

## 전기유동유체를 이용한 실린더형 밸브의 성능 고찰

김기선\*, 정달도\*\*, 이효정\*, 최승복\*\*\*, 정재천\*\*\*

### Performance Investigation of a Cylindrical Valve Featuring Electro-Rheological Fluids

K. S. Kim\*, D. D. Jung\*\*, H. J. Lee\*, S. B. Choi\*\*\*, C. C. Cheong\*\*\*

#### ABSTRACT

A multi-cylindrical hydraulic valve incorporating with an electro-rheological(ER) fluid is developed in this study. Field-dependent Bingham properties of the ER fluid are exploited to devise the valve system which features fast system response as well as simple mechanism. The fast response is accrued from almost instant response characteristics of the ER fluid itself, and the mechanism configuration is simplified since no mechanically moving parts are required. The material properties of the ER fluids to be utilized for modeling of the proposed valve system are firstly tested with a couette-type electroviscometer. The design and manufacturing processes are then undertaken on the basis of model parameters. The performance characteristics of the valve system are evaluated in terms of pressure variations with respect to the intensity of employed electric fields and flow rates.

**Key Words :** Electro-Rheological Fluid(전기유동유체), Bingham Behavior(빙햄 거동), Cylindrical Valve System(실린더형 밸브 시스템), Electric Field(전기장), Pressure Variation(압력 변화)

#### 1. 서 론

유압 시스템의 메카니즘을 구성하는데 있어 밸브는 가장 기본적인 중요한 구성 요소로서 유체의 압력과 유량을 기계적인 이동 장치에 의해 조절하여 제어 대상 시스템의 전달력을 제어한다. 기존 유압 시스템에 있어서, 작동유체와 구성 요소의 한계성과 연계된 밸브의 개폐 시간에 따른 느린 응답성과 정확한 위치 제어의 어려움 등을 극복하고자 많은 연구가 진행되어오고 있다. 기계적인 설계 구조 변경이나 피이드백(feedback) 제어와 연계된 서보(servo) 제어 시스템 적용 등의 많은 발전이 있었지만, 점차적으로

기계의 메카니즘이 고속 정밀성의 높은 성능을 요구함에 따라 기존 밸브 시스템이 복잡해지고 저가의 우수한 성능/비용을 구현하기 어렵게 되었다. 이러한 문제점을 극복하는 일환으로 본 연구에서는 소위 스마트(smart) 유체라 불리는 전기유동(electro-rheological ; ER) 유체(이하 'ER유체'라고 표현)를 작동유체로 하여 빠른 응답성과 정밀한 압력 가변성을 장점으로 하는 새로운 밸브 시스템을 제안하여 그 성능을 고찰하고자 한다.

ER 유체라 함은 가해지는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 것으로, 외면상 가장 두드러진 특징은 전기장 무부하시의 액체 상태가 전기장

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* (주) 롯데 기공

\*\*\* 인하대학교 기계공학과

부하에 따라 고체 상태로 상변화(phase change)하는 것이다. 이 때, 여기서 발생하는 ER 유체의 항복응력은 부하되는 전기장의 함수가 되며, 밸브 시스템에서 요구되는 크기의 압력을 전기장의 크기로서 조절할 수 있다. 전기장에 대한 유체의 반응이 순간적으로 이루어지므로 기존 유압 시스템에서 구현될 수 없는 매우 빠른 응답 조건을 충분히 만족시키고, 또한 연속 가변적인 실시간 동작이 가능하다.

실제 설계 및 제작면에서 살펴보면, 기존 밸브 장치는 복잡적이고 정밀한 부품들로 구성되어 있는 반면에, ER 유체를 적용하게 되면 압력과 유량을 조절하기 위해 필요한 전기장 공급 장치, 다시 말하여 전극판만을 첨가시킴으로서 밸브 내부의 기계적인 이동 장치가 필요 없이 액츄에이터(actuator)와 밸브 부분을 하나의 단일 구조로 형성, 장치 설계의 단순화가 가능하다. 또한, ER 유체에 가해지는 전기장의 크기만으로 외부 제어 대상 시스템에 전달되는 유체의 압력을 실시간에 연속적으로 가변함과 동시에 기존보다 더욱 정밀한 압력 변화를 통한 고정도의 제어성으로 경제성과 더불어 신뢰성면에서 강점을 갖게 된다. 실제 제어성 측면에서도 유체 자체의 힘을 제어함으로써 외부 시스템의 속도와 위치 제어가 동시에 가능하게 된다. 전체 제어 시스템을 구성할 경우에는 전기장 공급 장치와 측정 장치와의 연계를 통하여 미리 설정된 전기장과 압력 변화에 관한 프로그램에 의해 연속적인 전기장을 발생시켜 기존 밸브 시스템 비하여 보다 정확하고 간편하게 요구 성능을 구현할 수 있다.

ER 유체를 이용한 밸브(이하 'ER 밸브'라고 표현)는 ER 유체를 발견한 1949년 이후부터 가장 적합한 응용장치로서 인식되어, 댐퍼(damper) 개발과 함께 제시되어왔지만 실질적인 연구에 대한 접근은 1980년대 중반에 들어와서 본격적으로 시작되었다. ER 유체 자체가 갖고 있는 몇가지 문제점으로 인해 아직 상용화된 것은 없으나, 잠재적 응용성으로 인해 실제 메카니즘에 대한 효율성과 우수성에 대한 심도 깊은 연구등으로 선진국에서는 시제품 출현과 함께 그 중요성이 크게 증가하고 있다. 특히 유압 시스템 부문과 자동차 관련 부품 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있는데, ER 유체에 대한 전기장 부하에 따른 시스템의 정확한 위치 제어와 빠른 응답 특성을 이용하여 속압소버(shock absorber), 진동 절연장치(vibration isolator), 엔진 마운트, 클러치 및 브레이크 시스템 그리고 지능 구조물 등에서 다양한 가능성을 제시해 주고 있

다.<sup>(1)-(5)</sup> 한편, 유압 시스템에 대해서는 사용 목적과 밸브 구성 방식에 따라 다양한 회로를 구성할 수 있으며, ER 밸브를 복수개의 복합적인 회로로 구성할 경우에는 각 밸브에 대한 독립적인 제어 방식에 의해 더욱 다양한 성능을 나타낼 수 있다. 따라서, 성공적인 능동 제어형 유압 시스템 구성에 있어서 가장 중요한 과제는 성능이 우수한 ER 밸브를 개발하는 것이라 할 수 있다.<sup>(6)(7)</sup>

이러한 목적을 달성하기 위하여, 본 연구에서는 먼저 ER 유체를 자체 조성하여 ER 유체의 고유 특성치인 항복 전단응력(yield shear stress)값을 측정하였다. 전기장의 크기와 ER 유체의 고체 입자 농도에 따른 항복전단응력값은 자체 제작한 electroviscometer를 이용하여 얻었다. 전기장 변화에 따른 ER 유체의 특성이 ER 밸브에 미치는 영향을 고려하여 밸브를 모델링하였고, 이러한 모델링에 근거하여 구조의 단순성과 빠른 응답성을 장점으로 하는 ER 밸브 시스템을 제작 하였다. 제안된 ER 밸브는 다단의 실린더(multi-cylindrical valve)형으로 구성되었으며, 성능 분석을 위한 실험 조건으로서 전기장과 유량의 변화를 선택하여 이에 따른 특성 변화 즉, 압력변화를 고찰하였다.

## 2. ER 유체의 역학적 특성 실험

ER 유체는 일반적으로 비전도성 액체속에 전도성이 강한 입자들을 분산시킨 콜로이드 용액이며, ER 효과를 정의하면 전기장의 부하에 따라 유체의 항복전단응력이 변화하는 현상이다. 이러한 현상은 1949년 실리카를 입자로 한 유체의 점성이 전기장 부하에 따라 변화되었음을 처음 발표한 Winslow에 의해 알려졌다.<sup>(8)</sup> 그 후 많은 연구자들에 의해 여러 ER 유체의 조성 방법, 메카니즘 및 응용성에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.

이러한 ER 유체 특성이 Fig.1에 나타나 있으며, 전기장 무부하시 유체중의 입자가 양극 또는 음극으로 자유로이 운동을 하는 Newtonian 유체 상태에서 전기장 부하시에는 유체 중에 분산된 입자가 체인형 구조를 형성, 항복 응력전까지는 유체 유동을 보이지 않다가 항복 응력과 같아 지면서 흐름이 시작되는 Bingham 유체 상태로 변화하게 된다. 다시 말하여 Fig.1의 아래 그림에서 보는 바와 같이 외부에서 가해지는 전단력에 대해 그 운동 방향에 대한 저항성을 갖게 된다.<sup>(9)</sup> 입자의 종류로는 전분, 셀룰로이드, 실리카 등으로부터 전용으로 합성된 입자에 이르기까지 많은

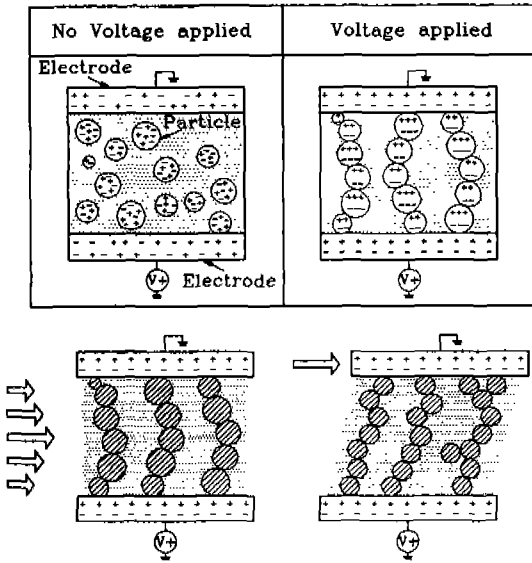


Fig. 1 Field-dependent characteristics of electro-rheological fluids

종류가 사용되고 있다. 이렇게 전기장 무부하시의 등방향(isotropic)성질에서 전기장 부하시의 이방향(anisotropic)성질로서의 상변화는 가역적으로 이루어지고 필요한 전기장의 크기는 약 1~3 kV/mm (유체 두께)이나 전류 밀도(current density)가 약 10  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  이하이기 때문에 요구 전력은 매우 낮다. 한편, 대부분의 ER 유체의 경우 상변화를 위한 반응 시간은 1~5ms 정도로 알려져 있다.

Bingham 유체 성질에서 도출된 ER 유체의 전단 거동식은 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>(10)(11)</sup>

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma}, \quad \tau_y = \alpha E^x \quad (1)$$

여기서  $\tau$ 는 유체의 전단 응력을 나타내고,  $\eta$ 는 유체의 점성계수이며,  $\dot{\gamma}$ 는 전단비(shear rate)를 나타낸다. 그리고,  $\tau_y$ 는 유체의 항복전단응력을 표현하는 것으로 전기장(E)의 증가와 더불어  $\alpha E^x$ 의 함수 관계로 알려져 있다. 식(1)에서 보는 바와 같이 전기장 무부하시에는 ER 효과가 없어지므로 유체의 점성력에 의한 전단력만을 발생시키지만 전기장이 가해진 경우에는 이에 따른 부가적인 전단력

$\tau_y$ 가 발생되어 전체 전단력을 증가시키며 임의로 변경 가능한 힘이다. ER 유체의 전단 거동식(1)에서 상수  $\alpha$ 와  $x$  값은 고체 입자 농도와 전기장 크기에 대한 ER 유체의

고유 특성치로서 실험을 통해 구할 수 있으며, 이러한 관계에 따라 전기장으로 인한 전단 응력의 증가 및 전체 항복 응력 크기 등을 예측할 수 있다. 본 연구에서는 같은 용매에 입자 중량비가 다른 2 종류의 ER 유체를 자체 조성하여 이들 유체의 Bingham 거동 실험을 수행하였다.

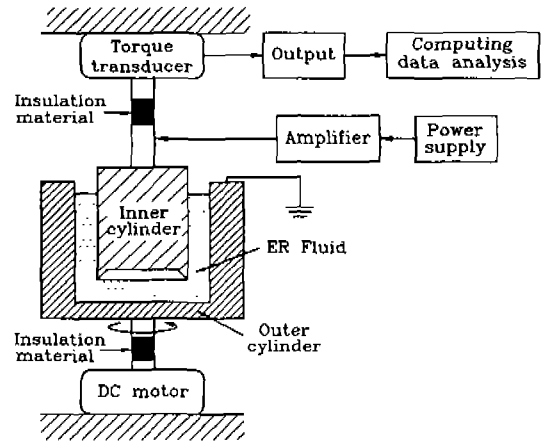


Fig. 2 Schematic diagram of the apparatus for electro-rheological measurements

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig.2에서 보는 바와 같이 동축실린더의 couette형으로 구성하여 자체 제작하였다. 안쪽 실린더의 직경은 20mm이고 길이는 45mm이다. 바깥쪽 실린더의 내경은 22mm이고 길이는 50mm로 하였다. ER 유체가 채워질 간극은 1mm로 하였으며, 유체가 접하는 부분의 길이는 45mm로 하였다. ER 유체로부터 전달되는 토크를 측정하기 위하여 안쪽 실린더의 상부에 스트레인 게이지를 부착하였는데 순수 비틀림이 작용하는 것으로 가정하여 휘스톤브리지를 형성하였다. 또한 전기장 부하시 스트레인 게이지에 대한 전기장의 영향을 없애기 위하여 안쪽 실린더의 중간 부분에 고장력 FRP(fiber reinforced plastic)를 사용하여 절연하였다. ER 유체에 전기장을 가하기 위하여 안쪽 실린더의 절연체 아래 부분과 바깥쪽 실린더에 전극부를 만들어 전기장을 형성할 수 있게 하였다. 또한, 주변기기에 대한 전기장의 영향을 고려하여 모터와 바깥쪽 실린더 사이에도 절연을 시켰고, ER 유체에 회전력을 가하기 위하여 DC 모터를 사용하였다. 형성된 전극을 통하여 0~3 kV/mm의 전기장을 가하면서 바깥쪽 실린더를 회전시켜 간극 사이에 채워진 ER 유체로부터 전달되는 토크를 측정하여 유체의 전단력으로 환산

하였다.

본 연구에서 조성된 ER 유체의 용매는 실리콘 오일(점성 : 30cs)이며, 전도성의 입자는 특수처리된 starch계로서 용매에 대한 중량비를 달리하여 각각 ER11(중량비 : 25%)과 ER12(중량비 : 35%)로 분류하여 실험을 수행하였다. ER 유체의 역학적 특성을 고찰하기 위한 실험 조건으로써 전기장은 0~3 kV/mm 까지 1 kV/mm 씩 증가시켰으며, 바깥쪽 실린더를 0~450rpm까지 50rpm씩 단계별로 증가시켰다. 또한, 실험의 오차를 줄이기 위하여 같은 조건에 대하여 5번씩 반복 측정하였고 그 평균값을 이용하여 직선보간하였다.

Fig.3은 실험에서 얻은 결과로서 전기장의 크기에 따른 ER 유체의 전단속도비와 전단응력과의 관계를 나타낸다. 그림에서 보듯이 전기장의 크기가 증가할수록 ER 유체의 동일한 전단속도비에 대한 전단 응력의 크기가 증가하는 것을 알 수가 있으며, 일정한 전기장의 크기에 대하여 유동이 시작된 후에는 전단 응력과 전단 속도비와의 크기가 전기장 무부하시의 경우와 유사한 비율로 증가함을 나타내고 있다. 그러나, 3 kV/mm의 전기장의 경우에는 전단 응력과 전단속도비의 비가 약간 다른 양상을 나타내고 있다. 이는 낮은 전단속도비 영역에서의 높은 전기장에 의한 유체의 모서리부 영향(edge effect)의 증대와, 높은 전기장에 의하여 입자가 과도하게 뭉쳐지는 현상 때문이다. ER11의 경우 식(1)과 같이 표현하면 이 때의 항복응력은 전기장 E에 대하여  $E^{1.42}$ 의 비례관계와 기울기  $\alpha$ 는 99.3의 값으로 결정된다. 한편, 전기장 증가에 따른 전단력의 분포는 무부하시의 ER 유체의 특성과 거의 유사하지만 전단속도비가 증가함에 따라 기울기가 조금 감소함을 볼 수 있는데 이는 ER 유체가 전기장만의 함수가 아니고 전단속도비에도 영향을 받기 때문이다. ER12의 경우는 전기장에 대하여  $142.1E^{1.47}$ 의 관계로 항복전단응력이 증가하며, 이로부터 입자의 중량비가 증가함으로써 항복응력이 증가함을 알 수 있다. ER11과 ER12의 실험 결과에서 나타난 바와 같이 같은 용매라 할지라도 입자 중량비가 들수록 동일한 전단속도비에 대하여 큰 전단응력의 분포를 갖게됨을 알 수 있다. ER 유체의 전기장의 크기와 항복응력과의 관계( $\alpha E^\lambda$ )를 Fig.4에 도시하였다. 입자의 중량비가 25%인 ER11의 경우보다는 35%의 중량비를 갖는 ER12가 큰 항복응력을 나타냄을 명백히 알 수가 있다. 실험에서 고찰한 바와 같이 ER 유체의 특성 변화에 영향을 미치는 인자로는 전기장의

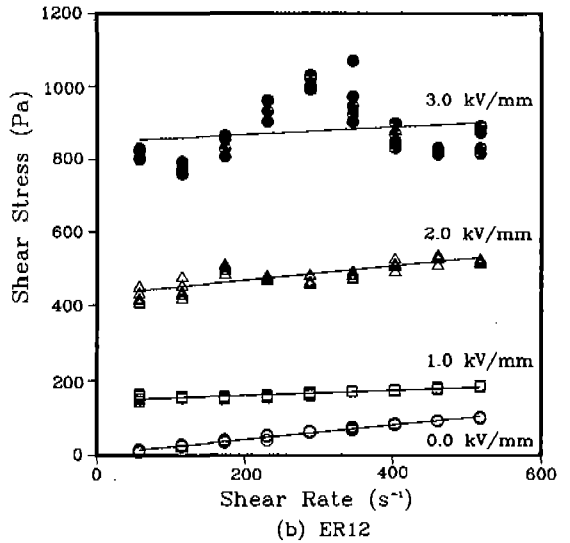
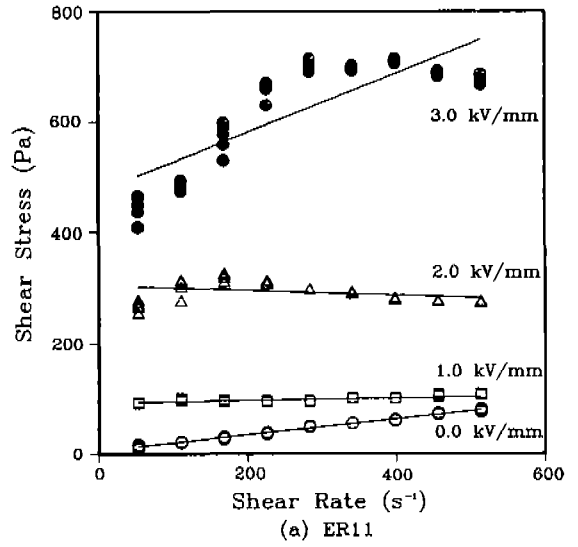


Fig. 3 Shear stress vs. shear rate

크기 뿐만 아니라 입자의 농도 등이 매우 중요하다는 사실을 알 수가 있다. 이상에서 고찰된 ER 유체의 특성 결과는 ER 밸브 설계시 맞닿는 제원 결정에 매우 중요한 기초적 자료가 된다.

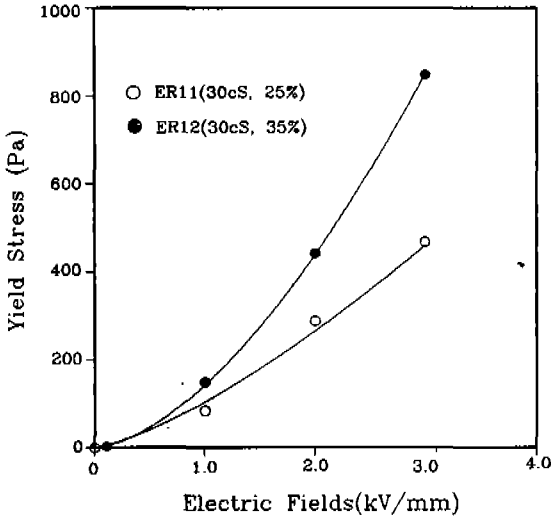


Fig.4 Yield stress vs. electric field

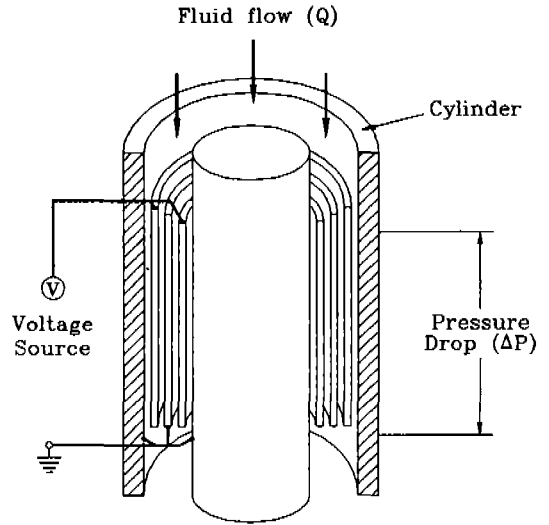
### 3. ER 밸브의 설계 및 제작

Fig.5는 본 연구에서 자체 제작한 ER 밸브의 전체적인 형상과 내부 구조를 나타낸다. 제안된 ER 밸브는 다단의 실린더(multi-cylindrical valve)형으로 각각의 실린더는 고전압 전원 장치와 연결되어 있어 전극판으로서 작용한다. 전원 공급 장치와 각 전극판과의 연결은 Fig.5(a)에서 보는 바와 같이, (+)전원과 (-)전원을 반복적으로 연결하여 전극판을 형성하며 실린더의 전체 갯수가 5개이므로 총 4개의 간극이 형성된다. 이러한 간극 사이에 펌프에 의해 구동된 ER 유체가 밸브로 유입됨에 따라 각 틈새로 흘러 들어가며, 전체 전극판에 요구되는 크기의 전기장을 인가함에 따라 ER 효과를 발생하게 되는 것이다.

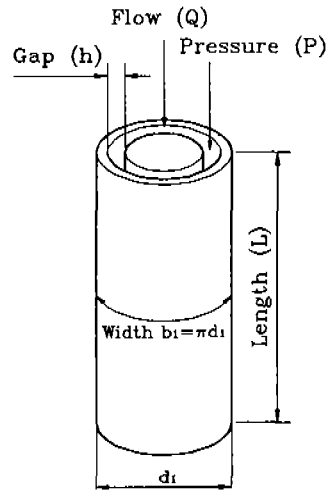
실린더의 재질은 황동이며, 실린더 사이의 간격을 유지하고 전극판의 절연을 위해 플라스틱 재질의 덮개가 양단에서 지지해 주고 있다. 실린더가 맞닿은 덮개 안쪽면에는 십(+)-자형의 안내면을 만들어 유입된 유량이 균일하게 흐를 수 있도록 하였다.

ER 밸브 모델링에 대한 관계식을 도출하기 위해 먼저 전기장을 가하지 않은 경우를 살펴보면 압력 강하는 전적으로 유체의 점성에 기인하며, 틈새를 통과하는 유량에 비례한다. 그러므로, 전기장 무부하시 틈새에 걸친 압력강하  $\Delta P_0$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta P_0 = 12 \eta \frac{L}{bh^3} Q \quad (3)$$



(a) Inside view



(b) Layout

Fig. 5 Schematic diagram of the ER valve

여기서 각각의 설계 변수는 Fig.5(b)에서 나타난 바와 같으며,  $Q$ 는 유량을  $\eta$ 는 ER 유체의 점성 계수를 나타낸다. 평판의 너비  $b$ 는 전체 4개의 실린더를 평판으로 환산하여 합산한 것이다. 다시 말하여, Fig.5(b)는 두 전극판을 도시한 것으로 이 경우에 해당되는 평판의 너비  $b_1$ 은  $d_1$ 의 직경을 갖는 실린더에 대한 것이며 나머지 세 실린더에 대한 평판의 너비도 각각 해당되는 실린더의 직경으로부터 계산될 수 있다.

ER 유체에 전기장이 가해지면 ER 유체의 항복전단응력  $\tau_y$ 는 유체의 유속과는 무관하게 일정한 크기까지 압력을 발생시킨다. 따라서 전기장 부하시 ER 유체의 전단력 증가에 의한 압력 강하는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\Delta P_{ER} = 2 \frac{L}{h} \tau_y \quad (3)$$

다시 말하여, 식(3)은 ER 유체의 거동을 단순화한 것이다.

전극 틈새의 형상에 따른 압력 손실은 무시하고, 동일 단면적에서의 내부 압력은 모든 방향으로 균일하게 작용한다고 가정하면, ER 밸브에서 발생하는 전체 압력 강하는 점성과 ER 유체의 전기장에 따른 전단응력 변화에 의한 압력 강하의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{ER} + \Delta P_\eta \\ &= 2 \frac{L}{h} \tau_y + 12 \eta \frac{L}{bh^3} Q \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 살펴보면, 전기장을 가하지 않았을 경우에는 전기장에 의한 전단응력  $\tau_y$  값이 없으므로 전체 압력은 밸브내의 ER 유체의 점성에 의해서만 영향을 받는다. 그러나, 전기장을 가했을 경우에는 전체 압력  $\Delta P$ 가  $\Delta P_{ER}$ 를 초과하지 않을 경우에는 유체의 흐름이 나타나지 않다가, 전기장의 크기만큼 발생한 저항력을 초과하는 순간부터 유체의 흐름이 다시 시작되게 되는 것이다. 이러한 특징이 밸브 부분과 액추에이터 부분으로 나누어진 기존 밸브 시스템과 크게 다른점으로, 동일한 구조에서 기계적인 이동 장치가 필요없이 두 가지 성능을 나타낼과 동시에 전기장에 따른 ER 유체의 빠른 반응 시간으로 더욱 향상된 이점을 갖게 된다. 그리고 식 (4)로부터 알 수 있듯이 ER 밸브의 성능은 밸브 전극의 너비와 길이, 전극의 간극등과 같은 설계 변수와 인가되는 전기장의 크기 그리고, ER 유체의 성질 즉, 입자의 농도와 전기장에 따른 항복전단응력의 크기등에 의해 영향을 받는다. 특히 전극 간격  $h$ 가 매우 중요한 설계 변수임을 알 수 있다.

설계된 ER 밸브 제원을 살펴보면 밸브 전극의 길이  $L$ 은 100mm이고, 전극판의 너비  $b$ 는 각각 42, 54, 66, 78 mm의 지름을 갖는 실린더를 평판으로 환산하여 전체 754 mm이다. 그리고 유체가 흘러들어갈 수 있는 전극의 간극  $h$ 는 1mm이다. Fig.6은 실제 제작된 ER 밸브에 대한 사진으로서 양단의 알루미늄 재질의 덮개는 다단의 실린더형 전극판과 플라스틱 덮개를 외부에서 밀착 고정해주는 것이며, 사진 왼쪽 부분의 밸브 끝단에서 보이는 나사부는 내부 실린더와 외부 전원 공급 장치와의 열결부이다.



Fig. 6 Photograph of the ER valve

#### 4. 실험방법 및 성능 고찰

Fig.7은 제작된 ER 밸브의 성능 고찰을 위한 전체적인 실험 장치 구성도를 나타낸다. 사용된 모터의 정격 회전수는 1710 rpm이고 펌프는 가변 피스톤형(variable piston pump type)으로 최대 유량은 14 l/min이다. 밸브 양단에는 압력 센서가 장착되어 펌프에서 구동된 ER 유체가 밸브에 입력되기 전의 압력과 전기장을 가한 후 ER 효과에 의해 발생한 압력, 즉 강화된 압력을 측정하였다. 이 센서는 최대 4.9 MPa까지 측정 가능하며 출력 전압은 0~5 V이다. ER 효과에 의한 최종적인 압력 강하는 연속적으로

발생하는데, 실제 압력차를 계산하기 위해 먼저 두 압력 센서부에서 출력되는 전압을 신호 분석기(signal analyzer)에서 0.25초 동안 측정하였다. 그리고, 측정된 데이터를 실제 압력 단위로 환산하여 전체 압력의 평균값을 취한 후 변화된 압력차를 얻었다.

실험 조건은 첫째 사용된 ER 유체의 용매 점도는 30cs로 고정하고 용매에 대한 입자의 중량비를 ER 특성 실험에서와 같이 25%(ER11), 35%(ER12) 두 가지 종류를 선택하였고, 두번째로 펌프에서 출력되는 유량은 최소 2 l/min부터 최대 6 l/min까지 2 l/min의 간격으로 변화시

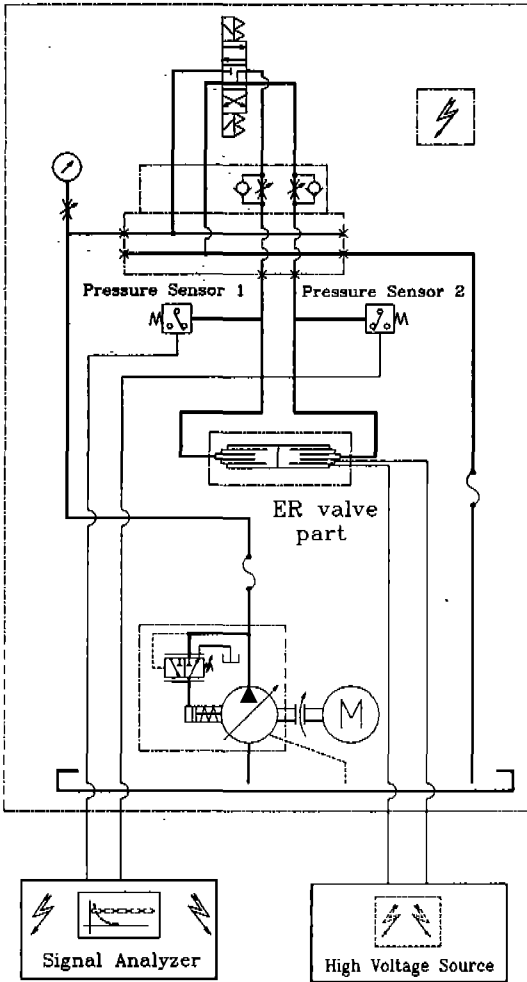
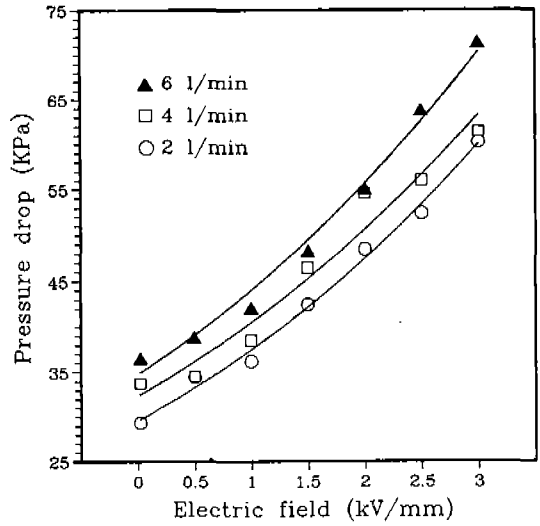
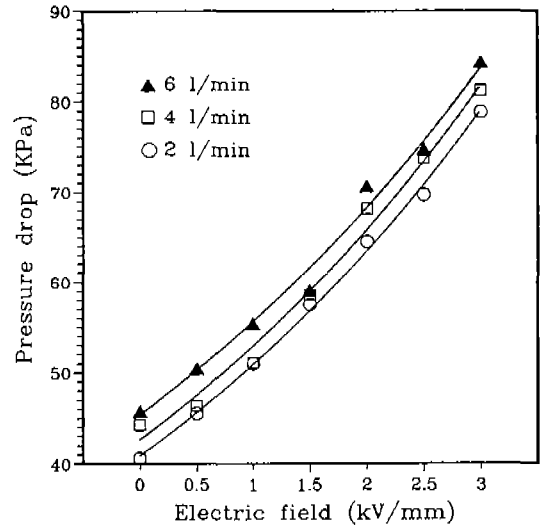


Fig. 7 Experimental configuration for the ER valve test



(a) ER11



(b) ER12

Fig. 8 Pressure variation with respect to electric field

켰다. 세번째로 ER 밸브에 가해진 전기장은 0~3 kV까지 0.5 kV 씩 증가시켜 공급하였다.

실험 절차를 살펴보면 먼저 ER 유체의 입자 중량비 25%인 ER11에 대해 유량을 고정시키고 전기장을 변화시켜 공급하면서 두 압력 센서에서 출력되는 신호 분석을 통하여 압력차를 측정하였다. 그리고, 첫번째 유량 조건에 대한 실험이 끝난 후 계속 유량을 변화시켜 가면서 전기장

크기 변화에 따른 압력변화를 측정하였다. ER11에 대한 실험이 끝난 후 ER 유체의 입자 중량비가 35%로 조성된 ER12에 대해서도 동일한 방법으로 실험을 반복하였다.

Fig.8은 ER11과 ER12 두 종류의 농도에 대해 전기장 크기 변화에 따라 발생한 압력 강하를 보간법을 이용하여 나타낸 것이다. 이 결과로부터 입자의 농도가 증가함에 따라 더 큰 압력을 발생하였고 또한 같은 입자 농도에서의 압력 강하는 전기장의 크기에  $E^x$  관계로 비례하여 증가하는 양상을 보인다. 여기에서, 전기장의 크기와 압력 강하 관계로서 대상 시스템의 요구 압력을 임의적으로 발생시킬 수 있음을 알 수 있다. ER 밸브 모델링에 대한 압력 강하의 관계식 (4)를 이용한 계산치를 살펴보면, 각 유량에 대해 3kV의 전기장을 인가하였을 경우에 대해 ER11은 100~120 kPa, ER12는 190~210 kPa로 10kPa 정도의 간격을 갖고 나타난다. 이러한 실험치와 이론치와의 오차는 실험에서 ER 유체가 ER 밸브의 전체 간극 사이로 균일하게 유입되지 않은 것에 기인한다고 생각된다. 이로써, 더욱 향상된 전기장에 따른 압력 강하 관계를 얻기 위해서는 유동하는 ER 유체가 밸브 간극 사이에서 항상 일정하게 흐를 수 있도록 유로 형성에 대해 더욱 정밀한 설계가 필요할 것이다. 한편, 예상되는 바와 같이 같은 ER 유체에 대하여 동일한 전기장 공급시 유량 증가에 따라 압력 변화도 증가되는 것을 알 수 있다. Fig.9는 이러한 특성을 보다 명확히 보여주는 것으로 유량이 증가함에 따라 발생된 압력 강하도 대체적으로 증가함을 나타낸다. 전기장 부하에 따른 압력 강하는 전기장 무부하시의 경우와 비슷한 기울기로 변화하였다. Fig.10에서는 고정된 유량 2 l/min과 6 l/min에서의 각기 다른 농도 ER11과 ER12에 대해 전기장의 크기 변화에 따른 압력 변화를 비교하여 살펴보았다. 여기서, 동일한 실험 조건상에서 고체 입자의 농도가 압력 강하에 미치는 영향을 단적으로 알 수 있다.

이러한 실험 결과를 통해 알 수 있듯이, ER 유체를 실제 유압 관련 장치에 적용시 고려해야 할 조건을 살펴보면 전극 간격(h)을 비롯한 여러 설계 변수, 전기장과 전단응력과의 관계, 그리고 고체 입자 농도와 유체의 점성 계수 변화에 따른 항복전단응력 변화등이다.

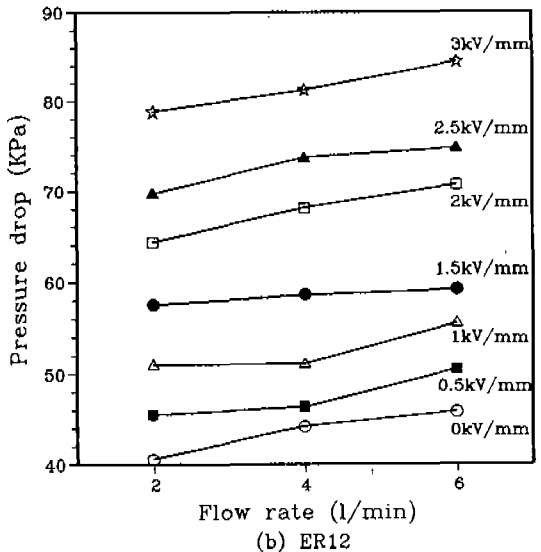
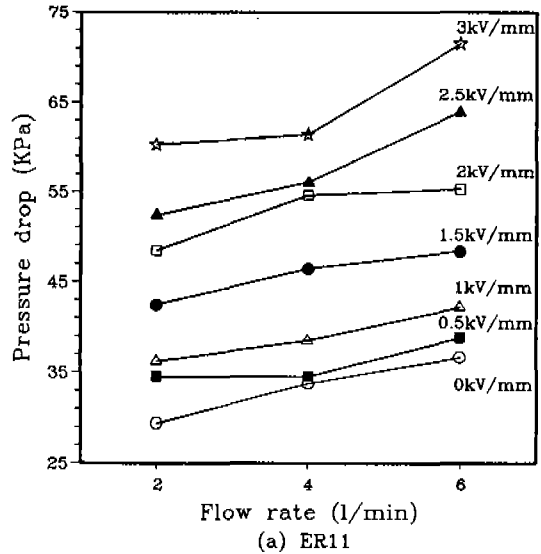


Fig. 9 Pressure variation with respect to flow rate



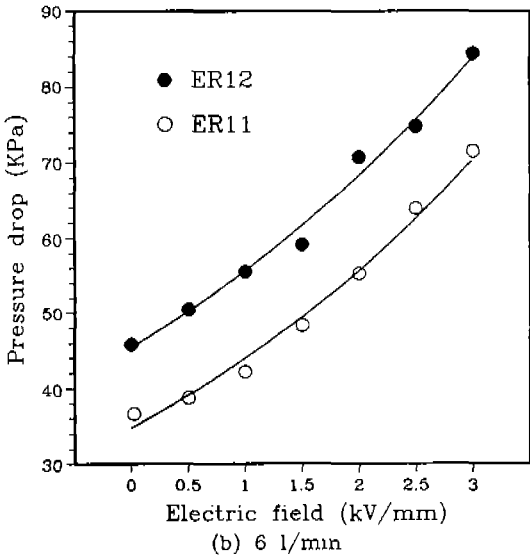
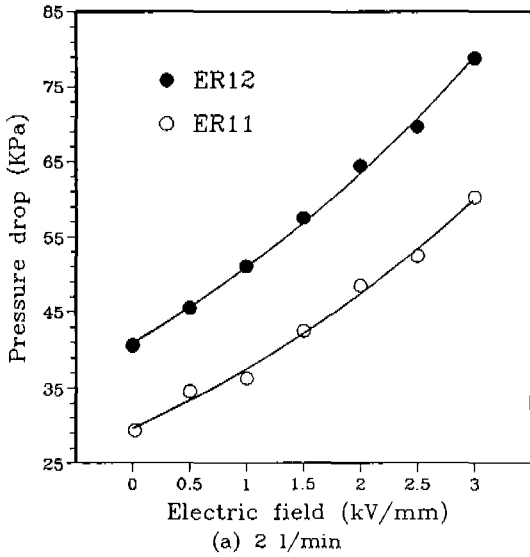


Fig. 10 Comparison of pressure variation

### 5. 결 론

본 연구에서는 새로운 작동 유체로서 ER 유체를 유압 시스템에 적용하여 그 특성에 적합한 실린더형 밸브를 제작, 실험을 통한 성능을 고찰하였다. ER 유체의 Bingham

특성을 얻기 위해 자체 제작한 electroviscometer를 이용하여 고체 입자 증량비와 전기장 변화에 따른 항복전단응력 값을 얻었다. 전기장에 따라 항복전단응력은 ER11의 경우  $99.3E^{1.42}$ , ER12의 경우  $142.1E^{1.47}$ 의 관계로 증가되었으며 고체 입자 농도가 큰 ER12의 증가율이 보다 크을 알 수 있다. 이러한 ER 유체의 특성을 바탕으로 ER 밸브의 설계와 제작을 수행하였다. ER 밸브의 성능 실험 결과, 일정한 유량에 대하여 압력 변화는 전기장 크기의 증가에 따라  $\alpha E^x$  관계로 증가하였다. 그리고, 예상된 바와 같이 동일한 전기장 하에서 보다 큰 항복전단응력값을 갖고 있는 ER12의 경우가 더 향상된 압력 변화를 나타내었다. 전기장 부하에 따라 요구되는 압력을 순간적으로 발생시킬 수 있어 정확하고 빠른 제어성을 기대할 수 있으며, 기존 밸브 시스템에 비해 보다 단순화된 구조로서의 이점을 확인할 수 있다.

본 연구에서 제시한 새로운 사고의 개념과 정량적 연구 결과는 향후 성능 향상된 여러 형태의 ER 밸브 개발시 매우 중요한 설계 기초 자료로 활용될 수 있으며 나아가서 능동 유압 시스템 구성에도 많은 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다. 관련 산업체의 실용성을 위한 금후 연구과제로서 우수한 ER 유체 개발, 새로운 형태의 밸브 시스템 구성, 요구 출력을 얻기 위한 능동제어 알고리즘 개발등이 계속 연구될 것이다.

### 후 기

본 연구의 일부는 우덕재단(友德財團) 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Stevens, N. G., Sproston J. L. and Stanway, R., 1988, "An Experimental Study of Electro-Rheological Torque Transmission," ASME J. of Mechanisms, Transmission and Automation in Design, Vol. 110, pp.182-188.
2. Duclos, T. G., 1988, "Electro-Rheological Fluids and Devices," Automotive Engineering, Vol. 96, pp.45-48
3. Petek, Nicholas K., "An Electronically Controlled

- Shock Absorber Using Electrorheological Fluid," SAE Paper No. 920275.
4. Brooks, D. A., 1992, "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices," International J. of Modern Physics, Vol. 6, pp.2705-2730.
  5. Choi, S. B. and Park, Y. K., 1994, "Active Vibration Control of a Cantilevered Beam Containing an Electro-Rheological Fluid," Journal of Sound and Vibration. Vol. 172, No.3, pp. 428-432
  6. Simmonds, A. J., 1991. "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit," IEEE Proceeding-D, Vol. 138, No. 4, pp.400-404
  7. Brooks, D. A., 1990, "Devices Using Electro-Rheological Fluid," Proceeding of the Second International Conference on ER Fluids, pp.371-401.
  8. Winslow, W. H., 1949, "Induced Fibration Suspension," Journal of Applied Physics, Vol.20, pp. 1137-1140.
  9. Jordan, T. C. and Shaw, M. T., 1989, "Electrorheology," IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, pp.849-878.
  10. Weiss, K. D., Coulter, J. P. and Carlson, J. D., 1992, "Electro-Rheological Materials and Their Usage in Intelligent Material Systems and Structures, Part I : Mechanisms, Formulations and Properties," Recent Advances in Sensory and Adaptive Materials and Their Applications, C.A. Rogers, ed., Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, PA.
  11. Seed, M., Hobson, G. S. and Tozer, R. C., 1990, "Macroscopic Behaviour of ER Fluid," Proceeding of the Second International Conference on ER Fluids, pp.214-230.