

# 직류 서보 전동기를 대상으로한 적응퍼지속도제어기의 설계

김 호 찬\* · 조 성 범\*\* · 문 동 춘\* · 고 봉 운\*\*\*

## Adaptive Fuzzy Speed Controller Design for DC Servo Motor

Ho-Chan Kim\*, Seong-Bum Cho\*\*, Dong-Chun Moon\*\* and Bong-Woon Ko\*\*\*

### ABSTRACT

This paper presents a study of the performance of a DC servo motor with a model reference adaptive fuzzy speed controller (MRAFSC) in the presences of load disturbances. MRAFSC comprised inner feedback loop consisting of the fuzzy logic controller (FLC) and plant, and outer loop consisting of an adaptation mechanism which is designed for tuning a control rule of the FLC. Experimental results show the good performance in the DC servo motor system with the proposed adaptive fuzzy controller.

**Key Words** : model reference adaptive fuzzy controller, speed control, load disturbance

### 1. 서 론

속도 또는 위치 제어용 서보 전동기는 회전자와 관성이 매우 작아서 낮은 용량의 직류 서보 전동기는 디스크 드라이버와 같은 컴퓨터 장비에, 대용량 서보 전동기는 산업용 로봇의 액츄에이터 등 많은 분야에서 사용되고 있다<sup>1)</sup>. 따라서 서보 전동기의 제어에 관한 연구가 다양하게 진행되어 오고 있는데, 그 중에서는 새로운 제어기법을 이용함으로써 제어성능을 향상시킬 뿐만 아니라 제어 시스템을 구성하는데 있어 부분생략 또는 간략화 함으로써 제어성능은 다소 떨어

어지나 경제적인 측면이나 하드웨어 부피 등을 우선적으로 고려하는 연구 내용들도 보고 되고 있다. 실제로 존재하는 모든 시스템에는 모델 불확실성과 외부 잡음이 존재할 수밖에 없다. 이러한 불확실성에 대한 제어시스템의 성능개선을 위한 연구도 많이 진행되어오고 있다. 지금까지 연구되어온 최적제어이론, 건실제어이론 등은 복잡한 행렬 부등식을 만족하는 것이 관건이며, 이를 구하는 알고리즘 또한 매우 복잡하여 실제 시스템에 적용하기에는 한계가 있다<sup>2,3)</sup>.

Zadeh가 제안한 퍼지 제어 이론은 플랜트의 수학적 모델링이 어렵거나 부분적으로 불가능하여 기존의 제어방법으로는 성능향상에 한계가 있는 경우에 주로 적용되어 그 유효성이 입증되었다<sup>4,5)</sup>. 이러한 특성으로 인하여 비선형성이 크고 복잡한 플랜트에 효과적이고, 물리적으로 측정할 수 없는 돌발적인 외란까지도 이용될 수 있다. 그러나 많은 매개변수로 구성되는 퍼지제어기 (fuzzy logic controller, FLC)는 설계를 위한 체계적인 방법론이 제시되지 않아서 어

\* 제주대학교 전기전자공학부, 첨단기술연구소  
Faculty of Electrical & Electronic Engineering, Research Institute of Advanced Technology, Cheju Nat'l Univ.

\*\* 제주대학교 산업대학원 전자전기공학과  
Department of Electronic & Electrical Engineering, Graduate School of Industry, Cheju Nat'l Univ.

\*\*\* 제주산업정보대학교 디지털시스템계열  
Division of digital system, Jeju College of Technology.

려움이 따른다. FLC의 또 다른 한계는 공정제어에 있어서 플랜트 동작조건 변화가 전문가의 경험지식 밖의 경우에 예측과 적용이 어려우며 전문가 이상의 제어효과를 기대하기가 어렵다. 따라서 FLC는 초기에 설계된 제어규칙 및 매개변수가 부적절할 경우 경험에 근거하여 성능을 향상시킬 수 있어야하며 플랜트의 동특성의 변화에 적응하여 충분히 보상할 수 있고, 비선형 시스템의 운전조건 변화에 대한 적응 능력도 요구된다<sup>6)</sup>.

본 논문에서는 모델 기준 추종기능을 이용한 적응 퍼지속도제어기 (model reference adaptive fuzzy speed controller, MRAFSC)를 설계한다. MRAFSC는 FLC와 플랜트로 구성된 내부 피드백 루프와 FLC의 규칙을 동조시키는 외부루프로 구성하였으며, 오차정보 특성에 근거한 제어규칙 동조모델을 설계하였다. 제안된 MRAFSC는 기존이 PID 제어기에 시스템 모델이나 파라미터의 불확실성 및 부하외란의 변화에도 적절히 대처하기 위한 기법이라 할 수 있으며 부하변동이 있는 직류 서보 전동기의 속도제어 실험을 통하여 제안된 방법과 기존의 PID 및 FLC 성능을 비교 분석한다<sup>1)</sup>.

## II. 직류 서보 전동기의 수학적 모델링

Fig. 1은 직류 서보 전동기의 시스템을 나타낸 것으로서 서보 전동기의 전기자 회로에 회로 방정식 (KVL)을 적용하면 다음과 같다<sup>2)</sup>.

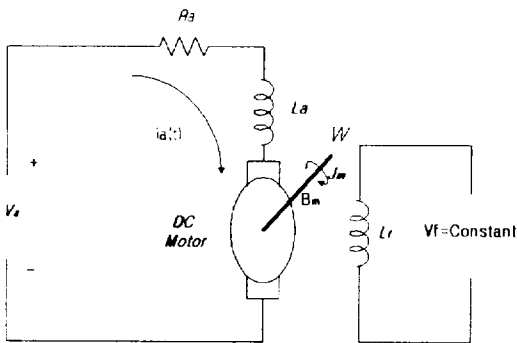


Fig. 1. Equivalent circuit of DC servo motor.

여기서  $V_a$ 는 전기자에 인가해주는 입력전압,  $i_a$ 는 전기자 전류,  $R_a$ 와  $L_a$ 는 각각 전기자회로의 저항과 인덕턴스를 나타낸다. 제자에 가해지는 전압은 일정하며 따라서 제자전류 및 공극자속은 일정하다고 가정한다. 전기자 전류에 의해서 발생하는 토크  $T$ 는 관성부분, 마찰부분 그리고 부하토크의 합이고  $e_b$ 는 속도에 의한 역기전력으로 나타낼 수 있는데, 직류전동기의 관계식을 나타내면 다음과 같다.

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_b \quad (1)$$

$$e_b = K_b \omega \quad (2)$$

$$T = K_t i_a = J_m \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega + T_L \quad (3)$$

여기서 사용되는 파라미터들은 각각  $e_b$ 는 역기전력,  $B_m$ 는 점성마찰계수,  $T_L$ 는 부하토크,  $\omega$ 는 회전자 속도,  $J_m$ 는 전동기관성모멘트,  $T$ 는 전동기의 토크,  $K_b$ 는 역기전력상수,  $K_t$ 는 토크 상수를 나타낸다. 위 식들을 참조하여 속도제어를 위한 일반적인 직류 서보 전동기의 블럭선도는 Fig. 2와 같다.

전동기제어에서 일반적으로 사용되는 속도제어기는 PID형태이다. 본 논문에서는 부하외란으로 인한 속도의 변동이 존재하는 경우에도 원하는 성능을 얻기 위해 모델기준 적응퍼지속도제어기 (MRAFSC)를 설계하도록 한다.

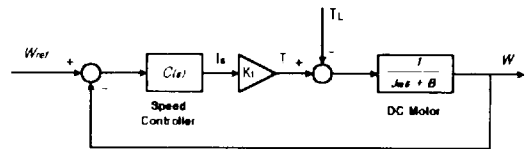


Fig. 2. Classical DC servo motor drive block diagram with speed controller.

## III. 적응퍼지속도제어기의 구성

제안된 MRAFSC는 Fig. 3과 같이 퍼지제어기와 기준모델 및 적응기구의 3부분으로 구성되어 있다.

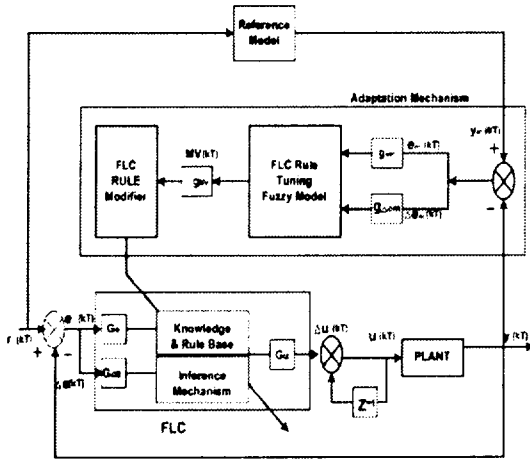


Fig. 3. Block diagram of MRAFSC.

### 3.1 퍼지제어기

퍼지제어기는 숙련 전문가의 경험 및 지식에 근거한 언어제어전략을 자동제어 전략으로 변환하는 기능을 수행한다. 일반적인 퍼지제어기는 조건문과 각각의 제어 상황을 정의하는 언어적 규칙으로 구성된다. 퍼지속도제어기에서 입력변수로는 속도오차와 오차의 변화율을 사용하고 출력변수는 싱글톤 (singleton) 형태를 취한다. 예를 들어 입력을  $u_1, u_2, \dots, u_m$  이라 표현하고, 출력을  $y$  라고 표현할 때 퍼지추론의 추론규칙은 다음과 같이 표현된다.

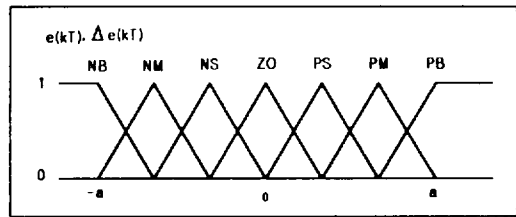
$$\begin{aligned} \text{IF } u_1 \text{ is } A_{1i} \text{ and } \dots \text{ and } u_m \text{ is } A_{im}, \\ \text{THEN } y \text{ is } w_i \quad (i=1, \dots, n) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $i$  는 규칙의 숫자,  $A_{1i}, \dots, A_{im}$  는 전건부의 소속함수들이고,  $w_i$  는 후건부의 언어변수이다. 퍼지추론 방법으로는 비교적 연산속도가 빠르고 계산과정이 간단한 단순 퍼지추론 방식을, 비퍼지화 방법으로는 무게중심법을 채택하였고 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다<sup>5)</sup>.

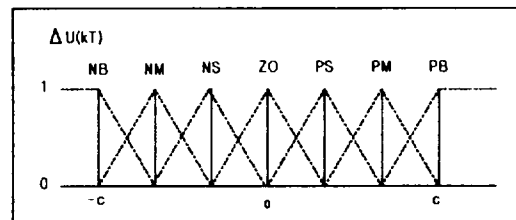
$$\mu_i = A_{1i}(x_1) \cdot \dots \cdot A_{im}(x_m) \quad (5)$$

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (6)$$

여기서  $\mu_i$  는 전건부의 소속값이다. 그리고 일반적인 퍼지변수의 수는 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB의 7개이다. 멤버십 함수는 초기에 범종형을 이용하기도 했지만 최근에는 거의가 삼각형이 사용되고 있다. 본 논문에서 사용된 FLC의 입출력변수  $e(kT) (= r(kT) - y(kT))$ ,  $\Delta e(kT)$ ,  $\Delta u(kT)$ 에 대한 각 퍼지의 멤버십 함수는 Fig. 4와 같고, 퍼지로직 규칙은 Table 1과 같다. 퍼지제어기의 입출력은 입출력이득 (scaling factor)에 의해 전체논의 (the universe of discourse) 집합으로 정규화된다.



(a) antecedent



(b) consequent

Fig. 4. Membership function for the control rules.

### 3.2 기준모델

기준모델 (reference model)은 기준입력에 대해 전체 제어 시스템에 요구되는 제어성능을 특성화하고, 수량화하는 퍼지제어기 설계기준으로 사용되었다. 또한 미지의 플랜트의 동특성을 식별하기 위한 신호로 사용되며, 플랜트의 정보를 얻는데 이용된다. 즉, 기준모델과 플랜트 출력사이의 추종오차에 관련된 정보는 기준모델을 완벽하게 추종하여 기준모델과 같은 제어성능을 얻기 위하여 FLC의 규칙을 변화시켜야 값을 계산하기 위하여 사용된다. 본 논문에서의 기준

모델은 2차 진동시스템의 제동비  $\xi$ 와 비감쇄 자연주파수  $w_n$ 으로 표현하였다.

Table 1. Fuzzy logic rules

7×7		$\Delta e$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NS	ZO	PS	PM	PB
	NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
	PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Table 2. Fuzzy model for tuning the FLC rules

7×7		$\Delta e_m$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e_m$	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	ZO	ZO	ZO	ZO	PS
	ZO	NB	NM	ZO	ZO	ZO	PM	PB
	PS	NS	ZO	ZO	ZO	ZO	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

### 3.3 적응기구

적응기구 (adaptive mechanism)는 페루프 시스템이 기준모델과 같이 동작하도록 퍼지제어기의 규칙을 동조하는 역할을 수행하며, 규칙동조는 기준모델과 플랜트 출력과의 추종오차에 대해 동작한다. 적응기구는 FLC의 규칙동조를 위한 퍼지추론 모델과 추론된 수정량에 따라 동조를 실행하고, 저장하는 규칙동조 실행부로 구성된다<sup>7,8)</sup>. FLC의 제어규칙을 동조하기 위한 퍼지모델의 입출력변수  $e_m(kT)$  ( $= y_m(kT) - y(kT)$ ),  $\Delta e_m(kT)$ ,  $MV(kT)$ 는 Fig. 3과 같은 형태로 정의되며, 입출력역득  $g_{e_m}$ ,  $g_{\Delta e_m}$ ,  $g_{MV}$ 에 의해 전체 논의를 집합으로 정규화된다. FLC의 규칙동조 퍼지모델도 (4)와 같은 IF-THEN 형태로 주어지며 추종오차 정보의 특성에 따라 분류할 수 있는데, 다음 Table 2와 같은 FLC 규칙동조 퍼지모델을 사용

하였다.

FLC 규칙동조 모델은 매 샘플링 순간마다  $e_m(kT)$ 가 입력되어 기준모델과 플랜트 출력사이의 오차가 0이 되도록 하는데 필요한 수정값  $MV(kT)$ 을 무게 중심법을 통해 발생시켜 퍼지제어 FLC 규칙의 결론부를 수정하게 된다. 규칙수정은 전단계의 샘플링에서 사용되었던 규칙결론부 멤버십함수의 중심을 수정값으로 이동시킴으로서 다음과 같이 이루어진다.

$$C_i(kT) = C_i(kT - T) + MV(kT) \quad (7)$$

여기서,  $C_i(kT)$ 와  $C_i(kT - T)$ 는 각각  $kT$ 와  $(kT - T)$  샘플링 시간에서 사용되었던  $i$  번째 규칙의 결론부 값이다.

## IV. 실험 및 검토

제안한 방법에 대한 성능 평가 실험을 위하여 제작된 디지털 서보 시스템을 동일 제어조건하에서 부하실험을 수행하였으며 PID, FLC 그리고 제안된 적응퍼지제어기의 성능을 분석하였다. 제작된 디지털 서보 시스템은 HITACHI의 고성능 마이크로 프로세서인 H8/532를 적용한 디지털 토크 서보시스템 (digital torque servo system)으로, PWM 주파수는 6.7[KHz]이며, PWM 펄스의 on-time 조정에 따라 전동기에 가해지는 전류를 조절하여 전동기의 회전을 제어하는 방식이다. 디지털 서보 시스템은 펜티엄 PC에서 C 프로그램 작업과 디버깅을 수행하고 프린터 포트를 통해 서보 전동기 구동회로로 다운로드 되도록 구성되어 있으며, PC상의 제어 프로그램으로 실시간 제어가 가능하고, 각 변수 및 자료를 저장할 수 있도록 설계되어 있다.

본 논문에서 제어 대상 시스템의 구성도는 Fig. 5와 같은데 두 개의 직류 서보 전동기를 구동용과 부하용으로 결합시킨 모델을 사용하였다. Fig. 5에서 저항  $R$ 의 값에 따라 부하의 값이 달라짐을 알 수 있고 전동기의 관성모멘트와 점성마찰계수는 구동용과 부하용 전동기의 값의 합으로 나타남을 알 수 있다.

본 실험에서는 3장에서 제안한 MRAFSC를 기존의

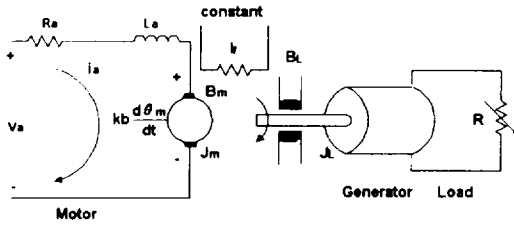


Fig. 5. Configuration of control object system.

Table 3. Parameters of DC servo motor

정격출력	Pr	200W
정격토크	Tr	6.50kgf.cm
정격회전수	Nr	3000rpm
정격전류	Ir	3.5A
정격전압	Er	75V
유기전압정수	Km	22.50 V/K rpm
토크정수	Kt	2.10 kgf.cm/A
전기자 관성	Jm	$1.33 \times 10^{-4}$ kgf.cm sec <sup>2</sup>
점성마찰계수	Bm	0.2128 kgf.cm sec
전기자 저항	Ra	2.12 Ω
전기자인덕턴스	La	1.02 mH
마찰토크	Tf	0.5 kgf.cm

PID 속도제어기와 FLC의 성능을 비교한 결과를 제시하는데, 기준속도입력으로는 구형파를  $1000 \Rightarrow 0 \Rightarrow -1000$ [rpm]의 형태로 연속적인 변화를 주었을 경우의 제어방법에 따른 전동기의 출력응답을 살펴본다. 실험에 이용된 직류 서보 전동기는 LG사의 FMD-E20EA인데 사양은 Table 3과 같다. 부하용으로 사용하기 위한 또다른 전동기의 전기자 관성과 점성마찰계수는 각각  $J_m = 2.5 [Kgf \cdot cm \cdot sec^2]$ 과  $B_m = 0.496 [Kgf \cdot cm \cdot sec]$ 이다. 사용된 전동기의 정격들은 Table 3에서의 값과 같고 필터의 시정수  $T_f$ 는  $0.001$ [sec]이다. 시스템에서 샘플링시간은  $1.8$ [msec]이고 부하는 권선형 저항을 사용하였으며 그 값은  $50/3$ [Ω]이며 PID 제어에서 사용한 계수는  $K_p = 2$ ,  $K_i = 1/32$ ,  $K_d = 3$ 이다.

Fig. 6은 무부하시의 기준입력  $\pm 1000$ [rpm]의 속도 지령으로 속도변화를 줄 때 속도응답을 나타낸 결과이다. PID 제어인 경우에는 약간의 오버슈트가 발생하였으나 FLC와 제안한 MRAFSC는 오버슈트가 발

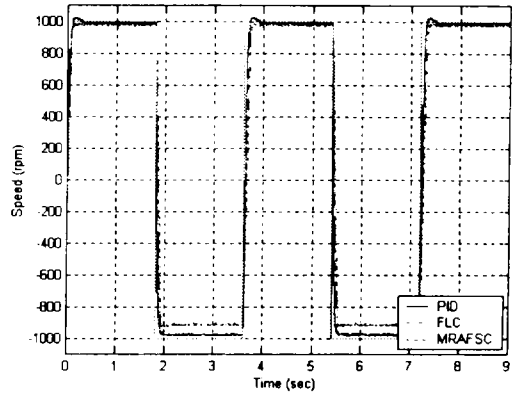


Fig. 6. PID, FLC and MRAFSC DC servo motor drive speed response (no load).

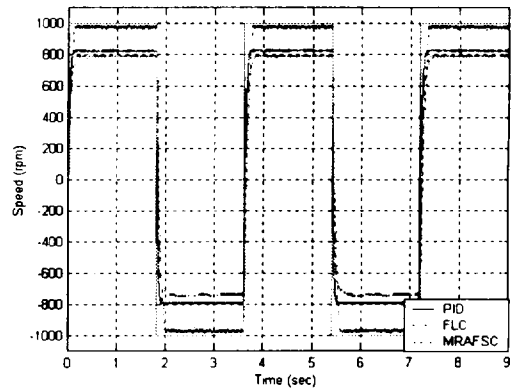


Fig. 7. DC servo motor drive speed response due to the load disturbance.

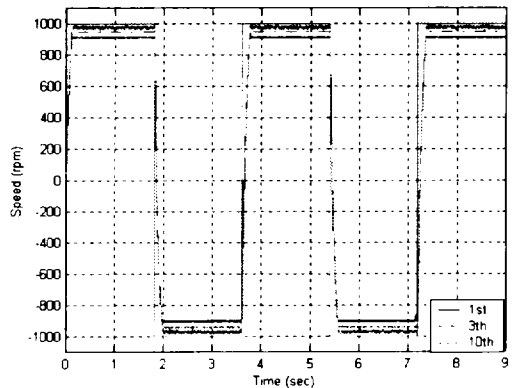


Fig. 8. Response of the MRAFSC for DC servo motor.

생하지 않았고, 상승시간은 오히려 PID 제어가 빠름을 알 수 있다. PID 계수를 잘 선택한 경우로서 세 방법 모두 좋은 추종능력을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 7은 일정한 부하가 존재하는 상태에서  $\pm 1000$ [rpm]의 속도지령으로 기동할 경우의 속도응답이다. PID 제어와 FLC 방법에서는 기준입력을 추종하지 못함을 알 수 있고, MRAFSC에서는 부하가 존재하는 경우에도 기준입력을 잘 추종함을 알 수 있다.

Fig. 8은 제안된 MRAFSC에서 새롭게 갱신된 퍼지룰에 따른 전동기의 응답을 나타낸 결과로서, 퍼지룰이 새로 갱신될수록 응답이 향상되어 부하가 존재하는 경우에도 기준입력을 잘 추종함을 알 수 있다. 그러나 정상상태에서 속도의 변동성은 점점 커짐을 알 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 부하외란이 존재할 때 직류 서보 전동기에 적용할 수 있는 적응퍼지속도제어기를 설계하는 방법을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 직류 서보 전동기에 적용되어 속도제어용 퍼지규칙 도출 및 부하실험을 수행하였는데 기존의 PID와 FLC에 비해 향상된 성능을 얻을 수 있었다. 본 논문에서 제시한 적응퍼지제어 알고리즘은 직류 서보 전동기 뿐 아니라 BLDC 전동기에도 쉽게 적용할 수 있으리라 기대되며 퍼지제어기를 구성할 때 부하관측기까지 포함하는 경우에는 더 좋은 성능을 나타낼 수 있으리라 기대된다.

## 참고문헌

- 1) 대한전기학회, 1992. 소형모우터기술조사전문위원회, 소형모우터 기술현황, 제4호, 대한전기학회.
- 2) U.K. Kang, J.T. Lee, Y.M. Kim, and B.H. Kwon, 1991. Speed controller design for induction motor drives using a PDF control and load disturbance observer. Proc. of IECON'91, pp.799-803.
- 3) W.G. Da Silva and P.P. Acarney, 1997 Fuzzy logic controlled motor driven in the presence of load disturbance. Proc. of European Conference on Power Electronics and Application, vol.2, pp.386-391.
- 4) L.A. Zadeh, 1973. Outline of a new approach to the analysis complex system and decision processes. IEEE Trans. Syst. Man and Cyber., vol.3, no.1, pp.28-44.
- 5) 변중남, 1997. 퍼지논리제어, 홍릉과학출판사.
- 6) L.X. Wang, 1994. Adaptive Fuzzy Systems and Control : Design and Stability Analysis, Prentice Hall.
- 7) 손재현, 1995. 동적시스템을 위한 모델기준 적응퍼지제어기의 설계, 건국대학교 전기공학과 박사학위논문.
- 8) S.Z. He, S. Tan, C.C. Hang, and P.Z. Wang, 1992. Control of dynamical process using an on-line rule : adaptive fuzzy control system. Fuzzy Sets Sys., vol.54, pp.11-22.