

수소/이산화탄소/알곤 혼합 연료의 비예혼합 대향류 화염에서 NO 배출 특성 연구

이 기 만*

순천대학교 기계우주항공공학부

A Study of NO Emission Characteristics in a Non-premixed Counterflow Flame with H₂/CO₂/Ar Blended-fuel

Kee-man Lee*

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Sunchon National University, Jeonnam 540-742, Korea

(Received 12 December 2006 / Accepted 16 January 2007)

Abstract : The detailed chemistry with reaction mechanism of GRI 2.11, which consists of 49 species and 279 elementary reactions, have been numerically conducted to investigate the flame structure and NO emission characteristics in a non-premixed counterflow flame of blended fuel of H₂/CO₂/Ar. The combination of H₂, CO₂, and Ar as fuel is selected to clearly display the contribution of hydrocarbon products to flame structure and NO emission characteristics due to the breakdown of CO₂. Radiative heat loss term is involved to correctly describe the flame dynamics especially at low strain rates. All mechanisms including thermal, NO₂, N₂O, and Fenimore are also taken into account to separately evaluate the effects of CO₂ addition on NO emission characteristics. The increase of added CO₂ quantity causes flame temperature to fall since at high strain rates diluent effect is prevailing and at low strain rates the breakdown of CO₂ produces relatively populous hydrocarbon products and thus the existence of hydrocarbon products inhibits chain branching. It is also found that the ratio of the contribution by Fenimore mechanism to that by thermal mechanism in the total mole production rate becomes much larger with increase in the CO₂ quantity and strain rate, even though the absolute quantity of NO production is decreased. Consequently, as strain rate and CO₂ quantity increase, NO production by Fenimore mechanism is remarkably augmented.

Key words : Fenimore NO, Hydrocarbon product(탄화수소 생성물), NO emission index(NO 배출지수), NO mole production rate(NO 몰 생성율), Radiative heat loss(복사 열손실), Thermal NO(열적 NO)

Nomenclature

- a : strain rate, s⁻¹
- Z : mixture fraction
- EINO : NO emission index, g/kg

1. 서론

전 세계 에너지의 약 85% 이상이 화석 연료의 연소에 의존하고 있는데, 연소 과정을 거치면서 CO₂와 NO_x와 같은 공해 물질이 필연적으로 발생하여 지구 온난화와 산성비와 같은 대기 환경오염이 점점 더 심각해지고 있다. 특히 지구 온난화 주범인 CO₂ 가스 저감과 관련하여 최근 선진국을 중심으로 화석 연료 연소 시 발생하는 CO₂를 저감하기 위한

*Corresponding author, E-mail: kmlee@sunchon.ac.kr

방법으로 연료나 산화제 측에 CO₂를 혼합하여 연소시켜 유해 물질을 저감시키고 동시에 연소 배가스 중 CO₂ 농도를 농축시켜 CO₂ 분리 공정 시 효율을 높여 줌으로써 결국 동일 에너지 대비 CO₂ 생성량을 억제하려는 노력들이 활발하게 진행 중이다. 그런데 이러한 노력 중에서 첨가된 CO₂가 NO_x 및 soot 등 다른 공해 물질 배출에 미치는 영향에 대해서도 조사할 필요성이 제기되고 있다.

한 예로 이전 보고¹⁾에 의하면 비탄소계 연료인 수소에 CO₂를 섞는 방식으로 반응대에 첨가되는 CO₂가 화염 구조에 미치는 영향은 반응물의 농도를 상대적으로 저감시키는 희석제적 영향 이외에 열분해 등으로 고온에서 CO₂가 분해되어 탄화수소계 화학종을 생성시켜 연소 반응에 참여하는 화학적 영향도 매우 중요함을 알았다. 이는 경우에 따라서 CO₂ 분해로 생성된 탄화수소계 화학종들의 역할이 반응 경로를 바꿀 수 있는 가능성을 암시한 결과이다.

따라서 온도 의존성이 큰 것으로만 알고 있는 질소산화물 배출과 관련하여 고온에서 분해된 CO₂가 대표적 공해물질인 질소산화물 생성에 미치는 영향도 매우 다를 수 있는 것으로 판단된다. 예를 들면 연소장에서 스트레인율이 증가하게 되면 화염 온도는 감소하여 thermal NO(이하 열적 NO라 함) 생성은 줄어들 수 있으나 첨가된 CO₂ 분해로 탄화수소계 화학종들이 활발하게 생성되어 prompt NO 생성이 현저할 수도 있기 때문이다. 이러한 이유에서 대향류 화염의 주요 변수인 스트레인율과 함께 첨가되는 CO₂ 양이 대표적 질소산화물인 일산화질소(NO) 배출과 관련하여 열적 NO와 Fenimore NO로 알려진 prompt NO 생성에 미치는 영향에 대해 상세한 조사가 필요하게 되었다.

한편, 일반적으로 H₂O와 CO₂와 같은 기체는 복사계수가 매우 큰 물질로 알려져 있으므로 본 연구와 같이 반응대에 CO₂를 첨가하여 미치는 영향에 대한 분석인 경우 정확한 화염 구조 해석을 위해서 복사 열손실 항을 반드시 고려하여 계산하여야만 할 것이다. Maruta 등은 화염의 복사 열손실 고려 유무에 대한 대향류 확산화염 수치 모사에서 낮은 스트레인율 영역에서는 복사 열손실을 고려한 경우와 하질 않은 경우에서 매우 많은 차이가 있음을 보고하고 있다.²⁾ 또한 Chan 등은 광학적 얇은 모델을

사용하여 온도에 대한 열적 NO 반응 민감도 때문에 소염 영역 근처를 제외하고는 실질적으로 모든 범위의 스칼라 소산율에서 복사열이 열적 NO생성에 매우 깊은 영향을 미치고 있음을 보고하였다.³⁾

본 연구는 지구 온난화 가스 주범인 CO₂ 저감을 위해 시도되고 있는 CO₂ 재순환 연소 연구와 관련한 일련의 수치 해석적 연구로, 첨가된 CO₂가 대표적 공해 물질인 NO 생성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 대향류 유동 구조를 갖는 확산 화염을 대상으로 수행하였다. 이를 위해 차세대 청정 연료로 주목을 받고 있는 비탄소계 연료인 수소(H₂)연료에 탄소계 성분인 CO₂와 불활성 가스인 Ar를 섞어서 만든 복합 연료에서 스트레인율에 따라 혼합(첨가)된 CO₂ 농도가 확산 화염 구조와 NO 배출 특성에 미치는 영향을 상세한 화학 반응기구들의 수치모사를 통해 조사하였다.

2. 수치해법

본 연구의 대상 화염은 비예혼합 대향류 화염으로 Fig. 1에 표시된 구조를 하고 있다. 즉, 서로 마주보는 두 노즐에서 한쪽에는 연료가 다른 한쪽에는 산화제가 분출되면 노즐 사이에 정체면이 형성되는데, 분출된 연료는 산화제 측으로 확산이 되면서 반응하여 산화제 측에 화염이 형성되게 된다. 정체선을 따라 생성된 화염은 스트레치된 상태로 존재하게 되며 이렇게 스트레치된 화염구조를 해석하기 위해 스트레인율(a, 이하 a로 표시함)을 주요 지배

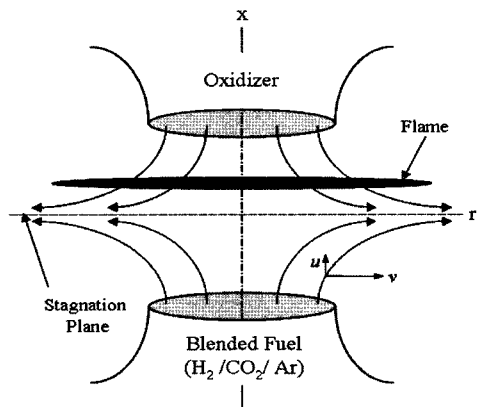


Fig. 1 Schematic drawing of non-premixed counterflow flame

변수로 사용하는데, 본 연구에서는 이전 연구와 같이 Chellian이 정의한 축 방향 속도 구배 값을 사용하였다.⁴⁾ 해석을 위한 질량과 운동량식, 에너지 및 화학종 방정식 등 지배 방정식들과 수치 계산을 위해 사용한 계산 코드는 이전의 연구들^{1,5,6)}과 동일하나 에너지 방정식에서 다음과 같은 복사 열손실 항을 추가하여 계산하였다.

$$\rho u \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} (\lambda \frac{dT}{dx}) + \frac{\rho}{c_p} \sum_k c_{p,k} Y_k V_k \frac{dT}{dx} + \frac{1}{c_p} \sum_k h_k \dot{w}_k - \frac{\dot{q}_r}{c_p} = 0 \quad (1)$$

여기서, \dot{q}_r 은 복사 열손실 항을 나타낸다.

복사 열손실에 대한 계산은 열손실에 주된 기여를 하는 것으로 알려진 CO₂, H₂O, CO 그리고 CH₄의 네 가지 화학종을 고려하였으며 광학적으로 얇다는 가정 하에 다음과 같은 식으로 단위 체적 당 복사 열손실 양을 계산하였다.

$$\dot{q}_r = -4\sigma K_p (T^4 - T_\infty^4) \quad (2)$$

$$K_p = P_{CO_2} K_{CO_2} + P_{H_2O} K_{H_2O} + P_{CO} K_{CO} + P_{CH_4} K_{CH_4} \quad (3)$$

여기서, σ 는 스테판-볼츠만 상수, T 와 T_∞ 는 국부 온도와 주위 온도를, K_p 는 네 가지 혼합 가스의 평균 플랭크 흡수계수를 나타낸다. 또한 P_k 와 K_p 는 화학종 k 의 분압과 평균 플랭크 흡수계수를 나타내며, 평균 플랭크 흡수계수는 다음 식으로 계산하였다.

$$K_k = \sum_{j=0}^5 A_{kj} T^j, \quad k = CO_2, CO, H_2O, CH_4 \quad (4)$$

여기서 A_{kj} 는 온도 범위에 따른 각 화학종의 다항식 계수로서 Ju 등에 의해 제안된 값을 사용하였다.⁷⁾

상세한 연소 화학반응 모사는 메탄의 C₂ 산화 반응과 NO_x의 모든 반응 경로를 세부적으로 묘사하고 있는 279개 요소 반응 기구들과 49개 화학종을 포함한 GRI 2.11의 상세 화학반응식을, 그리고 열역학적 물성치와 전달 물성치들은 Chemkin -II Package와 Transport Package를 사용하여 계산하였다.⁸⁻¹⁰⁾ 특히 CO₂ 첨가량에 따른 NO_x 생성 분석을 위해 총 NO 생성물에서 열적 NO, N₂O, NO₂ 및 Fenimore NO 등 각각의 NO 생성 역할을 구분하기 위하여 Nishioka가 제안한 반응 분리법을 사용하여 계산하였다.^{11,12)} 이

경우 Fenimore 생성 값은 full 생성 기구에서 열적 NO, N₂O와 NO₂ 기구에 의해 생성된 값을 뺀 것으로 정의하였다.

3. 결과 및 고찰

복사 열손실 고려가 화염 구조에 미치는 영향을 알아보기 위하여 스트레인을 변화에 따른 최대 화염 온도 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 하얀 색 모양은 복사 열손실을 고려하지 않은 경우이고 검정색 모양의 데이터들은 고려한 경우를 나타낸다. 복사 열손실을 고려하지 않은 경우 스트레인을 증가에 따라 화염 온도는 계속해서 감소하는 반면에 복사 열손실을 고려한 경우에는 초반 작은 스트레인을 영역에서는 다소 증가하다가 이후 다시 감소하고 있는데 일정 스트레인 값 이후에서는 복사 열손실을 고려한 경우와 하지 않은 경우 모두 화염 온도 차이가 없음을 알 수 있다.

따라서 스트레인을 값이 작은 영역에서는 복사 열손실 고려가 화염 구조 해석에 매우 중요함을 알 수 있다. 이러한 이유는 화염의 복사 열손실은 화염 체적과 반응대 두께에 비례하게 되는데 스트레인을 증가하게 되면 화염 체적과 반응대 두께가 작아져 복사 열손실 영향이 작아지는 이유 때문이다.

또한 첨가된 CO₂ 양 증가에 따라 화염의 온도가 낮아지게 되는데 이 경우에서도 작은 스트레인을 값

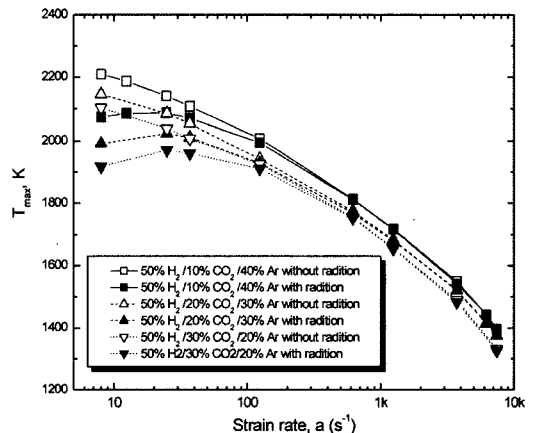


Fig. 2 Effect of inclusion of radiative heat loss term on maximum flame temperature according to added CO₂ quantity

영역에서는 복사 열손실을 고려한 경우와 하지 않은 경우에서 큰 차이를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 그런데 전체적으로는 모든 CO₂ 양에서 스트레인을 증가에 따라 화염의 온도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 스트레인율이 큰 영역에서는 연료에 혼합된 CO₂가 희석제 역할로서 화염 온도에 영향을 미치고 있으나, 스트레인율이 작은 영역에서는 이전 보고¹⁾에서 알 수 있듯이 CO₂가 고온에서 열분해 등으로 인해 새로운 탄화수소계 화학종을 생성시켜 연소 화학반응에 매우 중요한 연쇄 분기 반응을 억제함으로써 화염 온도에 영향을 미치게 된다.¹³⁾ 이 경우 복사 흡수 계수가 큰 CO₂ 첨가로 복사열 영향이 매우 클 것으로 여겨지므로 정확한 화염 구조 평가를 위해서는 반드시 복사 열손실을 고려하여 계산하여야 할 것이다. 이 후 모든 계산 결과들은 복사 열손실을 고려하여 계산된 값들이다.

이처럼 복사 열손실 고려가 화염 온도에 크게 영향을 미치는 Fig. 2의 작은 스트레인 영역(본 연구는 $a > 150$) 중에서 $a = 25.0 \text{ s}^{-1}$ 와 $a = 124.0 \text{ s}^{-1}$ 를 각각 대표적인 작은 스트레인율 값과 상대적으로 큰 값으로 해서 복사 흡수가 큰 CO₂ 첨가가 화염 구조에 미치는 영향에 대해 혼합분율 좌표축에서 주요 화학종들의 농도 분포를 Fig. 3과 4에 나타내었다.

먼저 Fig. 3(a)와 4(a)를 보면, CO₂ 양 증가에 따라 O₂와 H₂ 농도의 투과 위치가 연료 과잉 측으로 옮겨져 있으며 그 결과 연소 생성물인 H₂O의 최대 몰분율 위치도 역시 연료 과잉 측으로 옮겨져 있음을 볼 수 있다. 이전 연구에서도 나타났듯이 연료로 첨가된 CO₂의 농도 분포 곡선이 화염 대 근처에서 굴곡져 있으며 CO₂의 열분해로 인해 탄소계 화학종인 CO 농도가 새롭게 생성되었음을 볼 수가 있다.¹⁾ 또한 이렇게 생성된 CO 농도는 첨가된 CO₂ 양이 증가함에 따라 같이 증가하고 있으며 농도 분포도 넓어짐을 볼 수 있다.

Fig. 3(c)와 4(c)에서는 CO₂의 분해로 생성된 HCO, CH₃, CH₄와 같은 탄화수소계 화학종들이 첨가된 CO₂ 양 증가에 비례하여 증가되고 있음을 보여 주고 있다. 그 결과 Fig. 3(b)와 4(b)에서는 CO₂ 양 증가에 따라 이들 탄화수소계 화학종들을 생성하는데 사용되어진 H와 O, OH와 같은 주요 라디칼들의 몰 농도가 감소하고 있음을 볼 수 있다. 이전의 연구

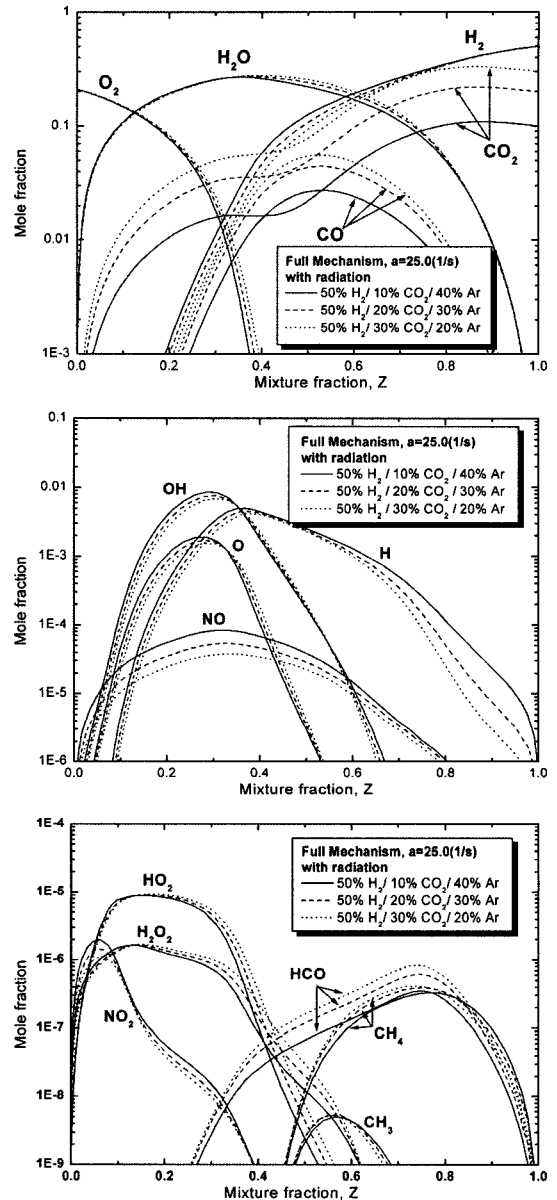


Fig. 3 Effect of CO₂ addition in flame structure : $a = 25.0 \text{ s}^{-1}$, full mechanism, inclusion of radiative heat loss term

들¹⁴⁾에서 이들 주요 라디칼들의 농도는 소염 한계 영역 근처 값을 제외하고는 스트레인율이 증가함에 따라 같이 증가함을 보여주고 있다. 본 연구에서도 $a = 25.0 \text{ s}^{-1}$ 인 경우 이들 O, H, OH 농도가 $a = 124.0 \text{ s}^{-1}$ 에 비해 낮게 분포하고 있음을 알 수 있다. 따라서 CO₂ 양 증가에 따른 O, H, OH 등의 몰 농도 감소가 Fig. 3(c)와 4(c) 간의 비교로부터 볼 수 있는 것과 같

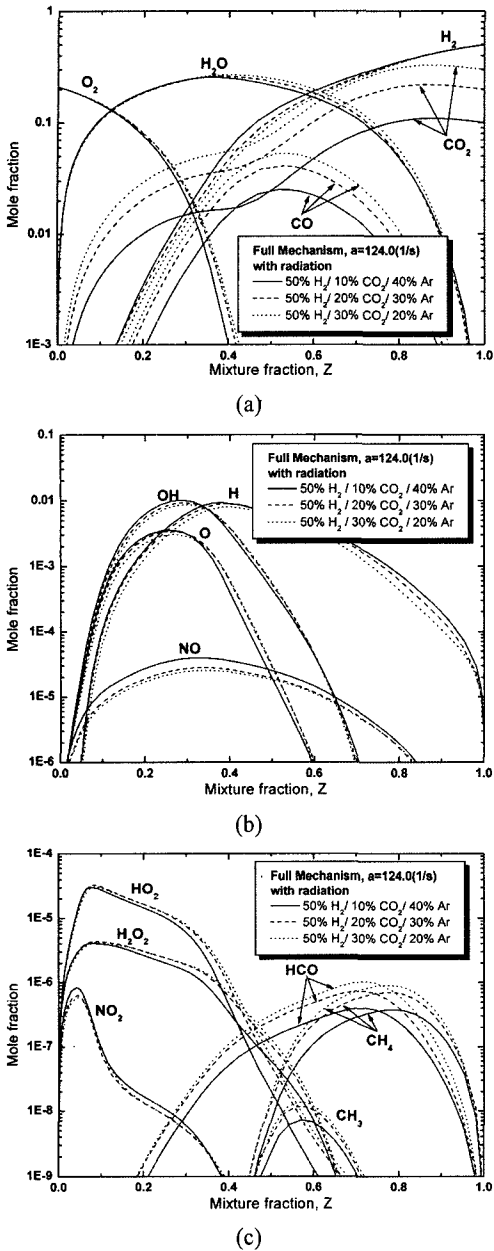


Fig. 4 Effect of CO₂ addition in flame structure : $a = 124.0\text{s}^{-1}$, full mechanism, inclusion of radiative heat loss term

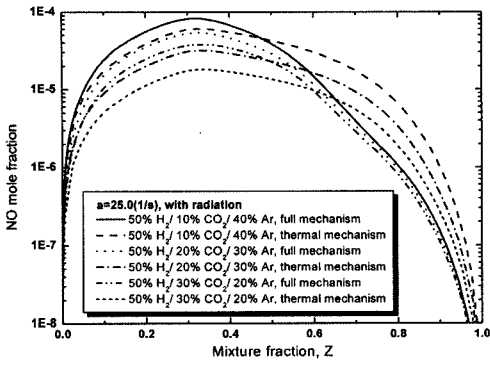
이 탄화수소계 화학종 생성 증가에 직접적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

또한 Fig. 3(b)와 4(b)에서 CO₂ 양과 스트레인율 증가에 따라 생성된 NO 농도가 감소되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 NO 농도의 감소는 겉보기에는 Fig. 2에서 나타난 것처럼 CO₂ 첨가량과 스트레인율이

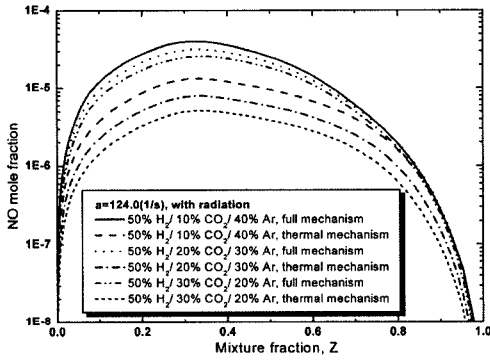
증가되면 화염 온도가 낮아져 화염 온도에 직접적인 영향을 받는 열적 NO가 감소함에 따라 낮아지는 것으로 보여 질 수도 있다. 그러나 나중인 Fig. 6과 7에서 다시 NO 생성을 비교로 설명되었지만 상세한 NO 기구를 살펴보면 Fenimore NO인 Prompt NO 생성 면에서는 논란의 여지가 있음을 알 수 있다. 즉, 탄화수소물의 형성과 분해 과정은 소위 Prompt NO라고 하는 Fenimore NO에 직접적인 영향을 미치고 있다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다.¹¹⁾ 또한 이전의 CO₂ 첨가에 따른 상세 조사¹⁾에서 CO₂로부터 열분해된 HCO와 같은 상당한 탄화수소계 생성물이 반응에 참가하여 연소 반응을 부분적으로 바꾸어 놓고 있음을 알았다. 따라서 이러한 연구들의 결과를 볼 때 본 연구에서와 같이 Fig. 3(c)와 4(c)에서 나타난 HCO, CH₃, CH₄와 같은 탄화수소물 생성이 NO 생성에 미치는 영향을 무시할 수는 없게 되었다.

일반적으로 연소반응에서 생성되는 대표적 질소산화물인 NO 생성 기구에는 열적 NO와 Prompt NO, Fuel NO 그리고 NO₂와 N₂O 기구들이 있다. Fuel NO는 본 연구에서는 상관없는 내용이고 NO₂와 N₂O로 인한 NO 생성은 대항류 화염에서는 무시될 수 있는 것으로 알려져 있으므로 본 연구에서 계산한 full mechanism과 thermal mechanism간의 차이는 Prompt NO인 Fenimore NO로 간주하여도 무방하였다.^{11,12)}

Fig. 5는 위에서 논의한 NO 생성 기구에서 full과 thermal mechanism으로 계산된 NO 몰 농도 간 차이를 나타내고 있는데, 전체적으로 두 가지 모두 경우에서 CO₂ 양 증가에 따라 NO 농도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 이미 Fig. 2에서 살펴 본바와 같이 CO₂ 농도 증가에 따라 화염 온도가 낮아지는 것과 밀접한 관련이 있다. 그러나 full mechanism에 의해 계산된 최대 NO 몰 농도는 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 $a = 25.0\text{ s}^{-1}$ 와 $a = 124.0\text{ s}^{-1}$ 모두에서 thermal mechanism에 비해 더 큼을 알 수 있다. 이는 화염 온도에 직접적인 영향을 받는 열적 NO 이외에 다른 NO 생성기구가 존재하고 있음을 암시하고 있다. 또한 Fig. 5(a)에서 full mechanism으로 계산된 NO 농도가 연료 과잉 영역에서 열적 기구로 계산된 농도보다 낮게 나타난 현상도 CO₂ 첨가에 의해 생성되는 질소산화물의 생성 원인이 열적 NO 기구 이외에 다

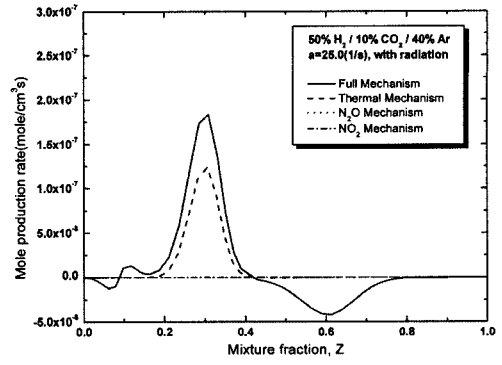


(a)

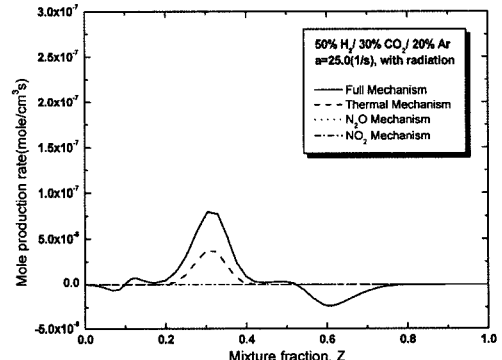


(b)

Fig. 5 Comparison of NO mole fraction calculated by full mechanism with that by thermal mechanism : (a) $a = 25.0s^{-1}$ and (b) $a = 124.0s^{-1}$



(a)



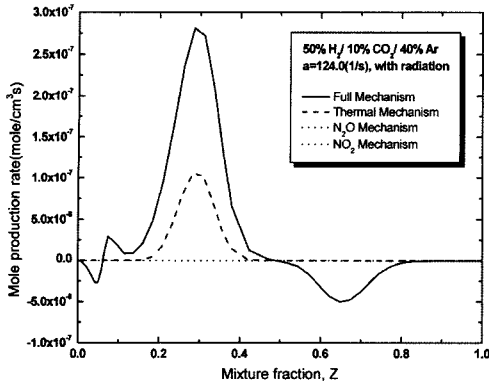
(b)

Fig. 6 Contribution of respective NO formation mechanisms in total NO mole production at $a = 25.0s^{-1}$: (a) 10% CO₂ and (b) 30% CO₂

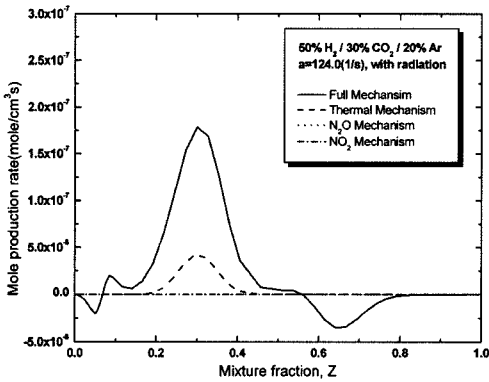
른 발생 요소가 존재함을 보여주는 셈이다. 이러한 각각의 NO 발생 기구별 영향 정도를 구별하기 위하여 네 가지 각 기구별로 계산된 NO 몰 생성율을 Fig. 6과 7에 나타내었다. 전체적인 경우에서 N₂O와 NO₂ 기구에 의한 NO 몰 생성율은 무시할 만큼 작음을 알 수 있고, 열적 기구에 의한 NO 생성은 오로지 반응대를 중심으로 집중되고 있음을 볼 수 있다. 여기서 연료 축 영역에서 나타나고 있는 마이너스적인 NO 생성율은 Fig. 3과 4에서 볼 수 있었던 NO가 NO₂로 변환되어 소모됨을 의미한다. Nishioka 등은 이전의 연구에서 full과 thermal 기구와의 차이는 전적으로 Fenimore 기구에 의한 것을 보고하고 있으며 thermal NO 대비 Fenimore NO의 농도비는 스트레인을 증가와 함께 현저하게 증가한다고 보고하고 있는데,¹¹⁾ 본 연구에서도 Fig. 6과 7에서 이러한 경향을 확인할 수 있었다. 또한 플러스 NO 생성율에서 full과 thermal 기구 모두 첨가된

CO₂ 양이 증가함에 따라 NO 생성율이 작아짐을 알 수 있다. 그러나 여기서 이러한 결과를 주의 깊게 살펴보면, Fig. 6과 7에서 나타난 CO₂ 양 증가에 따라 생성된 NO의 단순 생성율 크기에서는 작아지는 것과는 달리 전체 플러스 NO 몰 생성율에서 열적 기구의 생성율에 대한 Fenimore 기구에 의한 생성율간의 비는 첨가된 CO₂ 양이 많을수록, 스트레인을 증가할수록 매우 커짐을 알 수 있다. 즉, $a = 25.0s^{-1}$ 에서 CO₂ 첨가량이 10%인 경우 열적 NO 대비 Fenimore NO 생성율 값이 0.48인 반면 30%인 경우는 1.15로 약 두 배 이상 큰 값을 알 수 있다. 또한 $a = 124.0s^{-1}$ 에서는 CO₂ 첨가량이 10%인 경우 1.67인 반면 30%인 경우는 3.19로 나타나 첨가된 CO₂ 양이 많을수록, 스트레인을 증가할수록 Fenimore NO 생성율은 매우 커짐을 알 수 있다.

이러한 결과는 앞서 언급한 바와 같이 첨가되는



(a)



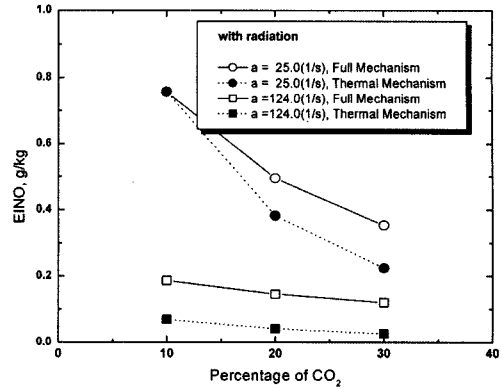
(b)

Fig. 7 Contribution of respective NO formation mechanisms in total NO mole production at $a = 124.0\text{s}^{-1}$: (a) 10% CO_2 and (b) 30% CO_2

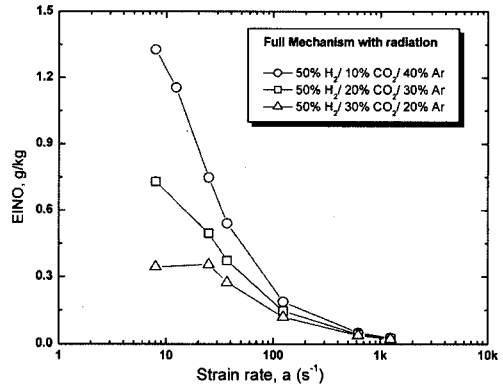
CO_2 양이 증가할수록 고온의 화염대에서 CO_2 가 분해되어 무시할 수 없을 만큼의 탄화수소계 화학종들이 생성되고 이렇게 생성된 화학종들이 Fenimore 기구에 의한 NO 생성에 관여한다는 것이다. 게다가 Fig. 6과 7의 연료 축 영역에서는 이러한 NO 생성 기구에 의해서 마이너스적 생성율 영역이 존재한다는 것이다. 그 결과 앞서 Fig. 5(a)의 full mechanism에 의해 계산된 NO 몰 농도가 thermal 기구에 의해 계산된 값보다도 작게 예측하고 있음을 알 수 있다.

한편, 종종 화염에서 배출되는 전체적인 NO 배출 특성은 다음과 같은 연료 1kg을 태워 발생하는 NO 발생량을 무게(gram)로 정의하는 NO 배출 지수인 EINO 값으로 환산하여 표시한다.^{11,15)}

$$EI_{NO} = \frac{\int W_{NO} w_{NO} dx}{\int W_{H_2} w_{H_2} dx}$$



(a)



(b)

Fig. 8 Variation of NO emission index with (a) CO_2 quantity and (b) strain rate

여기서, W_k 는 분자량율, w_k 는 k종의 몰 생성율을 나타내며, 적분은 Fig. 1에 표시된 대항류 버너에서 하부 노즐로부터 상부 노즐까지 이루어진다.

Fig. 8에서는 위에서 정의한 EINO 배출 지수를 사용하여 표시하였다. Fig. 8(a)에서는 큰 스트레인율($a = 124.0\text{s}^{-1}$) 값에서 EINO 양이 완만하게 감소하는데 반해 작은 스트레인율($a = 25.0\text{s}^{-1}$)에서는 CO_2 첨가량에 따라 EINO 지수가 급격하게 작아짐을 볼 수 있다. Fig. 8(b)에서는 CO_2 첨가량과 함께 전체적 경우에서 스트레인율이 증가함에 따라 처음에는 EINO의 급격한 감소를 보이고 있으며 이후 완만한 감소를 보여 주고 있다.

4. 결론

- 1) CO_2 첨가에 따른 화염 온도 계산에서 작은 스트레인율 영역에서는 복사 열손실 영향이 매우 큼

을 확인하여 복사 열손실을 고려한 수치 모사가 특히 스트레인율이 작은 경우의 화염 구조 해석에 매우 중요함을 알았다.

- 2) 첨가된 CO₂ 양이 많을수록, 스트레인율이 증가할수록 NO의 단순 생성 크기는 작아지나 열적 NO 생성율에 대한 Fenimore NO 생성율 간의 비는 첨가된 CO₂ 양이 많을수록, 스트레인율이 증가할수록 매우 커짐을 알 수 있다. 이는 첨가된 CO₂가 분해되어 생성된 탄화수소계 화합물들이 NO 생성에 깊게 관여하고 있음을 보여주는 중요한 결과이다.
- 3) 전체적인 NO 배출 특성에서 보면 큰 값 영역에서는 EINO 양이 완만하게 감소하는데 반해 작은 스트레인율에서는 CO₂ 첨가량에 따라 EINO 지수가 급격하게 작아져 매우 민감하게 반응함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2006년도 교육인적자원부의 지방대학 혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원되었음.

References

- 1) K. M. Lee, "Effects of CO₂ Addition on Flame Structure in a Non-premixed Counterflow Flame," Transactions of KSAE, (to be Published).
- 2) K. Maruta, M. Yoshida, H. Guo, Y. Ju and T. Niioka, "Extinction of Low-stretched Diffusion Flame in Microgravity," Combustion and Flame, Vol.112, p.181, 1998.
- 3) S. H. Chan, X. C. Pan and MMM Abou-Elail, "Flamelet Structure of Radiating CH₄-air Flames," Combustion and Flame, Vol.102, pp. 4381, 1995.
- 4) H. K. Chellian, 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," Proceedings of the 23rd Int. Symposium on Combustion, p.503, 1990.
- 5) R. J. Kee, 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," Proceedings of the 22nd Int. Symposium on Combustion, p.1479, 1988.
- 6) A. E. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grcar and F. M. Rupley, "OPPDIF: A Fortran Program for Computing Opposed-flow Diffusion Flames," Sandia Report, SAND96-8243, 1996.
- 7) Y. Ju, K. Maruta and F. Liu, "On the Extinction Limit and Flammability Limit of Non-adiabatic Stretched Methane-air Premixed Flames," Journal of Fluid Mechanics, Vol.342, p.315, 1997.
- 8) GRI Mech., Ver. 2.11, Web Address: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech.
- 9) 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.
- 10) 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," Sandia Report, SAND86-8246, 1994.
- 11) M. Nishioka, S. Nakagawa, Y. Ishikawa and T. Takeno, "NO Emission Characteristics of Methane-air Double Flame," Combustion and Flame, Vol.98, p.127, 1994.
- 12) M. Nishioka, Kondoh and T. Takeno, "Behavior of Key Reaction on NO Formation in Methane-air Flames," Proceedings of the 26th Int. Symposium on Combustion, p.2139, 1996.
- 13) C. K. Westbrook and F. L. Dryer, "Chemical Kinetic Modeling of Hydrocarbon Combustion," Progress in Energy and Combustion Science, Vol.10, p.1, 1984.
- 14) M. C. Drake and R. J. Blint, "Structure of Laminar Opposed-flow Diffusion Flames with CO/H₂/N₂ Fuel," Combustion Science and Technology, Vol.61, p.187, 1988.
- 15) S. C. Li and F. A. Williams, "NO_x Formation in Two Stage Methane-air Flames," Combustion and Flame, Vol.118, p.399, 1999.