

CH₄ 제트 화염의 NO_x 배출 특성에 관한 수치 및 실험적 연구

박정배* · 김종현* · 이창언**

Numerical and Experimental Investigation on NO_x Emission Characteristics of CH₄ Jet Flame

Jung Bae Park, Jong Hyun Kim, Chang Eon Lee

Key Words : CH₄ Jet Flames, Thermal NO_x, Prompt NO_x, Emission Index(EINO_x)

Abstract

Experimental and numerical investigation on NO_x emission characteristics with equivalence ratios, fuel flow rates and nozzle diameters were studied in CH₄ Jet flames. Emission indices of NO_x were measured by chemiluminescent method with carbon converter. Numerical analyses were carried out with GRI-2.11 mechanism that includes C₂-chemistry and all of NO reaction mechanisms. The roles of thermal NO and prompt NO mechanism on each flame's NO_x emission index were investigated. The results of this study show that the numerical results represent well the trends of EINO_x experimentally observed. The numerical analyses clarified the trends of EINO_x with equivalence ratios, fuel flow rates and nozzle diameters.

1. 서론

가스연료의 연소방식은 예혼합, 부분 예혼합, 확산화염으로 분류되며, 각 화염들은 안정성, NO_x 및 Soot 등의 공해 발생 측면에서 서로 다른 특징을 가지고 있다. 현재까지는 화염 안정성 및 Soot 발생 특성이 연소 방식의 결정에

중요한 기준으로 사용되어 왔으나, 근래에는 NO_x 발생 특성도 연소 방식의 결정에 매우 중요한 인자로 부각되고 있다. 따라서, 연소방식 및 운전 조건에 따른 NO_x 발생 특성에 대한 면밀한 검토는 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러나, NO_x 발생과정은 유동, 전열, 혼합 등의 물리적 현상과 반응 등의 화학적 현상에 민감하게 영향을 받기 때문에, 이 NO_x 생성 특성을 면밀히 검토하기 위해서는 위 인자들에 대한 종합적인

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과

정보가 요망된다.

NOx 발생에 대한 실험적 연구도 많이 수행되고 있으나, 실험적 연구로는 생성 특성에 대한 상세한 원인을 규명하는 데에는 한계가 있다. 최근, NOx 생성특성을 규명하기 위한 수치해석 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 이들 연구의 대부분은 유동장이 단순한 1 차원 혹은 대향류 화염을 대상으로 하고 있으며, 실용 연소장과 유사한 분류 화염에 대한 연구는 부족한 형편이다. Gore 등⁽¹⁾은 CH₄ 부분 예혼합 및 확산 분류 화염에서 NOx 가 가장 적게 나오는 당량비 2 근방의 최적 혼합비가 있음을 실험적으로 밝혔으나, 그 원인에 대해서는 구체적으로 논의하지는 않았다. Smook 등⁽²⁾은 실험 및 수치해석 연구를 통해 Prompt NO 에 의한 NOx 발생이 지배적임을 밝히고 있으나, 이 결과는 질소로 희석된 CH₄ 확산화염에서 얻어진 것이다. 또한 Nishioka 등⁽³⁾은 대향류 및 분류화염에서 당량비에 따른 Thermal NO 기구와 Prompt NO 기구의 역할을 규명하였다. 그리고, Zhu 등⁽⁴⁾은 혼합기 유속을 일정하게 유지한 CH₄ 화염에서, Gore 등의 실험결과와는 다르게 EINOx 는 당량비 증가와 더불어 단순 증가하며, 또 모든 당량비에서 Prompt NO 가 Thermal NO 보다 지배적임을 보고 한 바 있다. 이 밖에 최영호 등⁽⁵⁾은 당량비 변화에 따른 NOx 생성 특성에 관한 연구에서, EINOx 경향은 Gore 등의 실험과 유사한 결과를 얻었으나, 지배적인 NO 반응기구는 당량비에 따라 다름을 확인하였다. 그러나 이들 연구의 결과는 특정 조건에 대한 것이기 때문에, EINOx 에 대한 일반적인 결론을 도출하기 위해서는 여러 가지 인자에 대한 폭 넓은 연구가 필요하다

고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 실용 연소기의 화염 형태와 유사한 CH₄ 층류 분류 화염을 대상으로 당량비, 연료 유량 및 노즐 직경에 따른 EINOx 의 경향을 실험을 통하여 조사하고, 또 수치 계산을 이용하여 그 원인을 분석하여 연소방식 및 연소조건에 따른 EINOx 경향에 대해 일반적인 결론을 도출해보고자 한다.

2. 실험 방법

실험과 계산은 Fig. 1 과 같은 주위류 노즐 직경이 50mm 인 동축 분류 연소기를 대상으로 하였고, 주위류를 46 L/min 으로 고정하고 연료 노즐 직경(6, 8, 10, 13.7mm), 연료 유량(0.3, 0.4287, 0.6, 0.8, 1.0L/min) 및 당량비(0.8 ~ diffusion) 를 변화시키며 수행하였다. 연소 가스 중의 NOx 성분의 분석은 화학발광법을 이용한 질소산화물분석기(300-CLD)를 이용하였고, 화염으로부터 충분한 거리를 두고 반경방향의 NO 농도의 변화가 ± 2%인 지점에서 흡입 직경이 0.1mm 인 석영 프루브를 사용하여 측정하였다. 배출지수의 계산은 식(1)을 이용하였고, NOx 배출지수의 경우에는 연소장에

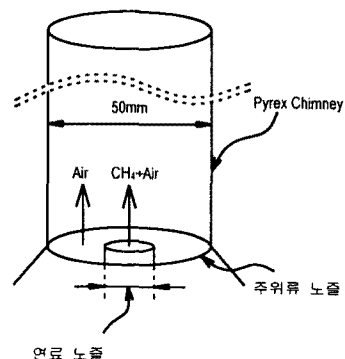


Fig.1 Schematic diagram of co-flow burner

서 생성된 NO는 화염 후류에서 다량의 NO₂로 변환되고 결국엔 모두 NO₂로 변환되므로 식(2)를 이용하였다.⁽¹⁰⁾

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

$$EINO_x = EINO \frac{MW_i}{MW_F} + EINO_2 \text{ (g/kg)} \quad (2)$$

3. 수치 계산 방법

본 연구 대상의 분류 화염은 경계층 근사가 가능하며, 지배 방정식은 2차원 포물선형 편미분 방정식으로 근사화 할 수 있다. 따라서 각종 보존량에 대한 지배 방정식은 Von Mises의 좌표변환을 이용하여 무차원 유동 함수로 변환하여 사용하였다. 그리고, 수치 계산 프로그램은 CLESRAF Code⁽⁶⁾를 수정하여 사용하였으며, 열역학적 물성치 및 화학종의 생성율은 CHEMKIN-II Package⁽⁷⁾로, 전달물성치는 TRANFIT Package⁽⁸⁾를 이용하여 계산하였다. 반응의 계산을 위해 C1, C2 반응 및 Thermal NO와 Prompt NO의 반응을 구체적으로 묘사하고 있는 GRI-2.11 반응기구⁽⁹⁾를 이용하였고, NO_x 생성에 미치는 Thermal NO 및 Prompt NO 기구의 역할을 분리, 검토하기 위해 Nishioka가 제안한 반응기구 분리 방법을 이용하여 동일 연소

Table.1 Boundary conditions a nozzle outlet

연료 노즐 (CH ₄ + 공기)		
노즐 직경	CH ₄ 유량	당량비
8 mm	0.4287 L/min	0.8
10 mm	0.4287 L/min	
12 mm	0.4287 L/min	
8 mm	0.3 L/min	Diffusion
8 mm	0.6 L/min	

조건에서 계산을 두 번 수행하였다. 분리 방법은 원래의 GRI 반응기구로 계산한 NO를 Full NO로 정의하고, GRI 반응기구에서 Thermal NO 기구만을 고려한 NO를 Thermal NO라 하였고, Full NO에서 Thermal NO를 뺀 값을 Prompt NO로 정의하였다.

계산 대상 화염의 조건은 실험조건의 일부이고, 구체 적인 사항은 Table. 1에 나타내었다. 화염의 형성을 위해 착화점으로 연료 노즐팁에 가우스 분포를 가지는 2100K 정도의 착화 온도를 주었고, 착화폭 및 착화 온도는 그 영향이 최소가 되도록, NO_x 반응계산은 노즐출구에서 1mm 떨어진 곳에서부터 시작하기로 결정하였다. 이에 대한 계산 방법 및 계산 결과의 타당성은 뒷부분의 수치 계산 결과에서 검토하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 실험 결과

Fig. 2는 연료 노즐 8mm에서 CH₄ 유량을 0.3, 0.4287, 0.6, 0.8, 1.0L/min으로 변화시킨 화염에서의 당량비 변화에 따른 EINO_x를 도시한 것이다. 당량비 변화에 따라 EINO_x는 당량비 1.5인 부분 예혼합황염에서 한번의 최고치를 가지며, 당량비 1.5를 기준으로 희박해지는 방향의 경우는 급격히 감소하고, 과농해지는 방향의 경우는 당량비 2부근까지 급격히 감소한 후 완만히 증가한다. 연료유량 변화에 따른 EINO_x는 상당히 민감하며 전 당량비 범위에서 유량이 증가함에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 연료 유량 0.4287L/min에서 연료 노즐 직경을 6, 8, 10, 13.7mm로 변화시킨 화염에서의 당량비 변화에 따

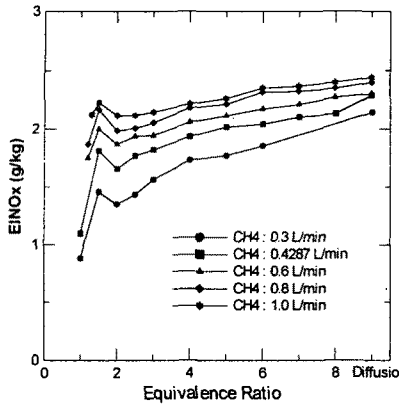


Fig. 2 Emission indices for NO_x with the variation of the flow rate of CH₄

른 EINO_x 를 도시한 것이다. 당량비 변화에 따른 EINO_x 는 Fig. 2 의 경우와 같은 경향을 보여주고, 연료 노즐 직경 변화에 따른 EINO_x 의 경향은 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 이 같은 현상은 CH₄ 유량이 증가한 조건에서도 매우 유사한 경향을 보인다.

앞의 Fig. 2~3 과 같은 연료 유량, 연료 노즐 직경 및 당량비 변화에 따른 EINO_x 경향의 원인을 자세히 분석하기에는 실험결과를 통해서만 한계가 있으므로, 뒷부분의 수치 계산 결과를 이용하여 보다 자세히 분석하고자 한다.

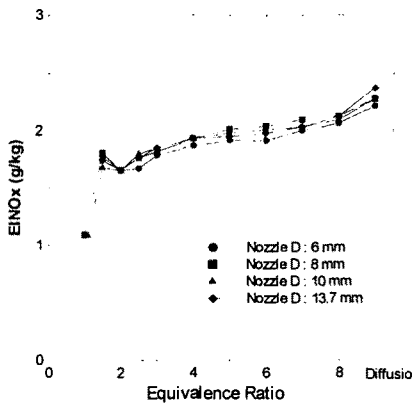


Fig. 3 Emission indices for NO_x with the variation of the diameter of inner fuel nozzle

4.2 수치 계산 결과

4.2.1 수치 계산의 타당성 검토

Fig. 4 는 본 연구의 계산 방법 및 계산 결과의 타당성을 검토하기 위한 것으로 그림에서 Smooke 의 계산 결과는 복사 효과를 고려한 타원형 방정식을 이용하는 계산법에 의해 얻어진 것이며, 본 계산 결과는 포물선형 방정식을 이용하는 계산법에 의해 얻어진 것이다. 본 계산에서는 착화 에너지에 의한 NO_x 생성을 제거하기 위해 NO_x 반응계산은 착화점보다 약간 하류지역에서 시작하였는데, 이 계산 시작점(Initiation point of NO_x calculation, IP NO_x)의 위치에 따라 NO_x 농도의 절대치에는 다소 영향을 미치나 그 경향에는 별 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 본 계산에서는 인위적으로 정한 시작점의 영향을 최소화 하면서 착화 에너지에 의한 비정상적인 NO_x 생성을 제거하기 위해 NO_x 반응계산을 노즐 출구에서 1mm 떨어진 곳에서부터 시작하기로 하였다.

Fig. 4 에서 일점 쇄선은 NO_x 계산 시작점을 1mm 로 하고, Smooke 와 동일한 조건에서 Ju⁽¹¹⁾가 제안한 복사 모델을

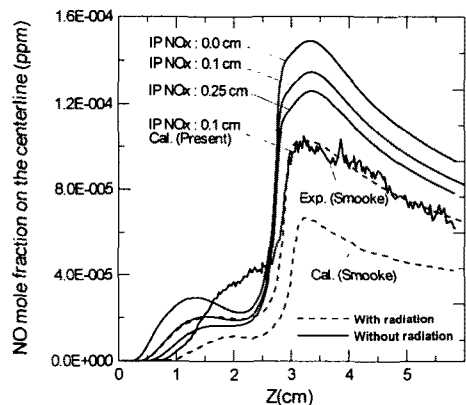


Fig. 4 Comparison of calculation results with experimental data of Smooke et al

이용한 계산 결과이며, 실험치와도 잘

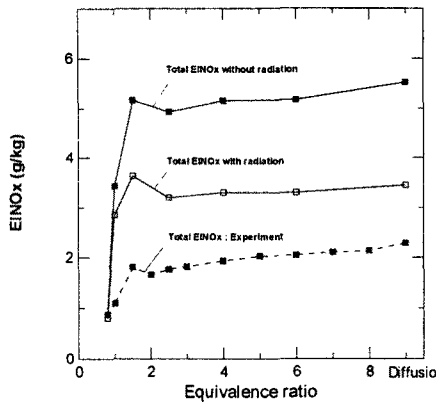


Fig. 5 Comparison of calculation results with experimental data of this investigation

일치함을 알 수 있다. 이 결과로부터 포물선형 방정식을 이용하는 본 계산법에 의해서도 분류 화염의 NOx 생성을 합리적으로 예측할 수 있음을 알 수 있다. 단, 복사모델을 적용한 계산결과는 본 경우와 같이 특정한 경우에는 잘 맞으나, Fig. 5 에 제시한 바와 같이 당량비, 연료 유량(CH₄:0.4287L/min) 등을 변화시킨 여러 경우의 실험결과를 합리적으로 예측하지는 못하였다. Smooke 는 연료에 N₂ 를 희석함으로써 화염온도가 낮아졌고, 이것에 의한 복사 효과의 변화가 차이점의 주요 원인으로 사료되며, 이 문제점에 대해서는 계속 연구중이다.

Fig. 5 에서 알 수 있듯이, 본 계산결과는 복사효과를 고려하지 않아도 정량적인 면에서 다소 차이가 있으나, 정성적인 측면에서는 NOx 생성특성을 합리적으로 예측한다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 NOx 계산 시작점을 1 mm 로 하고, 복사를 고려하지 않은 계산결과를 이용하여 NOx 생성특성을 논의 하고자 한다.

4.2.2 수치 계산 결과 및 검토

Fig. 6 은 Fig. 2 의 조건 중 CH₄ 유량

이 0.3, 0.4287, 0.6 L/min 으로 변화시킨 경우의 당량비에 따른 계산 결과이고, Fig. 7 은 Fig. 3 의 조건 중 연료 노출직경 13.7mm 대신 12mm 로 계산한 경우이다. Total EINOx 는 실험 결과의 EINOx 와 동일한 것이며, Thermal EINOx 는 Thermal NO 반응기구에 의한 NO 를 EINOx 로 환산한 것이고, Prompt EINOx 는 Total EINOx 에서 Thermal EINOx 를 뺀 것으로, 엄밀하게는 N₂O 경우 NO 를 포함한 prompt NO 에 EINO₂ 를 포함하는 것이나, N₂O 경우 NO 는 무시가능하며, EINO₂ 는 그림에 도시한 바와 같이 미소하기 때문에 대부분 Prompt NO 라 할 수 있다.

Fig. 2, 3 과 Fig.6, 7 을 비교해보면, 수치계산 결과는 정량적인 측면에서 실험치보다, 약 2~3 배 높게 예측하고 있으나, EINOx 경향은 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서, 본 수치계산결과를 이용하여 실험결과에서 분석할 수 없는 여러 가지 NOx 생성특성을 면밀히 분석해 보는 것은 충분한 의미가 있다고 할 수 있다. Fig. 6, 7 을 보면, Prompt EINOx 는 당량비 증가와 더불어 증가하며 특히 당량비 1.5 까지는 비교

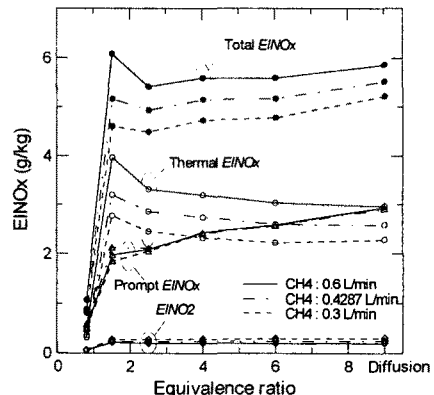


Fig. 6 Emission indices for NOx with the variation of the flow rate of CH₄

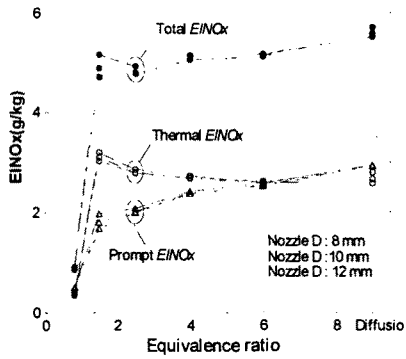


Fig. 7 Emission indices for NOx with the variation of the diameter of inner fuel nozzle

적 급격히 상승함을 알 수 있다. 이 당량비 변화에 따른 Prompt EINOx 는 연료 유량과 연료 노즐직경 변화에 관계 없이 일정한 것을 볼 수 있다. Thermal EINOx 는 당량비 1.5 까지는 급격히 상승하여 최고치에 도달하나 그 이상에서는 Prompt EINOx 와는 다르게 서서히 감소하는 경향을 보이고 연료 노즐 변화에는 변화가 거의 없으나, 연료유량이 증가함에 비례하여 Thermal EINOx 가 증가함을 알 수 있다. 또한, 예혼합화염

에 접근 할수록 Termal NO 가 지배적이며, 확산화염으로 접근할수록 Prompt NO 가 지배적이 되는 것을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 현상은 유량조건이 바뀌면 그 경향 또한 바뀌므로 항상 유효한 것은 아니다. 따라서 당량비 및 연료 유량 변화에 따른 NOx 의 생성특성을 분석하기 위해서는 보다 자세한 Prompt 및 Thermal NO 생성특성의 분석이 필요하다.

Fig. 8~11 의 결과들은 당량비 변화에 따른 NOx 생성특성을 면밀히 검토하기 위해 연료 유량을 0.4287L/min 으로 일정하게 고정하고 연료 노즐의 공기 유량을 변화시켜 당량비를 제어한 경우이다. 당량비 0.8 의 경우 전 화염장에서 NO 농도는 타 화염에 비해 매우 낮으며, 비교적 고농도 영역은 온도분포와 유사하게 반응대 주변 및 화염 후류에 존재한다. 부분 예혼합화염의 경우 고농도 영역(level 4 이상)은 부분 예혼합 화염의 확산 연소 영역과 대략 일치하며, 비교적 고농도 영역(level 3)은 예혼합 반응대 및 확산 연소 영역의 주변

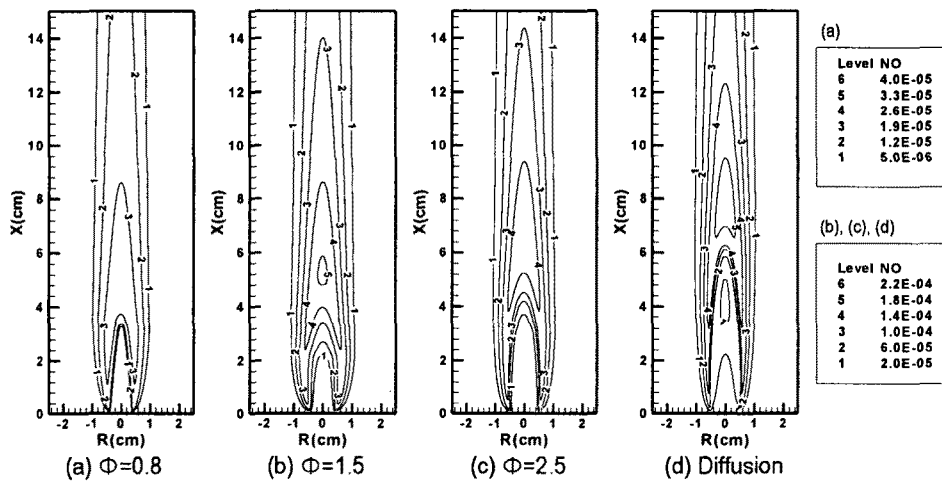


Fig. 8 Computed NO isopleths with the equivalence ratio

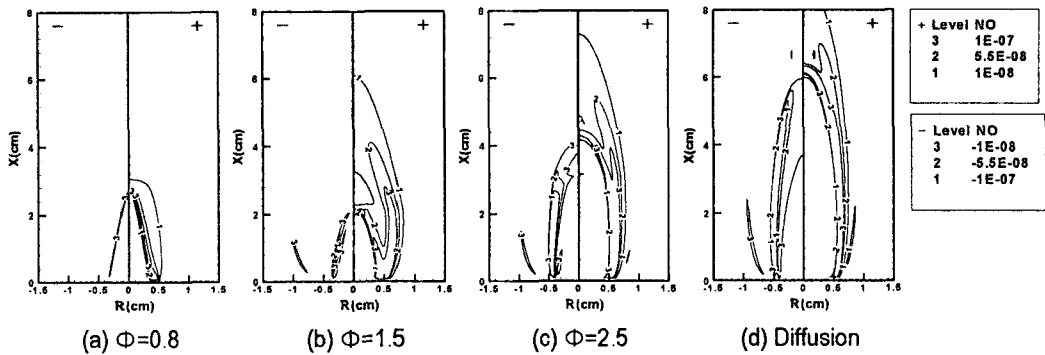


Fig. 9 Computed NO production rate isopleths with the equivalence ratio

에 위치함을 알 수 있다. 그리고 당량비가 증가하면 확산 연소 영역의 매우 고농도 영역(level 5)은 사라진다. 확산화염의 경우, 매우 고농도 영역(level 5)은 최고 온도 영역보다 다소 하류에 형성되며, 비교적 고농도 지역이 반응대 주변에 위치함을 알 수 있다. 그리고, 현재 도시하지는 않았지만 Fig. 8 과 당량비 변화에 따른 화염온도의 분포와 함께 칼라 그림을 화상처리 한 결과를 비교해 보면, 이들 두 화상은 대략적으로 일치함을 알 수 있다.

Fig. 9 의 NO 의 생성율은 희박 예혼합화염의 경우 생성율의 크기는 타 화염들에 비해 매우 작다. 그리고 부분예혼합 및 확산화염의 경우 NO 생성영역은 당량비 증가에 비례하여 매우 넓어지며, 이 생성 영역을 온도 분포와 비교하면 1800K 이상인 영역과 대체적으로 일치하고, 생성율이 매우 높은 영역은 고농도 영역보다 상류 지역에 존재하고 있다. NO 소멸 영역은 화염 온도가 점점 증가하는 반응대 내부 영역과 대체로 일치하고 당량비가 증가할수록 소멸 영역도 넓어지면서 소멸율도 커진다.

Fig. 10 은 Fig. 8 의 당량비 2.5 인 화염의 $x=2\text{cm}$ (Fig. 10(a)), $x=6\text{cm}$ (Fig.

10(b)) 단면의 NO 생성율과 관련성이 높은 온도, OH 및 CH 농도를 도시한 것이다. Fig. 10(a)에서 Thermal NO 생성율은 화염대의 온도 최고치보다 다소 외측에 분포하며 이 Thermal NO 발생영역은 가스온도가 1800K 이상이면서 동시에 OH 가 존재하는 영역과 대체로 일치한다. 즉, 화염대 내부에서는 가스온도가 1800K 이상이 되어도 OH 가 존재하지 않기 때문에 Thermal NO 도 발생하지 않음을 알 수 있다. 그리고 Prompt NO 생성율은 온도 peak 보다 다소 내측에 음의 값(소멸 영역)과 양의 값(생성 영역)이 동시에 존재하며, 이들 생성과 소멸 영역은 연료의 산화과정의 최종 단계에서 발생하는 CH 농도의 최고치를 기준으로 내부는 소멸영역, 외부는 생성영역으로 구별할 수 있다. Fig. 10(b)에서는 Thermal NO 생성율이 매우 높아 NO 는 주로 Thermal NO 에 의해 생성됨을 알 수 있으며, 이 NO 생성 영역도 앞에서 언급한 바와 같이 온도가 1800K 이상이면서 OH 가 존재하는 영역과 일치한다. 그리고 Prompt NO 생성율은 매우 미소하며 이 Prompt NO 생성영역을 나타내는 CH 농도도 미소함을 알 수 있다. 위 결과로부터 화염에서 Thermal NO 생성영역만을 독립적으로

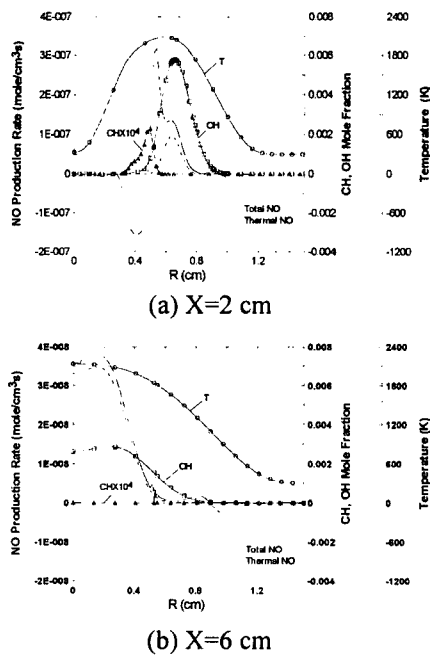


Fig. 10 Radial profile of flame ($\phi=2.5$)

나타내는 데에는 일정 농도(약 0.001 이상)의 OH 농도분포를 이용하는 것이 적합하며, Prompt NO 발생지역은 CH 농도 분포를 이용하여, 그 내측은 Prompt NO 반응기구에 의한 NO 소멸 지역, 그 외측은 NO 생성지역으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 11 은 앞에서 언급한 바와 같이

Thermal NO의 발생영역을 나타내는 OH 농도(그림의 왼쪽)와 Prompt NO 생성 영역을 볼 수 있는 CH 농도(그림의 오른쪽)의 등치선을 도시한 것이다. Fig. 11에서 CH 농도가 분포하는 지역은 매우 폭이 좁으며 특히, Prompt NO는 이 CH 분포지역의 외측에서만 발생하기 때문에 Prompt NO 발생량은 화염 면적에 비례한다고 할 수 있다. 단, 당량비 0.8의 CH 분포지역이 당량비 1.5의 경우보다 넓게 보이나, 이 경우 CH 농도 및 온도도 낮아 Prompt NO 발생량은 매우 낮다. 이 결과로부터 Fig. 6의 동일 연료 유량인 경우의 당량비에 따른 Prompt EINO_x 경향은 당량비에 따른 화염면적의 변화로 잘 설명할 수 있다. 그리고 OH 농도가 0.001 이상인 영역은 화염 후류에 넓게 분포하고 있으며, 이 영역에서 Thermal NO가 발생 할 수 있고 이 영역은 당량비 1.5까지는 급격히 증가하나, 당량비 1.5 이상에서는 당량비가 증가함에 따라 대등하거나 오히려 감소한다고 할 수 있다. 또 Thermal NO 발생량은 이 영역의 온도에 비례적인 관계가 있는데 당량비 1 이하에서는 비교적 낮은 온도이며 당량비 1.5인

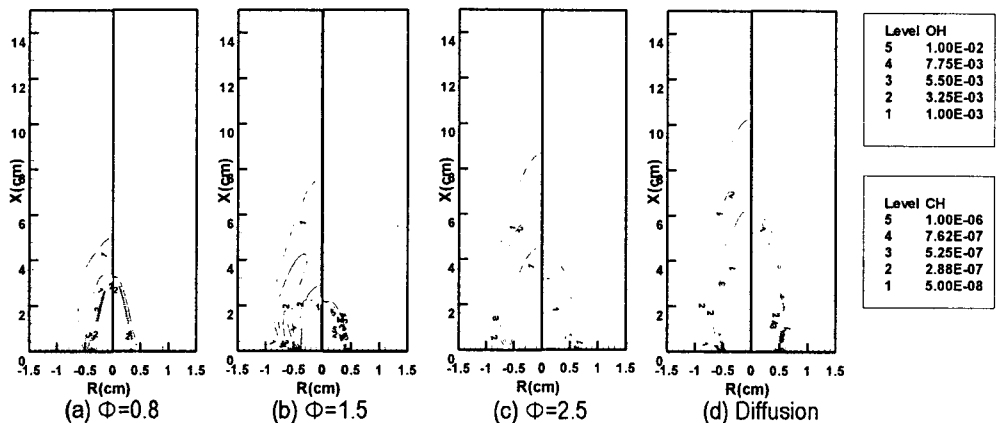
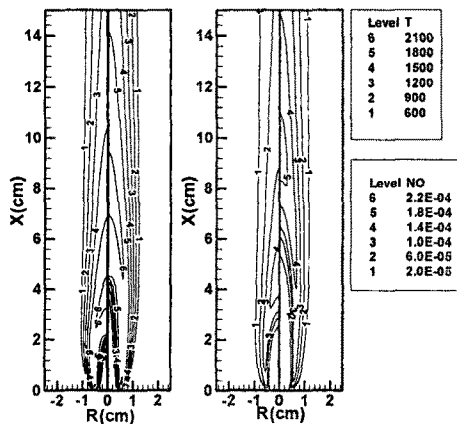


Fig. 11 Computed OH and CH concentrations with equivalence ratio

경우 매우 고온이나 당량비가 더 증가하면 고온영역은 작아지면서 하류의 중심 영역으로 이동한다. 이 결과로부터 Fig. 6 에 도시한 Thermal EINOx 경향, 즉 당량비 1.5 까지는 급격히 상승하여 피크에 도달하나 그 이상에서는 서서히 감소하는 이유를 잘 설명할 수 있다.

Fig. 11, 12 은 연료유량의 변한 경우의 각종 EINOx 의 경향을 살펴보기 위한 것으로 Fig. 11 에는 화염온도 및 NO 분율을 Fig. 12 에는 CH 및 OH 분율을 도시한 것이다. 각 그림의 왼쪽에는 연료유량의 0.3L/min, 오른쪽에는 두배인 0.6L/min 인 경우로, 연소조건은 모두 당량비 2.5 인 화염이다. 온도 분포(Fig. 11(a))를 비교해 보면, 온도가 급격히 증가하는 내부 화염대의 길이 및 고온 영역(level 5 이상 지역)은 연료 유량의 증가에 비례하여 2 배정도 커지고 있음을 알 수 있다. NO 농도 분포를 보면, 우선 내부 화염대에서의 NO 농도는 level 2, 3 정도로 유사하며 그 분포 지역은 연료 유량에 비례하여 2 배 정도 커진다. 그 이유로는 Fig. 12(a) 도시한 CH 농도의



(a) Temperature (b) NO mole fraction
Fig. 11 Comparison with the variation of the Fuel flow rate

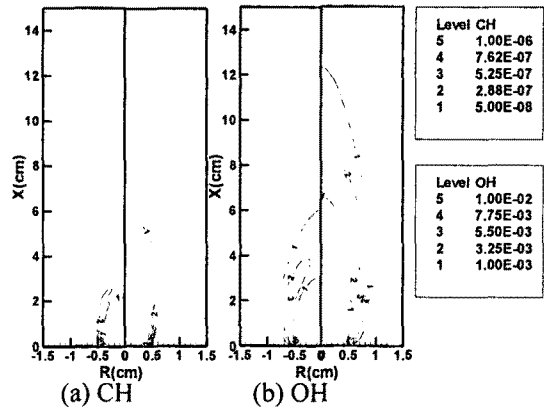


Fig. 12 Comparison with the variation of the Fuel flow rate

외측 면적 즉, Prompt NO 생성지역의 분포로부터 명확히 알 수 있는데, 이 두 화염에서의 단위 면적당 Prompt NO 생성율은 동일하다고 할 수 있으나 그 면적은 연료유량에 비례하여 증가하기 때문이다. 따라서, 연료 유량 증가에 대한 Prompt EINOx 의 증가량은 일정한 것을 알 수 있다. Fig. 11(b)를 보면 내부 화염대 후방의 NO 농도 분포가 많이 달라짐을 알 수 있다. 즉, 연료 유량이 0.3L/min 인 경우 최고농도 영역은 level 4 이며 좁은 지역에 분포하고 있으나, 유량이 0.6 L/min 인 경우 level 4 인 영역이 매우 확장되며 이보다 높은 level 5 인 영역도 나타남을 알 수 있다. 그 이유는 Fig. 12(b) Thermal NO의 생성지역과 관련된 OH 농도 분포가 증가하고, 이 영역을 통과 하는 체류시간의 증가가 연료 유량 증가에 따른 Thermal EINOx 증가의 원인으로 판단된다.

5. 결론

1. 실험과 수치 계산 결과는 EINOx 의 정량적인 크기에서는 차이를 보이나, 당량비 및 연료 유량 변화에 따른 EINOx 의 경향은 일치하는 것을 알았다.

2. Prompt EINOx 는 당량비 증가에 따라 화염 면적에 비례하여 증가하고, 동일 당량비에서 연료 유량이 증가한 경우, 연료 유량 증가에 대한 Prompt EINOx 의 증가량은 일정한 것을 알았다.

3. Thermal EINOx 는 당량비 증가에 따라 온도와 OH 분포가 증가하면서 당량비 1.5 에서 최대값을 가지고 이후 온도감소로 인해 점차 감소한다. 또한 연료 유량이 증가하면 OH 영역을 통과하는 체류시간의 증가하면서 전 당량비 영역에서 증가하는 것을 알았다.

4. Total EINOx 는 당량비가 증가하면서 당량비 1.5 근처에서 Thermal EINOx 에 의해 최고치를 가지고 이후 당량비 2.5 까지 급격히 감소한 후 Prompt EINOx 와 같이 완만히 증가한다.

5. Total EINOx 는 예혼합화염에 접근할수록 Thermal EINOx 가 지배적이고, 확산화염에 접근할수록 Prompt EINOx 가 지배적이지만, 연료 유량 등의 조건 변화에 따라 발생 경향 및 지배적 생성 기구는 변할 수 있다.

6. 참고 문헌

- (1) J. P. Gore, N. J. Zhan, "NOx Emission and Major Species Concentrations in Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-flow Jet Flames", *Combustion and Flame*, Vol.105, pp.414-427, 1996
- (2) M. D. Smook, A. Ern, M. A. Tanoff, B. A. Valdati, R. K. Mohammed, D. F. Marran, M. B. Long, "Computational and Experimental Study of NO in An Axisymmetric Laminar Diffusion Flame", *Twenty-sixth Symposium (Int.) on Combustion/The Combustion Institute*, pp. 2161-2170, 1996
- (3) M. Nishioka, S. Nakagawa, Y. Ishikawa and T. Takeno, "NO Emission Characteristics of Methane-Air Double Flame", *Combustion and Flame*, Vol. 98, pp. 127-138, 1994
- (4) Xue Lei Zhu, Makihito Nishioka and Tadao Takeno, "NO Emission Characteristics of Methane-Air Coflow Partially Premixed Flame", *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*, pp.1369-1376, 1998
- (5) Chang Eon LEE, Chang Bo OH, Young Ho CHOI and Ok Yong YANG, "NOx Formation Characteristics of Methane Jet Flaems", *Proceedings of the International Gas Turbine Congress 1999 Kobe*, pp.815-820, 1999
- (6) 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 SAND93-0478*, 1993
- (7) R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, "Chemkin-II : A Fortran Chemical Kinetics", *Sandia Report SAND89-8009B*, 1989
- (8) 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 SAND86-8246*, 1986
- (9) GRIMECH 2.11, available from www.gri.org
- (10) Strphen R. Turns, "Introduction to Combustion", *McGraw-Hill*, 1996
- (11) Yiguang Ju, Hongsheng Guo, Kaoru Maruta, Fengshan Liu, "On the Extinction Limit and Flammability Limit of Non-adiabatic Stretched Methane-Air Premixed Flames", *J. fluid Mech*, Vol. 342, pp. 315-334, 1997