

<연구논문>

## 전기유변유체의 빙햄특성과 밸브 및 댐퍼에의 응용

박명관 · 배종인

부산대학교 공과대학 기계공학부, 부산대학교 공과대학 정밀기계공학과  
(1998년 2월 15일)

### Bingham Characteristics of Electrorheological Fluid and Its Application to ER valve and ER Damper

Myeong-Kwan Park and Jong-In Bae

\*Dept. of Mechanical Engineering, Pusan University, Pusan 609-735, Korea,  
Dept of Mechanical and Precision Engineering, Pusan University, Pusan 609-735, Korea  
(Received February 15, 1998)

#### 요 약

전기장이 인가되고 있는 유로를 유동하는 전기유변유체의 기본성질을 파악하기 위한 실험 및 해석적 연구를 수행하여 빙햄유체로서의 유효성에 대해 알아보고 전기장과 유로면 형상 및 진동유동으로 인한 영향에 대해 조사함으로써 ER밸브 및 ER댐퍼의 응용과 관련한 감쇄력 제어에 대해 검토하였다. 첫 번째 실험은 ER밸브의 높이가 2 mm인 전극면이 평탄한 것과 요철로 된 것을 사용하여 압력손실을 압력변환기로 측정함으로써 전기장 및 유로형상에 대한 영향을 알아보았다. 압력손실 및 전단 응력이 전기장 세기와 함수관계를 가짐을 알 수 있었고, 전기장세기와 유속의 변화시 손실계수에 의한 ER효과의 상이함이 확인되었으며, 레이놀즈수가 커지면 항복전단응력의 영향은 나타나지 않았다. 두 번째 실험은 실린더를 장현파로 진동시켜 ER밸브에서 감쇄력제어가 가능한가를 알아보고 빙햄유체모델로 설계된 ER댐퍼의 모델과 비교하였다. ER밸브와 ER댐퍼의 수학적 모델을 시뮬레이션한 결과는 약간 벗어남이 보이는 하나 실험결과와 일치하고 있다. 이것은 ER유체를 단순히 빙햄유체로 취급할 수 없으나 거시적으로는 빙햄유체로 취급할 수 있음을 시사한다.

**Abstract**— The basic characteristics of ER fluid as Bingham plastic fluids in electric field were studied both experimentally and theoretically. In relation to the application of ER valve and ER damper, investigation on the damping force control was performed with the studies on the effects of electric fields, electrode geometry and oscillation flow. In the first experiment, using both the flat type and unevenness type electrode as ER valve of 2 mm height, the pressure drop was measured in two position to investigate the influence of the electric field strength and electrode type by the pressure transducers. The pressure drop and the shear stress are in proportional to the electric field strength. From the friction factor, ER effects are different by changing the flow and electric field condition. The influence of the yield shear stress did not appear with the increasing Reynolds number. In the second experiment, the possibility of the damping force control of ER valve for the sinusoidal input by a piston cylinder is investigated. The ER damper model based on the Bingham plastic model are proposed, and the simulation results agreed well with the experimental results although the small deviations were shown. Therefore, ER fluid is considered as Bingham plastic model from the macroscopic view.

**Keywords:** Electrorheological Fluid, ER Effect, Electric field, Bingham flow, ER damper, ER valve

#### 1. 서 론

전기유변유체(ER유체)는 1947년, W. M. Winslow가 전기점성유체의 제조에 관한 특허 신청을 하고, 거기에 응용법까지 연구한 것으로부터 일반적으로 Winslow유체로 불리우기도 한다. 1967년도에 Klass와 Matinek는 ER효과의 계통적인 검토를 수행함으로써 연구를 더욱 발전시킨 후, 세계각국에서 ER유체가 주목받기 시작했다[1]. 최근에 ER유체는 신기능성 유체로 주목받고 있으며 많은 연구가 진행되고 있고 ER효과를 이용하여 여러 분야에 적용한 연구도 활성화 되어가고 있다.

ER유체는 절연성의 유체에 유전고체 미립자를 분산시킨 분산계 유체로서 특성은, 1) 인가된 전장의 강도에 영향을 받아 점도의 변화가 급변하고 2) 점도변화의 응답성이 양호하고 수백 Hz 정도의 전기입력신호에 추정할 수 있으며, 3) 전기장의 크기에 따라 유체특성이 달라지므로 전기장의 제어에 의해 유동 특성 제어가 가능한 특성을 가지고 있다. 사용 목적에 따라 인가 전계는 다르지만, 보통 수백 V/mm에서 수십 kV/mm, 전류치는 수  $\mu\text{A}/\text{mm}^2$ 에서 수  $\text{mA}/\text{mm}^2$  정도이며, 소비전력이 수 W정도로 낮은 특징이 있다[2].

종래의 연구들은 ER유체를 전단속도와 함께 전단응력이 증

가하는 병행유체적인 거동으로 가정된 ER효과를 이용한 응용 연구[3-6]와 ER효과의 발생 메카니즘을 미시적으로 해명하는 것을 목적으로 한것이 대부분으로[7,8] ER효과와 유로 형상에 따른 거시적인 유체 운동과의 관계를 병행특성으로 설명하고 있는 연구는 거의 찾아볼 수 없다. 주로 입자와 분산매의 조합에 대한 전기장 세기와 항복응력과 관계를 조사한 것과 응용으로서 압력변동에대한 주파수응답을 알아보는 것으로 이들은 유동이 없는 상태이거나 또는 전단속도가 일정한 경우를 취급하고 있어 실제 응용시스템의 설계시 필요한 값들을 충분히 제공할 수 없으므로 이들 응용기기를 설계하는데 있어서 ER효과와 거시적인 유체운동과의 상호관계를 조사하는 것은 중요하다[9,10]. 따라서 본 연구에서는 ER유체의 유동을 비교적 잘 표현할수 있는 병행유체의 모델[11-13]을 사용하여 그 유효성을 알아보기 위해 평행평판 전극과 전극 형상의 변화에 따른 유동특성 변화 실험에의한 ER밸브의 특성 및 ER유체의 기본성질을 검토하고, 병행유체로서의 유동특성을 이용한 ER유체의 유동모델을 제시하고자 하였다. 또한 제작되어진 댐퍼 모델로 실험과 수치해석을 수행하여 ER효과를 이용한 댐퍼로서의 성능을 평가하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에서는, 정상류와 진동류의 두가지의 실험을 수행하였고 실험장치는 Fig. 1과 같다. 첫번째 실험은 Fig. 1(a)의 실험장치를 이용하여 정상류에서의 ER밸브의 특성 및 ER유체의 성질을 조사하고 두 번째 실험에서는 Fig. 1(b)의 실험장치를 이용하여 진동류에서의 ER밸브의 특성을 조사함으로써 감쇠력 발생기구로서의 효용성을 파악했다. 첫 번째 실험장치는 ER밸브 내부를 선형모터에 의해 일정유속으로 유동하는 ER유체에 일정세기의 전기장을 인가할 수 있도록 되어 있으며 ER밸브에서의 압력손실을 압력변환기로 측정하도록 제작하였다. 첫 번째 실험을 세분화하면 두 가지로 나눌 수 있는데 첫째는 평탄한 전극을 설치한 ER밸브 실험이고 두 번째는 요철된 전극을 설치한 ER밸브 실험으로 각 실험 때마다 두 가지 ER밸브 형태를 바꾸어 실험을 수행하였다. 두 가지 ER밸브의 전극형상은 Fig. 2와 같다. 평탄한 전극의 ER밸브는 유로폭이 20 mm, 높이가 2 mm, 길이 300 mm인 것으로, 유입, 유출시의 각종 손실에 의한 유동의 흠어짐을 고려하여 입구와 출구에 50 mm의 입출구영역을 설정하였고 압력변환기로 구간의 압력손실을 측정함으로써 인가된 전기장의 세기에 의한 영향을 조사하였고 그 영향을 본 연구에서 제시한 병행유체 모델과 비교하였다. 요철형 전극의 ER밸브는 평탄한 유로에 요철을 설치한 것으로 요철의 크기는 높이 0.1 mm, 요철폭 0.3 mm이다. 요철형 전극의 ER밸브에서는 요철형상에 의한 ER밸브의 특성의 변화를 조사하였다.

두 번째 실험에서는 스코치-요크 기구를 이용하여 실린더를

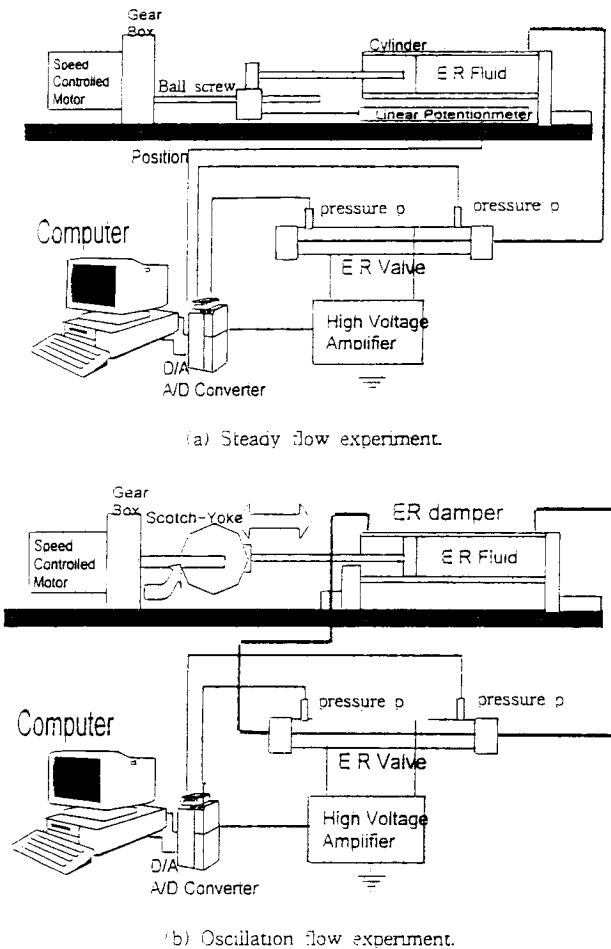


Fig. 1. Experimental layout.

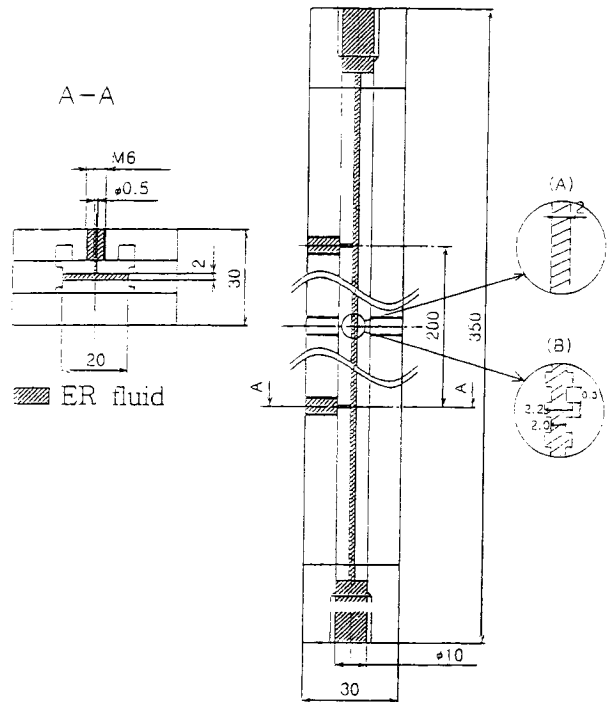


Fig. 2. ER Valve (A): Flat and (B): Irregular.

정현파로 진동시켜 ER밸브 내부를 유동하는 ER유체를 진동 유동으로 하여 ER밸브에 일정세기의 전기장을 인가할 수 있도록 하였다. ER밸브에서의 압력손실은 압력변환기로 측정하였으며 ER밸브는 평탄한 전극을 평행하게 설치하여 사용하였다. 본실험에서는 주파수 1 Hz와 진폭  $3.7 \times 10^{-3}$  m로 일정한 진동수에 대해서 ER밸브에 인가한 전기장 세기에 의해 생기는 감쇠력이 제어 가능한지를 평가하고 빙행유체모델로 설계된 ER밸브를 이용한 댐퍼의 모델과 비교하였다.

본 실험에서 사용된 ER유체는 일본의 브릿지스톤(Bridgestone)사에서 제작된 BA-1형의 탄소질미립자 분산형 ER유체이다. 이 분산형 ER유체는 직경이 수  $\mu\text{m}$ (최소 1.5  $\mu\text{m}$ )인 탄소질 분체의 미립자가 분산되어 있으며 유체의 작동영역에서 안정성이 탁월한 성능이 있고 3 kV/mm, 25°C, 366/sec에서 전단응력은 약 900 Pa, 전류밀도는 10  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  정도이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 빙행유체로서의 거동

ER유체는 전기장 인가시 빙행유체와 같은 항복전단응력이 생성되기 때문에 ER유체가 유동시 빙행유체와 거의 흡사한 특성을 가지게 된다. 이에 전기장 인가시 ER유체의 거동에 대한 실험결과를 정리하기 위해 다음과 같이 기초식을 유도한다 (Fig. 3 참조)[10,14].

유로높이 h에 대해서 유로폭이 충분히 넓은 2차원 전단류로 근사하면 전단응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{hx} = \tau_y - \eta_B \frac{du}{dh} = h \frac{\Delta P}{2l} \quad (1)$$

전단응력은  $h=0$ 에서  $\sigma_{hx}=0$ , 관벽  $h=H/2$ 에서 최대치  $\tau_w$ 가 된다. 따라서  $h=h_y$ 인 곳에서  $\sigma_{hx}$ 는 항복치  $\tau_y$ 와 같아지므로 비플러그 높이 h,와 항복응력과의 관계는 다음과 같다.

$$\tau_y = h_y \frac{\Delta P}{2l} \quad (2)$$

$h > h_y$ 인 범위에서는 식 (1), (2)로부터

$$\sigma_{hx} = \tau_y \frac{h}{h_y} \quad (3)$$

식(1), (3)과 경계조건( $h=H/2$ 에서  $u=0$ )으로부터 다음과 같이

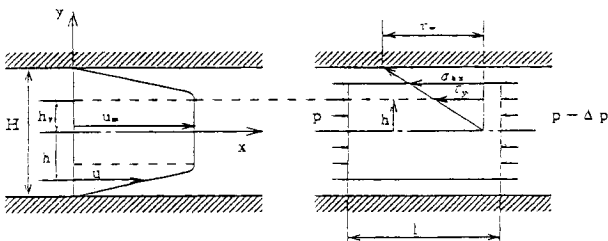


Fig. 3. Bingham flow model.

된다.

$$u = \frac{\tau_y}{\eta_B} \frac{1}{2h_y} \left( \frac{H^2}{4} - h_y H + 2h_y h - h^2 \right) \quad (4)$$

여기서 다음과 같이 두면

$$a = \frac{2h_y}{H} = \frac{\tau_y}{\tau_w}, \quad h' = \frac{2h}{H} \quad (5)$$

다음 식과 같이 Fig. 3에 나타내는 속도분포형을 얻을 수 있다.

$$u = H \frac{\tau_y}{2\eta_B} \left( \frac{1 - 2a + 2ah' - h'^2}{2a} \right) \quad (6)$$

여기서, u는 유속,  $\eta_B$ 는 점도, H는 전극간격,  $\tau_w$ 는 전단응력, a는 비플러그 반경(Relative plug radius)이다. 플러그부 유속  $u_m$ 은 식 (6)에서  $h'=a$ 로 두면 다음과 같이 된다.

$$u_m = H \frac{\tau_y}{2\eta_B} \frac{(1-a)^2}{2a} \quad (7)$$

$a \ll 1$ 일 때의 유량은 식 (6), (7)로부터 다음과 같이 된다.

$$q = \frac{H^2 \tau_y}{\eta_B} \frac{2-3a}{12a} = \frac{H^2 \tau_w}{2\eta_B} - \frac{H^2 \tau_y}{4\eta_B} \quad (8)$$

따라서, 식 (2), (6), (8)로부터 전단응력  $\tau_w$ 는 다음과 같이 된다.

$$\tau_w = \left( q + \frac{H^2 \tau_y}{4\eta_B} \right) \frac{6\eta_B}{H^2} = \eta_B \frac{6q}{H^2} + \frac{3}{2} \tau_y \quad (9)$$

여기서  $\frac{6q}{H^2}$ 는 유체의 전단속도를 나타낸다.

Fig. 4는 평탄한 ER밸브에서 전단속도와 전단응력의 관계를 나타낸다. 인가전압의 변화와 함께 항복응력은 크게 변화하나

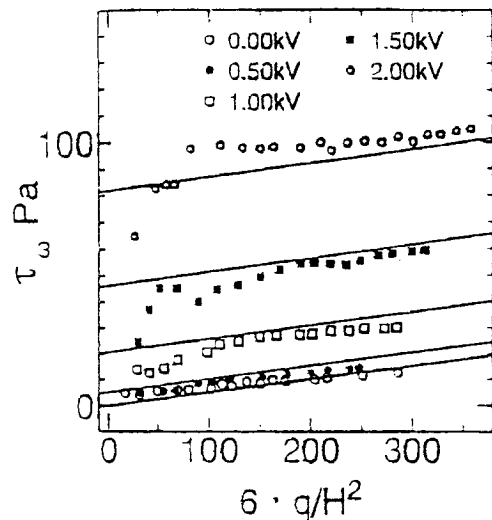


Fig. 4. Shear stress vs. shear rate at flat ER valve.

겉보기 점도는 거의 변화가 없다. ER유체의 종류에 따라 전단 변형에 의한 유체내의 저항력으로 인해 점도가 크게 증가하는 경우도 있지만 본 실험에 사용된 ER유체의 분산질 입자의 직경이 작아서 분극율이 크기 때문에 전기력에 의한 입자간의 인력이 점성력에 비해 크기 때문으로 생각된다. 또 ER효과에 의한 압력상승도 보이고 있다. 일반적으로 쌍극자 상호작용에 기인하는 입자간의 인력이 전기장 세기의 제곱에 비례하므로 전단응력도 인가된 전기장세기의 함수로 나타낼 수 있고 특히 낮은 전단 속도 영역에서 실험장치 및 측정에 의한 오차와 함께 유체의 유동이 형성된 클러스터에 미치는 영향이 작기 때문에 생각되는 결과를 보이므로 최소자승법에 의해 전기장의 세기에 의한 함수로 근사하여 Fig. 4에 실선으로 나타내었다. Fig. 5는 평탄한 ER밸브에서 인가전압의 변화에 의한 손실계수와 레이놀즈수와와의 관계를 나타내고 있다. 인가전압을 높임에 따라 손실계수가 증가하는 현상을 쉽게 알 수가 있다. 이 값을 전압과 레이놀즈수에 관한 함수로서 최소자승법을 적용하여 실선으로 표시하였다. 여기서  $\lambda$ 는 손실계수[14]로서 관마찰손실을 나타내는 Darcy-Weisbach식으로부터 유도되며, Re

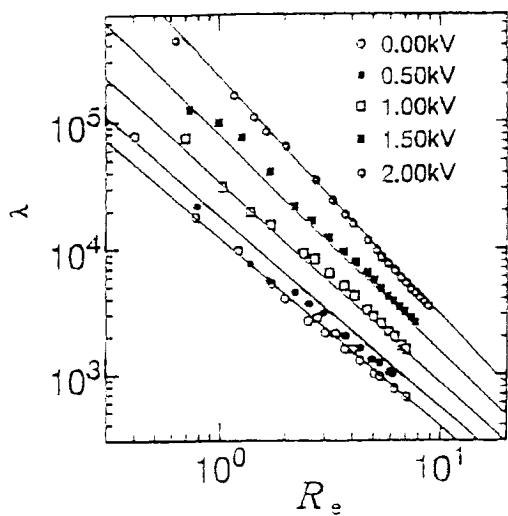


Fig. 5. Friction factor at flat ER valve.

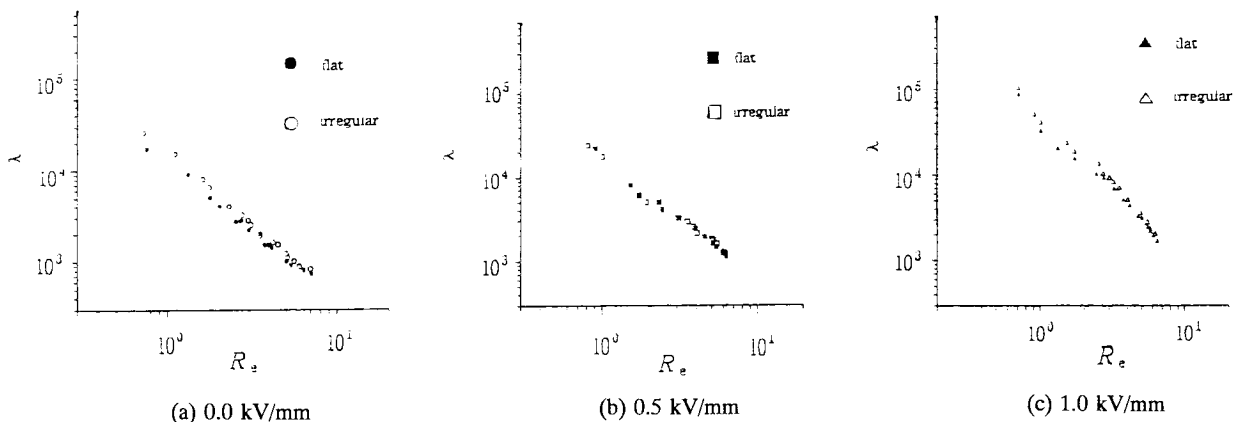


Fig. 6. Friction factor at irregular ER valve.

는 레이놀즈수를 나타낸다.

### 3.2. ER밸브의 전극형상의 변화에 따른 특성

본 실험에서는 유로(전극)의 형상변화에 따른 ER유체의 유동특성의 변화를 보기 위해 제시된 실험장치(Fig. 1(a))를 이용하였으며 Fig. 2와 같이 평탄한 ER밸브와 요철로된 ER밸브에서의 레이놀즈수와 손실계수의 관계를 알아보았다.

Fig. 6(a)는 E=0.0 kV/mm일 때 평탄한 ER밸브와 요철된 ER밸브에서의 Moody 선도이다. 요철이 있는 경우가 전체적으로 조금 윗쪽에 위치하고 있다. 이것은 요철이 있는 유로의 유동이 흩어져 압력손실이 좀더 커짐을 나타내고 있다. Fig. 6(b)는 E=0.5 kV/mm의 경우인데 양자의 차이는 거의 나타나지 않는데 이것은 E=0.5 kV/mm의 전압인가로 평탄유로인 경우는 압력손실이 좀더 커지는 반면 요철유로인 경우는 전기장이 오목한 부분에 브릿지를 형성할 정도로 충분치 않고 만약 브릿지를 형성하더라도 유동에 견딜만한 큰 입자간 인력이 되지 못한다. 또 돌출부에서 형성된 클러스터도 전단운동으로 인해 오목부를 지날 때에 파괴되어버리기 때문이라 생각된다. Fig. 6(c)는 E=1.0 kV/mm인 경우로서 요철부의  $\lambda$ 가 큼을 알 수 있다. 이것은 전기장 강도가 오목부에서의 클러스터가 브릿지를 형성할 정도로 강하며 형성된 브릿지는 돌출부의 측면에 의해 전단운동을 일으키기 어렵기 때문이다. 또 전기장 강도는 전극간의 폭에 반비례 하기 때문에 돌출부에 있어서는 전기장 강도가 강하므로 브릿지가 움직이기 어렵다.

Fig. 6(b), (c)에서 보면 레이놀즈수가 커짐에 따라 손실계수가 거의 일치함을 알 수 있는데 ER효과에 의한 전단응력의 상승에 비해, 유속에 의해 지배되는 전단응력의 크기가 훨씬 커지기 때문이다. 즉 레이놀즈수가 커지면 전기장 인가로 인한 항복전단응력의 영향은 나타나지 않는다.

그리고 빙행유체의 관내유동에 있어서는 평균유속이 같은 경우라도 항복응력, 점도의 크기에 따라 플라그부 크기의 차에 의해 벽면 전단응력이 달라지므로 결국 압력강하의 차이가 발생한다. 즉 속도분포에 대해서 상사가 성립하지 않더라도 압력손실에 관해서 상사가 성립하면 되는 것이다. 따라서 간단한

계산에 의해 [14] 빙행유동에 있어서의 손실계수와 레이놀즈수와의 관계인 이들 값들을 총류역의 뉴턴유체와 상사시켜 보면 대부분이  $\lambda \cdot R_c \approx 90$ 의 선에 가까운 값이 되는 것을 알 수 있는데 이 값은 Fig. 5과 Fig. 6에서의 0.0 kV의 경우의 전압을 인가하지 않은 값과 거의 일치한다. 이것은 본 실험에서 사용한 ER유체가 고농도의 현탁액으로 빙행성을 갖고 있고 또 동시에 유동을 빙행유체의 유동으로 취급할 수 있음을 시사한다.

**3.3. ER밸브를 이용한 댐퍼 실험(진동류 실험)**

본 실험에서는 ER밸브를 이용한 댐퍼실험장치(Fig. 1(b))에서 진동류 입력을 주었을 때 인가전기장 때문에 ER밸브에 항복전단응력에 의한 압력손실이 발생한다. 이러한 압력손실 때문에 발생하는 댐퍼 감쇠력을 진동요소의 감쇠성분으로 이용하려고 한다. 그렇게 하기 위해서는, 우선 압력손실을 예측할 수 있는 ER 댐퍼와 ER 밸브 간의 상호 관계를 표현하는 수학적 모델이 세워야 하는데 ER 댐퍼를 모델링하기 위해 연속 방정식을 도입하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \tag{10}$$

$$\frac{1}{\beta} = -V \frac{dP}{dV} \tag{11}$$

여기서, V는 제어체적의 부피,  $Q_{in}$ 는 제어체적으로 들어오는 유량,  $Q_{out}$ 는 제어체적에서 나오는 유량, P는 제어체적의 압력,  $\beta$ 는 유체의 압축성계수이다.

Fig. 7은 댐퍼 모델을 나타낸 것이고  $\beta_{ER}$ 는 본 ER 유체의 압축성계수,  $V_c$ 는 댐퍼 압축실의 체적,  $V_r$ 는 댐퍼 반동실의 체적,  $P_c$ 는 댐퍼 압축실의 압력,  $P_r$ 는 댐퍼 반동실의 압력,  $A_p$ 는 피스톤의 면적,  $A_r$ 는 로드 면적,  $Q_{ER}$ 는 ER밸브에 흐르는 유량,  $\dot{x}$ 는 피스톤로드의 속도이다.

식 (10)과 (11)을 이용한 댐퍼의 압축실/반동실에서의 유동 모델은 아래와 같다.

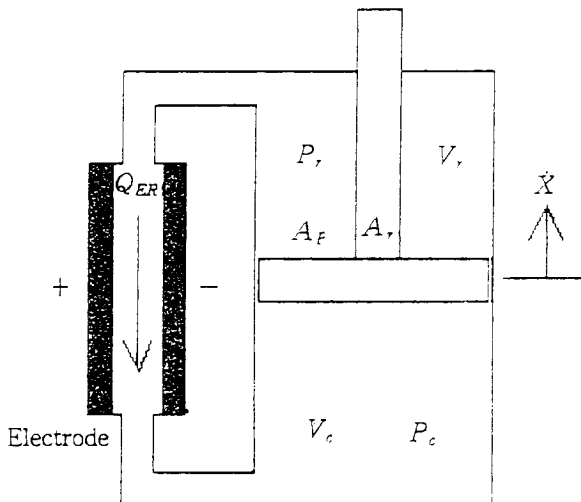


Fig. 7. ER Damper.

$$\beta_{ER} V_c \frac{\partial P_c}{\partial t} = -A_p \dot{x} + Q_{ER} \times \text{sgn}(\dot{x}) \tag{12}$$

$$\beta_{ER} V_r \frac{\partial P_r}{\partial t} = (A_p - A_r) \dot{x} - Q_{ER} \times \text{sgn}(\dot{x}) \tag{13}$$

식 (12)와 (13)을 살펴보면 ER 댐퍼를 시뮬레이션하기 위해선  $Q_{ER}$ 의 수학적 모델이 필요함을 알 수 있다.  $Q_{ER}$ 는 ER 밸브에서의 유동의 압력차로 표현될 수 있고 이 압력차는 기본적인 유로형상에 따른 압력손실( $\Delta P$ )과 빙행유동에 의해 생기는 압력손실( $\Delta P_c$ )로 두 가지 성분으로 나눌 수 있다.

$$\Delta P = \Delta P_o + \Delta P_c \tag{14}$$

실제적인 빙행 유동에서 보면 전극 간의 압력차가 빙행유동의 항복전단응력에 의해서 생기는 응력에 의한 손실을 이기지 못하면 거의 유동이 없는 상태이므로 다음과 같은 식으로 정의한다.

$$Q_N = \frac{h^3}{12\eta} \frac{w}{L} \Delta P \tag{15}$$

$$Q^* \equiv \frac{Q_{ER}}{Q_N} \tag{16}$$

$$\Delta P^* \equiv \frac{\Delta P}{\Delta P_c} = \frac{\Delta P}{2(Lh) \tau_y} \tag{17}$$

$$\text{if } \Delta P^* > 1 \quad Q^* = 1.0 - \frac{1.5}{\Delta P^*} \tag{18}$$

$$\text{if } \Delta P^* \leq 1 \quad Q^* = 0 \tag{19}$$

여기서  $\Delta P^*$ 는  $\Delta P_o$ 와  $\Delta P_c$ 의 압력비,  $Q_N$ 는  $\Delta P_o$ 에 의해서 생기는 유량,  $Q_{ER}$ 는 ER밸브 사이에서의 유량,  $Q^*$ 는  $Q_N$ 와  $Q_{ER}$ 의 유량비, w는 유로의 폭,  $\eta$ 는 ER유체의 점도, L는 유로의 길이이다.

식 (15)~(19)를 보면, 식 (19)는 압력차가 항복전단응력에 의한 손실을 넘지 못할 때의 경우를 말하며 식 (18)은 유동이 존재할 때 식 (8)을 정리한 것이고 두 식의 의미는 총압력차가 항복전단응력에 의한 압력차보다 적을 때는 유동이 발생하지 않음을 말한다.

위와 같은 댐퍼와 밸브의 두 가지 모델을 이용하여 시뮬레이션한 결과와 ER밸브에 각각 0.0 kV/mm, 1.0 kV/mm, 2.0 kV/mm을 인가한 상태에서 댐퍼의 스트로크에 한주기의 정현파 입력을 주었을 시의 차압 출력을 비교한 것을 Fig. 8(a), (b), (c)에 나타내었다. Fig. 8(a)를 보면 전기장을 가하지 않은 상태에서는 ER밸브에서의 손실이 거의 없기 때문에 감쇠력이 작음을 알 수가 있다. Fig. 8(b)에서는 전극에 1.0 kV/mm의 전장이 인가된 상태이므로 그에 따른 항복응력이 생겨 그에 손실에 따른 압력차가 감쇠력으로 작용함을 알 수가 있다. Fig. 8(c)에서는 종전의 두 결과 보다 더 큰 감쇠력이 형성됨을 알 수가 있으며 그것은 더욱 더 강한 체인이 형성되어 있고 항복전단응력이 크기가 커짐을 알 수가 있다. Fig. 8(a), (b), (c)에서 t=0에서의 초기의 압력강하가 음의 값을 가지는데 이것은 유로에 전기장이 걸려진 상태에서 강제적인 유동을 발생시키므로 항복전단응력에 의해서 유동에 대한 역방향힘(back force)이

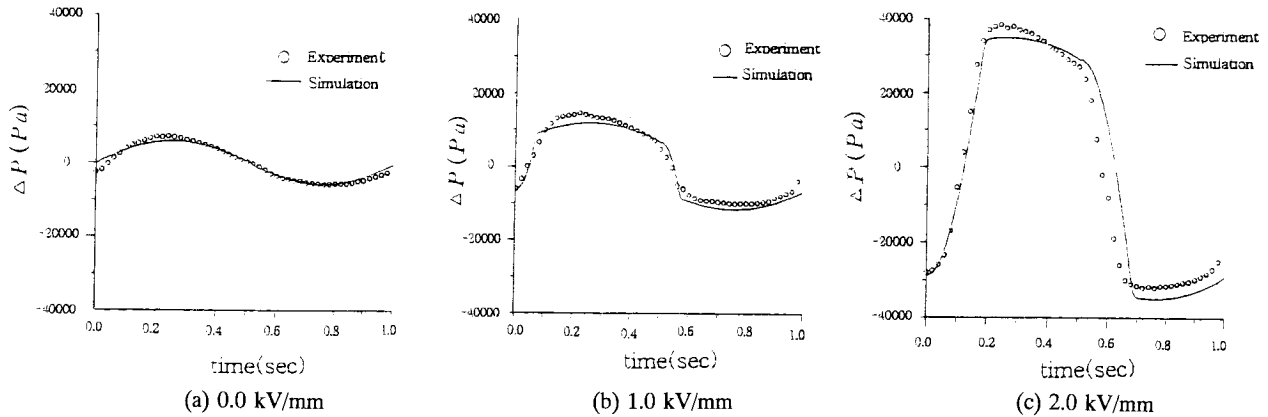


Fig. 8. Differential Pressure change (ER damper).

존재함을 알 수가 있다. 세 가지 경우에서 보면 그 역방향힘이 항복전단응력의 크기에 의해 결정됨을 또한 알 수 있으며 이것은 역방향힘을 이길 때까지 실제적인 ER 밸브로부터의 출력유동이 발생하지 않음을 알 수가 있다. 그리고 전기장의 세기가 커짐에 따라 정현파와 왜곡현상이 일어나는데 이것은 ER 유체의 점탄성특성[13,14]과 전기장 세기의 증가로 인한 고체화현상에 기인하는 것으로 생각되며 또 ER 밸브 출력유동이 항복전단응력을 이길 때까지 일어나지 않아서 계속 압축이 된 후 항복전단응력을 이기는 ER 밸브의 압력상태가 되면 유동이 일시에 발생하기 때문이다. 그리고 압축실과 반동실 간의 압력차가 바로 댐퍼의 감쇠력을 작용함을 알 수가 있다. 결국 전기장이 커짐에 따라 감쇠력이 커짐을 알 수가 있고, 전기장을 이용하여 감쇠력의 제어가 가능함을 나타내는 것이다. 또한 시뮬레이션 결과가 실험결과와 거의 일치함은 밸브의 수학적 인 모델이 실제적인 유동과 거의 일치함을 알 수 있다.

결국 미시적으로는 점탄성 특성 및 클러스터와 유동간의 상호작용, 유동장에 따라 유체의 이방성에 기인하는 전단력 작용의 불균일성 등으로 인해 빙행특성과 약간의 차이를 보이고 있으나 거시적으로는 빙행유체로 취급할 수 있음을 시사한다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 ER유체의 유동현상을 유체역학적으로 해석하기 위해 빙행유동의 모델을 제시하고 ER유체의 유동특성을 알아보기 위해 정상 및 진동유동과 함께 응용으로서 ER밸브 및 ER 댐퍼에 관한 실험을 수행하였고 그 결과를 다음과 같이 요약한다.

1. 항복전단응력은 전기장 세기의 제곱에 비례하여 증가함을 알 수 있다.
2. 평탄유로와 요철유로에 있어서 전기장세기와 유속의 변화시 손실계수에 의한 ER효과의 상이함이 확인되었고 레이놀즈수가 커지면 항복전단응력의 영향의 차이는 나타나지 않았다.
3. 진동류에서는 압력손실의 증가 및 항복전단응력에 의한

위상차를 고려함에도 불구하고 점탄성 특성으로 인한 정현파의 왜곡 현상을 보이지만 ER밸브와 ER댐퍼의 수학적 모델을 시뮬레이션한 결과는 실험결과와 거의 일치한다.

4. ER유체를 이용하여 ER밸브에 인가된 전기장의 세기에 따라 ER댐퍼의 감쇠력을 제어할 수 있음을 확인하였다.

5. ER유체는 점탄성 특성 등 미시적 현상을 고려할 경우는 단순히 빙행유체로 취급하기 어려우나 거시적으로는 빙행유체로 취급할 수 있음을 확인하였다.

본 실험과 해석은 ER유체의 유동의 메커니즘을 규명하기 위해 유체역학적인 접근을 시도한 것이고 유동의 메커니즘을 규명하기 위해선 입자간의 체인 구조 및 입자간의 상호작용하는 힘에 관한 기초 연구가 필요하다고 본다. 차후에는 유동해석과 더불어 입자간의 영향과 상호작용에 대해 심도깊은 연구를 진행해 볼 계획이다.

#### 후 기

본 연구에 도움을 주신 일본동경공대의 山根 隆一郎교수와 島倉 廣明씨께 감사드립니다.

본 연구는 1996년도 학술진흥재단의 신입교수과제 연구지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사를 표합니다.

#### 참고문헌

1. D.L. Klass and T.W. Matinek, *J. Appl. Phys.*, **38**, 75(1967).
2. A.R. Johnson, *Electrorheological fluid*, 424(1991).
3. S. Morishita and J. Mitsui, *SAE Paper*, **922290**, 92(1992).
4. 김상국, 정동운, 최운대, *대한 기계학회논문집*, **18**, 2706(1994).
5. 최영태, *한국자동차공학회논문집*, **2**, 62(1994).
6. 中野政身, *電氣粘性流體와 應用에 관한 第 6回 研究分科會資料*, JSME., 1(1993).
7. R.T. Bonnecaze and J.F. Brady, *J. Chem. Phys.*, **96**, 2183(1992).
8. D.J. Klingenberg, F. van Swol and C.F. Zukoski, *J. Chem. Phys.*, **94**, 6160(1991).
9. Y. Kita, T. Oshima, H. Takase, I. Kondo and S. Hujisawa, *Trans. of JSME., Series B*, 59, 42(1993).

10. M. Nakano and T. Yonekawa, *Trans. of JSME, Series B*, **61**, 166(1995).
11. Z. P. Shulman, E.V. Korobko, and Y.G. Yanovskii, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **33**, 181(1989).
12. Y.Z. Xu and R.F. Liang, *J. Rheol.*, **35**(7), 1355(1991).
13. W.S. Yen and P.J. Achorn, *J. Rheol.*, **35**(7), 1375(1991).
14. 富田幸雄, "レオロシ", コロナ社, 東京, 1975, p.307.
15. T.C.B. McLeish, T. Jordan and M.T. Shaw, *J. Rheol.*, **35**(3), 427(1992).
16. T.C. Jordan and M.T. Shaw, *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, **24**, 849(1989).