

ASU 연계 및 연료/질소 포화 조건이 석탄가스화 복합발전사이클의 성능 및 NO_x 배출특성에 미치는 영향에 관한 연구

이찬*, 서제영*, 윤용승**

* 수원대학교 기계공학과, ** 고등기술연구원 플랜트 엔지니어링 센터

Study on the Effects of ASU Integration and Fuel/Nitrogen Saturation Conditions on the Performance and the NO_x Emission Characteristics of Integrated Gasification Combined Cycle

Chan Lee*, Je-Young Seo*, Yongseung Yun**

* Department of Mechanical Engineering, Suwon University

** Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering

1. 서론

상용화 단계의 IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle)발전계통을 설계하기 위해서는 IGCC 하부 시스템들 간의 연계방식에 대한 최적화가 필수적이며, 특히 IGCC용 가스 터빈과 공기분리장치(ASU: Air Separation Unit)간의 연계문제가 매우 중요함이 알려져 있다. 가스터빈/ASU 의 연계란 가스터빈 압축기에서 추출된 일부의 공기를 ASU에서 산소와 질소로 분리하여, 산소는 석탄 가스화기의 산화제로 질소는 다시 가스터빈 연소기로 재유입되는 공정 설계 방식을 의미한다. 그러나 가스터빈/ASU 연계조건에 의해 IGCC 플랜트의 출력, 효율 뿐 만이 아니라 NO_x 배출량, 운전 안정성 등도 큰 영향을 받을 수 있으며[1], 이러한 이유로 IGCC 기술이 앞서 있는 선진국에서는 ASU/가스터빈 연계조건 최적화를 위한 많은 연구들이 이루어지고 있으며, 이렇게 최적화된 ASU/가스터빈 연계공정의 설계 개념은 향후 이루어질 상용화급 IGCC 공정 설계 및 개발에 적용될 것으로 전망된다.

그러므로 본 연구에서는 어떠한 IGCC 플랜트에도 공통적으로 적용 가능한 가스터빈/ASU 연계문제 해석을 위한 공정 모사기술을 개발하였고, 이를 이용하여 상용화급 IGCC 발전소의 개발 전 단계로 고려될 수 있는 10MW 규모의 PDU급(Process Development Unit Cladd)IGCC 플랜트의 성능, 안정성 및 NO_x 배출 특성 평가를 수행하였다. 본 연구는 가스 터빈과 ASU 간의 연계조건을 nitrogen integration 에서 full integration 에 이르기까지 다양하게 변화시키며 IGCC 성능해석을 수행하였으며, 이와 더불어 가스터빈 연료 및 재 유입되는 질소를 포화시키는 경우들도 고려하였다. 또한 본 연구는 서로 다른 연계조건을 가지는 다양한 IGCC 공정들을 비교, 분석함으로써, 성능, 환경 및 안정성 측면이 고려된 최적의 IGCC 발전계통 공정 선정을 위한 설계 기준을 제시하였다.

2. PDU급 IGCC 발전계통 공정 설계

PDU 급 IGCC 용 가스터빈은 실험실 규모 또는 bench급 시험설비에서 초기 상용화급 설비로의 scale-up을 위한 연구/개발 규모이어야 하므로, 본 연구에서는 석탄의 일일 소모량 100 ton 에 상응할 수 있는 약 10MW 급의 IGCC용 가스터빈 모델을 고려하였다. 또한 IGCC 상용화급 대형 가스터빈의 설계 사양과 비교적 잘 일치하는 설계 사양을 가지는 가스터빈을 Gas Turbine World 자료와 가스터빈 제작사별 기술 자료들을 참조하여 검토한 결과 최종적으로 Solar Turbine 사의 Taurus 70 모델을 선정하였다[2]. 이 모델은 압축비가 16 이고 높은 터빈입구온도(1097.8 °C) 를 가지므로, PDU급 가스터빈으로 상용화급 가스터빈의 특성을 예측하기에는 매우 적합한 모델로 판단된다.

PDU급 IGCC용 가스터빈의 해석을 위해서는 GateCycle 코드의 기본 요소들을 사용하였으나[3], 본 연구에서는 압축기, 터빈의 탈설계점 효과를 고려할 수 있는 압축기 성능 곡선 및 터빈 질식 조건에 대한 모델들을 추가하였고, 더 나아가 연소기 모델링 시에는 NOx 예측을 위한 semianalytical 모델[4]도 첨가하였다. 또한 가스터빈으로부터 ASU 로 추출되는 공기 및 ASU에서 가스터빈 으로 재유입되는 질소를 고려할 수 있도록 가스터빈 해석 모델을 구성하였다[5].

그 다음으로 Solar Taurus 70 가스터빈을 기준으로 10MW 용량의 PDU급 IGCC 복합 사이클을 설계하였고, 본 연구에서는 가스터빈 배기가스 폐열을 이용하는 증기 사이클로는 7기압의 증기를 생산하는 단일 압력(single pressure) 사이클을 고려하였고, 그 배열은 펌프-절탄기(economizer)-증발기(evaporator)-과열기(superheater)-증기터빈-복수기 의 순 으로 Fig.1과 같이 GateCycle 코드를 이용하여 구성하였다[5].

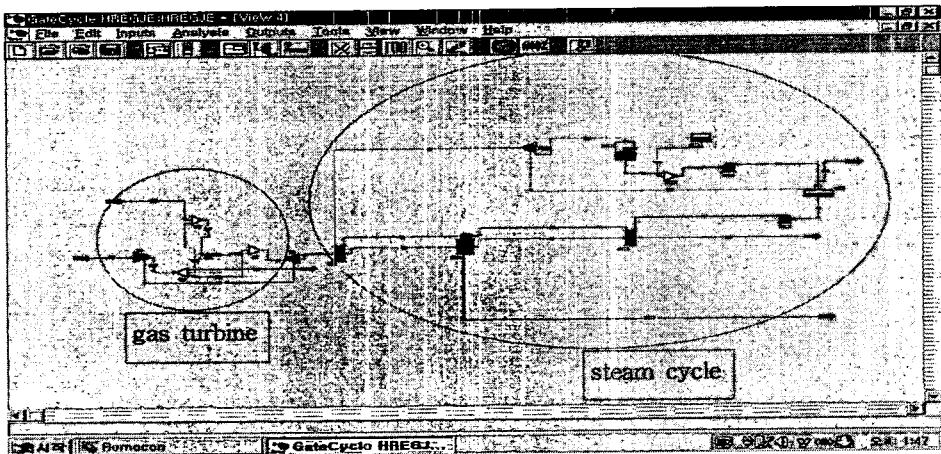


Fig.1 Schematic Diagram of PDU-Class IGCC with Single Steam Pressure

본 연구에서 사용한 석탄 가스연료는 석탄가스화 및 석탄가스정제공정으로 Shell 및 MDEA/Claus/SCOT 공정을 거친 것으로 가정하였고, 이러한 가스연료에 대한 조성, 온도, 압력 등은 ASPEN Plus code를 이용한 모사결과를 이용하였다. 본 연구에서 사용한 가스연료를 포화시킨 경우와 그렇지 않은 경우의 가스터빈 연소기 유입조건이 Table 1 에 나타나 있다.

Table 1 Gas Turbine Inlet Condition of Coal Gas Fuel

Composition	Unsaturated fuel gas	Saturated fuel gas
CO	64.53	58.95
H ₂	30.23	27.62
CO ₂	0.19	0.17
H ₂ O	0.42	9.03
CH ₄	0.23	0.21
N ₂	3.77	3.44
Ar	0.63	0.58
Flow rate (kg/s)	1.985	2.153
Pressure (bar)	22.3	20.7
Temp. (°C)	372.7	372.7
LHV (kJ/kg)	13264.0	12697.0
H ₂ /CO	0.468	0.468

Table 2 IGCC PDU Design Cases with Different ASU Integrations

Case	Fuel type (Sat./Unsat.)	Air integ. (extraction%)	Nitrogen integration
Base case	NG	N	N
PDU#1	CG (Unsat.)	N	N
PDU#2	CG (Unsat.)	Y	N
PDU#3	CG (Unsat.)	N	Y
PDU#4	CG (Unsat.)	Y (20%)	Y
PDU#5	CG (Unsat.)	Y (40%)	Y
PDU#6	CG (Unsat.)	Y (60%)	Y
PDU#7	CG (Unsat.)	Y (80%)	Y
PDU#8	CG (Unsat.)	Y (100%)	Y
PDU#9	CG (Sat.)	Y (100%)	Y
PDU#10	CG (sat.)	Y (100%)	Y (saturated)

Table 2 는 본 연구에서 고려한 다양한 PDU급 IGCC 복합발전 계통의 구성을 보여주고 있다. 석탄가스 연료는 포화/불포화 상태를 고려하였고, air integration 설계조건은 ASU의 필요 공기량 중의 가스터빈으로 부터의 추출량을 의미하는 공기 추출비를 0 에서 100% 까지 변화시켜 보았다. 또한 nitrogen integration 은 ASU 에서 버려지는 질소를 이용하여

가스터빈 연소기로 유입되는 연료를 희석해 주는 것으로 생각하였다. Table 2 에서 볼 수 있듯이, 본 연구는 연료/질소의 포화, air integration 및 nitrogen integration 방식의 조합에 따라 총 10개의 PDU IGCC 경우들을 고려하였고, 이에 대한 공정 모사를 수행하였다.

3. 성능해석 결과 및 검토

Fig.2 는 각 경우들에 대한 가스터빈, 증기터빈 출력, ASU 소요 동력 및 전체 복합사이클 출력을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, IGCC용 가스터빈 출력은 천연가스의 경우(base case)에 비해 증가됨을 볼 수 있고, 공기 추출비의 감소와 질소 희석 및 연료 포화로 인해 출력이 더욱 증가됨을 볼 수 있다. 또한 IGCC 증기터빈 출력은 가스터빈 출력의 약 1/3 수준으로 유지되고 있으며, ASU 소요동력은 공기 추출비의 증가에 따라 감소됨을 알 수 있다. 그리고, 전체 사이클 출력은 air integration 또는 nitrogen integration 적용된 경우에는 거의 대부분 10MW 정도를 유지하며, 연료포화가 출력에 미치는 영향도 약 1 MW 정도인 것으로 판단된다.

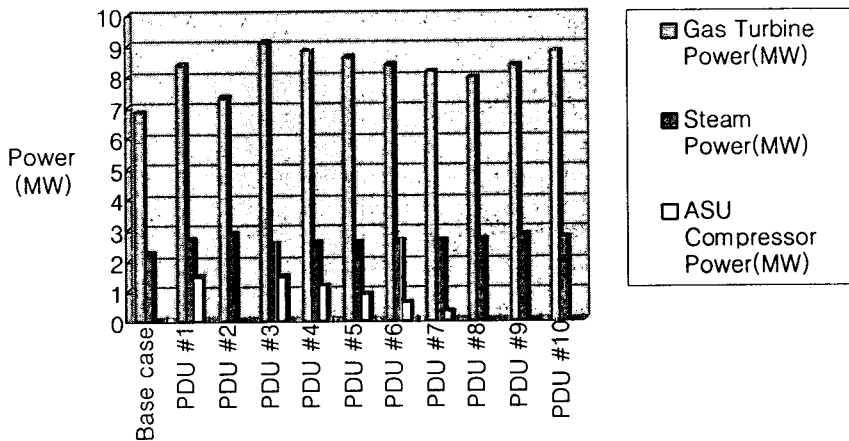


Fig.2 Comparisons of Gas Turbine, Steam Turbine and ASU Powers

또한 Fig.3 은 각 경우들에 대한 가스터빈 및 IGCC 전체 사이클 효율을 보여주고 있다. 가스터빈 효율은 공기 추출비의 증가에 따라 저하되는 경향을 보이며, 이러한 현상은 가스터빈 내부를 통과하는 공기유량의 감소에 기인한다. 그러나 IGCC 전체 사이클 효율은 ASU동력 소모로 인해 일반적으로 천연가스의 경우에 비해 비슷하거나 오히려 낮은 경향을 보여주고 있다. 질소 및 연료의 포화도 IGCC 사이클 효율을 향상시키는 데 기여함을 알 수 있다.

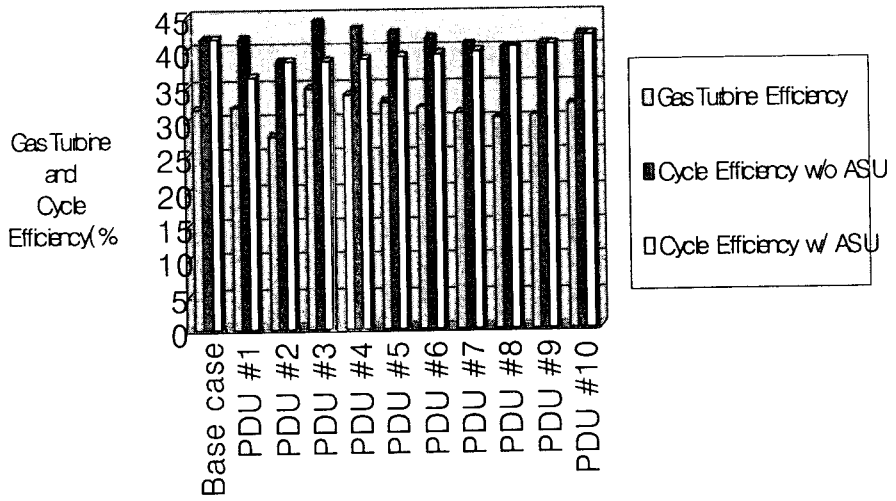


Fig.3 Comparisons of Combined Cycle and Gas Turbine Efficiencies

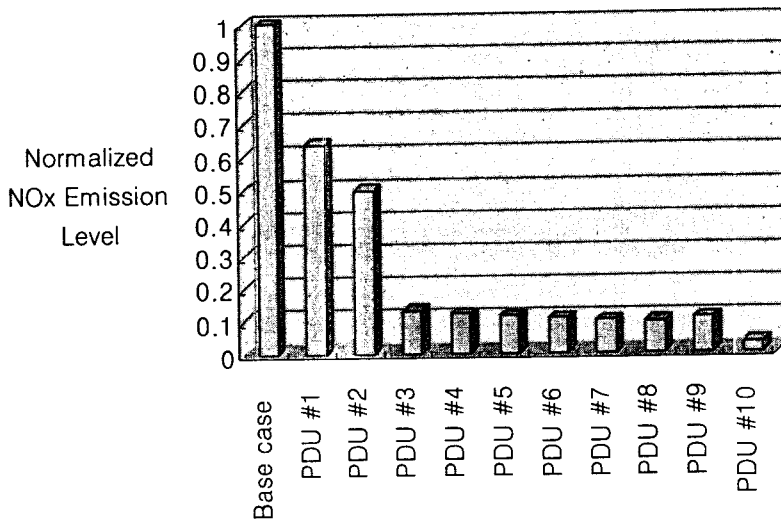


Fig.4 Normalized NOx Emission Level Comparisons

PDU급 IGCC 복합사이클의 NOx 발생량 변화가 Fig.4에 나타나 있다. 이때 천연가스 연소시 NOx 발생량은 본 연구에서 임의로 설정한 값(180 ppm)이며, 이를 기준으로 석탄가스 연소시의 다른 PDU 경우들을 비교, 분석하였다. 그림의 base case 와 PDU#1 에서 보여 지듯이, 석탄가스 연료는 천연가스에 비해 발열량이 낮은 관계로 동일한 연료 입력량 (thermal input)조건에 대해 상대적으로 낮은 화염온도를 수반하게 되며, 이로 인해 NOx 발생량도 천연가스에 비해 약 60% 가량의 수치를 보여준다. 또한 Fig.4 는 nitrogen integration 으로부터 얻어지는 질소의 회석으로 인해 NOx 발생량이 천연가스 경우에 비해 약 1/10 수준으로 저감되었음을 보여준다. 공기 추출비의 증가도 NOx 저감효과를 보여주고 있으나, 질소 재유입에 비해서는 상대적으로 NOx 저감효과가 그리 큰 편이 아니다. 더 나아가 연료 포화 보다는 질소의 포화가 추가적인 NOx 저감에 더욱 효과적임을 알 수 있다.

4. 결론

PDU급 IGCC 복합발전 계통의 성능 및 NOx 평가를 위한 해석방법을 제안하였다. 다양한 ASU 연계 및 연료/질소 포화조건을 가지는 10 가지 PDU 경우들에 대한 해석결과로부터, 가스터빈으로 재유입되는 질소는 가스터빈의 출력 향상에 크게 기여하나 공기 추출비의 증가는 가스터빈의 출력 감소를 수반한다. 또한 증기사이클의 출력은 가스터빈 출력의 약 1/3 정도의 출력을 유지하였으며, 질소연계로 인한 증기사이클 출력의 저감효과를 관찰할 수 있었다. 더 나아가 연료 및 질소 포화는 약 10% 가량의 사이클 출력 및 효율의 향상을 보여주었다.

천연가스에 비해 석탄가스는 상대적으로 낮은 NOx 발생량을 보여주었고, 질소 재유입에 의한 가스터빈 연소기 내 회석 현상으로 인해 NOx 발생량의 대폭적인 저감이 가능하였다. 공기 추출비의 변화는 NOx 저감에 그리 큰 영향을 미치지 못하고 있으며, 질소의 포화를 통한 NOx 저감이 연료를 포화시키는 방식보다 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 고등기술연구원에서 지원하는 “PDU급 IGCC 발전계통 공정 모사 기술 개발 및 BSU급 가스화기 슬래그의 거동에 관한 연구” 의 일환으로 수행되었으며, 이에 고등기술연구원 플랜트 엔지니어링 센터 관계자 여러분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. A.R.Smith et al., J. of Gas Turbine & Power, Vol.119, pp.298-304, 1997
2. Taurus 70 Catalogue, Solar Turbines, 1999
3. GateCycle User's Manual, ENTER Software Inc., 1995
4. Rizk,N.K. and Mongia,H.C., J. of Gas Turbine & Power, Vol.115, pp.612-619, 1993
5. 윤용승 외, 석탄가스화 복합발전 기반기술 개발(II), 산업자원부, 2000