

비에혼합 대향류 화염에서 CO₂ 첨가가 화염 구조에 미치는 영향 연구

이 기 만*

순천대학교 기계우주항공공학부

An Effects of CO₂ Addition on Flame Structure in a Non-premixed Counterflow Flame

Kee-man Lee*

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon National University, Jeonnam 540-742, Korea
(Received 1 November 2006 / Accepted 12 December 2006)

Abstract : A numerical study was conducted to have the effect of CO₂ addition to fuel on the chemical reaction mechanism with the change of the initial concentration of CO₂ and the axial velocity gradient. From this study, it was found that there were two serious effects of CO₂ addition on a non-premixed flame ; a diluent effect by the reactive species reduction and chemical effect of the breakdown of CO₂ by the third-body collision and thermal dissociation. Especially, the chemical effect was serious at the lower velocity gradient of the axial flow. It was certain that the mole fraction profile of CO₂ was deflected and CO was increased with the initial concentration of CO₂. It was also ascertained that the breakdown of CO₂ would cause the increasing of CO mole fraction at the reaction region. It was also found that the addition of CO₂ did not alter the basic skeleton of H₂-O₂ reaction mechanism, but contributed to the formation and destruction of hydrocarbon products such as HCO. The conversion of CO was also suppressed and CO₂ played a role of a dilution in the reaction zone at the higher axial velocity gradient.

Key words : Axial velocity gradient(축 방향 속도구배), CO₂ addition(이산화탄소 첨가), Chemical effect(화학적 효과), Diluent effect(희석 효과), Mixture fraction(혼합 분율)

Nomenclature

- a : axial velocity gradient, s⁻¹
- Z : mole fraction

1. 서 론

화석 연료를 사용하는 연소기에서는 필연적으로 환경을 오염시키는 연소 생성물이 발생하게 되는데 이러한 오염 물질로부터 대기 환경오염을 줄이려는 노력들이 오래 전서부터 시도되어 왔다. 그런데 이

러한 노력들의 대부분이 NO_x, SO_x 그리고 Soot 등의 전형적인 연소 공해 물질로 되어 있으나 최근 지구 온난화의 주범으로 화석 연료 연소 시 필연적으로 발생하는 이산화탄소(CO₂)를 저감하려는 시도들은 아직까지 미흡한 실정이다.

한편 이미 각국에서는 국제간 협약을 통하여 지구 온난화 가스의 주범인 CO₂ 배출을 규제하기 위해 화석 연료 사용을 제한하기 시작하였으며 이와 병행해서 연소 시 발생되는 CO₂ 저감법과 대체 연료 연구 등에 대한 노력들이 한창 진행 중이다. 일환의 하나로 최근 선진국을 중심으로 화석 연료 연소 시 발생되는 CO₂를 저감하기 위한 방법으로 연료나

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

산화제 측에 CO₂ 가스를 혼합하여 연소시켜 CO₂ 배출을 억제하려는 노력들이 활발하게 진행 중이다. 이러한 방법의 주요 내용은 기존에 NO_x 및 Soot 배출을 저감하기 위해 사용되었던 배가스 재순환 시스템인 EGR(Exhaust Gas Recirculation)과 유사하게 불활성 물질인 CO₂ 가스를 미리 연소 시스템에 첨가시킴으로써 유해 물질을 저감시킴과 동시에 연소 배가스 중 CO₂ 농도를 농축시켜 CO₂ 분리 공정 효율을 높여 줌으로써 결국 동일 에너지 대비 CO₂ 생성량을 억제하려는 시도이다.

그런데 이러한 시도에서 연료나 산화제에 혼합하여 첨가한 CO₂가 모든 연소 화학 반응에서 희석제로서의 역할만 하는가에 대한 의구심이 제기된다. 예를 들면 반응 기구에서 CO₂가 생성되는 가장 중요한 반응은 $CO + OH \rightarrow CO_2 + H$ 의 반응인데, 이 경우 생성된 CO₂ 가스가 어떠한 조건에서 수소 원자와 결합을 한다면 거꾸로 활성기인 CO 라디칼이 생성될 수 있음을 보여 준다는 것이다. 즉, CO₂에서 변환되어 새로 생성된 탄소계 화합물(이 경우 CO)이 연소 화학 반응에서는 무시할 수 없는 요소 반응을 하게 될 것이며 이러한 반응이 연소 과정에서 미치는 영향이 상당할 것으로 예상이 되기 때문이다. 이러한 관점에서 볼 때 CO₂ 첨가가 화염 구조에 미치는 영향에 대해서는 좀 더 세심한 기초적 연구가 선행되어야 할 것이다.

본 연구는 지구 온난화 가스 주범인 CO₂ 저감을 위해 최근 시도되고 있는 CO₂ 재순환 연소의 기초적 연구로, 수치 해석적 연구를 위해 Peters에 의해 체계화된 층류 화염편 모델을 이용하여 대항류 유동 구조를 갖는 확산 화염을 대상으로 수행하였다. 이를 위해 비 탄소계 연료인 수소(H₂)연료에 탄소계 성분인 CO₂와 불활성 가스인 N₂를 섞어서 만든 복합 연료에서 연료 조성비를 바꿔가면서 축 방향 속도 구배에 따라 혼합(첨가)된 CO₂ 농도가 확산 화염 구조에 미치는 영향을 상세한 화학 반응기구들의 수치해석을 통해 조사하였다.

2. 수치해법

본 연구의 대상 화염은 비에혼합 대항류 화염으로 Fig. 1에 표시된 구조를 하고 있다. 즉, 서로 마주

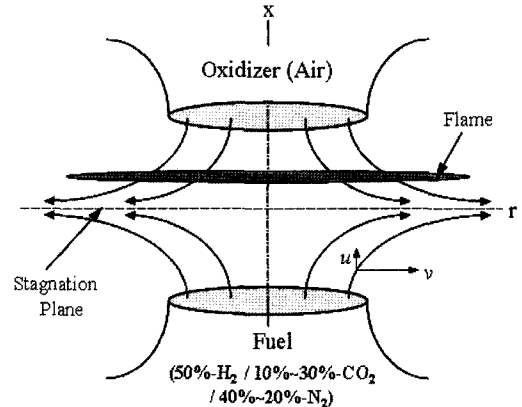


Fig. 1 Schematic drawing of non-premixed counterflow flame

보는 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 화염 구조를 해석하기 위해 층류 화염편 모델에서는 스트레인 윌(여기서는 축 방향 속도구배, a , 이하 속도 구배로 표시)을 주요 지배 변수로 사용하게 된다.¹⁾

수치 계산을 위해 본 연구에서 사용한 계산 코드는 Kee 등이 개발한 OPPDIF 코드를 사용하였으며, 질량과 운동량식, 에너지 및 화학종 방정식 등 지배 방정식과 해석 기법은 Lutz 등이 사용한 방법을 이용하여 계산하였다.^{2,3)} 마찬가지로 연소 화학반응 모사는 Drake 등이 제안한 32개 반응 기구들과 15 화학종의 상세 화학반응식을 그리고 열역학적 물성치와 전달 물성치들은 CHEMKIN Package를 사용하여 계산하였다.^{4,5)}

모든 계산들은 CO₂ 초기 농도가 10%인 경우 스트레인 윌에 해당하는 축 방향 속도 구배 a 값은 $36.0s^{-1}$ 에서 $9017.0s^{-1}$, 20%인 경우에는 $36.0s^{-1}$ 에서 $8501.0s^{-1}$ 그리고 30%에서는 $36.0s^{-1}$ 에서 $8151.0s^{-1}$ 로 비교적 넓은 범위 값에서 수행되었다. 여기서 각 최대 축 방향 속도 구배 값은 구배 값 증가에 따라 화염 스트레치로 야기되는 소염 발생 값을 나타낸다. 또한 초기 연료 온도는 상온인 300K이며, 산화제 역시 상온의 공기를 사용하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

이전의 연구에 의하면 연소 화학 반응에서 매우 작은 탄소계 화학종의 존재는 연쇄 분기 반응(chain branching reaction)을 억제하는 기능이 있어 연료의 산화 작용을 제한하여 전체적으로 연소 반응율이 떨어지는 것으로 알려져 있다.⁶⁾ 이는 본 연구인 경우 연료 측에 첨가된 이산화탄소의 양(농도)를 증가시키게 되면 CO₂가 고온의 화염대에서 열분해와 삼중체 충돌 반응으로 인해 CO₂ + H → CO + OH로 되면서 변환된 CO(탄소계 화학종)가 수소 원자와 결합되면서 연소 화학반응에서 가장 중요한 H + O₂ = O + OH와 같은 연쇄 분기 반응을 방해하는 작용을 하게 될 것이다. 이러한 결과는 Fig. 2에서 볼 수 있는 것과 같이 연료 측에 첨가된 CO₂ 농도가 증가함에 따라 화염의 최대 온도가 전 속도 구배 영역에서 낮아지고 있는 것으로 확인할 수 있었다. 좀 더 자세한 관찰을 위해 속도 구배가 CO₂가 첨가된 확산 화염 구조에 미치는 영향을 연료 조성비가 50%-H₂, 30%-CO₂, 20%-N₂로 혼합된 경우를 대상으로 조사하였다. 이를 위해 화학 반응과 무관하게 존재하는 보존 스칼라인 혼합 분율(mixture fraction, Z)에 따른 반응 영역에서의 주요 화학종들과 라디칼들의 농도 분포를 살펴보았다.

Fig. 3은 위와 같은 연료 조성비에서 혼합 분율 좌표축에서 속도 구배에 따른 주요 연소 화학종들의 몰 분율 분포도를 보여 주고 있다. 알려진 바와 같이 대량류 화염에서 스트레인율이 화염 구조에 미치는 영향은 특성 화학 반응 시간 대비 특성 확산 시간

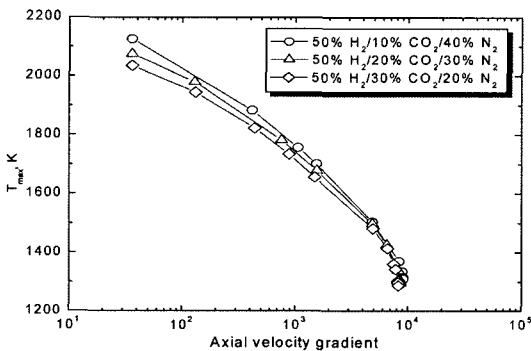


Fig. 2 Variation of maximum flame temperature with axial velocity gradient

의 비로 표현되는 댐콜레 수(Damchóler number, Da)로 이해되고 있다.

일반적으로 확산 화염인 경우 산화제측 속도 증가하는 축 방향 속도 구배와 화학종들의 농도 구배를 증가시키게 된다. 이는 연료와 산화제들의 속도 증가를 의미하며 아울러 특성 유동 시간의 감소를 의미하게 된다. 그런데 특성 유동 시간에 비해 특성 반응 시간이 현저하게 빠르질 못한 경우 화학 반응 속도면에서 화학 반응적 불평형 영향이 증가되어 댐콜레 수는 감소하게 된다.

이 경우 연료와 산화제가 반응대로 서로 확산되면서 반응하게 되는 확산 연소인 경우 짧은 반응 시간 내에 두 물질(연료와 산화제)간 연소 화학 반응이 이루어지질 못할 경우 연료와 산화제가 서로의 영역대로 투과되는 연료와 산화제 간 중첩 현상으로 나타나게 된다. 이러한 중첩의 정도가 결국 앞서 언급한 화학 반응적 불평형 정도로 나타나게 된다.

따라서 Fig. 3(a)에서 나타난 바와 같이 속도 구배 값인 a 값이 증가할수록 연료인 H₂와 산화제인 O₂간 상호 물질의 관통도가 증가되어 화염 대 위치인 Z = Z_{st}를 중심으로 서로 넓게 중첩되어 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(b), (c)는 혼합 분율 좌표계에서 속도 구배에 따른 CO₂와 CO의 몰 농도 분포를 보여 주고 있다. 그런데 이들 농도 분포를 주의 깊게 살펴보면 상대적으로 낮은 속도 구배 값들에서 CO₂와 CO 몰 농도 분포 곡선이 화염 면을 중심으로 좌, 우측에서 굴곡진 곡선(deflected curve) 상태로 분포되고 있음을 볼 수 있다. 이렇게 왜곡된 CO₂와 CO 반응 곡선들은 속도 구배 값이 증가함에 따라 점차 사라지는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 연료 측에 CO₂ 첨가가 없었던 이전의 탄화수소계 보고들에서는 없었던 현상으로 CO₂ 첨가에 의해서 나타난 매우 특이한 현상으로 본 연구 결과에서 얻어진 괄목할 만한 매우 중요한 결과들이다.

일반적으로 CO₂를 연료 혹은 산화제 측에 첨가해서 고려될 수 있는 효과는 다음과 같이 세 가지로 분류할 수 있다. 첫째는 연료와 산화제 조성을 변경시키는 희석 효과(diluent effect)로 물질이 첨가됨에 따라 반응할 수 있는 종들의 농도가 첨가제가 없는 순수 상태보다 상대적으로 묽어져 연소 반응율이 저

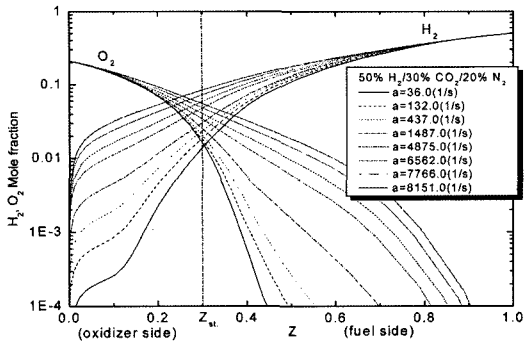


Fig. 3(a) Variation of H₂ and O₂ mole fraction

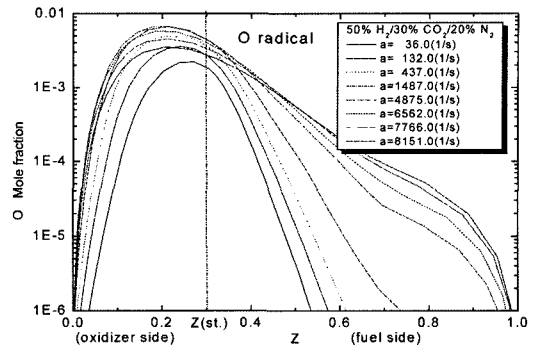


Fig. 3(e) Variation of O mole fraction

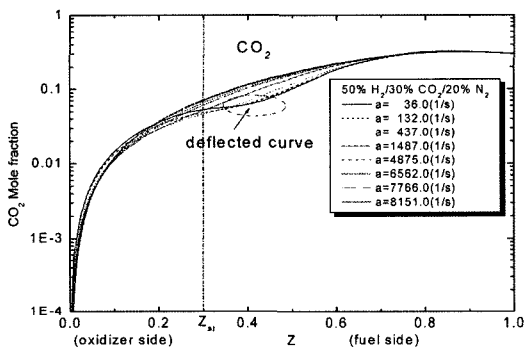


Fig. 3(b) Variation of CO₂ mole fraction

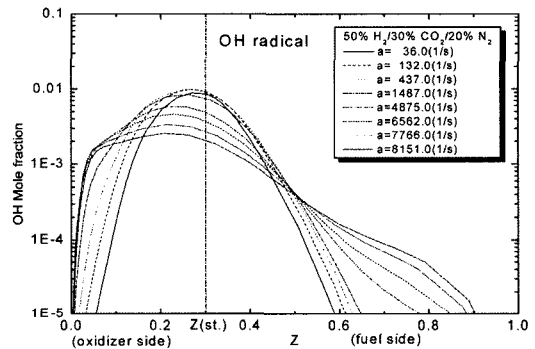


Fig. 3(f) Variation of OH mole fraction

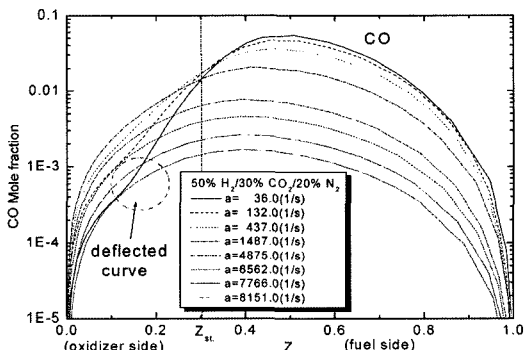


Fig. 3(c) Variation of CO mole fraction

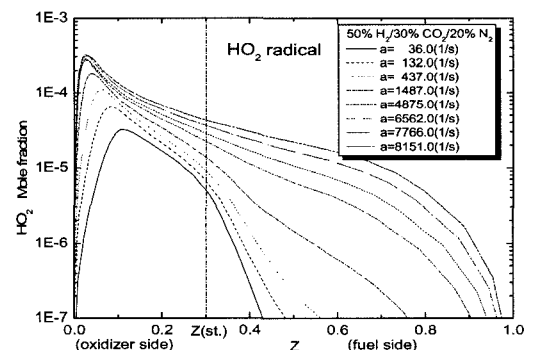


Fig. 3(g) Variation of HO₂ mole fraction

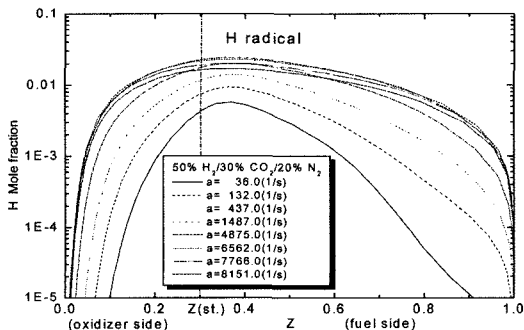


Fig. 3(d) Variation of H mole fraction

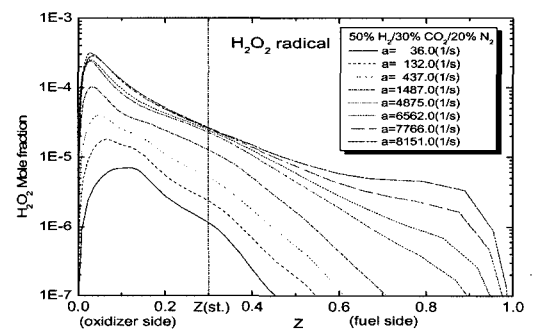


Fig. 3(h) Variation of H₂O₂ mole fraction

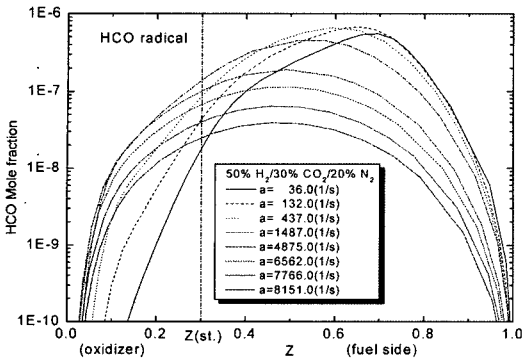


Fig. 3(i) Variation of HCO mole fraction with mixture fraction in terms of axial velocity gradient(50% H₂ /30% CO₂ / 20% N₂)

하되는 효과이다. 둘째는 CO₂가 복사 흡수 계수가 큰 물질이므로 복사열 손실과 자체 높은 열용량에 의해 반응대 온도가 저하되는 열적 효과(thermal effect)가 있다. 그리고 세 번째가 제안하는 화학적 효과로 안정된 상태 CO₂가 고온의 화학 반응 영역에서 열분해와 삼중체 충돌 반응으로 인해 탄소계 화학종들이 생성되어 이들이 연소 반응에 참여하는 경우이다.

이러한 화학적 효과를 본 연구 결과에서 살펴보면, 혼합 연료로 첨가된 CO₂가 고온의 반응 영역에서 CO₂ + H → CO + OH로 변환되면서 반응 영역에서 탄소계 화학종이 새롭게 생성되고(이 경우 CO 종), 생성된 CO가 수소 원자와 결합되면서 연소 화학 반응을 증가에 가장 중요한 H + O₂ → O + OH와 같은 연쇄 분기 반응을 억제하면서 전체 연소 반응을 저하시키는 쪽으로 반응에 참여한다는 것이다.

여기서는 두 번째인 열적 효과에 대해서는 이미 많은 연구가 진행되었고 본 연구에서 주된 관심 사항이 아니므로 제외하기로 하고 주로 CO₂ 첨가에 의한 첫 번째와 세 번째 효과에 대해서 논하기로 한다. 이를 위해 본 연구에서와 같이 비 탄소계 연료인 수소(H₂)에 불활성 기체인 CO₂를 탄소계 연료(성분)로, N₂를 희석 물질로 혼합한 경우 반응대에서 CO 화학종이 생성되거나 CO₂ 농도 분포에 왜곡 현상이 나타난다면 이는 탄소계 연료 성분으로 첨가된 CO₂로부터 변환되어 생성되었거나 기인되고 있음을 쉽게 알 수 있을 것이다.

앞서 언급한 바와 같이, Fig. 3(c)에서 보여지는 낮은 속도 구배 값에서의 CO 생성 정도는 Fig. 3(b)에서 나타난 굴곡된 CO₂ 물 분율 정도만큼 심화되는 것으로 이해할 수 있다. 그러나 속도 구배 값이 증가함에 따라 최대 화염 온도가 감소되어 결국 변환되는 CO 반응은 점점 덜 중요하게 된다. 그 결과 CO 물 분율 최대치도 Fig. 3(c)에서 보이는 바와 같이 점차 작아지며 Fig. 3(b)에서 굴곡된 CO₂ 곡선도 속도 구배 값 증가와 함께 사라지게 된다. 이처럼 큰 속도 구배 값을 갖는 화염 온도에서는 CO 농도가 매우 낮게 생성이 되며 결국 이러한 조건에서는 첨가된 CO₂가 희석제와 같은 효과를 나타내게 된다.

그런데 상대적으로 H, O, OH, HO₂ 그리고 H₂O₂와 같은 주요 라디칼들은 Fig. 3(d) ~ (h)에서 나타난 바와 같이 CO₂가 첨가된 반응 조건에서 속도 구배 증가에 따라 별 다른 영향 없이 이전의 연구 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 즉, 속도 구배 증가에 따라 이들 라디칼들의 물 분율 최대치가 증가했다가 소염 한계 영역 근처의 속도 구배 값들에서는 감소하여 결국 화염이 소멸되는 것을 알 수 있다. 그러나 HCO 라디칼 농도는 낮은 속도 구배 값과 높은 화염 온도에서 최고치가 되다가 속도 구배가 증가함에 따라 첨가된 CO₂가 희석제로서 역할이 강해지면서 생성 농도가 갑자기 적어짐을 볼 수 있다.

다음은 이러한 주요 화학종과 라디칼들이 첨가되는 CO₂ 물 분율 변화에 따라 받는 영향에 대해서 조사하였다. Fig. 4는 연료 측에 혼합(첨가)된 CO₂ 조성비가 각각 10%, 20%, 30%인 경우 화염의 스트레치 정도를 나타내는 속도 구배 값에 따라 주요 라디칼들의 농도 생성 특성을 보여 주고 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 속도 구배 값이 증가하게 되면 화염 온도가 감소하게 되어 고온에서 CO₂에서 CO로 변환되는 반응율이 떨어지게 되므로 Fig. 4(a)에서 나타난 바와 같이 속도 구배 값이 증가함에 따라 생성되는 CO 농도는 서서히 감소하게 되다가 소염이 발생하는 속도 구배 값 근처에서 갑자기 감소됨을 볼 수 있다. 또한 예상한 바와 같이 첨가되는 CO₂ 조성비가 큰 반응 조건(CO₂ 첨가비 : 10% < 20% < 30%)일수록 생성되는 CO 농도도 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

비에혼합 대항류 화염에서 CO₂ 첨가가 화염 구조에 미치는 영향 연구

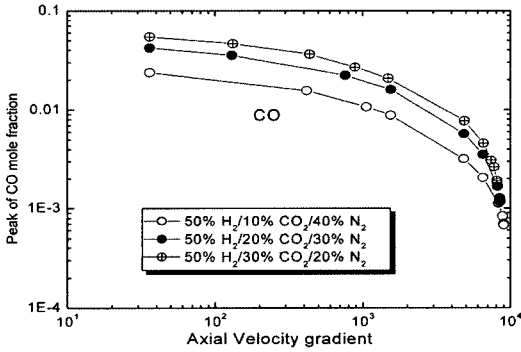


Fig. 4(a) Variation of peak of CO mole fraction

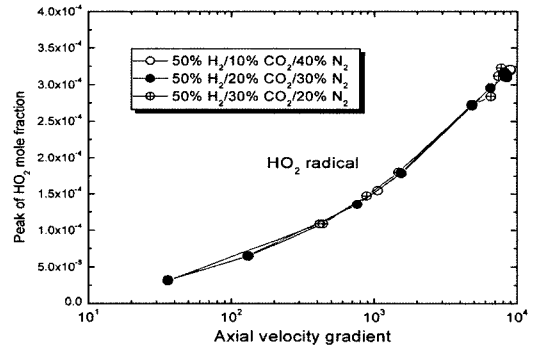


Fig. 4(e) Variation of peak of HO₂ mole fraction

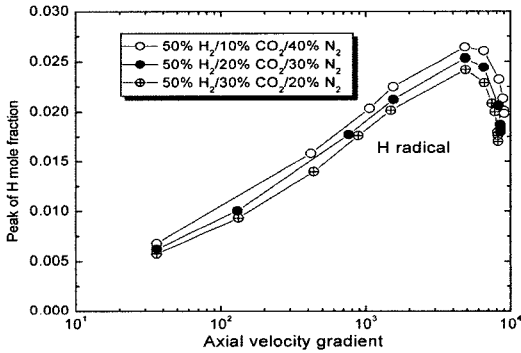


Fig. 4(b) Variation of peak of H mole fraction

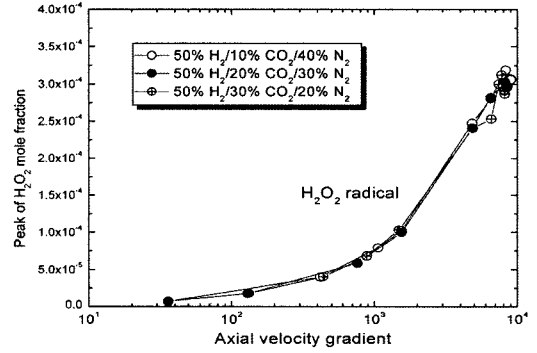


Fig. 4(f) Variation of peak of H₂O₂ mole fraction

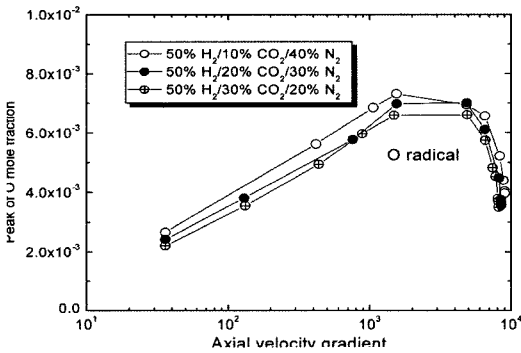


Fig. 4(c) Variation of peak of O mole fraction

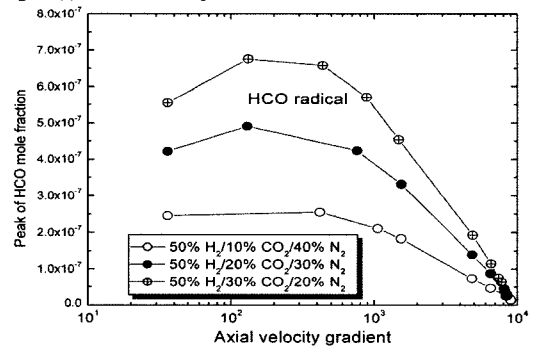


Fig. 4(g) Variation of peak of HCO mole fraction with axial velocity gradient

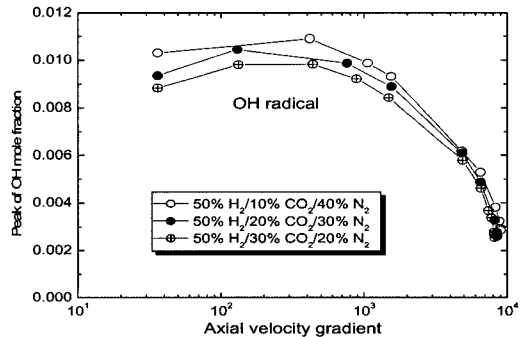


Fig. 4(d) Variation of peak of OH mole fraction

Fig. 4(b) ~ (d)에서는 H와 O 그리고 OH 등의 주요 라디칼들 생성 특성이 이전 보고에서와 유사한 특성을 나타내고 있음을 보여주고 있다.⁴⁾ 즉, 이들 주요 라디칼들은 속도 구배가 커짐에 따라 증가하여 최대치를 보이다가 소염 한계 근처에서 갑자기 생성 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 이에 비해서 HO₂와 H₂O₂ 같은 minor한 라디칼의 물 분율은 Fig. 4(e)와 (f)에서 볼 수 있는 바와 같이 소염 한계 근처에서 약간의 차이를 제외하고는 전 속도 구배에서

첨가된 CO₂ 양에 상관없이 일정함을 보이고 있어 CO₂가 이들 라디칼들의 생성과 소멸에 별다른 영향을 미치고 있지 못함을 알 수 있다.

한편, 속도 구배에 따른 HCO 라디칼 분포 특성은 CO/H₂/N₂의 복합 연료로 연구된 이전 연구에서는 속도구배 값 증가에 따라 단조하게 증가하다가 소염 한계 근처에서 갑자기 감소한 것에 비해 CO₂/H₂/N₂ 복합 연료인 본 연구에서는 Fig. 4(g)에서 나타난 바와 같이 소염 한계 근처 훨씬 이전에서부터 감소하는 특성을 보이고 있다.⁴⁾ 이러한 현상은 CO₂/H₂/N₂ 화염에서 생성된 HCO농도가 이전 연구에서는 속도 구배 값이 증가함에 따라 같이 증가되었음에도 불구하고 CO₂ 분해에 의해 기인되는 화학적 영향의 직접적인 척도가 될 수 있음을 말해 주고 있다. 즉, 소염 한계 훨씬 이전의 속도 구배 값서부터 감소하기 시작한 HCO의 이러한 경향은 화학적 영향 증거인 연소 반응대에서 굴곡된 CO₂ 물 분율 곡선이 Fig. 3(b)에서처럼 속도 구배 증가에 따라 사라지는 특성과 맥을 같이 하는 현상이다.

Fig. 5는 연료에 CO₂를 각각 10%, 20%, 30% 조성비로 혼합(첨가)시킨 경우 혼합기의 공간적 분포인 혼합 분율 값에 따라 주요 화학종과 라디칼들의 생성 분포 특성을 보여 주고 있다. 먼저, Fig. 5(a)에서는 초기 CO₂ 농도가 클수록 상대적으로 연료 측 분자량 증가로 인해 연료의 확산도가 떨어져 반응대 위치가 연료 과잉 지역으로 옮겨져 가고 있음을 보여주고 있다. 따라서 O₂, H₂, CO, H₂O 농도 분포선과 CO₂ 분포 곡선에서 변곡된 CO₂점의 위치가 초기 CO₂ 농도 증가에 따라 연료 측 영역으로 이동되고 있음을 볼 수 있다.

이처럼 초기 연료 조성비에서 CO₂ 농도가 증가함에 따라 생성되는 반응물 최고 값들이 연료 측으로 이동되는 현상들은 Fig. 5(b)와 (c)에서도 같은 경향을 띄고 있음을 알 수 있다. 또한 반응대에서 생성되는 CO 농도는 전반적으로 첨가되는 초기 CO₂ 농도 조성비가 클수록 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그런데 Fig. 5(b)와 (c)결과를 주의 깊게 살펴보면 연소 반응에서 매우 중요한 연쇄 분기 반응으로 생성된 H₂O, OH와 같은 주요 라디칼들이 첨가되는 CO₂ 농도 증가에 따라 억제되고 있음을 볼 수 있다. 그러나

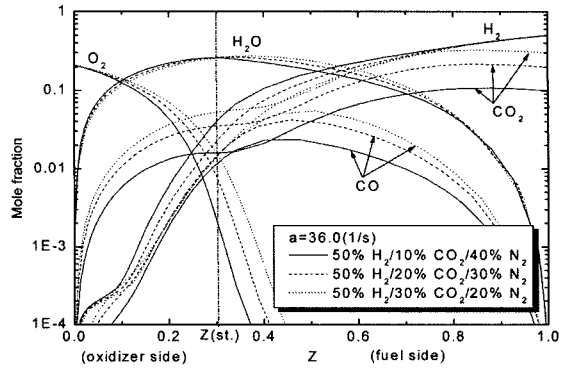


Fig. 5(a) Mole fraction variation of major species

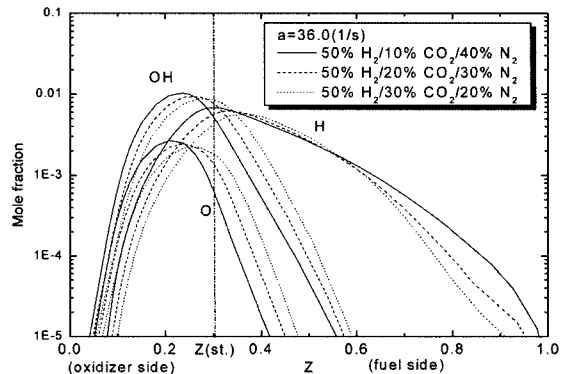


Fig. 5(b) Mole fraction variation of major radicals

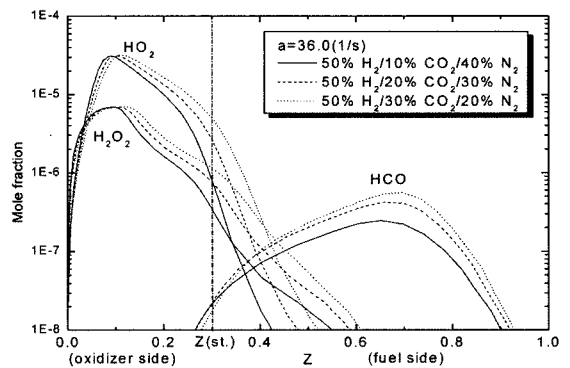


Fig. 5(c) Mole fraction variation of minor radicals

Fig. 5 Effect of CO₂ addition in mole fraction variation of (a) major species, (b) major radicals and (c) minor radicals

다른 minor한 라디칼들(HO₂, H₂O₂)에게는 별다른 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 결과들은 비록 순수 수소(H₂)-산소(O₂) 반응 기구에서 CO₂ 첨가로 고온의 화염 온도가 조금 변한다고 하여도 첨가된 CO₂가스가 반응

대에서 삼중체 충돌과 열분해 등으로 CO₂가 분해되면서 새롭게 반응할 수 있는 화학종들이 증가하여 연소 반응에 참여하게 되는 화학적 영향이 현저해질 수 있음을 보여주는 중요한 증거들이다.

4. 결론

- 1) CO₂ 첨가에 따른 화염 구조 관찰로부터 낮은 속도 구배 값에서는 고온 화염에 의한 열분해와 삼중체 충돌에 의한 반응 증대에 의해 CO₂로부터 변환된 CO 농도가 증대됨에 따라 새로 생성된 CO가 연소 반응에 참여하는 경우가 현저해짐을 상제한 연소 화학 반응의 수치해석을 통하여 확인하였다.
- 2) 연료로 첨가된 CO₂가 반응에 참여한다는 사실은 주요 화학종 농도 분포에서 CO₂ 분포 곡선이 반응대에서 변곡되는 현상과 초기 CO₂ 농도 증가에 비례하여 CO₂에서 변환된 CO몰 농도가 증가되는 것으로 증명되었다.
- 3) 속도 구배 값이 증가하게 되면 화염 온도가 저하되어 CO 변환 반응이 약해지게 되면서 변곡된 CO₂ 곡선이 사라지게 되는데 이러한 조건에서는 CO₂가 희석제 역할을 하게 됨을 알았다.
- 4) 첨가된 CO₂가 화염에 미치는 영향은 반응물의 농도를 상대적으로 저감시키는 희석제적 영향 이외에 열분해와 삼중체 충돌 반응을 통해 고온에서 CO₂가 분해되어 탄소계 화학종을 생성시켜 연소 반응에 참여하는 화학적 영향도 매우 중요함을 알았다.

후 기

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

References

- 1) N. Peters, "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-premixed Turbulent Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.10, p.319, 1984.
- 2) 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*, The Combustion Institute, p. 1479, 1988.
- 3) A. E. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grcar and F. M. Rupley, "OPPDIF : A Fortran Program for Computing Opposed-flow Diffusion Flames," SAND96-8243, 1996.
- 4) 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.
- 5) R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, "Chemkin : A General-purpose, Problem-independent, Transportable, Fortran Chemical Kinetic Code Package," SAND80-8003, 1980.
- 6) C. K. Westbrook and F. L. Dryer, "Chemical Kinetic Modeling of Hydrocarbon Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.10, p.1, 1984.
- 7) D. X. Du, R. J. Axelbaum and C. K. Law, "The Influence of Carbon Dioxide and Oxygen as Additives on Soot Formation in Diffusion Flame," *Proceedings of the 23rd Int. Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, p.1501, 1990.
- 8) N. Darabiha, "Transient Behavior of Laminar Counterflow Hydrogen-air Diffusion Flames with Complex Chemistry," *Combustion Science and Technology*, Vol.86, p.163, 1992.