

<논문>

메탄-공기 확산화염에서 수소 첨가 효과에 관한 연구

박 정[†] · 박준성* · 김정수** · 김성초** · 길상인*** · 윤진한*** · 김우현***
(2007년 1월 5일 접수, 2007년 3월 7일 심사완료)

A Study on Effects of Hydrogen Addition in Methane-Air Diffusion Flame

Jeong Park, June Sung Park, Jeong Soo Kim, Sung Cho Kim,
Sang In Keel, Jin Han Yun and Woo Hyun Kim

Key Words: Chain Initiation Reaction(체인 개시 반응), Global Strain Rate(전체신장률), H₂-CO Consumption Layer(H₂-CO 소모층), Methane Consumption Layer(메탄소모층), Prompt NO(프롬프트 NO), Thermal NO(열적 NO)

Abstract

Hydrogen-blending effects in flame structure and NO emission behavior are numerically studied with detailed chemistry in methane-air counterflow diffusion flames. The composition of fuel is systematically changed from pure methane to the blending fuel of methane-hydrogen through H₂ molar addition up to 30%. Flame structure, which can be described representatively as a fuel consumption layer and a H₂-CO consumption layer, is shown to be changed considerably in hydrogen-blending methane flames, compared to pure methane flames. The differences are displayed through maximum flame temperature, the overlap of fuel and oxygen, and the behaviors of the production rates of major species. Hydrogen-blending into hydrocarbon fuel can be a promising technology to reduce both the CO and CO₂ emissions supposing that NO_x emission should be reduced through some technologies in industrial burners. These drastic changes of flame structure affect NO emission behavior considerably. The changes of thermal NO and prompt NO are also provided according to hydrogen-blending. Importantly contributing reaction steps to prompt NO are addressed in pure methane and hydrogen-blending methane flames.

1. 서 론

세계 에너지의 거의 90%는 여전히 연소에 의존하며 이산화탄소/NO_x 등의 오염 배출물로 인하여 지구온난화와 산성비와 같은 심각한 환경문

제를 일으킨다. 1997년 교토의정서 발효로부터 이산화탄소를 포함하는 저공해 에너지원에 대해 필요성이 강조되어 왔다. 그럼에도 불구하고 화석 연료를 대체할 신기원을 이룰 기술이 개발되지 않는 한 에너지 수요의 급등으로 인한 대안을 마련하기가 쉽지 않은 여건이다. 따라서 수소 에너지 사용의 빈도는 미래에 급증할 것이고 점진적으로 기존 탄화수소 계열의 연료에 의해 부하가 맞추어진 기존 설비 역시 수소 에너지 사용에 따른 시설들로 대체될 것이 확실하다. 그러나 급격한 변화는 과도한 설비 투자를 한번에 요구한다는 점에서 수소 경제 사회

† 책임저자, 회원, 부경대학교 기계공학부
E-mail : jeongpark@pknu.ac.kr
TEL : (051)620-1601 FAX : (051)620-1531

* 순천대학교 기계공학과대학원

** 회원, 순천대학교 기계우주항공공학부

*** 한국기계연구원 환경에너지기계연구본부

를 대비하고 수소의 연소 특성, 수소 저장 혹은 폭발 등의 안정성 확보 문제가 해결되기까지 천이적인 대안 기술이 요구되는 실정이다. 최근 대안 기술로 수소와 탄화수소의 혼합 연료를 연소시키는 방식에 최근 많은 관심이 집중되고 있으며 본 연구 과제 또한 이런 맥락에서 이루어진다고 할 수 있다. 얼핏 수소와 탄화수소를 혼합 연료로 사용하는 경우 CO₂의 저감이 예측되는 반면 수소 첨가에 따라 NO_x 발생이 급격히 증가할 것이 예측되므로 기존에 잘 알려진 FIR 및 FGR 등⁽¹⁾ NO_x 저감 기법의 적용 혹은 새로운 기법의 개발 등을 통한다면 수소와 탄화수소를 연료로 하는 버너는 수소 경제화 사회로 가는 길목에서 가장 유용한 대안 기술이라 하겠다.

탄화수소/수소 화염에 대한 대부분의 연구는 예혼합 화염에 관한 연구로 회박 연소 안정성 문제는 상대적으로 낮은 온도에서 연소되는 탄화수소의 연소 활성화에 기여하도록 미량의 수소를 첨가함으로써 해결될 수 있음을 제안하였다.⁽²⁾ 회박 예혼합 메탄 대향류 화염에서 수소 첨가에 관한 실험 및 수치해석 연구에서 소염 온도는 수소 첨가에 따른 온도 조성이 아니라 당량비에 의존함을 보였고, 수소 첨가에 따른 메탄 연소율은 H, O, OH와 같은 라디칼 생성물의 급증으로 증진된다고 보였다.⁽³⁾ 회박 예혼합 메탄-공기 화염에서 수소 혼합 효과를 DNS를 통해 연구하였고,⁽⁴⁾ 순수 메탄 화염에 비해 화염 소화에 잘 견디며 화염 면적이 더 증가함을 보였다. 또한, 수소, 일산화탄소, 이산화탄소가 존재하는 상태에서 회박 예혼합 화염을 연구하였고,⁽⁵⁾ 층류 화염속도와 가연한계는 수소와 같이 확산율이 높은 첨가제가 있으면 연소 강도에 대한 척도가 되긴 힘들며 스트레인과 같은 유체역학적 효과가 고려되어야 함을 보였다.

본 연구에서는 상세 반응 기구를 사용하여 메탄-공기 대향류 확산 화염에서 화염 구조에 대한 수소 혼합 효과를 밝히는 연구를 수행하였다. 연료측에 수소를 30%까지 첨가하면서 순수 메탄화염과 수소-메탄 혼합 화염을 비교하였다. 본 연구는 CO와 CO₂ 감소를 통해 산업용 버너에 적용할 수 있을지 여부를 판단하고자 하는 것이다. 특별히 메탄 소모율과 H₂-CO 소모율로 잘 묘사되는 메탄 화염의 구조가

어떻게 바뀔지에 주목하였고 이러한 변화가 NO_x 배출거동에 미치는 영향도 조사하였다.

2. 수치해석 기법

층류 대향류 확산화염은 서로 반대로 충돌하는 사이에서 형성되고 정체점 근처에서 수학적 묘사는 1차원적 상사성을 갖는다. 이와같은 상사성에 근거한 1차원 지배 방정식은 Kee 등⁽⁶⁾에 의해 개발되어 Lutz 등⁽⁷⁾에 의해 확장된 Oppdif Code를 사용하여 풀게 된다. 본연구에서는 광학적막모델에 근거한 복사항을 추가하였고 지배 방정식은 다음과 같은 상미분 방정식으로 표현된다.

$$G(x) = \frac{dF(x)}{dx} \tag{1}$$

$$H - 2 \frac{d}{dx} \left(\frac{FG}{\rho} \right) + \frac{3G^2}{\rho} + \frac{d}{dx} \left[\mu \frac{d}{dx} \left(\frac{G}{\rho} \right) \right] = 0 \tag{2}$$

$$\rho u \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx} (\rho Y_k V_k) - \dot{w}_k W_k = 0, \quad k = 1, \dots, K \tag{3}$$

$$\rho u \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} (\lambda \frac{dT}{dx}) + \frac{\rho}{c_p} \sum_k p_k V_k Y_k \frac{dT}{dx} + \frac{1}{c_p} \sum_k h_k \dot{w}_k - \frac{\dot{q}_r}{c_p} = 0 \tag{4}$$

여기서 $G(x) = -\frac{\rho v}{r}$, $F(x) = \frac{\rho u}{2}$ 이고, 반경 방향

의 압력구배 $H = \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r}$ 는 상수이고, 문제에서 eigenvalue 이다. 축방향 및 반경 방향 속도 성분은 노즐 출구에서 균일하며 반경 방향 압력 구배는 해의 일부분으로 계산된다. 연료측 및 산화제측 경계조건은

$$x = 0:$$

$$F = \frac{\rho_F u_F}{2}, G = 0, T = T_F, \rho u Y_k + \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_F$$

$$x = L:$$

$$F = \frac{\rho_O u_O}{2}, G = 0, T = T_O, \rho u Y_k + \rho Y_k V_k = (\rho u Y_k)_O$$

복사 열손실은 광학적막모델을 사용하였다.⁽⁸⁾

$$\dot{q}_r = -4\sigma K_p (T^4 - T_\infty^4) \tag{6}$$

$$K_p = \sum_{i=1}^4 P_i K_i, \quad i = CO_2, H_2O, CO, CH_4 \tag{7}$$

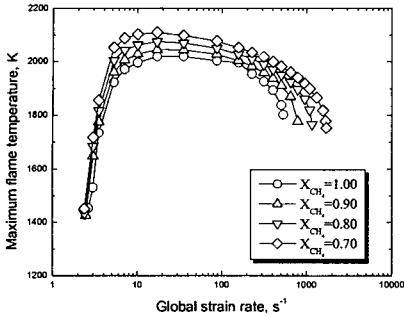


Fig. 1 Variation of maximum flame temperature with global strain rate for pure methane and various hydrogen-blended methane flames

여기서 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, T 와 T_∞ 는 국부 및 주위 온도이고, K_p 는 플랑크 평균흡수 계수, P_i 와 K_i 는 분압 그리고 임의의 화학종의 플랑크 평균 흡수 계수이다. 플랑크 평균흡수 계수는 온도의 다항식으로 근사된다. 전달 물성치는 다성분 식에 의해 표현되고 확산속도는 다음과 같이 주어진다.

$$V_k = \frac{1}{X_k \bar{W}} \sum_{j \neq k} W_j D_{kj} \frac{\partial X_j}{\partial x} - \frac{D_k^T}{\rho Y_k} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (8)$$

지배방정식은 Chemkin 코드⁽⁹⁾와 Tranfit 코드⁽¹⁰⁾를 사용하여 풀었다.

버너 간 간격은 2.0 cm이고 화염대는 연료측과 산화제측 모멘텀 유속(momentum flux)이 균형을 이루는 곳에서 형성되며 전체 신장률(global strain rate)은 다음과 같이 표현된다.

$$a = \frac{2(-u_O)}{L} \left[1 + \frac{u_F}{(-u_O)} \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_O}} \right] \quad (9)$$

기존 연구⁽⁴⁾에서 메탄-수소-공기 예혼합 화염의 여러 가지 연료 조합에 대해 실험과 수치해석으로부터 GRI v-3.0 기구⁽¹¹⁾가 적절하다는 것이 알려진 바 있다. 따라서 본 연구에서는 53개의 화학종과 325개의 반응 단계를 갖는 GRI v-3.0 기구를 사용하였다.

3. 결과 및 논의

Fig. 1 은 메탄과 수소의 여러 가지 조합에 대

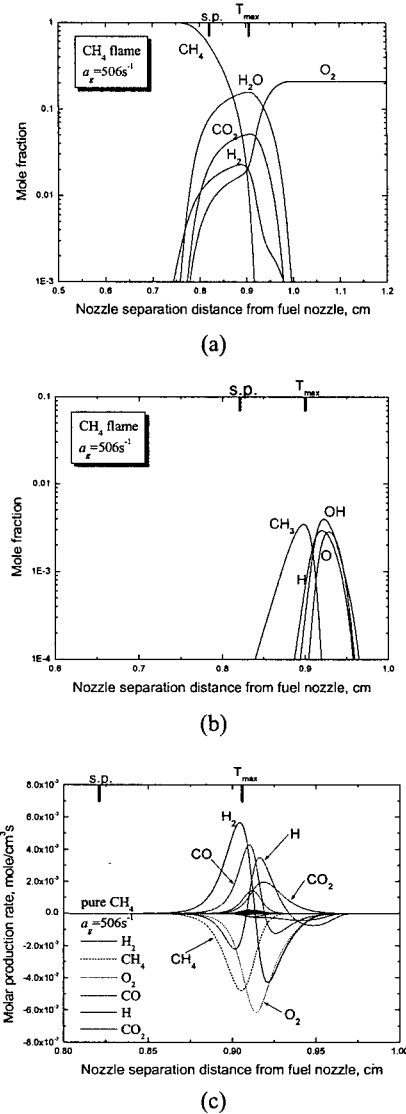


Fig. 2 Typical flame structure in pure CH₄ flame: (a) of major species, (b) of CH₃ and chain carrier radicals, and (c) of molar production rates of the major species for the strain rate of 506 s⁻¹

해 전체 신장률에 따른 최대화염온도의 변화를 나타낸다. X_{CH_4} 는 연료측에서 메탄 물분율을 나타낸다. 모든 경우에 있어서 최대화염 온도는 전체 신장률에 따라 증가하다가 최대를 보인 후 다

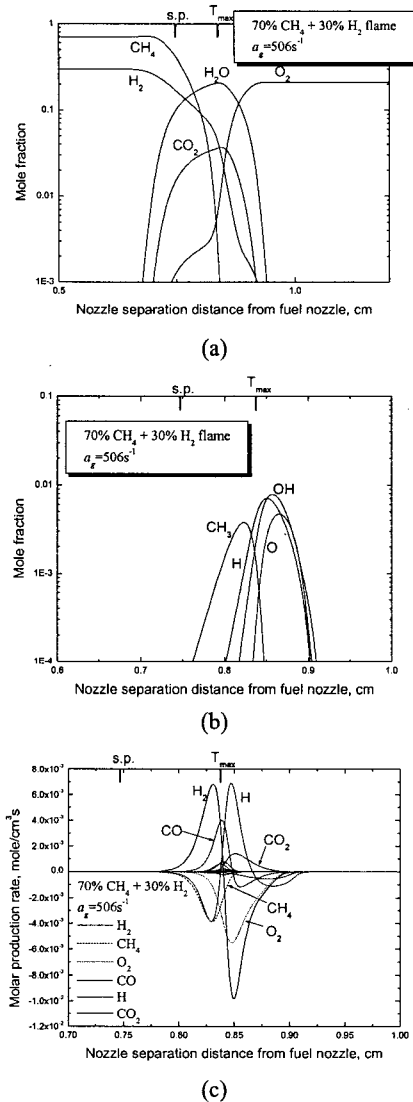


Fig. 3 Typical flame structure in CH₄-H₂ flame: (a) of major species, (b) of CH₃ and chain carrier radicals, and (c) of molar production rates of the major species for the strain rate of 506 s⁻¹

시 감소한다. 이것은 잘 알려진 전형적인 C-곡선을 나타낸다. 낮은 전체 신장률에서 화염 온도의 감소는 화염으로부터 복사열손실에 기인한다.⁽⁸⁾ 또한 최대화염온도의 최대값에서 전체 신장률은 메탄 몰분율이 감소함에 따라 더 낮은 값으로 이동한다. 이것은 메탄 감소에 따라 복사 열손실의

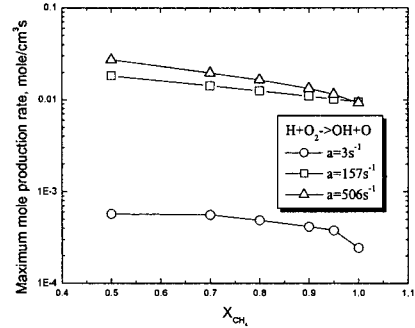


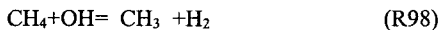
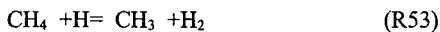
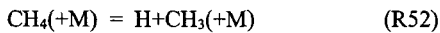
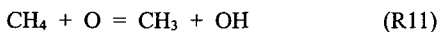
Fig. 4 Variation of maximum forward reaction rate of chain initiation reaction with added hydrogen mole fraction at several strain rates; $a=3, 157, \text{ and } 506 \text{ s}^{-1}$

주요한 소스인 CO와 CO₂가 감소하여 나타나는 현상이다. Fig. 1에서 여러 가지 조건에서 처음과 끝점은 각각 복사 열손실에 의한 화염 소화와 스트레인에 의한 화염 소화를 나타낸다. 두 화염 소화점들은 수소가 첨가됨에 따라 확장되는데, 이것은 전체 반응을 혹은 화염 강도에 대한 지지자로서 잘 알려진 체인 개시 반응(chain initiation reaction)인 H+O₂ =OH+O를 향상시켰기 때문이다.⁽¹²⁾ 스트레인에 의한 화염 소화에서 최대화염온도는 메탄몰분율이 감소함에 따라 감소한다.

Fig. 2는 순수 메탄에 있어서 전체신장률이 506 s⁻¹ 인 경우에 대해 (a) 주요한 화학종과 (b) CH₃ 와 체인 운반 라디칼들의 전형적인 화염 구조를, 그리고 (c) 주요한 화학종의 몰생성률의 변화를 나타낸다. Fig. 3는 메탄 몰분율이 0.7인 메탄-수소 혼합연료에 있어서 같은 정보를 나타낸다. 그림에서 s.p.와 T_{max}는 각각 정체점과 최대화염운동의 위치를 나타낸다. Fig. 2(a)에 보인 바와 같이 순수 메탄 화염에 있어서 화염대는 산화제측에 존재하고 주요한 생성물인 H₂O와 CO₂의 최대값은 메탄과 산소가 급격히 소모되는 위치에서 존재한다. 산소는 정체점을 통해 연료측으로 관통하고 메탄은 최대화염온도 근처에서 급격히 소모된다. 반면에 Fig. 3(a)에 보인 바와 같이 메탄-수소 혼합연료 화염에서는 산소는 정체점의 우측에서 소모되고, 산소와 메탄이 겹치는 부분이 상대적으로 적으나 산소와 수소가 중첩되는 부

분은 상당히 많다. 이러한 차이는 화염 구조에 상당히 다른 효과를 주게 된다.

일반적으로 전체 반응률과 관련되는 체인분기반응인 $H+O_2=O+OH$ 는 탄화수소와 H 사이의 반응률에 비해 적고 따라서 H에 대해 서로 경쟁하게 된다.⁽¹²⁾ 따라서 탄화수소의 농도 증가는 화염 강도를 약화시키게 된다. 다음의 다음 단계들은 메탄 산화반응의 첫 단계로서 CH_3 형성에 주로 기여하는 반응들이다. 여기서 반응 번호는 GRI v-3.0 기구의 반응 번호이다.



CH_3 형성에 대해 (R53)의 반응률이 가장 크며, Fig. 2(b)에 보인 바와 같이 메틸은 연료가 화염대 근처에서 급격히 소모되는 곳에서 형성된다. 체인 운반 라디칼들인 H, O, OH는 이 지역에서 작은 값은 갖는데 이것은 위의 반응들이 이 지역에서 H, O, OH를 급격히 소모하기 때문이다. H, O, OH의 최대 몰분율은 에탄 산화반응으로부터 생성된 수소의 산화반응이 이들의 형성에 밀접히 관련되기 때문에 산화제 측에서 생성된다. 메탄 산화반응의 화염구조는 메탄소모층과 H_2 -CO 소모층으로 이해된다.⁽¹³⁾ 따라서 H_2 가 소모되는 과정은 화염 구조와 오염물질 특성에 중요한 인자로 작용하게 된다는 점을 주목하여야 한다.

Fig. 3에서 화염 구조에 대한 수소 혼합 효과는 잘 묘사된다. 순수 메탄 화염에 비해 메탄-수소 혼합 화염은 메탄은 감소하였고 연료로서 수소가 증가하였기 때문에 CO_2 몰분율은 감소하고 H_2O 몰분율은 증가한다. Fig. 3(b)에 보인 바와 같이 순수 메탄 화염에 비해 H, O, OH의 몰분율은 더 증가하였고 그 분포들은 메틸이 형성되는 위치까지 좀 더 파고들어가 있는 것을 알 수 있다. 이것은 $H+O_2=O+OH$ 반응이 메탄의 감소와 수소 증가에 따라 H와 탄화수소 사이의 반응들에 비해 우세해지는 방향으로 환경이 조성된 것을 의미한다. Fig. 3(c)에서 메탄 소모층과 H_2 -CO 소모층이 명확히 변화된 것을 볼 수 있다. 순수 메탄 화염과 비교하여 공급되는 메

탄 몰분율이 감소하였음에도 메탄 소모율은 증가하였는데, 이것은 H 원자가 메탄 소모층내에서 급격히 소모되었기 때문이다. 또한 공급되는 메탄이 감소하였으므로 CO와 CO_2 생성률은 감소하는 것을 알 수 있다. 한편, 수소의 소모는 수소 소모층 내에서 왕성하고, 수소 라디칼은 수소의 소모율이 높기 때문에 증가한 것을 알 수 있다. 또한, 생성된 H 라디칼은 메탄 소모층 내에서 왕성하게 소모된다는 것을 Fig. 3(c)에서 확인할 수 있다.

한편, Fig. 1에서 수소 첨가에 따라 화염 소화 한계가 확장된다는 것을 언급하였고, 그 원인이 H 라디칼이 급증하였기 때문이라고 설명하였다. 이러한 점을 확인하고 스트레인의 효과를 평가하기 위해 Fig. 4에 $H+O_2=O+OH$ 반응의 정방향 반응률을 나타내었다. Fig. 4는 스트레인을 3, 157, 506 s^{-1} 에서 메탄 몰분율에 따른 $H+O_2=O+OH$ 반응의 정방향 반응률을 나타내었다. 그 정방향 반응률은 스트레인의 증가에 따라 그리고 메탄몰분율의 감소에 따라 증가한다. 이러한 증가는 스트레인을 증가와 수소 첨가에 따른 H 원자의 급격한 증가에 기인한다.

Fig. 5는 여러 가지 수소-메탄 혼합비에 대해 전체 신장률에 대한 CO와 CO_2 최대 몰분율을 나타낸다. CO와 CO_2 최대 몰분율은 첨가되는 수소 몰분율 증가에 따라 감소하는데 이것은 공급되는 메탄 몰분율이 감소하였기 때문이다. 전체신장률에 따라 탄화수소 중간 생성물은 증가하고 CO 생성의 대부분은 HCO 관련 반응으로부터 온다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다.⁽¹⁴⁾ 결과적으로 CO 몰분율은 순수 메탄 화염에서 화염 소화한계를 제외하고는 전체 신장률에 따라 증가하게 된다. 더욱이 대부분의 CO_2 는 (R99) 반응단계인 $CO+OH \rightarrow CO_2+H$ 로부터 형성된다. 기존연구⁽¹⁴⁾에서 OH 라디칼은 스트레인이 낮은 범위에서는 증가하다가 스트레인을 증가에 따라 다시 감소하고, H와 O는 스트레인이 증가함에 따라 증가하다가 소염한계 근처에서 다시 감소한다는 것을 보였다. 따라서 Fig. 5(b)에 보인 바와 같이 최대 CO_2 몰분율은 스트레인에 따라 초기에 증가하다가 감소하는 특성을 보여주고 있다. 이상에 보인 화염 구조의 변화는 NOx 배출 특성에도 상당히 영향을 미칠 것으로 판단된다.

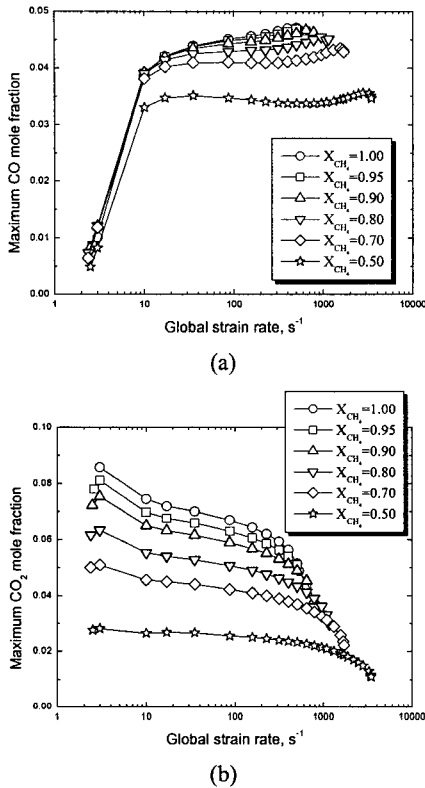


Fig. 5 Variation of maximum mole fractions (a) CO and (b) CO₂ with global strain rate for various hydrogen-blended methane flames

Fig. 6은 3, 157, 506 s⁻¹인 경우에 메탄-물분율에 따른 열적 NO와 프롬프트 NO의 지시 반응들의 반응률의 변화를 나타낸다. Fig. 6(a)에 보인바와 같이 열적 NO의 지시 반응인 N₂+O→NO+N의 몰생성률은 메탄-물분율의 감소에 따라 증가하고 스트레인을 증가에 따라 증가하다가 화염소화한계 근처로 가면 다시 감소한다. 열적 NO가 화염 온도에 의존하기 때문에 이러한 거동은 화염 온도와 관련된다. Fig. 6(b)는 프롬프트NO의 지시 반응 단계인 CH+N₂→HCN+N의 몰생성률은 메탄-물분율의 감소에 따라 증가하고 나서 감소한다. 수소 첨가에 따라 왕성하게 형성된 H, O, OH는 Fig. 3(c)에 보여진 바와 같이 탄화수소 생성물과의 반응을 통해 소모되고 따라서 CH-물분율은 적절한 정도까지는 증가한다. 그러나, 첨가된 수소의 그 이상의 증가는 메탄-물분율의 감소를 유발하므로 다시 감소하게 된다. 또한 CH+N₂→HCN+N

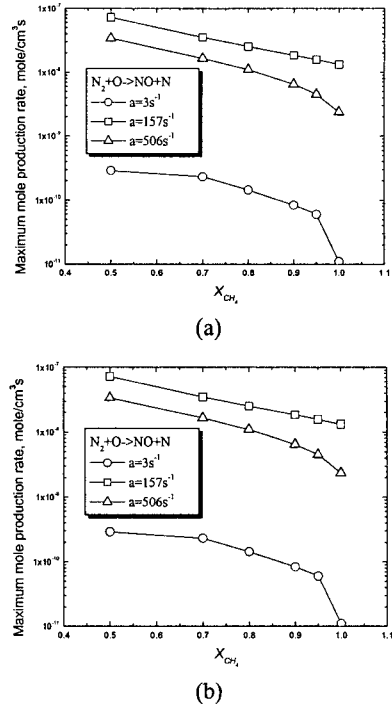
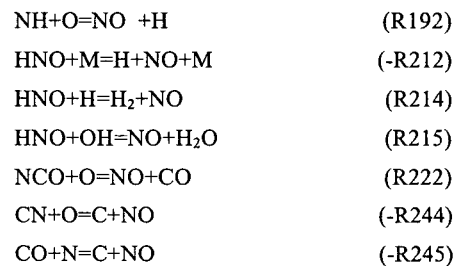


Fig. 6 Variation of maximum forward reaction rate of the precursor reactions of (a) thermal NO and (b) prompt NO with added hydrogen mole fraction at several strain rates; $a=3, 157,$ and 506s^{-1}

의 몰생성률은 스트레인을 증가에 따라 증가하는데 이것은 H, O, OH가 스트레인에 따라 증가하기 때문이고 CH-물분율 역시 점진에 언급된 바와 같기 때문이다. 소화 한계 근처에서 CH+N₂→HCN+N의 몰생성률이 감소하는 것은 소화한계 근처에서 H, O, OH가 감소하기 때문이다. 프롬프트 NO 생성 거동은 프롬프트 NO의 생성에 중요하게 기여하는 반응 단계들의 분석을 통해 완전히 이해될 수 있다. 다음의 반응들이 프롬프트 NO 생성 및 소멸에 관련된다.



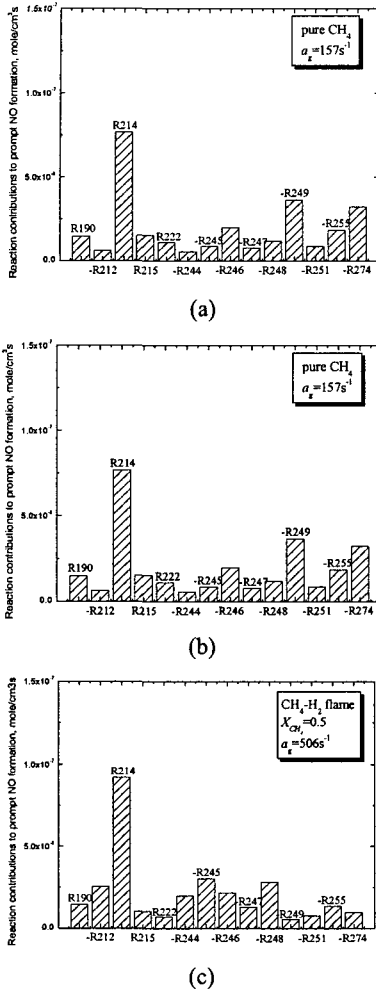
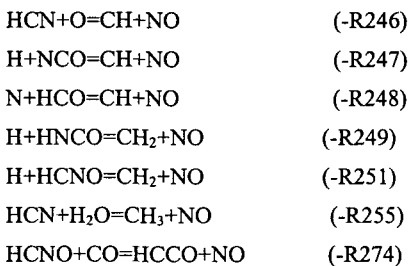


Fig. 7 Importantly contributing reaction steps in prompt NO formation (a) in pure methane flame; $a = 157\text{s}^{-1}$, (b) in hydrogen-blended methane flame; $X_{\text{CH}_4} = 0.5$, $a = 157\text{s}^{-1}$, and (c) in hydrogen-blended methane flame; $X_{\text{CH}_4} = 0.5$, $a = 506\text{s}^{-1}$



여기서 반응 번호 앞에 음의 부호는 GRI v-3.0 기구에서 역방향 반응을 의미한다.

Fig. 7은 프롬프트 NO에 대해 중요하게 기여하는 반응 단계로 (a) 순수 메탄의 157s^{-1} 의 스트레인의 경우, (b) 메탄-수소 혼합 화염에서 메탄 몰분율 0.5, 157s^{-1} 의 스트레인의 경우, 그리고 (c) 메탄-수소 혼합 화염에서 메탄 몰분율 0.5, 506s^{-1} 의 스트레인의 경우를 나타낸다. Fig. 7(a)의 순수 메탄화염의 경우 중요하게 기여하는 반응은 (R214), (-R249), (-R274)이다. (R214)의 중요성이 두드러지며 HNO 관련 반응들의 중요성에 대해서는 이미 기존의 연구에서 강조되어 왔다. Fig. 7(b)에 보인 바와 같이 메탄 몰분율 0.5, 157s^{-1} 의 스트레인의 경우 (-R212)와 (R214)의 HNO 관련 반응 단계가 우세하고 (-R214)와 (-R245)가 중요해진다. 스트레인이 증가된 Fig. 7(c)의 경우 Fig. 7(b)와 비교하여 (R14)와 (-R249)의 기여는 줄어들고 (-R248)의 기여가 중요해진다.

4. 결론

화염 구조와 NOx 배출 특성의 수소 첨가 효과에 관한 수치해석 연구를 메탄-공기 대향류 화염에 대해 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

화염 소화한계는 수소 첨가에 따라 확장되는데 이것은 전체 반응물의 지시자인 체인 개시 반응을 증진시키는 H 원자가 증가하였기 때문이다. 수소 첨가는 화염 구조를 상당히 변화시킨다. 즉, CO와 CO₂ 몰분율은 감소하고 H₂O 몰분율은 증가한다. 순수메탄화염과 비교하여 메탄몰분율이 감소하였음에도 메탄 소모율은 증가하는데 이것은 생성된 H 원자가 메탄 소모층에서 왕성하게 소모되기 때문이다. H₂-CO 소모층에서 CO 소모율은 감소하는데 이것은 CO가 줄어든 효과가 왕성하게 생성된 H, O, OH의 효과에 비해 우세하기 때문이다. 그러나, 수소 생성물은 상당히 증가하고 H₂ 소모층에서 급격히 소모된다.

이러한 변화들이 NOx 거동 특성에 상당한 영향을 미친다. 열적 NO는 전체신장률에 따라 증가하고 나서 다시 감소하고, 수소 첨가에 따라 증가한다. 이것은 열적 NO가 화염 온도와 직접 연관되기 때문이다. 프롬프트 NO는 수소 첨가에

따라 증가하고 나서 다시 감소하는데, 이것은 수소 첨가가 적절한 수준까지는 중간 생성물로서 탄화수소들의 생성을 촉진시키지만 그 이상의 증가는 연소로서 메탄 공급이 줄어들기 때문이다. 순수 메탄에서는 (R214), (-R249), (-R274)가 프롬프트 No 생성에 중요하게 기여한다. 반면에 메탄-수소 화염에서는 HNO 관련 반응들이 훨씬 우세해지고 (-R244)와 (-R245)는 중요해지는 반면에 (-R274)는 기여도 떨어진다. 메탄-수소화염에서 전체신장률을 증가시키면 (R214)와 (-R249)는 기여도는 떨어지는 반면 (-R248)은 중요해진다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 기본사업의 위탁과제로 수행되었고 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Park, J., Hwang, D. J., Choi, J. G., Lee, K. M., Keel, S. I., Shim, S. H., 2003, "Chemical Effects of CO2 addition to oxidizer and fuel streams on Flame Structure in H2-O2 Counterflow Diffusion Flames," *Int. J. Energy Research*, Vol. 27, pp. 1205~1220.

(2) Refael, S., Sher, E., 1989, "Reaction Kinetics of Hydrogen-Enriched Methane-Air and Propane-Air Flames," *Comb. Flame* Vol. 78, pp. 326~338.

(3) Jackson, G. S., Sai, R., Plaia, J. M., Boggs, C. M., Kiger, K. T., 2003, "Influence of H2 on the Response of Lean Premixed CH4 Flames to High Strained Flows," *Comb. Flame* Vol. 132, pp. 503~511.

(4) Hawkes, E. R., Chen, J. H., 2004, "Direct Numerical Simulation of Hydrogen-Enriched Lean Premixed Methane-Air Flames," *Comb. Flame* Vol. 138, pp. 242~258.

(5) Ren, J-Y, Qin, W., Egolfopoulos, F. N., Tsotsis, T. T., 2001, "Strain-Rate Effects on Hydrogen-Enhanced Lean Premixed Combustion," *Comb. Flame* Vol. 124,

pp. 717~720.

(6) Kee, R. J., Miller, J. A., Evans, G. H., Dixon-Lewis, G., 1988, "A Computational Model of the Structure and Extinction of Strained, Opposed Flow, Premixed Methane-Air Flame," *Proc. Combustion Inst.* Vol. 22, p. 1479.

(7) Lutz, A. E., Kee, R. J., Grcar, J. F., Rupley, F. M., 1997, "A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames," Sandia Report, SAND96-8243.

(8) Ju, Y., Guo, H., Maruta, K., Liu, F., 1997, "On the Extinction Limit and Flammability Limit of Non-Adiabatic Stretched Methane-Air Premixed Flames," *J. Fluid Mech.* Vol. 342, p. 315.

(9) Kee, R. J., Rupley, F. M., Miller, J. A., 1989, "Chemkin II: A Fortran Chemical Kinetics Package for Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics," Sandia Report, SAND89-8009B.

(10) Kee, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, J., Coltrin, M. E., Miller, J. A., 1994, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multi-Component Transport," Sandia Report, SAND86-8246.

(11) Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, N. W., Eiteneer, M. B., Goldenberg, M., Bowman, C. T., Hanson, R. K., Dong, S., Gardiner, W. C., Lissianski, Jr.-VV, Qin, Z., 2006, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/

(12) Westbrook, C. K., Dryer, F. L., 1984, "Chemical Kinetic Modeling of Hydrocarbon Combustion" *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 10, p. 1.

(13) Seshadri, K., Peters, N., 1988, "Asymptotic Structure and Extinction of Methane-Air Diffusion Flames," *Comb. Flame* Vol. 73, pp. 23~44.

(14) Park, J., Lee, K. M., Lee, E. J., 2001, "Effects of CO2 Addition on Flame Structure in Counterflow Diffusion Flame of H2/CO2/N2 Fuel," *Int. J. of Energy Research* Vol. 25, pp. 469~485.