개선된 IMC-PID tuning법의 제안

최희동, 이지태
경북대학교 화학공학과

Improved IMC-PID tuning method

Heedong Choi, Jitae Lee
Kyungpook national university,Chemical Engineering

1.서론

현장에서 사용되는 제어기의 대부분은 성능이 우수하고, 구조가 매우 간단하며, 각 요소의 기능이 명확하여 현장 엔지니어가 쉽게 받아들이는 PID 제어기이다.
한편 PID 제어기의 변수를 찾는 tuning법으로는 Ziegler-Nichols tuning, 오차 적분값의 최소화에 근거한 tuning, IMC-PID tuning, pole placement tuning등이 있다. 현재 가장 자주 사용되고 있는 방법이 ITAE tuning과 IMC-PID tuning 인데, 본 연구에서는 IMC-PID tuning에 pole placement tuning을 결합하여 관계식이 간편하면서 IMC-PID tuning의 부하 응답이 나쁜 단점을 보완하는 tuning법을 제안하고자 한다.

2.이론

2-1. pole/zero cancellation에 의한 PID 제어기 tuning

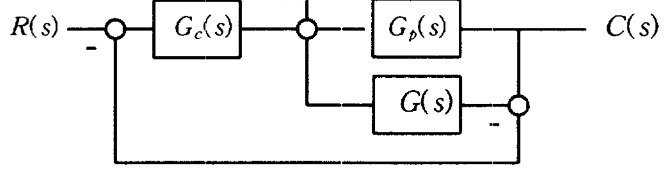
IMC(Internal Model Control) 제어기는 아래 그림과 같은 구조를 갖는다(Morari and Zafiriou, 1989) 아래 그림에서

$$G_c(s) = \frac{f(s)}{G_-(s)}$$

$$f(s) = \frac{1}{(\lambda s+1)^r}$$

$$G(s) = G_+(s)G_-(s)$$

$G_+(s)$: contains all time delays and right−half−plane zeros in the form of $e^{-\theta s}$ and $(-\beta s+1)/(\beta s+1)$



이 제어 시스템에서 만약 $G_p(s)=G(s)$이면

$\frac{C(s)}{R(s)}=f(s)G_+(s)=\frac{G_+(s)}{(\lambda s+1)^r}$ 가 되어, λ로 빠르기가 결정되는, 진동이 없는 좋은 설정점 응답을 준다. 반면에

$\frac{C(s)}{L(s)}=G(s)(1-f(s)G_+(s))$가 되어 부하 응답에는 공정의 open-loop pole이 남아있게 된다. 이는 pole/zero cancellation이 일어났기 때문이며, 부하 응답이 설정점 응답에 비해 매우 나쁠 수 있다.

2-2.pole placement에 의한 PID 제어기 tuning

PI 제어기는 두 조절 변수를 갖고 있으므로 폐루프 pole 두개를 임의로 결정할 수 있다. 예를 들어, 일차공정에 PI 제어기를 설치하는 경우를 고려해보자. 폐루프 전달함수는

$$\begin{aligned}\frac{C(s)}{R(s)}&=\frac{G_c(s)G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)}\\&=\frac{k_c(1+\frac{1}{\tau_i s})\frac{k}{\tau s+1}}{1+k_c(1+\frac{1}{\tau_i s})\frac{k}{\tau s+1}}\\&=\frac{\tau s+1}{\frac{\tau\tau_i}{kk_c}s^2+\frac{\tau_i(1+kk_c)}{kk_c}s+1}\end{aligned}$$

가 되어 PI 제어기 변수 k_c 및 τ_i를 변경하여 폐루프 시스템의 두 pole을 원하는 위치에 있게 할 수 있다(Åstrom and Hagglund, 1988). pole이 시스템의 전체적인 응답을 좌우하므로 이 방식으로 PI 제어기 변수를 결정할 수 있다.
부하변화에 대한 폐루프 전달함수는

$$\begin{aligned}\frac{C(s)}{L(s)}&=\frac{G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)}\\&=\frac{\tau s+1}{\frac{\tau\tau_i}{kk_c}s^2+\frac{\tau_i(1+kk_c)}{kk_c}s+1}\end{aligned}$$

가 되어 $C(s)/R(s)$와 같은 폐루프 pole을 갖는다. 따라서 앞절의 pole/zero 소거법에 기초한 tuning에서 처럼 부하응답이 매우 나빠진다는가 하는 단점은 없다. 단 이 tuning법은 식이 약간 복잡하고, 좋은 폐루프 pole위치가 잘 밝혀져 있지 않다는 단점이 있다.

2-3 개선된 IMC-PID tuning 법의 제안

pole/zero cancellation법의 간단함과 pole placement법의 부하응답의 우수성을 결합하는 개선된 PID제어기 tuning법을 제안하고자 한다. 먼저 dominant pole과 zero만 남기고 나머지는 pole/zero cancellation을 시킨다. 그런 후 dominant pole과 zero의 시스템에 pole placement 법을 적용하는데, 폐루프 pole위치와 관련된 여러 변수를 하나로 줄여 사용하기 편하게 한다.

먼저 공정을 다음과 같이 분리한다.

$$G_p(s) = G_{+d}(s)\,G_{-d}(s)$$

여기서 $G_{+d}(s) = G_{+}\dfrac{as+1}{\tau s+1}$

nonminimum phase part plus dominant pole and zero

그후 $G_{+d}(s)$의 시스템에 대하여 pole placement법을 적용하여 제어기를 설계한다. 설계방식은 폐루프 pole이 모두 $(-1/\lambda,\ 0)$가 되게 한다.

한편, $G_{-d}(s)$ 를 소거하는 compensator을 구성한다.

$f(s)\,G_{-d}(s)^{-1} = \dfrac{G_{-d}(s)^{-1}}{(\frac{\lambda}{10}s+1)^r}$를 설계한다. 여기서 r은 이 compensator가 proper 해지도록 하는 값이다. 아래 여러 경우에 대해 변수값이 나와있다.

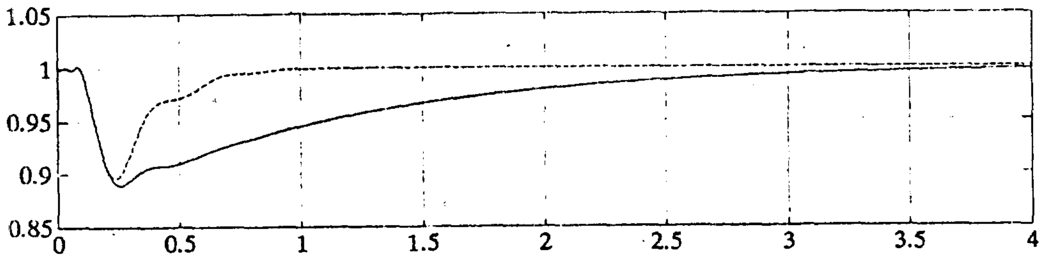
$$\text{제어기 } G_c(s) = k_c\left(1+\frac{1}{\tau_i s}+\tau_D s\right)$$

공정	kk_c	τ_i	τ_D
$\dfrac{k(-\beta s+1)}{\tau s+1}$	$\dfrac{\tau(\beta+2\lambda)-\lambda^2}{(\beta+\lambda)^2}$	$\dfrac{\tau(\beta+2\lambda)-\lambda^2}{\tau+\beta}$	
$\dfrac{k(-\beta s+1)}{\tau s-1}$	$\dfrac{\tau(\beta+2\lambda)+\lambda^2}{(\beta+\lambda)^2}$	$\dfrac{\tau(\beta+2\lambda)+\lambda^2}{\tau-\beta}$	
$\dfrac{k(-\beta s+1)}{\tau^2 s^2+2\phi\tau s+1}$	$[-\beta(3\lambda^2-6\lambda\phi\tau-\tau^2)+2\beta^2\phi\tau+3\lambda\tau^2-\lambda^3]/(\beta+\lambda)^3$	$[-\beta(3\lambda^2-6\lambda\phi\tau-\tau^2)+2\beta^2\phi\tau+3\lambda\tau^2-\lambda^3]/(-\beta^2-2\beta\phi\tau-\tau^2)$	$[\beta(\lambda^3-3\lambda\tau^2)-\beta^2\tau^2-3\lambda^2\tau^2+2\lambda^3\phi\tau]/[\beta(3\lambda^2-6\lambda\phi\tau-\tau^2)+2\beta^2\phi\tau+3\lambda\tau^2-\lambda^3]$
$\dfrac{ke^{-\theta s}}{\tau s+1}$	$\dfrac{\tau(\theta+2\lambda)-\lambda^2}{(\theta+\lambda)^2}$	$\dfrac{\tau(\theta+2\lambda)-\lambda^2}{\tau+\theta}$	
$\dfrac{ke^{-\theta s}}{s(\tau s+1)}$	$\dfrac{(3\lambda+\theta)(\tau+\theta)}{(\lambda+\theta)^3}$	$\theta+3\lambda$	$\dfrac{3\theta\tau\lambda+\theta^2\tau+3\tau\lambda^2-\lambda^3}{(\theta+3\lambda)(\theta+\tau)}$

3. 결과 및 토론

제안한 방법이 다양한 공정에 적용될 수 있는지 모사를 통하여 조사하였다. IMC-PID tuning과 비교를 할 수 있는 것은 하였다. 본 방법의 제안은 실제 IMC-PID tuning의 부하응답을 개선하려는 것으로 부하응답을 좋게 하면 설정점 응답에 큰 overshoot를 보통 주게된다. 이를 막기 위해 설정점 응답에는 미분동작을 없애고 비례동작에 weight를 주는 2자유도 PID제어기가 사용된다.
아래에 simulation결과가 나와있다.

공정은 $G_p(s)=\dfrac{e^{-\theta s}}{s+1}$에 대한 응답을 나타낸다. 시간지연 항은 5차 Pade근사를 하였다. 이를 보면 시간지연이 0.1인 경우 IMC-PID tuning의 부하응답이 매우 느린 것을 볼 수 있는데 이는 소거된 공정의 상대적으로 느린 pole이 부하응답에는 나타나기 때문이다.



dotted : proposed, dashed : IMC-PID

4. 참고 문헌

1. Seborg, D. E., T. F. Edgar, and D. A. Mellichamp, Process Dynamics and Control, Wiley, NY, 1989.
2. Åstrom, K. J. and T. Hägglund, Automatic Tuning of PID Controllers, Instrument Society of America, NC, 1988.
3. Morari, M. and E. Zafiriou, Robust Process Control, Prentice Hall, NJ, 1989.