



비에혼합 대향류화염에서 산소부화에 따른 NO_x 생성특성

황철홍 · 유병훈 · †이창언 · 한지웅*

인하대학교 기계공학과, *한국원자력연구원
(2007년 10월 26일 접수, 2007년 11월 16일 채택)

NO_x Formation Characteristics with Oxygen Enrichment in Nonpremixed Counterflow Flames

Cheol-Hong Hwang · Byung-Hun Yoo · †Chang-Eon Lee · Ji-Woong Han*

Dept. of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

*Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

(Received October 26 2007, Accepted November 16 2007)

요 약

비에혼합 대향류화염에서 산소부화에 따른 NO_x 생성특성에 관한 수치해석이 수행되었다. 순산소의 연소과정에서 공기침투에 의한 부득이한 질소 유입의 상황을 체계적으로 고려하기 위하여, 산화제의 O₂는 체적비 21%에서 100%까지 변화되었다. 결과적으로 NO 배출지수(EI_{NO})는 산소부화를 75%까지 증가하다가 급격히 감소하는 경향을 보여준다. 이러한 경향은 화염온도, 화염두께 및 체류시간 보다는 NO_x 생성과 관련된 N₂ 소모율 변화에 의해 설명될 수 있음을 확인하였으며, 특히 N+NO=N₂+O 반응이 가장 크게 기여함을 알 수 있었다.

Abstract – The NO_x emission characteristics with oxygen enrichment in non-premixed counterflow flames were investigated numerically. To consider systematically the situation of inevitable N₂ contamination by air infiltration in the process of pure-oxygen combustion, the volume ratio of O₂ in an oxidizer was changed from 21% to 100%. As a result, the NO emission index (EI_{NO}) has the highest value under condition of 75% oxygen enrichment. This result can be explained by the change of N₂ destruction rate with oxygen enrichment rather than flame temperature, flame thickness and residence time. In particular, it was found that the reaction of N+NO=N₂+O has the largest contribution on NO_x production in oxygen-enrichment flames.

Key words : Oxygen enrichment, NO_x(Nitrogen Oxides), Nonpremixed flame

I. 서 론

산소부화 연소는 산화제의 일부 혹은 전체를 산소로 대체하여 연소시키는 것으로, 폐가스량의 감소, 연소온도 상승, 전열효율 증대, 연소특성 개선 등을 통하여 시스템 및 공정 효율을 향상시키는 기술이다. 현재 이러한 산소부화 연소법은 높은 연소온도로 인해 고온로 등의 극히 한정된 분야에만 적용되고 있으며, 보다 넓은 범위의 적용을 위해서는 고온 화염에 의한 내화제 손상, 그을음(soot) 발생 등의 문제가 해결되어야 한다. 또한 연소기의 부적절한 설계는 주변 공기 중 N₂ 유입을 발생시켜 통상 공기를 이용한 연소보다 매우 많은 양

의 NO_x를 발생시키게 되어 산소부화 연소법 적용의 가장 큰 문제점으로 지적되고 있다[1].

산소부화 연소에서 NO_x 발생에 관한 기존의 실험적 연구를 살펴보면, Kuligowski 등[2]은 동축 제트화염에서 산화제의 O₂ 및 N₂량 변화에 따른 NO_x 배출지수(NO_x Emission Index; EI_{NO_x})를 구하였다. 그 결과 산화제 중 O₂가 60% 근처에서 EI_{NO_x}가 최고값을 나타내고, 5% 이하의 미량 N₂가 유입 되었을 때 통상 CH₄/air 연소의 경우 보다 NO_x 발생량이 많음을 확인하였다. 그러나 N₂ 유입에 따른 주위류 유속변화로 연료와 주위류의 운동량비가 크게 변경되어서, N₂ 유입에 의한 열 및 화학적 효과가 NO_x에 미치는 영향을 도출하는데 다소 어려움이 있었다. 이외의 대부분의 연구들은 고온으로 인한 측정기법의 한계로 인하여 주

†주저자: chelee@inha.ac.kr

로 화염의 길이 및 발광과 같은 가시적인 변화만을 검토하였다. 따라서 NOx 발생 원인에 관한 보다 상세한 해석을 위해서는 수치해석을 통한 연구가 필수적이라 할 수 있다.

대표적인 수치해석 연구로서 Sung 등[3]은 CH4 대향류 비예혼합 화염을 대상으로 O2 증가에 따른 NOx 생성을 해석하였다. 이로부터 산화제 내의 O2가 75% 정도일 때 최고의 EI_{NOx} 값을 보였으며, O2가 29%를 초과할 경우 Prompt NO 반응들이 NO의 소멸에 기여한다고 보고하였다. 또한 Beltrame 등[4]과 Du 등[5] 역시 대향류 화염을 대상으로 많은 연구를 진행하였으나, 60~75%의 O2 범위에서 NOx의 최고값이 발생되는 원인의 검토에 관한 연구는 거의 이루어지지 않은 실정이다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 CH4 비예혼합 화염을 대상으로 1차원 대향류 화염의 산소 부화율에 따른 보다 구체적인 NOx 발생 원인을 검토하고자 한다. 이를 위해 NOx 발생의 주요인자가 되는 화염온도, 화염두께, 체류시간, N2 소모율 변화에 따른 검토가 진행되었다.

II. 수치해석 방법

2.1. 지배방정식

본 연구에서는 층류 비예혼합 화염면에서 산소 부화율에 따른 NOx 생성특성을 검토하기 위하여 Fig. 1과 같이 노즐간의 거리가 2 cm인 비예혼합 대향류화염을 대상으로 하였다.

계산에 사용된 지배방정식은 정상상태의 원통좌표계로 다음과 같은 상미분 방정식 형태의 연속, 운동량, 에너지, 화학종 보존방정식 및 상태방정식으로 표현된다[6,7].

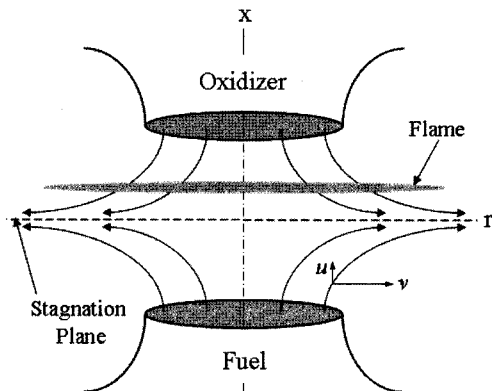


Fig. 1. Schematic of counterflow non-premixed flame.

$$dU/dx = G \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx} \left[\mu \frac{d}{dx} \left(\frac{G}{\rho} \right) \right] - 2 \frac{d}{dx} \left(\frac{UG}{\rho} \right) + \frac{3G^2}{\rho} + H = 0 \quad (2)$$

$$\rho u \frac{dT}{dx} + \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho}{c_p} \sum_k c_{pk} Y_k V_k \frac{dT}{dx} + \frac{1}{c_p} \sum_k h_k \dot{\omega}_k - \frac{\dot{q}_r}{c_p} = 0 \quad (3)$$

$$\rho u \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx} (\rho Y_k V_k) - \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad (4)$$

$$P = \rho RT / \bar{W} \quad (5)$$

위 식들에서 U 는 축방향 질량유속을, H 는 반경방향 압력구배의 고유치(eigenvalue)로 다음 식들로 정의된다.

$$U = \rho u / 2 \quad (6)$$

$$H = (1/r) (\partial P / \partial r) \quad (7)$$

여기서, u 는 축방향 x 에 대한 속도성분이며, $\rho, P, \mu, T, \lambda, R$ 과 \bar{W} 는 각각 밀도, 압력, 점성계수, 온도, 열전도계수, 기체상수 그리고 평균 분자량을 나타낸다. 또한 Y_k, W_k, c_{pk}, h_k 와 $\dot{\omega}_k$ 는 각각 화학종 k 의 질량분율, 분자량, 정압비열, 총엔탈피 그리고 화학종의 생성율을 나타내며, V_k 는 화학종 k 의 확산속도, \dot{q}_r 은 복사 열손실을 의미한다.

복사열손실에 대한 계산은 열손실에 주로 기여하는 것으로 알려진 CO₂, CO, H₂O, CH₄의 4가지 화학종에 대해 계산되었다. 단위 체적당 복사 열손실은 다음 식에 의해 계산되었다[8].

$$\dot{q}_r = 4\sigma K_p (T^4 - T_\infty^4) \quad (8)$$

$$K_p = P_{CO_2} K_{CO_2} + P_{H_2O} (K_{H_2O} + P_{CO} K_{CO} + P_{CH_4} K_{CH_4}) \quad (9)$$

여기서 σ 는 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 상수를, T 와 T_∞ 는 각각 국부 온도와 주위 온도를 나타내며, K_p 는 혼합가스의 플랑크 평균 흡수계수(이하 흡수계수)를 나타낸다. 또한 P_k 와 K_k 는 화학종 k 의 분압과 각 가스의 흡수계수를 나타내며, 흡수계수는 다음의 근사식으로 계산되었다.

$$K_k = \sum_{j=0}^5 A_{kj} T^j \quad (k = CO_2, CO, H_2O, CH_4) \quad (10)$$

이때, A_b 는 온도에 따른 각 화학종의 다항식 계수로써 Ju 등[9]에 의해 제안된 값을 적용하였다.

2.2. 계산방법

본 연구는 Oppdif code[6]를 수정하여 수행되었으며, 열역학적 및 전달 물성치는 각각 Chemkin-II[10]와 Transport package[11]를 사용하였다. 특정 스트레인을에 해당되는 노즐의 초기유속은 Williams 등[12]에 의해 유도된 식 (11)을 이용하였다.

$$a = \frac{2(-u_O)}{L} \left[1 + \frac{u_F}{(-u_O)} \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_O}} \right] \quad (11)$$

여기서, 하첨자 F 와 O 는 각각 연료노즐 및 산화제 노즐을 의미한다. 스트레인의의 변화는 화염구조 뿐만 아니라 NO의 생성특성에도 매우 중요한 변화를 초래할 수 있으나, 본 연구에서는 모든 조건에서 안정한 화염이 형성되는 스트레인을 100 s⁻¹의 조건에서 계산이 수행되었다.

연료 및 NOx에 대한 상세 반응기구는 GRI-2.11을 이용하였으며, NO 생성에 영향을 미치는 Thermal NO 및 Prompt NO 기구의 역할을 분리 검토하기 위하여 Nishioka 등[13]이 제안한 방법에 의해 동일 화염을 두 번 계산하였다. 즉, 앞에 언급한 GRI 반응기구를 이용하여 NO의 총생성량(이하, Total NO)를 구하고, C₂ 반응기구에 Thermal NO 반응만을 포함한 반응기구를 이용하여 Thermal NO를 구하였다. 그리고 이 Total NO에서 Thermal NO를 뺀 값을 Prompt NO로 정의하여, NO 생성에 미치는 각 기구의 역할을 검토하였다.

또한 각 화염에서의 NO 생성량을 정량적으로 비교하기 위하여 Takeno 등[14]이 제안한 NO 배출지수를 이용하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$EI_{NO} = \int_0^L W_{NO} \dot{\omega}_{NO} dx / \int_0^L W_{CH_4} \dot{\omega}_{CH_4} dx \quad (12)$$

III. 결과 및 검토

Fig. 2는 산화제로서 공기가 사용되는 통상화염과 산소 고부화화염의 구조를 비교하기 위하여, CH₄/O₂-79%N₂ 조건(Fig. 2(a))과 산화제가 90%의 O₂와 10%의 N₂로 구성된 CH₄/O₂-10%N₂ 조건(Fig. 2(b))에 대해 축방향 거리에 따른 온도, 주요 화학종 분포를 도시한 것이다. 통상화염의 구조를 살펴보면, 정체면(stag-nation plane; S.P.)은 연료와 산화제의 운동량 차이로 인하여 연료 노즐 측에 가까워 위치하고, 화염은 정체면을 기준으로 산화제 측에 약 0.47 cm의 두께로 형성된다. 또

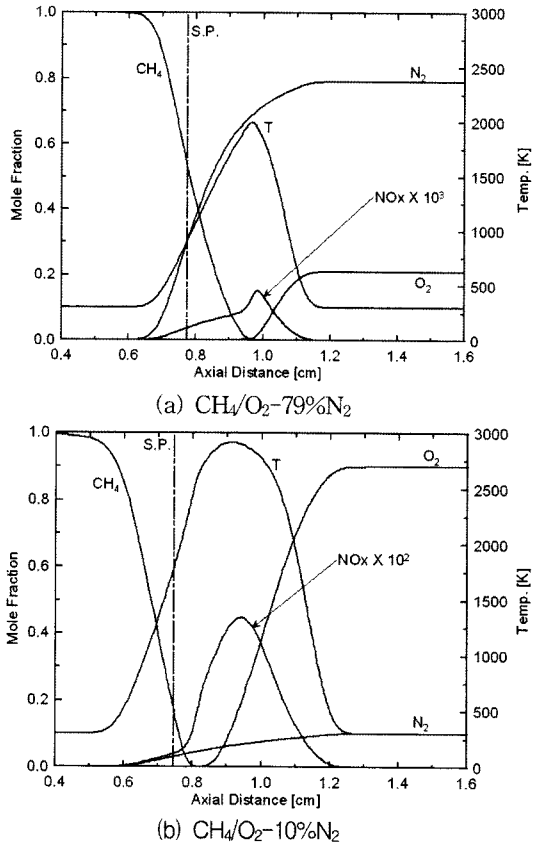


Fig. 2. Comparison of flame structure in CH₄/O₂-79%N₂ and CH₄/O₂-10%N₂.

한, NOx는 이미 알려진 바와 같이 화염대에서 생성되며, 발생량이 최대가 되는 지점은 화염의 최고온도 지점과 거의 일치함을 보인다. CH₄/O₂-10%N₂ 조건의 경우, 정체면은 통상화염에 비해 산화제의 운동량이 증가하여 연료 노즐 측으로 더욱 가깝게 위치함을 볼 수 있다. 또한 화염의 최고 온도가 통상 화염에 비해 약 900 K 이상 높으며, 화염두께가 약 0.65 cm로 증가되었음을 알 수 있다. 산소부화 조건일 경우는 통상화염 조건에 비해 화염의 두께가 증가하고, 화염의 최고온도 위치가 정체면에 가까워져 고온 영역에서의 NO 생성에 관여하는 체류시간(residence time)이 보다 증가됨을 짐작할 수 있다.

Fig. 3은 산화제 중 O₂의 체적비 증가에 따른 화염 최고온도와 EI_{NO}를 도시한 것이다. 여기서, EI_{NO}는 NOx 생성기구 분리법에 따라 Total, Thermal 및 Prompt NO로 구분되었다. 이해를 돕기 위해 산소부화율이 35% 이하인 경우에는 EI_{NO}를 10배하여 도시하였다. 그림에서 산화제 중 산소의 체적비를 의미하는 산소부화

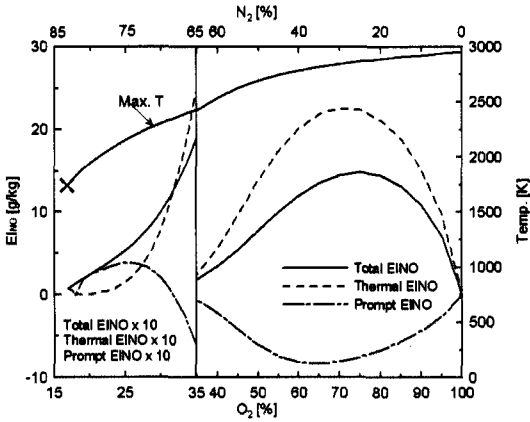


Fig. 3. EI_{NO} and temperature with O₂ enrichment in CH₄/O₂-N₂.

율이 증가함에 따라 화염 최고온도는 점차 상승을 하게 되고, 산소부화율이 높아질수록 그 상승정도는 완만해짐을 볼 수 있다. 각 생성기구에 따른 EI_{NO}의 경향을 살펴보면, Prompt EI_{NO}는 산소부화율이 약 30% 이하에서는 NO 생성에 기여하지 않지만, 30% 이상부터는 오히려 NO 소멸에 기여하고 있다. 이러한 경향은 Sung 등[3]과 Han 등[15]의 선행 연구결과에서도 확인된 바 있다. Thermal EI_{NO}는 산소부화율이 27%까지는 Prompt EI_{NO}보다 작은 값을 보이지만, 27% 이상의 산소부화 조건에서는 NO 생성의 주요 원인으로 작용하고 있다. 결과적으로 위의 두 EI_{NO}의 합에 해당되는 Total EI_{NO}는 산소부화율이 증가함에 따라서 상승을 하다가 부화율이 약 75% 이상에서 감소되는 결과를 보여주고 있다. 서론에서 언급되었듯이 산소부화율 75% 이상에서 NO_x가 감소되는 구체적인 해석결과를 찾기 어려운 실정이다. 이를 위해 본 연구에서는 산소부화율의 변화시 NO_x 생성에 대한 화염두께, 체류시간 및 N₂ 소모율 변화의 영향을 체계적으로 검토하였다.

Fig. 4는 산소부화율 증가에 따른 화염두께를 도시한 것이다. 이때 화염두께는 화염 최고온도의 5% 값을 갖는 위치 사이의 거리로부터 계산되었다. 그림에서 산소부화율이 증가함에 따라 화염두께는 0.47 cm에서 0.65 cm까지 점차적으로 증가함을 볼 수 있다.

Figs. 2와 4에서 확인되었듯이, 산소부화율이 증가함에 따라 화염면은 정체면에 보다 근접하게 되며, 동시에 화염두께가 증가하기 때문에 NO_x의 생성에 요구되는 체류시간은 크게 변하게 된다. 이들에 대한 결과를 확인하기 위하여 Fig. 5는 산소부화율 증가에 따른 체류시간과 화염내부의 최고유속을 도시한 그림이다. 이때 고온영역의 체류시간은 그림에 삽입된 식과 같이

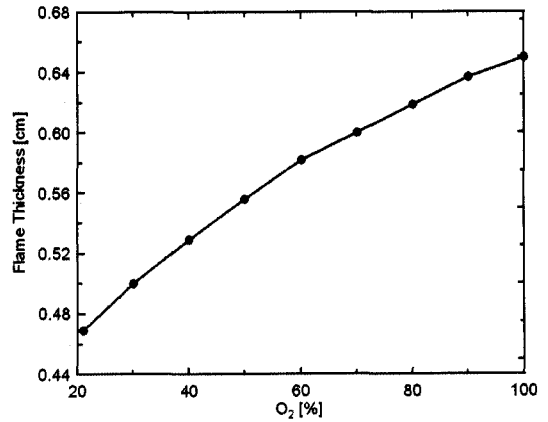


Fig. 4. Flame thickness with O₂ enrichment.

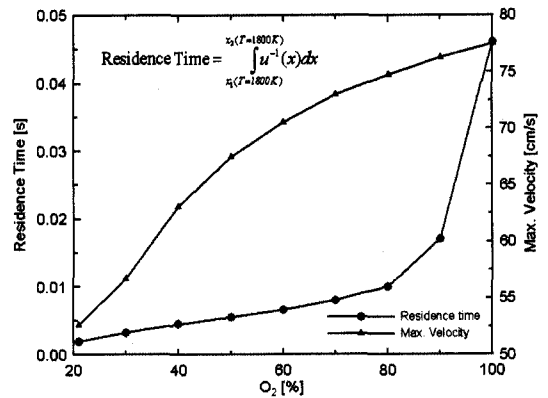


Fig. 5. Residence time and flame maximum velocity with O₂ enrichment.

Thermal NO의 생성이 시작되는 1800 K 이상의 온도영역에서 유속의 역수를 적분하여 얻어졌다. 우선, 화염 내부의 최고유속 변화를 살펴보면, 산소부화율 70%까지 최고유속은 급격하게 증가하다가 70% 이상이 되면 완만하게 증가하게 된다. 그러나 유속의 증가에도 불구하고 산소부화율에 따라 고온영역의 체류시간은 오히려 증가되는 결과를 볼 수 있다. 특히 70% 이후에서 체류시간은 급격히 증가하게 된다. 이는 산소부화율이 증가할수록 유속은 증가되지만, 화염두께의 증가 및 정체면과 화염과의 위치변화로 인하여 NO_x를 생성시킬 수 있는 고온영역에서의 체류시간은 더욱 증가하기 때문이다.

Figs. 3~5의 결과로부터, 일반적으로 NO_x 생성의 주요변수에 해당되는 화염온도, 화염두께 및 체류시간은 산소부화율에 따라 증가되는 일관된 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 결과는 특정 산소부화율 75% 이상의 조건에서 NO_x의 감소현상에 대한 뚜렷한 원인

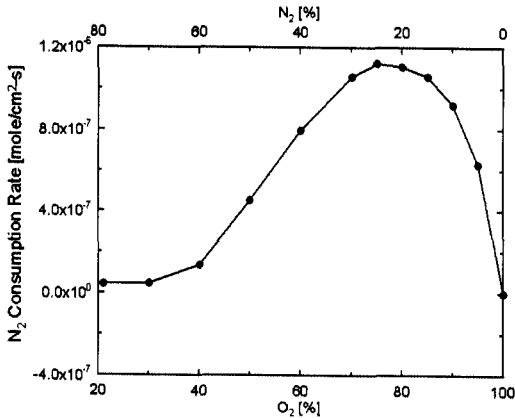


Fig. 6. N₂ consumption rate with O₂ enrichment.

을 제공하지 못함을 알 수 있다.

산소부화의 변화 시 NOx 생성에 영향을 줄 수 있는 또 다른 변수로서, NO 생성에 직접적인 영향을 줄 수 있는 N₂의 소모율을 검토하였다. Fig. 6은 산소부화를 증가에 따른 N₂의 소모율을 도시한 그림이다. 이때 N₂ 소모율은 전체 계산영역에 대해 적분된 값을 의미한다. 산소부화율이 증가할수록 N₂의 소모율은 서서히 증가하다가 부화율이 40%에서부터는 급격하게 증가하여 부화율이 75%가 될 때 최대점을 이루고 있고, 75%에서 100%까지는 급격하게 감소하고 있음을 보여주고 있다. 이는 Fig. 2의 산소부화에 따른 EI_{NO}의 경향과 같은 결과이다. 산소부화율 75%까지 N₂의 소모율이 증가하는 것은 NO의 생성과 관련된 반응이 활성화되고 있고, 이후 N₂의 소모율이 감소하는 것은 실제 투입되는 N₂의 양은 충분할지라도 NO의 생성을 위한 개시반응이 전체적으로 감소되어 나타나는 현상으로 사료된다.

이에 대한 보다 명확한 근거를 확인하기 위해, N₂ 개

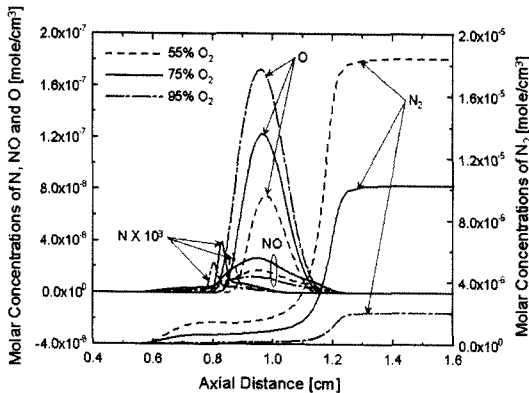


Fig. 7. Molar concentrations of N, NO, O and N₂ for different O₂ enrichments.

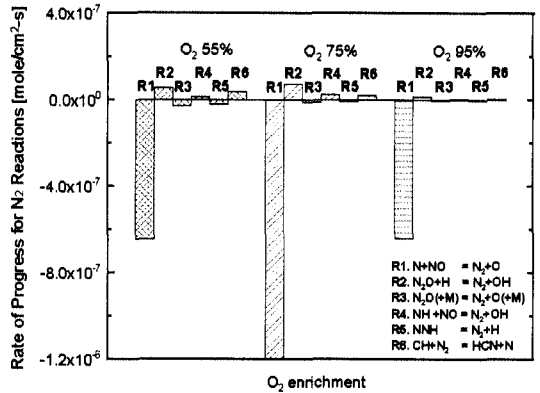


Fig. 8. N₂ consumption rate with O₂ enrichment.

시반응의 생성물에 해당되는 N 라디칼의 발생량을 산소부화에 따라 검토하였다. Fig. 7은 산소부화를 75%를 기준으로 55%와 95%에 대한 N₂, N, NO 및 O 라디칼의 농도분포를 도시한 것이다. 그림에서 산소부화율의 증가에 따라 O 라디칼의 농도는 증가된 반면, N 라디칼의 농도는 산소부화율 75%의 조건에서 가장 높음을 알 수 있다. 그 결과로서 NO의 농도는 Fig. 3에서도 확인한 바와 같이 산소부화율 75%에서 최대값을 보여주고 있다.

Fig. 8은 산소부화율 55%, 75% 및 95%의 조건에서 N₂ 관련 반응식 중 가장 민감한 6가지 소반응 (elementary reaction)들의 진행율(rate of progress)을 도시한 그림이다. y축의 각 소반응들의 진행율은 전 계산영역에 대해 적분되어 표현되었다. 이때 (+/-) 값이 클수록 그림에 삽입된 각 반응들의 정반응/역반응 속도가 큼을 의미한다. 그림에서 모든 산소부화율 조건에서 R1(N+NO=N₂+O) 반응이 다른 반응에 비해 가장 큰 절대치를 보여주고 있다. 즉 N₂와 O 라디칼의 결합에 의한 반응이 NO 생성에 가장 중요한 작용함을 확인할 수 있다. 산소부화에 따른 이 반응의 진행율을 비교해보면, 산소부화율 75%의 조건에서 가장 크며, 55%와 95%일 때 비슷한 값을 보이고 있다. 이는 Fig. 3에서 언급된 EI_{NO}의 경향과도 일치함을 재확인할 수 있다. 결론적으로 산소부화에 따른 EI_{NO} 경향은 화염온도, 화염두께 및 체류시간보다는 NO 생성과 관련된 N₂의 소모율과 밀접하게 관련되며, 이때 N₂ 소모율에 가장 큰 영향을 주는 반응은 Thermal NO 생성경로와 관련된 N+NO=N₂+O임을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

비에혼합 대항류 화염에서 산소부화에 따른 NOx 발

생에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 산소부화율이 약 30% 이상의 조건에서 Thermal NO는 주로 NO 생성에 기여하나, Prompt NO는 오히려 소멸에 기여함을 확인하였다.

2) 산소부화율이 증가함에 따라 화염온도, 두께, 체류 시간 등은 점점 증가하게 되지만, $E_{I_{NO}}$ 는 산소부화율이 75%까지 증가하다가 급격히 감소함을 보인다. 이는 N_2 소모율의 경향과 일치함을 알 수 있었다.

3) 산소부화 화염의 경우, Thermal NO와 관련된 $N+NO=N_2+O$ 반응이 N_2 의 소모에 크게 기여함을 알 수 있다. 또한, 이 반응은 NO 발생이 최대가 되는 산소부화율 75%에서 그 기여가 가장 큼을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Charles, E.B. Jr., Oxygen-Enhanced Combustion, CRC press, (1998)
- [2] Kuligowski, F.F. and N.M. Laurendeau, "Effect of Oxygen Content on NOx Emission Index for Nonpremixed CH_4-O_2/N_2 Flames", *Combust. Science & Tech.*, **130**, 423-430, (1997)
- [3] Sung, C.J. and C.K. Law, "Dominant Chemistry and Physical Factors Affecting NO Formation and Control in Oxy-Fuel Burning", *Proc. Combust. Inst.*, **27**, 1411-1418, (1998)
- [4] Beltrame, A., P. Porshnev, M.W. Merchan, A. Saveliev, A. Fridman, L.A. Kennedy, O. Petrova, S. Zhdanok, F. Amouri and O. Charon, "Soot and NO Formation in Methane-Oxygen Enriched Diffusion Flames", *Combust. & Flame*, **24**, 295-310, (2001)
- [5] Du, J. and R.L. Axelbaum, "The Effect of Flame Structure on Extinction of $CH_4-O_2-N_2$ Diffusion Flames", *Proc. Combust. Inst.*, **26**, 1137-1142, (1996)
- [6] Lutz, A.E., R.J. Kee, J.F. Grcar and F.M. Rupley, "OPPDIF: A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames", *SAND96-8243*, (1997)
- [7] Kee, R.J., J.A. Miller, G.H. Evans and G. Dixon-Lewis, "A Computational Model of the Structure and Extinction of Strained, Opposed Flow, Premixed Methane-Air Flame", *Proc. Combustion Inst.*, **22**, 1479-1494, (1988)
- [8] Tien, C.L., "Thermal Radiation Properties of Gases", *Advances in Heat Transfer*, **5**, 253-324, (1968)
- [9] Ju, Y., H. Guo, K. Maruta and F. Liu, "On the Extinction Limit and Flammability Limit of Non-adiabatic Stretched Methane-Air Premixed Flames", *J. Fluid Mechanics*, **32**, 315-334, (1997)
- [10] Kee, R.J., F.M. Rupley and J.A. Miller, "A Fortran Chemical Kinetic Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics", SAND89-8009B, (1989)
- [11] Kee, R.J., 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", SAND86-8246, (1986)
- [12] Chellian, H.K., C.K. Law, T. Ueda, M.D. Smooke and F.A. Williams, "An Experimental and Theoretical Investigation of the Dilution, Pressure and Flow-Field Effects on the Extinction Condition of Methane-Air-Nitrogen Diffusion Flames", *Proc. Combust. Inst.*, **23**, 503-511, (1990)
- [13] Nishioka, M., Nakagawa, S., Ishikawa, Y. and Takeno, T., "NO Emission Characteristics of Methane-Air Double Flame", *Combust. & Flame*, **98**, 127-138, (1994)
- [14] Takeno, T. and M. Nishioka, "Species Conservation and Emission Indices for Flames Described by Similarity Solutions", *Combust. & Flame*, **92**, 465-448, (1993)
- [15] Han, J.W. and C.E. Lee, "Numerical Study on Flame Structure and NO Formation Characteristics in Oxidizer-Controlled Diffusion Flames", *KSMF (B)*, **32**(4), 555-560, (2002)