

# 동축 분류 화염의 NO<sub>x</sub> 배출 특성에 관한 연구

## - 수소/메탄 화염 비교 -

김종현\* · 배동규\* · 이창언\*\*

# A Study on the NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of Coaxial Jet Flames

## - Comparison of H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Flame -

Jong-Hyun Kim, Dong-Kyu Bae and Chang-Eon Lee

### ABSTRACT

The NO<sub>x</sub> emission characteristics of jet flames fueled with H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> were studied. Experimental and numerical investigations were carried out for various flames with varying equivalence ratio, fuel flow rate and nozzle diameter. The Emission indices of NO<sub>x</sub>(EINO<sub>x</sub>) were measured by chemiluminescent method and calculated by numerical model based on detailed chemistry. The results show that EINO<sub>x</sub> of CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub> flames have different trends in terms of equivalence ratio and fuel flow rate but have the same trends in terms of nozzle diameter. These differences can be explained by the following Thermal and Prompt trends in both flames. Thermal EINO<sub>x</sub> is quite sensitive to the residence time in the high-temperature region weighted by the maximum flame temperature. Prompt EINO<sub>x</sub> is mainly influenced by flame surface area of each combustion conditions.

**Key Words** : Jet flame, Thermal NO<sub>x</sub>, Prompt NO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> Emission Index(EINO<sub>x</sub>)

### 1. 서 론

근래에 NO<sub>x</sub> 배출특성이 연소방식을 결정하는 중요한 인자중의 하나로 대두되면서 각종 연소기로부터 발생하는 NO<sub>x</sub> 저감을 위한 연구가 중요하게 대두되었다. 가스 연소에서의 NO<sub>x</sub> 생성 과정은 유동, 전열, 혼합 등의 물리적 현상과 반응 등의 화학적 현상, 그리고 이들의 복합적인 상호작용에 민감하게 영향을 받기 때문에, 가스용 연소기에서 NO<sub>x</sub> 저감을 달성하기 위해서는 위에 언급한 다양한 인자들에 대한 종합적인 정보를 바탕으로 NO<sub>x</sub> 배출특성을 면밀히 검토할 필요가 있다.

분류 화염에서의 NO<sub>x</sub> 생성 특성에 관한 연구

를 살펴보면, Turns[1] 등은 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub> 연료에 대한 난류 분류 화염에서 EINO<sub>x</sub>를 조사한 결과, 일정한 열방출율에서 부분 예혼합은 복사 열손실과 체류시간에 변화시켜 EINO<sub>x</sub>를 증가 또는 감소시킬 수 있음을 보고한 바 있으며, Rokke[2] 등은 난류 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>화염에서 부분 예혼합이 증가함에 따라 EINO<sub>x</sub>값이 더 높아짐을 보고하였다. 그리고 Gore[3] 등은 층류 부분에 혼합 CH<sub>4</sub> 화염에서 EINO<sub>x</sub>와 주요 화학종 농도분포를 연구한 결과 NO<sub>x</sub>가 적게 나오는 최적 당량비가 있음을 중간 탄화수소 화학종들의 변화에 기인한다고 추측하였으며, Kim[4] 등은 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 분류화염에서 실험을 통하여 NO<sub>x</sub>가 적게 나오는 특정 당량비가 있음을 예혼합 반응대의 Prompt NO<sub>x</sub> 생성과 확산 반응대의 Thermal NO<sub>x</sub> 생성의 상호작용에 의한 것으로 추측하였다.

또한, Smooke[5] 등은 CH<sub>4</sub> 확산 화염에서의

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학과

수치해석 연구를 통해 NOx 발생은 Prompt NO가 지배적임을 지적한바 있으나, 이는 계산시간을 단축하기 위해 N2를 희석시켜 화염을 작게 한 연구결과로 일반적인 경향이라고 보기는 어렵다.

한편, H2 분류 화염에서의 NOx 생성 특성에 관한 연구들을 보면 Driscoll[6] 등은 난류 H2 화염에서 부분 예혼합의 증가는 체류시간을 감소시켜 EINOx가 크게 감소됨을 알아내었으며, Gabriel[7] 등은 Ar과 He를 희석한 난류 확산 화염에서 연료의 Lewis number가 NOx 생성 특성에 크게 영향을 미침을 보고하였다. 그러나 이러한 NOx 생성 특성에 관한 연구들은 대부분 특정 조건에 대한 것이며, H2 연료에 대한 경우에는 주로 난류 확산 화염에서의 결과이므로, EINOx 배출 특성에 대한 종합적이며 일반적인 연구는 부족한 형편이다.

본 연구에서는 실용 연소기의 화염형태와 유사한 H2/CH4 분류화염을 대상으로 상세반응기구를 이용하여, 수치계산이 가능한 층류 연소조건에서의 당량비, 연료유량 및 노즐직경 변화에 따른 EINOx의 경향을 실험 및 수치해석을 통하여, 위 각 인자들에 따른 EINOx 경향 및 그 원인을 조사·분석하여 다양한 연소조건에서의 EINOx를 예견할 수 있는 상관식을 도출하고자 한다.

### 2. 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 중심에 설치된 혼합기(CH4+Air, H2+Air) 노즐과 그와 동축으로 설치된 직경 50mm인 동축 주위류 노즐로 구성된 연소기에서 형성되는 층류 분류화염을 실험 및 계산대상으로 하였다. 실험 및 계산에서의 연료 노즐직경과 유량조건은 Table. 1에서 보는 바와 같이 CH4 및 H2 화염에 대해 노즐직경을 고정시키고 혼합기 유량을 변화시킨 경우(조건 A,

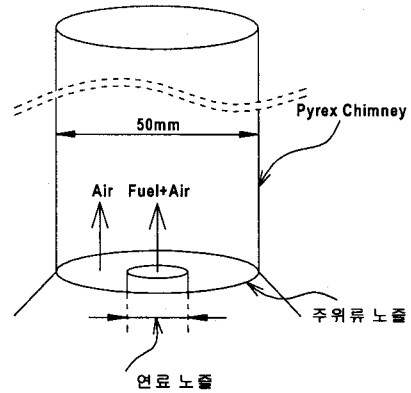


Fig.1 Schematic diagram of coaxial burner

C)와, 유량을 고정시키고 노즐직경을 변화시킨 경우(조건 B, D)로 하였다. 모든 조건에서 주위류 유량은 46 L/min으로 일정하게 하였으며, 당량비는 주어진 노즐직경과 유량조건에 대해 예혼합화염에서 확산화염 조건까지 변화시켰다. 연소가스중의 NO 및 NOx의 농도는 급속팽창 프루브를 이용하여 반경방향 NO 농도의 상대변화가 ±2% 이내가 되는 충분한 하류지역에서 연소가스를 샘플링하여, 화학발광법을 이용한 질소산화물 분석기(300-CLD)를 이용하여 측정하였다. 또한 CO는 CO 가스 측정기(KM-9104)를 이용하여 측정하였으며, CO2의 농도는 유입되는 연료가 완전 연소된다는 조건으로부터 계산된 값을 이용하였다. 배출지수는 CH4 화염의 경우는 식 (1) 및 (2), H2 화염[6]인 경우는 식 (3)를 이용하여 계산하였다.

$$EI_i = \frac{1000x_i}{x_{CO_2} + x_{CO}} \times \frac{MW_i}{MW_F} \quad (g/kg) \quad (1)$$

Table.1 Experimental condition and Boundary condition at nozzle outlet

연료 노즐(CH4+Air)				연료 노즐(H2+Air)			
조건	노즐 직경	연료 유량	당량비	조건	노즐 직경	연료 유량	당량비
A	8mm	0.3 L/min(계산)	0.8	C	3.7mm	1.86 L/min	0.9
		0.4287L/min(계산)				2.07 L/min	1.0
		0.6 L/min(계산)				2.29 L/min	1.5
		0.8 L/min					2.5
		1.0 L/min					
B	6 mm	0.4287 L/min	Diffusion	D	3.0mm	1.86 L/min	4.0
	8 mm(계산)				3.4mm		6.0
	10 mm(계산)				3.7mm		8.0
	12 mm(계산)						Diffusion
	13.7mm						

$$EINO_x = EINO \frac{MW_{NO_2}}{MW_{NO}} + EINO_2 \text{ (g/kg)} \quad (2)$$

$$EINO_x = 0.001 (MW_{NO_2} / MW_{H_2}) \times x_{NO_x} ((1 + (4.76 / \Phi_0)) / 2) \text{ (g/kg)} \quad (3)$$

### 3. 수치 계산 방법

본 연구의 수치계산에는 층류 분류화염에 대해 계산이 가능한 CLESLAF Code[8]를 수정하여 사용하였다. 열역학적 물성치 및 화학종의 생성율은 CHEMKIN - II Package[9]로, 전달 물성치는 TRANFI - T Package[10]를 이용하여 계산하였다. 그 외 계산방법에 대한 자세한 내용은 참고문헌[11]을 참조하기 바람이며 본 논문에서는 생략하겠다.

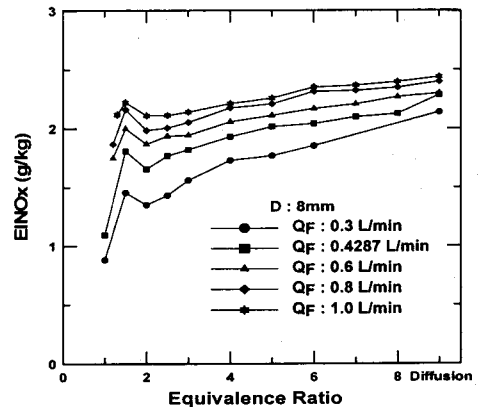
계산에 이용된 반응기구는  $CH_4$  화염의 경우 GRI-2.11이며,  $H_2$  화염의 경우에는 11개 화학종과 23개 반응식으로 구성된 상세 반응기구를 이용하였다. GRI- 2.11 반응기구는 Thermal 및 Prompt  $NO_x$  생성기구를 모두 포함하고 있으므로  $CH_4$  화염인 경우에는 Nishioka의  $NO_x$  분리법에 따라 Total  $NO_x$ 를 Thermal  $NO_x$ 와 Prompt  $NO_x$ 로 분리하였다. 단,  $H_2$  화염에서 발생하는  $NO$ 는 Thermal  $NO$ 만을 의미한다.

본 연구에 이용된 코드 및 계산방법은 기존에  $CH_4$  분류화염의  $NO_x$  계산에 적용하여 실험결과와의 비교를 통해 검증된 바 있으므로, 본 코드를 이용하여  $H_2$  화염의  $NO_x$  배출특성을 살펴보는 것도 타당한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 이후에는  $CH_4$  및  $H_2$  화염의  $NO_x$  배출특성을 실험 및 계산을 통해 살펴보고, 실험으로 규명하기 어려운 구체적인 원인에 대해서는 수치계산 결과를 이용하여 해석하고자 한다.

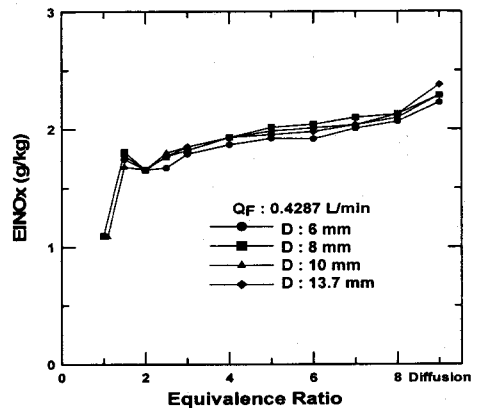
## 4. 결과 및 검토

### 4.1 실험 결과

Fig. 2는  $CH_4$  분류화염에서의  $EINO_x$  를 도시한 것으로, Fig. (a)는 동일 직경의 노즐에서 연료유량 및 당량비를 변화시킨 경우(조건 A)이며, Fig. (b)는 동일 연료 유량에 대해 노즐직경 및 당량비를 변화시킨 경우(조건 B)이다. 우선, 당량비 변화에 따른  $EINO_x$  경향은 당량비가 1.5인 부분 예혼합화염에서 최고치를 가지며, 당량비가 이보다 희박해지면 급격히 감소하고, 당량비가



(a)



(b)

Fig.2  $EINO_x$  with (a) the variation of the fuel flow rate and (b) the variation of diameter of inner fuel nozzle of  $CH_4$

1.5보다 농후해지면 당량비 2.0까지는 감소하다가 다시 완만히 증가한다. 그리고, Fig. (b)에서 연료유량이 동일하면 연료 노즐 직경이 변하여도  $EINO_x$ 에는 차이가 없음을 볼 수 있다.

Fig. 3은  $CH_4$  연료 유량 증가에 따른  $EINO_x$  증가 경향을 상세히 알아보기 위해, 대표적인 당량비에서의 유량 증가에 따른  $EINO_x$ 를 도시한 것이다. 그림에서, 모든 당량비에 대해 유량 증가와 더불어  $EINO_x$ 도 증가하는데, 그 증가 경향이 나 증가율은  $CH_4$  연료의 경우에는 당량비에 관계없이 거의 일정함을 알 수 있다.

Fig. 4는  $H_2$  분류화염에서의  $EINO_x$ 를 도시한 것으로, Fig. 4(a)는 동일 직경의 노즐에서 연료유량 및 당량비를 변화시킨 경우(조건 C)이며,

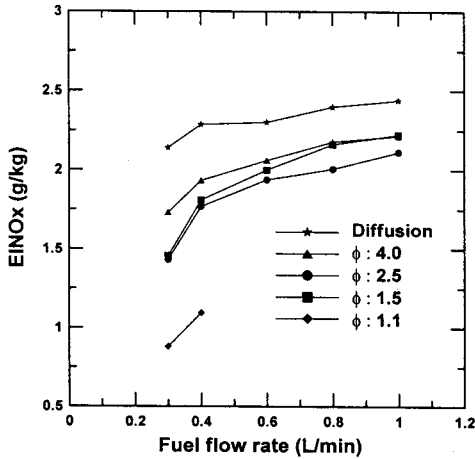


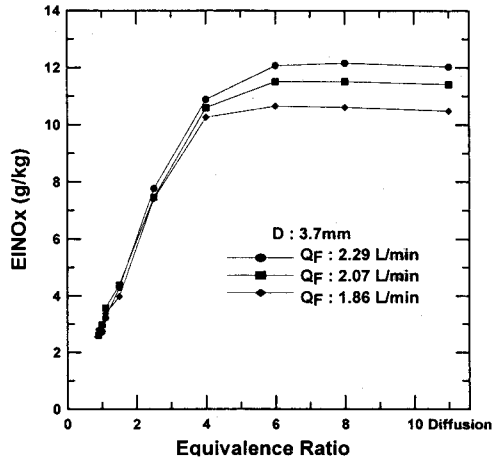
Fig.3 EINOx with the variation of the fuel flow rate of CH<sub>4</sub>

Fig. 4(b)는 동일 연료유량에 대해 노즐직경 및 당량비를 변화시킨 경우(조건 D)이다. 우선, 당량비 변화에 따른 EINOx 경향은, Fig. 2의 CH<sub>4</sub> 분류화염과는 달리, 모든 조건에서 당량비 4.0까지는 급격히 증가하며, 그 이후에서는 서서히 증가하여 거의 일정한 값에 도달함을 알 수 있다. 그리고, 연료유량이 동일한 경우에는, CH<sub>4</sub> 분류화염과 같이, 연료 노즐직경이 변하여도 EINOx에는 차이가 없음을 볼 수 있다. 그러나, 연료유량 변화에 따른 EINOx 경향은 CH<sub>4</sub> 화염과는 다르다. 이에 대해서는 Fig. 5에서 논의하겠다.

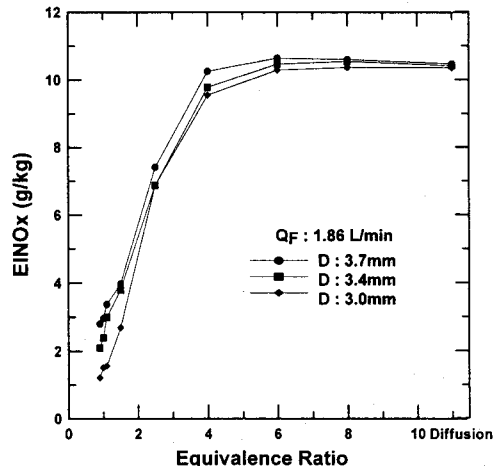
Fig. 5는 Fig. 4의 H<sub>2</sub> 연료유량 증가에 따른 EINOx 변화 경향을 상세히 도시한 것이다. 그림에서 당량비가 작은 경우, 약 2.5 이하에서는 연료유량이 증가함에도 불구하고 EINOx는 거의 일정한 값을 갖으나, 당량비가 이보다도 높은 경우에는 연료유량의 증가에 따라 EINOx도 증가함을 알 수 있다. CH<sub>4</sub> 화염의 경우, 당량비에 관계없이 유량 증가와 더불어 EINOx도 증가하였는데, 이 H<sub>2</sub> 화염에 대한 결과는 당량비가 높은 경우에는 CH<sub>4</sub>의 경향과 동일하다고 할 수 있으나, 당량비가 적은 경우에는 CH<sub>4</sub> 화염에서의 EINOx 경향과는 달라짐을 알 수 있다.

위 실험결과에서, 연료 종류, 유량, 노즐직경 등의 변화에 따른 EINOx 경향을 살펴보면, H<sub>2</sub> 화염 및 CH<sub>4</sub> 화염에서의 EINOx 경향은 상이점이 명확히 드러나, 그 원인을 실험결과만을 이용하여 분석하기에는 불충분하여 다음에 기술하는 수치계산 결과를 이용하여 그 원인들을 분석하고자 한다.

4.2 수치해석 결과



(a)



(b)

Fig.4 EINOx with (a) the variation of the fuel flow rate of and (b) the variation of the diameter of inner fuel nozzle of H<sub>2</sub>

Fig. 6은 Fig. 2(a)의 실험결과 중에 3가지 연료유량(0.3, 0.4278, 0.6 L/min)에 대한 수치해석 결과를 도시한 것이다. 그림에서, Total EINOx는 실험결과의 EINOx와 동일한 것이며, Thermal EINOx 및 Prompt EINOx는 앞의 수치계산 방법에서 언급한 NOx 분리법으로 구한 Thermal NO 및 Prompt NO의 배출지수이다. 우선 Fig. 6의 Total EINOx를 Fig. 2(a)의 실험결과와 비교해 보면, 계산결과는 정량적인 측면에서 실험치보다 약 2~3배 높게 예측하고 있으나, 당량비 및 유량 변화에 따른 EINOx 경향은 실험결과와

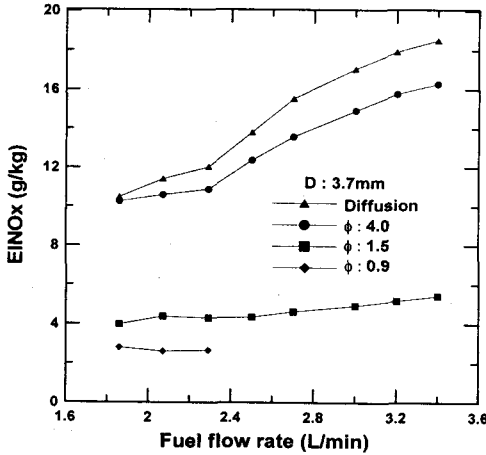


Fig.5 EINOx with the variation of the fuel flow rate of H<sub>2</sub>

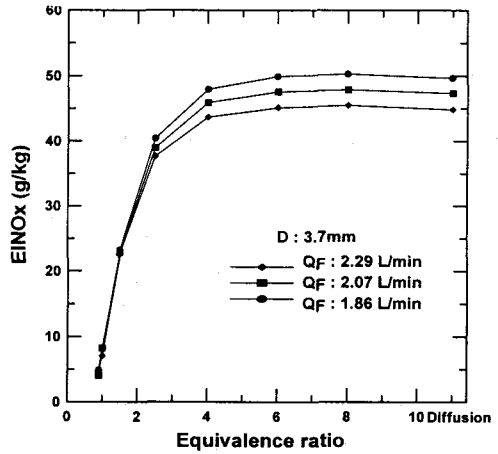


Fig.7 EINOx with the variation of the fuel flow rate of H<sub>2</sub>

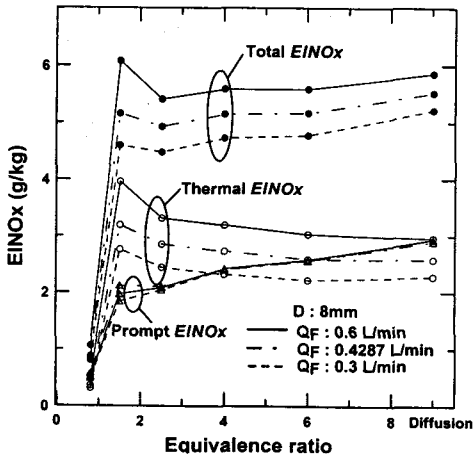


Fig.6 EINOx with the variation of the fuel flow rate of CH<sub>4</sub>

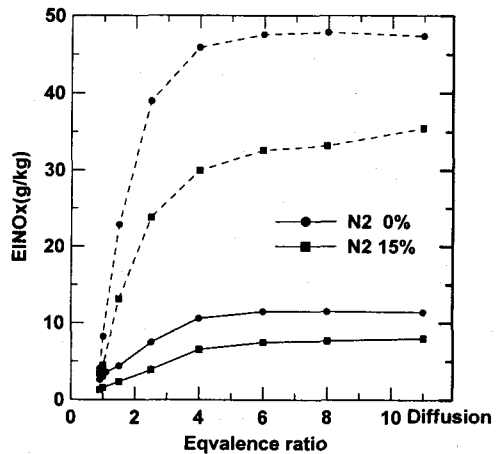


Fig.8 EINOx with the variation of the N<sub>2</sub> dilution of H<sub>2</sub>

잘 일치함을 알 수 있다. 따라서, 수치계산 결과를 이용하여 실험결과에서 분석할 수 없는 여러 가지 NO<sub>x</sub> 생성 특성을 면밀히 분석해 보는 것은 충분히 의미가 있다고 할 수 있다.

위 수치계산 결과를 이용하여, EINO<sub>x</sub>를 반응 기구별로 살펴보면, Prompt EINO<sub>x</sub>는 당량비에 대해서는 로그함수 형태로 변화하며, 연료유량 변화에 대해서는 차이가 없고 일정한 값을 갖는다. 한편, Thermal EINO<sub>x</sub>는 당량비 1.5까지는 급격히 상승하여 최고치에 도달하고, 그 이상에서는 서서히 감소하는 경향을 보이며, 연료유량 변화에 대해서는 유량비의 제곱근에 비례하여

증가함을 알 수 있다. 따라서 실험결과에서 관측된 당량비에 따른 Total EINO<sub>x</sub> 경향은 두 EINO<sub>x</sub> 경향의 조합으로 잘 설명될 수 있다. 그리고, 유량변화에 대한 EINO<sub>x</sub> 경향은 Thermal EINO<sub>x</sub> 경향에 기인함을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 4(a)의 실험결과에 대한 수치해석 결과로, 수치해석 결과는 실험 결과에 비해 정상적으로는 약 3-4배 높게 예측되고 있으나, 당량비, 연료유량, 노즐 직경 등의 변화에 따른 EINO<sub>x</sub> 경향은 실험에서 관측되는 EINO<sub>x</sub> 경향과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 4(a) 및 Fig. 7의 조건 중 연료

유량 2.07 L/min에 대하여 N<sub>2</sub>를 15% 희석한 실험 및 수치계산 결과를 나타낸 것으로 점선은 수치계산 결과를, 실선은 실험결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 N<sub>2</sub>희석으로 인한 화염온도의 감소로 두 경우 모두 EINO<sub>x</sub>값이 크게 감소함을 알 수 있다.

또한 수치계산 결과의 EINO<sub>x</sub>가 더 큰 폭의 감소를 보이는데, 이는 본 계산에서 고려하지 못한 복사효과의 영향 때문이라 판단되며, H<sub>2</sub> 화염의 경우가 CH<sub>4</sub> 화염에 비해 EINO<sub>x</sub> 값이 정량적으로 더 많이 차이가 나는 것은 화염온도의 상승이 더욱 현저해지기 때문이라 사료된다.

그러나 본 연구에서의 실험결과와 수치계산 결과의 정량적인 차이는 계산에서 복사효과를 고려하지 않은 점과 NO<sub>x</sub> 반응기구의 정량적 예측성능의 한계 및 Parabolic 방정식을 이용한 수치해법에서 노즐 근처의 인위적인 착화 등에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나, 이는 본 계산의 모든 조건에 공통적으로 작용하는 것이므로 본 연구에서 논의 하고자 하는 조건에서의 EINO<sub>x</sub> 경향에는 큰 영향을 미치지 않으리라 판단된다.

따라서, H<sub>2</sub> 화염의 경우에도 수치계산 결과를 이용하여 실험결과에서 분석할 수 없는 여러 가지 EINO<sub>x</sub> 특성을 분석하는 것은 충분히 의미가 있다고 할 수 있다.

다음 그림들은 각 화염에서의 EINO<sub>x</sub> 경향을 분석하기 위해 도시한 것으로, Fig. 9는 H<sub>2</sub> 분류 화염에서 동일 직경의 노즐에서 연료유량 및 당량비를 변화시킨 화염들(Fig. 4의 실험결과, Fig. 7의 수치계산 결과)에 대한 중심축 상에서의 최고온도 및 1850K 이상의 영역을 통과하는데 걸리는 시간 즉, 고온 체류 시간을 도시한 것이다. 이 그림을 Fig. 4의 실험결과 및 Fig. 7의 수치해석 결과와 비교해 보면, 분류화염에서의 당량비 변화 및 유량 변화에 따른 EINO<sub>x</sub> 경향은 고온 체류시간에 최고온도를 곱한 경향과 일치함을 알 수 있다. 따라서 H<sub>2</sub> 화염에서의 EINO<sub>x</sub> 경향은 고온 체류시간에 화염온도를 가중(weighting) 해 준 함수 형태로 나타낼 수 있다고 여겨진다.

Fig. 10은 CH<sub>4</sub> 분류화염에서의 동일 직경의 노즐에서 연료유량 및 당량비를 변화시킨 화염들(Fig. 2의 실험결과, Fig. 6의 수치해석 결과)에 대한 중심축 상에서의 최고온도 및 고온 체류 시간을 앞 그림과 동일하게 도시한 것이다. 이 그림을 Fig. 6에 도시한 Thermal EINO<sub>x</sub>경향과 비교해 보면, CH<sub>4</sub> 분류화염에서도 당량비 변화 및 유량변화에 따른 Thermal EINO<sub>x</sub> 경향은 이 그림에 도시한 고온 체류시간에 최고온도를 곱한 경향과 일치한다고 할 수 있다. 따라서 메탄 화염에서도 Thermal EINO<sub>x</sub> 경향은 고온 체류시간

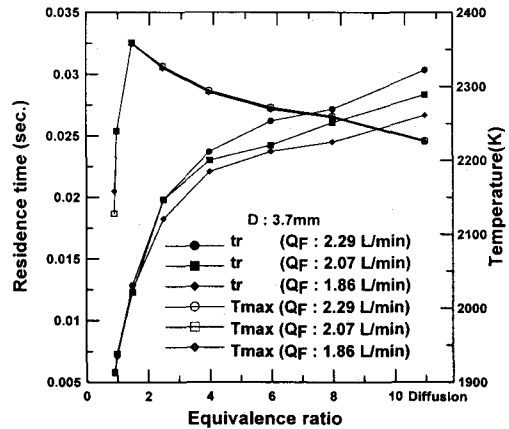


Fig.9 The residence time and maximum temperature on centerline with the variation of the fuel flow rate of H<sub>2</sub>

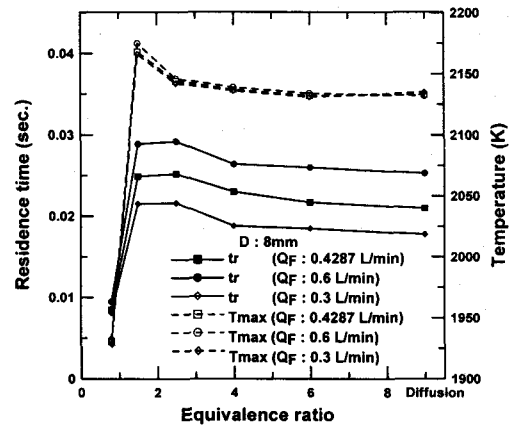


Fig.10 The residence time and maximum temperature on centerline with the variation of the fuel flow rate of CH<sub>4</sub>

에 화염온도를 가중(Weighting) 해 준 함수 형태로 나타낼 수 있다고 여겨진다.

Fig. 11은 Fig. 6의 조건 중 연료유량이 0.4287 L/min, 당량비 2.5인 화염의 x=2cm 단면의 NO 생성율과 관련성이 높은 온도 및 OH, CH radical의 농도분포를 도시한 것이다. 그림에서 Prompt NO는 Total NO에서 Thermal NO를 뺀 것으로 Prompt NO 생성영역은 CH radical 농도 분포를 이용하여 잘 나타낼 수 있음을 알 수 있으며, CH radical 분포영역의 외측 좁은 영역에서 생성됨을 알 수 있다.

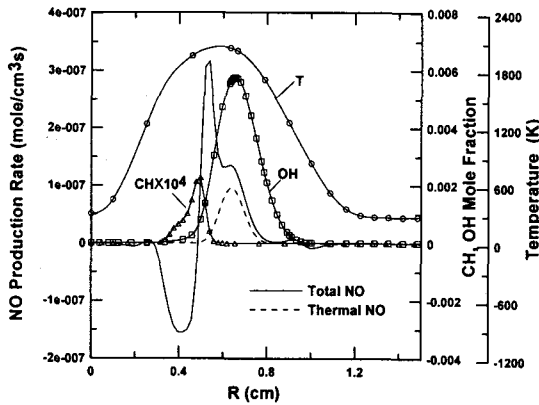


Fig.11 Radial profile of CH<sub>4</sub> flame for x=2cm, Φ=2.5

Fig. 12는 CH<sub>4</sub> 분류화염에서의 CH radical 농도분포를 도시한 것으로, Fig. (a), (b)는 연료유량이 0.4287 L/min으로 동일한 경우의 당량비가 각각 1.5, 2.5에 대한 결과이다. 그림에서 보듯이 CH radical이 분포하는 지역은 폭이 매우 좁으며, Prompt NO는 이 CH radical 분포영역의 외측에만 발생하기 때문에 Prompt NO 생성량은 화염면적에 비례한다고 할 수 있으며, 당량비 증가에 따라 화염 면적이 증가하면 CH radical 농

도 분포 영역이 증가함을 알 수 있다. 따라서 Fig. 6의 동일 유량의 경우 당량비에 따른 Prompt EINOx 경향은 화염 면적의 변화로 잘 설명할 수 있다. Fig. (c)는 당량비가 2.5인 경우로, 좌측은 연료유량이 0.3 L/min, 우측은 2배 증가한 0.6 L/min인 화염의 결과이다. Fig. (c)의 연료유량 변화에 따른 CH radical 농도분포를 살펴보면, 연료유량이 증가하면 CH radical의 분포 영역이 크게 증가하기 때문에 Prompt NO의 생성량도 크게 증가하리라는 것을 알 수 있다. 그러나 그림에 나타내지는 않았지만, 이 두 화염에서의 단위 면적당 Prompt NO 생성을 크기는 동일한 수준임을 확인 할 수 있었으며, Prompt NO 발생 면적은 연료유량에 비례하여 증가하기 때문에 증가된 연료유량으로 무차원한 Prompt EINOx는 동일하게 유지됨을 알 수 있다. 이와 같은 이유로 인해서 Fig. 6에서 보는 바와 같이 동일 당량비에 대해 연료유량이 증가하더라도 Prompt EINOx는 비슷한 수준을 유지하게 된다. 따라서 Fig. 6에 도시한 당량비 및 연료유량 변화에 따른 Prompt EINOx 경향은 이들 변수에 따른 화염면적의 변화로 잘 설명할 수 있다. 그리고, Total EINOx 경향은 Fig. 6의 Thermal EINOx 와 Prompt EINOx 경향의 조합에 의하여 결정될 수 있다.

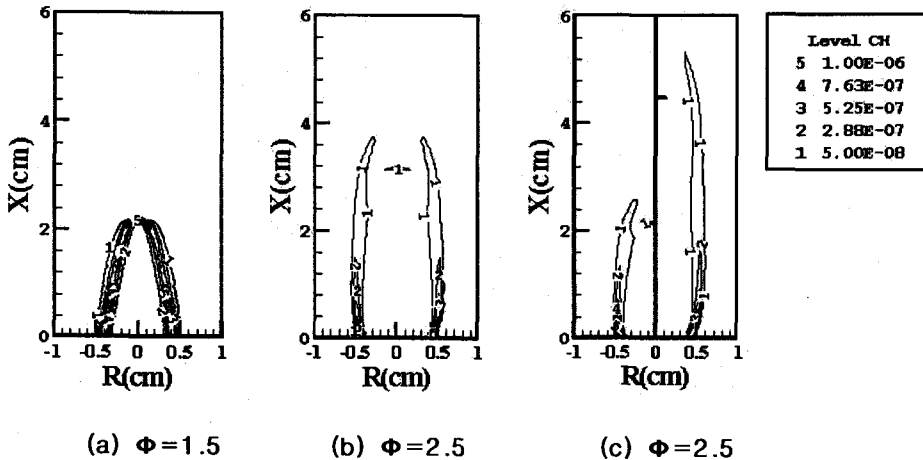


Fig.12 (a),(b) CH radical concentrations with equivalence ratio for CH<sub>4</sub> fuel flow rate 0.4287 L/min and (c) comparison with the variation of CH<sub>4</sub> fuel flow rate (left : 0.3 L/min, right : 0.6 L/min) for Φ=2.5

## 5. 결론

층류 동축 분류 CH<sub>4</sub> 및 H<sub>2</sub> 화염을 대상으로 실험 및 수치계산을 통해 당량비, 노즐직경 및 연료유량 변화에 따른 NO<sub>x</sub> 배출특성을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. H<sub>2</sub> 화염의 EINO<sub>x</sub>는 당량비가 작은 영역에서 급격히 증가하며, 당량비 4.0 이상에서는 완만히 증가한 후 일정해진다. 또, EINO<sub>x</sub>는 당량비가 작은 경우에는 유량 증가에 무관하나 높은 경우 유량에 비례하여 증가한다.
2. CH<sub>4</sub> 화염의 EINO<sub>x</sub>는 당량비 1.5까지는 급격히 증가하나, 이후 당량비 2.5까지는 감소하다가 확산화염까지 다시 완만히 증가한다. 또, EINO<sub>x</sub>는 모든 당량비에서 유량에 비례하여 증가한다.
3. CH<sub>4</sub> 화염 및 H<sub>2</sub> 화염의 Thermal EINO<sub>x</sub> 경향은 고온 체류시간에 화염온도를 가중(Weighting) 해준 함수 형태로 나타낼 수 있을 것으로 사료된다. 또한 CH<sub>4</sub> 화염의 Prompt EINO<sub>x</sub> 경향은 당량비 및 연료 유량변화에 따른 화염면적 변화로 설명할 수 있으며, Total EINO<sub>x</sub>는 Thermal 과 Prompt EINO<sub>x</sub> 경향의 조합에 의하여 결정된다.

## 참고문헌

- [1] S. R. Turns, F. H. Myhr, R. V. Bandaru and E. R. Maund, "Oxide of Nitrogen Emissions from Turbulent Jet Flames: Part II - Fuel Dilution and Partial Premixing Effect .," *Combustion and Flame*, Vol. 93, 255, 1993.
- [2] N. A. Rokke, J. E. Hustad. and O. K. Sonju, "A study of Partially Premixed Unconfined Propane Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 97, 88, 1994.
- [3] J. P. Gore, N. J. Zhan, "NO<sub>x</sub> Emission and Major Species Concentrations in Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-flow Jet Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 105, 1996, pp. 414-427.
- [4] Tae Kwon Km, B. J. Alder, N. M. Laurendeau and J. P. Gore, "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. 110-111, 1995, pp. 361-378.

[5] M. D. Smooke, Y. Xu, R. M. Zurn, P. Lin, J. H. Frank and M. B. Long, "Computational and Experimental Study of OH and CH Radicals in Axisymmetric Laminar Diffusion Flames," *24th Symposium (Internat.) on Combustion* The Combustion Institute, 1992, pp. 813-821.

[6] James F. Driscoll, Ruey-Hung Chen, YoungBin Yoon, "Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flames: Effects of Residence Time and Damkoler Number," *Combustion and Flame*, Vol. 88, 1992, pp. 37-49.

[7] Raymond Gabriel, Jose E. Navedo, and Ruey-Hung Chen, "Effects of Fuel Lewis Number on Nitric Oxide Emission of Diluted H<sub>2</sub> Turbulent Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 121, 2000, pp. 525-534.

[8] M. E. Coltrin, H. K. Moffat, R. J. Kee and F. M. Rupley, "CRESLAF (Version 4.0): A Fortran Program For Modeling Laminar, Chemically Reacting, Boundary-Layer Flow in Cylindrical or Planar Channels," *Sandia Report SAND 98-0478*, 1993.

[9] R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, "Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics," *Sandia Report SAND 89-8009B*, 1989.

[10] R. J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M. E. Coltrin and J. A. Miller, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties," *Sandia Report SAND 86-8246*, 1986.

[11] Jung Bae Park, Jong Hyun Kim, Chang Eon Lee, "Numerical and Experimental Investigation on NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of CH<sub>4</sub> Jet Flames," *제21회 Kosco symposium 논문집*, 2000.