

工學碩士 學位論文

퍼지 PID제어 파라미터의
자동조정에 관한 연구

指導教授 洪 淳 一

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

李 亨 宰

李亨宰의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2002 年 6 月 22日

主	審	工學博士	李 東 喆
委	員	工學博士	裴 鍾 一
委	員	工學博士	洪 淳 一



목 차

제 1장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구방법 및 연구내용	3
제 2장 PID 제어와 퍼지추론	5
2.1 PID 제어	5
2.1.1 PID제어의 조정법	6
2.2 퍼지추론	11
2.2.1 Min-Max 중심법	13
2.2.2 대수곱-가산-중심법	17
2.2.3 간략화 추론법	18
2.2.4 퍼지 싱글톤형 추론법	20
제 3장 퍼지추론에 의한 PID제어 파라미터의 자동조정	25
3.1 구 성	25
3.1.1 PID제어기	26
3.1.2 제어대상	27
3.2 제어응답 파형 인식	28
3.3 퍼지규칙 (조정규칙)	31
3.4 소속 함수	32
제 4장 시뮬레이션 및 고찰	36
제 5장 결 론	50
참고문헌	51
ABSTRACT	53

표 목 차

표 1	한계 감도법에 의한 제어기의 정수	7
표 2	식(2. 3)의 제어 대상에 대한 제어기의 정수	10
표 3	식(2. 4)의 제어계에 대한 제어기의 정수	11
표 4	PID 조절을 위한 제어응답 파형의 분류	28
표 5	조정 규칙	31

그 립 목 차

그림 2.1 개루프 시스템의 단위 계단응답	8
그림 2.2 특성함수와 소속함수	12
그림 2.3 퍼지제어	13
그림 2.4 Min-Max 중심법에 의한 퍼지추론	15
그림 2.5 퍼지추론의 결과 통합	17
그림 2.6 「대수곱-가산-중심법」에 의한 퍼지추론	18
그림 2.7 간략화 추론법	20
그림 2.8 퍼지 싱글톤형 추론법	22
그림 2.9 퍼지규칙과 등가인 퍼지 싱글톤형 규칙	23
그림 2.10 퍼지추론의 중심값	24
그림 3.1 단일 루프 제어계	25
그림 3.2 자동조정 시스템	26
그림 3.3 제어의 기본형	27
그림 3.4 응답파형의 최고치로 나타낸 특정량	29
그림 3.5 면적법에 의한 제어응답 파형의 특정량	30
그림 3.6 오버슈트(E)의 소속함수	33
그림 3.7 진폭 감쇠비 소속함수	33
그림 3.8 제어면적의 소속함수	34
그림 3.9 수정계수(CP, CI, CD)의 소속함수	34
그림 3.10 수정계수의 퍼지 싱글톤형 소속함수	35
그림 4.1 인디셜 응답	36
그림 4.2 제어의 응답 ($K_P=23.71$, $T_I=0.908[\text{sec}]$, $T_D=0.227[\text{sec}]$)	37
그림 4.3 시뮬레이션 알고리즘	40
그림 4.4 제어의 응답 ($K_P=1.0$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.2[\text{sec}]$)	42
그림 4.5 제어의 응답 ($K_P=0.45$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.8[\text{sec}]$)	43
그림 4.6 제어의 응답 ($K_P=15$, $T_I=1.4[\text{sec}]$, $T_D=0.26[\text{sec}]$)	44
그림 4.7 제어의 응답 ($K_P=15$, $T_I=1[\text{sec}]$, $T_D=0.3[\text{sec}]$)	45
그림 4.8 제어의 응답 ($K_P=0.6$, $T_I=0.908[\text{sec}]$, $T_D=1.5[\text{sec}]$)	46
그림 4.9 제어의 응답 ($K_P=10$, $T_I=1.5[\text{sec}]$, $T_D=0.3[\text{sec}]$)	47
그림 4.10 제어의 응답 ($K_P=15$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.3[\text{sec}]$)	48
그림 4.11 과도응답법으로 파라미터를 자동 조정한 응답	49

제 1장 서 론

1.1 연구 배경

퍼지제어는 1965년 캘리포니아 대학의 Zadeh교수에 의하여 제일 먼저 “퍼지 집합론”이란 논문을 발표하였다[1]. 1973년 퍼지집합 이론에 기초하여 제어 시스템의 응용에 관한 퍼지 알고리즘을 처음 제안하였다. 1974년 퍼지집합 이론에 기초하여 런던대학의 Mamdani박사가 스팀엔진 실험장치에 퍼지제어를 적용하여 그 응용 가능성을 제시하였다.

퍼지이론의 응용 중에서도 퍼지제어는 가장 진보된 것이고 1980년 덴마크 스미스사의 용융로, 정수기의 약품 주입을 제어, 열차 정위치, 정지제어 등 각 분야에 응용되고 있다 [2, 3].

인간이 기계를 제어하는 경우 애매 모호한 제어지식은 수식으로 엄밀히 표현할 수 없다. 이 때문에 플랜트 등의 제어에 숙련한 운전자가 가지고 있는 정성적인 Know-how를 컴퓨터에 의해 제어하는 것은 곤란한 경우가 있다.

물론 운전자는 수식을 사용하고 있지는 않고, 경험에 의해 얻어진 Know-how에 따라 제어를 하고 있다. 이와 같이 대부분의 Know-how는 주어진 상황에 대응하여 어느 정도 조작을 하면 좋은 것인가를 나타내는 정성적인 량으로 되어 있다. 이 지식은 산업현장에 사용되는 전문용어이지만 일상적인 회화에서 사용되고 있는 언어로 표현할 수 있다.

일상 생활의 회화에서 사용하고 있는 많은 언어는 대단히 애매 모호하다. 이 애매 모호함에는 말의 다양성이나 사물의 상태에 대하여 애매 모호함뿐 아니라 언어가 가지는 의미의 애매 모호함이다. 「젊다」 「아름답다」 등의 말은 그 의미가 애매하여서 말하는 사람이나 듣는 사람의 주관에 의해 여러 가지로 받아들여지는 것이다. 이와 같은 애매함을 컴퓨터에서 처리 가능하면 인간으로서는 바람직한 결과를 가져오게 되고 이 애매함을 컴퓨터에 의해 자동화 시스템의 실현을 기대할 수 있다.

최근 일본에서는 세계적인 전자제품의 제조회사들이 거의 모든 전자제품에 퍼지이론이란 새 기술을 적용한 신제품을 내어놓고 있으며 퍼지제어를 이용한 실용적인 개발에는 일본이 세계적으로 앞서가고 있다 [4, 5].

미국, 유럽 등에서 산업현장의 서보제어 시스템의 응용에 많은 연구가 진행되고 있으며 국내에서도 각 대학, 연구소등 에서 연구가 진행되고 되고 있다 [6, 7]. 그러나 지금까지의 연구는 주로 마이크로 프로세서에 기초한 제어방식을 이용하고 있으며 최근 퍼지제어기의 하드웨어화는 Josephson의 Fuzzy Process, Fuzzy Programmable Logic 회로 등 마이크로 컴퓨터와 혼합한 범용의 퍼지추론 원리에 기초하여 연구하고 있다 [8].

또한 서보제어 시스템에서 위치, 속도제어나 자립형 이동 로봇의 장애물 회피제어 등에 퍼지제어를 실현하는 단계에 있지만 지금까지 일반적으로 사용되고 있는 PID제어에 비교하여 우수한 점을 제시하지 못하고 있는 실정이다 [6, 9].

퍼지로직에 기초한 실 시스템은 지하철 시스템, 자동초점거리 조정 카메라, 냉난방장치 등에 사용되고 있고, 자동항로 로봇, 산업 로봇의 제어, 항공의 응용에 많은 연구가 진행되고 있다. 그 외에 퍼지로직의 응용 가능성이 있는 영역은 영상해석, 패턴인식, 펜글씨 특성인식, 시스템 진단과 데이터 베이스 등이 있다 [10].

퍼지제어는 종래의 제어 기술에서 해결할 수 없었던 문제에 퍼지제어를 조합하여 행하거나 종래와 동일한 수준의 문제를 취급한 경우에도 시스템의 간단, 조작의 용이, 적응의 유연성 등과 같은 특징이 있다. 또한, 퍼지이론의 특징은 불확실한 언어적 정보를 소속함수를 이용하여 수량적으로 취급할 수 있으며 숙련된 기술자가 갖는 Know-how 등 정성적인 양의 제어에 그 기능을 발휘할 것이다.

현재까지 퍼지제어로서 일반화되어 있는 퍼지추론에 의한 기본적인 구성은 다음과 같다. 우선, 인간은 주어진 상황에 대하여 여러 개의 제어규칙을 이용하여 추론을 행하고 실행해야 할 제어지령을 결정하고 있다고 생각한다. 그리고 그 제어 규칙은 숙련한 기술자가 가지고 있는 Know-how을 「만일 상황이 A라면 조작량을 B로서 출력한다.」라는 IF-THEN 형식으로 표현된다.

이 같이 인간의 행동을 규칙으로 기술한 제어 동작을 컴퓨터에 의해서 실행시키기 위해서는 애매 모호한 언어의 정량적인 표현법, 특히 그것을 사용한 IF-THEN 형식의 제어 규칙에 의한 추론법이 필요하다. 그 방법을 제공하는 것

이 퍼지이론이다.

1.2 연구방법 및 연구내용

PID제어기는 프로세서 자동화 분야에 널리 사용되고 있지만 제어 파라미터 결정이 대단히 어렵고 운전자의 경험적 지식이나 Know-how에 기초하여 수동으로 행해지므로 많은 시간과 노력이 소비되고 있다. 따라서 PID제어 파라미터의 조정을 자동화하는 것은 대단히 중요한 것이다.

파라미터 자동조정의 방식에는 여러 가지가 있지만 크게 구별하면 다음의 2가지 방식이 있다.

(1) 시험 신호를 입력하여 제어대상의 모델을 동정한 후 이 모델을 기초로 하여 PID제어기의 파라미터 값을 자동 설계하는 방식.

(2) 같은 방식으로 자동 설계한 파라미터 값 혹은 한계 감도법 등에서 설계한 값을 PID조정계의 초기치로 설정하고 폐루프계의 응답 특성에서 PID제어 파라미터 값을 다시 조정하는 방식.

본 연구는 (2)의 방식을 사용하여 퍼지추론에 의해 PID제어의 파라미터를 다시 조정하는 것이다.

자동조정 방법은 하나의 응답모델을 결정한 후 퍼지추론에 의해 PID제어 파라미터 값을 다시 조정한다.

일반적으로 PID제어기는 목표치와 피드백 된 현재 값의 편차에 대하여 비례, 적분, 미분의 연산을 하고 그 합으로 조작출력 값을 변화시킨다. 이 제어기는 적용 범위가 넓고 대부분의 프로세서에 적용할 수 있지만 제어대상에 맞추어 비례이득, 적분시간, 미분시간의 각 파라미터를 적절한 값으로 조정할 필요가 있다.

파라미터의 조정은 Ziegler - Nichols의 한계 감도법에 의한 고전적 방법이 있지만 실제 현장에서는 숙련된 운전자가 제어응답 파형의 특징을 보고 경험적 지식이나 Know-how에 의해서 조정하고 있다. 이 조정 작업은 어렵고 시간이 걸린다. 따라서 산업현장에서는 조정 작업이 가능한 숙련된 운전자의 확보가 어렵기 때문에 파라미터의 자동 조정이 요구되고 있다.

본 연구는 PID제어기의 파라미터 조정작업에 수반되는 경험적 지식이나 Know-how를 정성적인 조정 규칙으로 작성하고 제어응답 파형의 특정량에서 퍼

지추론에 의해 PID제어기의 각 파라미터를 적절한 값으로 자동조정 하는 법을 나타내었다.

설계방법은 제어계의 과도응답이 설계사양을 만족하도록 PID제어계의 비례이득, 적분시간 및 미분시간을 결정한다. 그리고 파라미터를 적절한 값으로 조정하기 위해서는 퍼지추론을 이용하여 조정규칙과 소속함수의 구성이 매우 중요하다. 여기서는 적절한 파라미터 값이 얻어질 때까지 시행착오를 반복하여 조정규칙과 소속함수를 변경하여 작성한다.

PID제어기의 파라미터 조정은 응답과형을 면적으로 나타낸 오버슈트, 진폭 감쇠비 및 제어면적 등의 특정량을 평가지표로 하여 퍼지추론이 적절히 되는 것을 시뮬레이션에 의해 검토하였다. 그 결과 조정규칙과 소속함수의 구성이 계획대로 되지 않아 퍼지추론에 의해 PID제어파라미터의 자동조정에는 도달하지 못하였지만 과도 응답법에 의한 PID제어 자동조정은 만족하게 행할 수 있었다.

제 2장 PID 제어와 퍼지추론

2. 1 PID 제어

일반적으로 PID제어는 목표치와 피드백 된 제어량의 차 인 제어편차에 기초하여 조작량이 결정된다. 편차가 적으면 조작량도 작고, 편차가 크게 되면 그것에 대응하여 조작량도 크게 하는 것이 적합하기 때문에 제어규칙에는 편차에 비례하는 항을 포함한다. 이것을 비례동작이라 하고 비례라는 의미에서 P 동작으로 약칭한다.

자기 평형성을 갖는 제어대상에 비례 제어만을 행하면 목표치나 외란의 계단 변화에 대해 최종 상태에 일정 편차가 남게 된다. 이것을 정상 편차 또는 오프셋(Off-set)라 부른다. 이 정상 편차는 제어편차의 적분에 비례하는 항을 제어규칙에 포함시켜서 제거할 수 있다. 이것을 적분동작이라 하고 적분이란 의미에서 I 동작으로 약칭한다. 정상편차를 없애는 것이 목적이므로 Reset 동작이라고 한다.

편차 증감의 동향을 조작량의 결정에 반영하여 제어 특성의 개선을 도모하기 때문에 편차의 미분에 비례하는 항도 제어규칙에 포함시킨다. 이것을 미분동작이라 하고 미분이란 의미에서 D 동작으로 약칭한다. 일종의 예견 동작이고 편차의 변화율에 비례하는 것에서 Rate 동작이라고도 한다.

이상 3개의 동작이 제어규칙에 포함된 것이 PID제어이고, 3항 동작제어로 부르기도 한다. 경우에 따라 그 일부를 포함하지 않는 경우는 포함한 것만 명시하여 P제어, PI제어, PD제어 등으로 부른다. PID제어는 이것들의 총칭으로서 쓰여진다.

따라서 PID제어의 제어규칙은 편차 e 를 입력으로 하여 나타내면 식(2. 1)과 같다.

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2. 1)$$

여기서 K_P , K_I , K_D 는 각각 비례이득, 적분계수, 미분계수이다. 일반적으로 식(2. 1)은 식(2. 2)로 나타낸다.

$$u(t) = K_P \left\{ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (2. 2)$$

여기서 K_P , T_I , T_D 는 각각 비례이득, 적분시간, 미분시간이라 부른다. 비례이득은 비례동작에서 편차와 조작량의 비이고 적분시간은 동일한 계단상의 입력에

대한 비례동작과 적분동작의 출력이 같을 때까지의 시간이며, 미분시간은 동일한 경사상의 입력에 대하여 비례동작과 비례·미분동작이 동일 출력에 도달하는 시간의 차와 같다.

편차와 조작량에 알맞은 유효 변화폭(Full scale)을 결정하기 때문에 비례동작을 기본으로 조작량이 유효 폭 변화에 필요한 편차의 변화폭을 백분율로 나타낸 것으로 비례대 라고 한다. 즉, 비례대는 비례이득의 역수를 유효폭으로 규격화한 것에 해당한다. 비례이득을 감도 혹은 비례감도라 부른다. 적분시간의 역수를 리셋(Reset)율 이라고 한다.

제어계의 설계는 비례이득, 적분시간, 미분시간 등 3개의 파라미터 값을 결정하는 것으로 집약되고 이것을 PID제어의 조정(Tuning)이라고 한다.

2.1.1 PID제어의 조정법

조정 방법에서는 여러 가지가 있지만 여기서는 종래의 파라미터 조정법에서 널리 사용되고 있는 두 가지의 방법에 관해서 설명한다.

한가지는 Ziegler-Nichols의 한계 감도법(Boundary sensitivity methods) 이고 다른 하나는 제어대상의 계단응답의 모양에 기초한 방법이 있다.

(1) Ziegler · Nichols의 한계 감도법

이 방법은 PID제어기를 제어대상에 직렬로 접속하고 실제로 장치한 K_p , T_I , T_D 를 조정하는 방법이다. 제어대상은 불안정성 프로세스에 근사하는 경우로 가정하고, 계단상의 외란에 대한 응답의 진폭 감쇠비가 25[%]가 되도록 조정하는 것이다. 다음의 순서에 따라 설계한다.

가. PID조절기는 $T_I = \infty$, $T_D = 0$ 로 하고 비례동작(K_p)만으로 한다.

나. K_p 를 조금씩 증가하여 제어 시스템이 안정한계에 되기까지 크게 한다.

이때의 K_p 를 한계감도라 하고, 이것을 K_C 로 한다.

다. K_p 를 한계감도 K_C 로 할 때 응답의 진동주기 T_C 를 측정한다.

라. 표 1에 의해 이 K_C , T_C 를 갖는 K_p , T_I , T_D 를 결정한다.

표 1 한계 감도법에 의한 PID제어기의 정수

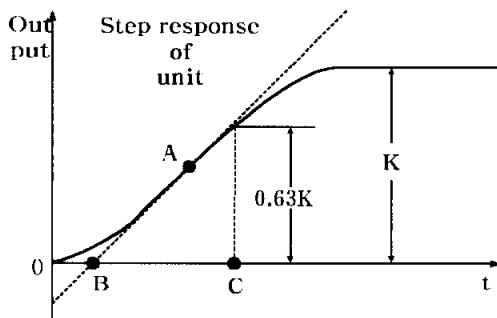
Table 1 Coefficient of PID controller by boundary sensitivity methods

제어기의 동작	K_P	T_I	T_D
비례 P	$0.5 K_C$	∞	0
비례+적분 PI	$0.45 K_C$	$0.83 T_C$	0
비례+적분+미분 PID	$0.6 K_C$	$0.5 T_C$	$0.125 T_C$

(2) 제어대상의 계단응답의 모양에 기초한 방법

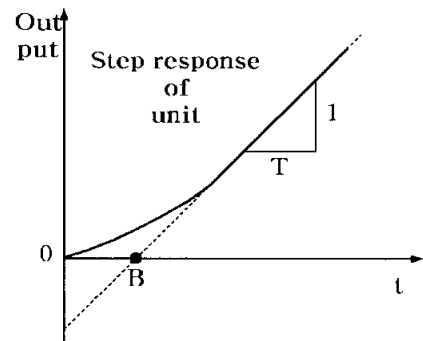
피드백 제어계는 개루프 상태에서 제어대상에 계단입력을 가한다. 그렇게 하면 크게 구분하여 그림 2.1(a), (b)와 같은 출력응답이 구해진다.

그림 2.1(a)와 같이 스텝응답의 정상치가 어떤 일정값에 도달하는 것과 같이 되는 프로세서를 안정성 프로세서라고 부르고, 그림 2.1(b)와 같이 최종값이 무한대로 되는 프로세서를 불안정성 프로세서라 부른다. 이와 같은 스텝응답 파형에서 엄밀한 전달함수를 구하는 것은 많은 처리시간이 필요하다.



(a)안정성 프로세서

(a)Stable processes



(b)불안정성 프로세서

(b)Unstable processes

그림 2.1 개루프 시스템의 단위 계단응답

Fig. 2.1 Unit step response of open loop system

여기서는 그림 2.1(a), (b)의 파형에서 간단히 전달함수를 구하는 것을 설명한다.

그림 2.1(a)의 안정성 프로세스의 경우는 실선으로 나타낸 계단응답 파형의 변곡점 A를 구하고 그 점에서 접선을 구한다. 여기서 접선과 시간축의 교점을 B로 하면 선분 OB가 부동작 시간의 길이이고, B 이후는 1차지연 특성으로 나타난다. 따라서 응답의 정상 값을 K로 하면 응답곡선에서 $K(1 - e^{-1}) = 0.63K$ 로 되는 점을 C로 한다.

이 경우 $OB = L$ 를 부동작시간, $BC = T$ 를 1차지연계의 시정수, K를 1차지연계의 비례이득으로 하면, 스텝응답이 그림 2.1(a)로 주어지는 제어대상은 식(2. 3)과 같은 근사 전달함수로 나타낼 수 있다.

$$G_1(s) = \frac{e^{-sL}}{Ts+1} \quad (2. 3)$$

이때, PID 제어기의 파라미터 K_P , T_I , T_D 는 표 2에 기초하여 추정한 제어대상의 계수 K, T, L 에서 구할 수 있다.

표 2(a)는 임펄스상의 외란에 대하여 출력응답이 정상상태에서 오버슈트 0[%], 또는 20[%]에 정정하도록 지정한 조정법이고 표 2(b)는 목표치의 스텝 변화에 대한 응답의 오버슈트 0[%], 또는 20[%]에 정정하도록 지정한 조정방법이다.

그림 2.1(b)의 불안정성 프로세서의 경우에는 시간이 충분히 경과한 후 직선에 근사 하는 선을 접선으로 할 때 시간축의 교점을 B로 하고, 그 기울기를 $1/T$ 로 한다. 이것에서 $OB = L$ 를 부동작시간, $1/T$ 를 근사선의 기울기(T 는 적분시간)로 하면 그림 2.1(b)의 제어 대상에 대한 전달함수는 식(2. 4)으로 나타낼 수 있다.

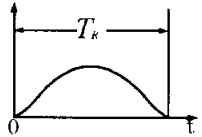
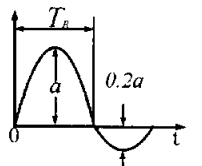
$$G_2(s) = -\frac{e^{-sL}}{Ts} \quad (2. 4)$$

이때 PID제어기의 파라미터 K_P , T_I , T_D 는 표 3을 이용하여 추정한 제어 대상의 파라미터 T, L 을 구한다.

표 2 식(2. 3)의 제어대상에 대한 PID제어기의 정수

Table 2 Coefficient of PID controller for equ.(2. 3)

(a) 외란에 대한 것(For noise)

조 건	제어기의 동작	K_P	T_I	T_D
	비례 P	$0.3T / KL$	∞	0
	비례+적분 PI	$0.6T / KL$	4 L	0
	비례+적분+미분 PID	$0.95T / KL$	2.4 L	0.4 L
	비례 P	$0.7T / KL$	∞	0
	비례+적분 PI	$0.7T / KL$	2.3 L	0
	비례+적분+미분 PID	$1.2T / KL$	2 L	0.42 L

(b) 목표치 변화에 대한 것(For reference)

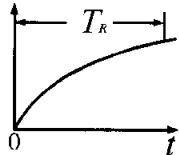
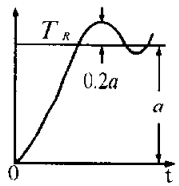
조 건	제어기의 동작	K_P	T_I	T_D
	비례 P	$0.3T / KL$	∞	0
	비례+적분 PI	$0.35T / KL$	1.2 T	0
	비례+적분+미분 PID	$0.6T / KL$	T	0.5 L
	비례 P	$0.7T / KL$	∞	0
	비례+적분 PI	$0.6T / KL$	T	0
	비례+적분+미분 PID	$0.95T / KL$	1.35 T	0.47 L

표 3 식(2. 4)의 제어계에 대한PID 제어기의 정수

Table 3 Coefficient of PID controller for equ.(2. 4)

제어기의 동작	K_P	T_I	T_D
비례 P	T / L	∞	0
비례+적분 PI	$0.9 T / L$	$3.3 L$	0
비례+적분+미분 PID	$1.2 T / L$	$2 L$	$0.5 L$

2.2 퍼지추론

이상 설명한 조정 방법에 따라 만족할 수 있는 제어특성이 얻어지는 것에 한정하지 않고 실제 현장에서는 제어특성을 보면서 다시 조정이 필요한 경우가 많다. 따라서 숙련한 기술자가 가지고 있는 Know-how를 포함하여 파라미터의 자동조정이 요구되고 있다.

여기서는 숙련한 기술자가 가지고 있는 Know-how를 파라미터의 자동조정에 포함시키기 위해서 퍼지추론을 적용한다.

일반적으로 「저녁 노을이 있으면 내일은 맑다」 「속도가 빠른 차는 위험하다」라 하는 「 ~ 이면 ~ 이다」로 하는 형태의 지식을 가지고 「오늘은 맑은 저녁 노을 때문에, 내일은 쾌청하겠지」라고 추론하고 있다.

이와 같이 평소에 하고 있는 추론은 퍼지집합을 이용하여 표현하는 것이 가능하고 이것을 퍼지추론이라 한다. 퍼지집합은 인간의 주관에 의해 정의된 집합으로서 경계가 불명확한 집합이다, 퍼지집합은 모든 공간의 요소가 퍼지집합에 속하는 정도를 구간 $[0,1]$ 의 연속값으로 주어지는 소속함수에 의해 정의된다. 이것에 대하여 일반적인 경계가 명확한 집합을 크리스퍼 집합이라 한다. 퍼지집합은 그림 2.2와 같이 소속함수(Membership function)로서 표현된다

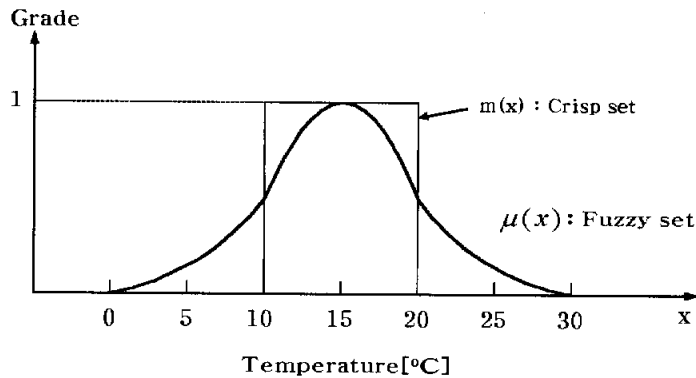


그림 2.2 특성함수와 소속함수

Fig. 2.2 Crisp and membership function

이와 같이 0 에서 1 사이의 값을 취하는 소속함수 값에 기초하여 인간행동의 Know-how를 「만약 상태가 A이면, 조작량을 B로 한다」라는 IF-THEN 형식으로 나타내면 각 제어규칙의 적합도를 통합하여 타당한 추론 결과를 얻을 수 있다.

퍼지추론은 퍼지제어, 퍼지 전문가(Expert)시스템, 퍼지 의사결정 등에 있어서 대단히 중요한 역할을 하고 있다. 퍼지제어는 퍼지추론을 이용하고 숙련된 운전자의 지적 정보를 퍼지집합으로 나타내어 판단·조작법을 퍼지규칙의 형으로 기술한다. 그리고 퍼지추론을 행하여 숙련된 운전자와 똑같은 교묘한 제어를 실현하도록 하는 것이다.

그림 2.3은 퍼지 PID제어기의 블록선도이고 비퍼지한 연속신호 e 가 입력되면 이것을 퍼지화하여 PB, PM, PS, ZO, NB, NM, NS 등의 언어적 변수로 변환한다. 이것을 퍼지규칙에 의해 퍼지논리 연산으로 추론하여 퍼지집합의 결과를 얻고 다시 비퍼지화하여 조작량을 얻는다.

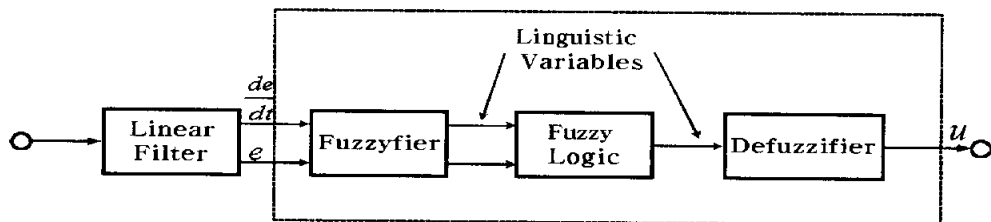


그림 2.3 퍼지PID제어기

Fig. 2.3 A fuzzy PID controller

PID제어와 퍼지추론을 조합시켜서 PID제어 파라미터 자동조정을 하는 것도 퍼지제어의 하나이다. 퍼지추론의 방법에는 여러 가지가 있지만 여기서는 먼저 퍼지제어나 퍼지 전문가 시스템에서 가장 많이 이용되고 있는Mamdani의 퍼지 추론법인 「Min-Max-중심법」에 대해서 설명하고, 다음, Min을 대수 곱으로, Max을 가산으로 치환한 「대수곱-가산-중심법」에 관해서 설명한다. 그리고 퍼지 제어법에 가장 많이 사용되는 간략화 추론법과 그 후건부의 퍼지 싱글톤 추론법에 대해서 설명한다.

2.2.1 Min-Max 중심법

퍼지제어나 퍼지 전문가 시스템에 사용되고 있는 퍼지추론 형식은 식 (2. 5)와 같다.

$$\begin{array}{ll}
 \text{규칙 } 1 : A_1 \text{ and } B_1 \rightarrow C_1 \\
 \dots \dots \dots \\
 \text{규칙 } n : A_n \text{ and } B_n \rightarrow C_n \\
 \text{사실} : x_0 \text{ and } y_0 \\
 \hline
 \text{결론} : C
 \end{array} \quad (2. 5)$$

그림2.4는 Min-Max 중심법에 의한 퍼지추론 과정을 나타낸 것이다.

사실 「 x_0 and y_0 」이 입력되면 퍼지규칙 「 $A_i \text{ and } B_i \rightarrow C_i$ 」 $i=1, \dots, n$ 에서 얻어지는 각각의 추론결과 C_i' 는 식(2. 6)이 된다.

$$\mu_{C_i'}(z) = \mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0) \wedge \mu_{C_i}(z) \quad (2. 6)$$

여기서 $\wedge$ 는 Min이다. 식(2. 6)의 최종적인 결론인 C 는 각각의 추론결과

$C_1', C_2', \dots, C_n'$ 을 통합하는 것이고 식(2. 6)은 식(2. 7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_{C'}(z) = \mu_{C_1'}(z) \vee \dots \vee \mu_{C_n'}(z) \quad (2. 7)$$

여기서 $\vee$ 는 Max이다. 이 최종적인 퍼지집합 C' 의 대표값 z_0 를 구하는 조작을 비퍼지화라 하고 중심법을 사용하여 식(2. 8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_0 = \frac{\int z \cdot \mu_{C'}(z) dz}{\int \mu_{C'}(z) dz} \quad (2. 8)$$

이상 설명한 추론법이 「Min-Max- 중심법」 이고, Mamdani의 퍼지 추론법이며 퍼지제어나 퍼지 전문가 시스템에서 가장 많이 사용되고 있다.

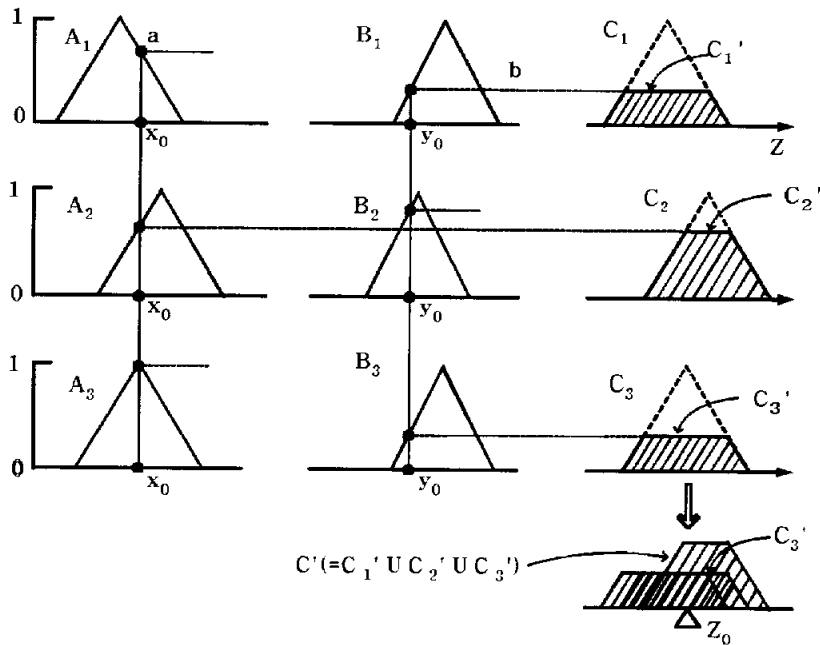


그림 2.4 Min-Max 중심법에 의한 퍼지추론

Fig. 2.4 Fuzzy inference by min-max-center of gravity rule

그러나 「Min-Max-중심법」은 Min과 Max라고 하는 비선형성이 강한 연산이 이용되고 있기 때문에 그 추론 과정은 반드시 직접 일치되는 것은 아니다.

식(2. 6)의 추론 결과를 구하는 방법을 생각해 보자. 예를 들어 그림 2.3의 첫 번째 규칙에서 a와 b의 작은(Min)쪽의 값 b에서 결론 C_1 의 정점부분이 잘려나

가는 형을 취하고 있기 때문에 이 경우 a 의 값이 변하여도 (상세하게 b 이상의 범위에서) 항상 b 이상의 높이에서 잘려 나가 버린다. 즉, 높이 a 의 변동은 무시되는 것이다. 따라서 a 값의 변화도 고려하려면 Min연산 대신에 대수곱을 이용하면 좋다는 것을 알 수 있다.

다음, Max을 이용한 추론 결과의 통합을 나타내는 식(2. 7)에 관해서 고찰 해 본다. 예를 들어 그림2.4의 추론 과정에서 세 번째의 제어규칙에서 얻어진 추론 결과 C_3' 은 최종적인 통합결과 C' 에는 내부에 묻히는 형으로 되어 있다. 즉 C_1 과 C_2 에 의해서만 결정되고 C_3 은 무시되어진 형태이다. 그러나 실제에는 C_3 의 효과를 많이 고려하여 넣어야 할 것이라고 생각된다.

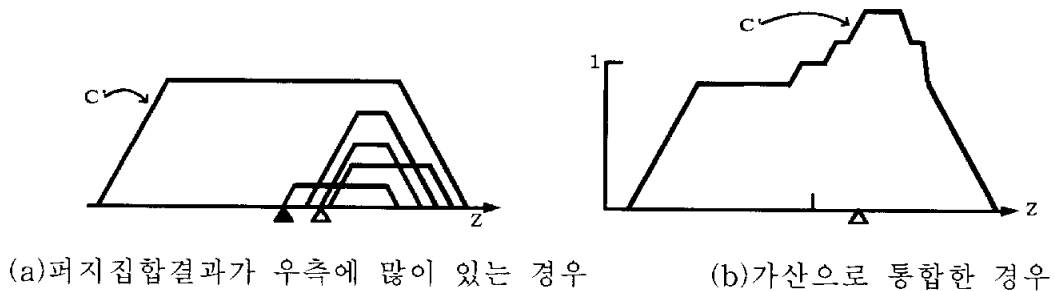


그림 2.5 퍼지추론의 결과 통합

Fig. 2.5 Sum results of a each fuzzy inference

나아가 그림 2.5 (a)처럼 몇 개의 추론 결과가 우측에 뭉쳐 있는 경우를 생각한 다. 이 경우 우측에 대단히 많은 추론결과가 존재하고 있으므로 중심값 z_0 는 중앙(▲)보다 조금 우측에 있다고 생각된다. 그러나 Max로서 통합하면 통합결과는 제일 외측의 추론 결과 C' 에 일치하고 그 중심값 z_0 는 중앙(▲)으로 되어 이것은 상식적으로 실제 중심과 어긋나고 있다. 이 때문에 우측에 있는 많은 추론결과의 영향을 고려하여 넣기 위해서는 가산을 사용하여 추론결과를 위에 포개 넣으면 좋고 결과는 그림 2.5(b)처럼 된다. 따라서 중심점은 우측에 치우친 점(△)으로 되는 것을 알 수 있다.

이처럼 Max로서 통합하면 내측에 있는 많은 추론결과의 영향이 무시되어 버린

다. 이 예에서 알 수 있는 것과 같이 그림 2.4의 규칙 3은 중심값의 계산에 무관하기 때문에 규칙 3을 조금 변경하여도 중심값은 변동하지 않은 것을 알 수 있다.

이상의 이유에서 「Min-Max-중심법」에서 Min의 대신에 대수곱을 Max대신에 가산을 사용한 「대수곱-가산-중심법」이 제안되고 있다.

2.2.2 대수곱-가산-중심법

그림 2.5는 「대수곱-가산-중심법」에 의해 결론 C' 을 구하는 추론 과정을 나타낸 것이다. 사실 입력 x_0, y_0 에 대하여 제어규칙 A_1 and $B_1 \rightarrow C_1$ 에 의한 각각의 추론결과 C_1' 는 식 (2. 6)에서 대수곱($\cdot$)을 이용하여 나타내면 식(2. 9)와 같이 구할 수 있다.

$$\mu_{C_1'}(z) = \mu_{A_1}(x_0) \cdot \mu_{B_1}(y_0) \cdot \mu_{C_1}(z) \quad (2. 9)$$

그리고 통합결론 C' 는 식 (2. 7)에서 가산 (+)을 이용하여 식 (2. 10)으로 구할 수 있다.

$$\mu_{C'}(z) = \mu_{C_1'}(z) + \dots + \mu_{C_n'}(z) \quad (2. 10)$$

이 통합결과를 이용하여 식 (2. 8)의 중심법에서 퍼지집합 C' 의 중심값 z_0 가 구해진다.

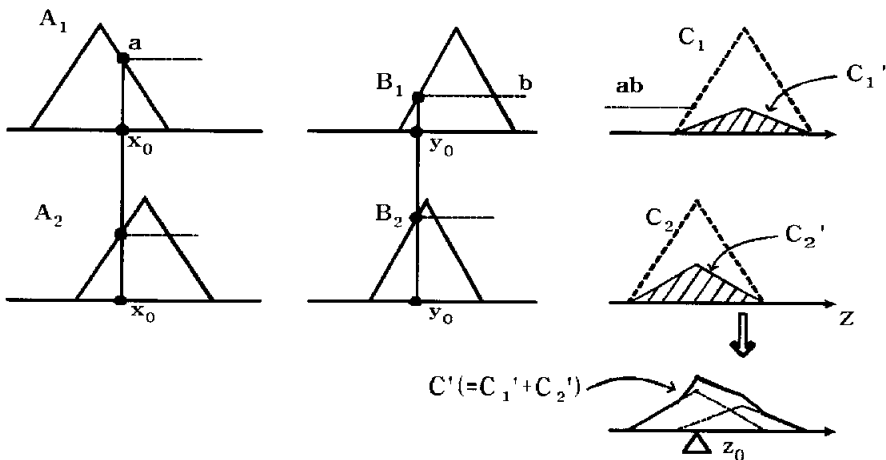


그림 2.6 「대수곱-가산-중심법」에 의한 퍼지추론

Fig. 2.6 Fuzzy inference by algebraic-sum-center of gravity rule

2.2.3 간략화 추론법

「대수곱-가산-중심법」의 특별 경우인 간략화 추론법에 관하여 기술한다. 이 퍼지 추론법은 퍼지규칙의 후건부가 퍼지집합이 아닌 실수치 인 경우의 퍼지추론이고 이것을 간략화 추론법이라 한다. 그림 2.7은 간략화 퍼지추론 과정을 나타낸 것이고 추론은 식 (2. 11)과 같다.

$$\begin{array}{lcl}
\text{규칙 1 : } & A_1 \text{ and } B_1 \rightarrow & z_1 \\
\text{.} & & \\
\text{규칙 n : } & A_n \text{ and } B_n \rightarrow & z_n \\
\text{사실 : } & x_0 \text{ and } y_0 & \\
\hline
\text{결론 : } & & z_0
\end{array}
\tag{2. 11}$$

여기서 우변의 후전부는 $z_1, \dots, z_n$ 로 나타낸 것이고 퍼지집합이 아닌 실수이다. $z_1, \dots, z_n$ 을 퍼지화 하면 식 (2. 5)와 동일한 추론형식으로 된다.

결론 z_0 을 구하는 방법은 다음과 같이 된다. 입력으로 사실 x_0, y_0 일 때 이것과 각 규칙의 전건부 A_1 and B_1 와의 적합도 h_i 는 식 (2. 12)와 같이 된다.

$$h_i = \mu_{A_i}(x_0) \cdot \mu_{B_i}(y_0) \quad (2.12)$$

여기서 적합도 h_i 는 입력 x_0, y_0 가 주어질 때에, z_i 가 얻어지는 정도(Grade)를 나타내는 것으로 해석할 수 있다.

각 규칙으로부터 확정값 $z_1, \dots, z_n$ 이 얻어지는 적합도는 $h_1, \dots, h_n$ 이므로 최종적인 결론 z_0 는 이들 적합도 $h_1, \dots, h_n$ 에 대한 각 확정값 $z_1, \dots, z_n$ 에서 적합도는 하중 평균을 구하는 것이므로 식 (2. 13)을 얻을 수 있다.

$$z_0 = \frac{z_1 h_1 + z_2 h_2 + \cdots + z_n h_n}{h_1 + h_2 + \cdots + h_n} \quad (2.13)$$

이 방법은 일반적 방법과 같이 삼각형 소속함수의 윗 부분을 자르거나 통합이라는 조작을 거치지 않고 결론 z_0 를 구하는 것과 같으므로 처리속도가 현저히 빠르게 되고 또한 규칙의 후건부가 퍼지집합이 아닌 정수이기 때문에 퍼지집합의 모양에 관계할 필요가 없다.

이 간략화 추론법은 「대수곱-가산-중심법」의 특별한 경우로서 후건부 퍼지집합

C_i 의 대집합 폭을 무한히 줄여서 z_i 를 실수로 한 경우에 해당한다.

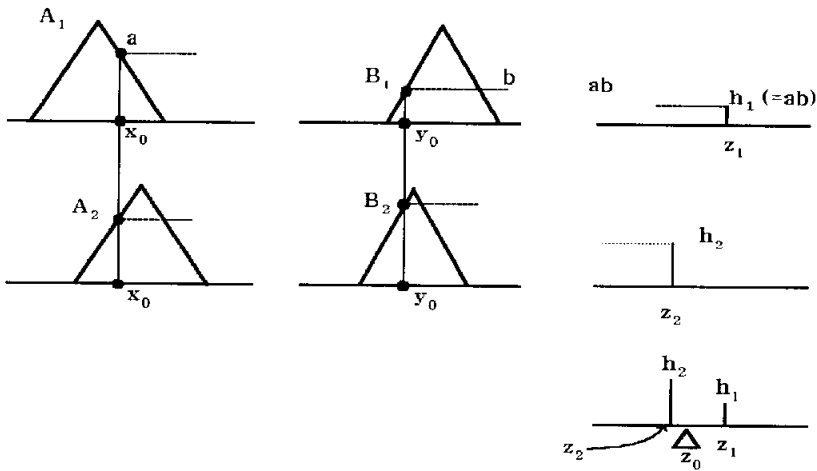


그림 2.7 간략화 추론법

Fig. 2.7 Simplified fuzzy reasoning method

2.2.4 퍼지 싱글톤형 추론법

이 추론법은 간략화 추론법의 후건부 z_i 에 급수(무게)를 부가한 추론법으로 후건부는 식(2. 14)와 같이 w_i/z_i 로 기술된다. 간략화 추론에서는 후건부 z_i 의 최고 높이를 1로 하지만 퍼지 싱글톤 추론법에서는 퍼지규칙에 강조 효과를 내기 위해서 z_i 의 높이를 w_i ($w_i > 0$)배 한다. 무게 w_i 는 0 이상의 실수이고 $w_i > 1$ 일 때는 퍼지규칙을 강조하고, $0 \leq w_i < 1$ 일 때는 퍼지규칙을 억제한다. $w_i = 1$ 때는 간략화 추론법으로 환원된다. 그림 2.8은 퍼지 싱글톤형 추론과정을 나타낸 것이고 이것의 퍼지추론 형식은 식(2. 14)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{array}{ll}
 \text{규칙 1 : } A_1 \text{ and } B_1 \rightarrow w_1 / z_1 \\
 \dots \dots \dots \\
 \text{규칙 n : } A_n \text{ and } B_n \rightarrow w_n / z_n \\
 \text{사실 : } x_0 \text{ and } y_0 \\
 \hline
 \text{결론 : } z_0
 \end{array} \quad (2. 14)$$

사실 입력 「 x_0 and y_0 」에 대하여 각 퍼지규칙의 전건부 「 A_i and B_i 」와 적합도 h_i 는 식(2. 12)와 같이 주어지고, 최종적인 결론 z_0 는 후건부 $z_1, \dots, z_n$ 을 각 적합도 $h_1, \dots, h_n$ 에 무게 $w_1, \dots, w_n$ 을 곱한 것으로 하중 평균하는 식에 의해 z_0 는 식(2. 15)와 같이 구할 수 있다.

$$z_0 = \frac{h_1 w_1 z_1 + h_2 w_2 z_2 + \dots + h_n w_n z_n}{h_1 w_1 + \dots + h_n w_n} \quad (2. 15)$$

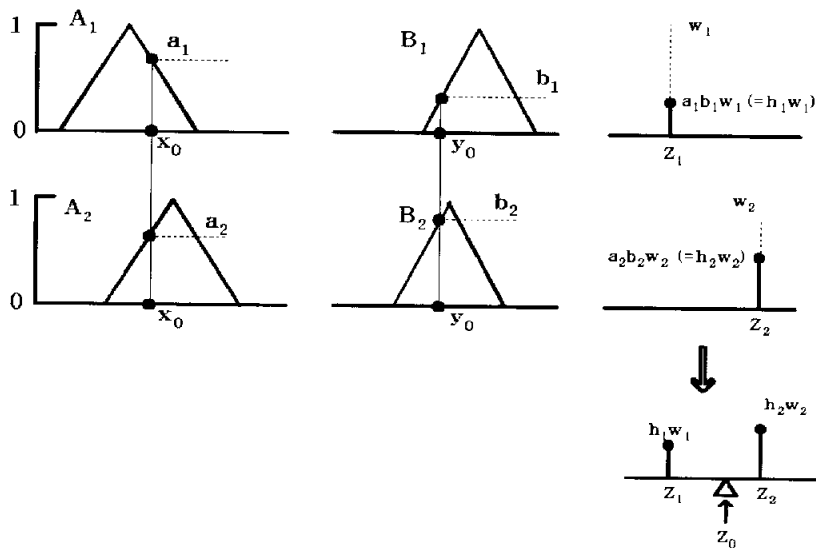


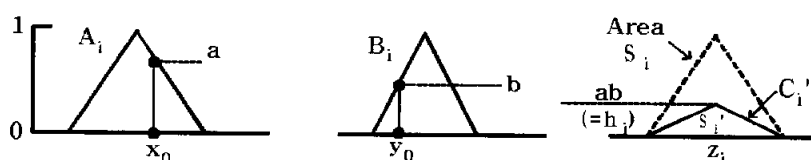
그림 2.8 퍼지 싱글톤형 추론법

Fig. 2.8 Fuzzy reference of singleton type

여기서, 「대수곱-가산-중심법」은 퍼지규칙 A_i and $B_i \rightarrow C_i$ 에서 후건부는 무게 w_i 로 하지 않고 C_i 의 면적 S_i 를 취하고 C_i 의 중심값을 z_i 로 하면 식(2. 16)이 성립한다.

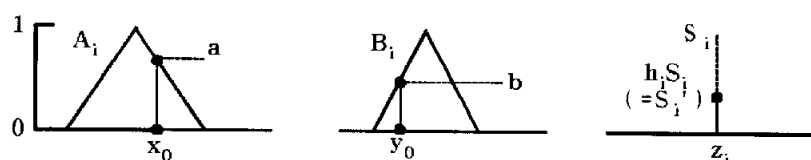
$$A_i \text{ and } B_i \rightarrow S_i / z_i \quad (2. 16)$$

식(2. 16)은 일반적인 퍼지규칙에 등가로 되는 퍼지 싱글톤형 퍼지규칙으로 치환한 것을 의미한다. 그림 2.9는 일반적 퍼지규칙에 퍼지 싱글톤형 퍼지규칙으로 변환되는 과정을 나타낸 그림이다.



(a) 일반적인 퍼지규칙

(a) Fuzzy rules



(b) 등가인 퍼지 싱글톤형 규칙

(b) The equivalent fuzzy singleton type rules

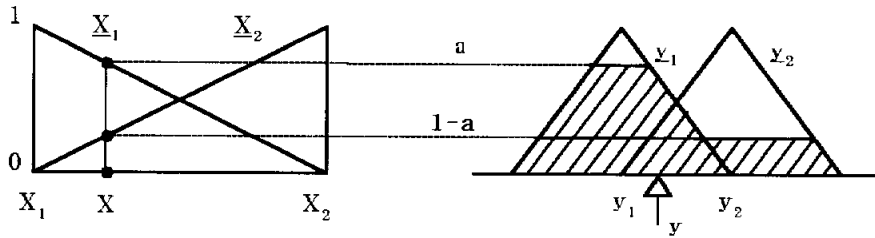
그림 2.9 퍼지규칙과 등가인 퍼지 싱글톤형 규칙

Fig. 2.9 General fuzzy rules and the equivalent rules fuzzy of singleton type

이와 같은 방법으로 후건부를 퍼지집합 아닌, 실수치로 나타낸 것을 퍼지 싱글톤형 추론법이라 한다. 여러 가지 퍼지추론 방법 중에서, 퍼지 싱글톤형 퍼지추론은 처리속도가 빠르고, 해석도 쉬우므로 본 연구에서는 퍼지 싱글톤형 추론법을 이용한다.

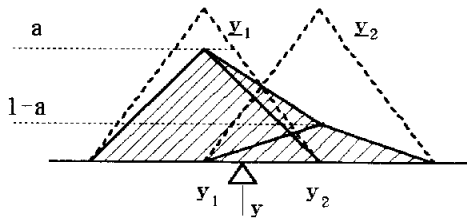
끝으로 퍼지규칙의 후건부가 퍼지집합의 경우와 간략화 추론법 및 퍼지 싱글톤형 추론법과 같이 후건부 퍼지집합을 세분할 때 막대 모양으로 한 경우 중심값의 계산에 관해서 고찰한다. 그림 2.10은 각 추론방법에 따라 퍼지추론 한 경우 중심값에 미치는 영향에 대하여 나타낸 것이다. 「Min-Max-중심법」에 의한 그림(a) 및 「대수곱-가산-중심법」에 의한 그림(b)의 경우, 중심값 y 는 y_1 에 가까운 점으로 주어진다. 그러나 간략화 추론법에 의한 그림 2.10(c)처럼 후건부의 퍼지집합 y_1 , y_2 를 매우 좁게 취하면 최종적으로 막대 모양으로 되고 중심값은 거의 변화

하지 않는다. 결국 y_1 에서 가까운 점으로서 주어지기 때문에 후반부를 퍼지집합이 아닌 막대 모양으로도 하여도 완전히 문제가 없는 것을 알 수 있다.



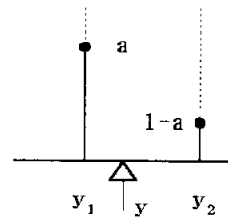
(a) Min-Max- 중심법

(a) Min-max-center of gravity



(b) 대수곱 - 가산 - 중심법

(b) Algebraic-sum-center of gravity



(c) 간략화 추론법

(c) Simplified fuzzy reasoning method

그림 2.10 퍼지추론의 중심값

Fig. 2.10 Center of gravity value of fuzzy inference

제 3장 퍼지추론에 의한 PID제어 파라미터의 자동조정

3.1 구 성

본 연구에서는 그림 3.1에 나타낸 것과 같은 단일 루프 제어계에 대하여 자동 조정의 시뮬레이션을 행한다.

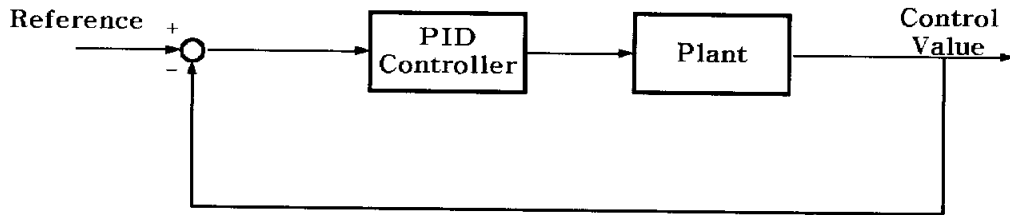


그림 3.1 단일 루프 제어계

Fig. 3.1 Feedback control system with single loop

그림 3.2는 그림 3.1의 단일 루프 제어계에 자동조정 시스템을 부가한 시스템 전체의 구성도를 나타낸다. 이 시스템은 특정량을 인식하는 제어응답의 파형 인식부, 퍼지추론부, 조정규칙 및 파라미터 계산부 등으로 이루어진다. PID제어 파라미터의 조정 과정은 아래와 같다.

(1) 특정량(Specifications) 추출

제어계의 응답파형에서 특정량을 추출한다.

(2) 파라미터의 수정

특정량과 제어 파라미터의 대응 관계를 퍼지규칙(조정규칙)으로 나타내고, (1)에서 추출한 특정량과 작성한 조정규칙으로 퍼지추론에 의해 제어 파라미터의 수정계수를 결정한다.

(3) 파라미터의 계산

제어 파라미터의 한주기 전의 값과 (2)에서 구해진 수정계수로 이번 회의 파라미터 값을 계산한다.

다음에 각 부분에 관해서 상세히 기술한다.

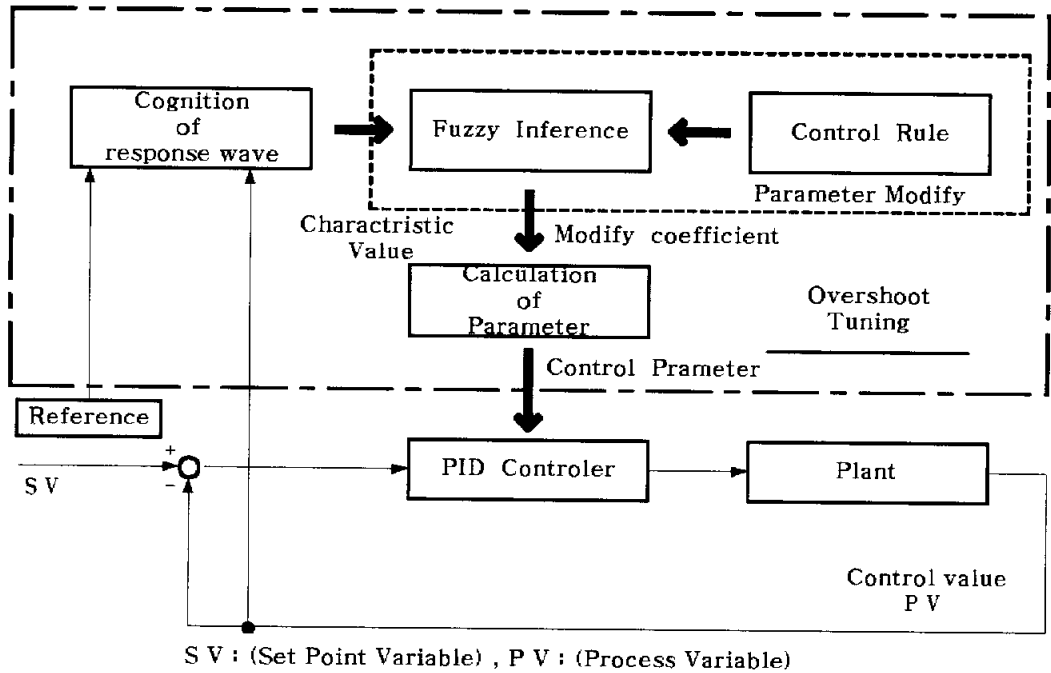


그림 3.2 자동조정 시스템의 블럭선도

Fig. 3.2 The block diagram of system with a self tuning control

3.1.1 PID제어기

PID제어기는 편차를 입력으로 하여 조작량을 출력하는 시스템으로 하면 그 전달 함수는 식(3. 1)이 된다.

$$G(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (3. 1)$$

그림 3.3은 식(3. 1)의 PID제어계를 블럭으로 상세하게 나타낸 것이다.

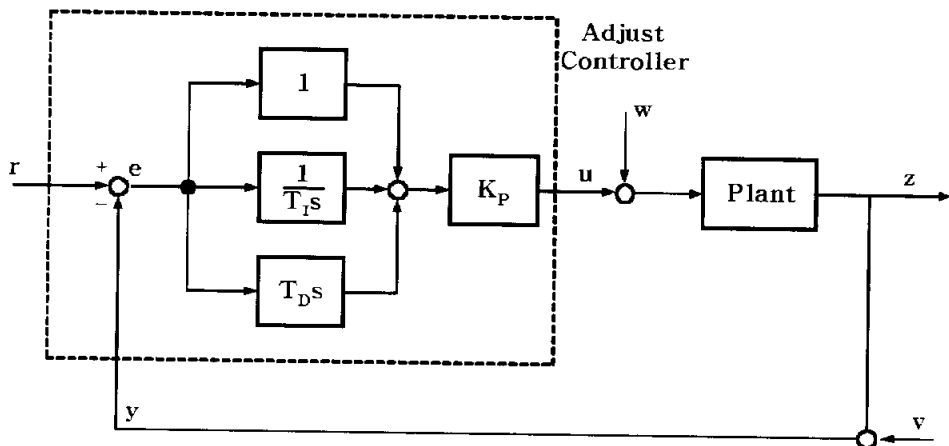


그림 3.3 PID제어의 기본형의 블록선도

Fig. 3.3 The block diagram of the PID control

3.1.2 제어대상

제어대상은 2차 지연계이고 전달 함수는 식 (3. 2)와 같이 가정한다.

$$G(s) = \frac{Kb}{s^2 + a_1 s + a_2} \quad (3. 2)$$

여기서, $a_1, a_2, b > 0$ 이고 $a_1 = 2\zeta\omega_n$, $a_2 = \omega_n^2$, $b = K\omega_n^2$ 이다.

그리고 감쇠계수는 $\zeta = 0.3$, 고유주파수 $\omega_n = 1$ 이고 이득 $K = 1$ 로 한다.

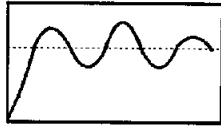
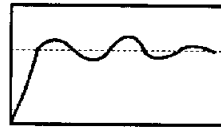
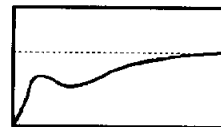
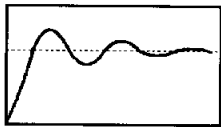
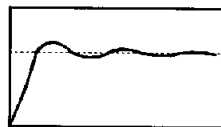
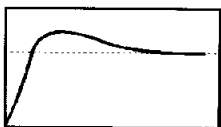
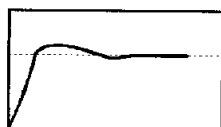
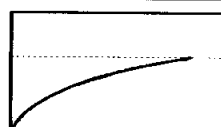
3.2 제어응답 파형 인식

조정규칙은 응답파형의 특정량과 밀접히 관계한다. 제어응답 파형의 특정량은 목표치가 스텝 변화할 때, 제어량의 오버슈트, 진폭 감쇠비, 정정시간 등이 있다.

이것들에 대응한 응답파형을 분류하면 표 4에 나타낸 것처럼 크게 8종류로 나눌 수 있다. 제어 파라미터의 조정을 위해서는 이 표의 파형으로부터 희망하는 응답파형을 선정하고, 이 파형이 얻어질 수 있도록 조정규칙을 작성하는 것이다.

표 4 PID조절을 위한 제어응답 파형

Table 4 Response waveforms for PID control

		Overshoot (E)		
		Large	Proper	Without
Amplitude damping ratio (D)	Large			
	Neutrality			
	Proper			

특정량의 추출 방법은 응답파형의 최고치에 의한 것과 면적법에 의한 방법이 있다. 그림 3.4는 응답파형의 최고치로부터 특정량을 추출하는 방법을 나타낸다

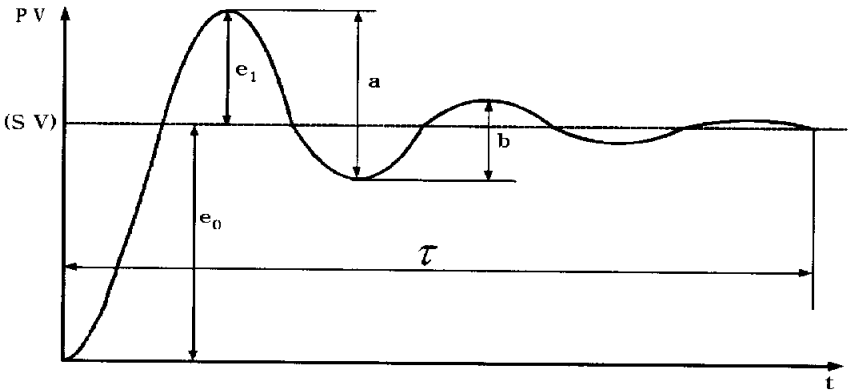


그림 3.4 응답파형의 최고치로 나타낸 특정량

Fig. 3.4 Maximum value for specifications of response waveform

그림 3.4의 응답 파형 최고치법에서 특정량으로 오버슈트(OV), 진폭감쇠비(ξ) 및 정정시간비(R)는 각각 $OV = a_1/a_0$, $\xi = b/a$, $R = T_s$ (전주기의 시간)/ T_s (이변주기의 시간)와 같이 정의된다. 그림 3.5 응답파형에서 면적 표시법에 의한 각 특정량은 다음과 같이 정의한다.

면적으로 나타낸 내면 오버슈트량은 식(3. 3)이 된다.

$$E = A_2/A_1 \quad (3. 3)$$

면적비로 나타낸 진폭 감쇄비는 식(3. 4)가 된다.

$$D = (A_3 + A_4) / (A_2 + A_3) \quad (3. 4)$$

그리고 제어면적은 식(3. 5)로 정의할 수 있다.

$$R = A_3 + A_4 + A_5 + A_6 \quad (3. 5)$$

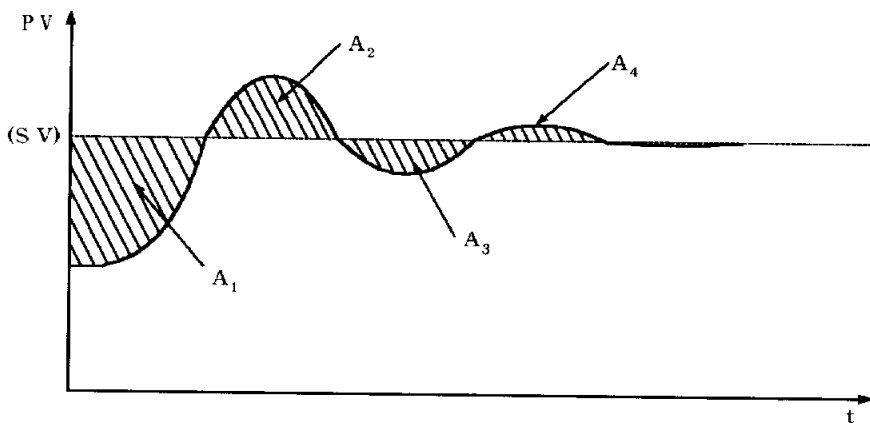


그림 3.5 면적법에 의한 제어응답 파형의 특정량

Fig. 3.5 Area of specifications for response waveform

본 연구에서는 보다 정확한 특정량을 추출하기 위해서 그림 3.5와 같이 응답파형의 면적으로부터 특정량을 구하는 것으로 하였다.

3.3 퍼지규칙 (조정규칙)

퍼지규칙은 응답파형의 특정량과 수정계수에 기초하여 작성한다. 전건부는 응답파형에 기초한 (E, D, R)의 각각 명제 3개, 후건부는 수정계수(CP, CI, CD)로 작성되는 각 3명제로 하여 모두 15개의 제어규칙으로 구성한다. 표 5는 조정규칙

을 나타낸다.

표 5 조정 규칙

Table 5 Tuning rule

Rule Number	특 정 량(전건부)			수 정 계 수(후건부)		
	E	D	R	CP	CI	CD
R1	PB	PB	--	NB	ZO	NB
R2	PB	PM	PB	ZO	PB	ZO
R3	PB	PM	ZO	ZO	PB	PB
R4	PB	PM	NB	NB	PB	ZO
R5	PB	ZO	PB	ZO	PB	ZO
R6	PB	ZO	ZO	ZO	PB	PB
R7	PB	ZO	NB	NB	ZO	ZO
R8	ZO	PB	PB	PB	NB	ZO
R9	ZO	PB	ZO	ZO	NB	ZO
R10	ZO	PB	NB	NB	NB	ZO
R11	ZO	PM	PB	PB	PB	NB
R12	ZO	ZO	PB	PB	ZO	NB
R13	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
R14	ZO	ZO	NB	NB	PB	PB
R15	NB	--	PB	PB	PB	NB

여기서, 각 라벨은 아래와 같다.

PB : Positive Big, PM : Positive Medium, PS : Positive Small, ZO : Zero,
NB : Negative Big, NM : Negative Medium, NS : Negative Small

표 5의 조정규칙에서 수정계수 CP, CI, CD 는 PID제어 파라미터 K_p , T_i , T_d 에 대한 수정계수이고 특정량 E, D, R는 각각 응답과형에서 정의한 것이다.

특정량 PB, ZO, NB에서 각각 PB는 Positive Big(크다), PM은 Positive Medium(중립), ZO는 Zero(적정), NB는 Negative Big(작다)라는 정도를 나타낸다. 수정계수 PB, ZO, NB에서 각각 PB는 증가하고, ZO는 불변, NB는 줄어든다는 의미이고, PID제어 파라미터를 어느 정도 변화시키는지의 정도를 나타내고 있다.

조정규칙의 의미는 예를 들어 규칙 번호가 R₂의 경우, 만약 오버슈트(E)가 크고(PB), 진폭 감쇠비(D)가 중립(PM)에서 동시에 제어면적(R)이 크게(PB) 된다면,

비례 이득의 수정계수(CP) 를 불변(ZO), 적분시간의 수정계수(CI)을 증가하고(PB), 동시에 미분시간의 수정계수(CD)을 불변(ZO)한다는 의미를 나타내고 있다. 또 여기에서 이용할 수 있는 PB, ZO, NB등의 정성적인 량은 퍼지집합이고 이것은 소속함수로서 정의한다.

3.4 소속 함수

그림 3.6 ~ 3.9는 삼각형법으로 정의한 특정량(E, D, R) 및 수정계수(CP, CI, CD)의 소속함수를 나타내고 그림 3.10은 퍼지 싱글톤형으로 정의한 경우 수정계수(CP, CI, CD)의 소속함수를 나타낸다.

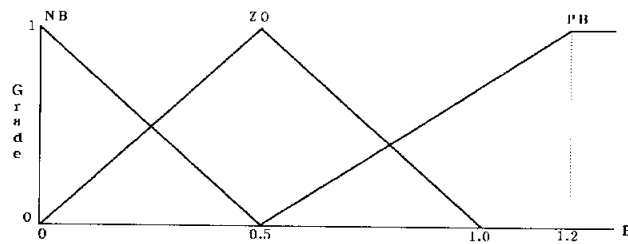


그림 3.6 오버슈트(E)의 소속함수

Fig. 3.6 Membership function of overshoot(E)

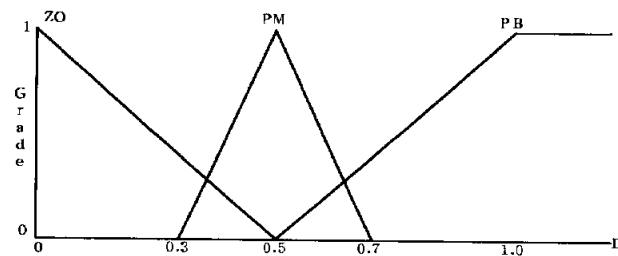


그림 3.7 진폭 감쇠비 소속함수

Fig. 3.7 Membership function of damping ratio(D)

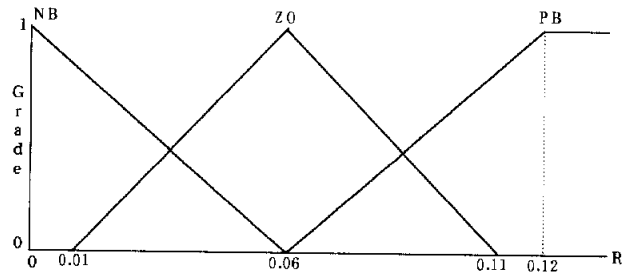


그림 3.8 제어면적의 소속함수

Fig. 3.8 Membership function of control dimensions(R)

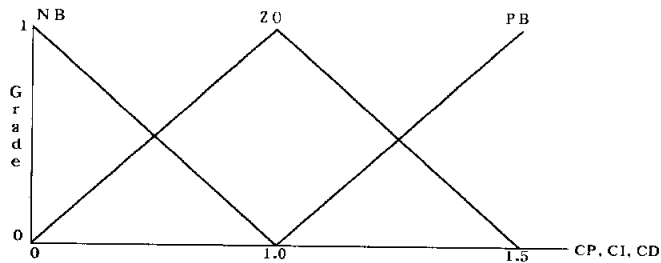


그림 3.9 수정계수(CP, CI, CD)의 소속함수

Fig. 3.9 Membership function of modified coefficients (CP, CI, CD)

수정계수의 소속함수는 그림 3.9처럼 되지만, 퍼지 싱글톤형 추론법을 사용할 경우에는 그림 3.10과 같이 된다.

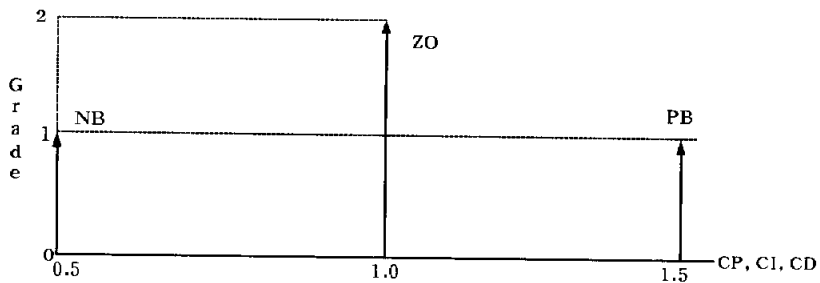


그림 3.10 수정계수의 퍼지 싱글톤형 소속함수

Fig. 3.10 Membership function of modified coefficients in fuzzy singleton type

제 4장 시뮬레이션 및 고찰

시뮬레이션은 전체 시간 폭 0.01[sec]로 오일러 법으로 행하고 제어 대상은 식(3. 2)에 나타낸 2차 지연계로 하였다. 식(3. 2)에 나타낸 제어대상의 개루프 시스템 대하여 단위 계단입력을 가한 경우 시뮬레이션을 통하여 그림 4.1과 같은 인디셜 응답파형을 얻을 수 있었다.

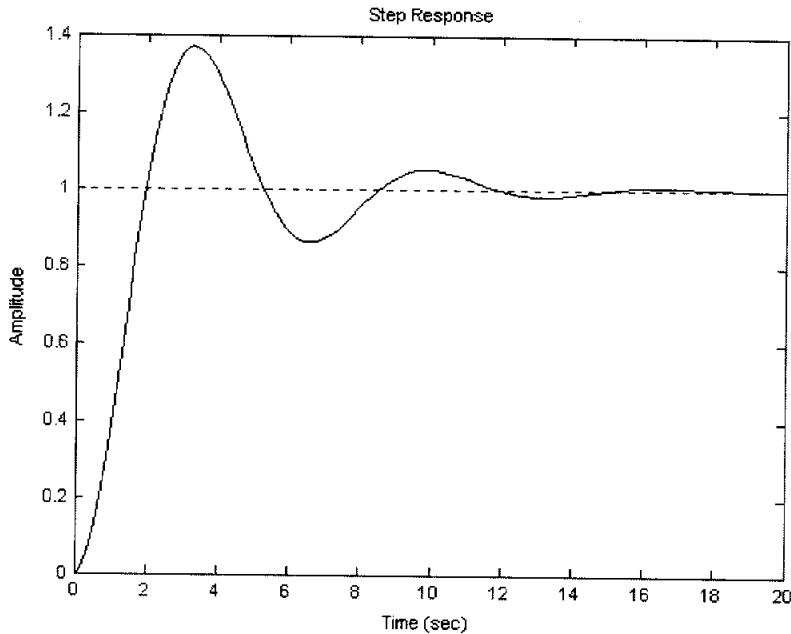


그림 4.1 인디셜 응답

Fig. 4.1 Indicial response

이 응답파형에서 부동작 시간 L , 시정수 T , 이득 K 를 각각 구하여 제어대상의 스텝응답에 기초한 Ziegler-Nichols의 과도응답법에서 식(4. 1)~(4. 3)이 성립한다.

$$K_P = 83K \cdot L / T \quad (4. 1)$$

$$T_I = 2L \quad (4. 2)$$

$$T_D = 0.5L \quad (4. 3)$$

이 식에 주어진 각 계수를 대입하면 PID제어기의 각 파라미터는, $K_P = 23.71$,

$T_I=0.908[\text{sec}]$, $T_D=0.227[\text{sec}]$ 로 되었다.

여기서 구한 값을 이용해서 제어대상에 PID제어를 행하면 그림 4.2와 같은 응답과형을 얻을 수 있다.

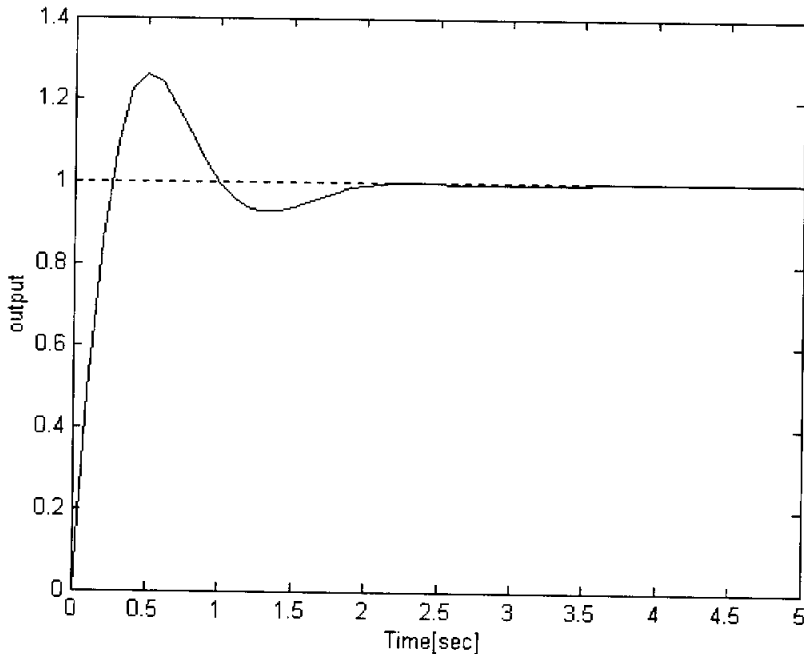


그림 4.2 PID제어의 응답 ($K_P=23.71$, $T_I=0.908[\text{sec}]$, $T_D=0.227[\text{sec}]$)

Fig. 4.2 The response of the PID control with
 $K_P=23.71$, $T_I=0.908[\text{sec}]$, $T_D=0.227[\text{sec}]$

이와 같이 제어대상 특성을 크기로 나타낸 특정량에 기초해서 PID제어 파라미터를 결정하는 방법은 여러 가지가 있고 Ziegler-Nichols의 조정법은 그 중의 한 방법이다.

그림 4.2는 제어대상에 $K_P=23.71$, $T_I=0.908[\text{sec}]$, $T_D=0.227[\text{sec}]$ 인 PID제어기를 부과한 경우의 출력응답 파형이다. 그림 4.2의 응답과형을 보면 오버슈트는 약 30[%]이고 정정시간 2[sec]로 구할 수 있다.

그러나 이와 같은 조정방법으로 파라미터를 조정하여도 반드시 희망하는 응답

파형을 얻을 수 있다고는 할 수 없기 때문에, 응답파형을 보면서 다시 조정하는 것이 필요한 경우가 많다. 그림 4.2의 응답 파형은 설계 사양인 오버슈트 20~30[%], 진폭 감쇠비 0.3~0.6, 정정시간 3[sec] 이하를 만족하고 있으므로, 이 파형의 면적으로 나타낸 특정량을 조정 규칙이나 소속함수를 작성할 때 하나의 지표로 한다.

다음에 PID제어 파라미터의 값을 변화시켜, 그때의 응답파형의 형태와 면적으로 나타낸 특정량의 관계를 구했다. 응답파형을 크게 분류하면 표 4처럼 되지만 여기서는 이것에 정정시간을 고려한 응답파형을 생각하여 특정량의 적합도와 PID제어 파라미터의 관계를 조사하여 퍼지제어 규칙을 작성했다.

시뮬레이션을 통하여 PID제어기의 제어 파라미터를 변화시키면서 그때의 응답파형의 특정량을 구하고 그것에 기초하여 작성한 조정규칙은 표 5에 나타내었다. 그림 3.8 ~3.10은 특정량 E, D, R 와 수정계수 CP, CI, CD의 작성한 소속함수를 나타낸다.

이들 조정규칙과 소속함수에 기초하여 퍼지추론에 의한 PID제어 파라미터의 자동조정을 하는 시뮬레이션 프로그램을 작성했다. 퍼지추론은 간략화 법으로 하고 제어규칙은 표 5를 이용하며 사용한 소속함수는 그림 3.8 ~3.10을 사용하였다.

그림 4.3은 시뮬레이션의 알고리즘을 나타낸 것이고 제어 응답의 설계사양은 오버슈트는 20~30[%], 진폭 감쇠비는 0.3~0.6, 정정시간 3[sec] 이하로 했다.

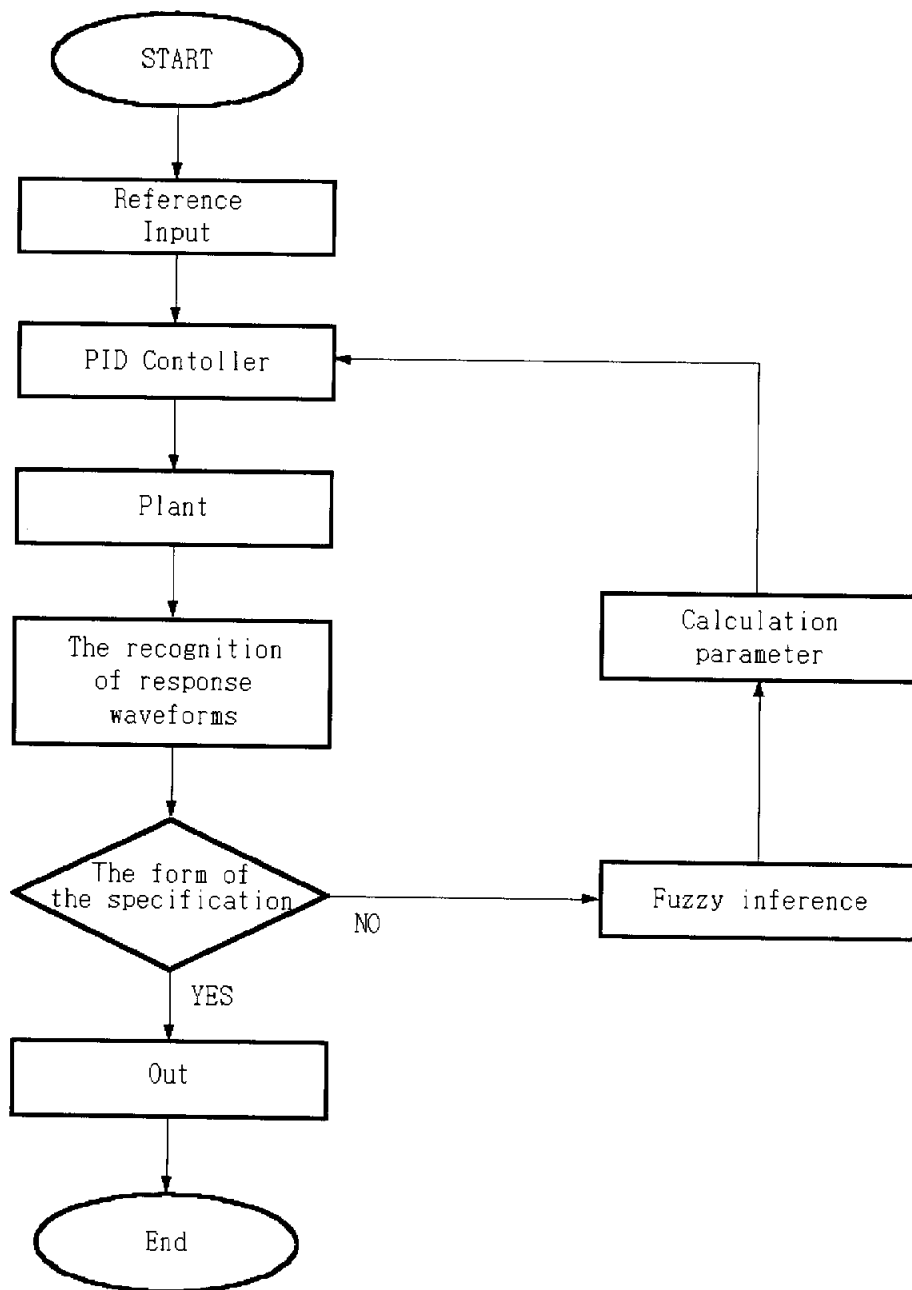


그림 4.3 시뮬레이션 흐름도

Fig. 4.3 Flowchart of simulation

그림 4.4는 응답파형의 분류에 기초하고 정정시간을 고려하여 조정규칙을 작성한후 $K_P=1.0$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.2[\text{sec}]$ 로한 경우의 응답 파형을 나타낸 것이다.

그림 4.4는 오버슈트가 크고 진폭 감쇠비가 중립, 제어면적으로 나타낸 정정시간은 크게 하는 것이 적합하다는 것을 알 수 있다.

그림 4.5는 응답파형의 분류에 기초하고 정정시간을 고려하여 작성한 후 $K_P=0.45$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.8[\text{sec}]$ 로 한 경우의 응답 파형을 나타낸 것이다.

그림 4.6은 같은 방법으로 $K_P=15$, $T_I=1.4[\text{sec}]$, $T_D=0.26[\text{sec}]$ 로 한 경우의 응답 파형을 나타낸 것이다

그림4.7은 같은 방법으로 $K_P=15$, $T_I=1[\text{sec}]$, $T_D=0.3[\text{sec}]$ 로 한 경우의 응답 파형을 나타낸 것이다.

그림4.8은 같은 방법으로 $K_P=0.6$, $T_I=0.908[\text{sec}]$, $T_D=1.5[\text{sec}]$ 로 한 경우의 응답 파형을 나타낸 것이다.

그림 4.9는 같은 방법으로 $K_P=10$, $T_I=1.5[\text{sec}]$, $T_D=0.3[\text{sec}]$ 로 한 경우의 응답 파형을 나타낸 것이다.

그림4.10은 같은 방법으로 $K_P=15$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.3[\text{sec}]$ 로 한 경우의 응답 파형을 나타낸 것이다.

이와 같이 PID제어 파라미터를 변화시켜 응답파형의 분류에 기초하여 파라미터를 어느 정도 변화시키면 설계사양을 만족하는가를 조사하여 퍼지 제어규칙과 소속함수를 작성하였다. 이에 따라 퍼지규칙과 소속함수를 작성하여 퍼지추론하고 PID제어 파라미터의 자동조정을 하는 시뮬레이션을 행했지만 파라미터가 설계사양을 만족하도록 조정되지는 않았다. 그래서 퍼지추론에 의해 얻어진 수정계수의 값을 조사하여 보면 파라미터에 대한 적절한 값은 없기 때문에, 파라미터에 수정계수를 곱한 것을 가감법에 의해서 조정하는 방법으로 변경하였지만 잘 행해지지 않았다.

실제로 시뮬레이션에서 설계사양을 만족하도록 PID제어 파라미터를 우수하게 조정할 수 없기 때문에, 조정규칙을 바꾸든지 소속함수를 만들어 고쳤지만, 파라미터의 조정이 설계사양을 만족하도록 조정되지 않아, 퍼지추론에 의한 자동조정을 행할 수 없었다.

여러 가지의 시뮬레이션 실험을 하였지만 파라미터 자동조정이 잘 되지 않아 퍼지 제어규칙과 소속함수가 적당하지는 않기 때문이라 생각된다. 또 제어규칙과 소속함수를 고쳐서 작성하였지만 설계사양을 만족하도록 파라미터 값을 퍼지 추론에 의해서 조정하여 얻기가 어려운 것을 알 수 있었다.

PID제어 시뮬레이션에 의한 응답파형에서 비례이득 K_P 값을 크게 하면 그것에 비례하여 응답파형이 진동하고, 적분시간 T_I 는 값을 크게 하면 편차가 크고 역으로 값을 작게 하면 응답파형이 진동하고 매우 적게 하면 마침내는 발산하였다. 미분시간 T_D 는 작게 하면 진동하고 크게 하면 진동이 적게 되지만 어느 정도 크게 하면 다시 진동하는 것을 알았다.

이것들의 각 파라미터 특성에 기초해서 PID제어 파라미터의 조정을 되풀이하여 퍼지규칙을 수정하기도 했지만 파라미터의 조정이 어렵고 생각처럼 되지 않았다.

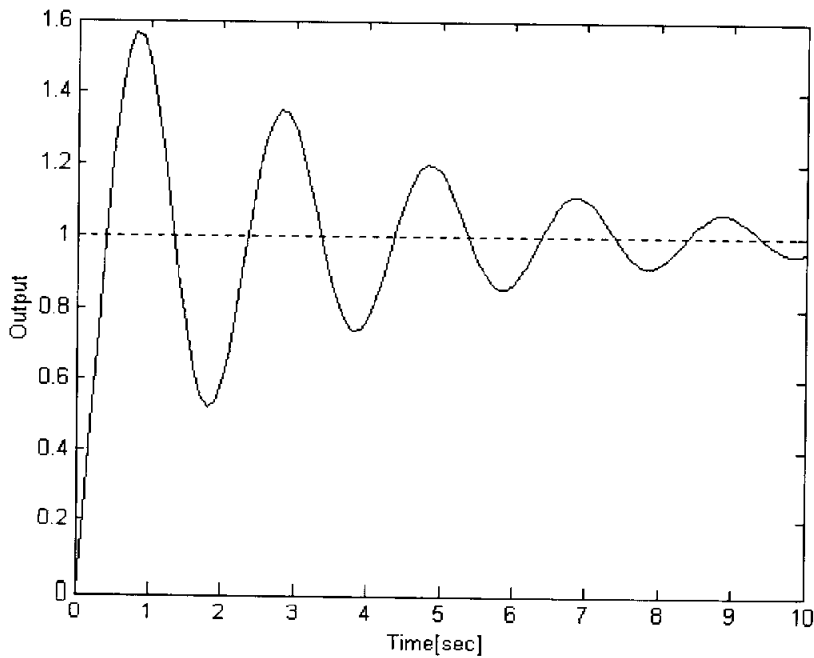


그림 4.4 PID제어의 응답($K_P=1.0$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.2[\text{sec}]$)

Fig. 4.4 The response of the PID control with $K_P=1.0$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.2[\text{sec}]$

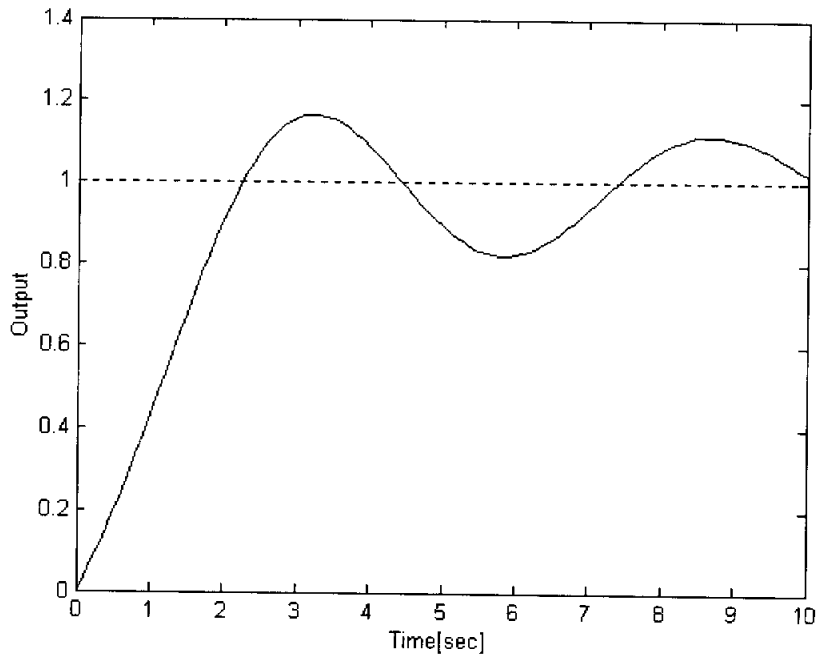


그림 4.5 PID제어의 응답($K_P=0.45$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.8[\text{sec}]$)

Fig. 4.5 The response of the PID control with $K_P=0.45$, $T_I=0.5[\text{sec}]$,
 $T_D=0.8[\text{sec}]$

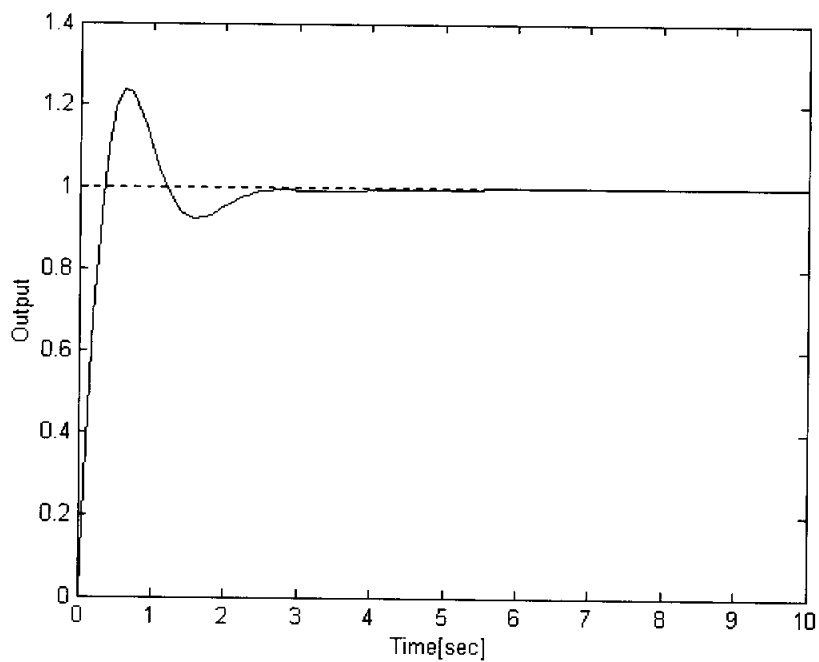


그림 4.6 PID 제어의 응답($K_p=15$, $T_I=1.4[\text{sec}]$, $T_D=0.26[\text{sec}]$)

Fig. 4.6 The response of the PID control with $K_p=15$, $T_I=1.4[\text{sec}]$,
 $T_D=0.26[\text{sec}]$

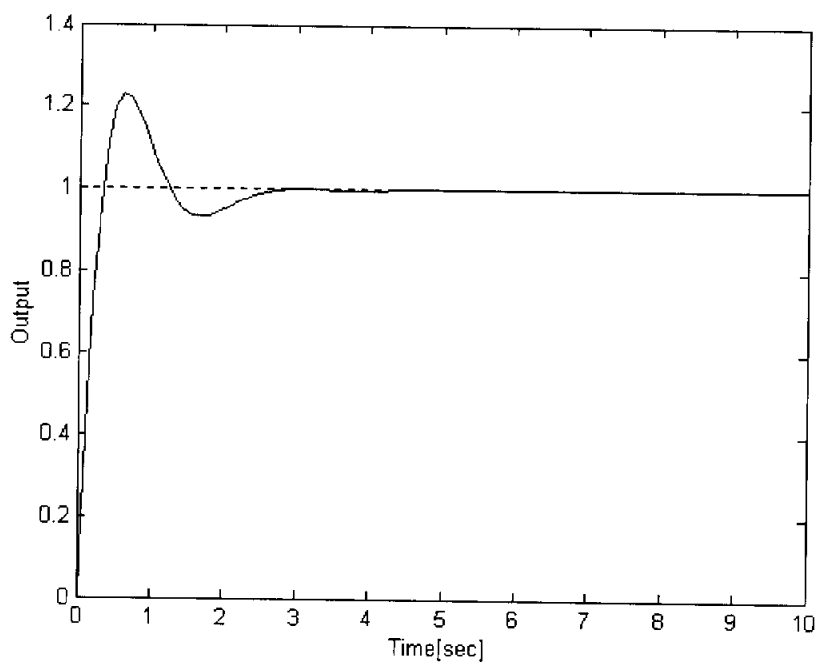


그림 4.7 PID제어의 응답($K_p=15$, $T_I=1[\text{sec}]$, $T_D=0.3[\text{sec}]$)

Fig. 4.7 The response of the PID control with $K_p=15$, $T_I=1[\text{sec}]$,
 $T_D=0.3[\text{sec}]$

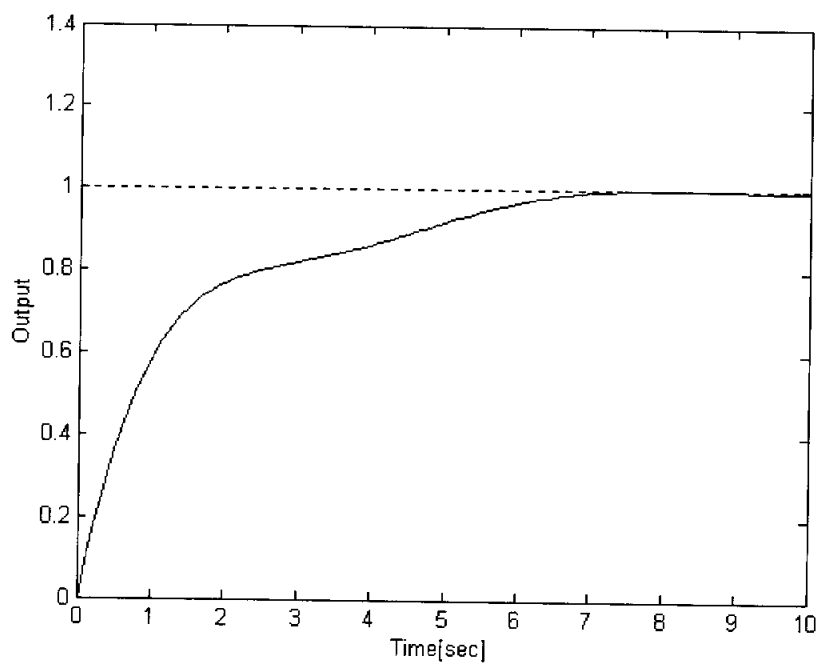


그림 4.8 PID제어의 응답($K_p=0.6$, $T_I=0.908[\text{sec}]$, $T_D=1.5[\text{sec}]$)

Fig. 4.8 The response of the PID control with $K_p=0.6$, $T_I=0.908[\text{sec}]$,
 $T_D=1.5[\text{sec}]$

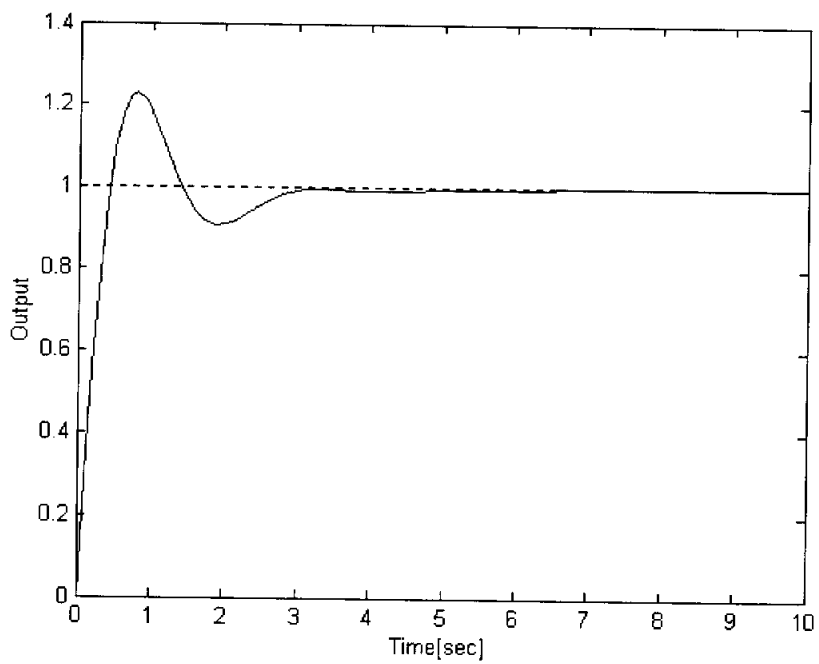


그림 4.9 PID제어의 응답($K_P=10$, $T_I=1.5[\text{sec}]$, $T_D=0.3[\text{sec}]$)

Fig. 4.9 The response of the PID control with $K_P=10$, $T_I=1.5[\text{sec}]$,
 $T_D=0.3[\text{sec}]$

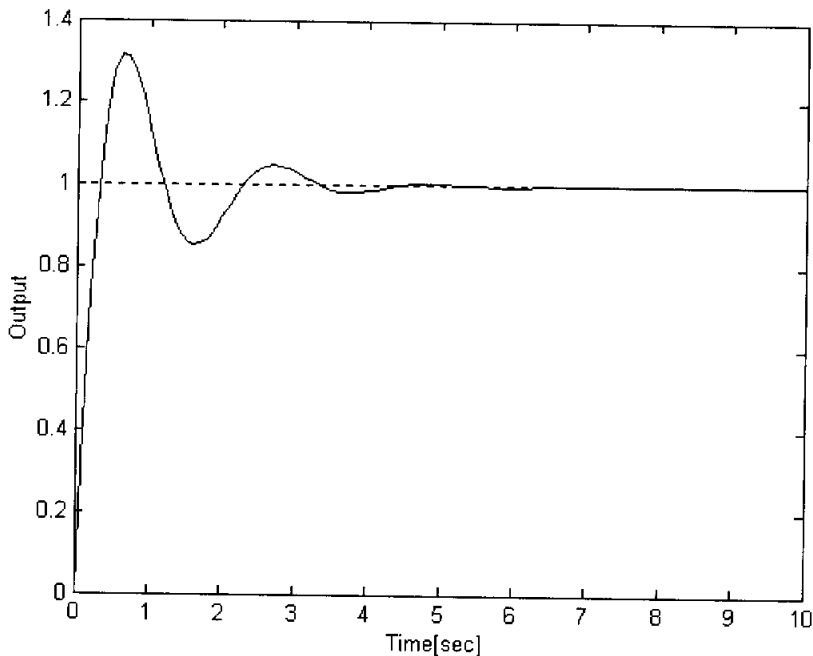


그림 4.10 PID제어의 응답 ($K_P=15$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.3[\text{sec}]$)

Fig. 4.10 The response of the PID control with $K_P=15$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.3[\text{sec}]$

조정규칙과 소속함수를 작성하기 위하여 PID제어의 시뮬레이션은 지금까지 조건에서 행한 것 이외도 여러 조건에서 파라미터를 어떻게 조정하면 설계사양을 만족하도록 할 것인가를 구하기 위해서 시행착오법을 되풀이하였다.

그림 4.11은 동일한 제어대상인 식 (3. 2)에 대하여, 인디셜 응답으로부터 과도 응답법에 의해서 PID제어 파라미터를 자동 조정하는 시뮬레이션을 하였으며 희망하는 응답을 얻을 수 있었다. 따라서 PID제어 파라미터의 자동조정은 과도 응답법에서 행하는 것은 가능함을 알 수 있다.

방법은 인디셜 응답의 변곡점에서 접선을 긋고 L (부동작시간), T (시정수), K (이득)를 구한다. 그리고 식(4. 1), 식(4. 2), 식(4. 3)으로부터 PID제어 파라미터를 산출하는 방법이다.

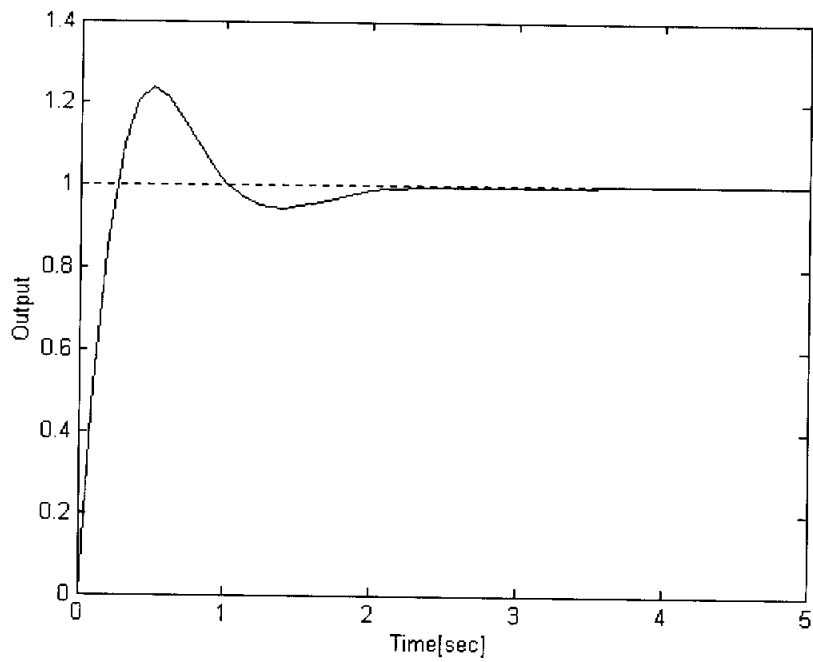


그림 4.11 과도응답법으로 파라미터를 자동 조정 한 응답

Fig. 4.11 The response by the PID parameter tuning with transient response

제 5장 결 론

제어대상에 PID제어기를 부가하여 단위 계단입력을 인가하면 그때 응답파형의 면적으로 나타낸 특정량을 구할 수 있는 것을 확인하였다. 이 면적을 이용한 퍼지추론으로 PID제어 파라미터의 자동조절에 대하여 다음을 알 수 있었다.

- 1) 제어 응답파형의 특정량으로 응답파형의 면적을 이용하여 자동조정 하는 것은 유효함을 확인하였다. 그러나 정정시간 대신에 특정량으로 제어면적을 이용하는 문제는 이것의 정확한 표현을 위하여 식을 다시 수정할 필요가 있다.
- 2) PID제어 파라미터 조정은 조정작업이 어려워서 퍼지규칙의 작성이 힘들었다. 수 차례 시행착오의 끝에 퍼지규칙과 소속함수를 작성하여 파라미터의 자동조정 시뮬레이션을 하였지만 퍼지규칙과 소속함수가 적절하지는 않았기 때문에 파라미터의 값이 설계사양을 만족하도록 조정할 수 없었다.
- 3) 응답파형 분석하여 이것에 기초한 퍼지규칙과 소속함수를 작성하고 퍼지추론하여 PID제어 파라미터를 자동조절하는 것은 어렵지만 과도응답에 의한 방법에서는 PID제어 파라미터의 자동조절을 하는 것이 가능하였다.
차후 과제는 퍼지규칙과 소속함수를 어떤 방법으로 하는 것이 가장 적합하고 쉬운 것인가에 대한 문제이다.

참고문헌

- [1] L.A Zadeh, "Fuzzy algorithms," Information and Control, Vol. 12, pp. 94-102, 1968.
- [2]菅野道夫, "あいまい集合と理論の制御への應用," 計測と制御, Vol. 18, No. 2, pp. 150- 160, 1979.
- [3] 春木, 束, "ファジイ制御技術の動向," 東芝レビュー-43卷 4號, pp. 300-30 1989.
- [4] 三 室, 田 中, "C言語による實用ファジイブック," ラッセル, 1989.
- [5] 林眞司, "ファジイ制御のチューニング方法," 第6回ファジイシステムシンポジウム講演論文集, pp. 189-192, 1990.
- [6] 李米澤, "DCモタサーボ系のファジイ制御," 日本ファジイ學會誌, Vol. 2, No. 4, pp. 598-603, 1991.11.
- [7] 변증남, 김동화, "퍼지추론에 의한 제어방법," 전기학회지, Vol. 39, No. 12, pp. 21- 32, 1990.
- [8] Murakami, S., H.Fujimura and E.Ide, "Weld-line Tracking Control of Arc Welding Robot Using Fuzzy Logic Controller," Proc. of 2nd Inter. Fuzzy System Association Congress, pp. 353-357, July 1991.
- [9] Spyros Tzafestas, Nikolaos P. "Incremental Fuzzy Expert PID Control" IEEE Transactions industrial electronics, Vol. 37, No. 5 October 1990.
- [10] Tomoyoshi Takeuchi, et., "Fuzzy Control a Mobile Robot for Obstacle Avoidance," Elsevier Science Publishing Co., Inc. 1988.
- [11] 竹内, 遠藤, 桶口, 制御理論 講義, 昭晃堂, 1990
- [12] 須田信英, "システム制御情報學會編集 : PID制御," 朝倉書店, 1985
- [13] 寺野壽郎, "實用ファジイ制御技術," 電子情報通信學會, 1991
- [14] 菅野道夫, "ファジイ制御," 日刊工業新聞社, 1988
- [15] 水本雅請編集 日本ファジイ學會, "講座ファジイ2 ファジイ集合," 日刊工業新聞社, 1993
- [16] 五百旗頭正ほか 日本ファジイ學會, "講座ファジイ5 ファジイ制御," 日刊工業新聞社, 1993
- [17] 浅居喜代治, ファジイ情報処理入門, オーム社, 1994

- [18] 中島, 竹田, 右井, ファジィ理論入門, 裳華房, 1985
- [19] 安信誠二, ファジィ工學, 昭晃堂, 1991
- [20] 洪淳一 외, “퍼지 제어 設計支援을 위한 소프트웨어의 構成,” 大韓電氣學會 '91하계학술대회 論文集, Vol. 1, pp. 717-719, 1991. 7

A Study on Automatic Tuning of Parameters in Fuzzy PID Control

Hyung-Jae Lee

**Department of Electrical Engineering
Graduate School of Industry
Pukyong National University**

ABSTRACT

In this paper, employing the experienced knowledge and know-how, which are accompanied by the adjustment for adjusting rule qualitatively in this research, we performed researches by simulation in order to adjust each parameter of the PID controller through the fuzzy inference in the characteristic value of control response waveform.

For the design, we consider the proportional gain, integral and derivate time of the PID controller system in order that the transient response(control response) of control system may meet the design specification. Moreover, it is very important that we compose the adjusting rule and membership function used in the fuzzy inference to adjust the parameters with appropriate values to the system, and that we should change the adjusting rule and membership function until we obtain the appropriate values of parameters by trial and error.

To adjust the parameter of the PID controller is considered by the simulation that is adapted to the fuzzy inference with the index ,which is used by the specific values such as the overshoot, the amplitude damping ratio and control area represented by the area in the response waveform.

Especially, it is presented by an effectiveness for the parameter adjustment of the PID controller with the constitution of the adjusting method and membership function. However it is different from the constitution the parameter adjustment rule and the membership function so we cannot correspond to the parameters of the PID controller automatically through the fuzzy inference in the adjustment of parameters of the PID controller but it is possible to adjust the parameters of the PID controller automatically by selecting the transient response method.

감사의 글

본 논문이 결실을 맺고 완성될 수 있도록 혼신의 지도를 해주신 홍순일 교수님께 감사를 드립니다. 또한 본 논문의 부족함을 보완할 수 있도록 세밀한 지도와 심사로서 물심양면 도와주신 이동철 교수님, 배종일 교수님께 감사를 드립니다.

그리고 2년 반의 석사과정 동안 훌륭한 가르침을 주신 전기공학과 교수님께도 감사의 마음을 전합니다.

그동안 본 논문이 완성되기 까지 아낌없이 지원해 주신 연구실 동료, 선·후배님께도 감사를 드리며, 특히 어려운 군생활 동안 이러한 큰 일을 할 수 있도록 후원해 주신 대대장님 이하 여러 간부님들과 중대원들, 사랑하는 가족에게 무한한 영광을 돌립니다.

언제나 배움의 자세로 노력하며 모든일에 최선을 다하겠습니다.

2002년 6월

이형재 올림