

탈설계점 효과를 고려한 석탄가스화 복합발전용 가스터빈의 성능평가

이 찬*, 김용철*, 이진욱**, 김형택***

Performance Evaluation of the Gas Turbine of Integrated Gasification Combined Cycle Considering Off-design Operation Effect

Chan Lee*, Yong Chul Kim*, Jin Wook Lee**, Hyung Taek Kim***

ABSTRACT

A thermodynamic simulation method is developed for the process design and the performance evaluation of the gas turbine in IGCC power plant. The present study adopts four clean coal gases derived from four different coal gasification and gas clean-up processes as IGCC gas turbine fuel, and considers the integration design condition of the gas turbine with ASU(Air Separation Unit). In addition, the present simulation method includes compressor performance map and expander choking models for considering the off-design effects due to coal gas firing and ASU integration. The present prediction results show that the efficiency and the net power of the IGCC gas turbines are superior to those of the natural gas fired one but they are decreased with the air extraction from gas turbine to ASU. The operation point of the IGCC gas turbine compressor is shifted to the higher pressure ratio condition far from the design point by reducing the air extraction ratio. The exhaust gas of the IGCC gas turbine has more abundant waste heat for the heat recovery steam generator than that of the natural gas fired gas turbine.

1. 서론

석탄을 이용하는 새로운 개념의 석탄가스화 복합발전(IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle)은 석탄의 가스화, 가스정제 공정을 가스터빈을 이용하는 복합발전 사이클과 연계하여 낮은

연료가격, 고효율의 성능 및 우수한 환경성을 구현할 수 있다는 특징을 가진다. 이러한 이유로, 2000년대초 부터는 IGCC 가 신규 석탄화력발전소의 주종을 이룰 전망이다. 기존의 노후 미분탄 발전소의 repowering 시에도 매우 유력한 대체수단으로 여겨지고 있다[1].

IGCC 가 기존의 천연가스를 연료로 사용하는 복합발전방식과 다른 점은 가스터빈의 연료를 세

* 수원대학교 기계공학과

** 고등기술연구원

*** 아주대학교 에너지학과

조하는 전공정으로 석탄을 산소, 증기와 반응시켜 CO, H₂ 가 주성분인 가연성 석탄가스를 만들어 내는 가스화공정, 생성된 석탄 가스 내 황산화물 및 입자성분 제거를 위한 가스정제공정이 존재하고, 이렇게 만들어진 저발열량의 석탄가스(천연가스 발열량의 약 1/4-1/5 수준)는 가스터빈 연소기에서 연소된후 팽창기에서 팽창된후 연소가스의 폐열은 증기사이클에서 다시 활용된다(Fig.1 참조). IGCC 용 석탄 가스화기에서 사용되는 산소는 가스터빈 압축기에서 압축된 공기의 일부를 추출한 후 공기분리장치(ASU: Air Separation Unit)에서 얻어내며, 이때 공기분리장치에서 발생하는 질소는 다시 가스터빈 연소기로 재유입된다. 이러한 가스터빈/ASU 간의 연계방식의 장점은 ASU 플랜트의 공기압축을 위한 보조부하량을 줄여, IGCC 출력을 증가시킬수 있다는 점과 ASU에서 가스터빈으로 재유입되는 차가운 질소를 이용하여, 연소기내 NO_x 발생을 제어하는데 사용할 수 있다는 점을 들 수 있다. 그러나 IGCC 시스템에 사용되는 가스터빈은 천연가스 연료를 기준으로 설계되어 있는 관계로, 앞서 언급한 저발열량 석탄가스의 연소 및 ASU와의 연계설계로 인해 가스터빈의 운전이 탈설계점에서 이루어지는 경향을 보이며, 이는 IGCC 발전소의 시스템 성능 및 안정성에 큰 영향을 미친다[2].

그러므로, 가스터빈을 IGCC 기타 시스템들과 연계설계 하는데 있어, 연계 공정과의 설계조건에 따른 가스터빈의 공정 분석 및 성능 평가가 필요하며, 이를 통해 IGCC 발전소 상용화를 위한 체계적 공정자료들의 수집이 가능하다. 이러한 맥락에서, 본 연구는 상용 IGCC 발전소의 개발단계에서 고려될 수 있는 10MW 규모의 PDU(Process Development Unit)급 가스터빈의 성능평가를 수행하였다. 본 연구에서는 가스터빈의 연료로 다양한 석탄 가스화 공정으로부터 생산되는 서로 다른 석탄가스를 사용하였고, 가스터빈과 ASU 간의 연계조건도 nitrogen integration 에서 full integration 에 이르기까지 다양하게 변화시키며 가스터빈성능 해석을 수행하였다. 더 나아가, 가스터빈의 탈설계점 효과를 고려하기 위하여 팽창기의 질식조건(choking condition)과 압축기의 성능곡선 모델을 본 해석방법상에 포함하였다. 본 예측결과를 통하여, 석탄가스 공정 및 ASU 연계에 따른 가스터빈

의 출력, 효율 및 압축비, 연료소모량, 공기유입량 등의 성능변화를 규명하였고, 압축기의 탈설계점 작동에 따른 가스터빈의 안정성 여부도 평가하였다.

2. 가스터빈 모델링 방법

본 연구에서는 IGCC 가스터빈 성능분석을 위해 발전소 전용 해석코드인 GateCycle 코드[3]를 사용하였으며, GateCycle로 모델링한 IGCC가스터빈의 구성도가 Fig.1 에 나타나 있다. 가스터빈은 대기중의 공기를 유입하여 압축기에서 가압한 후, 가스터빈 압축기 출구에서 일부의 공기가 추출되어 대기중에서 별도의 압축기를 통해 유입되는 공기와 합쳐져 공기분리장치(ASU: Air Separation Unit)로 보내져 산소와 질소로 분리된다. 산소는 석탄가스화기의 산화제로 사용되고, 질소는 가스터빈 연소기에 재유입된다. 연소기에서는 가스터빈 압축기에서 보내지는 공기와 석탄가스 연료, 재유입 질소가 혼합, 반응하여 고온, 고압의 연소공기를 생성한다. 최종적으로 연소가스는 팽창기를 통해 압력, 온도가 떨어지고 체적이 늘어나는 팽창과정을 거치며 동력을 발생한다. 본 연구에서 앞서의 IGCC 가스터빈 시스템의 열역학적 해석을 위해 이루어진 각 요소별 모델링 기법은 다음과 같다.

2.1. 가스터빈 압축기

설계점에서의 가스터빈 압축기 모델링은 압축기 설계제원들을 이용하여 열역학적 해석을 수행하였으며, 탈설계점에서는 설계점에서 구한 값들을 근거로 작성되는 압축기 성능곡선으로부터 구해지는 성능변수들을 이용하여 열역학적 해석을 수행하였다. 압축기의 성능곡선은 대부분의 가스터빈 제작자들이 대외비로 분류하여 공개하지 않고 있으므로, 본 연구에서는 기존의 공개된 압축기 성능곡선들로부터 유추한 Saravanamuttoo 의 일반화된 성능곡선[4]을 사용하였다.

또한 대부분의 발전용 가스터빈들은 팽창기 블레이드 냉각을 위해 공기가 중간단에서 추출되므로, 압축기 전체를 하나의 열역학적 과정으로 볼 수 없고, 이로 인해 열역학적 해석을 공기추출점을 기준으로 하여 압축기 부위(section)별로 적용하였

다.

2.2. 가스터빈 연소기

연소기의 모델링은 압축기로부터 들어오는 공기, 석탄가스화/가스정제장치를 거친 석탄가스 및 ASU에서 재순환되는 질소에 대한 에너지 방정식으로부터 연소기 출구조건을 구하였으며, 이때 연소기 출구온도(터빈입구온도)가 설계요구조건에 부합되도록 연료량을 조절하였다.

본 연구에서는 IGCC 용 가스터빈 연소기의 연료로 Destec, Prenflo, Shell, Texaco 의 석탄가스화 공정에서 생산되어 저온 가스정제공정을 거친 5가지의 석탄가스를 고려하였고, 각 석탄가스 연료의 연소기 유입조건은 참고문헌[5]를 참조하였다.

2.3. 가스터빈 팽창기

연소가스의 팽창과정은 단별(stage-by-stage)분석을 통해 모델링 하였으며, 이를 통해 팽창기 냉각공기의 효과를 좀더 상세하게 고려할 수 있다. 설계점의 팽창기 모델링을 위해 팽창비, 효율, 터빈 입구유량 및 팽창기 목면적을 설정하며, 설계점에서 결정된 효율은 팽창기 효율의 변화에 대한 제작자의 데이터가 없는 경우에는 탈설계점 조건에서도 일정하게 유지된다고 가정하였다. 탈설계점 조건에서의 팽창기의 냉각유량은 압력과 온도에 대해 설계점 냉각유량으로부터 계산된 기준값으로부터 아래의 식을 이용하여 계산하였다[6].

$$m = m_{des} \frac{P_{cool}}{P_{des}} \sqrt{\left(\frac{T_{des}}{T_{cool}}\right)} \quad \text{Cooling flow} \quad (1)$$

대부분의 발전용 가스터빈 팽창기는 질식조건에서 작동하므로, 본 연구에서는 팽창기가 질식조건에서 작동한다고 가정하였고, 천연가스 가스터빈을 IGCC 용으로 사용할 경우 가스터빈 팽창기에 대한 다음과 같은 질식조건이 성립되며,

$$\frac{(m_{air} + m_{CG} + m_{N_2})\sqrt{TIT}}{PA_t} = \frac{(m_{air} + m_{NG})\sqrt{TIT}}{PA_t} = const. \quad (2)$$

이때 P 는 팽창기 입구압력, TIT 는 팽창기 입구온

도, A_t 는 터빈의 목면적이며, m_{air} 는 압축기에서 연소기로 유입되는 공기량, m_{N_2} 는 ASU에서 유입되는 질소량을 의미하며, 그리고 m_{NG} 와 m_{CG} 는 연소기로 유입되는 천연가스와 석탄가스의 연료소모량을 나타내 준다. 동일한 TIT 를 유지하며 가스터빈을 IGCC용으로 사용하기 위해서는, 석탄가스의 유량이 천연가스에 비해 약 4-5 배 가량 더 많이 소모된다. 또한, ASU 로부터 재유입되는 질소로 인해 가스터빈 연소기의 물질흐름이 더욱 증가 된다. 그러므로, 식(2)에서 보여지듯이, 석탄가스 연소의 경우 팽창기 질식조건을 만족시키기 위해서는 공기유량의 감소와 압력의 증가를 수반하게 된다. 그리고, 이러한 압력과 유량의 변화는 압축기의 탈설계점성능곡선 특성에 따라 결정된다.

2.4. ASU 와 가스터빈의 연계조건

IGCC용 ASU로는 복수중류탑 공정을 사용하였으며, ASU 작동압력은 가스터빈 압축기의 압력에 상응하게 설정하였다. 이때 ASU 의 공정 및 운전조건 해석은 화학공정 전문 해석 코드인 ASPEN Plus를 사용하였다. ASU 로 유입되는 공기량은 전적으로 가스화기의 조업조건인 석탄/산소 비율에 따라 결정되며, 그 중의 일부는 가스터빈 압축기로부터 추출하고 나머지는 대기 중에 있는 공기를 별도의 압축기로 가압하여 ASU 에 공급하게 된다(Fig.2 참조). 이때 전체 ASU 소요 공기량 중에서 가스터빈 압축기의 공기 추출량이 차지하는 비율을 공기추출비(air extraction ratio)라 하며, ASU 에서 분리된 질소는 모두 가스터빈 압축기로 재 유입된다. 그러므로, 본 연구에서는 5가지 석탄가스화 공정에 대한 공정분석결과[5]로 부터, 가스터빈으로부터 ASU 로 추출되는 공기량을 연소기로 유입되는 석탄가스 연료량 과 공기추출비로 표현하는 상관관계식을 구하였고, 또한 가스터빈으로 재 유입되는 질소의 유량도 석탄가스 연료량의 함수로 표현할 수 있었다.

3. 해석결과 및 검토

본 연구에서 고려한 PDU급 가스터빈으로는 Solar Mars T12000 model 이며, 천연가스 연료를 기준으로 설계된 가스터빈이다[7]. 앞서 2장에서 언급한 가스터빈 모델링 기법을 이용하여, 5가지 석탄가스화 공정으로부터 나오는 석탄가스 연료를 태우는 경우의 가스터빈의 성능특성과 이에 따른 탈설계점 효과를 검토하였다. 이

때 가스터빈의 TIT가 일정하게 유지되도록 연료가스량을 조절하였고, 더 나아가 공기추출비도 0%(nitrogen integration)에서 100%(full integration)까지 변화시켜 가며 ASU 연계설계 조건이 가스터빈 성능에 미치는 영향을 고려하였다.

Fig.3 과 Fig.4 는 공기추출비에 따른 가스터빈 출력과 효율의 변화를 보여주고 있다. 4가지 석탄가스 모두 공기추출비 증가에 따라 출력과 효율이 저하됨을 알 수 있었다. 이러한 결과는 공기추출비의 증가는 상대적으로 가스터빈 내 공기유량의 감소를 가져오기 때문이며, SHELL 석탄가스의 경우는 공기추출비 80% 이상에서는 오히려 천연가스의 경우 보다 낮은 출력 특성을 보여주고 있다. 그리고 공기추출비가 0-30% 사이에서는 TEXACO 의 경우가, 그 이상인 경우에는 DESTEC 의 경우가 우수한 성능특성을 보여주고 있다. Fig.5 는 각 경우의 연료소모량의 변화를 보여주고 있다. 모든 경우에 대해 공기추출량의 증가에 따라 연료소모량이 점차 감소되고 있으며, DESTEC 과 TEXACO 의 경우가 다른 경우들에 비해 20-30% 정도 더 많이 연료를 소모함을 볼 수 있다.

Fig.6 과 Fig.7 은 가스터빈의 공기 추출에 따른 가스터빈 압축기의 탈설계점 성능특성을 보여주고 있다. Fig.6에서 보여지듯이, DESTEC, PRENFLO, TEXACO 의 경우는 공기추출비가 30% 근처에서 최고의 효율을 가지고 압축기가 운전되며, 반면에 SHELL 은 공기추출이 거의 없는 경우에 가장 좋은 효율을 보이고 추출량의 증가에 따라 효율이 저하되는 경향을 보인다. Fig.7 은 공기추출비와 가스터빈의 압축비 간의 관계를 보여주고 있으며, 공기추출비의 증가에 따라 압축비가 감소하는 경향을 알 수 있다. 압축기의 공기추출량이 적은 경우는 대기중에서 유입되어 ASU를 거치고 가스터빈 연소기로 유입되는 질소의 양이 증가되는 것을 의미하므로, 이로 인해 팽창기의 질식조건을 유지하기 위해서는 압축기 유입 공기량이 줄어들게 되고, 더 나아가 압축기는 성능곡선을 따라 압축비도 증가하는 양상을 보인다. 공기추출량의 변화에 따라 압축비가 15-18 의 범위에서 변화하고 있으며, 모든 경우에 있어서 압축기가 surge 한계 이하에서 안정된 작동조건을 보여주고 있다. 그러나, 이러한 결과는 본 연구에서 가정한 성능곡선 모델이 탈설계점 조건에 대해 비교적 완만한 변화 양상을 가지고 있기 때문이며, 만약 IGCC용 가스터빈의 성능곡선이 급격한 변화양상을 가지는 경우에는 공기추출량에 따라 가스터빈 압축

기가 불안정한 작동을 보일수 도 있음을 주의해야 한다.

Fig.8 은 가스터빈 출구의 총 엔탈피 흐름을 보여주고 있으며, IGCC 발전소의 경우 가스터빈 출구의 폐열은 가스터빈 후방의 폐열회수증기발생장치(HRSG: Heat Recovery Steam Generator)의 설계를 위해 매우 중요한 변수이다. Fig.8 에서 보여지듯이, 거의 모든 공기추출비에 대해 DESTEC 의 경우가 가장 많은 폐열을 보여주고 있으며, 그 다음으로 TEXACO, PRENFLO, SHELL 의 순서로 폐열이 많이 발생함을 알 수 있다.

4. 결 론

IGCC용 공정 특성평가를 위한 PDU급 가스터빈의 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시뮬레이션 방법에서는 석탄가스 연료조건에 따른 ASU 연계조건을 정의하였고, ASU 연계로 인해 유발되는 가스터빈 탈설계점 영향을 고려하기 위한 성능곡선 모델을 추가하였다. 본 시뮬레이션 결과들로 부터, DESTEC, PRENFLO, SHELL, TEXACO 석탄가스화 공정을 거친 석탄가스를 IGCC에 적용하는 경우, 공기추출비의 증가에 따라 출력과 효율은 저하되는 경향을 보이며 거의 모든 공기추출비 범위에서 DESTEC 과 TEXACO 석탄가스가 PRENFLO, SHELL 의 경우에 비해 월등히 우수한 출력 과 효율 특성을 보여주었다. 또한, 그에 따라 DESTEC 과 TEXACO 의 경우가 PRENFLO, SHELL 에 비해 연료 소모량도 20-30% 가량 증가하는 경향을 보여준다.

석탄가스 연소시 가스터빈 압축기는 DESTEC, TEXACO, PRENFLO 의 경우 공기추출비 30% 근처에서 그리고 SHELL 의 경우는 0% 추출조건에서 가장 높은 효율을 보여주고 있으며, 가스터빈의 압축비는 공기추출량의 증가에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 보인다. 가스터빈 출구에서 발생하는 폐열은 공기추출비에 따라 감소하는 경향을 보이며, 거의 모든 공기추출비 범위에서 DESTEC, TEXACO, PRENFLO, SHELL 순으로 폐열의 양이 많음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 고등기술연구원이 지원하는 “PDU급 IGCC 발전계통 공정모사기술 개발 및 BSU 급 가스화기 슬래그의 거동에 관한 연구” 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. D.M.Todd, "Clean Coal Technologies for Gas Turbines," GER-3650C, General Electric, 1993
2. 김종영 외, "석탄가스화 복합발전 기술개발(I)," TR. 92GJ11. 97. 26-1. 전력연구원
3. GateCycle User's Guide, EPRI & Enter Software Inc., 1996
4. P.Zhu and H.I.H.Saravanamuttoo, "Simulation of an Advanced Twin-Spool Industrial gas Turbine," ASME J. of Eng. for Gas Turbines and Power, vol.114, pp.180-186, 1992
5. Phase I Study: IGCC Process Evaluation , Bechtel Corp., 1995
6. Consonni, Lozza and Macchi, "Turbomachinery and Off-Design ASpects in Steam Injected Gas Cycles," 23rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, vol.4, p.103
7. Gas Turbine World, 1993

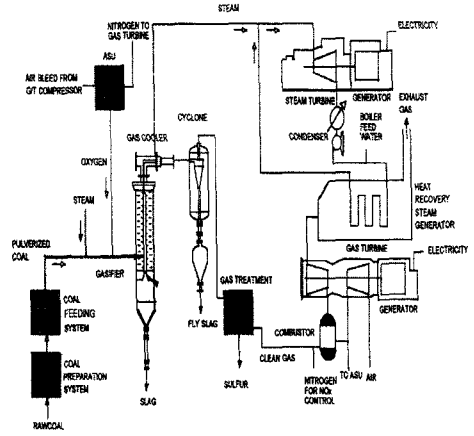


Fig.1 Schematic Diagram of IGCC

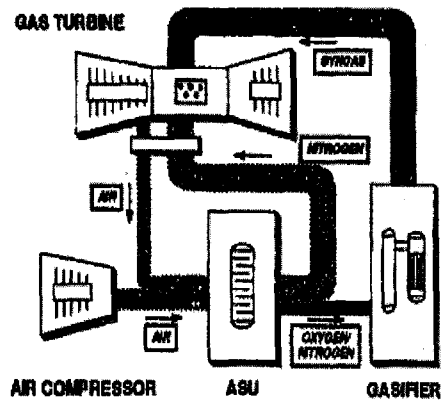


Fig.2 ASU Integration of IGCC

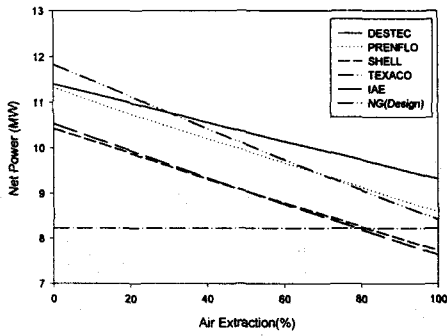


Fig.3 Net Power Output of IGCC Gas Turbine

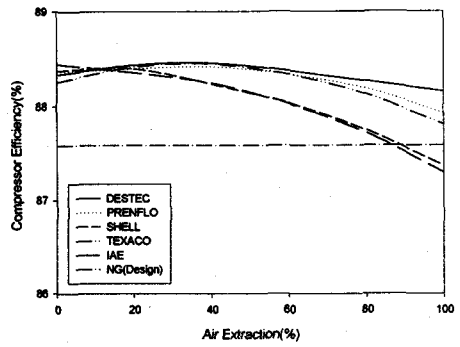


Fig.6 Compressor Efficiency of IGCC Gas Turbine

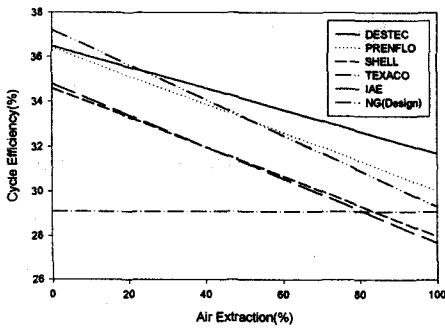


Fig.4 Cycle Efficiency of IGCC Gas Turbine

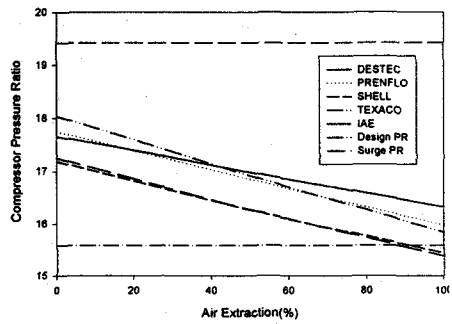


Fig.7 Compressor Pressure Ratio of IGCC Gas Turbine

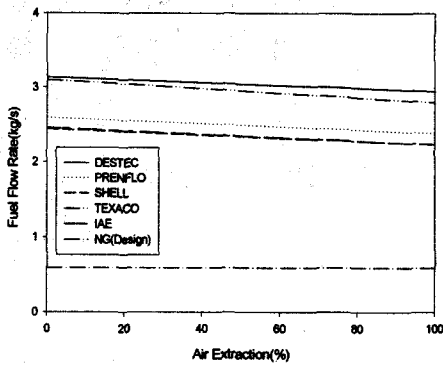


Fig.5 Fuel Flow of IGCC Gas Turbine

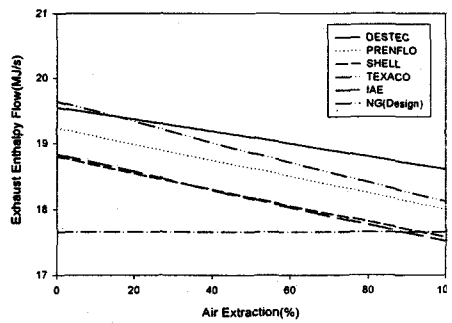


Fig.8 Exhaust Enthalpy Flow Rate of IGCC Gas Turbine