

# 메탄/공기 층류 부분에혼합화염의 화염구조와 NOx 배출특성 : 연료분배율과 혼합거리의 영향

정용기\*·이종호\*·이석영\*·전충환\*\*·장영준†  
(2004년 1월 30일 접수, 2004년 4월 1일 심사완료)

## Flame Structure and NOx Emission Characteristics in Laminar Partially Premixed CH<sub>4</sub>/Air Flames: Effects of Fuel Split Percentage and Mixing Distance

Yong Ki Jeong, Jong Ho Lee, Suk Young Lee, Chung Hwan Jeon and  
Young June Chang

**Key Words:** Partially Premixed Flame(부분에혼합화염), OH\*(OH 자발광), NOx Emissions(NO 배  
출물), Fuel Split percentage(연료분배율), Mixing Distance(혼합거리)

### Abstract

In this paper, the study of effects of flow parameters on flame structure and NOx emission concentration was performed in co-axial laminar partially premixed methane/air flames. Such flow parameters as equivalence ratio( $\phi$ ), fuel split percentage( $\sigma$ ), and mixing distance( $x/D_i$ ) were defined as a premixing degree and varied within  $\phi=1.36\sim 9.52$ ,  $\sigma=50\sim 100$ , and  $x/D_i=5\sim 20$ . The image of OH\* and NOx concentration were obtained with an ICCD camera and a NOx analyzer. The flame structure observations show a categorization of partially premixed flames into three distinct flame regimes corresponding to  $\phi<1.7$ (premixed flame structure),  $1.7<\phi<3.3$ (hybrid structure), and  $\phi>3.3$ (diffusion flame structure existing a luminous sooting region) at  $\sigma=75\%$ , and  $x/D_i=10$ . As  $\sigma$  decreases from 100% to 50%, and  $x/D_i$  decreases, nonpremixed flame structure appear at low equivalence ratio relatively. In addition, the measured emissions for NOx rise steeply from  $\phi=1.7$ , to  $\phi=3.3$ , then constants  $\phi>4.76$ . NOx emissions decrease with increase the level of premixing level. In conclusion, the main effect on flame structure and NOx production was at first equivalence ratio( $\phi$ ), and next fuel split percentage( $\sigma$ ), and finally mixing distance( $x/D_i$ ).

### 기호설명

$D_i$  : 안쪽 관 직경 [mm]  
 $D_o$  : 바깥쪽 관 직경 [mm]  
 $L_f$  : 화염 높이 [mm]  
 $x$  : 안쪽 관 후퇴 거리 [mm]  
 $x/D_i$  : 혼합 길이  
 $\tau_c$  : 체류 시간

$\sigma$  : 연료분배율  
 $\phi$  : 당량비

### 1. 서론

화염구조 및 배기배출물 특성과 관련한 연구는 일반적으로 연료와 공기의 초기 상태에 의해 결정되는 확산화염과 예혼합화염에 관한 연구가 주를 이루었다. 하지만 실제연소시스템, 특히 가스터빈, 디젤엔진, 연소로에서 빈번하게 부분에혼합화염의 형태가 발생한다. 이 부분에혼합화염은 비예혼합 화염(non-premixed flame)에 비하여 배기

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : changyj@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2332 FAX : (051)512-5236

\* 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부 기계기술연구소

배출 수준이 낮고 희박 예혼합 화염(lean premixed flame)보다 안정적인 상태를 가지는 장점으로 인해 환경 문제에 대한 관심조와 함께 배기배출물 저감의 한 방법으로 연구되어지고 있다.<sup>(1)</sup>

Katta 등<sup>(2)</sup>은 예혼합기에 공기를 희석시켜 부분예혼합화염에 관한 연구를 수행하였다. 그들의 결과에서 낮은 신장률에서 이중화염구조가 관찰되며, 예혼합기가 분출되는 내부관의 속도와 외부관의 속도, 그리고 당량비에 따른 상관식에 의해 화염길이 결정된다고 보고하고 있다. Lee 등<sup>(3)</sup>은 난류부분예혼합화염을 대상으로 내부관에 공기를 희석시킨 경우에 대하여 연구를 수행하였다. 내부관과 외부관의 상대속도비 증가는 화염길이를 증가시키고, 혼합길이(mixing distance)의 증가는 화염길이에 미치는 영향은 미비하다고 보고하고 있다. Greenhalgh 등<sup>(4)</sup>은 당량비가 과잉인 예혼합화염과 희박한 예혼합화염을 분사한 부분예혼합, 대향류 화염에 있어 삼지화염에 관한 연구를 수행하였다. 그들은 레이저유도형광법(LIF, Laser Induced Fluorescence)을 이용하여 당량비와 신장률에 따른 화염의 단면정보를 확인하였다. Gore 등<sup>(5)</sup>은 메탄-공기 층류와 난류 예혼합화염을 대상으로 화염구조와 NOx 발생특성에 관한 연구를 수행하였다. 그들의 결과에 의하면 부분예혼합 정도의 증가는 화염길이와 발광강도를 감소시킨다고 보고하고 있다. 당량비 3.5를 기준으로 화염형상이 이중화염과 확산화염형상이 구분된다고 보고하고 있고, NOx 배기배출물에 있어 가장 최적화 되는 조건이 발생한다고 보고하고 있다.

부분예혼합 화염 연구에 있어 화염구조적 측면과 더불어 실질적인 중요 관심사의 하나인 배기배출물에 관한 연구도 진행되고 있다. Nishioka와 Takeno 등<sup>(6)</sup>은 여러 조건의 메탄-공기 부분예혼합화염에서 CHEMKIN을 사용하여 동축류와 대향류 버너에서의 당량비에 따른 EINOx를 NOx 메카니즘 별로 구분하였다. 이의 결과로 당량비 1.5~3.0에서는 NOx의 발생량 또한 거의 로그 함수적으로 증가하였으며 대향류(counterflow)에서는 열적 메카니즘(thermal NO mechanism), 동축류(coflow)에서는 급속 메카니즘(prompt NO mechanism)의 영향이 지배적이라고 보고하고 있다. Lee 등<sup>(7)</sup>은 난류 부분예혼합 화염에서 화염형상이 NOx와 CO 배출물에 중요한 영향을 준다고 보고하고 있다. 연료공급의 증가는 전체적인 당량비를 증가

시키고, 이것은 체류시간의 증가로 인해 NOx를 증가시키는 역할을 한다고 보고하고 있다. Rokke 등<sup>(8)</sup>도 부분예혼합화염을 대상으로 NOx 배출물과 체류시간의 관계를 설명하고 있다.

실제로 많은 연소환경에서 초기 연료-공기 혼합상태, 공간적 변화들에 의해 부분예혼합화염 형태가 발생하고 있지만 실제로 어떤 파라미터가 화염형상, 안정성, 그리고 배기배출물에 영향을 미치는지에 대한 연구가 아직은 미약한 사항이다. 아울러 부분예혼합화염에 관한 연구는 전형적으로 연료공급라인에 희석을 시키기 위한 공기를 공급하여 부분예혼합화염을 만드는 것이 주를 이루고 있다.

따라서 본 연구에서는 이중동축화염을 대상으로 내부관에 공기를 공급하여 희석 및 혼합을 강화시키는 것이 아닌 연료를 공급하여 부분적으로 과농한 혼합기를 생성하는 형태의 부분예혼합화염을 대상으로 당량비( $\phi$ ), 연료분배율( $\sigma$ ), 그리고 혼합길이( $x/D$ )와 같은 변수가 부분예혼합화염에 미치는 영향을 OH 자발광을 통해 화염형상을 파악하고, 동일한 조건에서 세가지 변수가 NOx 생성에 미치는 영향을 파악함에 있어 각 인자가 화염에 미치는 상호작용을 연구하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치 및 방법

본 연구는 메탄 층류 부분예혼합화염을 대상으로 각종 변수가 화염구조와 배기배출물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같이 연소기와 실험장치를 구성하였다. 연소기는 연료와 공기를 각 조건에 맞춰 공급하기 위하여 높이의 변경이 가능하도록 설계한 직경 2mm인 내부관과 8mm인 외부관을 동축으로 설치하였다. 외부관 외부에는 화염의 안정화를 위해 55 lpm의 공기를 일정하게 공급하였다. 화염구조를 파악하기 위해 ICCD (PI MAX, Princetone Instrument) 카메라를 사용하였으며, OH 화상을 획득하기 위하여 간섭필터( $307.1 \pm 1.5\text{nm}$ )를 장착하였다.

각 조건에서의 화상은 50ms의 노출간격으로 100개의 화상을 누적인 평균값으로 취득하였다. 동일한 조건에서 OH 화상과 동시에 NOx 배출특성을 파악하였다. NOx를 획득하기 위한 프로브는 흡입구의 직경이 1.5mm로 제작하였으며, 빠른 냉

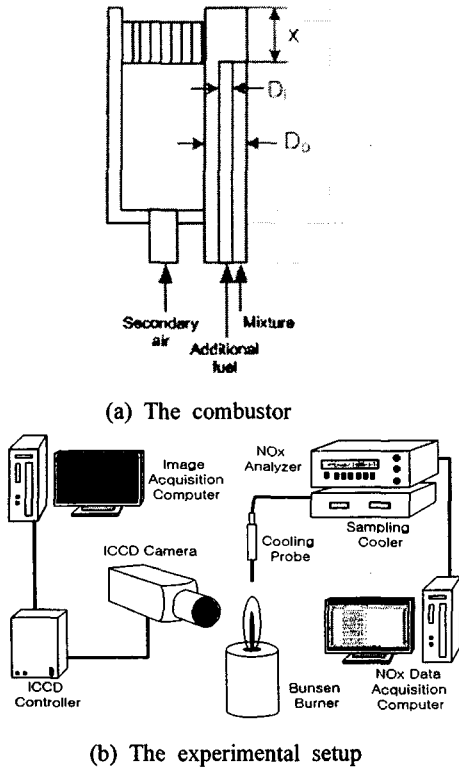


Fig. 1 Schematic diagram of the combustor and the experimental setup

각을 위해 냉각수를 공급할 수 있도록 제작하였다.<sup>(9)</sup> 일반적으로 측정위치는 가시화염 높이의 두 배 이상이면 화염에 직접적으로 영향을 주지 않고 일정한 NOx를 취득할 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(10)</sup> 본 연구에서는 노즐팁에서 12cm 떨어진 곳에 프로부를 설치하여 NOx를 취득하였다.

2.2 실험 조건

실험은 상온의 대기압조건에서 실행하였으며 연료로 메탄(CH<sub>4</sub>, 99.95%)을 분당 0.2 lpm로 일정하게 공급하였고 외부관으로 들어가는 압축공기(0.4~1.4 lpm)를 사용하여 당량비를 조절하였다.

Table 1은 본 연구에 사용된 예혼합 인자의 범위와 실험조건을 나타낸다.

당량비( $\phi$ )는 내부관과 외부관의 전체 당량비(Overall equivalence ratio)를 의미하는 것이고, 연

$$\sigma = \left( 1 - \frac{Q_{f, \text{innettube}}}{Q_{f, \text{total}}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

Table 1 Experimental conditions

Parameter	$\phi_{\text{total}}$	$V_f/V_o$			$x/D_1$
		$\sigma=50\%$	$\sigma=75\%$	$\sigma=100\%$	
Range	9.52	4.48	1.92	0	5,10,20
	4.76	2.69	1.22	0	
	3.17	1.92	0.90	0	
	2.38	1.49	0.71	0	
	1.90	1.22	0.58	0	
	1.59	1.03	0.50	0	
	1.36	0.90	0.43	0	

$Q_{\text{fuel}} = 0.2 \text{ lpm}$

$Q_{\text{primary air}} = 0.4\sim 1.4 \text{ lpm}$

$Q_{\text{secondary air}} = 55 \text{ lpm}$

료분배율( $\sigma$ )은 식 (1)로 정의되며 이는 국소적인 혼합기 농도의 상태를 나타낸다.<sup>(11)</sup>

본 연구에서는 50, 75, 100%의 세 조건에서 수행되었는데  $\sigma$ 가 50%라는 것은 연료가 내부관으로 0.1 lpm, 외부관으로 0.1 lpm 들어가는 것으로 국소적으로 아주 과농한 것을 의미한다. 그리고 100%는 연료와 공기가 모두 외부관으로 들어가서 예혼합되어 공급되는 것을 의미한다.

혼합거리( $x/D_1$ )는 버너출구에서의 연소 이전에 연료와 산화제가 혼합되는 길이를 무차원화 한 것으로  $x$ 는 버너출구로부터 내부관까지의 수직거리,  $D_1$ 는 내부관의 직경을 의미한다. 즉, 연료분배율( $\sigma$ )과 혼합거리( $x/D_1$ )가 증가한다는 것은 부분에 혼합화염에서 예혼합화염으로 변화하는 것을 의미한다.

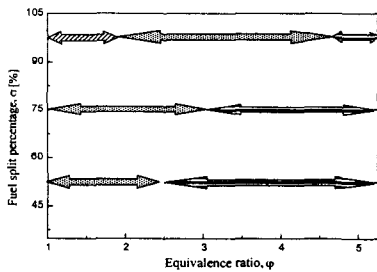
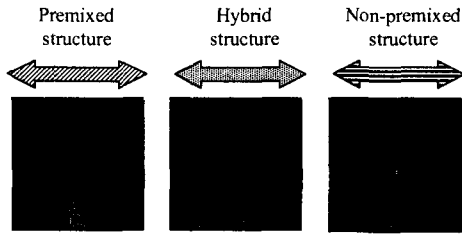
3. 실험결과 및 고찰

3.1 부분예혼합화염의 화염구조

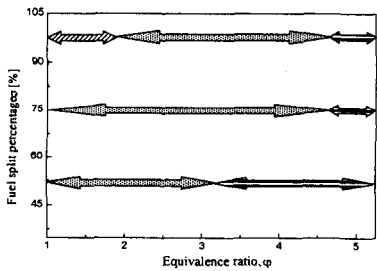
Fig. 2는  $\sigma$ 와  $x/D_1$ 에 따라 세가지 화염구조(예혼합화염구조, 확산화염구조, 그리고 혼합구조)를 보여준다. 최상단의 화염이미지는 대표적인 세가지 화염구조를 나타낸다.

$x/D_1=5$ 이고  $\sigma=100\%$ 의 경우  $\phi$ 의 증가에 따라 다른 화염구조를 보여준다.  $\phi < 1.59$ 의 영역에서는 내부 예혼합화염과 외부 비예혼합화염 구조를 가지는 일반적인 이론공연비 근처 동축화염의 이중구조를 보여준다. 이는 연료과농한 내부화염면에 의해서 생성된 CO와 H<sub>2</sub>가 외부 비예혼합화염면에서 과잉산소와 반응하여 나타나게 된다.<sup>(12)</sup>

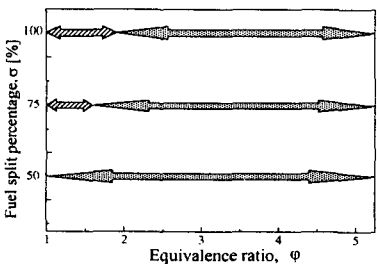
$1.59 < \phi < 4.76$ 의 영역에서는 예혼합화염구조에서



(a)  $x/D_i=5$



(b)  $x/D_i=10$



(c)  $x/D_i=20$

Fig. 2 Flame structure map of partially premixed flames

비에혼합화염구조로 변화하는 혼합구조(hybrid)를 가지고 있다.  $\phi=4.76$  조건에서 비록 외부화염 영역이 내부화염영역을 감싸고 있지만 작은 황염(luminous soot) 영역이 발생한다. 결과적으로 당량비의 증가에 따라 내부 청염 영역이 작아지게 되고 연료와 불안정한 생성물로 인해 외부 확산

화염이 지배적이게 된다.  $\phi>4.76$ 의 영역에서는 내부화염이 외부화염으로 편입하게 되고, 화염끝단에서 강한 매연 영역이 발생하게 된다. 그러므로 이 영역 이상에서는 비예혼합화염과 비슷한 구조를 가지고 있다.

Fig. 2(b)의  $x/D_i=10$ 인 경우  $\sigma$ 의 감소는 본 실험 영역에서 혼합구조가 당량비가 낮은 곳으로 이동하면서 비예혼합구조가 더 낮은 당량비에서 발생하게 된다. 또 일정한  $\sigma=75\%$  조건에서  $x/D_i=20$ 인 경우  $x/D_i=5$ 와 10에서는 나타나지 않는 이중화염구조가 나타난다.  $\sigma$ 의 증가의 결과와 유사하게  $x/D_i$ 의 증가도 확산화염구조보다는 예혼합화염구조를 나타낸다. 이는  $x/D_i$ 와  $\sigma$ 의 증가는 예혼합연료량의 증가로 인해 충분히 혼합되는 결과이다.

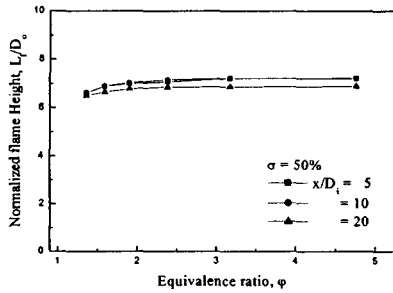
### 3.2 가시 화염길이의 변화

가시화염의 길이변화를 통해 연료입자가 연소하는 영역의 변화를 알 수 있으므로 부분 예혼합 정도를 거시적으로 판별할 수 있다. 본 논문에서는 선행연구를 참고하여 화염길이를 화염 밑단부터 화염후류에서의 강도변화를 인지할 수 있는 제일 끝단까지의 거리로 정의하였다.<sup>(13,14)</sup> 본 연구에서는 부상화염이 발생하지 않고 화염이 외부관에 부착된 영역에 대하여 실험을 수행하였다.

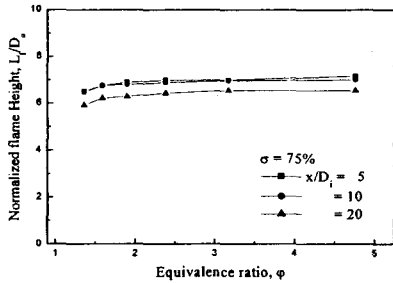
$\sigma$ 와  $x/D_i$ 를 변화시킨 경우에 각 당량비에 따른 화염높이를 Fig. 3에 나타내었다.

일정한  $\phi$  이상에서는  $\sigma$ 의 변화에 상관없이 화염 길이가 거의 변화하지 않는 것으로 나타났다. 이는 당량비와 속도의 관계를 언급한 turns 등<sup>(15)</sup>의 결과와 잘 일치하는 것으로 일정한 프레이드수 이상에서는 화염길이 변화가 일정하게 나타난다.

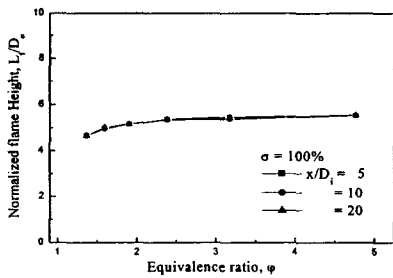
전체적으로 동일한 당량비 조건에서  $\sigma$ 와  $x/D_i$ 의 증가는 화염길이를 감소시키는 것으로 나타났다. 동일한  $x/D_i$  조건에서  $\sigma=50\%$ 에서 75%로 증가하는 경우  $\sigma=75\%$ 가 미소하나마 화염길이가 감소하였다. 하지만  $\sigma=100\%$ 인 경우는 화염 길이의 감소 폭이 상대적으로 크게 나타났다. 일정한  $\phi=3.17$ 에서 가장 혼합이 미약한 경우( $\sigma=50\%$ 와  $x/D_i=5$ 인 조건)와 혼합이 가장 잘된 경우( $\sigma=100\%$ 와  $x/D_i=20$ 인 조건)를 비교했을 때 약 29%의 화염길이의 차이를 나타내었다. 이는  $\phi=3.17$ 의 경우  $\sigma=50\%$ 의 경우는 내부관과 외부관의 상대속도비가 1.92로 다른 두 조건에 비해 상대속도차가 크게



(a)  $\sigma=50\%$



(b)  $\sigma=75\%$

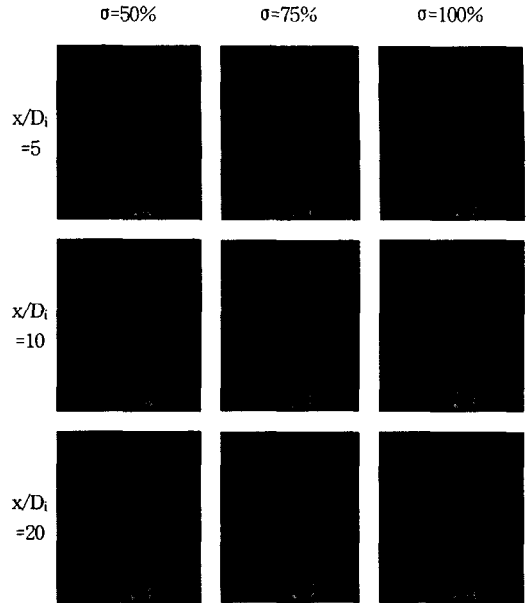


(c)  $\sigma=100\%$

**Fig. 3** The normalized flame height of visible image as a function of  $\phi$

되지만  $\sigma=100\%$  인 경우는 상대속도비가 0으로 혼합이 충분히 잘되어 있으므로 화염길이가 상대적으로 작게 나타나는 것이다.

결과적으로 연료분배율과 혼합거리의 증가는 화염길이를 감소시킨다. 하지만 혼합거리가 화염길이에 미치는 영향은 상대적으로 연료분배율의 영향보다 적은 것으로 나타났다.



**Fig. 4** OH\* photography at  $\phi=1.36$

### 3.3 OH 라디칼 화상 취득

Fig. 4는 당량비 1.36인 조건에서  $\sigma$ 와  $x/D_s$ 에 따른 혼합특성을 파악하기 위해 OH 자발광 이미지를 획득한 것이다.

내부관의 속도가 0인  $\sigma=100\%$ 인 경우에 약간 과농한 당량비 1.36에서 전형적인 이중구조를 가지는 예혼합화염 형태를 보여주고 있다.

$x/D_s$ 가 일정한 상태인 경우에 예혼합정도가 증가할수록, 즉  $\sigma$ 가 증가할수록 화염길이는 감소하고, 비예혼합화염의 형태에서 예혼합화염 형태의 이중구조로 변화하게 된다.

$\sigma=50\%$ 이고  $x/D_s=5$ 인 경우 내부관으로 연료가 0.11pm이 들어가므로 인해 내부관과 외부관과의 상대 속도차로 인해 화염길이가 증가하고, OH 라디칼의 분포가 화염의 밀면에 다량의 OH 라디칼이 존재하고 있어 이 지역에서 화학반응이 활발함을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 초기 내부관의 속도 증가에 의해 대부분의 화염길이를 차지하는 확산화염형태를 가지고, 또한 내부관의 빠른 속도에 의해 외부의 흐름이 내부로 유입되는 현상(entrainment) 때문에 노즐 근처에서 화염이 움추러들어 집중되는 현상(pinch)이 발생한다.<sup>(7)</sup>  $\sigma=75\%$ 이고,  $x/D_s$ 가 증가하는 경우, 혼합거리의 증가로 인해 부분적으로 예혼합이 발생하게

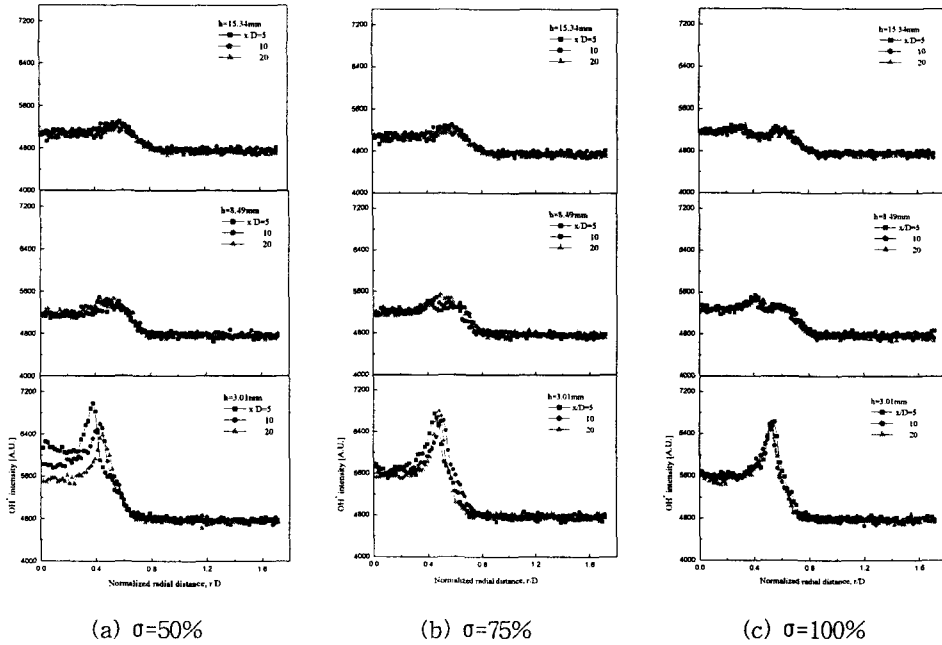


Fig. 5 Local OH\* for partially premixing degree at  $\phi=1.36$

된다. 이로 인해  $x/D_i$ 가 20인 경우에는 다른 두 혼합거리( $x/D_i=5$ 와 10)에서는 보이지 않는 이중화염구조가 관찰된다.  $\sigma=100\%$ 의 경우는  $x/D_i$ 에 관계없이 일반적인 분재화염의 원주형의 형태를 보여주고 있으며 내측에는 예혼합화염이 존재하고, 화염면을 통하여 유출된 여분의 연료는 주위의 공기와 함께 확산화염을 형성하는 구조를 가진다.

보다 자세한 정보를 획득하기 위하여 당량비 1.36인 조건에서  $\sigma$ 와  $x/D_i$ 의 변화에 따른 노즐 상부 세 지점 ( $h=3.01$ ,  $8.49$  그리고  $15.34\text{mm}$ )에서의 국소 OH 라디칼 강도를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5(a)의  $\sigma=50\%$ 이고  $x/D_i$ 가 5인 경우 Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 내부속도의 상대적 차이로 인해 화염이 움추려들어서 국소적으로 OH 라디칼 강도가 높게 나타난다.  $x/D_i$ 의 증가는 이런 반응영역을 나타내는 OH 라디칼 강도가 감소하며 반경방향으로 반응영역이 이동하는 것으로 나타났다. 반면에  $\sigma=75\%$ 와  $100\%$  조건은  $x/D_i$ 의 변화에 따른 OH 라디칼 강도의 크기 및 최고점의 위치의 변화가 50% 조건에 비하여 미약하게 나타났다.

Fig. 5(b)의 경우  $h=8.49\text{mm}$  지점에서 이중화염

구조가 관찰되며  $\sigma=100\%$ 로 변화함에 따라 두개의 최고값을 가지는 이중화염구조가 뚜렷하게 나타난다.

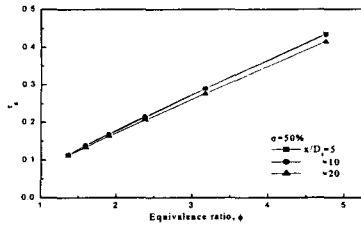
### 3.4 체류시간 및 NOx 배출 특성

Fig. 6은 각 조건에 따른 체류시간을 나타낸다. 본 연구에서 이중동축 연소기의 평균 속도를 사용하여 체류시간을 나타내었다.

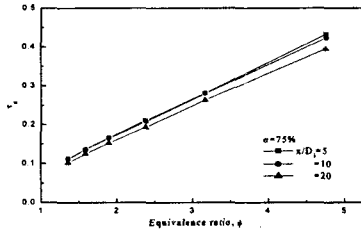
당량비에 따른 체류시간의 관계는 전체적으로 선형적인 관계를 가진다. 이는 상대적으로 낮은 당량비에서 연소가 짧은 시간에 이루어지는 것을 의미한다. 즉 연소반응이 빨리 진행되므로 인해 그 만큼 생성물의 화학양론적인 혼합기 상태가 되는데 필요한 시간이 짧아진다는 것이다.<sup>(15)</sup>

$\sigma$ 의 증가는 체류시간을 감소시키며,  $x/D_i$ 의 증가도 균일연소를 강화시키므로 인해 체류시간을 전체적으로 감소시키고 있다.

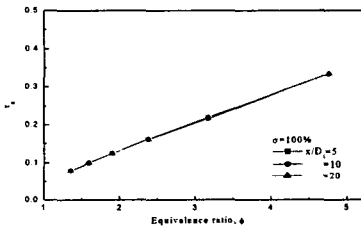
비균일한 연료-공기 혼합이 NOx에 미치는 영향을 확인하기 위하여 연소에서 발생하는 배기배출물 특성을 파악하였다. 전체 당량비를 고정하고 연료분배율과 혼합거리에 따른 특성을 분류하기 위하여 Fig. 7에 각 조건에서 당량비에 따른 NOx의 농도를 나타내었다. 전체적으로  $\phi$ 가 증



(a)  $\sigma=50\%$

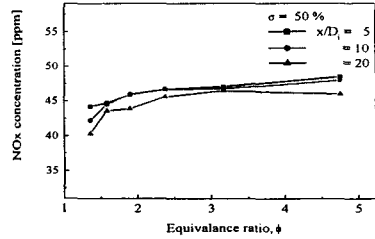


(b)  $\sigma=75\%$

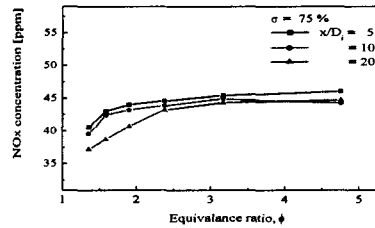


(c)  $\sigma=100\%$

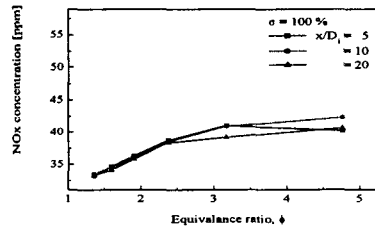
Fig. 6 Estimation of residence time



(a)  $\sigma=50\%$



(b)  $\sigma=75\%$



(c)  $\sigma=100\%$

Fig. 7 Characteristics of NOx emissions

가할수록 NOx의 양은 증가하였다. 이것은 여러 참고 논문의 결과와 유사하게 나타났다. 이는  $\phi$ 가 증가하므로 인해 화염온도의 감소에도 불구하고 앞에서 확인한 화염길이에 관련한 체류시간에 의한 것이다.<sup>(7)</sup> 체류시간의 증가는 NOx를 증가시키는 결과를 가져오지만 체류시간의 증가에도 불구하고 일정한 당량비 이상에서는 비교적 일정함을 가지는 것으로 나타났다.

Fig. 5 (a)-(c)의 변화, 즉 국소적 농후를 감소시키는 연료분배율의 상승은 질소산화물을 감소시키는 것으로 나타났다.  $\sigma=75\%$ 에서  $x/D_i$ 가 증가할수록 NOx 생성은 줄어들었는데 이는 내부관이 아래로 내려감에 따라 혼합할 수 있는 시간을 증가시키고, 내부관과 외부관의 속도 구배의 감소로 인해 균일한 혼합기 형성의 결과로 사료된다.

#### 4. 결 론

메탄-공기를 사용한 이중동축 층류 부분에 혼합 화염을 대상으로 화염구조 및 배기배출물 특성을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1)  $x/D_i=5$ 이고  $\sigma=100\%$ 의 경우  $\phi$ 의 증가에 따라 다른 화염구조를 보여준다.  $\phi < 1.59$ 의 영역에서는 이중화염 구조를 보여주며,  $1.59 < \phi < 4.76$ 의 영역에서는 예혼합화염구조에서 비예혼합화염구조로 변화하는 혼합구조(hybrid)를 가지고 있다. 그리고  $\phi > 4.76$ 의 영역에서는 내부화염이 외부화염으로 편입하게 되고, 화염끝단에서 강한 매연 영역이 발생하는 확산화염구조를 가진다.

(2) 동일한 당량비 조건에서  $\sigma$ 와  $x/D_i$ 의 증가는 화염길이를 감소시키는 것으로 나타났다.  $\sigma$ 가

50%에서 75%로 증가하는 경우  $\sigma=75\%$ 가 미소하나마 화염길이가 감소하였다. 하지만  $\sigma=100\%$ 인 경우는 화염 길이의 감소폭이 상대적으로 크게 나타났다.

(3) 당량비에 따른 체류시간의 관계는 전체적으로 선형적인 관계를 나타낸다.  $\sigma$ 의 증가는 체류시간을 감소시키며,  $x/D_i$ 의 증가도 균일연소를 강화시키므로 인해 체류시간을 전체적으로 감소시킨다.

(4) 전체적으로  $\phi$ 가 증가할수록 NOx의 양은 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 국소적 농후를 감소시키는  $\sigma$ 의 상승은 질소산화물을 감소시키는 것으로 나타났으며,  $x/D_i$ 가 증가할수록 NOx 생성은 줄어드는 결과를 보여준다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

(1) Lyle, K. H., Tseng, L. K., Gore, J. P. and Laurendeau, N. M., 1999, "A Study of Pollutant Emission Characteristics of Partially Premixed Turbulent Jet Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 116, pp. 627~639.

(2) Katta, V. R., Brenez, L. and Rolon, J. C., 2000, "Experimental and Numerical Investigation of Structures of Two-Dimensional Partially Premixed Methane/air Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 1909~1916.

(3) Lee, T. W., Fenton, M. and Shankland, R., 1997, "Effects of Variable Partial Premixing on Turbulent Jet Flame Structure," *Comb. and Flame*, Vol. 109, pp. 536~548.

(4) Lockett, R. D., Boulanger, B., Harding, S. C. and Greenhalgh, D. A., 1999, "The Structure and Stability of the Laminar Counter-Flow Partially Premixed Methane/Air Triple Flame," *Comb. and Flame*, Vol. 119, pp. 109~120.

(5) Gore, J. P. and Zhan, N. J., 1996, "NOx Emission and Major Species Concentrations on Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-Flow Jet Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 105, pp.

417~427.

(6) Nishioka, M., Nakagawa, S., Ishikawa, Y. and Takeno, T., 1998, "NO Emission Characteristics of Methane-Air Coflow Partially Premixed Flame," *27th Sym.(Int.) on Combustion*, pp. 1369~1376.

(7) Lee, T. W., Mitrovic, M. and Wang, T., 2000, "Temperature, Velocity, and NOx/CO Emission Measurements in Turbulent Flames: Effects of Partial Premixing with Central Fuel Injection," *Comb. and Flame*, Vol. 121, pp. 378~385.

(8) Røkke, N. A., Hustad, J. E. and Sonju, O. K., 1994, "A Study of Partially Premixed Unconfined Propane Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 97, pp. 88~106.

(9) Heitor, M. V. and Moreira, A. L. N., 1993, "Thermocouples and Sample Probes for Combustion Studies," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 19, pp. 259~278.

(10) Chen, R. H. and Driscoll, J. F., 1990, "Nitric Oxide Levels of Turbulent Jet Diffusion Flames : Effects of Coaxial Air and Other Mixing Parameters," *23rd Sym.(Int.) on Combustion*, pp. 281~288.

(11) Shih, W. P., Lee, J. G. and Santavica, D. A., 1996, "Stability and Emission Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *26th Sym. (Int.) on Combustion*, pp. 2771~2778.

(12) Kim, T. W., Alder, B. J., Laurendeau, N. M. and Gore, J. P., 1995, "Exhaust and In-Situ Measurements of Nitric Oxide for Laminar Partially Premixed C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>-Air Flames: Effect of Premixing Level at Constant Fuel Flowrate," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 110, pp. 361~378.

(13) Driscoll, J. F., Huh H., Yoon, Y. B. and Donbar, J., 1996, "Measured Lengths of Supersonic Flame Lengths-and Analysis," *Comb. and Flame*, Vol. 107, pp. 176~186.

(14) Driscoll, J. F., Chen, R. H. and Yoon, Y. B., 1992, "Nitric Oxide Levels of Turbulent Jet Diffusion Flames : Effects of Residence Time and Damkohler Number," *Comb. and Flame*, Vol. 88, pp. 37~49.

(15) Turns, S. R. and Myhr, F. H., 1991, "Oxides of Nitrogen Emissions From Turbulent Jet Flames: Part1-Fuel Effects and Flame Radiation," *Comb. and Flame*, Vol. 87, pp. 319~335.