

MPWM 을 이용한 공압 실린더의 지능제어

송인성*(울산대 대학원 기계자동차공학부), 표성만, 안경관(울산대 기계자동차공학부), 양순용, 이병룡

Intelligent control of pneumatic actuator using MPWM

I. S. Song(School of Mechanical & Automotive Eng. University of Ulsan),

S. M. Pyo, K. K. Ahn, S. Y. Yang, B. R. Lee

ABSTRACT

Pneumatic control system has been applied to build many industrial automation systems. But most of them are sequence control type because of their low costs, safety, reliability, etc. Pneumatic servo system is rarely applied to real industrial fields because accurate position control is very difficult due to its nonlinearity and compressibility of air. In pneumatic servo control system, a pneumatic servo valve can be applied. But it is very expensive and has no advantage of low cost compared with a common pneumatic system.

This paper is concerned with the accurate position control of a rodless pneumatic cylinder using on/off solenoid valve. A novel Intelligent Modified Pulse Width Modulation(MPWM) is newly proposed. The control performance of this pneumatic cylinder depends on the external loads. To overcome this problem, switching of control parameter using artificial neural network is newly proposed, which estimates external loads on rodless pneumatic cylinder using this training neural network. As an underlying controller, a state feedback controller using position, velocity and acceleration is applied in the switching control the system.

The effectiveness of the proposed control algorithms are demonstrated through experiments with various loads.

Key Words : Pneumatic servo system(공압서보시스템), on/off solenoid valve(개폐식 솔레노이드 밸브), load estimation(부하추정), MPWM(Modified Pulse Width Modulation), Intelligent control(지능제어), Artificial neural network(인공신경회로망)

1. 서론

산업현장에서 사용되어지고 있는 구동기는 그 작동원에 따라서 전기식, 유압식, 공압식으로 나누어진다. 공압 시스템은 공기의 압축성 때문에 정밀하고 강건한 제어를 하기에 다소 어려움이 있다. 그리고 스틱 슬립을 동반하는 큰 마찰력이 실린더 벽과 실링 재료 사이에 존재하므로 액츄에이터를 저속에서 연속적으로 제어하기가 힘들다. 그러나 공압 시스템은 이러한 단점에도 불구하고 다른 많은 장점 때문에 다양한 분야에서 사용되고 연구되어지고 있다. 전기식 시스템과 비교해 볼 때 가격이 저렴하면서 큰 힘을 낼 수 있으며, 실린더를 이용하여 간단하게 직선운동을 하도록 할 수 있다. 또한 유압식 시스템과 비교해 보면 유지보수가 간

편하고 환경 친화적인 장점이 있다.

이 논문의 목적은 고가의 서보밸브 대신 저가의 개폐식 밸브를 이용하여, 외부부하의 변화에도 상관없이 빠르고 정확한 위치 제어가 가능한 지능형 공압 제어 알고리즘을 개발하는 것이다.

공압위치제어 시스템에 관한 다양한 연구⁽¹⁾⁻⁽¹²⁾가 진행되어 오고 있고, 개폐식 밸브를 이용한 공압장치의 연구⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾에서는 PWM(Pulse Width Modulation) 방식이 개폐식 밸브를 제어하기에 효과적임이 밝혀졌다⁽¹³⁾. 또한, 기존의 연구에서는 PWM, PWMD(Pulse Width Modulation with Dead-zone), MPWMD(Modified Pulse Width Modulation with Dead-zone) 방식이 공압 장치를 효과적으로 제어하기 위해서 사용되었다⁽¹⁴⁾. 이러한 연구가 단위입력 및 고정된 외부부하에서는 좋은 성능을 보여 주었지만,

불감대 영역(Dead-zone band)에서의 위치제어와 외부 부하의 변화에 대해서는 여전히 문제점이 남아 있다. 불감대 영역에서의 불필요한 전력 손실을 막기 위해서 개폐식 밸브의 전원을 차단하는 방법이 사용되었지만⁽¹⁵⁾, 불감대 영역에서는 제어 출력값이 너무 작아 밸브가 열려야 함에도 불구하고 열리지 않는 현상이 발생해 공압장치를 제어하는데 많은 문제점이 발생한다. 또한 외부 부하가 변하게 되면 공압장치가 제대로 제어되지 않는 문제점이 발생되었다. 이러한 문제점들에 대한 연구가 본 논문에 언급되었고, 이러한 문제를 해결하기 위해 MPWM 방식이 새롭게 제안되어 이전의 PWM 방식과 비교되었다. 또한 인공 신경 회로망을 이용하여 외부 부하 변동에도 대처할 수 있는 알고리즘이 개발되었다.

2. 공압위치제어 시스템

2.1 공압 위치제어 시스템 및 동작방법

그림 1은 8개의 개폐식 밸브로 구성된 공압위치제어 시스템에 대한 개념도를 나타낸다. 이 시스템은 로드리스 실린더(SMC, MY1M32-1000L), 리니어 스케일(US Digital, resolution 0.05mm), 카운터 보드(Advantech, PCL 833), A/D 보드(Advantech, PCI 1731), 공압센서(SMC, ISE 40-01-22L), 디지털 IO 보드(Advantech, PCI 1731), DC 컨버터 및 8개의 개폐식 밸브(MAC, 111B-872JD)로 구성되어 있다. 각 개폐식 밸브에 공급되는 공압은 0.5[MPa] 이고, 퍼스널 컴퓨터(Celeron 1G)에 의해 0.1Khz 로 계산되어진다. 그림 2는 실제로 구성된 시스템을 보여준다. 압력센서는 시스템 특성을 파악하는 데에만 사용되었고, 실제 동작에는 아무런 관여를 하지 않는다.

2.2 개폐식 밸브의 특성

본 실험에 사용되는 개폐식 밸브 (MAC, 111B-872JD)의 특성을 파악하기 위하여 밸브에 흐르는 전류를 측정하였고, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 100ms 동안 개폐식 밸브를 열고, 오실로스코프를 이용하여 개폐식 밸브에 전류를 측정하였다. 그림 3의 확대된 그림에서 보면 전류가 상승하다가 감소하는 순간이 밸브가 열리기 시작하는 순간이고, 다시 전류가 상승하는 순간이 밸브가 다 열린 순간이다. 본 실험에 사용된 개폐식 밸브는 입력 신호가 가해진 시간보다 4ms 늦게 열리기 시작하여 0.6ms 동안 열리게 된다. 이 실험을 통하여 불감대 영역이 4ms임을 확인하였고, MPWM에 의한 밸브 구동 시간은 이보다 길어야 한다.

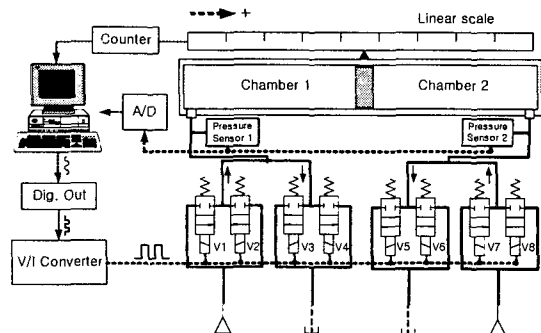


Fig. 1. Schematic diagram of pneumatic control system

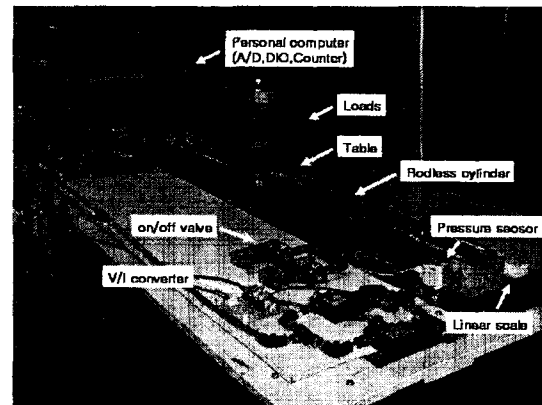


Fig. 2. Picture of the experimental apparatus

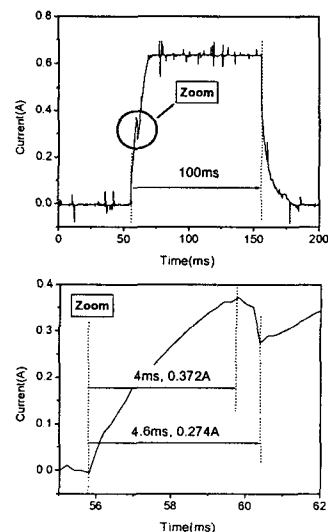


Fig. 3. Measurement of the valve opening time

3. 공압시스템의 제어 알고리즘

3.1 공압시스템의 제어기설계

공압실린더의 테이블 위치 제어를 위하여 위치 에러, 속도, 가속도를 케환하는 3-루프 제어기가 사용되었다. 공압시스템에는 3-루프 제어기가 유용하다고 이미 알려진바 있다⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾. 이러한 제어기를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$u = kp \cdot (y_d - y) - kv \cdot v - ka \cdot a \quad (1)$$

u : control input y_d : target position
 y : table position kp : position gain
 v : table velocity kv : velocity gain
 a : table acceleration ka : acceleration gain

그림 4는 3-루프 제어기, MPWM 변환기와 로드리스 실린더로 구성된 기본적인 제어기의 구조를 보여준다. 제어입력값 'u'는 테이블의 3 가지 상태 값으로부터 계산되어 지고, 개폐식 밸브를 동작시키기 위한 MPWM 출력비로 변환되어 진다.

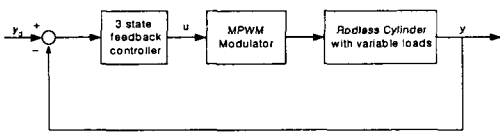


Fig. 4. Structure of the basic control algorithm

3.2 MPWM 변환기의 설계

개폐식 밸브의 응답시간과 비 연속적인 동작 특성 때문에 연속적인 제어 입력값으로 로드리스 실린더를 제어하기에는 많은 문제가 있다. 따라서 제어 입력값 'u'는 개폐식 밸브를 동작시키기 위한 비 연속적인 값으로 변환되어야 한다. 개폐식 밸브의 불감대보다 밸브를 여는 시간이 작게 되면, 전류만 흐를뿐 밸브는 열리지 않게 된다. 따라서 불감대는 제어 목표값 부근에서의 위치제어를 어렵게 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 제어출력값이 작더라도 밸브를 동작시킬 수 있도록 불감대 영역(t_{DZ})을 이동시켜 비례적인 출력이 가능하도록 하였다. 새롭게 제안된 MPWM 방식을 식(2)에 나타내었고, 제어 입력값에 의한 MPWM 출력결과를 그림 5에 나타내었다. 새롭게 제안된 MPWM 방식에 의해서 밸브는 동작되고, 10ms의 주기로 제어입력값이 출력된다.

제어성능을 향상시키기 위해서 한 쌍의 같은 크기의 밸브를 사용하는 방법을 제안하였다. 같은 크

기의 밸브는 응답시간이 같기 때문에 MPWM 신호에 의한 동기화가 쉽다. 제어입력값이 정해진 값보다 커지게 되면 한 쌍의 밸브(V1,V2,V5,V6 or V3,V4,V7,V8)가 동시에 열리게 되고 보다 많은 양의 공기가 흘러 들어갈 수 있어서 테이블이 빠르게 이동한다. 이때 열린 밸브는 제어 목표값 근처에 갈 때까지 열려있고, 제어 입력값이 정해진 값보다 작아지게 되면, 각각 하나의 밸브만 동작하여 정밀 위치제어를 하게 된다.

$$U_{MPWM}(t) = \begin{cases} \text{sign}(U_o)|U_o| & (k-1)T \leq t \leq (k-1)T + t_p(kT) \\ 0 & (k-1)T + t_p(kT) \leq t < kT \end{cases}$$

$$t_p(kT) = \begin{cases} t_s(kT) & 0 < t_s(kT) < T \\ T & t_s(kT) \geq T \end{cases} \quad (2)$$

$$t_s(kT) = \begin{cases} \frac{|U(kT)|}{U_{max}} T + t_{DZ} & 0 < |U(kT)| \leq U_{max} \\ T & |U(kT)| > U_{max} \end{cases}$$

- U_{MPWM} : MPWM output
- U_o : valve open order
- t_p : valve ON duty for one MPWM cycle
- t_s : shifted valve ON duty for one MPWM cycle
- t_{DZ} : valve dead time
- T : MPWM cycle
- t : time
- U_{max} : saturated control input for MPWM modulator
- k : Discrete sequence

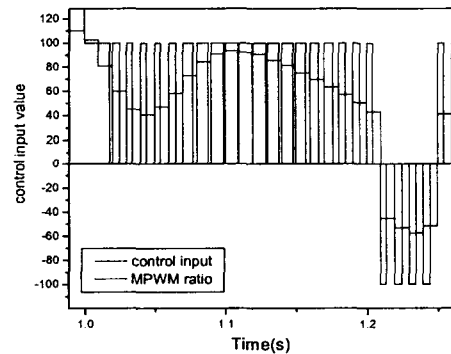


Fig. 5. Example of the MPWM ratio

3.3 로드리스 실린더의 정밀위치 제어

그림 6은 새롭게 제안된 MPWM을 이용하여

로드리스 실린더의 위치를 제어한 결과이다. 로드리스 실린더의 테이블이 목표위치에 위치했을 때 양쪽 챔버에 동시에 공압을 공급하여 테이블을 고정한다. MPWM 방식은 불감대 영역에서도 밸브가 열리도록 되어있으므로 목표 위치에서의 정상상태 오차가 줄어든다. 그림 6 은 무부하 상태에서의 실험결과를 나타내고, 그림 7 은 같은 조건에서 부하만을 더 증가(10kg, 20kg, 30kg)하여 같은 실험을 반복한 결과이다. 부하가 10kg, 20kg, 30kg 와 같이 점점 증가할수록 진동도 더 크게 발생되어 예러가 커진다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 LVQNN 을 이용하여 테이블 위의 외부부하를 추정하고 적당한 3-loop 제어기의 게인값을 선택하는 방법을 제안한다.

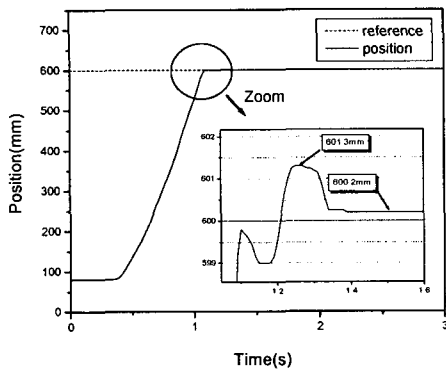


Fig. 6. Experiment result of the rodless cylinder by MPWM controller

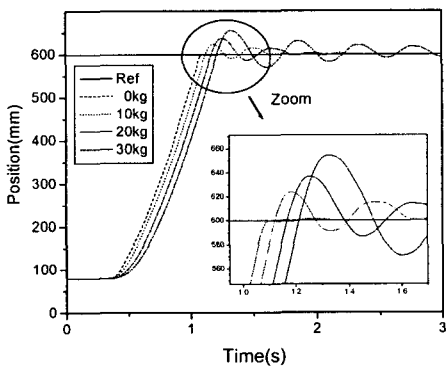


Fig. 7. Experiment results of the rodless cylinder with four different loads.

4. LVQNN 에 의한 게인 선택 알고리즘

4.1 LVQNN 의 구조

외부 부하가 크면 클수록 테이블의 초기 동작속도가 느려진다. 이러한 점에 착안하여 로드리스 실린더가 동작 할 때의 로드리스 실린더 테이블 속도로부터 부하를 추정한다. 그러나 작업환경에 따라서 매 실험시의 테이블 속도가 조금씩 달라지고, 공압의 특성상 동작속도가 비선형적이기 때문에 클래스화 하기가 힘들다. 이러한 것을 극복하기 위해서 Learning Vector Quantization Neural Network (LVQNN)을 도입하였다. 미리 측정된 속도를 LVQNN 을 이용하여 학습하고, 학습된 결과를 바탕으로 동작시의 속도를 기존의 학습 결과와 비교하여 외부부하를 추정하게 된다.

LVQNN 은 테이블이 움직이기 시작할때의 속도를 입력값으로 받아들인다. LVQNN 의 구조를 그림 8 에 나타내었고, 새롭게 제안한 제어 알고리즘은 그림 9 에 나타내었다. 속도값은 매 시간마다의 테이블 위치 변화에 의해서 계산되고, 외부 부하가 변함에 따라서 달라지게 된다.

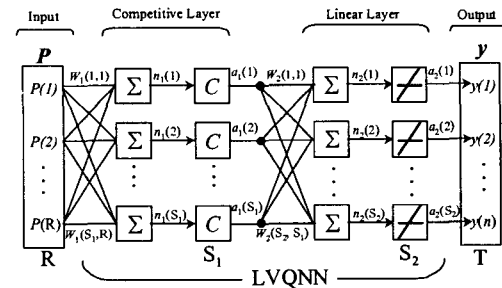


Fig. 8. Structure of the LVQNN

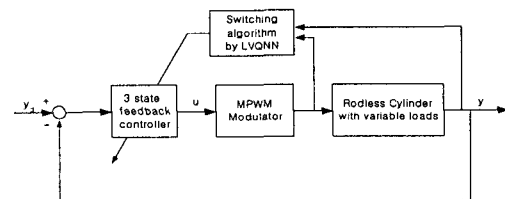


Fig. 9. Structure of the newly proposed control algorithm

4.2 학습방법

학습 데이터를 얻기 위해서 표 1 과 같은 3 가지의 다른 외부 부하 환경에서 실험이 수행되었다. 다양한 작업조건을 만들기 위해서 그림 10 에서와 같이 기준부하보다 더 부하를 증가하거나 감소하였다. 각 클래스의 기준이 되는 부하(0kg, 10kg, 20kg, 30kg)를 중심으로 더 증가되거나 감소된 부하를 표 1 에서와 같이 하나의 같은 클래스로 구분한다. 실험이 진행되는 동안 로드리스 실린더의 테이블은 실린더 좌측으로부터 80mm 위치에서 동작을 시작

한 후 우측으로 빠르게 이동된다(V1, V2, V5 와 V6 밸브 열림). 게인 선택기는 LVQNN 의 입력데이터 보다 측정된 위치 데이터의 개수가 많게 되면 동작한다.

표 2 는 LVQNN 의 최적화된 중간층 개수와 입력 데이터 개수를 나타낸다. 계산된 부하와 학습의 인식률을 고려해 볼 때 40 개의 중간층 개수와 30 개의 입력데이터 개수가 적당하며, 이때 LVQNN 의 학습인식률이 100%임을 알 수 있다.

그림 11 은 20kg 의 부하를 LVQNN 에 의해서 게인을 선택한 실험결과이다. LVQNN 은 실린더의 테이블이 움직이기 시작하면서부터 0.3 초동안 입력데이터를 받아 들이고, 그 후 0.1 초 동안 10 번 동작한다. LVQNN 으로 부하를 구별해 낸다고 하더라도 시스템의 비선형성으로 인하여 부하를 다르게 인식할 수 있다. 따라서 10 번 수행후에 가장 많이 선택된 부하를 최종 부하로 결정한다.

4.3 LVQNN 에 의한 실험결과

3.3 절에서는 외부 부하가 없는 상태에서 테이블의 위치를 제어하는 실험을 수행하였고, 같은 조건에서 외부부하를 더 가하는 실험을 반복하였다. 3 loop 제어가 게인값은 무부하 상태에서 최적화 되어 있기 때문에 외부 부하가 증가하게 되면 위치에러가 커지고 진동이 발생하였다. 이를 극복하기 위해 각 부하에 맞는 3 loop 제어기 게인값을 선정할 후, LVQNN 을 이용하여 부하를 판별하고, 적당한 게인을 선택 해 주었다. 그림 12 에서는 외부 부하가 0kg, 10kg, 20kg, 30kg 일 때의 실험결과를 나타내었고 새롭게 제안된 알고리즘의 효용성이 입증되었다.

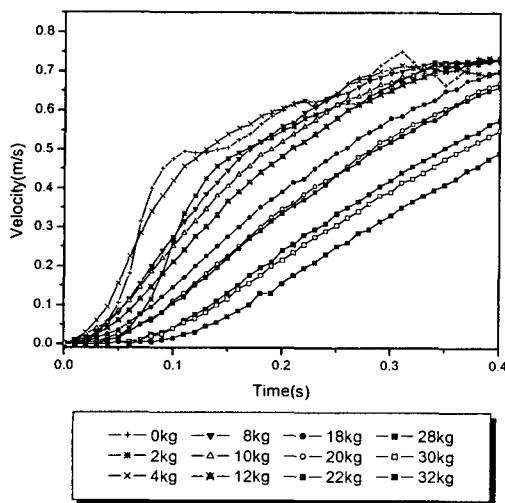


Fig. 10. input data for LVQNN

Table 1. Load classification

No.	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
1	0 kg	8 kg	18 kg	28 kg
2	2 kg	10 kg	20 kg	30 kg
3	4 kg	12 kg	22 kg	32 kg

Table 2. Success rate of the LVQNN

Hidden layer	Input data number					
	27	28	29	30	31	32
20	94.1%	95.5%	97.2%	98.5%	97.5%	98.1%
30	98.8%	98.7%	99.3%	97.7%	99.1%	100%
40	98.8%	98.1%	99.3%	100%	100%	100%

learning rate: 0.6
Training : 10000

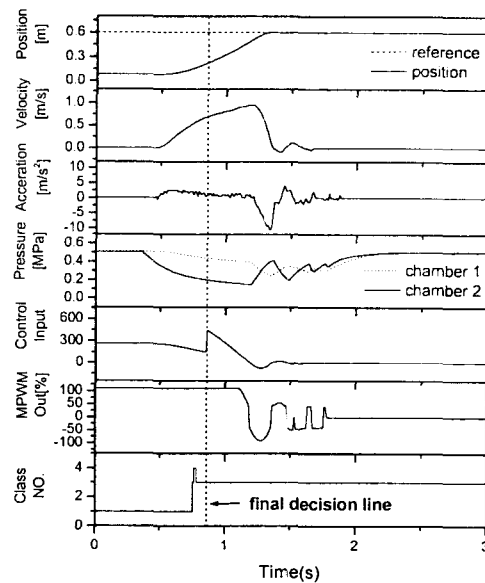


Fig. 11. Experiment result of switching by LVQNN

5. 결론

이 논문에서 개폐식 밸브를 이용하기 위한 새로운 MPWM 방식을 제안하였고, 외부 부하에 따라 게인값을 선택 하는 LVQNN 에 의한 게인선택 알고리즘을 제안하였다. MPWM 방법은 개폐식 밸브에서 발생하는 불감대에서의 제어 방법을 제시하였고, 정상상태 오차를 줄이면서 로드리스 실린더의 테이블을 원하는 위치에 위치 시킬 수 있는 것을 보여 주었다. 게인 선택 알고리즘은 로드리스 실린더에 가해지는 외부부하를 인지하고, 이에 맞는 게인을 선택할 수 있도록 해 준다. 무부하 상태와 3 가지 다른 부하에 대한 실험결과로부터 제안된 알

고리침이 효과적임이 입증되었다.

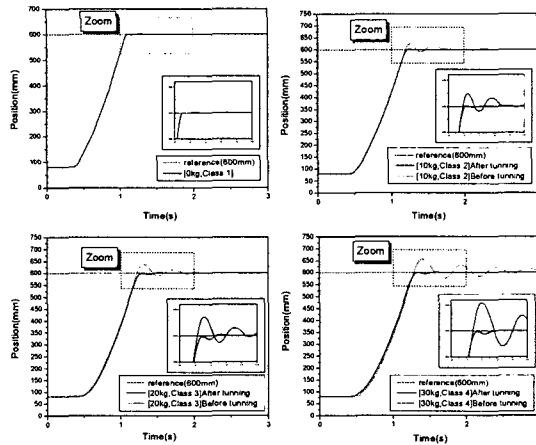


Fig. 12. Comparison of experimental results with and without Gain tuning

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 기계 부품 및 소재 특성평가 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- 1 Eric J. Barth, Jianlong Zhang and Michael Goldfarb, "Sliding Mode Approach to PWM-Controlled Pneumatic Systems", Proceedings of the American Control conference Anchorage, AK May 8-10, 2002.
- 2 J. E. Bobrow and F. Jabbari, "Adaptive pneumatic force actuation and position control", ASME J. Dynamic Syst., Measur., Contr., vol. 113, pp. 267-272, June 1991.
- 3 최서호, 홍예선, 이정오, "공기압 서보 시스템의 위치 제어 및 시뮬레이션에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제13권, 6호, pp. 102-113, 1996.
- 4 T. Noritsugu and M. Takaiwa, "Robust position of pneumatic servo system with pressure control loop", in Proc. IEEE int. Conf. Robotics and Automation, May 1995, vol. 3, pp. 2613-2618.
- 5 J. Tang and G. Walker, "Variable structure control of a pneumatic actuator", ASME J. Dynamic Syst., Measur., Contr., vol. 117, pp. 88-92, Mar. 1995.
- 6 M. Yu. Rachkov, M. Crisostomo, L. Marques and A. T. de Almeida, "Position control of pneumatic manipulators for construction tasks", Automation in Construction 11, 2002, 655-665.

- 7 Robert B. van Varseveld and Gary M. Bone "Accurate Position Control of a Pneumatic Actuator Using On/Off Solenoid Valves", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 2, No. 3, September 1997.
- 8 Tore Haeggglund, "A friction compensation for pneumatic control valves", journal of Process Control 12, 2002, 897-904.
- 9 T. Matsui, E. Ishimoto, and M. Takawaki, "Learning position control of a pneumatic cylinder using fuzzy reasoning", J. Fluid Control, vol. 20, no. 3, pp. 7-29, Mar. 1990.
- 10 J. A. Limmitt and M. C. Smith, "An accurate low-friction pneumatic position control system", Proc. Inst. Mech. Eng. B, vol. 203, no. 33, pp. 159-165, Apr. 1989.
- 11 A. K. Paul, J. K. Mishra, and M. G. Radke, "Reduced order sliding mode control for pneumatic actuator", IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., vol. 2, pp. 271-276, Sept. 1994.
- 12 T. Noritsugu, "Development of PWM mode electro-pneumatic servo mechanism, part II: Position control of a pneumatic cylinder", J. Fluid Control, vol. 17, no. 2, pp. 7-28, Mar. 1987.
- 13 W. Peirong, D. Yunbo and H. Jianhua. "The story of a Pneumatic PWM Position Control System", ICFP'93, Hangzhou, China, Sept., pp. 499-504, 1993.
- 14 황웅태, 최서호, 이정오, "개폐식 밸브를 사용한 공기압 서보 시스템의 효율적 밸브 개폐 방법에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제15권, 1호, pp. 109-116, 1998.
- 15 최서호 "공기압 서보 시스템의 위치 제어 및 시뮬레이션에 관한 연구", 석사논문, KAIST, 1995.
- 16 R. H. Weston, P. R. Moore. T. W. Thatcher "Computer controlled Pneumatic Servo Drives", Proc. Inst. Mech. Engrs. Vol. 198B. No 14, pp. 225-231, 1984.
- 17 A. Klein. "Einsatz der Fuzzy-Logik zur Adaption der Positionsregelung fluidtechnischer Zylinderantriebe", dissertation. RWTH Aachen, 1993.