

# PID 이득 동조를 위한 퍼지 스케줄링

## Fuzzy Scheduling for the PID Gain Tuning

신위재

Wee-Jae Shin

경남대학교 전자전기공학부

Division of Electronic & Electrical Engineering, Kyungnam University

### 요 약

본 논문에서는 PID 제어기의 이득 동조를 위한 퍼지 제어기를 제안한다. 제안한 제어기는 PID 제어기의 크리스퍼 출력 오차를 그대로 사용하지 않는 전단 퍼지화기에서 추론단계는 갖지만 Rule Table은 갖지 않는 특징이 있으며, 출력 소속 함수에 두 변수의 관계와 범위를 이용 도식화된 영역에서 비퍼지화 시킨 비선형 출력값을 PID 계수에 부가하는 새로운 Fuzzy PID 제어기를 제안한다. 여기서 Kp, Kd 계수의 최대, 최소 범위를 설정하여 퍼지추론에 의해 새로운 Kp, Kd 계수를 구한다. Ki 계수는 Ziegler-Nichols 동조 규칙을 사용하여 구하였고, 제안한 제어기는 유압서보모터 제어시스템에 의해 실험하였으며 실험결과 양호한 제어특성을 통해 원하는 결과를 얻을 수 있었다.

### Abstract

In this paper, We propose the fuzzy controller for the gain tuning of PID controller. The proposed controller doesn't use the crisp output error and rule tables though with a fuzzy inference process in forward fuzzifier, New Fuzzy PID Controller assigns relations and ranges of two variables of PID gain parameters. These new gain parameters are calculated by the fuzzy inference with max-min ranges of Kp and Kd. The Ki parameter is computed automatically between Kp and Kd parameter is calculated by Ziegler-Nichols tuning rules. Finally we experimented the propose controller by the hydraulic servo motor control system. We can obtained desired results through the good control characteristics.

**Key words :** PID Controller, Fuzzy PID Controller, Fuzzy Gain Scheduling, Hydraulic servo system

## 1. 서 론

기존의 PID 제어방식은 제어기의 설계가 간단하나 목표 값에 추종하도록 계수 값을 설정하는데 많은 시행 착오가 필요하다. 최근 들어 복잡한 동적 시스템을 위한 제어기설계는 논리, 추론 그리고 학습을 사용하여 제어하는 것이 보편화되어 있다. 특히 학습과 적용은 지능 제어시스템의 기본적인 특성이고, 예상치 못한 외란의 광범위한 변화를 극복할 수 있다. 본 논문에서는 Rule Table이 없고, 기존의 오차 값이 선형이라면 퍼지추론을 이용하여 비선형 오차 값으로 바꾸어 PID 제어기에 인가하는 새로운 Fuzzy PID 제어기를 제안하였다.

같은 미적분 방식으로 쓸 수 있다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

이 식으로부터 디지털 PID 제어기의 전달 함수를 구하기 위해, 식 (1)에서 적분/미분 항을 각각 사다리형 합산과 후향 차분으로 근사화해서 이산화 시키면 식 (2)와 같이 된다.

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{i=1}^k \frac{T_s}{2} \{ e(i-1) + e(i) \} + \frac{K_D}{T_s} \{ e(k) - e(k-1) \} \quad (2)$$

식 (2)을 '절대형' 또는 '위치형' PID 제어기 식이라고 한다. 여기서  $K_p$ 는 비례이득,  $K_I$ 는 적분이득,  $K_D$ 는 미분이득을 나타내며,  $T_s$ 는 샘플링 주기,  $e(k) = r(k) - y(k)$ 는 목표 값( $r(k)$ )과 현재 출력 값( $y(k)$ )을 뺀 값을 나타낸다. 절대형 PID 제어기의 출력 값( $u(k)$ )은 제어대상의 입력 값이 된다.

PID 제어기의 제어 출력을 매 시점마다 계산해 내는 데 있어 바로 1단계 전의 값을 수정해서 구하는 재귀형 식을 유도하면 다음과 같다.

## 2. Fuzzy Gain Scheduling을 이용한 Fuzzy PID 제어기

### 2.1 Fuzzy PID 제어기 설계

표준형 아날로그 PID 제어기의 입·출력 관계식은 다음과

접수일자 : 2004년 8월 31일

완료일자 : 2004년 12월 2일

감사의 글 : 본 연구는 경남대학교 학술논문 게재 연구비 지원에 의해 이루어 졌음.

$$\begin{aligned}
 u(k) &= u(k-1) + K_P \{ e(k) - e(k-1) \} \\
 &+ \frac{K_I T_S}{2} \{ e(k) + e(k-1) \} \\
 &+ \frac{K_D}{T_S} \{ e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \}
 \end{aligned} \tag{3}$$

식 (3)은 디지털 PID 제어기의 ‘증분형’ 또는 ‘속도형’ PID 제어기 식이다.

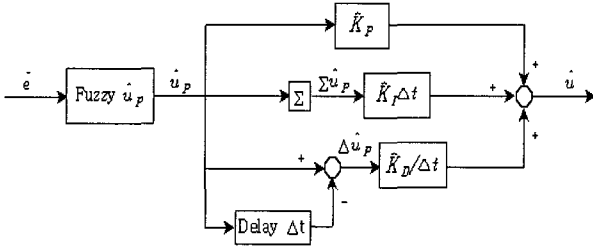


그림 1. Fuzzy PID 제어기의 구조  
Fig. 1. Structure of fuzzy PID controller

그림 1은 Fuzzy PID 제어기의 구조를 블록선도로 나타낸 것이며, 간단하게 하기 위해 이산치  $k$ 를 생략한 그림이다. 그림 1에서 입력은 정규화된  $\hat{e}(k)$ 를 사용하는데 식 (4), (5)와 같다.

$$\hat{e}(k) = \begin{cases} 1, & s_e e(k) > 1 \\ s_e e(k), & |s_e e(k)| \leq 1 \\ -1, & s_e e(k) < -1 \end{cases} \tag{4}$$

$$s_e = |1/[r(0) - y(0)]| = |1/e(0)| \tag{5}$$

이용하고자 하는 디지털 Fuzzy PID 제어기의 속도형 제어기 식으로 표현하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \hat{u}(k) &= \hat{u}(k-1) + \hat{K}_P \{ \hat{u}_p(k) - \hat{u}_p(k-1) \} \\
 &+ \frac{\hat{K}_I T_S}{2} \{ \hat{u}_p(k) + \hat{u}_p(k-1) \} \\
 &+ \frac{\hat{K}_D}{T_S} \{ \hat{u}_p(k) - 2\hat{u}_p(k-1) + \hat{u}_p(k-2) \}
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서  $\hat{u}_p(k)$ 는 비퍼지화된 출력을 나타내지만, 비선형 출력이다. 그리고  $\hat{K}_P, \hat{K}_I, \hat{K}_D$ 는 각각 정규화된 비례, 적분, 미분 이득을 나타낸다. 비퍼지화된 출력  $\hat{u}_p(k)$ 를 구하기 위해 다음과 같이 간단한 룰을 사용한다.

- R1 : if (  $\hat{e}(k)$  is NB ) then (  $\hat{u}_p(k)$  is NB )
- R2 : if (  $\hat{e}(k)$  is PB ) then (  $\hat{u}_p(k)$  is PB )
- R3 : if (  $\hat{e}(k)$  is AZ ) then (  $\hat{u}_p(k)$  is AZ )

그림 2와 같이 입·출력 소속함수를 간단하게 나타내기 위해 삼각형 소속함수를 사용하였다.  $\hat{e}(k)$ 의 입력 소속함수는 고정되어 있고,  $\hat{u}_p(k)$ 의 출력 소속함수는 변수  $x_1$ 과  $x_2$

에 의해 변한다.

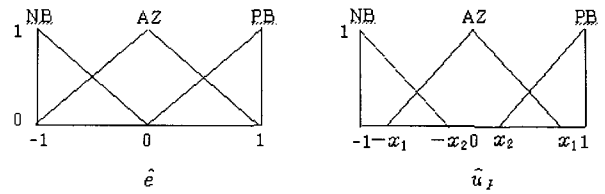


그림 2. 입·출력 소속함수  
Fig. 2. Input and Output membership function

그림 3에서 빗금 친 영역은 각 룰의 퍼지 추론에 의한 결론부의 결합을 나타낸다. 경우 1[그림 3 (a)]은 겹쳐지 않는 인접 소속 함수 때문에 두 영역으로 나누어 진다. 그리고 경우 2[그림 3 (b)-(d)]처럼 겹쳐지는 인접 소속함수 때문에 연결된 영역을 가진다. 경우 2에서 서로 다른 세 영역으로 나누어 지는 것은 식 (7)에 의해 결정된다.

$$\hat{e}_d = (x_1 - x_2) / (1 + x_1 - x_2) \tag{7}$$

그림 3과 그림 2의 입·출력 소속함수 관계에 의해 도식화된 영역에서 삼각형 무게 중심법으로 비퍼지화된 출력 ( $\hat{u}_p(k)$ )을 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

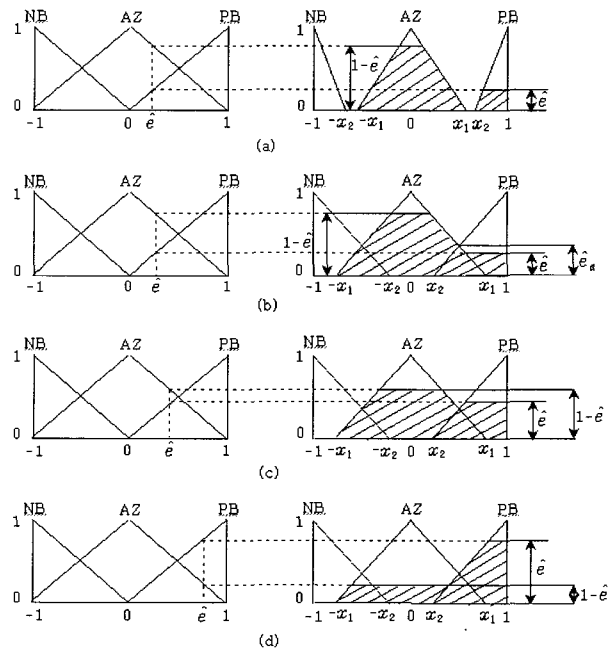


그림 3. 퍼지출력에 대한 2가지 경우  
(a) 경우1:  $x_1 \leq x_2$ . (b) 경우2:  $x_1 > x_2$  범위 A:  $0 \leq |\hat{e}| \leq \hat{e}_d$ . (c) 경우2:  $x_1 > x_2$ . 범위 B:  $\hat{e}_d \leq |\hat{e}| \leq 1 - \hat{e}_d$ . (d) 경우2:  $x_1 > x_2$ . 범위 C:  $1 - \hat{e}_d < |\hat{e}| \leq 1$

Fig. 3. Two cases for fuzzy output aggregation  
(a) Case 1:  $x_1 \leq x_2$ . (b) Case 2:  $x_1 > x_2$  Range A:  $0 \leq |\hat{e}| \leq \hat{e}_d$ . (c) Case 2:  $x_1 > x_2$ . Range B:  $\hat{e}_d \leq |\hat{e}| \leq 1 - \hat{e}_d$ . (d) Case 2:  $x_1 > x_2$ . Range C:  $1 - \hat{e}_d < |\hat{e}| \leq 1$

Case 1 (Nonoverlapping) :  $x_1 \leq x_2$

$$\hat{u}_p = \frac{y_2 \hat{e} [3x_2(2 - |\hat{e}|) + y_2(3 - \hat{e}^2)]}{3[2x_1(1 - \hat{e}^2) + y_2(2|\hat{e}| - \hat{e}^2)]}$$

Case 2 (Overlapping) :  $x_1 > x_2$

Range A :  $0 \leq |\hat{e}| \leq \hat{e}_d$

$$\hat{u}_p = \frac{\hat{e} [3(1 - x_1^2) + 3x_1^2 |\hat{e}| - x_1^2 \hat{e}^2]}{3[2x_1 + 2(1 - x_1) |\hat{e}| - x_1 \hat{e}^2]}$$

Range B :  $\hat{e}_d < |\hat{e}| < 1 - \hat{e}_d$

$$\hat{u}_p = \frac{\hat{e} \{y_2 |\hat{e}| [3x_2(2 - |\hat{e}|) + y_2(3 - \hat{e}^2)] - y_1 \hat{e}_d [(3 - \hat{e}_d)x_1 - y_1]\}}{3|\hat{e}| [2x_1(1 - \hat{e}^2) + y_2(2|\hat{e}| - \hat{e}^2) - y_1 \hat{e}_d]}$$

Range C :  $1 - \hat{e}_d \leq |\hat{e}| \leq 1$

$$\hat{u}_p = \frac{\hat{e} \{z_1 [3 - x_1^2(1 + |\hat{e}| + \hat{e}^2)] - y_2 z_3 [3 - y_2(1 - |\hat{e}| + \hat{e}^2)]\}}{3|\hat{e}| [z_1(2 + x_1 z_2) - y_2 z_3]}$$

$$z_1 = 1 - |\hat{e}|, z_2 = 1 + |\hat{e}|, z_3 = 1 - 2|\hat{e}|$$

$$y_1 = x_1 - x_2, y_2 = 1 - x_2 \quad (8)$$

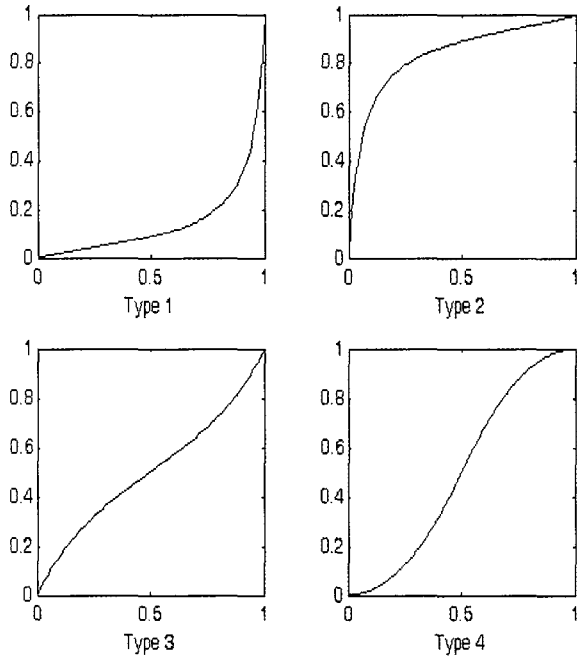


그림 4. Fuzzy PID에 대한 “ $\hat{e}$ 대  $\hat{u}_p$ ” 곡선의 4가지 형태  
Fig. 4. Four types of “ $\hat{e}$  versus  $\hat{u}_p$ ” nonlinear curve for the Fuzzy PID

그림 4는  $\hat{e}(k)$ 의 입력을 가진 퍼지제어기에서 퍼지 추론 [식 8]을 통한 비퍼지화된 출력  $\hat{u}_p(k)$ 의 관계 그래프를 나타낸 것이며  $x_1$ 과  $x_2$ 의 범위에 의해 4가지 Type 비선형 곡선을 보인 것이다.

## 2.2 Fuzzy Gain Scheduler 설계

그림 5는 Fuzzy PID 제어기에서 비퍼지화된 비례 출력  $\hat{u}_p(k)$  이용하여 퍼지추론에서 입력  $\hat{u}_p(k)$ 와  $\Delta \hat{u}_p(k)$ 을 가지고 출력 값인  $K'_p, K'_D, \alpha$  구한 후 식 (9), (11)의 선형 함수에 대입해서 최종 PID 계수 비례이득( $\hat{K}_p$ ), 적분이득( $\hat{K}_I$ ), 미분이득( $\hat{K}_D$ )에 의해 이득계수를 자동-조정하게 하는 제어기 구조를 표현 하였다.

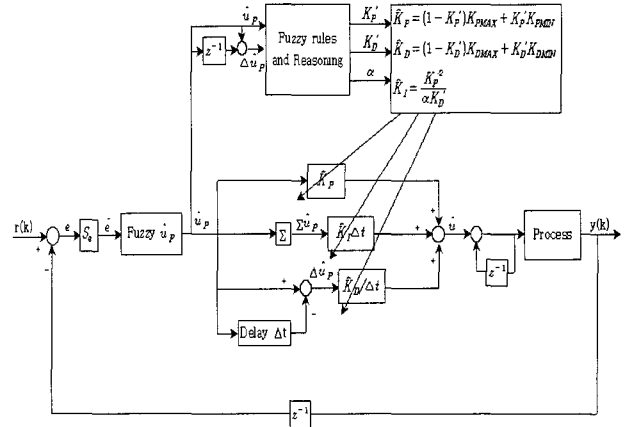


그림 5. Fuzzy Gain Scheduling을 이용한 Fuzzy PID 제어기의 구조

Fig. 5. Structure of Fuzzy PID controllers using Fuzzy Gain Scheduling

최종 PID 계수인  $\hat{K}_p, \hat{K}_D$ 은  $(K_{PMAX}, K_{PMIN})$ 와  $(K_{DMAX}, K_{DMIN})$ 로 범위가 제한된다고 가정하며, 다음 식 (9)의 선형 함수식을 사용한다.

$$\hat{K}_p = (1 - K'_p)K_{PMAX} + K'_pK_{PMIN}$$

$$\hat{K}_D = (1 - K'_D)K_{DMAX} + K'_DK_{DMIN} \quad (9)$$

여기서  $K'_p$ 와  $K'_D$ 는 비례 및 미분 이득의 min-max범위에 대한 계수 와 퍼지 추론의 비퍼지화된 출력 값이다.

$$0 < K'_p < 1 \quad 0 < K'_D < 1 \quad (10)$$

최종 PID 계수인 적분 이득( $\hat{K}_I$ )은 Zeigler-Nichols 동조 규칙을 기초로 구하는데  $\hat{u}_p(k)$ 와  $\Delta \hat{u}_p(k)$ 의 입력으로 퍼지추론을 통해  $K'_p, K'_D, \alpha$ 를 구하고 식 (11)의 선형수식으로 적분 이득( $\hat{K}_I$ )를 구한다.

$$T_I = \alpha T_D \quad T_I = \frac{K_p}{K_I} \quad T_D = \frac{K_D}{K_p}$$

$$\hat{K}_I = \frac{K'_p}{\alpha T_D} = \frac{K_p^2}{\alpha K'_D} \quad (11)$$

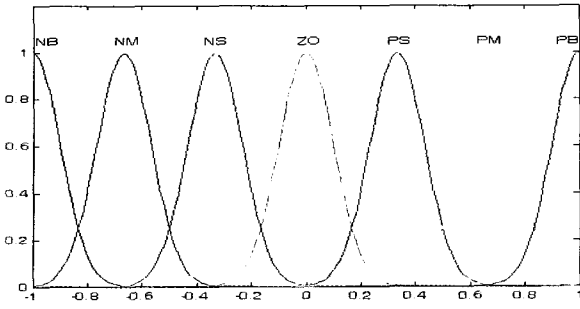


그림 6.  $\hat{u}_p(k)$ 와  $\Delta\hat{u}_p(k)$ 의 입력 소속 함수  
 Fig. 6. Input membership function of  $\hat{u}_p(k)$  and  $\Delta\hat{u}_p(k)$

그림 6은 비퍼지화된 출력  $K'_P, K'_D, \alpha$ 를 구하는 퍼지추론의 입력 소속 함수를 표현하였다.

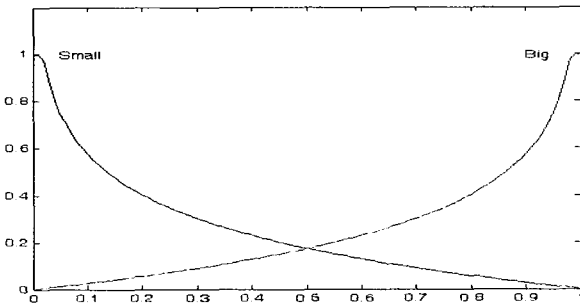


그림 7.  $K'_P, K'_D$ 의 출력 소속 함수  
 Fig. 7. Output membership function of  $K'_P$  and  $K'_D$

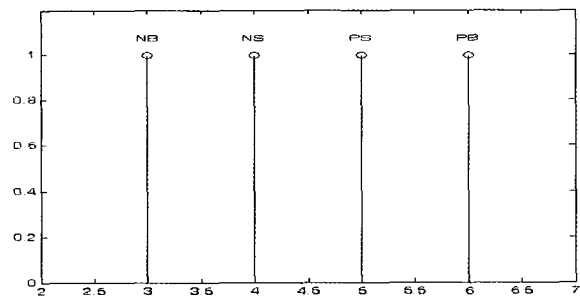


그림 8.  $\alpha$ 의 출력 소속 함수  
 Fig. 8. Output membership function of  $\alpha$

그림 7은  $K'_P, K'_D$ 의 출력 소속 함수를 그림으로 표현한 것으로 식 (12)와 같다. 그림 8은  $\alpha$ 의 출력 소속 함수를 그림으로 표현한 것이며, 여기서  $\alpha$ 는 비퍼지화된 출력 값으로 상수이다.

$$\mu_{Small}(x) = -\frac{1}{4} \ln x \text{ or } x_{Small}(\mu) = e^{-4\mu} \quad (12)$$

$$\mu_{Big}(x) = -\frac{1}{4} \ln(1-x) \text{ or } x_{Big}(\mu) = 1 - e^{-4\mu}$$

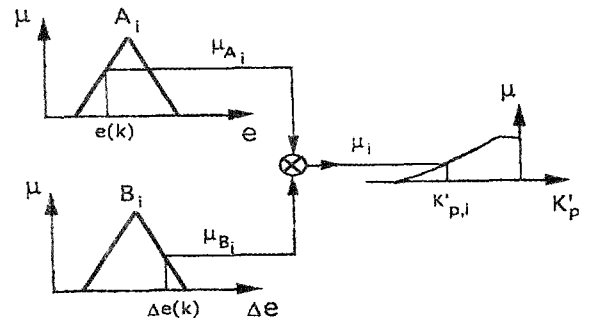


그림 9.  $K'_P, K'_D$  퍼지 룰 추론의 블록선도  
 Fig. 9. block diagram of  $K'_P$  and  $K'_D$  fuzzy rule

그림 9의  $\mu_i$ 는 퍼지 추론의 전진부에서 각 소속함수에 대해 product 연산을 통해 얻어진다.

$$\mu_i = \mu_{A_i}[\hat{u}_p(k)] \cdot \mu_{B_i}[\Delta\hat{u}_p(k)] \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^m \mu_i = 1 \quad K'_P = \sum_{i=1}^m \mu_i K'_{P,i} \quad K'_D = \sum_{i=1}^m \mu_i K'_{D,i}$$

그림 8에서 비퍼지화된 출력 값인 상수( $\alpha$ )는 Takagi-Sugeno Type 퍼지추론을 사용하였다. 단위 계단 응답에 의해  $\hat{u}_p(k)$ 와  $\Delta\hat{u}_p(k)$ 의 관계를 이용해  $K'_P, K'_D, \alpha$ 의 퍼지 룰 테이블을 만든 것이 표 1, 2, 3 이다.

표 1.  $K'_P$ 의 퍼지 룰 테이블

Table 1. Fuzzy rule table of  $K'_P$

e Δe	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	S	S	S	S	S	S	S
NM	S	S	S	S	S	S	B
NS	S	S	S	S	S	B	B
ZO	S	S	S	S	B	B	B
PS	S	S	S	B	B	B	B
PM	S	S	B	B	B	B	B
PB	S	B	B	B	B	B	B

표 2.  $K'_D$ 의 퍼지 룰 테이블

Table 2. Fuzzy rule table of  $K'_D$

e Δe	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	B	B	B	B	B	B	S
NS	B	B	B	B	B	S	S
ZO	B	B	B	B	S	S	S
PS	B	B	B	S	S	S	S
PM	B	B	S	S	S	S	S
PB	B	S	S	S	S	S	S

표 3.  $\alpha$ 의 퍼지 룰 테이블

Table 2. Fuzzy rule table of  $\alpha$

e Δe	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PS	NS	NB	NS	PS	PB
NM	PB	PS	PS	NS	PS	PS	PB
NS	PB	PB	PS	PS	PS	PB	PB
ZO	PB	PB	PB	PS	PB	PB	PB
PS	PB	PB	PS	PS	PS	PB	PB
PM	PB	PS	PS	NS	PS	PS	PB
PB	PB	PS	NS	NB	NS	PS	PB

### 3. 유압 서보 모터의 속도 제어 실험

유압 서보시스템은 유압모터와 직접구동 밸브(Direct Drive valve), 관성부하로 이루어진다. 유압 서보시스템에서 제어기의 제어 입력 신호를 D/A 변환기를 사용하여 아날로그 전압으로 바꾼 다음 직접구동 밸브에 인가한다. 직접구동 밸브는 서보 증폭기를 내장하고 있는 일체형으로 직접구동 밸브의 구동신호(제어입력)는 ±10V로 DSP33PLUS 보드(TMS320VC33PGE)에 D/A 변환기를 연결하여 생성하며 직접구동 밸브의 A, B 포트는 유압모터의 포트에 연결되고 유압모터의 축은 커플링을 통해 관성부하를 연결하는 축에 결합된다. 밸브에 의해 제어된 유량은 유압모터로 공급되고 공급된 유량에 비례하여 회전력을 발생시킨다. 관성부하를 고정하는 축은 다시 커플링을 통하여 증분 광부호기로 연결된다. 증분 광부호기는 유압모터의 회전수를 감지하는 부분으로 F/V 변환기를 사용하여 유압모터의 회전수를 전압신호로 변환하고, 변환된 신호는 A/D 변환기를 통과하여 DSP33PLUS 보드로 연결된다. 오실로스코프는 실험 결과 파형과 데이터를 기록한다.

그림 10은 DSP 프로세서로 유압 서보모터의 속도제어 실험을 위한 전체장치의 구성도이다.

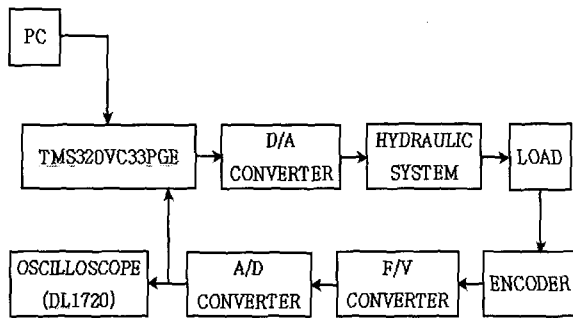


그림 10. 유압 서보 시스템 실험 블록선도  
Fig. 10. Experimental block diagram of the hydraulic servo system

표 4. 모델링을 위한 초기 파라미터들  
Table 4. Initial parameters for modeling

Type	FGS Analog PID	FGS Fuzzy PID Type1	FGS Fuzzy PID Type2	FGS Fuzzy PID Type3
$x_1$	-	0.386	0.00286	0.0
$x_2$	-	0.638	0.99	0.9999
$K_{P_{MIN}}$	0.32	0.32	0.32	0.32
$K_{P_{MAX}}$	0.9	0.9	0.9	0.9
$K_{D_{MIN}}$	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
$K_{D_{MAX}}$	0.003	0.003	0.003	0.003

PC는 TMS320C33 계열 개발 소프트웨어를 사용하여 C 언어로 작성하고 제안한 알고리즘을 DSP 어셈블리 언어로 번역한 뒤 실행 파일을 생성시켜 RS-232 통신 방식으로 다운로드시켜 알고리즘을 수행한다.

실험은 Fuzzy Gain Scheduling을 이용한 Analog PID 제어기와 Fuzzy Gain Scheduling을 이용한 Fuzzy PID 제어기

를 무부하 상태에서 유압 서보시스템에 적용하여 비교하였다.

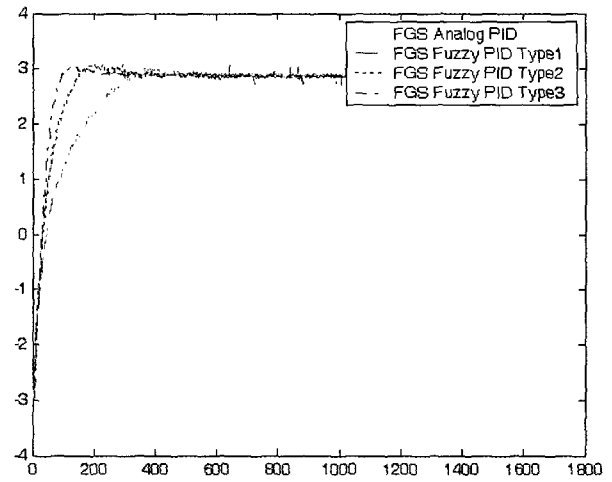


그림 11. 실험 파형 확대한 그림

Fig. 11. The magnified picture of experimental curves

표 5. 실험 파형 결과 비교

Table 5. Comparison of experimental curves

Type	FGS Analog PID	FGS Fuzzy PID Type 1	FGS Fuzzy PID Type 2	FGS Fuzzy PID Type3
$T_r$	0.194s	0.2444s	0.134s	0.094s
$T_s$	0.2s	0.245s	0.14s	0.1s
POS(%)	-	0.4%	0.55%	0.52%

표 4에 사용된 초기 파라미터들은 유압 서보 시스템 실험 전에  $K_p$ ,  $K_d$  계수의 min, max 값을 가정한 것이고, 실험에 사용된 Type의 변수 값을 나타낸 것이다. 그림 11는 유압 서보 시스템의 실험 결과 파형으로 오실로스코프로 파형을 저장한 것이며, 단위 계단응답처럼 상승 부분만 확대한 그림이다. 표 5의 파형 결과 비교에서 볼 수 있듯이 선형 에러를 이용한 FGS Analog PID 제어기보다 비퍼지화된 비선형 에러를 이용한 FGS Fuzzy PID 제어기가 몇 가지 Type에 따라 상당히 빠른 응답성과 정확성이 있음을 확인 할 수 있었다.

### 4. 결 론

제안한 제어기에서는 PID 제어기의 목표 값과 현재 출력 값의 차인 크리스퍼 출력 오차를 그대로 사용하지 않고 퍼지 추론의 단계는 가지면서 룰 테이블은 갖지 않는 특징이 있으며 출력 소속 함수에 두 변수의 관계와 범위에 의해 도식화된 영역에서 삼각형 무게 중심법으로 비퍼지화된 비선형 출력 값을 PID 계수에 인가하는 새로운 Fuzzy PID 제어기를 제안했다.

기존의 PID 제어기에서 경험과 시행착오로 구한 계수를 이용하지 않고  $K_p$ ,  $K_d$  계수의 min-max 범위를 설정하여 퍼지추론에 의해 새로운  $K_p$ ,  $K_d$  계수를 구한다. 그리고  $K_i$  계수는 Ziegler-Nichols 동조 규칙을 사용하여 이미 구한  $K_p$ ,  $K_d$  계수를 이용하며 이득 계수들이 자동 조정되게 제어기를 설계하였다.

유압 서보 시스템 실험 결과를 통해 제안한 FGS(Fuzzy Gain Scheduling)을 이용한 Fuzzy PID 제어기는 Analog PID 제어기와 FGS(Fuzzy Gain Scheduling)을 이용한 Analog PID 제어기보다 응답 특성에서 Type 형태에 따라 더욱 향상된 결과를 보임을 확인 하였다.

### 참 고 문 헌

[1] Baogang Hu, George K. I. Mann, Raymond G. Gosine, "New Methodology for Analytical and Optimal Design of Fuzzy PID Controllers", IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS, Vol. 7, No. 5, pp. 521-539, Oct. 1999.

[2] Zhen-Yu Zhao, Masayoshi Tomizuka, Satoru Isaka, "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers", IEEE TRANSACTION ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, Vol. 23, No. 5, Sep./Oct. 1993.

[3] Junghui Chen, Tien-Chih Huang, "Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control", Journal of Process Control, pp. 211-230, 2004.

[4] C. C. Hang, K. J. Astrom, W. K. Ho, "Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula", IEE PROCEEDINGS-D, Vol. 138, No. 2, pp. 111-118, Mar. 1991.

[5] P. K. Dash, A. C. Liew, B. R. Mishra, "An adaptive PID stabilizer for power systems using fuzzy logic", Electric Power Systems Research 44, pp. 213-222, 1998.

[6] Chia-Ju Wu, Ching-Huo Huang, "A Hybrid Method for Parameter Tuning of PID Controllers", J. Franklin Inst. Vol. 334B, No. 4, pp. 547-562, 1997.

Computing 1, pp. 201-214, 2001.

### 저 자 소 개



#### 신위재 (Wee-jae Shin)

1975년 동아대학교 전자공학과  
 1979년 동대학원 전자공학과(공학석사)  
 1989년 동대학원 전자공학과(공학박사)  
 1996년-1997년 대한전자공학회 부산경남 지부장  
 1998년-1999년 대한전자공학회 학술위원  
 1998년 일본 Kyushu 대학 객원교수

2000년-현재 한국신호처리·시스템학회 부회장  
 1983년-현재 경남대학교 전자전기공학부 교수  
 관심분야 : 시스템지능제어 및 자동화, 신호처리