

## 회전 아크 적용 플라즈마 저 NOx 버너 연소특성

김관태\*, 강희석\*, 이대훈\*<sup>†</sup>, 송영훈\*, 박재연\*\*

\*한국기계연구원 그린환경기계연구본부, \*\*(주)수국

### Characteristics of Low NOx Plasma Burner Incorporating with Rotating Arc Plasma

KWANTAE KIM\*, HEESEOK KANG\*, DAEHOON LEE\*<sup>†</sup>, YOUNGHOON SONG\*, JAEON PARK\*\*

\*Korea Institute of Machinery & Materials, 104 Sinseong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

\*\*Sookook Corporation, 345-4, Suha-ri, Shindun-myeon, Icheon-si, Gyeonggi-do, 467-842, Korea

#### ABSTRACT

Characteristics of low NOx burner is investigated. Low NOx burner introduced in this paper adopts two staged combustion with plasma burner for the 1st stage combustion. Extensive parametric tests were done to figure out the effect of burner stoichiometry, staged thermal load, electric power for plasma generation. Overall NOx production by burner shows effective reduction by adopting plasma staged burner. and the aspects depends on the fuel stoichiometry of 1st stage burner or operating condition of plasma burner. It is promising to use plasma burner as an alternative tools of low NOx burner technology.

**KEY WORDS** : Rotation arc(회전아크), Plasma burner(플라즈마 버너), NOx(질소산화물), Staged combustion(다단연소), Syngas(합성가스), Reforming(개질)

#### Nomenclature

PB : plasma burner  
LNB : low NOx burner  
PLNB : plasma low NOx burner  
 $\lambda$  : excess air ratio

### 1. 서 론

지난 '80-'90년대 미국의 청정공기법(clean air

act)에 의거 산업용 버너의 NOx 규제가 강화되면서 미국에서 개발 및 보급되기 시작한 산업용 저 NOx 버너는 1) 버너에 공급되는 연료 또는 공기의 공간적인 분산 즉, 연료/공기 노즐의 분산이나 희박(lean burn) 및 과농(fuel rich) 연소로 구분된 다단연소(staged combustion), 2) 배가스 재순환(Flue Gas Recirculation, FGR) 기술을 채택하였으며, 일부에서는 화염의 온도를 낮추기 위해 수증기 분사 기술도 활용하였다.

그러나 현재 활용되고 있는 저 NOx 연소기술인 다단연소 또는 FGR 기술의 한계는 화염의 안정성에서 비롯된다고 할 수 있다. 예를 들어 다단연소의

<sup>†</sup>Corresponding author : dhlee@kimm.re.kr

[ 접수일 : 2011.11.28 수정일 : 2011.12.26 게재확정일 : 2011.12.27 ]

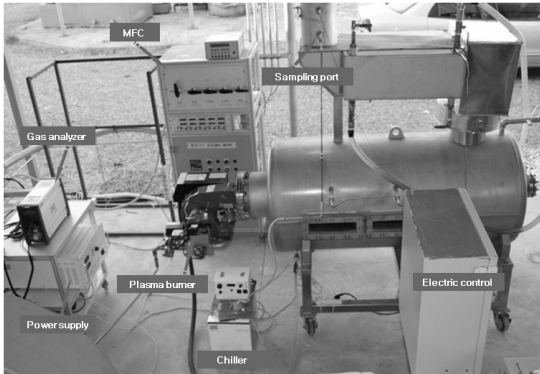


Fig. 1 Experimental apparatus

1단계에서 연료농후화염을 만들고, 2단계에서 연소 공기를 공급할 경우, 연료농후화염의 불안정성으로 인해 1단계에서 연료농후 조건을 충분히 만들기 어려우며, 이는 곧바로 NOx 저감의 한계로 이어지게 된다. 또한 FGR 기술을 활용할 경우 NOx 배출을 10ppm 이하로 줄일 수 있으나, 이 경우에도 1) FGR율의 증가에 따라 CO 및 미연탄화수소 배출의 증가 및 이로 인한 연소효율의 저하, 2) 높은 FGR율로 인한 송풍기 운전비용의 증가라는 문제가 발생된다.

따라서 저 NOx 연소기술은 화염의 안정화 기술에 초점을 맞추어 개발되기도 하는데<sup>1-7)</sup>, 예를 들어 FGR 연소기술에 수소를 이용한 화염 안정화 연구(미국 Lawrence Berkely Nat'l Lab), 저 NOx 가스 터빈 연소기술에 합성가스를 이용한 화염 안정화 연구(GE)<sup>8)</sup> 등의 기술개발 사례를 들 수 있다.

한편 플라즈마는 열 및 활성화화학종(chemically active species : 전자, 이온, O, H, OH, HO<sub>2</sub> 등의 라디칼)을 반응과정에 공급하거나 또는 반응을 일으키는 유동장에 전기장을 인가함으로써 연소 또는 부분산화(partial oxidation) 과정을 향상 시키게 되는데, 일반적인 기술로는 달성할 수 없는 연소과정의 향상을 플라즈마 기술은 가능하게 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 플라즈마를 이용한 연소 제어 기술의 가능성과 특성을 평가하기 위해 기존의 저 NOx 가스버너에 회전아크(rotating arc)를

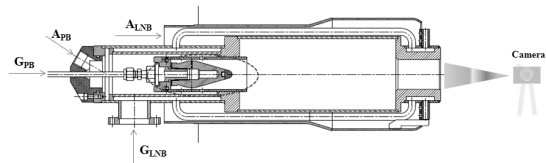


Fig. 2 Plasma assisted low NOx burner

발생시키는 플라즈마 버너를 결합하여 다양한 당량비(stoichiometric ratio) 조건 즉, 희박 및 연료과농 조건에서 화염이 안정화될 수 있으며, NOx 저감 가능성에 기여할 수 있는지에 대해 알아보았다. 이를 위해 플라즈마 버너를 적용한 저 NOx 버너를 설계/제작하였으며, 1) 다단 연소로 인한 NOx 저감 가능성과 다단연소의 안정적 연소 한계, 2) 화염 안정화에 기여하는 플라즈마의 기능, 3) 플라즈마에 의한 화염 안정화 및 NOx 저감 가능성에 대한 기초 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 구성 및 실험방법

### 2.1 실험장치

실험 장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 플라즈마 버너가 장착된 연소성능시험로를 중심으로 연료 및 연소용 공기 공급장치, 전력공급장치 및 가스분석 장치로 구성되어 있다. 성능시험 로는 350,000kcal/h 급 가스버너에 대한 연소특성을 알아보기 위해 설계/제작한 습식형태로서, 크게 연소 부를 중심으로 고온의 연소가스를 물과 간접방식으로 열 교환시켜 200℃ 이하로 냉각시키는 열교환부, 배출가스의 농도계측을 위한 시료채취부와 화염 관측창 등으로 구성되어 있다.

한편 플라즈마 버너를 적용한 저 NOx 버너는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 기존 저 NOx 버너의 중심부에 회전 아크 발생용 플라즈마 버너(점선 부분)가 결합된 형태로서, 아크 반응기에서의 연소형태는 연료과농의 조건에서 연료과농화염을 형성하여 NOx 발생을 억제하는 동시에, 희박연소조건에서 운전되는 주화염의 소염방지 및 화염 안정화를

Table 1 Experimental condition

O <sub>2</sub> /C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> [PB]	G <sub>PB</sub> [lpm]			A <sub>PB</sub> [lpm]			G <sub>LNB</sub> [lpm]			A <sub>LNB</sub> [lpm]		
	Q*0.1	Q*0.2	Q*0.25	Q*0.1	Q*0.2	Q*0.25	Q*0.9	Q*0.8	Q*0.75	Q*0.9	Q*0.8	Q*0.75
2.0	7.58	15.15	18.94	72.7	145.5	181.8	68.18	60.61	56.82	2,654.5	2,581.8	2,545.5
2.5				90.9	181.8	227.3				2,636.4	2,545.5	2,500.0
2.75				100.0	200.0	250.0				2,627.3	2,527.3	2,477.3
3.0				109.1	218.2	272.7				2,618.2	2,509.1	2,454.5
4.0				145.5	290.9	363.6				2,581.8	2,436.4	2,363.6
5.0				181.8	363.6	454.5				2,545.5	2,363.6	2,272.7

피하게 되는 다단연소 방식의 버너이다.

플라즈마 버너부에 대한 연료 및 공기, 그리고 기존 버너부의 연료는 Brooks사의 질량 유량계(Mass Flow Controller, MFC)를 이용하여 유량을 조절하였다. 기존 버너부에 대한 연소용 공기는 자체 장착된 블로워를 통해 공급되었으며, 과잉공기비를 조절하기 위하여 인버터를 사용하여 연소용 공기의 유량을 조절하였다.

또한 플라즈마 버너의 회전 아크 발생을 위한 전원공급장치는 AC 6kW(최대전압 8kV, 최대전류 4A, 20kHz)의 고전압-저전류 방식을 사용하였다. 이때 버너에 공급된 전력은 오실로스코프(Tektronix TDS 5054B)를 이용하여 계측하였다.

그리고 연소가스에 대한 농도계측은 성능시험로 스택에 설치된 시료채취구로부터 시료를 채취하여 응축기(chiller)를 통과시켜 수분을 제거한다. 그후 연소가스 전용분석기(VarioPlus사, MRU AIR)와 GC(Agilent, HP 6890)를 통해 여러 가스의 성분분석을 수행하였다.

## 2.2 실험방법

플라즈마 버너 적용 저 NOx 버너(plasma assisted Low NOx Burner, 이 후 PLNB)에 대한 연소특성 실험은 버너 전체 열부하 100,000kcal/h 수준에서 수행되었으며, 연료는 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)이 주성분인 LPG를 사용하였다.

Table 1은 PLNB의 성능실험 조건을 정리한 표이다. 여기서 PB(plasma burner)는 아크 반응기 또는 플라즈마 버너, LNB(low NOx burner)는 기존 저 NOx 버너를 의미하며, G는 Gas, A는 Air를 표시하였다. 따라서 Table 1에 나타난 바와 같이 연소 기준부하 100,000kcal/h에서 PB의 열부하율을 10%(Q\*0.1로 표기)로 할 경우, LNB의 열부하율은 90%(Q\*0.9), 그리고 PB의 열부하율을 20%(Q\*0.2로 표기)로 할 경우, LNB의 열부하율은 80%(Q\*0.8) 조건에서 가스유량을 조절하는 방식으로 실험을 수행하였다. 이때 아크 반응기는 완전 연소조건(O<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>= 5)과 이론 부분산화조건 (O<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>= 1.5) 사이의 영역에서 운전하였다. O<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 비에 따라 달라지는 공기량의 차이는 LNB에 대한 연소용 공기량 조절 시, 인버터를 통해 각각의 조건에서 PLNB의 전체 과잉공기비(λ)가 항상 일정한 값이 되도록 보정하였다.

본 실험에서는 기존의 가스버너(LNB)에 아크 반응기(PB)를 적용한 경우, 아크 반응기가 전체 연소 과정에 미치는 특성을 알아보고, 다단연소에 의한 NOx 저감효과가 잘 나타나는지에 대해 초점을 맞추어 수행하였다.

실험은 Table 1에 나타난 바와 같이 Q<sub>PB</sub> 부하율= 10%, 20%, 25% 3조건에서 O<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 비를 변화시키면서 플라즈마 버너를 작동한 경우와 작동하지 않은 경우(가스점화 후 plasma power off 상태)에 대하여 비교하였다. 이때 전체 버너(PLNB)의 과잉공

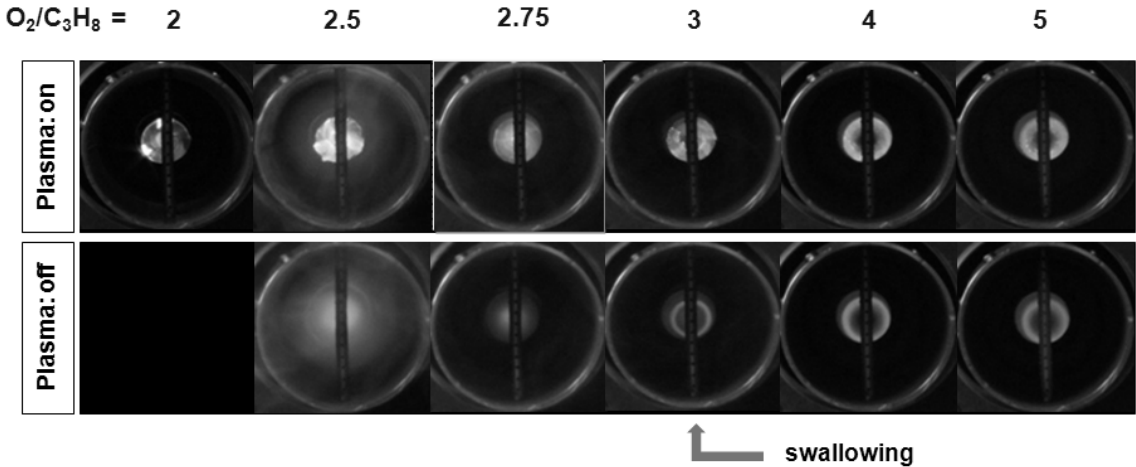


Fig. 3 Comparison of plasma burner flame with or without plasma discharge power(1/20", f29, Mf, M mode)

기비( $\lambda$ )는 1.5 조건에서 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 플라즈마 버너(PB) 연소특성

플라즈마 버너에 대한 연소특성실험은 버너 출구부분에 연소가스에 대한 시료채취를 위하여 길이 약 500mm 정도의 튜브를 장착하여 버너출구 약 400mm 지점에서 시료를 채취하였으며, 튜브 안을 통해 나타나는 화염형상을 가시화하였다. Fig. 3은 Fig. 2에서 점선 부분, 즉 플라즈마 버너부분만을 운전한 경우에 대한 화염형상으로,  $Q_{PB}=20\%$ (20,000 kcal/h) 조건에서 플라즈마를 작동한 경우(방전전력=150W)와 작동하지 않은 경우에 대하여  $O_2/C_3H_8$  비를 변화시키면서 관찰하였다. 실험결과  $O_2/C_3H_8=3$  조건에서 두 경우 모두 화염이 1차 연소실인 플라즈마 연소기 연소실 내부로 삼켜지는(swallowing) 특성을 확인하였다.  $O_2/C_3H_8$  비가 증가할수록 발생 화염은 점차 침염으로 변하면서 화염길이는 짧아지는 것으로 나타났다. 특히  $O_2/C_3H_8=3$  이하의 조건에서 플라즈마가 작동할 경우, 작동하지 않은 경우에 비해 상대적으로 화염길이가 짧아지는 것으로 나타났다. 이는 플라즈마에 의한 보염특성의 증가

에 기인하는 것으로 판단되며,  $O_2/C_3H_8=2$ 의 조건에서는 플라즈마를 작동하지 않을 경우 화염은 형성되지 않았다.

Fig. 4는  $O_2/C_3H_8$  비 변화에 따른 NOx 발생특성을 플라즈마 버너 작동여부에 따라 비교한 실험결과이다.  $O_2/C_3H_8=3$  이하의 개질(reforming) 영역에서는 플라즈마가 작동하지 않아 상대적으로 화염길이가 길어지는 경우 NOx 발생농도가 높게 나타났다.  $O_2/C_3H_8$  비가 증가하여 연소분위기로 갈수록

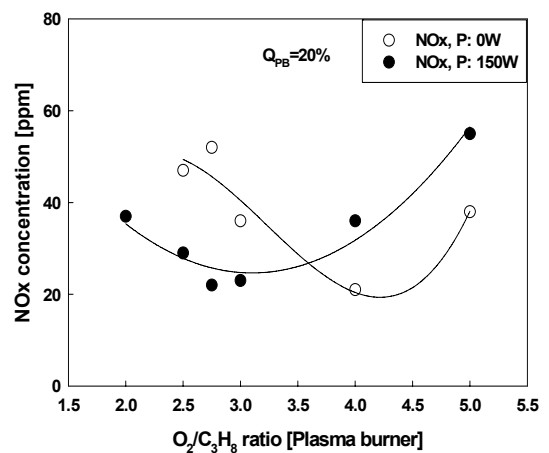


Fig. 4 Comparison of NOx generation with and without plasma operation in 1st stage burner

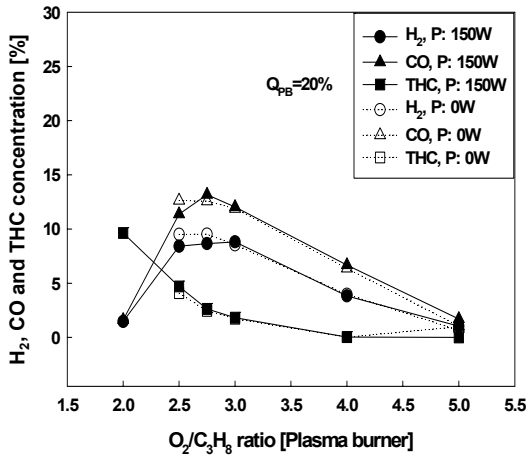


Fig. 5 Comparison of H<sub>2</sub>, CO, THC produce with and without plasma in 1st stage burner

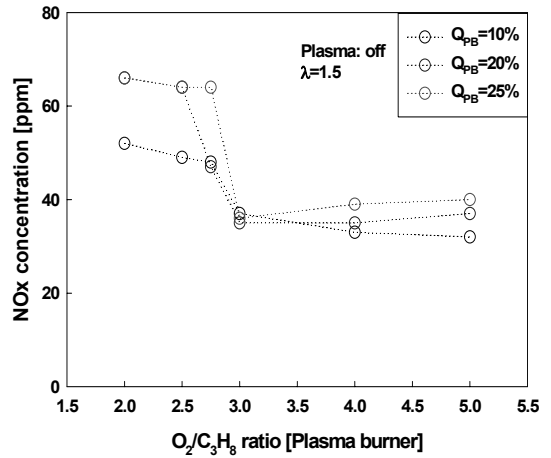


Fig. 7 NO<sub>x</sub> generated in different Q<sub>PB</sub> condition, without plasma operation

플라즈마 작동 시에 상대적으로 높은 NO<sub>x</sub> 발생농도를 보였다.

이때 플라즈마 버너에서 생성되는 합성가스(H<sub>2</sub> 및 CO)는 Fig. 5에 나타낸바와 같이 O<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>=2.5~3 영역에서 비교적 높게 나타났다. 플라즈마 작동시의 방전전력인 150W 수준에서는 플라즈마를 작동하지 않은 경우와 비교해 개질특성의 차이를 보이지 않았다.

### 3.2 플라즈마 버너 적용 저 NO<sub>x</sub> 버너(PLNB) 연소특성

Fig. 6은 Q<sub>PB</sub>=25%(25,000kcal/h) 조건에서 O<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 비 변화에 따른 연소특성을 플라즈마를 작동한 경우와 작동하지 않은 경우에 대하여 비교한 실험결과이다. Q<sub>PB</sub>=25% 조건은 LNB의 열부하율이 75%가 되는 조건으로 Q<sub>PB</sub>=10% 또는 20%에 비해 상대적으로 플라즈마 버너 안에서의 연소 부하가 커지

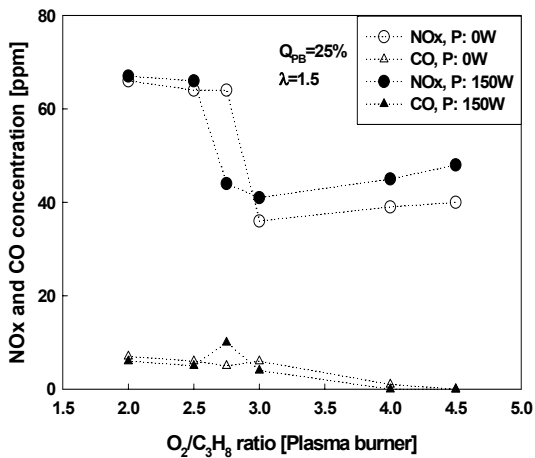


Fig. 6 NO<sub>x</sub> generation with and without plasma plotted against O<sub>2</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> ratio in Q<sub>PB</sub>=25% condition

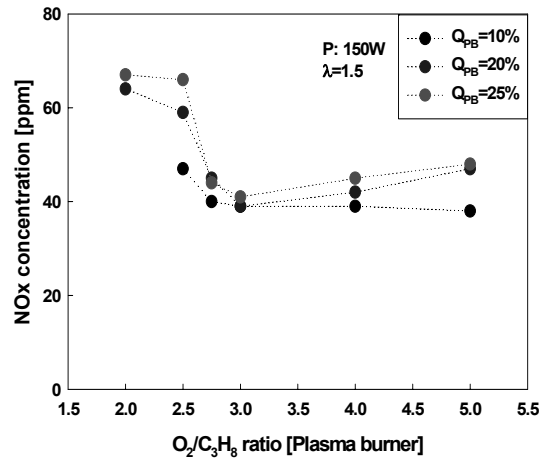
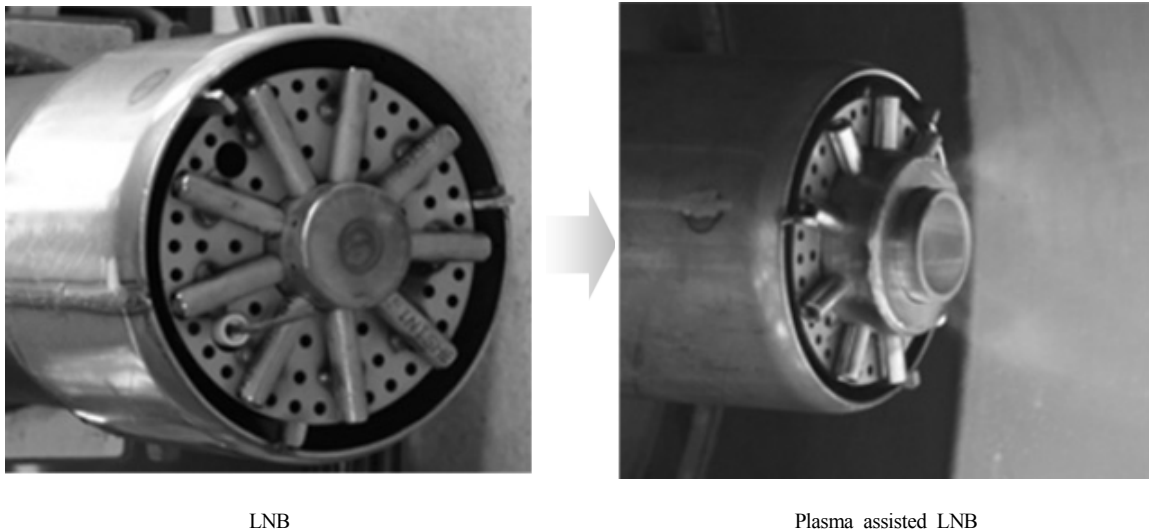


Fig. 8 NO<sub>x</sub> generated in different Q<sub>PB</sub> condition, with plasma operation



LNB

Plasma assisted LNB

Fig. 9 Plasma burner operated by arc reactor

게 되는 조건이다.

실험결과  $O_2/C_3H_8=3$ 을 기점으로  $O_2/C_3H_8=3$  이하의 영역에서는 비교적  $NO_x$  발생농도가 높게 나타났으며,  $O_2/C_3H_8=3$  이상의 영역에서는 상대적으로 낮은 발생농도를 보였다. 이 중  $O_2/C_3H_8=2.75$  조건에서는 플라즈마가 작동하지 않은 경우, 높은  $NO_x$  발생농도를 보이다가 플라즈마를 작동하게 되면 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이 후  $O_2/C_3H_8=3$  이상의 영역에서는 낮은  $NO_x$  발생농도를 보였으며, 플라즈마가 작동하는 경우, 상대적으로 다소 높게 나타났는데 이러한 특성은 플라즈마 버너의 Fig. 4 결과와 동일하였다.

$O_2/C_3H_8$  비 변화에 따른  $NO_x$  배출특성은  $Q_{PB}=10\%$  및  $20\%$ 의 경우에도 유사한 특성을 보였는데, Fig. 7과 Fig. 8에 플라즈마 작동유무에 대한 결과를 각각 비교하였다.

플라즈마 작동유무에 관계없이  $O_2/C_3H_8=3$ 을 기점으로  $O_2/C_3H_8=3$  이하의 영역에서는 비교적  $NO_x$  발생농도가 높다.  $O_2/C_3H_8=3$  이상의 영역에서 상대적으로 낮게 나타나는 특성은  $Q_{PB}=10\%$  및  $20\%$ 에서도 동일하였으며, 전체적으로  $Q_{PB}$  값이 증가할수록  $NO_x$  발생농도는 높게 나타났다. 그러나  $O_2/C_3H_8=$

3 조건에서는  $Q_{PB}$  값과 무관하게 큰 차이를 보이지 않았다. 특히 플라즈마 작동 시에는  $O_2/C_3H_8=2.75$  조건에서도  $Q_{PB}$  값에 따른  $NO_x$  발생농도는 크지 않아 이러한 영역이 플라즈마 작동에 따라 확대될 수 있음을 확인하였다.

대체적으로 플라즈마 버너를 적용한 저  $NO_x$  버너의 연소특성 실험결과, 완전 연소조건( $O_2/C_3H_8=5$ )과 이론 부분산화조건( $O_2/C_3H_8=1.5$ ) 사이의 중간 영역에서 저  $NO_x$  배출특성을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 플라즈마 버너(PB)의 연소실에 적합한 적정 연소부하율 및 최적의 운전조건을 통해 저  $NO_x$  연소기술 확보가 가능할 것으로 판단된다.

### 3.3 기존 저 $NO_x$ 버너(LNB) 연소특성

Fig. 9는 본 연구에서 설계/제작된 아크 반응기 적용 저  $NO_x$  버너(PLNB)의 형상 및 화염사진으로, 기존 저  $NO_x$  가스버너(LNB)의 특성을 살리기 위하여 버너의 전체적인 치수나 형상을 유지한 상태에서 보염 및 점화 역할을 하는 연소기 헤드(head)를 아크 반응기로 대체한 형태이다. 따라서 LNB의 연소특성을 평가해 봄으로서 PLNB에 대한 저  $NO_x$  연소기술의 개발 가능성을 판단할 수 있게

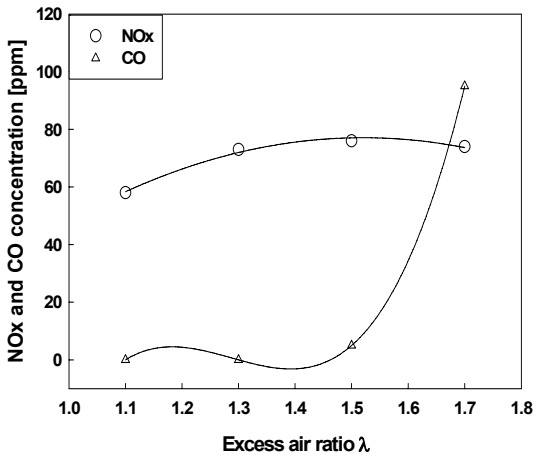


Fig. 10 NOx and CO generation in conventional burner

된다.

LNB에 대한 연소특성실험은 PLNB와 동일하게 100,000kcal/h 연소부하에서 과잉공기비( $\lambda$ ) 별 특성을 평가하였으며, Fig. 10에 나타난 바와 같이  $\lambda=1.1\sim 1.7$  범위에서 NOx 농도가 약 58~76ppm 수준으로 평가되었는데, 이는 PLNB( $O_2/C_3H_8=3$  조건)의 약 2배 수준에 해당한다.

#### 4. 결 론

플라즈마를 이용한 연소 제어 기술의 가능성과 특성을 평가하기 위해 기존의 저 NOx 가스버너에 회전아크를 발생시키는 플라즈마 버너를 결합한 형태의 다단연소방식 가스버너를 설계/제작하였으며, i) 아크 반응기 즉, 플라즈마 버너(PB)의 연소특성, ii) 플라즈마 버너가 장착된 저 NOx 버너(PLNB)의 연소특성, iii) 기존 저 NOx 가스버너(LNB) 연소특성에 대해 다양한 당량비 조건에서 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

##### 1) PB 단독실험결과

플라즈마 작동여부에 관계없이  $O_2/C_3H_8=3$  조건에서 화염이 1단 연소기인 플라즈마 연소실 내부로 삼켜지는 특성을 확인하였으며,  $O_2/C_3H_8$  비가 증가

할수록 발생화염은 점차 청염으로 변하면서 화염길이는 짧아지는 것으로 나타났다.

##### 2) PLNB 실험결과

- $O_2/C_3H_8=3$  조건에서 NOx 발생농도가 가장 낮게 나타났으며,  $O_2/C_3H_8=3$  이하의 영역에서 상대적으로 높고  $O_2/C_3H_8=3$  이상의 영역에서 낮은 발생농도를 보였다.
- 특히  $O_2/C_3H_8=2.75$  조건에서는 플라즈마가 작동하지 않는 경우, 높은 NOx 발생농도를 보이다가 플라즈마를 작동하게 되면 급격히 감소하여, 플라즈마 작동에 따라 이러한 영역이 확대될 수 있음을 확인하였다.
- 이상의 특성은  $Q_{PB}=10\%$  및  $20\%$ 에서도 동일하였으며, 전체적으로  $Q_{PB}$  값이 증가할수록 NOx 발생농도는 높게 나타났는데,  $O_2/C_3H_8=3$  조건에서는  $Q_{PB}$  값과 무관하게 큰 차이를 보이지 않았다.

##### 3) LNB 실험결과

PLNB와 동일하게 100,000kcal/h 연소부하에서 과잉공기비( $\lambda=1.1\sim 1.7$ ) 별 연소특성 실험결과, NOx 발생농도가 약 58~76ppm 수준으로, 이는 PLNB( $O_2/C_3H_8=3$  조건)의 약 2배 수준에 해당하는 것으로 나타났다.

## 후 기

이 연구는 한국에너지기술평가원의 지원을 통한 연구사업(NE3890)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) T.D. Andrea, P.F. Henshaw, D.S.-K Ting, "The addition of hydrogen to a gasoline-fuelled SI engine", Int. J. Hydrogen Energy, 29, 2004, pp. 1541-1552.
- 2) X. S. Li, A. M. Zhu, K. J. Wang, Y. Xu, and Z. M. Song, "Methane conversion to C<sub>2</sub> hydrocarbons and hydrogen in atmospheric non-thermal

- plasmas generated by different electric discharge techniques”, Catalysis Today, Vol. 98, No. 4, 2004, pp. 617-624.
- 3) 김관태, 이대훈, 차민석, 길상인, 윤진환, 김동현, 송영훈, “플라즈마를 이용한 FGR 기반 저 NOx 연소 타당성 연구”, 한국연소학회지, Vol. 12, 2007, pp. 1-7.
  - 4) 송영훈, 황나경, 이대훈, 김관태, “플라즈마 버너활용 저 NOx 연소기술”, 제41회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집, 2010, pp. 71-74.
  - 5) Dae Hoon Lee, Kwan-Tae Kim, Min Suck Cha, Young-Hoon Song, “Effect of excess oxygen in plasma reforming of diesel fuel”, Int. J. Hydrogen Energy, 35, 2010, pp. 4668-4675.
  - 6) 이상민, 최원석, 안국영, “Syngas-순산소 확산 화염의 연소특성에 관한 실험적 연구”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 21, No 6, 2010, pp. 553-560.
  - 7) Dae Hoon Lee, Kwan-Tae Kim, Min Suk Cha, Jae Ok Lee and Young-Hoon Song, “The influence of hydrogen-enriched gas on the performance of lean NOx trap catalyst for a light-duty diesel engine”, Int. J. Hydrogen Energy, 35, 2010, pp. 1789-1796.
  - 8) L.B. Davis, S.H. Black, “Dry Low NOx Combustion Systems for GE Heavy-Duty Gas Turbines”, GE Power Systems Schenectady, NY, GER-3568G.