

<학술논문>

Syngas를 연료로 사용하는 발전용 가스터빈의 성능해석

이종준* · 차규상* · 손정락** · 김동섭⁺ · 주용진***
(2007년 9월 3일 접수, 2007년 10월 29일 심사완료)

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

Jong Jun Lee, Kyu Sang Cha, Jeong Lak Sohn, Tong Seop Kim and Yong Jin Joo

Key Words: Integrated Gasification Combined Cycle(석탄가스화 복합발전), Gas Turbine(가스터빈), Syngas(합성가스), Composition(성분), Performance Change(성능변화)

Abstract

Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) power plant converts coal to syngas, which is mainly composed of 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 using syngas in a gas turbine, originally designed for natural gas fuel, on its performance. A commercial gas turbine is selected and variations of its performance characteristics due to adopting syngas is analyzed by simulating off-design gas turbine operation. Since the heating value of the syngas is lower, compared to natural gas, IGCC plants require much larger fuel flow rate. This increases the gas flow rate to the turbine and the pressure ratio, leading to far larger power output and higher thermal efficiency. Examination of using two different syngases reveals that the gas turbine performance varies much with the fuel composition.

기호설명

η : 효율

C_p : 정압비열(kJ/kg·K)

하첨자

k : 비열비

in : 입구

LHV : 저위발열량(kJ/kg or MJ/Nm³)

pt : 폴리트로픽

\dot{m} : 유량(kg/s)

out : 출구

P : 압력 (kPa)

T : 온도 (°C)

TET : 터빈출구온도(°C or K)

TIT : 터빈입구온도(°C or K)

TRIT : 터빈로터입구온도(°C or K)

1. 서론

최근 세계적으로 가장 큰 이슈중의 하나는 에너지 자원의 고갈과 환경오염의 심화이다. 이에 따라 점차 고효율 발전시스템에 대한 요구가 증가하고 있는 실정이며, 가스터빈과 스팀터빈을 결합한 복합 화력발전이 현재의 기술수준에서 가장 높은 효율을 얻을 수 있는 발전 시스템으로서 사용이 날로 증가하고 있다.

⁺ 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과,
E-mail : kts@inha.ac.kr
TEL : (032)860-7307 FAX : (032)868-1716

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 한국전력연구원

일반적으로 복합 화력에는 천연가스가 주 연료로 사용된다. 그러나 천연가스 역시 매장량이 한정되어 있고, 연료의 가격 또한 높은 편에 속하기 때문에, 좀 더 저렴하고 매장량에 상대적으로 영향을 덜 받는 연료의 도입이 필요하다. 이에 따라 석탄가스, 바이오메스 등을 연료로 사용한 발전 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다. 그 중에서도 특히 석탄 등의 연료를 가스화시켜 합성연료(이하 Syngas라 칭함)를 생성시키고 이를 복합화력의 연료로 사용하는 발전시스템을 가스화 복합발전(Integrated Gasification Combined Cycle, 이하 IGCC라 칭함)이라고 부른다.

Syngas는 수소(H₂)와 일산화탄소(CO)가 주 성분이며, 천연가스에 비하여 발열량이 낮다. 복합발전의 운전 측면에서 보면 만약 천연가스를 연료로 사용하도록 설계된 가스터빈이 동일한 터빈입구 온도조건에서 syngas로 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 IGCC 시스템의 성능해석 연구 결과가 발표되었으며,⁽¹⁻³⁾ 현재 건설되어 작동하는 대표적인 4대 IGCC plant의 성능에 대한 구체적인 연구결과가 발표되기도 하였다.⁽⁴⁾ 그러나 다양한 연구들에도 불구하고, 구체적인 연료 성분 변화에 따른 시스템의 작동성능 변화에 대한 연구나, 가스터빈 및 스팀터빈의 단독적인 성능 변화에 대한 연구결과 발표는 미비하다. 따라서, 본 연구에서는 천연가스를 사용하는 기존의 가스터빈의 설계점 성능해석을 통하여 기본 성능특성을 분석한 후, 연료를 Syngas로 변화시켰을 경우의 가스터빈 성능 변화특성을 해석적으로 분석하였다.

2. 해석 대상 가스터빈 성능특성

2.1 해석대상 가스터빈

본 연구에서는 GE의 7FA+모델 가스터빈을 대상 엔진으로 선정하였다. 이 가스터빈은 천연가스 연료를 사용하도록 설계되어서 광범위하게 사용되고 있으면서 IGCC 용으로도 사용이 고려

Table 1 Design specifications of GE 7FA+ gas turbine

Ambient temperature(°C)	15
Ambient pressure(kPa)	101.3
PR	16
TRIT(°C)	1326.7
TET(°C)	601
Exhaust 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

되고 있는 기종이다. 이 모델의 기본 성능은 Table 1과 같다. TRIT는 실제로 터빈에서 팽창을 시작하는 터빈 첫단 로터입구온도로서 일반적으로 점화온도(firing temperature)라 불리는 온도이다. 이 모델의 정격출력 및 열효율은 각각 171.7MW, 36.5%로 알려져 있다.⁽⁵⁾

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 프로그램인 Gate Cycle⁽⁶⁾에 7FA+엔진의 주요 성능 파라미터를 적용하여, 엔진 모사 프로그램을 작성하였다.

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 연소가스 유량의 변화는 터빈입구로 유입되는 유량의 변화를 의미하며 이는 터빈 작동특성상 터빈 입구압력의 변화를 발생시키고, 결과적으로 압축기의 압력비도 변화하게 된다. 이와 같이 사용 연료가 변경됨에 따른 가스터빈의 성능특성을 모사하기 위해서는 설계점 성능해석만으로 부족하며 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 2 Compositions of natural gas (mole percentage)

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 ₃ H ₁₂	0.02
N ₂	0.19

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

Fuel Type	Natural gas
Plant Net Power(MW)	171.33
Net Cycle Efficiency(%)	36.24
LHV(kJ/kg)	49258.2
Inlet Air Flow(kg/s)	435.30
Compressor Polytropic Efficiency(%)	91.5
Fuel Mass Flow (kg/s)	9.600
Fuel Energy Consumption (kJ/kg)	472750
TIT(°C)	1402.7
TRIT(°C)	1331.6
Combustor Exit gas C _p (kJ/kg-K)	1.336
Turbine Efficiency(%)	0.866
Coolant Fraction(%)*	18.0

* Total turbine coolant divided by inlet air flow

문헌상의 자료를 바탕으로 각 구성부를 모델링하여 각 구성부의 설계 값들을 정한 뒤, 탈설계해석을 수행하였다. 대상 가스터빈의 압축기 성능선도가 알려져 있지 않으므로 소프트웨어에 내장된 일반적인 다단 축류압축기 선도를 사용하였다. 일반적인 경향과 같이 주어진 회전수에서 압축기 유량은 거의 일정하다. 설계점에서 터빈 냉각 유량은 문헌 참조⁽⁷⁾를 통하여 대상 가스터빈의 성능이 확보되도록 합리적으로 설정하였으며, 탈설계 시에는 압축기 냉각 유량추출 지점과 터빈분사 지점 사이의 열 유체 역학적 관계에 의하여 유량이 결정되도록 소프트웨어 상에 프로그래밍 되어있다. 터빈의 탈설계 작동 특성은 일반적인 산업용 가스터빈의 특성을 따르도록 초킹(choking)조건에서 움직인다고 가정하였다. 기본 연료로 사용한 천연가스의 성분비는 Table 2와 같다.

Table 4 General Composition of Syngas (mole percentage)

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

2.1.2 천연가스를 사용하는 기본 성능해석 결과 Table 1의 데이터를 기반으로 7FA+모델에 천연가스를 사용하는 경우를 2.1.1의 해석 수단으로서 모사하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

터빈 출구온도 및 배기가스 유량을 Table 1의 값들로 고정된 상태에서 출력 및 효율이 역시 Table 1에서의 값들과 유사한 값이 계산되도록 다양한 운전 파라미터들 (공기유량, 연료유량, 압축기 및 터빈효율 등)을 결정하였다. 공기유량과 연료유량은 각각 435.3kg/s, 9.6kg/s로 추산되었다. 터빈 입구 온도(TIT)는 1402.7°C, 터빈 로터입구 온도(TRIT)는 1331.6°C를 얻었는데, TRIT는 Table 1의 값과 비교하여 약 1%정도의 오차 범위 내에서 일치하였다. 압축기의 폴리트로픽 효율은 91.5%로, 터빈의 단당 등엔트로피 효율은 86.6%로 예측되었으며(모든 단의 효율은 같다고 가정), 입구 공기유량 대비 터빈 총 냉각유량의 비는 18%로 추산되었는데, 대형 가스터빈의 일반적인 구성부 성능을 감안할 때 합리적인 값들로 판단된다. 결과적으로 모사된 엔진의 설계점 성능은 만족할 만 하다.

3. Syngas사용에 따른 성능 특성

3.1 Syngas의 성분

Table 4에 석탄(coal)과 석유 코크스(pet coke)의 가스화과정(gasification)을 통하여 생성된 syngas의 일반적인 성분 범위를 예시하였다. Syngas에서 메탄의 함량은 작으며, 주 구성성분은 수소(H₂) 및 일산화탄소(CO)이다. 발열량은 석탄 가스(coal syngas)의 경우 7,000 ~ 10,000kJ/kg, 석유 코크스 가스(pet coke syngas)의 경우 11,000 ~ 14,000kJ/kg로 메탄 및 천연가스에 비하여 매우 낮다.

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

Fuel Type	Syngas	
	I (Psi)	II (Tempa)
Plant Net Power (MW)	211.97	219.14
Net Cycle Efficiency(%)	38.64	39.01
LHV(kJ/kg)	8918.3	7886.0
Fuel Energy Consumption (kJ/kg)	548530	561760
Combustor exit gas C_p (kJ/kg-K)	1.360	1.361
Fuel Mass Flow (kg/s)	61.506	71.234
TIT(°C)	1402.7	1402.7

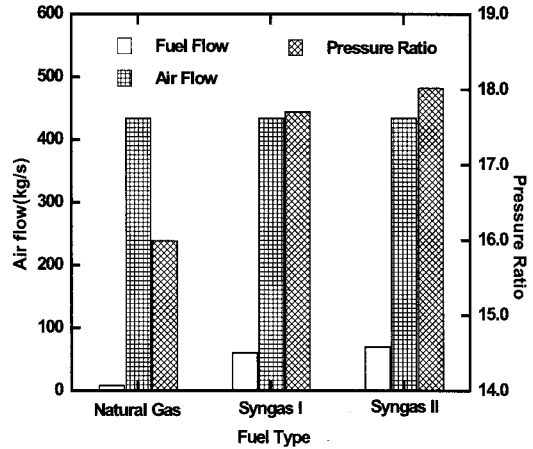


Fig. 2 Comparisons of fuel and air flow rates and compressor pressure ratio for different fuel types

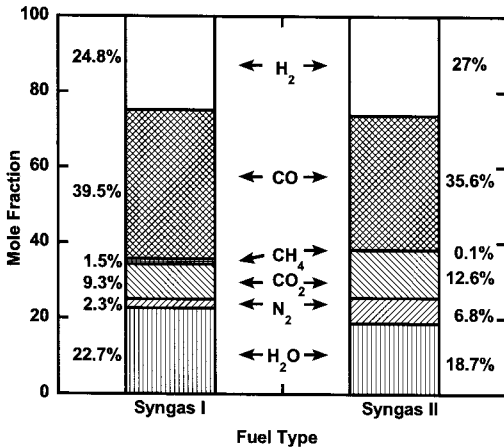


Fig. 1 Compositions of typical syngases produced in IGCC plants⁽⁹⁾

석탄 가스의 구체적인 성분은 가스화기기를 공급하는 공급사에 따라 다른데,⁽⁸⁾ 본 연구에서는 현재 상용화 되어있는 IGCC 발전소에서 사용하는 성분을 이용하고자 한다. 두 가지 공정에서 생산된 서로 다른 성분비를 가진 syngas를 선정하여 앞서 분석한 GE 7FA+ 모델 가스터빈엔진에 적용함으로써 천연가스에서 syngas로 바뀔 때의 가스터빈 성능변화뿐 아니라 서로 다른 성분비에 의한 성능 차이도 동시에 고찰하고자 하였다. 대상 성분은 각각 Psi 설비, Tempa 설비에서 생성되는 표준 성분⁽⁹⁾으로서 Fig. 1에 두 성분을 비교하여 나타내었다. 이하 Psi 성분은 syngas I, Tempa 성분은 syngas II로 칭한다. 두 가스 모두 수소와 일산화탄소의 합이 60%를 넘으며 II가 I에 비하여 수소가 다소 많고 일산화탄소는 적은 특징을 가진다.

3.2 Syngas 사용에 따른 가스터빈 성능 변화

Table 5는 Fig. 1의 두 가지 syngas를 연료로 사용하는 경우에 대해 계산된 성능 결과를 나타낸다. 외기 조건은 앞선 모든 계산과 동일하게 표준 대기 조건 (101.3kPa, 15°C)로 두었다. 앞서 서술한 바와 같이 천연가스를 사용한 기본 설계해석 결과를 바탕으로 탈설계 해석을 통하여 계산한 결과이며, 터빈 입구 온도는 애초 설계(천연가스 사용)와 동일하게 유지된다고 가정하였다. 연료 성분이 바뀌에 따라 동일한 터빈 입구온도를 유지하기 위하여 syngas I의 경우 천연가스 대비 약 6.4배 정도, syngas II의 경우에는 약 7.4배 정도 연료의 공급유량이 증가해야 한다. 두 경우 모두 터빈에서 가스의 비열(표에는 터빈 유입전의 연소기 출구 비열을 예로서 보여 주고 있음)은 천연가스 연료를 사용하는 경우에 비하여 다소 높은 것으로 나타났다. 엔진 출력은 천연가스 연료의 경우에 비하여 24~28% 증가하는 경향을 나타내었으며, 열효율은 약 6.6~7.6% 정도 증가하였다. 출력 증가의 주요 원인은 터빈 유량의 증가 및 물성치 변화인데, 이는 추후 자세히 설명할 것이다. 또한, syngas I과 비교하여 syngas II의 경우 출력은 약 1%, 효율 또한 1% 정도 더 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 엔진 성능 차이를 분석하기 위하여 엔진의 여러 가지 운전 파라미터 변화를 살펴보고자 한다. Fig. 2에서는 연료성분의 변화에 따른 공기유량, 연료유량 및 압력비의 변화를 나타내

었다. Syngas의 경우 천연가스보다 월등히 많은 연료량이 필요함은 앞서 설명한 바와 같다. 다만 축류압축기의 특성상 동일한 외기조건과 엔진 회전수에서 공기유입유량은 거의 일정하다. 같은 그림에 압축기 압력비의 변화도 나타내었다. 천연 가스에 비하여 syngas를 사용하게 되면 연료 유량이 월등히 증가하므로 터빈 유량이 대폭 증가하게 된다. 터빈을 거의 초크된 운전으로 보면 다음의 식 (1)로 터빈 특성이 모사되므로 터빈입구온도가 동일하게 유지된 상태에서 터빈입구 유량의 증가는 터빈입구압력의 증가, 즉 압력비의 증가를 가져 온다.

$$\frac{\dot{m} \sqrt{T_{in}}}{P_{in}} = \text{constant} \quad (1)$$

예를 들어 Syngas I의 경우 연료유량이 천연가스에 비하여 6배 이상 증가함으로 인하여 터빈입구에서 가스의 유량이 약 14% 정도 증가하게 되며, 결과적으로 압축기 출구 압력, 즉 압력비가 그만큼 상승하게 된다. Fig. 2의 결과가 이러한 이론적 특성을 잘 반영해 주고 있다. 일정한 회전수에서 압력비의 증가는 운전점을 서지쪽으로 이동시킨다. 즉, syngas I의 경우에 약 15% 정도 상승하게 되는데, 실제 압축기에서 서지마진 (surge margin, 기준 압력비에서 서지에 이르는 압력비까지의 여유분)이 그 이상 확보되어야만 안전한 운전이 가능하다. 일반적인 축류 압축기가 이 정도의 압력비 상승은 감당하리라 생각되지만 만일 서지마진이 충분하지 않다면 이러한 대폭적인 연료유량 증가를 감당하지 못할 수도 있다. 그러한 경우에는 불가피하게 터빈 등의 설계변경에 의하여 늘어난 유량을 압력비의 상승 없이 수용할 수 있도록(예를 들어 터빈 유효 단면적 증가 등을 통하여)해야 할 것이다. 그러나, 이러한 설계변경은 사실상 재설계에 해당하므로 경제성 등의 이유로 인하여 아직까지 실제 운전중인 IGCC 설비에서 이런 설계변경이 가해진 바는 없는 것으로 보인다. 이보다 더욱 현실적인(하드웨어 변경 없는) 방안은 터빈입구온도를 낮추어서 원하는 서지마진을 얻는 방법이다. 식 (1)이 의미하는 바와 같이 터빈입구온도가 낮아지면 터빈입구 압력, 즉 압력비가 낮아지면서 압축기에서 서지마진 확보가 가능할 것이다. 그러나 이 경우에

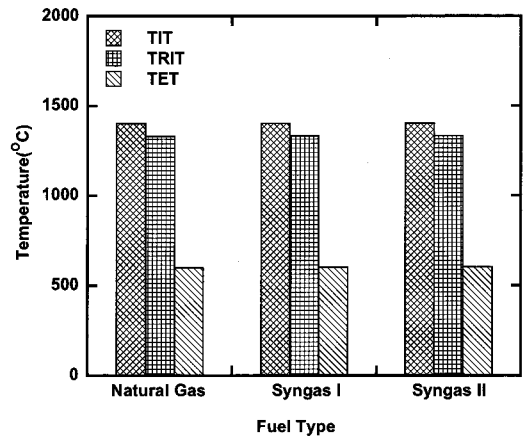


Fig. 3 Comparison of TIT, TRIT and TET for different fuel types

는 가스터빈의 효율이 다소 줄어드는 단점이 발생할 것이다. 기존의 플랜트들에 대한 분석을 담고 있는 문헌⁽⁴⁾을 참조해 볼 때 후자에 더욱 가까운 것으로 판단되었다. Syngas II의 경우에는 연료유량이 더 커지므로 터빈 입구온도를 유지하려면 압력비는 더욱 상승하는 것으로 예측되었다.

Fig. 3에는 터빈입구, 터빈로터입구, 터빈출구에서의 온도의 변화를 비교하여 나타내었다. 터빈입구온도(TIT)는 동일하게 유지한다고 가정하였으므로 세 경우에서 모두 같다. 로터입구온도(TRIT)도 거의 동일하게 유지된다. 한편 터빈 출구온도(TET)도 거의 일정하게 유지될 것으로 예측되었다. 이 부분은 특히 눈여겨 볼만한 부분인데, 연소가스의 물성치 변화의 영향을 볼 수 있는 인자이다. syngas 를 사용하게 되면 압력비가 증가한다. 일반적으로 압력비가 증가하면 동일한 터빈 입구온도에서는 터빈 출구 온도가 감소하는 것이 정상이다. 그러나 이러한 예상은 어디까지나 터빈을 흐르는 가스의 물성치, 특히 비열이 일정하다는 가정 하에 얻어지는 결론이다. 이번 예에서는 이러한 가정이 성립하지 않는다. 즉, syngas를 사용하면 연소가스, 즉 터빈으로 유입되는 가스의 비열이 증가한다. 이는 Table 3 과 5를 비교하면 알 수 있다(편의상 연소기 출구에서의 비열만 예시하였음). syngas 연소시에 비열이 증가하는 주 원인은 수소의 연소로 다른 가스 성분에 비하여 상대적으로 비열이 큰 수증기(H₂O)의 비율이 증가하기 때문이다. 비열이 증가하면 대체로 비열비가 감소하게 된다. 터빈 팽창을 다음

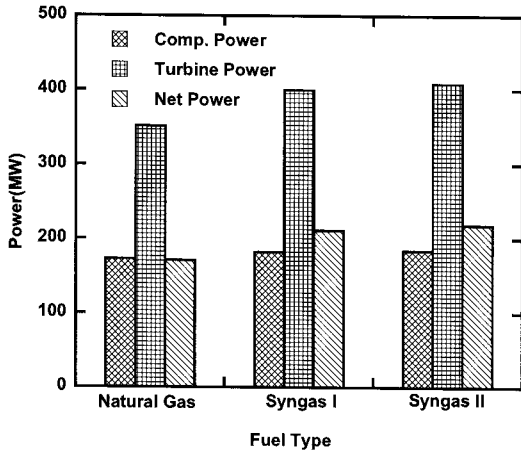


Fig. 4 Comparison of turbine and compressor powers for different fuel types

식과 같이 단순화하여 생각해 보면(실제로 냉각되는 다단 터빈의 경우에는 이러한 간단한 식으로 계산되지는 않지만 편의상 정성적으로 분석하기 위해서 단순화 하여 예시하였음), 비열이 커져서 비열비가 감소하면 터빈출구온도를 다소 상승시키는 방향으로 작용하게 된다.

$$T_{out} = T_{in} \cdot \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{(k-1)\eta_{pl}/k} \quad (2)$$

이와 같이 연료의 변경은 압력비의 변화뿐 아니라 가스 물성치의 변화도 가져오게 되어 터빈에서의 작동특성 및 성능에 많은 영향을 미치게 된다.

이제 위와 같은 여러 인자들의 영향에 의하여 결과로서 나타나는 터빈과 압축기의 출력을 비교하면 Fig. 4와 같다. syngas를 사용하면 터빈의 출력이 대폭 증가한다. 예를 들어 천연가스에서 syngas I로 전환하면 터빈출력은 약 15% 가까이 증가한다. 이러한 출력 증가에 가장 주 원인은 연료량 증가에 따른 터빈유량의 증가이다. 이에 더하여 비열이 다소 커지는 것도 출력 증가에 기여를 한다. syngas II에서는 터빈유량이 더 커지므로 터빈 출력 증가 폭이 더 크다. 반면 압력비의 상승은 압축기 소요 동력의 증가를 가져온다. 그러나, 터빈출력 증가가 압축기 소요 동력 증가보다는 훨씬 더 크기 때문에 결과적으로 가스터빈 순 출력이 대폭 상승하게 된다. syngas를 사용하면 연소기에 투입되는 연료에너지는 커진다

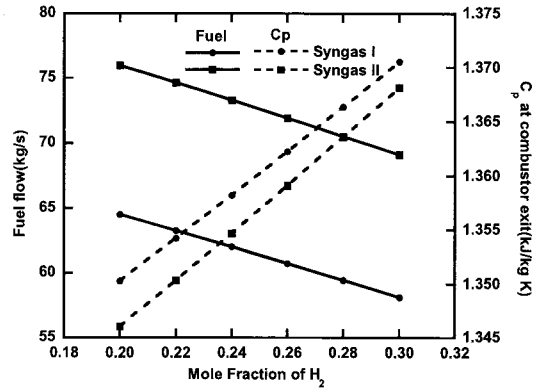


Fig. 5 Variations of fuel flow rate and specific heat at combustor exit with H₂ compositions

(Table 3과 5 비교). 그러나 연료에너지 투입량의 증가보다는 순출력 증가가 더 크므로 결과적으로 열효율은 증가할 것으로 예측되었다. 여기서 말하는 효율은 syngas가 생산된 뒤에 가스터빈만 보았을 때의 열효율을 의미하는 것으로서 원 연료인 석탄의 발열량을 기준으로 한 것은 아니다. 실제로는 가스화 공정에서의 에너지 소요 및 손실들을 감안하면 실제로 원 연료를 기준으로 한 열효율은 천연가스를 사용할 때보다 낮다. 즉, IGCC 전체의 효율은 일반 복합화력 발전의 효율에 비하여 낮게 된다.

3.3 syngas 성분변화의 영향

syngas의 구성 성분 중 수소와 일산화탄소를 합한 비중은 전체의 60%를 넘는다. 특히 수소(H₂)는 syngas를 구성하고 있는 물질 중 가장 큰 발열량을 가지는 물질로써, 이 성분비가 변화하면 다른 성분이 변화할 때 보다 엔진 성능에 상대적으로 큰 영향을 줄 것으로 판단된다. 따라서 본 절에서는 가상적으로 수소와 일산화탄소의 성분비를 고정한 상태에서 수소 성분비를 늘여가면서 성분비 변화의 효과를 예측한 결과를 예시하고자 한다. 이러한 시뮬레이션은 하나의 플랜트에서 연속적으로 가능한 성분비 변화라기 보다는 가스화 공정의 차이에 따른 다소간의 성분비 변화의 효과를 살피기 위함이다. 역시 터빈입구 온도(TIT)를 기준값을 유지하도록 한 상태에서 타설계 계산으로 얻은 결과이다.

먼저 Fig. 5는 수소 성분비 증가에 따라 변화하는 연소기 투입연료 유량 및 연소기 출구 가스 비

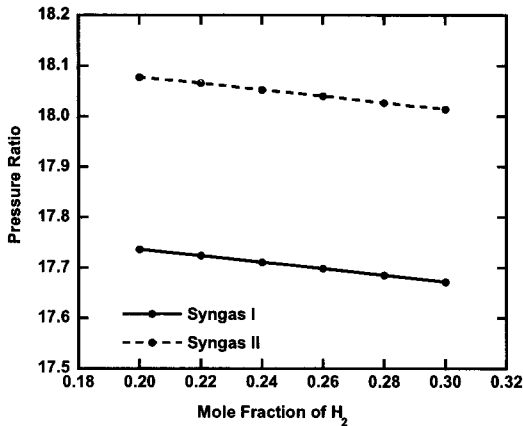


Fig. 6 Variation of the compressor pressure ratio with H₂ composition

열의 변화를 보여 준다. 연료 가스중 수소의 비율이 증가하면 연료의 발열량이 증가하므로 연소기에서 필요로 하는 연료의 유량은 감소한다. 반면에 연소가스 중의 수증기 비율 증가로 터빈으로 유입되는 가스의 비열은 커진다. Fig. 6에는 압축기 압력비 변화를 나타내었다. 연료 중 수소 비율이 증가하면 Fig. 5의 결과와 같이 연료 유량이 감소하므로 터빈의 유입 가스 유량이 감소한다. 따라서 압력비는 다소 감소할 것으로 예상된다. 현재 계산 범위내에서는 연료량 변화가 그리 크지 않고 특히, 연료량이 공기 유량에 비하여 상대적으로 작으므로 터빈입구 유량변화는 그리 크지 않다. 따라서 압력비의 변화도 작은 편이다. 물론 이 경우에도 압축기로 유입되는 공기 유량은 거의 일정하다.

Fig. 7에는 터빈과 압축기의 동력 변화를 나타내었다. 연료 중 수소 비율이 증가하면 터빈 출력은 연료유량이 감소하여 터빈의 가스 유량이 감소하는 부정적 효과와 가스의 비열이 증가하는 긍정적 효과 중 후자의 영향이 좀 더 커서 터빈의 출력은 다소 상승하지만 그 차이는 크지 않으며, 압축기 소요 동력은 압력비의 감소에 따라서 아주 작은 범위에서 감소한다.

Fig. 8는 결과적인 가스터빈 순출력과 열효율 변화를 나타내었다. Fig. 7의 터빈 출력 및 압축기 소요 동력 변화의 결과로서 가스터빈 순출력은 수소 성분 증가시 다소 증가할 것으로 예상된다. 그러나 거의 일정하다고 볼 수 있다. 열효율도 동일한 경향을 나타낸다.

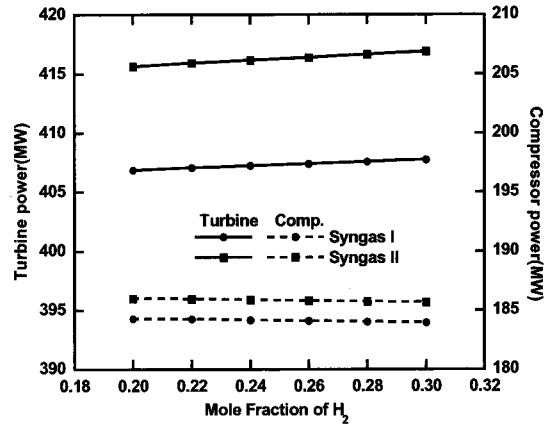


Fig. 7 Variation of turbine power and compressor power with H₂ composition

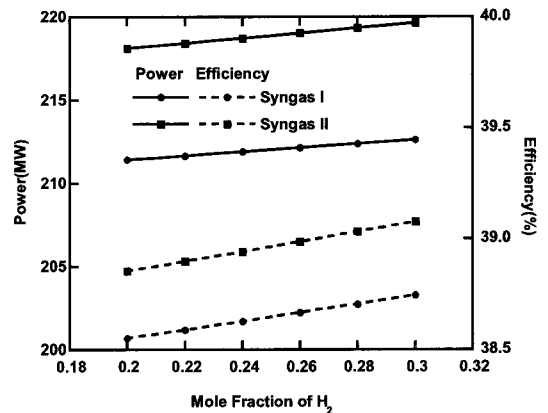


Fig. 8 Variation of gas turbine power and thermal efficiency with H₂ composition

4. 결론

본 연구에서는 천연가스를 사용하도록 설계된 발전용 가스터빈에 syngas를 사용하는 경우에 성능 특성 변화를 해석적으로 고찰하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 대표적인 석탄가스화 설비에서 생산되는 두 가지의 syngas 성분을 적용한 결과 천연가스에 비하여 연료량이 6~7배 정도 대폭 증가한다. 이로 인하여 터빈의 유량이 15% 이상 증가하고, 운전 압력비가 이에 상응하여 상승한다. 각 성분별로 약간의 차이(수 퍼센트)가 나는 서로 다른 합성연료를 사용하더라도 성능, 특히 출력은 제법 차이가 나게 된다. 특히, 발열량이 낮아질수록 연

료량의 증가로 인하여 압력비가 상승하게 되며, 서지 가능성이 대두될 수 있을 것으로 예상된다. 이로 인해 충분한 압축기 서지마진을 확보하지 못한 경우에는 터빈입구온도를 낮추어서 운전하거나, 터빈 인구조도를 유지하려면 터빈 개조설계 등이 필요할 것으로 보인다.

(2) 동일한 터빈입구온도를 유지하더라도 터빈 유량의 증가에 의하여 터빈출력이 증가한다. 연소 가스의 비열은 천연가스를 사용하는 경우에 비하여 커지는데, 이 또한 터빈출력 증가에 다소 기여한다. 압력비 상승 때문에 압축기 소요 동력도 다소 증가하지만, 터빈 출력 증가가 월등하기 때문에 결과적으로 가스터빈 순출력 증가는 천연가스 사용시에 비하여 20% 이상될 것으로 해석되었다. 또한 열효율도 5% 이상 상승하는 것으로 예상되었다.

(3) 연료 중에 수소 성분을 변화시키면서 계산한 결과(수소와 일산화탄소의 합은 유지), 수소 성분이 증가할수록 압력비는 다소 감소하고, 터빈유입 가스의 비열은 증가하였으며, 이러한 상쇄 효과에 의하여 출력과 효율은 크게 변하지는 않는 것으로 (다소 상승) 예상되었다.

후 기

본 논문은 산업자원부에서 시행한 신재생에너지 기술개발사업을 통한 연구결과임.

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," *Proc. of KSME Spring Annual Meeting* pp. 878-884.

- (2) Lee, C., Lee, S. J., Yun, Y. S. and Kim, H. T., 2005, "Performance and Emission Analysis of the Gas Turbine Cycle for Utilizing the Heavy Residue Oil from Refinery Process," *Proceedings of Asian Congress on Gas Turbines, Nov. 15-18, 2005, Seoul, Korea, 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) Dennis, R. A., Shelton, W. W. and Le, P., 2007, "Development of Baseline Performance Values for Turbines in Existing IGCC Applications," *ASME paper GT2007-28096*.
- (5) Eldrid, R., Kaufman, L. and Marks, P., 2001, "The 7FB: The Next Evolution of the F Gas Turbine," *GER-4194*, GE Power Systems.
- (6) GE Power-Enter Software, 2005, *GateCycle*, ver. 5.61.
- (7) Kim, T. S., 1995, *Design and Performance Analysis of Gas Turbine with Applications to Cogeneration Systems*, Ph.D dissertation, Seoul National University.
- (8) Gadde, S., Wu, J., Gulati, A. and McQuiggan, G., 2006, "Syngas Capable Combustion Systems Development For Advanced Gas Turbines," *ASME Turbo Expo paper*, GT2006-90970.
- (9) Brdar, R. D. and Jones, R. M., 2000, "GE IGCC Technology and Experience with Advanced Gas Turbines." *GER-4207*, GE Power Systems.