

정밀 위치제어를 위한 공압 피스톤의 미소변위 이송방법 및 혼합 제어 알고리즘 개발

노철하*, 김영식**

Development of the Small-displacement-movement of a Pneumatic Piston and the Hybrid Control Algorithm for Precision Position Control

Chul-Ha Roh * and Yeung-Shik Kim **

ABSTRACT

This paper proposes a methodology for the small-displacement-movement of a piston and develops a hybrid control algorithm for the precision position control of a pneumatic rodless cylinder. The pneumatic system uses the voltage-proportional solenoid valves to minimum valve switching since the on/off type valves are create difficulties for accurate position control and induce a lot of valve switching. For the accurate position control a methodology for the small-displacement-movement of the piston is developed and identified experimentally. The main consideration on the development of the hybrid control law is to eliminate a stick-slip phenomenon in the pneumatic control system. This paper addresses these critical issues and presents experimental results for the pneumatic control system.

Key Words : stick-slip(정지미끄럼), pneumatic rodless cylinder(공압로드레스실린더), small-displacement-movement(미소변위이송), sliding mode control(슬라이딩모드제어)

1. 서론

공압을 이용한 위치제어 시스템은 유압을 이용한 위치제어 시스템보다 보수 및 유지가 간단하고 동등한 출력을 내기 위한 전기식 및 유압식 시스템보다 장치비용이 저렴하다는 이점을 가지고 있어 공장 자동화 추세에 부합되어 빠르게 발전하고 있다. 그러나 공압식 위치제어 시스템이 정밀 위치제어 시스템으로 사용되지 못하고 있는 것은 작동 유체인 공기의 압축성과 마찰로 인한 비선형성 때문에 위치제어가 용이하지 못하기 때문이다. 특히 목표점에 도달하였을 때 실린더의 속도는 영 근방으로 접근하게 되며, 이때 정지미끄럼(stick-slip)현상이 발생한다. 이 현상에 대한 정확한 모델을 얻기가 매우 어려우며 이는

제어 성능을 저하시키는 요인이 된다. 한편 펄스의 주기를 일정하게 유지하면서 오차에 따라 펄스의 on/off 시간비가 선형적으로 변화하여 밸브의 개폐를 조절하는 PWM(Pulse Width Modulation) 방식은^[1] 잦은 밸브의 여닫음으로 인하여 밸브의 수명을 저하시키며, 이로 인한 소음 및 진동이 발생하며 on/off 밸브의 구조상 미소 변위 이송을 얻기가 어려운 점이 문제점으로 대두되고 있다.^{[2]-[4]} 본 논문에서는 로드레스 실린더를 사용하여 먼저 목표위치 부근에서 피스톤의 정지미끄럼 현상과 이로 인한 위치오차를 보완하기 위하여 전압비례밸브를 사용한 피스톤의 미소 변위 이송방법을 개발하고, 그 다음 피스톤의 미소변위 이송방법과 수정된 슬라이딩모드제어 기술을 혼합한 제어알고리즘을

☎ 2000년 10월 20일 접수

* 금오공과대학교 기계공학부 대학원

** 금오공과대학교 기계공학부

개발하여, 실린더 전 구간에 걸쳐 정밀위치제어가 가능함을 실험을 통하여 검증하고자 한다.

2. 로드레스 실린더의 운동방정식

로드레스 실린더는 로더실린더에 비하여 설치공간을 축소할 수 있고, 긴 행정에 의한 로드의 굽힘으로부터 좌굴이나 편심에 의한 원활한 왕복운동을 용이하게 할 수 있으며, 실린더의 양쪽챔버의 면 압력이 같으므로 좋은 중간 정지 정밀도를 얻을 수 있어 널리 사용되며, 이 시스템의 운동 방정식은 Newton의 제 2 법칙에 의하여 다음과 같이 간략하게 쓸 수 있다.

$$M\ddot{x}(t) + F_f(t) = A_s(P_1(t) - P_2(t)) \quad (1)$$

여기서 M 은 피스톤에 가해진 전체질량, F_f 은 피스톤과 실린더 사이의 마찰력, A_s 는 피스톤 단면적이고 $P_1(t)$ 과 $P_2(t)$ 는 각각 피스톤 양단에서의 압력이다. 피스톤 위치를 제어하기 위하여 위식으로부터 제어알고리즘에 의해 피스톤 양면에서의 압력차 $P_1(t) - P_2(t)$ 를 먼저 결정하고 이로부터 각 $P_1(t)$ 과 $P_2(t)$ 의 압력을 다시 결정한다. 제어 입력계산시 공급 압력과 온도는 일정하고 공기는 이상기체이며 등엔트로피 과정으로 가정하였다.

3. 시스템 구성 및 미소 변위이송 실험

3.1 시스템 구성

Fig. 1 는 실험 장치로서 에어 유니트(Air Unit), 전압비례 밸브, 에어 조절기, 로드레스 실린더, 리니어 엔코더(Linear Encoder), 파워 앰프(Power Amp.), 고속 카운터(High Speed Counter), 파워 서플라이(Power Supplier), D/A 변환기, 압력센서, 586 PC 로 구성되어 있다. 전압비례 밸브는 압력설정 범위가 $0.5-8\text{kg/cm}^2$ 이며 최대 전류는 1A 까지로 3-port 2-way 릴리프형이다. 1 차측 압력은 현장에서 많이쓰이는 6kg/cm^2 으로 설정하였으며, 로드레스 실린더의 직경과 행정은 64mm 와 2000mm 이다. 이 실험장치에 대한 공압 회로도 는 Fig. 2 와 같다. 그리고 변위를 측정하기 위해 1 회전시 2000 펄스를 발생시키는 로터리엔코더

(Rotary Encoder), 피스톤 이동을 로터리엔코더에 전달하기 위한 타이밍 벨트 및 고속 카운터기를 사용하여 빠른 속도 및 먼 거리에서도 0.1mm 까지 측정 가능한 위치 검출장치를 개발하였다.

3.2 전압과 압력과의 관계

본 시스템의 모델링으로부터 밸브에서 공급해야 할 압력을 산정하고 이를 공급하기 위해서는 전압비례밸브에 공급할 전압(V)과 압력(P_v) 과의 상관관계를 실험으로부터 파악하였다. 실험에서 측정된 자료는 Table 1 에 나타나 있으며 이 관계를 커브피팅한 결과식은 아래와 같다.

$$V = 1.033 + 0.43P_v + 0.16P_v^2 - 0.068P_v^3 - 0.0076P_v^4 \quad (2)$$

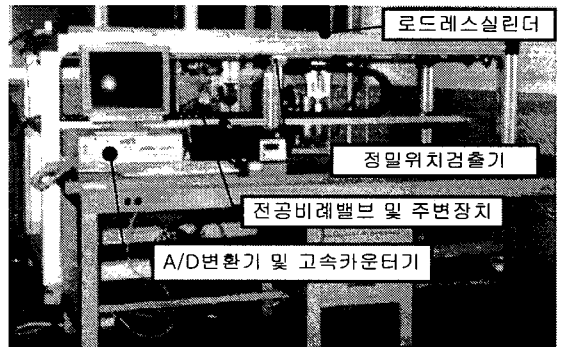


Fig. 1 Close-up fixture of the pneumatic control system

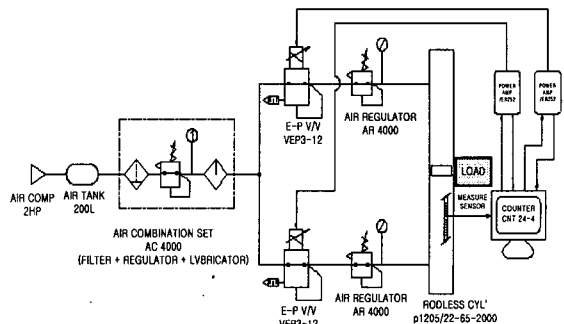


Fig. 2 Schematic diagram of the pneumatic servo system

Table 1 Input voltage vs. pressure

Input voltage (V)	Pressure(kg/cm ²)
1	0
1.5	0.84
1.7	1.21
2	1.88
2.5	3
3	4.15
3.5	5.3
4	5.6

3.3 피스톤의 이송 변화량 측정 실험

로드레스 실린더의 피스톤을 한쪽 밸브만을 가지고는 미소로 움직이게 하는 것은 정지미끄럼 (stick-slip) 현상 때문에 매우 어렵다. 공급압력은 밸브의 양단압력차에 의해 결정되며 양단의 압력조합의 경우의 수만큼 존재하므로, 피스톤 양쪽 끝에 있는 밸브를 각각 조정하여 미소 이송을 위한 최적의 방법을 실험을 통하여 제안하고자 한다. 실험에서 피스톤 양쪽 끝의 압력차이는 미소 변위를 움직일 때 최대 정지마찰력 (1.21kg_f /cm²)보다 큰 압력차를 공급하였다. Fig. 3 과 Fig. 4 는 피스톤 양단의 압력차가 2 kg/cm² 으로 같게 하였으며 이를 위하여 밸브 1 의 인가 전압을 Fig. 3 에서는 4V, Fig. 4 에서는 2.5V 로 하였고, 그리고 밸브 2 의 인가 전압을 Fig. 3 에서는 2.7V, Fig. 4 에서는 1.62V 로 각각 고정 시킨 후 피스톤의 미소 이송 변화량을 조사하여 본 결과이다. 이 두 그림으로부터 동일한 압력차로 높은 압력에서 피스톤이 시작점에서 끝점에 도달하는 시간이 오래 걸리며 또한 변화량이 작음을 알 수 있다. 따라서 높은 압력에서 피스톤이 미세하게 움직이며, 압축성으로 인한 비 선형성을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5 는 밸브 1 과 2 의 인가 전압을 각각 4V 와 2.9V 로 하였으며, 이는 본 시스템으로부터 얻을 수 있는 최적의 압력조합으로서 최소 변화량을 보여주며, 이그림을 Fig. 3 또는 Fig. 4 와의 비교로부터 압력차가 작을수록 피스톤의 미소 변화량이 작음을 알 수 있다. Fig. 6 은 같은 조건하에서 한쪽 밸브를 on/off 로 동작 시켰을 때의 변화량을 보여주며 전압비례밸브를 사용하여

얻은 그림과 비교하여 보면 피스톤 변위의 변화량이 불규칙하며 또한 변화량이 큼을 알 수 있다.

4. 혼합 제어 알고리즘

본 논문에서는 Fig. 7 과 같이 제어 영역을 설정하여 각 영역에 주어진 제어기법에 따라 제어 입력을 결정하는 혼합 제어기법을 개발하였다. 이 제어기법은 정지위치에서의 미소위치제어기법과 모델링 오차 및 외란에 강건한 기존의 슬라이딩 모드제어기법을 공압위치제어에 적합하도록 개발하였다. 제안된 제어기법은 3 개의 영역으로 나누어져 있으며, 슬라이딩모드 제어기법에 의하여 시작점부터 경계 영역(ϵ -zone)전 까지 제어하고, 경계 영역에서는 안정된 제어를 위하여 변위오차에 비례하는 제어 기법을 개발하게 되었으며 각 영역에서의 제어 기법은 다음과 같다.

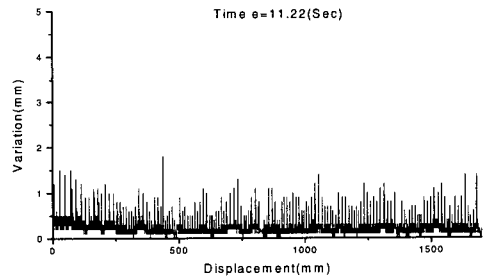


Fig. 3 Displacement Variation due to the pressure difference with P₁ = 5.55 kg_f/cm² and P₂ = 3.55 kg_f/cm²

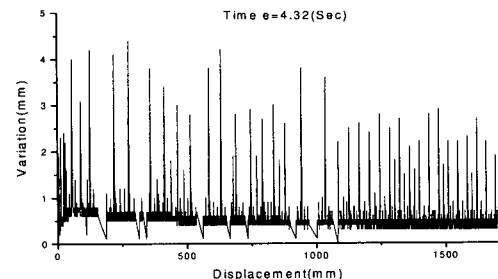


Fig. 4 Displacement Variation due to the pressure difference with P₁ = 3 kg_f /cm² and P₂ = 1 kg_f /cm²

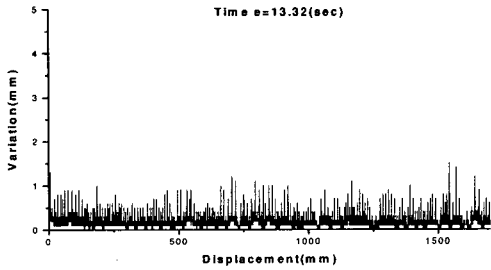


Fig. 5 Displacement Variation due to the pressure difference with $P_1 = 5.6 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ and $P_2 = 4.06 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$

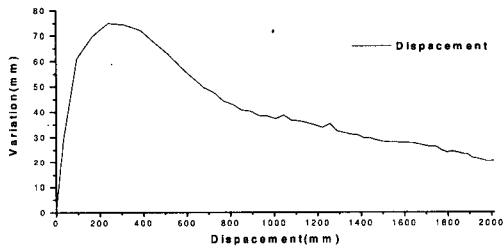


Fig. 6 Displacement Variation with on/off valve ($v_1 = 4v$, sampling time = 0.03sec)

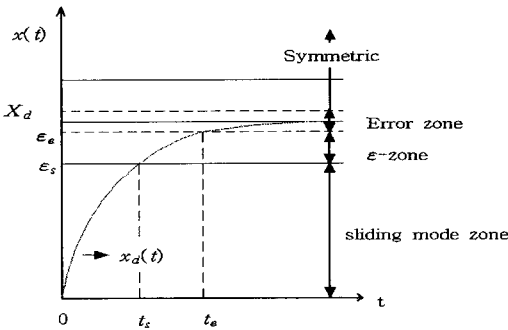


Fig. 7 Control zone strategy in the displacement curve

영역 I : 슬라이딩 모드 제어 영역

슬라이딩 모드 제어영역은 기준위치에 도달하는데 걸리는 시간과 시스템에 무리한 동작으로 발생하는 진동 등의 문제점을 해결하기 위하여 설정되었다. 따라서 시스템이 주어진 추적궤적을 잘 따라가도록 두 밸브의 압력차가 슬라이딩 모드 제어기법에^{[5]-[7]} 의해 계산되며,

경계 영역과 슬라이딩 모드 영역의 경계에서 급격한 압력변화가 없도록 밸브 2의 제어 입력 $v_2(t)$ 을 경계 영역에서 공급할 전압까지 기준변위 증가량에 비례하여 다음식과 같이 증가하였다.

$$\begin{cases} v_2(t) = v(0) + \frac{2.5 - v(0)}{X_d} x(t) & \text{if } x(t) < \epsilon_s \\ v_2(t) = 2.5 & \text{if } x(t) < \epsilon_s \end{cases} \quad (3)$$

영역 II : 경계 영역 (ϵ -zone)

기존의 위치제어 알고리즘에 의한 위치제어는 기준 변위 점에서 정확한 위치에의 어려움과 피스톤의 요동 및 시스템의 불안정성이 발생하므로, 본 논문에서는 경계 영역을 설정하여 피스톤이 안정하게 기준변위에 도달 할 수 있도록 미소 변위 제어기법에 의하여 제어입력을 계산하였다. 미소변위 제어기법은 기초실험을 통하여 압력차와 미소변위 변화량과의 관계를 파악하여 제어입력을 결정하였다. 결정된 제어입력은 전압과 압력의 관계식에 의하여 전압으로 환산된 값을 표기하면 다음식과 같이 쓸 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} v_1(t) &= V_{\max} \\ v_2(t) &= V_c - \frac{(V_c - V_s)}{(\epsilon_c - \epsilon_s)} \epsilon(t) \end{aligned} \right\} \text{if } \epsilon_s < x(t) < \epsilon_c \quad (4)$$

$$v_1(t) = V_{\max}, v_2(t) = V_{\max} \quad \text{if } |X_d - x(t)| < \text{Error zone}$$

- 여기서,
- v_1 : 밸브 1의 입력전압
 - v_2 : 밸브 2의 입력전압
 - V_{\max} : 최대 인가전압
 - V_s : ϵ_s 위치에서의 전압
 - V_c : ϵ_c 위치에서의 전압
 - X_d : 기준변위

영역 III : 오차 영역

오차 영역은 공압위치제어 시스템에서 구현할 수 없는 최소의 영역으로서 이 크기는 시스템의 특성에 따라 달라진 수 있으며 본 논문에서는 시스템의 안정성을 고려하여 0.5mm로 설정하였다.

5. 정밀위치 제어 실험

제안된 제어 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 다음과 같이 실험을 하였다. 변위의 변화량이 작은 영역인 100mm~700mm까지는 오차에 비례하는 미소변위 이동방법에 의하여, 변화량이 큰 영역인 700~1200까지는 개발된 제어 알고리즘에 의해 위치제어 실험을 하였다. Fig. 8~11은 실린더의 끝에서 피스톤이 각각 100mm, 500mm, 1000mm, 1200mm 이동했을 때, Fig. 12~14는 피스톤이 실린더 끝에서 500mm 인 지점으로부터 500mm, 1000mm, 1200mm 이동했을 때의 실험결과이며, 좌변 축은 각 밸브에 인가된 전압을 나타내며 우변 축은 기준변위를 나타낸다. 실험 결과를 보면 제안된 알고리즘을 적용하여 실험한 결과는 오버슈트 없이 0.5mm 허용오차 범위 내에서 정밀위치제어가 가능 한 것을 볼 수 있으며 on/off 형에서 발생하는 문제점이 나타나지 않음을 볼 수 있다. 한편 피스톤의 출발지점이 500mm 인 경우 초기에 시간 지연이 있으며, 따라서 정착시간이 길어짐을 볼 수 있다. 이러한 이유는 실린더 안에 공기가 채워지는데 시간이 소요되기 때문이다. 본 논문에서 제안된 제어 알고리즘은 행정거리의 변화 및 피스톤의 시작점이 변하더라도 공압시스템에서 만족할 만한 정착시간과 오버슈트 없이 정밀 위치제어가 가능함을 실험결과에서 확인 할 수 있었다.

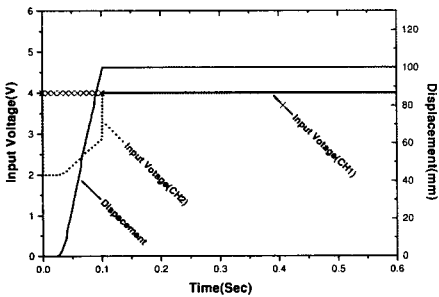


Fig. 8 Displacement of the cylinder for $X_d = 100\text{mm}$ starting from 0 mm

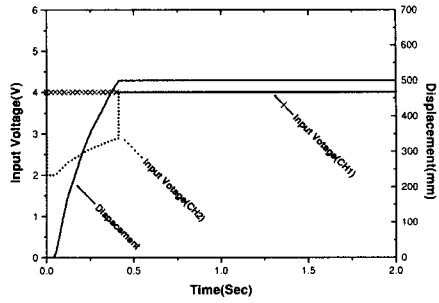


Fig. 9 Displacement of the cylinder for $X_d = 500\text{mm}$ starting from 0 mm

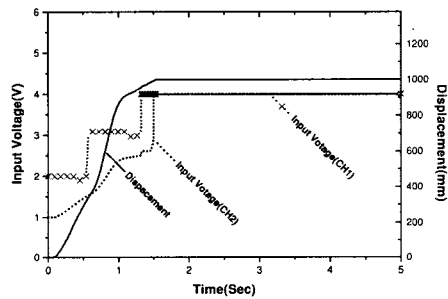


Fig. 10 Displacement of the cylinder for $X_d = 1000\text{mm}$ starting from 0 mm

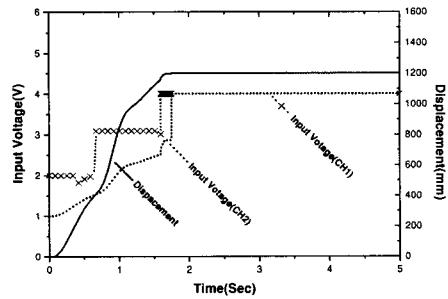


Fig. 11 Displacement of the cylinder for $X_d = 1200\text{mm}$ starting from 0 mm

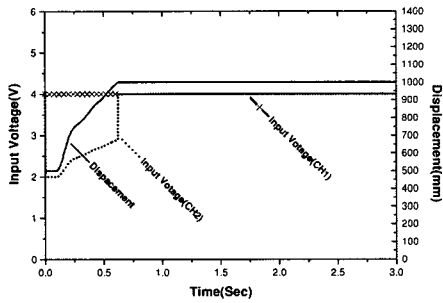


Fig. 12 Displacement of the cylinder for $X_d = 1000\text{mm}$ starting from 500 mm

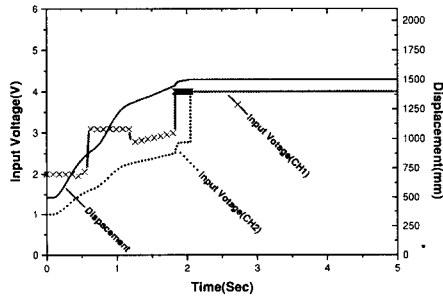


Fig. 13 Displacement of the cylinder for $X_d = 1500\text{mm}$ starting from 500 mm

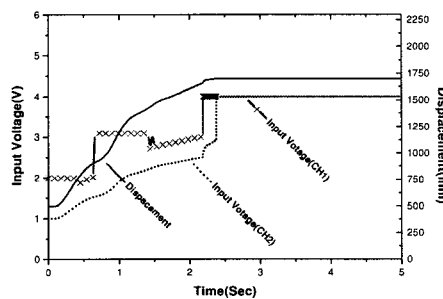


Fig. 14 Displacement of the cylinder for $X_d = 1700\text{mm}$ starting from 500 mm

6. 결론

본 논문에서는 전압비례 밸브를 사용하여 공압 로드레스 실린더의 정밀위치제어를 위해 피스톤의 미소변위 이송방법을 실험을 통하여 제시하였으며,

on/off 형에 의한 밸브 조정 방법보다 제시된 미소변위 이송 방법이 우수함을 기초실험을 통하여 보였다. 미소 이송 방법과 슬라이딩모드 제어를 혼합한 제어 알고리즘을 개발하였으며, 이를 적용하여 실린더 전 구간에 걸쳐 정밀 위치제어가 가능함을 실험을 통하여 검증하였다.

후기

본 논문은 1999 년도 금오공과대학교의 자유공모과제의 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Nroitsugu, T., "Pulse-width-modulated Feedback Force Control of a Pneumatically Powered Robot HAND," Proc. of International Symposium on Fluid Control and Measurement, Tokyo, pp. 47-52, 1985.
2. Lai, J. Y., "Accurate Position Control of a Pneumatic Actuator," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 112, pp. 734-739, 1990.
3. 최 서호, 홍 예선, 이 정오, "공기압 서보 시스템의 위치제어 및 시뮬레이션에 관한 연구," 한국 정밀 공학회지, 제 13 권, 제 6 호, 1996 년 6 월.
4. Linnet, J. A. and Smith, M. C., "Accurate Position Control of a Pneumatic Position Control System," Proc. IME, Vol. 203B, pp. 159-165, 1989.
5. Fillipov, A. F., "Differential Equations with Discontinuous Right-hand Side," American Mathematical Society Translation Series 2, Vol. 42, pp. 199-231, 1963.
6. Utkin, V. I., "Variable Structure Systems with Sliding Modes," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-22, No. 2, pp. 212-222, 1977.
7. Slotine, J. J. and Sastry, S. S., "Tracking Control of Non-linear Systems Using Sliding Surface with Application to Robot Manipulator," Int. J. of Control, Vol. 38, No. 2, pp. 421-434, 1983.