



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 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.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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

퍼지-PID 제어를 이용한 수조
시스템의 수위제어

Level Control of Water Tank Systems using
Fuzzy-PID Controller



2014년 2월

한국해양대학교 대학원

해양군사학과 이 상 현

본 논문을 이상현의 공학석사 학위논문으로 인증함

위원장 공학박사 오 세 준



위 원 공학박사 박 석 주



위 원 공학박사 소 명 옥



2013년 12월 13일

한국해양대학교 대학원

해양군사학과

목 차

Abstract	iii
Nomenclature	iv
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경 및 동향	1
1.2 연구내용 및 구성	2
제2장 수조 시스템의 모델링	3
2.1 수조 시스템	3
2.2 시스템 파라미터	7
제3장 퍼지-PID 제어기 설계	8
3.1 PID 제어	8
3.1.1 제어동작 특성	8
3.1.2 PID 제어기 파라미터 동조	13
3.1.3 수조 시스템의 PID 제어기 파라미터	15
3.2 퍼지 이론	16
3.3 퍼지 모델링	19
3.4 퍼지-PID제어기의 설계	22
제4장 시뮬레이션 및 고찰	25
4.1 PID 제어기의 응답	25
4.1.1 서브 제어기에 의한 서브 모델의 계단 응답	28
4.1.2 서브 제어기에 의한 퍼지 모델의 계단 응답	34
4.2 퍼지-PID 제어기에 의한 퍼지 모델의 계단 응답	37
4.2.1 일정한 상승 계단 입력 변화에 대한 응답	38
4.2.2 다양한 상승 계단 입력 변화에 대한 응답	39

4.2.3 하강 계단 입력 변화에 대한 응답	40
제 5 장 결 론	41
참 고 문 헌	42



Level Control of Water Tank Systems using Fuzzy-PID Controller

Sang-Heon Lee

*Department of Naval Study, Graduate School
Korea Maritime and Ocean 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 author, therefore, propose a fuzzy-PID controller which combines PID control and fuzzy technique to obtain the good performance of water level control system on the whole operating range.

To combine the PID controller with fuzzy logic, at first, the sub-PID controller is designed at each water level, whose parameters are adjusted using trial and error. Then fuzzy "If~Then" rules combine the sub-PID controllers as a consequence part.

Finally, the effectiveness of the proposed fuzzy-PID controller is verified through computer simulation.

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	수조의 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
F^1, F^2, F^3	소속함수
G_t	수조의 전달함수
G_v	제어밸브의 전달함수
H	수조의 수위
K_a	제어밸브의 이득
K_p, K_i, K_d	PID 제어기의 비례, 적분, 미분 이득
m_i	i 번째 소속함수의 평균
σ_i	i 번째 소속함수의 표준편차
PB	비례제어기의 비례대
Q_i	수조의 유입량
Q_o	수조의 유출량
R	퍼지 관계
R^i	i 번째 퍼지 규칙

R_0	수조 출구의 흐름 저항
r	퍼지 규칙의 개수
s	수조 출구의 단면적
T_a	제어밸브의 이득
u	제어밸브의 입력
u_0	초기상태의 제어입력
x, x'	언어적 변수, 퍼지 변수
y	수조의 수위
z	언어적 변수, 퍼지 변수
z_i	지지값
ρ^i	i 번째 규칙의 기여도



제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 동향

어떤 제어시스템을 설계하기 위해서는 제어대상에 대한 수학적 모델링이 필요하고 그것이 비선형인 경우에는 선형화 하여 제어를 설계한다. 비선형 시스템을 선형화 하면 모델링 오차가 발생하고 이로 인해 운전 중 시스템에 변화가 생기면 유연하게 대처하지 못하는 경우가 생길 수 있다.

본 논문에서 다루는 수조 시스템의 수위를 제어하기 위해서는 사용 유량에 따라 유입밸브를 적절히 제어해야 하는데 실제 산업현장에 적용되는 수조 시스템의 대부분은 PID (Proportional-Integral-Derivative) 계열의 제어를 사용하여 유입밸브의 개도를 제어하고 있다. 보통 이 밸브는 모터에 의해 구동되는 서보밸브를 사용하는데, 밸브의 시정수가 크기 때문에 목표값 변경에 대한 응답 속도가 느린 특성을 보인다. 이를 보완하기 위하여 제어기의 이득을 크게 하면, 제어시스템의 오버슈트(overshoot)가 증가되고, 제어밸브의 비선형 포화 동작을 유발할 뿐만 아니라, 제어시스템을 불안정하게 하는 요인이 되기도 한다. 이와 반대로 제어기의 이득을 줄이면 목표치 변경에 대한 제어시스템의 추종속도가 느려 만족할 만한 제어성능을 얻지 못하게 된다.

이와 같이 PID 제어는 목표치와 출력의 오차에 대하여 비례, 적분, 미분의 세 가지 조합된 연산을 통하여 제어기의 출력을 결정하여 제어하기 때문에 제어기 파라미터의 정확한 동조는 매우 중요하다. 또한 기존의 PID 제어기는 이들 파라미터를 정확하게 동조하였다 하더라도 운전조건의 변화 등으로 인해 제어대상의 파라미터가 변화하면 제어를 다시 동조하거나, 제어기 파라미터를 인위적으로 변경해 주어야 하는 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 제어대상을 몇 개의 구간으로 나누어 각 구간별로 서브 PID 제어기(sub-PID controller)를 설계하고 이들 서브 PID 제어를 퍼지 이론을 적용하여 결합하는 연구가 많이 이루어져 왔다. 그러나 제어대상도 몇 개의 구간으로 나누어 서브 모델을 만들고, 각 서브 모델별 제어를 설계한 후, 이들 서브 모델(sub-model)도 퍼지결합하고 서브 제어기도 퍼지결합하여 제어하는 연구는 그렇게 많지 않다. 여기서 언급한 퍼지 이론은 1965년 Lofti Zadeh에 의해 제창된 이후로 오늘날 적응제어에서부터 인공지능에 이르

기까지 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]~[4].

1.2 연구내용 및 구성

본 논문에서 제어대상으로 선정한 수위제어시스템은 시스템의 파라미터가 동작점에 따라 심하게 변동되기 때문에 수위에 따른 세 개의 서브 모델을 고려한다. 이때 수위 시스템의 각 서브 모델의 시정수와 이득은 실험을 통하여 구하고, 각 서브 모델을 제어하기 위한 서브 PID 제어기의 파라미터는 시행착오를 통해 동조한다.

이와 같은 과정을 통해 얻어진 각각의 서브 모델과 서브 PID 제어기는 퍼지 알고리즘으로 결합하여 운전조건(수위)이 변화할 때에도 유연하고, 적절한 수위 제어가 될 수 있도록 하는 퍼지-PID 제어기 설계 기법을 제안한다.

우선, 각 구간별로 설계된 서브 PID 제어기는 각 구간별 서브 모델에 적용하여 시행착오를 통해 얻어진 제어기의 유효성을 확인한다. 그리고 설계구간 이외의 서브 모델에 서브 PID 제어기를 적용하여 모델의 파라미터가 변화하는 경우 제어기의 파라미터를 재조정하지 않으면 좋은 응답특성을 기대할 수 없다는 것도 확인한다. 또한, 서브 PID 제어기를 퍼지 결합한 퍼지-PID 제어기를 각 서브 모델에 적용하여 제어기만 퍼지결합한 경우의 응답특성을 살펴본다. 마지막으로 각 서브 모델을 퍼지 결합한 수조 시스템에 퍼지-PID 제어기를 적용하고, 앞서 적용한 제어기와 비교 분석하여 본 논문에서 제시하는 설계기법의 타당성을 입증한다.

본 논문은 모두 5장으로 구성되어 있다. 제1장은 서론이며 제2장에서는 수조 시스템을 수학적으로 모델링하였으며, 제3장에서는 본 논문에서 사용된 제어 기법인 PID 제어와 퍼지제어 이론에 대하여 소개하고, 퍼지-PID 제어기를 설계하였다. 제4장에서는 제3장에서 설계된 퍼지-PID 제어기를 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 제5장에서는 본 논문에서 최종적으로 얻어진 결론을 요약한다.

제2장 수조 시스템의 모델링

2.1 수조 시스템

수조 시스템의 수위 제어 목적은 수조의 목표수위를 일정하게 유지하거나 원하는 수위로 신속하게 변화시키는 것이다. 그러나 수조 내부의 액체의 온도변화나 외란 등의 이유로 넘침이나 수조의 고갈 등의 위험이 따를 수 있다. 이러한 수조 시스템의 수위를 제어하기 위해 본 장에서 수조 시스템의 수학적 모델을 도출하고자 한다.

먼저 단일 수조의 입력유량에 대한 수위 변화로 표현되는 수조를 모델링한다. 수조의 유입유량, 유출유량, 수위, 탱크 단면적, 탱크 출구측 배관에서의 유출저항을 각각 Q_i , Q_o , H , A , R 로 각각 표현한다.

만약 수조의 유입유량 Q_i 와 탱크 출구의 유출유량 Q_o 이 같다면 수조의 수위 H 는 일정한 평형상태를 유지하고, 이때 수조 시스템은 입력 Q_i 와 출력 H 와의 관계에 대하여 단일입력 단일출력(SISO) 시스템으로 모델링할 수 있다.

그림 2.1과 같이 수위가 평형상태를 유지하고 있는 경우, 유입 및 유출량의 차이와 수조의 체적변화는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$(Q_i - Q_o) \cdot dt = A \cdot dH \quad (2.1)$$

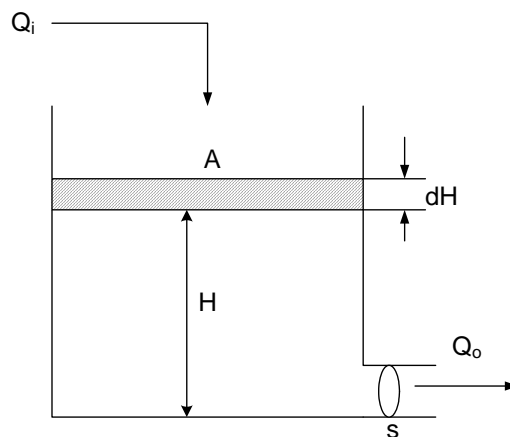


Fig. 2.1 Single water tank

식 (2.1)은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A}(Q_i - Q_o) \quad (2.2)$$

베르누이 방정식(Bernoulli's equation)에 의해 수조 출구의 속도는 $v = \sqrt{2gH}$ [cm/s]로 표현되고, 여기에 수조 출구 단면적 s [m²]을 곱하면 유량(flow rate, [cm³/s])이 된다. 따라서 출구유량 Q_o 는 다음 식과 같이 표현할 수 있으며 수조 출구측 유체저항 R_o 로도 표현할 수 있다.

$$Q_o = s\sqrt{2gH} = \frac{1}{R_o}H \quad (2.3)$$

또한 유입량과 유출량에 의해 수위가 평형을 이루고 있는 수조에서 전기공학 분야의 전압과 전류, 저항의 관계를 응용하면 밸브 오리피스에서의 유체저항 R_o 는 다음과 같이 정의되는데 이 식을 이용해서도 평형상태에서 유량과 수위에 관계되는 저항 R_o 의 관계를 나타낼 수 있다.

$$R_o = \frac{\text{Water level}}{\text{Flow rate}} \quad (2.4)$$

식 (2.2)와 식 (2.3)에서 수조 유입량에 대한 수위의 관계를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{H} = -\frac{1}{AR_o}H + \frac{1}{A}Q_i \quad (2.5)$$

여기서 Q_i 는 외부 유입유량, R_o 는 수조 출구측 유체저항, H 는 수조의 수위를 의미한다.

수조 유입량을 결정하는 유량제어밸브는 일반적으로 동력전달 요소의 감속비가 크고 밸브 부분의 마찰저항이 커서 식 (2.6)과 같이 일차계의 선형모델로 간주할 수 있다.

$$\dot{Q}_i = -\frac{1}{T_a}Q_i + \frac{K_a}{T_a}u \quad (2.6)$$

여기서 u 는 제어밸브의 입력, K_a 는 제어밸브의 이득 [$\text{cm}^3/\text{s}\cdot\text{V}$], T_a 는 제어밸브의 시정수 [s]이다.

식 (2.5)와 식 (2.6)로부터 제어대상을 블록선도로 표시하면 다음과 같다.

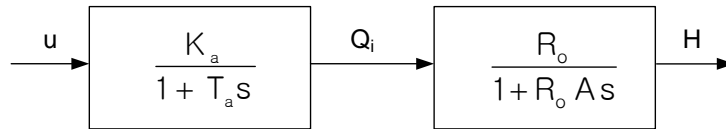


Fig. 2.2 Block diagram of the linearized plant

제어대상인 수조 시스템의 블록선도에 대해 입력 u 에 대한 출력 H 의 전달함수를 구하면 식 (2.7)과 같다.

$$\frac{H(s)}{U(s)} = \frac{R_o \cdot K_a}{R_o \cdot A \cdot T_a \cdot s^2 + (R_o \cdot A + T_a)s + 1} \quad (2.7)$$

Fig. 2.2의 블록선도와 식 (2.7)로부터 상태변수를 $x_1 = H$, $x_2 = \dot{H}$ 로 정의하고 상태변수 방정식으로 나타내면 다음과 같게 된다[5],[6].

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (2.8)$$

$$y = \mathbf{C}\mathbf{x}$$

여기서 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T = [H \ \dot{H}]^T \in \mathbf{R}^2$ 상태벡터, $u \in \mathbf{R}^1$ 입력, $y \in \mathbf{R}^1$ 출력이다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{R_o A T_a} & -\frac{(R_o A + T_a)}{R_o A T_a} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{R_o K_a}{R_o A T_a} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [1 \ 0]$$

수조 시스템을 블록선도로 나타내면 Fig. 2.3과 같다.

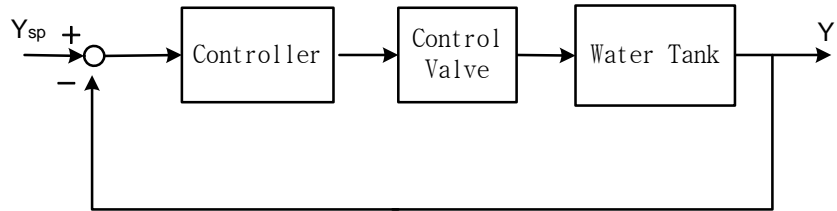


Fig. 2.3 Block diagram of water level control system

Fig. 2.4는 본 논문의 제어시스템인 수조 시스템을 나타내고 있다.

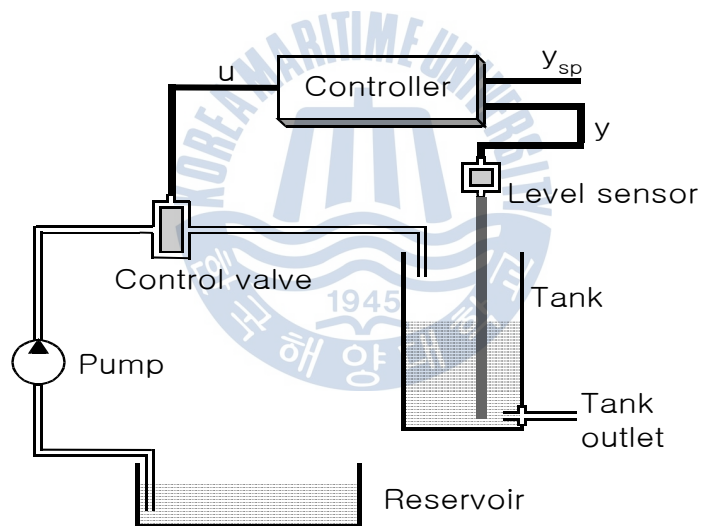


Fig. 2.4 Tank level control system

2.2 시스템 파라미터

본 논문에서는 정상상태의 수위가 각각 4cm, 8cm, 12cm일 때 수조를 선형으로 모델링하여 이 세 개의 모델을 각각 서브 모델이라 하고 sub-MDi(i=1,2,3)라 표현한다.

수조의 모델은 1차 지연 전달함수 형태로 나타나는데 수위별 서브 모델의 이득과 시정수는 Table 2.1과 같다.

또한 제어밸브의 전달함수도 1차 지연 전달함수로 표현되는데 시정수는 6.5, 이득은 62.5/20이다.

Table 2.1. Specifications of tank system

Parameters	Operating water level[cm]	Time constant	Gain
sub-MD1	4	63.8	0.322
sub-MD2	8	120.3	0.61
sub-MD3	12	176	0.89

Table 2.1의 값을 반영한 제어밸브의 전달함수 G_v 와 각 수조의 전달함수 G_t 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{sub-MD1(4cm 모델)} \quad G_v &= \frac{62.5/20}{1+6.5s} & G_t &= \frac{0.322}{1+63.8s} \\
 \text{sub-MD2(8cm 모델)} \quad G_v &= \frac{62.5/20}{1+6.5s} & G_t &= \frac{0.61}{1+120.3s} \\
 \text{sub-MD3(12cm 모델)} \quad G_v &= \frac{62.5/20}{1+6.5s} & G_t &= \frac{0.89}{1+176s}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

제3장 퍼지-PID 제어기 설계

3.1 PID 제어

동적 시스템을 제어하기 위해 가장 널리 이용되고 있는 PID 제어는 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[7].

3.1.1 제어동작 특성

① 비례동작(P)

비례동작은 식 (3.2)와 같이 목표값과 현재 출력과의 오차에 적절한 비례이득 K_p 를 곱하여 제어기 출력을 만들어낸다. Fig. 3.1과 같이 제어기 출력의 전체범위와 그에 해당하는 오차의 크기와의 비를 비례대(PB, Proportional Band)라고 하며 PB의 크기에 따라 제어기의 민감도가 결정된다. 즉 비례대는 100%의 출력 변화를 만들어 내는 데에 필요한 입력신호의 변화를 %로 나타내는 값이다.

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

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

비례제어 동작은 0형 시스템에서 오프셋(off-set)이라 하는 영구적인 잔류 오차가 정상상태에서 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 비례동작만으로는 불가능하며 대부분의 경우 적분동작이 함께 사용된다.

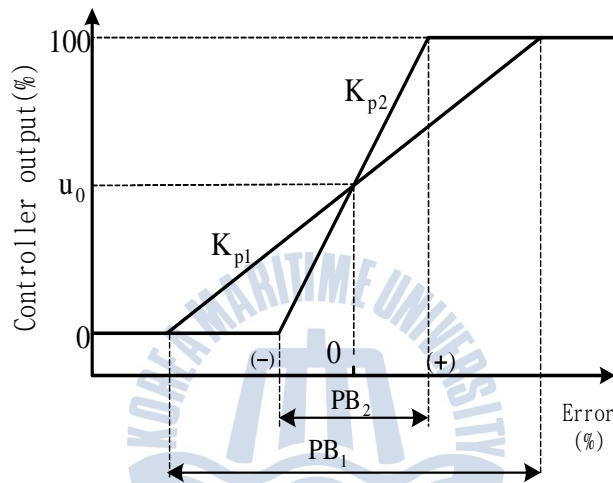


Fig. 3.1 The proportional band

② 적분동작(I)

앞에서 설명한 것처럼 비례제어기는 0형 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.

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

오차에 대한 적분제어기의 동작은 Fig. 3.2에 나타내고 있으며, 제어기 출력은 오차의 적분값과 이득 K_i 의 크기에 따라 변화한다. 오차의 합이 0이면 적분제어기는 그 당시의 출력상태로 고정되며, 오차가 0이 아니면 출력은 1%의 오

차에 대하여 $K_i(\%/sec)$ 의 비율로 출력이 증가 또는 감소한다. 적분제어기는 시스템의 파라미터가 변화하는 시스템에서도 정상상태 오차를 없앨 수 있으나 제어 동작의 특성상 오버슈트를 크게 하고 출력이 정상상태로 수렴하기 전까지 진동을 유발시키는 단점이 있다.

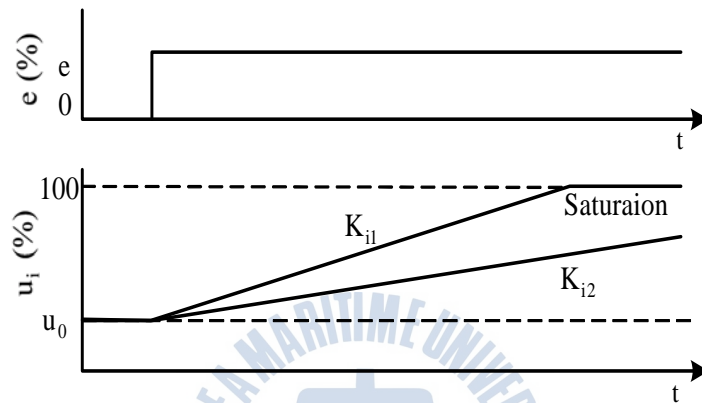


Fig. 3.2 Integral control action

③ 미분동작(D)

미분제어 동작은 오차의 미분 즉, 현재의 오차의 변화율에 대해 반응한다. 식 (3.5)와 같이 표현되는 미분제어기의 출력은 오차가 일정할 때 0이 되므로 단독으로는 사용될 수 없으며 비례제어기나 적분제어기와 함께 사용되어야 한다.

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

미분제어기는 Fig. 3.3과 같이 오차의 변화율에 따라 제어기의 출력이 급격히 변화할 수 있기 때문에 동적 응답특성이 빠른 시스템에서는 주의 깊게 사용해야 한다. 그리고 잡음(noise)이 입력에 포함되어 있으면 미분동작은 보통 이 잡음을 크게 증폭하므로 잡음 차단에 특별한 주의를 하여야 한다.

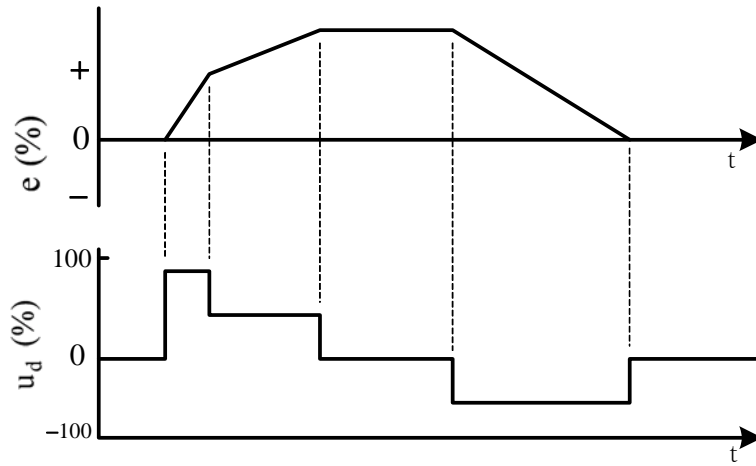


Fig. 3.3 Derivative control action

④ PI 제어(Proportional-Integral control)

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

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

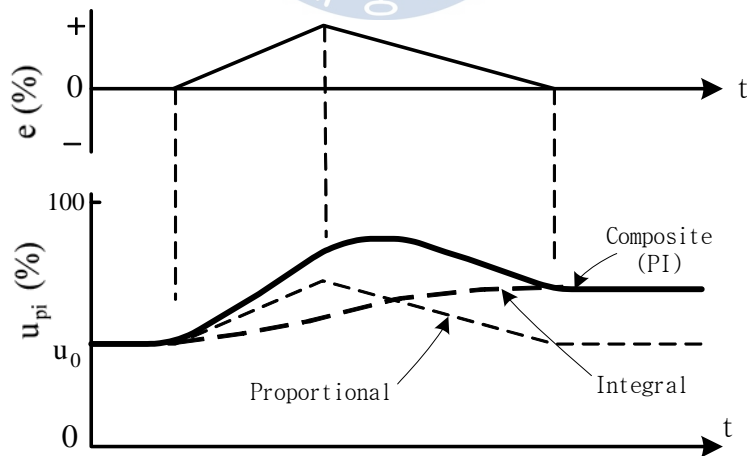


Fig. 3.4 Proportional-Integral control action

Fig. 3.4는 오차에 대한 PI 제어기의 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.

⑤ PD 제어(Proportional-Derivative control)

식 (3.7)과 같은 출력을 갖는 PD 제어기는 비례제어 동작에서 발생하는 오프셋을 제거하지 못하지만, 오차의 변화에 의해 신속하게 반응하므로 오프셋이 허용범위 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.

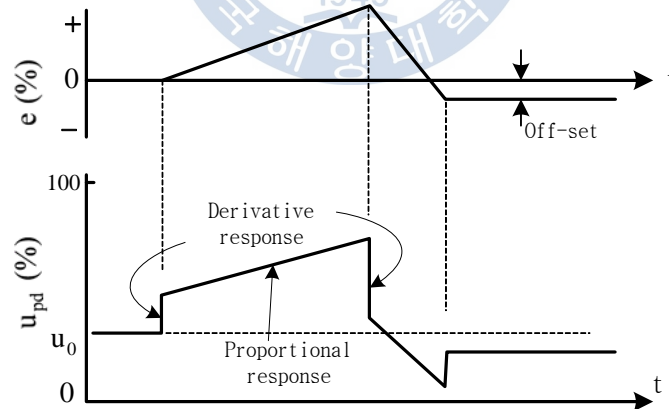


Fig. 3.5 Proportional-Derivative control action

⑥ PID 제어(Proportional-Integral-Derivative control)

식 (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.

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

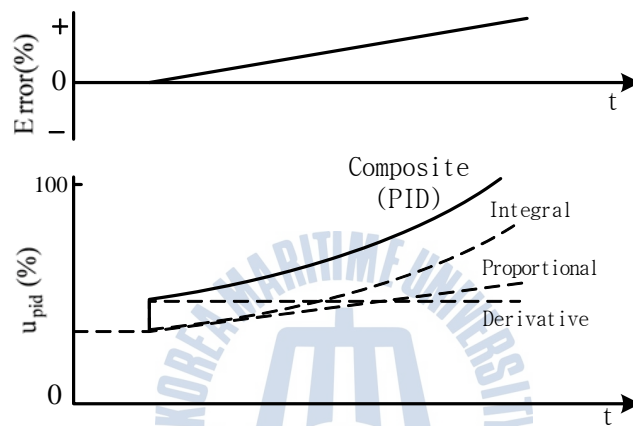


Fig. 3.6 Proportional-Integral-Derivative control action

3.1.2 PID 제어기 파라미터 동조

P 제어기는 가장 간단한 제어기로서 적절히 동조(Tuning)되었을 때 근본적으로 안정하며 동조하기는 쉬우나 수조와 같은 0형 시스템에 대해서는 정상상태에서 오프셋(offset)이 발생한다. PI 제어기는 P 제어기에서 발생된 오프셋을 제거할 수 있으며 적분 동작 하나보다는 더 좋은 동적응답을 얻을 수 있다.

PD 제어기는 P 제어기 단독보다 오프셋이 감소되며 응답지연을 감소시켜 더 빠른 응답을 얻을 수 있다. D 제어기를 도입함으로써 비레이득을 더 증가할 수 있다.

PID 제어기는 가장 복잡하고 고가이기는 하나 빠른 응답을 얻을 수 있고 오프셋(Off-set)이 없으며 적절히 동조되면 가장 좋은 제어기가 된다. 이러한 이유로 PID 제어기는 산업현장에서 가장 많이 사용되는 제어기이며 제어대상에 따라 제어기의 파라미터(K_p , K_i , K_d)를 어떻게 선정하느냐에 따라 제어기의 성능

이 결정된다. 일반적으로 현장에서 파라미터 조정은 제어대상의 특성과 작업자의 경험에 의해 시행착오의 결과로 결정된다. 이를 위해서는 PID 제어기 파라미터 조정에 따른 시스템 응답특성을 잘 알고 있어야 제어기의 적절한 동조가 가능하다.

Fig. 3.7은 임의의 시스템에 대하여 PI 제어기의 각 파라미터를 변경함에 따른 시스템의 응답 특성을 나타내고 있다.

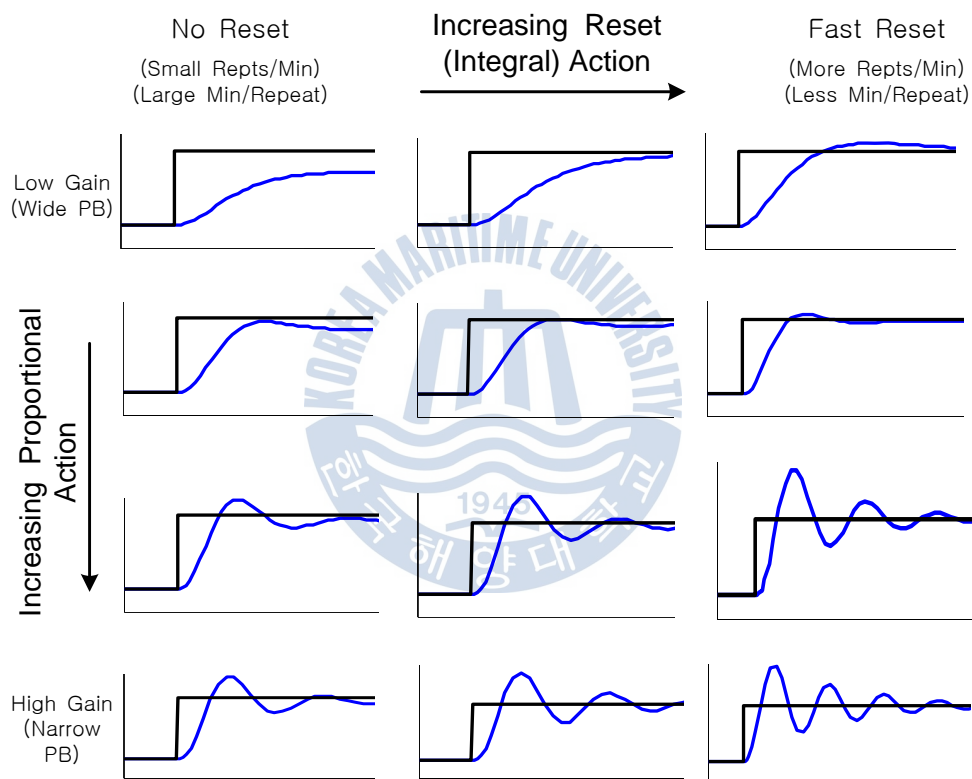


Fig. 3.7 PI control response characteristics

제어 시스템은 Fig. 3.8과 같이 제어기와 제어대상을 포함하는 폐루프 블록선도로 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.

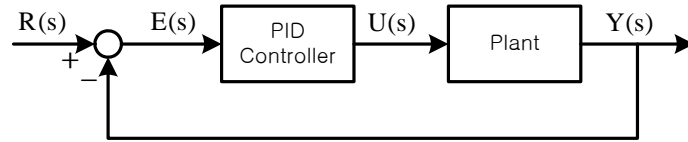


Fig. 3.8 Block diagram of PID control system

따라서 제어장치의 성능을 보장하기 위해서는 이 세 개의 파라미터를 적절히 조정하여야 한다.

3.1.3 수조 시스템의 PID 제어기 파라미터

수조의 서브 모델은 수위가 4cm, 8cm, 12cm의 정상상태에서 모델링하였고 이에 대한 결과는 2장에서 나타내었다. 각 서브 모델(sub-MDi)별로 sub-PIDi 제어기를 각각 설계하고, 이들 sub-PIDi 제어기를 기반으로 다음 장에서 설명할 퍼지기법을 활용하여 수조 시스템에 적용하고자 한다.

각 sub-MDi의 수위를 조절하기 위한 sub-PIDi 제어기의 파라미터는 시행착오를 통해 구하였고, 그 값들은 Table 3.1과 같다.

Table 3.1. Specifications of parameter for PID controller

Sub-model	Parameter Gain			Sub-PID controller
	K_p	K_i	K_d	
sub-MD1	9.5	0.08	18.2	sub-PID1
sub-MD2	6.5	0.04	12.7	sub-PID2
sub-MD3	5.9	0.03	10.5	sub-PID3

3.2 퍼지 이론

퍼지이론은 인간의 언어 및 사고와 관련된 애매함(fuzziness)을 수리적으로 취급할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이것은 전통적인 논리 시스템보다 실제 세계의 근사적(approximate)이고 부정확한 성질(inexact nature)을 표현하는데 효과적이다.

퍼지제어 시스템의 일반적인 구조는 Fig. 3.9와 같이 입력값을 언어변수와 대응되는 소속값으로 바꾸는 퍼지화부(fuzzification interface), 퍼지 “If-then” 규칙을 저장하며 퍼지집합의 소속함수(membership function)를 정의하는 지식베이스부(knowledge base), 퍼지 규칙베이스를 가지고 추론을 행하는 퍼지 추론부(inference engine), 추론에 의해 얻어진 퍼지출력을 상수 출력값으로 바꾸어 주는 비퍼지화부(defuzzification interface)로 구성된다.

퍼지제어 시스템의 추론과정은 센서로부터 물리량이나 수치적 명령 등의 보통의 수치정보를 퍼지시스템이 이해할 수 있도록 변환시키는 퍼지화부에서 소속함수를 이용하여 퍼지화를 수행하고 인간의 추론형태를 모방하는 퍼지추론부에서 식 (3.9)와 같이 퍼지조건과 합성규칙을 사용하여 규칙베이스의 퍼지 제어 규칙을 추론, 퍼지입력에 대한 퍼지출력을 추론한다.

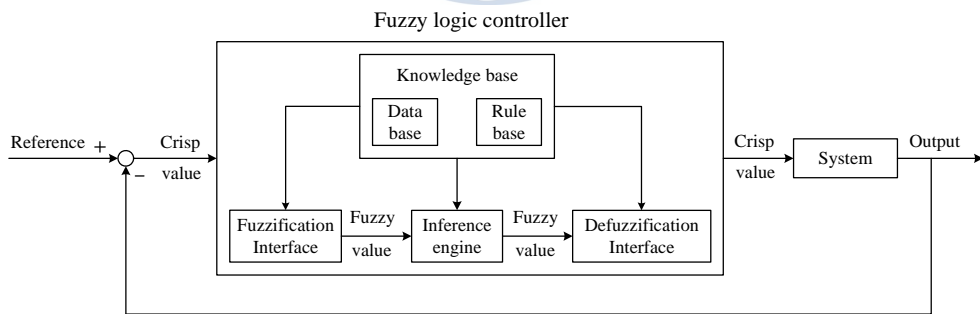


Fig. 3.9 Basic structure of a fuzzy logic controller

$$\begin{array}{l}
\text{Premise (사실) : } x \text{ is } A' \\
\text{Implication (규칙) : } \text{If } x \text{ is } A \text{ then } z \text{ is } C \\
\hline
\text{Consequence (결론) : } z \text{ is } C'
\end{array} \quad (3.9)$$

여기서, x, z 는 퍼지변수이며, A 와 A' , C 와 C' 는 각각 적절한 퍼지집합으로 A' 는 A 에 가깝고 C' 는 C 에 가깝다는 것을 의미한다.

이와 같은 퍼지추론에 이용되는 방법에는 사용되는 규칙 형태에 따라 Mamdani에 의한 추론법[8], Larsen에 의한 추론법[9], Mizmotto 등에 의한 추론법[10], Takagi와 Sugeno에 의한 추론법[11] 등이 있다.

본 논문에서는 이 중에서 Takagi-Sugeno의 추론방법을 사용한다. 이 방법은 각 규칙의 출력이 입·출력의 선형식이고 전체적인 출력은 각 규칙에 대한 출력의 가중평균으로 이루어진다. 이때 사용되는 퍼지규칙은 다음과 같다.

$$\begin{array}{l}
R^i: \text{If } x_1 \text{ is } A_{1,i} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{2,i} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_{n,i} \\
\text{then } z_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)
\end{array} \quad (3.10)$$

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 퍼지집합, z_i 는 후건부가 명확한 함수이다.

Fig. 3.10은 Takagi-Sugeno의 방법에 의한 2입력 r 규칙의 추론과정을 나타낸 것이다. 각 퍼지제어 규칙의 적합도는 각 규칙의 소속정도에서 “min” 연산 또는 “product” 연산을 행하여 구하고, 식 (3.11)과 같이 이를 가중평균하여 명확한 출력을 얻게 된다. 이 추론법은 비퍼지화 과정이 필요없어 시간이 절약되는 장점을 가지고 있다.

$$z = \frac{\sum_{i=1}^r (\rho_i \cdot z_i)}{\sum_{i=1}^r \rho_i} \quad (3.11)$$

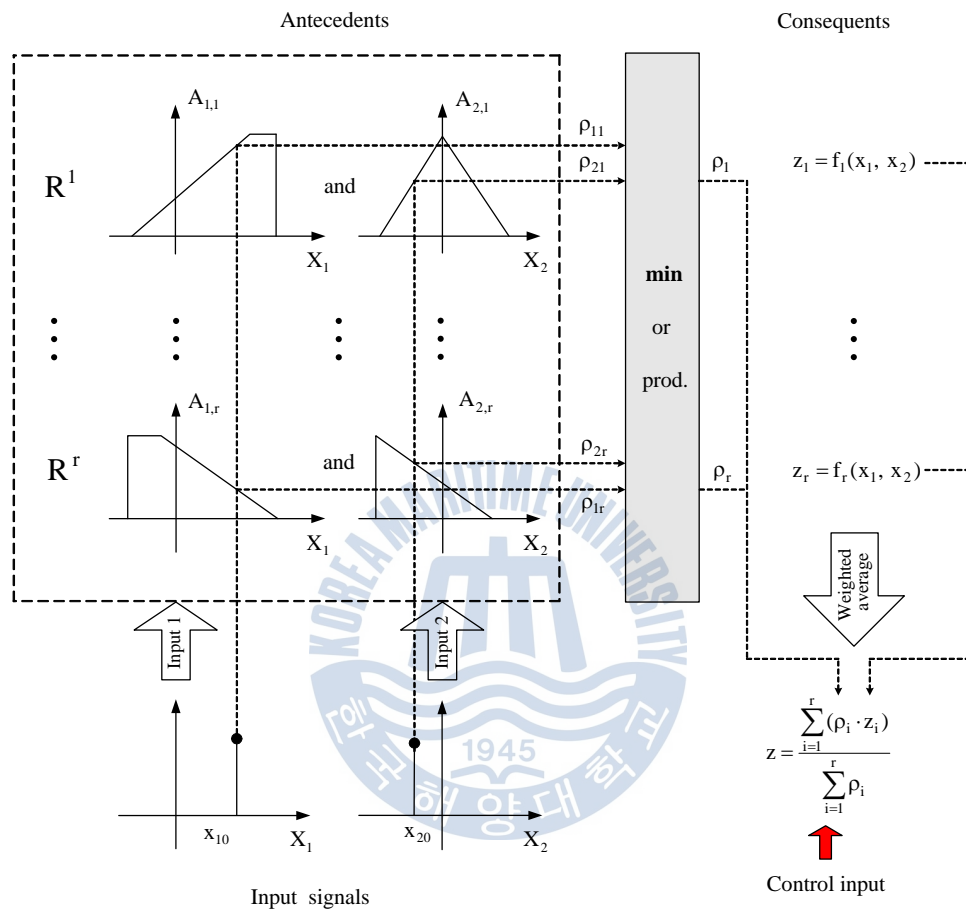


Fig. 3.10 Inference process of the Takagi-Sugeno method

3.3 퍼지 모델링

여기서는 2장에서 동작점(4cm, 8cm, 12cm 수위) 별로 얻어진 3개의 선형모델을 퍼지결합하는 방법에 대해 알아보기로 한다.

이때 퍼지모델의 입력신호는 수조의 유입유량이고, 퍼지분할에 사용된 퍼지 소속함수인 F^1, F^2, F^3 는 각각 수조의 수위를 의미한다. 이를 정의하기 위해서 식 (3.12)와 같은 가우스(Gauss)함수를 사용하였으며, 그 모양은 Fig. 3.11과 같다.

$$F^1(y) = \begin{cases} 1 & , y < m_1 \\ \exp\left(-\frac{(y-m_1)^2}{2(\sigma_1)^2}\right) & , y \geq m_1 \end{cases} \quad (3.12a)$$

$$F^2(y) = \exp\left(-\frac{(y-m_2)^2}{2(\sigma_2)^2}\right) \quad (3.12b)$$

$$F^3(y) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(y-m_3)^2}{2(\sigma_3)^2}\right) & , y \leq m_3 \\ 1 & , y > m_3 \end{cases} \quad (3.12c)$$

여기서, y 는 수조의 수위, m_i 와 σ_i ($i = 1, 2, 3$)는 각 소속함수의 평균과 표준편차를 의미한다.

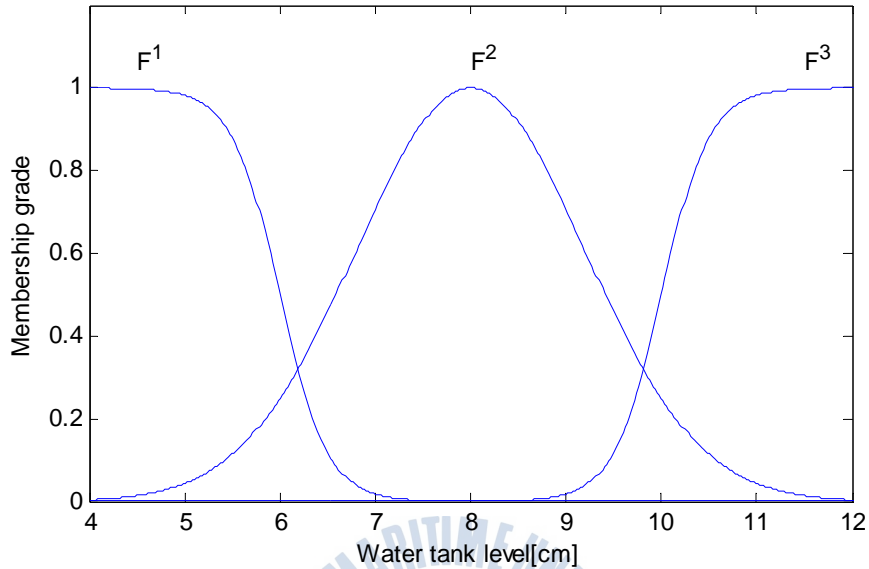


Fig. 3.11 Fuzzy partitions of the input space

식 (2.9)의 서브 모델을 퍼지결합하면 식 (3.13)과 같이 Takagi-Sugeno의 모델 형태로 나타낼 수 있다.

$$\text{If } y \text{ is } F^1, \text{ then } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}^1 \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}^1 u(t) \quad (3.13a)$$

$$\text{If } y \text{ is } F^2, \text{ then } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}^2 \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}^2 u(t) \quad (3.13b)$$

$$\text{If } y \text{ is } F^3, \text{ then } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}^3 \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}^3 u(t) \quad (3.13c)$$

여기서, \mathbf{A}^i 와 \mathbf{B}^i ($i = 1, 2, 3$)는 각각 해당 동작점에서의 시스템 행렬과 입력 벡터를 의미한다.

퍼지모델의 최종 출력은 가중평균하여 식 (3.14)와 같이 추론된다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^3 \rho^i [\mathbf{A}^i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}^i u(t)]}{\sum_{i=1}^3 \rho^i} \quad (3.14)$$

여기서, ρ^i ($i = 1, 2, 3$)는 i 번째 규칙의 기여도를 나타내며, 식 (3.15)와 같이 계산되어진다.

$$\rho^i = F^i(y) \quad (3.15)$$

여기서, $\sum_{i=1}^3 \rho^i$ 는 항상 양수이며, $F^i(y)$ 는 수조의 수위 y 에 대한 퍼지 집합의 소속정도를 의미한다.

Fig. 3.12는 지금까지 설명한 수조 시스템의 퍼지 모델링 과정을 그림으로 나타낸 것이다.

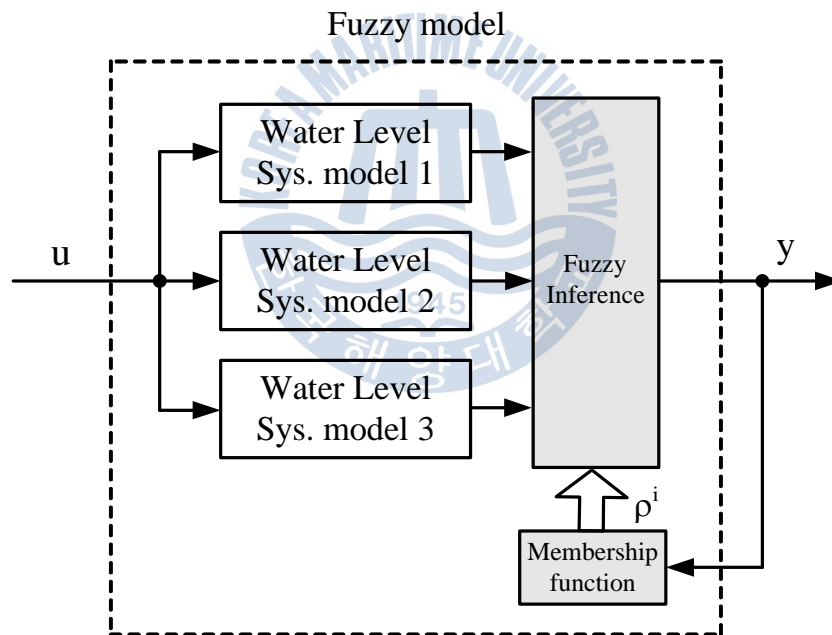


Fig. 3.12 Fuzzy model of a water level system

3.4 퍼지-PID 제어기의 설계

퍼지-PID 제어기를 설계하기 위해서 먼저 수조 시스템의 전체 수위 영역의 동특성을 나타내는 퍼지모델을 구하고, 각 동작점에 대해 sub-PID_i 제어기 (i=1,2,3)를 시행착오를 통해 설계한다.

이제 수조 시스템의 수위가 변화함에 따라 PID 제어기의 파라미터가 변경되도록 sub-PID_i(i=1,2,3) 제어기 출력을 퍼지결합 한다. 따라서 이들도 “If-then” 규칙으로 결합할 수 있고, 퍼지모델을 구하는 방법과 동일하게 Takagi-Sugeno 모델로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R^1 : \text{If } y \text{ is } F^1, \text{ then } u^1(t) = K_P^1 e(t) + K_I^1 \int_0^t e(t) dt + K_D^1 \frac{de(t)}{dt} \quad (3.16a)$$

$$R^2 : \text{If } y \text{ is } F^2, \text{ then } u^2(t) = K_P^2 e(t) + K_I^2 \int_0^t e(t) dt + K_D^2 \frac{de(t)}{dt} \quad (3.16b)$$

$$R^3 : \text{If } y \text{ is } F^3, \text{ then } u^3(t) = K_P^3 e(t) + K_I^3 \int_0^t e(t) dt + K_D^3 \frac{de(t)}{dt} \quad (3.16c)$$

R^i 와 F^i ($i = 1, 2, 3$)는 각각 i 번째 퍼지규칙과 입력공간의 분할을 의미하며, 입력공간의 분할은 퍼지 모델링에 사용된 것과 동일한 소속함수를 사용한다. $u^i(t)$ 는 i 번째 규칙에 대한 sub-PID_i 제어기의 출력이고, K_P^i , K_I^i , K_D^i 는 각각 i 번째 규칙에 대한 sub-PID_i 제어기의 비례이득, 적분이득, 미분이득이다.

따라서 퍼지-PID 제어기의 출력은 다음과 같이 추론된다.

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^3 \rho^i u^i(t)}{\sum_{i=1}^3 \rho^i} \quad (3.17)$$

여기서, ρ^i ($i = 1, 2, 3$)는 i 번째 규칙의 기여도를 나타내며, 식 (3.18)과 같이 계산된다.

$$\rho^i = F^i(y) \quad (3.18)$$

Fig. 3.13은 퍼지-PID 제어기의 구조와 전제 시스템을 보여준다.



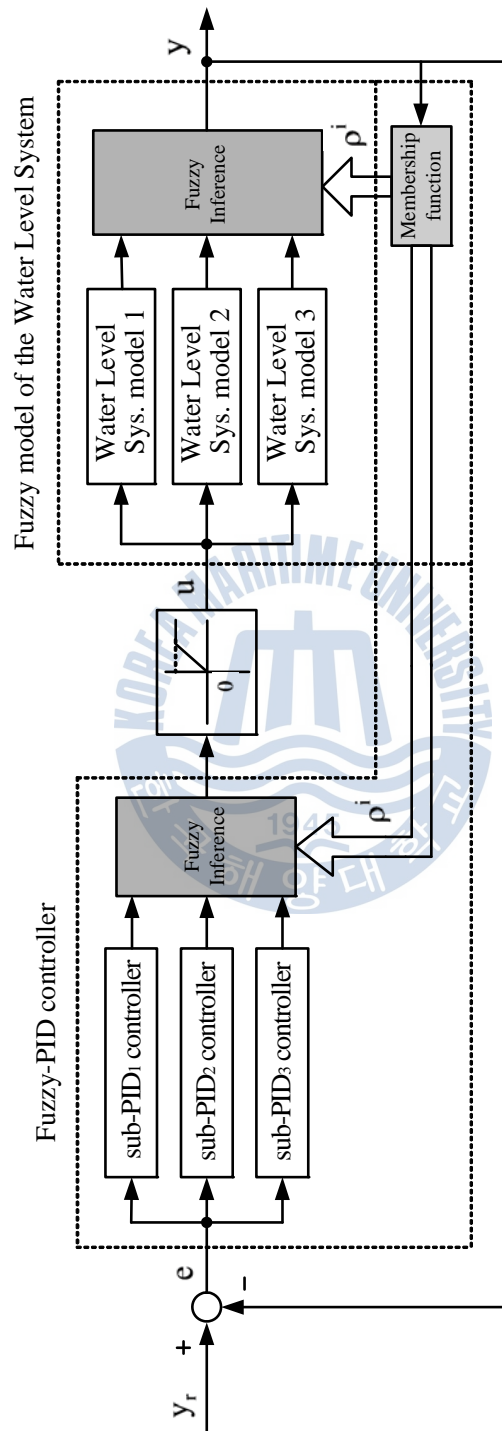


Fig. 3.13 Schematic diagram of the fuzzy-PID control system

제4장 시뮬레이션 및 고찰

제안한 PID 제어기를 이용하여 수조 시스템의 계단입력에 대한 응답성능을 시뮬레이션을 통해 확인하도록 한다.

이를 위해 우선, 수조 시스템의 동작점(4cm, 8cm, 12cm)별로 설계된 sub-PID $_i$ ($i=1,2,3$) 제어기를 수위제어시스템의 해당 서브 모델(sub-MD $_j$, $j=1,2,3$)에 적용하여 응답특성을 확인한다. 수조는 입력에 대한 응답이 느리기 때문에 적분이득의 영향이 커지게 되는데 P 제어, I 제어, D 제어의 특성을 확인할 수 있다. 다음으로 각 sub-PID $_i$ 제어기를 다른 동작점의 서브 모델(sub-MD $_j$)에 적용하여 시스템의 응답특성을 확인하도록 한다.

적용한 수조 시스템은 3개의 동작점에서 선형화된 모델이므로 이를 원래의 비선형 모델에 가깝도록 하기 위해 각 서브 모델을 퍼지결합한다. 이 퍼지모델에 동작점별 서브 제어기 sub-PID $_i$ 를 적용하여 제어성능을 확인한다. 또한 각 동작점별로 설계된 sub-PID $_i$ 제어기를 퍼지결합한 퍼지-PID 제어기를 설계하고, 퍼지-제어기를 각 서브 모델을 퍼지결합한 퍼지 모델에 적용하여 기존 PID제어기의 응답성능과 시뮬레이션을 통해 비교하고자 한다.

4.1 PID 제어기의 응답

Fig. 4.1부터 Fig. 4.3까지는 4cm, 8cm, 12cm 수조 모델을 기반으로 설계된 각 sub-PID $_i$ 제어기를 해당 수조 sub-MD $_i$ 에 적용할 때 계단응답을 나타낸 것이다. 그리고 각 동작점 모델별로 설계된 sub-PID $_i$ 제어기의 응답특성을 P 제어기, PI 제어기, PID 제어기의 응답특성과 비교한다.

동작점별 수조의 sub-MD $_i$ 에 적용한 제어기의 응답특성을 보면 P 제어기에서는 정상상태 편차(offset)가 발생했으며 PI 제어기에서는 정상편차는 제거되었지만 오버슈트가 크게 발생한 것을 볼 수 있다.

sub-PID $_i$ 제어기는 정상편차가 없고 오버슈트도 PI 제어기보다 많이 감소되었으며 목표치에 도달하는 시간도 빠른 것을 볼 수 있다. 4cm 수조 모델의 응답인 Fig. 4.1에서 P 제어기는 60초에서 안정화되어 0.38cm의 정상편차가 발생되고, PI 제어기는 0.37cm의 오버슈트가 발생되고 75초에서 안정화된 것을

볼 수 있으며, PID 제어기는 0.16cm의 오버슈트와 75초에서 정상편차 없이 안정화 되는 것을 볼 수 있다.

8cm 수조 모델인 Fig. 4.2에서 P 제어기는 80초에서 안정화되어 0.3cm의 정상편차가 발생되고, PI 제어기는 0.28cm의 오버슈트가 발생되고 90초에서 안정화된 것을 볼 수 있으며, PID 제어기는 0.12cm의 오버슈트와 68초에서 정상편차 없이 안정화 되는 것을 볼 수 있다.

12cm 수조 모델의 응답인 Fig. 4.3에서 P 제어기는 65초에서 안정화되어 0.24cm의 정상편차가 발생되고, PI 제어기는 0.25cm의 오버슈트가 발생되고 90초에서 안정화된 것을 볼 수 있으며 PID 제어기는 0.11cm의 오버슈트와 70초에서 정상편차 없이 안정화되는 것을 볼 수 있다

Fig. 4.4부터 Fig. 4.6까지는 sub-PIDi 제어기에 의한 서브 모델(sub-MDj)의 계단응답과 제어입력을 나타낸 것이다. Fig. 4.4는 4cm 수조 모델에서 설계된 서브 제어기(sub-PIDi)를 4cm, 8cm, 12cm의 수조 모델에 대해 적용하여 시뮬레이션 하였을 때의 응답과 제어입력을 나타내고 있다.

4cm 수위에서는 0.16cm의 오버슈트와 75초에 안정화 되나 8cm, 12cm 수위에서는 각각 0.37cm, 0.45cm의 오버슈트와 목표값 변경 시부터 안정화되기까지 각각 200초, 310초의 시간이 걸린다. Fig. 4.5와 Fig. 4.6은 각각 8cm, 12cm 수조 모델에서 설계된 sub-PID2, sub-PID3를 각 동작점의 수조 모델에 대해 적용한 것인데 Fig. 4.4와 같이 해당 제어 모델에서의 응답은 가장 우수하나 나머지 수위에 대해서는 응답속도가 느리고 오버슈트가 많이 발생하는 것을 볼 수 있다.

수조의 서브 모델을 퍼지 결합한 퍼지 모델에 동작점별로 설계한 서브 제어기를 적용하여 제어기의 응답특성을 확인하도록 한다. Fig. 4.7부터 Fig. 4.9까지는 sub-PIDi 제어기에 의한 퍼지 모델의 계단응답과 제어입력을 나타낸 것이다. Fig. 4.7은 4cm 동작점의 sub-PID1 제어기를 퍼지 모델에 적용할 때 계단응답과 제어입력을, Fig. 4.8은 8cm 동작점의 sub-PID2 제어기를 퍼지 모델에 적용할 때 계단응답과 제어입력을, Fig. 4.9는 12cm 동작점의 sub-PID3 제어기를 퍼지 모델에 적용할 때 계단응답과 제어입력을 나타낸 것이다.

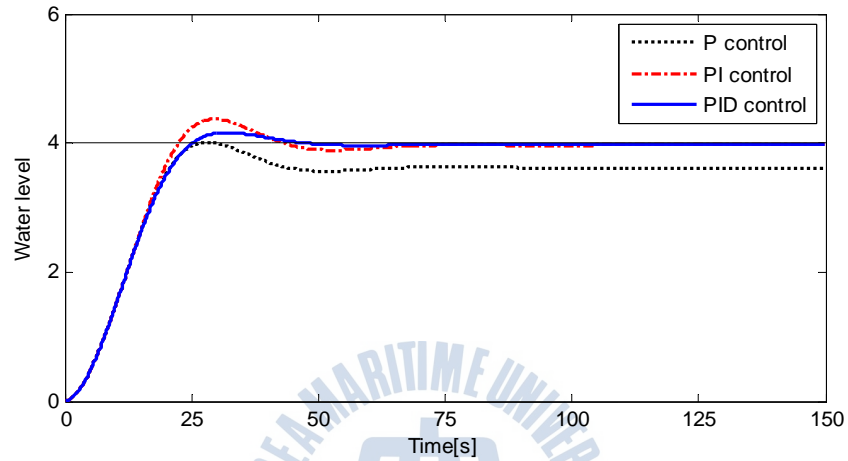
퍼지모델에서의 응답은 Fig. 4.4부터 Fig. 4.5까지의 동작점별 선형모델에 sub-PIDi 제어기를 적용한 것과 비교할 때 전반적으로 오버슈트가 크고 안정화 되는데 시간이 많이 걸리므로 제어성능이 많이 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는

수위가 변함에 따른 수조의 비선형 특성을 퍼지 결합 모델이 반영하고 있기 때문
으로 판단된다.

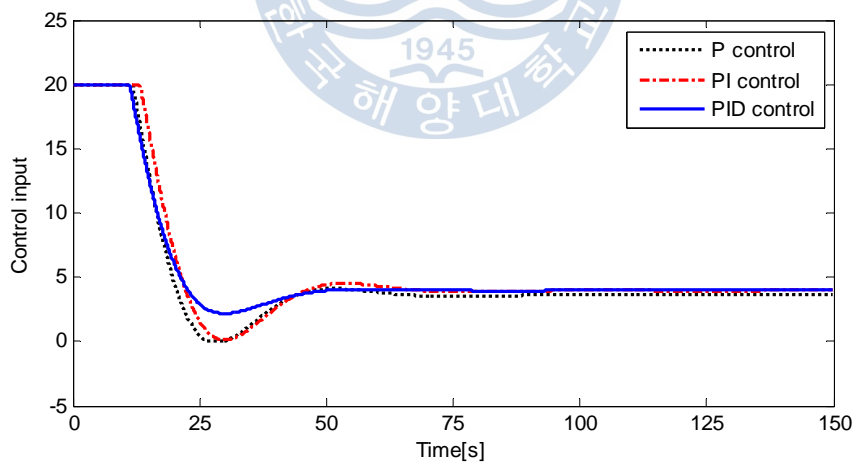
이와 같은 결과로 볼 때 P 제어기 및 PI 제어기보다 PID 제어기가 제어성능이
우수하다는 것을 확인할 수 있고, 동작점별 수조 모델에서 설계된 sub-PIDi
제어기를 다른 동작점의 서브 모델(sub-MDj)에 적용할 때는 제어성능이 떨어
지는 것을 확인할 수 있다. 또한 퍼지 결합 모델에 대해서도 제어성능이 크게
변화되는 것을 알 수 있다. 이러한 제어성능의 변화는 조작자가 실제 현장에서
적절히 수위 조절하기가 어려우므로 비선형성을 반영하고 다양한 수위 변화에
대해서 양호한 제어성능을 가지는 제어기의 설계가 필요하다고 할 수 있다.



4.1.1 서브 제어기에 의한 서브 모델의 계단 응답

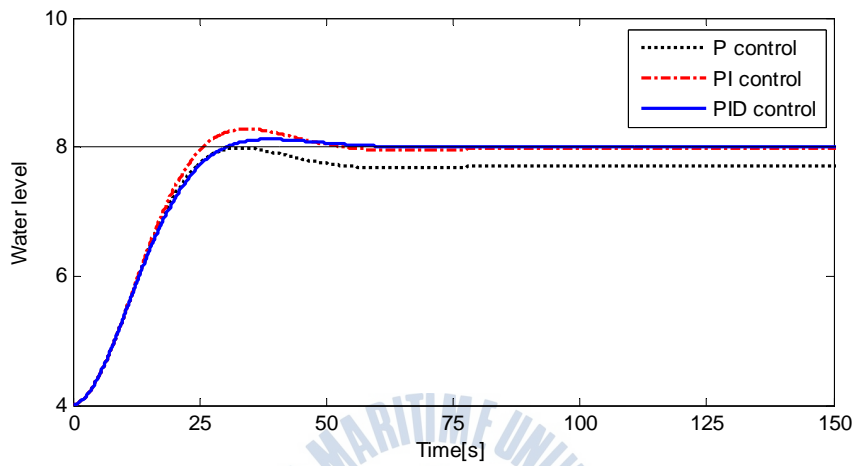


a) Step responses

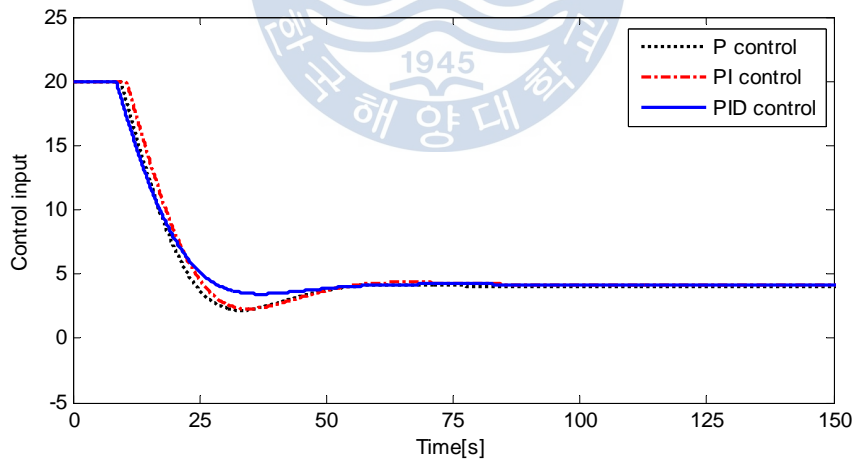


b) Control inputs

Fig. 4.1 Step responses for sub-MD1 using sub-PID1 controller

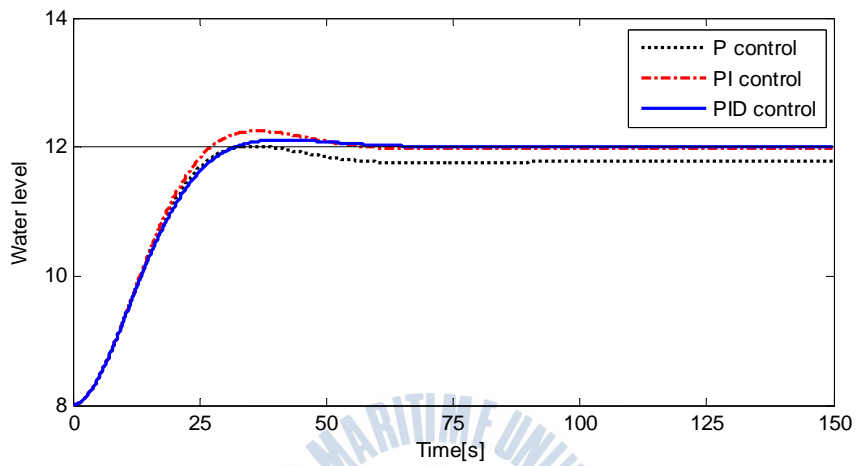


a) Step responses

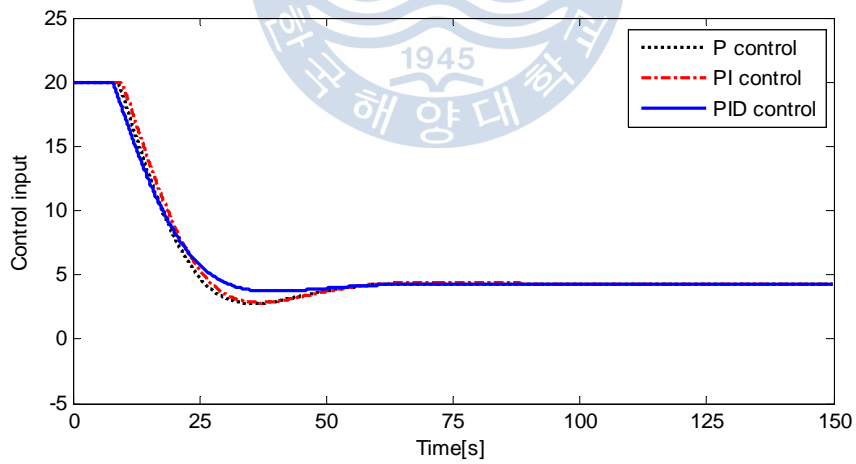


b) Control inputs

Fig. 4.2 Step responses for sub-MD2 using sub-PID2 controller

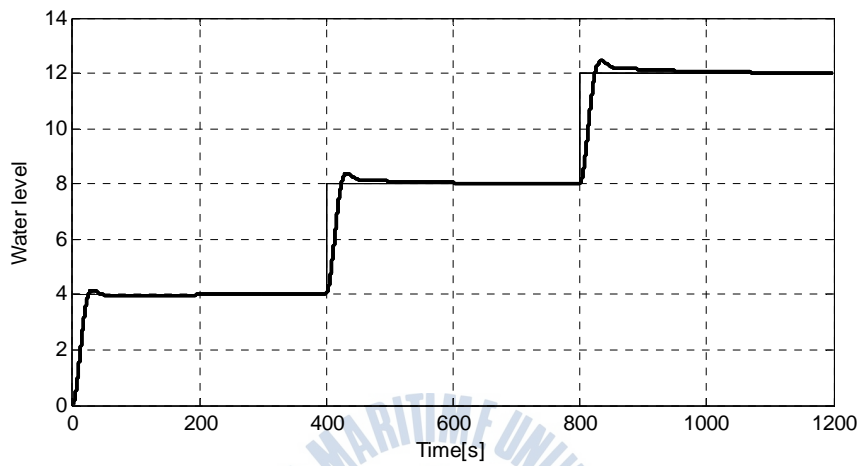


a) Step responses

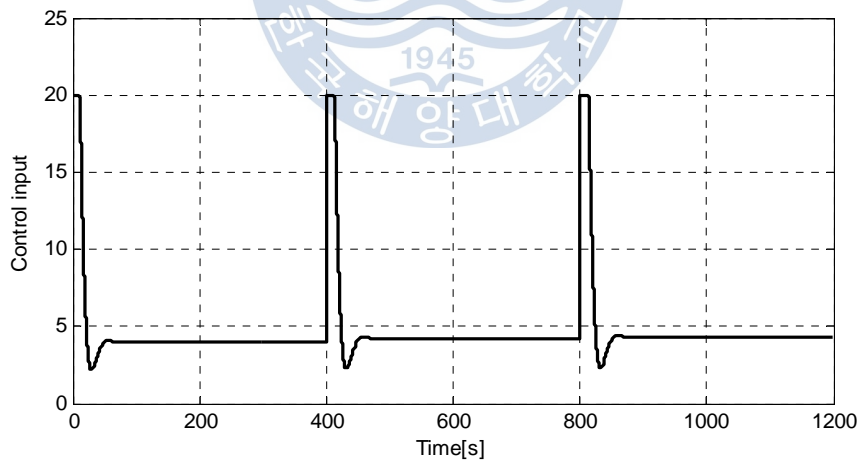


b) Control inputs

Fig. 4.3 Step responses for sub-MD3 using sub-PID3 controller

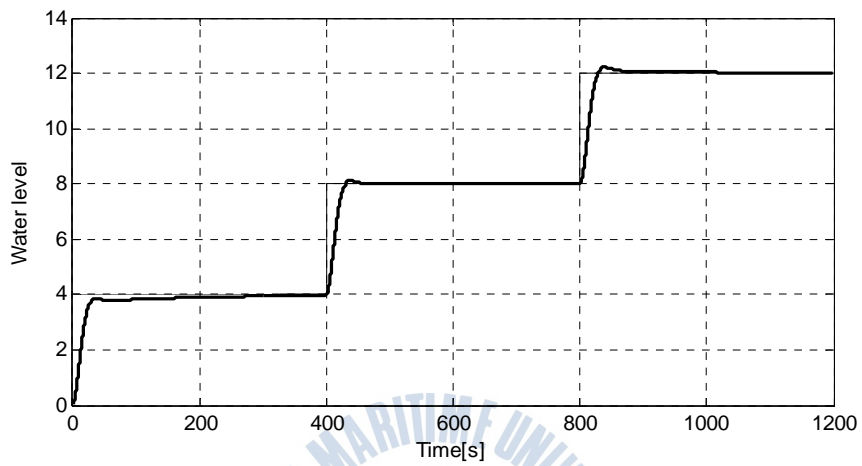


a) Step responses

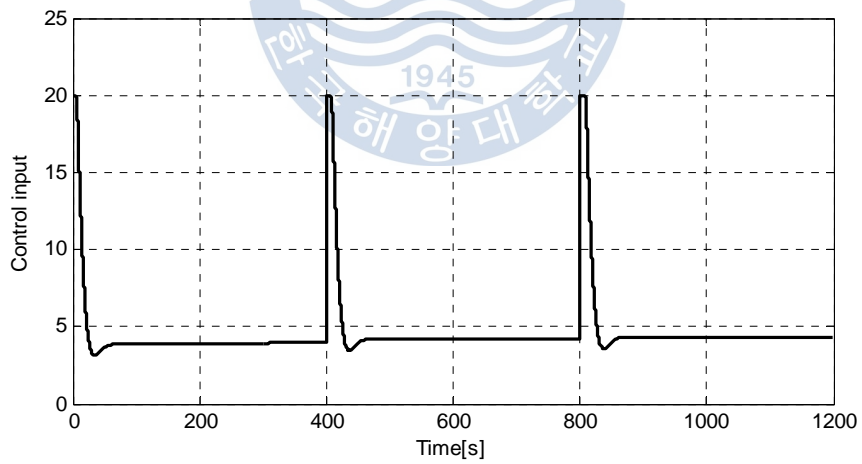


b) Control inputs

Fig. 4.4 Step responses for sub-MDi using sub-PID1 controller

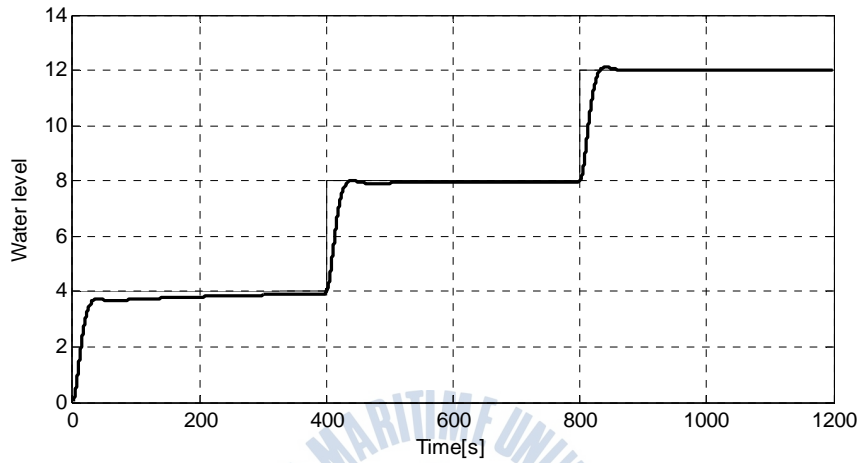


a) Step responses

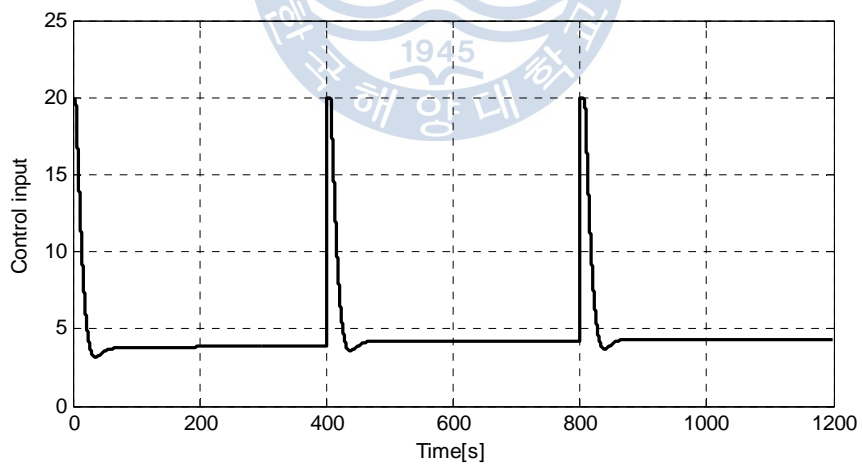


b) Control inputs

Fig. 4.5 Step responses for sub-MDi using sub-PID2 controller



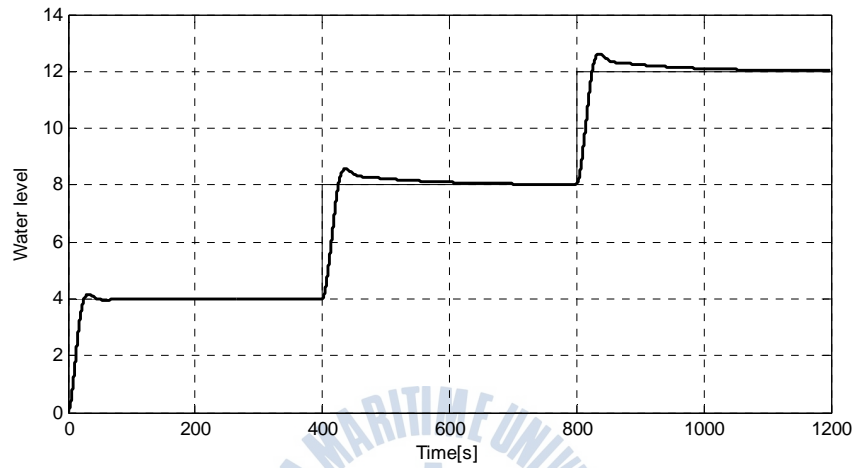
a) Step responses



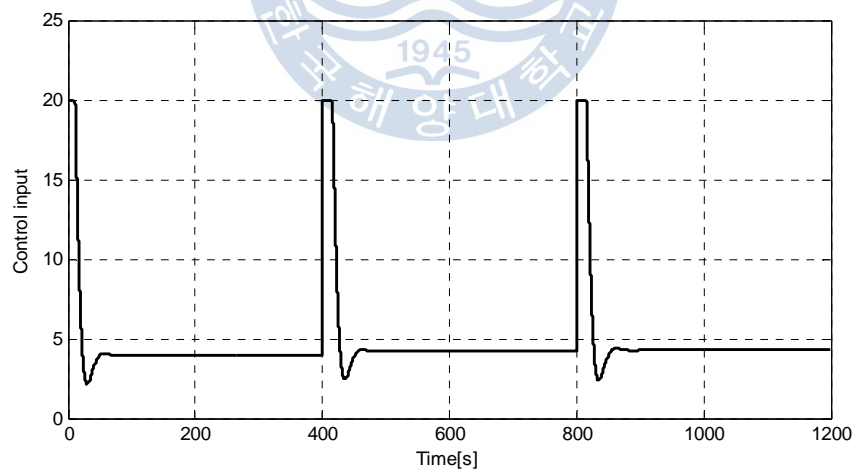
b) Control inputs

Fig. 4.6 Step responses for sub-MDi using sub-PID3 controller

4.1.2 서브 제어기에 의한 퍼지 모델의 계단 응답

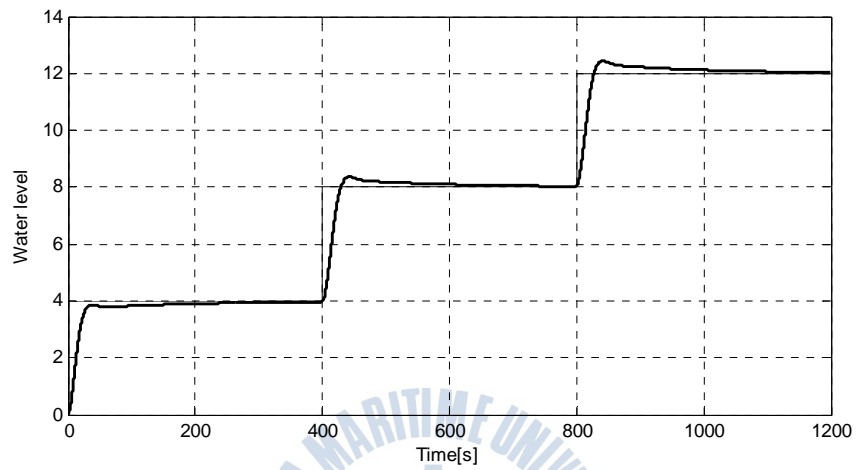


a) Step responses

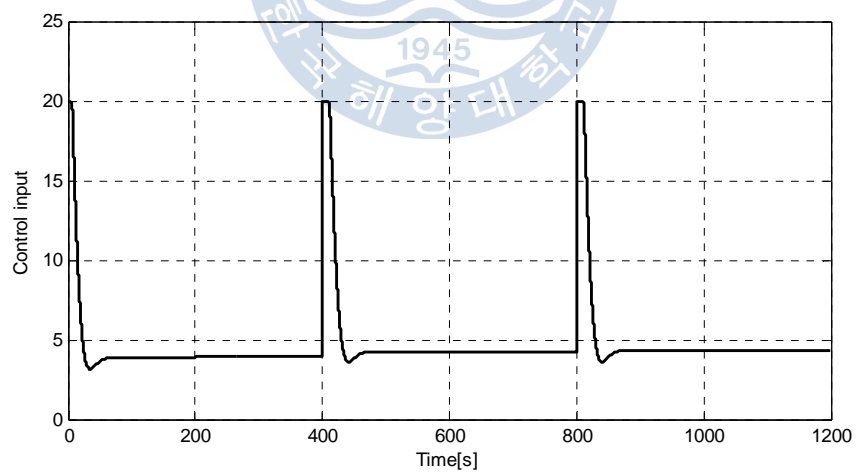


b) Control inputs

Fig. 4.7 Step responses for fuzzy-model using sub-PID1 controller

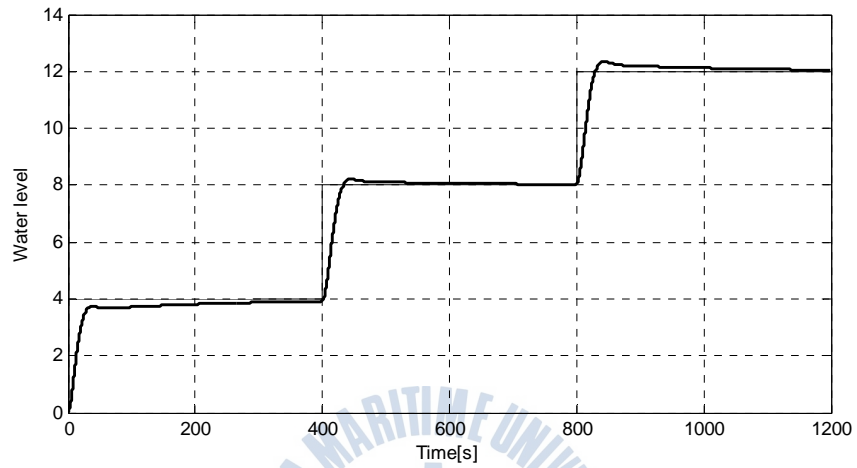


a) Step responses

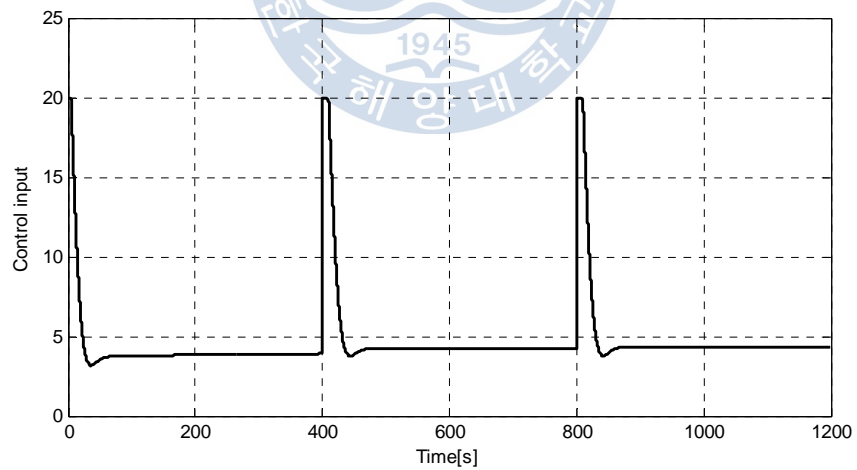


b) Control inputs

Fig. 4.8 Step responses for fuzzy-model using sub-PID2 controller



a) Step responses



b) Control inputs

Fig. 4.9 Step responses for fuzzy-model using sub-PID3 controller

4.2 퍼지-PID 제어기에 의한 퍼지 모델의 계단 응답

비선형 특성이 반영된 수조 모델을 제어하기 위해 퍼지-PID 제어기를 퍼지 모델에 적용하여 응답특성을 확인하도록 한다.

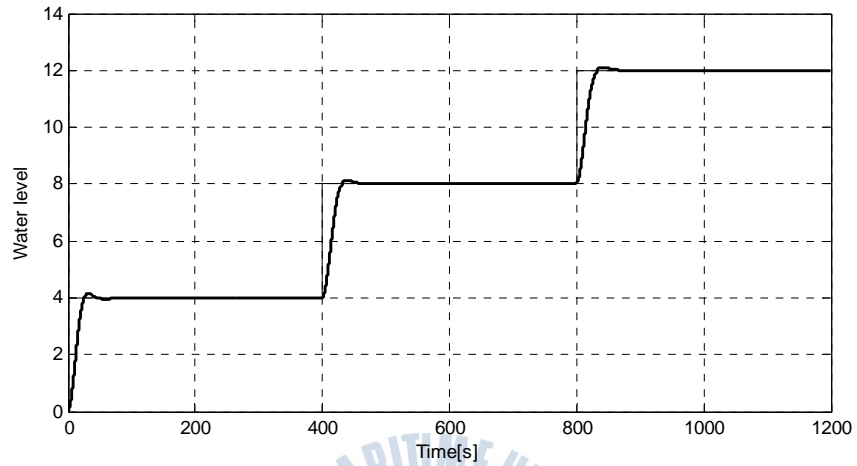
Fig. 4.10은 목표값을 4cm, 8cm, 12cm의 일정한 크기로 상승시킬 때 퍼지-PID 제어기에 의한 퍼지 모델의 계단 응답과 제어입력을 나타낸 것이다. 4cm 수위에서는 오버슈트 0.16cm와 75초에서 안정화, 8cm 수위에서는 오버슈트 0.14cm와 70초에서 안정화, 12cm 수위에서는 오버슈트 0.11cm와 75초에서 빠르게 안정화 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.11은 다양한 크기의 상승 계단 입력의 변화에 대한 퍼지-PID 제어기의 제어성능을 확인하기 위해 퍼지 모델에 목표치를 3cm, 5cm, 10cm로 변경시켰을 때 퍼지-PID 제어기에 의한 퍼지 모델의 계단 응답과 제어입력을 나타낸 것이다. 3cm에서는 오버슈트 0.1cm와 80초에서 안정화 되고, 5cm에서는 오버슈트 0.6cm와 100초에서 안정화 되며 10cm에서는 오버슈트 0.2cm와 100초에서 안정화 되어 수위 증가폭이 변함에도 불구하고 퍼지-PID 제어기 성능이 우수한 것을 알 수 있다.

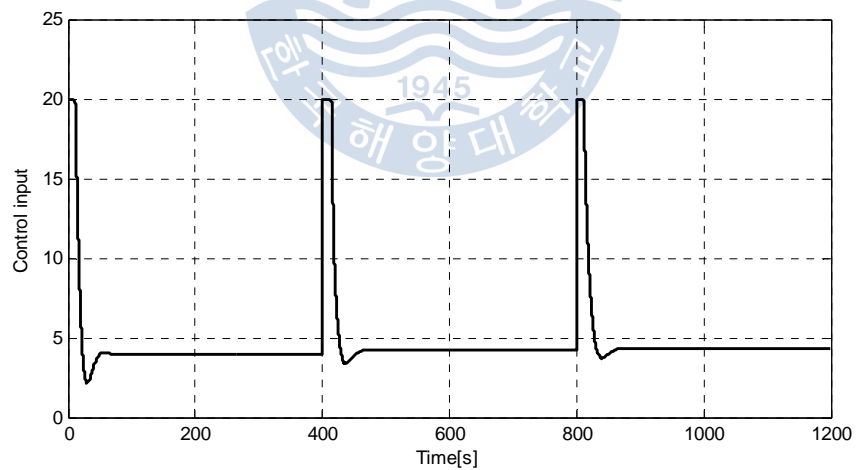
Fig. 4.12는 하강하는 계단 입력 변화에 대한 퍼지-PID 제어기의 제어성능을 확인하기 위한 것으로 수위를 12cm에서 시작하여 10cm, 8cm, 6cm로 감소시킬 때 퍼지-PID 제어기에 의한 퍼지 모델의 계단 응답과 제어입력을 나타낸 것이다. 시뮬레이션한 결과 양호한 제어성능을 나타내고 있다.

이와 같이 퍼지-PID 제어기는 다양한 수위 목표치에 대해서 모두 대체적으로 양호한 제어 성능을 나타내고 있다. 수조 시스템의 수위제어에 있어 퍼지 기법을 이용하여 PID 제어기의 이득을 계단입력의 크기에 따라 적절히 변화하도록 하였을 경우, 수위의 다양한 변화에 대해서 비교적 양호한 제어 성능을 보장할 수 있음을 알 수 있다.

4.2.1 일정한 상승 계단 입력 변화에 대한 응답



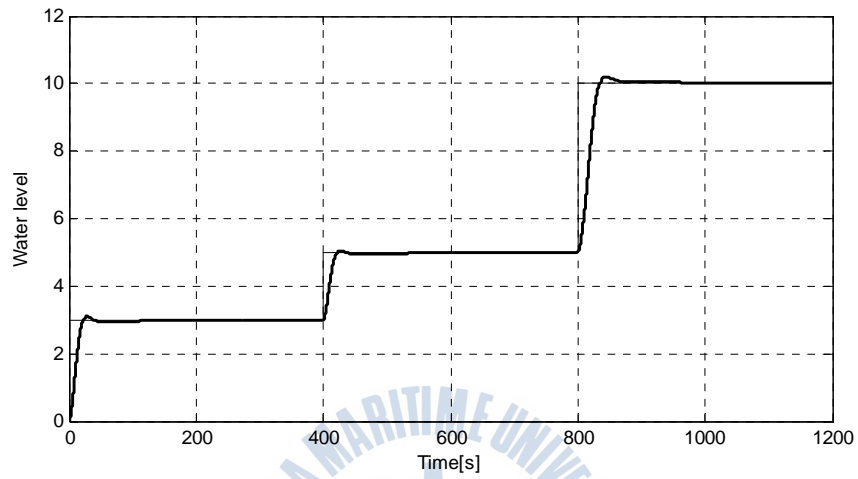
a) Step responses



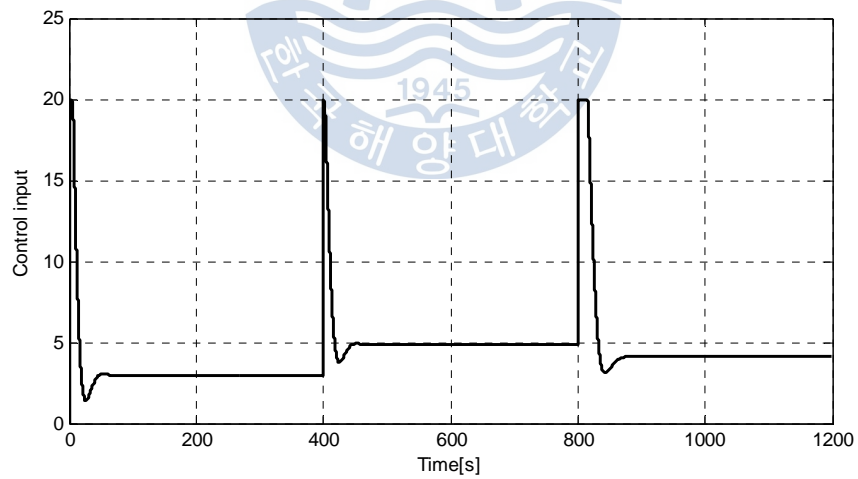
b) Control inputs

Fig. 4.10 Step responses for fuzzy-model using fuzzy-PID controller

4.2.2 다양한 상승 계단 입력 변화에 대한 응답



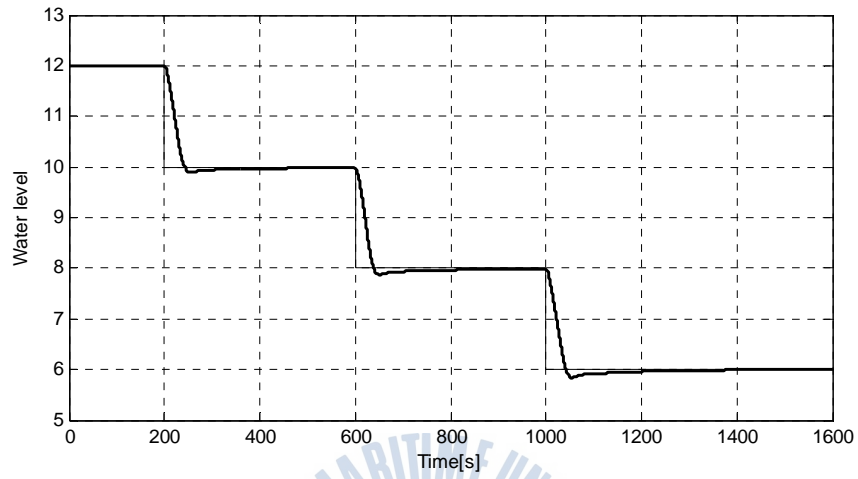
a) Step responses



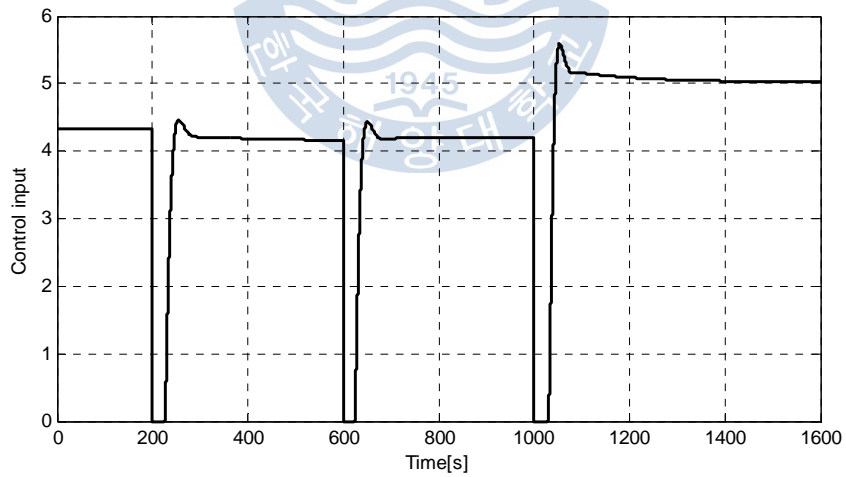
b) Control inputs

Fig. 4.11 Up step responses for fuzzy-model using fuzzy-PID controller

4.2.3 하강 계단 입력 변화에 대한 응답



a) Step responses



b) Control inputs

Fig. 4.12 Down step responses for fuzzy-model using fuzzy-PID controller

제 5 장 결 론

수조는 수위에 따라 동특성이 많이 변하므로 수조를 세 개의 동작점으로 나누어 수위별로 수조를 모델링하고 각각의 서브 모델에 대해 sub-PID 제어를 설계하였다. 이렇게 구간별로 설계된 sub-PID 제어를 각 서브 모델에 적용하여 제어 성능을 확인하였고, 제어설계구간 이외 구간에서도 응답특성을 확인하였다.

또한, 수조의 동특성을 반영하기 위해 세 개 구간의 서브 모델을 퍼지 결합하고, 동작점별로 설계된 서브 PID 제어를 적용하여 응답특성을 확인하였다.

시뮬레이션 결과 설계된 서브 PID 제어기는 해당 서브 모델에 대해서는 양호한 응답특성을 보였으나 제어설계구간 이외의 서브 모델에 대해서는 제어성능이 좋지 않았고, 수조의 동특성을 반영한 퍼지 수조 모델에 대해서도 응답이 좋지 않았다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 구간별로 설계된 sub-PID 제어를 퍼지 결합한 퍼지-PID 제어를 설계하였다. 이러한 퍼지-PID 제어를 퍼지 결합된 퍼지 모델에 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 다양한 수위 변화에 대한 제어성능을 확인하고자 수위의 목표값 크기를 달리하여 시뮬레이션을 실시하였으며 목표값의 계단상 상승뿐만 아니라 계단상 하강에 대해서도 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과 동작점 설계구간 이외의 수위 변화에 대해서도 양호한 응답특성을 확인하였다.

이와 같이 각 서브 모델에 대해 설계한 서브 퍼지 제어를 퍼지 결합한 퍼지 제어기는 구간별 기준 수위뿐만 아니라 다양한 수위 목표값 변화에도 양호한 응답특성을 나타냄으로써 제안한 제어기의 유효성을 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 주기관을 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] K. Ogata, “Modern Control Engineering”, Prentice Hall, 1999.
- [6] Chi-Tsong Chen, “Linear System Theory and Design”, Oxford University Press, 1999.
- [7] Curtis D. Johnson, “Process Control Instrumentation Technology”, Prentice Hall, 2003.
- [8] E. H. Mamdani, “Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant”, IEE Proc. Control and Science, Vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588, 1974.
- [9] P. M. Larsen, “Industrial Application of Fuzzy Logic Control”, Int. J. Man Mach. Studies, Vol. 12, No. 1, pp. 3-10, 1980.
- [10] M. Mizumoto, Fuzzy Controls by product-sum-gravity Method, Advancement of Fuzzy Theory and Systems in China and Japan, Int. Academic Publishers, 1990.
- [11] T. Tagaki and M. Sugeno, “Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control”, IEEE Trans. on SMC, Vol. SMC-15, No. 1, pp. 116-132, 1985.

감사의 글

늦은 나이에 주경야독의 힘들었던 날들을 잘 이겨내고 오늘의 결실을 이룰 수 있도록 도와주신 많은 분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

본 논문이 완성되기까지 부족한 저에게 배움의 길을 열어주시고 자상한 관심과 배려를 배풀어 주신 소명옥 지도교수님께 진심으로 존경과 감사의 마음을 전합니다.

또한 바쁘신 와중에도 심사과정에서 면밀한 검토와 지도로 논문의 깊이를 더해주시신 오세준 교수님, 박석주 교수님께 감사드립니다.

처음 연구실의 서먹한 분위기에 빨리 적응할 수 있도록 따뜻하고 온화한 미소로 반겨주시고, 본 논문의 연구 수행에 있어 이론적 전개의 막힘이나 어려움이 있을 때 마다 저녁 늦은 시간임에도 불구하고 기꺼이 연구실로 나와 지도해 주시고 도와주신 류기탁 교수님과 이윤형 교수님께 감사드립니다.

해양군사학과 특성상 진해에서 야간수업만 받던 저에게 많은 정보와 다양한 인적교류가 되고 힘과 희망을 주었던 연구소 모임 선배님들께도 감사인사 드립니다.

2년 동안 비가 오나 눈이 오나 부산에서 진해 교육사까지 오셔서 수업을 지도해주신 해양공학과 교수님들과 언제나 저희들의 든든한 버팀목이 되어주신 김용환 학장님께 감사드립니다. 아울러 같이 땀땀 뭉쳐서 함께 공부하며 어려움을 헤쳐 나온 해양공학과 학우들에게도 감사함을 전합니다.

마지막으로 오늘이 있기까지 어려움 속에서도 묵묵히 뒷바라지를 해준 아내에게도 고마움을 전합니다.

2014년 1월
이 상 현 드림