

가스터빈과 산소분리공정의 연계 방법에 따른 IGCC 플랜트 성능영향 분석

서석빈* · 김종진 · 조상기 · 이윤경 · 안달홍

한전 전력연구원

The Effect of the Integration Methods of Gas Turbine and Air Separation Unit on IGCC Plant Performance

Suk-Bin Seo*, Jong-Jin Kim, Sang-Kie Cho,

Yun-Kyoung Lee and Dal-Hong Ahn

Korea Electric Power Research Institute

요 약

석탄가스화 복합발전(IGCC; Integrated Gasification Combined Cycle)에서 가스터빈과 산소분리공정간의 연계는 플랜트의 성능과 경제성을 향상시키는 잠재력이 있어 최근에 이에 대한 연구가 다수 수행되었으며, 일부 방법은 상용플랜트에 적용이 되고있다. 본 논문은 가스터빈과 산소분리공정간의 연계방법들에 대해 검토하고 이들 방법을 적용시 IGCC 플랜트 성능을 비교하기 위해 Texaco Quench 가스화 공정을 채용한 300 MW 급 IGCC를 대상으로 공정모사를 수행하였다. 그 결과, 가스터빈 압축기 출구의 압축공기를 추출하여 산소분리공정에 요구하는 공기의 전량을 공급하는 방법이 가장 플랜트 효율이 좋은 것으로 나타났으며, 플랜트 출력은 산소분리공정의 공기요구량의 75%를 가스터빈에서 추출하여 공급하는 경우에서 최대가 됨을 알 수 있었다.

Abstract— Integration methods of a Gas Turbine and a Air Separation Unit have a potential to improve plant performance and cost of IGCC. Several studies on those integrations schemes were carried out. Then some of the methods were actually in commercial plants. This paper reviewed the integration schemes of a Gas Turbine and a Air Separation Unit. In order to compare the plant performance of IGCC with each scheme, simulation model was developed for IGCC power cycle with Texaco Quench gasification process. The simulation results showed that the thermal efficiency of the plant was appeared to be the best when all of the air consumption required for Air Separation Unit was supplied from the Gas Turbine and the net plant power output was maximized when 75% of the total ASU air requirement was supplied from Gas Turbine.

1. 서 론

석탄가스화 복합발전(IGCC; Integrated Gasification Combined Cycle)은 석탄을 연료로 사용하면서 NOx, SOx 등 오염물 발생량이 적고 가스터빈을 채용한 복합발전 방식으로 효율이 높은 청정에너지 발전방식이다. 특히 우리나라와 같이 전력생산 분야에서 석탄화력의 비중이 높은(99.3월 현재 27.2%(한전통계자료)) 우리나라에서 급격히 강화되는 석탄화력발전소에 대한 오염물 배출량 제한에 대처하기 위해 기존 석탄화력의 대안으

로써 석탄가스화 복합발전이 부각되고 있다.

석탄가스화 복합발전은 석탄을 가스화하는 가스화과정과 이 공정에 필요한 산소를 공급하는 산소분리공정, 석탄가스를 정제하는 탈황공정, 그리고 이 가스를 연소하여 발전하는 가스터빈 및 복합사이클로 구성되어있다. 석탄가스화 복합발전은 이러한 여러 공정들로 구성되어 있기 때문에 이 공정들간의 적절한 연계가 전체 플랜트 성능에 큰 영향을 미친다. 최근에 석탄가스화 복합발전에서 산소분리공정과 복합사이클의 가스터빈과의 연계에 대한 연구가 수행되었으며 일부는 상용설비에 적용

되고 있다. 산소분리공정과 복합사이클의 가스터빈과의 연계는 산소분리공정의 잉여질소를 회수하여 가스터빈에 이용함으로써 IGCC 플랜트의 성능을 향상시키는 방법이다. 최근에 이에 대한 연구가 주로 산소분리장치 제작사들에 의해 수행되었으며 이들 방법을 다음과 같이 크게 3가지로 대별할 수 있다.

- 방법 1: 질소연계
- 방법 2: 공기 및 질소 연계
- 방법 3: 가스터빈 압축기 입구 냉각

1-1. 방법 1(질소연계)

천연가스나 경유연소 가스터빈에서 NOx 제어방법으로 물분사, 증기분사 또는 저 NOx 연소기를 채용하고 있다. 물분사 방법은 투자비는 적게 들지만 열충격으로 가스터빈에 손상을 가져오는 단점이 있다. 증기분사 방법은 증기사이클의 출력을 감소시키며 증기분사로 인한 용수 요구량 증대는 용수가 부족한 지역에서 제한점이 된다. 저 NOx 연소기는 최근 기술 개발로 증기나 물을 사용하지 않고 산소 15%에서 NOx 배출량이 10~25 ppmvd로 낮출 수 있다. 이러한 건식 저 NOx 기술은 천연가스를 연소하는 복합계통에 이용되고 있다. 그러나 GE 7FA 터빈에 대해, 과수소가스(Hydrogen rich gas)의 연소특성상 단계 연소가 적합하지 않기 때문에 저 NOx 버너는 석탄가스연료에는 사용될 수 없다^[1]. 따라서, 산소분리공정과 같은 부지에 있는 IGCC 플랜트에서 가스터빈에 석탄가스 사용시 화염온도를 감소시키기 위해 산소분리공정으로부터 나오는 잉여질소를 회수하여 가스터빈 연소기에 주입함으로써 NOx를 제어하고 출력을 증대시키는 질소연계방법이 연구되었으며^[2], 미국 Tampa IGCC Plant에서 이 방법이 채용되었다. 질소연계에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다^[3].

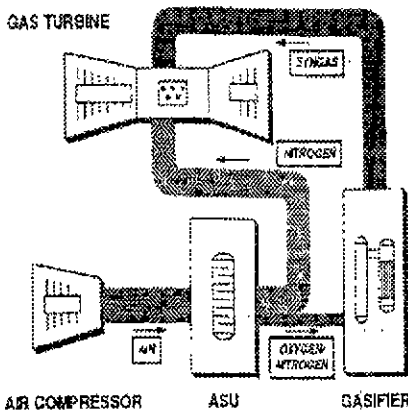


Fig. 1. N₂ Integration.

1-2. 방법 2(공기 및 질소 연계)

전통적인 복합사이클 플랜트에 사용되는 가스터빈과 비교하여, IGCC 플랜트에 설치되는 가스터빈은 상대적으로 낮은 발열량의 연료가스가 공급된다. 이에 따른 연료가스 유량의 증가는 다른 조건이 변화하지 않는다면 가스터빈압축기에서 서지문제를 가져오게 된다. 공기 및 질소 연계방법은 이 문제를 완화하기 위해 가스터빈 압축기의 압축공기 일부를 추출하여 산소분리공정과 연계하는 방법이다. 가스터빈 압축기로부터 추출된 압축공기는 산소분리공정으로 공급되며, 산소분리공정의 공기압축기는 가스화기에 공급되는 산소 생산에 필요한 공기량을 보충하게 된다. 산소분리공정에서 분리된 잉여질소는 회수되어 가스터빈 연소기에 주입되어 NOx 제어를 위한 희석제로서 사용된다. 압축기에서 추출된 공기의 보유열은 적절한 열교환망을 사용하여 회수하게 된다. 또한 공기추출에 따른 가스터빈의 팽창기 유량 저하에 의한 출력 감소를 억제하고 NOx 제어의 수단으로 공정중의 저준위 열원을 회수하여 연료가스 또는 회수질소를 가습하는 방법이 병행되기도 한다. 이 방법에 대한 개략도는 Fig. 2와 같다^[4].

1-3. 방법 3(가스터빈 압축기 입구냉각)

가스터빈과의 연계를 위한 또 다른 방법으로 산소분리공정의 잉여질소를 이용하여 압축기 입구를 냉각하는 방법이다^{[4][5]}. 이 방법은 두 공정간의 연계가 간단하며 가스터빈 특성상 압축기 입구온도 저하에 따른 가스터빈 성능이 향상된다. 고압 산소분리공정에서 나온 약 3~5 bar, 18~20°C의 질소는 가스터빈 압축기 입구압력까지 팽창되어 냉각된 후, 가스터빈 입구에 공급되어 입구 공기온도를 냉각시켜 가스터빈 성능을 향상시키는 방법이다. 이 방법은 대기온도가 높은 기후에 적합하다. 이에

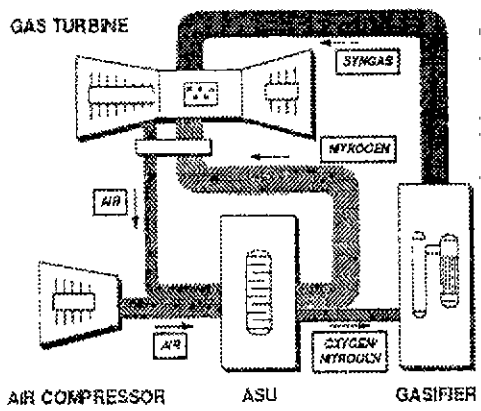


Fig. 2. Air and N₂ Integration.

③ Case B: 방법 2(공기 및 질소연계)

- B-25: 공기추출율 25%
- B-50: 공기추출율 50%
- B-75: 공기추출율 75%
- B-100: 공기추출율 100%

④ Case C: 방법 3(가스터빈 압축기 입구냉각)

- C-25: N₂ 총량의 25%를 가스터빈 연소기로 나머지 75%는 압축기입구에 공급
- C-50: N₂ 총량의 50%를 가스터빈 연소기로 나머지 50%는 압축기입구에 공급
- C-75: N₂ 총량의 75%를 가스터빈 연소기로 나머지 25%는 압축기로 공급

2-3. 공정 모델링

대상 공정에 대해 공기연계방법 채용에 따른 플랜트 성능을 분석하기 위해 공정 모델링을 수행하였다. 가스화공정 모델링은 ASPEN PLUS code를, 복합사이클 모델링은 GateCycle code를 사용하였으며 이 code간의 데이터 교환을 통해 전체 플랜트 성능을 계산하였다.

2-3-1. 가스화공정

가스화공정모델은 김 등^[6]이 개발한 ASPEN PLUS 모델을 사용하였으며 본 연구에서 Texaco Quench 가스화공정 채용에 따른 계통구성이 상이한 부분을 보완하였으며 복합블럭과의 물, 증기 및 공기 연계부분은 복합사이클 성능분석 상용코드인 GateCycle code와 데이터 교환을 할 수 있도록 보완하였다.

가스터빈 NOx 제어를 위해 산소분리공정과 연계가 없는 경우(Base case)는 연료가습만을, 연계 방법 1, 2는 가스터빈에 N₂ 주입을, 방법 3은 연료가습 및 N₂ 주입 두가지를 조합하였다. NOx 발생량예측은 Fig. 5의 회색 후 연료발열량대 NOx 발생량 예측 데이터를 사용하여 NOx 발생량이 설계기준 60 ppmd(@6% O₂) 이하가 되도록 회색제량을 제어하였다^[1]. 연료가습에 필요한 열원은 raw gas 냉각시의 열교환에 의해 연고 보충수는 복

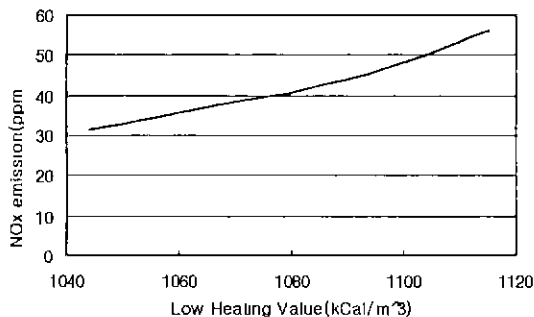


Fig. 5. Fuel LHV vs. NOx emissions.

Table 2. Gas turbine data (Fuel: LNG).

모델	출력 (MW)	압축비	배기가스온도 (°C)	TIT (°C)
GE 7FA	172	15.4	604	1327

합사이클의 고압수를 사용하였다.

2-3-2 가스터빈 및 복합사이클 모델링

가스터빈 모델은 GE 7FA 가스터빈을 대상으로 모델링하였으며 설계 제원은 Table 2과 같다^[7].

가스터빈 성능예측은 제작사가 제공하는 제한된 설계 데이터로부터 가스터빈 거동을 예측하는 시스템적인 방법이 발전플랜트 연구에 흔히 사용되고 있으며 본 연구에서는 이 방법에 의해 GateCycle code를 사용하여 가스터빈 성능을 해석하였다. 설계조건에서 제작사가 제공한 데이터를 사용하여 각 구성요소의 성능을 결정하였다. 단일축, 고정회전수를 갖는 가스터빈의 탈설계점 성능해석은 팽창기 입구 유량이 choke된다는 가정하에서 이상기체의 유량에 대한 관계식(1)을 사용하였다^[8].

$$\text{Constant} = \left(\frac{m\sqrt{T}}{XAP} \right)_{\text{nozzle inlet}} \quad (1)$$

- P: expander inlet pressure
- T: expander inlet temperature
- A: critical area
- c: constant

터빈냉각유량은 제작사 데이터를 이용하고 탈 설계조건에서의 냉각공기유량은 다음 식에 의해 계산하였다.

$$M_c = MC_{\text{des}} \left(\frac{P_c}{P_{\text{des}}} \right) \sqrt{\frac{T_{\text{des}}}{T_c}} \quad (2)$$

- M: cooling flow
- T: cooling flow temperature
- P: cooling flow pressure
- c: current cooling gas values
- des: design values

압축기 탈설계점 성능해석을 위해 GateCycle code에서 제공하는 압축기 맵인 GE 7FA map을 사용하였으며 이에 대한 그림은 Fig. 6와 같다. 이 맵상에서 압축기 입구온도와 물증량에 의한보정속도(corrected speed) 식(3)과 유량식(1)에 의해 운전점이 결정된다^[8].

$$\text{CS} = 100 * \frac{\text{rpm}}{\text{rpm}_d} * \sqrt{\frac{(RT)_d}{(RT)}} \quad (3)$$

- CS: corrected speed

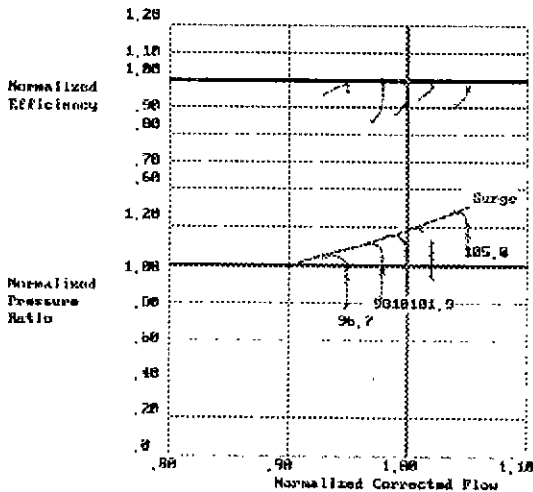


Fig. 6. GE 7FA compressor map.

- d: 설계값
- rpm: 회전수
- R: 가스상수
- T: 압축기 입구온도

가이드베인에 의한 유량제어시 압축기 성능을 예측하기 위해 식(4)에 의해 압축기 유량을 결정하고 압축기 효율은 식(5)에 의해 구하였다. 이 식에서 가이드베인 각도조정에 의한 압축기 효율보정값(VEFC)은 제작사의 GE 7FA 가스터빈의 압축기 유량과 효율(isentropic efficiency) 데이터¹⁹⁾로부터 구하였다.

$$W = W_{des} * (1 - \alpha * VFC) \tag{4}$$

- W: inlet flow
- α : angle
- des: denotes design values
- VFC: vane angle flow correction factor

$$\eta = \eta_{des} * \eta_{map} * (1 - \alpha * VEFC) \tag{5}$$

- η : compressor efficiency

des: denotes design values
VEFC: vane angle efficiency factor

모든 경우에 대해 시뮬레이션시 가스터빈 연소온도는 일정하게 유지되며 가스터빈 출력은 축 토오크 제한에 의해 제작사가 제시하는 최대출력 197 MW 이하가 유지되도록 하고¹⁹⁾ 이를 위해 압축기 가이드베인을 닫아 출력을 제한하였다.

복합사이클은 배열회수보일러, 증기터빈 및 보조기기로 구성된다. 가스터빈 출구로부터 나온 고온의 가스현열을 이용하여 배열회수보일러에서 회수하여 증기터빈을 운전하여 출력을 발생시킨다. 배열회수보일러 성능해석을 위해 설계기준은 다음과 같다.

- 주증기 조건: 538°C, 103kg/cm²
- HRSG 형식: 3압, 재열, 비조연
- 배기가스온도, >110°C
- 핀치점온도차(Pinch point temperature): 10°C
- 접근온도차(Economizer approach temperature), 10°C

설계 접근온도차와 핀치점 온도차를 사용하고 열전달 해석은 effectiveness-NTU methodology 에 기초하여 성능을 계산하였다. 증기터빈의 성능예측은 GE 증기터빈 성능데이터(Spencer, Cotton and Cannon; SCC)에 기초하였다¹⁸⁾.

3. 결과 및 고찰

위에서 설정한 각 옵션들에 대한 시뮬레이션 결과가 Table 3에 나타나있다. 표에서 보는 바와 같이 연계방법 2(공기 및 질소연계)를 채용하고 100% 추출율의 경우(B-100)에서 플랜트 효율이 가장 좋은 것으로 나타났으며, 플랜트 출력은 연계 방법 2를 채용하고 75% 추출율의 경우(B-75)에서 최대가 됨을 알 수 있었다. 이는 가스터빈 추출공기를 산소분리공정에 공급함으로써 산소분리공정의 소비동력의 감소로 인해 플랜트 순출력 및 순 효율이 증대되었기 때문인 것으로 분석된다 연계 방법 1(질소연계)을 채용한 Case A의 경우 연계가 없는 Base Case에 비해 오히려 플랜트 출력과 효율이 감소되는 것으로

Table 3. IGCC performance summary on Integration methods.

Items	Base case	Case A	Case B				Case C		
			B-25	B-50	B-75	B-100	C-25	C-50	C-75
Gas Turbine Power Output (MW)	197.0	197.0	197.0	197.0	190.7	172.9	197.0	197.0	197.0
Steam Turbine Power Output (MW)	106.7	105.7	107.0	108.0	107.7	104.4	107.1	107.3	106.0
Aux. Power Consumption (MW)	38.3	51.1	43.7	36.2	27.9	19.1	39.2	43.4	47.1
Net Plant Power Output (MW)	265.4	251.6	260.3	268.8	270.5	258.2	264.9	260.9	255.9
Net Plant Efficiency (% HHV)	38.3	38.0	38.7	39.4	39.9	40.1	38.5	38.3	38.3

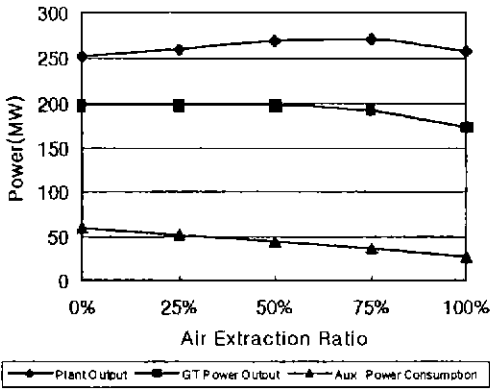


Fig. 7. Air Extraction Ratio vs. Power Output.

나타났는데 이는 질소주입으로 인한 가스터빈 팽창기 유량증대에 의해 가스터빈 출력이 최대 출력값(197 MW) 이상이 되는 것을 방지하기 위해 가스터빈 압축기 가이드베인을 닫아 공기유량을 감소시킴으로써 압축기 효율이 감소되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7는 Case B에 대해 가스터빈으로부터의 공기추출비율에 따른 IGCC 플랜트 출력을 나타내었다. 공기추출율이 증대될수록 플랜트 출력은 상승되는 것으로 나타났다. 이는 그림에서와 같이 공기추출율의 증가에 따라 산소분리공정에서 보충공기압축기의 소비동력이 적어져 보조동력의 감소가 주요인이다. 그러나 공기추출율이 75%를 넘으면 플랜트 출력은 감소되는데 이는 공기추출율이 증가되면서 가스터빈 출력이 최대출력을 유지하지 못하고 감소되어 이 감소분이 산소분리공정에서 보충 공기압축기의 동력소비량 감소분을 초과하기 때문이다. Fig. 8는 공기추출율에 따른 플랜트 성능을 나타내었다 이 그림에서와 같이 플랜트 효율은 공기추출율이 증가할수록 증대되는 것으로 나타났다. 이는 공기추출율

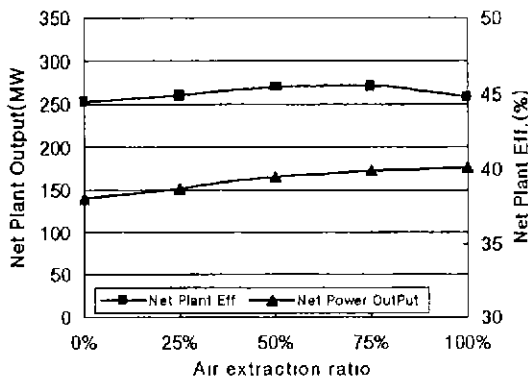


Fig. 8. Air Extraction Ratio vs. Plant Performance.

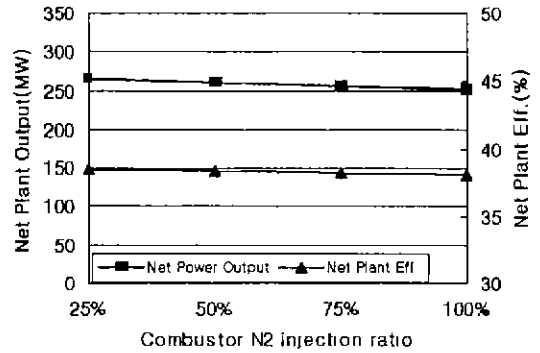


Fig. 9. Combustor N₂ Injection ratio vs. Plant Performance.

의 증가에 따라 산소분리공정에서 보충공기압축기의 소비동력의 감소가 주요인으로 판단된다

Fig. 9는 가스터빈 압축기입구냉각 방법(Case C)에 대해 질소를 가스터빈 연소기와 압축기 입구로 보내는 비율에 따른 플랜트 성능을 나타낸 것이다. 그림에서 플랜트 출력 및 효율은 압축기 입구로 공급되는 질소의 비율이 증가할수록 증대되는 것으로 나타났다. 이는 압축기 입구로 질소를 공급함에 따라 압축기 입구 공기온도가 낮아져 가스터빈 효율이 증대되며 연소기로 공급되는 질소의 유량감소로 인해 질소 압축에 필요한 소비동력이 낮아져서 보조동력이 감소되고 압축기 입구압력까지 질소를 팽창할 때 발생하는 질소팽창기의 전력생산이 주요인으로 분석된다.

Fig. 10는 연소기 질소주입비율에 따른 주요기기 출력을 나타낸 것이다. 그림에서 가스터빈은 연소기 질소주입비율에 관계없이 최대출력을 유지하며 보조동력은

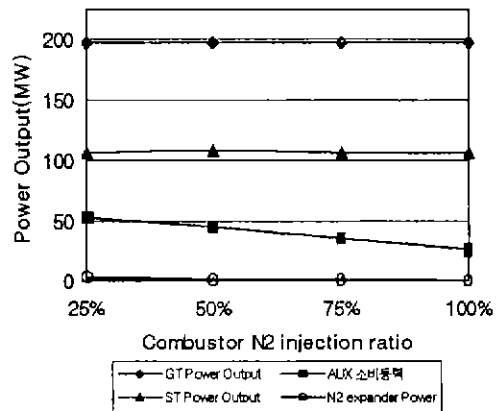


Fig. 10. Combustor N₂ Injection ratio vs. Power Output.

연소기 질소주입비를 증가에 따라서 감소되는 것으로 나타났다. 50% 연소기 질소공급(Case C-50)때 보다 25%(Case C-25)에서 증기터빈 출력이 감소되는 것은 가스터빈 연소기로 공급되는 희석제인 질소공급량이 감소함에 따라 NOx 배출량을 기준값 60 ppm(6% O₂) 이하로 유지하기 위해 연료가스 기습에 필요한 복합사이클의 고압급수 사용량 증가 때문이다.

위의 결과로 볼 때, 가스터빈과 공기분리공정간의 연계방법 중 방법 2(공기 및 질소연계)를 채용한 경우 IGCC 플랜트 성능이 가장 우수한 것으로 나타났으며 특히 압축기 공기추출율 100%(Case B-100)에서 플랜트효율이 최대로 나타났다. 플랜트 출력은 동일 연계 방법에서 압축기 공기추출율 75%(Case B-75)에서 최대인 것으로 나타났다.

4. 결 론

석탄가스화 복합발전 플랜트의 성능향상을 위한 방법으로 복합사이클의 가스터빈과 산소분리공정 간의 연계방법을 검토하고, 이들 방법을 적용시 IGCC 플랜트 성능을 비교하기 위해 Texaco Quench 가스화 공정을 채용한 300 MW 급 IGCC를 대상으로 공정모사를 수행하였다. 그 결과 산소분리공정의 잉여질소를 가스터빈 연소기에 주입하고 가스터빈 압축기 출구의 압축공기를 추출하여 산소분리공정에 요구하는 공기의 전량을 공급하는 방법(방법 2의 100% 추출율, B-100 Case)이 가장 플

랜트 효율이 좋은 것으로 나타났으며, 플랜트 출력은 동일 연계 방법에서 산소분리공정 요구 공기량의 75%를 가스터빈 압축기에서 추출하는 경우(B-75 Case)에서 최대가 됨을 알 수 있었다. 따라서 대상 IGCC 공정에 대해 LCOE(Levelized Cost of Electricity) 를 고려하여 설계시에는 방법 2의 100% 추출율을, 최대출력을 선호할 경우 방법 2의 75% 공기추출율을 채용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Bechtel co. "IGCC process evaluation" (1995).
2. US Patent No. 5,406,786, No. 5,802,875, No. 5,901,547.
3. Smith, A.R.: "Integration of Oxygen Plants and Gas Turbines in IGCC Facilities" 58th American Power Conference (1996).
4. Rao, A.D. and Smith, A.R.: "Integration of Texaco TQ Gasification with Elevated Pressure ASU" 12th EPRI Coal Gasification Conference (1993).
5. U.S Patent No. 5,388,395.
6. 김종진 외 5명: "Shell 석탄가스화 복합발전 시스템의 성능해석 연구" 한국에너지공학회, 제 6권 제 1호(1997).
7. 한국전력공사: "Contract for PUSAN combined cycle power plant" (1998).
8. Enter Co · "GateCycle User guide".
9. GE technical data, private communication (1999).