

# 자기동조 PID제어기를 위한 퍼지전문가 시스템

이기상, 김현철, 박태건, 김일우  
단국대학교 전기공학과

## A Fuzzy Expert System for Auto-Tuning PID Controllers

Kee-Sang Lee, Hyun-Chul Kim, Tae-Geon Park, Il-Woo Kim  
Dept. of Electrical Eng., Dankook University

### ABSTRACT

A rule based fuzzy expert system to self-tune PID controllers is proposed in this paper. The proposed expert system contains two rule bases, where one is responsible for "Long term tuning" and the other for "Incremental tuning".

The rule for "Long term tuning" are extracted from the Wills' map and the knowledge about the implicit relations between PID gains and important long term features of the output response such as overshoot, damping and rise time, etc., while "Incremental tuning" rules are obtained from the relations between PID gains and short term features, error and change in error.

In the PID control environment, the proposed expert system operates in two phases sequentially.

In the first phase, the long term tuning is performed until long term features meet their desired values approximately. Then the incremental tuning starts with PID gains provided by the long term tuning procedure.

It is noticeable that the final PID gains obtained in the incremental tuning phase are only the temporal ones.

Simulation results show that the proposed rule base for "Long term tuning" provides superior control performance to that of Litt and that further improvement of control performance is obtained by the "Incremental tuning".

### 1. 서론

PI(D)제어기법은 이미 1940년대에 프로세스제어에 도입되기 시작한 가장 고전적인 제어방식이지만 구조의 단순성에도 불구하고, 목표치 추적, 외란효과와 감쇄, 프로세스와 모델 파라미터의 불일치에 대한 강인성등 제어계에 요구되는 제반 특성면에서 우수한 특성을 가지고 있어 산업용 프로세스 제어에 가장 많이 채택되고 있다.

그러나 PI(D)제어기와 관련된 중요한 문제점은 프로세스 모델의 불확실성이 존재하는 경우 및 운전환경이 변화되는 경우, 프로세스 동작점에 따라 최적이득이 다른 경우, 프로세스 운전자가 이득조정에 익숙하지 않은 경우등 많은 경우에 만족할 만한 제어성능을 얻을 수 없다는 사실이다.

1980년대에는 이러한 문제의 해결을 위하여 PID이득을 자동적으로 조정하는 자동조정(Auto-tuning) 알고리즘이 도입되기 시작하였으며,[1] 현재에는 다음의 두가지 조정기법이 주로 사용되고 있다. 그 하나는 패턴인식에 근거한 기법[4][5]이며, 다른 한 종류는 Aström등이 제안한 릴레이교환기법[6]이다.

전자는 PID제어기를 프로세스에 연결한 상태에서 계단응답을 관찰하여 그 패턴에 따라 제어기 이득을 조정하는 방식으로 숙련된 프로세스 운전자의 이득조정방법을 알고리즘화 한 것이다. 이에 대한 연구는 Bristol로부터 시작되었으며 그 기본 개념은 프로세스 운전자의 조정방식이 관측된 출력패턴과 요구되는 출력패턴의 차이에 근거한다는 사실로부터 도출되었다. 그러나 이 자동조정 알고리즘은 초기이득 전정이 타당한 경우에 사용될 수 있으며, 따라서 시행착오에 의한 초기 이득조정과정이 요구되고 제안의 근거가 전문가에 의해 제공

되는 정성적이고 애매한 조정규칙임에도 불구하고 단순한 2가논리에 근거한 추론방식을 채택하고 있으며 이득조정과정에 부족제동의 경우만이 고려되었다는 문제점을 가지고 있다.

후자는 릴레이교환시스템(Relay feedback system)이 임계주파수( $f_c$ )로 진동한다는 사실에 착안하여 릴레이교환을 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 크기에는 아무런 사전정보도 요구되지 않으나 이득조정을 위해서 릴레이 입력을 투입해야 하므로 초기조정에 적절한 반면 후기조정에 적합치 않으며 ZNM에 의해 조정된 PID이득이 고도의 제어성능을 보장하지 못한다는 결점을 가지고 있다.

이들 문제점의 해결방안은 프로세스 자체 및 제어에 관한 전문가의 지식기반에 근거하여 PID이득을 자동조정하는 전문가시스템(Expert system)을 도입하는 것이다.

PID이득의 자동조정을 위한 전문가시스템에 관한 이제까지의 연구는 [1]에 잘 기술되어있다. 그러나 이들 연구 결과의 대부분은 최대허용 오버슈트와 제동비가 초과되지 않는 한 빠른 응답특성만을 갖도록 설계되었으며 바람직한 성능을 갖지는 못한다. 따라서 최근의 연구는 기존 전문가제어기의 성능 향상 및 범용화에 그 초점을 두고 있으며, [11] 가장 두드러진 동향은 거의 모든 전문가 제어시스템이 제어기 형태에 관계없이 정성적이고 주관적인 정보처리를 전제하고 있음에 착안하여 이러한 정보처리에 적합한 퍼지 알고리즘을 도입하고 있다는 사실이다. 현재까지 개발된 퍼지 전문가 제어시스템은 직접 전문가 제어시스템과 감시 전문가 제어시스템으로 대별될 수 있으나 대부분은 [ 지식기반 + 추론엔진 ]이 직접 제어 입력을 발생하는 직접 제어기가 대부분이다. [12][13] 그러나 PID형 FLC로 분류되는 직접 전문가제어기는 그 제어특성이 PID)와 유사할 뿐 구조적 측면에서 기존 PI(D)와는 다르며 정상상태에서의 체터링 현상이 발생하는등 작용상의 문제점이 있다.

본 연구의 목적은 기존 아나로그(또는 디지털) 방식으로 실현된 PID제어기 이득조정을 위한 퍼지 전문가시스템을 개발하여 운전자의 개입없이 효과적인 프로세스 제어를 가능케 함에 있다.

제안된 퍼지 전문가시스템은 두개의 이득조정 규칙군 및 추론엔진으로 구성되어 있다. 그중 하나의 규칙군은 기존 대부분의 자동조정기법과 같이 목표치 변화가 발생한 경우에만 한하여 오버슈트, 상승시간등의 특정량에 근거하여 이득조정량을 구하는 "Long term tuning"을 담당하며, 다른 하나는 "Long term tuning"에 의해서는 달성할 수 없는 미세한 제어성능을 얻기위해 "Long term tuning"이 완료된 이후 매 샘플 시간마다 "Incremental tuning"을 담당한다. 오직 "Long term tuning"만에 의한 성능과 "Long term tuning"에 이어 "Incremental tuning" 알고리즘을 적용한 경우의 성능이 제어성능 평가지표의 하나인 ISE합수에 의해 비교된다.

### 2. PID 자동조정 전문가시스템을 포함한 제어계의 개요

전문가제어시스템은 패턴인식기법 및 퍼지 추론엔진을 이용하여 설계되었으며 특징량추출기, 패턴분류기, 조정규칙기반, 추론엔진 및 고전적 PID제어기를 포함하고 있으며 초기 이득 결정기법으로 릴레이케환기법을 도입했다. 제어시스템의 운용은 다음의 세과정으로 수행된다.

- (i) 릴레이케환에 의한 초기조정.
- (ii) 전문가시스템에 의한 자동조정(Long term tuning).
- (iii) 전문가시스템에 의한 미세조정(Incremental tuning).

## 2.1 릴레이케환에 의한 초기조정

릴레이케환에 의한 이득 결정방법은 많은 계통의 출력이 릴레이케환 상태에서 임계주기( $P_u$ )로 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 저역 필터 특성을 가지고 있는 경우 편차신호의 크기는 근사적으로 식(2-1)과 같으며 임계주기를 갖는 진동이 발생할 조건은 식(2-2)와 같다.

$$a = \frac{4d}{\pi} |G_p(j\omega)| \quad (2-1)$$

$$\arg G_p(j\omega) = -\pi \quad (2-2)$$

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

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  $K_u$ 와  $P_u$ 가 얻어지면 PI(D)제어기의 이득은 아래기술된 Ziegler-Nichols의 조정규칙에 의해 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 감쇄비율값도록 설정된 값이다.

## 2.2 Long term tuning 알고리즘

### 2.2-1 특징량추출

센서출력, 즉 측정정보로부터 프로세스의 운전상태, 제어 성능 등과 관련된 제반 특징량(Feature)을 추출한다.

패턴인식 접근방법은 응답패턴을 특징지어주는 특징량의 질(즉, 응답패턴 집합간의 구분능 가능하게 하는 정도)에 따라 그 성능이 좌우되므로 전문가시스템에서 특징량의 선정과 추출은 대단히 중요하다.

측정 출력에서 추출되는 기본적인 특징량은 그림1.에서와 같이 폐루프시스템의 단위응답 특성에 기초하여 다음과 같이 정의하였다.

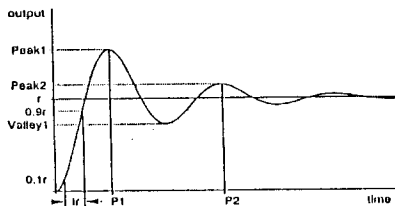


그림1. 계단 입력에 대한 플랜트의 출력 특성

- (1) 오버슈트(Overshoot):  $\frac{Peak1 - reference}{reference}$
- (2) 제동비(Damping ratio):  $\frac{Peak2 - Valley1}{Peak1 - Valley1}$   
여기에서 Peak1과 Peak2는 각각 첫번째와 두번째의 오버슈트의 값이고, Valley1은 첫번째 언더슈트의 값이다.

- (3) 주기(Period):  $P_2 - P_1$   
위에서  $P_1$ 과  $P_2$ 는 각각 첫번째와 두번째 오버슈트가 발생한 시간이다.
- (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

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

여기서,  $e(t) = r(t) - c(t)$

### 2.2-2 특징량의 가공

위의 과정에서 추출된 특징량은 단순히 응답패턴만을 나타내는 수치들이다. 따라서 이들 정보를 이용하여 각 특징량에 대한 요구값과의 편차를 구해 이를 정규화한다. 여기에서 각 특징량의 요구치는 프로세스 운전 데이터 및 조작자의 지식에 근거하여 선정한다.

먼저 각 특징량의 실제값과 요구치의 표현을 다음과 같이 설정한다.

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

이제 각 특징량의 편차는 다음식에 의해 정규화 한다.

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

위의 변화된 특징량  $f_i$ 는 모든 특징량에 같은비율을 부여한 결과이다. 그러나 실제제어상황에서는 안정도와 관계되는 제동비, 성능의 중요지표인 오버슈트등이 다른 특징량에 비해 그 중요도가크므로 이를 고려한 가중치(Weight)를 고려하는 것이 바람직하며 이 경우  $f_i$ 는 다음과 같이 정의된다.

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

단,  $w^i$ 는 상대적 가중치 (기준  $w^i = 1$ )

### 2.2-3 특징량의분류 및 퍼지화

전문가시스템은 전문가 또는 숙련된 조작자의 지식 및 조작규칙을 참조하며, 이러한 지식 및 규칙은 정성적이며 언어적인 특성을 가지고 있다.

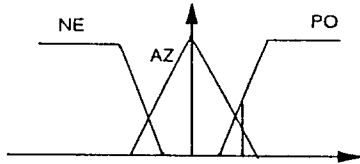
규칙기반내의 각 규칙은 다음과 같은 구조를 가진다.

- IF ( $f_1$  is Positive Large ,  
 $f_2$  is Positive Large ,  
 $f_3$  is Positive Small ,  
 $f_4$  is Any ,  
 $f_5$  is Any )

- Then ( Decrease  $m_k$  (Negative Medium) ,  
Decrease  $m_a$  (Negative Large) ,  
INcrease  $m_s$  (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 선정하여 정규화된 입력 특징량을 기준퍼지집합의 소속함수로 표현하는 것이다. 예를 들어, 어떤 특징량에 대한 기준퍼지집합을 다음과 같이 선정한다면,  $f_i = 0.2$ 는 다음의 소속함수로 표현할 수 있다.



$$\mu_{NE} = 0 \quad \mu_{AZ} = 0.2 \quad \mu_{PO} = 0.5$$

또는

$$\mu(f_i) = [0, 0.2, 0.5] \text{로 표현될 수 있다.}$$

### 2.2-4 규칙기반의 구축

규칙기반의 구축은 추론결과 PID제어기의 이득조정량이 전적으로 규칙기반의 참조에 의해 결정된다는 입장에서 전문가 시스템의 핵심을 이룬다. 새로운 PID이득조정 규칙기반은 D.M.Wills에 의해 작성된 PID제어기의 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 보여주고 있다.(보통 100-200회이상 수렴) 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. 아래의 조정규칙군은 다음과 같은 특징을 갖는다.

Wills의 조정맵에서 이득조정의 축을 이루는 임계주기를 고려하였으며, 같은 맵에서 추출된 Litt의 규칙에 비해 성능면(수렴속도)에 우월하며, 또한 릴레이개환기법에 의해 선정된 초기이득이 계통 불안정을 초래하는 경우에도 안정도를 보장하며 과제동의 경우에 대한 조정규칙을 포함하고 있다. 아래 규칙군에서 전진부내의 각 변수 ( $f_i \mid i=1, 2, 3, 4, 5$ )는 원하는 특징량과 실제 특징량의 차이를 정규화한 것으로서  $f_1$ 는 제동비,  $f_2$ 는 오버슈트,  $f_3$ 는 주기,  $f_4$ 는 상승시간,  $f_5$ 는 정상상태편차를 나타낸다. 또한 후진부는 Litt의 조정맵에서 정의된  $K_p$ ,  $\frac{P_u}{T_i} = \alpha$  및  $\frac{T_d}{P_u} = \beta$  조정량으로서

$m_k, m_\alpha, m_\beta$ 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 전진부 변수인 각 특징량의 정규치에는

- $$\begin{aligned} f_1 &: NE, AZ, PM, PL \\ f_2 &: AZ, PM, PL \\ f_3 &: NE, AZ, PO \\ f_4 &: NE, PO \\ f_5 &: AZ, NAZ \end{aligned}$$

의 언어치를 부가했으며, 후진부 변수인  $K_p$  조정량,  $\alpha$  조정량,  $\beta$  조정량에는

- $$\begin{aligned} m_k &: NM, NS, AZ, PS \\ m_\alpha &: NL, NM, NS, AZ, PS \\ m_\beta &: AZ, PS, PM, PL \end{aligned}$$

의 언어치가 부가되었다.

- 여기에서  $m_k$  ;  $K_p$ 의 조정량,  
 $m_\alpha$  ;  $\alpha (= P_u / T_i)$ 의 조정량,  
 $m_\beta$  ;  $\beta (= T_d / P_u)$ 의 조정량,  
 $P_u$  ; 임계주기  
 $K_p$  ; 비례이득  
 $T_i$  ; 적분시간  
 $T_d$  ; 미분시간

위 규칙군에서 규칙 (1)~(18)은 릴레이개환에 의한 결과 가 부족제동인 경우들, 규칙 (19)~(30)은 과제동인 경우를 고려한 규칙이다.

규칙 (1)~(6)은 시스템을 안정화시키는 것이 주 목적이며, 규칙 (7)~(30)은 안정화된 계의 성능을 향상시키는 것에 중점을 두며, 또한 조정 여부를 결정짓는 규칙(Stopping Rule)을 포함하고 있다.

### 2.2-5 퍼지추론 엔진

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

### 2.2-6 비퍼지화 및 추론결과와 PID이득의 관계

추론엔진의 출력은 퍼지값이므로 실제로 투입될 이득조정량을 구하기 위해서는 비퍼지화를 수행하여야 한다. 비퍼지화 방법중 본 연구에서 채택한 기법은 다음의 무게중심법이다.

$$m_o = \frac{\sum_{i=1}^k [m_i^* \cdot \mu_{F_i}(m_i^*)]}{\sum_{i=1}^k \mu_{F_i}(m_i^*)}$$

위 식에서 \*는  $k, \alpha, \beta$ 에 대응되며,  $\mu_{F_i}(m_i^*)$ 는 각 언어치 변수의 소속값이다.

추론결과를 비퍼지화함으로써 얻어진 이득수정량  $m_k, m_\alpha, m_\beta$ 는 PID제어기의 이득과 직접관계를 가지는  $K_p, \alpha, \beta$ 의 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  $s_k, s_\alpha, s_\beta$  는 scale factor이다.

이득변경식의 구성형태에의해 성능이 좌우될 수 있는데 본 연구에서는 Additive & Multiplicative 형태를 취하고 있으며, 다른 계통으로의 전환시 Scale factor의 약간의 변경으로 좋은 성능을 보장받는 것이 가능하다.

위에서 구해진  $K_p^{k+1}, \alpha^{k+1}, \beta^{k+1}$  등과 PID제어기 이득과의 관계는 다음과 같다.

$$K_p = K_p^{k+1}$$

$$T_i = \frac{P_u}{\alpha^{k+1}}$$

$$T_d = P_u \cdot \beta^{k+1}$$

### 2.3. Incremental tuning 알고리즘

#### 2.3-1. Incremental tuning 알고리즘의 필요성

2절에서 설계된 "Long term tuning" 알고리즘에 의한 조정 결과는 10-20% 오버슈트의 범위내에서 수렴하는 등 대체로 만족스러운 성능을 보장한다. 이 단계에서 얻어진 성능은 계통 차수, 개루프 극점위치 등 제어대상 프로세스의 특성에 따라 약간씩 다르다. 따라서 보다 향상된 제어성능을 위해서는 목표치가 변화하는 경우에 얻어지는 "Long term tuning" 조정결과에 근거한 PID이득을 초기 이득값으로 하여 매 샘플링 순간 마다 편차와 편차의 증분을 프로세스 변수로 하고, 조정 규칙을 참조하여 심세한 PID 이득조정량을 발생하는 "Incremental tuning" 알고리즘을 적용하여야 한다.

"Incremental tuning" 알고리즘은 다음과 같다.

#### 2.3-2. Incremental tuning 알고리즘의 구성요소

앞에서 논술한 것과 마찬가지로 프로세스변수인 편차와 편차의 변화량에 대해 퍼지화하고 다음에서 기술한 7개의 규칙 기반에 근거한 퍼지추론을 한 다음 비퍼지화하여  $K_p$ 의 조정량,  $\alpha$ 의 조정량,  $\beta$ 의 조정량을 구한다. 여기에 앞에서 기술된 이득변경식을 적용한 다음 PID제어기의 이득을 구하는 방식으로 전개된다.

##### 2.3-2-1. 프로세스 변수

프로세스 변수는 프로세스 출력의 목표치와 측정출력의 편차(e)와 편차의 변화량(ce)이다. 이는 다음으로 정의 된다.

$$e = \text{목표치} - \text{계통의 출력}$$

$$ce = \Delta(\text{목표치} - \text{계통의 출력})$$

##### 2.3-2-2. 규칙기반

충분히 이득조정은 매 샘플링 순간마다 수행되어야 하므로 가능한 규칙의 수를 최소화하여 계산에 요구되는 시간을 작게 해야 한다. 본 연구에서는 7개의 규칙을 사용하기로 하며 다음과 같다.

- (1) If (e,ce) is (NE,NE), Then ( $m_k, m_\alpha, m_\beta$ ) is (PO,PO,AZ)
- (2) If (e,ce) is (NE,AZ), Then ( $m_k, m_\alpha, m_\beta$ ) is (AZ,NE,AZ)
- (3) If (e,ce) is (NE,PO), Then ( $m_k, m_\alpha, m_\beta$ ) is (AZ,PO,AZ)
- (4) If (e,ce) is (AZ,AZ), Then ( $m_k, m_\alpha, m_\beta$ ) is (AZ,AZ,AZ)
- (5) If (e,ce) is (PO,NE), Then ( $m_k, m_\alpha, m_\beta$ ) is (NE,PO,PO)
- (6) If (e,ce) is (PO,AZ), Then ( $m_k, m_\alpha, m_\beta$ ) is (AZ,PO,AZ)
- (7) If (e,ce) is (PO,PO), Then ( $m_k, m_\alpha, m_\beta$ ) is (PO,AZ,AZ)

여기에서 전진부는 편차와 편차의 증분의 언어치를 나타내며 여기에는 동일하게 NE, AZ, PO를 부가하였고, 후진부는 각 이득 조정량의 언어치를 나타내며  $K_p$ 의 조정량에 대한

언어치는 NE, AZ, PO,  $\alpha$ 의 조정량에 대한 언어치는 NE, AZ, PO,  $\beta$ 의 조정량에 대한 언어치는 AZ, PO를 부가하였다.

#### 2.3-2-3. Incremental tuning 알고리즘의 적용시점

"Incremental tuning" 알고리즘을 구간의 처음부터 적용하면 상승시간이 증가하고 결과적으로 ISE(Integral of the square of the error) 또한 증가하게 된다. 이를 피하기 위해 계통의 출력이 "Long term tuning" 알고리즘의 조정결과 발생한 최대오버슈트와 목표치와의 편차 범위내에 들어올때를 "Incremental tuning" 알고리즘의 적용시점으로 한다.

#### 2.4. 조정결과의 비교

본절에서는 오직 "Long term tuning"에 의한 조정결과와 "Long term tuning"이 완료된 이후 "Incremental tuning" 알고리즘을 적용한 조정결과의 제어성능을 비교하기 위하여 평가지표(Performance index)를 도입한다.

평가지표는 중요하게 다루어지는 응답특성을 강조하는 계통 평가의 단일척도로서 ITAE(Integral of the time multiplied by the absolute value of the error), ISE(Integral of the square of the error), IAE(Integral of the absolute magnitude of the error)등이 있는데 본 연구에서 ISE함수를 사용하기로 한다. ISE(s)의 정의는 다음과 같다.

$$s = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt$$

#### 3. 시뮬레이션 결과

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

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

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

자동조정을 위한 식(1), (2)의 계통에 대한 특징값의 요구치는 표1과 같고, "Long term tuning" 알고리즘을 위하여 선정된 Scale factor는 표2에 나타나 있다.

표1. 특징값의 요구치

	식(1)의 계통	식(2)의 계통
제동비	0.1	0.1
오버슈트	0.1	0.1
주 상승 시간	40	1
상승 시간	15	2
정상상태편차	0	0

표2. "Long term tuning" 알고리즘을 위한 Scale factor의 선정

	식(1)의 계통	식(2)의 계통
$s_k$	2	9
$s_\alpha$	10	10
$s_\beta$	10	10

또한 초기 조정기법으로 식(1)의 계통에 대해서는 릴레이 개환을 채택하였으며, 릴레이개환에 의한 초기 이득 적용결과 발산한 식(2)의 계통에 대해서는  $k_p=0.8, T_f=4, T_d=0.1, P_u=8$ 로 선정하였다.

"Incremental tuning"시 매 샘플링 순간마다 PID이득 조정량을 발생하므로 이때 적용되는 이득의 변화량은 응답의 급격한 변화가 초래되지 않도록 비교적 작아야 한다. 적용의 한 예로 본 연구에서는 2절의 자동조정 알고리즘에서 선택한 Scale factor(표2)의 K배로 선택함으로써 이득조정량의 변화량을 대단히 작게 하였으며 표3과 같다.

표.3. "Incremental tuning" 알고리즘을 위한 Scale factor의 선정(K)

	식(1)의 계통	식(2)의 계통		
	Regulation & Reference variation	Parameter variation & Disturbance rejection	Regulation & Reference variation	Parameter variation & Disturbance rejection
$s_k$	12	10	9	6
$s_a$	50	50	50	50
$s_b$	50	50	50	50

위의 7 파라미터들을 사용하여 "Long term tuning" 알고리즘만을 적용한 경우와 "Long term tuning" 알고리즘 적용이 끝나는 단계에서 "Incremental tuning" 알고리즘을 적용한 경우를 다음처럼 비교하였다.

- ① 그림2.(1)과 그림3.(1)은 각각 계통(1), (2)에 대한 일반적인 제어계의 응답을 보여준다.
- ② 그림2.(2)와 그림3.(2)는 7 라미터 변화시 제어계의 응답이다. 시불변 Model uncertainty 의미에서 식(1)의 계통에 대해서 7 라미터 A(3,3)가 25%, 식(2)의 계통에 대해서 A(2,2)가 25% 변화했을 경우의 응답을 도시하였다.
- ③ 그림2.(3)과 그림3.(3)은 목표치 변화시의 제어계 응답을 보여준다.
- ④ 그림2.(4)와 그림3.(4)는 외란 투입시 제어계의 응답이다. 식(1)의 계통에 대해 3000초 이후 0.1 크기의 외란을, 식(2)의 계통에 대해 1600초 이후 1 크기의 외란을 투입시킨 경우의 응답을 나타내었다.

또한 각각의 동작 조건에 대해서 두 경우의 응답을 명확히 비교하기 위해 마지막 구간의 응답을 확대하여 도시하였다.

그림들은 다양한 동작 조건하에서 자동 조정 제어기가 조정 기능을 행하는 동안의 계의 응답을 보여주며 과도 응답의 성능을 ISE함수로 표.4에 나타내었다. 제어기는 계단 입력에 대한 계의 응답을 분석하여 "Long term tuning"을 우수하게 수행하였으며, 일단 각 특징값의 요구치에 개략적으로 도달하면 PID 7 라미터의 조정은 중단한다. "Long term tuning" 알고리즘 적용결과 대략 10-20%인 오버슈트를 "Incremental tuning" 알고리즘을 적용하여 오버슈트를 거의 제거할 수 있음을 보여준다.

표.4. ISE함수에 의한 성능 평가(식(1)의 계통/식(2)의 계통)

	Regulation & Reference variation	Parameter variation	Disturbance rejection
Long term tuning	11.4856/12.0815	12.8513/15.0217	11.4856/12.0819
Long term tuning + Incremental tuning	11.4293/11.9780	12.6947/14.8563	11.4276/11.9799
감소 변화율 (%)	0.49 / 0.86	1.22 / 1.10	0.50 / 0.84

4. 결 론

본 연구에서는 PID제어기 이득의 자동조정을 위하여 규칙 기반 퍼지 전문가 시스템에 의한 "Long term tuning" 을 수행한후 "Incremental tuning" 알고리즘을 적용시킴으로써 그 유용성을 입증하였다.

PID 제어시스템은 초기조정으로 릴레이 개환 기법용, 후속

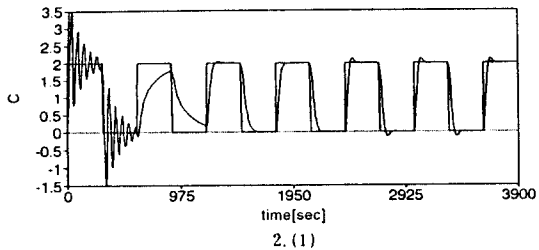
조정으로 전문가시스템을 도입했으며 "Long term tuning"에 의해 각 특징량의 요구치에 개략적으로 도달했을때의 PID 이득을 근거로하여 "Incremental tuning" 알고리즘을 적용하였다.

본 논문의 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다.

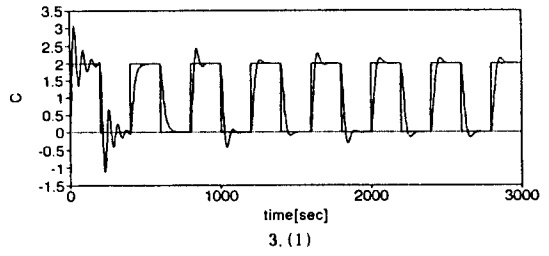
- (1) Wills의 조정맵에서 이득조정의 축을 이루는 임계주기를 고려하였다.
- (2) 같은 맵에서 추출된 Litt의 규칙에 비해 성능면(수렴속도)에서 우월하다.
- (3) 릴레이 개환기법에 의해 선정된 초기이득이 계통 불안정을 초래하는 경우에도 안정도를 보장한다.
- (4) 과제등의 경우에 대한 조정규칙을 포함하고있다.
- (5) 다른 계통으로 전환시 Scale factor의 약간의 변경으로 좋은 성능을 보장한다.
- (6) 패턴인식에 근거한 기존 연구결과는 일반적으로 3개의 피크가 진출된 경우에만 자동조정을 수행하며 25 - 40%의 오버슈트가 허용되는것이 일반적이다.[14] 그러나, 본논문에서는 "Long term tuning"에 의한 결과에 근거하여 "Incremental tuning" 알고리즘을 적용함으로써 보다 향상된 계의 응답을 얻을수 있다.

참고문헌

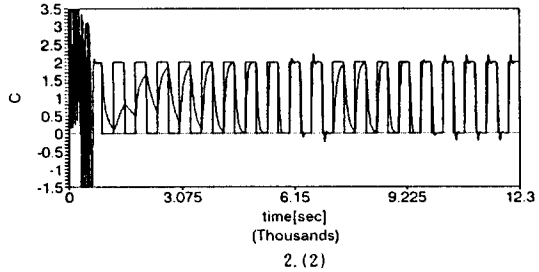
- [1] K. J. Åström, T. Hagglund, "Automatic Tuning of PID Controllers", Instrument Society of America, 1988.
- [2] K. J. Åström, "Toward Intelligent Control; Keynote Speech to the 1988 American Control Conference", IEEE Control Systems Magazine, pp. 60-64, April 1989.
- [3] P. J. Gawthrop, "Self-Tuning 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.
- [11] K. J. Åström, J. J. Anton and K. E. Arzen, "Expert control", Automatica, Vol. 22, No. 3, pp. 277-286, May 1986.
- [12] N. R. Sripada, Prof. D. G. Fisher and A. J. Morris, "AI application for process regulation and servo control", IEE proceedings, Vol. 134, Pt. D, No. 4, July 1987.
- [13] A. J. Krijgsman, H. M. T. Broeders, H. B. Verbruggen and P. M. Bruijn, " Knowledge-based Control", Proceedings of the 27th Conference on Decision and Control, Austin, Texas, December 1988.
- [14] M. A. da Silva et al., "A Rule Based Procedure for Selftuning PID Controllers", Proceedings of the 27th Conference on Decision and Control, Austin, Texas, December 1988.



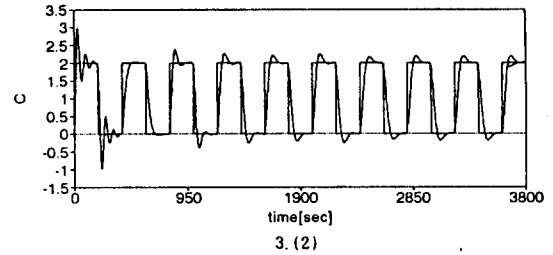
2. (1)



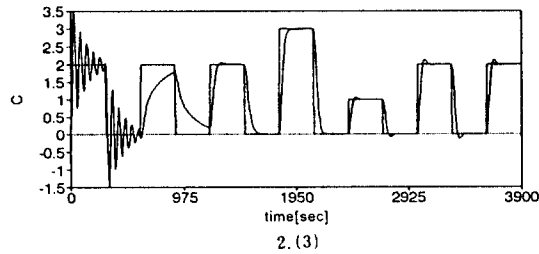
3. (1)



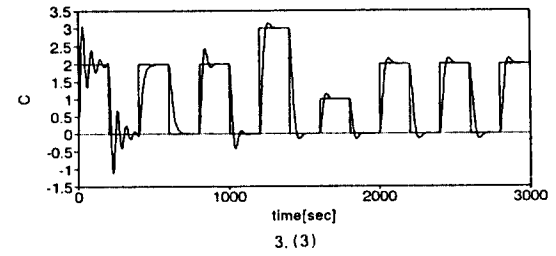
2. (2)



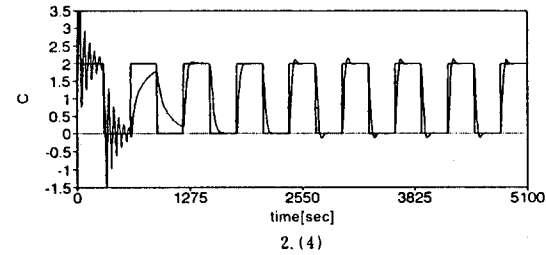
3. (2)



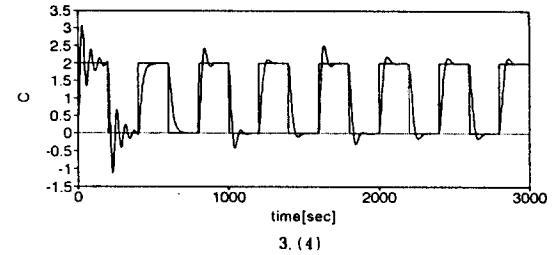
2. (3)



3. (3)



2. (4)



3. (4)

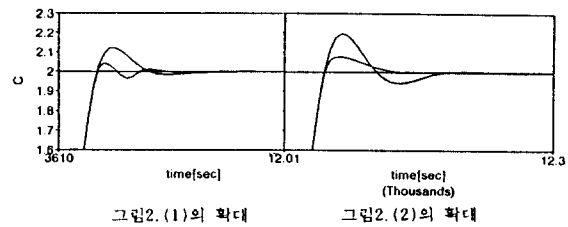


그림2. (1)의 확대

그림2. (2)의 확대

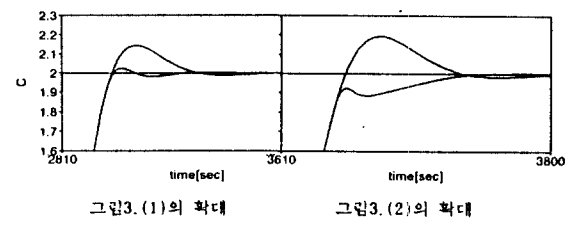


그림3. (1)의 확대

그림3. (2)의 확대

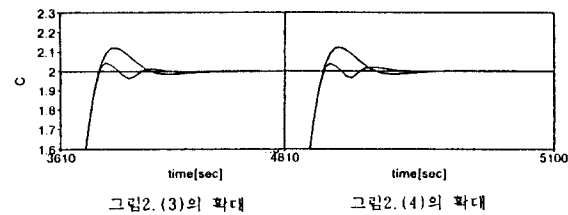


그림2. (3)의 확대

그림2. (4)의 확대

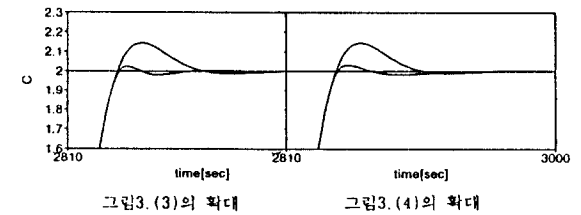


그림3. (3)의 확대

그림3. (4)의 확대

그림2. 식(1)의 계통에 대한 제어계 응답

그림3. 식(2)의 계통에 대한 제어계 응답