

스윌을 강화한 메탄/공기 부분 예혼합화염에서 자발광(OH^{*}, CH^{*}, 그리고 C₂^{*}) 배출특성과 배기배출물에 관한 실험적 연구

안경민* · 정용기* · 장영준** · 전충환†

An Experimental Investigation of the Characteristic of Radical (OH^{*}, CH^{*}, and C₂^{*}) and Pollutant Emission in Partially Premixed Swirling Methane-air Flames.

Kyuong Min Ahn, Yong Ki Jeong, Young June Chang and Chung Hwan Jeon

ABSTRACT

An experimental study was performed to investigate the effects of partially premixing, varying the equivalence ratios from 1.36~∞, and swirlers with swirl numbers of 0, 0.28, 0.64, and 1.32, on the characteristic of radical (OH^{*}, CH^{*}, and C₂^{*}) and pollutant emission in partially premixed swirling flames. The signal from the electronically excited state of OH^{*}, CH^{*}, and C₂^{*} was detected through a band pass filter with a photo multiplier tube, and flow fields images were detected through a schlieren system. The results demonstrated that the flame height decreases and jet spreading angle increase with increasing a swirl number. The more momentum ratio and swirl number increase, the more decrease flame height, and the generation of sooting flame is promoted.

Key Words : Partially premixed flame (부분예혼합화염), Chemiluminescence (자발광), EINOx (NOx 배출 지수), Schlieren (슈리렌)

기 호 설 명

Φ : 당량비(equivalence ratio)	X _c : 반경방향 거리(radial distance)
d _{in} : 노즐 출구 직경(nozzle inlet diameter)	F _r : 프라우드 수(Froude number, V^2/gd_o)
d _{out} : 연소기 외부 직경 (combustor outer diameter)	R _e : 레이놀즈 수(Reynolds number, Vd_o/ν)
I _r : 자발광 강도(Chemiluminescence intensity)	S _n : 스윌 수(Swirl number)
D : 라디칼 측정 높이 (radical measurement point)	V _n : 스윌러 베인 수(swirler vane number)
	L : 스윌러 길이(swirler length)
	d _s : 스윌러 직경(swirler diameter)

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부,
기계기술연구소
E-mail : chieon@pusan.ac.kr
Tel : (051)510-3051 Fax : (051)582-9818
* 부산대학교 기계공학과 대학원
** 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술 연구소

1. 서론

전 세계적으로 강화되고 있는 대기오염에 대한 규제를 극복하기 위해 다양한 방향으로 실험적인

방법과 수치 해석적인 방법이 함께 병행되면서 연소 기술에 대한 연구가 진행되고 있다.

부분 예혼합화염은 연소이전에 연료와 산화제가 부분적으로 예혼합되어 있는 화염으로, 당량비(Φ) 관점에서 볼 때 이론공연비와 확산화염 중간의 농후한 상태의 혼합기를 의미하며 국소적으로 연료분포의 불균일함을 나타내기도 한다.⁽¹⁾

희박예혼합화염(lean premixed flame)에 비해 화염의 안정성이 높고, 확산화염과의 비교에서는 배기배출물의 수준이 낮은 장점이 있는 부분 예혼합화염에 혼합 효율과 점화의 안정성을 증가시키는 동시에 블로워오프(blowoff)와 배기 배출물(pollutant emission)을 감소시키기 위하여 스윙(swirl) 유동을 적용시켜 현재 가스터빈 연소기(Gas turbine combustor)나 가정용 난방기(gas fired domestic appliances), 복사튜브(radiant tube), 산업용 로(industrial furnace)등의 장치에 많이 적용되고 있다.⁽²⁾

이와 같은 장점과 활용성으로 인하여 부분 예혼합화염에 대한 연구는 오랜 기간 동안 많은 연구자들에 의해 연구가 수행되어져 왔다.

Gore 등⁽³⁾은 메탄-공기 층류와 난류 부분예혼합화염 연구에서 당량비 증가에 따라 이중화염구조가 나타났으며, 가시화염의 증가에 따라 EINO_x 또한 이에 비례하여 증가함을 보여줬다. 이는 화염의 신장율(strain rate)이 체류시간(residence time) 및 복사열손실(radiative heat loss), 화염의 온도와 관련 있음을 의미한다.

Kojima와 Ikeda 등^(4, 5, 6)은 층류와 난류화염에서 국소지점과 전체 화염에서의 자발광 배출특성, 자발광비와 당량비와의 관계에 대하여 연구하였다. 그 결과로 OH*, CH*, C₂* 등은 대기압-상온의 메탄 연소조건인 이론공연비 부근에서 최대 강도값을 가지며, C₂*/CH*, C₂*/OH*, 그리고 CH*/OH*의 자발광비는 $\Phi=0.8\sim 1.5$ 의 영역에서 선형적인 관계를 가진다는 것을 밝혀냈다.

또한 자발광의 정성적인 연구와 함께 라디칼에 대한 정량적인 측정도 병행되고 있다. OH*와 CH*는 반응영역(reaction zone)과 열방출(heat release)의 지표로, 화염면의 부근에 위치하는 최고 강도점(peak intensity)은 화염의 구조와 국소적인 연료의 산화과정을 설명하는데 사용되고 있다.^(7, 8)

Nishioka와 Takeno 등은 여러조건인 메탄-공기 부분예혼합화염에서 CHEMKIN을 사용하여 당량비에 따른 EINO_x를 NO_x 메카니즘 별로 구분하였다. 이의 결과로 당량비 1.5~3.0에서는 NO_x의 발생량 또한 거의 로그 함수적으로 증가하였으며 동축류(coflow)에서는 급속 메카니즘(prompt NO mechanism)의 영향의 지배적이라고 보고하였다.

Higgins 등^(9, 10)에 따르면 자발광은 온도와 압

력의 함수로서, 메탄 연소에서 온도와 당량비가 증가 할수록($\Phi=0.66\sim 0.86$) 그리고 압력은 감소할수록($P=0.5\sim 2.5\text{MPa}$) 자발광 신호의 강도는 커짐을 실험과 수치해석으로 연구하였는데 이러한 온도와의 상관관계는 열적 NO 생성 메커니즘(thermal NO mechanism)이 온도에 관계하므로 배기배출물에 대한 연구⁽¹¹⁾와 중간생성물에 대한 연구⁽¹⁾로도 이어진다.

Cheng 등⁽¹³⁾은 스윙을 적용한 부분예혼합화염에서 체류시간에 따른 EINO_x와 EICO 등의 전체적인 배기배출물의 생성율(global pollutant production rate)은 예혼합 공기가 증가할수록 화염의 길이와 화염 온도의 증가, 그리고 연소 영역의 강화로 배기 배출물의 생성율은 증가한다고 하였다.

본 연구에서는 스윙을 강화한 부분예혼합화염에서 화염 유동 특성과 자발광의 분포특성을 파악하고, 스윙의 적용에 따른 질소 산화물 NO_x의 배출특성에 대하여 살펴보았다. 따라서 본 논문의 목적은 부분예혼합화염에서 스윙의 영향에 따른 화염의 유동특성과 화염구조, 배기 배출물 생성과의 상호관계에 대한 연구이다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

2.1.1 동축류 버너

Fig. 1은 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로, 실험 장치는 크게 세부분으로 나누어진다. 먼저 부분 예혼합화염이 구현되는 분젠버너(Bunsen burner)부로서, 혼합기가 나오는 노즐(Nozzle)의 내경은 $d_{in}=4\text{mm}$ 이고, 외경은 $d_{out}=24\text{mm}$ 의 스테인레스 관(Stainless pipe)을 통해 연소시 외부 유동에 대하여 화염이 떨리지 않고 안정적으로 연소하는데 도움이 되도록 하는 이차공기(Secondary air)를 지름 $d_s=24\text{mm}$, 배인(vain) 수 $V_n=6$, 길이 $L=24\text{mm}$ 인 스윙러(Swirl)를 통하여 분당 96 lpm의 유량으로 스윙을 인가하였다. Chigier et al.⁽¹⁴⁾은 일정한 선회각 θ_v 인 축방향 스윙러의 경우 스윙수(swirl number)를 아래의 식(1)과 같이 정의하였으며, 실험에 적용된 스윙각은 $Sa=0, 20, 40, 60$ 이며, Swirl number는 Table. 1에서 나타내었다.

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (R_h/R)^3}{1 - (R_h/R)^2} \right] \tan \alpha \quad (1)$$

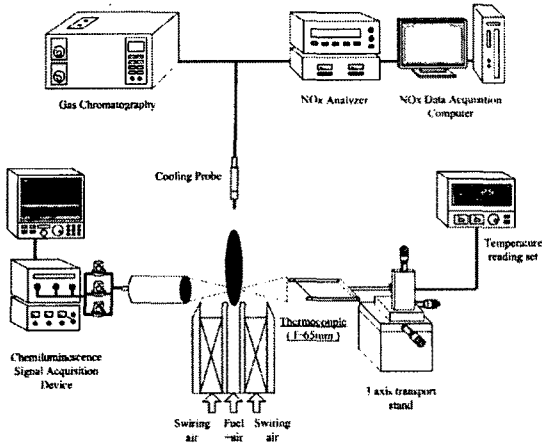


Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

R_b 연소기 내경의 반지름, R 은 스윌러의 반지름, 여기서 α 는 스윌러 베인의 각도이다.

2.1.2 슈리렌 광학 장치

화염의 유동특성을 관찰하기 위해 유체의 밀도 분포에 따라 선형적으로 변하는 빛의 굴절률을 이용하여 가시화하는 시스템인 슈리렌(schlieren) 촬영기법을 이용하여 열과 밀도 분포를 광학적으로 가시화 하였다.⁽¹⁵⁾ 슈리렌 광학 장치에 사용되는 2개의 오목거울의 초점 거리는 1500mm, 유효경은 200mm이다. 광원(light source)은 할로겐램프(Halogen lamp)를 사용하여 직경 2mm 핀 홀(pin hole)을 통과시켜 불필요한 광들은 배제시켰다. 이미지 취득은 고속 카메라(High Speed Camera; HCC-1000)를 이용하여 노출시간(exposure time) 20ms에서 관측 대상에 초점을 맞추고 상의 명암은 나이프 에지(Knife-edge)를 이용하여 초점부근의 필요한 상만을 잘라 초당 20장을 촬영하였다.

2.1.3 라디칼 취득 장치

PMT(Photo-Multi-Tube)를 이용한 1차원 점 측정(1 dimensional point measurement)시 초점에서의 수차를 줄이기 위해 비구면평면 렌즈(Aspherical plano convex lens; $\lambda=200\sim 000\text{nm}$; SIGMA KOKI, SLSQ-50-4009) 2개와 광파이버(optic fiber, $D=1.22\text{mm}$)를 사용하였다. $\text{OH}^*(0, 0)$, $\text{CH}^*(0, 0)$ 및 $\text{C}_2^*(0, 0)$ 밴드의 자발광을 획득하기 위하여 각각 $307.1\pm 1.5\text{nm}$, $430.7\pm 2\text{nm}$, $514.6\pm 2\text{nm}$ 의 간섭필터(interference filter)를 사용하였고,^(4,5) 자발광 측정시 버너의 림(rim)에서 반사광으로 인한 간섭을 줄이기 위해 노즐의 출구

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Range
Φ	1.36 ~ ∞
V_{in} [m/sec]	8.49
F_r	1838
R_e	2117 ~ 2345
Swirl Number	0, 2.8, 0.68, 1.32
MR	2.1 ~ 3.32

$Q_{fuel} = 800\sim 5600$ [lpm]
 $Q_{pri,air} = 800\sim 5600$ [lpm]
 $Q_{sec,air} = 96$ [lpm]

는 버너 출구에서 위로 100mm 높였다.

2.1.4 배기 배출물 측정 장치

배기 배출가스의 포집은 프로브(probe)를 사용하였고, 측정위치는 선형연구를 참조하여 측정 방향의 농도변화가 일정해지는 화염높이의 두 배로

하였고, 가스분석기(ECOM-A Analyzers(relative accuracy: NOx ranged from 1.5 to 12.1percent))를 사용하였다.

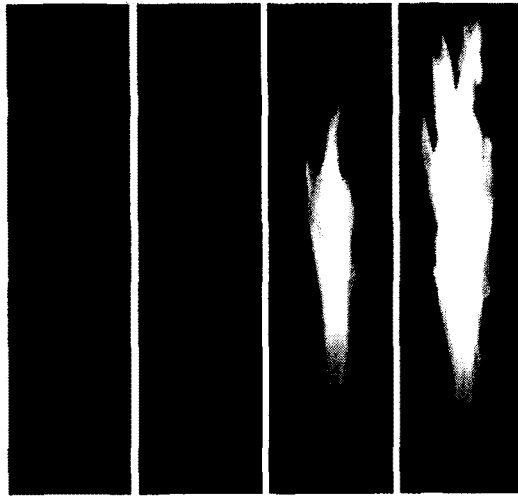
배출지수(emission index)는 실험을 통해 측정된 NOx와 CO₂를 Turns와 Lovett가 제안한 아래의 식(2)으로 산출하였다.⁽¹⁶⁾

$$EINO_x (g/kg) = \frac{46.0 \times X_{NO_x}}{(12.01 + 1.008y)(X_{CO_2} - X_{CO_{2,ref}})} \times 1000 \quad (2)$$

X_i 는 화학종 i 의 몰분율, y 는 연료의 수소와 탄소원자의 몰비(H/C)이다. 위식은 연료가 CO₂로 완전연소 하는 조건에서 성립한다.

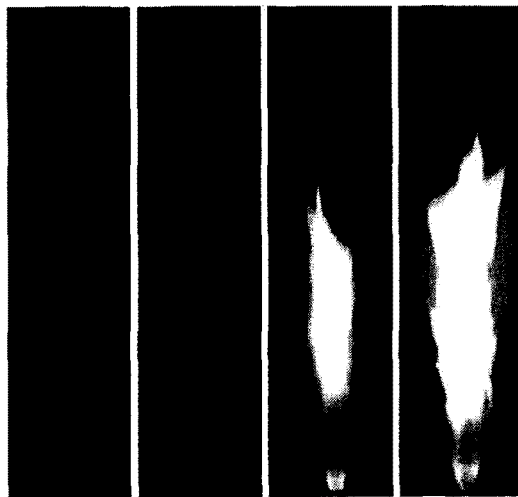
2.1.5 실험 조건

예혼합연소를 이루기 위한 혼합기는 메탄(99.95% : CH₄)과 건공기(dry air; 79%N₂, 21%O₂)를 사용하였으며, 당량비는 MFC(Mass Flow Controller : KOFLOC Model 3660)를 사용하여 혼합기의 총 유량(total flow rate)을 일정하게 유지한 상태에서 연료의 양과 1차 공기의 양을 조절하여 당량비 $\Phi=1.36$ 부터 확산화염(diffusion flame)까지 실험을 수행하였다. 스윌



$\Phi_F = 2.19$ 5.12 15.86 66.64
 MR = 3.22 2.91 2.50 2.09

(a)



$\Phi_F = 2.19$ 5.12 15.86 66.64
 MR = 3.22 2.91 2.50 2.09

(b)

Fig. 2 Photographs of swirling flame with different equivalence ratio, fuel-air momentum flux ratios(MR) and swirl number (a) Sn=0, Sn=1.32

효과에 큰 영향을 주는 주요인자로 연료와 2차공기(swirling air)와의 비인 MR(fuel and swirl-air momentum flux ratio; $\rho_F U_F^2 / \rho_A U_A^2$)⁽¹⁷⁾와 Re수는 부분예혼합의 예혼합 정도에 따라 감소하였고, Fr수는 일정하게 유지하였다.

Table. 1에 상세한 실험조건을 나타내었다.

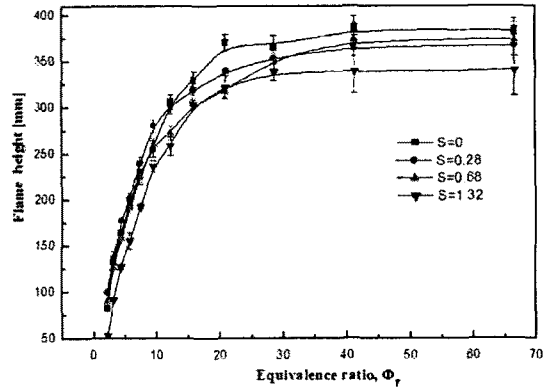


Fig. 3 Effect of swirling on the flame height of a partially premixed flame

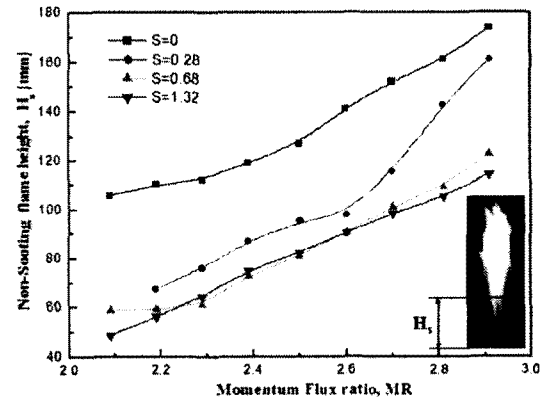


Fig. 4 Effect of swirling and MR on the non-sooting flame height of a partially premixed flame

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염의 형상과 화염 길이

Fig. 2는 스윙각과 당량비 증가에 따른 가시 화염의 형상을 보여주고 있다. Fig. 2 (a)는 스윙수 0, (b)는 스윙수 1.32일 때 당량비 변화에 따른 가시화염 형상을 보여주고, Fig. 3은 당량비 증가에 따른 화염 높이(flame height)를 스윙각에 따라 나타낸 것이다. Fig.2 (a), (b), Fig.3의 결과를 확인해 보면, 노즐(nozzle) 근처에서는 청염(blue flame)이 나타나고, 화염의 높이는 당량비 20까지 증가하고 그 이후에는 거의 일정하게 유지되지만, 스윙을 적용시켜 스윙 강도를 강화

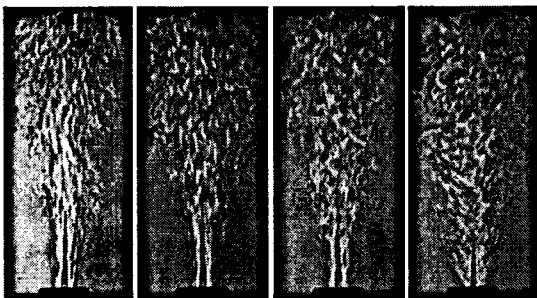
할수록 화염의 높이는 감소하고, 화염의 하류부분(downstream)에서는 휘염(yellow flame, sooting flame)이 발생한다. 당량비와 스윙각이 증가할수록 화염길이의 최대값과 최소값의 편차는 증가한다.

Fig. 4는 MR과 휘염의 발생 높이와의 관계를 나타낸 것으로, MR이 감소할수록 청염지역의 높이는 감소하고 휘염의 발생은 더욱 촉진되는데, 이것은 스윙각의 증가에 따른 스윙 강도(swirl intensity)와 MR에 의해 노즐 출구 근처에서 생성되는 재순환영역의 예혼합 범위가 노즐 출구 근처로 국한되고, 과잉연료와 불안정한 생성물로 인해 매연을 발생시키며 외부확산화염의 지배적인 영향이 촉진되어 나타나기 때문이다.⁽¹⁸⁾

3.2 화염의 유동 특성

Fig. 5는 당량비 $\Phi=2.2$ 에서 스윙수 증가에 따라 슈리렌 촬영기법을 이용하여 화염을 촬영한 것으로 촬영높이는 노즐 출구에서 높이 100mm이다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 스윙수가 증가함에 따라 화염의 유동특성은 노즐 출구근처에서 홀날림이 강해지고 반응영역이 반경반향으로 증가하며, 스윙수가 1.32인 (d)에서는 화염의 하단부분(downstream)과 유사한 유동형상이 관찰된다. 이 영역은 재순환영역이 나타나는 영역으로, 스윙에 의한 재순환 영역을 슈리렌 촬영으로 가시화 할 수 있다.

Fig. 6은 화염의 유동장(reaction flow)에서 스윙각에 따른 유동장의 분포범위를 노즐 출구를 중심으로 화염의 전파각을 나타낸 것으로, 스윙수가 0인 경우 화염의 전파각은 당량비가 증가할수록 노즐 분출 속도의 감소로 소폭 증가한다. 스윙이 강화됨에 따라 화염의 전파는 반경반향으로



(a) (b) (c) (d)
Fig. 5 Photographs of schlieren images with different swirl number (a) $S_n=0$ (b) $S_n=0.28$, (c) $S_n=0.68$, and (d) $S_n=1.32$ at Equivalence ratio of $\Phi=2.2$

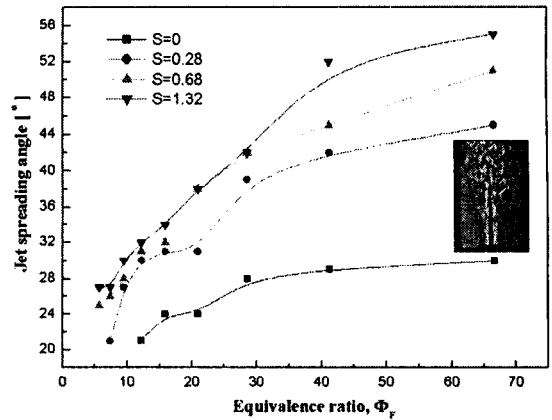


Fig. 6 Effects of swirling on the jet spreading angle of a partially premixed flames

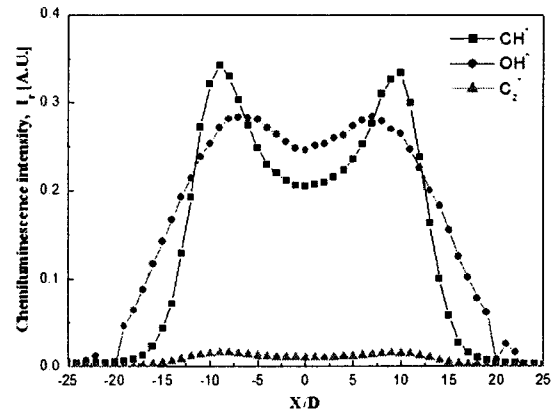
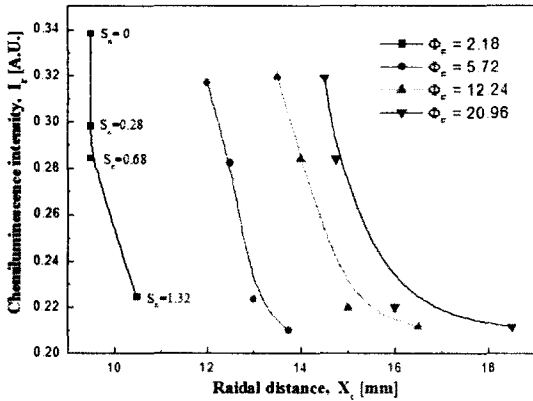


Fig. 7 OH^* , CH^* , and C_2^* emission intensity distributions at equivalence ratio of $\Phi=2.2$

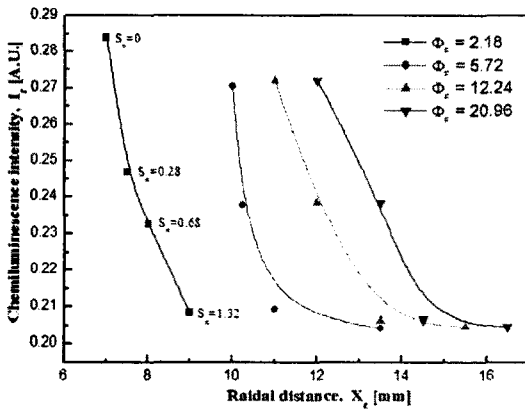
로 당량비 전 영역에 걸쳐 증가함을 보이고 있다. 특히 스윙수가 1.32인 스윙각 60°인 경우에는 당량비가 증가할수록 화염의 전파각은 다른 스윙수보다 선형적으로 증가하며, 노즐 출구 부근에서의 재순환영역을 더 활성화시키고 가시화염에서 확인할 수 있듯이 출구 부근에서 휘염을 생성시킨다.

3.2 OH^* , CH^* , 그리고 C_2^* 라디칼의 상세정보

Fig. 7은 $\Phi=2.2$ 의 경우에 높이 30mm (노즐 팁 상부)에서 반경방향에 따른 반응영역에 존재하는 OH^* , CH^* , 그리고 C_2^* 자발광 강도분포를 확한 것이다. 각 라디칼의 최고 강도값이 존재하는 지역은 $X/D=6\sim 12$ 이며, 이것은 화염면(flame



(a) CH*



(b) OH*

Fig. 8 Location of peak intensity of CH*, OH* radical for swirl angle

front)을 의미한다. CH*와 C₂*은 거의 동일한 지점(X/D=11)에서 최고치를 보이지만 OH*는 비반응대(unburned gas side) 연소장쪽에서의 CH*, C₂*보다 빨리 증가하여 그 최고점의 위치(X/D=6)가 다르다. 즉 CH*와 C₂* 내부에 위치한 OH*가 다른 화학종보다 중심축에 존재하며 이것은 화염내의 unburned 지역에 OH*이 존재한다는 것을 의미한다. 반경에서 멀어질수록 CH*의 신호강도가 급격히 감소하는 반면 OH*의 강도 기울기가 완만한 것으로 봐서 넓은 반응영역을 가짐을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 각각의 당량비 조건에서 CH*과 OH*의 자발광 최대 강도값과 최대 강도 발생지점을 스윙각에 대해 나타낸 것이다. 스윙각이 증가함에 따라 CH*, OH* 모두 최대 강도값은 감소하고, 최대 강도가 발생하는 지점은 화염의 중심축에서 반경방향으로 증가한다. 그 이유는 스윙의 영향에 의해 생성되는 재순환영역은 화염을 반경방향으로 반응영역을 확장시키는 동시에 재순환

영역내에서의 화염 온도를 감소시키기 때문이다.⁽¹⁹⁾

3.3 배기 배출물 특성

Fig. 9는 당량비 증가에 따른 NO_x의 배출지수를 스윙각의 영향에 대해 나타낸 것으로, EINO_x의 값은 연소시 발생하는 CO₂의 농도에 많은 영향을 받는다. 스윙수가 0인 조건에서의 EINO_x 배출 특성은 당량비 2~3사이에서 최저치를 보인 후 증가하고, 당량비 12부터 확산화염까지는 감소하는 경향을 보이고 있다. 스윙각이 증가할수록 EINO_x의 배출 특성은 전체적으로 당량비가 증가함에 따라 감소함을 보이고 있으며, 특히 스윙각 60°인 경우에는 전 당량비 영역에 걸쳐 EINO_x가 감소하고 있다.

Fig. 10은 체류시간(residence time)에 따른

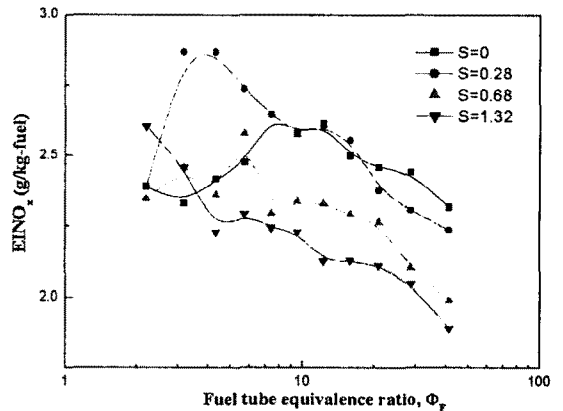


Fig. 9 NO_x emission index of the partially premixed swirling flames

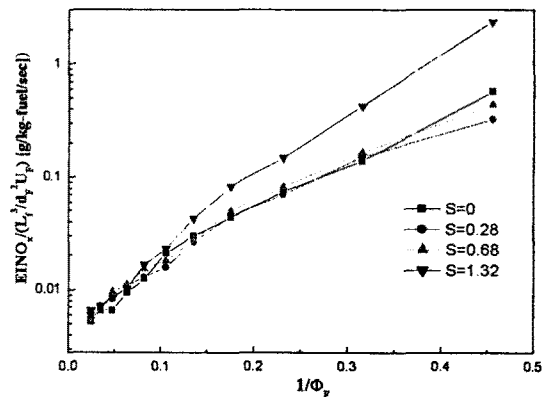


Fig. 10 Pollutant emission indices per global residence time for the partially premixed swirling flames

EINOx의 생성율을 나타낸 것이다. 체류시간이란 신장률의 역수로 물리적으로 연료의 입자가 버너 출구에서 가시화염으로 나타나는 연소반응지역에 상용하는 체적을 통과하여 뜨거운 생성물의 혼합기(a mixture of hot product) 상태가 되는데 필요한 시간을 의미한다.⁽¹⁵⁾ 결과를 확인해 보면, 당량비가 감소하고 예혼합 정도가 증가할수록 전체적인 EINOx 생산율(production rate)⁽¹³⁾은 증가한다. 또한 스월에 대한 관점으로 확인해 보면 스월각 60°, 스월수 1.32 이상에서는 당량비가 감소할수록 예혼합정도가 증가할수록 다른 스월각보다 증가율이 큰 EINOx의 생산율을 가진다.

전체적인 배기배출물의 생산율(global pollutant production rate)의 증가는 화염길이의 감소와 스월에 의해 생성된 재순환영역이 강한 연소 영역을 형성시켜 반경반향으로 증가되기 때문이다.⁽¹³⁾

4. 결론

스월을 강화한 메탄/공기 부분 예혼합화염에서 라디칼(OH*, CH*, 그리고 C₂*) 배출특성과 배기배출물에 관한 실험적 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 스월을 강화한 부분예혼합 화염은 스월강도가 증가할수록 화염의 높이는 감소하고, MR의 감소와 함께 노즐 출구 근처에서 생성되는 재순환영역에 의해 예혼합 지역의 범위가 노즐 출구 근처로 국한되어 외부화산화염의 지배적인 영향이 축진된다.
- [2] 스월수가 증가함에 따라 화염의 유동특성은 노즐 출구근처에서 훑날림이 강해지고, 화염의 반응영역과 화염전파는 반경반향으로 당량비 전 영역에 걸쳐 증가한다.
- [3] 각각의 자발광 최대 강도점 분포 범위에서 화염면이 형성되었고, 스월각이 증가함에 따라 CH*, OH* 최대 강도값은 감소하고, 최대 강도가 발생하는 지점은 화염의 중심축에서 반경반향으로 증가한다.
- [4] 스월각이 증가할수록 EINOx의 배출 특성은 전체적으로 당량비가 증가함에 따라 감소하며, 특히 스월각 60°인 경우에서는 전 당량비 영역에 걸쳐 EINOx가 감소한다. 전체적인 배기배출물의 생산율은 화염길이의 감소와 스월 강도가 증가할수록 증가한다.

후 기

본 연구는 “지역특화기술개발사업(산업자원

부)”의 지원아래 수행되었으며, 이에 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- [1] Gore, J. P., and Zhan, N. J., □NOx Emission and Major Species Concentration in Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-flow jet flames, □ *Comb. and flame*, Vol. 105, 1996, pp.414~427.
- [2] Linda G. Blevins., Michael W. Rrenfro., Kent H Lyle., Normand M. Laurendeau., and Jay P. Gore., □Experimental study of temperature and CH Radical Location in Partially Premixed CH₄/Air Coflow flames, □ *Comb. and flame*, Vol. 118, 1999, pp. 684~696.
- [3] K. H. Lyle., L. K. Tseng., J. P. Gore., and N. M. Laurendeau., □A Study of Pollutant Emission Characteristics of Partially Premixed Turbulent Jet Flames, □ *Comb. and flame*, Vol. 116, 1999, pp. 626~639.
- [4] Kojima, J., Ikeda, Y., and Nakajima, T., □ Spatially Resolved Measurements of OH*, CH*, and C₂* Chemiluminescence in the Reaction Zone of Laminar Methane/Air Premixed Flames, □ *Prog. Combust. Inst.* 28, 2000, pp. 1757~1764.
- [5] Ikeda, Y., Kojima, J., Nakajima, T., Akamatsu, F., and Katsuki, M., □ Measurement of the Local Flamefront Structure of Turbulent Premixed Flames by Local Chemiluminescence, □ *Prog. Combust. Inst.* 28, 2000, pp. 343~350.
- [6] Ikeda, Y., Kojima, J., and Hideki Hashimoto., □Local Chemiluminescence Spectra Measurements in a High-Pressure Laminar Methane/Air Premixed Flame, □ *Prog. Combust. Inst.* 29, 2002, pp. 1495~1501.
- [7] Christian Oliver Paschereit., Ephraim Gutma가., and Wolfgang Weisenstein., □ Control of thermoacoustic Instabilities and Emissions in an Industrial-Type Gas-Turbine Combustor, □ *27-Symposium on Combust. Inst.* 1998, pp. 1817~1824.
- [8] Habib N. Najm., Phillip H. Paul., Charles J. Mueller., and Peter S. Wyckoff., □On the Adequacy of Certain Experimental Observables as Measurements of Flame Burning Rate, □ *Comb. and flame*, Vol. 113, 1998, pp. 312~332.
- [9] B. Higgins., M. Q. McQuay., F. Lacas., J.

- C. Rolon., N. Darabiha., S. Candel., □ Systematic Measurements of OH Chemiluminescence for fuel-lean, high-pressure, premixed, laminar flames, □ *Fuel 80*, 2001, pp. 67~74.
- [10] B. Higgins., M. Q. McQuay., F. Lacas., S. Candel., □ An experimental study on the effect of pressure and strain rate on CH chemiluminescence of premixed fuel-lean methane/air flames, □ *Fuel 80*, 2001, pp. 1583~1591.
- [11] T-W Lee., A. Mitrovic., and T. Wang., □ Temperature, Velocity, and NO_x/CO Emission Measurements in Turbulent Flames : Effects of Partial Premixing with Central Fuel Injection, □ *Comb. and flame*, Vol. 121, 2000, pp. 378~385.
- [12] Charles S. Mcenally., Umit O. Koylu., Lisa D. Pfefferle., and Daniel E. Rosner., □ Soot Volume Fraction and Temperature Measurements in Laminar Nonpremixed Flames Using Thermocouples, □ *Comb. and flame*, Vol. 109, 1997, pp. 701~720.
- [13] T. S. Cheng., "Effects of Partial Premixing on Pollutant Emissions in Swirling Methane Jet Flames," *Comb. and Flame*, vol.125, 2001, pp.865~878.
- [14] J. M. Beer, N. A. Chigier, *Combustion Aerodynamics*, John Wiley, New York, 1972
- [15] J. P. Crowder, Begell House, "Full-scale schlieren flow visualization," *Flow Visualization VII*, New York, 1995, pp. 2~13
- [16] Turns, S. R., and Myer, F. H., 1991, "Oxides of Nitrogen Emission from Turbulent Jet Flames: Part I -Fuel Effects and Flame Radiation," *Comb. and Flame*, Vol. 87, pp. 319~335.
- [17] 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.
- [18] Aldo Coghe, Giulio Solero, Gianfranco Scribano., "Recirculation phenomena in a natural gas swirl combustor," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol.28, 2004, pp. 709~714.