

# PID제어기 튜닝 기술에 대한 연구현황과 전망

김 동 화\*, 이 은 용 \*\*

(\* 대전산업대학교 제어계측공학과 교수

\*\* 충남대학교 공과대학 전기공학과 교수)

## 1. 서 론

최근 제조업 관련자는 물론 중요한 정책을 다루는 정부 관련자들 까지도 생산 자동화 기술 확립은 장래 우리 산업의 경쟁력 제고를 위해 필수불가한 기본 기술로 인식하여 이의 관련기술 확립에 많은 관심을 기울이고 있다.

자동화 기술을 통한 생산성 제고를 위해서는 센서공학에서 부터 공장 운용기법 까지 많은 관련기술이 복합적으로 필요하겠으나 그 중 자동제어 관련 이론 및 구현 기술은 공장자동화는 물론 대부분의 시스템에서도 필수적으로 필요한 핵심기술로 볼 수 있다[1-4].

자동화를 위한 제어알고리즘에는 여러가지가 있으나 인류의 산업화 역사와 같다고 볼 수 있고 현재에도 원자력 발전소를 비롯하여 90%이상의 대부분 플랜트에서 이용되고 있는 것이 PID제어기이다[4-10].

PID제어기는 1940년대 Ziegler-Nichols[4]가 개발한 이래 대부분의 플랜트에서 많이 이용되어 왔으나 현대제어이론을 포함한 각종 제어이론이 개발되고 기존의 기계식 또는 아날로그 방식만으로는 복잡한 시스템의 안전성, 신뢰성 확립에 한계가 있어 한때 연구가 주춤하였다.

그러나 마이트로프로세서 용량이 급격히 증대하고 처리 속도가 빨라짐에 따라 PID제어기의 성능 및 그 특성도 급격히 개선되어 다방면의 생산현장에 사용 할 수 있게 되었고 또한 이를 기본으로 다른 제어기와 조합하여 고도의 제어계통에도 융통성 있게 사용 되고 있다[11-14].

특히 최근에 개발된 복잡한 제어이론에 비해 PID제어기의 제어이론은 지극히 간단한 반면 이용자의 편리성 및 범용성은 더욱 증가하는 추세에 있어 선진 각국에서는 더욱 많은 사람들이 연구하거나 새로운 제품을 내놓고 있는 실정이다[15-24].

그러나 국내의 PID제어기에 대한 연구는 그리 활발하지 못하고 산업계에서의 생산현황은 선진국에 비해 크게 뒤지고 있는 실정이다.

본 원고에서는 이와같이 많은 장점과 응용 능력이 매우

우수함에도 불구하고 국내의 PID제어기에 대한 연구 및 생산현황이 미미한 점을 고려하여 국내외의 연구개발 현황을 소개하고 장래 기술추이를 전망해 보고자 한다.

## 2. PID 제어기 관련이론 발전 과정

### 2.1 PID 제어 이론의 발전

현재 모든 플랜트의 운전에서 필수가 되고 있는 자동제어 시스템은 인류가 원시적으로 관개농업을 시작하면서 부터 실 생활에 이용되어 왔다고 볼 수 있으나 자동제어 개념을 실제로 산업 시스템에 응용한 것은 17세기 J. Watt가 가버너 장치를 사용하여 증기기관의 속도를 제어 한 것부터 보는 것이 일반적이다.

그후 2차 대전을 거치면서 通信, 兵器, 數學등에서 발전된 기초적 학문을 바탕으로 자동제어에 대한 중요성이 인식되면서 자동제어는 급속히 발전을 하게 되었다. 이때에 확립된 주파수 영역에서의 안정도 판별법, 궤환제어계의 이득조절 기법등은 지금도 자동제어계 이론에서 필수적으로 사용되고 있음은 이미 우리가 잘 알고 있는 사실이다[8].

한편 1960년 R.E.Karlman이 현대제어이론을 발표하면서 부터는 現代 制御理論에 대한 연구가 매우 활발히 이루어지고 1980년대 후반부터는 저렴한 초고속의 칩이 개발됨에 따라 다양한 제어이론을 실 플랜트에 적용해 가는 추세이나[3,11] 실제 산업현장에서의 이용 및 그 범용성에 있어서는 아직도 매우 제한적이다. 이에 비해 PID제어기는 1950년대 후반에 개발된 適應 제어기법과 최근의 퍼지 제어기법을 이용한 제어 알고리즘[25]은 물론 이미 언급한 현대 제어이론을 이용한 방법등 매우 다양한 제어알고리즘을 적용한 PID제어기가 개발되어 있는 실정이다[26-30].

종래의 PID제어기는 自由度の 선택 방법, 필터나 補償器의 설치방법, 튜닝 기법은 물론 운전원의 사용방법에 따라 제어性能에 있어서 현저한 차이가 발생하였고 현대제어와 같이 완벽하게 플랜트 변수 相互間的 構造의 특성등을

알 수 없는 결점등이 있으나 꾸준히 연구가 진행되어 지능적인 튜닝 기법의 개발, 초고속 칩을 이용한 응답성능 및 Man-Machine Interface의 개선등으로 그 활용성은 더욱 넓어져가고 있는 실정이다.

## 2.2 PID제어기 튜닝 방법의 발전

PID제어기가 이론적으로 연구가 시작된 것은 1868년 Maxwell[3]이 "On Governor"라는 논문을 발표하면서 부터인데 이때는 튜닝 기법 즉, P,I,D파라미터의 선정에 대한 언급은 없었다.

PID제어기의 제어알고리즘은 큰 변화없이 지속되어 오다가 1980년대 초 Horwitz가 5종류의 2자유도 제어기가 개발되면서 부터 외란에 대한 강인성과 제어성능을 동시에 만족 할 수 있는 PID제어기의 제어알고리즘이 제시되어 구현에 큰 전환기를 맞게 되었다.

한편 PID제어기의 튜닝 기법은 매우 많은 연구가 이루어져[10-15] 마치 PID제어기의 연구는 튜닝에 대한 것이 전부인것 처럼되어 있다. 따라서 PID제어기의 발전과정을 언급하는 경우 그 제어 알고리즘의 변화는 그다지 많지 않고 튜닝에 대한 것이 대부분이므로 이에 대한 것을 언급하는 것이 효과적인 경우가 많다.

PID제어기의 튜닝에 대한 효시는 1942년 J.G.Ziegler와 N.B.Nichols[5,8]가 플랜트 변화에 따른 P,I,D 파라미터의 최적 설정기법을 감도 영향을 고려하면서 체계적으로 완성한 限界感度法으로 볼 수 있는데 이 방법은 지금도 대부분의 자동제어 설계시 기본적으로 이용되고 있다. 튜닝 방법은 개 루프 방법(Open Loop Method)과 폐 루프 방법(Closed Loop Method)으로 구분 할 수 있는데 최근에는 주로 폐 루프 방식을 채택하여 가는 추세이고 튜닝 기법도 자기 적응제어기법(Self-Adaptive)[11-12], 自己同調(Self-tuning) 방법[13-15], 전문가 시스템의 응용[16-17], 퍼지알고리즘의 응용등[18] 그 방법이 다양해지고 있다.

Ziegler, Nichols의 튜닝 기법은 개 루프 상태에서 시스템의 계단응답 특성에 기초를 둔 것으로 시스템의 최대 진동주기(Ultimate Oscillation)를 갖는 최대이득(Ultimate gain)을 구하고 이 때 각각의 P, I, D의 계수값을 산출하는 방식이다. 따라서 이들 값을 구하기 위해서는 반복적 실험을 거쳐야 하므로 실제의 플랜트에서 이러한 반복 실험운전을 통해 이들 값을 정확히 구한다는 것은 지극히 어렵다고 볼 수 있다.

한편 1952년 Hrone and Reswick는 전달함수 표현기법에 의해 파라미터를 구하는 방법을 제시하였으나 실 플랜트에서 전달함수를 구한다는 것도 실질적으로는 어렵기 때문에 효과적인 방법이라고는 볼 수 없다.

이들은 현대제어 기법에 의한 것으로 제어성능 및 튜닝 기법은 대단히 우수하나 결정해야 될 많은 제어 파라미터를 포함하고 있어 현장의 엔지니어나 운전원들이 쉽게 이해하기 어렵고 또 설정된 파라미터와 시스템의 제어동작 사이 관계를 이해하기 어렵게 되어 있다. 뿐만 아니라 제어 이론의 構造的 特性을 이해하여야 한다는 어려움등이 있어

실용적인 면에서는 상당한 제한이 있다.

이러한 문제에 기인하여 실용적인 면에 기초를 둔 PID제어기의 자동 동조방법을 1984년 Yoshikazu Nishikawa[19] 등이 제안하였다.

이 방법은 시험신호(Test input signal)에 대한 시스템의 응답을 샘플링하고 이 샘플링 값에 의해 프로세스의 특성에 대한 데이터를 추출하여 PID파라미터의 최적값을 계산하는 방법이다. 따라서 운전원은 정해진 순서에 의해 조작하면 자동적으로 튜닝이 가능하도록 되어 있어 MMIS기능을 많이 고려한 것으로 평가 되고 있다. 특히 이 방법에서는 PID파라미터의 최적 설정값을 얻기 위해 性能指數(Performance Index) 표현기법을 도입했는데 이 성능지수에는 誤差乘積의 크기에 의해 결정되는 制御誤差面積 기법(Weighted ISE)을 처음으로 도입하였다.

한편 Åstrom과 Hagglund[20]는 1984년 처음으로 페 루프 시스템에서 임계이득과 임계 진동주기를 계단 입력에 대한 시스템의 진폭과 주파수에 의해 결정할 있는 방법을 제시하였는데 이와 유사한 방법은 Morris(1987), Gawthrop (1990)등에 의해서도 폭 넓게 제시되어 실 플랜트에 널리 이용되어 오고있다.

또 T.S.Schei(1992)는 Åstrom과 Hagglund기법을 확장하여 페 루프 시스템에서 시스템의 안정도와 성능이 결정되는 제한된 임계 주파수에서 제어파라미터를 결정 할 수 있는 방법을 제시하였다.

최근의 연구로는 K.J.Åstrom[4]의 적응제어 기법을 이용한 Self-Tuning방법, T. Kitamori[18]의 모델매칭에 의한 Self-tuning방법, Ziegler-Nichols방법을 확장 적용한 R. Kuwata의 개량형 한계감도법[35]등이 있다.

특히 이들 제어 알고리즘을 이용해 各社에서는 다양한 형태의 제어기를 개발, 시판하고 있는데 오버슈트 감쇄기법을 이용한 것으로는 Foxboro-760, Yokogawa社의 YS-80 및 YS-100이 있고, 모델 매칭법을 이용한 것으로는 Toshiba 제어기가 있다. 또 開 루프 튜닝 방식을 채택한 제어기에는 Fuji electric것이 있다.

이와같이 製作社에 따라 적용 제어 알고리즘 및 튜닝 기법이 다르고 그 특징도 다르므로 선택시는 사용목적 및 시스템 특성과 이들의 각 특징을 미리 검토 할 필요가 있으나 최근에 개발된 것들은 정확한 사용법을 모르더라도 플랜트 파라미터의 추정, 튜닝 등을 자동으로 할 수 있음은 물론 그래픽 기능도 첨가하여 MMIS기능을 대폭 보강하여 쉽게 이용 가능하도록 설계되어 있다.

## 3. PID제어기 제어 알고리즘

### 3.1 개요

PID제어기는 그 開發年度가 매우 오래되었고 현재에도 대부분의 플랜트에서는 약 90%[10] 정도가 이 방법을 이용하고 있으므로 關聯理論도 매우 일반화 되어 있다.

따라서 기본적인 PID제어 알고리즘에는 변함이 없으나 플랜트의 형태에 따라 기본형 PID제어기, 필터를 P, I, D값의 앞단 또는 P나 I항에만 기여하도록 한 형태, I-PD제어기, 자유도 PID제어기, PID제어기에適應 제어기법이나 최근의 퍼지 제어기법등의 제어알고리즘을 적절히 接木시킨 형태 등 다양한 제어 알고리즘이 개발되어 있다.

이들 제어 알고리즘 대부분은 정상운전시의 제어편차를 줄이기 위한 제어편차 보상형[16]과 외란(Disturbance, Noise)에 대해 강인성을 갖도록 설계한 외란 보상형, 외란과 제어편차 모두에 적절한 응답특성을 갖도록 한 2자유도 제어기 등으로 크게 분류 할 수 있다.

### 3.2 기본형 PID제어기

PID제어기의 前段 또는 D항 앞에 1차 지연형의 필터  $1/(1+T_d s)$ 를 첨가시킨 것으로 이것은 프로세스의 전달함수가  $G=k(1+T_d s)/((1+T_1 s)(1+T_2 s)(1+T_3 s))$ 와 같이 3차 이상이거나 지연요소를 가질 때 高周波나 低周波 영역에서도 제어기가 최적으로 프로세스를 제어 할수 있도록 하기 위한 것이다. 이때 필터를 포함한 전달함수는 다음식으로 주어진다.

$$G_p = \frac{k(1+T_d s)}{(1+bT_d s)} \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (3.1)$$

### 3.3 비례 선행형 PID제어기

비례항의 배치를 변형시킨 구조로서 그 배치 방법은 매우 다양하다.

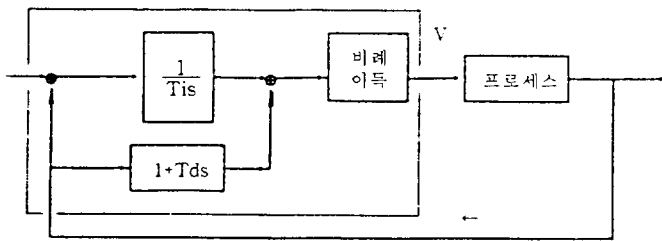


그림 3.1 비례 선행형 PID제어기

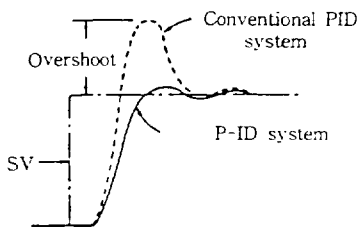


그림 3.2 기본 PID제어기와 비례선행형 PID 제어기 응답특성 비교

### 3.4 미분 선행형 PID제어기

$$M(s) = \frac{100}{PB} \left[ \left( -\frac{1}{T_i s} + 1 \right) E(s) - T_d s Y(s) \right] \quad (3.2)$$

기본 PID제어기의 경우는 제어편차에 대해서 PID제어 연산이 이루어지므로 설정값을 변경할 경우 미분동작에 의해 출력이 급격히 변하게 된다. 따라서 운전원은 출력변동에 주의를 하면서 설정값을 변경시켜야 한다.

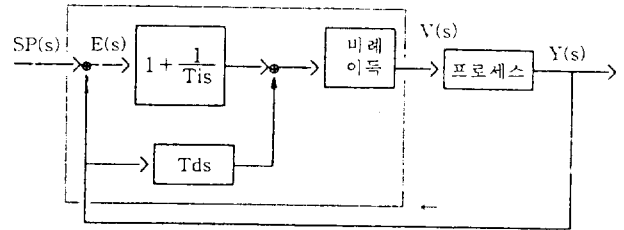


그림 3.3 미분 선행형 PID제어기

이러한 단점을 개선하기 위해 설정값에 대해 미분동작이 작용하지 않는 미분선행형 PID제어 알고리즘이 제안되었다[14]. 이 제어기의 잇점은 비례동작이나 미분동작에 의한 조작신호가 급격히 변하지 않으므로 조작단 또는 프로세스에 대해서 충격을 적게 주고 또 오차를 줄일수 있는 반면 안정한 값이 될 때까지의 시간이 지연되는 특징이 있다.

### 3.5 2 자유도 PID제어기

일반적으로 제어기는 설정한 목표치에 잘 추종 하거나 예기치 않은 외란에 대해 적절히 대응 할 수 있을 것 등의 목적에 만족해야 하는데 기본형 또는 미분 선행형 PID제어기에서 P, I, D의 각 파라미터를 조절하는 경우 위에서 언급한 두가지의 목적이 상반됨으로 소기의 제어 목적을 달성 할 수 없다. 이와같은 두가지의 목적을 충족시키기 위해서 2자유도 PID제어기가 제안되었다.

2자유도 PID제어기는 1960년대 I.M.Horowitz[33]가 5가지를 제시한 후 그 실효성이 의문시 되어 1980년대 전반까지는 큰 관심을 갖지 못했으나 최근에 플랜트에 대한 실용성이 인식되어 많이 연구되고 있다.

그림 3.4는 피이드 백 보상형 2자유도 제어기의 블록선도로 목표치에 대해서는 제어기가, 외란에 대해서는 H(s)가 역할을 담당하도록 되어 있다.

그러나 최근에는 여러형태의 2자유도 PID제어기가 개발되어 그림 3.5와 같이 자유도를 자유로이 선택 할 수 있는 Super Two Degrees of Freedom PID제어기를 이용한 신제품이 개발, 시판되고 있다[22-24].

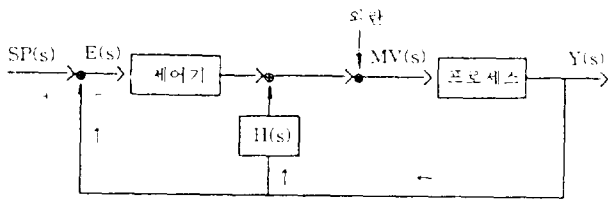


그림 3.4 피드백 補償形 2自由度 제어기의 블럭도

그림 3.5에서 PV-MV사이의 전달함수  $G_{ym}(s)$ 는

$$G_{ym}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \eta_d s} \right) \quad (3.3)$$

이고 SV-MV간의 전달함수  $G_{sm}(s)$ 는

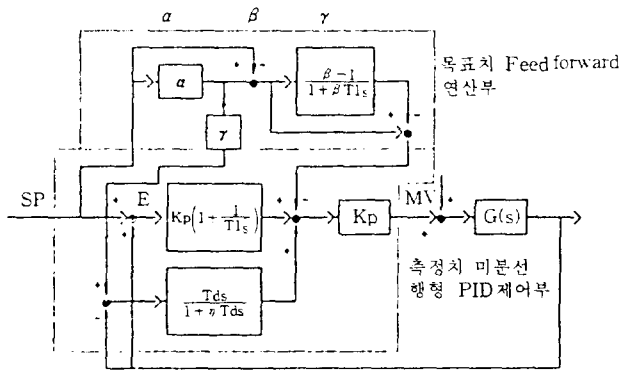


그림 3.5 Super 2自由度 PID 제어기

$$G_{sm}(s) = K_p \left[ \alpha + \left( \frac{1}{T_i s} - \frac{(1-\alpha)(\beta-1)}{1+\beta\eta_d s} \right) + \frac{\alpha\gamma T_d s}{1+\eta T_d s} \right] \quad (3.4)$$

이 된다. 여기서  $\alpha$ 는 비례이득 2자유도 계수로 일반적으로  $0 \leq \alpha \leq 1$ 의 값을 갖고  $\beta$ 는 적분시간 1자유도 계수로  $1 \leq \beta \leq 2$ 이다. 또  $\gamma$ 는 미분시간 2자유도 계수로  $0 \leq \gamma \leq 2$ 이고,  $1/\eta$ 는 미분시간으로  $0.1 \leq \eta \leq 1$ 의 값을 갖는다.

## 4. PID제어기의 튜닝

PID제어기의 튜닝은 제어기 응용 초기부터 연구 대상이 되어온 중요한 문제로 1940년대 Ziegler-Nichols가 제시한 방법이 주로 이용되어 왔다. 그후 여러가지의 튜닝 기법이 개발되어 Toshiyuki Kitamori의 모델 매칭 튜닝법, K.J.Astrom의 적응 제어기법등과 같이 튜닝 방법도 매우

다양하고 또 그 방법에 따라 파라미터 값도 조금씩 다르나 튜닝 방법을 크게 구분하면 오프라인상(Off-line)에서 수행하는 開 루프 방식[37]과 제어기를 플랜트에 장착한 상태에서 수행하는 閉 루프 방식[15-18]이 있다.

대부분의 연구방향이 온라인 방식을 채택하는 추세이고 각 제작사에서도 이를 응용한 제품개발에 주력하고 있는 추세이다.

### 4.1. 開 루프 방식[4,22,37]

제어기를 開 루프 상태에서 계단응답 또는 펄스신호와 같은 同定信號를 이용해 제어량의 변화상태를 보면서 이득, 시정수 T, 지연시간 L을 얻고 이에 의해 Ziegler-Nichols법, 한계감도법등과 같은 평가방법으로 PID제어기의 정수를 튜닝하는 기법이다. 이 방법은 종래부터 현장에서 대부분 많이 이용하여 온 형이나 반복적, 경험적 방법으로 튜닝을 수행하여야 하므로 운전원에 따라 그 성능 결과가 다르고 시간이 많이 소요되는 문제점이 있다.

#### 4.1.1 同定方法

제어대상의 동특성으로부터 인가된 계단응답에 대한 진폭(보통5-10%정도)을 결정하고 제어 대상이 整定(Settling)되어가는 상태를 검토한다.

즉 제어량의 변동상태를 검토하면서 계단응답의 인가를 완료한다. 제어량의 상태에서 적분형 시스템인가 아닌가를 판단하고 다음과 같은 전달함수를 이용하여 파라미터를 추정한다.

파라미터 추정은 응답파형으로부터 구하는 방법, 응답면적법, 응답 데이터와 모델응답의 오차를 최소화 하는 방법 등이 이용되고 있다. 그림 4.1은 응답파형과 파라미터와의 관계를 나타낸다.

$$G_1(s) = \frac{e^{-Ls}}{T_s} \quad (4.1)$$

$$G_2(s) = \frac{ke^{-Ls}}{1 + T_s s} \quad (4.2)$$

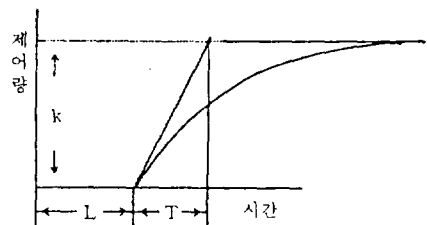


그림 4.1 응답파형과 파라미터 관계

#### 4.1.2 PID정수의 결정

전달함수가 구해지면 PID정수는 Ziegler-Nichols법, 한계감도법등과 같은 평가함수법등에 의해 튜닝한다. 표 4.1,

4.2는 각 방법의 제어이득에 대한 비교값이다.

한편 평가함수법은 다음식에서 최소값이 되는 PID정수를 구한다.

$$J = \int_0^{\infty} [(R(t) - X(t))e^{bt}]^2 dt \quad (4.3)$$

여기서 R(t)는 목표치, X(t)는 제어량, b는 정수이다. 그림 4.2는 개 루프 튜닝 기법의 브럭도이다.

### 4.2 閉 루프 방식[9-19]

제어기를 제어대상에 장착한 상태에서 튜닝을 하는 것으로 이것에는 다음과 같은 방법이 이용되고 있다.

표 4.1 Ziegler-Nichols법의 PID 定數表

제어동작	K	T <sub>i</sub>	T <sub>d</sub>	t <sub>p</sub>
P	T/L	-	-	5L
PI	0.9T/L	3.3L	-	6L
PID	1.2T/L	2L	0.5L	3.2L

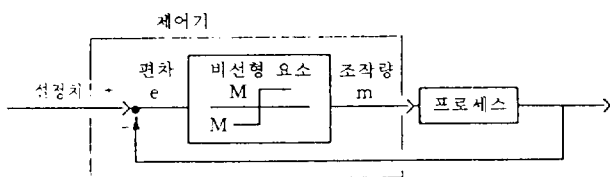
표 4.2 한계감도법의 PID定數表

구분	제어동작	외란			외란			
		K	T <sub>i</sub>	T <sub>d</sub>	K	T <sub>i</sub>	T <sub>d</sub>	
없음	최소	P	0.3T/L	-	-	0.3T/L	-	-
		PI	0.6T/L	4L	-0.4L	0.35T/L	1.2T	-
		PID	0.95T/L	2.4L	-	0.6T/L	T	0.5L
20%	최소		0.7T/L	-	-	0.7T/L	-	-
			0.7T/L	2.3L	-	0.6T/L	T	-
			1.2T/L	2L	0.4L	0.95T/L	1.35T	0.4L

#### 4.2.1 한계감도법

##### 1) 同定方法

동특성을 측정하기 위해 그림 4.2와 같은 비선형 요소로 폐 루프에 넣고 구형파신호에 대한 반복동작(Limit cycle)을 일으킨다. 이때 진동주기를 T<sub>c</sub>, 진폭을 X<sub>c</sub>라 하면 한계감도 K<sub>cp</sub>는 비선형 요소의 記述函數와 반복동작의 발생 조건식에서 K<sub>cp</sub>=4KM/πX<sub>c</sub> 이고 한계주기는 T<sub>cp</sub>=T<sub>oc</sub>가 된다. 이때 기동시의 로세스는 평형상태가 되어도 된다.



(a) 구형파 신호 발생기구

#### 2) PID정수의 결정

각각의 PID정수는 정치제어와 추종제어에 따라 다르고 이들의 값은 표 4.3과 같다.

표 4.3 한계감도법에 의한 PID 정수

제어모드	제어동작	K	T <sub>i</sub>	T <sub>d</sub>	비고
定値制御	P	0.45K <sub>cp</sub>	0.83T <sub>c</sub>	0	Ziegler-Nichols법
	PID	0.6K <sub>cp</sub>	0.5T <sub>c</sub>	0.125T <sub>c</sub>	
追従制御	PI	0.3K <sub>cp</sub>	1.0T <sub>c</sub>	0	CHR 법
	PID	0.45K <sub>cp</sub>	0.6T <sub>c</sub>	0.1T <sub>c</sub>	

#### 4.2.2 1/4감쇄법

실제의 플랜트에서 안정한계까지 진동을 계속한다는 것은 매우 어렵다. 따라서 좀더 쉬운 방법으로 1/4진동감쇠가 얻어 질때 까지 이득을 정하는 방법이 현장에서 많이 이용되고 있다. 이때의 진동주기를 T<sub>c</sub>라 하면 미분 및 적분시각은 각각 T<sub>i</sub> = T<sub>c</sub>/1.5, T<sub>d</sub> = T<sub>c</sub>/6로 주어진다.

#### 4.2.3 高橋 조정법

외란의 계단응답 변화에 대해 IAE을 최소로 하는 PID제어계수를 구하여 표 4.4와 같이 파라미터를 결정한다.

표 4.4 高橋법에 의한 파라미터 값

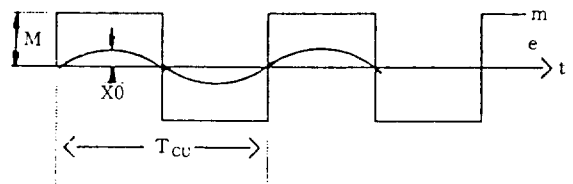
제어형태	K <sub>c</sub> RL	T <sub>i</sub> /L	T <sub>d</sub> /L
P	0.9	-	-
PD	1.1	-	1.44
PI	0.9	3.3	-
PID	1.3	2.2	0.45

#### 4.2.4 Hazebroek-Waerden법

PI제어기만을 대상으로 한것으로 제어대상의 입력은 물론 출력측에 대한 외란에 대해서도 제어량의 계단응답과형 ISE을 최소로 하는 것을 설계목표로 하고 있다.

또 제어대상을

- A형 : n계 1차 지연요소, G(s) = K/(1+Ts)<sup>n</sup>
- B형 : 위상지연요소, G(s) = Ke<sup>-Ls</sup>/(1+Ts)<sup>n</sup>
- C형 ; 순수한 위상지연 요소, G(s) = Ke<sup>-Ls</sup>
- D형 : n계 1차 지연요소와 적분기로 구성된 요소,



(b) 구형파 신호

그림 4.2 구형파 발생장치와 구형파 신호

$$G(s) = R/s(1+Ts)^n$$

- E형 적분기와 위상지연요소,  $G(s) = Re^{-Ls}/s$

의 5 종류로 나누어 A~C는 계단상의 목표치 변화를 D, E에 대해서는 램프상의 입력변화로 평가했다. 전달함수가 유리함수인 A~D에 대해서는 해석적으로 ISE를 구하고 다른 것은 수치계산에 의해 ISE를 최소로 하는 PI제어기 계수를 구한다.

#### 4.2.5 Wolfe조정법

이 제어기 조정법은 PI제어기의 경우만을 생각하여 계단상 변화에 대해 다음식의 적분값을 평가 기준으로 한다. 여기서  $G(s) = Re^{-Ls}/s$ 에 대해서 이 조건을 만족하는 범위에서  $T, K_p$ 가 최소로 되는 것을 계산하여 다음과 같은 결과를 얻는다.

표 4.5 Wolfe법에 의한 파라미터 값

제어형태	$K_pRL$	$T/L$	$T_d/L$
PI	0.87	4.35	-

또한 1차 위상지연 시스템에 대해서도 같은 검토를 하여  $T/L$ 의 값이 0.2 - 0.5의 범위로 하여 파라미터를 환산한 것을 다음과 같이 계산한다.

표 4.6 파라미터 값

$T/L$	$K_pRL$	$T_d/L$
0.2	1.5	0.53
1	0.78	1.28
2	0.9	2.27
5	0.88	3.23

#### 4.2.6 Chien, Hrones, Reswick조정법

1차 지연과 위상지연 시스템인  $G(s) = Ke^{-Ls}/(1+Ts)$ 에 대해서 외란과 목표치 변화 각각의 계단응답 변화에 대해 오버슈트 량을 영으로 하는 경우, 20%동 제어량이 정상치에 도달 할때까지 시간을 평가 기준으로 하여 표 4.7과 같이 정하였다.

#### 4.2.7 Cohen-Coon법

Chien, Hrones, Reswick조정법과 같이 1차 지연과 위상지연 시스템인  $G(s) = Ke^{-Ls}/(1+Ts)$ 에 대해서 계단상 외란에 대해 허수부가 가장적인 복소부 모드의 1/4감쇠를 기본 사양으로 하여 이것을 만족하는 파라미터를 표 4.8과 같이 나타낸다.

#### 4.2.8 Lopez, Miller, Smith, Murrill법

Chien, Hrones, Reswick조정법과 같이 1차 지연과 위상지연 시스템인  $G(s) = Ke^{-Ls}/(1+Ts)$ 에 대해서 계단상 외란에 대해 편차의 적분 IAE, ISE, ITAE를 평가 기준으로 한다. 시뮬레이션과 탐색법에 의해  $T/L = 1 - 20$ 에 대해  $a(T/L)^b$ 로 주어지는

표 4.7 Chien, Hrones, Reswick조정법의 파라미터

입력종류	오버슈트	제어형태	$K_pRL$	$T/L$	$T_d/L$
목표치	없음	P	0.3	-	-
		PI	0.35	1.17T/L	-
		PID	0.6	T/L	0.5
	20%	P	0.7	-	-
		PI	0.6	T/L	-
		PID	0.95	1.36T/L	0.47
외란	없음	P	0.3	-	-
		PI	0.6	4	-
		PID	0.95	2.38	0.42
	20%	P	0.7	-	-
		PI	0.7	2.33	-
		PID	1.2	2	0.417

표 4.8 Cohen-Coon법에 의한 파라미터 값

제어형태	$K_pRL$	$K_I R/L^2$	$K_d R$
P	1.03+0.35L/T	-	-
PD	1.24+0.146L/T	-	0.34-0.11L/T
PI	0.9+0.083L/T	3.3	-
PID	1.35+0.25L/T	2.2	0.5

표 4.9 Lopez, Miller, Smith, Murrill법조정법의 파라미터

평가 기준	제어 형태	$K_pRL$		$T/L$		$T_d/L$	
		a	b	a	b	a	b
IAE	P	0.9023	-0.015	-	-	-	-
	PI	0.984	-0.014	1.645	0.293	-	-
	PID	1.435	-0.079	1.139	0.251	0.482	-0.137
ISE	P	1.411	-0.083	-	-	-	-
	PI	1.305	0.040	2.033	0.261	-	-
	PID	1.495	-0.055	0.908	0.229	0.560	-0.006
ITAE	P	0.4897	0.085	-	-	-	-
	PI	0.859	-0.023	1.484	0.320	-	-
	PID	1.357	-0.053	1.188	0.262	0.381	0.005

식에 대해 a, b를 구하고 이를 표 4.9와 같이 정한다

#### 4.2.9 Kitamori(北森)법

앞서 기술한 4.2.1 - 8항의 것은 계단응답과형에 근거를 두고 파라미터를 결정하는데 반해 이것은 제어대상의 계단응답 모우먼트에 기초를 둔 것으로 모델 매칭법이라고도 한다.

Ziegler-Nichols의 계단응답법이나 한계감도법을 이용하는 경우 많은 시간과 노력이 들고 또 튜닝시 제어대상을 진동 시켜야 하므로 큰 플랜트인 경우는 파손 또는 막대한 비용이 들게 된다. 이러한 단점을 피하기 위해 Toshiyuki Kitamori는 모델매칭에 의한 제어기 튜닝 기법을 제안하였다.

Ziegler-Nichols의 PID제어기의 전달함수 및 플랜트의 전달

각수를 각각  $G_c(s), G_p(s)$ 라 할 때 폐 루프 시스템의 전달함수는

$$T(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (4.5)$$

로 주어지는데 여기서 원하는 모델의 폐 루프 전달함수  $T_m(s)$ 를

$$T_m(s) = \frac{1}{\sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k \sigma^k s^k} \quad (4.6)$$

라 하고 T. Kitamori는 10%의 오버슈트가 일어나는 제어응답이 가장 좋은 것으로 평가하여 이때의  $\alpha_1$ 의 값을 다음과 같이 정의 하였다.

$$\alpha = (\alpha_0, \alpha_1, \dots) = (1, 1, 0.5, 0.15, 0.03, \dots) \quad (4.7)$$

#### 4.2.10 개량형 한계감도법

이것은 제어대상의 응답특성과 폐루프 응답특성을 병행하여 사용하는 방법으로 제어대상에서 과도응답 특성이나 안정성은 절점주파수 즉  $G(\omega_1) = -180$ 로 되는  $\omega_1$ 의 영향이 매우 큰 특징이 있다.

#### 4.2.11 AI형 튜닝법

숙련된 운전원의 프로세스에 대한 튜닝 노하우를 이용하는 것으로 주로 응답특성으로 부터 PID정수를 조정한다. 이 방법은 同定法과 PID定數 결정법이 정확하게 구분되어 있지 않는 것이 특징으로 제어계의 응답특성을 정상계단 입력 및 외란에 따라 허용 오버슈트량과 허용 뎀핑량에 의해 여러개의 응답패턴을 기본적으로 설정하여 놓고 이 패턴과 비교하여 규칙(Rule)을 정해 PID각 정수를 정하는 것이다. 이때 규칙은 적절한 응답 특성이 얻어질 때까지 수회 반복하여 결정한다.

#### 4.2.12 적응제어 방법

제어계의 조작량과 제어량으로 부터 프로세스의 동특성을 추정하여 PID정수를 결정하는 방법으로 최근에 많이 연구되고 있다.

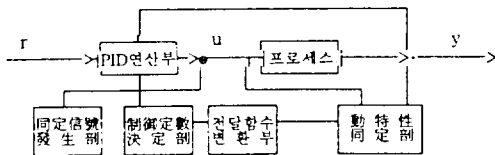


그림 4.3 적응제어 튜닝 방법

구되고 있다.

그림 4.3과 같이 광범위한 주파수 스펙트럼을 갖는 동정 신호를 가한 상태에서 프로세스를 단시간에 적은 변화량만

변화시킨다. 이때 프로세스의 입출력 데이터에 의해 최소 2乗法동의 방법으로 동특성을 同定한다.

동정된 모델에서 프로세스의 주파수 응답특성을 구하고 이 주파수 응답의 cut off 주파수 대역에서 모델 매칭법을 적용, 제어계의 주파수 응답이 기본 모델과 같은 이득여유, 위상여유를 갖는 PID정수를 결정한다.

#### 4.2.13 퍼지기법을 이용한 튜닝

최근에 많이 연구되고 있는 퍼지 추론기법을 PID제어기의 파라미터 결정에 이용한 것으로 그 구조는 그림 4.4와 같다.

초기 튜닝부와 온라인 튜닝부로 분리되어 초기 튜닝부는 폐 루프 상태에서 계단응답에 의해 프로세스의 특성, 지연특성등을 同定하고, 모델매칭법등을 이용해 PID정수를 정한다. 한편 온-라인 튜닝부는 퍼형 인식부에 의해 제어응답 파형을 관측하고 그 결과에 의해 PID정수의 조정규칙(Rule)이 있는 지식 데이터 즉, 퍼지추론을 이용해 PID정수를 결정한다.

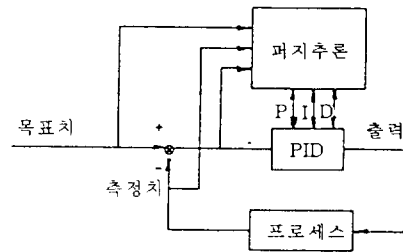


그림 4.4 Fuzzy추론을 이용한 PID 제어기 튜닝

## 5. PID제어기 제품현황

### 5.1 개요

PID제어기의 성능은 적용제어 알고리즘, 제어대상, 튜닝 기법등에 따라 조금씩 다르다. 본란에서는 최근 국내외에서 널리 이용되고 있는 PID제어기중 대표적인 것만을 선정하여 제어알고리즘, 튜닝 기법, 기타 특성을 분석 검토하고자 한다.

### 5.2 폐루프 튜닝기법을 이용한 것

이 방법을 이용한 것의 대표적인 것으로는 일본 Yokogawa社 제품의 YS-80 및 YS-100계열과 Foxboro社의 760계열이 있다.

#### 5.2.1 YS-80系列[23,35]

##### 5.2.1.1 개요

1980년 12월에 발표된 것으로 종래의 아날로그 처리방식 대신 마이크로프로세서를 택하여 디지털 처리속도 및 정밀도는 향상시키고 표시는 아날로그 방식과 같도록 한것이다. 외관은 액정 패널을 이용하고 튜닝시는 내부의 기기를 꺼내도록 되어 있다.

### 5.2.1.2 동작원리

#### 가. 프로세스 특성의 추정

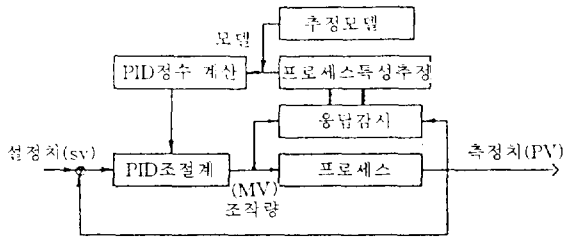


그림 5.1 YS-80 제어기의 기능 구성도

그림과 같이 입·출력신호를 항상 관측하여 측정신호 PV에서 프로세스 신호의 이상 유무(입·출력신호 이상 유무)를 관측하고 불규칙한 잡음을 제거한후 그 변동이 소정의 레벨을 넘어 크게 되면 PV와 조작량 MV를 이용해 모델饋還하여 프로세스 모델을 구한다.

이 방법에 의해 모델을 구하는 것은 여러번의 試行錯誤에 의해 구하는 것이 보통이나 YS-80인 경우 1회의 응답과형을 사용하여 프로세스 특성을 추정함으로써 단시간에 모델을 얻을 수 있다고 製作者는 제시하고 있다.

#### 나. PID정수의 튜닝

추정한 프로세스 모델에 의해 목표응답의 형태, 제어연산식, 미분의 유무등에 따라 PID정수를 계산한다.

또 이 제어기는 비례미분 선행형, 미분선행형을 선택할 수 있는 것외에 설정치 가변시는 필터를 이용할 수 있는 모드로 되어 있다.

프로세스의 응답특성은 종류에 따라 오버슈트 억제 우선, 또는 입상시간의 단축 우선등과 같이 요구조건이 다르므로 표 5.1과 같이 4가지의 기본 응답형태를 정해놓고 선택하도록 되어 있다. 추정한 모델로부터 PID정수를 결정한 후 운전원은 제어모드(제어목표의 형태)선택에 들어가게 되는데 이때 프로세스의 특성이 변동하여 제어기 내부의 모델과 프로세스 특성사이의 오차가 크면 다시 튜닝하여야 한다.

표 5.1 YS-80제어기의 제어목표 응답형태

	특 징	평 가 식
0	Overshoot 없다	Overshoot Zero
1	Overshoot 小 (約 5%) 整定時間 小	제어면적 최소 Min/lel t.dt
2	Overshoot 小 (約 10%) 整定時間 조금빠르다	제어면적 최소 Min/lel t.dt
3	Overshoot 大 (約 15%) 立上時間 빠르다	自乘制御面積 최소 Min/lel t.dt

### 5.2.2 YS-100系列

#### 1) 개요

YS-80을 바탕으로 외장, 운전원이 사용하기 편리하도록 MIS를 고려한 것등이 특징이다. 개발 순서에 따라 YS-110, YS-150, YS-170등 시리즈로 번호가 부여되어 있다. 본 원고에서는 가장 최근에 개발된 YS-170의 기능만을 요약 정리한다.

#### 2) 제어기능

이 기종은 PID제어 외에 비선형 제어도 가능하도록 되어 있고 또 PD+수동 Reset제어도 할 수 있다. 이 외에 이미 언급한 미분 및 적분 선행형, 제어의 연산 알고리즘도 가능하도록 되어 있다.

#### 3) 튜닝 기능

그림 5.2는 YS-170의 튜닝 구성도를 나타내는데 측정치와 조작량의 변동을 항상 관측함으로써 설정변경 또는 지령에 의해 조작량이 변경된 경우 응답과형을 단시간에 검출하여 프로세스의 특성 모델을 추정하고 PID정수를 계산하도록 되어 있다.

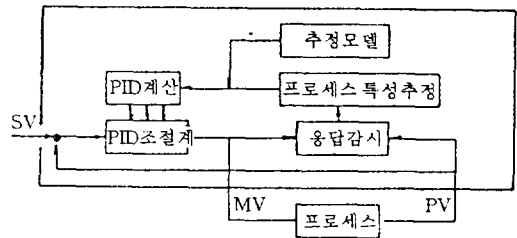


그림 5.2 튜닝 기능 블록 다이어그램

#### 4) 기타 제어기능

이 기종은 단일 루프에서 위에 언급한 기능외에 Feedforward제어, Preset MV출력기능, Cascade제어모드, 샘플 PI 제어, Batch PID제어, Cascade루프 사이의 연산기능등이 있는데 특히 캐스케이드 사이 루프 연산 기능은 YS-170만이 가진 가장 큰 특징으로 볼 수 있다.

### 5.2.3 Foxboro社의 760系列[4,24,25,37]

#### 1) 제어알고리즘

일반적인 제어기와 같은 모드를 가지고 있으나 예견제어(Predictive) 및 적응 예견제어(Adaptive predictive control) 등의 제어기능을 갖도록 한점이 큰 장점으로 볼 수 있다.

또한 지연시간을 가진 프로세스의 제어를 위해 Smith predictor구조를 도입한 것도 특징이다.

#### 2) 튜닝 방법

K.J.Anstrom이 제시한 적응제어 튜닝 이론을 응용한 EXACT(Expert Adaptive Controller Tuning)을 이용해 튜닝을 수행하는데 주로 제어기술자의 경험에 바탕을 두고 수행하도록 하



2) 튜닝 방법

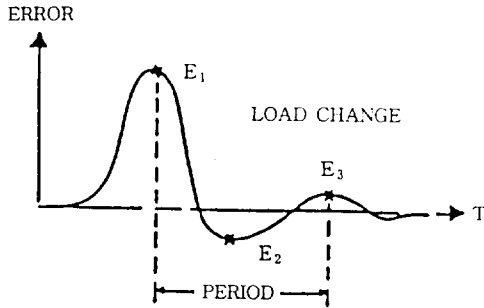


그림 5.3 파형인식 방법

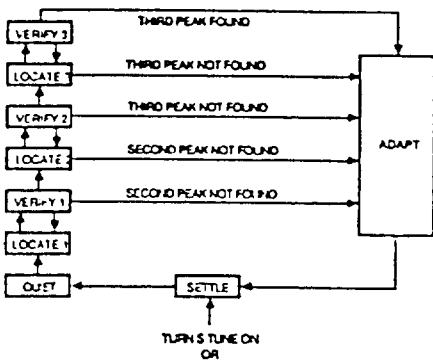


그림 5.4 Self tuning 알고리즘

고 있다.

이 기종은 pretune과 selftune 알고리즘을 갖고 있는 것이 특징인데 프로세스의 잡음 및 다이내믹 특성의 변화, 프로세스의 비선형성, Dead time, 부하 및 설정치 변경 등에 대해 최적의 튜닝이 가능하도록 하고 있다.

그림 5.3은 설정치 및 부하 변화에 대한 튜닝 방법에서 파형인식을 나타내는 것이고 그림 5.4는 Self tuning 알고리즘의 방법을 나타낸다.

3) 사용자 인터 페이스

사용자의 편리성을 도모하기 위해 그래픽 기능, 조작 SW의 단순화 등 MMIS기능을 보강한 것이 기존의 것과 다르다.

5.2.4 도시바 EC300계열

1) 제어 알고리즘

Batch control, Cascade control, 보일러 제어 등과 같이 각각의 프로세스 특성에 맞는 제어 알고리즘을 사용자가 선택하여 이용 할 수 있도록 많은 제어알고리즘을 포함하고 있는 것이 큰 장점으로 2자유도 제어기법 등도 모두 구현 할 수 있도록 하고 있다.

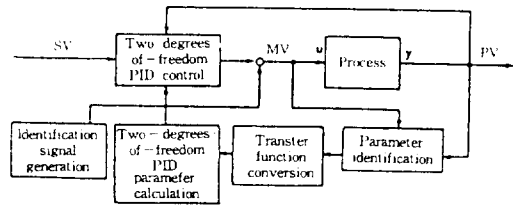


그림 5.5 EC300의 튜닝 과정

기본적인 튜닝 알고리즘은 AdTune을 적용하고 있는데 설정치 변경, 프로세스 값 변경 등은 물론 프로세스의 특성에 따라 제어기의 이득을 가변 할 수 있는 Gain scheduling 기능도 갖고 있다.

특히 이 기종은 T.Kitamori가 제시한 모델 매칭법을 이용해 프로세스의 특성에 따른 특성 분석, 자동 튜닝의 구현 등을 온-라인상에서 가능 하도록 하고 있다.

5.2.5 Sat control instrument의 ECA40

제어 알고리즘은 기존의 여러 제어기와 같으나 프로세스의 특성을 감지 할 수 있는 한계 감도법을 이용하고 있다. 즉, 그림 5.6과 같이 릴레이를 이용해 주기적인 진동을 주고 이때의 응답 주파수 특성을 보고 프로세스 특성을 감지한다.

개 루프형의 튜닝 법과 유사하나 동정용 신호를 온-라인으로 주는 것이 다르고 운전원은 튜닝 SW를 조작하면 제어기는 자동으로 시험신호를(t)를 인가하여 프로세스 특성을 파악한 다음 튜닝(c)을 완료한다. 잡음을 자동으로 검출 할 수 있고 수동 및 자동 튜닝이 가능하다. 튜닝 알고리즘은 Ziegler-Nichols법이다.

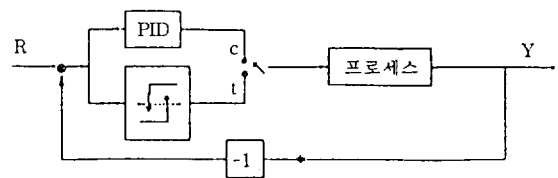


그림 5.6 릴레이에 의한 튜닝

5.2.6 Electromax V™

초기에는 단일 루프용 온도제어기로 개발 하였으나 후에 디지털용 PID제어기로 보완되어 사용되고 있다. 튜닝 과정이 고정모드(Fixed mode), 자가동조(Self-tune), 적응동조(Self-adaptive)등 3개의 모드로 구성되어 있는데 고정모드는 PID제어기의 파라미터 값을 저장하여 이용하는 것이고, 자기 동조는 외란 신호(Perturbation)를 자동으로 가하여 프로세스 모델을 추정한 후 PID파라미터를 계산하는 것으로

이때 운전원에게 설정된 파라미터에 대한 적정성을 묻는 형이다. 이에 대해적용 동조형은 연속적으로 계속하여 모델 변화에 따라 파라미터가 적용해 가도록 하는 것이다. 이때 동정용 신호는 그림 5.7과 같은 신호를 이용한다.

페 루프 전달함수  $H=(1-a)/(z-a)$ 를 인가하여 응답시간을 얻고 여기서  $a=\exp(-2.3h/T)$ ,  $h$ 는 샘플링 주기,  $T$ 는 90%까지의 응답시간이다.

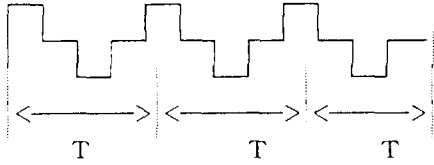


그림 5.7 동정용 신호

표 5.2 각사의 PID 제어기 튜닝 방식

구분	개루프	페 루 프		
		한계감도형	응답파형, 시형	적용제어형
구성				
튜닝	계단응답 펄스응답 ↓ Ziegler-Nichols, 평가함수, CHR법	限界주기, 한계감도 ↓ Ziegler-Nichols	Overshoot량 감쇄비, 주기 ↓ 튜닝 규칙	동특성 동정 (ARMA모델 최소 2승법 제어정수 자동 설계 (T.Kitamori법))
응용 기종	Fuji 전기 MICREX	TDSC3000	FOXBORO EXACT YEW 80계열	Toshiba EC300

또 각종 칩의 용량이 증대하고 그 처리속도가 급격히 증가하므로 PID제어기의 성능과 범용성은 급격히 향상되고 따라서 이의 연구 및 산업현장에서의 이용도 더욱 증가 할 것으로 본다.

## 7 결 론

본 원고에서는 PID제어기에 대한 현재의 국.내외 연구동향 및 기술현황을 분석하였다.

PID제어기는 1940년대에 제어이론 및 튜닝 방법에 대한 이론이 제시된후 많은 연구가 이루어져 일반 산업플랜트는 물론 대부분의 제어계통에서 가장 널리 이용되고 있는 범용성 제어기로 제어대상에 따라 미분선행형, 비례선행형 또는 2自由度 제어기 등과 같이 이들의 구조를 적당 배치시킬수 있어 여러종류의 제어 시스템에 대해서 적용 가능하고 따라서 어느정도의 강인성도 가질 수 있는 제어기로 발전되어 왔다.

한편 PID제어기의 튜닝에 대한 연구는 Ziegler-Nichols가 주파수 영역에서 그 방법을 제시한 이후 현재까지 지속적인 연구가 수행되어 그 방법도 매우 다양하므로 적용한 튜닝 방법에 따라 제어기의 사양이 다르고 사용방법도 다르므로 사용전에 제어기의 특징은 물론 플랜트의 특성, 사용목적등을 검토 할 필요가 있다.

현재 사용중인 제어기로서 개루프 튜닝 방법을 이용한 것에는 Fuji 電機의 MICREX, 한계 감도를 이용한 것에는 일본 山武社의 TDC3000, 응답파형의 오

버슈트 감쇄율을 이용한 제어기에는 미국 Foxboro社의 760계열과 일본 Yogawa社의 YS-80 및 YS-100계열이 있다. 또 모델매칭법을 이용한 제어기로는 도시바社의 EC300이 있다.

이와같이 많은 분야에 사용되고 있는 제어기중 약 90% 정도가 PID제어기이나 대부분의 제어기가 설정할 파라미터수가 너무 많을 뿐만 아니라 MMIS를 고려하지 않고 있고 또한 진동 및 오버슈트가 많은 시스템에는 적용할 수 없는 것이 문제점으로 지적되고 있어 향후 이들에 대한 연구가 큰 과제로 남아 있다. 또 튜닝 및 운용시 제어 엔지니어만이 이용이 가능하도록 그 사용법이 어려운 것도 문제점으로 지적되고 있어 향후 사용방법의 단순화가 필요하다.

## 참 고 문 헌

- [ 1 ] S.Suzuki, "An autotuning method for control system parameters in nuclear power plants," Nuc. Tech, vo.58,

### 5.3 개루프 방식을 이용한 것

이 방법을 이용한 것으로는 Fuji전기의 MICREX이 있다.

### 5.4 모델매칭법을 이용한 것

이미 설명한 EC300계열이 이 방법을 이용하고 있다. 지금까지 언급한 각사의 제어기에 대한 특징을 요약하면 표 5.2과 같다.

## 6. 연구현황 및 전망

PID제어기의 발전 및 기술현황에서 살펴 본 바와 같이 많은 연구자들이 PID제어기의 튜닝에 대한 연구는 끊임 없이 이루어지고 있고 특히 지능 제어기법을 적용한 튜닝에 대한 연구가 활발하다[16,25,34,35].

- pp.379-387, 1982.
- [ 2 ] 김동화, "Computer aided multivariable control system design," 한국원자력 연구소 연구 보고서, 1986.
  - [ 3 ] B.R.Upadhyaya, "Multivariable signal analysis algorithms for process monitoring and parameter estimation in nuclear reactors," Ann. Nuc Engery, vo.7, pp.1-11, 1979.
  - [ 4 ] K.J.Anstrom, "Towards intelligent PID control," Automatica, vol.28, no.1, pp.1-9, 1992.
  - [ 5 ] J.G.Ziegler & N.B.Nichols, "Optimum setting for Automatic controllers," Transactions of The AASME, pp.759-768, 1942.
  - [ 6 ] H.Seraji, "Design of proportional-plus-integral controllers for multivariable systems," INT.J.control, vol.29, no.1, pp.49-63, 1979.
  - [ 7 ] A.A.Rovira, "Modified PI Algorithm for digital control," Instrument and control, pp.101-102, 1970, AUg.
  - [ 8 ] G.E.Coon, "How to find controller setting from process characteristics," Control Eng, pp.66-76, 1956.
  - [ 9 ] F.Radke & R.Isermann, "A parameter-adaptive PID-controller with stepwise parameter optimization," Automatica, vol.23, no.4, pp.449-457, 1987.
  - [ 10 ] L.Keviczky & Cs.Banyasz, "A completely adaptive PID regulator," IFAC conference 1988.
  - [ 11 ] K.J.Astrom, "Industrial Adaptive controllers based on frequency response techniques," Automatica, vol.27, no.4, pp.599-609, 1991.
  - [ 12 ] Nichols J.Krikelis, "Microprocessor Implementation of PID controllers and lead-lag compensators," IEEETrac. on Industrial electronics vol.IE-31, no.1, pp.79-85, 1984. and Systems(51), pp.29-40, 1992.
  - [ 13 ] P.Vaga, "Self-tining predictive PID controller," IEE Proceeding-D vol.138, no.3, pp.303-311, 1991.
  - [ 14 ] Mikio Maeda, "A self-tuning fuzzy controller, Fuzzy Sets 15. K.L.Anderson, " A rule-based adaptive PID controller", IEEE control system and magazine, pp.564-569, 1988.
  - [ 15 ] K. L. Anderson, "A rule-based adaptive PID controller", IEEE control system and magazine, pp. 564-569, 1988.
  - [ 16 ] Zhen-Yu, "Fuzzy gain scheduling of PID controllers," IEEE Trans.on man & Cybernetids, vol. 23, no.5, pp. 1392-1398,1993.
  - [ 17 ] 田口秀文, "自由度 PID制御系の最適ハラメタ," SICE, vol.23, no.9, pp.889-895, 1988.
  - [ 18 ] K.J.Anstrom, "Intelligent tuning and adaptive control," 1992, 10,12-14, workshop in Seoul, Korea.
  - [ 19 ] Kiochi Suyama, "A practical design method for PID control systems," SICE, vol.29, no.2, pp.236-238, 1993.
  - [ 20 ] Toshiba manual, 1993.
  - [ 21 ] Yew PID제어기 Manual,1991.
  - [ 22 ] Foxboro 제어기 Manual, 1992.
  - [ 23 ] Koichi Suyama, "A practical design method for PID control systems," SICE, vol.29, no.2, pp.236-238,1993.
  - [ 24 ] T.Yamamoto, "A construction of descrete time control able PI-controllers," Automatica, vol.29, no.6, pp.1615-1616, 1993.
  - [ 25 ] Rubiyah Yusof, "A multivariable self-tuning PID controller," INT.J.control, vol.57, no.6, pp.1387-1403, 1993
  - [ 26 ] Lee,jihong, "On methods for improving performance of PI-type fuzzy logic controllers," IEEE Trans. Fuzzy System
  - [ 27 ] Steinar, "Amethod for closed loop automatic tuning of -PID controllers," Automatica, vol.28, no.3, pp.587-591, 1992.
  - [ 28 ] T. H. Lee, "Implementation of a knowledge-based PID auto-tuner," Automatica, vol.29, no.4, pp.1107-1113, 1993.
  - [ 29 ] Haruo Takasu, "Intelligent self-tuning PID controller," Inst-rumentation, vol.33, no.2, pp.47-51, 1990.
  - [ 30 ] 森剛志, "PID self-tuning controller," SICE, vol.1990, no. 8, pp.29-34, 1990.
  - [ 31 ] K.J.Astrom and Tore Hagglund, "Automatic tuning of PID controllers," ISA, 1988.
  - [ 32 ] P.J.Gawthrop, "Automatic Tuning of commercial PID controllers for single-loop and multiloop applications," IEEE control systems magazine, pp.34-42, Jan. 1990.
  - [ 33 ] T.Steinar, "A method for Closed loop automatic tuning of PID controllers," Automatic vol.28, no.3, pp.587-591, 1992.

저 자 소 개



김동화(金東和)

1949년 11월 15일생. 1978년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 아주대 대학원 전자공학과 졸업(공학). 1985년-86년 캐나다원자력공사(AECL)연구. 1977년-93년 한국원자력연구소. 현재 대전산업대 제어계측공학과 교수.



이은웅(李殷雄)

1944년 8월 14일생. 1971년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1982년-83년, 85년-86년 캐나다 McGill대학 방문교수. 1984년-85년 당 학회 대전지부장. 1987년-현재 평의원. 1989년-90년 편수위원. 현재 충남대 공대 전기공학과 교수 및 공대학장. 당 학회 편집이사.