

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(7), 603-610(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.7.603

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 가스터빈에서 SNG 연료 조성에 대한 희석제의 배기배출물 저감효과에 대한 실험적 연구

주성필\*, 윤지수\*, 김정진\*, 김성현\*, 윤영빈\*\*\*

### Experimental Study on Dilution Effect of Exhaust Gas in SNG Combustion on a Model Gas Turbine

Seongpil Joo\*, Jisu Yoon\*, Jeongjin Kim\*, Seongheon Kim\* and Youngbin Yoon\*\*\*

Seoul National University, Department of Mechanical and Aerospace Engineering\*

Seoul National University, the Institute of Advanced Aerospace Technology\*\*

#### ABSTRACT

This paper describes experimental results about emission and NO<sub>x</sub> reduction of dilution effect (Nitrogen and carbon dioxide) about various fuel compositions of synthetic natural gas (SNG). Combustion experiment was performed to investigate the combustion characteristics for SNG with various hydrogen ratio in SNG, heat input and equivalence ratio in a partially premixed model gas turbine combustor. NO<sub>x</sub> emission was similar to each hydrogen ratio and flame characteristics was investigated from OH chemiluminescence images. There was a singularity of CO emission in stoichiometric condition and it can be identified using OH chemiluminescence intensity. In addition, dilution effect was studied in using nitrogen and carbon dioxide as diluent to reduce the NO<sub>x</sub> emission. Carbon dioxide diluent was more effective to NO<sub>x</sub> reduction than nitrogen diluent because of its high diluent specific heat and its heat capacity.

#### 초 록

본 논문에서는 석탄으로부터 생성된 합성천연가스(SNG)의 다양한 연료 조성에 대한 배기 가스 배출 특성 및 희석제에 대한 NO<sub>x</sub>배출 저감에 대해 기술하였다. 예혼합거리가 짧은 부분 예혼합 가스터빈 연소기에서 SNG 연료조성에서의 수소 비율과 입열량, 당량비를 조절해 가며 연소특성을 관찰하였다. 수소 비율에 따른 NO<sub>x</sub> 배출지수는 유사하게 나타났고, 화염가 시화를 통해 화염의 특성을 파악할 수 있었다. CO 배출의 경우 당량비 1 구간에서 특이점이 나타났으며, 이를 화염의 자발광 이미지와 자발광 강도를 통하여 원인을 파악할 수 있었다. 또한 높은 NO<sub>x</sub> 배출을 저감하기 위하여 질소(N<sub>2</sub>)와 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 희석제를 사용하여 희석제 공급량에 대한 저감 효과를 파악하였다. 이로부터 희석제의 비열과 열용량이 연소로부터 발생한 연소열을 흡수하여 열화에 의한 NO<sub>x</sub> 배출을 저감하는 효과를 확인하였다.

**Key Words** : Synthetic Natural Gas(합성천연가스), Abel-inversion(아벨변환), Gas turbine combustor(가스터빈 연소기), Exhaust gas(배출가스), Dilution(희석제)

† Received : March 10, 2016      Revised : June 9, 2016      Accepted : June 15, 2016

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

## NOMENCLATURE

Wl	Wobbe index
Eq	Equivalence ratio
D.R.	Dilution ratio
HHV	Higher heating value
Gs	Specific gravity
Cp	Spccific heat

## I. 서 론

2013년 세계 에너지 기구에서 발표한 에너지 생산/소비 동향에 의하면 총 에너지생산량 중 차지하는 복합화력 발전의 비율이 꾸준히 상승하고 있다고 보고하였다[1]. 복합화력발전 기술은 고체상의 연료인 석탄을 가스화한 후 황성분과 N<sub>2</sub>성분을 제거하는 탈황, 탈질과정을 거치고 미소먼지를 제거하는 집진과정을 통하여 유해성분을 줄인 합성가스를 연료로 사용하는 발전 시스템이다[2]. 합성가스를 사용하는 대표적인 IGCC(integrated gasification combined cycle)는 세계적으로 규모가 커지고 있으며, 한국에서도 2017년 말을 목표로 300MW급 발전 플랜트를 태안에 건설 중에 있다[3]. 또한 합성천연가스(SNG)를 사용한 발전 시스템도 포스코의 주관으로 광양에 건설중에 있으며, 이 발전소에서는 연간 92MW를 목표로 연구, 개발중에 있다[4].

SNG의 장점은 다른 연료에 비하여 상대적으로 안정적이며, 이로 인한 저장성이 뛰어나다는 것이다. 또한 탈황, 집진장치를 거쳤기 때문에 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>, CO등의 배기가스의 배출이 매우 적다. 이는 점점 강화되고 있는 배기가스 환경 규제에 부합하는 환경 친화적인 연료임을 알 수 있다. 또한 SNG는 발전 시스템뿐 아니라 산업용 보일러, 내연기관의 연료 및 가정에서 사용가능한 연료이다. 이러한 장점 때문에 미국에서도 노스다코다에 1호 SNG 플랜트를 기점으로 최종적으로 15개까지 증설하는 것을 목표로 하고 있다.

이와 관련된 연구로는 2010년 Kim 등은 예혼합 가스터빈 연소기에서 연료조성에 대한 화염의 거동을 파악하였고, H<sub>2</sub>의 비율이 커지면서 화염이 안정적으로 변화함을 실험적으로 수행하였고, 화염전달합수로부터 화염의 동적특성을 파악하였다[5]. 또한 2013년 Park 등은 확산화염을 채택한 모델 가스터빈 연소기에서 H<sub>2</sub>의 비율이 증가하면서 화염의 길이가 감소하며, 덤프면으로부터의

각도가 감소하여 안정적인 연소가 가능함을 확인하였고, 연소기 후단의 온도 패턴 팩터를 계산하여 당량비에 따른 화염의 분포에 대한 연구를 수행하였다[6]. CH<sub>4</sub>연료에서 가진에 대한 화염의 소염현상을 OH자발광 이미지와 Proper orthogonal decomposition (POD) 후처리를 통하여 주파수분석을 수행하여 원인을 파악하는 연구를 수행하였다[7]. 이뿐만 아니라 화염전달합수, 화염의 역화현상등에 대한 다양한 연구가 수행되어왔다[8]. 하지만 NO<sub>x</sub> 배출을 줄이기 위한 SNG 연료 조성에 대한 희석제 영향의 연구가 미비하여, 본 연구에서는 다양한 연소 조건에서 질소(N<sub>2</sub>)와 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 희석제에 대한 연소 특성과 배기배출물 특성에 대한 실험적 연구를 모델가스터빈 연소기를 제작하여 수행하였다.

## II. 실험 방법 및 조건

### 2.1 실험 장치

SNG의 연소특성 및 희석제에 대한 영향을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같은 부분 예혼합 형태의 모델 가스터빈 연소기를 제작하였다. 고온의 연소 환경을 모사하기 위하여 연소용 공기를 225deg C(~500K)로 예열하여 공급하였으며, 상압의 연소환경에서 실험을 수행하였다. 연료와 예열된 공기는 16개의 베인(vane)을 갖는 노즐을 통하여 공급되며, 혼합거리는 2.7mm로 매우 짧아 부분 예혼합 조건을 상사시켰다. 이러한 매우 짧은 혼합거리에도 45 degree의 베인을 통한 강한 스윙효과에 의하여 연료와 공기의 혼합을 촉진시켜 부분 예혼합 화염을 형성할 수 있었다.

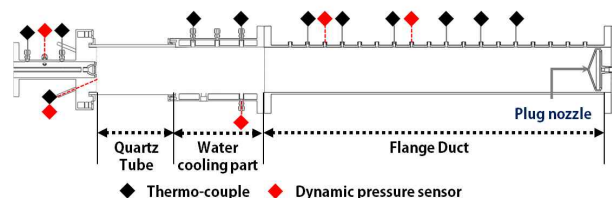


Fig. 1. Schematic of model gas turbine combustor and sensor positions

연소기 후단에는 터빈 블레이드에 의한 면적 변화 및 음향학적 경계를 모사하기 위하여 연소기 단면의 89%정도를 막는 썬기형 플러그 노즐을 설치하였다.

화염의 가시화를 위하여 연소기 덤프를 기준으로 230mm 길이의 석영튜브를 설치하여 화염의 이미지획득을 가능하게 하였다. 석영튜브의 열화에 의한 파손을 막기 위하여 화염이 집중되는 위치에 공기를 공급하였다. 화염의 이미지 획득은 PI-MAX ICDD 카메라를 이용하였고, 연소 화학반응의 중간자인 OH radical의 누적 이미지를 위하여 OH\* band-pass 필터를 적용하였다. 누적된 이미지는 단면화염의 특성을 파악하기 어렵다. 이를 해결하기 위하여 Abel-inversion 코드를 이용하여 누적된 화염 이미지로부터 단면 화염 이미지를 획득할 수 있었다.

11개의 동압센서, 4개의 열전대를 이용하여 각각 위치에 대한 연소진동 및 온도 분포를 파악하여 연소가 이루어졌을 때에 대한 연소특성을 파악하였다. 배기배출물에 대한 특성을 파악하기 위하여 NOx, CO, O2등을 측정할 수 있는 TESTO 350K를 연소기 배기덕트에 설치하였다. 부분 예혼합 연소는 확산화염보다 NOx 배출지수가 상대적으로 적기 때문에 NOx는 0.1ppm, CO는 1ppm 의 측정단위로 측정하여 정밀도를 높였다.

## 2.2 실험 조건

합성석탄가스의 탄종에 대한 다양한 조건의 결과를 도출하기 위하여 각각 H2의 함량이 발열 부피당 0, 1, 5, 10, 15%에 대한 실험조건을 Table 1과 같이 선정하였다. 서로 다른 연료조건에 대한 연소특성을 비교하기 위하여 각 연료조성의 Wobbe index (WI)값을 H2 0%, CH4 100%

Table 1. Experimental condition

	Unit	C0	C1	C5	C10	C15
H2		0	1	5	10	15
CH4	Vol%	100	93.8	88.1	80.9	84.2
C3H8		0	5.2	6.9	9.1	10.8
WI	MJ/N m <sup>2</sup>	55.3				
Eq	-	0.5~1.0				
H.I	kW	25.4, 38.1, 50.8, 63.5				
D.R.	%	0~200 (N2,CO2)				

의 조성의 값(WI=55.3)과 일치하도록 연료조성에서의 C3H8 비율을 조절하여 실험조건을 설정하였다.

$$WI = \frac{HHV}{\sqrt{Gs}} \quad (1)$$

여기서, HHV는 공급연료의 총 고위발열량이며, Gs는 각각의 specific gravity 이다. 또한 연료희박조건에서 실험을 수행하기 위하여 당량비를 0.5부터 1.0까지 0.1씩 증가하며 실험을 수행하였다. 연소장에서 발생하는 온도를 낮추어 배기가스의 배출지수를 낮추기 위하여 질소(N2)와 이산화탄소(CO2)회석제를 사용하여 각각의 회석제에 대한 연소특성과 배기배출물 저감 효과를 확인하였다. 이중 CO2의 경우 액화상태에서 기체 상태로 기화시켜 연소기에 공급을 하였다. 또한 회석제의 상대적인 양에 대한 저감효과를 함께 확인하기 위하여 식 (2)의 계산식에 의하여 회석제를 공급하였다.

$$D.R._{diluent} = \frac{\text{flow rate of diluent [slpm]}}{\text{sum of flow rate of fuel [slpm]}} \quad (2)$$

화염의 안정적인 연소를 위하여 연소공기의 공급부에 회석제를 0%부터 200%까지 늘려가며 실험을 수행하였다.

## III. 실험 결과 및 검토

### 3.1 SNG 화염에 대한 연소 특성

SNG 연료조성의 H2 비율에 따른 배기배출물 특성을 확인하기 위하여 각각 연료조성에 대한 당량비와 입열량에 대한 실험을 수행하였다. SNG 연소의 정적특성, 즉 화염의 특성을 파악하기 위하여 가시화창을 통한 화염의 이미지 획득을 수행하였다. Abel 변환을 통한 화염의 OH 자발광 이미지는 Table 2로부터 확인할 수 있다. H2의 비율이 0%부터 15%까지 증가할수록 화염의 OH radical에 의한 자발광 강도가 높아지며 화염이 노즐쪽으로 당겨지게 된다. 또한 당량비가 증가하면서 화염의 온도가 높아지며, 이로 인하여 자발광 강도가 커지게 된다.

또한 연소반응으로부터 발생하는 배기배출물에 대한 특성을 파악하기 위하여 NOx와 CO 배출물을 획득하여 비교하였다. NOx와 CO의 절대적인 수치를 비교하기 위하여 배출량을 15%에 대한 산소(O2)의 변환값으로 특성을 파악하였다. 변환된 NOx는 당량비가 증가할수록, 입열량이

Table 2. OH chemiluminescence images at 63.5kW SNG flame without diluent

Eq	C0	C1	C5	C10	C15
0.5	Blow off				
0.6					
0.7					
0.8					
0.9					
1.0					

증가할수록 많은 배출을 보이는 경향을 Fig. 2로부터 확인할 수 있다.

Thermal NOx는 연소장에서 고온의 영역에 의한 질소와 산소의 화학반응으로 생성이 되며 발생지수는 80~90%정도가 배출된다[9]. 즉, 연료조성의 당량비, 입열량에 직접적인 영향을 받는 thermal NOx는 SNG 연소에서 지배적으로 나타나는 배출 메카니즘임을 판단할 수 있다. 하지만 각각의 입열량에서 수소 비율이 증가함에 따른 연료조성에서 NOx 배출이 3% 미만으로 나타나는 것은 Wobbe index를 동일하게 한 결과이다. 높은 입열량 및 당량비에서 발생하는 150ppm 이상의 높은 NOx 배출 조건의 경우, 촉매 및 희석제를 이용한 NOx 배출 저감이 필요하다. 이를 위하여 본 실험에서는 일반적으로 사용이 되는 N<sub>2</sub> 및 CO<sub>2</sub>희석제를 공급하여 이에 대한 저감 효과를 비교할 수 있었다.

Figure 3은 Fig. 2와 같은 조건에서 동시에 측정된 일산화탄소(CO) 배출물 지수이다. CO는 연소과정에서 발생하는 불완전 연소의 결과물로 낮은 당량비, 낮은 입열량 조건에서 크게 발생하는 배기가스다. Fig. 3에서 입열량 조건이 높아질수록 배출 지수가 낮아지는 것을 확인할 수 있는데 이는 연소과정에서 발생하는 상대적으로 높은 화염온도에 의해서 탄소와 산소가 반응하는 화학반응속도가 커지기 때문에 발생하는 현상이다. 하지만 당량비 0.6부터 0.8까지 5ppm 미만의 배출

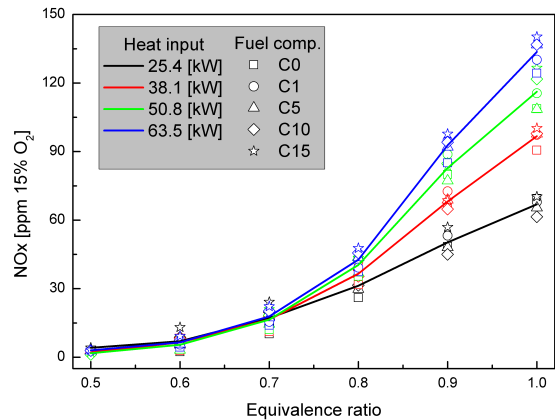


Fig. 2. Averaged NOx emission characteristics of SNG flame with heat input for each fuel conditions

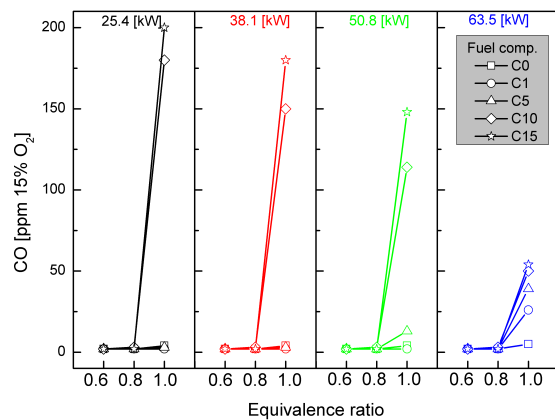


Fig. 3. CO emission characteristics of SNG flame with heat input for each fuel conditions

지수를 보이다가 당량비 1.0 조건에서 많게는 200ppm정도 배출해 내는 현상은 다른 메카니즘으로 인한 배출 특성임을 파악할 수 있다.

이에 대한 원인을 파악하기 위하여 화염의 자발광 이미지로부터 OH 자발광 강도를 획득하였다. Fig. 4는 각각의 연료 조건에 따른 OH 자발광 강도이다. 일부 연소 조건에서 자발광 강도가 나타나지 않는 것은 낮은 heat input과 C0, C1과 같은 낮은 수소의 비율로 인한 화염의 날림현상에 의한 것으로 해당 조건에는 NOx, CO 뿐 아니라 자발광 강도 또한 나타나지 않는다. OH 자발광 강도는 OH band-pass를 통해 획득한 이미지에서 후처리를 하지 않고, 영역 내에서의 자발광 강도를 합하여 정량화 하였다.

당량비가 증가할수록, 입열량이 커질수록 OH 자발광 강도가 커지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 앞에서 설명한 화염의 온도가 높아져 발생

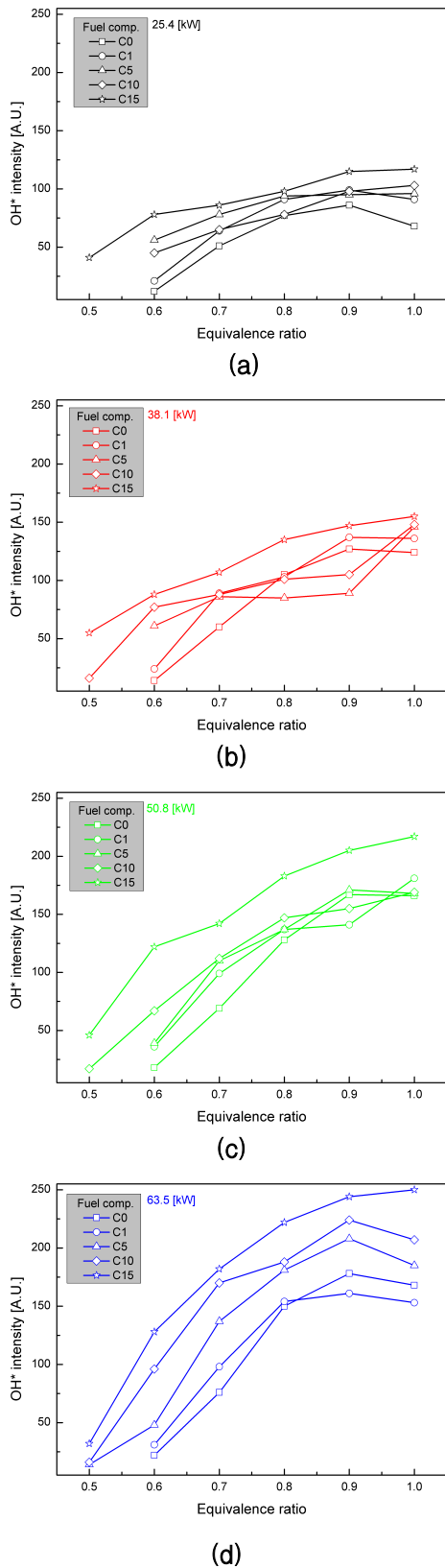
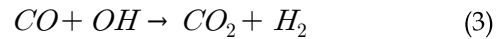


Fig. 4. OH\* chemiluminescence intensity of SNG flame with heat input for each fuel conditions; heat input: (a) 25.4 kW, (b) 38.1 kW, (c) 50.8 kW, (d) 63.5 kW

하는 현상이다. 하지만 SNG 연료조성 중 H<sub>2</sub>의 비율이 상대적으로 적은 C0와 C1 조건에서 급격한 OH 자발광 강도의 감소를 확인할 수 있는데, 이러한 급격한 OH 자발광 강도의 증가가 CO 배출과 상관관계가 있을 것으로 판단할 수 있다.

탄화수소계열의 연소반응에서 CO의 산화과정은 최종화학반응으로 이루어지며, 식 (3)의 과정을 거친다[10].

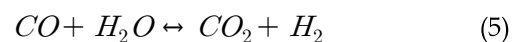
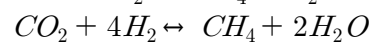
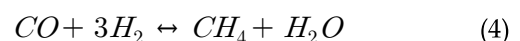


CO는 반응성이 매우 낮은 화학물로 반응속도가 매우 느려, 고온의 연소조건이나 물, 촉매 등의 화학반응을 촉진시켜주는 촉매 역할을 하는 매개체가 있어야 산화반응이 발생한다[11]. 따라서 고온의 연소조건 즉, 연소반응에서 OH 라디칼이 많이 존재할수록 CO의 배출지수는 감소하게 된다.

본 연구에서 사용된 노즐은 부분 예혼합 화염을 형성하기 위한 노즐로 연료-공기의 혼합거리가 매우 짧다. H<sub>2</sub>는 CH<sub>4</sub>에 비하여 매우 빠른 화염속도를 갖고 있으며 (화염속도; H<sub>2</sub>: 289cm/s, CH<sub>4</sub>: 37cm/s), 발열량 또한 CH<sub>4</sub>에 비해 상대적으로 크다. 또한 CH<sub>4</sub>의 상대적으로 큰 분자량 때문에 높은 H<sub>2</sub> 비율을 갖는 연료조성에서의 혼합이 더 효율적으로 일어난다. 즉, 같은 연료 조건일 경우 연료의 특성에 따라 혼합정도가 달라질 수 있다. 이 때문에 부분 예혼합 연소기에서 SNG 연소에 의한 CO 배출의 특이점이 나타나게 된다.

### 3.2 희석제에 대한 NO<sub>x</sub> 저감 효과

연소장에서의 높은 온도 분포는 NO<sub>x</sub>의 배출에 악영향을 미친다. 연소장의 온도를 낮추기 위하여 공급하는 연료의 양을 줄이게 되면, 원래 목표한 연소 효율과 출력을 얻지 못한다. 희석제는 같은 연소조건에서 연소장의 온도를 낮추어 NO<sub>x</sub>의 배출을 줄임과 동시에 터빈에 닿는 연소 생성물의 온도를 낮추기 위한 대안으로 활용될 수 있다. SNG를 생성하기 위한 과정 중 메탄화반응 (Methanation) 과정과 CO 수성전환반응 (CO shift reaction) 과정을 거치면 희석제로 일반적으로 사용 되는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 질소(N<sub>2</sub>), 수증기(steam) 등이 생성된다.



식 (4)와 식 (5)가 메탄화반응 (Methanation)



과정과 CO 수성전환반응 (CO shift reaction)이다. 본 연구에서는 희석제 중 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub> 희석제를 사용하여 NO<sub>x</sub> 배출 저감 효과를 파악하였다. 또한 안정적으로 연소조건에서 연소특성을 파악하기 위하여 공기 공급라인에 희석제를 투입하여 그 효과를 관찰하였다.

Figure 5는 각각 N<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>가 희석제로 사용되었을 때 입열량과 희석제 투입량에 대한 NO<sub>x</sub> 배출량이다. 희석제가 사용되지 않아도 매우 낮은 배출지수를 보이던 25.4kW 입열량 조건의 경우 NO<sub>x</sub> 배출에 대한 희석제 효과의 정량적 변화를 거의 확인할 수 없었다. 하지만 나머지 입열량 조건의 경우, 희석제가 증가할수록 NO<sub>x</sub> 배출량은 감소하는 경향이 명확하였으며, 이는 반응물의 엔탈피를 낮추어 화학반응에서 나오는 연소열을 감소시키는 역할에서 나타나는 결과이다.

N<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>에 대한 저감 효과를 상대적으로 확인하기 위하여 NO<sub>x</sub> reduction을 정의하여 비교하였다. NO<sub>x</sub> reduction은 희석제가 사용되지 않았을 때의 NO<sub>x</sub> 배출량에서 희석제가 사용되었

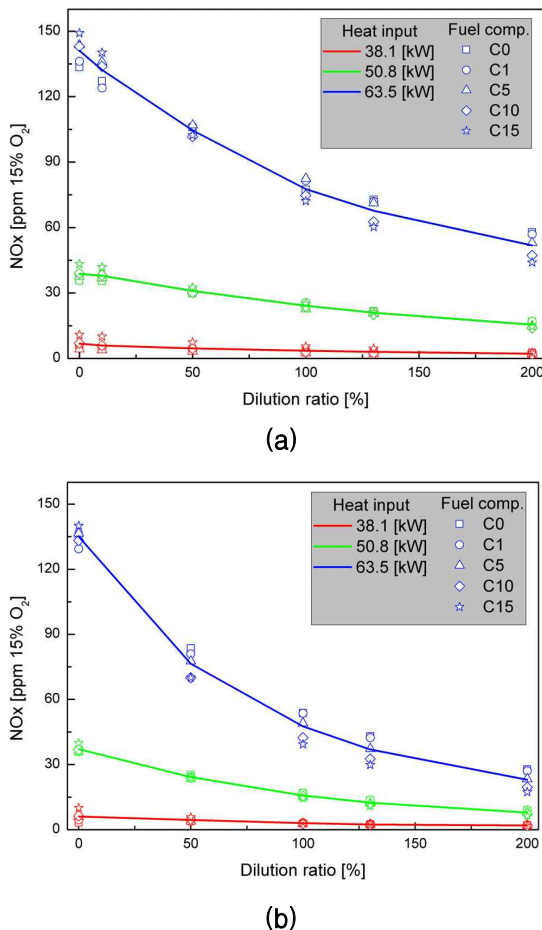


Fig. 5. NO<sub>x</sub> emission characteristics with diluents (a)Nitrogen (b)Carbon dioxide

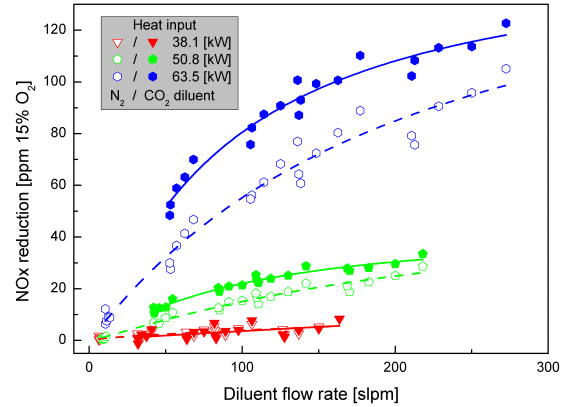


Fig. 6. NO<sub>x</sub> reduction with diluent flow rate in each diluent (N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>)

Table 3. Specific heat for each diluent(N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>)

Cp (@500K)	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
[kJ/kg K]	1.1	1.1
[kJ/mol K]	30.0	45.6

을 때의 NO<sub>x</sub> 배출량의 차로 정의했다.

각각의 희석제에 대한 NO<sub>x</sub> 저감 효과를 상대적인 비교를 위하여 Fig. 6과 같이 투입된 희석제의 양에 대한 NO<sub>x</sub>의 저감 효과를 상대적으로 비교하였다. 그 결과 N<sub>2</sub> 희석제에 비하여 CO<sub>2</sub> 희석제의 저감 효과가 뛰어났다. 입열량이 상대적으로 적은 25.4kW, 38.1kW 구간에서는 그 효과가 미비했지만, 높은 열량의 실험 조건에 대해서는 저감 효과가 확연히 드러났다.

CO<sub>2</sub>는 N<sub>2</sub>에 비하여 mole당 비열이 상대적으로 높다. 즉, 같은 부피유량일 경우 비열이 높은 희석제일수록 화염의 온도를 더욱 낮추는 역할을 한다. Table 3은 각각 희석제에 대한 입열공기 500K일 때의 비열을 나타낸다. 희석제의 투입 위치를 연소용 공기 공급라인에 투입하였기 때문에 희석제의 온도도 500K로 가정하였다.

$$Diluent\ heat\ capacity [J/Ks] = \dot{m}_{diluent} \cdot C_{p,diluent} \tag{6}$$

비열에 따른 공급한 희석제의 영향을 파악하기 위하여 공급한 희석제의 양과 비열의 관계가 있는 희석제 열용량을 비교해보았고, 식은 (6)과 같다.

연소반응에서 희석제는 연소반응에 참여하지 않는다. 즉, 화학종의 특성이 아닌 열용량에 의하여 연소온도가 제어된다. 이를 확인하기 위하여 Fig. 6의 그래프를 희석제의 열용량에 대한 NO<sub>x</sub>

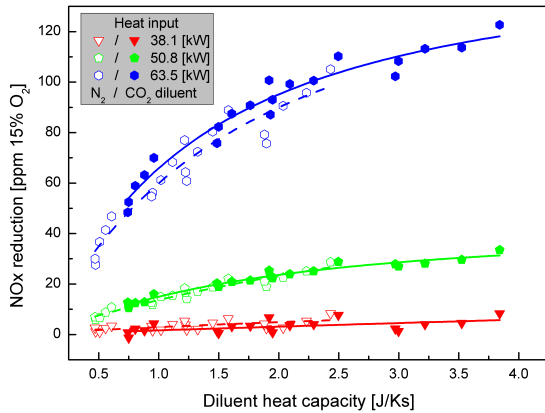


Fig. 7. NOx reduction with diluent heat capacity in each diluent (N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>)

reduction으로 확인하였다.

Figure 7은 각각 입열량에 대한 N<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub> 희석제에 대한 열용량에 따른 NOx reduction에 대한 그래프이다. 앞서 언급한대로 희석제의 화학적 특성이 아닌 열용량에 대한 효과가 매우 지배적이라는 것을 그래프로써 확인할 수 있다. 즉, 같은 양의 희석제를 투입하였을 때 N<sub>2</sub>보다 CO<sub>2</sub>에 의한 NOx 저감이 더욱 뛰어나다는 것을 확인할 수 있고, 이는 CO<sub>2</sub>의 높은 열용량 즉, 비열에 의한 효과임을 Fig. 7로부터 확인할 수 있다.

많은 양의 희석제를 투입하는 경우, 화염의 구조를 변형시킬 수 있으며, 이러한 변화는 연소불안정을 야기하는 원인으로 작용할 위험이 있다. 또한 희석제를 생성하기 위한 비용적 측면도 무시할 수 없다. 따라서 본 실험 결과를 바탕으로 할 경우, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 상대적으로 적은 유량에서 NOx 저감 효과가 뛰어난 CO<sub>2</sub> 희석제를 사용하는 것이 효율적이라고 판단된다.

#### IV. 결 론

가스터빈에서의 합성천연가스(SNG)의 연소 특성을 확인하기 위하여, 다양한 연료조성 및 희석제에 대한 효과를 배기가스 분석 및 OH 자발광 이미지로부터 확인하였고, 그로부터 아래와 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) Wobbe index를 통일한 SNG 연료조성에서 H<sub>2</sub>의 비율을 높여가며 다양한 연료조성에서의 배기배출물 특성을 파악하였다. 조성의 입열량이 높아질수록 당량비가 높아질수록 NOx 배출이 증가하는 경향을 보였고, 이는 NOx의 주요 배출은 열화에 의한 thermal NOx임을 확인할 수 있다. OH 자발광 이미지의 자발광 강도를 통하여

CO산화 반응에 의한 불완전 연소의 반응물인 CO의 배출 특성을 확인할 수 있었다.

(2) Abel-inversion을 통한 OH 자발광 이미지로부터 H<sub>2</sub>의 비율이 커질수록 화염이 덩프면 쪽으로 당겨져 오는 것을 확인할 수 있으며, 이는 CH<sub>4</sub>보다 상대적으로 빠른 H<sub>2</sub>의 화염속도 때문이다.

(3) 희석제에 대한 NOx 저감 효과를 파악하기 위하여 N<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub> 희석제를 다양한 공급조건에서 연소실험을 수행하였다. 같은 희석제 유량의 경우 N<sub>2</sub>보다 CO<sub>2</sub> 희석제에 대한 NOx 저감 효과가 뛰어난 것을 확인하였고, 이는 CO<sub>2</sub>가 갖는 상대적으로 높은 열용량이 원인임을 그래프를 통해 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861) 및 미래창조과학부 한국연구재단의 핵심연구지원사업(No.2015R1A2A2A010043)과 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구(No. 201195101001C)결과입니다.

#### References

- 1) Mangena, S. J., Bunt, J. R., and Waanders, F. B., "Mineralogical behaviour of North Dakota lignite in an oxygen/steam blown moving bed reactor", Fuel Processing Technology, Vol. 106, 2013, pp.474~482.
- 2) Duret, A., Friedli, C., and Marechal, F., "Process design of Synthetic Natural Gas (SNG) production using wood gasification", Journal of Cleaner Production, Vol. 13, 2005, pp.1434~1446.
- 3) Joo, S. P., Yoon J. S., Kim, J. J., Lee M. C., and Yoon, Y. B., "NOx emissions characteristics of the partially premixed combustion of H<sub>2</sub>/CO/CH<sub>4</sub> syngas using artificial neural networks", Applied Thermal Engineering, Vol. 80, 2015, pp.436~444.
- 4) Cliff, K. and Tom, L., "POSCO Gwangyang project for substitute natural gas (SNG)", Gasification Technologies Conference, 2010.

5) Kim, K. T., Lee, J. G., Lee, H. J., Quay, B. D., and Santavicca, D. A., "Characterization of Forced Flame Response of Swirl-Stabilized Turbulent Lean-Premixed Flames in a Gas Turbine Combustor", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 132, pp. 041502-1~8.

6) Park, S. I., Kim, U. S., Lee, M. C., Kim S. C., and Cha, D. J., "The effects and characteristics of hydrogen in SNG on gas turbine combustion using a diffusion type combustor", *International journal of hydrogen energy*, Vol. 38, 2013, pp. 12847-12855.

7) Jeong, C. Y., Shin, J. I., Hwang, J. J., Yoon, J. S., and Yoon Y. B., "Effect of Acoustic Excitation on Lean Blowoff in Turbulent Premixed Bluff Body Flames", *Combustion Science and Technology*, Vol. 188, 2016, pp. 55~76.

8) Yoon, J. S., Lee, M. C., Joo, S. P., Kim, J. J., and Yoon Y. B., "Instability mode and

flame structure analysis of various fuel compositions in a model gas turbine combustor", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, 2015, pp. 899~907.

9) Snyder, T. S., Rosfjord, T. J., McVey, J. B., and Chiappetta, L. M., "Comparison of Liquid Fuel/Air Mixing and NO<sub>x</sub> Emissions for a Tangential Entry Nozzle", *ASME Paper 94-GT-283*, 1994.

10) Lin, J., Qiao, B., Li, L., Guan, H., Ruan, D., Wang, A., Zhang, W., Wanga, X., Zhang, T., "Remarkable effects of hydroxyl species on low-temperature CO (preferential) oxidation over Ir/Fe(OH)<sub>x</sub> catalyst", *Journal of Catalysis*, Vol. 319 2014, pp. 142-149.

11) Rink, K. K., and Lefebvre, A. H., "Influence of Fuel Drop Size and Combustor Operating Conditions on Pollutant Emissions", *International Journal of Turbo and Jet Engines*, Vol. 6, 1989, pp. 113~122.