

工學碩士 學位論文

퍼지 게인 스케줄링을 이용한 이중수조  
시스템의 강인한 제어기 설계

Design of a Robust Water Level Controller for  
Coupled Tank System Using Fuzzy Gain Scheduling

指導教授 蘇 明 玉

2005 年 2 月

韓國海洋大學校 海事産業大學院

機關시스템工學科

金 榮 守

본 논문을 김영수의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 오 세 준 인

위 원 공학박사 이 상 태 인

위 원 공학박사 소 명 옥 인

2004년 12월 17일

한국해양대학교 해사산업대학원

기관시스템공학과

# 목 차

Abstract .....	iii
Nomenclature .....	v
제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구동향 .....	1
1.3 연구내용과 구성 .....	2
제 2 장 이중수조 시스템의 모델링 .....	4
2.1 이중수조 시스템 .....	4
2.2 모델링 .....	5
2.2.1 펌프 .....	5
2.2.2 이중수조 .....	5
2.2.3 센서 .....	7
2.3 시스템 파라미터 .....	10
제 3 장 퍼지 게인 스케줄링에 의한 제어기 설계 .....	12
3.1 PID 제어 .....	12
3.1.1 제어동작 특성 .....	12
3.1.2 PID 제어기 파라미터 동조 .....	17
3.2 퍼지제어 .....	21
3.2.1 퍼지제어의 특징 .....	21
3.2.2 퍼지제어기 .....	22
3.3 PID 제어기의 설계 .....	35
3.4 퍼지 게인 스케줄링 .....	38

제 4 장 시뮬레이션 및 고찰 .....	41
4.1 PID 제어기의 계단응답 .....	41
4.1.1 동작구간의 변화에 따른 계단응답 .....	41
4.1.2 계단입력의 크기에 대한 응답 .....	47
4.2 퍼지 케인 스케줄링에 의한 시뮬레이션 .....	50
제 5 장 실험 및 비교 .....	53
5.1 실험장치 및 실험방법 .....	53
5.1.1 실험장치의 구성 .....	53
5.1.2 실험방법 .....	54
5.2 실험결과 .....	55
5.2.1 동일한 크기의 계단입력에 대한 응답 .....	55
5.2.2 계단입력의 크기 변화시 응답실험 .....	58
제 6 장 결론 .....	61
참고문헌 .....	62

# **Design of a Robust Water Level Controller for Coupled Tank System Using Fuzzy Gain Scheduling Method**

*Young-Su Kim*

*Department of Marine Engineering, Graduate School of Maritime  
Industrial Studies, Korea Maritime University*

## **Abstract**

Even though lots of the modern control theories are developed, the PID control is the most widely used in real industrial field which is familiar to control engineer. It offers satisfactory control performance in most case of industrial applications.

However, traditional PID control has fixed gain for particular operating conditions, thus the conventional unique PID strategy would be unsatisfactory when the system parameters have changed due to the change of operating condition, aging, etc. of the controlled plants. The Fuzzy Gain Scheduling strategy, which changes the controller parameters for operating condition variation, could be a solution of these problems.

Water level control systems are applied to the many industrial plants like chemical reaction process, but it is known very difficult to control precisely the tank level without any overflow and shortage; Because of its complicate dynamic characteristics, it's impossible to realize the accurate control using the mathematical model which can be applied to the various operation modes.

In this paper, the author designed the PID controller for the various operating conditions like different water level points and different

magnitude of step change, and verified the performance of these controllers by experiments as well as simulations. It is noticed that the PID controller with fixed gains does not meet the requirements of control performance with large overshoot or late convergence, with varying the magnitude of step change. To improve this problem, three kinds of PID gain were scheduled under Fuzzy Gain Scheduling strategy and simulated and experimented under those operating conditions.

The Fuzzy gain scheduled PID controller made satisfactory performance which fixed gain PID controller couldn't make to the various magnitude of step change command.

## Nomenclature

$A, A'$	퍼지 집합
$A_1, A_2, \dots, A_n$	퍼지 집합
$A'_1, A'_2, \dots, A'_n$	퍼지 집합
$A_{j,i}$	퍼지 집합
$A_1, A_2$	수조 1 및 수조 2의 단면적
$C, C'$	퍼지 집합
$C_1, C_2, \dots, C_i, C_r$	퍼지 집합
$C'_1, C'_2, \dots, C'_i, C'_r$	퍼지 집합
$e$	목표치와 현재 출력과의 오차
$H_1, H_2$	수조 1 및 수조 2의 수위
$K_{\text{pump}}$	펌프의 이득
$K_p, K_i, K_d$	PID 제어기의 비례, 적분, 미분 이득
$L$	Ziegler-Nichols 동조 1방법의 시간지연
$K_{\text{cr}}$	Ziegler-Nichols 동조 2방법의 임계이득
$P_B$	비례제어기의 비례대
$P_{\text{cr}}$	Ziegler-Nichols 동조 2방법의 임계주기
$Q_i$	펌프로부터의 입력유량
$Q_1, Q_2$	밸브 1 및 밸브 2의 통과유량
$R$	퍼지 관계
$R^i$	$i$ 번째 퍼지 규칙
$R_1, R_2$	밸브 1 및 밸브 2의 흐름 저항
$r$	퍼지 규칙의 개수
$T$	Ziegler-Nichols 동조 1방법의 시정수
$T_{\text{pump}}$	펌프의 시정수

$u, u_0$	제어기의 출력 및 출력의 초기값
$w_i$	$i$ 번째 퍼지 규칙의 점호강도
$X, X'$	전체 집합
$x, x'$	언어적 변수, 퍼지 변수
$x_3$	모터속도 [ rad/s]
$y_s$	계단 입력의 크기
$Z$	전체 집합
$z$	언어적 변수, 퍼지 변수
$z_i$	지지값
$\rho^i$	$i$ 번째 규칙의 기여도

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

동적시스템을 제어하기 위해 많은 제어기법들이 연구되었으며 고전제어이론에서 현대제어이론까지 많은 발전이 이루어졌지만 실제 산업현장에서는 대부분 PID(Proportional-Integral-Derivative) 계열의 제어기가 사용되고 있다. PID 제어기는 비록 고전적인 제어기이긴 하지만 그 역사가 오래된 만큼 실용적인 면에서 많은 연구가 축적되어 현대제어 이론이 발전된 오늘날에도 산업현장에서 가장 많이 사용되고 있다.

PID 제어기에서는 목표치와 현재출력의 오차에 대하여 비례, 적분, 미분의 세 가지 연산을 통하여 제어기의 출력을 결정하기 때문에 이 세 연산에 필요한 파라미터를 결정하는 동조(Tuning)는 제어기의 성능에 결정적인 영향을 미친다. 그러나 플랜트의 노화나 운전조건의 변화 등으로 인해 플랜트 자체의 파라미터가 변화하면 운전조건에 적합하도록 제어기를 다시 자동 동조하거나, 제어기 파라미터를 인위적으로 변경해 주어야 하는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 플랜트의 동특성의 변화에 대해 제어기의 파라미터가 스스로 적절한 값으로 변경하도록 하는 적응제어(Adaptive control)에 대해서도 많은 연구가 이루어지고 있다.

그러나 적응제어 이론들은 대체적으로 수학적 표현방법이 매우 어려우며 비선형 시스템에 대한 적용이 어렵다. 시스템의 여러 가지 특정한 동작 조건에서 동조된 PID 제어기의 파라미터를 퍼지 알고리즘으로 결합하여 운전조건이 변화할 때에도 PID 제어기의 파라미터가 스스로 변화하도록 하는 퍼지 스케줄링은 수학적인 큰 어려움이 없이도 구현할 수 있기 때문에 적응제어의 한 방법으로 많이 연구되고 있다.

## 1.2 연구동향

퍼지 이론은 1965년 Lofti Zadeh에 의해 제창된 이후로 오늘날 적응제어에서부터 전문가시스템이나 인공지능에 이르기까지 광범위한 분야에 성공적으로 응용되고 있으며 기존의 PID 제어뿐만 아니라 유전알고리즘(Genetic

algorithm)이나 신경회로망(Neural network) 등과 같은 최신의 제어이론과도 성공적으로 결합되어 연구되고 있다[1] ~ [3].

PID 제어기는 전통적으로 유압식, 공압식, 전기식 등을 이용하는 아날로그 형태로 많이 사용되어 왔으나, 향후 마이크로프로세서를 이용한 디지털 형태로 크게 발전될 것으로 예상된다.

본 논문에서 사용된 제어대상인 이중수조형 수위제어시스템은 제어공학 분야에서 동적시스템의 수학적 모델링과 제어이론의 실험에 자주 사용되는 플랜트이다. 따라서 시스템의 특성과 수학적 모델링 기법이 잘 정립되어 있고 실험장치를 통해 각종 제어기법을 구현하여 그 특성을 확인하기 용이하다. 따라서 본 논문에서 사용된 퍼지 계인 스케줄링을 비롯하여 지능제어나 슬라이딩모드제어기(SMC) 등의 여러 최신 기법들을 적용한 연구가 다양하게 수행되고 있다 [1],[4],[5].

### 1.3 연구내용과 구성

본 논문에서는 퍼지기법을 이용하여 PID 제어기의 파라미터를 스케줄링하도록 설계하여 이중수조형의 수위제어시스템에 적용하였다. 플랜트에 대해 수학적 모델링을 하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 PID 제어기의 파라미터를 동조하였다. 수위를 변경하는 다양한 종류의 계단입력에 대한 응답을 시뮬레이션 하였으며, 실험을 통해 시뮬레이션 결과를 확인하고 분석하였다.

우선 동적 모델링을 위하여 전기회로에 적용되는 전압, 전류, 저항의 개념을 수위제어에 응용하여 전압에 해당하는 수위, 전류에 해당하는 유량, 저항에 해당하는 밸브저항으로 적용시켜 모델링하였다. 플랜트의 주요 비선형 요소인 밸브저항은 실험을 통해 수위와 유량과의 평형상태를 측정함으로써 구하였으며 이 실 측정치를 컴퓨터 시뮬레이션에 적용하였다.

이중수조에서 제어대상인 수조 2의 수위에서 사용가능한 가장 낮은 수위에서부터 가장 높은 수위까지를 적절한 구간으로 나누어 일정한 크기의 계단입력에 대해 PID 제어기를 동조하였으며 각 구간에서 설계된 제어기를 이용하여 설계 구간 이외의 구간을 포함한 전체 수위구간에 적용하여 응답특성을 확인하였다. 그리고 계단입력의 크기, 즉 수위변화량의 크기를 다양하게 변화시켜가면서 PID 제어기의 파라미터를 동조하고 응답특성을 확인하였다.

시뮬레이션 결과는 실험결과와 비교하여 특정한 운전조건에서 동조된 PID 제어기를 다양한 운전조건에 적용하여 운전조건에 따라 PID 제어기의 파라미터를 게인 스케줄링 할 필요가 있는 것으로 판단된 경우에 대하여 퍼지 게인스케줄링 기법을 적용하였다.

본 논문은 서론인 1장과 결론부분인 6장을 포함하여 총 6장으로 구성되어 있다. 2장에서는 이중수조형 수위제어시스템을 수학적으로 모델링하였으며, 3장에서는 본 논문에서 사용된 제어기법인 PID 제어와 퍼지제어 이론에 대하여 소개하고 각 기법에 해당하는 제어기를 설계하였다. 4장에서는 3장에서 설계된 PID 제어기와 퍼지게인스케줄링을 통한 PID제어기를 시뮬레이션을 통해 비교하였으며, 시뮬레이션은 MATLAB과 시뮬링크를 이용하였다.

5장에서는 시뮬레이션 결과를 실험을 통하여 비교 분석하였으며 실험은 영국 TQ사의 CE105MV 이중수조형 수위제어시스템을 이용하였다.

## 제2장 이중수조 시스템의 모델링

### 2.1 이중수조 시스템

이중수조의 수위제어시 제어의 목적은 수조의 목표수위를 일정하게 유지하거나 원하는 수위로 신속하게 변화시키는 것이다. 그러나 수조 내부의 액체의 점도변화나 외란 등의 이유로 오버플로우나 수조의 고갈 등의 위험이 따를 수 있다. Fig. 2.1은 본 논문의 제어대상인 이중수조 시스템을 나타내고 있다. 이와 같은 이중으로 된 수조의 경우 두 수조 간의 수위의 차이에 의해 밸브 1의 초당 통과유량  $Q_1$ 이 결정되고, 또한 수조 2의 수위에 의해 초당 출력유량  $Q_2$  또한 변화하게 되므로 단일수조형 모델을 단순히 곱하는 것으로서는 시스템의 수학적 모델을 구할 수 없다[6].

입력유량  $Q_i$  및 밸브 1, 2의 유량  $Q_1$ ,  $Q_2$ 와 수조 1, 2의 수위  $H_1$ ,  $H_2$ 로서 평형상태를 이루고 있는 이와 같은 시스템은 입력  $Q_i$ 와 출력  $H_2$ 와의 관계에 대하여 단일입력 단일출력(SISO) 시스템으로 모델링할 수 있다.

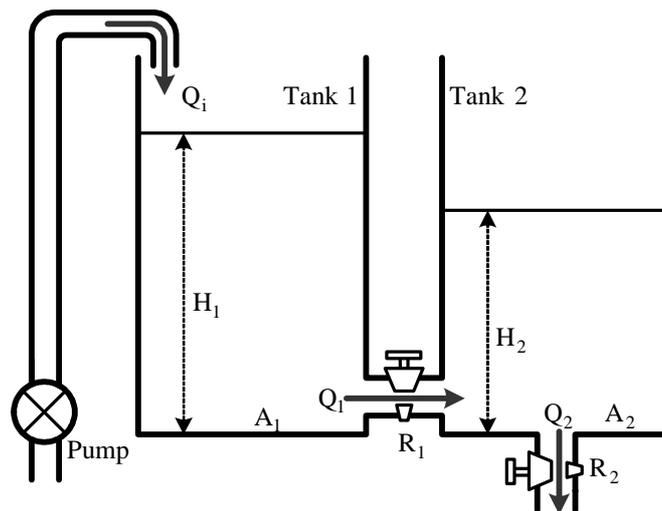


Fig. 2.1 Coupled tank water level system

Fig. 2.1의 시스템을 블록 다이어그램으로 나타내면 다음과 같다.

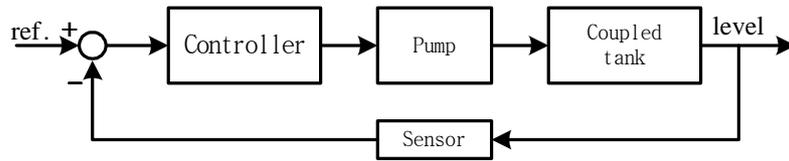


Fig. 2.2 Block diagram of water level control system

## 2.2 모델링

### 2.2.1 펌프

직류 전원으로 구동되는 펌프는 시정수와 이득으로 구성된 다음과 같은 1차 시스템으로 모델링 될 수 있다.

$$\frac{Q(s)}{U(s)} = \frac{K_{\text{pump}}}{T_{\text{pump}}s + 1} \quad (2.1)$$

응답이 매우 느린 이중수조 시스템에서 펌프의 시정수  $T_{\text{pump}}$ 는 무시할 수 있을 만큼 작으므로 펌프는 입력전압  $U$ 에 대한 비로써 단순화할 수 있다.

$$Q(s) = K_{\text{pump}} U(s) \quad (2.2)$$

### 2.2.2 이중수조

유입량과 유출량에 의해 물의 수두가 평형을 이루고 있는 수조에서 전기공학 분야의 전압과 전류, 저항의 관계를 응용하여 밸브 오리피스에서의 유체저항  $R$ 을

$$R = \frac{\text{Water Level (cm)}}{\text{Flow Rate (cm}^3/\text{s)}}$$

과 같이 정의하면, 시스템의 평형상태를 측정하여 유량과 수두에 관계되는 저항 R의 값을 쉽게 구할 수 있다. 그리고 위의 R의 정의와 다음의 식

$$Q_1 R_1 = H_1 - H_2 \quad (2.3)$$

$$Q_2 R_2 = H_2 \quad (2.4)$$

$$A_1 dH_1 = (Q_i - Q_1) dt \quad (2.5)$$

$$A_2 dH_2 = (Q_1 - Q_2) dt \quad (2.6)$$

으로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다[7].

단,	$Q_i$	외부 유입유량
	$Q_1, Q_2$	밸브1 및 밸브2에서의 유량
	$R_1, R_2$	밸브1 및 밸브2의 유체저항
	$H_1, H_2$	수조 1, 2의 수위

이다.

$$(2.3) \text{ 및 } (2.5) \text{에서} \quad \dot{H}_1 = -\frac{1}{A_1 R_1} (H_1 - H_2) + \frac{1}{A_1} Q_i \quad (2.7)$$

$$(2.4) \text{ 및 } (2.6) \text{에서} \quad \dot{H}_2 = \frac{1}{A_2 R_1} (H_1 - H_2) - \frac{1}{A_2 R_2} H_2 \quad (2.8)$$

위의 (2.7)와 (2.8)을 상태공간 표현으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{H}} = \mathbf{A} \mathbf{H} + \mathbf{B} Q_i \quad (2.9)$$

$$y = \mathbf{C} \mathbf{H} \quad (2.10)$$

여기서,

$$\mathbf{H} = [H_1 \ H_2]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{A_1 R_1} & \frac{1}{A_1 R_1} \\ \frac{1}{A_2 R_1} & -\left(\frac{1}{A_2 R_1} + \frac{1}{A_2 R_2}\right) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [0 \ 1]$$

이다.

한편, 위의 상태공간 표현을 전달함수 형태로 표현하기 위하여 다음의 관계식

$$G(s) = \mathbf{C} (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \quad (2.11)$$

을 이용하면

$$\frac{H_2(s)}{Q_i(s)} = \frac{R_2}{A_1 A_2 R_1 R_2 s^2 + (A_1 R_1 + A_2 R_2 + A_1 R_2) s + 1} \quad (2.12)$$

을 얻을 수 있다.

### 2.2.3 센서

수위의 변화에 따른 압력의 변화를 감지하는 수위센서는 수조의 전체 높이에 대하여 0~10V의 선형적인 응답을 보이는 것으로 간주한다.

지금까지의 결과에 따라  $Q_i$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$  등의 신호를 적절히 연결하여 전달함수로 표현하면 이중수조 시스템의 등가 블록 다이어그램은 Fig. 2.3과 같으며, 제어기를 포함한 전체 블록 다이어그램은 Fig. 2.4와 같다.

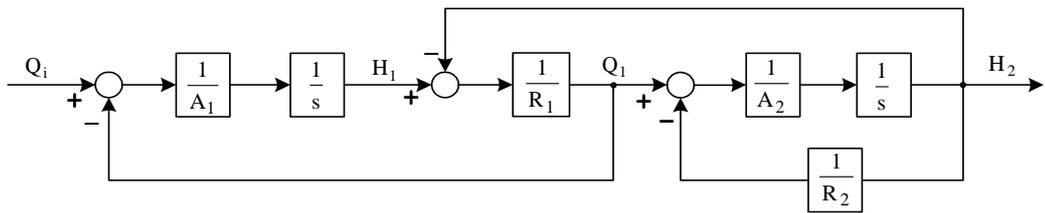


Fig. 2.3 Block diagram of coupled tank system

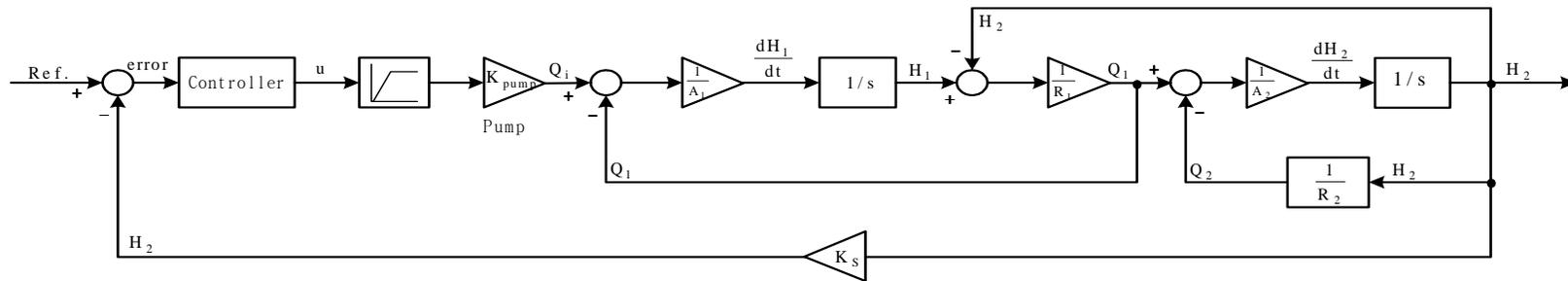


Fig. 2.4 Block diagram of coupled tank water level control system

### 2.3 시스템 파라미터

본 논문에 이용된 이중수조 시스템의 파라미터는 Table 2.1과 같다. 수조1과 수조2의 단면적과 전체 높이는 같고, 2개의 밸브는 모두 같은 크기의 오리피스 를 사용하였으나 논문의 목적상 밸브 1은 완전개방, 밸브 2는 약 60%를 개방한 상태로 고정하였다.

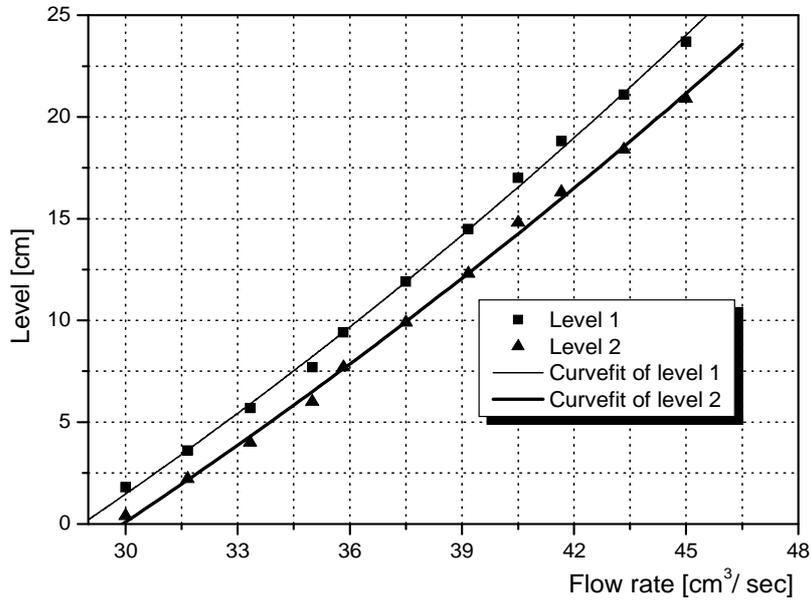
Table 2.1. Specifications of coupled tank system

Parameters	Specifications	Values
Tank 1	Cross Sectional Area	9,350 [cm <sup>2</sup> ]
Tank 2	Cross Sectional Area	9,350 [cm <sup>2</sup> ]
Valve 1, 2	Orifice Area	78.5 [cm <sup>2</sup> ]
Liquid Level	Sensors Output	0 ~ 10 [V]
	Level Scales	0 ~ 25 [cm]
Pump Flow Sensors	Sensors Output	0 ~ 10 [V]
	Flow Rates	Max. 73.33 [cm <sup>3</sup> /sec]

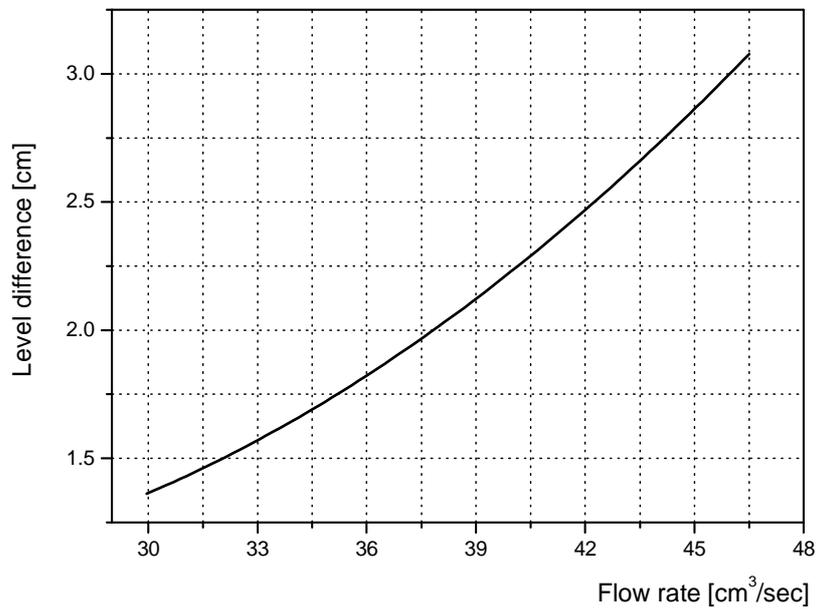
그리고 시스템의 주요 비선형 요소라고 할 수 있는 밸브 오리피스에서의 유체저항  $R_1$ ,  $R_2$ 는 이중수조 시스템의 각 유량과 수위에 대한 정상상태 실험을 통하여 Table 2.2 및 Fig. 2.5와 같은 결과를 얻었다. 유량센서 및 2개의 수위센서 출력은 모두 0~10V의 선형적인 관계로 가정하였다.

Table 2.2 Resistances of valves

$H_1-H_2$	$R_1$	$H_2$	$R_2$
1.373	0.046	0.270	0.009
1.493	0.047	2.530	0.079
1.631	0.048	4.872	0.144
1.785	0.050	7.297	0.205
1.958	0.052	9.805	0.262
2.147	0.055	12.394	0.316
2.354	0.057	15.067	0.367
2.578	0.060	17.821	0.416
2.819	0.063	20.659	0.462
3.077	0.066	23.578	0.507



a) Level of two tanks vs. input flow rate



b) Level difference between two tanks

Fig. 2.5 Resistance of valves from steady state experiment

## 제3장 퍼지계인 스케줄링에 의한 제어기 설계

### 3.1 PID 제어

동적 시스템을 제어하기 위해 가장 널리 이용되고 있는 PID제어는 목표값과 현재 출력과의 오차에 대해 비례(Proportional), 적분(Integral) 및 미분(Derivative)을 통하여 적절한 제어입력  $u$ 를 구하는 방법이다.

$$u_{pid} = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} + u_0 \quad (3.1)$$

단,  $e$ 는 오차신호,  $u_0$ 는 초기상태의 제어입력,  $K_p$ 는 비례이득,  $K_i$ 는 적분이득,  $K_d$ 는 미분이득이다.

따라서 위와 같은 PID 제어기의 출력은 이 세 동작에 곱해지는 이득의 크기에 따라 특성이 크게 달라지며, 각 제어동작의 특성은 다음과 같다[9].

#### 3.1.1 제어동작 특성

##### ① 비례동작(P)

비례동작은 (3.2)와 같이 목표값과 현재 출력과의 오차에 적절한 비례이득  $K_p$ 를 곱하여 제어기 출력을 만들어낸다. Fig. 3.1과 같이 제어기 출력의 전체 범위와 그에 해당하는 오차의 크기와의 비를 비례대(PB, Proportional Band)라고 하며 PB의 크기에 따라 제어기의 민감도가 결정된다.

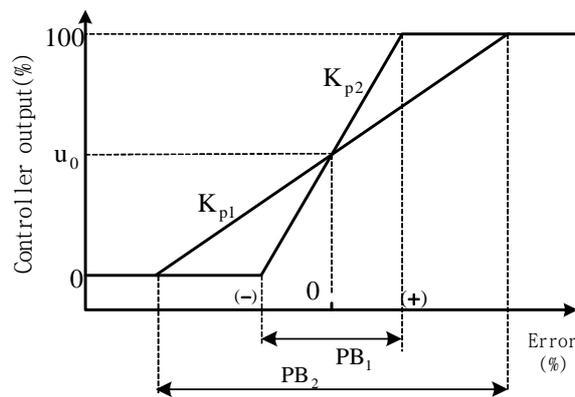


Fig. 3.1 The Proportional band of proportional controller

$$u_p = K_p e + u_0 \quad (3.2)$$

$$PB = \frac{100}{K_p} \quad (3.3)$$

비례제어 동작은 “0”형 시스템에서 정상상태에서 오프셋이라 하는 영구적인 잔류 오차가 발생한다. 오프셋은 비례이득  $K_p$ 를 크게, 즉 PB를 작게 하여 오차에 민감한 제어기로 설계하면 작아지지만, 시스템 파라미터의 변화나 데드밴드의 존재 등으로 인해 완전한 0으로 만들기는 비례동작 만으로는 불가능하며 대부분의 경우 적분동작이 함께 사용된다.

## ② 적분동작(I)

앞에서 설명한 것처럼 비례제어기는 “0”형 시스템에서 오프셋을 발생시킨다. 이를 제거하기 위한 방법으로 오차를 적분하여 적절한 이득을 곱한 제어기 출력을 선정함으로써 충분한 시간이 경과한 후에는 목표값에 대한 출력의 오차를 0으로 만들 수 있다.

$$u_i = K_i \int_0^t e \, dt + u_0 \quad (3.4)$$

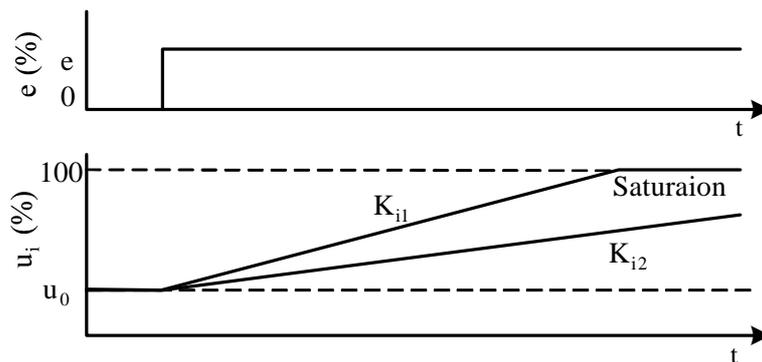


Fig. 3.2 Integral control action

오차에 대한 적분제어기의 동작은 Fig. 3.2에 나타내고 있으며, 제어기 출력의 변화율은 오차의 적분값과 이득  $K_i$ 의 크기에 따라 변화한다. 오차의 합이 0이면 적분제어기는 그 당시의 출력상태로 고정되며, 오차가 0이 아니면 출력은 1%의 오차에 대하여  $K_i$ (%/sec)의 비율로 출력이 증가 또는 감소한다. 적분제어기는 시스템의 파라미터가 변화하는 시스템에서도 정상상태 오차를 없앨 수 있으나 제어동작의 특성상 오버슈트를 크게 하고 출력이 정상상태로 수렴하기 전까지 진동을 유발시키는 단점이 있다.

### ③ 미분동작(D)

미분제어 동작은 오차의 미분 즉, 현재의 오차의 변화율에 대해 반응하며 예측제어(rate action 또는 anticipatory control)라고도 한다. (3.5)와 같이 표현되는 미분제어기의 출력은 오차가 일정할 때의 제어기 출력은 0이 되므로 단독으로는 사용될 수 없으며 비례제어기나 적분제어기와 함께 사용되어야 한다.

$$u_d = K_d \frac{de}{dt} \quad (3.5)$$

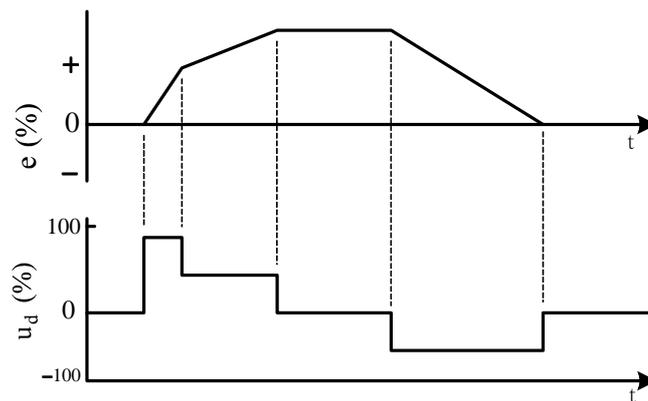


Fig. 3.3 Derivative control action

미분제어기는 Fig. 3.3과 같이 오차의 변화율에 따라 제어기의 출력이 급격히 변화할 수 있기 때문에 동적 응답특성이 빠른 시스템에서는 주의 깊게 사용해야 한다.

#### ④ PI 제어(Proportional-Integral control)

비례동작과 적분동작을 혼합한 형태인 PI제어기는 파라미터가 변화하는 시스템에서도 정상상태 오차를 없앨 수 있으며 제어기의 출력은 다음과 같다.

$$u_{pi} = K_p e + K_i \int_0^t e dt + u_0 \quad (3.6)$$

Fig. 3.4는 오차에 대한 PI제어기의 출력을 나타내고 있는데, 오차가 0이면 제어기 출력은 현 시점까지의 적분제어 동작의 향으로 고정되고, 오차가 0이 아니면, 비례항은 오차를 수정하고, 적분항은 오차의 누적값을 수정하게 된다. 그러나 제어동작의 특성상 오버슈트를 크게 하고 출력이 정상상태로 수렴하기 전까지 진동을 유발시키는 단점이 있다.

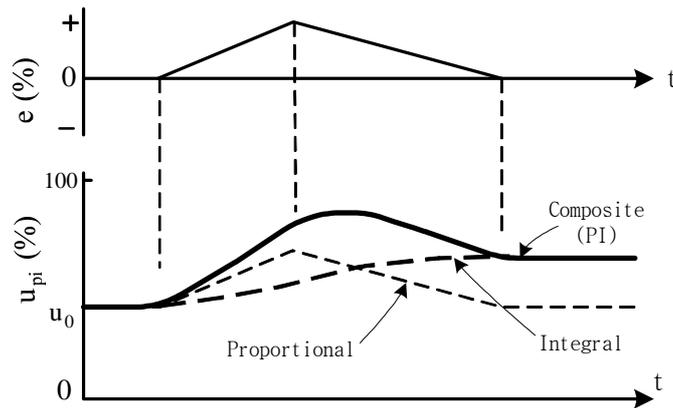


Fig. 3.4 Proportional-Integral control action

### ⑤ PD 제어(Proportional-Derivative control)

(3.7)과 같은 출력을 갖는 PD제어기는 비례제어 동작에서 발생하는 오프셋을 제거하지 못하지만, 오차의 변화에 의해 신속하게 반응하므로 오프셋이 허용 범위 내에서 발생하는 시스템의 제어에 효과적으로 사용될 수 있다.

$$u_{pd} = K_p e + K_d \frac{de}{dt} + u_0 \quad (3.7)$$

Fig. 3.5는 오차의 변화와 오프셋을 갖는 시스템의 PD 제어기 응답을 나타내고 있으며 오차의 변화율, 즉 기울기에 따라 제어기의 출력이 급격히 변화하는 것을 볼 수 있다.

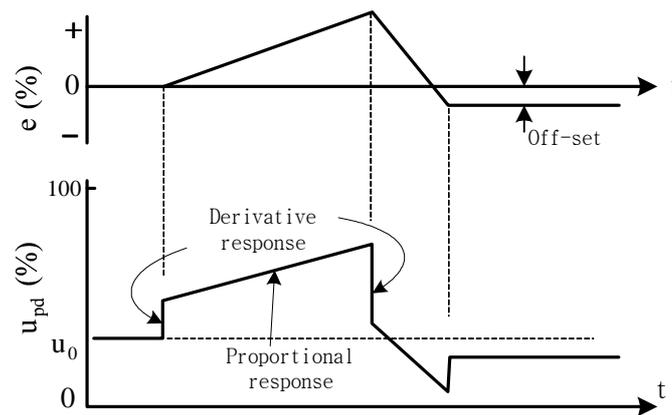


Fig. 3.5 Proportional-Derivative control action

### ⑥ PID 제어(Proportional-Integral-Derivative control)

(3.8)의 PID 제어기는 비례, 적분, 미분 동작이 혼합된 형태로서 비례제어 동작에서 발생하는 오프셋을 효과적으로 없애면서 빠른 응답을 얻을 수 있으므로 대부분의 제어문제에 성공적으로 적용될 수 있다. Fig. 3.6에서는 세 가지 동작이 결합된 제어기의 오차에 대한 제어기 출력을 나타내고 있다.

$$u_{pid} = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} + u_0 \quad (3.8)$$

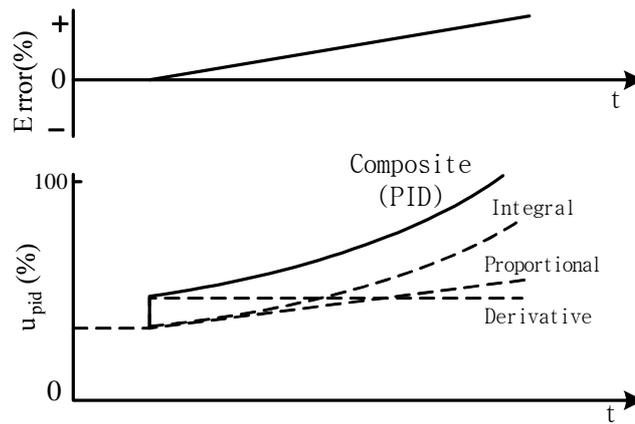


Fig. 3.6 Proportional-Integral-Derivative control action

### 3.1.2 PID 제어기 파라미터 동조

제어 시스템은 Fig. 3.7과 같이 제어기와 제어대상을 포함하는 폐루프 블록다이어그램으로 나타낼 수 있으며, 많은 제어기 중 산업현장에서 실제로 가장 널리 이용되고 있는 PID제어기는 앞에서 설명한 비례이득  $K_p$ , 적분이득  $K_i$ , 미분이득  $K_d$ 의 값에 따라 제어특성이 크게 달라진다.

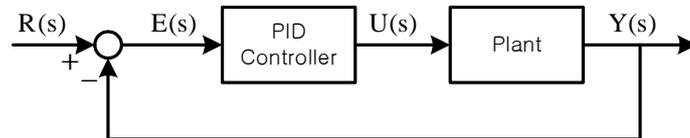


Fig. 3.7 Block diagram of PID control system

따라서 제어장치의 성능을 보장하기 위해서는 이 세 개의 파라미터를 적절히 조정하여야 하며, 이러한 작업을 동조(Tuning)라 한다. 현재까지 PID 제어기의 파라미터를 동조하기 위한 많은 방법이 제안되었으며, Ziegler-Niechols 방법, Cohen-Coon방법, IMC법 등이 있으며, 그 중 대표적인 방법이라고 할 수 있는 Ziegler-Nichols의 방법은 다음과 같다.

① 과도응답법 (Ziegler-Nichols 제1방법)

1942년 Ziegler-Niechols에 의해서 제안된 이 방법은 단위계단 입력에 대한 플랜트의 응답에 근거한 방법으로, 피드백 회로가 없는 개루프 시스템의 단위계단 입력에 대한 시스템의 응답곡선이 Fig. 3.8과 같이 S-형이 될 경우에 한하여 사용할 수 있다. Table 3.1에는 Fig. 3.8에서 나타난 응답곡선의 특성에 대한 PID 제어기의 동조규칙을 나타낸다.

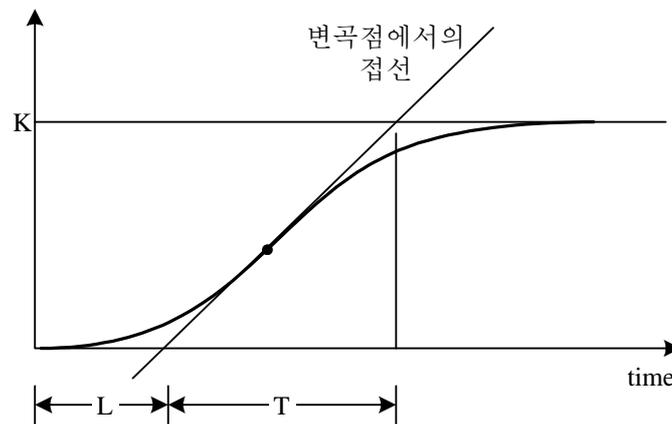


Fig. 3.8 Reaction curve for unit step input

Table 3.1 First method of Ziegler-Nichols tuning rule

Type of Controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$T/KL$	$\infty$	0
PI	$0.9T/KL$	$0.3/L$	0
PID	$1.2T/KL$	$2L$	$0.5L$

② 한계감도법 (Ziegler-Nichols 제2방법)

비례이득  $K_p$ 가 증가함에 따라 출력이 진동을 일으키는 시스템에 적용할 수 있는 방법으로, (3.8)에서 적분이득과 미분이득을 모두 0으로 하여 비례제어만으로 폐루프 시스템을 구성하여 비례이득을 점점 증가시켜 가면서 폐루프시스템의 응답을 구한다. 비례이득이 증가해가면서 특정의 이득 지점에서 시스템의 응답이 Fig. 3.9와 같이 지속적인 진동을 일으키게 될 때, 이 때의 임계이득  $K_{cr}$ 과 임계주기  $P_{cr}$ 을 통하여 PID 제어기의 파라미터를 계산하게 된다. Table 3.2는 제2방법에 의한 동조규칙을 나타낸다.

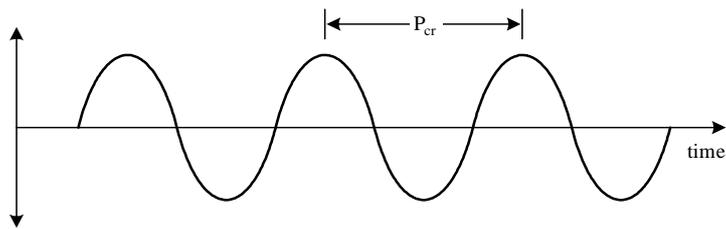


Fig.3.9 Reaction curve and ultimate period

Table 3.2 Second method of Ziegler-Nichols tuning rule

Type of Controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0.45K_{cr}$	$0.833 P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

플랜트에 Ziegler-Nichols 동조규칙을 적용할 경우 계단응답에서 약 10%-60%의 최대 오버슈트를 보이며, 많은 플랜트에 적용한 연구결과들을 종합하면 최대오버슈트는 약 25% 정도이다. 따라서, Ziegler-Nichols 동조규칙이 그 자체로 완전한 동조를 보장하는 것은 아니며, PID 파라미터에 대한 적절한 추측과 정교한 동조의 시작점을 제공한다고 보아야 할 것이다.

## 3.2 퍼지제어

### 3.2.1 퍼지제어의 특징

퍼지이론은 인간의 언어 및 사고와 관련된 애매함(Fuzziness)을 수리적으로 취급이 가능하며, 시스템의 특성이 복잡하여 정량적인 방법으로 해석하기 어렵거나 정보가 정성적이고 부정확한 경우에 유리하고, 전통적인 논리시스템보다 실제 현상의 근사적(Approximate)이고 부정확한 성질(Inexact nature)을 표현하는데 효과적이다.

실제의 시스템을 정확하게 모델링하는 것이 중요하지만 제어시스템을 실제 시스템과 동일하게 모델링하는 것은 어렵다. 정확한 모델 구축에서 요구되는 계산의 복잡도가 너무 크기 때문에 모델의 정확도와 계산의 복잡도 사이에 절충이 필요하게 되며, 정확도에 있어 근사 방법을 택하면서 계산의 복잡도를 낮추는 절충 방안이 퍼지시스템이다.

퍼지이론의 장점은 다음과 같다.

- 퍼지이론의 배경이 되는 수학적 개념이 간단하다.
- 시스템에 대한 부가적인 기능을 추가하거나 문제해결이 비교적 쉬워 유연성이 있다.
- 부정확한 자료에 대해 허용적이며 강인하다.
- 임의의 복잡성을 가지는 비선형 함수를 모델링하기 쉽다.
- 전문가의 경험이나 애매한 현장 경험을 응용할 수 있다.
- 전통적인 제어기법과 혼합하여 사용할 수 있다.
- 자연언어에 기초하여 인간 친화적이다.

그러나 퍼지 제어기는 비선형 제어시스템에 대한 안정도 해석이 어렵고, 퍼지 논리 제어기의 구조와 퍼지규칙을 최적으로 설계하는 것이 어렵다. 또한 성능지수를 최대화하기 위한 효과적인 소속함수 조절방법이 정형화되어 있지 않은 단점이 있다.

퍼지제어의 특징은 병렬형 제어, 무한치 논리형 제어, 언어적 제어로 대표될 수 있다. 일반적인 제어기는  $u = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  과 같은 제어식에 의해 플랜트로부터 정보  $x_1, x_2, \dots, x_n$  을 이용하여 조작량  $u$  를 결정하는 반면에, 퍼지제어기

는 복수개의 “If-then” 형식으로  $u$ 를 결정한다.

따라서 조건이 느슨하고 유연한 논리를 사용하며 이는 전문가의 사고를 모델화하기 위한 방법으로 적합한 것이다. 퍼지제어는 언어적인 변수를 도입하여 그대로 사용하기 때문에 전문가의 지식도입이 쉽고 대화형 제어가 가능하며, 제어기 내부 규칙의 동작정도를 알 수 있기 때문에 퍼지 제어기 자체가 블랙박스가 아니어서 제어기 구조를 이해하기 쉽고 제어규칙의 변경과 학습이 가능해진다.

퍼지제어는 정확한 모델에 근거하여 설계된 어떤 제어기들 보다 자유도가 많고 적절히 잘 설계하면 외란에 대해 강인한 특성을 갖는다. 현재까지 퍼지제어는 입출력 관계의 정량적인 분석이 어려운 공정제어 등 자동제어, 데이터 분류, 의사결정 분석, 전문가 시스템 및 컴퓨터 등의 여러 분야에서 기존 제어기의 부적합한 점을 보완 대체하여 성공적으로 도입되고 있다.

### 3.2.2 퍼지 제어기

퍼지 제어기의 일반적인 구조는 Fig. 3.10과 같이 퍼지화부(Fuzzification interface), 지식베이스부(Knowledge base), 퍼지추론부(Fuzzy inference engine) 및 비퍼지화부(Defuzzification interface)로 이루어져 있다.

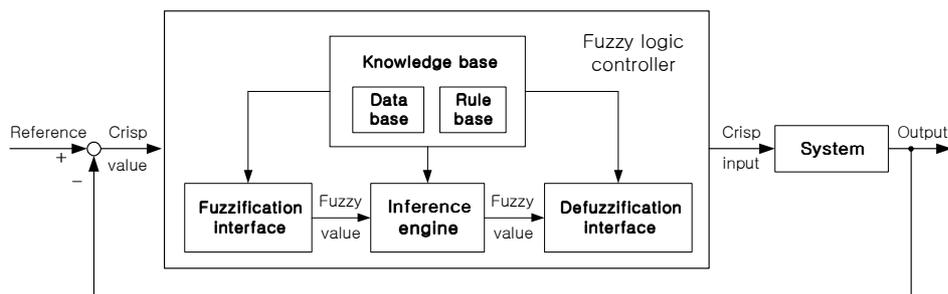


Fig. 3.10 Basic structure of fuzzy logic controller

### (1) 퍼지화부

퍼지화부는 명확한(Crisp) 입력 데이터를 받아들여 적당한 퍼지집합으로 변환하는 부분으로 모든 입력은 그 크기를 조절함으로써 해당 전체집합으로 사상되고, 크기가 조절된 입력은 **PB**(Positive big), **ZE**(Zero), **NB**(Negative big) 등과 같은 퍼지집합의 라벨로 간주된 언어적인 값으로 변환된다. 입력측정에 잡음이 많이 포함되지 않을 때는 보통 퍼지 단일값(Fuzzy singleton)이 취해진다.

### (2) 지식베이스부

지식베이스부는 데이터베이스(Data base)와 규칙베이스(Rule base)로 이루어져 있다. 데이터베이스는 전형적으로 전체집합의 양자화/정규화, 입·출력 공간의 퍼지분할(Fuzzy partition), 규칙에 사용된 소속함수의 선택 등에 대한 데이터를 포함하고 있다. 여기서, 양자화는 연속적인 전체집합을 컴퓨터 구현에 적합한 이산적인 양으로 이산화하는 것이고, 정규화는 전체집합을 밀폐된 구간으로 변환하는 것이며, 퍼지분할은 전체집합에서 정의된 퍼지집합의 수를 결정하는 것이다. 그리고 각 퍼지집합은 언어적인 값을 수치적인 값으로 변환하기 위해서 소속함수에 의해서 특성이 주어진다. 주로 사용되는 소속함수는 삼각형, 사다리꼴, 가우스형, 범종형 및 시그모이드형 등이며, 소속함수와 그 중첩(Overlap) 정도의 선택은 설계자의 선호도 또는 실제적인 상황에 따라 많이 다르고, 종종 시행착오에 의해 결정된다. 연속적인 퍼지집합의 중첩은 대략 25%이고, 너무 많은 중첩은 퍼지집합의 값들 사이의 구별을 흐리게 하고, 너무 적은 중첩은 온-오프(On-off)제어를 닮는 경향이 있다.

규칙베이스부는 퍼지제어 규칙에 대한 입·출력 변수의 선택과 제어 알고리즘을 나타내는 언어적인 퍼지제어 규칙을 포함하고 있다. 일반적으로, 전형적인 퍼지 제어기의 입출력 관계는 규칙문장 “If-then”의 집합에 의해 결정되며, 제어규칙의 퍼지조건문은 두 퍼지집합 A 와 C 간의 관계를 의미하므로 퍼지관계 “R”, 또는 퍼지 조건함수의 기호 “ $\Rightarrow$ ”를 사용하여 “ $A \Rightarrow C$ ”로 간단히 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{If } x \text{ is } A \quad \text{then } z \text{ is } C &\triangleq A \Rightarrow C \\ &\triangleq R \end{aligned} \quad (3.9)$$

여기서,  $x$  와  $z$  는 언어적 변수이고,  $A$  와  $C$  는 각각 소속함수가  $A(x)$  와  $C(z)$  이며, 전체집합  $X$  와  $Z$  내에 있는 퍼지집합에 의해 정의되는 “ Small”, “ Big ” 등과 같은 언어적 값이다. “  $x$  is  $A$  ” 를 전건부(전제), “  $z$  is  $C$  ” 를 후건부(결론)라고 한다.

퍼지 제어규칙 중의 문장 접속사 “and”와 “also”에 대한 연산은 대개의 경우 각각 “t-norm”과 “t-conorm” 연산자를 사용하여 연산할 수 있으며 2입력 1출력 퍼지 시스템에 대하여 다음과 같은 제어규칙이 주어질 경우 전건부를 간단히

$$\text{If } x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } x_2 \text{ is } A_2 \text{ then } z \text{ is } C \quad (3.10)$$

“  $A_1$  and  $A_2$  ”로 표시하고 접속사 “and”의 연산으로 “min” 연산자를 적용하면 다음과 같게 된다.

$$A_1 \text{ and } A_2 = \int_{x_1 \times x_2} \min\{A_1(x_1), A_2(x_2)\} / (x_1, x_2) \quad (3.11)$$

중요한 문제는 이러한 제어규칙을 효율적으로 구하는 방법이며, 그 몇 가지 방법이 제안되어져 있다.

- 전문가의 경험이나 제어공학자의 지식을 이용하는 방법
- 제어대상의 퍼지모델을 이용하는 방법
- 제어규칙을 수정할 수 있도록 학습기능을 부여하는 방법
- 숙련된 조작자의 제어동작을 모방하는 방법

### (3) 퍼지추론부

퍼지추론부는 인간의 추론형태를 모방하는 퍼지 제어기의 핵심 부분으로서, 퍼지조건과 합성규칙의 추론을 사용하여 규칙베이스에 있는 퍼지 제어규칙을 추론하여 퍼지입력에 대한 퍼지출력을 추론하는 기능을 가지고 있다. 언어적인 형태로 기술된 퍼지제어 규칙을 제어에 적용하기 위해서는 논리적인 실행 과정이 필요하므로 근사추론이 사용된다.

합성규칙의 근사추론은 다음과 같이 정의된다.  $R$ 이  $X$ 내에 있는 퍼지집합  $A$ 와  $Z$ 내에 있는 퍼지집합  $C$ 와의 이가 퍼지관계이고,  $A'$ 가  $X$ 내에 있는 퍼지집합이라면 다음과 같은 “sup- $*$ ” 합성규칙 추론이 주어진다.

$$C' = A' \circ R = \{(z, C'(z)) \mid z \in Z\} \tag{3.12}$$

$$C'(z) = \sup_{x \in X} \{A'(x) * R(x, z)\}$$

(3.12)에서 기호 “ $\circ$ ”는 “sup- $*$ ” 합성연산자를 나타내고, 실제 퍼지제어 응용분야에서 보통 사용되는 연산자는 “ $*$ ”를 “min” 또는 “product” 연산자로 사용하는 “sup-min”과 “sup-product” 연산자이다.

Premise(사실)	:	x is A'	
Implication(규칙)	:	If x is A then z is C	
Consequence(결론)	:	z is C'	(3.13)

여기서  $x, z$ 는 퍼지변수이며,  $A$ 와  $A'$ ,  $C$ 와  $C'$ 는 각각 적절한 전체집합  $X$ 와  $X'$ ,  $Z$ 와  $Z'$ 에서의 퍼지집합이고,  $A'$ 는  $A$ 에 가깝고  $C'$ 는  $C$ 에 가깝다. 퍼지추론 과정을 간단히 나타내면 다음 Fig. 3.11과 같다.



Fig. 3.11 Fuzzy inference



두 개의 관측  $A_1'$ 와  $A_2'$ 가 주어지면 결론  $C$ 를 다음과 같이 추론할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 C' &= (A_1' \text{ and } A_2') \circ R \\
 &= (A_1' \text{ and } A_2') \circ \bigcup_{i=1}^r [(A_{1,i} \text{ and } A_{2,i}) \Rightarrow C_i] \\
 &= \bigcup_{i=1}^r \{ [(A_1' \circ (A_{1,i} \Rightarrow C_i))] \text{ and } [(A_2' \circ (A_{2,i} \Rightarrow C_i))] \}
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

이러한 퍼지추론에 이용되는 방법에는 여러 가지가 있지만 자주 사용되는 몇 가지의 추론법에 대해서 설명한다[2],[12].

### ① 추론법 1

$n$ 개의 퍼지 싱글톤 입력  $A_1' = x_{10}, A_2' = x_{20}, \dots, A_n' = x_{n0}$ 가 있을 때, 만약 Mamdani의 “min” 연산과 “sup-min” 합성규칙을 사용하면  $C$ 의 소속함수  $C'(z)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 C'(z) &= \bigcup_{i=1}^n \{ [A_{1,i}(x_{10}) \Rightarrow C_i(z)] \wedge \dots \wedge [A_{n,i}(x_{n0}) \Rightarrow C_i(z)] \} \\
 &= \bigvee_{i=1}^n \{ [A_{1,i}(x_{10}) \wedge \dots \wedge A_{n,i}(x_{n0})] \wedge C_i(z) \} \\
 &= \bigvee_{i=1}^n [w_i \wedge C_i(z)]
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

여기서, 규칙의 점호강도  $w_i = A_{1,i}(x_{10}) \wedge A_{2,i}(x_{20}) \wedge \dots \wedge A_{n,i}(x_{n0})$ 는 출력에 대한  $i$ 번째 규칙의 적합도를 나타낸다. Fig. 3.12에서 두 개의 입력과 두 개의 퍼지제어 규칙이 있을 경우 크리스프 입력  $x_{10}$ 과  $x_{20}$ 이 주어질 때 입력과 전건부 소속함수의 교차점  $w_{11}, w_{21}, w_{12}, w_{22}$ 은 입력의 소속정도를 나타낸다. 각 퍼지제어 규칙의 적합도는 각 소속정도에서 “min” 연산을 행하여 얻어진  $w_1$ 과  $w_2$ 로 후건부 퍼지집합과 “min” 연산하여  $C_1', C_2'$ 을 구하고, 최종적인 퍼지출력  $C$ 는 퍼지관계 연산 “also”를 “max” 연산하여 얻는다.

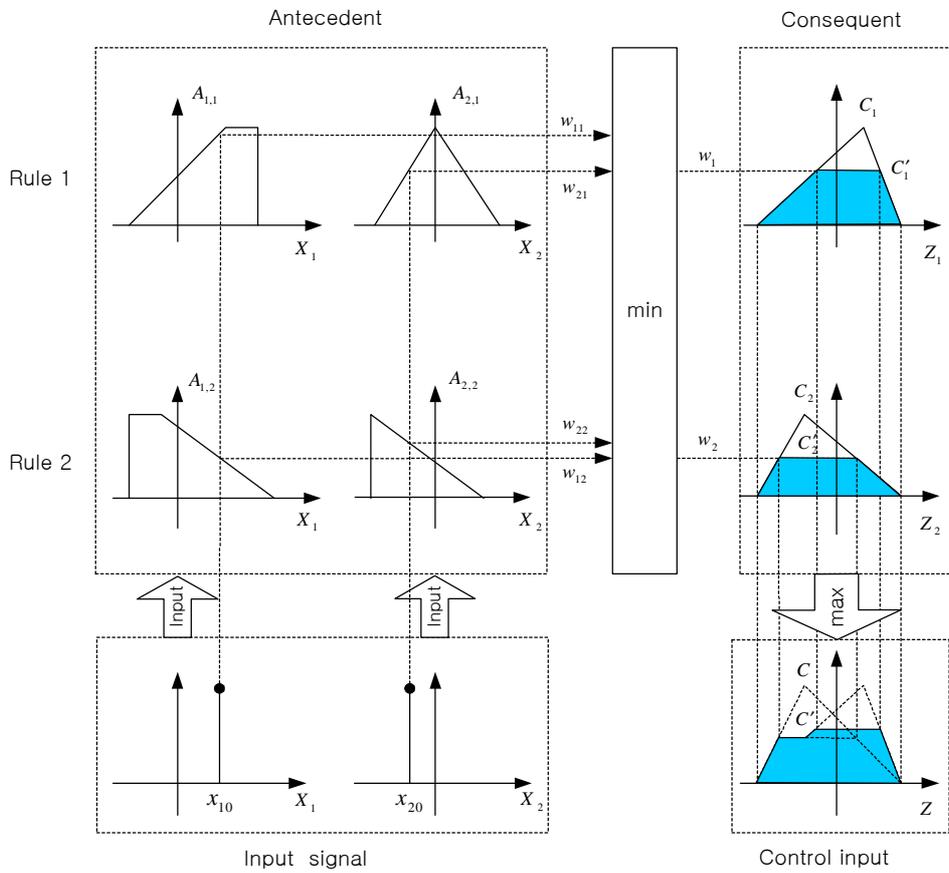


Fig. 3.12 Inference process of fuzzy inference method 1

② 추론법 2

$n$  개의 퍼지 싱글톤 입력  $A'_1 = x_{10}, A'_2 = x_{20}, \dots, A'_n = x_{n0}$  이 있을 때, 만약 Larsen의 “product” 연산과 “sup-product” 합성규칙을 사용하면  $C$  의 소속함수  $C'(z)$ 를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$C'(z) = \bigvee_{i=1}^n [w_i \cdot C_i(z)] \quad (3.18)$$

여기서, 규칙의 점호강도  $w_i = A_{1,i}(x_{10}) \cdot A_{2,i}(x_{20}) \cdot \dots \cdot A_{n,i}(x_{n0})$ 는 출력에 대한  $i$ 번째 규칙의 적합도를 나타낸다. Fig. 3.13은 2개의 크리스프 입력  $x_{10}$ 와  $x_{20}$ 이 주어지고 2개의 퍼지규칙이 있을 경우, 퍼지-AND와 퍼지-OR 연산자에 대해 각각 “대수곱(product)” 연산과 “max” 연산을 사용하는 “max-product” 합성을 적용할 때 전체출력  $z$ 를 결정하는 과정을 나타낸 것이다. 추론법 1과의 차이점은 각 규칙의 적합도를 후건부의 소속함수에 대수곱 연산으로 점호강도에 의해 비율이 감축된 후건부 퍼지집합  $C_1', C_2'$ 를 구한다는 것이다.

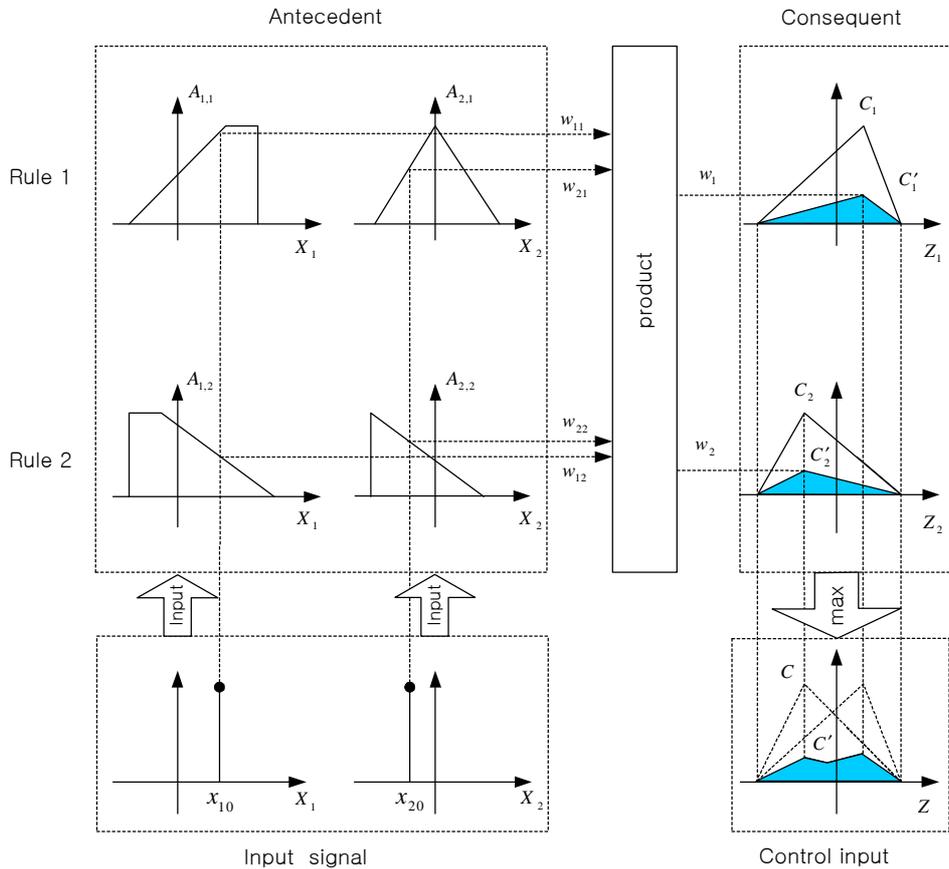


Fig. 3.13 Inference process of fuzzy inference method 2

추론법 1과 2에 있어서 퍼지 추론부의 기능은 다음 3단계로 요약할 수 있다.

- 주어진 크리스프한 입력에 대해  $i$  번째 규칙의 적합도(점호강도)  $w_i$ 를 계산한다.
- 이 적합도  $w_i$ 와 후건부의 소속함수에 의해  $i$  번째 규칙에 의한 후건부의 소속함수를 조절한다.
- 각 규칙에 의해 조절된 후건부의 소속함수를 통합하여 최종 소속함수를 구한다.

그리고 이러한 추론법 1 및 2에 의한 출력은 퍼지집합이므로 여러 가지 비퍼지화 방법 중의 하나로 비퍼지화 되어야 제어입력으로 사용될 수 있다.

### ③ 추론법 3

이 추론법은 Sugeno에 의해 제안된 것으로서 다음 식과 같이 후건부가 1차 다항식이나 상수로 되어있는 형태를 가진다.

$$R^i: \text{If } x_1 \text{ is } A_{1,i} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{2,i} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{n,i} \quad (3.19)$$

$$\text{then } z_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

여기서,  $R^i (i = 1, 2, \dots, r)$ 는  $i$  번째 제어규칙이고  $r$ 은 규칙의 수이다.  $A_{j,i} (j = 1, 2, \dots, n)$ 는 전건부의 퍼지집합인 반면,  $z_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 는 후건부의 명확한 함수이다.

Fig. 3.14는 추론법 3에 의한 2입력 2규칙의 추론과정을 나타낸 것이다. 각 퍼지제어 규칙의 적합도는 각 규칙의 소속정도에서 “product” 연산 또는 “min” 연산을 행하여 구하고, (3.20)과 같이 이를 가중평균하여 명확한 출력을 얻게 된다. 이 추론법은 비퍼지화 과정이 필요 없어 시간이 절약된다.

$$z = \frac{\sum_{i=1}^2 (w_i \cdot z_i)}{\sum_{i=1}^2 w_i} \quad (3.20)$$

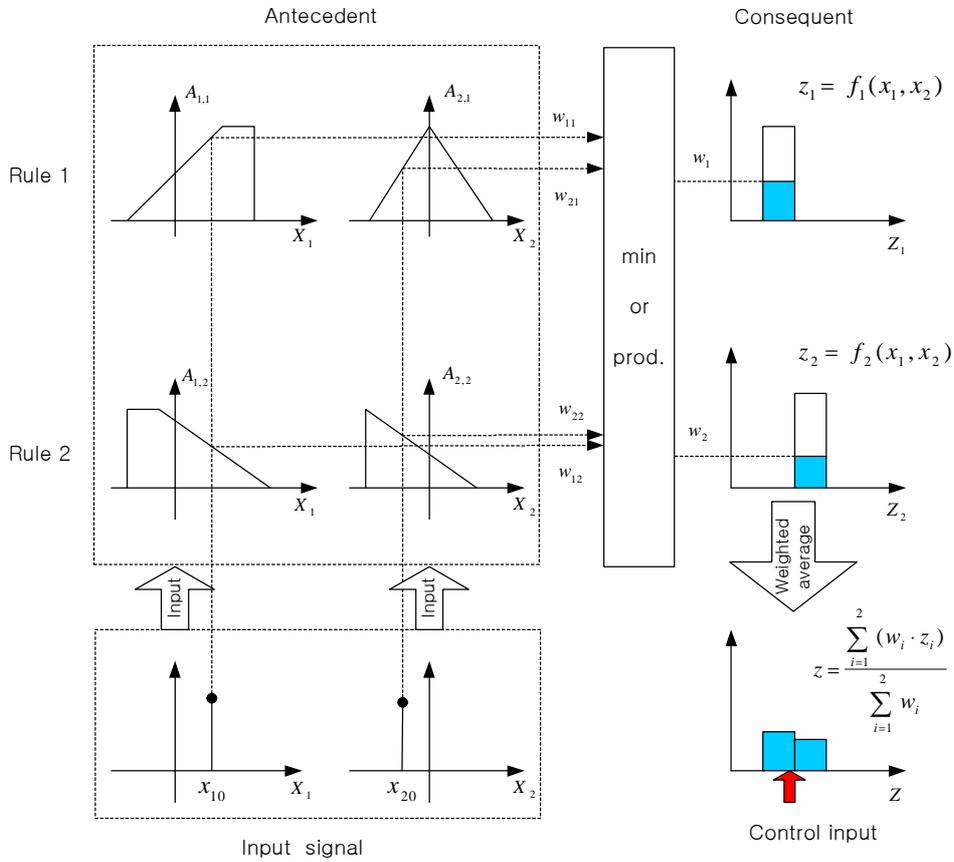


Fig. 3.14 Inference process of fuzzy inference method 3

#### ④ 추론법 4

이 추론법은 Tsukamoto에 의해 제안된 것으로서 후건부의 소속함수가 단조함수인 퍼지집합으로 표현된다. 각 규칙에 의해 추론된 출력은 각 규칙의 점호강도에 의해 결정된 명확한 값이고, 전체 출력은 각 규칙의 출력을 가중평균하여 구해지므로 역시 비퍼지화가 필요 없어 시간이 절약된다. Fig. 3.15는 2입력 2규칙 시스템에 대한 추론법 4의 추론과정을 나타낸 것이다.

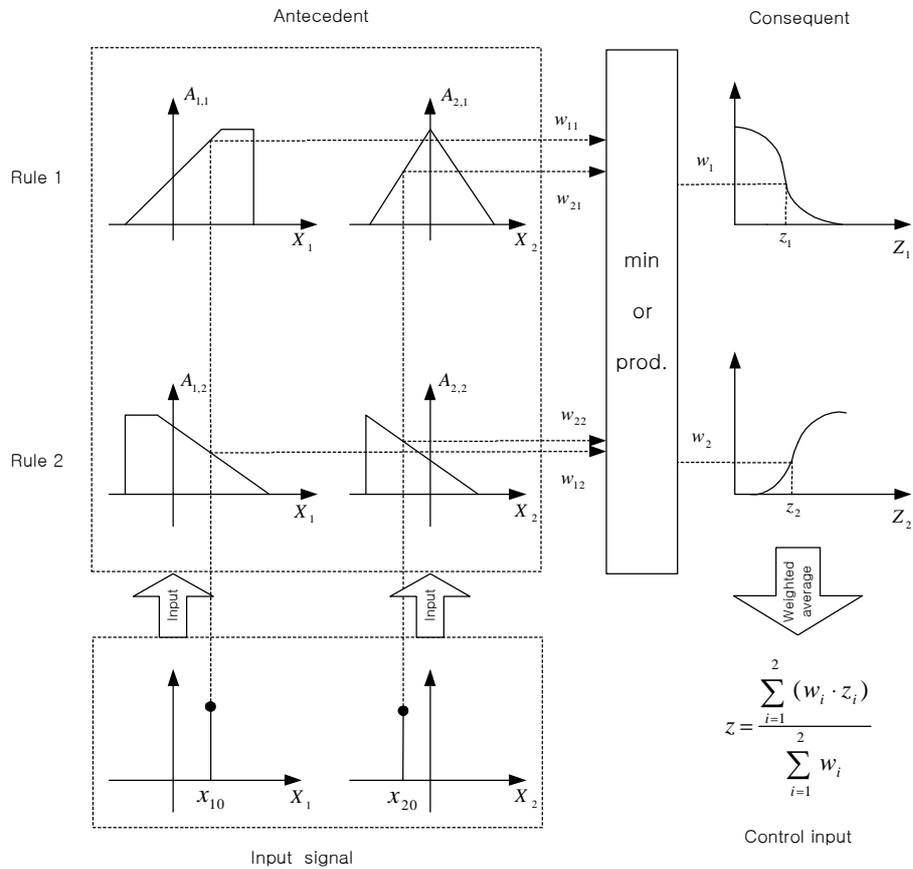


Fig. 3.15 Inference process of fuzzy inference method 4

#### (4) 비퍼지화부

비퍼지화부는 추론기구에서 추론한 퍼지출력의 결과를 명확한 제어입력 값 (Crisp value)으로 변환하는 부분이다. 추론법 1과 추론법 2에 의해 추론된 결론  $C$ 는 아직 퍼지집합이고 이러한 퍼지출력은 제어입력으로 사용하기에는 적합하지 않으므로 비퍼지화부를 통해 명확한 출력으로 변환시켜야 한다.

퍼지출력에 대한 비퍼지화 방법에는 여러 가지가 있으며, 퍼지제어 응용분야에서 널리 사용되는 것은 무게중심법(Center of gravity ; COG)과 최대평균법 (Mean of maximum ; MOM)이다. 그리고, 비퍼지화부에서는 퍼지화부에서 크 기조절요소에서 가중치가 부여되듯이 비퍼지화된 명확한 출력은 그것이 실제의

제어입력이 되도록 출력의 크기조절 요소에 의해 가중치가 부여된다.

### ① 무계중심법

(3.21)처럼 최종 퍼지집합의 무계중심에 해당하는  $z$ 를 명확한 출력으로 취하는 방법이다.

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \cdot C'(z_i)}{n} \quad (3.21)$$

여기서  $C'(z_i) (1 \leq i \leq n)$ 는 지지값(Support value)  $z_i$ 의 소속값이고,  $n$ 은 출력변수의 양자화 수준의 개수이다.

### ② 최대평균법

(3.22)처럼 최대 소속정도를 나타내는 요소의 값을 평균하여 명확한 출력을 구하는 방법이다.

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad (3.22)$$

여기서  $z_i (1 \leq i \leq n)$ 는 최종 조정된 소속정도에서 최대 소속정도를 주는 지지값이고  $n$ 은 이러한 지지값의 개수이다.

또한, 전체 면적을 이등분한 선분의 지지값을 명확한 출력으로 취하는 면적이 분법(Bisector of area ; BOA), 최대 소속정도를 나타내는 요소값들의 지지값 중에서 최대값을 명확한 출력값으로 취하는 최대법(Largest of maximum ; LOM), 최대 소속정도를 나타내는 요소값들의 지지값 중에서 최소값을 명확한 출력값으로 취하는 최소법(Smallest of maximum ; SOM) 등이 있다.

이외에도 비퍼지화라고는 할 수 없지만 추론법 3에서와 같이 각각 규칙의 적합도로서 가중치를 부여하여 평균하는 가중평균법이 있다. Fig. 3.16은 결론부가 퍼지집합인 경우에 있어서 여러 가지 비퍼지화 방법을 보여주고 있다.

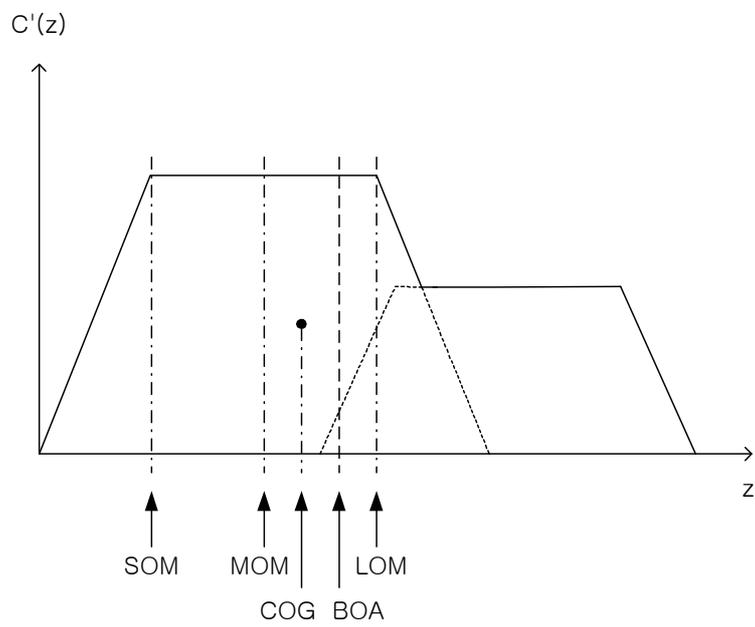


Fig. 3.16 Defuzzification methods

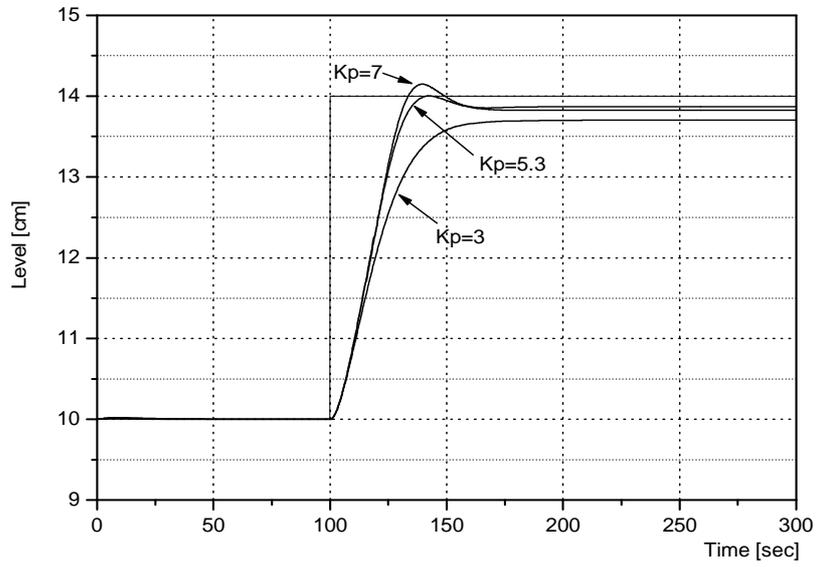
### 3.3 PID 제어기의 설계

이중수조 시스템의 수위제어기는 입력에 대한 반응이 느리며 계단입력의 크기에 따라 40초에서 100초 이상까지 소요된다. 따라서 이 시스템은 적분시간이 길어짐에 따라 적분이득의 크기에 영향을 많이 받으며 목표치 도달시의 큰 진동을 방지하기 위해서는 적분이득의 선정에 세심한 주의를 필요로 한다. 또한 느린 응답으로 인해 미분이득의 크기에는 영향을 작게 받는다.

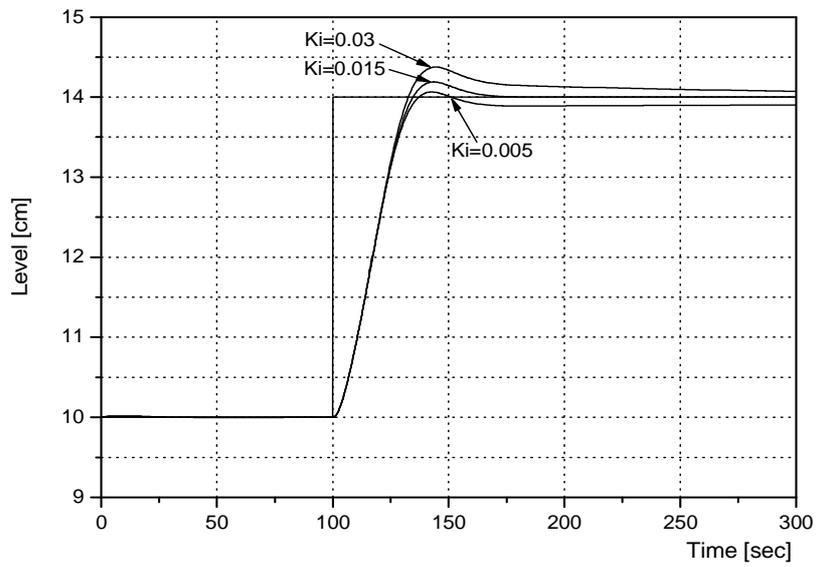
시뮬레이션 및 실험을 통해 확인한 결과 본 논문에 사용된 이중수조 시스템은 앞서 설명한 Ziegler-Nichols의 두 가지 동조법을 적용하기에 적합하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 시뮬레이션을 통한 시행착오법을 통해 PID제어기의 최적 파라미터를 동조하였으며 그 절차는 다음과 같다.

우선 PID 제어기의 적분이득  $K_i$  및 미분이득  $K_d$ 를 0으로 하여 비례이득을 서서히 증가시켜가면서 응답을 확인한다. 비례이득 만에 의한 응답에서 목표치 이상의 오버슈트가 최초로 나타나는 때의 값을 비례이득으로 선정한다. 비례이득을 고정한 후 적분이득을 조금씩 증가시켜가면서 적절한 시간에 목표치에 잘 수렴하는 때의 값을 적분이득으로 선정한다. 이 때 발생하는 오버슈트를 감쇄시키기 위하여 미분이득을 사용하며 오버슈트가 계단입력의 크기의 약 5% 이내로 되는 때의 값을 미분이득으로 선정하였다. 위와 같은 동조절차를 사용한 예를 Fig. 3.17 (a)~(c)에 나타내고 있으며, 이러한 방법을 통해 동조된 PID제어기 파라미터 값을 Table 3.3에 나타내었다.

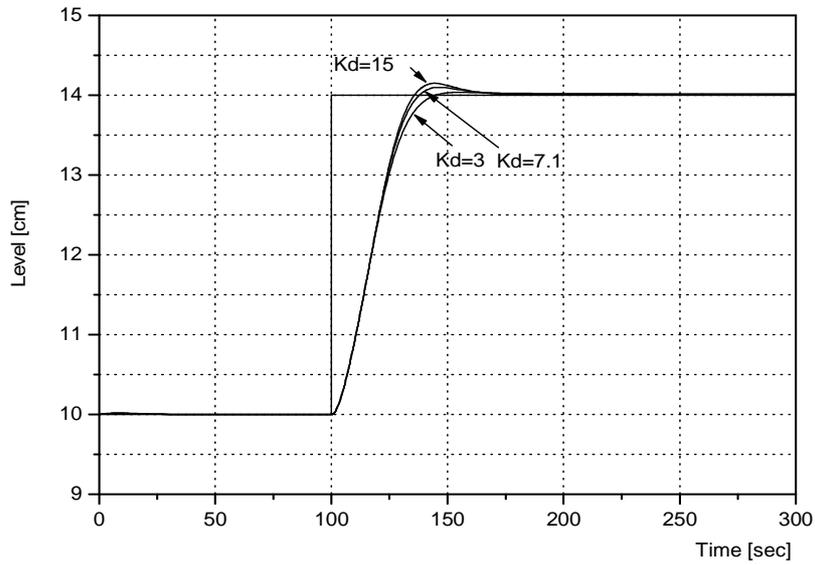
본 논문에서는 저수위에서 고수위에 걸치는 전체구간에서의 일정한 크기의 계단입력 뿐만 아니라, 계단입력의 크기 즉 수위변화의 크기에 따르는 응답특성까지도 고려하였으며 그에 대한 동조 결과는 Table 3.4에 나타내었다.



(a) Tuning of proportional gain



(b) Tuning of integral gain



(c) Tuning of derivative gain

Fig. 3.17 Tuning of PID controller parameters

Table 3.3 Parameter values of PID controller for various water level

Water level(cm)	$K_p$	$K_i$	$K_d$
6	6.1	0.02	7
10	5.7	0.015	6.7
14	5.3	0.015	7.1
18	4.9	0.012	8.1
22	4.6	0.012	9.2

Table 3.4 Parameters of PID controller for various step input magnitude

Step change	$K_p$	$K_i$	$K_d$
4	5.3	0.015	7.1
8	4.5	0.009	5
12	3.8	0.006	3
16	3	0.0045	0

### 3.4 퍼지 게인 스케줄링

적절히 동조된 PID 제어기로 시뮬레이션 및 실험한 결과 이중수조형 수위 제어시스템은 수위변화에 따른 동작점의 변화에는 그다지 큰 변화가 없으며, 수위 변경시 계단입력의 크기를 4cm 정도로 일정하게 유지하여 사용한다면 중간 수위에서 동조된 PID 제어기로서 전체 영역에서 양호한 제어성능을 보임을 알 수 있었다. 그러나 계단입력으로 가해지는 수위의 변경폭이 변화할 경우 변화의 크기에 따라 적절한 제어성능을 보이지 않음을 알 수 있었다.

수위제어 시스템의 계단 입력시 그 입력의 크기에 따라 PID 제어기를 동조한 후 그 크기에 따른 PID제어기의 파라미터를 퍼지 분할한다. 소속함수는 일정 크기 이상 및 이하의 계단입력에서는 사다리꼴로 하고 나머지 2개의 소속함수는 등간격의 삼각형으로 하였다.

그러면 이제 퍼지시스템을 "If~ then~" 형식의 규칙으로 표현할 수 있고, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R^i : \text{If } y_s \text{ is } F^i, \text{ then } K_p(t) = K_p^i, \quad K_I(t) = K_I^i, \quad K_d(t) = K_d^i \quad (3.23)$$

여기서,  $R^i$ 과  $F^i$ 는 각각  $i$ 번째 제어규칙과  $i$ 번째 퍼지집합을 의미하며,  $y_s$ 는 계단입력의 크기 즉, 기준입력과 기준입력이 가해지는 순간의 수위와의 차이를 의미한다. 그리고  $K_p^i$ ,  $K_I^i$ ,  $K_D^i$ 는 PID제어기의 비례, 미분, 적분 이득이다. 계단 입력의 크기에 대한 소속함수의 그래프로 나타내면 Fig. 3.18과 같다.

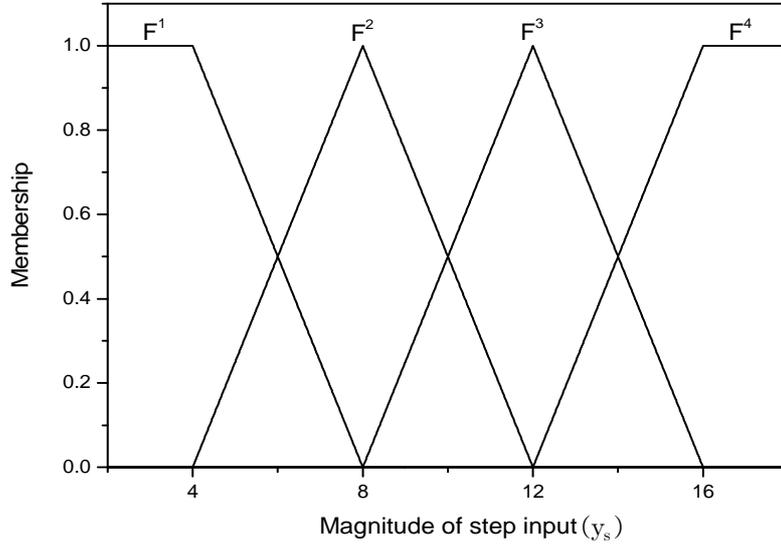


Fig 3.18 Fuzzy membership function

따라서, 퍼지 게인 스케줄에 의한 PID 제어기의 전체 출력은 다음과 같이 가중평균법을 이용하여 추론할 수 있다.

$$K_p(t) = \frac{\sum_{i=1}^4 (\rho^i K_p^i)}{\sum_{i=1}^4 \rho^i} \quad (3.24)$$

$$K_I(t) = \frac{\sum_{i=1}^4 (\rho^i K_I^i)}{\sum_{i=1}^4 \rho^i} \quad (3.25)$$

$$K_D(t) = \frac{\sum_{i=1}^4 (\rho^i K_D^i)}{\sum_{i=1}^4 \rho^i} \quad (3.26)$$

여기서  $\rho^i$  는  $i$ 번째 규칙의 기여도를 나타내며 다음과 같이 계산된다.

$$\rho^i = F^i(y_s) \quad (3.27)$$

또한  $F^i(y_s)$  는  $y_s$ 에 대한 퍼지집합의 소속 정도이다.

Fig. 3.19는 퍼지 게인 스케줄에 의한 PID 제어기의 구조를 나타낸 것으로서 수위를 변경하는 계단입력이 가해지면 계단입력의 크기를 판단하여 소속함수에 따라 퍼지 추론을 통해 PID 제어기의 비례, 적분, 미분 이득을 변경하여 최종 제어출력  $u$ 를 얻게 된다.

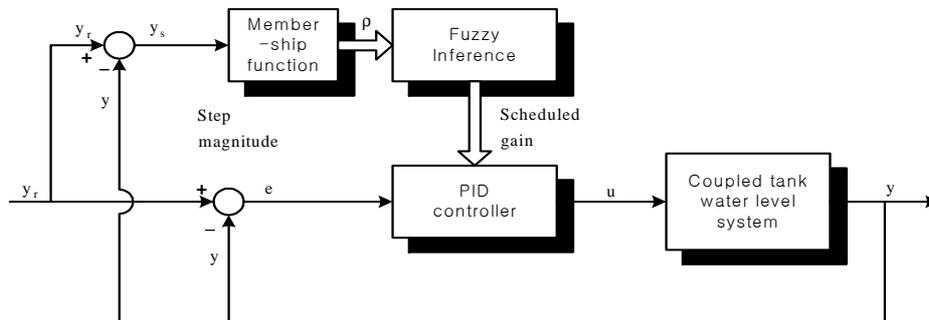


Fig. 3.19 Scheme of fuzzy gain scheduled PID controller

## 제4장 시뮬레이션 및 고찰

앞에서 설계된 PID제어기를 이용하여 이중수조 시스템의 계단입력에 대한 응답성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이중수조 시스템은 두 수조의 수위가 변화하면 밸브의 유량이 달라지며, 또 두 수조의 수위차에 의해서도 변화하게 된다. 또한 이중수조는 입력에 대한 응답이 느리기 때문에 적분이득의 영향이 커지므로 계단입력의 크기가 달라지면 동일한 제어기에서도 상이한 결과를 보인다.

각 구간별 및 입력의 크기별로 각각의 응답특성을 확인하였으며 기존의 PID 제어기와 퍼지이론을 적용해 개인 스케줄링된 PID제어기의 응답성능을 비교하였다. 시뮬레이션은 MATLAB ver. 5.3 및 SIMULINK Ver. 3.0을 이용하였다.

### 4.1 PID제어기의 계단응답

#### 4.1.1 동작구간의 변화에 따른 계단응답

Fig. 4.1은 저수위에서 계단입력에 대해 동조된 PID제어기를 이용해 전체 구간에서의 수위변화에 대해 적용하여 시뮬레이션하였을 때의 응답과 제어입력을 나타내고 있다. 최고 수위 25cm 수조의 2cm 지점에서 출발하여 각 4cm 씩 상승하도록 일정시간마다 계단입력을 가하였으며 저수위에서 고수위 동작구간으로 시스템이 이동할수록 약간씩 오버슈트와 편차가 증가하고 있으며, 18cm 지점에서 22cm 지점으로 변화할 때는 약 1.5mm의 편차가 발생하고 오랜시간 동안 지속되고 있음을 볼 수 있다. 수조 1과 수조 2의 수위를 비교 검토해보면 동작 수위가 높아질수록 수조 1과 수조 2의 수위차이가 커지고 있음을 알 수 있다.

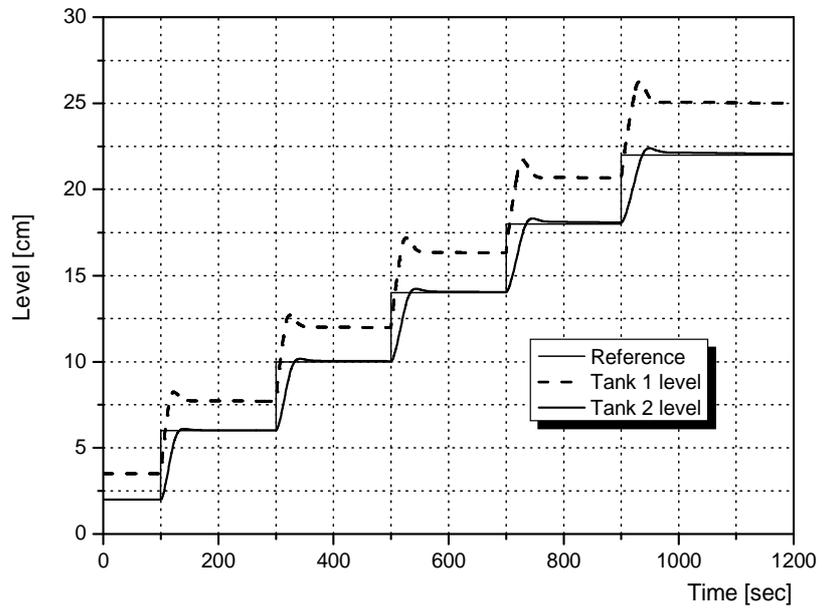
제어입력은 계단입력을 가한 시점에서 순간적으로 펌프모터의 포화지점까지 도달하여 일정기간동안 포화상태로 유지된다. 이 제어입력의 포화현상으로 인해 이중수조 시스템은 이득을 지속적으로 증가시키더라도 응답시간이 일정수준 이하로는 줄어들지 않는다. 포화상태가 종료된 후 제어입력은 진동이 작은 매우 부드러운 곡선을 그리면서 변화하는데 이는 정상상태 도달시의 진동을 감소시

키기 위해 사용한 큰 미분이득의 영향에 의한 것으로 판단된다.

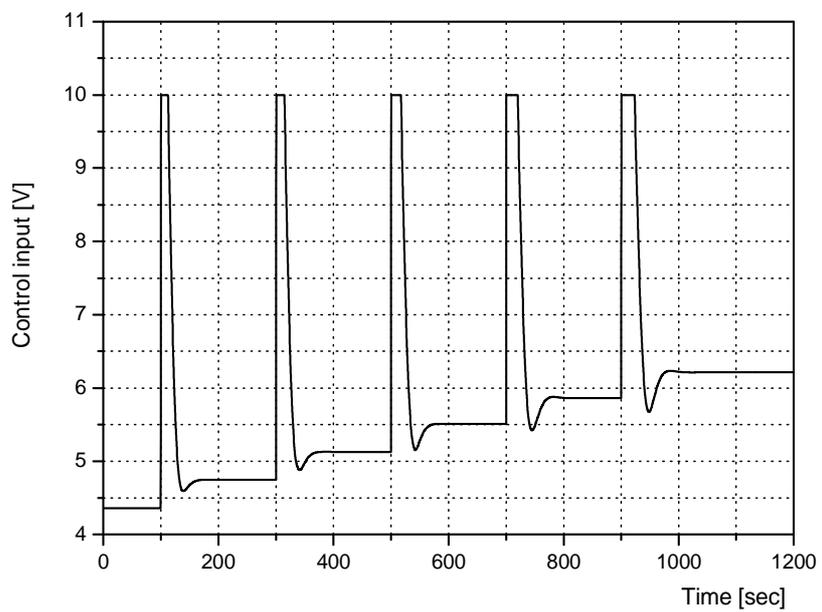
Fig. 4.2와 Fig. 4.3은 중간수위와 고수위에서 설계된 PID 제어기를 이용해 전체 구간에서의 계단입력에 대해 적용한 경우의 응답과 제어입력을 나타낸다. 고수위에서 설계된 제어기를 이용했을 경우에는 낮은 수위영역에서도 비교적 양호한 응답을 보인다고 할 수 있다.

Fig. 4.4는 앞의 시뮬레이션에서 가장 양호한 응답성능을 나타낸 중간수위의 제어기를 이용해 높은 수위에서 낮은 수위로 단계적으로 감소하는 명령을 가했을 경우이다. 약간의 언더슈트와 편차가 일정기간동안 존재하지만 전체적으로는 양호한 응답특성을 나타내고 있다.

이와 같은 결과로 볼 때 이중수조 시스템은 동작구간의 변화에 대하여는 시스템의 변화가 그다지 크지 않으며, 동일한 크기의 계단입력에 대해서는 전체 동작구간에서 중간 수위에서 설계된 하나의 제어기로도 비교적 양호한 응답성능을 나타냄을 알 수 있다.

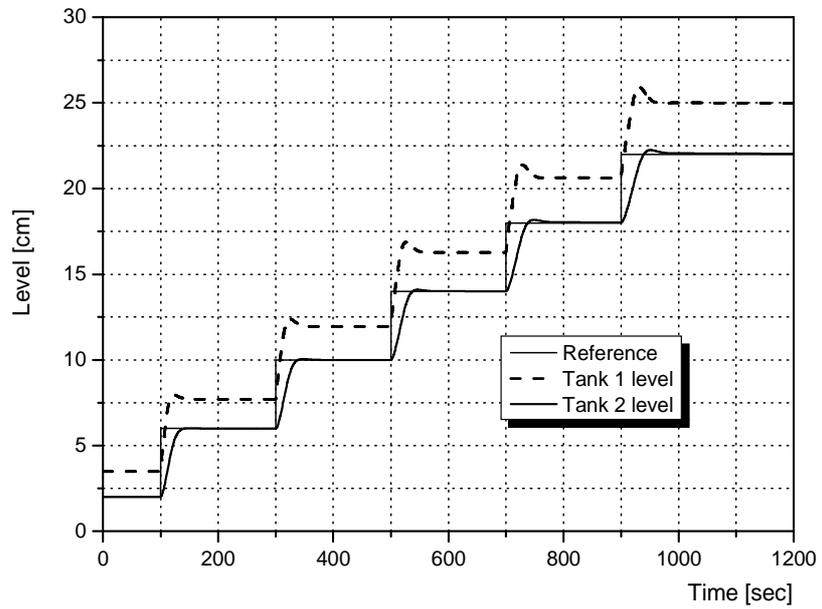


a) Step responses of tank 1 and tank 2

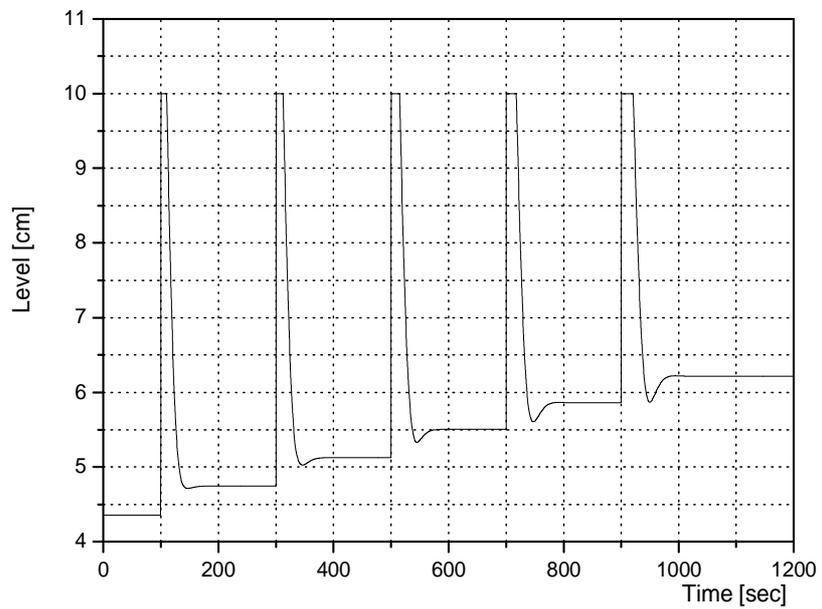


b) Control input

Fig. 4.1 Step responses of increasing step input using low-level controller

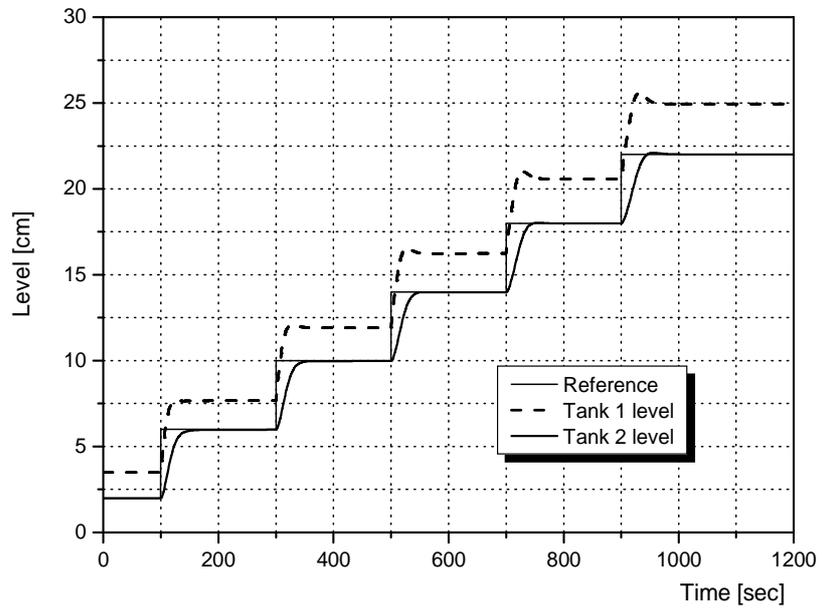


a) Step responses of tank 1 and tank 2

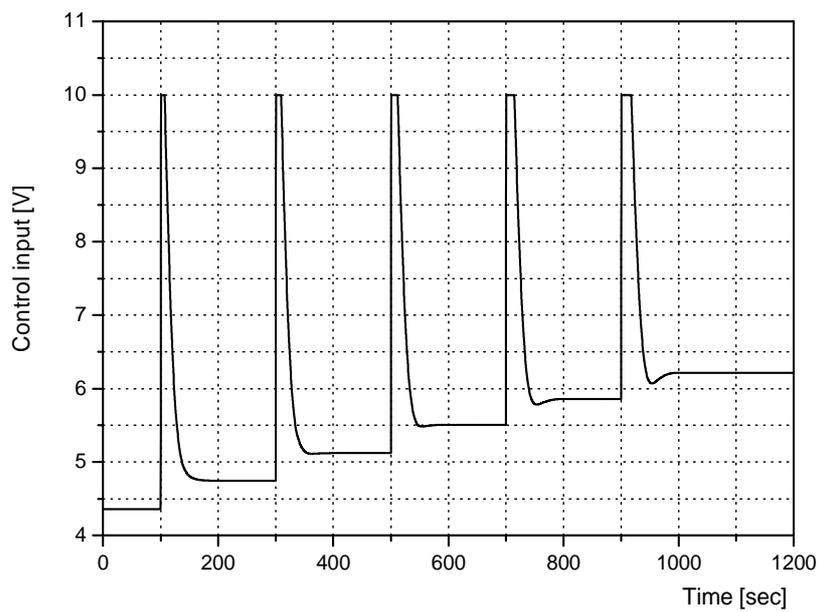


b) Control input

Fig. 4.2 Step responses of increasing step input using mid-level controller

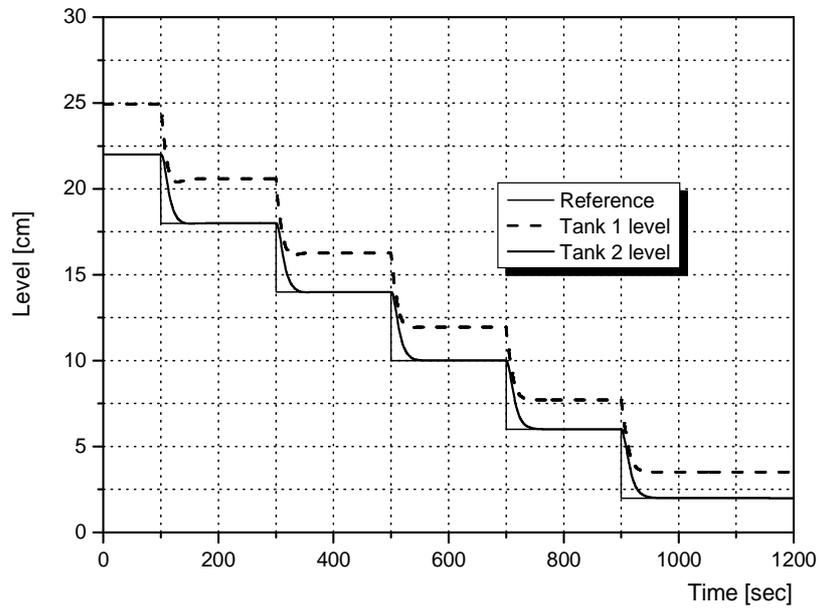


a) Step responses of tank 1 and tank 2

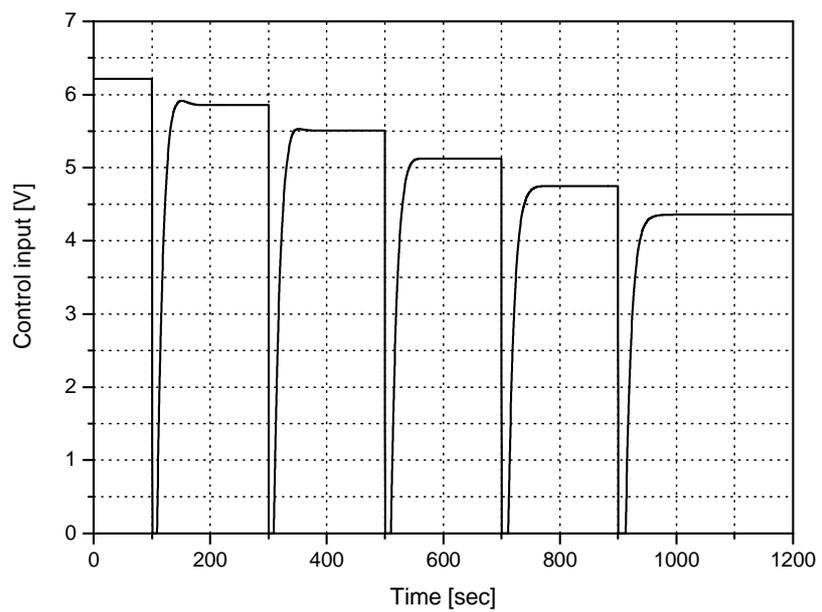


b) Control input

Fig. 4.3 Step responses of increasing step input using high-level controller



a) Step responses of tank 1 and tank 2



b) Control input

Fig. 4.4 Step responses of decreasing step input using mid-level controller

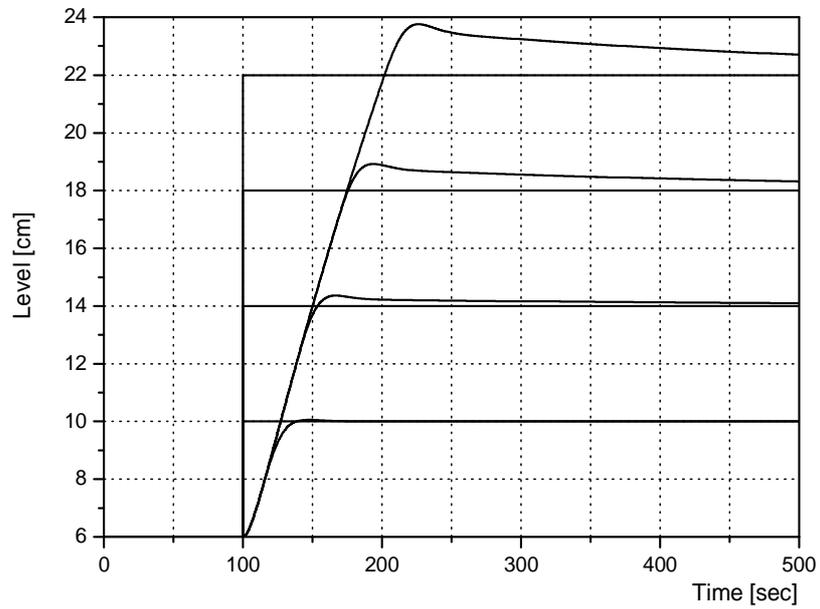
#### 4.1.2 계단입력의 크기에 대한 응답

계단입력의 크기에 따른 응답을 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 계단입력의 크기를 변화시켜 가면서 양호한 응답을 얻기 위해 PID제어기의 파라미터들이 어떻게 변화하는지를 살펴보았다. 수조2의 동작범위 중에서 가장 낮은 수위를 6cm, 가장 높은 수위를 22cm로 가정하고 4cm, 8cm, 12cm, 16cm 씩 계단입력의 크기를 증가 및 감소시켜 가면서 시뮬레이션을 실시하였다.

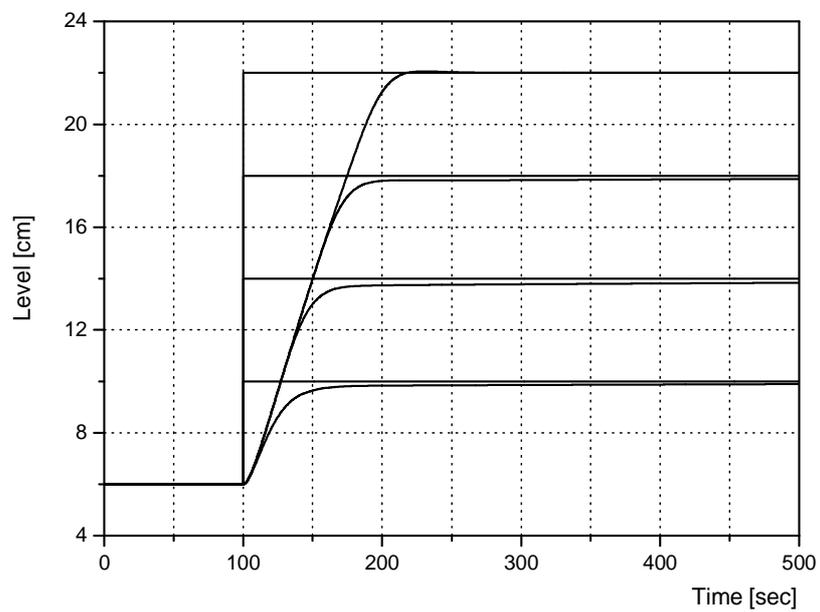
Fig. 4.5는 수조2의 수위가 6cm일 때 고정된 제어기를 사용한 상태에서 다양한 크기의 계단입력을 가했을 경우이다. Fig 4.5 (a)에서와 같이 4cm 크기의 계단입력에 적합하도록 설계된 제어기는 계단입력의 크기가 증가할수록 오버슈트가 커지고 목표치를 잘 추종하지 못하고 있다. Fig 4.5(b)에서는 가장 큰 크기인 16cm의 계단입력에 추종하도록 설계된 제어기를 적용했을 경우이며, 작은 크기의 계단입력에서는 목표치 도달 시간이 길어지며 편차가 매우 길게 지속되는 등 만족스럽지 못한 제어성능을 나타내고 있다.

Fig. 4.6은 수위를 고수위에서 저수위로 하강시키는 경우이며, 22cm에서 6cm로 큰 폭으로 하강하는 경우에도 약 2mm 정도의 편차가 상당기간 동안 지속되지만 전체적으로는 Fig. 4.5의 경우와 유사한 경향을 나타낸다.

위에서 본 바와 같이 이중수조 시스템은 계단입력의 크기가 동일하면 전체의 수위구간에서 양호한 제어성능을 보이지만, 계단입력의 크기가 변화할 경우에는 그 입력의 크기에 따라 제어기의 성능은 크게 변화됨을 알 수 있다. 이러한 제어성능의 변화는 운전자가 전체 수위구간에 대해 자유롭게 제어하는 것을 제한하게 되며 모든 수위구간에서 원하는 크기의 명령으로 자유롭게 제어할 수 있는 제어기의 설계가 필요하다고 할 수 있다.

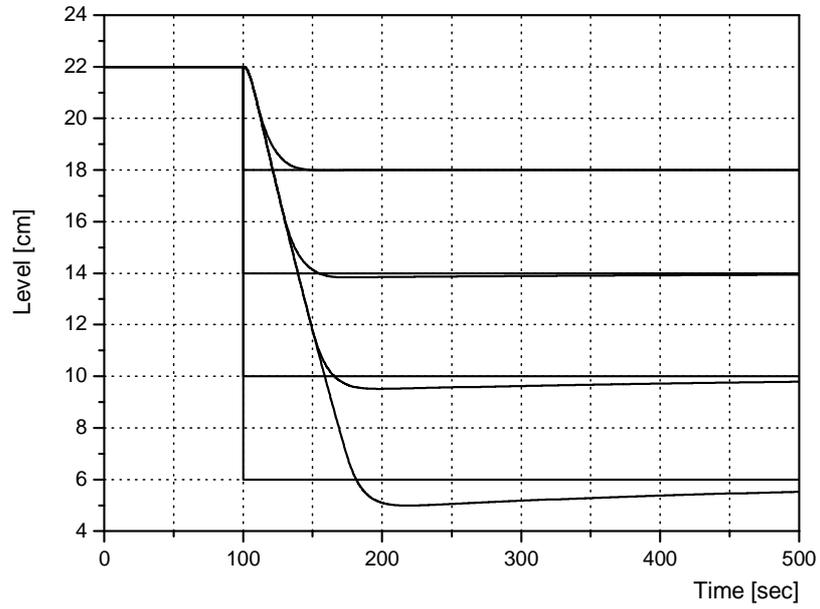


a) Step responses for the controller with small step change

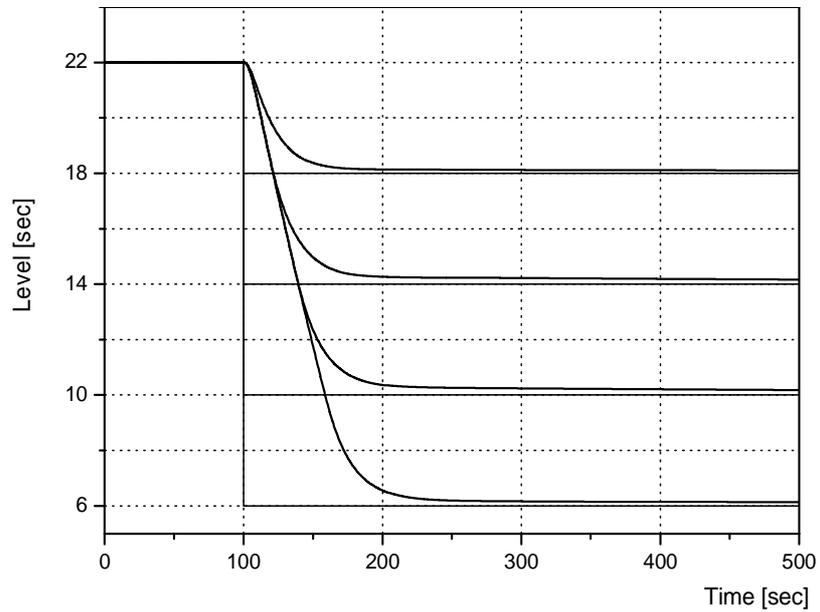


b) Step responses for the controller with large step change

Fig. 4.5 Responses for various increasing step inputs



a) Step responses for the controller with small step change



b) Step responses for the controller with large step change

Fig. 4.6 Responses of various decreasing step inputs

## 4.2 퍼지 계인 스케줄링에 의한 시뮬레이션

퍼지 소속함수를 이용하여 계단입력의 크기에 따라 자동으로 이득을 변경하는 퍼지 계인 스케줄링 기법을 이용하여 시뮬레이션하였다. Fig. 4.7은 퍼지 계인 스케줄링을 이용한 제어기와 큰 계단입력과 작은 계단입력에 대하여 각각 설계된 PID제어기를 비교하고 있다.

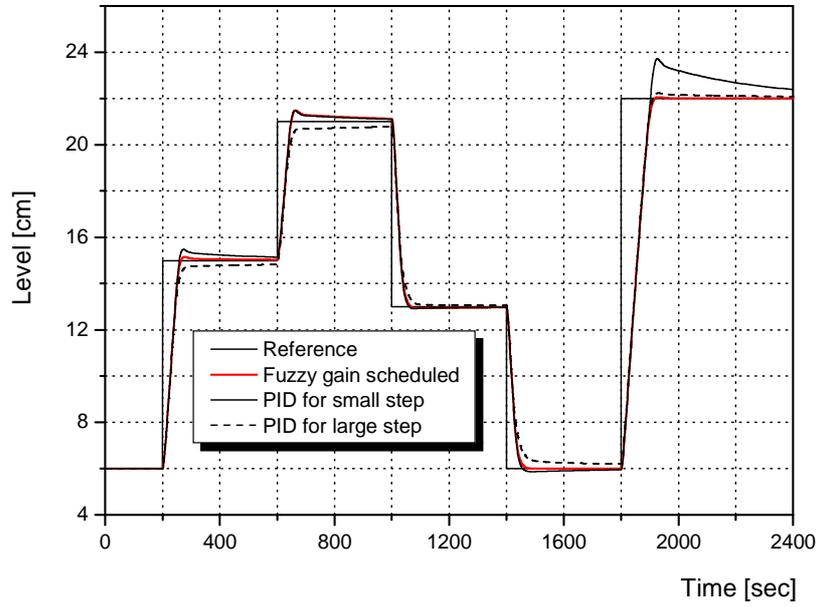
큰 계단입력에 적합하도록 설계된 제어기를 다양한 크기의 계단입력에 적용했을 경우 수위 6cm에서 22cm로 큰 폭으로 변화하는 때에는 목표치를 잘 추종하지만, 비교적 작은 크기의 계단입력에서 목표치에 잘 수렴하지 못하며 6cm에서 15cm, 15cm에서 21cm 및 13cm에서 6cm 등의 계단상 변화에서 200초간 약 3~4mm의 편차가 유지되는 것을 볼 수 있다.

작은 크기의 계단입력에 적합하도록 설계된 제어기를 다양한 크기의 계단입력에 적용했을 경우 전반적으로 비교적 양호한 제어성능을 나타내지만 6cm에서 22cm로의 큰 계단입력에서는 오버슈트가 매우 크게 발생하고 목표치에도 잘 수렴하지 못하는 것을 볼 수 있다.

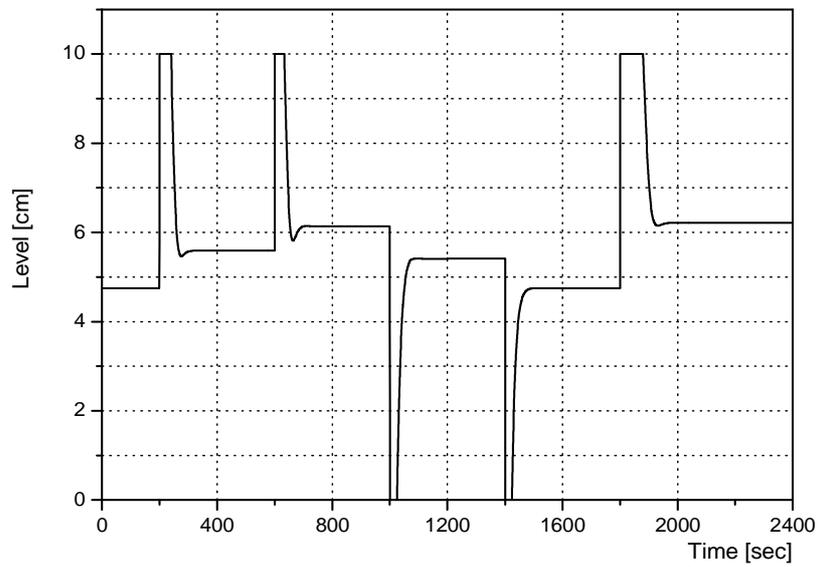
퍼지 기법을 이용하여 제어기의 계인을 조정하도록 설계된 퍼지-PID 제어기를 적용하였을 경우에는 15cm 수위에서 21cm 수위로 상승할 때 다소의 오버슈트가 발생하는 것을 제외하면, 다양한 크기의 계단입력을 다양한 수위 위치에서 가했을 경우 모두 대체적으로 양호한 제어 성능을 나타내고 있다.

위와 같은 결과를 볼 때 이중수조 시스템의 수위제어에 있어 퍼지 계인 스케줄링을 이용하여 PID 제어기의 이득을 계단입력의 크기에 따라 적절히 변화하도록 하였을 경우, 모든 수위에서 다양한 크기의 계단입력에 대하여 비교적 양호한 제어 성능을 보장할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4.8에서는 시뮬레이션 동안 퍼지 계인 스케줄링에 의해 스케줄된 PID 제어기의 각 파라미터를 나타내고 있다.



a) step responses



b) Control input of fuzzy gain scheduled controller

Fig. 4.7 Comparison of fuzzy gain schedule PID controller with small and large step change PID controller for various step input

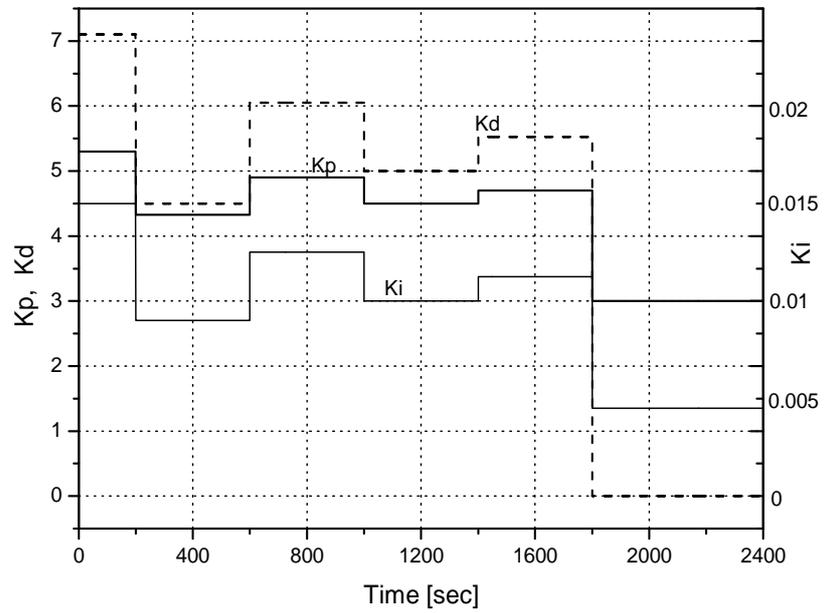


Fig. 4.8 Parameters change by fuzzy gain schedule

## 제 5 장 실험 및 비교

### 5.1 실험장치 및 실험방법

#### 5.1.1 실험장치의 구성

PID 제어기의 동조결과 및 계단 입력에 대한 시뮬레이션을 통해 얻어진 이중 수조 수위제어 시스템의 제어특성을 실험을 통해 확인하였다. 실험장치는 Fig. 5.1과 같이 이중수조장치, 센서신호와 제어입력을 AD, DA변환하기 위한 제어장치, 컴퓨터로 구성된다. 이중수조 장치에서 측정된 각 수조의 수위 및 입력유량은 제어장치의 AD변환기를 이용하여 디지털로 변환되어 컴퓨터에 전달되고, PID 알고리즘에 의해 계산된 제어기의 출력 전압은 DA변환기를 통하여 아날로그 전압신호로 변환된 후 펌프를 구동하기 위한 직류전동기로 전달되며 이러한 신호전달은 RS232 케이블을 통해 이루어진다.



Fig. 5.1 CE105MV Coupled tank water level control experiment system

Table 5.1 Specification of coupled tank system

Model	CE105MV Coupled Tanks
Manufacturer	TQ Education and Training Ltd.
Country	Eng.
Controller	CE120 controller
Soft	CE200L Icon Based Control

실험장치 하드웨어의 사양은 Table 5.1과 같으며, 두개의 수조에는 각각 출구 밸브가 설치되고 두 수조를 연결하는 밸브가 있으며 각 밸브의 개방정도에 따라 단일수조에서부터 다양한 이중수조를 구현하여 실험할 수 있다. 각 수조에는 독립된 펌프가 설치되어 다입력 다출력(MIMO) 시스템의 실험까지 할 수 있지만 본 논문에서는 Fig. 2.1과 같은 단일입력 단일출력 시스템으로 구성하였다.

### 5.1.2 실험방법

컴퓨터 시뮬레이션을 통해 동조되고 4cm 크기의 계단입력에 대하여 가장 양호한 제어성능을 나타낸 중간수위용 PID 제어기를 이용하여 전체 수위 구간에서 4cm 크기의 계단입력을 가하여 그 결과를 시뮬레이션과 비교하였다. 계단입력은 수위의 상승명령과 하강명령에 대하여 모두 적용하였으며 응답특성과 제어입력 전압의 특성에 대하여도 비교하였다.

실험장치에서 사용된 소프트웨어는 퍼지알고리즘을 지원하지 않기 때문에 퍼지 계인 스케줄링을 이용한 실험은 각각의 계단입력을 가한 후 PID제어기의 파라미터에 영향을 받지 않는 제어출력의 포화기간인 약 20초 기간동안 Fig. 4.8과 같이 변화하는 PID 파라미터를 수동으로 변경하면서 실험하였다.

## 5.2 실험결과

### 5.2.1 동일한 크기의 계단입력에 대한 응답

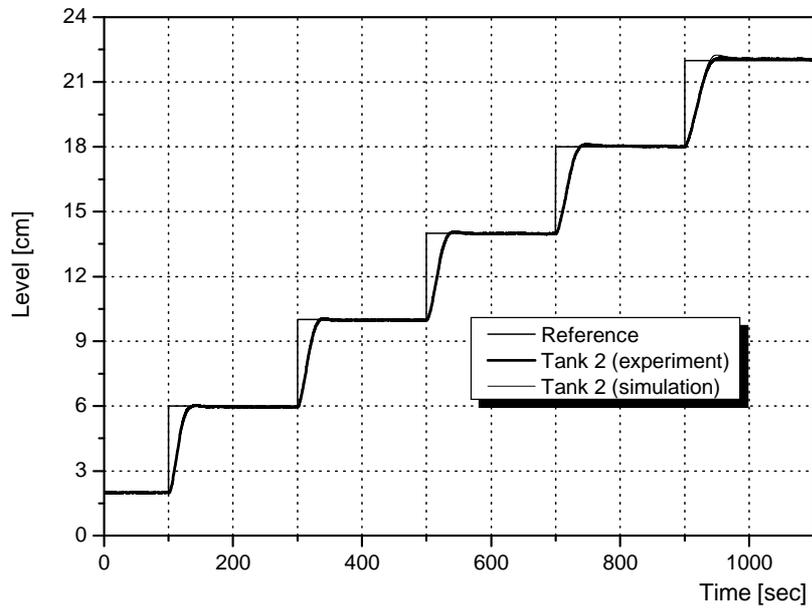
Fig. 5.2는 시뮬레이션 결과 4cm 크기의 계단입력에 대하여 가장 양호한 제어성능을 보인 중간 수위용 제어기를 이용하여 전체 수위구간에 4cm 크기의 계단입력을 가했을 경우의 실험결과를 시뮬레이션 결과와 함께 비교하여 나타내고 있다. Fig. 5.2 (a)는 수조 2의 수위의 수위 상승시의 계단응답을 나타내고 있는데 18cm에서 22cm로 변화하는 고수위 구간에서 약간의 오버슈트의 크기 차이를 제외하면 시뮬레이션 결과와 거의 동일한 결과를 보이고 있다.

Fig. 5.2(b)는 제어입력을 나타내고 있는데 과도상태에서는 거의 동일하지만 정상상태에서는 실험결과가 시뮬레이션 결과보다 약 0.5~0.7V 정도 높게 나타나는데 이는 DC 모터 구동 펌프를 모델링 할 시 입력전압과 출력 유량과의 관계를 손실이 없는 것으로 가정한 데에서 비롯되는 것이라고 판단된다. 실제로 시뮬레이션에 비해 실제 장치에서는 모터의 진동이나 발열, 소음 등이 모두 에너지 손실이며 시뮬레이션과 동일한 응답결과를 나타내기 위해서는 이 손실에 해당되는 값만큼 더 큰 제어입력이 가해져야 함을 쉽게 추정할 수 있다.

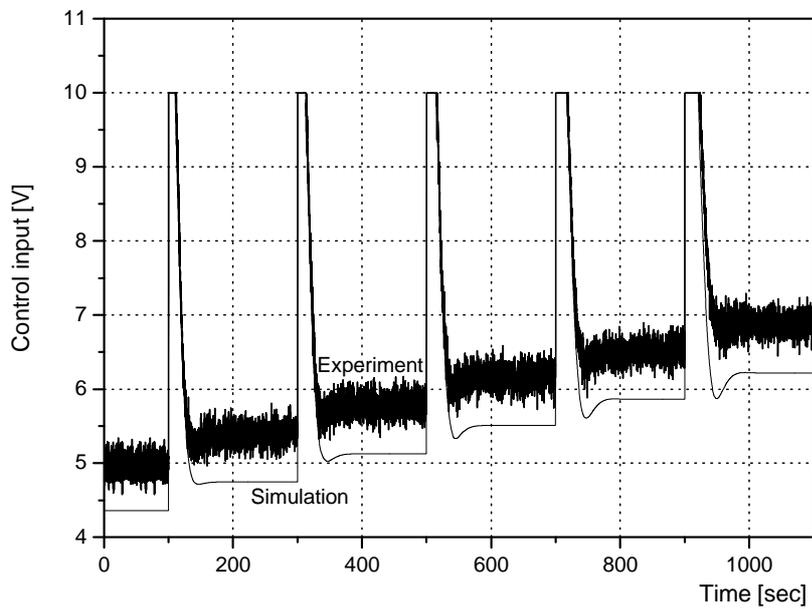
Fig. 5.2(b)의 실험결과에서 정상상태 제어입력은 매우 큰 진동을 나타내고 있는데 이는 정상상태를 유지하고 진동을 감쇄하기 위해 사용된 큰 미분 이득의 영향으로 판단되며 DC 모터에 가해졌을 때는 모터의 관성모멘트 등으로 인해 대부분 필터링되기 때문에 수조에 가해지는 유량의 진동은 그다지 크지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 5.3(a)와 (b)는 동일한 제어기를 이용하여 고수위에서 저수위로 하강하는 계단입력을 가했을 경우의 실험결과를 보이고 있으며 Fig. 5.2와 전체적으로 거의 유사한 결과를 보이고 있다.

Fig. 5.3(b)에서 나타내는 제어입력의 경우 실험결과에서는 -10V의 값을 나타내는 구간이 있는데 이는 PID 제어기의 실제 제어출력에 해당하지만 펌프를 역방향으로 구동하지는 못하므로 0V이하의 입력은 무의미하다. 시뮬레이션에서는 이 값이 0V로 포화되어 나타난다.

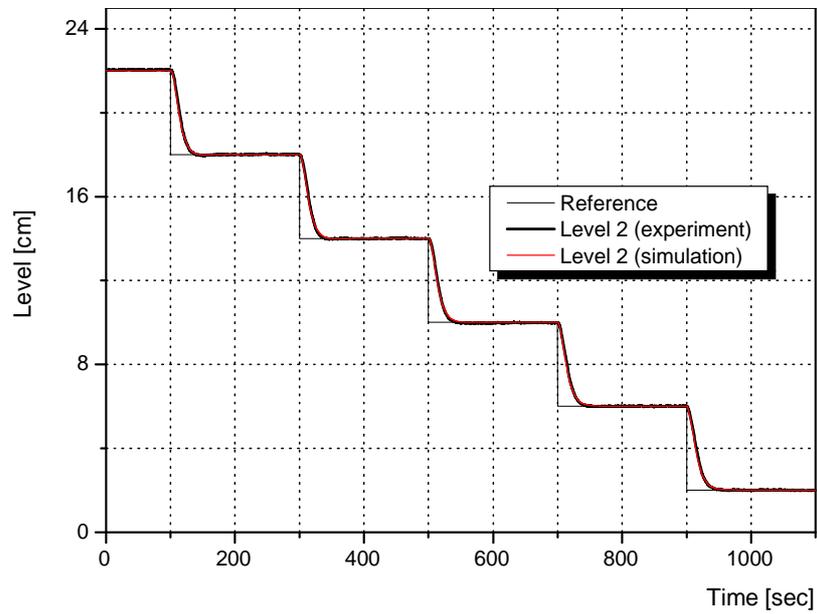


a) Step responses of tank 2

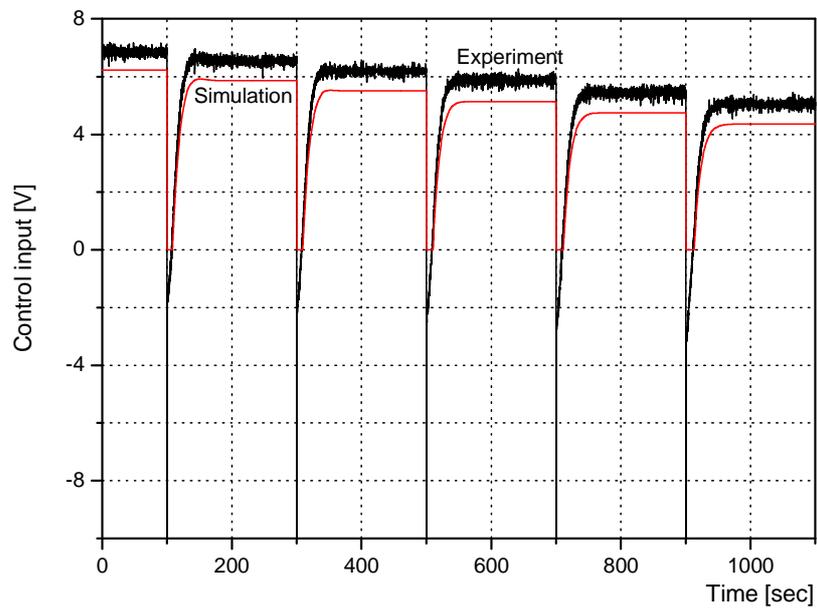


b) Control input

Fig. 5.2 Experimental results of mid-level controller on increasing step



a) Responses



b) Control input

Fig. 5.3 Experimental results of mid-level controller on decreasing step

### 5.2.2 계단입력의 크기 변화시 응답실험

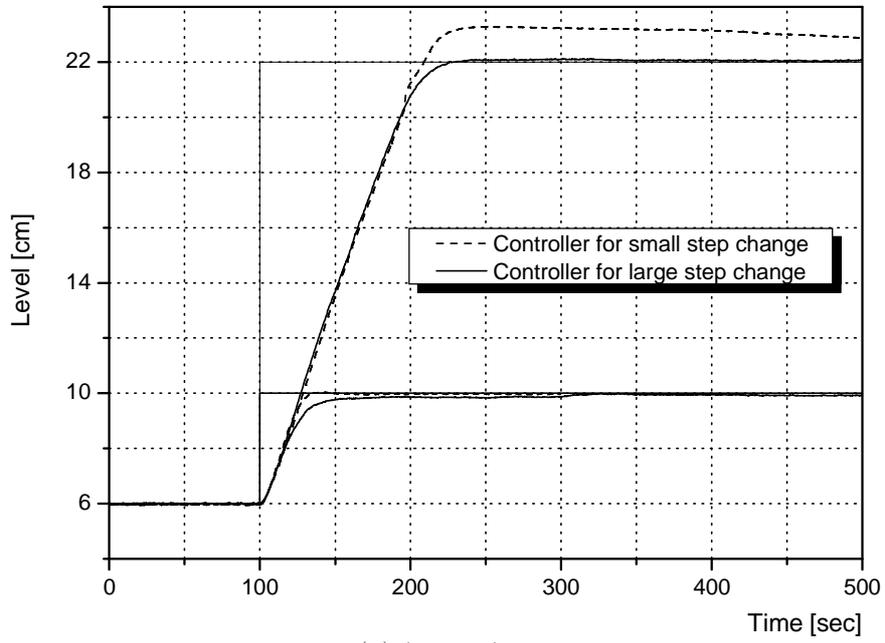
Fig. 5.4는 계단입력의 크기를 다양하게 가했을 경우 각 제어기의 응답특성을 나타내고 있다. 수위를 상승시키는 Fig. 5.4(a)의 경우 4cm 크기의 제어입력에 대해 설계된 제어기는 최초 설계시 고려된 크기의 입력에 대해서는 양호한 성능을 나타내지만 4cm에서 22로 크게 변화하는 입력에서는 큰 오버슈트가 나타나고 약 400초의 시간이 경과한 후에도 목표치에 제대로 추종하지 못함을 확인할 수 있다.

4cm에서 22cm로 변화하는 계단입력에 적합하도록 설계된 제어기의 경우는 설계조건에서는 양호한 성능을 보이지만 작은 크기의 계단입력에 대해서는 목표치를 잘 추종하지 못함을 알 수 있다.

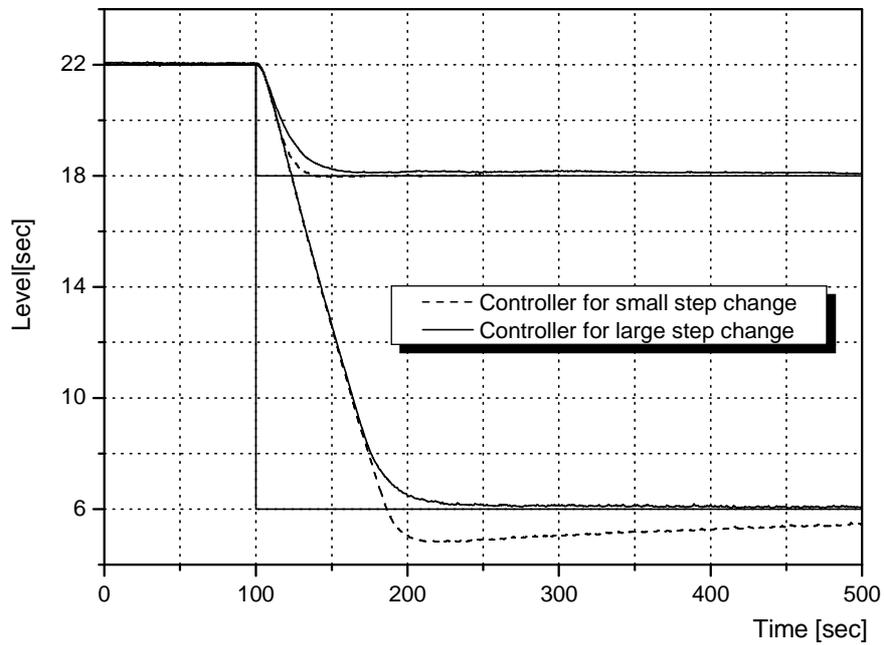
Fig. 5.4(b)는 수위가 하강하는 경우이며 (a)의 경우와 마찬가지로 제어기가 설계된 입력조건에서는 양호한 제어성능을 보이지만 그 범위를 벗어나면 제어성능이 저하됨을 알 수 있다.

Fig. 5.5는 계단입력의 크기에 따라 알맞도록 설계된 PID제어기의 파라미터를 퍼지 소속함수로 결합하여 다양한 크기의 계단입력이 가해지는 경우에도 적절한 값으로 변경하여 적용하도록 한 경우를 실험한 결과이다. 실험결과를 시뮬레이션 결과와 비교하기 위해 동일한 좌표에 표시하였다. 6cm에서 22cm로 가장 큰 크기의 계단입력을 가했을 경우에는 약 5mm 정도의 오버슈트가 발생하고 약간의 편차가 길게 지속되지만, Fig. 4.7의 시뮬레이션 결과와 유사하게 서로 다른 크기의 다양한 계단입력이 가해지더라도 양호한 응답특성을 보이며 시뮬레이션 결과와도 유사한 결과가 도출되었다.

Fig. 5.5의 결과로 볼 때 퍼지 소속함수로 PID 제어기의 이득을 스케줄하여 이중수조의 수위제어에 적용하면 모든 수위 구간에서 다양한 크기의 계단입력에 대해서도 비교적 양호한 응답을 보임을 알 수 있다.



(a) increasing



(b) decreasing

Fig. 5.4 Step responses to different step input

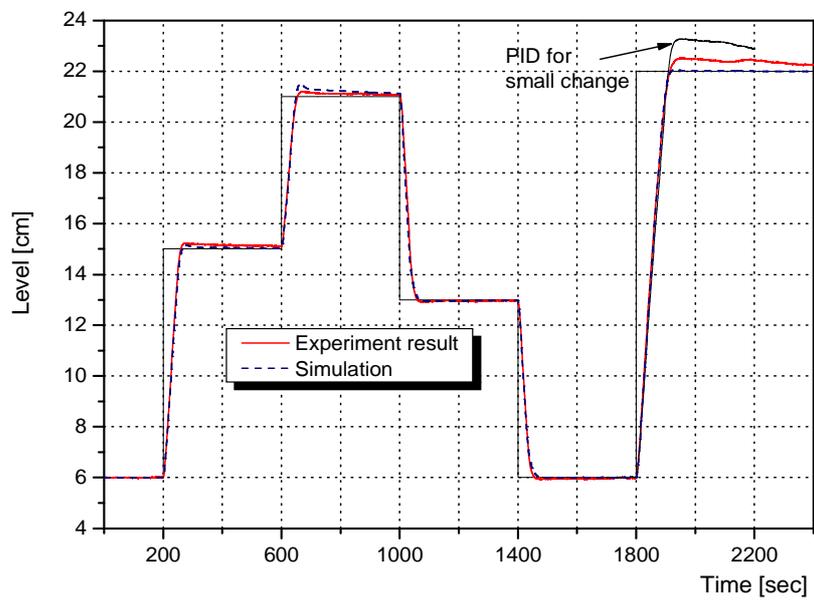


Fig. 5.5 Experimental results of fuzzy gain scheduled PID controller

## 제 6 장 결 론

본 논문에서는 퍼지 기법을 이용하여 각 운전조건별로 동조된 PID 제어기의 이득을 스케줄링하도록 설계하여 이중수조 시스템의 수위제어에 적용하였다. 이중수조에서 수조 2의 가장 낮은 수위에서부터 가장 높은 수위까지에 걸친 전체 수위구간을 4cm 간격으로 구분하여 각 구간에 알맞은 PID 제어기를 동조하고 그 응답특성을 확인하였다.

수위구간에 대한 응답특성과 함께 계단입력의 크기에 대해서도 적절히 변경하여가면서 응답특성을 확인하였으며, 계단입력의 서로 다른 크기에 따라 가장 양호한 응답특성을 보이는 PID 제어기 이득을 퍼지소속함수로 결합하여 계인 스케줄링할 수 있도록 알고리즘을 구성하여 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과는 다시 실제 플랜트를 이용한 실험을 통하여 비교 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 입력에 대한 응답속도가 느린 수위제어 시스템에서는 PID제어기의 파라미터들 중에서 적분 이득에 가장 민감하게 반응하였으며 이는 적분시간이 길어짐에 따른 것으로 판단된다. 미분이득에는 큰 영향을 받지 않았는데 반응시간이 길어짐에 따라 단위 시간에 대한 변화량 즉, 미분 값이 미소하게 됨에 따른 것이라 판단된다.
- 2) 본 실험에서 사용된 이중수조 수위제어시스템은 최저수위에서 최고수위에 걸치는 전체 수위구간에 대하여 동일한 크기의 계단입력에 대하여는 플랜트의 파라미터 변화는 크지 않았으며 중간 수위에서 동조된 하나의 제어기로도 전체 구간에 걸쳐 비교적 양호한 제어성능을 얻을 수 있었다.
- 3) 계단입력의 크기를 변화시켰을 때에는 해당 입력에 대해 알맞도록 동조된 PID 제어기 이외에는 오버슈트가 커지거나 목표치에 도달하는 시간이 길어지는 등 만족스럽지 못한 응답성능을 나타내었다.
- 4) 퍼지 계인 스케줄링을 이용하여 계단입력의 크기에 따른 PID 제어기의 이득을 변경하면서 다양한 크기의 계단입력에 적용하였을 경우에는, 전체 수위구간에서 서로 다른 크기의 계단입력에 대해서도 비교적 양호한 응답특성이 나타남을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- 1) 박현철, “GA-FSMC를 이용한 이중탱크의 정밀한 수위제어”, 동아대학교 교육대학원 전기교육전공 석사학위논문, 2002, 6.
- 2) 소명옥, “뉴로-퍼지 기법을 이용한 비선형 시스템의 제어”, 한국해양대학교 대학원 기관공학과 박사학위논문, 1997, 2.
- 3) 이찬하, “퍼지-PID 기법을 이용한 선박용 디젤 주기관의 강인한 속도제어기 설계”, 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 석사학위논문, 2003, 8.
- 4) 김병만, “퍼지모델에 기초한 이중수조용 제어기 설계”, Proceeding of the 14th KACC, October, pp. B93-B95, 1999.
- 5) 최재준, “퍼지-LQ 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 강인한 제어기 설계”, 한국해양대학교대학원 기관공학과 공학박사 학위논문, 2002, 2.
- 6) 정재학, “지능적 레벨제어와 실시간 통합환경 시스템 구현에 관한 연구”, 한국해양대학교 대학원 전자통신공학과 공학석사 학위논문, 1993, 8.
- 7) K. Ogata, “Modern Control Engineering”, Prentice Hall, 1999.
- 8) Chi-Tsong Chen, “Linear System Theory and Design”, Oxford University Press. 1999.
- 9) TQ Education and Training Ltd., CE105MV Coupled Tank Apparatus.
- 10) Curtis D. Johnson, “Process Control Instrumentation Technology”, Prentice Hall, 2003.
- 11) 김도웅, “RCGA를 이용한 PID 제어기의 모델기반 동조규칙”, 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 공학석사 학위논문, 2003, 2.
- 12) 이광형, 오길록, “퍼지이론 및 응용”, 홍릉과학출판사, 1991.
- 13) 진강규, “유전알고리즘과 그 응용”, 교우사, 2000.