

온라인 자기동조 퍼지 PID 제어기 개발

The Development of an On-Line Self-tuning Fuzzy PID Controller

\*임형순\*, 한진욱\*, 이창구\*, 김성중\*

\* 전북대학교 제어계측공학과(Tel : 0652-70-2476; Fax : 0652-70-2451; E-mail : micus@icrn.chonbuk.ac.kr)

**Abstracts** In this paper, we present a fuzzy logic based tuner for continuous on-line tuning of PID controllers. The essential idea of the scheme is to parameterize a Ziegler-Nichols-like tuning formula by a singler parameter  $\alpha$ , then to use an on-line fuzzy logic to self-tune the parameter. The adaptive scaling makes the controller robust against large variagions in parametric and dynamics uncertainties in the plant model. New self-tuning controller has the ability to decide when to use PI or PID control by extracting process dynamics from relay experiments. These scheme lead to improved performance of the transient and steady state behavior of the closed loop system, including processes with nonminimum phase processes.

**Keywords** Self-tuning, Relay Feedback, Fuzzy Logic

1. 서론

PID 제어기법은 고전적인 제어방법임에도 불구하고 목표치의 추적, 외란효과와 감쇄, 프로세스와 모델계수의 불일치에 대한 강인성등 제어계에 요구되는 제반 특성면에서 우수한 특성을 가지고 있어 오늘날 대부분의 산업현장에서 가장 많이 채택되고 있다. 그러나 PID 제어를 이용하는데 있어서 어려운 문제점은 프로세스 모델의 불확실성이 존재하는 경우, 운전중 공정환경이 변화하는 경우, 운전자가 이득조정에 익숙하지 못할 경우등 많은 경우에 만족할 만한 제어성능을 얻을수 없다는 사실이다. 이러한 문제점은 PID 이득을 자동적으로 조정하는 자동동조 알고리즘을 적용하여 해결할수 있다.

현재 주로 현장적용에 사용되는 방법은 Bristol로부터 시작된 패턴인식에 근거한 기법[1][2]과, Astrom등이 제안한 릴레이 변환 기법[3][4][5][6]이 있다. 전자의 방법은 PID 제어를 공정에 연결한 상태에서 계단응답을 관찰하여 응답패턴에 따라 제어기이득을 조정하는 숙련된 운전자의 이득동조 방법이다. 그러나 이러한 방식은 초기이득 결정이 타당한 경우에 사용될 수 있으며, 따라서 시행착오에 의한 초기이득조정과정이 요구되고 이득 조정과정에 부족제동의 경우만이 고려되었다는 단점을 내포하고 있다. 후자는 릴레이 변환루프의 응답이 일정한 임계주파수로 진동한다는 사실에 착안하여 릴레이 변환을 시행하여 임계주기와 임계이득을 얻고 이 결과를 Ziegler-Nichols 동조방식에 적용하여 PID이득을 결정하는 방식이다. 이 방법은 릴레이진폭의 크기만을 입력으로 요구하고 견실성이 우수하여 초기동조에 적절하다. 그러나 공정계수의 변화에 따라 릴레이입력을 재투입해야하므로 온라인 동조에는 적합치 않으며, 이때 조정된 PID이득이 고도의 제어성능을 보장하지 못한다는 단점을 지니고 있다. 이런 문제점을 매 순간의 제어오차를 분석하여 이것을 교정하는 적절한 신호를 퍼지 논리를 이용하여 발생시켜 해결하고자 했다.

본 연구는 프로세스의 제어를 운전자의 개입없이 온라인으로 PID제어이득을 조정할수 있는 퍼지 시스템을 구현함에 있다.

제안된 퍼지시스템은 Ziegler-Nichols 동조수식의 단일계수  $\alpha$ 를 출력오차와 오차의 변화에 따른 퍼지추론에 의하여 조정하며 PID이득을 공정상태에 따라 증가하거나 감소하도록 하는 기능을 수행한다. 또한 릴레이변환에 의한 공정모델을 분류하는 기능을 추가하므로써 적용성을 향상시켰다. 비최소위상 모델과 매 시간마다 플랜트가 변화하는 모델에 대하여 시뮬레이션을 통하여 제안한 방법이 기존의 동조방법이나 퍼지 동조제어기에 비하여 우수함을 비교하였다.

2. 퍼지 자기동조 PID 제어기

제안한 퍼지 자기동조 제어기는 그림 1에서와 같이 기존의 PID제어기와 릴레이에 의하여 폐루프(closed-loop)를 형성하도록

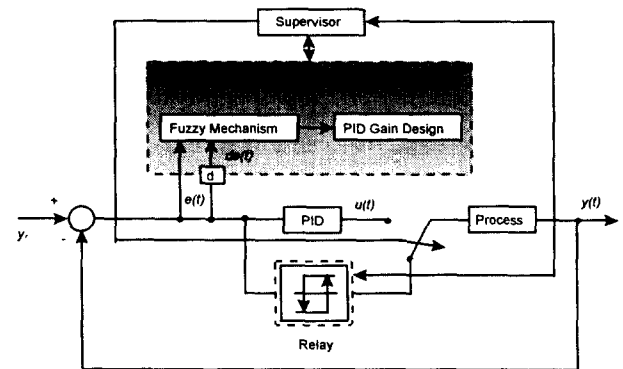


그림 1 퍼지 자기동조 PID제어기의 블록도

Fig.1 The Block diagram of a fuzzy self-tuning PID controller

하였고, 그 상층에 퍼지 자기동조 장치를 탑재하여 PID제어기 계수를 온라인으로 자동동조하도록 구성하였다.

최상층에 구성된 감독자층은 퍼지 자기동조 장치와 스위칭 기능, 릴레이 제어에 필요한 규칙 및 정보분류 기능을 포함한다. 또한, 감독자층은 릴레이제환을 형성하여 초기동조를 하고 모델 분류를 하며 이에따른 최적의 PID구조 선정 및 제어계수의 초기값을 제공한다. 퍼지 자기동조 PID제어기는 다음과 같이 크게 두단계로 나누어 구성하였다.

- (i) 릴레이제환의 의한 초기동조
- (ii) 퍼지논리에 의한 자기동조

### 2.1 PID제어기의 기본구조

페루프 오차  $e(t)$ 에 기초한 제어입력  $u(t)$ 를 만드는 PID제어기는 식 (1)과 같이 표현한다.

$$u(t) = K[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (1)$$

여기에서  $K$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ 는 각각 PID제어기의 비례이득, 적분시간, 미분시간이라 명칭한다. 동조란 이러한 제어이득을 공정에 따라 적절히 조절하여 좋은 제어성능을 얻는 것을 말한다. 일반적으로 널리 이용되어온 동조법으로 Ziegler-Nichols법이 있으며, 시스템의 동특성과 시스템의 동특성 변화에 따라서 단일 파라미터  $\alpha$ 에 의하여 다음의 식과 같이 나타낸다..

지연시간이 작은 시스템이나 2차 시스템인 경우:

$$K = 1.2k_c, \quad T_i = 0.75 \frac{t_c}{(1 + \alpha)}, \quad T_d = 0.25T_i \quad (2)$$

1차시스템인 경우:

$$K = k_c \alpha, \quad T_i = 0.96 \frac{t_c}{(1 + \alpha)}, \quad T_d = 0 \quad (3)$$

지연시간이 큰 시스템이나 고차시스템인 경우

$$K = 0.5k_c \alpha, \quad T_i = 0.38 \frac{t_c}{(1 + \alpha)}, \quad T_d = 0 \quad (4)$$

$k_c$ 와  $t_c$ 는 각각 임계이득과 임계 주기이다. 오차의 크기와 변화량에 따라  $\alpha$ 를 조절하므로써 온라인으로 PID이득을 자동동조하도록 한다. 이와같은 관계는 PID제어이득과 출력의 형태사이의 규칙에 의하여 공정출력을 적절히 조절하는 역할을 한다. 초기동조 구간에서는 임계값과 함께 공정의 동특성에 따른 제어기의 구조를 선정하고  $\alpha$ 값을 0.5로 한다. 또한 온라인 동조구간에서는 제어오차의 변화량에 따라 퍼지 자기동조 메카니즘에 의하여  $\alpha$ 를 온라인으로 조정하므로써 궁극적으로는 PID이득을 자동동조한다.

### 2.2 릴레이제환에 의한 초기동조

릴레이 동조의 기본개념은 그림 2와 같이 케환루프에 릴레이를 도입하여 플랜트가 인위적으로 발진하도록 하는 것이다. 그림 2에서  $d$ 는 릴레이 진폭이며,  $\epsilon$ 는 릴레이 히스테리시스(hysteresis)폭이다.

릴레이를 이용한 동조실험으로부터 얻어지는 공정에 관한 지식은 제어하고자 하는 플랜트의 페루프 이득을 Nyquist선도상의 한점값으로부터 도출하는 것이다. 이러한 정보는 Nyquist선도와

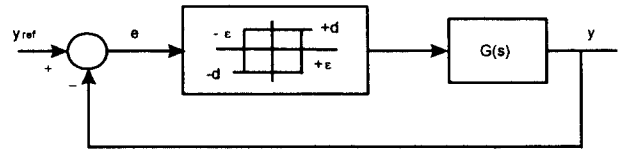


그림 2 릴레이 제환  
Fig. 2 Relay Feedback

음의 실축의 교차점으로 일반적으로 임계점이라 칭하며 이때의 이득을 임계이득( $k_c$ )과 임계주기( $t_c$ )라 한다. 이러한 값은 릴레이이득( $d$ )과 침투치값( $a$ )을 측정하여 식 (5)에 의하여 구한다.  $T_c$ 는 프로세스 출력의 주파수이다.

$$k_c = \frac{4d}{\pi a}, \quad t_c = T_c \quad (5)$$

일반적으로 릴레이 제어하에서 임출력 신호의 형태는 그림 3과 같이 입력은 구형파이고 출력은 정현파임을 알 수 있다. 또한, 제어입력과 공정출력은 위상편차를 갖으며 발진 진폭의 크기는 릴레이 진폭에 비례한다.

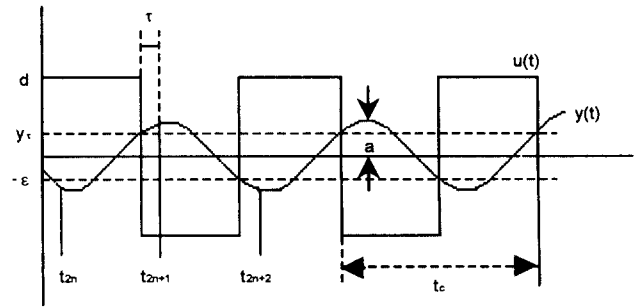


그림 3 릴레이 제어에 의한 공정 입력력 신호  
Fig. 3 Input and output signal of process by relay control

## 3. 퍼지 자기동조 메카니즘

### 3.1 퍼지 추론

퍼지 자기동조 메카니즘은  $\alpha(t)$ 값을 산출하는 퍼지논리 메카니즘과 식 (2),(3),(4)에 의하여 PID 이득을 설계하는 PID이득설

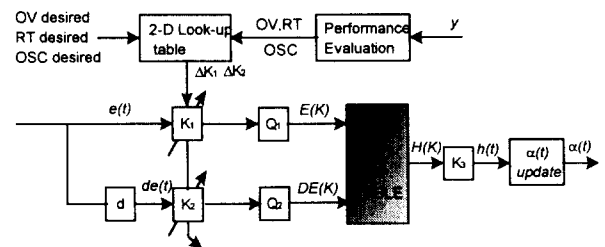
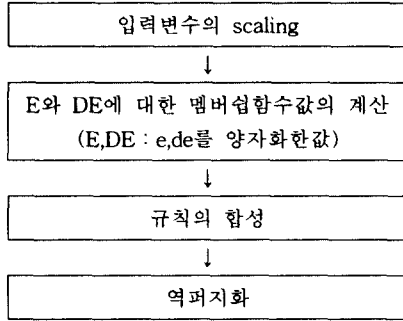


그림 4 퍼지논리 메카니즘  
Fig. 4 Fuzzy Logic Mechanism

계 구간으로 구성되었고, 퍼지논리 메카니즘은 그림 4와 같다. 입력변수는 제어오차(e(t))와 오차의 변화량(de(t))으로 선정하였고, 출력변수는 h(t)로 정의하였다. 입력력 변수에 대하여 7개의 언어변수를 사용하였다. 멤버십함수는 전체집합을 (-6,6)범위의 13개 레벨로 양자화하여 이산적으로 나타내기 쉽게 하였고 삼각형 형태를 사용하였다. 퍼지 추론의 합성법은 Mamdani의 최대-최소 합성(max-min composition)규칙을 이용하였고, 역퍼지화 방법으로는 가장 널리 쓰이는 방법인 무게 중심법을 사용하였다. 추론과정은 매 샘플순간마다 다음 4단계로 수행한다.



### 3.2 $\alpha(t)$ 의 update

PID이득 조정은 먼저 출력신호(y)와 기준입력( $y_r$ )사이의 4가지 경우, 즉, y가  $y_r$ 에 위나 아래에서 접근할 경우와 y가  $y_r$ 에서 위나 아래로 이탈할 경우로 나누어서, y가  $y_r$ 에 접근할 때에는  $\alpha$ 를 증가시켜 접근속도를 가속화하고 y가  $y_r$ 에서 이탈할 경우에는  $\alpha$ 를 감소시켜 이탈정도를 적게한다. 이와같은 기능에 의하여 조절한후에 식 (6)에 의하여  $\alpha(t)$ 를 update한다.

$$\begin{aligned} \alpha(t+1) &= \alpha(t) + h(t)(1 - \alpha(t)), & \text{for } \alpha(t) > 0.5 \\ \alpha(t+1) &= \alpha(t) + h(t)\alpha(t), & \text{for } \alpha(t) \leq 0.5 \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)에서 초기값  $\alpha(0)$ 은 0.5로 정한다. 이 식에 의한  $\alpha(t)$ 의 증가는 K가 증가하고  $T_i$ ,  $T_d$ 가 감소하므로 출력이 기준입력에 빠르게 수렴하도록 하는 반면  $\alpha(t)$ 의 감소는 K가 감소하고  $T_i$ ,  $T_d$ 가 증가하므로 발산을 더디게 한다. 출력의 상태에 따른  $\alpha(t)$ 의 궤적을 그림 5에 보였다. 또한  $\alpha(t)$ 값을 0에서 1로 한정하므로써 PID제어계수가 완만하고 한정된 적응성을 갖도록 보장하였다.

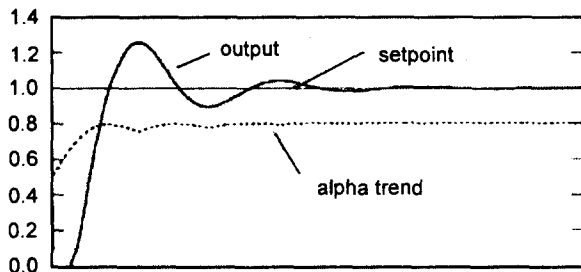


그림 5 출력곡선에 따른  $\alpha(t)$ 의 궤적  
Fig. 5 The trend of  $\alpha(t)$  versus plant output

## 4. 시뮬레이션 및 결과

제한한 퍼지 자기동조 PID 제어기의 특성분석을 위하여 비최소위상시스템((1-4s)/(1+4s)(1+10s))에 지능규칙을 이용하여 설계

한 Ziegler-Nichols동조법과 퍼지 메카니즘중  $\alpha(t)$  조절 기능을 제외한 각 요소들로 구성된 퍼지 제어기를 적용하였을 때의 출력응답, 제한한 방법에 의한 응답을 그림 6에 나타내었다. 여기에서 퍼지 제어기에 의한 응답은 scaling factor를 여러번 조절하여 가장 우수한 특징을 나타낸 응답만을 표시하였다. 반면에,

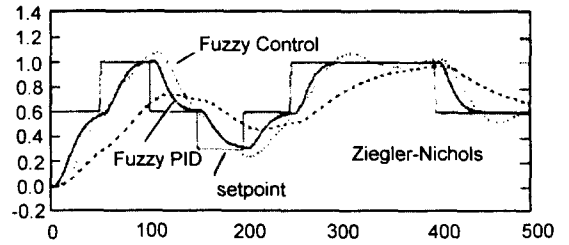


그림 6 비최소위상 모델에 대한 응답곡선  
Fig. 6 Response of the nonminimum-phase model

퍼지 자기동조 PID제어기 구성에 이용한 입력 scaling factor는 제어오차의 최대변화가 -1에서 1인 점을 고려하여 각각 5로, 출력 scaling factor는 0.02로 고정하여 실험모델에 적용하였다. 그림에서 보는바와 같이 비최소위상시스템에 대한 특성분석에서 제한한 방법이 다른 방법에 비하여 성능이 많이 향상되었음을 보여 주었다.

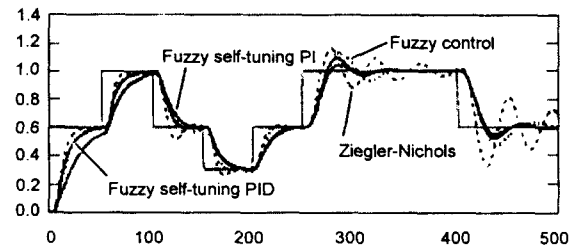


그림 7 변화하는 플랜트 모델에 대한 응답곡선  
Fig. 7 Response of the variable plant model

표 1 공정모델의 전달함수

Table 1 The transfer function of the process model

스텝	공정 모델
1 - 8 0	$1/(1+0.5s)(1+2s)$
8 1 - 1 6 0	$e^{-3s}/(1+0.5s)(1+2s)$
1 6 0 - 2 4 0	$e^{-3s}/(1+5s)$
2 4 1 - 3 2 0	$1/(1+5s)$
3 2 1 - 5 0 0	$e^{-4s}/(1+10s+40s^2)$

그림 7은 표 1에서 보는 바와같이 임의의 구간에서 플랜트가 변화하였을 경우의 응답곡선으로써 초기동조에 의한 응답에는 거의 차이가 없으나 240스텝 이후 공정의 동특성이 급격히 변화하는 구간에서 부터는 고정된 이득으로 제어하는 Ziegler-Nichols방법과 퍼지제어기는 성능이 저하됨을 보였고, 반면 적응성을 갖는 퍼지 자기동조 PID 제어기는 동특성에 따라 그림 8과 같이 완만하게 제어이득이 변화하므로써 다른 방법에 비하여 우수한 특징을 나타냄을 알 수 있다. 특히, 퍼지 자기동조 제어기의 PID형과 PI형이 약간의 차이가 있음을 볼 수 있는데 공정의 초기선정 모델이 2차제로 초기에는 PID제어구조가 더 낫

은 성능을 보이거나 240스텝이후 1차계로 공정이 변할때는 PI형이 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다.

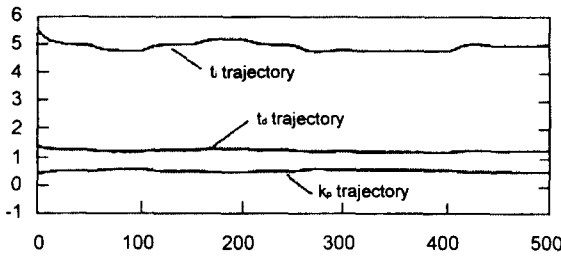


그림 8 제어이득의 변화추이 곡선  
Fig. 8 Trajectory of the PID gain

## 5. 결론

본 연구에서는 PID 제어기 이득의 자동조정을 위하여 릴레이 케환루프를 이용하여 초기이득을 결정하였고, 퍼지 논리를 이용하여 온라인으로 자동동조를 적용시킴으로써 그 유용성을 입증하였다. 퍼지제어기가 범용성과 강인성이 매우 부족한 점에 비하여 제안한 방법은 PID 제어기의 장점을 유지하고 간단한 퍼지 메카니즘에 의하여 동조기능을 수행하는 적용성을 지녔다는 면에서 매우 좋은 장점을 지녔다. 특히, 이와같은 구조는 현장에 설치된 PID제어기를 그대로 이용하면서, 동조기능만 컴퓨터에 탑재하여 온라인으로 제공 할 수 있다는 장점이 있다. 또한, PID 구조의 단점인 지연시간이 큰 공정에서의 비효율적인 변을 개선하기 위한 동조규칙을 제공하므로써 PID구조의 단점을 보완하였다.

## 참고 문헌

- [1] E. H. Bristol, et al, "Adaptive Process Control by Pattern Recognition," Instrument and Control Systems, pp.101-105, March 1970.
- [2] E. H. Bristol, et al, "Pattern Recognition : an Alternative Parameter Identification in Adaptive Control," Automatica, Vol.1, pp.197-202, March 1977
- [3] T. Hagglund and K.J. Astrom, "Automatic Tuning of PID Controllers Based on Dominant Pole Design", Proc. IFAC Conference on Adaptive Control of Chemical Process, Frankfurt, W. Germany, pp.205-210, 1985
- [4] K. J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins", Automatica, Vol.20, No.5, pp.645-651, 1984.
- [5] Y. Nishikawa, N. Sannomiya, T. Otha and M. Dkudara, "A method for auto-tuning of PID control parameters," Automatica, Vol.20, No.3, pp.321-332, 1984
- [6] K. J. Astrom, et. all, "Expert control," Automatica, Vol.22, No.3, pp.277-286, 1986.
- [7] P. Z. Wang, et. all, "PID Self-tuning Control using a Fuzzy Adaptive Mechanism," Proc. 1993 IEEE Intern. Conf. Fuzzy Syst., pp.708-713
- [8] T. Hagglund and K. J. Astrom, "Industrial Adaptive Controllers Based on Frequency Responce Techniques,"

Automatica, Vol.27, No.4, pp.599-609, 1991

- [9] 이창구의 2인, "경험적 규칙을 이용한 자동동조 PID제어기," 전기학회 논문지, Vol.39, No.5, pp.485-493, 1990
- [10] 이창구, 김성중, "규칙기반 자동동조 PID제어기에 관한 연구," 전기학회 논문지, Vol.40, No.11, pp.1161-1168, 1991
- [11] 김성중, 최한수, "퍼지제어기의 자기동조 방법에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집(A), pp.218-220, 1993