

공기분리장치 연계 설계에 따른 석탄가스화 복합발전 사이클의 플랜트 성능 및 환경배출 특성 분석

이찬*, 윤용승**

* 수원대학교 기계공학과/환경청정기술연구센터

** 고등기술연구원 플랜트 엔지니어링 센터

Analysis on the Plant Performance and the Emission Characteristics of the Integrated Gasification Combined Cycle due to Air Separation Unit Integration Design

Chan Lee* and Yongseung Yun**

* Department of Mechanical Engineering/

Center for Environmental and Clean Technology, Suwon University

** Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering

1. 서론

최근 들어 다시 관심이 집중되고 있는 대체 에너지의 활용은 차세대 석탄 화력 발전소인 IGCC의 실용화 개발에 매우 큰 기대를 걸고 있으며, 이를 위하여 세계 각국의 연구진들은 고효율의 환경친화적인 IGCC 개발에 박차를 가하고 있다. IGCC의 효율 개선은 고온 가스 터빈, 고온 정제공정 및 세부 공정간의 연계 최적화를 통해 상당 부분 이루어 졌으며, 앞으로 각 분야의 기술적 진보에 힘입어 더욱 뚜렷한 효율 및 성능 향상이 이루어질 것으로 기대된다. 그러나, IGCC 플랜트의 환경성능은 SO_x, NO_x, CO₂ 및 분진과 같은 환경배출물질의 측면에서 아직은 만족할 만한 수준이 아닌 것으로 판단된다⁽¹⁾. 그 중에서도, SO_x 및 분진은 고온 정제 및 집진 기술의 지속적인 개발과 향상을 통해 어느 정도 해결이 가능한 것으로 판단되나, NO_x 및 CO₂는 이에 대한 저감방안들이 IGCC 플랜트에 개념적으로 적용되는 초기 개발단계에 그치고 있다^(2,3).

이러한 이유로, NO_x 및 CO₂를 저감하는 환경친화적 차세대 IGCC 플랜트의 공정 설계를 위해서는, IGCC 플랜트의 성능(효율, 출력 및 안전성) 뿐만이 아니라 NO_x, CO₂ 배출특성 까지도 예측이 가능한 공정 모사기법의 개발이 필수적이다. 그리고 이러한 모사 기법이 설계 실제에 응용되어, 고효율 및 환경친화적인 IGCC 플랜트의 공정 및 연계설계에 대한 최적화가 이루어질 수 있는 것이다. 그러므로, 본 연구는 GateCycle 코드를 이용하여 IGCC 플랜트의 공정설계 및 성능/환경배출 평가를 위한 모사기법을 제시하였고, IGCC 설계시 주요한 설계 개념중에 하나인 공기분리장치(ASU: Air Separation Unit)와 복합사이클 간의 연계 방식에 따라 IGCC 플랜트의 성능(효율, 출력)과 환경배출물(NO_x, CO₂) 특성이 어떻게 변화되는 지를 살펴보았다. 더 나아가, IGCC의 성능/환경 특성에 관한 예측결과들을 천연가스 복합발전 플랜트와 비교, 검토하였다.

2. 공정 설계 및 전산 모사 방법

본 연구에서는 IGCC 발전계통의 가스터빈 연료를 산소공급형 가압분류층 건식 Shell-type 가스화기에서 석탄을 가스화하여 가스 정제 한 후 사용하는 것으로 가정하였다. 석탄가스화의 대상탄으로는 역청탄인 대동탄(Datong coal)을 사용하였고, 가스화기로 유입되는 산소는 공기분리장치로부터 공급되며, 가스화기의 운전조건은 1,430 °C, 27 bar 로 고정하였고 가스화기의 산소/석탄 및 증기/석탄의 공급비율도 일정하게 설정하였다. 또한 가스화된 석탄 가스는 열교환기를 거치며 냉각된 후, 고온 집진설비를 거치며 분진이 제거된다. 그리고, 석탄가스는 Sulfinol/Claus/SCOT 공정을 거치며, 가스중의 황성분이 제거된 후 예열되어 가스터빈 연소기로 유입된다. 본 연구의 가스화, 가스정제 공정에 대한 공정설계 및 모사방법에 대한 자세한 서술은 참고문헌⁽⁴⁾에 잘 기술되어 있다. Table 1 은 본 연구에서 사용한 석탄가스 연료의 가스터빈 유입조건이다.

Table 1 Inlet conditions of clean coal gas fuel

Composition(vol.%)		Fuel gas Inlet conditions to gas turbine combustor	
CO	64.53	Pressure(bar)	22.3
CO2	0.19		
CH4	0.23	Temperature(K)	372.7
H2	30.23		
H2O	0.42	Molecular wt.	20.05
N2	3.77		
Ar	0.63	LHV(kJ/kg)	13264.0
O2	0.00		

Table 1 의 연료를 사용하는 IGCC용 가스터빈은 General Electric 사의 MS700C1FA 모델을 사용하였고, 이때 가스터빈은 공기분리장치(ASU)와 연계되는 것으로 가정하였다. 즉, 가스터빈 압축기에서 추출된 공기를 ASU에서 산소 와 질소로 분리한 후, 산소는 석탄 가스화를 위한 산화제로 질소는 가스터빈 연소기에서 발생하는 NOx 지어를 위해 연소기로 재유입시켜 회석제로 사용하는 것이다. 이러한 설계방식을 ASU 연계설계라 하며, 특히 ASU에 소요되는 전체 공기량 중에서 가스터빈 압축기에서 추출되는 양의 비율을 공기추출비라 하고, 이 변수는 IGCC 플랜트 성능을 좌우하는 주요한 인자로 작용한다. 본 연구는 ASU와 연계된 가스터빈을 GateCycle 코드를 이용하여 모사하였고, ASU 연계 때문에 발생하는 탈설계점 작동 효과와 NOx 배출에 대한 해석모델도 모사기법에 고려하였다⁽⁵⁾.

가스터빈의 폐열을 회수하기 위한 폐열회수보일러(HRSG: Heat Recovery Steam Generator)는 저압, 중압, 고압의 3가지 증기를 생산할 수 있도록 열교환기들을 배열하였고, 증기터빈은 재열방식을 채택하였다. 그리고 이러한 증기사이클의 설계는 GateCycle 코드를 이용하였으며, 이때 본 연구의 가스터빈-증기사이클 복합발전계통에 대한 전산 모델이 Fig.1에 도시되어 있다.

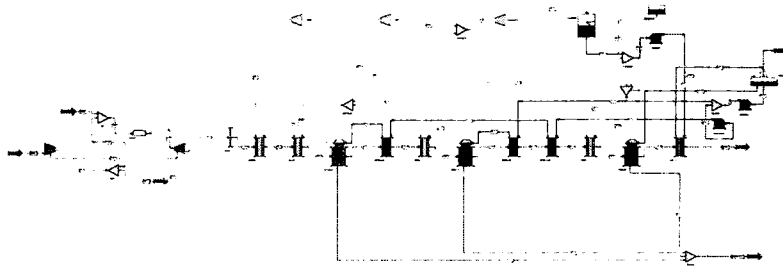


Fig.1 Process diagram of the gas turbine and the steam cycle of IGCC power plant

3. 해석 결과 및 검토

IGCC 모사 연구를 수행하기 전에, 본 연구에서 고려한 동일한 복합발전계통에 대해 천연 가스를 태우는 경우의 플랜트 성능 및 환경배출 특성을 Table 2 에 나타내었다. 이때 NOx 배출량은 확산형 가스터빈 연소기를 사용한 시험 결과⁽⁶⁾로부터 얻어진 값이다.

Table 2 Performance and emission characteristics of natural gas fired combined cycle

GT power(MW)	154.34	LHV Efficiency(%)	53.11
ST power(MW)	61.11	NOx(ppm, @ 15% O ₂)	200.0
ASU & aux. power(MW)	0	CO ₂ (kg/kWh)	0.3978

Figs.2, 3 은 플랜트의 가스터빈, 증기터빈 출력 및 ASU, 보조 부하들의 공기추출비에 따른 변화를 보여주고 있다. Fig.2 에서 볼 수 있듯이, 공기 추출비의 증가는 가스터빈의 출력 감소를 수반하나, 증기터빈 출력 및 보조부하는 큰 변화가 없으며 이로 인해 전체 플랜트의 출력도 저하되는 경향을 보인다. 또한, Fig.3 에서 보여지듯이, ASU에서 가스터빈 연소기 회석을 위해 재유입되는 질소는 가스터빈의 출력 증가 와 증기터빈 출력 감소를 동시에 야기 시키나, 전체적으로는 질소 회석이 없는 경우에 비해 약 10% 가량의 사이클 출력을 향상시킨다.

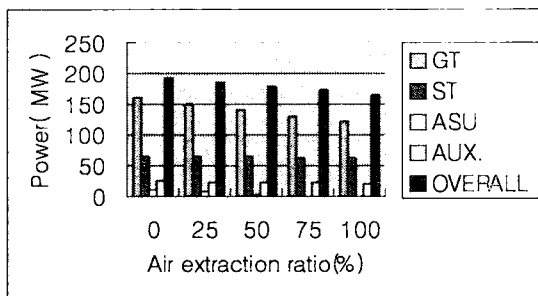


Fig.2 Power outputs and consumptions of IGCC without nitrogen dilution

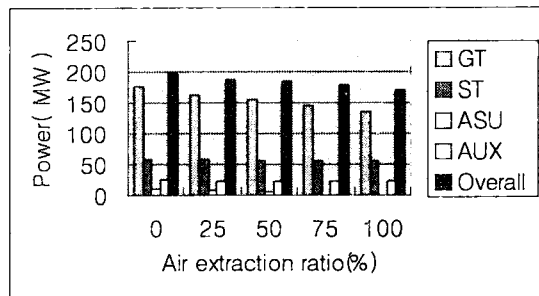


Fig.3 Power outputs and consumptions of IGCC with nitrogen dilution

Fig.4 에서 보여지듯이, 질소 회석의 적용에 상관없이, IGCC 복합발전계통의 효율은 공기추출비의 증가에 따라 효율이 감소되는 경향을 보여준다. 이러한 결과는 Fig. 2, 3 에서

보여지듯이, 공기추출량의 증가는 가스터빈의 출력저하를 가져오기 때문이다. Fig.4 는 질소 회석이 있는 경우가 없는 경우에 비해 IGCC 효율이 다소 향상됨을 보여주나, 천연가스 복합사이클의 효율에 비해서는 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 참고로 본 연구에서 예측한 효율은 IGCC 플랜트의 발전계통(가스터빈, 증기사이클 및 ASU 관련 계통)에 대한 값이므로, 가스화 및 정제공정과 같은 화학 공정의 운전에 필요한 보조 부하들을 고려한 전체 IGCC 효율은 본 방법의 예측결과들에 비해 다소 떨어질 것으로 예상된다.

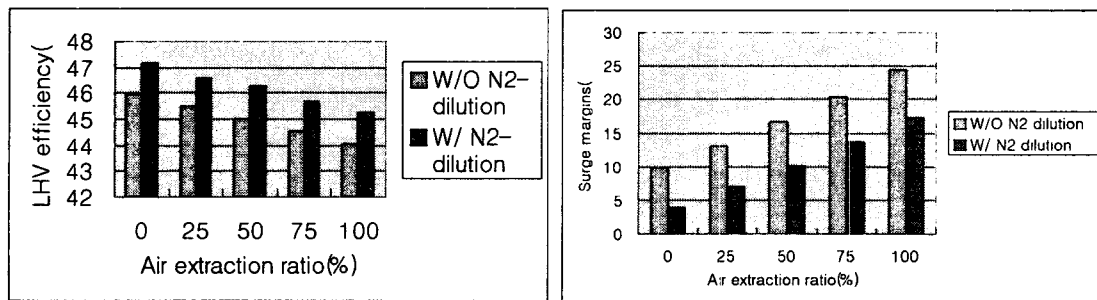


Fig.4 LHV efficiencies of IGCC power plant Fig.5 Surge margins of IGCC power plants

Fig.5 는 IGCC 플랜트의 가스터빈 작동 압력 변화에 따른 압축기의 씨지 마진을 보여주고 있다. 공기 추출비의 감소와 질소 회석으로 인해 팽창기로 유입되는 유량이 늘어나고, 이로 인해 가스터빈의 작동 압력이 급격히 상승되며, 더 나아가 가스터빈의 안정적인 운전 여유 범위를 나타내는 씨지 마진도 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 특히 질소회석이 있는 경우가 없는 경우에 비해, 씨지 마진이 대폭적으로 줄어들어 최소 3% 까지 근접함을 볼 수 있다. 일반적으로, 가스터빈의 안정성이 확보되기 위해서는 15% 정도의 압축기 씨지 마진을 필요로 하므로(본 연구의 천연가스의 경우 13 % 로 설정), IGCC 용 가스터빈의 경우는 질소회석이 있고 낮은 공기추출비 조건에서 부하 변동에 따른 안정성이 비교적 취약한 특징을 가짐을 알 수 있다.

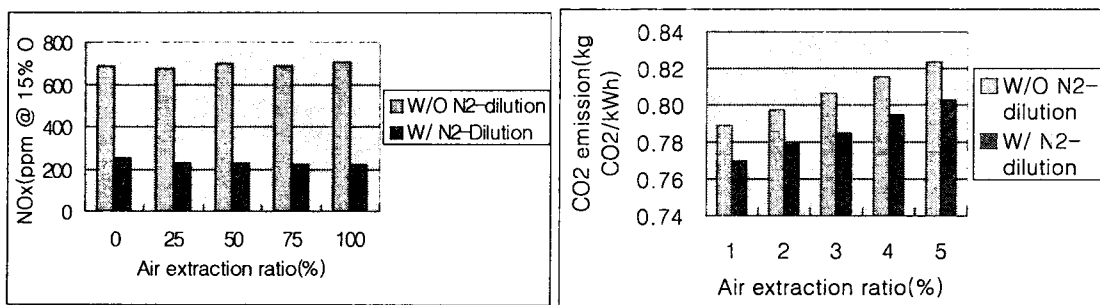


Fig.6 NOx emissions of IGCC power plants Fig.7 CO2 emissions of IGCC power plants

Fig.6 은 NOx 배출량 특성과 질소 회석을 통한 NOx 저감 효과를 보여주고 있다. 질소 회석이 없는 경우, 공기 추출비에 상관없이, NOx 배출량이 약 600 ppm(@15% O₂) 수준임을 알 수 있으며, 이 값은 천연가스를 확산형 연소기에서 태우는 경우의 200 ppm⁽⁶⁾ 에 비해 매우 높은 수치이다. 그러나, 질소회석이 이루어진 경우 NOx 발생량이 200-220 ppm 수준으로 급격히 저감되며, 거의 천연가스와 동등한 NOx 발생특성을 유지하게 된다.

Fig.7 은 본 연구에서 고려한 IGCC 발전계통의 효율(LHV기준), NOx 배출량 특성과 CO₂ 배출량 특성과 비교하여 본 결과이다. 공기추출비의 변화에 따른 CO₂ 의 배출량이 거의 변화가 없으며, 질소 회석에 의해서는 CO₂ 배출량이 0.8 kg/kWh 이하로 약간 감소되는

경향을 보인다. 즉, IGCC의 ASU 연계설계가 CO₂ 배출량 감소를 위해서는 낮은 공기추출비 조건이 유리하나, CO₂ 배출량을 천연가스의 0.4 kg/kWh 수준으로 낮추기 위해서는 새로운 CO₂ 저감 기법을 IGCC 플랜트 설계시 적용해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

ASU 연계조건에 따른 IGCC 복합발전 계통의 공정 설계 방법을 제시하였고, 성능 및 환경배출 특성간의 관계를 규명하였다. 본 모사 결과로부터, 공기 추출비의 감소와 질소회석을 통해 복합 플랜트 출력의 향상이 가능하며, 전체 IGCC 발전계통효율은 질소 회석이 없는 경우에는 44-46 % , 질소 회석이 있는 경우에는 45-47 % 범위의 값을 보였다. 더 나아가, 낮은 공기 추출비와 질소회석이 동시에 이루어지도록 IGCC 플랜트를 설계하는 경우에는, 가스터빈의 압축비 상승과 더불어 운전 불안정성이 유발될 가능성이 높아짐을 알 수 있다. 또한 NO_x 발생량은 질소회석이 없는 경우에는 천연가스의 경우에 비해 상대적으로 많은 600 ppm 수준이나, 질소회석을 통해 200 ppm 수준까지 저감이 가능하였다. IGCC 발전계통의 CO₂ 배출량은 0.76-0.82 kg/kWh 수준으로 천연가스에 비해 2배 가량 높고, CO₂ 의 획기적인 저감을 위해서는 새로운 CO₂ 저감 기법의 적용이 필수적임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 고등기술연구원이 지원하는 “중잔사유 가스화 복합발전 계통 및 중소형 가스화 연료전지-열병합 시스템의 공정설계 및 BSU급 가스화기 연료와 슬래그의 특성 평가” 과제 의 일환으로 이루어졌으며, 이에 관계자들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Pruschek, R. et al., " The Role of IGCC in CO₂ Abatement," Energy Conversion Management, vol.38, 153-158 (1997)
- (2) 이찬 외, " ASU 연계 및 연료/질소 포화 조건이 석탄가스화 복합발전사이클의 성능 및 NO_x 배출특성에 미치는 영향에 관한 연구," 2000년도 춘계에너지공학회 학술대회 논문집, 9-14 (2000)
- (3) Chiessa, P. and Lozza, G., "CO₂ Emission Abatement in IGCC Power Plants by Semiclosed Cycles", J. of Eng. for Gas Turbines and Power, vol.121, 635-648 (1999)
- (4) 이승종 외, "공정개발급 석탄가스화 복합발전플랜트의 성능평가," 화학공학, vol.37, No.5, 47-55 (1999)
- (5) 이찬, 윤용승, "중발열량 석탄가스를 사용하는 복합발전 사이클의 성능 및 NO_x 배출 특성," 한국에너지공학회지, vol.9, no.4, 295-302 (2000)
- (6) Claeys, J.P. et al., "Combustion System Performance and Field Test Results of MS7001F Gas Turbines," J. of Eng. for Gas Turbines and Power, Vol.115, 537-545 (1993)