

# 공압모터의 속도 전향이득을 갖는 슬라이딩 모드 제어

## Sliding Mode Control with Velocity Feedforward Gain of a Pneumatic Motor

김근목, 강이석\*

(Geun-Mook Kim and E-Sok Kang)

**Abstract :** In this study, the performance of the tracking control of a pneumatic servo motor driven position control system using sliding mode is investigated. It is usually quite difficult to obtain precise tracking control of a pneumatic servo motor driven position control system because of the nonlinear deadband and stick-slip friction of the proportional valve. Therefore, a continuous sliding mode controller with velocity feedforward gain is proposed. Experimental results show that the tracking accuracy can be remarkably improved by adding a proper velocity feedforward term to continuous sliding mode controller.

**Keywords :** pneumatic motor, continuous sliding mode, tracking control, velocity feedforward gain

### I. 서론

슬라이딩 모드 제어를 통해 공압 위치제어시스템의 비선형성을 극복하기 위한 연구가 시도되어 왔다[1-9]. 슬라이딩 모드 제어는 가변구조제어의 한 형태로 일단 시스템의 상태가 슬라이딩 평면에 도달하면 비선형 시스템을 선형 시스템처럼 거동하게 만들 수 있다. 또한 슬라이딩 모드 제어는 빠른 응답, 외란과 시스템 파라미터 변화에 둔감한 장점을 갖는다. 연속 슬라이딩 모드 제어는 제어대상의 수학적 모델이 없이도 가능하고 구현하기가 용이하다.

슬라이딩 모드 제어는 시스템 상태변수의 궤적들을 미리 정의된 스위칭 면에 머물게 함으로써 시스템의 불확실성, 외란 등에 대해서 안정성과 강인성을 보장할 수 있다[10]. 지금까지 수행되어온 연구는 공압모터와 같은 연속 구동기에 비해 대부분 실린더와 같은 왕복 구동기에 집중되어 왔다[11-17].

공압모터(pneumatic motor)는 구조가 간단하고 출발과 정지는 거의 순간적이며 과부하나 정지시에도 모터에 큰 무리를 주지 않는다. 또한 상대적으로 가격이 저렴하고, 유지 및 속도 가변이 용이하고 높은 기동 토크를 낼 수 있으며 위험한 작업영역에서도 안전하며 가혹한 환경에서도 양호하게 작동한다[17]. 그러나 공압모터 구동 제어시스템은 공기의 압축성, 베인(vane)과 하우징(housing)사이의 마찰력 및 누설(leakage), 상대마찰 운동부의 마찰력, 비레벨브의 불감대 및 밸브 몸체와 스폴라이의 스틱-슬립 마찰, 볼스크류의 백래시 등으로 시변 비선형 시스템이 되어 정밀 제어가 어렵다.

Surgenor 등[2]은 연속 슬라이딩 모드 제어를 직선형 공압 위치 제어시스템에 적용하였으며, 부하질량이 10배로 변하는 경우에도 양호한 위치제어 정밀도( $\pm 0.2\text{mm}$ )를 유지

할 수 있음을 보였다. Pu 등[13]은 공압모터의 모션제어를 위하여 비례제어 루프에 속도와 가속도를 궤환하고 속도 전향이득을 더한 추종제어 알고리즘을 수행하였으며 속도 전향이득을 적절히 선정하여 공압모터의 추종제어 오차를 상당히 감소시킬 수 있음을 보였다.

본 연구에서는 산업용 공압 베인 모터를 전기 및 유압 서보모터가 사용되는 중부하 핸들링 분야의 로봇이나 자동화 시스템 등에 적용을 검토하기 위하여 공압모터 구동 서보시스템을 구성하였다. 공압모터 구동 서보시스템의 추종 성능을 향상시키기 위하여 속도 전향이득을 갖는 슬라이딩 모드 제어를 제시하였고, 정현파 기준입력에 대한 추종 응답을 살펴보았다.

### II. 제어기 설계

본 연구에서 공압모터 구동 서보시스템의 궤적 추종제어에 적용할 수 있는 그림 1과 같은 속도 전향이득을 갖는 연속 슬라이딩 모드 제어를 제안하였다.

공압모터 구동 서보시스템의 전달함수는 비레벨브의 입력에 대한 압력변화와 모터내 베인 양단 압력차에 의한 토크에 의해 구동되는 3차 시스템 특성을 갖는다[4]. 공압모터 구동 서보시스템의 스위칭 함수는 시스템의 차수가 3차로 고려되는 공압 서보시스템의 거동 특성과 속도 전향이득을 고려하여 (1)과 같이 구성하였다.

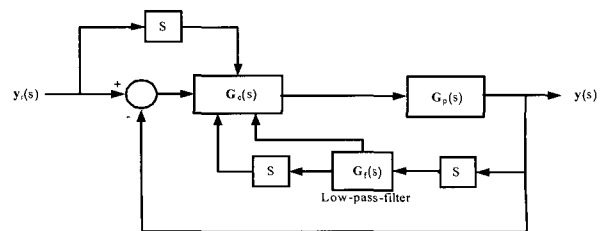


그림 1. 속도 전향이득을 갖는 연속 슬라이딩 모드 제어기.

Fig. 1. Continuous sliding mode controller with velocity feedforward gain.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 12. 26., 채택확정 : 2006. 8. 23.

김근목 : 아주자동차대학 자동차학부(gmkim@motor.ac.kr)

강이석 : 충남대학교 기계설계공학과(eskang@cnu.ac.kr)

충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단

$$\sigma = Gx$$

$$= -c_1 e + c_2 \dot{y} - c_3 \dot{y}_r + \ddot{y} \quad (1)$$

여기서,  $G = [-c_1 \ c_2 - c_3 \ 1]$ 이며, 계수  $c_1, c_2, c_3$ 에 의해 슬라이딩 평면(sliding surface)을 정의하는 벡터이며,  $x = [y_r - y \ \dot{y} \ \ddot{y}]$ 이고,  $y_r$ 는 목표 위치,  $y$ 는 제어위치를 나타낸다.

슬라이딩 모드가 일어날 때 전체 시스템의 폐회로 전달 함수는 (1)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{y(s)}{y_r(s)} = \frac{c_3 s + c_1}{s^2 + c_2 s + c_1} \quad (2)$$

여기서,  $c_1 = \omega_n^2$ ,  $c_2 = 2\zeta\omega_n$ ,  $c_3$ 는 속도 전향이득이며,  $\omega_n$ 과  $\zeta$ 는 각각 2차 시스템의 단위 계단응답 특성과 관계되는 고유 진동수와 댐핑인자이다. 이상적인 시스템에서는 절환 동작을 무한히 빠르게 할 수 있으므로 시스템을  $\sigma = 0$  궤적에 머물게 함으로써 이상적인 슬라이딩 모드가 일어난다. 그러나 실제 시스템의 경우 시스템 자체의 지연요소가 존재하고 제한신호의 지연 및 하드웨어의 절환기구 동작지연으로 절환평면 주위를 진동하게 되는 채터링이 발생한다 [18]. 이러한 채터링을 제거하기 위하여 본 연구에서는 절환평면 주위에 절환 경계층을 설정하고 스위칭 함수 값이 절환 경계층 값보다 클 때에는 원래의 절환제어 입력을 채택하고 경계층 내에서는 스위칭 함수 값을 절환 경계층 값으로 나눈 연속 제어 함수로 출력하도록 하였다.

슬라이딩 모드 제어기에서 절환 이득은 시스템의 불확실성 한계 값보다 큰 값을 갖도록 정해야하며 이 값이 클수록 도달시간이 짧아지고 반대로 작아지면 도달시간이 길게 된다.

본 연구에서 절환이득은 실험에 사용된 표 1의 비례밸브 작동특성을 고려하여 비례밸브의 최대 작동 영역으로 구동하기 위하여  $V = 5$ 로 하였고 오프셋 전압 5v를 더하여 밸브에 전압을 인가하도록 (3)과 같이 구성하였다.

$$u = -V \text{sat}(\sigma) \quad (3)$$

여기서,  $\text{sat}(\sigma) = \begin{cases} \text{sgn}(\sigma/\phi) - 1 & \text{for } \sigma > \phi \\ (\sigma/\phi) - 1 & \text{for } \sigma \leq \phi \end{cases}$

일단 시스템이 경계층에 들어가면 연속 슬라이딩 모드는 상태제어기가 된다.  $\phi$ 는 경계층의 두께이다. 경계층 내로 들어갈 때 제어기 출력  $u$ 는  $-Kx$ 의 형태가 되며 (4)와 같은 상태제어기 이득을 갖는다.

$$K = [-K_p \ K_v - K_f \ K_a] \quad (4)$$

여기서,  $K_p = Vc_1/\phi$ ,  $K_v = Vc_2/\phi$ ,  $K_f = Vc_3/\phi$ ,  $K_a = V/\phi$ 이며 각각 상태제어기의 비례이득, 속도이득, 속도 전향이득, 가속도이득을 나타낸다.

III. 실험

1. 실험장치

공압모터 구동 서보시스템의 전체 구성도는 그림 2 및 그림 3과 같다. 본 연구에 사용한 비례제어밸브의 규격은 표 1에 나타내었다. 실험에 사용한 공압모터의 규격은 표 2에 나타내었다. 공압모터의 축은 40mm의 리드를 갖는 볼스크류와 축커플링으로 직결되어 있다.

볼스크류의 회전에 의해 이동하는 카트의 위치는 볼스크류와 직결된 로터리 엔코더에 의해 측정된다.

스위칭 함수를 구하기 위해서는 카트의 위치 뿐만 아니라 속도 및 가속도 정보가 필요하다. 본 연구에서는 볼스크류 축에 부착된 엔코더로부터 출력되는 펄스로부터 위치를 계산하고 이 신호를 미분하기 전에 차단주파수가 70Hz인 2차 저역통과 필터(low pass filter)를 사용하였으며 필터링된 신호를 미분하여 속도 정보를 구하였다. 가속도 정보는 속도 정보를 미분하여 사용하였다.

2. 실험 및 결과 고찰

본 연구에서 제안된 속도 전향이득을 갖는 연속 슬라이딩 모드 제어기는 범용 패키지인 CEMTool을 이용하여 설계하였다. 샘플링 시간 간격은 1ms로 하였으며, 제어기로부터 출력되는 값에 디터신호(dither signal; 250Hz, 0.05v)를 중첩하여 비례밸브에 입력하였다.

표 1. 비례밸브의 규격.

Table 1. The specification of proportional valve.

유량	700lpm
한계 주파수	120Hz
공칭 유로직경	6mm
작동 특성	정방향 최대열림(10v) 달힘(5v) 역방향 최대열림(0v)

표 2. 공압모터의 규격.

Table 2. The specification of pneumatic motor.

회전수	6000(rpm)
토크	0.5(Nm)
동력	300(W)
Vane 수	8

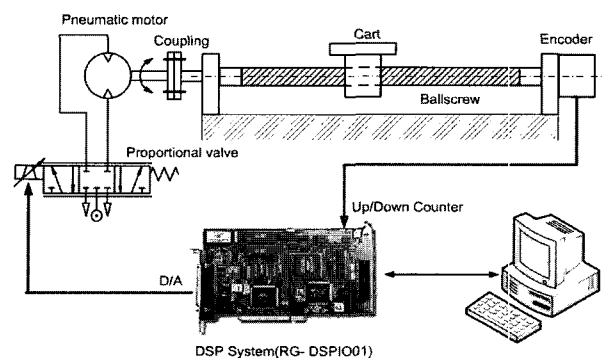


그림 2. 실험장치의 배치.

Fig. 2. Layout of the experimental devices.

공압모터 구동 서보시스템의 연속 슬라이딩 모드 제어기는 정착시간은 0.07초 보다 작게하고, 최대 퍼센트 오버슈트는 3%이하로 설계하였다.

설계된 슬라이딩 평면 계수 값은  $c_1=5625$ ,  $c_2=112.5$ ,  $c_3=150$ 이며 경계층의 두께  $\phi$ 는 7500이다. 스위칭 함수 값이 경계층 범위 내로 들어가면 슬라이딩 모드 제어기는 속도 전향이득을 갖는 상태제어기가 된다.

이 경우 상태제어기의 이득과 속도 전향이득은 (4)에 의해 구해진다. 실험에 사용된 제어기 이득은  $K_p=3.75$ ,  $K_v=0.075$ ,  $K_f=0.1$  및  $K_a=0.0006$ 이다.

본 연구에서 제안한 속도 전향이득을 갖는 연속 슬라이딩 모드 제어기의 성능을 확인하기 위하여 진폭 400mm, 주파수 0.2Hz인 정현파 추종제어를 수행하였다.

속도 전향이득에 따른 추종성능을 확인하기 위하여 다양한  $c_3$  값에 대한 추종오차 대역을 그림 4에 도시하였다.  $c_3$  값이 0부터 150으로 증가할 수록 추종오차는 감소하는 경향을 보였으며,  $c_3$  값이 150보다 클 경우 추종오차는 다시 증가함을 볼 수 있다.

그림 5에서 시행착오를 거쳐  $c_3$  값이 150일 때 기준궤적을 0.1초 이내로 오차를 급격히 줄이면서 추종하여 기준궤적과 거의 일치함을 볼 수 있다.



그림 3. 전체 실험장치.  
Fig. 3. Overall experimental setup.

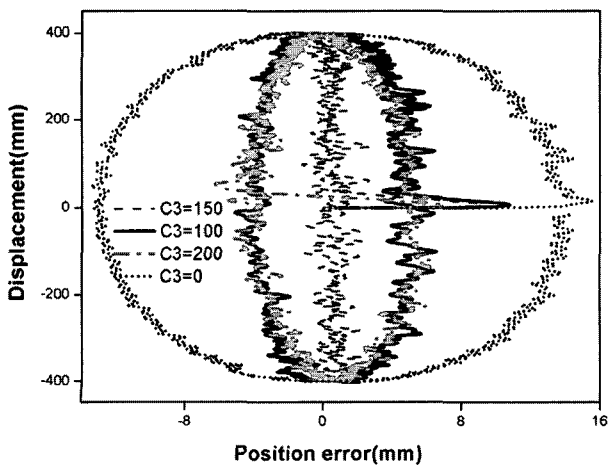


그림 4.  $c_3$ 에 따른 추종오차.  
Fig. 4. Tracking error according to  $c_3$ .

그림 6은  $c_3$  값이 0일 때와 비교하여 150일 때 시간에 따른 추종오차를 10mm이상 감소시키는 특성을 보였다. 제어기 출력은 펄스열로 이루어져 비교가 어렵다. 비교를 용이하게 하기 위하여 제어기 출력 값의 RMS(Root Mean Square)을 구하여 제어기 출력의 실효값  $u_{RMS}$ 를 위치오차와 함께 도시하였다. 제어기 출력의 실효값은  $c_3$  값이 0일 때와

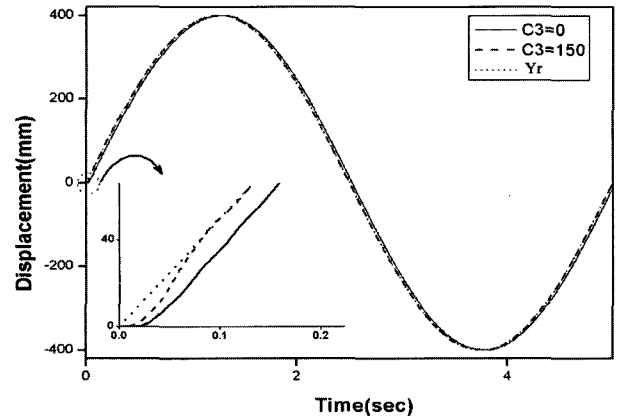


그림 5. 추종 응답 비교.  
Fig. 5. Comparison of tracking responses.

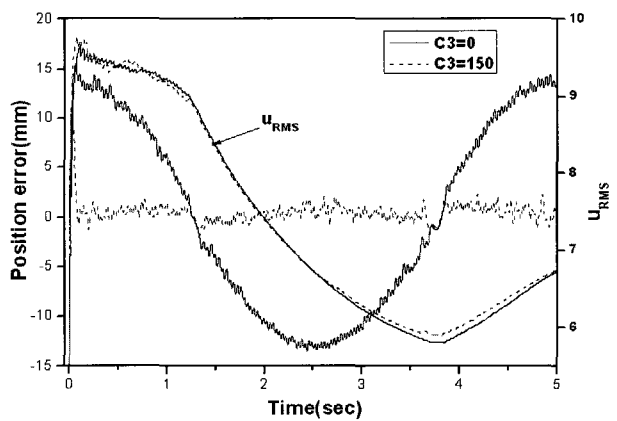


그림 6. 추종오차 및 제어입력 비교.  
Fig. 6. Comparison of tracking errors and control inputs.

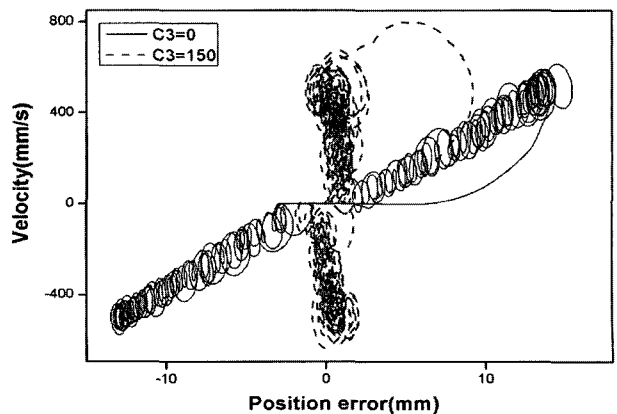


그림 7. 위상 궤적 비교.  
Fig. 7. Comparison of phase trajectories.

비교하여 150일 때 추종 시작 시에 더 큰 제어 출력이 인가되었음을 보여준다. 그림 7의 위상궤적에서  $c_3$  값이 150일 경우 추종속도 대역에 대한 오차대역이 좁아져서 보다 더 정밀한 추종제어가 이루어짐을 볼 수 있다.

#### IV. 결론

공압모터 구동 서보시스템의 추종성능을 높이기 위하여 속도 전향이득을 갖는 연속 슬라이딩 모드 제어를 제안하였으며, 실제 공압모터 구동 서보시스템에 적용하여 궤적을 추종한 결과, 진폭 400mm, 주파수 0.2Hz인 정현파 기준 입력을 0.1초 이내에 1.5mm의 오차 이내로 추종함을 확인할 수 있었다.

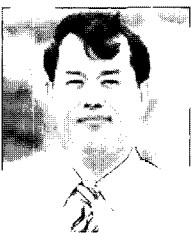
제안된 슬라이딩 모드 제어를 적용한 공압모터 구동 서보시스템은 중부하 중량물을 빠른 속도로 추종제어하고자 하는 로봇이나 핸들링 자동화 분야에 전기 및 유압 서보모터 구동 시스템의 대안으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] S. R. Pandian, Y. Hayakawa, F. Takemura, and S. Kawamura, "Control performance of an air motor -Can air motors replaces electric motors?," *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp. 518-524, 1999.
- [2] B. W. Surgenor and N. D. Vaughan, "Continuous sliding mode control of a pneumatic actuator," *Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 119, no. 3, pp. 578-580, 1997.
- [3] A. K. Paul, J. K. Mishra, and M. G. Radke, "Reduced order sliding mode control for pneumatic actuator," *IEEE Trans. on control systems Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 271-276, 1994.
- [4] S. R. Pandian, Y. Hayakawa, Y. Kanazawa, Y. Kamoyama and S. Kawamura, "Practical design of a sliding mode controller for pneumatic actuators," *Trans. of ASME*, vol. 119, no. 4, pp. 666-674, 1997.
- [5] J. Song and Y. Ishida, "Robust tracking controller design for pneumatic servo system," *Int. J. of Engineering Science*, vol. 35, no. 10-11, pp. 905-920, 1997.
- [6] S. Drakunov, G. D. Hanchin, W. C. Su and U. Ozguner, "Nonlinear control of a rodless pneumatic servoactuator, or sliding modes versus coulomb friction," *Automatica*, vol. 33, no. 7, pp. 1401-1408, 1997.
- [7] W.-C. Su and C.-Y. Kuo, "Variable structure control of

a rodless pneumatic servoactuator with discontinuous sliding surfaces," *Proc. of American Control Conference*, pp. 1617-1621, 2000.

- [8] M. Bouri and D. Thomasset, "Sliding control of an electropneumatic actuator using an integral switching surface," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 368-375, 2001.
- [9] J. Tang and G. Walker, "Variable structure control of a pneumatic actuator," *Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 117, no. 1, pp. 88-92, 1995.
- [10] 박근석, 김형의, 강이석, "가변구조제어를 이용한 외란을 받는 유압시스템의 위치제어," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering* vol. 10, no. 10, pp. 915-921, 2004.
- [11] F. Takemura, S. R. Pandian, Y. Nagase, H. Mizutani, Y. Hayakawa, and S. Kawamura, "Control of a hybrid-pneumatic/electric motor," *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 209-214, 2000.
- [12] H. M. Mahgoub and I. A. Craighead, "Development of a microprocessor based control system for a pneumatic rotary atuator," *Mechatronics*, vol. 5, no. 5, pp. 541-560, 1995.
- [13] J. Pu, P. R. Moore, and R. H. Weston, "Digital servo motion control of air motors," *Int. J. of Production Research*, vol. 29, no. 3, pp. 599-618, 1991.
- [14] J. Wang, J. Pu, P. R. Moore, and Z. Zhang, "Modelling study and servo control of air motor systems," *Int. J. of Control*, vol. 71, no. 3, pp. 459-476, 1998.
- [15] M.-C. Shih and C.-S. Lu, "Pneumatic servomotor drive a ball-screw with fuzzy-sliding mode position control," *Proc. of IEEE conf. on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 50-54, 1993.
- [16] W. Backe, "The application of servo-pneumatic drives for flexible mechanical handling techniques," *Robotics*, vol. 2, no. 1, pp. 45-56, 1986.
- [17] M. O. Tokhi, M. Al-Miskiry, and M. Brisland, "Real-time control of air motors using a pneumatic H-bridge," *Control Engineering Practice*, vol. 9, no. 4, pp. 449-457, 2001.
- [18] J. J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, 1991.



김근목

1987년 충남대학교 기계설계공학과 졸업. 1990년 동대학 석사. 2000년 동대학 박사수료. 1990년~1996년 국방과학연구소 선임연구원. 1996년~현재 아주자동차대학 자동차계열 부교수. 관심분야는 유공압시스템 제어 및 응용.



강이석

1974년 서울대 기계공학과 졸업. 1983년 아주대학교 기계공학과 석사. 1994년 한국과학기술원 기계공학과 박사. 1991년~1992년 MIT대학 방문연구원. 1981년~현재 충남대학교 기계설계공학과 교수. 관심분야는 제어이론의 응용, 로봇틱스, 인공지능, 유압공학.

로봇틱스, 인공지능, 유압공학.