

## IGCC 온라인 성능계산 모듈

주 용진<sup>1)</sup>, 김 시문, 이 민철, 정 재화

### On-line Performance Calculation Module of IGCC Power Plant

Yongjin Joo, Simoon Kim, Minchul Lee, Jaehwa Chung

**Key words** : IGCC(석탄가스화 복합발전), Performance Monitoring(성능감시), On-line(온라인)

**Abstract** : This present paper describes concepts of the real-time operation monitoring system as a tool for enhancing the reliability and raising the availability of the first Korea IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) power plant. This system consists of five (5) modules : (1) Data Validation Module, (2) Performance Calculation Module (3) Performance Diagnostic Module, (4) Trip Information Module, and (5) Statistics Analysis Module. Among these modules, Performance Calculation Module is explained in more detail. The objective of this module is to continuously evaluate the degradation (decrease in performance) of the IGCC plant and its equipment in order to provide plant operators additional information to help them identify problems, improve performance.

## 1. 서론

석탄 가스화복합발전 (IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle)은 연료인 석탄을 부분 연소시켜 가스화한 후, 생성된 가스를 정제하여 가스터빈 연료로 사용하고, 또한 석탄의 가스화시 발생한 열과 가스터빈 배기가스에서 회수한 열에 의해 발생된 증기를 이용하여 증기터빈을 구동하는 복합사이클 발전기술이다. 유럽과 미국에서 출력 300MW급 IGCC 플랜트 4기가 운전되고 있으며, 기존의 미분탄발전소와 경쟁하기 위해서 오늘날의 IGCC 기술이 직면한 주요 과제는 설치비용과 가동률(availability)과 관련한 문제들이다<sup>(1)</sup>.

Table 1의 전력생산을 목적으로 하는 300MW급 상업용 IGCC 플랜트에 대하여 상업운전 이후 가동률을 도시화하면 Fig. 1과 같이 표현된다<sup>(2)</sup>. 모두 상업운전 초기에는 가동률 30% 미만의 저조한 수치를 기록하였으며, 약 10년이 지난 현재시점에서야 비로서 약 80%의 가동률에 도달하고 있다. 그러나 이 수치도 미분탄발전소가 약 90% 가동률로서 운전됨에 비해 아직도 많은 기술적 보완이 필요함을 시사한다. 가동률을 높이기 위해서는 우선적으로 ‘올바른 설계 및 시공’이 선행되어야 하며 후속적으로 운전 및 유지관리 능력을 향상시키는 것이 필요하다.

Table 1 300MW class IGCC plants

Plant Owner	Nuon Power	Global Energy	Tampa Electric	Ecogas
Plant Name	Buggenum (Netherlands)	Wabash River (USA)	Polk Power (USA)	Puertollano (Spain)
Unit Net Capacity	253 MW	262 MW	250 MW	300 MW
Gasifier Supplier	Shell	ConocoPhillips	GE Energy	Prenflo
Gasifier Type	Entrained Flow	Entrained Flow	Entrained Flow	Entrained Flow
Gas Turbine	Siemens V94.2	GE 7FA	GE 7FA	Siemens V94.3
Start-up Date	1994	1995	1996	1998
Net Eff. (HHV)	41.30%	39.70%	36.50%	41.50%

이에 국내최초로 2012년 준공예정인 300MW급 IGCC 실증플랜트의 가동률을 높이기 위한 운전능력 향상 툴로서 ‘IGCC 실시간 운전감시시스템’ 개발을 모색하게 되었다. 이 시스템은 온라인, 실시간으로 분산제어시스템 (DCS, Distributed

1) 한전전력연구원  
E-mail : yongjj@kepri.re.kr  
Tel : (042)865-5380 Fax : (042)865-5497

Control System)으로부터 발전소 공정데이터를 취득하고 각종 성능(출력, 열소비율, 효율 등)을 계산하여 운영자에게 현재 발전소 전체 및 단위 구성기기 상태를 신속히 알려주는 역할을 수행한다. 성능을 계산하기 위해서는 이와 관련된 성능인자를 분석하고 이들의 상관관계를 수식화하는 것이 필요하며, 더 나아가 전산상 프로그래밍을 위해 데이터베이스를 구축하는 것이 요구된다.

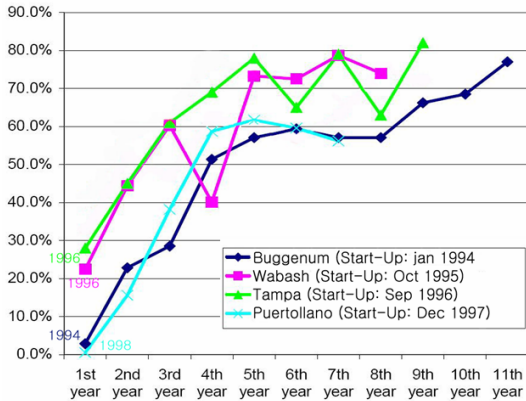


Fig. 1 IGCC availability history. Graph provided by Jeff Phillips, EPRI, 2005)

## 2. IGCC 실시간 운전감시시스템

### 2.1 소프트웨어 계층구조

운전감시시스템은 계층구조(Fig. 2 참조)에서 보는 바와 같이 크게 5개의 계층으로 구성되어 있고, 각 계층은 독립적인 기능을 수행하거나 서로 유기적으로 연계되어 순차적 기능을 수행한다.

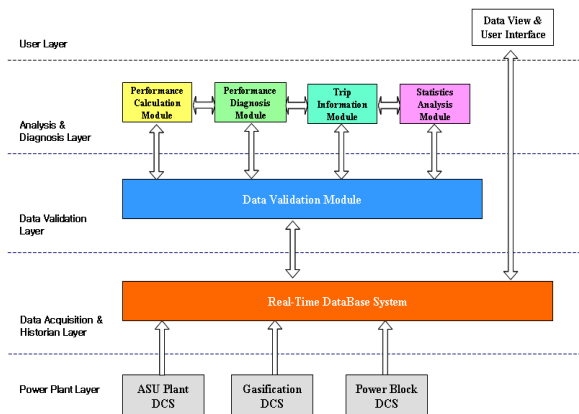


Fig. 2 System Layer Overview

구성계층은 발전소 분산제어시스템(DCS) 계층(1), 데이터 취득 및 저장계층(2), 신호검증 계층(3), 분석 및 진단 계층(4), 그리고 다양한 성능정보 결과를 제공하는 그래픽 사용자 인터페이스(GUI) 계층(5)으로 구성된다.

전체 계산 흐름은, 먼저 실시간 운전감시의 대상이 되는 IGCC 플랜트 주요 구성기기의 현재

실측값은, DCS에서 제공되는 OPC(OLE for Process Control) 서버로부터 취득한다. 온라인 플랫폼역할을 담당하는 데이터 취득 및 저장계층에서는 발전소 분산제어시스템으로부터 실시간으로 취득된 실측 데이터를 저장하거나 다양한 운전분석 및 성능감시관련 모듈의 성능분석 및 계산에 필요한 데이터를 제공하는 기능을 수행한다. 또한 방대한 발전소 성능데이터를 효과적으로 저장하고 추적할 수 있는 기능을 제공하고, 과거 운전 데이터를 호출하여 현재 운전 데이터와 비교함으로써 성능열화 등을 파악할 수 있는 실시간 데이터 관리기능을 수행한다. 다음으로 신호검증 계층에서는 열정산모델이나 회귀분석을 통해 계측 오류가 배제된 유효치를 제공한다. 운전감시시스템에서 가장 중요한 역할을 수행하는 분석 및 진단 모듈은 성능감시에 필요한 각종 성능계산 및 진단 모듈 등이 위치하며 실측데이터를 기준으로 각종 운전통계 및 성능분석결과를 제공한다. 이러한 일련의 모듈의 결과들은 데이터 통신채널을 통하여 다시 데이터 취득/저장 계층으로 보내지고 저장됨으로서 자동으로 발전소 성능정보가 구축되며, 향후 과거 운전 데이터의 열람이나 성능보고서 작성 시에도 편리하게 운전 및 성능정보를 추출하여 사용할 수 있도록 한다.

다양한 그래픽 사용자 인터페이스(GUI : Graphic User Interface)를 통해 각종 그래프나 프로세스 다이어그램으로 성능상태 화면 및 성능보고서를 제공함으로써 발전소 성능정보에 대한 이해를 돕고 사용자 편의성이 우수한 시스템을 구현한다.

### 2.2 시스템 모듈 구성

온라인 실시간으로 발전소 주요 구성기기의 운전정보를 제공함으로써 발전소의 최적의 운전 성능으로 운전될 수 있도록 운전요원 및 성능관리자를 지원하기 위한 모듈 구성은 다음과 같다.

- 신호검증 모듈
- 성능계산 모듈
- 성능진단 모듈
- 트립정보 모듈
- 통계분석 모듈

## 3. 성능계산 모듈

신호검증 모듈에서 계산된 유효값은 실시간 데이터베이스에 저장되어 IGCC 플랜트 성능계산에 사용된다. 플랜트 주요기기(가스화기, 가스터빈)에 대하여 실제성능 및 기대성능을 계산하기 위해 성능계산 엔진을 사용하여 실시간으로 성능지표를 제공하게 하며, 기타 기기에 대해서는 제작사가 제공하는 보정곡선, 개발된 성능계산 템플릿을 알고리즘으로 사용하여 현재 운전조건에서의 실제성능, 기대성능, 보정성능을 계산함으로써 기기의 성능열화 및 전체 발전소의 성능열화를 즉시 파악하게 한다.

### 3.1 성능인자 DB 분류체계

석탄 가스화복합발전(IGCC) 시스템의 공정을 블록다이어그램으로 간략히 나타내면 Fig. 3과 같으며, IGCC 공정을 크게 대별하면 파워블록과 가스화블록으로 구분할 수 있다.

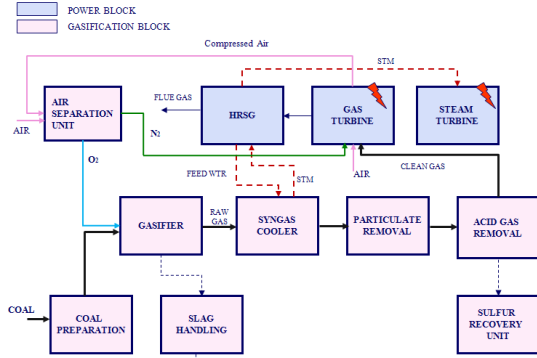


Fig. 3 Coal based IGCC Process Simplified Block Flow Diagram

성능인자를 체계적으로 정리하기 위해 Table 2과 같이 'Point ID'를 1차로 '0'으로 시작하는 "Atmospheric/General", '1'로 시작하는 "Power Block", '2'로 시작하는 "Gasification Block"으로 번호체계를 설정하였고, 2차로는 각 블록을 구성하는 주요기기에 따라 두 번째 숫자를 설정하였다.

Table 2 Category of Point ID for IGCC Performance Parameters

Point ID	Category	Comment
0010-0999	Atmospheric / General	COMMON
1000-1299	Gas Turbine	
1300-1399	Heat Recovery Steam Generator	POWER
1500-1699	Steam Turbine	BLOCK
1700-1799	Condenser	
1900-1999	Combined Cycle	
2000-2199	Gasifier	
2200-2299	Air Separation Unit	
2300-2399	Syngas Cooler	GASIFICATION
2400-2499	Particulate Removal System	BLOCK
2500-2599	Acid Gas Removal System	
2600-2699	Sulfur Recovery Unit	

Point ID는 성능인자의 출력/입력 포인트의 번호를 의미한다. 여기에는 설계치, 실측치, 계산치, 모델치로 각각 나누어 구분되며, 계산치에 해당되는 포인트에 대해서는 계산식과 인수(Arguments)의 의미, 참고문헌 등을 상세히 기록한 템플릿(template)을 가진다.

### 3.2 성능인자 DB화

앞 단원에서 분류한 성능인자 분류 체계에 따라 보다 상세히 Table 3과 같이 분류하였다. 열거된 성능인자가 측정된 것인지, 계산에 의해서 산출된 것인지를 알려주며, 계산에 의한 성능인자라면 보다 상세한 정보를 담은 템플릿(워드파일)

을 제공할 수 있도록 DB화 하였다(Fig. 4 참조). 이들 템플릿에는 상관관계식, 참고문헌, 비교, 작성자의 정보가 포함된다.

Table 3 Data Point IDs with Detail Information

Point ID	Parameter	Symbol	Unit	Data			Remarks
				Given	Measured	Calculated	
0010	Ambient Temperature	Tamb	K	○	○		
0011	Ambient Pressure	Pamb	Pa	○	○		
0012	Ambient Humidity	Humid	%	○	○		
0013	SeaLevel	L	m	○	○		
1000	Inlet Duct Pressure Drop	DPin	Pa	○	○		Including filter
1001	Specific Heat - Air	Cp	kJ/kgK	○	○		Polynomial or Constant
1002	Gas Constant - Air	Ra	J/kgK	○	○		Constant
1003	Gas Constant - Air	Ra	kJ/kgK	○	○		Constant
1004	Formation Enthalpy - Air	hfg	kJ/kg	○	○		Constant
1005	Compressor Inlet Air Flow Rate	ma1	kg/s	○	○		Constant
1006	Compressor Inlet Pressure	P01	Pa	○	○		
1007	Compressor Inlet Temperature	T01	K	○	○		
1008	Compressor Exit Temperature	T02comp	K	○	○		
1009	Compressor Exit Pressure	P02comp	Pa	○	○		
1010	Compressor Isentropic Efficiency	Eta-is-c	%	○	○		
1011	Compressor Pressure Ratio	PRcomp	%	○	○		
1012	Pressure Ratio	PRcomp	1	○	○		
1013	Compressor Power Consumption	Wcomp	kW	○	○		
1014	Cooling Air Flow Rate	mc	kg/s	○	○		
1015	Cooling Air Temperature	Tc	K	○	○		
1016	Cooling Air Pressure	Pc	Pa	○	○		
1017	Compressor Exit Air Flow Rate	ma2	kg/s	○	○		
1018	Compressor Inlet Pressure	P02comb	Pa	○	○		
1019	Compressor Inlet Temperature	T02comb	K	○	○		
1020	Compressor Exit Pressure	P03comb	Pa	○	○		
1021	Compressor Exit Temperature	T03comb	K	○	○		
1022	Compressor Exit Temperature	T03comb	K	○	○		Turbine Inlet Temperature
1023	Compressor Exit Gas Flow Rate	ma3	kg/s	○	○		
1024	Combustion Efficiency	Eta-comb	1	○	○		
1025	Mass Flow Rate of Supplied Fuel	mF	kg/s	○	○		
1026	Heating Value of Supplied Fuel	hHV	kJ/kg	○	○		Depending on Composition
1027	Pressure of Supplied Fuel	Pf	Pa	○	○		
1028	Temperature of Supplied Fuel	Tf	K	○	○		
1029	Mass Flow Rate of Supplied Water (or Steam)	mW	kg/s	○	○		
1030	Temperature of Supplied Water (or Steam)	Ts	K	○	○		
1031	Pressure of Supplied Water (or Steam)	Ps	Pa	○	○		
1032	Specific Heat - Combustion Gas	Cp	kJ/kgK	○	○		Polynomial or Constant
1033	Specific Heat Rate - Combustion Gas	q	1	○	○		Constant
1034	Gas Constant - Combustion Gas	Rg	kJ/kgK	○	○		Constant
1035	Formation Enthalpy - Combustion Gas	hfg	kJ/kg	○	○		Constant
1036	Turbine Inlet Pressure	P03tur	Pa	○	○		This value can be measured
1037	Turbine Inlet Temperature	T03tur	K	○	○		Firing Temperature
1038	Turbine Exit Pressure	P04	Pa	○	○		
1039	Turbine Exit Temperature	T04	K	○	○		
1040	Turbine Isentropic Efficiency	Eta-is-t	%	○	○		
1041	Turbine Output Power	Wtur	kW	○	○		
1042	Turbine Power Production	Wtur	kW	○	○		
1043	Pressure Drop in Inlet Duct	DPin	Pa	○	○		
1044	GT Power Production	WGT	kW	○	○		
1045	GT Thermal Efficiency	Eta-th-GT	%	○	○		
1300	Gas Flow Rate	mg	kg/s	○	○		Given from looping cycle
1301	Gas Temperature	T04	K	○	○		Given from looping cycle
1302	Gas Pressure	P04	Pa	○	○		Given from looping cycle
1303	Stack Temperature	T05	K	○	○		
1304	Stack Pressure	P05	Pa	○	○		
1305	Feedwater Flow Rate at HRSG Inlet	mfw	kg/s	○	○		
1306	Feedwater Temperature at HRSG Inlet	T06w	°C	○	○		
1307	Feedwater Pressure at HRSG Inlet	P06w	Pa	○	○		
1308	Feedwater Flow Rate at HP Feedwater Pump Exit	mfwH	kg/s	○	○		
1309	Temperature at HP Feedwater Pump Exit	T06wH	°C	○	○		
1310	Pressure at HP Feedwater Pump Exit	P06wH	Pa	○	○		
1311	Feedwater Flow Rate at IP Feedwater Pump Exit	mfwI	kg/s	○	○		
1312	Temperature at IP Feedwater Pump Exit	T06wI	°C	○	○		
1313	Pressure at IP Feedwater Pump Exit	P06wI	Pa	○	○		
1314	Feedwater Flow Rate at LP Feedwater Pump Exit	mfwL	kg/s	○	○		
1315	Temperature at LP Feedwater Pump Exit	T06wL	°C	○	○		
1316	Pressure at LP Feedwater Pump Exit	P06wL	Pa	○	○		
1317	HRSG Efficiency - Thermal Loss Method (%)	Eta-th-HRSG	%	○	○		
1318	HRSG Effectiveness	EFF-HRSG	%	○	○		

COAL-IGCC

Template ID: 1010		
Description: Calculate compressor isentropic efficiency		
Arguments		
No.	Description	Units
1	Compressor inlet pressure = P01	Pa
2	Compressor exit pressure = P02comp	Pa
3	Compressor inlet temperature = T01	K
4	Compressor exit temperature = T02comp	K
5	Mass flow rate of air at compressor inlet = ma1	kg/s
6	Mass flow rate of air at compressor exit = ma2	kg/s
7	Compressor isentropic efficiency = Eta-is-c	-
8		
9		
10		
Description of Calculation:		
<b>Method 1:</b>		
$\eta_{is,c} = \frac{\dot{m}_{a2} h_{02comp} - \dot{m}_{a1} h_{01}}{\dot{m}_{a2} h_{02comp} - \dot{m}_{a1} h_{01}}$		
where		
$h_{01} = \int_{T_{ref}}^{T_{01}} C_{p,a}(T) dT + h_{f,a}^0, h_{02comp} = \int_{T_{ref}}^{T_{02comp}} C_{p,a}(T) dT + h_{f,a}^0, h_{02comp} = \int_{T_{ref}}^{T_{02}} C_{p,a}(T) dT + h_{f,a}^0$		
<b>Method 2: Simplified method</b>		
Assuming ma1=ma2=constant and Cp=constant,		
$\eta_{is,c} = \frac{T_{02comp} - T_{01}}{T_{02comp} - T_{01}} \times 100$		
where,		
$T_{02comp} = T_{01} \left( \frac{P_{02comp}}{P_{01}} \right)^{(\gamma_a - 1)/\gamma_a}$		

Fig. 5 Sample Template of Calculated Pont ID

### 3.3 성능진단

성능계산 모듈에서 산출된 성능열화에 대해 보다 상세하게 열화원인을 분석하여 운영자로 하여금 성능관련 문제에 대해 즉각적인 조치를 취할 수 있도록 방향을 제시한다. 이를 통해 발전소의 운전성능을 향상시킬 수 있다.

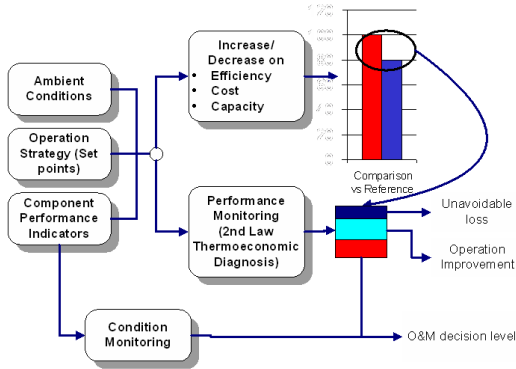


Fig. 6 Performance Diagnosis Problem Scheme

현재 대기조건과 운전모드에 대하여 앞 절에서의 성능계산값을 토대로 Fig. 5와 같이 성능(출력, 효율 등)의 열화를 정량화 하고, 이를 열역학 제1법칙과 제2법칙을 적절히 사용하여 성능열화를 진단하고 어디에서 원인이 있는지를 규명하여 운영자에게 알려주도록 한다. 성능열화의 주요 발생기인 가스화기와 가스터빈에 대하여는 상세히 진단할 수 있도록 실시간 성능계산 엔진과 연계한다.

### 4. 결론

석탄 가스화복합발전(IGCC)은 대량의 신에너지 생산할 수 있을 뿐만 아니라 기존 미분탄화력발전의 골치거리인 아황산가스(SOx)와 질소산화물(NOx)을 각각 95%와 90% 이상으로 획기적으로 줄여준다. 또 같은 양의 석탄으로 3~10%의 효율을 더 얻을 수 있는 친환경 발전방식이다. 반면에 해외의 전력생산을 목적으로 하는 상업용 IGCC 플랜트에 대하여 가동률을 살펴보면 거의 10년이 지난 현재시점에서야 비로서 약 80%의 가동률에 도달하고 있다. 이 수치도 미분탄화력발전소가 약 90% 가동률로서 운전됨에 비해 아직도 많은 기술적 보완이 필요함을 시사한다. 가동률을 높이기 위해서는 우선적으로 ‘올바른 설계 및 시공’이 선행되어야 하며 후속적으로 운전 및 유지관리 능력을 향상시키는 것이 필요하다.

이에 국내최초로 2012년 준공예정인 300MW급 IGCC 실증플랜트의 가동률을 높이기 위한 운전능력 향상 툴로서 ‘IGCC 실시간 운전감시시스템’ 개발을 모색하게 되었다. 이 시스템은 온라인, 실시간으로 발전소 공정데이터를 취득하여 성능정보(출력, 열소비율, 효율 등), 트립정보 등을 계산하여 운영자에게 현재 발전소 전체 및 구성기기 상태를 신속히 알려주는 역할을 수행한다.

운전감시시스템의 구성요소인 성능계산 모듈은 신호검증 모듈에서 계산된 유효값을 이용하여

현재 운전조건에서의 실제성능, 기대성능, 보정성능을 계산함으로써 기기의 성능열화를 즉시 파악하게 한다.

### 후기

본 논문은 지식경제부에서 시행한 신재생에너지 기술개발사업을 통한 연구결과임.

### References

- [1] Ola Maurstad, 2005, "An Overview of Coal based Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technology", Laboratory for Energy and the Environment, Massachusetts Institute of Technology
- [2] J. Phillips, 2005, "Integrated gasification combined cycles with CO2 capture", GCEP research symposium, Stanford University
- [3] J.W. Hines and R. Seibert, 1996, "Technical Review of On-Line Monitoring Techniques for Performance Assessment", Department of Nuclear engineering, University of Tennessee,
- [4] H.M. Hashemian, 1995, "On-Line testing of Calibration of Process Instrumentation Channels in Nuclear Power Plants", Analysis and Measurement Services Corporation
- [5] Philip P. Walsh, 1998, "Gas Turbine Performance", Blackwell Science Ltd and ASME
- [6] K.C.Cotton, 1998, "Evaluating and Improving Steam Turbine Performance", Cotton Fact Inc.
- [7] Rodney R. Gay, 2004, "Power Plant Performance Monitoring", R-Squared Publishing
- [8] Dennis A. 1998, "ASME PTC 47 - GASIFICATION COMBINED CYCLE PLANT PERFORMANCE: PROGRESS AND CHALLENGES", ASME
- [9] Arthur R. Smith, 1998, "ASME PTC 47 - IGCC PERFORMANCE TESTING: AIR SEPARATION ISSUES", ASME
- [10] Christopher Higman, 2003, "Gasification", Elsevier
- [11] Mike Bockelie, 2004, "A computational Workbench Environment for Virtual Power Plant Simulation (Final Report)", Reaction Engineering International
- [12] G. Farina and L. Bressan, 1999, "Optimizing IGCC design: Improve performance, reduce capital cost", Foster Wheeler Review, Vol. 1, No. 3, pp. 16-21
- [13] L. Schmoee, Bechtel, 2005, "IGCC Expected plant availabilities and efficiencies", Presentation at Platts IGCC symposium, Pittsburgh