

상호작용하는 H₂-CO 예혼합 화염에서 H₂선호확산의 영향에 관한 수치적 연구

오상훈* · 박 정* · 권오봉**

Effects of Preferential Diffusion on Downstream Interaction in Premixed H₂/CO Syngas-air Flames

Sanghoon Oh, Jeong Park and Ohboong Kwon

ABSTRACT

The effects of strain rate and preferential diffusion of H₂ on flame extinction are numerically studied in interacting premixed syngas-air flames with fuel compositions of 50% H₂ + 50% CO and 30% H₂ + 70% CO. Flame stability diagrams mapping lower and upper limit fuel concentrations at flame extinction as a function of strain rate are examined. Increasing strain rate reduces the boundaries of both flammable lean and rich fuel concentrations and produces a flammable island and subsequently even a point, implying that there exists a limit strain rate over which interacting flame cannot be sustained anymore. Even if effective Lewis numbers are slightly larger than unity on extinction boundaries, the shape of the lean extinction boundary is slanted even at low strain rate, i.e. $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ and is more slanted in further increase of strain rate, implying that flame interaction on lean extinction boundary is strong and thus hydrogen (as a deficient reactant) Lewis number much less than unity plays an important role of flame interaction. It is also shown that effects of preferential diffusion of H₂ cause flame interaction to be stronger on lean extinction boundaries and weaker on rich extinction boundaries. Detailed analyses are made through the comparison between flame structures with and without the restriction of the diffusivities of H₂ and H in symmetric and asymmetric fuel compositions. The reduction of flammable fuel compositions in increase of strain rate suggests that the mechanism of flame extinction is significant conductive heat loss from the stronger flame to ambience.

Key Words : Chemical interaction, Extinction mechanism, Flame interaction, Flame stability diagram, Lewis number, Preferential diffusion, Strain rate

1. 서론

전 세계적으로 에너지 생산의 90% 정도가 여전히 화석연료에 의존하고 있고 화석연료의 연소에 의해 발생하는 CO₂의 방출은 점점 더 심각한 지구온난화를 야기한다. 따라서 이산화탄소 배출 절감은 해결해야 할 문제로써 세계적으로 크게 대두되고 있다. 그러나 최근 에너지 수요의 증가로 인해 화석연료의 사용을 제한하는 것은 어려우며, 대체연료 개발이나 탄소저감기술에 대한 연구는 아직 미비하다. 이러한 측면에서 이산화탄소의 배출을 감소시키고 화석연료 고갈의 부담을 덜어 줄 수 있는 대체연료로 합성가스가 크게 대두되고 있다. 합성가스는 주로 H₂와 CO로

구성되어 있으며 또한 N₂, CO₂, H₂O, CH₄ 및 고분자 탄화수소계열의 연료를 포함한다. 합성가스는 열분해 과정 및 가스화 과정에서 발생하며 재생 가능한 에너지원으로써 전망 있는 연료로 각광 받고 있어서 합성가스의 급격한 수요 증가가 예측된다. 이러한 이유로 합성가스가 첨가된 탄화수소 계열의 산업용 버너를 개발하는데 많은 연구가 수행되고 있으나 상기의 목적에 맞는 버너를 설계함에 있어서 가장 큰 문제점은 각각의 열분해 과정 및 가스화 공정에 절대적으로 의존 할 수밖에 없는 복잡한 혼합물 구성이다. 이러한 관점에서 합성가스 연소에서 혼합물에 따른 기초적인 연소 특성[1-5]과 반응 메커니즘[6,7]을 규명하기 위해 본 연구가 수행되었다.

최근 연구는 난류 예혼합 화염들 사이에서 상호작용하는 인접한 소화염의 특성을 파악하기 위해 심층적인 층류 소화염(flamelet) 모델에서 수행되어왔다.

* 부경대학교 기계공학과

† 연락저자, obkwon@pknu.ac.kr

동일한 탄화수소 연료를 사용한 희박(과농)-희박(과농) 예혼합 화염들 사이에서의 상호작용에 관해 여러 가지 연구들이 수행되며 화염 특성을 명확하게 밝혔다[8-11]. 이러한 실험적 또는 이론적 연구들은 만약 화염이 강한 화염에 의해 지지되고 있다면 소화 한계를 뛰어 넘은 혼합물에서도 상호작용을 통해 화염이 존재 할 수 있음을 보임으로써 소화 한계가 달라질 수 있음을 보고했다. Park 등은 최근 희박(과농) 합성가스(또는 수소)-공기 예혼합 화염과 희박(과농) 메탄 예혼합 화염 사이에서의 후류 상호작용(downstream interaction)에서 큰 루이스 수의 화염은 상호작용을 약하게 하고 이로 인해 소화 경계가 직각(square)의 형태로 나타나고 반면에 작은 루이스 수의 화염들은 강하게 상호작용 하며 소화경계가 기울어진 형태로 나타난다고 보고하였다[12-14]. 그 결과를 살펴 보면 과농(희박) 메탄-공기 예혼합 화염과 희박(희박) 수소(또는 합성가스)-공기 예혼합 화염 사이에서의 후류 상호작용에서 화염 소화 경계는 직각(기울어진)형태로 나타났으며 희박(과농)-희박(과농) 메탄, 프로판, 부탄 예혼합 화염에서의 후류 상호작용에서와 같은 대칭적인 구조와는 다르게 삼중화염(triple flame)에서도 음의 화염전파속도(Negative premixed flame speed)가 나타났고 희박(과농)-희박(과농) 합성가스(또는 수소)-공기 예혼합 화염과 메탄-공기 예혼합 화염 사이에서의 후류 상호작용에서는 비대칭적인 하나 또는 두 개의 날개(wing)가 나타났다고 보고하였다[12-14]. 더 나아가 신장률(strain rate) $5\sim 500\text{ s}^{-1}$ 범위에서 연료조성 50% $\text{H}_2 + 50\%$ CO의 합성가스-공기 예혼합 화염 사이에서 후류 상호 작용의 특성을 파악하기 위한 연구가 수행되었다[15]. 이 연구에서 유효 루이스 수(effective Lewis number)가 1보다 조금 크지만 희박 소화 경계는 강한 상호작용을 의미하는 기울어진 형태로 나타났고 반면에 과농 소화 경계는 적당히 낮은 신장률에서 약한 상호작용을 의미하는 직각의 형태로 나타났으며 고신장률에서 상호작용하는 과농 예혼합 화염에서 과농 소화 경계는 기울어진 형태로 루이스 수가 1보다 상당히 큰 경우에서도 강한 상호작용을 하는 것을 밝히면서 화학적 상호작용(chemical interaction)의 중요한 역할을 보였다. 지금까지의 연구에서는 화염 소화에 대한 신장률의 한계 및 다른 확산속도(differential diffusion)의 영향과 같은 중요한 점들이 고려되지 않았으며 탄화수소 계열의 예혼합 화염들 사이에서 후류 상호작용에서 확산속도와 스트레치의 차이의 영향에 대한 연구가 거의 수행되지 않았다.

본 연구는 예혼합 합성가스 사이에서 후류 상호작용의 특성을 파악하기 위해 수치해석을 수행하였다. 연료 조성은 50% $\text{H}_2 + 50\%$ CO 및 30% $\text{H}_2 + 70\%$ CO

2가지 경우에 대해 화염 안정화 선도(flame stability diagram)를 나타내었으며 그래프는 화염 소화경계에서 신장률의 함수로서 상부버너와 하부버너의 연료농도 한계로 나타내었다. 그리고 H_2 와 H의 선호확산(preferential diffusion) 영향을 명확하게 설명하기 위해 화학종의 확산계수를 같다고 가정한 경우($D_{\text{H}_2} = D_{\text{H}} = D_{\text{N}_2}$)와 그렇지 않은 경우의 2가지 경우에 대해 수행하였다. 이와 같은 방법을 통한 신장률과 선호확산의 영향은 화염구조 뿐만 아니라 화염 소화에서도 다루어진다.

2. 수치해석 및 방법

희박(과농) 희박(과농) 합성가스-공기 예혼합 화염 사이에서의 후류 상호작용에 대해 Fig. 1에서 처럼 기하학적으로 간단한 대향류 유동장에서 수치해석이 수행되었다. 연료는 50% $\text{H}_2 + 50\%$ CO 및 30% $\text{H}_2 + 70\%$ CO의 합성가스로 구성되었고, 기본적으로 소화 경계가 대칭구조로 나타난다. 정제 유선 주위에서 상사성(similarity variable)을 이용한 수학적 기술을 통해 1차원으로 해석 가능하며 본 연구에서는 Kee에 의해 개발되고 Lutz에 의해 보완된 모델 사용하였다[16]. 질량, 운동량, 화학종, 에너지에 대한 지배 방정식(governing equations)과 수치해석방법의 상세한 기술은 다른 곳에서 찾을 수 있다[17]. 전체 신장률(global strain rate)은 다음과 같이 정의하였다.

$$a_g = \frac{V_U + V_L}{2L} \quad (1)$$

V 는 노즐경계에서 반응물의 유동속도를 나타내고

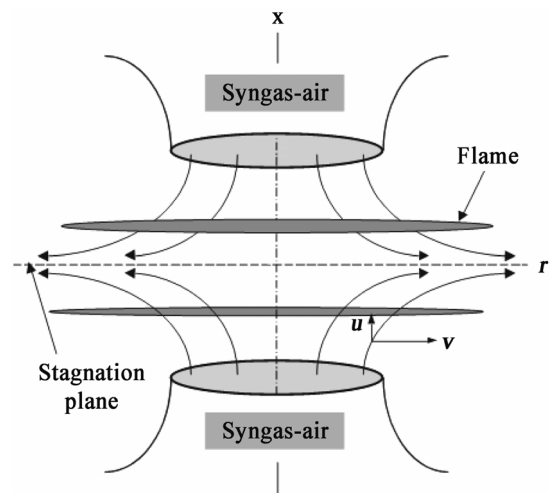


Fig. 1. Schematic of the configuration of interacting pre-mixed counterflow flame.

L 은 노즐 간격이며 첨자 U 와 L 은 각각 상부와 하부 노즐을 의미한다. 본 연구에서는 버너 간격을 1.5 cm로 고정시켰다. 이전 연구는 연료조성 50% H₂ + 50% CO의 합성가스 예혼합 화염에서 신장률을 500 s⁻¹까지 증가 시키면 희박-과농 소화경계가 줄어든다는 것을 보여주었다. 그것은 어떠한 연료 조성에서도 더 이상 화염이 존재 할 수 없는 한계 신장률이 존재한다는 것을 의미한다. 이렇게 하여 소화하기 위한 한계 신장률에 대해 수치해석 연구가 수행 되었다. 복사열손실은 저 신장률 화염의 두께에서 상당하고 화염의 체적은 $\sqrt{a_y}$ 의 역수와 관련이 있다. 복사 항은 보다 정밀한 예측을 위해 포함되었다. 복사 열손실에 가장 큰 영향을 끼치는 요인은 CO₂, H₂O, CO와 광학적으로 얇은 근사(optically thin approximation)에 기초한 복사 열 유속 등이며 다음과 같다[18].

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

$$K_p = \sum_{i=1}^3 P_i K_i, \quad i = CO_2, H_2O, CO$$

여기서, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이고, T 와 T_∞ 는 각각 국소온도 및 대기온도이며 K_p 는 평균 Plank 흡수 계수(absorption coefficient)이다. P_i 와 K_i 는 부분압과 화학종의 평균 Plank 흡수계수이다. 평균 Plank 흡수 계수는 대부분 온도의 다항식으로 얻어진다. 지배 방정식은 CHEMKIN-based 코드와 Transport-based 코드를 이용해 풀었다[19,20]. 대기 압력은 1 atm이고 상부와 하부의 온도경계는 298 K이다. 각각의 노즐 출구에서 상부와 하부 유동속도를 명시하기 위해 plug-flow 속도 경계조건을 사용하고 화학종과 온도에 대해서는 Dirichlet 경계 조건을 사용하였다. 격자점(grid point)은 200보다 크고 500보다 작은 적당한 격자를 사용하였다.

Davis와 Sun의 연구에서 H₂-CO 합성화염의 포괄적인 반응 메커니즘은 스트레치를 받지 않은 층류 화염전파 속도에 대해 실험결과와 수치해석 결과를 각 모델에 대하여 잘 비교하여 나타내었으며 잘 일치함을 보였다[7,21-24]. 본 연구에서는 Davis 모델을 사용 하였으며 H와 H₂ 선호확산의 영향에 대해 알아보기 위해 mixture-averaged diffusivities(M-A)인 경우와 $D_{H_2} = D_H = D_{N_2}$ 로 가정하여 두 가지 화학종의 확산계수 조절을 통해 수치해석을 수행 하였다. H₂의 확산 속도 제한은 화염상호작용에서 루이스 수의 영향을 명확히 하기 위해 적용하였다. 그리고 수치해석 결과는 고신장률의 과농 소화경계에서 화학적 상호작용을 증명하기 위해 H₂와 H의 확산속도를 제한한 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하여 나타낸 것이다.

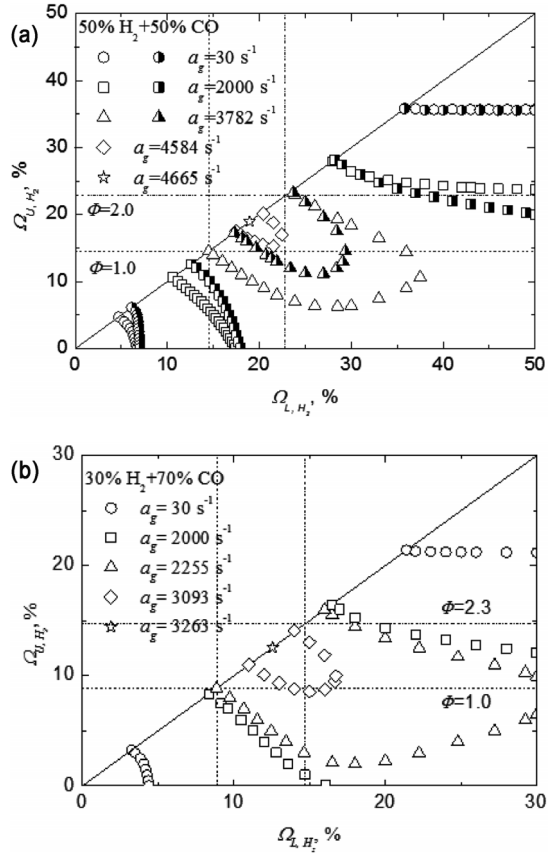


Fig. 2. Flame stability diagrams mapping the upper and lower limit fuel concentrations for flame extinction in terms of strain rate in the fuel compositions of (a) 50% H₂ + 50% CO and (b) 30% H₂ + 70% CO.

3. 결과 및 논의

3.1. 화염 안정화 선도

Fig. 2는 연료조성 (a) 50% H₂ + 50% CO와 (b) 30% H₂ + 70% CO 합성가스 예혼합 화염의 상호작용에서 신장률과 농도의 함수로 표현된 화염 안정화 선도이다. 속이 빈 기호(hollow symbol)는 M-A를 가정한 경우의 수치해석 결과이고 속이 반이 찬 기호(half-solid symbol)는 H₂와 H의 확산을 제한했을 때의 수치해석 결과이다. 대시로 된 선은 방해받지 않고 전파하는 예혼합 화염에서 화염전파 속도가 최대가 되는 점인 stoichiometric line의 당량비(Φ) 1에서의 연료 농도이고 대시와 점으로 된 선은 $\Phi = 2$ 에서의 연료 농도이다. 기호 Ω 는 연료의 몰농도를 나타내고 첨자 U 와 L 은 각각 상부(upper)와 하부(lower) 노즐을 나타낸다.

합성가스 혼합기에서 유효 루이스 수(Le_{eff})는 연

료와 산화제의 루이스 수의 조합으로 정의할 수 있다 [25,26].

$$Le_{eff} = 1 + \frac{(\leq_E - 1) + (\leq_D - 1)A_1}{1 + A_1} \quad (3)$$

여기서, Le_E 와 Le_D 는 각각 초과 반응물(excessive reactant)의 루이스 수와 부족 반응물(deficient reactant)의 루이스 수이다. $A_1 = 1 + \beta(\Phi - 1)$ 는 혼합강도(mixture strength)를 측정된 값이며 여기서, Φ 는 stoichiometric ratio와 관련 된 혼합물에서의 초과-결핍 반응물의 질량비이고 $\beta = E_a(T_{ad} - T_u)/R^0 T^2$ 는 Zeldovich 수이다. T_{ad} 는 단일 화염 온도(adiabatic flame temperature)며 $E_a = -2R^0[\partial \ln(\rho_u S_u^c)/\partial(1/T_{ad})]$ 는 활성화 에너지이고 R^0 는 일반기체상수다. ρ_u , ρ_b 와 함께 T_{ad} 는 평형 상태로 가정되었고 EQUIL 코드를 사용하여 계산되었다[19].

(50% H₂/50% CO)-공기 혼합기에서 희박 소화 경계의 Le_{eff} 의 범위는 1.021~1.060이고 과농 소화경계의 Le_{eff} 범위는 1.440~1.746이다. 반면 (30% H₂/ 70% CO)-공기 혼합기에서 희박 소화 경계의 Le_{eff} 범위는 1.050~1.064이고 과농 소화 경계의 Le_{eff} 범위는 1.053~1.234이다. $\leq_{eff} > 1$ 인 경우에 희박 및 과농 소화 경계는 약한 상호 작용으로 인해 직각 형태로 나타나야 한다[8-11]. 그러나 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 에서 과농 소화 경계는 직각 형태인 반면 희박 소화 경계는 상당히 기울어져 있음을 볼 수 있다. $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 에서 과농 소화 한계의 직각 형태는 잘 설명되고 과농 소화 한계에서 부족 반응물(oxidizer) 루이스 수가 연료 조성 50% H₂ + 50% CO에서는 1.453~1.762이고 연료 조성 30% H₂ + 70% CO에서는 1.166~1.279이다. 그러나 희박 소화 경계에서 연료조성 50% H₂ + 50% CO의 경우에 수소의 루이스 수가 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 에서 0.279~0.313의 범위에 있고 $a_g = 2000 \text{ s}^{-1}$ 에서 0.279~0.334의 범위에 있다. 연료조성 30% H₂ + 70% CO의 경우엔 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 에서 루이스 수의 범위가 0.279~0.285이고, $a_g = 2000 \text{ s}^{-1}$ 에서는 0.279~0.305이다. 그러므로 희박 소화 경계에서 수소의 루이스 수는 희박 소화 경계가 기울어지는 것에 크게 기여한다고 볼 수 있다. 반면 살펴보아야 할 것은 수소의 루이스 수가 신장률의 증가에 따라 오히려 약간 증가 한다는 것이다. 전통적인 루이스 수에 의존하는 상호작용하는 화염에서 희박소화경계는 신장률의 증가에도 크게 기울지 않아야 한다[8-11]. 그러나 희박소화경계는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 신장률의 증가에 따라 점점 더 기울었다. 즉, 화염의 상호작용에 있어서 신장률이 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 신장률의 증가는 H₂와 H의 선호화산을 통한 화염의 상호작용과 상

호작용하는 화염 사이의 거리를 줄임으로써 빠른 라디칼 공유를 통한 화염의 상호작용을 증가시킨다. 이를 명확히 하기 위해 본 연구에서는 연료조성 50% H₂ + 50% CO에 대하여 H₂와 H의 확산속도를 제한하고 $D_{H_2} = D_H = D_{N_2}$ 를 가정하여 그 결과를 Fig. 2(a)에 나타내었다. 희박소화경계는 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 에서 약한 상호작용을 의미하는 직각 형태로 나타났고 그렇게 함으로써 수소-공기 혼합기에서 H₂와 H의 확산속도를 제한하지 않는다면(이하 H₂와 H의 확산속도를 제한한 경우를 RD 제한하지 않은 경우를 NRD라 칭함) 강한 상호작용을 하는데 있어서 중요한 역할을 함을 확신할 수 있었다. 명백하게도, 화염대에서 H₂의 소모를 제한하기 때문에 RD의 소화경계는 줄어들었다. 그럼에도 불구하고 신장률의 증가는 RD의 효과에 의해 반응이 제한될지라도 화학적 상호작용은 증가된 신장률에 의해 여전히 양성하게 일어남을 의미하는 기울어진 희박소화경계를 나타내었다. 화염의 상호작용에 있어서 신장률의 중요한 역할은 유효 루이스 수가 1보다 큰 영역인 과농 소화한계 영역에서 좀 더 명백하다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 에서 과농 소화의 경우에 있어서 연료조성이 다른 두 경우 모두 상부버너의 연료농도는 거의 일정하다. 즉, 이는 신장률을 2000 s⁻¹까지 증가 시켰을 때 기울어진 부분이 점점 증가된 것이다. 이는 화염의 상호작용이 신장률의 증가에 따라 더 강해진 것을 의미한다. 또한 $a_g = 2000 \text{ s}^{-1}$ 에서의 결과는 연료조성 30% H₂ + 70% CO의 소화 경계는 연료조성 50% H₂ + 50% CO의 경우보다 더 기울어진 것을 보여준다. 이는 Le_{eff} 의 범위가 30% H₂ + 70% CO의 경우에 1.051~1.064의 범위이고 50% H₂ + 50% CO의 경우에는 1.021~1.357 사이에 있기 때문이다. 그래서 상호작용 하는 힘은 연료조성 30% H₂ + 70% CO의 경우에 루이스 수가 약간 더 낮기 때문에 더 강해지는 것이다. 대칭의 과농 예혼합 화염의 경우에 화염대의 위치에서 화염의 온도가 같다면 신장률의 증가로 더 강한 상호작용은 라디칼 공유와 같은 화학적 상호작용을 야기한다. 반면에 비대칭의 과농 예혼합 화염의 경우에는 더 강한 화염의 상호작용은 라디칼 공유와 상대적으로 더 강한 화염으로부터 약한 화염으로의 전도에 의한 열의 이동과 같은 화학적 상호작용을 불러일으킨다. 반면 연료조성 50% H₂ + 50% CO에서 $a_g = 2000 \text{ s}^{-1}$ 일 때 RD의 소화 경계는 확산속도 제한이 없을 때보다 더 기울었다. 이것은 RD의 유효 루이스 수가 제한이 없을 때보다 훨씬 더 작기 때문이다. 신장률의 더 큰 증가는 상호작용하는 화염들 사이의 거리를 감소시키며 그로 인해 상대적으로 약한 화염은 강한 화염으로 부터의 열적 또는 화학적 도움을 통해 더 오래 살아남는다. 연료조성 50% H₂ + 50% CO와 30%

H₂ + 70% CO의 소화 한계는 화염이 살아남을 수 있을 때만 섬(island) 모양으로 바뀐다. 상호작용하는 화염들은 대칭 연료 조성 라인에서 특정 연료 농도를 제외하고는 더 이상 살아남을 수 없는 한계 신장률에 도달한다.

더 많은 결과를 논의하고 분석하기 전에 자유롭게 전파하는 합성가스-공기 예혼합 화염의 경우에 최대 층류 화염 전파 속도는 $\Phi=1$ 에서 발생하지 않고 연료 조성 50% H₂ + 50% CO의 경우에는 $\Phi=2$ 인 지점에서 그리고 30% H₂ + 70% CO인 경우에는 $\Phi=2.3$ 인 지점에서 발생했다[22-25]. 그러므로 스트레치를 받지 않은 단일 예혼합 화염에서 화염 강도는 연료 조성 50% H₂ + 50% CO의 경우에는 $\Phi=2$ 인 지점에서 그리고 30% H₂ + 70% CO인 경우에는 $\Phi=2.3$ 인 지점에서 가장 세다. 자유롭게 전파하는 예혼합 화염의 경우에 층류 화염 전파 속도는 일반적으로 루이스 수가 1보다 작은 경우에 신장률의 증가에 따라 전파속도 역시 증가하고 루이스 수가 1보다 큰 반대의 경우도 마찬가지다[27]. 이러한 관점에서 상호작용하는 화염에서도 과농 소화에서 상부 및 하부 버너의

연료 농도는 신장률의 증가에 따라 감소하여야 한다. 한편 희박 소화에서는 상부 및 하부 버너의 연료 농도는 증가될 수 있다. 그러나 Fig. 2의 결과는 신장률의 증가에 따라 희박 소화 경계와 과농 소화 경계 모두 감소되었음을 보여주고 이는 신장률에 더 강하게 의존하는 다른 화염 소화 메커니즘이 존재할 수 있음을 의미하며 3.3 절에서 논의될 것이다.

3.2. 소화 경계에서의 화염구조 및 화염 소화에서의 선호 확산의 역할

지금까지 상호작용하는 합성가스-공기 예혼합 화염에서 화염소화는 신장률에 상당히 큰 영향을 받고 화염의 상호작용에 있어서 희박 소화 경계에서 수소의 루이스 수가 중요한 역할을 함을 보였다. 화염 소화 경계에서 H₂와 H 선호확산의 역할과 화염 구조 및 신장률의 영향에 대해 좀 더 명확하게 살펴볼 필요가 있다. Fig. 3은 대칭적인 (a)주요한 화염 구조 (b)과 농 소화 경계에서 chain carrier radical의 농도 분포 (c), (d)연료 조성 50% H₂ + 50% CO에서 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 일 때 희박 소화 경계에서 각종 라디칼의 농도 분포이다.

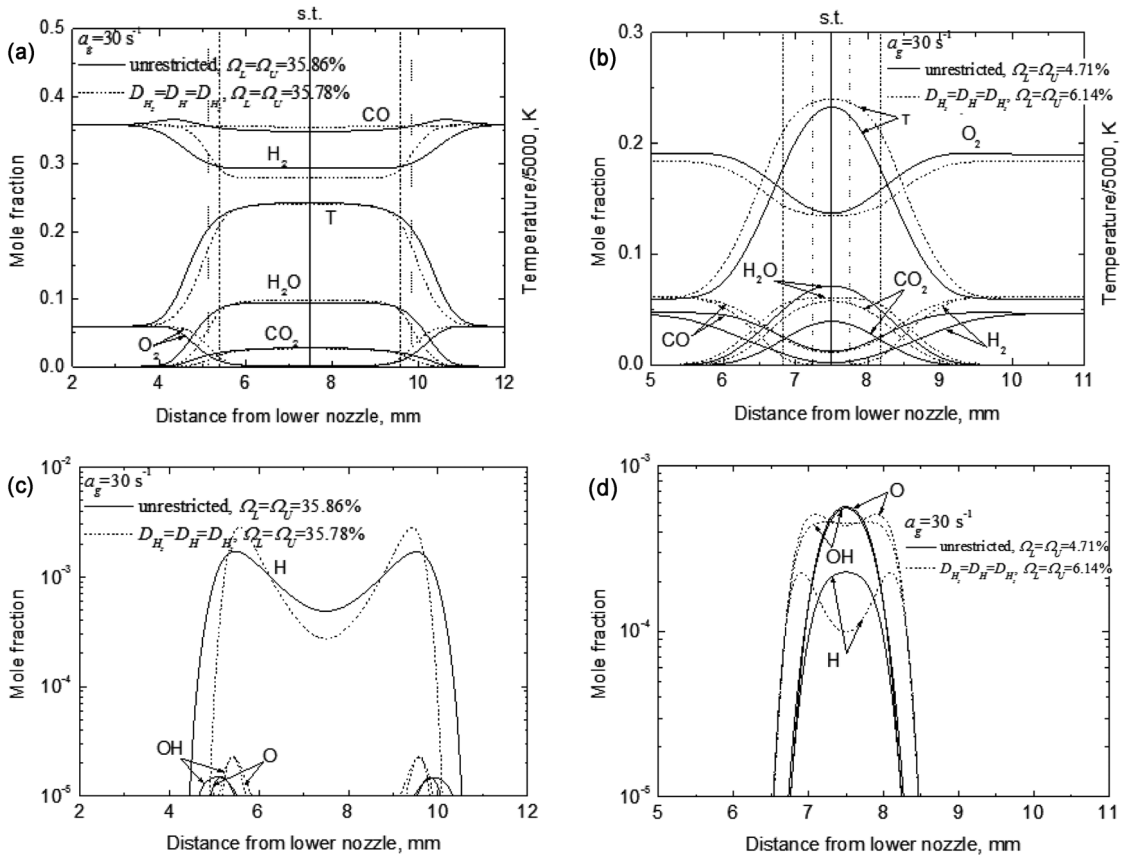


Fig. 3. Flame structures on the symmetric rich(a, b) and lean (c, d) extinction boundaries at $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ in the fuel composition of 50% H₂ + 50% CO.

세로 선은 정체점(stagnation point)을 나타내고 세로 대시 기호로 된 선과 대시 기호와 점으로 연결된 선은 각각 RD 및 NRD인 경우 화염염의 위치를 의미한다. 화염의 위치는 H 농도가 최대가 되는 지점으로 정의 하거나 열 방출이 최대인 지점으로 정의할 수 있다[14,25]. 그러나 지금의 상호작용하는 화염에서는 종종 정보가 단일 모드로 나타나고 대부분의 경우에 있어서 약한 화염의 화염위치를 인지하지 못한다. 그러므로 본 연구에서는 H₂의 소비율이 최대가 되는 지점을 화염의 위치로 정의 하였다.

Fig. 3(a)와 (b)는 상호작용하는 대칭의 과농 예혼합 화염에서 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 일 때 두 개의 뚜렷한 피크점을 가지는 H, O, OH 라디칼의 농도 프로파일과 그때의 온도 및 H₂O와 CO₂가 평지로 나타나는 것을 보여준다. 여기서의 열적 상호작용 및 화학적 상호작용은 무시할 만하고 평지의 온도를 단일 화염 온도로 볼 수 있다. RD 경우는 Fig. 3(a)와 (b)에서 대시 기호로 된 곡선으로 나타냈으며 두 개의 화염 사이의 거리가 조금 좁아진 것 외에는 크게 H₂O와 CO₂의 농도가 차이 나지 않는다. 이것은 RD경우에서도 루이스 수가 1보다 크기 때문이다. 그러나 상호작용하는 대칭의 희박 예혼합 화염의 경우에는 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 일 때 Fig. 3(c)와 (d)에서 볼 수 있듯이 두 화염 사이의 거리가 상당히 가깝고 온도, CO₂, H₂O, H, O 그리고 OH의 프로파일이 평지가 아닌 단일의 최고점이 정체점에서 나타난다. Le_{eff} 가 1보다 약간 크지만 부족 반응물로서 수소의 루이스 수가 1보다 상당히 작다는 것을 고려해야 한다. 이러한 상황에서 H₂의 반응은 화염대에서 완벽하게 일어나지 않는다[27]. 수소는 상당수가 화염대를 뚫고 지나가고 Fig. 3(c)에 보이듯 화염 형태의 대칭적인 구조 때문에 정체점에서 꽤 많은 양이 소비된다.

그러므로 정체점에서 H, O, OH 라디칼이 최고 농도로 나타나며 결과적으로 CO + OH = CO₂ + H 그리고 H₂ + OH = H + H₂O와 같은 반응단계를 통한 주요한 OH의 소비로 인해 CO₂와 H₂O가 정체점에서 형성된다. 이것은 대칭적인 구조에서 조차 화학적 상호작용이 강하게 나타날 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같은 화학적 상호작용은 대칭의 경우에서도 변칙적인 열적 상호작용을 일으킬 수 있다. 그러면 열은 약간 낮은 온도로 이중화염(twin flame)으로 옮겨가고 상호작용하는 화염은 화염소화로부터 좀 더 살아남을 수 있다. 이것은 연료조성 50% H₂ + 50% CO에서 자유롭게 전파하는 단일 예혼합 화염의 경우 스트레치를 받지 않았을 때 1차원 premixed code로 수치해석 결과 $\Omega_{H_2} = \Omega_{CO} = 6.88\%$ 이지만 Fig. 3(c)에서 상호작용하는 화염의 경우 Fig. 3(c)에서 볼 수 있듯이 4.71%다.

화염의 상호작용에서 선회확산의 역할은 RD 경우를 살펴보면 명백하게 이해할 수 있다. 대칭적인 희박 예혼합 화염의 상호작용에서 부족 반응물로 루이스 수가 1에 가까운 RD의 경우 H₂O와 CO₂의 프로파일은 평지로 나타나고 또한 H와 O는 구별되는 두 개의 최고점을 가지므로 화염의 상호작용을 더 약화시키는 것으로 판단된다. 결과적으로 실제상황은 NRD의 경우이며 수소는 부족 반응물로 루이스 수가 1보다 훨씬 작기 때문에 희박 예혼합 화염의 상호작용에서 중요한 역할을 한다는 것을 확인할 수 있다. 게다가 대칭적인 희박 예혼합 화염의 상호작용에서 RD의 경우와 NRD의 경우를 비교 하였을 때 두 화염들 사이의 거리가 RD 경우 더 커졌다. 이것은 확산속도의 제한은 부족 반응물로서 수소의 루이스 수를 증가시키기 때문에 이로 인해 상호작용이 더 약화되기 때문이다. 하지만 대칭적인 과농 예혼합 화염의 상호작용에서 $D_{H_2} = D_{N_2}$ 를 가정한 경우 두 화염 사이의 거리는 오히려 감소한다. 이는 부족 반응물(산소)로서 루이스 수가 1에 가까워지기 때문에 화염의 상호작용을 더 강하게 만든다. 따라서 H₂ 선회확산은 대칭적인 희박 예혼합 사이의 상호작용을 더 강하게 만들고 대칭적인 과농 예혼합 화염의 경우는 상호작용을 더 약화시킨다.

대칭의 예혼합 화염 사이의 상호작용에서 H₂ 선회확산의 고유한 영향에 기초하면 비대칭의 예혼합 화염들 사이의 상호작용에서 화염구조 역시 잘 묘사될 수 있다. Fig. 4는 비대칭의 (a) 주요한 화염 구조 (b) 과농 소화 경계에서 chain carrier radical의 농도분포 그리고 (c), (d) 연료조성 50% H₂ + 50% CO에서 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 일 때 희박 소화 경계에서 각종 라디칼의 농도 분포이다. Fig. 4(a)와 (b)에서 과농 소화 한계의 연료조성은 RD의 경우 각각 $\Omega_L = 44\%$, $\Omega_U = 35.57\%$ 이다. 약한 화염의 위치는 좌표계의 관점에서 보았을 때 정체점을 지나서 위치하고 이는 음의 화염 전파속도를 갖는 것으로 보인다[8-11,27]. 그리고 약한 화염은 상호작용과 같은 강한 화염의 도움 없이는 더 이상 살아남아 존재하기 어려움을 의미한다. 그럼에도 불구하고 O와 OH의 프로파일은 구별되는 두 개의 최고점을 가지고 이는 유효 루이스 수 및 부족 반응물 루이스 수가 1보다 크기 때문에 화염 상호작용은 약하게 일어나는 것을 의미한다. RD의 경우에 OH의 프로파일은 단일 모드가 되고 반면 NRD의 경우는 뚜렷한 두 개의 최고점을 가진다. 이는 대칭의 과농 예혼합 화염 사이의 상호작용과 비슷하며 H₂ 선회확산의 영향으로 상호작용을 약하게 만든다. Fig. 4(c)와 (d)는 비대칭의 희박 예혼합 화염 사이의 상호작용을 나타내며 희박 소화 한계의 연료조성은 각각 NRD의 경우 $\Omega_L = 6.17\%$, $\Omega_U = 2.5\%$ 이고 RD의 경우

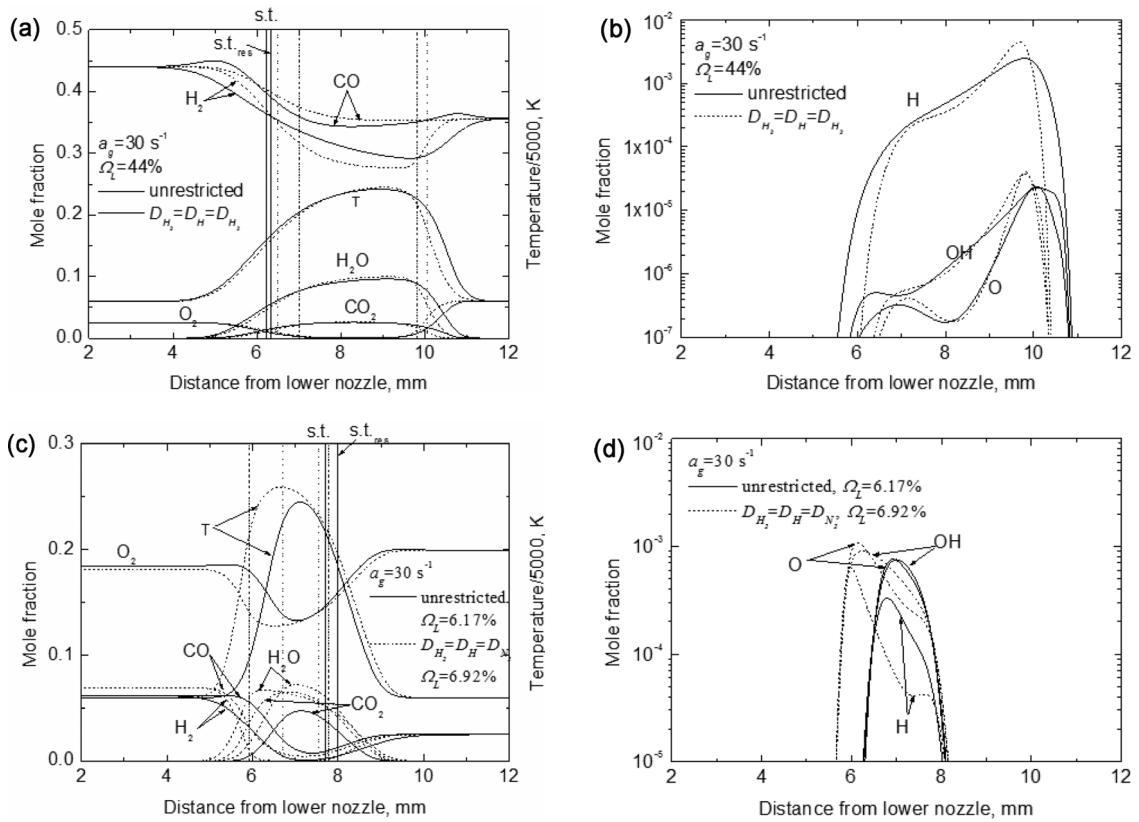


Fig. 4. Flame structures on the asymmetric rich (a, b) and lean (c, d) extinction boundaries at $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ in the fuel composition of 50% H₂ + 50% CO.

$\Omega_L = 6.92\%$, $\Omega_U = 2.5\%$ 이다. RD의 경우 희박 소화 한계는 반응대(reaction zone)로 H₂의 확산을 제한함으로써 상당히 줄어들었다. 더 약한 화염의 화염위치는 정체점을 지나쳐 형성되었으며(음의 화염 전파 속도) RD의 경우 두 화염 사이의 거리는 NRD의 경우와 비교하였을 때 눈에 띄게 증가하였다. H₂의 선호확산의 영향은 대칭의 예혼합 화염 사이의 상호작용을 더 강하게 만들고 이것은 제한된 H₂의 확산이 Fig. 4(d)에서 H가 뚜렷한 두 개의 피크를 가진다는 것으로 확인되었다. 반면에 H와 O, OH의 경우는 단일 모드이며 더 강한 화염으로부터 열적 또는 화학적으로 지지 받지 않으면 약한 화염이 살아남을 수 없을 정도로 상호작용이 강하게 일어난다는 의미이다.

다음으로는 소화 경계에서 H₂와 H의 확산속도 제한을 통한 선호확산에서 신장률의 영향과 화염 구조를 살펴볼 필요가 있다. 이들은 대칭적인 연료 조성에서 Fig. 3의 신장률 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 에서 Fig. 5의 신장률 $a_g = 2000 \text{ s}^{-1}$ 까지 증가시키면서 잘 설명되었다. Fig. 5(a)와 (b)는 신장률의 증가는 상호작용하는 화염 사이의 거리를 현저하게 줄이며($\sim(1/a_g^{1/2})$), 그로 인해 열적 또는 화학적 상호작용을 훨씬 더 쉽게 만든다.

Fig. 5(b)는 O의 프로파일이며 분명하게 구별되는 두 개의 피크를 가지지만 H는 단일 모드의 곡선으로 나타난다. 이는 Le_{eff} 와 부족 반응물의 루이스 수 둘 다 1보다 훨씬 커서 상호작용을 약하게 하는 경향이 있는 것을 의미한다. 그럼에도 불구하고 온도와 H₂O, CO₂의 프로파일은 Fig. 5(a)에서 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 에서의 것과는 다르게 단일 모드 형태이다. 게다가 유효 루이스 수와 부족 반응물의 루이스 수가 1보다 훨씬 클 때도 불구하고 부족 반응물(산소)이 각각의 화염대를 관통하고 정체점에서 완벽하게 소비되지 않는다. 이것은 루이스 수가 1보다 훨씬 작은 경우에도 신장률을 증가시키면 상호작용이 강하게 일어날 수 있다는 것을 의미한다. H의 최고 몰분율 역시 정체점에서 나타나고 Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 OH의 양의 상당수가 정체점에 머무른다. 이는 반응이 두 화염 사이의 영역에서 활발하게 일어난다는 것을 의미한다. 특히 OH 라디칼은 $\text{CO} + \text{OH} = \text{CO}_2 + \text{H}$ 와 $\text{H}_2 + \text{OH} = \text{H} + \text{H}_2\text{O}$ 의 반응 단계에서 소모되어 정체점에서 H₂O, CO₂, 온도의 최고점을 만든다. 결과적으로 스트레치를 많이 받은 상호작용하는 화염은 루이스 수가 1보다 훨씬 크더라도 두 화염 사이의 거리가 작

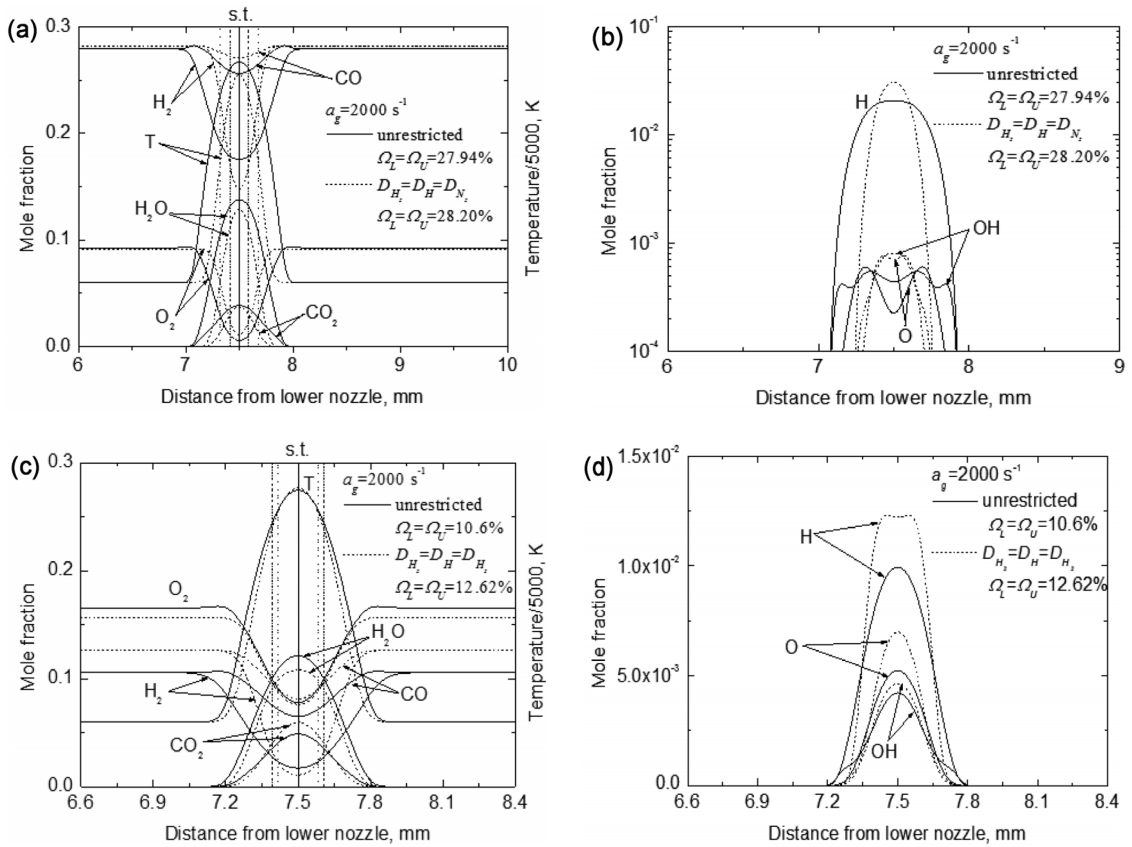


Fig. 5. Flame structures on the symmetric rich (a, b) and lean (c, d) extinction boundaries at $a_g = 2000 \text{ s}^{-1}$ in the fuel composition of 50% $\text{H}_2 + 50\%$ CO .

아지기 때문에 화학적 상호작용을 강하게 하여 라디칼 공유가 증가한다. 이것이 Fig. 2에서 유효 루이스 수 및 부족 반응물의 루이스 수가 1보다 큰 과농 소화 경계 초차 기울어진 형태로 나타나는 이유이다. 게다가 Fig. 5(b)에서 RD의 경우에 프로파일이 단일 모드인 반면에 NRD의 경우에 OH 라디칼의 프로파일이 두 개의 최고점을 가지는 이유이다. 이 또한 앞서 언급한 대로 H_2 의 선호확산의 영향으로 대칭의 희박 예혼합 화염 사이의 상호작용을 더 강하게 만들기 때문이다. 대칭의 희박 예혼합 화염 사이의 상호작용에서(Fig. 5(c)와 (d)) 수소의 중요한 역할 때문에 상호작용이 NRD의 경우에 H, O, OH의 프로파일이 단일 모드를 가지는 만큼 강하게 나타난다. Fig. 5(c)는 H_2 와 CO 의 프로파일이 수소의 루이스 수가 1보다 훨씬 작기 때문에 정체점에서 관통 되는 것을 보여주고 정체 점에서 반응이 활발히 일어난다는 것을 보여준다. 게다가 신장률을 2000 s^{-1} 까지 증가시키면 두 화염을 작아지게 만들고 그래서 상호작용이 더 활발하게 일어난다. 이것이 신장률 $a_g = 2000 \text{ s}^{-1}$ 에서 희박 소화 경계가 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 과 비교했을 때 더 기울어진

형태로 나타나는 이유이다.

Fig. 6(a)와 (b)는 비대칭의 과농 예혼합 화염 사이의 상호작용에서 신장률 $a_g = 2000 \text{ s}^{-1}$ 에서 H, O, OH가 단일 모드의 형태로 나타나는 것을 보여주고 이는 유효 루이스 수 및 부족 반응물의 루이스 수가 1보다 크며 신장률의 증가에 따라 비대칭 예혼합 화염들 사이의 거리가 줄어들기 때문에 상호작용은 더 강해진다는 것을 보여준다. Fig. 6(a)는 더 약한 화염이 정체점을 지나서 더 강한 화염과의 상호작용을 통해 살아 남아있다는 것을 보여준다. 그러나 RD의 경우 더 약한 화염은 화염대의 위치가 감지되지 않을 만큼 미약해진다. 이것은 H_2 와 H의 확산을 제한하면 화염의 상호작용이 약해지기 때문이다. 이것이 RD의 경우에 과농 소화에서의 상부 연료농도($\Omega_U = 21.58\%$)가 NRD의 경우($\Omega_U = 24.02\%$)와 비교했을 때 줄어든 이유이다. 반면 NRD의 경우 최고 온도와 CO_2 와 H_2O 의 농도 최고점이 화염대의 위치에서가 아니라 오히려 화염대 사이에 위치하였다. 이는 유효 루이스 수 및 부족 반응물의 루이스 수가 1보다 큰 경우에도 반응이 완벽하게 일어나지 않지만 라디칼

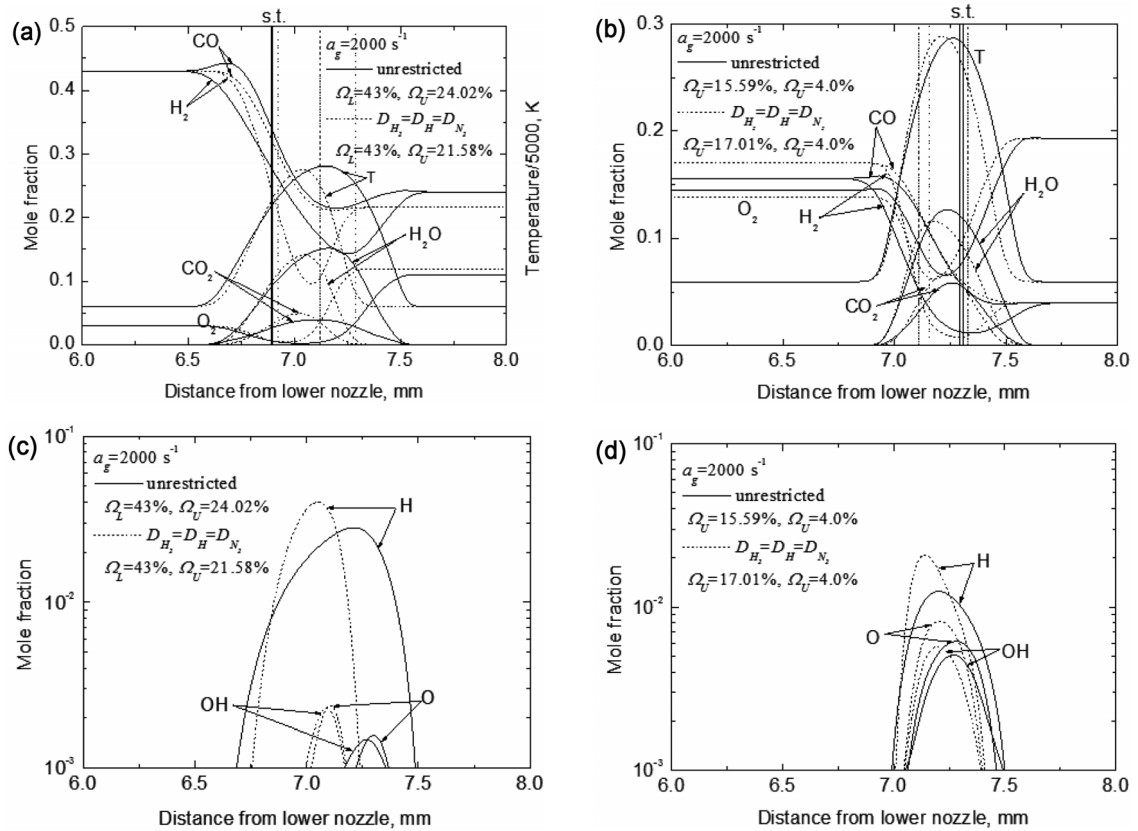


Fig. 6. Flame structures on the asymmetric rich (a, b) and lean (c, d) extinction boundaries at $a_g = 2000 \text{ s}^{-1}$ in the fuel composition of 50% H₂ + 50% CO.

공유와 같은 화학적 상호작용을 통해 두 화염대 사이에서 반응이 활발하게 일어난다는 것을 의미한다. Fig. 6(c)와 (d)의 신장률 $a_g = 2000 \text{ s}^{-1}$ 에서 비대칭의 희박 예혼합 화염의 경우 H, O, OH의 프로파일은 수소의 루이스 수가 1보다 훨씬 작고 두 화염대 사이의 거리가 눈에 띄게 작아져서 상호작용이 강하게 일어나 단일 모드 형태를 가진다. 희박 소화 경계에서 H₂와 H의 선호화산의 영향은 앞서 언급한 것처럼 과농 소화 경계와는 다르게 상호작용을 약하게 만든다. 그래서 Fig. 6(c)에서 NRD의 경우 약한 화염은 화염의 위치가 H₂연료 소비율의 피크점을 통해 감지되지 못할 정도로 훨씬 약해진다. 하지만 약한 화염은 여전히 살아 있으며 화염의 온도 및 CO₂와 H₂O의 농도가 최고인 위치는 강한 화염의 위치와 일치하지 않는다. 이것은 Fig. 6(a)와 (b)의 과농 소화 경계에서와 비슷하며 이는 상당한 화학적 상호작용이 일어난다는 것을 의미한다. 반대로 이것은 RD의 경우 H₂ 소비율의 최고점과 최고 화염 온도 및 CO₂와 H₂O의 농도가 최고인 지점이 두 화염 사이에 위치한 것을 통해 약한 화염이 감지되는 것을 확인할 수 있다.

반면 Fig. 2(a)에서 과농 소화 경계와 희박소화경

계는 신장률의 증가에 따라 $a_g = 3782 \text{ s}^{-1}$ 에서 섬 형태가 되고 게다가 신장률을 $a_g = 4665 \text{ s}^{-1}$ 까지 증가시켰을 때 섬이 점으로 나타났다. 이는 $a_g = 4665 \text{ s}^{-1}$ 에서는 상호작용하는 화염이 어떠한 연료 조성에서도 더 이상 살아남을 수 없는 한계 신장률이라는 것을 의미한다. 그러면 두 개의 당량 혼합비로 섞인 예혼합 화염 사이의 상호작용의 경우 $a_g = 3782 \text{ s}^{-1}$ 에서의 섬이 당량혼합비의 화염 조건을 거쳐 가는 희박 소화 경계에서와 비슷한 특성을 가지는지 아니면 그렇지 않은지 명백하게 밝혀져야 한다. Fig. 7은 (a) 주요 화염 구조 (b) $a_g = 3782 \text{ s}^{-1}$ 에서 이론 혼합비의 예혼합 화염들 사이의 상호작용에서 chain carrier radical(H, O, OH)의 프로파일을 나타낸다. H₂와 H의 선호화산의 영향을 명백하게 밝히기 위해 RD의 경우와 NRD의 경우 또한 비교하였다. 결과는 RD의 경우 화염대는 NRD의 경우의 화염대 안쪽에 존재하는 것을 보여준다. 게다가 RD의 경우 단일 모드의 형태로 나타나는 반면 NRD의 경우 OH의 프로파일은 화염대 근처에서 굴절(deflection)점을 가진다. 이것은 대칭의 희박 예혼합 화염에서 $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$, $a_g = 2000 \text{ s}^{-1}$ 에서의 상호작용과는 반대의 특성을 보인다. 이것은 상호작

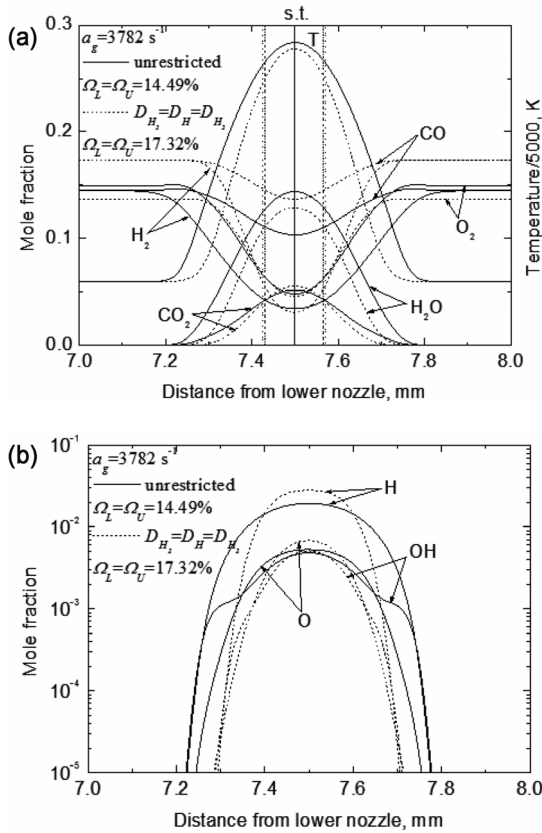


Fig. 7. Flame structures on the symmetric stoichiometric extinction boundary at $a_g = 3782 \text{ s}^{-1}$ in the fuel composition of 50% H₂ + 50% CO.

용하는 화염은 더 낮은 소화 경계가 이론 화염 조건을 초과하더라도 과농 소화 경계에서의 특성을 가진다는 의미이다. 그 이유는 이러한 상황에서 유효 루이스 수와 부족 반응물의 루이스 수 둘다 1보다 크기 때문이다. 그럼에도 Fig. 3(a), 5(a), 5(c), 7(a)를 비교해보면 온도의 프로파일은 단일 모드로 나타나고 최고점은 정체점에서 나타난다. CO₂와 H₂O 역시 마찬가지이다. 그래서 수소(deficient reactant)의 루이스 수가 1보다 훨씬 작거나 또는 상당히 큰 신장률에서는 루이스 수에 의해 확인된 고유한 성질을 무시하고 화염상호작용에 화학적 상호작용이 결정적인 역할을 한다고 판단된다. 수소의 루이스 수가 1보다 훨씬 작거나 상당히 큰 신장률에서는 희박(과농)-희박(과농) 화염 상호작용은 소화 경계에 있어서 그 의미가 크지 않다. 그래서 이와 같은 화염 구조는 화학적 상호작용에 크게 의존한다.

3.3. 스트레치를 받은 상호작용하는 화염에서 화염 소화 메커니즘

비록 희박-과농 소화 경계 사이에서 화염 구조의

비교를 통한 상세한 분석이 신장률 측면에서 수행되었지만 소화 한계가 왜 신장률의 증가에 따라 줄어드는지에 대해서는 설명하지 않았다. 부분 예혼합 화염의 경우 $a_g = 3782 \text{ s}^{-1}$ 에서 화염 소화 메커니즘은 에지 화염(edge flame)의 거동을 통해 잘 설명되었다[28]. 부분적으로 예혼합된 혼합기에서 삼지화염(tribrachial flame)의 형태는 곡률 반지름이 혼합층의 두께를 감소시켰을 때 예열대(preheat zone)의 두께와 동일한 차수(order)를 가지면 단일 화염의 구조로 나타날 수 있고 현재 연구에서의 유사한 상황은 삼중 화염의 병합과도 연관된다. 신장률의 더 큰 증가는 에지화염의 전파 속도를 감소시키고 화염 소화를 일으킨다. 이것은 Fig. 2에서 부분 예혼합 화염의 소화 메커니즘으로 볼 수 있다.

그러나 Fig. 2의 희박(과농)-희박(과농) 예혼합 사이의 후류 상호작용에서 소화 메커니즘은 명확히 설명되지 않고 희박 및 과농 예혼합 화염의 소화 한계는 신장률의 증가에 따라 감소한다. 신장률의 증가는 루이스 수가 1보다 작은 경우에 화염 대에서 부족 반응물의 반응이 완벽하게 일어나지 않기 때문에 화염 전파 속도를 증가시키지만 루이스 수가 1보다 큰 경우에는 신장률의 증가는 반응이 완벽하게 일어나기 때문에 화염 전파 속도를 감소시킨다고 알려져 있다[27]. 합성가스-공기 혼합기에서 신장률의 증가에 따른 과농 소화 경계의 감소는 유효 루이스 수 및 부족 반응물의 루이스 수가 1보다 크기 때문에 쉽게 설명된다. 연료조성 50% H₂ + 50% CO 예혼합 화염의 경우 자유롭게 전파하는 화염의 최대 전파 속도는 $\Phi = 1$ 에서 나타나는 것이 아니라 $\Phi = 2$ 에서 나타난다[6,7]. 자유롭게 전파하는 화염의 최대 속도의 측면에서 화염 전파 속도와 같은 화염의 강도는 희박 소화 경계가 $\Phi = 1$ 에서 $\Phi = 2$ 까지 지날 때 훨씬 증가하고 대조적으로 과농 소화 경계의 경우 $\Phi = 2$ 에서부터 $\Phi = 2$ 까지이다. 그러면 Fig. 2에서 보이는 것처럼 소화 경계의 축소는 화염의 전파 속도로 간단하게 설명되지 않고 상호작용하는 합성가스-공기 화염에서의 화염 소화에 상당히 영향을 미치는 다른 결정적인 요인이 있다는 것을 의미한다.

화염 소화에 영향을 끼칠 수 있는 몇몇 요인은 화학적 상호작용과 열적 상호작용이다. 화학적 상호작용은 신장률의 증가에 따른 화염 소화에 좀 더 적합하고 라디칼 공유를 통한 $\text{O}_2 + \text{H} = \text{OH} + \text{O}$ 와 같은 주요 연쇄반응을 늘려 전체 반응물(reaction rate)을 증가시키게 된다[29]. 이것은 신장률의 증가로 인해 강하게 상호작용하는 한 쌍의 화염에서 H, O, OH 라디칼의 최대 몰분율 그리고 최고 화염 온도와 CO₂와 H₂O의 최대 몰분율이 화염대에서 나타나는 것이 아니라 정체점에서 나타나기 때문에 이는 오히려 과

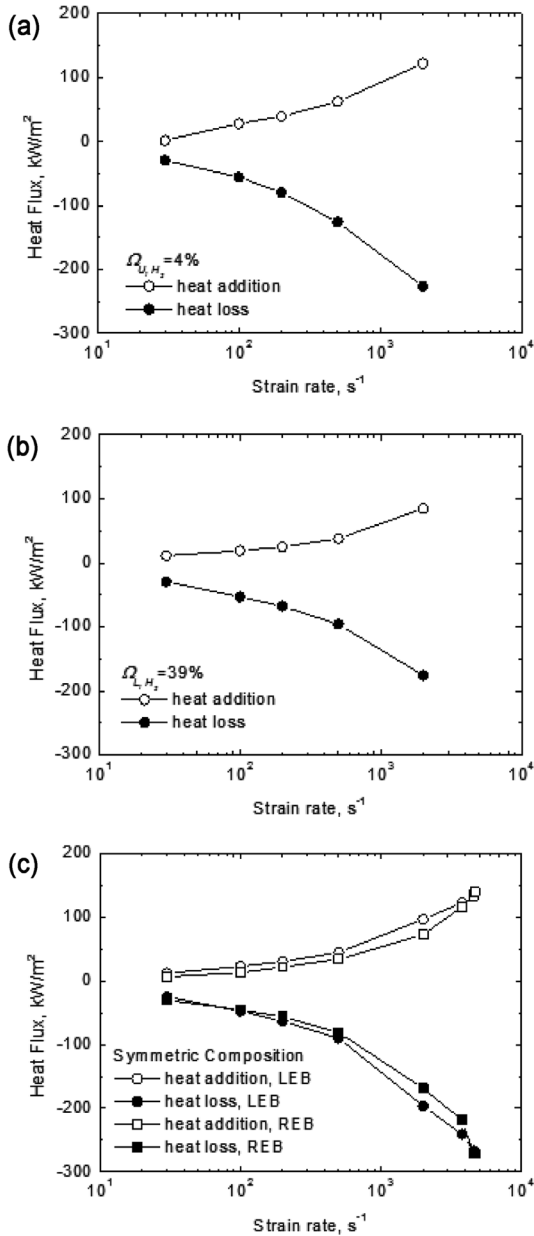


Fig. 8. Heat fluxes versus strain rate along (a) $\Omega_{U,H_2} = 4\%$, (b) $\Omega_{U,H_2} = 39\%$, and (c) symmetric fuel composition. The addition and loss of heat is evaluated at the location of stronger flame.

단열(superadiabatic) 화염온도가 정체점에서 나타나고 한 쌍의 화염에 초과 엔탈피를 제공하게 되는 것의 증거가 된다. 그러면 앞서 언급한 신장률의 증가에 따른 희박 소화 경계의 감소는 더 강한 화염에서 약한 화염으로의 전도 열손실과 대기로의 열손실로 설명이 되어야 할 것이다. 신장률의 증가에 따라 복사 열손실은 감소하기 때문에(화염대의 두께와 관련되

고 그러므로 화염의 체적과 관련되므로) 화염 소화가 복사열손실 때문이라고 설명하는 것은 적합하지 않다. 게다가 대류 열전달은 일반적으로 화염대에서 무시 가능하기 때문에 1차원 화염에서 만약 복사 열손실이 무시 가능하다면 화학적 열 발생이 전도 열손실과 밸런스를 이루어야 하고 그렇기 때문에 전도 열손실이 화염 소화를 설명하는 중요한 요인이 될 수 있는 것이다. 두 개의 희박 예혼합 화염 사이의 거리와 반응대의 두께는 신장률의 증가에 따라 크게 감소하므로 두 화염 사이의 전도 열 유속 및 대기로의 전도 열 유속이 주목할 만한 것이다. 이러한 측면에서 화염의 소화는 더 강한 화염에서부터의 더 약한 화염으로의 초과 열 손실과 대기로의 초과 열 손실에 의해 야기된다. 그러나 Fig. 3~7에서 보이는 것처럼 매우 스트레치를 받은 화염에서 초과 엔탈피 현상이 나타나기 때문에 더 강한 화염으로부터 더 약한 화염으로의 전도 열손실이 더 강한 화염을 약하게 만든다고 단정하는 것은 어렵다. Fig. 6에서 나타난 것처럼 더 강한 화염은 더 약한 화염이 미약하게 살아 있거나 소화 되었더라도 살아남아 있다. 이러한 상황에서 더 약한 화염은 더 강한 화염으로부터의 도움 없이는 살아남을 수 없기 때문에 더 강한 화염으로부터 대기로의 열손실이 화염소화에 주요한 요인이 될 것이다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 전체 신장률의 측면에서 더 강한 화염으로부터의 전도 열손실에 대해 연구하였다. Fig. 3~7에서 볼 수 있듯이 활발한 화학적 상호작용 때문에 상호작용하는 화염 사이에서 최대 화염 온도가 나타나고 이러한 상황에서의 전도열은 더 강한 화염으로 더해질 수 있으며 반면에 더 강한 화염으로부터 대기로 전도열이 빠져 나갈 수도 있다. 그래서 전도 열손실과 전도에 의한 열 공급은 다음과 같이 정의하였다.

$$q_{add} = k_{avg} \left| \frac{T_{max} - T_f}{\chi_{max} - \chi_f} \right|, \quad q_{loss} = - \left| k_f \frac{dT}{d\chi} \right| \quad (4)$$

여기서 첨자 max와 f 그리고 avg는 각각 최대 화염 온도와 더 강한 화염의 위치 그리고 최대 화염의 온도와 화염 온도 사이의 평균값을 나타낸다. 간단하게 공기의 열전도도는 Fig. 8에서 계산된 열유속 값을 사용하였다. Fig. 8에서 더해지거나 잃어버린 열 유속은 더 강한 화염에 대하여 평가되었다. 모든 경우에 더 강한 화염으로부터 대기로의 전도 열손실은 더 강한 화염으로 더해지는 전도 열 공급보다 크다. 화염대로부터 대기로의 전도 열손실은 신장률의 증가에 따라 상당히 증가하며 이는 신장률의 증가에 따른 소화에 민감해지는 직접적인 원인을 의미하고 그

래서 신장률의 증가에 따라 소화 경계는 줄어드는 것이다. 게다가 희박 소화 경계에서 이와 같은 전도 열손실과 공급은 과농 소화 경계에서 보다 크다. 그러므로 상호작용하는 화염에서 소화 메커니즘은 더 강한 화염으로부터 대기로의 초과 전도 열손실에 의해 설명된다.

4. 결론

본 연구에서는 스트레치를 받는 상호작용하는 합성가스-공기 예혼합 화염 사이에서 H₂와 H의 선호 확산의 영향에 대해 수치 계산을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

두 개의 화염 안정화 선도는 신장률의 증가에 따라 소화 경계가 민감하게 줄어드는 것을 보여주며 고신장률에서 소화 경계의 형태를 섬 모양으로 만들고 결국 어떠한 연료조성에서도 상호작용 하는 화염이 살아 남을 수 없는 한계 신장률까지 이르는 것을 의미한다.

수소(deficient reactant)의 루이스 수가 1보다 훨씬 작거나 상당히 큰 신장률에서는 루이스 수의 의미가 크지 않아서 루이스 수에 의해 확인된 고유한 성질을 무시하고 화염구조가 화학적 상호작용에 크게 의존한다.

끝으로 희박-희박 혼합기의 상호작용에서 신장률의 증가는 더 강한 화염으로부터 대기로의 복사 열손실을 감소시키는 반면 전도 열손실을 증가시킨다. 특히 신장률을 증가시키면 더 강한 화염으로부터 대기로의 전도 열손실은 상당히 증가하며 소화경계를 섬 형태로 나타나게 한다. 즉 더 강한 화염으로부터 대기로의 상당한 열손실은 상호작용하는 합성가스 공기 예혼합 화염 사이의 상호작용의 소화메커니즘으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2011학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2011-60).

참고문헌

- [1] Vagelopoupos CM, Egolfopoulos FN. Laminar flame speed and extinction strain rates of mixtures of carbon monoxide with hydrogen, methane, and air. *Proc Combust Inst.*, 1994;25:1317-1323.
- [2] Fortache CG, Tan Y., Sun, CJ, Law CK. Ignition of CO/H₂/N₂ versus heated air in counterflow: experimental and modeling results. *Combust Flame*, 2000;120:417-426.
- [3] Park J, Kim, JS, Chung JO, Yun JH, Keel SI. Chemical effects on added CO₂ on the extinction characteristics of H₂/CO/CO₂syngas diffusion flames. *Int J Hydrogen Energy*, 2009;34:8756-8762.
- [4] 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;34:6961-6969.
- [5] Vu TM, Park J, Kwon OB, Bae DS, Yun JH, Keel SI. Effects of Diluents on Cellular Instabilities in Outwardly Propagating Spherical Syngas-Air Premixed Flames. *Int J Hydrogen Energy*, 2010; 35:3868-3880.
- [6] Davis SG, Joshi AV, Wang H, Egolfopoulos F. An optimized kinetic model of H₂/CO combustion. *Proc Combust Inst.*, 2005;30:1283-1292.
- [7] Sun H, Yang SI, Jomaas G, Law CK. High-pressure laminar flame speeds and kinetic modeling of carbon monoxide/hydrogen combustion. *Proc Combust Inst.*, 2007;31:439-446.
- [8] Ishizuka S, Law CK. An experimental study on extinction and stability of stretched premixed flames. *Proc Combust Inst.*, 1982;19:327-335.
- [9] Sohrab SH, Ye Z, Law CK. An experimental investigation on flame interaction and the existence of negative flame speeds. *Proc Combust Inst.*, 1984;20:1957-1965.
- [10] Sohrab SH, Ye Z, Law CK. Theory of interactive combustion of counterflow premixed flames. *Combust Sci Technol.*, 1986;45:27.
- [11] Chung SH, Kim JS, Law CK. Extinction of interacting premixed flames: theory and experimental comparisons. *Proc Combust Inst.*, 1986;21:1845-1851.
- [12] 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;35:1390-1400.
- [13] 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.
- [14] Kim JS, Park J, Kwon OB, Bae DS, Yun JH, Keel SI. A study on flame structure and extinction in downstream interaction between lean premixed CH₄-air and (50% H₂ + 50% CO) syngas-air flames. *Int J Hydrogen Energy*, 2011;36:5717-5728.

- [15] 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 36:13181-13193.
- [16] 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.
- [17] Lutz AE, Kee RJ, Grcar JF, Rupley FM. A fortran program for computing opposed-flow diffusion flames. Sandia National Laboratories Report, 1997; SAND 96-8243.
- [18] 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.
- [19] Kee RJ, Rupley FM, Miller JA. Chemkin II: a fortran chemical kinetics package for analysis of gas phase chemical kinetics. Sandia National Laboratories Report, 1989; SAND 89-8009B.
- [20] 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, 1994; SAND86-8246.
- [21] 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.
- [22] Hassan MI, Aung KT, Faeth GM. Properties of laminar premixed CO/H₂/air flames at various pressures. *J. Propulsion Power*, 1997;13:239-45.
- [23] Natarajan J, Lieuwen T, Seitzman J. Laminar flame speeds of H₂/CO mixtures: effect of CO₂ dilution, preheat temperature, and pressure. *Combust. Flame*, 2007;151:104-19.
- [24] Prathap C, Ray A, Ravi MR. Investigation of nitrogen dilution effects on the laminar burning velocity and flame stability of syngas fuel at atmospheric condition. *Combust. Flame*, 2008;155:145-60.
- [25] Rogg B. Response and flamelet structure of stretched premixed methane-air flames. *Combust. Flame*, 1988;73:45-65.
- [26] Sohn CH, Chung SH, Kim JS. Instability-induced extinction of diffusion flames established in the stagnant maxing layer. *Combust. Flame*, 1999;117:404-12.
- [27] Law CK. *Combustion Physics*. 1st Ed. Cambridge University Press, 2006; 432-433.
- [28] Chung SH, Stabilization, propagation and instability of tribrachial triple flames. *Proc. Combust. Inst.*, 2007;31;877-892.
- [29] Westbrook CK, Dryer FL. Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1984;10;1.