

## 2-D LIF를 이용한 층류화염의 NO 생성특성에 관한 연구

이원남\* · 차민석\*\* · 송영훈\*\*

### A Study of NO Formation Characteristics in Laminar Flames Using 2-D LIF Technique

Wonnam Lee, Min Suk Cha and Young-Hoon Song

#### ABSTRACT

OH, CH and NO radical distributions have been measured and compared with the numerical analysis results in methane/air partially premixed laminar flames using 2-D LIF technique. The pick intensity of OH LIF signal is insensitive to fuel equivalence ratio; however, CH LIF intensity decreases as equivalence ratio increases and the NO concentration increases with equivalence ratio. The contribution of the prompt NO, formed near premixed reaction zone, to the total NO formation is evident from the OH, CH, and NO PLIF images in which the dilution effect of nitrogen is minimal for the highest equivalence ratio. Measured OH and NO LIF signals in counterflow flames agree with the computed concentration distributions. Both numerical and experimental results indicate that the structural change in a flame alters the NO formation characteristics of a partially premixed counterflow flame. The nitrogen dilution also changes flame structure, temperature and OH radical distributions and results in the decreased NO concentrations in a flame. The levels of decrease in NO concentrations, however, depends on the premixedness( $\alpha$ ) of a flame. The larger change in the flame structure and NO concentrations have been observed in a premixed flame( $\alpha=1.0$ ), which implies that the premixedness is likely to be a factor in the dilution effect on NO formation of a flame.

Key Words : NO<sub>x</sub>, LIF, Laminar flame, OH, CH

#### 기 호 설 명

$C_{pi}$  : i-화학종 정압비열, cal/mol · K  
 $h_i$  : i-화학종의 엔탈피, cal/mol  
 $N$  : 화학종의 수  
 $R$  : 일반기체상수, 8.314kJ/(K · mol)

$T$  : 온도, K  
 $\rho$  : 밀도, g/cm<sup>3</sup>  
 $W_i$  : i-화학종 분자량, g/mol  
 $\omega_i$  : i-화학종 반응율, mol/(cm<sup>3</sup> · s)  
 $Y_i$  : i-화학종 질량분율

#### 1. 서 론

대기오염 감소를 위한 노력의 일환으로 연소장치에서 배출되는 NO<sub>x</sub>의 저감기술에 대한 연구가 널리 수행되어 왔으며, 또한 이를 위한 기초지식

의 획득을 위하여 화염을 이용한 NO 생성 메카니즘에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 LIF 기법 등을 이용한 화염에서의 NO 생성 특성에 대한 in-situ 측정은 연소과정의 NO 생성 과정을 이해하고 저 NO<sub>x</sub> 연소시스템을 개발하기 위한 자료를 제공해 주고 있다.

화염에서의 NO 생성 특성은 thermal(Zeldovich), prompt(Fenimore), N<sub>2</sub>O intermediate 및 reburn 메카니즘에 의해 결정되며, 화염 조건에 따라 각각의

\* 단국대학교 기계공학과

\*\* 한국기계연구원

† 연락처, wlee@dku.edu

기여도가 달라지게 된다[1]. 일반적으로 thermal NO는 고온 지역에서 NO 생성 특성을 결정하며 온도에 높은 의존성을 갖게 된다. 반면에 prompt NO는 연료과농의 저온 지역에서,  $N_2O$  메커니즘은 저온의 희박연소 조건에서, reburn 반응은  $CH_4$  라디칼들이 많이 존재하는 확산화염 또는 과농 예혼합 화염의 NO 생성 특성에 영향을 미친다. 따라서 연소과정의 공기/연료 혼합비에 따른 각각의 NO 생성 메커니즘의 역할에 대한 충분한 이해가 요구된다.

최근의 GRI-Mech 반응 메커니즘[2]을 이용한 수치해석적 연구는 연소조건에 따라 prompt 및 reburn 메커니즘의 역할을 보여주고 있다[3,4]. 그러나 수치해석적으로 분석된 NO 생성 특성과 실험적으로 얻어진 결과를 직접적으로 비교한 연구는 많지 않다. 본 연구에서는 동축류 버너에서 LIF 기법을 이용하여 층류화염 내부의 OH, CH 및 NO 분포를 측정하고, 층류화염의 NO 생성에 대한 화염 구조, 연료/공기 혼합비, 희석제의 영향 등을 실험적으로 알아보았다. 또한 대항류 메탄/공기 부분예혼합 화염에서 과농 예혼합 화염과 희박 예혼합 화염을 동시에 형성하고 질소 10%를 첨가하며, OH 라디칼과 NO 분포를 PLIF를 이용하여 측정하였다. LIF 기법으로 측정된 OH 라디칼 및 NO 분포실험 결과는 수치해석 결과와 직접적으로 비교되었다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 레이저 유도 형광법(LIF)

레이저 유도 형광법은 레이저에 의하여 여기된 분자의 자발방출(spontaneous emission)을 측정하여 분자의 농도를 측정하는 비접촉식 방법으로서, OH, CH 및 NO 라디칼의 측정에 사용된 LIF 시스템의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 레이저 광원으로는 Nd:YAG 레이저(GCR-250-10, Spectra Physics)와 OPO(Optical Parametric Oscillator; MOPO 730D10, Spectra Physics)가 사용되었다. OPO는 BBO(Beta Barium Borate) 크리스탈의 비선형 광 분리 현상을 이용한 것으로, BBO에 입사되는 펄핑광의 크리스탈 표면과의 입사각에 따라 서로 다른 파장의 가시광선과 적외선이 분리되어 발생되게 된다. 이와 같이 분리된 광은 그레이팅(grating)을 통하여 선폭 0.2cm<sup>-1</sup>으로 발진되게 되며 이는 이후에 별도의 BBO와 펄핑광을 통하여 광 증폭된다. OPO에서 발진된 가시광 영역의 레이저는 주파수 배가기(frequency doubler)를 통하여 원하는 자외선으로 변환되게 된다. 이와 같은 OPO 시스템은 기존의 색소(dye) 레이저와는 달리 색소를 교환할 필요가 없고 단순히 BBO에

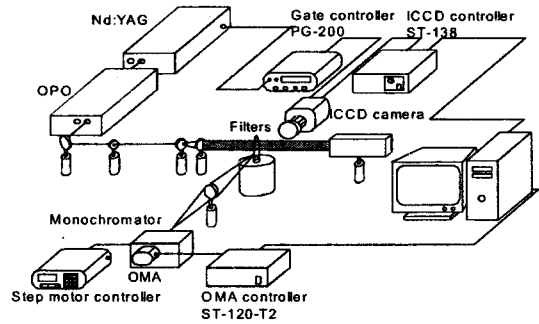


Fig. 1 Schematic of LIF setup

입사되는 펄핑광의 입사각을 변화시켜 원하는 파장의 레이저를 얻을 수 있다. 그러므로 색소 레이저와 비교하여 색소 취급에 따른 안전성 문제가 없으며 또한 레이저 광을 넓은 파장의 범위에서 비교적 간단하게 변경할 수 있는 장점을 갖고 있다.

LIF 신호측정은 monochromator와 OMA (Princeton Instrument)를 이용하여 점측정을 하였고, ICCD (Princeton Instrument) 카메라와 105mm UV렌즈 및 OH, CH, NO 측정의 경우 각각, WG305+UG11, 430nm band pass filter (FHBW 10nm), UG5 광학 필터를 사용하여 2-D LIF 측정이 이루어졌다. 이때 실린더렌즈( $f=100\text{mm}$ )와 구형렌즈( $f=250\text{mm}$ )를 사용하여 평면광을 형성하고, 카메라의 게이팅 시간은 100ns를 사용하였다.

### 2.2 LIF 여기 파장

지금까지 많은 연구들을 통하여 다양한 연소 생성물에 대한 LIF를 이용한 접근이 시도 되어왔으나, 주로 반응지역이나 화염면을 모사할 수 있는 OH, CH 라디칼과 주요 공해 물질의 하나인 NO에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 대표적인 예로 OH 라디칼에 대한 Dieke와 Crosswhite[5]의 연구가 있으며, NO에 대해서는 Partridge 등[6]과 Battles 등[7]의 연구가 있으며 최근에 Luque와 Crosley [8]는 OH, CH, NO 등의 여기 주사 시물 레이선이 가능한 프로그램을 개발하였다.

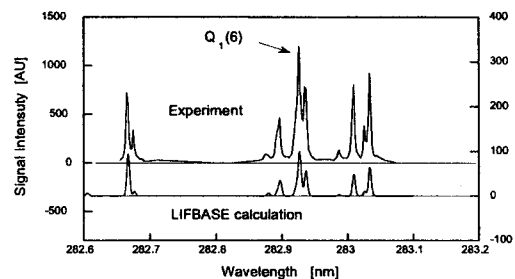


Fig. 2. OH excitation LIF spectrum

본 연구에서는 LIF를 위하여 레이저의 파장을 일정 범위 안에서 변화시켜 가며 이때 발생하는 형광신호를 측정하는 여기 주사 과정을 통하여 특정 라디칼의 흡수 스펙트럼을 조사하고 이를 Lifbase 프로그램[8]을 이용한 시뮬레이션과 비교하여 온도에 덜 민감하고 효율이 좋은 여기 파장을 결정하였다.

Fig. 2에 OH 라디칼의 여기 주사 결과를 수치결과와 비교하였는데 그 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 이를 통하여  $A^2\Sigma^+ - X_2\Pi_i$  (1, 0) 밴드  $Q_1(6)$  라인 282.96nm (3mJ)를 OH 라디칼의 여기 파장으로 선정하였다.

CH 라디칼은 화염중에 상당히 작은 농도로 존재하며 이런 경우에는 여기 주사 과정에 상당한 주의를 요하게 된다. 공기에 의한 탄성산란과 형광신호가 구분이 되지 않는 경우에는 이미 포화된 형광 신호가 주위 공기에 의한 산란 신호보다 작아지는 경우가 생기게 되어 주사 과정에서 잘못된 해석을 하게 될 수도 있다. 따라서 이런 경우는 레이저를 렌즈를 이용하여 초점을 맺게 하는 경우보다는 평면으로 만들어 단위 면적당 에너지를 줄이는 것이 형광신호의 포화를 막고 탄성산란은 줄여주는 효과가 있게 된다. OH 라디칼과 동일한 과정을 통하여 CH 라디칼의 여기 파장으로  $A^2\Sigma^+ - X_2\Pi_i$  (0, 0) 밴드  $Q_1(5)$  라인 431.29nm (10mJ)를 선정하였다. NO 라디칼의 경우 Nd:YAG로 작동하는 색소레이저와 적외선의 혼합 시스템에서는  $A^2\Sigma^+ - X_2\Pi_i$  (0, 0),  $Q_{22}^+$   $R_{12}(26.5)$  밴드, 225.58nm가 일반적으로 효율이 가장 높다고 알려져 있으나[9], 본 시스템에서는 파장이 짧은 UV쪽에서 레이저의 효율이 좋지않아 Battles 등[7]이 제안한 여기 파장인  $P_{21}+Q_1(14)/R_{12}+Q_2(21)+P_1(23)$  라인, 226nm(1.5mJ)로 여기 시키고 이에 따른 형광신호를 계속하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 NO LIF 측정의 경우  $O_2$ 의 Schumann Runge 시스템과의 간섭이 심하여 이를 피하여 여기 파장을 선정하는 것이 중요하며, 이로 인하여 화염에서의 직접적인 여기 주사 실험은 산소와의 간섭으로 인하여 쉽지 않게 된다. 본 연구

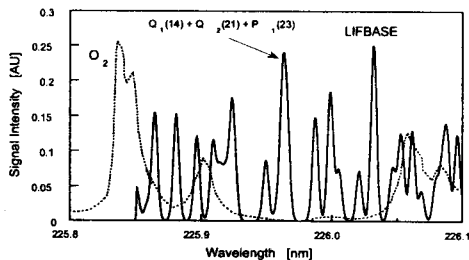


Fig. 3. NO excitation LIF spectrum (LIFBASE) and  $O_2$  Schumann-Runge system

에서는 표준 NO가스를 광학적 접근이 가능한 밀폐된 용기에 주입하여 이를 이용한 여기 주사를 수행하여 NO LIF 측정을 위한 여기 파장  $P_{21}+Q_1(14)/R_{12}+Q_2(21)+P_1(23)$  라인을 선택하였다.

### 2.3 동축류 버너

실험에 사용된 동축류 버너는 일반적으로 널리 사용되는 형태로서 버너의 중심에 위치한 내경 8.0mm의 황동 노즐을 통하여 연료와 공기의 혼합기가 공급된다. 노즐 외부에 층류를 유지하고 2차 공기를 공급하기 위하여 내경 76mm의 동축관으로 공기를 공급하였으며, 직경 2.5mm의 유리구슬, 황동 스크린 및 하니콤 장치를 통과하여 층류를 형성하며 1000scc/sec의 유량을 유지하도록 하였다. 사용된 동축류 버너의 구조는 Fig. 4에서 보여 주며 이원남[10]에 자세히 설명되어 있다.

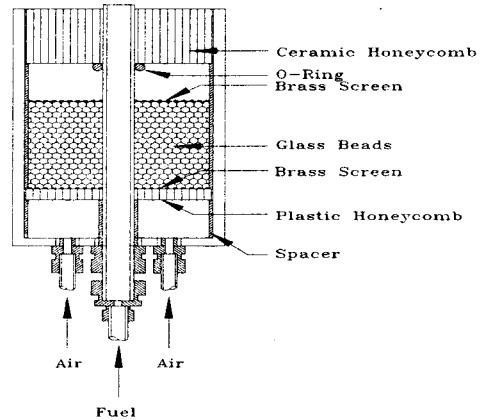


Fig. 4 Co-flow burner

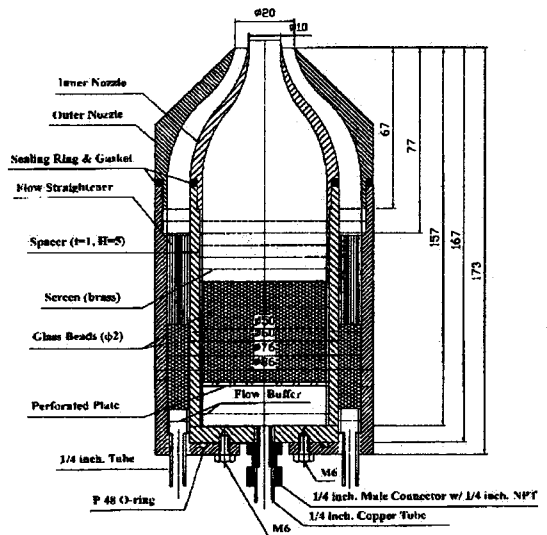


Fig. 5 Counterflow burner design

## 2.4 대향류 버너

대향류 화염의 실험에는 노즐 직경이 1.0cm인 대향류 버너가 사용되었다. Fig. 5는 대칭적으로 배열된 버너의 한쪽 부분의 내부 구조를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 버너는 연료/공기가 분출되는 내부 노즐과 차단 가스가 분출되는 외부 노즐, 그리고 노즐 부분에 층류 유동장을 제공할 수 있는 내부 및 외부 실린더로 구성되었다.

연료/공기 및 차단 가스를 층류로 균일하게 노즐에 공급하기 위하여 유리구슬과 단계적으로 크기가 작아지는 스크린을 배열하였으며, 노즐은 3차 곡선을 이용하여 경계층은 분리가 없고 두께가 최소화되도록 설계되었다. 동일한 구조를 갖는 노즐이 두랄루민으로 만든 지지대에 대칭적으로 장착되어 대향류 버너를 구성하며, Fig. 6은 완성된 대향류 버너를 보여준다. 이때 6개의 MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 노즐을 흐르는 연료/공기 혼합기 및 회석을 위한 질소의 유량을 조절하였다. Fluent를 이용한 수치해석 결과로부터 유동장 특성이 대향류 화염연구에 적합하다는 것을 알 수 있었으며, 사용된 버너에 대한 상세한 설계 사양과 이에 대한 설명은 참고자료[11]에 있다.

## 2.5 실험방법 및 조건

### 2.5.1 동축류 화염의 실험 조건

예혼합화염의 구조와 당량비의 변화에 따른 OH 및 NO 분포의 변화를 알아보기 위하여 메탄/공기 예혼합기가 사용되었다. 사용한 버너는 동축류 버너이며, 중앙에서 메탄/공기/(질소) 예혼합기가 공급되고 주위에는 균일한 유동장의 공기가 공급된다.

화염의 당량비 변화에 따른 특성을 고찰하기 위하여 당량비를 각각 1.0, 1.5, 2.0, 2.5로 변화시켰으며, EGR 등에 의한 온도 감소 효과가 NO 생성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 각 당량비에 대하여 질소를 희석시킨 화염을 대상으로 PLIF 기법을 사용하여 OH, CH 및 NO의 분포를 측정하였다. 측정된 화염에 대한 유량 조건은 다음 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions for co-flow flames

Equivalence ratio	Fuel flow rate [sccs]	Air flow rate [sccs]	N2 flow rate [sccs]
1.0	3.5	33.4	
1.0	3.5	33.4	2.6
1.5	3.5	22.3	2.6
1.5	3.5	22.3	
2.0	3.5	16.7	2.6
2.0	3.5	16.7	
2.5	3.5	13.4	2.6
2.5	3.5	13.4	

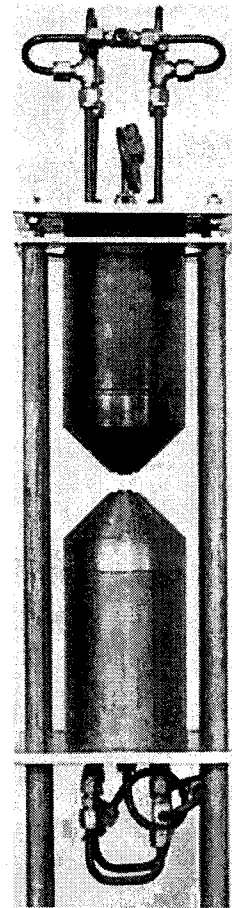
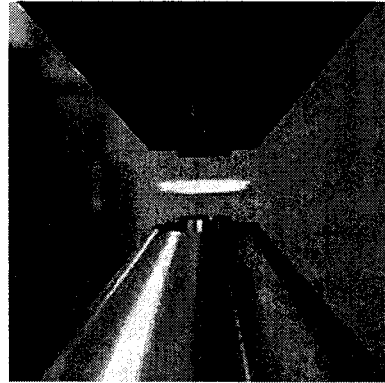


Fig. 6 Counterflow burner assembly

### 2.5.2 대향류 화염의 실험 조건

메탄/공기 혼합기를 사용하였으며, 예혼합정도 ( $\alpha$ )를 1.0, 0.6, 0.8로 변화시켰다. 노즐 간격은 1.0cm이며, 노즐 출구 속도는 양쪽 노즐 모두 80cm/s로 일정하게 유지하였다. 희석하는 경우에는 질소를 체적비 10% 첨가하였으며, 이 경우에도 모든 노즐의 출구 속도는 80cm/s로 조절하였다.

### 3. 지배 방정식 및 수치해석

대향류 예혼합 화염에서는 Fig. 7과 같이 과농의 연료/산화제와 희박의 연료/산화제가 서로 반대로 마주하며, 정체점을 중심으로 양쪽에 화염이 생성된다. 이 화염의 수치해석적 모사에는 대향류 유동장의 지배방정식[12]들이 사용되었으며, 연속 방정식, 운동량 방정식, 화학종 방정식, 에너지 방정식과 상태방정식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{dU}{dz} + 2af' = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz} (\mu \frac{df'}{dz}) - U \frac{df'}{dz} + a[\rho_\infty - \rho(f')]^2 = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dz} (\rho Y_i U_{iz}) + U \frac{dY_i}{dz} - w_i W_i = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dz} (\lambda \frac{dT}{dz}) - \bar{c}_p U \frac{dT}{dz} - \sum_{i=1}^v \rho Y_i U_{iz} c_{pi} \frac{dT}{dz} - \sum_{i=1}^v w_i W_i h_i = 0 \quad (4)$$

$$p = \frac{\rho RT}{W} \quad (5)$$

화학 반응식과 열역학적 물성치의 계산은 Chemkin-II을 이용하고, 전달 물성치는 Transport Package로 계산하였다. 본 연구에서 사용한 화학 반응 메카니즘은 49개의 화학종과 279개의 화학반응식으로 이루어진 Gri-Mech 2.11을 이용하였다[2]. 노즐 간격은 1.0cm로 하고 노즐 출구 속도는 양쪽 모두 80cm/s로 하였다.

본 논문에서는 NO 생성/소멸 메카니즘을 thermal 메카니즘, reburn 메카니즘, 그 밖의 NO 생성/소멸 메카니즘을 모두 포함한 Fenimore 메카니즘 세 가지로 분류하여 NO 생성/소멸에 미치는 메카니즘에 관해 연구하였다. 수치해석에 사용된

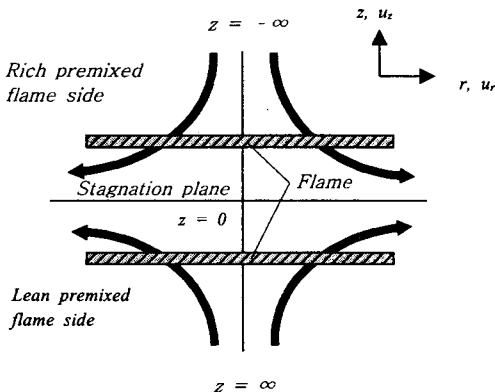


Fig. 7 Structure of a counterflow premixed flame

279개의 반응 메카니즘(GRI-Mech 2.11)에서 NO와 관련된 반응식은 모두 38개로서 이 가운데 178번부터 180번까지의 화학 반응식을 thermal 메카니즘으로, 244번부터 256번까지의 반응식을 reburn 메카니즘으로, 나머지 22개의 반응식을 Fenimore 메카니즘으로 사용하였다(182, 199, 228, 186-189, 190, 195, 198, 208, 212-216, 222, 224, 226, 229, 258, 274).

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 동축류 화염

##### 4.1.1 화염의 특징

Fig. 8에 메탄/공기 부분 예혼합 화염에 대한 직접 사진을 나타내었다. 화염사진은 ICCD 카메라를 사용하여 얻은 것으로, 그림을 보면 당량비  $\phi = 1.0$ 인 경우에 화염의 길이가 가장 짧고 명확한 예혼합 화염면(premixed flame cone)이 관찰되는 반면, 당량비를 높여감에 따라 예혼합 화염면에서 미처 반응하지 못한 연료가 후류에서 주위의 공기와 반응하여 확산화염을 형성하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 형성된 예혼합 화염과 확산 화염은 공기 혼합량을 줄여감에 따라 서로 그 공간적 위치가 일치해 감을 알 수 있다. 예혼합 화염의 전파속도는 당량비가 1보다 약간 큰 과농한 화염에서 최대가 되며 실험한 조건인  $\phi > 1.5$ 에서는 화염 전파 속도가 점점 느려지게 된다. 따라서  $\phi = 1.0$ 인 경우에 화염의 길이는 최단이 되며 오히려 전체 유량이 감소하는 고 당량비의 경우에는 느린 화염 전파 속도로 인하여 예혼합 화염의 길이가 길어지게 된다. 질소를 희석한 경우에는 전체적으로 크게 차이는 없으나 질소를 섞지 않은 경우에 비하여 유속의 증가와 화염전파 속도의 저하에 기인하여 화염의 길이가 약간 길어짐을 알 수 있다.

##### 4.1.2 CH 라디칼

CH 라디칼은 일반적으로 탄화수소계 연료의 화염면에서 농도가 최대가 되는 경향을 보일 뿐만 아니라 NO 생성 메커니즘에서는 prompt NO의 생성에 관여하는 중요한 라디칼이다.

Fig. 9에는 PLIF를 이용한 CH 라디칼의 분포를 각 당량비와 질소 희석에 따라 나타내었다. 실험 대상인 화염이 정상상태의 화염이므로 높은 S/N 비를 얻기 위하여 100장의 이미지를 평균하였다. CH 이미지를 Fig. 8의 직접사진과 비교하면 확산화염 부분에는 CH 라디칼이 존재하지 않고 예혼합 화염면에만 국한되어 존재함을 알 수 있다. 당량비가 높아질수록 즉, 연료 과농한 화염의 경우에는 CH가 보다 넓은 영역에 분포하게

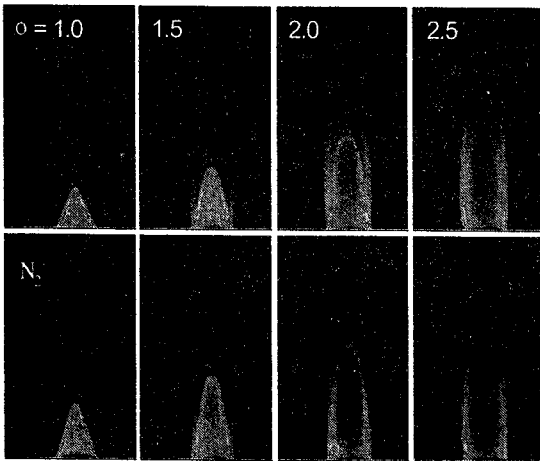


Fig. 8. Direct photographs of methane/air flame for various fuel equivalence ratios

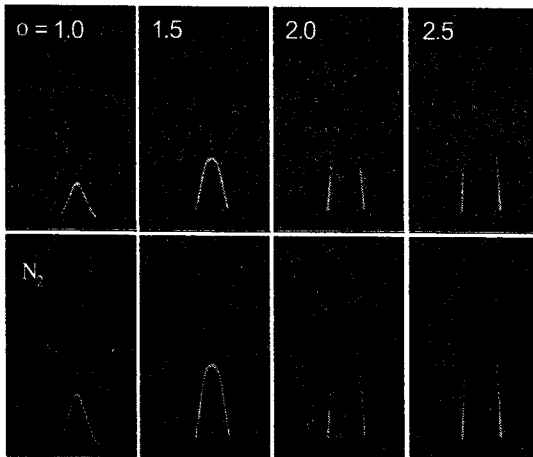


Fig. 9 CH radical distributions of methane/air flame for various fuel equivalence ratios

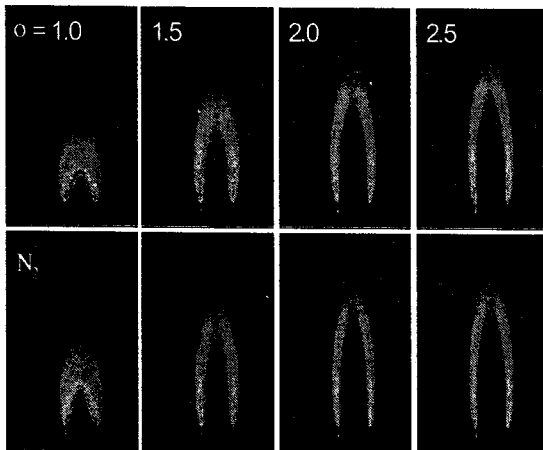


Fig. 10 OH radical distributions of methane/air flame for various fuel equivalence ratios

되며 그 농도는 줄어들게 된다. 이와 같은 특성은 Blevins와 Gore[3]의 대항류 버너에 대한 수치계산과도 유사하다. 특히  $\phi = 2.5$  인 경우에는 화염 끝 부분에서 CH 라디칼이 미미하게 존재함을 알 수 있다.

#### 4.1.3 OH 라디칼 분포

OH 라디칼 분포를 Fig. 10에 나타내었는데 그 분포는  $\phi = 1.0$ 인 화염과 다른 화염에 대하여 확연히 구분된다.  $\phi = 1.0$ 인 화염의 경우 예혼합 화염면에 집중되어 OH 라디칼이 분포하고 있는 반면  $\phi = 1.5$ 인 경우에는 OH 라디칼이 주로 예혼합 화염과 외부 확산화염의 사이에 존재하게 되며 당량비가 증가함에 따라 예혼합 화염과 확산 화염이 서로 그 위치가 비슷해지므로 측면의 OH 분포 영역도 점차로 좁아짐을 알 수 있다.

일반적으로 예혼합 화염의 온도는 당량비 증가에 따라 낮아지게 되는데 이는 예혼합 화염에서 산화제의 부족으로 상당량의 연료가 반응하지 못하고 유출되기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 유출된 연료가 주위의 공기와 반응하여 2차적인 확산화염 영역을 형성하기 때문에 실제로 온도 감소 효과는 적을 것으로 생각되며, 이는 상대적으로 반응이 활발하여 고온지역을 나타낼 수 있는 OH 라디칼의 분포가 당량비 변화에 따라 그 분포에는 차이가 있으나 최대값에는 큰 변화가 없는 것으로부터 확인할 수 있다. 반면에 질소를 희석한 경우에는 그 분포에 많은 차이를 보이지는 않지만 상대적으로 신호가 질소를 희석하지 않은 경우보다 낮게 측정되어 질소 첨가에 따른 온도 감소 효과가 있는 것으로 판단된다.

#### 4.1.4 NO 분포

Figure 11에는 NO 라디칼의 공간적인 분포를 나타내었다. 당량비가 증가할수록 NO의 농도가 점차로 높아짐을 알 수 있고, 안쪽의 예혼합 화염면에서부터 NO가 발생함을 알 수 있다.  $\phi = 1.0$ 인 경우에 비하여 과농한 경우에는 화염의 외부에 OH 라디칼은 다량 존재하는 반면 CH 라디칼은 존재하지 않으므로 이 지역에서는 고온지역의 영향을 받는 thermal NO 메커니즘에 의하여 NO가 생성된다고 생각할 수 있으며, 반면 예혼합 화염 부분에서는 CH 라디칼의 존재로 말미암아 prompt NO 메커니즘에 의하여 NO 라디칼이 생성됨을 알 수 있다. 특히, 연료 과농한 경우의 NO 분포에서는 화염면에서부터 NO 농도의 급격한 증가가 관찰되어 prompt NO의 영향을 확인할 수 있었다. 한편, 질소를 희석한 경우에  $\phi = 1.0$ 인 화염에서는 온도 감소 효과로 인하여 NO 발생량이 감소하였으며, 과농한 화염의 경우에도 NO양의 감소가 관찰되었으나  $\phi = 1.0$ 인 경우에

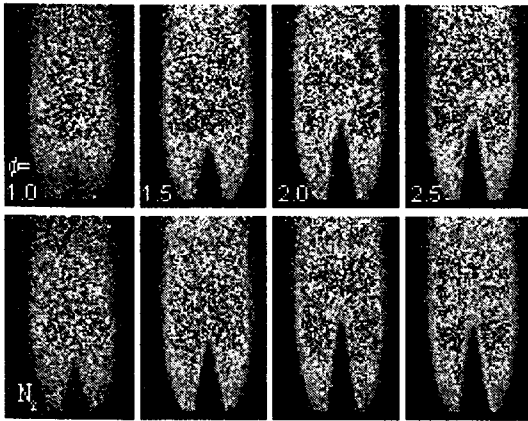


Fig. 11 NO radical distributions of methane/air flame for various fuel equivalence ratios

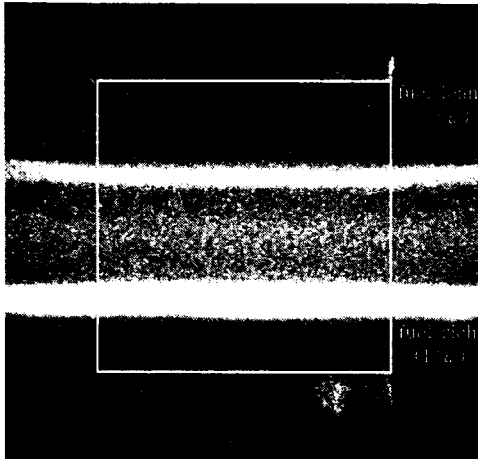


Fig. 12 Flame luminosity of a CH<sub>4</sub>/Air partially premixed flame ( $\alpha=0.8$ )

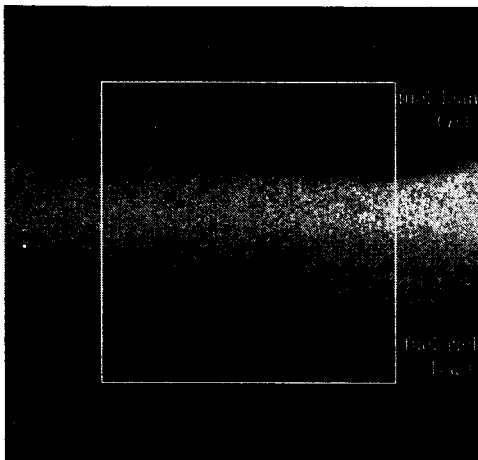


Fig. 13 OH LIF image of a CH<sub>4</sub>/Air partially premixed flame ( $\alpha=0.8$ )

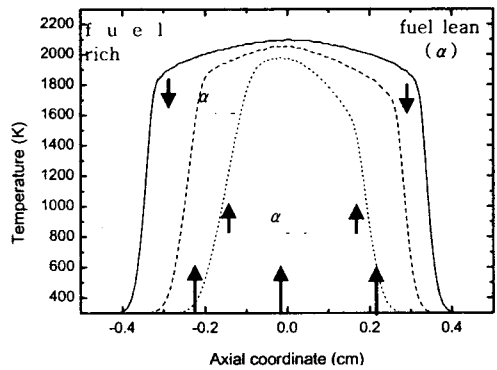


Fig. 14 Flame positions for various  $\alpha$ , calculated (lines) and measured (arrows)

비하여 감소량은 적게 나타났다. 이는 prompt NO와 thermal NO가 공간적으로 다른 위치에서 작용하는 과농화염에서는 온도 감소에 따른 NO의 감소 효과가 크지 않은 것으로 생각된다.

### 4.2 대항류 화염

예혼합 화염과 과농/희박 예혼합 화염을 대상으로 하였다. 예혼합정도( $\alpha$ )를 변화시키기 위하여 한 출구에서의 메탄과 공기의 당량비를  $\alpha$ 로 할 때, 다른 한쪽의 당량비를  $1/\alpha$ 로 조절하였으며, 예혼합 화염( $\alpha=1$ )과 과농/희박 예혼합 화염( $\alpha=0.6, 0.8$ )에서의 화염구조, OH 라디칼의 분포 및 NO 농도 분포를 시뮬레이션 결과와 PLIF 이미지를 비교하였다.

#### 4.2.1 화염 구조의 변화

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 430nm band pass 필터(FHFW 10nm)를 통과하여 얻어진 화염과 OH 라디칼의 LIF 이미지 예를 보여주고 있다.

Fig. 14는 이와 같이 얻어진 화염의 자발광 이미지에 나타난 화염면 위치와 시뮬레이션으로 얻어진 화염의 구조를 비교하고 있으며, 연료/공기 혼합비가 희석되지 않은 조건에서  $\alpha$ 값이 0.6, 0.8 및 1.0인 화염을 비교하고 있다. 본 연구에서 사용된 조건(노즐 간격 1.0cm, 출구속도 80cm/s)에서 시뮬레이션에서 예측된 과농/희박 예혼합 화염( $\alpha=0.6, 0.8$ )의 이중화염(double flame)과 삼중화염(triple flame)구조가 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

삼중 화염( $\alpha=0.8$ )은 과농한 화염과 희박한 화염 사이에 이 두 화염의 상호 작용에 의해 나타나는 확산 화염이 존재하는데 여기서의 확산 화염은 과농 예혼합 화염에서 공급된 H<sub>2</sub>와 CO가 희박 예혼합 화염에서 공급된 산소와 반응하는 화염이다[13]. 이중화염( $\alpha=0.6$ )은 분리된 희박 화염 지역과 과농 화염과 확산 화염이 함께 존재하는 지역

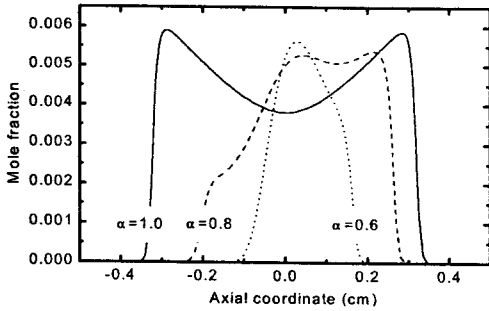


Fig. 15 Calculated OH concentrations for various  $\alpha$

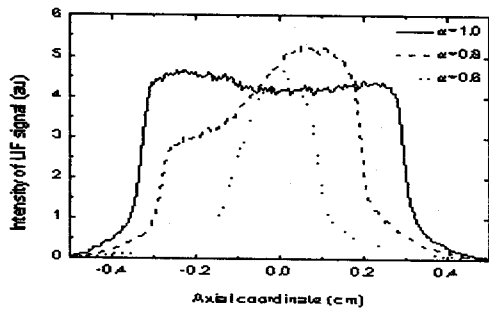


Fig. 16 OH LIF signals for various  $\alpha$

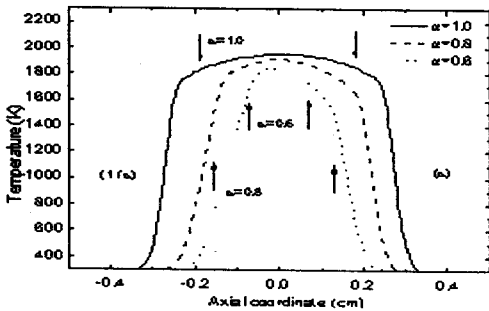


Fig. 17 Flame positions with 10 %  $N_2$  dilution for various  $\alpha$ , calculated (lines) and measured (arrows)

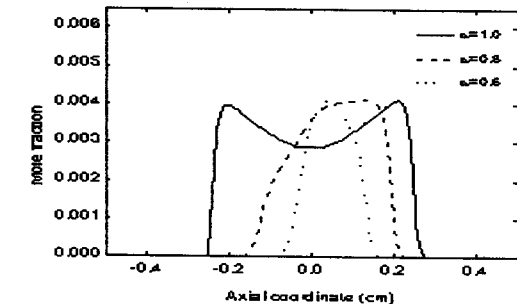


Fig. 18 Calculated OH concentrations for various  $\alpha$

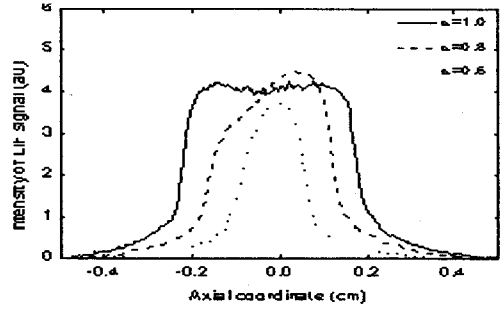


Fig. 19 OH LIF signals with 10 %  $N_2$  dilution for various  $\alpha$

을 갖는 2중구조로 되어 있다. 이러한 화염들의 구조는 OH 라디칼의 분포에서 확인할 수 있다.

Fig. 15의 OH 라디칼의 시뮬레이션 분포는  $\alpha = 0.8$  조건에서는 삼중화염이,  $\alpha = 0.6$  조건에서는 이중화염이 발생하는 것을 의미하고 있다. Fig. 16은 동일한 조건에서 실험된 OH 라디칼의 LIF 신호 분포를 보여주고 있다. 측정된 OH 라디칼의 LIF 신호 분포가 시뮬레이션과 경향이 같으며, 이로부터 시뮬레이션 결과가 타당하다는 것을 알 수 있었다.

대향류 화염의 특성상 연료/공기를 희석시키면 화염영역이 정체점 쪽으로 좁아지며, 따라서 화염의 구조도 변화하게 된다. Fig. 17은  $N_2$ 로 희석하면 연소반응 속도의 감소로 화염지역이 정체면으로 이동하며 고온/반응지역이 감소하는 것을 보여준다. 특히  $\alpha = 0.8$ 의 경우 질소 희석에 의한 반응지역의 축소로 삼중화염에서 이중화염 형태로 화염구조의 변화가 나타나고 있다.

Fig. 18은 시뮬레이션된 OH 라디칼의 분포를 나타내며, 질소의 희석으로 반응지역의 축소와 OH 라디칼 농도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 화염 구조의 변화는 대향류 화염의 NO 생성에 영향을 주게되어 NO 생성특성을 해석하는데 화염구조의 변화가 고려되어야 한다는 것을 의미한다. 질소 희석에 따른 반응지역의 변화는 PLIF를 이용한 실험에서도 확인되었다. Fig. 19는 질소 10%로 희석된 화염들의 OH 라디칼의 LIF 신호를 보여주며, 계산된 OH 라디칼의 분포와 같은 경향을 알 수 있었다. 그러나 실험 결과에서는 예혼합 화염( $\alpha = 1$ )의 경우 중앙의 고온지역에서 OH의 농도가 시뮬레이션보다 더 높게 나타났으며, 과농/희박 예혼합 화염( $\alpha = 0.6, 0.8$ )에서는 OH 라디칼의 분포가 약간 과농지역으로 치우쳐 나타났다.

#### 4.2.2 화염에서의 NO 분포

Fig. 20은 화염에서의 NO 분포 시뮬레이션 결과[8]를 보여주고 있다. NO 분포가 예혼합 화염( $\alpha = 1$ )에서는 중앙의 정체점에서 농도가 가장 높



고 대칭으로 넓은 지역에 존재하는 반면, 과농/희박 예혼합 화염( $\alpha=0.6, 0.8$ )에서는 당량비의 차이와 화염의 구조적 특성으로 NO 분포가 비대칭이며 상대적으로 좁은 지역에 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 21은 화염 내에서의 분포 특성을 실험적으로 확인하기 위하여 측정된 NO의 PLIF 이미지의 예로, 회석이 없는 과농/희박 예혼합 화염( $\alpha=0.8$ )의 NO LIF 신호를 보여준다. 이때 얻어진 이미지에는 화염의 자발광 신호가 함께 나타났으며, 별도로 얻어진 이미지로 화염의 자발광 신호를 제거하는 영상처리를 수행한 후 NO의 LIF 신호를 분석하였다.

Fig. 22는 예혼합 화염( $\alpha=1$ ), 과농/희박 예혼합 화염( $\alpha=0.6, 0.8$ )의 NO LIF 측정 결과로, Fig. 20의 시뮬레이션 결과와 경향이 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 LIF 실험결과는 다음의 대항류 화염 NO 생성 메커니즘에 대한 해석(8)을 지지하고 있다. (1) 예혼합 화염( $\alpha=1$ )의 경우 Fenimore 및 reburn 메커니즘의 기여도가 비교적 적으며 정체면을 중심으로 고온지역이 넓어 thermal 메커니즘의 역할이 매우 크다. (2) 비대칭 화염인  $\alpha=0.6$ 의 경우 NO 생성/소멸율이 과농 예혼합 지역에서만 높고 희박 예혼합 지역에서는 매우 낮으며, 특히 희박 예혼합 지역에서는 reburn의 역할이 거의 없다. (3)  $\alpha$ 가 0.8로 증가하면 희박 예혼합 지역에서도 Fenimore( $N_2O$  메커니즘 등을 포함) 메커니즘에 의한 NO 생성이 중요하게 되며,  $\alpha=0.6$  또는 0.8의 이중, 삼중 화염에서는 과농/희박 예혼합 화염의 위치에 따라 thermal, Fenimore 및 reburn 메커니즘의 상대적인 기여도가 다를 수 있다.

Fig. 23은 질소로 희석된 화염에서 예측된 NO의 분포를, Fig. 24는 동일한 조건에서 측정된 NO의 LIF 신호를 보여주고 있다. 질소 희석에 따라 예혼합화염( $\alpha=1$ )의 경우 NO 분포 지역이 줄어들고 정체면 지역에서 NO 농도가 크게 줄어드는 것을 알 수 있다. 반면에  $\alpha=0.6$ 인 과농/희박 예혼합 화염의 경우에는 NO 농도는 줄어들지만 NO 분포 지역은 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 앞에서 보여준 화염의 직접 사진과 OH LIF 이미지에서 확인된 화염 구조의 변화 효과임을 알 수 있었다.  $\alpha=1$ 인 예혼합 화염은 질소 희석에 의하여 화염/고온 지역이 크게 줄어드는 반면,  $\alpha=0.6$ 인 과농/희박 예혼합 화염은 화염/고온 지역이 크게 변하지 않으므로 NO 분포 지역의 변화가 거의 없게 된다고 생각된다. 따라서 대항류 부분예혼합 화염은 예혼합 정도에 따라 NO 생성 특성에 미치는 희석효과가 다를 수 있음을 확인할 수 있었다.

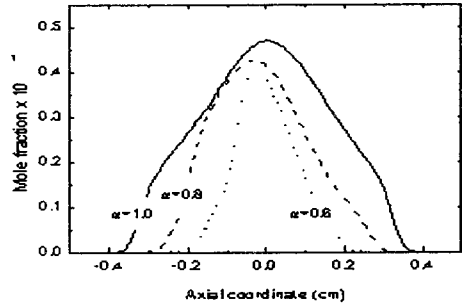


Fig. 20 Calculated NO concentration for various  $\alpha$

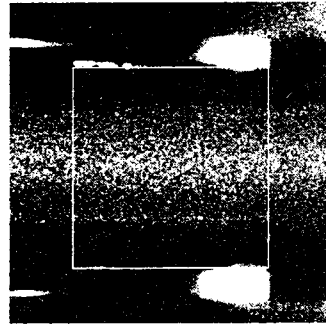


Fig. 21 NO LIF image of a  $CH_4/Air$  partially premixed flame ( $\alpha=0.8$ )

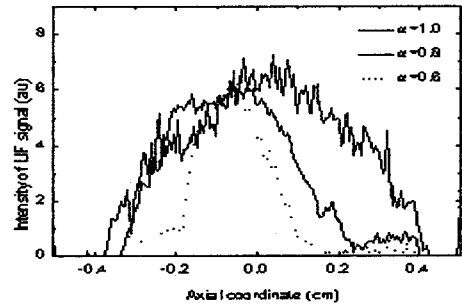


Fig. 22 NO LIF signals for various  $\alpha$

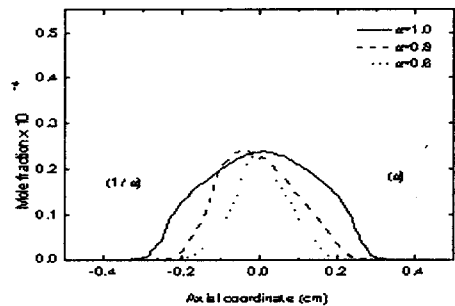


Fig. 23 Calculated NO concentrations with 10 %  $N_2$  dilution for various  $\alpha$

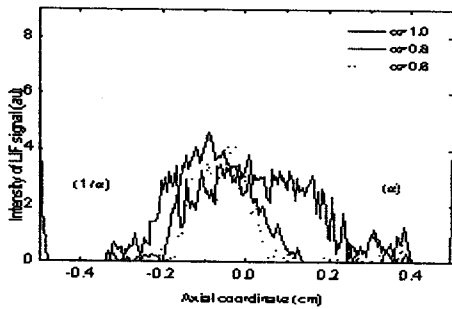


Fig. 24 NO LIF signals with 10 %  $N_2$  dilution for various  $\alpha$

## 5. 결론

2-D LIF 기법을 적용하여 메탄/공기 부분 예혼합 화염과 질소를 희석한 경우에 대한 화염의 특성을 고찰하였으며, OH, CH, NO 라디칼의 공간적인 분포를 가시화하였다. 그 결과로 과농한 화염에서는 후류에 확산화염이 재형성 되는 것을 확인하였으며 이부분에서 CH 라디칼은 존재하지 않은 반면 OH 라디칼은 예혼합 화염면에서 보다 다량 존재함을 확인하였다. NO의 생성 분포에서는 thermal NO와 prompt NO 메커니즘이 작용하는 것을 알 수 있었으며, 특히 과농한 화염의 경우 이 두가지 메커니즘이 작용하는 공간적 위치의 분리로 말미암아 다량의 NO가 생성됨을 확인할 수 있었다.

대향류 메탄/공기 예혼합 화염과 과농/회박 예혼합 화염에서 PLIF 기법을 이용하여 OH 및 NO 분포를 측정하고 이를 수치해석 결과와 비교하였다. OH 및 NO LIF 신호는 계산된 농도 분포와 대체적으로 잘 일치하였으며, 대향류 예혼합 화염에서는 화염의 구조가 NO 생성 특성에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

예혼합 화염( $\alpha=1$ )에서는 중앙의 정체점에서 NO 농도가 가장 높고 대칭으로 넓은 지역에 존재하는 반면, 과농/회박 예혼합 화염( $\alpha=0.6, 0.8$ )에서는 당량비의 차이와 화염의 구조적 특성으로 NO 분포가 비대칭이며 상대적으로 좁은 지역에 나타났다. 희석에 따른 부분예혼합 화염 구조의 변화가 NO 생성에 영향을 주었다. 예혼합화염( $\alpha=1$ )의 경우 질소 희석으로 NO 분포 지역이 줄어들고 정체면 지역에서 NO 농도가 크게 줄어들었으며,  $\alpha=0.6$ 인 과농/회박 예혼합 화염의 경우에는 NO 농도는 줄어들지만 NO 분포 지역은 크게 변하지 않았다.

예혼합 화염( $\alpha=1$ )의 경우 중앙의 고온지역에서 OH LIF 신호가 시뮬레이션보다 높게 나타났으며, 과농/회박 예혼합 화염( $\alpha=0.6, 0.8$ )에서는 OH 라디칼의 분포가 과농지역으로 치우치는 것이 관

찰되었다. NO PLIF 신호측정시 광학 필터만으로는 화염의 자발광을 제거할 수 없었으며 이에 대한 대책이 요구된다.

## 후 기

본 연구는 1996년도 한국학술진흥재단의 공모 과제(KRF-96-001-E0622) 연구비에 의하여 수행되었으며, SRI의 Dr. J. Luque로부터 LIFBASE (v.1.1)를 제공받아 사용하였습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Smyth, K. C., "NO Production and Destruction in a Methane/Air Diffusion Flame," *Combustion Science and Technology*, Vol. 115, 1996, pp. 151-176.
- [2] Smith, G. P., Crosley, D. R., Golden, D. M., Frenklach, M., Gardiner, W. C., Hanson, R. K. and Bowman, C. T., "GRI-Mech 2.11," *Annual Report SRI International*, 1996.
- [3] Blevins, L. G. and Gore, J., "Computed Structure of Low Strain Rate Partially Premixed  $CH_4$ /Air Counterflow Flames: Implications for NO Formation," *Combustion and Flame*, Vol. 116, 1999, pp. 546-566.
- [4] Feese, J. J. and Turns, S. R., "Nitric Oxide Emission from Laminar/Diffusion Flames: Effects of Air-Side versus Fuel-Side Diluent Addition," *Combustion and Flame*, Vol. 113, 1998, pp. 66-78.
- [5] Dieke, G. H. and Crosswhite, H. M., J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, Vol. 2, 1962, pp. 97.
- [6] Partridge, W. P., Klassen, M. S., Thomsen, D. D. and Laurendeau, N. M., *Applied Optics*, Vol. 34, 1996, pp. 4890.
- [7] Battles, B. E., Seitzman, J. M. and Hanson, R. K., *32nd Aerospace Science Meeting & Exhibit*, 1994.
- [8] Luque, J. and Crosley, D. R., "LIFBASE", computer program, v.1.1, SRI Report No. MP96-001, 1996.
- [9] Kang, K. T., 제15회 KOSCO symposium 논문집, 1997, pp. 13.
- [10] 이원남, "층류 확산화염에서의 PAH 및 매연 생성에 대한 압력의 영향," *대한기계학회논문집 B*, Vol. 22, No. 10, 1998, pp. 1445-1453.
- [11] 김기현, "Counterflow Burner Design and

Analysis of Counterflow Diffusion Flames Considering Flow Characteristics," M.S Thesis, 단국대학교, 1997.

[12] 이원남, 이용재, "EGR 및 예혼합 정도가 메탄/공기 화염의 NO 생성에 미치는 영향," 한국연소학회지, Vol. 4, No. 2, 1999, pp. 63-74.

[13] 이승동, 정석호, "회박-과농 메탄 화염의 상호작용에 관한 수치 해석적 연구," 대한기계학회 논문집(B), Vol. 20, No. 1, pp. 377-383.