

가스 연료의 연소 방식에 따른 NO_x 생성 특성

최영호(인하대 대학원), 이창언(인하대 기계공학과)

NO_x Formation Characteristics

in Diffusion, Partial Premixed and Premixed Jet flame

Young Ho Choi(Graduate School, Inha Univ.) Chang Eon Lee(Inha Univ.)

Abstract

Numerical analysis was performed with multicomponent transport properties and detailed reaction mechanisms for axisymmetric 2-D CH₄ jet diffusion, partial premixed, premixed flame. Calculations were carried out twice with C2-Full Mechanism including prompt NO reaction in addition to the above C2-Thermal NO Mechanism. The role of thermal NO mechanism and prompt NO mechanism on each flame's NO production is investigated by using the numerical result. The NO_x production of each flame were evaluated quantitatively in terms of the NO_x emission index

1. 서론

가스 연료를 사용하는 연소 방식은 연료 및 공기를 분리해서 공급하는 확산 화염, 연료에 소량의 공기를 혼합하여 공급하는 부분 예혼합 화염, 이른 혼합비 근방의 연료-공기 혼합기를 만들어 공급하는 예혼합 화염으로 대별 할 수 있다. 확산 화염은 역화의 위험성이 없고 안정 화염 범위가 넓기 때문에 산업용 연소기에 많이 이용되나, 매연이 발생할 가능성이 높다는 단점이 있다. 부분 예혼합 화염은 확산 화염의 높은 안정성 특성을 유지하면서 매연 발생을 억제할 수 있는 연소법으로 가정용 연소기에 많이 이용된다. 예혼합 화염은 매연, NO_x 발생량의 제어가 용이하나, 역화 화염 날림 등 연소 안정성이 타 화염에 낮아서 문제가 된다. 이와 같이 각 연소 방식은 서로 다른 장단점을 갖고 있기 때문에 연소기 설계시에 연소 방식은 위에 언급한 장단점을 기준으로 결정되어 왔다고 할 수 있다. 그러나 근래에는 공해 문제가 중요시되고 있기 때문에 연소 방식의 선택 기준으로 위에 언급한 장단점 이외에도 공해 물질의 배출 특성이 중요한 선택 기준으로 작용하고 있다. 그런데 가스 연료는 고체 연료나 액체 연료에 비하여 일산화탄소, 미연탄화수소, 미립자, 황산화물 등의 공해 물질 발생량은 미소한 반면 질소산화물의 발생량은 타 연료와 비슷한 수준이다. 따라서 가스 연료를 사용하는 경우에는 각 연소 방식에서의 NO_x 생성 특성을 검토하여 연소 조건을 결정할 필요가 있다.

NO_x의 생성은 유동, 전열, 혼합 등의 물리적 현상과 반응 등의 화학적 현상에 민감하게 영향을 받기 때문에 NO_x 생성 특성을 검토하기 위해서는 연소장 내부의 물리적 및 화학적 현상에 대한 종합적인 정보가 요망된다. 이러한 정보를 실험적 방법에 의존하여 획득하는 데에는 시간적, 경제적으로 많은 어려움이 있기 때문에, 최근에는 계산기의 성능 향상과 새로운 수치 계산법의 발전에

힘입어 연소장의 종합적인 정보를 획득할 수 있는 수치 계산적 연구가 활발하게 진행되고 있다.

Gore 등[1]은 CH₄ 부분 예혼합 분류 화염과 확산 분류 화염의 실험적 연구를 통해서 NO_x가 적게 나오는 최적 당량비가 있을 알아내었으나, 연소장에 대한 정보가 부족하여 상세한 NO_x 생성 특성에 관하여 논의하지는 않았다. Nishioka 등[2]은 1차원 화염을 대상으로 예혼합과 부분 예혼합 화염, 확산 화염을 대상으로 수치 해석을 수행해서 세 화염에서 NO_x 생성량의 차이가 크지 않으나 Thermal 기구, Femore 기구 등 각 NO_x 생성 기구의 기여도에 차이가 있다는 것을 밝혔고 화염이 확산 화염에서 당량비 1.5인 부분 예혼 화염으로 변함에 따라 Thermal NO와 Total NO가 줄어든다고 하였다. 또한 확산 화염에서는 Prompt 기구의 기여도가 크고 Thermal의 기여도 작다고 했고 부분 예혼화염에서는 Thermal 기구와 Prompt 기구의 기여도가 비슷하다고 하였다. 그러나 이 연구는 1차원 화염을 대상으로 하였기 때문에 이들 결과를 2차원, 3차원의 실용 화염에 적용하는 것에는 의문의 여지가 있다.

본 연구에서는 실용 연소기의 화염 형태와 유사하고, 경계층 근사가 가능하여 수치 계산이 용이한 층류 분류 화염을 대상으로, 타원형 방정식과 달리 반복 계산을 하지 않고 노즐 출구의 초기 조건을 이용하여 전진 계산을 수행하는 포물선형 방정식을 이용하여 각 화염의 NO_x 생성 특성을 규명하고자 한다. 연료의 산화 반응과 NO_x 생성 반응은 GRI 반응 기구를 이용하였으며, NO_x의 생성을 분리 규명하기 위하여 Nishioka[2]가 제안한 방법에 따라 NO를 Thermal NO와 발생량이 미소한 N₂O 경우 NO를 포함한 Prompt NO로 크게 구별하여, 세 화염에서의 각 NO 생성 기구의 역할을 검토하고, NO_x 배출 지수를 도입해서 각 화염의 NO_x 배출량을 정량적으로 비교한다.

2. 지배방정식 및 계산방법

2.1 지배방정식

축대칭 분류 화염은 경계층 근사가 가능하여, 축방향 확산을 무시한 정상 2차원 포물선형 편미분 방정식으로 근사화할 수 있다. 여기에 Von Mises의 좌표변환을 이용하여 x, r 좌표로 이루어진 원통 좌표계를 x, ξ 좌표계로 변환한 후에 총 질량 유량을 이용하여 ξ 좌표를 무차원 유동 함수 ξ 로 변환하면 지배방정식은 (1)-(4)으로 나타내어진다.

운동량 보존식

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{dp}{d\xi} = \frac{\rho u}{M^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\rho u \mu r^2 \frac{\partial u}{\partial \xi} \right) + g(\rho_i + \rho) \quad (1)$$

화학종 보존식

$$\rho u \frac{\partial Y_k}{\partial x} = \dot{\omega}_k W_k - \frac{\rho u}{M} \frac{\partial}{\partial \xi} (r \rho Y_k V_{k,r}) \quad (2)$$

에너지 보존식

$$\rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\rho u}{M^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\rho u \lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) - \sum_{k=1}^{K_s} \dot{\omega}_k W_k h_k - \frac{\rho^2 u r^2}{M} \sum_{k=1}^K Y_k V_{k,c_p} \frac{\partial T}{\partial \xi} \quad (3)$$

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 점성계수, λ 는 열전도도, \bar{W} 는 평균 분자량이며, 반경 방향 확산 속도 V_k 는 식(5)로부터 계산된다.

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

위 식에서 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.

화학종의 생성율 $\dot{\omega}_k$ 는 다음식으로 계산된다.

$$\dot{\omega}_k = \dot{C}_k + \dot{D}_k \quad (6)$$

여기서, \dot{C}_k 와 \dot{D}_k 는 각각 화학종 k 의 생성율과 소멸율을 나타내며, 식(7), (8)로 정의된다.

$$\dot{C}_k = \sum_{i=1}^I \nu_{ki}' k_{ri} \prod_{j=1}^K [X_j]^{\nu_{kj}''} + \sum_{i=1}^I \nu_{ki}'' k_{fi} \prod_{j=1}^K [X_j]^{\nu_{kj}'} \quad (7)$$

$$\dot{D}_k = \sum_{i=1}^I \nu_{ki}' k_{fi} \prod_{j=1}^K [X_j]^{\nu_{kj}'} + \sum_{i=1}^I \nu_{ki}'' k_{ri} \prod_{j=1}^K [X_j]^{\nu_{kj}''} \quad (8)$$

위식에서 ν_{ki}' 는 소반응 i 에서 반응 화학종 k 의 양론 계수, ν_{ki}'' 는 소반응 i 에서 생성화학종 k 의 양론 계수, k_{fi} 와 k_{ri} 는 각각 정반응 속도상수 및 역반응 속도상수 이다. 이들 중 열역학적 물성치 및 화학종의 생성율은 CHEMKIN-II Package[3]로, 전달물성치는 TRANFIT Package[4]를 이용하여 계산하였다.

2.2 계산방법

본 연구에서는 직경 8mm인 연료 노즐과 그와 동축으로 설치된 직경 50mm인 주위류 노즐로 구성된 연소기에서 형성되는 CH₄-공기 층류 분류 화염을 계산대상으로 하였다. 계산에 이용된 방정식은 경계층 근사를 적용한 포물선형이므로 화염 후류의 경계조건은 필요하지 않으며, 노즐출구 단면에서의 초기조건, 분류의 중심축과 외측 경계조건들이 필요하다. 분류의 중심축에는 대칭조건을 외측에는 벽면 조건을 이용하였다. 노즐 출구의 초기 조건은 다음과 같이 주었다. 주위류 노즐의 경우 공기 유량을 46L/min으로 고정하였으며 연료 노즐의 경우 연료 유량을 0.42438L/min으로 고정하고 공기 유량을 변화시켜서 연소 조건을 확산 화염에서부터 예혼합 화염까지 변화시켰다. 각각의 노즐 출구 단면에서의 유속 분포는 균일하다고 하였다. 이와 같은 계산 조건은 본 연구실에서 보유하고 있는 연소기를 사용하여 용이하게 실험을 할 수 있는 조건이며 추후 검증 실험을 수행할 예정이다.

계산 과정은 초기 조건을 이용하여 전진법에 의해 하류 방향으로 순차적으로 수행하게 된다. 방정식의 차분에는 유한 차분법이 이용되었고, 단면에서의 계산은 뉴턴법을 이용하였다. 계산에 필요한 반경 방향 격자는 부등 간격으로 300개를 배열하였으며, 전진 계산을 수행하기 위한 축방향 격자거리는 상류 단면과 하류 단면 사이의 변화가 허용 범위 안에 있도록 조절하였다. 화염이 형성되도록 하기 위해서는 노즐 출구 부근에서 착화를 시켜주어야 하는데, 그 착화점으로 연료 노즐 림에 가우스 분포를 가지는 2100K의 착화 온도를 주었다. 착화 온도의 결정은 계산 영역 내에 착화 온도의 변화에 따른 영향이 최소가 되도록 시행 착오를 거쳐 경험적으로 결정하였다.

반응의 계산을 위해서 GRI 반응기구[5]을 이용하였다. 이 반응 기구는 CH₄의 산화 반응을 C₂ 반응까지 묘사하고 있는 것으로 49개 화학종과 279개의 가역반응으로 구성되어 있으며, Thermal NO와 Prompt NO, N₂O 경우 NO 및 NO₂ 반응을 포함하여 NO_x 반응 경로를 잘 묘사하고 있다. 본 연구에서는 NO_x 생성에 미치는 Thermal NO 및 Prompt NO 기구의 역할을 분리하여 검토하기 위해 Nishioka가 제안한 반응기구 분리방법을 이용하여 두 번 계산을 수행하였다. 분리방법으로 우선 원래의 GRI 반응기구로 계산한 NO를 Full NO 정의하였으며, GRI 반응 기구에서 Thermal NO 기구를 제외한 NO 관련 반응을 뺀 반응기구로 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.

본 연구에서 각 화염에서의 NO_x 생성량을 정량적으로 비교하기 위해서 연소 효율, 희석, 공연 비 등의 영향을 받지 않는 NO_x 배출 지수(EINO_x)를 이용하였다. NO, NO₂ 배출 지수는 적절한 축방향 위치에서 다음식으로 계산하였다.

$$EI_{NO} = \frac{\int Y_{NO} \rho u dr}{\dot{m}_F} \quad (9)$$

$$EI_{NO_2} = \frac{\int Y_{NO_2} \rho u dr}{\dot{m}_F} \quad (10)$$

여기서 \dot{m}_F 는 연료의 질량유량이다. 그리고 NO_x 배출 지수의 경우에는 화염에서 생성된 NO는 대기 중에서 NO₂로 대부분 변환되기 때문에[6] 다음식으로 계산하였다.

$$EI_{NO_x} = EI_{NO} \frac{W_{NO_2}}{W_{NO}} + EI_{NO_2} \quad (11)$$

축방향 위치가 증가함에 따라 처음에는 NO_x 배출 지수가 증가하다가 일정한 값을 유하게 되는 데 이 때의 값을 각 화염에서의 배출 지수로 사용하였다.

3. 계산 결과 및 검토

Fig. 1은 수치 계산의 방법 및 결과의 타당성을 검토하기 위하여 Ishizuka[7]의 실험을 대상으로 계산한 결과를 도시한 것이다. 실험은 연료 및 주위류 노즐 반경을 각각 8.4mm, 30.8mm인 동축 분류 화염을 대상으로 하고 있으며, 연료 노즐에 CH₄, H₂, N₂를 각각 1mL/s, 26.6mL/s, 39.9mL/s, 주위류 노즐에 공기를 388.77mL/s의 유량으로 보내는 경우이다. 그림은 중심축에서의 주요 화학종의 농도 분포에 대한 실험 및 계산 결과를 도시한 것이다. 먼저 화학종의 농도와 온도에 대한 계산 결과를 보면 실험 결과와 다소의 차이가 있으나 전

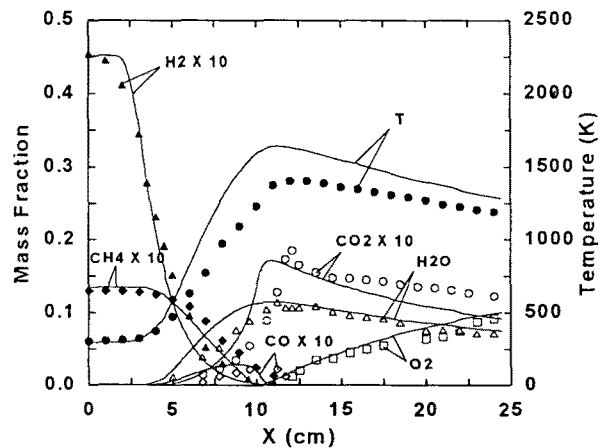


Fig. 1 Comparison of calculation results with experimental data of Ishizuka

체적으로 실험치를 잘 예측하고 있다. NO_x에 대해서는 층류 분류 화염에 대한 NO_x 농도까지 포함하여 계산 결과의 검토에 적합한 실험 결과를 구할 수 없어 직접 비교할 수는 없었으나, Smooke 등[8]이 CH₄ 분류 확산 화염을 대상으로 실험과 GRI-반응 기구를 이용한 수치 계산을 수행해서 실험치와 계산치에 큰 차이가 없음을 보였기 때문에 NO_x 생성에 관하여 논의하는 데에는 별 문제가 없을 것으로 생각된다. 그리고 앞에서 언급한 검증 실험의 기초 실험으로 화염 길이를 측정하였는데 실험치와 계산치에 큰 차이가 없었다. 위의 결과로 미루어 볼 때 본 수치 계산법은 합리적으로 작성되어져 있다고 생각된다.

Fig. 2에서는 우선 전체적인 화염 형상을 고찰하기 위하여 주요 연소 조건에의 온도에 대한 등치선을 도시한 것이다. Fig. 2(a) 당량비가 0.8인 예혼합 화염의 경우로 온도가 반응대에서 급격히 상승한 후 다소 낮은 온도 영역이 형성되는 희박 예혼합 화염의 특징을 잘 보여 주고 있다. Fig. 2(b) 당량비가 1.5인 부분 예혼 화염의 경우로 온도가 예혼합 반응대에서 급격히 상승한 후 확산 반응대에서 넓은 고온 영역이 형성되는 부분 예혼 화염의 특징을 잘 보여 주고 있다. Fig. 2(c)는 당량비가 2.5 인 경우로 예혼합 반응의 온도 상승이 예혼 화염에 비하여 완만하고 확산 반응대에서 당량비 1.5 화염에 비하여 약간 좁은 고온 영역이 형성되는 것을 보여준다. Fig. 2(d)는 확산 화염의 경우로 온도의 급격한 상승 관찰되지 않으며 축방향 거리 $x=7\text{cm}$ 근처에서 온도의 최고점이 위치하고 있다. 희박 예혼합 화염을 제외한 타 화염의 최고 온도는 약 2180K으로 CH₄-공기 혼합기의 단일 화학 평형 온도[9] 2227K보다 다소 낮게 예측되고 있다. 위 같이 각 화염의 특징이 잘 나타나 있다.

Fig. 3은 화염에서의 대표 단면의 축방향 위치를 도시한 것이다. 본 연구에서 화염을 비교하기 위한 대표 단면으로 다음과 같이 세 단면을 선택하였다. 공급된 연료 중 연소되지 않고 남이 있는 연료가 50%가 되는 단면을 상류 단면, 1%가 되는 단면을 중간 단면으로 선택하였고, 중심축에서 최고 온도가 되는 단면은 화염 길이로 정의될 수 있기 때문에 화염 길이 위치를 하류 단면으로 선택하였다. Fig. 2에서도 보여지지만 화염의 길이가 당량비에 따라 변하게되는데 당량비가 1일 때 가장 짧고 희박 또는 과농으로 변할 수록 화염 길이가 길어진다. 특히 당량비가 1일 때와 1.5일 때의 단면 위치를 비교해보면 연료 1% 단면의 위치는 비슷하지만 화염 길이 위치는 1.5일 때

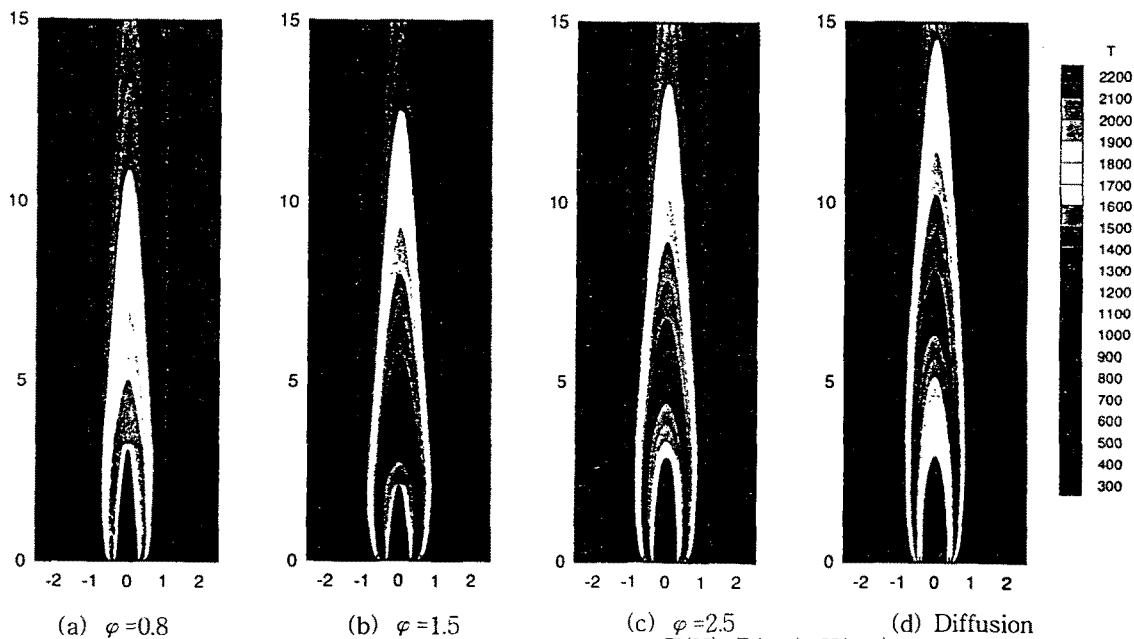


Fig. 2 Contours of flame temperature $T(K)$, $R(\text{cm})$, $X(\text{cm})$

가 멀다라는 것을 알 수 있다. 이는 당량비 1.5인 경우 예혼합 의한 산소의 존재로 연료의 초기 산화가 낮은 축방향 위치에서 일찍 시작된 후 CO의 CO₂로의 전환 등 후기 산화가 하류에서 완료되었기 때문이다. 예혼합 화염 경우는 연료의 산화가 반응대에서 급격하게 일어나기 때문에 화염 길이 위치와 연료 1% 단면 위치의 가깝지만 확산 화염 또는 부분 예혼 화염의 경우 연료의 산화가 넓은 영역 걸쳐서 일어나기 때문에 멀어진다.

Fig. 4는 NO 몰 분율 등치선을 도시한 것이다. Fig. 4(a)는 당량비가 0.8인 희박 예혼합 화염의 경우인데 타 화염에 비하여 NO의 농도 매우 낮음을 알 수 있다. 이것은 화염의 낮은 온도로 인하여 Thermal NO의 생성량이 적었을 뿐만 아니라 Prompt NO 발생할 수 있는 연료 산화 영역 작아서 Prompt NO의 생성량도 적었기 때문이라고 사료된다. Fig. 4(b)는 당량비가 1.5인 부분 예혼합 화염이다. 상류에서부터 NO가 높은 농도로 분포하고 축방향 거리 $x=5.5\text{cm}$ 에서 가장 높은 농도가 된다. 2000K 이상의 고온 영역과 NO의 높은 농도 영역이 전체적으로 일치하고 있다. 이것은 Thermal NO 생성량이 많다는 것을 보여준다. Fig. 4(c)는 당량비가 2.5인 경우로 당량비 1.5인 경우와 유사한 경향을 보여 주고 있으나 NO의 절대량은 1.5인 경우 보다 작다. 확산 화염(Fig. 4(d))의 경우에는 상류에서 높은 농도 영역이 나타지는 않고 축방향 거리 8cm에서 약간 높은 농도 영역이 나타나는데 이것은 상류에서부터 대류에 의해 전달된 NO와 화염의 끝단에서 생성된 NO가 합해져서 높은 농도가 되는 것이다.

Fig. 5는 당량비에 따른 NO_x 배출 지수를 도시한 것이다. 그림에서 보여지듯이 Total NO_x 배출 지수는 당량비 1.5에서 최고값을 가지며 그 당량비를 중심으로 당량비가 커지거나 작아지면 Total NO_x 배출 지수는 감소한다. 당량비가 작아지는 방향의 경우에서 Thermal NO의 배출 지수와

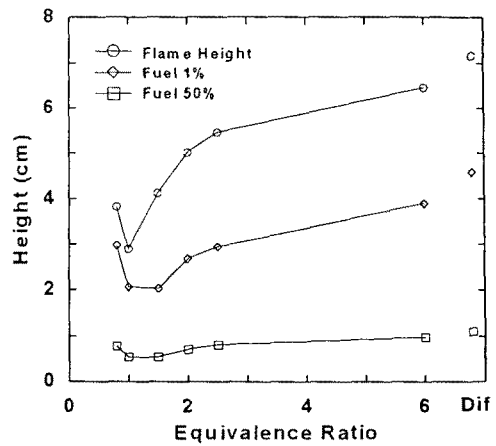


Fig. 3 Flam height, fuel 50% height, fuel 1% height

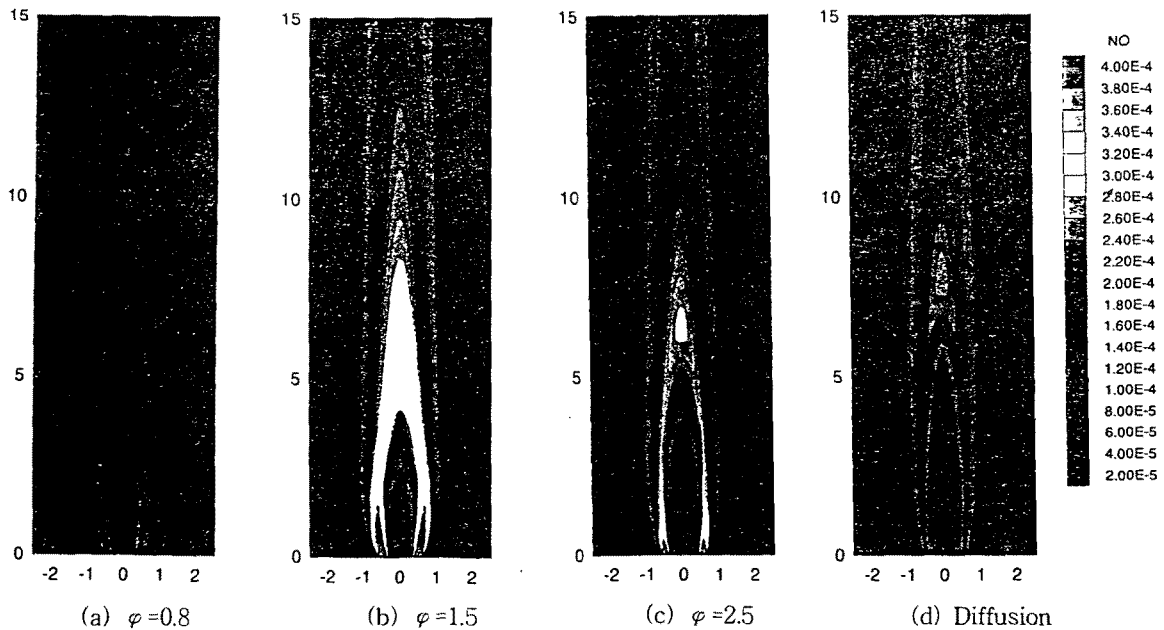


Fig. 4 Contours of NO mole fraction, R(cm), X(cm)

Prompt NO의 배출 지수는 모두 급격히 감소하고, 당량비가 커지는 방향의 경우에서 Thermal NO 배출 지수는 당량비 2.5 까지 급격히 감소 한 후 완만히 감소 하고 Prompt NO 배출 지수는 당량비 2.0까지 약간 감소한 후 완만히 증가한다. 당량비가 계속 커지면 최종에는 확산 화염이 되는데 이 때에는 Thermal NO와 Prompt NO의 기여도가 거의 같아진다. 이와 같이 연소 방식에 따라서 Total NOx 배출 지수에 미치는 Thermal NO와 Prompt NO 배출 지수의 기여도는 달라지게 된다. Prompt NO의 경향은 Nishioka[2]의 결과 일치하나 Thermal NO와 Total NO의 경향은 일치하지 않는다. Nishioka는 부분 예혼합 화염의 경우 Thermal NO의 기여도와 Prompt NO의 기여도가 비슷하고 Thermal NO와 Total NO 배출 지수가 당량비 2.0에서 가장 큰 값을 가지며 당량비 작아질 수록 배출 지수가 줄어든다고 하였다. 본 연구 결과와 Nishioka의 결과가 다른 이유는 Nishioka의 연구는 1차원 화염을 대상으로 하고 있어서 분류 화염의 중간 단면에 넓게 분포하는 고온 영역이 표현되지 않아 Thermal NO의 기여도가 작게 평가되었기 때문에 본 연구 결과와 Nishioka의 결과에 차이가 생기는 것으로 사료된다.

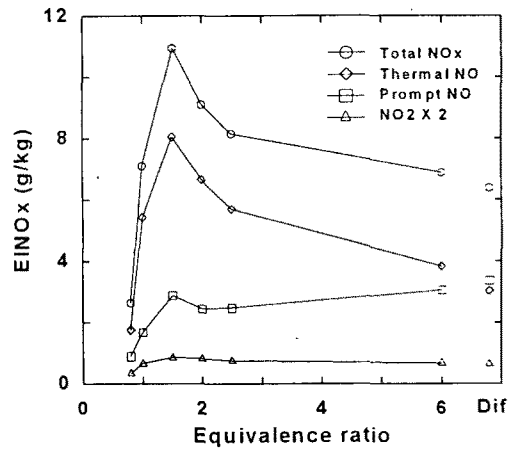
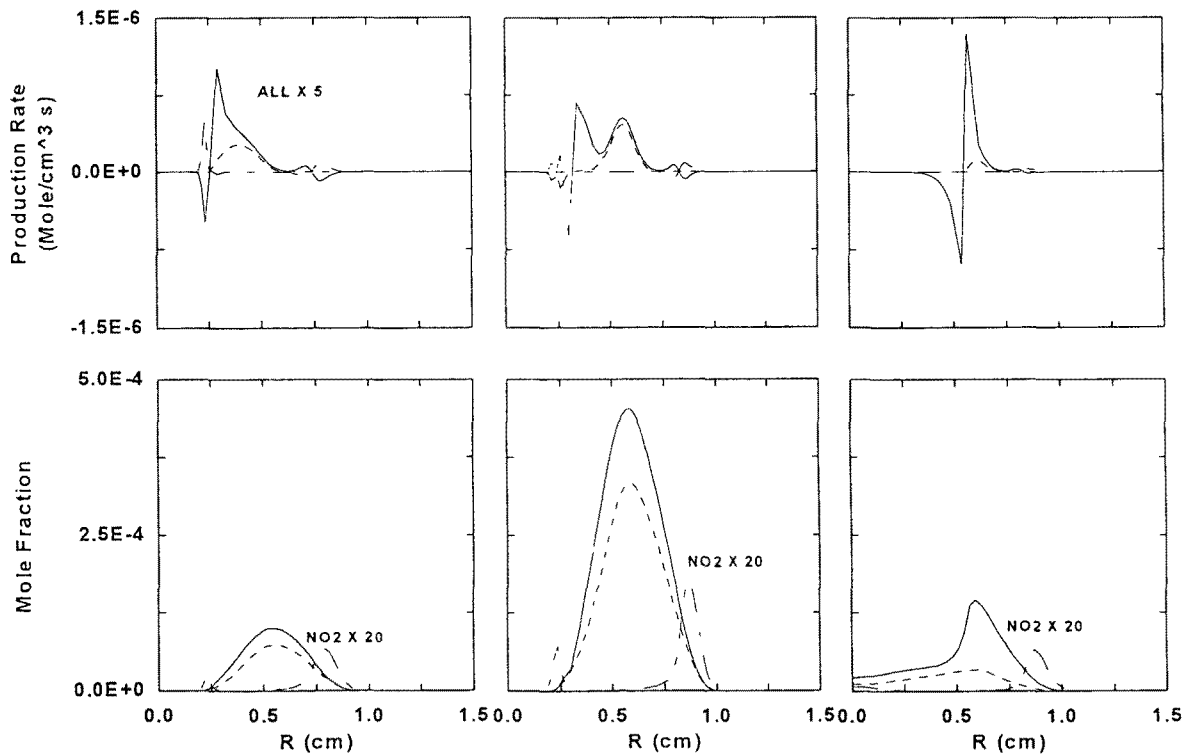


Fig. 5 Emission index for NOx plotted as function of equivalence ratio

Fig. 6은 상류 단면에서의 NO, NO2 물 분율과, Thermal NO, Full NO, NO2의 생성율을 도시한



(a) $\phi=0.8$ (b) $\phi=1.5$ (c) Diffusion
 Fig. 6 Radial profile of Full and Thermal NO, NO2 mole fractions, Full and Thermal NO production rates at fuel 50% height
 (Full NO : —, NO2: ·····, Thermal NO : - - - - -)

것이다. 당량비 0.8인 화염은 모든 NO_x 농도와 생성율이 타 화염이 비하여 매우 낮다. Full NO 생성율에 음과 양 첨두점이 모두 존재하는데, 음의 첨두점은 NO와 NO₂ 사이의 전환으로 인한 것이고 양의 첨두점은 Prompt NO 기구에 의한 것이다. Thermal NO 생성율은 낮은 온도로 인하여 작은 값을 가진다. 당량비 1.5인 화염은 넓은 고온 영역의 존재로 인하여 Thermal NO의 생성율이 넓고 크게 존재하고 Full NO 생성율에서 음과 양 첨두점이 두 번 나타난다. 내측의 양과 음의 첨두점은 당량비 0.8인 화염과 유사하게 NO과 NO₂ 사이의 전환 때문에 나타나는 것이고, 외측의 양과 음의 첨두점은 Prompt NO 기구에 의한 것이다. 당량비가 0.8에서 나타나지 않았던 Prompt NO 기구의 음의 생성이 당량비 1.5에서 나타난 이유는 Thermal NO 기구에 의하여 NO의 농도 높아졌고 공기 부족으로 인한 연료의 중간 생성물이 풍부하여 NO의 감소에 기여하는 HCN 재순환 경로가 활성화되었기 때문이라 사료된다. 확산 화염의 경우는 반응대에서 매우 큰 양과 음 첨두점이 나타난다. 음의 생성은 당량비 1.5의 경우 유사하게 연료 중간 생성물이 매우 풍부하고 NO의 농도가 높기 때문에 Prompt NO 기구에 의한 큰 음의 생성이 나타난다. 그러나 Prompt NO 기구에 의한 양의 생성을 최고점의 절대 값이 음의 생성율의 절대값보다 크기 때문에 Prompt 기구에 의한 순 생성은 크다. 고온 온도 영역이 없기 때문에 Thermal NO 생성은 작아진다. 결과적으로 Prompt NO 기구의 순 생성량과 Thermal NO 생성량은 비슷한 값을 가진다. 상류 단면의 경향은 중간 단면까지 계속되나 온도의 하락하고 연료의 산화가 완결되어 감에 따라 Thermal NO와 Prompt NO 생성율의 절대값이 작아진다.

Fig. 7은 하류 단면을 도시한 것이다. 세 화염에서 동일한 경향을 보여 주고 있는데 Full NO 생성율에서 Thermal NO의 생성율이 대부분 이지만 그 절대값은 매우 작다. 하류도 더 진행될 수록

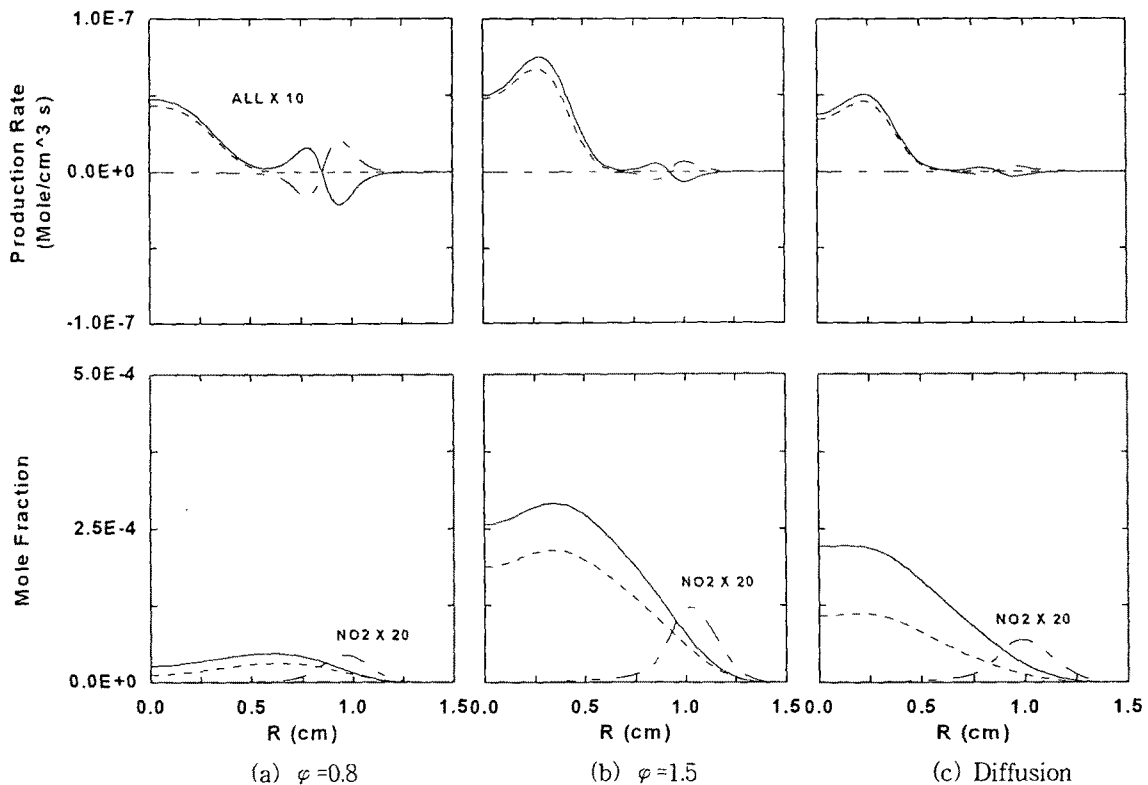


Fig. 7 Radial profile of Full and Thermal NO mole fractions, Full and Thermal NO production rates at flame height
(Full NO : —, NO₂ : - - - , Thermal NO : ·····)

주위류 공기 희석에 의한 온도의 하락 때문에 Thermal NO 생성율이 더 낮아지고 결국에는 NO의 생성이 중단된다. 그러나 풍부한 산소가 존재하기 때문에 NO의 NO₂로 전환은 지속된다. NO와 NO₂ 전환은 Total NO_x 배출 지수를 증가시키지 않는다.

4. 결론

본 연구에서는 축대칭 2차원 층류 분류 화염을 대상으로 연소 조건을 예혼합에서 확산 화염까지 당량비를 변화시키면서 NO_x 생성 특성을 비교 검토하였다. 이를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Total NO_x 배출 지수는 당량비가 1.5인 부분 예혼합 화염에서 가장 큰 값을 가진다. Total NO_x 배출 지수는 당량비 1.5를 기준으로 희박해지는 방향의 경우는 급격히 감소하고 과농해지는 방향의 경우는 당량비 2.5까지 급격히 감소한 후 완만히 감소한다.

(2) 예혼합 화염은 얇은 반응대에서만 소량의 NO가 생성되고 화염 길이 이후에서는 NO의 생성이 거의 없다. 당량비가 낮아질 수록 화염 온도가 낮아지고 이에 따라 Thermal NO의 생성량은 더욱 작아진다. 또한 연료 중간 생성물이 급속히 없어지기 때문에 Prompt NO도 생성량이 작아진다.

(3) 부분 예혼합 화염은 상류에서 부터 NO가 많이 생성되고 화염의 길이 위치까지 높은 농도가 유지된다. 넓은 고온 영역과 풍부한 연료 중간 생성물로 인하여 Thermal NO와 Prompt NO 모두가 활성화되기 때문에 Total NO의 생성량이 타 화염에 비하여 높다.

(4) 확산 화염은 화염 길이 보다 약간 높은 위치에서 최고 NO 농도가 나타나는데 이것은 상류에서부터 대류로 전달된 NO와 화염 끝에서 발생한 NO가 합해져서 나타나는 것이다. 낮은 온도 분포로 인하여 Thermal NO가 감소하고 풍부한 연료 중간 생성물로 인하여 Prompt NO의 증가한다. 결과적으로 Prompt NO의 기여도가 Thermal NO의 기여도 보다 약간 크다.

참고문헌

1. J. P. Gore, N. J. Zhan, 1996, "NO_x Emission and Major Species Concentrations in Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-flow Jet Flames", Combustion and Flame, Vol. 105
2. M. Nishioka, S. Nakagawa, Y. Ishikawa and T. Takeno, 1994, "NO Emission Characteristics of Methane-Air Double Flame", Combustion and Flame, Vol. 98
3. R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, 1989, "Chemkin-II : A Fortran Chemical Kinetics", Sandia Report SAND89-8009B
4. R. J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M. E. Coltrin and J. A. Miller, 1986, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties", Sandia Report SAND86-8246
5. GRIMECH 2.11, available from www.gri.org
6. R. Chen, J. F. Driscoll, 1990, "Structure and Tip-opening of Laminar Diffusion Flames", Twenty-third Symposium (Int.) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 281-288

7. S. Ishizuka, Y. Sakai, 1986, "Structure and Tip-opening of Laminar Diffusion Flames", Twenty-first Symposium (Int.) on Combustion/The Combustion Institute
8. M. D. Smook, A. Ern, M. A. Tanoff, B. A. Valdati, R. K. Mohammed, D. F. Marran, M. B. Long, 1996, "Computational and Experimental Study of NO in An Axisymmetric Laminar Diffusion Flame", Twenty-first Symposium (Int.) on Combustion/The Combustion Institute
9. Gordon and McBride, 1972, "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonations", NASA SP-273