

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(8), 639-648(2013)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.8.639>

모델 가스터빈 연소기에서 합성가스 연소성능시험 - Part 2 : NO_x/CO 배출특성, 온도특성, 화염구조

이민철*^{***}, 윤지수^{**}, 주성필^{**}, 윤영빈^{**}

Combustion Performance Test of Syngas Gas in a Model Gas Turbine Combustor - Part 2 : NO_x/CO emission Characteristics, Temperature Characteristics and Flame Structures

Min Chul Lee*^{***}, Jisu Yoon^{**}, Seong Pil Joo^{**} and Youngbin Yoon^{**}

Korea Electric Power Corporation, KEPCO Research Institute*

Seoul National University, School of Mechanical and Aeronautic Engineering^{**}

ABSTRACT

This paper describes on the NO_x/CO emission characteristics, temperature characteristics and flame structures when firing coal derived synthetic gas especially for gases of Buggenum and Taean IGCC. These combustion characteristics were observed by conducting ambient-pressure elevated-temperature combustion tests in GE7EA model combustor when varying heat input and nitrogen dilution ratio. Nitrogen addition caused decrement in adiabatic flame temperature, thus resulting in the NO_x reduction. At low heat input condition, nitrogen dilution raised the CO emission dramatically due to incomplete combustion. These NO_x reduction and CO arising phenomena were observed at certain flame temperature of 1500 °C and 1250 °C, respectively. As increasing nitrogen dilution, adiabatic flame temperature and combustor liner temperature were decreased and singular points were detected due to change in flame structure such as flame lifting. From the results, the effect of nitrogen dilution on the NO_x/CO and flame structure was examined, and the test data will be utilized as a reference to achieve optimal operating condition of the Taean IGCC demonstration plant.

초 록

본 논문은 부게넘 및 태안 IGCC플랜트의 연료를 대상으로 석탄으로부터 생성된 합성가스의 NO_x/CO배출 특성, 온도특성, 화염의 구조에 대해 기술하였다. GE7EA 모사 가스터빈 연소기를 대상으로 상압 고온 연소시험을 수행하여 입열량 및 질소희석에 따른 연소특성을 관찰하였다. 입열량이 감소하고, 희석계량이 증가할 때 단열화염온도의 감소로 NO_x가 감소하였고, 저부하에서는 희석량이 증가할수록 불완전 연소로 인해 CO가 증가하였다. 이러한 NO_x 감소 및 CO발생은 각각 1500 °C 와 1250 °C의 특정 화염온도에서 관찰되었다. 또한 질소 희석이 증가할수록 단열화염온도 및 연소기 라이너의 온도가 감소했고, 화염 부상과 같은 화염구조의 변화로 인해 특이점이 관찰되었다. 본 연구결과를 통해 질소희석이 NO_x/CO배출 및 온도, 화염구조에 미치는 영향이 검토되었으며, 시험 데이터는 향후 태안 IGCC 플랜트의 운전시 최적 조건 선정을 위한 기초자료로 활용될 예정이다.

† Received: April 12, 2013 Accepted: July 19, 2013

* Corresponding author, E-mail : lmc@snu.ac.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

Key Words : Synthetic Gas(합성가스), Integrated Gasification Combined Cycle(석탄가스화 복합발전), Gas Turbine Combustion(가스터빈 연소), Nitrous Oxides(질소산화물), Carbon Monoxide(일산화탄소)

1. 서론

1.1 연구배경

세계 제2차 대전(World War II) 시기에 석유를 대체하기 위한 기술로서 독일에서 활발히 개발된 석탄가스화 기술은 최근 에너지 안보 및 기후환경에 대한 관심이 고조됨에 따라, 이와 관련된 문제의 해결책 중 하나로 석탄가스화 복합발전기술(Integrated Gasification Combined Cycle)에 대한 실증사업들이 미국, 중국, 유럽, 일본, 호주, 한국을 중심으로 이루어지고 있다. 특히 국내에서는 정부주도로 한국서부발전에서 총괄주관하여 2015년 말에 300 MW급 태안 IGCC 플랜트를 건설함과 동시에, 한국형 플랜트의 설계·제작·운영 기술을 개발 중에 있다. 석탄가스화 복합발전 기술은 고체상의 연료인 석탄을 가스화한 후 탈황·집진의 정제과정을 거쳐 깨끗한 합성가스를 연료로 가스터빈 복합발전에서 전력을 생산하는 기술이다. 그러나 해외의 IGCC플랜트 운전사례를 볼 때, 플랜트 운영율은 기동 초기에 80% 미만으로 매우 낮다. 이에 대한 큰 원인 중 하나가 가스터빈 복합발전부에서의 사고이며, 이를 개선하기 위한 많은 노력이 있어왔으나 여전히 합성가스 터빈부에서 문제로 인한 가동정지 사고사례는 지속적으로 보고되고 있는 실정이다. 본 연구의 목적은 태안 IGCC플랜트를 대상으로 가동정지율을 낮추고, 운영 신뢰도를 높이기 위한 방안으로 합성가스의 연소특성을 미리 파악하여, 문제가 될 소지를 예측 및 해결하는 데 기여하고자 하는데 있다.

최근 발전기계기술의 발달로 Fig. 1과 같이 질소산화물의 환경규제치가 더욱 엄격해 지고 있다. 규제 (1)인 대기환경보존법에 따르면, 2009년까지 기존의 가스터빈 발전플랜트는 13% 산소보정시 250 ppm으로 매우 관대한 수준이었으나, 2010년 이후부터는 100 ppm으로 더 엄격한 관리기준이 적용되고 있고, 가장 엄격한 기준인 규제 (7)의 수도권 대기환경개선에 관한 특별법에 따르면 2010년부터 10 MW_e이상의 대형 기관에 대해서 15% 산소보정시 20 ppm으로 그 기준이 매우 엄격해졌다. 실제 IGCC플랜트는 고체연료인 석탄을 사용하지만, 가스화된 합성가스를 가스터빈에서 연소시키기 때문에 고체연료의 기준

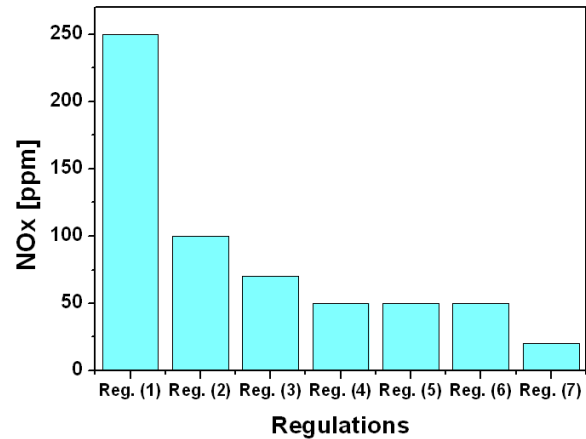


Fig. 1. Korea NOx emission regulations of gas turbine for power generation

을 따르지 않고, 신규 법규가 현재 제정 중에 있고, 정부(안)에 따르면 15% 산소보정시 약 50 ppm 내외의 수준으로 고시될 예정이다. 이에 본 연구에서는 이러한 NOx배출규제를 합성가스만족할 수 있을지 가능성을 판단하고, 특히 IGCC 플랜트 내의 산소분리공정(Air Separation Unit)으로부터 생산되는 잉여의 질소를 이용하여 NOx를 저감시 이 희석용 질소가 가스터빈 연소 성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

- 규제 (1) : 대기환경법(2009년까지, 기존설비 대상)
- 규제 (2) : 대기환경법(2010년부터, 기존설비 대상)
- 규제 (3) : 대기환경법(2009년부터, 신규설비 대상)
- 규제 (4) : 대기환경법(2010년부터, 신규설비 대상)
- 규제 (5) : 경기도조례(2005년부터, 신규설비 대상)
- 규제 (6) : 수도권법(2010년부터, 중형설비 대상)
- 규제 (7) : 수도권법(2010년부터, 대형설비 대상)

1.2 이전의 합성가스 연소연구

본 연구팀에서 합성가스의 화염안정성에 관해 다룬 연구(Part I)와 함께 본 논문에서는 NOx/CO의 배출특성, 온도특성, 화염구조를 다루고자 한다. 합성가스의 가스터빈 연소환경에서 연소특성에 관한 연구는 1990년대부터 미국을 중심으로 일본, 유럽 등에서 이루어져 왔으며 최근에는 국내에서 태안 IGCC의 안정적 운영을 위하여, 활발히 연구활동이 이루어지고 있다. 미국 조지아텍 대학의 Lieuwen 등은 덤프형 예혼합

연소기를 대상으로 다양한 조성비의 H₂, CO, CH₄ 합성가스의 연소시 blowout, flashback, 자발화, 화염안정성 등에 대해 보고하였고[1], 동 연구기관의 Natarajan 등은 합성가스 연료의 층류화염속도[2]를 계산하여, 합성가스 연소물성 데이터를 확보하는데 기여하였다. 또한 미국 Utah 대학의 Kevin 등은 합성가스 연소시 생성되는 NO_x, SO_x, CO, VOC, 분진 등의 배기배출물에 대해 정량적으로 비교하고, 생성기구를 설명함으로써 합성가스 연소의 청정성을 확인하였다[3]. 일본 CRIEPI의 하세가와 등은 터빈입구온도 1500°C급 가스터빈 연소기를 개발하고, 합성가스 연소시 우수한 NO_x 발생특성 및 화염안정성에 대해 보고하였으며[4], 국내 한전 전력연구원의 Lee등은 합성가스의 기본적인 특성파악을 위해 GE7EA 연소기를 대상으로 H₂/CO비 및 질소, 이산화탄소, 스팀 회석에 따른 NO_x 및 CO배출 특성, 연소안정성, 연소실 온도특성, 화염구조 등을 파악하였다[5, 6]. 앞선 선행연구를 배경으로 본 연구에서는 보다 실증플랜트의 성격에 맞게 네덜란드 부게넘(Buggenum) IGCC 플랜트의 합성가스의 조성파악과 태안 IGCC 플랜트 합성가스 조성을 대상으로 연소성능시험을 수행하고 비교한 결과를 보고하고자 한다.

II. 본 론

2.1 시험방법

2.1.1 시험설비 및 연소기

Figure 2는 본 연소시험을 위하여 구성된 모델 가스터빈 연소시험설비이다. 본 실험을 위해서는 수소, 일산화탄소, 질소의 원료가스를 각각 질량 유량계를 통해 유량제한 후 In-line static mixer를 통해 혼합하여 가스터빈 연소기로 공급

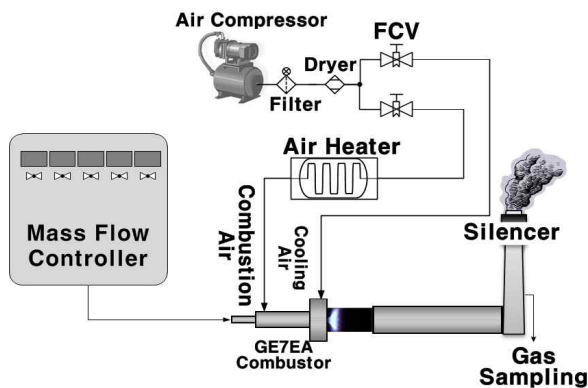


Fig. 2. Model gas turbine combustion test facility

하였다. 발전용 가스터빈 유사환경을 모사하기 위해 연소용 공기를 약 200°C로 예열하여 20g/s의 유량으로 공급하였으며, 화염가시화를 위한 석영관 냉각용 공기도 연소용 공기와 동등한 수준의 유량으로 공급하였다. 여기서 연소실 입구 온도가 실제 가스터빈 압축기 출구온도(356 °C) 보다는 156 °C 낮은 온도에서 시험이 수행되었는데, 이는 연소실 석영관의 파손을 예방하고, 시험의 안전을 위해 수소 사용시 자발화 온도까지 공기히터에서 가열하는 것을 막기 위해 200 °C로 연소실 입구온도 결정하여 시험을 수행하였다. 입구온도의 저감으로 인해 연소성능이 다소 달라질 수 있으나, 부하에 따른 그 성능결과의 경향 및 질소회석의 영향을 확인하는 등 정성적 측면에서는 충분히 의미있는 결과가 도출될 수 있기에 시험설비가 허용하는 최고의 온도에서 시험을 수행하였다. 시험용 연소기로는 국내 평택 복합화력 발전소에서 사용 중인 87MWe급 GE7EA 가스터빈 연소기를 축소한 모델 가스터빈 연소기를 제작한 후 사용하였다. 실제 IGCC 플랜트에서는 수소의 빠른 연소속도로 인한 역화의 우려로 인해, 예혼합(premixed) 화염의 연소방식을 채택하지 않고, 부분예혼합 또는 확산화염의 연소방식을 채택하고 있기에 본 연구에서도 이와 유사하게 부분예혼합 연소방식인 GE7EA 연소기를 시험대상으로 채택하였다. 실제 GE7EA 가스터빈 연소기는 10개의 동일한 can으로 구성된 can-annular 형의 연소시스템을 채용하고 있고, 본 실험에서는 그 중 1 can에 대해 길이비 기준 1/3스케일로 축소하여 모델 가스터빈 연소기를 제작한 후 사용하였으며, 연소실 후단부를 막힐 면적의 비가 90%인 plug nozzle로 막아서 음향경계조건이 형성되도록 하였다. 이렇게 후단부가 막히면서 연소실내 압력은 상압 혹은 상압보다 0.4bar 까지 상승된 값을 보였다. 한편, 실제 대상 가스터빈 엔진의 공기공급 유량은 290.98kg/s인데, 압력비(13.7:1)와 부피상사비(27:1) 및 연소용 공기비율(30%)을 고려하여 앞서 기술한 바와 같이 연소용 공기공급 유량을 20g/s로 결정하였다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 m_{air, tested} &= m_{air, realengine} \times \frac{1can}{10can} \times \text{압력비} \\
 &\quad \times \text{부피상사비} \times \text{연소용공기비} \\
 &= 290.98 \text{ kg} \times \frac{1}{10} \times \frac{1}{13.7} \times \frac{1}{3^3} \times 30\% \\
 &= 0.02 \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

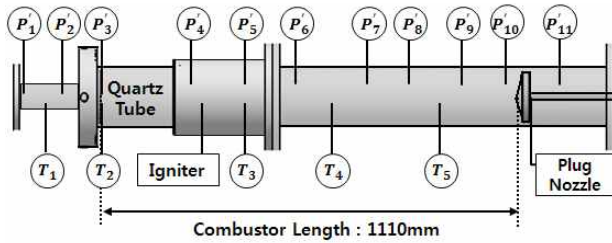


Fig. 3. Schematic diagram of model gas turbine combustion test rig

Table 1. Experimental conditions.

Items	Unit	Value
Combustion chamber pressure	bara	1.0~1.4
Air inlet temperature	°C	200
Mean mixture jet velocity at combustor inlet	m/s	41.2~74.9
Reynolds number	-	28,398~51,600
Swirl number	-	0.832
Heat input	kW _{th}	30~60
Overall equivalence ratio	L/L	0.38~0.77
Nitrogen dilution ratio	%	0~150

여기서 $m_{air, tested}$ 은 본 연구의 연소용 공기 공급 유량이고, $m_{air, realengine}$ 은 실제 엔진의 압축기 출구 공기공급 유량이다.

연소실은 Fig. 3과 같이 연소실 전체의 길이는 1110 mm, 내경은 130 mm으로 설계하였고, 화염 구조 파악을 위해 상류측에는 210 mm 길이의 석영관 부를 두었으며, 음향경계를 형성하기 위해 연소실 후단에는 수냉각 Plug nozzle을 설치하였다. 연소기는 동축 스윙 단일 노즐로 구성되어 있고, 연소용 공기는 축방향에 대하여 45도의 스윙각도를 가지는 스윙러를 통해 유입되고, 연소실로부터 약 2.7 mm의 짧은 예혼합거리를 가지는 위치에서 2.5 mm의 연료분사구를 통해 합성가스가 공급되어 연소실에서 부분예혼합의 형태로 연소되도록 구성되어 있다. 이 외 상세한 연소기의 형상 및 설명은 본 논문의 전편(Part I)[8]을 참조할 수 있다. 상기 언급된 실험조건 및 실험용 리그 사양을 정리하면 Table 1과 같다.

2.1.2 계측방법

본 연구를 위해서 Fig. 2와 같이 연소가 완전히 이루어진 연소실 출구에서 heated probe를 이용하여 배기가스를 포집한 후 TESTO 360 가스분석기를 이용하여 NO, NO₂, CO, O₂, CO₂ 등의 배기가스 농도를 측정하였으며, 이때 측정오

차는 각각의 측정셀에 대해 전체 측정범위의 3%, 1%, 1.2%, 2%, 2%이었고, 시험전 본 시험과 유사한 표준가스 분위기에서 보정절차를 거쳤기에 NO_x 측정의 정확도는 1 ppm 내외라 할 수 있다. 연소기 전후단의 온도계측 위해서는 5개의 k형 열전대를 이용하였으며, T₁ 및 T₃~T₅의 온도 측정은 내부 유동의 온도를 측정하기 위해 연소실 내측벽면 혹은 공기공급관의 내측벽면으로부터 10 mm 안쪽으로 떨어진 곳에서 계측되었다. 특히 T₃~T₅의 온도는 연소실 내부의 온도를 라이너를 따라 길이방향으로 등간격의 위치에서 측정하였으며, 화염의 거동에 따른 온도변화 및 내부 라이너의 온도추이를 확인하기 위한 목적으로 설치되었다. 온도 계측과 더불어 단열화염온도를 GRI 3.0 메카니즘을 이용하여 CANTERA 코드를 통해 화염온도를 계산하여 비교 도시하였다. 한편 화염구조의 파악을 위하여 PI-MAX Gen II ICCD카메라에 UV-Nikkor 105 mm 렌즈와 두 개의 광학필터(UG11, WG305)를 장착하여 OH라디칼의 분포를 촬영하였다.

2.1.3 시험조건

Shell 가스화 방식을 채용하고 있는 대표적인 두 개의 IGCC발전소인 네덜란드 부게넘 IGCC 플랜트와 태안 IGCC플랜트 합성가스 연료조성은 Table 2와 같다. 부게넘 플랜트의 H₂/CO비는 태안 플랜트에 비해 약 9%가 높고, 질소의 회석량이 8.7% 낮지만, 수분함량이 15%정도 높다는 것이 특징적이다. 또한 전체 연료의 열량을 비교하면 CO의 함량이 높은 태안이 저위발열량(Lower Heating Value, LHV)기준으로 약 20% 정도 높다. 이러한 연료구성을 대상으로 동일한 구성비율을 유지하면서 본 연소시험 리그에 맞게 30~60 kW의 연료열량을 가지도록 수소 및 일산화탄소를 공급하였으며, 가연성 가스가 아닌 질소, 이산화탄소, 스팀은 각각 동일한 열용량을 가지도록 계산하여 질소의 값으로 치환하여 실험시 합성가스를 제조 공급하였다.

2.2 시험결과

2.2.1 NO_x 배출 특성

두 가지 시험대상 연료에 대해 H₂/CO의 비율은 Table 2와 같이 유지하면서, 입열량을 30 kW에서 60 kW까지 5 kW간격으로 증가시킬 때 질소회석률에 따른 NO_x 배출특성을 관찰하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 태안과 부게넘 합성가스의 질소회석률에 따른 NO_x 및 CO배출특성을 나타낸다. 여기서 합성가스의 질소회석률(Dilution

Table 2. Syngas composition of Buggenum and Taeon

Syngas composition	Unit	Buggenum	Taeon
H ₂	mol%	12.3	12.7~12.9
CO	mol%	24.8	31.3~31.5
CH ₄	mol%	0.0	0.0~0.1
N ₂	mol%	42.4	50.6~50.8
CO ₂	mol%	0.8	0.2~0.4
H ₂ O	mol%	19.1	4.2~4.5
Ar	mol%	0.6	0.2~0.4
H ₂ S	mol%	0.0	0.0
Sum	mol%	100.0	100.0
LHV	MJ/Nm ³	4.46	5.35~5.37
H ₂ /CO	%	49.6	40.5~40.6
Mole fraction of combustible gas	mol%	37.1	44.1~44.3
N ₂ equivalent dilution ratio	mol%	65.4	56.3~56.5

ratio of nitrogen, DR_{N2})은 식 (1)과 같이 질소의 질량유량을 합성가스 총유량과 질소 동등 희석률(N₂ equivalent dilution ratio, DR_{N2,eq})의 곱으로 나누는 값으로 정의하였고, 이 때 Table 2의 질소 동등 희석률인 65.4% 및 56.4%의 물분율을 각각 100%의 질소희석률과 같게 된다.

$$DR_{N_2} = \frac{\dot{m}_{N_2}}{DR_{N_2,eq} \times \dot{m}_{syngas}} \quad (1)$$

여기서 \dot{m}_{syngas} 는 합성가스의 총 질량유량을 \dot{m}_{N_2} 는 합성가스 중 질소의 질량유량을 의미한다. 우선 태안 합성가스의 경우 질소를 희석하지 않고, 입열량이 30 kW에서 60 kW까지 높일 때 NOx의 발생량은 1ppm이하에서 순차적으로 높아져 16ppm이상까지 다량 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 입열량의 증가에 따른 화염온도 상승이 열적 NOx의 과다 발생을 유발시켰기 때문이라 할 수 있다. 즉 각각의 실험조건에 대해 단열화염온도(adiabatic flame temperature)를 계산해 보면 Fig. 10과 같고, 입열량이 30kW에서 60 kW로 증가할 때 단열화염온도는 1311°C에서 2066°C로 대폭 상승하였고, 연소기 라이너(combustor liner)온도(T₃) 또한 638°C에서 838°C로 크게 증가한 것이 NOx상승의 원인이라 할 수 있다. 한편 합성가스 내 질소의 비율을 높일 경우 NOx의 발생량이 급격히 줄어드는 것을 확인할 수 있고, 이는 질소가 연료내 가연성 가스

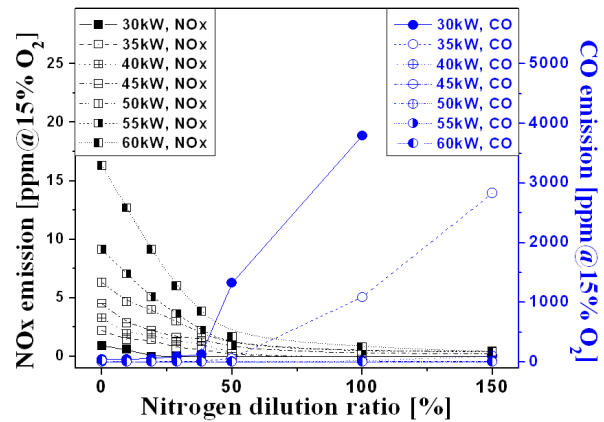


Fig. 4. NOx and CO emission of Taeon with respect to the nitrogen dilution ratio

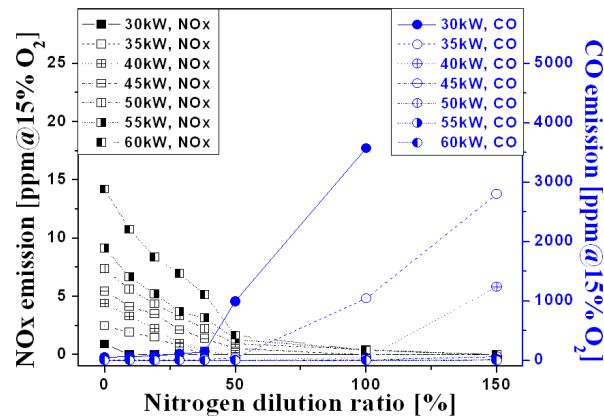


Fig. 5. NOx and CO emission of Buggenum with respect to the nitrogen dilution ratio

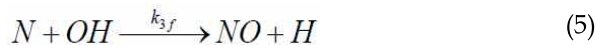
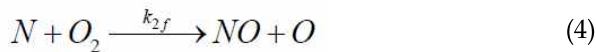
를 희석시켜, 화염의 온도를 떨어뜨리기 때문이라고 할 수 있다. 즉 60 kW 조건에서 질소로 희석하지 않을 때 단열화염온도는 앞서 언급한 바와 같이 2066 °C이고, 150% 질소희석률 조건에서는 1626 °C로 현저히 감소하는 것이 NOx저감의 주 원인이라 할 수 있다. 또한 질소희석율이 50%이상일 경우 모든 입열량 조건에 대해 NOx 발생량이 3 ppm미만으로 저감되는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 값으로 추정컨대, 태안과 부계념 모두 NOx저감을 위해 충분한 잉여 질소를 공급하고 있다고 할 수 있다. 이 모든 경향은 Fig. 5에 도시된 바와 같이 부계념 합성가스의 경우도 동일했으며, 그 발생량도 태안의 경우와 동등한 수준임을 확인할 수 있다.

한편 희석제 열용량(Diluent Heat Capacity)을 식 (2)와 같이 질소의 질량유량과 정압비열의 곱으로 정의하고, 이에 따른 NOx 발생량의 경향을 Fig. 6과 같이 도시하였다.

$$\text{Diluent heat capacity [J/ K-s]} = \dot{m}_{N_2} \cdot C_{p, N_2} \quad (2)$$

여기서 C_{p, N_2} 는 상온(300K)에서 질소의 정압비열 (specific heat at constant pressure)을 의미한다. 희석제 열용량은 질소의 주입으로 인해 화염의 온도를 얼마나 많이 떨어뜨릴 수 있는지와 관계되는 양으로 부계념과 태안의 합성가스의 NOx 발생결과를 동시에 비교할 수 있는 기준이 된다고 할 수 있다.

Figure 6을 통해 질소의 열용량 증가에 따라 NOx가 지수승으로 감소하는 경향을 모든 연료 및 부하조건에 대해 명확히 확인할 수 있다. Extended Zeldovich NOx 발생 메커니즘[7]인 식 (3)~(5) 및 NO에 대한 화학평형식인 식 (6)에 의하면 질소의 물분율이 증가하면, NOx 발생량이 증가하지만, 이 영향보다는 화염온도의 저감이 NOx발생량을 줄이는데 훨씬 큰 영향을 미치는 것으로 분석된다. 이는 다시 간단한 수치계산으로도 확인이 가능하다. 예를 들어 입열량이 60 kW 일 때, 0% 및 150% 질소희석율 조건을 비교하면, 연료-공기 혼합물 중 질소의 물분율은 $DR_{N_2}=0\%$ 일 때 37.4%에서 $DR_{N_2}=150\%$ 일 때 52.6%로 1.41배 상승했지만, 반대로 화염온도에 의한 k_{1f} 는 $DR_{N_2}=150\%$ 일 때 0.87에서 $DR_{N_2}=0\%$ 일 때 1550.9로 1778배 상승했다. 이렇듯 NOx발생에 있어서 질소의 물분율에 의한 영향은 화학반응계수의 변화에 비해 매우 미미한 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 이러한 결과는 NOx의 발생량이 희석제의 종류와 상관없이 단지 희석제의 열용량에만 관계한다는 Lee 등의 연구의 결과[6]와 일치한다.



$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{1f}[O]_{eq}[N_2]_{eq} \quad (6)$$

여기서, $[O]_{eq}$ 및 $[N_2]_{eq}$ 는 화학평형상태에서 산소원자와 질소분자의 물분율을 뜻하고, 화학반응을 계수인 k_{1f} , k_{2f} , k_{3f} 각각 아래와 같다.

$$k_{1f} = 1.8 \times 10^{11} \exp\left(\frac{-38,370}{T [K]}\right) \text{ m}^3 / \text{kmol} \cdot \text{s}$$

$$k_{2f} = 1.8 \times 10^7 T \exp\left(\frac{-4680}{T [K]}\right) \text{ m}^3 / \text{kmol} \cdot \text{s}$$

$$k_{3f} = 7.1 \times 10^{10} \exp\left(\frac{-450}{T [K]}\right) \text{ m}^3 / \text{kmol} \cdot \text{s}$$

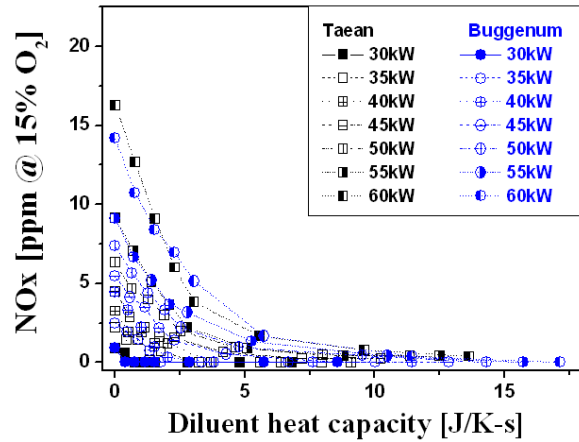


Fig. 6. NOx emission with respect to the nitrogen heat capacity

앞서 언급한 바와 같이 태안과 부계념 NOx발생량은 거의 동등수준이나, 질소희석량이 없을 때를 비교하면, H_2/CO 의 비율이 낮은 태안의 경우가 NOx발생량이 1~3 ppm 정도 약간 높게 배출되는 것을 알 수 있는데, 이는 화염의 구조와 관계 지어 그 원인을 분석할 수 있다. Fig. 11과 Fig. 12는 태안과 부계념 합성가스 연소시 화염으로부터 방출되는 OH 자발광 이미지와 Abel 역변환을 통해 얻어진 단면 이미지이다. 입열량 60 kW, 질소희석율 0%의 조건에서 두 연료에 대해 비교하면, H_2/CO 비가 9% 높은 태안의 경우가 화염면적이 다소 넓게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 열적 NOx의 발생 메커니즘에 따르면, 화염온도가 동등한 수준일 때는 체류시간(residence time)이 증가할수록 NOx의 발생량이 증가하는데, Fig. 10에서와 같이 두 연료에 대해 질소희석이 없을 경우 화염온도가 거의 동일하고, 화염면적은 태안의 경우가 약간 더 넓게 형성되기에 NOx발생량 차이를 열적 NOx의 생성 메커니즘과 상응한다고 할 수 있다. 한편 부계념의 경우 합성가스 중 질소의 열용량이 태안보다 다소 높은 것을 확인할 수 있고, 질소의 열용량이 5 J/K-s 이상에서 모든 실험조건에 대해 3 ppm미만의 NOx가 발생하고, 10 J/K-s 이상에서는 1ppm 미만이 되는 것을 확인할 수 있다.

Figure 7은 희석제 열용량에 따른 NOx 저감량을 나타내고 있다. NOx 저감량은 희석제인 질소를 연료 상에 첨가했을 때와 첨가하지 않았을 때 NOx발생량의 차로 정의하였다. 입열량이 증가할수록 질소희석열용량은 선형적으로 증가하였고, NOx 감소의 효과는 지수승으로 증가하는 경향을 보였다. 질소희석으로 인한 NOx 감소효과는 5 J/K-s이하에서 크게 나타남을 그 이후에는 거의 질소의 양을 늘려도 효과가 미미함을 확인할 수 있다.

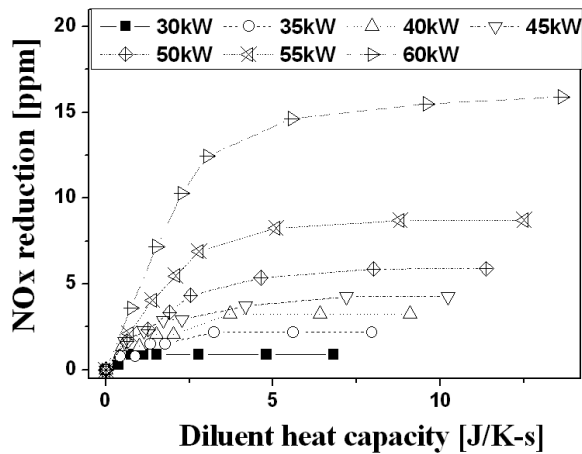


Fig. 7. NOx reduction of Taeon syngas combustion with respect to the diluent heat capacity of nitrogen

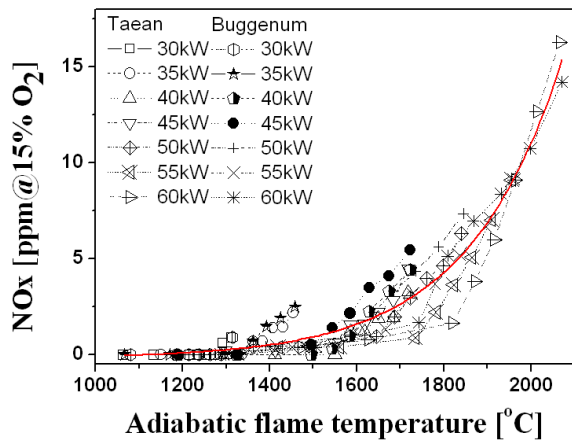


Fig. 8. NOx emission of Taeon and Buggenum with adiabatic flame temperature

Figure 8에서는 태안 및 부계넘 합성가스 연소 시 단일화염온도에 따른 NOx 발생량을 함께 도시하였다. 여기서는 모든 실험데이터에 대해 exponentially growing curve fitting을 한 적색 곡선을 기준으로 할 때, 단일화염온도가 1500°C 이상일 때부터 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 30 kW, 35 kW 등 일부 저부하에서 단일화염온도가 낮음에도 불구하고, NOx가 상당수준 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 본 실험에 사용된 연소기가 부분예혼합(partially premixed) 화염구조를 이루기 때문에 국부적인 고온부 형성으로 인한 열적 NOx가 발생한다고 할 수 있다. 즉, 저부하에서는 혼합기 유속저하로 인해 연료/공기의 혼합도가 고부하의 경우보다는 낮아지고, 이로 인해 불균일한 당량비 분포로 인한 고온부 형성이 저부하에서 curve fitting한 NOx 발생의 점근선보다 NOx가 높게 나타나는 원인이라 할 수 있다.

상기와 같이 부하에 따른 태안 및 부계넘 합성가스의 NOx발생특성을 살펴보고, 영향 및 원인을 분석하였다. 실제 부계넘 IGCC플랜트뿐만 아니라 미국의 탐파(Tampa), 와바시(Wabashi), 스페인의 푸에르토자노(Puertollano) 플랜트에서도 산소분리장치(Air Separation Unit)으로부터 분리된 질소를 가스터빈 연소기에서 NOx제어용으로 사용되고 있는데, 이러한 NOx 저감효과를 본 실험을 통해 확인할 수 있었으며, 이러한 데이터는 향후 국내에 건설될 태안 IGCC플랜트에서 질소의 희석비율 조정시 활용할 수 있다.

2.2.2 CO 배출 특성

태안과 부계넘 합성가스를 대상으로 H₂/CO의 비율은 Table 2와 같이 유지하면서, 입열량을 30 kW에서 60 kW까지 증가시킬 때 질소희석량에 따른 CO의 배출특성을 관찰하였다.

앞서 보여준 Fig. 4와 Fig. 5는 각각 두 가지 시험연료에 대한 CO의 배출특성을 보여준다. 주요한 특징은 태안의 경우 30 kW 및 35 kW의 저부하때 질소희석율이 50%일 경우 CO의 발생이 급격히 늘어나기 시작하여 수천 ppm의 범위로 심하게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 CO의 발생원인은 NOx발생과 유사하게 단일화염온도로 설명되어 질 수 있으며, 이를 위해 Fig. 9와 같이 모든 실험조건에서 단일화염온도에 대한 CO발생량을 도시하였다. 단일화염온도가 1250 °C이하에서 CO의 발생량이 현저히 높게 나타남을 1300 °C이상에서는 완전연소에 가까운 거의 0ppm의 CO가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 화염의 온도가 낮은 조건에서 CO의 연소반응이 충분히 활성화되지 않아 불완전 연소가 일어나기 때문으로 이해할 수 있다. 한편 부

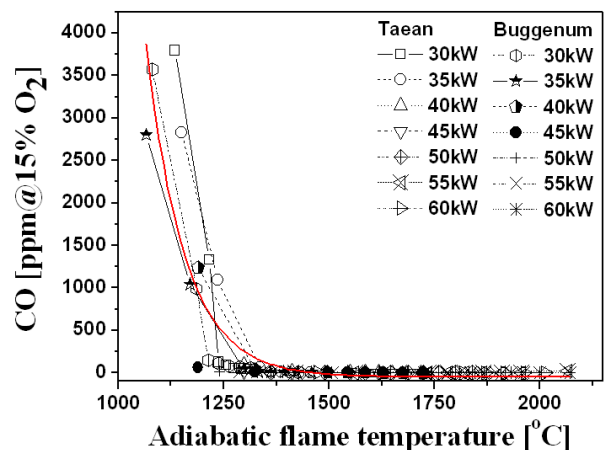


Fig. 9. CO emission of Taeon and Buggenum with adiabatic flame temperature

계념 연료가스의 경우 30 kW, 35 kW뿐 아니라 40 kW일 때도, 150% 질소희석을 조건에서 1000 ppm이상의 CO가 발생하였는데, 이는 Fig. 6에서 확인한 바와 같이 질소의 희석열용량이 부계념의 경우가 훨씬 더 많기 때문이라고 할 수 있다. 이렇듯 질소의 희석은 NO_x의 저감에는 매우 효과적이지만, 과도한 희석은 CO의 발생 및 불안정한 연소를 야기시킬 수 있으므로, 최적의 연소상태를 유지하기 위해서는 적절하게 질소혼합비율의 제어할 필요가 있다.

2.2.3 온도 특성

Figure 10은 태안 및 부계념 합성가스를 대상으로 입열량을 30 kW에서 60 kW까지 증가시킬 때 질소희석량에 따른 연소용 공기의 연소기 입구 온도(T_1), 연소기 라이너 온도(T_3) 및 단열화염온도(T_{ad})의 배출특성을 관찰하였다. 본 그래프를 통해 T_1 은 모든 실험조건에 대해 200°C로 고정되어 있어 전체 실험조건에 대해 일정한 입구 온도로 잘 제어되어 공급되고 있음을 확인할 수 있다. 단열화염온도의 경우 질소의 희석비율을 줄일수록, 입열량을 증가시킬수록 거의 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있고, 질소희석을 하지 않을 때는 태안과 부계념의 화염온도가 동등수준이었으나, 희석비율을 높일수록 질소의 함량이 많은 부계념의 경우가 단열화염온도가 더 낮게 나타났다. 한편 2.1.2장에서 서술한 바와 같이 연소실 라이너 내벽에서 10 mm 안쪽에서 측정된 연소기 라이너 온도의 경우 단열화염온도와 유사하게 부하에 따라 증가하고, 질소희석을 늘림에 따라 감소하는 경향을 보였으나, 50% 이상의 희석인 경우 불규칙한 구간이 발생함을 특

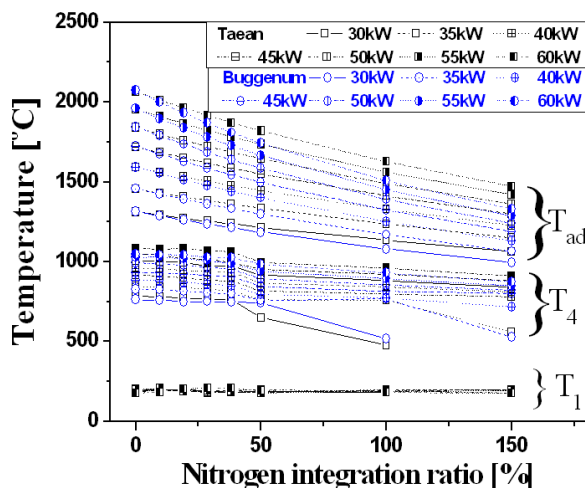


Fig. 10. Temperature of inlet air, combustor liner and adiabatic flame with respect to the nitrogen dilution ratio

이사항으로 발견하였다. 이는 화염의 구조 및 본 연구의 Part I [8]에 해당하는 화염의 안정성과 연관지어 원인을 파악할 수 있다. 30 kW, 35 kW에서 50%이상의 질소희석을 할 경우 화염이 불안정해 지는 진동구간에 있어 과도한 CO의 발생과 더불어 화염이 부상(Lift-off)하여 연소기 후단으로 밀리는 현상을 보이게 된다. Fig. 11 및 Fig. 12의 입열량이 30 kW이고 DR_{N2}가 50%, 100%일 때의 화염영상을 통해 화염이 가시화 석영관 영역을 벗어나 T_3 계측위치보다 더 하류쪽으로 밀려나 있음을 확인할 수 있고, 이러한 이유 때문에 저부하 고희석 조건에서는 연소기 라이너 온도 특이점이 나타났다.

2.2.4 화염 구조

Figure 11 및 12와 같이 태안 및 부계념 합성가스를 대상으로 30 kW, 45 kW 60 kW조건에 대해 질소희석량에 따른 OH자발광 계측 영상(상) 및 이를 Abel 역변환 한 이미지(하)를 도시하였다. 화염은 대부분의 경우 연료노즐 근처에 부착되어 V형의 형태를 가졌고, 입열량의 증가는 가연성 연료의 증가로 인해 전체적인 화염면적의 확대 및 화염강도의 증가를 야기시켰고, 60 kW 조건에서는 화염이 스월유동을 따라 빛살무늬를 띠는 것을 볼 수 있다. 이는 연료의 유량 증가 및 혼합기의 분출유속이 증가함에 따라 연료공기의 혼합이 충분히 이루어지지 않아 일어나는 현상이라 할 수 있다.

한편 질소의 희석이 증가할수록 화염의 강도가 약해지고, 화염의 폭이 좁아지며, 길이는 길어지고, 덤프면과 화염이 이루는 각도가 커지는 특징을 관찰할 수 있다. 이는 질소의 희석량을 늘릴수록 연료의 총질량 유량은 늘어나는 반면, 화학반응을 일으키기 위한 가연성 연료의 몰분율이 줄어들어 화염의 강도가 약해진다고 할 수 있다. 또한 화염이 얇아지고, 길어지는 현상은 연료의 총질량 유량이 늘어나서 연료의 분출속도가 질소희석을 하지 않을 경우보다 150%희석을 할 경우 1.38배 증가하게 되고, 이에 의해 연소실 길이 방향의 모멘텀이 늘어나 화염의 폭이 좁아지고, 덤프면과 화염이 이루는 각도가 커지는 현상이 나타나며, 혼합기의 유속증가와 더불어 질소희석으로 인한 화염온도 및 연소속도의 감소로 화염의 길이가 길어지는 현상이 나타난다고 할 수 있다. 또한 50% 이상의 질소희석을 조건에서는 화염의 강도가 현저히 약해지고, 구조 또한 V형의 구조가 아닌 cone형의 구조로 변화한 것을 확인할 수 있는데 이는 T_3 온도계 측 결과 중 50%이상의 희석을 조건에서 불규칙한 경계는 일어나는 원인이 된다.

Fig. 11. Flame images of Taeam syngas (upper : OH chemiluminescence image, lower : Abel Inverted Image)

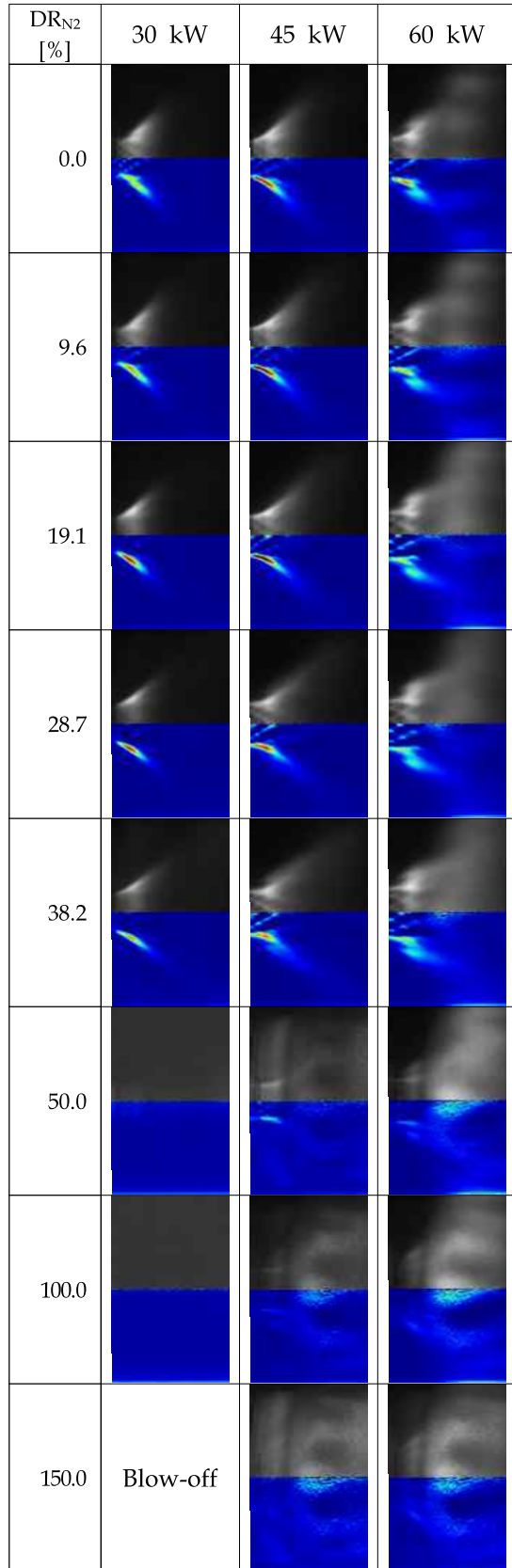
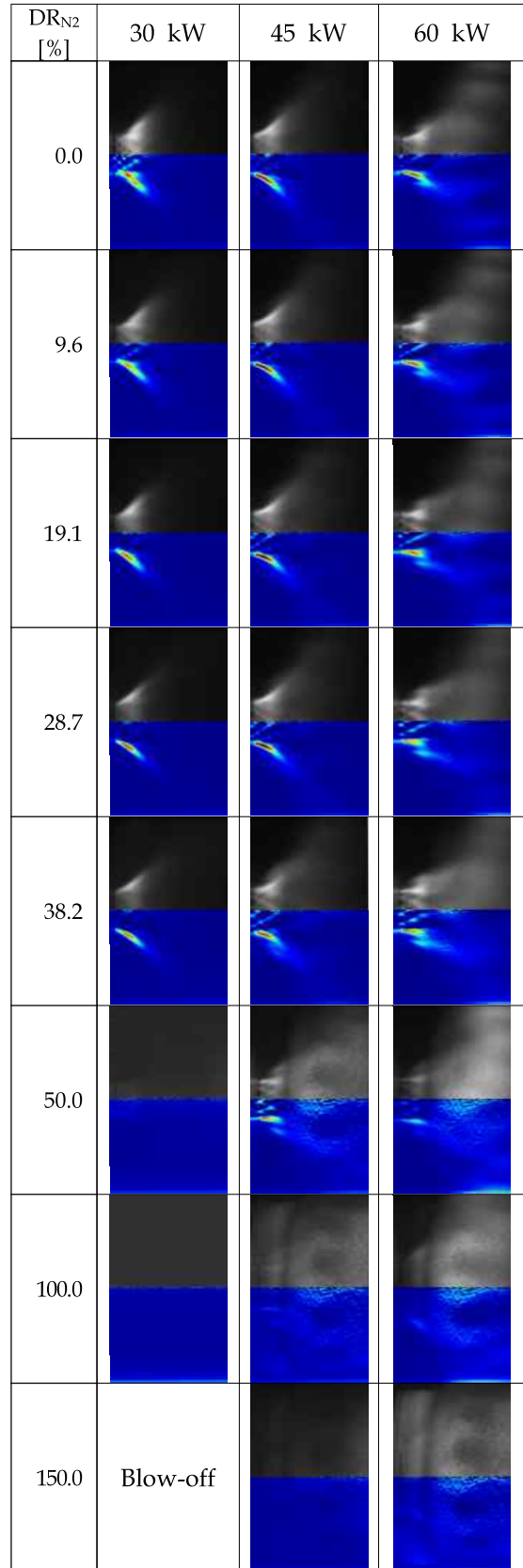


Fig. 12. Flame images of Buggenum syngas (upper : OH chemiluminescence image, lower : Abel Inverted Image)



III. 결 론

국내 최초 IGCC플랜트인 태안 IGCC의 운영을 개선을 위해 부분 예혼합 연소형태를 채용하고 있는 GE7EA 모델 연소기를 대상으로 부계념 및 태안 IGCC플랜트의 합성가스의 NO_x 및 CO배출 특성, 온도특성 그리고 화염의 구조를 살펴보고, 그 결과로부터 아래의 결론을 얻을 수 있다.

(1) IGCC 실증플랜트에서 사용되고 있는 연료상 질소의 회석방법은 배기가스 중 질소산화물 저감에 매우 유용함을 실험을 통해 확인하였다. 질소의 회석량을 늘릴수록 NO_x배출량은 급격히 줄어들어 1 ppm 수준까지 낮아졌고, 50%이상의 질소회석률 조건에서는 NO_x저감에 있어 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 또한 이 NO_x 발생현상은 Zeldovich 메커니즘을 통해 설명 가능했고, 그 과정에서 회석제 열용량 및 단열화염온도를 사용했다. 두 플랜트의 연료 중 H₂/CO비가 낮고 단열화염온도가 약간 더 높은 태안 합성가스의 경우 NO_x가 다소 더 높게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 저부하 고회석 조건을 제외하고는 CO의 발생은 거의 되지 않았고, 완전연소 되었다. CO의 발생은 질소의 회석으로 인한 화염온도 저감이 주원인이었고, 단열화염온도가 1250 °C 이하에서 급격히 증가하였다. 두 플랜트의 연료 중 H₂/CO비가 다소 높지만, 질소 및 스팀의 회석제 비율이 높은 부계념 합성가스의 경우 CO가 과다 발생할 가능성이 높은 것으로 확인되었다.

(3) 질소의 회석은 단열화염온도 저감 및 연소기 라이너 온도의 저감을 야기시켰고, 일부 화염구조의 변화 및 부상으로 인해 특이점이 발생하기도 했다. 또한 화염의 구조는 질소회석으로 인해 화염의 강도가 약해지고, 넓이는 줄어들고, 길이는 길어지는 경향을 보였고, 덤프면과 화염이 이루는 각도가 커지는 특징을 관찰할 수 있었다.

(4) 본 연구를 통해 얻어진 결과 데이터는 향후 태안 IGCC 플랜트의 운전시 화염안정성, NO_x 저감, 연소효율 상승, 연소기 온도 등과 관련하여 최적 조건 선정을 위한 기초자료로 활용될 예정이다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제 성과입니다. (R-2005-1-390-004) 또

한 본 연구는 교육과학기술부의 중견연구자지원사업(0498-20110009)과 서울대학교 항공우주신기술연구소(IAAT)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) D.R. Noble, Q. Zhang, A. Shareef, J. Tootle, A Meyers, T. Lieuwen, 2006, "Syngas Mixture Composition Effects upon Flashback and Blowout", ASME Turbo Expo 2006, GT2006-90470.
- 2) Natarajan, J., Lieuwen, T., Seitzman, J., "Laminar Flame Speeds of H₂/CO mixtures: Effect of CO₂ Dilution, Preheat Temperature, and Pressure" Combustion and Flame, Vol. 151, 2007, pp.104~19.
- 3) Whitty, K.J., Zhang, H. R., Eddings, E.G., "Emissions from Syngas Combustion", Combustion Science and Technology, Vol. 180, 2008, pp. 1117-1136.
- 4) Hasegawa, T., Tamaru, T., "Gas Turbine Combustion Technology Reducing both Fuel-NO_x and Thermal NO_x Emissions for Oxygen-blown IGCC with Hot/dry Synthetic Gas Cleanup", Journal of Engineering of Gas Turbine and Power, Vol. 129(2), 2007, pp. 358~369.
- 5) Lee, M.C., Seo S.B., Chung J.W., Kim S.M., Joo Y.J., Ahn D.H., "Gas Turbine Combustion Performance Test of Hydrogen and Carbon Monoxide Synthetic Gas", Fuel, Vol. 89, 2010, pp. 1485~91.
- 6) Lee, M.C., Seo S.B., Yoon J., Kim M., Yoon Y., "Experimental Study on the Effect of N₂, CO₂, and Steam Dilution on the Combustion Performance of H₂ and CO Synthetic Gas in an Industrial Gas Turbine", Fuel, Vol 102, 2012, pp. 431~438.
- 7) Turns S. R., "An Introduction to Combustion", McGraw-Hill 3rd edition, 1999, pp. 170~175.
- 8) Lee, M.C., Joo S. P., Yoon J., Yoon Y., "Combustion Performance Test of Syngas Gas in a Model Gas Turbine Combustor - Part 1 : Flame Stability" J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol 41(8), 2013, pp. 509-515.