

공정용 PID 제어기의 자동동조 시스템 설계

Auto-tuning System Design for Process PID Controllers

°신창훈*, 윤명현*, 박익수*

*한국전력공사 전력연구원 (Tel: +82-42-865-5759, Fax: +82-42-865-7704, E-mail: hoony@kepri.re.kr)

Abstract The auto-tuning system for process PID controllers has been developed. The system is composed of a portable notebook PC based data acquisition kit and application softwares. After acquiring the measured process and controller output signals with appropriate time interval, the system identifies the unknown process and computes the PID control parameters which guarantee optimal process control on the present operating conditions. The controller design rule used in this system is derived as it minimizes the average mean squared error between desired closed-loop step response and that of the identified process. In addition, the system analyzes the control stabilities and performances of the old and new control parameters. As an useful PID parameter analyzer, the system contributes to reliable process operation.

Keywords Process Control, PID Control, Auto-tuning, System Identification

1. 서론

PID 제어기는 구조가 단순함에도 불구하고 양질의 제어성능을 발휘하기 때문에 산업현장의 제어요원에게는 아주 친숙한 범용 제어기로 일반화되어 있다. PID 제어기가 적절한 제어성능을 나타내기 위해서는 제어대상인 프로세스의 특성을 다각도로 파악하여 이에 상응하는 정확한 제어 파라미터를 선정하는 제어기 동조가 중요하다. 그러나, 제어기 동조는 경험적인 방법에 기반을 두고 있기 때문에 다수의 노력, 시간 및 비용 등을 요구하며 특별한 이론적인 근거가 없으므로 파라미터의 타당성 규명에도 어려움이 있다.

1943년 Ziegler와 Nichols^[9]가 PID 제어기의 동조에 관한 일반적인 기법을 발표한 이래 PID 제어기의 동조과정을 자동화하는 자동동조에 관한 연구가 활발히 전개되어 왔다. 자동동조 기법은 프로세스의 특성을 파악하는 방법에 따라 크게 유한진동(limit oscillation)을 이용하는 방식과 system identification을 이용하는 방식으로 구분된다. Åström과 Hägglund^{[1][2]}는 릴레이 피드백을 이용하여 유한진동 응답을 발생시켜 프로세스 특성 정보를 추출하였고, Melo와 Fiedly^[5]는 온라인 프로세스 모델 추정 기법을 개발하였으며, Sung과 Lee^[7]는 기존의 모델 추정 기법을 개선하였다. 확인된 프로세스 정보로부터 Ziegler-Nichols 계산식, Åström과 Hägglund가 제안한 이득여유 및 위상여유 설정 계산식 및 Zhuang^[8] 등이 최적제어 이론을 도입하여 만든 ISTE 최적 파라미터 계산식 등을 이용하여 PID 제어기 파라미터를 결정함으로써 자동동조 과정은 완료된다. 자동동조 기법을 응용한 PID 제어기는 다수의 업체에서 다양하게 상용화되고 있지만, 현장에서는 기존 제어기를 이러한 기능의 제어기로 교체하기를 기피하는 경향이 있다. 일반적으로 자동동조 기능을 가진 제어기를 적용했을 때 프로세스 운전의 안정성 혹은 경제성의 측면에서 신뢰할 만한 검증자료를 제시하기가 어렵고 새로운 시스템에 대한 유지보수의 어려움이 있기 때문이다.

본 논문에서는 이러한 현장의 어려움을 감안하여 공정제어 루프에서 운용중인 기존의 PID 제어기에 대하여 현재의 제어 파라미터에 대한 운전데이터를 취득한 후, 현상항에 가장 적합한 새로운 제어 파라미터를 계산하여 제시하고, 이전 파라미터와 성능을 비교, 분석하는 기능을 가진 PID 제어기 자동동조 시스템의

설계 및 개발에 관한 내용을 다루었다. 자동동조 시스템은 노트북 PC를 포함한 프로세스 입출력 신호 취득 하드웨어 시스템과 자동동조 작업의 전반적인 환경을 제공하고 취득된 데이터로부터 필요한 여러 사항을 분석하고 계산하는 소프트웨어 시스템으로 구성된다. 자동동조 과정에서 사용되는 동조기법은 취득된 프로세스 입출력 데이터로부터 system identification 기법을 이용하여 최적의 제어 파라미터를 제시할 수 있도록 구현하였다. 개발된 시스템의 타당성은 다양한 프로세스 모델에 대한 실험을 통하여 입증하였다.

2. 시스템 구성

개발된 자동동조 시스템은 하드웨어 및 소프트웨어 시스템으로 구분된다. 시스템은 작업할 현장 프로세스 간의 이동이 편리하도록 설치 및 휴대가 간편한 구조로 개발되었다. 시스템의 개괄적인 구성을 그림 2-1에 나타냈다.

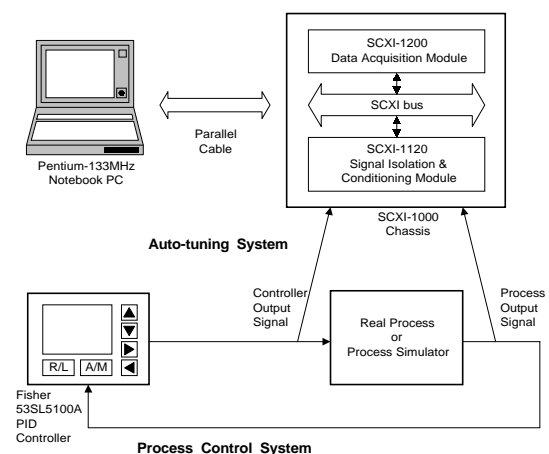


그림 2-1 자동동조 시스템 구성

Fig. 2-1 Auto-tuning system configuration

2.1 하드웨어 시스템

하드웨어 시스템은 노트북 PC와 National Instrument사의 SCXI-1000 Chassis를 기반으로 설계한 데이터 취득 시스템으로 구성된다. SCXI-1000 Chassis에는 아날로그 입출력을 담당하는 SCXI-1200 다기능 데이터 취득 모듈과 SCXI-1120 신호격리 및 조절 모듈이 탑재된다. 프로세스 시뮬레이터 혹은 실제 프로세스로부터 신호선을 통하여 전송되는 프로세스 입출력 신호는 SCXI-1120 신호격리 및 조절 모듈의 각 채널로 전송되고, 이 신호들은 다시 SCXI-1000 Chassis의 내부 Bus를 따라 SCXI-1200 데이터 취득 모듈의 각 채널로 전송된다. 각 채널별로 독립적으로 취득된 신호들은 SCXI-1000 Chassis 단말과 노트북 PC의 병렬포트 간을 연결하는 케이블을 통하여 노트북 PC의 메모리에 로드되어 자동동조 작업에 사용되거나 하드디스크에 저장된다.

2.2 소프트웨어 시스템

소프트웨어 시스템은 Microsoft사의 Visual Basic 4.0 환경에서 National Instrument사의 데이터 취득 관련 하드웨어의 제어를 위하여 Component Works 1.0을 이용하여 구축하였다. 소프트웨어 시스템은 총 4개의 GUI(graphic user interface) 모듈로 구분되어 있으며 자동동조 과정이 진행됨에 따라 다음 모듈로 작업이 이동된다.

2.2.1 환경설정 모듈

자동동조에 필요한 전반적인 작업환경을 설정한다. 여기서 자동동조를 실시할 프로세스명, 제어기명, 날짜 및 데이터 취득 장치의 채널 등을 설정한다.

2.2.2 신호취득 모듈

프로세스 전후단에서 자동동조에 필요한 신호를 측정하기 위하여 데이터 취득 장치를 제어하고 측정 신호의 필터링 및 조절 기능을 수행하며 측정된 신호를 편집 및 저장한다.

2.2.3 자동동조 모듈

취득된 프로세스 입출력 신호를 바탕으로 System identification 알고리즘을 이용하여 해당 프로세스의 모델을 결정하고 최적 PID 파라미터를 계산한다.

2.2.4 모의실험 모듈

현재 프로세스 환경에 적절한 PID 제어기 파라미터가 구해졌는지 검증할 수 있도록 이전 파라미터에 대한 제어성능과 새 파라미터에 대한 제어성능을 비교할 수 있게 한다.

3. 자동동조 알고리즘

자동동조 작업의 흐름도를 그림 3-1에 나타냈다. 제시된 자동동조 알고리즘은 프로세스의 입출력 신호를 취득한 후 프로세스의 모델을 결정하고 여기에 적합한 최적 PID 제어 파라미터를 계산하는 과정으로 이루어진다.

3.1 프로세스 모델

연속시간 영역에서 시간지연이 있는 미지의 프로세스 전달함수 $G_p(s)$ 는 system identification 과정을 통하여 이산시간 영역의 전달함수

$$\hat{G}_p(z) = \frac{z^{-d}(b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n})}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}} \quad (1)$$

로 추정된다. 프로세스는 d 시간지연을 가진 n 차 ARMA (Auto-Regressive Moving Average) 모델로 표현되며, 모델의 계수는 일정한 샘플링 간격 T_s 로 측정된 프로세스 출력 $y(k)$ 와 프로세스 모델 차분 방정식 $y_M(k)$ 사이의 평균 자승 오차를

최소화하는 값으로 선택된다. 즉, 다음의 성능지수 J_1 을 최소화하는 계수를 구하는 것이 프로세스 모델 계수 추정의 목표가 된다.

$$J_1 = \sum_{k=0}^{N-1} \{y(k) - y_M(k)\}^2 \quad (2)$$

여기서 $y(k)$ 는 프로세스 출력 신호이며 $y_M(k)$ 는 다음의 차분 방정식을 만족하는 프로세스 모델 차분 방정식이다.

$$y_M(k) = b_1u(k-1-d) + b_2u(k-2-d) + \dots + b_nu(k-n-d) - a_1y_M(k-1) - a_2y_M(k-2) - \dots - a_ny_M(k-n) \quad (3)$$

비선형 최소 자승 함수 J_1 은 Levenberg-Marquardt^[4] 알고리즘을 사용하여 푼다.

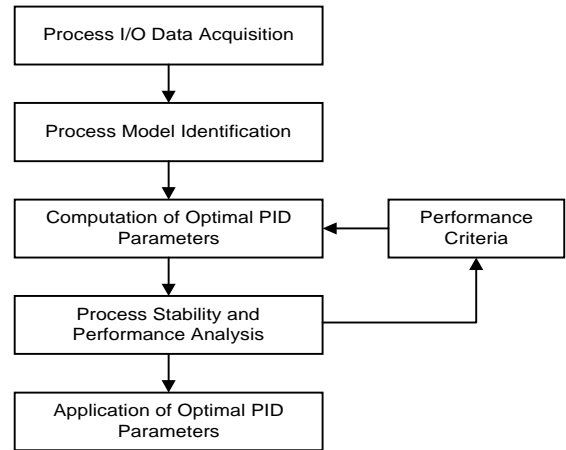


그림 3-1 자동동조 작업의 흐름도
Fig. 3-1 The flow diagram of auto-tuning procedure

3.2 제어 시스템 모델링

연속시간 영역에서의 PID 제어기 전달함수

$$G_c(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (4)$$

를 고려한다. 제어기는 비례이득(K_p), 적분시간(T_i) 및 미분시간(T_d)을 포함한다. 이산시간 영역에서의 PID 제어기 전달함수 $\hat{G}_c(z^{-1})$ 로 표현하기 위하여 후방 차분 근사법을 이용하면 s 는 $(1-z^{-1})/T_s$ 로 근사화시킬 수 있으며

$$\hat{G}_c(z^{-1}) = K_p \left[1 + \frac{T_s}{T_i} \frac{1}{1-z^{-1}} + \frac{T_d}{T_s} (1-z^{-1}) \right] \quad (5)$$

로 표현된다. 식(1)과 식(5)로부터 프로세스 제어계통의 폐루프 전달함수 $\hat{G}(z^{-1})$ 는

$$\hat{G}(z^{-1}) = \frac{\hat{G}_c(z^{-1}) \hat{G}_p(z^{-1})}{1 + \hat{G}_c(z^{-1}) \hat{G}_p(z^{-1})} \quad (6)$$

로 표현된다.

3.3 성능지표

제어계통의 희망 응답 특성을 설정하기 위해 폐루프 전달함수가 다음의 전달함수로 근사화 된다고 가정한다. 즉, 제어계통이 다음 전달함수의 극점을 우세극점으로 가진다고 가정한다.

$$G_d(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (7)$$

여기서 ω_n 은 자연 주파수이고 ζ 는 제동비이다. 희망하는 페루프 전달함수의 계단 응답은

$$g_d(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \phi) \quad (8)$$

이다. 여기서

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{-\zeta}$$

이다.

적당한 자연 주파수와 제동비를 선택함으로써 희망하는 상승 시간과 최대 오버슈트를 갖는 프로세스의 성능지표를 결정할 수 있다.

3.4. PID 제어기 파라미터 계산

제어계통의 페루프 단위 응답과 희망하는 페루프 단위 응답 사이의 평균 자승 오차를 최소화하는 최적 PID 제어기 파라미터를 결정하기 위해서 다음의 성능지수가 사용된다.

$$J_2 = \sum_{k=0}^{N-1} \{g_d(k) - \hat{g}(k)\}^2 \quad (9)$$

여기서 $\hat{g}(k)$ 는 식(6)을 풀므로써 결정되는 프로세스 제어계통의 페루프 계단 응답이다.

성능지수 J_2 를 최소화하는 필요조건은 $\nabla J(K_p, T_i, T_d) = 0$ 이다. 즉,

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{N-1} \{g_d(k) - \hat{g}(k)\} \frac{\partial \hat{g}(k)}{\partial K_p} &= 0 \\ \sum_{k=0}^{N-1} \{g_d(k) - \hat{g}(k)\} \frac{\partial \hat{g}(k)}{\partial T_i} &= 0 \\ \sum_{k=0}^{N-1} \{g_d(k) - \hat{g}(k)\} \frac{\partial \hat{g}(k)}{\partial T_d} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

이다. 최적 PID 제어 파라미터 K_p , T_i 및 T_d 는 비선형 최소자승 문제인 식(9)와 식(10)을 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 이용하여 풀므로써 구한다.

4. 실험 및 고찰

개발된 자동동조 시스템의 기능을 검증하기 위하여 그림 2-1과 같이 시스템을 구성하여 실험하였다. 여기서 사용된 프로세스 시뮬레이터는 Pentium-pro 200MHz PC 환경에서 프로세스의 동역학을 계산하고 내부 입출력 카드를 통해 Fisher 53SL5100A PID 제어기와 연결되어 실제 프로세스 운전환경을 모사한다. 실험에 사용된 프로세스는 다음과 같다.

실험1 - 시간지연이 작고 응답이 빠른 프로세스

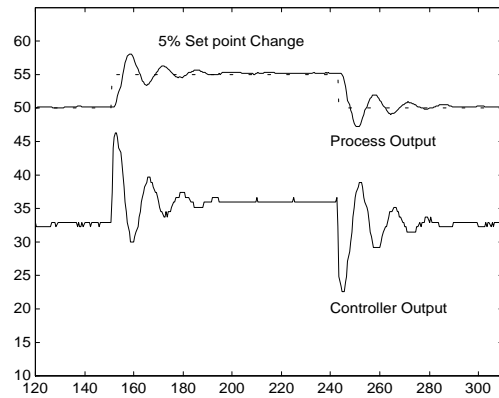
$$G_p(s) = \frac{1}{(3s+1)(5s+1)} e^{-0.5s} \quad (11)$$

실험2 - 시간지연이 크고 응답이 느린 프로세스

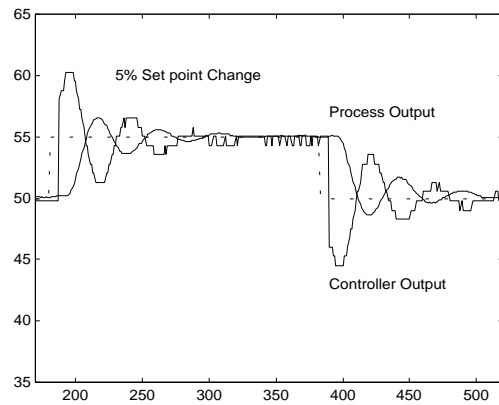
$$G_p(s) = \frac{1}{(2s+1)(7s+1)(10s+1)} e^{-5s} \quad (12)$$

이들 프로세스를 식(1)과 같은 ARMA 모델로 추정하기 위하여 프로세스 출력 및 제어기 출력신호를 취득하였다. 이때 프로세스는 설정치 50%에서 정상상태 운전중 5%의 설정치 변경을 통하여 프로세스의 과도응답이 발생할 수 있도록 하였다. 프로세스

운전중 설정치를 변경하기가 곤란할 경우에는 프로세스의 기동 및 정지시의 과도 데이터를 사용하거나 운전중 발생하는 과도 데이터를 이용할 수도 있다.



(a) 실험1



(b) 실험2

그림 4-1 취득된 운전데이터

Fig. 4-1 Acquired operation data

취득된 신호를 바탕으로 각 프로세스 모델의 계수를 추정하였다. 프로세스 모델은 각각 2차 및 3차의 이산형 ARMA 모델로 추정되었으며 오차가 10^{-3} 보다 작은 범위에서 수렴할 때 까지 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 반복하여 수행하였다. 실험2에서 취득신호를 바탕으로 추정된 시간지연은 6 샘플링 시간으로 추정되었다.

표 4-1 추정된 프로세스 계수

Table 4-1 Estimated process coefficients

계수	실험1		실험2	
	2차	3차	2차	3차
a_1	-1.7238e 0	-9.1759e-1	-1.7837e 0	-2.0734e 0
a_2	7.3962e-1	-6.4433e-1	7.9565e-1	1.3227e 0
a_3		5.9085e-1		-2.4006e-1
b_1	-1.7133e-2	-7.9955e-3	6.2685e-3	2.1821e-2
b_2	4.1359e-2	7.5491e-3	5.8585e-3	-2.9972e-2
b_3		4.4850e-2		1.7540e-2

추정된 모델과 식(7)에 나타낸 성능지표를 바탕으로 희망하는

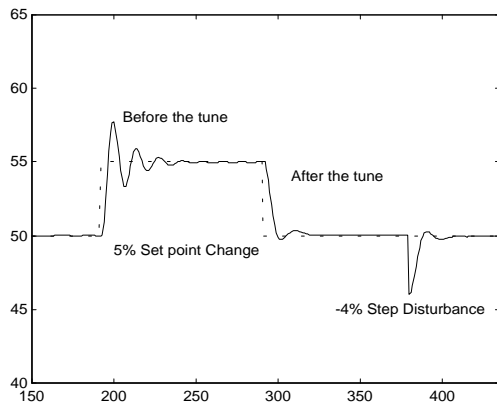
프로세스 응답을 결정하고 이때의 최적 PID 파라미터를 계산하였다. 실험1에서는 희망하는 성능지표를 $\zeta=0.8$, $\omega_n=0.4$ 로 설정하였고, 실험2에서는 $\zeta=0.8$, $\omega_n=0.1$ 로 설정하였다.

표 4-2 계산된 PID 제어기 파라미터
Table 4-2 Calculated PID parameters

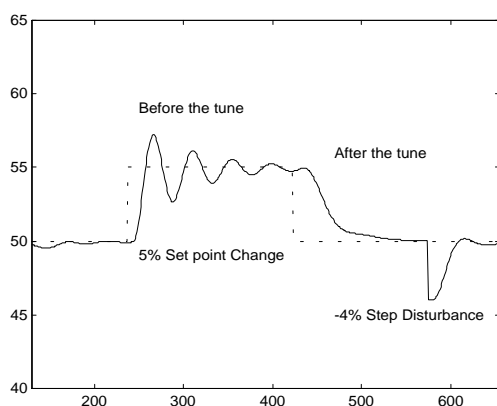
실험1	PI 제어기		PID 제어기		
	K_p	T_i	K_p	T_i	T_d
2차	1.099	8.594	1.067	7.110	0.975
3차	1.098	8.571	1.067	7.093	0.976

실험2	PI 제어기		PID 제어기		
	K_p	T_i	K_p	T_i	T_d
2차	0.868	18.517	0.860	14.797	5.359
3차	0.867	18.436	0.860	14.727	5.429

새로 계산된 파라미터들 중 2차 프로세스 모델에 대한 PI 제어 파라미터를 이용하여 각 프로세스를 시뮬레이터를 통해 운전하면서 제어 성능을 관찰하였다. 5%의 계단형 설정치 변경에 대한 설정치 추정성능과 4%의 계단형 외란에 대한 외란 억제성능을 그림 4-2에 나타냈다.



(a) 실험1



(b) 실험2

그림 4-2 프로세스 시간응답

Fig. 4-2 Time responses of the processes

동조전의 제어 파라미터에 대한 프로세스의 응답은 실험1과 실험2 모두 오버슈트가 크고 정상상태 도달시간이 긴 특성을 보였지만 자동동조 시스템을 이용하여 계산한 제어 파라미터를 적용함으로써 우수한 설정치 추종성능과 외란 억제성능을 보였다.

실험을 통하여 확인된 자동동조 시스템의 장점은 우선 프로세스를 정지하지 않고 정상적으로 운전하면서 그 프로세스의 최적 제어 파라미터를 계산하고 성능을 분석할 수 있다는 것이며, 제어 파라미터는 설정하는 성능지표에 따라 다양하게 계산될 수 있으므로 제어 파라미터 계산시 프로세스의 물리적인 특성을 고려한 실질적인 최적 제어 파라미터를 계산할 수 있다는 것이다.

5. 결론

자동동조 시스템은 휴대형 노트북 PC 기반의 데이터 취득 시스템과 응용 소프트웨어로 구성되어 현장 프로세스 간의 이동시 휴대 및 분리가 용이하게 제작되었다. 자동동조 시스템은 일정한 시간 간격으로 프로세스 출력 및 제어기 출력신호를 취득하여 미지의 프로세스 모델을 결정하고 현재의 운전조건에 가장 적합한 최적 PID 제어 파라미터를 계산한다. 최적 PID 파라미터는 설계자가 지정하는 시간영역에서의 프로세스 페루프 단위 응답과 추정된 프로세스의 페루프 단위 응답 사이의 평균 자승 오차를 최소화시키는 과정에서 구하여 진다. 또한, 자동동조 시스템은 기존 제어 파라미터와 새로이 계산된 파라미터의 제어 안정도 및 성능을 분석하는 기능을 제공한다. 개발된 시스템의 타당성을 다양한 프로세스 실험을 통하여 검증하였다. 향후 자동동조 시스템의 더욱 광범위한 프로세스 실증실험과 작업 진행의 편의성과 신뢰성 향상을 통하여 여러 산업현장에서 공정 PID 제어제통의 신뢰성있고 효율적인 운전에 기여하고자 한다.

참고문헌

- [1] K. Åström and T. Hägglund, "Automatic tuning of simple regulator with specifications on phase and amplitude margins," *Automatica*, vol. 20, pp. 645-651, 1984.
- [2] K. Åström and T. Hägglund, "Automatic Tuning of PID Controllers," Instrument Society of America, 1988.
- [3] B. Kuo, "Automatic Control Systems", Prentice-Hall, 1987.
- [4] L. Ljung, "System Identification: Theory for the User". Prentice-Hall, 1987.
- [5] D. Melo and J. Friedly, "On-line, closed-loop identification of multivariable systems," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 31, pp. 274, 1992.
- [6] C. Phillips and H. Nagle, "Digital Control System Analysis and Design", 2nd ed. Prentice-Hall, 1990.
- [7] S. Sung and I. Lee, "On-line Process identification method and automatic tuning of PID controllers," *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1995.
- [8] M. Zhuang and D. Atherton, "Automatic tuning of optimum PID controllers," *IEE Proceedings*, vol. 140, no. 3, 1993.
- [9] J. Ziegler and N. Nichols, "Optimum setting for automatic controllers," *Trans. ASME*, vol. 65, pp. 433-444, 1943.