

# 비례방향제어밸브에 의해 구동되는 차동 실린더 부하계의 운동제어

## Motion Control of a Single Rod Cylinder-Load System Driven by a Proportional Directional Control Valve

이민우 · 조승호

M. W. Lee and S. H. Cho

**Key Words:** Electro-Hydraulic Servo System(전기-유압서보시스템), Simple Adaptive Control(단순적응 제어), Almost Strict Positive Real(ASPR), Parallel Feedforward Compensator(병렬 피드포워드 보상기)

**Abstract:** This paper deals with the issue of motion control of a single rod cylinder-load system using simple adaptive control (SAC) method. Prior to controller design, the experiment of open-loop response has been performed. Based on it, design parameters of transfer function are obtained. The effect of parallel feedforward compensator has been investigated by computer simulation, suppressing the oscillatory motion. Through experiments it is conformed that the SAC method gives good tracking performance compared to the PD control method.

### 기호 설명

- $u_m$  : 입력 신호(Reference input)
- $m$  : 질량 부하(Mass load)
- $\beta_e$  : 유효체적탄성계수(Effective bulk modulus)
- $p_1$  : 입구 측 압력 (Inlet chamber pressure)
- $p_2$  : 출구 측 압력 (Outlet chamber pressure)
- $Q_1$  : 입구 측 유량 (Inlet flow)
- $Q_2$  : 출구 측 유량 (Outlet flow)
- $y_p$  : 피스톤 변위(Displacement of piston)
- $x_s$  : 밸브 변위(Displacement of valve)
- K : 개루프 게인(Open-loop gain)
- $G_{pfc}(s)$  : 병렬 피드포워드 보상기 (Parallel Feedforward Compensator)
- $G_m(s)$  : 기준 모델 (Reference model)
- $k_e(t), k_x(t), k_u(t)$  : 가변적응게인

### 1. 서론

전기-유압서보시스템은 전기 시스템에 비해 소형으로 큰 출력을 낼 수 있는 장점을 가지고 있어서 건설기계, 방위산업, 항공산업, 자동차, 대형로봇등 다양한 분야에서 위치제어 구동기구로서 많이 사용되고 있다. 그러나 시스템에 내재된 비선형적 특성이나 외란과 부하의 변화에 기인한 서보계의 특성 변동 등으로 인해 시스템의 제어성능에 많은 영향을 받는다. 이러한 특성을 고려하여 본 연구에서는 제어 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 플랜트의 파라미터 변동에 강인한 적응제어 기법을 고려한다. 적응제어이론이 전제로 하는 가정, 즉 제어대상의 선형성, 플랜트 차수의 기지, 최소위상, 무외란조건을 유압서보기구가 만족하지 않을 때에는 적응제어 알고리즘에 관계된 제어파라미터의 조정이 곤란해진다<sup>1)</sup>. 본 연구에서는 플랜트의 특성을 고려하여 피드포워드 보상기  $G_{pfc}(s)$ 를 추가한 단순적응제어(Simple Adaptive Control : SAC)기법을 사용한다. PD제어와 SAC제어기법을 플랜트에 각각 적용하고 실험과 시뮬레이션을 통해 제어성능의 변화를 고찰하고자 한다.

### 2. 시스템 모델링

본 연구에 사용된 전기-유압서보시스템의 회로도 가 Fig. 1에 도시되어 있다. 유압 시스템은 유압 펌프, 비례방향제어밸브, 리니어포텐시오미터, 편로드

---

접수일: 2010년 6월 9일  
 조승호(교신저자): 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과  
 E-mail: shcho@hongik.ac.kr, Tel: 02-320-1682  
 이민우(발표자): 홍익대학교 대학원 기계공학과

유압실린더, 선으로 연결된 20kg의 질량을 갖는 중력방향 부하로 구성되어 있다. 본 연구에서 실린더 변위와 챔버 압력, 서보밸브의 스톱 변위는 14bit A/D컨버터를 통해 측정된다. 유압실린더의 한 쪽 끝에 선으로 연결된 부하는 중력방향의 힘을 받는다. 모든 실험은 릴리프밸브 설정압력  $p_s = 50\text{bar}$ 의 조건하에서 수행된다. 부하를 고려한 운동 방정식은 아래와 같이 정리된다.

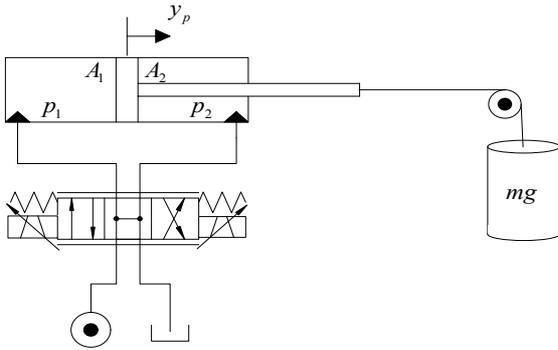


Fig. 1 Electro-hydraulic servo system

(i) 운동 방정식

$$\begin{aligned} \frac{dy_p}{dt} &= v \\ m \frac{dv}{dt} &= p_1 A_1 - p_2 A_2 - mg \end{aligned} \quad (1)$$

(ii) 서보 밸브와 유압실린더사이의 연속방정식

$$\frac{V_1}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} = Q_1 - A_1 v \quad (2)$$

$$\frac{V_2}{\beta_e} \frac{dp_2}{dt} = A_2 v - Q_2 \quad (3)$$

(iii) 서보 밸브의 동적 거동

$$\frac{dx_s}{dt} = v_s \quad (4)$$

$$\frac{dv_s}{dt} = -2\zeta_v \omega_v v_s + \omega_v^2 (k_a u_p - x_s) \quad (5)$$

제어기 설계를 위하여 편로드 실린더의 양쪽 챔버의 단면적을 ( $A_1 = A_2 = A$ )로 동일하다고 가정하면,  $V_1 = V_2 = V$  와  $Q_1 = Q_2$ 이며 비례제어밸브의 동적 거동을 무시한 시스템의 전달함수는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (6)$$

Fig. 2에 있는 플랜트 모델의 고유진동수와 감쇠비는 시뮬레이션과 실험을 통하여  $\omega_n = 44\text{rad/s}$ ,  $\zeta = 1.0$ 으로 얻어졌다. 아울러 개회로 스텝응답실험에서  $K = 0.012(m/s)/\text{volt}$ 로 구해졌다.

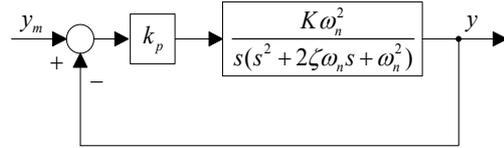


Fig. 2 Simplified block diagram

### 3. 단순적응제어(SAC) 알고리즘

단순적응제어는 플랜트 파라미터가 부정확하거나 미지의 경우 비교적 간단한 구조로서 강인한 제어 성능을 얻을 수 있는 이점이 있다. 전기유압서보시스템의 SAC 기본구성이 Fig. 3에 나타나있다.

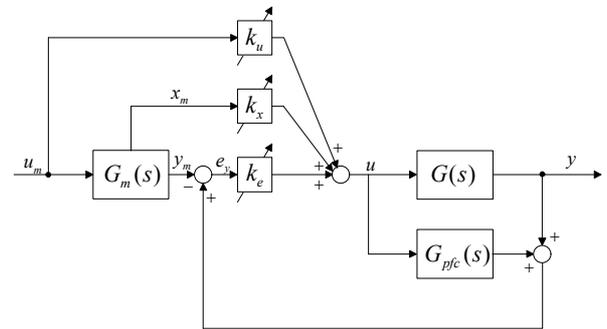


Fig. 3 Block diagram of the SAC with PFC

SAC계를 구성하기 위해서는 플랜트  $G(s)$ 가 ASPR조건을 만족해야만 한다. 일반적으로 ASPR조건을 만족하는 플랜트는 매우 적은 편이다. 시스템이 ASPR이 되기 위한 조건<sup>3)</sup>은 다음과 같다.

- (A) 상대적인 차수가 0또는 1
- (B) 다항식의 최고차항의 계수가 양수
- (C) 시스템이 최소위상

Fig. 3에서  $G_m(s)$ 는 시스템 동특성을 고려한 기준모델이며,  $u_m$ 은 기준모델에 대한 입력이다. 가변 적응제어인  $k_e(t)$ ,  $k_x(t)$ ,  $k_u(t)$ 는 식 (7)로 표현된다. 적응조정법칙에 의하여 조정되며  $G_{pfc}(s)$ 는 병렬 피드포워드 보상기(PFC:Parallel Feedforward Compensator)로 플랜트  $G(s)$ 를 ASPR화 하기 위해서 필요하다<sup>4)</sup>. ASPR(Almost Strictly Positive

Real)성은 기존의 플랜트에 플러스게인 출력피드백을 실시한 페루프계가 SPR(Strictly Positive Real)로 되는 성질을 말한다. 대상으로 하는 유압서보계의 전달함수인 식 (6)는 조건 (A)에 부합하지 않아 ASPR을 만족하지 않으므로, PFC를 도입하여 ASPR 조건에 적합하게 한다. 병렬 피드 포워드 보상기  $G_{pfc}(s)$ 를 부가하여 확장계를 구성하고, 확장계  $G_a(s) = G(s) + G_{pfc}(s)$ 가 ASPR이 되도록  $G_{pfc}(s)$ 를 설계하고  $G_a(s)$ 에 대하여 SAC를 적용할 수 있다. 상대차수가 3인 플랜트에 적합한 PFC의 전달함수는 식 (8)과 같이 표현 된다<sup>1)</sup>.

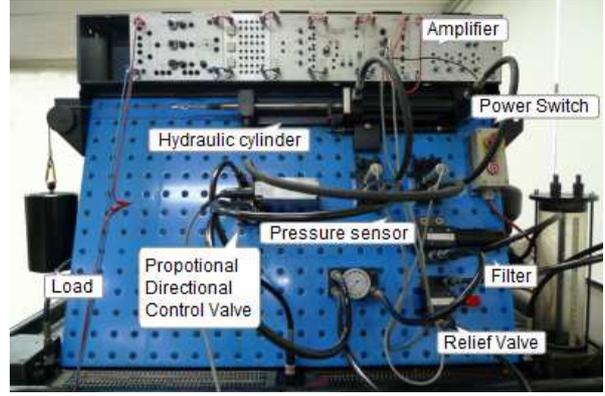


Fig. 4 Experimental equipment

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= \mathbf{k}(t)^T \mathbf{z}(t) \\ \mathbf{k}(t) &= [k_e(t) \quad \mathbf{k}_x(t) \quad k_u(t)]^T \\ \mathbf{z}(t) &= [e_y(t) \quad \mathbf{x}_m(t) \quad k_u(t)]^T \\ \dot{\mathbf{k}}(t) &= \mathbf{k}_p(t) + \mathbf{k}_I(t) \\ \dot{\mathbf{k}}_I(t) &= -\Gamma_I \mathbf{z}(t) e_y(t) - \sigma(t) \mathbf{k}_I(t) \\ \mathbf{k}_p(t) &= -\Gamma_P \mathbf{z}(t) e_y(t) \\ \sigma(t) &= \frac{\sigma_1 e_y^2(t)}{1 + e_y^2(t)} + \sigma_2 \\ \Gamma_I &= \Gamma_I^T > 0, \Gamma_P = \Gamma_P^T > 0 \\ \sigma_1, \sigma_2 &> 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$G_{pfc}(s) = \frac{k_1}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} + \frac{k_2}{(1 + T_2 s)} \quad (8)$$

$$k_1 = 0.01K, \quad k_2 = 0.01K, \quad T_1 = T_2 = \omega_n^{-1} \quad (9)$$

$K$ 와  $\omega_n$ 은 불확정적이고 전기-유압서보시스템의 동작 동안 변화하므로, PFC 전달함수를 조절할 수 있는  $\alpha$ 와  $\sigma$ 의 두 가지 파라미터를 사용하여 나타내 진다.

$$G_{pfc}(s) = \frac{\delta(s + 11\alpha)}{(s + \alpha)^2} \quad (10)$$

위의 적응 조정법칙을 토대로 하여 SAC계를 구성하고 실험을 수행하였다.

#### 4. 시뮬레이션 및 실험결과

개회로 실험을 수행 하였다. 실험에 사용된 실험장치 사진이 Fig. 4에 나타나있다. 리니어포텐시오미터로부터 위치신호는 컴퓨터와 연결된 14bit A/D컨버터를 통하여 제어기로 보내지고 제어기에서 처리된 신호는 다시 서보밸브로 입력된다. 효율적이고 유연한 제어 실험을 수행하기 위해서 Matlab-Simulink

Table 1 Specification of hydraulic components

Components	Specifications
Hydraulic Pump	$Q_{max} = 14 \text{ l/min}, P_{max} = 160 \text{ bar}$
Hydraulic Cylinder	Piston Diameter = 0.032 m, Rod Diameter = 0.016 m stroke = 20 cm
Proportional Directional Control Valve	$P_{max} = 160 \text{ bar},$ $Q = 14 \text{ l/min} (700 \text{ mA})$
Relief Valve	$P_{max} = 160 \text{ bar}, P_{set} = 50 \text{ bar}$
Filter	Mesh size ( $5\mu\text{m}$ )
Displacement Transducer	stroke = 20cm ( $\pm 10V$ )

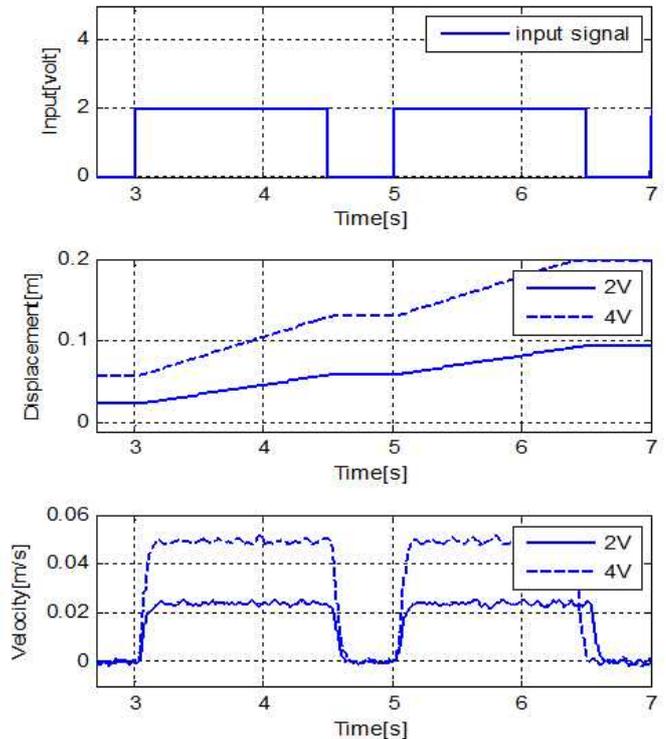


Fig. 5 Open-loop response

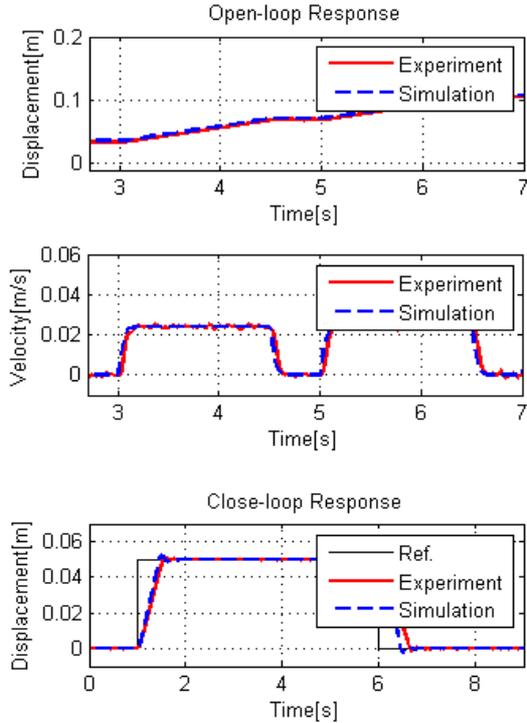


Fig. 6 Comparison of experiment with simulation

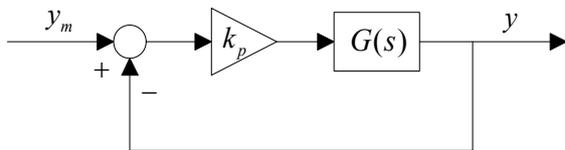


Fig. 7 Block diagram of proportional control

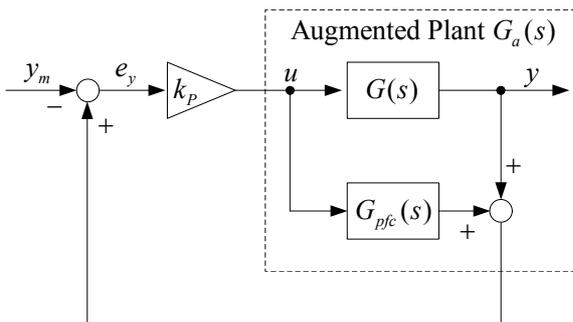


Fig. 8 Block diagram of control with PFC

사의 실시간 프로세싱 툴과 Humusoft사의 데이터 획득 보드(MF624)가 내장된 PC가 사용되었다. 방향제어밸브로서 Parker사의 비례방향제어 밸브(모델명 : D1FH)가 사용되었다. 시스템에 사용된 주요 유압부품들의 사양은 Table 1과 같다. 개회로 응답으로서 구형파 전압(2V, 4V)을 가하여 전진방향의 변위와 속도를 측정된 것이 Fig. 5에 나타나 있다. 실험결과 개회로 게인과 고유진동수가  $K = 0.012(m/s)/volt$ ,  $\omega_n = 44rad/s$ 로 구해졌다.

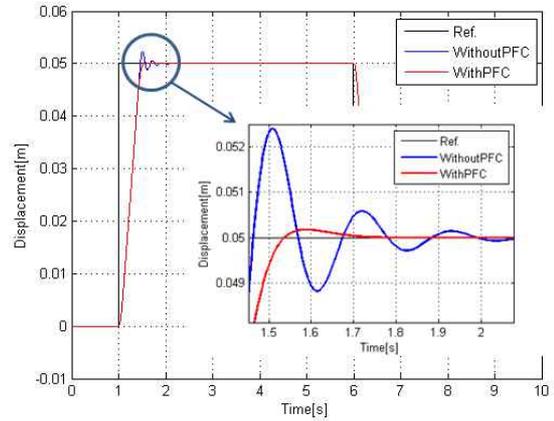


Fig. 9 Effect of PFC on step response ( $k_p = 30$ )

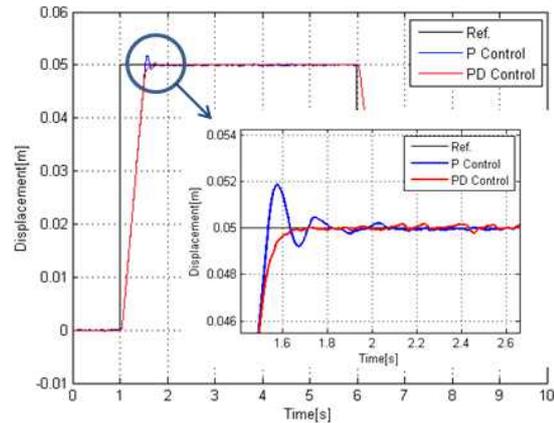


Fig. 10 Comparison of step responses

$k_p = 30$ 으로 하여 실제 실험한 결과와 선형플랜트 모델을 구성하여 시뮬레이션 한 결과가 Fig. 6에 비교되어 있다. 실제 실험결과, 개회로와 폐회로의 경우 모두 선형 플랜트 특성과 유사한 경향을 보인다. 이를 통해 선형모델의 타당성을 검증할 수 있다. 비례제어실험에 사용된 플랜트는 Fig. 7의 구성을 하고 있다. 3장에서 언급한 것과 같이 본 연구의 제어 대상 플랜트가 ASPR을 만족하지 않기 때문에 SAC 계를 구성할 수 없다. 따라서, 우선 Fig. 8과 같이 병렬 피드 포워드 보상기(PFC)도입<sup>2)</sup>에 의해 확장계  $G_a(s) = G(s) + G_{pfc}(s)$ 가 시스템 성능에 미치는 영향을 고찰한다.  $k_p = 30$ 일 때의 스텝입력에 대한 응답과 PFC를 추가하였을 때의 응답이 Fig. 9에 나타나 있다. PFC를 추가했을 때 응답특성이 매우 향상 되는 것을 확인 할 수 있다. PFC를 추가하여 ASPR조건을 만족하는 것만으로도 시스템의 응답특성을 개선한다. 비례(P)제어와 비례미분(PD)제어의 결과가 Fig. 10에 도시되어 있다. Fig. 10의 결과를

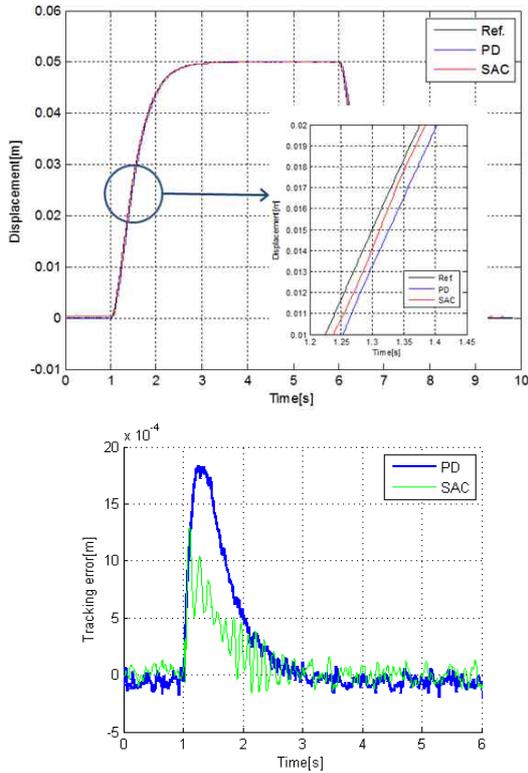


Fig. 11 Comparison of PD with SAC method

Table 2 Design parameters for controller

SAC
$\Gamma_I = \text{diag}[100 \ 1.0 \ 0.2 \ 1.0]$ $\Gamma_P = \text{diag}[100 \ 1.0 \ 0.2 \ 1.0]$ $\sigma_1 = 0.1, \sigma_2 = 0.01$ $\delta = 0.0005$
$PD(G_{PD}(s) = k_p + k_D s)$
$k_p = 30$ $k_D = 1.0$

보면 비례제어시 오버슈트가 유발된다. 미분계인의 미세조정을 통해 이러한 응답특성이 개선됨을 알 수 있다. 공급압력  $p_S = 50\text{bar}$ 하에서 진폭 5V의 구형파를 가하여 PD제어와 SAC제어를 실험 하였다. 이 때 비례제어밸브의 최대유량과 시스템의 정/동특성을 고려하여 기준 모델  $G_m(s)$ 을 선정하였다. 실험에 사용된 설계 파라미터 값들이 Table 2에 열거되어 있다. 실험 결과를 이용하여 PD제어와 SAC제어를 비교한 것이 Fig. 11에 나타나있다. SAC제어계를 구성할 때  $G_{pfc}(s)$ 설계파라미터에 플랜트의  $\omega_n$  값을 사용함으로써 ASPR조건을 만족하도록 하였다. Fig. 11의 확대된 그림으로부터 PD제어가 SAC제어보다

과도상태에서 많은 오차를 수반하는 것을 확인 할 수 있었다. SAC제어가 PD제어에 비하여 최대 추적 오차를  $2 \times 10^{-3}m$ 에서  $1.3 \times 10^{-3}m$  정도로 저감시킬 수 있었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 비례방향제어밸브에 의해 구동되는 차동실린더-부하계의 운동제어에 SAC제어기법을 적용하였다. 실험과 시뮬레이션으로 시스템의 고유진동수를 추정하였고, 이를 이용하여 PFC설계파라미터를 구하고 나아가 SAC제어계를 구성하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 PFC가 오버슈트와 과도 진동을 저감시키는데 효과가 있음을 보였다. 실험을 통하여 PD제어와 SAC제어를 비교한 결과, SAC제어를 사용하여 최대 추적오차를 상당히 줄일 수 있었다. 향후과제로서 외란이나 고유진동수가 변화하는 시스템을 대상으로 적응적으로 강인성을 가질 수 있는 제어기법에 대하여 고찰할 예정으로 있다.

### 참고 문헌

- 1) Iwai Z. and Mizumoto I., "Robust and Simple adaptive control", Int J Control, Vol. 55, No 6, pp. 1453-1470. 1992.
- 2) Tsukamoto N and Yokota S., "Two-degree-of-freedom control including parallel feedforward compensator (The effectiveness in the control of 6-link electro hydraulic serial manipulators)", Trans Jpn Fluid Power Syst Soc., 34(6), pp. 126-133, 2003[in Japanese].
- 3) Zeheb H., "A sufficient condition for output feedback stabilization of uncertain system", IEEE Trans Automat Control, Vol. 31, No 11, pp.1055-1057. 1986
- 4) Kaufman H, Barkana I, Sobel K. Direct adaptive control algorithms : theory and applications. 2nd ed. Springer; 1997.