

# 1차 시간지연 프로세스를 위한 IMC 기법에 기초한 PID 제어기 설계

소건백 · 예지희\* · 조홍우\* · 소명옥†

목포해양대학교(교수) · \*한국해양대학교(학생) · †한국해양대학교(교수)

## Design of a PID Controller Based on Internal Model Control Technique for First Order Time Delay Processes

Gun-Baek SO · Jea-Hea YEA\* · Hong-Yu ZHAO\* · Myung-Ok SO†

Mokpo National Maritime University(professor) · \*Korea Maritime & Ocean University(student) ·

†Korea Maritime & Ocean University(professor)

### Abstract

In the design of the PID controller, if the gain is increased to speed up the response speed, the overshoot may become large and become unstable. Conversely, if the gain is reduced to mitigate the overshoot, the response speed is slowed down and the response performance is degraded. Because of these opposed relationships, an appropriate compromise between excellent response performance and stability is necessary. In addition, a conventional PID controller with fixed parameters cannot expect excellent performance when used in a control environment different from the design conditions, and in some cases may become unstable, so a stability margin must be ensured. This paper proposes IMC-PID controller design and tuning techniques based on IMC principles. In an IMC based PID controller, the only adjustment parameter to obtain the controller's parameters is the time constant of the IMC filter, which is used as a control means to compromise between the robustness and response performance of the system. In addition, to ensure the stability of the control system, the controller is adjusted in consideration of MS, which is the maximum magnitude of the sensitivity function. The proposed technique is applied to two first order time delay models, and the validity of the proposed method is verified by comparing the two existing methods through simulation.

**Key words** : PID controller, IMC principle, Stability, First order time delay

## I. 서론

지능제어를 포함한 제어이론의 획기적인 발전에도 불구하고 산업공정을 비롯한 석유·화학, 기계·전기 분야 등 대부분의 산업현장에서는 종래의 PID 계열의 제어기가 많이 사용되고 있다

(Åström et al., 2001; Desborough et al., 2002). 이 유는 PID 제어기는 구조가 간단하여 구현이 쉽고, 조정해야 할 파라미터의 수가 적어 현장 기술자들이 비교적 쉽게 조작할 수 있으면서도 산업현장에서 요구하는 제어목적은 어느 정도 만족시킬 수 있기 때문이다. 현재까지 많은 연구자들

---

† Corresponding author : 051-410-4248 smo@kmou.ac.kr

이 프로세스의 모델에 기반하여 PID 제어를 설계하고 동조하는 방법을 다양하게 연구하여 왔다. 모델기반 제어기 설계에서의 모델은 주로 FOPTD(First Order Plus Time Delay), SOPTD (Second Order Plus Time Delay), PIPTD(Pure Integrating Plus Time Delay) 등이 많이 이용되어 왔다. 또한 PID 제어를 설계하고 동조하는 방법들이 다양하게 제안되고 보고되어 있다 (Pathiran et al., 2014). 즉, 경험적 방법(Ziegler et al., 1942), 분자/분모의 계수일치 방법(Chidambaram et al., 2003), 주파수영역 방법, 안정성 분석 방법 (Luyben WL, 2003), 최적화 방법(Tavakoli et al., 2003; Cvejn J, 2009; Ali et al., 2011), 내부모델 제어(IMC; Internal Model Control) 방법(Lee et al., 2014; Shamsuzzoha M, 2015), 직접합성(DS; Direct Synthesis) 방법(Chen et al., 2002; Anil et al., 2015), 비선형제어 기법 및 2자유도(2-DOF; Two-Degree of Freedom) 제어 기법(Wu et al., 2020) 등이 있다.

Ziegler et al.(1942)는 제시된 플랜트의 과도응답특성에 기초하여 비레이득, 적분시간 및 미분시간의 값을 결정하기 위해 개루프법과 폐루프법을 제안했다. 개루프법은 시간지연이 1차 시간지연 프로세스를 제어하기 위한 것이고, 폐루프법은 임계진동이 있는 프로세스를 제어하기 위한 것이다.

Chidambaram et al.(2003)은 시간지연이 있는 순수적분 프로세스(PIPTD)를 제어하기 위해 PD 또는 PI/PID 제어기의 간단한 동조규칙을 제안했다. 이 방법은 설정값에서 출력까지의 폐루프 전달함수의 분자에 있는  $s$ 의 거듭제곱의 각 계수가 분모에 있는 해당 거듭제곱의 각 계수를  $\alpha$  배한 것과 같도록 함으로써 PID 계열 제어기의 파라미터를 구하며 시간지연 항은 Pade의 1차식으로 근사화한다. 여기서  $\alpha$ 가 1이면 PD 제어가 유도되고 1보다 크면 PI 또는 PID 제어가 유도된다.

Tavakoli(2003)는 차원해석 및 최적화 기법을

사용하여 FOPTD 프로세스 모델에 대한 PID 제어를 동조하는 방법을 제안했으며 성능평가지수로 제곱오차적분 (ISE ; Integral of Squared Error), 절대오차적분 (IAE; Integral of Absolute Error) 및 시간가중절대오차적분 (ITAE; Integral Time weighted Absolute Error)을 사용하였다.

Skogestad(2003)는 FOPTD 및 SOPTD 프로세스 모델과 시간지연이 있는 다양한 적분프로세스를 제어하기 위해 PID 제어기의 파라미터를 해석적으로 동조하는 규칙(SIMC)과 고차의 프로세스를 FOPTD 모델 또는 SOPTD 모델로 근사화하는 기법을 제안했다. 프로세스를 FOPTD 모델로 근사화하면 PI 제어가 유도되고, SOPTD 모델로 근사화하면 PID 제어가 유도된다.

Lee et al.(2014)은 PID 제어를 동조하기 위한 Skogestad(2003)의 SIMC 방법을 다시 검토하고 새로운 방법 (K-SIMC)을 제안했다. 이 방법에서는 Skogestad가 제안한 프로세스의 근사화 방법을 일부 수정하고 Skogestad의 방법보다 적분시간을 더욱 제한하는 새로운 동조규칙과 Skogestad의 방법에서 사용하지 않았던 설정값 필터의 사용을 제안했다.

Shamsuzzoha(2015)는 시간지연이 있는 여러 유형(PIPTD, FOPTD, SOPTD)의 프로세스에 대해 IMC 기법을 기반으로 설정값 필터를 가지는 2-DOF PID 제어기의 설계 및 동조 기법을 제안하였다. 또한 설정값 추종성능을 향상시키기 위해 PI 제어기에 대해서는 1차 진상/지상 설정점 필터를, PID 제어기에 대해서는 2차 진상/지상 필터를 사용하였다.

시간지연이 있는 1차 프로세스는 해양수산분야에서 대부분의 선박에 설치되어 있는 열교환기의 온도제어가 이에 해당되며 이러한 시간지연 프로세스의 제어는 어렵다. 즉, 응답속도를 높이기 위해 PID 제어기의 이득을 크게 하면 오버슈트가 크게 되어 불안정하게 될 수 있고, 반대로 오버슈트를 줄이기 위해 이득을 감소시키면 응답속도가 느려져 응답성능이 저하된다. 이와 같은 상반

된 관계 때문에 우수한 응답성과 안정성 간에 적절한 타협이 필요하다. 또한, 파라미터가 고정된 기존의 제어기는 설계 시의 조건과 다른 제어 환경에서 사용하면 우수한 성능을 기대할 수 없을 뿐만 아니라 경우에 따라 불안정해질 수도 있기 때문에 안정 여유를 확보해야 한다.

본 논문에서는 IMC 원리를 기반으로 한 IMC-PID 제어기 설계 및 동조 기법을 제안한다. PID 제어기의 파라미터를 구하기 위한 조정 파라미터는 IMC 필터의 시정수 하나뿐이고 이것은 제어 시스템의 강인성과 성능을 조절하는 수단으로 사용된다. 또한 제어시스템의 안정성을 보증하기 위해 상대감도 함수의 최대 크기인 MS를 고려하여 제어기를 동조한다. 제안한 기법을 2 개의 FOPTD 모델에 적용하고, 시뮬레이션을 통해 Lee et al. (2014)의 방법 및 Skogestad(2003) 방법과 비교하여 제안한 방법의 유효성을 확인한다.

## II. 연구 방법

### 1. IMC-PID 제어기 설계

본 논문에서의 제어대상은 식 (1)의 전달함수를 가진 프로세스이고, 설계하고자 하는 제어기는 식 (2)와 같은 표준형 병렬 PID 제어기이다.

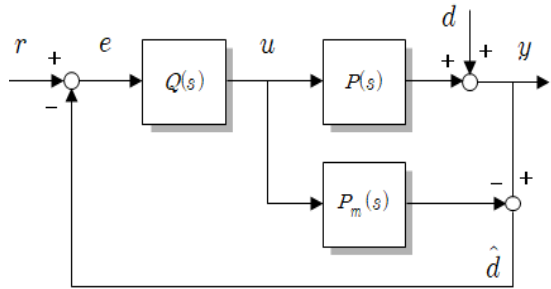
$$P(s) = \frac{ke^{-Ls}}{T_s + 1} \dots\dots\dots (1)$$

$$C(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $P(s)$  및  $C(s)$ 는 각각 프로세스 및 PID 제어기의 전달함수이다.  $k$ ,  $L$  및  $T$ 는 각각 프로세스의 이득, 시간지연 및 시정수이고,  $K_p$ ,  $T_i$  및  $T_d$ 는 PID 제어기의 비례이득, 적분시간 및 미분시간이다.  $e$ 는 목표값과 제어량 간의 오차,  $u$ 는 제어기의 출력인 제어입력을 의미한다.

내부모델 제어(Internal model control: IMC) 동조법은 페루프 내에 플랜트 모델을 두고 플랜트

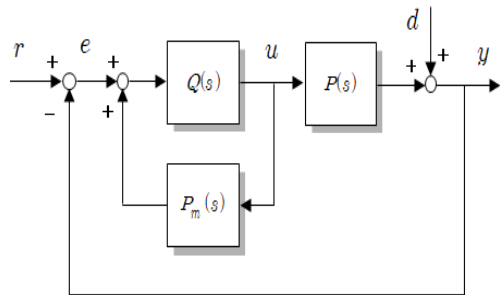
와 모델간의 오차를 궤환하여 새로운 제어입력을 만드는 방법이며 [Fig. 1]은 IMC 폐회로 제어시스템의 블록선도를 나타낸다.



[Fig. 1] Closed loop control system of the IMC.

여기서  $Q(s)$ ,  $P_m(s)$  및  $P(s)$ 는 각각 IMC 제어기, 프로세스 모델, 프로세스의 전달함수이다.  $r$ 은 설정값,  $d$ 는 외란,  $y$ 는 출력,  $\hat{d}$ 는 프로세스와 모델 간의 오차를 의미한다.

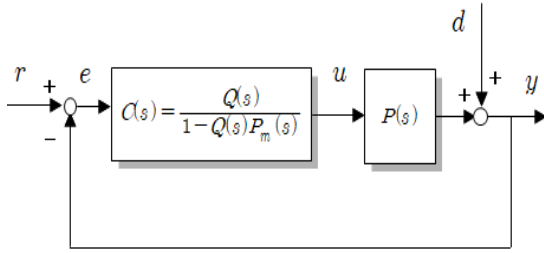
[Fig. 1]의 폐회로 제어시스템은 다시 [Fig. 2]와 같은 등가 블록선도로 표시할 수 있다.



[Fig. 2] Closed loop control system of the modified IMC.

이로부터 IMC 제어기와 등가인 피드백 제어기의 전달함수를 구하면 식 (3)과 같고, 이를 포함한 제어시스템을 블록선도로 표시하면 [Fig. 3]과 같다.

$$\alpha(s) = \frac{Q(s)}{1 - Q(s)P_m(s)} \dots\dots\dots (3)$$



[Fig. 3] Equivalent block diagram with internal model control.

플랜트 모델을 가역부분(Invertible part)  $\tilde{P}_m(s)$  와 비가역부분(Non-invertible part)  $\bar{P}_m(s)$  으로 분리하고 가역부분의 역에 저주파통과 필터  $F(s)$  를 곱하여 식 (4)와 같이  $Q(s)$  를 설계한다.

$$Q(s) = \tilde{P}_m^{-1}(s)F(s) \dots\dots\dots (4)$$

이때 필터  $F(s)$  의 차수는 제어기의 분자 다항식의 차수가 분모 다항식의 차수보다 크지 않도록 정한다. 만약 제어대상이 식 (1)과 같은 FOPTD 인 경우 IMC 제어기는 다음과 같은 절차로 PID 제어기로 등가 변환된다.

단계 1: 시간지연 항을 1차 Pade 근사화하여 플랜트를 표시한다.

$$P_m(s) = \frac{ke^{-Ls}}{1+Ts} \approx \frac{k(1-0.5Ls)}{(1+Ts)(1+0.5Ls)} \dots\dots (5)$$

단계 2: 가역부분과 비가역부분으로 분리한다.

$$\tilde{P}_m(s) = \frac{k}{(1+Ts)(1+0.5Ls)} \dots\dots\dots (6a)$$

$$\bar{P}_m(s) = 1-0.5Ls \dots\dots\dots (6b)$$

단계 3: 가역부분  $\tilde{P}_m(s)$  에 필터  $F(s)$  를 추가하여 IMC 제어기를 설계한다. 이때 일반적인 규칙과는 달리 1차 필터를 선택함으로써  $Q(s)$  의 분자 차수가 분모보다 크게 된 것은 PID 파라미터를 얻기 위해 특별히 적용된 경우이다.

$$Q(s) = \tilde{P}_m^{-1}(s)F(s) = \frac{(1+Ts)(1+0.5Ls)}{k(1+T_c s)} \dots (7)$$

단계 4: 식 (3)으로부터 구하고자 하는 제어기의 전달함수는 식 (8)처럼 된다.

$$\begin{aligned} C(s) &= \frac{Q(s)}{1-Q(s)P_m(s)} \\ &= \frac{(1+Ts)(1+Ls/2)}{k(1+T_c s)} \\ &= \frac{(1+Ts)(1+Ls/2)}{1 - \frac{(1+Ts)(1+Ls/2)}{k(1+T_c s)} \frac{k(1-Ls/2)}{(1+Ts)(1+Ls/2)}} \\ &= \frac{(1+Ts)(1+Ls/2)}{k(T_c + L/2)s} \\ &= \frac{(T+L/2)}{k(T_c + L/2)} \left[ 1 + \frac{1}{(T+L/2)s} + \frac{TL}{2T+L} s \right] \dots\dots (8) \end{aligned}$$

따라서 병렬형 PID 제어기의 식 (2)와 식 (8)을 비교하면 PID 제어기의 파라미터를 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$K_p = \frac{(T+L/2)}{k(T_c + L/2)} \dots\dots\dots (9a)$$

$$T_i = T+L/2 \dots\dots\dots (9b)$$

$$T_d = \frac{TL}{2T+L} \dots\dots\dots (9c)$$

## 2. IMC-PID 제어기 동조

식 (9)에서  $k, L$  및  $T$  는 제어대상으로부터 주어지며 미지의 값은  $K_p, T_i, T_d$  및  $T_c$  이다. 여기서  $T_c$  를 조정하면 PID 제어기의 파라미터를 구할 수 있다. 따라서 제한한 PID 제어기의 동조에서 조정해야 할 유일한 변수는 IMC 제어기에 있는 필터 시정수뿐이다.

그러나 적절한 조정 파라미터의 선택은 어렵고 지루한 작업이 된다. 이 조정 파라미터는 설계된 PID 제어기가 우수한 성능과 강인성을 절충할 수 있도록 선택되어야 한다. 안정적인 프로세스에서  $T_c$  값이 프로세스의 시정수에 비해 너무 작으면 빠른 응답을 얻을 수 있으나 진동하거나 불안정해질 수 있다.

제어기를 동조할 때 제어기의 강인성에 직접 관련 있는 식 (10)의 감도함수의 최대 크기 MS

(Maximum Sensitivity)를 고려한다.

$$MS = \max_{\omega} |F_s(j\omega)| = \max_{\omega} \left| \frac{1}{1 + C(j\omega)P(j\omega)} \right| \dots\dots\dots (10)$$

MS의 물리적인 의미는 나이퀴스트(Nyquist) 선도에서 임계점  $(-1, 0:j)$ 로부터 나이퀴스트 선도까지 가장 가까운 거리의 역수이다. 따라서 이 값이 크다는 의미는 나이퀴스트 선도가 임계점 가까이를 지난다는 의미이므로 안정 한계점에 접근한다는 것이다. 일반적으로 안정한 시스템에 대해서 1.4와 2 사이의 MS 값은 양호한 안정성을 제공한다(Anil et al., 2015). 조정변수인  $T_c$ 의 값은 제어시스템의 성능 및 강인성을 절충할 수 있도록 설계자가 정하는 값에 따라 선택되어야 한다.

### III. 연구 결과 및 고찰

이 장에서는 FOPTD 모델에서  $L/T$ 의 비를 다르게 하여 두 가지 프로세스에 대해서 IMC-PID 제어기(이후 Proposed라 함), Lee et al.(2014)의 PID 제어기(이후 Lee라 함), Skogestad(2003)의 PI 제어기(이후 SK라 함)를 각각 동조한 후, 시뮬레이션을 수행한다.

Lee의 IMC 동조법(2014)은 다음과 같다.

PID 제어기:

$$K_p = \frac{T}{k(T_c + L)} \dots\dots\dots (11a)$$

$$T_i = \min(T, 5T_c) \dots\dots\dots (11b)$$

$$T_d = \max\left(\frac{L - T_c}{2}, 0\right) \dots\dots\dots (11c)$$

SK의 동조법(2003)은 다음과 같다.

PI 제어기:

$$K_p = \frac{1}{k} \frac{T}{T_c + L} \dots\dots\dots (12a)$$

$$T_i = \min[T, 4(T_c + L)] \dots\dots\dots (12b)$$

시뮬레이션은 각 프로세스마다 크게 두 가지의

경우에 대해서 수행한다. 하나는 프로세스의 파라미터 값이 변하지 않은 공칭 프로세스(nominal process)의 경우이고, 다른 하나는 제어시스템의 강인성을 알아보기 위해 운전 중 프로세스의 파라미터가 공칭 프로세스의 파라미터에 대해 각각 10% 변한 경우이다. 이러한 프로세스의 파라미터 변화는 알 수 없으므로 불확실성(uncertainty)으로 취급한다. 불확실성으로 파라미터의 변화가 10% 있는 것으로 가정하되 가장 가혹한 조건의 경우를 고려한다. 일반적으로 FOPTD 모델에서 이득과 시간지연은 큰 쪽으로 변할 때, 프로세스의 시정수는 작아지는 쪽으로 변할 때 제어하기가 어려워진다. 따라서 이득 및 시간지연은 각각 10% 증가하고 프로세스의 시정수는 10% 감소하는 경우를 고려한다.

각 시뮬레이션에서 설정값 추종성능에 대한 정량적 비교를 위해 상승시간  $t_r=t_{90}-t_{10}$ , 2% 정정 시간  $t_s$ , 백분율 오버슈트 %OS, 절대오차의 적분 (IAE<sub>s</sub>; Integral of Absolute Error)의 관점에서, 외란제거 성능에 대한 정량적 비교를 위해 2%의 회복시간  $t_{rcy}$ , IAE<sub>d</sub>, 최대 피크오차  $M_p$ 를 사용한다. 이때  $M_p = |y - y_{max}|$  또는  $|y - y_{min}|$ 를 의미한다. IAEs 및 IAEd에서 첨자 s와 d는 설정값 및 부하외란을 의미한다. 총괄적인 성능평가는  $t_r$ ,  $t_s$ , OS[%],  $t_{rcy}$ ,  $M_p$ 를 고려하여 최종적으로 IAE<sub>s</sub> 및 IAE<sub>d</sub>를 기반으로 평가한다. 이들 값이 작으면 작을수록 성능이 좋은 것이다.

#### 1. 프로세스 $P_1$ 시뮬레이션

프로세스  $P_1$ 은 FOPTD 모델에서  $L/T=0.2$ 인 경우로 그 값이 비교적 작은 값이다.

제안한 IMC-PID 제어기의 파라미터를 동조할 때 안정성을 보장하기 위해 MS=1.7을 선택한다. 이 MS값을 맞추기 위해 IMC 필터의 시정수  $T_c$  값을 조정하면 1.0876이 된다. 비교대상의 제어기는 식 (11)과 식 (12)에 따라 동조한다.

<Table 1>은 제안한 방법 및 기존의 방법에 의해 동조한 제어기의 파라미터,  $T_c$ , MS를 요약하여 정리한 것이다.

<Table 1> Controller parameter tuning for process  $P_1$

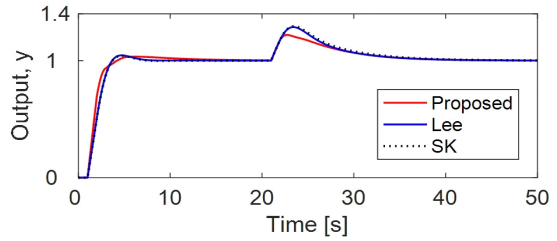
$$P_1 = \frac{e^{-s}}{5s+1}$$

Tuning Methods	Parameters				Remark MS
	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$T_c$	
Proposed	3.4643	5.5	0.4545	1.0876	1.7
Lee	2.5744	4.711	0.0289	0.9422	1.6
SK	2.5	5	-	1	1.6

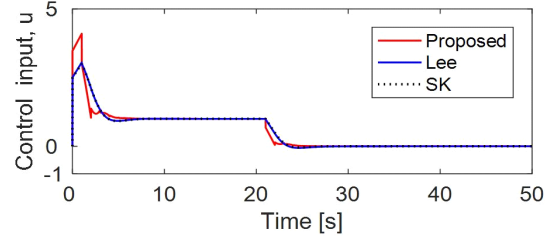
설정값으로  $t=0$ 초 시점에, 부하외란으로  $t=20$ 초 시점에 계단상의 단위입력을 공칭 프로세스에 인가하였을 때의 설정값 추종응답 및 외란제거 응답과 그때의 제어입력이 [Fig. 4]에 표시되어 있으며, 세밀한 정량적 비교를 위해 <Table 2>에  $t_r$ ,  $t_s$ , OS[%],  $IAE_s$ ,  $t_{rcy}$ ,  $M_p$ ,  $IAE_d$  등의 성능평가지수 값을 요약하여 나타내었다. 설정값 추종 응답에서 3가지 방법 모두 비슷한 성능을 나타내지만 외란제거 성능에서는 제안한 방법의  $M_p$ 와  $IAE_d$ 가 작기 때문에 다른 두 방법보다 우수함을 확인할 수 있다.

제어시스템의 강인성을 알아보기 위해 운전 중 프로세스의 파라미터가 공칭 프로세스의 파라미터에 대해 가장 가혹한 조건으로 각각 10% 변한  $P_1^{un} = 1.1e^{-1.1s}/(4.5s+1)$  인 경우를 고려한다.

[Fig. 5]에 설정값 추종 및 외란제거 응답과 그때의 제어입력이 표시되어 있으며, 세밀한 정량적 비교를 위해 <Table 3>에 다양한 성능평가지수 값을 요약하여 나타내었다. [Fig. 5] 및 <Table 3>으로부터 제안한 방법이 설정값 추종응답에서 다른 두 방법보다 우수한 성능을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. Lee의 방법과 SK의 방법은 거의 비슷한 응답을 나타내지만 Lee의 방법이 조금 더 우수하다. 특히 제안한 방법은 OS[%] 및  $M_p$ 가 작다.



(a) Step responses



(b) Control inputs

[Fig. 4] Step responses and control inputs for nominal process  $P_1$ .

<Table 2> Performances for nominal process  $P_1$

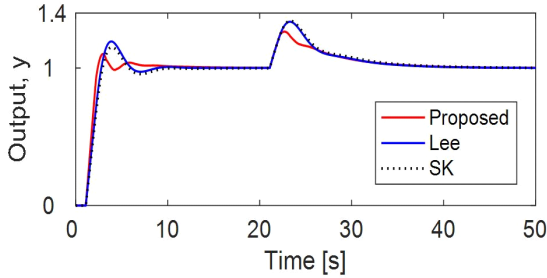
$$P_1 = \frac{e^{-s}}{5s+1}$$

Tuning Methods	Tracking Performances				Disturbance Performances		
	$t_r$ [s]	$t_s$ [s]	OS[%]	IAEs	$t_{rcy}$ [s]	$M_p$	IAEd
Proposed	1.51	10.24	3.43	2.11	23.65	0.22	1.59
Lee	1.88	6.27	4.52	2.19	21.26	0.29	1.83
SK	1.90	6.11	4.28	2.18	23.09	0.29	2.00

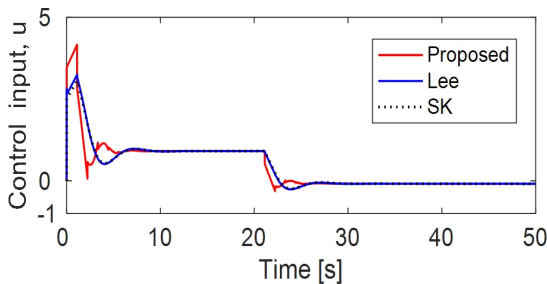
<Table 3> Performances for 10% uncertainty process  $P_1^{un}$

$$P_1^{un} = \frac{1.1e^{-1.1s}}{4.5s+1}$$

Tuning Methods	Tracking Performances				Disturbance Performances		
	$t_r$ [s]	$t_s$ [s]	OS[%]	IAEs	$t_{rcy}$ [s]	$M_p$	IAEd
Proposed	0.97	7.14	10.18	1.99	22.82	0.26	1.59
Lee	1.30	7.75	19.34	2.34	20.73	0.34	1.83
SK	1.39	8.53	15.19	2.34	22.44	0.34	2.00



(a) Step responses



(b) Control inputs

[Fig. 5] Step responses and control inputs for 10% uncertainty process  $P_1^m$ .

따라서 제안한 방법이 공칭 프로세스와 프로세스의 불확실성에 대해서 다른 두 방법보다 우수함을 알 수 있다.

## 2. 프로세스 $P_2$ 시뮬레이션

프로세스  $P_2$ 는 FOPTD 모델에서  $L/T=2$ 인 경우로 시간지연이 프로세스  $P_1$ 보다 10배 큰 시스템이다. 제안한 IMC-PID 제어기의 파라미터를 동조할 때 안정성을 보장하기 위해  $MS=1.6$ 을 선택한다. 이  $MS$ 값을 맞추기 위해 IMC 필터의 시정수  $T_c$ 값을 조정하면 12.4519가 된다. 비교대상의 제어기는 식 (11)과 식 (12)에 따라 동조한다.

<Table 4>는 제안한 방법 및 기존의 방법에 의해 동조한 제어기의 파라미터,  $T_c$ ,  $MS$ 를 요약하여 정리한 것이다.

설정값으로  $t=0$ 초 시점에, 부하외란으로  $t=100$ 초 시점에 계단상의 단위입력을 공칭 프로세스에

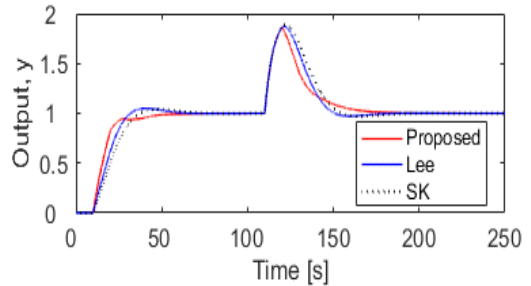
인가하였을 때의 설정값 추종응답 및 외란제거 응답과 그때의 제어입력이 [Fig. 6]에 표시되어 있으며, 세밀한 정량적 비교를 위해 <Table 5>에 다양한 성능평가지수 값을 요약하여 나타내었다.

<Table 4> Controller parameter tuning for process  $P_2$

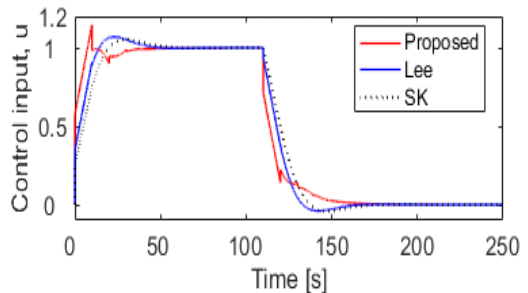
$$P_2 = \frac{e^{-10s}}{5s+1}$$

Tuning Methods	Parameters				Remark MS
	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$T_c$	
Proposed	0.5730	10	2.5	12.4519	1.6
Lee	0.3447	6.1206	0.9154	7.7588	1.6
SK	0.25	5	-	10	1.6

설정값 추종응답에서 제안한 방법은 모든 성능평가지수에서 다른 두 방법보다 우수하고 특히  $t_s$ 가 매우 작고  $OS[\%]$ 가 없다. 외란제거성능에서는 제안한 방법과 Lee의 방법이 비슷한 성능을 나타내지만 SK의 방법은  $t_{rcy}$ 와  $IAE_d$ 가 크다.



(a) Step responses



(b) Control inputs

[Fig. 6] Step responses and control inputs for nominal process  $P_2$ .

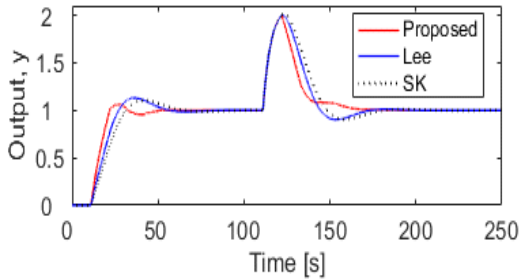
<Table 5> Performances for nominal process  $P_2$

$$P_2 = \frac{e^{-10s}}{5s+1}$$

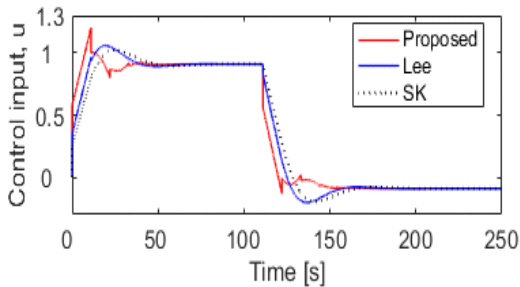
Tuning Methods	Tracking Performances			Disturbance Performances			
	$t_r$ [s]	$t_s$ [s]	OS[%]	IAE <sub>s</sub>	$t_{rcy}$ [s]	$M_p$	IAE <sub>d</sub>
Proposed	12.23	47.12	0	17.45	71.77	0.87	17.45
Lee	15.45	53.85	4.91	19.55	68.89	0.87	18.79
SK	19.04	60.59	4.07	21.69	76.49	0.89	21.32

제어시스템의 강인성을 알아보기 위해 앞의 경우처럼 공칭 프로세스의 파라미터에 대해 가장 가혹한 조건으로 각각 10% 변환  $P_2^{un} = 1.1e^{-11s} / (4.5s+1)$  인 경우를 고려한다.

[Fig. 7] 및 <Table 6> 으로부터 설정값 추종성능 및 부하외란 제거성능의 모든 성능평가지수에서 제안한 방법이 월등히 우수함을 확인할 수 있다.



(a) Step responses



(b) Control inputs

[Fig. 7] Step responses and control inputs for 10% uncertainty process  $P_2^{un}$ .

따라서 제안한 방법이 공칭 프로세스와 프로세스의 불확실성에 대해서 다른 두 방법보다 우수함을 알 수 있다.

<Table 6> Performances for 10% uncertainty process  $P_2^{un}$

$$P_2^{un} = \frac{1.1e^{-11s}}{4.5s+1}$$

Tuning Methods	Tracking Performances			Disturbance Performances			
	$t_r$ [s]	$t_s$ [s]	OS[%]	IAE <sub>s</sub>	$t_{rcy}$ [s]	$M_p$	IAE <sub>d</sub>
Proposed	8.70	46.32	6.19	16.80	63.16	1.01	17.45
Lee	12.27	52.52	12.92	20.54	68.71	1.01	21.04
SK	15.36	59.62	10.50	22.24	75.94	1.02	23.73

## IV. 결론

일반적으로 프로세스의 응답속도를 높이기 위해 제어기의 이득을 크게 하면 오버슈트가 크게 되어 불안정하게 될 수 있고, 반대로 오버슈트를 줄이기 위해 이득을 감소시키면 응답속도가 느려져 응답성능이 저하된다.

본 논문에서는 FOPTD 모델을 제어대상으로 하고 응답성능과 안정성 간의 상반된 개념을 적절히 타협을 할 수 있는 IMC 방법에 기반을 둔 PID 제어기의 설계 방법을 제안하고 제어기의 파라미터를 동조하는 방법을 다루었다. 이를 위해 제어기를 동조할 때 제어기의 강인성에 직접 관련 있는 감도함수의 최대 크기인 MS를 고려하고 이에 따라 IMC 필터의 시정수를 조정하였다.

제안한 방법을  $L/T$ 의 값이 비교적 작은 프로세스  $P_1$  과 이것보다 10배 큰 프로세스  $P_2$  의 1차 시간지연 시스템의 제어에 적용하였고, 그 성능을 검증하기 위해 Lee의 방법 및 Skogestad 방법과 비교한 결과 제안한 방법이 우수한 제어성능을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 차후 주어진 강인성 수준을 쉽게 만족시킬 수 있는 IMC 필터의 시정수 결정을 위한 지침을 제공하기 위한 연구가 필요하다고 사료된다.

## References

Ahn JK, Koh G, and So MO(2019). Nonlinear PD depth control for autonomous underwater vehicle,



- The Korea Society for Fisheries and Marine Sciences Education, 31(4), 949~959.  
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2019.8.31.4.949>
- Ali A and Majhi S(2011). Integral criteria for optimal tuning of PI/PID controllers for integrating processes, *Asian Journal of Control*, 13(2), 328~337.  
<http://doi.org/10.1002/asjc.278>
- Anil C and Sree RP(2015). Tuning of PID controllers for integrating systems using direct synthesis method, *ISA Transactions*, 57, 211~219.  
<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.03.002>
- Åström KJ and Hägglund, T(2001). The future of PID control,"*Control Engineering Practice*, 1163~ 1175.  
[https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(01\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(01)00062-4)
- Chen D and Seborg DE(2002). PI/PID controller design based on direct synthesis and disturbance rejection, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41, 4807~4822.  
<https://doi.org/10.1021/ie010756m>
- Chidambaram M and Sree RP(2003). A Simple method of tuning PID controllers for integrator /dead-time processes, *Computers and Chemical Engineering*, 27(2), 211~215.  
[https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(02\)00178-3](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(02)00178-3)
- Cvejn J(2009). Sub-optimal PID Controller Settings for FOPDT Systems with Long Dead time,"*Journal of Process Control*, 19(9), 1486~1495.  
<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2009.07.002>
- Desborough LD and Miller RM(2002). Increasing customer value of industrial control performance monitoring-honey's experience, *Chemical Process Control-VI*, AICHE Symposium Series No.326, 98.
- Lee JT, Cho WH, and Edgar TF(2014). Simple analytic PID controller tuning rules revisited, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53, 5038~5047.  
<https://doi.org/10.1021/ie4009919>
- Luyben WL(2003). Identification and tuning of integrating process with dead time and inverse response, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42, 3030~3035.  
<https://doi.org/10.1021/ie020935j>
- Pathiran AR and Prakash J(2014). Design and implementation of a model-based PI-like control scheme in a reset configuration for stable single-loop systems, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 92(9), 1651~1660.  
<https://doi.org/10.1002/cjce.22014>
- Ryu KT and Lee YH(2020). Characteristic of the potential according to line-to-earth fault for ships applying unearthed system, *The Korea Society for Fisheries and Marine Sciences Education*, 32(6), 1523~1530.  
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2020.12.32.6.1523>
- Shamsuzzoha M(2015). A unified approach for proportional - integral-derivative controller design for time delay processes, *Korean Journal of Chemistry Engineering*, 48(4), 583~596.  
<https://doi.org/10.1007/s11814-014-0237-6>
- Skogestad S(2003). Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning, *Journal of Process Control*, 13, 291~309.  
[https://doi.org/10.1016/S0959-1524\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0959-1524(02)00062-8)
- So GB(2019). Design of a nonlinear PID controller based on error scaling technique and its application to an electro-hydraulic servo-systems, *The Korea Society for Fisheries and Marine Sciences Education*, 31(4), 1100~1108.  
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2019.8.31.4.1100>
- Tavakoli S and Tavakoli M(2003). Optimal tuning of PID controllers for first order plus time delay models using dimensional analysis, In *Proceedings of the Fourth International Conference on Control and Automation*, Montreal, Que, Canada, 12~12.  
<https://doi.org/10.1109/ICCA.2003.1595161>
- Wu S, Li Z. and Zhang R(2020). An improved 2-degree-of-freedom internal model proportional-integral-derivative controller design for stable time delay processes, *Measurement and Control*, 53(5-6), 841~849.  
<https://doi.org/10.1177/0020294020912522>
- Ziegler JG and Nichols NB(1942). Optimum setting for automatic controllers, *Transaction of the American Society Mechanical Engineers (ASME)*, 64, 759~768.

- 
- Received : 22 November, 2021
  - Revised : 27 December, 2021
  - Accepted : 04 January, 2022