

석탄가스화 복합화력 발전용 가스터빈 성능해석

이 종준¹⁾, 차 규상¹⁾, 손 정락²⁾, 김 동섭³⁾

Performance Analysis of a Gas Turbine for Integrated Gasification Combined Cycle

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

Key words : Integrated Gasification Combined Cycle (석탄가스화 복합화력), Performance(성능), Syngas(석탄가스), Gas Turbine(가스터빈)

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 syngas. 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. Also, Changing of turbine inlet Mass flow lead to change the turbine matching point, in the event the pressure ratio is changed.

Nomenclature

LHV	: Low Heating Value(kJ/kg)
η	: Efficiency
PR	: Pressure Ratio
\dot{m}	: Mass Flow(kg/s)
TIT	: Turbine Inlet Temperature(°C)
TRIT	: Turbine Rotor Inlet Temperature(°C)
TET	: Turbine Exit Temperature(°C)

1. 서론

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 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 매장량

에 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 칭함)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 가스터빈에

- 1) 인하대학교 대학원 기계공학과
E-mail : jjlee@inha.ac.kr
Tel : (032)876-7308 Fax : (032)868-1716
- 2) 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : jlsohn@snu.ac.kr
- 3) 인하대학교 기계공학과
E-mail : kts@inha.ac.kr
Tel : (032)860-7307 FAX : (032)868-1716



Fig. 1 Schematic diagram of GE7FA+

서 연료를 Syngas로 대체하기 위해서는 이와 관련된 성능변화를 파악하고, 분석하는 것이 매우 중요하다.

그동안 국내외에서 Syngas사용에 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.

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 1과 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 Gate 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 성

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

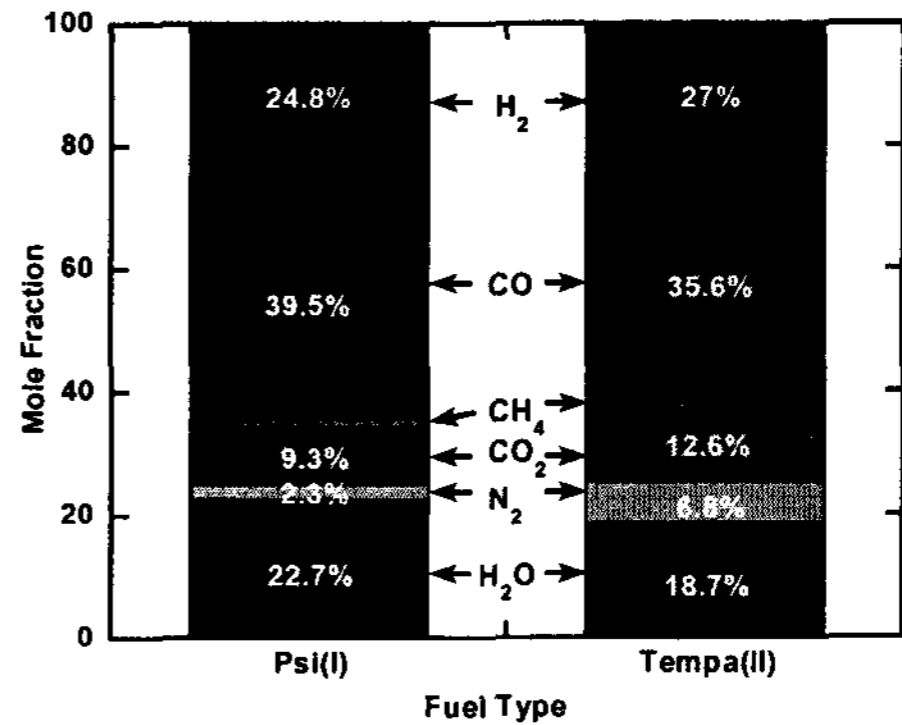


Fig. 2 Composition of typical syngases produced by two IGCC Power plants (7)

능특성을 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.

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 모사하였다.

3. Syngas사용에 따른 성능 특성

3.1 Syngas의 성분분석

석탄(coal gasification)을 통하여 생성된 syngas의 성분 특성은 메탄의 함량은 매우 미미하며, 주 구성성분은 수소(H₂) 및 일산화탄소(CO)로 구성되어 있다. 발열량은 7000 ~ 10000kJ/kg로 메탄 및 천연가스에 비하여 매우 낮다. 석탄 가스의 구성성분은 대체로 가스화기를 공급하는 공급사에 따라 그 구성성분에 변

Table 2 Results of performance analysis of the GE 7FA+ model gas turbine using two types of syngases and hydrogen

Fuel Type	Syngas	
	Psi(I)	Tempa(II)
Plant Net Power (MW)	211.973480	219.141357
Net Cycle Efficiency(%)	38.6427956	39.0085411
LHV(kJ/kg)	8918.29688	7886.02734
Air Flow(kg/s)	435.400238	435.400238
Turbine Efficiency(%)	86.691874	86.691874
Fuel Energy Consumption (kJ/kg)	548525.313	561756.813
Exit gas C _p (kJ/kg-K)	1.35981119	1.36131787
Fuel Mass Flow (kg/s)	61.5056076	71.2344360
TIT(°C)	1402.71008	1402.71033

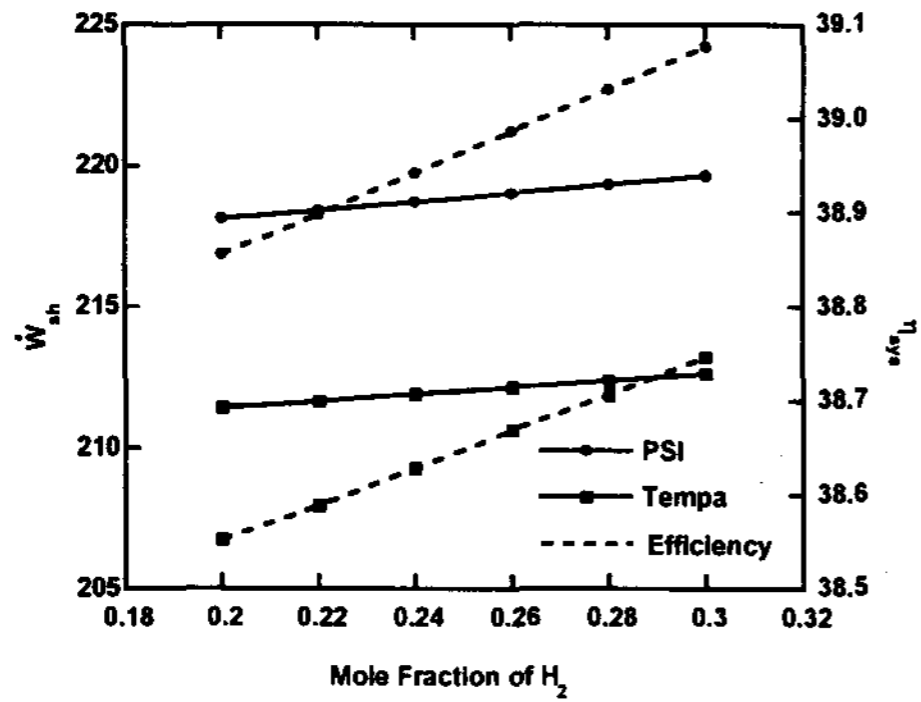


Fig. 3 Shaft Power and system efficiency with H₂ composition

화가 있으며, 현재 상용화 되어있는 IGCC 발전소에 에서 사용하는 석탄 가스의 성분의 예는 Fig. 2와 같다. 본 연구에서는 Table 2와 같은 두 가지의 IGCC 발전소에서 생성되는 석탄 가스를 GE 7FA+ 모델 가스터빈엔진에 적용하였다.

3.2 syngas 성분 변화에 따른 효과

syngas의 구성 성분 중 수소와 일산화탄소는 전체의 약 65%를 차지하고 있는 물질이다. 특히 수소(H₂)는 syngas를 구성하고 있는 물질 중 가장 큰 발열량을 가지는 물질로써, 앞 절에서 살펴본 바와 같이 수소의 성분비가 변화함에 따라 가스터빈 성능에 미치는 영향이 매우 크다. 본 절에서는 두 상용 IGCC플랜트의 데이터를 바탕으로, CO와 H₂의 합에 해당하는 64.3%, 62.5%의 구성비를 고정한 상태에서, 수소의 성분비를 증가시키면서, 가스터빈의 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

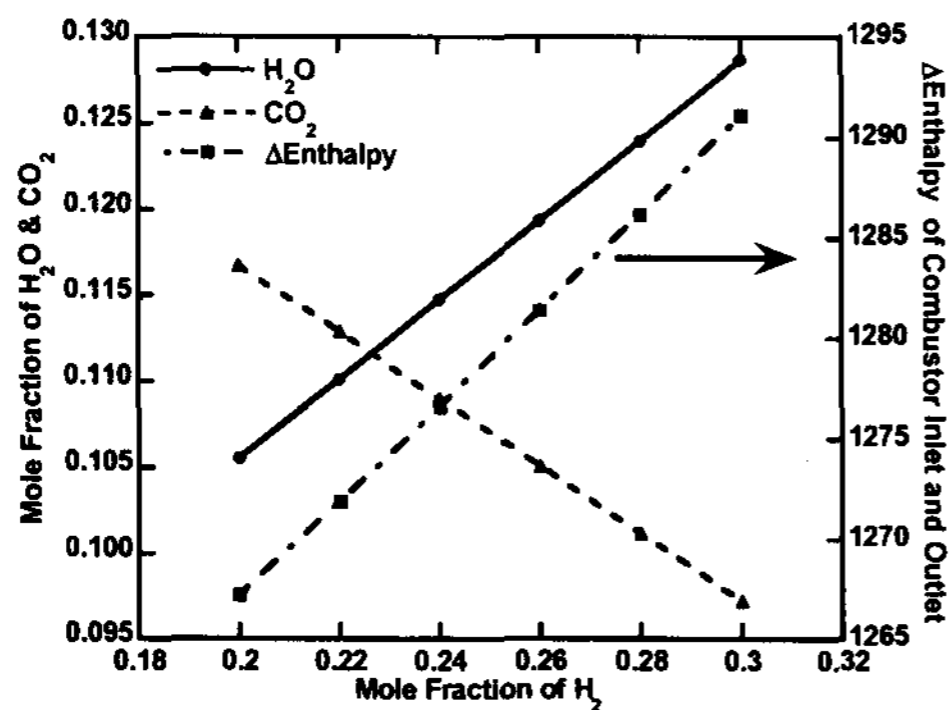


Fig. 5 Mole Fraction of Combustor Exhaust Gas (PSI Plant)

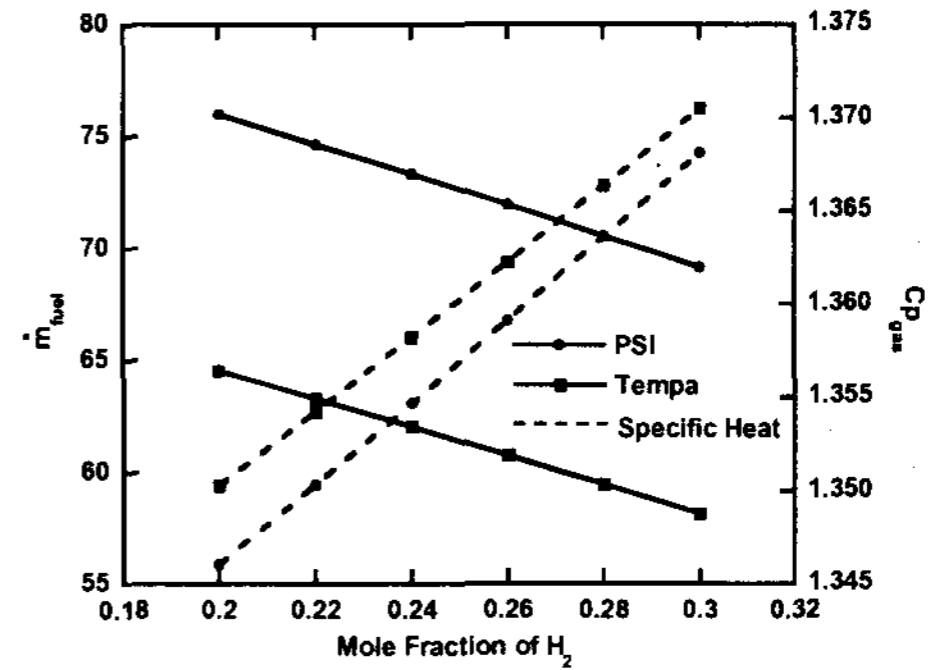


Fig. 4 Fuel flow and Specific Heat with H₂ composition

증가하여 연료 유량의 감소에도 불구하고 출력은 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 공급 연료를 천연가스에서 syngas로 바꾸면 연료 유량은 약 10배 이상 증가하게 되지만 연소 가스 전체 유량의 변화와 비교할 때 상대적으로 매우 작다. 이는 가스터빈 엔진의 성능 변화의 원인이 연료의 유량의 변화 이외에 다른 원인이 있다는 것을 의미한다. Fig. 4에서 연소기 출구 가스 비열이 변화하는 원인을 분석하기 위하여 PSI Plant의 성분을 기준으로, 연소기 출구 배기가스의 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. 결과적으로 수소 성분의 함량 변화는 압축기 출구 가스의 성분 변화를 유발하고 이에 따라 연소기 출구에서의 엔탈피가 증가하게 되며, 이러한 원인에 의하여 가스터빈 엔진의 성능이 변화하게 된다.

3.3 압축기 성능변화에 따른 효과

본 절에서는 엔진에 유입되는 연료의 변화에 따른 압축기의 성능 특성이 변화하는 현상 및 이에 따른 엔진 성능의 변화 등을 고찰하였다. 앞에서 설명한 바와 같이 엔진으로 유입되는 연료

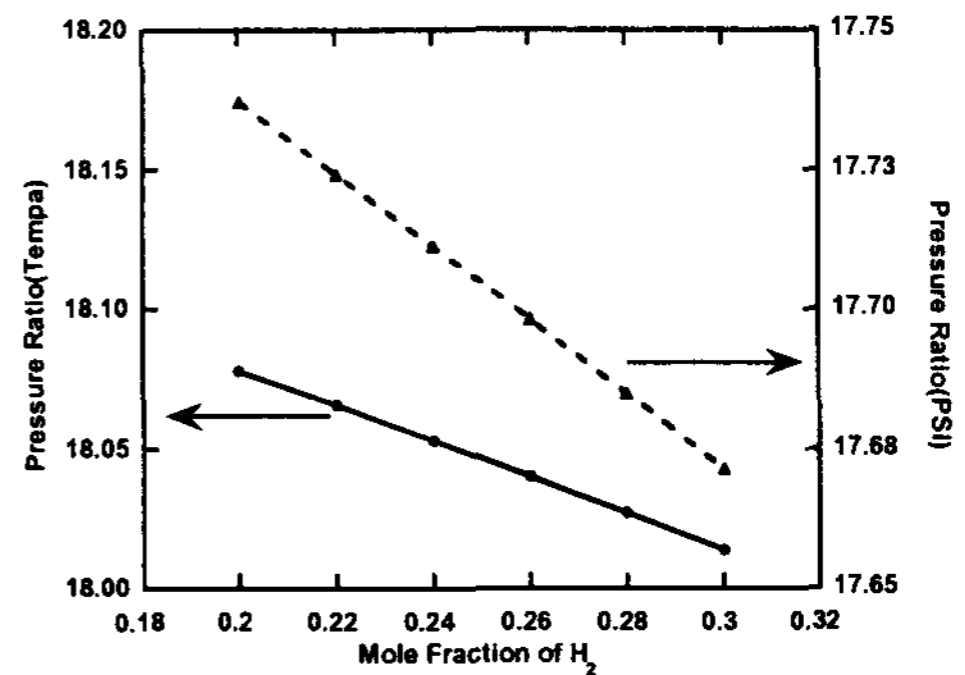


Fig. 6 Change of Pressure Ratio with H₂ composition

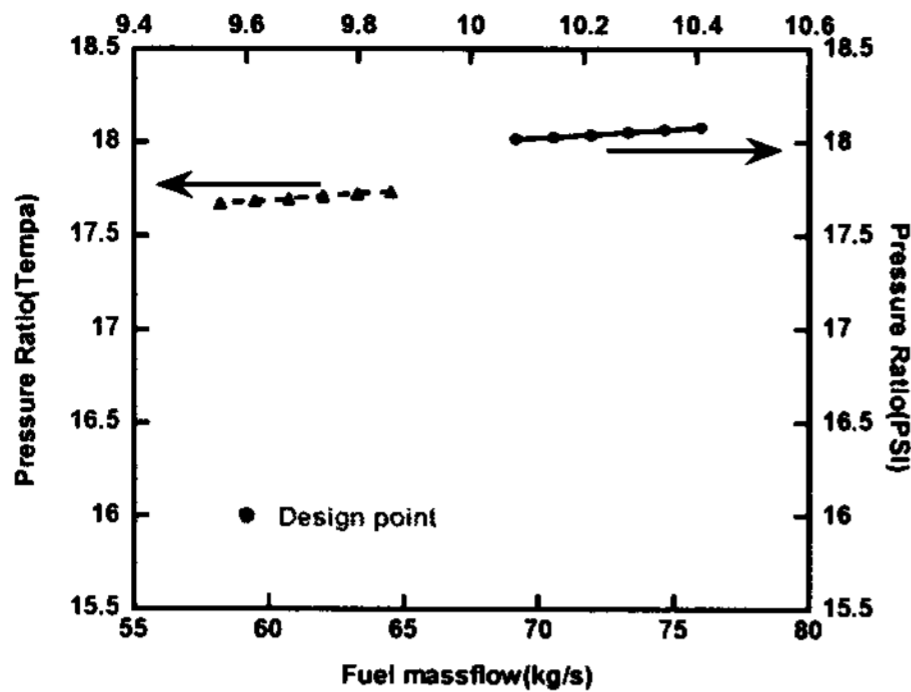


Fig. 7 Change of Pressure Ratio with Fuel mass flow

의 변화에 따라 전체 유량이 변화하고, 이에 따라 압축기 입구로 유입되는 공기유량 및 매칭에 의한 압축기 출구 압력 등이 변화하게 된다. 이는 압축기의 작동조건을 변화시키게 되며, 압축기 서징 등의 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 연료의 변화에 따른 압축기의 압력비의 변화를 Fig 6에 나타내었다. 두 경우 모두 입구 유량은 거의 변화가 없었으며, 작은 유량의 변화에 따른 압력비의 변화만을 나타내었다. 또한 syngas 성분변화에 따른 압축비의 변화는 미미한 것으로 판단된다. 그러나 실제로 설계점에서의 압력비는 16으로 설계되어 있었으며 PSI 및 Tempa plant에서 사용하는 syngas 연료 성분을 적용하였을 경우 17~18사이로 압력비가 상승하는 효과를 받게 된다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 터빈으로 유입되는 연료의 유량이 변화함에 따라 터빈 압력이 변화하고, 압축기와 매칭에 의하여 압축비가 변화한 것이라고 판단된다. 그러나 연료 내 수소 성분의 변화에 따른 연료유량의 감소에도 압력비는 크게 변화하지 않는다. 실제로 압축기에 의한 성능의 변화는 압축기 성능선도(Running Line)에 의하여 영향을 받을 것으로 판단되어지며 추후 가스터빈에 사용된 압축기의 정확한 성능선도(Running Line)를 프로그램에 적용하여 해석함으로써 더욱 정확한 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 공급 연료의 종류 및 성분에 따른 발전용 가스터빈의 성능특성을 고찰하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) syngas 중에서 수소의 함량이 증가함에 따라 출력과 열효율은 증가 하였으며, 연료 유량은 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.
- (2) 엔진 설계점의 압축비에 비하여 연료를 syngas로 변화시켰을 때의 압축비가 다소

높게 나타났으며, 이는 터빈 입구로 유입되는 유량의 변화에 따른 매칭에 의한 영향으로 압축비가 상승한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 전력연구원의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [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] 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