

# 상호작용 하는 H<sub>2</sub>-공기/CO-공기 예혼합화염에 미치는 H<sub>2</sub> 선호 확산 영향에 대한 수치적 연구

정용호\* · 박 정\*\*\* · 권오봉\*\* · 길상인\*\*\* · 윤진한\*\*\*

## Numerical Study on H<sub>2</sub> Preferential Diffusion Effect in Downstream Interactions between Premixed H<sub>2</sub>-air and CO-air Flames

Yong Ho Chung, Jeong Park, Oh Boong Kwon, Sang In Keel and Jin Han Yun

### ABSTRACT

The effects of preferential diffusion of hydrogen in interacting counterflow H<sub>2</sub>-air and CO-air premixed flames were investigated numerically. The global strain rate was varied in the range 30-5917 s<sup>-1</sup>, where the upper bound of this range corresponds to the flame-stretch limit. Preferential diffusion of hydrogen was studied by comparing flame structures for a mixed average diffusivity with those where the diffusivities of H, H<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> were assumed to be equal. Flame stability diagrams are presented, which show the mapping of the limits of the concentrations of H<sub>2</sub> and CO as a function of the strain rate. The main oxidation route for CO is CO + O<sub>2</sub> → CO<sub>2</sub> + O, which is characterized by relatively slow chemical kinetics; however, a much faster route, namely CO + OH → CO<sub>2</sub> + H, can be significant, provided that hydrogen from the H<sub>2</sub>-air flame is penetrated and then participates in the CO-oxidation. This modifies the flame characteristics in the downstream interaction between the H<sub>2</sub>-air and CO-air flames, and can cause the interaction characteristics at the rich and lean extinction boundaries not to depend on the Lewis number of the deficient reactant, but rather to depend on chemical interaction between the two flames. Such anomalous behaviors include a partial opening of the upper lean extinction boundary in the interaction between a lean H<sub>2</sub>-air flame and a lean CO-air flame, as well as the formation of two islands of flame sustainability in a partially premixed configuration with a rich H<sub>2</sub>-air flame and a lean CO-air flame. At large strain rates, there are two islands where the flame can survive, depending on the nature of the interaction between the two flames. Furthermore, the preferential diffusion of hydrogen extends both the lean and the rich extinction boundaries.

**Key Words** : Chemical interaction, Downstream interaction, Flame stability map, Lewis number, Preferential diffusion

### 1. 서론

전 세계적으로 생산되는 에너지의 90% 정도가 화석 연료에 의존하고 있으며, 최근 에너지 수요의 증가로 인한 화석 연료의 고갈 문제가 대두되고 있다. 그에 따라 연소 분야에서 이러한 문제를 해결하기 위해 합성 가스, 매립지 가스, 코크스로 가스 등의 대체 연료에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 그리고 이러한 가스는 주로 수소, 일산화탄소, 이산화탄소, 질소, 메탄 등으로 이루어져 있으며, 앞서 열거

된 연료의 다양한 조성은 산업용 버너 혹은 엔진을 설계하는 데에 많은 어려움을 야기한다. 따라서 여러 연료의 점화, 층류 화염전파속도, Markstein Length의 측정을 비롯한 연소 특성과 여러 구성의 예혼합 화염의(H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub>) 반응 메커니즘을 설명하기 위해 여러 연구가 진행되었다[1-7].

앞서 언급했듯이, 낮은 발열량을 가진 H<sub>2</sub>, CO로 인해 합성가스를 사용하는 버너를 설계할 시에 심각한 화염 안정성 문제가 생기게 되며, 산업 및 발전소 등에서 현재의 버너 시설 개조를 통해 탄화수소-합성가스(또는 H<sub>2</sub>) 혼합 가스의 연소 특성에 대해 연구가 진행되고 있다[8-10].

대향류 유동장에서 합성가스-공기 예혼합 화염과 탄화수소-공기 예혼합 화염의 후류 상호작용은 매우

\* 부경대학교 의생명융합협동과정

\*\* 부경대학교 기계공학과

\*\*\*한국기계연구원 환경에너지기계본부

† 연락저자, jeongpark@pknu.ac.kr

중요하게 다뤄져야 할 연구 영역이다[11,12]. 그러나,  $\text{CH}_4$ -합성가스(또는  $\text{H}_2$ ) 예혼합 화염 같이 서로 다른 연료의 예혼합 화염들의 상호작용은 이중화염이라 할지라도 비대칭적으로 나타날 수 있으며, 실제로 같은 탄화수소 예혼합 화염 사이의 상호작용에서도 다소 다른 거동이 나타날 수 있다[13-16]. 따라서 서로 다른 연료의 후류 상호 작용을 설명하기 위해서는 다소 복잡하거나 변칙적인 현상을 포함한 예혼합 화염사이의 후류 상호 작용의 포괄적인 이해를 필요로 한다. 이를 명확히 밝히기 위해, 예혼합 합성가스(50%  $\text{H}_2$ +50%  $\text{CO}$ ) 간의 후류 상호 작용에서 선택 확산과 화염 스트레치의 영향에 대한 연구가 진행되었다[17,18].

화염 스트레치의 증가는 화염 안정화 영역의 형성에 중대하게 영향을 미치며, 결국 극단적인 스트레치가 증가하면 화염은 소화하게 된다. 또한, 매우 높은 스트레치의 화염의 화학적 영향은 부족 반응물의 루이스 수가 1보다 크다고 할지라도 과농 화염 소화 경계가 기울어진 형태를 가지며,  $\text{H}_2$ 의 선택 확산이 화염의 상호작용을 희박 화염 소화 한계영역에서는 더 강하게 하고, 과농 화염 소화 한계영역에서는 더욱 약하게 한다는 것을 보인 바 있다.

이 같이 서로 다른 연료를 사용한 예혼합 화염의 후류 상호작용에 대한 연구에도 불구하고,  $\text{CO}$ 의 역할이 명확하게 밝혀진 바가 없다.  $\text{CO}$ -공기 예혼합 화염에서  $\text{CO}$ 는  $\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}$  반응을 거쳐 매우 느리게 산화 반응을 한다. 여기서  $\text{CO}$  산화 반응 과정 중  $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}$ 은 비교적 빠른 반응 과정이기 때문에  $\text{H}_2$ 가 매우 적은 양이라도 반응에 참여한다면 산화 반응물에 중요한 영향을 미치게 된다.  $\text{H}_2$ -공기 희박 예혼합 화염의 부족 반응물 루이스 수가 1보다 작기 때문에 화염간의 상호작용을 강하게 할 뿐만 아니라 수소-공기 화염으로부터 아주 작은 양이라도 투과하여  $\text{CO}$ -air 화염으로 향하게 되면  $\text{H}_2$ 는 선택 물질 및 열 수송에 중요한 역할을 할 뿐만 아니라  $\text{CO}$  산화 작용에도 참여하여 영향을 미칠 수 있다. 따라서  $\text{H}_2$ -공기와  $\text{CO}$ -공기 예혼합 화염의 후류 상호작용의 기초적인 이해는 향후 합성가스를 이용한 후류 상호작용에 관한 연구의 필수적이라 할 수 있다.

따라서  $\text{H}_2$ -공기와  $\text{CO}$ -공기 예혼합 화염의 후류 상호작용에서 수치 해석을 통해  $\text{H}_2$  선택 확산의 영향에 대해 연구가 진행되었다. 다양한  $\text{H}_2$ 와  $\text{CO}$  농도 조건에서 전체 신장율에 따른 화염 안정화 선도를 나타내었고,  $\text{H}_2$ 와  $\text{H}$ 의 선택 확산 영향을 명확하게 설명하기 위해  $\text{H}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ 의 확산계수가 모두 같다고 가정하였을 경우와 각 화학종의 확산계수를 고려한 경우의 비교를 통해  $\text{H}_2$ 의 선택확산효과를 제시하는 수치적 연구를 수행하였다.

## 2. 수치해석 및 방법

Fig. 1과 같이 대향류 유동 구조에서 후류 상호작용을 수치 해석하였다. 정체점 근처에서 1차원의 상사해를 갖는 대향류화염의 Oppdif 코드는 Kee에 의해 개발되고[19], Lutz에 의해 확장되었다[20]. 수치해석에 이용된 질량, 운동량, 화학종, 에너지에 관한 지배 방정식과 수치해석 방법에 대한 상세한 설명은 참고문헌 [20]에 잘 나타나 있으므로 여기서는 생략하기로 한다. 전체 신장율은 다음과 같이 정의하였다.

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

여기서  $V$ 는 노즐 출구에서 반응물의 유동속도를 나타내고,  $L$ 은 노즐 간격이며 첨자  $U$ 와  $L$ 은 각각 상부와 하부 노즐을 의미한다. 버너 간격은 15 mm로 고정하였다. 복사 열손실은 저 신장율화염에서 중요해지며, 화염의 두께 즉, 화염의 체적은  $\sqrt{a_g}$ 와 연관이 있다. 따라서 흡수계수가 높은  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ 에 대해 광학적 박 모델(optical thin model)을 사용하였다[21].

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

$$\text{where } K_p = \sum_{i=1}^3 P_i K_i, \quad I = \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CO} \quad (3)$$

여기서,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수이고,  $T$ 와  $T_\infty$ 는 각각 국소온도 및 대기 온도이며,  $K_p$ 는 평균 Plank 흡수 계수이다.  $P_i$ 와  $K_i$ 는 부분압과 화학종의 평균 Plank 흡수계수이며, 평균 Plank 흡수 계수는 온도의 다항식으로 얻어진다. CHEMKIN-기반 코드와 Tran-

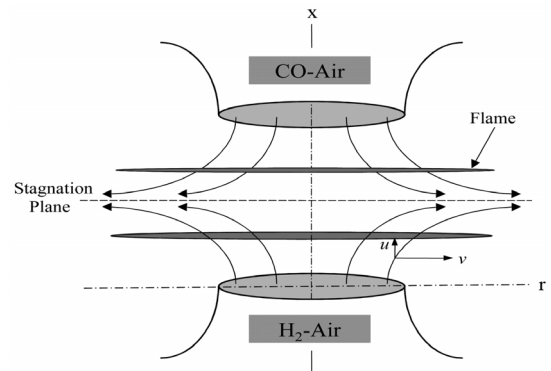


Fig. 1. Schematic diagram showing the interacting counterflow flame configuration.

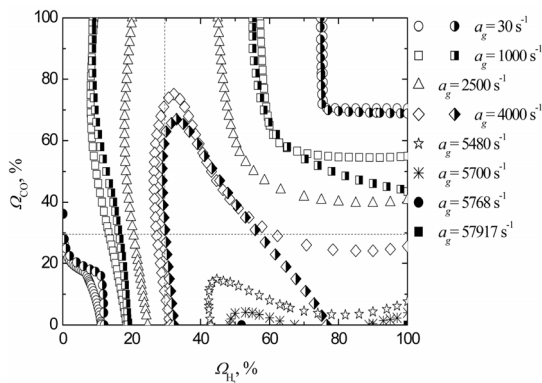
sport-기반 코드를 이용하여 지배 방정식의 해를 얻었다[22,23].

대기 압력은 1 atm이고 상부와 하부의 온도경계는 298 K이다. 각각의 노즐 출구에서 상부와 하부 유동 속도를 명시하기 위해 plug flow 속도 경계 조건을 사용하였다. 격자점은 200보다 크고 500보다 작은 적당한 격자를 사용하였다. Davis와 Sun의 연구에서 H<sub>2</sub>-CO 화염의 상세 반응 메커니즘은 스트레치를 받지 않은 층류 화염전파 속도에 대해 실험결과와 수치해석 결과의 비교로부터 잘 일치함을 보인 바 있다[3-5,7]. 따라서 본 연구에서는 Davis 모델을 사용하였으며, H<sub>2</sub> 선호 확산의 영향을 설명하기 위해 혼합기 평균 확산계수(mixture-averaged diffusivity, MAD)로 계산한 경우와  $D_{H_2} = D_H = D_{N_2}$ (RMAD)로 가정하여 얻어진 결과를 비교함으로써 H<sub>2</sub>의 선호확산이 화염 구조 및 화염 소화에 미치는 효과를 조사하였다.

## 3. 결과 및 논의

### 3.1. 화염 안정화 선도

Fig. 2는 상호작용하는 H<sub>2</sub>-공기와 CO-공기 예혼합 화염의 전체 신장율에 따른 다양한 연료 농도의 화염 안정화 선도를 나타낸 것이다. 부족 반응물의 루이스 수의 범위는 과농 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 조건에서  $1.718 < Le_D < 2.045$ 이고, 희박 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 조건일 경우  $0.285 < Le_D < 2.045$ 이었다. 그리고 희박 CO-공기 예혼합 조건일 경우  $1.1055 < Le_D < 2.074$ 이고, 과농 CO-공기 예혼합 조건에서  $1.1055 < Le_D < 2.074$ 으로 나타났다. 전체 신장율  $30 \text{ s}^{-1}$ 에서 과농 화염 소화 경계선



**Fig. 2.** Flame stability diagram, mapping the extinction limit for various fuel concentrations as a function of the strain rate. The hollow symbols show the extinction boundaries calculated using MAD, and the half-solid symbols are those calculated with RMAD.

(rich extinction boundary, REB)은 사각형의 형태로 나타났다, 부족 반응물의 루이스 수는 1보다 컸으며, 이는 화염간의 상호작용이 약함을 의미한다[11-18]. 또한, REB는 전체 신장율이  $2500 \text{ s}^{-1}$ 까지 증가함에 따라 기울어진 형태를 띠게 되는데, 이는 신장율이 증가하면서 두 화염사이의 거리가 좁아지고, 이 때문에 두 화염 사이의 상호작용이 chain carrier radicals(H, O, OH)의 공유를 통해서 더 강해지게 되기 때문이다[17].

MAD일 경우 희박 화염 소화 경계선(lean extinction boundary, LEB)이 전체 신장율  $30 \text{ s}^{-1}$ 에서 매우 경사진 형태를 갖는데, 이는 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염( $Le_D < 1$ )과 CO-공기 예혼합 화염과의 상호작용이 강함을 의미한다.

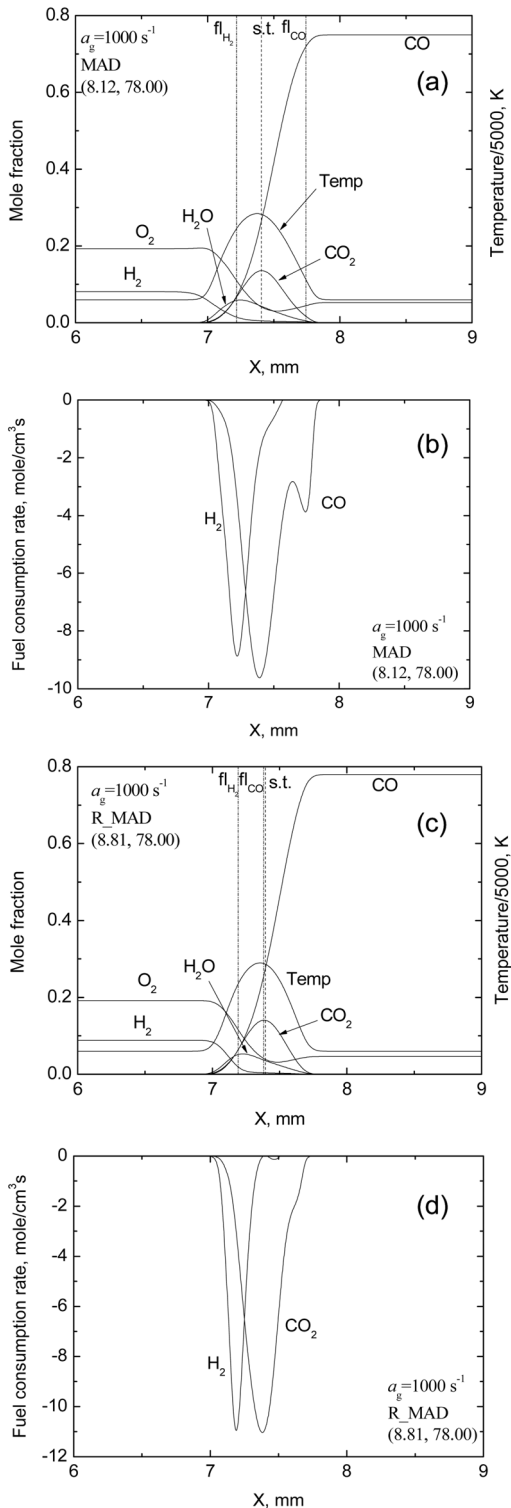
전체 신장율이  $4000 \text{ s}^{-1}$ 일 때를 살펴보면, LEB와 REB가 서로 연결되어 섬 형태를 이루는 것을 볼 수 있다. 특히,  $\Omega_{H_2} \geq 32.2\%$ 일 때, MAD의 그래프가  $\Omega_{CO}$ 에 따라 감소후 증가하는 형태를 보인다. 또한,  $24.12\% \leq \Omega_{CO} \leq 25.59\%$ 인 영역에서는 동일한  $\Omega_{CO}$ 에서  $\Omega_{H_2}$ 가 세 가지의 해를 갖게 되고, 이러한 경향은 전체 신장율  $5480 \text{ s}^{-1}$ 의 그래프에서 더욱 뚜렷이 나타난다.

화염 안정화 선도는 MAD가 RMAD에 비해 더 넓게 나타나는 모습을 볼 수 있다. 이는 H<sub>2</sub>의 선호 확산에 의해 과농 및 희박영역의 화염 안정화 영역이 확대됨을 의미한다. 또한, MAD와 RMAD의 차이가 적은 REB와는 달리 LEB의 RMAD가 더 기울어지는 경향을 보이며 MAD와 차이를 보이고 있다. 이는, RMAD 방법과는 달리 MAD의 경우에서 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염의  $Le_D$ 가 1보다 매우 작기 때문이며, 이러한 경향은 비슷한 종류의 이전 연구 결과를 기반으로 이해된다[13-16].

### 3.2. 희박 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염의 H<sub>2</sub> 선호 확산이 화염 안정화에 미치는 영향

전체 신장율의 증가는 주위로의 전도 열손실의 증가를 유발하여 과농 및 희박 예혼합 화염의 화염 안정화 영역을 감소시키는 것으로 알려져 있다[17]. 그러나 전체 신장율  $1000 \text{ s}^{-1}$ 에서 LEB 상부 화염 소화 경계가 열려있는 현상은 앞서 언급한 화염 소화 메커니즘으로 설명하기에 명확하지 않은 부분이 있다. 따라서 이에 대해 자세히 알아보기 위해 RMAD 및 MAD에서 전체 신장율  $1000 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Omega_{CO} = 78.0$  조건의 화염 구조 및 연료 소비율을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3의 (a), (b)을 살펴보면 희박 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염으로부터 투과된 O<sub>2</sub>와 과농 CO-공기 예혼합 화염에서 투과된 CO로 형성되는 확산화염으로 이루어진 삼지화염의 구조로 나타난다는 것을 알 수 있

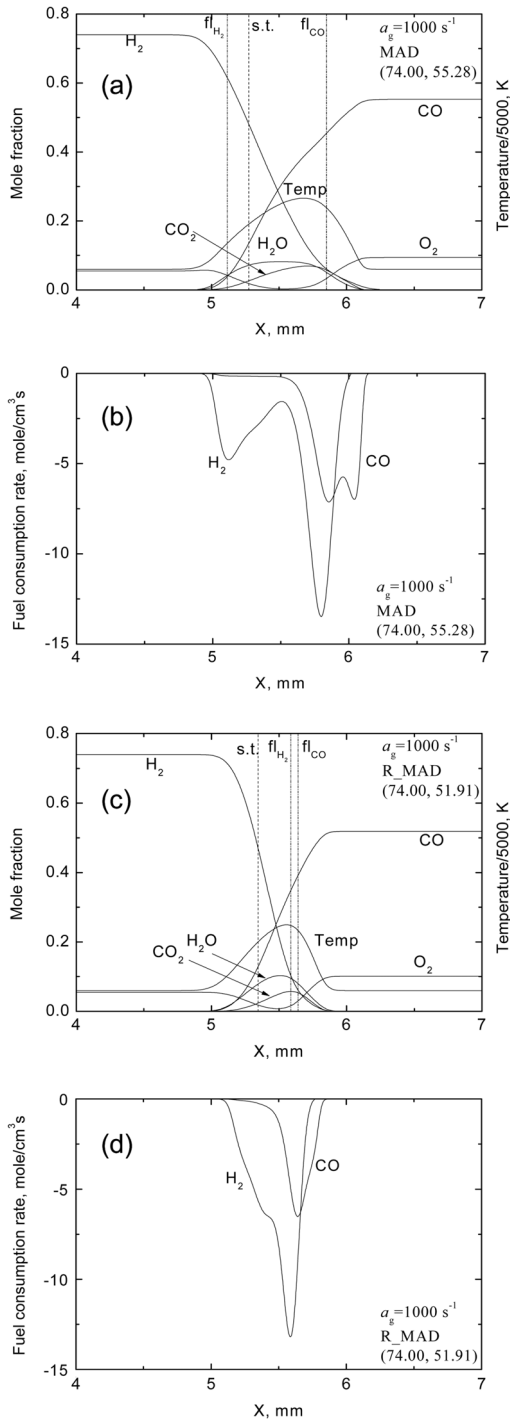


**Fig. 3.** Flame structures and fuel consumption rates at the partial opening of the extinction boundary, (a), (b) with MAD and (c), (d) with RMAD, both at  $a_g = 30 \text{ s}^{-1}$ .

다. 한편, Fig. 3(a)에서 나타난 바와 같이, H<sub>2</sub>의 투과가 충분히 이루어지고 있으며, 이 때문에 서론에서도 언급 했듯이 H<sub>2</sub>가 CO의 산화반응에 참여할 수 있게 된다. 이러한 상황에서 확산화염은 더욱 안정되게 되며, 이 영향으로 CO-공기 예혼합 화염이 계속해서 유지될 수 있게 된다. 이처럼, H<sub>2</sub>가 투과하여 CO 산화반응에 참여하기 때문에, 만일 충분한 양의 H<sub>2</sub>가 공급되지 못한다면, H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염은 불안정하게 되며 삼지 화염을 유지 할 수 없게 된다. 이러한 메커니즘이 Fig. 2의 LEB에서 볼 수 있었던 상부 화염 소화 경계가 열려있는 모양을 갖는 것을 잘 설명해 줄 수 있다. 그리고 Fig. 3의 (b)보다 (d)에서 희박 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염에서 H<sub>2</sub>의 소비율이 더 증가하는 것으로 보아 CO-공기 예혼합 화염으로 투과되는 H<sub>2</sub>의 양이 감소하게 되고, 결국 앞서 언급한 메커니즘으로 삼지 화염이 유지되지 못하고 CO-공기 예혼합 화염이 Fig. 3(c)와 같이 확산화염과 합쳐지게 된다.

### 3.3. 고 신장율의 과농 H<sub>2</sub>-공기 및 희박 CO-공기 예혼합 화염에 대한 H<sub>2</sub> 선호 확산 영향

화염 안정화 선도의 REB부분을 보면 전체 신장율을  $30 \text{ s}^{-1}$ 일 때 직각모양으로 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 H<sub>2</sub>-공기와 CO-공기 혼합물의 부족 산화물의 루이스 수가 1보다 크기 때문이다[11-18]. 그 후, 전체 신장율이 증가함에 따라 화염간의 화학적 상호작용에 의해 REB는 기울어지는 형태를 띠게 된다[17]. 그러나 전체 신장율  $1000 \text{ s}^{-1}$ 을 보면 RMAD일 경우 MAD에 비해 눈에 띄게 기울어진 모습을 볼 수 있다. 이를 자세히 알아보기 위해 Fig. 4에 전체 신장율을  $1000 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Omega_{H_2} = 0.86$ 일 때 MAD와 RMAD의 화염구조와 연료 소비율을 비교하여 나타내었다. Fig. 4(a)를 보면 부족 산화물의 루이스 수가 1보다 크기 때문에 화염간의 상호작용이 약해지게 되어 정체점을 넘어가지 않은 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)의 H<sub>2</sub> 및 CO의 소비율 선도는 두 예혼합화염 사이에 후류 상호작용이 있음에도 불구하고 두 개의 변곡점을 나타내고 있다. 첫 번째 CO 소비 변곡점을 보면  $\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}$ 의 반응이 주로 이루어지기 때문에 H<sub>2</sub>의 소비는 그다지 크지 않고, 하지만 두 번째 변곡점에는 과농 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염으로부터 투과되어 온 H<sub>2</sub>가 CO 산화반응에 참여하고 있기 때문에 H<sub>2</sub> 소비율 역시 높게 나타난다. 이러한 현상은 두 화염간의 상호작용이 상대적으로 약하다는 것을 의미하며, 이 때문에 Fig. 2의 REB에서 나타난 전체 신장율  $1000 \text{ s}^{-1}$ 에서 MAD가 경사를 갖게 된다. 그러나 RMAD에 해당하는 Fig. 4(c)와 (d)는 H<sub>2</sub>와 H의 확산에 제한이 있기 때문에 부족 반응물에 해당하는 것이 O<sub>2</sub>가 되고, 따라서 루이스 수에 영향을 미치지 않는다. 이러



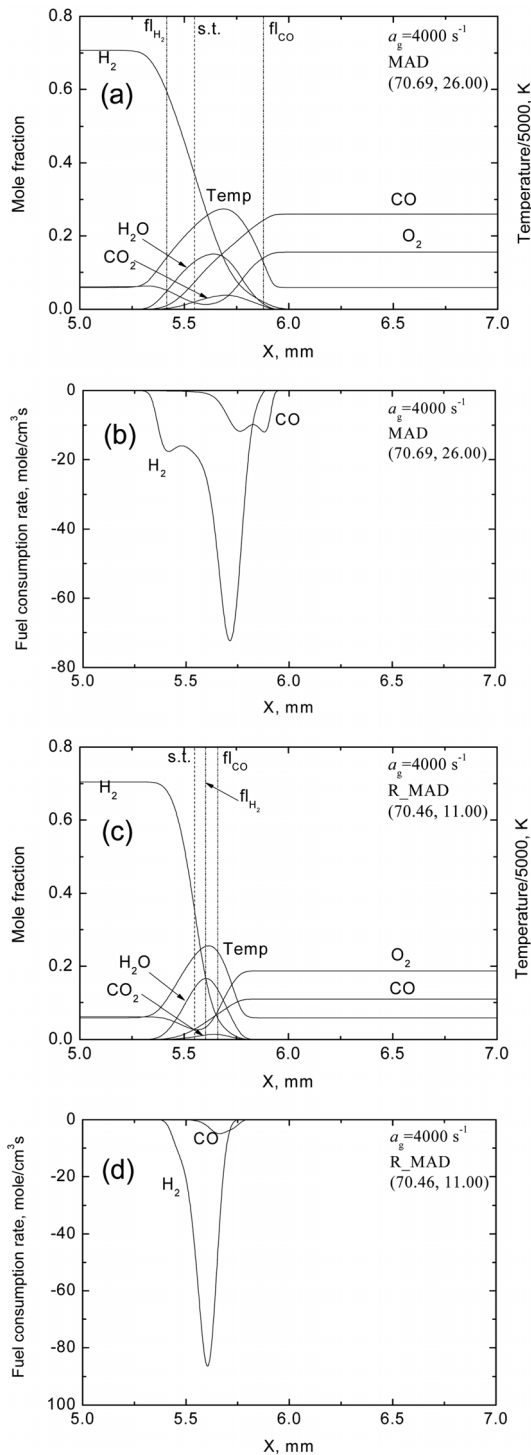
**Fig. 4.** Flame structures and fuel consumption rates at the rich extinction boundary, (a), (b) with MAD and (c), (d) with RMAD, both at a strain rate of  $a_g = 1000 \text{ s}^{-1}$ .

한 확산에 있어서의 제한은 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염의 반응 속도를 느리게 하고, 따라서 화염 전파속도와

화염 온도 또한 MAD에 비해 감소하게 된다. 이러한 상황에서 Fig. 4(c)와 같이 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염이 정체 점을 지나 위치하면, CO-공기 예혼합 화염으로 제공되는 H<sub>2</sub>가 많아지고, Fig. 4(d)와 같이 CO 소비율 선도는 하나의 변곡점을 갖는 형상으로 나타난다. 이러한 영향은 두 화염간의 거리를 감소시키며, 따라서 두 화염간의 화학적 상호작용을 강화시키는 결과를 갖게 한다.

한편, 전체 신장율이 더욱 증가하게 되면 REB는 Fig. 2의  $4000 \text{ s}^{-1}$ 와 같은 형상을 갖게 된다. 이는 두 화염간의 거리가 감소함에 따라 화학적 상호작용이 활발해졌기 때문으로 이해될 수 있다. 그러나 RMAD의 그래프와는 달리 MAD인 경우 화염 소화 한계가 단조롭게 감소하는 형상이 아닌 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이게 된다. 이러한 경향은 두 고신장율 화염의 상호작용의 영향만으로 설명하기에 충분하지 않다[17]. Fig. 5는 전체 신장율  $4000 \text{ s}^{-1}$  일 때, 화염 구조 및 연료 소비율을 나타내고 있다. Fig. 5(a)를 보면 두 화염 모두 정체점을 넘어서 형성되어 있지 않고, Fig. 5(b)의 그래프에서 연료 소비율이 두 개의 변곡점을 갖는 것으로 보아 삼지 화염 구조를 갖는다는 것을 알 수 있다. H<sub>2</sub>의 소비율 선도의 두 번째 변곡점에 해당하는 위치에서 각각의 화염에서 투과해온 H<sub>2</sub>와 CO가 만나 H<sub>2</sub>가 반응속도가 비교적 느린 CO를 대신하여 화학 반응에 활발히 참여하게 되며, 이는 두 예혼합 화염 보다 확산화염이 더욱 강하다는 것을 의미한다. 이러한 상황에서 H<sub>2</sub>-공기 과농 예혼합화염과 CO-공기 희박 예혼합 화염이 강한 확산화염에 기생하는 화염 구조를 나타내게 되고, 화염을 계속 유지 할 수 있게 된다[19].

한편, 확산의 제한은 H<sub>2</sub>-공기 화염의 반응 속도를 감소시키는 결과를 초래하며, 화염 전파속도 역시 감소시키게 된다. 그러나 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염이 정체점을 넘어 CO-공기 예혼합 화염 근처에 형성되어, 충분한 양의 H<sub>2</sub>를 공유하게 된다. 따라서 Fig. 5(b)처럼 두 개의 변곡점이 아닌 Fig. 5(d)와 같이 하나의 변곡점을 갖게 되며, 삼지 화염이 아닌 단일 가지의 구조를 갖는 화염이 형성된다. 이 현상은 연료 농도 구배에 따른 삼지화염에 대한 지난 연구 결과에 의해 설명될 수 있다[26]. 또한, 앞서 언급했듯이 확산의 제한으로 인해 H<sub>2</sub>-공기 화염의 반응 속도가 느려짐으로 인해 화염 소화 한계가 감소하는 것을 알 수가 있다. 한편, 연료 농도 구배가 증가하는 화염을 소화시키게 되는데, 확산의 제한 또한 정체점 근처에서의 연료 농도 구배를 증가시키므로, 여기서 RMAD 일 경우 화염 소화 한계가 감소하였던 현상의 이유를 찾을 수 있다.



**Fig. 5.** Comparison between the flame structures and fuel consumption rates at the extinction boundary, (a), (b) with MAD, (c), (d) with RMAD and (e), (f) with MAD in a partially premixed mixed configuration (i.e., a rich H<sub>2</sub>-air and lean CO-air flame), all with a strain rate of  $a_g = 4000 \text{ s}^{-1}$ .

## 4. 결론

H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염과 CO-공기 예혼합 화염의 후류 상호 작용과 H<sub>2</sub>의 선호 확산의 영향에 대해 수치적 연구가 진행되었으며, 결론은 다음과 같다.

1) 전체 신장율  $1000 \text{ s}^{-1}$ 에서 LEB 상부 화염 소화 경계가 열려있는 현상이 나타났으며, 이는 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염으로부터 CO-공기 예혼합 화염에게 투과하여 들어온 H<sub>2</sub>가 CO의 산화작용에 참여하였기 때문으로 판단된다. 이러한 H<sub>2</sub>의 선호 확산은 반응 속도를 더욱 빠르게 하며 희박 화염 소화 한계의 확장을 야기한다.

2) H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염과 CO-공기 예혼합 화염에서 MAD인 경우 H<sub>2</sub>의 선호 확산으로 인해 H<sub>2</sub>가 CO-공기 예혼합 화염으로부터 투과해온 CO의 산화작용에 참여하게 되며, 이로 인해 보다 빠른 화학 반응이 일어난다. 따라서, 확산화염의 강도는 더욱 강해지게 되고, 이 영향으로 삼지화염은 계속 유지되고, 이러한 메커니즘이 Fig. 2에서 나타난 LEB영역에 상부 화염 소화 경계가 열려있는 현상을 잘 설명해 주고 있다.

3) 고신장율의 과농 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염과 희박 CO-공기 예혼합 화염인 경우를 살펴보면, MAD에서는 과농 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염에서 투과해온 H<sub>2</sub>와 CO-공기 예혼합 화염으로부터 투과해온 CO가 만나서 H<sub>2</sub>가 참여한 보다 빠른 CO 산화 반응이 일어나게 된다. 따라서 강한 확산화염이 형성되며, 삼지 화염이 계속 유지되게 된다. 한편, RMAD인 경우에는 H<sub>2</sub>의 확산에 제한이 있기 때문에 과농 H<sub>2</sub>-공기 예혼합 화염에 기생하여 충분한 양의 H<sub>2</sub>를 공유하게 되고, 삼지 화염이 아닌 단일 가지의 화염을 형성하게 된다. 한편, 확산의 제한은 H<sub>2</sub>-공기 화염의 반응 속도를 감소시키는 결과를 초래하며, 화염 전파속도 역시 감소시키게 되는데, 이는 정체점 근처에서의 연료 농도 구배를 증가시키므로 화염 소화 한계를 감소시킬 야기한다.

## 후기

본 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의해 지원되었고 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Fotache CG, Tan Y, Sung CJ, Law CK. Ignition of CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> versus heated air in counterflow: experimental and modeling results. *Combust Flame* 2000;120:417-26.

- [2] Vagelopoupos CM, Egolfpoulos 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/H<sub>2</sub>/air flames using expanding spherical flames. *Proc Combust Inst* 1996; 26:875-81.
- [5] Natarajan J, Lieuwen T, Seitzman J. Laminar flame speeds of H<sub>2</sub>/CO mixture effects of CO<sub>2</sub> 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, Egolfpoulos F. An optimized kinetic model of H<sub>2</sub>/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 H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O 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] 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.
- [12] 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.
- [13] Ishizuka S, Law CK. An experimental study on extinction and stability of stretched premixed flames. *Proc. Combust. Inst.* 1982;19:327-35.
- [14] 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.
- [15] Sohrab SH, Ye ZY, Law CK. Theory of interactive combustion of counterflow premixed flames. *Combust Sci Technol* 1986;45:27.
- [16] Chung SH, Kim JS, Law CK. Extinction of interacting premixed flames: theory and experimental comparisons. *Proc Combust Inst* 1986;21:1845-51.
- [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 H<sub>2</sub>/CO syngas-air flames. *Int J Hydrogen Energy* 2012;37:12015-27.
- [19] Kee RJ, Miller JA, Evans GH, Dixon-Lewis G. A computational model of the structure and extinction of strained, opposed flow, premixed methane-air flames. *Proc Combust Inst* 1988;22:1479-94.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 정승욱, 박정, 권오봉, 길상인, 윤진한, “신장된 H<sub>2</sub>-공기와 CO-공기의 예혼합 화염 사이의 후류 상호작용에서 화염소화에 화학적 상호작용”, 한국연소학회지 투고중
- [25] Chung SH. Stabilization, propagation and instability of tribrachial triple flame. *Proc Combust Inst* 2007;31:877-892.