

IMC-LPID 제어를 이용한 LM-2500 엔진의 속도 제어 연구

이찬하¹, 이윤형², 이창식¹, 류기탁², 조홍우³, 소명옥^{3*}

¹대한민국 해군, ²한국해양수산연수원, ³한국해양대학교

Study on Speed Control of LM-2500 Engine using IMC-LPID Controller

Chan-Ha Lee¹, Yun-Hyung Lee², Chang-Shik Lee¹,
Ki-Tak Ryu², Hong-Yu ZHAO³, Myung-Ok So^{3*}

¹Republic of Korea navy

²Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology

³Korea Maritime & Ocean University

요약 다양한 해상환경에서 운용되는 해군 함정의 가스터빈 엔진은 안정적인 속도 제어가 중요하다. 이를 위해서는 엔진 특성을 반영한 정밀한 수학적 모델링과 제어기 설계가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 해군 함정에서 많이 사용하는 LM-2500 엔진에 대해 실제 함정의 시운전 자료를 활용하여 3개의 동작점에 대해 3차 선형모델인 공칭 플랜트를 유도한다. 그리고 제어기 설계를 위해 공칭 플랜트는 1차 시간지연 모델로 근사화하고, IMC 기법과 선형 PID 제어를 결합하여 속도 제어를 위한 IMC-LPID 제어를 제안한다. 이 제어기는 필터 시정수 조정만으로 PID 제어기의 파라미터를 결정할 수 있어 동조가 편리하다. 제안한 제어기는 공칭 플랜트와 파라미터가 변동한 불확실성 플랜트에 적용하고, 시뮬레이션을 시행하여 추종 및 외란 억제성능, 강인성을 정량적으로 평가한다. 시뮬레이션 결과 제안한 제어기는 추종 및 외란 억제성능 모두에서 우수한 성능을 나타내었다. 특히, 실제 가스터빈 엔진의 운용 환경인 파라미터 변동을 고려한 불확실성 플랜트에 대해서도 우수한 성능을 보여 실제 제어기 설계에서도 하나의 방법론으로 기여할 것으로 기대된다.

Abstract Gas turbine engines of naval ships operate in various marine environments, and it is important to control their stable speed. To do this, precise mathematical modeling considering the engine characteristics and controller design are essential. In this study, nominal plants were represented as a 3rd order linear model for three operating points for LM-2500 engines, which are widely applied in naval ships. This was done by using sea trial data. For the controller design, the nominal plant was approximated by a first-order plus time delay (FOPTD) model, and an IMC-LPID controller is proposed for speed control by combining internal model control (IMC) and a linear PID controller. It is convenient to tune the parameters of the PID controller because we only adjust the filter time constant. The proposed controller was applied to a nominal plant and an uncertainty plant, and simulations were performed to quantitatively evaluate the tracking, disturbance suppression performance, and robustness. As a result of the simulations, the proposed controller showed excellent performance in both tracking and disturbance suppression. In particular, it shows excellent control results for an uncertain plant when considering the actual operating environment of a gas turbine engine.

Keywords : LM-2500 Engine, FOPTD Model, IMC-LPID Controller, Tracking, Disturbance Suppression, Robustness

*Corresponding Author : Myung-Ok So(Korea Maritime & Ocean Univ.)

email: smo@kmou.ac.kr

Received September 22, 2022

Revised October 17, 2022

Accepted December 7, 2022

Published December 31, 2022

1. 서론

해군 함정은 추진 및 전력발전용으로 가스터빈 엔진을 많이 사용하고 있다. 이는 피스톤 왕복동 엔진에 비해 단위 부피당 출력이 클 뿐만 아니라 최단 시간 내 가속 및 최대 요구 속도 충족, 잠수함전에 대비한 적은 소음, 함정 운영목적에 적합한 대용량 전력생산 등의 작전 요구 성능(ROC : Required Operational Capability)과 함정 건조 기본 지침서(TLR : Top Level Requirement)를 충족할 수 있기 때문이다.

미국의 줌월트급 구축함, 영국의 Type 45 구축함, 대한민국의 정조대왕급 구축함 등이 가스터빈 엔진을 추진 및 전력발전용으로 사용하는 대표적인 함정이다. 이러한 가스터빈의 안정적인 성능 발휘는 공기압축기의 서지(surge) 발생영역에 대한 근접 정도에 따라 달라진다. 서지는 출력손실, 부품 손상 및 연소정지 등 엔진성능 전반에 직접적인 영향을 미치므로 운전 측면에서 매우 중요한 요소로 간주된다.

현재 대형 가스터빈 엔진에 보편적으로 사용되는 축류식 공기압축기는 대용량의 공기 처리, 높은 압력비 형성이라는 장점에도 서지 발생이라는 불안정성으로 인해 엔진의 안정적인 운전에 제한을 주고 있다.

따라서 공기압축기에서 발생하는 서지와 엔진의 성능에 관한 활발한 연구가 이루어지고 있다[1-3].

이와 함께 가스터빈 엔진의 속도 제어를 위해 연료조절장치[4]와 엔진의 모델링[5,6]에 관한 연구도 진행되었고, 속도 제어기 설계[7-9]와 관련된 연구도 다양하게 이루어져 왔다. 특히, 속도 제어기 설계를 위해서는 가스터빈 엔진의 모델링 과정이 중요한데, 엔진 구조 자체의 복잡성과 비선형성, 다양한 해상환경에 따른 모델의 파라미터 변동 등으로 인해 쉽지 않은 것이 현실이다. 본 연구에서는 대한민국 해군 함정에서 추진용으로 많이 사용되는 LM-2500 가스터빈 엔진에 대한 속도 제어기 설계 문제를 다루고자 한다. 이를 위해 우선 LM-2500 엔진을 가스발생기(GG : Gas Generator)와 연료계량장치(FMU : Fuel Metering Unit)로 구분하고, 각각에 대한 선형모델을 유도한다. 또한, 엔진의 실제 성능과 운전 환경을 고려하여 전체 운전구간 중 대표할 수 있는 3개의 운전 동작점을 선정하고, 시운전 자료를 활용하여 모델의 파라미터를 결정한다. 이 과정을 통해 운전 동작점별 엔진의 특성이 반영된 선형의 공칭 플랜트를 확보할 수 있도록 한다.

이렇게 유도된 공칭 플랜트는 MATLAB(2016b)의

System Identification Toolbox를 이용하여 1차 시간 지연(FOPTD) 모델로 근사화하고, 내부모델제어(IMC) 기반의 선형 PID(LPID : Linear Proportional Integral Derivative) 제어기인 IMC-LPID 제어를 설계한다.

이 제어기는 IMC 필터 시정수인 T_f 조정만으로 PID 제어기의 3개 파라미터를 결정할 수 있다. 본 연구에서 T_f 는 설계한 속도 제어시스템에서 IAE(Integral of Absolute Error)가 최소로 되는 관점에서 시행착오를 통해 선정한다. 제한한 제어기는 3개의 동작점에 적용하고 MATLAB을 사용하여 시뮬레이션을 시행한다. 시뮬레이션은 시운전 자료를 활용해 확보한 공칭 플랜트와 파라미터 변동을 고려한 불확실성 플랜트에 적용하며 속도 추종과 외란 억제능을 각각 정량적으로 평가하여 그 유효성과 강인성을 확인한다.

2. LM-2500 엔진의 수학적 모델

LM-2500 엔진은 Fig. 1과 같이 공기압축기(air compressor), 연소기(combustor), 고압터빈(HPT : High Pressure Turbine) 등으로 구성된 GG 섹션과 저압터빈(LPT : Low Pressure Turbine)에 해당하는 동력터빈(PT : Power Turbine) 섹션으로 이루어져 있다.

그러나 PT 섹션은 구조적으로 GG 섹션과 분리되어 있고, HPT의 배기가스에 의해 간접 제어되므로 본 연구에서는 연소기의 연료공급장치인 FMU와 GG 섹션을 제어대상으로 고려한다.

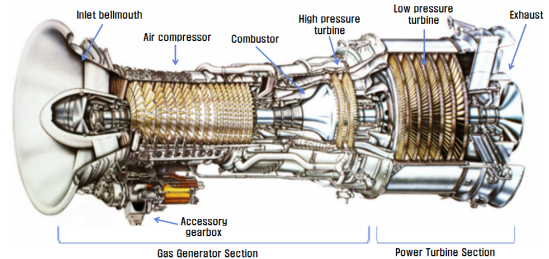


Fig. 1. LM-2500 gas turbine engine

2.1 가스발생기

GG는 연소기와 공기압축기, HPT로 각각 구분하여 모델링하는 것이 이상적이다. 그러나 그 과정이 쉽지 않으므로 제어시스템 설계 시에는 일반적으로 Eq. (1)과 같

이 연료량 $Q(s)$ 와 속도 $Y(s)$ 로 표현되는 전달함수를 사용한다[8].

$$G_{GG}(s) = \frac{Y(s)}{Q(s)} = \frac{K_{GG} e^{-L_{GG} s}}{T_{GG} s + 1} \quad (1)$$

Where, K_{GG} , T_{GG} and L_{GG} denote gain, time constant and time delay of the GG system, respectively.

Eq. (1)은 연료량과 속도에 따라 GG 시스템의 파라미터가 변동하는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 LM-2500 엔진의 실제 성능과 운전 환경을 고려하여 동작점을 6500[rpm], 7500[rpm], 8500[rpm]으로 선정한다. 각 동작점에 대한 시스템의 파라미터는 합정을 시운전하면서 취득한 자료를 활용하여 식별하였으며, Table 1은 이를 정리하여 나타낸 것이다.

Table 1. Parameters of GG system

Operating point	K_{GG}	T_{GG}	L_{GG}
6500[rpm]	9.332	4.375	0.52
7500[rpm]	6.507	2.785	0.30
8500[rpm]	2.984	1.400	0.15

2.2 연료계량장치

FMU는 Fig. 2와 같이 작동기(FMA : Fuel Metering Actuator)와 계량밸브(FMV : Fuel Metering Valve)로 구성되며, 작동 메커니즘을 살펴보면 다음과 같다.

FMA 서보밸브는 제어기로부터 수신한 제어입력 $U(s)$ 에 따라 공급되는 작동유의 방향과 FMA 스푼 (spool)의 직선 이동 거리를 변화시킨다. 이 과정을 통해 FMV의 오리피스(orifice) 면적이 변화되며 최종적으로 필요한 연료량 $Q(s)$ 가 연소기에 공급된다. 이때 공급되는 연료량을 모니터링하기 위한 FMA 스푼의 이동 거리는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 통해 피드백(feedback)된다.

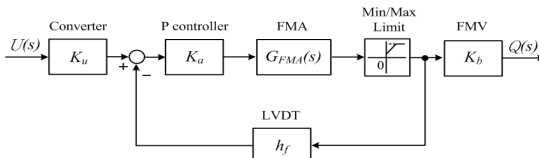


Fig. 2. Block diagram of FMU

구체적인 FMU의 모델링 방법은 선행연구[9,10]를 참조한다. 여기서 $G_{FMA}(s)$ 는 적분기 1개를 가지고 있는 1형 시스템인데, 이는 FMA 스푼의 이동 속도를 직선 변위로 변환하는 역할을 한다. 또한, 신속한 연료공급을 위해 내부루프(loop)에 P 제어를 포함한다.

한편, FMV는 일반적으로 이득으로만 고려할 수 있는데 연료 공급량은 동작점에 따라 변동되므로 이 값은 시운전 자료에서 확보해야 한다. 그 이외의 파라미터는 동작점에 따라 변동되지 않는다.

이와 같은 과정을 거치면 FMU는 Eq. (2)와 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$G_{FMU}(s) = \frac{Q(s)}{U(s)} = \frac{K_u K_a K_{FMA} K_b}{T_{FMA} s^2 + s + K_a K_{FMA} h_f} \quad (2)$$

Where, K_u , K_a , K_{FMA} , T_{FMA} , h_f and K_b denote spool constant of FMA, gain of amplifier, gain of FMA, time constant of FMA, feedback gain of LVDT and fuel flow rate constant, respectively.

Table 2는 시운전 자료로부터 식별한 FMU의 파라미터를 나타낸 것이다.

Table 2. Parameters of FMU

Operating point	K_b	K_u	K_a	K_{FMA}	T_{FMA}	h_f
6500[rpm]	155	0.8	2	4	0.1	0.8
7500[rpm]	158					
8500[rpm]	204					

2.3 LM-2500 엔진

전체 제어대상은 Eq. (1)의 GG 시스템과 Eq. (2)의 FMU를 통합한 것으로 Fig. 3과 같다.

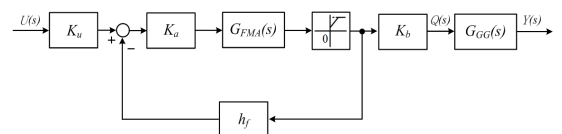


Fig. 3. Block diagram of LM-2500 engine with FMU

최종적으로 Fig. 3은 6500[rpm], 7500[rpm], 8500[rpm]의 동작점에 따라 Eq. (3)의 $G_p^i(i=1,2,3)$ 와 같이 표현할 수 있다.

$$G_p^i(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_1 e^{-L_{GG} s}}{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (3)$$

Where, a_1, a_2, a_3, a_4 and b_1 denote as follows respectively.

$$\begin{aligned} a_1 &: T_{FMA} T_{GG} & a_2 &: T_{FMA} + T_{GG} \\ a_3 &: 1 + K_a K_{FMA} h_f T_{GG} & a_4 &: K_a K_{FMA} h_f \\ b_1 &: K_u K_a K_{FMA} K_b K_{GG} \end{aligned}$$

3. IMC-LPID 제어기 설계

3.1 IMC-LPID 제어기의 구조

IMC[11]는 실제 플랜트의 완전한 모델을 얻을 수 있다면 그 역으로 제어기를 설계하여 이론적으로는 완전한 제어가 가능하도록 할 수 있다는 개념이다.

그러나 실제 제어 환경에서는 실제 플랜트와 일치하는 모델을 얻기가 어렵고, 모델의 역을 만들 때도 문제가 되는 요소(시간지연과 양의 영점)가 있으며, 또한 사전에 알지 못하는 외란이 존재할 수 있어 일반적으로 Fig. 4와 같은 폐루프(closed loop) 구조를 취하게 된다.

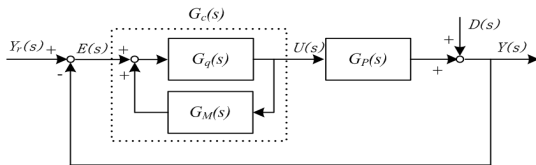


Fig. 4. Closed loop system of the general IMC

여기서 $G_q(s)$, $G_p(s)$, $G_M(s)$, $D(s)$ 는 각각 IMC 제어기, 제어대상 플랜트, 플랜트 모델, 외란을 의미한다. 모델의 불일치는 일반적으로 플랜트의 고주파수 영역 응답에서 발생하므로 이를 해소하기 위한 IMC 제어기는 Eq. (4)의 저주파 통과 필터를 곱하여 Eq. (5)와 같이 설계한다.

$$G_f(s) = \frac{1}{(T_f s + 1)^n} \quad (4)$$

$$G_q(s) = G_f(s) G_M(s)^{-1} \quad (5)$$

Eq. (4)의 n 은 $G_q(s)$ 의 분자의 차수가 분모의 차수보다 크지 않게 설계자가 선정해야 하는 $G_f(s)$ 의 차수

이다. 플랜트 모델 $G_M(s) = \hat{G}_M(s) \tilde{G}_M(s)$ 로 분리 되는데 $\hat{G}_M(s)$ 은 최소위상 부분, $\tilde{G}_M(s)$ 은 비최소위상 부분으로 시간지연, 양의 영점 등이 해당하며, 제어 시스템의 응답을 느리게 하거나 불안정하게 만든다.

따라서 IMC 제어기는 최소위상 부분만을 가지고 설계하며, Eq. (5)는 $G_q(s) = G_f(s) \hat{G}_M(s)^{-1}$ 로 다시 나타낼 수 있다. 그러면 $G_c(s)$ 는 Eq. (6)으로 표현할 수 있다.

$$G_c(s) = \frac{G_q(s)}{1 - G_q(s) G_M(s)} = \frac{G_f(s) \hat{G}_M(s)^{-1}}{1 - G_f(s) \tilde{G}_M(s)} \quad (6)$$

$G_M(s)$ 는 시간지연을 포함한 1차 또는 2차 모델을 사용할 수 있으나, 본 연구에서는 Eq. (3)으로 표현되는 LM-2500 엔진이 FOPTD 모델로 근사화 가능하므로 Eq. (7)을 적용한다. $G_f(s)$ 의 차수 $n=1$ 로 선정하면 $G_M(s)$, $\hat{G}_M(s)$, $\tilde{G}_M(s)$, $G_f(s)$ 는 다음과 같다.

$$G_M(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-Ls} \quad (7)$$

$$\hat{G}_M(s) = \frac{K}{T_s + 1} \quad (8)$$

$$\tilde{G}_M(s) = e^{-Ls} \quad (9)$$

$$G_f(s) = \frac{1}{T_f s + 1} \quad (10)$$

Eq. (9)의 e^{-Ls} 는 Pade 1차로 근사화하고, Eq. (8)~(10)을 Eq. (6)에 대입하면 Eq. (11)과 같이 정리할 수 있다.

$$G_c(s) = \frac{T + \frac{L}{2}}{K(T_f + \frac{L}{2})} \left[1 + \frac{1}{(T + \frac{L}{2})s} + \frac{TL}{2T + L} s \right] \quad (11)$$

Eq. (11)을 표준 병렬형 PID 제어기인 Eq. (12)와 비교하면 IMC-LPID 제어기의 파라미터는 Eq. (13)과 같이 정리할 수 있다.

$$G_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (12)$$

Where, K_p , T_i and T_d denote proportional gain, integral time and derivative time, respectively.

$$K_p = \frac{T+L/2}{K(T_f+L/2)}, \quad T_i = T+L/2 \quad (13)$$

$$T_d = \frac{TL}{2T+L}$$

Where, T_f , K , T and L denote filter time constant, gain, time constant and time delay, respectively.

3.2 LM-2500 엔진의 FOPTD 근사화

앞에서 살펴본 것과 같이 IMC-LPID 제어를 설계하기 위해서는 우선 Eq. (3)으로 표현된 LM-2500 엔진을 Eq. (7) 및 Eq. (8)로 표현되는 FOPTD 모델로 근사화하는 과정이 필요하다. Fig. 5는 FOPTD 모델로 근사화하기 위한 MATLAB의 Identification Toolbox [12,13]의 모습을 나타낸 것이다.

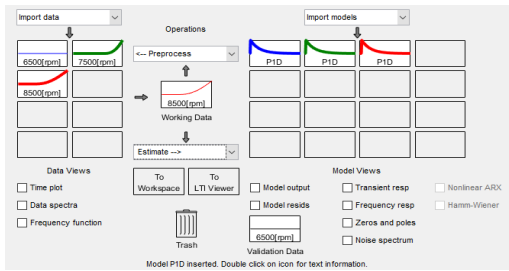
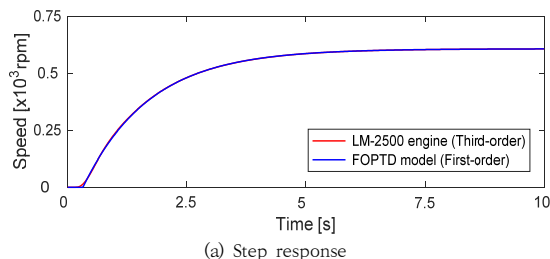


Fig. 5. System identification toolbox for approximation with an FOPTD model

Fig. 6은 3개의 동작점 중 8500[rpm]에서의 $G_p(s)$ 와 $G_M(s)$ 의 단위계단 입력 응답을 대표하여 나타낸 것이며, $G_M(s)$ 이 $G_p(s)$ 과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. Table 3은 모든 동작점에서 근사화한 FOPTD 모델의 파라미터를 정리한 것이다.



(a) Step response

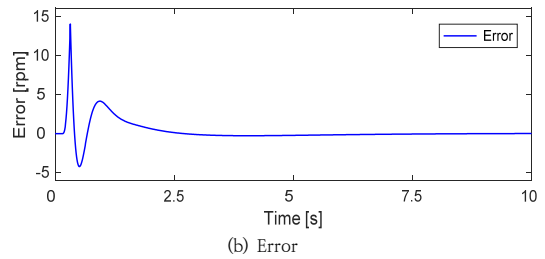


Fig. 6. Response comparisons of LM-2500 engine and FOPTD model at 8500[rpm]

Table 3. Parameters of FOPTD model

Operating point	K	T	L
6500[rpm]	1446.4	4.370	0.69
7500[rpm]	1028.0	2.779	0.47
8500[rpm]	608.7	1.390	0.32

3.3 IMC-LPID 제어기 파라미터 동조

IMC-LPID 제어기의 파라미터 K_p , T_i , T_d 동조를 위한 조정변수는 Eq. (13)를 통해 확인할 수 있듯이 $G_f(s)$ 의 필터 시정수 T_f 만 하나뿐이다. 따라서 본 연구에서는 최적의 T_f 를 선정하기 위해 Eq. (14)의 IAE를 최소화하는 관점에서 추종 성능과 외란 억제성능을 동시에 충족하도록 시행착오를 통해 결정한다.

$$IAE = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (14)$$

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

Table 4는 제안한 IMC-LPID 제어기와 비교목적으로 사용한 Skogestad[14]와 Cohen-Coon[15] 제어기의 파라미터를 함께 정리한 것이다.

Table 4. Controller parameters tuning for LM-2500 engine

Operating point	Tuning methods	Controller parameters			
		K_p	T_i	T_d	T_f
6500[rpm]	Proposed	0.00354	4.7150	0.3198	0.575
	Skogestad	0.00219	4.3700	-	0.690
	Cohen-Coon	0.00151	1.5939	0.2439	-

7500[rpm]	Proposed	0.00407	3.0140	0.2167	0.485
	Skogestad	0.00287	2.7790	-	0.470
	Cohen-Coon	0.00300	1.0811	0.1658	-
8500[rpm]	Proposed	0.00490	1.5500	0.1435	0.360
	Skogestad	0.00357	1.3900	-	0.320
	Cohen-Coon	0.00726	0.7197	0.1117	-

4. 시뮬레이션 및 성능 고찰

시뮬레이션은 두 가지로 구분하여 시행한다. 하나는 플랜트의 파라미터가 변하지 않는 공칭 플랜트(nominal plant), 다른 하나는 불확실성 플랜트(uncertainty plant)를 고려하여 제어기의 강인성을 확인하기 위한 것이다.

일반적으로 제어시스템에서 이득과 시간지연은 커질 때, 반대로 시정수는 작아질 때 제어가 어려워진다. 따라서 LM-2500 엔진의 이득 및 시간지연은 각각 10% 증가시키고, 시정수는 10% 감소시켜 가장 가혹한 환경을 제어조건으로 고려한다.

시뮬레이션의 정량적인 비교를 위해서 추종 성능에서는 IAE_s , 상승시간(T_r), 2%정정시간(T_s), 백분율 오버슈트(%OS)를 외란 억제성능에서는 IAE_d , 2%회복시간(T_{rcy}), 응답 피크값(M_{pk})를 성능지수로 고려한다.

이때 T_r 은 계단입력에 대한 응답 출력값이 목표값의 10%에서 90%를 달성하는 데 필요한 시간[s]을, M_{pk} 는 목표값 y_r 과 응답 출력값 y 의 최솟값의 절대오차를 의미한다.

제어기의 성능은 이들의 값이 작으면 작을수록 좋다고 판단할 수 있다. 또한, 제한한 제어기의 성능 비교목적으로 Skogestad 및 Cohen-Coon의 제어기 응답 결과도 함께 나타내었다.

4.1 공칭 플랜트

Fig. 7 ~ 9는 t=0초 시점에 목표값이 인가되고, t=15초 시점에 계단상의 외란 입력이 인가된 경우의 응답을 나타낸 것이다. 여기서 외란은 각 동작점별 운전 중 부하의 20%에 해당하는 해풍이 함수에서 계단입력 형태로 지속되는 것으로 가정한다.

Table 5 ~ 7은 동작점에 따른 제어기의 성능을 정리하여 나타낸 것이다. 목표값 추종에서는 제안한 제어기가 IAE_s , T_r 에서 양호하며, 특히 IAE_s 가 가장 작아 오차

측면에서 가장 우수하다. Skogestad 방법은 T_r 이 다소 크고, Cohen-Coon 방법은 큰 %OS를 보이고 있다.

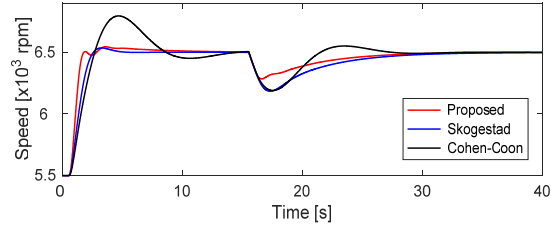


Fig. 7. Step responses for nominal plant G_p^1

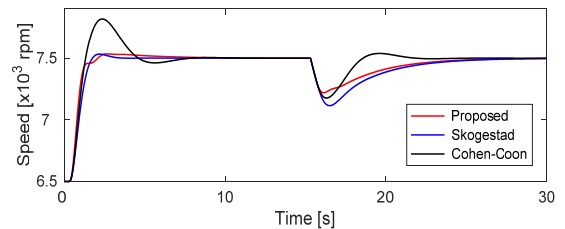


Fig. 8. Step responses for nominal plant G_p^2

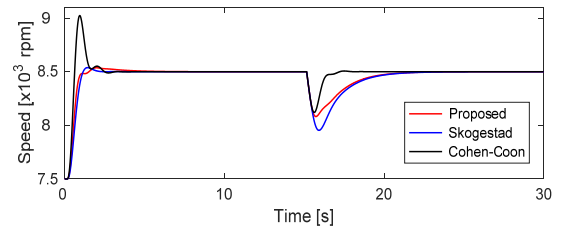


Fig. 9. Step responses for nominal plant G_p^3

외란 억제 측면에서는 제한한 제어기가 IAE_d , M_{pk} 에서 우수한 성능을 보인다. Skogestad 방법은 T_{rcy} 가 다소 크며, Cohen-Coon 방법은 IAE_d 가 작게 나타나지만 목표값 추종에서 매우 큰 %OS를 보이므로 목표값 추종과 외란 억제를 동시에 충족시키는 제어기로는 적합하지 않다.

Table 5. Performance comparisons for nominal plant G_p^1

Tuning methods	Tracking				Disturbance		
	IAE_s	T_r	T_s	%OS	IAE_d	T_{rcy}	M_{pk}
Proposed	1363	0.739	7.399	0.684	1194	19.240	218
Skogestad	1479	1.299	4.057	0.541	1789	19.452	316
Cohen-Coon	2845	1.537	13.034	4.540	1322	15.822	317

Table 6. Performance comparisons for nominal plant G_P^2

Tuning methods	Tracking				Disturbance		
	IAE_S	T_r	T_s	%OS	IAE_d	T_{rcy}	M_{pk}
Proposed	990	0.652	5.072	0.464	1083	12.627	281
Skogestad	1004	0.883	2.694	0.440	1416	12.429	386
Cohen-Coon	1557	0.668	6.747	4.240	672	6.365	324

Table 7. Performance comparisons for nominal plant G_P^3

Tuning methods	Tracking				Disturbance		
	IAE_S	T_r	T_s	%OS	IAE_d	T_{rcy}	M_{pk}
Proposed	663	0.493	3.212	0.436	884	6.603	419
Skogestad	685	0.603	1.785	0.451	1088	6.413	547
Cohen-Coon	781	0.283	2.349	6.163	285	2.083	380

4.2 불확실성 플랜트

제어시스템의 강인성을 확인하기 위해 앞에서 설명한 것과 같이 LM-2500 엔진의 공칭 파라미터인 이득 K_{GG} 와 시간지연 L_{GG} 는 10% 증가하고, 시정수 T_{GG} 는 10% 감소시켜 시뮬레이션을 시행한다.

Fig. 10 ~ 12는 각 동작점별로 불확실성 플랜트에 대해 각 제어기에 의한 응답 결과이며 Table 8 ~ 10은 각 제어기의 성능지수를 정량적으로 나타낸 것이다. 세 가지 방법 모두 공칭 플랜트에 비해 큰 오버슈트와 진동을 보여 주고 있으며, 이는 파라미터 변화가 제어기의 안정성(stability)을 감소시키는 것을 의미한다.

불확실성 플랜트인 경우에도 목표값 추종에서 제안한 제어기가 IAE_S , T_r 에서 양호하며, 특히 IAE_S 가 가장 작게 측정되어 오차 측면에서 가장 우수한 성능을 보인다. Skogestad 방법은 T_r 이 크고, Cohen-Coon 방법은 T_s 및 %OS에서 다른 제어기보다 매우 크다.

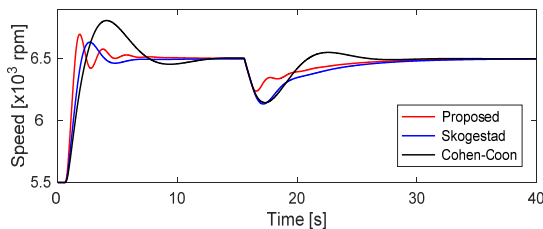


Fig. 10. Step responses for 10% uncertainty plant G_P^1

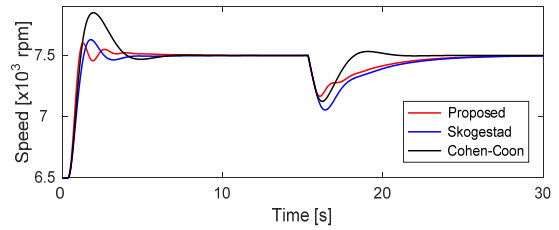


Fig. 11. Step responses for 10% uncertainty plant G_P^2

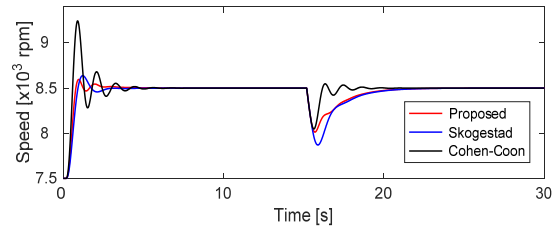


Fig. 12. Step responses for 10% uncertainty plant G_P^3

외란 억제 측면에서는 제안한 제어기가 IAE_d , M_{pk} 에서 우수한 성능을 보인다. Skogestad 방법은 M_{pk} 가 가장 크게 나타나 외란 억제 능력에서 가장 성능이 좋지 않고, Cohen-Coon 방법은 IAE_d 가 다른 제어기에 비해 가장 작게 나타나지만 목표값 추종에서 매우 큰 %OS가 나타나 목표값 추종과 외란 억제를 동시에 충족시키지 못하고 있다. 제안한 제어기는 이득과 시간지연이 증가하고, 시정수가 감소하는 가혹한 조건을 고려한 불확실성 플랜트에 대해서도 목표값 추종 및 외란 억제성능 모두에서 다른 제어기보다 우수한 성능을 나타내었다.

Eq. (14)가 최소가 되도록 필터 시정수 T_f 를 조정하면 IMC-LPID 제어기는 추종 및 외란 억제성능 모두에서 의도한 대로 IAE 측면에서 가장 우수한 성능을 나타내었다. 특히, 실제 운전 환경을 고려하여 LM-2500 엔진의 파라미터가 가장 가혹하게 변동한 불확실성 플랜트에 대해서도 우수한 성능이 나타난 것은 실제 제어기 설계기법에도 기여할 것으로 사료된다.

Table 8. Performance comparisons for 10% uncertainty plant G_P^1

Tuning methods	Tracking				Disturbance		
	IAE_S	T_r	T_s	%OS	IAE_d	T_{rcy}	M_{pk}
Proposed	1420	0.565	6.263	3.040	1194	18.475	263
Skogestad	1560	0.951	5.683	2.057	1789	18.924	365
Cohen-Coon	2593	1.229	11.366	4.748	1268	13.280	356

Table 9. Performance comparisons for 10% uncertainty plant G_P^2

Tuning methods	Tracking				Disturbance		
	IAE_s	T_r	T_s	%OS	IAE_d	T_{rcy}	M_{pk}
Proposed	930	0.471	4.253	1.351	1083	12.217	333
Skogestad	1051	0.657	3.796	1.726	1416	12.108	444
Cohen-Coon	1450	0.534	5.670	4.659	634	5.523	374

Table 10. Performance comparisons for 10% uncertainty plant G_P^3

Tuning methods	Tracking				Disturbance		
	IAE_s	T_r	T_s	%OS	IAE_d	T_{rcy}	M_{pk}
Proposed	629	0.376	2.327	1.128	884	6.430	487
Skogestad	715	0.469	2.540	1.619	1088	6.269	630
Cohen-Coon	1004	0.245	4.020	8.758	336	3.753	453

5. 결론

본 연구에서는 LM-2500 엔진의 속도 추종과 외란 억제 성능을 동시에 충족시키는 IMC-LPID 제어기 설계 방법을 제안하였다. 이를 위해 3개 동작점에 대해 시간지연이 있는 1차 선형모델로 표현한 GG 시스템과 2차 선형모델로 나타낸 FMU를 모델링하고, 이를 결합하여 시간지연이 있는 3차 선형모델인 공칭 플랜트를 유도하였다. 이때 모델의 파라미터는 동작점별 실제 LM-2500 엔진의 동특성이 반영될 수 있도록 시운전 자료를 활용하여 결정하였다. 이렇게 유도된 공칭 플랜트는 제어기 설계를 위해 MATLAB의 Identification Toolbox를 이용해 FOPTD 모델로 근사화한 후, IMC 기법과 선형 PID 제어기를 결합하여 IMC-LPID 제어기를 설계하였다. 이 제어기는 필터 시정수인 T_f 조정만으로 PID 제어기의 3개 파라미터를 결정할 수 있는 장점을 가진다. 이때 T_f 는 제어시스템의 IAE를 최소화 하는 관점에서 시행착오로 선정하였다. 제안한 방법의 유효성을 검증하기 위하여 3개 동작점의 공칭 플랜트에 대해 제안한 제어기, Skogestad 및 Cohen-Coon의 선형 PID 제어기를 각각 적용하여 추종 성능 및 외란 억제 성능을 확인하였다. 또한, 제어기의 강인성을 검토하기 위해 공칭 플랜트에서 파라미터가 10% 변동한 불확실성 플랜트도 함께 고려하였다. 시뮬레이션을 통해 IAE_s , T_r , T_s , %OS,

IAE_d , T_{rcy} , M_{pk} 를 성능지수로 고려하여 정량적으로 평가한 결과 제안한 제어기가 공칭 플랜트와 불확실성 플랜트에 대해 추종 및 외란 억제 성능 모두에서 우수하고 강인한 성능을 확인할 수 있었다. 또한, 정량적 성능평가 중에서 IAE는 제어기 설계 시 선정한 의도대로 가장 작은 값을 나타내어 오차 측면에서 가장 우수한 성능을 나타내었다. 특히, 제안한 제어기가 LM-2500 엔진의 파라미터가 가장 가혹하게 변동한 불확실성 플랜트에 대해서도 우수한 성능을 나타내어 실제 제어기를 설계하는 단계에서도 하나의 방법론으로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 모델링 단계에서 PT 시스템과 연료의 연소 시 압축기의 공기량 제어 부분이 고려되지 못한 점은 본 연구에서 한계로 남아 있다. 차후 이와 같은 부분이 더 추가되고, 하나의 동작점에서 또 다른 동작점으로 천이하는 문제와 동작점마다 설계된 여러 개의 제어기를 하나로 결합하는 연구가 더 진행될 필요가 있다고 사료된다.

References

- [1] K. W. Bae, S. J. Kim, D. I. Han, C. O. Min, D. W. Lee, "Surge control of turbofan engine compressor with the variable inlet guide vane". *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 41, No. 7, pp.539-546. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.7.539>
- [2] C. Y. Oh, J. Y. Koo, "Effects of axial flow compressor surge on the performance of turbofan engine". *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol.13, No.3, pp.1-8. 2009.
- [3] Manuj Dhingra, *Compressor Stability Management*, Ph.D. Thesis Georgia Institute of Technology, 2006.
- [4] D. Y. Lee, H. Y. Choi, J. S. Park, J. Y. Koo, "A study on stability improvement of fuel metering unit for air breathing engine". *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.34, No.9, pp.76-81. 2006. DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2006.34.9.076>
- [5] K. M. Back, H. I. Huh, J. Y. Ki, "Modeling and simulation of a gas turbine engine for control of mechanical propulsion systems". *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol.25, No.4, pp.43-52. 2021. DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2021.25.4.043>
- [6] S. R. Guda, C. Wang, M. H. Nehrir, "Modeling of microturbine power generation systems". *Electric Power Components and Systems*, Vol.34, No.9, pp.1027-1041. 2006.

DOI: <https://doi.org/10.1080/15325000600596767>

- [7] G. B. So, J. H. YEA, H. Y. ZHAO, M. O. So, "Design of a PID Controller based on internal model control technique for first order time delay processes", *Journal of the Studies on Education of Fisheries and Marine Sciences*, 34.1, pp.1-9. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2022.2.34.1.1>
- [8] Y. H. Lee, M. O. So, "Speed control of marine gas turbine engine using nonlinear PID controller". *Journal of Korean Navigation and Port Reserch* Vol.39, No.6, pp.457- 463. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.5394/KINPR.2015.39.6.457>
- [9] Y. B. Cha, B. M. Koo, D. H. Song, J. K. Choi, "Development of an engine simulator for optimal control system implementation of a gas turbine engine", *Journal of the Korea Institute of Maritime Information & Communication Sciences*, Vol.11, No.1, pp.75-82. 2007.
DOI: <https://doi.org/10.6109/KIICE.2007.11.1.75>
- [10] C. H. Lee, *Design of an IMC-based PID controller for speed control of an warships G/T Engines*, Ph.D dissertation, Graduate School Korea Maritime and Ocean University. pp.29-32, 2022.
- [11] M. Morari, E. Zafiriou, *Robust Process Control*, Prentice- Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1989.
- [12] *System Identification Toolbox, Getting Started Guide: Mathworks: Natick, MA, USA, 2020.*
- [13] *System Identification Toolbox, User's Guide: Mathworks: Natick, MA, USA, 2020.*
- [14] Sigurd Skogestad, 2004. "Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning". *Journal of Process Control*. June 2003. Vol.13, No.4, pp.291-309.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-1524\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0959-1524(02)00062-8)
- [15] Cohen G. H. and Coon G. A, "Theoretical Investigation of Retarded Control", *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 75, pp. 827-834, 1953.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4015451>

이 찬 하(Chan-Ha Lee)

[정회원]



- 2022년 8월 : 한국해양대학교 대학원 해양군사학과 (공학박사)
- 2022년 1월 ~ 현재 : (주) 베가스 국방전문컨설팅/데이터분석가 (인턴)
- 2022년 11월 : 대한민국 해군 (대령)

<관심분야>

퍼지 및 선형제어, 시스템식별, 함정 추진 및 전력 제어

이 윤 형(Yun-Hyung Lee)

[정회원]



- 2007년 8월 : 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 (공학박사)
- 2008년 2월 ~ 2014년 6월 : 한국항공우주연구원 교수
- 2014년 7월 ~ 현재 : 한국해양수산연수원 교수

<관심분야>

유전알고리즘 이론 및 응용, 퍼지제어, 비선형제어, 시스템식별, 선박 전기 및 제어시스템

이 창 식(Chang-Shik Lee)

[정회원]



- 2000년 2월 : 한국해양대학교 대학원 기관공학과 (공학석사)
- 2018년 2월 : 한국해양대학교 대학원 해양군사학과 (공학박사수료)
- 2022년 1월 ~ 현재 : 대한민국 해군 (준장)

<관심분야>

함정 디젤기관 및 가스터빈 운용 및 제어

류 기 탁(Ki-Tak Ryu)

[정회원]



- 2008년 2월 : 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 (공학석사)
- 2011년 2월 : 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 (공학박사수료)
- 2007년 5월 ~ 현재 : 한국해양수산연수원 교수

<관심분야>

비선형제어, 최적제어, 선박 전기 및 전력시스템, AC드라이브

조 흥 우(Hong-Yu ZHAO)

[준회원]



- 2015년 3월 ~ 2021년 1월: 한국해양대학교 해사대학 기관공학부 (공학학사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 대학원 기관공학과 (공학석사과정)

<관심분야>

내부모형제어 이론 및 응용, 선박 기관 제어

소 명 옥(Myung-Ok So)

[정회원]



- 1997년 2월 : 한국해양대학교 대학원 기관공학과 (공학박사)
- 2002년 2월 ~ 2004년 2월 : 한국해양대학교 선박전자기계공학부장
- 2005년 1월 ~ 2006년 1월 : Cardiff 대학 교환교수
- 2022년 1월 ~ 현재 : 한국해양대학교 해양군사대학 학장

<관심분야>

퍼지제어, 최적제어 및 적응제어, 유전알고리즘, 선형 및 비선형 시스템, 항만하역장비, 선박 디젤기관 및 가스터빈 제어, 셀-튜브 열교환기 제어, 자율 무인잠수정 제어