

차세대 가스화복합발전 시스템 연구(I)

서석빈, 김종진, 이윤경, 안달홍
한전 전력연구원

A Study of Advanced IGCC Systems(I)

Suk-Bin Seo, Jong-Jin Kim, Yun-Kyoung Lee, Dal-Hong Ahn
Korea Electric Power Research Institute

1. 서론

가스화 복합발전(IGCC; Integrated Gasification Combined Cycle)은 천연가스 연소에 의한 복합발전 시스템만큼 공해물질을 줄일 수 있게 하였으며, 발전효율도 중래 화력발전소의 성능보다 높아 차세대 발전방식으로 각광을 받고 있다. 더욱이 세계 각국이 가스화 발전기술에 관하여 깊은 관심을 갖는 주 요인은 가스화 기술을 이용하여 폐기물 또는 바이오메스의 안정적 가스화가 가능하며, 생성가스를 소규모 발전소에 이용할 수 있어 기존 석탄보일러 발전소를 대체할 수 있기 때문이다.

이러한 이유로 가스화 복합발전은 '90년대에 들어 본격적으로 상업화 시험에 들어갔으며 최근까지의 미국, 유럽 및 일본 등에서 5,000MW 이상이 석탄, 잔사유, Petroleum 등 다양한 연료를 사용하는 플랜트가 개발 중 또는 운전 중에 있다[1]. 그러나 가스화복합발전은 건설투자비가 높아 경제성 측면에서 타 발전방식에 비해 다소 불리하다. 따라서 가스화복합발전의 경쟁력 제고를 위해 가스화로부터 나온 현열을 최대한 이용하기 위한 고온정제 공정에 대한 연구가 진행 중에 있으며, 특히 가스터빈의 연소온도가 높은 신형가스터빈의 개발에 의해 가스화복합발전은 경제성 측면에서도 경쟁력을 가질 수 있을 것으로 전망된다.

이에 본 논문에서는 고온정제를 채용한 석탄가스화복합발전에 있어서 가스터빈의 개발 수준에 따라 3종의 가스터빈을 채용한 시스템의 성능과 경제성을 분석하였으며 이를 통해 차세대 가스화복합발전의 잠재성을 검토하고자 하였다.

2. 본론

고온정제를 채용하는 IGCC 시스템에 있어서 가스터빈의 발달 수준에 따라 3가지 타입의 가스터빈을 적용하여 다음과 같이 세가지 경우의 시스템을 고려하여 각 시스템들에 대해 성능과 경제성을 분석하고자 하였다.

- a. Case 1 : Texaco Gasification + Hot Gas Clean-Up + GE 7FA Gas Turbine
- b. Case 2 : Texaco Gasification + Hot Gas Clean-Up + W501G Gas Turbine
- c. Case 3 : Texaco Gasification + Hot Gas Clean-Up + GE 7H Gas Turbine

가. 시스템 설계기준

시스템의 주요 구성설비는 Table 1과 같으며 이에 대한 계통구성은 Fig. 1에 나타내었으며

시스템 성능해석을 위한 설계기준은 다음과 같다.

○ 설계기준

- 대기조건 : 15℃, 상대습도 60%
- 연료 : Datong Coal(역청탄), 6,281 KCal/kg(HHV)
- 시스템 구성 : Single train Gasification, Combined Cycle and Air Separation Unit

Table 1 Main Components of Advanced IGCC System

Items	Components
Gasifier	Texaco Full Heat Recovery type, Oxygen-blown, Slurry feed
Acid Gas Removal	Hot Gas Clean-Up(Fluidized bed Desulfurization)
Gas Turbine	GE 7FA(W501G, GE 7H)
Steam Cycle	3 pressure level, Unfired HRSG, Reheat
Air Separation Unit	Cryogenic Separator

나. 성능해석 모델링

IGCC 시스템은 가스화공정과 복합사이클이 결합되어 있기 때문에 이를 단일의 시뮬레이션 코드를 사용하여 성능을 해석하기가 어렵다. 본 연구에서는 시스템 성능해석을 위해 Johnson[2]이 수행한 방법을 사용하여 가스화공정은 ASPEN PLUS code를, 복합사이클은 GateCycle code를 사용하였으며 전체 시스템 성능을 계산하기 위해 이 code간의 데이터 교환을 통해 수행하였다[3]. 가스터빈 성능해석을 위해 3종의 가스터빈 대한 설계제원은 Table 2 와 같다.

Table 2 Gas Turbine design data

Items	GE 7FA	W501G	GE 7H
Output(MW)*	197	272	340
Firing Temperature(℃)	1,260	1,356	1,402
Pr Ratio	13.5	19.2	23
Air flow(kg/sec)	416.5	544.5	558.0

* Syngas Fuel Firing

다. 시스템 성능예측 결과

위의 성능해석 모델을 사용하여 3가지 시스템들에 대한 성능을 예측하였으며 그 결과는 Table 3 와 같다.

GE 7FA 가스터빈을 고온정제공정과 연계한 Case 1 의 경우 시스템 효율은 43.65% 로 저온정제공정 채용 시 42.6%(전력연구원 자료[4])에 비해 약 1% 상승하는 것으로 나타났으며 신형 W501G 가스터빈을 채용하는 경우 가스터빈의 출력상승과 더불어 증기터빈의 출력도 상승하여 순 출력이 392. 8MW 로 나타났다. 이는 가스화기로부터 생산되는 가스 유량이 상대적으로 많아 가스냉각기로부터 생산되는 증기량이 증대되고 증기사이클의 배열회수보일러에서 증기생산량이 증대되었기 때문으로 판단된다. 한편, GE 7H 가스터빈을 적용한 Case 3의 경우는 가스터빈 블레이드를 증기냉각하면서 흡수된 열을 다시 증기사이클로 회수함으로써 증기사이클의 효율이 증대되어 시스템의 출력과 효율이 높게 나타났다.

Table 3 Performance Summary

Items	Case 1	Case 2	Case 3
Gas Turbine	GE 7FA	W501G	GE 7H
Gas Turbine Power(MW)	197.0	272.1	340.3
Steam Turbine Power	133.0	165.4	196.3
Aux. Power(MW)	51.1	44.7	73.7
Net Power(MW)	278.9	392.8	462.9
Efficiency, HHV(%)	43.65	46.31	47.76

라. 경제성 분석

위에서 예측한 각 시스템 성능결과를 바탕으로 시스템의 주요 구성설비 투자비를 산출하여 시스템의 총 투자비를 산출하였으며 운전유지비 등을 고려하여 발전원가를 산정하였다.

1) 투자비 산정

주요 설비의 투자비 산출을 위해 전력연구원에서 수행한 300MW급 IGCC 경제성 분석 자료 [4]를 참고하였으며 고온정제설비, 신형가스터빈의 투자비예측을 위해 NETL 보고서[5], DOE 보고서[6]를 참고하여 예측하였다. 각 시스템의 투자비 예측을 위해 용량계수를 적용하여 식 (1)의 Six-Tenths factor[7]에 의해 산출하였다.

○ 투자비 산정기준

- 가격 기준일 : 2000년 1월
- 환 율 : 1,100 원/US\$
- 사 업 기 간 : 5년
- 건설 중 이자 : 연 8%의 이자율 적용

$$\frac{\text{Cost of Unit A}}{\text{Cost of Unit B}} = \left(\frac{C \text{ of Unit A}}{C \text{ of Unit B}} \right)^{0.6} \quad (1)$$

C : Capability

각 시스템의 투자비를 산출한 결과는 Table 4 와 같으며 시스템 출력이 증대함에 따라 KW 당 총 투자비(Total Plant Cost) 는 감소하는 것을 알 수 있었다.

2) 발전원가 산정

위에서 산정한 투자비를 바탕으로 식 (2)에 의해 발전원가를 산정하였다. 운전유지비는 전력연구원 자료[4], NETL 보고서[5]를 참고하여 산정하였으며 각 시스템의 연간 운전유지비는 Table 5와 같다. 발전원가 산정을 위한 기준은 다음과 같다.

○ Basis for Economic Analysis

- a. Coal Price : ₩37,593/ton
- b. Cost of Electricity evaluation term : 25 years
- c. Escalation rate : 3.0%/year
- d. Discount rate : 8%/year
- e. Selling price : ₩74.65/KWh

Table 4 Total Plant Cost Summary

(Unit : \$1,000)

	Case 1	Case 2	Case 3
Coal Slurry Preparation	20,572	25,267	27,878
Oxygen Plant	40,519	49,765	54,909
Texaco Gasifier(RSC+CSC)	50,513	62,040	68,452
Gas Conditioning, Desulfurizer, Sulfur Acid Plant	35,808	43,981	48,527
Gas Turbine System	41,384	52,642	54,675
HRS&G & Steam Turbine	51,140	62,812	69,303
Piping, Electric, Control etc.	57,194	70,247	77,508
Engineering Fees	29,861	36,675	40,466
Contingency	34,020	60,303	66,025
Total Plant Cost	361,013 \$1,294/KW	463,734 \$1,180/KW	507,741 \$1,097/KW

$$L_c = \frac{\sum_{t=0}^n (D + m + f + I - B) \times (1 + e)^t / (1 + r)^t}{\sum_{t=0}^n [Gt \times (1 - Ap) \times Cf \times H] \times (1 + e)^t / (1 + r)^t} \quad (2)$$

Lc : 균등화 발전원가

I : 차입금 이자

G : 시설용량

Cf : 설비이용율(%/100)

t : 가동연도

e : 물가상승율(%/100)

m : 운전유지비

D : 감가상각비

B : 부산물 판매수익

Ap : 소내소비율(%/100)

H : 발전시간(1년=8760시간)

n : 발전소 수명기간

r : 할인율(%/100)

f : 연료비

Table 5 Annual Operating Cost summary

(Unit : \$1,000)

Item\Case	Case 1	Case 2	Case 3
Fuel Cost	27,799	36,896	42,155
Various Operating Cost	7,369	9,088	9,969
Fixed Operating Cost	8,784	11,308	12,288
By-Product Credits	5,425	6,690	7,339
Net Operating Cost	38,527	50,602	57,074

각 시스템의 발전원가를 산출한 결과는 Table 6 와 같으며 출력 및 효율이 상대적으로 높은 Case 3이 가장 낮게 나타났다. Case 1의 경우 발전원가는 46.11원/KWh 로써 Table 7의 저온정

제 공정을 채용한 IGCC에 비해 낮게 나타났다. Case 2의 경우 발전원가는 42.09원/KWh 로써 PFBC(Pressurized Fluidized Bed Combustion) 플랜트에 비해 낮은 것으로 나타났다. 또한, GE 7H와 고온정제를 채용한 시스템 Case 3의 경우 발전원가는 39.65원/KWh로써 PC(Pulverized Coal) 플랜트에 비해 낮게 나타났다.

Table 6 Levelized Cost of Electricity

Item\Case	Case 1	Case 2	Case 3
LCOE(₩/kWh)	46.11	42.09	39.65

Table 7 Cost Comparison

Item/Plant type	PC	PFBC	IGCC (저온정제+GE7FA)
LCOE(₩/kWh)	40.85	46.06	47.44

* 한국전력기술(주) 자료(2001. 5)[8]

3. 결 론

고온정제를 채용하는 IGCC 시스템에 있어서 가스터빈의 발달 수준에 따라 3가지 타입의 가스터빈을 적용한 세가지 경우의 시스템을 고려하고 각 시스템들에 대해 성능과 경제성을 분석하였다. 그 결과 출력 및 효율이 높은 가스터빈을 채용하면 가스터빈의 출력상승과 더불어 증기터빈의 출력도 상승하여 순 출력이 증대하며 시스템 효율도 가스터빈 성능이 가장 좋은 Case 3의 경우 47.76%로 가장 높게 나타났다. 시스템별로 투자비를 산출한 결과, 시스템 출력이 증대함에 따라 KW 당 총투자비(Total Plant Cost)는 감소하는 것을 알 수 있었다. 발전원가는 출력 및 효율이 상대적으로 높을수록 낮게 나타났으며 Case 2의 경우 발전원가는 42.09원/KWh이며 PFBC 플랜트에 비해 낮았다. GE 7H 가스터빈을 채용한 Case 3의 경우 발전원가는 39.65원/KWh 로써 PC 플랜트에 비해 낮은 것으로 나타나 차세대 IGCC 플랜트가 성능과 경제성에서 타 발전방식에 비해 경쟁력이 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. EPRI, www.gasification.org
2. Johnson, Mark Scott "The effects of gas turbine characteristics on integrated gasification combined-cycle power plant performance", Ph.D. thesis, 1990
3. 서석빈 등 "2 Case IGCC 시스템 연구", 에너지공학회 추계학술논문, 2000. 11
4. 전력연구원 "300MW급 IGCC 예비기본설계", Technical Report, pp. 73, 1999. 12
5. U.S. National Energy Technology Lab. "Texaco Gasifier IGCC Base Cases", 2000. 6
6. U.S. Department of Energy "Market-Based Advanced Coal Power Systems"
7. John D. Constance "Cost Estimating by use of Six-Tenths Factor", 1973. 9
8. 한국전력기술(주) "청정석탄발전 도입타당성조사 보고서", 2001. 5

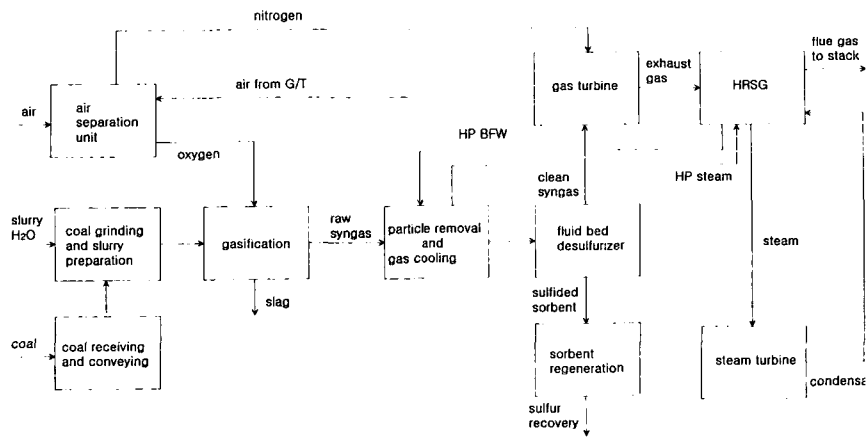


Fig. 1 Process Block Diagram