

## 산화제 제어 확산화염의 화염구조 및 NO 생성 특성에 관한 수치해석적 연구

한 지 웅\* · 이 창 언†

(2001년 10월 16일 접수, 2002년 2월 7일 심사완료)

### Numerical Study on Flame Structure and NO Formation Characteristics in Oxidizer-Controlled Diffusion Flames

Ji-Woong, Han and Chang-Eon, Lee

**Key Words :** CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> Flame(메탄/산소-이산화탄소 화염), CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> Flame(메탄/산소-질소 화염), Radiation Effect(복사효과), Oxidizer-Controlled Flame(산화제 제어 화염), EINO(NO 배출지수), Quantitative Reaction Path Diagram(반응경로도)

#### Abstract

Numerical Study with detailed chemistry has been conducted to investigate the flame structure and NOx formation characteristics in oxygen-enhanced(CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>) and oxygen-enhanced-EGR(CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>) counter diffusion flame with various strain rates. A small amount of N<sub>2</sub> is included in oxygen-enhanced-EGR combustion, in order to consider the inevitable N<sub>2</sub> contamination by O<sub>2</sub> production process or air infiltration. The results are as follows : In CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> flame it is very important to adopt a radiation effect precisely because the effect of radiation changes flame structure significantly. In CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> flame special strategy to minimize NO emission is needed because it is very sensitive to a small amount of N<sub>2</sub>. Special attention is needed on CO emission by flame quenching, because of increased CO concentration. Spatial NO production rate of oxygen-enhanced combustion is different from that of air and oxygen-enhanced-EGR combustion in that thermal mechanism plays a role of destruction as well as production. In case CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> flame contains more than 40% CO<sub>2</sub> it is possible to maintain the same EINO as that of CH<sub>4</sub>/Air flame with accomplishing higher temperature than that of CH<sub>4</sub>/Air flame. EINO decreases with increasing strain rate, and those effects are augmented in CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> flame.

#### 1. 서 론

최근 선진국들은 기후변화협약회의를 통해 지표면의 온도를 상승시키는 CO<sub>2</sub> 를 비롯한 온실가스에 대한 규제를 점차 강화해 나가고 있다. 국내적으로도 온실가스 중 86%가 CO<sub>2</sub> 인 점과 CO<sub>2</sub> 배출 증가율이 세계 1 위인 점을 감안할 때 화석연료의 연소시 필연적으로 발생하는 CO<sub>2</sub> 를 저감하기 위한 고효율 연소기술의 개발이 필수적이라 할

수 있다.

이러한 고효율 연소기술의 하나인 산소부화(Fuel/O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>) 연소는 공기의 일부 혹은 전체를 산소로 대체하여 연소시키는 것으로, 폐가스량 감소 연소온도 상승, 전열효율 증대, 연소특성 개선 등을 통하여 시스템 및 공정 효율을 향상시키는 연소기술이다. 현재, 이러한 산소부화 연소법은 고온 등의 극히 한정된 산업분야에서만 이용되고 있는 실정이며, 이를 더욱 보편화하기 위해서는 고온 화염에 의한 내화재 손상 및 미량의 N<sub>2</sub> 침투에 의한 NOx 과다 생성, 그리고 안정성 등에 대한 해결책이 마련되어야 한다.<sup>(1)</sup> 이중 고온 화염에 의한 문제점들은 배기가스를 재순환하여 이용하는 산소부화 재순환(Fuel/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>) 연소법으로

\* 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : chelee@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7323 FAX : (032)868-1716

화염온도를 적절히 제어함으로써 가능할 것으로 예상되지만, 이들 산화제 제어 화염의 제반 연소 특성에 대한 체계적인 연구는 아직 미비한 실정이다.

본 연구에서는 메탄(CH<sub>4</sub>) 연료를 대상으로 산소부화(CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>)<sup>(2)</sup> 및 산소부화 재순환(CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>) 연소의 화염구조 및 NO 발생특성을 고찰하기 위하여, 대향류 확산화염의 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서는 우선, 수치계산시 CO<sub>2</sub> 첨가에 의한 복사효과의 중요성을 검토하였으며, CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 화염 및 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 화염에서 산화제 조성변화 및 스트레이너에 따른 화염구조, NO 배출 지수(EINO) 및 생성특성을 검토하였다. 단, CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 화염에는 O<sub>2</sub> 생산공정, 공기 침입 등에 의하여 불가피하게 N<sub>2</sub> 성분이 미량 존재하기 때문에 이를 고려하기 위하여 산화제에 미량의 N<sub>2</sub> 가 존재한다고 가정하여 연구를 수행하였다.

## 2. 지배방정식 및 계산방법

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 대향류 확산 화염을 계산 대상으로 하였으며, 노즐간의 거리(L)는 2cm 로 하였고, 연료와 산화제의 유속은 동일하게 하였다.

계산에 사용된 방정식은 정상상태의 원통 좌표계로 다음의 상미분 방정식 형태로 표현된다.<sup>(3,4,5)</sup>

#### 연속방정식

$$\frac{dU}{dx} = G \quad (1)$$

#### 운동량 방정식

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

#### 에너지 방정식

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

#### 화학종 보존 방정식

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

#### 상태 방정식

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

여기서 U 는 축방향 질량유속을, H 는 반경방향 압력 구배의 고유치(Eigenvalue)로 다음 식으로 정의된다.

$$U = \frac{\rho u}{2} \quad (6)$$

$$H = \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (7)$$

$u, v$  는 각각 축방향  $x$  와 반경방향  $r$  에 대한 속도성분이며,  $\rho, P, \mu, T, \lambda, R$  과  $\bar{W}$  는 각각 밀도, 압력, 점성계수, 온도, 열전도 계수, 기체상수 그리고 평균 분자량을 나타낸다. 또  $Y_k, W_k, c_{pk}, h_k$  와  $\dot{\omega}_k$  는 각각 화학종  $k$  의 질량분율, 분자량, 정압 비열, 총엔탈피 그리고 화학종의 생성률을 나타내며,  $V_k$  는 화학종  $k$  의 확산속도,  $\dot{q}_r$  은 복사열손실을 나타낸다. 화학종  $k$  의 확산속도는 다음의 다성분 공식에 의해 계산하였다.

$$V_k = \frac{1}{X_k \bar{W}} \sum_{j=1}^K W_j D_{kj} \frac{dX_j}{dx} - \frac{D_k^T}{\rho Y_k} \frac{1}{T} \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

여기서,  $D_{kj}, D_k^T$  는 각각 다성분 확산계수, 열확산계수를 나타낸다.

복사열손실에 대한 계산은 열손실에 주로 기여를 하는 것으로 알려진 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CH<sub>4</sub> 의 4 가지 화학종에 대해 계산하였다. 단위 체적당 복사열손실은 다음 식에 의해 계산하였다.<sup>(6)</sup>

$$\dot{q}_r = -4\sigma K_p (T^4 - T_\infty^4) \quad (9)$$

$$K_p = P_{CO_2} K_{CO_2} + P_{H_2O} K_{H_2O} + P_{CO} K_{CO} + P_{CH_4} K_{CH_4} \quad (10)$$

여기서  $\sigma$  는 스테판-볼츠만 (Stefan-Boltzmann) 상수를,  $T$  와  $T_\infty$  는 각각 국부 온도와 주위 온도를 나타내며,  $K_p$  는 혼합가스의 플랭크 평균 흡수 계수(이하 흡수계수)를 나타낸다. 또한  $P_k$  와

$K_k$ 는 화학종  $k$ 의 분압과 각 가스의 흡수 계수를 나타내며, 흡수계수는 다음의 근사식으로 계산하였다.

$$K_k = \sum_{j=0}^5 A_{kj} T^j \quad (11)$$

$$k = CO_2, CO, H_2O, CH_4$$

여기서  $A_{kj}$ 는 온도에 따른 각 화학종의 다항식 계수로써 Ju<sup>(6)</sup>에 의해 사용된 값을 사용하였다.

## 2.2 계산 방법

본 연구에서는 OPPDIF Code<sup>(5)</sup>를 수정하여 계산을 수행하였으며, 열역학 및 전달 물성치는 각각 Chemkin-II<sup>(7)</sup>와 Transport Package<sup>(8)</sup>를 사용하였다. 저자들이 사용한 OPPDIF Code에서는 임의 스트레인율에 대한 화염구조를 계산하기 위해 그에 해당하는 노즐 유속을 초기조건으로 입력해야 하는데, 이 유속을 계산하기 위하여 대항류 확산화염을 대상으로 F. A. Williams가 유도한 다음 식<sup>(9)</sup>을 이용하였다.

$$a = \frac{2(-u_o)}{L} \left[ 1 + \frac{u_F}{(-u_o)} \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_o}} \right] \quad (12)$$

여기서, 첨자  $F$ 는 연료노즐,  $O$ 는 산화제 노즐을 나타낸다. 이와 같은 대항류 화염에서 스트레인율은 화염구조 및 NO 생성 특성에 중요한 인자이나, 본 연구에서는 스트레인율이 10~200인 화염에 한정하여 연구를 수행하였다.

연료 및 NO<sub>x</sub>에 대한 상세 반응 기구로는 GRI 2.11<sup>(10)</sup>를 이용하였다. 이 반응기구는 49개의 화학종과 279개의 가역반응으로 구성되어 있다. CH<sub>4</sub>의 산화반응은 C<sub>2</sub> 반응까지 고려하며, Thermal NO와 Prompt NO, N<sub>2</sub>O 경우 NO 및 NO<sub>2</sub> 반응 등 NO<sub>x</sub>의 전 반응경로를 상세하게 묘사하고 있다. 특히, 본 연구에서는 NO 생성에 미치는 Thermal NO 및 Prompt NO 기구의 역할을 분리 검토하기 위해 Nishioka<sup>(11)</sup>가 제안한 방법에 의해 동일 화염을 두 번 계산하였다. 즉, 앞에 언급한 GRI 반응기구를 이용하여 NO의 총생성량(이하, Full NO)를 구하고, 다음에 C<sub>2</sub> 반응에 Thermal NO 반응만을 포함한 34개의 화학종과 180개의 가역반응으로 이루어진 반응기구를 이용하여 Thermal NO를 구하였다. 그리고 이 Full NO에서 Thermal NO를 뺀

값을 Prompt NO로 정의하여, NO 생성에 미치는 각 기구의 역할을 검토하였다.

또한 각 화염에서의 NO 생성을 정량적으로 비교하기 위해, Takeno<sup>(12)</sup>등이 제안한 NO 배출지수(NO Emission Index)를 이용하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$EI_{NO} = \frac{\int W_{NO} \dot{\omega}_{NO} dx}{-\int W_{CH_4} \dot{\omega}_{CH_4} dx} \quad (13)$$

## 3. 계산결과 및 검토

Fig. 1은 복사효과를 비교, 검토하기 위하여 CH<sub>4</sub>/Air 화염, CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 화염 및 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 화염의 스트레인율( $a=10\sim 200$ )에 따른 화염 최고 온도를 비교, 도시한 것으로, 그림중 실선은 복사효과를 고려한 경우, 점선은 고려하지 않은 경우의 계산 결과이다. 복사효과와 유무에 따른 화염온도의 차이는 저스트레인율 영역에서 크며, 특히 CO<sub>2</sub>가 첨가된 화염의 경우 복사 열손실의 증가로 인하여 다른 화염에 비해 더 증가한다. 따라서 CO<sub>2</sub>와 같이 복사 흡수 계수가 큰 기체를 포함한 화염의 경우 복사 효과를 정밀하게 고려해야 하며, 이후에 제시한 모든 결과는 모두 복사효과를 고려한 것이며, 스트레인율은 100인 경우이다.

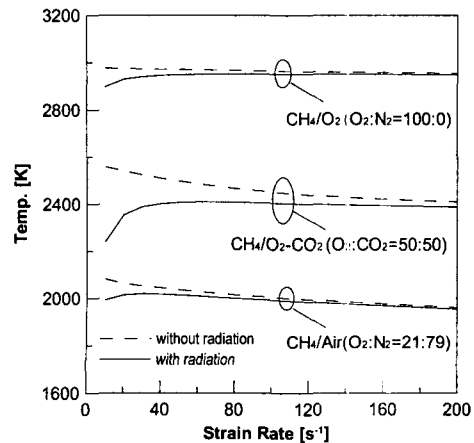


Fig. 1 Maximum flame temperature variation with and without radiation

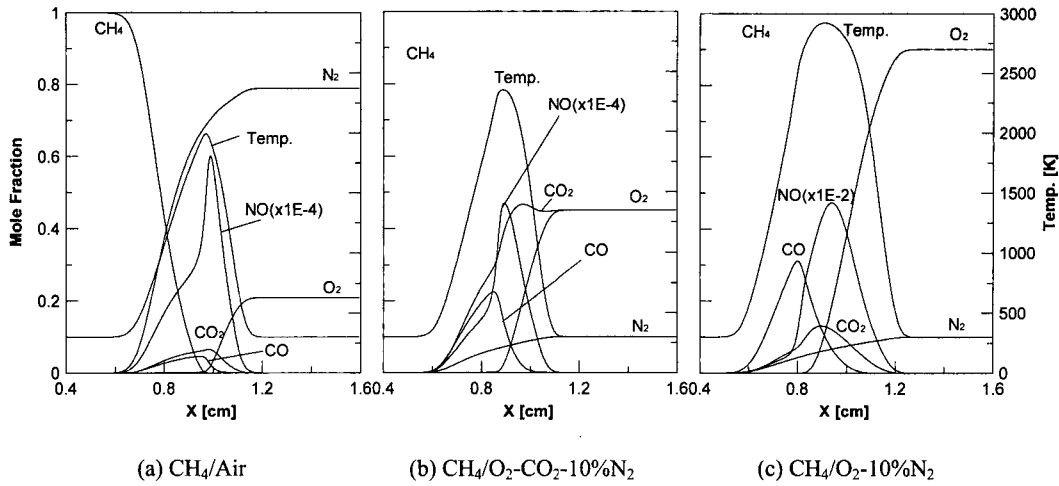


Fig. 2 Comparison of flame structures

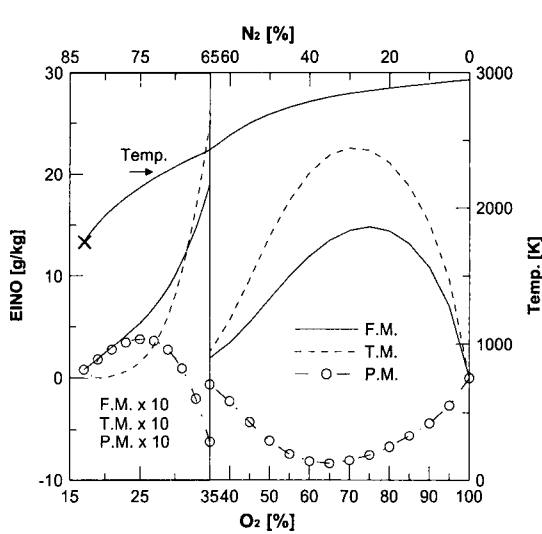


Fig. 3 Effect of O<sub>2</sub> enrichment in CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> flame

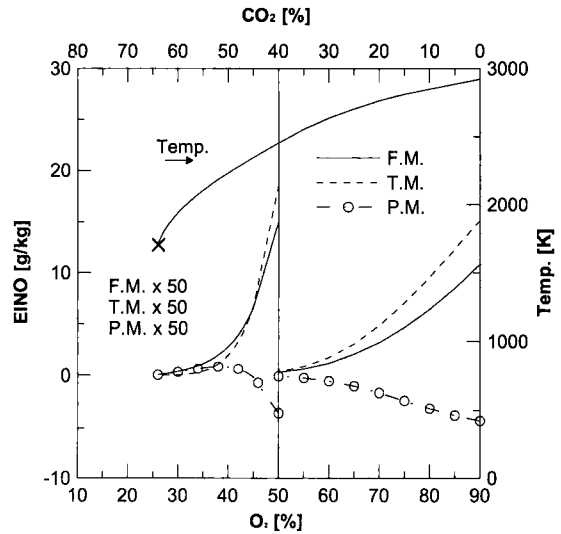


Fig. 4 Effect of O<sub>2</sub> enrichment in CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> flame

Fig. 2 는 (a) 통상 화염, (b) 산화제 제어 화염 및 (c) 산소 부화 화염의 구조를 도시한 것이다. O<sub>2</sub> 생산과정이나 공기 침입 등에 의하여 산화제에 N<sub>2</sub> 성분이 존재할 수 있기 때문에, 산화제중 10%의 N<sub>2</sub> 가 존재한다고 가정하여 계산하였다. 우선 CH<sub>4</sub>/Air 화염과 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> 화염을 비교하면, 반응대라 할 수 있는 고온 영역의 두께 및 반응대 내에서의 연료의 산화과정에 많은 차이가 있어, CH<sub>4</sub>/Air 화염대에서 최대 CO 농도는 5% 정도로 최대 CO<sub>2</sub> 농도의 약 2/3 정도이며 NO 농도는 최대 60ppm 정도이다. 그러나, CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> 화염대

의 경우에는 최대 CO 농도가 30% 정도로 최대 CO<sub>2</sub> 농도보다도 2 배 정도 많이 존재하며, NO 농도 역시 통상화염에 비해 80 배 정도 많이 존재한다. 다음으로 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> 화염을 살펴보면, 화염구조는 CH<sub>4</sub>/Air 와 거의 유사하나, 화염대의 두께 및 온도분포에 차이가 있으며, 이로 인해 화염 안정성에도 얼마간의 차이가 있으리라 예상된다.

Fig. 3 은 산소부화에 따른 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> 화염의 최고온도 및 NO 생성기구에 따른 EINO 를 도시한 것으로, 실선은 Total NO(F.M.), 점선은 Thermal

NO(T.M.), 그리고 일점쇄선은 이들의 차에 해당하는 Prompt NO(P.M.)의 배출지수(EINO)를 나타내며, 산소부화율이 35% 이하인 경우에는 EINO 를 10 배하여 도시하였다. 그림에서 산소부화율이 증가함에 따라 화염 최대 온도는 급격히 상승하나, 부화율이 높을수록 그 상승정도는 완만해진다. Total EINO(F.M.)는 부화율 증가에 따라 초반에는 상승하나, 부화율이 약 70% 이상에서는 온도증가에도 불구하고 질소 농도의 감소로 급격히 감소함을 알 수 있다. 이러한 EINO 를 생성기구별로 보면 P.M.은 대부분의 산소부화 조건에서 NO 발생을 억제하는 경향이 있으며, 이는 P.M.이 T.M.과 대등하거나 오히려 지배적인 CH<sub>4</sub>/Air 연소에서의 경향과는 반대이다. 이 결과로부터, 산소부화 연소시 발생하는 NO는 대부분 Thermal NO라 할 수 있다. 또한 Total EINO 는 N<sub>2</sub>가 1%만 포함되더라도 2 g/kg 이 되어, CH<sub>4</sub>/Air(EINO=0.3 g/kg) 화염보다 7 배 정도 많이 발생함을 알 수 있다. 따라서 산소부화 연소의 경우 미량의 N<sub>2</sub>에 대해서도 각별한 주의가 요구되며, N<sub>2</sub> 혼입을 방지할 수 없는 경우에는 NO 배출량을 저감시키기 위한 특별한 대책이 요구됨을 알 수 있다.

Fig. 4 는 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 연소에서 산화제 중에 N<sub>2</sub>가 10%가 존재한다는 가정하에 산화제중의 CO<sub>2</sub> 함유량 변화에 따른 최고온도 및 EINO 들을 도시한 것으로 CO<sub>2</sub> 함유율이 40% 이상인 영역(50 배 확대하여 도시하였음)은 EINO 가 CH<sub>4</sub>/Air 화염보다 적게 발생하는 영역을 나타낸다. 그리고 이 영역에서의 화염 최고온도는 CH<sub>4</sub>/Air 화염에 비해 최대 450K 정도 높다. 이 결과로부터, O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>를

산화제로 이용할 경우, 통상화염과 동일 수준의 EINO 에서도 고온 연소가 가능함을 알 수 있다. NO 생성 특성을 살펴보면, CO<sub>2</sub> 농도가 55% 이상인 지역에서의 NO 생성은 CH<sub>4</sub>/Air 와 유사하다고 할 수 있으나, 45% 보다 작아지면, T.M.에 의한 생성률이 지배적이며 P.M.에 의해서는 오히려 NO가 소멸하는 산소부화 화염의 NO 생성특성과 유사함을 알 수 있다.

Fig. 5 는 NO 생성 특성을 비교, 검토하기 위하여 CH<sub>4</sub>/Air 화염과 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 화염 및 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 화염에서 각 NO 생성기구에 의한 몰생성률(Molar Production Rate)을 도시한 것이며, 그림의 하단에 표시된 수치는 각 화염에서의 EINO 다. 우선 P.M. 생성률은 CH<sub>4</sub>/Air 화염과 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 화염의 경우 온도 최고점 부근의 좁은 영역에서 음(-)과 양(+ )의 극대점을 갖으며, CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 화염에서는 그 위치가 연료측으로 이동하고 있음을 알 수 있다.

그러나 T.M. 생성률은 CH<sub>4</sub>/Air 화염의 경우 반응대 전 영역에서 미소한 양(-)의 값을 가지나, CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 화염에서는 온도최고점을 중심으로 산화제 측의 T.M. 생성률이 양의 극대점을 형성하는 것을 알 수 있다. 또한 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 화염에서는 넓은 영역에 걸쳐 양의 극대점 뿐만 아니라 음의 극대점도 갖는 분포를 하고 있으며, 이와 같은 차이로 F.M. NO 생성률도 매우 다른 분포로 나타난다. 특히 T.M. 생성률이 음의 극대점을 갖는 부분은 N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>↔N+NO 의 반응에 기인하는 것으로 사료되며, 이에 대해서는 뒤의 반응경로도에서 상세하고자 한다.

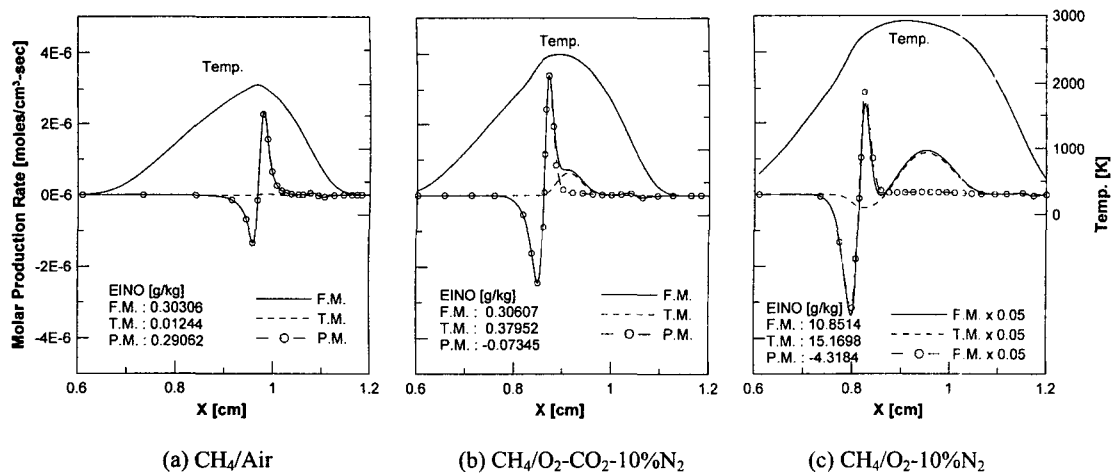
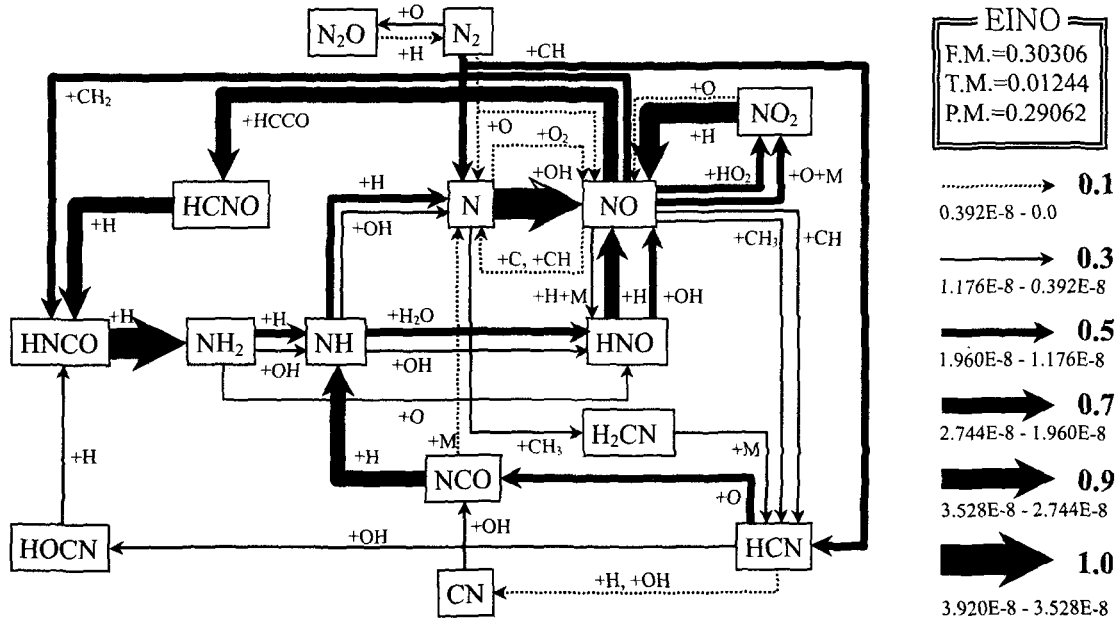
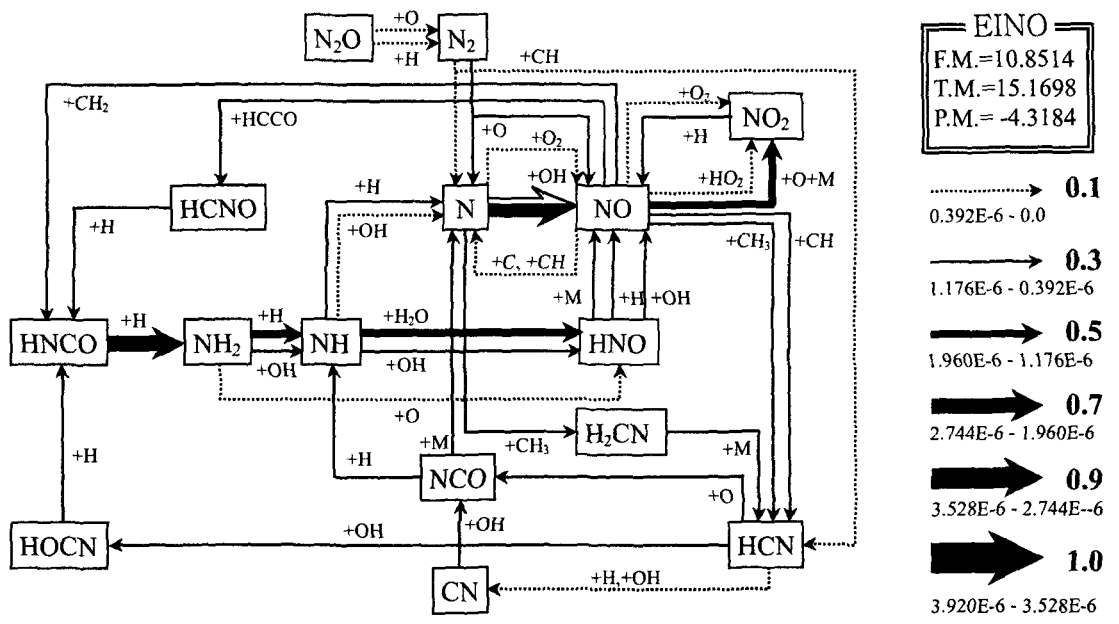


Fig. 5 NO production rate via different NO formation mechanisms

Fig. 6 은 NO 의 생성 및 소멸 경로를 관찰하기 위하여, (a)CH<sub>4</sub>/Air 화염과 (b)CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> 화염에 서의 NO 반응경로도를 각각 비교, 도시한 것이다. NO 반응경로도는 국부 NO 생성률의 면적 적분값



(a) CH<sub>4</sub>/Air



(b) CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub>

Fig. 6 Integrated quantitative reaction path diagrams

을 기준으로 작성되었으며, 화살표의 굵기는 NO 생성물의 면적 적분값에 비례한다. 또한, CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> 화염의 NO 생성물은 CH<sub>4</sub>/Air 화염의 그것보다 100 배 확대하여 도시하였으며, N+OH↔NO+H 반응경로중 백색부분은 T.M. 에 의한 기여도를 나타낸다. 우선 CH<sub>4</sub>/Air 화염을 보면, T.M. 의 개시반응(N<sub>2</sub>+O↔N+NO)이 P.M.의 개시반응(N<sub>2</sub>+CH↔HCN+N)에 비해 상대적으로 약하게 진행됨을 알 수 있으며, N+OH↔NO+H 반응에 있어서 T.M. 의 기여도는 전체 기여도의 2%정도에 불과함을 알 수 있다. 그렇지만 P.M. 반응경로를 살펴보면, CH 라디칼에 의해 상당량의 N<sub>2</sub>가 HCN 으로 전환되며 CH<sub>2</sub> 와 HCCO 라디칼에 의한 Reburning 반응도 활발히 일어난다. 이로부터 CH<sub>4</sub>/Air 화염에서는 P.M.에 의한 NO 생성이 지배적임을 알 수 있다.

그러나, CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> 화염에서는 T.M.의 개시반응이 P.M.에 비해 상대적으로 지배적으로 작용하며, N+OH↔NO+H 반응에 있어서도 T.M.이 37% 정도를 차지한다. 반면에, P.M.은 NO 생성 반응보다는 NO 소멸 반응에 상대적으로 많이 기여하여, 결과적으로 EINO 가 음의 값을 갖게 되며, 결과적으로 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> 화염에서 T.M.은 NO 생성에 기여하며, P.M.은 NO 소멸에 기여한다.

Fig. 7 은 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> 화염에서 T.M.에 의한 NO 생성물이 음의 극대점을 나타내는 지점

(x=0.824 cm)에서의 국부 반응경로도를 도시한 것으로서, 사각형 내의 기울어진 분자는 해당 화학종의 음의 생성물을, 그렇지 않은 분자는 양의 생성물을 나타낸다. 우선 T.M.의 개시반응이 역방향으로 진행되는 것으로부터 국부적으로는 T.M.이 NO 의 소멸에 기여하며, 대부분의 NO 가 HCN 을 거쳐서 생성되는 것으로부터 P.M.은 NO 의 생성에 지배적으로 기여하고 있음을 알 수 있다. 따라서 국부 반응경로도와 화염 전체의 면적 적분 반응경로도의 비교를 통해 T.M.에 의한 NO 생성이 지배적인 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> 화염에서도 국부적으로는 T.M.에 의한 NO 소멸도 존재하며, 반응경로 또한 크게 변화함을 알 수 있다.

Fig. 8 는 스트레인율에 따른 EINO 생성 특징을 NO 생성기구 별로 도시한 것으로 각 화염의 산화제 조성 및 그림 중의 표기는 Fig. 3 과 동일하며, CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> 화염의 경우 EINO 를 0.02 배, CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> 화염의 경우 0.5 배하여 각각 도시하였다. CH<sub>4</sub>/Air 화염의 경우 T.M.과 P.M.은 모두 NO 의 생성에 기여하며, 저스트레인율에서는 T.M.에 의한 생성이 P.M.과 거의 대등한 수준으로 작용하지만, 스트레인율의 증가에 따라 그 기여도는 감소됨을 알 수 있다. CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> 화염 및 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> 화염에서는 본 계산 범위내 (a=10-200)에서 P.M.은 주로 NO 의 소멸에 기여하며, 스트레인율이 증가함에 따라 T.M.에 의한 NO

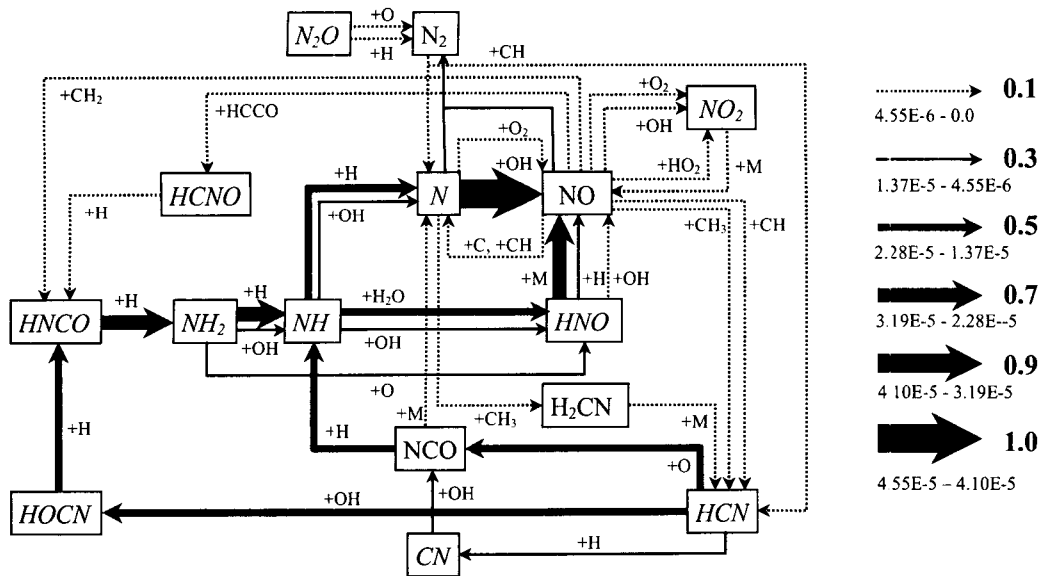


Fig. 7 Local quantitative reaction paths diagrams at the first positive NO peak in CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>-10%N<sub>2</sub> flame

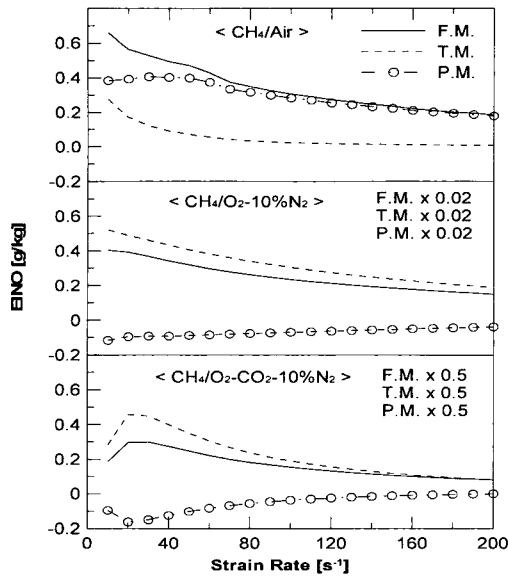


Fig. 8 Change of EINO with strain rate variation

생성이 급격히 감소된다. 특히  $\text{CH}_4/\text{O}_2-10\%\text{N}_2$  화염에서는 스트레인율에 따른 T.M. 저감비율이 매우 큰 것을 알 수 있으며, 이로부터 NO 생성특성이 스트레인율 변화에 매우 민감하게 변화함을 알 수 있다. 이는 산소 부화 연소에서 국부적인 화염신장이 EINO 저감 대책의 유효한 방법으로 이용될 수 있다는 것을 잘 보여주는 결과이다.

#### 4. 결론

산화제 제어 확산화염에 대한 수치계산을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1)  $\text{CH}_4/\text{O}_2-\text{CO}_2-\text{N}_2$  화염에서는 복사효과를 정밀하게 고려해야 한다.
- (2)  $\text{CH}_4/\text{O}_2-\text{N}_2$  화염의 EINO는 통상화염에 비해  $\text{N}_2$ 가 1%만 존재해도 약 7 배가 되며,  $\text{N}_2$ 의 존재량에 따라 최대 50 배까지 증가한다. 이러한 산소 부화 연소에서 화염신장은 EINO 저감 대책으로 유효한 방법으로 예상된다.
- (3)  $\text{CH}_4/\text{O}_2-\text{CO}_2-10\%\text{N}_2$  화염에서  $\text{CO}_2$  농도가 40% 이상에서는 EINO는 통상화염보다 낮으며, 통상화염과 동일 수준의 EINO에서도 고온연소가 가능하다.
- (4) 산화제제어 고온 화염에서의 NO 생성기구는 통상화염과 상이하다. 특히 Prompt NO 기구는 NO 소멸에 많이 기여하며, Thermal 기구도 위치에 따라서는 소멸에 기여하기도 한다.

#### 후 기

본 연구는 연소기술연구센터(Combustion Engineering Research Center)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Charles E. Baukal, Jr., 1998, Oxygen-Enhanced Combustion, CRC.
- (2) Sung, C. J. and Law, C. K., 1998, "Dominant Chemistry and Physical Factors Affecting NO Formation and Control in Oxy-Fuel Burning," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 1411~1418.
- (3) Robert J. Kee, James A. Miller, Gregory H. Evans, Graham Dixon-Lewis, 1988, "A Computational Model of the Structure and Extinction of Strained, Opposed Flow, Premixed Methane Air Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 22, pp. 1479~1494.
- (4) Graham Dixon-Lewis, 1990, "Structure of Laminar Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 23, pp. 305~324.
- (5) Lutz, A. E., Kee, R. J., Grcar, J. F. and Rupley, F. M., 1997, "OPPDIF: A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames," SAND96-8243.
- (6) Yiguang Ju, Hongsheng Guo, Kaoru Maruta, Fengshan Liu, 1997, "On the Extinction Limit and Flammability Limit of Non-adiabatic Stretched Methane-Air Premixed Flames," *J. Fluid Mech.*, Vol. 342, pp. 315~334.
- (7) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1989, "Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics", SAND89-8009B.
- (8) Kee, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., 1994, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multi-component Transport," SAND86-8246.
- (9) Chellian, H. K., Law, C. K., Ueda, T., Smooke, M. D. and Williams, F. A., 1990, "An Experimental and Theoretical Investigation of the Dilution, Pressure and Flow-Field Effects on the Extinction Condition of Methane-Air-Nitrogen Diffusion Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 23, pp.503~511.
- (10) GRI Mech. Ver. 2.11, Web address: [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/)
- (11) Nishioka, M., Nakagawa, S., Ishikawa, Y. and Takeno, T., 1994, "NO Emission Characteristics of Methane-Air Double Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 98, pp. 127~138.
- (12) Takeno, T. and Nishioka, M., 1993, "Species Conservation and Emission Indices for Flames Described by Similarity Solutions," *Combustion and Flame*, Vol. 92, pp. 465~448.