



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사 학위논문

비선형 퍼지 PID제어기의 성능개선에 관한 연구

A Study on a Performance Improvement of the Nonlinear Fuzzy
PID Controller



2012년 8월

한국해양대학교 대학원
제어계측공학과
주 하 나

본 논문을 주하나의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 조 석 제



위 원 공학박사 하 윤 수



위 원 공학박사 김 종 화



2012 년 6 월 24 일

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract

제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구내용	3
제 2 장 고정 파라미터 퍼지 PID제어기	4
2.1 기본 구조	4
2.2 퍼지화 알고리즘	7
2.3 퍼지 제어 규칙	9
2.4 비퍼지화 알고리즘	11
2.5 고정 파라미터 퍼지 PID제어기 제어칙	14
2.6 고정 파라미터 퍼지 PID제어기 시뮬레이션	16
2.7 고정 파라미터 퍼지 PID제어기의 성능분석 및 고찰	23
제 3 장 기 연구된 가변 파라미터 비선형 퍼지PID제어기 ...	25
3.1 가변 파라미터 퍼지 PID제어기 설계	25
3.2 가변 파라미터 퍼지 PID제어기 시뮬레이션	30
3.3 논의된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 고찰	35
제 4 장 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 제안	36

4.1 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 기본 설계	36
4.2 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기 시뮬레이션	44
제 5 장 비선형 이중 수조 시스템의 제어	53
5.1 비선형 이중 수조 시스템 설계	53
5.2 퍼지 PID제어기를 이용한 비선형 이중 수조 시스템의 시스템 성능 검증과 결과 고찰.....	55
제 6 장 결 론	61

참 고 문 헌



A Study on the Performance Improvement of the Nonlinear Fuzzy PID Controller

Ha-Na Ju

*Department of Control & Instrumentation Engineering,
Graduate School, Korea Maritime University*

Abstract

PID controllers have been widely used for industrial processes but to its simplicity and effectiveness. They provide high sensitivity and stability of the overall feedback control system and reduce overshoot and steady-state error. It has been well known that PID controllers can be effectively used for 1st and 2nd-order linear systems, but they can suffer from problems on higher-order and nonlinear systems.

On the other hand, fuzzy controllers in general are suitable for many nontraditionally modeled industrial processes such as linguistically controlled systems that cannot be precisely described by mathematical model formulation and have significant unmodeled effects and uncertainties.

There are several types of control systems that adopt a fuzzy logic controller as an essential system component. The majority of applications during the past two decades belong to the class of fuzzy PID controllers.

This thesis describes the design principle, tracking performance, and stability analysis of a nonlinear fuzzy PID controller with fixed parameters and nonlinear fuzzy PID controllers with variable parameters.

At first, the fuzzy PID controller with fixed parameters is derived from the design procedure of the conventional fuzzy linguistic controller. The resulting controller is a discrete-time fuzzy version of the conventional PID controller, which has the same structure with proportional, derivative and integral parts but has nonconstant gains. However, all the gains of fuzzy PID controller are nonlinear function of the input signals at every sampling time. The resultant fuzzy PID controller has a simple structure of the conventional PID controller but possesses its self-tuning control capability. In order to increase the applicability of the fuzzy PID controller using low-level microprocessors, a simplified fuzzy PID controller is introduced.

At second, a fuzzy PID controller with variable parameters, named variable parameter fuzzy PID controller, is suggested to improve the shortage of the fuzzy PID controller with fixed parameters. The fuzzy PID control action cannot be operated accurately when the scaled inputs are greater than the normalization parameter of the fuzzy input sets in case of the fuzzy PID controller with fixed parameters. If design parameters are adjusted by comparing magnitude among the inputs of the fuzzy controller at every sampling time, the partitions of all the scaled fuzzy inputs converge within regions confined by the normalization parameter and the resultant fuzzy PID controller with variable parameters can always accomplish PID control action precisely regardless of the input magnitude variation.

At last, several simulations for various systems including a linear time-invariant system and a nonlinear two-tank level control system are executed in order to verify that the suggested fuzzy PID controller is superior to other fuzzy PID controllers already discussed by comparing control performances among them.



제1장 서론

1.1 연구배경

PID제어기(PID controller)는 구조가 간단하고 적용이 쉽고, 제어 성능이 우수하며 제어이득 조정이 비교적 쉽기 때문에 산업현장에서 80% 이상을 차지할 정도로 많이 사용되고 있다. PID제어기는 우수한 성능에도 불구하고 단일 입출력 시스템에만 작용 가능한 선형 제어기로서 비선형성이 강한 플랜트에 적용 시 만족할 만한 성능을 얻기가 어렵다는 단점을 가지고 있다.

최근에는 현대제어이론의 발전에 따라 PID제어기를 다변수 시스템이나 비선형 시스템에 적용하려는 연구가 진행되고 있다. PID제어기를 다변수 시스템에 적용하기 위해 다변수 시스템의 입력과 출력을 일대일로 대응시키는 분해과정을 거쳐 여러 개의 단일 입출력 모델을 구하고 각각에 대해 PID제어기를 설계하여 적용하는 연구가 이루어져 왔다^{[1],[2]}. 그러나 이 모델 분해과정이 대부분의 경우에 매우 어려워 직접 적용할 수 있는 현대 제어기법이 주로 사용되고 있다.

비선형 시스템을 제어하는 방법으로는 퍼지 이론을 응용한 연구들이 진행되고 있다^{[3],[4]}. 퍼지 제어기(Fuzzy controller)는 전문가의 언어적 정보를 제어기에 포함시킬 수 있을 뿐만 아니라 그 자체의 비선형적 특성으로 훌륭한 비선형 제어기가 된다.

퍼지 제어기는 초창기 퍼지이론만으로 구성된 퍼지 제어기에서 적응알고리즘을 도입하거나 강인성을 포함하는 퍼지 제어기들로 연구 분야들이 확장되고 있다^{[5],[6]}. 퍼지로 PID제어기를 구현하여 실제 플랜트에 적용한 연구 결과들이 보고되고 있다^{[7],[8],[9],[10]}. 퍼지 제어기나 적응 퍼지 제어기는 우수한 성능에도 불구하고 제어기의 복잡성으로 실시간 제어에 컴퓨터 연산이 증가 되고, 현장에서 주로 사용되는 PID제어구조와 다르다는 단점을 갖는다. 퍼지 PID제어(Fuzzy PID controller)기는 PID제어기와 동일한 형태를 가지면서 비선형성이 강한 시스템에 적용이 가능하다.

퍼지 PID제어기는 오차 신호와 오차의 변화율을 입력으로 실시간으로 퍼지 규칙(Fuzzy rule)과 추론을 거쳐 제어 출력을 결정하는 제어기이다. 퍼지 PID제어기는 제어 출력값을 직접 결정하는 위치형^{[11],[12],[13],[14]}과 제어 출력의 증감을 결정하는

속도형^[10]이 있다. 또한, 두 형태를 합성하는 몇 가지 방법의 퍼지 PID제어기가 제안되었다^{[9],[15],[16]}. 제안된 제어기들은 우수한 성능을 나타내었지만, 퍼지추론을 위한 비선형 계산이 포함되므로써 PID제어기에 비해 복잡해 제어기 구현을 위한 컴퓨터 연산이 증대될 수밖에 없는 단점을 가지고 있다. 연산 시간을 줄이기 위해 정규화를 통해 변수를 줄이거나 퍼지 규칙의 수를 제한하는 형태로 간략화된 퍼지 PID 제어기가 제안되었다. 그러나 여전히 PID제어기에 비해 복잡한 형태의 제어칙을 갖게 되어 연산 시간을 감소시킬 수 있는 더욱 간단한 형태의 제어칙이 요구된다.

일반화된 퍼지 PID제어기는 퍼지화기(Fuzzifier), 제어칙 베이스(Fuzzy rule base), 비퍼지화기(Defuzzifier)로 구성되고 일반적인 퍼지제어기의 설계 과정에 따라 유도된다. 유도된 퍼지 PID제어기는 일반적인 PID제어기의 이산시간 퍼지형 제어기가 되고, 선형 PID제어기와 동일한 제어기 구조를 갖지만 제어기의 이득은 고정되지 않는다. 퍼지 PID제어기의 이득은 입력신호에 대한 비선형 함수 형태가 된다. 그러므로 퍼지 PID제어기는 단순한 선형 구조를 갖는 일반적인 선형 PID제어기에 비해 향상된 비선형 보상 능력과 자기동조(Self-tuning)능력을 갖는다. 이러한 퍼지 PID제어기는 각 파라미터들이 고정되므로 우리는 이 제어기를 고정 파라미터 퍼지 PID제어기^{[10],[17],[18]}라 부른다.

고정 파라미터 퍼지 PID제어기는 제어기의 설계 파라미터가 한번 결정되면 고정됨으로써 초기 설계 시 적용되었던 목표치보다 넓은 동작범위의 입력이 인가될 경우에는 설계 시 고려된 퍼지 PID 제어동작의 적용범위를 벗어나게 되어 제대로 효율을 발휘하지 못하게 되고, 이와는 반대로 설계시의 목표치보다 작은 범위의 입력이 인가될 경우에도 그 순간 요구되는 PID제어동작에 따른 제어입력이 정확하게 생성되지 않아 정교한 제어가 이루어지지 않는 단점을 가지고 있다.

기존에 연구되어진 가변 파라미터 퍼지 PID제어기는 이러한 단점을 개선시킨 제어기로서 입력 변수의 변화를 실시간으로 측정하고 입력 변수들의 상호관계를 비교하여 각 샘플링 시간마다 제어기의 정규화 파라미터를 가변시킴으로써 동작 입력의 범위에 영향을 받지 않고, 보다 빠르고 정밀한 제어가 가능하도록 제어기 파라미터가 가변되는 비선형 퍼지 PID제어기법이다.

하지만 가변되어진 정규화 파라미터값이 지나치게 커진 상태의 경우 정상상태에서의 PID제어 효능을 저하시킨다는 단점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 정규화 파라미터를 고정하고 설계 파라미터를 가변시킴으로써 모든 퍼지 제어 입력이 PID

제어 동작을 가지게 하며 정상상태에서도 PID제어 성능이 우수한 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기를 제안하고자 한다.

1.2 연구내용

본 논문에서는 첫 번째로 고정 파라미터 퍼지 PID제어기에 대한 설계 방법을 기술하고 컴퓨터 연산시간을 줄일 수 있는 간결한 형태의 제어기 설계를 제안한다.

두 번째로는 기존에 연구되어진 정규화 파라미터를 가변시키는 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 성능을 확인해 본다.

세 번째로는 본 논문에서 제안한 정규화 파라미터는 고정시키고 설계 파라미터를 가변키는 퍼지 PID제어기 설계를 제안하고 제안된 퍼지 PID제어기의 특성에 대하여 알아본다.

네 번째로는 비선형성이 강한 이중 수조 시스템에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 고정 파라미터 퍼지 PID제어기의 성능, 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 성능과 본 논문에서 제안한 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 성능을 비교한다.

2장과 3장에서는 기존에 연구되었던 퍼지 PID제어기의 설계 구조에 대하여 알아보고 제어기를 시뮬레이션 함으로써 문제점을 파악한다.

4장에서는 기존에 연구되었던 퍼지 PID제어기의 단점을 보완하기 위한 개선된 성능의 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 설계를 제안하고 성능을 시뮬레이션을 통해 알아본다.

5장에서는 기존에 연구되었던 고정 파라미터 퍼지 PID제어기와 가변 파라미터 퍼지 PID제어기, 본 논문에서 제안한 개선된 가변 퍼지 PID제어기에 대하여 대표적인 비선형 시스템인 이중 수조 시스템을 이용하여 성능을 확인한다.

마지막으로 6장에서는 본 논문에서 제안한 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 성능평가를 위해 실시한 시뮬레이션에 대하여 종합적으로 평가하고 결론을 맺는다.

제 2 장 고정 파라미터 퍼지 PID제어기

본 장에서는 가변 설계 파라미터 PID제어기의 기초로서 파라미터가 고정되는 고정 파라미터 퍼지 PID제어기의 설계 과정과 설계 방법을 기술하고 컴퓨터 연산 시간을 줄일 수 있는 간결한 형태의 고정 파라미터 퍼지 PID제어기의 제어칙에 관하여 논한다^{[10],[17],[18]}.

2.1 기본 구조

비선형 퍼지 PID제어기를 구성하는 퍼지 논리제어기(Fuzzy logic controller)는 전형적인 제어 시스템보다 자연언어와 인간의 생각에 더욱 가까운 퍼지 논리를 기본으로 하고 있다. 시스템이 비선형이거나 플랜트가 크고 복잡하여 시스템의 모델링을 위한 파라미터의 추출이 어려운 경우, 수학적모델을 기초로 한 기존의 제어기 설계방법으로는 제어기의 설계가 어렵거나 만족할 만한 제어성능을 기대하기 어려우므로 전문가의 지식과 숙련자의 경험적 지식을 활용하는 지능제어 기법을 고안하게 되었다. 퍼지 논리제어기는 이와 같은 대표적인 지능제어기법의 하나로 숙련자의 경험과 제어 전문가의 지식을 활용하여 시스템 제어에 필요한 제어칙을 기술하고 제어기 스스로가 시스템의 동작상태에 따라 제어능력을 보유하도록 고안된 것이다. 퍼지 논리제어기는 숙련자의 경험과 제어 전문가의 지식을 규칙 베이스 또는 데이터 베이스 형태로 가지게 되며, 제어기가 규칙 베이스를 활용하여 주어진 오차에 대한 조작량을 판단 결정하는 기능을 가진다.

그림 2.1은 퍼지 논리 제어기로 구성된 고정 파라미터 퍼지 PID제어 시스템의 구성도이다^[10,17,18].

퍼지 논리제어기는 목표치에 대한 오차와 오차의 변화율 그리고 오차의 변화율에 대한 변화율을 입력으로 사용하고, 이 세 입력과 퍼지 규칙과 비퍼지화기를 각각 포함하는 서로 다른 두 개의 퍼지 제어블록으로 구성된다.

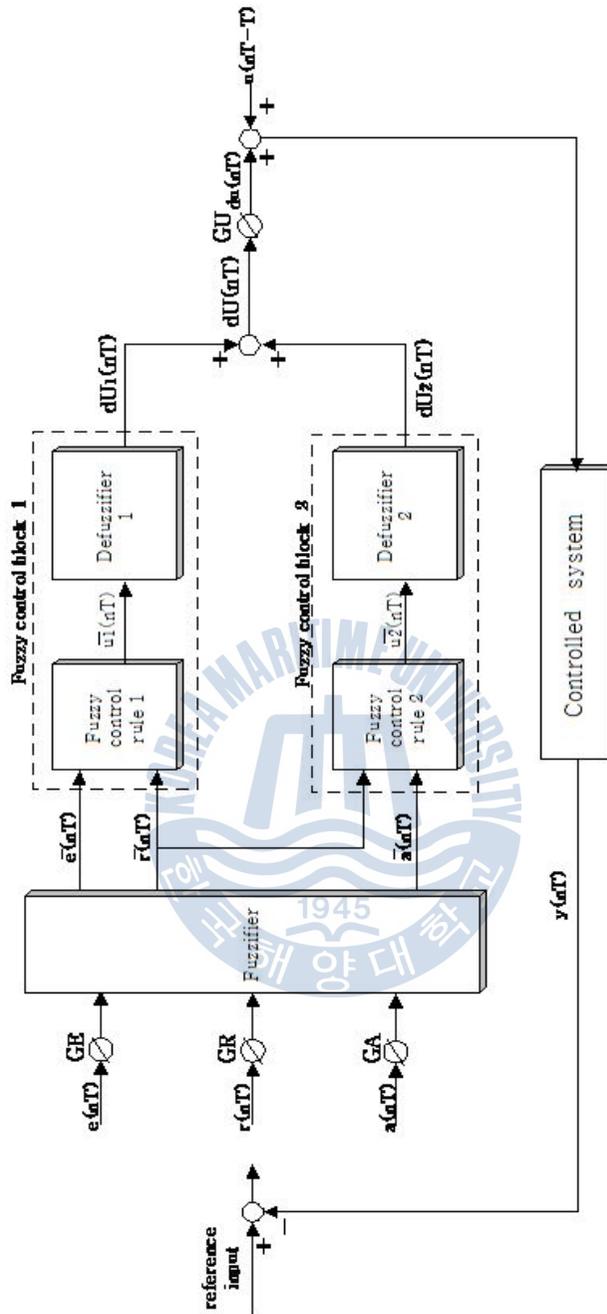


그림 2.1 고정 파라미터 퍼지 PID제어기의 구조

Fig. 2.1 Structure of a fuzzy PID control system with fixed parameters

따라서 퍼지 논리제어기의 출력은 두 퍼지 제어블록의 출력값을 더함으로써 구할 수 있다. 그림 2.1에서 $F(\bullet)$ 는 스케일 파라미터에 의해 정규화된 입력신호 (\bullet) 의 퍼지화를 의미한다.

$$e(nT) = ref(nT) - y(nT) \quad (2.1)$$

$$e^* = GE \times e(nT) \quad (2.2)$$

$$r(nT) = [e(nT) - e(nT - T)] / T \quad (2.3)$$

$$r^* = GR \times r(nT) \quad (2.4)$$

$$a(nT) = [r(nT) - r(nT - T)] / T \quad (2.5)$$

$$= [e(nT) - 2e(nT - T) + e(nT - 2T)] / T^2 \quad (2.6)$$

$$a^* = GA \times a(nT) \quad (2.7)$$

$$u(nT) = du(nT) + u(nT - T), du(nT) = GU \times dU(nT) \quad (2.8)$$

$$dU(nT) = dU_1(nT) - dU_2(nT) \quad (2.9)$$

여기서 n 은 양의 정수를 나타내며 T 는 샘플링 시간을 나타낸다. 그리고 $y(nT)$, $e(nT)$, $r(nT)$, $a(nT)$ 는 각각 샘플링 시간 nT 에서 프로세서의 출력, 오차 (이후부터로 *error*로 표기), 오차의 시간 변화율(이후부터 *rate*로 표기), 오차의 시간 변화율의 변화율(이후부터 *acc*로 표기)을 나타내며 GE , GR , GA , GU 는 각각 *error*, *rate*, *acc* 및 퍼지 출력 dU 의 퍼지화 스케일 파라미터, 퍼지 PID 제어기의 제어 이득을 계산하는데 사용된다. dU_1 , dU_2 는 퍼지 제어 블록 1,2에서의 출력을 표시하고, u 는 제어 입력을 의미한다.

2.2 퍼지화 알고리즘

그림 2.2는 본 논문에서 퍼지제어기의 입력으로 사용하는 $error$ 와 $rate$, acc 에 대하여 정규화 파라미터를 도입하여 스케일 처리한 다음 이들을 퍼지집합으로 퍼지화 하는 알고리즘을 나타낸 것이다.

$error$ 는 그림 2.2와 같이 $EP(Error_Positive)$ 와 $EN(Error_negative)$ 의 두 개의 멤버를 갖고, $rate$ 는 $RP(Rate_Positive)$ 와 $RN(Rate_Negative)$ 의 두 개의 멤버, acc 는 $AP(Acc_Positive)$ 와 $AN(Acc_Negative)$ 의 두 개의 멤버를 갖는다^{[10],[17]}. $output1$ 에 대한 퍼지출력은 그림 2.3에서 보는 것과 같이 $OP(Output_Positive)$, $OZ(Output_Zero)$ 와 $ON(Output_Negative)$ 의 세 개의 멤버를 갖는 퍼지집합으로 정의되고, $output2$ 에 대한 퍼지출력은 그림 3.4에서 보는 것과 같이 $OPM(Output_Positive_Middle)$ 과 $ONM(Output_negative_middle)$ 의 두 개의 멤버를 갖는다.

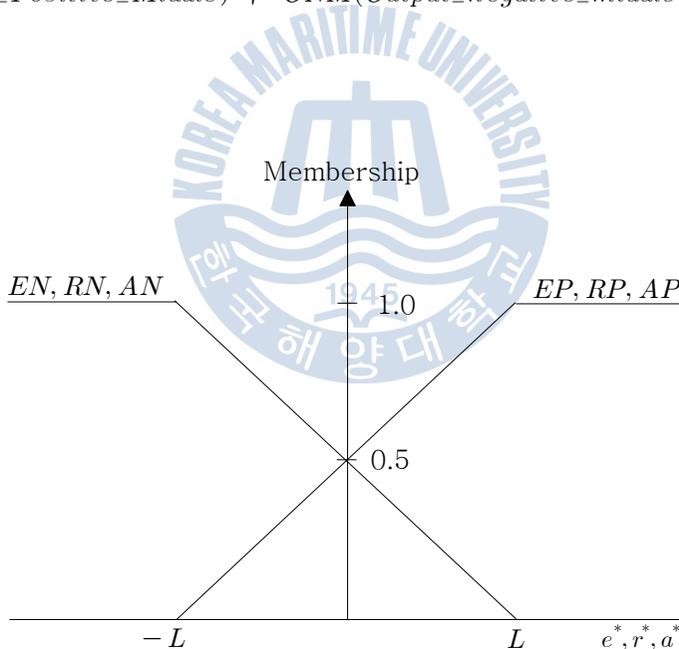


그림 2.2 e^*, r^*, a^* 의 퍼지화

Fig. 2.2 Fuzzification of e^*, r^* and a^*

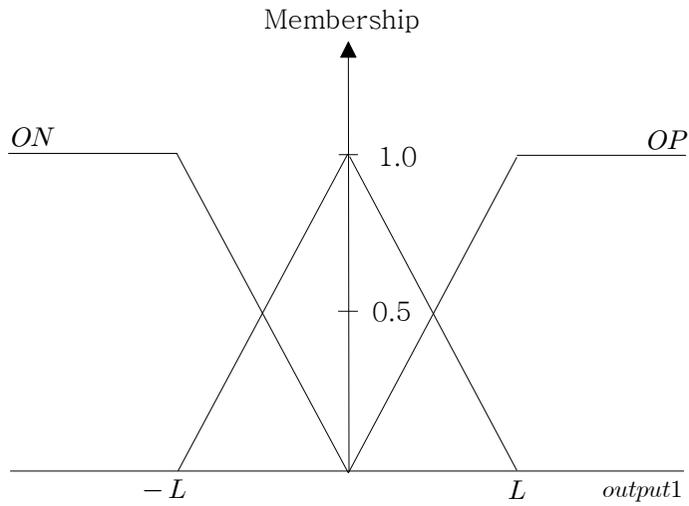


그림 2.3 퍼지 제어블록 1에 대한 출력 퍼지화
 Fig. 2.3 Output fuzzification for fuzzy control block 1

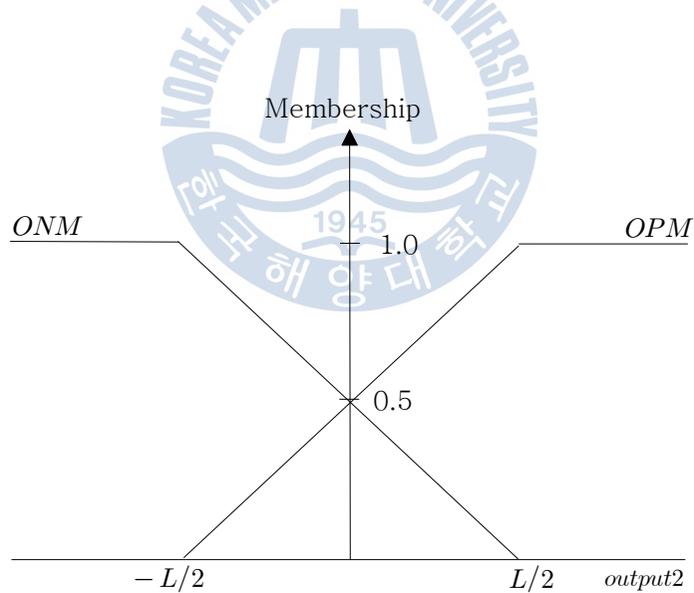


그림 2.4 퍼지 제어블록 2에 대한 출력 퍼지화
 Fig. 2.4 Output fuzzification for fuzzy control block 2

2.3 퍼지 제어규칙

퍼지 제어규칙은 숙련된 작업자의 풍부한 경험적 지식과 제어 엔지니어의 전문가적 지식을 기초로 하여 만들어진다. 이 퍼지 제어규칙은 ‘*IF ~ THEN ~*’ 형식으로 표현된다.

퍼지 제어블록 1에 대한 4개의 퍼지 제어규칙은 다음과 같다^{[10],[17]}.

$$(R1)_1 : IF \text{ error} = EP \text{ and } \text{rate} = RP \text{ THEN } \text{output1} = OP$$

$$(R2)_1 : IF \text{ error} = EP \text{ and } \text{rate} = RN \text{ THEN } \text{output1} = OZ$$

$$(R3)_1 : IF \text{ error} = EN \text{ and } \text{rate} = RP \text{ THEN } \text{output1} = OZ$$

$$(R4)_1 : IF \text{ error} = EN \text{ and } \text{rate} = RN \text{ THEN } \text{output1} = ON$$

퍼지 제어블록 2에 대한 퍼지 제어규칙은 다음과 같다.

$$(R1)_2 : IF \text{ rate} = RP \text{ and } \text{acc} = AP \text{ THEN } \text{output2} = OPM$$

$$(R2)_2 : IF \text{ rate} = RP \text{ and } \text{acc} = AN \text{ THEN } \text{output2} = ONM$$

$$(R3)_2 : IF \text{ rate} = RN \text{ and } \text{acc} = AP \text{ THEN } \text{output2} = OPM$$

$$(R4)_2 : IF \text{ rate} = RN \text{ and } \text{acc} = AN \text{ THEN } \text{output2} = ONM$$

제어규칙 $(R1)_1 \sim (R4)_1$, $(R1)_2 \sim (R4)_2$ 에서는 Zadeh의 AND 논리가 적용되었다. 이는 두 개에 대한 최소값을 찾는 min연산이다^{[3][4]}.

퍼지 추론논리를 퍼지 제어블록1, 2에 적용하기 위한 입력 공간은 각각 서로 다른 조건을 갖는 20개로 그림 2.5와 그림 2.6과 같이 분할된다. 그림 2.5는 퍼지 제어블록 1에서 입력으로 사용된 *error*와 *rate*를 정규화 시킨 e^* 와 r^* 에 대한 위상평면에서의 입력 공간 분할을 나타낸 것이고, 그림 2.6은 퍼지 제어블록 2에서 입력으로 사용된 *rate*와 *acc*를 정규화 시킨 r^* 와 a^* 에 대한 위상평면에서의 입력 공간 분할을 나타낸 것이다.

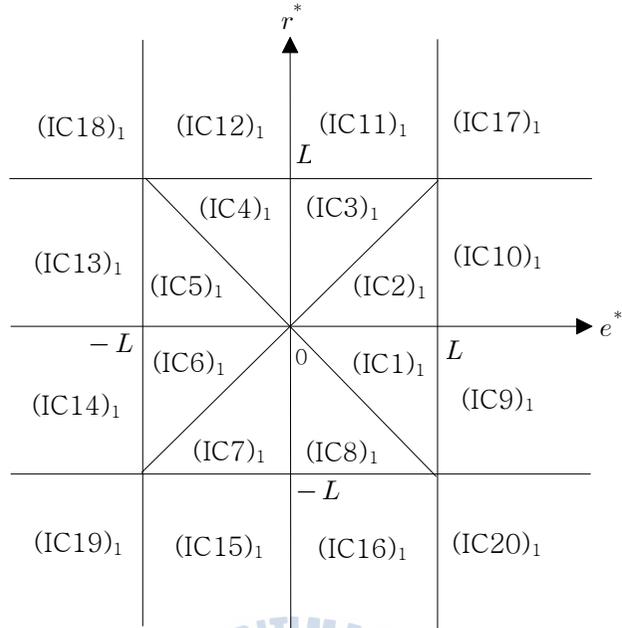


그림 2.6 e^* 와 r^* 에 대한 입력 공간 분할
 Fig. 2.5 Possible input combinations of e^* and r^*

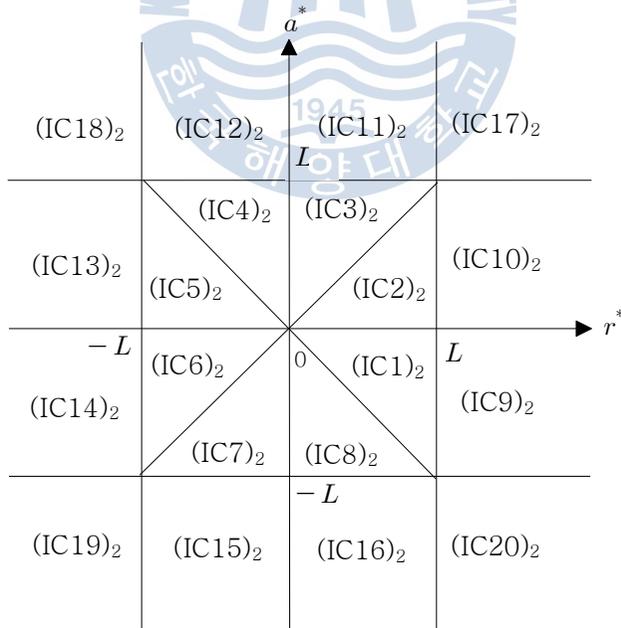


그림 2.8 r^* 와 a^* 에 대한 입력 공간 분할
 Fig. 2.6 Possible input combinations of r^* and a^*

2.4 비퍼지화 알고리즘

본 논문에서는 비퍼지화 알고리즘으로 무게중심 평균법을 사용하였다. 이때 비퍼지화된 출력은 식 (2.10)과 같이 정의된다^{[3],[4]}.

$$dU = \frac{\sum(\text{membership of member}) \times (\text{value of member})}{\sum(\text{memberships})} \quad (2.10)$$

여기서 n 은 규칙의 수, w_i 는 멤버의 값, 그리고 $\mu_{output}(w_i)$ 는 소속정도를 나타낸다.

퍼지 제어블록 1, 2에 대해서 출력 퍼지집합을 L 의 구간 내에서 비퍼지화 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$IF \ GR \times |r(nT)| \leq GE \times |e(nT)| \leq L, \quad (2.11)$$

$$dU_1(nT) = \frac{0.5 \times L}{2L - GE \times |e(nT)|} [GE \times |e(nT)| + GR \times |r(nT)|]$$

$$IF \ GE \times |r(nT)| \leq GR \times |e(nT)| \leq L, \quad (2.12)$$

$$dU_1(nT) = \frac{0.5 \times L}{2L - GE \times |r(nT)|} [GE \times |e(nT)| + GR \times |r(nT)|]$$

위의 조건에 벗어나는 범위, 즉 e^* 나 r^* 이 $[-L, L]$ 의 구간 밖에 존재하는 경우에 대한 출력값은 표 2.1에 나타내었다.

같은 방법으로 퍼지 제어블록 2에 대하여 출력 퍼지집합을 비퍼지화 하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있으며 이 조건에 해당하지 않는 경우 즉 e^* 나 r^* 이 $[-L, L]$ 의 범위를 벗어나는 경우에 대해서는 표2.2에서 나타내었다.

$$IF \ GA \times |a(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L, \quad (2.13)$$

$$dU_2(nT) = \frac{0.25 \times L}{2L - GA \times |r(nT)|} [GA \times |a(nT)|]$$

$$IF \ GR \times |r(nT)| \leq GA \times |a(nT)| \leq L, \quad (2.14)$$

$$dU_2(nT) = \frac{0.25 \times L}{2L - GA \times |a(nT)|} [GA \times |a(nT)|]$$

따라서 퍼지 논리제어기의 출력 $dU(nT)$ 는 퍼지 제어블록 1의 출력 $d_1U(nT)$ 와 퍼지 제어블록 2의 출력 $d_2U(nT)$ 를 합하여 구해지고, 여기에 출력 스케일 파라미터 GU 를 곱하면 플랜트에 인가 할 수 있는 제어신호의 증분 $u(nT)$ 를 생성할 수 있다.

결과적으로 FLC의 출력 $dU(nT)$ 는

$$dU(nT) = dU_1(nT) + dU_2(nT) \quad (2.15)$$

이고, 출력 $dU(nT)$ 에 대한 제어입력의 증분 $du(nT)$ 는

$$du(nT) = GU \times dU(nT) \quad (2.16)$$

이다.

표 2.1 e^* 와 r^* 가 퍼지화 알고리즘의 $[-L, L]$ 구간을 벗어난 경우의 퍼지 제어블록 1에 대한 증분 출력

Table 2.1 The incremental output of fuzzy control block 1 when e^* and/or r^* are not within the interval $[-L, L]$ of the fuzzification algorithm

Input combinations of e^* & r^*	Output of fuzzy control block1, $dU_1(nT)$
(IC9) ₁ ,(IC10) ₁	$[GR \times r(nT) + L]/2$
(IC11) ₁ ,(IC12) ₁	$[GE \times e(nT) + L]/2$
(IC13) ₁ ,(IC14) ₁	$[GR \times r(nT) - L]/2$
(IC15) ₁ ,(IC16) ₁	$[GE \times e(nT) - L]/2$
(IC17) ₁	L
(IC18) ₁ ,(IC20) ₁	0
(IC19) ₁	-L

표 2.2 r^* 와 a^* 가 퍼지화 알고리즘의 $[-L, L]$ 구간을 벗어난 경우의 퍼지 제어블록 2에 대한 증분 출력

Table 2.2 The incremental output of fuzzy control block 1 when r^* and/or a^* are not within the interval $[-L, L]$ of the fuzzification algorithm

Input combinations of r^* 와 a^* 의	Output of fuzzy control block2, $dU_2(nT)$
(IC9) ₂ ,(IC10) ₂	$0.5 \times GA \times a(nT)$
(IC13) ₂ ,(IC14) ₂	
(IC11) ₂ ,(IC12) ₂	$0.5 \times L$
(IC17) ₂ ,(IC18) ₂	
(IC15) ₂ ,(IC16) ₂	$-0.5 \times L$
(IC19) ₂ ,(IC20) ₂	



2.5 고정 파라미터 퍼지 PID제어기 제어칙

퍼지 제어블록 1,2로 구분되는 병렬구조를 가진 퍼지 PID제어기의 제어칙은 조건에 따라 다음과 같이 네 가지 형태로 구분할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & 1) \text{ IF } GR \times |r(nT)| \leq GE \times |e(nT)| \leq L \text{ and } GA \times |a(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L, \\
 & du(nT) = \frac{0.5 \times L \times GU}{2L - GE \times |e(nT)|} [GE \times |e(nT)| + GR \times |r(nT)|] \\
 & \quad + \frac{0.5 \times L \times GU}{2L - GR \times |r(nT)|} [GA \times |a(nT)|]
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\begin{aligned}
 & 2) \text{ IF } GR \times |r(nT)| \leq GE \times |e(nT)| \leq L \text{ and } GR \times |r(nT)| \leq GA \times |a(nT)| \leq L, \\
 & du(nT) = \frac{0.5 \times L \times GU}{2L - GE \times |e(nT)|} [GE \times |e(nT)| + GR \times |r(nT)|] \\
 & \quad + \frac{0.5 \times L \times GU}{2L - GA \times |a(nT)|} [GA \times |a(nT)|]
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\begin{aligned}
 & 3) \text{ IF } GE \times |e(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L \text{ and } GA \times |a(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L, \\
 & du(nT) = \frac{0.5 \times L \times GU}{2L - GR \times |r(nT)|} [GE \times |e(nT)| + GR \times |r(nT)|] \\
 & \quad + \frac{0.5 \times L \times GU}{2L - GR \times |r(nT)|} [GA \times |a(nT)|]
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned}
 & 4) \text{ IF } GE \times |e(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L \text{ and } GR \times |r(nT)| \leq GA \times |a(nT)| \leq L, \\
 & du(nT) = \frac{0.5 \times L \times GU}{2L - GR \times |r(nT)|} [GE \times |e(nT)| + GR \times |r(nT)|] \\
 & \quad + \frac{0.5 \times L \times GU}{2L - GA \times |a(nT)|} [GA \times |a(nT)|]
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

위의 식 (2.17)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 du(nT) &= \frac{0.5 \times L \times GU \times GE}{2L - GE \times |e(nT)|} e(nT) \\
 & \quad + \frac{0.5 \times L \times GU \times GR}{2L - GE \times |e(nT)|} r(nT) \\
 & \quad + \frac{0.5 \times L \times GU \times GA}{2L - GE \times |r(nT)|} a(nT)
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

$$du(nT) = K_i e(nT) + K_p r(nT) + K_d a(nT) \quad (2.22)$$

여기서 K_p 를 비레이득, K_i 를 적분이득 그리고 K_d 를 미분이득으로 정의하면 다음과 같다.

$$K_i = \frac{0.5 \times L \times GU \times GE}{2L - GE \times |e(nT)|} \quad (2.23)$$

$$K_p = \frac{0.5 \times L \times GU \times GR}{2L - GE \times |e(nT)|} \quad (2.24)$$

$$K_d = \frac{0.5 \times L \times GU \times GA}{2L - GR \times |r(nT)|} \quad (2.25)$$

위의 식에서 보는 바와 같이 앞에서 구한 퍼지 제어기는 *error*, *rate*, *acc*의 값에 따라 변화하는 비레이득 K_p , 적분이득 K_i 그리고 미분이득 K_d 를 가지는 비선형 퍼지 PID제어기 형태를 가지고 있음을 알 수 있다. 같은 방법으로 다른 조건문에 해당할 경우의 PID 제어이득 K_p , K_i , K_d 는 식 (2.18), (2.19), (2.20)을 통하여 구할 수 있다. 또한 *error*, *rate*, *acc*가 0에 아주 가까운 값을 가질 때, 즉 정상상태에 도달했을 때에는 상수 값을 가지는 비레이득 K_p^* , 적분이득 K_i^* 그리고 미분이득 K_d^* 를 식 (2.26)과 같은 형태로 얻을 수 있으며, 이는 비선형 퍼지 PID제어기를 유도하는 과정에서 얻을 수 있는 선형 PID제어기의 이득이다.

$$K_p^* = \frac{GU \times GR}{4}, \quad K_i^* = \frac{GU \times GE}{4}, \quad K_d^* = \frac{GU \times GA}{8} \quad (2.26)$$

따라서, 플랜트의 수학적모델을 모르는 선형 시불변 시스템의 제어시스템 구성을 위하여 본 논문에서 논의하는 퍼지 PID제어기를 사용할 경우에는, 제어기를 유도하는 과정에서 선형 PID제어기를 자연스럽게 얻을 수 있고 이를 적용하여 선형 PID 제어시스템을 구성하더라도 원하는 제어성능을 충분히 얻을 수 있게 되고 아날로그 회로를 사용한 아날로그 제어기 설계도 가능하다.

2.6 고정 파라미터 퍼지 PID제어기 시뮬레이션

고정 파라미터 퍼지 PID제어기의 성능을 검증하기 위해 선형 시불변 2차 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 주어진 시스템의 수학적모델과 파라미터 즉 시스템의 동특성은 모르는 것으로 가정하였다.

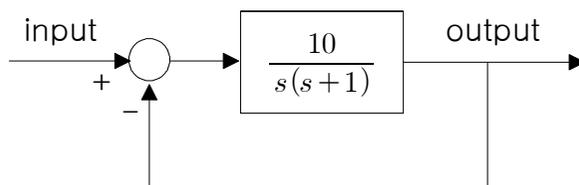
먼저 단위 계단응답을 살펴본 후 퍼지 PID제어기 설계 절차를 거쳐서 비례이득 K_p , 적분이득 K_i , 그리고 미분이득 K_d 를 결정하였고, 고정 파라미터 퍼지 PID제어기에 대입하여 시스템의 응답 곡선을 살펴봄으로써 제어기의 성능을 비교 분석하였다.

(1) 플랜트 동특성을 모르는 선형 시불변 시스템 제어에서의 성능평가

식 (2.27)과 같은 피드포워드 플랜트 전달 함수 $G(s)$ 를 가지는 단위 피드백 선형 시불변 시스템을 대상으로 퍼지 PID 제어를 설계하고자 한다.

$$G(s) = \frac{10}{s(s+1)} \quad (2.27)$$

이때 이 시스템의 블록선도는 다음과 같다.



식 (2.27)의 시스템은 부족 감쇠 특성을 가지는 안정한 2차 선형시스템으로 단순 피드백에 의한 단위 계단입력에 대한 응답 특성은 그림 2.7과 같다. 이 시스템의 목표값을 1로 설정하고 정규화 파라미터 L 은 100으로 두고, 스케일 파라미터 GE 는 100, GR 은 126.42, GA 는 5.05, GU 값은 0.0316으로 설정하였을 때 아래 그림 2.8과 같은 제어시스템의 단위계단 응답을 얻을 수 있다.

점선의 응답곡선이 고정 파라미터 퍼지 PID 제어시스템의 응답곡선이고 실선은 선형 PID 제어시스템의 응답곡선이다.

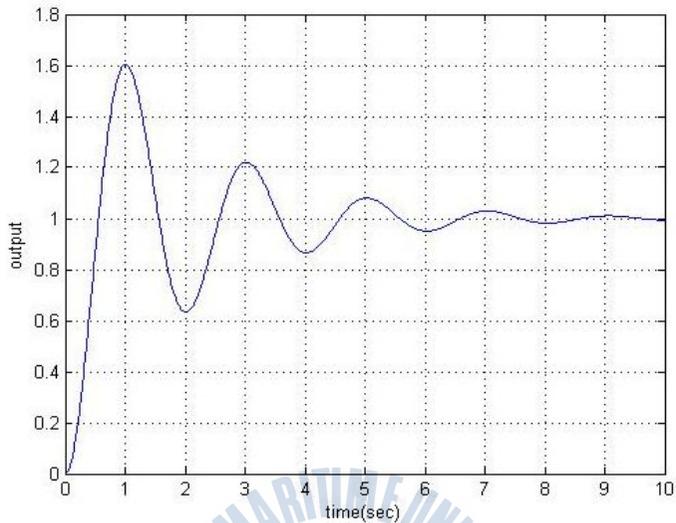


그림 2.7 단순 피드백 선형 시불변 시스템의 단위 계단 응답
Fig. 2.7 Unit step response of nominal closed-loop system

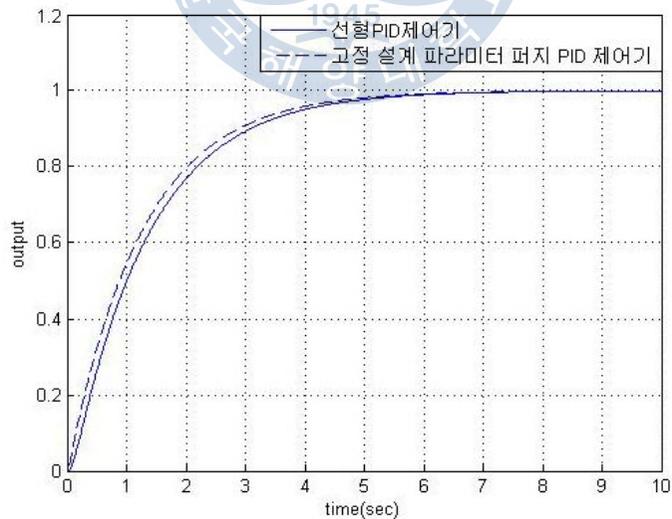


그림 2.8 기준 입력 1에 대한 제어 시스템의 응답
Fig. 2.8 Response curves of control systems for reference input 1

선형 PID 제어기의 제어기 이득은 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기의 설계과정에서 부수적으로 얻어지는 것으로 정상상태에서 $e(nT)$, $r(nT)$, $a(nT)$ 가 0이라는 가정 하에서 다음과 같이 일정한 값으로 구할 수 있고 이는 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기의 이득이 정상상태에서 수렴되는 값이기도 하다.

$$K_i^* = \frac{GU \times GE}{4} = \frac{0.0316 \times 100}{4} = 0.79$$

$$K_p^* = \frac{GU \times GR}{4} = \frac{0.0316 \times 126.42}{4} = 0.9987$$

$$K_d^* = \frac{GU \times GA}{8} = \frac{0.0316 \times 5.05}{8} = 0.0199$$

그림 2.8에서 보는 바와 같이 위와 같이 얻어진 이득을 가진 선형 PID 제어기의 응답은 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기의 응답과 매우 비슷한 응답을 표출하는 것을 볼 수 있다.

이와 같이 선형 시불변 시스템에 대한 성능평가 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 첫째, 주어진 시스템이 선형 시불변 시스템이라면 비록 수학 모델을 모르더라도 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기를 성공적으로 설계할 수 있다. 둘째, 수학 모델을 모르더라도 주어진 시스템이 선형 시불변이라면 고정 파라미터 퍼지 PID 설계과정에서 얻어지는 선형 PID 제어기로도 주어진 시스템을 훌륭하게 제어할 수 있으며 이를 활용하여 아날로그 제어기의 구현도 가능하다. 셋째, 고정 파라미터 퍼지 PID 제어시스템의 과도응답이 선형 PID 제어시스템의 과도응답보다 우수한 것은 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기의 제어이득 K_p, K_i, K_d 가 응답이 정상상태에 도달하기 전까지는 시스템의 상태에 따라 최적으로 가변되어 플랜트를 제어하기 때문이다.

(2) 목표값이 가변되는 선형 시불변 시스템에 대한 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기의 성능평가

고정 파라미터 퍼지 PID 제어기가 PID 제어동작을 발생시키기 위해서는 정규화된 퍼지 제어기의 입력변수가 정규화 구간 $[-L, L]$ 이내에 있어야만 한다는 가정이 있었다. 한편 플랜트의 목표값은 경우에 따라 가변될 수도 있기 때문에

이에 대한 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기의 성능을 평가하는 것이 필요하다.

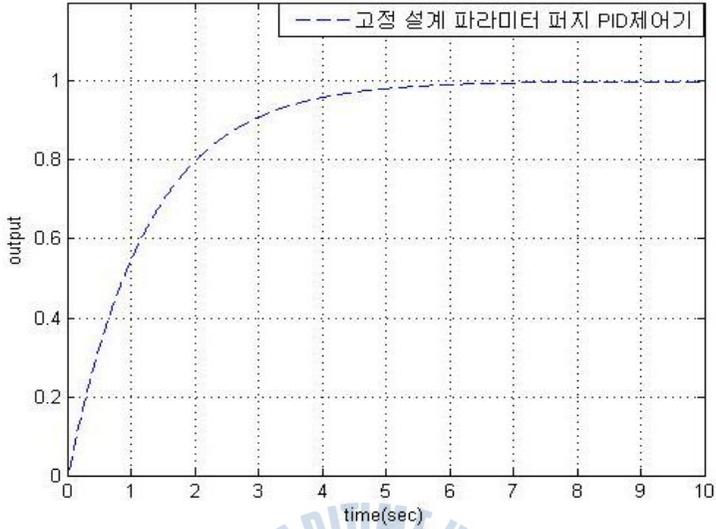


그림 2.9 목표값 1일 때 고정 파라미터 퍼지 PID제어기 응답

Fig 2.9 Response of Fuzzy PID control system with fixed parameters for reference input 1

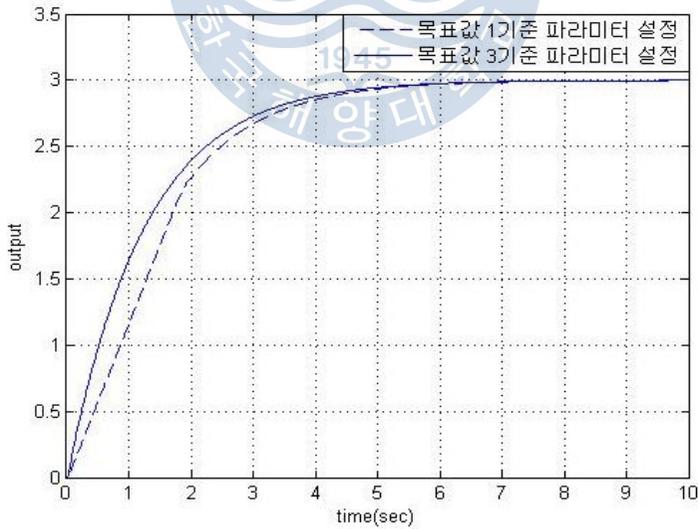


그림 2.10 목표값 3일 때 고정 파라미터 퍼지 PID제어기 응답

Fig 2.10 Responses of Fuzzy PID control systems with fixed parameters for reference input 3

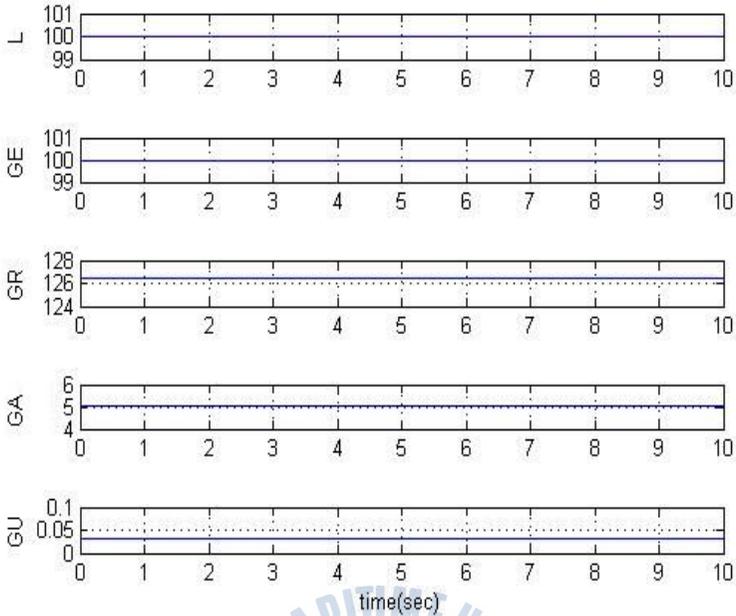


그림 2.11 목표값 1기준일 때 설계 파라미터 L , GE , GR , GA , GU 값
 Fig 2.11 Design parameter L , GE , GR , GA , and GU value computed under reference input 1

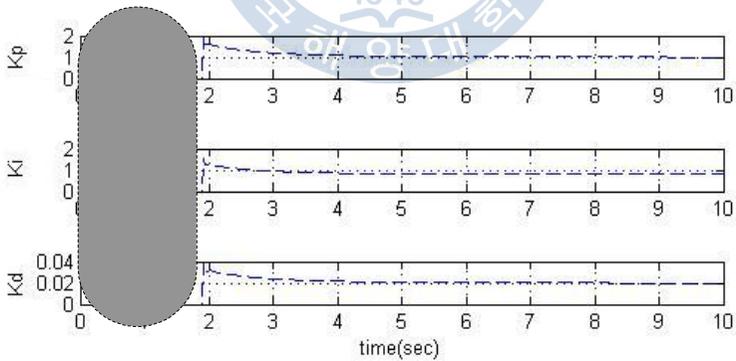


그림 2.12 목표값 1 하에서 계산된 퍼지 PID 제어이득 K_p , K_i , K_d 값
 Fig 2.12 Fuzzy PID controller gain K_p , K_i , and K_d value computed under reference input 1

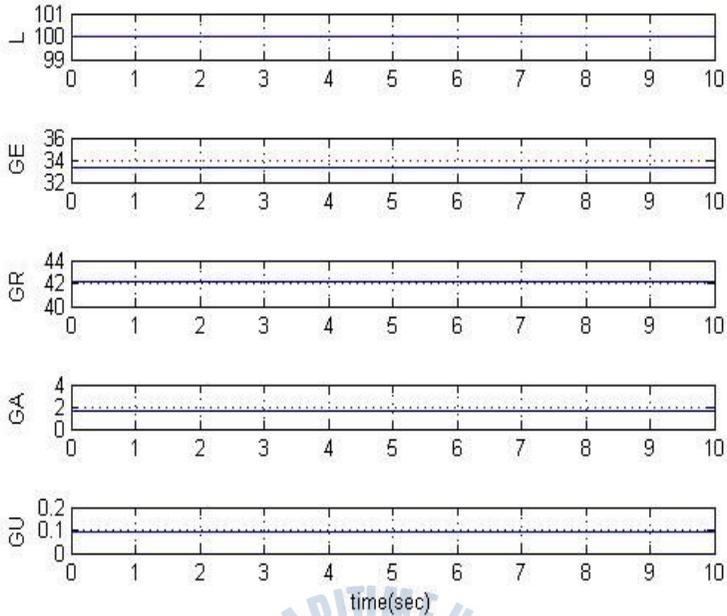


그림 2.13 목표값 3기준일 때 설계 파라미터 L , GE , GR , GA , GU 값
 Fig 2.13 Design parameter L , GE , GR , GA , and GU value computed under reference input 3

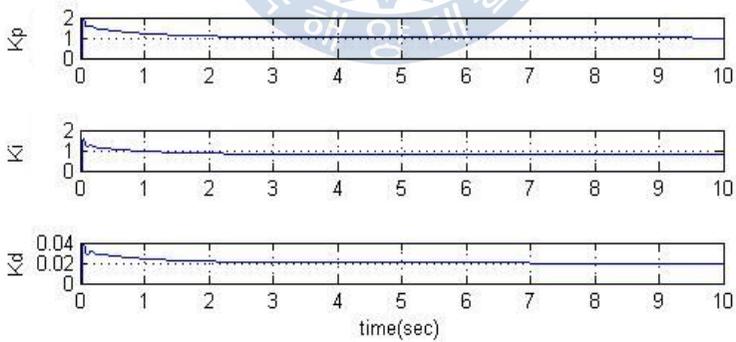


그림 2.14 목표값 3기준일 때 퍼지 PID 제어이득 K_p , K_i , K_d 값
 Fig 2.14 Fuzzy PID controller gain K_p , K_i , and K_d computed under reference input 3

이를 위하여 주어진 플랜트의 동특성을 모르고 있는 상태에서 목표값이 가변될 경우 고정 파라미터 퍼지 PID제어기의 제어성능이 어떻게 변하는 지를 알아보기 위해 목표값을 바꾸면서 시뮬레이션을 수행하였다.

목표값이 1일 경우 시스템의 입출력 데이터를 기초로 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기의 설계파라미터 값을 그림 2.11과 같이 계산하였을 때, 퍼지 PID 제어시스템의 응답은 그림 2.9와 같이 훌륭한 응답을 표출한다. 그 이유는 퍼지 PID 제어기의 정규화된 입력이 정규화 파라미터 구간 $[-L, L]$ 내에 존재함으로써 매 샘플링 시간마다 변하는 PID 제어이득에 따라 항상 PID 제어동작을 받기 때문이다.

한편, 그림 2.11과 같이 목표값이 1일 경우에 계산된 설계파라미터 값을 가지고 목표값을 3으로 변경시켰을 경우의 제어시스템 응답은 그림 2.10의 점선과 같고 이때의 제어이득은 그림 2.12와 같다. 분석해 보면 약 2초까지의 응답은 제어입력이 포화된 것처럼 응답이 일정하게 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그 이유는 퍼지 PID 제어기의 정규화된 입력이 설정된 정규화 구간 $[-L, L]$ 을 벗어남으로써 플랜트가 정확한 PID 제어동작에 의해 생성된 제어입력을 받지 못하고 표 1과 표 2의 조합에 의해 생성된 제어입력을 받기 때문이며, 이 구간 즉 그림 2.12의  구간에서는 보는 바와 같이 PID 제어이득 K_p, K_i, K_d 도 전혀 계산되지 않음을 알 수 있다.

그러나 그림 2.13과 같이 목표값 3에 대응하도록 설계 파라미터값을 계산하고 목표값 3을 인가하였을 경우에는 그림 2.14에 보는 바와 같이 전 구간에서 PID 제어이득 K_p, K_i, K_d 가 가변되도록 계산되며 이때의 제어시스템 응답은 그림 2.10의 실선과 같이 훌륭한 응답을 표출함을 볼 수 있다.

결론적으로 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기를 설계할 당시의 목표값 보다 작은 입력이 제어시스템에 인가될 경우에는 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기는 매 샘플링 시간마다 변하는 PID 제어이득 K_p, K_i, K_d 를 정상적으로 계산하고 플랜트가 항상 PID 제어동작을 받도록 한다. 하지만, 설계당시의 목표값 보다 큰 입력이 인가될 경우에는 초기 과도응답의 특정 구간에 있어서 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기는 제어이득 K_p, K_i, K_d 를 정상적으로 계산하지 못하게 되고 플랜트는 정확한 PID 제어동작을 받지 못하는 단점을 지니고 있음을 알 수 있다.

2.7 고정 파라미터 퍼지 PID제어기의 성능분석 및 고찰

(1) 제어기 설계 시 설정된 목표값의 크기에 의존하여 계산된 설계 파라미터와 퍼지 입력공간의 분할에 의해 종속되는 PID 제어동작

고정 파라미터 퍼지 PID제어기는 $error$, $rate$, acc 등 세 개의 입력 변수를 사용하여 퍼지 논리제어기를 구성하고 있다. 제어기 입력 변수 $error$, $rate$, acc 를 정규화 시킨 e^* , r^* , a^* 가 그림 2.5와 그림 2.6의 입력 공간분할에서 언급한 바와 같이 퍼지집합의 정규화 구간 $[-L, L]$ 내에 있을 경우에는 식 (2.17)~(2.20)에 의해 매 샘플링 시간마다 가변되는 제어이득 K_p, K_i, K_d 를 계산함으로써 PID 제어기로서의 기능을 정확히 발휘하게 된다.

그러나 퍼지집합의 정규화 구간 $[-L, L]$ 을 분할된 입력공간에서 한 쪽이라도 벗어나게 되면 제어입력이 식 (2.17)~(2.20)에 의해 생성되는 것이 아니라 표 1과 표 2의 조합에 의해 생성되며 이는 PID 제어동작에 의해 생성되는 제어입력이 아님을 알 수 있다. 또한 이때의 제어기는 PID 제어기 형태가 아니며 최적의 제어결과도 얻을 수 없다.

(2) 구현된 제어기 설계파라미터 변경의 어려움

제어기를 설계할 당시 설정한 목표값보다 큰 입력이 인가되는 경우에 정확한 PID 제어동작을 얻기 위해서는 오프라인으로 고정 파라미터 PID 제어기의 설계 파라미터를 재설정해 주어야만 한다. 그러나 제어기가 구현된 후에는 이를 재설정하는 것이 불가능하다. 설사 오프라인으로 재설정할 수 있다 하더라도 변하는 목표값과 갑작스럽게 인가되는 외란이 크기를 알지 못하는 경우에는 적절한 설계 파라미터를 설정하기가 어려워 정확한 PID 제어동작을 표출하는 제어기를 설계한다는 것은 불가능하다.

(3) 가변되는 PID 제어이득 K_p, K_i, K_d 계산의 불균형성

고정 파라미터 퍼지 PID 제어기의 장점은 시스템 응답의 현 상태에 따라 최적의 제어를 실현할 수 있도록 제어기의 이득 K_p, K_i, K_d 를 매 샘플링 시간마다 가변시킬 수 있다는 것이다.

한편, PID 제어동작은 정규화 입력 e^* , r^* , a^* 가 퍼지집합의 정규화 구간 $[-L, L]$ 내에 있을 경우 얻을 수 있으므로 인해, 이를 만족시키기 위하여 제어 시스템에 인가되는 기준입력과 모르는 외란의 크기를 추정하여 설계시의 목표값 크기를 매우 크게 설정하여 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기의 설계 파라미터를 계산한다면, 정규화 파라미터 L 이 커짐에 따라 절대적으로는 큰 e^* , r^* , a^* 임에도 불구하고 상대적으로는 작은 e^* , r^* , a^* 로 간주되어 PID 제어기의 출력되는 제어입력이 작게 되어 그 시간에서의 정확한 제어이득 K_p, K_i, K_d 를 계산하지 못하게 되고 따라서 최적의 제어동작도 얻을 수 없게 된다.

(4) 온라인 계산량의 증가로 인한 실시간 제어의 곤란함 야기

고정 파라미터 퍼지 PID 제어기의 또 다른 장점은 온라인으로 계산해야 될 명령어의 수를 줄여 실시간 제어가 가능하면서도 제어효능이 우수하다는 데 있다. 한편, 제어기의 입력이 퍼지집합의 정규화 구간 $[-L, L]$ 내에 있을 경우에는 제어입력이 식 (2.17)~(2.20)에 의해 주어지는 4개의 조건문만 실행하면 됨으로 온라인 계산량이 매우 적어 실시간 제어가 가능하다.

그러나 제어기의 정규화 입력이 정규화 구간 $[-L, L]$ 을 벗어날 경우가 발생될 때에는 정상적인 4개의 조건문에 더하여 표 1과 표 2의 조합에 의해 발생되는 21개의 조건문을 더 실행해야 함으로 온라인 계산량이 증가하여 실시간 제어에 큰 어려움이 초래된다.

(5) 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기의 성능 향상방법

이상에서 고찰한 바와 같은 단점을 가진 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기의 성능과 실시간 제어의 가능성을 향상시키기 위한 방법은 목표값과 외란의 크기 변동에도 관계없이 항상 PID 제어동작을 발생시킬 수 있도록, 제어기의 정규화 입력이 퍼지집합의 정규화 구간 $[-L, L]$ 내에 있도록 강제적으로 만드는 것이다. 또한 그 과정은 오프라인이 아니라 제어시스템의 동작 중에 온라인으로 이루어지도록 알고리즘을 수정해야 한다.

제 3 장 기 연구된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기

본 장에서는 2장에서 설계한 고정 파라미터 퍼지 PID제어기의 단점을 보완해 목표값의 모든 범위에서 항상 PID 제어동작을 행하도록 참고문헌[20]에서 연구된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 설계방법을 기술하고 그 성능을 검증함으로써 새로운 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 제안을 위한 근거를 발견하고자 한다.

3.1 가변 파라미터 퍼지 PID제어기 설계

가변 파라미터 퍼지 PID 제어기법은 목표값과 시스템의 출력 사이에서 발생하는 $error$, $rate$, acc 를 매 샘플링 시간마다 측정하여 이 중 가장 큰 값을 기준으로 제어기의 입력을 정규화 시키기 위한 정규화 파라미터 L 의 값을 가변시켜 정규화 입력변수 e^* , r^* , a^* 가 항상 구간 $[-L, L]$ 의 범위에 속하게 하는 방법이다. 이때 정규화된 모든 입력변수는 그림 2.5와 그림 2.6의 분할된 퍼지 입력공간에서 $[-L, L]$ 내에 존재하게 된다.

퍼지 입출력 집합을 결정하는 정규화 파라미터 L 은 다음과 같은 규칙에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} IF |e(nT)| = \max[|e(nT)|, |r(nT)|, |a(nT)|] \quad THEN \quad L(nT) = GE \times |e(nT)| \\ IF |r(nT)| = \max[|e(nT)|, |r(nT)|, |a(nT)|] \quad THEN \quad L(nT) = GR \times |r(nT)| \quad (3.1) \\ IF |a(nT)| = \max[|e(nT)|, |r(nT)|, |a(nT)|] \quad THEN \quad L(nT) = GA \times |a(nT)| \end{aligned}$$

따라서 가변되는 $L(nT)$ 로 인해 퍼지 제어블록 1,2에 대한 입력공간은 그림 3.1 및 그림 3.2와 같이 $[-L, L]$ 구간내의 $(IC1)_1 \sim (IC8)_1$, $(IC1)_2 \sim (IC8)_2$ 만으로 분할된다.

이것은 입력변수들의 분할된 공간 수를 대폭 줄이는 효과를 가져 올뿐만 아니라, 제어기의 초기 설계 당시에 사용되는 기준입력보다 큰 동작범위를 가진 입력이 인가되더라도 항상 정규화 범위 내에서 제어동작이 이루어짐을 의미한다.

그림 3.1 가변 정규화 파라미터 $L(nT)$ 를 사용한 e^* 와 r^* 에 대한 공간 분할
Fig. 3.1 Possible input combinations of e^* and r^* using variable normalization parameter $L(nT)$



그림 3.2 가변 정규화 파라미터 $L(nT)$ 를 사용한 r^* 와 a^* 에 대한 공간 분할
Fig. 3.2 Possible input combinations of r^* and a^* using variable normalization parameter $L(nT)$

따라서 플랜트 동작입력과 외란의 크기 범위에 관계없이 온라인상에서 항상 PID 제어동작을 발생시키도록 제어기를 구성할 수 있음을 의미한다.

식 (3.1)과 같이 매 샘플링 시간마다 제어기의 입력을 토대로 $L(nT)$ 를 재조정한다면, 식 (3.2)~(3.5)에서 항상 등호만 성립하게 된다. 또한 식 (3.2)~(3.5)에서 PID 이득의 분모는 매 샘플링 시간마다 항상 $L(nT)$ 가 됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 1) \text{ IF } GR \times |r(nT)| \leq GE \times |e(nT)| \leq L \text{ and } GA \times |a(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L, \\
 du(nT) = \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GE}{2L(nT) - GE \times |e(nT)|} e(nT) + \frac{0.5 \times L \times GU(nT) \times GR}{2L(nT) - GE \times |e(nT)|} r(nT) \\
 + \frac{0.25 \times L(nT) \times GU \times GA}{2L(nT) - GR \times |r(nT)|} a(nT) \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2) \text{ IF } GR \times |r(nT)| \leq GE \times |e(nT)| \leq L \text{ and } GR \times |a(nT)| \leq GA \times |a(nT)| \leq L, \\
 du(nT) = \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GE}{2L(nT) - GE \times |e(nT)|} e(nT) + \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GR}{2L(nT) - GE \times |e(nT)|} r(nT) \\
 + \frac{0.25 \times L(nT) \times GU \times GA}{2L(nT) - GA \times |a(nT)|} a(nT) \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3) \text{ IF } GR \times |r(nT)| \leq GE \times |e(nT)| \leq L \text{ and } GA \times |a(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L, \\
 du(nT) = \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GE}{2L(nT) - GR \times |r(nT)|} e(nT) + \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GR}{2L(nT) - GR \times |r(nT)|} r(nT) \\
 + \frac{0.25 \times L(nT) \times GU \times GA}{2L(nT) - GR \times |r(nT)|} a(nT) \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 4) \text{ IF } GE \times e(nT) \leq GR \times |r(nT)| \leq L \text{ and } GR \times |r(nT)| \leq GA \times |a(nT)| \leq L, \\
 du(nT) = \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GE}{2L(nT) - GR \times |r(nT)|} e(nT) + \frac{0.5 \times L(nT) \times GU \times GR}{2L(nT) - GR \times |r(nT)|} r(nT) \\
 + \frac{0.25 \times L(nT) \times GU \times GA}{2L(nT) - GA \times |a(nT)|} a(nT) \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

따라서 (3.2)~(3.5)는 조건이 필요 없고 결론부는 다음과 같이 하나의 형태로 간단히 표시됨을 알 수 있다.

$$du(nT) = K_i(nT) \times e(nT) + K_p(nT) \times r(nT) + K_d(nT) \times a(nT) \quad (3.6)$$

이때, PID 제어기의 이득 $K_i(nT)$ 와 $K_p(nT)$, $K_d(nT)$ 는 다음의 식 (3.7)에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned}
K_i(nT) &= 0.5 \times GU(nT) \times GE(nT) \\
K_p(nT) &= 0.5 \times GU(nT) \times GR(nT) \\
K_d(nT) &= 0.25 \times GU(nT) \times GA(nT)
\end{aligned} \tag{3.7}$$

그림 3.3은 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 구조를 나타내고 있다. 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기는 비록 퍼지 논리제어기의 설계과정을 따르지만, 매 샘플링 시간마다 파라미터들을 가변시킴으로써 전반부의 조건이 필요 없고 하나의 결론부만 가지는 아주 단순한 형태가 되고, 시스템의 동작상황이 어떻게 변하든 간에 항상 최적의 PID 제어입력을 생성함을 알 수 있다. 또한 매 샘플링 시간마다 입력들의 대소를 판단하는 알고리즘이 추가되는 반면, 퍼지화 입력의 조합에 대응하여 출력을 결정하는 조건이 없어지기 때문에 오히려 연산량이 줄어들게 되어 실제 구현의 측면에서도 유리함을 알 수 있다.

그림 3.4는 이와 같은 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 설계 절차를 보여주고 있다. 초기의 설계 시에는 고정 파라미터 퍼지 PID 설계절차와 동일하게 적당한 임의의 목표값에 대하여 설계 파라미터들을 계산한 후 제어시스템을 구성한다. 이 후에는 목표값이 변동됨에 따라 식 (3.1)에 의해 온라인으로 정규화 파라미터 $L(nT)$ 가 가변되고, 가변된 $L(nT)$ 에 의해 다른 입력들의 스케일 파라미터 $GE(nT)$, $GR(nT)$, $GA(nT)$ 중에서 나머지 2개가 가변되는 절차를 거치게 된다. 이 때 정규화된 입력변수 $e^*(nT)$, $r^*(nT)$, $a^*(nT)$ 가 항상 식 (3.8)을 만족시키도록 스케일 파라미터 $GE(nT)$, $GR(nT)$, $GA(nT)$ 가 가변된다.

$$\begin{aligned}
|e^*(nT)| &= GE(nT) \times |e(nT)| = L(nT) \\
|r^*(nT)| &= GR(nT) \times |r(nT)| = L(nT) \\
|a^*(nT)| &= GA(nT) \times |a(nT)| = L(nT)
\end{aligned} \tag{3.8}$$

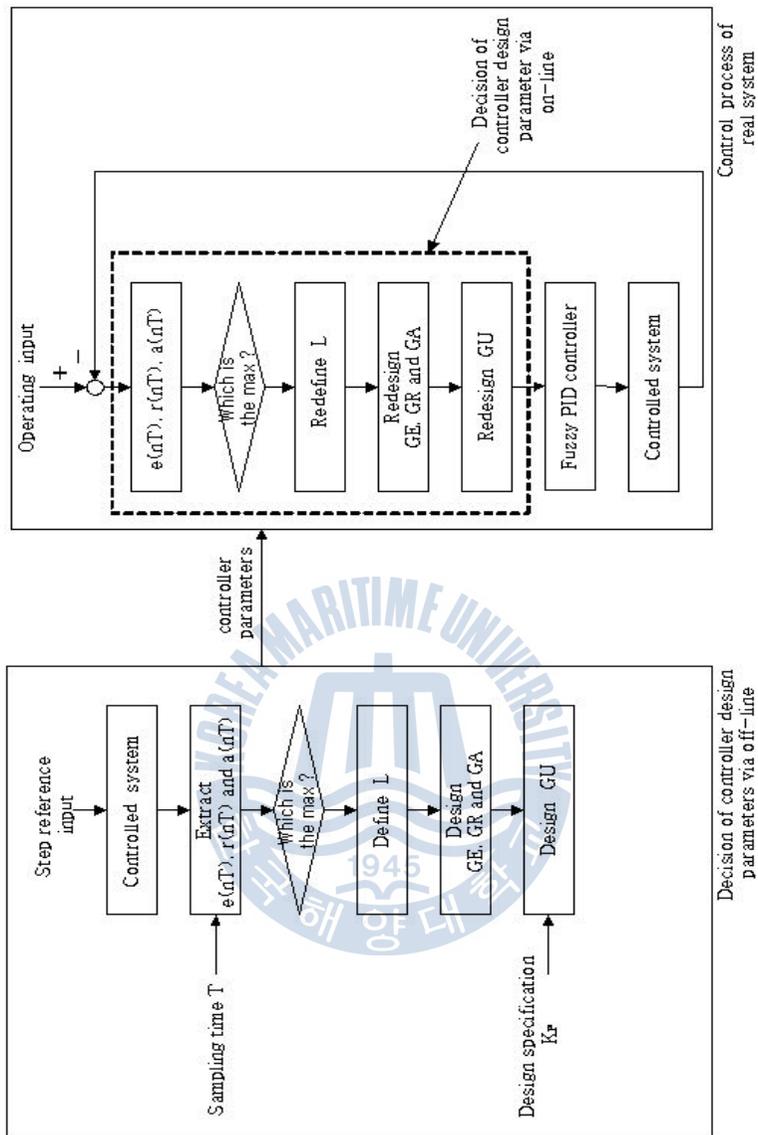


그림 3.3 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 설계 절차

Fig. 3.3 Design procedure of the variable-parameter fuzzy PID controller

3.2 가변 파라미터 퍼지 PID제어기 시뮬레이션

가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 성능개선 정도를 평가하고 장단점을 분석하기 위하여 2.6절에서 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기를 대상으로 시뮬레이션 한 결과를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다.

(1) 목표값을 초기에 변경하고 고정된 경우의 성능분석

가변 파라미터 퍼지 PID제어기와 고정 파라미터 퍼지 PID제어기의 성능 차이를 비교하기 위해서 2.6절과 같은 조건으로 시뮬레이션을 수행하였다. 고정 파라미터 PID 제어기와 가변 파라미터 PID 제어기의 초기설계 당시에는 목표값을 1로 하였을 경우 계산된 설계 파라미터를 사용하였고, 수행된 시뮬레이션에서 인가된 목표값은 3으로 변경하여 인가하였다.

그림 3.4를 보면 고정 파라미터 퍼지 PID제어기 보다 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 제어시스템 성능이 우수한 것을 볼 수 있다. 그림 2.12와 그림 3.6을 비교해 보면으로써 고정 파라미터 퍼지 PID제어기와 가변 파라미터 퍼지 PID제어기 성능에 차이가 나는 이유를 분석할 수 있다. 고정 파라미터 퍼지 PID제어기는 설계시의 목표값 보다 큰 목표값이 입력됨에 따라 제어기의 정규화된 입력변수가 정규화 범위 $[-L, L]$ 을 벗어나게 되고 K_p, K_i, K_d 이득을 계산하지 못해 정확한 PID 제어동작이 이루어지지 않는 반면, 가변 파라미터 퍼지 PID제어기는 정규화 파라미터 $L(nT)$ 가 가변되어 정규화된 입력변수 모두가 정규화 범위 $[-L, L]$ 상에 있게 됨에 따라 항상 제어이득 K_p, K_i, K_d 를 계산하여 정확한 PID 제어동작을 발생하였기 때문이다. 이는 그림 2.11과 그림 3.5의 설계 파라미터 값을 비교해 보면 알 수 있는데, 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 경우에는 정규화 파라미터 L 값이 초기시간부터 가변되어 증가한 것을 볼 수 있다.

결론적으로 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기의 경우 설계당시 목표값 보다 큰 목표값이 들어오게 되면 PID 제어 연산을 제대로 얻지 못해 제어성능이 저하되지만 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 경우 가변되어 증가된 $L(nT)$ 에 의해 모든 동작시간에서 PID 제어연산을 수행함을 알 수 있다.

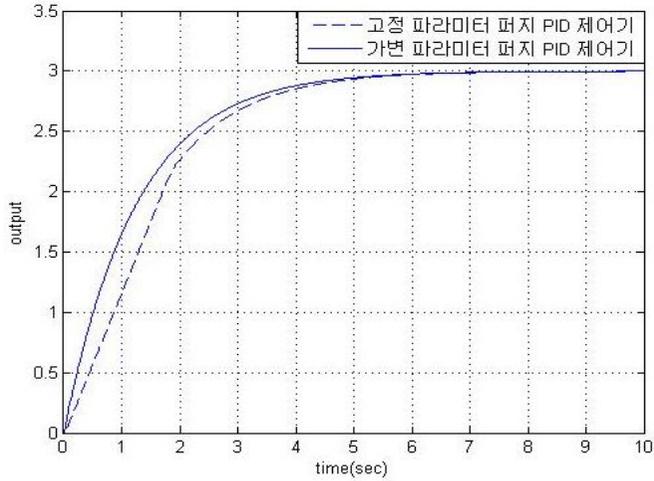


그림 3.4 퍼지 PID 제어시스템의 성능 비교
 Fig. 3.4 Performance comparison of fuzzy PID control systems

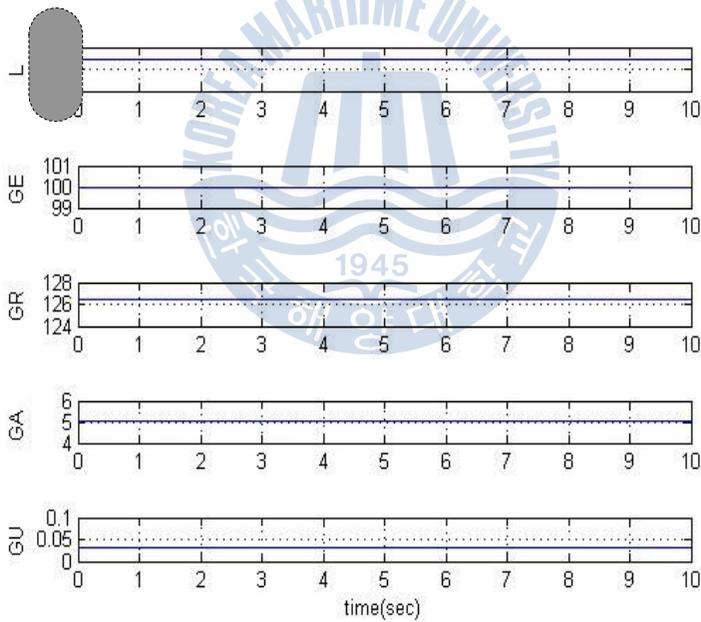


그림 3.5 목표값이 1에서 3으로 변경된 후 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 가변된 설계 파라미터 L , GE , GR , GA , GU

Fig 3.5 Varied design-parameter L , GE , GR , GA , and GU of variable parameter fuzzy PID controller when reference input was changed from 1 to 3

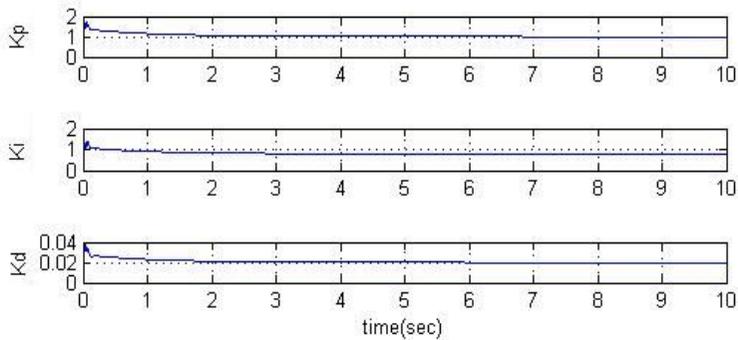


그림 3.6 목표값이 1에서 3으로 변경된 후 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 제어이득 K_p , K_i , K_d

Fig 3.6 Controller gain K_p , K_i , and K_d of variable parameter fuzzy PID controller when reference input was changed from 1 to 3

(2) 목표값을 연속적으로 가변시킨 경우의 성능분석

가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 설계변수가 목표값의 변동에 따라 어떤 경향으로 가변되고 또 성능에 있어서는 어떤 영향을 미치는지를 보다 자세히 확인하기 위하여 하나의 목표값에 대해 제어시스템의 응답이 정상상태에 도달한 이후 목표값을 연속적으로 가변시켜서 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 3.7은 목표값을 1-4-1-2의 크기로 가변시켰을 때 가변 파라미터 퍼지 PID 제어시스템의 응답을 나타낸 결과이다. 그림 3.9와 같이 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 제어이득의 변화를 살펴보면 목표값이 0초와 30초에서 동일하게 1의 계단입력으로 상승하였지만 계산된 K_p , K_i , K_d 이득은 같지 않은 것을 볼 수 있다. 따라서 동일한 크기의 목표값이 인가되었음에도 불구하고 PID 제어성능은 같지 않음을 볼 수 있다. 그 이유는 그림 3.8의 설계 파라미터의 변화를 살펴보면 알 수 있다. 0초일 때는 작은 $L(nT)$ 값에 대응하는 K_p , K_i , K_d 이득이 계산되어 PID 제어동작이 이루어진다. 한편, 목표값의 크기가 10초에서 크기가 4인 계단입력으로 3만큼 커지면서 정규화된 입력변수 모두가 정규화 범위 $[-L(nT), L(nT)]$ 내에 존재하도록 $L(nT)$ 값은 크게 가변되었고 30초가 지난 경우에도 그대로 유지됨으로써, 비록 30초의 경우 0초와 같은 계단의 크기로 목표값이 변경되었음에도 불구하고 설계파라미터 GE, GR, GA, GU 의 값들은

크게 변한 $L(nT)$ 기준으로 계산됨으로서 K_p, K_i, K_d 이득이 달라졌기 때문이다.

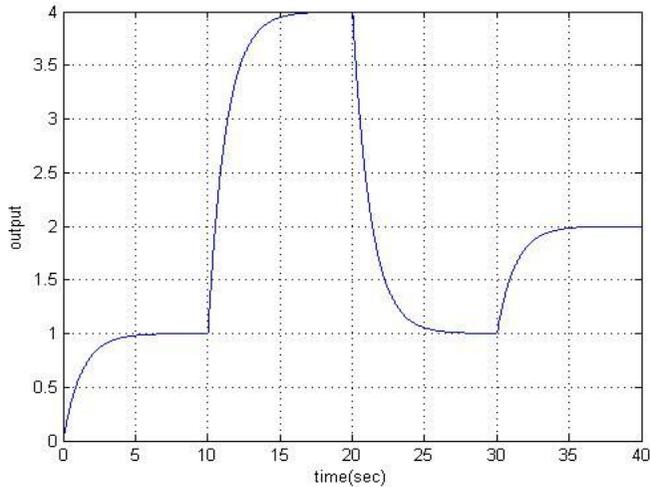


그림 3.7 목표값이 가변될 때 가변 파라미터 퍼지 PID 제어시스템의 응답
 Fig. 3.7 Response of variable parameter fuzzy PID control system
 when a reference input was varied

결론적으로 가변 파라미터 퍼지 PID제어기에서는 목표값이 커짐에 따라 $L(nT)$ 의 값이 계속 증가하기만 하게 되고 이때 작은 입력변수 값이 들어 왔을 경우는 커진 정규화 범위 $L(nT)$ 값에는 상대적으로 더 작은 입력으로 간주되어 정확한 PID 제어이득을 계산하지 못하고 제어성능을 떨어뜨리게 되는 원인이 된다.

따라서 이와 같은 단점은 이제까지 논의한 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기에서는 개선할 수 없는 것으로, 특히 퍼지 PID 제어기를 비선형 시스템에 적용할 경우에는 제어성능에 결정적인 영향을 미치게 됨으로써 반드시 개선방법을 찾아야 함을 알 수 있다.

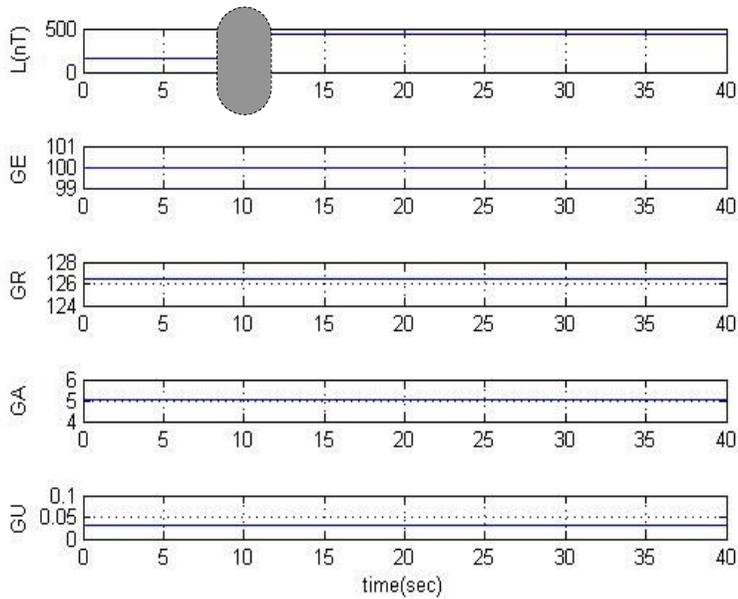


그림 3.8 목표값이 변경될 때 실시간으로 가변된 설계파라미터 L, GE, GR, GA, GU 값
 Fig. 3.8 Varied design-parameter $L, GE, GR, GA,$ and GU of variable parameter fuzzy PID controller when reference input was changed

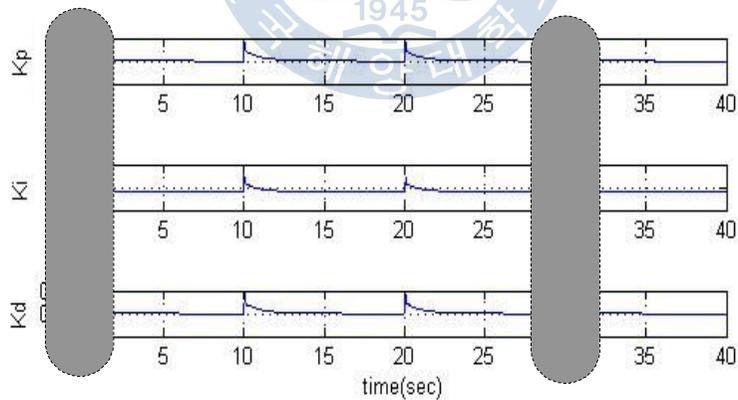


그림 3.9 목표값이 변경될 때 실시간으로 계산된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 제어기 이득 K_p, K_i, K_d

Fig. 3.9 Controller gain $K_p, K_i,$ and K_d of variable parameter fuzzy PID controller when reference input was changed

3.3 논의된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 고찰

(1) 정규화 파라미터 $L(nT)$ 값을 목표값이 커짐에 따라 확장시켜 정규화된 모든 퍼지입력을 $[-L, L]$ 구간 사이에 존재하게 함으로써 입력변수의 분할공간의 수를 대폭 줄이는 효과를 가져 온다. 따라서 $[-L, L]$ 구간 밖의 입력공간에 대한 제어입력 연산의 경우를 생각하지 않아도 되기 때문에 제어식이 매우 간단하고 연산시간이 고정 파라미터 퍼지 PID제어기에 비해 매우 짧아지게 되어 실시간 제어의 측면에서 매우 유리하다.

(2) 고정 파라미터 퍼지 PID제어기 경우 제어기 설계 시에 사용되는 목표값보다 큰 동작 범위를 가진 목표값이 들어오게 되는 경우에는 설계 파라미터를 다시 설정해 주어야 한다. 반면, 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 경우 목표값의 크기가 변함에 따라 온라인으로 정규화 파라미터 $L(nT)$ 를 가변시키고 이에 상응하도록 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU 를 재설정함으로써 목표값 변동에 상관없이 항상 PID 제어동작을 수행하도록 해 준다.

(3) 선형 시불변 시스템을 대상으로 할 경우에는 PID제어동작 사이의 불균형이 다소 초래되더라도 제어성능에는 크게 영향을 미치지 않음으로 가변 퍼지 PID제어기를 사용하는 데에는 전혀 문제가 없으며, 특히 조건문이 필요 없고 PID제어이득을 계산하는 식만 처리함은 되므로 실시간 제어의 측면에서 매우 유리하고 저급의 마이크로프로세서를 사용한 제어시스템 구성이 가능하다.

(4) 비선형 시스템을 제어할 경우에는 비선형 시스템의 특성이 동작구간에 따라 변하게 됨에 따라 PID제어동작도 항상 정밀하게 이루어져야 하는데, 가변 파라미터 퍼지 PID제어기는 이를 실현하기 곤란함으로 인해 비선형 시스템의 제어에는 한계를 나타낼 것으로 판단되어 적용하는데 유의하여야 한다. 이것의 증명은 5장에서 수행할 비선형 시스템의 제어결과에서 확인할 수 있다.

(5) 따라서 비선형 시스템의 경우에도 목표값의 변화에 관계없이 항상 정확한 PID제어동작을 표출할 수 있도록, 정규화 파라미터 L 을 가변시키지 않고 고정된 상태에서 제어기의 정규화 입력의 크기가 $[-L, L]$ 내에 항상 존재하도록 하는 새로운 형태의 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 연구가 필요하다.

제 4 장 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 제안

본 장에서는 3장에서 논의한 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 단점을 보완함으로써 비선형 시스템의 목표값이 변하는 경우에도 모든 범위에 걸쳐 뛰어난 제어성능을 보이는 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기를 제안한다.

4.1 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 기본 설계

개선된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 제어방법은 퍼지 제어기 입력의 정규화 파라미터 L 은 고정시키고 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU 를 매 샘플링 시간마다 변화시켜 큰 입력변수가 들어오게 되면 스케일 파라미터 값을 작게 만들어서 정규화 입력변수 e^*, r^*, a^* 가 항상 구간 $[-L, L]$ 의 범위에 속하게 하는 방법이다.

스케일 파라미터는 다음과 같은 규칙에 의해 결정된다. 스케일 파라미터 $GE(nT)$ 는 식 (4.1)의 조건문이 만족할 때 마다 결론부와 같이 가변된다. 스케일 파라미터 $GR(nT)$ 는 식 (4.2)의 조건문이 만족할 때 마다 결론부와 같이 가변되고, 이때 제어기의 전체 이득은 항상 일정해야 함으로 $GR(nT)$ 가 가변됨에 따라 $GU(nT)$ 도 동시에 식 (4.2)와 같이 가변된다. 스케일 파라미터 $GA(nT)$ 는 식 (4.3)의 조건문이 만족할 때 마다 결론부와 같이 가변된다.

$$IF GE(nT) \times |e(nT)| > L THEN GE(nT) = L/|e(nT)| \quad (4.1)$$

$$IF GR(nT) \times |r(nT)| > L THEN GR(nT) = L/|r(nT)|, \quad (4.2) \\ GU(nT) = 4/GR(nT)$$

$$IF GA(nT) \times |a(nT)| > L THEN GA(nT) = L/|a(nT)| \quad (4.3)$$

따라서 가변되는 $GE(nT), GR(nT), GA(nT), GU(nT)$ 로 인해 제어 블록 1, 2에 대한 입력공간은 그림 4.1과 그림 4.2와 같이 $[-L, L]$ 구간내의 $(IC1)_1 \sim (IC8)_1, (IC1)_2 \sim (IC8)_2$ 만으로 분할된다.

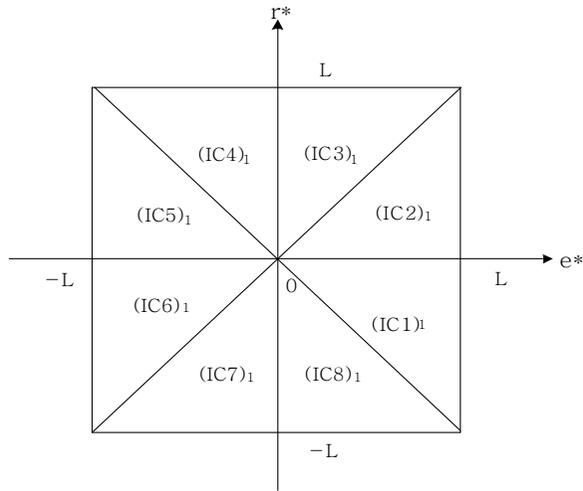


그림 4.1 고정된 정규화 파라미터 L 을 사용한 e^* 와 r^* 에 대한 공간 분할
 Fig. 4.1 Possible input partition combinations of e^* and r^* using fixed normalization parameter L

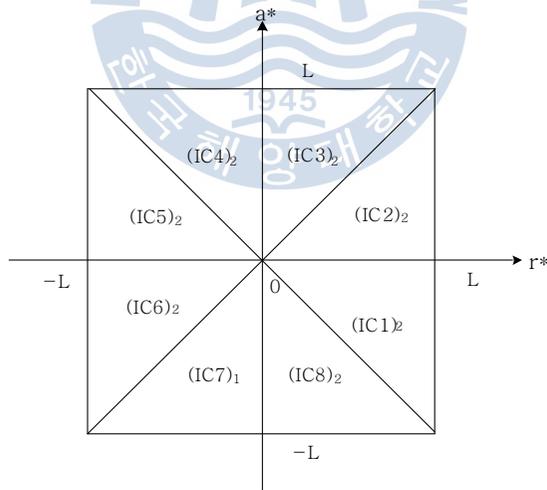


그림 4.2 정된 정규화 파라미터 L 을 사용한 r^* 와 a^* 에 대한 공간 분할
 Fig. 4.2 Possible input partition combinations of r^* and a^* using fixed normalization parameter L

이와 같은 방법은 3장에서 논의한 가변 파라미터 퍼지 PID제어기와 같이 분할된 변수들의 입력 공간 수를 대폭 줄이는 효과가 있을 뿐만 아니라, 제어기의 초기 설계 당시에 사용되는 목표값보다 큰 동작범위를 가진 목표값이 인가되더라도 항상 정규화 범위 내에서 제어동작이 이루어짐을 의미한다.

스케일 파라미터의 크기는 입력변수가 작아지면 커지게 되고 입력변수 값이 커지면 스케일 파라미터 값은 작아지게 된다. 한편, 제어시스템의 응답이 정상상태에 도달하여 입력변수가 매우 작아지게 되면 스케일 파라미터는 무한대로 커지게 되며 경우에 따라서는 연산을 수행하는 CPU에서 계산할 수 있는 값의 범위를 초과하게 됨으로써 불능상태에 빠지게 되는 경우를 초래할 수 있는 단점이 있다.

따라서 이와 같은 경우를 피하기 위한 대책을 마련하는 것이 중요하며 하나의 해결책으로는 제어시스템의 응답이 정상상태에 도달하기 전에 매우 양호한 수준에서 PID 제어동작을 보장할 수 있도록 퍼지 제어기의 입력 $error, rate, acc$ 의 크기에 대한 조건을 부여하는 것이다. 조건식으로 표현하면 식 (4.4)에서 (4.6)으로 나타낼 수 있는데 식 (4.1)에서 식 (4.3)의 조건이 만족되지 않을 경우에는 반드시 수행되도록 해야 한다. 여기서 퍼지 제어기의 입력 $error, rate, acc$ 에 대한 기준 값은 $|e(ref)|, |r(ref)|, |a(ref)|$ 이며 이에 대응하는 스케일 파라미터의 기준 값은 $GE(ref), GR(ref), GA(ref), GU(ref)$ 이다. 통상 제어시스템 동작 중에 제일 처음으로 얻어지는 입력변수의 절대값과 스케일 파라미터를 정상상태 전에 환원하는 기준 값으로 사용할 수 있다.

$$IF |e(ref)| \geq |e(nT)| THEN GE(nT) = L/|e(ref)| \quad (4.4)$$

$$IF |r(ref)| \geq |r(nT)| THEN GR(nT) = L/|r(ref)|, GU(nT) = 4/GR(nT) \quad (4.5)$$

$$IF |a(ref)| \geq |a(nT)| THEN GA(nT) = L/|a(ref)| \quad (4.6)$$

따라서 플랜트 동작의 범위나 목표값의 크기, 작용하는 외란의 크기에 관계 없이 항상 PID제어동작을 수행할 수 있게 된다. 그때 퍼지 PID제어기의 출력인 제어입력의 증분 du 는 다음과 같이 4가지 조건에 의해서만 계산된다.

(조건 1)

IF $GR(nT) \times |r(nT)| \leq GE \times |e(nT)| \leq L$
and $GA(nT) \times |a(nT)| \leq GR(nT) \times |r(nT)| \leq L$,

THEN

$$\begin{aligned} du(nT) &= \frac{0.5 \times L \times GU(nT) \times GE(nT)}{2L - GE(nT) \times |e(nT)|} e(nT) + \frac{0.5 \times L \times GU(nT) \times GR(nT)}{2L - GE(nT) \times |e(nT)|} r(nT) \\ &+ \frac{0.25 \times L \times GU(nT) \times GA(nT)}{2L - GR(nT) \times |r(nT)|} a(nT) \end{aligned} \quad (4.7)$$

(조건 2)

IF $GR(nT) \times |r(nT)| \leq GE(nT) \times |e(nT)| \leq L$
and $GR(nT) \times |a(nT)| \leq GA(nT) \times |a(nT)| \leq L$,

THEN

$$\begin{aligned} du(nT) &= \frac{0.5 \times L \times GU(nT) \times GE(nT)}{2L - GE(nT) \times |e(nT)|} e(nT) + \frac{0.5 \times L \times GU(nT) \times GR(nT)}{2L - GE(nT) \times |e(nT)|} r(nT) \\ &+ \frac{0.25 \times L \times GU(nT) \times GA(nT)}{2L - GA(nT) \times |a(nT)|} a(nT) \end{aligned} \quad (4.8)$$

(조건 3)

IF $GR(nT) \times |r(nT)| \leq GE \times |e(nT)| \leq L$
and $GA(nT) \times |a(nT)| \leq GR(nT) \times |r(nT)| \leq L$,

THEN

$$\begin{aligned} du(nT) &= \frac{0.5 \times L \times GU(nT) \times GE(nT)}{2L - GR(nT) \times |r(nT)|} e(nT) + \frac{0.5 \times L \times GU(nT) \times GR(nT)}{2L - GR(nT) \times |r(nT)|} r(nT) \\ &+ \frac{0.25 \times L \times GU(nT) \times GA(nT)}{2L - GR(nT) \times |r(nT)|} a(nT) \end{aligned} \quad (4.9)$$

(조건 4)

IF $GE(nT) \times |e(nT)| \leq GR(nT) \times |r(nT)| \leq L$
and $GR(nT) \times |r(nT)| \leq GA(nT) \times |a(nT)| \leq L$,

THEN

$$\begin{aligned} du(nT) &= \frac{0.5 \times L \times GU(nT) \times GE(nT)}{2L - GR(nT) \times |r(nT)|} e(nT) + \frac{0.5 \times L \times GU(nT) \times GR(nT)}{2L - GR(nT) \times |r(nT)|} r(nT) \\ &+ \frac{0.25 \times L(nT) \times GU \times GA}{2L(nT) - GA \times |a(nT)|} a(nT) \end{aligned} \quad (4.10)$$

그림 4.3은 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 구조를 나타내고 있다. 매 샘플링 시간 마다 파라미터들을 가변시킴으로 정규화 변수 e^* , r^* , a^* 가 항상 구간 $[-L, L]$ 사이에 존재하게 함으로써 항상 PID제어 입력을 생성하게 할 수 있도록 하는 구조이다. 또한 퍼지 제어기의 입력변수 크기에 대한 기준값을 설정하여 입력변수의 크기가 너무 작아지고 스케일 파라미터의 크기가 무한대로 커짐을 방지하여 PID제어의 불균형이 발생하거나 불능상태에 빠지는 것을 방지하였고 가변되는 목표값에도 적응력이 뛰어나도록 설계되었다.

그림 4.4는 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기 알고리즘의 수행을 위한 흐름선도를 나타낸 것이다. 2장과 3장에서 논의한 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기나 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기를 사용한 제어시스템을 설계할 경우에는 초기에 설계 파라미터들을 오프라인으로 결정해 주어야 하는 과정을 반드시 거쳐야만 했으나, 제안된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기를 사용하여 제어시스템을 설계하는 경우에는 흐름선도에서 보는 바와 같이 오프라인에 의한 설계 파라미터 결정 없이 온라인에서 바로 결정할 수 있도록 알고리즘이 구성되어 있음을 알 수 있다. 따라서 인가되는 목표값이나 외란의 크기와 변동에도 관계 없이 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기 구성에 필요한 설계 파라미터를 온라인으로 결정하고 이들을 토대로 PID 제어이득을 계산하기 때문에 항상 최적의 PID 제어효능을 발휘하도록 구성되어 있다.

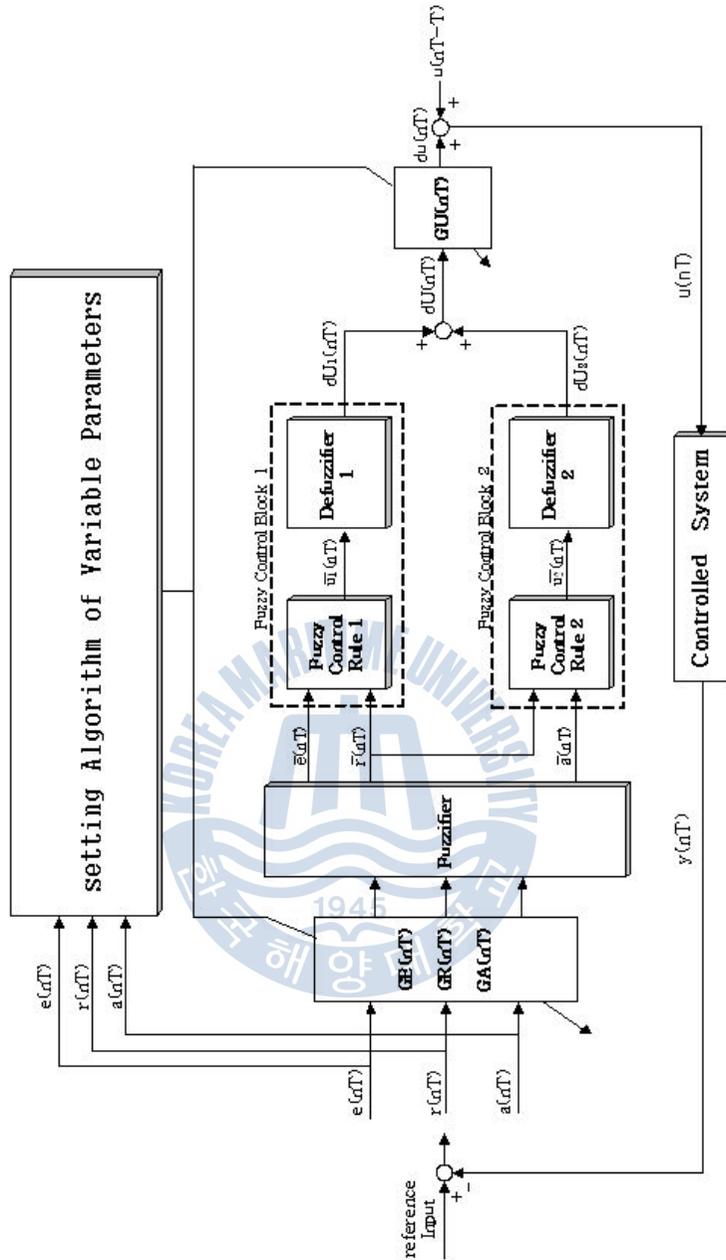
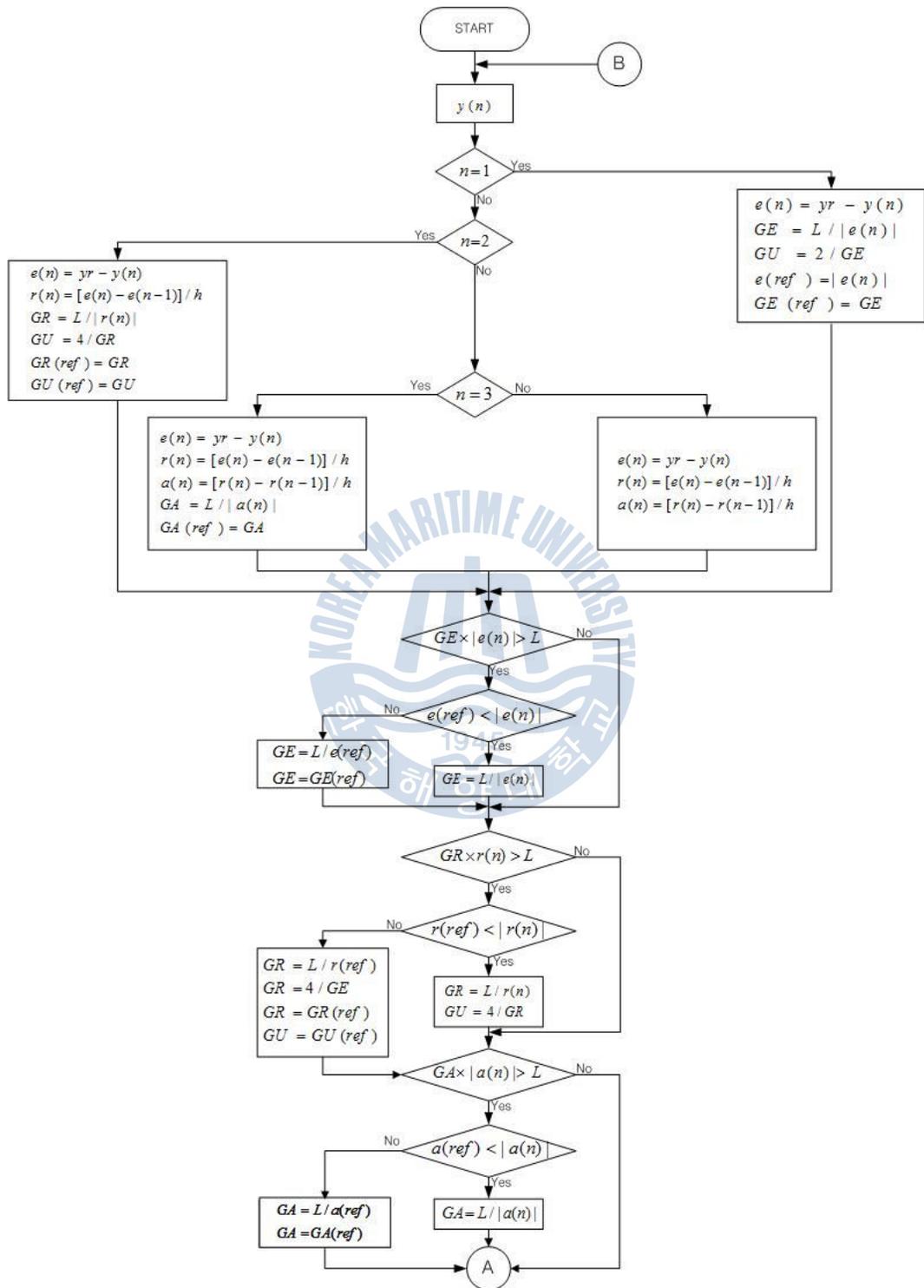


그림 4.3 제안된 가변 파라미터 퍼지PID 제어기의 구조
 Fig. 4.3 Structure of a suggested variable parameter fuzzy PID controller



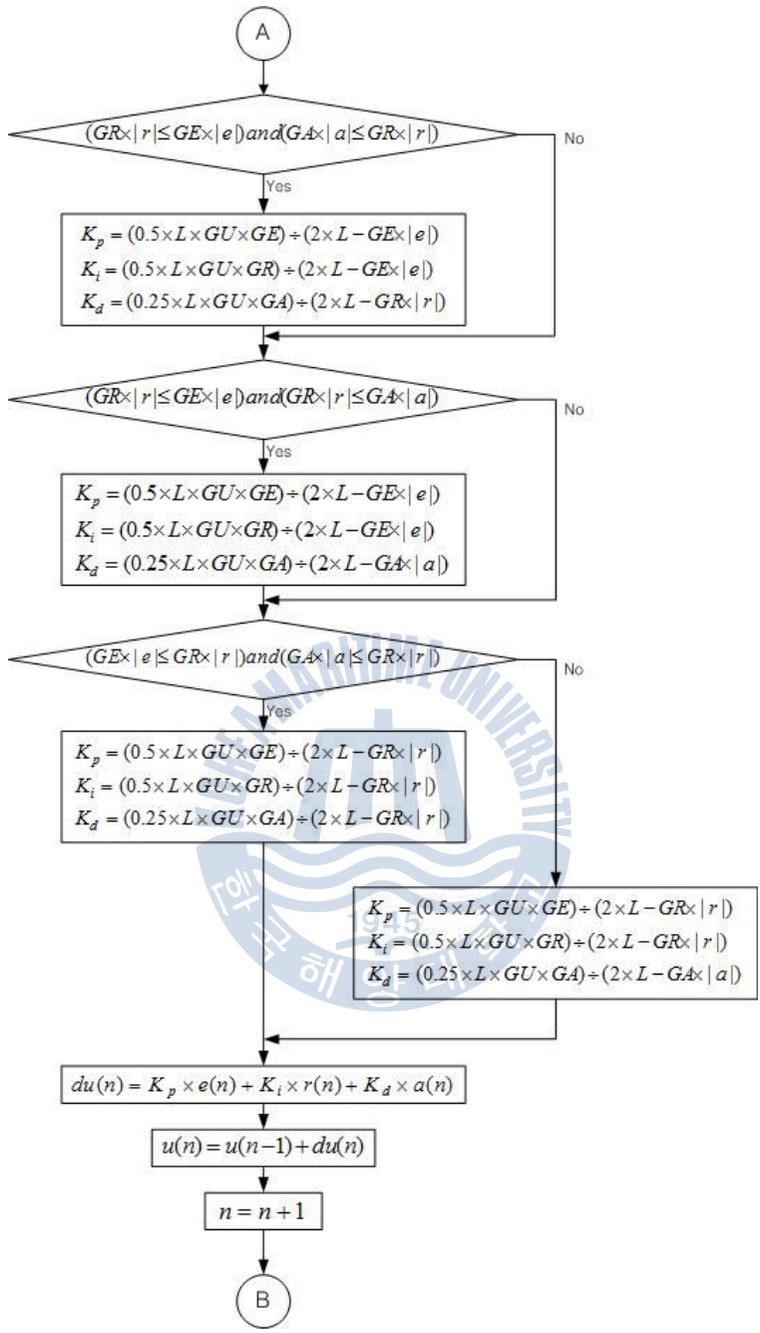


그림 4.4 제안된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 수행 알고리즘
 Fig. 4.4 Execution algorithm of the suggested variable parameter fuzzy PID controller

4.2 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기 시뮬레이션

개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기와 3장에서 다루었던 기존의 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 성능을 비교분석하기 위하여 목표값을 고정시켰을 때와 목표값을 연속적으로 가변시켰을 때의 시뮬레이션을 수행하였다.

(1) 목표값을 고정시킬 경우의 성능분석

기존의 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기와 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 성능 차이를 비교하기 위해서 목표값을 고정하여 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과를 비교하였다. 이 때 가변 파라미터 PID제어기는 목표값을 1로 하였을 경우 계산된 설계 파라미터를 사용하여 설계되었고, 시뮬레이션에서는 목표값을 3으로 변경하고 고정하여 인가하였다. 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 설계는 오프라인에서의 설계 파라미터 설정절차를 거치지 않고 목표값 3을 바로 인가한 상태에서 그림 4.4에서 제시한 알고리즘에 따라 온라인에서 자동적으로 이루어졌다.

그림 4.5에 나타낸 두 제어시스템 응답결과를 보면 거의 유사함을 볼 수 있다. 주어진 대상 플랜트가 선형 시불변 시스템이고 두 퍼지 PID제어기가 매 샘플링 시간마다 제어이득을 가변시키는 가변구조 제어기의 형태를 지니고 있기 때문이다.

한편, 두 제어기의 동작특성은 설계 파라미터의 변화와 이를 토대로 계산된 제어이득의 변화를 살펴봄으로써 분석할 수 있다. 기존의 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 설계 파라미터 변화를 나타낸 그림 4.6에서는 $L(nT)$ 가 초기에 목표값 변경에 대응하여 가변되고 그림 4.7에서 나타낸 것과 같이 연속적으로 PID제어이득이 계산되어 PID 제어동작을 발생시키고 있음을 볼 수 있다. 반면에 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID 어기의 설계 파라미터의 변화를 나타낸 그림 4.8에서는 정규화 파라미터 L 이 고정된 상태에서 제어기의 입력의 크기변화에 따라 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU 가 연속적으로 변함으로써 그림 4.9에 나타낸 PID 제어이득이 연속적으로 변화되어 최적의 PID 제어동작을 받

생시키고 있음을 볼 수 있다. 그림 4.7과 그림 4.9에서 보는 바와 같이 온라인으로 계산된 제어이득의 변화범위는 거의 비슷함을 알 수 있으나 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 제어이득 변화가 과도응답 구간에서 시간에 따라 보다 더 부드럽게 변하고 있음을 볼 수 있음으로써 제어입력의 증분을 생성하는 속도형 가변구조 제어기로서 응용 타당성이 더 높음을 암시하고 있다. 한편 정상상태에서 수렴하는 제어기의 이득 값은 두 제어기에서 동일함으로 볼 수 있고 결과적으로 두 제어시스템의 정상상태 응답도 거의 동일하게 됨을 알 수 있다.

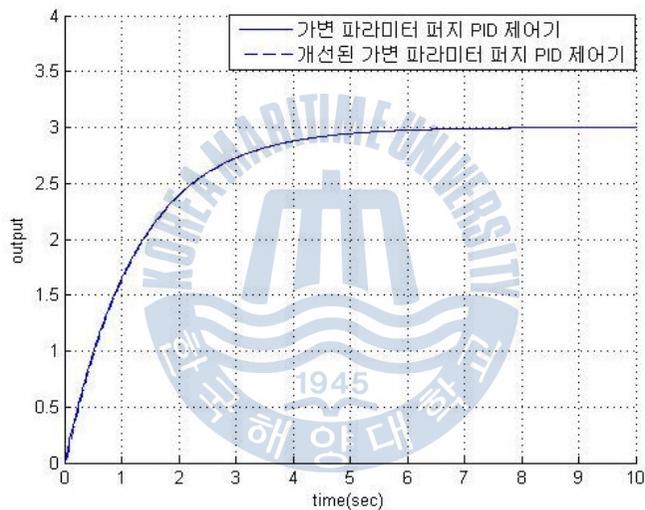


그림 4.5 고정된 목표값에 대한 가변 파라미터 퍼지 PID 제어시스템과 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어시스템의 응답 비교

Fig. 4.5 Response comparison of two variable parameter fuzzy PID control systems under fixed reference step input

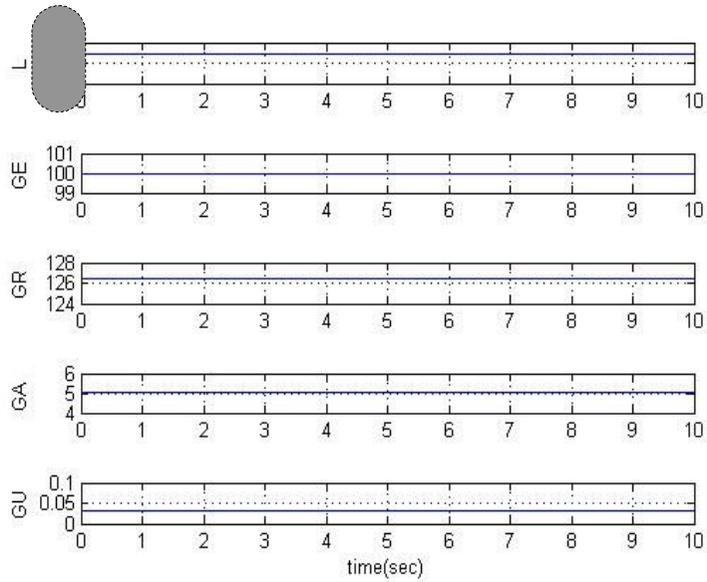


그림 4.6 목표값이 1에서 3으로 변경된 후 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 가변된 설계 파라미터 L, GE, GR, GA, GU

Fig 4.6 Varied design-parameter L, GE, GR, GA, GU of variable parameter fuzzy PID controller when reference input is changed from 1 to 3

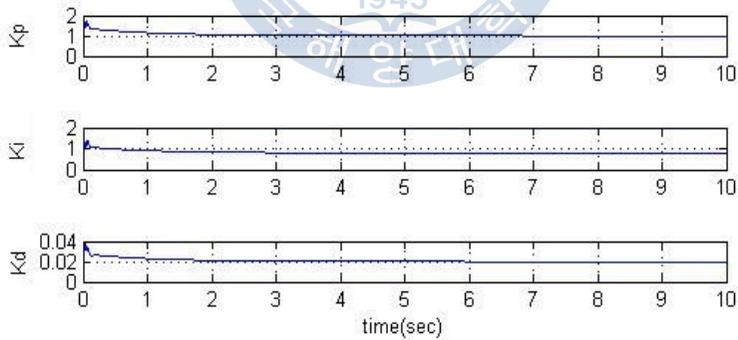


그림 4.7 목표값이 1에서 3으로 변경된 후 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 제어이득 K_p, K_i, K_d

Fig 4.7 Controller gain K_p, K_i, K_d of variable parameter fuzzy PID controller when reference input is changed from 1 to 3

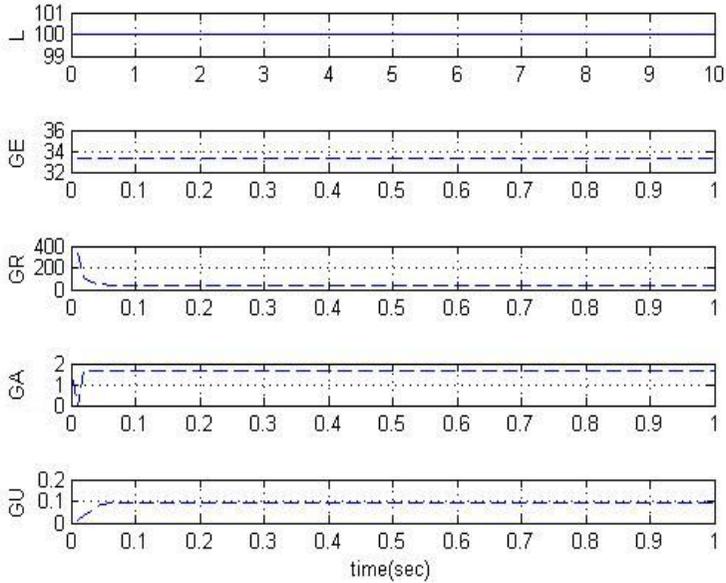


그림 4.8 목표값 3이 인가될 때 제안된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 설계 파라미터 GE, GR, GA, GU 의 변화(L 은 상수)

Fig. 4.8 Variations of design parameter $GE, GR, GA,$ and GU of the suggested variable parameter fuzzy PID controller under reference input 3 (L was selected as constant)

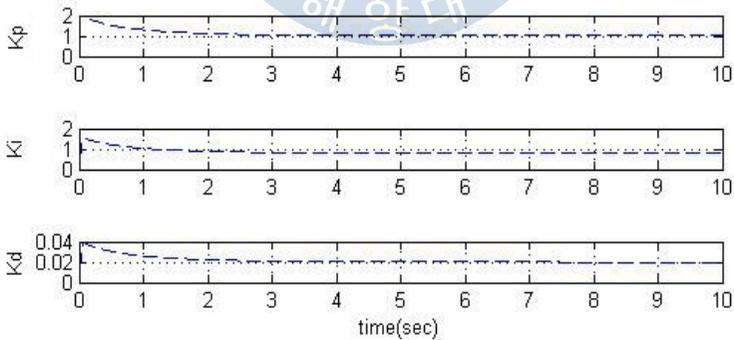


그림 4.9 목표값 3이 인가될 때 제안된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 제어이득 K_p, K_i, K_d

Fig. 4.9 Controller gain $K_p, K_i,$ and K_d of the suggested variable parameter fuzzy PID controller under reference input 3

(2) 목표값을 연속적으로 가변시킨 경우의 성능분석

가변 파라미터 퍼지 PID제어기와 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 성능 차이를 구체적으로 확인하기 위하여 목표값을 가변시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 대상 플랜트는 3장에서 사용한 것과 동일한 선형 시불변 부족감쇠 특성을 가지는 시스템이고 목표값이 10초 단위로 스텝의 크기가 1-4-1-2로 가변되도록 인가하였다.

그림 4.10에서 실선은 기존의 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기를 채용한 제어시스템의 응답결과이고 점선은 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기를 채용한 제어시스템의 응답 결과가 도시한 것이다. 두 제어시스템의 응답결과는 거의 유사한 것으로 나타났으나, 그림 4.11와 그림 4.12에서 도시한 제어기 입력의 변화에 대응하여 계산된 PID 제어이득의 변화를 관찰하면 PID 제어동작을 발휘하는 능력에서는 질적으로 많은 차이를 가짐을 알 수 있다. 하지만 구체적으로 살펴보면 그림 4.11와 그림 4.12에서 도시한 제어기의 입력 $error, rate, acc$ 는 목표값이 변화함에 따라 동일하게 발생함에도 불구하고, 그림 4.13에서 나타낸 기존의 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 제어이득 K_p, K_i, K_d 는 그림 4.14에 나타낸 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID의 제어이득 K_p, K_i, K_d 에 비해 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 목표값이 변함에 따라 그 목표값을 빨리 추종하도록 생성된 제어입력의 증분에 있어, 개선된 방법에서 생성된 증분의 크기가 기존의 방법에서 생성된 증분 크기보다 더 커 과도응답 성능이 그만큼 더 우수함으로 말해 주고 있다.

이와 같은 현상을 좀 더 구체적으로 살펴보면, 그림 4.11로부터 0초와 30초에서 인가된 목표값의 변화량이 같음으로써 제어기의 입력 $error, rate, acc$ 값도 같음을 볼 수 있다. 하지만 기존의 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 경우 0초 일 때 목표값의 변화에 대응하여 계산되는 K_p, K_i, K_d 이득의 크기가 30초 때의 이득 K_p, K_i, K_d 보다 더 큰 것을 그림 4.13에서 볼 수 있는데, 동일한 크기로 목표값이 변하더라도 목표값을 추종하기 위해 생성되는 제어입력의 증분은 0초와 30초에서 같지 않다는 것을 의미하며, 동일한 제어기이지만 PID 제어성능에 불균형이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 3장에서도 고찰한 바와

마찬가지로 그림 4.11에서 10초에 가변된 목표값에 의해 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 정규화 파라미터 $L(nT)$ 가 크게 변한 이후에는 변하지 않음으로써 30초에서의 목표값 변화에 민감하게 PID 제어동작을 발휘할 수 없기 때문임을 알 수 있다.

하지만 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 경우, 0초와 30초 때 발생하는 같은 크기의 목표값 변화로 인한 $error, rate, acc$ 의 제어기 입력이 같을 경우에는 계산되는 제어기 이득 K_p, K_i, K_d 도 동일하다는 것을 그림 4.14로부터 볼 수 있다. 따라서 제어기 입력이 동일할 경우에는 PID 제어이득도 동일하고 계산되는 제어입력의 증분도 언제나 동일하다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 파라미터 변화를 나타낸 그림 4.12를 살펴보면 쉽게 이해할 수 있는데, 목표값 변화가 같을 경우에는 고정된 L 값을 기준으로 온라인으로 계산되는 설계 파라미터 GE, GR, GA, GU 값의 변화도 같아짐을 볼 수 있기 때문이다. 따라서 목표값 변화가 동일한 0초와 30초의 경우 동일한 K_p, K_i, K_d 이득을 계산하게 되어 PID 제어동작이 항상 균형 있게 발생함을 알 수 있다.

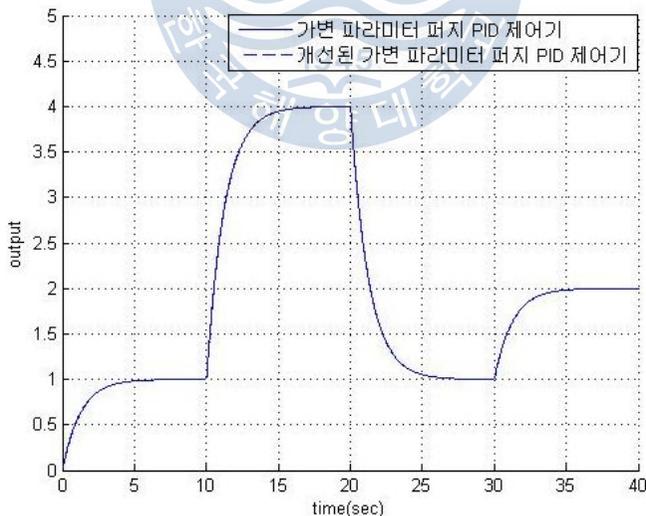


그림 4.10 목표값 가변에 대한 가변 파라미터 퍼지 PID제어시스템의 응답
 Fig. 4.10 Responses of fuzzy PID control systems corresponding to variable step reference input

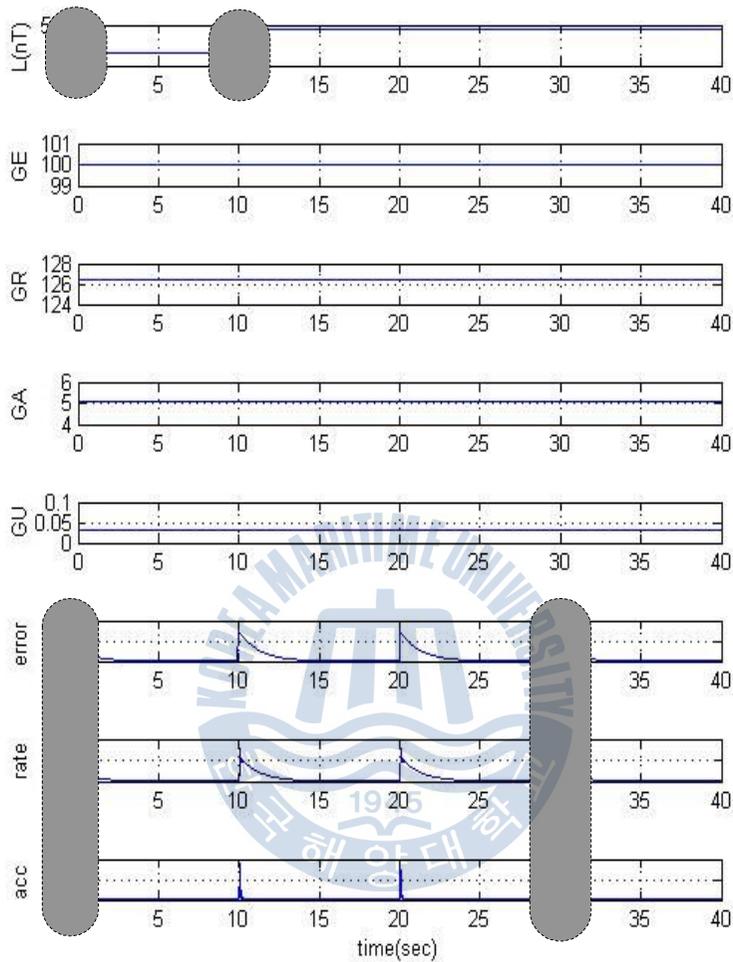


그림 4.11 기존의 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 설계 파라미터

L , GE , GR , GA , GU 의 변화 및 제어기 입력 $error$, $rate$, acc

Fig. 4.11 Variations of design-parameter L , GE , GR , GA , and GU and controller input $error$, $rate$, and acc of the surveyed variable parameter fuzzy PID controller according to reference input variation

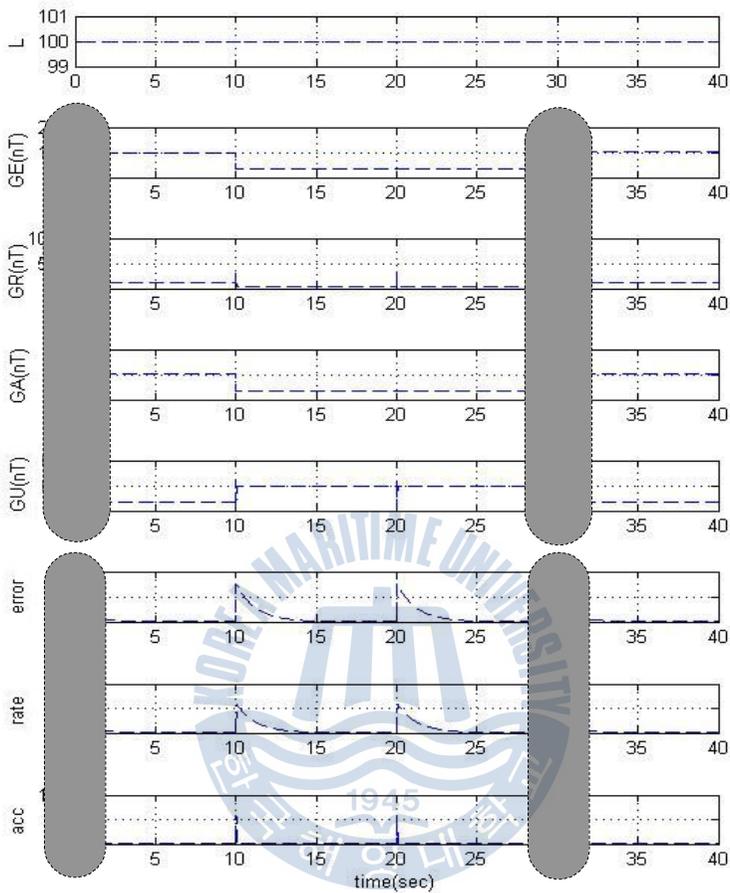


그림 4.12 제안된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 설계 파라미터

L, GE, GR, GA, GU 의 변화 및 제어기 입력 $error, rate, acc$

Fig. 4.12 Variations of design-parameter L, GE, GR, GA, GU and controller input $error, rate, acc$ of the suggested variable parameter fuzzy PID controller according to reference input variation

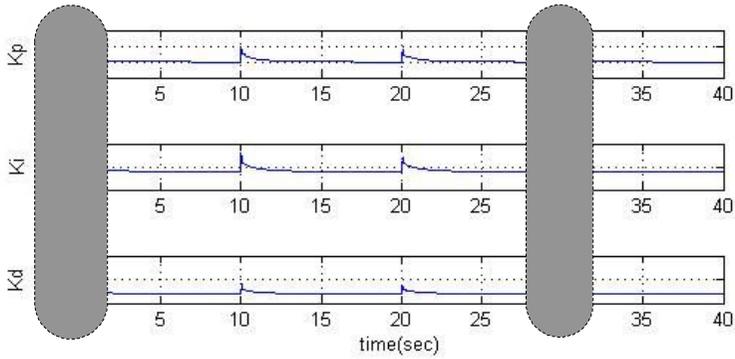


그림 4.13 기존의 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기 이득 K_p , K_i , K_d 생성의 불균형성
 Fig. 4.13 Unbalance of generated controller gain K_p , K_i , and K_d in the surveyed variable parameter fuzzy PID controller

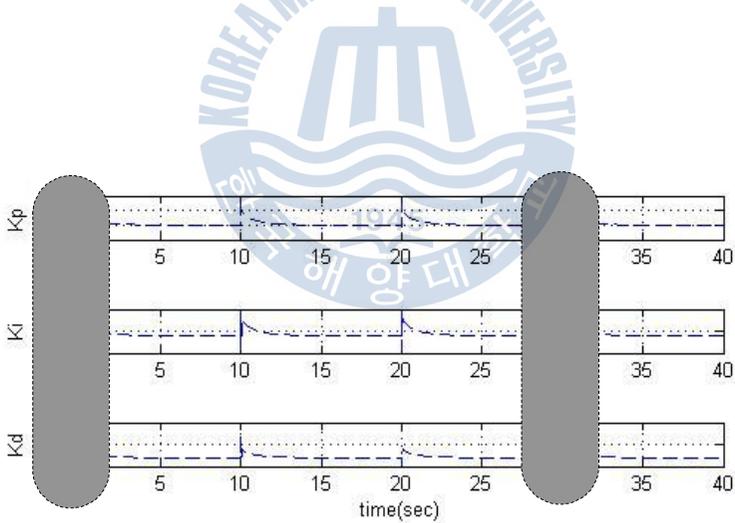


그림 4.14 제안된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기 이득 K_p , K_i , K_d 생성의 균형성
 Fig. 4.14 Balance of generated controller gain K_p , K_i , and K_d in the suggested variable parameter fuzzy PID controller

제 5 장 비선형 이중 수조 시스템의 제어

2장과 3장에서는 기존에 연구된 고정 파라미터 퍼지 PID제어기와 가변 파라미터 퍼지 PID제어기에 대해서 설명하고 4장에서는 기존에 연구된 제어기보다 우수한 성능을 가지는 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기에 대하여 제안하였다. 4장까지에서 다양한 제어기들의 성능비교를 하기 위하여 시뮬레이션에서 사용된 플랜트는 선형 시불변 시스템을 대상으로 하였으나, 퍼지 PID제어기를 응용하는 중요한 분야는 기존의 제어기로서는 불가능한 비선형 시스템을 대상으로 제어시스템을 설계하는 영역이다.

따라서 본 장에서는 대표적 비선형 시스템인 이중 수조 시스템에 이제까지 성능을 검토한 퍼지 PID제어기들을 적용하여 제어성능을 비교분석함으로써 본 논문에서 제안하는 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 우수성을 검증하고자 한다.

5.1 비선형 이중 수조 시스템 설계

그림 5.1과 같은 비선형 이중 수조 시스템을 대상 플랜트로 한다. 제어대상 시스템은 2개의 탱크와 유량 제어밸브와 서보모터로 구성된다. 시스템의 동작 원리는 서보모터의 입력단에 전압이 가해지면 전압에 비례하여 밸브가 개폐되어 #2 탱크에 유체가 유입되고, 두 탱크의 수위 차에 의하여 연결관을 통하여 #1 탱크 쪽으로 유체가 흐르며, 배출관을 통하여 외부로 배출된다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터 값은 표 5.1에 정리 되어 있다.

그림 5.1의 시스템을 미분방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$s_1 \frac{dh_1}{dt} = p_2 \operatorname{sgn}(h_2 - h_1) \sqrt{2g|h_2 - h_1|} - p_1 \sqrt{2gh_1} \quad (5.1)$$

$$s_2 \frac{dh_2}{dt} = q_3 - p_2 \operatorname{sgn}(h_2 - h_1) \sqrt{2g|h_2 - h_1|} \quad (5.2)$$

$$T_v \frac{dq_3}{dt} = -q_3 + K_v u \quad (5.3)$$

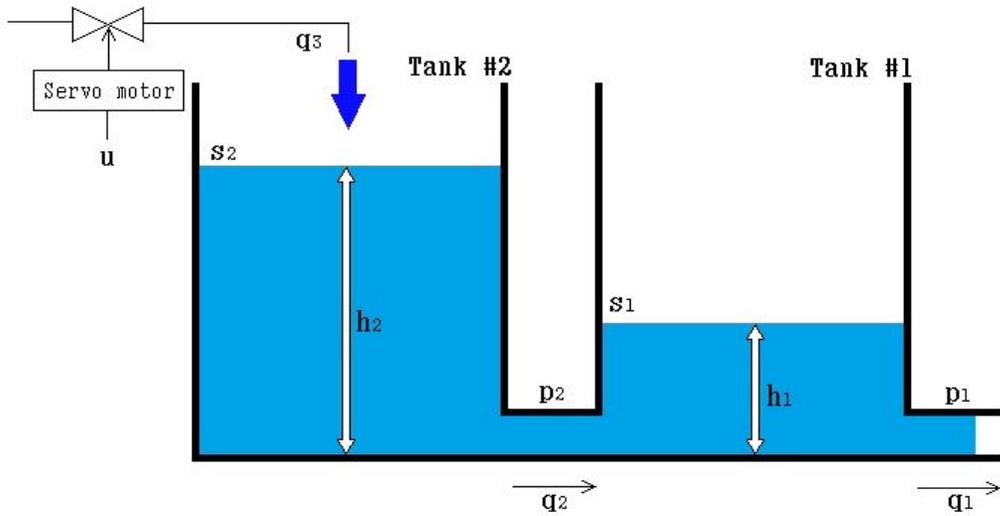


그림 5.1 이중 수조 시스템의 구조

Fig. 5.1 Structure of a two-tank system

표 5.1 이중 수조 시스템 파라미터

Table 5.1 parameters of the two-tank system

s_1	탱크 #1 단면적	20.1062×10^{-3}	m^2
s_2	탱크 #2 단면적	11.3097×10^{-3}	m^2
h_1	탱크 #1 수위	-	m
h_2	탱크 #2 수위	-	m
p_1	출력관의 단면적	0.7069×10^{-3}	m^2
p_2	연결관의 단면적	0.7069×10^{-3}	m^2
q_1	p_1 의 유량	-	m^3/sec
q_2	p_2 의 유량	-	m^3/sec
q_3	입력 유량	-	m^3/sec
u	서보모터 입력	-	V
K_v	서보모터 이득	0.9896×10^{-3}	$m^3/sec \cdot V$
T_v	서보모터 시정수	1.0	sec
g	중력	9.8	m/sec^2

5.2 퍼지 PID제어기를 이용한 비선형 이중 수조 시스템의 제어 시스템 성능검증과 결과고찰

식 (5.1), 식 (5.2), 식 (5.3)으로 모델링되고 그림 5.1에 나타난 비선형 이중 수조 시스템을 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행함으로써 본 논문에서 논의하고 제안한 퍼지 PID 제어기들의 응답 특성을 비교분석하였다.

그림 5.2는 이중 수조 시스템에서 수조의 목표 높이를 1m로 설정했을 때 각 제어기에 의한 제어시스템 응답을 비교한 것이다. 이때 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기와 기존의 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기에서 요구하는 설계파라미터 값은 목표 높이 1m에 대하여 설정되었을 때 오프라인으로 산정한 결과를 이용하였다. 하나의 목표값을 대상으로 설계 파라미터를 결정하고 동일한 목표값을 인가한 경우이므로 세 가지 퍼지 PID 제어시스템 모두 설계 파라미터 변화가 없기 때문에 항상 정확한 PID 제어동작을 받고 있음을 알 수 있고 거의 유사한 과도응답을 표출하면서 정상상태에 도달함을 볼 수 있다. 이것은 퍼지 PID 제어기가 가지는 장점의 하나로 비선형 시스템의 제어에 매우 적합하다는 것을 보여 주는 좋은 예이다.

그림 5.3은 그림 5.1에서 설정했던 목표 높이 1m에서 산정한 설계파라미터 값을 그대로 사용한 상태에서 목표 높이를 3m로 목표값을 변경하였을 경우의 각 PID 제어시스템의 응답을 비교한 것이다. 이때 고정 파라미터 퍼지 PID 제어시스템은 목표값에 빠른 시간내에 도달하지 못하고 정착시간이 길어지는 것을 볼 수 있고, 가변 파라미터 퍼지 PID 제어시스템은 정상상태에서 채터링 현상을 일으키면서 목표치에 도달하는 것을 볼 수 있다. 한편, 본 논문에서 제안하여 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어시스템은 목표값의 변화에도 불구하고 안정적인 과도응답을 표출하면서 정상상태에 도달함을 볼 수 있다.

이와 같은 응답결과를 보다 자세히 확인할 수 있는 근거로서 목표 높이 3m로 설정했을 때 각 제어기의 파라미터 변화를 나타낸 것이 그림 5.4와 그림 5.5, 그림 5.6이고, 이를 토대로 계산한 PID 제어이득의 변화를 나타낸 것이 그림 5.7, 그림 5.8, 그림 5.9이다.

그림 5.4로부터 고정 파라미터 퍼지 PID제어기 경우 제어기 입력의 퍼지집

합 정규화 파라미터 L 값을 비롯하여 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU 모두 고정되어 있으므로 볼 수 있다. 결과적으로 정규화된 입력의 크기가 정규화 파라미터 구간 $[-L, L]$ 을 벗어나 초기 과도구간에서는 목표값의 변화에 대처하지 못하고 PID 제어동작을 발생시키는 제어기 이득 K_p, K_i, K_d 를 정상적으로 계산하지 못하고 있음을 그림 5.7에서 확인할 수 있다.

가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 경우 L, GE, GR, GA, GU 값 중에 정규화 파라미터 L 값이 목표값의 변화에 따라 정규화 입력 중 가장 큰 것에 해당하는 값으로 변화한 것을 그림 5.5에서 확인할 수 있고 초기시간에서부터 모든 시간에 걸쳐 PID 제어동작을 수행하여 제어이득 K_p, K_i, K_d 을 계산하고 있음을 그림 5.8을 통해 확인할 수 있다. 그러므로 초기의 제어시스템 응답이 빨리 상승함으로써 정착시간은 당겨짐을 알 수 있다. 하지만 정규화 파라미터 L 이 커진 반면 정상상태에서의 제어기 입력은 크기가 작아짐으로 인해 PID 제어동작 사이에 불균형이 발생하여 미분제어동작이 정상적으로 발생하지 않게 되고 결과적으로 과도한 보상으로 인하여 정상상태에서 응답이 채터링 현상을 유발하는 원인을 제공함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 비선형 시스템의 제어에 있어 기존의 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기의 경우에는 매우 조심스럽게 사용해야 함을 의미한다.

마지막으로 개선된 가변 파라미터 퍼지PID제어기의 경우에는 정규화 파라미터 L 을 고정하고 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU 를 목표값의 변화에 따라 온라인으로 가변하는 구조인데 그림 5.6으로부터 GE, GR, GA, GU 가 가변된 것을 그림 5.6에서 확인할 수 있다. 또한 이를 토대로 PID 제어이득 K_p, K_i, K_d 가 정상적으로 초기시간부터 원활히 계산되어 정확한 PID제어동작을 수행하고 있음을 그림 5.9를 통하여 확인할 수 있다.

결론적으로 목표값이 변하는 비선형 시스템의 제어에 있어서도 본 논문에서 제안한 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기가 안정적으로 PID제어 동작을 발휘함으로써 응답의 과도상태도 개선하면서 정상상태에도 안정적으로 도달하도록 제어효능을 발휘할 수 있음을 알 수 있다.

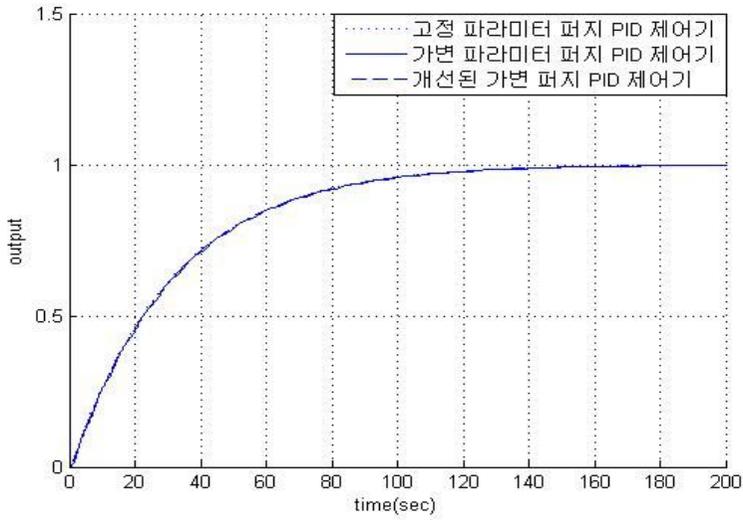


그림 5.2 목표높이 1m 일 때 퍼지 PID 제어시스템의 응답

Fig. 5.2 Responses of fuzzy PID control systems for reference input level 1m

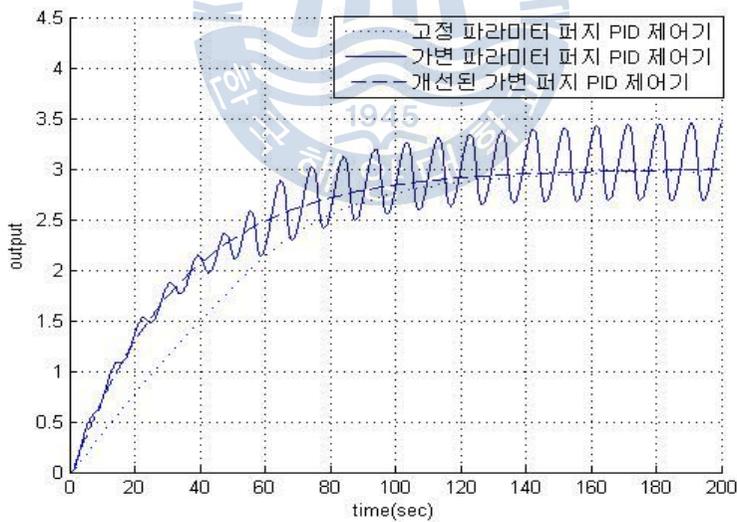


그림 5.3 목표높이 3m 일 때 퍼지 PID 제어시스템의 응답

Fig. 5.3 Responses of fuzzy PID control systems for reference input level 3m

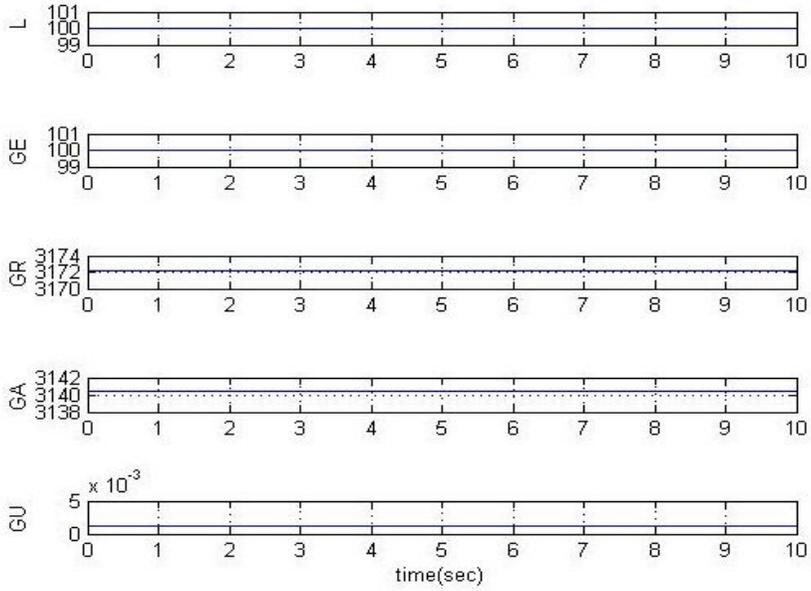


그림 5.4 목표높이 3m 일 때 고정 파라미터 퍼지 PID제어기의 설계 파라미터
 Fig. 5.4 Design parameters of the fixed parameter fuzzy PID controller
 for reference input level 3m

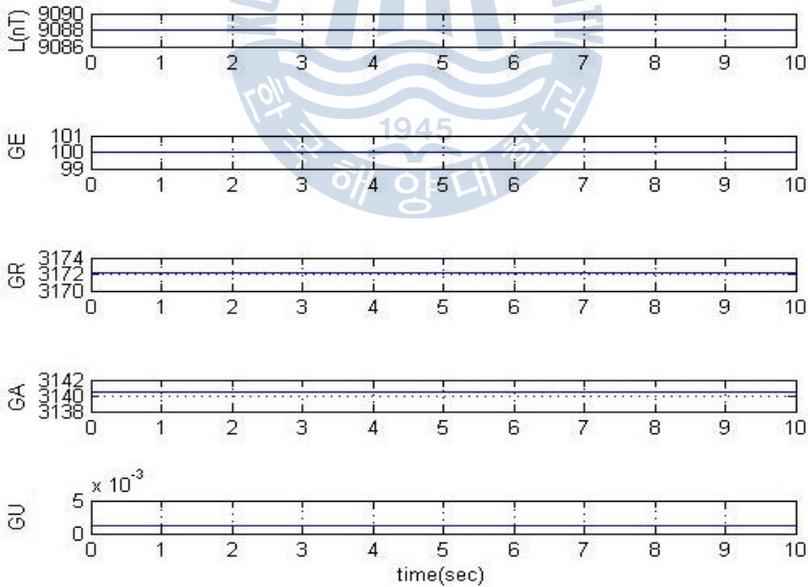


그림 5.5 목표높이 3m 일 때 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 설계 파라미터
 Fig. 5.5 Design parameters of the variable parameter fuzzy PID controller
 for reference input level 3m

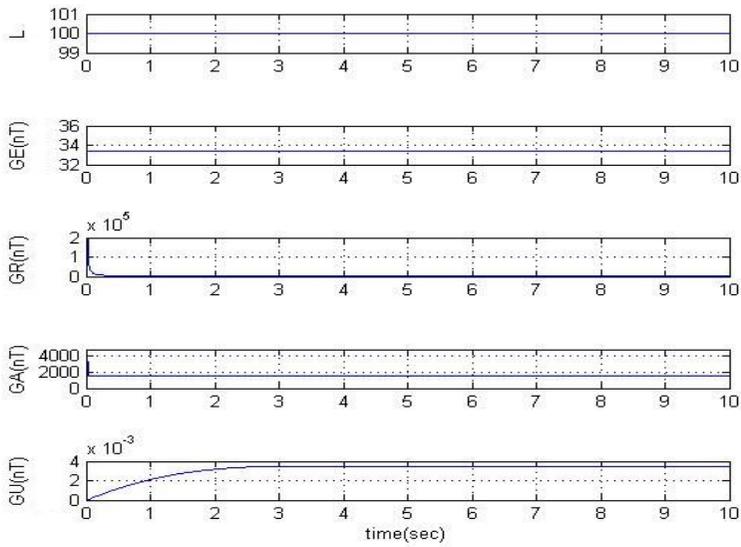


그림 5.6 목표높이 3m 일 때 제안된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 설계 파라미터

Fig. 5.6 Design parameters of the suggested variable parameter fuzzy PID controller for reference input level 3m

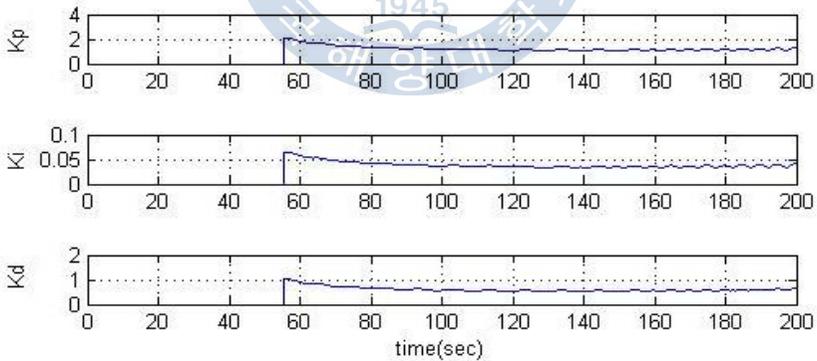


그림 5.7 목표높이 3m 일 때 고정 파라미터 퍼지 PID제어기의 제어이득
Fig. 5.7 Controller gains of the fixed parameter fuzzy PID controller for reference input level 3m

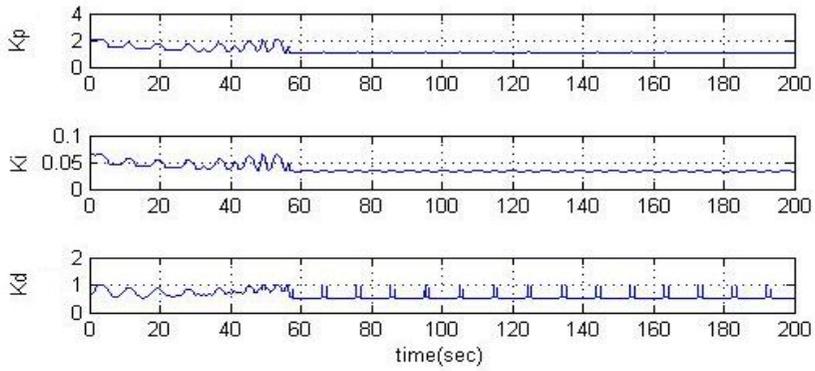


그림 5.8 목표높이 3m 일 때 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 제어이득
 Fig. 5.8 Controller gains of the variable parameter fuzzy PID controller
 for reference input level 3m

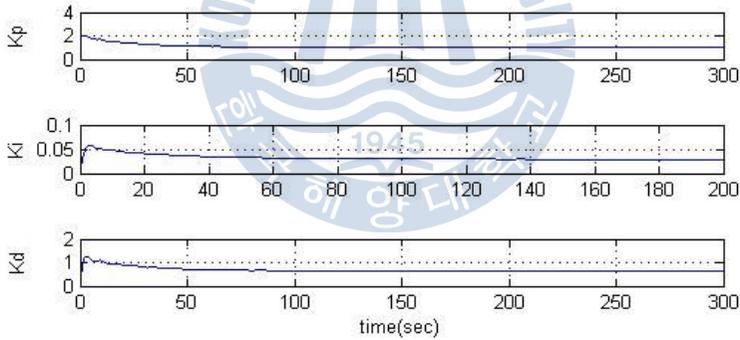


그림 5.9 목표높이 3m 일 때 제안된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 제어이득
 Fig. 5.9 Controller gains of the suggested variable parameter fuzzy PID
 controller for reference input level 3m

제 6 장 결 론

본 논문에서는 기존의 연구자들이 제안한 고정 파라미터 퍼지 PID제어기와 가변 파라미터 퍼지 PID제어기의 효능 검증과정을 거침으로써 그것들의 단점을 보완할 수 있는 개선방법을 찾으려고 노력하였다. 그 결과 목표값이나 외란의 변화에도 관계없이 온라인으로 설계 파라미터를 결정하고 항상 정확한 PID 제어동작을 표출하는 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기를 제안하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 먼저 선형 시불변 플랜트에 대한 시뮬레이션을 수행함으로써 고정 파라미터 퍼지 PID 제어기가 선형 PID제어기에 비해 우수한 제어 성능을 발휘함을 검증하였다. 또한 고정 파라미터 퍼지 PID제어기는 목표값이 설계당시보다 크게 인가될 경우에는 정확한 PID 제어동작을 발휘하지 못하는 것을 확인하였고, 따라서 정규화된 제어기의 입력 크기가 정규화 파라미터 범위 $[-L, L]$ 내에 머물도록 하는 일종의 가변 파라미터 퍼지 PID제어기 형태로 개선되어야 함을 확인하였다.
- (2) 고정 파라미터 퍼지 PID제어기의 단점을 보완한 기존에 연구된 가변 파라미터 퍼지 PID제어기를 검토하였다. 선형 시불변 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행한 결과 목표값의 변화에 대해서도 정규화 파라미터 $L(nT)$ 를 가변시킴으로써 항상 PID 제어동작을 발휘하여 양호한 제어효능을 나타냄을 확인하였다. 한편, 정상상태에서는 PID 제어동작 사이에 불균형을 유발하는 단점을 지니고 있음으로써 항상 정확한 PID 제어동작을 발휘하는 것은 아님을 확인하였다.
- (3) 기존의 가변 파라미터 PID 제어기가 가지는 단점을 보완하는 방법으로 목표값이 변할 때마다 정규화 파라미터 $L(nT)$ 를 가변시키는 방법이 아니라, L 은 고정된 상태에서 스케일 파라미터 GE, GA, GR, GU 를 온라인으로 가변시킴으로써 정규화된 제어기의 입력 크기가 정규화 파라미터 범위 $[-L, L]$

내에 머물도록 하는 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어를 제안하였다. 선형 시불변 플랜트를 대상으로 동일한 시뮬레이션을 수행함으로써 목표값의 변화에도 불구하고 모든 범위에서 항상 정확한 PID 제어동작을 표출하며 뛰어난 제어성능을 발휘하는 것을 증명하였다.

- (4) 대표적 비선형 시스템인 이중 수조 시스템을 대상으로 제어시스템을 구성하고 시뮬레이션을 수행한 결과, 제안된 가변 파라미터 퍼지 PID제어의 효능이 기존의 고정 파라미터 퍼지 PID제어나 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기보다 우수함을 입증하였다.

이상의 연구결과를 통해 본 논문에서 제안한 개선된 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기는 시스템의 수학적 모델 확립이 어렵거나 비선형 시스템을 제어하는데 매우 적합한 제어기임을 확인할 수 있었고, 특히 온라인 계산량이 많지 않음에도 불구하고 우수한 제어효능을 발휘함으로써 저급 마이크로프로세서를 사용한 실시간 제어시스템 설계가 충분히 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

향후의 과제는 실제의 비선형 시스템을 대상으로 제어시스템을 구성하고 성능을 확인함으로써 제안된 제어기의 효능을 실증하는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] K.J. Astrom and T. Hagglund, *PID controllers: Theory, Design and Tuning*, Instrument Society of America, 1995.
- [2] K.J. Astrom, K. H. Johansson, and Q. G. Wang. "Design of decoupled PID controllers for MIMO systems," American Control Conference, 2001.
- [3] L. Wang, *A courses in Fuzzy systems and Control*, Prentice-Hall, 1997.
- [4] K. M. Passino and S. Yukovich, *Fuzzy control*, Addison Wesley, 1999.
- [5] A. Heidar, M. H. Li and G. Chen, "New Design and Stability Analysis of Fuzzy Proportional-Derivative Control System", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 2, pp 245~254, 1994.
- [6] L. Wang, *Adaptive Fuzzy Systems and Control : Design and stability Analysis*, Prentice Hall, 1994.
- [7] S. K. Nam and W. S. Yoo, "Fuzzy PID Control with Accelerated Reasoning for DC Servo Motors," Engineering Application of Artificial Intelligent, Vol. 7, pp. 559~569, 1994.
- [8] S. He, S. Tan, F. Xu and P.Wang, "Fuzzy Self-Tuning of PID controllers," Fuzzy Sets and systems, Vol 56, pp. 37~46, 1993.
- [9] H. A. Malki, D. Misir, D. Feigenspan and G. Chen, "Fuzzy PID Control of a Flexible-Joint Robot Arm with Uncertainties from Time-Varying Loads," IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 5, pp. 371~378, 1997.
- [10] J. H. Kim, "A Suggestion of Nonlinear Fuzzy PID Controller to Improve Transient Responses of Nonlinear or Uncertain Systems," 한국 퍼지 및 지능 시스템학회 논문지, Vol. 5, No. 4, pp. 87~100, 1995.
- [11] M. Braae and D. A. Rutherford, "Selection of Parmeters for a Fuzzy Logic Controller," Fuzzy Sets and Systems Vol. 2, pp. 185~199, 1979.
- [12] H. Ying, W. Siler and J. J. Buckley, "Fuzzy Control Theory: A Nonlinear Case," Automatica, Vol. 29, pp. 513~520, 1990.
- [13] H. Ying, "The Simplest Fuzzy controllers using Different Inference Methods are Different Nonlinear Proportional -Integral Controllers with Variable Gains," Automatica, Vol. 29, pp. 1579~1589, 1993.

- [14] C. L. Chen and F. C. Kuo, "Design and Analysis of a Fuzzy Logic Controllers," *International Journal of System and Science*, Vol. 29, pp.1579~1589,1998.
- [15] D. Misir, H. A. Malki and G. Chen, "Design and Analysis of a Fuzzy Proportional-Integral-Derivative Controller," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 79, pp. 297~314, 1996.
- [16] C. J. Harris, C. G. Moore and M. Brown, *Intelligent Control: Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets.*, World Scientific 1993.
- [17] 박장호, "퍼지 PID 제어기의 성능 개선과 비선형 유압실린더 위치제어에의 응용," 한국해양대학교 碩士論文, 2001.
- [18] 김진규, "해수용 센서내장형 유압실린더와 다중실린더의 위치동조 제어에 관한 연구," 한국해양대학교 碩士論文, 2001.
- [19] K. Tanaka and M. Sugeno, "Stability Analysis and Design of Fuzzy Control Systems," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 45. pp. 135~156, 1992.
- [20] 김인환 "가변 파라미터를 갖는 비선형 퍼지 PID 제어기의 설계방법에 관한 연구," 한국해양대학교 博士論文, 2004.
- [21] K. H. Cho, C. W. Kim and J. T. Lim, "On Stability Analysis of Nonlinear Plants with Fuzzy Logic Controllers," *Proceeding IFSA '93*. pp1094~1097, 1993.
- [22] R. J. P. de Figueiredo and G. Chen, *Nonlinear Feedback Control Systems: An Operator Approach*, New York Academic, 1993.
- [23] 김인환, 이병걸, 김종화 "비선형 퍼지 PID 제어기의 성능 개선에 관한 연구," 한국박용기관학회 논문지, pp 852~661, 제27권 7호, 2003.
- [24] 김진규, 김인화, 김종화, "가변 설계파라미터 퍼지 PID 제어기를 이용한 비선형 유압시스템의 위치제어," 한국박용기관학회 논문지, pp852~661, 제 27권 8호, 2003.
- [25] 오성권, *퍼지 모델 및 제어이론과 프로그램* 技多利, 1999.