

비선형 PID 제어를 사용한 CSTR의 온도 제어

Temperature Control of a CSTR using a Nonlinear PID Controller

이 주 연, 소 건 백, 이 윤 형, 소 명 옥, 진 강 규*
(Joo-Yeon Lee¹, Gun-Baek So¹, Yun-Hyung Lee², Myung-Ok So³, and Gang-Gyoo Jin^{4*})

¹School of Ocean Science and Technology, Korea Maritime and Ocean University

²Education and Research Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology

³Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University

⁴Division of IT, Korea Maritime and Ocean University

Abstract: CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) which plays a key role in the chemical plants exhibits highly nonlinear behavior as well as time-varying behavior during operation. The control of CSTRs in the whole operating range has been a challenging problem to control engineers. So, a variety of feedback control forms and their tuning methods have been implemented to guarantee the satisfactory performance. This paper presents a scheme of designing a nonlinear PID controller incorporating with a GA (Genetic Algorithm) for the temperature control of a CSTR. The gains of the NPID controller are composed of easily implementable nonlinear functions based on the error and/or the error rate and its parameters are tuned using a GA by minimizing the ITAE (Integral of Absolute Error). Simulation works for reference tracking and disturbance rejecting performances and robustness to parameter changes show the feasibility of the proposed method.

Keywords: CSTR, temperature control, nonlinear PID controller, genetic algorithm

I. 서론

화학 반응을 일으키기 위해 사용되는 반응기는 화학공업의 공정 전체를 좌우할 만큼 그 역할은 대단히 크다. 반응기는 형태나 크기에 따라 크게 회분식(batch type)과 연속식(continuous type)으로 나뉘며, 연속식의 대표적인 것이 연속교반탱크반응기(CSTR)라 할 수 있다. CSTR 내에서 일어나는 화학 반응은 반응 물질의 농도, 온도, 압력, 촉매, 시간 등에 큰 영향을 받기 때문에 비선형성과 시변 특성이 강하고 또 동작점에 따라 안정 또는 불안정한 상태를 보이므로 제어가 대단히 까다로운 프로세스 중 하나이다[1-3].

이런 곳에 기존의 방법으로 동조된 제어기로 전 동작점에서 운전하면 경우에 따라서는 불안정해질 뿐만 아니라 성능도 좋지 못하게 된다. 따라서 보다 정밀하고 안정된 성능을 가지는 CSTR 프로세스용 제어를 설계하기 위하여 적응제어, 신경회로망, 퍼지제어, 진화기법 등을 적용한 많은 노력들이 있어 왔다[4-8].

Banu와 Uma는 CSTR의 농도를 제어하는 프로세스에서 전 영역을 저, 중, 고 농도 영역으로 구분하여 지역모델에 대한 상태 피드백 제어기의 게인 행렬을 극배치법으로 얻

어 퍼지 게인 스케줄링하는 방법 [4]과 GA로 동조된 PID 제어를 퍼지 게인 스케줄링하는 방법 [5]을 제안하였고, Nekoui 등 [6]은 CSTR 농도 제어용 PID 제어기의 파라미터를 PSO (Particle Swarm Optimization) 알고리즘으로 최적 동조하는 방법을 제안하였다. 이들은 한 동작점에서 모델을 얻고, ITAE (Integral of Time multiplied by Absolute Error)를 최소화 하는 관점에서 PID 파라미터들을 동조하고 있다. Chen과 Peng [7]은 CSTR의 냉각수 출구 온도를 제어하기 위해 제한치를 갖는 비선형 제어기(bounded nonlinear controller)를 학습제어하는 방법을 제안하였고, 변동하는 프로세스에 대한 학습 알고리즘은 Lyapunov 안정성 이론에 기초하여 얻어진다. Saoud 등 [8]은 신경회로망을 사용한 마이크로 컨트롤러에 기초한 임베디드 시스템을 제안하였고, 신경회로망은 역전파 알고리즘으로 학습된다. 이들은 서로 다른 제어 환경에서 나름대로 만족스러운 성과를 제시하고 있으나 개선의 여지를 남기고 있다.

따라서 본 연구에서는 CSTR 프로세스의 온도 제어에 저자들이 제안한 비선형 PID (Nonlinear PID: NPID) 제어를 적용하고 GA로 최적 동조하는 문제를 다룬다. 이때 현장에서 흔히 접할 수 있는 포화기를 고려하였고, 이상적인 미분 동작의 한계성을 극복하기 위해 필터식을 가진 PID 제어기의 비선형 비례, 적분 및 미분 이득의 파라미터들은 GA를 기반으로 ITAE 평가함수를 최소화 하는 관점에서 최적 동조된다. 제안하는 방법은 시뮬레이션을 통해 적응제어기법과 선형 PID 제어기의 성능과 비교하여 그 유효성을 확인한다.

* Corresponding Author

Manuscript received November 28, 2014 / revised January 12, 2015 / accepted February 23, 2015

이주연, 소건백: 해양대학교 해양과학기술대학원

(ahddl71@naver.com/superior3608@naver.com)

이윤형: 한국해양수산연수원 교육연구팀(domse54@hanmail.net)

소명옥: 한국해양대학교 기관공학부(smo@kmou.ac.kr)

진강규: 한국해양대학교 IT공학부(ggjin@kmou.ac.kr)

II. CSTR 모델링

1. CSTR

CSTR 내에서 일어나는 반응은 발열(exothermic)이거나 흡열(endothermic)이어서 반응기 내의 온도를 일정하게 유지해 주기 위해서는 외부 매체를 통해 냉각하거나 가열해 줄 필요가 있다. 그림 1은 CSTR 프로세스의 개략도이고, 여기에는 발열반응이 일어나는 것으로 간주한다. 그림에서 C_f , T_f , F_f 와 C , T , F 는 각각 유체의 입구와 출구 측 농도 [mol/m³], 온도[K]와 유량[m³/sec]을 T_{cf} , F_{cf} 와 T_c , F_c 는 각각 냉각수의 입구와 출구 측 온도와 유량을 의미한다.

문제를 단순화하기 위해 비가역 반응($A \rightarrow B$)은 발열반응이고, 반응은 반응물에 대하여 1차로 간주되며, 반응기 내의 유체는 잘 교반되며, 입출력 유량은 같고, 파라미터들이 일정하고 또 온도와는 무관하다는 가정 하에 CSTR에 물질과 에너지 보존법칙을 적용하면 다음 무차원화 방정식을 얻게 된다[1].

$$\dot{x}_1 = -x_1 + D_a(1-x_1)\exp\left(\frac{x_2}{1+x_2/\gamma}\right) + d_1 \quad (1a)$$

$$\dot{x}_2 = -(1+\beta)x_2 + HD_a(1-x_1)\exp\left(\frac{x_2}{1+x_2/\gamma}\right) + \beta u + d_2 \quad (1b)$$

$$y = x_2 \quad (1c)$$

여기서 x_1 과 x_2 는 각각 농도 C 와 온도 T 를 나타내는 상태변수이고, y 와 u 는 각각 출력과 입력으로서 유체의 출구 온도와 냉각수 온도를, d_1 과 d_2 는 외란을 의미한다. 이때 x_1 , x_2 , u 와 t 는 각각 식 (2)로 무차원화 되었다.

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

$$t = t' \frac{F_f}{V} \quad (2b)$$

한편 D_a 는 Damökhler number, H 는 반응열, β 는 열전달계수, V 는 CSTR의 체적[m³], $\gamma = E/RT_f$ 이고 E 는 활성화 에너지[cal/mol]와 R 은 기체상수[cal/mol-K]를 의미한다.

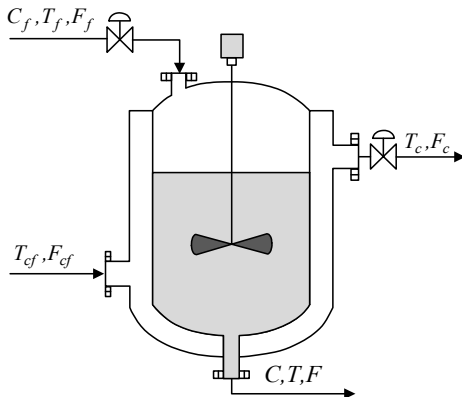


그림 1. 비등온 CSTR 프로세스.
Fig. 1. Nonisothermal CSTR process.

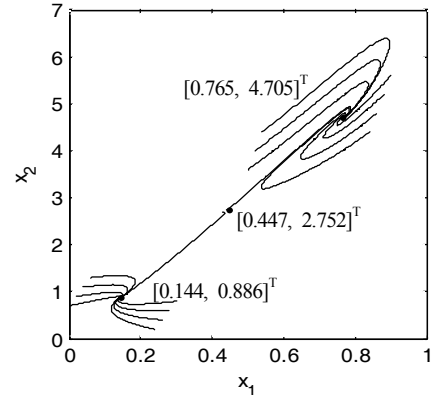


그림 2. 세 평형점과 위상선도.
Fig. 2. Phase-portrait for three equilibrium points.

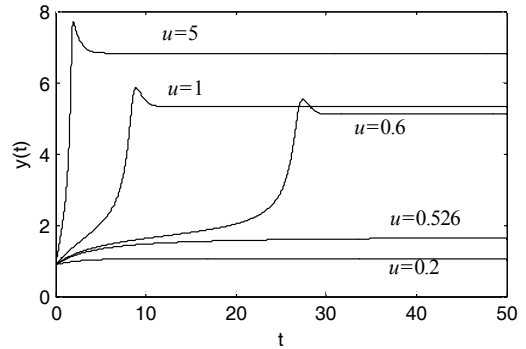


그림 3. 계단형 입력에 대한 응답.
Fig. 3. Responses for step inputs.

식 (1)의 개회로 시스템이 정상상태에서 $D_a=0.072$, $\gamma=20$, $H=8$, $\beta=0.3$ 의 값을 가질 때에는 3개의 평형점(equilibrium point) $x_{eA}=[0.144, 0.886]^T$, $x_{eB}=[0.447, 2.752]^T$, $x_{eC}=[0.765, 4.705]^T$ 이 존재하며 x_{eA} 와 x_{eC} 는 안정한 평형점, x_{eB} 는 불안정한 평형점이다. 그림 2는 위상선도 상의 세 평형점들을 보여준다.

계단형의 입력 u 에 대해 CSTR의 개회로 응답 y 를 그린 그림 3에서 보면 u 의 크기에 따라 응답 속도와 정상상태 이득이 확연히 달라지는 것을 알 수 있다. 이러한 비선형성 때문에 CSTR를 제어하는 것이 쉽지 않음을 짐작할 수 있다.

III. 비선형 PID 제어기

최근 표준형 PID 제어기의 프레임에 비선형 요소를 도입하는 일련의 연구들이 수행되었고, 이들은 오차 또는 오차의 변화율에 기초한 다양한 형태의 비선형 함수를 도입하고 있다[10-14]. 본 연구에서는 CSTR의 온도제어에 식 (3)으로 표시되는 NPID 제어기를 사용하고 설정치 추종 성능을 개선한다. NPID 제어기는 선형 PID 제어기의 세 동작과 동일한 의미를 가지는 비례, 적분, 미분 동작의 병렬결합으로 되어 있다.

$$C(s) = K_p(e) + \frac{K_i(e)}{s} + \frac{K_d(e, \dot{e})s}{1 + T_f(e, \dot{e})s} \quad (3)$$

여기서 $K_p(e), K_i(e), K_d(e, \dot{e})$ 및 $T_f(e, \dot{e})$ 는 오차 e 와 오차 변화율 \dot{e} 의 비선형 함수로 시변이득이고, $T_f(e, \dot{e}) = T_d(e, \dot{e})/N$ 는 필터 시정수이며, 최대미분이득(maximum derivative gain) N 은 8~20 사이에서 경험적으로 정해지는 상수이고 문헌에 자주 $N=10$ 을 사용하고 있어 [9], 본 논문에서도 이 값을 사용한다.

NPID 제어기의 이득은 사용 목적이나 제어 환경에 따라 다양한 형태로 기술될 수 있지만, 현재까지 발표된 문헌에는 시그모이드(Sigmoid)나 쌍곡선(Hyperbolic) 함수가 주를 이루고 있다[10-13]. 그러나 이러한 함수들은 마이크로컨트롤러 상에서 구현이 어려워 저자들은 단순하면서도 구현이 쉬운 함수를 제안하였고[14], 본 논문에서도 이를 사용한다.

1. 비선형 비례이득(Nonlinear proportional gain)

비례동작 u_p 는 비례이득이나 오차의 크기에 비례해서 커지며, 속응성을 높이기 위해서는 오차가 클 때에 비례이득도 적절히 크게 해줄 필요는 있지만, 응답이 설정치 부근에 도달해 오차가 작을 때에도 계속 큰 비례이득을 유지하면 과도한 제어로 오버슈트와 진동현상이 일어날 수 있다. 이 점을 고려해 NPID 제어기의 비례이득 $K_p(e)$ 는 e 의 크기에 따라 적절히 조절되며 식 (4)로 정의된다.

$$K_p(e) = K_p g_p(e) \tag{4a}$$

$$g_p(e) = 1 - \frac{1}{a_p + (c_p e)^6} \tag{4b}$$

여기서 K_p 는 양의 상수이고, $g_p(e)$ 는 $a_p(\geq 1)$ 와 $c_p(>0)$ 의 비선형 함수이다. a_p 는 $e = 0$ 부근에서 함수의 깊이, c_p 는 폭을 결정해주는 조정 파라미터로서 그림 4는 a_p 와 c_p 의 변화에 따른 $g_p(e)$ 의 모양을 보여준다.

식 (4)에서 e 가 커지면 $g_p(e)$ 는 상한값 1에 수렴하고, 반대로 작아지면 하한값 $(1 - 1/a_p)$ 에 수렴되지만, 그 크기는 a_p 값에 따라 달라진다. 특히 식 (4b)에서 $(c_p e)^6$ 을 사용함으로써 $g_p(e)$ 는 e 에 대해 대칭이 되고 또 $e = 0$ 부근에서 평활한 영역을 가져 여기서는 과도한 이득 변동이 일어나지 않게 된다.

2. 비선형 적분이득(Nonlinear integral gain)

적분동작 u_i 는 누적오차 값이 클수록 또는 적분이득이 클수록 더 커진다. 오차 e 의 절대값이 클 때에는 적분이득 값을 줄여 오버슈트 발생에 대비하고, e 의 절대값이 작을 때에는 적분이득 값을 크게 해서 정상상태 오차를 줄이도록 식 (5)를 사용한다.

$$K_i(e) = K_i g_i(e) \tag{5a}$$

$$g_i(e) = \frac{1}{1 + (c_i e)^6} \tag{5b}$$

여기서 K_i 는 양의 이득이고, $g_i(e)$ 는 $c_i(>0)$ 를 파라미터로 갖는 비선형 함수이고 0과 1 사이의 값을 갖는다. 그림 5는 c_i 의 크기에 따른 $g_i(e)$ 의 변화를 나타낸 것이다. c_i 는 함수의 폭을 결정하며 c_i 값이 작을수록 폭은 넓어진다.

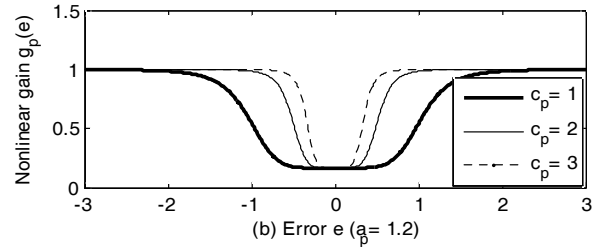
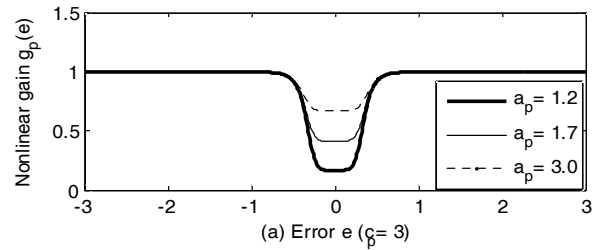


그림 4. a_p 및 c_p 의 변화에 대한 $g_p(e)$ 의 형태.

Fig. 4. $g_p(e)$ shapes to changes of a_p and c_p .

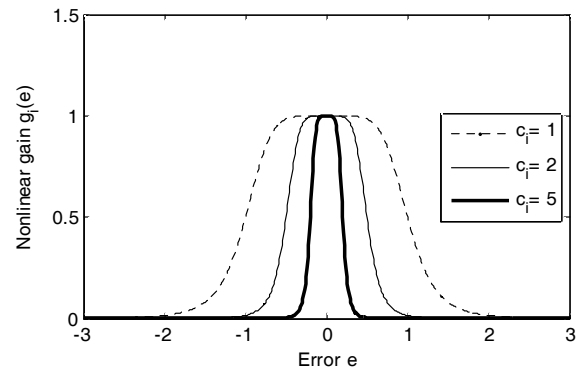


그림 5. c_i 의 변화에 대한 $g_i(e)$ 형태.

Fig. 5. $g_i(e)$ shapes to changes of c_i .

3. 비선형 미분이득(Nonlinear derivative gain)

미분동작 u_d 는 오차의 변화율과 미분이득에 비례해서 커지고, u_p 와 u_i 가 커지면 출력도 같이 커질 것을 미리 예측하고 제동을 걸게 된다. 전체 제어 사이클 동안 필요 이상의 제동을 걸면 응답속도가 느려질 수 있고, 특정 사이클 동안만 제동을 걸면 u_p 와 u_i 를 더 과감하게 활용할 수 있고 또 오버슈트도 줄일 수 있다. 따라서 응답이 $e\dot{e} > 0$ 인 영역에서 큰 제동이 걸도록 미분이득의 크기를 변경하기 위해 식 (6)으로 기술되는 시변 함수를 사용한다.

$$K_d(e, \dot{e}) = K_d g_d(e, \dot{e}) \tag{6a}$$

$$g_d(e, \dot{e}) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{a_d + (c_d e)^6}, & e\dot{e} > 0 \\ 1 - \frac{1}{a_d}, & \text{elsewhere} \end{cases} \tag{6b}$$

여기서 K_d 는 양의 이득이고, $g_d(e, \dot{e})$ 는 두 매개변수 $a_d(\geq 1)$ 와 $c_d(>0)$ 를 가지는 비선형 함수이고 역시 0과 1 사이의 값을 갖는다.

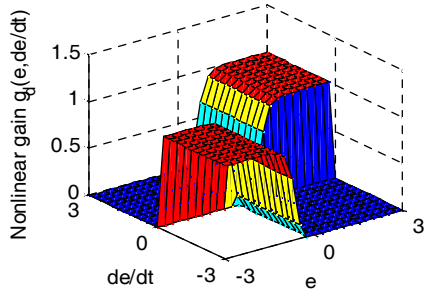


그림 6. e 와 \dot{e} 의 변화에 대한 $g_d(e, \dot{e})$ 의 모양 ($a_d=1, c_d=1.5$).
Fig. 6. $g_d(e, \dot{e})$ shape to changes of e and \dot{e} ($a_d=1, c_d=1.5$).

그림 6은 오차 e 와 오차의 변화율 \dot{e} 를 변화시켜 가며 $g_d(e, \dot{e})$ 를 그린 것이다. 그림의 $e\dot{e} > 0$ 평면에서 e 의 절대값이 작으면 $g_d(e, \dot{e})$ 는 $(1-1/a_d)$ 에 수렴하지만 그 크기는 a_d 값에 따라 달라지고, 반대로 크면 1에 수렴한다. 한편 식 (3)의 $T_f(e, \dot{e})$ 는 $T_f(e, \dot{e}) = K_d(e, \dot{e}) / (NK_p(e))$ 로부터 구할 수 있다.

IV. NPID 제어기의 동조

본 연구에서 다루는 CSTR 프로세스는 제어입력으로 냉각자켓의 출구온도(T_c)를 변경하기 때문에 물리적으로 한계가 있을 수밖에 없다. 따라서 제어기와 CSTR 사이에는 다음 비선형 식으로 표시되는 포화기가 존재하는 것으로 간주한다.

$$u_{sat} = \begin{cases} u_{min}, & u < u_{min} \\ u, & u_{min} \leq u \leq u_{max} \\ u_{max}, & u > u_{max} \end{cases} \quad (7)$$

앞서 언급하였듯이 NPID 제어기의 비선형 이득들은 총 8개의 파라미터를 가지고 있고, 제어기의 동조는 포화기가 포함된 그림 7의 전체 제어 프로세스가 원하는 설정치 추종 성능을 유지하도록 이들을 적절히 조정하게 된다.

동조를 위해 $t=0$ 에서 제어 프로세스가 안정한 평형점 x_{eA} 에 머물 때 설정치 $r(t)$ 를 변경하여 불안정한 평형점 x_{eB} 로 옮기고, 다시 $t=15$ 에서 $r(t)$ 를 변경하여 안정한 평형점 x_{eC} 로 옮기는 시나리오를 고려한다. 이를 위해 $t=0$ 에서 $r(t)$ 를 0.886에서 2.752로 계단형으로 변경하고, 다시 $t=15$ 에서 $r(t)$ 를 2.752에서 4.705로 계단형으로 변경하며 데이터를 취한다. 결국 동조는 비선형 다변수 최적화 문제로 귀착되며, 이를 풀기 위해 GA [11,12]를 이용한다. 이때 시스템의 성능이 좋고 나쁨을 계량하는 평가함수로 ITAE를 사용한다.

$$J(\phi) = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (8)$$

여기서 $\phi = [K_p, K_i, K_d, a_p, c_p, c_i, a_d, c_d]^T \in \mathbb{R}^8$ 는 제어기 파라미터로 구성되는 벡터이고, $e(t)$ 는 설정치 $r(t)$ 와 출력 $y(t)$ 간의 오차이며, 적분시간 t_f 는 이후의 적분값이 무시될 수 있도록 충분히 큰 값이다.

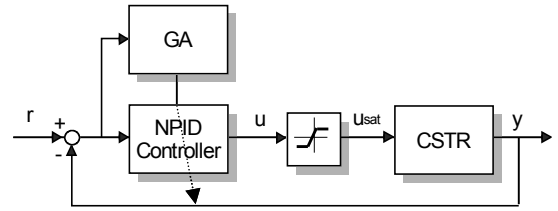


그림 7. 포화기를 갖는 NPID 제어기의 동조.
Fig. 7. Tuning of the NPID controller with a saturator.

V. 모의실험 및 검토

제안된 방법의 성능평가를 위해 모의실험을 실시하고 Chen과 Peng의 적응기법과 GA 기반의 선형 PID 제어기와 비교하였다.

1. 비교대상의 제어기법

최근 Chen과 Peng [7]은 포화기 $u_{min} \leq u(t) \leq u_{max}$ 를 가지는 시스템을 위한 적응 제어를 제안하였고 제어입력은 다음 식으로 주어진다.

$$u(t) = \frac{1}{2} [(1 + \tilde{u}(t))u_{max} + (1 - \tilde{u}(t))u_{min}] \quad (9)$$

여기서 $\tilde{u}(t)$ 는 하이퍼볼릭탄젠트(hyperbolic tangent) 함수로서 다음과 같이 주어진다.

$$\tilde{u}(t) = \frac{1 - \exp[-m(e(t) - \theta(t))]}{1 + \exp[-m(e(t) - \theta(t))]} \quad (10)$$

여기서 $e(t)$ 는 설정치와 출력과의 오차, m 은 기울기(slope), $\theta(t)$ 는 바이어스(bias)를 의미한다. $\tilde{u}(t)$ 는 -1과 1사이의 값을 가지므로 $u(t)$ 는 포화기의 제한치 이내로 유지된다.

식 (10)에서 알 수 있듯이 $\tilde{u}(t)$ 는 2개의 조정 파라미터를 가지고 있으며, 특히 기울기 m 의 크기와 부호는 제어기의 특성에 민감하게 반응하므로, Chen과 Peng은 문제에 따라 m 을 고정시키고 바이어스 $\theta(t)$ 만 적응적으로 조정하는 알고리즘을 제안하고 있다.

$\theta(t)$ 의 동조 알고리즘은 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{\theta}(t) = -\eta m e(t) (1 - \tilde{u}(t)) (1 + \tilde{u}(t)) \text{sign}\left(\frac{\partial y}{\partial u}\right) \quad (11)$$

여기서 $\eta > 0$ 는 학습률(learning rate)이고, $\text{sign}\left(\frac{\partial y}{\partial u}\right)$ 는 시스템의 응답 방향에 따라 결정되는 ± 1 의 값이며 계단응답 실험을 하거나 제어대상의 물리적 특성으로부터 구해진다. 이렇게 함으로써 알고리즘은 설정치와 실제 출력간의 오차를 가지고 연속적으로 제어기의 파라미터를 조정하게 된다.

Chen과 Peng은 CSTR의 온도제어 문제에 적용하면서 $\eta = 0.2$, $m = 5$ 를 사용하고 있고, CSTR 프로세스는 특성상 양의 이득을 가지므로 $\text{sign}\left(\frac{\partial y}{\partial u}\right)$ 는 1이 된다.

또한 같은 비교 목적으로 사용되는 선형 PID(Linear PID: LPID) 제어기의 전달함수는 식 (12)와 같다.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{1 + T_f s} \quad (12)$$

여기서 $T_f = T_d/N$ 는 필터 시정수이고, $N = 10$ 이 사용되었다.

LPID 제어기의 동조는 그림 7의 NPID 제어기 대신 LPID 제어기로 대체한 페루프 시스템에서 수행되고, 비례이득 K_p , 적분이득 K_i , 미분이득 K_d 는 NPID 제어기를 동조할 때와 동일한 시나리오로 데이터를 취해 식 (8)의 평가 함수가 최소가 되는 관점에서 GA로 동조된다.

2. 모의실험용 데이터와 제어기 파라미터

모의실험에 사용된 CSTR의 데이터로는 $D_a = 0.072$, $\gamma = 20$, $H = 8$, $\beta = 0.3$, 포화기의 상하한 값은 ± 5 , 샘플링 간격은 0.02로 하였다. GA의 집단크기로는 $P_{size} = 40$, 교배확률로는 $P_c = 0.9$, 동적 돌연변이의 매개변수로는 $P_m = 0.05$, $b = 4$ 를 사용하였고[11], NPID 제어기와 LPID 제어기의 파라미터들은 구간 $0 < K_p, K_i, K_d \leq 500$, $1 < a_p, a_d \leq 25$, $0 < c_p, c_i, c_d \leq 25$ 에서 탐색되었다.

GA를 기반으로 동조된 본 방법의 NPID 제어기와 LPID 제어기의 결과는 표 1에 나타내었다.

3. 성능 비교

먼저 CSTR 냉각수 출구 측 온도를 변경하는 제어 환경을 고려해 설정치 추종 실험을 실시하였다. 실험은 프

표 1. 제안된 NPID 제어기와 LPID 제어기의 동조된 파라미터.

Table 1. Tuned parameters of the proposed NPID controller and the LPID controller.

Methods	Parameters								
	K_p	K_i	K_d	a_p	c_p	c_i	a_d	c_d	
Proposed	3.76	261.72	451.22	13.64	14.70	7.80	8.44	2.07	
LPID	1.30	7.62	342.33	-	-	-	-	-	

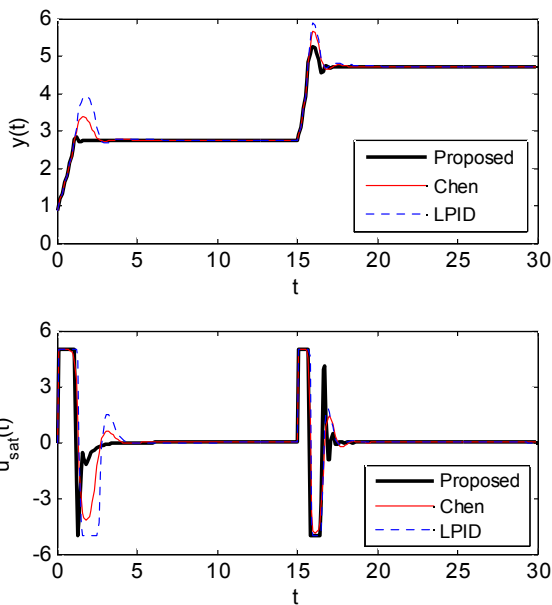


그림 8. r 이 0.886에서 4.705로 증가될 때 설정치 추종 응답.
Fig. 8. Set-point tracking responses when r is step-wisely increased from 0.886 to 4.705.

로세스가 안정한 평형상태 $\mathbf{x}_{eA} = [0.144, 0.886]^T$ 에 있을 때 설정치를 $r = 2.75$ 로 계단형으로 증가시켜 출력 y 를 불안정한 평형상태 \mathbf{x}_{eB} 로 가져가고 다시 $t = 15$ 에서 $r = 4.705$ 로 계단형으로 증가시켜 안정한 평형상태 \mathbf{x}_{eC} 에 이르게 하였다. 그림 8은 이때의 y 와 포화기 출력 u_{sat} 를 그린 것이다.

그림에서 보면 GA로 동조한 두 LPID, NPID 제어기와 적응 제어기의 응답들은 모두 시간이 경과하면 정상편차 없이 설정치에 도달하지만, 제안한 방법이 두 방법보다 더 작은 오버슈트를 가지고 빨리 접근해 가는 것을 알 수 있다. 특히 제안한 방법이 \mathbf{x}_{eA} 에서 \mathbf{x}_{eB} 로 변경될 때 보다 \mathbf{x}_{eB} 에서 \mathbf{x}_{eC} 로 변경될 때 응답의 오버슈트가 더 큰 것은 CSTR의 내재적인 비선형성 때문인 것으로 생각된다.

표 2는 세 방법의 정량적인 성능을 보이기 위해 오버슈트(M_p), 도달시간($t_r = t_{90} - t_{10}$), 2% 정정시간(t_s), 절대오차의 적분(LAE)를 계산하고 요약한 것이다. 이때 t_{10} 과 t_{90} 은 각각 출력이 설정치의 10%와 90%에 도달하는데 걸리는 시간을 뜻한다. 표에서 보면 제안한 방법이 두 방법보다 모든 면에서 성능이 앞서는 것을 확인할 수 있고, 특히 LPID 제

표 2. r 이 0.886에서 4.705로 증가될 때 설정치 추종성능의 비교.

Table 2. Comparison of set-point tracking performances when r is step-wisely increased from 0.886 to 4.705.

Methods	$r = 0.886 \rightarrow 2.75$				$r = 2.75 \rightarrow 4.705$			
	M_p	t_r	t_s	LAE	M_p	t_r	t_s	LAE
Proposed	4.18	0.89	1.51	1.23	28.77	0.52	1.84	1.21
Chen	33.84	0.89	2.58	1.82	48.99	0.52	2.94	1.53
LPID	63.41	0.86	4.61	2.57	59.86	0.52	4.29	1.81

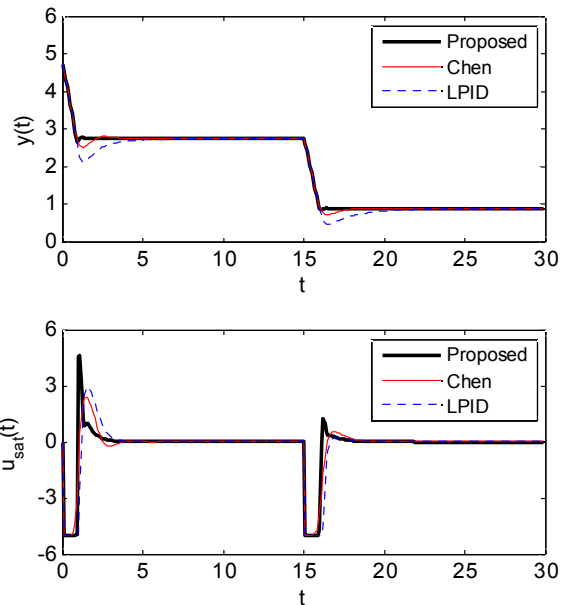


그림 9. r 이 4.705에서 0.886으로 감소될 때 설정치 추종 응답.
Fig. 9. Set-point tracking responses when r is step-wisely decreased from 4.705 to 0.886.

어기의 성능이 제일 좋지 못한 것은 앞서 잠시 언급하였듯이 선형 제어기의 한계성 때문이라 생각된다.

CSTR의 내재적인 비선형성은 r 을 높일 때와 낮출 때의 응답특성이 서로 다를 수 있으므로, 반대로 그림 9는 프로세스가 평형상태 $x_{eC} = [0.765, 4.705]^T$ 에 있을 때 r 을 2.75로 다시 x_{eB} 에 있을 때 $t = 15$ 에서 r 을 0.886으로 계단형으로 줄이면서 응답을 그린 것이다.

다음은 제안한 방법의 외란 억제 성능을 확인하기 위하여 설정치를 $r = 2.75$ 에 고정하고 식 (1)의 우측 단에 계단형의 서로 다른 외란 d_1 과 d_2 를 투입하는 두 가지 시뮬레이션을 실시하였다. 첫 번째 시뮬레이션은 프로세스가 불안정한 평형점 x_{eB} 에 있을 때 $t = 5$ 이후 계단형의 외란 $d_1 = 0.2$, $d_2 = 0.2$ 를, 두 번째 시뮬레이션은 $d_1 = 0.2$, $d_2 = -0.2$ 를 투입하였다. 그림 10의 위와 아래 그림은 두 가지 시뮬레이션의 결과를 그린 것이다. 이 경우에도 제안한 방법은 효과적으로 외란을 억제하고 있지만, 반면에 나머지 두 방법은 외란으로부터 회복시간이 더 많이 걸리는 것을 알 수 있다.

다시 세 방법의 성능을 정량적으로 계량하기 위하여 응답변동의 피크치(perturbance peak) M_{peak} 와 외란의 영향이

소멸되고 출력이 설정치로 회복되는데 걸리는 회복시간(recovery time) t_{rcy} 를 구하였다. 이때 $M_{peak} = |r - y_{max}|$ 또는 $|r - y_{min}|$ 를 의미하고, t_{rcy} 는 출력 y 가 설정치 r 의 2% 이내로 회복되는데 걸리는 시간을 의미한다. 표 4에서 보면 제안한 방법의 성능이 전반적으로 우수함을 확인할 수 있다. 특히 두 방법은 M_{peak} 도 클 뿐 아니라 t_{rcy} 도 긴 것을 알 수 있다.

CSTR은 시변 프로세스이고 운전 중 파라미터 변동이 일어날 수 있으므로 파라미터 변동에 대한 제안한 방법의 강인성을 확인하기 위해 두 가지 시뮬레이션을 실시하였다. 그림 11의 위 그림은 제어 프로세스가 x_{eB} 에 머물고 있을 때 $t = 5$ 이후 파라미터 D_a 를 0.072에서 0.09로 변경하며 얻은 결과이고, 아래 그림은 $t = 5$ 이후 D_a 를 0.072에서 0.09로, B 를 8에서 5로 동시에 변경하며 얻은 응답을 그린 것이다.

제안된 방법은 파라미터 변동에 덜 민감한데 비해, 나머지 두 방법은 피크값이 클 뿐만 아니라 회복시간도 길어, 전반적으로 만족스럽지 못함을 알 수 있다. 이는 정량적인 결과를 보여주는 표 5에서도 확인할 수 있다.

표 3. r 이 4.705에서 0.886로 감소될 때 설정치 추종성능의 비교.

Table 3. Comparison of set-point tracking performances when r is decreased from 4.705 to 0.886.

Methods	$r = 4.705 \rightarrow 2.75$				$r = 2.75 \rightarrow 0.886$			
	M_p	t_r	t_s	IAE	M_p	t_r	t_s	IAE
Proposed	5.28	0.67	1.03	1.03	1.74	0.77	0.97	1.04
Chen	12.41	0.68	2.87	1.23	9.29	0.79	2.75	1.24
LPID	32.38	0.67	5.55	2.09	22.99	0.77	6.32	2.06

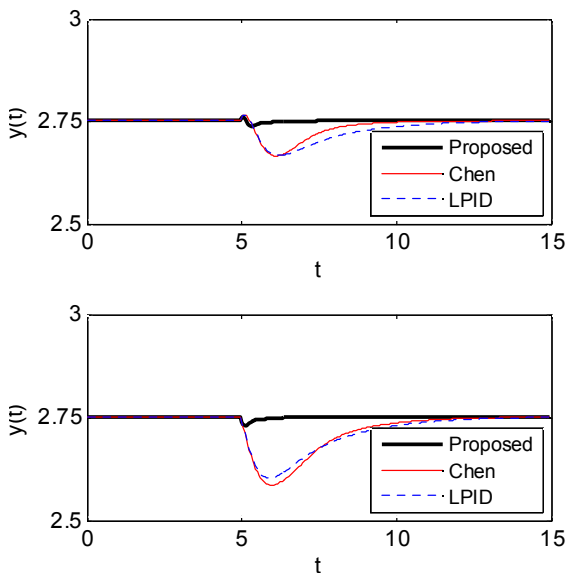


그림 10. $r = 2.75$ 인 동안 d_1 과 d_2 를 계단형으로 변경시켰을 때의 외란 제거응답.

Fig. 10. Disturbance rejection responses when d_1 and d_2 are step-wisely changed while $r = 2.75$.

표 4. d_1 과 d_2 를 계단형으로 변경시켰을 때의 외란 억제성능의 비교.

Table 4. Comparison of disturbance rejection performances when d_1 and d_2 are step-wisely changed.

Methods	$d_1 = 0 \rightarrow 0.2, d_2 = 0 \rightarrow 0.2$			$d_1 = 0 \rightarrow 0.2, d_2 = 0 \rightarrow -0.2$		
	M_{peak}	t_{rcy}	IAE	M_{peak}	t_{rcy}	IAE
Proposed	0.01	2.39	0.01	0.02	2.08	0.01
Chen	0.09	5.76	0.22	0.17	7.34	0.42
LPID	0.08	5.22	0.21	0.15	8.41	0.42

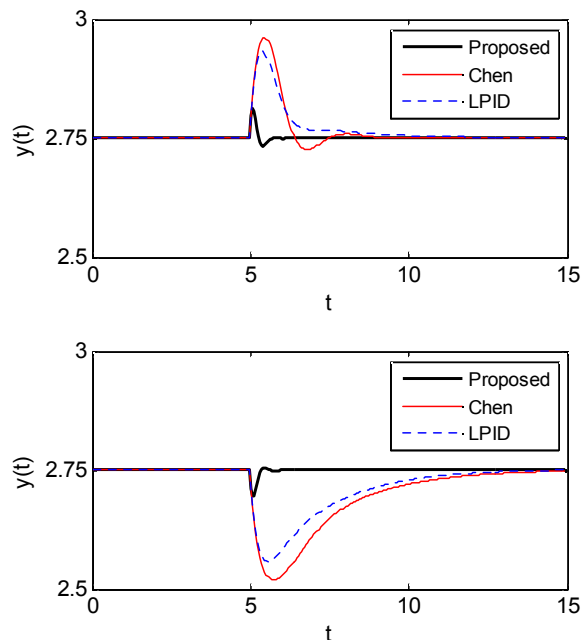


그림 11. 파라미터 변동에 대한 응답 비교.

Fig. 11. Response comparison to parameter changes.

표 5. 계단형 파라미터 변경시켰을 때의 강인성 비교.

Table 5. Comparison of robustness to step-wisely parameter changes.

Methods	$D_a = 0.072 \rightarrow 0.09$			$D_a = 0.072 \rightarrow 0.09, B = 8 \rightarrow 5$		
	M_{peak}	t_{rcy}	I_{AE}	M_{peak}	t_{rcy}	I_{AE}
Proposed	0.06	1.20	0.02	0.06	1.04	0.01
Chen	0.21	3.53	0.26	0.23	9.13	0.64
LPID	0.18	5.22	0.20	0.19	8.21	0.49

VI. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 NPID 제어기로 CSTR 프로세스의 온도를 제어하는 문제를 다루었다. 현장에서 흔히 접할 수 있는 포화기를 고려하였고, 필터식을 가진 NPID 제어기의 비선형 비례, 적분 및 미분 이득의 파라미터들은 GA를 기반으로 ITAE 평가함수를 최소화 하는 관점에서 최적 동조되었다. 제안된 방법을 검증하기 위해 적응제어기법과 선형 PID 제어기의 성능과 비교한 결과 제어 성능이 향상되었음을 확인할 수 있었다. 차후 안티와인드업기법을 결합한 비선형 PID 제어기의 동조에 관한 연구가 필요하다고 사료된다.

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] U. S. Banu and G. Uma, "Fuzzy gain scheduled pole placement based on state feedback control of CSTR," *IET UK Int. Conf. on Information and Communication Technology in Electrical Sciences (ICTES 2007)*, India, pp. 63-68, 2007.

[5] U. S. Banu and G. Uma, "Fuzzy gain scheduled CSTR with GA-Based PID," *Chem. Eng. Comm.*, vol. 195, pp. 1213-1226, 2008.

[6] M. A. Nekoui, M. A. Khameneh, and M. H. Kazemi, "Optimal design of PID controller for a CSTR system using particle swarm optimization (PSO)," *14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2010*, Ohrid, Republic of Macedonia, pp. T7-63-T7-66, 2010.

[7] C. T. Chen and S. T. Peng, "Learning control of process systems with hard input constraints," *J. of Process Control*, vol. 9, pp. 151-160, 1999.

[8] L. S. Saoud, F. Rahmoune, V. Tourchine, and K. Baddari, "An inexpensive embedded electronic continuous stirred tank reactor (CSTR) based on neural networks," *2011 International Conference on Multimedia Technology (ICMT)*, China, pp. 6233-6237, 2011.

[9] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*, ISA Press, 1995.

[10] M. Korkmaz, O. Aydogdu, and H. Dogan, "Design and performance comparison of variable parameter nonlinear PID controller and genetic algorithm based PID controller," *Proc. of 2012 IEEE Int. Symp. on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, pp. 1- 5, 2012.

[11] K. Kianfar, R. Amiri, and A. Bozorgmehr, "Designing the non-linear PID controller for a missile," *2011 First Int. Conf. on Informatics and Computational Intelligence*, Bandung, Indonesia, pp. 171-175, 2011.

[12] H. Zhang and B. Hu, "The Application of nonlinear PID controller in generator excitation system," *Energy Procedia*, vol. 17, pp. 202-207, 2012.

[13] J. Chen and B. Lu et al., "A nonlinear PID controller for electro-hydraulic servo system based on PSO algorithm," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 141, pp. 157-161, 2011.

[14] G. So, M. So, and G. Jin, "EA-based design of a nonlinear PID controller," *Proc. of the 37th KOSME Conference*, pp. 374-374, Jinhae, Korea, 2013.

[15] G. Jin, *Genetic Algorithms and Their Applications*, Kyowoo Publishing Co., 2000.



이 주 연

2012년 한국해양대학교 IT공학부 공학사. 2013년 한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 석사과정 재학중. 관심분야는 프로세스 제어, PID 제어.



소 건 백

2009년 한국해양대학교 선박전자기계공학부 졸업. 2010년 현대상선 주식회사. 2012년 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과. 2015년 한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 PID 제어, 유전알고리즘.



이 윤 형

2002년 한국해양대학교 기관공학부 졸업. 2004년 동 대학원 공학석사. 2007년 동대학원 공학박사. 2008년~2014년 6월 부산항만연수원 교수. 2014년 7월~현재 한국해양수산연수원 교수. 관심분야는 지능제어, 유전알고리즘 응용.



소 명 옥

1980년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1989년 동 대학원 기관학과 석사. 1997년 동 대학원 박사. 2005년~2006년 (영) University of Wales Cardiff 파견교수. 현재 한국해양대학교 기관공학부 교수. 관심분야는 퍼지제어, 최적제어, 항만하역장비 제어.



진 강 규

1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1985년 FIT 전기·전자·컴퓨터공학과 공학석사. 1996년 University of Wales, Cardiff 전기·전자·시스템공학과 공학박사. 1996년~현재 한국해양대학교 IT공학부 교수. 관심분야는 지능제어, 진화연산과 응용.