

〈논 문〉

PR형 공압 머니플레이터의 위치서보제어

임 승 철* · 어 윤 범**

(1997년 2월 15일 접수)

Position Servo Control of a PR Type Pneumatic Manipulator

S. Lim and Y. B. Eao

Key Words : Pneumatic Cylinder (공압실린더), PD Control (비례미분제어), Nonlinearity (비선형성), Deadband (불감대), Limit Cycle (리미트 사이클), Describing Function (묘사함수), PR (병진-회전)

Abstract

This paper concerns a 2-axis PR type pneumatic manipulator system translating in vertical and rotating in horizontal directions. A simplified linear model is mathematically formulated similar to the pneumatic actuators in dynamic responses in order to devise an appropriate position control scheme. A PD controller preceding the on/off solenoid valve turns out not only economical but also effective in reducing rise time and amplitude of limit cycles, if its control gains are determined on the basis of frequency response. And, additional implementation of symmetric or asymmetric deadband at the PD controller output greatly helps minimize valve opening numbers, positional error, and undesirable direction-dependent property due to the gravitational load. Such a control concept is synthesized through numerical simulations and next applied to the experimental set-up, featuring enhanced positional servo characteristics.

1. 서 론

공압기기가 실제 산업에 응용되기 시작한 것은 비교적 최근의 일이지만, 현재는 공압기기가 사용되고 있지 않은 산업현장은 없다고 할 정도로 널리 이용되고 있다. 더우기 최근에는 공장자동화의 활발한 추진과 더불어 공압기기에 요구되는 성능과 기능에도 새로운 요구사항들이 발생되고 있다. 이러한 현상중 특히 두드러진 추세는 공압기기의 사용범위를 획기적으로 넓혀주고 있는 위치제어의 정밀화, 즉 공압의 서보화이다.⁽¹⁻³⁾

이러한 요구에 맞추어 경제성이 있는 공압장치의

위치제어에 관한 논문들이 많이 발표되었으며, 그중 다수의 연구들은 솔레노이드 밸브가 달린 공압실린더의 위치제어를 위하여 PWM(Pulse Width Modulation) 제어알고리즘 단독 혹은 그 앞에 또 다른 제어기가 복합된 형태의 제어를 사용하였다.^(4,5) 그러나 PWM방법이 효과적이려면 솔레노이드 밸브 응답속도가 전체 시스템의 속도에 비하여 매우 빨라야 한다. 이 때문에 기존의 논문들은 스펴이 소형이고, 유효 단면적이 작은 고속 2위치 밸브를 여러개 사용하여 시스템을 구성함에 따라 회로가 복잡해지고 비용 및 설치공간이 커지는 단점이 있었다. 또한 자동화에 쓰이는 공압실린더는 수직으로 놓인 것도 상당수인데 반하여 기존의 논문들은 대부분 공압실린더가 수평으로 놓인 상태에서의 연구들이었다.^(4,5)

*회원, 명지대학교 기계공학과

**명지대학교 대학원

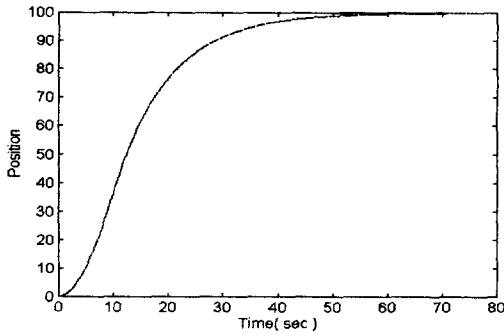


Fig. 3 Pulse response of the simplified model

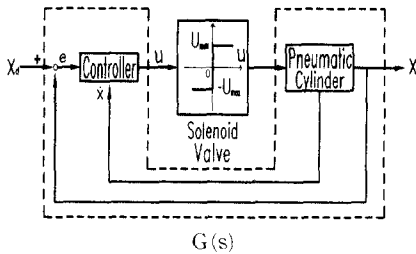


Fig. 4 System block diagram

시스템 파라메타가 각각 $\tau=0.1\text{ s}$, $m=1$, $c=0.1$ 일 때, 폭이 1초인 단위크기 펄스입력을 가한 경우의 변위응답은 Fig. 3 과 같다.

4. 위치서보 제어기의 설계

본 논문에서 제안하는 위치서보 제어기는 다음과 같이 PD제어, 방향성 제거, 불감대 설정 등 크게 3개 요소로 구성된다.

4.1 PD 제어기의 이득 결정

시스템의 위치제어 성능을 향상시키기 위하여는 Fig. 4와 같이 솔레노이드 밸브 전단에 제어기를 추가하는 것이 바람직하다.

최근까지 개폐식 밸브를 제어하는 데는 주로 PWM 방법이 연구되었다. 이 제어방법은 위치오차 혹은 또 다른 선형 제어기 출력의 크기에 따라 펄스의 폭을 변화시키므로 마치 서보밸브를 사용하는 것과 같이 뛰어난 위치결정 성능을 가질 수 있지만 이의 적용을 위하여는 시스템의 속도를 상대적으로 낮추거나 고속 소형 솔레노이드 밸브를 사용하여야 하며 많은 개폐로 밸브의 수명이 단축되는 등 실용화에 문제가 있다.

이를 감안하여 본 논문에서는 PWM 대신, 제어

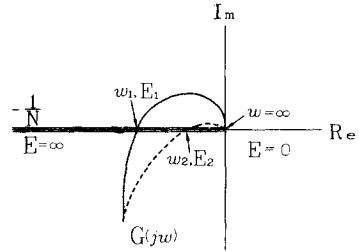


Fig. 5 Nyquist plot of a 3rd order system

입력 u_c 를 구하기 위하여 분현⁽⁸⁾에서와 같이 PD 알고리즘을 사용하였다.

$$u_c = -Kx \tag{2}$$

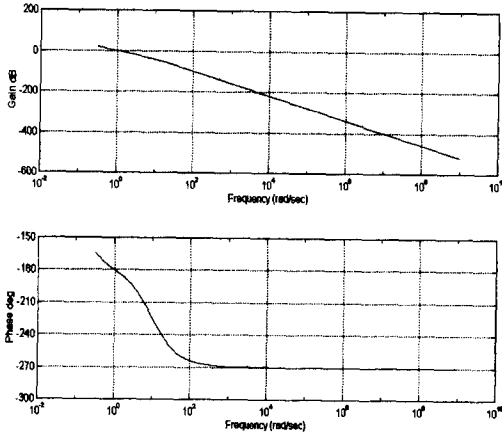
여기서, 제어이득 $K=[k_p \ k_v]$, $x=[(x-x_d) \ \dot{x}]^T$, x_d 는 목표위치이다.

양방향 대칭 on/off 밸브를 사용하는 3차 이상 시스템의 경우에는 일반적으로 리미트 사이클이라는 비선형 주기운동이 나타난다. 이것은 아래 Fig. 5의 Nyquist선도에서와 같이 리미트 사이클의 진폭을 E 라고 할 때 on/off 밸브의 묘사함수 $N=4U_{max}/E\pi$ 와 밸브를 제외한 나머지 시스템의 전달함수 $G(jw)$ 의 교차에 의한다.^(9,10)

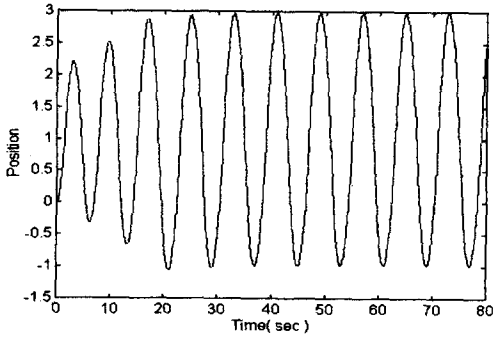
즉, 위의 그림에서 단순 on/off 제어시 주파수가 w_1 이고 진폭이 E_1 인 리미트 사이클이 발생함을 알 수 있다. 따라서 위치결정 성능을 향상시키기 위하여는 E_1 의 크기를 작게 하여야 하므로 진상 보상할 필요가 있다. 예를 들어 on/off 밸브이전에 PD 제어기를 설치하고 그 이득의 비율을 조정하여 corner 주파수 k_p/k_v 가 w_1 근처에 오게 하면 위상이 진전되면서 교차점이 이동하여 리미트 사이클의 주파수가 w_2 로 증가하고 진폭은 E_2 로 감소할 것이다.

이와 같은 개념을 식 (1)의 단순화 모델에 수치적으로 적용하여 본다. $x_d=1$ 이고 $U_{max}=1$ 일 때, on/off 밸브만 동작하는 경우 시스템 $G(s)$ 의 주파수응답함수(FRF)는 Fig. 6(a)와 같으며, 시간응답은 Fig. 6(b)에서와 같이 진폭이 2이고, 주파수가 0.13 Hz인 리미트 사이클이 발생하여 위치결정 능력이 부족함을 알 수 있다.

따라서, PD 제어기를 설치하고 그 이득을 공히 1로 하여 corner 주파수가 $1r/s$ 이 되도록 하면 각각 Fig. 7(a), (b)와 같은 FRF와 시간응답을 갖는다. 즉, 예측한 대로 진폭이 매우 작고 주파수가 높은 리미트 사이클이 나타난다. 그러나, 여기서



(a) Frequency response function



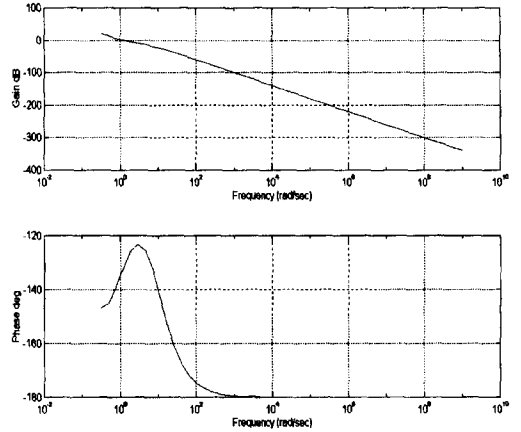
(b) On/off controlled time response

Fig. 6 Model without the PD controller

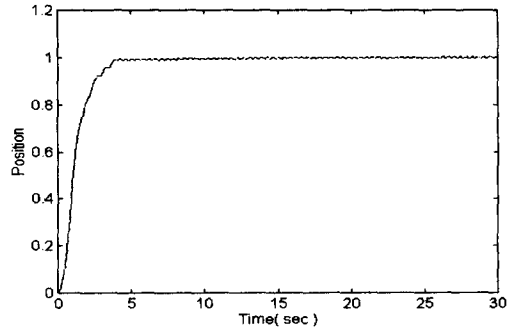
주목할 것은 위의 최적제어이득의 비가 이론처럼 $2\pi \times 0.13$ 와 정확히 일치하지는 않는다는 것이다. 그 이유는 묘사함수 자체가 on/off 요소의 구형 출력을 단순히 한개의 조화함수로 근사화하여 유도된 것이기 때문으로 여겨진다. 따라서 묘사함수에 의한 리미트 사이클의 진폭과 주기의 예측시 항상 어느 정도의 오차는 불가피하다.

4.2 방향성 제어

실린더가 수직으로 설치될 경우 가동부 하중의 영향으로 목표위치를 중심으로 리미트 사이클 oscillation의 overshoot와 undershoot의 크기가 상호 다른 현상이 나타나며 따라서 방향에 따라 위치결정오차가 달라진다. 그러므로 이러한 문제점을 보완하기 위하여 PD 제어기 출력 u_c 값에 oscillation 균형을 맞출 수 있는 최적의 상수 u^* 을 추가하는 방법을 다음과 같이 제안한다.



(a) Frequency response function



(b) PD controlled time response

Fig. 7 Model with the PD controller

$$u_c^* = -Kx + u^* \tag{3}$$

4.3 불감대 설정

전술한 바와 같이 PD 제어기를 on/off 솔레노이드 밸브 앞에 달아 주면 위치결정오차가 작아질 수 있다. 그러나, 동시에 리미트 사이클의 주기가 빨라지면서 그 만큼 밸브의 개폐횟수가 증가하여 밸브의 수명이 짧아지고 진동과 소음도 증가하는 단점이 있다. 그러한 문제를 해결하기 위하여는, 위치오차만을 기준으로 하는 기존의 일반적 방식 대신 다음과 같이 제어기 출력 u_c^* 의 크기를 기준으로 하는 불감대의 설정방식이 제어입력의 연속성 보장면에서 불 때 더욱 자연스럽고 효과적이다.

$$u = \begin{cases} \text{sgn}(u_c^*) & \text{for } |u_c^*| > d \\ 0 & \text{for } |u_c^*| \leq d \end{cases} \tag{4}$$

만일, 리미트 사이클 발생시의 제어기 출력값 u_c^* 의 진폭을 초기치로 하여 그 근방에서 불감대의

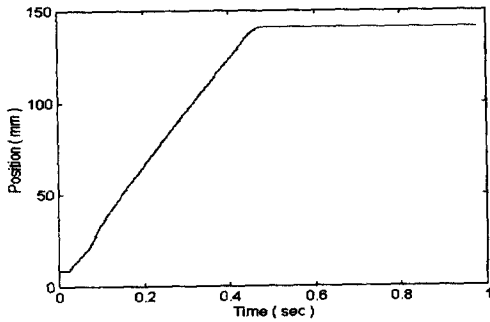
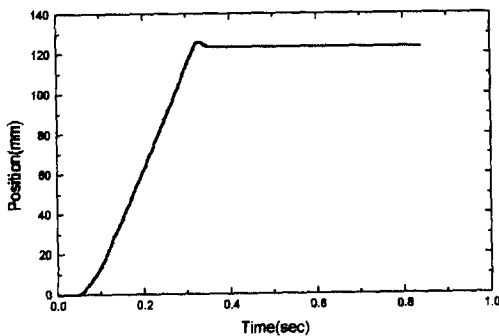
(a) 5 turns with A_e 0.32 mm²(b) 6.5 turns with A_e 0.76 mm²

Fig. 8 Pulse response of the experimental set-up

크기 d 를 적절히 조정하면 위치결정 능력을 거의 훼손시키지 않으면서도 밸브의 개폐횟수를 크게 줄여 시스템을 목표위치에 완전히 정지시킬 수 있다.

한편, 식 (3)과 (4)의 개념을 하나로 통합하면 비대칭 불감대의 개념이 된다.

5. 실험결과 및 토의

앞장에서 제안된 제어방식을 공압 머니플레이터의 병진 및 회전형 실린더에 각각 적용하였다.

5.1 수직 병진실린더

시스템의 특성을 파악하기 위하여 일정 시간폭의 펄스를 주고 위치신호를 검출하였다. 속도제어 밸브의 knob를 약 5.0과 6.5 회전만큼 열어, 즉 유효단면적 A_e 를 각각 0.32, 0.76 mm²으로 하여 유량을 조정할 경우, 응답은 각각 Fig. 8(a), (b)와 같으며 Fig. 8(b)와 같이 유량이 비교적 큰 경우를 제외하면 Fig. 3과 경향에 있어 유사함을 알 수 있었다.

그러나 여기서 주목해야 할 것은 4장에서 제안된

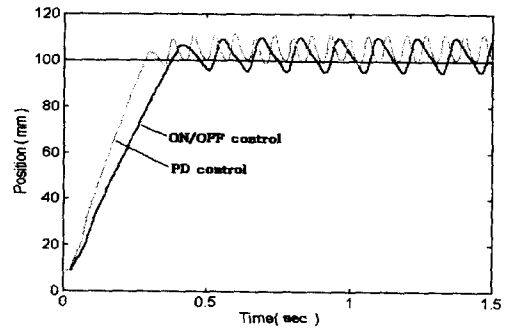
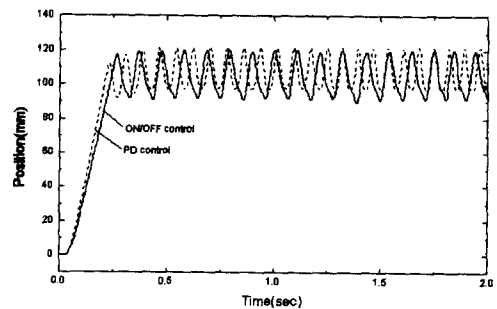
(a) 5 turns with A_e 0.32 mm²(b) 6.5 turns with A_e 0.76 mm²

Fig. 9 Controlled responses

제어방식은 시스템의 응답특성과는 사실상 무관하며 따라서 유량에 관계없이 일반적으로 적용가능하다는 점이다. 한편, 페루프제어 실험은 C-언어 프로그램에 의하여 주기 0.28 ms로, 크게 3가지 경우에 대하여 수행되었으며, 속도제어 밸브의 knob 회전수가 5.0, 6.5 회전된 경우의 초기위치는 각각 9, 0 mm이며 목표위치는 공히 100 mm로 동일하였다.

5.1.1 On/Off 제어

식 (2)에서 $h_v=0$ 인 경우, 즉 목표위치와의 오차만을 계산하여 솔레노이드 밸브에 u_c 를 가한 경우의 실험결과는 Fig. 9의 실선과 같다.

Fig. 9(a)의 경우 진폭과 주기가 각각 7.5 mm, 7.1 Hz인 주 리미트 사이클이 목표위치를 초과한 형태의 상하 비대칭으로 발생하였으며, 시간을 더 연장하여 보면 진폭은 작고 주기가 훨씬 큰 또 다른 리미트 사이클이 발생함을 알 수 있었다. 또한 유량, 즉 속도가 큰 Fig. 9(b)의 경우는 진폭과 주기가 약 15 mm, 10 Hz인 좀 더 극심한 비대칭 리미트 사이클이 발생함을 알 수 있었다.

5.1.2 PD 제어

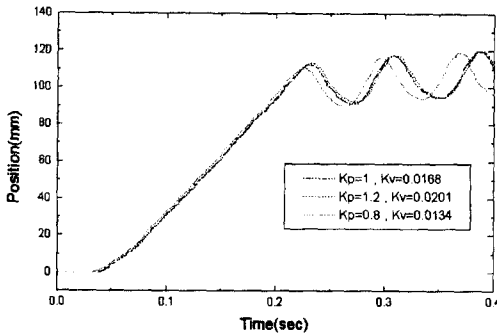


Fig. 10 PD controlled responses with varied proportional gains

On/Off 제어와 동일한 조건하에서 식 (2)의 방법대로, 위치오차에다 속도신호를 부가하여 주 리미트 사이클이 작아지도록 knob 회전수가 5.0 인 경우 gain값을 각각 $k_p=1$, $k_v=0.0227$ 로 조정하여 제어 입력을 주었다. 이 경우, PD제어 실험결과 는 Fig. 9(a)의 점선과 같아져 상승시간의 단축 과 함께 리미트 사이클의 진폭이 감소하였음을 알 수 있다.

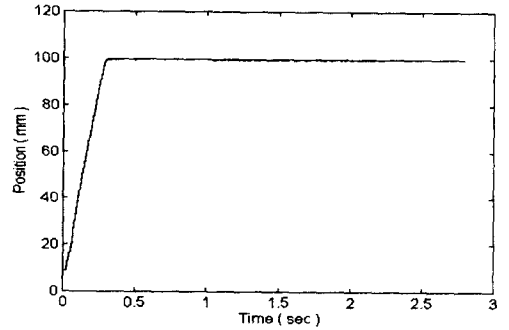
이 때, 진폭의 감소비율이 수치에의 경우만큼 크 지 않음은 실험 공압계의 전달함수 크기가 180° 위상 지연 주파수 근방에서 완만히 감소함을 시사한다. 한편, PD 제어의 경우 목표위치로부터의 overshoot와 undershoot간의 불균형이 더욱 커지는 특 징이 있다.

또한 knob 회전수가 6.5 인 경우는 $k_p/k_v=59.524$ 로 조정하면 Fig. 9(b)의 점선과 같은 제어성능 을 갖게 되며, k_p 의 영향을 파악하기 위하여 상기 제어이득의 비는 유지한 채 k_p 값을 가변시킨 결과 Fig. 10에서와 같이 그 값이 0.8일 때 약간의 상승 시간 단축이 생길 뿐 큰 영향이 없음을 알 수 있었 다.

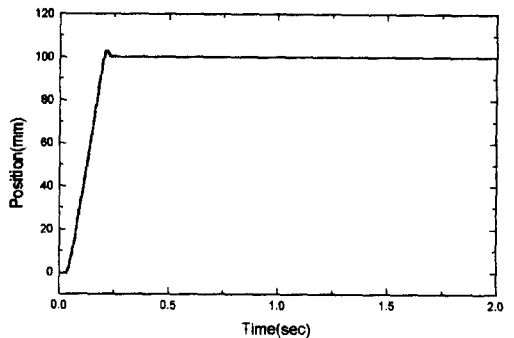
5.1.3 비대칭 불감대를 갖는 PD 제어

식 (3)과 (4)로 제어한 경우로서, knob 회전수 가 5.0 인 경우 제어기 출력을 기준으로 하한 -1.5 , 상한 5.0 인 불감대를 설정할 때, 실험결과는 Fig. 11(a)와 같다.

이 경우는, $u^*=-1.75$, $d=3.25$ 인 경우에 해당 하며 밸브 개폐회수가 크게 감소하였을 뿐만 아니 라 리미트 사이클의 진폭이 거의 양이며 목표위치 상하간의 불균형도 제거된 우수한 제어성능을 보인다. 한편, knob 회전수가 6.5 인 경우는 불감대의 하한 -13.5 , 상한 7.0으로 설정한 경우 Fig. 11(b)



(a) 5 turns with $A_c 0.32 \text{ mm}^2$



(b) 6.5 turns with $A_c 0.76 \text{ mm}^2$

Fig. 11 PD controlled response with an asymmetric deadband

와 같은 우수한 성능을 보이므로써 공기유량에 관 계없이 제안된 제어방식이 효과적임을 알 수 있다.

또한, 이와 같은 특성은 제어이득과 불감대의 크 기를 고정한 채 목표위치를 40, 80, 120 mm 등으로 변경하여도 동일하게 유지됨을 Fig. 12로부터 알 수 있다.

5.2 회전형실린더

병진실린더의 경우와는 달리 회전형실린더의 운 동은 중력과 직교하는 방향이므로 부하의 영향에 따른 리미트 사이클의 비대칭성은 나타나지 않는 다. 따라서 식 (3)의 u^* 는 고려할 필요가 없으며, 그 밖에는 회전형실린더의 각위치 제어방식은 병진 실린더의 경우와 동일하다.

예로써 목표각이 120° 이며, 해당 속도제어밸브의 knob를 2회전시킨 경우의 on/off, PD, 그리고 대칭 불감대를 갖는 PD 제어시의 응답결과만을 제시하 면 Fig. 13과 같으며, 기타 다양한 실험을 통하여 도 병진실린더의 경우와 일치하는 특성을 확인하였 다.

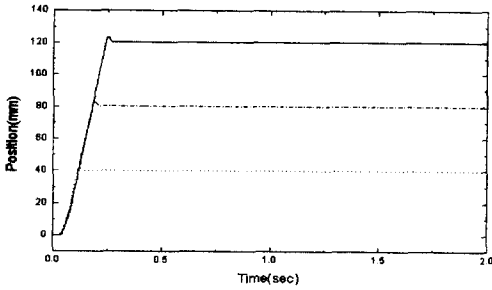


Fig. 12 PD controlled responses with varied desired positions (6.5 turns)

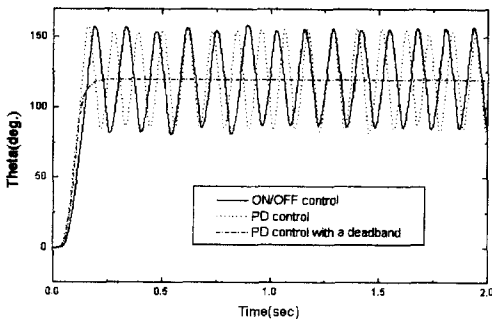


Fig. 13 Controlled responses of the rotary actuator

6. 결 론

각 축에 범용 솔레노이드 방향제어 밸브 한개씩만이 설치된 2축 수직 공압 머니플레이터 시스템의 실시간 위치제어를 수행하였다.

적합한 제어기를 설계하기 위하여 공압실린더의 간단한 수학적 모델을 수립하여 PD 제어의 이득 설정방법을 도출하였고, 수직방향 액츄에이터의 고유특성인 부하에 의한 위치제어 성능의 방향성과 밸브의 개폐횟수를 감소시키는 방법으로서 PD 제어기 출력에 대칭 혹은 비대칭 불감대를 설정하는 방안도 함께 제시하여 그 효용성을 수치 시뮬레이션으로 검증한 다음, 머니플레이터의 각 축 제어실

험에 적용하였다.

이 제어방식이, PWM 제동의 제어방법보다 경제적이면서도, 단순 on/off나 PD 제어와 on/off가 복합된 그리고 위치오차를 기준으로 불감대를 설정하는 제어방법보다 성능면에서 우수함을 실험적으로 입증하였다.

참고문헌

- (1) 송창섭, 1991, 공기압 기술 실무 매뉴얼, 도서출판 기술.
- (2) 황세후, 1989, 유공압의 디지털제어와 응용, 기전연구사.
- (3) 편집부, 1995, 월간 자동화기술, (주)첨단, Vol. 6, pp. 146~153.
- (4) 최서호, 이정오, 1995, "상대 피드백 제어기와 퍼지계인 조정기를 이용한 공압 서보시스템의 위치제어에 관한 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 816 ~ 820.
- (5) 조은환, 1993, "퍼지제어에 의한 공압구동장치 위치제어에 관한 연구," 석사학위논문, 영남대학교.
- (6) 어운범, 임승철, 1996, "수직 공압 액츄에이터의 실시간 위치서보제어," 대한기계학회 추계 학술대회 논문집 A, pp. 765~770.
- (7) Burton, T. D., 1994, *Introduction to Dynamic Systems Analysis*, McGraw-Hill.
- (8) 전용원, 1994, "공압 3축 매니플레이터의 위치제어에 관한 연구," 석사학위논문, 한국과학기술원, 대전.
- (9) Slotine, J. E., and Li, W., 1991, *Applied Non-linear Control*, Prentice-Hall International Editions.
- (10) Hale, F. J., 1973, *Introduction to Control System Analysis and Design*, Prentice-Hall, Inc.