

ER-Valve 작동기를 이용한 Two link Robot의 위치제어

Two Linked-Robot Actuated by ER-Valve Systems

이호근* 김휘동** 인하대학교 기계공학과

Abstract

This paper presents performance analysis of two-linked robot system using ER (electro rheological) valve actuators. An ER fluid consisting of soluble chemical starches (particles) and silicone oil is made and its field-dependent yield stress is experimentally distilled using electro-viscometer. From this result, the design parameters of ER valve are determined. Based on parameter study, an ER valve system is designed and manufactured. Furthermore, the measured pressure drop is compared with predicted one obtained from the Bingham model. Following the evaluation of field-dependent pressure drop of ER valve, a two-linked robot system with two ER valve actuators is then constructed and its governing equation of motion is derived. From this equation, PID controller is established. Consequently, control performances of the proposed two-linked robot system featuring ER valve are evaluated.

1. 서론

위치제어 시스템의 발전은 산업에 상당히 중요한 영향을 미친다. 특히 생산 조립공정과 정밀공작기계에서의 위치 제어는 높은 정밀도를 필요로 한다. 위치제어를 하는데, 있어서 가장 어려운 점은 작동기의 각종 마찰과 외란 등이다.

대부분의 위치제어 시스템에 피드백 제어기가

*: 인하대학교 기계공학과 대학원

** : 인하대학교 기계공학과 대학원

사용 되지만 마찰 등의 조건에 취약한 단점이 있다. 그러나 높은 Gain값을 부여 함으로 이 문제를 극복할 수 있다.

또한 대부분의 피드백 작동기에 서보 모타가 사용되지만 가격이 비싼 문제점이 있기 때문에, 본 논문에서는 Two-linked Robot system의 위치제어를 위하여 ER 작동기를 사용한 새로운 작동 메커니즘을 제안 하였다. 이를 위해 ER 유체의 전기장에 따른 항복전단응력에 기초로 밸브 작동기를 제작 하였으며, Two-linked Robot 과 밸브 작동기의 지배 방정식을 유도 하였다. 이로부터 PID controller를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2. ER 밸브-브리지-실린더 시스템

2-1 ER 밸브의 설계 및 제작

ER(electro-rheological)유체는 부하 되는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 것으로, 일반적으로 비전도성 유체 속에 약한 전도성 입자들을 분산시킨 콜로이드 용액이다. 1949년 Winslow 가 부하 되는 전기장에 의해 실리카를 입자로 한 유체의 점성이 변함을 처음으로 발표하였으며, 따라서 Winslow 유체라고도 불리운다. ER 유체의 특성은 다음과 같은 빙햄 모델로서 그 역학적 성질이 표현된다.

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

여기서, τ 는 ER 유체의 전단응력을 나타내고, η 는 ER 유체의 점성계수이며, $\dot{\gamma}$ 은 전단 속도비를 나타낸다. $\tau_y(E)$ 는 전기장 부하에 따른 ER 유체의 항복응력을 표현하는 것으로 전기장의 세기에

따라 지수적으로 증가하며, 식 (1)에서 비례상수 α 와 지수 β 는 ER 유체 조성에 사용된 용매와 입자의 종류, 입자의 중량비, 수분함유량 등에 따라 달라지는 ER 유체의 고유특성치로써, 전기점도계를 사용하여 병행특성 실험을 수행함으로써 구할 수 있다. 본 연구에서는 실리콘오일(점도: 30cs)을 용매로 하고 특수 화학 처리된 전분계입자를 전도성입자로 사용하여 입자중량비 30%로 자체조성한 실리콘계 ER 유체를 사용하였다. 로봇시스템 모델의 작동 시 온도를 고려하여 ER 유체의 온도를 55°C 로 고정하고, 형성된 전극을 통하여 전기장을 0~3kV/mm 까지 증가 시키면서, 매 전기장마다 전단비를 0~700[1/s]까지 단계적으로 증가 시켜 얻은 실험결과를 Fig. 3 에 나타내었다. 전단비가 영(zero)인 지점에서의 전단응력을 항복응력으로 도출하여 식 (1)에서의 전기장에 의한 항복응력 $\tau_y(E)$ 로 표현하면 전기장 E 에 대하여 $144.6 E^{1.77}$ Pa 의 관계가 된다. 여기서 E 의 단위는 kV/mm 이다.

전기장 부하 시 ER 유체는 병행특성으로 인하여 유체의 흐름에 저항하는 특성을 갖게 되며, 이를 이용한 실린더형 ER 밸브의 전극형상을 간략하게 도시하면 Fig. 4(a)와 같다. 전기장 무부하 시, ER 밸브의 압력강하는 오직 유체의 점성에 의해서만 발생하고, 유량에 비례하며, 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta P_\eta = 12\eta \frac{L}{b_e h^3} Q_{NE} \quad (2)$$

여기서, L 은 밸브 전극길이, b_e 는 평판으로 환산한 전극의 유효너비, h 는 전극 사이의 간극, 그리고 Q_{NE} 는 전기장 무부하 시 간극사이를 통과하는 유량을 나타낸다. 반면에, 전기장을 부하하면 ΔP_η 이외에 ER 유체에 전기장이 가해짐으로써 생성되는 항복전단응력에 의한 압력강하 ΔP_{ER} 이 추가적으로 발생하게 되며, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

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

따라서, 유체가 유동할 때 발생할 수 있는 형상변화에 따른 압력손실을 무시하고, 동일단면적에서의 내부압력은 모든 방향으로 균일하게 작용한다

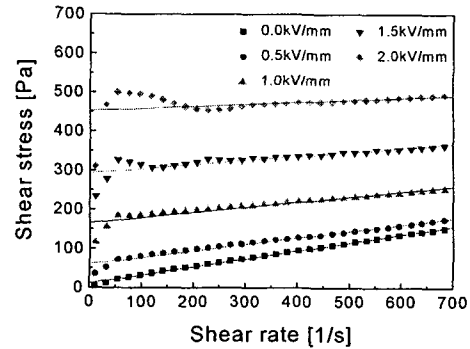


Fig. 1 Bingham property of ER fluid at 55°C.

고 가정하면, 전기장 부하 시 ER 밸브 한 개에서 얻어지는 압력강하 ΔP_E 는 다음과 같다.

$$\Delta P_E = \Delta P_{ER} + \Delta P_\eta = 2 \frac{L}{h} \tau_y(E) + 12\eta \frac{L}{b_e h^3} Q_E \quad (4)$$

여기서, Q_E 는 전기장 부하 시 간극사이를 통과하는 유량을 나타낸다. 식 (4)로부터 알 수 있듯이, ER 밸브의 성능은 전극의 길이, 간극 등과 같은 설계변수와 전기장에 따른 항복응력의 크기에 영향을 받는다.

소형 하역시스템 모델에서 플랫폼을 구동하기 위해 요구되는 압력을 기준으로 전기장에 따른 압력강하를 해석하였고, 이로부터 전극 길이 L 을 264mm, 반지름 r 을 12.5mm, 전극간의 거리 h 를 0.8mm 로 하여 실린더형 ER 밸브를 제작하였다. Fig. 4(b)는 제작된 ER 밸브의 조립개략도를 나타낸다. ER 밸브는 안쪽면이 호닝 처리된 외부전극(②)내에 S45C 봉으로 제작된 내부전극(③)이 결합된 형태를 갖고 있으며, 외부전극과 내부전극의 간격을 일정하게 유지하도록 MC 플라스틱으로 지지부(④)를 만들었고, 실링을 위하여 “O”링(①)을 사용하였다.

Fig. 5 는 ER 밸브에 계단과 전기장을 인가하여 얻어진 압력강하 특성으로서 전기장 증가에 따라 압력강하량이 전기장의 크기에 지수적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며, 5kV/mm 인가 시 약 9bar 의 압력강하를 나타낸다. 전기장의 크기에 따라 시상수값이 약간의 차이는 있으나 크게 다르지 않으며 3kV/mm 인가시의 시상수는 약 6ms 이다. 이러한 반응시간은 플랫폼 작동속도에 비하면 매우 빠른 반응시간으로서 ER 밸브의 동적특성은 제어기 설계 시 고려하지 않았다.

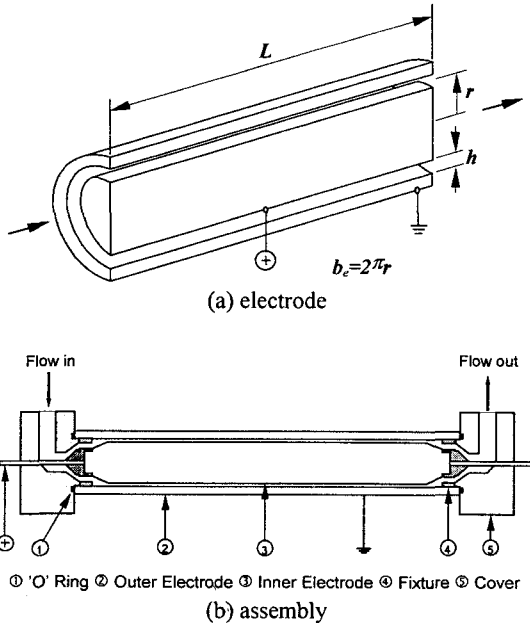


Fig. 2 Schematic diagram of cylindrical ER valve.

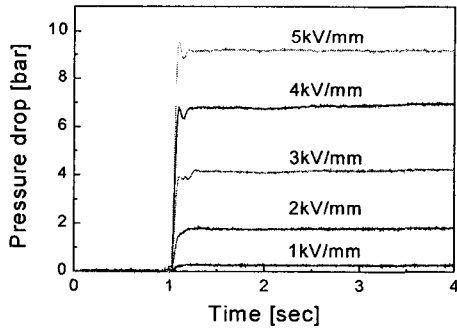


Fig. 3 Pressure drop due to step input field.

2-2 ER 밸브-브리지의 회로구성

ER 밸브의 압력강하를 이용하여 실린더 피스톤의 위치 및 속도를 제어하기 위해 Fig. 6 과 같은 브리지 모델이 도입되었다.⁽³⁾ 밸브에 흐르는 유량을 각각 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 라고 정의하고, 밸브 1, 3 에 가해지는 전기장의 세기를 E_1 , 밸브 2, 4 에 가해지는 전기장의 세기를 E_2 라고 하면, 실린더 양단에서 발생하는 압력강하는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_1 - P_a &= RQ_1 + \Delta P_{ER}(E_1) \\ P_1 - P_b &= RQ_2 + \Delta P_{ER}(E_2) \\ P_a - P_2 &= RQ_4 + \Delta P_{ER}(E_2) \\ P_b - P_2 &= RQ_3 + \Delta P_{ER}(E_1) \end{aligned} \quad (5)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4$$

여기서, R 은 식 (2)로부터 다음과 같다 ; $R = 12\eta L / b_c h^3$. 4 개의 밸브조건이 동일하다고 가정하면 피스톤 양단에 주어지는 압력은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{2}(P_1 + P_2 - R(Q_1 - Q_4) - \Delta P_{ER}(E_1) + \Delta P_{ER}(E_2)) \\ P_b &= \frac{1}{2}(P_1 + P_2 + R(Q_3 - Q_2) + \Delta P_{ER}(E_1) - \Delta P_{ER}(E_2)) \end{aligned} \quad (6)$$

상기식으로부터 공급압력이 일정할 경우 작동기 양단에 걸리는 압력은 밸브에 가해지는 전기장과 유량의 함수로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 그리고, 유체의 연속방정식을 적용하여 실린더 내부

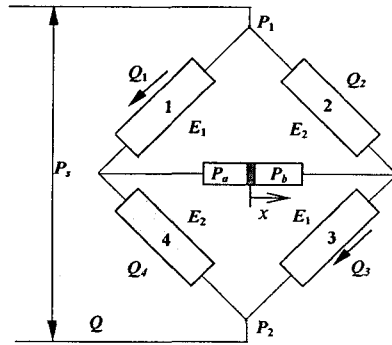


Fig. 4 ER valve bridge circuit.

에서의 피스톤의 운동을 모델링하면 다음 식이 얻어진다.⁽⁴⁾

$$\begin{aligned} Q_1 - Q_4 &= A\dot{x} + C_a \frac{dP_a}{dt}, \quad C_a = \frac{V_a}{\beta_{ER}} \\ Q_3 - Q_2 &= A\dot{x} - C_b \frac{dP_b}{dt}, \quad C_b = \frac{V_b}{\beta_{ER}} \\ C_a &\cong C_b = C = \frac{V_a + V_b}{2\beta_{ER}} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, A 는 피스톤 램(ram)의 면적, V_a 와 V_b 는 검사체적(control volume) a 와 b 의 부피, 그리고 β_{ER} 은 ER 유체의 체적탄성계수(bulk modulus)이다. 이제, 식 (7)을 식 (6)에 대입하고, 실린더 양단에 걸리는 압력차를 $\Delta P = P_a - P_b$ 로 정의하면, 다음 식을 얻게 된다.

$$\frac{d(\Delta P)}{dt} = -\frac{2}{RC}\Delta P - \frac{2A}{C}\dot{x} - \frac{2}{RC}[\Delta P_{ER}(E_1) - \Delta P_{ER}(E_2)] \quad (8)$$

상기식에서 $\Delta P_{ER}(E_1)$, $\Delta P_{ER}(E_2)$ 는 전기장 부하 시 ER 밸브에서의 압력강하를 나타내므로 항상 양의 값을 갖는다. 또한 하나의 작동유체를 사용하므로 ΔP 의 제어는 운동방향에 따라 아래의 식과 같이 단일 제어입력으로 고려할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{When } \dot{x} > 0, \Delta P_{ER}(E_2) > 0 \text{ and } \Delta P_{ER}(E_1) &= 0 \\ \text{When } \dot{x} < 0, \Delta P_{ER}(E_1) > 0 \text{ and } \Delta P_{ER}(E_2) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

3.시스템 모델링

3-1 Two-linked Robot의 운동 지배 방정식

Fig.5에 나타난것과 같이 Robot의 두개의 Arm은

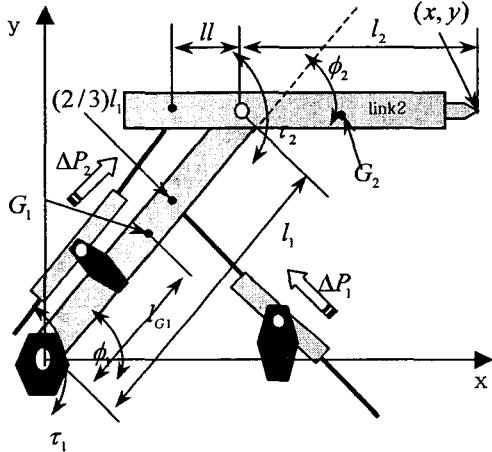


Fig.5 Schematics of Two-linked Robot System

ER밸브-브리지에 전기장을 부하함으로써 발생하는 실린더 피스톤 양단의 압력차에 의해 구동된다. Robot 끝단의 위치제어를 위하여 동적 모델링을 통해 운동지배방정식을 구하면 다음과 같다.

Fig.5의 평면 2링크 머니플레이터 운동방정식을 라그랑지의 방정식에 의해 도출한다. Fig5와 같이 일반화 좌표를 관절각도 (ϕ_1, ϕ_2) 로하면 일반화력은 각 관절에 작용하는 토크(τ_1, τ_2)가 된다. 운동에너지를 계산하는 데는 각 링크의 무게 중심 속도가 필요하므로 우선 이것을 구한다.

링크1의 중심위치 G_1 의 좌표는

$x_{G1} = l_{G1} \cos \phi_1$, $y_{G1} = l_{G1} \sin \phi_1$ 이고 그 속도는 양변을 시간 t 로 미분 하여

$\dot{x}_{G1} = -\dot{\phi}_1 l_{G1} \sin \phi_1$, $\dot{y}_{G1} = \dot{\phi}_1 l_{G1} \cos \phi_1$ 이 된다. 따라서

$v_{G1}^T v_{G1} = (\dot{x}_{G1}, \dot{y}_{G1})^T (\dot{x}_{G1}, \dot{y}_{G1}) = \dot{x}_{G1}^2 + \dot{y}_{G1}^2 = l_{G1}^2 \dot{\phi}_1^2$ 이 된다. 중심 G_2 에 대해서도 동일하게 계산하면

$$x_{G2} = l_1 \cos \phi_1 + l_{G2} \cos(\phi_1 + \phi_2)$$

$$y_{G2} = l_1 \sin \phi_1 + l_{G2} \sin(\phi_1 + \phi_2)$$

가 되고, 그 속도는

$$\dot{x}_{G2} = -\dot{\phi}_1 l_1 \sin \phi_1 - (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) l_{G2} \sin(\phi_1 + \phi_2)$$

$$\dot{y}_{G2} = \dot{\phi}_1 l_1 \cos \phi_1 - (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) l_{G2} \cos(\phi_1 + \phi_2)$$

가 된다. 따라서 $v_{G2}^T v_{G2}$ 는 다음과 같이 된다.

$$v_{G2}^T v_{G2} = l_1^2 \dot{\phi}_1^2 + l_{G2}^2 (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)^2 + 2l_1 l_{G2} \dot{\phi}_1 (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) \cos \phi_2$$

한편, 회전 운동 에너지는 중심 주위의 에너지를 생각하면 되므로 링크 j 의 중심을 통과하는 z 축 주위의 관성 모멘트를 I_j 라고 하면

$$\frac{1}{2} \omega_j^T I_j \omega_j = \frac{1}{2} I_j \omega_j^2 \text{ 이 된다.}$$

여기서 링크 j 의 질량을 m_j 라고 한다.

$\omega_1 = \dot{\phi}_1$, $\omega_2 = (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)$ 이므로 시스템의 전체 운동 에너지 T 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 (m_j v_j^2 + I_j \omega_j^2) \\ &= \frac{1}{2} m_1 l_{G1}^2 \dot{\phi}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \left\{ l_1^2 \dot{\phi}_1^2 + l_{G2}^2 (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)^2 + \right. \\ &\quad \left. + 2l_1 l_{G2} \dot{\phi}_1 (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) \cos \phi_2 \right\} \\ &\quad + \frac{1}{2} I_1 \dot{\phi}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)^2 \end{aligned}$$

한편, 퍼텐셜 에너지는 y 축의 $-$ 방향에 중력 방향이므로

$$\begin{aligned} U &= \sum_{j=1}^2 m_j g y_j \\ &= m_1 g l_{G1} \sin \phi_1 + m_2 g \{ l_1 \sin \phi_1 + l_{G2} \sin(\phi_1 + \phi_2) \} \end{aligned}$$

이다. 위의 식들에서 라그랑지안 L 을 구하고 그 결과를 라그랑지의 방정식

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} &= Q_i, (i=1, \dots, n) \\ L &= T - U \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

에 의해 계산하면, 머니플레이터의 운동방정식이 구해진다. 식 (10)에서 일반화 좌표 q_i 는 위의 머

니플레이터에서는 ϕ_1, ϕ_2 두 가지이다. 여기서는 이 중의 ϕ_1 에 관한 계산을 든다.

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}_1} = \{m_1 l_{G1}^2 + m_2(l_1^2 + l_{G2}^2) + 2m_2 l_1 l_{G2} \cos \phi_2 + I_1 + I_2\} \dot{\phi}_1 + (l_{G2}^2 + m_2 l_1 l_{G2} \cos \phi_2 + I_2) \dot{\phi}_2$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}_1} \right) = \{m_1 l_{G1}^2 + m_2(l_1^2 + l_{G2}^2) + 2m_2 l_1 l_{G2} \cos \phi_2 + I_1 + I_2\} \ddot{\phi}_1 - 2m_2 l_1 l_{G2} \dot{\phi}_1 \dot{\phi}_2 \sin \phi_2 + (m_2 l_{G2}^2 + m_2 l_1 l_{G2} \cos \phi_2 + I_2) \ddot{\phi}_2 - m_2 l_1 l_{G2} \dot{\phi}_2^2 \sin \phi_2$$

$$\frac{\partial L}{\partial \phi_1} = \frac{\partial T}{\partial \phi_1} - \frac{\partial U}{\partial \phi_1} = -\frac{\partial U}{\partial \phi_1} = -m_1 g l_{G1} \cos \phi_1 - m_2 g \{l_1 \cos \phi_1 + l_1 \cos(\phi_1 + \phi_2)\}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi_1} = \tau_1 = \{I_1 + m_1 l_{G1}^2 + I_2 + m_2(l_1^2 + l_{G2}^2 + 2l_1 l_{G2} \cos \phi_2)\} \ddot{\phi}_1 + \{I_2 + m_2(l_{G2}^2 + l_1 l_{G2} \cos \phi_2)\} \ddot{\phi}_2 - m_2 l_1 l_{G2} (2\dot{\phi}_1 \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_2^2) \sin \phi_2 + m_1 g l_{G1} \cos \phi_1 + m_2 g \{l_1 \cos \phi_1 + l_{G2} \cos(\phi_1 + \phi_2)\}$$

변수 ϕ_2 에 대해서도 동일한 연산을 하면 ϕ_2 에 관한 계산을 할 수 있다. 이렇게 계산해서 만들어진 ϕ_1, ϕ_2 에 관한 2쌍의 미분방정식이 Fig.5의 머피플레이터의 운동방정식이다. 이 식을 벡터와 행렬을 사용하여 표현하면 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$H(\Phi) \ddot{\Phi} + h(\Phi, \dot{\Phi}) + g(\Phi) = \tau \quad (11)$$

여기서,

$$\Phi = (\phi_1, \phi_2)^T, \quad \tau = (\tau_1, \tau_2)^T$$

$$H(\Phi) = \begin{bmatrix} A_{-11} & A_{-12} \\ A_{-21} & A_{-22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

where;

$$A_{-11} = I_1 + m_1 l_{G1}^2 + I_2 + m_2(l_1^2 + l_{G2}^2 + 2l_1 l_{G2} C_2)$$

$$A_{-12} = I_2 + m_2(l_{G2}^2 + l_1 l_{G2} C_2)$$

$$A_{-21} = I_2 + m_2(l_{G2}^2 + l_1 l_{G2} C_2)$$

$$A_{-22} = I_2 + m_2 l_{G2}^2$$

$$h(\Phi, \dot{\Phi}) = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_{G2} (2\dot{\phi}_1 \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_2^2) S_2 \\ m_2 l_1 l_{G2} \dot{\phi}_1^2 S_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$g(\Phi) = \begin{bmatrix} m_1 g l_{G1} C_1 + m_2 g (l_1 C_1 + l_{G2} C_{12}) \\ m_2 g l_{G2} C_{12} \end{bmatrix} \quad (14)$$

이다. 식(12)은 관성항을 나타내며, 식(13)은 원심력과 코리올리력으로 구성되는 비선형항, 식(14)은 중력항이다. 또한 식(11)에서 τ 는 Valve System의 ΔP 와 관련이 있는데, link1에 관련된 피스톤의 ΔP 를 ΔP_1 , link2에 관련된 피스톤의 ΔP 를 ΔP_2 라 하면 τ 와 ΔP 의 관계식은 다음과 같다.

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} l_1 \Delta P_1 A \cos \frac{\phi_1}{2} \\ \Delta P_2 l l \end{bmatrix}$$

여기서 ΔP 는 식(8)과 식(9)에 의해서 계산되어 지는데 ΔP_2 의 경우는 식(9)가 다음과 같이 변형된다.

$$\text{When } \dot{x} > 0, \Delta P_{ER}(E_2) = 0 \text{ and } \Delta P_{ER}(E_1) > 0$$

$$\text{When } \dot{x} < 0, \Delta P_{ER}(E_1) = 0 \text{ and } \Delta P_{ER}(E_2) > 0$$

4. 제어시스템 구성

본 시스템의 위치제어를 위하여 이 논문에서는 PID Controller를 이용하였다.

PID Controller를 이용하기 위하여 에러방정식을 구해보면, 우선 식(11)를 다시 구성하여보면 다음과 같이 된다.

$$H(\Phi) \ddot{\Phi} + h(\Phi, \dot{\Phi}) + D\dot{\Phi} + g(\Phi) = \tau \quad (15)$$

(D 는 회전축 주위의 점성 마찰계수)

여기서 τ_n 을 새로운 입력으로 하여

$$\tau = H(\Phi) \tau_n + \hat{h}(\Phi, \dot{\Phi}) \quad (16)$$

$$\hat{h}(\Phi, \dot{\Phi}) = h(\Phi, \dot{\Phi}) + D\dot{\Phi} + g(\Phi)$$

로 표시되는 피드백 보상을 생각한다. 그래서 식

(16)을 식(15)에 대입하면

$$\ddot{\Phi} = \tau_n$$

이 된다. 따라서 $\tau_n = \ddot{\Phi}$ ($\ddot{\Phi}$ 는 머니플레이터의 바람직한 관절각 가속도)로 설정하면

$$\ddot{\Phi} = \ddot{\Phi}_d \quad (17)$$

가 되고 출력은 원하는 가속도 운동을 하게 된다. 이 방법은 식(15)에 포함되는 비선형항, 점성 마찰항, 줄력항 및 관성행렬이 정확하고 고속으로 구하면 식(16)의 토크를 이용함으로써 시스템 방정식이 식(17)이 되도록 조작 토크를 결정하는 방법으로서, 매우 간단하나 실제로는 이러한 가정들이 전부 완전히 충족되는 일이 없다. 특히 모델화 오차나 외란 토크는 반드시 존재한다고 볼 수 있다. 그래서 다시 다음과 같은 서보계를 구성하여 이들에 의한 영향을 경감화 하는 것을 생각했다.

$$\tau_n =$$

$$\ddot{\Phi}_d + K_p \left\{ (\Phi_d - \Phi) + K_D (\dot{\Phi}_d - \dot{\Phi}) + \frac{1}{K_I} \int (\Phi_d - \Phi) \right\}$$

여기서 궤도 추종 오차를

$$e = \Phi_d - \Phi$$

라고 정의하면 오차 e 에 관한 방정식 즉, 오차 방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{e} + K_p K_D \dot{e} + K_p e + \frac{K_p}{K_I} \int e = 0$$

5. 제어결과 및 고찰

Fig.6은 본 시스템의 시뮬레이션 결과이다.

Link1, Link2의 초기위치를

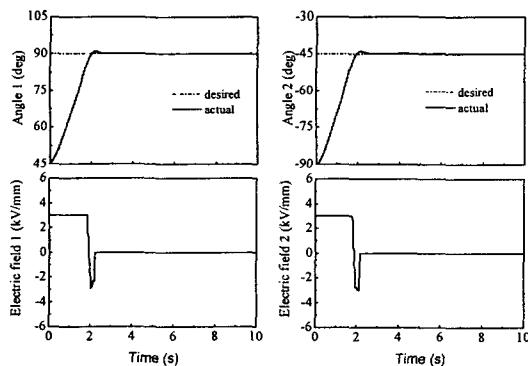


Fig.6 Simulation result of regulating control

$$\Phi = (\phi_1, \phi_2) = (45^\circ, -90^\circ) \text{로 두고}$$

목표값은 $\Phi = (\phi_d, \phi_{2d}) = (90^\circ, -45^\circ)$ 로 설정하였다. Fig.6에서 Angle 1, Angle 2는 ϕ_1, ϕ_2 를 나타내며 Electric field 1, Electric field 2는 Valve 1, Valve 2에 인가된 전기장이다.

위의 결과에서 보듯이 ER 밸브 작동기를 이용한 새로운 메커니즘은 빠른 반응속도를 보이며 안정적으로 목표 값에 도달하는 것을 알 수 있다. 사용된 요구 전압을 보면 3kV/mm가 부하 되었으나 ER유체의 특성상 낮은 전류가 필요하므로 전체 소요 전력량은 매우 낮은 것으로 나타난다. 따라서 기존 시스템에 비해 보다 적은 동력으로 효율적이고 정확한 작동을 수행 할 수 있어 산업기계 응용 시 우수한 성능을 보일 것으로 예측된다. 앞으로 이 시뮬레이션을 바탕으로 실제 Two-linked Robot System을 제작하여 Tracking control을 수행하고자 한다.

6. Reference

- (1) S. B. Choi, C. C. Cheong, J. M. Jung and Y. T. Choi, 1997, "Position Control of an ER Valve-Cylinder System via Neural Network Controller", *Mechatronics*, Vol.7, No.1, pp.37-52.
- (2) H. S. Lee and M. Tomizuka, 1996, "Robust Motion Controller Design for High-Accuracy Positioning Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Vol.43, No.1, pp. 48-55.
- (3) W. S. Levine, 1996, *The Control Handbook*, CRC Press, pp.345-361
- (4) Jean-Jacques E. Slotine Weiping Li "Applied Nonlinear Control" pp211-214, 394-397.