

# 3S Look-up table을 이용한 서보전동기의 속도제어에 관한 연구

## A study on the Speed Control of Servo Motor using 3S Look-up Table

김 동 회\*, 신 위 재\*\*  
Dong-Hee Kim\*, Wee-Jae Shin\*\*

### 요 약

본 논문은 3S Look-up table을 이용한직류서보 전동기 시스템의 퍼지 PID제어의 한 기법을 제안한다. 이러한 제어기법은 재래식 조정기법인 ITAE table을 이용하여 제어기의 변수를 1차 조정한 다음 퍼지제어 행렬을 사용하여 작은 이득값의 변화를 자동 결정함으로써 전동기 속도제어 시스템의 정상상태오차와 과도응답 특성을 향상시킬 수 있었다. 또한 이러한 시스템은 마이크로프로세서를 이용함으로써 쉽게 실현할 수 있었다.

### ABSTRACT

This paper present an approach to fuzzy PID control of DC servo control system. This approach assumes that available nominal controller parameter settings through some classical tuning technique (ITAE table). By using an appropriate fuzzy matrix(which is 3-separate Look-up Table)<sup>1)</sup>, we determine small changes on these gain values during the system operation, and these lead to improved performance of the transient and steady behavior of the motor speed control system. this is achieved at the expense of some small extra computational effort, which can be very easily undertaken by a microprocessor.

### I. 서 론

퍼지제어는 퍼지논리에 기초를 두고 있으며, 지난 몇 년 사이에 퍼지 이론의 응용분야로서 가장 활발히 연구 응용되어 왔다. 직류 전동기 제어는 일반적으로 구조가 간단하고 실현하기가 용이한 PID(Proportional, Integral, Derivative) 제어를 많이 이용하고 있다. 그러나 PID 제어기는 적당한 파라미터(Parameter)를 선정하는 데 있어서, 제어대상의 상태를 어느 정도 알고 있어야 하고, 제어 대상의 특성이 크게 변화될 때 파라미터를 바꾸어야 하는 등, 변화하는 제어환경 또는 시스템의 비선형성에 대한 적응능력이 부족하다. 따라서 이러한 점을 해결하기 위해 자기동조(Self-tuning)방법<sup>3)</sup> 등 여러 가지가 있으나, 이 또한 정확한 수학적 해석이 필요하다. 따라서 왜란이 심한 경우나 비선형 시스템에서 퍼지제어 알고리즘을 이용하여, PID 제어기의 파라미터를 자동으로 조정하여 성능을 향상시킨 연구논문이<sup>3),4),5)</sup> 많이 발표 되었으나, 기존의 PID 이득조정기술(Gain Tuning Technique)을 이용하여 얻어진 PID 이득값은 시스템의 입력이나 출력의 상태에 관계없이 일정하므로 시스템의 과도응답을 해소 하기에는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 Macvicar-Whelan 퍼지제어행렬을 이용하여 설정한 이득값을 기준으로하여 안정도의 만족하는 범위 내에서 이득값을 변화시켜 오버슈트(Overshoot) 및 정상상태편차(Steady State Error)를 최적한 상태로 할 수 있는 3S(separte) Look-up table 방법을 제안 하고자 한다.

\*경남대학교 전자공학과  
\*\*경남대학교 전자공학과 부교수

## II. PID 제어기 구성

PID 제어기의 전달함수는 식 (2.1)와 같다.

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + sK_D + \frac{K_I}{s} \quad (2.1)$$

입력  $V_a(s)$ 에 대한 속도  $W_m(s)$ 의 전동기 전달함수는 식 (2.2)와 같다.

$$\frac{W_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{J_m L_a s^2 + (L_a B_m + R_a J_m)s + (R_a B_m + K_t K_b)} \quad (2.2)$$

제어시스템의 양호한 성능을 얻기 위해서는 매개변수들을 최적화 시켜야 하는데 본 연구에서는 ITAE criterion을 이용하여 PID 제어기의 최적화된 이득을 구하고자 한다. 본 연구에서 이용되는 시스템의 차수는 3차이므로 ITAE table중 식 (2.3)을 이용하고, 속도 제어계통의 블록선도는 그림 2.1과 같다.

$$s^3 + 1.75 \omega_n s^2 + 2.15 \omega_n^2 s + \omega_n^3 \quad (2.3)$$

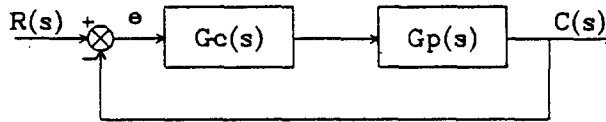


Fig 2-1. Block diagram of DC motor control system.

여기서 소형모터의 경우  $B_m$ 은 무시할 수 있다.  
따라서 전체 전달함수  $T(s)$ 는 다음과 같다.

$$T(s) = \frac{K_t(K_D s^2 + K_P s + K_I)}{s^3 + (K_t K_D + \frac{R_a}{L_a})s^2 + (\frac{K_t K_b}{L_a J_m} + K_t K_P)s + K_t K_I} \quad (2.4)$$

식 (2.3)과 식 (2.4)에 의해서 를 구할 수 있다.

## III. 퍼지제어기

### 3.1 입력변수의 퍼지화

본 논문에서는 컴퓨터를 사용하여 제어기를 구성하였으므로, 입력 변수의 전체집합을 이산화 하는 것이 효율면에서나 제어기 설계 측면에서 장점이 있기 때문에 연속적인 입력값을 구간 별로 이산화시켜 정의한다. 이산화 구간을  $[-6 \sim +6]$  사이의 정수로 이산화 시키면 표 3.1과 같이 이산화 시킬 수 있다.

Table 3.1. Discrete of error and change of error.

오차 (%)	오차변화분 (%)	이산화준위
$E \geq +50$	$\Delta E \geq +25$	+6
$+50 > E \geq +40$	$+25 > \Delta E \geq +20$	+5
$+40 > E \geq +30$	$+20 > \Delta E \geq +15$	+4
$+30 > E \geq +20$	$+15 > \Delta E \geq +10$	+3
$+20 > E \geq +10$	$+10 > \Delta E \geq +5$	+2
$+10 > E \geq +0$	$+5 > \Delta E \geq +0$	+1
$+0 > E > -0$	$+0 > \Delta E > -0$	0
$-0 \leq E < -10$	$-0 \leq \Delta E < -5$	-1
$-10 \leq E < -20$	$-5 \leq \Delta E < -10$	-2
$-20 \leq E < -30$	$-10 \leq \Delta E < -15$	-3
$-30 \leq E < -40$	$-15 \leq \Delta E < -20$	-4
$-40 \leq E < -50$	$-20 \leq \Delta E < -25$	-5
$E \leq 50$	$\Delta E \leq -25$	-6

### 3.2 추론 방법

입, 출력 변수를 선정하여 제어규칙을 결정하는 방법은 여러 가지 경우가 있으나, 본 연구에서는 전문가의 경험 및 제어 지식을 도입하는 방법으로 추론 규칙을 정한다. 그리고 Tzafestas가 제안한<sup>5)</sup> Macvicar-Whelan의 퍼지 제어 행렬을 응용하여 퍼지 PID 제어를 하고자 한다. Tzafestas의 퍼지 PID제어기의 경우 Look-up Table을 하나만 구성하여 제어를 함으로서 PID 제어 알고리즘을 완전하게 표현을 하지 못하였다. 그래서 본 연구에서는 Look-up Table을 PID 각각에 대하여 구성하여 제어를 하고자 한다. 제어시스템의 전체 블록 선도는 그림 3.1와 같다. 그림 3.1에서 퍼지제어기로의 입력은 설정치와 회전속도계(T, G)와의 오차와, 오차의 변화분이다.

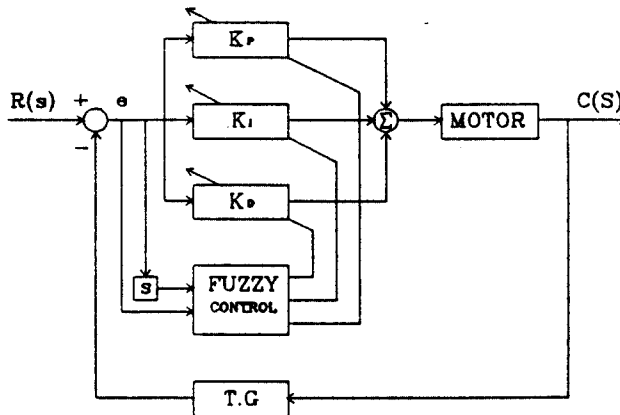


Fig 4-1. Block diagram of control system.

### 3.3 PID 퍼지 3S(separate) Look-up Table 구성 방법

#### 3.3.1 PID 제어기의 특성

PID 제어의 특성을 그림 3.2의 각 영역에 대해 알아보면 다음과 같다.

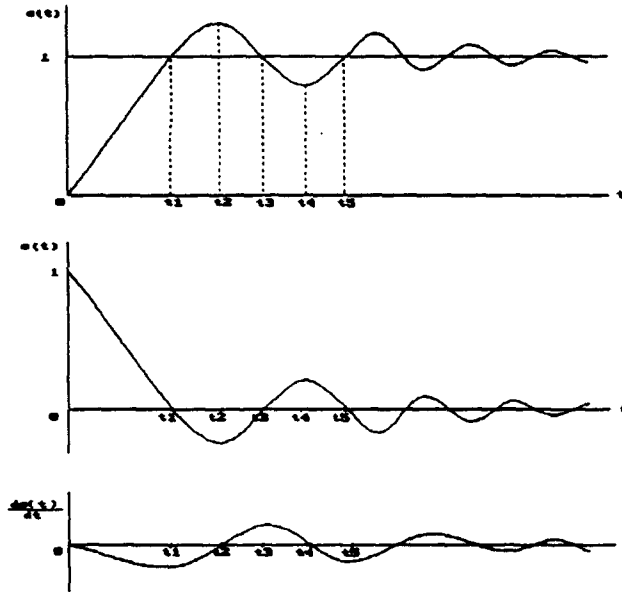


Fig 4-2. Time response for the unit step.

0 - t<sub>1</sub>: 빠른 상승시간을 요구하므로 비례이득과 적분이득을 증가 시킴으로써 상승 시간을 줄인다.

t<sub>1</sub> - t<sub>2</sub>: 오버슈트가 발생하였으므로 비례이득과 미분이득을 감소 시키고 적분 이득을 증가 시킴으로써 오버슈트를 줄인다.

t<sub>2</sub> - t<sub>3</sub>: 오차변화의 기울기가 반대이고 오차가 줄어들고 있으므로 t<sub>1</sub> - t<sub>2</sub> 영역과 부호만 반대로 하면 된다.

t<sub>3</sub> - t<sub>4</sub>: 이 영역은 설정치 보다 낮아지고 있는 언더슈트(undershoot)상태이므로 적분 이득은 감소시키고 미분 이득을 증가시켜 언더슈트를 줄인다.

t<sub>4</sub> - t<sub>5</sub>: 오차변화의 기울기가 반대이고 오차가 줄어들고 있으므로 t<sub>3</sub> - t<sub>4</sub> 영역과 부호만 반대로 하면 된다.

3.3.2 3S(separate) Look-up Table 구성 알고리즘

퍼지 PID 제어행렬은 앞에서 언급한 내용을 근거로 하여 P, I, D 각각에 대하여 Look-up table을 구성한다. 4개의 영역으로 나눈 Look-up table을 표 3.2에 나타내었다. 여기서

Table 3.2. Simplicity of Proportional fuzzy control matrix.

		ΔE		
		+L	0	-L
-L		II	I	
E 0		III	IV	
+L				

I 영역: 오차의 편차는 음, 오차가 음 이므로 그림 3.2에서  $t_1 - t_2$  부분인 오버슈트 구간이다 따라서 비례이득과 미분이득은 감소, 적분이득은 증가.

II 영역: 오차의 편차는 양, 오차가 음 이므로 그림 3.2에서  $t_2 - t_3$  부분이므로 비례이득과 미분이득은 약간 증가, 적분이득은 약간 감소.

III 영역: 오차의 편차는 양, 오차가 양이므로 그림 3.2에서  $t_3 - t_4$  부분인 언더슈트 구간 이므로 비례이득과 미분이득은 증가, 적분이득은 감소.

IV 영역: 오차의 편차는 음, 오차가 양이므로 그림 3.2에서  $0 - t_1$  부분과  $t_4 - t_5$  부분인 상승 구간이므로 비례이득과 미분이득을 약간 증가 적분이득은 약간감소.

II, IV 영역은 대각으로 나뉘어져서 대각선 부분은 빠르게 오차를 수정할 수 있는 부분이므로 "0"으로 하고, 대각으로 나뉘어진 부분은 부호를 서로 반대로 한다.

### 3.3.3 제어 규칙

퍼지 제어기의 입력변수는 각 샘플링 시간 마다 설정치에 대한 오차(E)와 오차변화분( $\Delta E$ )이며, 이것은 적당한 언어변수로 변환된후 IF-THEN 형태의 언어규칙으로 출력을 결정하게 된다. 또한, 복수개의 규칙들이 모여서 제어규칙 집합을 이룰때 각각의 규칙들 사이에는 "also" 라는 언어적 연관성을 가진다.

본 논문에서 제어기의 동특성은 PID 제어기의 제어지식을 언어적 형식으로 나타낸 제어규칙에 의해 결정되는데, 이는 다음과 같은 형식의 퍼지 조건문들로 이루어 진다.

즉,  
 IF (조건부) THEN (결론부)  
 여기서 조건부와 결론부는 각각 정성적인 언어로 표현되고, 각각 복수개의 퍼지변수들이 도입될 수가 있으며, 전체 제어규칙은 복수 입력, 복수 출력 퍼지 조건문들로 구성된다.

Table 3.3 Proportional matrix.

		$\Delta E$							
		+L	+M	+S	+0	-0	-S	-M	-L
E	-L	0	-0	-S	-S	-M	-M	-L	-L
	-M	+0	0	-0	-S	-S	-M	-M	-L
	-S	+S	+0	0	-0	-S	-S	-M	-M
	-0	+S	+S	+0	0	-0	-S	-S	-M
	+0	+M	+S	+S	+0	0	-0	-S	-S
	+S	+M	+M	+S	+S	+0	0	-0	-S
	+M	+L	+M	+M	+S	+S	+0	0	-0
	+L	+L	+L	+M	+M	+S	+S	+0	0

Table 3.4 Integral matrix.

		$\Delta E$							
		+L	+M	+S	+0	-0	-S	-M	-L
E	-L	0	-0	-S	-S	+M	+M	+L	+L
	-M	-0	0	-0	-S	+S	+M	+M	+L
	-S	-S	-0	0	-0	+S	+S	+M	+M
	-0	-S	-S	-0	0	+0	+S	+S	+M
	+0	-M	-S	-S	-0	0	-0	-S	-S
	+S	-M	-M	-S	-S	-0	0	-0	-S
	+M	-L	-M	-M	-S	-S	-0	0	-0
	+L	-L	-L	-M	-M	-S	-S	-0	0

Table 3.5 derivative matrix.

		$\Delta E$							
		+L	+M	+S	+0	-0	-S	-M	-L
E	-L	0	+0	+S	+S	-M	-M	-L	-L
	-M	+0	0	+0	+S	-S	-M	-M	-L
	-S	+S	+0	0	+0	-S	-S	-M	-M
	-0	+S	+S	+0	0	-0	-S	-S	-M
	+0	+M	+S	+0	+0	0	+0	+S	+S
	+S	+M	+M	+S	+S	+0	0	+0	+S
	+M	+L	+M	+M	+S	+S	+0	0	+0
	+L	+L	+L	+M	+M	+S	+S	+0	0

그리고 이득조정 방법은 Tzafestas가 제안한 식 (3.1)을 이용하여 PID 제어기의 이득을 조정하였다.

$$\begin{aligned} K_P &= P' + CV\{E, \Delta E\} \times k_1 \\ K_I &= I' + CV\{E, \Delta E\} \times k_2 \\ K_D &= D' + CV\{E, \Delta E\} \times k_3 \end{aligned} \quad (3.1)$$

여기서

$CV\{E, \Delta E\}$  = 퍼지제어기 출력값  
 $P', I', D'$  = 이득조정에 의해 얻어진 값  
 $k_1, k_2, k_3$  = 각 제어기의 변화율

### 3.4 비퍼지화

비퍼지화 방법에는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 일반적인 PI 제어기와 유사한 특성을 가지고 있는 무게 중심법을 사용한다. 제어 입력을 결정하기 위한 식은 아래와 같다.

$$U_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(u_j) \times u_j}{\mu(u_j)} \quad (3.2)$$

여기서

$U_0$ : crisp 제어입력(무게중심)  
 $U_j$ : 소속값이 무게중심이 되는 제어값  
 $\mu$ : 소속함수  
 $n$ : 제어변수 전체집합의 이산화 준위 또는 등급

## IV. 실험 및 고찰

본 연구에서 제안한 속도제어 계통을 그림 4.1과 같이 구성하여 실험하였다.

여기서 컴퓨터는 80486(25MHz) IBM-PC를 사용하였고, DATA ACQUISITION BOARD는 A/D변환 속도가 30KH이고 A/D변환 채널이 16개, D/A변환 채널 2개, 디지털 입,출력이 각각 16 bit Timer와 counter가 3개 있는 PCL-812 BOARD를 사용하였고, 직류 전동기는 EC (Electro-Craft)사의 E-530-01을 사용하였으며, T. G는 EC(Electro-Craft)사의 M-110을 사용하였다. 그리고 신호발생기에서는 3KHz의 삼각파를 발생하도록 하였다.

### 4.1 실험결과 및 고찰

실험에서 사용한 E-530-01의 사양을 이용하여 식 (2.3)과 식 (2.5)에 의해서  $K_P, K_I, K_D$ 를 구하면

$$K_P = 6.809, \quad K_I = 0.00154, \quad K_D = 1816.96 \quad (4.1)$$

식 (4.1)에서 얻은 이득을 기존의 PID제어, 퍼지 3S 제어, Tzafestas 제어, 3가지의 제어 방법으로 실험한 결과는 다음과 같다. 그림 4.3는 직류 전동기의 속도를 2500[rpm]으로 설정 하였을때의 속도응답 특성으로 세 경우를 비교하면 표 5.1과 같다. 여기서 상승시간은 3개의 제어기 모두가 같으나 최대 오버슈트나 정상상태 도달 시간은 3S 제어기가 다른 제어기에 비하여 성능이 우수함을 알수 있다.

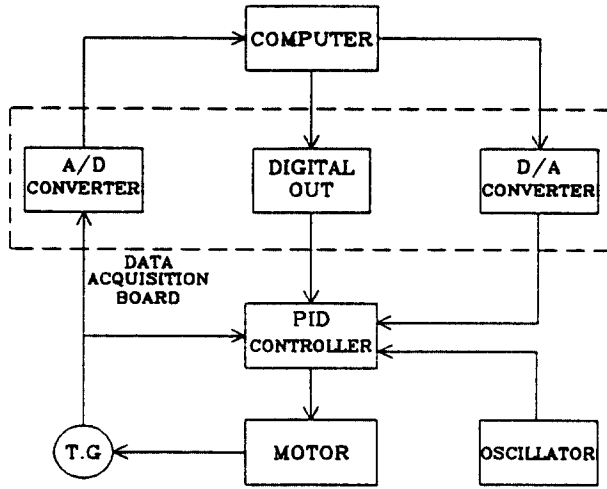


Fig 5-1. Block diagram of proposed speed control system.

Table 4.1 Response result for Fig.

	최대 오버슈트	정상상태 도달시간
3S	131 [rpm]	489 [msec]
Tzafestas(1S)	142 [rpm]	738 [msec]
PID	185 [rpm]	816 [msec]

그림 4.4는 직류 전동기의 속도를 2200[rpm], 2000[rpm], 1800[rpm]순으로 변화를 시켰을 경우 2200[rpm]에서 2000[rpm]으로 속도를 낮출때의 언더슈트는 3S의 경우 1961[rpm]이고, Tzafestas는 1949[rpm], PID는 1871[rpm]이다. 그리고 속도를 낮출때 PID 제어기가 3S나 Tzafestas보다 51 msec 정도 늦어짐을 아수있다. 이러한 결과는 퍼지 제어기가 PID제어기 보다 변화하는 상황에 대하여 적응능력이 우수하다고 볼 수 있다. 그림 4.5은 3S 제어기의 경우 직류 전동기의 속도를 2500[rpm]으로 설정하여, 이득의 변화율을 각각  $K_P = 0.1$ ,  $K_I = 0.01$ ,  $K_D = 10$ 에서  $K_P = 0.3$ ,  $K_I = 0.02$ ,  $K_D = 15$ 로 변화 시켜 실험한 결과이다. 이러한 이득의 변화율이 제어기의 과도응답 개선에 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 그림 4.6은 PD제어를 할 경우 3개의 제어기를 비교한 결과이다. 여기서 3S제어기와 Tzafestas 제어기의 결과가 비슷하게 나왔다. 그 이유는 비례이득 조정 Look-up Table과 미분이득 조정 Look-up Table이 유사 하기때문에 그림 4.6과 같은 결과가 나왔다. 그림 4.7은 PI 제어를 할 경우 3개의 제어기를 비교한 결과이다. 표 4.2에 나타낸 결과 처럼 3S 제어기가 Tzafestas 제어기 보다 과도응답이 적은 것을 알수 있다. 그이유는 비례이득 조정 Look-up Table과 적분이득 조정 Look-up Table이 이득의 조정부호가 반대이기 때문에 Tzafestas 제어기의 경우는 비례이득과 적분이득의 변화 방향을 같이할 수 밖에 없으므로 그림 4.7과 같은 결과가 나왔다고 생각된다.

Table 4.2 Response result for Fig. 4.7

	최대 오버슈트	정상상태 도달시간
3S	127 [rpm]	495 [msec]
Tzafestas(1S)	136 [rpm]	743 [msec]
PID	184 [rpm]	819 [msec]

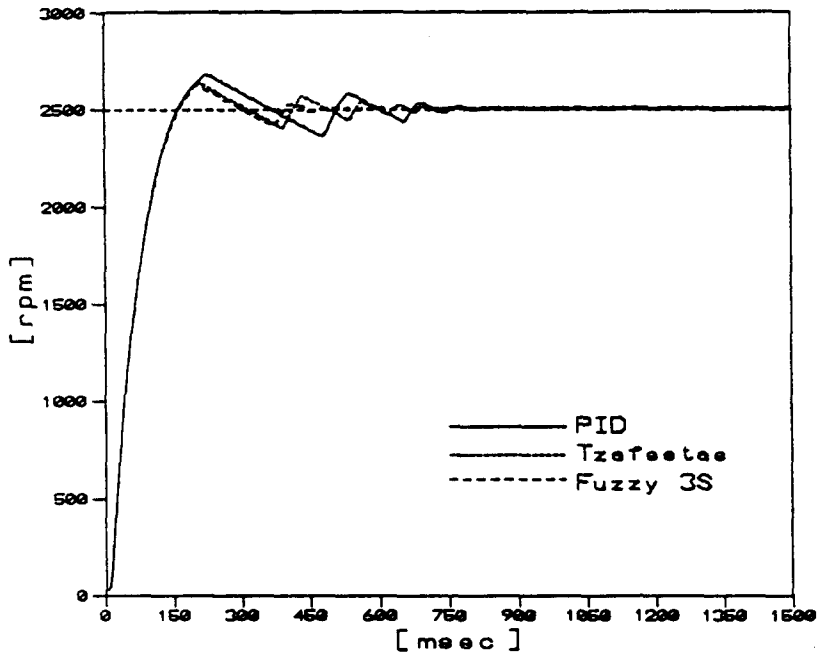


Fig 5-2. Time response of fuzzy(3S,1S) and PID control system with 2500 [rpm].

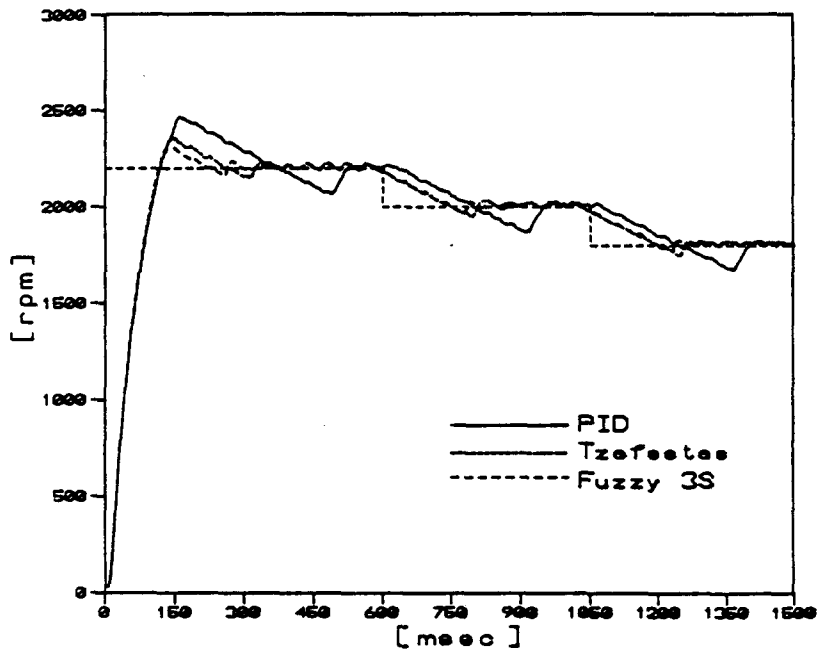


Fig 5-3. Time response of fuzzy(3S,1S) and PID control system with 2200, 2000, 1800 [rpm].



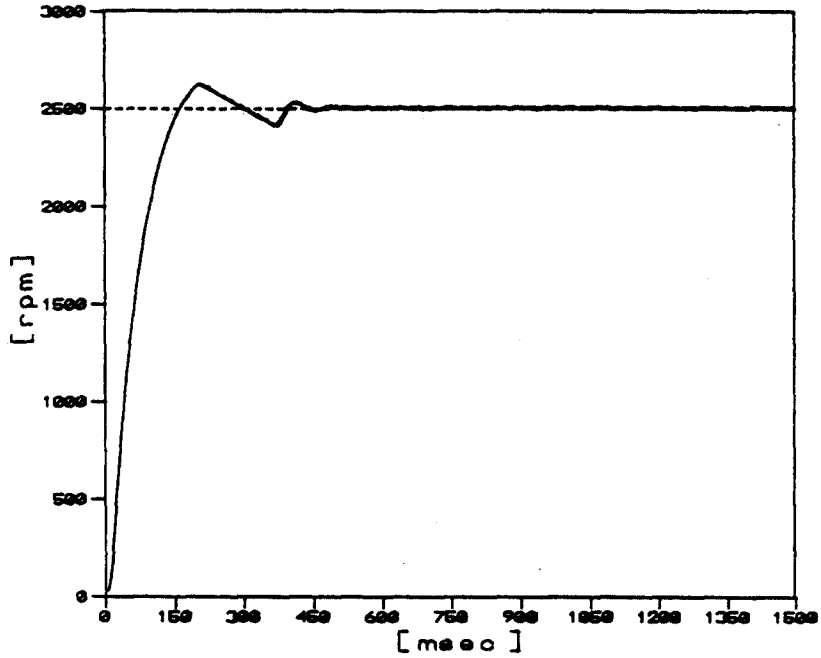


Fig 5-4. Time response of fuzzy 3S control system according to change of gain rate.

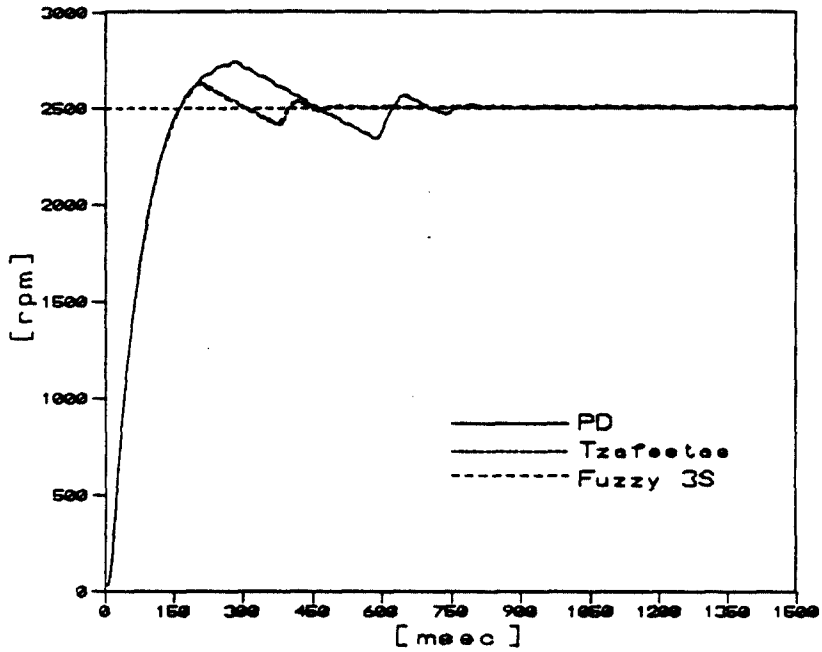


Fig 5-5. Comparison of 3S and Tzafestas with PD controller time response.

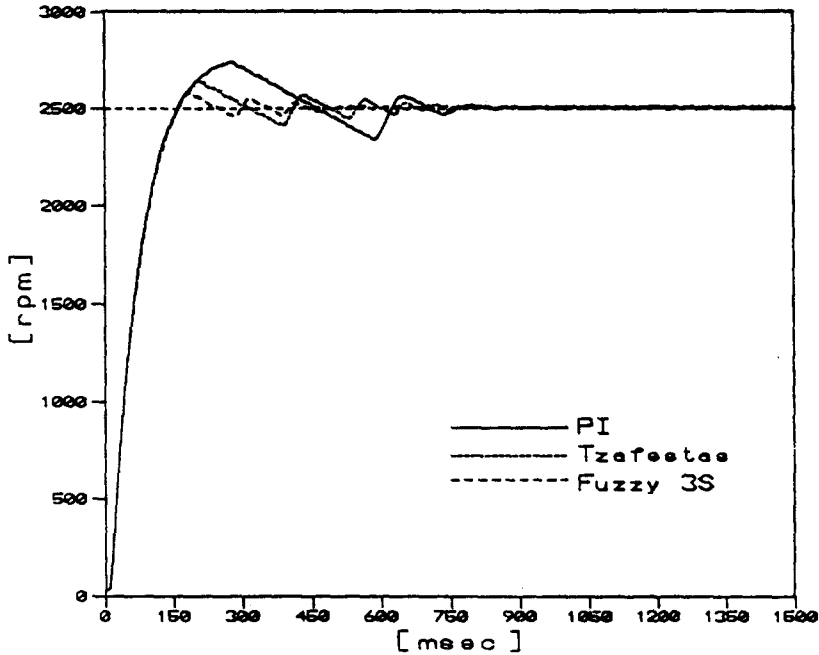


Fig 5-6. Comparison of 3S and Tzafestas with PI controller time response.

## V. 결 론

Tzafestas는 기존의 PID 제어기에 1개의 퍼지 Look-up Table을 사용하여 PID제어기의 이득을 변화시키는 제어 알고리즘을 제안하였다. 기존의 PID 제어기와 Tzafestas가 제안한 제어기, 그리고 3S Look-up Table을 이용한 제어기, 3개를 비교하여 실험한 결과 본 논문에서 제안한 제어기가 다른 2개의 제어기에 비해 오버슈트나 정상상태오차가 많이 개선됨을 알 수 있었다.

본 연구에서 제안한 제어기는 기존의 PID제어기를 이용하는 시스템에 새로운 하드웨어의 구성없이 마이크로 프로세서를 이용한 퍼지 추론부를 추가하여 간단하게 구성할 수 있다. 그리고 본 논문에서 제안한 제어기를 이용하여 직류 서보 전동기의 속도제어 뿐만 아니라 로봇의 위치제어에도 응용할 수 있으리라 기대된다. 그러나 3개의 분리된 Look-up Table을 사용함으로써 추론과정의 시간이 길어짐에 따라 실시간 처리에 문제점이 있었다. 앞으로 이러한 문제점을 해결하는 연구가 요구된다.

## 참 고 문 헌

1. H. -J. Zimmermann. "FUZZY SET THEORY-and Its Applications, second edition." Kluwer Academic Publishers. 1991.
2. 이 광혁, 오 길록 "퍼지이론 및 응용 II : 응용," 홍릉과학출판사. 1991
3. P. Vega & C. Prada & V. Aleixandre. "Self-turning predictive PID controller," IEE PROCEEDINGS-D. pp138, No.2, MAY 1991.
4. S. Tzafestas, "Incremental Fuzzy Expert PID Control" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 37, No. 5, Oct, 1990.

5. Shuta Murakami & Mikio Meada. "AUTOMOBILE SPEED CONTROL SYSTEM USING A FUZZY LOGIC CONTROLLER," Industrial Application of Fuzzy Control. North-Holland. pp105. 1985.
6. D. A. Linkens & S. B. Hasnain. "Self-organising fuzzy Logic Control and application to Mucle relaxant anaesthesia" IEE PROCEEDING-D, pp138. No3, MAY 1991.
7. Richard C. Drof. "Modern Control Systems," Sixth Edition. Addison-Wesley. 1992.
8. John Van de Vegte "FEEDBACK CONTROL SYSTEMS," Prentice-Hall. Inc. 1986.
9. Charles L. Phillips and H. Troy Nagle, Jr "Digital Control System Analysis and Design," Prentice-Hall. Inc. 1984.
10. Dana F. Geiger "Phaselock Loops for DC Motor Speed Control," John Wiley & Sons, Inc. 1981.
11. Kenji Tamaki, Kiyoshi Ohishi, Kouhel Ohishi and Kunio Miyachi. "Microprocessor-based Robust Control of a DC servo Motor," IEEE Control Systems. pp30 - 35. 1986
12. Ernest O. Doebelin. "CONTROL SYSTEM PRINCIPLES AND DESIGN," JOHN WILEY & SONS, Inc. 1985.
13. J. MICHAEL JACOB. "INDUSTRIAL CONTROL ELECTRONICS APPLICATION AND DESGIN," Prentice-Hall. 1989.