

H₂-공기와 CO-공기 예혼합화염 사이의 후류상호작용에 있어서 CO₂ 첨가 효과

길상인* · 박 정***

Effects of CO₂ Addition in Downstream Interaction between H₂-Air and CO-Air Premixed Flames

Sang In Keel and Jeong Park

ABSTRACT

Numerical study was conducted to clarify effects of added CO₂ for the downstream interaction between H₂-air and CO-air premixed flames in counterflow configuration. The reaction mechanism adopted was Davis model which had been known to be well in agreement with reliable experimental data. The results showed that both lean and rich flammable limits were reduced. The most discernible difference between the two with and without having CO₂ addition into H₂-air and CO-air premixtures was two flammable islands for the former and one island for the latter at high strain flame conditions. Even a small amount of H₂, in which H₂-air premixed flame cannot be sustained by itself, participates in CO oxidation, thereby altering the CO-oxidation reaction path from the main reaction route $\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}$ with a very long chemical time in CO-air flame to the (H, O, OH)-related reaction routes including $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ with relatively short chemical times. This intrinsic nature alters flame stability maps appreciably. The results also showed that chemical effects of added CO₂ suppressed flame stabilization. Particularly this phenomenon was appreciable at flame conditions which lean and rich extinction boundary was merged. The detailed discussion of chemical effects of added CO₂ was addressed to the present downstream interaction.

Key Words : CO₂ Addition, Chemical effect, Downstream interaction, Lewis number

1. 서론

최근 기후변화, 화석연료의 고갈, 에너지 비용의 급상승에 따라 합성가스, COG, LFG, BFG, 바이오매스와 같은 저 발열량 연료들의 사용은 광범위하게 확장되어 왔다. 이러한 연료들은 주로 H₂, CO, CO₂, N₂, CH₄가 주성분으로 구성되어 있다. COG의 경우 위에서 언급한 연료 중 비교적 발열량도 높고 화염 안정성도 높은 편으로 제철 공정에서 안정적으로 사용되고 있다. 최근 Siemens 사에 의해 합성 가스만을 연료로 하는 산업용 버너가 개발되어 운전되고 있기도 하다. 또한 IGCC 기술 개발을 위해 필요한 핵심 기술 중의 하나는 가스터빈연소기의 개발이며 따라서 H₂, CO 합성가스에 대한 연소 특성 파악이다. 이러한 합성가스에 대한 다양한 적용성과 저 발열량 연

료들의 구성 성분들과 유사성으로 주 연료인 H₂, CO 에 CO₂와 N₂ 등의 첨가 효과를 포함하는 다양한 연소 특성 연구들이 수행되어 왔다[1-10].

화염 간의 후류 상호 작용은 1980년대에 동종 탄화수소 연료간의 상호작용에 대해 많은 연구[11-14]가 있었고 화염간의 후류 상호 작용은 루이스 수에 의해 잘 묘사되었다. 즉, 루이스수가 1보다 크면 화염간의 상호작용은 약하여 각 화염이 독립적인 예혼합화염의 특성을 가지지만 루이스수가 1보다 작으면 화염 간의 상호작용이 강해져 강한 화염에 약한 화염이 기생하여 생존하는 특성을 나타내게 된다.

한편 합성 가스는 저 발열량과 화염 불안정성으로 인해 독자적인 연료로 사용되기 보다는 기존 탄화수소에 혼합 연료로 사용된다는 측면에서 탄화수소와 합성 가스 간의 후류 상호 작용에 대한 연구[15,16]들이 수행되었고, 루이스 수에 의한 화염 거동 설명에 한계가 있으며 수소에 의한 화학적 효과가 중요한 역할을 하게 됨을 보인 바 있다. 그러나,

* 한국기계연구원 환경에너지기계본부

** 부경대학교 기계공학과

† 연락처자, jeongpark@pknu.ac.kr

탄화수소-공기 예혼합화염과 합성가스-공기 예혼합 화염의 후류 상호작용은 H_2 와 CO 의 역할의 복잡성으로 인해 이해의 폭은 제한되어 있었다. 이러한 상황에서 합성가스 화염들 사이의 상호작용에 대한 연구[17,18]가 수행되었으나 여전히 IGCC에서 가스터빈 연소기는 H_2 와 CO 만을 연료로 사용한다는 측면에서 H_2 -공기 및 CO -공기 예혼합화염 간의 후류 상호작용에 대한 H_2 와 CO 의 화학적 및 물리적 역할의 복잡성으로 근원적인 이해는 힘들었다. 따라서 H_2 -공기 및 CO -공기 예혼합화염 사이의 상호작용에 있어서 화학적 효과의 중요성에 대한 연구[19]와 수소의 선호화산 효과에 대한 연구[20]가 수행되었다.

대부분의 가스화 과정으로부터 생성되는 합성가스는 CO_2 와 N_2 를 포함하고 있기 때문에 이러한 희석제들의 첨가 효과들이 연구될 필요가 있으나 아직 문헌상에 보고되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 화염 소화 한계 근처의 H_2 -공기 및 CO -공기 예혼합화염 간의 후류 상호작용에 있어서 CO_2 첨가 효과를 명확히 제시하고자 한다.

2. 수치해석 방법

H_2/CO_2 -공기와 CO/CO_2 -공기 예혼합화염 사이의 후류 상호작용은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 대향류 유동 구조에서 연구된다. 정체점 근처에서 유효한 상사변수에 대해 1차원으로 표현되는 상세한 상미분 지배 방정식은 Kee 등[21]에 의해 개발되었고 Lutz 등[22]에 의해 확장되었고 상세한 지배 방정식과 해법이 후자의 연구에서 잘 묘사되어 여기서는 생략하기로 한다. 전체 화염 신장율은 $a_g = (V_U + V_L)/2L$ 로 정의되며, V, L 은 노즐 출구 속도와 버너간 거리이고 하점자 U, L 은 각각 상부 및 하부 노즐을 의미한다. 여기서 버너 사이의 거리는 15 mm로 고정하였다.

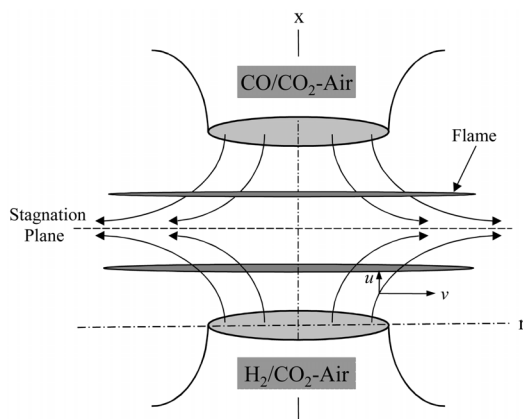


Fig. 1. Schematic of the present flow configuration.

복사 열손실은 화염 부피가 $1/\sqrt{a_g}$ 에 관련되므로 저신장율에서 우세해지며 H_2O, CO_2, CO 에 대해 평균 플랑크 흡수계수가 온도의 다항식으로 표현되는 광학적 박 모델(optical thin model)[23]을 사용하였다. 지배 방정식은 Chemkin 코드[24]와 Tanfit 코드[25]을 사용하여 풀게 된다.

주위 조건은 1기압, 298 K이고 화학종과 온도는 Dirichlet 경계조건을 사용하였다. 적응 격자(adaptive grid)를 사용하였고 최대 500개보다는 작았다. 화학 반응기구는 합성가스 화염에 대해 신뢰할 수 있는 실험 데이터[3-5]들에 대해 스트레치를 받지 않는 화염전파속도가 잘 일치하는 Davis 모델[7]을 사용하였다. 호 길이 연속 계산법(arclength continuation method)을 사용한 경우 적용하지 않은 경우에 비해 화염 소화에서 H_2 와 CO 의 농도는 2.2% 보다 작았다. 따라서 본 연구에서는 화염 소화를 결정할 때 호 길이 연속 계산법을 사용하지 않았다.

첨가하는 CO_2 의 화학적 효과와 복사열손실 및 열적 효과를 구분하기 위해 가상의 화학종 X 를 도입[26]하여 세 번의 계산을 수행하였다. 즉, 첫 번째는 실제 CO_2 를 첨가하여 계산을 수행하고, 두 번째는 가상의 화학종 X 가 첨가하는 CO_2 와 복사열손실, 열역학적 물성치와 전달 물성치가 모두 같으나 화학 반응에는 참가하지 않도록 하였고, 세 번째는 가상의 화학종 X 가 첨가하는 CO_2 와 화학반응에 참여하지 않고 열역학적 물성치와 전달 물성치가 모두 같으나 복사열손실 효과는 없도록 하였다. 따라서 두 번째와 세 번째의 차이는 순수하게 복사열손실의 효과만이 나타나고, 첫 번째와 두 번째의 차이에 의해 화학적 효과가 나타나게 된다.

3. 결과 및 논의

3.1. 화염 안정화에 있어서 CO_2 첨가 효과

Fig. 2는 CO_2 첨가 유무에 따른 H_2 -공기와 CO -공기 예혼합화염의 화염 안정화 선도를 나타낸다. CO_2 첨가의 경우 20%가 첨가되었다. Fig. 2(a)에서 수직 및 수평의 점선은 수소-공기와 CO -공기 화염의 당량비 1인 경우를 각각 나타낸다. Fig. 2에 보인 바와 같이 CO_2 가 첨가되지 않은 경우 스트레인율의 증가에 따라 화염 안정화 영역은 서서히 감소하다가 스트레인율이 $5700 s^{-1}$ 에서 화염 안정화 영역이 두 개의 점으로 존재하다가 $5768 s^{-1}$ 에서는 $(\Omega_{H_2}, \Omega_{CO}) = (51.9, 0)$ 과 그리고 $5917 s^{-1}$ 에서는 $(\Omega_{H_2}, \Omega_{CO}) = (100, 0)$ 로 안정화 영역이 제한된다. 스트레인율의 증가에 따라 화염 안정화 영역이 감소하는 것은 강한 화염으로부터 약한 화염과 주위로의 전도 열손실에 기인함을 보인 바 있다[17]. 또한 50% $H_2/50\%$ CO 합성가스의

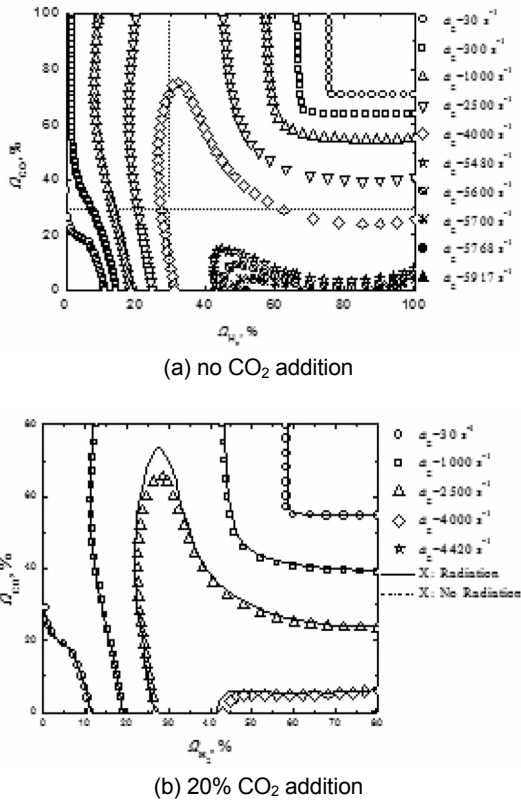


Fig. 2. Comparison of flame stability maps with and without CO₂ addition in H₂-air and CO-air premixed flames.

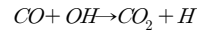
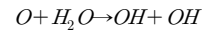
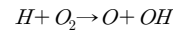
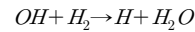
동종 연료간의 후류 상호작용에서는 스트레인율의 증가에 따라 화염 안정화되는 섬이 존재했고 그 이상으로 스트레인율을 증가시키면 단지 한 조건에서만 화염이 안정화된다는 것을 보여 왔다[17].

따라서 H₂-공기와 CO-공기 예혼합화염에서 H₂가 과농한 경우에 나타나는 섬은 극단적으로 과농한 H₂가 극단적으로 희박한 CO와 부분 예혼합 구조를 이루면서, 먼저 확산화염을 형성하고 두 개의 약한 화염인 H₂-공기 과농 예혼합화염과 CO-공기 희박 예혼합화염이 기생하는 변칙적인 화염 구조를 나타내면서 생존할 수 있었다[19].

한편 CO₂가 첨가되지 않은 경우 H₂-공기 화염의 루이스 수는 희박 조건에서 0.285-0.395, 과농 조건에서는 1.718-2.045의 범위에서 변한다. 또한 CO-공기 예혼합화염은 희박한 연료 조건에서 1.105-2.074, 과농 연료 조건에서 1.080-1.039의 범위에서 변하게 된다. 따라서 H₂-공기와 CO-공기가 둘 다 과농한 경우 루이스 수가 모두 1보다 크기 때문에 두 화염은 상호 작용은 약하게 되어[11-14] 스트레인율 30 s⁻¹에 보여진 바와 같이 직각 사각형 형태가 된다. 그러나 스트레인율이 점점 증가하게 되면 두 화염 사이의 거리

가 감소하게 되고 H, O, OH와 같은 라디칼들을 두 화염이 공유하게 되면서 화염의 화학적 상호 작용이 강해지면서 소화 경계들은 점점 경사지게 된다.

한편, 희박 연료 조건에서 H₂가 과다하게 희박한 경우 스트레인율이 30 s⁻¹인 경우 화염이 존재하는 상부 소화 경계의 CO 농도가 급격히 증가하면서 1000 s⁻¹에서 상부 화염 소화의 경계가 열리면서 스트레인율이 더 증가하여 4000 s⁻¹에서는 두 경계가 만나게 된다. 한편, 스트레인율이 30 s⁻¹인 경우 H₂ 농도가 감소하면 루이스 수는 더욱 감소하게 되어 화염 상호 작용은 더 강해지려는 경향을 갖는다. 따라서 화염 소화 경계는 점점 더 기울어지는 경향을 갖게 된다. 한편, 자유 전파하는 CO-공기 화염의 주 산화 반응은 화학반응시간이 매우 큰 $CO + O_2 \rightarrow CO_2 + O$ 를 통해 이루어진다. 그러나 H₂가 매우 미량만 혼합되어도 화학반응시간이 훨씬 짧은 다음과 산화반응 경로를 취하게 된다.



스트레인율이 30 s⁻¹인 경우 CO-공기 희박 예혼합 화염은 $CO + O_2 \rightarrow CO_2 + O$ 가 화학반응시간이 매우 길어 공급되는 CO를 화염면에서 다 소화하지 못하게 되고 투과된 CO는 H₂-공기 예혼합기와 만나게 되어 H₂의 농도가 작아지게 되어 자신의 화염 스스로는 반응이 유지되지 않으므로 상술된 후자의 CO 산화 반응 경로에 참여하게 된다. 스트레인율이 더 증가하여 300 s⁻¹이 되면 전도 열손실에 의해[17] 화염의 강도는 약화되어 있고 변경된 CO 산화 반응 경로에 참여하는 H₂가 참여하기 위해 충분한 H₂가 공급되어야 하나 H₂ 농도의 감소로 더 이상 산화 반응에 참여하지 못하게 되면 H₂-공기 측 화염은 더 이상 유지되지 못하게 되고 CO-공기 측 화염도 과농 한계를 벗어나게 되어 화염이 유지되지 못하는 현상이 나타나게 되어 Fig. 2(a)와 같이 상부 화염 소화 경계가 열리는 현상이 발생하게 된다[21].

그 이상의 상세한 Fig. 2(a)에 대해서는 기존 연구들[21,22]에서 상술하였으므로 여기서는 그 이상은 생략하기로 한다.

한편 이러한 상황 하에서 20%의 CO₂가 H₂-공기 및 CO-공기 예혼합화염에 첨가되면 Fig. 2에 보여진 바와 같이 같은 스트레인율에 대해서 화염 안정

화 영역은 감소하는 것을 알 수 있다. 예로서 스트레인을 2500 s⁻¹인 경우 Fig. 2(a)와 (b)를 비교하면 CO₂가 첨가되지 않은 희박 화염 소화 경계와 과농 화염 소화 경계가 만나지 않았지만 CO₂가 첨가된 경우 두 경계가 만나는 것을 Fig. 2(b)에서 확인할 수 있다. 스트레인을 4000 s⁻¹에서는 CO 농도는 매우 희박하고 H₂ 농도가 과농인 부분예혼합 구조에서만 화염이 안정화되는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 2(a)에서는 스트레인을 5700 s⁻¹에서 두 개의 화염이 안정화되는 점이 나타나지만 Fig. 2(b)에 보이는 바와 같이 두 개의 점은 나타나지 않고 한 개의 점만이 나타나는 차이를 보이고 있다. 또한 CO₂가 첨가되지 않은 경우는 스트레인을 더 증가시키면 각 점의 영역이 줄어들면서 각기 한 점으로 수렴해가지만 CO₂가 첨가되면 하나의 점으로부터 ($\Omega_{H_2}, \Omega_{CO}$) = (100, 0)인 하나의 점으로 수렴해 가는 것을 볼 수 있다. 이러한 CO₂ 첨가 효과에 대해 분석이 요구되며 다음 절에서 상세한 설명이 주어진다.

3.2. CO₂ 첨가가 화염소화에 미치는 열적·화학적 효과

CO₂를 첨가하게 되면 $CO + OH \leftrightarrow CO_2 + H$ 의 역반응에 의해 CO가 생성되어 확산화염의 화염구조에 영향을 미치는 CO₂의 화학적 효과를 보인 바 있다[26]. 또한 CO₂는 복사 흡수계수가 매우 큰 화학종으로 알려져 있다. 이러한 효과들은 예혼합화염 간의 후류 확산에서도 영향을 미칠 것으로 판단되며 명확히 보일 필요가 있다. 이것을 명확히 하기 위해 가상의 화학종 X를 도입하여 계산을 담음과 같이 세 번 수행하였다.

- 1) CO₂를 첨가한 경우
- 2) 가상의 화학종 X가 복사 열전달 물성치 그리고 열 및 전달 물성치가 같으나 화학반응에는 참여하지 않는 경우
- 3) 가상의 화학종 X가 복사에는 기여가 없고 열 및 전달 물성치가 같으나 화학반응에는 참여하지 않는 경우

따라서 2)와 3)의 비교로부터 복사 열손실의 효과를 명확히 할 수 있고, 1)과 2)의 차이는 첨가하는 CO₂의 화학적 효과를 명확히 할 수 있다. 복사열손실은 부피에 관련되므로 대향류화염에서는 반응대의 두께와 관련되므로 $1/\sqrt{a_g}$ 에 관련된다. 따라서 복사 열손실 효과는 저신장영역에서 우세하고 스트레인이 증가할수록 복사 열손실에 의한 효과는 점점 줄어들게 된다. 따라서 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 스트레인을 30 s⁻¹의 희박 예혼합 조건에서만 복

사열손실을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교하였다. Fig. 2(b)에서 실선은 복사항을 고려한 경우이고 파선은 복사항을 고려하지 않은 경우이다. Fig. 2(b)에 보여진 바와 같이 30 s⁻¹에서 CO 농도가 큰 경우를 제외하고는 복사 열손실 효과는 화염 소화 경계를 예측하는데 큰 기여를 하지 못하고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 상황을 고려한다면 스트레인이 증가함에 따라 복사 열손실의 효과는 더 작아지게 되므로 다른 경우들에 대해서는 복사 열손실의 효과를 평가하지 않았다.

한편 Fig. 2(b)에서 심볼과 실선은 각각 전술한 1)과 2)의 계산 결과를 나타낸다. 따라서 둘 사이의 차이는 첨가되는 CO₂의 화학적 효과임을 의미한다. 모든 스트레인을에서 CO₂가 화학 반응에 참여하는 경우가 화염 안정화 영역이 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, $CO + OH \leftrightarrow CO_2 + H$ 에서 CO₂가 첨가에 의해 역반응이 일어나게 되고 생성된 OH 라디칼이 H₂-산화 반응에 참가하게 된다. 일반적으로 수소 화염과 탄화수소 화염의 전체 반응율은 $O_2 + H \rightarrow OH + O$ 로 알려져 있다[27]. 따라서 두 반응을 비교하면 H 원자에 대해 서로 경쟁하게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 첨가한 CO₂가 $CO + OH \leftrightarrow CO_2 + H$ 의 역반응을 통해 반응에 참가하게 되면 H 원자에 대해 $O_2 + H \rightarrow OH + O$ 반응과 경쟁하게 되므로 결국 전자의 반응에 H가 소모될수록 전체 연소 반응율은 감소하게 된다.

3.3. CO₂ 첨가가 화염안정화 점에 미친 영향

3.1절에서 설명했던 바와 같이 Fig. 2를 비교해 보면 스트레인이 매우 큰 경우 CO₂ 첨가가 없는 경우는 두 개의 점이 분리된 형태로 화염 안정화 영역이 존재했고, CO₂ 첨가의 경우는 하나의 점으로 바뀌는 것을 알 수 있었다. 이것을 명확히 설명하기 위해서 스트레인이 동일하지 않기 때문에 명확한 비교는 되지 않는다 할지라도 원을 파악하는 데는 도움이 된다.

Fig. 3과 4는 CO₂를 첨가하지 않은 경우에 스트레인을 5480 s⁻¹, $\Omega_{CO} = 6.0\%$ 일 때 Ω_{H_2} 에 따른 화염 구조와 열방출율을 비교하였다. 세 가지 모두 H₂-공기는 과농 그리고 CO-공기는 희박한 경우로 부분예혼합에 의해 삼지 화염이 나타나는 경우에 해당하며 H₂ 농도만을 증가시켜서 화염 구조를 관찰한 것이다. Fig. 3에서 f_{H_2} 와 f_{CO} 는 각각 H₂-공기와 CO-공기 화염의 위치를 나타낸다. 여기서 화염대의 위치는 H₂와 CO 소모율이 최대인 지점으로 정의하였다[19,20]. 세 경우 모두 CO-공기 화염은 스스로는 생존할 수가 없는 예혼합 조건임을 알아야 한다. 그럼에도 불구하고 열방출율을 살펴보면 삼중 화염의 구조를 갖는 것을 볼 수 있다. Fig. 3(a)를 살펴보면 H₂는 과농이

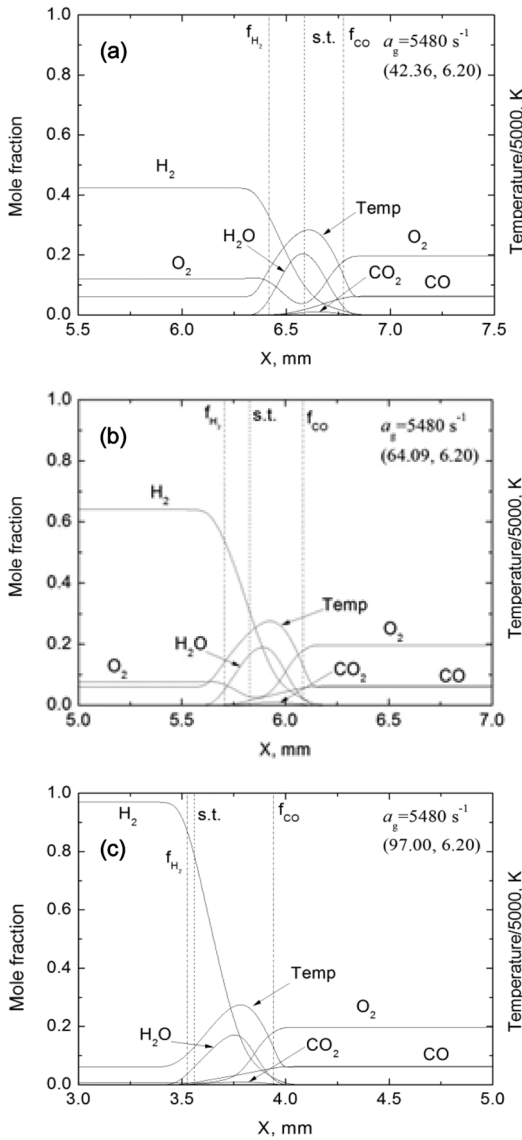


Fig. 3. Flame structures for $(\Omega_{H_2}, \Omega_{CO}) = (42.36, 6.20)$, $(64.09, 6.20)$, and $(97.00, 6.20)$ at $a_g = 5480 \text{ s}^{-1}$ without having CO₂ addition.

고 CO는 희박하므로 수소가 H₂-공기 화염으로부터 정체점 근처에서 CO₂와 H₂O가 활발히 소모되는 확산화염이 생성되는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 4(a)를 보면 CO-공기 화염 측의 열방출률이 매우 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 H₂-공기 화염으로부터 투과된 화염이 먼저 화학반응시간이 빠른 CO 산화 반응에 참가하여 CO-공기 예혼합화염을 형성하고 여기서 투과된 공기와 수소 화염으로 투과된 수소와 만나 정체점 근처에서 확산 화염을 형성한다는 것을 알 수 있다. 수소 농도가 더 증가하여 $\Omega_{H_2} = 64.09\%$ 가 되면 Fig. 3(b)에서 보듯이 화염 구조는 Fig. 3(a)와 매

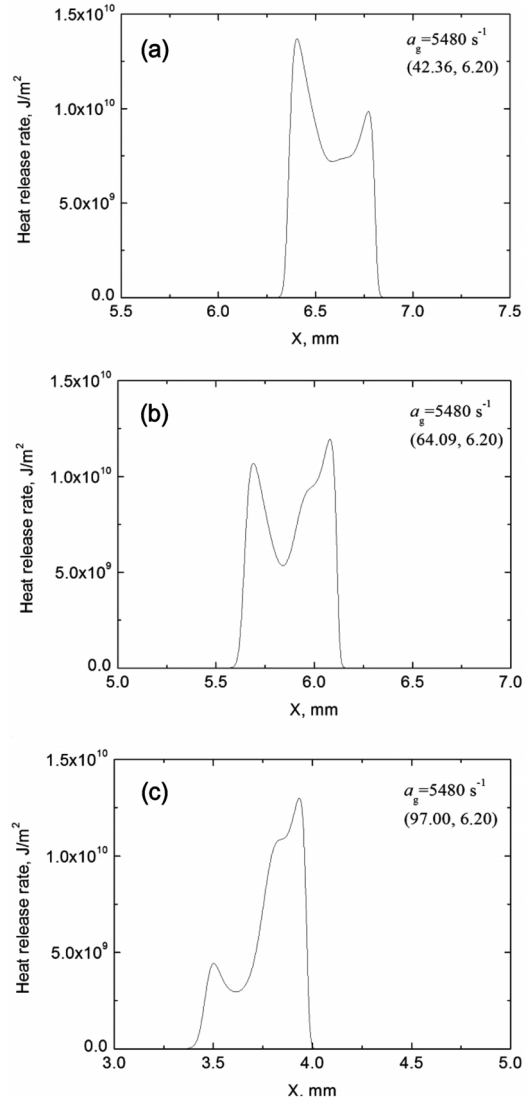


Fig. 4. Heat release rates for $(\Omega_{H_2}, \Omega_{CO}) = (42.36, 6.20)$, $(64.09, 6.20)$, and $(97.00, 6.20)$ at $a_g = 5480 \text{ s}^{-1}$ without having CO₂ addition.

우 유사하지만 Fig. 4(b)에서와 같이 확산 화염의 열방출률이 급격히 증가될 것을 볼 수 있다. 수소 농도가 더 증가되어 $\Omega_{H_2} = 97\%$ 가 된 경우는 실제로 수소-공기 예혼합화염과 CO-공기 예혼합화염 둘다 가연한계를 넘어선 경우임에도 불구하고 화염이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 수소-공기 및 CO-공기 예혼합기들로부터 수소와 공기가 투과되어 먼저 확산화염을 형성하고 확산화염을 또한 투과한 수소가 CO 산화 반응에 참가하여 CO-공기 예혼합화염이 생존하도록 돕고, 또한 형성된 확산화염에 과농 수소-공기 화염이 기생하여 생존한다는 것을 알 수 있다. 결과로서 두 개의 화염 안정화 점이 존재하

는 것을 이유를 정리하면 다음과 같다. H_2 -공기 화염으로부터 투과된 수소는 확산화염의 형성과 CO-공기 화염에서 CO 산화 과정에 함께 관여하기 때문에 H_2 의 농도가 증가하여 수소-공기 화염의 강도가 약해지면서 수소 화염에 열적으로 기생하는 확산화염과 CO-공기 화염에 열전달을 해야 하고 또한 투과된 수소가 확산 화염과 CO-공기 화염에 충분히 관여하지 못하게 되면서 Fig. 2(b)의 4000 s^{-1} 인 경우 좌측의 화염 안정화 섬을 형성하게 된다. 즉, 이러한 화염 안정화 섬에서는 수소-공기 화염이 강한 화염으로 약한 화염인 CO-공기 화염과 확산 화염을 지탱하는 역할을 수행하려할 때 생기게 된다. 반면에 수소 농도가 더 높아져서 수소-공기 화염이 화염 강도가 자기 자신을 지탱하기 힘든 상황에서는 수소-공기 혼합기에서 과다하게 투과된 수소의 일부는 CO-공기 혼합기에서 투과된 공기와 만나 확산 화염을 생성하고 또한 투과된 수소가 CO 산화 과정에 참여하여 CO-공기 희박 예혼합화염을 형성하게 된다. 따라서, 과농 수소-공기 예혼합화염과 희박 CO-공기 예혼합 화염이 확산 화염에 새로운 화염 안정화 기구에 의해 또다른 화염 안정화 섬을 형성하게 된다.

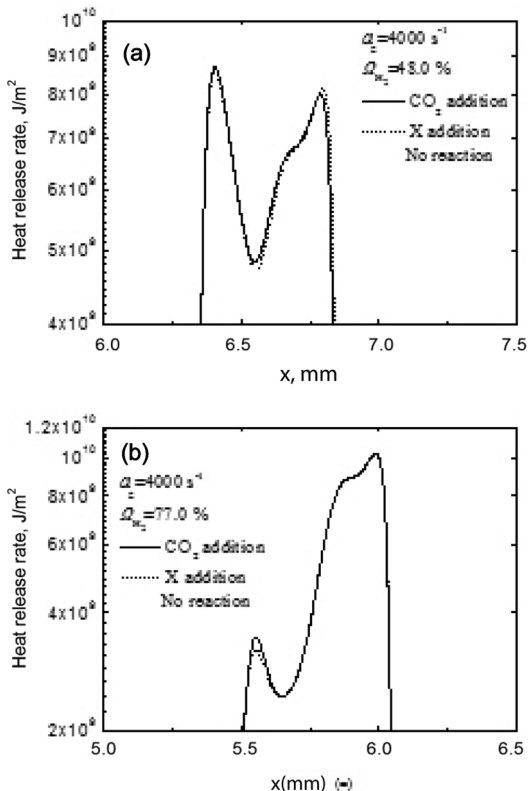


Fig. 5. Heat release rate $\Omega_{H_2} = 48.0\%$ and 77.0% at $\alpha_0 = 4000\text{ s}^{-1}$ without having addition of CO_2 and X.

한편 CO_2 가 첨가 효과를 명확히 하기 위해 Fig. 5에 CO_2 첨가의 경우에 화염 구조와 열방출율을 나타내고 있다. $\Omega_{H_2} = 48.0\%$ 인 경우는 수소-공기 예혼합 화염 자신을 유지하기에 충분한 수소 농도를 갖는다. 따라서 이 경우는 Fig. 5(a)에 보인 바와 같이 삼중 화염을 형성하게 된다. 그러나 Fig. 3과 4와는 달리 CO_2 를 형성하는 경우 수소-공기 화염은 화염 소화 한계가 급격히 감소하여 수소 농도가 더 증가하게 되면 자신의 화염을 유지하는 것이 불가능해진다. 이러한 상황에서 수소 농도의 증가는 다시 과다한 수소와 CO-공기 측의 과다한 산소와 만나 확산 화염을 형성하고 또한 확산화염으로부터 투과된 수소가 CO 산화 반응에 참여하면서 CO-공기 화염을 유지시킨다. 이러한 상황에서 화염 강도가 매우 약한 수소 화염은 확산화염에 기생하여 생존하는 구조를 갖게 된다. 따라서 수소 농도의 증가에 따라 첫째 화염 안정화 기구로부터 두 번째 화염 안정화 기구의 빠른 전환에 의해 Fig. 2(b)에서 스트레인을 이 4000 s^{-1} 인 경우 하나의 화염안정화 섬만이 나타나게 된다. 이것을 좀더 명확히 하기 위해 가상의 화학종 X를 첨가하여 이것을 확산을 갖고자 하였다. Fig. 5에 보인 바와 같이 CO_2 와 가상의 화학종 X를 첨가한 경우 열방출율의 분포가 거의 변화가 없는 것을 볼 수 있는데 이것으로부터 CO_2 혹은 가상의 화학종의 첨가에 의해 수소 농도의 증가에 따라 두 가지 화염안정화 기구의 빠른 전환에 의해 모두 하나의 화염 안정화 섬을 형성하는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

H_2 -공기 예혼합화염과 CO-공기 예혼합화염 간의 후류 상호작용에 있어서 CO_2 첨가 효과에 대한 수치해석 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론이 얻어진다.

- 1) CO_2 첨가로 인한 복사 열손실에 의해 화염 안정화 경계는 영향을 크게 받지 않는다.
- 2) CO_2 첨가에 의해 $CO + OH \leftrightarrow CO_2 + H$ 의 역반응은 전체 반응율에 대한 지시자인 $O_2 + H \rightarrow OH + O$ 과 H 원자에 대해 서로 경쟁을 함으로써 후자의 반응율을 떨어뜨리는 역할을 한다. 따라서 CO_2 첨가에 의해 화염 소화 경계는 감소하게 되며 희박 화염 경계와 과농 화염 경계가 만나는 화염 조건들에서 이러한 효과들이 더 크게 나타난다.
- 3) 스트레인을 이 큰 CO_2 첨가가 없는 경우는 두 개의 화염 안정화 섬이 존재하나 20% CO_2 를 첨가하는 경우는 하나의 화염안정화 섬이 존재하게 된다. 따라서 그 이상으로 스트레인을 증가시키면 전자는

두 개의 각기 다른 점에서만 화염이 안정화되는 화염 조건들이 존재하지만 후자는 $(\Omega_{H_2}, \Omega_{CO}) = (100, 0)$ 화염 조건에서만 화염이 안정화된다.

후 기

본 논문은 한국에너지기술평가원 에너지지원기술포발사업의 지원을 받아 수행되었고 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Fotache CG, Tan Y, Sung CJ, Law CK. Ignition of CO/H₂/N₂ versus heated air in counterflow: experimental and modeling results. *Combust Flame* 2000;120:417-26.
- [2] Vagelopoulos CM, Egolfopoulos FN. Laminar flame speeds and extinction strain rates of mixtures of carbon monoxide with hydrogen, methane, and air. *Proc Combust Inst* 1994;25:1317-23.
- [3] Mclean IC, Smith DB, Taylor SC. The use of carbon monoxide/hydrogen burning velocities to examine the rate of the CO+OH reaction. *Proc Combust Inst* 1994;25:749-57.
- [4] Brown MJ, Mclean IC, Smith DB, Taylor SC. Markstein lengths of CO/H₂/air flames using expanding spherical flames. *Proc Combust Inst* 1996; 26:875-81.
- [5] Natarajan J, Lieuwen T, Seitzman J. Laminar flame speeds of H₂/CO mixture effects of CO₂ dilution, preheat temperature, and pressure. *Combust Flame* 2007;151:104-9.
- [6] Vu TM, Park J, Kwon OB, Kim JS. Effects of hydrocarbon addition on cellular instabilities in expanding syngas-air spherical premixed flames. *Int J Hydrogen Energy* 2009;34:6961-9.
- [7] Davis SG, Joshi AV, Wang H, Egolfopoulos F. An optimized kinetic model of H₂/CO combustion. *Proc Combust Inst* 2005;30:1283-92.
- [8] Park J, Keel SI, Yun JH, Kim TK. Effects of addition of electrolysis products in methane-air diffusion flames. *Int J Hydrogen Energy* 2007; 32: 4059-70.
- [9] Park J, Keel SI, Yun JH. Addition Effects of H₂ and H₂O on Flame Structure and Pollutant Emission in Methane-Air Diffusion Flame. *Energy & Fuels* 2008;21:3216-24.
- [10] Kim JS, Park J, Kwon OB, Yun JH, Keel SI, Kim TK. Preferential diffusion effects on NO formation in methane/hydrogen-air diffusion flames. *Energy & Fuels* 2008; 22:278-83.
- [11] Ishizuka S, Law CK. An experimental study on extinction and stability of stretched premixed flames. *Proc. Combust. Inst.* 1982;19:327-35.
- [12] Sohrab SH, Ye ZY, Law CK. An experimental investigation on flame interaction and the existence of negative flame speeds. *Proc Combust Inst* 1984; 20:1957-65.
- [13] Sohrab SH, Ye ZY, Law CK. Theory of interactive combustion of counterflow premixed flames. *Combust Sci Technol* 1986;45:27.
- [14] Chung SH, Kim JS, Law CK. Extinction of interacting premixed flames: theory and experimental comparisons. *Proc Combust Inst* 1986;21: 1845-51.
- [15] Kim JS, Park J, Bae DS, Vu TM, Ha JS, Kim TK. A Study on Methane-air Premixed Flames Interacting with Syngas-air Premixed Flames. *Int J Hydrogen Energy* 2010;35:1390-400.
- [16] Ha JS, Moon CW, Park J, Kim JS, Yun JH, Keel SI. A Study on Flame Interaction between Methane-air and Nitrogen-diluted Hydrogen-air Premixed Flames. *Int J Hydrogen Energy* 2010;35:6992-7001.
- [17] Ha JS, Park J, Vu TM, Kwon OB, Yun JH, Keel SI. Effect of flame stretch in downstream interaction between premixed syngas-air flames. *Int J Hydrogen Energy* 2011;36: 13181-93.
- [18] Kim TH, Song WS, Park J, Kwon OB, Park JH. Effects of Preferential Diffusion on Downstream Interaction in Premixed H₂/CO Syngas-Air Flames. *Int J Hydrogen Energy* 2012;37:12015-27.
- [19] 정승욱, 박정, 권오봉, 길상인, 윤진한, “신장된 H₂-공기와 CO-공기의 예혼합화염 사이의 후류 상호작용에서 화염소화에 화학적 상호작용”, 한국연소학회지 투고
- [20] 정용호, 박정, 권오봉, 길상인, 윤진한, “상호작용하는 H₂-공기/CO-공기 예혼합화염에 미치는 H₂ 선호확산 영향에 대한 수치적 연구”, 한국연소학회지 투고
- [21] Kee RJ, Miller JA, Evans GH, Dixon-Lewis G. A computational model of the structure and extinction of strained, opposed flow, premixed methane-air flame. *Proc Combust Inst* 1988;22:1479-94.
- [22] Lutz AE, Kee RJ, Grcar JF, Rupley FM. A fortran program for computing opposed-flow diffusion flames. Sandia National Laboratories Report. SAND 96-8243;1997.

- [23] Ju Y, Guo H, Maruta K, Liu F. On the extinction limit and flammability limit of non-adiabatic stretched methane-air premixed flames. *J Fluid Mech* 1997;342:315.
- [24] Kee RJ, Rupley FM, Miller JA. Chemkin II: a fortran chemical kinetics package for analysis of gas phase chemical kinetics. Sandia National Laboratories Report. SAND 89-8009B;1989.
- [25] Kee RJ, Dixon-Lewis G, Warnatz J, Coltrin ME, Miller JA. A fortran computer code package for the evaluation of gas-phase multi-component transport. Sandia National Laboratories Report. SAND86-8246; 1994.
- [26] Park J, Kim JS, Chung JO, Yun JH, Keel SI. Chemical effects of added CO₂ on the extinction characteristics of H₂/CO/CO₂ syngas diffusion flames. *Int. J. Hydrogen Energy* 2009;34:8756-62.
- [27] Westbrook CK, Dryer FL. Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion. *Prog Energy Combust. Sci* 1984;10:1-57.

논문접수일 : 2013. 10. 21

심사완료일 : 2013. 11. 21