

열회수증기발생기 해석방법을 개선한 가스터빈 복합발전 성능해석 프로그램 개발

박진희* · 이재홍** · 김동섭***† · 정경우****

Development of a Performance Analysis Program for the Gas Turbine Combined Cycle with an Improved Heat Recovery Steam Generator Analysis

Jin Hee Park*, Jae Hong Lee**, Tong Seop Kim***†, Kyung Woo Jung****

Key Words : Gas turbine combined cycle(가스터빈 복합발전), Heat recovery steam generation(열회수증기발생기), Performance analysis(성능해석), Design(설계), Off-design(탈설계)

ABSTRACT

Accurate prediction of off-design performance is an important task in the design stage of gas turbine combined cycle (GTCC) power plants, and commercial software is generally used for that purpose. Most commercial software is easy to use in general but is hard to use effectively to guarantee a high accuracy because the mathematical models are very simple or not easy to be tuned to specific purposes. In the GTCC analysis, the analysis of the heat recovery steam generator (HRSG) is the major source of simulation uncertainty. To overcome the problem, a GTCC analysis program was developed, focusing on enhancing the convenience and versatility of the HRSG analysis. The program was coded with the Excel Visual Basic for applications (VBA). The program was validated through comparison with reference data. The maximum deviation from the reference data was 0.27% in the design calculation and 3.26% in the off-design calculation, which are lower in comparison to commercial software.

1. 서 론

가스터빈 복합발전(Gas turbine combined cycle, GTCC)은 상부사이클인 가스터빈(Gas turbine, GT)에서 1차적으로 전력을 생산한 후, 600 °C 내외의 높은 온도의 가스를 배출한다⁽¹⁾. 그리고 열회수증기발생기(Heat recovery steam generator, HRSG)와 증기터빈(Steam turbine)으로 구성된 하부사이클에서 배출가스의 폐열을 회수하여 2차 전력을 생산한다.

우리나라에서 GTCC 플랜트가 침두부하를 담당하기 때문에 대부분의 GTCC는 설계점과 다른 부하나 외기 조건에서 가동된다. 따라서 탈설계(Off-design) 모드에서 변화된

GTCC의 성능을 분석하는 것은 필수적인데, 일반적으로 상용프로그램으로 성능변화를 예측한다⁽²⁾. 특히, 플랜트 설계를 위한 엔지니어링 단계에서 사용하기 편리하면서도 정확도가 높은 성능예측 프로그램의 필요성이 매우 높다. 하지만, 시중에 출시되어 있는 많은 상용프로그램들은 사용 난이도가 높기 때문에 플랜트엔지니어들이 플랜트 설계 단계에서 활용하기에 편의성이 낮다. 더욱이, 탈설계 해석의 정확도를 높이는 것이 어렵다.

특히, 하부사이클, 그 중에서도 HRSG의 탈설계 성능을 예측하는 것이 쉽지 않다. 많은 상용프로그램의 경우 HRSG의 탈설계 운전 시 총괄열전달계수(Overall heat transfer

* 인하대학교 대학원 (Graduate School, Inha University)

** 현 소속, (주)두산중공업 (Doosan Heavy Industries & Construction)

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

**** 포스코건설 (POSCO Engineering & Construction)

† 교신저자, E-mail : kts@inha.ac.kr

coefficient, U) 도출에 식 (1)을 사용하는데 이러한 방법을 본 연구에서 Empirical equation(EE)방법이라 명명한다. 하첨자 'de', 'h'는 각각 설계점, 고온부 가스의 값을 의미한다.

$$\frac{U}{U_{de}} = \left(\frac{m_h}{m_{h,de}} \right)^a \left(\frac{T_h}{T_{h,de}} \right)^b \left(\frac{P_h}{P_{h,de}} \right)^c \quad (1)$$

일예로 GateCycle⁽³⁾에서는 기본적으로 식 (1)의 지수 a, b, c를 사용자가 직접 입력하여야 하는데 사전정보가 없을 경우에 0.8, 0, 0 과 같은 기본값을 사용하도록 권한다. 즉, EE 방법으로 해석할 경우 해석의 정확도를 높이기 위해서는 사용자가 지수를 튜닝(tuning)하여 사용해야 한다. 하지만, 엔지니어링 단계에서 프로젝트를 수행할 때마다 지수를 찾는 것은 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점에 착안하여 사용 난이도가 비교적 낮은 Excel VBA를 기반으로 하여 편의성과 범용성을 높인 GTCC 플랜트 성능 해석 프로그램을 개발했다. 특히 개발된 프로그램은 EE 방법과 다른 방법을 사용하여 해석의 정확성을 높였다.

2. 프로그램 개발

2.1 개요 및 구조

선행연구에서 가스터빈에 대한 전문적인 지식이 높지 않은 상태에서도 제작사가 제시하는 보장곡선을 재현하고 운전점 변화를 손쉽게 모사할 수 있는 가스터빈 해석프로그램을 개발하였다^(4~5). 본 연구에서는 이 프로그램에 하부사이

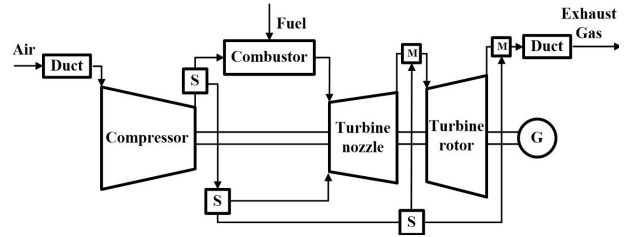


Fig. 1 Configuration of the GT

클 해석을 추가하여 GTCC 해석 프로그램으로 확장했다.

가스터빈 프로그램과 하부사이클 프로그램을 순차적으로 호출하면 GTCC 해석이 가능하도록 프로그램을 구축하였다. 프로그램은 설계 성능 모사 후 설계점 값을 기준으로 탈설계 해석을 수행한다. 프로그램은 HRSG의 배치가 자유롭고 삼중압까지 해석이 가능하여 다양한 GTCC 해석이 가능하다.

2.2 가스터빈 프로그램

프로그램 구성요소는 Fig. 1과 같이 덕트, 압축기, 연소기, 터빈, 발전기, 믹서, 스플리터이다. Fig. 2에 프로그램의 입력값(Input data)과 계산 과정을 나타냈다. Fuel, Air 모듈에서 연료, 공기의 질량 유량 계산 후, 구성부의 모듈을 순차적으로 호출하여 설계 및 탈설계 해석을 한다. 각 해석 모드는 다변수 뉴턴랩슨(Multi-variable Newton-Raphson) 방법을 사용하여 목표값(Target value)을 만족시키기 위한 변수(Unknown)를 찾아내는 과정이다. 탈설계 해석에서 외기 및 연료 조건이 변화하는 경우(Mode I)와 부분 부하로 작동하는 경우(Mode II)의 목표값과 변수가 달라서 이를 구분

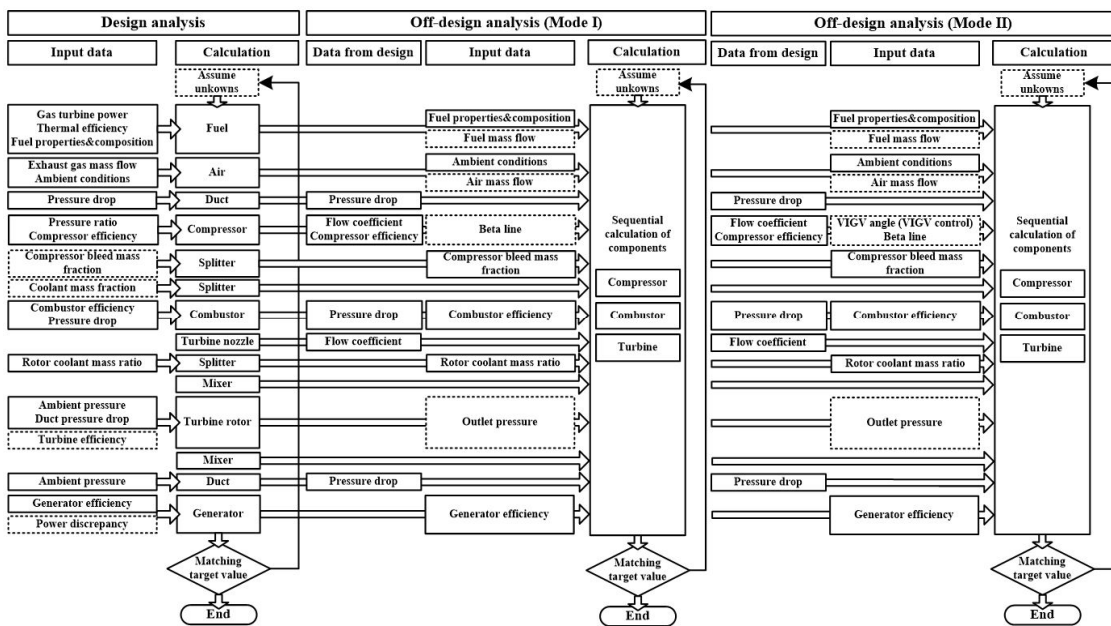


Fig. 2 Structure of the GT program

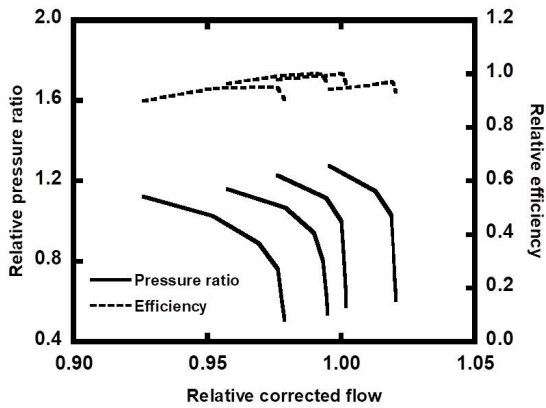


Fig. 3 Example of the compressor map

하였다. Table 1-3은 해석 모드 별 목표값과 변수이다. Compressor bleed mass fraction은 압축기 출구 질량 유량과 연소기 입구 질량 유량의 비이고, Coolant mass fraction은 총 냉각 유량과 터빈 노즐 입구 질량 유량의 비이다. Beta line은 압축기 성능선도 상의 가상의 선으로 무차원 유량이 증가하지 않는 터빈 choking 영역에서 수치 해석적으로 해를 찾는 데 사용된다. Beta line을 사용하여 특성 파라미터를 도출하는 과정은 문헌으로부터 참고 가능하다⁽⁶⁾.

가스터빈의 부하는 가변 입구안내깃(Variable Inlet Guide Vane, VIGV) 방법으로 제어한다. VIGV의 각도 조절이 가능한 한도까지 줄인 후에 연료 유량을 조절하여 부하를 낮추는 방법으로 복합발전에서 하부사이클의 효율을 높이기 위해 사용한다. VIGV 각도 조절 시, 터빈 입구 혹은 출구 온도를 일정하게 유지함에 따라 목표값을 다르게 설정할 수 있다.

Table 1 Target values and unknowns for the GT design analysis

Target values	Unknowns
Turbine inlet temperature	Compressor bleed mass fraction
Turbine rotor inlet temperature	Coolant mass fraction
Exhaust gas temperature	Turbine efficiency
Power output	Power discrepancy

Table 2 Target values and unknowns for the GT off-design analysis (Mode I)

Target values	Unknowns
Compressor mass balance	Air mass flow
Turbine inlet temperature	Fuel mass flow
Turbine choking	Beta line
Ambient pressure	Turbine outlet pressure

Table 3 Target values and unknowns for the GT off-design analysis (Mode II)

Target values	Unknowns
Compressor mass balance	Air mass flow
Net power	Fuel mass flow
Turbine choking	Beta line
Ambient pressure	Turbine outlet pressure
Turbine inlet temperature / Exhaust gas temperature	VIGV angle

2.3 하부사이클 프로그램

하부사이클 프로그램은 Fig. 4처럼 증기를 생성하는 HRSG와 전력을 생산하는 증기터빈 영역으로 나눌 수 있다. 프로그램은 Fig. 5와 같이 HRSG와 증기터빈 영역의 모듈을

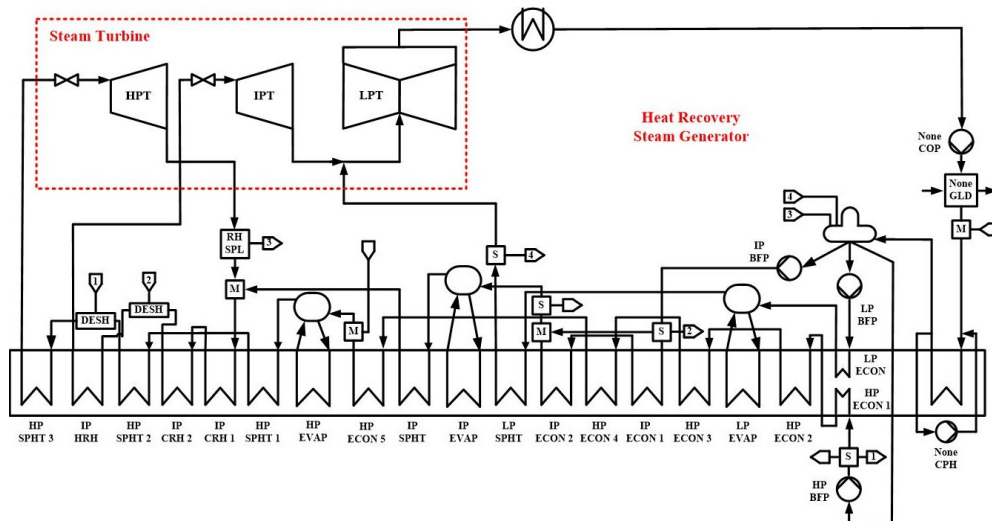


Fig. 4 Configuration of the bottoming cycle

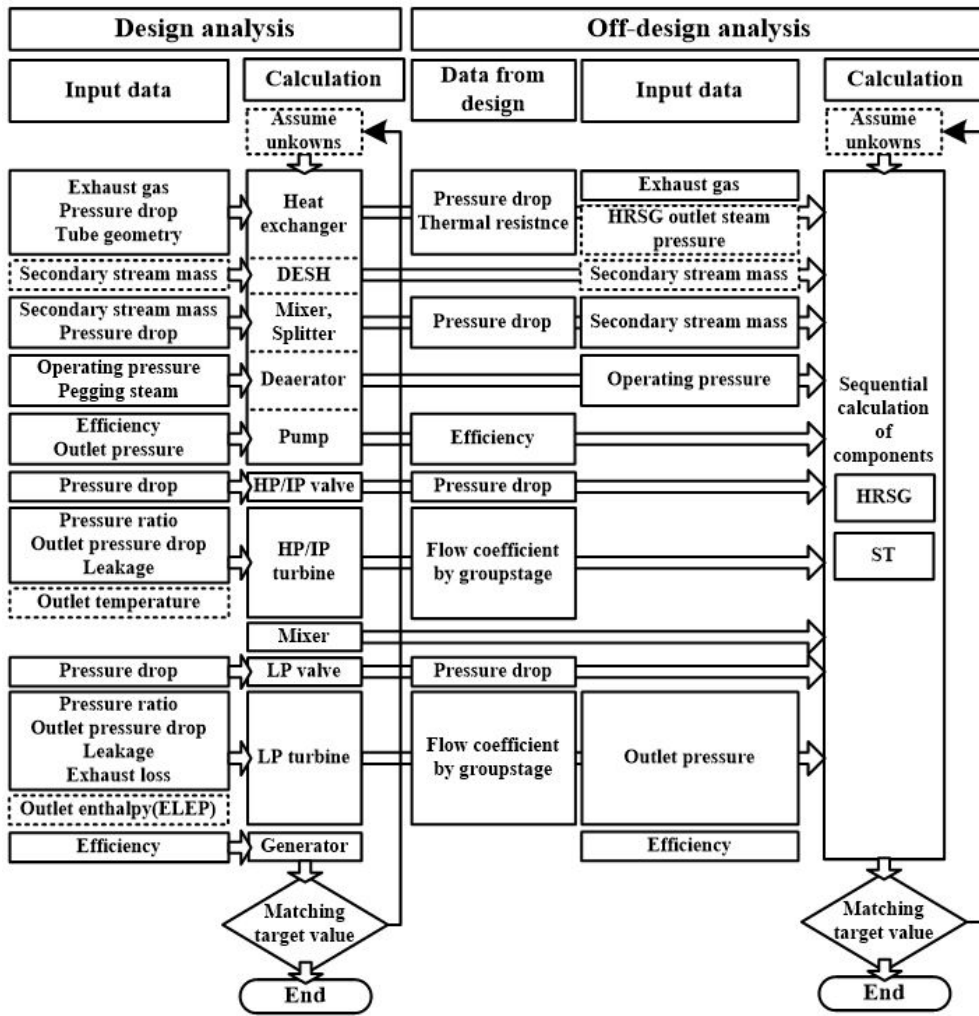


Fig. 5 Structure of the bottoming cycle program

Table 4 Target values and unknowns for the bottoming cycle design analysis

Target values	Unknowns
Downstream SPHT outlet temperature	DESH secondary mass flow rate
Turbine efficiency	Turbine outlet temperature
LPT efficiency	LPT outlet enthalpy

Table 5 Target values and unknowns for the bottoming cycle off-design analysis

Target values	Unknowns
Downstream SPHT outlet temperature	DESH secondary mass flow rate
Turbine inlet pressure	HRSG outlet steam pressure

호출하여 해석한다. 플랜트마다 HRSG의 구성이 다양하므로 HRSG 영역에서는 사용자가 입력한 기기 순서대로 해당 모듈이 호출된다. 설계와 탈설계 해석의 목표값과 변수를

Table 4-5에 나타냈다. 과열저감기(Desuperheater, DESH)는 과열기(Superheater, SPHT) 입구에 설치되어 터빈 입구 증기의 과열도를 낮추는 기기이다. 다른 압력 레벨의 터빈과 달리 저압 터빈(Low pressure turbine, LPT)은 엔탈피를 변수로 한다.

3. 단위기기 모델링

3.1 물성치

가스의 물성치 계산 코드는 NASA Glenn Report⁽⁷⁾를 참고하여 개발했고, 증기 및 물의 물성치 계산코드 XSteam⁽⁸⁾을 Excel VBA와 연동하여 사용했다.

3.2 가스터빈

가스터빈의 단위기기 해석 모델은 각 기기에서의 질량 및 에너지 보존 방정식을 이용하여 모델링하였다⁽⁴⁻⁵⁾. 사용자가

보유한 압축기 성능 선도를 행렬 형태로 입력하면, 압축기와 터빈의 매칭을 통해 가스터빈 탈설계 해석이 가능하다.

3.3 열회수증기발생기

3.3.1 열교환기

본 연구에서 채택한 해석 방법을 열 저항(Thermal resistance, TR) 방법이라 명명하였다. 열교환기를 Fig. 6과 같이 관의 외·내부 대류, 관의 전도 영역으로 나누어 해석하였다. Fig. 7은 열교환기의 설계 및 탈설계 해석 순서도이다. 물성치 계산이 완료되면 식 (2)–(3)을 통해 관의 표면적(A_o)과 총괄 열전달계수를 구한다. 관의 표면적은 나관(Bare tube)의 표면적($A_{o,bare}$)에서 핀(fin)으로 인해 증가한 면적비(AR_{fin})를 곱하여 구할 수 있다. n_{tube}, d_o, l 은 관의 개수, 외부 직경, 길이를 의미한다.

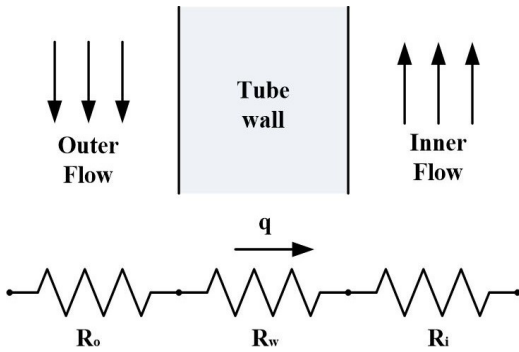


Fig. 6 Heat transfer through tube wall

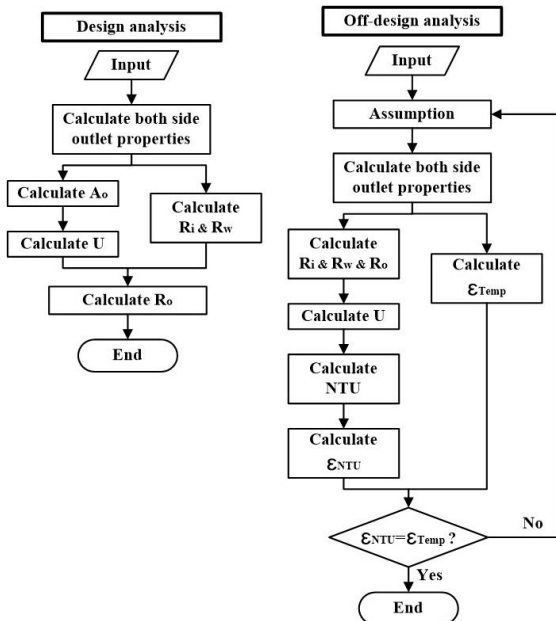


Fig. 7 Flow chart for the heat exchanger

$$A_o = AR_{fin} A_{o,bare} \quad (2)$$

$$A_{o,bare} = n_{tube} \pi d_o l$$

$$U = \frac{\dot{Q}}{A_o \Delta T_{LMTD}} \quad (3)$$

각 영역의 열 저항 식은 식 (4)–(6)이다. 관 내부 대류 열전달 계수(h_i)는 상변화 유무에 따라 달라지기 때문에 과열기와 절탄기(Economizer, ECON)에서는 Dittus Boelter형 상관식을 사용하고⁽⁹⁾, 증발기에서는 Chen의 경험식을 사용했다⁽¹⁰⁾. 증발기에서 관 내부 대류 열전달 계수는 강제 대류(forced convection, fc) 열전달 계수와 핵비등(nucleate boiling, nb) 열전달 계수의 합이며, 두 계수는 Reynolds number factor(F)와 Suppression factor(S)로 보정하여 사용한다.

관 외부 열전달 계수(h_o)는 ESCOA의 제안에 따라 식 (6)으로 정의된다⁽¹¹⁾. j, G, Pr 는 Colburn 인자, 가스 질량 유속, 프란틀 수를 의미하며 식 (6)을 사용하면 추가적인 설계 조건이 필요하다. 따라서 프로그램에서는 총괄 열전달 계수와 앞서 계산한 두 가지 열 저항을 이용하여 외부 열 저항을 식 (7)로 구한다. 탈설계 외부 열 저항은 식 (6)의 관 외부 대류 열전달 계수 정의를 통해 도출한 식 (8)로 구한다.

탈설계 해석에서는 저온부 유체 출구온도(과열기, 절탄기) 혹은 생성 증기량(증발기)을 가정한 후 ϵ_{NTU} 와 ϵ_{Temp} 가 같아질 때까지 계산한다. ϵ_{NTU} 는 effectiveness-NTU 방법⁽¹²⁾으로 구한 유용도이고, ϵ_{Temp} 는 최대 교환 열량 대비 실제 교환 열량 값으로, 작동 유체의 온도로 구할 수 있다.

$$R_i = \frac{d_o}{h_i d_i} \quad (4)$$

$$\text{where, } h_i = \begin{cases} 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{k}{d_i} & \text{for SPHT, ECON} \\ Fh_{fc} + Sh_{nb} & \text{for EVAP} \end{cases}$$

$$R_w = d_o \frac{\ln(d_o/d_i)}{2k} \quad (5)$$

$$R_o = \frac{1}{h_o} \quad \text{where, } h_o = jGC_p Pr^{-0.6} \quad (6)$$

$$R_o = \eta_{fin} \left(\frac{1}{U} - AR_{fin} R_i - AR_{fin} R_w \right) \quad (7)$$

$$R_o = R_{o,de} \left(\frac{\dot{m}_h}{\dot{m}_{h,de}} \right)^{-1} \left(\frac{C_{ph}}{C_{ph,de}} \right)^{-0.33} \left(\frac{k_h}{k_{h,de}} \right)^{-0.67} \left(\frac{\mu_h}{\mu_{h,de}} \right)^{0.67} \quad (8)$$

3.3.2 기타 기기

기타 기기로는 과열저감기, 믹서, 스플리터, 탈기, 펌프가 있다. 질량 및 에너지 보존 법칙에 따라 해석이 이뤄지며, 탈설계 해석에서는 설계 조건의 압력 손실을 질량 유량과 비

체적으로 보정하는 과정이 추가된다. 기기로 유입되는 유체의 상태(증기·물)에 따라 식 (9) 혹은 (10)을 사용한다.

$$\frac{\Delta P_{steam}}{\Delta P_{steam,de}} = \left(\frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{i,de}} \right)^{1.98} \left(\frac{v_i}{v_{i,de}} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\Delta P_{water}}{\Delta P_{water,de}} = \left(\frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{i,de}} \right)^{1.98} \quad (10)$$

3.4 증기터빈

3.4.1 밸브

밸브를 통해 터빈 입구의 압력 손실을 반영하고, 작동 유체가 증기 이므로 식 (9)로 설계점의 압력 손실을 보정하여 탈설계 해석에서 사용한다.

3.4.2 터빈

터빈은 다단 터빈으로 해석하고 누설 유량을 고려하여 스테이지 그룹(Stage group)을 나누어 해석했다⁽¹³⁾. 모든 단은 등압력비 단으로 설정되었으며, 단의 개수가 N개인 경우 각 단의 압력비는 식 (11)로 계산한다.

저압 터빈에서는 터빈 최종단과 응축기 사이에서 발생하는 배출손실(Exhaust loss)을 고려한다. 식 (12)는 배출손실, ELEP(Expansion line end point), UEEP(Used energy end point)의 관계이다. Moisture function(MF)을 통해 터빈 최종단 출구의 습분에 영향을 반영했다.

탈설계 해석에서 터빈 입구 압력 산정을 위하여 Stodola's ellipse law를 적용했다. 설계점을 기준으로 하여 단의 출구 압력(B_i)을 식 (13)으로 계산할 수 있다.

$$\text{Stage pressure ratio} = (\text{Pressure ratio})^{1/N} \quad (11)$$

$$h_{UEEP} = h_{ELEP} + MF \times \text{exhaust loss} \quad (12)$$

where, $MF = (1 - 0.01 Y) 0.86 (1 - 0.0065 Y)$

$$B_i = P_i \sqrt{1 - \frac{\dot{m}_i v_i}{P_i} Y_{i,de}} \quad \text{where, } Y_{i,de} = \frac{P_{i,de}^2 - B_{i,de}^2}{P_{i,de}^2 \phi_{i,de}^2} \quad (13)$$

4. 결과 및 논의

4.1 가스터빈 프로그램 검증

가스터빈 프로그램은 해석 결과를 상용프로그램 GateCycle⁽³⁾과 비교하여 검증하였다. MHPS, GE, Siemens사의 H, J급 가스터빈의 설계해석을 수행하여 설계 변수 값과 가스터빈 출력을 비교했고, 최대 0.22%의 편차를 보였다. 탈설계 해석은 GE 7FA.03 기종을 대상으로 외기온도,

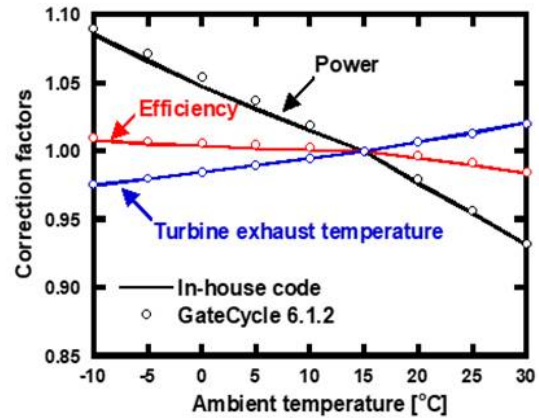


Fig. 8 Variation in the GT performance with ambient temperature

외기압력, 부하를 변화시키며 수행하였다. 상용프로그램과 터빈 출구 온도, 효율, 출력을 비교하여 최대 0.60%의 편차를 가졌다. Fig. 8에 개발된 프로그램과 상용프로그램의 외기 온도 변화에 따른 가스터빈의 성능 변화 결과를 예시하였다.

4.2 하부사이클 프로그램 검증

하부사이클 프로그램으로 플랜트 엔지니어링사에서 수행한 프로젝트를 모사하였으며 하부사이클 구조는 Fig. 4와 같다. 기준 데이터(Reference data)는 열정산도 상의 자료를 사용하였고, 기타 열교환기 관의 개수, 직경 등의 형상 정보도 제공받았다(430MW급 GTCC 자료, 포스코건설 제공).

Table 6에 하부사이클의 설계 조건과 해석 결과를 나타냈다. 설계 해석의 결과는 HRSG의 최종 출구 가스 온도를 비

Table 6 Bottoming cycle specifications

Parameters		In-house code	Reference data
Ambient conditions		19 °C, 1.01 bar, 58.7 %R.H.	
Gas input	Mass flow rate [ton/hr]	2467.60	
	Temperature [°C]	610.00	
	Composition [wt.%]	13.72 (O2), 6.12 (CO2), 5.68 (H2O), 73.17 (N2), 1.36 (AR)	
Steam input	Desired steam production [ton/hr] (EVAP)*	299.90 (HP), 62.8 0(IP), 38.00 (LP)	
	Deaerator operating pressure [bar]	3.2	
	Turbine inlet pressure [bar]	125.00 (HP), 30.60 (IP), 5.70 (LP)	
Output	Exhaust gas temperature [°C]	90.30	90.54

* Enter cold side outlet temperature for SPHT, ECON.

Table 7 Gas turbine operating condition

Case	Ambient temperature [°C]	Gas turbine load [%]	Evaporative cooler
1	5	100	Off
2	35	100	Off
3	19	100	On
4	35	100	On
5	19	90	Off
6	19	80	Off

교하였고, 해석 결과와 기준 데이터와의 편차는 0.27%이다.

탈설계 해석은 Table 7의 서로 다른 6가지의 조건 아래 작동한 가스터빈의 출구가스 조건을 입력 받았다. Case 1, 2는 외기 온도를 변화시킨 경우이고, Case 3, 4는 Evaporative cooler를 사용하면서 외기온도가 각 19°C, 35°C 인 경우이다. Evaporative cooler는 외기 온도가 높아져 발생한 가스터빈의 출력 감소 방지를 위해 사용한다. Case 5, 6은 가스터빈이 90%, 80%의 부분부하로 작동할 때이다.

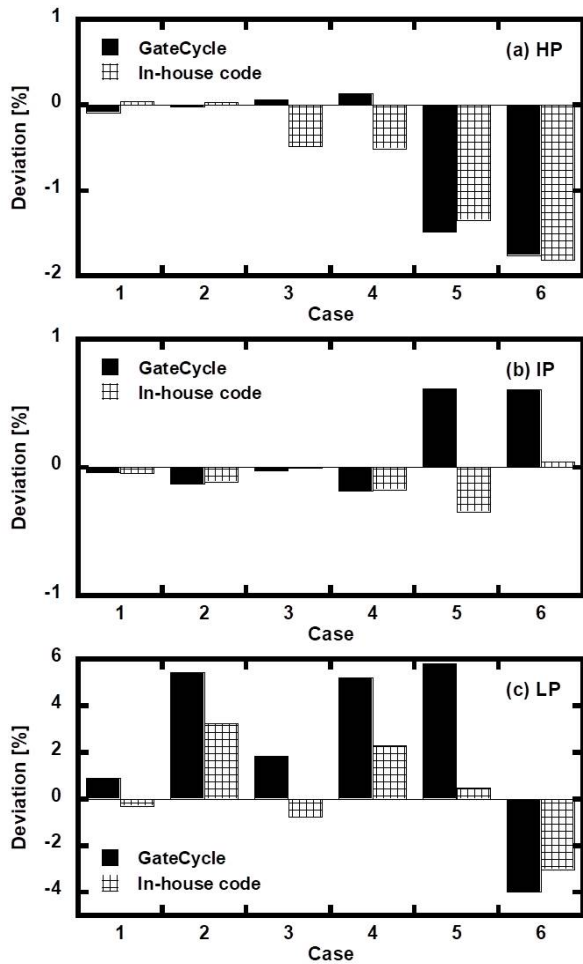


Fig. 9 Turbine inlet mass flow deviation between program results and reference data: (a) HP (b) IP (c) LP

탈설계 해석 결과는 기준 데이터와 압력 레벨 별 터빈입구 질량 유량과 온도를 비교하였다. 개발된 프로그램은 HRSG 탈설계 해석 시 EE 방법의 문제점을 보완하기 위하여 TR 방법을 사용했다. 따라서 동일한 하부사이클을 EE 방법을 사용하는 상용프로그램인 GateCycle⁽³⁾으로도 해석하여 그 결과를 기준 데이터와 비교하였다. Fig. 9-10 에 6 가지 case 의 각 프로그램 해석 결과와 기준 데이터 사이의 편차를 나타냈다. Fig. 9가 질량 유량, Fig. 10이 온도의 결과이다. 질량 유량과 온도의 편차의 정의는 식 (14)-(15)와 같다.

$$\text{mass flow deviation [\%]} = \frac{\dot{m} - \dot{m}_{ref}}{\dot{m}_{ref}} \times 100 \quad (14)$$

$$\text{temperature deviation [\%]} = \frac{T - T_{ref}}{T_{ref}} \times 100 \quad (15)$$

개발된 프로그램으로 6 가지 case의 해석 결과 기준 데이터와 최대 편차는 질량 유량에서 3.26%, 온도에서 -0.60% 이고, 대부분의 편차가 GateCycle의 해석 결과와 기준 데이

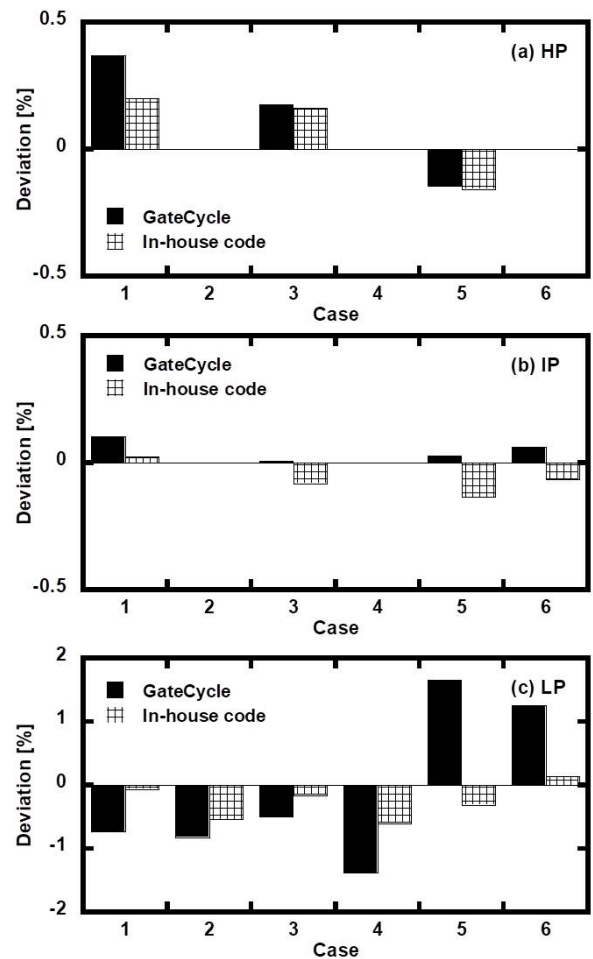


Fig. 10 Turbine inlet temperature deviation between program results and reference data: (a) HP (b) IP (c) LP

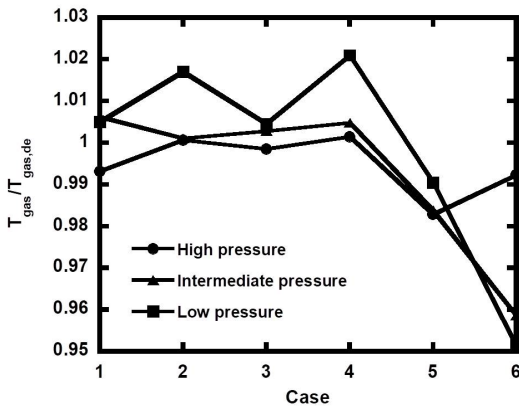


Fig. 11 EVAP gas inlet temperature ratio between design and off-design

터 사이의 편차와 비교하여 감소했다. 위 검증을 통해 개발된 프로그램이 하부 사이클 성능 해석에 활용되기에 충분한 신뢰성이 있다고 판단하였다.

GateCycle의 해석 결과 기준 데이터 사이 편차가 크게 발생하는 원인을 분석하였다. Fig. 11은 압력 레벨 별 증발기 입구 가스의 설계와 탈설계 온도 비이다. 압력 레벨 별 Case 5, 6 그리고 저압의 Case 2, 4에서 온도 비가 1에서 많이 벗어나는 데 이때, GateCycle의 결과와 기준데이터 사이 편차가 다른 Case 대비 큰 것을 Fig. 9에서 확인할 수 있다. 즉, EE 방법으로 HRSG의 탈설계 해석을 수행할 경우 식 (1)에서 설계와 탈설계 가스 온도 비의 지수인 b의 최적 값을 찾는 과정이 필요하지만 개발된 프로그램에서는 이러한 튜닝 과정 없이 열교환기 형상 정보를 이용하여 GateCycle보다 정확도 높은 HRSG 탈설계 해석이 가능하다.

5. 결론

본 연구를 통해 가스터빈 복합발전 플랜트 성능 해석 프로그램을 개발하고 신뢰성을 검증했다.

- 1) 프로그램은 범용 소프트웨어인 Excel VBA를 기반으로 개발되었고, 객체지향 프로그래밍 기법으로 플랜트 구성부를 모듈화하여 사용 편의성을 높였다. 가스터빈 프로그램은 상용프로그램인 GateCycle과 해석 결과를 비교하여, 설계 해석 최대 0.22%, 탈설계 해석에서는 최대 0.60%의 편차가 발생했다. 하부사이클 프로그램은 기준데이터와 해석 결과를 비교하였다. 설계 해석에서 0.27%, 탈설계 해석에서는 3.26%의 편차가 발생했다.
- 2) 개발된 프로그램은 HRSG 탈설계 해석에 TR 방법을 사용했다. 이 방법은 EE 방법에서 정확성을 높이기 위한 과정인 지수 튜닝이 필요하지 않다는 장점을 가지고 있다. 동일한 하부사이클을 두 가지 해석 방법으로 해석하여 그 결과와 기준 데이터 사이의 편차를 비교하였

고, TR 방법을 사용하였을 때 기준데이터와의 편차가 더 작음을 확인했다.

- 3) 본 연구를 통해 개발된 프로그램은 가스터빈 복합발전 플랜트의 운전조건 변화에 따른 성능 변화를 예측할 수 있다. 또한, HRSG 해석 면에서 상용프로그램보다 편의성, 신뢰성이 높다. 따라서 엔지니어링 업무에서 요구하는 HBD 및 보정곡선 도출에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.
- 4) 프로그램은 단위기기가 모듈화되어 있어 지속적인 확장이 가능하다. 현 프로그램은 수평형 HRSG를 기본으로 프로그래밍 되었는데, 열전달 계산 관계식을 보완하면 수직형 HRSG도 해석할 수 있다. 또, 지역난방 열교환기 모듈을 추가하면 열병합발전 플랜트의 성능해석에도 본 프로그램이 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 포스코건설의 지원을 받아 수행한 과제입니다. (과제명: 복합발전 통합설계 시스템 개발)

References

- (1) Szuch JR., 1974, "HYDES - A generalized hybrid computer program for studying turbojet or turbofan engine dynamics," NASA-TM-X-3014.
- (2) Ersayin E, Ozgener L., 2015, "Performance analysis of combined cycle power plants: A case study," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 43, pp. 832~842.
- (3) GE Energy, 2015, GateCycle 6.1.2.
- (4) Lee, J.H., Kim, T.S., Kang, J.S., Jung, K.W., 2019, "Development for performance analysis program of gas turbine to generate correction curves of combined cycle power plant," Annual conference, Korea Institute of Plant Engineering & Construction, Seoul, Korea.
- (5) 김동섭, 권현민, 문성원, 이재홍, 2019, "복합발전용 가스 터빈 상용모델별 성능특성 연구 보고서," 포스코건설
- (6) Kim, J.H., Kim, T.S., Moon, S.J., 2016, "Development of a program for transient behavior simulation of heavy-duty gas turbine," J. of Mechanical Science and Technology, Vol. 30, pp. 5817-5828
- (7) McBride, Bonnie J., Zehe, Michael J., Gordon, Sanford, 2002, "NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species", NASA/TP-2002-211556.
- (8) Magnus Holmgren, 2006, "X STEAM FOR MATLAB", www.x-eng.com (accessed on 01 February 2022).
- (9) John G. Collier, John R. Thome, 1994, "Convective Boiling and Condensation," Oxford: Clarendon Press.

- (10) John C. Chen, 1966, "Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow," *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 5, pp. 322~329.
- (11) ESCOA, 1978, "Fin Tube Manual," ESCOA Corp.
- (12) Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, 2012, "Foundations of Heat Transfer," John Wiley & Sons, New York, pp. 662~669.
- (13) D. H. Cooke, 1985, "On Prediction of Off-Design Multistage Turbine Pressures by Stodola's Ellipse," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 107, No. 3, pp. 596~606.