

# 상호작용하는 대향류 메탄-수소 부분에혼합화염의 CO 배출특성

박지웅\* · 오창보\*\* · 김태형\*\* · 박종호\*\*\*

## CO Emission Characteristics in the Interacting Counterflow Methane and Hydrogen Partially Premixed Flames

Ji-Woong Park, Chang Bo Oh, Tae-Hyung Kim and Jongho Park

### ABSTRACT

The CO emission characteristics of interacting hydrogen and methane partially premixed flames were numerically investigated. A counterflow geometry was introduced to establish interacting two partially premixed flames. A one-dimensional OPPDIF code was used to simulate the interacting flames. The GRI-v3.0 was used to calculate the chemical reactions. Emission index for CO(EICO) was evaluated to quantify the CO emitted from the interacting flames. The global strain rate and equivalence ratios for each flame( $\Phi_{CH_4}$  and  $\Phi_{H_2}$ ) were used as parameters to control the extent of interaction between two partially premixed flames. When  $\Phi_{CH_4}$  was kept to stoichiometric condition and  $\Phi_{H_2}$  was at rich condition, unburned  $H_2$  species of hydrogen flame was transported to the methane flame and affected reactions related with CO formation. When  $\Phi_{CH_4}$  increased from a stoichiometry to rich condition while  $\Phi_{H_2}$  was kept to stoichiometric condition, EICO increased initially, had a peak value at  $\Phi_{CH_4}=1.5$  and decreased gradually. This could be elucidated with an analysis for the elementary reactions related with CO formation.

**Key Words** : Flame interaction, CO emission index, Methane flame, Hydrogen flame

### 1. 서론

화석연료의 고갈과 환경오염의 문제로 인해 최근 청정에너지인 수소연료에 대한 관심이 증가하고 있다. 향후 수소연료의 사용이 증가된다면 수소의 안전관리상의 위험성에 대한 사전관리가 매우 중요하다. 만약 실내공간에서 수소연료를 사용 중에 누설과 같은 사고가 발생한다면 폭발이나 화재로 이어질 가능성이 높다. 실제로 근년에 들어서 수소저장소나 연료전지 사용 중의 수소폭발이나 화재사고의 발생빈도가 점차 증가되는 추세에 있다[1]. 이러한 사고들 중에서 수소화재가 가지는 특이한 점은 실내공간의 수소화재는 수소화재 자체로만 존재할 수도 있지만 주변의 탄화수소 가연물로 화재가 전파될 경우에는 수소화재와 탄화수소화재가 상호작용하는 시나리오로 전개될 가능성이 높다는 것이다.

수소화재는 주변이 밝은 상황에서는 가시적으로

잘 보이지 않으며 화염온도는 높지만 오염물질인 CO나 Soot 등을 배출하지 않는다. 반면에 통상의 가연물인 탄화수소계 연료에서 기인하는 화재는 적염의 성질을 보이며 화염온도는 수소화재보다 상대적으로 낮지만 오염물질인 CO나 Soot 등에서 기인하는 연기 발생량 또한 많다. 이렇게 특징이 상이한 두 개의 화재가 구획실 내부에서 상호작용하게 된다면 현재까지 알려진 통상의 화재와는 매우 다른 양상을 보일 가능성이 있어 두 개 화염간의 상호작용을 검토하기 위한 구체적인 연구가 필요하다.

상호작용하는 두 개의 화염에 관한 연구는 오래 전부터 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다. Sohrab 등[2]은 메탄과 부탄연료에서 기인한 두 개의 대향류 예혼합화염에 대하여 가연한계 및 하루 상호작용모드에 대하여 검토하여 상호작용하는 두 개의 대칭화염에서 연료의 가연한계가 넓어짐을 보고한 바 있다. Cheng 등[3]은 희박한 조건의 메탄 예혼합화염이 고온의 연소생성물과 상호작용하는 경우에 극희박 연소가 가능함을 실험과 수치계산을 통해 확인하였다. 그리고 이러한 조건에서 다양한 화학반응기구의 실험에 대한 예측성능을 비교하였다. 본 연구팀은 선행 연구를 통해 대향류 연소장에서 메탄-수소 부분예혼

\* 부경대학교 안전공학과

\*\* 한국전력공사 전력연구원 그린에너지연구소

\*\*\*충남대학교 기계공학과

† 연락저자, cboh@pknu.ac.kr

**Table 1.** Numerical simulation cases and corresponding compositions of the methane- and hydrogen-side mixtures

Case	$\Phi$		Volume Percentage (%)	
	CH <sub>4</sub> /Air	H <sub>2</sub> /Air	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>
S - S	1.0	1.0	9.5	29.6
R2 - R2	2.0	2.0	17.3	45.6
R4 - R4	4.0	4.0	29.6	62.7
S - R4	1.0	4.0	9.5	62.7
R4 - S	4.0	1.0	29.6	29.6

합화염간의 상호작용에 대한 연구를 수행한 바 있다 [4-6]. 이 연구에서는 상호작용하는 두 화염의 화염구조에 대한 고찰과 총괄 스트레인율과 국소 스트레인율 간의 상관관계를 검토하였다. 또한 메탄화염이 수소화염과 상호작용하는 경우 가연한계가 넓어지며 높은 스트레인율 영역에서도 안정된 화염이 존재함을 보고하였다. 유사한 조건의 상호작용하는 화염에서 거시적인 화염 응답특성을 검토하여 수소측 당량비 조건이 과농해질 경우 충분히 산화되지 못한 H<sub>2</sub> 성분이 정체면을 넘어가 메탄측 화염의 열발생율에 영향을 주는 것을 확인한 바 있다[7].

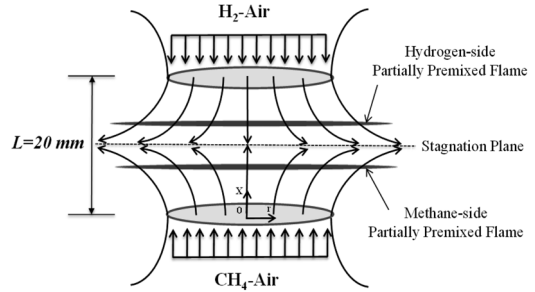
현재까지 상호작용하는 화염에 대하여 진행된 연구는 거시적인 화염응답특성이나 화염구조 혹은 가연한계에 많은 초점을 두었으며 오염물질 배출특성에 관한 연구는 수행된 바 없다. 특히 화재의 관점에서 중요한 오염물질의 하나가 CO인데 CO의 배출특성이 상이한 수소연료와 탄화수소연료에서 기인하는 화염이 상호작용할 때 CO 배출특성을 검토하는 것은 수소화염의 기본적인 특성을 이해하는 데에 유익할 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 대표적인 탄화수소계 연료인 메탄과 수소연료가 화재의 초기조건과 유사한 부분예혼합화염의 형태로 상호작용할 경우에 대한 수치계산을 수행하여 CO의 배출특성에 대해 검토하였다.

## 2. 수치계산

### 2.1. 대상화염 형상 및 계산방법

본 연구에서는 반응기구가 비교적 간단하면서 잘 정의된 메탄연료를 대표적인 탄화수소 연료로 하였다. 수소와 메탄에서 기인하는 화염들은 Fig. 1과 같이 기하학적으로 간단한 대향류 유동장에 형성되도록 하였으며 이들 두 개의 화염간의 상호작용에 대해 수치해석적으로 고찰하였다. 대향류화염은 상사(Similarity)를 이용하여 1차원 화염으로 모델링할 수 있기 때문에 수치해석적으로 간단하게 처리할 수 있



**Fig. 1.** Schematic diagram of interacting counterflowing partially premixed methane and hydrogen flames.

는 장점을 가지고 있다. 통상적인 화재는 비예혼합화염의 특성을 보이는 것으로 알려져 있지만, 점화 초기의 화재에서는 연료와 공기가 과농한 상태로 혼합된 부분예혼합화염의 특성을 보이는 경우도 많다. 1차원 대향류 연소장에서는 비예혼합화염간의 상호작용을 고려할 수 없기 때문에 본 연구에서는 수소 부분예혼합화염과 메탄 부분예혼합화염간의 상호작용에 대해서 검토하였다.

Table 1에는 본 연구에서 검토한 각 화염측의 당량비 조건을 표시하였다. 여기서 S와 R은 각각 이론혼합비(Stoichiometric; S)와 과농조건(Rich; R)을 의미하며, 이들 문자 뒤의 숫자는 당량비를 의미한다. 그리고 첫 번째와 두 번째 문자는 각각 메탄측과 수소측 혼합기 조건을 나타낸다.

수치계산에는 대향류 유동장의 화염해석에 적합한 OPPDIF 코드[8]를 이용하였다. 화학반응기구는 수소와 메탄 산화반응들을 포함하는 GRI-v3.0[9]을 사용하였다. 이 반응기구는 53개의 화학종과 325개의 소반응으로 구성되어 있다.

대향류 노즐간의 간격(L)은 20 mm로 고정하였었다. 상부 노즐측에서는 수소/공기 혼합기가 공급되며, 메탄/공기 혼합기는 하부 노즐측에서 공급되도록 하였다. 두 화염의 신장률과 상호작용정도를 나타내기 위한 파라메타로는 다음과 같이 정의되는 총괄 스트레인율(Global strain rate;  $a_g$ )[10]을 이용하였다. 이 후부터는 총괄 스트레인율을 스트레인율로 통일하여 사용하도록 하겠다.

$$a_g = \frac{2V_U}{L} \left( 1 + \frac{V_L \sqrt{\rho_L}}{V_U \sqrt{\rho_U}} \right) = \frac{2V_r V_L}{L} \left( 1 + \frac{1}{V_r} \frac{\sqrt{\rho_L}}{\sqrt{\rho_U}} \right) \quad (1)$$

여기서  $V$ 는 혼합기의 유속,  $\rho$ 는 혼합기의 밀도,  $L$ 은 노즐사이의 간격을 의미하며, 아래첨자  $U$ 와  $L$ 는 각각 수소혼합기 및 메탄혼합기 위치를 나타낸다. 또한  $V_r$ 은 두개의 혼합기 유속간의 비로써  $V_U / V_L$ 과 같이 정의된다.

복사효과를 고려한 선행연구를 통하여, 본 연구에

서 고려하고 있는 높은 스트레인을 영역에서는 복사 영향이 미소함을 확인하였다. 따라서 본 계산에서는 복사효과는 고려하지 않았다. 격자수는 스트레인이 높을 경우의 좁은 구간에서 발생하는 열발생률과 라디칼 농도를 충분히 잘 해상할 수 있도록 약 1,500~2,500개의 격자를 사용하였다.

## 2.2. CO 배출지수

CO 배출특성은 정량적으로 검토하기 위해 배출지수(Emission Index; g/kg)[11]를 도입하였다. 이 배출지수는 다양한 조건의 화염에 대해 소모된 연료 1 kg 당 발생하는 CO의 발생량을 정량적으로 비교하기 용이하게 하는 변수로서, 아래의 식 (2)와 같이 정의된다.

$$EI_{CO} = \frac{1000 \times \int_0^L W_{CO} \dot{\omega}_{CO} dx}{-\int_0^L W_F \dot{\omega}_F dx} \quad (2)$$

여기서,  $W_{CO}$ 와  $W_F$ 는 CO와 메탄연료의 분자량,  $\dot{\omega}_{CO}$ 와  $\dot{\omega}_F$ 는 CO와 메탄의 생성률을 나타낸다. 그리고,  $L$ 은 앞에서 언급한 노즐간의 간격을 의미한다. CO는 메탄연료에서 기인하는 화학종이기 때문에 EICO 계산 시 분모의 연료는 메탄만을 이용하여 계산하였다.

## 3. 결과 및 검토

### 3.1. 스트레인을 변화에 따른 CO 배출특성

Fig. 2는 스트레인을(ag) 변화에 따른 CO 배출지수(EICO)의 변화 경향을 보여주고 있다. 결과를 보면 전체적으로 스트레인을 증가에 따라서 EICO는 일정한 수준을 유지하거나 완만하게 증가하는 것을 알 수 있다. CO는 메탄화염측에서 발생하기 때문에 수소화염의 당량비 조건이 같더라도 메탄화염의 당량비 조건이 다르게 되면 EICO 값은 차이를 보이게 된다. 메탄화염이 이론혼합비 조건인 S-S와 S-R4 조건에서는 스트레인을 증가할수록 EICO도 서서히 증가하는 경향을 보인다. 그리고 메탄측 당량비조건을 동일하게 이론혼합비로 공급하였음에도 불구하고 수소측 당량비조건을 과농조건으로 공급한 조건(S-R4)에서는 화염이 존재하는 영역에서는 양측이 이론혼합비조건(S-S)보다 높은 EICO값을 보인다. 메탄측을 과농으로 공급하게 되는 R2-R2, R4-S 그리고 R4-R4 조건에서는 스트레인의 증가에 따라서 EICO는 거의 일정하거나 미소하게 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 조건들에서는 이미 메탄화염의 가연한계[12]인 당량비 1.7을 훨씬 초과하는 상태에서

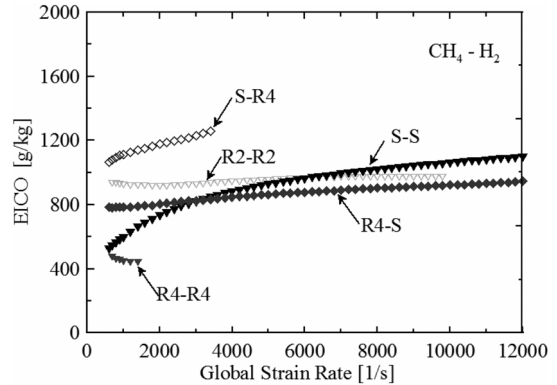
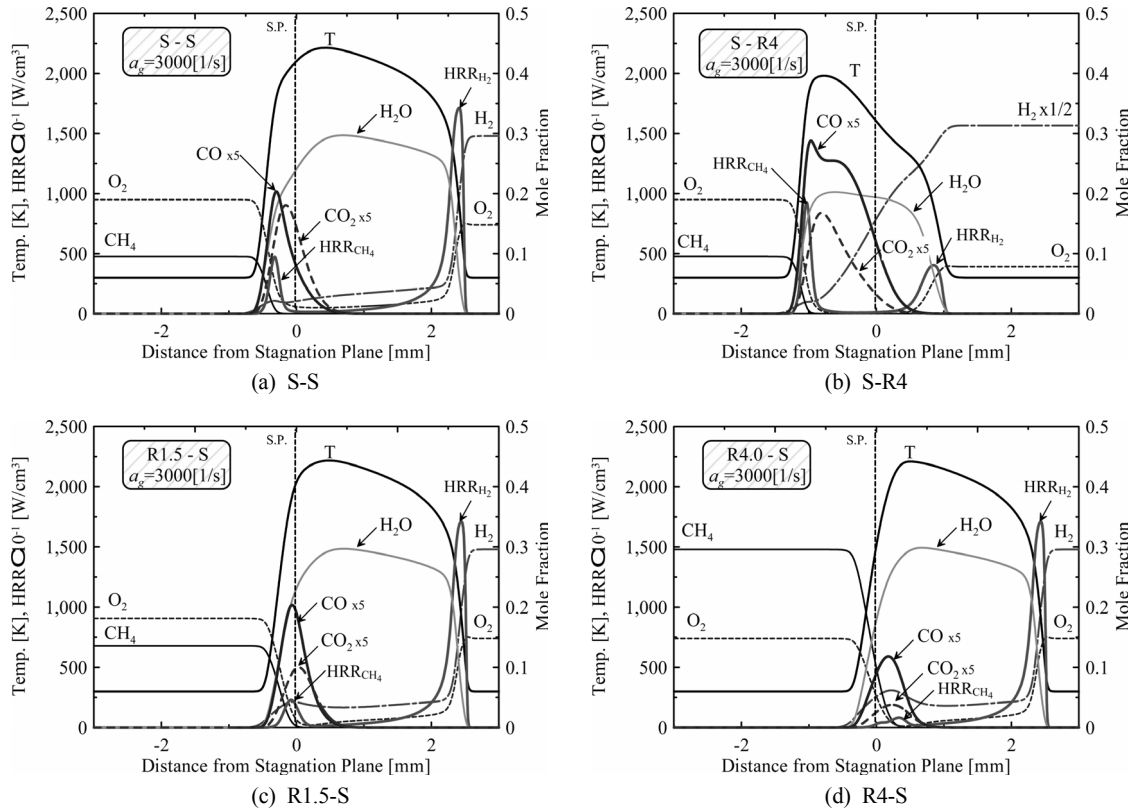


Fig. 2. Emission Indices of CO for the interacting partially premixed methane and hydrogen flames as functions of global strain rates.

도 화염이 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 메탄화염이 반응강도가 훨씬 강한 수소측 화염의 영향을 받기 때문이다[7]. 메탄측을 과농으로 공급하게 되면 메탄측 화염이 정체면을 넘어서 수소측에 위치하게 되어 음의 화염전파속도(Negative flame speed)를 가지게 된다.

Fig. 3에서는 다양한 당량비 조건에서의 화염구조를 고정된 스트레인을에서 도시화 하였다. 각 그림의 결과는 정체면(수직점선)이 좌표 0이 되도록 수정된 좌표상에 도시되었는데, 이 때 음의 좌표는 정체면을 기준으로 메탄화염측, 양의 좌표는 수소화염측을 의미한다. 그림 Fig. 3(a)~(b)에서 보면, 동일한 스트레인을에서 메탄측 당량비 조건이 동일하게 공급하더라도 수소측 당량비 조건이 과농해지면 수소화염의 강도가 많이 약해지기 때문에 화염 최고온도의 위치도 수소측 화염대에서 메탄측 화염대로 이동한 것을 알 수 있다. 또한 S-R4 조건에서는 공급한 수소연료가 충분히 산화되지 못한 상태로 메탄측 화염으로 전달되는 것을  $H_2$  화학종의 농도구배를 통해서 확인할 수 있다. CO 농도분포에서는 수소측 당량비 조건이 과농해지면 CO 몰분율 최고값이 증가하며 분포폭도 넓어지는 것을 알 수 있다. 이것은 과농한 수소화염에서 메탄화염측으로 전달되어온  $H_2$ 성분이 CO의 생성과 관련된 반응에 영향을 주기 때문이다.

Fig. 3(a), (c) 및 (d)의 화염구조를 살펴보면 수소측 당량비조건이 동일하게 공급되었음에도 불구하고 메탄측 당량비조건을 과농하게 할수록 메탄화염측 최고 열발생율 위치(화염면으로 정의함)는 정체면을 건너 수소화염 측으로 이동하여 음의전파속도를 갖는 복잡한 화염구조를 갖는다. 메탄화염측 강도가 매우 낮아진 R4-S조건에서는 CO와  $CO_2$ 의 농도가 매우 낮아지고 있음을 알 수 있다. 이렇듯 상호작용하는 메탄-수소 부분예혼합화염은 통상의 메탄 대항

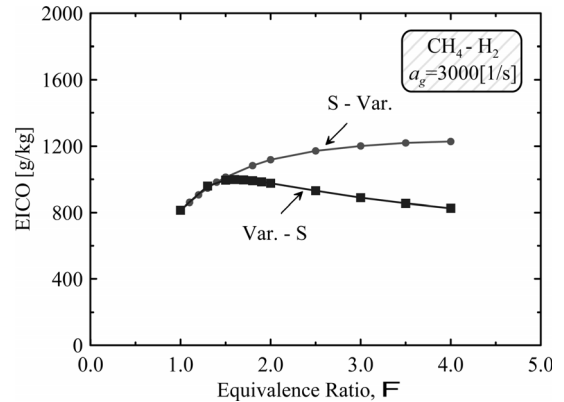


**Fig. 3.** Flame Structure of interacting counterflowing partially premixed methane and hydrogen flames at  $a_g = 3000 \text{ s}^{-1}$ : (a) S-S, (b) S-R4. (c) R1.5-S, and (d) R4-S.

류 부분예혼합화염과는 달리 복잡한 화염구조를 갖게 되고 이러한 화염구조가 CO의 배출특성에 크게 영향을 미치게 된다. 이에 대해서는 뒤에서 자세히 설명하도록 하겠다.

### 3.2. 당량비 변화에 따른 EICO

앞에서 설명한 바와 같이 EICO 경향은 CO의 생성과 직접적으로 연관이 되는 메탄측 당량비 조건뿐만 아니라 수소측 당량비 조건에도 영향을 받는 것을 확인하였다. 이러한 경향을 좀 더 자세히 검토하기 위해서 Fig. 4에서는  $a_g = 3000 \text{ s}^{-1}$ 으로 고정된 조건에서 양측 당량비 조건을 부분예혼합화염 조건내에서 변화시키며 EICO의 변화를 관찰하였다. 먼저 메탄측 당량비 조건을 이론혼합비로 고정시킨 상태에서 수소측 당량비 조건을 증가시킬 경우(S-Var)의 EICO는 점차 증가하게 되는데 그 증가율은 점차 완만해지는 경향을 보인다. 반대로 수소측 당량비 조건을 고정시킨 상태에서 메탄측 당량비 조건을 증가시킬 경우(Var-S)는 EICO가 증가하는 경향을 보이다가  $\Phi_{\text{CH}_4} \approx 1.5$  조건 이후 다시 감소하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.



**Fig. 4.** Emission Indices of CO for the interacting partially premixed methane and hydrogen flames with the variation of equivalence ratios of each mixtures.

#### 3.2.1. $S(\Phi_{\text{CH}_4})\text{-Var}(\Phi_{\text{H}_2})$ 조건

메탄화염측 당량비조건을 이론혼합비 조건으로 고정시킨 상태에서 수소화염측 당량비 조건을 점차 과농하게 증가시킬 경우의 EICO의 증가이율을 정량적으로 검토하기 위해서, Fig. 5에서는 CO의 생성

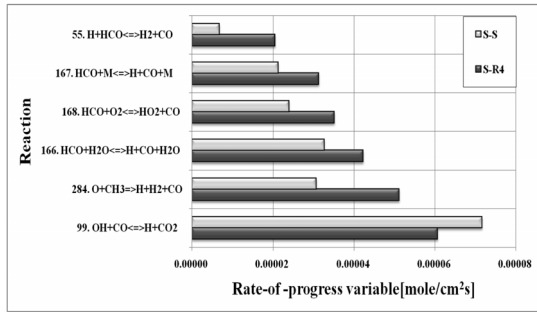
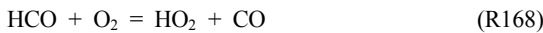
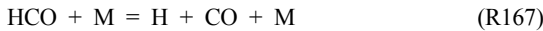
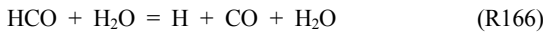


Fig. 5. Key chemical reactions that play important roles to formation of CO species of S-S and S-R4 conditions at  $a_g = 3000 \text{ s}^{-1}$ .

에 기여하는 소반응들의 변화를 검토하였다. CO의 생성과 관련된 소반응들은 CO의 양의 생성에 기여하는 소반응들인 (R55), (R166), (R167), (R168) 및 (R284)와 음의 생성 즉, 소멸에 기여하는 (R99) 소반응으로 분류할 수 있다.

CO의 생성에 기여하는 소반응;



CO의 소멸에 기여하는 소반응;



참고로 이들 소반응들의 번호는 GRI-v3.0에 표기된 소반응 번호이다.

수소화염측의 당량비 조건이 변화되었을 때는 이러한 양과 음으로 기여하는 소반응들의 기여도 차이에 의해 CO의 순생성율(Net production rate)이 결정된다. 이러한 소반응들의 기여도 차이를 자세히 설명하기 위해서 Fig. 6에는 메탄측 반응영역에서 CO의 생성, 소멸과 관련되는 주요한 라디칼의 생성과 소멸에 관여하는 소반응들을 도시하였다. 앞서 설명한 바와 같이 수소측 당량비조건을 과농으로 공급하면 충분히 산화되지 못한  $\text{H}_2$  화학종이 정체면을 건너 메탄측 화염대로 이동한다. 이때 이동한  $\text{H}_2$  화학종은 아래의 (R84)을 통해 H 라디칼의 생성을 촉진시키고, 증가된 H 라디칼은 (R38), (R53)의 반응률을 증가시켜, 결과적으로 H, O, OH 및  $\text{CH}_3$  라디칼의 생성을 증가시키게 되고 H 라디칼은 HCO 화학종을 증가시키게 된다. 결과적으로 증가된 H, HCO 및  $\text{CH}_3$  화학종

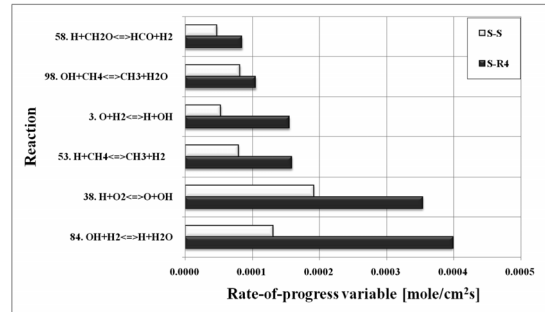
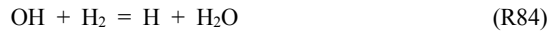
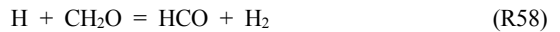


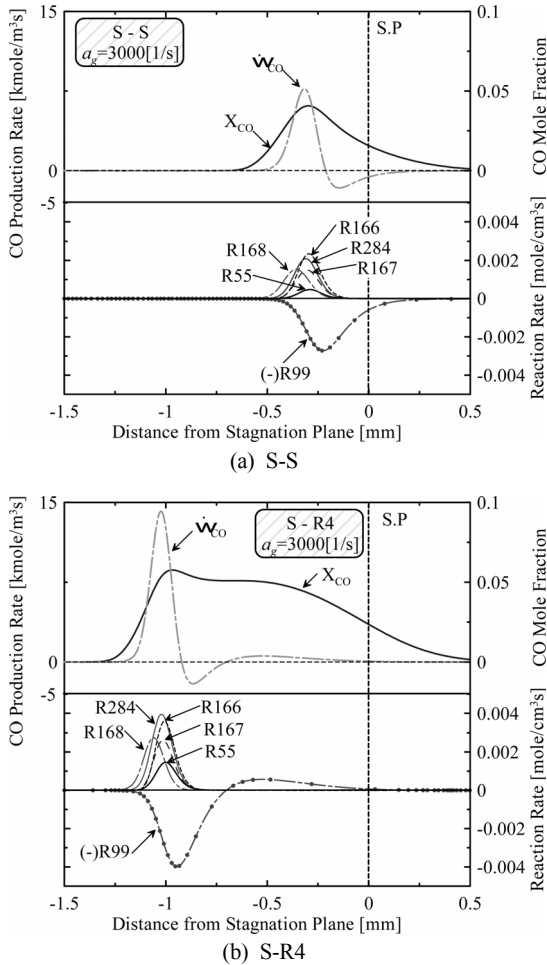
Fig. 6. Key chemical reactions affected by transported  $\text{H}_2$  species from  $\text{H}_2$ -side flame integrated in the methane-side flames of S-S and S-R4 conditions at  $a_g = 3000 \text{ s}^{-1}$ .



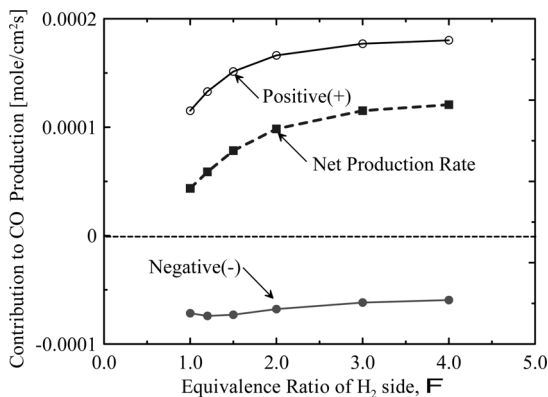
들의 영향으로 수소화염측 당량비가 증가할수록 CO 생성량은 점차 증가하게 된다.

Fig. 4의 결과를 통해 S-Var 조건에서는 수소화염측 당량비가 증가할수록 CO의 생성은 증가하지만 그 증가경향은 당량비가 증가할수록 완만해짐을 알 수 있었다. 이러한 경향을 검토하기 위하여 Fig. 7에는 CO의 생성과 소멸에 기여하는 소반응들의 생성 및 소멸률의 공간분포와 CO 농도를 도시하였으며, Fig. 8에는 CO 생성과 소멸에 관여하는 주요 소반응들의 CO의 생성과 소멸에 대한 기여율을 도시하였다. 기여율이 (+)값을 갖는 것은 CO 생성에 기여하는 것을 의미하며 (-)값을 갖는 것은 CO의 소멸에 기여하는 의미한다. Fig. 7(a) 및 (b)를 고찰해보면 전체적으로 수소화염측 당량비가 과농해질수록 CO의 생성률이 증가하고 있다. 또한 CO의 농도 최고치는 미소하게 증가하였지만 CO 분포영역은 매우 넓어졌음을 알 수 있다. 각 소반응의 기여도를 통해서 앞에서 설명한 CO 생성과 소멸에 대한 각 소반응의 기여도를 확인할 수 있는데, (R99) 반응이 CO의 소멸에 지배적으로 기여하고 있음을 다시 한번 확인할 수 있다.

Fig. 8에서 CO 생성에 대한 증가와 소멸에 대한 기여율 경향을 통해 수소화염측 당량비 변화에 대한 EICO의 변화 거동을 알 수 있다. CO의 생성에 대한 기여율은 (R55), (R166), (R167), (R168) 및 (R284)의 반응률을 합친 값을 의미하며, 음의 기여율은 (R99)에 의한 CO의 소멸 반응률값을 의미한다. 전체적으



**Fig. 7.** Distribution of CO mole fraction, production rate, and reaction rate of the methane-side flames at  $a_g = 3000 \text{ s}^{-1}$ .



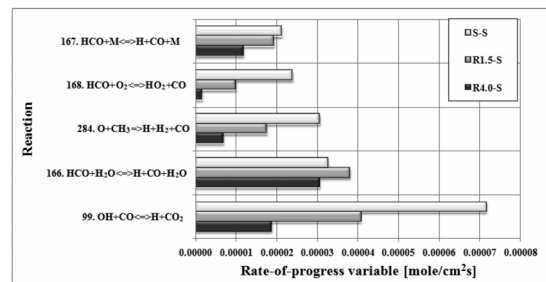
**Fig. 8.** Contribution to CO production for S-Var conditions at  $a_g = 3000 \text{ s}^{-1}$ .

로 수소화염측 당량비가 증가할수록 양의 기여도는 증가하지만 점차 증가폭이 완만해지고 있으며 음의

기여도는 미소하게 줄어드는 것을 알 수 있다. 음의 기여도의 변화량은 그다지 크지 않기 때문에 CO의 순생성률값은 양의 기여도와 유사한 경향을 보이고 있다. 그림으로 도시하지는 않았지만 수소화염측 당량비가 증가해지면서 메탄화염의 산화과정에서 생성되는 화학종들의 농도는 많이 낮아지고 있음을 확인하였다. 일반적으로 고온연소에서  $\text{CH}_4$  연료의 산화경로는  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO} \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ 와 같다. 수소화염측 당량비 조건이 과농해지면 수소화염은 점차 약해지게 되어 거의 메탄화염만으로 유지가 되는 상태가 된다. 고찰한 총괄 스트레인이율이  $3000 \text{ s}^{-1}$ 인 조건에서는 메탄화염 단독으로만은 연소상태가 유지되기 힘든 조건[6]이 되어 메탄연료의 산화과정이 충분히 진행되지 못하게 된다. 따라서 수소화염측 당량비가 과농해지면 메탄화염측으로 공급되는  $\text{H}_2$  화학종의 양은 증가하지만 메탄화염측의 산화과정이 더욱 이루어지기 힘든 상태가 되기 때문에 CO 생성에 중요한 HCO 농도도 충분하지 못하게 된다. 결과적으로 수소화염측 당량비 증가에 따른 CO 생성량 증가도 점차 완만해지게 된다.

### 3.2.2. $\text{Var}(\Phi_{\text{CH}_4})\text{-S}(\Phi_{\text{CH}_2})$ 조건

Fig. 4에서 수소측 당량비조건이 이론혼합비로 고정된 상태에서 메탄측 당량비조건이 점차 과농조건으로 공급되면 CO의 배출지수가 점차 증가하는 경향을 보이다가  $\Phi_{\text{CH}_4} \approx 1.5$  조건 이후 다시 감소하는 경향을 확인하였다. Fig. 3(a), (c) 및 (d)의 화염구조에서 볼 수 있듯이 메탄측 당량비조건이 점차 과농으로 공급됨에 따라 최고 열발생률 위치로 정의되는 화염면은 점차 정체면을 넘어 수소화염측으로 넘어가게 되어 음의 화염전파속도를 가지는 복잡한 구조를 가지게 된다. Fig. 9에는 수소측 당량비는 이론혼합비 조건으로 고정한 상태에서 메탄화염측 당량비를 점차 과농조건으로 만든  $\text{Var-S}$  조건에 대한 CO의 생성과 관련된 소반응들의 반응률을 도시하였다.  $\text{Var-S}$  조건에서도 S-Var 조건과 유사하게 CO의 생성에 기여하



**Fig. 9.** Key chemical reactions that play important roles to formation of CO species of Var-S conditions at  $a_g = 3000 \text{ s}^{-1}$ .

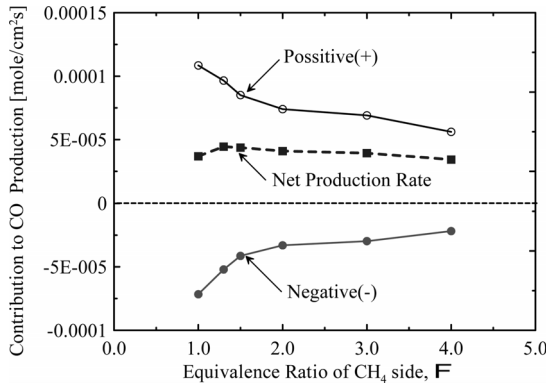
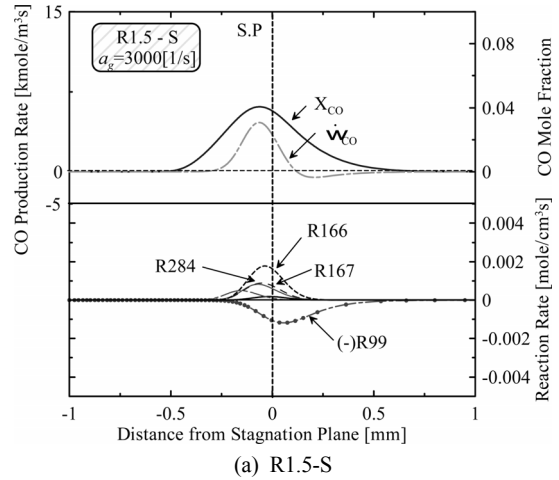


Fig. 10. Contribution to CO production for Var-S conditions at  $a_g = 3000 \text{ s}^{-1}$ .

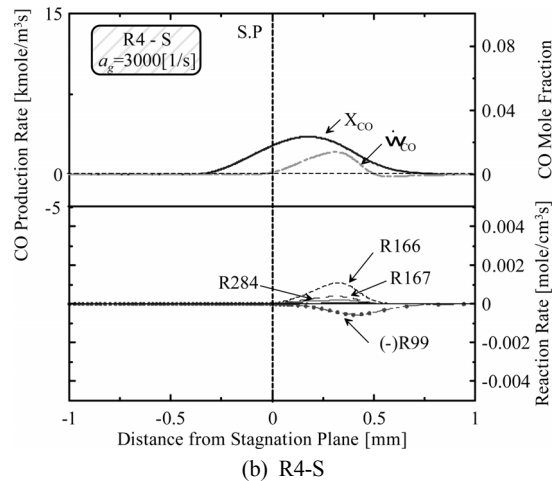
는 소반응은 (R166)~(R168) 그리고 (R284)이며, CO의 소멸에 기여하는 반응은 (R99)로 분류할 수 있다. 그러나 S-Var 조건에서의 CO 생성률 변화와는 다른 경향을 보인다.

이러한 경향은 Fig. 10의 CO 생성과 소멸에 기여하는 소반응들의 역할을 통해 확인할 수 있다. 즉 S-Var 조건에서는 전체적으로 CO의 생성과 관련된 소반응들의 기여도가 증가하여 CO의 배출지수가 증가되었다. 반면에 Var-S 조건에서는 CO의 생성과 관련된 소반응들의 기여도는  $\Phi_{\text{CH}_4} \sim 1.5$ 까지는 급격히 감소된 후 완만하게 줄어들고 있으며 CO 소멸과 관련된 소반응(R99)의 역할은  $\Phi_{\text{CH}_4} \sim 1.5$ 까지는 크게 줄어든 후 당량비가 더 과농한 영역에서는 완만하게 감소하게 된다.  $\Phi_{\text{CH}_4} > 1.5$ 과농한 영역에서는 CO의 생성에 기여하는 소반응들의 역할은 비교적 크게 줄어들었지만 CO 소멸에 기여하는 소반응의 역할은 생성보다는 상대적으로 덜 줄어들었기 때문에  $\Phi_{\text{CH}_4} \sim 1.5$  이후의 과농조건에서는 CO 순생성률은 감소하게 된다.

이러한 경향은 Fig. 11의 CO 농도와 생성률의 공간분포를 통해서 좀 더 자세히 설명할 수 있다. Fig. 7(a)의 S-S 조건에서 CO의 생성률 공간분포를 보면 정체면을 기준으로 약간 메탄화염측에서 CO가 주로 생성되며 정체면보다 약간 수소화염측에서 CO는 주로 소멸되는 것을 확인할 수 있다. CO 생성에 기여하는 소반응들의 반응률을 합친값이 CO 소멸에 대한 값보다 크기 때문에 CO의 생성량은 소멸량보다 크게 된다. 메탄측 당량비 조건을  $\Phi_{\text{CH}_4} = 1.5$ 로 한다면 CO 생성에 관여하는 소반응들의 역할이 급격히 약해지게 되며 (R99)에 의한 CO의 소멸량도 급격히 감소하지만 CO 소멸과 관련된 (R99)의 역할이 덜 감소하게 되어 R1.5-S 조건에서는 EICO값은 S-S 조건보다 증가하고 최고값을 갖게된다. 메탄측 당량비를 더욱 증가시키게 되면( $\Phi_{\text{CH}_4} = 4.0$ ) 메탄화염이 정체면을



(a) R1.5-S



(b) R4-S

Fig. 11. Distribution of CO mole fraction, production rate, and reaction rate of the methane-side flames at  $a_g = 3000 \text{ s}^{-1}$ .

건너 수소화염측에 위치하게 되는 복잡한 화염구조를 가지게 된다. 이 경우에는 Fig. 3(d)에서 보는 바와 같이 메탄연료의 열발생률이 매우 작은 값을 갖게 된다. 이것은 메탄연료가 CO까지 충분히 산화되지 못하는 것을 의미하며 이로 인해 CO의 배출량은 다시 줄어들게 된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 상호작용하는 대항류 메탄-수소 부분예혼합화염의 CO 배출특성에 관한 수치계산 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

상호작용하는 메탄-수소 부분예혼합화염은 스트레인을 변화에 따른 EICO 경향은 각 화염의 당량비 조건에 따라 크게 달라지는 것을 확인하였다. 동일한 스트레인율에서는 S-R4 조건이 다른 조건의 화염들에

비해 소화한계는 비교적 작지만 CO를 가장 많이 배출하는 것을 알 수 있었다. 이것은 수소화염축이 과농조건일 경우 충분히 산화되지 못한 H<sub>2</sub> 성분이 정체면을 건너 메탄축 화염으로 이동하여 메탄화염의 CO 생성과 관련된 소반응에 영향을 주기 때문임을 확인할 수 있었다.

스트레인율과 수소화염축 당량비 조건을 이론혼합비로 고정한 상태에서 메탄축 당량비를 점차 과농하게 증가시킬 경우에는 EICO가  $\Phi_{CH_4} \approx 1.5$ 에서 최고값을 가진 후 점차 완만하게 감소하게 된다. 이것은 메탄축 당량비가 과농해지면서 CO의 생성률과 소멸률은 줄어들지만  $\Phi_{CH_4} \approx 1.5$ 까지는 CO의 소멸률이 더 급격히 줄어들었기 때문이며 더욱 과농조건이 될수록 메탄연료가 충분히 산화되지 못하기 때문에 CO는 점차 줄어드는 것을 알 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(과제번호 : 20110004602).

## 참고문헌

- [1] H<sub>2</sub> Incident Reporting and Lesson Learned, <http://www.h2incidents.org/>.
- [2] S. H. Shorab, Z. Y. Ye, C. K. Law, "An Experimental Investigation on Flame Interaction and the Existence of Negative Flame Speeds", *Proc. Combust. Inst.* Vol. 20, 1984, pp. 1957-1965.
- [3] Z. Cheng, J. A. Wehrmeyer, R. W. Pitz, "Lean or Ultra-lean Stretched Planar Methane/Air Flames", *Proc. Combust. Inst.* Vol. 30, 2005, pp. 285-29.
- [4] 오창보, 이의주, 최병일, "수소화염과 상호작용하는 탄화수소화염의 연소특성", 2008년 한국 화재소방학회 추계학술논문발표회 논문집, 2008, pp. 17-20.
- [5] 오창보, 이의주, "수소화염과 탄화수소화염의 상호작용에 관한 수치계산 연구", *한국안전학회지*, 제25권, 제2호, 2010, pp. 12-17.
- [6] 박지용, 오창보, 상호작용하는 탄화수소-수소화염의 구조 및 오염물질 배출특성에 관한 수치계산연구, *KOSCO SYMPOSIUM 논문집*, Vol. 42, 2011, pp. 159-165.
- [7] J.-W. Park and C. B. Oh, Flame structure and global flame response to the equivalence ratios of interacting partially premixed methane and hydrogen flame, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 37, 2012, pp. 7877-7888.
- [8] A. E. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grcar, and F. M. Ruppel, 1997, *OPPDIF:A FORTRAN Program for computing opposed-flow diffusion flames*, Sandia Report, SAND 96-8243.
- [9] G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach, N. W. Moriarty, B. Eiteneer, M. Goldernberg, C. T. Bowman, R. K. Hanson, S. Song, W. C. Gardiner, Jr., V. Kissianski, and Z. Qin, [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).
- [10] K. Sheshadri and F. A. Williams, Laminar Flow between Parallel Plates with Injection of a Reactant at High Reynolds Number, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, 1978, pp. 251-253.
- [11] T. Takeno and M. Nishioka, Species Conservation and Emission Indices for Flames Described by Similarity Solutions, *Combust. Flame*, Vol. 92, 1993, pp. 465-468.
- [12] I. Glassman, R. A., Yetter. *Combustion*, 4th ed., Academic Press, San Diego, USA; 2008.