

Syngas 및 수소를 연료로 사용하는 발전용 가스터빈 성능해석

이종준[†], 차규상*, 손정락**, 김동섭***

Performance Analysis of a Gas Turbine for Power Generation using Syngas as a Fuel

J.J. Lee*, K.S. Cha*, J.L. Sohn**, T.S. Kim***

Key Words: Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC), Performance, Syngas, Gas Turbine

Abstract

Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) power plant converts coal to syngas, which is mainly composed with hydrogen and carbon monoxide, by the gasification process and produces electric power by the gas and steam turbine combined cycle power plant. The purpose of this study is to investigate the influence of the syngas to the performance of a gas turbine in a combined cycle power plant. For this purpose, a commercial gas turbine is selected and its performance characteristics are analyzed with three different fuels, i.e., natural gas (CH₄), syngas and hydrogen. It is found that different heating values of those fuels and chemical compositions in their combustion gases are the causes in the different performance characteristics.

1. 서론

기호설명

LHV : 저위발열량(kJ/kg)
 η : 효율
PR : 압력비
 \dot{m} : 유량(kg/s)
Cp : 정압비열(kJ/kg·K)
TIT : 터빈입구온도(°C)
TRIT : 터빈로터입구온도(°C)
TET : 터빈출구온도(°C)

최근 세계적으로 가장 큰 이슈중의 하나는 에너지 자원의 고갈과 환경오염의 심화이다. 이에 따라 점차 고효율 발전 시스템에 대한 요구가 증가하고 있는 실정이며, 현재의 기술수준에서 가장 합리적으로 효율을 증대시킬 수 있는 발전 시스템의 하나로써 가스터빈과 스팀터빈을 각각 상하부 사이클로 결합시킨 형태의 복합 화력발전이 주목 받고 있으며, 가장 폭넓게 사용되고 있다.

일반적으로 복합 화력에는 천연가스가 주 연료로 사용되어진다. 그러나 천연가스 자원 역시 매장량이 한정되어 있고, 연료의 가격 또한 높은 편에 속하기 때문에, 좀 더 저렴하고 자원 매장량에 상대적으로 영향을 덜 받는 연료의 도입이 필요하다. 이에 따라 석탄가스, 바이오메스 등을 연료로 사용한 발전 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 특히 석탄 등의 연료를 가스화시켜 합성연료(이하 'Syngas'라 칭

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 인하대학교 기계공학부

E-mail : kts@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7307 FAX : (032)868-1716

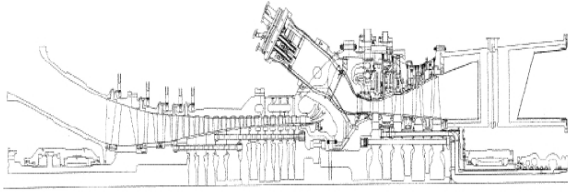


Fig. 1 Schematic diagram of GE7FA+

합)를 생성시키고 이를 복합화력의 연료로 사용하는 발전 시스템을 가스화 복합발전(Integrated Gasification Combined Cycle, 이하 'IGCC'라 칭함)이라고 부른다.

Syngas는 주로 수소(H₂)와 일산화탄소(CO)가 주 성분이며, 천연가스에 비하여 발열량이 낮다. 복합발전의 운전 측면에서 보면 만약 천연가스를 연료로 사용하는 동일한 가스터빈에서 동일한 터빈입구 온도조건에서 운전하게 될 경우 상대적으로 많은 양의 연료가 공급되어야 한다. 그 결과, 가스터빈의 작동 특성이 달라지며, 출력 등을 포함한 각종 성능 변수 값들이 변하게 된다. 따라서 천연가스를 연료로 사용하는 기존의 가스터빈에서 연료를 Syngas로 대체하기 위해서는 이와 관련된 성능변화를 파악하고, 분석하는 것이 매우 중요하다.

그동안 국내외에서 Syngas 사용에 따른 가스터빈의 성능 변화에 관한 많은 연구가 진행되었으나,⁽¹⁻³⁾ 연료 변화에 따른 대상 가스터빈의 성능 변화에 대한 연구 등은 미비한 실정이다. 본 연구에서는 천연가스를 사용하는 기존의 가스터빈의 설계점 성능해석을 통하여 기본 성능특성을 분석한 후, 연료를 Syngas 등으로 변화시켰을 경우의 가스터빈 성능 변화특성을 해석적으로 분석하였다.

Table. 1 Basic specifications of the GE 7FA+ model gas turbine

PR	15.5(16)
TRIT(°C)	1326.7
TET(°C)	601
Gas Flow Rate(kg/s)	445
Power(MW)	171.7
Shaft Speed(rpm)	3600
Number of Compressor stage	18
Number of Turbine stage	3
Thermal Efficiency(%)	36.5

Table. 2 Compositions of Natural gas(mole fraction)

CH ₄ (%)	90.09
C ₂ H ₆ (%)	6.04
C ₃ H ₈ (%)	2.54
iC ₄ H ₁₀ (%)	0.54
nC ₄ H ₁₀ (%)	0.58
iC ₅ H ₁₂ (%)	0.02
N ₂ (%)	0.19
CO ₂ (%)	-
Lower heating value(kJ/kg)	49258.16

2. 해석 대상 가스터빈 성능특성

2.1 해석대상 가스터빈의 사양 및 구조

본 연구에서는 GE의 7FA+모델 가스터빈을 대상 엔진으로 선정하였다. 이 모델의 기본 성능은 Table 1와 같으며, 구성 개략도는 Fig. 1과 같다. 이 모델의 정격출력 및 열효율은 각각 171.7MW, 36.5%로 알려져 있다.⁽⁴⁾

2.1.1 가스터빈 성능해석 방법

가스터빈 엔진의 성능을 해석하기 위해서는 엔진의 성능거동을 정확하게 모사 할 수 있는 프로그램이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 가스터빈 성능해석 전용 상용 프로그램인 Gage/Cycle⁽⁵⁾에 7FA+엔진의 주요 성능 파라미터를 적용하여, 엔진 모사 프로그램을 제작하였다.

사용 연료를 변화시킬 경우 연료의 성분비에 따라 발열량이 변하여, 공급 연료의 유량이 달라진다. 또한, 연소기에서 생성된 연소 가스의 성분이 변하게 되어 되고, 결과적으로 엔진의 출력 및 열효율이 변한다. 이와 함께 연소 가스 유량의 변화는 터빈 입구에서의 choking 조건을 변형시키고 그에 따라 터빈의 작동 특성이 달라지며, 결과적으로 압축기의 운전 특성도 변하게 된다. 이와 같이 사용 연료를 바꿈에 따른 가스터빈의 성능특성을 모사하기 위해서는 설계점 성능해석만으로는 정확한 예측이 불가능하며, 탈설계(off-design)성능해석이 필수적이다. 본 연구에서는 천연가스를 이용한 설계점 성능해석 결과를 기본으로 한 탈설계 성능해석을 통하여 사용 연료의 변화에 따른 성능변화 특성을 고찰하였다.

Table. 3 Results of the design-point performance analysis of GE 7FA+ model gas turbine

Fuel Type	Natural gas	CH4 Only
Plant Net Power(MW)	171.33	175.38
Net Cycle Efficiency(%)	36.24	37.01
LHV(kJ/kg)	49258.16	50034.82
Inlet Air Flow(kg/s)	435.30	435.40
Turbine Efficiency(%)	0.86597	0.86597
Fuel Energy Consumption (kJ/kg)	472750	473806
TRIT(°C)	1331.6	1331.1
Exit gas CP (kJ/kg-K)	1.33626	1.33925
Fuel Mass Flow (kg/s)	9.6	9.4695
TIT(°C)	1402.71	1402.71

성능해석에 필요한 주요 변수들의 값은 Table. 1의 데이터를 사용하였고, 터빈의 냉각유량은 문헌 참조⁽⁶⁾를 통하여, 합리적인 값으로 설정하였다. 기본 연료로 사용한 천연가스의 성분비는 한국표준과학연구원에서 제작한 기준가스 성분을 이용하여 모사하였으며, 그 결과는 Table. 2와 같다.

2.1.2 천연가스를 사용하는 기본 성능해석 결과

Table 1의 데이터를 기반으로 7FA+모델의 천연가스를 사용하는 경우의 성능해석 결과는 Table. 3과 같다. 참고로 메탄의 성분이 90.09%인 천연가스와 함께 메탄의 성분이 100%인 연료를 사용했을 경우도 함께 정리되어 있다.

터빈 출구온도 및 전체 가스유량을 Table 1의 값들로 고정한 상태에서 출력 및 효율이 역시 Table 1에서의 값들과 유사한 값이 계산되도록 연료유량을 조정하여 설계점 성능해석을 수행하였다. 그 결과 터빈 입구 온도(Turbine Inlet Temperature)는 1402.71°C, 터빈 로터 입구온도(Turbine Rotor Inlet Temperature)는 1331.6°C로 각각 계산되었는데, 터빈 로터 입구온도는 Table 1의 값과 비교하여 약 1%정도의 오차 범위 내에서 일치하였다. 압축기 효율은 폴리트로픽 효율로 91.5%로 가정하였으며, 터빈 효율은 터빈 출구온도를 고정한 상태에서 폴리트로픽 효율로 약 86.6%로 계산되었다.

2.1.4 메탄을 사용하는 기본 성능해석 결과

본 절에서는 천연가스 연료를 사용하여 계산한

Table. 4 Fuel Composition of Syngas(mola fraction)

Fuel Type	Coal	PetCoke
H ₂ (%)	25~30	25~30
CO(%)	30~40	50~60
CH ₄ (%)	0~5	5~10
CO ₂ (%)	10~15	5~10
N ₂ (%)	0~3	0~2
H ₂ O(%)	15~25	0~2
LHV(MJ/Nm ³)	7~10	11~14

가스터빈 모델에 메탄 연료를 사용한 경우를 탈설계 해석기법을 적용하여 해석하였다. 천연가스 연료를 사용하는 경우에 비하여 순수 메탄을 사용하는 경우 주 연료성분인 메탄의 함량 변화에 따라 연료의 발열량은 증가하게 되며 이에 따른 엔진의 성능 변화를 계산한 결과는 Table.3과 같다. 메탄을 연료로 사용한 경우 천연가스에 비하여 연료유량은 약 1.3%정도 감소하였다. 그러나 연료의 변화에 따른 가스의 정압비열이 변하게 되어 전체 출력은 175.38MW로 약 2.3% 증가하였으며, 발열량의 변화 및 출력의 증가에 따라 전체 열효율은 약간 증가하였다.

3. Syngas사용에 따른 성능 특성

3.1 Syngas의 성분분석

Table.4는 석탄(coal)과 석유 코크스(pet coke)를 가스화과정(gasification)을 통하여 생성된 syngas의 성분 특성을 나타내고 있다. 두 연료 모두 syngas

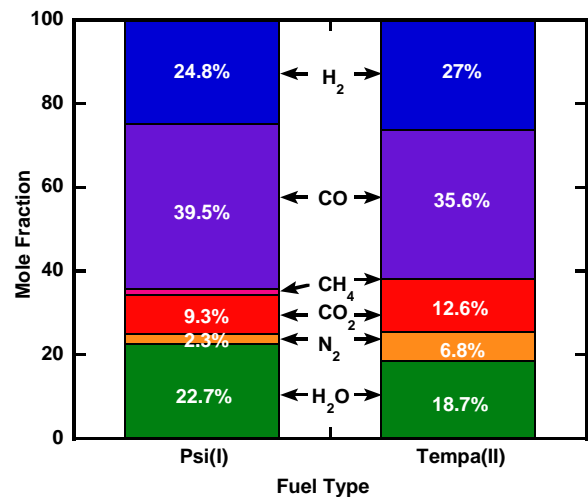


Fig. 2 Composition of typical syngases produced by two IGCC Power plants⁽⁸⁾

에서의 메탄의 함량은 매우 미미하며, 주 구성 성분은 수소(H₂) 및 일산화탄소(CO)로 구성되어 있다. 발열량은 석탄 가스(coal syngas)의 경우 7000 ~ 10000kJ/kg, 석유 코크스 가스(pet coke syngas)의 경우 11000 ~ 14000kJ/kg로 메탄 및 천연가스에 비하여 매우 낮다. 석탄 가스의 구성성분은 대체로 가스화기기를 공급하는 공급사에 따라 그 구성성분에 변화가 있으며, 현재 상용화 되어있는 IGCC 발전소에서 사용하는 석탄 가스의 성분의 예는 Fig. 2와 같다. 본 연구에서는 Table 5와 같은 두 가지의 IGCC 발전소에서 생성되는 석탄 가스를 앞서 분석한 GE 7FA+ 모델 가스터빈엔진에 적용하였다.

3.2 syngas 사용에 따른 가스터빈 성능특성

Table.5는 Fig.2의 IGCC 발전에서 생성된 syngas를 연료로 사용하는 가스터빈의 성능해석 결과와 함께 순 수소만을 사용하는 경우의 결과를 비교한 결과이다. 이 결과는 앞서 서술한 바와 같이 천연가스를 사용한 기본 성능의 결과를 이용한 탈설계 해석을 통하여 계산한 결과이며, 터빈 입구 온도 및 터빈 출구온도가 일정하다고 가정하였다. 연료가 바뀔때 따라 동일한 터빈 입구온도를 유지하기 위하여 Psi(I)의 경우 천연가스 대비 약 6.4배정도 증가하였으며, Tempa(II)의 경우에는 약 7.4배정도 증가하였다. 두 경우 모두 연소기 출구 가스의 비열은 약 1.36정도로 천연

Table. 5 Results of performance analysis of the GE 7FA+ model gas turbine using two types of syngases and hydrogen

Fuel Type	Syngas		H ₂
	Psi(I)	Tempa(II)	
Plant Net Power (MW)	211.973480	219.141357	184.794190
Net Cycle Efficiency(%)	38.6427956	39.0085411	38.0184670
LHV(kJ/kg)	8918.29688	7886.02734	119943.078
Air Flow(kg/s)	435.400238	435.400238	434.646362
Turbine Efficiency(%)	86.691874	86.691874	86.597282
Fuel Energy Consumption (kJ/kg)	548525.313	561756.813	486046.031
Exit gas C _p (kJ/kg·K)	1.35981119	1.36131787	1.39248705
Fuel Mass Flow (kg/s)	61.5056076	71.2344360	4.05230522
TIT(°C)	1402.71008	1402.71033	1402.71314

가스 연료를 사용하는 경우에 비하여 높은 것으로 나타났다. 연료유량의 증가 및 비열의 변화 등의 원인에 의하여 엔진 출력은 천연가스 연료의 경우에 비하여 1.24~1.28배 증가하는 경향을 나타내었으며, 열효율은 약 6.6~7.6%정도 증가하였다. 또한, Psi(I)의 경우와 비교하여 Tempa(II)의 경우 출력은 약 1%, 효율또한 1%정도 더 증가하는 것으로 나타났다. 두 개의 결과가 차이는 연료의 성분변화에 따라 연소과정에서 연료로 사용되어지는 성분의 비가 감소하게 되어, 발열량이 감소하고 이에 따른 연료의 양이 증가하는 것과, 주요 연료성분인 수소 및 일산화탄소의 함량변화에 따른 연소기 출구가스의 성분 변화에 의한 것으로 파악된다. 특히 수소의 경우 분자량에 비하여 매우 큰 발열량을 가지는 물질로써, 수소함량의 변화는 가스터빈 성능 변화에 매우 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

수소 연료에 의한 가스터빈 성능변화를 좀 더 살펴보기 위하여 순수 수소를 사용하는 경우의 가스터빈 엔진의 특성을 파악하여 Table.5에 비교하여 보았다. 수소를 연료로 사용하는 경우, 연료 유량은 1/2이하로 감소하였으나, 비열이 1.39정도로 증가하며, 전체 출력은 1.08배, 열효율은 4.9% 정도 증가하였다.

3.3 syngas성분변화에 따른 가스터빈 성능 변화

syngas의 구성 성분 중 수소와 일산화탄소는 전체의 약 65%를 차지하고 있는 물질이다. 특히 수소(H₂)는 syngas를 구성하고 있는 물질 중 가장

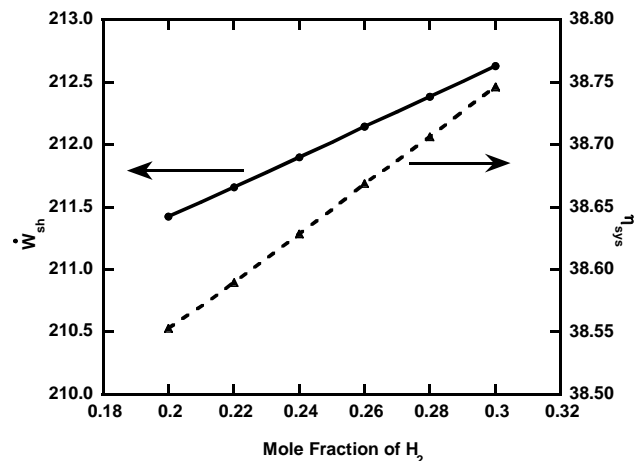


Fig. 3 Shaft Power and system efficiency with H₂ composition

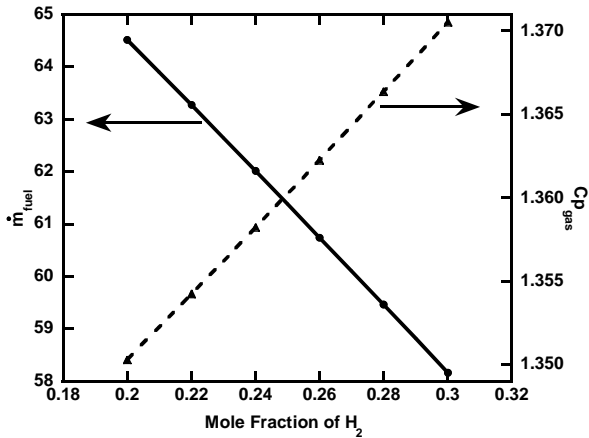


Fig. 4 Fuel flow and Specific Heat with H₂ composition

큰 발열량을 가지는 물질로써, 앞 절에서 살펴본 바와 같이 수소의 성분비가 변화함에 따라 가스 터빈 성능에 미치는 영향이 매우 크다. 본 절에서는 I (PSI Plant)의 구성 성분을 기준으로 CO와 H₂의 합에 해당하는 64.3%의 구성비를 고정된 상태에서, 수소의 성분비를 증가시키면서, 가스 터빈의 성능 변화를 고찰하였다.

Fig. 3은 수소의 성분이 증가함에 따른 전체 출력 및 열효율의 변화를 보여주고 있는데, 열효율 및 출력 모두 수소 성분의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 4는 수소 성분의 증가에 따른 연료유량 및 연소가스의 비열의 변화를 나타내고 있다. 수소의 증가에 따라 연료의 발열량은 증가하게 되므로, 사용되는 연료의 유량은 감소한다. 그러나 연소가스의 비열은 증가하여 연료 유량의 감소에도 불구하고 출력은 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 공급 연료를 천연가스에서 syngas로 바꾸면 연료 유량은 약 10 배 이상 증가하게 되지만 연소 가스 전체 유량의 변화와 비교할 때 상대적으로 매우 작다. 이는 가스 터빈 엔진의 성능 변화의 원인이 연료의 유량의 변화 이외에 다른 원인이 있다는 것을 의미한다. Fig. 4에서 연소기 출구 가스 비열이 변화하는 원인을 분석하기 위하여 연소기 출구 배기 가스의 성분 및 연소기 입 출구에서의 엔탈피 변화량을 분석하여 Fig. 5에 나타내었다. 수소의 함량이 증가함에 따라 연소기 출구 가스에서 H₂O의 함량은 증가하고, CO₂의 함량은 점차 감소하는 경향을 나타내게 된다. 이에 따라 연소기 출구에서의 엔탈피가 증가하게 되고 전체적으로 연소기 입출구의 엔탈피 차가 커지게 된다. 결과적

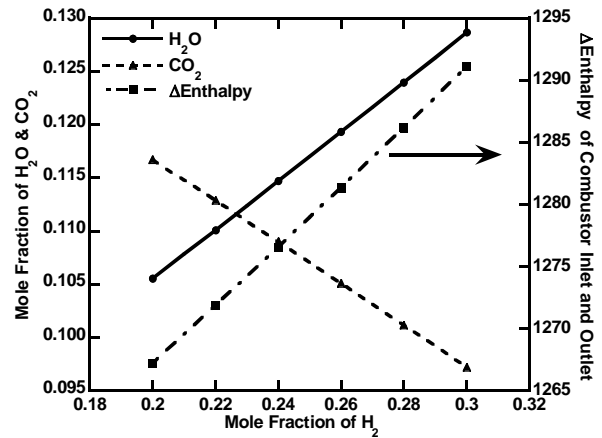


Fig. 5 Mole Fraction of Combustor Exhaust Gas

으로 수소 성분의 함량 변화는 압축기 출구 가스의 성분 변화를 유발하고 이에 따라 연소기 출구에서의 엔탈피가 증가하게 되며, 이러한 원인에 의하여 가스 터빈 엔진의 성능이 변화하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 공급 연료의 종류 및 성분에 따른 발전용 가스 터빈의 성능 특성을 고찰하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 천연가스와 메탄을 연료로 사용하는 경우를 비교해 본 결과 메탄의 성분이 증가함에 따른 발열량의 변화 및 연료 유량, 구성 성분의 변화에 따른 비열 등의 영향으로 출력 및 열효율이 다소 증가하는 결과를 확인하였다.
- (2) syngas 중에서 수소의 함량이 증가함에 따라 출력과 열효율은 증가 하였으며, 연료유량은 감소하였다. 이는 발열량이 높은 수소의 함량이 증가함에 따라 연소기 출구 가스의 비열이 증가하게 되며 이는 출구가스의 성분에서 CO₂는 감소하고 H₂O는 증가하여, 결과적으로 연소기 입 출구에서의 엔탈피가 변화하는데 원인이 있는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 전력연구원의 연구비 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) Seo, S. B., Kim, J. J., Chung, J. H. and Ahn, D. H., 2001, "A Performance Prediction of Gas Turbine using Syngas Fuel in IGCC," *Proceedings of KSME(B) paper*, pp. 878~884
- (2) Lee, C., Lee, S. J., Yun, Y. S. & Kim, H. T., 2005, "Performance and Emission Analysis of the Gas Turbine Cycle for Utilizing the Heavy Residue Oil from Refinery Process," *Proceedings of ACGT paper ACGT 2005-042*
- (3) Arrieta, F. R. P. and Lora, E. E. S., 2005, "Influence of ambient temperature on combined-cycle power-plant performance," *Applied Energy* Vol. 80, pp. 261~272
- (4) Eldrid, R., Kaufman, L. and Marks, P., 2001, "The 7FB: The Next Evolution of the F Gas Turbine," *GE Power Systems*, GER-4194, pp. 1~18
- (5) GE Power-Enter Software, 2005, GateCycle, ver. 5.61.
- (6) Kim, T. S., 1995, *Design and Performance Analysis of Gas Turbine with Applications to Cogeneration Systems*, Ph.D dissertation, Seoul National University
- (7) Gadde, S., Wu, J., Gulati, A. and McQuiggan, G., 2006, "Syngas Capable Combustion Systems Development For Advanced Gas Turbines," *Proceedings of ASME paper*, GT2006-90970
- (8) Brdar, R. D. and Jones, R. M., 2000, "GE IGCC Technology and Experience with Advanced Gas Turbines." *GE Power Systems*, GER-4207, pp. 1~12