

## 메탄-공기/합성가스-공기 예혼합화염의 후류 상호 작용에 대한 연구

박 정\* · 권오봉\*\* · 길상인\*\* · 윤진한\*\*

\*부경대학교 기계공학과

\*\*한국기계연구원 환경 에너지 기계 시스템

## A Study on Downstream Interaction between Methane-air and Syngas-air Premixed Flames

Jeong Park\*, Oh Boong Kwon\*\*, Sang-In Keel\*\* and Jin-Han Yun\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

\*\*Environment & Energy Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received 8 September 2015, Received in revised form 16 December 2015, Accepted 16 December 2015)

### ABSTRACT

Downstream interactions between lean premixed flames with mutually different fuels of syngas and CH<sub>4</sub> have been numerically investigated particularly on and near lean extinction limits. The interaction characteristics between lean premixed (50% H<sub>2</sub> + 50% CO)-air and CH<sub>4</sub>-air flames were shown to be quite different from those between the same hydrocarbon flames. The lean extinction boundaries were of slanted shape, thereby implying strong interactions. The weaker flames had negative flame speeds on the upper extinction boundaries, whereas the weaker flame speeds on the lower extinction boundaries were both negative and positive. The results also showed that the flame interaction characteristics did not follow the general tendency with the dependency of Lewis number in downstream interactions between the same hydrocarbon flames. Importance of chemical interaction in flame characteristics is discussed in the downstream interactions between lean premixed (50% H<sub>2</sub> + 50% CO)-air and CH<sub>4</sub>-air flames.

**Key Words** : Difficient reactant & effective Lewis numbers, Extinction boundary, Radical sharing

### 1. 서론

층류 화염편(Laminar flamelet) 개념은 점근적으로 매우 얇은 층(화염편) 안에서 화학반응이 빠른 난류 화염들을 성공적으로 묘사하여 왔다[1,2]. 층류 화염편 모델은 난류화염은 스트레치를 받는 화염들의 앙상블로 평균 구조를 구성하며 순간적인 화염은 층류 화염 구조를 갖는 것으로 이해될 수 있다. 따라서 층류 화염편 모델을 개선하는 좋은 방법 중 하나는 대상 화염인 대향류화염에서 층류화염에 대한 다양한 특성을 데이터베이스로 구축하여 난류 모델링에 제

공하는 것이다. 층류 화염편 모델에서 화염 간의 상호작용에 대한 개념 확장은 여전히 도전할만한 가치가 있는 분야 연구들은 층류 화염편 모델의 확장에 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

후류 상호작용은 화염 강도가 같거나 다른 두 예혼합화염의 기이며 따라서 화염 간의 후류 상호작용에 대한 확장된 가스들의 상호작용을 통해 나타난다. 이러한 연구들은 주로 1980년대 동종의 연료들에 대해 희박(과농)-희박(과농) 화염들 간의 상호작용을 집중적으로 연구하였다[3-6]. 이러한 연구들이 화염소화 근처에서 루이스 수(Lewis number)에 따른 화염 거동의 이해의 폭을 넓힌 반면에, 이중 연료들의 예혼합화염 사이의 후류 상호작용은 훨씬 복잡하고 문헌상에 보고된 예도 적다[7]. 한편, 심각한 기후 변화를 고려한다면 다양한 가스화 과정을 통해 얻어지는 합성가스의 사용은 점차 증가하는 추세이다. 이러한 관점에서 합성가스 연료의 기초 연

† Corresponding Author, obkwon@pknu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

소 특성을 이해하고자 점화[8], 층류 화염전파속도 측정과 마크스타인(Markstein) 길이[9-13], 화학반응기구[14,15]에 대한 연구들이 있었다. Siemens 같은 회사들이 합성가스를 연료로 하는 산업용 버너를 생산하고는 있지만 발열량을 고려한다면 기존의 탄화수소 연료에 합성가스를 혼합연료로 사용하는 것이 가장 적절한 방식이다. 이러한 관점에서 탄화수소와 합성가스(혹은 수소)의 혼합연료에 대한 연구들이 그간 상당히 수행된 바 있다[13,16-21].

본 연구에서는 희박 메탄-공기 그리고 희박 합성가스-공기 예혼합화염들 사이의 후류 상호작용에 대한 연구를 수행한다. 합성가스-공기 혼합물에 대해서 유효 루이스수가 1 근처이므로 기존 탄화수소-공기 예혼합화염의 결과들[3-6]을 근거로 후류 상호작용이 약해야 하지만 희박 수소-공기의 경우는 부족 반응물개념(deficient reactant concept) 하에서 루이스수가 0.2 근처에 해당하므로 상호작용은 매우 강할 것으로 기대된다. 특별한 관심은 희박소화 경계 근처에서 약한 화염(weaker flame)이 강한 화염(stronger flame)에 기생하면서 생존하기 위해 좌표축의 의미(coordinate sense)에서 양(positive)과 음(negative) 화염전파속도를 갖게 되는 과정을 명확히 하고자 한다.

## 2. 수치해석 방법

수치해석은 희박 메탄-공기와 합성가스-공기 예혼합화염들 사이의 후류 상호작용에 대해 대향류화염을 대상으로 수행된다. 대향류화염 구조는 정체점 근처에서 유효한 유사변수들(similarity variables)로부터 1차원이며 상세한 모델 묘사는 Kee 등[22]에 의해 개발되었고 Lutz 등[23]에 의해 확장되었던 Oppdif code로 잘 알려져 있다. 따라서 지배방정식의 상세한 것은 현재의 연구에서는 생략하기로 한다. 전체 신장율(global strain rate,  $a_g$ )은 다음과 같이 정의된다.

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

여기서  $V$ 는 노즐출구속도,  $L$ 은 노즐 사이의 거리, 하점자  $U$ ,  $L$ 은 각각 상부 및 하부노즐을 의미한다. 여기서 버너간 거리는 20 mm로 고정하였다. 저신장율에서 우세한 복사열손실 효과 묘사를 위해 광학박모델(optical thin model)을 사용하였다[24]. 지배방정식은 Chemkin 코드[25]와 Tanfit 코드[26]을 사용하여 풀게 된다. 주위 조건은 1기압, 298 K이고 화학종과 온도는 Dirichlet 경계조건을 사용하였다. 적응격자(adaptive grid)를 사용하였고 최대 500 개보다는 작았다.

합성가스화염에 대한 상세반응기구는 Sun[27]과 Davis[28] 모델이 신뢰도가 가는 Mclean 등[10]의 화염전파속도를 잘 묘사하여 왔다. 그러나 이 반응기구들로는 탄화수소 부산물들에 대한 묘사는 포함하지 않는다. 그러나 이전 결과들[7,30]에서는  $H_2/CO/CO_2$  화염에 대해 GRI v-3.0을 사용한 수치해석 결과로는 Natarjan 등[12]에 의해 측정된 화염전파속도와 질소로 희석된 수소-공기 화염과 메탄-공기 화염간 상호작용에서 측정된 소화 경계[7]가 잘 일치함을 보인 바 있다. 따라서 본 연구에서는 53개의 화학종과 328개의 반응단계를 갖는 GRI v-3.0 화학반응기구[30]를 사용하였다.

## 3. 결과 및 논의

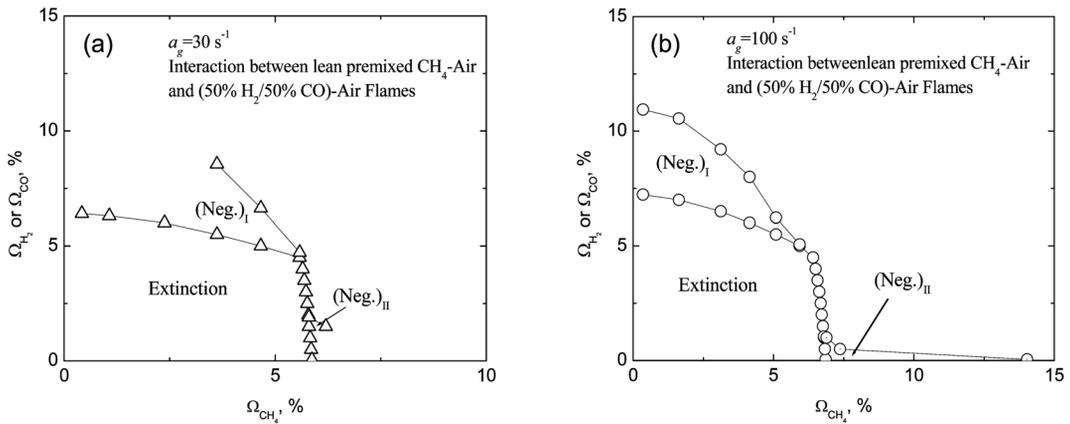
### 3.1. 희박 소화한계 근처에서 화염 특성

메탄-공기와 (50%  $H_2$  + 50%  $CO$ )-공기의 농도를 변화시키면서 희박소화 조건 근처에서 수치해석을 수행하였다. 희박 메탄-공기 예혼합화염에서는 부족 반응물 루이스수( $L_D$ )는 1보다 약간 작고, 희박(50%  $H_2$  + 50%  $CO$ )-공기 화염의 경우 유효 루이스수( $L_{eff}$ )가 1보다 약간 크다. 그러나 희박 수소 ( $CO$ )-공기 혼합기의  $L_D$ 는 1보다 매우 작다는(약간 크다) 것을 알아야 한다. 여기서 희박 수소-공기 혼합기의  $L_{eff}$ 는 다음과 같이 정의된다[13,31].

$$L_{eff} = 1 + \frac{(L_E - 1) + (1 - L_D)A_1}{1 + A_1} \quad (2)$$

여기서  $L_E$ 는 초과반응물의 루이스수를 의미하고,  $A_1 = 1 + \beta(\Phi - 1)$ 은 혼합기 강도의 척도이다. 이때  $\beta = E_a(T_{ad} - T_u)/R^0 T_{ad}^0$ 는 Zeldovich 수이고  $\Phi$ 는 미연가스 축에서 부족반응물에 대한 초과반응물의 질량비로  $\Phi < 1$ 이면  $\Phi = 1/\phi$ 이고  $\Phi > 1$ 이면  $\Phi = \phi$ 가 된다. 여기서  $E_a$ 는 활성화 에너지,  $T_{ad}$ 는 단열화염온도,  $T_u$ 는 미연가스 온도,  $R^0$ 는 우주기체상수이다.  $L_{eff}$ 는 EQUIL 코드[25]를 사용하여 계산할 수 있다.

Fig. 1은 희박 예혼합 메탄-공기와 (50%  $H_2$  + 50%  $CO$ )-공기 화염 사이의 후류 상호작용에 대해  $a_g$ 가 30과 100  $s^{-1}$ 에서 희박 소화경계들과 음의 화염전파속도 영역을 나타내고 있다. 음의 화염전파속도 영역은 30  $s^{-1}$ 인 경우에 역화로 인해 (Neg.)<sub>I</sub>에 대해 ( $\Omega_{CH_4}$ ,  $\Omega_{H_2}$ ) = (3.62, 8.55) % 그리고 (Neg.)<sub>II</sub>에 대해 (6.2, 1.5) %로 제한되었다. 반면에 100  $s^{-1}$ 에 대해서는 화염의 역화는 나타나지 않고 음의 화염전파속도 영역이 Fig. 1(b)와 같이 나타난다. 한편, 탄화수소-공기 화염들의 후류 상호작용에 관한 이전 연구들[3-6]에서



**Fig. 1.** Extinction boundaries and negative flame speed regimes at (a)  $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$  and (b)  $100 \text{ s}^{-1}$  in downstream interaction between lean premixed CH<sub>4</sub>-air and (50% H<sub>2</sub> + 50% CO)-air flames.

$L_D < 1$ 인 경우 소화경계는 경사진 형상을 가지며 상호작용이 강하게 나타나고,  $L_D > 1$ 인 경우 소화경계는 사각형 형상을 나타내며 약한 상호작용을 나타낸다는 것을 보인 바 있다. 특히 Chung 등[6]은  $L_D < 1$ 인 경우 경사진 형상을 보이던 소화경계가  $L_D$ 를 증가 시킴에 따라 사각형으로 변하고 화염 상호작용도 약해지는 것을 이론적으로 보인 바 있다. 현재의 연구에서 희박 메탄-공기는  $L_D$ 가 0.989-0.990의 범위에서 변하고 합성가스-공기는  $L_{eff}$ 가 1.022-1.036의 범위에서 변한다. 이것은 기존 연구 결과들을 토대로 두 화염간의 상호작용이 강하지 않다는 것을 의미한다. 그러나 희박 수소-공기 혼합기는  $L_D$ 가 0.279-0.285의 범위에서 변하기 때문에 강한 상호작용이 예상된다. 예로서 Fig. 1에서 상부 소화경계(U.E.B)는 상당히 경사진 형상을 하고 있어 화염 상호작용이 강하다는 것을 의미한다. 이것은 메탄-공기와 합성가스-공기의 상호작용에서 수소-공기 혼합기에 의해 소화 경계들이 상당히 영향을 받는 것을 의미한다. 또한  $a_g$ 가  $100 \text{ s}^{-1}$ 인 경우가  $30 \text{ s}^{-1}$ 인 경우에 대해 소화 경계 형상이 더 경사진 것을 볼 수 있다. 이것은  $a_g$ 의 증가에 의해 두 화염간의 거리가 감소하여 두 화염간의 열적 상호작용이 커지는 외에도 라디칼을 공유하는 등의 화학적 상호작용이 커졌기 때문이다.

Fig. 1은 또한 음의 화염전파속도를 갖는 영역이 존재함을 보여주고 있다. 하부 소화경계(L.E.B)에 대해  $30 \text{ s}^{-1}$ 인 경우에는  $\Omega_{H_2} \leq 1.5\%$  그리고  $100 \text{ s}^{-1}$ 인 경우에는  $\Omega_{H_2} \leq 1.05\%$ 인 경우에 음의 화염전파속도가 얻어진다. 희박 H<sub>2</sub>-공기 (CO-공기)인 경우  $L_D$ 는 1보다 훨씬 작고 (약간 크고), 따라서 희박 메탄-공기 화염과 강한 (약한) 상호작용을 하게 된다. 이러한 상황에서 L.E.B. 위에서 더 약한 합성가스-공기 화염은 더 강한 메탄-공기 화염에 기생하여야 생존

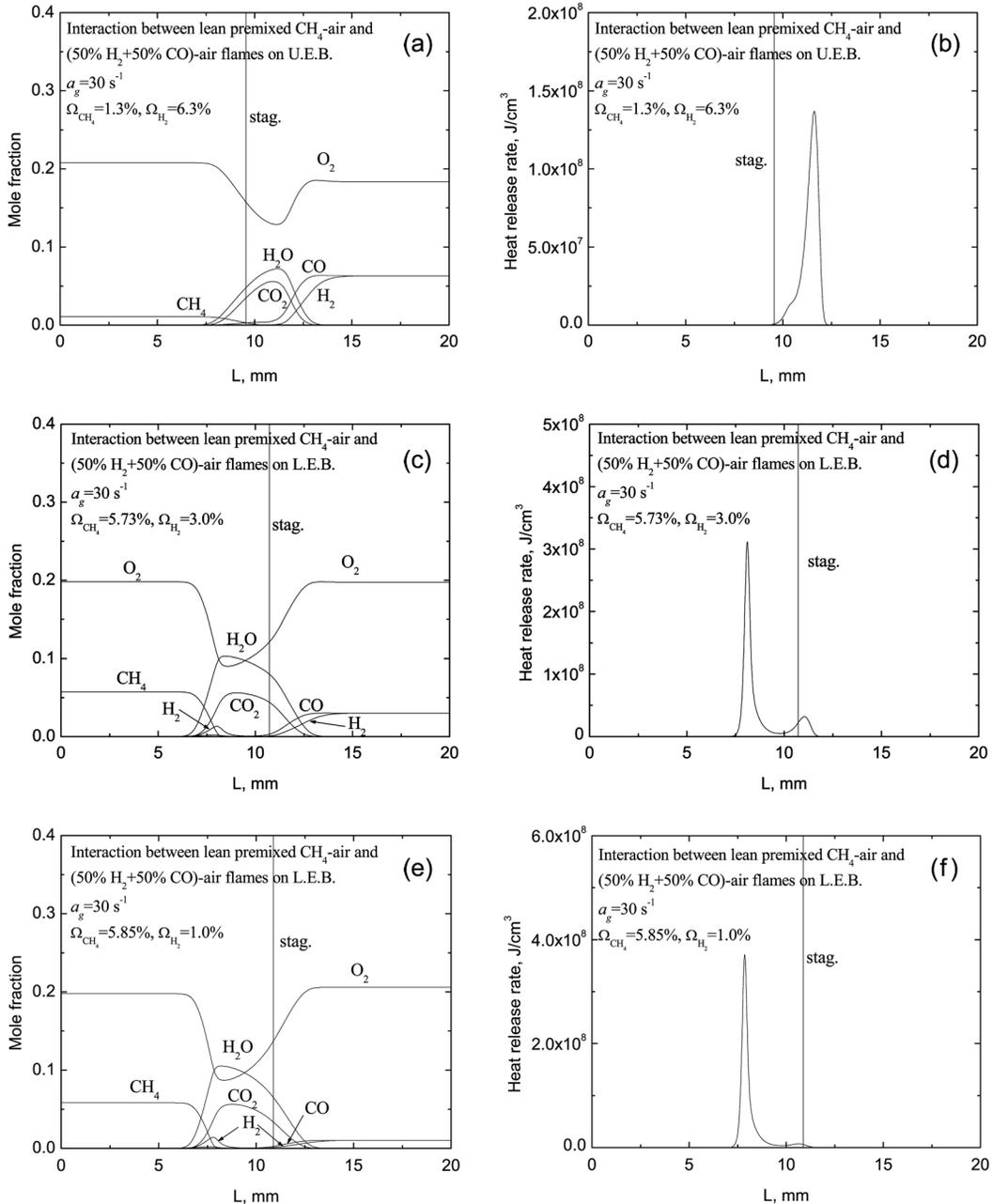
하게 되며, 결국 희박 메탄-공기 화염과 합성가스-공기 화염은 복잡한 상호작용을 하게 된다. 한편,  $a_g$ 가 30에서  $100 \text{ s}^{-1}$ 로 증가하면 화염소화 경계가 축소된다. 상호작용 없이 자유 전파하는 화염에서 화염전파속도는  $L_D < 1$ 인 경우  $a_g$ 의 증가에 따라 증가하게 된다. 이것은 Fig. 2의 L.E.B.의 경향과는 반대에 해당한다. 즉, 희박 메탄-공기 화염( $L_D < 1$ )과 희박 합성가스-공기 화염에서는 후류 상호작용(예를 들어 더 약한 화염에서 주위로의 열손실)에 의해 훨씬 더 크게 영향을 받는다는 것을 의미한다. U.E.B에 대해  $30 \text{ s}^{-1}$ 인 경우에 합성가스 화염의 최대 화염온도는 1,400 K보다 작았고 희박 메탄-공기 화염의 경우 가장 작은 최대 화염온도가 1,500 K보다 컸다. 따라서 더 강한 합성가스-공기 화염이 더 약한 메탄-공기 화염을 열적으로 지탱한다고 말하기는 어렵다. 게다가  $a_g$ 의 증가로 화염 사이 거리는 감소하게 되므로 더 강한 화염이 더 약한 화염을 지탱하려는 화염 상호작용 효과가 더 큰 상황이다. 이러한 상황을 극복하기 위해서는 더 강하지만 화염온도가 낮은 상황에서 라디칼의 공유 등을 통하여 이러한 상황을 극복할 것으로 판단되어진다. 이것을 좀더 명확히 하기 위해 음의 전파화염속도를 갖는 영역과 화염소화경계에서 상세한 조사가 필요하다.

일반적으로  $L_D > 1$ 인 경우 벽 정체(wall stagnation) 예혼합 화염에서 더 이상 연소가 가능하지 않는 화염온도가 감소하는 임계 스트레치율이 존재하고, 이것은 화염이 정체벽으로부터 유한한 거리에서 소화가 일어난다는 것을 의미한다.  $L_D < 1$ 인 경우 스트레치율은 반응율(화염온도)을 증가시킨다. 결과로서 화염은 더욱 정체벽으로 접근할 수 있고 화염소화는 정체벽과의 접촉에 의해 발생한다. 이것은 대량류 구성과 같이 정체벽이 없다면 화염은 정체면을 넘어

설 수 있음을 의미한다. 그러나 현재의 상황에서는 정체면을 넘어설 수 있는 직접적인 조력자는 스트레치율이 아니라 더 강한 화염으로부터 열전달이라든지 라디칼 공유와 같은 후류 상호작용이라는 점을 알아야 한다. 또한 더 약한 화염이 정체면을 넘어서는 것은 좌표축의 의미에서 음의 전파속도[3-6]가 된다는 것을 의미한다.

### 3.2. 희박 소화경계에서 화염구조

Fig. 2는  $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 에서 U.E.B.에 대해  $(\Omega_{\text{CH}_4}, \Omega_{\text{H}_2}) = (1.3, 6.3)\%$  그리고 L.E.B.에 대해  $(\Omega_{\text{CH}_4}, \Omega_{\text{H}_2}) = (5.73, 3.0)$ 와  $(5.85, 1.0)\%$ 인 경우에 대한 농도와 열방출율을 나타내고 있다. Fig. 2(a)에 보인바와 같이 U.E.B.에서 CO는 합성가스화염을 상당히 관통하나 H<sub>2</sub>는 합성가스 화염에서 거의 소모된다. 더 약한 메탄-공



**Fig. 2.** Profiles of major chemical species and heat release rate on upper and lower lean extinction boundaries (U.E.B., L.E.B.) with positive and negative flame speeds at  $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ .

기 화염이 더 강한 합성가스-공기 화염에 가까워짐에 따라 더 강한 합성가스-공기 화염으로부터 투과된 CO의 소모를 통해 더 약한 메탄-공기 화염을 지탱한다. 결과로서 더 약한 메탄-공기 화염은 정체면을 넘어 더 강한 합성가스-공기 화염에 합쳐져서 음의 화염전파속도를 나타내게 된다. Fig. 3(c)에 보여진 바와 같이 희박 메탄-공기 화염은 1,495 K보다 크다. 이러한 상황에서 더 약한 메탄-공기 화염은 정체면을 넘어서 더 강한 합성가스-공기 화염과 라디칼 공유를 통해 지탱된다. L.E.B.에서, 더 약한 합성가스-공기 화염은  $1.9 < \Omega_{H_2} \leq 4.5\%$ 에서 양의 화염 전파속도를 갖고  $\Omega_{H_2} \leq 1.9\%$ 에서 음의 화염전파속도를 갖는다. Figs. 2(c)와 (d)로부터 두 개의 상호작용하는 화염들은 상대적으로 떨어져 있어서 더 강한 메탄-공기 화염이 더 약한 합성가스-공기 화염으로 열전달을 하고 라디칼을 공유하기 쉽지 않다는 것을 보여준다. 그러나  $L_D < 1$ 인 수소-공기 혼합기는 (따라서 강한 상호작용의 소스) 합성가스-공기 화염대에서 소모된다. 게다가  $5.58 < \Omega_{CH_4} \leq 5.79\%$ 에서 더 강한 메탄-공기 화염의 강도는 더 약한 합성가스-공기 화염을 지탱시키기에는 충분히 크지 않다. 이

러한 상황에서 합성가스 농도의 감소는 감소된 반응율로 인해 소화되고 결과적으로 양의 화염전파속도를 나타내게 된다. 그러나 Figs. 2(e)와 (f)에서 L.E.B.에서 극단적으로 희박한 합성가스-공기 화염은  $\Omega_{H_2} \leq 1.9\%$ 에서 음의 전파속도를 갖게 된다. 또한 Figs. 2(e)와 (f)에서 두 화염 사이의 거리는 가깝지 않다. 결과적으로 더 강한 메탄-공기 화염에서 메탄의 농도의 증가를 통해서만이 더 약한 합성가스-공기 화염을 지탱하는 유일한 통로가 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은  $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 에서 희박 소화경계 위에서  $\Omega_{H_2}$  농도에 따른 화염위치, 최대 열방출율, 최대 화염온도, 그리고 최대 H 몰분율을 나타내고 있다.  $x_{f,CH_4}$ 와  $x_{f,syngas}$ 는 메탄-공기와 합성가스-공기 화염들의 위치를 나타내며 최대 열방출율로 정의하였다[7]. Fig. 3에 보여진 바와 같이 합성가스-공기 화염은 메탄-공기 화염에 비해 더 정체면 근처에 머무르는 것을 볼 수 있다. 또한 더 강한 화염의 화염 위치는 더 약한 화염이 정체면을 넘어서었을 때 더 영향을 많이 받는 것을 볼 수 있다. 더 약한 메탄-공기 화염이 정체면을 넘어서자마자 최대 열방출율과 최대 화염온도는

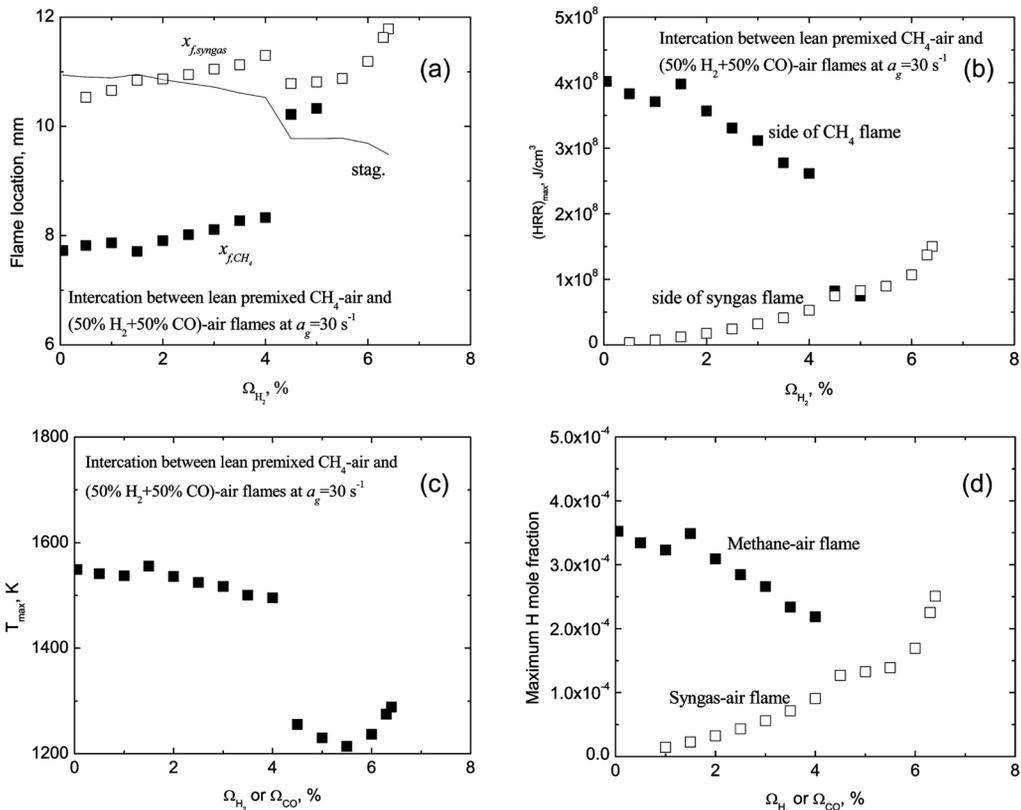


Fig. 3. Characteristics of flame interaction between lean premixed CH<sub>4</sub>-air and (50% H<sub>2</sub>+ 50% CO)-air flames on L.E.B. at  $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ .

더 약한 화염이 더 강한 화염에 합쳐지기까지 급격히 감소한다. 이러한 상황에서 Fig. 3(d)에 보여진 바와 같이 최대 H 몰분율은 약간 증가한다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 더 약한 화염은 더 강한 화염에 라디칼을 공유함으로써 생존한다는 것을 알 수 있다. 또한 더 약한 메탄-공기화염이 더 강한 합성가스 화염에 합쳐진 후에 최대 화염온도와 열방출율은 합성가스 농도 증가에 따라 급격히 증가한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는  $a_g = 100 \text{ s}^{-1}$ 에서 희박 소화경계 위에서  $\Omega_{\text{H}_2}$  농도에 따른 화염위치, 최대 열방출율, 최대 화염온도, 그리고 최대 H 몰분율을 나타내고 있다. 두 개의 상호작용하는 화염은 Fig. 3에 비해 훨씬 거리가 가깝다는 것을 알 수 있다. 결국 두 화염들의 라디칼 공유와 같은 화학적 친화력도 더 높을 수밖에 없다. 결과적으로 더 약한 합성가스-공기 화염이 정체면을 넘자마자 바로 더 강한 메탄-공기 화염에 합체가 되는 것을 볼 수 있다. 또한, 더 약한 메탄-공기 화염은 정체점을 넘은 후에 조차도 더 강한 합성가스-공기 화염의 도움으로 지탱한다. 그러나 더 약한 메탄-공기 화염이 더 강한 합성가스-공기 화염에 합체한

후에는 최대 화염온도와 열방출율은 급격히 증가한다. 또한  $a_g = 100 \text{ s}^{-1}$ 에서 합성가스 측의 최대 화염온도는  $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ 인 경우보다 더 높다. 이것은  $a_g$ 의 증가에 의한 H, O, OH 라디칼의 증가와 그로 인한 라디칼 공유에 의해 전체 반응율의 지시자(indicator)인  $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O}$ 의 반응율이 증가하기 때문이다.

한편 상호작용하는 화염에서 화염소화 기구의 명확함을 위해 더 약한 화염의 연료 농도를 고정하고 더 강한 화염의 연료 농도를 변화시키면서  $a_g = 100 \text{ s}^{-1}$ 에서 화염 소화가 발생하는 것을 관찰하여 Figs. 5-7에 나타내었고 실선은 정체점의 위치를 나타낸다. Fig. 5는  $\Omega_{\text{CH}_4} = 3.12\%$ 에서 화염소화가 나타날 때까지  $\Omega_{\text{H}_2}$ 를 변화시킨 경우를 나타낸다. Fig. 6은  $\Omega_{\text{H}_2} = 3.5\%$ 로 고정하고  $\Omega_{\text{CH}_4}$ 를 변화시킨 경우이다. Fig. 7은  $\Omega_{\text{H}_2} = 0.05\%$ 로 고정하고 화염소화가 나타날 때까지  $\Omega_{\text{CH}_4}$ 를 변화시킨 경우를 나타낸다. 음의 화염전파속도 구간에서는 화염온도와 H 몰분율은 하나의 피크만이 나타나고 열방출율에 대해서는 두 개의 피크가 나타난다. 따라서 앞서 언급하였듯이 화염 위치의 정의는 강한 화염 측에서 한 개의 피크가 나타나는 화염의 온도와 H 몰분율에 의한 위치

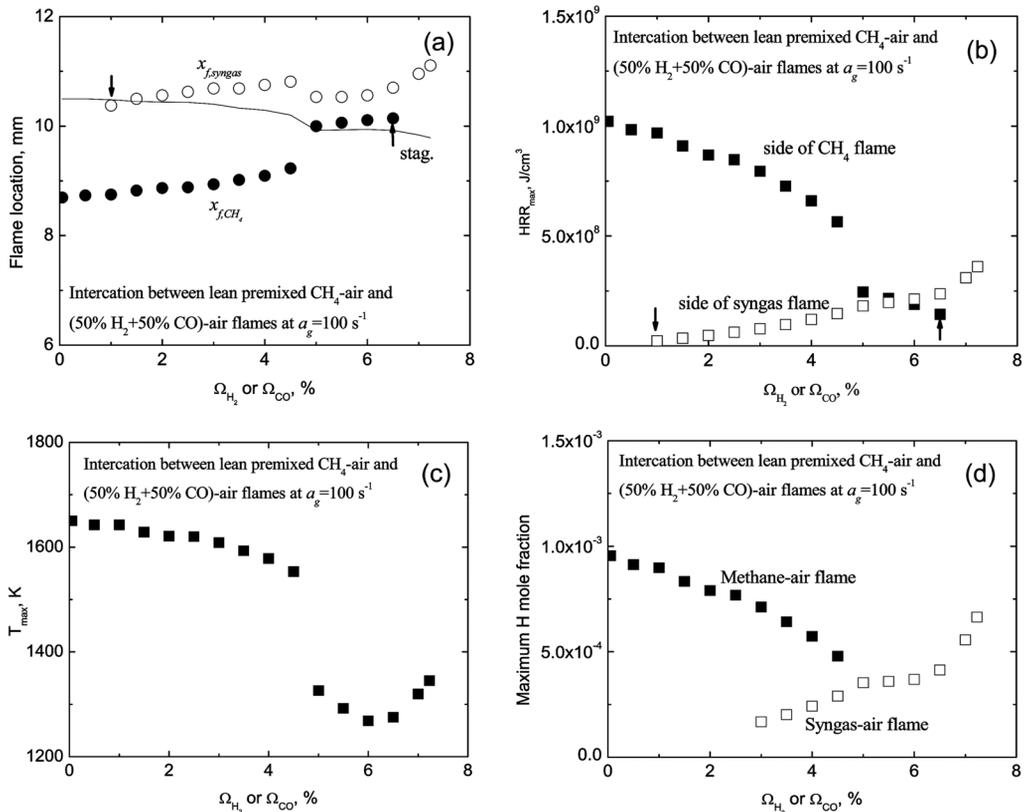


Fig. 4. Characteristics of flame interaction between lean premixed CH<sub>4</sub>-air and (50% H<sub>2</sub>+ 50% CO)-air flames on lean extinction boundaries at  $a_g = 100 \text{ s}^{-1}$ .

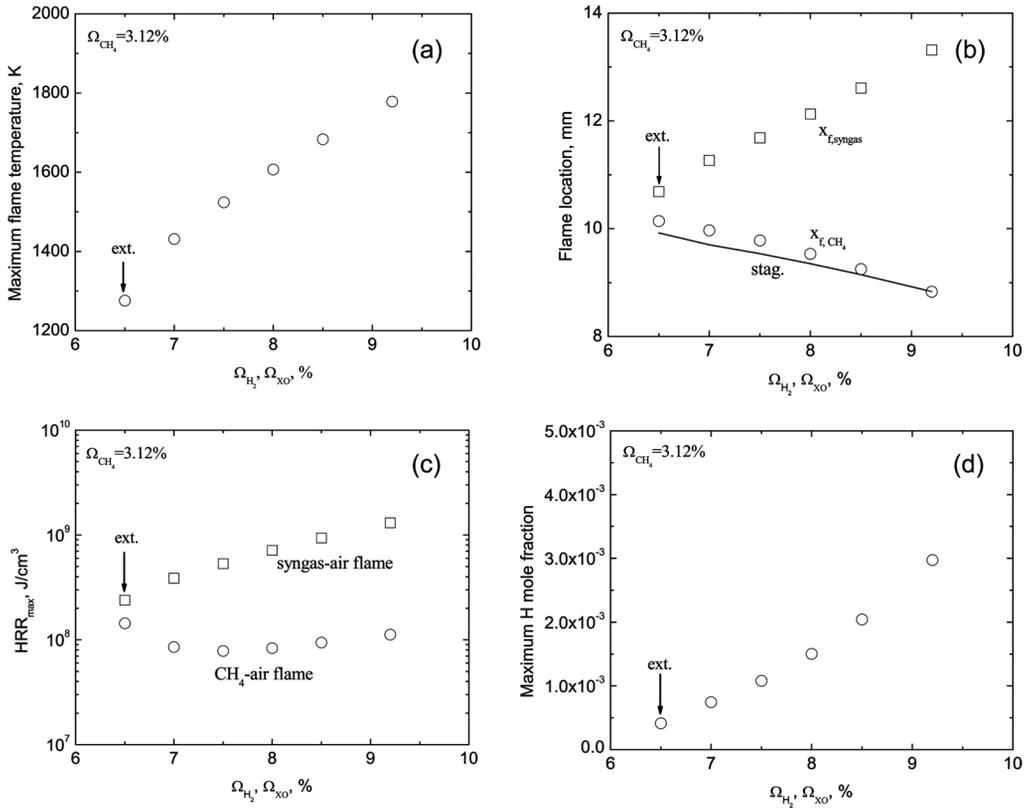


Fig. 5. Flame characteristics as a function of  $\Omega_{H_2}$  for fixed  $\Omega_{CH_4} = 3.12\%$  at  $a_g = 100 \text{ s}^{-1}$ .

보다는 2개의 피크가 나타나는 열방출율에 의해 나타내는 것이 타당함을 알 수 있다. Fig. 5에 보인 바와 같이 합성가스 농도가 감소할수록 더 약한 메탄-공기 화염의 위치는 더 강한 합성가스-공기 화염에 더 가까워지나, 메탄-공기 화염의 최대 열방출율은 약간 감소하고 나서 급격히 증가하며 이것은 더 강한 합성가스-공기로부터 열전달에 기인한 것이 아니라 넓게 분포되는 라디칼의 공유에 기인한 것임을 알 수 있다. 이것은 Fig. 4에서 희박 소화경계에서 메탄-공기 화염의 화염온도가 합성가스-공기 화염의 화염온도보다 훨씬 컸던 것으로부터도 추론될 수 있다. 또한 열방출율은 합성가스 농도의 감소에 따라 화염 온도의 감소에도 불구하고 다시 증가한다. 이것은 화염 간의 거리가 감소하고 따라서 약한 메탄-공기 화염이 더 강한 합성가스 화염과 라디칼을 공유한다는 것을 의미하나 합성가스 농도가 더 감소하면 화염은 소화된다.

Fig. 6에서  $\Omega_{H_2} = 3.5\%$ 로 고정하고  $\Omega_{CH_4}$ 를 증가시키면 두 화염은 양의 화염전파속도를 나타내고, 더 약한 합성가스 화염의 화염위치는 약간 증가하고, 더 강한 메탄-공기 화염의 화염위치는 정체점으로부터 점점 더 멀어진다. 또한 더 약한 합성가스-공기 화염

의 열방출율과 최대 H 몰분율은 약간 증가하게 된다. 이것은 두 화염 사이의 상호작용이 강하지 않다는 것을 의미한다. 즉, 더 강한 메탄-공기 화염이 메탄 농도의 감소로 소화될 때 더 약한 합성가스-공기 화염도 조력자가 사라짐으로 해서 또한 소화되는 과정을 잘 보여주고 있다.

Fig. 7에서는 메탄-공기 화염의 화염위치는 더 멀어졌다가 약  $\Omega_{CH_4} = 10.0\%$ 에서 최소를 보인 후 다시 정체점으로 가까워진다. 화염온도는 증가하다가 약  $\Omega_{CH_4} = 10.0\%$ 에서 최대를 보인 후 다시 감소하고 반면에 최대 H 몰분율은 약  $11.0\%$ 에서 최대를 나타낸다. 이상의 결과로부터 극단적으로 약한 합성가스-공기 화염조차도 열방출율은  $\Omega_{CH_4}$ 의 증가에 따라 증가한다. 이것은 훨씬 강한 메탄-공기 화염은 과다한 열전달과 라디칼 공유를 통해 극단적으로 약한 합성가스-공기 화염을 강하게 만든다는 것을 의미한다. 반대로,  $100 \text{ s}^{-1}$ 에서 더 강한 메탄-공기 화염은  $30 \text{ s}^{-1}$ 인 경우에 비해 화염간의 거리가 더 가까워 상호작용이 더 강해지기 때문에 화염소화에는 더 민감할 수 있다. 이것은 Fig. 1에서  $a_g$ 가  $30 \text{ s}^{-1}$ 에서  $100 \text{ s}^{-1}$ 로 증가하는 경우 소화경계 영역이 더 줄어들어 것으로부터 확인된다.

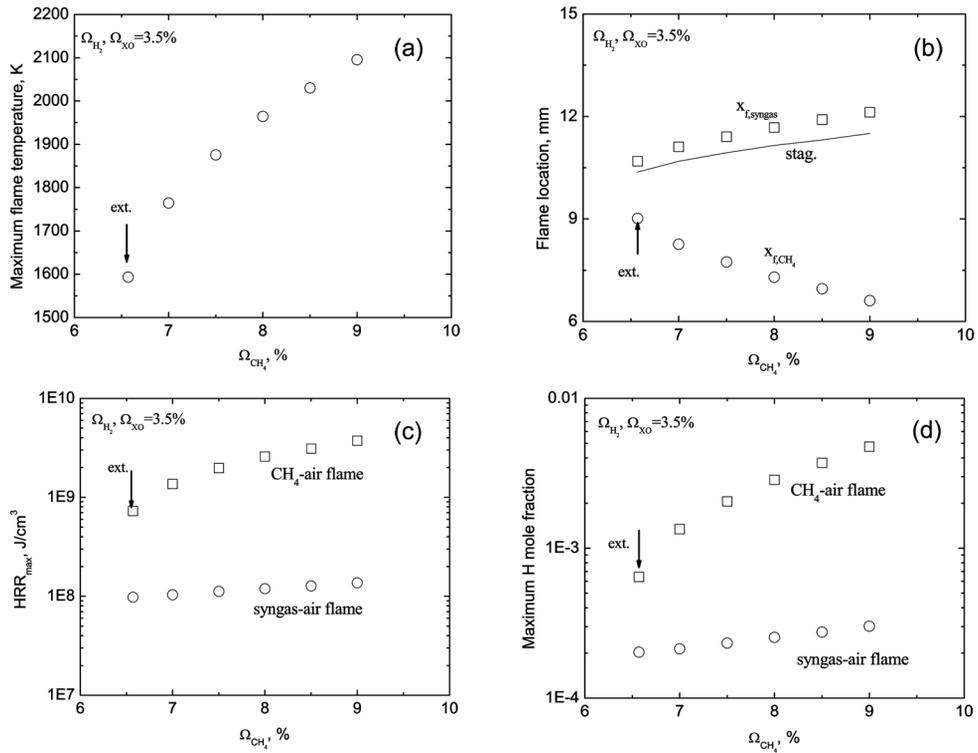


Fig. 6. Flame characteristics as a function of  $\Omega_{CH_4}$  for fixed  $\Omega_{H_2} = 3.5\%$  at  $a_g = 100 \text{ s}^{-1}$ .

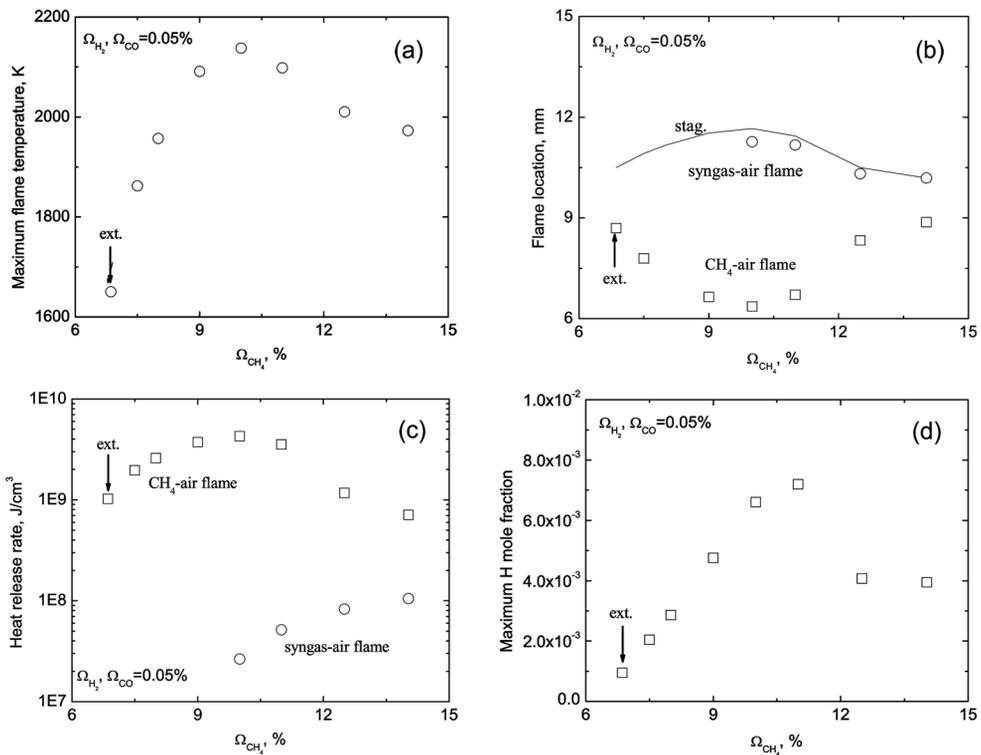


Fig. 7. Flame characteristics as a function of  $\Omega_{CH_4}$  for fixed  $\Omega_{H_2} = 0.05\%$  at  $a_g = 100 \text{ s}^{-1}$ .

#### 4. 결론

희박 메탄-공기 화염과 희박 합성가스 화염 사이의 후류 상호작용에 대한 수치해석이 수행되었고 다음과 같은 결론이 얻어진다.

1) 희박 합성가스 화염의 경우  $L_{eff}$ 는 1보다 약간 크지만 희박 수소-공기 혼합기의 영향으로 그리고 희박 메탄-공기 화염의  $L_D$ 가 1보다 작기 때문에 희박 소화경계는 경사진 형상을 갖는다. U.E.B.에서 모두 음의 화염 전파속도를 갖지만 L.E.B.에서는 양과 음의 화염전파속도를 모두 갖는다. 이러한 요인에 의해 음의 화염전파속도 영역은 비대칭의 날개 형상을 갖게 된다. 또한 화염 상호작용은 기존에 탄화수소 연료들로부터 알려진 루이스수에 의해 잘 알려진 거동을 따르는 것이 아니라 직접적인 상호작용의 요소들 즉, 두 화염 사이의 거리, 라디칼 공유, 화염온도와 같은 요인들의 의존성이 더 크다.

2)  $L_D < 1$ 인 희박 메탄-공기가 강한 화염의 경우에조차도  $a_g$ 의 증가에 따라 오히려 화염소화 경계는 축소되어 화염 소화는 일반적인 스트레치와  $L_D$ 의 상호 의존성보다는 화염 간의 상호작용에 훨씬 민감하게 의존함을 알 수 있다.

3) U.E.B.에서 나타나는 더 약한 메탄-공기화염(화염온도가 1,500 K 이상)과 더 강한 합성가스 화염(화염온도가 1,300 K 이하) 사이의 상호작용은 더 강한 화염으로부터 열전달에 의해 영향을 받는 것이 아니라 라디칼 공유가 더 약한 화염을 지탱하는 역할을 하게 된다.

#### 후 기

본 연구는 2015년 부경대학교 자율창의과제에 의해 지원을 받았고 이에 감사드립니다.

#### References

- [1] N. Peters, Laminar diffusion flamelet models in nonpremixed turbulent combustion, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 10 (1984) 319-339.
- [2] N. Peters, Laminar flamelet concepts in turbulent combustion, *Proc. Combust. Inst.*, 21 (1986) 1231-1250.
- [3] S. Ishizuka, C.K. Law, An experimental study on extinction and stability of stretched premixed flames, *Proc. Combust. Inst.*, 19 (1982) 327-335.
- [4] S.H. Sohrab, Z.Y. Ye, C.K. Law, An experimental investigation on flame interaction and the existence of negative flame speeds, *Proc. Combust. Inst.*, 20 (1984) 1957-1965.
- [5] S.H. Sohrab, Z.Y. Ye, C.K. Law, Theory of interactive combustion of counterflow premixed flames, *Combust. Sci. Technol.*, 45 (1986) 27.
- [6] S.H. Chung, J.S. Kim JS, C.K. Law, Extinction of interacting premixed flames: theory and experimental comparisons. *Proc. Combust. Inst.*, 21 (1986) 1845-1851.
- [7] J.S. Ha, C.W. Moon, J. Park, J.S. Kim, J.H. Yun, S.I. Keel, A study on flame interaction between methane-air and nitrogen -diluted hydrogen-air premixed flames, *Int. J. Hydrogen Energy*, 35 (2010) 6992-7001.
- [8] C.G. Fotache, Y. Tan, C.J. Sung, C.K. Law, Ignition of CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> versus heated air in counterflow: experimental and modeling results, *Combust. Flame*, 120 (2000) 417-426.
- [9] C.M. Vagelopoupos, F.N. Egolfpoulos, Laminar flame speeds and extinction strain rates of mixtures of carbon monoxide with hydrogen, methane, and air, *Proc. Combust. Inst.*, 25 (1994) 1317-1323.
- [10] I.C. Mclean, D.B. Smith, S.C. Taylor, The use of carbon monoxide/hydrogen burning velocities to examine the rate of the CO + OH reaction, *Proc. Combust. Inst.*, 25 (1994) 749-757.
- [11] M.J. Brown, I.C. Mclean, D.B. Smith, S.C. Taylor, Markstein lengths of CO/H<sub>2</sub>/air flames using expanding spherical flames, *Proc. Combust. Inst.*, 26 (1996) 875-881.
- [12] J. Natarajan, T. Lieuwen, J. Seitzman, Laminar flame speeds of H<sub>2</sub>/CO mixture effects of CO<sub>2</sub> dilution, preheat temperature, and pressure. *Combust. Flame*, 151 (2007) 104-109.
- [13] T.M. Vu, J. Park, O.B. Kwon, J.S. Kim, Effects of hydrocarbon addition on cellular instabilities in expanding syngaseair spherical premixed flames, *Int J Hydrogen Energy*, 34 (2009) 6961-6969.
- [14] S.G. Davis, A.V. Joshi, H. Wang, F. Egolfopoulos, An optimized kinetic model of H<sub>2</sub>/CO combustion, *Proc. Combust. Inst.*, 30 (2005) 1283-1292.
- [15] G. Yu, C.K. Law, C.K. Wu, Laminar flame speeds of hydrocarbon-air mixtures with hydrogen addition, *Combust. Flame*, 63 (1986) 339-347.
- [16] P. Dagat, A. Nicolle, Experimental and detailed kinetic modeling of hydrogen-enriched natural gas blend oxidation over extended temperature and equivalence ratio ranges, *Proc. Combust. Inst.*, 30 (2005) 2631-2638.

- [17] V. Di Sarli, A. Di Benedetto, Laminar burning velocity of hydrogen-methane/air premixed flames. *Int. J. Hydrogen Energy*, 32 (2007) 637-646.
- [18] J.S. Kim, J. Park, O.B. Kwon, E.J. Lee, J.H. Yun, S.I. Keel, Preferential diffusion effects in opposed-flow diffusion flame with blended fuels of CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>. *Int. J. Hydrogen Energy*, 33 (2008) 842-850.
- [19] J. Wang, Z. Huang, C. Tang, H. Miao, X. Wang, Numerical study of the effects of hydrogen addition on methane-air mixtures combustion, *Int. J. Hydrogen Energy*, 34 (2009) 1084-1096.
- [20] E. Hu, Z. Huang, J. He, C. Jin, J. Zheng, Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane-hydrogen-air flames, *Int. J. Hydrogen Energy*, 34 (2009) 4876-4888.
- [21] C.M. Vagelopoupos, F.N. Egolfpoulos, Laminar flame speeds and extinction strain rates of mixtures of carbon monoxide with hydrogen, methane, and air, *Proc. Combust. Inst.*, 25 (1994) 1317-1323.
- [22] R.J. Kee, J.A. Miller, G.H. Evans, G. Dixon-Lewis, A computational model of the structure and extinction of strained, opposed flow, premixed methane-air flame. *Proc. Combust. Inst.*, 22 (1988) 1479-1494.
- [23] A.E. Lutz, R.J. Kee, J.F. Grcar, F.M. Rupley, A fortran program for computing opposed-flow diffusion flames. Sandia National Laboratories Report, 1997, SAND 96-8243.
- [24] Y. Ju, H. Guo, K. Maruta, F. Liu, On the extinction limit and flammability limit of non-adiabatic stretched methane-air premixed flames. *J. Fluid Mech.*, 342 (1997) 315.
- [25] R.J. Kee, F.M. Rupley, J.A. Miller, Chemkin II: a fortran chemical kinetics package for analysis of gas phase chemical kinetics. Sandia National Laboratories Report, 1989, SAND 89-8009B.
- [26] R.J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M.E. Coltrin, J.A. Miller, A fortran computer code package for the evaluation of gas phase multi-component transport. Sandia National Laboratories Report, 1994, SAND 86-8246.
- [27] H. Sun, S.I. Yang, G. Jomaas, C.K. Law, High-pressure laminar flame speeds and kinetic modeling of carbon monoxide/hydrogen combustion. *Proc. Combust. Inst.*, 31 (2007) 439-446.
- [28] S.G. Davis, A.V. Joshi, H. Wang, F. Egolfpoulos, An optimized kinetic model of H<sub>2</sub>/CO combustion. *Proc. Combust. Inst.*, 30 (2005) 1283-1292.
- [29] J. Park J, D.S. Bae, M.S. Cha, J.H. Yun, S.I. Keel, H.C. Cho, K.T. Kim, Ha JS. Flame characteristics in H<sub>2</sub>/CO synthetic gas diffusion flame diluted with CO<sub>2</sub>: effects of flame radiation and mixture composition. *Int. J. Hydrogen Energy*, 33 (2008) 7256-7264.
- [30] G.P. Smith GP, D.M. Golden, N.W. Frenklach, M.B. Eiteneer, M. Goldenberg, C.T. Bowman, R. K. Hanson, S. Dong, W.C. Gardiner, Jr. V.V. Lissianski, Z. Qin, Available from: [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech).
- [31] R. Addabbo, J.K. Bechtold, M. Matalon, Wrinkling of spherically expanding flames, *Proc. Combust. Inst.*, 29 (2002) 1527-35.