

제어곡선에 따라 운전되는 발전용 가스터빈의 성능민감도 분석

박영광* · 김동섭**†

Performance Sensitivity Analysis of a Power Generation Gas Turbine Subject to a Control Curve

Young Kwang Park*, Tong Seop Kim**†

Key Words : Gas turbine(가스터빈), Full-load(전부하), Part-load(부분부하), Control curve(제어곡선), Performance map(성능 맵), Performance degradation(성능 저하), Sensitivity analysis(민감도 분석)

ABSTRACT

This study examines the impact of various operational factors on the performance of gas turbines. Unlike previous studies that compared performance based on the same turbine inlet temperature, this study compares performance based on the temperature control curve. Additionally, since different control strategies are applied to full-load and part-load operations, their respective effects on performance were examined. As a result, both full-load and part-load operations showed that compressor fouling and turbine erosion significantly impacted performance. In full-load, a 2% decrease in the dimensionless mass flow rate due to compressor fouling resulted in reductions of 4.93 MW (2.7%) in overall power and 0.36%p in overall efficiency. Furthermore, when turbine efficiency decreased by 1% due to turbine erosion, TIT dropped by 10.07 °C, resulting in reductions of 6.67 MW (3.6%) in overall power and 1.06%p in overall efficiency. Meanwhile, in part-load, turbine erosion-induced efficiency degradation led to significant changes in TIT. The overall power exhibited different variations depending on the extent of turbine efficiency degradation. Additionally, overall efficiency decreased as turbine efficiency declined, with a 1% reduction in turbine efficiency leading to an overall efficiency decrease of 0.68%p at 75% load and 0.61%p at 50% load.

1. 서 론

발전용 가스터빈은 고온 및 고압의 유체를 이용하여 전력을 생산하는 장치이다. 터빈입구온도(Turbine inlet temperature, TIT)가 높을수록 가스터빈의 성능(출력, 효율 등)은 향상된다. 그러나 너무 높은 TIT는 블레이드 수명을 감소시키기 때문에, 전부하(full-load)에서 TIT가 일정하게 운전되도록 설계한다. 이러한 이유로, 가스터빈에 관한 다양한 연구에서는 기준 성능(설계 성능)과 변화된 성능을 비교할 때 동일한 TIT를 기준으로 비교해왔다.

Inlet air cooling system이 가스터빈 성능에 미치는 영향을 확인하거나⁽¹⁾, 특정 가스터빈을 Digital twin으로 구성하기 위한 연구⁽²⁾, 그리고 수소 혼소 가스터빈 특성을 분석

한 연구⁽³⁾, 잉여 전력으로 생산한 수소를 가스터빈의 연료로 사용하는 연구⁽⁴⁾ 등 다양한 연구들에서 동일한 TIT를 기준으로 성능 변화를 분석하였다.

TIT가 성능에 미치는 영향을 고려할 때, 동일한 TIT를 기준으로 성능을 비교하는 것이 합리적이다. 그러나 운전 중인 가스터빈에서는 TIT를 직접 측정할 수 없다. 또한, 특정 운전 조건에서는 TIT의 상한이 조정되거나 부하 변동에 따라 TIT가 변화하기도 한다. 이는 측정된 성능의 변화를 일으킨 원인을 분석하기 어렵게 만든다.

많은 발전소 엔지니어들은 효율적인 유지보수를 위해 성능 진단 기술을 필요로 한다. 성능 진단은 측정 데이터의 변화가 어떤 물리적 결함으로 인해 발생했는지를 분석하는 기술이다. 측정 데이터의 변화가 성능 저하로 인한 것인지 판

* 인하대학교 대학원(Graduate School, Inha University)

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

† 교신저자, E-mail : kts@inha.ac.kr

단하려면, 먼저 다양한 운전 요인이 성능에 미치는 영향을 확인해야 한다. 이때 실제 TIT는 측정되지 않으므로, 기준 성능과 변화된 성능을 비교하기 위한 새로운 기준이 필요하다.

본 연구의 목표는 다음과 같다. 첫 번째, 다양한 운전 요인이 가스터빈 성능에 미치는 개별적인 영향을 확인하는 것이다. 두 번째, 가스터빈 모델링에 의존하지 않고, 측정 성능의 변화로부터 성능 저하 여부를 정성적으로 판단할 수 있는 방법을 제안하는 것이다.

본 연구에서는 기준 성능과 변화된 성능을 비교할 때, 동일한 TIT가 아닌, 동일한 온도제어곡선(Temperature Control Curve, TCC) 상에서 비교할 것을 제안하였다. TCC는 압축기 출구 압력(Compressor discharge pressure, CDP)과 터빈 출구 온도(Turbine exhaust temperature, TET)를 이용하여 TIT를 간접적으로 제어하는 방식으로^(5,6), CDP 및 TET 데이터를 기반으로 도출될 수 있다. 본 연구에서는 복합발전용 가스터빈의 운전 방식을 고려하여 전부하 및 부분부하 조건에서 TCC를 적용하였다. 제안한 비교 방법이 성능 저하 여부를 판단할 때 유효한지 확인하기 위하여, 가상의 전부하 및 부분부하 운전을 모사하였다. 민감도 분석을 통해 성능 저하 요인을 포함한 각 운전 요인이 측정 성능에 미치는 영향을 비교하였다. 이를 바탕으로, 성능 저하 여부를 정성적으로 판단하는 데 유효한 측정 파라미터들을 확인하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 설계점 모델링

본 연구의 대상 가스터빈은 F급 가스터빈이며, Fig. 1과 같이 압축기, 연소기, 터빈, 축, 입출구의 덕트 등으로 가스터빈 모델을 구성하였다. 가스터빈 해석 프로그램은 MathWorks사의 MATLAB 기반으로 만들어졌다. 이전 연구들⁽⁷⁻⁹⁾을 통하여, 해당 프로그램의 각 구성기에 적용되는 질량유량 및 에너지 보존방식, 열역학적 물성치 등에 대한 계산 정확도는 이미 검증되었다.

Table 1에는 대상 가스터빈의 주요 설계 파라미터들을 나타냈다. 가스터빈 설계점은 F급 가스터빈을 분석한 문헌들^(9,10)과 제작사에서 작성한 데이터 시트⁽¹¹⁾를 참고하여 모사하였다. 가스터빈 설계점은 전부하 운전에서 공기가 ISO(15°C, 1 atm, 60% RH) 조건일 때의 성능을 의미한다. 그 성능은 base load performance 혹은 rated performance로 표현된다.

설계점에서 연료는 천연가스를 사용한다고 가정하였다. 천연가스의 조성은 91.33 %의 메탄, 5.36 %의 에탄, 2.14% 프로판, 0.95 %의 부탄(n-Butane), 그리고 0.22 %의 질소로 구성하였다⁽⁸⁾. 해당 천연가스 연료의 저위발열량(Lower heating value, LHV)은 49,299 kJ/kg이다. 압축기 효율, 터빈 효율, 그리고 TIT는 문헌의 값을 참고하

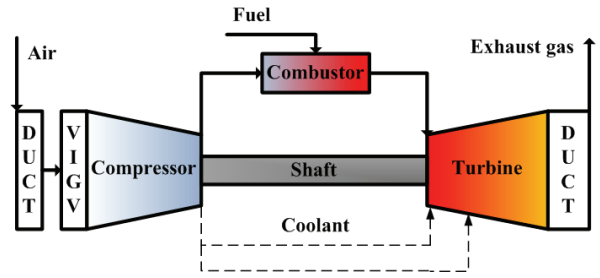


Fig. 1 Gas turbine configuration

Table 1 Design specifications of the gas turbine⁽⁹⁻¹¹⁾

Parameters	Reference			Simulation
	(9)	(10)	(11)	
Ambient temperature [°C]	15			15
Ambient pressure [kPa]	101.325			101.325
Ambient relative humidity(RH) [%]	60			60
Inlet air flow rate [kg/s]	440	435	436	440.45
Compressor pressure ratio [-]	>15.5	16	16.1	15.7
Compressor isentropic efficiency [%]	<90	85.95	-	89.76
Fuel flow rate [kg/s]	>9.8	9.52	10	9.861
Combustor efficiency [%]	99.6	-	-	99.6
Turbine inlet temperature [°C]	1427	1410	-	1427
Turbine exhaust temperature [°C]	>610	601.1	605.6	616.83
Turbine isentropic efficiency [%]	91.68	91.5	-	91.18
Net efficiency [%]	>37	36.5	36.5	37.65
Net power output [MW]	>180	171.7	183	183.05

였다^(9,10). 전체 출력과 전체 효율은 식 (1), (2)로부터 계산되며, 설계 값은 각각 183.05 MW, 37.65 %였다.

$$\dot{W}_{GT} = (\dot{W}_{turb} - \dot{W}_{comp}) \eta_{mech} \quad (1)$$

$$\eta_{GT} = \frac{\dot{W}_{GT}}{\dot{m}_{fuel} \cdot LHV} \quad (2)$$

2.2 탈설계 모델링

가스터빈은 다양한 운전 요인에 의하여 출력, 효율 등이 달라진다. 주요 요인으로는 외기조건의 변화, 연료 조성에 따른 LHV의 변화, 그리고 성능 저하 등이 있다. 성능 저하는 대표적으로 압축기 파울링(Fouling)과 터빈 침식(Erosion)이 있다⁽¹²⁾. 파울링은 대기 중에 포함된 2~10um 정도의 입자들이 구성기 입구에 쌓여서 유동면적을 감소시키는 현상이다. 침식은 5~10um 또는 더 큰 입자들이 물리적으로 충돌하여 발생하는 현상이며, 금속 표면이 침식되면 유동 면적은 증가한다. 또한, 부하 조건에 따라라도 가스터빈의 제어 방식이 달라지고, 시스템 출력과 효율이 크게 변한다.

전부하 운전에서는 외기온도가 변하더라도 TIT는 상한 값을 넘지 않도록 제한해야 한다. 전부하 운전에서는 Fig. 2와 같은 TCC를 사용한다^(5,6). 본 연구에서는 실제 가스터빈에서 적용되는 일반적인 TCC를 사용하였다. TCC는 TIT가 설계값을 초과하지 않도록 CDP에 따른 TET 값을 기준으로 설정하였다. 해당 곡선은 전부하 운전에서 TIT의 상한을 설정하기 위하여 사용된다. TET가 상한 값에 도달하면, 연료 유량은 더 이상 늘어나지 않도록 제어된다.

부분부하 운전에서는 연료유량을 조절하여 요구되는 load에 맞는 출력을 만들어 낸다. 그러나 단순히 연료유량만으로 출력을 조절하면, 낮은 부하에서 TET가 크게 감소한다. 터빈출구에서 배출되는 가스의 열을 최대한 회수하기 위해서는 TIT를 높게 유지해야 한다. 따라서, CDP가 낮아짐에 따라 TET를 더 높이도록 공기유량을 조절한다. 이때 Fig. 3과 같은 TCC가 사용된다. 해당 곡선은 동일한 F급 가스터빈을 연구한 문헌⁽⁷⁾으로부터 참고하여 대상 가스터빈의 설계 성능에 맞추어 수정하였다. 부분부하 운전에서는 특정 CDP에 해당하는 TET를 맞추기 위하여 공기유량이 조절된다. 공기유량은 압축기 입구에 설치된 가변입구안내깃(Inlet guide vane, IGV)의 각도를 변화시켜 조절된다.

가스터빈의 탈설계 운전을 모사하기 위하여, 각 구성기기에선 설계 상태의 입출구 변화 비율을 활용하여 출구 조건을 계산하는 방정식을 사용하였다. 입출구 덕트의 압력손실은 식 (3)을 통하여 계산하였다.

$$\frac{\Delta P/P_{in}}{(\Delta P/P_{in})_d} = \frac{(\dot{m}\sqrt{T_{in}}/P_{in})^2}{(\dot{m}\sqrt{T_{in}}/P_{in})_d^2} \quad (3)$$

주요 구성기기인 압축기와 터빈에서는 Fig. 4, Fig. 5와 같이 무차원화된 파라미터로 이루어진 성능 맵⁽¹³⁾을 사용하였다. 식 (4), (5), (6), (7)에는 성능 맵을 구성하는 무차원화된 회전속도(Normalized corrected speed, NCS), 유량(Normalized corrected flow, NCF), 압력비(Normalized pressure ratio, NPR) 및 효율(Normalized efficiency, NEF)을 나타냈다. 달라진 운전 조건에서 가스터빈의 작동점은 압축기와 터빈 성능 맵의 매칭 과정으로부터 결정하였다.

$$NCF = (\dot{m}\sqrt{RT_{in}}/P_{in})/(\dot{m}\sqrt{RT_{in}}/P_{in})_d \quad (4)$$

$$NPR = \frac{PR-1}{PR_d-1} \quad (5)$$

$$NEF = \frac{\eta_s}{\eta_{s,d}} \quad (6)$$

$$NCS = \frac{(\omega/\sqrt{RT_{in}})}{(\omega/\sqrt{RT_{in}})_d} \quad (7)$$

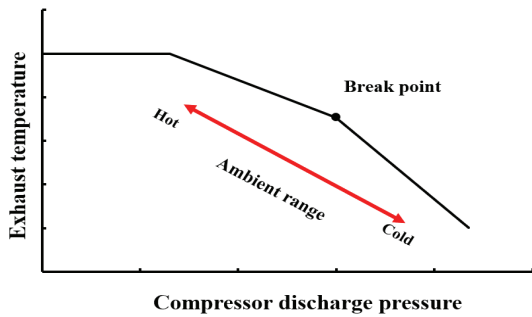


Fig. 2 Temperature control curve for base load operation

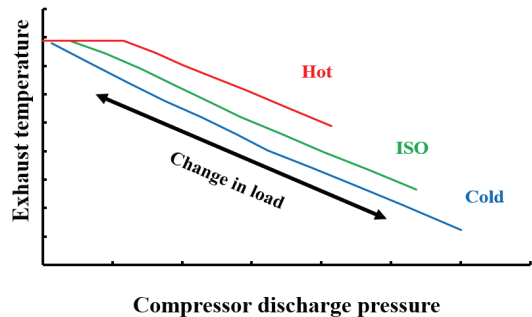


Fig. 3 Temperature control curve for part-load operation

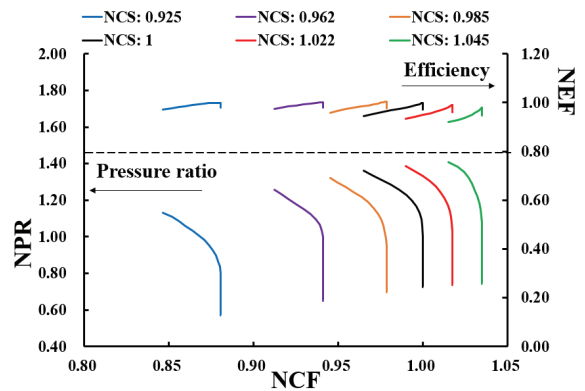


Fig. 4 Compressor performance map⁽¹³⁾

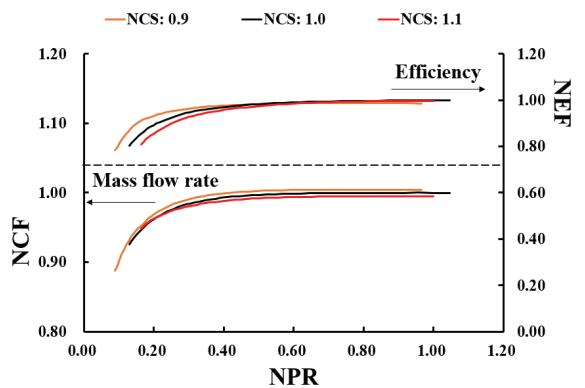


Fig. 5 Turbine performance map⁽¹³⁾

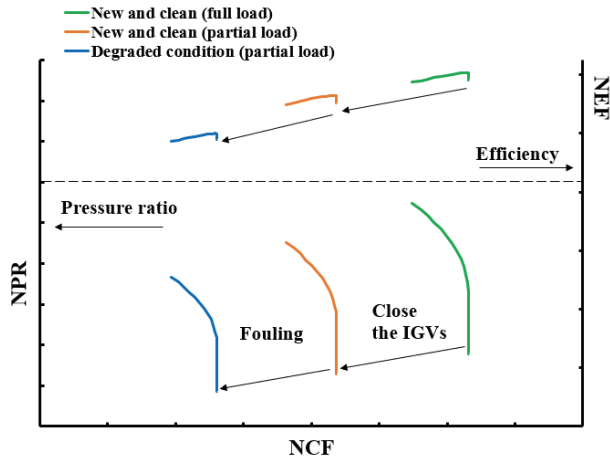


Fig. 6 Example of change in compressor performance map

압축기 성능 맵에는 IGV 개도나 성능저하가 발생함에 따라 공기유량, 압력비, 그리고 효율이 달라지는 현상을 모사하기 위하여, 식 (8), (9), 그리고, (10)과 같이 Map scaling^(9,14)을 적용하였다. 여기서, SF_{IGV} 는 IGV에 대한 scaling factor를 의미하며, IGV가 완전히 열리면 그 값은 1이다. SF_{deg} 는 성능 저하에 따른 scaling factor를 의미한다. 압축기 작동점은 축소된 성능 맵으로부터 결정된다. 터빈 성능 맵에는 성능저하에 따른 map scaling만 적용되었다.

Fig. 6은 IGV 조절 및 파울링에 따른 압축기 성능 맵의 변화 예시를 보여준다. 식 (8), (9), 그리고, (10)에서 성능저하에 따른 scaling factor는 입력되는 값이며, 특정 가스터빈 운전 조건에 따라 $SF_{IGV, mass flow}$ 는 결정되는 값이다. 이때 IGV 각도 변화에 따른 압력비, 효율에 대한 scaling factor는 $SF_{IGV, mass flow}$ 에 따라 결정되며, 그 비율은 IGV 각도에 따라 다르지만 대체로 1:1:0.3의 비율로 설정하였다^(8,15).

$$NCF_{scaled} = NCF_{original} \cdot SF_{IGV, mass flow} \cdot SF_{deg, mass flow} \quad (8)$$

$$NPR_{scaled} = NPR_{original} \cdot SF_{IGV, PR} \cdot SF_{deg, PR} \quad (9)$$

$$NEF_{scaled} = NEF_{original} \cdot SF_{IGV, efficiency} \cdot SF_{deg, efficiency} \quad (10)$$

2.3 민감도 분석 방법

전부하 운전과 부분부하 운전에서 다양한 운전 요인에 따른 성능 변화를 분석할 때, 기준 성능을 명확하게 설정해야 한다. 각 부하에서의 기준 성능은 연료의 LHV가 설계값과 동일하며, 공기 조건은 ISO 기준을 따르며, 성능저하가 발생하지 않은 new and clean 상태의 운전점으로 정의하였다. 100%, 75%, 그리고 50% 부하에서의 기준 성능을 Table 2에

제시하였다. 연료유량만 조절하는 전부하 운전과 달리, 부분부하 운전에서는 어떤 파라미터를 비교 기준으로 정하는지에 따라 다양한 비교가 가능하다. 본 연구에서는 동일한 압축기 출구 압력을 가지는 운전 조건에서 성능을 비교함으로써 출력, 연료유량, TIT 등의 파라미터 변화를 확인하고자 하였다. 특정 운전 요인으로 인하여 성능이 변화할 경우, 동일한 TCC 상에서 변화된 운전점을 각 부하에서의 기준 성능과 비교하여 주요 파라미터들의 변화량을 분석하였다.

본 연구에서 고려한 다양한 운전 요인들은 Table 3에 제시하였다. 입출구 덕트의 압력 손실 증가, 압축기 파울링 및 터빈 침식 발생, LHV 또는 상대습도(relative humidity, RH) 변화 등의 상황에서 성능 민감도를 분석하였다. 운전 요인은 Fig. 7과 같은 외부 요인과 내부 요인으로 구분된다. 이때 외부요인으로는 LHV와 상대습도 변화만을 고려했고,

Table 2 Reference GT performance by load

Parameters	100% Load	75% Load	50% Load
Inlet air flow rate [kg/s]	440.45	359.86	281.98
Compressor discharge temperature [°C]	387.92	360.31	334.70
Compressor discharge pressure [kPa]	1579.54	1274.50	979.60
Compressor isentropic efficiency [%]	89.76	86.54	80.52
Fuel flow rate [kg/s]	9.861	7.975	6.001
Turbine inlet temperature [°C]	1427.00	1395.70	1339.23
Turbine exhaust temperature [°C]	616.83	635.00	650.00
Turbine isentropic efficiency [%]	91.18	90.88	90.20
Net efficiency [%]	37.65	34.90	30.44
Net power output [MW]	183.05	137.22	90.05

Table 3 Representation of performance change factors

Case	Factors	Effected by
Ref.	New and clean GT & reference LHV, RH	-
A	Inlet duct pressure loss	$\Delta P_{loss} = +10\%$
B	Exhaust duct pressure loss	$\Delta P_{loss} = +10\%$
C	Compressor fouling	$\Delta NFC = -2\%$, $\Delta NEF = -1\%$
D	Turbine erosion	$\Delta NFC = +2\%$
E	Turbine erosion (severe)	$\Delta NFC = +2\%$, $\Delta NEF = -1\%$
F	LHV decrease	$\Delta LHV = -1\%$
G	LHV increase	$\Delta LHV = +1\%$
H	RH decrease	60% → 10%
I	RH increase	60% → 90%

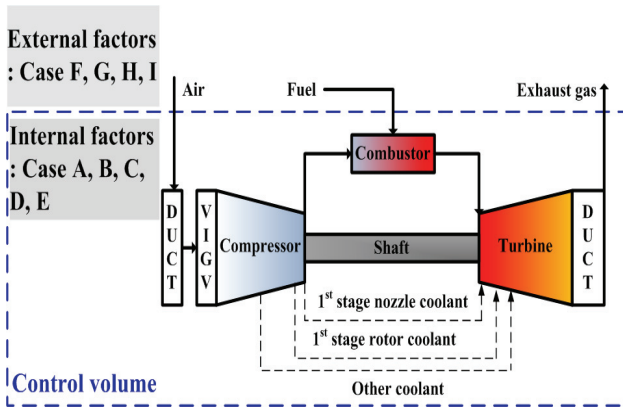


Fig. 7 Classification of operational factors based on gas turbine control volume

외기 온도 및 압력은 측정 데이터에서 동일한 조건을 쉽게 선별할 수 있으므로 분석 대상에서 제외하였다. 각 운전 요인이 미치는 정량적인 영향은 실제 가스터빈에서 발생할 수 있는 범위를 고려하여 설정하였다. 특히 압축기 파울링 및 터빈 침식과 같은 성능 저하 요인을 다른 요인과 구분할 수 있는지 확인하기 위해 그 영향을 최소한으로 설정한 반면, 나머지 요인들에 의한 영향은 최대한으로 설정하였다.

입출구 덕트의 압력 손실은 측정데이터를 통해 확인할 수 있었으며, 최대 변화 비율인 10%만큼 증가하는 상황을 가정하였다. 압축기 파울링으로 인하여 유동 면적이 감소하면, 압축기 맵의 NCF가 2~10%만큼 감소시키는 것으로 알려져 있다^(16,17). 민감도 분석에서는 압축기 파울링이 미치는 영향을 최소 범위로 가정하였다. 터빈 침식의 영향은 상황에 따라 크게 달라질 수 있으므로, 침식으로 인한 유동 면적 증가 비율은 압축기 파울링으로 인한 유동 면적 감소 비율과 동일하다고 가정하였다. 이때 터빈 효율은 크게 저하되지 않거나⁽¹⁶⁾, 터빈 성능 맵에서 NCF가 증가하는 값의 절반만큼 감소한다고 알려져 있다⁽¹⁷⁾. 터빈 효율 저하가 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 터빈 효율이 저하되지 않는 경우와 저하되는 경우를 모두 고려하였다. 압축기 파울링과 터빈 침식의 효과는 압축기 및 터빈 성능 맵을 스케일링 (scaling)하여 반영하였다. LHV의 변화 정도는 문헌^(9,18)을 참고하여 ±1%로 설정하였고, 상대습도는 10~90%까지 변화한다고 가정하였다.

3. 해석 결과

3.1 전부하 운전의 민감도 분석 결과

Fig. 8은 base load TCC 위에서 다양한 운전 조건에서 운전점이 얼마나 변하는지 보여준다. Base load TCC는 new and clean 상태의 가스터빈이 기준 TIT로 운전되는 조건을

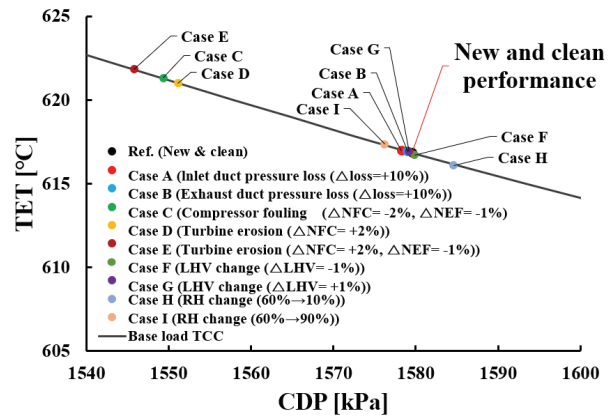


Fig. 8 Change of operating points according to various conditions on the base load TCC

나타내는 선이다. 그러나 실제 운전 환경에서는 운전 요인에 따라 base load TCC 위의 운전점이더라도 TIT는 기준값과 달라질 수 있다. Fig. 8에서 다른 운전 요인들은 작동점에 미치는 영향이 미미하여 곡선 상의 위치가 크게 벗어나지 않지만, 압축기 파울링 또는 터빈 침식과 같은 성능 저하 요인이 발생한 경우에는 작동점이 뚜렷하게 변화하는 경향을 보인다. 이러한 경우 CDP가 크게 감소하고 TET는 증가하여, 작동점이 TCC 곡선 위에서 좌상단 방향으로 크게 이동하게 된다. 따라서 동일한 외기 조건에서 수집한 운전 데이터의 CDP와 TET를 도식화했을 때, 작동점이 동일한 TCC 상에서 좌상단으로 크게 이동한다면 이는 구성기기 결합에 따른 성능저하 가능성을 시사한다. 이러한 작동점의 이동을 바탕으로 성능 저하 여부를 정성적으로 판단할 수 있다.

Fig. 9는 다양한 운전 요인에 따른 성능 민감도 분석 결과를 나타낸다. 세로축은 Fig. 8에 표시된 운전점들과 기준 성능 간의 차이를 보여준다. 민감도 분석은 공기유량, CDP, 압축기 출구 온도(compressor discharge temperature, CDT), 압축기 효율, 연료유량, TIT, TET, 전체 시스템 출력, 그리고 전체 시스템 효율 등 총 9개의 성능 파라미터들에 대하여 수행하였다.

Fig. 9의 (a)는 공기유량이 운전 요인에 따라 변화하는 정도를 보여준다. 공기유량은 압축기 파울링이 발생했을 때 가장 크게 감소하며, 그 감소량은 8.67 kg/s (2%)이다. 상대습도의 변화 또한 공기유량을 변화시켰다. 이는 조성 변화에 따라 압축기 작동점이 달라지기 때문이다. 높은 상대습도는 분자량을 감소시키고 NCS와 NCF는 감소한다. 상대습도로 인한 공기유량 변화 효과는 기준 공기 유량 대비 0.3~0.4% 수준이다. 이는 압축기 파울링의 발생 여부를 공기 유량을 통해 판단할 수 있음을 의미한다.

Fig. 9의 (b), (c), 그리고 (d)는 각각 CDP, CDT, 및 압축기 효율의 민감도 분석 결과를 나타낸다. 압축기 파울링은 공기 유량을 감소시켜 CDP를 낮추고, 터빈 침식은 터빈 성

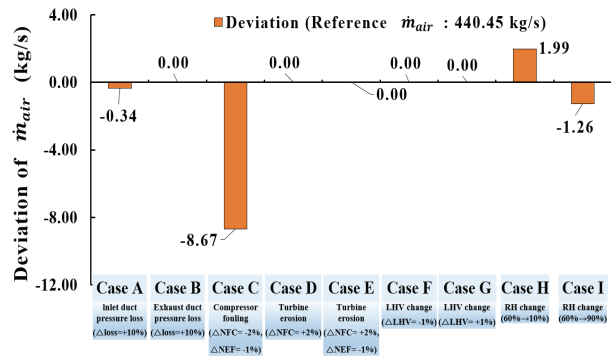
능 맵의 NCF를 증가시켜 CDP를 낮춘다. 압축기 파울링에 의한 압축기 효율 감소는 CDT를 증가시키는 효과가 있지만, CDP가 낮아짐에 따라 그 효과가 상쇄된다. 터빈 침식은 CDP를 낮추므로 압축기 작동 효율이 약간 감소하고, CDT도 감소한다. 상대습도 변화에 따라서도 CDT는 크게 변화한다. 이는 실제 측정된 가스터빈 데이터에서 CDT 정보만으로는 성능 저하를 직접 판단할 수 없음을 의미한다.

Fig. 9의 (e)는 연료유량의 민감도 분석 결과를 나타낸다. 연료유량 변화는 압축기 파울링 뿐만 아니라 LHV의 변화에도 크게 영향을 받는다. 이는 실제 측정된 가스터빈 연료유량 정보만으로는 성능 저하를 직접 판단할 수 없음을 보여준다.

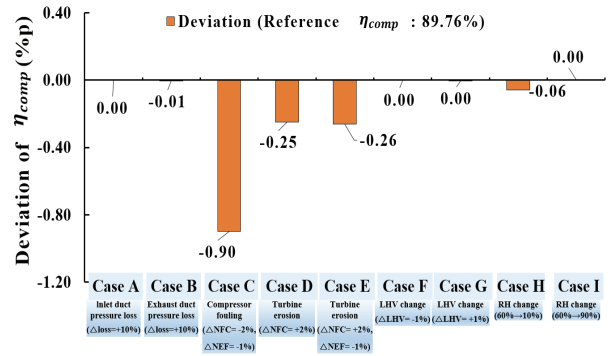
Fig. 9의 (f)와 (g)는 각각 TIT와 TET의 민감도 분석 결과

를 나타낸다. 터빈 효율 저하를 동반한 터빈 침식에 의하여 TIT는 가장 크게 감소하며 그 감소량은 10.07 °C이다. 압축기 파울링과 터빈 침식은 TET를 4~5 °C만큼 높인다. 이는 압력비가 낮아져서, 터빈의 작동 효율이 낮아졌기 때문이다.

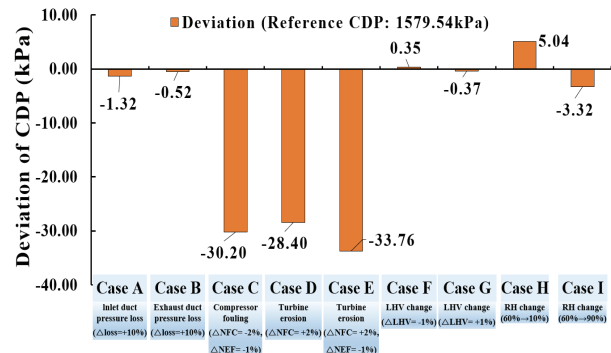
마지막으로 Fig. 9의 (h)와 (i)는 전체 가스터빈 시스템 출력과 효율의 민감도 분석 결과를 나타낸다. 출력은 압축기 파울링과 터빈 효율 저하를 동반한 터빈 침식에 의하여 가장 민감하게 변화했고, 그 감소량은 각각 4.93 MW (2.7%)와 6.67 MW (3.6%)이다. 전체 효율의 경우에는 압축기 파울링과 터빈 효율 저하를 동반한 터빈 침식에 의하여 가장 크게 감소했다. 그 감소량은 각각 0.36%p와 1.06%p였다.



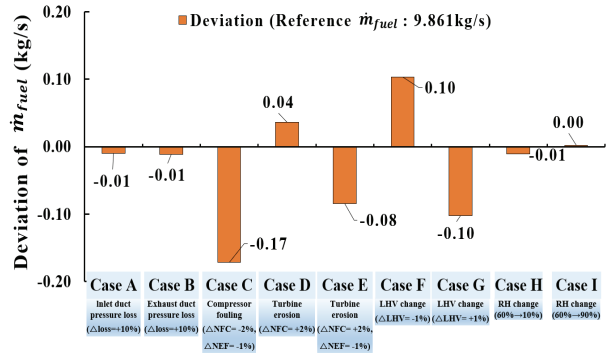
(a) air mass flow rate



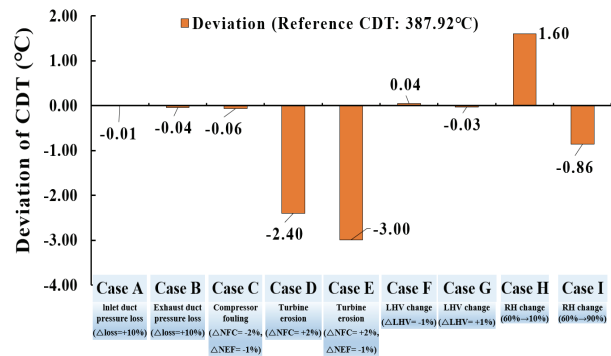
(d) compressor efficiency



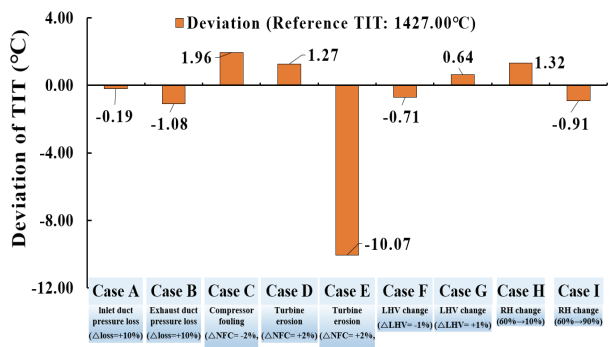
(b) compressor discharge pressure (CDP)



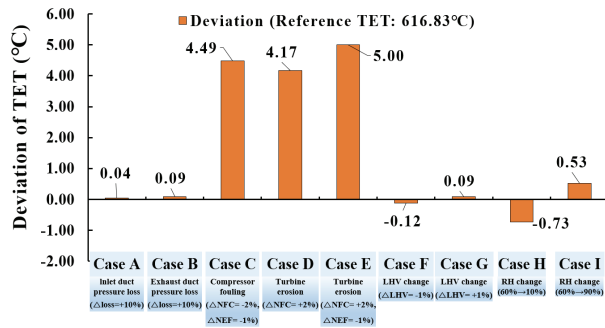
(e) fuel mass flow rate



(c) compressor discharge temperature (CDT)



(f) turbine inlet temperature (TIT)



(g) turbine exhaust temperature (TET)

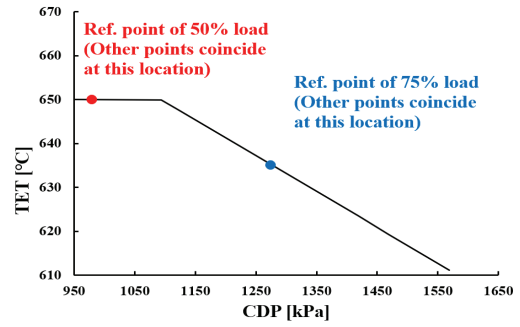
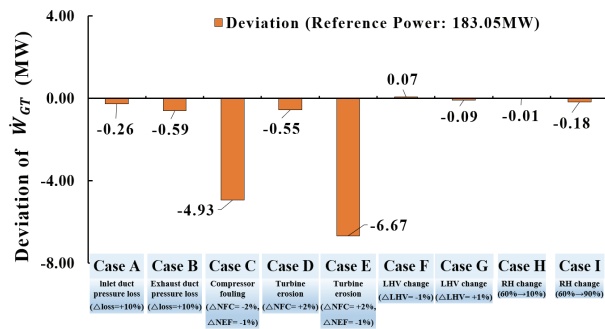
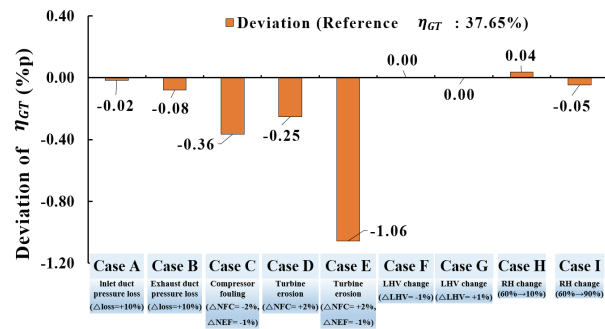


Fig. 10 Operating points according to various conditions on the part-load TCC



(h) GT system power



(i) GT system efficiency

Fig. 9 Sensitivity analysis of parameters according to various conditions under full-load operation

3.2 부분부하 운전의 민감도 분석 결과

Fig. 10은 part-load TCC 상에서 75%와 50% 부하의 기준 성능을 나타냈다. 가스터빈이 부분부하로 운전될 때에는 IGV와 연료가 함께 제어된다. 이때 특정 CDP마다 목표 TET가 정해져 있다. 따라서, 운전 조건이 달라지더라도 부분부하 운전의 기준 CDP에서는 동일한 TET를 따르도록 IGV 개도가 조절된다. 이는 IGV가 완전히 열려 있고 연료 제어만으로 작동점이 변하는 전부하 운전과는 다른 점이다. 즉, 변화된 운전점들은 part-load TCC 상에서 동일한 위치에 놓일 수 있다. 따라서, 부분부하 운전에서는 동일한 CDP, TET를 갖는 운전점을 선별한 후, 다른 파라미터 변화를 확인해야 한다.

Fig. 11은 75%와 50%의 부분부하 운전에서 다양한 운전

요인에 따른 성능 민감도 분석 결과를 보여준다. 세로축은 달라진 운전점들과 기준 상태 간의 차이를 보여준다. 민감도 분석은 공기유량, $SF_{IGV, mass flow}$, CDT, 압축기 효율, 연료유량, TIT, 전체 시스템 출력, 그리고 전체 시스템 효율 등 총 8개의 성능 파라미터들을 대상으로 수행하였다.

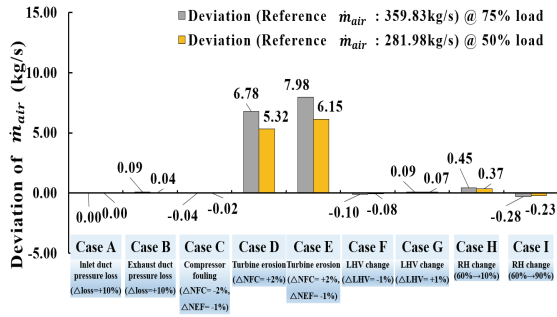
Fig. 11의 (a)와 (b)는 공기유량과 IGV가 운전 요인에 따라 변화하는 정도를 보여준다. 부분부하의 기준 CDP를 유지할 때, 압축기 파울링에 의한 유량 감소 효과는 IGV가 열리는 효과에 의하여 상쇄되었다. 터빈 침식으로 인하여 공기유량이 가장 크게 증가하였고, 그 증가량은 75% 부하와 50% 부하에서 모두 기준 값 대비 약 2% 수준이었다. 이는 터빈 침식이 직접적으로 공기유량을 증가시키기보다는, 기준 CDP를 유지하기 위해 IGV가 더 열리면서 발생하는 복합적인 결과이다.

Fig. 11의 (c)와 (d)는 부분부하에서 CDT와 압축기 효율의 민감도 분석 결과를 나타낸다. 기준 CDP에서, 압축기 파울링으로 인한 압축기 효율 감소 효과는 IGV 개방에 따른 압축기 효율의 증가 효과보다 크다. 그 결과, CDT는 증가하였다. 터빈 침식은 IGV를 더 열리게 만들어 압축기의 작동 효율을 증가시켰고, 이에 따라 CDT는 감소하였다. 상대습도에 따라서도 CDT는 변화하였다. 그 영향은 성능 저하로 인한 효과와 유사한 수준이었으며, 따라서 부분부하로 운전 중인 가스터빈에서 CDT 정보만으로 성능 저하를 판단하기 어렵다.

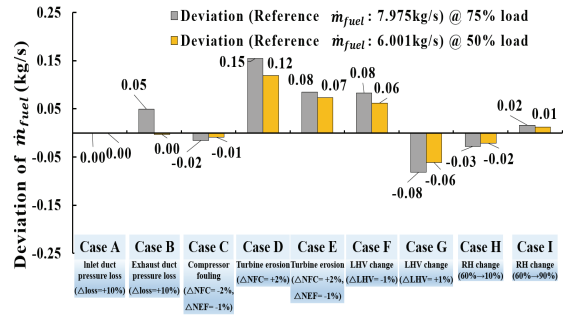
Fig. 11의 (e)와 (f)는 연료유량 및 TIT의 민감도 분석 결과를 나타낸다. 연료유량은 터빈 침식과 LHV에 의하여 크게 영향을 받았다. 터빈 침식은 공기유량을 간접적으로 증가시킨다. 터빈 효율 저하가 없다면, CDP와 TET가 같은 조건에서 TIT는 유지되어야 하므로 연료유량이 증가한다. 터빈 효율 저하가 동반되면, CDP와 TET가 같은 조건에서 TIT는 크게 감소하고 연료유량의 증가폭은 줄어든다.

Fig. 11의 (g)와 (h)는 전체 시스템 출력과 효율의 민감도 분석 결과이다. 출력은 터빈 침식에 가장 민감했고, 터빈 효율 저하를 동반하는지 여부에 따라 경향이 달라졌다. 전체 시스템 효율은 터빈 효율 저하에 의하여 가장 민감하게 감소하였고, 그 감소량은 75% 부하와 50% 부하에서 각각 0.68%p, 0.61%p였다.

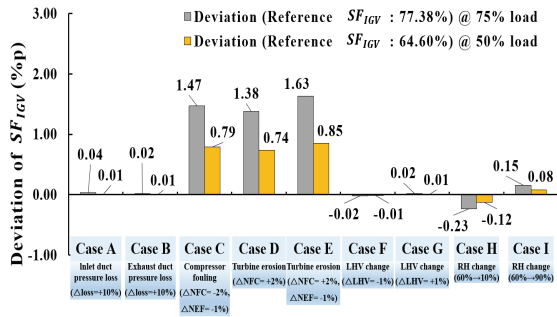
제어곡선에 따라 운전되는 발전용 가스터빈의 성능민감도 분석



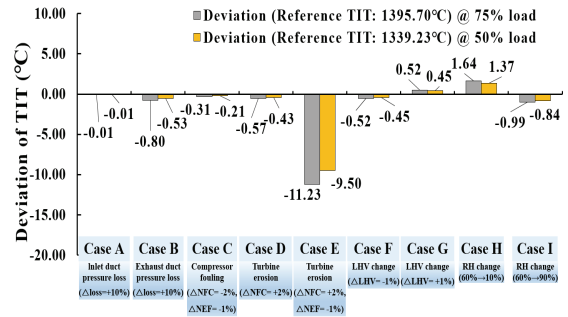
(a) air mass flow rate



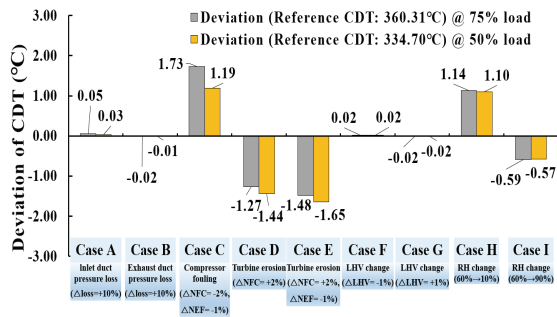
(e) fuel mass flow rate



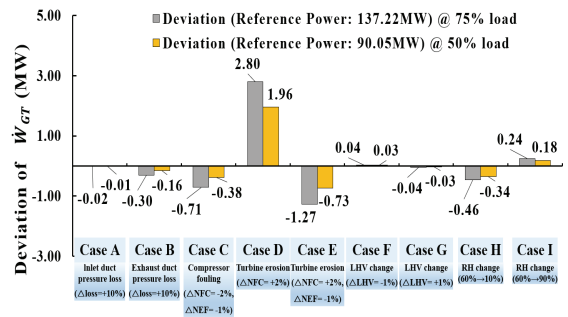
(b) Scaling factor of inlet guide vane (IGV)



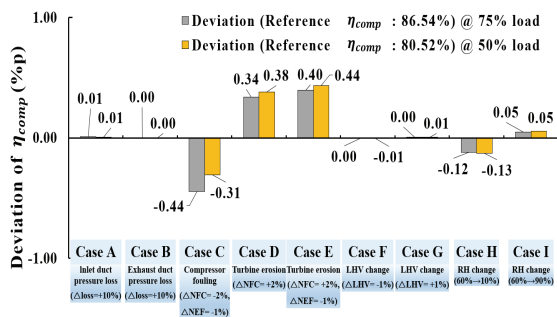
(f) turbine inlet temperature (TIT)



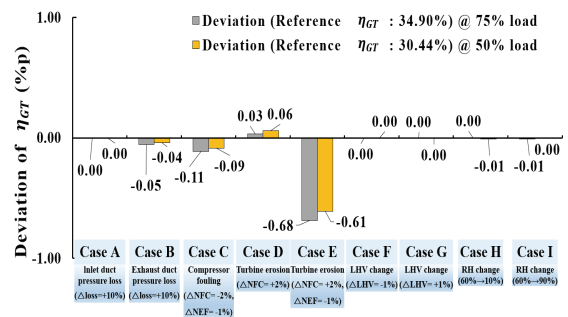
(c) compressor discharge temperature (CDT)



(g) GT system power



(d) compressor efficiency



(h) GT system efficiency

Fig. 11 Sensitivity analysis of parameters according to various conditions under part-load operation

4. 결 론

본 연구에서는 성능 저하를 포함한 다양한 운전 요인이 가스터빈 성능에 미치는 개별적인 영향을 분석하였다. 측정이 불가능한 TIT를 기준으로 성능을 비교하는 것이 아닌, 동일한 온도제어곡선(TCC) 상에서 성능을 비교하였다. 결과적으로, 압축기 파울링과 터빈 침식의 영향은 보수적으로 반영되었음에도 불구하고, 측정 성능에 가장 크게 영향을 미쳤다. 민감도 분석 결과를 통해서, 어떤 측정 성능의 변화로부터 성능 저하 여부를 정성적으로 판단할 수 있는지 확인하였다.

먼저, 전부하 운전의 민감도 분석 결과는 다음과 같다. 공기유량이 2% 감소하는 정도의 최소한의 압축기 파울링 효과는, 다른 운전 요인들에 의한 영향과 명확히 구분될 만큼 공기유량을 감소시킨다. 따라서 공기 유량이 감소했다면, 이는 압축기 파울링이 발생했음을 의미한다. 반면, CDT와 연료 유량은 여러 요인의 영향을 받아 변할 수 있으므로, 해당 정보만으로는 성능 저하를 확인할 수 없었다. CDP와 TET를 통해 성능 저하가 발생했음을 파악할 수 있었지만, 어떤 구성 기기의 문제인지는 확인할 수 없었다. 터빈 효율 저하를 동반한 터빈 침식은 TIT를 10.07 °C만큼 감소시켰다. 시스템 출력은 압축기 파울링과 터빈 침식이 발생했을 때 현저히 감소했으며, 시스템 효율은 터빈 효율 저하에 따라 크게 감소하는 것으로 나타났다.

다음으로, 부분부하 운전의 민감도 분석 결과는 다음과 같다. 터빈 침식의 발생 여부는 공기 유량을 통해 확인할 수 있다. 반면, CDT와 연료 유량 정보만으로는 성능 저하를 파악하기 어려웠다. IGV 개도를 통해 성능 저하가 발생했음을 알 수 있지만, 어떤 구성 기기의 문제인지는 확인할 수 없었다. TIT는 터빈 효율 저하에 따른 영향으로 크게 변화했다. 시스템 출력은 터빈 침식에 가장 크게 영향 받으며, 특히, 터빈 효율 저하의 정도에 따라 결과가 크게 달라졌다. 또한, 시스템 효율은 터빈 효율 저하에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

결론적으로 TIT, 시스템 출력 및 효율, 그리고 다른 파라미터들의 민감도 분석 결과는 다음과 같이 활용될 수 있다. 첫 번째로, TIT의 민감도 분석 결과에 따르면, 터빈 효율 저하는 TIT를 크게 변화시킨다. 이는 연소기 안정성 문제를 야기할 수 있고, 따라서 TCC를 조정(튜닝)할 때 이러한 정보가 활용될 것이다. 두 번째로 시스템 출력 및 효율의 민감도 분석 결과에 따르면, 압축기 파울링 뿐만 아니라 터빈 효율 저하 또한 성능 변화에 큰 영향을 미친다. 따라서 터빈 효율 저하를 확인하면 진단 정확도를 높일 수 있을 것이다. 마지막으로, 각 파라미터들의 민감도 분석 결과는 실제 측정 데이터에서 성능 저하를 판단할 때, 어떤 파라미터들의 변화를 고려해야 하는지에 대한 참고 기준이 될 수 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. RS-2023-00236869 and RS-2024-00449309).

Nomenclature

CDP	compressor discharge pressure
CDT	compressor discharge temperature
IGV	inlet guide vane
LHV	lower heating value [kJ/kg]
\dot{m}	mass flow rate [kg/s]
NCF	normalized corrected mass flow
NCS	normalized corrected speed
NEF	normalized corrected efficiency
NPR	normalized corrected pressure ratio
P	pressure [kPa]
R	specific gas constant [kJ/kg · K]
RH	relative humidity
SF	scaling factor
T	temperature [K]
TCC	temperature control curve
TET	turbine exhaust temperature
TIT	turbine inlet temperature
\dot{W}	power [kW]

Greek

η	efficiency
ω	rotation speed [rad/s]

Subscripts

<i>comp</i>	compressor
<i>d</i>	design
<i>deg</i>	degradation
<i>GT</i>	gas turbine
<i>in</i>	inlet
<i>mech</i>	mechanical
<i>original</i>	original value
<i>s</i>	isentropic
<i>scaled</i>	scaled value
<i>turb</i>	turbine

References

- (1) Santos, A. P. and Andrade, C. R., 2012. "Analysis of gas turbine performance with inlet air cooling techniques applied to Brazilian sites," *Journal of aerospace technology and management*, Vol. 4, No. 3, pp. 341-353.
- (2) Moroz, L., Burlaka, M., and Barannik, V., 2019, "Application of digital twin for gas turbine off-design performance and operation analyses," In *AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum*, p. 3913.
- (3) Jeong, J. H., Park, H. S., Park, Y. K., and Kim, T. S., 2024, "Analysis of the influence of hydrogen co-firing on the operation and performance of the gas turbine and combined cycle," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 54, 104061.
- (4) Pyo, M. J., Moon, S. W., and Kim, T. S., 2021, "A comparative feasibility study of the use of hydrogen produced from surplus wind power for a gas turbine combined cycle power plant," *Energies*, Vol. 14, No. 24, p. 8342.
- (5) Mendoza, E., Lin, T., and Jiang, X., 2015, "Reduction of Gas Turbine Exhaust Temperature Limit Due to HRSG Limitations by Change on Control Curve to Optimize Plant Operation and Performance," *ASME Paper No. GT2015-43784*.
- (6) Gülen, S. C., 2019, "Gas turbines for electric power generation," Cambridge University Press.
- (7) Moon, S. W. and Kim, T. S., 2020, "Advanced Gas Turbine Control Logic Using Black Box Models for Enhancing Operational Flexibility 645 and Stability," *Energies*, Vol. 13, No. 21, p. 5703, <https://doi.org/10.3390/en13215703>
- (8) Park, Y. K., Moon, S. W., and Kim, T. S., 2021, "Advanced Control to Improve the Ramp-Rate of a Gas Turbine: Optimization of Control schedule," *Energies*, Vol. 14, No. 23, p. 8024.
- (9) Park, Y. K., Kang, D. W., Jeong, J. H., and Kim, T. S., 2024, "A novel model-based diagnostics for identifying component degradations in gas turbines for power generation," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 64, p. 105528.
- (10) Lee, J. H. and Kim, T. S., 2018, "Novel performance diagnostic logic for industrial gas turbines in consideration of over-firing," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 32, No. 12, pp. 5947-5959.
- (11) Gas Turbine World, 2022, "2022 GTW Handbook," Pequot Publication, Vol. 37.
- (12) Mishra, R. K., 2015, "Fouling and corrosion in an aero gas turbine compressor," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 15, No. 6, pp. 837-845.
- (13) J. Kurzke, 2015, *GasTurb 12 Software*, Aachen, Germany.
- (14) Kim, J. H., Kim, T. S., and Moon, S. J., 2016, "Development of a program for transient behavior simulation of heavy-duty gas turbines," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, pp. 5817-5828.
- (15) Lee, J. H., Kang, D. W., Jeong, J. H., and Kim, T. S. 2023. "Quantification of variations in the compressor characteristics of power generation gas turbines at partial loads using actual operation data," *Journal of mechanical science and technology*, Vol. 37, No.3, pp. 1509-1521.
- (16) Morini, M., Pinelli, M., Spina, P. R., and Venturini, M., 2010, "Influence of blade deterioration on compressor and turbine performance," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 132, No. 3, p. 032401.
- (17) Mohammadi, E. and Montazeri-Gh, M., 2014, "Simulation of full and part-load performance deterioration of industrial two-shaft gas turbine," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 136, No. 9, p. 092602.
- (18) Kang, D. W. and Kim, T. S., 2018, "Model-based performance diagnostics of heavy-duty gas turbines using compressor map adaptation," *Applied energy*, Vol. 212, pp. 1345-1359.