PID제어기의 자동조정을 위한 퍼지 전문가시스템

이 기 상, 김 현 철, 박 태 건*
단국대학교 전기공학과

A Fuzzy Expert System for Auto-tuning PID Controllers

Kee-Sang Lee, Hyun-Chul Kim, Tae-Geon Park*
Dept. of Electrical Eng., DanKook University

ABSTRACT

A rule based fuzzy expert system to self-tune PID controllers is presented in this paper. The rule base, the core of the expert system, is extracted from the Wills' tuning map and the author's knowledge about the implicit relations between PID gains and controlled output response.

The overall control system consists of the relay feedback scheme and the expert system, where the one is responsible for initial tuning and the other for subsequent tuning.

The PID control system with the proposed fuzzy expert system shows better convergence rate and control performances than those of a Litt in spite of the fact that the two rule bases are extracted from the same maps provided by Wills.

1. 서론

PI(D)제어기법은 1940년대에 프로세스제어에 도입되기 시작한 가장 고전적인 제어방식이다. 이 제어기는 구조의 단순성에도 불구하고, 목표치 추적, 외란효과의 감쇄, 프로세스와 모델 파라미터의 불일치에 대한 강인성등 제어계에 요구되는 제반 특성면에서 우수한 특성을 가지고 있다.[1] 그러나 PI(D)제어기와 관련된 중요한 문제점은 프로세스 모델의 불확실성이 존재하는 경우, 프로세스 동작점에 따라 최적이득이 다른 경우, 프로세스 운전자가 이득조정에 익숙하지 않은 경우등 많은 경우에 만족할 만한 제어성능을 얻을 수 없다는 사실이다. 이 문제의 해결은 PID이득을 자동적으로 조정하는 소위 자동조정(Auto-tuning) 알고리즘을 도입하는 것이며, 이는 1980년대에 이르러서야 본격적으로 연구되기 시작하였다.[1]

그 중 한가지 방법은 입출력 정보를 이용하여 모델파라미터를 식별하고 모델파라미터에 근거하여 PID이득을 계산하는 방식으로 자기조정 제어기[3]에 기초한 것이다. 그러나 이 방법은 많은 사전정보가 요구되는 관계로 실질적 적용에 부적합한 것으로 판명되었으며,[2] 현재에는 다음의 두가지 조정기법이 주로 사용되고 있다. 그 하나는 패턴인식에 근거한 기법[4][5]이며, 다른 한 종류는 Åström등이 제안한 릴레이궤환 기법[6]이다. 전자는 PID제어기를 프로세스에 연결한 상태에서 계단응답을 관찰하여 그 패턴에따라 제어기 이득을 조정하는 방식으로 숙련된 프로세스 운전자의 이득조정방법을 알고리즘화 한것이다. 이에 대한 연구는 Bristol로 부터 시작되었으며 그 기본 개념은 프로세스 운전자의 조정방식이 관측된 출력패턴과 요구되는 출력패턴의 차이에 근거한다는 사실로 부터 도출되었다. 그러나 이 자동조정 알고리즘은 초기이득 결정이 타당한 경우에 사용될 수 있으며 따라서 시행착오에 의한 초기 이득조정과정이 요구되고 제안의 근거가 전문가에 의해 제공되는 정성적이고 애매한 조정규칙임에도 불구하고 단순한 2가논리에 근거한 추론방식을 채택하고 있으며 이득조정과정에 부족제동의 경우만이 고려되었다는 문제점을 가지고 있다. 후자는 릴레이궤환시스템(Relay feedback system)이 임계주파수(f_u)로 진동한다는 사실에 착안하여 릴레이궤환을 시행하여 임계주기(P_u)와 임계이득(K_u)을 얻고 이 결과를 ZNM(Ziegler-Nichols tuning method)에 대입하여 PID 이득을 결정하는 방식이다. 이 기법은 릴레이의 크기외에는 아무런 사전정보도 요구되지 않으나 이득조정을 위해서 릴레이 입력을 투입해야 하므로 초기조정에 적절한 반면 후기조정에 적합치 않으며 ZNM에의해 조정된 PID이득이 고도의 제어성능을 보장하지 못한다. 이들 문제점의 해결방안은 프로세스 자체 및 제어에 관한 전문가의 지식기반에 근거하여 PID이득을 자동조정하는 전문가시스템을 도입하는것이다.

퍼지알고리즘을 이용한 감시전문가제어시스템에 대한 최초의 연구 결과는 [7]등이 있으나 기법의 실질적 적용을 가능케 하기 위해서는 제어성능, 일반성등 여러 측면에서 많은 개선이 이루어져야 한다.

따라서 본 논문에서는 기존 PI(D)제어기 이득의 자동조정을 위한 퍼지전문가시스템을 개발하고 그 유용성을 입증하는데 궁극적인 목표를 두었으며 릴레이궤환에 근거한 자동조정기법을 초기조정기법으로 채택하여 퍼지전문가시스템과 병용하도록 하였다.

2. 제안된 PID 자동조정 전문가 시스템의 구조및 개요

제안한 전문가제어시스템은 패턴인식기법 및 퍼지추론엔진을 이용하여 설계되었으며 특징량추출기, 패턴분류기, 조정규칙기반, 추론엔진 및 고전적 PID제어기를 포함하고 있으며 초기이득결정기법으로 릴레이궤환기법을 도입했다.

전문가시스템의 운용과정은 다음의 두단계로 나누어지며 그 구조는 그림 1 과 같다.

(i) 릴레이궤환에 의한 선조정과정.

(ii) 퍼지알고리즘의 규칙기반에 의한 자동조정과정.

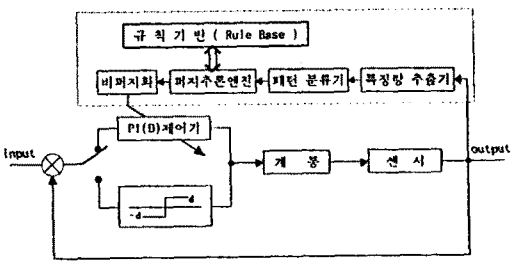

그림 1. 제안된 PID 자동조정 전문가 시스템의 구조

2.1 릴레이궤환에 의한 선조정과정

릴레이궤환에 의한 이득결정방법은 많은 계통의 출력이 릴레이궤환 상황에서 임계주기로 진동을 하므로 이로부터 제어기 이득조정에 필요한 임계이득(K_u)과 임계주파수(f_u)가 구해질 수 있다는 사실에 근거한다. 이 기법에 대한 해석적 고찰은 참고문헌[1][6]에 잘 나타나있다. 계통이 저역필터 특성을 가지고 있는 경우 편차신호의 크기는 근사적으로 식(2-1)과 같으며 임계주기를 갖는 진동이 발생할 조건은 식(2-2)와 같다.

$$a = \frac{4d}{\pi}|G_P(j\omega)| \qquad (2\text{-}1)$$

$$\arg\ G_P(j\omega) = -\pi \qquad (2\text{-}2)$$

$$K_u = \frac{4d}{\pi a} = \frac{1}{|G_P(j\omega)|}$$

식(2-2)에서 $G_P(j\omega)$는 미지의 모델이므로 K_u 는 설정된 릴레이출력의 크기(d)와 진동주기($P_u = \frac{1}{f_u}$) 및 오차신호의 크기(a)를 이용하여 결정한다. 일단 K_u와 P_u가 얻어지면 PI(D)제어기의 이득은 아래기술된 Ziegler-Nichols의 이득 결정식으로부터 결정할 수 있다.

$$K_p = \frac{K_u}{1.7}\ ,\quad T_i = \frac{P_u}{2}\ ,\quad T_d = \frac{P_u}{8}$$

이 이득은 설정치 변화시 출력응답의 오버슈트가 일반적으로 $\frac{1}{4}$ 되는 감쇄비를갖도록 설정된 값이다.

2.2 퍼지알고리즘의 규칙기반에의한 자동조정과정

2.2-1 특징량추출

센서출력, 즉 측정정보로 부터 프로세스의 운전상태, 제어성능 등과 관련된 제반 특징량(Feature)을 추출한다.

(ⅰ)측정 출력에서 추출되는 기본적인 특징량

본 연구에서 채택한 특징량은 그림 2에서와 같이 페루프시스템의 단위응답 특성에 기초하여 다음과 같이 정의하였다.

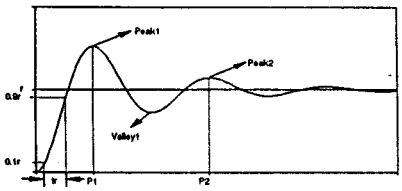

그림 2. 계단 입력에 대한 플랜트의 출력 특성

(1)오버슈트(Overshoot): $\frac{Peak1 - reference}{reference}$

(2)제동비(Damping ratio): $\frac{Peak2 - Valley1}{Peak1 - Valley1}$

여기에서 *Peak*1과 *Peak*2 는 각 각 첫번째와 두번째의 오버슈트의 값이고, *Valley*1은 첫번째 언더슈트의 값이다.

(3)주기 (Period): $P_2 - P_1$

위 에서 P_1과 P_2는 각각 첫번째와 두번째 오버슈트가 발생한 시각이다.

(4)상승시간(Rise time): 플랜트의 출력이 최종치의 10%에서 90%까지 도달하는데 걸리는 시간

(5)정상상태편차(Steady state error): 과도기가 지난후 남아 있는 출력과 기준입력 사이의 편차. 즉

$$e_{ss} = \lim_{t \to \infty} e(t)$$

여기서, $e(t) = r(t) - c(t)$

(ii)적용된 PID제어기 자체의 특징량

(1) 비례이득(proportional gain) : K_p
(2) 적분시간(integral time) : T_i
(3) 미분시간(derivative time) : T_d

2.2-2 특징량의 가공

위의 과정에서 추출된 특징량은 단순히 응답패턴만을 나타내는 수치들이다. 따라서 이들 정보를 이용하여 각 특징량에 대한 요구값과의 편차를 구해야 하며 이들 특징량이 사용자가 지정하지 않는한 같은 비중으로 적용될 수 있도록 정규화하여야 한다. 먼저 각 특징량의 실제값과 요구치를 다음과 같이 설정한다.

f_d^i , f_r^i $\quad i = 1, 2, 3, 4, 5$
f_d^1 (f_r^1) : 제동비의 요구치(실제값)
f_d^2 (f_r^2) : 오버슈트의 요구치(실제값)
f_d^3 (f_r^3) : 주기의 요구치(실제값)
f_d^4 (f_r^4) : 상승시간의 요구치(실제값)
f_d^5 (f_r^5) : 정상상태편차의 요구치(실제값)

이제 각 특징량의 편차는 다음식에 의해 정규화 한다.

$$f_i = \frac{f_r - f_d}{f_d} , \qquad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

위의 변화된 특징량 f_i는 모든 특징량에 같은비중을 부여한 결과이다. 그러나 실제제어상황에서는 안정도와 관계되는 제동비, 성능의 중요지표인 오버슈트등이 다른 특징량에 비해 그 중요도가크므로 이를 고려한 가중치(Weight)를 고려하는것이 바람직하며 이 경우 f_i는 다음과 같이 정의된다.

$$f_i = \frac{f_r - f_d}{f_d} \times w^i , \qquad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

단, w^i 는 상대적 가중치 (기준 $w^i = 1$)

2.2-3 특징량의분류 및 퍼지화(Fuzzification)

거의 모든 전문가시스템은 전문가 또는 숙련된 조작자의 지식 및 조작규칙을 참조한다. 규칙기반내의 각 규칙은 다음과 같은 구조를 가진다.

IF f_1 *is Positive Large*
and f_2 *is Positive Large*
and f_3 *is Positive Small*
and f_4 *is Any*
and f_5 *is Any*
Then Decrease m_k (Negative Medium)
and *Decrease* m_α (Negative Large)
and *INcrease* m_β (Positive Large)

따라서 위와 같은 규칙을 참조한 퍼지추론을 위해서는 각 특징량을 분류하여 (PL PM ... NM NL)등의 퍼지변수로 표현하여야 한다.

입력 특징량의 분류(→퍼지화)는 각 특징량에 대응하는 기준퍼지집합(Reference fuzzy set)을 설정하고 정규화될 입력 특징값은 기준퍼지집합의 소속함수로 표현하는 것이다.

2.2-4 규칙기반(Rule base)의 구축

규칙기반의 구축은 추론결과 PID제어기의 이득조정량이 전적으로 규칙기반의 참조에 의해 결정된다는 입장에서 전문가 시스템의 핵심을 이룬다. 새로운 PID이득조정 규칙기반은 D.M.Wills에 의해 작성된 PID 제어기의 조정맵(Tuning map)을 참조하여 구축하였다.[8][9] 이 조정맵은 이미 Litt 등에 의해 조정규칙 추출에 사용된 바 있다.[10] Litt의 규칙은 비교적 좋은 성능을 주는 초기이득으로 부터 출발한 경우에도 수십회의 반복조정을 거쳐야만 어느 정도의 성능개선을 달성할 수 있음을 보이고 있으며, 이 단순한 규칙기반에 퍼지알고리즘을 적용한 결과도 이 조정규칙의 수렴속도가 매우 늦음을 잘 보여주고있다.(보통 100-200회에수렴) 또한 이제까지의 연구는 Map에서 이득조정의 축을 이루고있는 임계주기(P_u)를 도입하지 못하다고 있다는 점도 Litt가 추출한 조정규칙의 문제점으로 지적된다.

본 논문에서는 Litt의 조정규칙과는 달리 임계주기(P_u)를 고려하는 동시에 수렴속도가 비교적 빠른 조정규칙군을 개발하였다.

아래 규칙군에서 전건부내의 각 변수(f_i | i=1, 2, 3, 4, 5)는 원하는 특징량과 실제 특징량의 차이를 정규화한것으로서 f_1은 제동비, f_2는 오버슈트, f_3는 주기, f_4는 상승시간, f_5는 정상상태편차를 나타낸다.

또한 후건부는 Litt의 조정맵에서 정의된 K_p , $\frac{P_u}{T_i} = \alpha$ 및 $\frac{T_d}{P_u} = \beta$ 조정량으로서 m_k , m_α , m_β 에 대응된다.

(1) *If* (*PL, PL, PO, -, -*) *Then* (*NM, NL, PL*)
(2) *If* (*PL, PL, AZ, -, -*) *Then* (*NM, NL, PM*)
(3) *If* (*PL, PM, PO, -, -*) *Then* (*NS, NM, PM*)
(4) *If* (*PL, PM, AZ, -, -*) *Then* (*NS, NM, PS*)
(5) *If* (*PL, AZ, PO, -, -*) *Then* (*AZ, NM, PS*)
(6) *If* (*PL, AZ, AZ, -, -*) *Then* (*AZ, NM, AZ*)
(7) *If* (*PM, PL, PO, -, -*) *Then* (*NM, NM, PL*)
(8) *If* (*PM, PL, AZ, -, -*) *Then* (*NM, NM, PM*)
(9) *If* (*PM, PM, PO, -, -*) *Then* (*NS, NS, PM*)
(10) *If* (*PM, PM, AZ, -, -*) *Then* (*NS, NS, PS*)
(11) *If* (*PM, AZ, PO, -, -*) *Then* (*AZ, NS, PS*)
(12) *If* (*PM, AZ, AZ, -, -*) *Then* (*AZ, NS, AZ*)
(13) *If* (*AZ, PL, PO, -, -*) *Then* (*NM, NS, PL*)
(14) *If* (*AZ, PL, AZ, -, -*) *Then* (*NM, NS, PM*)
(15) *If* (*AZ, PM, PO, -, -*) *Then* (*NS, AZ, PM*)
(16) *If* (*AZ, PM, AZ, -, -*) *Then* (*NS, AZ, PS*)
(17) *If* (*AZ, AZ, PO, -, -*) *Then* (*AZ, AZ, PS*)
(18) *If* (*AZ, AZ, AZ, -, -*) *Then* (*AZ, AZ, AZ*)
(19) *If* (*NE, PL, -, PO, AZ*) *Then* (*NM, PS, PS*)
(20) *If* (*NE, PL, -, PO, NAZ*) *Then* (*NS, PS, PS*)
(21) *If* (*NE, PL, -, NE, AZ*) *Then* (*NM, PS, AZ*)
(22) *If* (*NE, PL, -, NE, NAZ*) *Then* (*NS, PS, AZ*)
(23) *If* (*NE, PM, -, PO, AZ*) *Then* (*NS, PS, PS*)
(24) *If* (*NE, PM, -, PO, NAZ*) *Then* (*AZ, PS, PS*)
(25) *If* (*NE, PM, -, NE, AZ*) *Then* (*NS, PS, AZ*)
(26) *If* (*NE, PM, -, NE, NAZ*) *Then* (*AZ, PS, AZ*)
(27) *If* (*NE, AZ, -, PO, AZ*) *Then* (*AZ, PS, PS*)
(28) *If* (*NE, AZ, -, PO, NAZ*) *Then* (*PS, PS, PS*)
(29) *If* (*NE, AZ, -, NE, AZ*) *Then* (*AZ, PS, AZ*)
(30) *If* (*NE, AZ, -, NE, NAZ*) *Then* (*PS, PS, AZ*)

위의 규칙군들에서 전건부 변수인 각 특징량의 정규치에는

f_1 : *NE, AZ, PM, PL*
f_2 : *AZ, PM, PL*
f_3 : *NE, AZ, PO*
f_4 : *NE, PO*
f_5 : *AZ, NAZ* 의 언어치를 부가했으며,

후건부 변수인 K_p조정량, α조정량, β조정량에는

m_k : *NM, NS, AZ, PS*
m_α : *NL, NM, NS, AZ, PS*
m_β : *AZ, PS ,PM, PL* 의 언어치가 부가되었다.

앞 규칙들을 살펴보면 주기와 안정도를 개선시키도록 m_β를, 제동비와 주기, 그리고 상승시간등을 개선시키도록 m_k , m_α를 그리고 특히 제동비와 오버슈트를 향상 시키도록 m_α를 주로 조정하는 것을 볼 수 있다. 또한 이들 규칙들을 추출할 때 PID파라미터 각각이 독단적으로 계의 응답 특성에 영향을 주지않고 상호 간섭하여 계의 응답 특성을 결정함에 유의하였다.

2.2-5 퍼지추론 엔진

퍼지추론 엔진은 전처리 과정에서 추론된 프로세스의 상태 즉, 정규화된 각 특징량(f_i)에 대응하는 퍼지집합을 패턴분류기로 부터 받고 전절에 기술된 이득 자동조정규칙을 참조하여 각 PID이득의 조정량에 대한 퍼지집합을 추론하는 기능을 가진다. 퍼지추론의 연산방법으로는 Mandani의 max-min연산법을 채택하였다.

2.2-6 비퍼지화 및 추론결과의 적용 알고리즘

추론엔진의 출력은 이득공간에서 정의되는 퍼지집합이다. 따라서 실제로 투입될 이득조정량을 구하기 위해서는 비퍼지화를 수행하여야 한다. 비퍼지화 방법중 본 연구에서 채택한 기법은 다음의 무게중심법이다.

$$m_* = \frac{\sum_{i=1}^{n}[m_*^i \cdot \mu_{P_*}(m_*^i)]}{\sum_{i=1}^{n}\mu_{P_*}(m_*^i)}$$

위 식에서 * 는 k, α, β에 대응되며, $\mu_{P_*}(m_*^i)$는 각 언어치 변수의 소속값이다.

추론결과를 비퍼지화함으로써 얻어진 이득수정량 m_k, m_α, m_β는 PID제어기의 이득과 직접관계를 가지는 K_p , α , β의 수정에 사용되며 본 연구에서 사용한 이득변경식은 아래와 같다.

$$K_p^{k+1} = K_p^k \left(1 + \frac{m_k}{s_k}\right)$$
$$\alpha^{k+1} = \alpha^k \left(1 + \frac{m_\alpha}{s_\alpha}\right)$$
$$\beta^{k+1} = \beta^k \left(1 + \frac{m_\beta}{s_\beta}\right)$$

위에서 k는 k번째 조정 step을 의미하며 s_k , s_α , s_β 는 scale factor 이다. 위에서 구해진 K_p^{k+1} , α^{k+1} , β^{k+1} 등과 PID제어기 이득과의 관계는 다음과 같다.

$$K_p = K_p^{k+1}$$
$$T_i = \frac{P_u}{\alpha^{k+1}}$$
$$T_d = P_u \cdot \beta^{k+1}$$

3. 시뮬레이션 결과

제안된 방법의 타당성을 보이기 위하여 시뮬레이션에 사용된 계통은 열교환기의 등가 3차모델과 순수 2차계통이며 개루프 전달함수는 각각 식(1), (2)와 같다.

$$G_p(s) = \frac{0.8}{(30s+1)(10s+1)(3s+1)} \quad (1)$$

$$G_p(s) = \frac{1}{(1+10s)^2} \quad (2)$$

식(1)의 계통에 대하여 목정값 즉, 제동비, 오버슈트, 주기, 상승시간, 정상상태편차의 요구치는 각각 0.1, 0.1, 40, 15, 0으로 선정하였으며 scale factor s_k, s_α, s_β는 각각 2, 12, 10으로 채택하였다. 식(2)의 계통에 대해서는 목정값을 각각 0.1, 0.1, 1, 2, 0으로 고려하였으며 scale factor는 각각 9, 10, 10으로 선정하였다. 또한 선조정 기법으로 계통(1)은 릴레이궤환을 채택하였으며, 계통(2)는 k_p=0.8, T_i=4, T_d =0.1, P_u=8 로 임의 선정하였다.

그림3.1과 4.1은 각각 계통(1), (2)에 대하여 비교적 빠른 수렴 특성을 갖는 계의 응답을 보여준다. 그리고 계통의 목정 파라미터가 각각 3000초에서 25%, 1600초에서 25% 변하였을 경우의 응답을 그림3.2와 그림4.2에 도시하였다.

그림3.3과 그림4.3은 설정치의 변화시에도 몇회의 조정에의하여 우수한 조정 성능이 보장됨을 보여준다. 마지막으로 계통(1)에 대해 3000초 이후 0.9 크기의 외란을, 계통(2)에 대해 1600초 이후 1 크기의 외란을 투입시킨 경우의 응답을 그림3.4와 그림4.4에 나타내었다. 그림들은 다양한 동작 조건하에서 자동 조정 제어기가 조정 기능을 행하는 동안의 계의 응답을 보여준다. 제어기는 계단입력에 대한 계의 응답을 분석하여 자동조정 기능을 우수하게 수행하였으며, 일단 각 목정값의 요구치에 개략적으로 도달하면 PID파라미터의 조정은 중단한다.

4. 결론

본 연구에서는 PID제어기 이득의 자동조정을 위한 규칙기반 퍼지 전문가 시스템을 제안하고 그 유용성을 입증하였다. 제안된 간접전문가 PID제어기는 다음과 같은 특징을 갖는다.

(1) 기존의 아날로그 또는 디지탈 PID제어기의 자동조정기법에 직접 도입될 수 있으므로 기존 설비의 성능개선에 매우 효과적으로 사용될 수 있다.

(2) PID제어기의 자동조정을 위한 기존의 전문가시스템 중에는 전문가의 조정규칙, 지식등 정성적 개념을 정량적 알고리즘 처리한 경우가 적지 않아 성능상의 문제가 야기되었으나 여기서는 적합한 퍼지알고리즘을 도입함으로써 이러한 문제점을 해결하였다.

(3) 제안된 전문가시스템의 핵심요소인 이득조정규칙은 Wills등의 조정맵에서 추출되었지만 Litt등의 규칙기반과는 큰 차이가 있다. 제안된 조정규칙군은 Litt의 연구결과 및 Litt의 규칙에 퍼지알고리즘을 도입한 결과에 비해 훨씬 빠른 수렴 특성을 가진다.

(4) 제안된 전문가 시스템은 릴레이궤환 및 Ziegler-Nichols 조정규칙에 의해 결정된 제어기 이득이 폐루우프계의 불안정을 초래하는 경우에도 후속조정에서 즉시 계의 안정도를 확보해 두는 능력을 가진다.

(5) 패턴인식에 근거한 기존 연구결과는 일반적으로 3개의 피이크가 검출된 경우에만 자동조정을 수행하며 25-40(%)의 오버슈트가 허용되는 것이 일반적이다. 그러나 제안된 제어계는 사용자에 의해 주어진 성능이 만족될때까지 이득조정을 수행하므로 고성능 제어시스템에도 적용이 가능하다.

참고문헌

[1] K. J. Åström, T. Hagglund, Automatic Tuning of PID Controllers, Instrument Society of America, 1988.
[2] K. J. Åström, "Toward Intelligent Control: Keynote Speech to the 1988 American Control Conference", IEEE Control Systems Magazine, pp. 60-64, April 1989.
[3] P. J. Gawthrop, "Self-Tuning PI and PID Controller", IEEE Conference on applications of Adaptive and Multivariable Control, Hull, 1982.
[4] E. H. Bristol, et al, "Adaptive Process Control by Pattern Recognition", Instrument and Control Systems, pp.101-105, March, 1970.
[5] E. H. Bristol, et al, "Pattern Recognition : an Alternative to Parameter Identification in Adaptive Control", Automatica, Vol.13, pp.197-202, March 1977.
[6] K. J. Åström, "Auto-Tuning Adaptation and Expert Control", in Proc. 1985 Amer. Control Conf. , pp. 1514-1519, Boston, MA, June, 1985.
[7] Spyros Tzafestas and Nikolaos P. Papanikolopoulos, "Incremental Fuzzy Expert PID Control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 37, No. 5, pp. 365-371, October 1990.
[8] Doris M. Wills, "A Guide to Controller Tuning", Control Engineering, pp. 93-95, August, 1962.
[9] Doris M. Wills, "Tuning Maps for Three-Mode Controllers", Control Engineering, pp. 104-108, April 1962.
[10] Jonathan Litt, "An Expert System to Perform On-line Controller Tuning", IEEE Control Systems, pp. 18-23, April 1991.

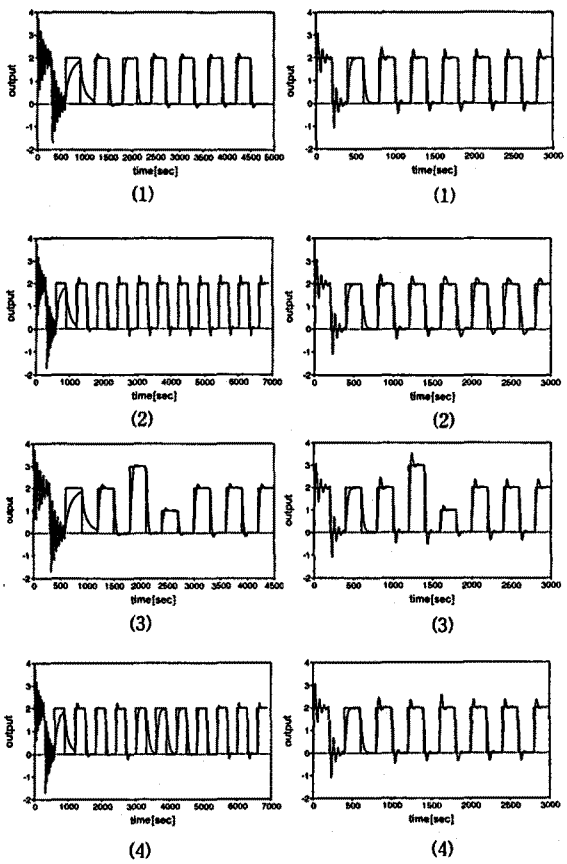

그림3. 식(1)의 계통에 대한 제어계 응답.

그림4. 식(2)의 계통에 대한 제어계 응답.