

신경제어기법을 이용한 ER 밸브 브리지-실린더 시스템의 위치제어

Position Control of an ER Valve Bridge-Cylinder System Via Neural Network

°최우연*, 최승복*, 정재천*

*인하대학교 기계공학과(Tel:032-860-7319,Fax:032-868-1716,E-mail: seungbok@dragon.inha.ac.kr)

Abstracts: This paper presents the position control of a double-rod cylinder system activated by an electrorheological(ER) valve unit. Following the composition of a silicone oil-based ER fluid, rheological properties of the ER fluid are experimentally tested as a function of imposed electric fields to determine appropriate design parameters of the ER valve. The ER valves are then designed and manufactured. Subsequently, the pressure drop of the ER valve is evaluated with respect to the intensity of the electric field. Four ER valves bridge-cylinder system is formulated, and the governing equations for the system are derived. A neural network control scheme is then synthesized to perform the position control of the cylinder system. Tracking control responses are experimentally evaluated and presented in order to demonstrate the effectiveness of the proposed control system.

Keywords: Electro-Rheological Fluid, Position Control, Pressure Drop, ER Valves Bridge-Cylinder System, Neural Network

1. 서론

유압시스템은 다른 동력 전달 시스템과 비교할 때 부피에 비하여 매우 큰 힘을 낼 수 있고, 시스템의 안정성과 직결되는 댐핑특성이 우수하기 때문에 산업현장에서 많이 이용되고 있다. 그 중 서보시스템은 전기적, 기계적 신호를 입력받아서 유체의 흐름을 제어하는 시스템으로 유압을 이용한 고속 제어 시스템에 없어서는 안될 장치이다. 최근 고도의 산업화에 편승하여 모든 산업시스템이 고속, 고정밀화되는 추세에 따라 유압시스템도 이에 따르는 성능의 향상이 요구되었고, 이에 중심이 되는 서보시스템의 성능향상에 많은 연구가 이루어지고 있다 [4]. 그러나 유량제어를 위한 기본적인 메카니즘에서 오는 응답 지연과 유압시스템이 가지고 있는 비선형성은 유압시스템의 고속, 고정밀화에 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 이런 이유로 새로운 차원의 서보시스템에 관한 연구가 필요하였고, 본 연구에서는 ER(electro-rheological:ER)유체(이하 "ER유체"라 칭함)를 작동 유체로 하는 서보시스템을 제안하게 되었다.

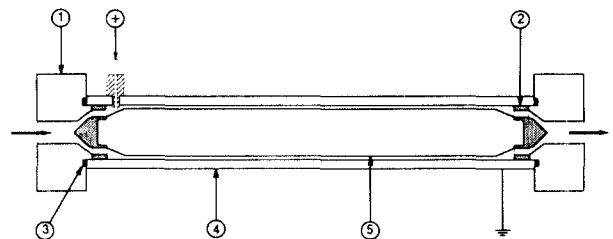
ER유체는 부가되는 전기장의 강도에 따라 역학적 특성이 변하는 유체를 말하며, 외면상 가장 두드러진 특징은 전기장 무부하시 액체 상태에서 전기장 부하시 고체 상태로 상변화(phase change)하는 것이다. 이를 역학적 관점에서 표현하면 전기장 무부하시의 랜덤 구조를 갖고 있던 뉴토니안(Newtonian) 유체가 전기장을 가하면 체인형 구조를 갖게 되어 항복 전단 응력을 갖게 되는 빙햄(Bingham) 유체로 변하게 된다. 이때 발생하는 ER유체의 항복 전단 응력은 부가되는 전기장의 함수가 되며, 전기장을 조절(tuning)함으로써 밸브 시스템에서 요구되는 압력 크기를 얻을 수 있다. 그리고, 전기장에 대한 ER유체의 반응은 순간적으로 이루어지므로, 이는 기존 기계적 장치에 의해 구현될 수 없는 매우 빠른 응답 조건을 충분히 만족시키고, 나아가서 연속적으로 압력을 가변할 수 있는 밸브 시스템 구현을 가능하게 한다[1][3][6].

본 연구에서는 실린더형(cylindrical type)의 ER 밸브를 제작하여 밸브-실린더 시스템을 구성하여 시스템의 위치 제어를 수행하고자 한다. 이를 위해 먼저 자체 조성한 ER유체의 빙햄 특성을 실험적으로 측정하고 이를 근거로 ER 밸브를 모델링하였다. 밸브 성능에 영향을 주는 각종 설계 변수를 변화시켜 압력 강하를 분석한 후, 이에 근거하여 ER 밸브를 설계, 제작하였다.

이를 이용 ER 밸브 브리지-실린더 시스템을 구성하였으며, 제어기 설계를 위해 제안된 시스템의 동적 모델링을 통해 지배방정식을 도출하였다. 위치 제어 구현을 위하여 학습 능력을 통해 강한 적응성을 나타내는 신경제어기법이 도입되었으며, 비례-적분-미분(PID) 제어기와 연계하여 전체 제어 시스템을 구성하였다. 실험을 통하여 실린더 로드의 여러 요구함수에 대한 위치 추적 제어 결과를 고찰하였고, 이를 통하여 제안된 ER 밸브 브리지-실린더 시스템의 유용성을 입증하였다.

2. 시스템 모델링

Fig. 1은 본 연구에서 제안된 ER 밸브의 전체적인 형상과 내부 구조를 나타낸 것이다. 제안된 ER 밸브는 실린더형으로 알루미늄 재질의 외부전극내에 강관을 외부전극과 일정 간격이 유지되도록 가공하고, MC 플라스틱으로 지지부를 만들어, 유로를 만들고 동시에 두 전극의 간극이 유체의 빠른 흐름에도 일정하게 유지되도록 하였다.



① Cover ② Fixture ③ 'O' Ring ④ Outer Electrode ⑤ Inner Electrode

그림 1. 실린더형 ER 밸브
Fig. 1. Schematic diagram of ER cylindrical valve

제작된 4개의 밸브를 이용한 ER 밸브 브리지 회로를 구성하여, 전기장만으로도 유체의 방향과 유량의 조절이 가능하게 하였다. 제안된 실린더형 ER 밸브의 압력 강하 수식을 도출하면 다음과 같다.

$$\Delta P_f = \Delta P_{ER} + \Delta P_n \quad (1)$$

여기서 ΔP_{ER} 은 ER유체에 전기장이 가해짐으로서 생성되는 전단응력에 의한 압력강하이고, ΔP_{η} 는 유체의 흐름에 따른 유체 점성에 의한 압력강하이다. 유체가 유동할 때 발생될 수 있는 형상의 변화에 따른 압력 손실은 무시하였으며, 동일 단면적에서의 내부 압력은 모든 방향으로 균일하게 작용한다고 가정하였다. ER유체에 전기장이 부하되지 않은 경우에는 일반 유체와 마찬가지로 점성에 의한 압력 강하(ΔP_{η})만이 존재하지만, 전기장이 부하된 경우에는 ER유체의 항복전단응력 $\tau_y(E)$ 에 의한 압력 강하(ΔP_{ER})가 추가적으로 발생된다. 따라서, ΔP_E 는 유체의 점성에 의한 압력 강하와 ER 효과에 의한 압력 강하의 합으로 표현될 수 있으며 다음과 같다[6].

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

여기서, L 는 밸브 전극의 길이, b 는 평판으로 환산한 전극의 유효 너비, h 는 전극 사이의 간극, 그리고 Q_E 는 전기장이 부하될 경우에 간극 사이를 통과하는 유량을 나타낸다.

다음으로 브리지 시스템의 압력강하에 대한 수식을 도출하기 위하여, 먼저 Fig. 2와 같이 ER 밸브 브리지 시스템을 구성하였다.

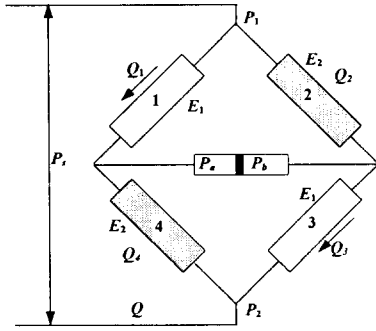


그림 2. ER 밸브 브리지 시스템
Fig. 2 ER valves bridge system

Fig. 2에서 보듯이 4개의 밸브로 구성된 시스템에 공급압 P_1 이 가해지고 있다. P_2 는 대기압과 같고, 시스템에 공급되는 유량 Q 는 시간에 대해 항상 일정하다. 각각의 밸브를 밸브 1,2,3,4라고 칭하고 각각의 밸브에 흐르는 유량을 각각 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 , 그리고 밸브 1,3에 가해지는 전기장의 세기를 E_1 , 밸브 2,4에 가해지는 전기장의 세기를 E_2 라고 하면 액추에이터(actuator) 양단에서 발생하는 압력 강하는 다음식과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$\begin{aligned} P_1 - P_a &= RQ_1 + \Delta P_{ER}(E_1) \\ P_1 - P_b &= RQ_2 + \Delta P_{ER}(E_2) \\ P_a - P_2 &= RQ_4 + \Delta P_{ER}(E_2) \\ P_b - P_2 &= RQ_3 + \Delta P_{ER}(E_1) \\ Q &= Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \\ P_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

4개의 밸브의 모든 조건이 같다고 가정하면 식(3)으로부터 P_a 및 P_b 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{2} (P_1 - R(Q_1 - Q_4) + \Delta P_{ER}(E_2) - \Delta P_{ER}(E_1)) \\ P_b &= \frac{1}{2} (P_1 + R(Q_3 - Q_2) - \Delta P_{ER}(E_2) + \Delta P_{ER}(E_1)) \end{aligned} \quad (4)$$

마지막으로 실제 시스템의 제어 대상이 되는 액추에이터(actuator)부를 고려해보면, 실험에 사용된 액추에이터는 복동 양

로드형 공압 실린더로, 실험시 액추에이터에 가해지는 부하를 조절하기 위하여 질량역할을 할 수 있는 차량(cart)을 Fig. 3에서 보는바와 같이 부착하였다. 그림에서 M 은 차량의 질량에 실린더 로드의 질량을 합한 값이고 A 는 실린더 내부 절단면적에서 로드의 절단면적을 뺀 값이다.

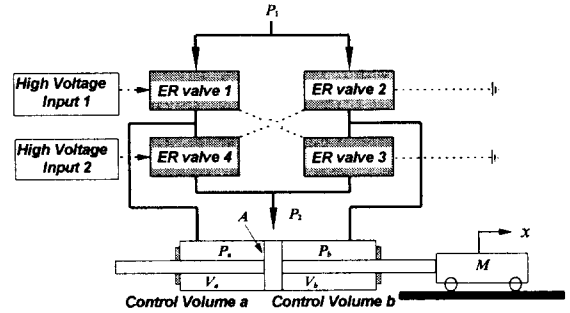


그림 3. ER 밸브 브리지-실린더 시스템
Fig. 3. ER valves bridge - cylinder system

이로부터 액추에이터에 발생되는 운동 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$A(P_a - P_b) - F = M\ddot{x} \quad (5)$$

식(5)에서 F 는 액추에이터 운동시 발생될 수 있는 모든 마찰력을 나타낸 것이다.

액추에이터와 밸브 브리지 시스템의 운동 방정식으로부터 다음 식을 유도해 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_1 - Q_4 &= A\dot{x} + C_a \frac{dP_a}{dt} \\ Q_3 - Q_2 &= A\dot{x} - C_b \frac{dP_b}{dt} \\ C_a &= \frac{V_a}{\beta_{ER}} \quad C_b = \frac{V_b}{\beta_{ER}} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 V_a 는 검사 체적 a 의 부피, V_b 는 검사 체적 b 의 부피이고, β_{ER} 은 ER 유체의 체적 탄성 계수(bulk modulus)이다. 따라서, 식(3)에서 P_i 를 구하고 식(4) 및 식(6)을 이용하면 다음과 같이 P_a 및 P_b 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{2} \left(-R \left(A\dot{x} + C_a \frac{dP_a}{dt} \right) + RQ + 2\Delta P_{ER}(E_2) \right) \\ P_b &= \frac{1}{2} \left(+R \left(A\dot{x} - C_b \frac{dP_b}{dt} \right) + RQ + 2\Delta P_{ER}(E_1) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

위 식에서 $\Delta P_{ER}(E_1)$, $\Delta P_{ER}(E_2)$ 는 전기장이 가해졌을 때의 밸브에서의 압력강하를 나타내므로 항상 양의 값을 갖는다.

지금까지 제안된 ER 밸브 브리지-실린더 시스템의 지배 방정식을 상태 공간 모델(state space model)로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + BU + D \quad (8)$$

$$\begin{aligned} X &= [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [x \ \dot{x} \ P_a \ P_b]^T \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A}{M} & -\frac{A}{M} \\ 0 & -\frac{A}{C_a} & -\frac{2}{C_a R} & 0 \\ 0 & \frac{A}{C_b} & 0 & -\frac{2}{C_b R} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{C_a R} \\ 0 & \frac{2}{C_b R} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{F}{M} \\ \frac{Q}{C_a} \\ \frac{Q}{C_b} \end{bmatrix} \\ U &= [\Delta P_{ER}(E_1) \ \Delta P_{ER}(E_2)] \end{aligned}$$

3. ER 밸브의 설계 및 제작

ER 밸브를 설계함에 앞서, 실험에서 사용될 ER유체의 동특성을 파악하는 것이 필요하다. 일반적으로 병행 유체 성질에서 도출된 ER유체의 전단 거동식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau = \tau_v(E) + \eta \dot{\gamma}, \quad \tau_v(E) = \alpha E^\beta \quad (9)$$

여기서, τ 는 ER유체의 전단응력을 나타내고, η 는 ER유체의 점성 계수이며, $\dot{\gamma}$ 는 전단비(shear rate)를 나타낸다. 그리고 $\tau_v(E)$ 는 ER유체의 항복전단응력을 표현하는 것으로 전기장 E 의 증가와 더불어 증가하며, αE^β 의 함수 관계로 표현된다. ER유체의 전단 거동식 (9)에서 비례 상수 α 와 지수 β 값은 고체 입자 농도와 전기장 크기, 사용되는 입자와 용매의 종류, 수분 함유량, 사용 온도 등에 따라 달라지는 ER유체의 고유 특성치로 실험을 통해 구할 수 있다. 식(9)의 관계로부터 전기장에 대한 전체 전단응력의 증가 및 항복전단응력의 크기 등을 예측할 수 있으므로, 제작될 밸브의 형상에 따른 성능이 예측될 수 있다. 본 연구의 병행특성실험 결과로부터 도출된 ER유체의 항복전단응력의 변화를 식(9)에서의 전기장에 의한 항복응력 $\tau_v(E)$ 로 표현하면 전기장 E 에 대하여 $164.5E^{1.46}$ (Pa)의 관계가 된다.

앞의 실험에서 구해진 병행특성결과를 바탕으로 실린더형 ER 밸브를 설계하였다. 그 개략적인 외형은 앞에 기술한 바와 같으며, 밸브의 성능에 큰 영향을 주는 전극간의 거리와 전극의 길이는 1mm와 200mm로 설정되었다.

실험에 들어 가기전에 앞의 기술에서와 같이 밸브의 특성 함수인 $\Delta P_{ER}(E)$ 를 파악하는 것이 필요하다. 밸브의 압력강하특성에 대한 실험결과는 Fig. 4와 같다. 점선으로 표시된 곡선은 병행테스트에서 얻어진 항복전단 응력으로부터 얻은 예측결과로 실험에서 얻은 압력강하와 우수하게 일치하는 것을 볼 수 있다.

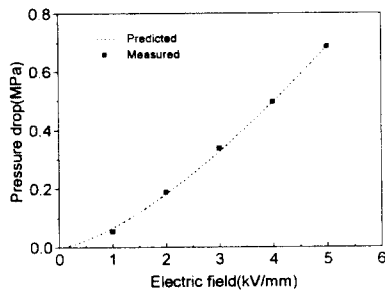


그림 4. 전기장 인가에 따른 밸브의 압력강하
Fig. 4. Field-dependent valve pressure drop

4. 제어기 설계

일반적으로 유압 서보 시스템은 측정 불가능하거나 생각된 파라미터(parameter), 외란 등과 같은 불확실성과 비선형성으로 인하여 플랜트(plant)를 정확하게 모델링하는 것과 강건한 제어를 설계하는 것이 매우 어렵다. 그리고 이 실험에 사용된 ER 유체 또한 온도와 전단률, 그리고 전기장의 변화등에 비선형적인 특성을 갖고 있기 때문에 우수한 성능을 얻기위해선 기존의 선형화된 제어로직을 적용하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 시스템의 위치제어를 위하여 PID 제어기에 연계된 신경망제어기법[2]을 사용하였다. PID 제어기는 가장 널리 쓰이고 있는 제어로직으로 시스템의 운동방정식이 정확히 구해지고 모든 물성치들이 외란과 주위 환경의 변화에 따라 쉽게 변하지 않는다면, 이득값의 선택여부에 따라 좋은 성능을 낼 수 있다. 그러나

그렇지 못한 시스템의 경우 고정된 이득치들 때문에 파라미터들의 변화에 따른 성능 저하를 피할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 PID 제어기의 단점을 보완하기 위하여 피드백 오차학습방식(feedback-learning algorithm)의 신경망 제어기를 PID제어기와 연계하여 제어 입력을 시스템에 인가하였다. PID 제어기는 신경망제어기의 학습이 완료 될 때까지 시스템의 최소 성능을 유지 시켜준다. 실험에 사용된 제어기의 간략화 된 구조를 Fig. 5에 도시하였다.

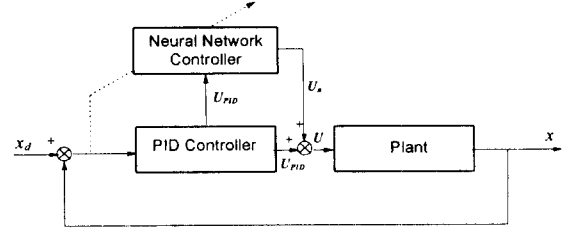


그림 5. 제어 시스템 구조
Fig. 5. Structure of the control system

실험에 사용된 신경망제어기는 학습 능력을 통하여 요구 출력과 플랜트의 실제 출력과의 오차가 최소화되도록 제어 입력을 발생하게 하는 구조로 되어 있다. 구조를 살펴보면 신경 제어기는 입력층(input layer), 중간층(hidden layer), 출력층(output layer)으로 구성되며, 플랜트에서의 위치 오차는 피드백 되어서 PID 제어기의 입력이 된다. PID제어기의 출력 U_{PID} 는 신경 제어기의 학습 신호로 사용되고, 신경 제어기는 학습 알고리즘을 통하여 제어 입력 U_n 을 능동적으로 발생시킨다. 결국, ER 밸브 브리지-실린더 시스템에 입력되는 제어 입력 U 는 신경망제어기의 출력 U_n 과 PID제어기의 출력 U_{PID} 의 합이 되며 다음과 같다.

$$U = U_n + U_{PID} \quad (10)$$

여기서, 제어 입력 U 는 식(8)에서 보듯이 전기장에 의한 압력강하 ΔP_{ER} 로 매 순간마다 능동적으로 변화된다. 전기장에 의한 압력 강하 ΔP_{ER} 을 제어 전기장 E 로 변환하면, 식(2)와 (9)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$E = \left[U \cdot \frac{h}{2l\alpha} \right]^{1/\beta} \quad (11)$$

식(11)로부터 결정된 제어 전기장 E 를 매 순간마다 ER 밸브 브리지-실린더 시스템에 공급하여 피스톤 로드 끝단의 변위를 정확히 제어하게 된다. 또한 신경 제어기의 출력 U_n 은 능동적으로 변화되어 PID 제어기가 나타내지 못하는 플랜트의 비선형성과 파라미터 변화를 강건하게 보상해 준다. 본 연구에서 제안된 신경 제어기는 중간층을 하나 갖는 다층 신경망으로 입력층, 중간층, 출력층에서의 뉴런의 수는 각각 3개, 7개, 1개이다.

5. 실험 결과 및 고찰

제안된 신경제어기법을 이용하여 ER 밸브 브리지-실린더 시스템의 위치 제어를 실현하기 위하여 실험 장치를 구성하고, 제작된 시스템으로 주기함수의 추적제어성능을 실험하였다. 구성된 실험장치는 먼저, 실린더를 구동 시키기 위한 기본 동력원으로 정량 펌프를 사용하였고, 구동시 유온의 과다 상승을 막기 위하여 냉각기가 사용되었다. 시스템을 제어하기 위한 제어부는 센서, 마이크로 컴퓨터, A/D 및 D/A 컨버터 역할을 하는 DSP보드(UEIDAQ WIN30), 고전압 공급 장치, 고압 다이오드로 구성하였다. 센서는 피스톤 로드의 변위를 측정하기 위한 변위 측정기(LVDT)와 실린더 양단의 압력 강하를 측정하기 위한 압

력계, 시스템의 작동온도를 알아보기 위한 온도계(thermocouple)를 사용하였다.

펌프에서 공급된 유압으로 작동 유체인 ER 유체를 유동시켜 실린더의 피스톤을 움직이게 한다. 이때 피스톤 로드 끝단의 변위를 변위 측정기로 측정하여 미리 설정된 요구 위치와 비교하여 그 오차를 최소화 하도록 제어 입력인 전기장을 ER 밸브 브리지 시스템에 부하한다. 부하된 전기장에 의하여 실린더의 양단에서 압력차가 발생하므로, 부하되는 전기장의 세기를 조절하여 실린더 양단의 압력차의 크기를 제어함으로써 피스톤 로드의 위치 및 속도를 제어할 수 있다. 앞에서 유도된 모델링을 이용하여 컴퓨터 모의실험을 수행한 후, 이를 바탕으로 알맞은 실험 상수들을 결정 후 추적제어실험을 실시 하였다.

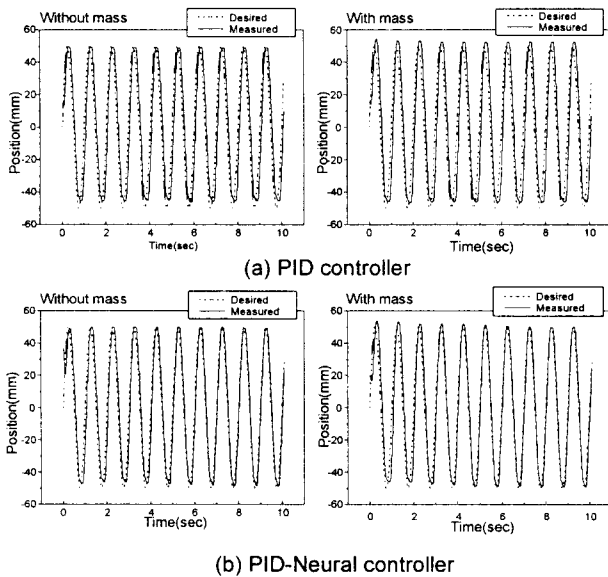


그림 6. 정현파의 위치추적제어 응답
Fig. 6. Sinusoidal position tracking control response

Fig. 6은 피스톤 로드의 변위를 원하는 함수 형태의 요구출력이 되도록 설정하였을 때의 위치추적제어에 관한 실험결과를 나타낸다. 요구위치출력은 다음과 같은 주기 함수를 선택하였다.

$$x_d = 50\sin(2\pi \times t) \quad (12)$$

Fig. 6의 좌측은 부하되는 질량이 없을 때 시스템의 제어 성능을 보여 준다. 그림에서 보듯이 PID 제어기와 PID-Neural 제어기 모두 양호한 성능을 내고 있지만, PID-Neural 제어기가 학습이 끝난 후 좀더 나은 성능을 보여 준다. 추적제어시 발생된 평균 오차는 PID 제어기를 사용하였을 경우 $\pm 3\text{mm}$ 정도이고, PID-Neural 제어기의 경우는 학습이 끝난 후 $\pm 1.5\text{mm}$ 정도이다.

Fig. 6의 우측은 실린더 로드에서 질량역할을 하는 차량을 부하하였을 때의 결과로, 질량이 없을 때와 달리 PID 제어기, PID-Neural 제어기를 사용할 경우 모두, 초기에 질량의 부하에 따른 오버슈트가 발생됨을 볼 수 있다. 그러나 PID-Neural 제어기의 경우 학습이 이루어짐에 따라 그런 오버슈트가 감소되어 좋은 성능을 내게됨을 볼 수 있다. 추적평균오차는 PID 제어기의 경우 $\pm 4.5\text{mm}$ 정도이고, 학습이 끝난 후 PID-Neural 제어기의 경우 $\pm 2.3\text{mm}$ 정도이다.

결과에서 보듯이 ER 밸브 브리지-실린더 시스템은 밸브에 인가되는 전기장만을 조절함으로써 액추에이터의 속도와 방향을 조절할 수 있다. 이러한 결과는 기존의 유압 서보 시스템을 대

체할 수 있는 높은 가능성을 보여 준다. PID 제어기는 이득값의 조절에 의하여 기대되는 성능을 얻을 수 있더라도 시스템에 외란이 가해지면 기대되는 성능을 내지 못하게 된다. 그러나 신경망제어기를 접속함으로써 외란에 대한 신경망제어기의 능동적인 반응으로 일정한 학습시간이 지나면, 시스템의 변화에 서오는 제어성능의 저하를 보상하여 항상 요구성능을 유지하게 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 ER유체를 작동 유체로 하는 새로운 형태의 서보시스템인 ER밸브 브리지-실린더 시스템을 제안하여 위치 추적제어를 수행하였다. 작동 유체의 유동 특성과 전기장 부하에 따른 ER유체의 빙행 특성 모델을 연계하여 ER 밸브의 설계와 제작을 수행하였다. 기존 밸브와는 달리 ER 밸브는 매우 단순화된 구조로서 전기장의 크기만으로 요구 성능을 실현할 수 있다. 제작된 ER 밸브를 이용하여 브리지 시스템을 제작하고, 실린더 시스템과 연계하여 역학적 모델링을 통한 지배 방정식을 도출하였고, 학습 능력을 보유한 신경 제어 기법을 적용하여 매우 우수한 실린더의 위치 추적 제어 성능을 얻었다. 기존의 유압 서보시스템에서는 유동 흐름을 제어하기 위해 각종 밸브의 개폐 작용에 의한 기계적인 구동 방법을 이용하지만, 제안된 ER 밸브 브리지-실린더 시스템은 이러한 기계적인 구동 장치 없이 전기장의 크기만으로 방향 전환 및 위치 제어를 수행함에 따라 정확하고 빠른 응답 특성과 함께 밸브 자체의 내구성에서도 상당한 이점이 있다. 따라서 제안된 시스템은 기존의 서보시스템을 이용한 로봇, 능동 현수 장치등 각종 유압 제어 시스템에 응용될 수 있다.

후기

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

참고문헌

- [1] D. A. Brooks, "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices", *Journal of Modern Physics B*, Vol.6, pp.2705-2730, 1992.
- [2] H. Miyamoto, M. Kawato, T. Setoyama and R. Suzuki, "Feedback-error-learning Neural Network for Trajectory Control of a Robotic Manipulator", *Neural Networks*, Vol. 11, pp.251-265, 1988.
- [3] M. Nakano, T. Yonekawa, "Pressure Response of ER Fluid in a Piston Cylinder-ER Valve System", *Proceedings of the Fourth International Conference on Electrorheological Fluids*, pp.477-489, 1994.
- [4] A. R. Plummer, N. D. Vaughan, "Robust Adaptive Control for Hydraulic Servosystems", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 118, pp. 237-244, 1996.
- [5] J. Watton, *Fluid Power Systems*, Prentice Hall, London, 1989.
- [6] 이효정, 김기선, 정달도, 최승복, 정재천, "전기유동유체를 이용한 실린더형 밸브의 성능 고찰", *한국정밀공학회지*, 제 8 권, 제 4호, pp.428-432, 1994.