

pH 공정의 적응제어

이지태, 최진영

경북대학교 화학공학과

1. 서론

산성도(pH)를 조절하는 중화공정의 제어는 화학공업에서 매우 중요한 역할을 한다. 예를 들어, 폐수처리공정, 생화학공정, 고분자 반응공정등 많은 중요 공정에서 pH는 중요한 변수이다. pH의 중화공정은 중화점 근처에서 pH가 급격히 바뀌는 매우 심한 비선형성을 보인다. PID 제어기 같은 선형 제어기로는 제어가 어렵고, 비선형성을 완화시킬 수 있는 장치가 필수적이다.

초기 pH 제어기에서는 pH 공정의 이득 변화를 경험적으로 보상하는 간단한 구조의 비선형 제어기가 사용되었다. pH 변수를 세구간으로 나누어 각 구간 다른 제어기 변수를 갖는 three zone PID 제어기가 여기에 속한다. 최근에 pH 공정에 관한 모델링 기법의 발전과 더불어 엄밀한 물리 화학적 모델에 기반하는 비선형 제어기가 제안되어 사용되고 있다. 입력 흐름의 농도 변화가 없는 경우 이런 고정형의 비선형 제어기를 사용할 수 있으나, 폐수처리 공정 등에서와 같이 입력 흐름의 성분, 농도 등의 변화가 심한 공정에는 사용할 수 없다. 비선형성의 변화를 추적할 수 있는 비선형 적응 제어가 요구된다. 물리 화학적 모델을 기반으로 하는 비선형 적응제어기도 여럿 제안되어 사용되고 있다. pH 공정의 제어방법으로는 비선형 적응제어법이 앞으로의 방향으로 보고 있으며, 본고의 목적은 pH 공정의 비선형 적응제어법을 정리하고, 앞으로의 연구 방향을 제안하고자 한다.

McAvoy 등(1972)은 pH 공정을 물질수지식과 평형 관계식으로 구성된 모델식을 제안하였다. Gustafsson과

Waller(1983, 1992)는 좀 더 복잡한 공정에 관한 물질수지식과 평형관계식을 유도하였다. Wright와 Kravaris(1991)는 물질수지식의 구조가 각 성분에 대하여 같은 것에 착안하여 pH 공정 모델이 일차 공정에 정적 비선형 블록이 결합된 형태의 모델이 될 수 있음을 보였다. 그외에 공정을 black box로 두고 하는 모델링 방법들이 제안되어 있다. Gustafsson 등(1995)은 산업기 반응으로 알갱이가 생겨 가라앉는 등의 더 복잡한 공정을 표현하는 모델을 제안하였다.

Choi(1995)등은 혼합이 완전하지 못한 경우, 센서 지연, 측정 잡음 등을 고려하는 pH 공정의 동적 모사기를 제안하고 있다.

적응제어법은 앞의 모델을 선형의 변수로 parameterize하고, 반복 최소자승법으로 이 변수들을 추적하는 방식으로 구성된다. 어떻게 parameterize하는가에 따라 여러가지 적응제어법이 얻어질 수 있다.

입력 흐름이 하나의 가상의 약산이라는 가정에 따라 두개의 변수를 갖는 모델과 여기에 따른 적응제어법이 여러 연구자에 의해 제안되어 있다(Parrish 와 Brosilow(1988), Williams 등(1990), Lee 등(1994), Sung 과 Lee(1995), Sung 등(1997)). 입력 흐름이 하나의 가상의 강산과 하나의 가상의 약산의 혼합이라는 가정에 따라 3개의 변수를 갖는 적응제어 법도 제안되어 있다(Lee 등(1993), Mahuli등(1993), Lee 등(1997)).

Pajunen(1992)는 pH 공정을 Wiener형태의 black box모델로 가정하고, 여기에 따른 적응제어법을 제안하였다.

Lin과 Yu(1993)는 pH 공정을 여러 대표적인 적정곡

선의 합으로 가정한 모델에 근거하는 적응제어법을 제안하였으며, Chan과 Yu(1995)는 이 적응제어기의 실험 결과를 보여주고 있다.

다른 공정의 적응제어에서와 마찬가지로 pH 공정의 적응제어에서도 estimation windup이 가장 문제가 되고 있다. 여러가지 경험적인 해결방법을 구비하고 있지만 완벽하지 못하거나 제어성능에 나쁜 영향을 주거나 한다. 본고에서는 pH 공정의 특성을 고려하는 제어 성능에 영향을 주지 않는 estimation windup 제거 방안을 제어한다. 또한 다른 형태의 적응제어 방법을 줄 수 있는 새로운 모델 변수 estimation 목적 함수를 제안한다.

2. pH 공정의 모델

그림 1과 같은 연속 교반 탱크의 중화공정을 고려한다. 연속 교반조에 유입되는 유량은 $F[\ell/\text{min}]$ 이고, 농도가 $c_i, i=1, \dots, n$ 인 산과 $d_i, i=1, \dots, m$ 인 염기가 들어오고 농도 d_0 인 강염기 NaOH로 중화한다.

각 성분에 관한 물질 수지식은

$$\begin{aligned} V \frac{dx_i(t)}{dt} &= Fc_i - (F+u)x_i, & i=1, \dots, n \\ V \frac{dy_i(t)}{dt} &= Fd_i - (F+u)y_i, & i=1, \dots, n \quad (1) \\ V \frac{dy_0(t)}{dt} &= ud_0 - (F+u)y_0, & i=1, \dots, n \end{aligned}$$

여기서

V : 반응탱크의 부피[ℓ]

c_i : 입력 산의 농도[mol/ ℓ]

d_i : 입력 염기의 농도[mol/ ℓ]

d_0 : 적정 염기의 농도[mol/ ℓ]

$x_i, i=1, \dots, n$: 반응 탱크 내에서의 산의 농도 [mol/ ℓ]

$y_i, i=1, \dots, m$: 반응 탱크 내에서의 산의 농도 [mol/ ℓ]

y_0 : 적정 염기(NaOH)의 반응탱크 내에서의 농도[mol/min]

F : 입력 유량 [ℓ/min]

u : 조작 변수의 유량 [ℓ/min]

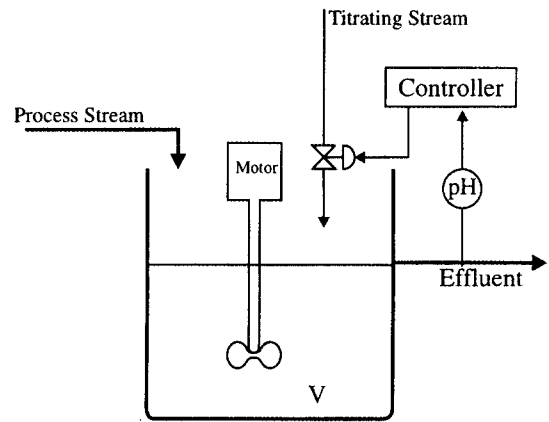


그림 1. pH Control System.

각 성분이 빠르게 완전혼합이 되면, 매우 빠른 산 염기 반응이 일어나 다음과 같은 수소 이온에 관한 평형 관계식이 얻어진다.

$$[\text{H}^+] - \frac{K_w}{[\text{H}^+]} + \sum_{i=1}^n a_i([\text{H}^+])x_i + \sum_{i=1}^m b_i([\text{H}^+])y_i + y_0 = 0 \quad (2)$$

여기서

$$b_i([\text{H}^+]) = \frac{q[\text{H}^+]^q + (q-1)\frac{K_w[\text{H}^+]^{q-1}}{K_{bq}} + \dots + \frac{K_w^{q-1}[\text{H}^+]}{K_{b0} + K_{b1}\dots K_{bq}}}{[\text{H}^+]^q + \frac{K_w[\text{H}^+]^{q-1}}{K_{bq}} + \dots + \frac{K_w^q}{K_{b1}K_{b2}\dots K_{bq}}}$$

$[\text{H}^+]$: 수소이온의 농도

$K_w = 10^{-14}$: 물의 이온화 곱

$$a_i([\text{H}^+]) = -\frac{p + (p-1)\frac{[\text{H}^+]}{K_{ap}} + \dots + [\text{H}^+]^{p-1}}{1 + \frac{[\text{H}^+]}{K_{ap}} + \dots + \frac{[\text{H}^+]^p}{K_{a1}K_{a2}\dots K_{ap}}}$$

$i=1, \dots, n$

p : i 번째 산의 수소이온을 내놓을 수 있는 전체 숫자

$K_{a1}, K_{a2}, \dots, K_{ap}$: 각 수소이온을 내놓는 이온화 상수 $i=1, \dots, m$

q : i 번째 염기의 수산이온을 내놓을 수 있는 전체 숫자
 $K_{b1}, K_{b2}, \dots, K_{bq}$: 각 수산 이온을 내놓는 이온화 상수

$$x = \frac{[\text{H}^+] - \frac{K_w}{[\text{H}^+]} + \sum_{i=1}^m a_i([\text{H}^+])c_i - \sum_{i=1}^m b_i([\text{H}^+])d_i}{-d_0 + \sum_{i=1}^m a_i([\text{H}^+])c_i - \sum_{i=1}^m b_i([\text{H}^+])d_i} = \phi^{-1}([\text{H}^+]) \quad (5)$$

식 (1)이 pH 공정의 동특성을 나타내며, 식 (2)가 정특성을 나타낸다.

$$\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+] \quad (3)$$

이다. 보통 $u \ll F$ 이기 때문에 식 (1)에서의 비선형성은 거의 없다. 반면에 식(2)는 매우 심한 비선형성을 보인다.

이온화 상수 K_w, K_a, K_b 들은 온도의 함수이기도 하지만 보통 무시한다. 값들은 일반화학 교과서 같은 데서 찾을 수 있다.

3. pH 공정 모델의 차수감소

Wright와 Kravaris(1991)은 앞의 공정 모델을 간략화 할 수 있는 중요한 발견을 하였다. 즉 식(1)이 각 성분에 대하여 비슷한 형태를 하고 있다는 것이다.

$$x(t) = \frac{c_i - x_i(t)}{c_i}$$

로 두면 식 (1) 중 첫번째는

$$V \frac{dx(t)}{dt} = -Fx + (1-x)u$$

가 된다. 식 (1)의 나머지 식들도 같은 형태로 만들 수 있는데, 정리하면

$$\begin{aligned} V \frac{dx(t)}{dt} &= -Fx + (1-x)u \\ x_i(t) &= c_i - c_i x(t) + \text{error} \\ y_i(t) &= d_i - d_i x(t) + \text{error} \\ y_0(t) &= d_0 x(t) + \text{error} \end{aligned} \quad (4)$$

을 얻을 수 있다. 여기서 error는 초기값 차이로 생기는 것으로 제어 입력과 무관하게 빠르게 없어진다.

식 (2)를 $x(t)$ 변수로 정리하면

가 얻어진다. 식 (4), (5)를 이용하여 제어 시스템을 설계한다.

4. 비선형 제어 시스템

식 (4)와 (5)로 부터 쉽게 비선형 제어 시스템을 구성할 수 있다. 보통 $x(t) \ll 1$ 이기 때문에 식 (4)는 선형 시스템으로 볼 수 있다. 따라서 그림 2와 같은 제어 시스템을 구성할 수 있다. 여기서 PI제어기 변수는 pole assignment 법에 따라

$$\begin{aligned} K_c &= \sqrt{2} \omega V - F \\ \tau_I &= \frac{K_c}{\omega^2 V} \end{aligned}$$

로 잡는다. $\omega[1/\text{min}]$ 는 tuning factor로 크게하면 제어 속도가 빨라진다. Open-loop의 time constant, V/F 를 보고 결정한다.

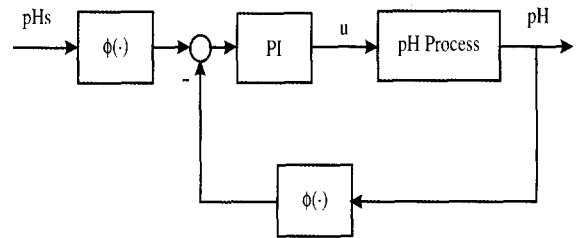


그림 2. Nonlinear pH control system.

그림 2의 제어기를 설계하는데 필요한 값들은 $V, F, c_i, d_i, d_0, K_a, K_b, \omega$ 들이다. 이중 ω 는 tuning 변수이고, d_0 는 적정 흐름의 농도로 아는 값이며, V 와 F 는 비교적 쉽게 얻을 수 있다. 반면에 입력 흐름의 각 성분 농도 c_i, d_i 그리고 각 성분의 이온화 상수들 K_a 와 K_b 는 구하기 매우 힘든 값들이

다. 실제로는 식 (5)의 x 와 $[H^+]$ 와 관계만 알면 되기 때문에, 입력흐름을 off-line으로 적정하여, $\phi(\cdot)$ 를 구하여 사용하여도 된다.

Off-line 적정시 입력 흐름의 양을 F , 적정 흐름의 양을 u 로 하였으며, $x = u/(F + u)$ 가 된다. 여러 x 에 대한 pH를 실험으로 구하여 $\phi(\cdot)$ 를 찾는다.

5. 적정 곡선의 매개변수화

입력 흐름의 성분과 농도가 일정하면 입력 흐름을 적정, $\phi(\cdot)$ 를 구하여 제어 시스템을 구성할 수 있다. 그러나 입력흐름의 성분과 농도가 바뀌면 여기에 따라 $\phi(\cdot)$ 를 새롭게 해야 한다. 이를 off-line 실험을 통하지 않고 연속으로 on-line으로 새롭게 해 나가기 위해서는 $\phi(\cdot)$ 를 잘 근사하면서 적은 수의 변수를 갖는 매개변수화가 필요하다.

적정곡선 $\phi(\cdot)$ 를 근사하는 몇몇 방법들이 제안되어 있다. 이것을 소개하기 전에 먼저 식(5)에서 입력 흐름과 관련되는 결정하기 어려운 부분을 분리한다. 즉

$$v \triangleq \sum_{i=1}^n a_i([H^+])c_i + \sum_{j=1}^m b_j([H^+])d_j \quad (6)$$

5-1 Parameterization 1

입력 흐름에 여러가지 이온화 상수를 갖는 물질들이 섞여 들어오지만 이를 주어진 이온화 상수를 갖는 물질 몇몇이 들어온다고 가정한다. 즉

$$v = \frac{c_1}{1 + \frac{[H^+]}{K_{a,1}}} + \frac{c_2}{1 + \frac{[H^+]}{K_{a,2}}} + \dots + \frac{c_n}{1 + \frac{[H^+]}{K_{a,n}}} \quad (7)$$

여기서 $K_{a,i}$ 는 주어진 값이고, c_i 는 적정곡선 $\phi(\cdot)$ 를 fitting하는 변수이다. v 와 $[H^+]$ 관계가 측정되거나 예측되어지면, 모르는 변수 c_i 가 선형으로 나타나 있기 때문에 반복 최소자승법 같은 방법을 이용하여 이들을 쉽게 찾아낼 수 있다. Gustafsson과 Waller(1992)가 제안하는 방법이다.

5-2 Parameterization 2

하나의 가상의 약산이 들어온다고 가정한다.

$$v = \frac{c}{1 + \frac{[H^+]}{K_a}} \quad (8)$$

여기서 c 는 약산의 농도이고 K_a 는 이온화 상수를 나타낸다. c 와 K_a 를 fitting 변수로 한다. 이 식을 정리하면

$$v[H^+] = cK_a - vK_a$$

로 매개변수가 선형으로 나타나게 만들 수 있다.

여러 pH 공정의 적응제어에서 성공적으로 사용된 방법이다(Lee 등(1994), Sung 등(1997)).

5-3 Parameterization 3

강산과 약산이 섞여들어온다고 가정한다.

$$v = c_1 + \frac{c_2}{1 + \frac{[H^+]}{K_a}} \quad (9)$$

여기서 c_1 과 c_2 는 각각 강산과 약산의 농도이고, K_a 는 약산의 이온화 상수이다. 이 세 변수를 fitting 변수로 한다. 이 식을 앞에서와 마찬가지로 정리하면

$$v[H^+] = (c_1 + c_2)K_a + c_1[H^+] - K_a v \quad (10)$$

로 매개변수가 선형으로 나타나게 할 수 있다. Lee 등(1993) 그리고 Mahuli 등(1993)이 사용한 방법이다. 여기서 c_1 은 음의 값을 가질 수 있으며, 이는 강 염기가 섞여 들어오는 것을 의미한다.

5-4 여러 다른 방법들

$\phi(\cdot)$ 를 spline함수로 근사하는 방법(Pajunen(1992)), 신경회로망으로 근사하는 방법, 특정한 적정곡선의 합으로 표현하는 방법(Lin과 Yu(1993))등이 발표되어 있다.

6. 적응제어법

식 (5)와 (6)으로 부터

$$v = \frac{-[H^+] + \frac{K_w}{[H^+]} - xd_0}{1-x} \quad (11)$$

x 는 측정이 안되기 때문에 다음과 같은 open-loop observer를 이용한다.

$$V \frac{dx_m(t)}{dt} = -Fx_m + (1-x_m)u \quad (12)$$

$[H^+]$ 는 측정된 pH로부터 얻어진다. v 와 $[H^+]$ 가 얻어지면 앞의 여러 parameterization과 반복 최소자승법을 이용하여 적정곡선 $\phi(\cdot)$ 를 근사할 수 있는 변수들을 구할 수 있다. 반복 최소 자승법 적용식은 정형화 되어 있으며 적응제어에 관한 교과서로부터 찾을 수 있다.

적응제어기 구조는 그림 3과 같이 된다. Estimation에는 여러가지 실제 적용상의 기교들이 첨가되어야 한다. 먼저 변수의 변화를 추적하기 위하여 forgetting factor의 도입과 이것의 변경기능, 혹은 이와 유사한 기능이 필요하다(Fortescue 등 1981). Estimation의 windup을 막기 위한 매개변수의 값의 제한, 입력에 perturbation 신호 첨가(Sung 등(1997))등과 더불어 선형 적응제어법에서 이용하는 여러 기능이 요구된다.

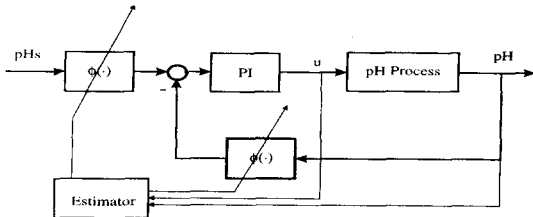


그림 3. Adaptive control strategy to control the pH system.

7. 제안

Gustafsson과 Waller(1992), Lee등 (1994) 그리고 Sung 등(1997)의 결과를 보면, 앞의 둘 혹은 세변수를 갖는 parameterization과 여기에 따른 적응제어법으로

공정의 심한 비선형성을 극복하면서, 좋은 제어 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 제어가 잘 되기는 하

지만, 매개변수의 수렴성은 그렇게 우수하지 않은 것을 볼 수 있다. 논문에는 나타나 있지는 않지만, 모사를 해보면 간혹 estimation이 진동하는 경우를 볼 수 있다. pH 공정의 특성을 고려하는, estimator를 좀 더 견실해 지도록 하는 장치가 필요하다.

7-1 제안 1

지금까지의 parameter estimation은 $\phi(\cdot)$ 를 근사하는 것에 목적을 두었다. 그러나 제어시스템의 성능에 영향을 주는 것은 $\phi(\cdot)$ 의 gain에 해당하는 $d\phi(x)/dx$ 이다. $\phi(\cdot)$ 를 잘 근사하는 parameter보다 $d\phi(x)/dx$ 를 잘 근사하는 parameter가 더 좋은 제어 성능을 주는 것을 볼 수 있다. 예를 들어, 입력 흐름으로 0.0001 mol/l로 인산(H3PO4)이 흘러 들어오는 경우 $\phi(\cdot)$ 를 근사하는 2변수 parameterization (8)은

$$\begin{aligned} c &= 0.0002 [\text{mol}/\ell] \\ K_a &= 6.34 \times 10^{-8} [\text{mol}/\ell] \end{aligned} \quad (13)$$

$d\phi(x)/dx$ 를 근사하는 2변수 parameterization (8)은

$$\begin{aligned} c &= 0.0001 [\text{mol}/\ell] \\ K_a &= 6.34 \times 10^{-8} [\text{mol}/\ell] \end{aligned} \quad (14)$$

이다. 모사를 해보면 식 (14)의 변수가 더 우수한 제어 성능을 주는 것을 볼 수 있다.

두 변수 c, K_a 가 $d\phi(x)/dx$ 에 선형으로 나타나 있지 않기 때문에 반복 최소자승법을 쓸 수 없고, 비선형 최소자승법을 사용하여야 한다. 계산량이 많고 제한된 시간 내에 수렴된 변수를 얻을 수 있을 지 등 실제 응용하는데 아직 해결되어야 할 사항이 많다.

7-2 제안 2

적응제어의 실제 응용에 가장 큰 걸림돌은 제어가 잘되고 있는 동안에는 변수 estimation에 필요한 정보가 충분히 제공되지 않아 변수 예측이 매우 부정확해지는 경우가 생기는 것이다. pH 공정의 적응제어에서도 종종 발생 되는데, 때에 따라서는 선형 시스템의 관점에서는 충분히 자극된다고 보이는 경우에도 변수에

측이 잘못될 수 있다. 여기서는 이를 밝히고 해결책을 제안한다.

식 (8)의 매개변수화에 따른 적응제어법을 고려한다. 예측되는 K_a 의 값이 10^{-5} 수준이고 pH는 7근처로 제어되고 있다고 가정한다. pH가 7근처에서 어느정도 변화더라도 $[H^+]/K_a$ 값이 1보다 매우 적어서

$$v \approx c \quad (15)$$

가 되고 K_a 를 새롭게 할 만한 정보가 얻어지지 않는다. 즉 K_a 는 더욱 잘못된 값으로 가게 될 것이다. 실제 계산해보면 점점 커지게 되는 경향이 있다.

이 문제는 다음과 같이 해결할 수 있을 것이다.

step 1: 측정된 pH, observer의 출력 x_m 으로부터 c 와 K_a 를 update한다.

step 2: $[H^+]/K_a < 0.01$ 이면 step 1의 update를 취소하고 c 만 update한다.

step 3: step 1과 step 2를 반복한다.

비슷한 분석을 parameterization 1과 parameterization 3에 의한 적응제어법에도 응용할 수 있을 것이다.

8. 결론

pH 공정은 비선형이며, 입력흐름의 성분과 농도가 바뀔 때 따라 비선형성이 급격히 바뀌는 적응제어가 요구되는 공정이다. 최근 이 공정에 대한 모델링 기법이 확립되고, 매우 작은 수의 변수를 갖는 parameterization이 제안되어 간단한 형태의 우수한 적응제어법이 구성되어 있다. 그러나 estimation의 windup은 선형 시스템의 적응제어법에서와 마찬가지로 큰 문제점으로 남아있다.

본고에서는 pH 공정의 적응제어법을 간략히 살펴 보았으며 좀 더 견실하고 우수한 성능을 주는 방법을 위하여 두가지 제안을 하였다. 한 제안은 기존의 변수 estimation의 목적함수가 제어기 성능에 직접적이지 못한 것을 바로 잡으려는 것이다. 새로 제안 한 것을

적응제어에 바로 이용하는데 아직 걸림돌이 몇몇 남아 있어 연구가 요구되고 있다. 또 한 제안은 estimation windup을 해결하려는 것으로 pH 공정 특성상 나타나는 것으로 바로 pH 공정 적응제어에 이용될 수 있다.

참고문헌

- McAvoy, T. J., Hsu, E., Lowenthal, S., Dynamics of pH in Control Stirred Tank Reactor, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 11, 68-70, 1972.
- Gustafsson, T. K., Waller, K. V., Dynamic Modeling and Reaction Invariant Control of pH, Chem. Eng. Sci., 38, 389-398, 1983.
- Gustafsson, T. K., Waller, K. V., Nonlinear and Adaptive Control of pH, Ind. Eng. Chem. Res., 31, 2681-2693, 1992.
- Wright, R. A., Kravaris, C., Strong Acid Equivalent Control of pH Processes: An Experimental Study, Ind. Eng. Chem. Res., 30, 2437-2444, 1991.
- Gustafsson, T. K., Skrifvars, B. O., Sandstrom K. V., Waller, K. V., Modeling of pH for Control, Ind. Eng. Chem. Res., 34, 820-827, 1995.
- Choi, J. Y., Pandit, H. G., Rhinehart, R. R., Farrell, R. J., A Process Simulator for pH Control Studies, Computers Chem. Engng., 19, 781, 1995
- Parrish, J. R., Brosilow, C., Nonlinear Inferential Control, AIChE J., 34, 633-644, 1988
- Williams, G. L., Rhinehart, R. R., Riggs, J. B., In-line Process Model Based Control of Wastewater pH Using Dual Base Injection, Ind. Eng. Chem. Res., 29, 1254-1259, 1990.
- Lee, S. D., Lee, J., Park, S., Nonlinear Self-tuning Regulator for pH Systems, Automatica, 30, 1579-1586, 1994.
- Sung, S. W., Lee, I., pH control using a simple set point change, Ind. Eng. Chem. Res., 34, 1730-1734, 1995
- Sung S. W., Lee, I., Choi, J. Y., Lee, J., Adaptive Control for pH Systems, Ind. Eng. Chem. Res., Submitted. 1997

- Pajunen G., Adaptive Control of Wiener Type Nonlinear Systems, Automatica, 28, 781, 1992.
- Lin, J., Yu, C., Automatic Tuning and Gain Scheduling for pH Control, Chem. Eng. Sci., 48, 3159, 1993
- Chan, H., Yu. C., Autotuning of Gain-Scheduled pH Control, An Experimental Study, Ind. Eng. Chem. Res., 34, 1718, 1995.
- Mahuli., S. K., Rhinehart, R. R., Riggs, J. B., pH Control Using A Statistical Technique for Continuous On-line Model Adaptation, Computers Chem, Engng, 17, 4, 309-317, 1993.
- Fortescue, T. R., Kershenbaum, L. S., Ydstie, B. E., Implementation of Self-tuning Regulators with Variable Forgetting Factors, Automatica, 17, 831-835, 1981.

저자소개

이지태

1979년 서울대학교 화공과 학사
 1986년 한국과학기술원 화공과 박사
 1983년-현재 경북대학교 화공과 교수
 1989년, 1995년 University of Texas at Austin
 (702-701) 대구광역시 북구 산격동 1370번지
 경북대학교 화학공학과
 Tel: 053-950-5620
 Fex: 053-950-6615
 관심분야 : 공정제어

최진영

1991년 경북대학교 화공과 학사
 1993년 경북대학교 화공과 석사
 1995년 경북대학교 화공과 (병역특례 전문 연구요원)
 관심분야 : 공정제어, 적응제어

- 담당 편집위원:

저자가 편집이사에게 직접 투고한 원고임 -