

## 가스터빈 압축기 성능맵 생성을 위한 운전 데이터 분석적 접근

이현태\* · 박영광\* · 김진서\* · 강도원\*\* · 김동섭\*\*\*†

### An Analytic Approach to Operational Data for Generating Performance Map of a Gas Turbine Compressor

Hyun Tae Lee\*, Young Kwang Park\*, Jin Seo Kim\*, Do Won Kang\*\*, Tong Seop Kim\*\*\*†

Key Words : Gas turbine(가스터빈), Compressor performance map(압축기 성능맵), Map generation(맵 생성)

#### ABSTRACT

The accuracy of gas turbine performance prediction depends on the precision of the performance map. An accurate performance map is crucial for maintaining the gas turbine compressor's efficiency and stability across diverse operating conditions. Traditionally, performance maps have been created by manufacturers based on experimental data. This study aims to generate a gas turbine compressor performance map using actual operational data from power plants instead of experimental data. To achieve this, Gas Path Analysis (GPA) was implemented to calculate and correct performance parameters according to external conditions, resulting in a more accurate performance map. Our research consists of the following steps. First, a virtual performance map was used to construct a virtual dataset to validate the accuracy of the GPA was performed using the virtual dataset, and the results were compared with the virtual data to verify the accuracy of the GPA. Next, actual operational data from power plants were applied, and extensive filtering and GPA were used to calculate the gas turbine performance parameters. Based on these performance parameters, correction criteria for operating points were established, and fitting techniques were employed to generate the performance map. Finally, the accuracy of the generated performance map was evaluated through off-design analysis and compared with actual operational data. This validation confirmed that the performance map accurately reflects various operating conditions and effectively predicts performance variations.

#### Nomenclature

CC	correction coefficient
CDP	compressor discharge pressure
CF	corrected flow
CS	corrected speed
h	enthalpy [kJ/kg]
LHV	lower heating value [kJ/kg]
$\dot{m}$	mass flow rate [kg/s]
N	rotation speed [RPM]
n	number of data points

NCF	normalized corrected flow
NCS	normalized corrected speed
NEFF	normalized efficiency
NPR	normalized pressure ratio
P	pressure [kPa]
PR	pressure ratio
R	gas constant [kJ/kg · K]
RH	relative humidity [-]
T	temperature [°C]
TIT	turbine inlet temperature [°C]
TET	turbine exhaust temperature [°C]

\* 인하대학교 대학원(Graduate School, Inha University)

\*\* 한국기계연구원(Korea Institute of Machinery and Materials)

\*\*\* 인하대학교 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering, Inha University)

† 교신저자, E-mail : kts@inha.ac.kr

$\dot{W}$  power [W]  
 $\gamma$  specific heat ratio

**Subscripts**

Air	air
Comp	compressor
cool	cooling air flow
d	design point
gas	combustion gas
in	inlet
loss	losses
nozzle	nozzle
out	outlet
RH	relative humidity
RMSE	root mean square error
s	isentropic
Turb	turbine

**1. 서 론**

최근 전 세계적으로 전력 수요 증가와 함께 온실가스 배출량이 증가함에 따라<sup>(1,2)</sup>, 여러 나라들이 온실가스 배출량을 감축하기 위한 계획을 수립하였다<sup>(3)</sup>. 이 계획을 바탕으로 석탄 중심의 발전 방식을 축소하고 재생에너지를 활용한 발전을 확대<sup>(4)</sup>하고 있다. 하지만 재생에너지 사용량의 증가는 간헐적 특성으로 인해 전력 공급에 있어 변동성을 가져오며, 전력망 시스템의 안정성을 저하시킨다<sup>(5)</sup>. 이에 따라 빠른 기동과 유연한 부하 추종이 가능한 가스터빈이 대응책으로 주목받고 있다<sup>(6)</sup>.

브레이튼 사이클의 열역학적 작동 원리에 따라 설계된 발전 시스템인 가스터빈은 뛰어난 연료 유연성을 바탕으로 천연가스뿐만 아니라 수소, 암모니아, 바이오가스, 합성가스 등 다양한 연료를 활용할 수 있다<sup>(7,8)</sup>. 그러나 천연가스를 기준으로 설계된 기존 가스터빈은 수소, 암모니아와 같은 저탄소 연료로 전환될 때, 연소가스 특성이 변하면서 압축기와 터빈의 작동특성에 변화가 발생한다<sup>(9,10)</sup>. 이에 따라 각 구성부의 성능 예측의 중요성이 주목받으면서, 대체 연료를 적용하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다<sup>(11,12)</sup>. 특히, 압축기의 경우 성능맵을 통해 성능을 예측하는 연구가 진행되고 있다. 성능맵은 다양한 운전 조건에서의 유량(Flow rate), 회전속도(Rotational speed), 압력비(Pressure ratio), 효율(Efficiency)과 같은 성능 파라미터를 그래프 형태로 통합해 나타낸 자료로, 이를 통해 압축기의 성능 특성을 시각적으로 파악할 수 있다. 하지만 대부분의 엔진 제작사가 성능맵을 제공하지 않기 때문에, 성능맵을 직접 도출하거나 기존 성능

맵의 정확도를 개선하기 위한 연구가 이루어지고 있다.

Kong<sup>(13)</sup>은 성능 예측 정확도를 향상시키기 위해 엔진의 운영 지점별 성능 데이터를 성능맵과 결합하는 방법에 대해 연구하였다. Joseph<sup>(14)</sup>은 NASA에서 제공하는 성능 시험 데이터를 바탕으로 고정된 압축기 형상에 대한 새로운 손실 모델을 구축하고 이를 통해 압축기의 성능을 예측하는 방법을 제안하였다. Tsoutsanis<sup>(15)</sup>는 성능 예측 정확도를 개선하기 위해 성능맵 보정 기법으로 타원 방정식과 좌표 변환을 통합하여 도입하였다. Mark<sup>(16)</sup>는 설계점 데이터를 기반으로 3차원 수치해석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 단축적법을 활용하여 설계 범위를 벗어난 운용 조건에서의 성능을 예측하였다.

이와 같은 연구들은 가스터빈 압축기 성능맵의 정확도 향상에 기여하였다. 그러나, 서지(Surge) 운전과 같은 불안정한 운전영역을 포함한 광범위한 영역의 운전 데이터와 함께 구체적인 압축기 형상 정보를 필요로 한다. 하지만 이는 고비용의 실험이나 실제 가스터빈이 필요하기 때문에 데이터를 확보하는 데 제약이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 제한된 설계 정보와 실제 발전소 운영 데이터를 활용하여 가스터빈 압축기 성능맵 생성 방법을 탐구하고 이를 제안하였다.

**2. 가스터빈 압축기 성능맵 생성 과정**

**2.1 개요**

가스터빈 압축기 성능맵 생성 절차는 Fig. 1에서 보이는

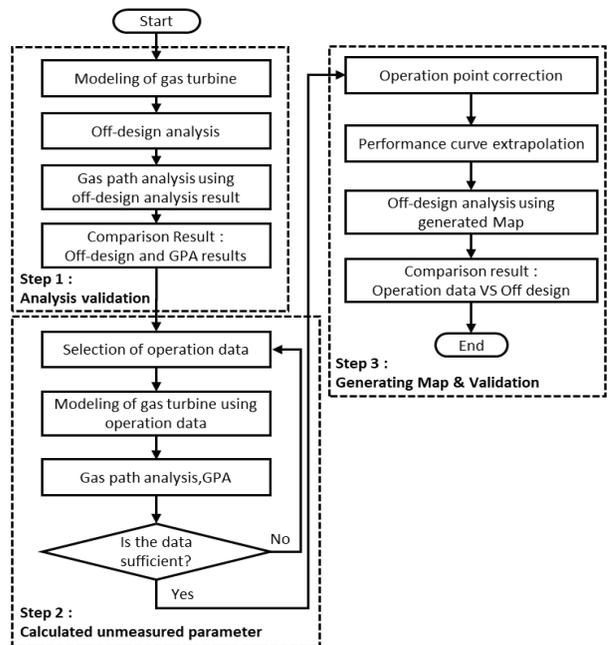


Fig. 1 Flowchart of the gas turbine compressor performance map generation process

것처럼 세 단계로 구성된다. 첫 번째 단계는 분석 방법의 신뢰성을 검증하기 위한 것으로, 가상의 성능맵을 활용하여 가상 데이터셋을 생성한다. 이후, 생성된 데이터셋을 활용하여 가스 경로 해석법(Gas path analysis, GPA)을 적용하고, 데이터셋과 비교를 통해 분석 방법의 정확도를 평가한다. 이어지는 단계에서는 발전소에서 얻은 운전 데이터를 기반으로 데이터를 선별하고, 가스터빈 모델을 구축한다. 그 후 실제 운전 조건을 반영하여 가스 경로 해석법(Gas Path Analysis, GPA)을 통해 측정되지 않은 성능 파라미터를 계산한다. 마지막으로, 계산된 파라미터를 바탕으로 다양한 운전조건을 동일한 운전조건으로 보정하는 과정을 거쳐 작동점을 결정한다. 이후, 성능맵을 구성하기 위해 외삽(Extrapolation), 스케일링(Scaling)과정을 통해 성능맵을 생성한다. 이렇게 생성된 성능맵은 탈설계 해석을 통해 검증되며, 실제 운전 데이터와 비교하여 그 정확도를 확인한다.

## 2.2 대상 가스터빈 및 시스템 모델링

본 연구의 분석 대상 가스터빈은 정격 출력이 171.5 MW의 F급 가스터빈이며 상용소프트웨어 GateCycle 6.1.2<sup>(17)</sup>로 모델링하였다. 모델링은 두 가지 접근 방식으로 수행하였으며, 먼저 OEM에서 제공한 ISO 외기 조건(RH 60%, 15°C, 101.325 kPa)을 기준으로 정격 성능 스펙에 따라 모델을 구축하였다. 이 모델을 바탕으로 Fig. 1의 Step 1 절차에 따라 GPA의 정확성을 확인하였다. 다음으로 2.3절에서 설명된 절차에 따라 선별된 발전소의 실제 운전 데이터를 기반으로 모델링하였으며, 이를 통해 Fig. 1의 Step 3을 수행하여 성능맵을 생성하였다. 각 모델에서 사용된 가스터빈의 주요 설계 파라미터는 Table 1과 Table 2에 도시하였다.

Table 1 Rated performance gas turbine

Parameters	Manufacture	Simulation
Inlet air flow rate [kg/s]	N/A	440
Compressor pressure ratio [-]	16	16
Compressor polytropic efficiency [%]	N/A	89.8
Fuel flow rate [kg/s]	N/A	9.46
Combustor pressure loss [%]	N/A	4
Combustor efficiency [%]	N/A	99.5
Turbine inlet temperature [°C]	1397	1397.01
Turbine exhaust temperature [°C]	601.1	601.1
Turbine Isentropic efficiency [%]	N/A	89.2
Shaft speed [rpm]	3600	3600
Mechanical efficiency [%]	N/A	99
Net efficiency [%]	36.8	36.76
Net power output [MW]	171.6	171.5

Table 2 Operating data of gas turbine: design parameters and simulation results

Parameters	Filed data	Simulation
Inlet flow rate [kg/s]	N/A	436.6
Compressor discharge pressure [kPa]	1556.81	1556.81
Compressor discharge temperature [°C]	387.50	387.50
Stage polytropic efficiency [%]	N/A	92.1
Fuel flow rate [kg/s]	9.418	9.418
Combustor pressure loss [%]	N/A	4
Combustor efficiency [%]	N/A	99.5
Turbine inlet temperature [°C]	N/A	1397
Turbine exhaust temperature [°C]	615.69	615.69
Isentropic efficiency [%]	N/A	88.25
Shaft speed[rpm]	3600	3600
Mechanical efficiency [%]	N/A	99
Net efficiency [%]	N/A	36.45
Net power output [MW]	171.69	171.7

### 2.2.1 압축기

대상 가스터빈의 압축기는 다단(Multi-stage)으로 구성되어 있으나, 본 연구에서는 구조의 단순화를 위해 단일 단(Single-stage)으로 모델링하였다. 이러한 접근은 설계 정보가 제한된 상황에서 계산의 복잡성을 줄이고, 높은 성능 예측 정확성을 제공한다<sup>(18,19)</sup>. 따라서, 모든 냉각 공기의 추기는 끝단에서만 이루어진 것으로 가정하였으며, 압축기의 소모 동력과 등엔트로피 효율은 각각 식(1)과 식(2)에 따라 계산하였다.

$$\dot{W}_{Comp} = \dot{m}_{Air} (h_{out} - h_{in}) \quad (1)$$

$$\eta_{Comp} = \frac{h_{out,s} - h_{in}}{h_{out} - h_{in}} \quad (2)$$

탈설계 해석은 성능맵을 활용하였으며, 두 차례 수행되었다. 첫 번째는 2.1절에서 언급한 바와 같이, 상용 소프트웨어에서 제공하는 성능맵을 활용하여 GPA 해석의 정확성을 검증하기 위한 목적으로 이루어졌다. 이때 사용된 성능맵은 Fig. 2에 도시하였다. 두 번째 해석은 본 연구에서 새롭게 생성된 성능맵을 기반으로 수행하였으며, 이를 통해 성능맵의 유효성을 평가하였다. 성능맵은 무차원 파라미터인 유량(Normalized corrected flow, NCF), 회전속도(Normalized corrected speed, NCS), 압력비(Normalized pressure ratio, NPR) 및 효율(Normalized efficiency, NEFF)로 이루어져 있으며, 이는 식(3)부터 식(6)에 제시하였다.

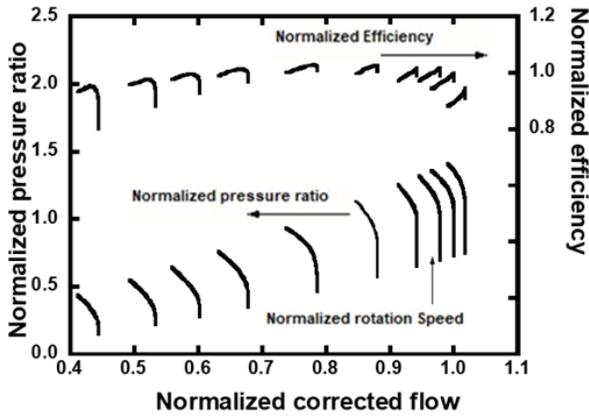


Fig. 2 Normalized compressor performance map

$$NCF = \frac{(\dot{m} \sqrt{RT_{in}} / P_{in})}{(\dot{m} \sqrt{RT_{in}} / P_{in})_d} \quad (3)$$

$$NPR = \frac{PR - 1}{PR_d - 1} \quad (4)$$

$$NEFF = \frac{\eta_s}{\eta_{s,d}} \quad (5)$$

$$NCS = \frac{(N / \sqrt{T_{in}})}{(N / \sqrt{T_{in}})_d} \quad (6)$$

### 2.2.2 덕트

운전 데이터에 덕트 관련 정보는 제공되지 않으나, 실제 가스터빈 시스템에는 덕트가 포함되기 때문에 본 연구에서는 덕트를 포함하여 모델링하였다. 덕트에서는 열 손실을 무시하고 압력 손실만을 고려하였으며, 압력 손실은 유체의 유량, 온도, 압력 조건의 변화에 의존한다. 덕트의 입구 및 출구 압력은 관련 조건을 바탕으로 식(7)을 통해 계산하였다.

$$\frac{(\Delta P / \Delta P_{in})}{(\Delta P / \Delta P_{in})_d} = \frac{(\dot{m} \sqrt{T} / P_{in})^2}{(\dot{m} \sqrt{T} / P_{in})_d^2} \times \frac{R}{R_d} \quad (7)$$

### 2.2.3 터빈

터빈의 고온 환경에서는 노즐과 로터가 과열되지 않도록 냉각 시스템이 필수적이며, 이를 위해 압축기에서 추기된 공기를 사용하였다. 모든 냉각 공기는 노즐을 통해 주입된다고 가정하였다. 이러한 단순화된 모델링은 복잡한 열역학적 계산을 용이하게 하고, 터빈 성능 예측에 높은 정확성을 제공한다<sup>(20)</sup>. 터빈의 효율과 출력은 각각 식(8)과 식(9)를 통해 계산하였다.

$$\eta_{Turb} = \frac{(\dot{m}h)_{in} - (\dot{m}h)_{out}}{(\dot{m}h)_{in} - (\dot{m}h)_{out,s}}$$

where  $(\dot{m}h)_{in} = (\dot{m}h)_{gas} + (\dot{m}h)_{cool}$  (8)

$$\dot{W}_{Turb} = (\dot{m}h)_{in} - (\dot{m}h)_{out} \quad (9)$$

터빈의 탈설계 해석은 초킹 조건을 가정하였으며, 이는 중대형 가스터빈의 고부하 조건에서 성능 예측의 정확성을 높이는 데 유효하다<sup>(21,22)</sup>. 초킹 조건에 대한 수식은 식(10)에 도시하였다.

$$\frac{\dot{m}_{in} \sqrt{T_{in}}}{k A_{nozzle} P_{in}} = const, \quad k = \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (10)$$

### 2.2.4 연소기

연소기에서 발생하는 압력 손실은 4%로 가정하였으며, 연소 효율은 99.5%로 설정하였다. 사용된 연료는 메탄 91.3%, 에탄 5.36%, 프로판 2.14%로 구성된 천연가스로, 이 연료의 저위 발열량(Lower Heating Value, LHV)은 49,298 kJ/kg이다.

### 2.3 가스 경로 해석법(Gas path analysis, GPA)

가스 경로 해석법(Gas path analysis, GPA)은 가스터빈 성능 평가와 진단에서 활용되는 기법으로, Urban<sup>(23)</sup>에 의해 처음 제안되었다. 이는 열역학적 모델을 이용하여 실제 운전 데이터를 기반으로 측정되지 않은 데이터를 추정함으로써 성능 저하의 원인을 파악하고 예상 성능을 평가한다<sup>(24,25)</sup>. 본 연구에서는 GPA를 사용하여 운전 데이터로부터 압축기의 성능 파라미터를 추정하였다.

GPA에 사용되는 주요 입력값으로는 외기온, 외기압, 상대습도, 연료 유량 및 온도, 압축기 출구와 터빈의 배기 온도와 압력, 시스템 출력, 가변입구 안내깃(Variable inlet guide vane, VIGV) 각도를 활용한다. 이를 바탕으로 압축기 입구에서의 공기 유량을 계산하였으며, 이 과정은 Fig. 3에 순서대로 나타내었다. 또한, 해당 계산은 Table 1에서 제공된 터빈 효율을 활용하였다. 실제 운전 데이터를 기반으로 설계점이 정의되었으며, 이를 바탕으로 계산이 이루어졌다. 계산도중 데이터와 설계점이 일치하지 않는 경우 조건을 재조정 한 후 다시 계산을 진행하였다. 이 과정을 반복 수행하여 입력값과 일치하는 결과가 도출되면 계산을 종료하였다.

### 2.4 운전 데이터 선별 및 분류

#### 2.4.1 비현실적데이터 선별

본 연구에서는 1년간 1분 주기로 측정된 525,600개의 발전

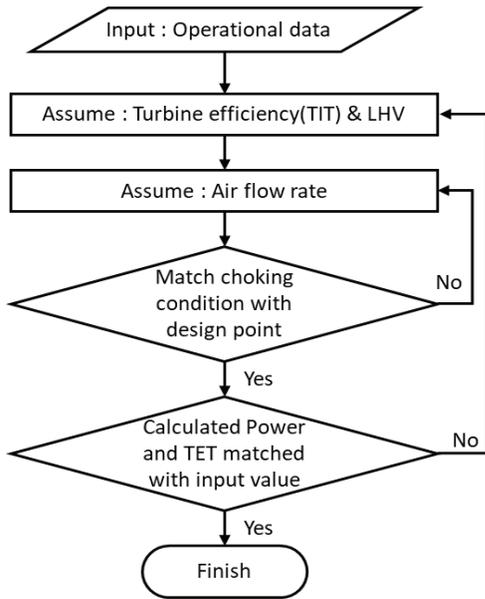


Fig. 3 GPA flow chart for calculation of the unmeasured parameter

Table 3 Selection criteria for ambient conditions based on Korea Meteorological Administration data

Parameter	Minimum limit value	Maximum limit value
Ambient temperature [°C]	-15.9	31.8
Ambient pressure [kPa]	98.325	104.325
Relative humidity [%]	20	100

소의 운전 데이터를 활용하였다. 데이터 선별의 첫 단계로, 환경적으로 측정이 불가능한 데이터를 제거하기 위해 외기 조건을 기준으로 필터링을 수행하였다. 이를 위해 발전소 주변의 기상청 데이터<sup>(26)</sup>를 참고하여 가스터빈의 정상 작동 환경을 설정하고, 이 조건에 맞지 않는 데이터를 제거하였다. 설정에 따른 외기조건 선별기준은 Table 3에 도시하였다.

2.4.2 과도운전 및 잡음 데이터 선별

운전 데이터에는 외기 조건 변화나 부하 변동으로 인해 과도 운전 및 잡음이 포함되기도 한다. 이를 제거하기 위해 상용화된 필터링 기법인 저주파 통과 필터(Low pass filter, LPF)와 이동평균 필터(Moving average filter)를 적용하였다<sup>(27)</sup>. 본 연구에서 활용된 운전 데이터는 1분 간격으로 수집되어 샘플링 주기가 60초이며, 저주파 통과 필터는 차단 주파수 0.0239 Hz로 설정하였다. 이를 통해 0.0239 Hz 이하의 신호만을 통과시켰으며, 필터링은 VIGV 각도, 연료 유량, 터빈 출구 온도(Turbine exit temperature, TET) 부하(Load)를 포함하는 입력 데이터에 대해 수행하였다. 저주파 통과 필터<sup>(28)</sup>를 활용하여 부하 변동과 외기조건의 급격한 변화로 인해 발생하는 과도 운전 데이터를 제거하였다. 또한 열 관성으로 인한 영향을 고려하여, 필터링 된 데이터가 60

Table 4 Number of data points filtered by filtering process

Ambient temperature [°C]	Selected data points (1 Year)
-5	23
0	52
5	166
10	190
15	32
20	88
25	190
30	115

분 이상 지속된 경우에만 정상 상태로 간주하여 선별하였다. 이동평균 필터<sup>(29)</sup>는 연속된 데이터 사이에서 발생하는 일시적인 이상값을 보정하여 데이터 품질을 향상시키기 위해 활용되었다. 본 연구에서는 연속된 데이터 사이에 2분 미만으로 나타나는 이상값을 잡음으로 간주하고, 잡음이 발생하는 지점의 전후 10분 데이터를 평균하는 이동평균 필터를 적용하였으며, 이를 바탕으로 정상 상태 데이터를 선별하였다.

2.4.3 VIGV 각도 및 외기온도에 따른 데이터 선별

세 번째 단계에서는 VIGV 각도와 외기 온도가 가스터빈 압축기 성능에 미치는 영향을 줄이기 위해 데이터 필터링을 수행하였다. VIGV 각도는 압축기 입구 형상을 변경시켜 성능 파라미터인 압력비, 효율, 유량의 변화를 초래한다<sup>(30)</sup>. 따라서 VIGV 각도 변화가 일정 각도 이상인 데이터를 제거하여 성능맵 변화로 인한 영향을 최소화하였다.

본 연구에 활용된 대상 가스터빈의 최대 VIGV 개방 각도는 84 °이며, 이는 운전 환경 및 작동조건에 따라 이 각도는 지속적으로 변동이 발생한다. 이를 고려하여 83.95 ° 이하 데이터는 제거하였으며, 부하가 없더라도 VIGV 각도가 고정된 상태로 유지 가능하므로 출력이 1 MW 미만인 데이터를 제거하였다. 또한 본 연구에서 활용된 외기 조건 데이터는 실시간으로 수집되어, 표면적으로 5°C 단위로 분류될 수 있지만, 실제로는 미세한 차이가 존재한다. 이를 고려하여, 각 온도 포인트를 ±0.1°C의 오차 범위 내에서 동일한 온도 조건으로 간주하고 해당 범위를 만족하는 데이터만을 선별하였다. Table 4는 해당 조건을 만족하는 선별된 개별 운전 데이터 포인트의 개수를 나타낸다.

2.5 압축기 작동점 보정

2.5.1 외기조건에 따른 작동점 보정

Fig. 2와 같이 성능맵은 무차원 회전 속도에 따라 여러 개의 곡선으로 구성되어 있으며 각 곡선은 식(6)에 따라 동일한 회전속도를 유지하는 압축기 작동점을 기반으로 구성된다. 이때 압축기 작동점은 외기조건, 시스템 구성, 운전 방식에

의해 결정된다. 따라서, 다양한 외기조건을 반영하는 운전 데이터에 의한 작동점은 Fig. 4와 같은 분포를 가진다. 외기 온도는 공기의 밀도와 유량에 영향을 주며, 본 연구에서는 2.4.3절에 따라 분류 및 선별된 온도 범위 내의 데이터를 사용하여 외기온의 영향을 최소화하였다. 또한, 상대 습도는 공기의 물성치 및 비열 등에 영향을 끼쳐 압축기 성능에 영향을 미친다. 따라서, 상대습도에 따른 영향을 제거하기 위해, 무차원 유량에 따른 보정 계수(Correction coefficient, CC)를 선형 회귀 분석 방법을 통해 계산하였다. 이를 통해 동일한 외기온도에서 다양한 상대습도 조건을 ISO 조건으로 보정하였고, 해당 보정을 수행하기 위한 수식은 식(11)에 도시하였다. 이 보정 과정은 Fig. 4에 도시하였다.

$$CC_{RH} = \frac{n \sum ((RH)(NCF)) - (\sum (RH) \sum (NCF))}{n \sum (RH^2) - (\sum (RH))^2} \quad (11)$$

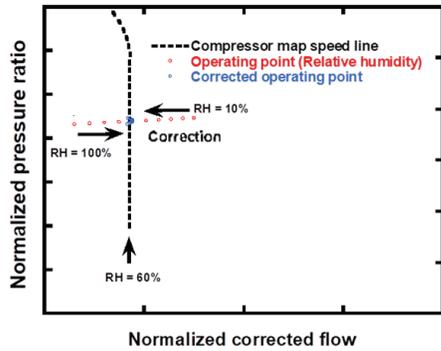


Fig. 4 Relative humidity correction of compressor operating points

### 2.5.2 기타 요인에 따른 작동점 보정

운전 데이터에는 데이터만으로는 분석이 제한되는 다양한 요인들이 포함되어 있으며, 이로 인해 압축기 작동점의 분포가 형성될 수 있다. 이러한 요인으로는 성능 저하와 측정 오류 등이 있으며, 이는 주로 환경적 요인이나 센서의 정확도 부족으로 인해 발생한다. 본 연구에서는 이를 기타 요인으로 간주하여 추가적인 작동점 보정을 수행하였다. 이 보정 과정에서는 평균 제공근 오차를 최소화하고 데이터의 밀집도를 고려하여 신뢰성 높은 데이터를 선별함으로써 무차원 유량을 결정하였으며, 이는 식(12)를 기반으로 결정된다.

$$CC_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} (NCF - \widehat{NCF})^2} \quad (12)$$

## 3. 결과 및 논의

### 3.1 GPA 해석 검증 및 탈설계 해석 결과 비교

실제 운전 데이터를 활용하여 성능맵을 생성하기 전에, 본 절에서는 Fig. 1의 Step 1에 따라 GPA 해석의 유효성을 검증하였다. 이를 위해 상용 소프트웨어인 GateCycle 6.1.2를 활용하여 탈설계 해석을 수행하였으며, 소프트웨어에 내장된 성능맵을 사용하여 다양한 운전 조건에서의 가상 운전 데이터를 생성하였다. 약 720개의 운전 조건을 고려하였으며, 생성된 가상 데이터 세트는 공기 유량을 제외한 운전 조건 변수들로 구성된다. 생성된 가상 데이터를 활용해 GPA 해석을 수행하고, GPA 해석 결과와 탈설계 해석 결과를 비교 분석하였으며, 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 도시하였다.

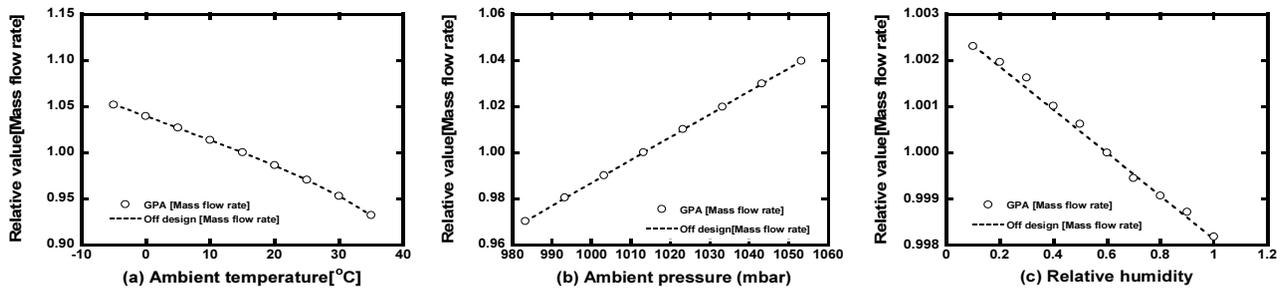


Fig. 5 Comparison of off design and the GPA results based on (a) ambient temperature, (b) ambient pressure, (c) relative humidity

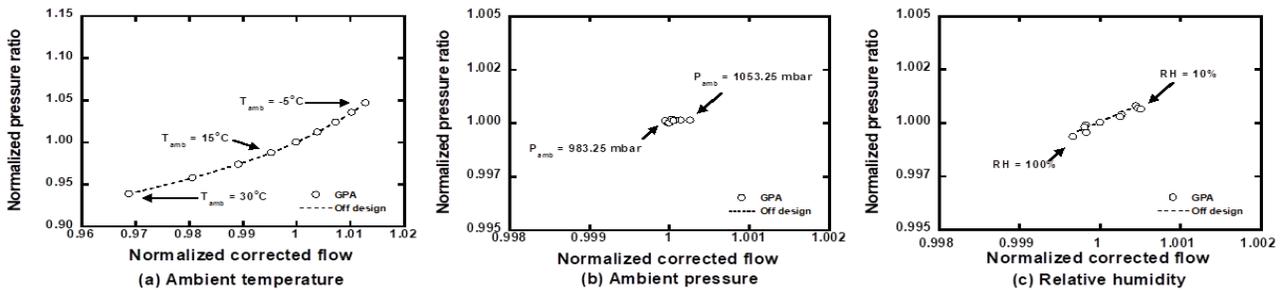


Fig. 6 Distribution of operating point by (a) ambient temperature, (b) ambient pressure, (c) relative humidity

외기 온도의 변화에 따른 공기 유량의 변화는 Fig. 5 (a)에 나타나 있으며, 15°C를 기준으로 외기 온도가 상승하면 공기 밀도가 감소하여 공기 유량이 6.8% 감소하였다. 반대로 외기 온도가 15°C 이하로 하락하면 공기 밀도가 증가하여 공기 유량이 5.17% 증가하였다. 무차원 유량과 압력비의 변화는 각각 Fig. 6 (a)에 따라 나타나며, 외기 온도가 상승할 경우 무차원 유량이 3.1% 감소하고, 압력비는 6.1% 감소하였다. 반대로 외기 온도가 하락할 경우, 무차원 유량은 1.2% 증가하고, 압력비는 4.6% 증가하였다. 이를 통해 외기 온도 변화가 압축기와 터빈의 매칭에 직접적인 영향을 미쳐 가스터빈의 작동 특성과 성능 파라미터에 변화가 발생함을 확인하였다.

외기압력의 변화는 Fig. 5 (b)에서 공기 유량에 3~3.9%의 변화를 유발하였으나, 무차원 유량과 압력비는 Fig. 6 (b)에 따라 0.01% 미만의 차이가 나타났다. 이 결과는 외기압력의 변화가 가스터빈 압축기와 터빈의 압력비 및 팽창비에 거의 영향을 미치지 않아, 공기 유량 변화를 통해 터빈 성능에 간접적인 영향만 나타나는 것을 확인하였다. 상대습도의 변화는 Fig. 5 (c)에서 공기 유량에 0.2%의 변화만 발생하였지만, 무차원 유량과 압력비는 Fig. 6 (c)에 나타나듯이 각각 0.04%에서 0.08%의 변화가 발생하였다. 이는 상대습도 변화가 공기 중 수분 함량 변화를 통해 터빈 입구 온도에 영향을 끼치며, 압축기와 터빈의 작동점에 직접적인 변화를 일으켰다. 이를 통해 외기 온도 변화에 비해 상대적으로 적지만 외기압력보다 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

GPA 해석을 통해 외기 조건 변화에 따른 가스터빈 성능을 분석하고 예측하였으며, 탈설계 해석 결과와의 평균 오차가 0.03% 이내로 나타났다. 이를 통해 GPA 해석이 가스터빈 성능 평가와 파라미터 도출에 있어 높은 정확도를 제공하는 방법임이 검증하였다.

### 3.2 운전 데이터를 활용한 GPA 해석 결과

가스터빈 압축기 성능맵을 생성하기 전에, GPA 해석을

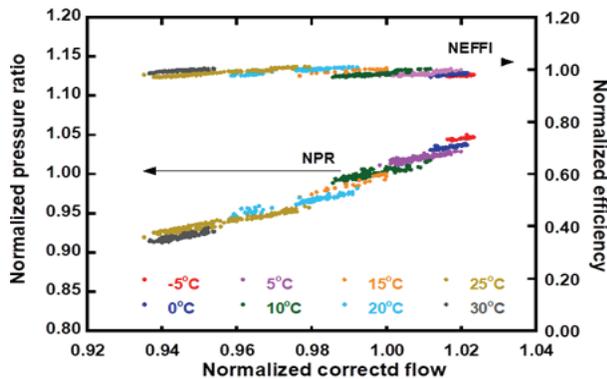


Fig. 7 Result of GPA simulation distribution by operational data

수행하고 이를 바탕으로 작동점을 분석하였다. 운전 데이터는 2.3절의 전처리 과정을 통해 선별된 856개의 운전 데이터를 사용하였으며, 외기 온도에 따라 작동점을 분류하여 Fig. 7에 도시하였다. 외기 온도가 감소할수록 공기 밀도가 증가하여 무차원 유량과 압력비가 상승하였으며, 반대로 외기 온도가 상승하면 이 값들이 감소하였다. 이러한 결과는 Fig. 6(a) 경향과 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 상대습도가 외기 온도 -5 °C와 30 °C에서 무차원 유량에 미치는 영향을 나타낸다. -5 °C에서는 상대습도의 변화가 무차원 유량에 거의 영향을 주지 않는 반면, 30 °C에서는 상대습도가 증가함에 따라 무차원 유량 변화량이 증가하였다. 이는 상대습도가 증가할 때, 고온에서 포화증기압이 더 크게 상승하고, 이로 인해 공기 중 수증기 비율이 증가하면서 공기의 밀도와 비열이 변화하여 터빈 입구의 무차원 유량에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 결과적으로, 상대습도 변화는 고온 조건에서 성능 변동에 더 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

추가적으로, 동일한 외기 온도 조건에서 데이터 수집 시기와 기간에 따른 GPA 해석 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 이 결과를 통해 특정 외기 온도에서 데이터 수집 시기나 기간에 따라 무차원 유량과 압력비가 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 가스터빈의 장시간 작동으로 인해 압축기 오염이 축적되면서 나타나는 성능 저하가 발생하였으며, 이로 인해 압축기의 공기 유량과 압력비가 감소하였다. 결과적으로 시간이 지남에 따라, 작동점이 성능맵에서 좌하단으로 이동하였다. 또한, 일부 시기에는 수 세정 작업을 통해 오염물이 제거되면서 성능이 일부 회복되었으며, 이에 따라 작동점이 다시 상승하는 경향이 나타나는 것을 확인하였다.

### 3.3 작동점 보정 및 성능맵 생성 결과

본 절에서는 2.5절에서 언급한 작동점 보정 과정의 결과에 대한 분석을 수행하였다. 상대습도에 따른 영향을 보정한 결과, -5 °C에서 무차원 유량은 약 2.09%, 0 °C에서는

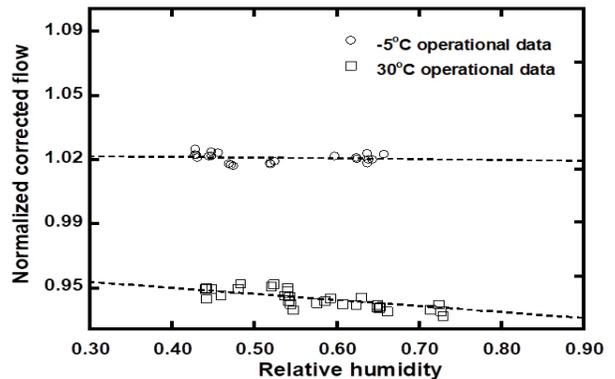


Fig. 8 Normalized corrected flow distribution by relative humidity

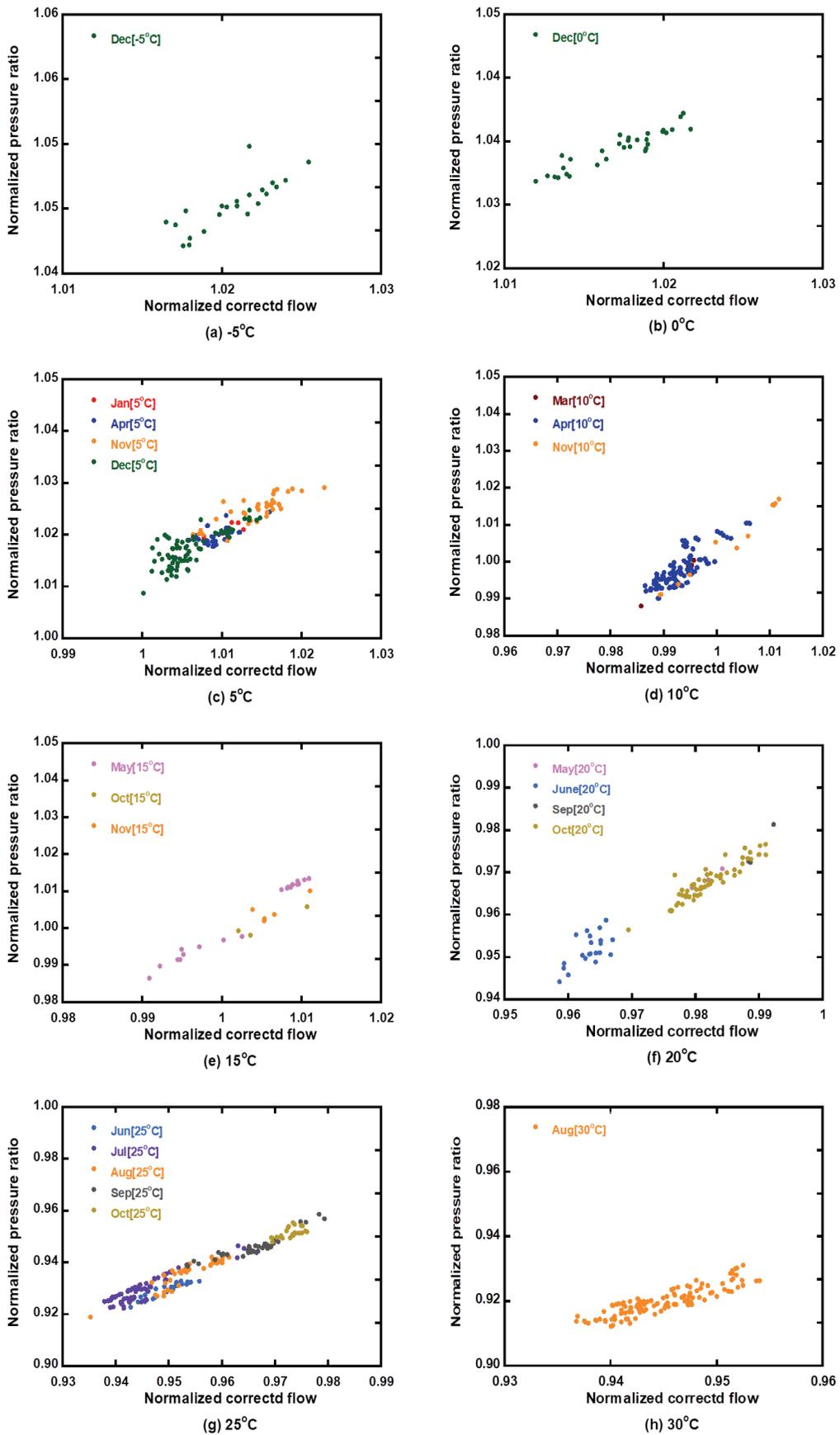


Fig. 9 Operating point distribution by month and measured temperature  
 (a)  $-5^{\circ}\text{C}$ , (b)  $0^{\circ}\text{C}$ , (c)  $5^{\circ}\text{C}$ , (d)  $10^{\circ}\text{C}$ , (e)  $15^{\circ}\text{C}$ , (f)  $20^{\circ}\text{C}$ , (g)  $25^{\circ}\text{C}$ , (h)  $30^{\circ}\text{C}$

1.39%의 무차원 유량이 감소하였다. 그러나, 5 °C에서 무차원 유량의 감소율은 23.04%로 급격하게 증가했으며, 10 °C에서는 감소폭이 3.67%로 상대적으로 적었다. 15 °C에서 15.20%, 20 °C에서는 6.88% 감소가 관찰되었으며, 25 °C에서 29.80%로 가장 큰 감소율이 나타났으며, 30 °C에서 11.60% 감소하였다. 이러한 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 이를 통해, 저온에서 상대습도의 영향은 미미했지만, 고온으로 갈수록 그 영향이 크게 나타나는 것을 확인하였다.

또한, 25 °C에서 상대습도의 영향이 30 °C보다 더 크게 나타났으며, 이는 선별 데이터의 수집 기간의 차이에 따른 결과로 확인되었다. 동일한 온도 조건에서 데이터가 특정 기간에 편향된 경우, 보정된 데이터의 신뢰도에 차이가 생기며, 이는 보정 결과에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 데이터 수집이 충분히 이루어져야 하며, 월별 데이터간 개수의 차이로 인해 성능 결과가 왜곡되지 않도록 해야 한다. 이는 정확한 성능 보정을 위해 충분한 데이터 확보가 필수적임을 의미한다.

기타 요인에 따른 보정은 2.5.2절에서 언급한 바와 같이, 센서 오류 및 환경적 변수 등을 고려하여 수행하였다. 이러한

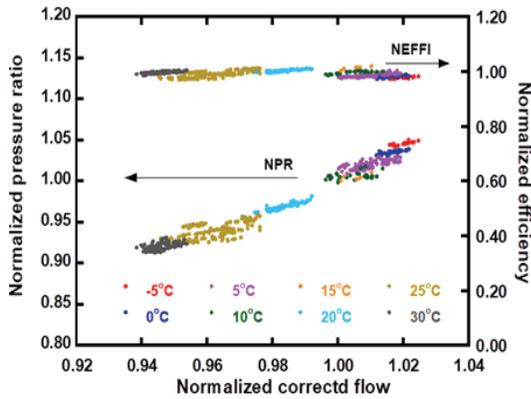


Fig. 10 Result of operating point correction by relative humidity

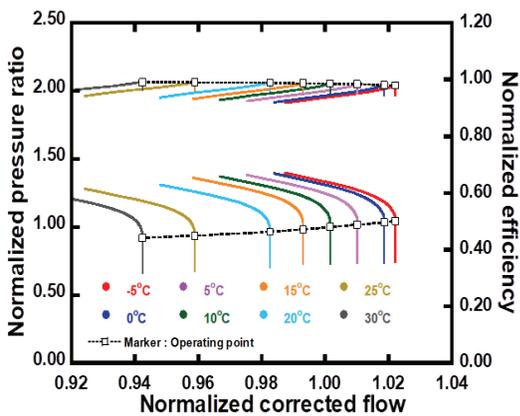


Fig. 11 Compressor performance map generation results for each operating point

보정 결과를 바탕으로 외기 온도별 작동점을 결정하였으며 이를 바탕으로, 15 °C를 기준으로 성능맵을 피팅한 후, 이 성능맵을 기반으로 다양한 외기 온도에 대한 스케일링 작업을 수행하였다. 스케일링 팩터는 보정된 작동점 데이터를 바탕으로 결정되었으며, 최종 성능맵을 Fig. 11에 도시하였다.

### 3.4 생성 성능맵을 활용한 탈설계 해석 결과

본 절에서는 생성된 성능맵을 바탕으로 탈설계 해석을 수행하고, 운전 데이터와 비교하여 성능맵의 정확성 및 적용 가능성을 평가하였다. 해석 결과는 Fig. 12에 도시하였으며, 각 결과는 출력, 터빈 출구 온도, 그리고 압축기 출구 압력에 대한 결과를 나타내었다.

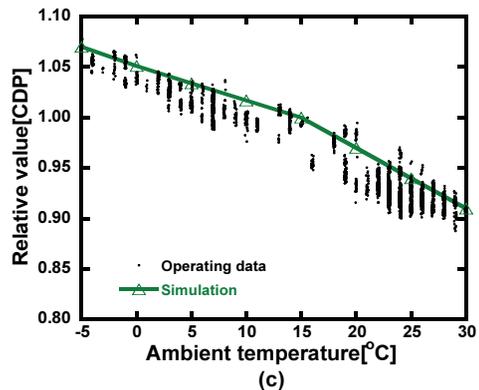
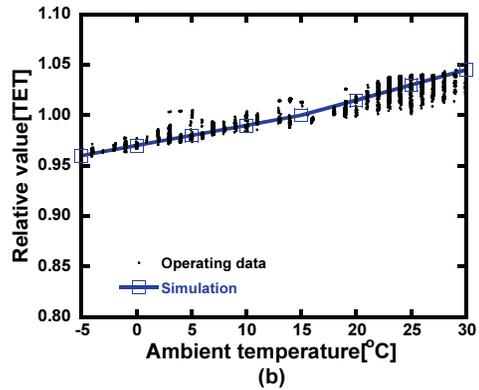
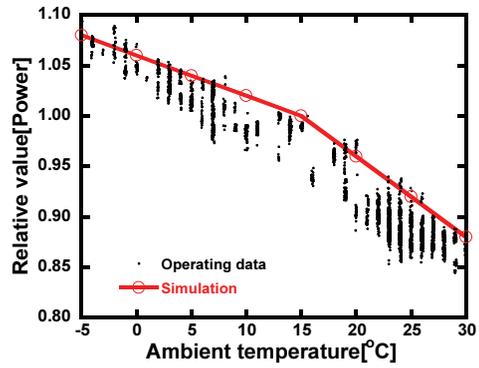


Fig. 12 Result of off-design analysis using generated map (a) Power, (b) TET, (c) CDP

탈설계 해석은 수집된 운전 데이터와 동일한 외기 온도 조건에서 수행되었으며, 15 °C를 기준으로 설정한 성능 값과 비교하였다. 비교를 위한 기준 출력, 터빈 출구 온도, 압축기 출구 압력은 운전 데이터를 참고하여 각각 171.69 MW, 615.69 °C, 1556.81 kPa로 설정하였다. Fig. 12에 따라, 외기 온도가 30°C로 상승할 경우 공기 밀도 감소와 압축기 유입 공기량 감소로 인해 출력은 11.69% 감소하여 151.6 MW로 나타났으며, 터빈 출구 온도는 4.48% 증가한 643.27 °C로 계산되었다. 압축기 출구 압력은 8.98% 감소하여 1417.0 kPa로 측정되었다. 반대로, 외기 온도가 -5°C로 떨어질 경우 공기 밀도 증가로 인한 압력비 및 팽창비의 상승에 따른 결과로 출력은 8.12% 증가하여 185.63 MW로 나타났고, 터빈 출구 온도는 4.36% 감소하여 589.96 °C로 확인되었다. 압축기 출구 압력은 6.58% 증가한 1658.79 kPa로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로, 탈설계 해석 결과가 운전 데이터와 일치하는 경향을 보임으로써, 생성된 성능맵이 실제 운전 조건을 반영하여 성능 해석에 유효함을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구는 실제 운전 데이터를 바탕으로 가스터빈 압축기의 성능맵을 생성하고 이를 검증하는 방법을 제시하였다. 연구는 세 가지 주요 목표로 나누어졌으며, 각 목표에 대한 결과는 다음과 같다.

첫째, 상용 소프트웨어에서 제공된 성능맵과 비교하여 GPA 해석의 정확성을 평가하였다. 다양한 운전 조건에서 데이터를 분석한 결과, GPA 해석은 평균 오차율 0.03%p 이내로 나타나, GPA 해석이 실제 가스터빈 압축기의 성능 파라미터 계산에 있어 적용할 수 있음을 확인하였다.

둘째, 상대습도 변화가 성능에 미치는 영향을 분석한 결과, 고온에서 상대습도 변화가 더 큰 성능 변화를 유발하는 것으로 나타났다. 특히, 25°C에서 무차원 유량의 최대 감소율(29.80%)이 관찰되었으며, 이는 상대습도 변화가 성능에 미치는 영향을 반영하여 보정이 필요함을 시사한다. 또한, 성능맵의 신뢰성을 확보하기 위해서는 다양한 외기 조건에서 충분한 데이터 수집이 필수적임을 확인하였다.

셋째, 생성된 성능맵을 사용하여 탈설계 해석을 수행한 결과, 다양한 운전 조건에서 가스터빈 성능 변화를 효과적으로 예측할 수 있음을 확인하였다. 이 성능맵은 운전 데이터와 높은 일치도를 보였으며, 이를 통해 성능맵의 신뢰성이 입증되었다.

결론적으로, 본 연구는 운전 데이터를 바탕으로 한 성능맵 생성이 가스터빈 성능 변화를 신뢰성 있게 예측할 수 있음을 보여주었으며, 이를 통해 성능맵의 정확성과 실용성을 확인하였다. 이러한 데이터 기반의 접근 방식으로 생성된 성능맵은 다양한 운전 조건에서 성능 분석 및 성능 최적화에 활용

될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

이 논문은 한국 중부발전(주)의 지원(제 2022-현장-16호)과 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원 지원(No. 202400449309)을 받아 수행된 연구의 결과임.

#### References

- (1) Suganthi, L., and Anand A. Samuel. "Energy models for demand forecasting—A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2, 2012, pp. 1223–1240.
- (2) Lu, W.-C. "Greenhouse Gas Emissions, Energy Consumption and Economic Growth: A Panel Cointegration Analysis for 16 Asian Countries." *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 14, 2017, Article 1436.
- (3) H. Choo, Y.-G. Kim, and D. Kim, "Power sector carbon reduction review for South Korea in 2030." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 196, 2024, Article 114348.
- (4) B. Wang and M. Gopal, "Climate action brief South Korea," *Asia Society Policy Institute*, 2023.
- (5) M. Y. Worku. "Recent advances in energy storage systems for renewable source grid integration: A comprehensive review." *Sustainability*, vol. 14, 2022, Article 5985.
- (6) Farhat, H., and Salvini, C. "Novel Gas Turbine Challenges to Support the Clean Energy Transition." *Energies*, vol. 15, 2022, Article 5474.
- (7) R. Jones, J. Goldmeier, and B. Monetti. "Addressing gas turbine fuel flexibility." *GE Energy*, no. 4601, 2011, pp. 1–20.
- (8) G. A. Richards, M. M. McMillian, R. S. Gemmen, W. A. Rogers, and S. R. Cully. "Issues for low-emission, fuel-flexible power systems." *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 27, no. 2, 2001, pp. 141–169.
- (9) Burnes, D., and Camou, A. "Impact of Fuel Composition on Gas Turbine Engine Performance." *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 141, no. 10, 2019, Article 101006.
- (10) B. Li, M. J. Gross, and T. P. Schmitt. "Gas Turbine Gas Fuel Composition Performance Correction Using Wobbe Index." *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 133, no. 10, 2011, Article 104501.
- (11) M.-C. Chiong et al. "Advancements of combustion technologies in the ammonia-fuelled engines." *Energy Conversion and Management*, vol. 244, 2021, Article 114460.
- (12) W. S. Chai et al. "A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 147, 2021, Article 111254.

- (13) C. D. Kong, J. Y. Ki, and M. C. Kang. "A New Scaling Method for Component Maps of Gas Turbine Using System Identification." GT2002-30150.
- (14) J. P. Veres. "Axial and Centrifugal Compressor Mean Line Flow Analysis Method." NASA/TM-2009-215585, 2009.
- (15) E. Tsoutsanis, Y. G. Li, P. Pilidis, and M. Newby. "Part-Load Performance of Gas Turbines: Part I—A Novel Compressor Map Generation Approach Suitable for Adaptive Simulation." In Proceedings of the ASME 2012 Gas Turbine India Conference, Mumbai, India, 1 December 2012.
- (16) G. T. Mark, A. R. John, R. Robert, and J. P. Veres. "Multi-Fidelity Simulation of a Turbofan Engine With Results Zoomed Into Mini-Maps for a Zero-D Cycle Simulation." NASA TM-2004-213076, 2004.
- (17) GE Energy. GateCycle, version 6.1.2, GE-Energy, Atlanta, GA, 2015.
- (18) J. H. Lee and T. S. Kim. "Novel performance diagnostic logic for industrial gas turbines in consideration of over-firing." Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 32, no. 12, 2018, pp. 5947-5959.
- (19) D. W. Kang and T. S. Kim. "Model-based performance diagnostics of heavy-duty gas turbines using compressor map adaptation." Applied Energy, vol. 212, 2018, pp. 1345-1359.
- (20) J. Li and Y. Ying. "Gas turbine gas path diagnosis under transient operating conditions: A steady state performance model based local optimization approach." Applied Thermal Engineering, vol. 170, 2020, Article 115025.
- (21) J. Kurzke. "About simplifications in gas turbine performance calculations." Turbo Expo: Power for Land, Sea, Air, vol. 47926, 2007, pp. 493-501.
- (22) H. M. Kwon, S. W. Moon, and T. S. Kim. "Performance enhancement of the gas turbine combined cycle by simultaneous reheating, recuperation, and coolant inter-cooling." Energy, vol. 207, 2020, Article 118271.
- (23) L. A. Urban. "Gas Path Analysis Applied to Turbine Engine Condition Monitoring." AIAA/SAE Paper 72-1082, 1972.
- (24) D. W. Kang and T. S. Kim. "Model-based performance diagnostics of heavy-duty gas turbines using compressor map adaptation." Applied Energy, vol. 212, 2018, pp. 1345-1359.
- (25) O. Khustochka, S. Chernysh, S. Yepifanov, M. Ugryumov, and R. Przysowa. "Estimation of performance parameters of turbine engine components using experimental data in parametric uncertainty conditions." MATEC Web of Conferences, vol. 304, 2019, Article 03003.
- (26) Korea Meteorological Administration. Daily minimum, maximum, and average meteorological data for Incheon, 2024.
- (27) D. L. Simon and J. S. Litt. "A Data Filter for Identifying Steady-State Operating Points in Engine Flight Data for Condition Monitoring Applications." NASA TM-2010-216359, GT2010-22818, 2010.
- (28) A. Filippone, B. Parkes, N. Bojdo, and T. Kelly. "Prediction of aircraft engine emissions using ADS-B flight data." The Aeronautical Journal, vol. 125, no. 1288, 2021, pp. 988-1012.
- (29) S. Dai, X. Zhang, and M. Luo. "A Novel Data-Driven Approach for Predicting the Performance Degradation of a Gas Turbine." Energies, vol. 17, 2024, Article 781.
- (30) J. H. Kim and T. S. Kim. "A new approach to generate turbine map data in the sub-idle operation regime of gas turbines." Energy, vol. 173, 2019, pp. 772-784.