

CSTR용 PID 제어기의 EA 기반 동조

EA-Based Tuning of the PID Controller for a CSTR

진강규[†]

Gang-Gyoo Jin[†]

*한국해양대학교 IT공학부

[†] Division of IT, Korea Maritime and Ocean University

요 약

연속교반탱크반응기, 담수화 플랜트, 증류탑, pH 중화 프로세스 등을 포함한 많은 산업용 프로세스들은 높은 비선형성과 시변 특성으로 인해 제어가 까다로워 보다 정밀하고 안정된 성능을 가지는 제어기를 설계하려는 많은 노력들이 있어 왔다. 본 논문에서는 기존 연구의 단점을 개선한 CSTR 프로세스의 농도제어용 PID 제어기를 동조하는 문제를 다룬다. 액추에이터 포화 문제를 극복하기 위해 PID 제어기에는 적분기 안티와인드업 피드백 루프가 구성되며, PID 제어기의 파라미터는 전체 제어 프로세스가 만족스러운 설정치 추종 성능을 가지도록 진화연산(EA)에 의해 동조된다. 제안하는 방법은 시뮬레이션을 통해 설정치 추종 성능, 외란 억제 성능과 파라미터 변동에 대한 강인성을 확인한다.

키워드 : 연속교반탱크반응기, PID 제어기, 안티와인드업, 진화연산

Abstract

Many industrial processes such as continuous stirred tank reactors(CSTRs), desalination plant, distillation columns, pH neutralization processes and so on exhibit highly nonlinear characteristic and time-varying behavior during operation. The control of such processes has been challenging to control engineers. Hence, a variety of forms of PID controllers and their tuning rules for industrial processes have been developed to guarantee the best performance. In this paper, a scheme that designs the practical PID controller with an anti-windup strategy incorporating with an evolutionary algorithm(EA) is presented for the concentration control of a nonisothermal CSTR. EA is used to tune the parameters of the overall PID control process with anti-windup by minimizing the integral of absolute error(IAE). Simulation works for reference tracking and disturbance rejecting performances and robustness to parameter changes show the feasibility of using the proposed method.

Key Words : CSTR, PID controller, Anti-windup, Evolutionary algorithm

1. 서 론

지난 수십 년 동안 계속적인 유가 인상으로 기존의 고에너지 저효율 분리 공정을 대체하거나 개선하면서 산업 프로세스들이 더욱 복잡하게 되었고, 성능과 안전에 대한 사용자의 기대심리가 높아지고 또 환경배출에 대한 국내외 기준이 날로 엄격해지면서 제어 엔지니어들이 직면하게 된 도전은 해를 거듭할수록 증대되었다. 특히 연속교반탱크반응기(CSTR), 담수화 플랜트(Desalination plant), 증류탑(Distillation columns), pH 중화 프로세스(Neutralization

process), 연신공정의 온도제어 등과 같은 프로세스들은 높은 비선형성과 시변 특성 때문에 제어가 까다로워 보다 정밀하고 안정된 성능을 가지는 제어기를 설계하려는 많은 노력들이 있어 왔다[1-4,13].

그 중에서도 PID 제어기의 동조법 개선과 부가적인 기능과의 결합에 관한 연구가 더 큰 비중을 차지하는데 그 이유는 아직도 생산현장 제어루프의 90%가 PID 알고리즘을 적용하고 있기 때문이다[4]. CSTR 프로세스의 PID 제어와 관련된 연구로 Pan 등[5]은 하위 계층에 PID 제어기를, 상위 계층에 입출력 데이터를 기반으로 선형모델을 식별하고 이로부터 PID 제어기의 파라미터를 동조하는 2계층 구조의 CSTR 제어 알고리즘을 제안하였고, Banu와 UMA[6]는 CSTR의 농도를 PID 제어하는 화학공정 프로세스에서 GA로 PID 제어기를 동조하고 퍼지 개인 스케줄링하는 방법을 제안하였고, Chang[7]은 CSTR 농도 제어용 PID 제어기의 파라미터를 ABC(Artificial bee colony) 알고리즘으로 최적 동조하는 방법을 제안하였다.

이들은 나름대로 만족스러운 성과를 제시하고 있으나 모두 액추에이터(Actuator) 포화로 발생할 수 있는 적분기 와

접수일자: 2013년 11월 19일

심사(수정)일자: 2013년 12월 10일

게재확정일자 : 2013년 12월 12일

[†] Corresponding author

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

인드업 문제를 고려하지 못하고 있다. 적분기 와인드업과 관련된 연구로는 Krikelis[8]는 적분기의 출력값을 액추에이터의 선형구간 내에 유지하도록 데드존(Dead zone)이 있는 Hard limiter를 사용을 제안하였고, Åström과 Hägglund[4]는 포화기의 입출력 차이를 적분기의 입력단에 피드백하여 적분동작을 수정하는 문제를 다루었다. 한편 Hodel과 Hall[9]은 제어입력이 포화 속으로 들어가면 제어입력이 포화기의 가장자리에 놓이도록 특정 조건에 따라 적분기의 입력을 스위칭하는 가변구조 PID 안티와인드업 기법을 제안하였다.

그러나 이들은 액추에이터 포화를 고려하지 않은 제어대상으로 제어기를 동조한 다음 적분기 와인드업을 보상하는 부가적인 기능을 적용함으로써 성능개선의 여지를 남기고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구의 단점을 개선한 CSTR 프로세스의 온도제어용 PID 제어기를 설계하는 문제를 다룬다. 액추에이터 포화 문제를 극복하기 위해 PID 제어기에는 적분기 안티와인드업 피드백 루프가 구성되며, PID 제어기의 파라미터는 진제 제어 프로세스의 설정치 추종 성능을 개선하도록 진화연산(EA)[11]에 의해 동조된다. 제안하는 방법은 시뮬레이션을 통해 기존의 방법과 비교하여 그 유효성을 확인한다.

2. CSTR 모델링

2.1 CSTR(Continuous Stirred Tank Reactor)

그림 1은 본 연구에서 다루게 될 CSTR 프로세스를 보여준다. 반응기는 입력 유체를 수용하고 여기서 반응이 일어나는 용기이며, 교반기는 반응기 내의 유체가 공간적으로 균일하도록 교반해주며, 냉각자켓은 반응열을 흡수해서 외부로 내보내는 역할을 담당한다.

C_f, T_f, F_f 와 C, T, F 는 각각 입구측과 출구측 유체의 농도[mol/m³], 온도[K]와 유량[m³/sec]을, T_{cf}, F_{cf} 와 T_c, F_c 는 각각 입구측과 출구측 냉각수의 온도와 유량을 의미한다.

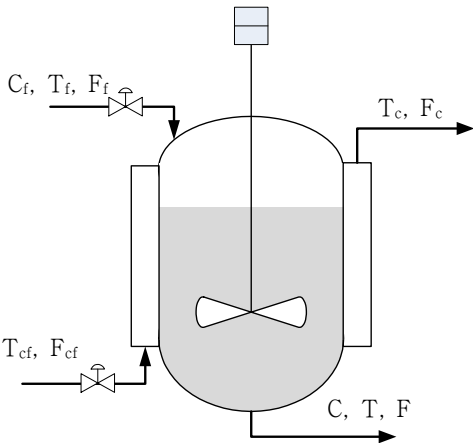


그림 1. 비등온 CSTR 프로세스

Fig. 1. Nonisothermal CSTR process

2.2 제어대상의 수학적 모델

일반적으로 CSTR은 열의 저장과 방출 또 반응과 관련하여 비선형적인 특성을 가지고 있어서 정확히 모델링하는

것이 쉽지 않다. 따라서 문제를 단순화하기 위해 비가역 반응(A→B)은 발열반응이고, 반응은 반응물에 대하여 1차로 간주되며, 반응기 내의 유체는 잘 교반되며, 입출력 유량은 같고, 파라미터들이 일정하고 또 온도와는 무관하다는 가정하에 집중정수(Lumped-parameter)계로 모델링한다.

CSTR에 물질과 에너지 보존법칙을 적용하면 다음 방정식을 얻을 수 있다[1].

$$\dot{x}_1 = -x_1 + D_a(1-x_1)\exp\left(\frac{x_2}{1+x_2/\gamma}\right) \quad (1a)$$

$$\dot{x}_2 = -(1+\beta)x_2 + HD_a(1-x_1)\exp\left(\frac{x_2}{1+x_2/\gamma}\right) + \beta u \quad (1b)$$

$$y = x_1 \quad (1c)$$

여기서 x_1, x_2, y 와 u 는 모두 무차원화 된 신호이고, x_1 과 x_2 는 각각 반응기의 농도(C)와 온도(T)를 나타내는 상태변수, y 와 u 는 각각 프로세스의 출력과 입력이고 u 는 냉각자켓의 출구온도(T_c)를 뜻한다. 한편 D_a, γ, H, β 는 각각 Damökhler number, 활성화 에너지(Activated energy), 반응열(Heat of reaction)과 열전달계수(Heat transfer coefficient)를 의미한다.

식 (1)의 무차원 방정식을 얻기 위해 시가지와 신호들은 다음과 같이 정의된다[1].

$$t = t \frac{F_f}{V}, \quad x_1 = \frac{C_f - C}{C_f}, \quad x_2 = \frac{T - T_f}{T_f} \gamma, \quad u = \frac{T_c - T_f}{T_f} \gamma \quad (2)$$

여기서 V 는 CSTR의 체적[m³], $\gamma = \frac{E}{RT_f}$ 이고 E 는 활성화 에너지[cal/mol], R 은 기체상수[cal/mol-K]이다.

위의 방정식을 다시 벡터 형태로 표시하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u \quad (3a)$$

$$y = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \quad (3b)$$

여기서 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T \in \mathbb{R}^2$ 이고 우측의 함수들은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} -x_1 + D_a(1-x_1)\exp\left(\frac{x_2}{1+x_2/\gamma}\right) \\ -(1+\beta)x_2 + HD_a(1-x_1)\exp\left(\frac{x_2}{1+x_2/\gamma}\right) \end{bmatrix} \quad (3c)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \beta \end{bmatrix} \quad (3d)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = x_1 \quad (3e)$$

식 (3a)에서 $u = 0$ 일 때의 평형점(Equilibrium point) \mathbf{x}_E 는 $\mathbf{f}(\mathbf{x}_E) = \mathbf{0}, \forall t \in [0, \infty)$ 를 만족하는 해로서 파라미터의 값에 따라 한 개에서부터 수 개가 될 수 있으며, 안정성 측면에서 이들은 안정 또는 불안정 평형점으로 구분된다. \mathbf{x}_E 는 식 (1)로부터 얻은 식 (4a)의 비선형 방정식을 풀어 해 x_{2E} 를 먼저 얻은 다음 식 (4b)로부터 x_{1E} 를 구하면 된다.

$$-(1+\beta)x_2 + D_a[H - (1+\beta)x_2]\exp\left(\frac{x_2}{1+x_2/\gamma}\right) = 0 \tag{4a}$$

$$x_1 = \frac{1+\beta}{H}x_2 \tag{4b}$$

3. 안티와이드업 기법을 갖는 PID제어기

3.1 PID 제어기

PID 제어기는 PI, PD, PID 형과 같이 구조의 선택이 자유스럽고, 원리가 간단하고 동조할 파라미터 수가 적고 또 안티와이드업(Anti-windup) 보상기나 수동/자동 무충돌 전환(Bumpless transfer)이 용이하기 때문에 현장 기술자에게 친숙한 알고리즘이다. CSTR의 농도를 조절하기 위한 제어기로 표준형 PID 제어기를 이용할 수 있으나 이상적인 미분동작은 물리적으로 구현이 어렵고 또 센서를 통해 들어오는 잡음이 클 경우에는 미분폭주(Derivative kick) 현상을 일으키므로 수정식을 사용한다. 따라서 제어기의 전달함수 $C(s)$ 는 다음과 같다.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{1+T_f s} \tag{5}$$

여기서 K_p , K_i , K_d 는 각각 비례이득, 적분이득, 미분이득을, $T_i = K_p/K_i$ 와 $T_d = K_d/K_p$ 는 각각 적분시간, 미분시간을 의미한다. 또한 $T_f = T_d/N$ 는 필터 시정수이며, N 은 최대미분이득(Maximum derivative gain)으로서 8-20 사이에서 경험적으로 정해진다[4]. 많은 문헌에서 $N=10$ 을 사용하고 있으므로 본 연구에서도 이 값을 사용한다.

3.2 적분기 안티와이드업

산업현장에는 여러 형태의 액추에이터가 사용되고 있지만 이들의 동작에는 물리적인 한계가 존재하는 관계로 설정치나 외란 등이 갑작스레 크게 변하면 포화(포화)가 일어나게 된다. 포화로 인해 제어기의 출력이 액추에이터의 한계치(최대 또는 최소)에 도달하면 출력은 변하지 않고 적분기에는 오차가 계속 누적되는 적분기 와인드업 현상이 일어난다. 이 때문에 액추에이터가 존재하는 곳에 이를 고려하지 않고 설계된 제어법칙을 그대로 적용하면 프로세스 성능이 심하게 왜곡될(일반적으로 오버슈트가 커지고 정정시간이 길어짐) 수 있고, 경우에 따라서는 불안정하게 될 수도 있다.

본 연구에서 다루는 CSTR 프로세스도 냉각자켓의 출구 온도(T_c)를 제어입력으로 변경하기 때문에 물리적으로 한계가 있을 수밖에 없다. 따라서 제어기와 CSTR 사이에 액추에이터 포화가 일어나는 것으로 간주하며, 포화는 다음 정적 비선형식으로 표시된다.

$$u_{sat} = \begin{cases} u_{min}, & u < u_{min} \\ u, & u_{min} \leq u \leq u_{max} \\ u_{max}, & u > u_{max} \end{cases} \tag{6}$$

적분기 와인드업 문제에 대처할 수 있는 방법으로는 몇 가지가 있으나 대표적인 방법으로는 추종 안티와이드업

(Anti-windup)법[4]이 있으며, 이는 제어기 출력과 포화기의 출력 차이를 피드백해서 적분동작을 수정하게 되는데 본 연구에서도 이 방법을 사용한다. 적분기 안티와이드업을 가지는 PID 제어기의 구조는 그림 2와 같다.

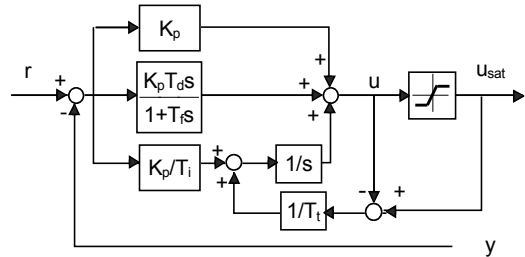


그림 2. 안티와이드업을 갖는 PID 제어기
Fig. 2. PID controller with anti-windup

포화가 일어나면 내부적으로 제어입력의 포화값과 제어입력간의 차에 의한 피드백 루프가 형성된다. 적분기의 재설정(Reset) 속도는 시정수 T_t 에 의해 좌우되며, T_t 가 너무 크면 오버슈트가 커지고, 너무 작으면 응답이 느려진다. T_t 값은 대개 경험적으로 정해지며 Bohn과 Atherton[10]은 $T_t = T_i$ 를 제안하고 있으므로 이 값을 사용한다.

4. PID 제어기의 동조

PID 제어기의 동조는 전체 제어 프로세스가 원하는 성능을 갖도록 세 파라미터를 적절히 조정하는 것을 말하며, 식 (5)의 1자유도(One-degree-freedom) PID 제어기는 제어 환경에 따라 설정치 추종 성능 또는 외란 억제 성능이 최적화되도록 동조된다.

지금까지 잘 알려진 PID 동조법으로는 Z-N 동조법, Cohen-Coon 동조법, IMC 동조법 등이 있고, 포화기가 있는 제어시스템에 이들을 적용할 경우에는 선형구간(포화기를 고려하지 않은 구간)에서 동조한 후 안티와이드업 루프를 적용하게 된다.

이는 전체 시스템의 관점에서 최적화라고 할 수 없기 때문에 본 연구에서는 안티와이드업 루프가 구성된 그림 3에서 설정치 추종 성능이 좋도록 PID 제어기의 파라미터를 최적화하는 문제를 다룬다.

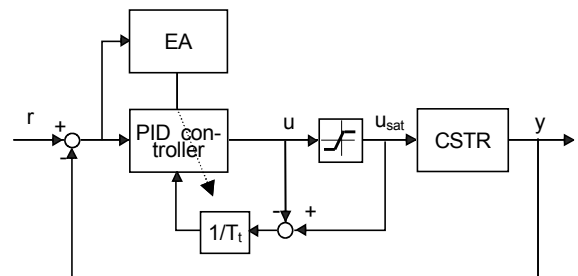


그림 3. 안티와이드업 루프를 갖는 PID 제어기의 동조
Fig. 3. Tuning of the PID controller with anti-windup loop

비선형 다변수 최적화 문제를 풀기 위해 설정치를 계단형으로 변경하며 운전하는 동안 최적화 알고리즘을 이용하

여 최적의 파라미터 집합을 찾게 된다. 이 때 시스템의 성능의 좋고 나쁨을 계량할 수 있는 평가함수로 절대오차적분 (IAE)을 사용하였다.

$$J(\phi) = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (7)$$

여기서 $\phi = [K_p, K_i, K_d]^T \in \mathbb{R}^3$ 는 제어기 파라미터로 구성되는 벡터이고, $e(t)$ 는 설정치와 출력 간의 오차이며, t_f 는 이후의 적분값이 무시될 수 있도록 충분히 큰 값이다.

최적화 도구로는 Jin 등이 제안한 나선운동(Spiral movement)을 기반으로 개발된 EA[11]를 사용하였다. 이 알고리즘은 다음과 같이 요약된다. 이때 집단의 크기 $N=40$, Attractor의 매개변수로는 $\lambda=0.618$ (황금비), $\omega=-0.3$, $n_{max}=20$, 동적 돌연변이의 매개변수로는 $P_m=0.05$, $b=4$ 를 사용하였다.

```

Initialize population P(0) of size N randomly;
Evaluate fitness fi(0)(1≤i≤N) and select the best {xb(0), fb(0)};
for k= 1: max_generation do
    Assign a new vector xi(k) to xi(k-1)(1≤i≤N) using the attractor;
    Apply non-uniform mutation;
    Apply elitism if necessary;
    Evaluate fitness fi(k)(1≤i≤N) and select the best {xb(k), fb(k)};
end
Output xb(k)
    
```

5. 모의실험 및 검토

제안한 방법의 유효성을 검증하기 위하여 모의실험을 실시하고 표준형 PID 제어기를 기반으로 하는 Chang의 방법 [7]과 Z-N방법과 비교하였다. 비교의 공정성을 유지하도록 다른 두 방법도 같은 안티와인드업 기법을 적용하였다.

5.1 모의실험용 데이터와 제어기 파라미터

모의실험에 사용된 CSTR의 데이터는 표 1과 같고[7], 액추에이터 포화의 상하한 값은 현실성을 고려하여 정하였다. 샘플링 시간 Δt 는 0.01로 하였다.

표 1. 모의실험용 CSTR 데이터
Table 1. CSTR data for simulation

Parameter name	Parameter	Value
Damökhler number	Da	0.072
Activated energy	γ	20
Heat of reaction	H	1
Heat transfer coefficient	β	0.3
Upper limit of actuator saturation	u_{max}	25
Lower limit of actuator saturation	u_{min}	-0.32

식 (1)의 CSTR 모델과 EA를 기반으로 동조된 세 파라미터와 다른 두 방법의 동조 결과는 표 2에 나타내었다. 이 때 PID 파라미터들은 구간 $0 < K_p, K_i, K_d \leq 1500$ 에서 탐색되었다. Chang의 결과는 ABC 알고리즘으로 IAE 평가함수를 최소화 하는 관점에서의 최적 동조된 것이고[7], Z-N 방법의 결과는 설정치 $r=0.5$ 부근에서 이 등[12]이 제안한 모델 식별법으로 FOPTD(First-order plus time delay) 모델, 즉 $Y(s)/U(s) = K \exp(-L)/(1+\tau s)$ 의 파라미터 $K=0.0503$, $\tau=1.1761$, $L=0.2467$ 을 얻고 이를 동조규칙에 적용한 것이다.

표 2. 동조된 PID 제어기의 파라미터
Table 2. Tuned PID controller parameters

Method	PID controller parameters			
	K_p	K_i	K_d	N
Proposed	993.32	571.79	176.95	10
Chang	118.82	157.99	23.95	-
Z-N	113.73	230.51	14.03	-

5.2 성능 비교

5.2.1 설정치 추종 성능

먼저 CSTR 유체의 농도를 변경하게 되는 경우를 고려해 설정치 추종응답 실험을 실시하였다. 그림 4는 $r=0.1$ 에서 프로세스가 정상상태에 있을 때 $t=0.01$ 에서 r 을 0.3으로 다시 $t=15$ 에서 0.5로 계단형으로 변경하면서 출력 y 와 액추에이터 출력 u_{sat} 를 그린 것이고, 그림 5는 $r=0.5$ 에서 정상상태에 있을 때 $t=0.01$ 에서 r 을 0.7로 다시 $t=15$ 에서 0.9로 계단형으로 변경하면서 응답을 그린 것이다.

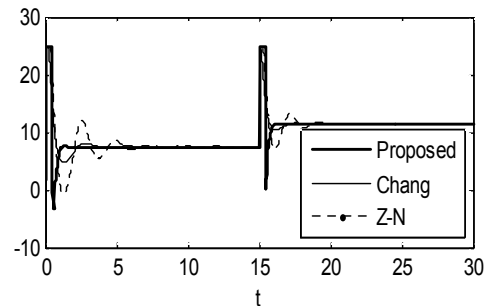
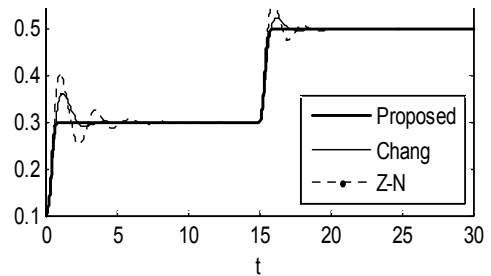


그림 4. r 이 0.1에서 0.5로 증가될 때 설정치 추종응답
Fig. 4. Set-point tracking responses when r is step-wisely increased from 0.1 to 0.5

그림에서 보면 응답들은 시간이 진행됨에 따라 설정치에 도달하지만, 제안한 방법이 두 방법보다 더 좋은 성능으로 접근해 가는 것을 알 수 있다. 표 3은 세 방법의 성능을 정량적으로 비교하기 위해 오버슈트(M_p), 도달시간(t_r), 2% 정정시간(t_s)을 계산한 결과이다. 이때 $t_r = t_{90} - t_{10}$ 이고, t_{10} 과 t_{90} 은 각각 출력이 설정치의 10%와 90%에 도달하는데 걸리는 시간을 의미한다.

표에서 보면 제안한 방법이 두 방법보다 M_p 도 작을 뿐만 아니라 t_s 도 짧은 것을 확인할 수 있다.

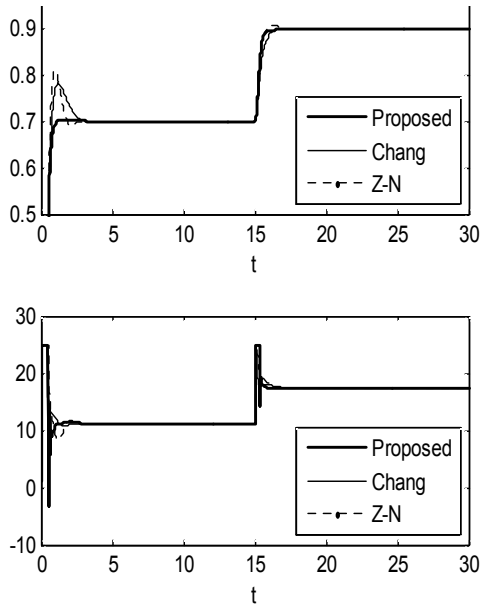


그림 5. r이 0.5에서 0.9로 증가될 때 설정치 추종응답
Fig. 5. Set-point tracking responses when r is step-wisely increased from 0.5 to 0.9

표 3. r이 0.1에서 0.9로 증가될 때 설정치 추종성능의 비교
Table 3. Comparison of set-point tracking performances when r is increased from 0.1 to 0.9

Set-point change	Proposed			Chang			Z-N		
	M_p	t_r	t_s	M_p	t_r	t_s	M_p	t_r	t_s
0.1→0.3	0.70	0.42	0.78	31.30	0.45	3.33	52.67	0.37	6.25
0.3→0.5	0.43	0.43	0.77	12.78	0.52	2.07	31.72	0.38	3.46
0.5→0.7	2.00	0.46	0.91	41.93	0.42	2.50	56.21	0.37	1.73
0.7→0.9	0.00	0.44	0.87	1.42	0.75	1.24	4.76	0.45	1.99

CSTR의 내재적인 비선형성으로 인해 r이 증가할 때와 감소할 때의 응답특성이 서로 다를 수 있으므로, 반대로 그림 6과 그림 7은 각각 $r = 0.9, 0.5$ 에서 프로세스가 정상상태에 있을 때 r를 0.2씩 계단형으로 감소시키며 응답을 그린 것이다.

r이 계단형으로 감소하는 경우에도 제안한 방법이 더 우수한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 세 방법의 성능을 정량적으로 비교한 표 4의 결과에서도 이를 확인할 수 있다.

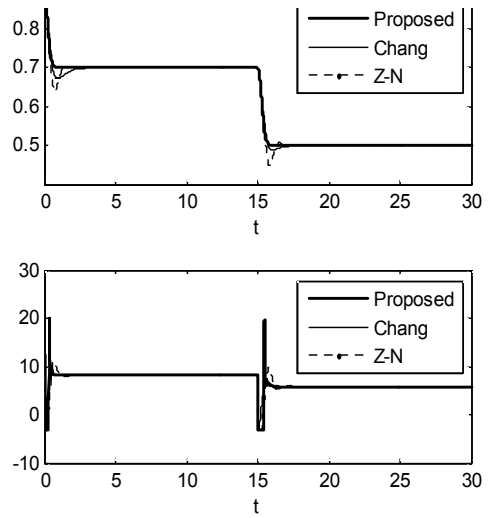


그림 6. r이 0.9에서 0.5로 감소될 때 설정치 추종응답
Fig. 6. Set-point tracking responses when r is step-wisely decreased from 0.9 to 0.5

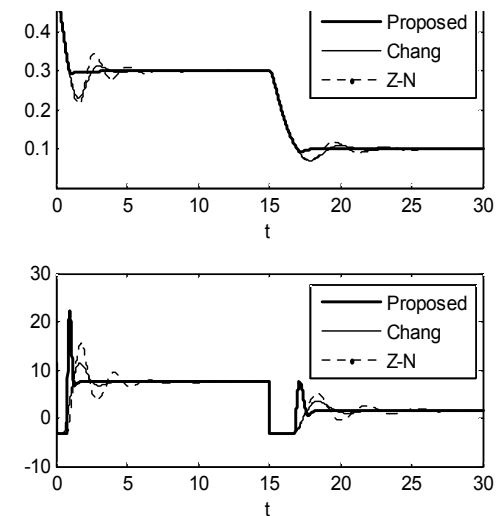


그림 7. r이 0.5에서 0.1로 감소될 때 설정치 추종응답
Fig. 7. Set-point tracking responses when r is step-wisely decreased from 0.5 to 0.1

표 4. r이 0.1에서 0.9로 감소될 때 설정치 추종성능의 비교
Table 4. Comparison of set-point tracking performances when r is decreased from 0.9 to 0.1

Set-point change	Proposed			Chang			Z-N		
	M_p	t_r	t_s	M_p	t_r	t_s	M_p	t_r	t_s
0.9→0.7	0.05	0.41	0.75	14.22	0.41	2.22	30.11	0.33	1.32
0.7→0.5	0.43	0.42	0.74	6.39	0.50	1.81	26.39	0.39	1.76
0.5→0.3	4.00	0.66	1.32	34.45	0.67	3.70	42.17	0.66	6.58
0.3→0.1	4.12	1.37	2.59	14.73	1.37	5.79	15.07	1.37	8.57

5.2.2 외란 억제 성능

CSTR 운전 중 어떤 요인으로 인해 외란이 갑작스럽게 변동할 수 있으므로 제안한 방법의 외란 억제 성능을 확인하였다. 이때 제어기의 역할은 외란으로 인해 교란된 출력이 빨리 설정치에 되돌아오도록 조절해주는 것이다.

외란 억제 성능을 확인하기 위하여 프로세스가 정상상태에 있을 때 식 (1a)의 우측 단에 계단형의 외란을 투입하고 이때의 y 와 u_{sat} 를 그렸다. 그림 8과 그림 9는 각각 $r = 0.3$, $r = 0.7$ 에서 프로세스가 정상상태에 있을 때 $0 < t \leq 5$ 동안 $d = 0.2$, $d = -0.2$ 의 외란을 투입하고, 다시 $15 < t \leq 20$ 동안 $d = 0$ 으로 변경하고 그린 것이다. 이 경우에도 제안한 방법의 응답이 두 방법보다 나음을 알 수 있다.

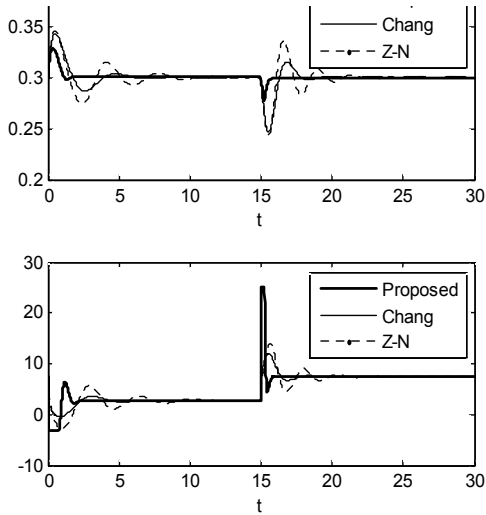


그림 8. $r = 0.3$ 에서 d 를 계단형으로 변경시켰을 때의 외란 제거응답

Fig. 8. Disturbance rejection responses when d is step-wisely changed while $r = 0.3$

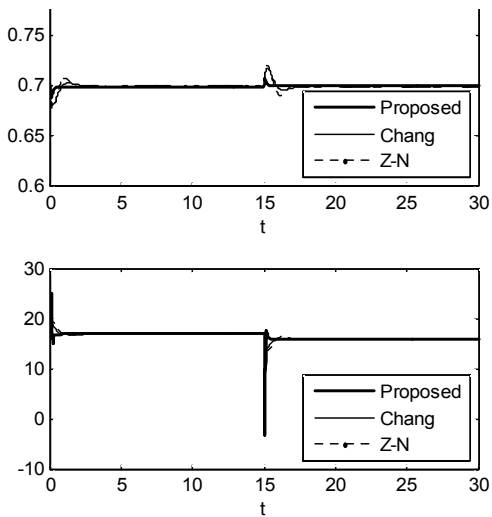


그림 9. $r = 0.7$ 에서 d 를 계단형으로 변경시켰을 때의 외란 제거응답

Fig. 9. Disturbance rejection responses when d is step-wisely changed while $r = 0.7$

세 방법의 성능을 정량적으로 계량하기 위하여 응답변동의 피크치(Perturbance peak) M_{peak} 와 외란의 영향이 소멸되는데 걸리는 회복시간(Recovery time) t_{rcy} 를 구하였다. 이때 $M_{peak} = |y_{max} - r|$ 또는 $|y_{min} - r|$ 를 의미하고, t_{rcy} 는 y 가 r 의 2% 이내로 회복되는데 걸리는 시간을 의미한다. 표에서 보면 제안한 방법의 성능이 전반적으로 우수함을 확인할 수 있다. 특히 $r = 0.3$ 의 응답에서는 두 방법은 M_{peak} 도 클 뿐 아니라 t_{rcy} 도 긴 것을 알 수 있다.

표 5. d 를 계단형으로 변경시켰을 때의 외란 제거성능의 비교

Table 5. Comparison of disturbance rejection performances when d is step-wisely changed

Disturbance change	Proposed		Chang		Z-N	
	M_{peak}	t_{rcy}	M_{peak}	t_{rcy}	M_{peak}	t_{rcy}
0→0.2	0.03	2.30	0.04	7.15	0.05	11.82
0.2→0	0.02	2.80	0.05	3.88	0.06	6.76
0→-0.2	0.01	0.79	0.02	2.64	0.02	2.60
-0.2→0	0.01	0.86	0.02	2.63	0.02	2.78

5.2.3 파라미터 변동

CSTR은 시변 프로세스이고 운전 중 파라미터 변동이 일어날 수 있기 때문에 제안한 방법의 파라미터 변동에 대한 강인성을 확인하기 위해 시뮬레이션을 실시하였다. 제어 프로세스가 표 1의 파라미터를 가지고 $r = 0.5$ 에서 정상상태에 있을 때 $0 < t \leq 15$ 동안 H 를 8로 변경하였고, 이어 $15 < t \leq 30$ 동안에는 H 를 다시 1로 또 γ 를 30으로 변경하며 응답을 그린 것이 그림 10이다.

제안된 방법은 두 방법에 비해 제어기의 비례이득 K_p 가 클 때도 불구하고 파라미터 변동에 덜 민감한데 비해, H 값이 클 때 Chang의 방법은 응답이 진동하고, Z-N방법은 전반적으로 만족스럽지 못하다는 사실을 알 수 있다.

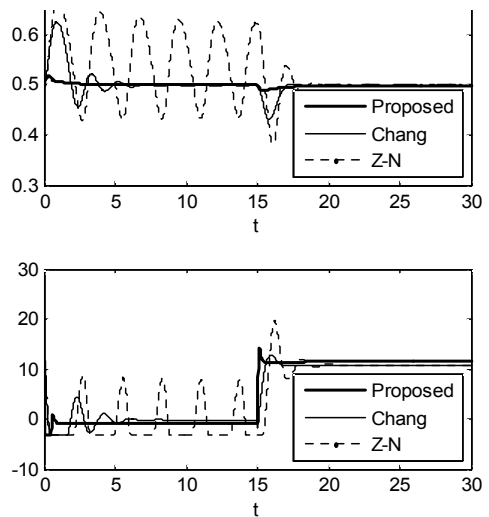


그림 10. 파라미터 변동에 대한 응답 비교

Fig. 10. Response comparison to parameter changes

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 적분기 안티와인드업 기법과 EA에 기초하여 CSTR 프로세스 농도를 제어하기 위한 PID 제어를 설계하는 문제를 다루었다. 표준형 PID 제어기의 미분 동작의 한계성을 보완하기 위해 수정식을 사용하였고, 포화기로부터 일어날 수 있는 적분기 와인드업 문제를 극복하기 위해 적분기 안티와인드업 기법을 채용하였고, EA를 기반으로 PID 제어를 최적 동조하였다. 제안된 방법으로 CSTR의 농도제어에 적용한 결과 제어 성능이 향상되었음을 확인할 수 있었다. 차후 각 동작영역에서 지역 PID 제어를 동조하고 이들을 지능기법으로 계인 스케줄링하는 연구가 필요하다.

References

[1] W. H. Ray, *Advanced Process Control*, McGraw-Hill Book Co., N.Y., 1981.
 [2] J. P. Corriou, *Process Control: Theory and Applications*, Springer-Verlag, London, 2004.
 [3] B. W. Bequette, *Process Control: Modeling, Design, and Simulation*, Prentice Hall, 2002.
 [4] K. J. Åström, and T. Hägglund, *PID Controllers: theory, design and tuning*, ISA Press, 1995.
 [5] T. Pan, S. Li and W.-J. Cai, "Lazy Learning-Based Online Identification and Adaptive PID Control: A Case Study for CSTR Process," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 46, pp. 472-480, 2007.
 [6] U. S. Banu and G. Uma, "Fuzzy Gain Scheduled CSTR with GA-Based PID," *Chem. Eng. Comm.*, vol. 195, pp. 1213-1226, 2008.
 [7] W. D. Chang, "Nonlinear CSTR control system design using an artificial bee colony algorithm," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 31, pp. 1-9, 2013.
 [8] N. J. Krikelis, "State Feedback Integral Control with 'Intelligent' Integrators," *Int. J. of Control*, vol. 32, no. 3, pp. 465-473, 1980.

[9] A. S. Hodel and C. E. Hall, "Variable-Structure PID Control to Prevent Integrator Windup," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 2, pp. 442-451, 2001.
 [10] C. Bohn and D. P. Atherton, "An Analysis Package Comparing PID Anti-windup Strategies," *IEEE Systems Magazine*, vol. 15, no. 2, pp.34-40, 1995.
 [11] G. Jin and T. Tran, "A nature-inspired evolutionary algorithm based on spiral movements," *Proc. of the SICE Annual Conference 2010*, Taiwan, pp. 1643-1647, 2010.
 [12] H. Lee and G. Jin, "On-line Parameter Estimation of Continuous-time Systems using a Genetic Algorithm," *J. of Inst. of Control, Robotics and Systems*, vol. 4, no. 1, pp.76-81, 1998.
 [13] M. Kim, et al., "Design of an Auto-Tuning IMC-PID Controller for a Heater System Using uDEAS", *J. of Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 21, no. 4, pp.407-535, 2011

저 자 소개



진강규(Gang-Gyoo Jin)

2017년 : 한국해양대학교 기관학과 공학사

1985년 : FIT 전기·전자·컴퓨터공학과 공학석사

1996년 : University of Wales, Cardiff 전기·전자·시스템공학과 공학박사

1996년~현재 : 한국해양대학교 IT공학부 교수

관심분야 : 지능제어, 진화연산

Phone : +82-10-2831-0050

E-mail : ggjin@kmou.ac.kr