

플랜트의 구성을 고려한 IGCC용 가스터빈의 성능해석

김영식* □ 이종준* □ 김동섭† □ 손정락** □ 주용진***
(2008년 5월 26일 접수, 2008년 7월 17일 수정, 2008년 8월 7일 심사완료)

Performance Analysis of a Gas Turbine for IGCC Considering Plant Configuration

Young Sik Kim, Jong Jun Lee, Tong Seop Kim, Jeong Lak Sohn and
Yong Jin Joo

Key Words: ASU(공기분리기), Gas Turbine(가스터빈), IGCC(석탄가스화복합발전), Integration(결합), Pressure Ratio (압력비), TRIT(터빈로터입구온도)

Abstract

Integrated gasification combined cycle (IGCC) is an environment friendly method of using coal. Several commercial IGCC plants have been built worldwide during the past decade, and a domestic development project has also been launched recently. Operation and performance characteristics of a gas turbine in the IGCC plant deviates from those of original gas turbines due to several factors such as increased amount of fuel supply and integration with other components. In this study, performance of a gas turbine in the IGCC plant is analyzed considering its integration with the air separation unit (ASU). Influence of the degree of integration (split of air supplies to ASU from the auxiliary compressor and the gas turbine compressor) on the system performance is investigated. In addition, effect of modulating nitrogen return flow from the gasifier to the gas turbine on the operating characteristics of the gas turbine is examined.

기호설명

ASU : 공기분리기
ID : 결합도
IGCC : 석탄가스화 복합화력발전
LHV : 저위발열량(kJ/kg)
 η : 효율
 \dot{m} : 유량(kg/s)
P : 압력(kPa)

PR : 압력비
T : 온도(K)
TRIT : 터빈로터입구온도(K)
TET : 터빈출구온도(K)
 \dot{W} : 출력 (MW)

하첨자

add : 추가
comp : 압축기
f : 연료
GT : 가스터빈
in : 입구
sys : 시스템
tur : 터빈

† 인하대학교 기계공학부
E-mail : kts@inha.ac.kr
TEL : (032)876-7308 FAX : (032)876-7308

* 인하대학교 대학원
** 서울대학교 기계항공공학부
*** 한국전력연구원

1. 서 론

최근 세계적으로 에너지 자원의 고갈과 환경오염에 대해 관심이 집중되면서 신재생에너지가 각광을 받고 있다. 그 중에서 석탄을 가스화하여 합성가스(이하 Syngas라 칭함)를 생성하고 이를 연료로 사용하는 가스화 복합화력 발전(Integrated Gasification Combined Cycle, 이하 IGCC라 칭함)은 현재 세계적으로 건설되어 작동되고 있으며, 대표적인 4대 IGCC 플랜트의 성능자료가 발표되기도 하였다.⁽¹⁾ 기존의 IGCC 플랜트는 가스화기와 부가적인 손실로 인하여 대략 34~36%의 효율이었으나, 최근 더욱 친환경적이고 효율도 약 44%정도로 향상되는 등의 더욱 발달된 IGCC 플랜트의 개발을 위한 연구가 이루어지고 있다.⁽²⁾ 각 가스터빈 제작회사들이 IGCC 플랜트에 자사의 가스터빈을 적용한 사례들을 연구하여 발표하였다.^(3,4) 국내에서도 최근 IGCC 플랜트에 대한 연구가 진행되고 있다.⁽⁵⁾

기존의 복합화력 발전의 연료로 사용되던 천연가스에 비하여 Syngas는 발열량이 매우 낮으며 주요 성분은 수소와 일산화탄소이다. Syngas는 발열량이 낮기 때문에 천연가스를 연료로 사용할 때와 동일한 터빈입구온도를 유지하기 위해서는 더 많은 유량이 연소기로 공급되어야 한다. 또 Syngas를 생성하기 위해 공기분리기(Air Separation Unit, ASU)로 공기를 공급하는 방식과, ASU에서 분리된 질소(N₂)를 연소기로 공급하는 방식 등 플랜트의 구성에 따라 가스터빈의 운전상태와 성능이 변하게 된다. 선행연구⁽⁵⁾에서는 특정한 하나의 시스템 형태에 대해서 IGCC 시스템에서의 가스터빈 성능을 분석한 바 있으며, 본 연구에서는 이를 확장하여 가스터빈과 ASU간의 결합정도에 따른 성능변화와 ASU에서 분리된 질소가 연소기로 재공급되는 비율에 따른 가스터빈의 성능을 해석하였다. 특히 보조압축기들의 동력을 고려한 순출력 기준으로 시스템 성능을 분석하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 가스터빈 설계점 모사

본 연구에서는 IGCC power 플랜트의 가스터빈

Table 1 Design specification of GE7FA gas turbine

		Simulation	reference ^(7,8)
Air	Temp.(K)	288.15	-
	Pressure(kPa)	101.3	-
Fuel	Flow(kg/s)	9.478	-
	LHV(kJ/kg)	49244	-
compressor	PR	16	16
Turbine	TRIT(K)	1599.2	1599.2
	TET(K)	874.2	874.3
Exhaust gas	Pressure(kPa)	101.5	-
	Flow(kg/s)	445	445
System	Power(MW)	171.4	171.7
	Efficiency(%)	36.72	36.5

을 모사하기 위하여 Tampa 및 Wabash 플랜트에서 이용하고 있는 GE사의 7FA모델을 선정하였다.⁽¹⁾ 그리고 GE7FA의 알려진 성능 데이터를 바탕으로 상용프로그램인 Gate cycle⁽⁶⁾을 사용하여 가스터빈을 모사하였다. GE사의 7FA모델은 ISO 조건에서 TRIT 1599.15K, PR 16, 정격출력 171.7MW, 시스템 효율 36.5% 등이다.^(7,8) 이때 연료는 CH₄가 90.09%, C₂H₆가 6.04%, C₃H₈ 2.54% 조성의 천연가스를 사용하였다. 알려져 있는 온도, 압력, 유량 등의 성능 파라미터를 기반으로 추가적으로 알려지지 않은 압축기 및 터빈의 효율, 냉각유량 등의 특성파라미터 등을 추산하여 사용하였다. 그 결과는 Table 1에 나타내었으며 참고 데이터^(7,8)와 비교하였을 때 출력, 효율, 유량 등이 1% 이내의 오차를 나타낸 것으로 잘 모사되었다. TRIT는 터빈 첫단 로터입구온도이며 가스터빈에서 팽창을 시작하는 온도로서 실제적인 최고온도(firing temperature)에 해당한다.

2.2 시스템 설계 및 구성

본 연구에서는 IGCC 플랜트 전체가 해석대상이 아니며, 가스터빈만을 대상으로 한다. 단, 가스터빈과 ASU와의 상호작용(물질교환)을 고려하였다. 자세한 구성은 Fig.1에 나타내었다. 가스터빈 압축기 출구에서 추출된 공기 또는 추가 압축기에서 압축된 공기는 가스화기에 필요한 산소를 생산하기 위해 ASU로 공급된다. ASU에서 분리된 산소는 압축기를 거쳐 가스화기로 보내지고, ASU에서 분리된 질소는 다른 공정을 위하여 배출되거나(Fig. 1의 N₂ vent) 연소기로 재공급될 수도 있다. ASU에서 분리된 산소와 질소의 압축

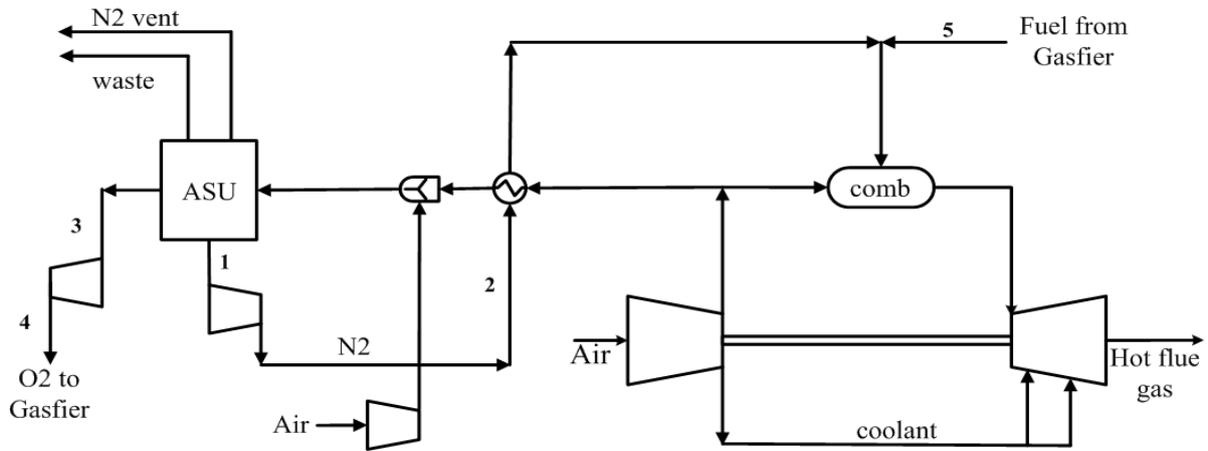


Fig. 1 System Configuration

Table 2 Conditions of pressure

Number	Pressure(kpa)
1	634.3
2	1912.5
3	634.3
4	4481.6
5	1912.5

기 입·출구 압력 및 가스화기로부터 공급되는 연료의 압력조건은 문헌상의 조건을 참고하여 사용하였으며 Table 2에 나타내었다.⁽⁹⁾ Table 2의 숫자는 Fig. 1의 위치를 의미한다. 또 이때 사용된 추가압축기들의 효율은 폴리트로픽효율 90%로 고정하였다.

가스화기에서 Syngas를 생성하기 위해서는 수증기(H₂O), 산소(O₂)와 석탄이 필요하다. 가스화기의 공정은 해석대상에서 생략하였으므로 다음의 가정을 통해 시스템 유량 균형을 맞추었다.

- 수소(H₂)는 수증기에 의해서만 공급됨
- 산소(O₂)는 수증기와 공기에 의해서 공급됨
- ASU 공급공기량 및 질소량은 계산된산소량과 공기성분비로부터구함

가스화기로부터 연소기로 공급되는 연료의 조성은 Table 3에 나타내었다.⁽¹⁾ 본 연구에서는 산소를 가스화기기로 공급하기 위해 ASU로의 공기 공급량 전부를 추가 압축기를 통해서 공급할 때를 ASU와 가스터빈의 결합도(Integration Degree)가 0%라하고 공기공급량 전부를 가스터빈 압축

Table 3 Composition of Syngas

Component	%(Volume)
Carbon Monoxide(CO)	43.1
Carbon Dioxide(CO ₂)	13.8
Methane(CH ₄)	0.4
Nitrogen(N ₂)	1.9
Moisture(H ₂ O)	5.4
Hydrogen(H ₂)	35.4
Lower Heating Value	10314.93(kJ/kg)

기 출구에서 추출할 때를 결합도 100%라고 하였다. 다음은 결합도의 정의이다.

$$ID = \frac{\text{Air to ASU From GT}}{\text{Total air to ASU}} \quad (1)$$

천연가스로 설계된 가스터빈에 Syngas를 사용하고 작동조건을 바꾸면 가스터빈은 탈설계 운전 을 하게 된다. 따라서 본 연구에서는 해석상 탈 설계 작동모델이 필요하다. 압축기의 운전 특성은 상용 프로그램에 내재되어 있는 GE7FA모델의 압축기 성능선도를 이용하였으며, 터빈은 다음의 초킹조건으로 특성을 모사하였다.

$$\frac{\dot{m}_{in} \sqrt{T_{in}}}{P_{in}} = constant \quad (2)$$

가스터빈의 운전점은 터빈과 압축기의 매칭에 의해서 결정된다. ASU로 공기를 보내는데 사용하는 추가공기 압축기와 ASU에서 분리된 산소와

질소를 압축하는 압축기의 소모동력을 고려하여 시스템 출력과 효율을 다음의 식들로서 정의하였다.

$$\dot{W}_{GT} = \dot{W}_{tur} - \dot{W}_{comp} \quad (3)$$

$$\dot{W}_{add,comp} = \dot{W}_{add,air} + \dot{W}_{O_2} + \dot{W}_{N_2} \quad (4)$$

$$\dot{W}_{sys} = \dot{W}_{GT} - \dot{W}_{add,comp} \quad (5)$$

$$\eta_{sys} = \frac{\dot{W}_{sys}}{\dot{m}_f LHV_f} \quad (6)$$

3. 해석결과

3.1 ASU로의 공기공급 방식에 따른 가스터빈 성능변화

ASU로의 공기공급 방식, 즉 결합도에 따라 가스터빈의 성능변화를 알아보았다. 이 때 ASU에서 분리된 질소는 연소기로 재공급하지 않는다. 가스터빈에서 가장 중요한 운전 파라미터는 터빈 입구온도(본 논문에서는 TRIT)와 압력비이며, 이들이 가능한 설계값 이하에서 운전되는 것이 바람직하다. IGCC용 가스터빈에서 시스템 구성 방식과 운전 상태에 따라서 이 두 파라미터들이 변하게 될 것이다. 본 절에서는 TRIT를 원래 설계값으로 하여 IGCC 용 가스터빈의 설계점을 정하는 경우와 압력비를 가스터빈 설계 압력비로 맞추어 IGCC 시스템을 설계하는 경우로 나누어 각 경우에 상대 파라미터의 변화(TRIT가 고정된 경우에 압력비의 변화를 압력비가 고정된 경우에는 TRIT의 변화)와 출력 효율 등 성능변화를 살펴보고자 한다. Fig.2~4는 TRIT를 고정한 경우이고 Fig.5,6은 압력비를 고정한 경우의 결과이다.

먼저 원래 가스터빈의 설계값으로 TRIT가 설정해지도록 IGCC 를 설계한 경우를 살펴본다. Fig. 2는 TRIT를 설계값인 1599.15K 으로 고정한 상태에서 결합도에 따른 압력비와 압축기 효율을 나타내었다. 결합도가 증가할수록 가스터빈 압축기 출구에서 추출하는 공기유량이 늘고 외부에서 ASU로 공급되는 공기의 유량이 줄어든다. 따라서 결합도가 증가하면 터빈입구유량이 작아지며, 터빈입구 온도가 동일하면 터빈입구압력 즉 압축기 압력비가 낮아진다 (식 (2) 참조). 압축기의 효율은 결합도가 감소할수록 낮아지는 경향이 나타

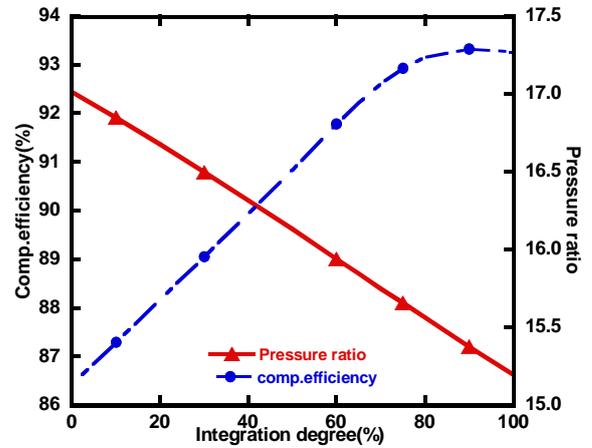


Fig. 2 Variations of pressure ratio and compressor efficiency with integration degree for the fixed TRIT operation

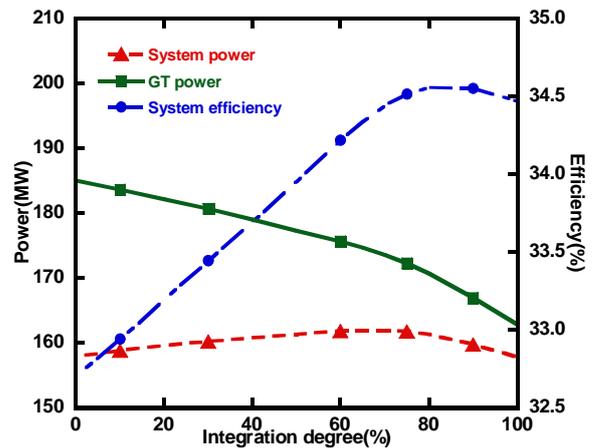


Fig. 3 Variations of gas turbine power, system power and system efficiency with integration degree for the fixed TRIT operation

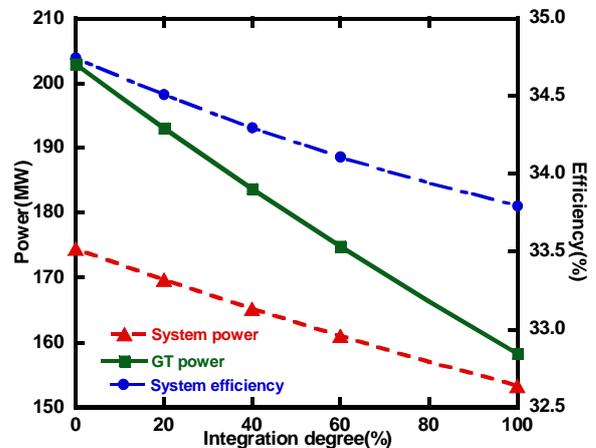


Fig. 4 Variations of gas turbine power, system power and system efficiency with integration degree for the fixed TRIT operation (fixed compressor efficiency)

났다. 결합도가 낮아져서 외부에서 공급되는 공기 유량이 증가하여 터빈입구에서 유량이 늘어나면 터빈 팽창비가 늘고 압축기의 압력비도 커진다. 설계점보다 압력비가 높아지면서 압축기 효율은 감소하는 것이 현실적이며, 본 연구에서 사용한 압축기 성능선도도 Fig. 2에서 확인되듯이 이를 반영하고 있다.

결합도가 감소할수록 터빈입구에서의 유량이 증가하기 때문에 출력과 효율이 증가될 것으로 예상되나 Fig. 3에서 나타낸 것처럼 결합도가 증가하면서 시스템출력과 시스템효율이 어느 정도까지는 증가하다가 최대값을 갖고 감소하는 경향이 나타났다. 이는 Fig. 2에서 보는 것처럼 결합도가 감소할수록 압축기의 효율이 낮아지는 영향에 의한 것이다. 즉, 결합도가 감소하면서 압축기 효율이 낮아져서 압축기 소요 동력이 과하게 증가하기 때문에 가스터빈 출력의 증가율이 줄어들고, 결국 순출력은 특정 결합도 이하에서 감소하게 된다. 이를 확인하기 위하여 압축기 효율이 유량과 압력비에 상관없이 일정한 경우도 해석해 보았다. Fig. 4에 그 결과를 도시하였다. 압축기 효율이 고정된다고 가정한 경우에 예상한 바와 같이 결합도가 감소할수록 출력과 효율은 단조롭게 증가하게 된다. 따라서 Fig. 3의 최대점이 존재하는 이유는 압축기효율의 영향임을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 압축기 효율이 변화하는 경우를 현실적인 계산이라고 판단하여 이후에는 유량과 압력에 따라 압축기 효율이 바뀌는 성능선도를 사용하여 계산하였다.

위 결과는 비록 터빈입구온도가 동일하다 하더라도 결합도에 따라서 시스템 성능이 차이를 보인다는 것을 보여주는데, 주된 이유는 가스터빈의 작동상태, 즉 압력비가 달라지기 때문이다. 특히 결합도가 감소할수록 압력비가 증가하게 되는데, 실제 가스터빈에서는 허용 가능한 서지마진이 있게 마련이므로 터빈입구온도를 설계값으로 유지하면서 낮은 결합도로 IGCC를 설계하기는 쉽지 않을 것이다. 본 결과에 의하면 안정적으로 설계 압력비 이하에서 운전하려 한다면 결합도 약 60% 이상에서 IGCC가 설계되어야 하며, 그 경우 시스템 순출력은 가스터빈 설계출력에 미치지 못하고 시스템 효율도 가스터빈 설계효율에 미치지 못한다.

두 번째로 압력비가 원래 설계압력비로 설정되

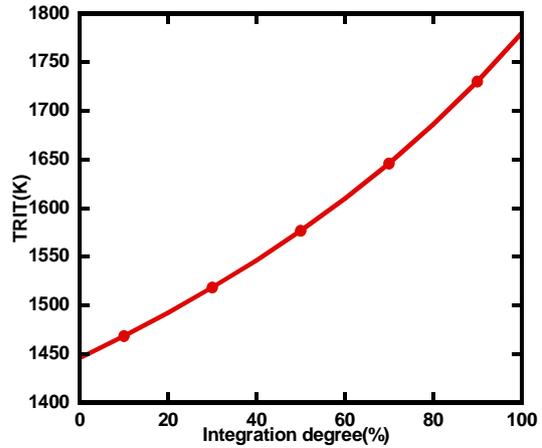


Fig. 5 Variation of TRIT with integration degree for the fixed pressure ratio operation

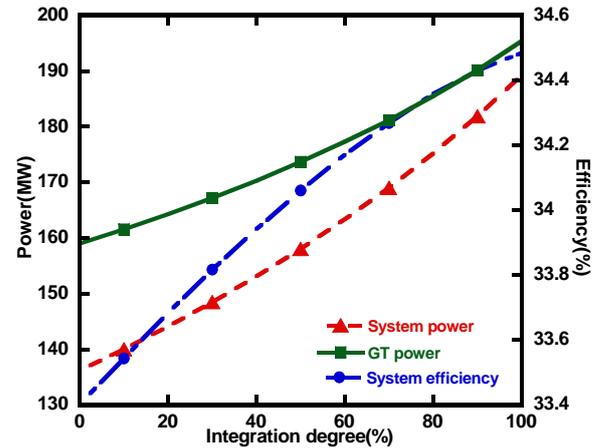


Fig. 6 Variations of gas turbine power, system power and system efficiency with integration degree for the fixed pressure ratio operation

도록 IGCC 시스템을 설계하는 경우를 살펴본다. 설계점에서의 압력비인 16으로 압력비를 고정한 상태에서 결합도에 따른 가스터빈의 성능특성을 알아보았다. TRIT를 고정한 경우와는 다르게 결합도가 증가함에 따라 출력과 효율이 모두 증가하는 경향을 보였다. 결합도가 증가하면서 가스터빈 입구유량은 줄어들지만 터빈입구 압력이 일정하므로 터빈입구온도가 높아져야 한다(식 (2) 참조). 즉, 공급되는 연료의 유량이 증가하게 된다. Fig. 5에 TRIT 변화를 보였다. 결합도가 증가하면서 터빈입구 유량이 줄어드는 영향보다 터빈입구 온도가 상승하는 영향이 더 우세하여 가스터빈 출력이 증가한다. 이에 더하여 결합도가 증가할수록 추가압축기를 통한 ASU로의 공기공급량 부담이 줄어들기 때문에 추가 압축기 소모

동력도 줄어든다. 결과적으로 Fig. 6과 같이 결합도가 증가할수록 시스템 출력과 효율이 증가한다. 그러나, 실제적으로는 가스터빈 설계시의 터빈입구온도 이상으로 작동하는 것은 피해야 할 것이다. 이를 고려한다면 결합도 약 60% 이상으로 IGCC를 설계하는 것은 어려울 것으로 보인다. 그 이하로 설계하는 경우에는 시스템 순출력과 효율이 애초 가스터빈 출력과 효율에 비하여 낮다. 앞의 터빈입구온도를 유지하는 설계결과와 묶어서 본다면, 안정적인 운전을 고려한 IGCC 설계 범위에서는 시스템 성능이 천연가스를 사용할 경우의 가스터빈 성능에 미치지 못하는 공통적인 결론을 얻게 된다.

3.2 연소기로의 N2 재공급에 따른 가스터빈 성능변화

3.1에서는 ASU에서 분리된 질소를 연소기에 재공급하지 않은 상태에서 결합도에 따른 가스터빈의 성능변화를 알아보았다. 본 절에서는 재공급되는 질소의 비율이 가스터빈 운전 상태와 성능에 미치는 영향을 질소 재공급의 영향을 보고자, 결합도는 75%로 고정하였으며, 가스터빈의 성능변화를 앞 절에서와 마찬가지로 TRIT와 압력비를 고정한 두 경우에 대해 알아보았다.

첫 번째로 TRIT를 고정하고 ASU에서 분리된 질소가 연소기로 재공급되는 경우에는 연료유량이 늘어 터빈입구유량이 증가되고, 이에 따라 압력비가 상승하고 압축기의 효율은 감소하는 경향이 나타난다. Fig. 7에 그 결과를 도시하였다. Fig. 8은 가스터빈 출력과 시스템 출력 그리고 시스템 효율의 변화를 나타낸다. 질소 재공급율이 커지면 터빈유량이 증가하여 가스터빈 출력과 시스템 출력은 증가한다. 질소 재공급율 약 20% 이후 증가폭이 다소 줄어드는 것은 압력비 증가에 따른 압축기 효율 감소의 영향이다. 결합도의 증가는 압축기 압력비의 증가 즉, 서지마진의 감소를 야기하게 되므로 역시 신중한 질소 재공급을 설정이 필요하다.

두 번째는 앞 절에서 압력비를 고정한 상태에서 역시 결합도가 75%인 경우를 선정하여 질소를 연소기로 재공급함에 따른 가스터빈의 성능특성에 대해 알아보았다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 TRIT를 고정한 경우와는 다르게 질소 재공급율이 증가함에 따라 출력이 감소하는 경향이 나

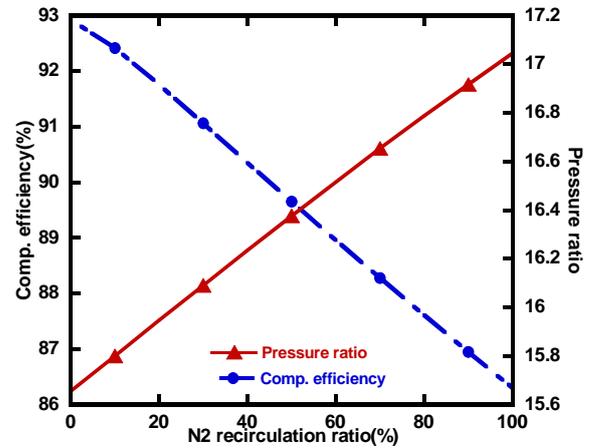


Fig. 7 Variations of pressure ratio and compressor efficiency with N₂ recirculation ratio for the fixed TRIT operation

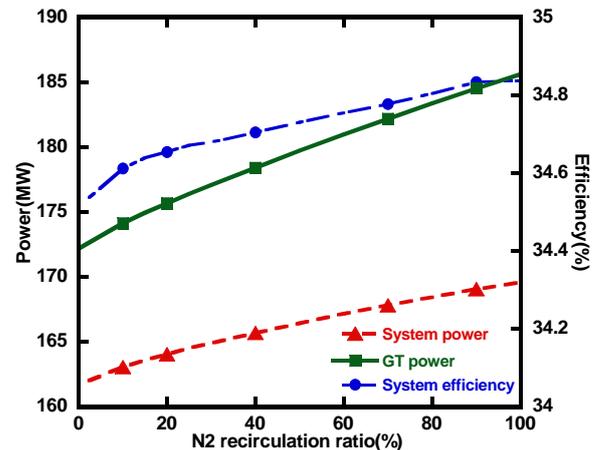


Fig. 8 Variations of gas turbine power, system power and system efficiency with N₂ recirculation ratio for the fixed TRIT operation

타났다. Fig. 10은 압력비를 고정한 상태에서 질소를 연소기로 재공급함에 따른 TRIT의 변화를 나타냈다. 연소기로 재공급되는 질소의 유량이 늘어남에 따라, 터빈입구의 유량이 증가하므로 압력비를 유지하기위해 터빈입구온도는 낮아지게 된다. 즉, 연료유량이 감소한다. 이 때 터빈 유량이 늘어나는 것보다 TRIT의 감소효과가 상대적으로 더 커서 가스터빈 출력과 시스템 출력은 질소 재공급율이 커짐에 따라 감소한다. 그러나 시스템 효율은 질소 재공급율이 증가함에 따라 증가하였으며, 이는 출력의 감소효과보다 연료유량의 감소 효과가 더 크기 때문이다. 본 절의 결과에서도 안정적인 운전 범위를 고려한다면, 즉 TRIT가 일정한 경우 설계압력비보다 낮은 압력

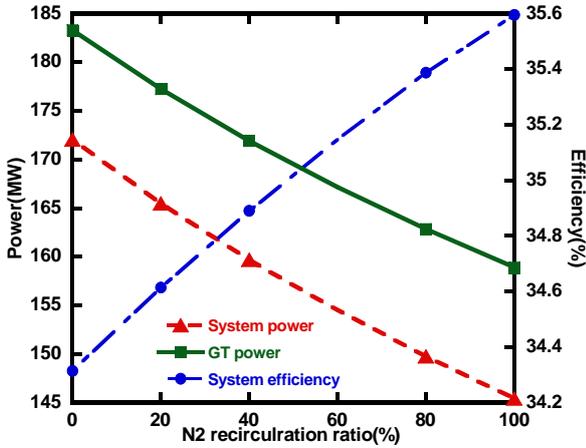


Fig. 9 Variations of gas turbine power, system power and system efficiency with N₂ recirculation ratio for the fixed pressure ratio operation

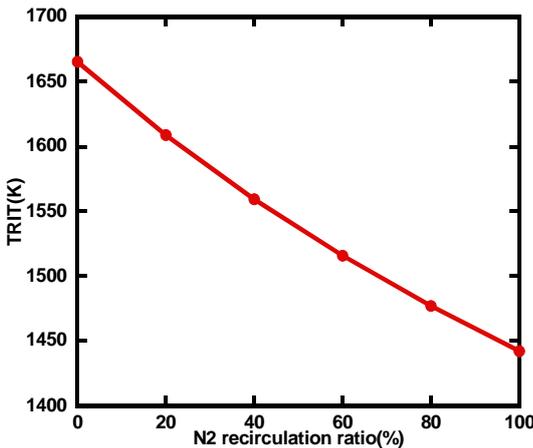


Fig. 10 Variation of TRIT with N₂ recirculation ratio for the fixed pressure ratio operation

비에서 운전하고 (Fig. 8의 결합도 약 80% 이하) 압력비가 설계값과 동일한 경우 TRIT를 설계값 이하에서 운전한다면(Fig. 10의 결합도 약 20% 이상), 시스템의 출력과 효율은 천연가스를 사용할 경우의 가스터빈 성능에 미치지 못할 것으로 예상되었다.

4. 결론

천연가스를 연료로 사용하도록 설계된 가스터빈을 IGCC에 사용할 때 ASU로의 공기공급 방식, 즉 가스터빈과 ASU간의 결합도와 연소기로의 질소 재공급율에 따른 가스터빈의 성능변화를 고찰하였다.

첫 번째로 가스터빈과 ASU의 결합도에 따른

성능변화를 고찰하였다. TRIT가 애초 설계값으로 작동하도록 설계하는 경우와 압력비를 설계값으로 유지하도록 설계하는 경우로 나누어 시스템 성능을 분석하였다. 질소 재공급율은 0%로 두었다. 먼저, TRIT를 고정한 경우에는 결합도가 감소함에 따라 압력비가 증가하고 시스템 출력이 증가하는데, 압축기의 효율 감소 정도에 따라서 출력의 증가 정도가 결정된다. 압력비를 고정하는 경우에는 결합도가 증가할수록 TRIT가 증가하여 출력과 효율이 모두 증가하였다. 결과적으로, 안정적인 운전범위를 고려한다면 TRIT를 설계치로 운전하고자 하는 경우에는 특정 결합도 이상에서, 설계 압력비로 운전하고자 하는 경우에는 특정 결합도 이하에서 IGCC가 설계되어야 하는데, 두 경우 모두 안정적 설계 범위에서는 시스템 성능이 천연가스를 사용할 경우의 가스터빈 성능에 미치지 못한다.

두 번째로 가스터빈과 ASU의 결합도가 고정된 상태에서 연소기로 재공급되는 질소량을 바꾸면서 성능변화를 해석하였다. 이때도 TRIT를 고정한 경우와 압력비를 고정한 경우에 대해 나누어 해석하였다. TRIT를 고정시킨 경우 질소 재공급율이 증가할수록 압력비가 높아지고, 시스템 출력과 효율은 증가하였다. 또한 압력비를 고정시켰을 경우에는 질소 재공급율이 증가될수록 터빈 입구온도가 감소하여 시스템 출력은 감소하였지만 출력의 감소효과보다 연료유량의 감소효과가 더 커서 효율은 증가하였다. 질소 재공급율에 따른 해석 결과에서도 안정적인 운전범위를 고려한다면 시스템 성능이 천연가스를 사용할 경우의 가스터빈 성능에 미치지 못하였다.

결론적으로 결합정도에 따른 성능변화와 질소 재공급에 따른 성능변화를 살펴본 결과, 가스터빈의 안정적인 운전범위에서 시스템 출력과 효율은 천연가스를 사용할 경우의 가스터빈의 출력과 효율에 미치지 못한다. 즉, IGCC용 가스터빈에서 구성부의 수정이 가해지지 않는 한 순성능(가스터빈 출력에서 소모동력을 뺀 순출력 기준의 성능)은 원래 가스터빈의 성능에 미치지 못한다.

후 기

본 논문은 산업자원부에서 시행한 신재생 에너지 기술 개발 사업을 통한 연구 결과이다.

참고문헌

- (1) Dennis, R. A., Shelton, W. W. and Le, P., 2007, "Development of Baseline Performance Values for Turbines in Existing IGCC Applications," *ASME paper* GT2007-28096.
- (2) Jin, H., Gao, L., Han, W. and Yan, J., 2007, "A New Approach Integrating CO₂ Capture Into a Coal-Based Polygeneration System of Power and Liquid Fuel," *ASME paper* GT2007-27678.
- (3) Huth, M., Heilos, A., Gaio, G. and Karg, J. 2000, "Operation Experiences of Siemens IGCC Gas Turbine Using Gasification Products From Coal and Refinery Residues," *ASME paper* 2000-GT-26.
- (4) Brdar, R. D. and Jones, R. M., 2000, "GE IGCC Technology and Experience with Advanced Gas Turbines," General Electric Report, GER-4207.
- (5) Lee, J. J., Cha, K. S., Sohn, J. L., Kim, T. S. and Joo, Y. J., 2008, "Performance Analysis of a Gas Turbine for Power Generation Using Syngas as a Fuel," *Trans. of KSME(B)*, Vol. 32, pp.54~61.
- (6) GE Power-Enter Software, 2006, GateCycle, ver. 6.0
- (7) Eldrid, R., Kaufman, L. and Marks, P., 2001, "The 7FB: The Next Evolution of the F Gas Turbine," General Electric Report, GER-4194.
- (8) Farmer, R., 2007, Gas Turbine World, Handbook: Pequot Publishing, Inc., Vol. 26, p.64.
- (9) Texaco, 1998, Texaco Gasifier IGCC Base Cases, A Report to NETL, PED-IGCC-98-001.