연구논문

Journal of Drive and Control, Vol.18 No.4 pp.52-58 Dec. 2021
ISSN 2671-7972(print) ISSN 2671-7980(online)
http://dx.doi.org/10.7839/ksfc.2021.18.4.052

적분 가변구조제어기를 갖는 전기유압 서보시스템의 속도제어
Velocity Control of an Electro-hydraulic Servo System with Integral Variable Structure Controller

허준영
J. Y. Huh

Received: 18 Aug. 2021, Revised: 01 Nov. 2021, Accepted: 10 Nov. 2021

Key Words : Electro-hydraulic Servo System(전기유압 서보시스템), Velocity Control(속도 제어). Integral Variable Structure Control(적분 가변구조 제어), State Observer(상태관측기), Disturbance(외란)

Abstract: The variable structure controller is designed such that in sliding mode, the system moves along the switching plane in the vicinity of the switching plane, thus it is robust because it is not affected by the parameter fluctuations of the plant. However, a controller based on a variable structure may not meet the desired performance when it is commanded to track any input or is exposed to disturbances. This study proposes a sliding mode controller that follows the IVSC (Integral Variable Structure Control) approach with ELO (Extended Luenberger observer) to solve this problem. The proposed sliding mode control is applied to the velocity control of the hydraulic motor. The sliding plane was determined by the pole placement, and the control input was designed to ensure the existence of the sliding mode. The feasibility of modeling and controller are reviewed by comparing with conventional proportional-integral control through computer simulation using MATLAB software and experimenting on the cases of significant plant parameter fluctuations and disturbances.

기호 설명

B_m : viscous damping coefficient, N·m·s
B_t : bulk modulus, bar
C_{tp} : leakage coefficient of cylinder, m^5/sN
D_m : volumetric displacement of motor, m^3/rad
J : mass of moving part, kg·$m·s^2$
K_a : servo valve amp gain, A/V
K_c : gain for flow-pressure, m^5/sN
K_q : valve flow gain, m^2/s
K_v : valve gain, m/A
Q_L : load flow, m^3/s
P_L : load pressure difference, N/m^2
V_t : static volume of valve and motor, m^3
ω_c : angular velocity of motor shaft, rad/s

* Corresponding author: huh@koreatech.ac.kr
1 School of Mechatronic Engineering, Korea University of Technology and Education, Cheonan 330-708, Korea
Copyright Ⓒ 2021, KSFC
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

가변 구조 제어기는 1970년대에 Itkis[1]과 Utkin[2]의 저서가 서방에 알려지면서 구 소련에서 서방 세계로 전파되었다. 1980년대에 Harashima[3]는 국소 피드백루프를 사용한 외란 대처법을 n차계로 확대 적용하였다. 1990년대에 Slotine[4]와 Nonami[5] 등은 MIMO 시스템에 적용하였고, 체터링 방지 대책을 개발하였다. 그 이후에 디지털 컴퓨터의 발전과 더불어 비선형 강인제어이론으로 광범위하게 응용되어 왔다. 가변구조 제어의 가장 두드러진 특징은 미리 정한 스위칭 평면에서 발생하는 슬라이딩 모드의 존재이다.[1-5] 슬라이딩 모드에서 시스템은 스위칭 평면 부근에서

스위칭 평면을 따라 이동하므로 이론적으로는 플랜트의 매개 변수 변동에 강인하다. 그러나, 가변 구조 제어기가 임의의 입력을 추적하도록 명령을 받거나 외란에 노출될 때 원하는 성능을 충족시키지 못할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 Son[6]은 슬라이딩 모드 제어를 사용하여 외란을 적극적으로 관측하여 보상하는 방법을 시도하였다. Chern[7]은 적분기를 포함하는 적분 가변구조제어(IVSC, Integral Variable Structure Control) 접근법을 제안하였고, Istanto[8,9]은 노즐 플래퍼형 유압서보밸브의 성능 개선을 위해 서보밸브의 위치제어에 응용하였다. 본 연구에서는 Chern[7]이 제안한 접근법을 따르지만 외란은 ELO(Extended Luenberger Observer)[10]을 사용하여 적극적으로 보상함으로써 적분 가변구조제어가 불필요하게 높은 게인(gain)으로 스위칭하지 않도록 제안한다.

제안한 적분 가변구조제어를 유압모터의 속도제어에 적용한다. 극배치에 의해 슬라이딩 평면을 결정하고, 슬라이딩 모드의 존재를 보장하도록 제어 입력을 설계한다. 상당히 큰 플랜트 매개 변수 변동과 외란이 있는 경우에 대해 MATLAB 소프트웨어를 사용한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 종래의 비례적분 제어와 비교함으로써 모델링과 제어기의 타당성을 검토한다.

2. 모델링

2.1 시스템 모델링과 기초 방정식

본 연구에서 대상으로 하는 전기유압 서보시스템은 유압모터의 속도 제어를 위한 것으로 유압동력장치와 직동형 전기유압 서보밸브, 유압모터 및 속도검출센서로 구성되어 있다. 수학적 모델링을 위해 서보밸브의 스풀과 유압모터, 관성부하 부분의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다.

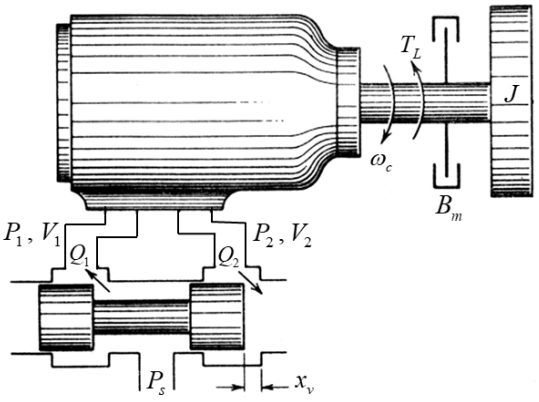

Fig. 1 Valve-motor combination.

서보밸브 스풀을 통과하는 유량 Q_1, Q_2는 제곱근을 포함하는 오리피스 유량식으로 표시되나 부하압력 $P_L(=P_1-P_2)$과 평균유량 $Q_L(=(Q_1+Q_2)/2)$를 도입하고 작동점 부근에서 선형화를 하면 식 (1)과 같다. 유압모터의 입구측 챔버와 출구측 챔버 각각에 연속 방정식을 적용하면 식 (2)로 나타낼 수 있다. 그리고 유압모터에 작용하는 스프링 부하와 외부힘이 없을 경우에 운동방정식은 식 (3)과 같다.[11]

$$Q_L = K_q x_v - K_c P_L \tag{1}$$

$$Q_L = D_m \omega_c + C_{tm} P_L + \frac{V_t}{4\beta_e}\dot{P}_L \tag{2}$$

$$D_m P_L = J\dot{\omega}_c + B_m \omega_c + T_L \tag{3}$$

상태변수를 $x_1 = \omega_c,\ x_2 = \dot{\omega}_c$로 정의한다. 한편 $x_v = K_a K_v u$ 이다. 식 (1)과 (2)에서 Q_L을 소거하고, 식 (3)을 미분하여 대입하면 아래와 같이 한 쌍의 식 (4)를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -a_1 x_1 - a_2 x_2 + bu + d\end{aligned} \tag{4}$$

여기서, $a_1 = \dfrac{4\beta_e D_m^2}{V_t J} + \dfrac{4\beta_e B_m K_{ce}}{V_t J}$,

$a_2 = \dfrac{4\beta_e K_{ce}}{V_t} + \dfrac{B_m}{J}$, $b = \dfrac{4\beta_e K_a K_v K_q D_m}{V_t J}$,

$d = -\dfrac{4\beta_e K_{ce}}{V_t J} T_L - \dfrac{1}{J}\dot{T}_L$ 이다.

식 (4)는 아래의 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t) \\ y(t) &= \mathbf{c}\mathbf{x}(t)\end{aligned} \tag{5}$$

여기서,

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix},\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 \end{bmatrix},\ \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix}$$

3. 적분 가변구조 제어기 설계

3.1 적분 가변구조 제어기의 구성

Chern[7]에 의해 제안된 적분 가변구조제어 시스템(IVSS)는 Fig. 2와 같다.

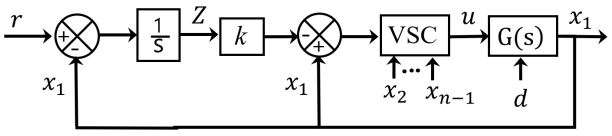

Fig. 2 Block diagram of an IVSS.

여기서 k는 적분 제어기의 게인이고, d는 플랜트에 작용하는 외란이다. 제어 입력 u는 식 (6)에 나타낸 바와 같이 u_{eq}와 u_s의 합으로 나타낼 수 있다. 여기서 u_{eq}는 시스템이 슬라이딩 모드 상에 있을 때의 등가 제어 입력이고, u_s는 파라미터 변동이나 외란의 영향을 제거하고 시스템이 슬라이딩 모드 상에 존재하도록 스위칭하는 제어 입력이다. 스위칭 함수 σ를 식 (7)과 같이 취하고, 슬라이딩 모드가 존재하도록 제어입력 u를 정해준다.

$$u = u_{eq} + u_s \tag{6}$$

$$\sigma = c_1(x_1 - kz) + x_2 \tag{7}$$

식 (4)에 사용된 파라미터를 정상상태 값 a_i^0, b^0과 변동분 Δa_i, Δb의 식 (8)로 나타낸다.

$$a_i = a_i^0 + \Delta a_i, \quad i = 1, 2 \tag{8}$$
$$b = b^0 + \Delta b$$

u_{eq}는 $d = 0$와 $a_i = a_i^0$, $b = b^0$ 상태에서 $\dot{\sigma} = 0$의 해를 구하면 식 (9)와 같이 얻을 수 있다.

$$u_{eq} = [c_1 k(r - x_1) + a_1^0 x_1 + a_2^0 x_2]/b^0 \tag{9}$$

한편, 슬라이딩 모드가 존재하도록 스위칭하는 입력 u_s를 식 (10)으로 둔다. 슬라이딩 모드의 존재조건은 식 (11)과 같다.

$$u_s = \psi_1(x_1 - kz) + \psi_2 x_2 \tag{10}$$

$$\lim_{\sigma \to 0} \sigma\dot{\sigma} < 0 \tag{11}$$

$$\lim_{\sigma \to 0} \sigma\dot{\sigma} = (-\Delta a_1 + \frac{a_1^0 \Delta b}{b^0} + b\psi_1)(x_1 - kZ)\sigma \tag{12}$$
$$+ (-\Delta a_2 + \frac{a_2^0 \Delta b}{b^0} - \frac{c_1 \Delta b}{b^0} + b\psi_2) x_2 \sigma + N$$

여기서,

$$N = [-kZ(\Delta a_1 - \frac{a_1^0 \Delta b}{b^0}) + \frac{\Delta b}{b^0} c_1 k(r - x_1) - d]\sigma$$

식 (11)의 슬라이딩 모드 존재조건을 만족하도록 스위칭 입력 u_s를 결정함에 있어서 입력 명령과 시스템 매개 변수 변화 및/또는 외란을 포함하는 N을 무시하고 식 (13)과 같이 정한다. 이 경우에 식 (11)의 부등식이 성립되지 않고 슬라이딩 모드는 깨져서 시스템은 리밋 사이클을 발생시킬 수 있으나 제어이득 ψ_i를 증가시킴으로써, 리밋 사이클의 크기가 허용 가능한 범위 내로 감소될 수 있도록 무시된 항에 의한 효과를 임의로 억제할 수 있다. 따라서 준 이상 슬라이딩 동작(quasi-ideal sliding motion)을 얻을 수 있다.

$$\psi_1 = \begin{cases} \alpha_1 < (\Delta a_1 - \frac{a_1^0 \Delta b}{b^0})/b, & \text{if } (x_1 - kz)\sigma > 0 \\ \beta_1 > (\Delta a_1 - \frac{a_1^0 \Delta b}{b^0})/b, & \text{if } (x_1 - kz)\sigma < 0 \end{cases}$$

$$\psi_2 = \begin{cases} \alpha_2 < (\Delta a_2 - \frac{a_2^0 \Delta b}{b^0} + \frac{c_1 \Delta b}{b^0})/b, & \text{if } x_2\sigma > 0 \\ \beta_2 > (\Delta a_2 - \frac{a_2^0 \Delta b}{b^0} + \frac{c_1 \Delta b}{b^0})/b, & \text{if } x_2\sigma < 0 \end{cases} \tag{13}$$

3.2 스위칭 평면과 적분제어 게인의 결정

슬라이딩 모드 상태에서는 $\dot{\sigma} = 0$이고, 이로부터 식 (14)를 얻는다. 이 경우에 제어시스템을 블록선도로 나타내면 Fig. 3과 같고 전달함수는 식 (15)와 같다.

$$\dot{x_1} = c_1 x_1 - c_1 kz \tag{14}$$

$$\frac{X_1(s)}{R(s)} = \frac{c_1 k}{s^2 + c_1 s + c_1 k} \tag{15}$$

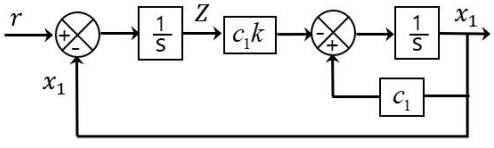

Fig. 3 Block diagram in the sliding mode.

식 (15)의 특성방정식을 살펴보면 단지 계수 c_1과 게인 k를 선택하여 시스템의 동적 성능을 결정할 수 있음이 분명하다. 원하는 고유값 λ_1과 λ_2를 갖는 시스템의 특성 방정식은 식 (16)과 같다. 그러면 c_1과 k는 각각 식 (17) 및 (18)과 같이 얻어진다.

$$s^2-(\lambda_1+\lambda_2)s+\lambda_1\lambda_2=0 \tag{16}$$

$$c_1=-(\lambda_1+\lambda_2) \tag{17}$$

$$k=\frac{-\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1+\lambda_2} \tag{18}$$

원하는 고유값은 스텝응답에서 2% 오차범위에 들어가는 정착시간을 0.05s로 하고, 오버슈트의 크기가 1% 이하가 되도록 극점을 $r=-80\pm52j$로 정한다.[12] 그러면 식 (17)과 (18)에 의해 $c_1=160$과 $k=56.9$로 구해진다.

식 (13)에 의해 주어진 제어입력 계수 $\psi_i(i=1,2)$가 식 (19)와 같이 선택된다면 제어입력 u는 식 (20)으로 나타낼 수 있다.

$$\psi_i=\alpha_i=-\beta_i \tag{19}$$

$$\begin{aligned}u=c_1k(r-x_1)+a_1^0x_1+a_2^0x_2/b^0\\+(\psi_1|x_1-kz|+\psi_2|x_2|)sgn(\sigma)\end{aligned} \tag{20}$$

제어입력 u는 σ의 부호에 따라 채터링을 발생시키기 때문에, 이러한 제어 신호를 플랜트에 직접 적용하는 것은 비실제적일 수 있다. 연속적인 제어 신호를 얻기 위해 σ의 부호에 따른 불연속 함수를 적절한 연속 함수로 식 (21)과 같이 대체할 수 있다[6-8]. 여기서 δ는 양의 상수이다.

$$sgn(\sigma)=\frac{\sigma}{|\sigma|+\delta} \tag{21}$$

3.3 외란을 포함하는 확대계의 구성

식 (5)의 상태방정식에서 각속도 x_1와 각가속도x_2를 상태변수로 사용하고 있다. 적분 가변구조제어를 적용하기 위해서는 모든 상태변수가 측정 가능하여야 한다. 본 연구에서는 유압모터의 각속도만 측정하므로 각가속도를 얻기 위해서는 상태 관측기의 구성이 필요하다. 그리고 일정한 외란 $d(t)$가 가해지는 경우를 고려하면 $\dot{d}(t)=0$이므로, 외란을 포함하는 확대계의 상태방정식은 식 (22)와 같다. 이때 외란 $d(t)$는 불가제어이지만 가관측이므로 식 (22)의 확대계에 대한 상태 관측기(ELO, Extended Luenberger observer)는 식 (23)과 같고, 상태변수들과 함께 외란 $d(t)$의 추정이 가능하다.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_e(t)&=\mathbf{A}_e\mathbf{x}_e(t)+\mathbf{b}_eu(t)\\y_e(t)&=\mathbf{c}_e\mathbf{x}_e(t)\end{aligned} \tag{22}$$

여기서, $\mathbf{x}_e(t)=[\mathbf{x}(t)\ d(t)]^T$,

$$\mathbf{A}_e=\begin{bmatrix}\mathbf{A}&\mathbf{b}\\0&0\end{bmatrix},\ \mathbf{b}_e=\begin{bmatrix}\mathbf{b}\\0\end{bmatrix},\ \mathbf{c}_e=\begin{bmatrix}\mathbf{c}&0\end{bmatrix}$$

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_e(t)=\mathbf{A}_e\hat{\mathbf{x}}_e(t)+\mathbf{b}_eu(t)+\mathbf{G}\{y(t)-\mathbf{c}_e\hat{\mathbf{x}}_e(t)\} \tag{23}$$

여기서, $\mathbf{G}$는 극배치법으로 결정되는 관측기 게인을 나타낸다.

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션 설정

적분 가변구조제어의 특성을 확인하기 위하여 전기유압서보로 구동되는 모터시스템을 대상으로 하여 시뮬레이션 및 실험을 수행한다. ELO를 포함하는 전기유압 서보 모터시스템의 Matlab/Simulink 시뮬레이션 모델을 Fig. 4에 나타낸다. 샘플링 시간은 1ms로 하였다. 시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터는 Table 1과 같다.

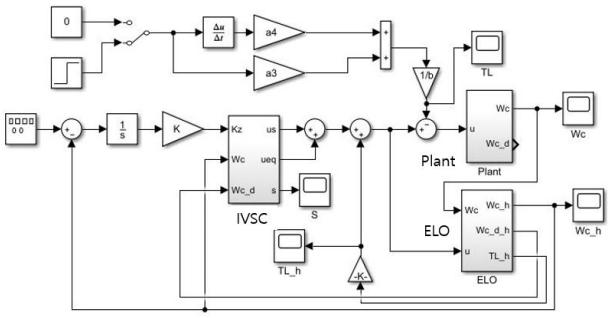

Fig. 4 Simulation model of IVSC

Table 1 EH servo system parameters

Parameter	Value	Unit
Q_{max}	2.5	L/min
I_{max}	10	mA
D_m	1.31e-6	m^3/rad
V_t	5.2e-5	m^3
J	4.73e-4	kg·m·s^2
β_e	7000	bar
K_{ce}	7.63e-12	(m^3/s)/(N/m^2)
B_m	0.0864	N·m·s
$K_V \cdot K_q$	4.17e-6	(m^3/s)/A
K_a	1	A/V

적분 가변구조제어와 비교하기 위해 모터의 각속도를 피드백하여 PI제어기를 Fig. 5와 같이 구성하였다. 여기서 최적 게인은 Matlab/Simulink Tuner를 사용하여 $k_p = 1,\ k_i = 12,\ k_d = 0$로 구했다.

작동점에 따른 파라미터 변동의 범위가 아래 식 (24)와 같다고 가정한다.

$$\begin{aligned} |\Delta a_1| &\le a_1^0 \times 0.4 \\ |\Delta a_2| &\le a_2^0 \times 0.4 \\ |\Delta b| &\le b^0 \times 0.4 \end{aligned} \tag{24}$$

Table 1의 값과 식 (24)에 의해 스위칭 입력 계수 $\psi_i\,(i=1,2)$는 $\psi_1 \le -0.35$와 $\psi_2 \le -0.001$로 구해진다. 제어 입력 u_s 산출과정에서 무시된 외란은 ELO를 사용하여 추정하여 보상하지만, 무시된 입력 명령 항의 영향을 최소화하기 위해 스위칭 입력 계수를 두 배로 크게 $\psi_1 = -0.7$와 $\psi_2 = -0.002$로 정한다.

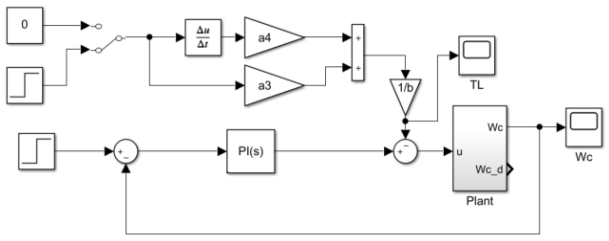

Fig. 5 Simulation model of PI

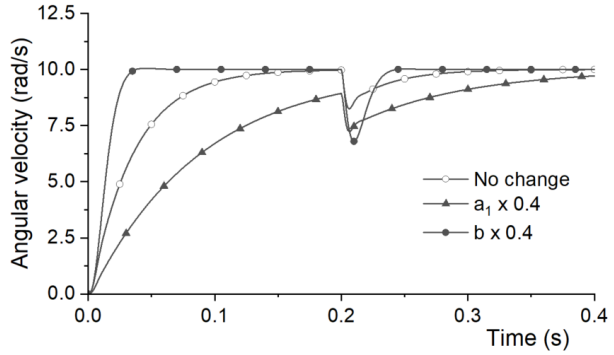

Fig. 6 Simulation results of PI

4.2 시뮬레이션 결과

적분 가변구조제어와 비교하기 위해 우선 Fig. 5로 나타낸 PI제어의 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 기준입력으로 유압모터가 10rad/s 스텝으로 회전하는 것을 목표로 하였다. ○를 포함한 실선은 Table 1의 시스템 파라미터를 변화 없이 그대로 적용한 경우이다. 0.2s에서 외란 0.2Nm이 가해지는데, PI제어의 영향으로 인해 정상상태 오차는 곧 소멸하였다. ▲을 포함한 실선은 식 (5)의 시스템 파라미터 중 a_1이 Table 1의 정상값의 40%인 경우로 0.05s만에 목표값에 도달하는 빠른 응답을 보인 반면에 외란에 크게 영향받는다. ●를 포함한 실선은 시스템 파라미터 중 b가 정상값의 40%인 경우로 과감쇠의 특성을 보인다. 따라서 산업계에서 일반적으로 사용되는 PI제어기를 사용한 속도제어에서의 응답은 외란과 함께 시스템 파라미터 변동의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

Fig. 7에 동일한 속도 스텝 입력에 대한 ELO를 사용한 적분 가변구조제어의 결과를 나타낸다. ○를 포함한 실선은 Table 1의 시스템 파라미터를 변화 없이 그대로 적용한 경우이다. 제어목표인 최대 초과 1% 미만과 상승시간 0.05s 이하, 정착시간 0.1s를 잘 만족시키고 있는 것을 볼 수 있다. 0.2s에서 가해지는 외란 0.2Nm에 대해서 ELO를 사용하여 외란값을 추정하여 보상함으로써 0.04s만에 정상상태 오차는 0.4%(0.04rad/s) 미만이 되었다. ▲을 포함한 실선은 시스템 파라미터 중 a_1이 정상값의 40%로 변화된 경우이고, ●를 포함한 실선은 시스템 파라미터 중 b가 정상값의 40%로 변화된 경우이다. 시스템 파라미터 변화에 거의 영향 받지 않았다.

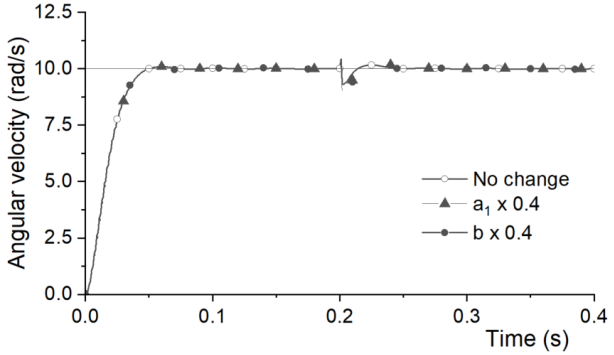

Fig. 7 Simulation results of IVSC with ELO

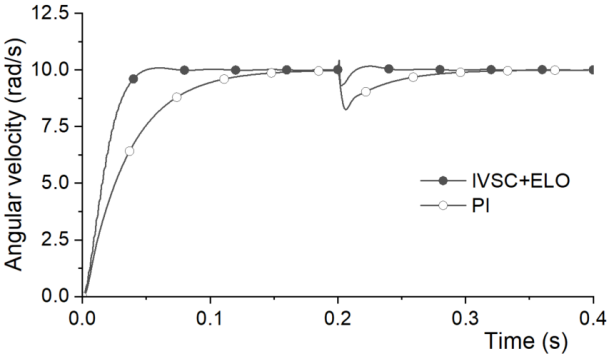

Fig. 8 Comparison between IVSC with ELO and PI

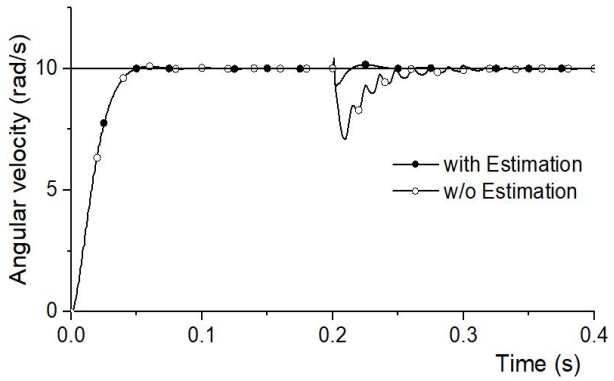

Fig. 9 Comparison between w/wo estimation

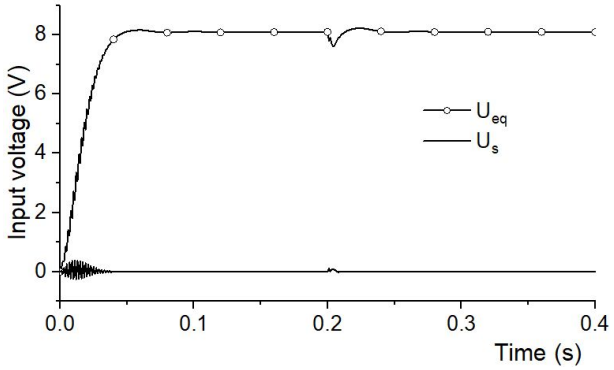

Fig. 10 Control inputs of IVSC

PI제어와 IVSC의 시뮬레이션 결과가 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 있지만 Table 1의 시스템 파라미터를 변화 없이 그대로 적용한 경우에 대해 비교하여 Fig. 8에 나타낸다. PI제어는 IVSC에 비해 정착시간이 길고, 외란의 영향도 크게 나타났다.

Fig. 9에 적분 가변구조제어에서 ELO를 사용하여 외란을 추정하여 보상한 경우를 ●를 포함한 실선(이 경우는 Fig. 7의 No change와 동일함)으로, 그리고 보상하지 않은 경우를 ○를 포함한 실선으로 비교하여 나타낸다. 외란을 추정하여 보상하지 않은 경우에는 적분 가변구조제어기 자체 내에 포함된 적분기의 영향으로 외란에 대한 정상상태오차는 0.07s만에 소멸하였고, PI제어의 결과와 비교할 때 외란의 영향은 비슷하게 나타났다.

Fig. 10에 적분 가변구조제어의 등가 제어 입력 u_{eq}는 ○를 포함한 실선으로, 스위칭 제어 입력 u_s는 단지 실선으로 나타낸다. 스위칭 제어 입력 u_s는 응답의 초기와 외란이 가해졌을 때 ±0.5V 이하의 크기로 스위칭하였고, 등가 제어 입력 u_{eq}는 최대 8V가 요구됨을 알 수 있다.

4.3 실험장치의 구성

본 연구에 사용된 Festo사의 전기유압 서보 시스템(TP511)[13]의 사진을 Fig. 11에, 유압회로도를 Fig. 12에 나타낸다. 이 장치는 유압동력장치와 직동형 전기유압 서보밸브(Moog, D633), 유압모터, 엔코더, NI DAQ 보드(6221)로 구성되어 있다. 엔코더로부터의 누적 각도값을 Matlab/Simulink 내의 미분기를 사용하여 미분하여 각속도를 구하였다. 유압모터에 외란으로 가해지는 토크장치를 제작하기 어려워 외란 실험은 못하였고, 스텝응답만 측정하였다.

Fig. 13은 적분 가변구조제어(IVSC)를 비례적분(PI) 제어와 비교한 시뮬레이션 및 실험 결과이다. PI제어의 결과를 점선으로, IVSC의 결과는 실선으로 나타낸다. 실험결과를 ○를 포함한 선으로 나타내었고, 시뮬레이션 결과를 ●를 포함한 선으로 나타내었다. PI제어의 실험결과에서는 오버슈트가 발생하지 않았고, 목표값의 2% 오차범위에 들어가는 정착시간은 0.3초이다. IVSC에서는 1%의 오버슈트가 발생하였고, 목표값의 2% 오차범위에 들어가는 정착시간은 0.1초이다. PI제어와 적분 가변구조제어에서 모두 응답 초기에 0.01s의 응답지연이 발생하였는데 이는 이론해석에서는 고려하지 못한 유압모터의 정지마찰력 때문으로 사려된다.

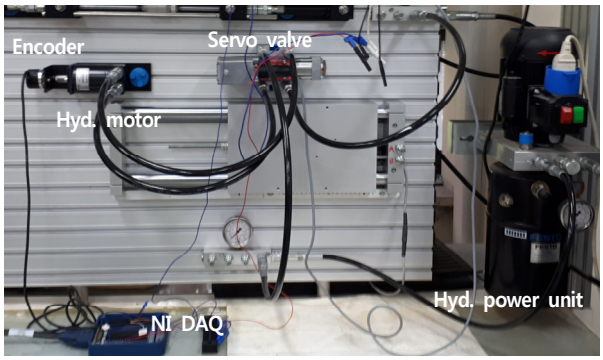

Fig. 11 Photo of the experimental equipment.

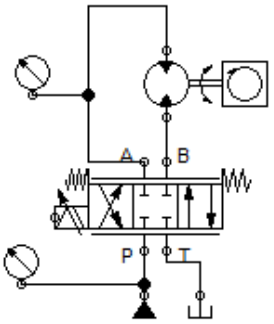

Fig. 12 Circuit of the experimental equipment

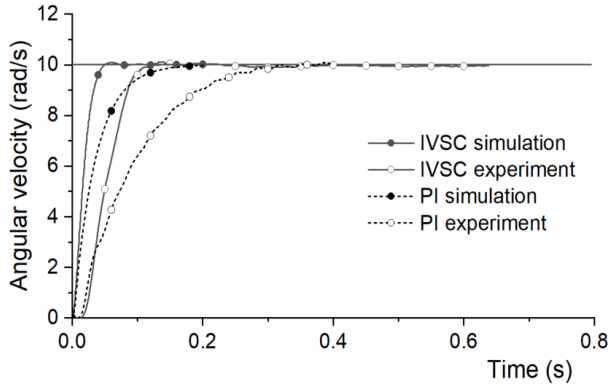

Fig. 13 Comparision between simulation and experimental results of IVSC with ELO and PI

5. 결 론

적분 가변구조제어의 견실성을 확인하기 위하여 Festo사의 전기유압서보로 구동되는 모터시스템(TP511)에 대해 상태방정식을 유도하고 각속도와 각가속도 상태변수를 관측하여 적분 가변구조제어계를 구성하였다. 슬라이딩 모드의 스위칭 평면을 극배치법으로 설계하여 시뮬레이션과 실험을 통해서는 시스템 파라미터의 변동에 대한 응답특성을 조사하였고, 시뮬레이션을 통해서는 토크 외란의 응답특성에 대해 조사한 결과는 아래와 같이 요약된다.

1) 외란은 ELO를 사용하여 적절하게 추정되어 보상될 수 있다.

2) 토크 외란은 확대계를 구성하여 보상해줌으로써 0.4% 내의 오차로 제거될 수 있다.

3) 60%의 시스템 파라미터 변동에 대해서도 슬라이딩 모드제어를 하면 일정한 응답을 얻을 수 있다.

4) ELO를 사용한 적분 가변구조제어기에 의해 시스템 파라미터의 변동과 외란의 영향은 최소화된다.

후 기

이 연구는 2020년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다. 한편, 부경대학교 이일영 교수 Lab.의 Sliding Mode Control 주말 세미나(2016년 9월 ~ 2017년 6월)에 참여한 결과입니다.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

1) U. Itkis, Control Systems of Variable Structure, John Wiley & Sons, Inc., 1976.
2) V. I. Utkin, Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems, Mir Publishers Moscow, 1978.
3) F. Harashima and H. Hashimoto, “Sliding Mode Theory & Aapplication – I (in Japanese)”, System & Control, Vol.29, No.2, pp.94–102, 1985.
4) J.-J. E. Slotine, W. Li, Applied Nonlinear Control. Prentice Hall, 1991.
5) G. Nonami and K. Den, Sliding Mode Control (in Japanese), Korona Co., 1994.
6) I. H. Kim and Y. I. Son, “Design of a DC Motor Controller Using a Sliding Mode Disturbance Observer and Controller”, J. of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.22, No.2, pp.34–41, 2016.
7) T. L. Chern and Y. C. Wu, “Design of Integral Variable Structure Controller and Application to Electrohydraulic Velocity Servosystems”, IEE Proceedings-D, Vol.138, No.5, pp.439–444, 1991.
8) I. Y. Lee, I. Istanto and H. C. Lee, “Control of Nozzle-flapper Type Hydraulic Servo Valve – Application of an Integral Sliding Mode Controller”, KSFC Conference, pp.293-296, 2019.
9) I. Istanto, “A Study on Control of an ElectroHydraulic Servo Valve”, Ph.D. 2019.
10) S. K. Jeong, J. Y. Huh and I. Y. Lee, “Introduction of Modern Control Theory”, Munundang, 2021.
11) H. E. Merritt, “Hydraulic Control Systems”, John Wiley & Sons, Inc., 1967.
12) I. Y. Lee, “Hydraulic Engineering”, Munundang, 2012.
13) Festo Didactic GmbH & Co., “Closed-Loop Hydraulics” Workbook TP511, 2000.