

원자력발전소 PID 공정제어기에 대한 튜닝 최적화 방법

성찬호[†] · 민문기^{*}

A Method of Tuning Optimization for PID Controller in Nuclear Power Plants

Chan Ho Sung[†] and Moon Gi Min^{*}

(Received 9 April 2014, Revised 23 June 2014, Accepted 24 June 2014)

ABSTRACT

PID(Proportional, Integral, Derivative) controller is one of the most used process controllers in nuclear power plants. The optimized parameter setting of process controller contributes to the stable operation and efficiency in the operating nuclear power plants. PID parameter setting is tuned when new process control system is established or process control system is changed. It is a burdensome work for I&C(Instrument and Control) engineers to tune the PID controller because it requires a lot of experience and knowledge. When the plant is in operation, inadequate PID parameter setting can be the cause of the unstable process of the plant. Therefore the results of PID parameter setting should be compared, simulated, verified and finally optimized. The practical PID tuning methods used in process controller are tuning operation calculation(Ziegler-Nicholes, Minimum TIAE, Lambda, IMC), exclusive tuning program based on computer and Matlab application. This paper introduces the various tuning methods and suggests an optimized PID tuning process in the operating nuclear power plants.

Key Words : Nuclear Power Plant(원자력발전소), PID Controller(PID 제어기), Process Control System(공정제어시스템), Tuning(조정)

1. 서론

산업 플랜트의 계측제어설비에 사용되는 공정제어기(Process Controller)는 공정의 입력이 변할 경우 적절하지 못한 PID 설정치는 오버슈팅이나 언더슈팅의 발생 가능성을 내포하고 있다. 공정제어기의 튜닝 최적화는 플랜트의 효율향상과 안정운전에 직·간접적인 영향을 준다. 원자력발전소의 공정제어기는 대부분 비례-적분-미분 제어기(PID 제어기)를 사용한다. PID 공정제어기는 구현이 쉽고 성능과 신뢰

도가 높아 산업계 전반에 널리 사용되고 있다. 발전소에서 PID 공정제어기의 변수 설정은 새로운 공정시스템이 설치되거나 공정시스템의 변화가 있을 때 수행한다. PID 공정제어기의 튜닝은 발전소가 상업운전을 하지 않는 경우는 엔지니어가 경험과 지식으로 공정제어기의 PID 변수 설정치를 조절해 가면서 공정시스템을 최적화 할 수 있으나, 발전소가 상업운전 중인 경우 적절하지 못한 PID 변수 설정은 발전소 계통을 더욱 불안정하게 만들 수 있다. 따라서 운전중인 발전소의 PID 변수 설정은 이를 수행하기 이전에 다양한 튜닝 방법으로 비교, 모사, 검증의 튜닝 최적화 과정이 요구된다. PID 제어기의 튜닝 방법으로는 널리 알려진 지글러-니콜스, Minimum ITAE, TMC, Lambda 등의 튜닝 연산식 방법이 있다.

[†] 책임저자, 회원, 한국수력원자력 중앙연구원
E-mail: chsung@khnp.co.kr
TEL: (042)870-5923 FAX: (042)870-5930

^{*} 한국수력원자력 엔지니어링처

또한 최근에는 PC기반 튜닝전용 프로그램과 Matlab 등을 활용하는 방법도 사용되고 있다.

본 논문은 PID 공정제어기의 다양한 튜닝 방법을 소개하고, 특히 운전중인 원자력발전소에 적용할 수 있는 PID 공정제어기의 튜닝 최적화 방법을 제시하고자 한다.

2. PID 공정제어기 튜닝 일반적인 방법

2.1 PID 제어기 구조

PID 제어기는 공정제어 분야에서 사용되는 대표적인 피드백 제어기(Feedback Controller)로서 원하는 공정 출력의 설정 값과 실제 공정의 물리적인 측정값의 오차를 비례, 적분, 미분 계산하여 밸브나 덤퍼 등의 액추에이터에 조작 값으로 입력함으로써 원하는 응답을 얻도록 하는 것이다. Fig. 1은 PID 제어기를 포함한 공정 블록 다이어그램의 일반적인 형태를 나타낸다. PID제어기는 제어하고자 하는 대상의 프로세스 현재 값(Process Value)을 측정하여 이를 목표하는 설정 값(Setpoint)과 비교하여 오차(Error)를 계산하고, 이 오차를 이용하여 제어에 필요한 튜닝 설정치를 구하는 구조이며, 제어기와 공정을 거친 값을 제어 출력값(Control Output, CO)이라고 한다. PID 튜닝(Tuning)이란 공정의 출력을 설정 값과 일치하도록 제어하기 위해 최적의 동특성 및 정특성을 나타내는 제어기의 설정치를 조정하는 것이다⁹⁾.

PID 제어기 알고리즘의 기본식은 설정 값과 공정 출력의 오차(error, e)에 비례하는 출력을 내는 비례동작(Proportional Action, P), 오차의 적분에 비례하는 출력을 내는 적분동작(Integration Action, I), 오차의 미분에 비례하는 출력을 내는 미분동작(Derivative Action, D)의 합으로 나타내지며 시간영역에서 다음과 같이 표현된다.

$$CO = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) + CO_0$$

여기서 CO : 제어기 출력, e : 오차, K_p : 비례이득, T_i : 적분시간(min or sec/Reset), T_d : 미분시간(sec), CO_0 : 제어기 출력의 초기치 또는 제어기 수동 상태에서 마지막 값이다. 이와 같은 시간영역의 식은 우변에 오차의 적분, 미분 항으로 인해 오차에 대한 제어출력의 전달함수 형태로 표현하기 어렵다. 따라서 다음과 같이 라플라스 연산자를 사용한 전달함수 형태도 자주 사용된다.

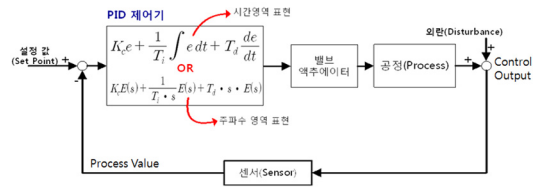


Fig. 1 Block diagram of process using PID controller

$$C(s) = \frac{CO(s)}{E} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

여기서 $C(s)$: PID 제어 전달함수, s : 라플라스 연산자이다. PID 동작 중 두 가지 동작만을 조합하여 PI, PD 제어기로 자주 사용된다.

2.2 튜닝 연산식 방법

공정제어 현장에서 사용되는 제어기 튜닝 방법은 크게 개루프 방법(Open Loop Method)과 폐루프 방법(Closed Loop Method) 방법이 있고 대부분의 튜닝 알고리즘은 개루프 방법을 사용하고 있다. 제어기 튜닝은 공정의 전달함수를 추정하는 공정 확인(Process Identification)과 튜닝 변수 연산의 두 단계를 거치게 된다.

공정 확인은 공정의 입력(또는 제어기 출력)에 변화를 줘서 공정의 전달함수를 추정하는 것이다. 공정의 모델을 수식으로 정확하게 모사하기 위해서는 공정의 입출력에 영향을 주는 변수에 대하여 미분방정식으로 나타내어야 하지만 고차의 미분 방정식으로 실제 공정에 가까운 모델을 구현해도 최적의 PID 제어기 튜닝 변수를 찾기는 어려우며 미세 튜닝 과정을 거쳐야 한다. 따라서 현장에서 주로 사용되는 방법은 공정의 입출력 관계를 시간지연을 가지는 1차함수로 추정하는 방법을 사용한다. 공정 확인을 통해 추정하는 1차 전달함수 형태는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$$

$$(\text{시간영역에서 } y(t) = K(1 - e^{-(t-\theta)/\tau}),$$

$$\text{단 } t \leq \theta \text{ 일 때 } y(t) = 0)$$

여기서 K : 공정이득, τ : 시정수(공정의 응답이 최종값의 63.2%에 도달하는 시간), θ : 시간지연이다. 1차 함수 추정방법을 계단응답법(Step Response

Method)이라 하며 Fig. 2와 같이 PID 제어기 출력 또는 구동기 입력에 계단입력을 가해 전달함수를 추정한다. 1차함수를 통해 공정의 입출력 특성을 정확하게 추정할 수 있는 경우는 드물다. 대부분의 공정의 경우 2차 이상의 고차 특성을 가지기 때문이다. 2차 이상의 고차 전달함수를 추정하는 방법에 대해서도 다양하게 소개되고 있지만 복잡하기 때문에 현장에서 이 방법을 통해 PID 튜닝을 실시하는 경우는 적다. 따라서 1차 전달함수 추정을 통한 튜닝 변수 설정 후 미세튜닝을 하는 방식이 주로 사용되고 있다. 계단응답법의 순서는 제어기를 수동모드로 전환하고 공정의 출력이 안정해질 때까지 기다린 후 제어기 출력이 계단변화를 가한다. 공정에 영향이 적을 경우는 제어기를 자동모드로 계단입력을 인가하기도 한다. 그리고 공정의 출력이 변화하여 새로운 안정 지점에 도달하면 공정이득, 시정수, 시간지연이 확인된다.

폐루프에서 공정을 확인하는 다른 방법은 적분 상수(T_i)는 ∞ , 미분 상수(T_d)는 0로 놓고, 비례이득(K_p)을 작은 값부터 시작하여 목표치를 변경하여 제어밸브응답이 무한진동(Ultimate Oscillation)을 보일 때까지 비례이득을 증가시켜 무한진동 일 때 최대주기(Period, Pu)와 제어기 최대 이득(Gain, Kcu)을 구하는 것이다. 가동 원전에서는 안정운전이 최우선이므로 무한진동을 할 수 없어 이 방법을 사용하지 않고 단위 기기 운전이나 시운전 등에 사용할 수 있다. 공정 확인을 통해 공정이득, 시정수, 시간지연이 추정되면 다양한 방법의 PID 튜닝 알고리즘을 통해 제어기의 비례, 적분, 미분 상수를 연산한다. 현장에서

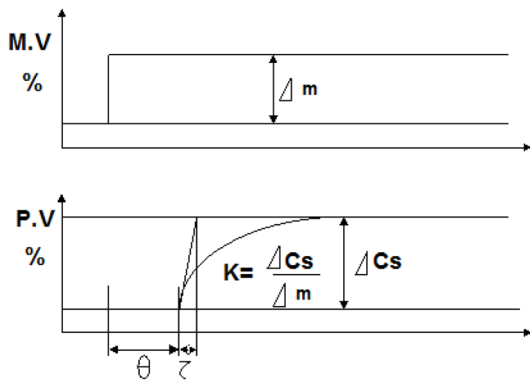


Fig. 2 Process identification using open loop tuning method

자주 사용되는 튜닝 연산식은 지글러-니콜스, Minimum TIAE(Integral of the Time-weighted Absolute Error), Lambda, IMC(Internal Model Control) 등이 있다. 지글러-니콜스 방법은 페루프 방법, 개루프 방법 두 가지에 대해 변수 연산 방법을 제시하고 있으며 개루프 방법에 의한 연산식은 Table 1과 같다. 지글러-니콜스 방법은 설정 값의 계단변화에 대해 공정의 출력이 1/4 감쇠비를 가지는 것을 목표로 한다. 따라서 진동이 심한 공정이나 안정적인 제어응답을 요구하는 공정에 사용하기에는 적합하지 않다^{1,7)}.

어떤 공정에 대해 제어성능의 우수함을 언급하는 것은 상대적이고 사용자의 주관이 많이 개입된 표현이다. 따라서 제어성능에 대한 객관적인 지표가 사용될 필요가 있는데 PID 제어의 경우 적분오차 기준 (IAE: Integral of the Absolute value of the Error)을 적용하여 해당 기준을 최소화 하는 튜닝 설정치를 판단하는 방법인 Minimum ITAE가 사용되고 있다.

Bialkowski에 의해 제안된 Lambda 튜닝방법은 1968년 Dahlin에 의해 소개된 제어기 설계방식에 기반을 둔 것으로 제지공정에 성공적으로 적용된 이후 다양한 분야에 널리 사용되고 있다(Table 2). Lambda 방법은 제어이론의 극점배치법(Pole Placement)을 활용한 형태로 볼 수가 있다. 이 방법은 공정 모델식에 기반을 둔 제어기 튜닝 방법을 사용하고 설계자가 원하는 페루프 응답 속도를 반영한 튜닝이 가능한 장점이 있는 반면, 극점 소거 방식을 사용하므로 외란 제거에 대하여 나쁜 특성을 보일 수도 있는 단점이 있다.

Table 1 Ziegler-Nicholes Tuning Calculation

제어기	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{\tau}{K\theta}$	∞	-
PI	$\frac{0.9\tau}{K\theta}$	3.33θ	-
PID	$\frac{1.2\tau}{K\theta}$	2θ	0.5θ

Table 2 Lambda Tuning Calculation

제어기	K_p	T_i	T_d
PID	$\frac{(\theta/2+\tau)}{K(\lambda+\theta)}$	$(\theta/2+\tau)$	$\frac{\tau/2}{(\theta/2+\tau)}$

Table 3 IMC Tuning Calculation

제어기	K_p	T_i	T_d
PID	$\frac{1}{K} \frac{2(\frac{\tau}{\theta})+1}{2(\frac{\tau_c}{\theta})+1}$	$\frac{\theta}{2} + \tau$	$\frac{\tau}{2(\frac{\tau}{\theta})+1}$

IMC(Internal Model Control) 방법은 Rivera가 1986년 자신의 논문을 통해 내부모델제어(Internal Model Control)라는 모델기반 귀환제어 방법을 소개하였다. 이 방법은 Lambda 방법과 같이 공정의 모델식을 기반으로 제어기의 변수 값을 Table 3과 같이 설정한다. IMC 방법은 모델의 불확실성을 고려하여 설계를 할 수가 있으며 설정 값 변화에 대한 속응성과 외란에 대한 강인성 사이에 설계자가 절충하여 택할 수가 있는 장점이 있다.

지글러-니콜스 방법과 Minimum ITAE 방법은 반복적인 실험을 통해 얻어진 경험에 의거한 튜닝 연산식을 제공한다. 반면 Lambda 방법과 IMC 방법은 공정의 전달함수에 기반을 둔 튜닝 연산식을 제공하며 모델의 불확실성과 페루프 응답의 기댓값을 반영하여 변수 설정을 가능하게 한다. 오버슈트를 원하지 않는 공정에 대해서는 상대적으로 보수적인 튜닝 변수를 제공하는 Lambda 방법과 IMC 방법을 사용하는 것이 효과적이다^{2,3)}.

2.3 PC 기반 튜닝 전용 프로그램

PC기반 튜닝전용 프로그램은 공정모델을 사용하는 모델예측제어 알고리즘(Model Predictive Control)을 기반으로 한다. 모델예측제어 기술은 많은 계산을 요구하지만 컴퓨터 기술의 발달로 인해 산업 전반에 적용이 늘고 있는 추세이다. PC기반 튜닝전용 프로그램은 수동 입력이나 직렬통신을 통한 자동입력으로 제어 명령 값(공정 출력의 오차)과 프로세스 현재 값 등의 데이터를 취득한다. 취득된 데이터로 PC기반 튜닝전용 프로그램은 튜닝 이전에 히스테리시스, 고착, 선형성, 변동성 적합성 판단한 후 Fig. 3과 같이 공정이득, 시간지연, 시정수를 계산하여 최적의 PID 값을 제공한다. 계단응답, 램프응답 등 다양한 입력에 대한 PID 값을 자동 제공하는 우수함과 편리성이 있지만, PC기반 튜닝 프로그램은 제어 대상의 공정의 전달함수를 사용자에게 제공하지 않아 공정 확인을 할 수 없는 단점이 있다⁶⁾.

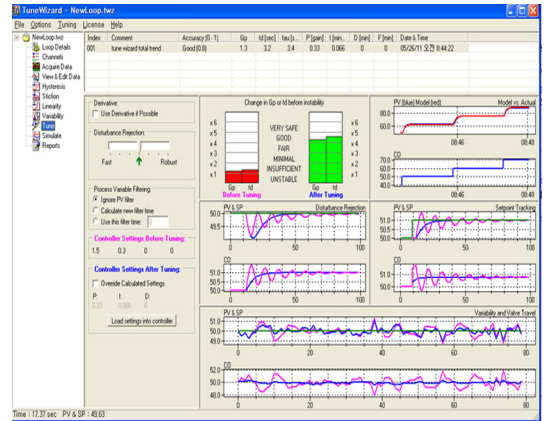


Fig. 3 Process PID tuning display based on PC tuning program

2.4 MATLAB 활용 튜닝 방법

Matlab의 System Identification Toolbox는 공정의 제어 명령 값과 프로세스 현재 값으로 공정 전달함수를 모델링하는 기능을 제공한다. 튜닝 연산식은 계단응답법을 통해 공정 전달함수를 계산하지만, Matlab 활용 튜닝방법은 제어기의 자동 및 수동모드에서 계단응답, 임펄스응답, 주파수응답, Zero Pole Plots 등을 통해 Fig. 4와 같이 공정의 전달함수를 제공한다.

공정의 전달함수를 결정할 때 Fig. 5와 같이 추정 공정 전달함수에서 가장 점수가 높은 최적합(Best Fit) 모델을 선택하면 최적의 공정 전달함수로 공정 확인을 할 수 있다.

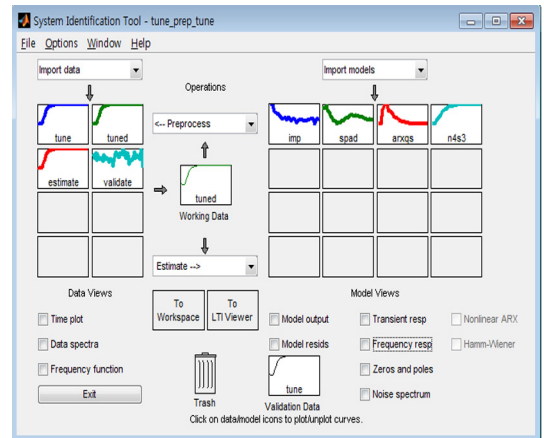


Fig. 4 Assuming of process transfer function using system identification

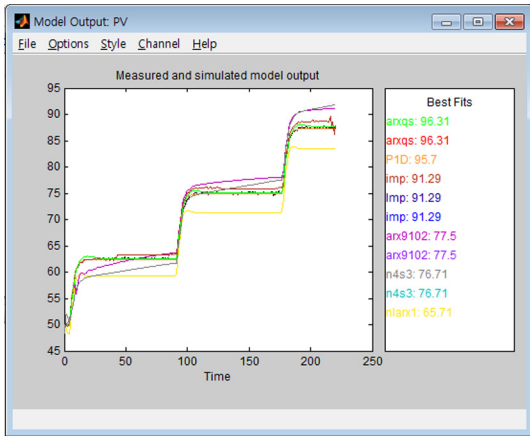


Fig. 5 Best fit model using system identification of MATLAB

3. PID 튜닝 최적화 방법

제어시스템의 공정 제어기에 동일한 제어 명령 값 및 프로세스 현재 값으로 튜닝방법을 통해 PID 값을 최적화할 수 있다. 고전적인 튜닝방법으로 Fig. 6과 같이 계단입력을 통해 공정이득, 시정수, 시간지연을 계산한 후 이 값으로 튜닝 연산식에서 PID 값을 구한다. 튜닝 연산식 방법은 쉽게 PID 값을 계산할 수 있어 산업현장에서 자주 사용하나 고차 특성이 있는 공정의 경우에는 미세튜닝을 해야 한다.

PC기반 튜닝전용 프로그램으로 Fig. 7과 같이 제어시스템의 공정제어기에 동일한 제어 명령 값 및 프로세스 현재 값으로 PID 값이 자동으로 연산된다. 그리고 PC기반 튜닝전용 프로그램에서 계산된 PID 값을 튜닝 연산식 방법으로 도출된 PID 값과 비교한다. 또한, 상세한 검토를 위해 PC기반 튜닝전용 프로그램

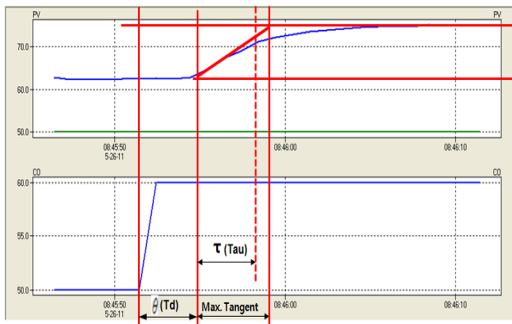


Fig. 6 Process gain, delay time, time constant using step response method

에서 자동 계산된 공정이득, 시간지연, 시정수를 튜닝 연산식 방법의 계단응답법에서 구한 공정이득, 시간지연, 시정수와 비교한다. 튜닝 연산식 방법에 의한 PID 값과 PC기반 튜닝전용 프로그램에 의한 PID 값은 유사한 값을 가지므로 계단 응답법과 PC기반 튜닝전용 프로그램에 의해 구해진 PID 값들을 상호 비교함으로써 검증이 가능하다.

Matlab은 PID 값 자동계산, 공정의 전달함수를 추정하는 공정 확인뿐만 아니라 계단입력, 경사입력, 임펄스 입력 등에 대한 제어시스템의 예상 응답 특성을 제공한다. Matlab의 System Identification은 제어 명령 값과 프로세스 현재 값으로 최적 모델을 선정하여 튜닝 제어대상의 고차 공정의 전달함수를 제공한다. 이것은 PC기반 튜닝전용 프로그램이 제공하지 못하는 부분으로 공정의 전달함수를 추정할 수 있다.

공정 확인이 되면 공정 전달함수를 제어대상에 적용시켜 Fig. 8과 같이 제어시스템을 구성한다. 이때 목표 설정 값, 제어 명령 값, 제어 출력 값 및 프로세스 현재 값의 트렌드가 확인될 수 있도록 한다. 목표 설정 값에 실제 공정에서 사용되는 여러 입력을 인가하면 적절한 PID 값을 구할 수 있다⁴⁾.

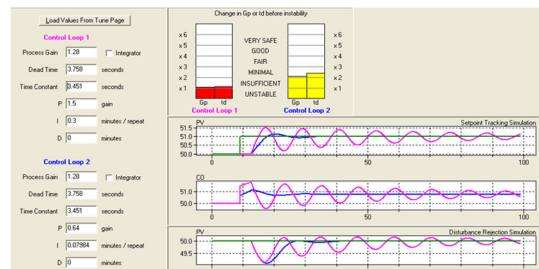


Fig. 7 PID parameter setting using PC based tuning program

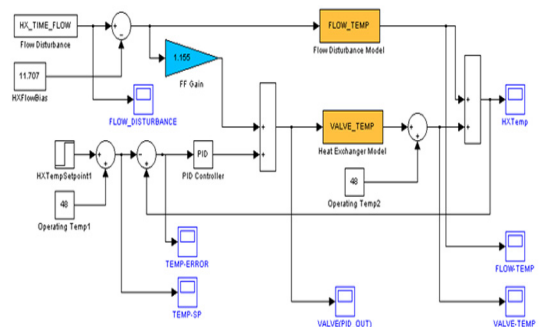


Fig. 8 Control system with process transfer function

Matlab을 활용한 또 다른 PID 값을 구하는 방법으로, Matlab System Identification으로 도출된 공정의 전달함수를 Matlab Simulink에 입력하여 PID 값을 구할 수 있다. 여기서 구해진 PID 값을 조절함으로써 제어 명령 값에 따른 프로세스 현재 값의 변화를 Fig. 9와 같이 시뮬레이션하여 제어시스템의 성능과 강건함을 확인함으로써 제어시스템에 적합한 PID 값을 구할 수 있다.

마지막 단계로, 튜닝 연산식과 PC기반 튜닝전용 프로그램으로 각각 도출된 PID 값을 Matlab에서 연산된 PID 값과 비교한다. 튜닝 연산식 및 PC기반 튜닝전용 프로그램으로 도출된 PID 값과 Matlab에서 계산된 PID 값은 유사하지만 차이가 발생하는 경우가 있다. 이때, PID 값 차이 구간을 Matlab 시뮬레이션에 입력하여 제어 명령 값 변화에 대한 제어시스템의 프로세스 현재 값의 응답을 관찰하여, 최적의 PID 설정치를 선택하면 된다.(Fig. 10 참조)

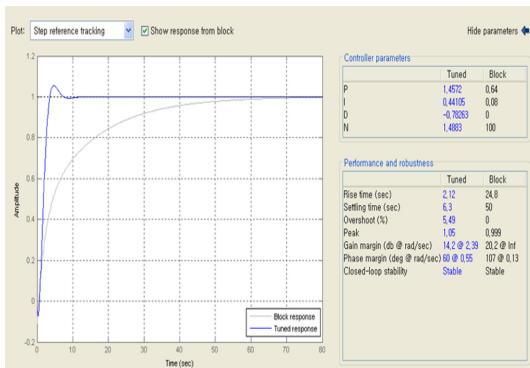


Fig. 9 PID simulation in Matlab

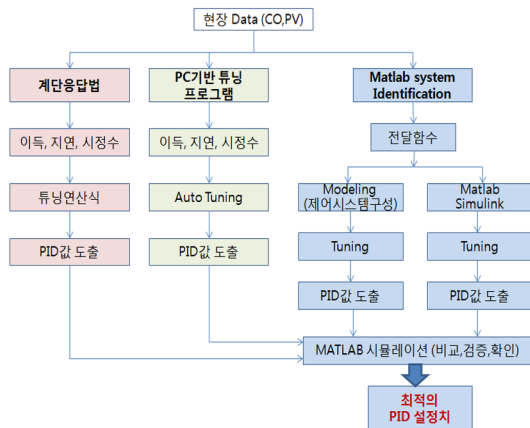


Fig. 10 Diagram of PID tuning optimization method

4. 결론

본 논문에서는 발전소에서 사용가능한 PID 공정제어의 다양한 튜닝 방법을 소개했고, 특히, 운전 중인 원자력발전소 현장에서 적용할 수 있는 공정제어기의 PID 튜닝 최적화 방법을 제시하였다. 튜닝 연산식은 발전소 안전 운전에 영향을 주지 않을 경우, 계단응답법을 활용하여 쉽게 PID 설정치를 계산할 수 있고 다른 튜닝 방법의 기본적인 비교 검증 수단이 된다. 그러나 튜닝 연산식은 고차 특성 공정 전달함수가 도출되지 않아 미세 튜닝이 필요하다. PC기반 튜닝전용 프로그램은 실시간 제어 명령 값과 프로세스 현재 값으로 공정이득, 시간지연, 시정수로 PID 값을 구할 수 있으나 공정의 전달함수를 제공하지 않는 단점이 있다. Matlab의 System Identification은 최적의 공정함수를 제공하고 튜닝 연산식에서 할 수 없었던 PID 값 변경 및 목표 설정 값 변경에 따른 제어시스템 프로세스 현재 값의 응답 특성을 예측할 수 있는 장점이 있다.

가동 중인 원전의 PID 튜닝은 제어 명령 값의 변화가 적어 한가지의 PID 튜닝방법으로 PID 값 설정 최적화가 어려우므로 주위 환경에서 발생하는 외란으로 부터 안전하고 고 신뢰성을 가지기 위해서는, 본 논문에서 제시된 것처럼 튜닝 연산식, PC기반 튜닝전용 프로그램, Matlab 등의 연계를 통해, PID 값을 비교, 검증, 및 모사되는 PID 튜닝의 최적화 방법을 적용하면 보다 안정적이고 효과적인 PID 설정치 결과를 얻을 수 있다.

참고문헌

1. KITTI, 2008, "Tuning and Control", pp. 60~71.
2. Choi, I. G., 2013, "Analysis Report of Calculation Algorithm for PID Controller Tuning Parameters", KEPRI, pp. 4~25.
3. Yu, G. M., 2013, "Development Trend of PID Control Algorithm using Process model".
4. Lee, G. D., 2001, "Control Analysis of Purification System in Wolseung Unit 2", KEPRI, pp. 30~31.
5. Benjan C. Kuo, 2010, "Kuo Auto Control System", WILEY, 8th Edition, pp. 291~312.
6. PAS, 2005, "PID Controller Tuning, Process Diagnostics, Control Loop Simulation", Tune Wizard, pp. 93~116.
7. Ziegler, J. G. and N. B. Nicholes, 1942, "Optimum Settings for Automatic Controllers", Trans. of ASME, Vol. 64, pp. 759~768.