

석탄가스화 복합발전용 가스터빈의 상압 및 고압연소특성에 관한 실험적 연구

이민철* · 서석빈* · 운영빈**

An Experimental Study on the Ambient and High Pressure Combustion Characteristics of Gas Turbine for IGCC

Min Chul Lee*[†] · Seok Bin Seo* · Youngbin Yoon**

ABSTRACT

In the era of energy climate, IGCC technology is one of the powerful solutions for the demands of new energy with low carbon green growth. The present study is conducted to investigate the combustion characteristics of syngas from the coal gasifier to predict problems when it is fed to the gas turbine. Through high and low combustion tests, we understood that hydrogen is the main reason of NOx emission but easily controled by injecting the dilution of nitrogen. CO emission of syngas was comparable with that of methane and pressure fluctuation of syngas was not significant. The data from this study will be used for the optimization of combustion in the Korea first IGCC plant in 2015.

초 록

에너지기후시대에 신에너지원 발굴, 저탄소 녹색성장의 일환으로 석탄 IGCC기술이 개발 중에 있다. 본 연구는 IGCC기술 중 가스화기에서 생산된 합성가스를 가스터빈에 직접 주입시 생길 수 있는 문제점을 미리 파악하고, 그 연소특성자료를 축적하기 위해 수행되었다. GE7EA연소기를 대상으로한 상압 및 고압연소실험을 통해 합성가스의 기본적인 연소특성을 파악하였으며, 수소화염이 과도한 NOx발생의 원인임을 파악하고, 질소희석을 통해 NOx배출량을 제어할 수 있음을 확인하였으며, 연소진동은 크게 발생치 않음을 확인하였다. 본 연구를 통해 축적된 시험 데이터는 2015년에 국내 최초로 준공예정인 태안 IGCC플랜트에 연소진단시스템 및 최적화 기술적용시 활용될 예정이다.

Key Words: Integrated Gasification Combined Cycle(석탄가스화 복합발전), Combustion Performance(연소성능), Hydrogen and Carbon Monoxide Combustion(수소, 일산화탄소 연소)

* 한국전력공사 전력연구원

** 서울대학교 기계항공공학부

† 교신저자, E-mail: lmc@snu.ac.kr, LMC@kepri.re.kr

석탄 IGCC기술은 지구상에 가장 많은 자원인 석탄을 이용하고, 탄소포집저장(CCS, Carbon Capture and Storage)기술과 접목할 때 이산화탄소의 배출을 거의 하지 않는 장점을 가지고 있다. 특히 후쿠시마 원전사고 이후 원자력이 아닌 다른 신에너지원 발굴이 시급해 졌고, 기술성, 경제성, 즉시성 등을 고려할 때 IGCC기술은 중요한 신재생에너지기술임에 분명하다. 한편 국내에서는 한국서부발전 총괄주관하에 대한 IGCC 플랜트를 2015년까지 준공하는 것을 목표로 20여개의 산학연 기관과 더불어 과제를 수행 중에 있고, KEPCO가 독일의 Uhde와 함께 Joint-venture 회사를 설립하여 IGCC 독자기술을 개발 중이다. IGCC플랜트가 국내 최초로 건설되어 운영시 운전경험이 없고, 숙련된 운전요원이 없는 상태에서는 많은 기술적 문제들이 야기될 것으로 예상된다. 특히 미국, 유럽의 석탄 IGCC 발전소의 경험으로 미루어 보면 80%의 가동율(availability)을 얻기도 어려운 실정이고, 특히 가스터빈 부에서 50% 이상의 고장정지율을 보여 이 문제의 해결이 시급하다.[1] 이러한 예상되는 문제를 미리 예방하기 위해 본 연구에서는 석탄 가스로부터 생산된 합성가스를 대상으로 상압 및 고압 가스터빈 연소시험을 수행하였고, 이를 통해 연소특성데이터 베이스를 구축하였으며, 이는 향후 IGCC플랜트 가동율을 높이기 위해 활용될 예정이다.

2. 시험설비 및 시험방법

2.1 석탄가스 연소시험설비

본 시험에 사용된 석탄가스 연소시험설비는 연료공급부, 공기공급부, 연소시험부, 냉각배기부로 구성되어 있다. (그림 1) 우선 연료공급부에는 2개의 수소 트레일러를 이용해 교환절체형으로 연속적인 수소 공급이 가능하게 하였고, 일산화탄소는 80병의 가스용기를 통해 공급하였으며, 질소 및 이산화탄소는 고압가스 용기를 통해 증기는 전기가열식 증기발생기 및 과열기(Super heater)를 통해 합성가스 가열기로 공급하였다. 합성가스는 각각 유량 및 압력제어가 가능하게

하였고, 최종적으로 연소기 전단에서 300℃, 30bar의 합성가스가 공급가능하도록 하였다. 공기공급을 위해서는 단단 원심형 압축기를 이용하였고, 공기가열기를 거쳐 20bar, 400℃의 공기를 공급하였다. 연소시험부에서는 GE7EA 연소기의 1/2 상사모델의 연소기가 장착되었고, 터빈 입구온도 등 65개의 온도계측, 3개의 동압계측, 배기가스 농도계측, 연소실내 압력, 연소기 전후 차압 등을 측정할 수 있도록 제작하였다. 마지막으로 냉각배기부를 통해 식혀진 연소후 가스가 안전하게 배출될 수 있도록 구성하였다.

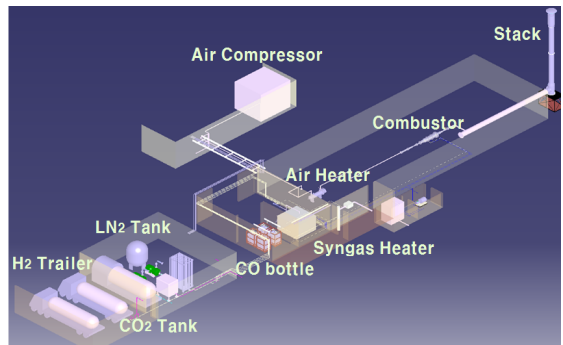


Fig. 1 Iso-diagram of KEPRI coal gas combustion test facility

2.2 GE7EA 시험연소기

평택복합화력의 GE-7EA 가스터빈은 10개의 can형 연소기가 로터를 중심으로 둘러싼 can-annular 형의 연소시스템을 이루고 있는데, 그 중 1 can을 대상으로 시험을 수행하였다. 이 연소기는 부분 예혼합 연소방식 및 reverse flow air inlet 방식을 취하고 있으며, NOx 제어를 위해서는 WLN(Wet Low NOx) 방식을 사용하고 있다. 상압 및 고압시험에 사용된 연소기 및 노즐은 각각 그림 2와 그림 3과와 같고, 주요 치수는 표 1과 같다. [3]

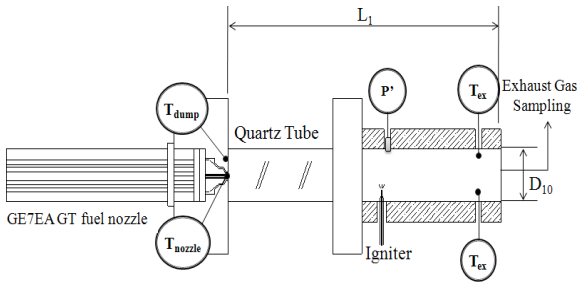


Fig. 2 Drawing of GE7EA Model Combustor Test Rig and Measurements

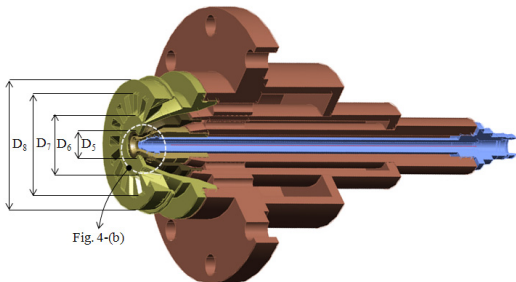
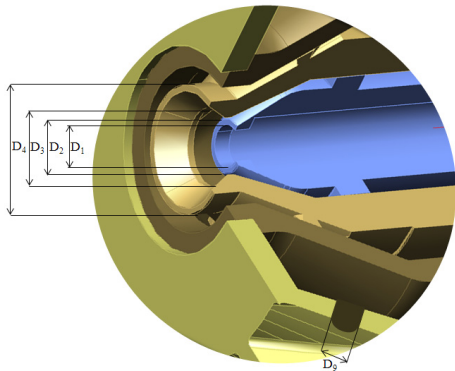


Fig. 4-(b)

(a) GE7EA model combustor fuel nozzle



(b) Magnified drawing of core section in Fig. 4-(a)

Fig. 3 Drawing of GE7EA model combustor test rig

Table 1. Main geometry of M1-combustor

Symbol	Description	Size (mm)
D1	Diameter of distillate oil fuel hole	3.2
D2	Inner diameter of atomizing air hole	2.97

D3	Outer diameter of atomizing air hole	5.5
D4	Inner diameter of DeNOx water hole	8.9
D5	Outer diameter of DeNOx water hole	11.4
D6	Inner diameter of combustion air hole	30
D7	Outer diameter of combustion air hole	53.5
D8	Fuel nozzle head diameter	76.3
D9	Diameter of main fuel injection hole	2.5
D10	Inner diameter of combustion chamber	190
L1	Length of combustion chamber	900

3. 시험결과 및 고찰

3.1 H₂/CO 비에 따른 연소성능 시험

H₂, CO, H₂/CO 가스 연료의 기초 연소성능 특성을 파악하기 위해 H₂/CO비 및 총 입력열량 (30kW~60kW)을 변화시키면서 NO_x, CO배출가스, 동압진동, 온도(@연료노즐, 덤프면, 연소실출구) 및 화염의 형상 등을 관찰하였다. 연료공급온도는 200℃, 공기공급온도는 350℃로 유지하였고, 메탄의 연소시험결과와 비교하였다. 그 결과 그림 5와 같이 수소 화염의 경우 짧게 노즐쪽에 부착되어 형성되고, 연한 청색의 불꽃 색을 가졌으며 후단에는 H₂O의 radiation에 의한 붉은 색이 발광되었다. 반면 CO의 비율을 높여갈수록 화염의 휘도가 높아졌고, 불꽃의 길이도 가운데로 길어지고, 덤프면으로 퍼지지 않는 형상을 보였다. 메탄화염과 비교를 하면 H₂, CO 화염은 덤프면쪽으로 recirculation되는 영역이 거의 보이지 않는 것이 특징적이다. 노즐온도는 H₂/CO의 CH₄보다 전체적으로 높았으며 덤프면온도는 그 반대의 경향을 보였다. 또한 연소실출구온도 부하에 따라 증가하는 경향성이 매우 유사였다. 연소진동의 크기 CH₄의 경우 특정 부하에서 매우 크게 나타나는 반면, H₂, CO의 경우는 거의 나타나지 않았다. NO_x 배출량은 H₂가 CO와 CH₄보다 단일화염온도가 높기 때문에 NO_x 배출량이 높게 나타났으며, CO 배출량의 경우 CO가 가장 높은 결과를 보였다.

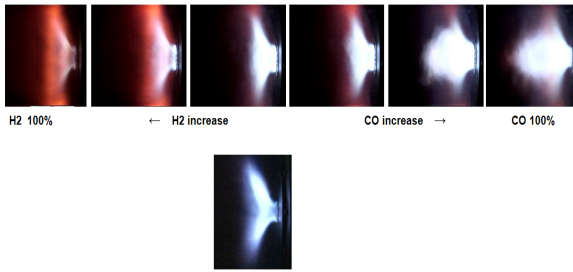


Fig. 4 H₂/CO비에 따른 화염영상과 메탄의 화염영상 비교

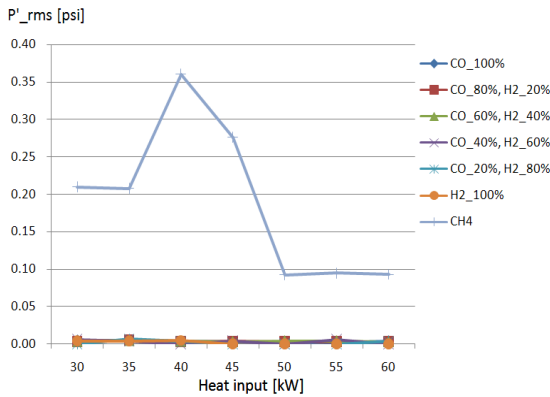


Fig. 5 Characteristics of Pressure Fluctuation according to the H₂/CO ratio

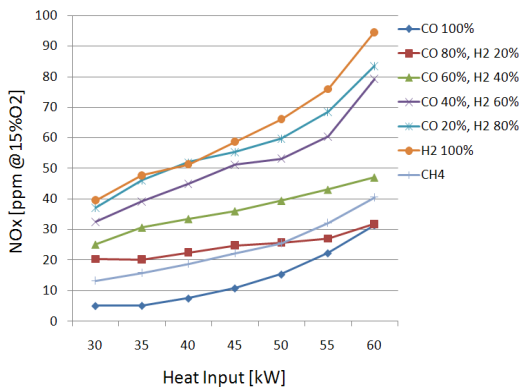


Fig. 6 Characteristics of NO_x emission according to the H₂/CO ratio

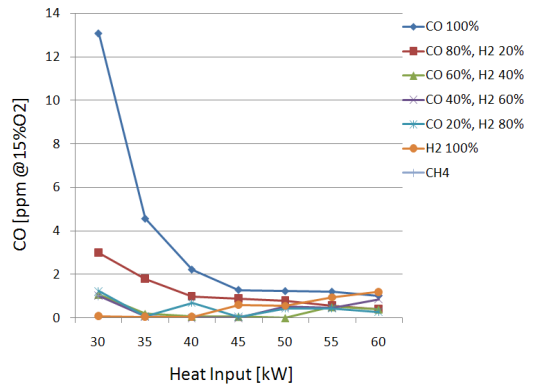


Fig. 7 Characteristics of CO emission according to the H₂/CO ratio

3.2 공기 온도에 따른 연소성능 시험

가스터빈 자체의 이상이 아닌 주위로부터의 외란에 따른 가스터빈에 고장사고가 자주 발생하기에 외란에 대한 강인성을 높일 필요가 있다. 외란 중 가장 큰 변화요인은 외부공기 온도이며, 이에 따라 연소기로 공급되는 공기의 온도가 변화한다. 본 실험에서는 이러한 공기온도에 따른 연소성능 특성을 알아보하고자 연소기 입구 공기 온도(15, 100, 200, 300, 400℃), H₂/CO비 및 총 입열량(30kW~60kW, 5kW 간격)을 변화시키면서 NO_x, CO배출가스, 동압진동, 온도(@연료노즐, 덤프면, 연소실 출구) 및 화염의 형상 등을 관찰하였다. 시험결과 중 연소진동 결과만을 그림6~8과 같이 도시하였다. 동압진동은 전체적으로 매우 낮은 수준이었고, CO 100%의 조건에서만 위험수준의 동압진동이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이 때 동압진동은 공기온도에 따라 발생하는 조건이 달랐고, 연소기 입구 공기온도가 증가할수록 동압진동이 감소하고, 그 발생하는 부하는 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 즉 가스터빈 연소진동은 연소기 입구 공기온도와 밀접한 관계가 있음을 보여주는 결과이다. 또한 이러한 동압진동이 발생하는 조건에서는 연소실 내 각 부분에서의 온도 및 배기가스 배출특성도 경향성에서 벗어난 특이한 결과를 보였다.

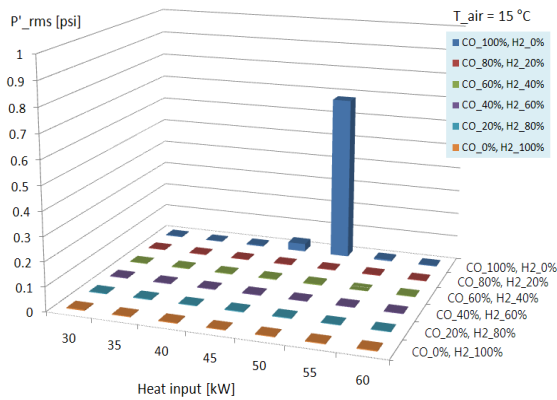


Fig. 8 Characteristics of Pressure Fluctuation at $T_{air}=15^{\circ}C$

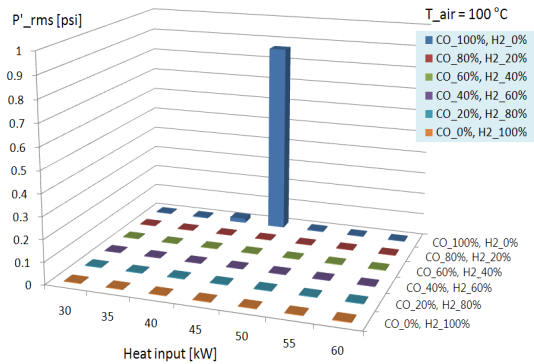


Fig. 9 Characteristics of Pressure Fluctuation at $T_{air}=100^{\circ}C$

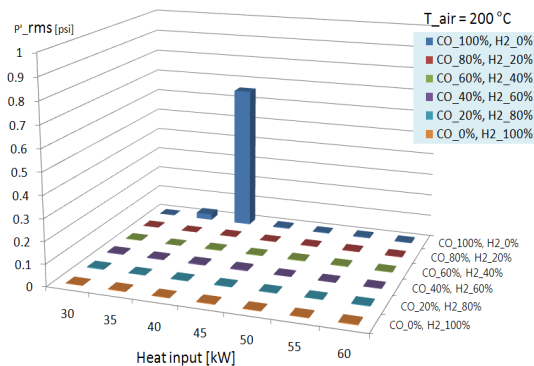


Fig. 10 Characteristics of Pressure Fluctuation at $T_{air}=200^{\circ}C$

3.3 메탄으로부터 석탄가스로 연료전환시 연소성능 시험

일반 복합화력발전소의 주연료로 많이 사용되는 천연가스는 IGCC 플랜트에서도 기동용 연료 혹은 Back up 연료로 많이 사용되고 있다. 기동시에 천연가스를 사용하여 약 50%의 부하까지 가스터빈 출력을 증가시킨 상태에서 석탄가스를 가스터빈으로 동시 주입하면서 천연가스를 서서히 줄여가는 형식으로 연료제어를 하는데, 이 때 Trip 사고가 빈번히 발생한다고 Polk Power 플랜트 등에서 보고되고 있다. 이에 메탄과 석탄가스 연료전환시 연료비율에 따른 연소성능을 알아볼 필요가 있어, Tab. 2와 같은 조건에서 상압 연소실험을 수행하였다. 석탄가스 조성은 Buggenum 플랜트의 가스터빈 입구조성비율을 이용하였고, 온도는 $200^{\circ}C$ 로 공급하였다. 메탄의 경우는 상온으로 공급하였고, 메탄과 석탄가스가 혼합되어 공급되는 조건에서는 연소기 바로 전단에 가스혼합기를 이용하여 충분히 빠른 속도로 혼합한 후에 공급하였다. 본 실험에서는 증기 유량제어 성능이 다소 부진하여, 증기 대신 동일한 희석효과를 보이는 질소를 비열비만큼 더 주입하는 것으로 대체하였다.

NOx 배출특성은 메탄 100%의 경우가 35kW 부하조건을 제외하고 가장 높았다. 또한 35kW 부하조건에서 메탄은 연소진동이 크게 일어났고, 이에 불안정한 연소특성을 보였다. 메탄함량이 80%일 때부터 점차 감소함에 따라 NOx 배출량도 감소됨을 보였는데 이는 석탄가스의 희석제가 NOx의 배출을 억제시켜주는 데 큰 영향을 미친 것으로 해석된다. CO 배출특성의 경우 석탄가스가 100%일 때 가장 많은 배출결과를 보였으나, 10ppm이하로 대체로 만족할 만한 수준이었다. 동압진동특성은 그림 11에서와 같이 메탄의 경우만 연소진동이 발생하고 그 외 석탄가스가 20% 이상 혼합되면 연소진동이 발생하지 않았다.

Table 2. Test Condition of Fuel Change from CH4 to Syngas

Gas	Unit	Composition (Buggenum Plant)	Composition (Tested)
H ₂	vol. %	12.3	11.9
CO	vol. %	24.8	24.0
CH ₄	vol. %	0	0.0
CO ₂	vol. %	0.8	0.8
H ₂ O	vol. %	19.1	0
O ₂	vol. %	0.4	0
N ₂ +Ar	vol. %	42.6	63.4
Sum	vol. %	100	100.0
Temp.	°C	300	200

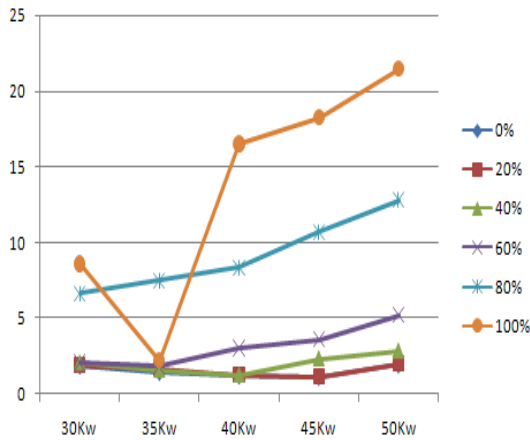


Fig. 11 NOx emission Characteristics of Syngas and methane [Unit: ppm @15% O₂]

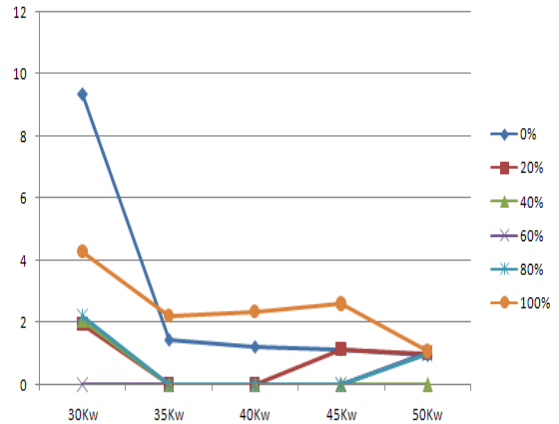


Fig. 12 CO emission Characteristics of Syngas and methane [Unit: ppm @15% O₂]

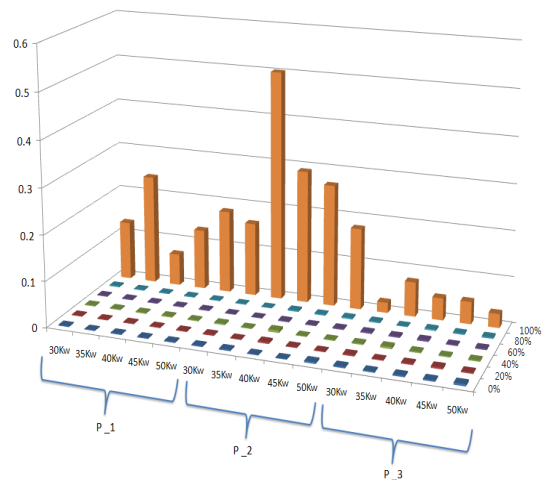


Fig. 13 Pressure Fluctuation Characteristics of Syngas and methane [Unit: psi]

덤프면 온도는 100% 메탄의 경우를 제외하고는 부하에 따라 서서히 증가하는 경향을 보였다. 100% 메탄, 35 kW 부하 조건에서는 연소진동이 발생으로 인해 덤프면, 노즐, 연소기 출구 온도 결과에서 확인할 수 있듯이 다소 특이한 경향을 보였다. 이는 연소진동으로 인해 화염의 고온영역을 이동시키고, 각 연소기 노즐 및 덤프면 출구 온도까지 영향을 미치는 것으로 이해할 수 있다. 노즐 온도는 석탄가스의 경우 300°C, 메탄의 경우 400°C 근처에서 부하에 따라 균일한 온도

특성을 보였다. 노즐온도가 석탄가스가 첨가되면 떨어지는 이유는 다량의 회석제를 포함한 석탄가스가 노즐로부터 화염을 멀리 밀어내는 효과를 보이기 때문인 것과 회석제를 포함한 200℃ 이하의 석탄가스가 노즐을 냉각시키기 때문으로 사료된다. 연소기 출구온도 특성은 연소진동에 따라 약간의 변화가 있었지만 전체적으로 부하에 따라 균일하게 증가하는 경향을 보였다.

Table 3. Flame Images of CH₄ and Syngas

Load (kW)	Syngas : CH ₄					
	100 : 0	80 : 20	60 : 40	40 : 60	20 : 80	100 : 0
30						
35						
40						
45						
50						

3.4 질소 회석 영향평가

NO_x 제어를 위해 사용되는 질소의 영향을 그림 14와 같이 확인하였다. 질소회석시 NO_x를 현저히 줄일 수 있었으며, 그 효과는 고부하시 더 컸고, 초기 회석제 투입시 더욱 효과적이었다.

이러한 상압시험 결과는 고압시험에도 유효함을 검증하기 위해 12barg, 400℃ 공기공급조건에서 고압연소시험을 수행하였다. 그림 14에서와 같이 부하의 증가에 따라 연소효율과 NO_x 배출량이 증가함을 볼 수 있다. 그러나 연소효율의

경우 전부하에서 거의 100%에 가까운 수준이어서 전혀 문제시 수준이 아니다. 즉 주입된 석탄가스 연료를 완전연소하는 결과를 볼 때, GE7EA 가스터빈은 고압조건에서 석탄가스 연소 효율이 매우 우수함을 알 수 있다. 한편 NO_x 배출특성은 실제 조건과 비교할 때, 화염의 안정성이 떨어져 회석제를 충분히 주입하지 못해 NO_x 배출이 과대해 짐을 알 수 있다. 실제 GE7EA 연소기는 WLN 타입으로 물분사를 통해 NO_x를 제어하지만 본 시험에서는 연소기 내에 물을 직접하지 않았다는 점을 고려할 때, IGCC플랜트에서의 NO_x 배출특성을 크게 개선될 가능성이 있다. IGCC플랜트에서 연료측으로 질소회석시 연소효율과 NO_x 배출량의 변화를 관측하기 위해 표 3과 같은 조건으로 시험을 실시하였다. 질소회석량을 4배 증가시키고, 그 외의 조건은 거의 동일하게 유지한 상태에서 연소효율과 NO_x 배출량의 변화는 그림 12과 같다. NO_x 배출량은 약 4분의 1로 크게 줄어드는 결과를 보였고, 연소효율은 99.9%에서 94.9%로 줄어들었다. 이는 실제 IGCC운영시 질소회석시 고려해야할 중요한 사항이라 할 수 있다[7].

Table 4. High Pressure Combustion Test Condition to Evaluate Diluent Effect

Case #	Power Output [MW]	Pres. of comb. [barg]	Flow rate [kg/hr]				
			H ₂	CO	N ₂	CO ₂	Steam
1	3.30	11.82	60.1	105.2	27.4	3.2	14.8
2	3.34	11.80	58.8	108.4	102.8	3.0	14.7

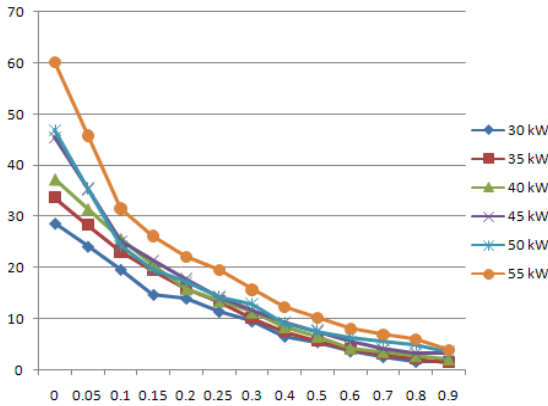


Fig. 14 NOx Emission Characteristics with respect to N2 dilution ratio [Unit: ppm @15% O2]

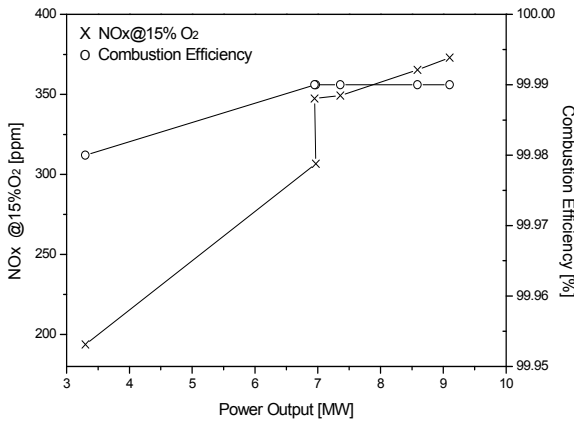


Fig. 15 Combustion Efficiency and NOx Emission

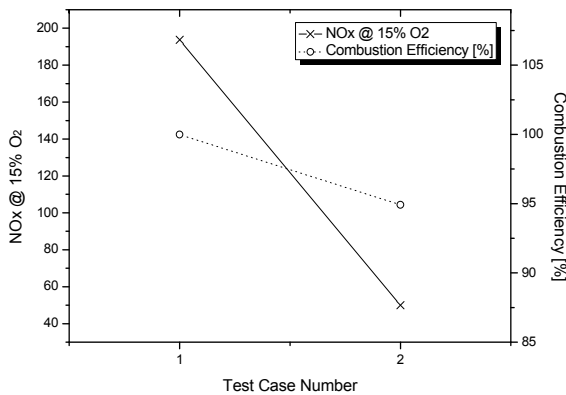


Fig. 16 Nitrogen dilution effect on NOx reduction and combustion efficiency in high pressure combustion

4. 결 론

GE7EA 가스터빈 연소기 1can을 대상으로 석탄가스 상압 및 고압연소시험을 수행하였으며 이를 통해 부하별 연소특성, 천연가스로부터 석탄가스의 연료전환실험, 공기온도에 따른 영향 및 질소회석에 대한 영향을 살펴보았다. 본 시험을 통해 도출된 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 연소진동의 크기 : H₂/CO 가스 < CH₄
- NO_x 배출량 : H₂ > CH₄
- CO 배출량 : CO > CH₄ ≒ H₂
- 노즐온도 : H₂/CO 가스 > CH₄
- 덤프면 온도 : H₂/CO 가스 < CH₄
- 연소실 출구온도 : H₂/CO 가스 ≒ CH₄

특히 고압연소시험시 부하의 증가에 따라 NO_x배출량 및 연소효율이 증가하였고, 7MW이후에는 100%의 연소효율을 보였다. 대부분의 NO_x배출은 thermal NO_x로 인해 기인한다는 것을 질소회석시험을 통해 확인할 수 있었다. 그러므로 IGCC플랜트 운영시 NO_x 저감을 위해 Syngas Saturator 및 산소분리장치에서 남은 잉여 질소의 연료측 회석기술을 이용한다. 그러나 본 시험을 통해 확인한 결과 저부하시 질소 회석 및 합성가스 증기포화는 화염의 안정성 및 연소효율 측면에서 부정적이므로 실험을 통해 신중히 검토할 필요가 있으며, 향후 추가 연소시험을 통해 다양한 연소조건과 연료조성에 대해 석탄가스 연소특성을 관찰하고, DB화하여 태안 IGCC플랜트의 안정적 운영에 기여코자 한다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KEPTEP)의 지원을 받아 수행한 한국형 300MW급 IGCC실증플랜트 기술 개발사업 연구 과제의 성과물입니다.

(No. 2011951010001C)

참 고 문 헌

1. J. Phillips, "Integrated Gasification Combined Cycle Design Consideration for High Availability" EPRI Technical Report, 2007, NO. 1012226
2. Hasegawa, T, Sato, M, Nakata, T, "A study of combustion characteristics of gasified coal fuel" Trans of the ASME 123, 2001, pp.22-32
3. Lee, M.C, et al., "Experimental study on synthetic gas combustion for IGCC application" RE2008 conference, 2008, AB-435
4. Lee, M.C, et al., "Gas turbine combustion performance test of hydrogen and carbon monoxide synthetic gas". Fuel 89, 2010, pp. 1485-91
5. Richard A. D. et al., "Development of baseline performance values for turbines in existing IGCC applications" Proceedings of ASME Turbo Expo, 2007, GT2007-28096
6. Venkatraman I. et al., "Evaluation of emissions performance of existing combustion technologies for syngas combustion" Proceedings of ASME TurboExpo, 2005, GT2005-68513
7. 이민철, 서석빈, 박세익, 운영빈, "석탄으로부터 생성된 합성가스의 가스터빈 고압연소성능시험". 한국연소학회 춘계학술대회 논문집, 2011, pp.313-318
8. 주용진 외, "한국형 300MW급 IGCC실증플랜트 운영기술 개발 과제 1단계 최종보고서", 지식경제부 신재생에너지기술개발사업, 2010