

## 터빈입구온도 보정기법을 적용한 가스터빈 성능진단 프로그램 개발

이재홍\* · 강도원\*\* · 김동섭\*\*\*†

### Development of a Performance Diagnosis Program for Gas Turbines Using Turbine Inlet Temperature Correction

Jae Hong Lee\*, Do Won Kang\*\*, Tong Seop Kim\*\*\*†

*Key Words* : Correction(보정), Gas Turbine(가스터빈), Performance Degradation(성능 저하), Performance Diagnostic Program(성능진단 프로그램), Turbine Inlet Temperature(터빈입구온도)

#### ABSTRACT

In this study, an in-house program to analyze the performance degradation for gas turbines is developed using MATLAB and is validated using commercial software. This program consists of design and off-design calculations. The results of design calculation is used for reference values of off-design calculation. The off-design calculation is composed of measured and expected performance analyses, and turbine inlet temperature correction. In general, performance degradation is analyzed by comparing the results of measured and expected performance analysis. However, if gas turbine performance degrades, turbine inlet temperature might increase due to the general control logic to comply with the power demand. Therefore, it is required to consider the deviation of turbine inlet temperature from the normal value in the performance diagnosis to analyze the performance degradation exactly. In this study, a special effort is given to the correction of turbine inlet temperature. The accuracy of the developed program is confirmed by comparison with commercial software, and its capability of performance diagnosis using the turbine inlet temperature correction is demonstrated.

#### 1. 서 론

가스터빈의 성능은 다양한 요인에 의하여 변한다. 외기<sup>(1-3)</sup> 및 연료조건<sup>(4)</sup>과 같은 운전조건의 변화는 가스터빈 성능 변화로 이어진다. 이러한 성능변화는 자연적인 변화로서 성능저하라고 부르지 않는다. 하지만 가스터빈의 운전시간이 증가함에 따라서 가스터빈의 성능은 점차 감소하며,<sup>(5)</sup> 이러한 성능변화를 성능저하(Performance degradation)라고 부른다. 성능저하는 가스터빈의 출력과 효율을 감소시키며, 경제적 손실을 발생시킨다.<sup>(6,7)</sup> 가스터빈의 성능저하는 부식, 침식, 외부이물피해(F.O.D) 및 파울링 등 다양한 원인에 의하여 발생한다. 압축기 파울링에 의하여 발생한 성능저하는 세척(Washing)을 통하여 어느 정도 회복이 가능하다.<sup>(8)</sup> 즉,

성능저하를 분석하고 진단하여 적절한 시기에 엔진의 유지, 보수 및 관리를 하는 것은 가스터빈의 안정적, 경제적인 운전 측면에서 중요하다.

가스터빈의 성능진단에는 퍼지 논리(Fuzzy logic)를 기반으로 하는 방법, 유전 알고리즘(Genetic algorithm), 신경회로망 기법(Neural networks)과 같은 인공지능 기반의 방법 및 가스경로해석(Gas path analysis, GPA)과 같은 모델기반의 기법 등 다양한 기법이 사용된다.<sup>(9)</sup> 가스경로해석 기법은 수치해석(Numerical analysis)을 이용하여 가스터빈 구성부의 특성 파라미터를 분석하는 기법이다. 가스경로해석 기법을 이용하면 압축기 및 터빈의 효율과 같이 측정되지 않는 구성부 특성 파라미터의 변화를 분석하는 것이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 가스경로해석 기법을 이용하여 가스

\* 인하대학교 대학원(Graduate school, Inha University)

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

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

† 교신저자, E-mail : kts@inha.ac.kr

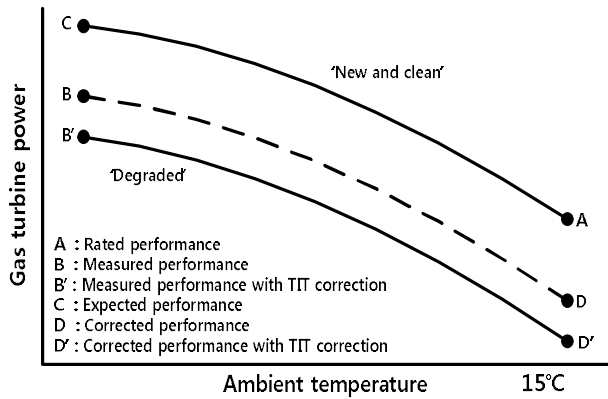


Fig. 1 Variation in gas turbine power with ambient temperature

터빈 구성부의 특성 파라미터의 변화를 파악하고 성능저하를 분석할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

Fig. 1<sup>(12)</sup>에 가스터빈의 일반적인 성능변화 특성을 나타내었다. 가스터빈이 초기상태(New and clean condition)에서 낮은 외기온도로 운전된다면 기대성능(C)만큼의 출력을 낼 수 있다. 그러나 실제 측정성능(B)은 가스터빈의 성능저하에 의한 영향으로 기대성능보다 작게 나타난다. 측정성능과 기대성능을 비교하여 가스터빈 성능저하를 분석하기에는 다소 어려움이 있다. 측정성능은 성능저하의 영향과 운전조건 변화에 의한 출력 변화의 영향이 모두 포함되어 있기 때문이다. 따라서 정량적인 가스터빈 성능저하 분석을 위하여 측정성능을 ISO 조건(15°C, 101.325 kPa, R.H 60%)으로 보정한 보정성능(D)이 사용된다. 보정성능은 측정성능을 ISO 조건으로 보정하여 얻은 결과이기 때문에 보정성능을 이용하면 운전조건 변화에 의한 영향 없이 성능저하의 영향만을 분석할 수 있다. 이러한 이유로 가스터빈의 정량적인 성능저하 분석을 위하여 보정성능을 설계성능(A)과 비교하는 방법이 일반적으로 사용된다.

하지만, 가스터빈의 성능저하는 터빈입구온도(Turbine inlet temperature, TIT)를 상승시키는 효과가 있다.<sup>(7)</sup> 압축기 파울링이 발생하면 압력비, 압축기 효율, 유량 등과 같은 압축기의 성능 파라미터가 감소한다.<sup>(13)</sup> 가스터빈은 압축기 출구압력이 감소함에 따라서 터빈출구온도(Turbine exhaust temperature, TET)를 상승시키는 제어 로직에 의하여 운전된다.<sup>(14)</sup> 압축기 파울링에 의한 압력비 감소는 터빈출구온도의 상승으로 이어지며, 이는 터빈입구온도의 상승으로 이어진다. 즉, 가스터빈의 성능저하는 터빈입구온도를 상승시킨다. 터빈입구온도는 가스터빈의 성능에 큰 영향을 미치며, 터빈입구온도가 상승할수록 가스터빈의 출력이 상승한다. 따라서 가스터빈 성능진단에서 터빈입구온도 상승에 의한 영향을 제거하여 정확한 성능저하 경향을 분석하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 터빈입구온도 보정을 적용한 가스터빈 성능진단 프로그램을 개발하고 상용 프로그램과 비교를 통하여 검증하였다. 또한, 실제 발전플랜트의 운전 자료를 이용하여 성능진단을 수행하였다.

## 2. 프로그램 개발

### 2.1 개요 및 구조

본 연구의 가스터빈 성능진단 프로그램은 매스웍스(Math Works)사의 매틴랩(MATLAB)을 이용하여 개발되었다.<sup>(15)</sup> 객체지향 프로그래밍을 적용하여 각 구성부를 모듈화 하였으며, 객체지향 프로그래밍을 통하여 프로그램의 확장성과 유용성을 높였다.

개발된 성능진단 프로그램의 구조는 Fig. 2와 같다. 가스터빈 성능진단을 위하여 설계점 계산 후 탈설계 해석을 수행하도록 구성되었다. 탈설계 해석은 측정성능 분석, 기대성능

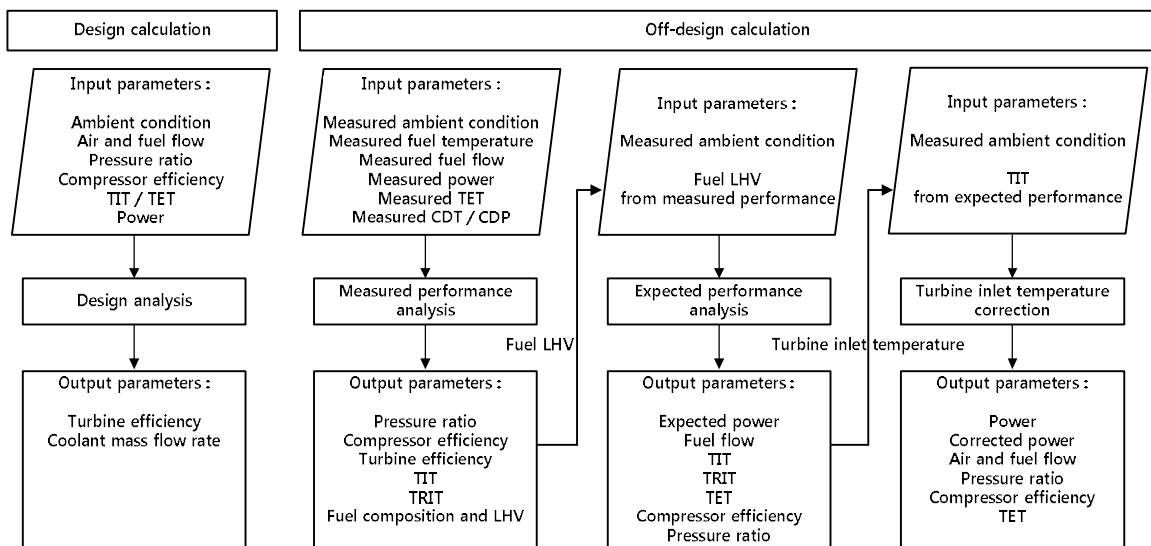


Fig. 2 Structure of the simulation program

Table 1 Design specifications of F-class gas turbine

Parameters	In-house code	GateCycle 6.1.2 <sup>(16)</sup>
Air temperature (°C)		15
Air pressure (kPa)		101.325
Relative humidity (%)		60
Air flow rate (kg/s)	430	430
Inlet duct pressure drop (%)	1.5	1.5
Pressure ratio	16	16
Compressor isentropic efficiency (%)	85.95	85.95
Fuel flow rate (kg/s)	9.26	9.26
Lower heating value (kJ/kg)	49426	49427.2
Combustor pressure drop (%)	3	3
Turbine isentropic efficiency (%)	91.09	90.92
Turbine inlet temperature (°C)	1410	1409.98
Turbine outlet temperature (°C)	608.9	608.9
Exhaust duct pressure drop (%)	3	3
Generator gross power (MW)	165.4	165.4
Efficiency (%)	36.15	36.15

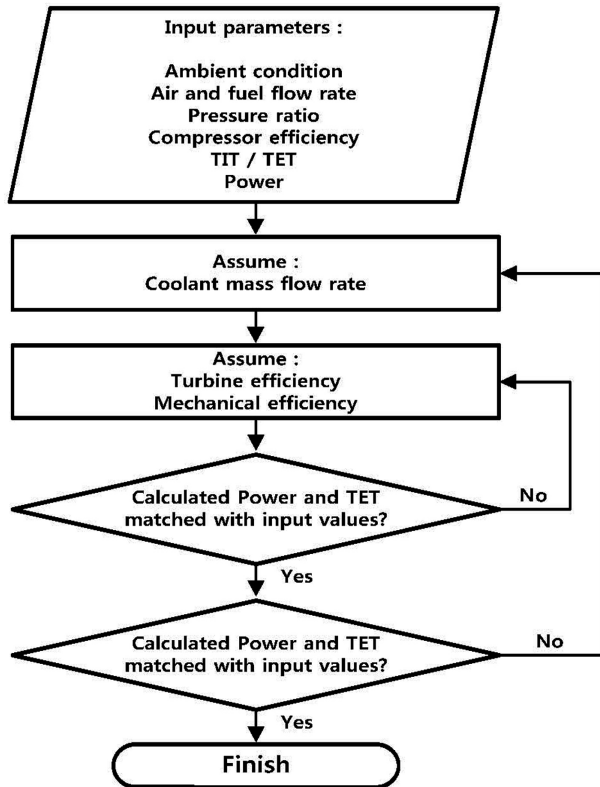


Fig. 3 Flowchart for the design analysis

분석 및 터빈입구온도 보정으로 구성되어 있어 총 세 번의 성능 해석을 수행한다. 각각의 성능 해석에서는 구성부 파라미터 계산을 위하여 다변수 뉴턴랩슨 기법(Multi-dimensional Newton-Raphson method)을 사용하였다.

2.1.1 설계점 해석

설계점 해석에는 ISO 조건 (15 °C, 101.325 kPa, RH 60 %)이 적용되었으며, Table 1에 성능진단에 사용된 F-class

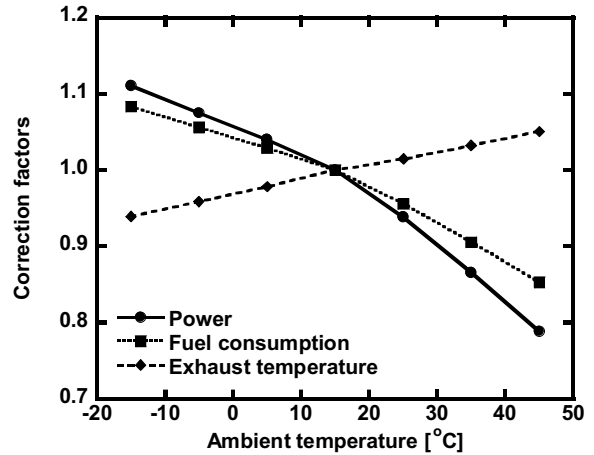


Fig. 4 Correction curves of the gas turbine parameters with the ambient temperature

가스터빈의 설계 파라미터를 요약하였다. Fig. 3에 설계점 해석에서의 프로그램 흐름도를 나타내었다. 설계점 해석에서는 제작사에서 제공하는 외기 및 연료조건, 압력비, 터빈입구온도(터빈로터입구온도), 터빈출구온도 등을 이용하여 제공되지 않는 가스터빈 구성부 특성 파라미터를 계산한다. Table 1에 요약한 값들은 개발된 프로그램과 상용 프로그램인 GateCycle 6.1.2<sup>(16)</sup>을 이용하여 계산한 결과 값으로 제작사에서 제공한 설계 파라미터와 상당히 근사한 값을 갖는다. 두 가지 프로그램의 결과는 0.2% 미만의 오차로 가스터빈이 잘 묘사되었음을 알 수 있다. 즉, 설계점 해석 결과가 탈설계 해석에서의 기준 값으로 사용되기에 적절하다는 것을 알 수 있다.

2.1.2 측정성능 분석

측정성능 분석은 측정된 가스터빈의 성능 및 특성 파라미터를 이용하여 가스터빈의 운전상태를 분석하는 과정이다. 이 과정에서는 측정된 외기 및 연료조건, 압축기 출구 압력 및 온도, 터빈출구온도, 출력을 사용하여 측정되지 않는 압축기 등엔트로피 효율, 터빈입구온도, 터빈로터입구온도, 터빈 등엔트로피 효율 등과 같은 구성부 특성 파라미터를 계산한다.

또한, 보정곡선을 이용하여 측정성능을 ISO 조건으로 보정한 보정성능을 계산한다. 보정곡선은 외기 및 연료조건과 같은 가스터빈의 운전조건 변화에 따라 가스터빈의 출력, 효율과 같은 성능 파라미터의 변화를 나타내는 곡선으로, 계산에 사용된 보정곡선을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4은 외기 온도 변화에 따른 가스터빈의 출력, 연료소모량, 터빈출구온도의 변화를 보여준다. 이 외에도 외기압력, 상대습도, 연료 발열량 및 조성 변화에 의한 보정곡선 등이 사용되었다. 프로그램에 사용된 모든 보정곡선은 제작사로부터 제공받았다.

2.1.3 기대성능 분석

기대성능 분석은 가스터빈을 초기상태로 가정하고 측정된

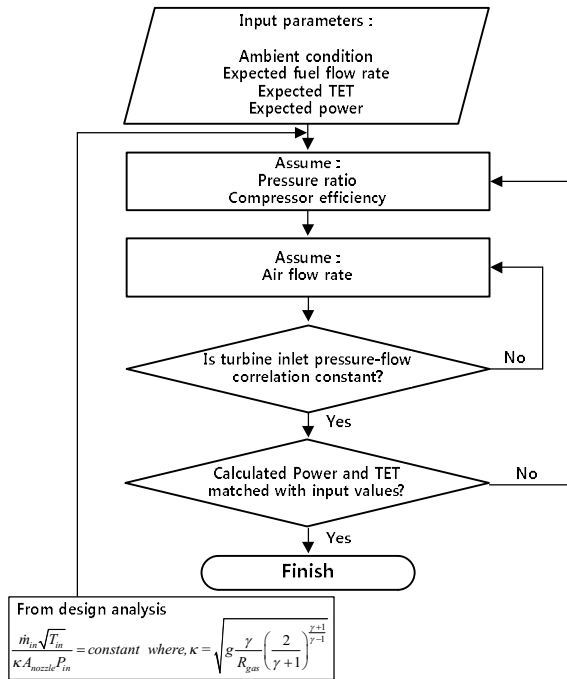


Fig. 5 Flowchart for the calculation of expected performance

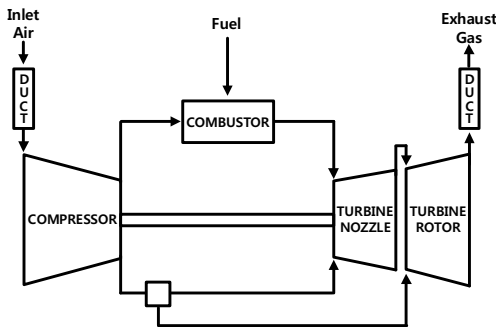


Fig. 6 Gas turbine configuration

외기 및 연료조건을 사용하여 가스터빈의 성능 및 특성 파라미터를 분석하는 과정이다. 즉, 초기상태의 가스터빈이 측정된 운전조건으로 운전될 때, 기대되는 성능 및 특성 파라미터를 분석하는 과정이다. Fig. 5에 기대성능 분석에서의 흐름도를 나타내었다. 기대성능 분석에서는 보정곡선을 이용하여 계산한 출력, 터빈출구온도, 연료 소모량의 기대값을 이용하여 구성부 특성 파라미터의 기대값을 계산한다. 측정성능 분석에서와 마찬가지로 압축기 등엔트로피 효율, 터빈입구온도, 터빈로터입구온도, 터빈 등엔트로피 효율 등과 같은 파라미터를 계산한다.

### 2.1.4 터빈입구온도 보정

터빈입구온도 보정은 압축기 파울링에 의하여 터빈입구온도가 상승하고 출력이 증가하는 효과를 제거하기 위한 과정이다. 이 과정에서 터빈입구온도는 기대성능 분석에서 계산된 값을 사용한다. 즉, 초기상태의 가스터빈이 측정된 외기

및 연료조건에서 운전되었을 때 기대되는 터빈입구온도를 사용하는 것이다. 측정된 외기 및 연료조건과 계산된 터빈입구온도의 기대값을 사용하여 가스터빈의 출력 및 효율과 같은 성능 파라미터와 구성부 특성 파라미터를 분석한다.

## 2.2 구성부 모델링

본 연구에서 사용된 가스터빈의 개략도를 Fig. 6에 나타내었다. 가스터빈은 입구덕트, 압축기, 연소기, 터빈, 출구덕트로 구성되어 있다. 실제 가스터빈은 다단 축류 압축기와 다단 축류 터빈으로 구성되어 있지만 본 연구에서는 1단 압축기와 터빈으로 모델링하였으며, 터빈은 노즐과 로터로 나누어 모델링하였다.

### 2.2.1 물성치

공기, 연료 및 연소가스 등 모든 유체는 이상기체로 가정하였다. 작동유체의 엔탈피와 엔트로피를 계산하기 위하여 다항식 형태의 정압비열 식을 적분하여 사용하였다.<sup>(17)</sup> 작동유체를 구성하는 모든 성분에 대하여 물성치를 계산한 뒤 몰분율을 기준으로 가중 평균하여 작동유체의 물성치를 계산하였다.

공기의 경우 문헌<sup>(18,19)</sup>에서 참고한 건공기 조성과 온도에 따른 수증기압의 상관관계식을 이용하여 공기의 조성을 계산한 후에 앞서 설명한 방법을 이용하여 물성치를 계산하였다.

### 2.2.2 압력손실

설계점 해석에서 압력손실은 설계조건을 적용하였다. 탈설계 해석에서의 압력손실은 설계점에서의 압력손실과 작동유체의 유량, 온도, 압력을 이용하여 식 (1)과 같이 계산하였다.<sup>(16)</sup>

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_d} = \left( \frac{\dot{m}_{i,n}}{\dot{m}_{i,n,d}} \right)^{1.84} \left( \frac{P_{i,n}}{P_{i,n,d}} \right)^{-1} \left( \frac{T_{i,n}}{T_{i,n,d}} \right) \quad (1)$$

### 2.2.3 압축기

설계점 해석에서는 설계조건인 압력비와 등엔트로피 효율을 사용하여 압축기 출구의 온도, 압력, 엔탈피를 계산한다. 압축기 입·출구 엔탈피 및 유량을 이용하여 식 (3)과 같이 압축기의 소모동력을 계산할 수 있다.

$$\eta_{comp} = \frac{h_{out,s} - h_{i,n}}{h_{out} - h_{i,n}} \quad (2)$$

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}(h_{out} - h_{i,n}) \quad (3)$$

탈설계 해석에서는 압축기 성능선도와 터빈의 압력-유량 상관관계식의 매칭(Matching) 과정을 통하여 작동점이 결정된다. 작동점이 결정되면 압축기의 유량, 압력비, 등엔트로피 효율이 결정된다. 압축기 성능선도는 질량유량, 압력비, 압축기 효율 등의 압축기 특성 파라미터를 설계점에서의 값으로

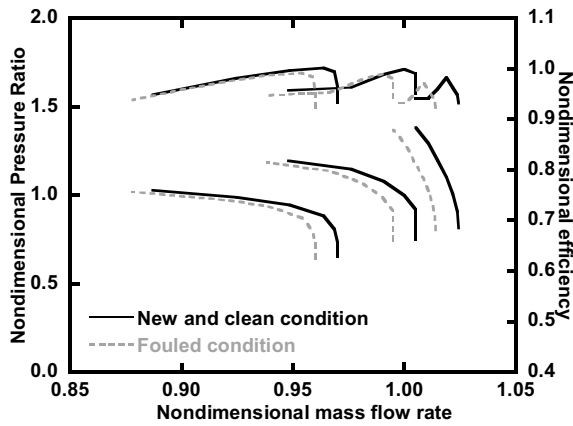


Fig. 7 Compressor performance maps

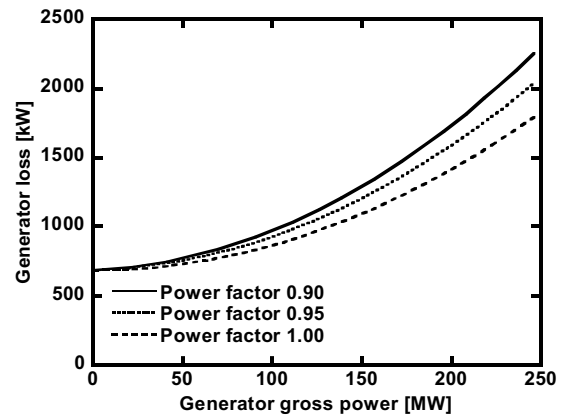


Fig. 8 Generator loss curves

무차원화하여 압축기의 성능 변화를 나타내는 곡선이다. 프로그램에 사용된 압축기 성능선도를 Fig. 7에 나타내었다.

압축기 파울링이 발생하면 압력비, 공기유량 및 효율과 같은 압축기 성능 파라미터가 감소하며, 압축기 성능선도는 Fig. 7에 나타낸 것처럼 초기상태(New and clean condition)를 기준으로 좌측 하단 방향으로 이동한다.<sup>(13)</sup> 파울링이 발생한 상태에서의 성능선도를 예측하기 위하여 Adaptation method를 사용하였다.<sup>(23)</sup> 측정성능 분석 과정에서 계산된 공기유량과 효율을 기대성능 분석에서 계산된 값으로 나누어 Fouling factor를 계산한다.

$$Fouling\ factor_1 = \frac{\dot{m}_{air,measured}}{\dot{m}_{air,expected}} \quad (4)$$

$$Fouling\ factor_2 = \frac{\eta_{comp,measured}}{\eta_{comp,expected}} \quad (5)$$

계산된 Fouling factor를 초기상태의 압축기 성능선도에 적용하여 파울링이 발생한 상태에서의 압축기 성능선도를 예측한다.

### 2.2.4 연소기

연소기에서의 연소반응은 완전연소반응으로 가정하였으며, 연소 반응은 행렬 형태로 모사하였다.<sup>(20,21)</sup> 설계점 해석에서는 설계조건의 연료 유량 및 조성, 압력손실을 사용하여 연소기 출구의 온도와 압력을 계산한다. 측정성능 분석에서는 측정되지 않는 연료의 조성 및 저위발열량(Lower heating value, LHV)을 계산한다. 계산된 연료 조성 및 저위발열량은 기대성능 분석 및 터빈입구온도 보정 과정에서 사용된다. 연료의 저위발열량은 문헌<sup>(16)</sup>에서 참고한 연료 성분별 발열량을 사용하였으며, 연료 성분의 몰분율을 기준으로 가중평균을 하여 연료의 저위발열량을 계산하였다.

### 2.2.5 터빈

설계점 해석에서는 출구 덕트의 압력손실을 고려하여 배기가스의 압력이 대기압과 같아지도록 터빈의 팽창비를 결정한다. 터빈의 등엔트로피 효율은 제작사에서 제공하지 않으므로 터빈출구온도와 배기가스 압력을 이용하여 터빈의 등엔트로피 효율을 계산한다. 계산된 터빈의 입·출구의 엔탈피와 유량을 이용하여 출력을 계산한다.

$$\eta_{turb} = \frac{h_{in} - h_{out}}{h_{in} - h_{out,s}} \quad (6)$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}(h_{in} - h_{out}) \quad (7)$$

탈설계 해석에서는 터빈의 입구 압력-유량 상관관계식이 사용된다.

$$\frac{\dot{m}_{in} \sqrt{T_{in}}}{\kappa A_{nozzle} P_{in}} = constant \quad where, k = \sqrt{g \frac{\gamma}{R_{gas}} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (8)$$

앞서 언급한 것과 같이 압축기 성능선도와 터빈의 압력-유량 상관관계식 사이의 매칭 과정을 통하여 터빈의 입구조건이 결정된다. 결정된 입구조건과 측정된 터빈출구온도 혹은 터빈출구온도의 기대값을 이용하여 터빈의 등엔트로피 효율과 출력을 계산한다.

### 2.2.6 축 및 발전기

각 구성부의 해석이 완료된 후, 축에서 가스터빈의 출력과 효율을 계산한다. 축 출력(Shaft power)은 식 (9)에 의하여 계산된다.

$$\dot{W}_{shaft} = \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{comp} \quad (9)$$

발전기에서는 계산된 축 출력과 발전기 손실을 고려하여 가스터빈 출력(System power), 열효율(Thermal efficiency)

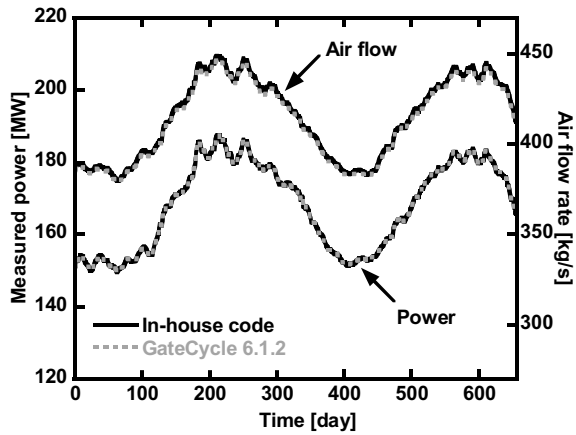


Fig. 9 Comparison of In-house code and commercial software (Power and air flow)

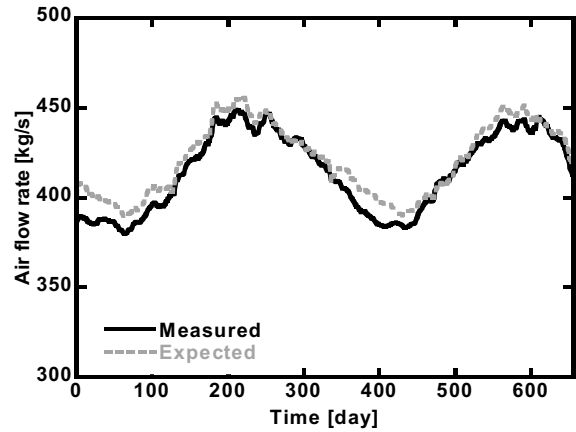


Fig. 10 Air flow rate in measured and expected calculation

Table 2 Comparison of In-house code and commercial software

Item	Error (%)	
	Average	Standard deviation
Power	0.0026	0.0014
Air flow	0.3887	0.0555
Pressure ratio	0.0115	0.0088
Compressor efficiency	0.0077	0.0061
Turbine inlet temperature	0.0687	0.0337
Turbine exhaust temperature	0.0024	0.0015

을 계산한다. 발전기 손실은 제작사로부터 제공받은 손실곡선을 이용하여 결정하였으며, 이를 Fig. 8에 나타내었다.

$$\dot{W}_{system} = \dot{W}_{shaft} - \dot{W}_{loss} \quad (10)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{system}}{(\dot{m} \times LHV)_{fuel}} \quad (11)$$

### 3. 결과 및 논의

가스터빈 성능진단을 위하여 실제 복합화력 발전소에서 측정된 656 일간의 운전 자료를 이용하였다. 656 일간의 운전 자료 중에서 입구안내깃(Inlet guide vane, IGV)이 최대 개방된 전부하(Full-load) 운전 자료를 선택하였으며, 그 중에서 하루에 1개의 운전 자료를 선택하여 성능진단을 수행하였다. 사용된 운전 자료는 외기 온도, 압력 및 상대습도, 연료 유량 및 온도, 압축기 출구 압력 및 온도, 터빈출구 온도, 출력이다. 측정 데이터에는 잡음이 섞여 있기 때문에 데이터를 분석하기에는 다소 어려움이 있다. 따라서 데이터에 섞여있는 잡음을 제거할 필요가 있다. 본 연구에서는 이동평균필터<sup>(22)</sup>를 이용하여 측정 데이터의 잡음을 제거하여 성능진단에 사용하였다.

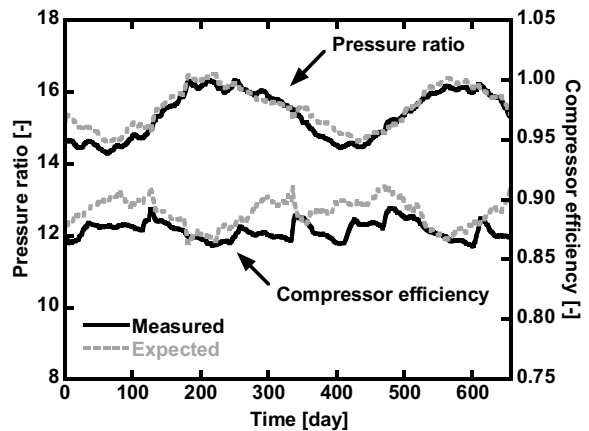


Fig. 11 Pressure ratio and compressor efficiency in measured and expected calculation

### 3.1 프로그램 검증

프로그램 검증을 위하여 가스터빈 성능해석 상용 프로그램인 GateCycle 6.1.2<sup>(16)</sup>를 사용하였다. 개발된 프로그램과 상용 프로그램을 이용하여 측정성능 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 9와 Table 2에 정리하였다. Fig. 9에 출력과 공기 유량을 나타내었다. 두 가지 파라미터 모두 상용 프로그램과 유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. Table 2에는 Fig. 9에 나타난 파라미터와 더불어 압축기 및 터빈 특성 파라미터의 비교 결과를 오차의 평균과 표준편차를 이용하여 정리하였다. 최대 오차는 약 0.4%정도로 두 프로그램의 결과가 일치하는 것을 알 수 있다. 즉, 개발된 프로그램이 가스터빈의 운전특성을 잘 모사하고 있으며, 개발된 프로그램을 이용한 성능진단 결과가 타당한 것을 알 수 있다.

### 3.2 가스터빈 성능저하 분석

#### 3.2.1 측정 및 기대성능 분석

가스터빈의 성능진단을 위하여 측정된 파라미터를 이용하

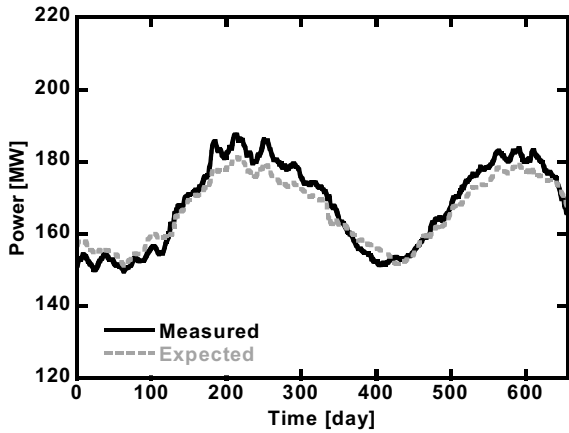


Fig. 12 Measured and expected power

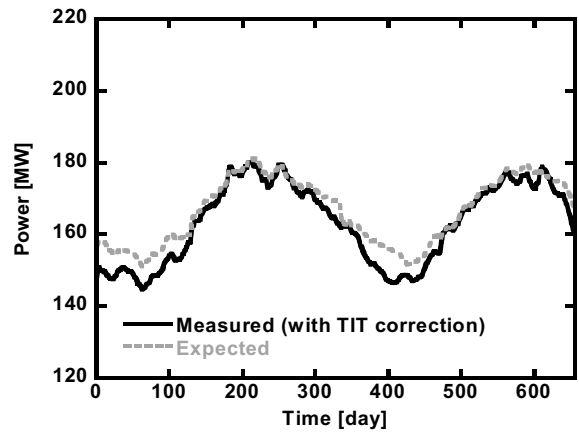


Fig. 14 Measured power with TIT correction and expected power

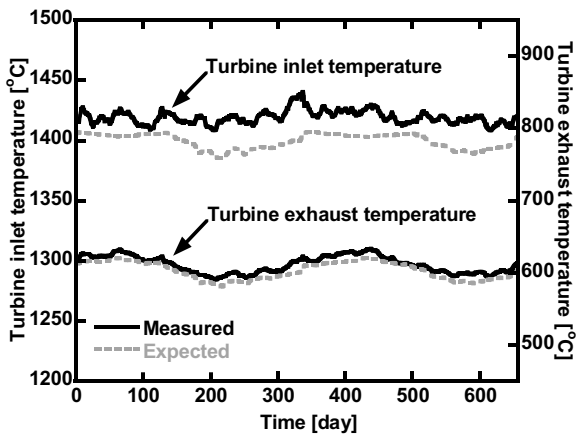


Fig. 13 Turbine inlet temperature and turbine exhaust temperature in measured and expected calculation

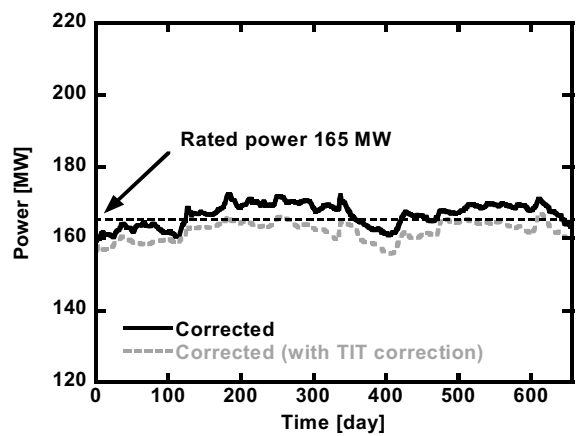


Fig. 15 Corrected power

여 측정성능 및 기대성능을 분석하였다. Fig. 10과 Fig. 11에 측정성능 및 기대성능 분석을 통하여 계산된 공기 유량, 압력비 및 압축기 등엔트로피 효율을 나타내었다. 세 가지 파라미터 모두 측정성능 분석과 기대성능 분석에서의 결과의 경향은 유사하지만 측정성능 분석에서 더 낮은 결과가 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 가스터빈의 장시간 운전으로 인하여 압축기의 파울링이 발생하여 나타난 결과이다. 다음으로 측정출력과 기대출력을 비교하였으며 이를 Fig. 12에 나타내었다. 장시간 운전으로 인하여 가스터빈의 성능이 저하되었음에도 불구하고 측정출력과 기대출력의 값이 유사하거나 측정출력이 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 압축기 파울링에 의하여 압력비가 감소하고 가스터빈 제어로직<sup>(14)</sup>에 의하여 터빈출구온도와 터빈입구온도가 상승하였기 때문이며, 이를 Fig. 13에서 확인할 수 있다. 터빈입구온도와 터빈출구온도 모두 기대성능 분석에서 보다 측정성능 분석에서 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 결과들을 통하여 터빈입구온도가 가스터빈 성능진단에서 중요한 변수임을 알 수 있다. 따라서 터빈입구온도 보정을 통하여 성능진단을 수행하였다.

### 3.2.2 터빈입구온도 보정

측정된 운전 자료와 기대성능 분석에서 계산된 터빈입구온도를 이용하여 터빈입구온도 보정을 수행하였다. Fig. 14에 터빈입구온도 보정 과정을 통하여 계산된 출력과 기대성능 분석에서 계산된 기대출력을 나타내었다. Fig. 12에서 측정출력이 기대출력보다 높게 나타난 것과는 반대로 터빈입구온도 보정을 거쳐 계산된 출력은 기대출력보다 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 15에는 측정출력과 터빈입구온도 보정에서 계산된 출력을 ISO 조건으로 보정한 결과를 나타내었다. 측정출력을 ISO 조건으로 보정한 결과는 압축기 파울링에 의한 터빈입구온도의 상승효과가 반영되어 있기 때문에 일부 구간에서 설계 성능인 165 MW보다 높은 출력이 나타난다. 하지만 터빈입구온도를 보정한 결과에서는 165 MW와 같거나 보다 낮은 출력이 나타난다. 즉, 압축기 파울링에 의한 터빈입구온도의 상승효과를 제거함으로써 정확하게 가스터빈의 성능저하를 분석할 수 있다.

## 4. 결 론

가스터빈 성능진단 프로그램을 개발하였다. 가스터빈 성

능해석을 위하여 다양한 상용 프로그램이 존재하지만 프로그램을 수정하여 사용하는 것이 불가능하다. 즉, 상용 성능 해석 프로그램을 이용하여 터빈입구온도 보정 과정과 같은 가스터빈의 성능진단 로직을 구현하기에는 어려움이 있다. 또한, 상용 프로그램은 독립적인 실행이 불가능하기 때문에 실제 발전소에서 성능진단을 위한 프로그램으로 사용하기에 적절하지 않다. 따라서 본 연구에서는 이러한 어려움을 해결하기 위하여 독립적으로 실행이 가능한 프로그램을 개발하였으며, 이를 상용 프로그램과 검증하였다. 검증 결과 0.4% 미만의 오차로 상용 프로그램과 일치하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 개발된 프로그램은 발전소에 설치되어 성능진단에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

실제 발전소에서 측정된 운전 자료를 이용하여 성능진단을 수행하였다. 측정성능과 기대성능을 분석한 결과를 통하여 압축기에 파울링에 의해 공기 유량, 압력비, 압축기 등엔트로피 효율 등의 파라미터가 감소하고, 가스터빈의 제어 로직에 의해 터빈출구온도와 터빈입구온도가 상승하여 가스터빈의 출력이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 터빈입구온도 보정을 통하여 가스터빈의 성능저하를 분석하였다. 터빈입구온도 보정을 통하여 계산한 가스터빈의 보정출력이 설계 성능보다 낮게 나타나며, 가스터빈에서 성능저하가 발생한 것을 명확하게 확인할 수 있다. 즉, 터빈입구온도 보정을 통하여 가스터빈의 성능저하를 정확하게 분석할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 2011 년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 2011951010001C)

## References

- (1) Arrieta, F. R. P. and Lora, E. E. S., 2005, "Influence of Ambient Temperature on Combined-Cycle Power-Plant Performance," *Applied Energy*, Vol. 80, No. 2, pp. 261~272.
- (2) De Sa, A. and Al Zubaidy, S., 2001, "Gas Turbine Performance at Varying Ambient Temperature," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 14-15, pp. 2735~2739.
- (3) Amell, A. A. and Cadavid, F. J., 2002, "Influence of the Relative Humidity on the Air Cooling Thermal Load in Gas Turbine Power Plant," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, No. 13, pp. 1529~1533.
- (4) de Silva, E. B., Assato, M., and de Lima, R. C., 2013, "Performance Prediction of Gas Turbine Under Difference Strategies Using Low Heating Value Fuel," *ASME Turbo Expo*, San Antonio, Texas, USA, GT 2013 96013.
- (5) Zwebek, A. and Pilidis, P., 2003, "Degradation Effects on Combined Cycle Power Plant Performance : Part 1 - Gas Turbine Cycle Component Degradation Effects," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 125, No. 3, pp. 651~657.
- (6) Diakunchak, I. S., 1991, "Performance Deterioration in Industrial Gas Turbines," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 114, No. 2, pp. 161~168.
- (7) Razak, A. M. Y. and Carlyle, J. S., 2000, "An Advanced Model Based Health Monitoring System to Reduce Gas Turbine Ownership Cost," *AMSE Turbo Expo*, Munich, Germany, 2000-GT-0627.
- (8) Kurz, R. and Brun, K., 2000, "Degradation in Gas Turbine Systems," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 123, No.1, pp. 70~77.
- (9) Li, Y. G., 2002, "Performance-Analysis-Based Gas Turbine Diagnostics : A Review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A : Journal of Power and Energy*, Vol. 216, No. 5, pp. 363~377.
- (10) Kong, C. D., Kho, S. H., and Ki, J. Y., 2004, "A Study on Intelligent Performance Diagnostics of a Gas Turbine Engine Using Neural Networks," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 32, No. 4, pp. 51~57.
- (11) Kim, S. K., Singh, R., and Kong, C. D., 1999, "Optimal Parameter Selection by Health Monitoring of Gas Turbine Engines using Gas Path Analysis," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 3, No. 1, pp. 24~33.
- (12) Kang, D. W., 2015, "A study on improvements in gas turbine system design, operation strategy and performance diagnostics for power plant performance enhancement," Ph. D. Thesis, Department of Engineering, Inha University, Incheon, Republic of Korea.
- (13) Li, Y. G., 2010, "Gas Turbine Performance and Health Status Estimation Using Adaptive Gas Path Analysis," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 132, No. 4, pp. 041701-1~041701-9.
- (14) Cloyd, S. T. and Harris, A. J. Jr., 1995, "Gas Turbine Performance : New Application and Test Correction Curves," *ASME 1995 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, Houston, Texas, USA., 95-GT-167.
- (15) MathWorks, MATLAB ver. R2015b, 2015.
- (16) GE Energy, GateCycle ver. 6.1.2, 2013;
- (17) McBride, B. J., Zehe, M. J., and Gordon, S., 2002, "NASA Glenn coefficients for calculating thermodynamic properties of individual species," *NASA/TP-2002-211556*.
- (18) Walsh, P. P. and Fletcher, P., 2004, *Gas turbine performance*, 2nd ed., Blackwell Publishing, Massachusetts.



- (19) Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., and Bailey, M. B., 2012, Principles of Engineering Thermodynamics, 7th ed., John Wiley & Sons, New York.
- (20) Turns, S. R., 2000, An Introduction to Combustion Concept and Applications, 2nd ed., McGraw-Hill International editions, USA.
- (21) Lee, J. J. Kang, D. W., and Kim, T. S., 2011, "Development of a Gas Turbine Performance Analysis Program and Its Application," Energy, Vol. 36, No. 8, pp. 5274~5285.
- (22) Smith, S. W., 1997, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, 2nd ed., California Technical Publishing, San Diego.
- (23) Stamatis, A., Mathioudakis, K., and Papailiou, K. D., 1990, "Adaptive Simulation of Gas Turbine Performance," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 112, No. 2, pp. 168~175.