

저열량의 합성가스 연료를 사용한 가스터빈의 성능해석

서석빈* · 김종진* · 안달홍* · 이성노** · 박종호**

*한전 전력연구원, **충남대학교 기계공학과

A Performance Analysis of Gas Turbine Using Low Caloric Value Syngas Fuel

Seok-Bin Seo*, Jong-Jin Kim*, Dal-Hong Ahn*, Sung-No Lee** and Jong-Ho Park**

*Korea Electric Power Research Institute

**Chungnam National University

요 약

가스화복합발전기술은 석탄 또는 중질유 등의 기존 발전연료 뿐만 아니라 잔사유 또는 나무와 같은 다양한 연료를 가스터빈에 사용할 수 있어 차세대 발전방식으로 부각되고 있다. 본 논문은 이러한 가스화 복합발전에서 가스화 하여 나온 저열량의 합성가스를 천연가스연료로 설계된 가스터빈에 사용할 때 가스터빈의 성능을 예측하였다. 이를 위해 제한된 설계 데이터로부터 가스터빈의 거동을 예측하는 시스템적인 방법을 사용하여 발전용 GE 7FA 가스터빈에 설계연료인 천연가스와 4가지의 다른 종류의 합성가스를 사용할 때 가스터빈의 설계조건과 탈 설계조건 성능을 예측하였다.

Abstract— IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) power plant is becoming more attractive because it allows that various fuels like coal, heavy oil and even residue oil and wood are used in a gas turbine. This paper presents a prediction of performances of gas turbine when low caloric value syngas fuels produced from the IGCC is used in it originally designed with natural gas fuel. Using a systemic method which predicts a gas turbine behavior with limited design data, when natural gas, design fuel and four other types of syngas are used in GE 7FA gas turbine, its performances are predicted on design and off-design conditions.

1. 서 론

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, 벙커 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(Biomass) 등 다양한 연료를 가스터빈에 사용

할 수 있는 가교 역할을 하게 된다. 가스화 기술은 이러한 연료들을 가스화 및 정제함으로써 고체나 액체 등의 연료를 가스터빈 연료로 사용할 수 있게 하였다.

가스화복합발전의 가스터빈에서 사용되는 연료는 천연가스나 경유 등을 사용하는 가스터빈과 달리 저열량의 합성가스이다. 천연가스의 발열량이 약 13,000 Kcal/kg 인데 비해 합성가스는 약 2,000 Kcal/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^[1].

저열량의 합성가스 연료를 사용하는 가스터빈의 성능을 분석한 연구로서 Johnson[1990]은 가스화복합발전시스템에서 가스터빈 개발 정도에 따라 3가지 종류의 가스터빈을 사용할 경우 가스터빈 성능이 시스템에 미치는 영향을 분석하였으며, Palmer[1991]는 wood chip을 연소하여 가스터빈에 적용한 경우에 가스터빈 시스템의 동적모사를 하였다. 또한, Palmer와 Erbes[1993]는 GE사의 LM2500 가스터빈에 2가지 종류의 바이오매스 연료를 사용하는 경우에 가스터빈의 성능을 분석하였으며, Jaber 등[1998]은 Oil Shale 연료를 사용하는 경우 가스터빈 및 복합사이클의 성능을 예측하였다.

본 연구에서는 천연가스용으로 설계된 발전용 GE 7FA 가스터빈에 4가지 다른 종류의 합성가스를 연료로 사용할 경우 가스조성에 따른 가스터빈의 성능의 영향을 분석하였으며, 탈 설계조건에서 가스터빈의 거동을 천연가스 연소의 경우와 비교, 분석하였다.

2. 가스터빈 모델링

본 연구에서 가스터빈의 성능을 예측하기 위해 제작사가 제공하는 제한된 설계데이터로부터 가스터빈의 거동을 예측하는 시스템적인 방법을 사용하였으며 Gate Cycle code를 이용하여 열성능해석 모델링을 수행하였다. 설계조건에서 제작사가 제공한 데이터를 이용하여 각

구성요소의 성능을 결정하였다. 단일축, 고정회전수를 갖는 가스터빈의 탈설계점 성능해석을 위해 팽창기 입구 유량이 질식(choke)된다는 가정 하에서 이상기체의 유량 관계식 (1)을 사용하였다^[2].

$$\left(\frac{W\sqrt{T}}{KAP}\right)_{nozzleinlet} = \text{Constant} \quad (1)$$

압축기 탈 설계조건에서의 성능예측은 GateCycle code에서 제공하는 GE 7F 압축기 맵을 사용하여 수행하였다. 이 맵은 보정회전수(Corrected Speed; CS)와 압축기 맵 변수(Compressor map Variable; CMV)로 정의되어있으며, 여기서 CMV는 압축기 맵에서 보정 회전수 라인 상의 운전점을 표시하며 압축기 서지마진(surge margin)을 나타내는 것으로 사용될 수 있다^[3]. 이 맵상에서 압축기 입구온도와 몰중량에 의한 보정속도(Corrected Speed) 식 (2)와 유량식 (1)에 의해 운전점이 결정된다.

$$CS = 100 \times \frac{\text{rpm}}{\text{rpm}_{des}} \times \sqrt{\frac{(RT)_{des}}{RT}} \quad (2)$$

연소기 모델에서 연소는 연료가 완전연소 되는 것을 가정하며 다음의 에너지 방정식으로부터 연소기 출구조건을 계산한다^[4].

$$W_{out}H_{out} = W_f(LHV + H_f) + W_{in}H_{in} + W_{in}H_{in} \quad (3)$$

연소기에서의 압력손실은 입구압력(압축기 출구압력)의 일정 비율로 계산하고 탈 설계조건에서도 이 비율이 일정한 것으로 가정하였다.

3. 가스터빈 모델의 검증

가스터빈 성능해석모델의 건전성을 확인하기 위해 산업용 가스터빈 중의 하나인 GE 7FA 가스터빈을 대상으로 성능을 계산하였다. GE 7FA 엔진은 산업용이며, 단일 축으로 1개 압축기와 1개의 터빈으로 구성되어있으며 설계제원은 Table 1과 같다. 이 엔진은 석탄이나 바이오매스 등에서 파생되는 가스 연료를 사용하기에 적합하다^[5].

GateCycle을 사용하여 구성한 가스터빈 모델에 설계 연료인 천연가스를 사용하여 계산한 성능결과는 다음과

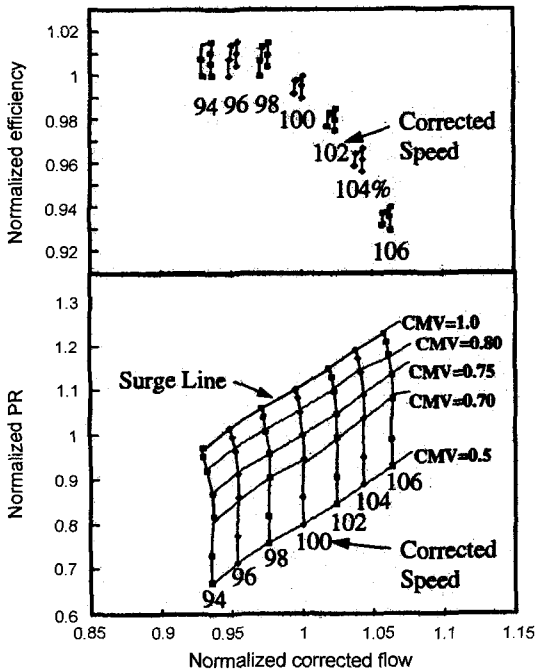


Fig. 1. Compressor map in GateCycle code^[6].

Table 1. Design data of GE 7FA gas turbine^[6].

Model	Power output (MW)	Pressure ratio	Exhaust temperature (°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	Remark
Power output	MW	173	Generator output
Efficiency	%	36.7	LHV basis
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	

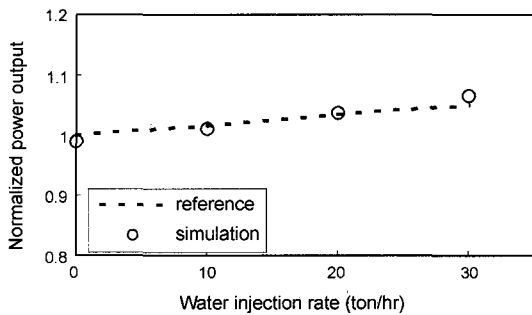


Fig. 2. Comparison of gas turbine power outputs.

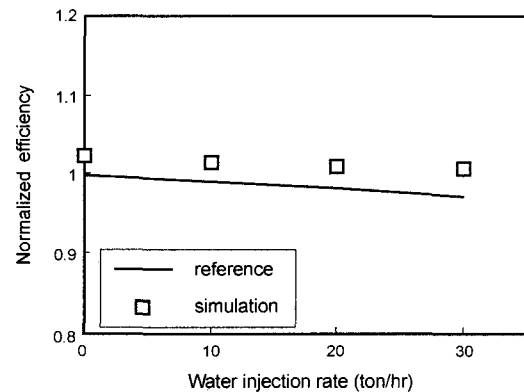


Fig. 3. Comparison of gas turbine efficiencies.

같다.

또한, 탈 설계 성능예측에 대한 프로그램의 신뢰성을 검토하기 위해 경유를 사용하고 NOx 제어용 물분사를 하는 경우, 가스터빈의 성능을 예측하였으며 그 결과, 제작사의 성능데이터^[6](Figs. 2, 3의 reference values)와 유사한 결과를 얻었다(Figs. 2, 3).

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4-1. 연료조성에 따른 영향

저 열량의 합성가스 사용에 따른 가스터빈 성능해석

Table 3. Compositions of syngas.

Composition	Wood ^[7]	Coal gas #1 ^[8]	Coal gas #2 ^[9]	Oil shale ^[10]
H ₂	11.9	27.0	31.7	29.0
CO	15.7	35.6	47.7	68.5
CO ₂	12.1	12.6	10.5	0.5
CH ₄	4.7	0.1	0.1	1.0
H ₂ O	27.8	18.7	8.3	0.5
N ₂	27.1	1.0	1.0	0.5
Ar	0.7	6.0	0.7	-
LHV (kCal/kg)	1,218	1,900	2,450	3,350

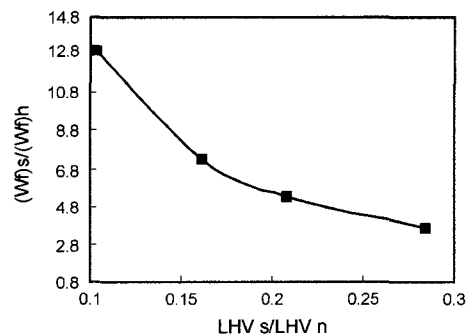


Fig. 4. Rate of syngas fuel consumption relative to that of natural gas

을 위해 Table 3과 같이 4종의 합성가스를 선정하였다. 이 연료들은 가스화 기술을 적용하여 가스터빈 연료로 사용할 수 있는 대표적인 연료들이다.

이들 합성가스 사용에 따른 성능을 분석하기 위해 가스터빈의 연소온도는 모든 경우에 천연가스 사용 시와 동일한 값으로 가정하였다.

시뮬레이션 결과, 발열량이 낮아지면 연료유량은 시스템에 요구하는 입열을 제공하여 같은 연소온도를 유지하기 위해 Fig. 4와 같이 증가되었다. 이 추가되는 연료유량은 압축기를 통과하지 않고 바로 연소기에서 연소된 후 터빈으로 유입되기 때문에 가스터빈의 출력은 Fig. 5와 같이 천연가스 연소에 비해 상대적으로 큰 출력이 발생되는 것을 알 수 있었다. 같은 이유로 발열량이 감소될수록 가스터빈 엔진의 성능은 Fig. 6와 같이 증대하였다. 이는 6~13 MJ/kg 범위의 발열량을 갖는 Oil shale 가스를 사용하여 연료조성에 따른 가스터빈의 성능을 예측한 Jaber[1998]의 결과와 유사한 경향을 나타내었다^[10]. 그러나 저열량의 합성가스 연료를 사용할 경우 터빈을 통과하는 유량이 증가되면 압축기의 압축비가 Fig. 7과 같이 증대하게 되며, Fig. 8에 나타난 바와 같이 압축기 맵상에서 설계연료인 천연가스 연소 시 운전점(CMV :

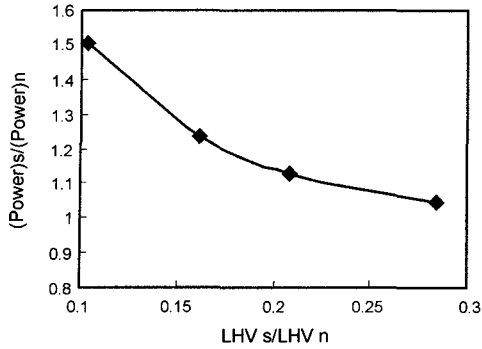


Fig. 5. Power output of gas turbine with syngas relative to that of natural gas.

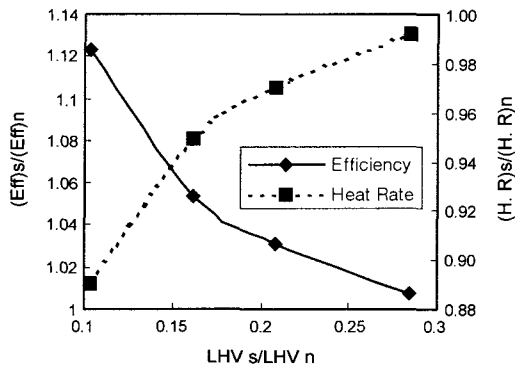


Fig. 6. Thermal performance of gas turbine with relative to that of natural gas.

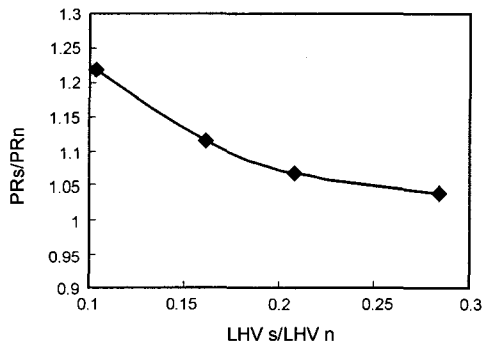


Fig. 7. Pressure ratio of gas turbine with syngas relative to that of natural gas.

0.65)이 저열량의 연료를 사용함에 따라 서지라인 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다(Wood Gas의 경우 CMV : 0.98). 따라서 적절한 압축기 서지마진을 유지하기 위해 압축기 출구로부터의 압축공기의 일부를 추출하는 방법^[1] 등을 설계 시에 고려가 되어야 할 것이다.

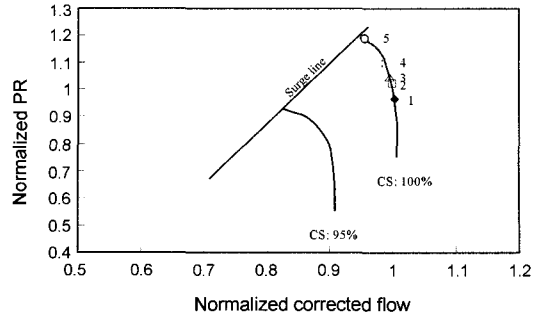


Fig. 8. Operational points on compressor map.

- 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)
- Surge line : CMV 1.0

$$\text{Normalized PR} = \frac{\text{PR} - 1}{\text{PR}_{\text{des}} - 1}$$

$$\text{Corrected flow} = \left(\frac{W \sqrt{RT}}{P} \right)_{\text{inlet}}$$

4-2. 탈 설계조건에서 가스터빈의 성능분석

합성가스를 사용할 때, 탈 설계조건에서 가스터빈의 거동이 천연가스를 사용할 때와 차이가 있는지를 비교 분석하기 위해 대표적인 탈 설계조건인 대기온도와 연료 온도의 변동에 따른 가스터빈의 성능을 예측하였다.

4-2-1. 대기온도 영향

설계 연료인 천연가스와 합성가스(Coal gas #2)를 사용하는 경우 대기온도의 변화에 따른 가스터빈의 성능

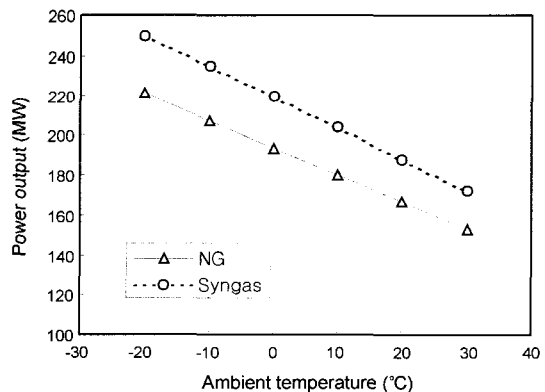


Fig. 9. Power outputs for various ambient temperature.

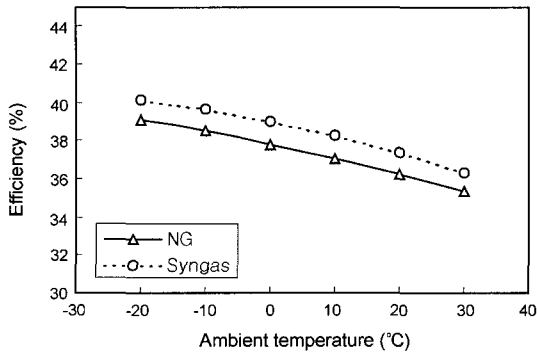


Fig. 10. Thermal efficiencies for various ambient temperature.

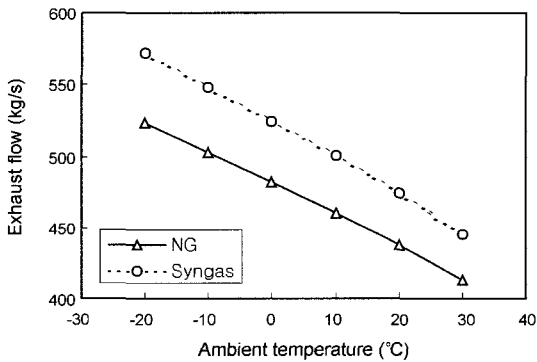


Fig. 11. Exhaust flows for various ambient temperature.

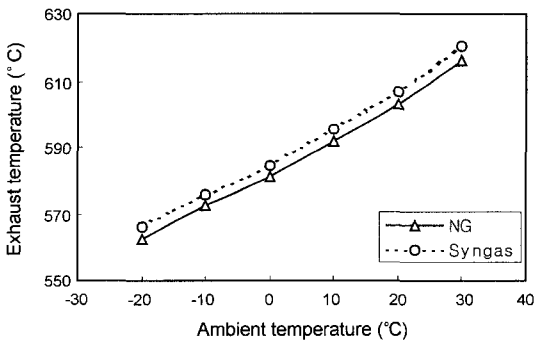


Fig. 12. Exhaust temperatures for various ambient temperature.

영향을 예측하였으며, 그 결과는 Fig. 9~12와 같다.

Fig. 9~12에 나타난 바와 같이 합성가스를 사용할 때 대기온도변화에 따른 가스터빈의 성능은 천연가스를 사용하는 경우와 유사한 경향을 나타내었으며 이는 석탄가스를 사용하여 연소온도 1,260°C급 GE 7F 가스터빈

에 대해 예측한 Johnson[1990] 결과와 유사한 경향을 나타내었다¹¹⁾. 그러나 본 연구에서는 연소온도 1,327°C의 신형 GE 7FA 가스터빈의 설계제원을 바탕으로 성능을 예측하였기 때문에 출력 및 효율의 절대 값은 Johnson의 결과보다 높게 나타났다. 이 결과로부터 설계조건에서 천연가스와 합성가스 사용 시의 가스터빈성능의 절대편차를 알 수 있으면 합성가스를 사용할 때 탈 설계조건의 거동을 천연가스 사용 시의 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. 13~15와 같다.

Fig. 13에서와 같이 연료온도가 높아지면 연료유량은 두 연료 모두 감소하는 경향을 보이고 있으며 합성가스의 경우가 천연가스에 비해 민감한 것으로 나타났다. 이 연료유량의 변화로 인해 출력은 Fig. 14와 같이 연료온도 증가에 따라 감소하는 경향을 나타냈으며 합성가스를 사용한 경우가 천연가스에 비해 민감한 경향을 보였

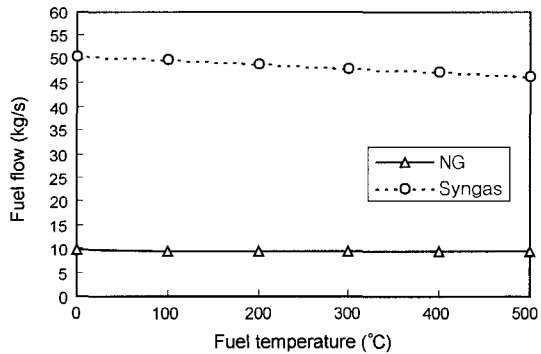


Fig. 13. Fuel flow for various fuel temperatures.

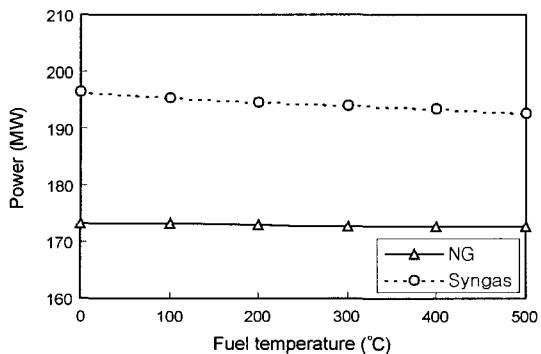


Fig. 14. Power output for various ambient temperatures.

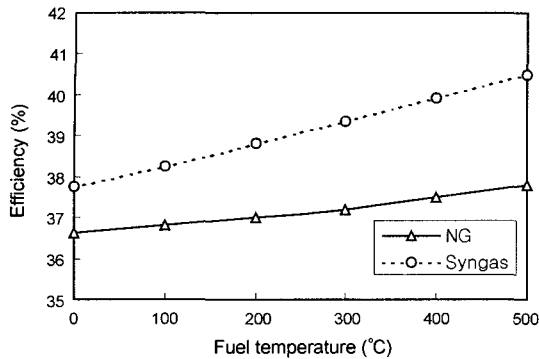


Fig. 15. Thermal efficiencies for various ambient temperature.

으나 큰 차이는 없었다. 반면에 가스터빈 효율은 Fig. 15와 같이 연료온도의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 연료온도가 높아질수록 효율은 증대되며 특히, 합성가스를 사용할 때가 천연가스를 사용할 때에 비해 증대되는 비율이 높아지는 것으로 나타났다. 이는 연료온도의 증가에 따른 출력의 감소보다 연료 입열의 감소에 의한 시스템 효율증가가 크기 때문인 것으로 분석된다. 따라서 가스화복합발전에서 가스터빈의 효율을 증대하기 위해 가스화기에서 생산된 합성가스의 현열을 보존하기 위한 설계가 고려되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

가스화복합발전기술은 석탄 또는 증질유 등의 기존 발전연료 뿐만 아니라 나무와 같은 다양한 연료를 가스터빈에 사용할 수 있어 차세대 발전방식으로 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 가스화복합발전에서 생산되는 저열량의 연료를 천연가스연료로 설계된 가스터빈에 사용할 경우, 가스터빈의 성능을 예측하였다. 이를 위해 Gate Cycle code를 사용하여 발전용 GE 7FA 가스터빈의 성능해석 모델을 구성하고 4가지 종류의 다른 합성가스를 사용할 때 연료조성에 따른 가스터빈의 성능을 예측하였다. 또한 합성가스를 사용할 때 탈 설계조건에서의 성능을 예측하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

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

- 그러나 저열량의 합성가스를 사용할 경우 터빈을 통과하는 유량이 증가됨에 따라 압축기의 압축비가 증대하고 압축기의 운전점이 설계점을 벗어나 서지(surge)라인 쪽으로 이동하게 되어 설계 시 압축기의 서지마진에

대한 고려가 필요함을 알 수 있었다.

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

기호 설명

윗첨자

- A' : effective turbine flow area
- H : enthalpy
- LHV : low heating value
- MW : molecular weight
- P : absolute pressure
- T : absolute temperature
- PR : pressure ratio
- R : gas constant
- W : mass flow
- η : efficiency

아래첨자

- des : design condition
- f : fuel
- g : gas
- in : inlet stream
- inj : vapor injection
- n : natural gas
- out : outlet stream
- s : isentropic condition or syngas

참고문헌

1. Johnson, Mark Scott: "The effects of gas turbine characteristics on integrated gasification combined-cycle power plant performance", Ph. D. thesis (1990).
2. Palmer, C.A., Erbers, M.R. and Pechel, P.A.: "GATECYCLE performance cycle Gas Turbine Power Plants", POWER_GEN International (1997).
3. Palmer, C.A.: "Dynamic Simulation of a Solid Fuelled Gas Turbine System", Ph. D thesis, 1991, pp. 40.
4. Enter co. "GateCycle user guide" (1996).
5. Cook, C.S., Corman, J.C. and Todd, D.M.: "System evaluation and LBTU fuel combustion studies for

- IGCC power generation”, *J. of Engineering for Gas Turbine and Power*, 117(4), pp. 673-677 (1995).
6. 한국전력공사: “부산복합 공급계약서 II”, performance data section (1999).
 7. Larson, E.D. and Williams, R.H.: “Biomass-Gasifier Steam-Injected Gas Turbine Cogeneration”, *J of Engineering for Gas Turbine and Power* (1990).
 8. Todd, D.M.: “Clean Coal and Heavy Oil Technologies”, GE technical report.
 9. 한전 전력연구원: “석탄가스화복합발전기술개발 연구 결과보고서” (1997).
 10. Jaber, J.O., Probert, S.D. and Williams, P.T.: “Gaseous fuels (derived from oil shale) for heavy-duty gas turbines and combined-cycle power generators”, *Applied Energy* 60 1-20 (1998).
 11. Johnson, M.S.: “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).