

# 패턴 인식에 의한 Auto - Tuning PI 제어

朴貴泰 \* 李起常 \*\* 金星鎬 \* 朴太洪 \* 李東垣 \*  
 \* 고려대학교 전기공학과 \*\* 단국대학교 전기공학과

## Auto-Tuning PI Control By Pattern Recognition

Gwi-Tae Park\* Gee-Sang Lee\*\* Sung-Ho Kim\* Tae-Hong Park\* Dong-Won Lee\*  
 \* Department of Electrical Eng., Korea University  
 \*\* Department of Electrical Eng., Dan-Kook University

### ABSTRACT

This paper describes the procedures for pre-tuning and re-tuning of the PI controller to specifications on patterns of output response.

The key ideas of the proposed adaptive scheme are as follows. The relay feedback is adopted first for pre-tuning and the adaptive algorithms by the pattern recognition are introduced for re-tuning procedure to retune the gains whenever control conditions are changed. The proposed scheme was applied to the experimental laboratory process, heat exchanger.

### 1. 서 론

PID 제어기는 Set Point의 추적기능, 외란처리기능 등이 있을 뿐 아니라 프로세스의 비선형성, 불확정성 등에 대해서도 강인한( Robust ) 고유의 특성을 가지기 때문에 각종 현대 제어기법의 개발에도 불구하고 산업 공명제어에 가장 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 제어기 이득결정에 대한 확정적 방법이 없기 때문에 PID 제어기 성능개선을 위하여 이득조정에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. (1,2) 그중 본 논문에 관련된 몇가지 방법을 살펴보면 다음과 같다.

1984년 Aström 과 Hägglund 는 Relay 궤환을 도입하여 ZNM( Ziegler-Nichols Tuning Method )에서 요구되는 임계이득  $K_{pc}$  와 임계주파수  $f_0$  를 결정하여 PID 이득을 조정함으로써 모델 파라미터 추정을 요하지 않는 Auto-Tuning Rule을 개발하고 그 성능을 입증하였다. 이 방법은 기존의 기법중 가장 일반화된 ZNM 을 On-line화 했다는 차원에서 매우 가치있는 결과로 평가되고 있다. 그러나 이 방법에 의해 설계된 PID 제어기는 ZNM에 의해 설계된 것과 동일하며, 일반적으로 Set Point 변화시 30 % 정도의 오버슈트를 나타내기 때문에 매우 정교한 제어성능은 기대할 수 없고 프로세스 운전조건이 변화한 경우에 제어기 파라미터의 재조정 ( Re-Tuning )이 불가능하다. (3)

따라서 80년대 들어서는 파라미터 추정을 전제한 적응 제어기법 및 극점배치기법을 도입한 Self-Tuning PID 기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나 이들 기법은 공통적으로 프로세스의 모델차수, 지연시간 등에 대한 정확한 정보를 요구할 뿐 아니라 파라미터의 추정을 위한 지속 여기조건이 만족되어야만 그 적용이 가능하다. 그러나 최근 프로세스에 대한 정확한 정보도 없이 단지 Set Point 변화 및 외란 투입시 계통의 출력응답으로부터 이득조정이 가능한 패턴 인식에 의한 적응제어기법이 활발히 연구되고 있다. (2, 4-6)

특히, 이들 연구중 Bristol이 제안한 방법은 출력편차의 면적에 근거하여 제어기의 이득을 결정하는 것은

로 Kraus의 방법보다 잡음에 대하여 강인할 뿐 아니라 패턴을 찾기 위한 복잡한 경험논리( Heuristic Logic )를 필요로 하지않는 장점이 있다. (7, 8)

그러나 이 방법은 반드시 계통의 초기응답이 오버슈트를 가져야하며 부궤환을 보장하는 상수의 선정이 선행되어야 하는 문제점을 안고 있다.

따라서 본 연구에서는 위에 언급한 Self-Tuning PID 의 문제점과 Relay 궤환에 의한 PID Tuning 기법의 문제점을 해결하기 위하여 파라미터 추정값이도 우수한 제어성능을 갖는 PI 제어기를 제안함에 그 목적을 두었다. 제안된 PI 제어기는 응답이 적절한 오버슈트를 갖도록 Relay 궤환에 의한 Pre-Tuning 과정과 과도특성 개선을 위한 2차적 이득조정 과정을 도입하고 패턴 인식에 의한 적응제어기 설계시 요구되는 상수의 선정을 간단히 하여 설계의 용용성을 확장시켰다.

### 2. 제안된 PI Tuning기법의 개요 및 제어기 구조

제안된 제어계는 Relay 요소와 PI 동작요소 및 출력응답의 패턴 분석에 의한 PI 제어기 이득 재조정을 위한 Adaptive Tuning Mechanism 으로 구성되어 있으며 그 구조는 그림 2.1 과 같다.

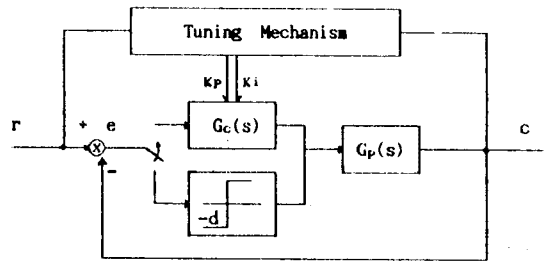


그림 2.1 제안된 Auto-Tuning PI 제어 계통도

제안된 Tuning 기법은 두개의 과정으로 구성된다. 그 첫번째 과정은 미지의 제어대상 계통으로부터 On-line기법으로 PI 제어기 이득 결정을 위한 정보를 추출하고 이를 이용하여 초기 제어이득을 결정하는 것이다. 이 제어이득은 최초의 Set Point 변화의 추적 또는 외란처리를 위해 투입된다. 두번째 과정은 첫과정에서 구해진 제어기 이득의 투입으로 나타나는 출력의 과도응답을 원하는 응답과 비교 분석함으로써 PI 이득을 조정하는 것이다. 이 과정은 Set Point의 변화 또는 외란의 투입등이 발생한 경우 항상 적용할 수 있기 때문에 제어성능의 감시와 성능개선에 효과적일 뿐 아니라 제안된 제어계통의 강인성 및 적응능력을 크게 향상시킬 수 있다.

2.1 Relay 궤환에 의한 초기 이득 결정

Relay 궤환에 의한 Tuning 기법의 기본 개념은 많은 프로세스가 Relay 궤환 상황에서 Limit Cycle을 가지는 진동을 하며 이러한 Limit Cycle로부터 Tuning에 필요한 임계이득 (K<sub>pc</sub>) 와 임계주파수, f<sub>c</sub>)가 구해진다는 사실이다. 이에 대한 해석적 입증은 Åström (10)에 잘 나타나 있으며 진동조건 및 Relay 궤환시 편차신호는 다음 식 (1),(2)와 같다.

Relay 크기가 d 일때 편차신호 e 의 크기 a :

$$a = \frac{4d}{\pi} |G(j\omega_c)| \quad (1)$$

진동 조건 :

$$\begin{aligned} \arg G(j\omega_c) &= -\pi \\ K_{pc} &= \frac{4d}{\pi a} = \frac{1}{|G(j\omega_c)|} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 G(jω<sub>c</sub>)는 미지의 모델이므로 K<sub>pc</sub> 와 f<sub>c</sub> = 1/T<sub>c</sub>는 설정된 Relay의 크기 (d)와 진동주기 (T<sub>c</sub>) 및 편차신호의 크기 (a)를 이용하여 결정한다. 일단 K<sub>pc</sub>와 T<sub>c</sub>가 얻어지면 PI 제어기의 각 이득은 식 (3)으로 결정할 수 있으며 이 이득은 Set Point 변화시 출력응답의 오버슈트가 일반적으로 1/4 감쇄비 (Quarter Decay Ratio)를 갖도록 설정된 값이다.

PI의 경우 : K<sub>p</sub> = K<sub>pc</sub>/2.2, τ<sub>i</sub> = T<sub>c</sub>/1.2  
 PID의 경우 : K<sub>p</sub> = K<sub>pc</sub>/1.7, τ<sub>i</sub> = T<sub>c</sub>/2, τ<sub>d</sub> = T<sub>c</sub>/8 (3)

2.2 제안된 이득 재조정 과정

제안된 기법은 모든 적응 제어기법이 목표하고 있는 사항 즉, 프로세스의 다양성, 복잡성, 시변성, 비선형성을 처리할 수 있는 일반성을 확보하기 위하여 원하는 응답과 실제 응답을 비교하여 PI제어기의 이득을 결정하는 매우 간단한 Tuning 방법이다.

Relay 궤환에 의해 계산된 초기 PI제어기 이득을 적용하여 발생된 출력응답의 과도특성을 분석하여 이득 재조정 (Re-Tuning)을 위한 정보를 추출하고 제어상황 변화시 이 정보에 근거하여 제어기 이득을 재조정하는 것이다.

PI제어기 이득 조정에 사용되는 정보는 출력응답의 첫번째 오버슈트의 양의 편차 평균치 (비레이득 조정)와 첫번째 과도응답의 한 주기에 대한 편차의 평균치 (적분이득 조정)이다. 이들 정보의 추출 가능성은 이 출력 응답이 1/4 감쇄 규칙에 의하여 결정된 제어기 이득을 적용하여 얻어진 결과이기 때문에 일반적으로 30% 정도의 오버슈트를 나타낸다는 사실에서 쉽게 이해될 수 있다. 그러나 상당한 크기의 잡음에 의하여 오염된 측정 데이터로부터 편차적분 구간인 기준 교차점 (Zero Crossing Point)을 결정하는 것은 바람직하지 않으므로 여기에서는 편차의 적분 구간으로 그림 2.2와 같이 다음의 시점 (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>)을 사용하였다.

- T<sub>1</sub> : 편차 적분의 하한으로써 응답이 지정된 오버슈트 준위를 초과한 이후의 임의 시점 (단, 최대 오버슈트 발생 이전)
- T<sub>2</sub> : 첫번째 오버슈트가 음의 편차로 되기 이전의 임의 시점 (단, 최대 오버슈트 발생 이후)
- T<sub>3</sub> : 첫번째 과도응답 중 음의 편차구간이 끝나기 이전의 임의 시점

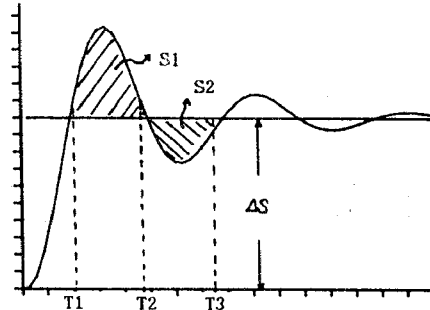


그림 2.2 편차 적분구간 결정 (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>)

따라서 첫번째 과도응답 중 비레이득 조정에 이용되는 양의 편차 평균치와 적분이득 조정에 사용되는 편차의 평균치는 각각 식 (4),(5)와 같다.

$$\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \frac{E(t)}{\Delta S} dt \quad (4)$$

$$\frac{1}{T_3 - T_1} \int_{T_1}^{T_3} \frac{E(t)}{\Delta S} dt \quad (5)$$

여기서 E(t)는 기준 입력과 출력과의 편차를 나타내며, ΔS는 기준입력의 변화 크기이다.

첫번째 과도응답에서 위의 정보가 결정된 경우 PI 제어기의 이득 조정식은 다음과 같다.

$$K_p = K_{p0} \left[ 1 + \frac{K_1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \frac{E(t)}{\Delta S} dt \right]$$

$$K_i = K_{i0} \left[ 1 + \frac{K_2}{T_3 - T_1} \int_{T_1}^{T_3} \frac{E(t)}{\Delta S} dt \right] \quad (6)$$

식 (6)에서 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>는 이득조정시 편차에 따른 적응 속도를 조정하는 역할을 하는 조정 인자, K<sub>p0</sub>, K<sub>i0</sub>는 Relay 궤환 Scheme 이후 구해진 제어기 이득이며 K<sub>p</sub>, K<sub>i</sub>는 새로 조정된 이득값이다. 조정 인자 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>는 K<sub>p</sub>, K<sub>i</sub>가 양의 값을 유지하도록 식 (7)을 만족하도록 선정하여야 한다.

$$\begin{aligned} \int_{T_1}^{T_2} E(t) dt &> \frac{(T_1 - T_2) \Delta S}{K_1} \\ \int_{T_1}^{T_3} E(t) dt &> \frac{(T_1 - T_3) \Delta S}{K_2} \end{aligned} \quad (7)$$

2.3 적응 속도 조정인자 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> 결정 방법

식 (7)에서 조정인자 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>의 상한치가 결정될 수 있다. 그러나 실제로 상한치에서는 적응 속도는 빠르지만 때 적응시 큰 폭으로 PI 이득이 감소하게 되어 응답이 Overdamp 되고 제어성능을 저하시킬 위험이 있으므로 적절한 비율로 이득을 조정시킬 필요가 있다.

본 연구에서는 이러한 위험을 방지하기 위하여 초기 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>를 작게 선정하고 때 적응시 상한치의 20~50%씩 감소시키는 방법을 사용하였다. 따라서 다음식 (8)과 같은 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> 결정식을 얻을 수 있다.

$$K_1 = \frac{(T_1 - T_2) \Delta S}{C_1 \int_{T_1}^{T_2} E(t) dt}, \quad K_2 = \frac{(T_1 - T_3) \Delta S}{C_2 \int_{T_1}^{T_3} E(t) dt} \quad (8)$$

여기서 C<sub>1</sub>과 C<sub>2</sub>는 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>의 감소 비율로서 2~5의 값을 갖도록 선정하였다.

3. 수치에 및 시뮬레이션 비교

a) 수치에

본 연구의 시뮬레이션에 사용된 계통은 그림 3.1의 열교환기로 게루프 전달함수가 식 (9)와 같은 3차 모델을 선정하였다.

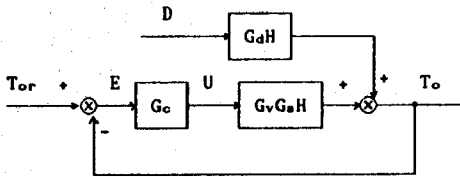


그림 3.1 등가 열 교환기 온도제어 계통도  
Fig. 3.1 Simplified Equivalent Block Diagram For Heat Exchanger Temperature Control

$$G(s) = \frac{1}{10s+1} \frac{50}{30s+1} \frac{0.016}{3s+1} \frac{0.8}{(10s+1)(30s+1)(3s+1)} \quad (9)$$

b) K1, K2 에 대한 응답 비교

적응 속도를 결정하는 속도인자 K1, K2가 각각 K1=K2=0.5, K1=K2=1.5, K1=K2=2.0 인 경우를 비교한 결과를 그림 3.2 에 나타내었다. 그림에서 알수 있듯이 K1, K2 가 클수록 빨리 적응됨을 보이고 있다.

c) Set Point 변화에 대한 응답

계통의 기존 신호가 변화했을때 제안된 알고리즘을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우를 그림 3.3에 비교 도시하였다. 그림에서 알수 있듯이 제안된 알고리즘에 의한 이득 조정시 몇 회의 적용에 의하여 Set Point 추종 성능이 매우 우수함을 알 수있다.

d) 외란에 대한 응답

외란 제거효과를 알아보기 위하여 2300 초이후 Set Point 의 30 % 크기를 갖는 외란을 투입시킨 응답을 그림 3.4 에 비교 도시하였다.

e) 파라미터 변동에 대한 응답

2300 초이후 계통의 파라미터가 20 % 변화했을 경우의 Set Point 추종 성능을 그림 3.5 에 도시하였다.

4. 실험 결과

본 논문에서 제안한 적응 알고리즘의 타당성을 확인하기 위하여 실험용 열교환기에 적용 실험하였다. 본 실험에서는 일정한 냉수의 공급하에서 유입온수량을 제어함으로써 출력되는 온수의 온도를 일정하게 유지시키는 것을 제어 목적으로 하였다.

그림 4.1 은 본 논문에서 제안한 Relay 규환에 의한 선조정 (Pre-Tuning) 과정에 의하여 초기이득을 결정한 후 적응알고리즘을 적용한 응답으로 Sampling 시간을 5 초로 하여 5000 초동안 Set Point 35℃ 와 40℃ 를 500 초마다 반복 추종토록 한 경우이고, 제어입력은 스텝 모터를 구동시키는 펄스 수이다. 표 4.1에 나타난 것처럼 약 4500 초가 지난 후에는 원하는 Set Point로 잘 추종됨을 알 수 있다.

표 4.1 실험에 의한 제어기 이득의 변화  
Table 4.1 Changes Of The PI Gains

단 계 ( 회 )	이득 변화	
	Kp	T1
초 기	1910.000	0.01233
1	1227.993	0.01311
2	943.577	0.01417
3	748.965	0.01398
4	606.624	0.01319
5	562.259	0.01308

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 PI 제어기의 문제점을 해결하기 위하여 이득 선조정 과정과 재조정 과정을 통해 제어환경 변화시의 이득을 응답의 출력패턴으로 개선시키는 알고리즘을 제안하였다. 또한 본 연구에서 제안한 기법의 타당성을 검토하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 실제용인 열교환기에 적용 실험하였다. 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- i) 기존의 PI 제어기로 제어하기 어려운 잡음, 시간 지연, 비선형성을 갖는 계통에서 Set Point 추종 성능이 개선됨을 알 수 있었다.
- ii) 추종속도가 바르며 3~4 회 정도의 적응으로 원하는 응답을 얻을 수 있었다.

앞으로 본 논문에서 제안된 적응기법의 몇가지 경험적인 적응 인자를 Fuzzy 화시키고 측정상의 정확성을 높인다면 더욱 개선된 제어기가 구성될 것이며, 동작 범위가 보다 큰 현장 계통에 적용시킴으로써 그 유용성을 확인할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. C.A.Smith, A.B.Corrypio, Principles and Practice of Automatic Process Control. John Wiley & Sons, 1985.
2. Y.Nishikawa, et al, " A Method for Auto-Tuning of PID Control Parameters ", Automatica, vol.20, no.3, pp 321-332, 1984.
3. K.J.Åström, B.Wittenmark, Adaptive Control. Addison-Wesley Pub, 1989.
4. C.L.Nachtigal, " Adaptive Controller Performance Evaluation : Foxboro EXACT and ASEA Novatune ", ACC, vol. pp.1428-1433,
5. E.Higham, " Expert Systems in Self-Tuning Controllers ", Chemical Engineer, pp.41-43, MAR. 1986.
6. -----, " A Different Approach for Self-Tuning in Process Controllers-the Case for Introducing an Expert System", Measurement and Control, vol.19, NOV. 1986.
7. E.H.Bristol, et al, " Adaptive Process Control by Pattern Recognition ", Instrument and Control Systems, pp.101-105, MAR. 1970.
8. -----, " The Design of Industrially Useful Adaptive Controllers ", ISA Trans. vol.22, no.3, pp.17-25, 1983.
9. J.G.Ziegler, N.B.Nichols, " Optimum Settings for Automatic controllers ", Trans. ASME. vol.64, pp 759-768, NOV. 1942.
10. K.J.Åström, B.Wittenmark, Adaptive Control. Addison-Wesley Pub, 1989.
11. T.W.Karus, T.J.Myron, " Self-Tuning PID Controllers Pattern Recognition Approach", Control Eng. pp.106-111, JUN. 1984.

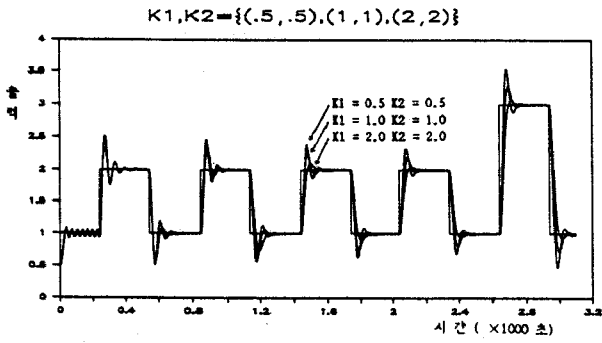


그림 3.2 적응 속도 인자 (K1, K2)에 따른 응답

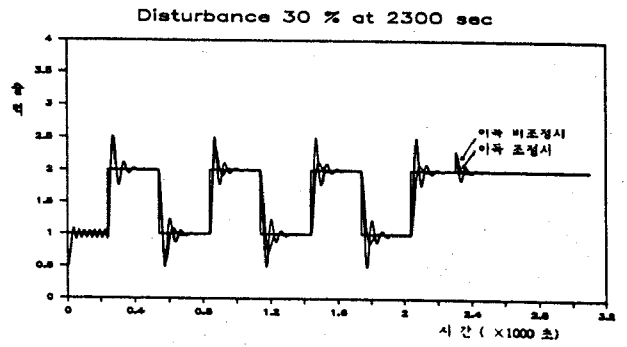


그림 3.4 외란 투입에 대한 응답

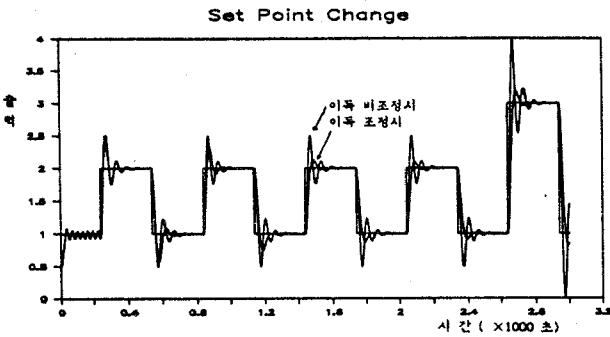


그림 3.3 Set Point 변화에 대한 응답

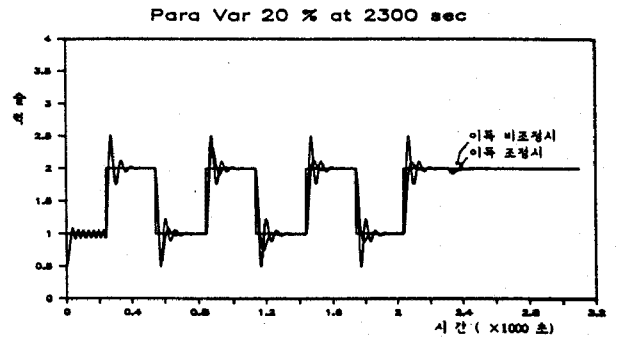


그림 3.5 파라미터 변동에 대한 응답

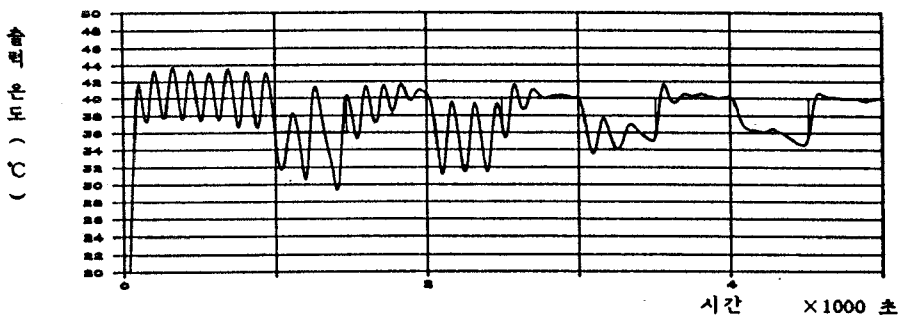


그림 4.1 Set Point 변화에 대한 응답 (실험 결과)