

단순 극배치법을 이용한 PIPTD 프로세스의 외란억제용 PID 제어기

조홍우, 소혜림*
한국해양대학교

PID Controller for Disturbance Rejection of PIPTD Processes Using Simple Pole Placement Method

Hong-Yu Zhao, Hye-Rim So*
Korea Maritime & Ocean University

요약 시간지연이 있는 1차 순수적분기 모델을 대상으로 외란을 효과적으로 제거하기 위한 단순 극배치법 기반 2자유도 PID 제어기를 제안한다. 제안한 2자유도 제어기는 병렬형 PID 제어기와 설정점 필터로 구성된다. 병렬형 PID 제어기의 파라미터는 모델의 정보와 바라는 특성방정식의 시정수로부터 구해진다. 병렬형 PID 제어기를 동조할 때 최대감도 함수를 이용하여 안정성을 확보하도록 한다. 설정점 필터는 제어기의 파라미터와 0과 1사이의 가중값으로 구성되며 설정값 추종응답에서 오버슈트를 줄인다. 제안한 제어기를 시간지연이 있는 1차 순수적분 프로세스 모델과 그 모델의 파라미터 불확실성에 대해 적용하고 기존의 제어기와 비교하여 그 타당성을 입증한다. 1차 순수적분모델은 플랜트의 전달함수에 하나의 적분기가 있어 이 원점의 극으로 인해 본질적으로 불안정한 시스템이며, 시간지연 항은 비선형성을 가지고 있어 제어가 대단히 어렵다. 제안된 방법의 주목할 만한 특징 중 하나는 설정값 필터의 가중값을 고정함으로써 조정파라미터의 수를 줄였으며, 바라는 특성방정식의 시정수 한 개만을 조절하여 제어기의 세 파라미터들을 조절할 수 있어 이용이 매우 편리하다. 또한, 응답성능과 안정성 사이에 적절한 타협이 가능하여 사용자가 원하는 안정성을 확보할 수 있다.

Abstract This paper proposes a 2-DOF PID controller based on a simple pole-placement method to eliminate disturbances effectively in a first-order pure integrator model with time delay. The proposed controller consists of a parallel PID controller and a set-point filter. The parameters of the parallel PID controller are determined from the model information and the desired characteristic time constant of the equation. Stability is ensured using the maximum sensitivity function when tuning the parallel PID controller. The set-point filter comprises the controller parameters and a weighting value between 0 and 1, which reduces overshoot in set-point tracking responses. The proposed controller was applied to a first-order pure integrator process model with time delay and parameter uncertainties, and its validity was confirmed by comparing it with conventional controllers. The first-order pure integrator model was inherently unstable because of the pole at the origin in the transfer function in the plant, and the time delay term made control extremely difficult due to its nonlinearity. One notable feature of the proposed method was that it reduced the number of adjusting parameters by fixing the weighting value of the set-point filter. This allowed for an adjustment of the three parameters of the controller by varying only a one-time constant of the desired characteristic equation, making it convenient to use. Furthermore, a proper trade-off between the response performance and stability is possible, ensuring the desired stability the user requires.

Keywords : Pure Integration Model, Time Delay, Maximum Sensitivity Function, 2-DOF Controller, Set-Point

*Corresponding Author : Hye-Rim So(Korea Maritime & Ocean University)

email: gpfla6989@naver.com

Received April 30, 2024

Accepted July 5, 2024

Revised June 12, 2024

Published July 31, 2024

1. 서론

기본적인 PID 제어기는 비례이득, 적분시간 및 미분시간으로 구성된 3개의 조정 파라미터를 가지고 있어 이 3개의 파라미터를 적절하고 균형되게 조절해야 전체 피드백 시스템의 만족할만한 성능을 기대할 수 있다. 모델 기반 제어기 설계에서 선택된 모델이 제어대상의 동특성을 적절히 반영하지 못하면 만족스러운 제어 성능을 기대할 수 없다[1]. 대부분의 산업 플랜트가 시간지연이 있는 과감쇠 특성을 갖고 있어 1차 시간지연 (FOPTD: First Order Plus Time Delay, 이하 FOPTD) 모델이 제어기 설계에 널리 적용되어왔다[2-5]. 그러나 부족감쇠 특성을 가진 플랜트는 시간지연이 있는 적분모델이나 더 높은 차수의 모델이 더욱 적합할 수 있다. 적분모델은 플랜트의 전달함수에 하나 이상의 적분기를 가진 프로세스이다. 이러한 프로세스의 예에는 보일러 증기 드럼 및 액체 저장 탱크 등이 있다. 특히, 시간지연이 있는 적분 프로세스 (IPTD: Integrating Process with Time Delay)는 원점에 존재하는 극(pole)으로 인해 본질적으로 불안정한 시스템이며 시간지연 항은 비선형성을 가지고 있다.

Jin 등[3]은 FOPTD 프로세스를 제어하기 위한 비선형 PID 제어기의 세 가지 동조규칙을 제안했다. 이 방법은 비례동작과 미분동작은 기존의 선형 제어기와 동일하고 적분동작은 비선형 함수를 사용하여 오차의 크기를 조정하여 구현하며 PID 제어기의 파라미터는 유전알고리즘으로 조정된다.

Luyben 등[6]은 안정성 분석을 기반으로 임계 진동할 때의 비례 이득인 한계 이득(ultimate gain)과 이때의 주기인 한계 주기(ultimate period)를 구하여 병렬형 PID 제어기의 파라미터를 동조하였다.

Chidambaram 등[7]은 시간지연이 있는 순수적분 프로세스(PIPTD; Pure Integrating Process with Time Delay)을 제어하기 위해 전달함수에서 분모의 각 계수와 분자의 각 계수를 조절하여 PID 제어기 계열의 파라미터를 동조하는 규칙을 제안했다.

Skogestad[8]은 기존의 IMC 방법을 획기적으로 개선한 SIMC방법을 제안하여 다양한 시간지연 프로세스에 적용하여 그 타당성을 입증하였다. 이 방법은 많은 제어기 설계자들이 그들이 제안한 방법의 타당성을 입증하기 위한 비교 대상의 제어알고리즘으로 많이 이용된다.

Lee와 Cho[9]는 PID 제어기의 파라미터를 동조하기 위해 Skogestad의 SIMC 방법[9]을 수정하여 새로운 동

조규칙인 K-SIMC를 제안했으며, SIMC 방법과 다른 점은 적분시간을 다소 줄이고 SIMC 방법에서 사용하지 않은 설정점 필터를 사용한 것이다.

Rao 등[10]과 Anil 등[11]은 직접합성법에 기초하여 다양한 IPTD 프로세스를 제어하기 위해 병렬형 PID 제어기에 진상/지상 보상이 직렬로 연결되어있는 PIDC 제어기의 설계 방법을 제안했다. 여기서, 사용자는 직접합성법의 시정수 값을 조정하여 제어기 파라미터를 구하고, 설정점 가중값을 조정하여 목표값 추종성능을 향상시켰다. 특히 Anil 등[11]은 Jin 및 Liu [12] 및 Ajmeri 및 Ali [13]의 방법보다 우수함을 증명했다.

So[14]는 시간지연이 있는 순수적분 모델을 제어하기 위한 PID 제어기를 직접합성법으로 설계하였다. PID 제어기의 파라미터는 무차원의 시정수 함수로 표현하고, 조정변수 선택을 위한 지침을 최대감도에 대한 함수로 제공하여 사용자가 편리하게 제어기의 파라미터를 구할 수 있게 하였다.

위에서 언급된 대부분의 연구들은 서보 응답 성능이 우수하면 부하외란 응답 성능이 다소 미흡하고 부하외란 성능이 우수하면 서보 응답이 다소 떨어진다.

본 연구에서는 PIPTD 모델에 대해 서보 응답과 부하외란 응답의 성능을 동시에 개선할 수 있는 단순극배치법 기반의 2-DOF(2-Degree of Freedom) PID 제어기를 제안하고, PID 제어기 파라미터를 조정하는 방법을 다룬다. 앞에서 언급한 것처럼 PIPTD 모델은 구조적으로 간단하지만 전달함수의 원점에 하나의 극이 있어 불안정하고, 또한 시간지연으로 인한 비선형성이 있어 제어하기가 어려운 시스템이다. 2-DOF PID 제어기는 부하외란에 대한 응답성능을 향상시키기 위한 PID 제어기와 목표값 추종응답에서 초과량(over-shoot)을 완화하기 위한 설정점 필터로 구성되며, PID 제어기는 부하외란 억제에 중점을 두고 설계한다. 제안된 방법을 두 개의 가상 PIPTD 모델에 적용하고, 시뮬레이션을 통해 다른 두 방법과 비교하여 그 타당성을 검증한다.

이 논문의 핵심 기여는 다음과 같다.

- PID 제어기와 PIPTD 모델로 구성된 폐회로 전달함수의 특성방정식을 목표 폐회로 전달함수의 특성방정식과 일치시킴으로써 병렬형 PID 제어기를 설계하였다.
- 목표 특성방정식의 근을 동일한 위치에 배치함으로써 목표 시정수 하나만을 조정하여 제어기의 파라미터를 동조하기 때문에 제어기 동조가 간단하고 쉽다.

- PID 제어기를 동조할 때 시스템의 응답성과 강인성 사이의 타협을 위해 안정성 수준을 나타내는 MS (감도함수의 최대 크기)를 사용하였다.
- 목표값 추종성을 향상시키기 위해 PID 제어기의 파라미터와 가중값으로 구성된 설정점 필터를 사용하였다.

이 논문은 다음과 같은 내용으로 구성되어 있다.

2절에서는 단순극배치법 기반 2-DOF PID 제어기와 설정점 필터에 관해, 3절에서 성능평가지수와 최대감도에 관해, 4절에서 PID 제어기의 파라미터 조정 방법에 관해 설명한다. 5절에서는 2개의 가상 PIPTD 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하고, 그 성능을 기존의 PID 제어기와 비교하여 제안된 방법의 타당성을 입증한다. 6절에서 이 논문의 결론을 요약한다.

2. 단순극배치법 기반 2-DOF PID 제어기 설계

이 절에서는 외란에 대한 응답 성능을 개선하기 위한 PID 제어기와 오버슈트를 완화하기 위한 설정점 필터로 구성된 2-DOF PID 제어기에 관해 설명한다.

2.1 2-DOF PID 제어시스템의 구조

Fig. 1은 설정점 필터를 가진 2-DOF PID 제어시스템의 구조를 나타낸다.

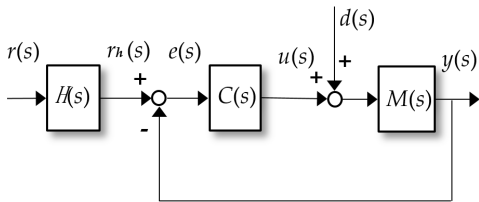


Fig. 1. Structure of 2-DOF PID control system

여기서 $H(s)$ 는 설정점 필터의 전달함수, $C(s)$ 는 제어기의 전달함수, $M(s)$ 는 프로세스 모델의 전달함수를 나타낸다. $r(s)$ 는 설정 입력신호, $r_h(s)$ 는 설정점 필터의 출력신호, $d(s)$ 는 외란 입력신호, $u(s)$ 제어기의 출력신호, $y(s)$ 는 프로세스 출력신호, $e(s)$ 는 설정점 필터의 출력과 프로세스 출력과의 오차를 나타낸다.

Fig. 3으로부터 설정 입력신호 $r(s)$, 외란 입력신호 $d(s)$, 프로세스 출력신호 $y(s)$ 의 관계는 다음과 같이

표현된다.

$$y(s) = \frac{H(s)C(s)M(s)}{1 + C(s)M(s)}r(s) + \frac{M(s)}{1 + C(s)M(s)}d(s) \quad (1)$$

Eq. (1)로부터 설정점 필터의 전달함수는 외란 입력 $d(s)$ 와는 무관함을 알 수 있다.

먼저, 단순극배치법 기반 PID 제어기의 설계에 대해 설명하면 다음과 같다.

제어 대상으로 Eq. (2)의 PIPTD 프로세스 모델을 고려한다.

$$M(s) = \frac{ke^{-Ls}}{s} \quad (2)$$

Where, k and L denote the gain and time delay of process, respectively.

설계하고자 하는 제어기는 병렬형 PID 제어기로 Eq. (3)으로 표현된다.

$$C(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \quad (3)$$

Where, K_p , T_i and T_d denote the proportional gain, integral time, derivative time of PID controller, respectively.

프로세스 모델의 전달함수 Eq. (2)와 제어기의 전달함수 Eq. (3)으로 구성된 폐회로 전달함수의 특성방정식은 Eq. (4)로 표현할 수 있다.

$$1 + K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \frac{ke^{-Ls}}{s} = 0 \quad (4)$$

Eq. (4)에서 시간지연 항을 Eq. (5)와 같은 Pade의 1차식으로 근사화한 후 s 에 대한 내림차순으로 정리하면 Eq. (6)이 된다.

$$e^{-Ls} \approx \frac{1 - 0.5Ls}{1 + 0.5Ls} \quad (5)$$

$$c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + 1 = 0 \quad (6)$$

Eq. (6)의 각 계수는 다음과 같다.

$$c_3 = \frac{T_i L}{2kK_p} - \frac{T_i T_d L}{2}$$

$$c_2 = \frac{T_i(2T_d - L)}{2} + \frac{T_i}{kK_p}$$

$$c_1 = \frac{2T_i - L}{2}$$

목표 페루프 특성방정식의 극($s = -\frac{1}{\lambda}$)을 Eq. (7)과 같이 3 중극으로 두며, 여기서 λ 는 특성방정식의 시정수이다.

$$(s + \frac{1}{\lambda})^3 = 0 \quad (7)$$

Eq. (6)과 Eq. (7)의 각 해당 차수의 계수를 일치시켜 연립방정식을 풀면 PID 제어기의 세 파라미터를 Eqs. (8)-(10)과 같이 구할 수 있다.

$$K_p = \frac{4L(L + 6\lambda)}{k(L + 2\lambda)^3} \quad (8)$$

$$T_i = \frac{L + 6\lambda}{2} \quad (9)$$

$$T_d = \frac{(L - 2\lambda)^3 + 12L^2\lambda}{4L(L + 6\lambda)} \quad (10)$$

Eqs. (8)-(10)에서 보인 것과 목표 페루프 특성방정식의 시정수인 λ 만을 조정하여 제어기의 세 파라미터를 동조할 수 있어 동조가 간단하고 쉽다.

다음으로 목표값 추종 성능에서 오버슈트를 줄이기 위해 가중값 w 를 가진 Eq. (11)의 설정점 필터를 사용한다. 가중값 w 는 0과 1사이의 값을 갖는다.

$$H(s) = \frac{T_i T_d s^2 + w T_i s + 1}{T_i T_d s^2 + T_i s + 1} \quad (11)$$

3. 성능평가지수

성능평가지수로 백분율 오버슈트(%OS), 응답 피크값(M_p), 절대오차적분 IAE (Integral of Absolute Error), 절대오차시간적분 ITAE (Integral of Time Absolute Error)를 고려한다. ITAE는 오차의 절대값에 시간을 곱하여 적분하므로 정정시간(또는 회복시간)에 대한 성능을 많이 내포하고 있다. IAE와 ITAE는 각각 Eq. (12) 및 Eq. (13)으로 정의된다.

$$IAE = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (12)$$

$$ITAE = \int_0^{t_f} t |e(t)| dt \quad (13)$$

Where, $e(t)$, t_f denote error, sufficient time to be negligible after this time, respectively.

또한, PID 제어기의 안정성을 평가하기 위해 감도 함수의 최댓값 M_s 를 사용하며, 그 정의는 Eq. (14)와 같다.

$$M_s = \max_w \left| \frac{1}{1 + C(j\omega)P(j\omega)} \right| \quad (14)$$

M_s 는 임계점 $(-1, 0j)$ 에서 나이퀴스트 곡선까지의 가장 가까운 거리의 역수이다. 이 값이 크면 나이퀴스트 곡선이 임계점에 가까워져 안정 한계에 접근하므로 안정 여유가 적어진다. 일반적으로 안정한 프로세스의 경우에는 M_s 가 1.4에서 2.0까지, 불안정한 적분 시스템의 경우에는 2에서 2.5까지 값이면 적절한 안정성이 확보된다고 평가한다[12,15]. 제어기의 성능은 이들 성능지수 값이 작으면 작을수록 좋다고 판단할 수 있다.

4. 2-DOF PID 제어기 동조

단순극배치법 기반 PID 제어기의 파라미터 K_p , T_i , T_d 를 동조하기 위한 조정변수는 Eqs. (8)~(10)을 통해 알 수 있듯이 목표 특성방정식의 시정수 λ 하나뿐이다. 따라서 제어시스템의 안정성과 성능 간에 적절한 타협이 이루어질 수 있도록 M_s 를 지정하여 λ 값을 선정하고 설정값 추종 성능에서 오버슈트가 작으면서 Eq. (12)의 IAE를 최소화하는 관점에서 설정점 필터 가중값 w 을 시행착오로 조정한다. 제어기 파라미터의 동조는 두 개의 가상 PIPTD 프로세스 모델에 대해 동조한다.

4.1 프로세스 모델 $M_1(s)$

먼저, 이득 k 가 0.2 이고 시간지연 L 이 0.5[s]인 프로세스 모델 $M_1(s)$ 를 고려한다.

$$M_1(s) = \frac{0.2e^{-0.5s}}{s} \quad (15)$$

제안한 방법과 Lee의 방법에서는 λ 를 조정할 수 있으므로 $Ms = 2.0$ 이 되게 각각 $\lambda = 0.5893$ 과 $\lambda = 0.4283$ 로 선정하고 제안한 방법과 Lee의 방법[10]에 의해 제어기의 파라미터들을 구한다. 그리고 이 두 방법은 설정점 필터를 사용하므로 가중값으로 각각 $w = 0.44$ 와 $w = 0.50$ 을 사용한다. SIMC의 경우에는 $\lambda = L$ 로 고정되므로 이로부터 Skogestad가 제안한 공식[9]을 이용하여 제어기의 파라미터들을 구할 수 있고 $Ms = 1.7035$ 가 된다. Table 1에 제안한 방법과 비교 대상의 제어기에 관련된 값이 정리되어 있다.

Fig. 2은 공칭 프로세스 모델에 대한 각 제어기의 나이퀴스트 선도를 나타낸 것으로 안정도 측면에서 SIMC, 제안한 방법, Lee의 순으로 안정 여유가 많다.

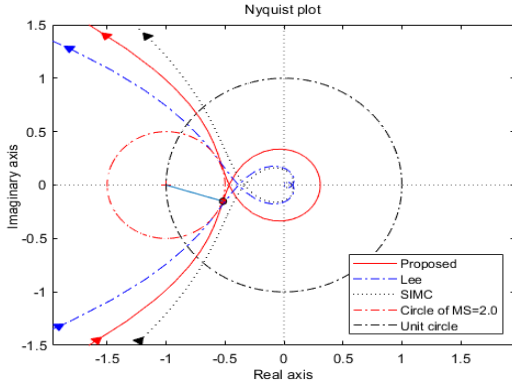


Fig. 2. Nyquist plots for nominal process model $M_1(s)$

Table 1. Controller parameters tuning for $M_1(s)$

Tuning methods	Controller parameters					MS
	K_p	T_i	T_d	λ	w	
Proposed	8.5327	2.0179	0.1803	0.5893	0.44	2.0
Lee	5.3862	2.1415	-	0.4283	0.50	2.0
SIMC	5.0000	4.0000	-	0.5000	-	1.7035

4.2 프로세스 모델 $M_2(s)$

프로세스 $M_2(s)$ 는 이득 k 는 $M_1(s)$ 모델과 같게 유지하고, 시간지연 L 은 2.5[s]로서 $M_1(s)$ 모델보다 5배 큰 Eq. (16)을 고려한다. 일반적으로 시간지연 L 이 클수록 만족스러운 제어 성능을 얻기가 어렵다.

$$M_2(s) = \frac{0.2e^{-2.5s}}{s} \quad (16)$$

제안한 방법과 Lee의 방법에서는 $Ms = 2.0$ 이 되게 각각 $\lambda = 2.9468$ 과 $\lambda = 2.1420$ 로 선정하고 제안한 방법과 Lee의 방법[10]에 의해 제어기의 파라미터들을 구한다. 그리고 이 두 방법은 설정점 필터를 사용하므로 가중값으로 각각 $w = 0.44$ 와 $w = 0.50$ 을 사용한다. SIMC의 경우에는 $\lambda = L$ 로 고정되므로 이로부터 Skogestad가 제안한 공식[9]을 이용하여 제어기의 파라미터들을 구할 수 있고 $Ms = 1.7035$ 가 된다. Table 2에 제안한 방법과 비교 대상의 제어기에 관련된 값이 정리되어 있다.

Fig. 3은 공칭 프로세스 모델에 대한 각 제어기의 나이퀴스트 선도를 나타낸 것으로 안정도 측면에서 SIMC, 제안한 방법, Lee의 순으로 안정 여유가 많다.

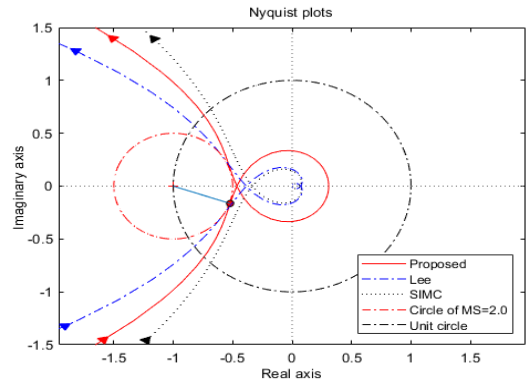


Fig. 3. Nyquist plots for nominal process model $M_2(s)$

Table 2. Controller parameters tuning for $M_2(s)$

Tuning methods	Controller parameters					MS
	K_p	T_i	T_d	λ	w	
Proposed	1.7063	10.090	0.9015	2.9468	0.44	2.0
Lee	1.0771	10.710	-	2.1420	0.50	2.0
SIMC	1.0000	20.000	-	2.500	-	1.7035

5. 시뮬레이션 및 성능 고찰

시뮬레이션은 다음과 같은 두 가지 시나리오에 따라 시행한다.

시나리오(a)는 프로세스와 모델이 일치하는 공칭조건인 경우이고, 시나리오(b)는 프로세스의 파라미터와 모델의 파라미터가 다른 경우로 파라미터 불확실성을 고려한 것이다. 일반적으로 프로세스의 시간지연과 이득이 함께

커질 때 제어가 어려워지므로 이들을 각각 20% 증가시킨 상태에서 시뮬레이션을 수행한다. 모든 시뮬레이션은 응용 프로그램인 Matlab을 이용하며 m-파일로 코딩한다[15,16].

5.1 프로세스 모델 $M_1(s)$

Fig. 4는 시나리오(a)에 따른 응답으로 $t=0$ 초와 $t=30$ 초 시점에 각각 단위계단 설정입력과 단위계단 외란 입력이 인가된 경우의 응답을 나타낸 것이다.

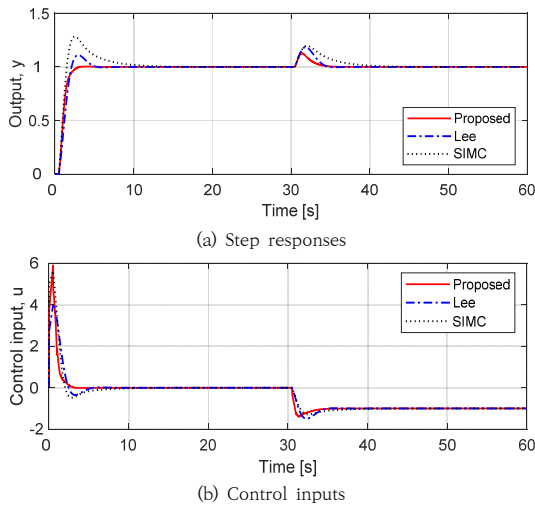


Fig. 4. Step responses for nominal process model $M_1(s)$

Table 3은 각 제어기에 대한 성능평가지수를 정량적으로 정리하여 나타낸 것이다.

Table 3. Performance for nominal process model $M_1(s)$

Tuning methods	Set-Point Tracking			Disturbance Rejection		
	%OS	IAE_s	$ITAE_s$	M_p	IAE_d	$ITAE_d$
Proposed	0.41	1.14	0.79	0.13	0.24	0.48
Lee	11.11	1.44	1.53	0.18	0.41	0.90
SIMC	28.30	1.97	5.06	0.20	0.80	3.20

Fig. 4와 Table 3으로부터 Lee의 방법은 제안한 방법보다 %OS, IAE_s , $ITAE_s$, M_p , IAE_d , $ITAE_d$ 가 각각 27.10배, 1.26배, 1.94배, 1.38배, 1.71배, 1.88배 크고, SIMC 방법은 제안한 방법보다 69.02배, 1.73배, 6.41배, 1.54배, 3.33배, 6.67배 크다. 따라서 제안한

제어기가 Lee의 방법과 SIMC 방법보다 설정값 추종 응답 및 외란억제 응답에서 월등히 우수함을 알 수 있다.

제어기의 강인성을 알아보기 위해 Eq. (15)를 시나리오(b)에 따라 시뮬레이션을 시행하며 Fig. 5는 +20%의 파라미터 불확실성에 대한 각 제어기의 응답을 나타낸 것이다.

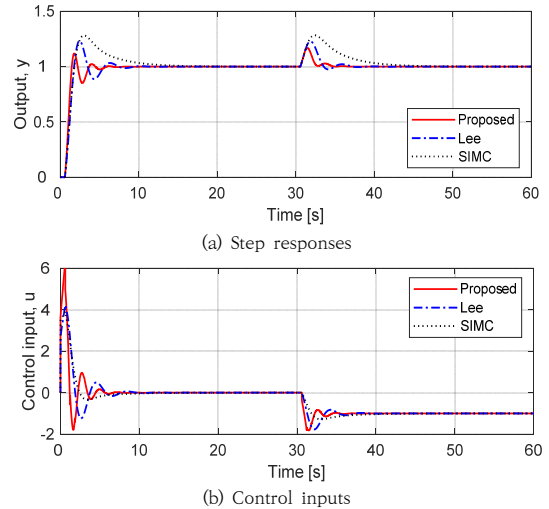


Fig. 5. Step responses for 20% uncertainty process $P_1(s)$

Table 4는 각 제어기에 대한 성능평가지수를 정량적으로 정리하여 나타낸 것이다.

Table 4. Performance for 20% uncertainty process $P_1(s)$

Tuning methods	Set-Point Tracking			Disturbance Rejection		
	%OS	IAE_s	$ITAE_s$	M_p	IAE_d	$ITAE_d$
Proposed	11.95	1.27	1.26	0.17	0.24	0.48
Lee	23.40	1.66	2.55	0.23	0.45	1.13
SIMC	28.21	2.37	7.29	0.28	1.38	6.63

Fig. 5와 Table 4으로부터 Lee의 방법은 제안한 방법보다 %OS, IAE_s , $ITAE_s$, M_p , IAE_d , $ITAE_d$ 가 각각 2.36배, 1.31배, 2.02배, 1.35배, 1.88배, 2.35배 크고, SIMC 방법은 제안한 방법보다 2.36배, 1.87배, 5.79배, 1.65배, 5.75배, 13.81배 크다. 따라서 제안한 제어기가 Lee의 방법과 SIMC 방법보다 설정값 추종응답 및 외란억제 응답에서 월등히 우수함을 알 수 있다.

5.2 프로세스 모델 $M_2(s)$

Fig. 6은 시나리오(a)에 따른 응답으로 $t=0$ 초와 $t=100$ 초 시점에 각각 단위계단 설정입력과 단위계단 외란 입력이 인가된 경우의 응답을 나타낸 것이다.

Table 5는 각 제어기에 대한 성능평가지수를 정량적으로 정리하여 나타낸 것이다.

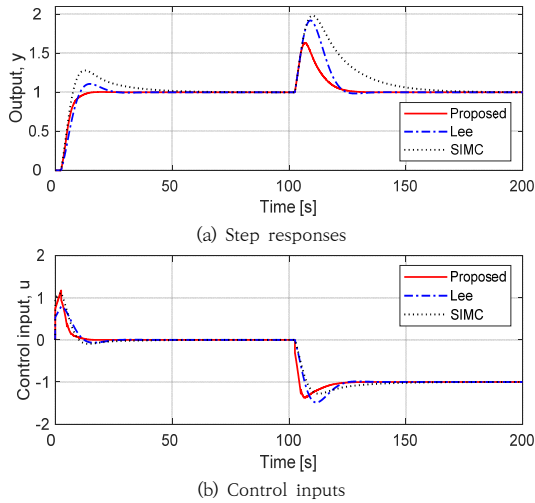


Fig. 6. Step responses for nominal process model $M_2(s)$

Table 5. Performance for nominal process model $M_2(s)$

Tuning methods	Set-Point Tracking			Disturbance Rejection		
	%OS	IAE_s	$ITAE_s$	M_p	IAE_d	$ITAE_d$
Proposed	0.37	5.72	19.98	0.63	5.91	59.62
Lee	10.67	7.17	37.96	0.92	10.15	112.6
SIMC	27.85	9.82	126.2	0.98	20.00	399.8

Fig. 6과 Table 5로부터 Lee의 방법은 제안한 방법보다 %OS, IAE_s , $ITAE_s$, M_p , IAE_d , $ITAE_d$ 가 각각 28.83배, 1.25배, 1.90배, 1.46배, 1.72배, 1.89배 크고, SIMC 방법은 제안한 방법보다 75.27배, 1.72배, 6.32배, 1.56배, 3.38배, 6.71배 크다. 따라서 제안한 제어기가 Lee의 방법과 SIMC 방법보다 설정값 추종 응답 및 외란억제 응답에서 월등히 우수함을 알 수 있다.

제어기의 강인성을 알아보기 위해 Eq. (16)을 시나리오(b)에 따라 시뮬레이션을 시행하며 Fig. 7은 +20%의 파라미터 불확실성에 대한 각 제어기의 응답을 나타낸 것이다. Table 6은 각 제어기에 대한 성능평가지수를 정량적으로 정리하여 나타낸 것이다. Fig. 7과 Table 6으

로부터 Lee의 방법은 제안한 방법보다 %OS, IAE_s , $ITAE_s$, M_p , IAE_d , $ITAE_d$ 가 각각 2.14배, 1.31배, 2.05배, 1.37배, 1.89배, 2.33배 크고, SIMC 방법은 제안한 방법보다 2.65배, 1.89배, 6.01배, 1.70배, 5.85배, 13.91배 크다.

따라서 제안한 제어기가 Lee의 방법과 SIMC 방법보다 설정값 추종 응답 및 외란억제 응답에서 월등히 우수함을 알 수 있다.

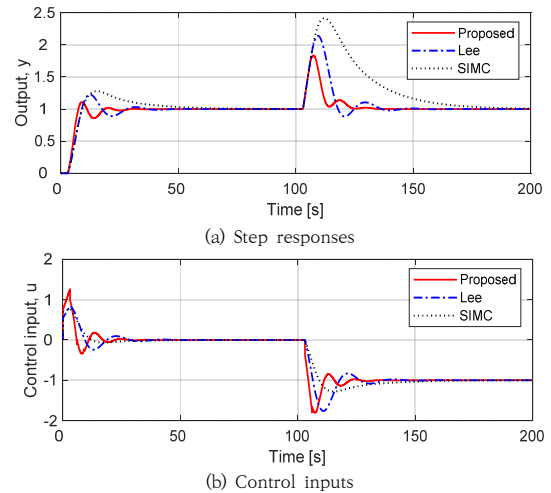


Fig. 7. Step responses for 20% uncertainty process $P_2(s)$

Table 6. Performance for 20% uncertainty process $P_2(s)$

Tuning methods	Set-Point Tracking			Disturbance Rejection		
	%OS	IAE_s	$ITAE_s$	M_p	IAE_d	$ITAE_d$
Proposed	10.52	6.24	30.22	0.83	5.91	59.61
Lee	22.55	8.20	61.85	1.14	11.19	139.1
SIMC	27.83	11.78	181.6	1.41	34.56	829.0

이상에서 살펴본 것처럼 제안한 제어기는 두 개의 가상 PIPTD 프로세스에 대해 설정값 추종 및 외란억제 성능에서 매우 우수한 성능을 보이고 SIMC 방법이 가장 나쁜 응답 성능을 보인다.

6. 결론

시간지연이 있는 순수적분 프로세스를 제어하기 위해 단순극배치법 기반 2-DOF PID 제어기를 제안하였으며

제한한 제어기는 PID 제어기와 설정점 필터로 구성된다. PID 제어기는 단순극배치법에 기초하여 외란 억제에 중점을 두어 설계하고 특성방정식의 시정수값 하나만을 조정하여 PID 제어기의 파라미터를 동조할 수 있어 이용하기가 매우 편리하다. 이때 시정수는 제어시스템의 성능과 안정성 간에 적절한 타협이 이루어질 수 있도록 최대 감도인 M_s 에 기초하여 시행착오로 조정한다. 설정점 필터는 설정값 추종 성능을 개선하기 위한 것으로 제어기의 파라미터와 하나의 가중값으로 구성되고 가중값은 0.44로 고정하였다. 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위하여 두 개의 시간지연이 있는 가상의 순수적분 프로세스에 적용하여 추종 성능 및 외란 제거성을 기존의 방법과 비교하였다. 또한, 파라미터 변화에 대한 제어기의 강인성을 검토하기 위해 공칭 모델에서 파라미터가 +20% 변동한 불확실성을 내포한 프로세스에 대해서도 함께 고려하였다. 두 개의 프로세스 모델에 대한 시뮬레이션 결과, 제안한 제어기는 비교 대상의 두 제어기보다 모든 성능평가지수에서 매우 우수함을 나타내었다. 따라서 시간지연이 있는 순수적분 시스템으로 모델링되는 프로세스 제어에 효과적으로 응용될 수 있으리라 생각된다. 향후 연구로는 실제 적용을 용이하게 하기 위해 이상적인 미분제어기의 단점을 보완할 수 있는 제어기 필터를 이 방법에 의해 설계하고자 한다.

References

- [1] B.W. Bequette, Process control: modeling design and simulation. New Delhi: Prentice Hall; 2003.
- [2] J.Cvejn, "Sub-optimal PID controller settings for FOPDT systems with long dead time", *Journal of Process Control*, Vol.19, No.9, pp.1486-1495, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2009.07.002>
- [3] G.G. Jin, Y.D. Son, "Design of Nonlinear PID Controller and Tuning Rules for First-Order Plus Time Delay Models", *Studies in Informatics and Control*, Vol.28(2), pp.157-166, 2019. DOI: <https://doi.org/10.24846/v28i2y201904>
- [4] Z. Li, J. Bai, H. Zou, "Modified two degree of freedom Smith predictive control for processes with time delay", *Measurement and Control*, Vol.53(3-4), pp.691-697, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/0020294019898743>
- [5] H.Y. Zhao, *Design of IMC-based PID controller for FOPDT and SOPDT models*. Master's thesis, Graduate School Korea Maritime and Ocean University, pp.13-17, 2023.
- [6] W.L. Luyben, "Tuning proportional-integral-derivative controllers for integrator/deadtime processes", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol.35, No.10 pp.3480-3483, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie9600699>
- [7] M. Chidambaram, R.P. Sree, "A simple method of tuning PID controllers for integrator/dead-time processes", *Computers and Chemical Engineering*, Vol.27, pp.211-215, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(02\)00178-3](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(02)00178-3)
- [8] S. Skogestad, "Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning", *Journal of Process Control*, Vol.13, pp.291-309, 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0959-1524\(02\)00062-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0959-1524(02)00062-8)
- [9] J.T. Lee, W.H. Cho, T.F. Edgar, "Simple analytic PID controller tuning rules revisited", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol.53, pp.5038-5047, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie4009919>
- [10] A.S. Rao, V.S.R. Rao, M. Chidambaram, "Direct synthesis-based controller design for integrating processes with time delay", *Journal of the Franklin Institute*, Vol.346, pp.38-59, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2008.06.004>
- [11] Ch. Anil, R.P. Sree, "Tuning of PID controllers for integrating systems using direct synthesis method", *ISA Transactions*, No.57, pp.211-219, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.03.002>
- [12] Q.B. Jin, Q. Liu, "Analytical IMC-PID design in terms of performance/robustness tradeoff for integrating processes: From 2-Dof to 1-Dof", *Journal of Process Control*, Vol.24, pp.22-32, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.12.011>
- [13] M. Ajmeri, A. Ali, "Direct synthesis based tuning of the parallel control structure for integrating processes", *International Journal of Systems Science*, Vol.46(13), pp.2461- 2473, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207721.2013.871369>
- [14] G.B. So, "Design of linear PID controller for pure integrating systems with time delay using direct synthesis method", *Processes*, Vol.10(831), pp.1-17, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10050831>
- [15] Curve Fitting Toolbox, User's Guide, MA: Mathworks, 2021.
- [16] System Identification Toolbox, Getting Started Guide, MA: Mathworks, 2021.

조 홍 우(Hong-Yu ZHAO)

[정회원]



- 2021년 1월 : 한국해양대학교
해사대학 기관공학부 졸업
- 2023년 2월 : 한국해양대학교
대학원 기관공학과 공학석사
- 2023년 3월 ~ 현재 : 한국해양대
학교 대학원 기관공학과 공학박사
과정

<관심분야>

제어 이론 및 응용, 선박 기관 제어, 유전알고리즘

소 혜 림(Hye-Rim So)

[정회원]



- 2015년 2월 : 부경대학교 식품공
학과 졸업
- 2017년 2월 : 한국해양대학교
해양과학기술전문대학원 해양과학
기술융합학과 공학석사
- 2022년 2월 : 한국해양대학교
대학원 기관공학과 공학박사
- 2022년 3월 ~ 현재 : 한국해양 대학교 강사

<관심분야>

프랙탈 이론 및 응용, 제어이론 및 응용, 유전알고리즘