

퍼지 게인 스케줄링을 이용한 3-수조 시스템의 수위 제어

전재훈* · 문복산* · 박장호* · 송현석* · 한정태* · 황윤창* · 손보건* · 진강규**

Level Control of 3-Water Tank Systems Using Fuzzy Gain Scheduling

J. Jeon · B. Moon · J. Park · H. Song · J. Han · Y. Hwang · B. Son and G. Jin

〈 목 차 〉

I. 서 론	IV. 시뮬레이션
II. 3-수조 시스템의 모델링	V. 결 론
III. 제어기 설계	※ 참고문헌

Abstract

In this paper, a technique combining fuzzy gain scheduling with conventional PID control is presented for level control of a 3-water tank system. The proposed controller is implemented using a set of "if-then" fuzzy rules, which are of Sugeno-Tagaki's form. The parameters of both premise and consequence parts are tuned based on expert's experience and knowledge regarding the system on several operating conditions. Simulation results demonstrate the performance of the proposed method.

I. 서 론

1960대부터 현대제어이론에 입각한 여러 형태의 제어기가 제안되어 왔음에도 불구하고 아직도 래식 PID제어기는 산업현장에 널리 이용되고 있으며, 그 수는 현재 사용중인 전체 제어기의 약 70-90%에 달하는 것으로 보고하고 있다[1]. 이와 같이 PID제어기가 지속적으로 설계자와 사용자의 관심을 끄는 이유는 구조가 간단해서 구현이 용이하고, 동작조건의 범위가 어느 정도 넓더라도 견실한 성능을 가지며, 범용의 응용성 때문이라 할 수 있다.

* 한국해양대학교 자동화·정보공학부 제어시스템전공

** 한국해양대학교 자동화·정보공학부 교수

PID제어기를 설계하거나 현장에서 다룰 때 일어나는 중요한 문제 중의 하나는 제어대상의 출력이 희망하는 응답특성을 갖도록 파라미터(계수)를 조절하는 것이다. 이러한 작업을 동조(Tuning)라 한다. PID제어기의 동조 문제는 1940년대부터 수많은 제어 기술자들의 연구 대상이 되어 왔고 대표적인 방법으로는 주파수영역 설계법, 과도응답법 등이 있다[2-4]. 실제 현장에서 운전되고 있는 대부분의 PID제어기들은 이러한 방법에 기초하여 조정되고 있다. 제어대상으로부터 과도응답 또는 주파수 응답을 얻고, 제어기의 계수를 정하고, 이를 시행착오적으로 미세 조정하는 일련의 작업들은 비록 제어 전문가가 수행한다 해도 비용과 더불어 많은 시간을 요구한다. 따라서 최근에는 이들을 자동적으로 조정해주는 자동동조(auto-tuning)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 자동동조는 릴레이 개환[4], 자기동조[5], 신경회로망과의 결합[6], 패턴인식[7] 등을 이용함으로써 구현될 수 있다. 그러나 이러한 방법도 동조가 끝난 후 일정 기간 동안에는 고정된 파라미터로 운전되기 때문에 운전 환경이 변화되면 만족스러운 제어 성능을 기대하기가 어렵다. 한편 전 등[8]은 퍼지 게인 스케줄링 기법으로 PID제어기의 계수를 조절하는 문제를 검토하였는데, 여기서 계수들은 출력 오차, 오차의 변화율과 퍼지논리에 의거 특정 범위에서 선형적으로 변경되었다. 특히 수력발전소의 수차계, 원자력발전소의 냉각계, 각종 화학플랜트의 공정 등을 단순화한 모델로서의 수조 시스템은 동작점의 변경에 따라 플랜트 파라미터에는 현저한 변화가 일어나므로 다중 동작점에 입각한 계수의 조정이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 퍼지 게인 스케줄링과 PID제어를 결합하여 전 동작점에서 성능이 만족스러운 제어기를 설계하고 이를 3-수조 시스템의 수위를 조절하는 문제에 적용한다. 이를 위해 Sugeno-Tagaki 퍼지모델 형태의 비선형 제어기를 얻는다. 제어기는 단일 동작점에서 동조된 다수의 PID제어칙을 퍼지조건문으로 결합한 형태로서 이들간의 전환은 계획변수(scheduling variable)와 퍼지논리에 의해 자동적으로 수행된다. 전진부 입력공간의 퍼지분할은 전문가의 경험으로부터 결정되고, 결론부의 PID제어기의 계수는 Ziegler-Nichols 과도응답법으로 동조된다. 이와 같이 제안된 제어기를 시뮬레이션을 통해 기존의 고정 파라미터 PID제어기와 비교분석을 통하여 성능의 우수함을 보인다.

II. 3-수조 시스템의 모델링

본 연구의 제어대상에 해당되는 3-수조 시스템은 그림 1과 같다. 제어목적은 #1 수조의 수위 H_1 가 신속 정확하게 목표 수위에 도달되도록 서보밸브 구동전압 u 를 제어하는 것이다. u 가 인가되면 유량 Q_4 가 유입되고, 유입된 물의 양에 따라 #2 수조의 수위 H_2 가 변경되고, 수조간의 수위차로 결국 #1 수조의 수위 H_1 가 제어되게 된다.

사용된 파라미터는 다음과 같다.

Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 : #1, #2, #3 수조의 유입 또는 유출 유량 [m^3/sec]

H_1, H_2, H_3 : #1, #2, #3 수조의 수위 [m]

S_1, S_2, S_3 : #1, #2, #3 수조의 단면적 [m^2]

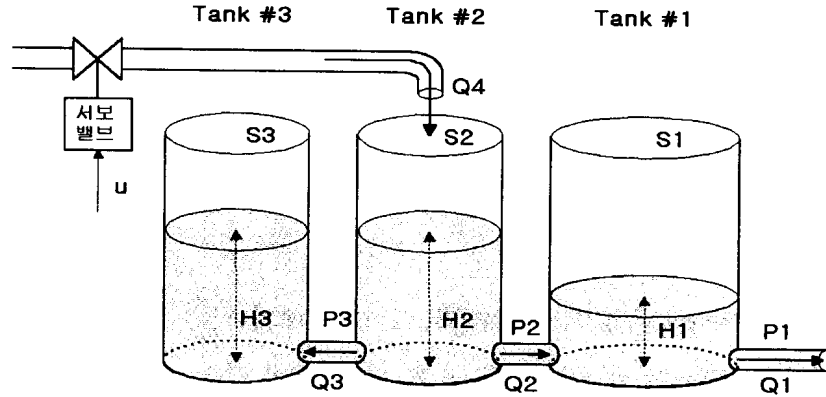


Fig. 1 3-수조 시스템

P_1, P_2, P_3 : #1. #2. #3 수조에 연결된 관의 단면적 [m^2]

u : 서보밸브 구동전압 [V]

g : 중력가속도 [m/sec^2]

각 수조에서 유입, 유출된 유량이 수위변화를 일으키므로 다음 식을 얻는다.

$$S_1 \frac{dH_1}{dt} = (P_2 \text{sgn}(H_2 - H_1) \sqrt{2g|H_2 - H_1|} - P_1 \sqrt{2gH_1}) \quad (1)$$

$$S_2 \frac{dH_2}{dt} = (Q_4 - P_2 \text{sgn}(H_2 - H_1) \sqrt{2g|H_2 - H_1|} - P_3 \text{sgn}(H_2 - H_3) \sqrt{2g|H_2 - H_3|}) \quad (2)$$

$$S_3 \frac{dH_3}{dt} = (P_3 \text{sgn}(H_2 - H_3) \sqrt{2g|H_2 - H_3|}) \quad (3)$$

여기서 $\text{sgn}(x)=1$ ($x>0$), $\text{sgn}(x)=-1$ ($x<0$)이다. 한편 서보밸브 입력신호에 대한 유량 사이의 관계는 다음 방정식으로 표시한다.

$$T_v \frac{dQ_4}{dt} = -Q_4 + K_v u \quad (4)$$

여기서 K_v 와 T_v 는 각각 서보밸브의 정상이득 [$m^3/sec \cdot V$]과 시정수[sec]를 의미한다.

식 (1)-(4)에서 상태변수를 다음과 같이 정의하면

$$x_1 = H_1, x_2 = H_2, x_3 = H_3, x_4 = Q_4 \quad (5)$$

시스템은 다음과 같은 동적방정식으로 표시된다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{1}{S_1} (P_2 \text{sgn}(x_2 - x_1) \sqrt{2g|x_2 - x_1|} - P_1 \sqrt{2gx_1}) \quad (6)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{S_2} (x_4 - P_2 \text{sgn}(x_2 - x_1) \sqrt{2g|x_2 - x_1|} - P_3 \text{sgn}(x_2 - x_3) \sqrt{2g|x_2 - x_3|}) \quad (7)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{S_3} (P_3 \text{sgn}(x_2 - x_3) \sqrt{2g|x_2 - x_3|}) \quad (8)$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{1}{T_v} x_4 + \frac{K_v}{T_v} u \quad (9)$$

$$y = x_1 \quad (10)$$

시스템이 어느 한 동작점에서 장시간 운전되면 식 (1)-(4)에서 $\frac{dH_1}{dt} = 0$, $\frac{dH_2}{dt} = 0$, $\frac{dH_3}{dt} = 0$, $\frac{dQ_4}{dt} = 0$ 인 관계가 성립되고 이 때의 수위, 유량, 입력전압을 각각 H_{10}^i , H_{20}^i , H_{30}^i , Q_{10}^i , Q_{20}^i , Q_{30}^i , Q_{40}^i , u_0^i 로 정의하고 양변을 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다. 예컨대 H_{10}^i 이 정해지면 나머지 값들은 자동적으로 결정된다.

$$H_{20}^i = [1 + (\frac{P_1}{P_2})^2] H_{10}^i \quad (11)$$

$$H_{30}^i = H_{20}^i \quad (12)$$

$$Q_{10}^i = Q_{20}^i = Q_{40}^i = P_1 \sqrt{2gH_{10}^i} \quad (13)$$

$$Q_{30}^i = 0 \quad (14)$$

$$u_0^i = \frac{P_1}{K_v} \sqrt{2gH_{10}^i} \quad (15)$$

Ⅲ. 제어기 설계

1. 퍼지 게인 스케줄링

퍼지 게인 스케줄링 기법에 기초한 제안되는 제어기는 그림 2와 같은 구조를 갖는다.

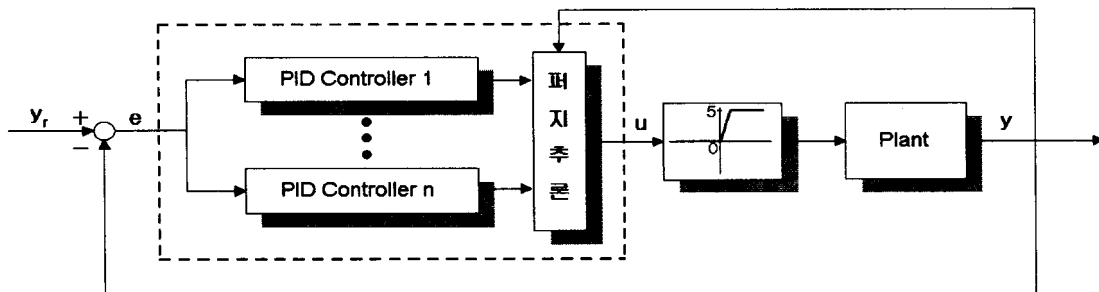


Fig. 2 제안된 제어기

제어기는 다음과 같이 Sugeno-Tagaki의 퍼지모델 형태를 가지는 다수의 퍼지규칙으로 구성된다. 각 결론부의 PID제어기는 단일 동작점에 적절히 동조되는 것으로 간주된다.

$$R^i: \text{If } y \text{ is } F^i, \text{ then } u^i(t) = K_p^i e(t) + K_I^i \int e(t) dt + K_D^i \frac{de(t)}{dt} \quad (1 \leq i \leq n) \quad (16)$$

여기서 R^i 는 i 번째의 제어규칙, y 는 계획변수로서 시스템의 출력, F^i 는 i 번째의 퍼지집합, n 은 제어규칙의 수를 뜻한다. 또한 $u^i(t)$ 는 i 번째 PID제어기의 출력이고, K_p^i, K_I^i, K_D^i 는 제어기의 비례, 적분 및 미분 상수이다. 위 식을 퍼지추론하면 다음과 같은 최종 출력을 얻을 수 있다.

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \rho^i u^i(t)}{\sum_{i=1}^n \rho^i} \quad (17)$$

여기서 $\rho^i = F^i(y)$ 는 i 번째 규칙의 기여도를 나타낸다.

2. 제어기의 파라미터 결정

퍼지 게인 스케줄링에 기초한 제어기의 구조가 결정되면 다음 문제는 제어기의 파라미터를 결정하는 것으로서 이는 크게 두 가지로 구분된다. 하나는 전건부 입력공간을 분할하는 퍼지집합과 그 소속함수를 정의하는 것이고, 다른 하나는 결론부의 계수들을 동조하는 것이다. 아직까지 입력공간을 최적으로 퍼지분할하는 해석적인 방법은 없고 전적으로 전문가의 경험에 의존하고 있으므로, 본 연구에서도 운전환경에 따라 몇 개의 동작점을 설정하고 이를 삼각함수와 사다리꼴함수로 구분하고, 그 중심과 폭을 경험적으로 결정하도록 한다.

한편 결론부의 PID 제어기는 Ziegler-Nichols 과도응답법으로 동조한다. 이 방법은 대부분의 복잡한 산업 프로세스들이 S자 모양의 응답곡선을 가진다는 사실로부터, 이들의 동특성이 응답곡선으로부터 해석된다. 따라서 제어대상은 실제로는 고차이나 다음과 같이 시간지연 요소를 가지는 1차계의 전달함수로 표시된다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{1 + Ts} \quad (18)$$

여기서 K 는 정상이득, T 는 시정수, L 은 시간지연이다.

응답을 통해 K, T, L 을 얻고 표 1과 같이 설정하게 된다. $K_I = K_p/T_I, K_D = K_p T_D$ 의 관계가 성립한다. 이 값들은 단위 계단입력에 대한 시스템 출력의 진폭이 1 싸이클마다 1/4씩 감소하는 응답특성을 준다.

Table 1 Z-N의 과도응답법에 의한 PID제어기의 동조 규칙

제 어 기	K _P	T _I	T _D
PID	1.2T/KL	2L	0.5L

IV. 시뮬레이션

제안한 퍼지 제어기의 성능을 파악하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다. 사용된 대상 시스템의 파라미터는 표 2와 같다.

Table 2 시뮬레이션에 사용된 파라미터 값

파 라.미 터	값	단 위
S ₁	0.02	[m ²]
S ₂	0.785 × 10 ²	[m ²]
S ₃	0.785 × 10 ²	[m ²]
P ₁	0.314159 × 10 ³	[m ²]
P ₂	0.314159 × 10 ³	[m ²]
P ₃	0.314159 × 10 ³	[m ²]
K _v	0.44 × 10 ³	[m ³ /sec · V]
T _v	0.1	[sec]
g	9.81	[m/sec ²]

시뮬레이션을 위하여 계획변수인 #1 수조의 높이를 고려하여 세 동작점이 가정되었고, 제어기는 다음 세 규칙으로 구성된다.

$$\begin{aligned}
 R^1: \text{ If } y \text{ is } F^1, \text{ then } u^1(t) &= K_{P1}^1 e(t) + K_{I1}^1 \int e(t) dt + K_{D1}^1 \frac{de(t)}{dt} \\
 R^2: \text{ If } y \text{ is } F^2, \text{ then } u^2(t) &= K_{P2}^2 e(t) + K_{I2}^2 \int e(t) dt + K_{D2}^2 \frac{de(t)}{dt} \\
 R^3: \text{ If } y \text{ is } F^3, \text{ then } u^3(t) &= K_{P3}^3 e(t) + K_{I3}^3 \int e(t) dt + K_{D3}^3 \frac{de(t)}{dt}
 \end{aligned} \tag{19}$$

따라서 입력공간은 3개의 퍼지집합을 사용하여 분할하였다. 각 퍼지집합은 F¹= Low Level, F²= Medium Level, F³= High Level의 의미를 가지며 소속함수 모양은 그림 3과 같다.

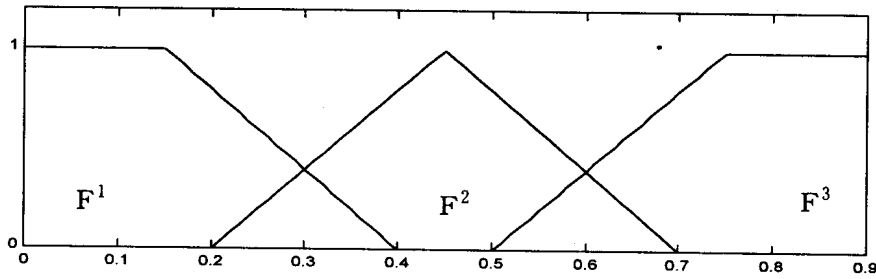


Fig. 3 입력공간의 퍼지분할

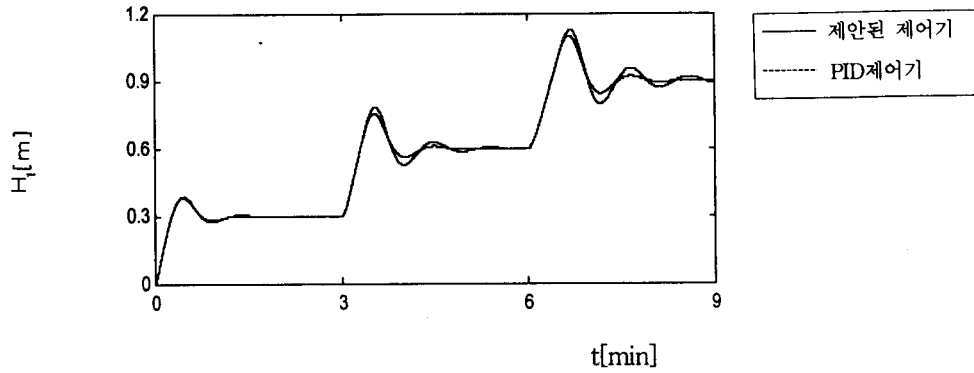
세 동작점에서 Z-N 과도응답법으로 PID 파라미터를 얻고 미세 조정된 결과는 다음 표와 같다.

Table 3 동조된 PID제어기의 파라미터

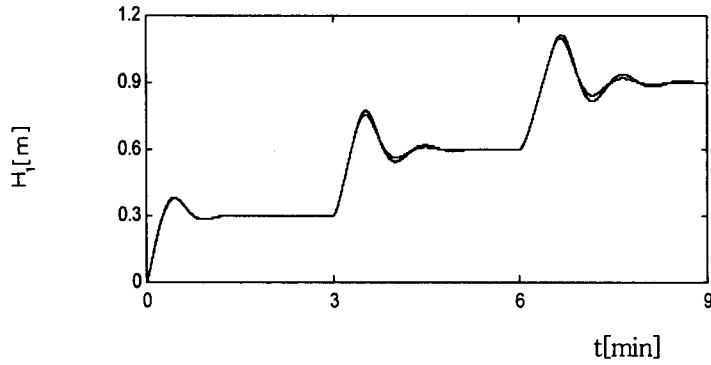
동작점 i	파라미터	K_P^i	K_I^i	K_D^i
1	$Q_{10}^1 = Q_{20}^1 = Q_{40}^1 = 0.76218 \times 10^3, Q_{30}^1 = 0$ $H_{10}^1 = 0.3, H_{20}^1 = H_{30}^1 = 0.6, u_0 = 1.73$	15.9	1.54	40.94
2	$Q_{10}^2 = Q_{20}^2 = Q_{40}^2 = 0.10779 \times 10^2, Q_{30}^2 = 0$ $H_{10}^2 = 0.6, H_{20}^2 = H_{30}^2 = 1.2, u_0 = 2.45$	17.2	1.51	49.02
3	$Q_{10}^3 = Q_{20}^3 = Q_{40}^3 = 0.13201 \times 10^2, Q_{30}^3 = 0$ $H_{10}^3 = 0.9, H_{20}^3 = H_{30}^3 = 1.8, u_0 = 3.0$	19.6	1.49	64.19

먼저 제안한 방법의 응답을 기존의 PID제어기 응답과 비교하는 시뮬레이션을 실시하였다. 이때 PID제어기도 표 3의 파라미터를 사용하였다. 그림 4는 목표치를 계단형으로 변경할 때 두 방법의 추종성능을 비교한 것으로서 각 그림은 PID제어기가 서로 다른 파라미터로 동조된 경우를 보여준다. 그림에서 보면 PID제어기는 일반적으로 동작점이 변경되면 그 성능도 달라지지만 제안된 제어기의 경우에는 이와는 무관함을 알 수 있다.

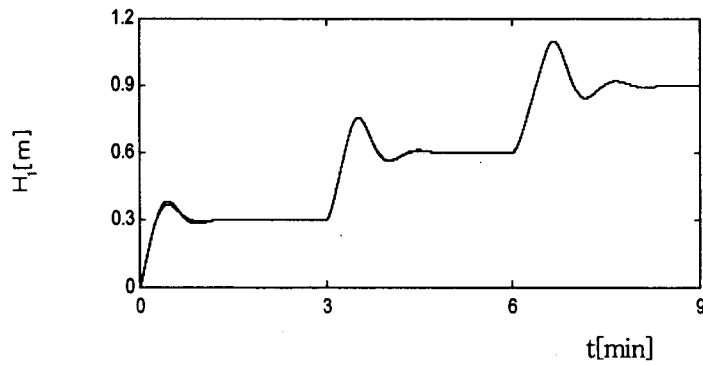
그림 5는 외란 변화에 대한 제안된 제어기의 조절성능을 확인하기 위한 것으로 역시 PID제어기와 비교하였다. 시스템이 각 동작점에서 운전을 시작하고 1분이 경과한 후 #1 수조에 $-0.02[m^3/sec]$, 5분이 경과한 후에 $+0.02[m^3/sec]$ 의 유량을 주입시키는 외란을 가하였다. 각 그림은 PID제어기가 서로 다른 파라미터로 동조된 경우를 보여준다. 두 방법 다 외란에 대한 출력을 조절하는 능력을 갖고 있지만 그림 5(c)에서 명확하게 확인할 수 있듯이 PID제어기의 경우는 동작점에 따라 그 성능이 달라진다.



(a) PID제어기(K_P^1 , K_I^1 , K_D^1)

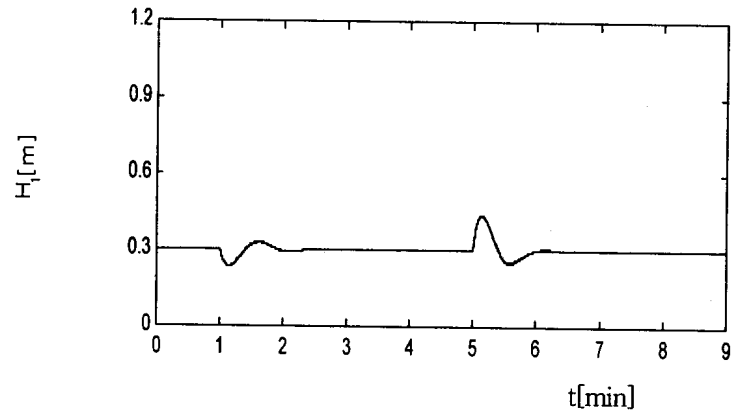


(b) PID제어기(K_P^2 , K_I^2 , K_D^2)

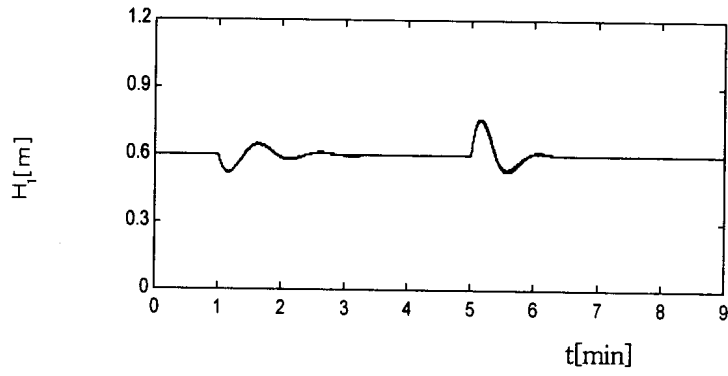


(c) PID제어기(K_P^3 , K_I^3 , K_D^3)

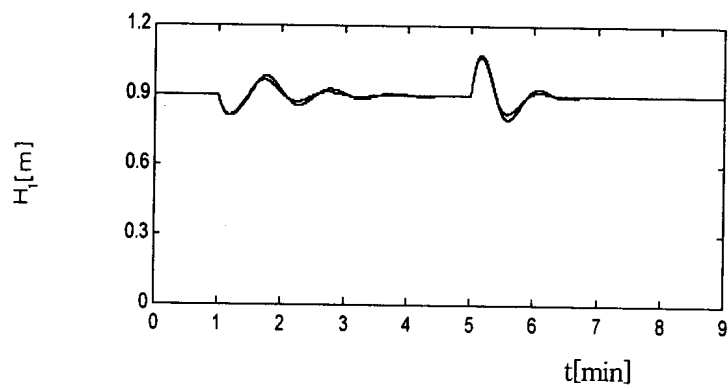
Fig.4 제안된 제어기와 PID제어기의 추종성능 비교



(a) PID제어기(K_P^1, K_I^1, K_D^1)



(b) PID제어기(K_P^2, K_I^2, K_D^2)



(c) PID제어기(K_P^3, K_I^3, K_D^3)

Fig. 5 외란에 대한 제안된 제어기와 PID제어기의 조절성능 비교

V. 결 론

본 연구에서는 기존의 PID제어와 퍼지 게인 스케줄링을 결합하여 비선형 퍼지 제어기를 설계하는 문제를 고려하였다. 먼저 Sugeno-Tagaki의 퍼지모델 형태, 즉 다수의 “if-then” 규칙으로 구성되는 제어기를 얻고, 다음 전진부의 입력공간을 경험적으로 퍼지분할하고 결론부의 PID 파라미터를 Ziegler-Nichols 과도응답법으로 동조하였다. 본 방법과 기존의 PID제어기의 응답특성을 비교하는 시뮬레이션을 실시한 결과, 비록 제한된 결과이지만 본 방법의 우수성을 입증할 수 있었다. 차후 PID제어기의 최적조정과 입력공간의 최적 퍼지분할 등에 대한 체계적인 연구가 필요할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Y. Nozaka, “Trend of New Control Theory Application in Industrial Process Control (Survey),” Proc. IFAC 12th Triennial World Cong., Vol. 4, pp. 215-218, 1993
2. J. G. Ziegler and N. B. Nichols, “Optimum Setting for PID Controllers,” Trans. ASME, Vol. 64, pp. 759-768, 1942
3. G. H. Cohen and G. A. Coon, “Theoretical Considerations of Retarded Control,” Trans. ASME, Vol. 75, pp. 827, 1953
4. T. Hägglund and K. J. Åström, “Industrial Adaptive Controllers Based on Frequency Response Techniques,” Automatica, Vol. 27, No. 4, pp. 599-609, 1991
5. K. J. Åström and B. Wittenmark, Adaptive Control, Addison-Wesley Publishing Co., N.Y., 1989
6. T. Yamamoto et al., “Intelligent Tuning PID Controllers,” Proc. IEEE Int. Conf. on SMC, Vol.5, pp. 2610-2615, 1995
7. E. H. Bristol, “Pattern Recognition: An Alternative to Parameter Identification in Adaptive Control,” Automatica, Vol. 13, pp. 197-202, 1977
8. 전재홍, 이진국, 김병화, 안현식, 김두현, “PID 제어기의 게인 조절을 위한 퍼지 게인 스케줄링 기법 및 응용” 전자공학학회문집 제35권 S편 제 1호, pp.60-67, 1998