

대기온도에 따른 300 MW 석탄가스화복합발전 성능특성

김영목*, 유호선**†

*한국서부발전(주), **† 숭실대학교 기계공학과

Performance Characteristics of the 300 MW Integrated Gasification Combined Cycle Plant according to Ambient Temperature

Young-Mook Kim*, Ho-Seon Yoo**†

* Korea Western Power Corp., Taeon 32140, Korea

**† Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

ABSTRACT : In this study, the output and thermal efficiency of Taeon Integrated Gasification Combined Cycle Plant were calculated by using the manufacturer's basic design data and the performance correction factor for each atmospheric temperature, and the actual performance was measured at summer and winter representative points. The results were compared with the calculated values to verify their validity. The thermal efficiency is the highest at around 15 °C and lower at lower temperature and higher temperature. This is similar to that of natural gas Combined Cycle Power Plant, but the thermal efficiency has drastically decreased due to the increase of power consumption of the air separation unit at relatively high temperature. The output is highest in the range of 5 to 15 °C, and is kept almost constant at below 5 °C and declines above 15 °C. The reason why the output does not increase at low temperatures is that the torque limit of the shaft is activated by the increase of the flow rate due to the nitrogen injection of the gas turbine combustor. In order to improve the performance in the future, efforts should be made to improve the power generation output and to reduce the power consumption of the air separation unit in summer.

초 록 : 본 연구에서는 태안석탄가스화복합발전을 대상으로 대기온도에 따른 출력 및 열효율 변화를 제작사의 기본설계자료와 대기온도별 성능보정계수를 이용하여 계산하였으며, 하계 및 동계 대표지점에서 실제 성능을 측정하고 그 결과를 계산값과 비교하여 타당성을 확인하였다. 열효율은 15 °C 부근에서 가장 높고 이보다 저온이나 고온에서는 낮아지는데 이는 천연가스복합발전과 유사하였으나, 상대적으로 고온구간에서는 공기분리장치의 소비동력증가로 열효율이 급격히 하락하였다. 또한 출력은 5~15 °C 구간에서 가장 높고 5°C 이하에서는 거의 일정하게 유지되며 15 °C 이상에서는 하락한다. 저온에서 출력이 증가하지 않는 이유는 가스터빈 연소기 질소주입에 따른 유량 증가로 축의 토크 제한이 작동하기 때문이다. 향후 성능향상을 위해서는 하계에 발전출력향상 및 공기분리장치 소비동력 저감 등의 노력이 필요하다.

Key words : Integrated Gasification Combined Cycle Plant(석탄가스화복합발전), Performance(성능), Ambient Temperature(대기온도), Thermal Efficiency(열효율), Power Output(출력)

- 기호설명 -

P_{gross} : 복합발전 출력 (MW)

P_{net} : 송전출력 (MW)

η_{th} : 열효율 (%)

T : 대기온도 (°C)

† Corresponding Author, hsy@ssu.ac.kr

1. 서론

자원이 적은 우리나라에서는 다양한 에너지원의 확보와 안정적인 전력생산방안이 필요하다. 그 중에서도 석탄은 전 세계적으로 널리 부존하고 아직도 매장량이 풍부하기 때문에 앞으로도 비중 있는 연료원으로 활용이 필요하나, 연소시 미세먼지, 황 및 질소산화물 등 다량의 환경오염물질 배출로 현재 퇴출위기에 처해 있다. 이에 대한 대안으로 세계 각국은 석탄을 깨끗하게 사용하는 청정석탄기술(CCT, Clean Coal Technologies)의 개발을 적극적으로 추진하였다. 국내에서도 세계 7번째로 충남 태안에 300 MW 석탄가스화복합발전(IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle)을 도입하여 2016년부터 상업운전을 시작하였다. 연구대상인 태안 석탄가스화복합발전소의 개략도^[1]는 Fig. 1-1과 같다. 석탄을 이용하여 합성가스를 생산하는 ① Shell사 가스화 설비와 합성가스를 연료로 사용하는 ② GE사 복합발전설비와 공기중 산소와 질소를 분리하는 ③ Air Products사 공기분리장치로 구성되어 있다. 복합발전의 가스터빈 설비는 GE 7F Syngas 모델로 기존 천연가스를 연료로 사용하는 7FB 가스터빈 모델에서 연소기만 개조하여, 발열량이 천연가스의 1/4 수준인 Syngas 연소에 최적화 되어있으며, 질소산화물 저감을 위해 약 200 ton/h 의 N₂를 고온(100 °C), 고압(30 bar)으로 주입할 수 있는 장치도 갖추어져 있다. 연구대상 발전소지역 연간 월 평균 대기온도는 최저 -6 °C에서 최고 30 °C이며, 천연가스복합발전이 대기온도에 따라 성능 특성이 변화하듯이,

석탄가스화복합발전도 대기온도에 따라 출력 및 효율 등 성능특성이 변화할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 제작사가 제시한 기본설계자료와 대기온도 성능보정계수를 이용하여 대기온도에 따른 출력 및 열효율 변화를 계산하였으며, 이렇게 계산된 출력 및 열효율을 실제 발전소 성능특성으로 사용이 가능한지, 신뢰성과 타당성을 확보하기 위해 실제 성능시험을 실시하여 측정결과와 비교하였다.

성능시험은 ASME-PTC 47 기준에 따라 연중 최저 최고 대기온도 범위 중 동계와 하계 대표지점에서 2회 성능시험을 실시하고 입열량, 발전 및 송전출력, 열효율을 측정하였다.

2. 본론

2.1 방법 및 기준

대기온도에 따른 석탄가스화 복합발전의 성능을 구하기 위하여 먼저 기본설계조건(ISO 표준대기조건)에서의 성능을 아래와 같이 계산하기로 한다.^[2]

IGCC 발전출력 P_{gross} 은 식(2-1) 와 같다.

$$P_{gross} = P_{gt} + P_{st} \quad (2-1)$$

여기서 P_{gt} 는 가스터빈 발전출력(MW), P_{st} 는 증기터빈

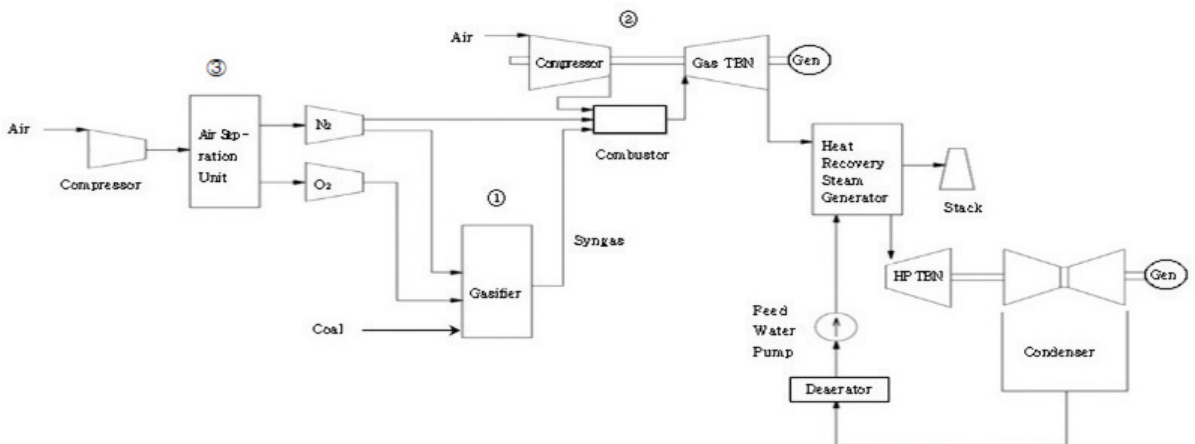


Fig. 1-1 Schematic diagram of Taean Integrated Gasification Combined Cycle Plant

대기온도에 따른 300 MW 석탄가스화복합발전 성능특성

발전출력(MW)를 각각 나타낸다.

IGCC 송전출력 P_{net} 은 식(2-2)와 같다.

$$P_{net} = P_{gross} - P_{aux} \quad (2-2)$$

여기서 P_{aux} IGCC 발전소내 보조기기소비동력(MW)을 나타낸다.

IGCC 열효율 η_{th} 은 식(2-3)와 같다.

$$\eta_{th} = P_{net} / Q_{input} \quad (2-3)$$

여기서 Q_{input} 는 IGCC에 공급되는 석탄의 입열량(GJ/h)을 나타낸다.

태안IGCC 제작사의 기본설계 조건에서의 설계값을 Table 2-1와 같다.

태안IGCC 가스터빈 입구기준 제작사 기본설계조건^[3]은 Table 2-1과 같다. 또한 성능관련 주요항목의 설계값^[3]은 Table 2-2와 같으며, 설계값을 성능계산 식 (2-1), (2-2), (2-3) 대입하면 기본설계조건에서의 IGCC 성능을 아래와

Table 2-1 Gas Turbine Inlet Design Condition

Description	Unit	Value
Ambient Temperature	℃	15.0
Atmospheric Pressure	bar	1.013
Relative Humidity	%	60.0
Syngas Flow	ton/h	195.2
N ₂ Flow	ton/h	200.1

Table 2-2 Taeon IGCC Specification Data

Description	Unit	Value
Coal Heat Input (Q_{input} , HHV)	GJ/h	2,534
Gas Turbine Generator Output(P_{gt})	MW	239.1
Steam Turbine Generator Output(P_{st})	MW	149.6
Auxiliaries Power Consumption(P_{aux})	MW	75.4

같이 구할 수 있다.

- 발전출력(P_{gross}) : 388.7 MW
- 송전출력(P_{net}) : 313.3 MW
- 열효율 (η_{th}) : 42.2 %

2.2 대기온도에 따른 성능보정

대기온도에 따른 성능(발전출력 및 열효율) 변화를 알아보기 위하여, 먼저 발전소 지역(충남 서산) 연중 월평균 대기온도가 최저 -6 ℃에서 최고 30 ℃로 확인됨에 따라 최저 최고온도 범위내에 일정한 분포의 5개 대표온도 지점(-6, 4, 15, 23, 30℃)에서 성능을 확인하기로 하며, 이를 위하여 제작사가 제시한 발전출력 보정계수 및 열효율 보정계수를 이용하여 아래와 같이 성능을 계산^[2]하기로 한다.

특정대기온도(X)에서의 보정발전출력($P_{gross,corr}$)은 식(2-4)와 같다.

$$P_{gross,corr} = P_{gross} \times Y_{p,temp} \quad (2-4)$$

여기서 $Y_{p,temp}$ 는 특정대기온도(X)에 대한 발전출력 보정계수로 식(2-5)은 대기온도 -18.7 ~ 8.5 ℃ 구간에서 사용가능한 수식^[4]의 예시이다.

$$Y_{p,temp} = 2.53 \times 10^{-8} \cdot X^3 + 3.15 \times 10^{-6} \cdot X^2 + 1.40 \times 10^{-4} \cdot X + 0.99 \quad (2-5)$$

특정 대기온도(X)에서의 보정송전출력($P_{net,corr}$)은 식(2-6)와 같다.

$$P_{net,corr} = P_{gross,corr} - P_{aux,corr} \quad (2-6)$$

여기서 $P_{aux,corr}$ 는 보정보조기기소비동력^[4]으로 특정대기온도(X)에서의 $P_{aux,corr}$ 은 식(2-7)와 같다.

$$P_{aux,corr} = 0.054 \cdot X + 74.73 \quad (2-7)$$

특정 대기온도(X)에서의 보정열효율($\eta_{th,corr}$)은 식(2-8)와 같다.

$$\eta_{th,corr} = \eta_{th} \times Y_{e,temp} \quad (2-8)$$

여기서 $Y_{e,temp}$ 는 대기온도 변화에 대한 열효율 보정계수^[6]로 식(2-9)은 대기온도 $-18.7 \sim 8.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 구간에서 사용 가능한 수식^[4]의 예시이다.

$$Y_{e,temp} = (6.34 \times 10^{-8} \cdot X^3 - 1.70 \times 10^{-8} \cdot X^2 - 6.29 \times 10^{-4} \cdot X + 1.01)^{-1} \quad (2-9)$$

특정대기온도에서의 보정발전출력($P_{gross,corr}$), 보정송전 출력($P_{net,corr}$), 보정열효율($\eta_{th,corr}$)을 식(2-4), (2-6), (2-8)을 이용하여 계산할 수 있으며, Table 2-3은 대기온도 4°C 기준의 보정성능 계산결과 예시이다.

Table 2-3 Corrected Performance at $4 \text{ }^\circ\text{C}$ Ambient Temperature

Description	Unit	Value
Power Gross Output	MW	389.1
Power Net Output	MW	314.1
Thermal Efficiency	%	42.1

대기온도이외에 대기압 및 상대습도 변화도 성능에 영향을 주는데 제작사의 대기압 및 상대습도 보정계수를 이용하여 대기온도 이외에 추가로 특정 대기압 및 상대습도에서의 성능변화를 계산할 수 있다. 식(2-10)은 특정 대기온도(X), 특정 대기압(Z) 및 상대습도(H)에서의 보정발전출력($P_{gross,corr}$)을 구하는 식으로 기본설계조건 발전출력(P_{gross})에 대기온도 출력보정계수($Y_{p,temp}$), 대기압 출력보정계수($Y_{p,pressure}$), 상대습도 출력보정계수($Y_{p,humidity}$)를 각각 곱하여 구할 수 있다.^[2]

$$P_{gross,corr} = P_{gross} \times Y_{p,temp} \times Y_{p,pressure} \times Y_{p,humidity} \quad (2-10)$$

또한 특정대기온도(X), 대기압(Z), 상대습도(H)에서의 보정열효율($\eta_{th,corr}$)도 식 (2-11)와 같이 기본설계조건 열효율(η_{th})에 대기온도 열효율보정계수($Y_{e,temp}$), 대기압 열효율보정계수($Y_{e,pressure}$), 상대습도 열효율보정계수($Y_{e,humidity}$)를 각각 곱하여 구할 수 있다.^[2]

$$\eta_{th,corr} = \eta_{th} \times Y_{e,temp} \times Y_{e,pressure} \times Y_{e,humidity} \quad (2-11)$$

2.3 성능계산의 타당성 검증

1) 타당성 검증방법

대기온도에 따른 성능치를 구하기 위하여 제작사의 대기온도 성능보정계수를 이용하여 계산하였으나, 이러한 계산방식이 실제 발전소 성능특성으로 적용이 가능하고 적합한 방식인지 타당성 검증이 필요하다. 타당성 검증방법은 성능을 계산한 5개 지점의 대기온도 중 최저,최고 온도를 제외한 동계($4 \text{ }^\circ\text{C}$)와 하계($23 \text{ }^\circ\text{C}$) 대표지점에서 실제 성능시험을 하여 실측값을 구한 후 성능보정계수를 이용한 성능 계산값과 비교하여 검증하기로 한다.

2) 성능시험방법 및 조건

성능시험은 ASME PTC 47-2006 (IGCC Power Generation Plant)에 따라 대기온도 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 와 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 2회 실시하였으며, 발전소 운전상태가 성능시험 결과에 영향을 미치는 것을 방지하기 위하여 설비들이 정상 상태에서 열적 평형상태가 유지되도록 1시간이상 안정화 시간 이후에 시험을 실시하였다.

성능시험 조건은 Table 2-4 와 같다.

Table 2-4 Gas Turbine Inlet Condition in Performance Test

Parameter	Unit	1st Test	2nd Test
Ambient Temperature	$^\circ\text{C}$	4	23
Barometric Pressure	bar	1.03	1.01
Relative Humidity	%	44	74

3) 데이터 취득

성능시험 결과 산정에 필요한 데이터를 취득하기 위한 계측기는 ASME PTC 19의 요구조건에 따라 교정하였고, 특설 계측기 또는 현장에 운전감시용으로 설치된 기존 계측기를 이용하였다.

석탄 사용량은 가스화기의 버너 입구측 유량계를 기준으로 측정하였으며, 발전단 전기출력과 역률은 가스터빈 및 증기터빈 발전기 단자에 정밀급 전력량계를 설치하여 측정하였다. 송전단 전기출력은 전력거래용으로 사용하고 있는 전자식 전력량계를 이용하여 측정하였고, 보조기기 총 소비동력은 발전단 전기출력과 송전단 전기출력의 차로 계산하였으며, 성능시험 결과에 필요한 측정데이터는

대기온도에 따른 300 MW 석탄가스화복합발전 성능특성

시험기간 중 일정주기로 기록된 값들의 편차중 평균치를 적용하였다.

4) 성능실측값과 성능계산값의 비교

대기온도 4 °C와 23 °C에서 성능시험 후 측정된 송전단 전기출력(P_{net})과 입열량(Q_{input})을 이용하여 식(2-12)에 따라 열효율을 산정하였으며, Table 2-5는 2번의 성능시험 측정결과이다.

$$\eta_{th} = P_{net} / Q_{input} \quad (2-12)$$

Table 2-5 1st and 2nd Performance Test Result

Description	Unit	1st, 2nd Test (Ambient Condition)	
		1st Test (4°C/1.03bar /44%)	2nd Test (23°C/1.01bar /74%)
Heat Input(Q_{input})	GJ/h	2,543.3	2,465.0
Power Gross Output (P_{gross})	MW	389.1	377.2
Auxiliaries Power Consumption (P_{aux})	MW	75.1	75.9
Power Net Output (P_{net})	MW	314.1	301.3
Thermal Efficiency (η_{th})	%	42.14	41.72

대기온도 4 °C, 23 °C에서 각 각의 성능시험결과와 기본 설계조건에서 제작사 성능보정계수 이용하여 성능을 계산한 값과 비교하였으며, 기본설계조건에서 성능시험과 동일한 대기조건(대기온도, 대기압, 상대습도) 모두를 보정하여 계산한 보정성능값을 Calculated 1, 대기조건 중 대기온도만 보정하여 계산한 보정성능값을 Calculated 2로 나누어 비교한 결과 Calculated 1이 Calculated 2보다 성능시험 실측치와 편차가 적었으나, 대기온도만 보정한 Calculated 1 결과도 최대편차가 출력 1.3 MW 이하, 효율 0.2 %p 이하로 성능변화추세 확인이 가능한 수준으로 확인되었다

3. 대기온도에 따른 성능특성 고찰

Fig. 3-1은 대기온도에 따른 발전출력 및 송전출력을

나타내는 그래프로 15 °C를 기준으로 대기온도가 높아지면 출력은 감소하는 반면, 대기온도가 떨어져도 출력은 증가하지 않고 일정하게 유지된다. 이는 기본설계 운전조건에서 공기분리장치를 통해 생산된 질소중 약 200 ton/h를 고온/고압(120 °C/30 bar)으로 가스터빈 연소기에 주입함에 따른 기계적인 토크 제한 때문이다.

Fig. 3-2은 대기온도에 따른 열효율을 나타내는 그래프로 15 °C를 기준으로 약 42.2%에서 온도가 낮거나 높아지는 경우 모두 열효율은 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 제작사가 기본설계조건인 대기온도 15 °C 부근에서 최고 효율을 나타낼 수 있도록 설계하기 때문이다.

또한 15 °C를 기준으로 대기온도가 낮아지는 경우보다 높아지는 경우에 열효율저하가 크게 나타났다.

Fig. 3-3은 대기온도에 따른 입열량 및 보조기기 소비동력을 나타내는 그래프로 대기온도 15 °C 이상에서 보조기기소비동력은 증가하는데 이는 여름철 공기분리장치의 소비동력 증가 영향이며, 이는 IGCC 플랜트 열효율 저하

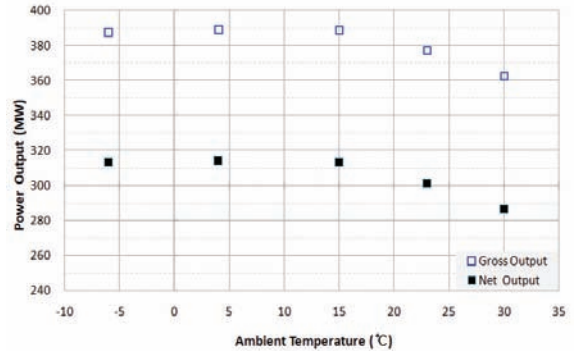


Fig. 3-1 Power output by various ambient temperature

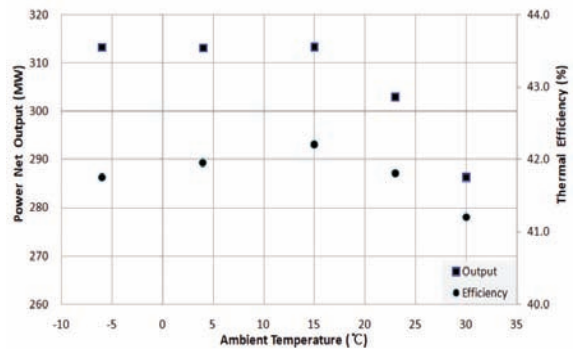


Fig. 3-2 Power net output & Thermal efficiency by various ambient temperature

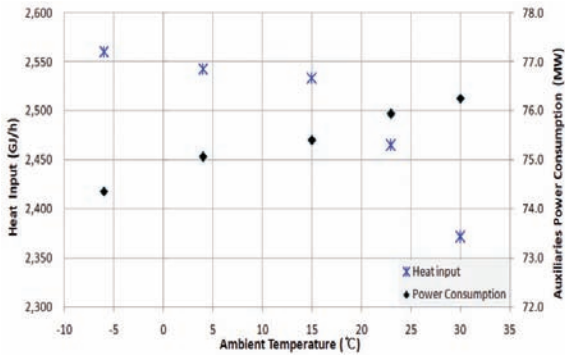


Fig. 3-3 Heat input & auxiliaries power consumption by various ambient temperature

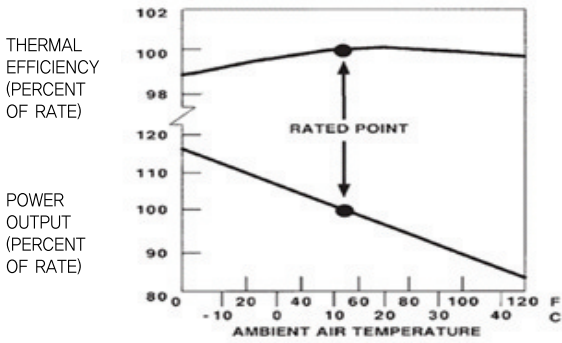


Fig. 3-4 Combined cycle, ambient air temperature effect curve

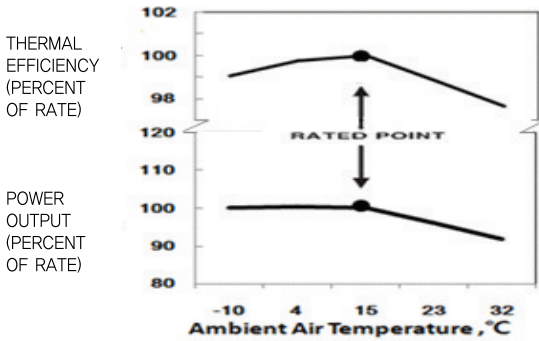


Fig. 3-5 IGCC, ambient air temperature effect curve

의 원인이다.

Fig. 3-4와^[5] 3-5는 각 각 천연가스복합발전과 석탄가스복합발전의 대기온도에 따른 열효율 및 출력변화를 나타낸다. 열효율은 동일하게 15 °C 부근에서 가장 높고 이

보다 고온에서는 미미하게 감소하고 저온에서 약 1% 이상 감소한다. 반면 석탄가스복합은 저온보다는 고온에서의 열효율 감소가 약 1%로 크게 나타나는데 이는 하계 공기 분리장치 소비동력증가 때문이다. 또한 저온에서 출력이 지속적으로 증가하는 천연가스복합발전과 다르게 석탄가스복합발전은 5 °C 이하에서는 증가하지 않는데 이는 제작사가 가스터빈 연소기 질소주입에 따라 축의 기계적인 토크 제한 설정 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 300 MW급 석탄가스복합발전에서 대기온도가 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 제작사가 제공한 자료를 기반으로 보정 출력 및 열효율 계산하고 성능보정의 타당성을 검증하기 위하여 하계와 동계를 대표하는 대기조건에서 성능시험을 실시하였다. 연구를 통하여 얻은 핵심결과 및 결론은 다음과 같다.

열효율은 대기온도 15 °C 부근에서 가장 높고 이보다 저온이나 고온에서는 낮아지는데 이는 천연가스복합발전과 유사한 경향이다. 상대적으로 고온구간에서 열효율이 급격히 하락하는 것은 하계 공기분리장치의 소비동력이 증가하기 때문이다. 출력은 5~15 °C 구간에서 가장 높고 5 °C 이하에서는 거의 일정하게 유지되며 15 °C 이상에서는 하락한다. 저온에서 출력이 증가하는 천연가스복합발전과 특성이 상이한 것은 가스터빈 연소기 질소주입에 따른 유량 증가로 축의 토크 제한이 작동하기 때문이다.

참고문헌

- [1] 한국서부발전, 2013, 태안IGCC 매뉴얼, pp 6.
- [2] 채대근, 2016, Taeon IGCC Performance Test Report, 에네스지, pp 21~34.
- [3] 한국서부발전, 2011, 태안IGCC 주기기 구매계약서
- [4] GE, 2016, 태안IGCC 성능시험 절차서
- [5] GE, Combined Cycle Product Line and Performance(GER-3574G), pp 27. (KIPEG)