

2-spool 선박용 가스터빈 엔진의 동적 시뮬레이션 수학적 모델 개발

차승우¹ · 기자영² · 손나영³ · 김동진⁴ · 심재순⁵ · 김명환⁶ · 박상균[†]

(Received September 18, 2019 ; Revised October 5, 2019 ; Accepted October 5, 2019)

Development of a dynamic simulation mathematical model of a 2-spool marine gas turbine engine

Sung-Woo Gha¹ · Ja-Young Ki² · Na-Young Son³ · Dong-Jin Kim⁴ · Jae-Soon Shim⁵ · Myoung-Hwan Kim⁶ · Sang-Kyun Park[†]

요약: 본 연구에서는 2-Spool 선박용 가스터빈 엔진의 동적거동 모사 수학적 모델을 개발하였다. 선박 추진시스템의 다른 구성품 성능 모델과의 통합의 용이함, 빠른 계산처리 속도를 위해 엔진 제작사로부터 제공받은 데이터를 이용하여 엔진 성능 모델을 개발하였다. 동적 거동 모델링에는 SIMULINK를 사용하였으며, 수학적 모델의 검증에 위해 정상상태 수렴 구간에서의 성능데이터와 제작사 제공 데이터를 비교하였다. 또한 엔진의 정지 상태에서 최대 출력까지 증가하는 천이 모드의 성능해석을 수행하여 제작사 데이터와 비교하였다. 검증된 모델을 이용하여 정지, 공회전까지의 가속, 최대 출력까지의 가속, 감속 및 정지의 동작 거동 시뮬레이션을 수행하였다.

주제어: 선박, 2스폴 선박용 가스터빈, 시스템 식별 기법, 동적 성능 모사

Abstract: In this study, a dynamic behavior simulation mathematical model of 2-spool marine gas turbine engine is developed. Specifically, we develop an engine performance model using data provided by an engine manufacturer for ease of integration with other component performance models of ship propulsion systems and for fast calculation processing speed. SIMULINK is used for dynamic behavior modeling, and performance data and steady-state convergence interval data are compared to verify the mathematical model. In addition, performance analysis of the transient mode, which increases from engine stop to maximum output, is performed and compared with manufacturer data. A simulation of the engine behaviors in terms of acceleration, deceleration, and stopping to stop, idling, and maximum output is performed using the verified model.

Keywords: Ship, 2-spool marine gas turbine, System identification, Transient performance simulation

1. 서 론

국내 가스터빈 엔진의 수학적 모델링 및 시뮬레이션에 대한 연구는 주로 항공기 엔진을 대상으로 이루어졌으며 [1]-[3], 복합 화력 발전 플랜트에서 사용하는 터보 축 엔진에 대한 연구가 일부 있었으나 선박용 가스터빈에 대한 사례는 미흡하였다. 최근 선박에서 기인하는 대기 환경 오염 물질의 배출을 저감하기 위한 다양한 기술을 선박에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그러한 기술 중의 하나로 고속 구간에서 기동성이 우수한 가스터빈과 저속 구간에서 기동 특성 및 경제성이 우수한 추진 전동기와의 통합운용으로 해군 함정의 작전 성능 향상 및 오염원 감소 등의 이유로 가스터빈의 적용 함정이 증가하고 있으며, 한국 해군

함정에서도 가스터빈과 추진전동기의 통합운용 추진체계가 울산급 Batch-II, Batch-III 등 최근에 건조되는 함정에 적용되고 있다.

가스터빈의 동적 특성을 구현하기 위한 수학적 모델은 일반적으로 정상상태 구성품 맵 (Component characteristics) 을 기초로 하는 연속·유량 기법(Continuity of Mass Flow Method; CMF Method)과 구성품 간 제어 체적 기법(Method of Inter-component Volumes; ICV Method), In-out 데이터를 기초로 활용한 시스템 식별 기법(System Identification Method; SI Method)을 적용한다. 가스터빈의 성능 계산을 위한 반복 계산이 필요하고 특정 구간에서 불안정성이 나타날 수 있지만 축 회전수 변화 범위가 큰 대상과 보다 정

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9981-6250>): Professor, Division of Marine Information Technology, Korea Maritime & Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: skpark@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4579

1 Engineer, EGT Co., Ltd, Korea, E-mail: s.w.cha@ezgtc.com, Tel: 042-336-3473

2 CEO, EGT Co., Ltd, Korea, E-mail: young@ezgtc.com, Tel: 042-336-3480

3 Junior Engineer, Hanwha Systems Co., Ltd, Korea, E-mail: sson1228@hanwha.com, Tel: 054-460-8711

4 Senior Engineer, Hanwha Systems Co., Ltd, Korea, E-mail: dongin01.kim@hanwha.com, Tel: 054-460-8711

5 Chief Engineer, Hanwha Systems Co., Ltd, Korea, E-mail: js2014.shim@hanwha.com, Tel: 054-460-8726

6 Professor, Division of Marine Engineering, Korea Maritime & Ocean University, E-mail: mhkim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4267

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

확한 결과를 얻고자 하는 경우에 CMF Method이 적용된다. SI Method은 주어진 입/출력 데이터를 활용하여 모델링하며 반복계산을 위한 절차가 필요 없으므로 빠른 결과 값이 필요한 경우에 유용하게 적용된다.

본 연구에서는 40MW급 2-Spool 방식의 선박 추진용 가스터빈에 대한 동적 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 동적 시뮬레이션을 위한 수학 모델은 실시간에 가까운 동적 거동을 모사할 수 있도록 성능 특 데이터를 기반으로 하는 SI(system Identification) 기법을 적용하였으며, 시동/정지 구간과 정상운용(Idle~Max) 구간으로 구분하였으며, 개발 프로그램으로 SIMULINK를 사용하였다. 개발 모델은 제작사에서 제공한 데이터와 가스터빈 상용프로그램과 비교하여 오차범위 5%) 이내의 신뢰성을 확보하는 것을 목표로 하였으며, 계산 처리시간은 1(sec) 이하로 시뮬레이션 하였다.

2. 해석 모델 구성 및 조건

2.1 가스터빈 엔진 및 모델 구성

MT30 엔진은 8단 저압 압축기와 1단 저압 터빈, 6단 고압 압축기와 1단 고압 터빈, 4단 분리 축 방식 동력 터빈과 애놀러 타입의 연소기로 구성되어 있다. Table 1은 MT30 엔진의 정격 성능을 나타내고 있다[4][5].

Figure 1은 MT30 가스터빈 모델의 전체 구성도를 나타내고 있다. 본 연구에서 개발한 MT30 가스 터빈 모델은 동작 제어명령(Start/Stop), TIC(Throttle Input Command, 연료량 조절 신호), 동력 터빈 회전속도(NPT), 입구 압력 및 온도의 5개의 변수를 입력으로 하여 고압 회전 축 속도(NH), 저압 회전 축 속도(NI), 토크 및 현재 동작 상태(Starting/Idle/Running/Stopping/Stop)를 출력으로 구성된다. 입력 신호인 동작 제어 명령은 Stop/Start의 명령을 의미한다. 가스터빈의 운전 상태를 나타내는 출력 신호인 동작 상태는 다음과 같이 5가지의 상태로 정의한다.

- 1) Starting 상태 : Stop → Idle 상태로 전환 중인 경우
- 2) Idle 상태 : Starting 완료 후 TIC 0%인 경우
- 3) Running 상태 : TIC > 0%인 경우
- 4) Stopping 상태 : Idle → Stop 상태로 전환 중인 경우
- 5) Stop 상태 : 정지되어 있는 경우

Figure 2는 가스터빈 모델의 하위 구성도를 나타내고 있다. 가스터빈 모델에 들어오는 입력을 바탕으로 현재 동작 상태에 해당하는 출력을 내보내는 모듈로 구성되어 있다.

- 1) Stop Mode 모듈 : 현재의 상태가 Stop인 상태에 해당하는 출력을 내주는 모듈
- 2) Starting/Idle Mode 모듈 : 현재의 상태가 Starting/Idle인 상태에 해당하는 출력을 내주는 모듈

- 3) Stopping Mode 모듈 : 현재의 상태가 Stopping인 상태에 해당하는 출력을 내주는 모듈
- 4) Running Mode 모듈 : 현재의 상태가 운전(idle ~ max)인 상태에 해당하는 출력을 내주는 모듈

Table 1: Performance rating of gas turbine(MT30)

Parameter	Unit	Data
Power	MW	40
Ambient Temperature	K	288.15
Ambient Pressure	bar	1.0113
Relative humidity	%	60
Air Mass Flow	kg/s	120
Overall Pressure Ratio	-	24
Turbine Inlet Temp.	K	1507.6
Fuel Consumption(SFC)	kg/kwhr	0.216
Lower Calorific Value (LCV)	kJ/kg	42800

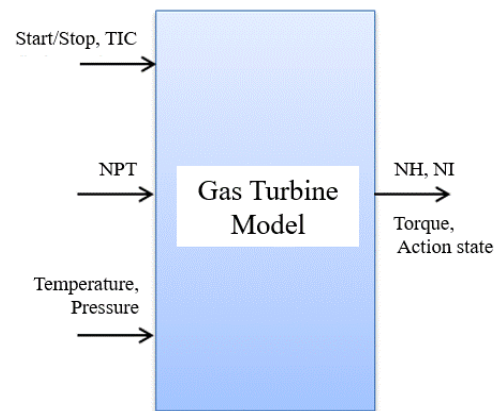


Figure 1: Configuration of gas turbine(MT30) model

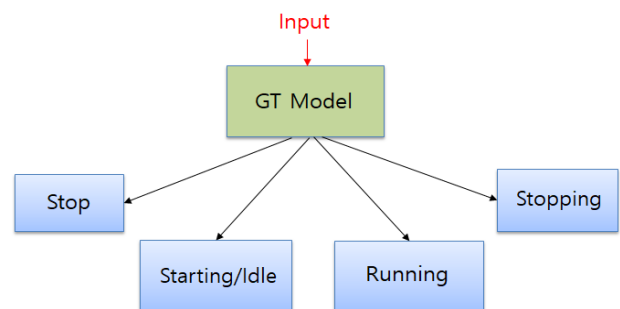


Figure 2: Subsystem of gas turbine(MT30) model

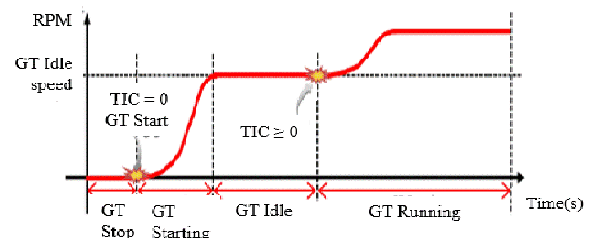


Figure 3: Sequence of start-up

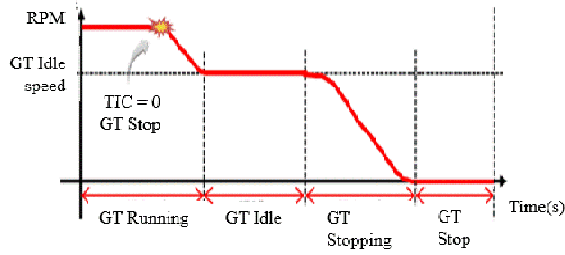


Figure 4: Sequence of stop

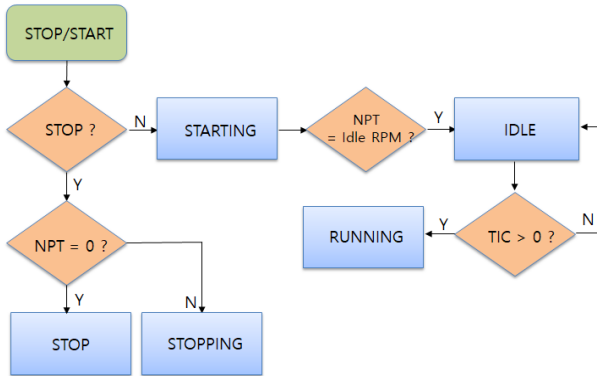


Figure 5: Algorithm of operational mode decision

Figure 3과 Figure 4는 시동/정지 구간에서 운용 개념을 나타낸다. 시동 및 정지 시퀀스는 다음과 같다.

- 1) GT start sequence : Stop → Starting → Idle → Running
- 2) GT Stop sequence : Running → Idle → Stopping → Stop

Figure 5는 MT30 가스터빈의 운용모드 결정 알고리즘을 나타내고 있다. 각 운용모드 실행여부는 다음과 같은 알고리즘에 의하여 결정된다.

- 1) 가스터빈 모델은 타 장비 모델(상위 추진 제어기 모델)로부터 동작제어 명령 (Stop/Start)을 받아 가스터빈 모델의 실행 여부를 결정한다.
- 2) Stop 명령을 받으면 가스터빈 모델은 가스터빈으로 들어오는 입력 NPT 값에 따라 정지(Stop) 또는 정지 중 (Stopping)에 해당하는 출력을 내보낸다.
- 3) Start의 명령을 받으면 가스터빈 모델은 시동(Starting)에 해당하는 출력을 내보낸다.
- 4) 시동구간이 끝나고 정해진 NPT 값(Idle rpm)에 도달하면 Idle에 해당하는 출력을 내보낸다.
- 5) 타 장비 모델(상위 추진 제어기 모델)로부터 TIC 입력 (> 0)을 받게 되면 정상 운용(Running)구간에 해당하는 출력을 내보낸다.

2.2 정상 운용 모드에서의 SI 기법 모델링

엔진 제작사 또는 운용사에서 충분한 입/출력 데이터를

제공받을 수 있다면 반복 계산 절차가 없이 빠른 동적 거동 해석이 가능한 System Identification(SI) 기법을 적용할 수 있다. SI 기법은 시스템에서 측정되는 입/출력 정보를 활용하여 입/출력 간의 관계를 정의하는 것으로 본 연구에서는 TIC(연료량 조절 신호)에 따른 동력 터빈 출력, 고압 회전축 속도(NH) 및 저압 회전축 속도(NL)의 데이터를 제작사에서 제공받은 성능 텍 데이터를 활용하여 정의하였다[6].

가스터빈의 동적 수학 모델은 다음과 같은 일반적인 구조를 가진다[7][8].

$$Y(t) = X(t) \times \left(\frac{\tau_{lad}}{\tau_{lag}} \right) + \left(1 - \frac{\tau_{lad}}{\tau_{lag}} \right) \times [Y(t - \Delta t) + (X(t) - Y(t - \Delta t)) \times (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{lag}}})] \quad (1)$$

여기서, X 는 입력, Y 는 출력을 의미하며 τ_{lad} 와 τ_{lag} 는 각각 시스템의 lead 시정수와 lag 시정수이다. 각 시정수들은 실험 데이터를 통하여 얻어지는 값이며 각각 입력 X 와 출력 Y 에 대한 응답속도 특성을 나타내는 파라미터이다. 위의 식을 정리하여($\tau_{lad} = 0$) 표현하면 다음과 같다.

$$Y(t) = Y_f \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{lag}}}) + Y_i \times e^{-\frac{t}{\tau_{lag}}} \quad (2)$$

여기서, Y_f 는 출력의 최종 수렴 값, Y_i 는 출력의 초기 수렴 값을 의미한다. 출력의 초기 값 및 최종 값은 입력 값에 의해 결정되어진다. 식 (2)를 본 연구에서 정의된 출력에 적용하면 임의의 시간에 대한 출력을 구할 수 있고 그 식은 다음과 같이 표현된다.

$$PW(t) = PW_f \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{lag}}}) + PW_i \times e^{-\frac{t}{\tau_{lag}}} \quad (3)$$

$$NH(t) = NH_f \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{lag}}}) + NH_i \times e^{-\frac{t}{\tau_{lag}}} \quad (4)$$

$$NI(t) = NI_f \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{lag}}}) + NI_i \times e^{-\frac{t}{\tau_{lag}}} \quad (5)$$

여기서, PW 는 동력 터빈 출력, NH 는 고압 압축기 회전수, NI 는 저압 압축기 회전수이다.

각 출력의 초기 값 및 최종 값은 TIC에 의해 정해지는 값이며 TIC에 따른 출력의 값들은 엔진 제작사 데이터를 활용하였다. 위의 식 (3) ~ 식 (5)에서 시정수 값은 일반적으로 상수 값이 아니라 고압단 스톱의 회전수에 의존한다.

2.3 동적 거동 모델링

Figure 6은 개발된 MT30 가스터빈 엔진 모델의 상위 구조도를 나타내고 있다. 총 5개의 입력이 들어가 4개의 출력이 나오는 구조이다. 입력 측의 노란색 부분은 상위 추진 제어기로부터 오는 입력(Operation Mode, TIC)을 의미하여

빨간색 부분은 기어박스로부터 들어오는 입력(NPT), 파란색은 가스터빈 모델 내에서 자체적으로 설정하는 입력을 말한다. 또한 출력 측의 빨간색 부분은 기어박스 측으로 보내는 출력(Torque), 노란색 부분은 상위 추진 제어기로 보내는 출력(Operating State)을 의미한다.

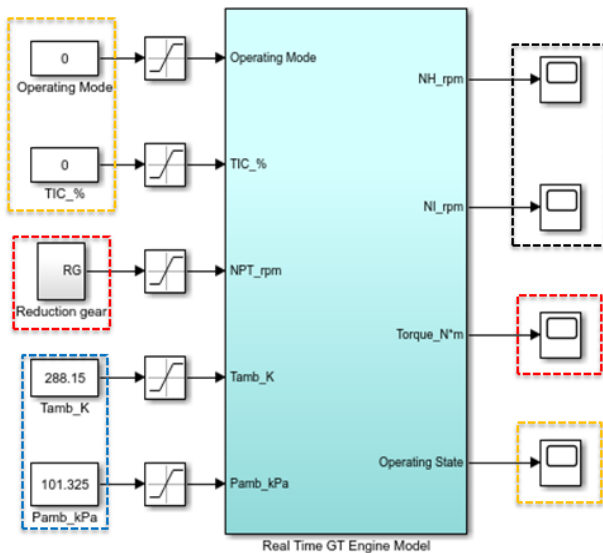


Figure 6: Real time GT engine model

Figure 6의 Real Time GT Engine Model 블록 내부에 총 4개의 운용모드(Stop, Starting/Idle, Running, Stopping) 모듈이 있으며 Operating Mode, NPT, TIC의 입력 값으로부터 각 운용모드의 실행 여부를 결정해주는 Operating state change 모듈이 있다. 정상 운용(Running)모드는 엔진 제작사 데이터를 활용한 Fuel schedule 모듈, Steady Output 모듈이 있으며 천이구간의 값을 계산해주는 Dynamics 모듈로 구성되어 있다.

3. 해석결과

Figure 7은 본 연구에서의 개발한 가스터빈 모델의 실제 운전 자료와의 비교 검증 방법을 나타내고 있다. 검증을 위한 기준 값, 또는 그래프를 엔진 제작사로부터 제공받은 데이터를 기반으로 적용하였다.

3.1 파라미터 설정 및 계산처리시간 확인

가스터빈 엔진의 성능은 외부 환경조건(온도, 압력)에 의존한다. 따라서 가스터빈 모델은 온도, 압력 변화에 따른 출력의 변화를 고려해주어야 하며 온도, 압력 변화에 대한 출력의 변화에 대한 모델의 검증이 필요하다.

Figure 8는 온도와 압력의 변화에 따른 출력 평가 기준 및 시험 결과를 나타내고 있다. 본 연구에서 개발된 수확모델의 결과는 성능데이터와 비교하여 최대 오차 5% 이내에 드는 것을 확인할 수 있다. Figure 9은 개발된 수확모델의 계산 처리 시간을 나타내고 있다. 약 0.16(sec)로 주어진 요구사항인 1(sec)을 만족함을 확인할 수 있다.

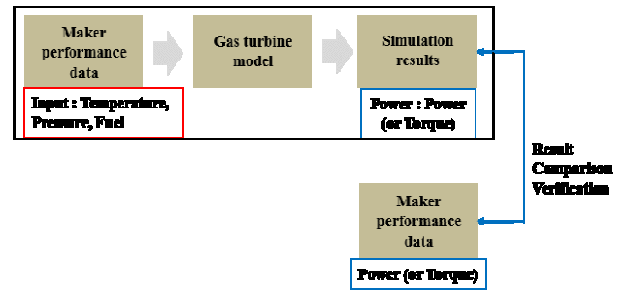


Figure 7: Verification of dynamic behavior model

Item		Valuation basis			Test result				
N o.	Parameter	Input			Output MW	Output MW	Decision Pass/Fail	Note	
1	Temperature	Set point	TIC	100	40	40	Pass		
			Temperature	288.15					
		Change value	Pressure	101.325	36.12	36.36	Pass		1.50 %
			Temperature	325.15					
2	Pressure	Set point	TIC	100	40	40	Pass		
			Temperature	288.15					
		Change value	Pressure	101.325	38.92	38.65	Pass		0.08 %
			Pressure	86.874					

Figure 8: Result of parameter setting check

Simulink Profile Report: Summary

Report generated 19-Feb-2019 12:32:16

Total recorded time:	3.14 s
Number of Block Methods:	537
Number of Internal Methods:	3.14/20 = 0.16 s
Number of Model Methods:	5
Number of Nonvirtual Subsystem Methods:	9
Clock precision:	37
Clock Speed:	0.00000002 s
	4001 MHz

To write this data as MT30_Integrated_RealTimeModel_final_2016_fifProfileData in the base workspace [click here](#)

Figure 9: Result of calculation processing time

3.2 Running 모드에서의 정상상태 수렴 확인

개발된 모델이 실제 MT30의 성능과 비교하여 요구 오차 범위 안에서 수렴하는지 아래와 같은 절차로 시험을 수행하였다.

- 1) 동작 상태를 'Running'으로 설정한다.
- 2) 출력제어명령(TIC, %)을 엔진 성능 데이터의 기준 입력과 동일하게 순차적으로 설정 한다.
- 3) 기준에 대한 수확모델 출력 결과를 확인한다.
- 4) 입력은 현재입력에 대한 시험 완료 시, 다음 입력 데이터로 전환하여 상태 변화를 시험한다.
- 5) 판정기준 오차는 최대 5% 이내로 한다.

Figure 10은 정상상태에서의 출력제어명령에 따른 출력특성을 나타내고 있다. TIC 45(%)에서 최대오차 1.7(%)를 보이며 전체 운영 구간에서 모델의 신뢰성을 확인할 수 있다[6].

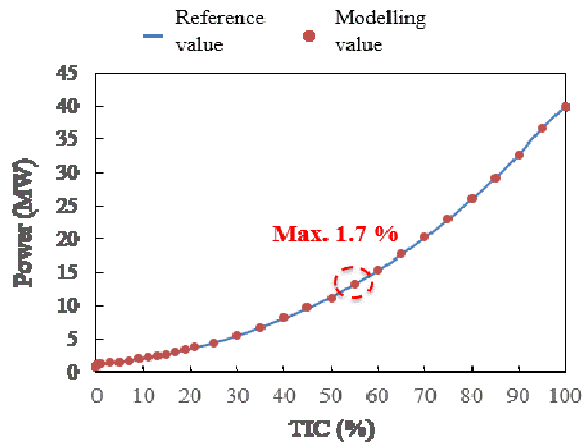


Figure 10: Result of error analysis of steady state

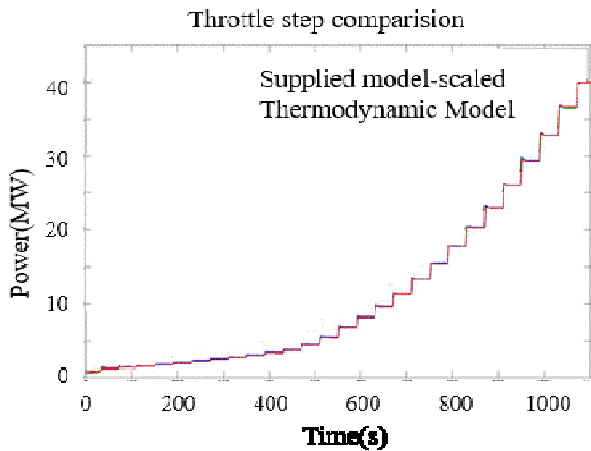


Figure 11: Test result of manufacture

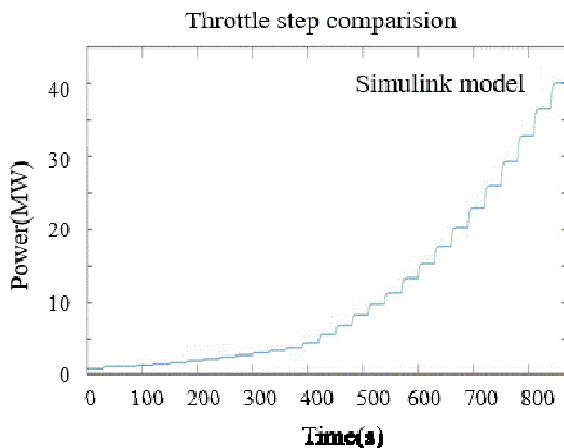


Figure 12: Result of simulation

Table 2: Performance rating of gas turbine(MT30)

Signal	Parameter	Description
Input signal		Start/Stop
Input signal	Throttle position	0 ~ 100 (%)
Output signal	Operating state	Starting/ Idle/ Running/Stopping/Stop

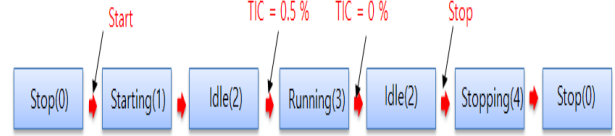


Figure 13: Test procedure for operation conditions

3.3 천이거동 시험

개발 프로그램의 천이 상태에서의 신뢰성 검증을 위해 아래와 같은 시험 절차를 적용하였다.

- 1) 동작 상태를 'Running'으로 설정한다.
- 2) 출력제어명령(TIC, %)을 Figure 11과 같이 0에서 100% 까지 증가하는 상황으로 모사한 제작사 제공 데이터와 유사하게 설정한다[6].
- 3) 수학적모델 출력 결과를 확인하여 Figure 11의 그래프 추세와 비교한다.

Figure 12는 정상상태에서의 천이거동 해석 결과를 나타내고 있다. 제작사로부터 주어진 그래프와 동일한 추세를 출력함을 확인할 수 있다.

3.4 동작상태 확인

입력 신호에 따른 작동상태를 적절한 값으로 내보내는지 확인하는 시험을 수행하였다. Table 2는 동작상태 계산을 위한 입력신호와 출력신호를 나내고 있다.

Figure 13은 정상상태에서의 동작상태 시험 절차를 나타내고 있으며 다음과 같은 순서로 진행하였다.

- 1) 동작 상태가 'Stop' 상태인지 확인 한다.
- 2) 동작 제어 명령(Start)을 입력한다.
- 3) 동작 상태가 'Stop' → 'Starting' → 'Idle'로 전환되는지 확인한다.
- 4) 'Idle' 상태에서 출력제어(TIC) 명령을 변경(0.5%) 한다.
- 5) 'Idle' → 'Running' 상태로 전환되는지 확인 한다.
- 6) TIC 명령을 0%로 변경하고 동작제어 명령(Stop)을 입력한다.
- 7) Running → 'Idle' → 'Stopping' → 'Stop' 상태로 전환되는지 확인한다.
- 8) Stopping' 상태에서 추세는 확인하지 않는다.

Signal		Result			
Input order		Action state output		Model output	Pass/Fail
Action	TIC(%)	Previous State	Present state	Present state	
Start	-	Stop	Starting	Starting	Pass
-	-	Starting	Idle	Idle	Pass
-	0.5	Idle	Running	Running	Pass
Stop	-	Running	Idle	Idle	Pass
-	-	Idle	Stopping	Stopping	Pass
-	-	Stopping	Stop	Stop	Pass

Figure 14: Input signals and results for calculating operating conditions

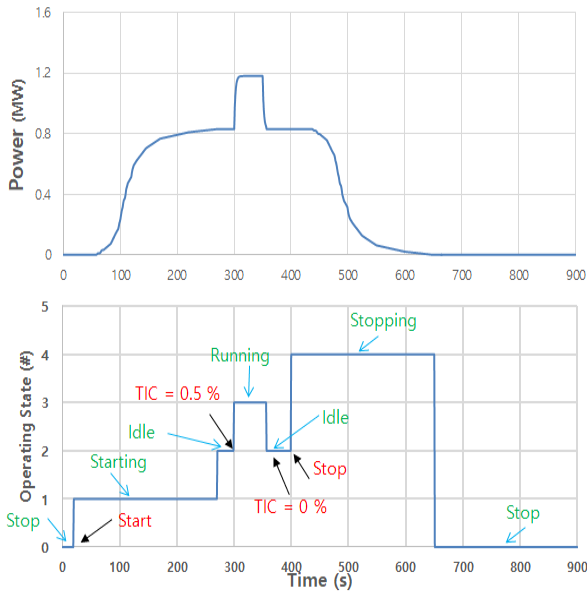


Figure 15: Results of simulating motion behavior

Figure 14와 Figure 15는 가스터빈 엔진의 정지 상태에서 최대 출력까지 가속 후 다시 정지하는 동작 거동 모사 결과를 나타내고 있으며 시나리오 따른 정상적인 출력 결과를 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 40MW급 선박 추진용 가스터빈 엔진에 대하여 시동/정지 구간과 정상운용 구간에서의 동적 거동을 모사할 수 있는 SIMULINK 모델을 개발하였다. MT30 엔진의 경우 2-Spool 및 분리 축 동력 터빈으로 구성되어 동적 시뮬레이션 프로그램에 많이 이용되는 CMF (Continuity Mass Flow) 방법으로 모델링 할 경우 수렴에 따른 반복계산이 많아지기 때문에 본 연구에서는 제공된 가스터빈 운용 데이터로부터 모델링을 하는 시스템 식별 (System Identification) 기법을 적용하였다. 본 연구의 범위에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 개발 프로그램의 검증을 위해 정상상태 수렴구간에서의 데이터와 정지 상태에서 최대 출력까지의 가속 모사 결과를 제작사 운용데이터와 비교한 결과 최대 1.7% 이내의 오차율로 잘 맞는 것을 확인하였다.
- (2) 정지 상태에서 공회전 상태까지의 가속하는 시동 모드, 최대 출력까지 가속하는 정상운용 모드, 다시 정지 상태로 들어오는 감속 운용모드를 해석한 결과 입력 값을 잘 추종함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 핵심SW(응용연구) “함정 추진체계 동적 시뮬레이션 SW” 연구개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구결과이다.

Author Contributions

Conceptualization, D. J. Kim, J. Y. Ki and S. K. Park; Methodology, J. Y. Ki and N. Y. Son; Software, S. W. Gha, N. Y. Son and J. S. Shim; Validation, J. Y. Ki and S. K. Park; Formal Analysis, N. Y. Son, D. J. Kim and J. S. Shim; Investigation, D. J. Kim, M. H. Kim and S. K. Park; Writing—Original Draft Preparation, S. W. Gha and J. Y. Ki; Writing—Review & Editing, D. J. Kim and S. K. Park;

References

- [1] C. D. Kong, S. H. Kho, and J. Y. Ki, “A study on Steady-State Performance Analysis Program for Turboprop Engine using MATLAB,” The Korean Society of Propulsion Engineers Conference, pp. 33-34, 2002 (in Korean).
- [2] C. D. Kong, J. Y. Ki, S. H. Kho, and J. H. Kim, “A study on Performance Analysis of a Helicopter Propulsion System Using SIMULINK,” Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, vol. 12, no. 1 pp. 44-50, 2008 (in Korean).
- [3] C. D. Kong, J. Y. Ki, and S. H. Kho, “Steady-state and transient performance modeling of smart UAV propulsion system using SIMULINK,” Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 131, no. 3, pp. 1-8, 2009
- [4] Rolls-Royce Naval UK, MT3040 Mechanical Drive Package Technical Description
- [5] Rolls-Royce Naval UK, Functional Data for Ship Installation
- [6] Rolls-Royce Naval UK, MT3040 Operating Envelope
- [7] J. Kurzke, GasTurb 11 Manual: Design and Off-Design Performance of Gas Turbines, 2007.
- [8] Real-time modeling methods for gas turbine engine performance, AEROSPACE INFORMATION REPORT, 1995.