

# 슬라이딩모드 제어를 이용한 공기압 실린더 구동장치의 강인제어 Robust Control of Pneumatic Cylinder Driving System using Sliding Mode Controller

장지성\* · 한승훈\*\*\*†

Ji-Seong Jang\* and Seung-Hun Han\*\*\*†

(Received 03 July 2017, Revision received 26 September 2017, Accepted 26 September 2017)

**Abstract:** The pneumatic driving system has advantages such as high output power per weight and low heat generation rate. However, it is difficult to control the position because of its strong non-linearity such as large friction forces compared to driving force, and heat transfer characteristics that change during operation. Therefore, in order to achieve the control objectives, a robust controller should be designed considering modeling error and model uncertainty. In this paper, a sliding mode controller is designed to improve the position control performance of pneumatic cylinder driving system. Experimental results show that the designed controller achieves the designed control objectives even if the model of the cylinder driving system, such as the initial pressure inside the cylinder and the initial position of the piston is changed.

**Key Words :** Pneumatic Driving System, Non-linearity, Sliding Mode Controller, Robust Controller

## 1. 서 론

공기압 구동 시스템은 압축공기를 작동유체로 사용하므로 중량당 출력비가 높고, 주위 환경을 오염시키지 않는 등의 장점이 있으므로 공기압 로봇, 정밀 위치제어, 진동 절연 등<sup>1-3)</sup>으로 그 적용 범위가 점차 확대되고 있다. 하지만 작동매체인 공기의 압축성에 기인하는 비선형성 때문에 설정한 위치 제어 성능의 달성이 용이하지 않다. 위치 제어를 곤란하게 하는 요소로는 구동력에 비해 큰 마찰력과 초기 상태 변화에 따른 시스템 모델의 변화 등이 있다. 그러므로 공기압 구동시

스템의 위치 제어기로는 모델링 오차와 모델의 불확실성을 고려한 강인제어기의 설계가 요구되어진다.<sup>4-8)</sup>

비선형 시스템을 대상으로 한 강인한 제어기 중에서 가변구조시스템(variable structure system, VSS) 이론<sup>9,10)</sup>에 근거한 슬라이딩 모드제어(sliding mode control, SMC) 기법은 이론의 간략성과 슬라이딩 모드라는 특성 때문에 강인한 제어 성능이 요구되는 다양한 시스템에 적용되고 있다.<sup>9-18)</sup>

본 논문에서는 공기압 실린더 구동장치의 위치제어성능 향상을 위해 슬라이딩 모드제어 기

\*\*\* 한승훈(교신저자) : 목포해양대학교  
E-mail : nicehsh1@mmu.ac.kr, Tel : 061-240-7462  
\*장지성 : 부경대학교 기계시스템공학과

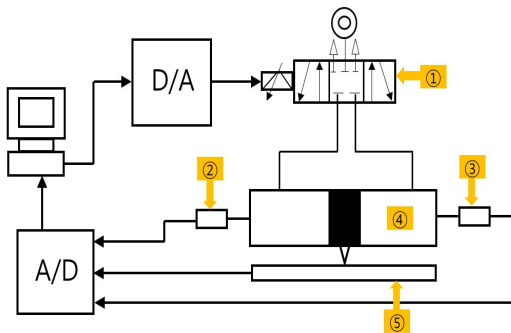
\*\*\* Seung-Hun Han(corresponding author) : Mokpo National Maritime University.  
E-mail : nicehsh1@mmu.ac.kr, Tel : 061-240-7462  
\*Ji-Seong Jang : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

법을 적용하여 모델링 오차와 파라미터 변동에 강인한 상태피드백 제어를 설계하였다.

설계된 제어기의 타당성은 다양한 조건하의 실험 결과를 통하여 확인하였다.

## 2. 위치 제어장치의 구성 및 모델링

본 연구에서 대상으로 한 공기압 실린더장치를 Fig. 1에 나타낸다. Fig. 1에서 실린더는 내경 25 mm, 행정길이 500 mm인 로드레스(rodless) 실린더(SMC Co., MY H25-500H)를 이용하였다. 피스톤의 위치는 선형 포텐서미터(Novotechnik Co., 분해능 0.01 mm, TLH500)를 실린더 내부의 피스톤과 연결된 실린더 상부 슬라이딩 테이블에 직접 연결하여 검출하였다. 압력은 압력센서(Sensys co., PS HK001 0KCAG)를 실린더 입구에 설치하여 검출하였다. 실린더 구동용 제어 밸브는 최대 유효 단면적이 18.46 mm<sup>2</sup>인 유량비례제어밸브(FESTO Co., MPYE-5-1/4-010B)를 이용하였다.



- ① Proportional control valve, ②,③Pressure sensor,
- ④ Cylinder, ⑤ Potentiometer

Fig. 1 Schematic diagram of position control apparatus

Fig. 2에서 절선은 비례제어밸브의 유량을 계측한 결과이다.  $u$ 는 제어밸브로의 입력전압[V],  $Q$ 는 제어밸브를 통과하는 공기의 체적유량[l/min]를 나타낸다. 이때, 유량은 체적유량계(FESTO Co., SFAM-62-3000L)로 계측하였다. Fig. 2의 점선에 나

타낸 바와 같이 밸브 중립점이 5.15 V이었고, 4.5~5.8 V에서는 비례제어밸브의 오버랩 영향으로 인해 불감대가 형성되어 있음을 알 수 있다. 이러한 불감대가 제어 성능에 영향을 미치지 않도록 하기 위하여 불감대 영역의 제어밸브 유량특성이 Fig. 2의 실선과 같이 되도록 Matlab/Simulink의 데드존 블록(Dead Zone block)을 사용하여 구현하였다. 밸브의 중립점 부근에서 제어 밸브의 선형화 입력은 Fig. 2의 실선과 같이 하였다.

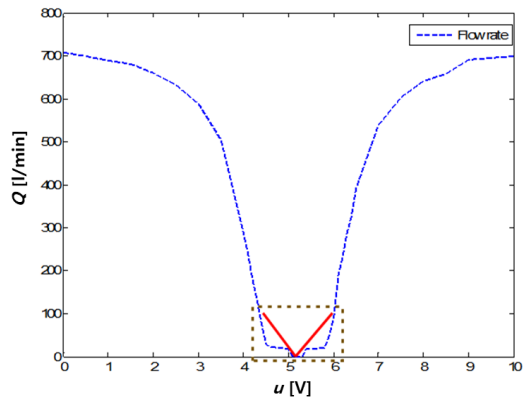


Fig. 2 Flow rates characteristic of control valve according to input voltage.

실린더 구동장치의 개략도를 Fig. 3에 나타낸다. Fig. 3에 사용된 기호는 다음과 같다.  $L$ : 실린더의 전 행정[m],  $d$ : 관로의 직경[m],  $G$ : 실린더로 공급 또는 실린더에서 방출되는 질량유량[kg/s],  $L_d$ : 관로의 길이[m]  $M$ : 가동부 질량[kg],  $P$ : 압력

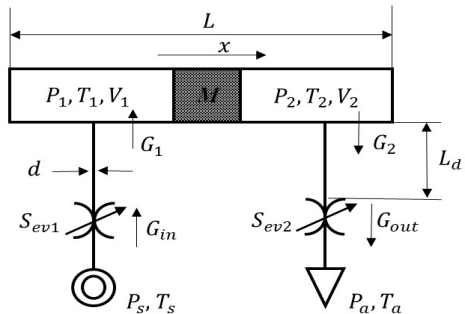


Fig. 3 Schematic diagram of a pneumatic cylinder driving system

[Pa],  $S_{cv}$ : 밸브의 유효 단면적[mm<sup>2</sup>],  $T$ : 온도[K],  $V$ : 실린더 내부 체적[m<sup>3</sup>],  $x$ : 피스톤 위치[m], 하첨자 1은 유입측, 2는 유출측,  $s$ : 공급측,  $a$ : 대기를 의미한다. 공기의 상태변화를 단열변화로 가정하고 관로를 단순한 용적으로 표현하면 실린더 내부 압력 변화는 식 (1)과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= \frac{\kappa}{V_1} \left( -P_1 \frac{dV_1}{dt} + G_1 R T_1 \right) \\ \frac{dP_2}{dt} &= \frac{\kappa}{V_2} \left( P_2 \frac{dV_2}{dt} + G_2 R T_2 \right) \\ V_1 &= A_c x + A_L L_d \\ V_2 &= A_c (L - x) + A_L L_d \\ G &= G_1 = -G_2 = k_q u \end{aligned} \quad (1)$$

피스톤의 운동 방정식은 식 (2)로 표현된다.

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} = A_c (P_1 - P_2) - d_c \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 사용된 기호는 다음과 같다.

$\kappa$ : 비열비,  $L$ : 피스톤의 전 행정[m],  $A_L$ : 관로 단면적[m<sup>2</sup>],  $L_d$ : 관로의 길이[m]  $A_c$ : 피스톤 수압 면적[m<sup>2</sup>],  $k_q$ : 제어입력-유량계수[(kg/s)/V],  $u$ : 제어입력[V],  $b$ : 동마찰계수[N/(m/s)],  $R$ : 기체상수 [J/(kgK)],  $d_c$ : 마찰력( $\mu Mg \cdot \text{sgn}(v) + F_L$ )[N],  $\mu$ : 정마찰계수,  $F_L$ : 외부 부하력

실린더 평형위치에서  $x = x_0$ ,  $v = 0$ ,  $T = T_a$   $P_1 = P_{10} = P_0$ ,  $P_2 = P_{20} = P_0$  로 가정하고 출력을 피스톤의 위치라고 하면, 공기압 실린더 구동장치의 상태방정식은 식 (1), (2)를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ v \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{M} & \frac{A_c}{M} & -\frac{A_c}{M} \\ 0 & -\kappa \frac{P_{10} A_c}{A_c x_0 + A_L L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \kappa \frac{P_{20} A_c}{A_c (L - x_0) + A_L L_d} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ v \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\kappa k_q R T_a}{A_c x_0 + A_L L_d} \\ -\frac{\kappa k_q R T_a}{A_c (L - x_0) + A_L L_d} \end{bmatrix} u$$

$$y = [1 \ 0 \ 0 \ 0] [x \ v \ P_1 \ P_2]^T \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 실린더 구동장치의 전달함수를 구하고, 고유진동수를  $w_n$ , 감쇠비를  $\zeta$  라고 하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{x}{u} = \frac{\frac{\kappa R T_a A_c (A_c L + 2 A_L L_d) k_q}{M (A_c x_0 + A_L L_d) \{A_c (L - x_0) + A_L L_d\}}}{s \left\{ s^2 + \frac{b}{M} s + \frac{\kappa P_0 A_c^2 (A_c L + 2 A_L L_d)}{M (A_c x_0 + A_L L_d) \{A_c (L - x_0) + A_L L_d\}} \right\}}$$

$$w_n = \sqrt{\frac{\kappa P_0 A_c^2 (A_c L + 2 A_L L_d)}{M (A_c x_0 + A_L L_d) \{A_c (L - x_0) + A_L L_d\}}}$$

$$\zeta = \frac{b}{2 M w_n} \quad (4)$$

식 (4)에서  $w_n$ 은 고유진동수[rad/s],  $\zeta$ 는 감쇠비를 나타낸다.

### 3. 제어기 설계

본 연구에서 설계한 슬라이딩모드 제어기를 설계하기 위해서는 제어대상 시스템을 표준형(canonical form)으로 만들어 주어야 한다.<sup>19)</sup> 그러므로 피스톤의 운동방정식인 식 (2)를 시스템의 불확실성을 포함한 등가의란  $d_c$ 를 고려한 3차계 공칭모델로 만들었다. 식 (2)를 미분하고, 식 (1)을 대입하여 정리하면 식 (5)와 같이 된다.

$$M \frac{d^3 x}{dt^3} + b \frac{d^2 x}{dt^2} = A_c (\dot{P}_1 - \dot{P}_2) - d_c$$

$$\frac{d^3x}{dt^3} = -\frac{b}{M}\ddot{x} + \frac{A_c\kappa}{M}\left(-\frac{P_{10}A_c}{A_cx_0 + A_L L_d} - \frac{P_{20}A_c}{A_c(L-x_0) + A_L L_d}\right)\dot{x} + \frac{A_c\kappa}{M}\left(\frac{k_qRT}{A_cx_0 + A_L L_d} + \frac{k_qRT}{A_c(L-x_0) + A_L L_d}\right)u - d_e \quad (5)$$

식 (5)를 불확실성 및 부하 외란을 포함하는 등가외란  $d_e$ 를 적용한 제어 입력  $u_{eq}$ 에 대해서 정리하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{eq} = b_n^{-1} \left\{ \frac{d^3x}{dt^3} + a_{n3} \frac{d^2x}{dt^2} + a_{n2} \frac{dx}{dt} + a_{n1}x + b_n d_e \right\} \quad (6)$$

식 (6)에 기술한 시스템 파라미터 공칭값  $a_{n1}, a_{n2}, a_{n3}$  그리고  $b_n$ 을 정리하면 식 (7)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} a_{n1} &= 0 \\ a_{n2} &= \frac{A_c\kappa}{M} \left( \frac{P_{10}A_c}{A_cx_0 + A_L L_d} + \frac{P_{20}A_c}{A_c(L-x_0) + A_L L_d} \right) \\ a_{n3} &= \frac{b}{M} \\ b_n &= \frac{A_c\kappa}{M} \left( \frac{k_qRT}{A_cx_0 + A_L L_d} + \frac{k_qRT}{A_c(L-x_0) + A_L L_d} \right) \quad (7) \end{aligned}$$

Fig. 4는 식 (6)의 블록선도를 나타낸다.

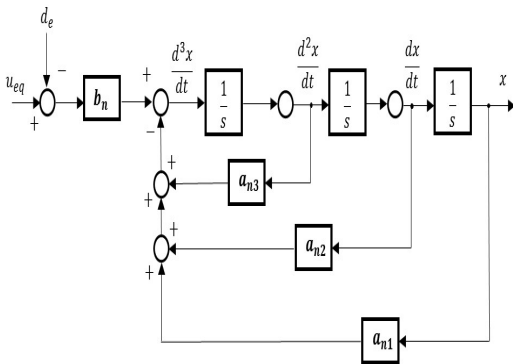


Fig. 4 Block diagram of the third-order system of pneumatic cylinder driving system

슬라이딩모드 제어기는 3차의 슬라이딩 평면이 영점(zero)으로 수렴하도록 궤적 추종 제어를 한다. 추종해야 할 추종 오차는 위치 오차  $e$ , 속도 오차  $\dot{e}$ , 가속도 오차  $\ddot{e}$ 이며, 식 (8)과 같이 구성한다. 슬라이딩 모드 제어 입력  $u$ 는 Lyapunov 함수에 의해 결정되며  $s$ 가 0에 수렴하기 위해서는 식 (9)의 조건을 만족해야 한다. 슬라이딩 모드 제어 입력  $u$ 는 식 (10)과 같이, 연속함수로 구성된 등가입력  $u_{eq}$ 와 슬라이딩 평면에서 등가외란을 보상하기 위한 스위칭 입력  $u_s$ 로 구성한다.

$$s = c_1e + c_2\dot{e} + \ddot{e}, \quad (8)$$

$$e = x - x_r, \quad \dot{e} = \dot{x} - \dot{x}_r, \quad \ddot{e} = \ddot{x} - \ddot{x}_r$$

$$\dot{V} = s\dot{s} \leq 0 \quad (9)$$

$$u = u_{eq} + u_s \quad (10)$$

식 (9)에서  $\dot{s}=0$ 일 때, 즉 시스템의 응답이 슬라이딩 모드 상태에 있을 때, 식 (11)에 추종 오차를 대입하여  $u_{eq}$ 에 관해서 정리하면 식 (12)가 얻어진다. 이때  $d_e$ 는 계측이 곤란하기 때문에  $b_n d_e$  대신에  $-\phi e$ 로 적용한다.<sup>19)</sup> 이때  $\phi$ 는 양의 상수이다.

$$\dot{s} = c_1\dot{e} + c_2\ddot{e} + e \quad \dots \quad (11)$$

$$u_{eq} = b_n^{-1} \left\{ a_{n1}x + (a_{n2} - c_1)\dot{x} + (a_{n3} - c_2)\ddot{x} - \phi e + c_1\dot{x}_r + c_2\ddot{x}_r + \ddot{x}_r \right\} \quad (12)$$

또한 스위칭 입력  $u_s$ 는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.  $u_s$ 는 스위칭 평면상의 부호 상태에 따라 불연속적인 제어입력으로 슬라이딩 모드가 설정된 궤적을 추종하도록 제어 구조를 변화시켜 준다.  $sgn(s)$ 는 부호함수이고,  $\bar{D}$ 는 스위칭 계인이다.

$$u_s = -\bar{D}sgn(s), \quad sgn(s) = \begin{cases} 1 & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ -1 & s < 0 \end{cases} \quad (13)$$

Fig. 5는 슬라이딩모드 제어를 적용한 공기압 실린더 구동장치 블록선도를 나타낸다. 슬라이딩 모드 제어기는 제어 입력이 불연속적으로 변화하는

비선형적 제어와 슬라이딩 조건 만족 시 정해진 상태 궤적을 추종해가는 적응 제어의 성격을 가진다. Fig. 5에서 SMC controller는 식 (8)~(13)를 나타내고, Pneumatic cylinder model은 식 (3)을 나타낸다.

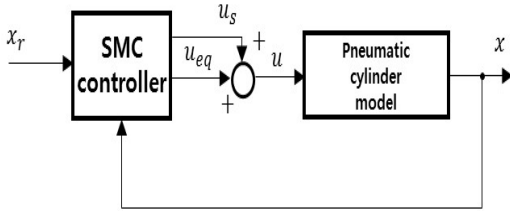


Fig. 5 Block diagram of a sliding mode controller of pneumatic cylinder driving system

#### 4. 실험 결과 및 고찰

제어기 및 I/O interface는 PC 기반의 MATLAB/simulink RTWT(Real Time Windows Target)으로 구현하였으며, 샘플링 주기는 1 ms이다.

제어계 설계 사양은 단위스텝 입력에 따른 최대 오버슈트  $M_p$ 가 35% 이내, 정착시간은  $t_s$ ( $\pm 3\%$  오차기준)가 0.5초 이내 그리고 90% 상승시간  $t_r$ 이 0.3초이다. 또한 스텝입력, 정현파입력에 따른 정상 상태 오차가  $\pm 1\%$ 이다.

Fig. 6은 본 연구에서 대상으로 하는 공기압 실린더 구동 장치의 사진을 나타낸다. Table 1은 구동 장치의 물리적 파라미터이고, Table 2는 설계된 슬라이딩모드 제어기의 파라미터를 나타낸다.

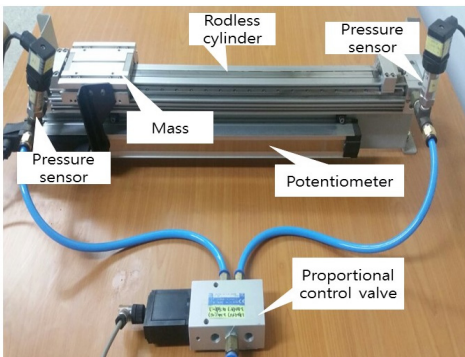


Fig. 6 Photo of the experimental equipment

Table 1 Physical parameters of the driving apparatus

$A_c$	$4.90 \cdot 10^{-4}$ [m <sup>2</sup> ]	$P_0$	540 [kPa]
$A_L$	$1.32 \cdot 10^{-4}$ [m <sup>2</sup> ]	$R$	287 [J/(kgk)]
$b$	50 [N/(m/s)]	$S_{ev}$	max.18.46 [mm <sup>2</sup> ]
$k_q$	$5.06 \cdot 10^{-3}$ [(kg/s)/V]	$T_a$	293 [K]
$L$	0.5 [m]	$x_0$	0.25 [m]
$M$	1.5 [kg]	$L_d$	0.4 [m]
$d$	0.0065 [m]	$\kappa$	1.4
$P_s$	591.6 [kPa]		

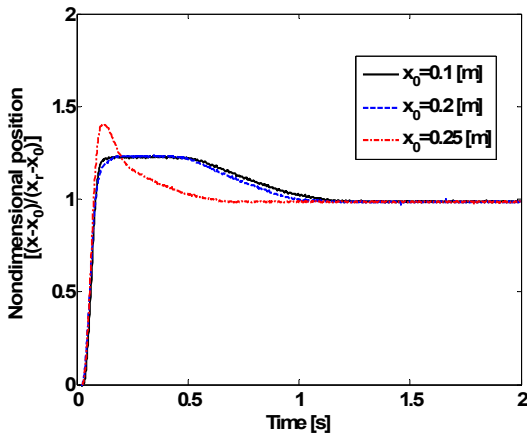
Table 2 Design parameters of the sliding mode controller(SMC)

$\bar{D}$	0.1	$\phi$	$2.67 \times 10^3$
$c_1$	1050	$c_2$	33

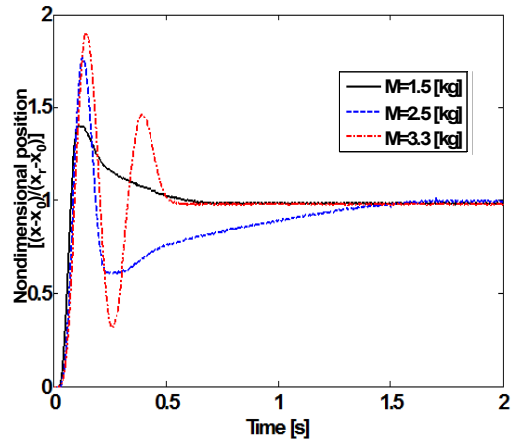
본 논문에서 설계한 슬라이딩모드 제어기의 제어 성능을 비교하기 위해서 PID 제어기를 사용하였다. PID 제어기의 게인 값은 지글러-니콜스 방법(Ziegler-Nichols Method)<sup>20</sup>에 의해  $K_p=0.03$ ,  $K_i=0.15$ ,  $K_d=0.0034$ 로 선정하였다.

Fig. 7은 PID 제어기 및 SMC 제어기를 적용하고 기준입력신호로서 스텝입력을 가했을 때의 결과를 나타낸다. 횡축은 시간이고, 종축은 피스톤의 위치를 무차원화한 결과이다. 목표 스텝을 +0.05 m로 설정하고, 피스톤의 초기 위치를 0.1 m, 0.2 m, 0.25 m까지 변화시킨 경우의 결과를 나타낸다. Fig. 7의 (a)는 PID 제어기를 적용하였을 때의 실험 결과이고, (b)는 SMC 제어기를 적용하였을 때의 실험결과이다. PID 제어기를 적용한 (a)는 피스톤의 초기 위치가 변화함에 따라 오버슈트가 감소하였으나, 정착시간이 증가되어 목표 궤적에 느리게 수렴되어짐을 알 수 있다.

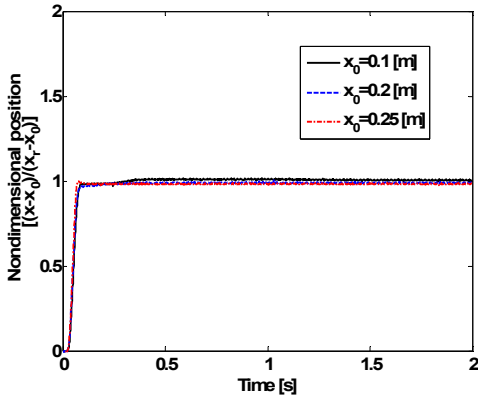
SMC 제어기를 적용한 (b)는 피스톤의 초기 위치가 변화여도 피스톤의 동특성이 일정하게 유지되며 목표 위치를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.



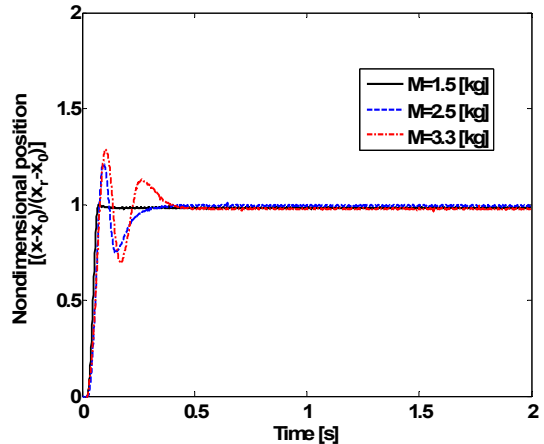
(a) Experimental results using PID controller (step width: +0.05 m)



(a) Experimental results using PID controller (step width: +0.05 m)



(b) Experimental results using SMC controller (step width: +0.05 m)



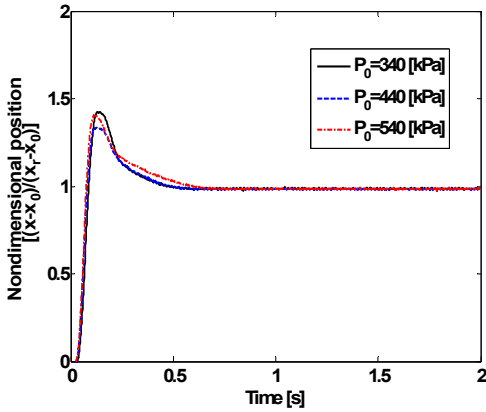
(b) Experimental results using SMC controller (step width: +0.05 m)

Fig. 7 Position control results when initial position changes ( $M:1.5$  kg,  $P_0:540$  kPa)

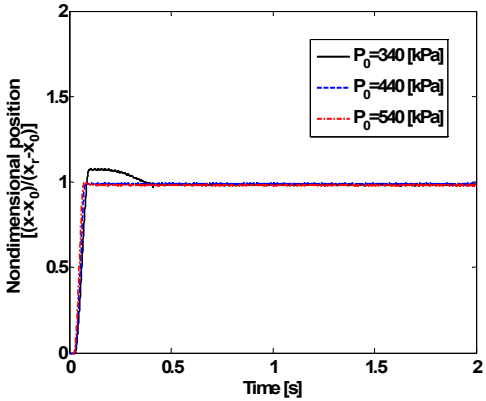
Fig. 8은 피스톤의 초기 위치를 0.25 m로 하고, 가동부 질량을 각각 1.5 kg, 2.5 kg, 3.3 kg로 변화시킨 경우의 응답을 비교한 결과이다. (a)는 가동부 질량이 3.3 kg일 때, 초기 심하게 진동하였으나 목표 궤적에 빠르게 수렴하였고, 2.5 kg일 때는 3.3 kg일 때보다 진동은 감소하였지만 목표 위치에 느리게 수렴하게 됨을 알 수 있었다. 반면 (b)는 가동부 질량이 증가함에 따라 초기 응답에 약간의 진동을 보이지만 진동이 사라지고 목표 위치에 빠르게 수렴하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8 Position control results when moving mass changes ( $x_0:0.25$  m,  $P_0:540$  kPa)

Fig. 9는 평형 위치에서의 실린더 압력을 340 kPa, 440 kPa, 540 kPa로 설정한 경우의 결과를 나타낸다. 압력 변화에 따라 (a)는 응답 특성의 변화가 거의 없었고, 과도한 오버슈트가 나타났다. (b)는 340 kPa의 압력에서 약간의 오버슈트가 발생하였지만 제어계 설계사양을 만족하였으며, 초기 압력이 변해도 우수한 제어 성능을 보임을 알 수 있다.



(a) Experimental results using PID controller (step width: +0.05 m)



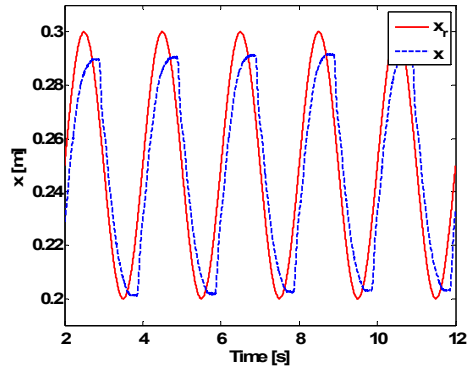
(b) Experimental results using SMC controller (step width: +0.05 m)

Fig. 9 Position control results when initial pressure changes ( $x_0:0.25$  m,  $M:1.5$  kg)

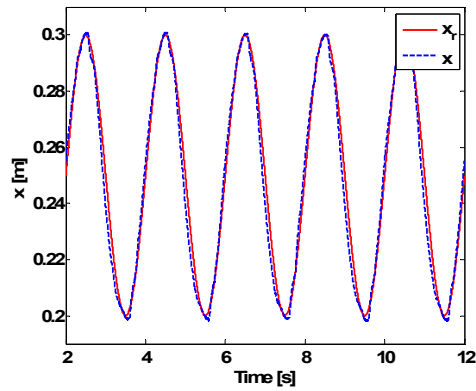
Fig. 10은 피스톤 초기 위치를 0.25 m, 가동부 질량을 1.5 kg으로 설정하고 기준입력으로 정현파 신호 0.5 Hz를 가했을 때의 결과이다.

(a)는 정상 상태 오차가 크게 발생하였으나, (b)는 정상상태 오차가 거의 발생하지 않고 목표 위치를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10에 나타낸 시간 응답 결과들로부터 입력 신호에 대한 출력 신호의 크기 오차를 Fig. 11에 나타내었다.



(a) Experimental results using PID controller ( $x_r = \alpha \sin 2\pi ft$ ,  $\alpha=0.05$  m,  $f=0.5$  HZ)



(b) Experimental results using SMC controller ( $x_r = \alpha \sin 2\pi ft$ ,  $\alpha=0.05$  m,  $f=0.5$  HZ)

Fig. 10 Position control results when sinusoidal input signal ( $x_0:0.25$  m,  $M:1.5$  kg)

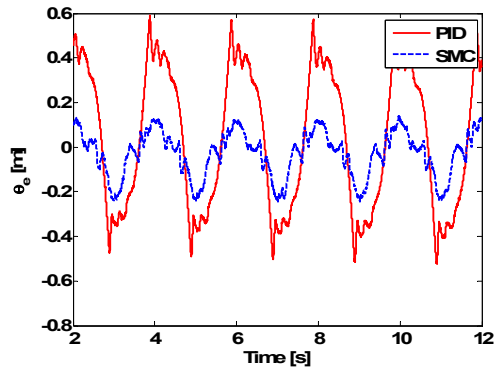


Fig. 11 Error between input and output evaluated based on Fig. 10

## 5. 결 론

본 연구에서는 공기압 구동장치의 비선형성을 극복하면서, 시스템의 파라미터 변화에 대하여 강인성과 우수한 제어 성능을 얻을 수 있는 슬라이딩모드 제어를 설계하였다. 제어기는 실린더 내부 압력과 온도를 각각 540 kPa, 293 K, 피스톤 위치를 0.25 m, 가동부 질량을 1.5 kg으로 설정하여 설계하였고, 다양한 조건하의 실험을 실시하여 그 결과를 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 성과는 다음과 같다.

1) 피스톤의 초기 위치가 0.1~0.25 m 사이에서 변하여도 피스톤의 응답특성이 일정하게 유지되며 목표위치를 잘 추종하였고, 정현파 신호를 입력하여도 정상상태 오차 없이 잘 추종하였다.

2) 가동부 질량이 증가함에 따라 감쇠비가 감소하므로 오버슈트가 증가하였으나 질량이 220%까지 증가하여도 설계한 제어성능을 달성하였다.

3) 실린더실 내부 초기압력이 감소하면 고유진동수가 변화하여 응답특성이 변하지만 초기압력을 63%까지 감소시켜도 제어계 설계사양을 만족하였다.

## 후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

## References

1. J. Wang, D. J. D Wang, P. R. Moore and J. Pu, 2001, "Modeling Study, Analysis and Robust Servocontrol of Pneumatic Cylinder Actuator Systems", IEEE Proceedings-Control Theory and Applications, Vol. 148, No. 1, pp. 35-42.
2. J. S. Jang, S. W Ji and Y. B. Kim, 2008, "LMI-Based Controller Design of Pneumatic Cylinder", J. of Korea Fluid Power Systems Society, Vol. 5, No. 1, pp. 1-5.

3. J. S. Jang, S. W Ji, 2008, "Multi-Objective State-Feedback Controller Design of Pneumatic Actuating Systems", J. of Korea Fluid Power Systems Society, Vol. 5, No. 2, pp. 32-36.
4. T. Kato, K. Kawashima, K. Sawamoto and T. Kagawa, 2007, "Active Control of a Pneumatic Table using Model following Control and a Pressure Differentiator", Precision Engineering, Vol. 31, pp. 269-275.
5. S. R. Pandian, Y. Hayakawa, Y. Kanazawa, Y. Kamoyama and S. Kawamura, 1997, "Practical Design of a Sliding Mode Controller for Pneumatic Actuators", Transaction of the ASME, Vol. 119, pp. 666-674.
6. S. R. Pandian, F. Takemura, Y. Hayakawa, F. Takemura, and S. Kawamura, 2002, "Pressure Observer-Controller Design for Pneumatic Cylinder Actuators", ASME Transaction ON Mechatronics ASME, Vol. 7, No. 4 pp. 490-499.
7. M. Samoui, X. Brun and D. Thomaset, 2006, "A Study on Tracking Position Control of an Electropneumatic System using Backstepping design", Control Engineering Practice, Vol. 14, No. 8, pp. 923-933.
8. Z. Rao, B. A. Chelmsford and G. M. Bone, 2008, "Nonlinear Modeling and Control of Servo Pneumatic Actuators", Control System Technology, Vol. 16, No. 2, pp. 562-569.
9. V. I Utkin, 1976, "Control System of Variable Structure", J Wiley and Sons Inc., New York.
10. R. A Decarlo S. H Zac and G. P. Mathews, 1988, "Variable Structure Control of nonlinear multivariable Systems : Atutorial.", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 111, pp. 212-232.
11. S. Umerujan, N. Umeda, Hanamoto and T. Tsji, 2000, "Model Reference Sliding Mode Control of Flexible Arm with Non-linear VSS Observer", Proc. of 3rd Asian Control Conference, pp. 2893-2898.



12. I. C. Baik, K. H. Kim and M. J. Youn, 1993, "Robust Nonlinear Speed Control of PM Synchronous Motor using Boundary Layer Inegral Sliding Mode Control Technique", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 47-54.
13. R. A Decarlo S. H Zac and G. P. Mathews, 1988, "Variable Structure Control of nonlinear multivariable Systems : Atutorial.", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 111, pp. 212-232.
14. V. I Utkin, 1993, "Sliding Mode Control Design Principles and Application to Electric Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No.1, pp. 23-36.
15. V. I Utkin and J. Shi, 1996, "Integral Sliding Mode in Operating under Uncertainty Conditions", Pro. of the 34th IEEE conf. Decision and Control, pp. 4591-4596.
16. J. J Slotin and S. S. Sastry, 1983, "Tracking Control of Non-linear Systems using Sliding Surface with Application to Robot Manipulator", J. of International Control, Vol. 38, No. 2, pp. 465-492.
17. R. G Morgan and U. Ozguner, 1985, "Decentralized Variable Structure Control Algorithm for Robot Manipulator", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 57-65.
18. J. Y. Park, T. B. Lee and H. K. Choi, 1991, "Robot Manipulators Control using Variable Structure System Theory", J. of KITE Electronics Engineering, Vol. 2, No. 2, p. 2.
19. I. H. Kim and Y. I. Son, 2016, "Design of a DC Motor Current Controller Using a Sliding Disturbance Observer and Controller", J. of Control, Robotics and Systems, Vol. 22, No. 2, pp. 417-423.
20. Gene F. Frankin, J. David Powell and Abbas Emami-Naeini, 2015, "Feedback Control of Dynamic Systems", Pearson, Seventh edition, pp. 226-232.