

## ER 밸브-실린더 시스템의 위치 제어 Position Control of an ER Valve-Cylinder System

이효정\*, 정재민, 박재석, 최승복, 정재권  
인하대학교 기계공학과

### Abstract

This paper presents design, dynamic modeling and control issues of a novel type of an ER valve-cylinder system incorporating with an electro-rheological(ER) fluid. The yield stress of the ER fluid to be employed to the proposed system is evaluated as a function of applied electric fields. The design and manufacturing processes of the ER valve which features fast system response and simple mechanism are undertaken on the basis of model parameters. The governing equation for the hydraulic and pneumatic model is constructed by incorporating with the field-dependent Bingham behavior of the ER fluid. An effective neuro controller is proposed to realize an accurate position control.

### 1. 서론

유압 시스템의 메카니즘을 구성하는데 있어 밸브는 가장 기본적인 중요 구성 요소로서 유체의 압력과 유량을 기계적인 이동 장치에 의해 조절하여 제어 대상 시스템의 전달력을 제어한다. 기존 유압 시스템에 있어서, 작동유체의 구성 요소의 한계성과 인가된 밸브의 개폐 시간에 따른 느린 응답성과 정확한 위치 제어의 어려움 등을 극복하고자 많은 연구가 진행되어오고 있다. 기계적인 설계 구조 변경이나 피이드백(feedback) 제어와 연계된 시보(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 'ER 유체'라고 표현)를 작동 유체로 하여 빠른 응답성과 정밀한 압력 가변성을 장점으로 하는 새로운 밸브 시스템을 제안하여 그 성능을 고찰하고자 한다.

실제 설계 및 제작 측면에서 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 필요없이 액추에이터(actuator)와 밸브 부분을 하나의 단일 구조로 형성, 장치 설계의 단순화가 가능하다. 이렇게 간단한 구조에서도 ER 유체에 가해지는 전기장의 크기만으로 외부 제어 대상 시스템에 전달되는 유체 자체의 힘을 제어함으로써 고정도의 제어성을 실현할 수 있다. 실린더의 변위를 선정된 요구 위치에 빠른 응답 특성으로 정확하게 정착하기 위한 제어 방법은 ER 유체에 on-off 방식의 전기장 부하에 의해 가능하며, 다양한 형태의 요구 궤적에 대해서는 실시간에 연속적인 전기장 변화에 따른 속도 변화에 의해 효과적인 제어 성능을 실현할 수 있다. 또한, 이러한 구조적인 장점은 기존 밸브에서 기계적 구동방식에 따라 발생할 수 있는 내구성 문제도 ER 밸브를 적용함에 따라 그 신뢰성을 보장할 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 들어서 본격적으로 시작되었다.<sup>(1)-(4)</sup> 본 연구에서는 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 제작하였다. 작동 유체의 압축성과 유동에 대한 모델링을 통해 저배 방정식을 도출하였다. 위치제어 특성을 살펴보기 위해 하수 능력을 통한 강한 적용성을 나타내는 신경망 제어기를 이용하여 요구 궤적에 대한 추종 성능을 실험적으로 고찰하였다.

### 2. ER 유체의 역학적 특성 실험

본 연구에서 조성된 ER 유체의 용매는 실리콘 오일(점성 : 30cs)이며, 전도성의 입자는 특수 처리된 진분개로서 용매에 대한 중량비율 25%로써 입자 크기는 20 ~ 88  $\mu\text{m}$ 으로 하여 실험을 수행하였다. ER 유체의 역학적 특성을 고찰하기 위한 실험 조건으로써 전기장은 0~3 kV/mm 까지 1 kV/mm씩 증가시켰으며, 바깥

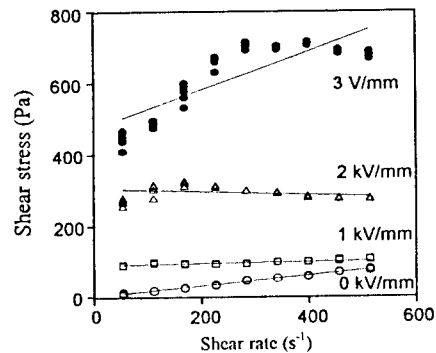


Fig.1 Shear stress vs. shear rate

쪽 실린더를 0~450rpm까지 50rpm씩 단계별로 증가시켰다. 또한, 실험의 오차를 줄이기 위하여 같은 조건에 대하여 5번씩 반복 측정하였고 그 평균값을 이용하여 직선보간하였다.

Fig.1은 실험에서 얻은 진폭로서 전기장의 크기에 따른 ER 유체의 진단속도비와 진단용력과의 관계를 나타낸다. 그림에서 보듯이 전기장의 크기가 증가할수록 ER 유체의 동일한 진단속도비에 대한 진단 용력의 크기가 증가하는 것을 알 수가 있으며, 일정한 전기장의 크기에 대하여 유동이 시작된 후에는 진단 용력과 진단속도비와의 크기가 전기장 무부하시의 경우와 유사한 비율로 증가함을 나타내고 있다. 그러나, 3 kV/mm의 전기장의 경우에는 진단 용력과 진단속도비의 비가 약간 다른 양상을 나타내고 있다. 이는 낮은 진단속도비 영역에서의 높은 전기장에 의한 유체의 모서리부 영향(edge effect)의 증대와, 높은 전기장에 의하여 입자가 과도하게 뭉쳐지는 현상 때문이다. 한편, 전기장 증가에 따른 진단 용력의 분포는 무부하시의 ER 유체의 특성과 거의 유사하지만 진단속도비가 증가함에 따라 기울기가 조금 감소함을 볼 수 있는데 이는 ER 유체가 전기장만의 함수가 아니고 진단속도비에도 영향을 받기 때문이다.

### 3. ER 밸브-실린더 시스템

#### 3.1 ER 밸브의 설계 및 제작

Fig.2는 본 연구에서 자체 설계하여 제작한 ER 밸브의 전체적인 형상과 내부 구조를 나타낸다. 제안된 ER 밸브는 실린더(cylindrical valve)형으로 내·외부 실린더는 각각 고전압 전원 장치의 (+)전원과 (-)전원에 연결되어 있어 진극판으로서 작용한다. 이러한 간극 사이로, ER 유체의 유입이 이루어짐에 따라 각 틈새로 흘러 들어간 유체에 요구되는 크기의 전기장을 부하하여 ER 효과를 발생하게 되는 것이다.

내부와 외부 실린더 전극의 제작은 각각 황동과 알루미늄이며, 실린더 사이의 간격을 유지하고 전극판 사이의 절연을 위해 플라스틱 재질의 덮개가 양단에서 지지해 주고 있다. 내부 실린더는 일체형으로서 직접 유압 라인과 연결할 수 있도록 양 끝단에 나사 부를 만들었으며, Fig.2에 유체의 유동 경로를 화살표로 나타내었다. 내부 실린더와 플라스틱 덮개 사이의 누수를 막기 위해 오링(o-ring)을 양단에 삽입하였다.

ER 밸브 모델링에 대한 관계식을 도출하기 위해 먼저 전기장을 가하지 않은 경우를 살펴보면 입력 강하는 전적으로 유체의 점성에 기인하며, 틈새를 통과하는 유량에 비례한다. ER 유체에 전기장이 가해지면 ER 유체의 항복진단용력  $\tau_y$ 는 유체의 유속과는 무관하게 일정한 크기까지 압력을 발생시킨다. 따라서 전극 틈새의 형상에 따른 압력 손실을 무시하고, 동일 단면적에서의 내부 압력은 모든 방향으로 균일하게 작용한다고 가정하면, ER 밸브에서 발생하는 전체 압력 강하는 점성과 ER 유체의 전기장에 따른 진단용력 변화에 의한 입력 강하의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = \Delta P_{ER} + \Delta P_v \quad (1)$$

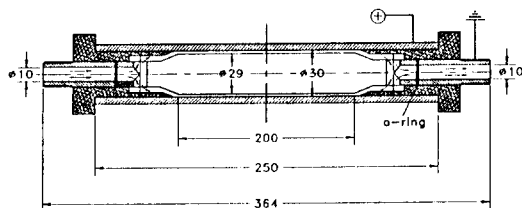


Fig.2 Schematic diagram of the ER valve

$$= 2 \frac{L}{h} \tau_y + 12 \eta \frac{L}{bh^3} Q$$

여기서 나타난 설계 변수를 살펴보면  $b$ 는 실린더를 평판으로 환산한 너비이고  $h$ 는 전극의 간극,  $L$ 은 밸브 전극의 길이이며  $Q$ 는 유량을  $\eta$ 는 ER 유체의 점성계수를 나타낸다. 평판의 너비  $b$ 는 외부 실린더를 평판으로 환산한 것이다. 식 (1)을 살펴보면, 전기장을 가하지 않았을 경우에는 전기장에 의한 진단용력  $\tau_y$  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 액츄에이터 부분으로 나누어진 기존 밸브 시스템과 크게 다른 점으로, 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 (1)로부터 알 수 있듯이 ER 밸브의 성능은 밸브 전극의 너비와 길이, 전극의 간극 등과 같은 설계 변수와 부하되는 전기장의 크기 그리고, ER 유체의 점성 계, 전기장에 따른 항복진단용력의 크기 등에 의해 영향을 받는다. 특히 전극 간격  $h$ 가 매우 중요한 설계 변수임을 알 수 있다.<sup>(5)</sup>

#### 3.2 시스템 구성 및 모델링

Fig.3은 ER 밸브-실린더 시스템 구성도로 크게 작동부와 제어부로 나뉘어질 수 있다. 작동부의 구체적인 구성을 살펴보면 실린더를 구동시키기 위한 기본 동력원은 공압으로서 압축기에서 전달된 공압을 변환 장치(air-to-hydraulic converter)를 통하여 내부에 채워진 ER 유체를 유동하게 하여 실린더를 구동할 수 있도록 하였다. ER 유체의 유동 부분은 실린더의 왼쪽 부분이고 반대쪽 부분은 공압과 직접 연결되어 있어 솔레노이드 밸브의 방향성에 따라 ER 유체 또는 공압에 의해 실린더가 동작하게 된다.

공압에 의한 구동 방식은 선택한 것은 실제 유압 시스템에서 펌프에 의한 작동 유체의 구동시 ER 유체의 고체 입자와 펌프내 기계 요소간의 마모에 따른 시스템의 불안정성을 해소하기 위한 것으로 본 연구에서 제안된 밸브 시스템에서는 구동부와 작동 유체의 직접적인 접촉이 필요 없으므로 이러한 문제가 해결될 수 있다.

Fig.4는 ER 유체와 공압을 작동 유체로 하는 밸브-실린더 시스템의 역학적 모델을 나타내는 것으로 실린더, 피스톤의 질량, 밸브로 구성되어 있으며 한 방향에 대해서만 고려되었다.

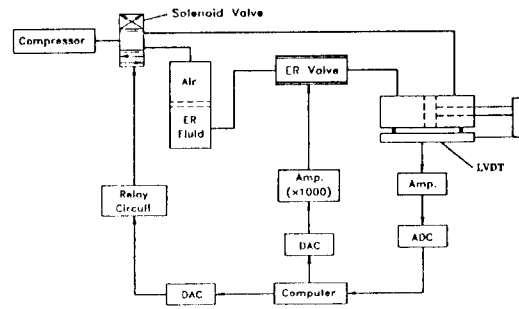


Fig.3 Experimental configuration of the ER valve-cylinder system

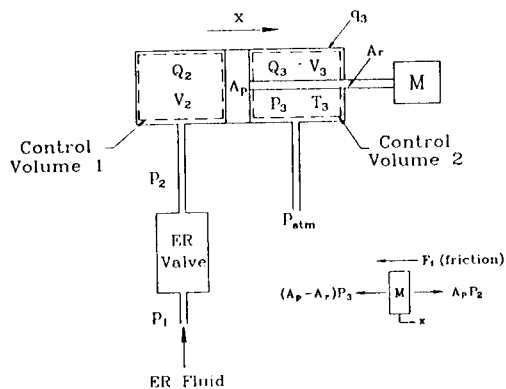


Fig. 4 Hydraulic and pneumatic model of the ER valve-cylinder system

Fig.4로 부터 피스톤에 대한 운동 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{x} = A_p P_2 - (A_p - A_r) P_3 - F_f \quad (2)$$

여기서, 질량  $M$ 은 피스톤의 질량,  $A_p$ 는 피스톤 램 면적,  $A_r$ 은 피스톤 로드 면적이다.  $F_f$ 는 정지 마찰력으로 아래와 같고  $F_0$ 는 최대 정지 마찰력을 나타낸다.

$$F_f = F_0 \text{sign}(|\dot{x}|) \quad (3)$$

ER 유체 부분인 검사체적 1에 대해 고려하면 검사체적 1에 흐르는 유체에 대해 연속 방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$Q_2 = A_p \dot{X} + C_2 \dot{P}_2 \quad (4)$$

여기서  $C_2$ 는  $V_2/\beta_{ER}$ 로서  $V_2$ 는 검사체적 1의 체적,  $\beta_{ER}$ 은 ER 유체의 bulk modulus이다.

한편, ER 밸브에 의한 압력강하에 대한 식(1)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$P_1 - P_2 = 2 \frac{L}{h} \tau_s + 12 \frac{L \eta}{bh^3} Q_2 = P_{ER} + R_i Q_2 \quad (5)$$

여기서  $P_1$ 은 공급압력,  $\eta$ 는 ER 유체의 점성계수,  $P_{ER}$ 은 ER 밸브에 전기장을 부하할 경우 ER 유체에 의해 발생하는 압력강하이며,  $R_i$ 는 두 평판 사이의 유동일 경우에 나타나는 유체 저항(fluid resistance)을 나타내는 항으로 다음과 같다.

$$P_{ER} = 2 \frac{L}{h} \tau_s, \quad R_i = 12 \frac{L \eta}{bh^3} \quad (6)$$

식 (5)에 식 (4)를 대입하면 다음과 같은 압력강하에 대한 식을 얻는다.

$$P_1 - P_2 = P_{ER} + A_p R_i \dot{X} + C_2 R_i \dot{P}_2 \quad (7)$$

다음에 고려할 실린더의 오른쪽 부분(검사체적 2)은 기체(공압) 부분으로서 다음과 같은 가정을 통해 해석을 단순화하였다. 첫번째 가정은 작동 유체는 이상기체(ideal gas)이며 모든 작동과정 동안 열역학 성질은 일정하고 두번째는 작동유체의 누수손실을 무시하고 평형상태에서 작동유체는 검사체적 2 전체에 걸쳐서 일정하다는 것이다.

이러한 가정하에 에너지 보존법칙으로 부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{P}_3 = \frac{\kappa}{(V_{30} - (A_p - A_r) X)} (-W_3 R T_3 + (A_p - A_r) \dot{X} T_3) \quad (8)$$

여기서  $\kappa (= c_p/c_v)$ 로서 비열비,  $W_3$ 는 질량유량,  $R$ 은 가스 정수,  $V_{30}$ 은 검사체적 2에서 실린더내의 초기 체적,  $T_3$ 는 실린더내 온도 륜 각각 나타낸다.

따라서, 상태 벡터 (9)를 사용하여 식 (2), (7), (8)로 부터 상태 방정식 (10)을 얻을 수 있다.

$$\bar{X} = [ X, \dot{X}, P_2, P_3 ] \quad (9)$$

$$\dot{X} = X_2$$

$$\dot{X}_2 = \frac{A_p}{M} X_3 - \frac{(A_p - A_r)}{M} X_4 - \frac{F_f}{M}$$

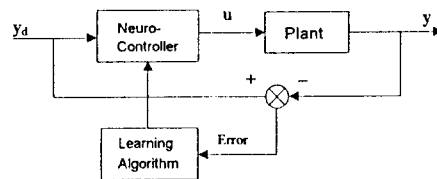
$$\dot{X}_3 = -\frac{A_p}{C_2} X_2 - \frac{1}{C_2 R_i} X_3 - \frac{P_{ER}}{C_2 R_i} + \frac{P_3}{C_2 R_i}$$

$$\dot{X}_4 = \frac{\kappa}{(V_{30} - (A_p - A_r) X)} (-W_3 R T_3 + (A_p - A_r) X_2 X_4) \quad (10)$$

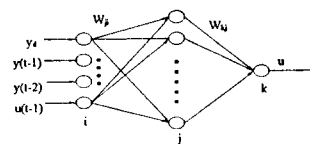
#### 4. 실린더 위치 제어

본 연구에서는 위치 추종 제어를 위해 신경회로망 제어 방법을 선택하였다. 그 근본 이유는 시스템의 작동 상태에 따라 전기장의 크기와 속도 변화와의 관계가 비선형적으로 변화하기 때문에 선형적인 모델링을 근거로 한 기존 제어 방법으로는 요구 목적을 실현할 수 없기 때문이다. 따라서, 플랜트(plant)의 입력력 정보를 이용한 비선형 대응을 통하여 플랜트나 주위 환경의 변화 혹은 잡음 등에 대한 학습 능력으로 강한 적응성을 보유한 신경망 제어 기법을 이용하였다. 실제적으로 유-공압 시스템의 측정 불가능하거나 생략된 파라미터들과 외란 등과 같은 불확실성과 비선형성으로 플랜트를 정확하게 모델링하는 것은 매우 어렵다.

신경회로망 제어가 실제에서는 플랜트에 대한 정보가 필요없이 요구 출력(desired output)과 플랜트의 실제 출력과의 오차를 최소화하는 제어 입력을 설계하게 된다. 본 연구에서 사용된 신경 제어 구조는 Fig.5와 같다.<sup>(7)(8)</sup> Fig.5 (a)의 블록도에 대해 살펴보면, 요구 출력과 실제 출력의 차로 나타내지는 오차(error)를 계산하여 신경회로망의 학습과정용 통해 제어입력  $u$ 를 생성, 플랜트로 입력하게 된다. 신경 제어기는 중간층을 한개 갖는 다층 신경 회로망으로 학습에는 오차 역전달 학습 알고리즘을 사용하였다. 다음과 같은 성능 지수를 설정하여 오차  $\beta$ 를 최소화하도록 제어 입력  $u$ 를 생성한다.



(a) Block diagram



(b) Architecture of Neuro-Controller

Fig.5 Neuro-control structure

$$\hat{E} = \frac{1}{2} (y_d - y)^2 \quad (11)$$

윗식의 성능 지수를 최소화하는 방향으로 뉴런 사이의 연결강도를 조절하게 된다. 이 뉴런 사이의 연결강도 변화식은 Gradient Descent 알고리즘을 사용하면 다음과 같이 주어진다.

출력층에서의 연결강도 변화 :

$$\begin{aligned} \Delta w_k &= -\eta_e \frac{\partial \hat{E}}{\partial w_k} \\ &= \eta_e \delta_k out_i \\ \delta_k &= (y_d - y) \frac{\partial y}{\partial u} f'(net_k) \end{aligned} \quad (12)$$

$$net_k = \sum_j w_{kj} out_j + \theta_k$$

중간층에서의 연결 강도 변화 :

$$\begin{aligned} \Delta w_{jk} &= \eta_e \delta_j out_i \\ \delta_j &= f'(net_j) \sum_k \delta_k w_{jk} \\ net_j &= \sum_i w_{ji} out_i + \theta_j \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $\eta_e$ 는 학습률이고  $f(x)$ 는 미선형 맵핑 함수인 Sigmoid 함수를 이용하였다. 또한 신경회로망의 연결강도는 매우 작은 랜덤 함수의 값으로 초기화 하였다.

본 연구에서 사용한 신경제이기의 성능지수는 실린더의 민위인  $X(t)$ 가 지수함수 형태를 갖고 있는 요구 출력이 되도록 설정하였으며 이 신경망 제이기를 통해 플랜트인 ER 밸브-실린더 시스템에 가해지는 제어입력  $u$ 는 ER 밸브의 진극판에 가해지는 전기장의 세기  $E$ 이다. 또한 사용된 신경망 제이기는 입력층 4개, 중간층 8개, 출력층은 1개의 뉴런으로 구성되어 있다.

Fig.6은 실험을 통한 성능으로 전기장의 입력 형태가 상당히 비선형성적인 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 기존 실험 제이기에서는 나타날 수 없는 성질이며, 시스템 작동상태의 불확실성이 존재하여도 학습을 통해 모든 작동점에서 오차가 최소가 되도록 제어 입력을 생성하는 것을 알 수 있다. 제이기의 학습능력을 높이기 위해 중간층의 뉴런수를 증가함에 따라 더욱 향상된 결과를 기대할 수 있지만, 실험 과정에서 제어의 실시간 처리를 고려한 하드웨어 성능과 뉴런수와의 관계를 통해 가장 적절한 수를 선택하였다.

이러한 결과를 통해 전기장과 속도 민화와의 비선형성을 고려하여 학습 능력을 보유한 신경망 제이기를 적용하여 요구 출력과의 오차가 최소화 되는 전기장을 ER 밸브에 공급하여 플랜트 출력의 적응성을 고찰할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 작동 유체로서 ER 유체를 ER 밸브-실린더 시스템에 적용하여 그 특성에 적합한 실린더형 밸브를 제작하고 실험을 통하여 위치제어 성능을 고찰하였다. 작동 유체의 유동 특성과 전기장 부하에 따른 ER 유체의 Bingham 특성을 연계하여 시스템의 모델링을 통한 지배 방정식을 도출하였다. 전기장의 크기와 속도 민화의 비선형적인 관계를 고려하여 제안된 학습능력을 보유한 신경 회로망 제어 기법을 이용하여 전기장 민화에 따른 실린더의 추종 위치 제어 성능을 실험적으로 고찰하였다.

## 참고 문헌

1. D. A. Brooks, "Design and Development of Flow Based

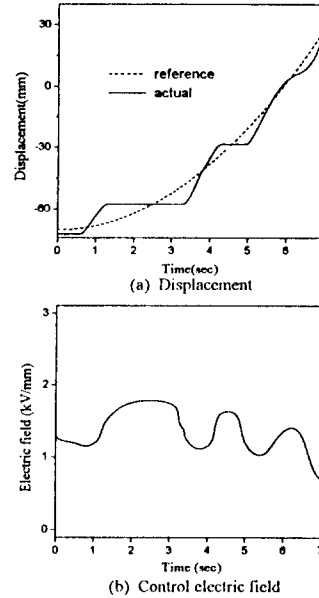


Fig.6 Neuro-controlled tracking response

Electro-Rheological Devices," International J. of Modern Physics, Vol. 6 pp.2705-2730, 1992.

2. M. Whittle, R. Firoozian and W. A. Bulough, "Decomposition of the Pressure Response in an ER Valve Control System," J. of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, No.1, pp.105-111, 1994.
3. Petek, K. Nicholas, "An Electronically Controlled Shock Absorber Using Electro-rheological Fluid," SAE Paper No. 920275.
4. Choi, S. B. and Park, Y. K., "Active Vibration Control of a Cantilevered Beam Containing an Electro-Rheological Fluid," Journal of Sound and Vibration, Vol. 172, No. 3, 1994, pp.428-432.
5. 이효정, 김기선, 정달도, 최승복, 정재찬, "전기유동유체를 이용한 실린더 밸브의 성능고찰", 한국정밀공학회지, 제 8권, 제 4호, pp.148-157, 1994.
6. J. Walton, "Fluid Power Systems", Prentice Hall, 1989.
7. D. Psaltis, A. Sideris and A. Yamamura, "A Multilayered Neural Controller", IEEE Control Systems Magazine April, pp.17-25, 1988.
8. K. P. Venugopal and S. M. Smith, "A Feedback Scheme for Improving Dynamic Response of Neuro-Controllers", Proceedings of the American Control Conference, pp.84-88, 1993.