

He와 Ar으로 희석된 합성가스 화염에서 루이스 수와 선호확산효과

김태형* · 박정*** · 권오봉** · 박종호***

*한전전력연구원 발전연구소 · **부경대학교 기계공학과 · ***충남대학교 기계공학과

Effects of Lewis Number and Preferential Diffusion in Syngas Flame Diluted with He and Ar

Tae Hyung Kim*, Jeong Park***, Oh Boong Kwon** and Jong Ho Park***

*Power Generation Research Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

**Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

***Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University

(Received 19 November 2014, Received in revised form 5 December 2014, Accepted 5 December 2014)

ABSTRACT

Numerical study is conducted to grasp flame characteristics in H₂/CO syngas counterflow diffusion flames diluted with He and Ar. An effective fuel Lewis number, applicable to premixed burning regime and even to moderately-stretched diffusion flames, is suggested through the comparison among fuel Lewis number, effective Lewis number, and effective fuel Lewis number. Flame characteristics with and without the suppression of the diffusivities of H, H₂, and He are compared in order to clarify the important role of preferential diffusion effects through them. It is found that the scarcity of H and He in reaction zone increases flame temperature whereas that of H₂ deteriorates flame temperature. Impact of preferential diffusion of H, H₂, and He in flame characteristics is also addressed to reaction pathways for the purpose of displaying chemical effects.

Key Words : Effective fuel Lewis number, H₂/CO syngas, Preferential diffusion, Reaction pathway

1. 서론

합성 가스는 석탄, 바이오매스, 유기 폐기물 등의 가스화 과정을 통해 생성된다. 석유 자원의 고갈에너지 수요, 그리고 CO₂ 배출 등을 고려할 때 합성 가스가 미래 에너지 생산에 있어서 중요한 역할을 담당하게 될 것은 자명하다. 그러나 이러한 연료들의 저발열량 및 CO 화염의 불안정성을 고려할 때 탄화수소-수소 혹은 탄화수소-합성가스의 혼소 방식은 유력한 대안으로 보인다[1-5]. 이러한 연소 방식은 희박 화염 안정성의 확장을 통한 연소 효율 개선과 NOx 저감, 성능 향상, CO₂ 저감의 측면에서 많은 유

리한 점들을 갖는다. 반면에 가스화 과정에서 N₂, CO₂, H₂O와 같은 원치 않는 부산물의 생성으로 합성가스의 조성은 다양하게 변하며 이것이 버너 설계에 있어서 해결해야 할 가장 도전적 과제이다. 이러한 상황에서 CO₂ 혹은 H₂O 첨가의 화학적 효과는 화염 특성에 영향을 미치고 NOx 등의 배출물 특성에 영향을 줄 수 있다[6,7].

이러한 관점에서 점화[8], 층류 화염 전파속도와 Markstein 길이의 측정[9-12], 화학 반응 기구[13-15]와 같은 화염 기초 특성을 위해 하기 위한 연구 노력이 경주되어 왔다. 합성가스 혼합물에 대한 확산 화염에 대한 연구들은 문헌에서 상대적으로 드물게 발견된다[16-18]. 최근 Chen 등[19]은 He과 Ar 희석된 화염에서 반응물들의 예혼합 특성을 갖는 화염 소화 근처에서 화염온도는 연료와 산화제의 Lewis 수에 비해 가중치(weighted)의 Lewis 수를 고려하는 것이 훨씬 잘 설명된다고 보고한 바 있다. He와 Ar은 같은 부피 열용량(20.8 J/mol K)을 가지지만, He의 열

† Corresponding Author, jeongpark@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.

전도도(0.150 W/mK)는 Ar의 열전도도(0.018 W/mK)보다 훨씬 크다. 또한 He의 유효 Lewis 수는 Ar의 유효 Lewis 수보다 크지만 연료 Lewis 수에는 교차점이 존재함을 또한 설명하였다. 그러나, 복사 열손실에 의한 소화가 나타나는 저신장률 화염에서는 이러한 설명은 잘 맞지 않을 수 있다. 또한 스트레치를 받는 화염에서는 Ar으로 희석된 화염이 He으로 희석된 화염에 비해 화염 온도가 훨씬 더 높다는 것을 주목하여야 한다. 따라서 유효 Lewis 수는 이러한 점들을 고려하여 수정되어야 한다.

이전 연구에서 초과단열화염온도는 수소-공기 예혼합화염에서 나타나지 않았고 단지 과농 예혼합 화염에서만 발생했었고[20], 초과단열화염온도는 화학적 효과에 의해 설명되어야 함을 보인 바 있다[20,21]. Liu와 Gülder[22]는 자유 전파하는 메탄-공기와 메탄-산소 예혼합 화염에서 초과단열화염온도의 화학적 성질은 H 라디칼의 상대적 결핍에 기인함을 보인 바 있다. 또한, H₂-CO-CO₂ 확산화염[18]에서 H의 확산계수를 억제하는 것이 H + O₂ → O + OH의 열흡수율을 증가시키고, 또한 H₂의 확산계수를 억제하는 것이 CO₂ + H → CO + H의 반응률을 증가시켜 H 원자에 대해 H + O₂ → O + OH 반응과 경쟁을 함으로써 H + O₂ → O + OH의 열흡수율을 감소시킨다는 것을 보인 바 있다.

현재의 연구 목적은 He와 Ar으로 희석된 합성가스 확산화염에서 화염 특성에 관한 H, He, 그리고 H₂의 선호확산 효과를 명확히 하는 것이다. 본 연구에서 화염 특성을 설명하는데 있어서 연료 Lewis 수, 유효 Lewis 수, 그리고 유효 연료 Lewis 수 중 어떤 것이 가장 타당한지를 평가가 주어진다. 또한 화염 특성에 관한 선호확산효과를 화학적 효과에서 상세히 설명한다.

2. 수치해석 방법

축대칭의 대향류 H₂/CO 합성 가스 화염을 Kee 등[23]과 Lutz 등[24]에 의해 개발된 OPPDIF코드를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 지배 방정식과 수치해법의 상세한 내용은 Lutz 등[24]의 연구에 상세히 나타나 있어 여기서는 생략한다. 복사열손실은 광학 박모델[25]을 사용하였고 CO₂, H₂O와 CO에 대해 적용된다. 지배 방정식은 CHEMKIN[26] 및 TRANFIT 코드[27]를 사용하여 풀게 된다. 버너간의 간격은 3 cm로 하였고, 전체 화염 신장률은 다음 식으로 표현된다[28].

$$a_g = \frac{2(-u_o)}{L} \left[1 + \frac{u_F}{u_o} \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_o}} \right] \quad (1)$$

여기서 하첨자 F와 O는 각각 연료와 산화제 측을 의미한다. 주위 압력은 1 atm이고 연료와 산화제측 경계 온도는 298 K이다. 선호확산에 대한 화염 응답 특성을 조사하기 위해 He으로 희석된 화염에 대한 계산은 4번 계산되었다(혼합기 평균 확산율 (MAD), $D_H = D_{N_2}$ 인 혼합기 평균 확산율, $D_{H_2} = D_{N_2}$, 그리고 $D_{He} = D_{Ar}$). 문제를 단순화하기 위해 열확산은 무시하여 혼합기 평균 확산에 대한 확산을 억제한 경우와 비교하는 형태로 선호확산 효과를 고려하였다.

Davis 등[13]과 Sun 등[15]의 반응 기구는 가장 신뢰할만한 Mclean 등[10]의 화염 전파속도를 잘 예측하는 것으로 알려져 있다. 그러나 이전 연구[17]에서 20% CO₂로 희석된 95 H₂/5% CO와 50% H₂/50% CO 예혼합 화염에서 Sun 등의 반응 모델은 Natarjan 등[12] 실험 결과를 과다 예측하는 반면 Davis 모델은 잘 예측하는 점을 고려하여 본 연구에서는 Davis 등의 모델을 사용하였다.

3. 결과 및 논의

3.1. Lewis 수와 화염 특성에 대한 상관성

Fig. 1은 80% H₂/20% CO 확산화염에서 스트레인이 100 s⁻¹인 경우에 Ar과 He 희석율에 따른 화염 온도를 나타내고 있다. He으로 희석된 화염온도가 Ar으로 희석된 경우보다 더 낮다. 이것은 선호확산 효과가 복잡한 형태로 화염에 영향을 미치지 않는다면 연료 Lewis 수와 높은 열전도도에 기인한다. 그러나 열전도도의 효과는 Lewis 수에 묵시적으로 포함되므로 Lewis 수의 효과만으로도 설명이 가능할 필요가 있다. 따라서 연료 Lewis 수도 같은 경향을 갖

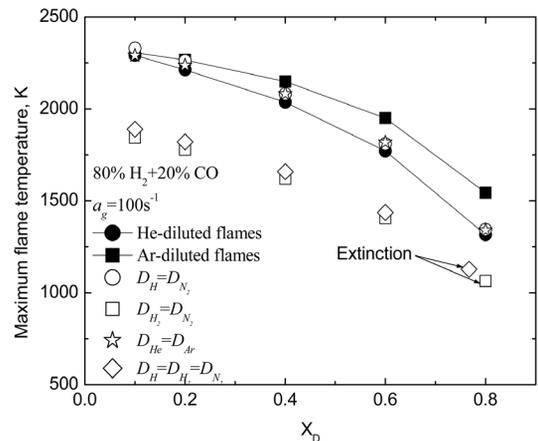


Fig. 1. Maximum flame temperature versus diluent mole fraction at $a_g = 100 \text{ s}^{-1}$ in 80% H₂/20% CO diffusion flame.

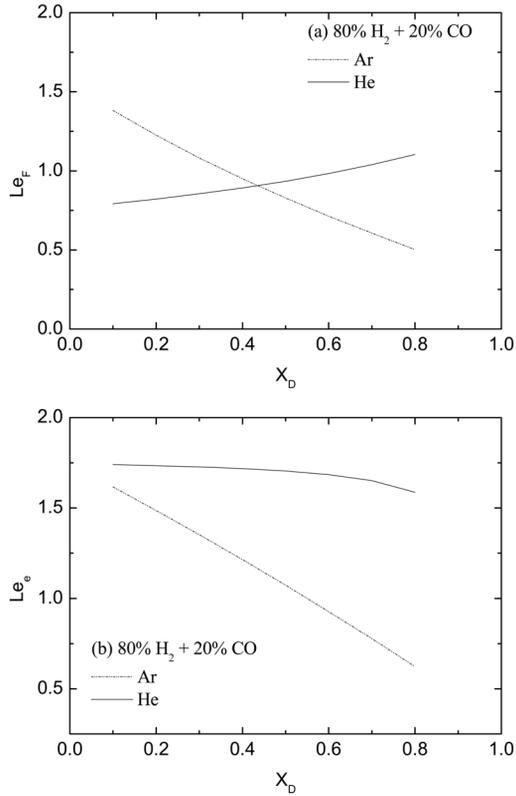


Fig. 2. Variations of fuel Lewis number and effective Lewis number with diluent mole fraction in 80% H_2 /20% CO diffusion flame.

는지 조사할 필요가 있다. Fig. 2는 80% H_2 /20% CO 확산화염에 대해 희석제 몰분율에 따른 연료 Lewis 수와 유효 Lewis 수를 나타낸다. 예혼합 영역에 해당하는 화염 소화 한계 근처와 적절히 큰 스트레인을 확산 화염에 적용할 수 있는 유효 Lewis 수[19]는 다음과 같이 정의된다.

$$Le_e = \frac{(Le_F)_e + A_F (Le_O)_e}{1 + A_F} \quad (2)$$

여기서 $(Le_F)_e$ 와 $(Le_O)_e$ 는 유효 연료 및 산화제 Lewis 수이고 이러한 값들은 1기압 298 K에서 평가된 연료, 산화제, 희석제의 혼합물을 고려하여 정의된다. $A_F = \nu Y_F / Y_O$ 는 예혼합 연소의 혼합기 강도의 척도이고, ν 는 연료에 대한 산화제의 당량 질량비이다. 이전 연구[19]에서 메탄과 프로판 확산화염에서 적절한 스트레인을 화염 온도는 위에서 정의된 유효 Lewis 수에 대한 경향을 따랐기 때문에 Fig. 2에서 스트레인이 100 s^{-1} 가 선택되었다. Lewis 수를 낮추는 것은 반응물 확산을 증가시켜 화염 온도를 증가시키기 때문에 화염 소화에 대해 더 잘 견딘다

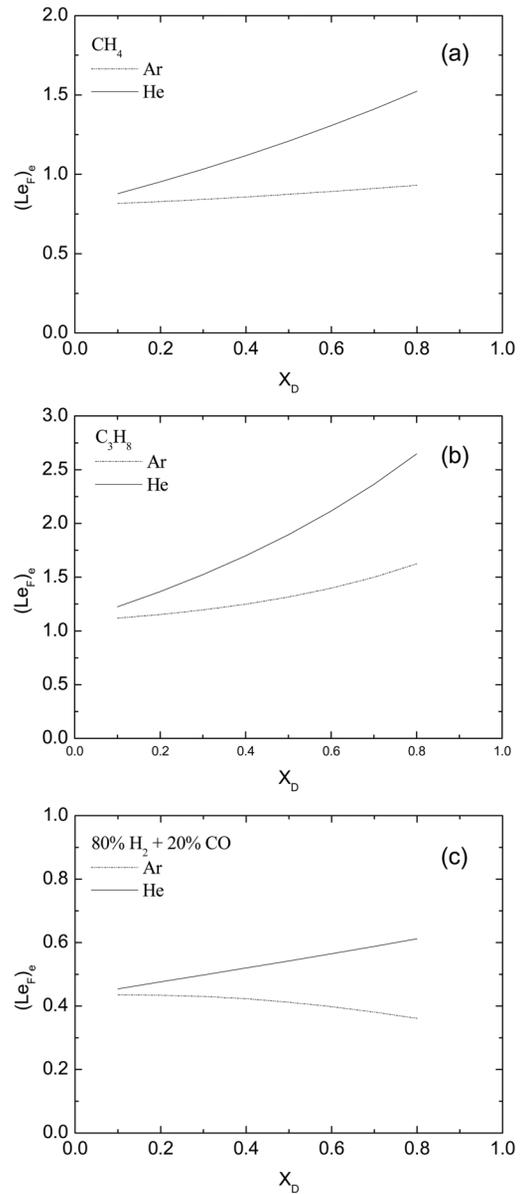


Fig. 3. Effective fuel Lewis number versus diluent mole fraction in (a) CH_4 , (b) C_3H_8 , (c) 80% H_2 /20% CO diffusion flames.

는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서 만일 Fig. 1에 보인 화염 온도가 거동이 연료 Lewis 수를 따른다면 연료 Lewis 수는 He과 Ar 몰분율 증가에 따라 증가해야 하고, 더욱이 He으로 희석된 연료 Lewis 수는 Ar으로 희석된 것보다 더 커야 한다. 그러나 Fig. 2에 보이는 바와 같이 He 몰분율에 따른 연료 Lewis 수는 증가하는 반면 Ar 몰분율에 따른 연료 Lewis 수는 감소한다. 더욱이 He과 Ar으로 희석된 합성가스 화염에 있어서 연료 Lewis 수들 사이에는 교차점이

존재한다. 따라서 연료 Lewis 수와 화염 온도는 불일치한다는 것을 알 수 있다. Fig. 2(b)에서 He으로 희석된 유효 Lewis 수는 Ar으로 희석된 경우에 비해 더 크다. 따라서 이것이 He으로 희석된 화염온도가 Ar으로 희석된 경우에 비해 더 낮은 경향과 잘 일치하고 있다. 그러나 두 경우의 유효 Lewis 수는 He과 Ar 몰분율의 증가에 따라 감소하며, 이것은 Fig. 1의 화염 온도 거동을 설명하는 데는 여전히 실패하고 있다. 결과적으로 Fig. 1에서 화염 온도 거동은 연료 Lewis 수와 Chen 등[19]이 제시한 유효 Lewis 수로는 충분히 설명되지 않는다. 그러나 부족 반응물 개념[29]은 화염 소화 근처와 같은 예혼합 영역과 적절히 큰 스트레인을(유한한 화학반응 시간으로 인한 연료와 산화제의 중첩이 허용되므로)에서조차도 여전히 유효하다. 그렇다면 부족 반응물 개념에 기반을 두어 식 (1)에 나타난 유효 연료 Lewis 수를 사용할 수 있다.

Fig. 3은 희석제 몰분율에 따른 유효 연료 Lewis 수를 메탄, 프로판, 합성가스(80% H₂/20% CO) 확산 화염들에 대해 비교하였다. Fig. 3(a)와 (b)에 나타난 바와 같이 Ar과 He으로 희석된 메탄-공기 및 프로판-공기 확산 화염에서 화염 거동과 유효 연료 Lewis 수 거동은 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그렇다면 유효 Lewis 수의 경향은 또한(80% H₂/20% CO) 확산 화염에서 화염 온도 거동을 잘 설명할 수 있어야 한다. Fig. 3(c)에서 He으로 희석된 화염에서 유효 연료 Lewis 수는 Ar으로 희석된 경우에 비해 더 크다. 이러한 경향은 Fig. 1에서 He으로 희석된 화염 온도가 Ar으로 희석된 화염 온도보다 더 낮은 결과들과 잘 일치한다. He 몰분율에 대한 화염 온도 거동의 상호 관계가 잘 일치하는 반면 Ar 몰분율에 따라 유효 연료 Lewis 수가 감소하는 경향은 화염 온도 거동과는 다르게 나타난다. 이러한 Ar 몰분율에 따른 유효 연료 Lewis 수 거동과 화염 온도 거동의 상이성에 대해서는 여전히 미래에 해결되어야 할 문제로 남아있다.

3.2. 합성가스 화염에서 선호확산 효과

Fig. 1에서 He과 H의 확산율의 역제는 화염 온도를 증가시키고, H₂의 확산율의 역제는 오히려 화염 온도를 감소시키는 것을 알 수 있었다. 그리고 $D_{He} = D_{Ar}$ 과 $D_H = D_{N_2}$ 로 He과 H의 확산율을 억제한 화염 온도가 혼합기 평균 확산율(M-A)을 가지고 He으로 희석된 화염에 비해 더 높다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과들은 화염대에 H와 He 농도를 작게 하는 것이 화염 온도를 증가시키는 역할을 하고, 반면에 H₂의 농도를 화염대에서 작게 하는 것은 화염 온도를 떨어뜨린다는 것을 의미한다. 한편 화염대에 He의 농도를 떨어뜨리는 것이 화염 온도를 증가시

키다는 점은 상대적으로 H₂와 CO 반응물을 화염대로 유도한다는 점에서 이해가 된다. 그러나 H와 H₂의 확산율의 억제에 대한 Fig. 1의 화염 온도에 결과들은 상세한 분석을 요한다.

이전 연구[18]에서 H와 H₂의 선호확산 효과는 화학적 효과들로부터 유발된다는 것을 보인 바 있다. 이것은 화염 온도가 스칼라 소산율의 경향을 따르지 않고 화염대 내의 H, O, OH 라디칼의 농도 거동을

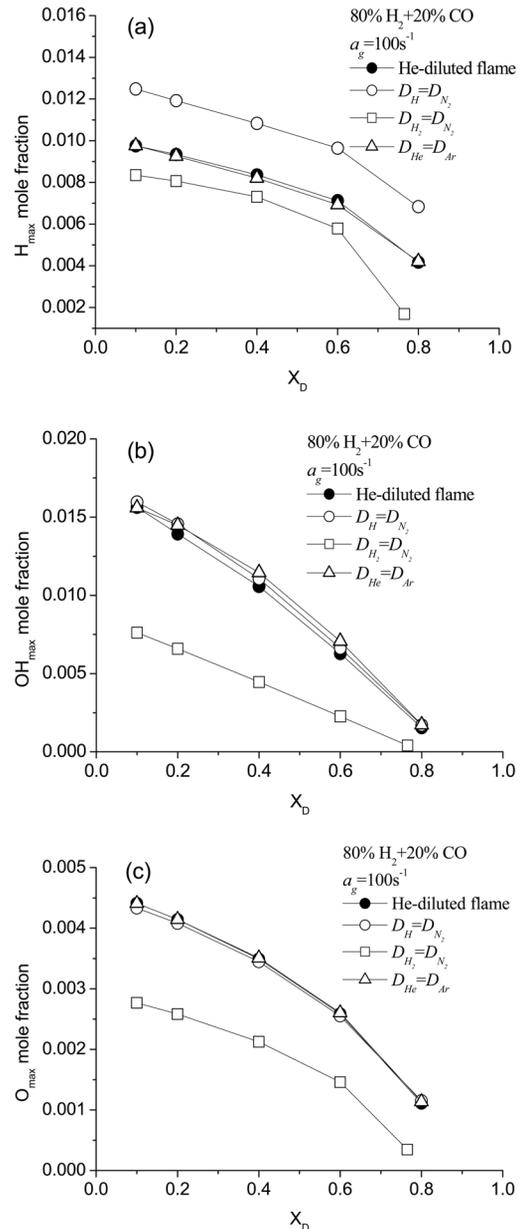


Fig. 4. Maximum mole fractions of (a) H, (b) OH, and (c) O versus diluent mole fraction at 100 s⁻¹ in 80% H₂/20% CO diffusion flame.

더 잘 따른다는 결과들로부터 확인된 바 있다. 특히 이러한 사실은 스트레인을율 변화를 따른 결과들로부터도 잘 확인된다[5]. Fig. 4는 80% H₂/20% CO 확산화염에서 확산율을 억제하거나 하지 않은 경우에 대해서 He 몰분율에 따른 H, O, OH 최대 몰분율의 변화를 나타낸다. He로 희석한 화염에서 $D_H = D_{N_2}$ 인 경우 최대 H 몰분율은 M-A인 경우 보다 훨씬 크다. 반면에 $D_H = D_{N_2}$ 인 경우 최대 O (OH) 몰분율은

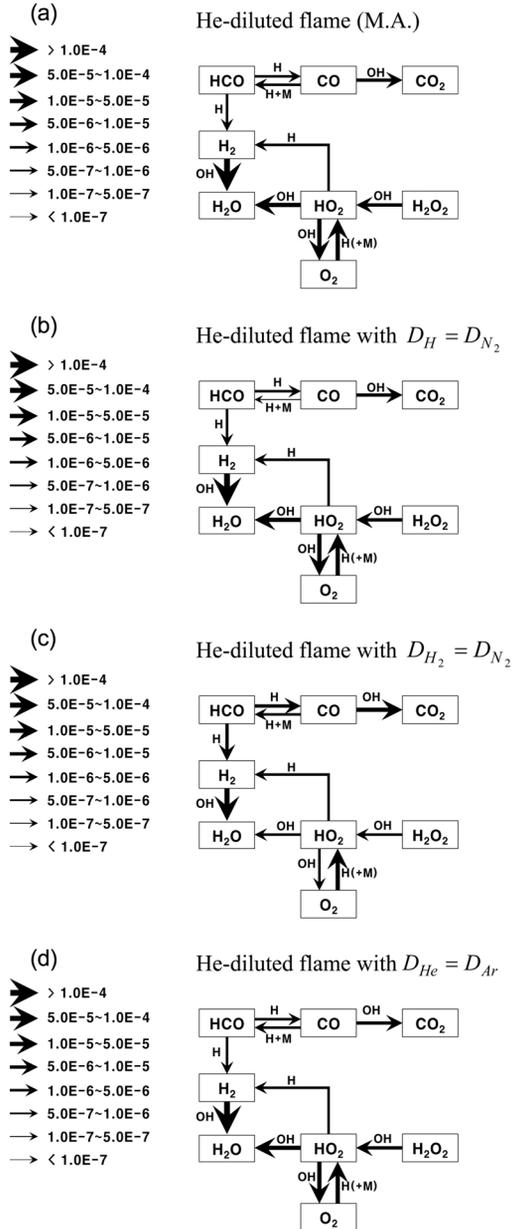


Fig. 5. Reaction pathways with (a) M-A, (b) $D_H = D_{N_2}$, (c) $D_{H_2} = D_{N_2}$, and (d) $D_{He} = D_{Ar}$ at 100 s^{-1} in 80% H₂/20% CO diffusion flames diluted with 40% He.

M-A인 경우와 거의 같다 (경미하게 크다). H 라디칼에 대해서는 $D_H = D_{N_2}$ 인 경우 화염 온도가 더 높다는 사실과 상호 관련성에서 원인을 찾을 수 있다. 즉, $H + O_2 \rightarrow O + OH$ 반응이 전체 반응물에 대한 척도이라는 점에서 잘 이해된다. $D_{H_2} = D_{N_2}$ 인 경우 H, O, OH의 최대 몰분율은 M-A인 경우에 비해 훨씬 작게 나타나며, 결국 이것이 Fig. 1에 나타난 바와 같이 화염 온도 경향과 일치한다는 것을 알 수 있다. $D_{He} = D_{Ar}$ 에 대한 H와 O의 최대몰분율은 M-A인 경우와 거의 같고, OH는 M-A인 경우보다 더 크게 나타난다. 결과적으로 이러한 OH의 이러한 경향에 따라 Fig. 1에서 $D_{He} = D_{Ar}$ 인 경우 화염온도가 M-A인 경우에 비해 높게 나타났음을 알 수 있다.

결과적으로 이러한 화학적 효과들은 화학반응 경로에 영향을 줄 것이므로, H, H₂, He의 선호산화효과를 산화반응 경로에 비한 비교를 통해 다시 확인하고자 한다. Fig. 5는 40% He으로 희석된 80% H₂/20% CO 확산화염에 대해 스트레인을율 100 s^{-1} 에서 M-A, $D_H = D_{N_2}$, $D_{H_2} = D_{N_2}$, $D_{He} = D_{Ar}$ 인 경우에 대한 반응 경로를 비교하였다. Fig. 5에 보인 바와 같이 주반응 경로는 $O_2(\text{or } H_2O_2) \rightarrow HO_2 \rightarrow H_2O$, $O_2(\text{or } H_2O_2) \rightarrow HO_2 \rightarrow H_2 \rightarrow H_2O$, $HCO \rightarrow H_2 \rightarrow H_2O$, 그리고 $HCO \rightarrow CO \rightarrow CO_2$ 이다. 저온 산화 반응과 관련되는 $HCO \rightarrow CO \rightarrow CO_2$ 는 Fig. 5(b)와 (d)에 화살표 크기로는 잘 나타낼 수 없지만 $D_H = D_{N_2}$ 와 $D_{He} = D_{Ar}$ 에 의해 약간 억제된다. 예를 들어 $CO + OH \rightarrow CO_2 + H$ 반응에 대해 M-A인 경우 반응률은 $6.01 \text{ e}^{-6} \text{ mole/cm}^3\text{s}$ 이고, $D_H = D_{N_2}$ 인 경우 $5.690 \text{ e}^{-6} \text{ mole/cm}^3\text{s}$, $D_{He} = D_{Ar}$ 인 경우 $6.467 \text{ e}^{-6} \text{ mole/cm}^3\text{s}$ 로 나타난다. 고온 반응과 관련되는 H₂O로의 반응 경로는 $D_H = D_{N_2}$ 와 $D_{He} = D_{Ar}$ 인 경우 약간 활성화되는 것을 볼 수 있다. 대표적으로 $H_2 + OH \rightarrow H_2O + H$ 반응에 대해, M-A인 경우 반응률은 $1.075 \text{ e}^{-4} \text{ mole/cm}^3\text{s}$, $D_H = D_{N_2}$ 인 경우 $1.080 \text{ e}^{-4} \text{ mole/cm}^3\text{s}$, 그리고 $D_{He} = D_{Ar}$ 인 경우 $1.084 \text{ e}^{-4} \text{ mole/cm}^3\text{s}$ 로 나타난다. 반면에 $D_{H_2} = D_{N_2}$ 인 경우에는 저온 반응 경로인 $HCO \rightarrow CO \rightarrow CO_2$ 는 두드러지게 우세하고, H₂O로의 고온 반응 경로는 억제되는 것을 알 수 있다.

4. 결론

He과 Ar으로 희석된 합성가스 확산화염에 대한 수치해석을 수행하였고, 다음과 같은 결론이 얻어진다.

1) He와 Ar으로 희석된 합성가스 확산화염의 화염온도 거동은 연료 Lewis 수와 Chen 등[19]에 의해 제시된 유효 Lewis 수의 경향을 따르지 않고, 오히려 유효 연료 Lewis 수에 의해 더 잘 묘사된다. 그러나 Ar 몰분율 증가에 따른 유효 Lewis 수의 감소와 화염 온도의 증가에 대한 불일치에 대해서는 미래

의 개선의 여지를 남긴다.

2) H와 He의 확산율의 역제는 화염 온도를 증가시키고, H₂의 확산율의 역제는 오히려 화염 온도를 증가시킨다. 이러한 것들은 화학적 효과에 관련되며, H, O, OH 라디칼의 최대 몰분율 거동과 반응 경로에 대한 조사로부터 확인된다.

후 기

본 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의해 지원되었고 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Ilbas M, Crayford AP, Yilmaz I, Bowen PJ, Syred N. Laminar velocities of hydrogen-air and hydrogen-methane-air mixtures: an experimental study. *Int J Hydrogen Energy* 2006;31:1768-79.
- [2] Halter F, Chauveau C, Djebaili-Chaumeix N, Gokalp I. Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane-hydrogen-air mixtures. *Proc Combust Inst* 2005;30:201-8.
- [3] Dagaut P, Nicole A. Experimental and detailed kinetic modeling of hydrogen-enriched natural gas blend oxidation over extended temperature and equivalence ratio ranges. *Proc Combust Inst* 2005; 30:2631-8.
- [4] 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.
- [5] Kim JS, Park J, Kwon OB, Lee EJ, Yun JH, Keel SI (2008). Preferential diffusion effects in opposed-flow diffusion flame with blended fuels of CH₄ and H₂. *Int. J. Hydrogen Energy* 33, 842-850.
- [6] Park J, Park JS, Kim HP, Kim JS, Kim S, Cho HC, Cho KW, Park HS. NO emission behavior in oxy-fuel combustion recirculated with carbon dioxide. *Energy Fuels* 2007;21:121-9.
- [7] Liu F, Guo H, Smallwood GJ, Gülder Ö. Numerical study of the superadiabatic flame temperature phenomenon in hydrocarbon premixed flames. *Proc Combust Inst* 2002;29:1543-50.
- [8] Fotache CG, Tan Y, Sung CJ, Law CK. Ignition of CO/H₂/N₂ versus heated air in counterflow: experimental and modeling results. *Combust Flame* 2000;120:417-26.
- [9] Vagelopoulos CM, Egolfopoulos 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.
- [10] 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.
- [11] Brown MJ, Mclean IC, Smith DB, Taylor SC. Markstein lengths of CO/H₂/air flames, using expanding spherical flames. *Proc Combust Inst* 1996; 26:875-81.
- [12] Natarajan J, Lieuwen T, Seitzman J. Laminar flame speeds of H₂/CO mixtures: effects of CO₂ dilution, preheat temperature, and pressure. *Combust Flame* 2007;151:104-9.
- [13] Davis SG, Joshi AV, Wang H, Egolfopoulos F. An optimized kinetic model of H₂/CO combustion. *Proc Combust Inst* 2005;30:1283-92.
- [14] Zsély IG, Zádor J, Turányi T. Uncertainty analysis of updated hydrogen and carbon monoxide oxidation mechanisms. *Proc. Combust Inst* 2005; 30:1273-81.
- [15] 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;31:439-46.
- [16] Drake MC, Blint RJ. Structure of Laminar opposed-flow diffusion flames with CO/H₂/N₂ fuel. *Combust Sci Tech* 1988;61:187-224.
- [17] Park J, Bae DS, Cha MS, Yun JH, Keel SI, Cho HC, Kim TK, Ha JS. Flame characteristics in H₂/CO synthetic gas diffusion flame diluted with CO₂: effects of flame radiation and mixture composition. *Int. J. Hydrogen Energy* 2008, in press.
- [18] J. Park, O.B. Kwon, J. H. Yun, S.I. Keel, H.C. Cho, and S.C. Kim. Preferential diffusion effects on flame characteristics in H₂/CO syngas diffusion flames diluted with CO₂. *Int. J. Hydrogen Energy* 2008, in press.
- [19] Chen R, Chaos M, Kothawala A. Lewis number effects in laminar diffusion flames near and away from extinction. *Proc Combust Inst* 2007;31:1231-37.
- [20] Ruf B, Behrendt F, Deutchmann O, Kleditzsch S, Warnatz J. Modeling of chemical deposition of diamond films from acetylene-oxygen flames. *Proc Combust Inst* 2000; 28: 1455-61.
- [21] Liu F, Gülder Ö. Effects of H₂ and H preferential

- diffusion and unity Lewis number on superadiabatic flame temperatures in rich premixed methane flames. *Combust Flame* 2005;143:264-81.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Ju Y, Guo H, Maruta K, Liu F. On the extinction limit and flammability limit non-adiabatic stretched methane-air premixed flames. *J. Fluid Mech* 1997; 342:315-34.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Chellian HK, Law CK, Ueda T, Smooke MD, Williams FA. An experimental and theoretical investigation of the dilution, pressure and flow-field effects on the extinction condition of methane-air-nitrogen diffusion flames. *Proc Combust Inst* 1990; 23:503.
- [28] Law CK. Dynamics of stretched flames. *Proc Combust Inst* 1988;22:1381-1402.