

ER 밸브 작동기를 이용한 3 자유도 실린더 시스템의 위치제어 Position Control of 3 D.O.F. Cylinder Systems Using ER Valve Actuators

조 명 수 (인하대 대학원)*, 최 승 복(인하대), 김 재 환(인하대), 정 재 천(인하대)

M. S. Cho(Inha Univ. Graduate School)*, S. B. Choi(Inha Univ.), J. H. Kim(Inha Univ.), C. C. Cheong(Inha Univ.)

ABSTRACT

This paper presents the position control of a closed-loop cylinder system using ER(electro-rheological) valve actuators. Following the field-dependent pressure analysis of the ER valve actuators on the basis of Bingham model of ER fluids, a 3 d.o.f. closed-loop cylinder system having the heave, roll and pitch motions is proposed. The governing equations of motion are derived using Lagrange's equation, and a control model is established by considering system uncertain parameters such as load conditions. A sliding mode controller which has inherent robustness to system uncertainties is adopted to achieve robust tracking control performance. Tracking control results for sinusoidal trajectory were presented in order to demonstrate the effectiveness of the proposed control system.

Key Words : ER Fluid (ER 유체), ER Valve Actuator (ER 밸브 작동기), Hydraulic Cylinder System (유압 실린더 시스템), Sliding Mode Controller (슬라이딩 모드 제어기)

1. 서 론

병렬형 매니퓰레이터(parallel manipulator)는 첨단 부(end effector)와 기저계(base frame)가 2개 이상의 병렬 링크에 의해 연결되어 폐루프 구조를 형성하고 있다. 따라서 직렬형 매니퓰레이터(serial manipulator)보다 구조적으로 높은 강성도와 정밀도 그리고 안정성을 지니기 때문에 고속 고부하 고정밀 운동에 적합하다. 한편 유압시스템은 다른 동력 전달 시스템과 비교할 때 부피에 비하여 매우 큰 힘을 낼 수 있고, 시스템의 안정성과 직결되는 댐핑특성이 우수하기 때문에 산업 현장에서 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 산업 시스템이 고속, 고정밀화되는 추세에 따라 유압시스템도 이에 따르는 성능의 향상이 요구되었고, 이에 중심이 되는 서보시스템의 성능향상에 많은 연구가 이루어지고 있다. 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 "ER 유체"라 칭함)를 작동유체로 하는 유압제어시스템을 제안하게 되었다.^(1,2,3)

ER 유체는 부가되는 전기장의 강도에 따라 역학적 특성이 변하는 유체를 말하며, 외면상 가장 두드

러진 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 항복전단응력을 갖게 되는 빙햄(Bingham) 유체로 변하게 된다. 이때 발생하는 ER 유체의 항복전단응력은 부하되는 전기장의 함수가 되며, 전기장을 조절(tuning)함으로써 밸브 시스템에서 요구되는 압력 크기를 얻을 수 있다. 그리고, 전기장에 대한 ER 유체의 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.

본 연구에서는 3 개의 ER 밸브 작동기를 이용하여 3 자유도 폐루프 실린더 시스템의 위치제어를 수행하고자 한다. 이를 위해 먼저 자체 조성한 ER 유체의 빙햄특성을 실험적으로 측정하고 이를 근거로 ER 밸브를 모델링하였다. 또한 라그랑지 방정식을 이용하여 시스템의 운동방정식을 도출하였다. 위치 제어 구현을 위하여 시스템의 비선형성과 불확실성 및 외란에 대하여도 강건한 성능을 보장하는 슬라이딩 모드 제어기법을 사용하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 여러 요구함수에 대한 위치 추적제어 결과를 고찰하였고 이를 통해 제안된 ER 밸브 작동기의 유용성을 입증하였다.

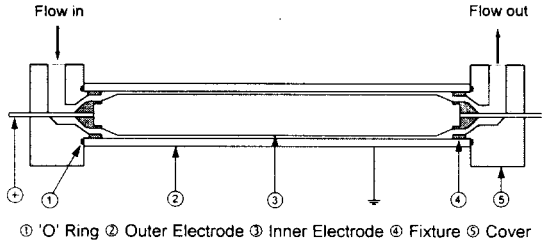


Fig. 1. Schematic diagram of ER cylindrical valve

2. ER 밸브 작동기

본 연구에서 제안된 ER 밸브의 형상과 내부 구조는 Fig.1에 나타난 바와 같다. 제작된 4개의 밸브를 이용하여 Fig.2의 ER 밸브 브리지 회로를 구성하였으며, 이로부터 전기장의 조율만으로도 유체의 방향과 유량 조절을 가능하게 하였다. 제안된 실린더형 ER 밸브의 압력강하 수식을 도출하면 다음과 같다.

$$\Delta P_E = \Delta P_{ER} + \Delta P_n = 2 \frac{L}{h} \tau_y(E) + RQ_E \quad (1)$$

여기서 ΔP_{ER} 은 ER유체에 전기장이 가해짐에 따라 생성되는 전단응력 $\tau_y(E)$ 에 의한 압력강하이고, ΔP_n 는 유체의 흐름에 따른 유체점성저항 R 에 의한 압력강하이다. 또한 L 은 밸브 전극의 길이, h 는 전극 사이의 간극, 그리고 Q_E 는 전기장이 부하될 경우에 간극 사이를 통과하는 유량을 나타낸다.

Fig.2의 ER 밸브 브리지 회로에서 피스톤 양단에 주어지는 압력은 다음과 같이 표현된다.

$$P_a = \frac{1}{2} (P_1 + P_2 - R(Q_1 - Q_4) - \Delta P_{ER}(E_1) + \Delta P_{ER}(E_2)) \quad (2)$$

$$P_b = \frac{1}{2} (P_1 + P_2 + R(Q_3 - Q_2) + \Delta P_{ER}(E_1) - \Delta P_{ER}(E_2))$$

액츄에이터와 밸브 브리지 시스템의 운동 방정식

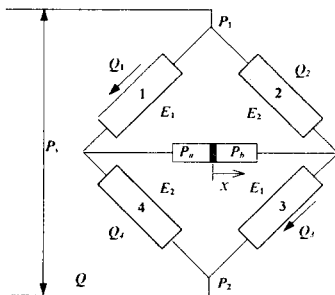


Fig. 2. ER valves bridge system

으로부터 다음 식을 유도해 낼 수 있다

$$Q_1 - Q_4 = A\dot{x} + C_a \frac{dP_a}{dt}, \quad Q_3 - Q_2 = A\dot{x} - C_b \frac{dP_b}{dt} \quad (3)$$

$$C_a = \frac{V_a}{\beta_{ER}}, \quad C_b = \frac{V_b}{\beta_{ER}} \quad C = C_a \approx C_b$$

식(2)와 식(3)으로부터 피스톤 양단에 걸리는 압력은 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$\Delta P = P_a - P_b$$

$$\frac{d(\Delta P)}{dt} = \frac{2}{RC} \Delta P + \frac{2A}{C} \dot{x} + \frac{2}{RC} [\Delta P_{ER}(E_1) - \Delta P_{ER}(E_2)] \quad (4)$$

3. 시스템 모델링

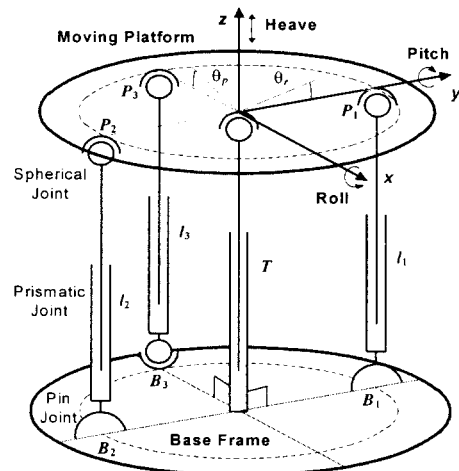
Fig.3은 본 논문에서 제안된 3 자유도 실린더 시스템의 개략도로서 첨단부와 기저체가 3개의 실린더 작동기에 의해서 연결되어 페루프 구조를 형성하고 있다. 이때 각각의 실린더 작동기를 구동함으로써 3 자유도의 운동(heave, roll, pitch)을 실현할 수 있다. 여기서 b 는 기저체의 중심으로부터 조인트 B_i 까지의 거리이고, p 는 첨단부의 중심으로부터 조인트 P_i 까지의 거리이다.

시스템의 정기구학 및 역기구학적 해석은 아래의 식으로부터 얻어낼 수 있다.

$$l_1^2 = (b - p \cos \theta_r)^2 + (T + p \sin \theta_r)^2 \quad (5)$$

$$l_2^2 = (b - p \cos \theta_r)^2 + (T - p \sin \theta_r)^2$$

$$l_3^2 = (b - p \cos \theta_p)^2 + (p \sin \theta_p \sin \theta_r)^2 + (T + p \sin \theta_p \cos \theta_r)^2$$



$$b=p=125 \text{ mm}, \quad m_o=3 \text{ kg}, \quad I_o=I_{po}=1.041e-3 \text{ kgm}^2$$

Fig. 3. Schematic diagram of 3 d.o.f. cylinder system

또한 침단부의 선속도(\dot{T}) 및 각속도($\dot{\theta}_r, \dot{\theta}_p$), 그리고 입력링크의 선속도($\dot{i}_1, \dot{i}_2, \dot{i}_3$)와의 관계는 자코비안행렬로 나타나며, 링크의 입력 힘과 침단부의 힘/모멘트 간의 관계는 가상일의 원리로부터 표현될 수 있다.⁽⁵⁾

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{i}_3 \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{T} \\ \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_p \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} \quad J = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & j_{13} \\ j_{21} & j_{22} & j_{23} \\ j_{31} & j_{32} & j_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ M_x \\ M_y \end{bmatrix} = J^T \begin{bmatrix} A \cdot \Delta P_1 \\ A \cdot \Delta P_2 \\ A \cdot \Delta P_3 \end{bmatrix} = J^T \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

이상의 식들을 이용하여 시스템의 운동방정식을 도출할 수 있으며 외란 및 부하조건(loading condition)의 불확실성을 고려하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_e \ddot{T} &= F_x - m_e g - F_f & m_r &= m_o + \Delta m, \quad |\Delta m| \leq \alpha_1 < 0.5 m_o \\ I_{r_e} \ddot{\theta}_r &= M_x - M_{yf} & I_{r_e} &= I_{r_o} + \Delta I_r, \quad |\Delta I_r| \leq \alpha_2 < 0.5 I_{r_o} \\ I_{p_e} \ddot{\theta}_p &= M_y - M_{yf} & I_{p_e} &= I_{p_o} + \Delta I_p, \quad |\Delta I_p| \leq \alpha_3 < 0.5 I_{p_o} \end{aligned} \quad (8)$$

부가된 시스템의 불확실성은 정합조건(matching condition)을 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.⁽⁶⁾

$$\begin{aligned} \frac{1}{m_o + \Delta m} &= \frac{1}{m_o} (1 + \gamma_1), \quad |\gamma_1| < \phi_1 < 1 \\ \frac{1}{I_{r_o} + \Delta I_r} &= \frac{1}{I_{r_o}} (1 + \gamma_2), \quad |\gamma_2| < \phi_2 < 1 \\ \frac{1}{I_{p_o} + \Delta I_p} &= \frac{1}{I_{p_o}} (1 + \gamma_3), \quad |\gamma_3| < \phi_3 < 1 \end{aligned} \quad (9)$$

4. 제어기 설계

일반적으로 유압 서보 시스템은 측정 불가능하거나 생략된 파라미터, 외란 등과 같은 불확실성과 비선형성으로 인하여 시스템을 정확하게 모델링하는 것이 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 시스템에 존재하는 비선형성과 불확실성 및 외란에 대하여 강건한 성능을 보장하기 위해 슬라이딩 모드 제어 기법을 사용하였다. 제어기 설계의 목적은 시간이 경과함에 따라 $T(x_1)$ 및 $\theta_r(x_2), \theta_p(x_3)$ 가 각각 요구 경로(x_{i_d})를 추적하는 것 이므로 다음과 같은 슬라이딩 서피스를 설정하였다.

$$\begin{aligned} S_k &= \sum_{i=1}^3 (C_{k(i)} \cdot e_i + C_{k(i+3)} \cdot \dot{e}_i) \quad k=1,2,3 \\ e_i &= x_i - x_{i_d}, \quad \dot{e}_i = \dot{x}_i - \dot{x}_{i_d} \end{aligned} \quad (10)$$

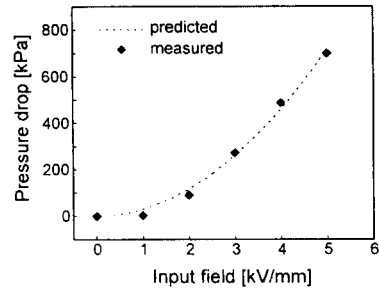


Fig. 4. Field-dependent valve pressure drop

여기서 $C_{k(i)}$ 는 슬라이딩 서피스의 기울기를 나타낸다. 알맞은 슬라이딩 서피스의 기울기를 결정하여 임의의 오차공간상에 있는 RP(representative point)를 이 슬라이딩 서피스 위로 보낼 수 있다면 추적오차는 점근적으로 영이 될 것이다. 이것은 다음과 같은 슬라이딩 서피스 존재조건을 만족함으로써 성취할 수 있다.

$$S_k \cdot \dot{S}_k < 0 \quad (11)$$

위의 조건을 만족시키기 위하여 다음과 같은 슬라이딩 모드 제어기를 제안한다.

$$u_k = -\frac{3}{i-1} \frac{1}{1-\phi_i} \left\{ C_{k(i)} (|x_{2i}| + |x_{2i_d}|) + C_{k(2i)} |x_{2i_d}| \right\} \text{sgn}(S_k) - K_k \text{sgn}(S_k) \quad (12)$$

여기서 K_k 는 불연속 계인이다.

5. 결과 및 고찰

시뮬레이션의 수행에 앞서, 본 연구에서 제안된 ER 밸브의 전기장 인가에 따른 압력강하 ΔP_{ER} 를 파악하는 것이 필요하다. ER 밸브의 압력강하 특성에 대한 실험결과는 Fig.4와 같다. 점선으로 표시된 곡선은 빙햄테스트에서 얻어진 항복전단응력으로부터 얻은 예측값으로 실험에서 얻은 압력강하와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

ER 밸브 작동기의 특성치를 바탕으로 3자유도 실린더 시스템의 위치제어를 수행하였다. 요구위치 함수는 각각 다음과 같은 주기함수를 선택하였다.

$$\begin{aligned} T_d &= 15 \sin(2\pi t) \quad [mm] \\ \theta_{r_d} &= 5 \sin(2\pi t) \quad [deg] \\ \theta_{p_d} &= 15 \sin(2\pi t + \pi) \quad [deg] \end{aligned} \quad (13)$$

시스템의 제어를 위해서는 먼저 3개의 실린더의 길이를 변위측정기(LVDT)로부터 얻어낸후 기구학적

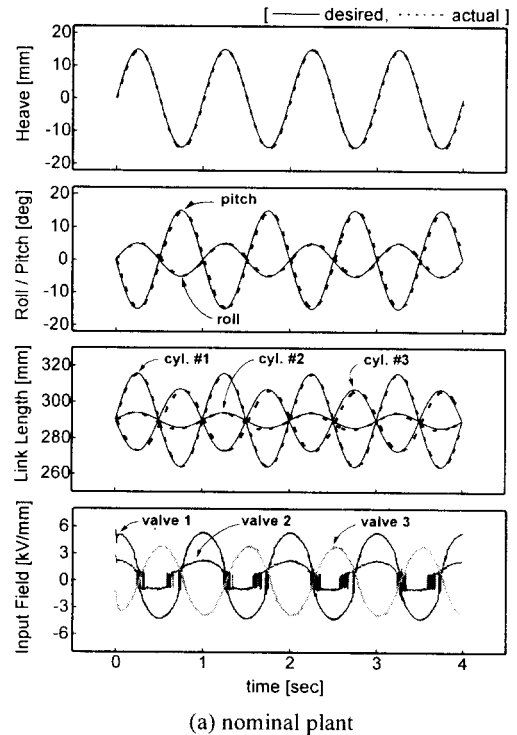
해석을 통해 첨단부(end effector)의 위치(position / orientation)를 계산해 내며, 이 값들을 요구위치와 비교하여 되먹임 하므로써 추적제어를 수행하게 된다. Fig.5 는 요구위치함수에 대한 위치 추적제어 시뮬레이션 결과이다. 공칭 및 불확실성 시스템에 있어 매우 우수한 추적제어가 이루어지는 것을 볼 수 있으며, 이때 각 밸브를 통해 입력된 전기장의 크기도 주어진 한계내에서 알맞게 공급된 것을 고찰할 수 있다.

6. 결론

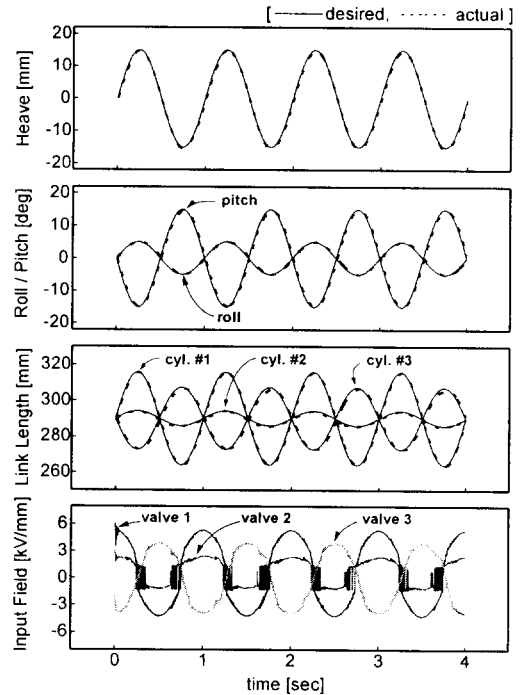
본 연구에서는 ER 유체를 작동유체로 하는 새로운 형태의 서보제어시스템을 이용하여 3 자유도 실린더 시스템의 위치 추적제어 시뮬레이션을 수행하였다. 작동유체의 유동특성과 전기장 부하에 따른 ER 유체의 빙햄특성 모델을 연계하여 ER 밸브 작동기를 제작하였으며 지배방정식을 도출하였다. 시스템의 비선형성과 불확실성 및 외란에 대하여 강건한 성능을 보장하는 슬라이딩 모드 제어기법을 사용하여 매우 우수한 위치 추적제어 성능을 얻었다. 현재 제안된 제어시스템의 실험적 구현이 수행되고 있다.

7. 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. 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.
3. S. B. Choi, C. C. Cheong, J. M. Jung and Y. T. Choi, "Position Control of an ER Valve-Cylinder System via Neural Network Controller", *Mechatronics*, Vol. 7, No. 1, pp. 37-52, 1997.
4. J. Watton, *Fluid Power Systems*, Prentice Hall, London, 1989.
5. K. Kosuge, M. Okuda, H. Kawamata, T. Fukuda, "Input/Output Force Analysis of Parallel Link Manipulators", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 714-719, 1993.
6. G. Leitmann, "On the Efficacy of Nonlinear Control in Uncertain Linear Systems", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102, pp. 95-102, 1981.



(a) nominal plant



(b) with 50% load uncertainty

Fig. 5. Sinusoidal trajectory tracking control ; simulated