

# 연소실 분위기 압력이 화염형상에 미치는 영향

김종률<sup>†</sup>·최경민\*·김덕줄\*

## The Influence of Combustor Atmospheric Pressure on Flame Characteristics

J.-R. Kim<sup>†</sup> G.-M. Choi and D.-J. Kim

Key Words: Combustor Atmospheric Pressure(연소실 분위기 압력), Flame Shape(화염 형상), NOx Emission(질소산화물 배출)

### Abstract

Recently, development of flame control scheme has been hot issues in the combustion engineering. It has been held that flame shape can be controllable by pressure inside combustor. The influence of combustor atmospheric pressure on flame shape was investigated in the present study. The flame shape, flammable limit, flame temperature and nitric oxide emission were measured as functions of combustor atmospheric pressure and equivalence ratio. The reaction region became longer and wider with decreasing combustor atmospheric pressure by direct photography, hence reduction of blow off limit. This tendency was also observed in the mean flame temperature distribution. Nitric oxide emission decreased with decreasing combustor atmospheric pressure. Low NOx combustion is ascribed to wide-spread reaction region in the low atmospheric pressure condition. These results demonstrate that flame shape and nitric oxide emission can be controllable with combustor atmospheric pressure.

### 기호설명

$\phi$  : Equivalence ratio (당량비)

$P_{abs}$  : Absolute pressure(절대압력)

$P_{ref}$  : Reference pressure(기준압력)

$p^*$  : Pressure index (압력지수)

$$p^* = \frac{P_{abs}}{P_{ref}}$$

### 1. 서 론

최근 에너지 문제가 증대한 사회문제로 대두되고 있고, 중동유의 가격상승으로 또 다른 오일 쇼크가 염려되고 있는 실정이다. 또한 에너지 소

비에 따른 배출물이 많은 환경 문제를 일으키고 있다. 이에 많은 연구자들은 고부하 저공해 연소기의 개발을 위해 끊임없는 노력을 기울이고 있다.

이러한 고효율 저공해 연소기의 개발을 위해 최근에는 화염의 반응속도 및 국소화염구조를 제어하는 기술에 관심이 고조되고 있다. 화염을 능동적으로 제어하기 위하여 공급 미연혼합기의 유량을 주기적으로 가변하는 기술<sup>(1,2)</sup>, 2차 연료를 이용하여 진동연소를 제어하는 기술<sup>(3,4)</sup> 등이 보고되고 있으나, 대부분의 연소제어기술은 화염불안정성과 진동연소를 대상으로 하고 있는 것이 현실이다. 따라서 미래지향적인 연소제어기술로는 화염의 반응속도와 국소화염구조를 지능적으로 제어할 수 있는 기술이 요구된다. 본 연구에서는 연소실내의 분위기 압력의 조절을 통하여 화염의 형상을 제어하고자 한다. 연소실 내에 압력 변화에 따른 화염의 형상 및 배출 특성을 규명하는 연구는 일부 연구자들에 의하여 고압의 연소실 분위기 압력 조건에 한하여 일부 수행되었지만<sup>(5,6)</sup>, 본 연구에서 시도하는 것처럼 대기압

<sup>†</sup> 부산대학교 기계공학부

E-mail : choigm@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2476 FAX : (051)510-516-9598

\* 부산대학교 기계공학부

이하의 조건에서 화염의 형상과 연소특성을 조사한 연구를 찾아보기 힘들다. 본 연구의 목적은 연소실내에 형성된 다양한 분위기 압력 조건에 대하여 부분 예혼합 화염의 형상변화와 연소특성을 규명하는 것이다.

실험은 크게 두 가지 관점에서 수행하였다. 화염의 배출 특성을 알아보기 위해 평균 온도와 질소산화물 배출특성을 조사하였고, 화염의 구조를 조사하기 위하여 화염 가시화를 통한 화염형상 변화를 조사하여 연소실내의 분위기 압력이 부분 예혼합 화염의 연소특성에 미치는 영향을 자세히 관찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험 장치도는 Fig.1 에 나타내었다. Blower를 통하여 발생된 공기는 저장탱크를 거쳐 연소실내의 분위기 압력 조건을 형성하기 위한 공기로 사용되어 진다. 연소실로 공급되어지게 되는 공기는 증류유량계(LFE-50B)를 통하여 계측되어지고 게이트 밸브로 제어하여 압력을 조절한다. 연소실 내에서 연소가 완료되어진 연소 가스는 열교환기를 통하여 냉각되어진 후 Suction fan을 거친 뒤 대기로 배출되어진다.

Fig 2는 실험에서 사용한 디퓨저 및 보염기의 형상을 나타낸 것이다. 공기와 연료는

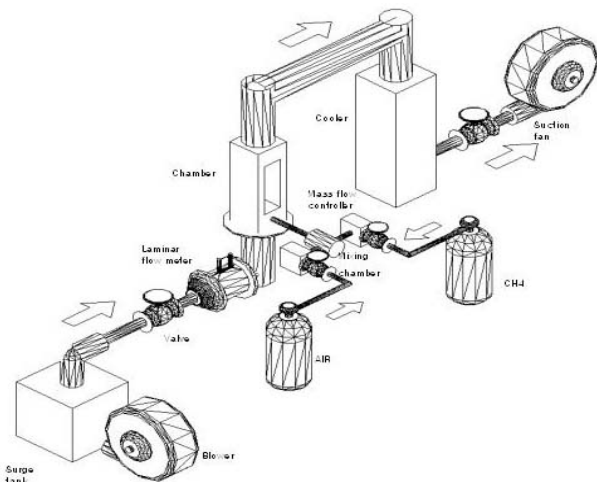


Fig.1 Experimental apparatus

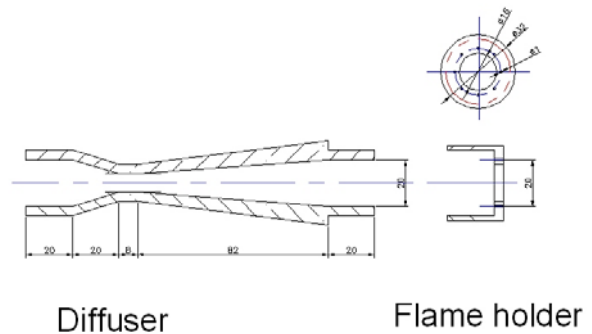


Fig. 2 Burener shape

질량유량계(Mass flow controller)를 거쳐 예혼합실(Mixing chamber)로 공급되고 혼합기는 스테인레스관을 통하여 연소기 내부의 디퓨저로 공급된다. 본 실험에서 연료는 순도 99.99%의 메탄(CH<sub>4</sub>)을 사용하였으며 연소용 공기로는 습기가 제거된 압축 공기를 사용하였다. 예혼합실 내에는 steel ball과 허니콤을 설치하여 혼합기의 유동을 정류하였고, 역화를 방지하는 기능으로도 사용되었다. 한편 다양한 압력 변화에 대해 안정적인 화염 형성을 위해 디퓨저와 파이롯트 화염용 인젝터가 부착된 보염기를 사용하였다.

### 2.2 실험방법

Table 1에 연소실 분위기 압력과 당량비 변화에 따른 화염의 구조와 배출 특성을 조사한 실험 조건을 나타내었다.

#### 2.2.1 가연한계 측정

연소기 내에 압력 변화에 따른 화염의 블로우 오프 한계를 측정하기 위하여 각각의 압력에 대한 예혼합기 유량을 조절하였다. 화염이 부상하여 소화되기 직전까지의 최대 혼합기량을 측정하여 화염 안정 범위를 결정하였고, 연료를 고정된 후 공기량을 증가시켜 가면서 최대 희박 당량비 값을 조사하였다.

#### 2.2.2 화염의 가시화

화염 유동장의 가시화를 위하여 직접사진을 촬영하였으며, 촬영에는 수동 초점 조정이 되는 디지털 카메라를 이용하였다. 카메라의 셔터속도는 1/125sec로 촬영하였으며, 화염길이는 디지털 캠코더를 이용하여 촬영한 30개의 이미지를 평균화

여 구하였다.

2.2.3 화염대의 평균 온도 측정

화염 내부의 온도를 측정하기 위하여 삽입되는 열전대는 Pt/Pt-Rh 13%의 R형 열전대를 사용하였고, 세라믹제로 단열처리 되어진 2공 튜브로 소선을 분리하여 온도계에 입력시켰다. 실험시의 측정 위치는 연소실 분위기 압력과 당량비에 대하여 각각의 화염길이의 1/2 지점에서 반경방향 1mm 간격으로 측정하였다. 각 지점에서 안정된 온도값의 측정을 위해 측정시간을 5분내외로 하였으며, 3회 측정치의 평균값을 평균온도로 하였다.

2.2.4 질소산화물 분석

질소산화물의 측정을 위하여 스테인레스 샘플링 프로브를 사용하였으며 프로브의 과열을 막기 위해 샘플링 튜브 외측에 수냉식 2중관을 설치하였다. 연소가스의 포집 위치는 연소실 분위기 압력과 당량비에 대하여 각각의 화염 길이의 2배 되는 지점에서 하였다.

포집된 연소 가스는 가스중의 soot와 수분을 1차적으로 실리카겔과 거즈를 통하여 여과하고 필터를 통하여 순차적으로 제거 후 가스분석기에 유입되었다. 본 실험에서 측정된 NOx는 화학발광법으로 분석하는 COSA 6000에 의하여 측정되었다.

Equivalence ratio, $\phi$	Air condition	Pressure P*	Air Flow rate (lpm)
0.9 ~ 1.2	Suction	0.7	140lpm
		0.8	
		0.9	
	Suction + Blow	1	
	Blow	1.1	
		1.2	
		1.3	

Table 1 Experimental conditions.

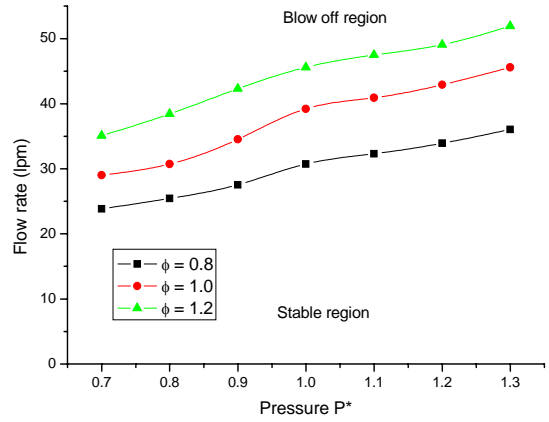


Fig3. Distribution of flammability limits

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 가연한계측정

Fig. 3은 부분 예혼합 화염에서 혼합기의 당량비의 변화에 따른 화염의 블로우 오프 한계 및 안정영역을 나타낸 것이다. 각각의 당량비조건( $\phi = 0.9, 1.0, 1.1, 1.2$ )에 대하여 혼합기량을 증가시켜 화염이 날아가는 시점의 최대 공급 예혼합기 유량을 블로우 오프 한계라 하며, 그 이전의 영역을 화염 안정영역으로 하였다. Fig. 3은 부분 예혼합 화염에서 당량비가 증가함에 따라서 점차적으로 화염안정 영역이 늘어나고 있음을 볼 수 있으며, P\*가 감소함에 따라 블로우 오프되는 부분 예혼합화염의 화염 안정화 영역이 단순히 축소되는 것을 관찰할 수 있다. 여기서 가연한계 영역의 차이는 연소실 분위기 압력에 따른 가연 영역의 차보다 당량비에 대해서 보다 많은 차를 나타내는 것을 볼 수 있다.

3.2 화염의 가시화

Fig.4는 각각의 당량비에서 압력 변화에 따른 직접 사진을 나타낸 것이다. 사진에서의 화염은 이중 구조 예혼합화염을 나타내고 있다. 화염 내측의 내염영역에서 화염은 밝은 색상의 청색을 나타내며 외측의 외염영역에서는 휘도가 낮은 청염을 나타낸다. 보염기에서 분사되어진 미연 예혼합 가스는 내염영역에서 1차적인 반응을 일으키고, 일부 미연성분은 외염영역에서 주위의 공기와 2차적인 반응을 일으켜, 전체적으로 2중 화염 구조를 나타나게 되었다. 연소실 분위기 압력

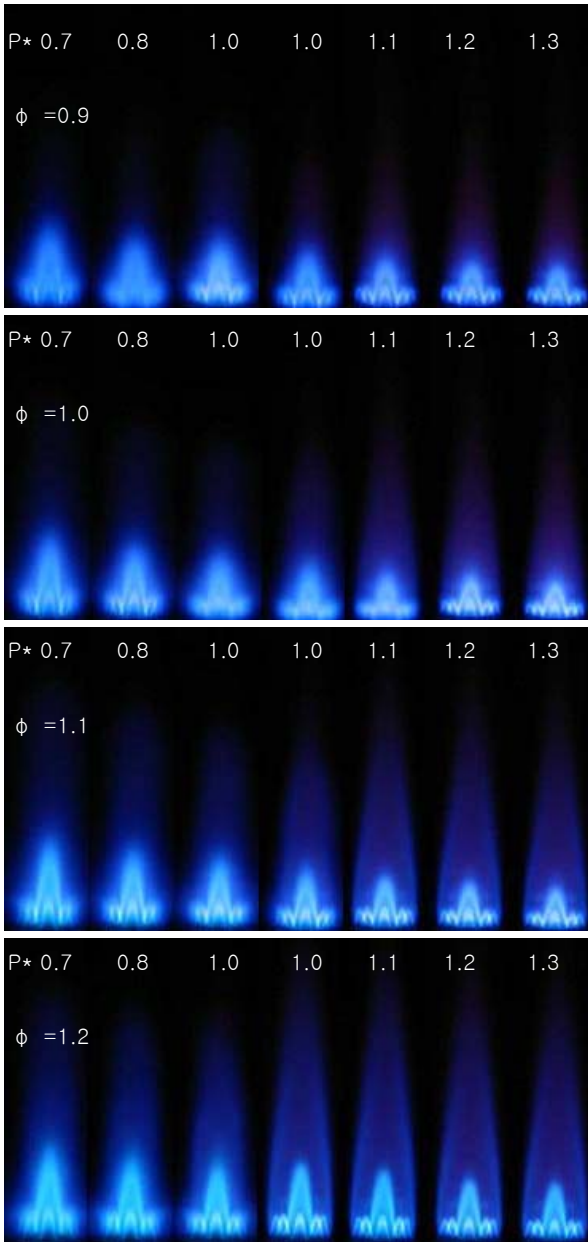


Fig4. Direct Photograph with the variation of pressure index

은 외염보다 내염에 크게 영향을 미치는 것으로 관찰된다. 사진에서 화염의 크기는 P\*가 1 이하인 조건이 1 이상인 조건에 비해 상대적으로 화염 길이가 신장 되어진 것을 볼 수 있다.

Fig.5 는 당량비와 분위기 압력의 변화에 따른 화염길이를 나타낸다. 당량비가 증가함에 따라 화염 길이는 증가되는 경향을 나타나고 있다. 동일한 당량비에 대해 압력 변화에 대한 중심 화염 길이는 최대 30% 정도 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

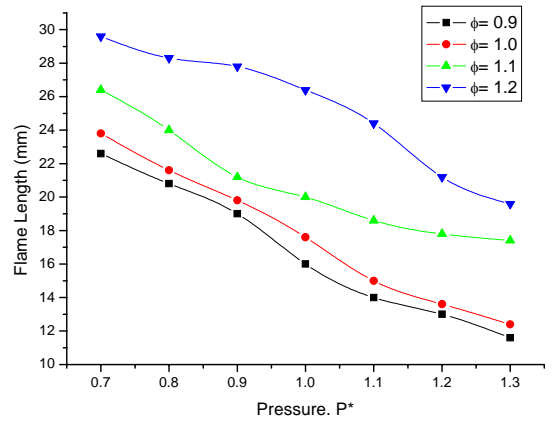


Fig5. Flame length with the variation of pressure index

### 3.3 온도 및 배기가스 측정

Fig.6은 동일한 당량비 조건에 대하여 연소실 내에 분위기 압력의 변화에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 온도 측정 위치는 각각의 실험 조건에 따른 화염길이의 1/2 점에서 하였다. P\*가 1 이상인 경우 고온 영역이 좁게 나타나며 P\*가 1 이하인 경우는 화염 신장으로 인해 전체적인 온도장이 균일하고 넓게 분포함을 관찰할 수 있다. 특히, 당량비 0.9의 P\*가 1 이하인 조건에서는 온도 분포가 균일할 뿐만아니라 중심축부위에서 절대온도도 낮게 나타나 Thermal NOx 배출량의 감소가 기대된다.

Fig.7은 동일한 당량비 (phi = 0.9, 1.0, 1.1, 1.2)에서 압력 변화에 따른 최고 온도 분포를 나타낸다. P\*가 1 이상인 영역에서는 희박 조건에서 최고 온도가 나타나는 것을 볼 수 있으나, P\*가 1 이하로 감소되면서 이러한 현상은 역전되고 있다. 이는 P\*가 1이하로 감소되면서 과농연소조건인 미연혼합기와 주위공기와와의 확산이 촉진되었기 때문으로 생각된다. 본 연구의 실험조건 내에서는 희박연소조건이 과농연소조건에 비해 연소실 분위기 압력의 영향을 크게 받음을 알 수 있다.

Fig.8은 가스 샘플링 프로브를 이용하여 NOx 분석기(COSA 6000)로 측정된 결과이다. 측정 위치는 실험 조건에 따른 화염 길이의 2배 되는 위치에서 스테인레스관으로 포집하여 습기제거와 soot를 제거 후 가스 분석기에 공급하여 NOx 값을

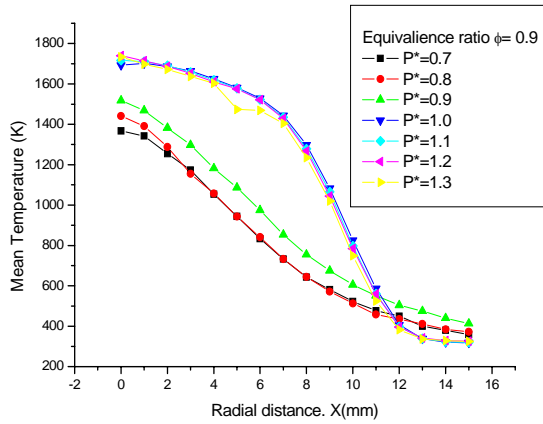


Fig6. Distribution of Temperature with the variation of pressure index

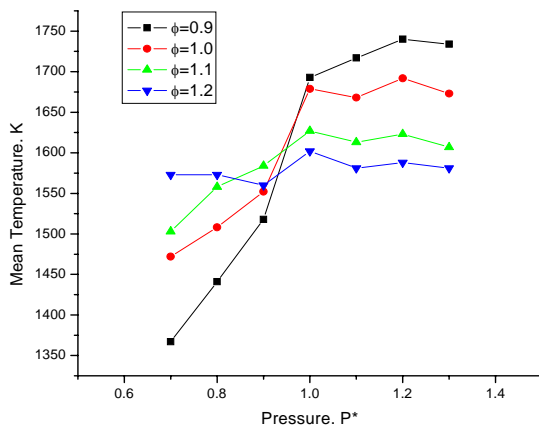
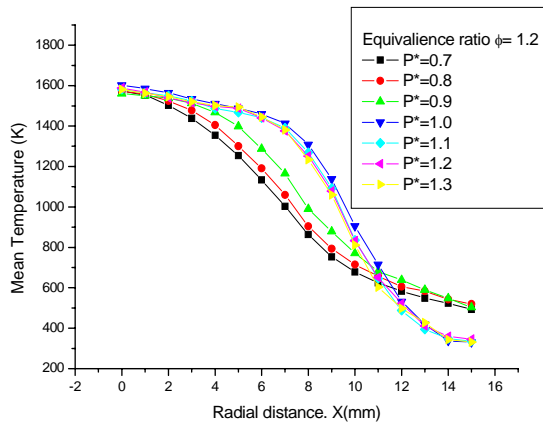


Fig7. Distribution of Maximum Temperature with the variation of pressure index

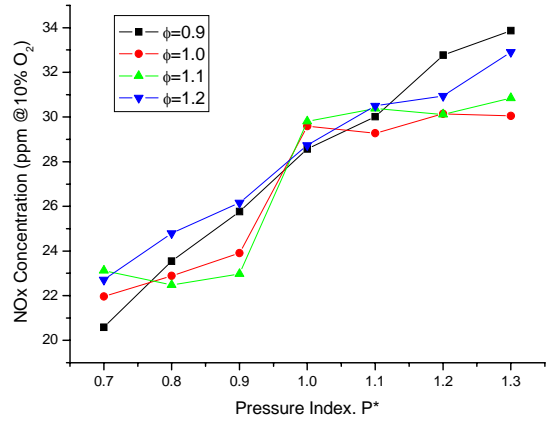


Fig8. Distribution of NOx Concentration

측정하였다. 측정된 값은 O2 10% 화산농도로 표시하였다. P\*가 1인 점을 기준으로 압력이 낮아짐에 따라 NOx 배출량이 약 30% 정도 감소하는 것을 볼 수 있다.

이것은 대기압보다 낮은 연소실 압력 조건에서는 화염의 길이와 폭의 신장으로 전체적으로 온도분포가 균일하며 화염대의 고온영역이 감소하여 Thermal NOx 배출량이 감소하였기 때문이라 생각된다.

따라서 상기의 결과들로부터 연소실내의 분위기 압력을 조절함으로써 화염형상 및 배출특성의 제어가 가능함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 연소실내의 분위기 압력의 변화에 따른 부분 예혼합 화염의 구조와 배출특성의 변화를 조사하기 위하여 화염의 가시화, 화염의 평균 온도 측정 및 NOx 배출특성을 측정하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압력지수가 1이하 조건에서 1이상인 조건보다 화염반응면의 신장현상이 뚜렷이 나타났으며, 압력지수의 변화에 따른 전체적인 화염 온도 및 NOx 배출특성의 변화를 관찰 할 수 있다.

(2) p\*가 1이상인 경우는 좁은 고온 영역을 나타내는 반면, p\*가 1이하인 조건에서는 상대적으로 낮은 최고온도와 전체적으로 균일한 온도 분포를 나타내었다.

(3) 화염장의 온도감소 및 균일한 분포를 나타낸 낮은 분위기 압력 조건에서 30%이상의 저 NOx 연소가 실현되었다.

(4) 연소실내의 분위기 압력을 조절함으로써 화염형상 및 배출특성의 제어가 가능함을 알 수 있었다.

Fuel vol 75 pp.1509-1514

(10) Sayangdev Naha, Suresh K. Ahharwal - 2004  
Fuel effecton on NOx emissions in partially premixed flames. Combustion and Flame

### 참고문헌

- (1) Dec, J. E. and Keller, J. O., - 1989 Pulse Combuster Tail-Pipe Heat-Transfer Dependence on Frequency, Amplitude, and Mean Flow Rate, Combust. Flames, vol 77 pp.359-274
- (2) Poppe, C., Sivasegaram, S. and Whitelaw, J. H., - 1998 Control of NOx Emission in Confined Flames by Oscillations, Combust. Flame, vol 113 pp.13-26
- (3) Lee, J. G., Kim, K. and Santicca, D. A., - 2000 Effect of Injection Location on the Effectiveness of an Active Control System using Secondary Fuel Injection, Proc. Combust. Inst., vol 28 pp.739-746
- (4) Docquier, N., Lacas, F. and Candal, S., - 2002 Close-Loop Equivalence Ratio Control of Premixed Combustor using Spectrally Controllered Resolved Chemilminescence Measurements, Proc. Combust. Inst., vol 29 pp.139-145
- (5) H.H. Liakos, M.A. Founti, N.C.. Markatos -1999 The relative importance of combustion mechanisms in industrial premixed flames under high pressure. Applied Thermai Engineering vol 20 pp. 925-940
- (6) A. Soike, F. Dinkelacker, A. Leipertz -2001 Pressure influence on the flame front curvatuer of turbulent premixed flame: comparison between experiment and thery. Combustion and Flame vol 132 pp. 451-462
- (7) D. DOUGLAS THOMSEN - 1999 Modeling of NO Formation in Premixed, High-Pressure Methane Flame. Combustion and Flame vol 119 PP. 307-318
- (8) M.F.M. Nogueira, E.M. Fisher -2002 Effect of dimethyl methylphosphonate on premixed methane flame. Combustion and Flame vol 132 PP. 352-363
- (9) Koji Hase, Yasumichi Kori - 1996 Effect of permixing of fuel gas and air on NOx formation.