

시간지연을 갖는 불안정한 시스템의 PID 제어

이수룡* · 이윤형** · 안종갑*** · 손정기** · 류기탁*** · 소명옥†

(원고접수일 : 2009년 3월 4일, 원고수정일 : 2009년 7월 1일, 심사완료일 : 2009년 7월 10일)

PID Control of Unstable Processes with Time Delay

Soo-Lyong, Lee* · Yun-Hyung, Lee** · Jong-Kap Ahn*** · Jung-Ki Son** · Ki-Tak Ryu*** and Myung-Ok, So†

Abstract : PID control is widely used to control stable processes, however, PID control for unstable processes is less common. In this paper, systematic tuning methods are derived to tune the PID controller for unstable FOPTD(Forst Order Plus Time Delay) processes. The proposed PID controllers for set-point tracking and disturbance rejection problem are tuned based on minimizing the performance indexes (IAE, ISE, ITAE) using a real-coded genetic algorithm. Simulation example is given to illustrate the set-point tracking and disturbance rejection performance of the proposed method.

Key words : Unstable FOPTD(First Order Plus Time Delay) process(시간지연을 갖는 불안정 시스템), PID controller(PID 제어기), Performance index(성능지수), Real-coded genetic algorithm(실수코딩 유전알고리즘)

1. 서 론

대부분의 산업 프로세스들은 2차 이상의 고차 프로세스로서 안정한 개회로 시스템(Open loop system)이다. 또한, 이 고차 프로세스에 적절한 방법을 이용하면 시간지연을 갖는 1차 시스템으로 근사화될 수 있어서 PID 제어기의 설계방법들은 주로 이러한 프로세스를 대상으로 하고 있고, 많은 연구가 진행되어왔다⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾.

이번 연구에서 다루고자 하는 시스템은 불안정

프로세스로서 특성근이 s-평면상의 우반부에 한 개 존재하는 형태이다. 여기에 대부분의 공정에 존재하는 시간지연(Time delay)도 함께 고려한 불안정한 FOPTD (Unstable First Order Plus Time Delay) 프로세스이다. 이러한 형태를 가지는 프로세스는 특성근의 위치 때문에 근원적으로 불안정한 응답특성을 보일뿐만 아니라 안정 시스템에서 획득할 수 있는 제어성능을 보장할 수 없어 PID 제어기 설계가 까다롭다.

불안정 FOPTD 프로세스의 PID 제어에 관한

† 교신저자(한국해양대학교 선박전자기계공학부, E-mail:smo@hhu.ac.kr, Tel:051-410-4248)

* 동명대학교 조선공학과

** 한국항만연수원 부산연수원

*** 한국해양수산연수원

기존의 연구로 De Paor과 O'Malley^[5]는 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols)방법을 개선하여 최적 이득여유와 최적 위상여유를 기반으로 하는 PID 제어기를 동조하는 방법을 제안하였다.

이 후 Venkatasankar와 Chidambaram^[6]이 De Paor과 O'Malley 방법에서 필요한 수치 해석적 방법 대신 근사적 해법을 이용해 P 제어기와 PI 제어기를 제안하였고, Poulin과 Pomerleau^[7]는 최대 피크 공진에 기초하여 PI 제어기와 PID 제어기를 제안하였다. Ho와 Xu^[8]는 특정한 이득여유와 위상여유를 만족하도록 하는 PI 제어기를 제안하였으며, 페루프 시스템이 나이퀴스트(Nyquist)안정도 조건을 만족시킴을 보여주었다.

한편, Wen과 Yingqin^[9]은 루프-쉐이핑(Loop-shaping) H_∞ 제어에 기초하여 PID 제어기를 동조하는 방법을 제안하였다. 그러나 이들 방법의 대부분은 이득 및 위상여유를 계산하는데 복잡한 수치 해석적 방법이 필요하다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구의 단점을 개선할 수 있도록 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded genetic algorithm : RCGA)을 이용하여 불안정 FOPTD 프로세스용 PID 제어기의 동조방법을 체계적으로 얻는 문제를 다룬다. 특히, PID 제어기는 사용환경에 따라서 설정치 추종성능을 개선하거나 또는 외란제거 성능을 개선하기 위해 이용되므로 두 가지 성능을 각각 구분하여 고려한다. 제안하는 방법은 시뮬레이션을 통해 기존의 방법과 비교하여 그 유효성을 검토한다.

2. 불안정 FOPTD 프로세스의 PID 제어기 동조법

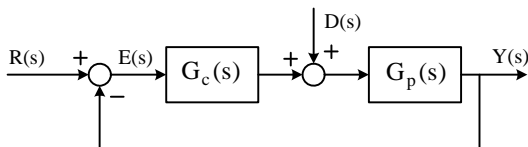


Fig. 1 Unit feedback PID control system

제어대상과 제어기가 결합된 블록선도는 Fig. 1과 같으며 $G_c(s)$ 는 표준 PID 제어기로서 (1)과 같고,

$G_p(s)$ 는 불안정 FOPTD 프로세스로서 (2)와 같다.

$$G_c(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \tag{1}$$

$$G_p(s) = \frac{K \exp(-Ls)}{Ts - 1} \tag{2}$$

여기서 K, T, L 은 각각 시스템의 이득, 시정수와 시간지연을 의미한다.

다음은 불안정 FOPTD 프로세스에 대한 대표적인 동조법을 연구된 시기에 따라서 정리한 것이다.

2.1 De Paor와 O'Malley 방법^[5]

(Quasi-optimum phase margin)

$$K_p = \frac{\cos(\sqrt{\epsilon(1-\epsilon)}) + \sqrt{(1-\epsilon)/\epsilon} \sin(\sqrt{\epsilon(1-\epsilon)})}{K} \tag{3a}$$

$$T_i = \frac{T \sqrt{\epsilon/(1-\epsilon)}}{\tan(\phi_m/2)} \tag{3b}$$

$$T_d = \frac{\epsilon}{T(1-\epsilon)} \mu$$

여기서 $\epsilon = \frac{L}{T}$ 이고, $\mu = \sqrt{(1-\epsilon)/\epsilon} \tan(\phi_m)$,

$\phi_m = \tan^{-1} \sqrt{\frac{1-\epsilon}{\epsilon}} - \sqrt{\epsilon(1-\epsilon)}$ 이다.

2.2 Venkatasankar와 Chikambaram 방법^[6]

(Optimal gain margin)

$$K_p = \sqrt{K_{\min} K_{\max}} \tag{4a}$$

$$T_i = 25T(1-\epsilon) \tag{4b}$$

여기서 $\epsilon = \frac{L}{T}$ 이고, $K_{\min} = 0.98 \sqrt{1 + T^2 \omega_c^2}$,

$$K_{\max} = 5\alpha \sqrt{\frac{1 + \alpha^2 T^2 \omega_c^2}{1 + 25\alpha^2}}, \quad \omega_c = 0.2/(T(1-\epsilon))$$

이다. $\alpha = 5\beta(1-\epsilon)/\epsilon, \beta = \begin{cases} 1.373, & 0 < \epsilon < 0.25 \\ 0.953, & 0.25 < \epsilon < 0.775 \end{cases}$ 이다.

2.3 Poulin과 Pomerleau 방법[7]

$$K_p = \frac{T_i \omega_{\max} |G(j\omega_{\max})| \sqrt{1 + (T\omega_{\max})^2}}{K \sqrt{1 + (T_i \omega_{\max})^2}} \quad (5a)$$

$$T_i = \frac{4TL}{(T(\angle G(j\omega_{\max}) + \pi/2)^2 - 4L)} \quad (5b)$$

여기서 $\epsilon = \frac{L}{T}$ 이고,

$M_r = M_r(\epsilon)$, (참고문헌 [7]의 Fig. 10 참조)

$$\angle G(j\omega_{\max}) = \arccos(\sqrt{10^{0.1M_r}} - 1 / 10^{0.05M_r}) - \pi,$$

$$|G(j\omega_{\max})| = 10^{0.05M_r} / \sqrt{10^{0.1M_r} - 1},$$

$$\omega_{\max} = \sqrt{1/(TL) + 1/(T_i L)} \text{ 이다.}$$

2.4 Ho와 Xu 방법[8]

$$K_p = \frac{\omega_p T}{A_m K} \quad (6a)$$

$$T_i = \frac{1}{\left(\frac{\pi}{2} \omega_p - \omega_p^2 L - \frac{1}{T}\right)} \quad (6b)$$

여기서 $\omega_p = \frac{A_m \phi_m + \frac{\pi}{2} A_m (A_m - 1)}{(A_m^2 - 1)L}$ 이다. 사용

자가 PI 제어기의 파라미터를 얻기 위해서는 이득 여유(A_m)와 위상여유(ϕ_m)를 선정해야하는데, 이득 및 위상여유는 다음과 같이 계산된다.

$$A_m = \frac{\pi T}{4K_p KL} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{16L}{\pi^2 T_i} - \frac{16L}{\pi^2 T}}\right) \quad (7a)$$

$$\phi_m = \frac{\pi}{2} - \frac{K K_p L}{T} - \frac{1}{K_p KL} \left(1 + \frac{T}{T_i}\right) \quad (7b)$$

한편, A_m 과 ϕ_m 의 결정을 위한 가이드라인(guide line)을 다음과 같이 제시하고 있다.

- A_m 의 선정 범위 : $0.7A_{\phi_{\max}} \sim 1.3A_{\phi_{\max}}$

- ϕ_m 의 선정 범위 : $0.5\phi_{\max} \sim 0.9\phi_{\max}$

이때, ϕ_{\max} 와 $A_{\phi_{\max}}$ 은 각각 다음과 같다.

$$\phi_{\max} = \frac{\pi}{2} - 2\sqrt{L/T} \quad (8a)$$

$$A_{\phi_{\max}} = \frac{2\sqrt{L/T}}{\pi/2 - \sqrt{\pi^2/4 - 4L/T}} \quad (8b)$$

2.5 Wen과 Yingqin 방법[9]

$$K_p = \frac{1}{K(a_1 \epsilon + a_2)} \quad (9a)$$

$$T_i = \frac{1}{KT(b_1 \epsilon + b_2)} \quad (9b)$$

$$K_d = \frac{T(c_1 \epsilon + c_2)}{K} \quad (9c)$$

여기서 $\epsilon = \frac{L}{T}$, λ 는 사용자 정의 파라미터이고,

각 계수들은 다음과 같다.

$$a_1 = -\frac{0.0373}{\lambda} + 0.1862$$

$$a_2 = -0.1498 \log \lambda + 0.6508$$

$$b_1 = \frac{10.5045}{\lambda} + 0.8032$$

$$b_2 = \frac{3.2312}{\lambda} - 0.3445$$

$$c_1 = 0.9065 \lambda^{0.1632}$$

$$c_2 = -\frac{1}{0.2075\lambda + 2.0335}$$

3. RCGA를 이용한 동조법

위의 다양한 동조법은 주로 추종제어에 대한 것에 초점이 맞추어져 있어 외란제거에 대한 동조법

은 다루고 있지 않다. 또한, ϵ 이 큰 프로세스에 적용하면 안정도가 보장되지 않거나, 일부의 동조범에서는 제어기 계수가 음수로 나타나기도 하는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 기존의 접근보다 더 체계적인 방법으로 추종제어용 뿐 만 아니라 외란제어용 PID 제어기 동조범을 도출하는 데 그 목적이 있다.

이를 위해 본 논문에서는 RCGA를 이용한 불안정 FOPTD 프로세스의 PID 제어기 동조범을 보이고자 한다. Fig. 2는 RCGA를 이용하여 PID 제어를 최적 동조하는 블록선도로서 RCGA는 PID 제어기 파라미터 K_p , T_i , T_d 를 최적으로 동조하게 된다.

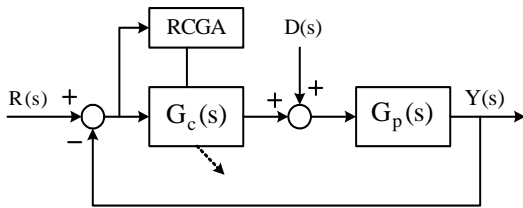


Fig. 2 Optimal tuning of the PID controller

3.1 RCGA의 목적함수

PID 제어기의 동조 시에 발생하는 다변수 최적화 문제를 풀기위해 사용되는 RCGA는 실수코딩을 채용함으로써 RCGA의 염색체(Chromosome)는 PID 제어기 세 개의 파라미터를 유전자로 가지게 된다.

한편, 집단 내 염색체들의 성능이 좋고 나쁨은 적합도 평가를 통해 계량되며, 적합도는 성능지수(목적함수)로부터 계산되어진다.

본 논문에서는 제어환경에 따라 적절히 선택해서 사용할 수 있도록 절대오차적분(IAE), 제곱오차적분(ISE), 시간곱절대오차적분(ITAE) 세 가지 성능지수를 고려하며, 짐작할 수 있듯이 최적의 PID 계수는 어떤 성능지수를 선택하느냐에 따라 그 값이 달라지게 된다.

위 성능지수 중에서 ISE는 일반적으로 해석이

용이하여 최적제어기 설계 등에 자주 이용되나 오차가 클 때는 큰 벌점을, 작을 때는 작은 벌점을 주는 결과를 초래해 최적해 부근에서 계수의 변화에 둔감하다. 한편, IAE는 오차의 절대 크기를 취함으로써 양이나 음의 오차에 균등한 벌점을 부여하는 효과를 주므로 ISE보다 나은 감도를 나타낸다. ITAE는 장시간의 과도현상에 대해 벌점을 주는 매우 유용한 기준으로 IAE나 ISE보다 훨씬 더 변별력이 있으며, 이 적분의 최소값은 시스템의 파라미터들이 변하는 경우에 훨씬 더 잘 정의될 수 있다.

◆ 성능지수

$$IAE : J_1(\psi) = \int_0^{t_f} |e(\psi, t)| dt \quad (10a)$$

$$ISE : J_2(\psi) = \int_0^{t_f} e^2(\psi, t) dt \quad (10b)$$

$$ITAE : J_3(\psi) = \int_0^{t_f} t |e(\psi, t)| dt \quad (10c)$$

여기서 $\psi = [K_p, T_i, T_d]^T \in \mathbb{R}^3$ 는 PID 제어기 파라미터로 구성되는 벡터이고, e 는 설정치와 출력간의 오차이며, t_f 는 이후의 적분값이 무시될 수 있도록 충분히 큰 시간이다.

한편 RCGA의 제어변수로 집단의 크기 $N = 30$, 재생산 계수 $\eta = 1.7$ 을 사용하는 구배와 유사한 재생산, 교배확률 $P_c = 1.0$ 을 사용하는 수정 단순 교배, 돌연변이 확률 $P_m = 0.2$ 를 사용한 동적돌연변이를 선택하였다.

3.2 추종제어용 PID 제어기

추종제어용으로 동조하는 경우에는 $r(t) = 1, d(t) = 0 (t \geq 0)$ 으로 간주하며 RCGA는 추종제어에 해당하는 K_p, T_i, T_d 를 최적 동조한다. 이때 추종 설정치 $R(s)$ 에 대한 출력 $Y(s)$ 의 폐루프 전달함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{R(s)} &= \frac{G_c(s)G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)} \\ &= \frac{q(s) \exp(-Ls)}{TT_i s^2 - T_i s + q(s) \exp(-Ls)} \end{aligned}$$

여기서 $q(s) = KK_p T_i T_d s^2 + KK_p T_i s + KK_p$ 이다.

3.3 외란제거용 PID 제어기

외란제거용으로 동조하는 경우에는 $d(t)=1$, $r(t)=0$ ($t \geq 0$)으로 간주하며 RCGA는 외란제거에 부합하는 K_p , T_i , T_d 를 최적 동조한다. 외란 설정치 $D(s)$ 에 대한 출력 $Y(s)$ 의 페루프 전달함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{D(s)} &= \frac{G_p(s)}{1+G_c(s)G_p(s)} \\ &= \frac{(KT_i s) \exp(-Ls)}{TT_i s^2 - T_i s + q(s) \exp(-Ls)} \end{aligned}$$

여기서 $q(s) = KK_p T_i T_d s^2 + KK_p T_i s + KK_p$ 이다.

4. 시뮬레이션 및 검토

제안한 방법의 유효성을 검증하기 위하여 De Paor와 O'Malley[5], Venkatasankar와 Chikambaram[6], Poulin과 Pomerleauuyben[7], Ho와 Xu[8] 그리고 Wen과 Yingqin[9] 방법의 응답을 서로 비교하는 시뮬레이션을 실시하였다.

4.1 불안정 FOPTD 프로세스

시뮬레이션에 사용된 불안정 FOPTD 프로세스는 여러 문헌에서 인용되는 다음 시스템^[6-9]을 고려하였다.

$$\text{시스템} : G_p(s) = \frac{\exp(-0.4s)}{s-1}$$

이 프로세스는 $K=1$ 와 $T=1$ 그리고 $L=0.4$ 를 가지며, Fig. 3의 단위계단 응답곡선으로부터 알

수 있듯이 시간이 지나면서 그 출력값이 무한대로 증가하는 것을 볼 수 있다.

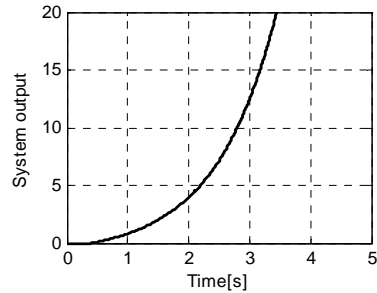


Fig. 3 Step response of unstable process

4.2 추종제어

추종제어의 경우 기존의 동조법과 제안한 방법의 PID 제어기 계수는 Table 1에 나타내었다.

이때, Venkatasankar와 Chikambaram의 동조법에 적용한 $\beta=1.373$ 이고, Poulin과 Pomerleau의 동조법에 사용되는 $M_r=8.0$ 이며, Ho와 Xu의 동조법에 적용한 이득여유와 위상여유는 각각 $A_m=0.7A_{\phi_{max}}$, $\phi_m=0.6\phi_{max}$ 로 선정하였고, Wen과 Yingqin의 동조법에 적용하는 사용자의 계수 $\lambda=9$ 를 선정하였다.

Table 1 PID parameters for set-point tracking

PID Parameter / Methods	K_p	T_i	T_d
De Paor and O'Malley	1.699	1.354	0.184
Venkatasankar and Chikambaram	2.647	20.0	-
Poulin and Pomerleau	3.39	1.457	-
Ho and Xu	2.929	1.436	-
Wen and Yingqin	2.792	1.141	0.001
Proposed method(IAE)	5.840	0.645	0.080
Proposed method(ISE)	5.492	1.865	0.114
Proposed method(ITAE)	5.681	0.631	0.078

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 추종 제어인 경우에 기존의 방법을 적용한 PID 제어기와 RCGA를 이용해 최적으로 동조한 PID 제어기의 응답을 나타낸 것이고, Table 2는 기존의 방법과 제안한 방법을 정량적으로 비교하기 위해 백분율 오버슈트(Mp),

피크시간(t_p), 상승시간(t_r), 정정시간(t_s)을 계산한 것이다.

Table 2 Performance for set-point tracking

Performance Methods	Mp(%)	t_p	t_r	t_s
De Paor O'Malley	105.45	1.99	0.44	14.14
Venkatashankar Chikambaram	68.16	1.19	0.26	31.58
Poulin Pomerleau	100.73	0.86	0.19	2.75
Ho and Xu	98.37	0.97	0.22	2.01
Wen, Yingqin	106.15	1.01	0.22	3.05
Proposed method(IAE)	114.85	0.56	0.11	1.39
Proposed method(ISE)	58.19	0.52	0.13	3.37
Proposed method(ITAE)	114.81	0.57	0.12	0.96

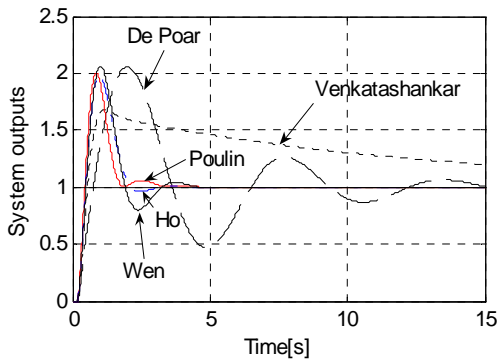


Fig. 4 Set-point tracking responses of conventional methods

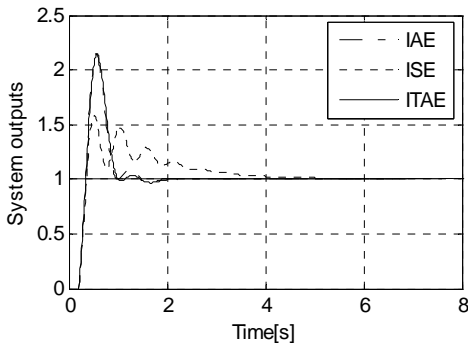


Fig. 5 Set-point tracking responses of proposed methods

Fig. 4와 Fig. 5, 그리고 Table 2를 통해 알 수 있듯이 RCGA로 최적 동조한 PID 제어가 기존의 제어기 보다 양호한 추종 성능을 보이고 있다.

4.3 외란제거

기존의 방법은 외란제거용을 별도로 구분하여 동조법을 제안하고 있지 않으므로 PI 및 PID 제어기의 파라미터는 Table 1과 동일하다. 한편, 제안한 방법은 외란제거에 초점을 두고, 평가함수 사용하면 외란제거를 위한 PID 제어기를 별도로 동조할 수 있다. 외란제거의 경우 기존의 동조법과 제안한 방법의 PID 제어기 계수는 Table 3에 나타내었다.

Table 3 PID parameters for disturbance rejection

PID Parameter Methods	K_p	T_i	T_d
De Paor and O'Malley	1.699	1.354	0.184
Venkatashankar and Chikambaram	2.647	20.0	-
Poulin and Pomerleau	3.39	1.457	-
Ho and Xu	2.929	1.436	-
Wen and Yingqin	2.792	1.141	0.001
Proposed method(IAE)	6.145	0.496	0.098
Proposed method(ISE)	6.375	0.377	0.068
Proposed method(ITAE)	5.978	0.564	0.087

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 외란제거 제어인 경우에 기존의 방법(추종 제어용 파라미터와 동일)을 적용한 PID 제어기와 RCGA를 이용해 최적으로 동조한 PID 제어기의 응답을 나타낸 것이고, Table 4는 기존의 방법과 제안한 방법을 정량적으로 비교하기 위하여 단위계단 외란이 투입될 때 교란된 응답의 첨두값(Perturbation peak)을 M_{pk} , 이 첨두값에 도달하는 데 걸리는 시간을 t_{pk} , 교란된 응답이 설정치의 2% 내의 범위로 회복되는 시간을 t_{rv} 로 정의하고 계산하여 나타낸 것이다. Fig. 6과 Fig. 7 그리고 Table 4를 통해 알 수 있듯이 RCGA로 최적 동조한 외란 제거용 PID 제어기가 기존의 제어기 보다 양호한 외란제거 성능을 보이고 있다.

Table 4 Performance for disturbance rejection

Performance Methods	M_{pk}	t_{pk}	t_{ry}
De Paor O'Malley	0.665	1.401	>15
Venkatashankar Chikambaram	0.615	1.135	>15
Poulin Pomerleau	0.466	0.765	2.815
Ho and Xu	0.512	0.835	1.961
Wen, Yingqin	0.519	0.845	2.940
Proposed method(IAE)	0.259	0.490	1.561
Proposed method(ISE)	0.274	0.510	3.411
Proposed method(ITAE)	0.268	0.505	0.835

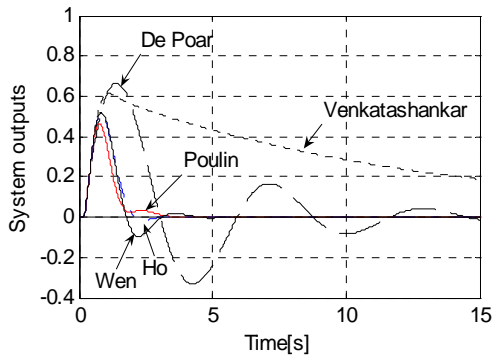


Fig. 6 Disturbance rejection responses of conventional methods

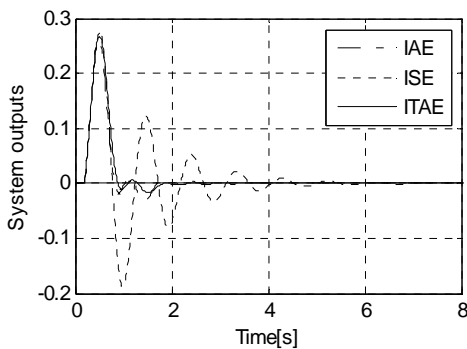


Fig. 7 Disturbance rejection responses of proposed methods

5. 결 론

본 논문에서는 주파수 평면상의 우반부에 극점을

하나 포함하고, 시간지연을 동시에 갖는 불안정 FOPTD 프로세스에 대한 체계적인 PID 제어기 동조방법을 제시하였다. 이를 위해 RCGA를 이용하여 주어진 세 가지 성능지수인 IAE, ISE 그리고 ITAE를 최소화 하는 관점에서 최적으로 PID 제어기를 동조하였다.

특히, 추종성능에 양호한 성능을 갖는 제어기라 할지라도 외란제거 성능을 항상 보장하는 것은 아니기 때문에 두 경우를 각각 구분하여 동조방법을 제시하였다.

제시한 기법을 예제 프로세스에 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 기존의 PID 동조 방법 보다 추종 및 외란제거 성능에서 더욱 양호한 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

그러나 본 논문에서는 불안정한 FOPTD 프로세스에만 적용된 한계가 있으며, 이후 2차 이상의 불안정한 고차 시스템에 대한 연구도 진행될 필요가 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2009년 동명대학교 항만물류사업단의 지원을 받아 연구되었음에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum setting for PID controllers," Trans. ASME, Vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [2] 김도웅, 진강규, "RCGA를 이용한 PID 제어기의 모델기반 동조규칙," 제어·자동화·시스템 공학회 논문지, 제8권, 제12호, pp. 1056-1060, 2002.
- [3] D. E. Rivera, M. Morari, and S. Skogestad "Internal model control 4 : PID controller design", Ind. End. Chem. Process Des Dev., 25, pp. 252-265, 1986.
- [4] M. Zhuang, and D. P. Atherton,

"Automatic tuning of optimum PID controllers", IEE Proc. Control Theory Appl., 140, pp. 216- 224, 1993.

- [5] A. M. De Paor and M. O'Malley, "Controllers of Ziegler-Nichols Type for unstable process with time delay", Int. J. Control, Vol. 49, No. 4, pp. 1273-1284, 1989.
- [6] V. Venkatasankar and M. Chidambaram, "Design of P and PI controllers for unstable first-order plus dead time delay systems", Int. J. Control, Vol. 60, No. 1, pp. 137-144, 1994.
- [7] E. Poulin and A. Pomerleau, "PID tuning for integrating and unstable processes", IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 143, No. 5, pp. 429-439, 1996.
- [8] W. K. Ho, W. Xu, "PID tuning for unstable process based on gain and phase margin specifications", IEE Proc.-Cont. Theory Appl., Vol. 146, No. 5, pp. 415-425, 1998.
- [9] T. Wen, Y. Yingqin and N. Yuguang, "Tuning of PID controller for unstable Process", IEEE Proc.-International Conference on Control Applications, pp. 121-124, 1999.

저 자 소 개



이수룡(李秀龍)

1980년 부산대학교 조선공학과(공학사), 1986년 부산대학교 대학원 조선공학과(석사), 1989년 부산대학교 대학원 조선공학과(박사), 1982년~1984년 신아조선(주) 설계부, 현재 동명대학교 조선공학과 교수



이윤형(李潤炯)

2002년 한국해양대학교 기관시스템공학부(공학사), 2004년 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과(석사), 2007년 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스 공학과(박사), 현재 한국항만연수원 부교수. ※ 관심분야 : 제어이론, 유전알고리즘 응용



안종갑(安鍾甲)

2000년 한국해양대학교 기관시스템공학부(공학사), 2006년 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과(석사), 2008 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과(박사수료), 현재 한국항만연수원 부교수. ※ 관심분야 : 제어이론, 유전알고리즘 응용



손정기(孫正基)

1990년 부경대학교 전기공학과(공학사), 1997년 부경대학교 대학원 전기공학과(석사), 2004년 부경대학교 대학원 기계공학과(박사), 현재 한국항만연수원 부산연수원 교수 ※ 관심분야 : 하역장비 제어시스템, PLC 프로그램



류기탁(柳基喲)

2001년 한국해양대학교 기관시스템공학부(공학사), 2008년 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과(석사), 현재 동대학원 박사과정, 한국해양수산연수원 전임강사 ※ 관심분야 제어이론, 유전알고리즘



소명옥(蘇明玉)

1980년 한국해양대학교 기관학과(공학사), 1989년 한국해양대학교 대학원 기관학과(석사), 1997년 동 대학원(박사), 한국 항만·운송노동연구원 연구위원, 2005~2006년 University of Wales Cardiff 파견교수, 현재 한국해양대학교 선박전자기공학부 교수. ※ 관심분야 : 퍼지제어, 최적제어, 항만하역장비제어