Check for updates

Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers
Vol. 25, No. 1, pp. 12-18, 2021

Research Paper
DOI: https://doi.org/10.6108/KSPE.2021.25.1.012

선박용 MT30 가스터빈 엔진의 성능 모델링에 관한 연구

백경미[a] · 기자영[b] · 허환일[c,*]

Study on Performance Modeling of a MT30 Gas Turbine Engine for Marine Ship Applications

Kyeongmi Back[a] · Jayoung Ki[b] · Hwanil Huh[c,*]
[a]*Department of Aerospace Engineering, Graduate School of Chungnam National University, Korea*
[b]*ESND, Korea*
[c]*Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University, Korea*
[*]*Corresponding author. E-mail: hwanil@cnu.ac.kr*

ABSTRACT

In this study, the performance modeling of MT30 gas turbine engine is performed. The design point is determined, and the component performance maps to which the scaling technique is applied are generated using standard maps provided by the commercial program. Off-design point performance analysis is performed with the generated performance model, and this is compared with the performance deck data of the engine. It is confirmed that the data of the performance maps generated by the one-point scaling method had some errors from the performance deck data, and it is determined that correction is necessary to increase the accuracy of the performance model. Therefore, the off-design point analysis is performed by creating the correction performance model in a manner that obtains the scaling factors for each operating point(off-design point) according to the high pressure spool speed.

초 록

본 연구에서는 MT30 가스터빈 엔진의 성능 모델링을 수행하였다. 설계점을 결정하고, 상용 프로그램에서 제공하는 스탠다드 맵을 이용한 스케일링 기법으로 구성품 성능 맵을 생성하였다. 생성된 성능 모델로 탈-설계점 성능 해석을 수행하여 그 결과를 엔진 성능 덱 데이터와 비교하였다. 한 점 스케일링 기법으로 생성된 성능 모델이 성능 덱 데이터와 다소 오차가 있음을 확인하고, 성능 모델의 정확성을 높이기 위한 보정이 필요하다고 판단하였다. 따라서 고압 스풀 회전수에 따른 작동점(탈-설계점) 별 스케일링 계수를 구하는 방식으로 보정 성능 모델을 생성하여 탈-설계점 해석을 수행하였다.

Key Words: MT30 Gas Turbine(MT30 가스터빈), Performance Maps Scaling(성능 맵 스케일링), Off-design Point(탈-설계점)

Received 23 July 2020 / Revised 8 December 2020 / Accepted 14 December 2020
Copyright Ⓒ The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548
[이 논문은 한국추진공학회 2020년도 춘계학술대회(2020. 7. 16-17), 온라인 학술대회) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

Nomenclature

SFC : Specific fuel consumption
IPC : Intermediate pressure compressor
HPC : High pressure compressor
IPT : Intermediate pressure turbine
HPT : High pressure turbine
PT : Power turbine
MFP : Mass flow parameter
PR : Pressure ratio
ETA : Efficiency

1. 서 론

가스터빈 엔진은 비행기, 고속 제트기, 헬리콥터, 탱크, 기관차 및 기타 차량에 이르기까지 다양하게 활용되고 있으며, 1950년대부터는 선박에도 도입되기 시작하였다.

선박용 가스터빈 엔진의 적용은 전함부터 시작되었다. 이는 가스터빈의 장점인 시동과 정지가 쉽고, 큰 동력에 빠르게 도달할 수 있다는 점이 전함의 단기간 가속 운용에 부합하였기 때문이다. 이 후 선박용 가스터빈 엔진은 가스터빈의 발전, 환경오염 규제의 강화, 타 추진시스템과의 복합 적용 용이성 등으로 인해 상용 선박까지 적용 범위가 확장되고 있다.

선박용 가스터빈 엔진 업체는 대표적으로 미국의 General Electric사, Rolls-Royce사 그리고 우크라이나의 Zorya-Mashproekt사가 있다. 이 중 Rolls-Royce사의 선박용 가스터빈 엔진인 MT30은 미국의 Zumwalt class destroyer(DDG 1000)와 Littoral Combat Ship(LCS), 영국의 Queen Elizabeth class aircraft carrier에 적용 중이며 국내에서도 한국 해군 호위함인 대구급 호위함(FFG-II)에 적용되고 있다[1].

FFG-II 호위함은 추진 체계로 가스터빈 엔진과 추진 전동기를 통합한 운용 체계를 적용하였다. 고속 구간에서의 기동성이 우수한 가스터빈과 저속 구간에서의 기동성 및 경제성이 우수한 추진 전동기를 통합 운용하고 있다[2]. 통합 운용은 임무 시 운용 전환 대응에 용이하지만 전체 추진 시스템의 제어가 복잡해지는 단점이 있다. 이 때문에 제어 및 시뮬레이션의 필요성이 커지고 있으며, 엔진 성능 및 작동을 효율적으로 모사할 수 있는 성능 모델링 및 시뮬레이션 기술 연구가 더욱 중요해졌다.

엔진 성능 모델링을 위해서는 주요 구성품인 압축기 및 터빈의 특성 데이터인 성능 맵이 필요하다. 주요 구성품의 성능 맵은 일반적으로 획득하기 어렵기 때문에 김승재 등[3]과 같이 엔진 성능 실험을 통하여 성능 맵을 구성하기도 하고, 김상조 등[4]과 같이 상사성을 이용하여 공개된 엔진의 성능 맵을 스케일링하여 사용하기도 한다. 따라서 본 연구에서는 선박용 가스터빈 엔진인 Rolls-Royce사의 MT30 엔진을 대상으로, 스케일링 기법을 적용하여 구성품 성능 맵을 도출하고 이를 통해 엔진 성능 모델링 및 해석 연구를 수행하고자 한다.

성능 맵의 스케일링은 두 가지 방식으로 나누어 수행하였다. 설계점만을 기준으로 스케일링하는 한 점 스케일링과 고압 스풀 회전수에 따라 선정한 여러 작동점(탈-설계점)을 이용하여 스케일링하는 방식으로 성능 맵을 생성하였다. 두 방식으로 생성한 성능 맵에 대하여 부분부하 해석을 수행하여, 그 결과를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 엔진 성능 모델링

2.1.1 MT30 엔진 데이터

Rolls-Royce사의 MT30 엔진은 최대 40 MW의 출력을 내는 30톤급 가스터빈 엔진이다. Table 1은 MT30 엔진의 정격 성능이다.

MT30 엔진은 Fig. 1과 같이 크게 가스발생기, 동력터빈, 그 외 기어박스 등으로 나눌 수 있다. 가스발생기는 2-spool 구조로, 고압 스풀과 중간 압력 스풀로 구분된다. 고압 스풀은 6단의 고압 압축기(HPC) 및 1단의 고압 터빈(HPT)으로 구성되어 있으며, 중간 압력 스풀은 8단의 중간 압력 압축기(IPC) 및 1단의 중간 압력 터빈(IPT)으

Table 1. Operating condition of MT30 Engine[5].

Parameter	Data
Ambient Temperature [K]	288.15
Ambient Pressure [kPa]	101.325
Intake Pressure Loss [mm.water]	100
Exhaust Pressure Loss [mm.water]	150
Relative Humidity [%]	60
Lower Calorific Value [kJ/kg]	42800

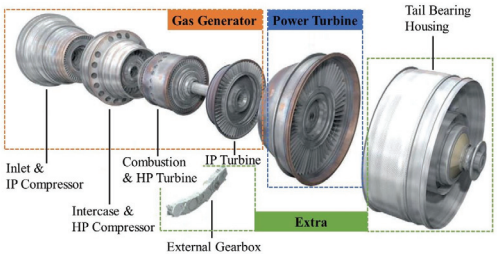

Fig. 1 MT30 engine module.

로 구성되어 있다.

2.1.2 설계점 해석

일반적으로 설계점 성능은 엔진 최적의 성능을 제공하는 스펙 성능을 의미하며, 본 연구에서 선정 및 적용되는 설계점 성능은 엔진의 모델링을 위한 기준점으로 사용된다.

설계점 해석은 상용 가스터빈 엔진 해석 프로그램인 Gasturb[6]를 이용하여 수행하였다. 설계점 해석을 위한 입력 값 중 운용 조건(대기온도, 압력, 습도)과 LCV(Lower Caloritic Value) 등은 MT30 엔진의 정격 성능 및 운용 기술서를 참고하였다. 설계점 압축기 압력비는 Holsonback[7]가 수행한 관련 연구를 참고하여, 전체 압력비 ≈ 24 수준으로 압력비를 추론하여 적용하였다. 터빈 입구 온도 및 회전수는 성능 덱 데이터[8]를 참고하여 적용하였다. 마지막으로 각 구성품 효율은 Gasturb에서 제공한 예제 효율 입력 값을 수정해 가면서, 해석 결과를 검토하여 최적 값으로 적용하였다. 본 연구에 사용된 설계점 입력 값은 Table 2와 같다.

Table 2. MT30 design point input data.

Parameter	Data
Air Mass Flow [kg/s]	121
IPC Pressure Ratio [-]	4.34
HPC Pressure Ratio [-]	5.43
Turbine inlet Temperature [K]	1507.6
PT Spool Speed [RPM]	3418
HPC efficiency [%]	0.89
IPC efficiency [%]	0.89
HPT efficiency [%]	0.905
IPT efficiency [%]	0.901
PT efficiency [%]	0.91

Table 3. Results of design modeling.

Parameter	Reference	Gasturb	Error [%]
Power [MW]	40	40	0.00
SFC [kg/kW · hr]	0.2137	0.2137	0.00
Exhaust flow [kg/s]	121.504	121.510	0.00

설계점 해석 결과는 제공받은 성능 덱 데이터와 비교하여 검증하였다. 성능 덱 데이터에서 대기 온도는 288.15 K, 대기 압력은 101.325 kPa, 동력 축 회전수는 3418 RPM일 때, 최대 출력이 40 MW인 케이스 데이터를 이용하였다.

Table 3은 선정한 설계점 성능(Gasturb)과 성능 덱 데이터(Reference)를 비교한 결과이다. 추진 기관 주요 변수인 출력과 SFC, 배기유량의 오차는 0.00%로 설계점 수준의 결과로 적절하다고 할 수 있다.

2.1.3 구성품 맵 생성

설계점 외 작동점(탈-설계점)에서의 해석을 위해서는 엔진 성능에 맞는 주요 구성품의 성능 데이터가 필요하지만 일반적으로 구성품 성능 데이터를 획득하는 것은 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 성능 맵의 상사성을 이용하여 공개된 성능 맵을 스케일링하여 성능 맵을 생성

하는 스케일링 기법을 적용하였다.

성능 맵 데이터는 유량함수(MFP), 압력비(PR), 효율(ETA)로 구성된다. 스탠다드 맵 데이터의 유량함수는 공기유량과 온도, 압력을 이용하여 무차원화한 값으로 설계점 데이터도 이에 맞게 정리하여야 한다. Eq. 1은 설계점 데이터의 유량함수(MFP) 무차원화 식이며, 각 구성품의 압력비(PR)는 Eq. 2를 이용하여 계산하였다[9, 10]. 여기서 Ma는 공기유량, T_{T1}은 입구 온도, P_{T1}은 입구 압력, P_{T2}는 출구 압력을 의미한다.

$$MFP = \frac{Ma\sqrt{T_{T1}}}{P_{T1}} \tag{1}$$

$$PR = \frac{P_{T2}}{P_{T1}} \tag{2}$$

Equations 3~5은 스케일링 계수를 구하는 식이다. 여기서 첨자 'design'은 설계점 데이터, 첨자 'reference'은 스탠다드 맵 기준점 데이터를 의미한다.

$$MFP_{scalefactor} = \frac{MFP_{design}}{MFP_{reference}} \tag{3}$$

$$PR_{scalefactor} = \frac{PR_{design} - 1}{PR_{reference} - 1} \tag{4}$$

$$ETA_{scalefactor} = \frac{ETA_{design}}{ETA_{reference}} \tag{5}$$

위 식을 통하여 계산한 스케일링 계수를 스탠다드 맵 기준점 데이터에 곱하여 성능 맵을 생성하였다. Fig. 2 및 Fig. 3은 각각 본 연구를 통해 산출된 MT30 엔진의 고압 압축기와 중간 압력 압축기의 성능 맵이며, 여기서 세로축은 압력비(Pressure Ratio), 가로축은 유량함수(Mass Flow Parameter)이다. 또한 Figs. 4~6은 각각 MT30 엔진의 고압 터빈, 중간 압력 터빈, 동력 터빈의 성능 맵이다. 여기서 세로축은 압력비, 가로축은 유량함수와 보정 축 속도(Corrected Shaft Speed)를 곱한 값이다. 보정 축 속도는 최대 축 속도를 1.0으로 하여 계산된 상대 속도를

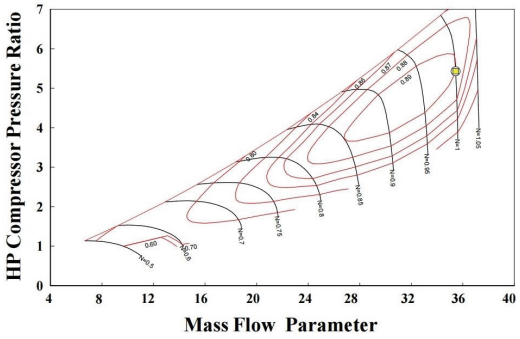

Fig. 2 Performance map of HPC.

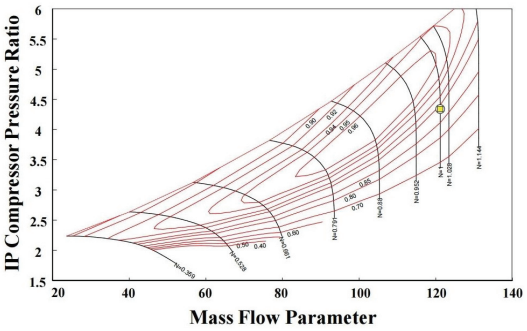

Fig. 3 Performance map of IPC.

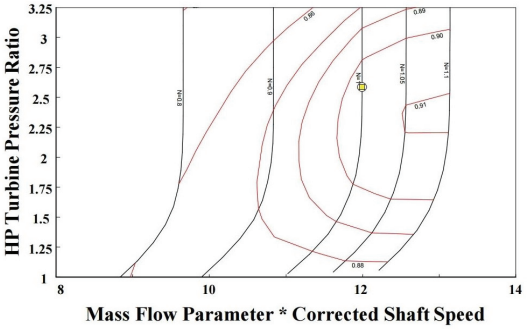

Fig. 4 Performance map of HPT.

의미한다. 구성품 성능 맵에서 효율은 Figs. 2~6에서 등고선 형태(붉은색)로 나타내었다.

2.2 부분부하 해석

2.2.1 한 점 스케일링 모델 부분부하 해석

성능 모델링 결과를 확인하기 위하여 작동점(탈-설계점)에 대해 부분부하 성능해석을 수행하였다. 이는 앞서 생성한 구성품 맵을 이용하여

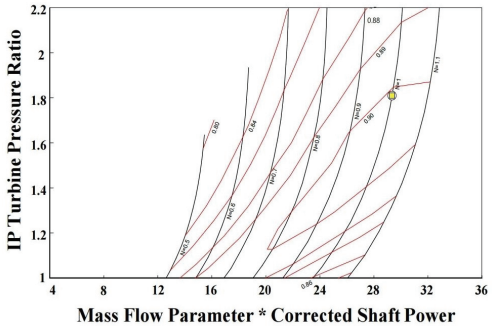

Fig. 5 Performance map of IPT.

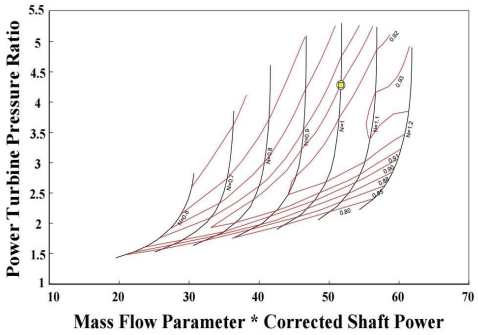

Fig. 6 Performance map of PT.

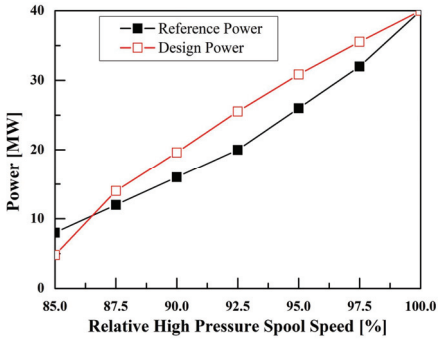

Fig. 7 Relative gas generator spool speed vs power of one-point scaling model.

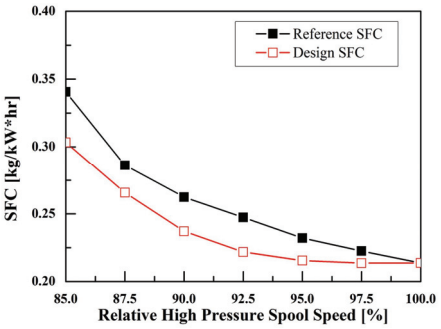

Fig. 8 Relative gas generator spool speed vs SFC of one-point scaling model.

수행하였으며, 해석한 성능을 성능 덱 데이터와 비교하여 신뢰성을 검토하였다.

Fig. 7은 고압 스풀 회전수에 따른 출력을, Fig. 8은 고압 스풀 회전수에 따른 SFC를 비교한 결과이다. 고압 스풀 회전수의 최댓값 9418 RPM을 100%로 하여 고압 스풀 회전수 85%부터 2.5% 간격으로 100%까지를 생성한 모델로 부분부하 해석(Design)하고 이를 성능 덱 데이터(Reference)와 비교하였다.

본 절의 부분부하 해석에는 설계점(고압 스풀 회전수 100% 구간) 성능 데이터만을 기준으로 스케일링 계수를 구하였다. 한 점에서의 스케일링 계수로 전 구간에 적용하여 스케일링한 것이다. 이로 인해 Table 4와 같이 고압 스풀 회전수 100% 구간의 출력 및 SFC에 대해서는 0.0%의 오차로 적절한 결과를 도출하였으나, 그 외의 구간에서는 상대적으로 큰 오차를 보였다. 최대 오차는 고압 스풀 회전수 85% 구간에서 나타났으며, 이 때 출력의 오차는 40.2%, SFC의 오차는 11%이다. 이 결과를 통하여 성능 모델의 신뢰성 및 정확성을 높일 수 있는 성능 맵 보정이 필요함을 확인하였다.

Table 4. Error of power and SFC for One-point scaling model.

Rel. high pressure spool speed [%]	85	87.5	90	92.5	95	97.5	100
Power error [%]	40.2	16.8	22.6	27.6	18.6	11.1	0.0
SFC error [%]	11.0	7.1	9.6	10.3	7.2	4.0	0.0

2.2.2 보정 모델 부분부하 해석

본 절에서는 성능 맵의 정확성을 높이기 위해,

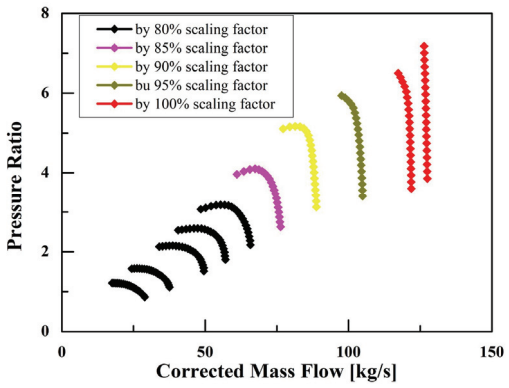

Fig. 9 The Concept of Map Correction Method.

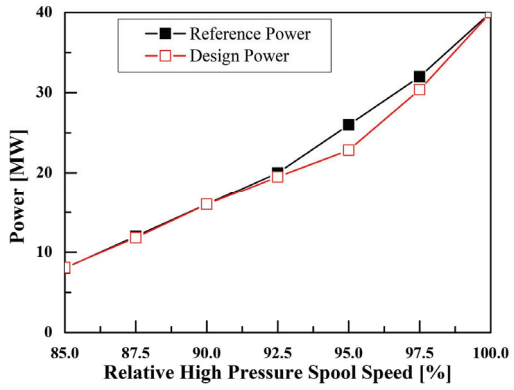

Fig. 10 Relative gas generator spool speed vs power of Correction model.

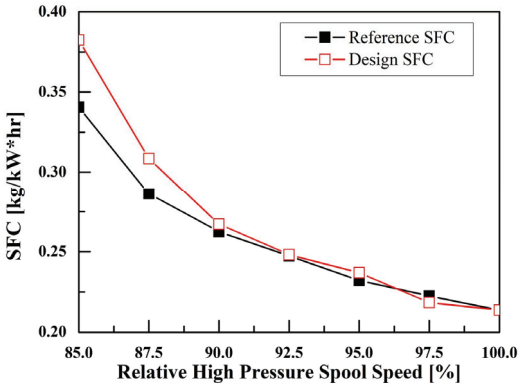

Fig. 11 Relative gas generator spool speed vs SFC of Correction model.

성능 맵을 보정하여 부분부하 해석을 수행한다. 기존과 동일하게 고압 스풀 회전수 100%에 대한 기준점 스케일링은 진행하고, 작동점(탈-설계점)에 대해서도 개별적인 스케일링 계수를 구하여 맵 데이터에 각각을 구하는 방식으로 새로운 맵을 생성하였다. 이러한 보정 스케일링 기법에 대한 이해를 돕기 위하여 Fig. 9에 중간 압력 압축기 성능 맵으로 스케일링 개념을 나타내었다.

Table 5. Error of power and SFC for correction model.

Rel. high pressure spool speed [%]	85	87.5	90	92.5	95	97.5	100
Power error [%]	1.1	1.4	0.0	2.4	12.1	5.1	0.0
SFC error [%]	9.1	7.0	1.8	0.3	2.0	1.9	0.0

새로운 맵 생성을 위한 스케일링 절차는 다음과 같다.

(1) 설계점(고압 스풀 회전수 100%)을 기준으로 맵 데이터를 스케일링한다.

(2) 작동점(고압 스풀 회전수 95%, 90%, 85%, 80%)을 기준으로 각 영역에 대해 맵 데이터를 스케일링한다.

(3) 고압 스풀 회전수 80% 이하의 영역에 대해서는 80% 기준 스케일링 계수를 이용하여 스케일링하고, 100% 이상의 영역에 대해서는 설계점을 기준 스케일링 계수를 이용하여 스케일링 한다.

보정 기법을 적용하여 생성한 성능 맵을 부분부하 해석한 결과는 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 설계점 구간의 출력 및 SFC에 대한 결과 외에도 작동점에서의 해석 결과가 보정 전 해석 결과보다 정확성이 향상되었음을 확인하였다.

Table 5는 보정 모델에 대한 해석 오차이다. 추진기관 성능 지표인 출력은 설계점인 고압 스풀 회전수 100% 구간과 90% 구간에서 최저 오차 0.0%를, 고압 스풀 회전수 95% 구간에서 최대 오차 12.1%를 보였다. SFC는 설계점인 고압 스풀 회전수 100% 구간에서 최저 오차 0.0%를, 고압 스풀 회전수 85% 구간에서 최대 오차인 9.1%를 보였다. 이 결과를 통해 보정 전 결과에 비해 오차를 크게 감소시켰음을 확인하였다. 특

히 보정을 통해 출력의 최대 오차를 28.1% 감소시켜, 출력에 대하여 효과적으로 보정하였음을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 2-spool 선박용 가스터빈 엔진인 MT30의 구성품 성능 맵 스케일링 및 보정을 통해 생성한 맵을 이용하여 부분부하 해석을 수행하고, 이를 성능 덱 데이터와 비교하였다.

성능 모델은 상용 가스터빈 해석 프로그램의 스탠다드 맵을 활용하여 생성한다. 이 때, 부분부하 상태에 대한 스케일링은 고압 스풀 회전수 100%인 설계점을 기준으로 모든 맵 데이터에 적용하여 생성하였다. 한 점 기준 스케일링 모델의 해석 결과 성능 덱 데이터와 다소 오차가 존재하는 것을 확인하였다.

성능 모델의 정확성을 높이기 위한 보정 기법으로 각 작동점(고압 스풀 회전수 95%, 90%, 85%, 80% 구간)의 스케일링 계수를 구하고, 각 영역에 대해 맵 데이터를 스케일링하여 새로운 맵을 생성하였다.

보정 모델에 대한 부분부하 해석 결과 오차 0.0%인 설계점을 제외하고 작동점 구간의 최대 오차가 보정 전 출력 40.2%, SFC 11.0%에서 보정 후 출력 12.1%, SFC 9.1%로 특히 출력에 대한 오차가 크게 감소함을 확인하였다. 이러한 연구 결과로부터 보정을 통하여 엔진 성능 모델 구성 및 탈-설계점 성능 해석이 가능함을 확인하였다.

References

1. Lee, T.H., Ki, J.Y. and Kho, S.H., “Overview of the Gas Turbine Status of the Ship,” *49th KSPE Fall Conference*, Busan, Korea, pp. 83-84, November 2017.
2. Cha, S.W., Ki, J.Y., Son, N.Y., Kim, D.J., Shim, J.S., Kim, M.H. and Park, S.K., “Development of a Dynamic Simulation Mathematical Model of a 2-Spool Marine Gas Turbine Engine,” *Journal of the Korean Society of Marine Enginering*, Vol. 43, No. 9, pp. 65-60, 2019.
3. Kim, S.J., Choi, S.M. and Rhee, D.H., “Off-design Performance Analysis Based on Experimental Data of a Micro Gas Turbine,” *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 22, No. 6, pp. 64-71, 2018.
4. Kim, S.J., Kim, M.H. and Kim, Y.I., “Study on the Performance Model Adaptation for an Aero Gas Turbine,” *53rd KSPE Fall Conference*, Busan, Korea, pp. 686-689, November 2019.
5. Rolls-Royce Naval U.K., “MT3040 Mechanical Drive Package Technical Description,” 2012.
6. Kurzke, J., “GasTurb 11 Manual: Design and Off-Design Performance of Gas Turbines,” 2007.
7. Holsonback, C.R., “Dynamic Thermal -Mechanical-Electrical Modeling of the Integrated Power System of a Notional All-Electric Naval Surface Ship,” Department of Mechanical Engineering, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, U.S.A., 2007.
8. Rolls-Royce Naval UK, “Functional Data for Ship Installation,” 2014.
9. Hong, Y.S., *Basic Theory of Gas Turbine,* 2nd ed., Chung Moon Gak, Paju, Gyeonggido, Ch. 2, 2004.
10. Walsh, P.P. and Fletcher, P., *Gas Turbine Performance*, 2nd ed., Blackwell Science lnc., Oxford, U.K., Ch. 2-3, 1998.