영역의 전단응력을 외삽해 사용해 온 기존의 실험논문에 비해 보다 정확한 값이라고 생각된다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 위탁연구과제(UD 970048CD)로 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

## 참고문헌

1. D. A. Brooks, Proc. XIth int. Cong. on Rheology, (1992)
2. A. R. Johnson, W. A. Bullough, R. Firoozian, A. Hosseini-Sianaki, J. Makin and S. Xiao, Proc. of the Int. Conf. on ER-fluids, pp. 424~441, (1991)
3. S. B. Choi, C. C. Cheong and G. W. Kim, Mechatronics Vol. 7, No. 1, pp. 53~66, (1997)
4. S. H. Choi, Y. T. Choi, S. B. Choi and C. C. Cheong, Int. J. Mod. Phys. B, Vol. 10, No. 23, pp. 3143~3157, (1996)
5. M. Nakano, R. Aizawa and Y. Asako, Proc. of the 5th Int. Conf. on ER-fluids, pp. 132~139, (1995)
6. J. L. Sproston, A. K. El Washed, E. W. Williams and R. Stanway, Proc. of the 5th Int. Conf. on ER-fluids, pp. 259~269, (1995)
7. E. W. Williams, S. G. Rigby, J. L. Sproston and R. Stanway, J. Non-Newtonian Fluid Mech., Vol. 47, pp. 221~238
8. J. C. Ryu, "Bingham Properties of an ER Fluid under Rotational Shear Mode and Flow Mode", Master Thesis of Mechanical Engineering, Inha University, (1996)
9. Y. B. Choi, "Performance Analysis of a Semi-Active Variable Damper Featuring Electro-Rheological Fluids", Master Thesis of Mechanical Engineering, Inha University, (1993)