



## 파일럿 구동 비례 릴리프 밸브의 시간지연과 외란 보상을 위한 슬라이딩 모드 제어기 설계에 관한 연구

# The Study of a Sliding Mode Controller on a Pilot Operated Proportional Pressure Relief Valve for Time Delay and Disturbance's Compensations

정황훈\*†

Hwang Hun Jeong\*†

(Received 14 March 2018, Revision received 03 July 2018, Accepted 04 July 2018)

**Abstract:** This study's purpose is to design the controlled system that compensates the time delay and disturbance on a pilot operated proportional pressure relief valve. This relief valve is driven by pilot pressure and this pilot pressure transfers into the orifices and chambers. So this kind of hydraulic valves always have the time delay. A time delay lets the system to unstable when system has large open loop gain.

In this study, a SMC(Sliding mode controller) and Smith predictor were used as controller. A SMC is an one of best controller which can be used on the system that has uncertainty. A Smith predictor can compensates time delay during to keep the controller's characteristics. This study also deals with a disturbance observer. A steady state error will be come out from modeling error and disturbance when used the smith predictor. This steady state error have to be recovered to satisfy the controller's goal. A disturbance observer was selected as a solution. A controlled system was verified by computer simulation.

**Key Words :** Sliding Mode Controller, Smith Predictor, State Observer, Disturbance Observer, Pilot Operated Proportional Valve

## 1. 서 론

파일럿 구동 비례 릴리프 밸브는 대유량의 작동유에 대하여 압력을 제어하는 밸브이다. 이 밸브는 직동식 밸브와 다르게 파일럿 압력을 제어하는 밸브와 메인 밸브로 구성되어 있다. 밸브 내 파일럿 배관에는 2~3개의 오리피스와 작은 챔버

를 가지고 있기 때문에 릴리프 밸브를 모델링할 때에는 반드시 시간 지연 요소가 포함된다. 시간 지연 요소는 시스템의 개루프 게인의 크기에 따라 시스템을 안정 또는 불안정하게 만든다. 이러한 시간 지연 요소를 보상하는 방법에는 Smith 예측기와 적응 제어기가 있으며 활용의 편의상 본 연구에서는 Smith 예측기를 도입한다.

\*† 정황훈(교신저자) : 건설기계부품연구원  
 E-mail : hwanghun@koceti.re.kr, Tel : 063-447-2523

\*† Hwang Hun Jeong(corresponding author) : Smart Construction Research Center, Korea Construction Equipment Technology Institute.  
 E-mail : hwanghun@koceti.re.kr, Tel : 063-447-2523

슬라이딩 모드 제어기는 제어 대상 내 불확실성, 외란 및 내부 파라미터의 변동 등을 가지고 있기 때문에 강인한 제어 성능이 필요한 다양한 시스템에서 활용되는 제어 기법이다.<sup>1-8)</sup> 제어 대상인 파일럿 구동 비례 릴리프 밸브는 비선형시스템으로 작동유의 유온, 유체력, 외란 등의 불확실한 요소가 많은 시스템으로 슬라이딩 모드 제어기를 사용하기에 적합한 시스템이다.

일반적으로 슬라이딩 모드 제어기(Sliding Mode Controller)를 설계하기 위해서는 먼저 상태공간으로 표현된 제어 대상에 대하여 원하는 상태를 정의하고, 이 상태를 안정화시킬 수 있는 슬라이딩 평면을 정의한다. 다음으로 정의된 슬라이딩 평면으로부터 슬라이딩 모드가 도달가능성 조건(reachability condition)을 만족하도록 등가제어입력과 스위칭 제어입력을 유도하고, 선정된 제어기의 타당성을 시뮬레이션을 통해 확인한다.<sup>9,10)</sup>

슬라이딩 모드 제어기를 적용한 시스템의 경우 모델링 오차나 외란에 자유로우나, 시간 지연 요소를 보상하기 위해 Smith 예측기를 도입함으로써 모델링 오차나 외란에 따른 정상상태 오차가 발생하게 된다. 이를 보상하기 위해 본 연구에서는 상태 관측기와 외란 관측기를 설계하였다.

본 연구의 목적은 시간지연과 모델링 오차, 외란에 강인한 제어시스템을 설계하는 것이며, 이를 위해 Smith 예측기와 외란 관측기를 도입하였다. 설계된 제어 시스템의 타당성은 모의실험을 통해 확인하였다.

## 2. SMC 설계

### 2.1 제어대상의 모델링

Fig. 1은 Bosch Rexroth의 비례압력 릴리프 밸브의 개략도이다.<sup>11)</sup> 파일럿 압력에 의해 구동되는 밸브 시스템의 전달함수는 이전 연구에 의해 식 (1)과 같이 동정되었다.<sup>12)</sup>

$$G(s) = e^{-0.083s} \frac{547.852}{s^2 + 42.671s + 1755.121} \quad (1)$$

슬라이딩 모드 제어기를 설계하기 위하여 시간지연을 고려하지 않은 식 (1)을 식 (2)와 같이 상태공간으로 표현한다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \end{bmatrix} u(t - \tau) \\ y(t) &= [1 \ 0] \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\mathbf{x}(t) = [x_1 \ x_2]^T$ ,  $x_1 = p$ ,  $x_2 = \dot{x}_1$ ,  $a_1 = 1755.121$ ,  $a_2 = 42.617$ ,  $b_1 = 547.852$ ,  $\tau = 0.083$ 이다.

슬라이딩 모드 제어기의 설계 목표는 주어진 밸브의 출력 압력  $p$ 와 기준 압력  $p_r$  사이의 오차  $e$ 를 최소로 하는 레귤레이터를 설계하는 것이다. 따라서 식 (2)와 같이 상태변수가 2개인 시스템에 대하여 식 (3)과 같은 슬라이딩 평면을 정의한다.

$$s = c_1 e + \dot{e} \quad (3)$$

슬라이딩 모드의 도달가능성 조건을 만족하기 위하여 주어진 슬라이딩 평면에 대한 Lyapunov 방정식을 식 (4)와 같이 정의한다.

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad \lim_{s \rightarrow 0} s \dot{s} < 0 \quad (4)$$

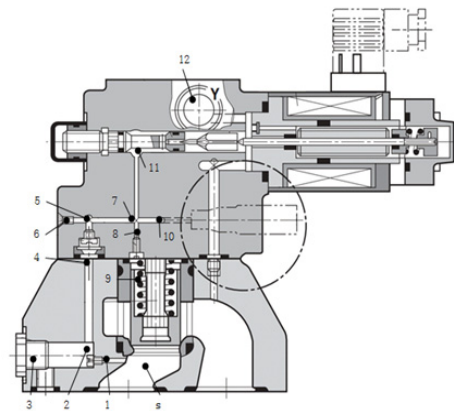


Fig. 1 Model of pilot operated proportional pressure relief valve

슬라이딩 모드 제어기의 제어 입력  $u$ 는 등가 제어 입력  $u_{eq}$ 과 스위칭입력  $u_s$ 의 합으로 나타낼 수 있으며, 이는 식 (5)와 같다.

$$u = u_{eq} + u_s \quad (5)$$

슬라이딩 모드 조건( $\dot{s}=0$ )으로부터 등가 제어 입력  $u_{eq}$ 를 구하면, 식 (6)과 같다.

$$u_{eq} = \frac{a_1}{b_1}p + \frac{1}{b_1}(a_2 - c_1)\dot{p} + \frac{c_1}{b_1}\dot{p}_r + d + \frac{1}{b_1}\ddot{p}_r \quad (6)$$

여기서,  $e = p - p_r$ ,  $\dot{e} = \dot{p} - \dot{p}_r$ ,  $\ddot{e} = \ddot{p} - \ddot{p}_r$  이다. 외란  $d$ 의 경우 측정이 난해한 값이기 때문에 등가 제어입력에서 직접 사용하기가 힘들다. 하지만, 외란  $d$ 와 오차  $e$ 가 비례관계를 가지므로, 외란  $d$ 를 대신하여  $\phi e$ 를 활용한다. 이때 미지수  $c_1$ 은 극배치법을 활용하여 선정할 수 있다.<sup>10)</sup>

$$u_{eq} = \frac{a_1}{b_1}p + \frac{1}{b_1}(a_2 - c_1)\dot{p} + \frac{c_1}{b_1}\dot{p}_r + \phi e + \frac{1}{b_1}\ddot{p}_r \quad (7)$$

스위칭 입력  $u_s$ 는 갑작스런 스위칭 동작을 회피하기 위하여 식 (10)과 같이 근사화된 식을 활용한다.

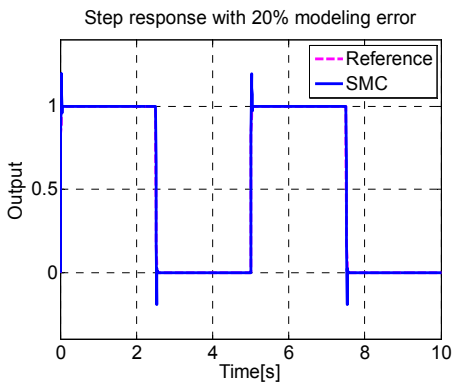


Fig. 2 Step response with 20% modeling error

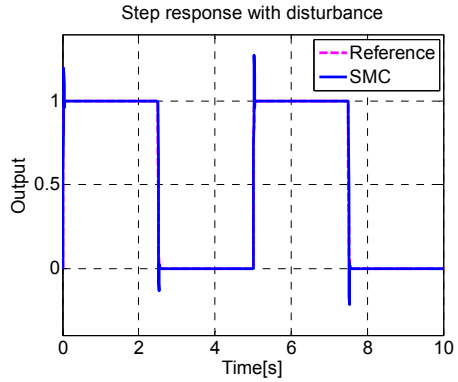


Fig. 3 Step response with step disturbance

$$u_s = K \frac{s}{|s| + \lambda} \quad (10)$$

스위칭 입력  $u_s$ 는 갑작스런 스위칭 동작을 회피하기 위하여 식 (10)과 같이 근사화된 식을 활용한다. Fig. 2는 모델링 오차가 20%일 때 설계된 SMC를 사용하는 제어시스템의 스텝응답을 나타낸 것이며, Fig. 3은 기준 입력의 20% 크기를 가지는 외란에 대한 스텝응답 결과를 나타낸 것이다. 설계 의도와 일치하게 정상상태 오차가 없는 응답을 얻을 수 있었다.

## 2.2 Smith 예측기 설계

Fig. 4는 Smith 예측기의 원리를 나타낸 블록선

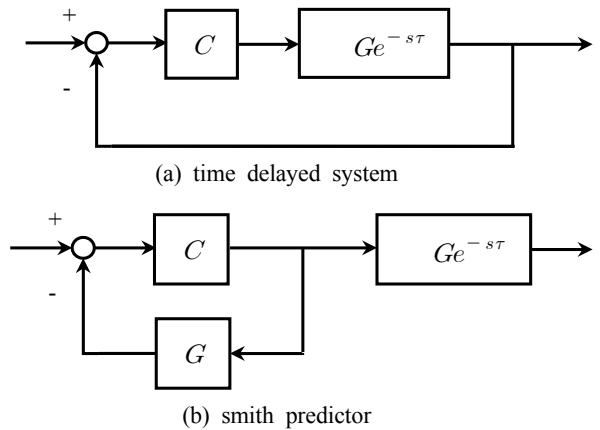


Fig. 4 Block diagram for time delayed system and smith predictor

도이다. Smith의 원리는 ‘시간 지연을 가지는 시스템으로부터 원하는 출력은 시간 지연을 가지지 않은 시스템의 원하는 출력을 구하고 이를 시간 지연 요소만큼 지연한 것과 같다’는 것이다.<sup>1)</sup> 즉 식 (11)을 만족한다는 것이다.

$$\frac{CGe^{-s\tau}}{1+CGe^{-s\tau}} \Rightarrow \frac{CG}{1+CG}e^{-s\tau} \quad (11)$$

Fig. 4 (a)의 시스템에 대한 특성방정식은 시간 지연 요소인  $e^{-s\tau}$ 를 포함하고 있기 때문에 개루프 계연에 따라 시스템이 불안정해지기도 한다. 하지만, Smith의 원리를 통해 시간 지연을 가지는 시스템을 Fig. 4 (b)와 같이 두면 특성방정식 내시

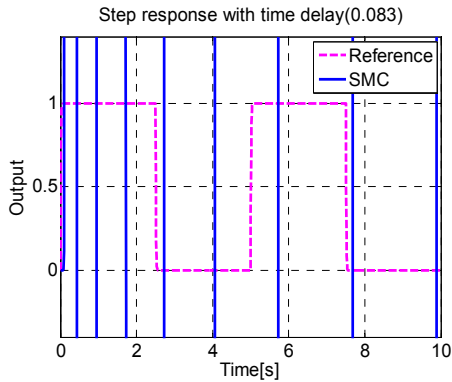


Fig. 5 Step response with time delay(0.083s)

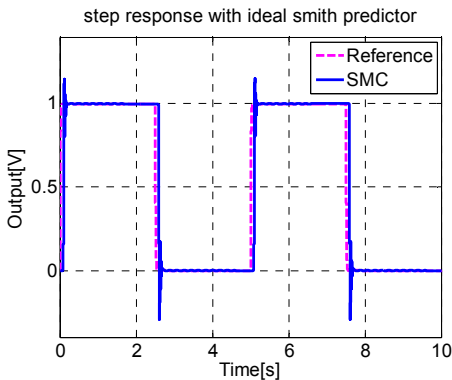


Fig. 6 Step response of Smith predictor with time delay(0.083s)

간 지연 요소  $e^{-s\tau}$ 가 사라지게 되어 제어기에 의해 안정한 시스템이 구성되게 된다.

Fig. 5는 시간 지연 요소가 있을 때, 슬라이딩 모드 제어기를 포함하는 시스템의 스텝응답을 나타낸 것이며, Fig. 6은 Smith 예측기를 활용한 시스템의 스텝응답을 나타낸 것이다. 간단한 구조 변경을 통해 시간 지연 요소를 쉽게 보상할 수 있다.

Smith 예측기는 피드백 루프에 제어 대상에 대한 모델을 직접 포함시켜 시간 지연의 영향을 생략한 형태의 제어기이다. 하지만 Smith 예측기에 사용되어지는 제어 대상에 대한 수학적 모델은 실제 제어대상을 명확히 표현하기 힘들며, 이에 따라 적당한 모델링 오차를 가지고 있다. 따라서 실제 모델의 전달함수를  $(G + \Delta G)e^{-s\tau}$ 라고 둘 수 있을 때, Smith 예측기와 모델링 오차를 포함하는 시스템의 전달함수  $G_c(s)$ 는 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} G_c &= \frac{C(G + \Delta G)}{1 + CG} s^{-s\tau} \\ &= \left( \frac{CG}{1 + CG} + \frac{C\Delta G}{1 + CG} \right) s^{-s\tau} \end{aligned} \quad (12)$$

즉 Smith 예측기를 구성하면서 발생한 모델링 오차는 정상상태 오차의 형태로 나타나게 된다. Fig. 7은 20% 모델링 오차에 따른 Smith 예측기의 스텝응답을 나타낸 그림이다. 모델링 오차가 지속

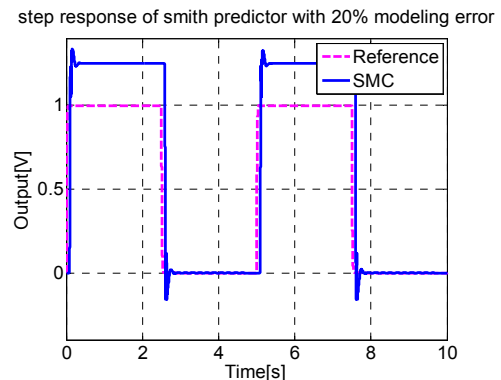


Fig. 7 Step response of Smith predictor with 20% modeling error

적으로 정상상태 오차의 형태로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

이러한 정상상태 오차를 제거하기 위해 본 연구에서는 상태관측기를 도입한다. Smith 예측기와 실제 모델과의 차이를 식 (13)과 같은 상태관측기를 통해 구해진 상태를 통해 보상한다.

$$\dot{\mathbf{x}}_p(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}_p(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{L}_p(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (13)$$

여기서, Smith 예측기 게인  $\mathbf{L}_p$ 는 상태 천이 행렬로  $e^{A\tau}$ 이다.<sup>13)</sup> Fig. 8은 상태 관측기를 포함하는 Smith 예측기의 스텝응답을 나타낸 것이다. 모델링 오차를 보상함으로써 정상상태 오차가 사라진 것을 확인할 수 있다.

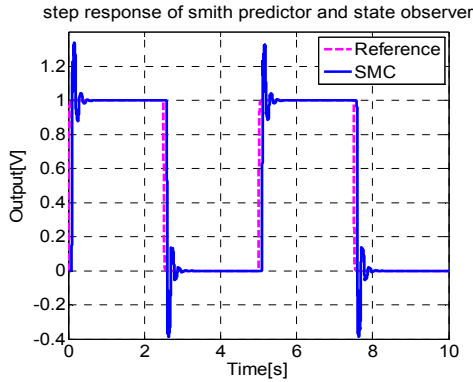


Fig. 8 Step response of Smith predictor and state observer with 20% modeling error

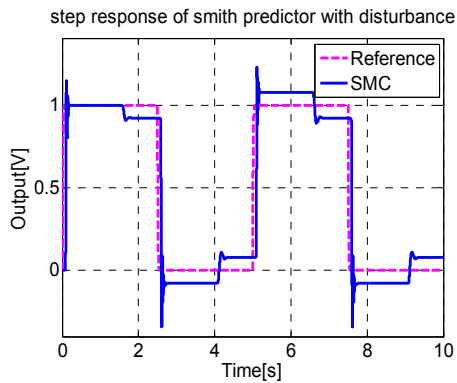


Fig. 9 Step response of Smith predictor with step disturbance

2.1절에서 설계한 슬라이딩 모드 제어기는 Fig. 3에서처럼 주어진 외란을 잘 보상하고 있다. 하지만 Smith 예측기를 사용함에 따라 시스템에 주어지는 외란이 모델링 오차와 마찬가지로 정상상태 오차의 형태로 나타나게 된다. Fig. 9는 Smith 예측기에 외란을 가했을 때의 결과를 나타내고 있다.

이러한 외란에 의한 정상상태 오차를 보상하기 위해서는 Smith 예측기 내에 외란에 관한 항을 포함시켜야 하나, 불확실성을 가지는 외란은 측정하거나 모델링을 할 수 없다. 따라서 불확실한 외란을 보상하기 위해서는 외란 관측기를 설계하여 보상을 할 필요가 있다. Smith 예측기의 모델링 오차를 개선하는데 이미 상태 관측기를 사용하고 있으며, 본 연구에서는 이 상태 관측기의 차원을 확장하여 외란 관측기로 사용하고자 한다.

식 (14)는 외란 관측기를 포함하는 제어시스템의 상태방정식이다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_o &= \mathbf{A}_o \mathbf{x}_o + \mathbf{B}_o u + \mathbf{g}(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= \mathbf{C}_o \mathbf{x}_o \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $\hat{x}$ 는  $x$ 의 추정치이며,  $\hat{y}$ 는  $y$ 의 추정치이다.

$$\mathbf{x}_o = [x_1 \ x_2 \ d]^T, \quad x_3 = d, \quad \mathbf{C}_o = [1 \ 0 \ 0]$$

$$\mathbf{A}_o = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -a_1 & -a_2 & -b_1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_o = \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

이때, 상태관측기의 게인  $\mathbf{g}$ 는 극배치법을 통해 구할 수 있다.

### 2.3 설계된 제어 시스템의 확인

Fig. 10은 외란관측기와 Smith 예측기를 포함하는 제어 시스템의 블록선도이다. 전체 시스템의

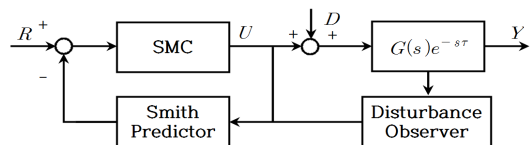


Fig. 10 Block diagram of controlled system

step response of smith predictor with disturbance observer

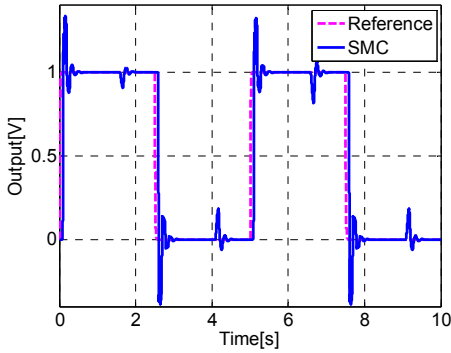


Fig. 11 Step response of controlled system with time delay(0.083s), 20% modeling error and disturbance

Table 1 Parameter of controlled system

Parameter	Value	
switching control input's gain : $K$	0.5	
switching control input's pole: $\lambda$	10	
constant of sliding surface : $c_1$	$1.0 \times 10^4$	
proportional factor : $\phi$ (between disturbance and error)	$-5.0 \times 10^4$	
disturbance observer gain	for $x_1$	407.33
	for $x_2$	$4.59 \times 10^4$
	for $x_3$	$-5.48 \times 10^3$

제어는 슬라이딩 모드 제어기가 맡고 있으며, 시간 지연을 보상하기 위하여 Smith 예측기를 사용하였다. Smith 예측기를 사용하면서 발생하는 모델링 오차 및 외란에 의한 정상상태 오차는 외란 관측기를 통해 보상되고 있으며, 이를 통해 유압 시스템의 개루프 계인을 증가시키더라도 시스템이 안정하게 유지된다. 즉 유압시스템의 응답성이 개선될 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10과 같은 시스템에 대하여 Table 1과 같은 변수를 가질 때, 0.083s의 시간지연, 20% 모델링 오차와 기준입력의 20% 크기를 가지는 외란에 대한 스텝응답을 나타낸 것이다. 기준입력 또는 외란에 따라 내부 상태가 변하는 시간에서 오버슈트가 크게 존재하나 정상상태 오차 없이 목표치를 잘 추종함을 알 수 있다. Fig.

11에서 나타난 큰 오버슈트는 모델링 오차 및 외란에 의해 결정되어지는 값으로 모델링 오차 및 외란이 작은 일반 시스템에서는 충분히 작은 값을 가진다.

### 3. 결론

일반적인 유압시스템은 관로에 존재하는 오리피스와 관로의 챔버 등에 의해 시간지연이 존재한다. 특히, 대유량을 제어하는 파일럿 구동 비례 압력 릴리프 밸브와 같은 경우 펌프의 맥동 및 압력 외란에 의한 밸브의 채터링을 방지하기 위하여 파일럿 라인 내 오리피스와 챔버를 가지고 있으며, 이에 따라 시간 지연이 필연적으로 발생한다. 이 시간 지연 요소는 계인의 크기에 따라 시스템을 불안정하게 하고, 유압 엔지니어들은 이를 회피하기 위해 시스템의 응답성을 포기한다.

본 연구에서는 시간 지연, 모델링 오차, 외란에 강인한 제어기를 설계하여 유압시스템의 응답성을 향상시킬 수 있는 제어 시스템을 구성하고자 하였다. 이를 위해 Smith 예측기를 도입하고, 모델링 오차와 외란에 강인할 수 있도록 외란관측기를 설계하였다. 그 결과 다음과 같은 시뮬레이션 결과를 확인하였다.

- 0.083s의 시간지연을 가지는 시스템에 Smith 예측기를 적용함으로써 안정한 스텝응답을 얻을 수 있었다.

- Smith 예측기를 사용함에 따라 20% 모델링 오차와 기준입력 20% 크기의 외란에 의해 발생하는 정상상태 오차를 외란관측기를 설계하여 보상하였다.

### References

1. C. Brown and D. J. Coombs, 1991, "Notes on Control with Delay", Technical Report, The University of Rochester, New York, America, pp. 2-4.
2. W. Gao and J. Hung, 1993, "Variable Structure Control of Nonlinear System: A New

- Approach", IEEE Transaction on Industrial, Electronics, Vol. 40, No. 1, pp. 45-55. (DOI:10.1109/41.184820)
3. S. Aiyoshizawa and A. Shimada, 2014, "Sliding Mode Control with Disturbance Observer for Parallel Link Robot", The 57<sup>th</sup> Japan Joint Automatic Control Conference, pp. 645-650. (DOI:10.11511/jacc.57.0\_645)
  4. H. Kato, S. Hasegawa and Y. Oshinoya, 2013, "Active Control of Ultra-Compact Vehicle Seat with Voice Motor", Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 37, No. 3-1, pp. 95-101. (DOI:10.3379/msjmag.1302R015)
  5. M. Izutsu, Y. Pan and K. Furuta, 2008, "Swing-up of Furuta Pendulum by Nonlinear Sliding Mode Control", SICE Journal of Control, Measurement and System Integration, Vol. 1, No. 1, pp. 12-17. (DOI:10.9746/jcmsi.1.12)
  6. S. Suzuki, K. Nonami and S. Sakai, 2006, "Continuous Trajectory Following Control of Small-Scale Unmanned Helicopter by Using Model Following Based Sliding Mode Control", Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 72, No. 721, pp. 111-118.
  7. Y. K. Ahn, S Kim and S. Jeong, 2017, "Sliding Mode Control for Improving Performance of Mount with MR(Magneto-Rheological) Fluid", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 18-25. (DOI:10.9726/kspse.2017.21.4.018)
  8. S. S. Yang, S. M. Jin, J. J. Choi, C. D. Lee and Y. S. Kim, 2009, "A Study on Tracking Control of Remote Operated Excavator for Field Robot", Journal of the Korea Fluid Power System Society, Vol. 6, No. 4, pp. 68-74.
  9. I. H. Kim and Y. I. Son, 2016, "Design of a DC motor Current Controller Using a Sliding Mode Disturbance Observer and Controller", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 22, No. 6, pp. 417-423. (DOI:10.5302/J.ICROS.2016.16. 0026)
  10. N. Kenzo and D. Koki, 1994, "Sliding Mode Control - Design Theory of Nonlinear Robust Control", Corona press, Tokyo, pp. 14-20, 56-75.
  11. Bosch Rexroth, 2017, "Proportional pressure relief valve pilot operated type DBE(M), DBE(M)E", Bosch Rexroth, p. 3.
  12. S. N. Yun, H. H. Jeong, J. H. Yang and I. Y. Lee, 2011, "System Identification and Pressure Control of Pilot Type Poppet Valve", The 2011 Autumn Conference of the Korean Society for Power System Engineering, pp. 93-96.
  13. K. Kawaguchi et al., 2014, "New Design Approach for Sliding Mode Control of Plants with Time Delay", International Journal of Control and Automation, Vol. 7, No. 5, pp. 387-396. (DOI:10.14257/ijca.2014.7.5.38)