

# 가스화복합발전에서 Syngas 연료를 사용하는 가스터빈의 성능예측

서석빈<sup>†</sup> · 김종진\* · 정재화\* · 안달홍\*

## A Performance prediction of Gas Turbine using syngas fuel in IGCC

Seo Seok Bin<sup>†</sup>, Kim Jong Jin\*, Chung Jae Hwa\*, Ahn Dal Hong\*

**Key Words:** Gas Turbine(가스터빈), Combined Cycle(복합사이클), Syngas(합성가스), IGCC(가스화 복합발전)

### Abstract

IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle) power plant are becoming more attractive because of fuel flexibility and low emission. In this study, performances are evaluated when the low caloric value syngas fuels produced in gasification process is used a gas turbine originally designed naturel gas fuel. Using GateCycle computational thermal analysis model, performances of GE 7FA gas turbine are predicted for using four types of syngas. Also, off design performance is presented for firing syngas fuel in the gas turbine.

	기호설명	PR	pressure ratio
		R	gas constant
		T	absolute temperature
	윗 첨자	W	mass flow
A'	effective turbine flow area	$\eta$	efficiency
H	enthalpy	$\gamma$	ratio of specific heat
LHV	low heating value	$\phi$	cooling effectiveness
MW	molecular weight		
P	absolute pressure		
		아래 첨자	
		c	cooling air
		des	design condition
		f	fuel
		g	gas
		i	donate stage number

---

<sup>†</sup> 한국전력공사 전력연구원  
E-mail : dolbin@kepri.re.kr  
TEL : (042)865-5377 FAX : (042)865-5374

\* 한국전력공사 전력연구원

in	inlet condition
inj	vapor injection
max	maximum value
met	metal
n	natural gas
out	outlet stream
s	isentropic condition or syngas

## 1. 서론

가스터빈 발전은 청정연료를 사용하면서 단독 사이클 또는 배열회수에 의한 복합사이클을 채택하여 발전효율이 높고 전력생산을 위한 운전이 비교적 간단하다. 그러나, 가스터빈에 의한 발전 방식의 큰 단점은 연료로써 천연가스 또는 휘발성이 높은 경유 등의 청정연료만이 사용 가능하며 석탄, 병커 C 또는 휘발성이 낮은 중질 잔사유 등의 기존 기력발전소의 연료는 사용할 수 없다는 점이다. 이에 이들 연료를 가스화하여 발전하는 가스화 복합발전기술(IGCC : Integrated Gasification Combined Cycle) 이 부각되고 있다. 이 가스화 기술은 석탄 또는 중질유 등의 기존 발전연료 뿐만 아니라 나무와 같은 바이오매스 등 다양한 연료를 가스터빈에 사용할 수 있는 가교 역할을 하게 된다.

가스화복합발전의 가스터빈에서 사용되는 연료는 천연가스나 경유 등을 사용하는 가스터빈과 달리 저열량의 합성가스(Syngas)이다. 천연가스의 발열량이 약 13,000 Kcal/kg 인데 비해 합성가스는 약 2000Kcal/kg(석탄가스의 경우)로써 천연가스 발열량의 1/6 수준이다. 이러한 저열량의 연료를 가스터빈에 사용하기 위해 이에 맞는 가스터빈을 설계·제작하는 것은 막대한 비용이 들어가므로 현실적으로 어렵다. 따라서 합성가스연료를 사용하는 경우, 기존 천연가스 연료로 설계된 가스터빈의 연료노즐 등 최소한의 하드웨어의 수정만으로 운전하는 것이 바람직하다고 하겠다<sup>(1)</sup>.

본 연구에서는 고열량의 천연가스로 설계된 기존의 가스터빈에 가스화공정에서 생산된 저열량의 합성가스를 사용할 경우에 있어서, 가스터빈의 성능을 예측하였다. 이를 위해 상용코드인 Gate-Cycle code를 사용하여 성능예측모델을 구성하고,

천연가스 및 4가지 종류의 합성가스 연료를 사용할 때, 연료조성 변화가 가스터빈 출력, 효율 및 압축기 서지마진, 압축비 등에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 탈 설계조건에서 천연가스연료와 합성가스연료를 사용할 경우, 가스터빈의 성능을 비교 분석하였다.

## 2. 가스터빈 모델링

본 연구에서 가스터빈 성능예측은 제작사가 제공하는 제한된 설계 데이터로부터 가스터빈 거동을 예측하는 시스템적인 방법을 사용하였으며 상용코드인 GateCycle code를 이용하여 가스터빈 성능계산 모델을 구성하였다. 설계조건에서 제작사가 제공한 제한된 설계데이터를 사용하여 각 구성요소의 성능을 결정하였다. 단일축, 고정회전수를 갖는 가스터빈의 탈 설계점 성능해석은 팽창기 입구 유량이 choke된다는 가정 하에서 이상기체의 유량에 대한 관계식 (1)을 사용하였다.

$$Constant = \left( \frac{W\sqrt{T}}{xAP} \right)_{\text{nozzle inlet}} \quad (1)$$

설계조건에서의 터빈냉각유량은 제작사의 데이터를 이용하고 탈 설계조건에서의 냉각공기유량은 다음 식에 의해 계산하였다.

$$W_c = W_{c_{des}} \left( \frac{P_c}{P_{des}} \right) \sqrt{\frac{T_{des}}{T_c}} \quad (2)$$

압축기 탈설계조건의 성능예측은 GateCycle 프로그램에서 제공하는 압축기맵을 사용하였다.

이 맵은 보정회전수(Corrected Speed; CS)와 압축기 맵 변수 CMV(Compressor Map Variable)로 정의되어있다. 여기서 CMV는 압축기 맵에서 보정 회전수 라인 상의 운전점을 표시하며 압축기 서지마진(surge margin)을 나타내는 것으로 사용될 수 있다(Palmer, 1991)<sup>(2)</sup>. 이 맵상에서 압축기 입구온도와 물증량에 의한 보정속도(corrected speed)식 (3)과 유량식(1)에 의해 운전점이 결정된다.

$$CS = 100 * \frac{rpm}{rpm_{des}} * \sqrt{\frac{(RT)_{des}}{(RT)}} \quad (3)$$

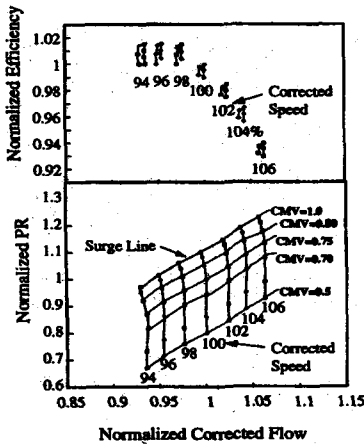


Fig. 1 Compressor map in GateCycle<sup>(3)</sup>

### 3. 가스터빈 설계점 성능해석

가스터빈의 설계점 성능해석 모델링을 위해 산업용 가스터빈 중의 하나인 GE 7FA 가스터빈을 선정하고 이 가스터빈의 설계 데이터를 사용하여 모델링을 수행하였다. GE 7FA 엔진은 산업용이며, 단일축으로 1개 압축기와 1개의 터빈으로 구성되어있고 설계 제원은 table 1과 같다. 이 엔진은 석탄이나 바이오매스 등의 연료를 사용하기에 적합하다<sup>(4)</sup>. 설계 연료인 천연가스를 사용하여 계산한 설계점 성능은 Table 2 와 같다.

Table 1 Design data of GE 7FA gas turbine<sup>(5)</sup>

Model	Power output (MW)	Pressure Ratio	Exhaust Temp.(°C)	TIT (°C)
GE 7FA	172.3	15.4	604	1,327

\* 기준 : ASME 조건(대기온도 15°C, 표준 대기압)

Table 2 Performance data for design conditions

item	Unit	values	비고
Power output	MW	173	Generator Output
Efficiency	%	36.7	LHV
Fuel consumption	kg/sec	9.54	
Fuel LHV	kcal/kg	11,786	
Pressure ratio	-	15.4	
Exhaust Temperature	°C	604	
Air flow	kg/sec	431.2	

### 4. 합성가스 사용에 따른 가스터빈의 성능예측

#### 4.1 합성가스 조성에 따른 가스터빈의 성능분석

천연가스 연료로 설계된 가스터빈에 저 열량의 합성가스 사용을 사용할 때의 성능을 분석하기 위해 Table 3 과 같이 4종의 합성가스 연료를 선정하였다. 이 연료들은 가스화 기술을 적용하여 가스터빈 연료로 사용할 수 있는 대표적인 연료들이다.

Table 3 Compositions of syngases

Composition	Wood	Coal gas #1	Coal gas #2	Oil Shale
H <sub>2</sub>	11.9	27.0	31.7	29.0
CO	15.7	35.6	47.7	68.5
CO <sub>2</sub>	12.1	12.6	10.5	0.5
CH <sub>4</sub>	4.7	0.1	0.1	1.0
H <sub>2</sub> O	27.8	18.7	8.3	0.5
N <sub>2</sub>	27.1	6.0	1.0	0.5
Ar	0.7		0.7	-
LHV(Kcal/kg)	1,218	1,900	2,450	3,350

이들 합성가스 사용에 따른 성능을 분석하기 위해 가스터빈의 연소온도는 모든 경우에 천연가스 사용 시와 동일한 값으로 가정하였다. 시뮬레이션 결과, 천연가스에 비해 낮은 발

열량의 합성가스를 사용하면, 가스터빈의 성능에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 발열량이 낮아지면 연료유량은 천연가스 연소시와 같은 연소온도를 유지하기 위해 Fig. 2와 같이 증가되었다. 그러나 고열량의 연료를 사용할 때, 연료유량은 연소기로 들어가는 총 유량의 약 2%이지만, 저열량의 합성가스인 경우 약 20%이상의 양이 요구된다. 이 추가되는 유량은 압축기를 통과하지 않기 때문에 가스터빈의 출력은 Fig. 3과 같이 천연가스 연소에 비해 상대적으로 큰 출력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 같은 이유로 발열량이 감소될수록 가스터빈 엔진의 성능은 Fig. 4와 같이 증대하였다.

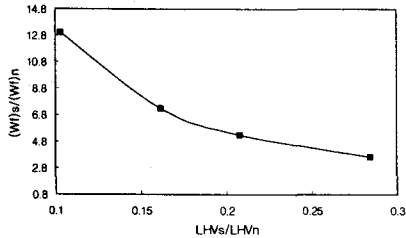


Fig. 2 Rate of syngas fuel consumption relative to that of natural gas

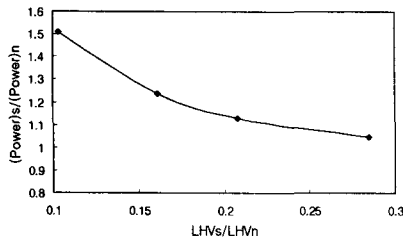


Fig. 3 Power output of gas turbine with syngas relative to that of natural gas

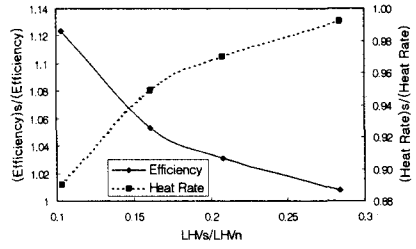


Fig. 4 Thermal performance of gas turbine with relative to that of natural gas

이는 6 ~ 13MJ/kg 범위의 발열량을 갖는 Oil shale 가스를 사용하여 연료조성에 따른 가스터빈의 성능을 예측한 J. O. Jaber(1998)의 결과와 유사한 경향을 나타내었다<sup>(6)</sup>. 그러나 저열량의 합성가스 연료를 사용할 경우 터빈을 통과하는 유량이 증가되면 압축기의 압축비가 Fig. 5와 같이 증대하게 되며, Fig. 6에 나타난 바와 같이 압축기 팽창에서 설계연료인 천연가스 연소시 운전점(CMV:0.65)이 저열량의 연료를 사용함에 따라 서지라인 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다.

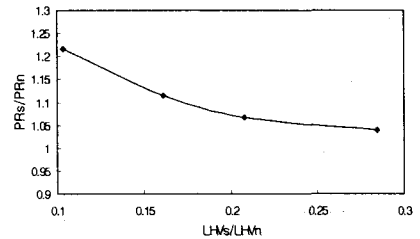


Fig. 5 Pressure ratio of gas turbine with syngas relative to that of natural gas

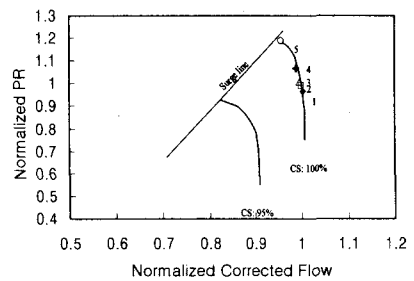


Fig. 6 Operational points on compressor map

- 1: LNG Gas(CMV:0.65) : design operation point
- 2: Oil Shale Gas(CMV:0.70)
- 3: Coal Gas #2(CMV:0.73)
- 4: Coal Gas #1(CMV:0.80)
- 5: Wood Gas(CMV:0.98)

#### 4.2 탈 설계조건에서 가스터빈의 성능분석

합성가스를 사용할 때, 탈 설계조건에서 가스터빈의 성능변화가 설계연료인 천연가스를 사용할 때와 차이가 있는지를 비교 분석하기 위해 대기온도와 연료온도의 변동에 따른 가스터빈의 성능을 예측하였다.

##### 4.2.1 대기온도 영향

설계 연료인 천연가스와 합성가스(Coal gas #2)를 사용하는 경우 대기온도의 변화에 따른 가스터빈의 성능영향을 예측하였으며, 그 결과는 Fig. 7 ~ 9와 같다.

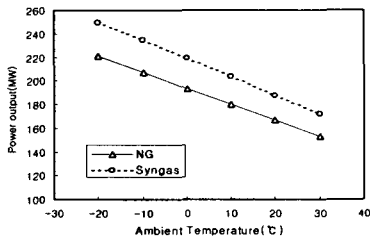


Fig. 7 Power outputs for various ambient temperature

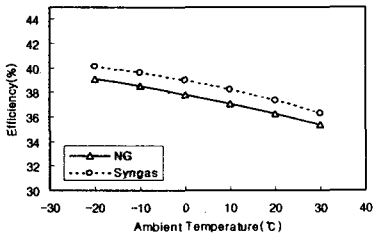


Fig. 8 Thermal efficiencies for various ambient temperature

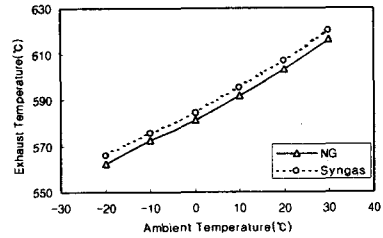


Fig. 9 Exhaust temperatures for various ambient temperatures

그림 7 ~ 9 에 나타난 바와 같이 합성가스를 사용할 때 대기온도변화에 따른 가스터빈의 성능은 천연가스를 사용하는 경우와 유사한 경향을 나타내었으며 이는 석탄가스를 사용하여 연소온도 1260°C 급 GE 7F 가스터빈에 대해 예측한 M. S. Johnson(1992)결과와 유사한 경향을 나타내었다<sup>(7)</sup>. 그러나 본 연구에서는 연소온도 1327°C 의 신형 GE 7FA 가스터빈의 설계제원을 바탕으로 성능을 예측하였기 때문에 출력 및 효율의 절대값은 Johnson의 결과보다 높게 나타났다. 이 결과로부터 설계조건에서 천연가스와 합성가스 사용시의 가스터빈 성능의 절대편차를 알 수 있으면 합성가스를 사용할 때 탈 설계조건에서의 거동을 천연가스 사용시의 거동으로부터 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

##### 4.2.2 연료온도에 따른 영향

설계 연료인 천연가스와 합성가스(Coal gas #2)를 사용하는 경우 연료온도 변화에 따른 가스터빈의 성능을 예측하였으며 그 결과는 Fig. 10 ~ 12와 같다. Fig. 10과 같이 연료온도가 높아지면 연료유량은 두 연료 모두 감소하는 경향을 보이고 있으며 합성가스의 경우가 천연가스에 비해 민감한 것으로 나타났다. 이 연료유량의 변화로 인해 출력은 Fig. 11과 같이 연료온도 증가에 따라 감소하는 경향을 나타냈으며 합성가스를 사용한 경우가 천연가스에 비해 민감한 경향을 보였으나 큰 차이는 없었다. 반면에 가스터빈 효율은 Fig. 12와 같이 연료온

도의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 이는 연료유량 감소에 의한 출력감소에 의한 가스터빈 효율저하보다 연료 입열의 감소에 의한 효율증가가 크기 때문인 것으로 분석된다. 따라서 가스화복합발전에 있어서 가스터빈의 효율을 증대하기 위해 가스화기에서 생산된 합성가스의 현열을 보존하기 위한 설계가 고려되어야 할 것으로 판단된다.

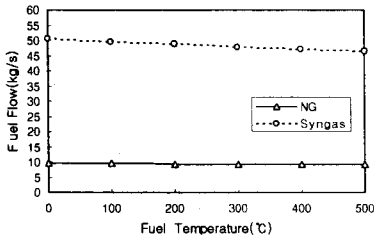


Fig. 10 Fuel flow for various fuel temperatures

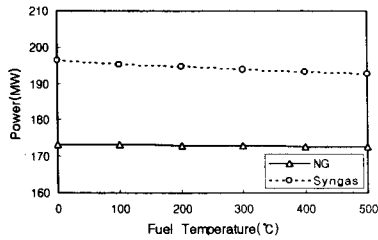


Fig. 11 Power output for various fuel temperatures

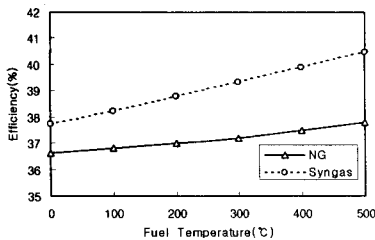


Fig. 12 Thermal efficiencies for various fuel temperature

## 5. 결론

가스화복합발전기술은 석탄 또는 중질유 등의 기존 발전연료 뿐만 아니라 나무와 같은 다양한 연료를 가스터빈에 사용할 수 있는 가교 역할을 하게 된다. 본 논문에서는 이러한 저열량의 연료를 천연가스 연료로 설계된 가스터빈에서 사용할 경우의 가스터빈 성능을 해석하였다.

이를 위해 GateCycle code를 사용하여 가스터빈의 성능해석 모델을 개발하고 합성가스의 조성에 따른 가스터빈의 성능을 분석하였으며, 합성가스를 사용할 때 대기온도 및 연료온도 변화에 따른 가스터빈의 성능을 설계연료인 천연가스를 사용하였을 때와 비교, 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 천연가스에 비해 저열량인 합성가스를 사용하면, 동일한 연소온도조건에서 연료유량이 증대되며 터빈을 통과하는 유량이 증대되어 가스터빈의 출력 및 효율이 증대되었다.

- 그러나 저열량의 합성가스를 사용할 경우 터빈을 통과하는 유량이 증가되어 압축기의 압축비가 증대하고 압축기의 운전점이 설계점을 벗어나 서지(surge)라인 쪽으로 이동함을 알 수 있었다.

- 또한, 대기온도변화에 따른 가스터빈의 성능은 합성가스를 사용하면 전 온도범위에서 천연가스를 사용하는 경우와 유사한 경향을 보였다. 연료온도의 변화에 따른 가스터빈의 효율은 합성가스를 사용하는 경우가 천연가스에 비해 크게 민감한 것으로 나타나, 가스화복합발전에 있어서 가스화기에서 생산된 합성가스의 현열을 가스터빈에 공급할 때까지 보존하기 위한 설계가 고려되어야 한다.

## 참고문헌

- (1) Johnson, Mark Scott "The effects of gas turbine characteristics on integrated gasification combined-cycle power plant performance", Ph.D. thesis, 1990
- (2) Carl A. Palmer "Dynamic Simulation of a Solid Fuelled Gas Turbine System", Ph. D thesis, 1991, pp. 40
- (3) Enter co. "GateCycle user guide", 1996
- (4) Cook CS, Corman JC, Todd DM "System evaluation and LBTU fuel combustion studies for IGCC power generation" J of Engineering

for Gas Turbine and Power, 1995; pp. 673-677

- (5) 한국전력공사 "부산복합 공급계약서 II",  
performance data section, 1999.
- (6) J. O. Jaber, S. D. Probert, P. T. Williams  
"Gaseous fuels(derived from oil shale) for  
heavy- duty gas turbines and combined  
cycle power generators", Applied Energy  
pp. 601-20, 1998
- (7) M. S. Johnson "Prediction of Gas Turbine On-  
and Off-Design Performance When Firing  
Coal-Derived Syngas", J of Engineering for  
Gas Turbines and Power, Vol.114, pp. 384,  
1992