한국에너지공학회 (1998년도)
춘계학술발표회 논문집 pp.9-14

IGCC PDU 플랜트의 정적모사를 통한 성능평가

이승종, 이진욱, 윤용승
고등기술연구원 에너지/환경연구실 및 아주대학교 시스템공학과

Performance Evaluation of the IGCC PDU System by Static Process Simulation

Seung-Jong Lee, Jin-Wook Lee, and Yongseung Yun
Institute for Advanced Engineering and
Dept. of Systems Engineering, Ajou University

1. 서 론

석탄가스화 복합발전시스템(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)은 기존의 미분탄 연소 발전 방식에 비해 발전효율이 5-10%이상 높고, 공해물질 배출 특성에 있어서도 SOx와 NOx를 각각 95% 및 75% 이상 감소시키고 재는 용융 슬랙 형태로 처리하는 발전시스템이다. 이와 같은 고효율 및 환경 친화적인 특성으로 인하여 IGCC 시스템은 차세대 석탄화력 발전 방식으로서 각광받고 있으며, 이미 선진 공업국들은 70년대 석유파동 이후 IGCC 기술의 개발을 활발히 진행하여, 최근에는 250MW 이상 출력의 상용화급 플랜트를 가동 또는 건설 중에 있으며[1,2], 머지않아 상업화에 도달할 전망이다. 또한 국내에서도 최근 전력수요의 급증과 전세계적으로 확산되고 있는 환경 규제의 강화 등으로 우리의 실정에 맞는 IGCC 공정의 개발이 활발히 진행되고 있다.

IGCC 시스템은 석탄을 산화제 및 증기와 반응시켜 가연성 가스를 생성하는 석탄가스화공정, 생성된 가스내에 함유된 불순물(주로 산성가스)을 정제하는 가스정제공정, 정제된 저발열량의 가스를 연소 및 팽창시켜 1차 발전에 이용하는 가스터빈 공정과 연소가스의 폐열을 이용하여 2차로 발전시키는 증기터빈공정으로 구성된 복합적 개념의 발전시스템이다. 이들 공정 이외에 산소를 산화제로 이용하는 공정일 경우에는 공기분리공정이 추가된다. 따라서 IGCC 시스템의 실용화개발을 위해서는 앞서 언급한 공정들에 대한 연구/개발이 우선되어야 하고, 최종적으로 이러한 시스템들을 효율적으로 연계 및 종합하는 일이 필요하며, 특징적 공정 흐름에 대한 분석기술을 확보하는 것이 필수적이라고 할 수 있다. 이러한 공정분석 기술의 확보를 위하여, 현재 다수의 선진국 연구기관들과 전문업체들은 IGCC의 특징적인 공정 흐름에 대한 공정개발시설(Process Development Unit, PDU)을 시운전 중에 있으며, 이를 통해 IGCC 발전소 상용화를 위한 공정자료들을 수집하고 있다. 국내에서도 전력연구원, 고등기술연구원 및 에너지기술연구소를 중심으로 IGCC 발전시스템 개발을 위한 기초연구가 진행중에 있으며,

현재 고등기술연구원에서는 석탄가스화기 개발의 일환으로 BSU(Bench Scale Unit)급 플랜트를 운전하고 있다. 따라서 현재 운전중인 BSU보다 규모가 큰 PDU 플랜트에 대한 시스템을 구성하고 이에 따른 공정 평가/분석 연구를 통해 PDU 공정 및 계통에 대한 특성을 파악하고자 한다.

2. PDU 시스템 구성

석탄가스화공정으로서는 대용량화가 가능하여 발전용에 적합한 산소공급형 분류층 가스화기를 선택하였는데, 국내에서 1992년부터 연구가 진행된 IGCC BSU 시스템[3]으로 부터의 자료를 최대한 반영하여 모사하였다. 가스화기에서 생성된 고온의 생성가스(raw gas)는 열교환기를 통과하면서 냉각되고, 이 과정을 통하여 산업용에 활용가능한 증기를 생산하도록 시스템을 구성하였다. 실증플랜트(demonstration plant)에서는 열교환기에서 생성된 고온/고압의 증기는 증기터빈으로 유입되어 전력생산에 사용된다. 본 연구에서는 생성가스 냉각시 7bar/165℃의 포화증기를 생성하는 시스템을 채택하였다. 열교환기를 통과한 생성가스는 사이클론에서 분진이 제거되고 물 분사에 의해 암모니아 가스가 제거된 후 가스정화공정으로 유입되도록 구성하였다.

선택된 가스정화공정은 현재 상업화가 가능한 저온탈황공정 중의 하나인 Sulfinol/Claus/SCOT 공정이다. 생성가스에 포함된 산성가스(황화수소, 황화카르보닐 등)는 Sulfinol 공정에서 제거되고 산성가스를 포함한 용매는 재생기로 유입되어 산성가스를 분리시키고 분리된 산성가스는 Claus 공정으로 유입된다. Claus 공정에서는 일련의 산화, 환원 반응을 거쳐 원소 형태의 황을 생성한다. Claus 공정에서 반응되지 않고 남아 있는 산성가스는 SCOT 공정에서 미량의 정제된 가스와 혼합된 후 촉매 반응에 의해 가수분해되어 황화수소를 생성한다. 생성된 황화수소는 다시 Claus 공정으로 재순환되도록 구성하였다. 가스정화공정에서 분진 및 산성가스가 제거된 석탄연료가스(이하 석탄가스, 영문일 경우 fuel gas)는 가스터빈 시스템에서 연소 및 팽창과정을 거쳐 전력생산에 이용된다.

공기분리공정의 IGCC 시스템 연계 방법으로는 공기분리공정에서 필요한 공기 소요량을 가스터빈에서 일부 공급받는 부분연계(partial integration) 방법, 필요량 전부를 공급받는 완전연계(full integration) 방법 및 공기 소요량을 가스터빈에서 공급받지 않고 전량 대기에서 공급받아 가스화공정에 산소 및 질소를 공급하는 비연계(non-integration) 방법으로 구분된다[4,5]. 본 연구에서는 비연계 방법의 공기분리공정을 채택하여 공정해석을 실시하였다.

상기와 같이 구성된 PDU 시스템의 공정해석을 위하여 고체 반응물을 포함한 시스템의 공정해석에 효과적인 ASPEN 코드를 사용하였다. 우선 100톤/일급 처리용량의 PDU 시스템에서 4가지의 석탄을 가스화시키는 경우에 대한 공정해석을 실시하여 생성가스의 조성, 플랜트 출력 및 효율 등의 성능특성을 분석하였다. 또한 상업용 IGCC 시스템에서는 가스터빈의 출력을 기준으로 석탄처리용량이 결정되는 점을 고려하여, 선택된 가스터빈의 설계점 입열량(thermal input)을

만족시킬 수 있는 석탄가스의 양을 입력으로 한 전산해석을 실시하여 PDU 시스템의 성능분석을 하였다. 이와 같은 공정해석 결과들은 PDU 시스템의 적정단위 선정 등의 기본설계에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이며, 나아가 축적된 공정해석 경험은 상용화 IGCC 시스템의 성능을 정확하게 비교분석할 수 있는 토대가 될 것으로 판단된다.

3. PDU 시스템 공정 평가 및 분석

채택한 가스화기는 산소공급형 가압분류층 건식 가스화기이고, 가스화기의 석탄처리용량은 100톤/일(ton/day)급이며, 대상탄으로서 역청탄인 Datong탄 및 Illinois No. 6탄, 아역청탄인 Usibelli탄과 Buckskin탄을 채택하여 공정해석을 실시하였다. 전산모사에 사용된 역청탄 및 아역청탄에 대한 공업분석 및 원소분석 자료는 표 1에 나타내었다.

표 1. 대상탄의 분석자료

분석항목	Bituminous coal		Subbituminous coal	
	Illinois No.6	Datong	Usibelli	Buckskin
공업분석(as-received, wt%)				
Moisture	12.00	11.44	24.03	25.00
Fixed carbon	44.02	53.81	29.25	33.95
Volatile	35.18	25.93	37.42	34.19
Ash	8.80	8.82	8.60	6.86
원소분석(dry basis, wt%)				
Carbon	69.57	71.83	62.70	67.32
Hydrogen	5.31	3.87	4.83	4.78
Nitrogen	1.26	0.87	0.72	1.17
Sulfur	3.87	1.22	0.45	1.24
Oxygen	9.99	12.25	19.98	16.35
Ash	10.00	9.96	11.32	9.14

가스화기로 유입되는 각 대상탄에 대한 질소/석탄 및 증기/석탄의 무게비는 일정하게 설정하였고, 가스화기의 운전압력은 모든 경우에 대하여 27 bar로 고정하였다. 이러한 기준조건하에서 각 석탄에 대하여 산소/석탄의 무게비를 변화시켜 가스화기의 운전온도가 1430℃가 되는 조건을 산소유입량의 기준조건으로 설정하였다. 가스화기로 유입되는 산소, 질소 및 증기에 대한 소요량을 표 2에 나타내었는데, 석탄내 산소 함유량이 낮고 탄소의 함유량이 높은 역청탄이 아역청탄에 비해 산소의 요구량이 비교적 큰 것을 알 수 있었으며, 100톤/일급 PDU의 산소 소요량은 석탄의 종류에 따라 약간의 차이는 있으나 하루 약 80톤 정도인 것으로 나타났다.

표 2. 가스화공정에서의 석탄 및 utility 소요량

유량(톤/일)	Illinois No.6	Datong	Usibelli	Buckskin
석 탄(as-received)	111.36	110.66	129.00	130.67
석 탄(2% dry)	100.00	100.00	100.00	100.00
산화제(95% O_2)	80.30	82.72	77.32	79.88
질 소	7.34	7.34	7.34	7.34
증 기	4.55	4.55	4.55	4.55

가스화 반응에 의해 생성되는 생성가스는 열교환기에서 냉각된 후 사이클론과 세정기를 거친 후 가스정화공정으로 유입되어 산성가스가 제거된다. 가스정화공정을 거친 석탄가스는 예열된 후 가스터빈으로 유입된다. 표3에 가스터빈으로 공급되는 석탄가스의 유량 및 조성을 나타내었다. 표 3으로부터 가스량이 적을수록 재가열되는 석탄가스의 온도는 높아지는 것으로 나타났다. 또한 4가지 탄종 모두 수소는 25-30% 범위, 일산화탄소는 62-69% 범위의 조성을 가지는 것을 알

표 3. 석탄가스의 조성 및 유량

석탄가스 조성(vol %)	Illinois No.6	Datong	Usibelli	Buckskin
H_2	30.80	25.12	27.53	28.03
CO	63.33	68.68	61.45	63.61
CO_2	0.42	0.84	5.42	2.91
CH_4	0.38	0.13	0.02	0.04
H_2O	0.19	0.21	0.21	0.21
N_2	3.85	3.90	4.21	4.10
AR	1.03	1.12	1.16	1.10
온도(℃)	339.18	336.52	355.27	345.67
석탄가스 유량(톤/일)	177.26	181.97	165.43	174.67
LHV* (kJ/kg)	12824.2	11858.2	11083.6	11190.9

* LHV(at 25℃) + sensible heat

수 있다. 저위발열량은 Illinois No. 6, Datong, Buckskin, Alaskan Usibelli의 순으로서 천연가스 저위발열량(47450.4 kJ/kg)의 약 1/4 수준이며, 4가지 석탄가스 모두 온도가 340-350℃ 가량으로서 비교적 높은 현열(sensible energy)을 보유하고 있는 상태이다.

공기분리공정에서 필요한 공기량은 가스화공정에서 요구되는 산소량을 기준으로 전산해석에 반영하였으며, 표 4에 공기분리공정에서 소요되는 공기량과 산소 및 질소의 생성량을 나타내었다.

표 4. 공기분리공정의 성능 특성

유량(톤/일)	Illinois No.6	Datong	Usibelli	Buckskin
공기소요량	359.47	370.28	346.13	357.56
O_2(95.00%) 생성량	82.18	84.65	79.13	81.74
N_2(99.99%) 생성량	22.44	23.11	21.60	22.32
N_2(97.86%) 생성량	252.54	260.13	243.17	251.20

석탄 소모량이 하루에 100톤인 PDU 플랜트에서 생산되는 4가지의 석탄가스(표 3. 참조)를 연소시키기 위해, 이의 입열량에 상응할 수 있는 10MW급 또는 그보다 약간 상회하는 가스터빈 모델로서 GE사의 LM1600PA를 선정하여 전산해석을 하였다.

이상에서 하루 100톤의 석탄처리용량을 기준으로 한 PDU 플랜트의 성능특성을 고찰하여 보았다. 그러나 실증플랜트에서는 가스터빈의 입열량을 기준으로 가스화기의 석탄처리용량이 결정된다는 점이 고려되어야 하며, 이 경우 가스터빈의 입열량에 맞도록 석탄가스의 유량을 조절하여야 한다. 따라서 이와 같은 사항을 고려하여 가스터빈의 설계점 입열량을 맞추는 전산해석을 수행하였고, 이때 가스화기에서 소요되는 석탄의 양과 생성되는 석탄가스 유량을 그림 1에 나타내었다. 가스터빈의 입열량에 맞추기 위한 PDU 플랜트의 석탄처리용량은 약 150-180톤/일이고, 이와 비례하여 포화증기의 생성량도 증가하는 것을 알 수 있다.

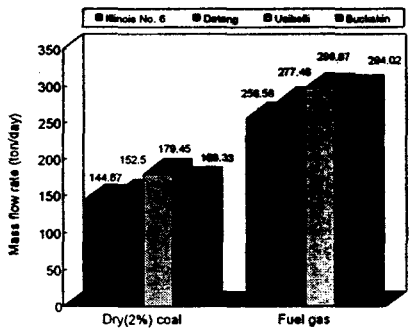

그림 1. 가스터빈의 설계점 입열량 기준시 탄종별 석탄 소요량 및 석탄가스 생성량.

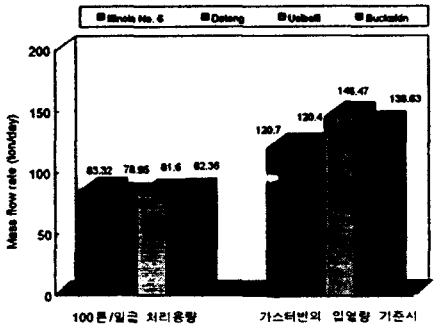

그림 2. 생성가스 냉각시 탄종별 증기 생성량.

가스화기에서 생성된 고온의 생성가스를 냉각할 때 생성되는 포화증기량을 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 결과로부터 생성가스 냉각시 생성되는 포화증기는 100톤/일급 PDU 플랜트에서는 하루 약 80톤인 것으로 나타났고, 가스터빈의 입열량을 기준으로 하였을 경우에는 120-160톤/일로 나타났다. 상업용 발전플랜트에서는 생성가스 냉각시 저온/저압의 포화증기 대신에 고온/고압의 과열증기를 생산하여 증기터빈 사이클을 구동하여 전력을 생산하게 된다.

표 5. 100톤/일급 가스화기 용량 기준시 IGCC PDU 플랜트의 성능

IGCC PDU system description				
Gasifier type	Oxygen-blown entrained-bed			
Gas cleanup process	Sulfinol/Claus/SCOT			
Gas turbine model	GE-LM1600PA			
Coals	Illinois No.6	Datong	Usibelli	Buckskin
Coal feed(2% dry, ton/day)	100.00	100.00	100.00	100.00
Oxidant feed(ton/day)	80.30	82.72	77.32	79.88
Energy input(HHV, MW)	33.85	31.59	27.98	30.50
Gas turbine power output(MW)	8.56	7.90	6.15	6.82
Internal power consumption(MW)	2.04	2.10	2.05	2.07
Net power generation(MW)	6.52	5.80	4.10	4.75
Plant efficiency (GT only, %)	19.26	18.36	14.65	15.57

최종적으로 PDU급 IGCC 플랜트의 성능특성을 고찰하기 위하여 표 5에 100톤/일급 PDU 플랜트에 대한 성능을 나타내었으며, 표 6에 가스터빈의 입열량 기준시의 PDU 플랜트에 대한 성능을 나타내었다. 100톤/일 석탄처리 용량 기준시 4-6.5MW과 14.5-19%의 플랜트 순출력(net power)과 효율을 나타내었고, 가스터빈의 입열량 기준시 10-11MW와 19.5-22%의 순출력 및 효율을 각각 나타내었다. 표 5의 경우에는 선정된 가스터빈에서 필요한 입열량보다 30-50% 적은 입열량이 공급되어 플랜트의 순출력과 효율이 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 증기터빈공정을 배제하고 가스터빈공정 만을 도입하여 전산해석하였기 때문에 증기터빈에서 2차 발전시켜 전력을 생산하는 실증플랜트에 비해 플랜트 효율이 현저히 떨어지는 것으로 나타났다.

반면에 표 6은 가스터빈의 입열량에 맞추어 석탄가스의 입열량을 조절하였기 때문에 표 5의 결과에 비해 플랜트 효율이 높게 나타났다. 그러나 표 5와 마찬가지로, 가스터빈 만을 도입하였기 때문에 표 6에서도 PDU 플랜트 효율이 실증플랜트의 효율보다는 비교적 낮은 것으로 나타났다. 상기의 원인 이외에 실증플랜트에서는 공기분리공정과 가스터빈과의 부분(또는 완전)연계를 통하여 플랜트 효율을 향상시키고 있지만, 본 연구에서는 비연계 방법의 공기분리공정을 도입하여 전산해석을 수행하였기 때문에 플랜트 효율이 저하되는 결과를 보여주었다. 따라서 향 후 실제 PDU 플랜트를 건설할 경우에는 제반 조건들을 신중히 검토하여 PDU 플랜트의 알맞은 공정선택 및 가스터빈의 선정 등이 필요할

표 6. 가스터빈의 설계점 입열량 기준시 IGCC PDU 플랜트의 성능

IGCC PDU system description				
Gasifier type	Oxygen-blown entrained-bed			
Gas cleanup process	Sulfinol/Claus/SCOT			
Gas turbine model	GE-LM1600PA			
Coals	Illinois No.6	Datong	Usibelli	Buckskin
Coal feed(2% dry, ton/day)	144.87	152.50	179.45	168.33
Oxidant feed(ton/day)	116.33	126.14	138.75	134.45
Energy input(HHV, MW)	49.04	48.17	50.22	51.34
Gas turbine power output(MW)	13.72	13.71	13.74	13.50
Internal power consumption(MW)	2.96	3.20	3.65	3.48
Net power generation(MW)	10.76	10.51	10.09	10.02
Plant efficiency(GT only, %)	21.94	21.82	20.09	19.52

것으로 판단되며, 이러한 경우 본 연구와 같은 공정해석 기술이 개념설계 단계에서 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

100톤/일급 IGCC PDU 플랜트에 대한 시스템구성 및 공정해석을 수행하여 플랜트 성능을 예측하였다. 가스화기의 석탄처리용량이 100톤/일급인 PDU 플랜트에서의 산소 소요량은 하루 약 80톤으로 나타났고, 플랜트의 순출력과 효율은 4-6.5MW 및 14.5-19%로 관찰되었다.

가스터빈의 설계점 입열량을 기준으로 전산해석한 경우에는 가스화기에서 석탄처리량은 탄종 및 가스터빈의 종류에 따라 100톤/일급 PDU 시스템보다 1.5-1.8배 증가하는 것으로 나타났다. 플랜트의 순출력과 효율도 10-11MW 및 19.5-22%로 증가하는 것으로 나타났으나, 증기터빈시스템을 배제하고 비연계 방법의 공기분리공정을 적용하는 등의 원인으로 인하여, 상업용 IGCC 플랜트에 비하여 상당히 낮은 것으로 나타났다.

향 후에는 공기분리공정과 가스터빈 공정과의 연계 방법으로서 부분연계 또는 완전연계 방법 등을 적용한 공정에 대한 공정해석 연구를 수행할 예정이며, 이러한 해석결과들을 바탕으로 하여 플랜트의 출력, 효율 및 경제성 등이 종합적으로 고려된 IGCC PDU 플랜트 공정을 제안할 수 있는 연구를 수행할 예정이다.

감 사

본 연구는 산업자원부산하 에너지자원기술개발지원센터에서 지원하고, 전력연구원이 주관하는 '석탄가스화 복합발전 기반기술개발' 과제의 일환으로 수행되었읍니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. G.D. Zon, "Integrated Coal Gasification Combined Cycle Demonstration Project Buggenum", EPRI conference(1995).
2. J. Motter, "Advanced Coal-Fired Power Generation Systems", EPRI conference(1995).
3. 통상산업부, "Bench Scale급 건식석탄가스화기 운전 및 모사기술개발(I)", 951E104-252FG1 (1996).
4. A. Smith, E. Alsandor, E. Doering and P. Unger, "Improved IGCC Power Output and Economics Incorporating a Supplementary Gas Turbine", EPRI Conference(1994).
5. 전력연구원, "석탄가스화 복합발전 기술개발 (I): IGCC 예비 타당성 검토 및 기술규격서 작성"(1996).