

PI형 퍼지제어기를 이용한 강인한 자기동조 시스템 설계

The Design of a Robust Self-Tuning Controller using PI-Type Fuzzy Controllers

김민정*, 강신출**, 이인용***, 박재형****, 최부귀*****, 임영도*****

* : 동아대학교 전자공학과 석사과정, ** : 남해대학 전기과교수 ***: 동아대학교
전자공학과 박사과정, **** : 동아대학교 전자공학과 박사, *****: 동아대학교
전기·전자·컴퓨터 공학부 교수

* : Min-Jung, Kim, ** : Shin-Chul, Kang, ***In-Yong, Lee, ****Jae-Hyung, Park,
*****Boo-Kwi, Choi, *****Young-Do, Lim

부산광역시 사하구 하단동 840번지, 동아대학교 전자공학과 제어연구실

Tel : (051) 200-6733, Fax : (051) 200-7712 e-mail : mavericknol@hanmail.net

Dong-A Univ. Department of Electronic Engineering 840, Hadan-dong, Saha-gu,
Pusan, 604-714, Korea

Abstract

퍼지 논리 제어기(FLC)는 복잡한 프로세스와 비선형 프로세스에 사용되기 위해 연구되어져왔다. PI형 퍼지 제어기는 가장 보편적이고 실용적이다. 그러나 종래의 PI형 퍼지 제어기들은 큰 불감대를 가진 시스템이나 비선형 시스템에 대해 큰 오버슈트와 과도한 발진으로 인해 불안정하다. 본 논문에서는 PI형 퍼지 제어기에서 제어 입력의 축적에 의해 야기된 오버슈트를 제거하기 위한 관점에서, 두 개의 퍼지 제어기를 사용하여 좋은 성능을 이루기 위해, 직접적인 성능치로부터가 아니라, 현재의 프로세스 경향에만 의존하여, 조정하는 제어동작들을 발생하는 자기 동조 메커니즘을 사용하였다. 시뮬레이션 결과, 비선형 프로세스뿐만 아니라 선형의 다양한 형태를 갖는 프로세스에서 제안된 PI형 퍼지 제어기가 종래의 제어기의 성능을 능가한다는 것을 보여준다.

I. 서론

일반적으로 제어란 어떤 목적에 적합하도록 시스템에 필요로 하는 제어 동작을 의미한다. 이들의 제어 동작을 컴퓨터, 전자 회로 및 기기를 이용하여 자동적으로 행하여지는 자동제어와 인간이 행하는 수동제어가 있다. 물론 자동 제어는 고전적 제어 이론에 기초를 둔 PID 제어 법과 현대적 제어 이론에 기초를 둔 최적 제어 법에 의한 제어용 전자 기기, 컴퓨터 등의 하드웨어의 발달에 따라, 오늘날 산업과 사회의 여러 분야에 활용되고 있다.

퍼지 논리 제어기(FLC)는 복잡한 프로세스와 비선형 프로세스에 사용되기 위해 연구되어져 왔다. 가끔씩 FLC는 더 강인하다고 판명되어지고 성능이 종래의 제어기보다 시정변수를 이용한 변수에 덜 민감하다. 최근에 많은 연구자들이 제어기들의 설계에 있어서 신경망과 유전 알고리즘을 사용하여, 강화된 성능을 얻고 FLC의 강인성을 증가시키기 위해 노력하고 있다. 프로세스 제어 시스템에서 광범위하게 사용된 전통적인 PI 제어기들과 같이, 비례적분(PI), 비례미분(PD), 그리고 비례적분 미분(PID) 등 FLC의 여러 형태들 사이에서, PI-형 FLC는 가장 보편적이고 PD-형 FLC 만큼 실용적이다. 왜냐하면, 비례제어기의 고유의 안정성과 적분 제어기의 offset 제거 능력의 이점들을 가지기 위해 비례적분(PI) 제어기에서 비례(P)와 적분(I)이 결합되었기 때문이다. 그러나 종래의 PI-제어기들과 같이, 고차시스템, 적분요소 또는 큰 불감대를 가진 시스템에 대해, 또한 비선형 시스템에 대해 PI-형 FLC의 성능은 큰 오버슈트와 과도한 발진으로 인해 매우 불충분해질지도 모른다.

자동제어의 실제 프로세스의 대부분이 비선형 시스템이며 불감대가 고려되어진다. 가끔씩 그것의 파라미터들은 주위 조건의 변화나 시간에 의해 랜덤하게 변할지도 모른다. 제어 동작은 불감대를 갖는 프로세스에서 불가피하게 지연된다. 이런 이유에서, 불감대는 물리적 시스템에서 자연스럽게 발생하는 가장 어려운 역학적 요소로 인정되어진다.

퍼지 PI형 제어기에서 제어 입력의 측정에 의해 야기된 오버슈트를 제거하기 위한 관점에서, Lee는 리세팅 요소를 사용한 전형적인 퍼지 PI 제어기의 2단계 증가된 버전을 제공한다. 두 개의 퍼지 제어기 중 첫 번째는 두 번째 퍼지 제어기가 오차와 제어입력을 사용하는 동안, 오차와 오차율에 기초된 리세팅을 결정한다. 리세팅 요소의 계산은 퍼지 rule base에 의해 동작된다. 제어기는 적분요소를 갖는 2차 선형 시스템의 다른 형태들로 수행된다는 것을 시뮬레이션으로 명백하게 보여준다.

II. 제어기 설계

본 논문에서 제안하는 PI형 퍼지 제어기는 제어기의 이득(즉, 출력 scaling factor : 제어량)을 자기 동조시키는 것이다. PI형 퍼지 제어기의 특성은 입·출력 SF에 의존하는데, 여기서 제안할 PI-형 퍼지 제어기는 더 낮은 제어 성능을 얻기 위해서 주어진 입력 SF에 대해 출력 SF만을 적용시키는 것이다.

그림 1은 보편적인 PI형 퍼지 제어기의 블록도이고, 그림 2는 본 논문에서 제안한 PI형 퍼지 제어기의 블록도이다. PI형 퍼지 제어기에서 제어기 출력값은 다음과 같이 주어진다.

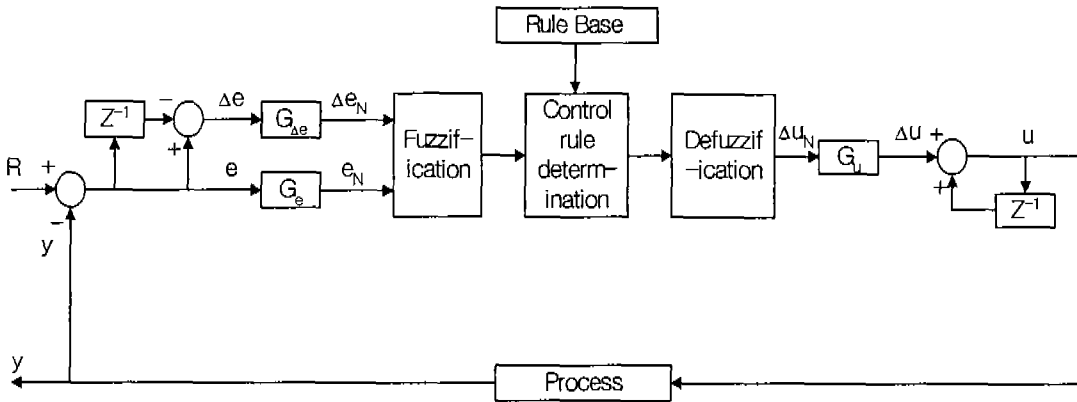


Fig. 1. 일반적인 PI 퍼지 제어기의 블록다이어그램

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \text{ -----(1)}$$

식 (1)에서 k는 sampling instance이고, $\Delta u(k)$ 는 제어기 출력의 증분 변화율이다. 그림 3.2는 제어기의 출력 SF(이득)이 자기동조 메카니즘에 의해 수정되어진다는 것이 점섬안의 시스템으로 나타난다.

모든 멤버쉽 함수는, 제어기 입력, 즉, 오차(e)와 오차의 변화율(Δe)에 대해 그리고 PI형 퍼지 제어기에 대한 제어기 출력(Δu)에서의 증분 변화율에 대해, 보통 $[-1, 1]$ 사이에서 정의된다. 이득 갱신 요소(α)에 대한 멤버쉽 함수는 $[0, 1]$ 사이에서 정의된다. 본 논문에서는 그림 3.3과 같은 멤버쉽 함수를 사용한다. 이것은 가장 보편적인 멤버쉽 함수이다.

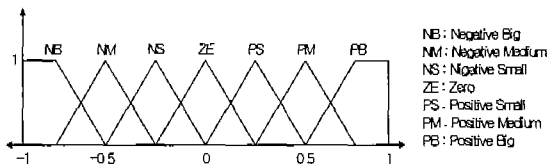


Fig. 3. (a) E, ΔE , ΔU 의 멤버쉽 함수

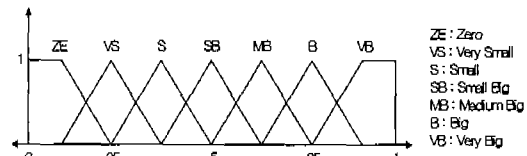


Fig. 4. (b) 이득 갱신 요소(α)의 멤버쉽 함수

자기동조 퍼지 제어기의 입·출력 변수와 SF의 관계는 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$e_N = G_e \cdot e \text{ -----(2)}$$

$$\Delta e_N = G_{\Delta e} \cdot \Delta e \text{ -----(3)}$$

$$\Delta u = (\alpha \cdot G_u) \cdot \Delta u_N \text{ -----(4)}$$

PI형 퍼지 제어기에 대해 제어기 출력(Δu)에서의 증분 변화율은 다음과 같은 형태의 규칙에 의해 결정되어진다.

R_{PI} : If e is E and Δe is ΔE
then Δu is ΔU .

이득 갱신 요소(α)는 다음 형태의 퍼지 규칙

을 사용하여 계산한다.

진다.

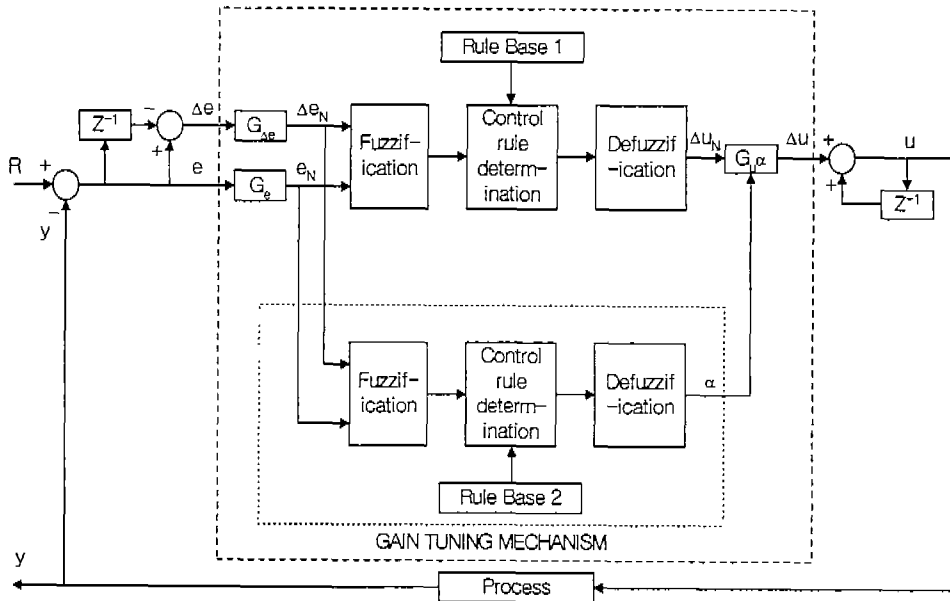


Fig. 2. 강인한 자기동조형의 PI-퍼지제어기의 블록다이어그램

R_{α} : If e is E and Δe is ΔE then α is α .

표 1 Δu 를 계산하는 퍼지 규칙

이것에 대한 규칙표는 표 3.1과 같다.

식 (4)에서 자기 동조 제어기의 효과적인 이득은 간단하게 G_u 가 아닌, αG_u 임을 알 수 있다. 보편적인 퍼지 제어기에서 G_u 는 고정되어 있지만, 제안된 자기동조 퍼지 제어기에서의 제어 이득은 제어기가 동작하는 동안 고정되어 있지 않고, 각각의 샘플링 시간마다 이득 갱신 요소 α 에 의해 수정되어진다. 제안된 제어기는 기본적으로 적응 피드백 루프 제어기이다. α 의 함수적 관계는 다음과 같이 보여질 수 있다.

$$\alpha(k) = f(e(k), \Delta e(k)) \text{ -----(5)}$$

여기서, f 는 e 와 Δe 의 비선형 함수인데, 이것은 표 1과 2에 보여진 규칙 기반에 의해 기술되어

$\Delta e/e$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	Nb	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PS	PM	PB	PB	PB

표 2 α 를 계산하는 퍼지 규칙

$\Delta e/e$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	VB	VB	VB	B	SB	S	ZE
NM	VB	VM	B	B	MB	S	VS
NS	VB	MB	B	VB	VS	S	VS
ZE	S	SB	MB	ZE	MB	SB	S
PS	VS	S	VS	VB	B	MB	VB
PM	VS	S	MB	B	B	VB	VB
PB	ZE	S	SB	B	VB	VB	VB

이러한 규칙들로 구성된 PI형 퍼지 제어를 시뮬레이션한다. 플랜트는 2차 선형 시스템과 한계 안정 시스템의 두 종류를 사용한다. 그리고 지연시간 0, 0.1, 0.2 sec에 대한 응답 특성을 시뮬레이션 한다. 여기서, $G_e = 0.9$, $G_{\Delta e} = 20$, $G_u = 0.02$ 이다. 본 논문에서는 제안한 제어기의 성능을 일반형태의 PI-퍼지 제어기와 비교, 평가한다.

1) 2차 선형 시스템

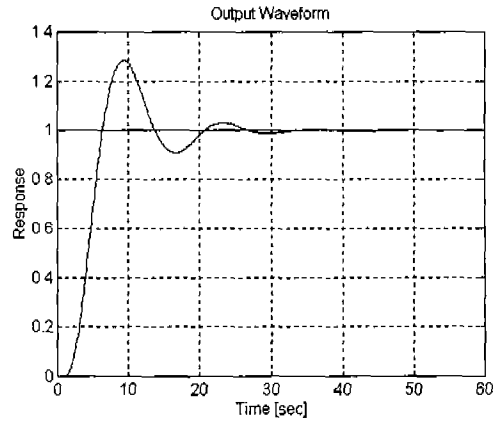
$$\frac{e^{-Ls}}{s^2 + s + 0.2} \text{ -----(6)}$$

지연시간(L) 0.1 sec일 때의 응답곡선은 다음과 같다.

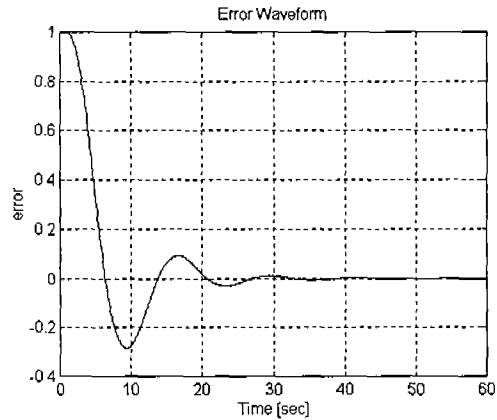
2) 한계 안정 시스템

$$\frac{e^{-Ls}}{s^2 + s} \text{ -----(7)}$$

지연시간(L) 0.1 sec일 때의 응답곡선은 다음과 같다.

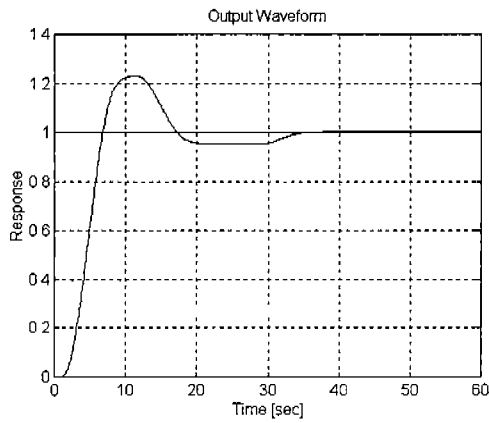


(a) 출력 파형

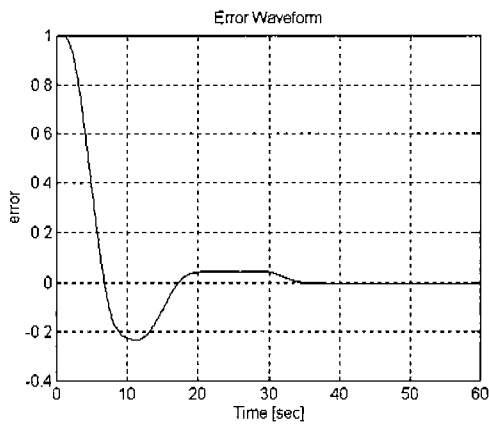


(b) 오차 파형

Fig. 5. The waveform of PI-fuzzy Controller (L=0.1)



(a) 출력 파형



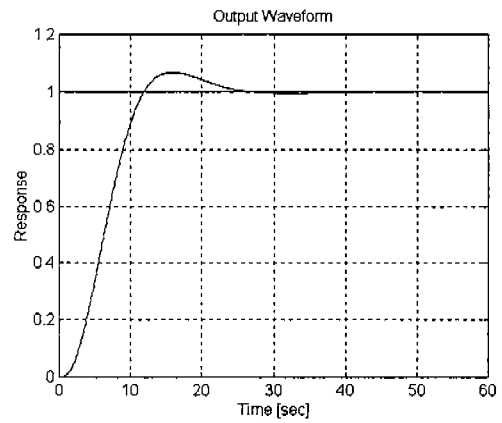
(b) 오차 파형

Fig. 6. The waveform of PI-fuzzy Controller ($L=0.1$)

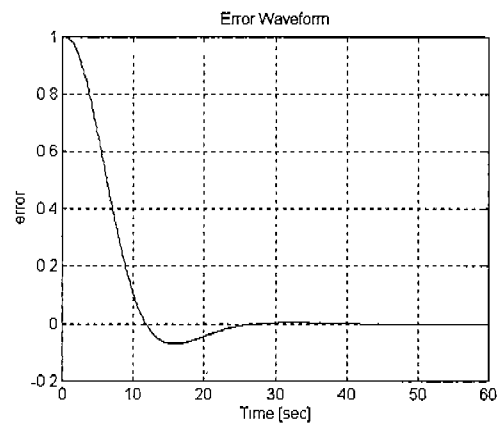
기존의 PI형 퍼지 제어기의 경우, 과도한 오버슈트와 안정시간이 길어짐을 알 수 있다. 여기에 대해 본 논문에서 제안하는 PI형 퍼지 제어기를 시뮬레이션 하였다.

3) 2차 선형 시스템

식 (3.6)의 플랜트를 사용하여 지연시간이 0인 경우의 응답곡선을 시뮬레이션하였다.



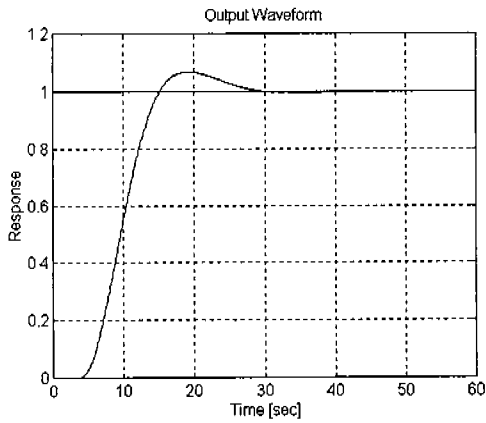
(a) 출력 파형



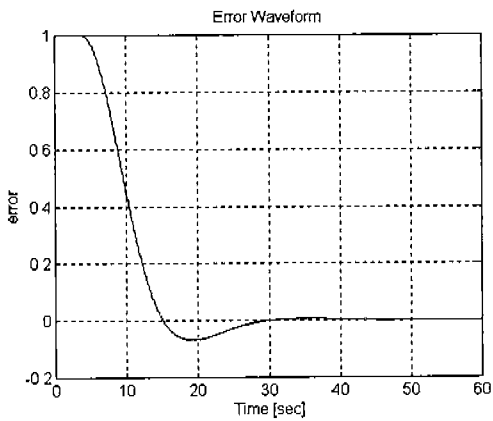
(c) 오차 파형

Fig. 7. The waveform of A robust self-tuning PI-fuzzy controller ($L=0$)

지연시간 0.2 sec인 경우의 응답곡선은 다음과 같다.

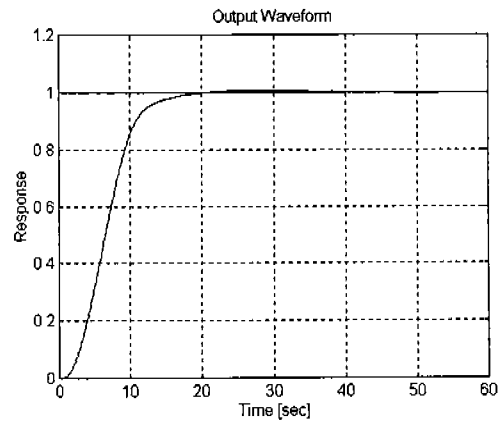


(a) 출력 파형

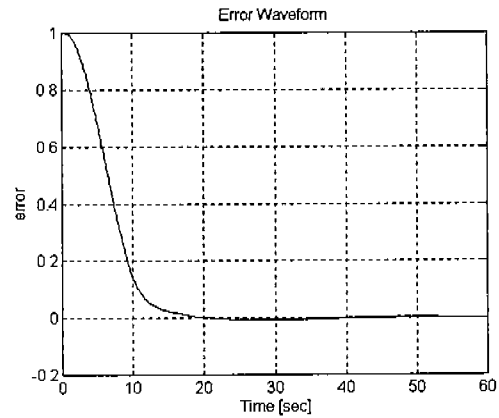


(c) 오차 파형

Fig. 8. The waveform of A robust self-tuning PI-fuzzy controller (L=0.2)



(a) 출력 파형



(b) 오차 파형

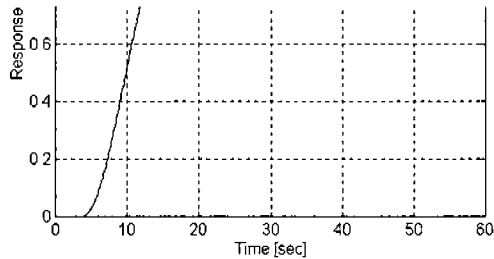
Fig. 9. The waveform of A robust self-tuning PI-fuzzy controller (L=0)

4) 한계 안정 시스템

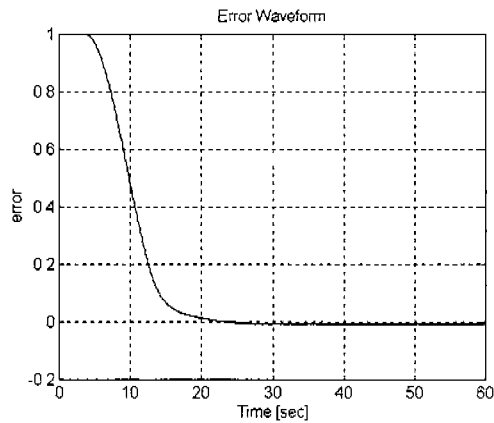
식 (3.7)의 플랜트를 사용하여 불감시간 0인 경우의 응답곡선을 시뮬레이션 하였다.

지연시간 0.2 sec인 경우의 응답곡선은 다음과 같다.

에 대한 강인성을 보장하고, 플랜트가 고차 시스템인 경우 응답특성의 안정성을 보완해야 할 것이다.



(a) 출력 파형



(b) 오차 파형

Fig. 10. The waveform of A robust self-tuning PI-fuzzy controller ($L=0$)

III. 결 론

시뮬레이션 결과 기존의 PI형 퍼지 제어기는 플랜트의 특성과 지연시간에 따라 과도한 오버슈트와 발진을 보이고 있는데 반해, 제안된 PI형 퍼지 제어기의 경우 플랜트의 특성에도 잘 적응하고, 지연시간에 관계없이 안정된 응답특성을 보인다.

향후 과제로서 제안된 PI형 퍼지 제어기의 외란

참 고 문 헌

- [1] M. Sugeno, Industrial Applications of Fuzzy Control. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1985.
- [2] R. Palm, "Sliding mode fuzzy control", in Proc. FuzzIEEE, San Diego, CA, 1992, pp.519-526.
- [3] C. J. Harris, C. G. Moore, and M. Brown, Intelligent Control-Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets. Singapore: World Scientific, 1993.
- [4] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller-Parts I, II", IEEE Trans. Syst., Man, Cybern, vol.20, pp.404-435, Mar./Apr. 1990.
- [5] D. Dirankov, H. Hellendorn, and M. Reinfrank, An Introduction to Fuzzy Control. New York: Springer-Verlag, 1993.
- [6] S. Z. He, S. Tan, F. L. Xu, and P. Z. Wang, "Fuzzy self-tuning of PID controller", Fuzzy Sets Syst., vol.56, pp. 37-46, 1993.
- [7] M. Maeda and S. Murakami, "A self-tuning fuzzy controller", Fuzzy Sets Syst., vol. 51, pp. 29-40, 1992.
- [8] T. J. Procyk and E. H. Momdani, "A linguistic self-organizing procedd controller", Automatica, vol. 15, no.1, pp. 53-65, 1979.

- [9] S. Shao, "Fuzzy self-organizing control and its application for dynamical systems", *Fuzzy sets Syst.*, vol. 26, pp. 151-164, 1988.
- [10] Y. Park, U. Moon, and K. Y. Lee, "A self-organizing fuzzy logic controller for dynamic systems using a fuzzy auto-regressive moving average(FARMA) model", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol.3, pp 75-82, Feb. 1995.
- [11] R. Transcheit and E. M. Scharf, " Experiments with the use of a rule-based self-organizing controller for robotics applications", *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 26, pp. 195-214, 1988.
- [12] S.Galichet and L, Foulloy, "Fuzzy controllers: Synthesis and equivalences", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 3, pp. 140-148, May 1995.
- [13] B. S. Moon, "Equivalence between fuzzy logic controllers and PI controllers for single input systems", *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 69, pp. 105-113, 1995.
- [14] H. Ying, W. Siler, and J. J. Buckley, " Fuzzy control theory: A nonlinear case", *Automatica*, vol. 26, no.3, pp. 513-520, 1990.