

ITAE에 기초한 해상용 가스터빈 엔진의 RCGA-PID 제어기

류기탁 · 이윤형[†]

한국해양수산연수원(교수)

RCGA-PID Controller Based on ITAE for Gas Turbine Engine in the Marine Field

Ki-Tak RYU · Yun-Hyung LEE[†]

Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology(professor)

Abstract

Gas turbine engines have a complicated internal structure. In the case of the marine, parameters of gas turbine engine model change according to the characteristics of the marine environment and the operating point. Since it is mainly used in warships and there is not much accumulated data, it is difficult to design model parameters or controllers. The gas turbine engine mainly used for marine use is the LM-2500. In this paper, gas turbine engine models are designed using sea trial data of LM-2500. Three models are designed for three operating points. This paper proposes a PID controller design method for tracking control using RCGA for them. A gas turbine engine is modeled with a gas generator and a FMU(fuel metering unit). The PID controller parameters are tuned using a RCGA to minimize the ITAE objective function. The efficacy of the proposed controller is verified by performing simulations and using Ms(Maximum sensitivity) and performance index.

Key words : Gas turbine engine, ITAE, Ms, PID controller, RCGA

I. 서론

가스터빈 엔진은 영국의 존 바버가 1791년 특허를 받은 이후 선박용, 기관차용, 자동차용으로 실용화 되었다(Potter, 1972). GE사의 LM-2500 가스터빈 엔진은 상용화되고 안정화된 대표적인 모델로 미국의 쥘트급 구축함, 영국의 Type 45 구축함, 대한민국의 정조대왕급 구축함에 추진 및 선내 발전용으로 사용되고 있다(Lee et al., 2022). 가스터빈 엔진은 왕복동 엔진에 비해 단위 출력당 무게가 가볍고, 부피가 작으며 엔진 출력의 가용성(可用性)이 높고, NOx와 SOx와 같은 배기가스 배출이 작은 특징을 가진다. 이러한 이

유로 1970년대 이전에는 상선에서도 사용되었으나 1~2차 오일쇼크 이후 상선에서는 저질유를 사용할 수 없는 가스터빈 엔진 대신 디젤엔진으로 대체되었다(Neut, 1980). 한편, 육상에서는 발전을 위한 원동기로 가스터빈 엔진이 많이 적용된다. 이는 대용량의 발전 시설에서는 정격에서 가스터빈 엔진이 운전되므로 높은 효율로 운전될 수 있고, 대형화될수록 압축비 증가 및 입구 온도 증가로 효율이 향상되기 때문이다. 항공분야에서는 프로펠러를 구동하거나 배기가스의 분사추진력을 이용하여 항공기의 추력을 발생시킨다. 해상분야는 해양플랜트 일부에서 발전용으로 사용하고,

[†] Corresponding author : 051-620-5823, domse54@daum.net / 0000-0002-4459-5793

대부분은 앞에서 설명한 군함의 추진목적으로 적용된다. 추진형태로는 COGAG(COMBined Gas turbine And Gas turbine), COGOG(COMBined Gas turbine Or Gas turbine), CODAG(COMBined Diesel And Gas turbine), CODOG(COMBined Diesel Or Gas turbine)가 있으며, 제한적이기는 하지만 레저용 또는 호버크래프트와 같은 특수선에도 적용되고 있다(Cho, 2007; Choi, 2006).

이처럼 해상분야에 적용되는 가스터빈 엔진은 해상환경 특성과 운전 동작점이 빈번히 변경됨에 따라 시스템의 파라미터도 변하기 때문에 속도제어를 위한 제어기 설계가 쉽지 않다. 또한, 적용분야가 주로 군함이고, 데이터 축적이 많지 않아 시스템 모델링이나 제어기 설계에 한계가 있다.

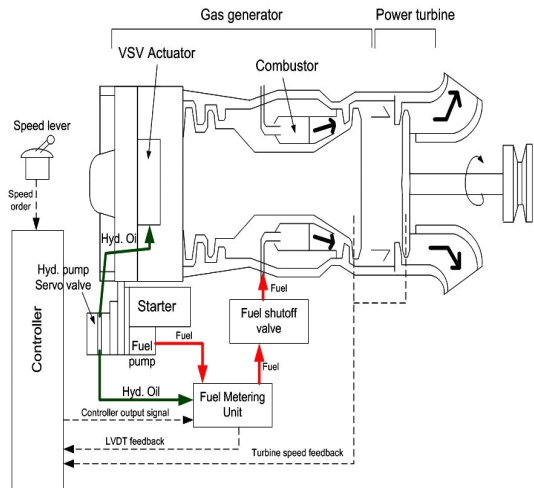
따라서 본 논문에서는 해군 군함용으로 많이 사용되는 가스터빈 엔진 LM-2500에 대해 시운전 데이터를 이용하여 엔진 모델링과 회전속도용 제어기를 설계하고자 한다. 시운전 데이터는 해상에서 COGAG 추진형태로 LM-2500 엔진 4대가 모두 운전되는 환경에서 확보한 것이다. 이 자료를 기반으로 가스터빈 엔진을 3가지 운전 동작점에서 가스발생기와 연료공급장치로 구분하여 모델링한다. 속도제어를 위한 추종제어기는 최적화 기법 중 하나인 RCGA(Real-coded genetic algorithm)를 이용하여 ITAE(Integral Time weighted Absolute Error) 평가함수가 최소가 되는 관점에서 설계하는 RCGA-PID 제어기를 제안한다. 제안한 제어기는 3개의 운전 동작점에 적용하여 MATLAB(2021a)으로 설정치 추종 시뮬레이션을 시행하고, 선행연구인 IMC-PID 제어기와 성능을 정량적으로 비교 및 평가하여 제안한 방법의 유효성을 검증한다.

II. 연구 방법

1. 가스터빈 엔진 LM-2500의 개요

GE사가 미국 공군 C-5 갤럭시 수송기용으로

TF39 엔진을 개발한 이후, 민간 여객기를 위해 최초로 개량한 것이 CF6-6 엔진이다. LM-2500은 이들 엔진을 함정용으로 개조한 것으로 2축 구조의 터보샤프트 엔진이다. 하나의 축은 16단 축류형 공기압축기, 환상형 연소기, 2단 고압터빈으로 구성되는 가스발생기(gas generator)를 구동시키고, 분리된 또 다른 축은 저압 6단 동력터빈과 부하가 연결되어 구동된다. 이때 연료는 비중 0.8484인 경유를 사용한다. [Fig. 1]은 전반적인 제어계통의 신호와 연료의 흐름을 나타낸 것이다.



[Fig. 1] Control signal and fuel flow of LM-2500.

그림에서 연료 조절장치 FMU(Fuel Metering Unit) 신호는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer) 장치를 통해 제어기로 피드백된다. 이때 연료량과 공기량은 상호 스케줄링에 의해 자동으로 조절되므로 공기 조절장치 VSV Actuator에 대해서는 고려하지 않는다. 또한, 회전속도 제어를 위해 고압 및 동력터빈의 회전속도도 제어기로 피드백된다. 그러나 LM-2500과 같은 2축식은 연소가스에 의해 고압터빈의 회전속도가 1차로 제어되고, 배기가스 유량에 의해 동력터빈이 2차로 간접 제어되는 형태이다. 따라서 본 연구에서는 동력터빈을 제외한 고압터빈의 회전속도 제어를 다루고자 한다.

2. 최적화 도구로서의 RCGA

유전알고리즘(GA; Genetic Algorithm)은 해(solution) 집단을 임의로 설정하고 진화의 개념을 도입한 최적화 알고리즘이다(Gen and Cheng, 1997; Holland, 1975). 이때 해 집단 내에서 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)와 같은 유전 연산자가 작동하여 인위적으로 진화를 일으킨다.

RCGA는 염색체의 유전자를 식 (1)과 같이 실수로 표현하고, 해 벡터와 일대일로 대응시킴으로써 이진코딩 방법보다 정밀도가 높고, 연산 처리가 쉽다.

$$s = (s_1 \ s_2 \ \dots \ s_n) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 $s_i \in R$ 는 i 번째 유전자, n 은 벡터 차원이다.

유전 연산자 중 재생산은 적자생존을 모방하여 진화가 진행될수록 집단 내에 좋은 유전자만 남게 하는 메커니즘이고, 교배는 부모 세대의 유전 인자가 서로 교환되는 유성생식 모방한 것이다. 돌연변이는 염색체의 변화를 일으켜 유전자의 다양성을 확보하기 위한 연산자이다.

최적해로의 수렴은 개체의 적합도(fitness)를 사용하여 평가하며 자연계에서 생물이 생존하고, 자연 도태되는 현상을 반영한 것이다. 적합도 평가는 다음 세대로 넘어갈 때 목적함수에 의해 매번 이루어진다. 또한, 한 세대의 최적 개체 소멸을 방지하는 엘리트 전략(elitist strategy)을 적용하며, 모의 진화는 정해진 세대까지 진행하면 종료한다.

3. 가스터빈 엔진 LM-2500 모델링

가. 가스발생기 모델

가스발생기는 식 (2)와 같이 연료량 $Q(s)$, 고압터빈의 회전속도 $Y(s)$ 로 나타낼 수 있다(Shon YC et al., 1998).

$$G_E(s) = \frac{Y(s)}{Q(s)} = \frac{K_E}{1 + T_E s} e^{-L_E s} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 K_E 와 T_E 는 각각 가스발생기 이득과 시정수이고, L_E 는 연료가 연소되어 회전이 발생하기까지의 시간지연을 의미한다.

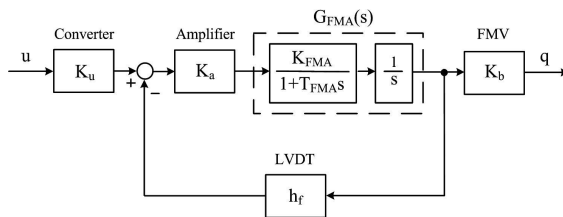
본 연구에서는 식 (2)의 모델 파라미터를 얻기 위해 COGAG 추진 방식에서 추진축이 2개, LM-2500엔진 4대가 동시에 운전되는 조건의 시운전 데이터를 이용하였다. 가스발생기 운전 동작점은 6500[rpm], 7500[rpm], 8500[rpm]로 설정하였으며, 이는 가스발생기 최대 속도의 30[%], 60[%], 90[%] 부근으로 저속, 중속, 고속 지점에 해당한다. <Table 1>은 최종적으로 얻어진 모델의 파라미터를 정리한 것이다.

<Table 1> Parameters of LM-2500 gas generator

Model	$G_{E1}(s)$	$G_{E2}(s)$	$G_{E3}(s)$
Operating point	6500[rpm]	7500[rpm]	8500[rpm]
K_E	9.332	6.507	2.984
T_E	4.375	2.785	1.400
L_E	0.52	0.30	0.15

나. FMU의 모델

본 연구의 모델링 대상인 LM-2500엔진의 연료 공급장치는 전자식 FMU(Fuel Metering Unit)이다. FMU는 입력 전류에 따라 스펴의 변위가 변하여 연료 밸브의 개도를 조절하는 FMA(Fuel Metering Actuator)를 포함하며, [Fig. 2]와 같이 나타낼 수 있다(Cha et al., 2007).



[Fig. 2] FMU of LM-2500.

[Fig. 2]에서 K_{FMA} 와 T_{FMA} 는 FMA의 이득과 시정수이고, FMA의 적분기는 스펙의 이동속도를 이동변위로 변환한다. FMV(Fuel Metering Valve)는 시정수가 매우 작으므로 이득 K_b 만으로 고려한다. 또한, K_u 는 전압 신호인 제어입력 u 를 FMA로 인가되는 전류로 변환하는 상수이다. 한편, K_a 는 캐스케이드 제어(cascade control) 전략을 위한 내부 비례 제어기로 h_f 를 이용하여 스펙의 변위를 피드백하며, 이를 통해 신속한 연료공급이 가능하게 된다.

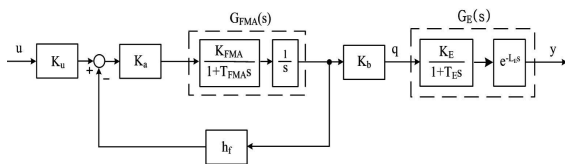
<Table 2>는 시운전 데이터를 이용하여 얻은 FMU의 파라미터를 나타낸 것이다. 이때, K_b 는 동작점에 따라 공급되는 연료량이 변동하므로 서로 다른 값을 가지며, 나머지 FMU의 파라미터는 일정한 값을 가진다.

<Table 2> Parameters of FMU for LM-2500

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

다. 가스터빈 엔진 전체 모델

본 연구에서 제어대상으로 고려하는 가스터빈 엔진 전체는 식 (2)와 [Fig. 2]를 결합한 것으로 [Fig. 3]과 같이 나타낼 수 있다.



[Fig. 3] Block diagram of LM-2500.

그림에서 제어대상의 전체 전달함수는 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$G_P(s) = \frac{b_1 e^{-L_E s}}{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \dots \dots \dots (3)$$

여기서 $a_1 = T_E T_{FMA}$, $a_2 = T_E + T_{FMA}$
 $a_3 = 1 + h_f T_E K_{FMA} K_a$, $a_4 = h_f K_{FMA} K_a$
 $b_1 = K_E K_b K_{FMA} K_a K_u$ 이다.

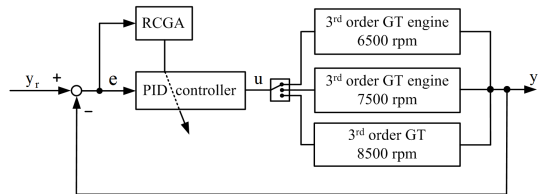
4. ITAE 기반의 RCGA-PID 제어기 설계

PID 제어기는 설비의 특성과 운전환경에 따라 다양한 결과가 나타나므로 적절한 제어기 동조가 필요하다. 본 연구에서는 연구방법에서 설명한 RCGA를 이용하여 가스터빈 엔진이 해상에서 운용될 때 최적의 속도 제어를 설계하고자 한다.

RCGA는 PID 제어기 파라미터와 염색체의 유전자를 일대일로 대응시키므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s = (K_p \ T_I \ T_D) \in R^3 \dots \dots \dots (4)$$

[Fig. 4]는 가스터빈 엔진 3개 동작점에 대해 각각의 PID 제어기를 RCGA로 동조하는 방법을 나타낸 것이다.



[Fig. 4] RCGA-PID tuning process.

이때 개체의 적합도 평가를 위한 목적함수는 식 (5)를 적용하여 ITAE에 기초한 RCGA-PID 제어기로 동조한다. 이는 가스터빈 엔진은 정상상태 오차 없이 신속하고, 정확한 속도 추종이 중요한데 ITAE는 시간의 경과에 가중치를 부여할 수 있기 때문이다.

$$J_{ITAE} = \int t \cdot |y_r - y| dt \dots \dots \dots (5)$$

여기서, y_r 은 가스터빈 엔진 목표치 속도, y 는 출력 속도를 의미한다.

5. 제어기의 강인성 및 성능 평가

가. 강인성 평가

제어기가 상대적 안정성과 강인성은 식 (6)의 Ms(Maximum sensitivity) 함수를 이용한다.

$$Ms = \max_{0 \leq \omega \leq \infty} \left| \frac{1}{1+C(j\omega)P(j\omega)} \right| \dots\dots\dots (6)$$

여기서 $C(j\omega)$ 와 $P(j\omega)$ 는 각각 제어기와 플랜트의 주파수 전달함수를 의미한다.

Ms는 제어기 설계 시 상대 안정성의 척도로 사용되는데, 크기가 개루프 전달함수의 나이퀴스트 선도에서 임계점 (-1, 0)까지의 최단 거리의 역수를 의미하기 때문이다. 따라서 Ms 값이 작을수록 더 강인한 제어성능을 가지게 된다. 일반적으로 Ms의 값은 1.4 ~ 2.0 사이가 적절한 것으로 제시하고 있다(Anil and Sree, 2015).

나. 성능 평가

제안된 제어기의 성능은 과도응답 평가지수와 오차 평가지수를 활용하여 검증한다. 과도응답 평가를 위해서 상승시간 $T_r[s]$, 정정시간 $T_s[s]$, % 오버슈트(%OS)를 고려한다. 오차 평가지수는 빠른 시간 내에 목표치에 도달하고, 정상상태 오차도 없어야 하므로 IAE와 ITAE 2가지를 모두 고려하기로 한다.

$$IAE = \int |e(t)|dt \dots\dots\dots (7)$$

$$ITAE = \int t|e(t)|dt \dots\dots\dots (8)$$

III. 연구 결과

1. 가스터빈 엔진 및 제어기 파라미터

가. 가스터빈 엔진 동작점별 모델

동작점에 따른 가스터빈 엔진 모델은 식 (3)과

같은 3차 시스템이며, 시운전 데이터를 이용하여 각 동작점에 대한 전달함수 $G_{pi}(i = 1, 2, 3)$ 를 구하면 식 (9)와 같다.

$$G_{P1}(s) = \frac{9257.3 e^{-0.52s}}{0.4375s^3 + 4.475s^2 + 29s + 6.4} \dots\dots (9a)$$

$$G_{P2}(s) = \frac{6579.9 e^{-0.3s}}{0.2785s^3 + 2.885s^2 + 18.824s + 6.4} \cdot (9b)$$

$$G_{P3}(s) = \frac{3895.9 e^{-0.15s}}{0.14s^3 + 1.5s^2 + 9.96s + 6.4} \dots\dots\dots (9c)$$

나. RCGA-PID 제어기 파라미터 탐색

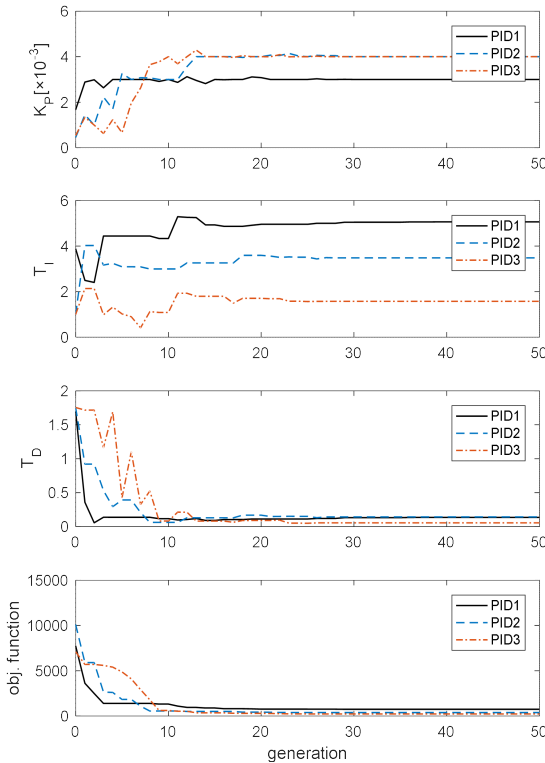
RCGA-PID 제어기의 파라미터 탐색을 위해서 유전적 다양성을 형성하는 집단 크기를 선정해야 한다. 집단의 크기가 크면 전역해를 포함하는 유전자가 많을 수 있지만, 연산속도의 저하가 발생한다. 일반적으로 많은 최적화 문제에서 20~80 사이의 값을 사용하고 있으며 본 연구에서는 경험적으로 집단의 크기를 40으로 선정하였다. RCGA는 확률적 탐색법이므로 어느 시점이 전역해에 도달했는지 알기 쉽지 않다. 일반적으로 탐색하는 변수 또는 목적함수 값이 일정 값으로 수렴하는 세대를 기준으로 하는데, 본 연구에서는 이를 반영하여 50세대를 종료 조건으로 선정하였다.

또한, 초기 집단의 선택에 따라 최적해의 정밀도가 좌우되므로 독립된 씨드(seed)로 3회 모의실험을 실시하고, 평균한 값을 최종적으로 사용한다. 그 이외의 제어 파라미터는 <Table 3>에 나타내었다.

<Table 3> Parameters of the RCGA

	Reproduction	Crossover	Mutation
Applied operator	gradient-like	arithmetical	dynamic
Parameter	Reproduction coefficient	crossover probability	mutation probability
Value	$\eta=1.8$	$P_c=0.95$	$P_m=0.2$

[Fig. 5]는 RCGA가 K_p , T_i , T_D 를 탐색하는 과정이며 obj. function은 식 (5)의 목적함수 값을 나타낸다. 6500[rpm], 7500[rpm], 8500[rpm]의 동작점에서 탐색된 RCGA-PID 제어기는 그림에서 각각 PID1, PID2, PID3로 표시하였다.



[Fig. 5] Tuning process of RCGA-PID controller.

이렇게 탐색과정을 통해 설계된 RCGA-PID 제어기의 성능은 Lee et al.,(2022)의 IMC-PID 제어기와 비교하여 실효성을 검증한다. 선행연구에서 적용한 IMC-PID 제어기는 실제 플랜트의 완전한 모델이 얻어지면 그 역으로 제어기를 설계할 수 있는 IMC(Internal Model Control) 개념과 PID 제어를 결합한 것이다. IMC 필터 시정수 조정만으로 PID 제어기의 3개 파라미터를 결정할 수 있는 장점을 가지고 있다.

<Table 4>는 본 연구에서 제안하는 RCGA-PID 제어기와 비교 제어기의 파라미터 및 M_s 를 나타

낸 것이다. 표에서 비례이득 K_p 값이 매우 작는데 이는 식 (9)에서 가스터빈 엔진의 정상이득이 매우 커서 P제어의 역할이 크지 않기 때문이다. 또한, 동작점별 M_s 값이 제안하는 제어기와 비교 제어기 모두 Anil and Sree.(2015)에서 제시하는 범위 내에 있다. 그러나 제안하는 제어기가 동일 모델에 대해 M_s 값이 작아 조금 더 안정적인 것을 예상할 수 있다. 특히, G_{P1} 모델에서는 M_s 차이가 0.31로 나이퀴스트 선도상에서 뚜렷한 길이 차이를 예측할 수 있다.

<Table 4> Controller parameters and M_s

Model	Tuning methods	Parameters			M_s
		K_p	T_i	T_D	
G_{P1}	RCGA (Proposed)	0.00300	5.0630	0.1360	1.68
	IMC	0.00354	4.7150	0.3198	1.99
G_{P2}	RCGA (Proposed)	0.00400	3.4830	0.1430	1.67
	IMC	0.00407	3.0140	0.2167	1.77
G_{P3}	RCGA (Proposed)	0.00400	1.5760	0.0560	1.54
	IMC	0.00490	1.5500	0.1435	1.65

[Fig. 6]에서 [Fig. 8]은 3개의 동작점에서 얻은 모델 G_{P1} , G_{P2} , G_{P3} 에 각각 RCGA-PID 제어기와 IMC-PID 제어기를 포함시킨 개루프 전달함수의 나이퀴스트 선도를 나타낸 것이다.

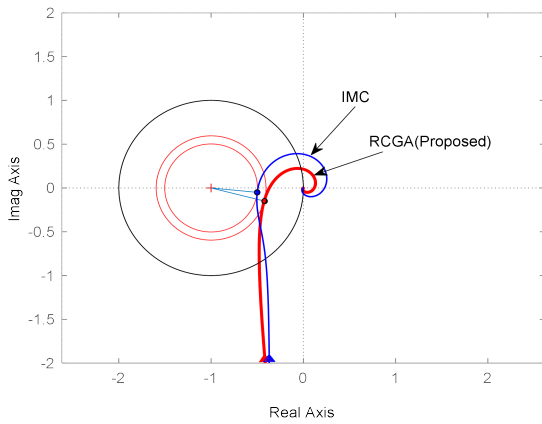
그림의 임계점 $(-1, j0)$ 에서 나이퀴스트 선도까지의 최단거리는 M_s 의 역수이며, RCGA-PID 제어기는 모든 경우 M_s 가 작아 임계점에서 나이퀴스트 선도까지 최단 거리가 더 길다. 이를 통해 제안한 제어기가 비교 제어기보다 안정적인 것을 확인할 수 있다.

2. 추종제어 특성

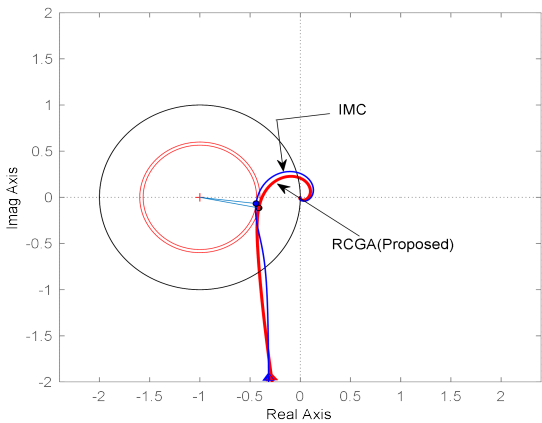
가. 6500[rpm]의 추종제어 성능

동작점이 6500[rpm]에서 모델링된 G_{P1} 에 대한

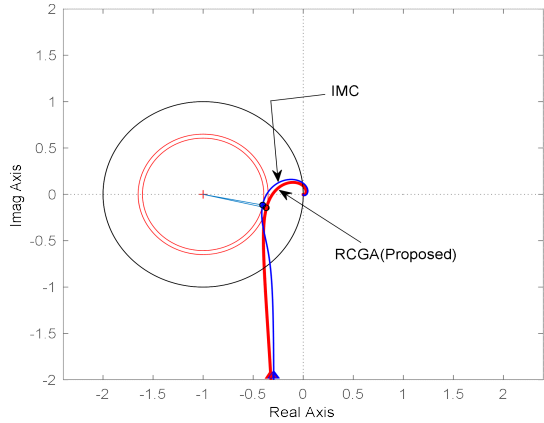
제어기의 추종성능을 확인한다. [Fig. 9]는 가스터빈 엔진이 5500[rpm]으로 운전 중인 상태에서 $t=0$ 에서 6500[rpm]으로 계단입력을 가했을 때 회전속도와 제어입력에 대한 응답특성을 나타낸 것이다. 또한, <Table 5>는 제어기를 정량적으로 비교하기 위해 앞에서 선정된 성능지표 값들을 정리한 것이다.



[Fig. 6] Comparison of sensitivity function of G_{P1} with controller(Ms: RCGA=1.68, IMC=1.99).

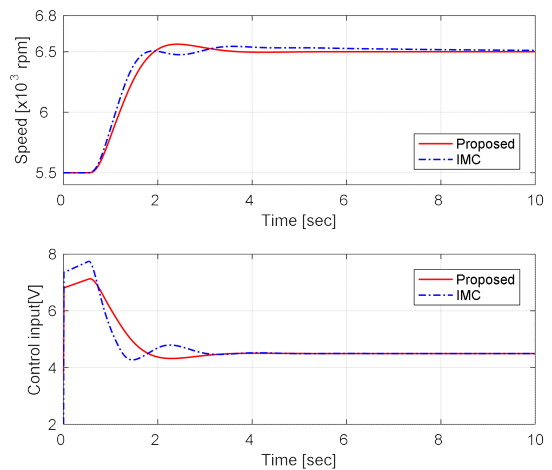


[Fig. 7] Comparison of sensitivity function of G_{P2} with controller(Ms: RCGA=1.67, IMC=1.77).



[Fig. 8] Comparison of sensitivity function of G_{P3} with controller(Ms: RCGA=1.54, IMC=1.65).

[Fig. 9]와 <Table 5>를 살펴보면 과도응답 측면에서 RCGA-PID 제어기의 T_r 과 %OS는 비교 제어기에 비해 다소 크지만 T_s 는 2배 이상 빠른 응답성능을 보이고 있다. 한편, 오차 성능의 2가지 관점에서도 제안한 제어기가 그 값이 작아 우수한 제어성능을 보임을 알 수 있다. 특히, 안정화되는 시간이 많이 필요한 비교 제어기는 ITAE 지표에서는 제안한 제어기에 비해 2배 이상 큰 값을 보이고 있다.



[Fig. 9] Tracking control response for G_{P1} .

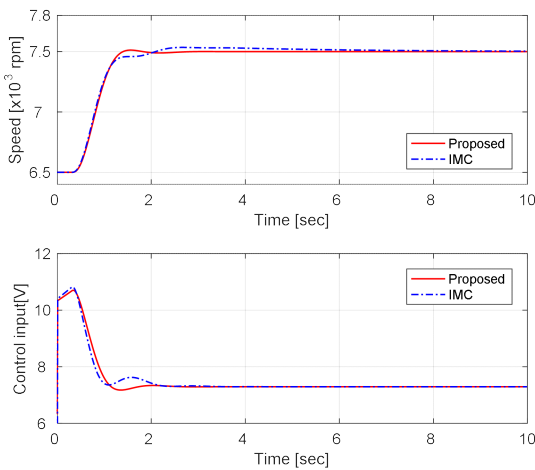
<Table 5> Tracking control performance for G_{P1}

Tuning methods	Tacking performance				
	T_r	T_s	%OS	IAE	ITAE
RCGA (Proposed)	0.89	3.20	0.96	1285.3	970.8
IMC	0.74	7.40	0.68	1314.4	1704.9

나. 7500[rpm]의 추종제어 성능

두 번째로 G_{P2} 에서 설계된 제어기의 추종 응답 성능을 확인한다. 초깃값은 6500[rpm]으로 운전 중인 상태로 $t=0$ 에서 계단입력 7500[rpm]이 인가된 경우이다. [Fig. 10]은 제안하는 RCGA-PID 제어기와 IMC-PID 제어기의 응답성능을 보여준다. 전반적으로 6500[rpm]의 제어결과와 유사하며, 비교 제어기는 목표 회전속도에 도달하는 시간이 긴 것을 확인할 수 있다. 제안한 제어기가 비교 제어기 보다 T_s 가 0.26배로 짧아 빠르게 안정화되는 것을 알 수 있다. 또한 %OS는 비교 제어기의 약 0.35배로 작아 더 좋은 응답성능을 보인다.

제안하는 제어기가 정량적인 모든 지표에서 우수한 것을 <Table 6>을 통해 확인할 수 있다. 특히, ITAE는 제안한 제어기가 약 0.39배로 작다.



[Fig. 10] Tracking control response for G_{P2} .

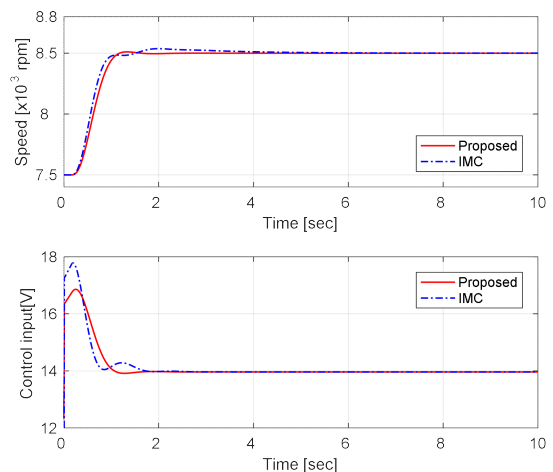
<Table 6> Tracking control performance for G_{P2}

Tuning methods	Tacking performance				
	T_r	T_s	%OS	IAE	ITAE
RCGA (Proposed)	0.63	1.32	0.16	848.6	399.1
IMC	0.65	5.07	0.46	980.5	1014.1

다. 8500[rpm]의 추종제어 성능

마지막으로 G_{P3} 에서 설계된 제어기의 추종성능을 확인한다. 초깃값은 7500[rpm]으로 운전될 때의 상태 값을 적용하고, 역시 $t=0$ 에서 계단상기 준입력 8500[rpm]을 인가한다.

[Fig. 11]을 통해서 제안한 제어기가 상승속도는 느리나 비교 제어기 보다 빨리 안정화되며, 제어입력의 변화도 작은 특성을 보인다. <Table 7>에서 상승시간을 제외한 모든 정량적 지표에서 제안한 제어기가 우수한 성능을 보인다. T_s 가 비교 제어기에 비해 0.34배로 짧아 빠르게 안정화되고 %OS는 약 0.3배로 더 좋은 응답성능을 보이고 있다. 오차 성능지수 측면에서도 IAE와 ITAE가 비교 제어기에 비해 작아 제어성능이 우수함을 알 수 있다.



[Fig. 11] Tracking control response for G_{P3} .

<Table 7> Tracking control performance for G_{P3}

Tuning methods	Tacking performance				
	T_r	T_s	%OS	IAE	ITAE
RCGA (Proposed)	0.57	1.09	0.13	648.9	235.4
IMC	0.49	3.21	0.44	662.7	428.8

IV. 결론

본 논문에서는 가스터빈 엔진 LM-2500 4대가 COGAG 형태로 추진할 때의 시운전 데이터를 기반으로 시간지연을 포함하는 3차 시스템으로 엔진을 모델링하였다. 또한, 추종제어 성능이 우수하도록 ITAE에 기초한 RCGA-PID 제어기 설계방법을 제안하였다.

모델링은 연료공급장치와 가스발생기를 구분하고, 동작점에 따른 파라미터 변동을 고려하여 3개의 동작점에서 모델을 얻었다.

고압터빈의 회전속도 제어를 위한 제어기는 3개의 동작점에서 RCGA를 이용하여 ITAE 목적함수가 최소가 되도록 하는 RCGA-PID 제어기를 설계하였다. 이 ITAE 목적함수는 시간의 경과에 가중치를 부여해 정상상태 오차 없이 신속하고, 정확한 속도 추종이 중요한 가스터빈 엔진에 적합하다.

본 연구에서 제안한 제어기의 유효성을 검증하기 위해 선행연구인 IMC-PID 제어기와 성능지수를 사용하여 정량적으로 비교하였다.

3개의 동작점별 추종제어에서 제안한 제어기가 정량적 평가에서 대부분 우수한 결과를 나타내었다. 우선, T_s 와 IAE, ITAE는 모든 동작점에서 제안한 제어기가 우수했으며, IMC-PID 제어기는 T_s 가 길어 목표값에 도달되는데 많은 시간이 소요되었다. 다음으로 각 동작점별로 살펴보면 6500[rpm]인 경우 제안한 제어기가 T_s , IAE, ITAE에서 더 좋은 성능을 보였다. 7500[rpm]인

경우 모든 지표에서 우수한 성능을 보였고, 8500[rpm]인 경우 T_r 를 제외한 모든 지표에서 우수한 성능을 보였다.

이를 통해 본 연구에서 제안한 RCGA-PID 제어기 설계기법은 정량적 평가와 운전환경을 고려하면 실제적인 제어기 설계 과정에서 방법론으로 고려할 수 있을 것으로 생각한다. 그러나 가스터빈 모델링 과정에서 유입 공기량과 동력터빈을 고려하지 못한 연구의 한계점을 가지고 있다. 또한, 실제 운전환경을 고려하여 각 동작점에서 설계된 제어기를 하나로 결합하는 연구도 필요할 것으로 생각한다.

References

- 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>
- Cha YB, Koo BM, Song DH and Choi JK(2007). 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, 11(1), 75~82.
- Cho JS(2007). Gas Turbine Engine, The plantech Journal 3(1), 21~34.
- Choi Y(2006). Gas Turbine Practical Lecture, CheongSan-GiHoeg.
- Gen M and Cheng R(1997). Genetic Algorithms and Engineering Design, A Wiley-Interscience Publication.
- Holland JH(1975). Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- Lee CH, Lee YH, Lee CS, Ryu KT, Zhao HY and So MO(2022). Study on Speed Control of LM-2500 Engine using IMC-LPID Controller, Journal of the Korea Academia-Industrial 23(12), 984~993.
<http://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.12.984>
- Michalewicz Z(1996). Genetic Algorithms+Data Structure= Evolution Programs, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Neut LJ(1980). Re-Engining Euroliner Class Ships, SHAME Paper Presented December 4.

Potter JH(1972). The Gas Turbine Cycle, ASME Paper presented at the Gas Turbine Division Forum Dinner, New York.

Shon YC, Kim SW and Jee WH(1998), Design of Robust Feedback Controller for Turbo Jet Engine :

Time Domain Approach, Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, 2(2), 38~46.

-
- Received : 31 January, 2023
 - Revised : 15 February, 2023
 - Accepted : 21 February, 2023