

## IGCC용 PDU급 가스터빈의 성능 및 NO<sub>x</sub>배출 특성에 관한 예비평가

김용철, 이찬, 이한구\*, 윤용승\*

수원대학교 기계공학과, 고등기술연구원 전력에너지 연구실\*

### Preliminary Estimates on the Performance and the NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of the Gas Turbine of IGCC PDU

Yong Chul Kim, Chan Lee, Han Goo Lee\* and Yongseung Yun\*

Dept. of Mechanical Eng. Univ. of Suwon

Electric Power System Lab. Inst. for Advanced Engineering.\*

#### 요 약

상용 IGCC발전소의 특징적 공정흐름에 대한 분석기술의 확보를 위해 PDU급 IGCC발전계통에 대한 성능평가와 NO<sub>x</sub> 배출에 대한 모델링을 수행하였다. 향후 IGCC발전소 건설시 선정가능성이 있는 4가지 가스화 공정에서 생산되는 석탄가스를 연료로 하고, 그 발전계통의 대상 가스터빈은 산업현장에서 사용되고 있는 GE사의 LM1600PA를 선정하였다. 석탄가스는 천연가스에 비해 가스터빈의 효율과 출력 상승을 가져오나, 이와 동시에 압축기 탈설계점 작동문제를 야기시킬 수 있다. 또한 NO<sub>x</sub> 발생량은 석탄가스 연소시 급격히 증가하며, NO<sub>x</sub> 제어를 위해 질소분사가 이루어져야 함을 알 수 있었다.

#### 1. 서론

최근 들어 차세대 화력발전 시스템으로 각광받고 있는 석탄가스화 복합발전(IGCC : Integrated Gasification Combined Cycle)은 석탄의 가스화 공정을 복합발전용 가스터빈시스템과 연계하여 낮은 연료가격과 발전단가로 고효율의 성능과 우수한 환경성을 구현할 수 있다는 장점을 가진다. 2000년대 초부터 가시화될 IGCC발전소의 시장수요를 일찌감치 예측했던 기술선진국들은 이미 80년대부터 IGCC연구/개발에 많은 노력을 기울여 왔으며, 지금은 전세계적으로 다수의 IGCC실증플랜트들이 운전 또는 건설중에 있으며 이를 통해 IGCC상용화를 위한 마무리 작업에 박차가 가해지고 있다. 상용화 이전에 IGCC발전소의 특징적 공정흐름에 대한 분석기술은 주로 PDU(Process Development Unit)급 설비를 통해 이루어지고 있으며, PDU급 공정평가/분석 연구를 통해 상용 IGCC공정 및 계통설계에 필요한 구체적인 단위 공정의 분석결과를 제시하게 된다.

그러므로 본 연구는 향후 건설될 IGCC발전소에 채택 가능한 4가지 가스화 공정으로부터 생산되는 석탄가스 연료를 태워볼 수 있도록, PDU급 IGCC발전계통을 설계하였고, Gate/Cycle Code를 이용하여 이에 대한 공정분석을 이론적으로 수행하였다. 본 연구에서 고려한 PDU급 발전계통의 대상 가스터빈은 실제 산업적으로 사용되고 있는 LM1600PA모델을 이용하였고, 4가지 연료가스의 유입조

건에 따라 PDU급 가스터빈이 어떠한 운전조건과 성능특성을 가지는지를 검토하였으며, 또한 NO<sub>x</sub> 모델링을 통하여 NO<sub>x</sub> 배출 특성도 규명하였다.

## 2. 성능평가 및 분석

본 연구에서 고려된 PDU급 IGCC발전계통의 흐름은 대기상태(15℃, 1 bar)의 공기가 압축기에 유입되어 압축된 후, 연소실에서 석탄가스와 반응하여 연소된 연소가스가 터빈에서 팽창되며, 터빈 냉각공기는 압축기로부터 추출되는 단순 가스터빈 시스템으로 고려하였다. 이러한 가스터빈 시스템에 대한 해석 모델은 상용코드인 Gate/Cycle을 이용하여 구성하였다.

### 2.1. 석탄가스 연료의 조건

본 연구에서는 Destec, Prenflo, Shell, Texaco의 석탄 가스화 공정에 의해 생산된 4가지 석탄가스를 고려하였다. <표 1>은 각 석탄가스 연료의 연소기 유입조건을 보여주고 있다.[1]

<표 1>에서 보는 바와 같이, 4가지 석탄가스의 조성을 살펴보면 대체적으로 수소는 29~32% 범위의 조성을 가지나 Destec의 경우는 가장 낮은 17.96%의 수소를 함유하고 있다. 일산화탄소의 경우 Destec과 Texaco는 42~48% 범위의 조성을 가지는 반면, Prenflo와 Shell은 62~65%의 조성비를 나타낸다. 이중 가장 많은 황성분을 함유하고 있는 것은 Destec이며 CH<sub>4</sub>의 비율 또한 가장 높다. H<sub>2</sub>/CO비율은 Texaco의 경우가 두드러지게 높음을 알 수 있다. LHV는 가연성기체 성분이 많은 Shell, Prenflo, Texaco, Destec의 순이며, 4가지 석탄가스 모두 287~344℃ 사이의 대체로 높은 현열(sensible heat)을 보유하고 있는 상태이다.

<표 1> 석탄가스 연료의 유입조건

연료가스조성 (mole%)	Destec	Prenflo	Shell	Texaco
CO	42.98	62.76	64.57	47.76
H <sub>2</sub>	17.96	29.28	29.33	31.70
CO <sub>2</sub>	3.04	1.66	0.71	10.48
H <sub>2</sub> O	29.30	0.22	0.14	8.32
CH <sub>4</sub>	4.74	0.01	0.04	0.05
Ar	0.42	0.71	0.72	0.74
N <sub>2</sub>	1.56	5.36	4.49	0.95
H <sub>2</sub> S	1.4E-3	1.7E-3	1.0E-3	-
COS	2.1E-3	-	-	1.7E-3
연료가스 유량 (kg/s)	3.9913	3.1777	3.0803	3.7923
연료가스 온도 (℃)	343.3	300.0	287.8	343.3
LHV (kJ/kg)	9969.0	11994.5	12358.4	10255.2
H <sub>2</sub> /CO	0.418	0.467	0.454	0.664

## 2.2. PDU급 가스터빈의 선정

앞서 언급한 4가지 석탄가스를 태우기 위해, PDU급에 합당한 약 10MW급 가스터빈 모델을 고려했다. 본 연구에서는 GE사의 LM1600PA를 선정하였다.[2,3] 이 가스터빈은 소형 산업용 가스터빈으로 실제 산업현장에서 사용되고 있는 모델이며, 연료로는 주로 천연가스를 사용하나 경우에 따라서는 석유계통의 액체연료도 태울 수 있다. 또한 LM1600PA는 용량 및 출력에 비해 압축비가 높고 TIT(터빈입구온도)가 높은 관계로, PDU급 가스터빈 공정분석을 통해 대용량의 상용 IGCC 가스터빈의 특성을 유추해 내는데 좋은 조건을 가지고 있다.

## 2.3. PDU급 가스터빈의 공정분석결과

선정된 가스터빈에 대하여 우선적으로 천연가스를 태웠을 때의 가스터빈의 성능을 예측하였다. 그리고 그 다음 단계로 4가지 석탄가스를 가스터빈에서 태웠을 때의 각 석탄가스에 따른 가스터빈 성능예측 결과를 천연가스 결과와 비교하면서 PDU급 IGCC발전계통 설계를 위해 합당한 석탄가스 연료와 가스터빈 성능 간의 상호관계를 규명하였다. 그리고 이때 석탄가스의 연소과정 중 투입되는 석탄가스의 유량은 Gate/ Cycle Code를 이용하여 천연가스 연소시와 같은 TIT를 내도록 조절하였다.

### 2.3-1. 성능 특성

#### 가. 천연가스 연소의 경우

<표 2>과 <표 3>에서 보여지듯이, LM1600PA는 상당히 큰 압축비와 높은 TIT를 가지고 있으며 반면에, 압축기입구 유량은 비교적 적게 유지되고 있다. 즉 LM1600PA가 항공기용 엔진으로부터 파생된 형태(aero-derivative type)이므로, 일반적인 소형 가스터빈에 비해 압축비와 TIT가 비교적 높다. 그리고, 이러한 고온/고압의 가스터빈 설계개념으로 인해, LM1600PA가 출력은 일반적인 소형 가스터빈과 비슷하나, 사이클 효율은 비교적 매우 우수함을 볼 수 있다.

<표 2> 천연가스 연소시 가스터빈의 성능특성

Model	LM1600PA
TIT(°C)	1205
Pressure Ratio	22.3
Exhaust Mass Flow Rate (kg/s)	45.4
Net Power (MW)	13.5
Cycle Efficiency (%)	35.42

<표 3> 천연가스 연소시 가스터빈의 운전조건

Model	LM1600PA
* Compressor	
Inlet Flow Rate (kg/s)	44.6
Maximum Efficiency	0.89
Pressure Ratio	22.34
* Combustor	
Efficiency	0.998
Pressure Drop (fract)	0.035
Fuel Flow Rate (kg/s)	0.8026
* Turbine	
Efficiency	0.905
Inlet Area (cm <sup>2</sup> )	185.6
Inlet Temp (°C)	1205
Expansion Ratio	21.55
Cooling Flow (m <sub>cool</sub> /m <sub>air</sub> )	0.095

나. 석탄가스 연소의 경우

<표 4> 각 연료별 LHV, 연료소모량 및 Thermal Input

	Destec	Prenflo	Shell	Texaco	NG
LHV (kJ/kg)	9969.037	11994.54	12358.36	10225.15	47450.4
Fuel Flow Rate (kg/s)	3.9913	3.1777	3.0803	3.7923	0.8026
Thermal Input (kW)	39789.4	38115.0	38067.5	38776.8	38083.7

<표 4>에서 보여지듯이 4가지 석탄가스의 유량이 천연가스의 유량에 비해 약 4~5배 가량 상회하고 있다. 이러한 결과는 TIT를 일정하게 유지하기 위해서는 천연가스에 비해 좀더 많은 석탄가스가 소모되어야 하기 때문이다.

<표 5>은 각각의 가스화 공정에서 생성된 석탄가스를 연소하였을 때 성능 특성을 나타내고 있다. 이때 압축기로 들어가는 공기의 유량은 천연가스의 경우와 동일하게 유지시키고, 공기 입구조건도 15°C와 1.0135bar로 동일하게 설정하였다. 표에서 보여지듯이, 석탄가스의 LHV가 천연가스에 비해 낮은 관계로, 동일한 TIT를 유지하기 위해 천연가스 연료에 비하여 약 4~5배의 석탄가스연료 유량의 유입을 볼 수 있다. 이러한 유량의 증가로 인해 약간의 압축비 상승과 출력의 상승을 가져왔으며 효율의 증가도 야기되었다. 4가지 석탄가스 중에서는 연료의 LHV가 가장 낮았던 Destec공정의 석탄가스가 가장 좋은 효율을 보여주었고, LHV가 가장 높았던 Shell공정의 석탄가스가 가장 나쁜 효율을 보여주었다. 이러한 결과는 압축비의 증가에 따른 압축기 소요동력의 증가에 비해 유량의 증

가에 의한 터빈출력의 향상이 더욱 커 효율이 상승된 것으로 판단된다.

압축비 예측결과로부터, LHV가 가장 낮아 석탄가스의 유입량이 가장 많았던 Destec의 경우 가스터빈 압축기 운전조건이 설계점 압축비 조건(천연가스의 경우)에서 가장 떨어져 있음을 알 수 있으며, 이러한 결과는 터빈의 질식조건을 충족시키기 위한 현상이다. 즉, 이와 같이 설계점에서 벗어난 탈설계점 작동은 기존의 천연가스를 사용하던 가스터빈에 석탄가스를 연소시킬 때 일어나는 현상으로서 상용플랜트에서는 압축기의 불안정성(예:surge 또는 stall 현상)을 야기시킬 수 있는 요인이다. 이러한 탈설계점 문제는 좀더 정확한 압축기의 성능곡선 자료를 이용하여 운전범위의 안정성 여부를 검토하여 해결이 가능하다.[4]

<표 5> 석탄가스 연소시 LM1600PA의 성능특성

Model	Destec	Prenflo	Shell	Texaco	NG
TIT (°C)	1205	1205	1205	1205	1205
Pressure Ratio	23.97	23.28	23.23	23.70	22.34
Exit Mass Flow Rate (kg/s)	48.6	47.8	47.7	48.4	45.4
Net Power (MW)	15.6	14.3	14.2	15.0	13.5
Heat Rate (kJ/kWh)	9172.1	9592.7	9632.7	9333.3	10164.3
Efficiency (%)	39.25	37.53	37.37	38.57	35.42

### 2.3-2. NOx 배출특성

본 연구에서는 NOx 발생량 예측을 위해서 Lefebvre[5]가 다수의 가스터빈 엔진 시험결과로부터 도출한 다음과 같은 correlation을 사용하였다.

$$NO_x(g/kg) = 0.459E-8 P_{comb}^{0.25} F_{pr} \tau_{pr} \exp(T_{st}/100)$$

이때  $P_{comb}$ ,  $F_{pr}$ ,  $\tau_{pr}$  은 주 연소영역(primary combustion zone)에서의 압력(kPa), 유입 공기비, 체류시간을 나타내며,  $T_{st}$ 는 화학량론적 온도(stoichiometric temperature)를 의미한다. 그리고, 석탄가스 연소시의  $F_{pr}$  및  $\tau_{pr}$ 은 주 연소영역에서의 당량비가 1.1인 천연가스 연소의 경우[6]로부터 유추하였다.

<표 6>에서 보듯이 가연성 가스의 성분비가 가장 많아  $T_{st}$ 가 가장 높은 Shell공정에서 가장 많은 NOx 발생을 예측 할 수 있었으며, 이것은 석탄가스내의 가연성 가스성분의 함량비에 비례한다. 또한 각 공정별  $T_{st}$ 와 NOx 발생량을 보면,  $T_{st}$ 의 증가에 따라 NOx 발생량이 급격히 증가함을 알 수 있다. 그러므로,  $T_{st}$ 가 NOx 발생에 중요한 요인임을 알 수 있다. 이러한 석탄가스의  $T_{st}$ 가 비교적 천연가스에 비해 높은 이유로는 석탄가스연료가 가지는 높은 현열을 생각할 수 있다.

<표 6>에 나타난 NOx 발생량을 제한 값인 25ppm[3]이하로 줄이기 위해서는 ASU로부터 회수되는 차가운 질소(cold nitrogen)의 분사가 필수적이며, Destec, Texaco, Prenflo, Shell의 순으로 질소 분사 량이 증가 될 것으로 기대된다. 이때에도 질소 분사에 따른 유량증가로 인해 야기되는 압축기 탈설계점 작동 문제를 고려해야한다.

<표 6> NO<sub>x</sub>예측을 위한 변수와 NO<sub>x</sub>발생량

	DESTEC	PREFLO	SHELL	TEXACO	NG
P <sub>3</sub> (kPa)	24.29E+2	23.60E+2	23.54E+2	24.02E+2	22.64E+2
F <sub>pr</sub> (%)	24.20	21.85	21.80	22.59	31.19
τ <sub>pr</sub> (ms)	1.125	1.122	1.124	1.122	1.050
T <sub>st</sub> (K)	2580.1	2868.4	2885.95	2721.0	2619.0
NO <sub>x</sub> (g / kg)	1.4065	22.4683	26.7614	5.3432	2.4530
NO <sub>x</sub> (ppm : 15% O <sub>2</sub> )	122.2	1377.2	1582.1	412.2	48.9

### 3. 결론

앞서의 PDU급 가스터빈 성능분석결과와 NO<sub>x</sub> 모델링 결과로부터 다음과 같은 공정분석결과를 유추할 수 있다. 천연가스를 태우는 가스터빈과 동일한 TIT(터빈입구온도)를 유지하도록 각각의 석탄가스를 연소하였을 경우 출력 및 효율은 상승하는 반면, 터빈입구유량의 증가를 수반하며, 이는 곧 압축기의 지나친 압축비 증가로 불안정한 탈설계점 작동을 유발할 수도 있다. 그러므로, 석탄가스 연소시 가스터빈 압축기의 불안정성 여부는 압축기 성능곡선의 검토를 통해 해결해야 한다. 또한 NO<sub>x</sub> 발생량은 석탄가스 연소시 천연가스 연소에 비해 급격하게 증가함을 볼 수 있었고, 4가지 석탄가스 연소시 모두 질소분사를 통해 NO<sub>x</sub>의 제어가 이루어져야 함을 알 수 있다. 그러나 이러한 질소분사는 석탄가스 연소시 터빈입구유량의 증가를 일으켜 압축기의 탈설계점 작동에 대한 검토를 필요로 한다.

### 후기

본 연구는 고등기술연구원이 지원하는 “PDU급 IGCC발전계통 공정모사기술 개발 및 BSU급 가스화기 슬래그의 거동에 관한 연구” 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1]. 김종영외, “석탄가스화 복합발전 기술개발(I)”, TR. 92GJ11. 97. 26-1. 전력연구원
- [2]. Modern Power Systems ; Product Guide, May, 1993
- [3]. J. M. Thames and R. P. Coleman, “Preliminary Performance Estimates for a GE Steam Injected LM1600 Gas Turbine”, ASME 89-GT-97, 1989
- [4]. M. S. Johnson, “Prediction of Gas Turbine On- and Off-Design Performance When Firing Coal-Derived Syngas”, ASME J. of Eng. for Gas Turbines and Power, vol.114, pp.380~385, 1992
- [5]. N. K. Rizk and H. C. Mongia, “Semianalytical Correlations for NO<sub>x</sub>, CO, and UHC Emissions” J. of Eng. for Gas Turbines and Power, vol.115, pp.612~619, 1993
- [6]. F. Bozza R. Tuccillo and G. Fontana, “Performance and Emission Levels in Gas Turbine Plants” J. of Eng. for Gas Turbines and Power, vol.116, pp.53-62, 1994