

# CH<sub>4</sub>/Air-CO<sub>2</sub> 대향류 확산화염의 NO<sub>x</sub> 생성 특성 및 화염구조

한지웅\* · 이승로\* · 이창언\*\*

## NO<sub>x</sub> Formation and Flame Structure in CH<sub>4</sub>/Air-CO<sub>2</sub> Counterflow Diffusion Flames

J. W. Han, S. R. Lee and C. E. Lee

**Key Words:** Counterflow Diffusion Flame (대향류 확산 화염), Radiation Effect (복사효과), Strain Rate (스트레인율), NO<sub>x</sub> Reduction (NO<sub>x</sub> 저감)

### Abstract

Numerical study with detailed chemistry has been conducted to investigate the NO<sub>x</sub> formation and structure in CH<sub>4</sub>/Air-CO<sub>2</sub> counterflow diffusion flames. The importance of radiation effect is identified and the role of CO<sub>2</sub> addition is addressed to thermal and chemical reaction effects, which can be precisely specified through the introduction of an imaginary species. Also NO separation technique is utilized to distinguish the contribution of thermal and prompt NO formation mechanisms. The results are as follows : The radiation effect is dominant at low strain rates and it is intensified by CO<sub>2</sub> addition. Thermal effect mainly contributes to the changes in flame structure and the amount of NO formation but the chemical reaction effect also cannot be neglected. It is noted that flame structure is changed considerably due to the addition of CO<sub>2</sub> in such a manner that the path of methane oxidation prefers to take CH<sub>4</sub>→CH<sub>3</sub>→C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>→C<sub>2</sub>H<sub>5</sub> instead of CH<sub>4</sub>→CH<sub>3</sub>→CH<sub>2</sub>→CH. At low strain rate(a=10) the reduction of thermal NO is dominant with respect to reduction rate, but that of prompt NO is dominant with respect to total amount.

### 1. 서론

산업화로 인한 화석연료의 과도한 사용은 CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>등을 다량으로 발생시켜 지구의 온난화 및 대기오염을 가속시키고 있는 실정이다. 이미 선진 각국에서는 CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 등의 오염물질 배출규제가 엄격하게 시행되고 있으며, 이에 관한 연구도 체계적으로 진행되고 있다. 또 화석 연료의 고갈에 대비한 새로운 대체 에너지원의 개발 및

활용에 대한 연구도 심도 있게 진행되고 있다. 그 좋은 예로, 배기가스를 재순환하여 NO<sub>x</sub>를 저감시키는 EGR<sup>[1]</sup>, 새로운 에너지원인 매립지 가스(LFG) 및 바이오 가스(Biogas) 등의 저급 연료<sup>[2]</sup>에 관한 연구를 들 수 있다. LFG등의 저급연료에는 다량의 CO<sub>2</sub>가 포함되어 있으며, EGR의 경우도 산화제에 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 등이 포함되어 있으므로, 이들을 이용하는 화염에는 연소시 발생하는 CO<sub>2</sub> 이외에도 여분의 CO<sub>2</sub>가 다량 존재하게 된다. 그리고 CO<sub>2</sub>는 공기에 비해 비열이 크며 복사물성인 흡수계수도 크다. 따라서, 위에 언급한 여분의 CO<sub>2</sub>는 화염 구조, NO<sub>x</sub> 발생 및 화염 안정성 등에 많은 영향을 미치나, 이들에 대한 기초 연구는 아직 미진한 실정이다.

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 인하대학교 기계·항공·자동차공학부

본 연구는 반응대에 CO<sub>2</sub>가 여분으로 존재하는 CH<sub>4</sub> 화염의 NO<sub>x</sub> 생성 특성 및 화염구조에 대해 대향류 확산화염의 수치해석 결과를 이용해 검토한 것이다. 이를 위해, 우선 CO<sub>2</sub>가 다량 존재하는 화염에서의 복사 효과의 중요성을 검토하였다. 그리고 열역학적 물성치, 전달 물성치 및 복사 물성이 CO<sub>2</sub>와 동일하나 반응에는 전혀 참여하지 않는 가상의 불활성 가스 X를 도입<sup>[6]</sup>하여, CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 열적 효과 및 반응 효과를 분리하여 규명하였다. 또한 CO<sub>2</sub>의 첨가로 인한 NO<sub>x</sub>의 저감원인에 대해서는 Nishioka<sup>[7]</sup>가 제안한 NO 분리법을 이용하여, NO 생성 기구별로 분리하여 규명하였다. 이러한 연구는 CO<sub>2</sub>를 포함하는 화염 구조 및 NO<sub>x</sub> 생성특성을 이해하는 기초 자료로의 활용뿐만 아니라 난류 화염을 수치해석하는데 사용되는 층류 소화염 모델의 데이터로의 활용 가치도 있을 것으로 생각된다.

## 2. 지배방정식 및 계산방법

### 2.1. 지배방정식

본 연구에서는 1차원 대향류 화염을 수치해석적으로 모델링한 OPDF Code<sup>[9]</sup>를 수정하여 계산을 수행하였으며, 지배방정식은 다음과 같고, 지배방정식에 대한 상세는 문헌<sup>[3,8,9]</sup>을 참고하기 바란다.

#### 연속방정식

$$\frac{dU}{dx} = G$$

#### 운동량 방정식

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

#### 에너지 방정식

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

#### 화학종 보존 방정식

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

#### 상태 방정식

$$P = \frac{\rho RT}{W}$$

여기서 U는 축(x)방향 질량유속을, H는 반경(r)방향 압력 구배의 고유치(Eigenvalue)이며  $\rho$ , P,  $\mu$ , T,  $\lambda$ , R 과  $\overline{W}$  는 각각 밀도, 압력, 점성계수, 온도, 열전도 계수, 기체상수 그리고 평균 분자량을 나타낸다. 또한  $Y_k$ ,  $W_k$ ,  $c_{pk}$ ,  $h_k$  와  $\dot{w}_k$  는 각각 화학종 k 의 질량분율, 분자량, 정압 비열, 총엔탈피 그리고 화학종의 생성률을 나타내며,  $V_k$  은 화학종 k 의 확산 속도,  $\dot{q}_r$  은 복사 열손실을 나타낸다. 복사열손실에 대한 계산은 열손실에 주된 기여를 하는 것으로 알려진 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CH<sub>4</sub>의 4가지 화학종에 대해 계산하였으며 단위 체적당 복사열손실은 다음 식에 의해 계산하였다<sup>[10]</sup>.

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

$$K_b = P_{CO_2} K_{CO_2} + P_{H_2O} K_{H_2O} + P_{CO} K_{CO} + P_{CH_4} K_{CH_4}$$

여기서  $\sigma$ 는 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 상수를, T 와 T<sub>∞</sub> 는 각각 국부 온도와 주위 온도를 나타내며, K<sub>b</sub> 는 혼합가스의 평균 플랭크 흡수 계수를 나타낸다. 또한 P<sub>k</sub> 와 K<sub>k</sub> 는 화학종 k 의 분압과 각 가스의 평균 플랭크 흡수 계수를 나타내며, 평균 플랭크 흡수 계수는 다음의 근사식으로 계산하였다.

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

여기서, A<sub>kj</sub> 는 온도에 따른 각 화학종의 다항식 계수로써 Ju<sup>[4]</sup>에 의해 사용된 값을 사용하였다.

## 2.2. 계산 방법

본 연구에서는 대향류 확산 화염을 계산 대상으로 사용하였다. 연료는 (+)x 방향, 산화제는 (-)x 방향으로 공급되며 유속은 동일하게 하였다. 노즐간의 거리(L)는 2cm이며, 임의 스트레인율(a)에서의 노즐 유속은 다음 식<sup>[11]</sup>에서 구하였다.

$$a = \frac{2(-u_0)}{L} \left[ 1 + \frac{u_F}{(-u_0)} \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_0}} \right] \quad (1)$$

여기서, 첨자 F는 연료노즐, O는 산화제 노즐을 나타낸다.

상세 반응 기구로는 GRI 2.11<sup>[12]</sup>를 이용하였다. 이 반응기구는 49개의 화학종과 279개의 가역반응으로 구성되어 있다. CH<sub>4</sub>의 산화반응은 C2 반응까지 고려하며, Thermal NO와 Prompt NO, N<sub>2</sub>O 경유 NO 및 NO<sub>2</sub> 반응 등 NO<sub>x</sub>의 전 반응경로를 상세하게 묘사하고 있다. 특히, 본 연구에서는 NO<sub>x</sub> 생성에 미치는 Thermal NO 및 Prompt NO 기구의 역할을 분리 검토하기 위해 Nishioka<sup>[7]</sup>가 제안한 방법에 의해 동일 화염을 두 번 계산하였다. 즉, 앞에 언급한 GRI 반응기구를 이용하여 NO의 총생성량(이하, Full NO)를 구하고, 다음에 C2반응에 Thermal NO 반응만을 포함한 34개의 화학종과 180개의 가역반응으로 이루어진 반응기구를 이용하여 Thermal NO를 구하였다. 그리고 이 Full NO와 Thermal NO를 뺀 값을 Prompt NO로 정의하여, NO 생성에 미치는 각 기구의 역할을 검토하였다.

## 3. 계산결과 및 검토

Fig. 1은 복사효과를 살펴보기 위해, CH<sub>4</sub>/Air 화염과 공기에 물분율로 10%의 CO<sub>2</sub>를 첨가한 CH<sub>4</sub>/Air-CO<sub>2</sub> 화염의 스트레인율에 따른 화염의 최고온도를 도시한 것으로, 실선은 복사를 고려한 경우, 점선은 고려하지 않은 경우이다. 먼저, 복사를 고려하지 않은 경우 최고 온도는 스트레인율 증가에 따라 단조롭게 감소함을 알 수 있다. 한편, 복사 효과를 고려한 경우, 스트레인율 증가에 따라 30 이하에서는 온도가 오히려 증가하다가 감소함을 알 수 있다. 그리고 복사 효과의 유무에 따른 최고 온도의 차이는 저 스트레인

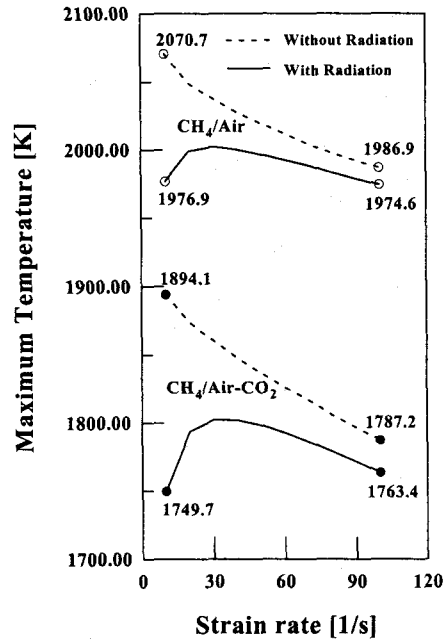
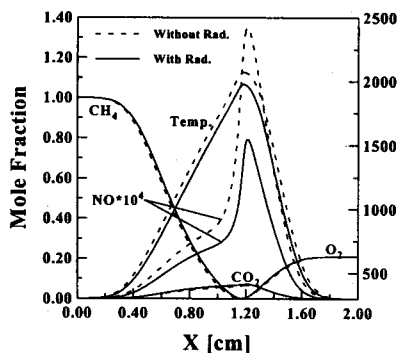


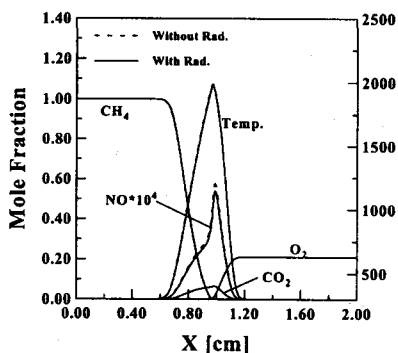
Fig. 1 Maximum temperature variation of CH<sub>4</sub>/Air and CH<sub>4</sub>/Air-CO<sub>2</sub> counterflow diffusion flame with strain rate

율에서는 매우 크나, 스트레인율이 증가함에 따라 그 차이는 점차 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 복사 열손실량은 화염 체적에 크게 의존하기 때문에 스트레인율이 큰 경우 화염 온도의 감소는 복사 효과보다는 스트레인율에 크게 의존하나, 스트레인율이 작은 경우 화염 신장에 따른 온도 저감 효과는 미소하나 복사로 인한 온도 저감 효과가 매우 현저하게 나타나기 때문에 화염의 최고 온도가 스트레인율이 큰 경우보다 오히려 낮아짐을 의미한다. CH<sub>4</sub>/Air-CO<sub>2</sub> 화염의 경우 통상의 CH<sub>4</sub>/Air 화염보다 화염 최고 온도는 낮음에도 불구하고, 복사의 유무에 따른 최고 온도의 차이는 더 커져, CO<sub>2</sub>의 첨가로 인한 복사열 손실의 효과가 더욱 두드러짐을 알 수 있다. 따라서 CO<sub>2</sub> 등 복사 흡수계수가 큰 화학종이 연소장에 미치는 영향을 살펴보기 위해서는 복사효과를 고려하는 것이 필수적임을 알 수 있다.

Fig. 2은 복사 효과가 화염 구조 및 NO 생성에 미치는 영향을 살펴보기 위한 CH<sub>4</sub>/Air 화염의 계산 결과이다. Fig. 2(a)의 스트레인율이 10인 경우, 복사 효과를 고려함으로써 화염면 전체에서 온도가 감소하며 이로 인해 주요 화학종의 농도



(a) Strain rate 10

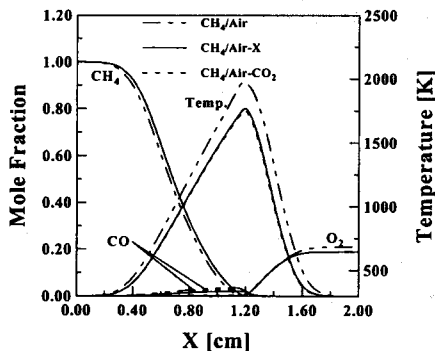


(b) Strain rate 100

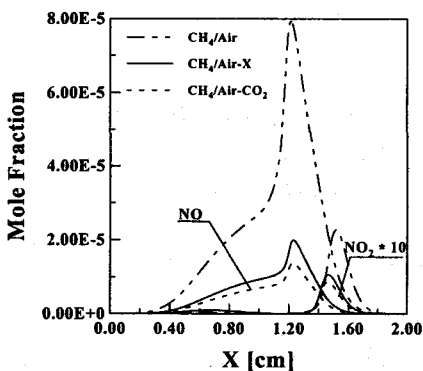
Fig. 2 Flame structure of CH<sub>4</sub>/Air counter flow diffusion flame with strain rate

분포에 있어서 약간 차이를 보이나 그 차이는 그다지 크지 않다. 그러나 NO의 경우, 복사 효과를 고려하지 않은 경우 최고치가 135 ppm이던 것이 복사 효과를 고려하면 80 ppm으로 약 40% 정도가 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. 한편, Fig. 2(b)의 스트레인이 큰 100인 경우, 화염 신장에 의해 온도 및 화학종 농도 구배가 급격해지기 때문에 열 및 물질 확산이 증가하여 저 스트레인의 화염에 비해 화염의 최고 온도가 낮아짐을 알 수 있다. 그러나, 복사 효과의 고려에 따른 차이는 온도 및 농도 분포에서 알 수 있듯이 매우 적음을 알 수 있다. 그리고 NO 분포에도 큰 영향을 미치지 않는다. 이러한 결과로부터 저 스트레인의 화염에서 복사 효과의 고려는 매우 중요함을 알 수 있다. 그리고 산화제측에 CO<sub>2</sub>를 10% 첨가한 CH<sub>4</sub>/Air-CO<sub>2</sub> 화염의 경우에도 복사 효과를 고려하면 스트레인이 작은 경우(a=10)에

는 NO의 최고치가 급격히 감소하나, 스트레인이 큰 경우(a=100)에는 Fig. 2(b)와 마찬가지로 복사 효과에 따른 차이는 거의 없다. 또한 CO<sub>2</sub> 첨가에 의해서는 스트레인이 10인 경우 온도저감은 227.2K, NO 농도저감은 약 65ppm 정도이지만, 스트레인이 100인 경우는 각각 24K, 2ppm 정도로 매우 작으며 지면관계상 그림은 생략하였다. 이와 같이 저스트레인(a=10)의 화염에서 큰 비열 값을 갖는 CO<sub>2</sub>는 화염 온도를 저감시켜, NO 농도의 저감에 크게 기여하지만, 이러한 열적 효과 외에도 제3체(Third Body) 및 열해리 반응 등의 화학 반응에도 영향을 줄 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 열역학적 물성치 및 전달 물성치는 CO<sub>2</sub>와 동일하지만, 반응에는 전혀 참여하지 않는다고 가정한 불활성 가



(a) Flame structure



(b) NO<sub>x</sub> concentration

Fig. 3 Thermodynamic and chemical reaction effect of CO<sub>2</sub> with CH<sub>4</sub>/Air-X flame

스 X를 도입하여, CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 열적 효과 및 반응 효과를 분리하여 규명해 보고자 한다.

즉, CO<sub>2</sub> 대신에 X를 첨가한 화염의 경우, X는 완전 불활성가스라 할 수 있기 때문에 계산된 결과는 순수한 열적 효과로 볼 수 있다.

Fig. 3은 CH<sub>4</sub>/Air, 공기에 X 10%를 첨가한 CH<sub>4</sub>/Air-X와 공기에 CO<sub>2</sub> 10%를 첨가한 CH<sub>4</sub>/Air-CO<sub>2</sub> 화염의 계산 결과를, Fig. 3(a)에는 화염 구조, Fig. 3(b)에는 NO<sub>x</sub> 농도의 변화에 대해 도시한 것이다. Fig. 3(a)를 보면, CH<sub>4</sub>/Air와 CH<sub>4</sub>/Air-X 화염에서의 최고 온도의 차이는 약 208 K 정도로, 이 열적 효과에 의한 온도차는 앞에 언급한 전체 저감 온도의 약 91%를 차지하며, 반응 효과에 의한 온도차도 전체의 9% 정도로 무시할 수 없다. 그리고 CO<sub>2</sub> 첨가로 인한 열적 효과는 CH<sub>4</sub>의 산화 반응을 억제하기 때문에 CH<sub>4</sub>의 농도가 높게 나타나며, CO<sub>2</sub>의 열해리 반응도 감소시키기 때문에 CO 농도도 낮게 나타남을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)를 보면, CH<sub>4</sub>/Air 화염과 CH<sub>4</sub>/Air-CO<sub>2</sub> 화염의 NO 최고치의 차이는 약 65 ppm이며, 그 중 열적 효과로 볼 수 있는 CH<sub>4</sub>/Air 화염과 CH<sub>4</sub>/Air-X화염에서의 차가 약 59 ppm으로 전체 저감 농도의 약 90%를 차지하며, 약 10%는 반응 효과에 의해 감소함을 알 수 있다. 그리고 NO<sub>2</sub>의 농도도 이와 유사한 비율로 감소한다. 이

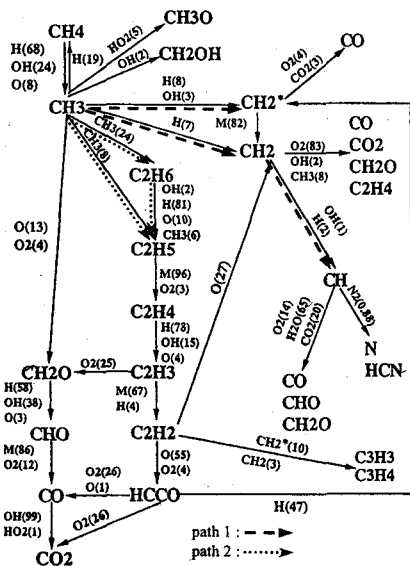


Fig. 4 Reaction path for CH<sub>4</sub>/Air[From Ref. 5]

결과로부터 CO<sub>2</sub> 첨가로 인한 화염 구조 및 NO 생성의 변화는 열적 효과에 의한 영향이 매우 크지만, 반응 효과도 무시할 수 없음을 알 수 있다.

이와 같은 CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 NO<sub>x</sub>의 저감원인에 대해서는 연료의 산화과정과 밀접한 관련이 있기 때문에 먼저 연료의 산화과정의 변화를 살펴본 후에 논의하겠다.

일반적인 CH<sub>4</sub>의 산화 과정은 Fig. 4에 도시한 바와 같이, 일단 CH<sub>4</sub>이 H, OH, O 등과 반응하여 CH<sub>3</sub>가 생성된다. 이 CH<sub>3</sub>는 그림과 같이 크게 두 경로를 통해 산화가 진행되는데, 첫 번째 경로는 H 등과 반응하여 CH<sub>2</sub>, CH를 생성하며, 이들은 N, HCN를 생성하여 Prompt NO를 발생시킨다 (path 1). 두 번째 경로는 제3체, H, OH 등과 반응하여 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>등을 생성하는 경로(path 2)로 구분할 수 있다.

Fig. 5은 CH<sub>4</sub>의 산화 과정에 밀접한 관련이 있는 CH, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>3</sub>의 물분율을 도시한 것이다. 그림에서 CO<sub>2</sub>가 첨가된 경우, 이들의 농도 최대점이 산화제측으로 이동하는데, 이는 CH<sub>4</sub>와 반응하는 H, OH, O 라디칼 등의 생성이 산화제측에서 활발하기 때문이다. 또, 농도 분포를 살펴보면 CH<sub>3</sub> 및 CH의 농도는 감소하나, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>의 농도는 대응하거나 오히려 높게 나타난다. 이 결과는, Fig. 4에 설명한 CH<sub>4</sub>의 산화 경로를 토대로 분석해 보면, CO<sub>2</sub>를 첨가함으로써 CH<sub>4</sub> → CH<sub>3</sub> → C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> → C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>경로(path 2)가 CH<sub>4</sub> → CH<sub>3</sub> → CH<sub>2</sub> → CH 경로(path 1)에 비해 훨씬 더 활발하게 일어나고 있음을 보여주며, 이로 인해 화염의 구조에 영향을 주게 되는 것이다. 또한 감소된 CH는 Prompt NO

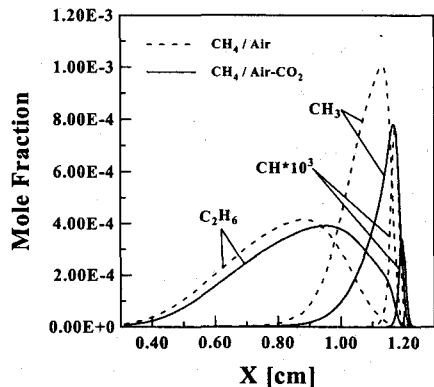


Fig. 5 Concentrations of CH, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>3</sub> radical

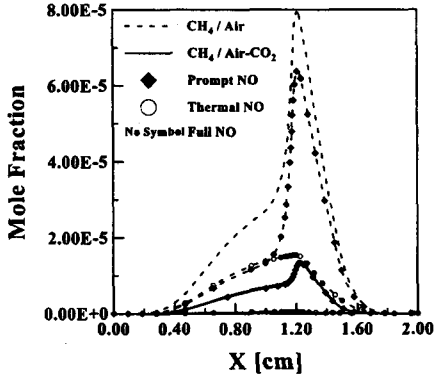


Fig. 6 NO Formation Mechanisms with  $\text{CH}_4/\text{Air}$  and  $\text{CH}_4/\text{Air-CO}_2$

를 생성하는 주요 중간화합물 N, HCN의 생성을 저감함으로써 NO 생성에도 영향을 미치리라 생각된다.

Fig. 6은 NO 발생량을 Thermal NO 및 Prompt NO로 분리하여 계산한 결과이다. 그림에서 점선은  $\text{CH}_4/\text{Air}$  화염의 Full NO 발생량을, 이 점선에 심볼이 첨부된 것은 각각의 NO 생성기구에서 발생한 양을 나타내며, 실선은  $\text{CH}_4/\text{Air-CO}_2$  화염에서의 각종 NO 농도를 같은 방법으로 나타낸 것이다.  $\text{CH}_4/\text{Air}$  화염의 경우 NO의 발생은 주로 Prompt NO와 약간의 Thermal NO에 의해 발생하며, Prompt NO는 화염대에서 매우 급격히 생성되어 주변으로 확산되나 연료측으로 확산된 NO는 Reburning 기구에 소멸되기 때문에 NO 농도가 급격히 감소하는 대향류 확산화염의 일반적인 NO 생성 경향을 잘 보여 주고 있다. 한편,  $\text{CH}_4/\text{Air-CO}_2$  화염의 경우 그림에서 도시된 바와 같이 Thermal 기구에 의해 발생하는 NO양은 아주 미소하며, NO는 대부분 Prompt NO 기구에 의해 발생하나 그 절대량은  $\text{CO}_2$ 의 첨가로 인해 매우 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터  $\text{CO}_2$ 의 첨가는 Thermal NO와 Prompt NO를 동시에 저감시키는 효과가 있으며, 저감 비율로 보면 Thermal NO가 우세하나, 절대량 측면에서 보면 Prompt NO에 의한 NO 감소가 우세함을 알 수 있다.

Fig. 7은  $\text{CO}_2$  첨가량에 따른  $\text{NO}_x$  발생지수 (EINO<sub>x</sub>)를 스트레인율의 변화에 따라 도시한 것으로, 통상의  $\text{CH}_4/\text{Air}$  화염에  $\text{CO}_2$ 의 첨가량을 5%씩 증가시켜 15%까지 첨가한 경우에 대한 결과

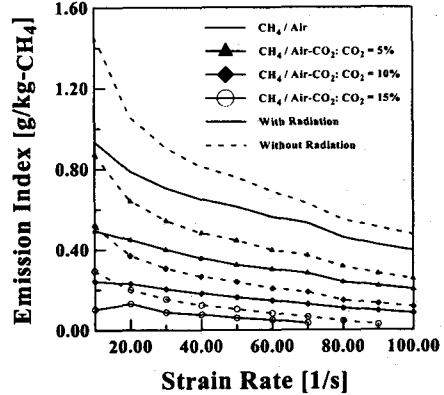


Fig. 7  $\text{NO}_x$  emission index variation of the effect of  $\text{CO}_2$  with  $\text{CH}_4/\text{Air}$  and  $\text{CH}_4/\text{Air-CO}_2$  flames

이다. 먼저  $\text{CH}_4/\text{Air}$  화염의 경우 복사 효과를 고려하지 않은 경우 EINO<sub>x</sub>는 스트레인율이 증가함에 따라 급격히 감소한다. 한편, 복사효과를 고려한 경우 EINO<sub>x</sub>는 고려하지 않은 경우보다 전스트레인율 영역에서 작으며 스트레인율에 따른 감소율도 다소 완만해지나, Fig. 1의 온도 분포경향과는 상이하다. 그 이유로는 저 스트레인율 영역에서 온도가 낮아 NO 생성율은 낮아지나, 화염 폭은 크기 때문에 EINO<sub>x</sub>는 온도 분포와는 다르게 스트레인율 증가에 따라 단순 감소 형태로 나타난다고 생각된다.  $\text{CO}_2$ 가 첨가된 화염의 경우에도 위에 언급한 EINO<sub>x</sub> 경향은 유사하다고 할 수 있으나, 스트레인율 증가에 따른 EINO<sub>x</sub> 저감 구배는 매우 작아짐을 알 수 있다. 그리고  $\text{CO}_2$  첨가량이 증가할수록 EINO<sub>x</sub>는 매우 적어짐을 알 수 있다. 이러한 결과들로부터 EGR과 LFG 연소와 같이 화염대에 여분의  $\text{CO}_2$ 가 첨가되면  $\text{NO}_x$  저감에는 상당한 효과가 있으며, 그 양이 많아질수록 복사 효과에 대한 고려가 필수적이지만, 동시에 소염이 발생할 가능성도 높아지므로 최적 첨가량에 대해서는 심사 숙고 할 필요가 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는  $\text{CO}_2$ 가 여분으로 첨가된  $\text{CH}_4$  대향류 확산 화염을 대상으로  $\text{NO}_x$  생성 특성 및 화염구조에 대해 복사열손실 효과를 고려한 수치계

산을 수행한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 복사 효과가 화염구조에 미치는 영향은 스트레인율이 낮은 경우 매우 현저하며, 스트레인율이 증가할수록 복사 효과보다 스트레인율에 의한 효과가 지배적이다. 그리고 CO<sub>2</sub>가 첨가되면 복사효과는 더욱 커져 복사에 대한 고려가 필수적이다.

(2) CO<sub>2</sub> 첨가로 인한 화염 구조 및 NO 생성의 변화는 열적 효과가 약 90%를 차지하나, 반응 효과도 무시할 수 없음을 알았다.

(3) 첨가된 CO<sub>2</sub>는 연료의 산화과정 중 CH<sub>4</sub>→CH<sub>3</sub>→CH<sub>2</sub>→CH의 경로보다 CH<sub>4</sub>→CH<sub>3</sub>→C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>→C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>의 경로를 활성화시켜 화염의 구조에 영향을 미치며, 이로 인해 CH농도가 감소하기 때문에 Prompt NO의 생성에도 영향을 미친다.

(4) CO<sub>2</sub>의 첨가는 Thermal NO와 Prompt NO를 동시에 저감시키는 효과가 있으며, 저감 비율로 보면 Thermal NO가 우세하나, 질대량 측면에서 보면 Prompt NO의 감소가 우세함을 알았다.

(6) CH<sub>4</sub>/Air 화염에 CO<sub>2</sub> 첨가량을 증가함에 따라 CO<sub>2</sub>에 의한 복사열손실 효과는 더욱 커지며, NO<sub>x</sub> 저감 효과도 더욱 커짐을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) John B. Heywood, 1990, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, New York
- (2) 정태준, 이창언, 오수철, 이인대, 1998, "LFG 혼합가스의 연소특성에 관한 연구", 대한기계학회 1998년도 추계학술대회 논문집B, pp. 354~359
- (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", Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1479~1494
- (4) 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
- (5) S. C. Li, F. A. Williams, 1999, "NO<sub>x</sub> Formation in Two-Stage Methane-Air Flames", *Combustion and Flame*, Vol. 118, pp. 399~414
- (6) J. Warnatz, private communication
- (7) M. Nishioka, S. Nakagawa, Y. Ishikawa, T. Takeno, 1994, "NO Emission Characteristics of Methane-Air Double Flame", *Combustion and Flame*, Vol. 98, pp.127~138
- (8) Graham Dixon-Lewis, 1990, "Structure of Laminar Flames", Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 305~324
- (9) A. E. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grcar, F. M. Rupley, 1997, "OPPDIF: A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames", Sandia Report, SAND96-8243
- (10) C. L. Tien, 1968, "Thermal Radiation Properties of Gases", *Advances in Heat Transfer*, Vol. 5, pp. 253~32
- (11) H. K. Chellian, C. K. Law, T. Ueda, M. D. Smooke, F. A. Williams, 1990, "An Experimental and Theoretical Investigation of the Dilution, Pressure and Flow-Field Effects on the Extinction Condition of Methane-Air-Nitrogen Diffusion Flames", Twenty -Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 503~511
- (12) GRI Mech. Ver. 2.11, Web address: [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/)