

메탄 분류 화염에서의 연소 조건에 따른 NO_x 배출 특성

이상한* · 오창보* · 이창언**

NO_x Emission Characteristics in Parametrically Varied Methane-Air Coflow Flames

Sang Han LEE, Chang Bo OH, Chang Eon LEE

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

Abstract

It was numerically studied that NO_x emission characteristics of confined CH₄ jet flames with the variation of the diameter of inner fuel nozzle, the flow rate of CH₄ and equivalence ratio. Parabolic type equations were adopted in the calculation and GRI-2.11 mechanism was used for the chemical reaction. NO_x emission index (EINO_x) was introduced to evaluate NO_x emission quantitatively in parametrically varied flames and the contribution of Thermal and Prompt NO mechanism was discussed. The results showed that Total EINO_x varied sensitively with the variation of the flow rate of CH₄ but it was not sensitive to the variation of the diameter of inner fuel nozzle. Thermal EINO_x showed the similar tendency to total EINO_x and Prompt EINO_x showed insensitivity to the variation of the diameter of inner fuel nozzle and the flow rate of CH₄.

1. 서론

천연 가스는 메탄이 주성분으로서 타 연료에 비해 열효율이 높으며 그 양이 풍부하고 비교적 공해 물질 배출량이 적은 청정 연료라는 점에서 석유 연료

의 대체 에너지로서 사용량이 점차 늘어나고 있다. 공해 물질 배출량의 측면에서 메탄 등의 가스 연료는 고체 및 액체 연료에 비하여 일산화탄소, 분진, 유황산화물 등의 발생량은 미소한 편이나 질소산화물(NO_x)의 발생량은 타 연료와 비슷한 수준이다. NO_x는 인체에 유해할 뿐만 아니라 광화학 스모그, 산성비를 유발하는 등 환경에 악영향을 미치는 물질이므로, 가스 연료를 에너

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과

지 자원으로 사용하기 위해서는 연소시 발생하는 NOx 의 저감이 필수적이다.

따라서 최근 메탄 화염의 NOx 생성 특성에 관한 연구들이 많이 진행되고 있다. 이중에서 분류 화염에 대한 연구의 예로서, Smooke 등⁽¹⁾은 타원형 방정식을 이용한 계산과 실험을 수행하여 확산 화염에는 Prompt NO 기구에 의한 NOx 발생이 지배적이라고 지적하였고, Gore 등⁽²⁾은 연소 조건을 부분 예혼합, 확산 화염으로 변화시키면서 NOx 를 측정하여 NOx 가 적게 나오는 특정 당량비가 있다는 것을 알아내었다. Zhu 등⁽³⁾은 부분 예혼합 및 확산 화염을 대상으로 한 연구에서 화염 끝단 하류에서의 고온 가스 영역에서는 NO가 발생하지 않으며 분류 화염에서는 대향류 화염에 비해 Fenimore 반응에 의한 Prompt NO의 생성이 훨씬 많다는 것을 지적하였다. 이 밖에도 최영호 등⁽⁴⁾은 포물선형 방정식을 이용한 수치 해석적인 연구를 통해 당량비 변화에 따른 NOx 생성 특성을 규명, 당량비 1.5 근처에서 NOx 발생량이 가장 많다고 보고한 바 있다.

그러나 이들 연구들은 그 대상 화염이 일부 특정 조건에 대한 것이며 NOx 배출 경향도 서로 불일치하고 있어, 이 연구 결과들이 메탄 화염의 일반적인 NOx 배출 경향을 나타낸다고 말하기는 힘들다. 따라서 좀 더 일반적인 경향을 얻기 위해서는 여러 가지 연소 조건 변화에 따른 NOx 배출 특성을 검토해 볼 필요가 있다.

본 연구에서는 계산 시간이 짧아 여러 가지 연소 조건 변화에 따른 계산에 적합한 포물선형 방정식을 이용하여 당량비, 노즐 직경 및 연료 유량 등의 연소 조건을 변화시켜 다양한 연소 조건 하에서의 NOx 배출 특성에 관해 검토

하고자 한다.

2. 수치 계산 방법

2.1 지배 방정식

축대칭 분류 화염은 경계층 근사 및 Von Mises 의 좌표 변환을 이용하여 x, r 좌표로 이루어진 원통 좌표계를 x, φ 좌표계로 변환한 후에 총 질량 유량을 이용하여 φ 좌표를 무차원 유동 함수 ξ로 변환하면 지배방정식은 (1)-(4) 식으로 나타내어진다⁽⁵⁾.

운동량 보존식

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\rho u}{M} \left(\xi \frac{dM}{dx} - \frac{dM_1}{dx} \right) \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{dp}{dx} \\ = \frac{\rho u}{M^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\rho u \lambda r^2 \frac{\partial u}{\partial \xi} \right) + g(\rho_i - \rho) \end{aligned} \quad (1)$$

화학종 보존식

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial Y_k}{\partial x} - \frac{\rho u}{M} \left(\xi \frac{dM}{dx} - \frac{dM_1}{dx} \right) \frac{\partial Y_k}{\partial \xi} \\ = \dot{\omega}_k W_k - \frac{\rho u}{M} \frac{\partial}{\partial \xi} (r \rho Y_k V_k) \end{aligned} \quad (2)$$

$(k=1, \dots, K_g)$

에너지 보존식

$$\begin{aligned} \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\rho u c_p}{M} \left(\xi \frac{dM}{dx} - \frac{dM_1}{dx} \right) \frac{\partial T}{\partial \xi} \\ = \frac{\rho u}{M^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\rho u \lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) - \sum_{k=1}^{K_g} \dot{\omega}_k W_k h_k \\ - \frac{\rho^2 u r}{M} \sum_{k=1}^{K_g} Y_k V_k c_{p_k} \frac{\partial T}{\partial \xi} \end{aligned} \quad (3)$$

상태방정식

$$p = \frac{\rho R T}{W} \quad (4)$$

여기서 x 는 축방향 좌표이고, ξ 는 무차원 유동 함수이다. 또한 r 은 반경 방향 거리, u 는 축방향 속도, Y_k 는 화학종 k 의 질량 분율, T 는 온도, c_p 는 비열, p 는 압력, μ 는 점성 계수, λ 는 열전도도, \bar{W} 는 평균 분자량이며, 반경 방향 확산 속도 V_k 는 식 (5)로 계산한다.

$$V_k = \frac{\rho u r}{X_k \bar{W} M} \sum_{j=k}^{K_s} W_j D_{kj} \frac{\partial X_j}{\partial \xi} - \frac{D_k^T}{\rho Y_k T M} \frac{\partial T}{\partial \xi} \quad (5)$$

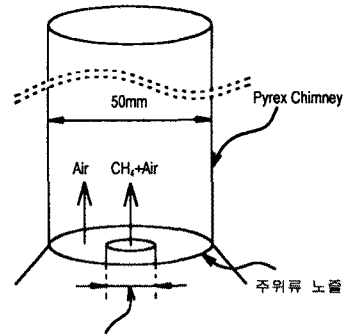
위식에서 X_k 는 화학종 k 의 몰 분율, W_j 는 분자량, D_{kj} 는 다성분 확산 계수, D_k^T 는 열 확산 계수이다.

본 연구에서는 CLESALF Code⁽⁵⁾를 수정하여 계산을 수행하였으며, 열역학적 물성치 및 화학종의 생성열은 CHEMKN-II Package⁽⁶⁾로, 전달 물성치는 TRANFIT Package⁽⁷⁾를 이용하여 계산하였다.

2.2 계산 조건 및 방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 메탄-공기 층류 분류 화염을 대상으로 하였다.

여러 가지 연소 조건 변화에 따른 NOx 배출 특성을 검토하기 위해 Table 1에 표시한 것과 같이 노즐 직경, 연료 유량 및 당량비를 변화시키고 주유류는 모든 조건에 대해 동일하게 하여 계산을 수행하였다. 또한 각각의 노즐 출구 단면에서의 유속 분포는 균일하다고 하



연료 노즐 직경 : 8mm, 10mm, 12mm

Fig. 1 The schematic diagram of the confined axisymmetric jet flame combustor

였다.

화염이 형성되도록 하기 위해서는 노즐 출구 부근에서 착화를 시켜주어야 하는데, 그 착화점으로 노즐 림에 최고 온도 2100 K의 가우스 온도 분포를 주었다. 착화폭 및 착화 온도의 결정은 계산 영역 내에 착화폭 및 착화 온도의 변화에 따른 영향이 최소가 되도록 시행 착오를 거쳐 경험적으로 결정하였다.

이전의 계산 방식⁽⁴⁾에서는 초기 착화 에너지에 대한 영향으로 노즐 림 근처에서 기존 연구 결과와는 다른 비정상적인 NOx의 생성이 있었다. 따라서 본 연구에서는 초기 착화 에너지로 인한 비정상적인 NOx의 생성을 최소화하기 위하여 초기 단면에서 일정 거리까지는 NOx의 생성에 관련된 반응들을 고려하지 않고 계산을 수행한 뒤, 그 이후 거리에서부터 원래의 모든 반응들을 포함하여 계산을 수행하였다. 이하에서는

Table. 1 Boundary conditions at nozzle outlet

계산 대상	연료 노즐 (CH ₄ + 공기)			주유류 노즐(공기)	
	노즐 직경	CH ₄ 유량	당량비	노즐 직경	공기 유량
계산조건 A	8 mm	0.4287 L/min	0.8, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0, 6.0, Diffusion	50 mm	46 L/min
계산조건 B	10 mm	0.4287 L/min	0.8, 1.5, 2.5, 4.0, 6.0, Diffusion	50 mm	46 L/min
계산조건 C	12 mm	0.4287 L/min	0.8, 1.5, 2.5, 4.0, 6.0, Diffusion	50 mm	46 L/min
계산조건 D	8 mm	0.6 L/min	0.8, 1.5, 2.5, 4.0, 6.0, Diffusion	50 mm	46 L/min

이와 같이 NO_x와 관련된 반응들이 고려되지 않은 초기의 거리를 NO_x 반응 지연 거리라고 하겠다.

반응의 계산에는 49개 화학종과 279개의 가역 반응으로 구성되어 있는 GRI-2.11 반응기구⁽⁸⁾를 이용하였는데, 이 반응기구는 C1, C2 반응 및 Thermal NO_x와 Prompt NO_x의 반응을 구체적으로 묘사하고 있다.

NO_x 생성에 미치는 Thermal NO 및 Prompt NO 기구의 역할을 분리하여 검토하기 위해 Nishioka⁽⁹⁾가 제안한 반응기구 분리 방법을 이용하여 동일 연소 조건에서 두 번 계산을 수행하였다. 분리방법으로 우선 원래의 GRI 반응기구로 계산한 NO를 Full NO로 정의하였으며, GRI 반응 기구에서 Thermal NO 기구를 제외한 NO 관련 반응을 뺀 반응 기구로 계산한 NO를 Thermal NO라 하였다. 그리고 이 Full NO에서 Thermal NO를 뺀 값을 Prompt NO로 정의하여 NO 생성에 미치는 Prompt NO 기구와 Thermal NO 기구의 역할을 검토하였다.

3. 계산 결과 및 검토

3.1 NO_x 반응 지연 거리의 결정 및 계산 결과의 타당성 검토

Fig. 2와 Fig 3에는 NO_x 반응 지연 거리를 도입한 수정 계산 결과의 타당성을 검토하기 위해 기존 계산 결과 및 실험치를 비교 도시하였다.

먼저, Fig 2에는 축방향으로 진행하면서 반경 방향 단면의 최고 NO 농도를 나타내었다. 점선은 이전 방식의 계산 결과를, 실선은 수정 방식의 계산 결과를 나타낸다. 이전의 계산에서는 초기 단면 약 0.1 cm 이내에서 초기 착화 에너지의 영향으로 인해 비정상적으로

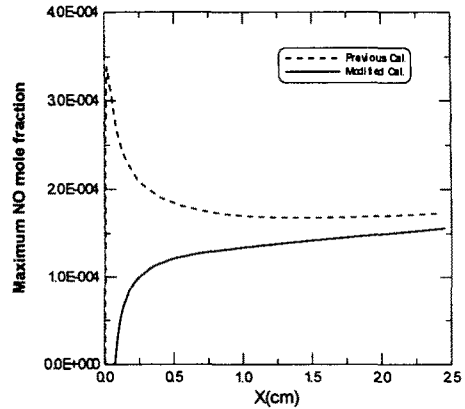


Fig. 2 Comparison of previous calculation results with modified calculation results

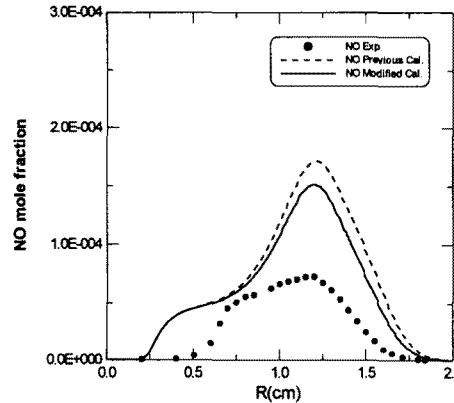


Fig. 3 Comparison of calculation results with experimental data at $x=2.1$ cm

NO가 생성되는 것을 볼 수 있다. 그러나 수정 계산에서 경험적으로 0.075 cm의 NO_x 반응 지연 거리를 주었을 경우, 초기 착화 에너지로 인하여 노즐 림 근처에서 NO_x가 생성되는 현상은 나타나지 않았다. 일반적으로 노즐 림과 바로 인접해서는 NO_x가 거의 발생하지 않는 데, 이것은 위에서 언급한 NO_x 반응 지연 거리의 도입에 의한 계산이 합당하다는 것을 의미하며, Smooke 등⁽¹⁾의 실험이나 Zhu 등⁽³⁾의 결과에서도 이러한 계산의 타당성을 확인 할 수 있었다.

Fig. 3은 수정 계산 결과의 정확성을 검토하기 위해 Nguyen 등⁽¹⁰⁾의 실험 결

과와 계산 결과를 함께 나타낸 것으로서, 축방향 거리 2.1 cm 단면에서의 반경 방향 NO 농도 분포를 도시한 것이다. 그림에서 심볼은 실험치를, 점선은 기존 계산 결과를, 실선은 수정 계산 결과를 나타낸다. 결과에서 확인 할 수 있듯이 이전의 계산보다 수정된 계산 방식이 보다 실험치를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 그러나 수정 계산 결과도 실험치를 다소 높게 예측하고 있는데, 이는 아직까지 NO_x 반응 기구가 완전히 정립되지 않은 점과 본 계산에서 복사 효과를 고려하지 않았기 때문으로 사료되며, 향후 복사를 고려한 NO_x 배출 특성도 검토할 필요가 있으리라고 판단된다.

또한 본 논문에 그림으로 나타내지는 않았으나 NO 농도 외에 온도 및 주요 화학종에 대해 검토해 본 결과, 실험과 비교적 잘 일치하였으며 수정 계산 방법이 NO 농도를 제외한 다른 화염 구조에는 영향을 주지 않음을 확인하였다.

3.2 당량비 변화에 따른 NO 배출 특성 (계산 조건 A)

Fig. 4 에는 계산 조건 A 를 대상으로 당량비 변화에 따른 이전 계산과 수정 계산에 의한 NO 농도 분포를 나타내었다. 각각의 그림에서 좌측은 이전의 계산 결과이고 우측은 수정 계산의 결과이다. 수정 계산 결과에서는 기존 계산에서 있었던 노즐 림 근처의 비정상적인 NO 의 생성이 없으며, 전체적으로 NO 농도가 약간 낮아졌음을 알 수 있다. 각 당량비에 따른 NO 농도 분포 경향을 살펴 보면 당량비가 0.8 인 예혼합 화염의 경우 NO 농도는 화염장 전체에서 매우 낮다. 당량비 1.5 와 2.5 의 부분 예혼합 화염의 경우에는 예혼합 화염과 확산 화염대에 걸쳐 넓은 영역에 분포하며 당량비 2.5 의 경우가 1.5 의 경우에 비해 NO 농도는 낮아진다. 확산 화염의 경우에는 주로 하류 화염대에 고농도 NO 영역이 존재하며 예혼합과 부분 예혼합 화염에 비해 화염 끝단에 NO 농도가 높게 분포한다.

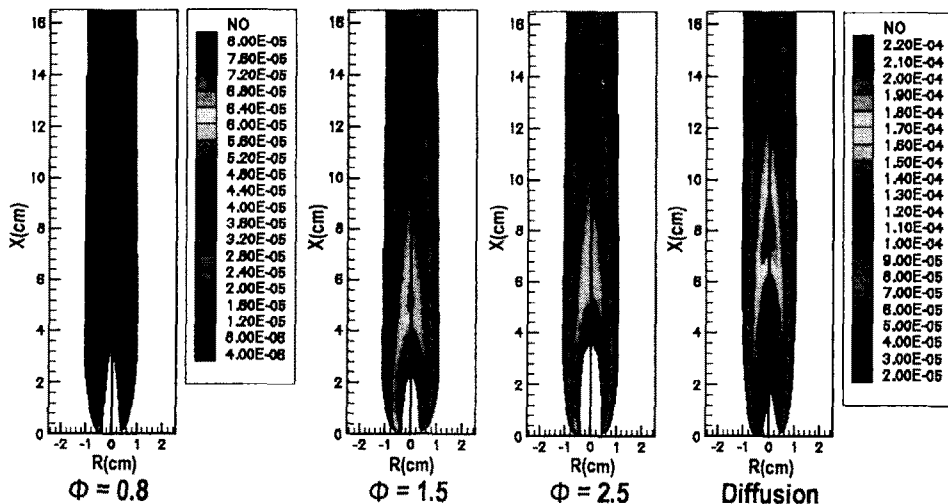


Fig. 4 Comparison of previous calculation results with modified calculation results for NO mole fraction

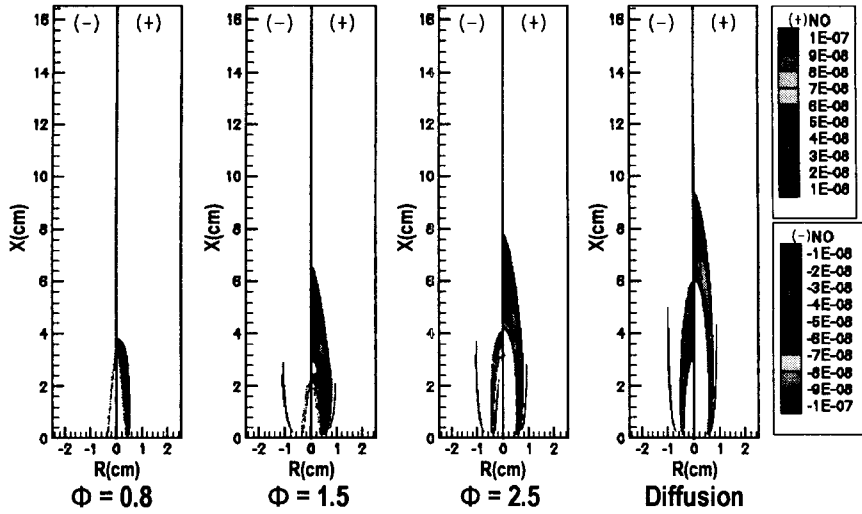


Fig. 5 Computed NO production and destruction rates with variation of equivalence ratio (condition A)

Fig. 5는 Fig. 4의 NO 농도 분포 특성을 구체적으로 살펴보기 위해 당량비 변화에 따른 NO의 생성율과 소멸율 ($\text{mole}/\text{cm}^3\text{s}$)의 분포를 도시한 것이다. 각각의 그림에서 왼쪽은 음의 생성(소멸)을, 오른쪽은 양의 생성을 나타낸다. 당량비 0.8의 예혼합 화염의 경우에는 예혼합 반응대의 좁은 영역에서 NO가 생성되며, NO의 소멸 또한 미소하게 있음을 알 수 있다. 당량비가 1.5인 화염의 경우에는 예혼합 반응대와 확산 반

응대의 두 영역에서 NO가 많이 생성되고 있으며 NO의 소멸은 예혼합 반응대의 좁은 영역에서 일어나고 있다. 당량비 2.5의 경우에는 1.5와 마찬가지로 NO는 예혼합 반응대와 확산 반응대의 두 영역에서 많이 생성되고 있으나, 당량비 1.5에 비해 NO의 소멸도 크다는 것을 알 수 있다. 또한 확산 화염의 경우에는 NO의 생성과 소멸 위치가 예혼합 화염이나 부분 예혼합 화염의 경우에 비하여 하류로 길게 확장되고 있음을 알 수 있다. 각 당량비에 따른 NO 생성율 분포를 Fig. 4의 NO 농도 분포와 비교해서 보면, NO의 최고 농도점은 하류의 중심축상에 위치하고 있으나 NO의 최고 생성 위치는 상류의 반응대에 위치하고 있음을 알 수 있다.

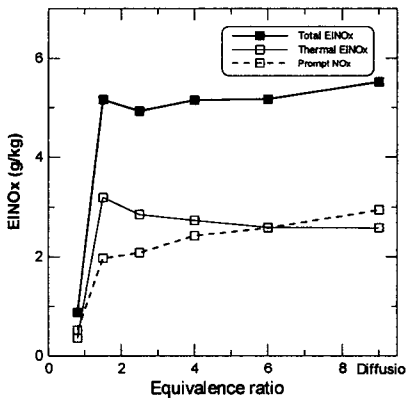


Fig. 6 Emission indices for NOx with the variation of equivalence ratio (condition A)

Fig. 6에는 당량비 변화에 따른 NOx 배출 지수(EINOx)를 나타내었다. Total EINOx는 당량비 0.8의 경우 부분 예혼합 화염과 확산 화염에 비해 상당히 작고 당량비 1.5까지 급격히 증가하며 확산 화염에서 최대값을 가진다. 당량비 변화에 따라 Prompt EINOx는 예혼합

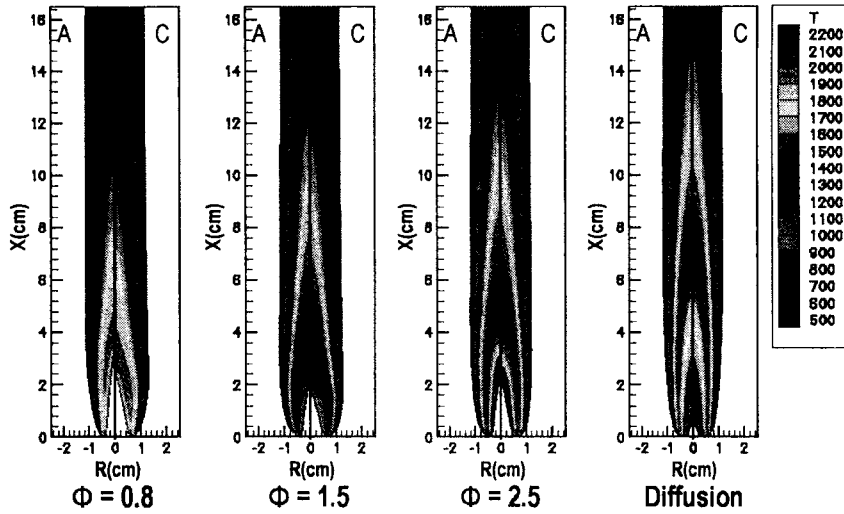


Fig. 7 Computed temperature isopleths with variation of the diameter of inner fuel nozzle (condition A, C)

화염에서 최소값을 갖고 당량비가 증가함에 따라서 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 Thermal EINOx는 당량비 1.5에서 최대값을 가지며 1.5를 기준으로 희박한 경우에는 급격히 감소하며 과농한 경우에는 서서히 감소하는 것을 알 수 있다.

3.3 노즐 및 유량 변화에 따른 수정 계산 결과 (계산 조건 B, C, D)

Fig. 7과 8은 NO 생성과 밀접한 관련이 있는 화염 온도 분포를 도시한 것으로서, 그림은 노즐 및 유량 변화에 따른 화염 온도 분포 결과이다. 각각의 그림에서 좌측은 계산 조건 A, 우측은

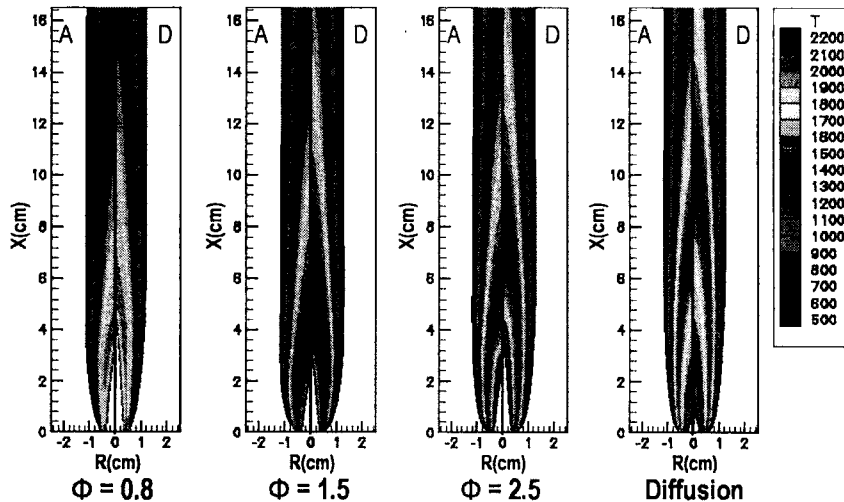


Fig. 8 Computed temperature isopleths with variation of the flow rate of CH₄ (condition A, D)

계산 조건 C 및 D에서의 온도 분포 결과를 나타낸다.

Fig. 7에서 연료 노즐 직경 변화에 따른 화염 구조는 동일 유량에 대한 노즐 직경의 증가와 그에 따른 유속의 감소로 인하여 화염이 짧아지고 두꺼워지고 있으며, 특히 예혼합 화염과 부분 예혼합 화염에서 이러한 경향이 두드러지게 나타나고 있다. 그러나 확산 화염에서는 그 영향이 비교적 적은 것을 알 수 있다.

Fig. 8의 유량 변화의 경우에는 노즐 내 연료 유량의 증가로 인해 화염 길이가 전체적으로 증가하는 것을 알 수 있고, 이러한 화염 길이의 변화는 NO 생성에 많은 영향을 줄 것으로 판단된다. 화염 길이 변화와 NO 배출량과의 관계는 아래에서 설명하겠다.

Fig. 9에는 연료 노즐 직경을 8 mm, 10 mm, 12 mm로 변화시킨 화염에 대해 당량비 변화에 따른 EINOx를 도시하였다. 그림에서 노즐 직경 변화에 따른 Total EINOx를 살펴보면, 당량비 1.5 근방의 부분 예혼합 화염과 확산 화염에서 소폭의 증감을 보이는 것을 제외하고는 큰 변화를 보이지 않음을 알 수

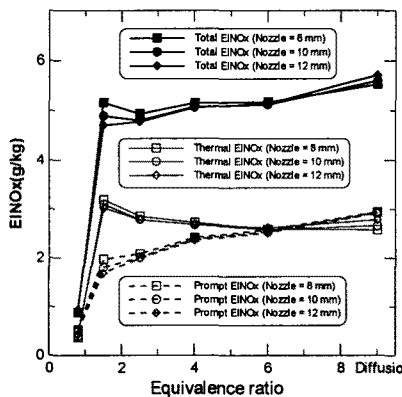


Fig. 9 Emission indices for NOx with the variation of equivalence ratio (condition A, B, C)

있다. 또한 Thermal EINOx 및 Prompt EINOx 역시 같은 경향을 보이고 있다. 따라서 노즐 직경 변화에 대해 EINOx는 민감하게 변화하지 않음을 알 수 있으며, 이러한 경향은 Fig. 7의 화염 온도 분포에서도 확인 할 수 있다.

Fig. 10에는 연료 유량을 0.4287 L/min과 0.6 L/min로 변화시킨 화염의 당량비 변화에 따른 EINOx를 도시하였다. 연료 유량을 증가시킨 경우에도 노즐 직경 변화에서의와 같이 Prompt EINOx는 전 당량비 범위에서 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 반면에 Thermal EINOx는 유량 변화에는 매우 민감하여 전 당량비 범위에서 유량이 증가하면 더불어 증가하고 있다. 이는 Fig. 8에서 본 바와 같이 연료 유량 증가에 따른 화염 크기의 변화, 즉 1850 K 이상의 고온 영역이 확대 되었기 때문으로 사료되며, 이러한 Thermal EINOx의 증가로 인해 Total EINOx도 전 당량비 범위에서 증가하고 있다. 또한 특이할 만한 것은 연료 유량 0.4287 L/min에서는 확산 화염에서 EINOx가 최대가 되는 반면 연료 유량 0.6 L/min에서는 당량비 1.5 근방의 부분 예혼합 화염에서 최대가 되

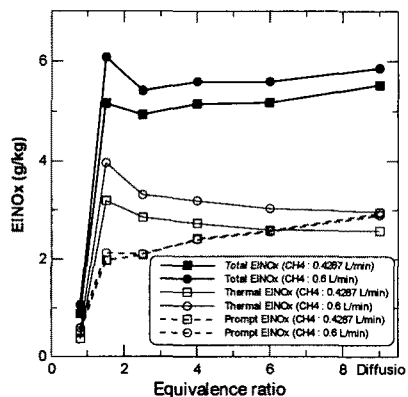


Fig. 10 Emission indices for NOx with the variation of equivalence ratio (condition A, D)

는 것이다.

위의 결과에서 알 수 있듯이 화염에서 배출되는 NOx는 당량비 뿐만 아니라 유량 등의 연소 조건에 따라 서로 다른 경향을 가질 수 있기 때문에 기존 연구 결과들만으로 일반적인 NOx의 배출 특성을 논하기는 어렵다. 따라서 향후 NOx 생성에 영향을 미치는 보다 다양한 인자들을 고려하는 포괄적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

1. NOx 반응 지연 거리의 도입을 통해 초기 착화 에너지의 영향으로 인한 비정상적인 NOx의 발생을 최소화하였고, 보다 정확한 계산이 가능함을 확인하였다.

2. Total EINOx는 전 당량비 범위에서 연료 노즐 직경의 변화에 따라 큰 변화가 없는 반면, 연료 유량을 변화시킨 경우에는 큰 폭의 변화를 보였다.

3. Thermal EINOx는 연료 노즐 직경 변화에는 둔감한 반면, 연료 유량 변화에는 화염 크기의 변화로 인해 민감하게 영향을 받는 것을 알았다.

4. Prompt EINOx는 예혼합 화염에서 최소값을 가지며 서서히 증가하여 확산 화염에서 최대값을 가진다. 연료 노즐 직경 및 유량의 변화에는 거의 변화하지 않음을 알았다.

후 기

본 연구는 1999년 인하대학교 교내 연구비로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) M. D. Smooke, A. Ern, M. A. Tanoff, B. A. Valdati, R. K. Mohammed, D. F. Marran and M. B. Long, "Computational and Experimental Study of NO in an Axisymmetric Laminar Diffusion Flame", *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*, pp.2161-2170, 1996
- (2) J. P. Gore and N. J. Zhan, "NOx Emission and Major Species Concentrations in Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-flow Jet Flame", *Combustion and Flame*, Vol.105, pp.414-427, 1996
- (3) 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
- (4) Chang Eon LEE, Chang Bo OH, Young Ho CHOI and Ok Yong YANG, "NOx Formation Characteristics of Methane Jet Flames", *Proceedings of the International Gas Turbine Congress 1999 Kobe*, pp.815-820, 1999
- (5) 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
- (6) 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 SAND89-8009B*, 1989
- (7) 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
- (8) GRIMECH 2.11, available from www.gri.org
- (9) 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
- (10) Q. V. Nguyen, R. W. Dibble, C. D. Carter, G. J. Fiechtner and R. S. Barlow, "Raman-LiF Measurements of Temperature, Major Species, OH and NO in a Methane-Air Bunsen Flame", *Combustion and Flame*, Vol.105, pp.499-510, 1996