

Fuzzy Rule을 이용한 공압 서보 제어 알고리즘의 개발

°박 상 덕* 정 규 원* 염 영 일**

*산업과학기술연구소 **포항공과대학 기계공학과

Development of Pneumatic Servo Control Algorithm using Fuzzy Rule

°Sang-deok Park* Kyu-won Jeong* Young-il Youm**

*Research Inst. of Ind. Sci. and Tech.

**Dept. of Mech. Engg., Pohang Inst. of Sci. and Tech.

ABSTRACT

Pneumatic control system has been used mainly for end-point position control because of the compressibility, viscosity and low output stiffness of air which causes nonlinear flow characteristics.

In this paper, pneumatic position control algorithms using fuzzy rule were developed to achieve faster and more stable response than conventional PI control algorithm. The performances of the proposed algorithms were compared by computer simulations with them of PI controller.

From those simulations it was shown that the proposed algorithms are more efficient about settling time, steady state error and overshoot than PI control algorithm.

1. 서론

공압 실린더를 이용한 부하의 위치제어 시스템은 공기압이 이용되기 시작한 역사에 비해 전기모터나 유압을 이용한 그것들 보다 사용이 미미한 실정이다. 그 이유는 작동유체인 압축공기가 갖는 압축성과 점성등의 비선형성이 크고 실린더 벽면과 피스톤 사이의 마찰력이 크다는 점과 출력경도(output stiffness)가 낮고 응답속도가 늦으며 입력신호에 비례하는 선형적인 유량제어가 어렵다는 점등 때문이다. 반면에 공기압 시스템은 유압시스템에 비해 소형 경량으로 가격이 저렴하고 작동유체의 귀환라인이 불필요하여 회로 구성이 간단하며 공기의 압축성을 이용한 에너지 축적이 용이하고 넓은 온도 영역에서의 사용이 가능하다는 점 등의 장점으로 인해 유압시스템에 비해 그다지 큰 힘을 필요로 하지않거나 고온 다분진 등의 조악한 작업환경 또는, 시스템 전체의 무게가 중요한 곳 등에서의 사용이 날로 증가되고있다.

공기압 서보 시스템은 1950년대 중반 Shearer^{1),2),3)}

에 의해 그 이론적인 체계가 세워진 이래 C. B. Sung⁴⁾, E. Esmailzadeh⁵⁾, S. D. Kim⁶⁾등에 의해 각각 항공기의 방향제어장치, 공기압 현가장치 및 산업용 로봇 등 여러 분야에 적용되었으며 P. W. M 제어⁷⁾ 및 비례-단속 제어⁸⁾등 여러가지 제어 방법이 소개되었다. 그러나 비례-단속 제어기의 경우 오버슈트 없는 응답을 얻기 위해서는 긴 안정시간(settling time)과 상승시간(rising time)을 필요로 하였으며 역으로 상승시간을 빠르게 하기 위해서는 심각한 오버슈트를 감수해야만 했다.

본 연구에서는 공기압 서보시스템의 비선형성등을 감안하여 Fuzzy 이론을 이용한 공기압 서보제어기를 구성하여 빠르고 안정된 응답을 얻을수 있는 Fuzzy rule을 개발하고 개발된 제어기의 성능을 예측하며 기존의 비례-적분 제어기와 그 성능을 비교하고 각각의 단점을 보완한 새로운 제어기를 개발하는 것을 목적으로 한다.

2. 본론

2.1. 공기압 서보시스템의 구성 및 수학적 모델링

본 연구의 해석에 사용된 공기압 서보 시스템은 그림1과 같이 피스톤의 양쪽 단면적이 동일한 실린더

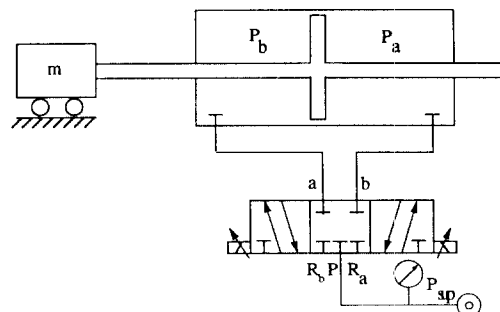


그림1. 공기압 서보 시스템의 개략도

와 양쪽 오리피스 단면적이 서로 대칭인 3위치 5방향 서보밸브와 부하로 구성되어있다.

3위치 5방향 서보밸브의 오리피스 단면적 A_s 는 다음과 같이 입력신호에 대해 선형적으로 변한다고 가정한다.

$$A_s = k_v u \quad (1)$$

여기서 k_v 는 서보밸브의 출력상수(0.00085)이며 u 는 제어입력이다.

오리피스 양단의 압력이 각각 P_u, P_d ($P_u > P_d$)일때 압력차에 의해 오리피스를 통하여 흐르는 유량 W 는 다음과 같다.³⁾

$$W = C_2 A_s \frac{P_u}{\sqrt{T_s}} f_1 \left(\frac{P_d}{P_u} \right) \quad (2)$$

여기서, C_2 는 상수 ($1.53205 \sqrt{^\circ K/sec}$), T_s 는 오리피스 내의 정체온도이며 $f_1(P_d/P_u)$ 는 유량함수³⁾로써 다음과 같다.

$$f_1 \left(\frac{P_d}{P_u} \right) = 1 \quad \frac{P_d}{P_u} < P_{cr} \text{일때} \\ = \frac{C_1}{C_2} \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \quad \frac{P_d}{P_u} \geq P_{cr} \text{일때} \quad (3)$$

여기서, P_{cr} 은 임계압력비(0.528), C_1 는 상수($0.3965 \sqrt{^\circ K/sec}$)이며, κ 는 공기의 비열비(1.4)이다. 그러므로 그림1의 시스템에서 밸브입력신호가 (+)일 경우의 유량 및 유출입 방향은 다음과 같다.

$$W_a = C_2 A_s \frac{P_{sup}}{\sqrt{T_a}} f_1 \left(\frac{P_a}{P_{sup}} \right) \quad P_{sup} > P_a \text{ 일때} \\ (P \rightarrow a) \\ = C_2 A_s \frac{P_a}{\sqrt{T_a}} f_1 \left(\frac{P_{sup}}{P_a} \right) \quad P_{sup} < P_a \text{ 일때} \\ (a \rightarrow P) \\ W_b = C_2 A_s \frac{P_b}{\sqrt{T_a}} f_1 \left(\frac{P_{am}}{P_b} \right) \quad P_b > P_{am} \text{ 일때} \\ (b \rightarrow R_a) \\ = C_2 A_s \frac{P_{am}}{\sqrt{T_a}} f_1 \left(\frac{P_b}{P_{am}} \right) \quad P_b < P_{am} \text{ 일때} \\ (R_a \rightarrow b) \quad (4)$$

여기서 P_{sup} 는 공급압력($6kg_f/cm^2$), P_{atm} 은 대기압력($1kg_f/cm^2$)이며 T_a 는 대기온도로서 밸브 오리피스내의 정체온도(T_s)가 대기온도와 같다고 가정한 결과이다. 식(4)와 같은 유량이 실린더내로 유출입될 때 각 실린더 챔버내의 압력변화는 다음과 같다.

$$\dot{P}_a = \frac{\kappa R T_a}{g(V_i + A_c x)} W_a - \frac{\kappa A_c}{V_i + A_c x} P_a \dot{x} \quad (5)$$

$$\dot{P}_b = \frac{\kappa R T_a}{g(V_i - A_c x)} W_b + \frac{\kappa A_c}{V_i - A_c x} P_b \dot{x}$$

여기서 R 은 공기의 기체상수($2.86 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}^2 \text{ } ^\circ K$), g 는 중력가속도(981 cm/sec^2), V_i 는 실린더 초기체적(125.6 cm^3)이며 A_c 는 실린더 단면적(12.56 cm^2)이다.

피스톤과 부하의 운동에 의한 힘과 운동의 관계는 다음과 같다.

$$m_{eff} \ddot{x} = A_c (P_a - P_b) - F_f \quad (6)$$

여기서 m_{eff} 는 피스톤과 부하의 무게를 합한 유효질량(10 kg)이며 F_f 는 총마찰력으로서 본 해석에서는 다음과 같이 모델링하였다.

$$F_f = f_c \quad \text{for } \dot{x} = 0 \\ = f_c + f_v \dot{x} \quad \text{for } \dot{x} \neq 0 \quad (7)$$

여기서 f_c 는 쿨롱마찰력(2.5 kgf)이며 f_v 는 점성마찰계수($0.2 \text{ kgf} \cdot \text{sec} / \text{cm}$)이다.

식(5)와 식(6)을 Runge Kutta 4차 수치 적분으로 계산하여 x, \dot{x}, P_a, P_b 등의 값을 구한다.

2-2. 제어 알고리즘(Control Algorithm)의 구성

본연구에서는 다음과 같은 세가지 경우에 대한 제어 알고리즘을 구성하였으며 각각의 경우에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

i) 비례-적분제어

ii) Fuzzy 제어

iii) 비례-적분제어를 포함하는 Fuzzy 제어

각 경우에 대한 제어시스템의 구성은 다음과 같다.

i) 비례-적분제어 시스템의 구성

비례-적분제어시의 제어입력은 다음과 같다.

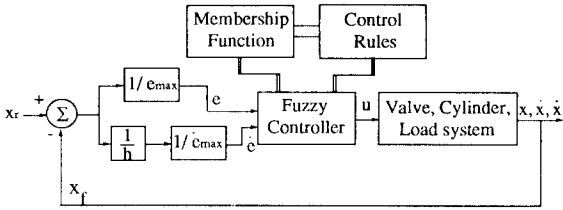
$$u = k_p e + k_i \int e dt \quad (8)$$

여기서 k_p 는 비례이득값(proportional gain), k_i 는 적분이득값(integral gain)이며 e 는 위치오차로서 기준입력(reference input) x_r 과 궤환위치값(feedback position value) x_f 의 차이이다.

ii) Fuzzy 제어 시스템의 구성

Fuzzy 제어 이론은 인간의 지각적인 판단을 자동 제어 시스템에 적용한 것으로 L. A. Zadeh⁹⁾에 의해 그 이론이 세워진 이래 Y. F. Li¹⁰⁾는 Fuzzy 제어를 구성하여 서보모터의 위치제어 시뮬레이션을 통한 제어기의 성능을 예측하였으며 H. Y. Lee¹¹⁾등은 연속주조시 주형의 탕면제어 시스템에 Fuzzy 제어를 응용하는 등 새로운 제어이론으로 정착되기에 이르렀다.

본 연구에서는 Fuzzy 제어를 응용한 공압실린더의 위치제어 시스템을 구성하였으며 그 블록선도는 그림 2와 같다.



x_r ; reference input, x_f ; feedback position value
 e_{max} ; maximum value of error
 \dot{e}_{max} ; maximum value of error change
 u ; control input
 h ; sampling time

그림2. Fuzzy 제어기의 블록선도

기존 위치입력을 x_r , 궤환위치를 x_f 라고 할때 오차 e 는 다음과 같이 계산된다.

$$e = (x_r - x_f) / e_{max} \quad (-1 \leq e \leq 1) \quad (9)$$

여기서 e_{max} 는 최대 위치오차의 크기를 1 로 표준화(normalization)하기 위한 값으로 기준입력(reference input)의 최대값과 같다. 시간 t_1 일때의 오차를 e_1 , t_2 일때의 오차를 e_2 라고 하면 오차 변화량 \dot{e} 는 다음과 같다.

$$\dot{e} = (e_1 - e_2) / \dot{e}_{max} \quad (-0.6 \leq \dot{e} \leq 0.6) \quad (10)$$

여기서 \dot{e}_{max} 는 \dot{e} 의 최대치를 0.6 이하로 만들어 주기 위한 값이며 특별한 의미는 가지지 않는다.

Fuzzy 제어기는 식(8)과 식(9)에 의한 오차 e 와 오차변화량 \dot{e} 로 제어입력을 계산하며 본 연구에 사용된 Membership함수와 Fuzzy 제어규칙은 각각 그림4 및 표1과 같다.

Fuzzy 제어규칙의 갯수가 n 일 때, 오차 e 및 오차 변화량 \dot{e} 에 대한 Membership 함수의 값 z 와 제어입력 u 는 각각 다음과 같다.

$$z_i = \min [\text{Membership}(e_i), \text{Membership}(\dot{e}_i)] \quad (11)$$

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n (z_i \times w_i)}{\sum_{i=1}^n z_i} \quad (12)$$

여기서 w_i 는 각 Fuzzy 규칙의 가중치(weighting factor)로서 표1에서의 PL, PB, ..., NL 등의 값이다.

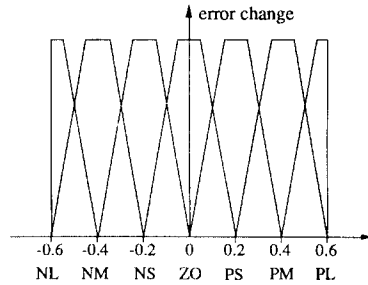
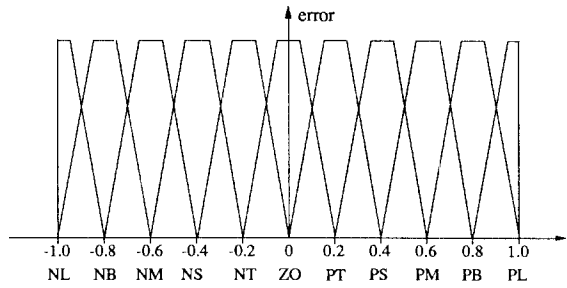


그림3. 본 연구에 사용된 membership 함수 및 Fuzzy 변수

표1. Fuzzy 규칙 결정표

error	error change						
	NL (-0.6)	NM (-0.4)	NS (-0.2)	ZO (0)	PS (0.2)	PM (0.4)	PL (0.6)
NL(-1.0)	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL
NB(-0.8)	NB	NB	NB	NL	NL	NL	NL
NM(-0.6)	NM	NM	NM	NB	NB	NB	NB
NS(-0.4)	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
NT(-0.2)	NS	NT	NT	NS	NM	NB	NL
ZO(0)	PL	PM	PS	ZO	NS	NM	NL
PT(0.2)	PL	PB	PM	PS	PT	PT	PS
PS(0.4)	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM
PM(0.6)	PB	PB	PB	PB	PM	PM	PM
PB(0.8)	PL	PL	PL	PL	PB	PB	PB
PL(1.0)	PL	PL	PL	PL	PL	PL	PL

Control Input

Control Input : PL = 1.0, PB = 0.8, PM = 0.5,
 PS = 0.3, PT = 0.1
 NL = -1.0, NB = -0.8, NM = -0.5,
 NS = -0.3, NT = -1.0

표1. Fuzzy 규칙 결정표

iii) PI - Fuzzy 제어 시스템의 구성

비례-적분제어와 Fuzzy 제어를 동시에 사용하는 제어기의 블록선도는 다음과 같다.

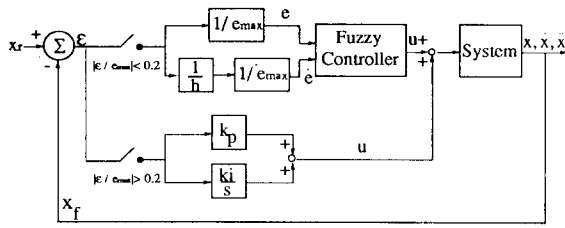


그림4. PI-Fuzzy 제어기의 블록선도

즉, 위치오차의 절대값이 0.2보다 클때는 비례-적분제어가 수행되고 0.2보다 작을때는 Fuzzy 제어가 수행되도록 하였다. 이때 Fuzzy 제어기의 Membership 함수와 규칙결정 표의 값은 각각 그림과 표1의 20% 값이다.

3. 시뮬레이션 및 그 결과

본 연구에서 사용된 공기압 서보시스템이 빠르고 안정된 응답을 얻을 수 있는 제어이론을 도출하기 위해 전술한 바와같은 Fuzzy 이론을 이용한 제어기를 구성하였으며 기존의 비례-적분제어기와 그 성능을 비교하고 각각의 장점을 살린 새로운 제어이론을 구하는 것이 시뮬레이션의 목적이며 PI 제어, Fuzzy 제어 및 PI-Fuzzy 제어시의 시뮬레이션 결과는 각각 다음과 같다.

3.1. 비례-적분제어

먼저 그림1과 같이 구성된 시스템에 대해 5cm의 계단입력(step input)을 주어서 비례-적분제어를 수행하였으며 그 결과는 그림5와 같다.

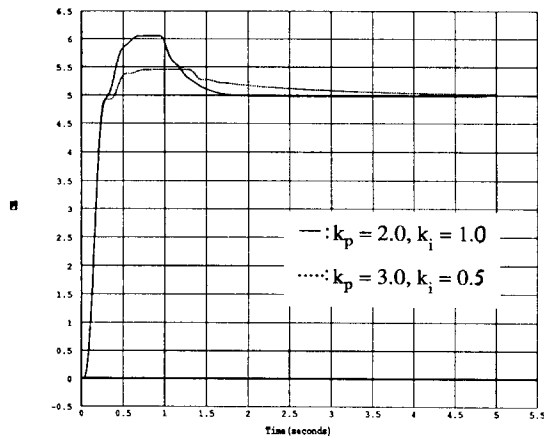


그림5. 이득값(Gain) 변화에 따른 PI 제어기의 응답

그림5의 결과에서 보는 바와같이 비례-적분제어 수행시는 이득값(gain)에 따라서 큰 오버슈트(overshoot)이 발생하였으며 한번 발생한 오버슈트는 마찰력이 크므로 인해 쉽게 없어지지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 오버슈트를 피하기 위해 k_p 및 k_i 를 작게 했을때는 상승시간(rising time)과 안정시간(settling time)이 커진다. 그림6은 $k_p = 3.0, k_i = 0.5$ 일때 각각 1cm, 3cm, 5cm의 계단입력을 주었을 때의 비례-적분 응답으로 매 경우마다 비슷한 크기의 오버슈트가 발생하였다.

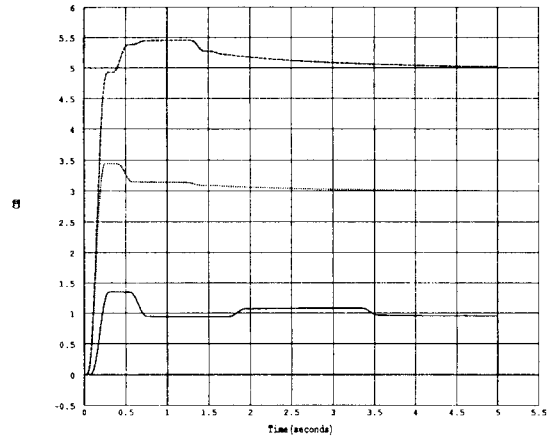


그림6. 기준입력 변화에 따른 PI 제어기의 응답 ($k_p = 3.0, k_i = 0.05$)

3.2 Fuzzy 제어

그림7은 그림2와같이 구성된 Fuzzy 제어기에 그림 3 및 표1과같은 Membership 함수와 Fuzzy 규칙을 적용했을 때 1cm, 3cm, 5cm의 계단입력에 대한 응답이며 그림8은 그때의 제어입력(control input) 곡선이다.

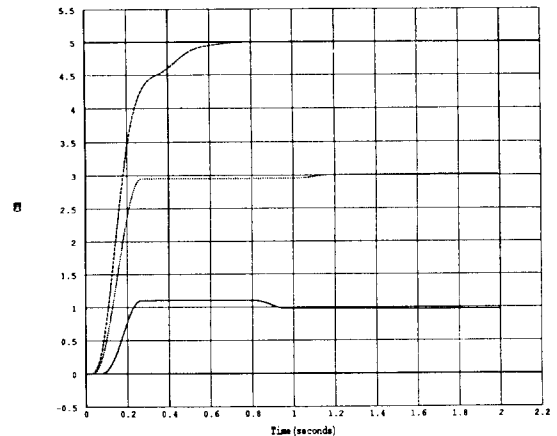


그림7. Fuzzy 제어기의 기준입력 변화에 따른 응답

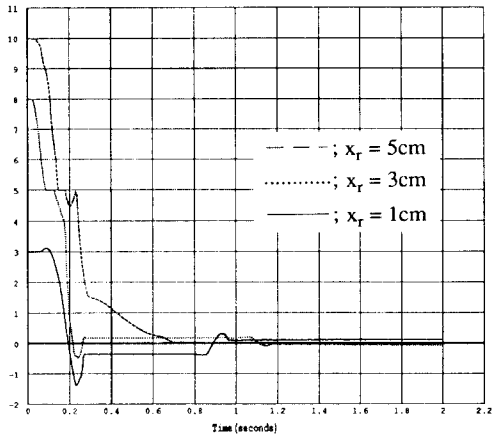


그림8. Fuzzy 제어기의 제어입력(control input)

그림7의 결과로부터 Fuzzy 제어를 수행했을 때가 PI 제어시 보다 상승시간이 다소 길어지나 오버슈트는 작아지고 안정시간도 짧아짐을 알 수 있다. 특히 기준 입력이 5cm 일 때는 0.75초에서 완전히 안정(settling) 됨을 알 수 있다. 그러나 기준입력이 1cm일 때는 오버슈트가 발생하였다. 그 이유는 기준입력이 작을 때는 위치 오차도 작아져서 상대적으로 Fuzzy 규칙 수가 적어지기 때문이다. 예를들어 $e_{max} = 5\text{ cm}$ 이고 $x_r = 1\text{ cm}$ 일 때 위치오차 e 는 $-0.2 \leq e \leq 0.2$ 이다. 따라서 표1에서 적용되는 규칙 수는 불과 20개 정도이다. 또한 $x_r = 3\text{ cm}$ 일 때 발생한 언더슈트는 Fuzzy 제어기 내에 적분기능이 없으므로 인해 정상상태에 도달하는데 긴 시간이 걸렸다. 이런점은 Fuzzy 제어이론의 단점으로 생각되며 이를 보완하기 위해 Fuzzy 제어규칙을 너무 많이 만들면 컴퓨터 제어시 판단과 계산이 너무 많은 시간이 필요되므로 비합리적이고, 경우에 따라서는 입력변화 등의 조건 변화에 따라 규칙을 바꾸어 주어야 하는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 비례-적분 제어와 Fuzzy 제어를 동시에 사용하는 제어기를 제안하였으며 그 결과는 다음과 같다.

3.3 PI - Fuzzy 제어

큰 이득값의 비례-적분 제어시 상승시간이 짧다는 장점과 Fuzzy 제어시 안정상태(steady state)에서의 응답성이 좋다는 장점을 살리기 위해 그림4와같은 PI 제어와 Fuzzy 제어를 동시에 수행하는 제어기를 제안하였다. 즉, $e_{max} = 5\text{ cm}$ 일 때, 오차 e 가 0.2보다 클 때는 PI 제어가 수행되고 0.2보다 작을 때는 Fuzzy 제어가 수행되도록 하였으며 그때의 Fuzzy 규칙표는 표2와 같다.

그림9는 $k_p = 4.0$, $k_i = 0.023$ 이고 Fuzzy 규칙이 표2와 같을 때 각각 1cm, 3cm, 5cm의 계단입력에 대한 PI - Fuzzy 제어 위치응답이다.

표2. PI-Fuzzy 제어시의 Fuzzy 규칙

error	error change						
	-0.12	-0.08	-0.04	0.0	0.04	0.08	0.12
-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
-0.16	-0.16	-0.16	-0.16	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
-0.12	-0.1	-0.1	-0.1	-0.16	-0.16	-0.16	-0.16
-0.08	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
-0.04	-0.06	-0.06	-0.1	-0.06	-0.1	-0.16	-0.2
0.0	0.2	0.1	0.06	0.0	-0.06	-0.1	-0.2
0.04	0.2	0.16	0.1	0.06	0.1	0.06	0.06
0.08	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0.12	0.16	0.16	0.16	0.16	0.2	0.2	0.2
0.16	0.2	0.2	0.2	0.2	0.16	0.16	0.16
0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
control input							

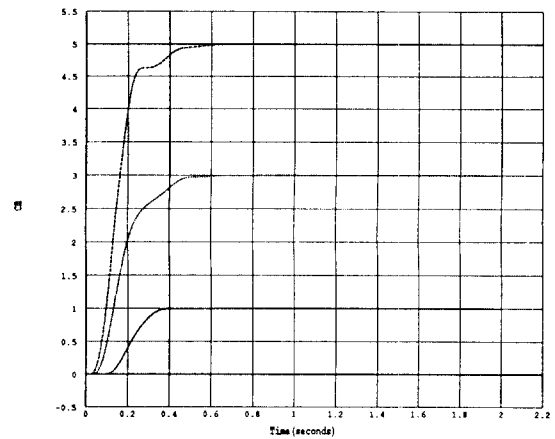


그림9. PI - Fuzzy 제어기의 기준입력 변화에 따른 응답

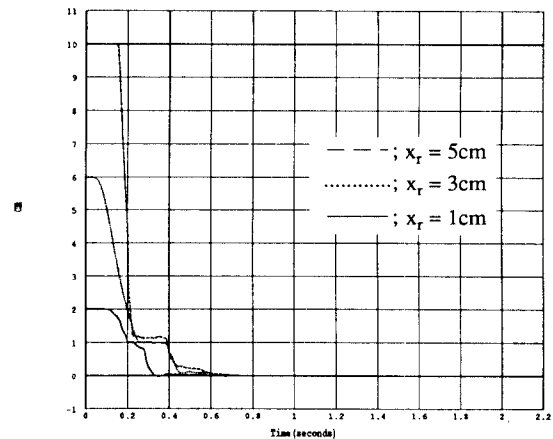


그림10. PI - Fuzzy 제어기의 제어입력

즉, 기준입력이 5cm일 경우는 4cm까지는 PI, 나머지 1cm는 Fuzzy 제어로 제어되고 기준입력이 3cm일 경우는 2cm까지는 PI, 나머지 1cm는 Fuzzy 제어로 제어되며 기준입력이 1cm일 경우는 Fuzzy 제어로만 제어된다. 그림9에 나타난 결과에 의하면 5cm, 3cm 및 1cm의 기준입력에 대해 각각 0.65초, 0.7초 및 0.4초 만에 안정(settling)되고 오버슈트나 정상상태 오차(steady state error)도 없음을 알 수 있다. 그림10은 그림9의 각 경우에 대한 제어입력(control input)이다.

4. 결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 공기압 실린더의 위치제어를 위한 Fuzzy 제어 및 PI - Fuzzy 제어 알고리즘(algorithm)을 제안하였으며 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 이들을 기존의 PI 제어기와 그 성능을 비교하였다.
- 2) Fuzzy 제어만으로 공압 시스템의 위치를 제어할 경우 최대오차(e_{max})에 비해 기준입력이 작을 때는 Fuzzy 규칙수가 상대적으로 적어져서 좋은 응답을 얻기가 어렵다는 것을 알았다.
- 3) PI 제어와 Fuzzy 제어를 동시에 사용하는 제어가 PI 또는 Fuzzy 제어만을 사용한 제어기 보다 안정 시간이 빠르고 정상상태 오차가 작은 응답을 보였다.
- 4) 향후 연구가 계속되어야 할 부분은 실험 등을 통한 방법으로 마찰력 및 기타 변수를 정확히 모델링하고, 부하 및 기타 조건 변화에 따른 응답을 비교하며 실제 제어기로서의 정확성, 안정성 및 적용성 등을 실험을 통해 검증하는 것이다.

참고문헌

- [1] J. L. Shearer, "Study of Pneumatic Process in the Continuous Control of Motion with Compressed Air-I & II, "Trans. of ASME, pp233-242, pp243-249, Feb. 1956.
- [2] J. L. Shearer, "Nonlinear Analog Study of a High-Pressure Pneumatic Servomechanism, "Trans. of ASME, pp456-472, Apr. 1957.
- [3] F. D. Ezekiel, J. L. Shearer, "Pressure-Flow Characteristics of Pneumatic valves, "Trans. of ASME, PP1577-1590, Apr. 1957.
- [4] C. B. Sung, L. B. Taplin, "Aerospace Pneumatic Control Systems", J. of Engg. for Ind., PP135-150, May 1963.
- [5] E. Esmailzadeh, "Servovalve-Controlled Pneumatic Suspensions", J. of Mech. Engg. Sci., vol 21, No 1, PP7-18, 1979.

- [6] S. D. Kim, "Application of Pneumatic On-off Servo to the Position Control of an Industrial Robot, "M. S. Thesis, Dept. of Mech., Sci, KAIST, 1981.
- [7] C. H. Hyun, "Positioning Control of an Air Cylinder by P.W.M. Method", M. S. Thesis, Dept. of Mech. Engg., Yeungnam Univ., 1989.
- [8] S. D. Park, "Development of Pneumatic Servo System with Proportional plus On-Off Control for the Industrial Robots", M. S. Thesis, Dept. of Mech. Engg., POS-TECH, 1990.
- [9] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets", Inform. Contr., vol. 8, pp338-353, 1965.
- [10] Y. F. Li and C. C. Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for servo Systems", Int. Conf. on Robotics and Automation, IEEE, pp65-72, Apr. 1988.
- [11] H. Y. Lee, K. N. Peak and D. J. Lim, "Fuzzy Control of Mold Level in the Continuous Casting System", Technical report, RIST, vol. 5, No. 2, pp277-282. 1991.