

환경 관련 시스템의 공정자동화

성수환, 경북대학교

환경관련 시스템의 경우, 배출 오염물질의 규제가 갈수록 강화되고 있어 공정의 안정성과 효율성이 향상될 필요가 있다. 그리고, 전력,약품, 인건비 등의 운전관리 비용 절감에 대한 요구가 점점 더 높아지고 있다. 나아가, 모든 데이터의 모니터링과 수 많은 공정 변수들의 제어가 가능해져야 종합적인 오염원 배출 감소와 에너지 절감을 위한 계획을 세울 수 있고 그 계획을 실행할 수 있다. 이런 관점에서 볼 때, 공정 자동화는 환경 관련 시스템의 운전엔 필수 요건이라고 말할 수 있다.

공정 자동화는 크게 다음과 같은 5가지의 세부 항목들로 구성된다고 할 수 있다. 1.공정 2.센서 및 계측 3.모니터링 및 제어 4.액츄에이트. 환경관련 시스템의 공정 자동화면 이 세부 항목들이 환경 관련 공정과 관련이 있는 경우가 될 것이다. 공정 자동화의 관점에서 볼 때, 자동화 대상공정은 환경 관련 공정이고 일부 센서와 액츄에이터가 환경관련 공정에서만 볼 수 있는 것을 제외하고는 화학공정의 자동화와 근본적으로 큰 차이가 없다. 그래서, 여기서는 현재 화학 및 환경공정의 자동화에 가장 널리 사용되고 있는 비례-적분-미분(PID)제어기에 대해 알아 보고 제어기구성에 필수 적인 공정확인 과 응용에 대해 간단하게 소개하고자 한다.

비례-적분-미분 제어기

그림 1을 참조하자. 그림 1은 미생물을 이용한 수처리 공정에서 많이 볼 수 있는 폭기조의 개략도 이다. 폐수폭기조는 폐수 속에 기포를 불어넣어 산소를 공급함으로써 미생물이 호흡할 수 있는 환경을 만들어 주는 것이다. 그래서, 제어의 목적은 blower의 공기 유속을 조정하여 폐수 속의 DO(Dissolved Oxygen)을 제어하는 것이다. 이 작업을 위해서는 1. DO를 측정할 수 있는 DO센서가 설치되어야 하고 2. DO센서로부터 전기적 신호를 읽을 수 있는 장치 (예, AD변환기, PLC, DCS 등)가 요구되며 3. 읽은 DO값에 근거를 하여 원하는 DO를 보장하기 위해서 액츄에이트를 어떻게 조절할 것인가 즉, 제어 알고리즘 (알고리즘은 컴퓨터나 PLC, DCS, 마이크로 프로세스 등에 내장된다)이 필요하며 4. 제어 알고리즘에 의해 계산된 결과를 전기적 신호로 바꾸어 주는 장치 (예, DA변환기, PLC, DCS 등)가 필요하고 5. 전기적 신호를 받아 제어출력을 실행해주는 액츄에이트(여기서는 blower)가 필요하다.

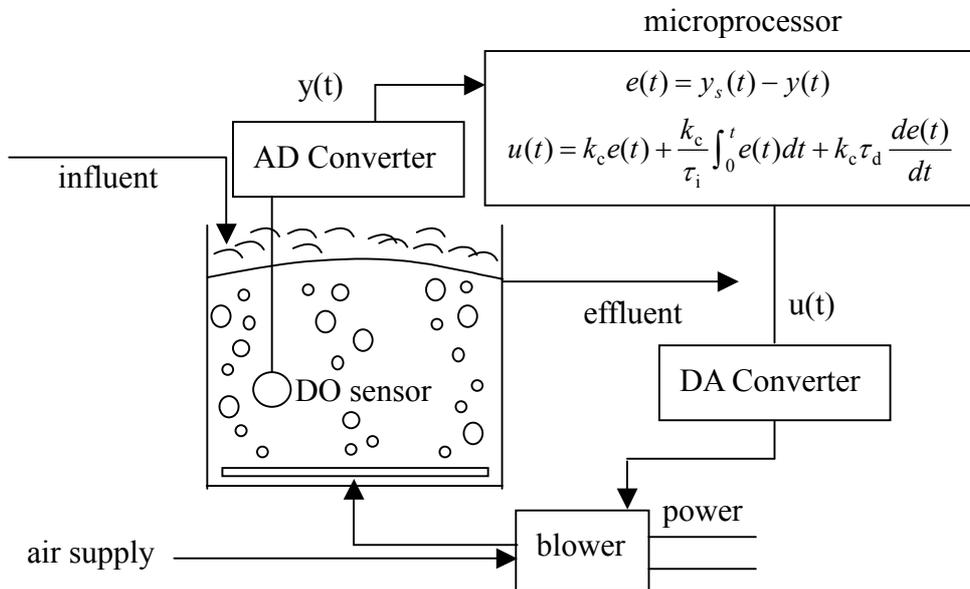


그림 1. PID제어기를 이용한 폭기조내 용존산소량 제어 간략도

공정 자동화를 위해서는 자동화 하드웨어장비 (센서, 계측장비, 액츄에이트, 제어알고리즘이 내장되는 컴퓨터나 마이크로 프로세서)가 매우 중요하다. 다양한 상업용 장비들이 나와있다. 사용자는 공정의 목적과 특징에 가장 맞는 하드웨어 장비를 구매, 조합, 설치하면 된다. 그러나, 제어알고리즘의 튜닝파라미터를 어떻게 정해야 하는지 모르면 효과적인 제어에 문제가 생긴다.

그림 1과 같이 비례-적분-미분(PID) 제어기는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$u(t) = k_c (y_s(t) - y(t)) + \frac{k_c}{\tau_i} \int_0^t (y_s(t) - y(t)) + k_c \tau_d \frac{d(y_s(t) - y(t))}{dt} \quad (1)$$

여기서, $y_s(t), y(t), u(t)$ 는 각각 설정치(set point, 원하는 공정출력), 공정출력, 제어출력을 나타낸다. 상수 k_c, τ_i, τ_d 는 비례이득(proportional gain), 적분시간(integral time), 미분시간(derivative time)을 나타낸다.

식1에서와 같이, PID제어기는 공정출력 값과 설정치(원하는 공정출력)와의 차이 즉, 에러를 계산한 다음에 에러, 에러적분, 에러미분을 선형조합한 값, 즉 제어출력을 계산하여 액츄에이트에 전달한다. 여기서, 이 제어기는 위 수식에서 보는 것과 같이 세가지의 튜닝파라미터(k_c, τ_i, τ_d)를 가지는데 이 값들은 공정의 동특성에 따라 결정되어야 한다. 그렇지 않으면, 우수한 제어성은

을 보장할 수 없다.

비례-적분-미분 제어기의 튜닝파라미터 결정 과정

튜닝파라미터는 공정의 동특성에 따라 결정되어야 하기 때문에 튜닝파라미터를 정하기 위해서는 공정동특성을 알아야 한다. 공정의 동특성을 수식으로 표현한 것이 공정확인 혹은 공정 모델링이다. 공정 모델링을 위해서는 공정 동특성이 밖으로 드러나도록 공정을 움직여 주어야 한다. 공정을 움직이기 위해서는 공정입력에 변화를 주어야 할 것이다. 즉, PID제어기의 튜닝을 위해서는 다음과 같은 과정이 필요하다.

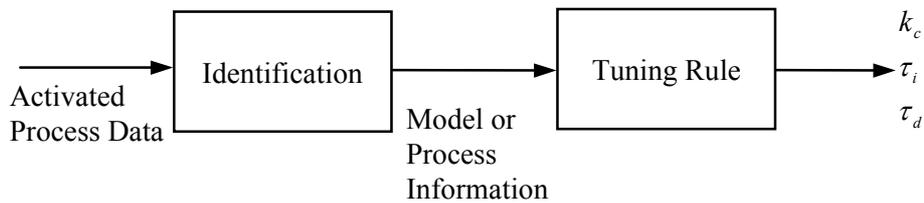


그림 2. PID제어기 튜닝 절차

여기서, 튜닝공식(tuning rule)은 모델부터 튜닝파라미터를 계산해주는 공식을 말하고 공정확인(identification)은 활성화된 공정데이터로부터 모델을 구해내는 작업이다.

비례-적분-미분 제어기의 튜닝을 위한 공정확인

예로, 공정입력을 u_{∞} 만큼 증가시켜주면 공정출력은 다음 그림3와 같은 공정 응답곡선(process reaction curve)형태로 반응을 보일 것이다.

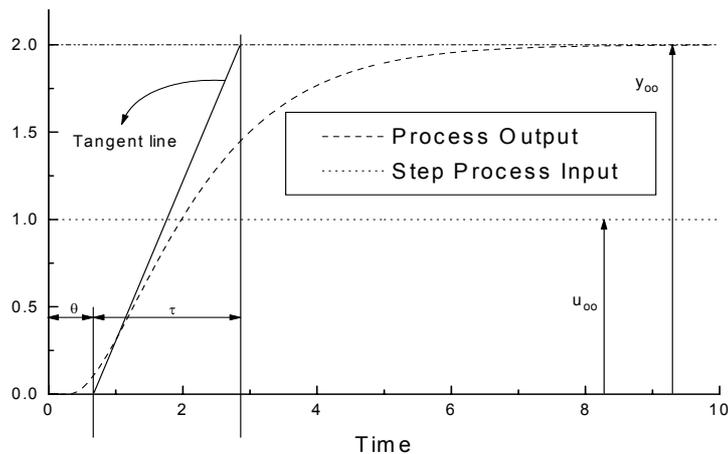


그림 3. 계단형입력에 대한 공정응답곡선

여기서, 공정출력의 변곡점에서 접선을 긋고 $\tau, \theta, k=y_x/u_x$ 를 구한다. τ 는 공정의 빠르기, k 는 공정입력의 변화폭에 대한 공정 출력의 변화폭, θ 는 공정입력의 변화에 대해 공정출력이 얼마나 늦게 반응하는지를 나타내는 시간지연을 나타낸다.

이 값들 자체가 공정입력에 대한 공정 출력의 동특성 즉, 빠르기, 변동량, 응답지연을 대변하는 모델이라고 할 수 있다. 이 값들로 구성된 모델을 일차 시간지연모델이라고 한다.

공정모델로부터 비례-적분-미분 제어기의 튜닝파라미터 계산

앞의 예제에서 일차시간지연모델이 구해지면 다음의 튜닝공식에 의해 튜닝 파라미터를 계산할 수 있다.

Table 1. IMC tuning rule.

	kk_c	τ_i	τ_d
PI Controller	$(2\tau + \theta)/2\lambda$	$\tau + \theta/2$	-
PID Controller	$(2\tau + \theta)/2(\lambda + \theta)$	$\tau + \theta/2$	$\tau\theta/(2\tau + \theta)$

여기서, PID제어기의 경우 $\lambda \geq 0.25\theta$, PI제어기의 경우 $\lambda \geq 1.7\theta$ 를 만족하는 λ 를 선택한다. λ 값이 작을수록 제어성능은 우수하지만 모델링에러가 클 경우 오히려 제어성능이 떨어질 수 있다.

비례-적분-미분 제어기의 Autotuning

앞에서 PID제어기의 튜닝파라미터를 결정하기 위해서는 공정의 동특성이 규명되어야 다음으로 튜닝파라미터가 구해질 수 있었다. PID제어기의 Autotuning이라는 것은 그림2의 전과정을 자동화한 것이다. 상업용 제어기에 가장 많이 사용되고 있는 릴레이를 이용한 Autotuning을 간략하게 소개하면 그림 4와 같다. 그림 5는 릴레이 되먹임을 사용하여 공정을 활성화시킨 결과를 보여주고 있다. 릴레이 되먹임은 다음과 같은 절차로 이루어진다. 1. 공정입력 d 를 공정출력이 움직일 때 까지 넣어준다. 2. 공정입력 $-d$ 를 공정출력이 0을 지날 때까지 넣어준다. 3. 공정입력 d 를 공정출력이 0을 지날 때까지 넣어준다. 3-4주기의 cycle이 만들어질 때 까지 2와3번을 반복한다. 그리고, 측정된 주기 p_r 과 공정출력의 크기 a 로부터 임계주기 $p_u = p_r$ 와 임계이득 $k_u \approx 4d/\pi a$ 를 계산한다. 다음으로 표2에 의해 튜닝파라미터를 구한다. 그리고 이것을 적용한다. 이 모든 과정을 그림4와 같이 자동으로 수행하는 것이 PID Autotuning이다.

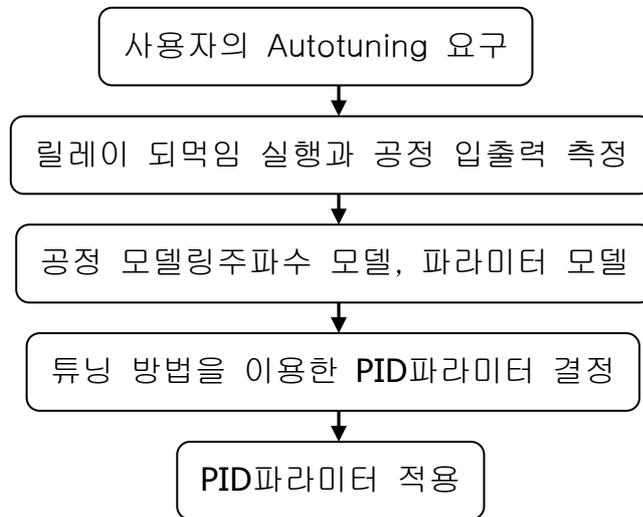


그림 4. 릴레이를 이용한 제어기 Autotuning

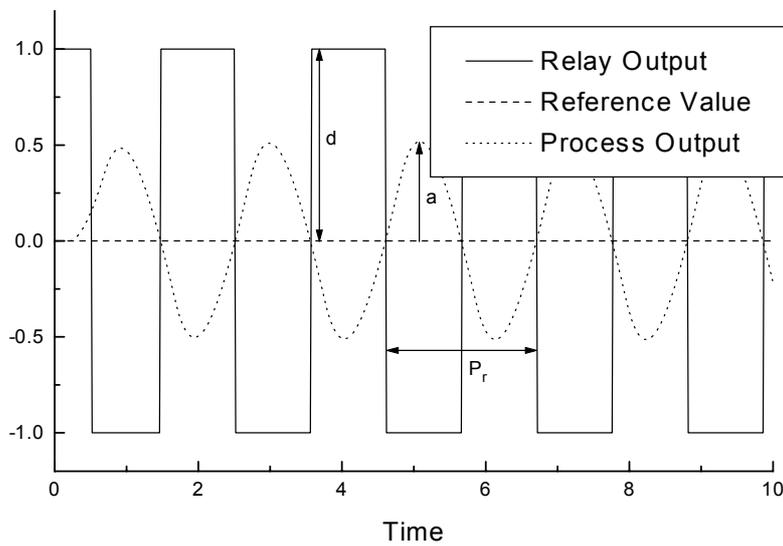


그림 5. 릴레이 되먹임 방법에 의한 공정활성화

Table 2 Ziegler–Nichols tuning rule.

	k_c	τ_i	τ_d
P Controller	$k_u/2.0$	–	–
PI Controller	$k_u/2.2$	$p_u/1.2$	–

PID Controller	$k_u/1.7$	$p_u/2.0$	$p_u/8.0$
----------------	-----------	-----------	-----------

여기서, k_u 와 p_u 는 임계이득과 임계주기를 나타낸다.

결언

환경관련 산업계에서 가장 많이 사용되는 PID제어기를 주로 소개하였다. PID 제어기의 튜닝파라미터가 어떻게 결정되는지 Autotuning이 무엇인지 알아보았다. 여기서 다룬 내용은 매우 간략한 소개에 해당된다. PID제어기와 PID 제어기의 Autotuning에 대한 연구결과는 매우 많다. 비선형 PID제어기, 다양한 릴레이 되먹임 방법 등이 개발되었고 튜닝공식 또한 다양하다. 자세한 내용은 다음의 참고문헌을 참조할 수 있다.

참고문헌

- [1] PID Controllers and Automatic Tuning, Su Whan Sung/In-Beum Lee, A-Jin Press, 1999
- [2] Su Whan Sung, Jietea Lee, Relay Feedback Method under Large Static Disturbance, *Automatica*, Vol 42, 353-356, 2006
- [3] Chapter 6: Regulation of pH in Commande de Procédés Chimiques, Jietae Lee/ Su Whan Sung /In-Beum Lee (Editor: J.P. Corriou), Hermes Science, 2001
- [4] Ho Cheol Park, Su Whan Sung, Jietea Lee, Modeling of Hammerstein-Wiener Processes with Special Input Test Signals, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 45, 1029-1038, 2006
- [5] Su Whan Sung and Jietae Lee, Modeling and Control of Wiener-type Processes, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 59, 1515-1521, 2004
- [6] Su Whan Sung, System Identification Method for Hammerstein Processes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 41, 4295-4302, 2002