

적응제어기법을 이용한 레벨제어시스템의 제어기 설계

소명옥* · 정재학** · 류길수***

Design of a Controller for Level Control System Using Adaptive Control

M. O. So · J. H. Chung · K. S. Rhyu

Abstract

Generally, the main difficulty in the composition of tank level control system may be in the point that plant parameters are severely varied according to the change of operating point. In order to cope with this difficulty, in this paper, an adaptive control is employed using model following technique based on the optimal control law.

Through the simulations and experiments the following results were observed.

1) The steady-state error was not found under the parameter variations caused by the change of operating point.

2) In spite of the change of operating point, the corresponding gains which were stored in the computer were found to be automatically updated so that the controller could have the adaptive ability. And also, the control specifications in view of transient response were found to be satisfied.

1. 서 론

일반적으로 제어시스템을 설계하기 위해서는 모델의 선형화가 필수불가결하며 이로 인해 발생하는 모델링 오차 및 운전중 시스템의 파라미터 변동 등에 유연하게 대처할 필요가 있다¹⁾. 특히 탱크의 레벨제어에 있어서 모터 구동 연속제어밸브를 사용하는 경우 제어대상인 밸브의 시정수가 크기 때문에 목표치 변경에 대한 출력의 응답속도

가 느리다. 이 응답속도를 높이기 위하여 제어기의 이득을 크게 하면, 제어시스템의 오버슈트를 증가시키고 제어밸브의 비선형 포화동작을 유발할 뿐만 아니라, 제어시스템을 불안정하게 하는 요인이 되기도 한다. 반대로 제어기의 이득을 줄이면 목표치 변경에 대한 제어시스템의 추종속도가 느려 만족할 만한 제어성능을 얻지 못한다.

따라서 본 연구에서는 제어대상으로부터 선형 모델을 얻고 제어시스템의 응답속도를 높이면서

* 정희원, 한국해양대학교 대학원

** 정희원, 한국해양대학교 해사대학 사무과

*** 정희원, 한국해양대학교

오버슈트를 줄이기 위한 방법으로 모델추종 (Model - Following) 기법^{2,6,7)}을 이용하고, 동시에 최적제어이론을 적용하기로 한다. 이 때 모델링 오차, 운전중 시스템 파라미터의 미세한 변동, 일정한 외란이 수반되는 환경에 있어서도 계단상의 목표치 변경에 대하여 출력이 정상편차 없이 잘 추종되도록 전향경로에 하나의 적분기를 삽입하도록 한다. 또한 제어대상으로 선정된 탱크 레벨제어시스템의 경우에는 시스템의 파라미터가 동작점에 따라 심하게 변동되기 때문에, 각 레벨의 동작점마다 설계사양에 부합되는 퍼드백 이득을 미리 계산하여 컴퓨터에 저장해 두고, 목표치의 변경신호와 레벨센서의 측정신호로부터 대응되는 이득값을 변경해 줌으로써 제어기에 적응능력을 부여한다. 또 스텝형태의 목표치 변경신호와 파라미터 변화에 대해 컴퓨터 시뮬레이션과 실제의 실험에 의한 추종성능을 비교함으로써 본 연구의 유효성을 입증한다.

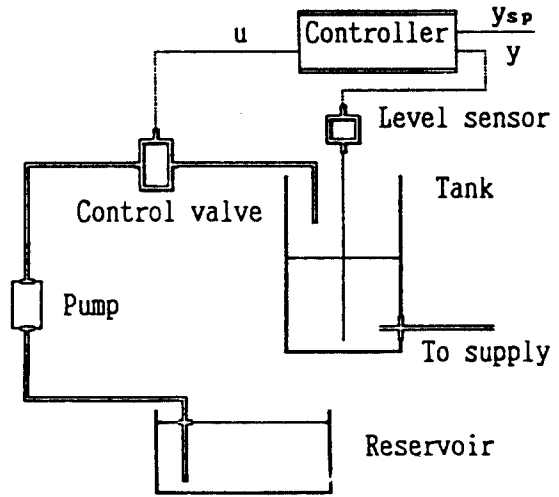


Fig. 2.1 Tank level control system

2. 탱크 레벨제어시스템의 모델링

탱크 레벨제어시스템에서 탱크에 단위시간당 유입되는 유량 Q 와 탱크레벨 H 와의 관계는 식 (2.1)과 같이 비선형방정식으로 표시되어지며

$$\dot{H} = N(H, Q) = -\frac{1}{A_t} A_p \sqrt{\frac{d}{fL+d}} \sqrt{2gH} + \frac{1}{A_t} Q \quad (2.1)$$

- H : 탱크레벨(m)
- Q : 단위시간당 유입유량(m³/sec)
- A_t : 탱크의 단면적(m²)
- A_p : 탱크출구 파이프의 단면적(m²)
- L : 탱크출구 파이프의 길이(m)
- d : 탱크출구 파이프의 직경(m)
- f : 탱크출구 파이프의 마찰계수
- g : 중력가속도(m/sec²)

식 (2.1)로 표시되어지는 비선형방정식 $N(H, Q)$ 를 동작점(H_0, Q_0) 부근에서 선형화하면 다음 식과 같게 된다.

$$\dot{h} = -h/T_w + K_w q/T_w \quad (2.2)$$

여기서

$h = H - H_0$: 레벨의 변화(m)

$q = Q - Q_0$: 단위시간당 유입유량 변화(m³/sec)

$$T_w = -\frac{1}{\partial N(H, Q) / \partial H | (H_0, Q_0)}$$

: 탱크의 시정수(sec)

$$K_w = -\frac{\partial N(H, Q) / \partial Q | (H_0, Q_0)}{\partial N(H, Q) / \partial H | (H_0, Q_0)}$$

: 탱크의 이득(sec/m²)

또 탱크 입구측의 유량제어밸브는 일반적으로 동력전달 요소의 감속비와 밸브부분의 마찰저항이 커서 식 (2.3)과 같이 일차계의 선형모델로 간주할 수 있다.

$$\dot{q} = -\frac{1}{T_a} q + \frac{K_a}{T_a} u \quad (2.3)$$

여기서

u : 제어밸브 입력전압 변화(V)

K_a : 제어밸브의 이득(m³/sec.V)

T_a : 제어밸브의 시정수(sec)

식 (2.2)와 식 (2.3)로부터 제어대상을 블록선도로 표시하면 다음과 같다.

Fig. 2.2의 블록선도로부터 상태변수를 $x_1 = h$, $x_2 = \dot{h}$ 로 정의하고 제어대상의 동적방정식을 구하

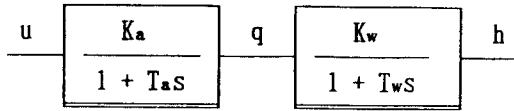


Fig. 2.2 Block diagram of the linearized plant

면 다음과 같게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{2.4}$$

여기서

$$x = [x_1 \ x_2]^T = [h \ \dot{h}]^T \in \mathbb{R}^2 \text{ 상태벡터}$$

$$u \in \mathbb{R}^1 \text{ 입력}$$

$$y \in \mathbb{R}^1 \text{ 출력}$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1/T_a T_w & -(T_a + T_w)/T_a T_w \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ K_a K_w / T_a T_w \end{pmatrix}$$

$$C = [1 \ 0]$$

식 (2.4)의 시스템에서 행렬의 쌍 (A, B)는 $\rho[AB] = 2$ 가 되어 가제어이다.

3. 탱크 레벨제어기 설계

탱크의 레벨제어 문제에 있어서 각 제어요소들은 일반적으로 시정수가 커서 목표치 변경에 대한 시스템의 출력 응답속도가 느리므로 응답속도를 빠르게 하기 위하여 제어기의 이득을 크게 하면, 모델링 오차 및 외란 등으로부터 발생하는 정상오차를 줄이기 위해 제어기 설계 때 삽입되는 적분기의 적분동작이 커지게 된다. 이 적분동작은 제어시스템의 오버슈트(Overshoot)를 크게 하고, 경우에 따라서는 밸브의 비선형 포화동작을 유발할 뿐만 아니라, 제어시스템을 불안정하게 하는 요인이 되기도 한다.

따라서 본 연구에서는 오버슈트를 줄이기 위한 하나의 대책으로 모델추종기법을 이용하며, 모델은 Set-point filtering을 사용한다. 이 기법은 제어시스템이 목표치를 입력으로 가지는 한 모델의

출력신호를 추종케 함으로써 갑작스런 목표치 변경으로 인하여 과도한 오버슈트가 발생하는 것을 막을 수 있다. 탱크 레벨제어시스템은 다음과 같은 일차계의 모델을 따른다고 가정한다.

$$\dot{y}_m = F(y_m - y_{sp}) \tag{3.1}$$

여기서 F는 일차계 모델의 상수로서 목표치 y_{sp} 의 변경명령에 대한 모델의 출력 y_m 의 응답속도를 결정해 준다. 탱크 레벨제어시스템의 출력 y가 계단형으로 변하는 목표치 y_{sp} 를 추종하도록 하는 선형제어기를 설계하기 위하여 목표치 y_{sp} 에 대한 x_{sp}, u_{sp} 가 다음 식 (3.2)를 만족한다고 한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{sp} &= Ax_{sp} + Bu_{sp} \\ y_{sp} &= Cx_{sp} \end{aligned} \tag{3.2}$$

그리고 x_{sp} 와 u_{sp} 는 식(3.2)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_{sp} \\ u_{sp} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A & B \\ C & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ y_{sp} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} y_{sp} \\ 0 \\ y_{sp} / K_a K_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(y_{sp}) \\ g(y_{sp}) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

여기서 $f(y_{sp}) = x_{sp}, g(y_{sp}) = u_{sp}$ 이며 아래와 같이 오차신호벡터와 새로운 벡터 z_1, z_2 를 다음과 같이 정의하면

$$\begin{aligned} \Delta x &= x - x_{sp} \\ \Delta u &= u - u_{sp} \\ \Delta y &= y - y_{sp} \end{aligned} \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned} z_1 &= \int (y - y_m) dt \\ z_2 &= y_m - y_{sp} \end{aligned} \tag{3.4}$$

확장시스템은 다음과 같이 표시되어 진다

$$\begin{aligned} \dot{x}_a &= A_a x_a + B_a \Delta u \\ y_a &= C_a x_a \end{aligned} \tag{3.5}$$

여기서

$$x_a = \begin{pmatrix} \Delta x \\ z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^4 \text{ 상태벡터}$$

$$y_a = \begin{pmatrix} \Delta y \\ z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \text{ 출력벡터}$$

$$A_a = \begin{pmatrix} A & 0 & 0 \\ C & 0 & -1 \\ \mathbf{0} & 0 & F \end{pmatrix}$$

$$B_a = \begin{pmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_a = \begin{pmatrix} C & 0 & 0 \\ \mathbf{0} & 1 & 0 \\ \mathbf{0} & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

식 (3.5)로 표현되는 확장시스템은 식 (2.4)의 시스템에서 행렬의 쌍 (A,B)가 가제어이고 다음 관계가 만족됨으로 역시 가제어임을 알 수 있다^{4,8)}.

$$\rho \begin{pmatrix} B & A \\ \mathbf{0} & C \end{pmatrix} = 3 \quad (3.6)$$

다음과 같은 2차 형식의 평가함수를 최소로 하면서 피드백 시스템을 점근적으로 안정하게 하는 최적제어법^{1,2,9)}은 다음 식(3.8)으로 주어진다. 한편 Q와 R은 출력벡터와 제어입력의 상대적인 중요성에 근거를 두고 설계자가 선정하는 하중행렬과 하중계수로서 Q ≥ 0, R > 0인 관계를 가진다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (y_a^T Q y_a + \Delta u^T R \Delta u) dt \quad (3.7)$$

$$\Delta u = -R^{-1} B_a^T P x_a = -K x_a \quad (3.8)$$

여기서 P는 다음 Riccati 방정식의 해행렬이며, K=[R⁻¹B_a^TP]인 피드백 이득행렬이다.

$$P A_a + A_a^T P + C_a^T Q C_a - P B_a R^{-1} B_a^T P = \mathbf{0}$$

식 (3.3)과 (3.4)를 이용하여 식 (3.8)을 다시 표현하면 다음과 같게 된다.

$$u = u_{sp} - K_1(x - x_{sp}) - k_2 f(y - y_m) dt - k_3 (y_m - y_{sp}) \quad (3.9)$$

여기서 피드백 이득행렬 K=[K₁ k₂ k₃]는 식 (3.5)의 피드백 시스템이 주어진 설계사양을 만족하도록 Q와 R를 적절히 선정하여 계산되어진다.

한편 식 (3.9)를 이용하여 실제 피드백 시스템을 구성할 때는 상태변수 x₂의 피드백도 요구된다. 본 연구에서는 경제성이 있는 제어시스템을 구성하

기 위하여 탱크레벨의 변화율 x₂를 직접 측정하지 않고 탱크의 레벨센서로부터 계속되는 신호 y로부터 근사 추정하여 사용하도록 한다. 특히 제어시간은 탱크레벨의 변화에 비해 극히 짧음으로 x₂의 근사 추정치는 다음 식 (3.10)과 같이 표시할 수 있다.

$$x_2(kT) \approx \{y(kT) - y[(k-1)T]\} / T \quad (3.10)$$

여기서 T는 샘플링 시간을 나타낸다. 앞서 설명한 바와 같이 탱크 레벨제어시스템에서 입력유량에 대한 탱크 레벨은 비선형적으로 변하므로 이러한 비선형요소를 선형화하였을 경우에 선형화 모델은 피드백 이득을 동작점에 따라 그 파라미터가 심하게 변하므로 전 동작범위에서 레벨제어시스템이 주어진 설계사양을 만족하도록 하기 위해서는 동작점의 변경에 따라 피드백 이득을 적절히 조정할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 표 3.1과 같은 설계사양에 부합되는 동작점에 따라 미리 계산하여 컴퓨터에 저장해 두고, 제어시스템이 운전 중 센서로부터 측정된 출력 y가 목표치 y_{sp}의 90%에 도달되었을 때 목표치에 대응되는 이득값으로 변경해 줌으로써 제어기에 적응능력을 부여하도록 한다.

Table 3.1 Design specifications

Overshoot(MP)	25.0 (%)
Control input(u)	1.0~5.0(V)
Rise time(tr)	25.0(sec)
Steady state error(ε)	0.0(V)

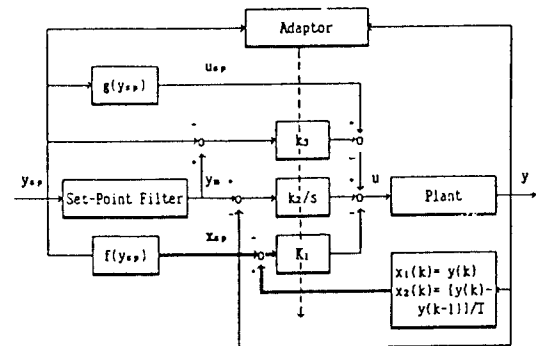


Fig. 3.1 Overall tank level control system with adaptive function

이와 같은 적응기능을 가진 제어시스템의 블럭 선도는 Fig. 3.1과 같다.

4. 시뮬레이션 및 실험

제안한 방법의 유효성을 검토하기 위하여 수위 제어장치의 탱크레벨을 8개의 동작구간으로 나누어 각 구간에서 파라미터를 구한 다음 +0.5(V)의 목표치 변경명령에 대하여 하중행렬 Q와 하중계수 R를 선정하여 주어진 설계사양을 만족하는 최적 피드백 이득을 구한 결과 표 4.1과 같았다.

여기서 Set-point Filter의 상수값으로는 Fig. 4.1과 같이 계단상의 목표치 변경에 대하여 출력 응답 y_m 의 정정시간($\pm 5\%$)과 상승시간이 각각 30초, 22초가 되는 $F = 0.1$ 을 선정하여 사용하였다. 편의상 레벨센서의 이득 4.16(V/m)을 제어대상의 전채이득 $K_a K_w$ 에 포함시킴으로써 출력신호가 전압단위로 표시되도록 하였다.

4.1 목표치 변경에 대한 검토

동작점이 변경될 경우 피드백 이득을 변경해 가며 목표치를 추종해 가는 추종성능을 평가하기 위해서 Fig. 4.2와 같은 두 가지 경우의 목표치 변경 신호를 원래의 비선형 탱크 레벨제어시스템에 가하였다. Fig. 4.3과 같이 목표치를 0.5(V)씩 증가시킬 경우나 Fig. 4.4와 같이 목표치를 0.5(V)씩 감소시킬 경우이나 모두 오버슈트는 약 20%, 상승시간은 약 22초로서 시뮬레이션은 설계사양에 부합됨을 알 수 있다.

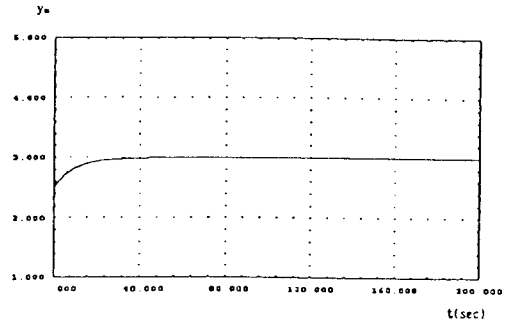


Fig. 4.1 Response of the set point filter for $\Delta y_{sp} = +0.5(V)$

4.2 시스템 파라미터 변동에 대한 검토

제어시스템을 설계하는 과정에서 일어나는 모델링 오차와 운전중 파라미터의 변동 등으로 모델은 실제장치와 일치하지 않게 되는데, 본 연구에서 제안한 방법은 시스템의 안정성이 보장되는 한 약간의 파라미터 변동이 발생하더라도 정상오차가 발생되지 않는 강인성을 가지고 있다. Fig. 4.5는 목표치를 2.5(V)에서 3.0(V)으로 변경하면서 동시에 제어밸브의 시정수 T_a 를 약 +20% 변경하였을 경우의 응답 그래프이고, Fig. 4.6은 목표치를 2.5(V)에서 3.0(V)으로 변경하면서 동시에 탱크의 시정수 T_w 를 약 +20% 변경하였을 경우의 응답 그래프이다. 어느 경우이든 오버슈트는 약 22%이고 정상편차는 발생하지 않는다. 그러나 상승시간은 T_a 의 경우는 약 21초, T_w 의 경우는 약

Table 4.1 Optimal feedback gains at the eight operating points

Operating Point		Parameters			Optimal Gains			
No.	Level	$K_a K_w$	T_a	T_w	k11	k12	k2	k3
1	$1.0 \leq H_0 < 1.5$	0.133	10.0	25.72	2.840	19.726	0.0707	0.0707
2	$1.5 \leq H_0 < 2.0$	0.218	10.0	42.00	3.706	28.259	0.0707	0.0707
3	$2.0 \leq H_0 < 2.5$	0.459	10.0	53.54	4.039	30.644	0.0707	0.0707
4	$2.5 \leq H_0 < 3.0$	0.779	10.0	63.00	4.123	30.590	0.0707	0.0707
5	$3.0 \leq H_0 < 3.5$	1.093	10.0	71.22	4.147	30.222	0.0707	-0.0707
6	$3.5 \leq H_0 < 4.0$	1.521	10.0	78.58	4.117	29.209	0.0707	-0.0707
7	$4.0 \leq H_0 < 4.5$	1.584	10.0	85.30	4.152	29.491	0.0707	0.0707
8	$4.5 \leq H_0 < 5.0$	1.683	10.0	91.54	4.221	30.401	0.0707	0.0707

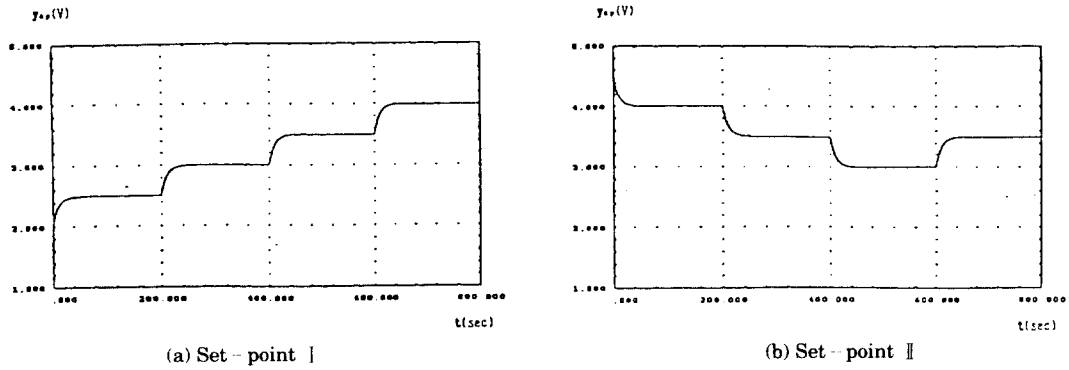


Fig. 4.2 Curves of the programmed set - point

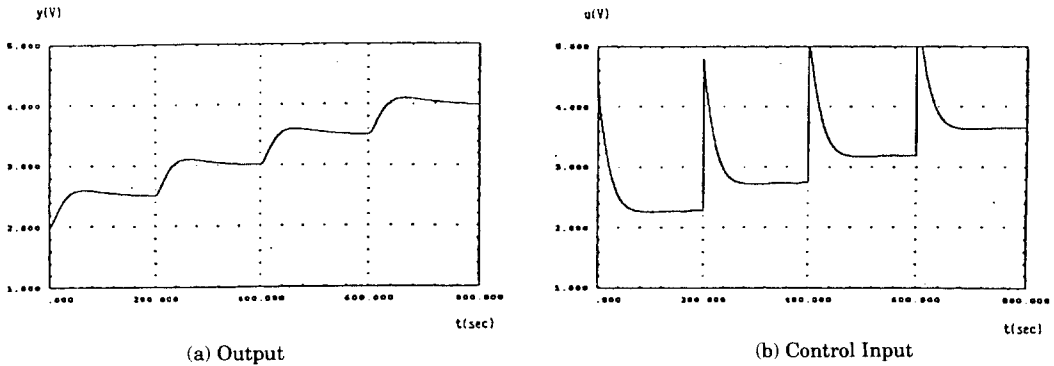


Fig. 4.3 Step response for the programmed set - point I

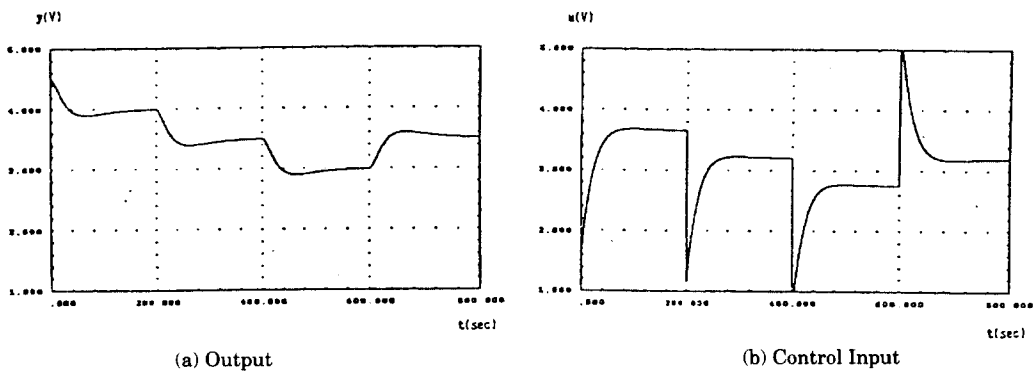


Fig. 4.3 Step response for the programmed set - point II

25초로 다소 크다.

4.3 실험 및 고찰

Fig. 4.7은 탱크 레벨제어시스템의 구성도를 나

타내고 있으며, (a)PC(cpu i80386), (b)레이저 프린터, (c)X - Y 레코더, (d)A - D/D - A 변환기, (e) 전압/전류 변환기, (f)디지털 멀티메타, (g)DC 전압 공급장치 (h)Main control box(power 스위치,

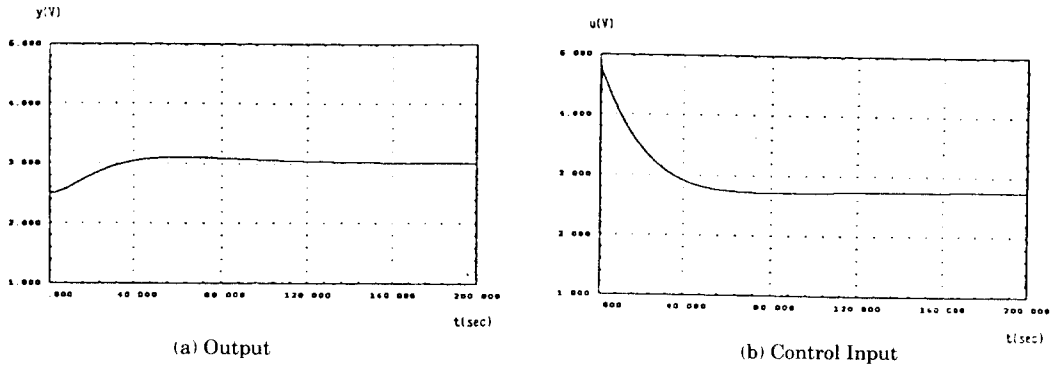


Fig. 4.5 Step response for parameter change, $\Delta T_a = +2.00(\text{sec})$

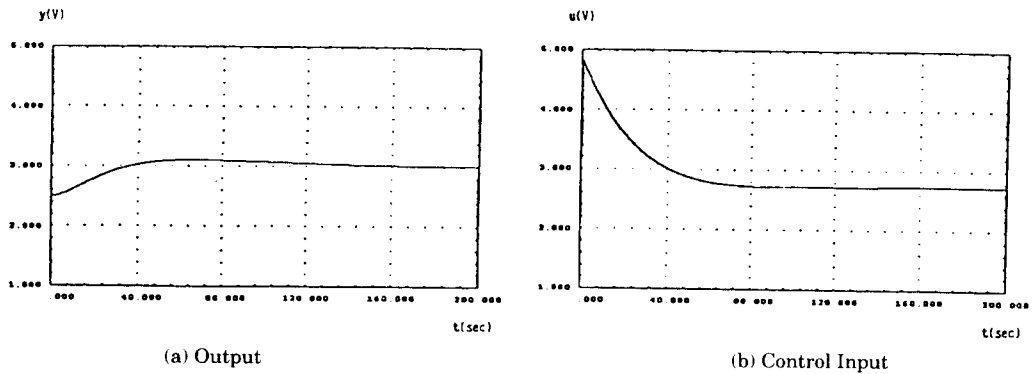


Fig. 4.6 Step response for parameter change, $\Delta T_w = +12.77(\text{sec})$

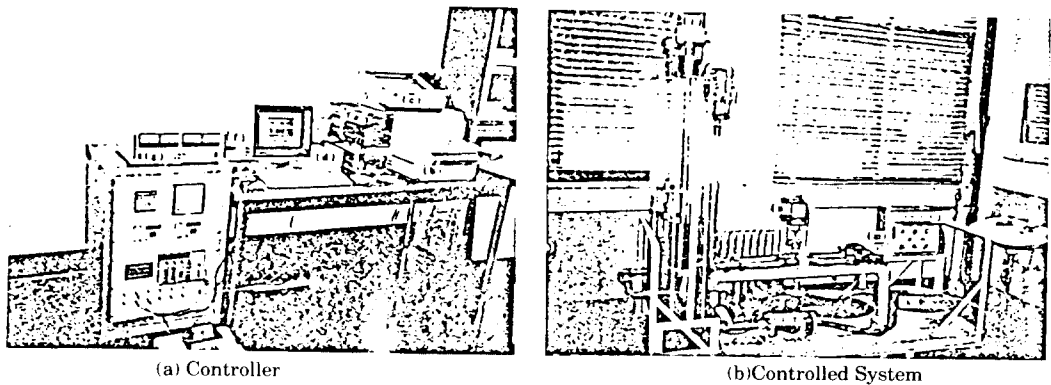


Fig. 4.7 Structure of tank level control system

auto/manual 선택스위치, 인터페이스용 터미널, 전류/전압 변환기등), (i)압력 센서, (j)스위치 박스 (Remote/Local, 펌프, 솔레노이드밸브 스위치), (k)저장 탱크, (l)유량계, (m)압력 스위치, (n)제어

밸브, (o)탱크 등으로 구성되어 있다.

앞 절에서 언급한 두 가지 경우의 목표치 변경 신호에 대해 실험에 의해 그 추종성능을 입증한다.

다음은 동작점이 변경될 경우 피드백 이득을 변

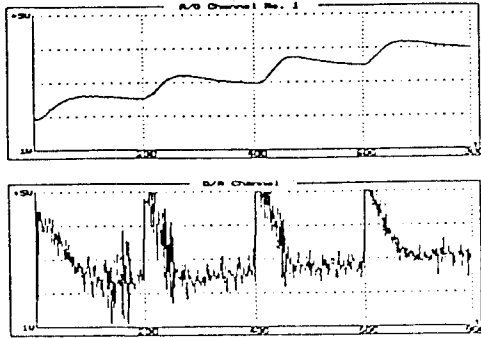


Fig. 4.8 Step response for programmed set - point I

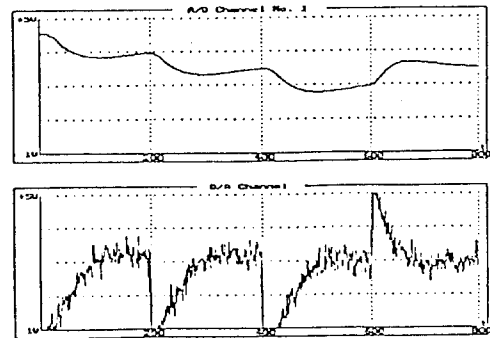


Fig. 4.9 Step response for programmed set - point II

경해가며 목표치를 추종해가는 출력의 추종성능을 파악하기 위하여 두가지 목표치 변경신호를 레벨제어시스템에 가하였다. Fig. 4.8 및 4.9에서 보면 오버슈트는 모두 약 22%이고 상승시간은 각각 약 23초와 20초로 설계사양에 부합됨을 알 수 있다.

최적인 값으로 유지해 줌으로써 적응능력이 있는 시스템임을 확인 하였다.

5. 결 론

탱크 레벨제어시스템의 경우는 동작점에 따라 파라미터의 변동이 심하며 제어대상의 시정수가 크기 때문에 목표치 변경에 대한 응답속도의 둔화, 과도한 오버슈트, 제어밸브의 포화동작, 정상편차, 시스템의 불안정 등이 발생한다. 따라서 먼저 선형 모델을 얻고 일정한 외란이 수반되는 환경에서도 출력이 계단상의 목표치 변경에 대하여 정상편차 없이 잘 추종하도록 전향경로에 하나의 적분기를 삽입한 후, 모델추종기법과 최적제어이론을 적용하여 오버슈트를 줄이면서 동시에 응답속도를 높일 수 있는 적응제어기를 설계하였다. 이 제어기를 이용하여 구현한 제어시스템을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 검토해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- 1) 본 제어기는 시스템의 모델링 오차, 운전중 시스템의 파라미터의 변동 등에 대해서도 정상편차가 발생되지 않고, 또 오버슈트가 크지 않음을 확인하였다.
- 2) 제어기의 피드백 이득값을 동작구간에 따라

- 1) H. Seraji, "Design of Proportional - plus - integral Controllers for Multivariable Systems", Int. Journal Contr., Vol. 20, No. 1, 1970.
- 2) K. P. Wong and D.E. Seborg, "Optimal Proportional Plus Integral Control for Regulator and Tracking Problems", Optimal Contr. Appl. & Methods, Vol. 6, 1985.
- 3) J. Litt, "An Expert System to Perform On - Line Controller Tuning", IEEE Control Systems Magazine, Vol. 11, No. 3, 1991.
- 4) 서원모, "비선형 유압서어보 시스템용 제어기 설계", 한국해양대학 대학원 석사학위논문, 1991.
- 5) 박종구, 최종호, "입력에 포화기를 가진 제어시스템의 성능 향상", 대한전기학회 논문집, Vol.38, No.5, 1989.
- 6) T. Arie et al., "An Adaptive Steering System for a Ship", IEEE Control Systems Magazine, Vol. 6, No. 5, 1986.
- 7) Yoan D. Landau, Adaptive Control, Marcel Dekker, Inc., N. Y., pp. 202 - 265, 1979.
- 8) B.Porter & H.M. Power, "Controllability of Multivariable Systems Incorporating Integral Feedback", Electronic Letters, Vol. 6, No. 22, 1970.
- 9) B. Porter & A. Bradshaw, "Design of Linear Multivariable Continuous - Time Tracking Sys-

- tems", *Int. J. Systems Sci.*, Vol. 5, No. 12, 1974.
- 10) Benjamin C. Kuo, *Automatic Control System*, Prentice - Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1991.
- 11) 河注植, 柳吉洙, "PID 制御器의 最適調整에 關한 研究", 韓國海洋大學 大學院 論文集, Vol. 2, pp. 89 - 106, 1979.