

# 연속 슬라이딩 모드를 이용한 공압모터 구동 볼스크류 위치제어 시스템 The Ball Screw Position Control System Driven by a Pneumatic Motor Using Continous Sliding Mode

김근목\*  
Geun-Mook Kim\*

## <Abstract>

The ball screw position control system driven by a pneumatic motor using continuous sliding mode is proposed. The design and performance of proposed servo system are presented by means of examples tested under practical service conditions. Results of experimental implementation on the proposed system illustrate the effectiveness of the ball screw position control system driven by a pneumatic motor using continuous sliding mode as a servo pneumatic actuator driven by a pneumatic motor.

**Keywords :** *Ball screw position control system, Pneumatic motor, Continuous sliding mode*

## 1. 서 론

공압모터는 전기 모터에 대한 대안으로 인간과 기계 상호작용에 적합한 메카트로닉(mechatronic) 요구를 수행하기 위한 구동기 분야에 대해 적극적인 연구를 시작하게 되었다<sup>1)</sup>.

공압모터는 간결하고 출발과 정지는 거의 순간적이며 과부하나 연속 정지 시에도 모터에 큰 무리를 주지 않는다. 또한, 상대적으로 가격이 저렴하고, 유지가 용이하고 속도가변이 용이하고 높은 기동 토크를 낼 수 있으며 위험한 영역에서도 자체 특성상 안전하며 가혹한 환경에서도 원활하게 작동할 것으로 기대되는 공압모터는 전기모터에 비해 다음과 같은 장점을 갖는다<sup>2)</sup>.

• 전기를 요구하지 않으며 폭발 위험성 있는 곳에서도 사용될 수 있다.

• 일반적으로 크기 및 중량 대비 높은 출력을 내기 때문에 더 작은 공압모터로 같은 힘을 낸다.

• 공압모터 토크는 공압모터로 공급되는 공기 압력을 조정하여 변화시킬 수 있다.

• 공압모터는 전기 모터가 필요로 하는 마그네틱 스타터, 과부하 보호, 다수의 다른 지원 요소를 필요로 하지 않는다.

• 공압모터는 전기모터에 비해 아주 적은 열을 낸다.

그러나 이러한 장점에도 불구하고 공압모터 시스템은 공기의 압축성, 배인과 하우징 사이의 마찰력, 상대마찰 운동부의 마찰력, 비레벨브를 통한 공기 유량 및 볼스크류의 백래시 등으로 시변 비선형 시스템으로 정밀제어가 매우 어렵다.

시스템 파라미터가 변하는 경우에도 변함없이 좋은 응답을 얻기 위해서는 적응제어 또는

\* 교신저자, 정희원, 아주자동차대학, 자동차튜닝제어과, 부교수 \* Corresponding Author, Professor Dept. of Automotive Tune-up Control Engineering, Ajou Motor College  
E-mail: gmkim@motor.ac.kr

강인제어가 요구되고 있다<sup>3)</sup>.

본 연구는 산업용 공압 배인 모터를 전기 및 유압 서보모터가 사용되는 중부하 핸들링 분야의 로봇이나 자동화 시스템 등에 적용을 검토하기 위하여 공압모터 구동 볼스크류 시스템의 위치제어 시스템을 구성하고 Surgenor등<sup>4)</sup>이 제안한 연속 슬라이딩 모드 제어를 적용하였다.

## 2. 실험장치 및 제어기

### (1) 실험장치

공압모터 구동 볼스크류 위치제어 시스템의 전체 블록 다이어그램은 Fig. 1과 같고, 실험장치는 Fig. 2와 3에 보여준다. 최종제어 밸브는 Festo사(독일)의 MPYE-5-1/8이며 700 l/min 이다. 밸브는 Gast사(미국)의 공압모터를 구동한다.

공압모터 축은 볼스크류와 축커플링으로 연결되어 있다. 볼스크류의 회전에 의해 이동하는 카트(cart)의 위치는 볼스크류와 연결된 로터리 엔코더(Auto nics 2000펄스/회전)에 의해 측정된다.

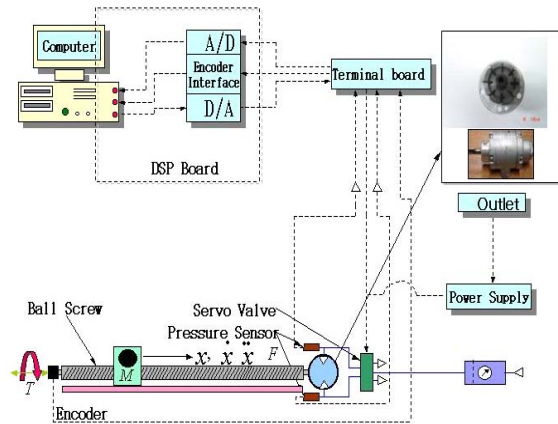


Fig. 1. Overall system block diagram.

이 때, 로터리 엔코더의 펄스는 DSP보드(RG-01D)에서 4채배하여 사용하였다. 공압모터 내부의 압력은 Festo사의 압력센서를 사용하였으며 측정된 압력은 터미널 보드를통하여DSP 보드의 A/D변환기를 통하여 컴퓨터로 귀환된다. 이 때, 측정된 압력은 단지 모니터링 용도로 사용되었다.

Fig. 2, 및 3에 보여주는 볼스크류 시스템은 삼익LMS(주)의 볼나사킷(GE2040 볼나사의 지름이 20mm, 리드가 40mm), LM가이드(GL20),

LM블록(GSR20V), 서포트 유닛(BK12/BF12)등으로 제작하였다. 볼나사 너트와 LM블록의 연결을 위한 너트 부라켓은 알루미늄을 가공하여 자체 제작하였다.



Fig. 2. Ball screw drive system.

Fig. 3은 공압모터 구동부로 공압모터를 구동하기 위하여 2개의 비례밸브가 병렬로 공압모터에 연결되어 있는 것을 보여준다.



Fig. 3. Compressed air motor driving part.

이것은 한 개의 비례밸브로 공압 모터를 최대 회전속도로 회전시킬 때 부족한 유량을 공급하도록 하기 위함이다. 공압모터의 회전은 감속기를 거치지 않고 직접 볼스크류와 축커플링으로 연결된다.

Table 1은 실험에 사용한 비례밸브의 제원을 나타낸 것으로 작동특성을 부연 설명하면 0V와 10V에서 밸브 포트가 최대로 열리고 5V에서 밸브 포트가 닫힌다는 것을 의미한다.

Table 1. The specification of MPYE-5-1/8

유량	700 l/min
한계주파수	120 Hz
공칭직경	6 mm
매체	필터링(5m)된 압축공기
작동특성	단협(5V) 최대 열림(0V, 10V)

실험에 사용한 공압모터는 GAST사의 1UP-NRV-10으로 제원은 Table 1에 보여준다. 이 공압모터는 전용 배기구가 없는 형태로 흡기 및 배기가 2개의 포트에서 이루어진다. 즉, 공압모터를 양방향으로 회전시키기 위해 2개의 연결구만을 갖는다.

Table 2. The specification of air motor

회전수	6000(rpm)
토크	0.5(Nm)
파워	300(W)
NO. of Vane	8
최대 공기 소모량	13( l )
중량	1.4(Kg)

(2) 제어기

슬라이딩 모드제어는 공압위치 제어시스템과 결합된 비선형성을 극복하기 위한 수단으로 발전되어 왔다. 슬라이딩 모드 제어는 가변구조제어의 한 형태로 일단 시스템의 상태가 슬라이딩 서피스에 도달하여 추종하면 비선형 시스템을 선형시스템처럼 거동하게 만들 수 있다. 또한 슬라이딩 모드 제어는 빠른 응답, 외란과 시스템 파라미터 변화에 둔감한 장점을 갖는다. 구현에 있어 연속 슬라이딩 모드 제어는 제어 대상의 수학적 모델이 필요 없어 설계가 간단하고 구현하기가 용이하다. 따라서, 본 연구에서는 공압모터 구동 볼스크류 시스템의 위치 제어기로 Surgenor 등이 제안한 연속 슬라이딩 모드 제어를 적용하였다. 연속 슬라이딩 모드를 위한 제어 법칙은 다음과 같이 주어진다<sup>4)</sup>.

$$u = -K_{eq}x - V \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (1)$$

여기서,  $K_{eq}$ 와  $x$ 는 각각 이득과 상태 벡터를 나타낸다.  $V$ 는 최종 제어밸브로 공급되는

최대 전압이다.

본 연구에서 사용한 비례밸브의 특성(그림 2)을 참조하여 10 V로 하였다. 최종 제어 밸브인 비례밸브의 형태는 Fig. 1에 보여진다. 첫째 항은 시스템이 슬라이딩 서피스에 도달하는 것을 보장한다. 결과적으로 이것은 시스템의 안정성을 보장한다 이득  $K_{eq}$ 는 시스템의 모델을 완벽하게 알고 있다고 가정했을 때  $x=0$ 을 주기 위해 요구된다. 응용의 대부분에 있어 문제는 슬라이딩 서피스에 도달하는 것이 아니고 슬라이딩 서피스에 머무르는 것이기 때문에 이 항은 자주 무시되어진다. 더구나, 연속 슬라이딩 모드의 매력의 하나는 시스템 모델 필요없이 제어를 설계하는 능력이다. 적용에서, 안정성이 문제가 아닌 곳에서, 첫째 항은 시스템 응답에 별 효과를 미치지 않는다.

위치제어 시스템에서 오차,  $e \equiv y_d - y$ 로 정의하면,  $e' = y'_d - y'$ ,  $e'' = y''_d - y''$ 이다. 여기서,  $y_d$ 는 목표 위치,  $y$ 는 실제 위치를 나타낸다.

공압 위치제어 시스템의 경우에서와 같이 3차 서보시스템에서, 상태 벡터,  $X = [e \ e' \ e'']$ 로 놓으면 스위칭(switching) 함수는 다음과 같은 형태로 쓸 수 있다.

$$\sigma = -c^T X \quad (2)$$

여기서,  $c^T = [c_1 \ c_2 \ 1]$ 이며, 계수  $c_1, c_2$ 에 의해 슬라이딩 서피스(sliding surface)를 정의하는 벡터이다. 위치제어의 경우  $e' = -y'$ ,  $e'' = -y''$ , 가 된다. 따라서 식(2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma &= -c^T X \\ &= -c_1 e + c_2 y' + y'' \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)으로 주어지는 스위칭 함수를 구하기 위해서는 시스템의 위치 뿐만 아니라 속도 및 가속도 정보가 필요하다. 본 연구에서는 볼스크류 축에 부착된 엔코더로 부터 출력되는 펄스로부터 위치를 계산하고 이 신호를 미분하기 전에 차단주파수(cutoff frequency)가 170 Hz인 2차 저역통과 필터(low pass filter)를 사용하였으며 필터링(filtering)된 신호를 미분하여 속도정보를 구하였다. 가속도 정보 또한 속도 정보를 저역통과 필터를 통과시킨 후 미분하여 구하였으며

가속도 신호는 필터링하지 않고 사용하였다. 슬라이딩 모드에서 폐회로 전달함수는 식(3)으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{y}{y_r} = \frac{c_1}{S^2 + c_2 S + c_1} \quad (4)$$

여기서,  $c_1 \equiv \omega_n^2$ ,  $c_2 \equiv 2\xi\omega_n$ ,  $\omega_n$ 과  $\xi$ 는 목표 위치  $Y_d$ 에 대한 요구된 2차 폐회로 응답의 고유 진동수(natural frequency)와 댐핑 인자(damping factor)로 시스템의 성능을 나타내는 정착시간(settling time)과 퍼센트 오버슈트(percent overshoot)에 관계가 있다. 응답이 2%이내로 들어올 때 정착시간은 다음과 같다.

$$T_s = \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (5)$$

퍼센트 오버슈트는 다음과 같다.

$$M_p = 100 e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}} \quad (6)$$

식(1), (2), (3), (4), (5)와 (6)은 연속 슬라이딩 모드 설계를 정의한다. 이상적인 시스템에서는 절환 동작을 무한히 빠르게 할 수 있으므로 시스템을  $\sigma=0$  궤적에 머물 수 있도록 할 수 있어서 이상적인 슬라이딩 모드가 일어난다. 그러나 실제 시스템의 경우 시스템 자체의 지연 요소가 존재하고 궤환 신호의 지연 및 하드웨어 상의 절환 기구 동작지연으로 절환 평면 주위를 진동하게 되는 채터링(chattering)이 발생한다<sup>5)</sup>. 이러한 채터링을 제거하는 한 가지 일반적인 기술은 절환 평면 주위에 절환 경계층을 설정하고 스위칭 함수 값이 절환 경계층 값보다 클 때는 원래의 절환제어 입력을 채택하고 경계층 내에서는 스위칭 함수 값을 절환 경계층 값으로 나눈 연속함수로 대체하는 방법이다. 또한, 본 연구에서 사용한 비례밸브의 입력 전압에 따른 유량특성(Table 1)을 참조하여 식(1)의 기본 제어법칙을 수정하는 것이다. 본 연구에서는 등가제어 입력항은 생략되었고 비례밸브의 중립상태를 고려하여 5V로 하였고 앞에서 언급한 바와 같이 비례밸브로 공급되는 최대전

압을 적용하여 식(7)과 같이 쓸 수 있다.

$$u = 5 - 10 \text{sat}(\sigma) \quad (7)$$

여기서,  $\text{sat}(\sigma) = \begin{cases} \text{sgn}(\sigma/\Phi) & \text{when } |\sigma| > \Phi \\ \sigma/\Phi & \text{when } |\sigma| \leq \Phi \end{cases}$

시스템이 경계층에 들어가면 연속 슬라이딩 모드는 상태제어기가 된다. 이때 상태 제어기는 .. 의 형태이며 식(8)과 같은 상태제어기 계인을 갖는다.

$$K = (\sigma/\Phi)[-c_1 c_2 1] \quad (8)$$

그리고 상태벡터는 다음과 같다.

$$x = [e \ e' \ e'']^T = [y_d - y \ y' \ y'']^T \quad (9)$$

앞에서 설계한 연속 슬라이딩 모드 제어기는 과학기술 범용 패키지인 CEMTool 5.0/SIM Tool 4.0을 이용하여 Fig. 4와 같이 설계하였으며, 블록으로 설계된 알고리즘은 C코드 생성기인 AUTOTool을 이용하여 C코드로 생성되어 DSP보드에 다운로드하여 제어기를 동작시키도록 하였다. 샘플링 시간은 1ms로 하였다.

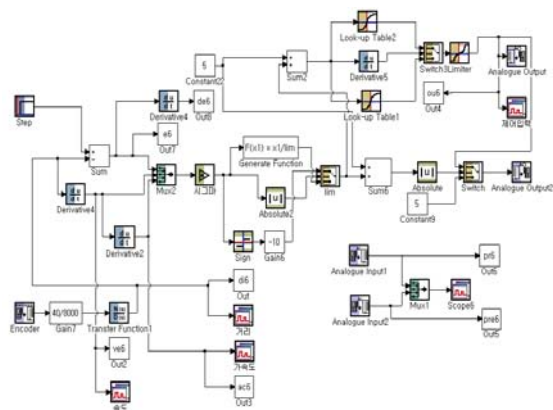


Fig. 4. Designed controller.

### 3. 실험 결과 및 고찰

공압모터 구동 위치제어 시스템의 연속 슬라이딩 모드 제어기는 식(4)의 계수  $c_1, c_2$ 를 구함으로써 설계할 수 있다.  $c_1, c_2$ 는 2차 폐회로 시스템의 성능을 나타내는 식(5)와 (6)의 관계로

부터 구할 수 있다. Table 3에 정착시간이 0.1 초로 주어질 때  $\xi$  값에 따른 스위칭 함수의 계수를 구하였다.

식(2)와 (3)으로 정의되는 스위칭 함수 값가 경계층 내로 들어오면 상태제어기가 식(8)과 같은 제어 이득을 갖고 식(9)의 상태벡터를 갖는 상태제어기가 된다. 이 때 상태 제어기 계인은 Table 3과 같다.

Table 3에서  $\xi=0.707$ 일 때 비례 계인이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 이것으로 이때 정상 상태 오차가 가장 적고 응답이 가장 빠를 것이라고 예측할 수 있다. 따라서, 정착시간이 주어지면  $\xi$  값이 클수록 정상상태 오차가 커지고 응답속도도 감소할 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 5는 Table 3으로 정리된  $\xi$  값에 따른  $c_1, c_2$  값을 갖는 (2)식으로 정의되는 스위칭 함수를 갖는 (7)식으로 정의되는 연속 슬라이딩 모드 제어기의 계단응답을 보여준다.

여기서,  $\xi$  값은 Table 3에서와 같이 0.707, 0.8 및 1로 설정하였다. 이 때, 적용한 경계층의 값은 실험을 통하여  $\phi=15,000$ 으로 하였다.

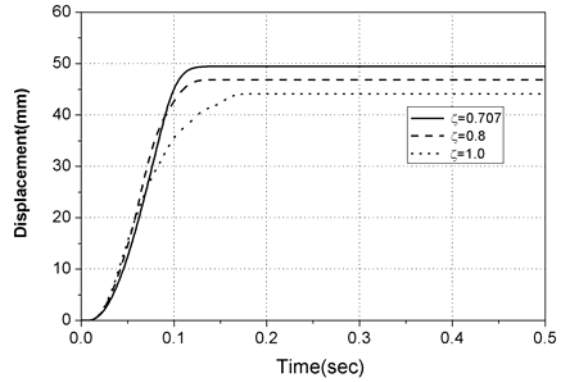
Fig. 5(a)는  $\xi$ 에 따른 계단응답(step response)을 보여준다. Fig. 5(a)에서  $\xi$ 이 가장 작을 때 정상상태 오차가 가장 적었음을 알 수 있다.

Table 3.  $c_1, c_2$  values according to  $\xi$  for  $T_s=0.1s$

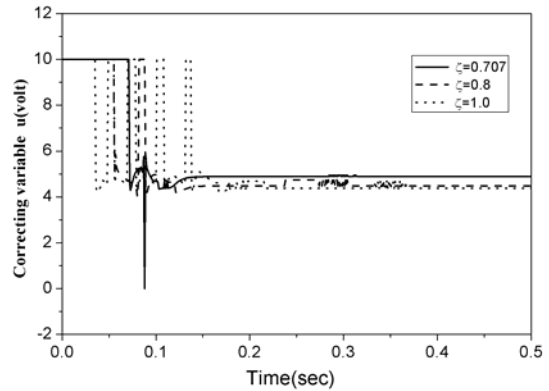
$T_s=0.1$	$\xi$		
	0.707	0.8	1
	3200.9667	2500	1600
	80	80	80
Kp	2.134	1.6667	1.0667
Kv	0.0533	0.0533	0.0533
Ka	6.6667e-004	6.6667e-004	6.6667e-004

이것은 정착시간이 주어졌을 때 (3), (4) 및 (5)로부터  $\xi$ 가 작을수록  $c_1$  값이 증가하여 정상상태 오차를 감소시킨다고 볼 수 있다. Fig 5(b)는  $\xi$ 에 따른 수정 값의 궤적을 보여준다.  $\xi$ 가 0.707일 때 제어기 출력이 가장 먼저 수렴함을 알 수 있다. 이때의 고유 진동수는 약 9 Hz이다.

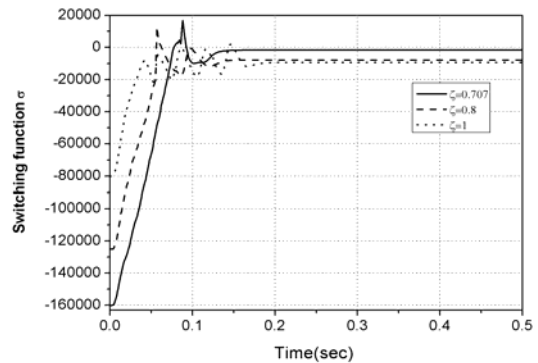
Fig. 5 (c)는 스위칭 함수의 궤적을 나타낸 것으로  $\xi$  값이 가장 작았을 때 스위칭 함수가 가장 빨리 수렴함을 알 수 있다.



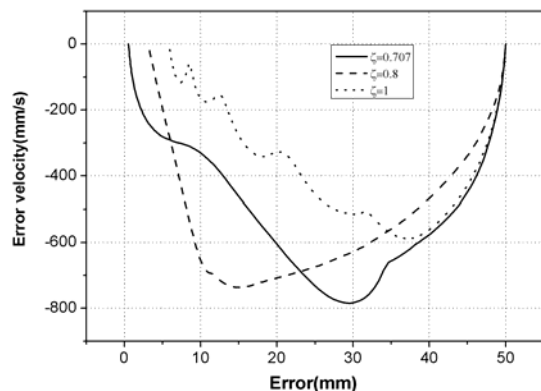
(a) Position trajectory



(b) Correcting value trajectory



(c) Switching function trajectory

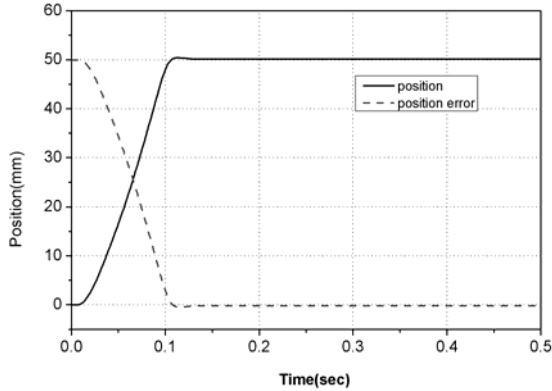


(d) Phase plane trajectory

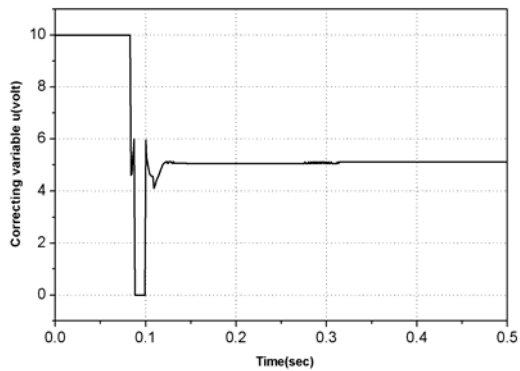
Fig. 5. Step responses according to  $\xi$  for  $T_s=0.75$ .

Fig. 5 (d)는  $\xi$ 값에 따른 위상 궤적을 보여준다. 위상 궤적으로부터  $\xi$ 가 가장 작았을 때 가장 빠른 속도로 위치오차가 감소하였으며 이때 정상상태 오차가 가장 적음을 알 수 있다.

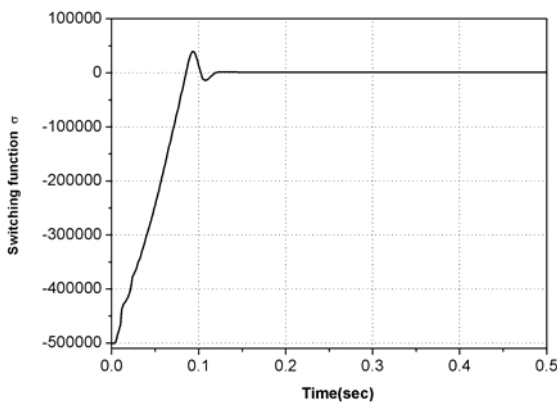
본 실험으로 부터 정착시간과  $\xi$ 값으로부터 슬라이딩 서피스를 구할 수 있었으며 같은 정착시간에서  $\xi$ 가 작을수록 빠른 속도로 목표 값에 도달하였으며 정상상태 오차도 가장 적었다.



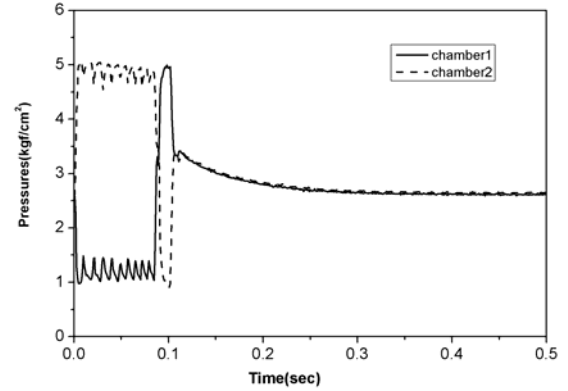
(a) Position and error trajectory



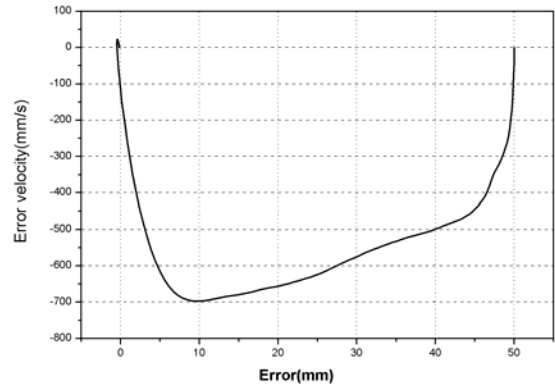
(b) Correcting value trajectory



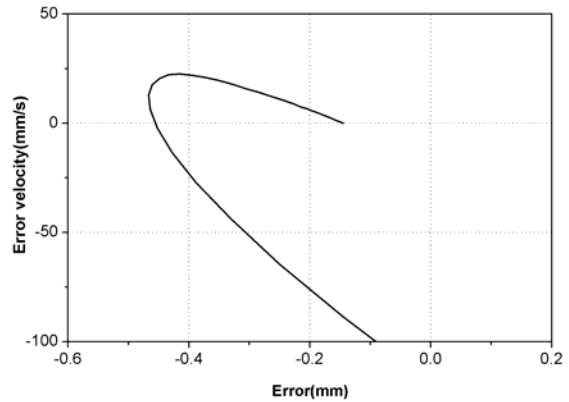
(c) Switching function trajectory



(d) Pressures in air motor chambers



(e) phase plane trajectory



(f) Detail of phase plane trajectory

Fig. 6. Step responses for  $T_s=0.75$ ,  $\xi=0.8$  and  $\phi=15,000$ .

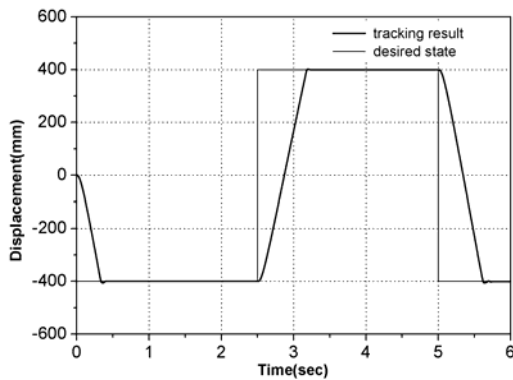
Fig. 6은 정착시간( $T_s=0.05s$ ),  $\xi=0.8$ 일때 슬라이딩 서피스( $c_1=10000$ ,  $c_1=160$ )을 구하였다. 스위칭 함수 값이 경계층 내로 들어올 때 상태제어기 게인( $k_p = 6.6667$ ,  $k_v=0.1067$ ,  $k_a=6.6667e-004$ )을 갖는 상태제어기가 된다.

Fig. 6 (a)는 위치 및 오차 궤적을 나타낸 것으로 정착시간이 0.1s일 때보다 빠른 응답특성을 보여준다. Fig. 6(b)는 수정값 궤적을 보여준다.

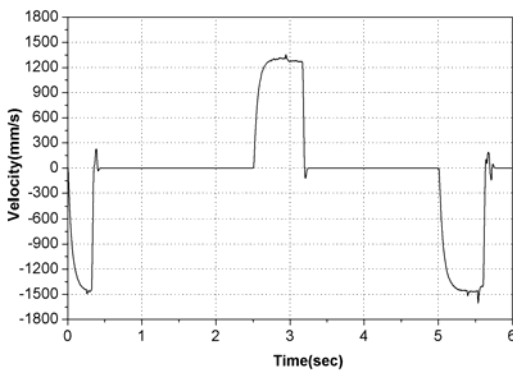
약0.1s까지 비례밸브를 최대 개방하여 스위칭한 후 약0.1s이 후에 상태제어 영역으로 돌입한다. 즉, 공압모터를 돌려 볼 스크류 전진 방향으로 0.828s동안 최대 개방하고 0.009s동안 볼스크류 후진 방향으로 최대 개방한 후에 비례 밸브 제어 영역에 도달하게 된다. 식(7)에서 시스템의 상태가 슬라이딩 서피스에 도달하면 제어기 출력은 Fig. 6 (b)와 같이 5V로 수렴함을 알 수 있다.

Fig. 6 (c)는 스위칭 함수 궤적을 나타낸 것으로 값이 음에서 양으로 바뀌는 순간 Fig. 6(b)의 수정 값이 10V에서 0V로 스위칭 함을 알 수 있다. 이 때 5V근처에서 약간의 요동이 있는 것은 스위칭 함수 값 가 음에서 양으로 바뀌면서 경계층 내에 있기 때문에 식(7)에 의한다.

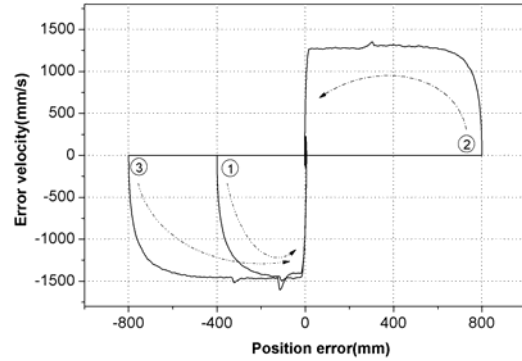
엄밀하게 0.0997s이후에 스위칭 함수 값 가 경계층 내로 들어가 식(8)로 정의되는 상태 제어기 계인을 갖는 상태제어기가 된다.



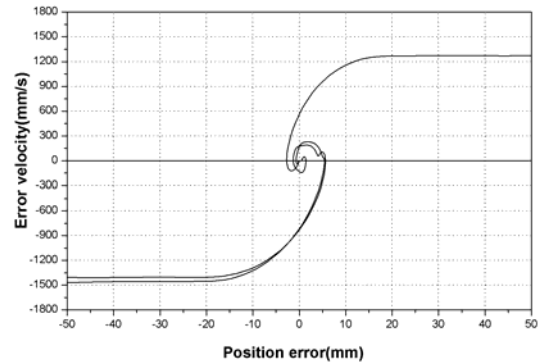
(a) Tracking trajectory



(b) Velocity trajectory



(c) Phase plane trajectory



(d) Error according to position

Fig. 7. Square wave tracking performance. (amplitude:400mm, 0.2Hz)

Fig. 7은 Fig. 6의 결과로부터 정착시간 0.8s,  $\sigma=0.8$ ,  $\phi=15,000$ 의 값을 적용한 연속 슬라이딩 모드 제어기를 이용하여 구형파를 추종한 결과를 보여준다. 추종 궤적(a)에서 위치가 감소하는 방향보다 증가하는 방향으로 구동될 때 목표 값에 도달하는 시간이 더 증가함을 알 수 있다. 이 사실은 속도 궤적 Fig. 7(b)을 살펴봄으로 확연하게 알 수 있다.

즉, 구동 속도가 속도= 0인 시간 축에 대해 대칭이 아님을 알 수 있다. 즉, 위치가 감소하는 방향으로 구동될 때 속도가 약 200mm/s 정도 더 증가됨을 보여준다. Fig. 7(c)는 Fig. 7(a)와 비교해 봄으로써 구형파 추종 위상 궤적의 진행과정을 보여준다. Fig. 7(d)는 Fig. 7(c)의 확대도로 구형파 추종시 정상상태 수렴과정을 보여준다. Fig. 7(e)는 구형파 추종시 위치에 따른 오차를 나타낸 것으로 Fig. 7(c)와 비교해 봄으로써 위치에 따른 오차뿐만 아니라 오차가 감소하는 속도를 알 수 있다.



#### 4. 결 론

공압모터 구동 위치제어 시스템은 공기의 압축성, 베인과 하우징 사이의 마찰력, 상대마찰 운동부의 마찰력, 비례밸브를 통한 공기 유량 및 볼스크류의 백래시 등으로 시변 비선형 시스템으로 정밀제어가 매우 어렵다.

본 연구는 산업용 공압 베인 모터를 전기 및 유압 서보모터가 사용되는 중부하 핸들링 분야의 로봇이나 자동화 시스템 등에 적용을 검토하기 위하여 수행되었으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

최대 구동속도 약1500mm/s, 정상상태 오차 0.2mm이내로 제어할 수 있음을 보였다.

공압모터 구동 위치제어 시스템의 수학적 모델 없이 2차 폐회로 시스템의 성능을 나타내는 정착시간과 퍼센트 오버슈트를 정의하는 식으로부터 제어기를 쉽게 설계할 수 있었다.

연속슬라이딩 모드 제어가 적용된 산업용 공압 베인 모터 구동 볼스크류 위치제어 시스템은 전기 및 유압 서보모터가 사용되는 중부하 핸들링 로봇이나 자동화 시스템 분야에 전기 및 유압서보 모터 구동 시스템의 대안으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) S.R.Pandian, Y.Hayakawa, F.Takemura, S. Kawamura, *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation Detroit, Michigan*, pp.518-524, (1999)
- 2) M.O. Tokhi, M. Al-Miskiry, M.Brisland, *Control Engineering Practice* **9**, 449, (2001)
- 3) 허준영, *한국 자동제어학술회의 논문집* 297 (1994)
- 4) W. Surgenor and N.D. Vaughan, *Transactions of the ASME*, **119**, (1997)
- 5) 이동권, "슬라이딩 모드를 이용한 편로드 유압실린더의 추종제어 특성연구", *서울대학교 박사학위논문*, (1990)
- 6) J.J.E. Slotine, W.Li, *Applied nonlinear control*, Prentice-Hall, (1991)

---

(2008년 7월 9일 접수, 2008년 11월 21일 채택)