

퍼지 PI를 이용한 배수갑문용 유압실린더 제어기 설계

Design of Control System for Hydraulic Cylinders of a Sluice Gate Using Fuzzy PI Algorithm

혜 무은* · 최철희* · 최병재* · 홍춘표* · 류석환* · 권영태**

Hui Wuyin*, Chul-Hee Choi*, Byung-Jae Choi*, Chun-Pyo Hong*, Seog-Hwan Yoo* and Yeung-Tae Kwon**

* 대구대학교 전자공학과

** 한국기계연구원

요 약

수문 제어의 주요기술은 두 개의 실린더가 하나의 수문을 동시에 10[m] 이상 들어 올리는 행정 동안 정밀하게 제어되도록 하여 동기 작동 시키는 것이다. 실린더에 공급되는 유량 및 압력이 일정하지 않으며, 실린더 피스톤의 비선형적인 마찰력에 의해 두 개의 실린더 위치 오차가 발생하게 되면 수문의 개폐 시 비틀림 현상을 야기 시켜서 수문의 마모를 발생시키고, 수문의 개폐작동 불능 현상을 만들기도 한다. 배수갑문용 유압실린더의 위치 및 동기 제어기를 설계하기 위하여 fuzzy PI 제어기를 이용하여 두 개의 실린더의 위치 및 동기제어기를 설계하고, 시뮬레이션을 통해 효용성을 제시한다.

키워드 : 유압실린더, 퍼지PI제어기, 동기제어기, 배수갑문, 위치제어

Abstract

A main technology of opening and closing a sluice gate is accurate synchronous and position control for the two cylinders when they are moving with the sluice gate together over 10[m]. Since the supply flow and supply pressure of cylinders are not constant and a nonlinear friction force of the piston in cylinders exists, a difference will be made between the displacement of two cylinders. This difference causes the sluice gate to deform and abrade, and even it may be out of order. In order to solve this problem we design two kinds of fuzzy PI controllers. The former is for a position control of two cylinders, the latter is for their synchronous control. We show some simulation results compare the performance of fuzzy PI controller to the conventional PID controller.

Key Words : Hydraulic Cylinders, Fuzzy PI Controller, Synchronous Controller, Sluice Gate Position Controller

1. 서 론

유압기술은 액체를 동력전달의 매체로 사용하는 기술로, 동력원이나 동력전달기구로 물을 이용하는 기본개념에서 발전되었다. 처음에는 군사용의 목적으로 제 1차 세계대전, 제 2차 세계대전에 이용되면서 우수한 성능을 평가받고 고도로 발전하여 산업용 유압기술의 기반이 되었다. 산업부흥에 따른 설비의 근대화, 자동화에 수반되어 유압동력의 수요가 급속히 증대 했으며 다양한 분야에서 그 응용이 확대되었고 생산성의 향상, 작업의 효율성과 정확성 향상을 위하여 유압장치 자동화에 대한 연구와 장비 개발이 이루어졌다. 유압 시스템 자동화는 유압시스템의 비선형성, 작업 부하에 따른 부하변동, 공급 압력 변동 등의 파라미터 변화 등에 강인한 제어기의 설계가 요구된다. [6]

최근 퍼지제어와 신경망 제어기법이 여러 지능제어기법 중 활용도 측면에서 관심을 모으고 있으며, 퍼지제어 이론은 중요한 제어이론으로 부상하여 산업체에서 널리 적용되고 있다.

배수갑문용 유압실린더는 독일, 프랑스, 미국, 일본 등의 기계 산업 선진국에서 원천기술을 독점하고 세계시장을 주도하고 있다. 최근 동남아시아와 중국 등의 신흥시장에서 상대적으로 가격경쟁력이 우수한 국내업체의 제품에 대한 수요가 발생하기 시작하였고, 우리나라도 성장의 발판을 형성할 수 있는 기술개발이 필요하게 되었다. 수문개폐의 주요기술은 각 견인력 250톤급 두 개의 실린더가 300톤급 하나의 수문을 동시에 10[m]이상 들어 올리는 행정 동안 정밀하게 제어되도록 하여 동기 작동 시키는 것이다. 하지만 실린더에 공급되는 유량 및 압력이 일정하지 않고, 실린더 피스톤의 비선형적인 마찰력에 의해 두 개의 실린더 로드의 위치 오차가 발생하게 된다. 로드의 위치 오차가 커지게 되면 수문의 개폐 시 비틀림 현상을 야기 시키고, 이로 인한 수문의 마모를 발생시키고, 수문의 개폐작동 불능현상을 일으키기도 한다. 따라서 시스템에 따라 모든 환경에서 작동

접수일자 : 2009년 11월 13일

완료일자 : 2010년 1월 27일

본 연구는 2008년도 지식경제부 부품·소재기술개발사업 지원으로 수행되었습니다.

이 보장되어야 하며 적용 시스템에 따라 특별한 설계가 고려되도록 구성되어야 한다. [3]

본 논문에서는 두 실린더의 위치 제어 및 동기제어를 위하여 퍼지 PI 제어를 사용하는 제어기 구조를 제안한다. 아울러 제안한 제어기를 사용하여 배수갑문의 위치 및 동기 제어에 대하여 시뮬레이션을 수행하고, 그 효용성을 제시한다.

2. 유압시스템 모델링

유압서보시스템의 개략적인 구성은 [그림 1]과 같다. 주 시스템의 입력신호는 증폭기를 거쳐 서보밸브에 신호를 보내준다. 신호의 크기에 따라 노즐-플래퍼 운동이 발생하고, 스프링의 움직임이 생겨 실린더에 공급되는 유량의 변화를 가져온다. 유량의 변화로 각 격실의 압력변화가 일어나게 되고, 이로 인해 실린더가 운동한다.

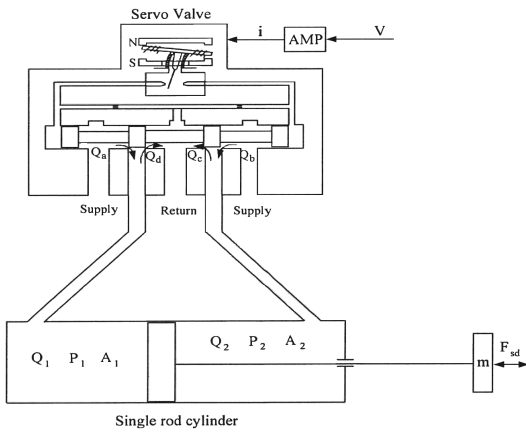


그림 1. 유압서보시스템의 구성
Fig. 1. Hydraulic servo system

제어 대상 시스템의 모델을 구하기 위하여 다음과 같이 가정한다. 공급압력 P_s 는 일정하고, 귀환압력 P_t 는 0이다. 서보밸브 오리피스 개구면적은 밸브 스프링이며, 변위에 비례적인 특성을 가진다. 실린더의 각 실 내의 압력분포는 균일하고, 공동현상은 발생하지 않는다. 서보밸브는 임계중립밸브이며, 쌍대적, 대칭적이고, 서보밸브 실린더의 누유는 무시할 정도의 적은 양이다.

이제 시스템의 모델을 구한다. 먼저 실린더의 서보밸브 방정식은 아래 식 (1)과 같다.

$$x_{sv} = K_{sv}i \quad (1)$$

여기서, x_{sv} 는 밸브스풀의 위치, K_{sv} 는 밸브게인, i 는 입력전류를 나타낸다. 오리피스의 유량방정식은 식 (2)와 같이 피스톤의 팽창행정과 수축행정에 따라 얻어진다. 여기서 Q_L 은 부하유량, K_q 는 유량계수를 나타낸다.

$$Q_L = K_q x_{sv} \quad (2)$$

연속방정식은 정상유동의 관로에서 모든 단면의 질량유량이 같으므로 식 (3)과 같다. 여기서 P_L 은 부하압력, A_1 은 실린더 헤드부 격실의 단면적, A_2 는 실린더 로드부 격실

의 단면적, x_p 는 실린더 로드의 이동거리, C_{tp} 는 총 누설계수, $A_p = \frac{A_1 + A_2}{2}$ 로 실린더의 피스톤의 평균단면적을 나타낸다.

$$P_L = \frac{1}{C_{tp}}(K_q x_{sv} - A_p \dot{x}_p) = \frac{K_q}{C_{tp}} x_{sv} - \frac{A_p}{C_{tp}} \dot{x}_p \quad (3)$$

운동방정식은 뉴턴의 제2법칙을 적용하여 다음의 식 (4)와 같이 유도된다.

$$M_t \ddot{x}_p = P_1 A_1 - P_2 A_2 - B_p \dot{x}_p - F_f(v) \quad (4)$$

여기서 P_1 과 P_2 는 유압실린더 좌우 양실의 압력, B_p 는 댐핑을 고려한 마찰계수, $F_f(v)$ 는 비선형 마찰력을 나타낸다. 부하와 유체체적의 총질량을 결정하여 시스템 파라미터 값을 정한다. [3]

제어대상 시스템은 밸브, 실린더, 부하에 관한 상태방정식으로, 상태변수는 다음과 같다.

$$x_1 = x_p, \quad x_2 = \dot{x}_p, \quad x_3 = P_L, \quad u = x_{sv} \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 상태방정식을 구할 수 있다. M_t 는 총 질량, β 는 질량계수, V_t 는 밸브와 실린더 실의 총 부피이다.

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{M_t}(A_p x_3 - B_p - F_f(v)) \quad (6)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{4\beta}{V_t}(-A_p x_2 - C_{tp} x_3) + \frac{4\beta}{V_t}(K_q x_{sv})$$

출력방정식은 다음 식 (7)과 같다.

$$y = x_1 \quad (7)$$

3. 유압실린더를 위한 제어기 구현

3.1 전체 제어기 구조

본 논문에서 제안하는 전체 시스템의 제어기 구조는 수문 개폐를 위한 두 개의 유압실린더의 위치 및 동기 제어이다. 유압실린더는 퍼지시스템을 이용하여 [그림 8]에서와 같이 유압 실린더의 제어기를 설계하고, 각 실린더는 장착된 위치 센서의 신호를 피드백 하여 퍼지 PI에 의해 1차로 위치 제어를 한다. 그리고나서 각 실린더의 로드 위치 차이가 발생 할 경우 퍼지 PI 동기 제어기에 의해 2차적으로 위치 제어를 한다.

위치 및 동기 제어를 위한 입출력 함수는 다음과 같다. 여기서 r 은 기준값 신호이다.

Position controller:

$$\text{Input} = e_p, \quad \dot{e}_p$$

$$\text{Output} = y_p$$

$$e_p = r - x_p$$

$$\dot{e}_p = \frac{de_p}{dt}$$

Synchronous controller:

$$\text{Input} = e_s, \dot{e}_s, d$$

$$\text{Output} = y_s$$

$$e_s = \begin{cases} [x_p(a) - x_p(b)] * \text{sign}(\dot{r}) & (e_s > 0) \\ 0 & (e_s \leq 0) \end{cases}$$

$$\dot{e}_s = \frac{de_s}{dt}$$

$$d = r - x_p$$

$$\mu_s = (\text{output of FLC}) * \text{sign}(\dot{r})$$

3.2 위치 제어를 위한 퍼지 PI 제어기 구현

각 실린더의 위치 제어를 위한 입력변수로는 오차와 오차의 변화를 사용한다. 멤버십 함수는 [그림 2] 와 같다.

오차와 오차의 변화율에 대하여 각각 NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL의 7개 멤버를 가진다.

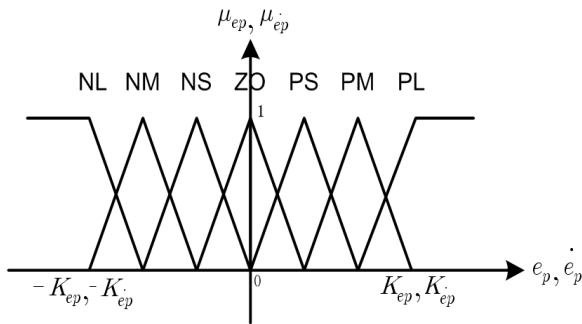


그림 2. 위치 제어를 위한 입력신호 'e_p'와 'e_p_dot'의 멤버십 함수

Fig. 2. Membership functions of input "e_p" and "e_p_dot" for position controllers.

[그림 3]은 위치 제어기를 위한 출력 멤버십 함수를 나타낸다. 퍼지집합의 멤버로는 NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL의 7개를 갖는다.

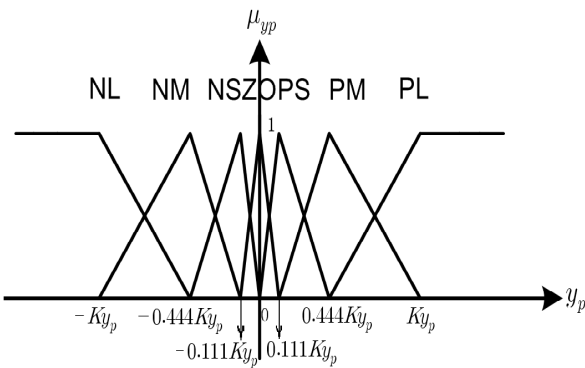


그림 3. 위치 제어를 위한 출력의 멤버십 함수

Fig. 3. Membership functions of output for position controller.

이 때 제어 규칙표는 표 1과 같이 설정하였다. 표1은 위치를 위한 입력변수인 오차와 오차의 변화에 대한 제어규칙을 나타낸다.

표 1. 위치 제어를 위한 퍼지 PI 제어 규칙표
Table 1. Rules of fuzzy PI position controller

		de/dt						
		NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
e	NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZO
	NM	NL	NL	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NS	NL	NM	NM	NS	ZO	ZO	PS
	ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
	PS	NS	ZO	ZO	PS	PM	PM	PL
	PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PL	PL
	PL	ZO	PS	PM	PL	PL	PL	PL

3.3 동기 제어를 위한 퍼지 PI 제어기 구현

동기 제어를 위한 퍼지 PI 제어기의 입력변수는 그림 4, 그림 5 및 그림 6과 같은 멤버십 함수를 가진다. 오차에 대하여 ZO, PS, PM, PL 4개의 멤버를 가지고, 오차의 변화율에 대한 멤버는 [그림 5]와 같이 NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL 7개 멤버를 가진다. 그리고 실린더 위치 차이에 대하여 P, ZO, N 3개의 멤버를 가진다.

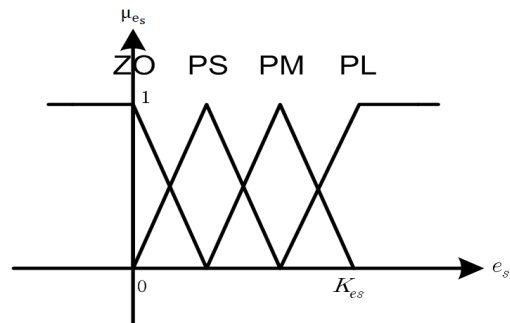


그림 4. 동기 제어를 위한 입력 "e_s"의 멤버십 함수

Fig. 4. Membership functions of the input "e_s" for synchronous controller.

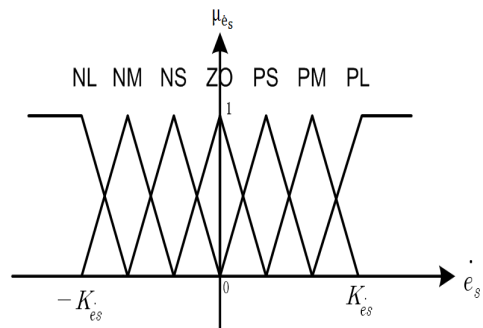


그림 5. 동기 제어를 위한 입력 "e_s_dot"의 멤버십 함수

Fig. 5. Membership functions of the input "e_s_dot" for synchronous controller.

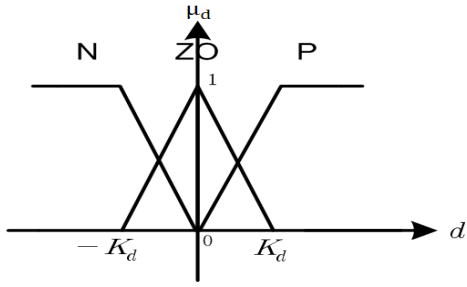


그림 6. 동기 제어를 위한 입력 "d"의 멤버십 함수
Fig. 6. Membership functions of the input "d" for synchronous controller.

그림 7은 동기 제어를 위한 퍼지 PI 제어기의 출력 멤버십 함수를 나타낸다. 퍼지집합의 멤버로는 NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL의 7개를 갖는다.

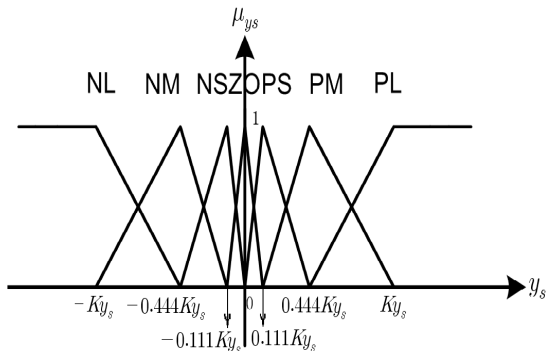


그림 7. 동기 제어를 위한 출력의 멤버십 함수
Fig. 7. Membership functions of output for synchronous controller.

이 때 제어규칙은 표 2와 같다. 동기 제어를 위한 입력변수인 오차와 오차의 변화율에 대한 제어규칙을 나타낸다. 제어규칙에서 “기준값-이동값위치”가 Zero, Negative일 때, 출력은 Zero이고, Positive일 때, 출력은 NS, ZO, PS, PM, PL이다.

표 2. 동기 제어를 위한 퍼지 PI 제어 규칙표
Table 2. Rule of fuzzy PI Synchronous controller

		de/dt(Reference-displacement=N)						
e		NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PL	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
			de/dt(Reference-displacement=ZO)					
e		NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PL	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
			de/dt(Reference-displacement=P)					
e		NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
	ZO	NS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
	PS	NS	ZO	ZO	PS	PM	PM	PL
	PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PL	PL
	PL	ZO	PS	PM	PL	PL	PL	PL

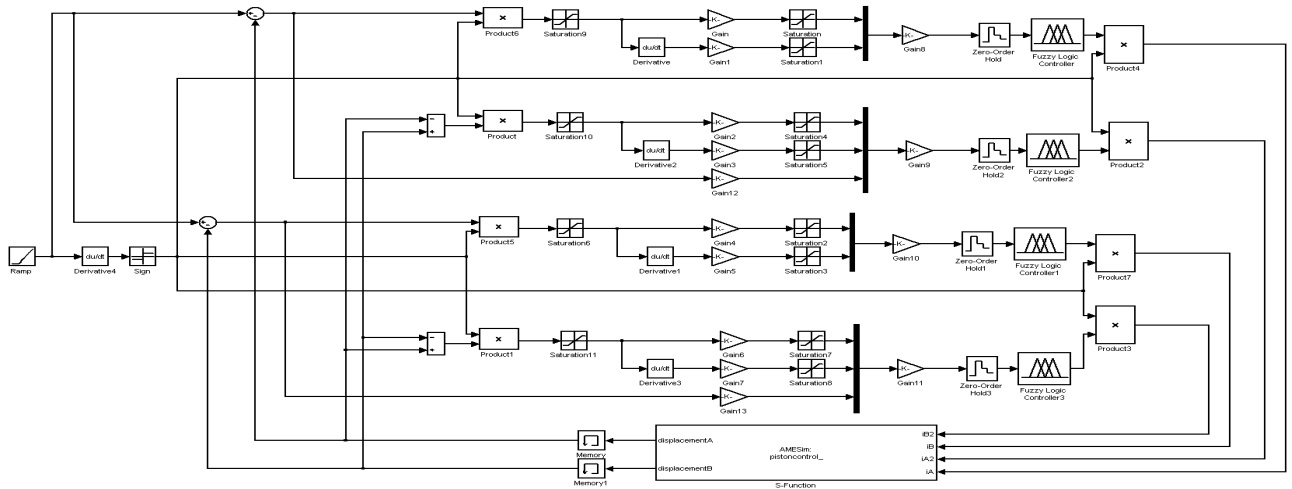


그림 8. 퍼지 PI 제어 시스템의 구조
Fig. 8. Structure of Fuzzy PI Control System

4. 시뮬레이션

유압시스템의 위치 및 동기제어기 성능을 평가하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션 파라미터는 표 3과 같다.

제한한 제어 알고리즘의 효용성을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 설계 사양에서 요구된 성능은 다음과 같다: 실린더가 4.7[mm/s] 정격 속도로 전진 할 경우에 두 실린더의 로드 위치 차이가 10[mm] 이하가 되어야 한다.

여기서는 비퍼지화 알고리즘으로 식 (8)과 같이 무게중심법을 사용하였다.

$$u = \frac{\sum(\text{membership value}) \times (\text{member value})}{\sum(\text{membership value})} \quad (8)$$

표 3. 시뮬레이션에 사용한 시스템 파라미터
Table 3. System parameters for simulation

Item	Parameter	Index	Value	Unit
Servo valve	Valve gain	K_{sv}	3.3867×10^{-5}	m/mA
	Rated current	i_{rated}	1,500	mA
	Rated flow rate	Q_{rated}	160	L/min
Single rod cylinder A	Head-side piston area	A_1	8.5×10^{-3}	m^2
	Rod-side piston area	A_2	17.38×10^{-3}	m^2
	coulomb friction	f_c	214,780	N
	static friction	f_s	456,240	N
Single rod cylinder B	Head-side piston area	A_1	8.52×10^{-3}	m^2
	Rod-side piston area	A_2	17.36×10^{-3}	m^2
	coulomb friction	f_c	197,690	N
	static friction	f_s	361,170	N
System	Supply pressure	P_s	31.5	MPa
	Oil density	ρ	897.03	kg/m^3
	Bulk modulus	β_e	706.08	MPa
	Total mass	M_t	3.0×10^5	kg
	Viscous damping coefficient	B_p	10,000	$Pa \cdot sec$
Fuzzy PI position controller	e_p Gain	Ke_p	0.04	
	\dot{e}_p Gain	$K\dot{e}_p$	$2 \times e^4$	
	y_p Gain	Ky_p	80	
Fuzzy PI synchronous controller	e_s Gain	Ke_s	0.006	
	\dot{e}_s Gain	$K\dot{e}_s$	$2 \times e^4$	
	d Gain	Kd	0.015	
	y_s Gain	Ky_s	15	

그림 9는 유압실린더의 전진시 경사함수에 대한 응답을 나타낸다. ①은 위치 및 동기 제어를 위하여 퍼지 PI 제어기를 사용한 경우이고, ②는 위치 제어를 위하여 퍼지 PI 제어기, 동기 제어를 위하여 PID 제어기를 사용한 경우이며, ③은 위치 및 동기 제어를 위하여 모두 PID 제어기를 사용한 경우이다.

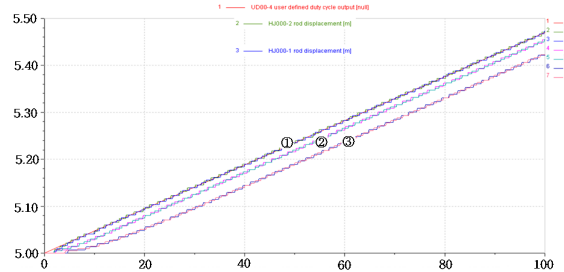


그림 9. 실린더 전진 위치의 경사함수응답
Fig. 9. Ramp response of cylinders (at extending stroke)

그림 9로부터 위치 및 동기 제어를 위하여 퍼지 PI 제어기를 사용한 경우, 더 우수한 수렴 속도 특성을 가지는 것을 확인하였다.

그림 10은 두 개 실린더의 로드 위치차이를 시뮬레이션한 결과로 100초간 시뮬레이션 하였을 때 6[mm]정도의 로드 위치오차를 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 로드 위치차이의 최대값 측면에서 위치 및 동기 제어기로 퍼지 PI 제어기를 채택한 경우인 ①이 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

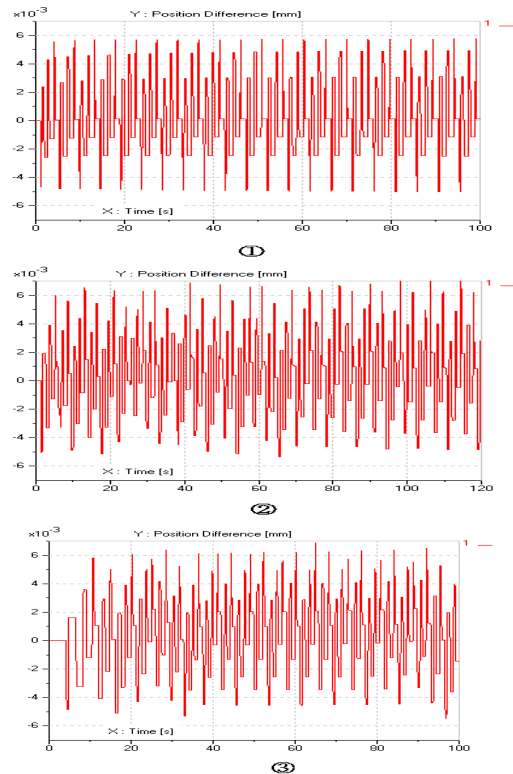


그림 10. 실린더 로드의 위치 차이
Fig. 10. Position difference of cylinder rods

①의 결과는 퍼지 PI 위치 제어기와 퍼지 PI 동기 제어기를 사용한 시뮬레이션 결과이고, 최대값 5.76[mm], 최소값 -5.05[mm]이다. ②는 퍼지 PI 위치 제어기와 PID 동기 제어기를 사용한 시뮬레이션이며 최대값 6.86[mm], 최소값 -5.34[mm]이다. ③은 PID 위치 제어기와 PID 동기 제어기를 사용한 시뮬레이션 결과로 최대값 6.89[mm], 최소값 -5.29[mm]이며, ①의 로드 위치 오차가 ②와 ③보다 줄어든 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 배수갑문용 유압실린더의 위치 및 동기 제어기에 대하여 시스템을 모델링하고, 퍼지 PI 제어기를 설계하였으며, 시뮬레이션을 통하여 설계요구사항에 따른 성능을 확인하였다.

제안한 퍼지 PI 위치 제어기와 퍼지 PI 동기 제어기로 설계한 경우와 기타의 경우에 대하여 시뮬레이션 한 결과, 모두 정지 마찰력으로 인해 발생되던 초기의 큰 위치 차이를 감소시킬 수 있었으며, 전진 시 평균 이동 속도는 4.7[mm/s], 입력신호에 대한 정상상태오차는 거의 없었다. 또한 퍼지 PI 제어기를 사용한 결과 수렴속도가 향상된 것을 확인할 수 있었다. 이 때 발생하는 각각의 실린더 로드 위치차이는 약 6[mm]로 설계 요구사항인 10[mm] 이하를 만족하였다.

참 고 문 헌

[1] Jong Hwa Kim, "A suggestion of Nonlinear Fuzzy PID Controller to Improve Transient Responses of Nonlinear or Uncertain Systems," 한국 퍼지 및 지능 시스템학회 논문지, Vol. 5, No. 4, pp, 87-100, 1995.

[2] Chuen Chien Lee, "Fuzzy logic in Control system," *IEEE Trans. On Syst. Man. and Cybernetics*, Vol. 20, No. 2, March/April, 1990.

[3] Kyung Soo Kim, "Synchronous Position Controller Design of Hydraulic Cylinders for A Sluice Gate," *Graduate School Chungnam National University*, 2008.

[4] 박장호, "퍼지 PID제어기의 성능개선과 비선형 유압실린더 위치제어에의 응용," 한국해양대학교 대학원 석사 학위논문, 1992.

[5] 박근석, "Fuzzy sliding mode control of a hydraulic servo system subjected to disturbances," *충남대학교 대학원 박사학위논문*, 2004.

[6] I.H.Kim, "Nonlinear Hydraulic System Control using Fuzzy PID Controller," *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, 1999.

[7] Jin-Kyu Kim, "A Position Control of Nonlinear Hydraulic System using Variable Design-Parameter Fuzzy PID Controller," *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, 2003.

[8] 이동권, "유압 서보 시스템의 위치제어를 위한 관측-제어기의 일련화 연구," *서울대학교대학원 석사 학위논문*, 1986.

[9] 윤일로, 염만오, "A study on position control of

hydraulic single-rod cylinder subjected to load disturbance," 한국정밀공학회지, 제20권, 제12호, pp. 89-95, 2003.

[10] 안수병, "뉴로-퍼지 제어기를 이용한 유압서보시스템의 추적제어," *충남대학교 대학원 기계설계공학과 공학석사 학위논문*, 2000.

저 자 소 개



혜무은(Hui Wu-Yin)

2003년 : 중국 강소대학교 자동화전공 학사
2008년~현재 : 대구대학교 전자공학과 석사과정

관심분야 : 지능제어, 제어시스템
Phone : 010-5149-8715
Fax : 053-850-4432
E-mail : huiwuyin@gmail.com



최철희(Chul-Hee Choi)

2009년 : 대구대학교 전자공학부 학사
2009년~현재 : 동 대학원 석사과정

관심분야 : 지능제어시스템, 임베디드시스템
Phone : 010-9358-7629
Fax : 053-850-4432
E-mail : prospeao@naver.com

최병재(Byung-Jae Choi)

한국지능시스템학회 논문지 2009. Vol 19. No.3 참조



홍춘표(Chun-Pyo Hong)

1978년 : 경북대학교 전자공학과 학사
1986년 : Georgia Institute of Technology ECE 석사
1991년 : Georgia Institute of Technology ECE 박사
1992년~현재 : 대구대학교 정보통신공학부 교수

관심분야 : DSP 하드웨어 및 소프트웨어, 프로세서구조
암호시스템, Embedded System
Phone : 053-850-6574
Fax : 053-850-6629
E-mail : cphong@daegu.ac.kr

류석환(Seog-Hwan Yoo)

한국퍼지및지능시스템학회 논문지 제14권 제3호 p.323 참조



권영태(Yeung-Tae Kwon)

1998년 : 안동대학교 전자공학과 석사

관심분야 : 제어시스템

Phone : 010-4430-1304

Fax : 042-868-7082

E-mail : kytyhj@kimm.re.kr