

PI제어기 이득 조정을 위한 퍼지동조기 개발에 관한 연구

A Study on Development of a Fuzzy Tuner for Tuning Gains of a PI Controller

허 윤 기*, 최 일 섭*, 최 승 갑**
Yone Gi Hur*, Il Seup Choi*, Seung Gap Choi**

요 약

본 논문에서는 공정제어계의 PI 제어기의 이득을 동조하는 방법을 다룬다. 산업계에서 사용되고 있는 제어기는 PI형이고, 이의 이득은 숙련조업자에 의하여 시행착오법으로 조정되고 있다. 따라서 제어기의 동조에는 많은 시간과 노력이 소요되며 다중루프를 갖는 공정의 경우에는 동조하기가 매우 어려운 실정이다. 본 논문에서 다루는 퍼지동조기는 아래와 같은 가정하에서 개발되었다. 제어기는 아날로그 PI제어기이고 플랜트의 신호는 On-line으로 받지만 동조는 Off-line에서 이루어진다. 또한 동조를 위한 특징량을 플랜트로 부터 얻을 수 있어야 한다. 동조 방법은 퍼지논리를 사용하였으며, 개발된 퍼지동조기는 공정의 현재신호와 과거의 상태를 보여주며 동조된 새로운 PI제어기의 이득값을 제시한다. 퍼지동조기는 현장에서 여러실험을 통하여 성능을 검증하였다.

Abstract

This paper proposes how to tune the gains of PI controllers in case of gain change in a process control system. Controllers of PI type have been used in industry and the gains of the controllers have been tuned by expert engineers. It, therefore, takes much time and efforts to tune the controllers. It is more difficult to find gains of multi-loop processes. The tuning method of a fuzzy tuner in this paper is developed based on the assumptions that the PI controllers are of analog type and are tuned off-line, and that the characteristic values must be supplied for the tuner. A Tuner using Fuzzy Logic(FLT) is capable of showing present/past states of a process control system and finding gains of PI controllers. The verification of the FLT is shown by various experiments.

I. 서 론

본 논문은 공정제어계의 상태 및 제어계의 주변여건의 변화에 따른 제어기의 이득 변경이 필요시 그 값을 제시하여 조정할 수 있는 기술에 관한 것이다.

*포항제철(주) 기술연구소
**포항제철(주) 도쿄연구소

산업공정에서는 제어계의 주변여건의 변화(설비의 노후화, 외부 노이즈, 부품의 열화 등)에 신속하게 대처하는 것이 제품의 품질과 생산성에 많은 영향을 미치게 된다. 제어정도를 향상시키기 위해서는 현재 제어계의 상태를 분석해야 하고, 그 설비에 적합한 제어기의 이득을 결정해 주어야 한다. 산업현장에 설치되어 있는 대부분의 제어기는 P, I형이고 이들의 값은 숙련된 기술자에 의하여 시행착오법으로 조정되고 있다. 이 경우 많은 시간과 노력이 필요할 뿐만아니라, 많은 루프를 가진 공정을 조정하기에는 사실상 어렵다. 따라서, 제어기의 상태를 판정하고 그에 따라 제어기의 조정을 쉽게하는 기술이 필요하다. 또한 이에 따른 시간과 노력의 절감은 생산성 향상에도 매우 크게 작용한다.

본 논문은 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 것으로, 각종 제어시스템의 상태를 분석하여 제어기의 이득조정이 필요한 경우, 신속하게 적합한 이득값을 제시하여 조정에 따른 시간을 단축할 수 있는 제어기의 동조기(Tuner)를 제공하는데 본 연구의 목적이 있다.

본 논문은 공정 제어계 신호의 상태를 봄으로써 현재 제어계가 과거에 비해 변하여 갈 때 얼마만큼 변했는지 알 수 있고, 이득변경시 얼마만큼의 제어가 향상되었는지를 알 수 있다. 또한 산업계 제어기의 동조에 있어서 기존의 숙련조업자가 시행착오법으로 오랜시간과 노력을 들여서 하는 것을 신속하게 동조하여 생산성 향상을 도모할 수 있는 큰 효과가 있다.

본 논문의 구성은 서론에 이어 2장에서는 문제를 설정하고 이어 3장에서는 퍼지동조기에 관하여 서술한다. 4장에서는 퍼지동조기의 동조 방법을 기술하고, 5장에서는 현장에서 실험한 결과를 보인다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

II. 문제 설정

본 논문에서 다루고자 하는 퍼지동조기의 동조방법을 아래와 같은 가정하에서 설정된다.

가정 1. 제어기는 아나로그 PI제어기라고 가정한다.

산업체의 대부분 제어기는 PID형태이고 그중 PI제어기가 주를 차지한다. 포항제철의 경우 디지털 PI제어기가 다수를 차지하지만 부분적으로는 아나로그 PI제어기를 사용하고 있다. 본 논문의 동조방법은 디지털형에도 적용이 가능하지만 여기서는 아나로그형이라고 가정한다.

가정 2. 플랜트는 동조를 위한 특징량을 구할 수 있다고 가정한다.

산업체의 경우 동조를 위한 특징량, 예를 들어 오차, 최대편차(Overshoot), 상승시간(Rising time), 감쇄비(Damping ratio) 등이 쉽게 구할 수 있지 않다. 실험실의 모의 실험에서는 플랜트를 수식으로 혹은 소형 실험장치를 만들어서 얼마든지 실험할 수 있으나, 현장의 경우 조업에 영향을 주지 않기 위해서는 많은 제약하에서 동조의 특징량을 구해낸다. 따라서 플랜트로부터 동조를 위한 특징량을 구할 수 있다는 가정하에서 본 논문의 동조방법이 성립한다.

가정 3. 제어기의 동조는 Off-line 동조라고 가정한다.

디지털 PI제어기의 경우는 제어기의 이득을 On-line으로 변경시킬 수 있으나, 아나로그 PI제어기의 경우는 P와 I의 이득값을 아나로그 회로상에서는 O.P. amp.와 가변저항과 콘덴서로 구현되는데 이들의 값은 Off-line에서 조업자에 의하여 바뀌어지고 있다. 즉, 플랜트의 신호는 On-line상에서 받지만 동조는 Off-line이라고 가정한다.

PID제어기의 자동동조 방법은 많이 알려져 있다. 그러나 실제 플랜트에 적용하기에는 어려움이 있다. Ziegler-Nichols의 과도상태응답법(Step Response Method)의 경우[1], 플랜트의 모델이 단순하여 원하는 계단응답이 나오면 시간지연(Time delay)과 시정수로 동조가 가능하겠지만, 실제 플랜트는 여러가지 Dynamic한 요소들에 의하여 영향을 받으므로 모델이 단순화되기 어렵다. 또한 Ziegler-Nichols의 한계감도법(Ultimate Sensitivity Method)[1]은 시스템의 지속적인 진동을 통하여 한계영역에서 진동의 주기와 진폭을 구하여 제어기의 이득을 구한다. 이방법은 현장에서는 플랜트를 불안정영역까지 접근시키므로 실제상황에서 적용하기 실로 어렵다.

포항제철의 경우, 대부분이 PI제어기이고 제어기의 동조는 숙련된 기술자에 의하여 시행착오법으로 조정되고 있다. 따라서 동조에 따르는 시간과 노력이 많이 필요하고 숙련자의 감소에도 대처할 수 있는 비숙련자라도 제어기의 동조를 할 수 있는 도구가 필요하다.

본 논문은 위에 설정한 가정하에서, 제어시스템의 상태를 분석하여 제어기의 이득조정이 필요한 경우, 신속하게 적합한 이득값을 제시하여 동조에 따른 가이드(Guide)를 제공하는 동조기(Tuner)를 제안하고자 한다.

III. 퍼지동조기

FLT는 Fuzzy Logic Tuner의 약자로서 퍼지 기법을 이용한 제어기의 동조기를 뜻한다. 동조기관(그림 1)에서 보면, 제어기와 동조기는 입/출력의 물리량이 다를 뿐이며, 그 내부 수행되는 과정은 같다. 즉, 제어기는 제어입력을 계산하고 동조기는 PI(혹은 PID) 제어기의 이득값을 계산한다. 그 수행과정은 현재 프로세서의 기준치, 공정값 등을 입력받아서 그로부터 동조에 필요한 특성값을 추출한 뒤, 현재에 적합한 PI 이득값을 계산한다. 여기에서 알 수 있듯이 동조기는 PI(혹은 PID)제어기를 사용한다는 가정하에서 필요한 장치이다.

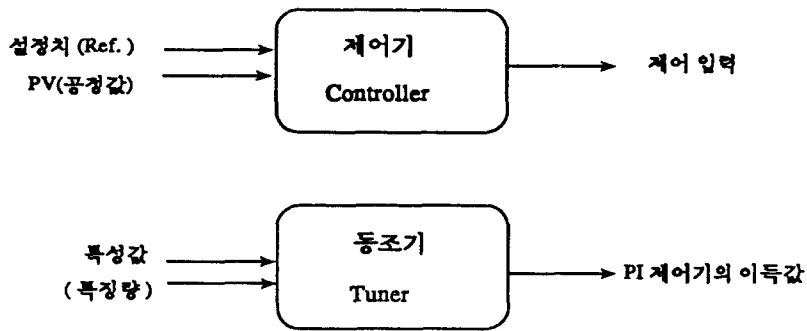


그림 1. 제어기와 동조기의 비교
Fig 1. Comparison of controller and tuner

그림 2는 동조에 관한 블록도이다. 동조기는 On-line에서 현재 제어계의 설정치(Ref.)와 플랜트의 출력치를 받아서 현재 제어계의 상태를 나타내고, 이 값들로부터 동조를 위한 특징량을 산출하여 새로운 이득값을 제시한다. 제어기는 Off-line에서 이 이득값을 받아서 보다 나은 제어입력값을 플랜트로 내보낸다.

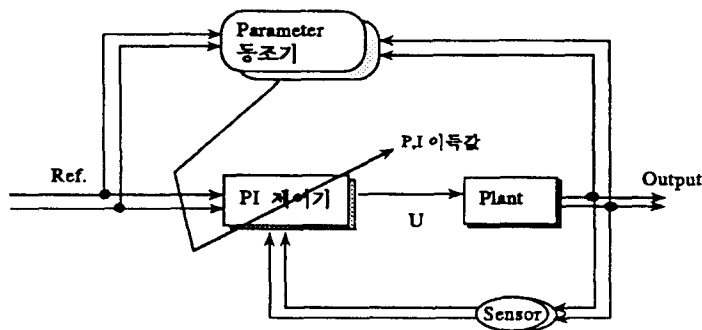


그림 2. 동조에 관한 블록도
Fig 2. Block diagram of tuning

그림 3은 동조기의 구조에 관한 블록도이다. 동조기는 입력신호를 필터에서 필터링하여 노이즈를 제거한 후, 필터링된 신호를 신호분석부(S)로 보내고 여기서 각신호의 상태를 판단할 수 있는 값으로 계산하여 모니터링부(M)로 보낸다. 동조기에 사용된 필터는 현장의 신호를 받아본 결과 화이트 노이즈(White Noise)가 많이 있어서 이를 제거하기 위하여 Butterworth 필터를 사용하였다. 필터(F)를 설명하면, 입력신호(노이즈가 있는 신호)를 $U(n)$, 출력신호(필터링 신호)를 $Y(n)$ 이라 두면 아래와 같이 구성된다.

$$X(n+1) = A X(n) + B U(n)$$

$$Y(n+1) = C X(n) + D U(n), n=0, 1, 2, \dots$$

여기서, $A=0.7265$, $B=1.0$, $C=0.2361$, $D=0.1367$

필터는 신호에 포함된 노이즈를 제거하여 원신호를 복원하는 기능을 하고 위의 계수는 많은 모의실험을 통하여 구했으며, 실제 현장신호에 대해서도 좋은 결과를 보였다. 필터를 기친 신호로부터 동조를 위한 특징량을 산출한 뒤(C 부분), 동조 파라미터를 계산하고 이득을 추출하여 최종적으로 모니터링부(M)로 보낸다. 모니터링부는 신호분석값과 동조된 제어기의 이득이 그래픽으로 처리되어 보여준다.

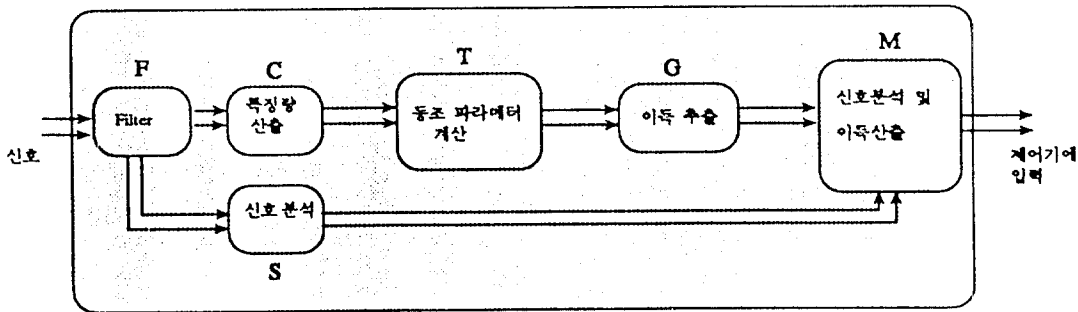


그림 3. 동조기의 구조에 관한 블록도
Fig 3. Block diagram of the tuner structure

동조기는 특징량을 산출하기 위하여 제어계가 정상상태로 구동하고 있을 때, 시험신호를 제어계에 인가한다. 시험신호의 크기와 인가되는 시간은 Interface 화면상에서 조정이 가능하다. 시험신호는 10V에서 -10V까지 인가 가능하지만 프로세서에 영향을 적게하기 위하여 0.5V를 인가하였다. 이보다 작은 값은 A/D모드를 통하여 얻어진 신호의 두드러진 특성을 얻기 어려워서 이 값으로 정하였다.

동조에 사용된 방법은 퍼지논리를 사용하였다. 퍼지논리를 사용한 배경은 플랜트의 수식 모델에 얽매이지 않고 모터같이 응답이 빠른 제어계나 비선형성 제어계에 적절하게 반응하기 때문이다.

IV. 퍼지동조기의 동조 방법

본 논문의 동조기에 사용된 동조방법은 퍼지논리이다. 동조기는 제어계의 설정치와 출력치의 오차와 오차의 변화량을 입력받아서 미리 작성된 규칙에 의하여 동조를 시작한다. PI제어기에서 제어입력을 U 라고 두면,

$$U(t) = P e(t) + I \int^t e(t) dt$$

$$U(t) = K (e(t) + \frac{1}{T_i} \int^t e(t) dt)$$

여기서 $K=P$, $T_i = \frac{K}{I}$ 이다.

FLT에서는 퍼지논리에 의하여 ΔK , ΔT_i 값을 계산하고 이 값은 아래의 관계를 통하여 최종적인 K , T_i 값이 계산된다.

$$\begin{aligned} K(n+1) &= K(n) + \Delta K \\ T_i(n+1) &= T_i(n) + \Delta T_i, n=0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

다음은 동조를 위한 규칙을 살펴보면, 퍼지화는 삼각형법을 사용하였고 그의 규칙은 아래와 같다. 여기서 오차 e = 기준치-출력치, 오차의 변화량 Δe = 현재오차-이전 오차이고 \tilde{e} 는 퍼지화된 오차, $\tilde{\Delta e}$ 는 퍼지화된 오차의 변화량이다.

ΔK 에 관한 규칙:

If \tilde{e} is NB and $\tilde{\Delta e}$ is ZO	Then $\tilde{\Delta K}$ is NBK
If \tilde{e} is NS and $\tilde{\Delta e}$ is ZO	Then $\tilde{\Delta K}$ is NSK
If \tilde{e} is ZO and $\tilde{\Delta e}$ is ZO	Then $\tilde{\Delta K}$ is ZOK
If \tilde{e} is PS and $\tilde{\Delta e}$ is ZO	Then $\tilde{\Delta K}$ is PSK
If \tilde{e} is PB and $\tilde{\Delta e}$ is ZO	Then $\tilde{\Delta K}$ is PBK
If \tilde{e} is ZO and $\tilde{\Delta e}$ is NB	Then $\tilde{\Delta K}$ is NBK
If \tilde{e} is ZO and $\tilde{\Delta e}$ is NS	Then $\tilde{\Delta K}$ is NSK
If \tilde{e} is ZO and $\tilde{\Delta e}$ is PS	Then $\tilde{\Delta K}$ is PSK
If \tilde{e} is ZO and $\tilde{\Delta e}$ is PB	Then $\tilde{\Delta K}$ is PBK

ΔT_i 에 관한 규칙:

If \tilde{e} is NB and $\tilde{\Delta e}$ is ZO	Then $\tilde{\Delta T}_i$ is NBI
If \tilde{e} is NS and $\tilde{\Delta e}$ is ZO	Then $\tilde{\Delta T}_i$ is NSI
If \tilde{e} is ZO and $\tilde{\Delta e}$ is ZO	Then $\tilde{\Delta T}_i$ is ZOI
If \tilde{e} is PS and $\tilde{\Delta e}$ is ZO	Then $\tilde{\Delta T}_i$ is PSI
If \tilde{e} is PB and $\tilde{\Delta e}$ is ZO	Then $\tilde{\Delta T}_i$ is PBI
If \tilde{e} is ZO and $\tilde{\Delta e}$ is NB	Then $\tilde{\Delta T}_i$ is NBI
If \tilde{e} is ZO and $\tilde{\Delta e}$ is NS	Then $\tilde{\Delta T}_i$ is NSI
If \tilde{e} is ZO and $\tilde{\Delta e}$ is PS	Then $\tilde{\Delta T}_i$ is PSI
If \tilde{e} is ZO and $\tilde{\Delta e}$ is PB	Then $\tilde{\Delta T}_i$ is PBI

ΔK 와 ΔT_i 에 관한 소속함수는 그림 4에 나타내었다. 퍼지 추론은 기존의 min_MAX방법과 비퍼지화는 무게중심법(C.O.G.)을 사용하였다.

규칙의 소속함수는 많은 실험을 통하여 결정하였으며 이들은 플랜트의 특성에 따라서 수정이 가능하다. 규칙의 수는 많으면 계산시간이 그에따라 많이 소요되고, 반대로 적으면 얻어진 값의 신뢰도가 낮아지므로 여기서는 각각 9개씩 정했다. 동조된 제어기의 이득은 다음 장의 그림 6에 나타낸 바와 같이 신호의 상태값과 함께 그래픽으로 처리된 모니터에 표시된다.

FLT의 적용대상은 PI제어기가 있는 디지털 제어시스템이나 아날로그 제어시스템에 모두 적용이 가능하다. 그러나 이것을 적용하기 위해서는 시스템에 대한 정보가 필요하고 또한 동조기의 소속함수의 Tuning이 필요하다. 따라서 한 시스템에서 좋은 성능을 보인다고 해서 다른 시스템에 적용시, 반드시 좋은 결과를 보인다고는 할 수

없으며 그때마다 시스템에 대한 정보를 바탕으로 동조기의 소속함수의 Tuning을 해주어야 한다. 물론, 유사한 시스템의 경우라면 바로 적용해도 무방할 것이다.

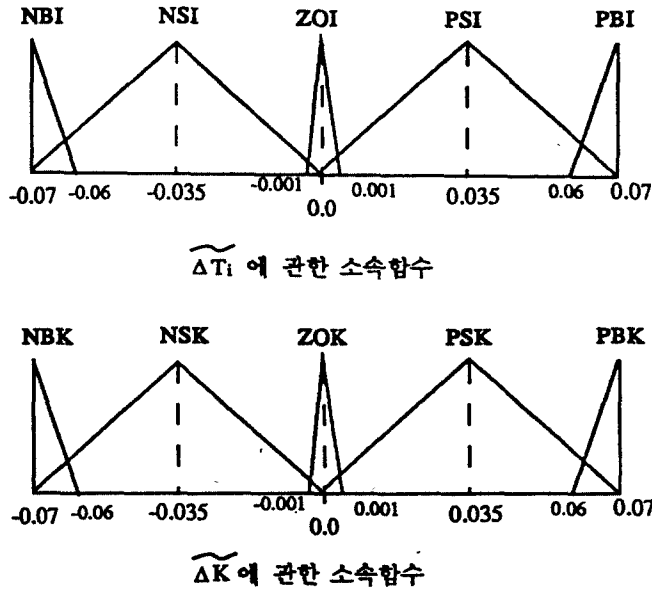


그림 4. ΔK 와 ΔT_i 에 관한 소속함수
Fig 4. Membership function of ΔK and ΔT_i

V. 실험결과

본 장에서는 3장에서 설명한 퍼지동조기의 S/W 화면 구성과 기능 그리고 현장 모터를 대상으로 실험한 결과를 살펴본다. 본 연구의 동조기는 크게 3가지 기능을 가지고 있다.

첫째, On-line에서 플랜트의 신호를 받아서 이를 monitor하고 시험신호를 플랜트에 인가하며 신호를 저장하는 기능이 있다. 플랜트의 신호는 A/D보드를 통하여 1msec로 동조기에 입력되며 그림 5의 On-line Process Values Monitor에 8 channel까지 보여준다.

둘째, Off-line에서 앞에서 지정한 신호를 로드하여 보여준다. 즉, 과거신호의 시간과 전압의 값을 화면상에서 확대/축소하여 보여준다. 또한 아날로그신호의 값을 디지털 값으로 변환해주는 기능이 있다.

셋째, 동조화면에서는 현 플랜트의 상태를 나타내고 제어기의 새로운 이득값을 보여준다.

그림 5는 동조기의 On-line에서 각 채널별로 플랜트의 아날로그 신호를 보여주고 있다. 여기서 동조기의 특징량을 구하기위하여 시험신호를 발생할 수 있고 플랜트의 신호를 저장할 수 있다. 시험신호를 발생하는 이유는 동조를 위하여 과도상태 때의 신호의 오차와 오차의 변화량을 특징량으로 삼았으므로, 제어기가 정상상태로 구동중일 때 D/A보드를 통하여 시험신호를 인가하여 과도상태를 만들어서 특징량을 구하였다.

그림 6는 동조기의 동조화면이다. 현 제어기의 이득값과 설정치를 입력하면 현 플랜트의 최대편차와 감쇄비 그리고 상승시간을 나타내어 플랜트의 상태를 알 수 있다. 또한 동조가 완료되면 제어기의 새로운 이득값을 제시한다.

본 논문의 퍼지동조기를 현장 냉연공장에서 사용하는 DC 모터를 대상으로 실험한 결과를 아래에 나타내었다. 그림 6에서 동조된 제어기의 이득값을 현장 아날로그 제어기에 Off-line으로 입력한 뒤 모터를 구동시켰다. 그림 (a)는 현장 숙련조업자가 초기에 설정된 이득값으로 모터를 구동한 결과이고 그림 (b)는 퍼지동조기에서 동조된

이득값으로 모터를 구동한 결과이다. 결과를 보면 (a)와 (b)는 최대편차는 같으나 (b)의 경우가 상승시간이 항상 되었음을 알 수 있다.

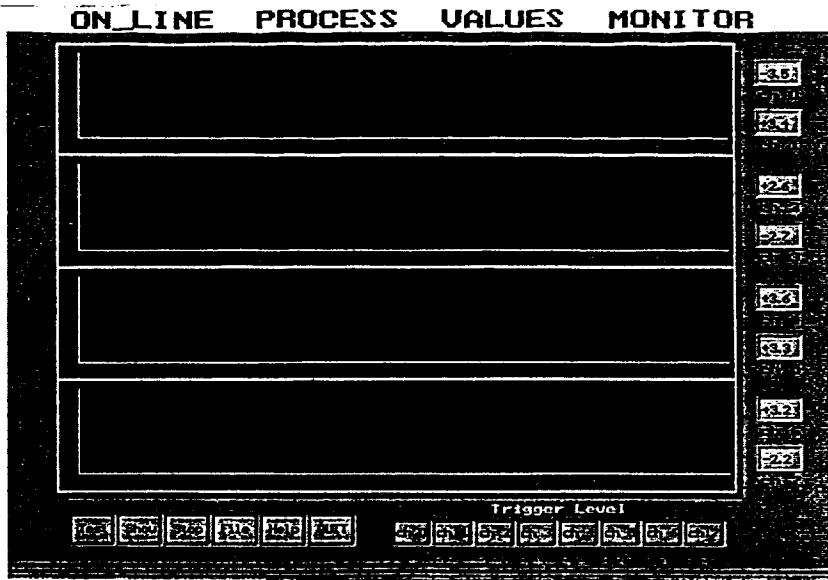


그림 5. 동조기의 On-line Process Values Monitor
Fig 5. On-line Process Values Monitor of the tuner

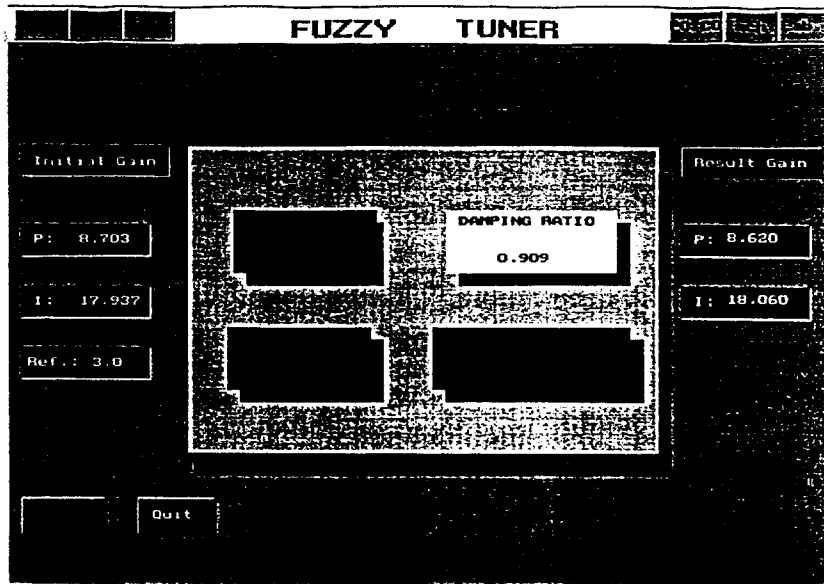
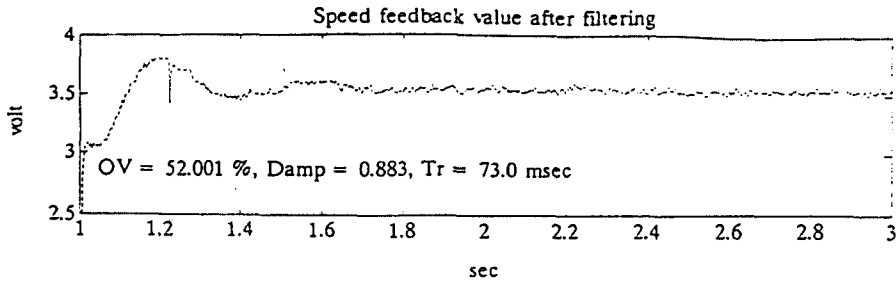
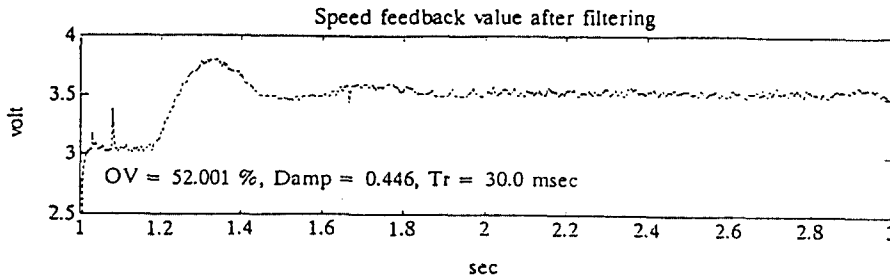


그림 6. 동조기의 Fuzzy Tuner
Fig 6. Fuzzy Tuner of the tuner



(a) 초기 설정된 PI 값에 의한 결과
(a) Results of initial PI values



(b) FLT에서 동조된 PI 값에 의한 결과
(b) Results of tuning PI values from FLT

그림 7. 현장 DC Motor에 실험한 결과
Fig. 7. Experimental results of FLT applied to DC motor

VI. 결 론

본 논문에서는 산업공정에 적합한 PI제어기의 파라미터 조정을 위한 동조기를 다루었다. 동조의 방법은 먼저 필터를 설계하여 노이즈를 제거한 플랜트신호와 제어기의 설정치가 동조기에 입력된다. 신호의 오차와 그의 변화량을 동조를 위한 특징량으로 정하여 퍼지논리에 의하여 PI 제어기의 이득을 구해내었다. 그리고 동조기로부터 구해진 이득값을 PI제어기에 구현하여 모터를 구동하였으며 기존의 설정된 이득값보다 나은 결과를 보였다. 본 논문에서의 동조기는 현재 플랜트의 신호를 On-line으로 Monitoring할 수 있고 그의 정보를 저장할 수 있다. 또한 저장된 신호를 로드하여 볼 수 있으며 과거와 현재의 신호를 비교할 수 있는 정보(최대편차, 상승시간, 감쇄비)를 제공하며 동조의 결과를 볼 수 있는 사용자 Interface 환경을 갖춘 동조기를 개발하였다.

본 논문에서 사용한 동조기는 퍼지 규칙을 수정할 수 있으며 이경우 다른 플랜트에 적용이 가능하다. 또한 Off-line 아나로그 PI 제어기의 동조를 다루었으나 동조의 방법은 On-line디지털 제어기에도 적용가능하다.

참 고 문 헌

1. K.J. Astrom, T. Hagglund, Automatic Tuning of PID Controllers, pp 52-57, Instrument Society of America, 1988
2. K.J. Astrom, B. Wittenmark, Computer Controlled Systems, pp 186-187, Prentice-Hall, Inc., 1984

3. 이광형, 오길록, 퍼지이론 및 응용 I, II권, 홍릉과학출판사, 1992
4. D.M. Wills, "A guide to Controller Tuning," Control Engineering, pp 93-95, August, 1962
5. D.M. Wills, "Tuning Maps for Three-Mode Controllers," Control Engineering, pp 104-108, April, 1962
6. T.W. Kraus, T.J. Myron, "Self-Tuning PID Controller Uses Pattern Recognition Approach," Control Engineering, pp 106-107, June, 1984
7. Masashide, Tadayoshi, nobuyuk, Susuma, "An Auto-Tuning System Based on Fuzzy Reasoning for PID-Controllers," 日立評論. 71-8, 115/122, 1989
8. J. Litt, "An Expert System to perform on-line Controller Tuning," IEEE Control System, pp 18-23, April, 1991
9. S. Tzafestas, N.P. Papanikolopoulos, "Incremental Fuzzy Expert PID Control," IEEE Trans. Indus. Ellection, Vol. 37, pp. 365-371
10. R.Cao, T. Mcavoy, "Evaluation of a Pattern Recognition Adaptive PID Controller," Automatica, Vol. 26, No. 4, pp 797-801, 1990
11. K.J. Astrom, C.C. H.P. Persson, W.K. Ho, "Towards Intelligent PID Control," Automatica, Vol. 28, No 1, pp. 1-9, 1991
12. Yoshikazu, Nobuo, Tokuji, Haruki, "A Method for Auto-tuning of PID Control Parameters," Automatica, Vol. 20, No 3, pp 321-332, 1984