

합성가스(H₂/CO) 예혼합 층돌 제트화염에서 조성비에 따른 부상 화염구조에 관한 연구

김슬기¹ · 심근선² · 이기만^{2†}

¹순천대학교 우주항공공학전공, ²순천대학교 기계·우주항공공학부

A Study on the Lift Flame Structure with Composition Ratios in Premixed Impinging Jet Flames of Syngas (H₂/CO)

SEULGI KIM¹, KEUNSEON SIM², KEEMAN LEE^{2†}

¹School of Aerospace Engineering, Suncheon National University,

²School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon National University,
255, Jungangno, Suncheon-si, Jeollanam-do, Korea

Abstract >> A numerical study on lifted flame structure in impinging jet geometry with syngas composition ratio was investigated. The numerical calculations including chemical kinetic analysis were conducted using SPIN application of the CHEMKIN Package with Davis-Mechanism. The flame temperature and velocity profiles were calculated at the steady state for one-dimensional stagnation flow geometry. Syngas mixture compositions were adjusted such as H₂ : CO = 10 : 90 (10P), 20 : 80 (20P), 30 : 70 (30P), 40 : 60 (40P), 50 : 50 (50P). As composition ratios are changed from 10P to 50P, the axial velocity and flame temperature increase because the contents of hydrogen that have faster burning velocity increase. This phenomenon is due to increase in good reactive radicals such as H, OH radical. As a result of active reactivity, the burning velocity is more faster and this is confirmed by numerical methods. Consequently, combustion reaction zone was moved to burner nozzle.

Key words : Hydrogen(수소), Syngas(합성가스), Impinging jet flame(층돌제트화염), Composition ratio(조성비), Lift flame(부상화염), Flame structure(화염구조)

Nomenclature

a_g : Global strain rate, s⁻¹
 Φ : Equivalence ratio
H/d : Dimensionless impinging distance
 S_L : Laminar burning velocity, m/s

1. 서 론

유리, 제지, 금속 등을 가공하는 기존의 산업 공정에서는 균일한 가열을 위해 화염을 관내에 삽입하는 열교환기 방식을 채택하고 있다. 이러한 경우 화염의 직접적인 가열이 불가능하며, 상당한 열손실을 갖게 된다. 이에 열손실이 적으며 신속한 가열이 가능한 층돌연소(Impinging combustion)의 사용이 절대적이다. 이러한 층돌연소는 피가열물을 직접 가열하는 방

[†]Corresponding author : kmlee@snu.ac.kr

Received : 2016.3.31 in revised form : 2016.4.26 Accepted : 2016.4.30

Copyright © 2016 KHNES

식으로 향상된 가열성능을 나타내지만 국부적인 가열과 피가열물을 오염시킬 수 있는 단점을 갖는다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 불순물이 섞이지 않은 청정 연료를 사용하여 균일한 화염을 형성해주어야 한다¹⁾.

이 경우 균일가열이라는 연소의 특성상 일반적으로 프로판(C_3H_8), 메탄(CH_4) 등의 단일 조성의 가스 연료가 주로 사용하여왔다. 하지만 최근 지구 온난화등과 같은 환경문제에 관한 관심이 증가하면서 이러한 문제를 해결하기 위하여 다른 가스연료에 비해 발열량이 낮아 저급연료로 분류되던 합성가스(Syngas)의 활용에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

합성가스란 석탄(Coal), 바이오매스(Biomass), 고분자 폐기물의 열분해(Pyrolysis) 혹은 가스화(Gasification)를 통해 생산되며 합성가스의 주 성분 중 H_2 는 확산계수가 높아 합성가스 내의 H_2 함유량이 증가하면, 화염 전파 속도(Flame propagation velocity)가 빨라져 점화가 용이하고, 이에 따라 화염거동도 상이하여 H_2 함유량의 변화가 연소기 주요성능인 소염과 점화, 화염불안정현상, 역화 등 연소성능에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다²⁾. 이에 따라 본 연구팀에서는 합성가스의 안정성 및 연소 특성을 파악하기 위하여 합성가스 충돌제트 연소시스템을 구성하여 이에 대한 연구를 진행하여왔다³⁻⁶⁾. 하지만, 합성가스의 연소 및 배기특성에 밀접하게 관련되는 화염의 연소반응 및 화염구조에 관한 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 조성비가 고정된 이전 연구³⁾와 달리 동일한 Reynolds number(이하 Re) 2200에서 H_2 -CO 조성비를 10 : 90, 20 : 80, 30 : 70, 40 : 60, 50 : 50인 5가지 경우로 하여 조성비에 따른 연소 속도, 화염의 거동, 연소반응 특성을 우선적으로 조사하였다. 이를 위해 실험적으로 파악하기 어려운 1차원형상을 갖는 부상된 충돌 제트화염의 상세 반응을 이해하고자, 1차원 수치해석 코드인 SPIN-Code⁷⁾를 통해 수치해석하고 이를 분석하였다.

2. 실험장치 및 수치해석

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치는 이전에 보고한 연구³⁻⁶⁾와 비슷한 실험장치로 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다. 실험에 사용된 버너의 전체길이는 200 mm로 난류억제와 역화방지를 위하여 버너 높이 2/3 지점까지 직경 2.5 mm의 구슬과 다공 메쉬(Mesh)를 형성함으로써 균일하게 혼합된 H_2 -CO-Air의 혼합기가 완전 발달 층류상태로 분사되도록 하였다. 또한 노즐 출구의 내경은 10 mm로 화염에 의해 예열되지 않도록 최대한 얇고 날카롭게 가공하였다. 유동에 의한 교란을 방지하기 위해 노즐 주위로 질소(N_2) 장막유동(Curtain flow)을 형성하였고, 아크릴 실드(shield)를 버너 바깥쪽에 설치하였다. 충돌판은 각 실험 조건의 화염크기를 고려하여 지름 180 mm의 알루미늄 재질로 제작하였으며, 버너와의 원활한 높이를 조절을 위하여 상하 조절이 가능한 정밀 이송장치가 사용되었다. 또한 충돌판 표면의 응축수 생성과 과열 방지를 위하여 충돌판 내부에서 배출되는 냉각수의 온도는 온도센서를 이용한 자동 온도 조절장치를 통해 약 $323.15K \pm 5K$ 가 유지되도록 하였다.

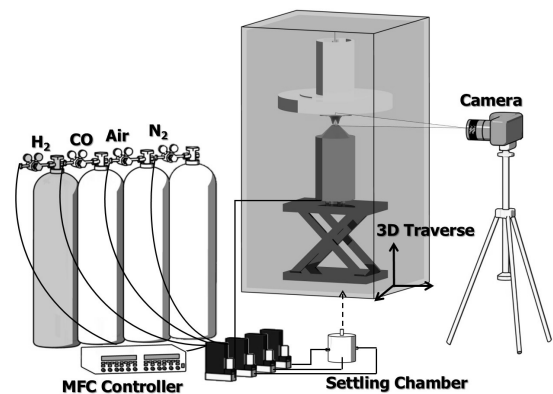


Fig. 1 Experimental set-up

정확한 화염특성을 관찰하기 위하여 99.999%의 고순도 H₂와 CO 그리고 공기가 사용되었으며, 각각 가스의 유량은 버블(Bubble) 유량계로 검증된 MFC를 통해 유량을 조절하였다. 공급된 가스들은 버너로 공급되기 전 정체실(Settling chamber)를 거쳐 균일하게 섞인 후 버너로 공급하였다.

2.2 수치해석 모델

본 연구에서의 예혼합 층돌 제트화염은 Fig. 2처럼 화염이 노즐에서 부상되어 층돌판과 노즐사이에서 층돌판과 평행하게 형성된 일자(一)형 평면화염으로 정체점을 기준으로 정체점 근처에서 수학적 모사는 1차원적 상사성을 갖게 된다. 따라서 이러한 부상된 평면형태의 층돌제트화염 해석에 적합하도록 Chemkin code를 기반으로 Contrin 등이 개발한 SPIN code⁷⁾를 통해 수치해석을 수행하였다.

SPIN code는 무한대의 값을 갖는 노즐과 층돌판 사이에 존재하는 1차원의 평면화염을 모사하며, 이를 수치해석 하기 위해 지배방정식(Governing equation) 및 화학소스(Chemical source) 등은 Kee 등이 제작한 Sandia National Lab.의 Chemkin package⁸⁾를 바탕으로 하고 있으며, 층돌판에서 발생하는 화학반응을 모사하기 위해 Surface chemkin package⁹⁾, 전달 물성치 등은 Transport package¹⁰⁾, 수치해석 알고리즘은 Twopnt software¹¹⁾ 사용하여 개발되었다. 또한 SPIN code는 무한대 직경의 노즐과 층돌판 사이에 평면화염이 존재하기 때문에 초기 연소시 유입되는 산화제의 반응을 제외하고는 외부에서 유입되는 산화제의 반응은 존재하지 않는 특징을 갖고 있어 연료와 산화제의 반응관계를 엄밀하게 볼 수 있게 된다.

본 연구에서 사용된 상세 반응기구로는 H₂-CO의 고온연소에 적합한 것으로 알려진 합성가스 연료 등의 계산에 주로 사용되는 Davis mechanisms¹²⁾을 사용하였다.

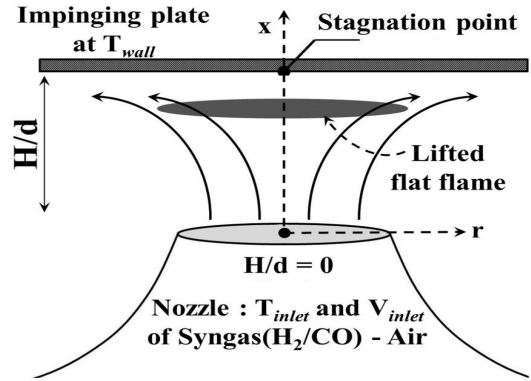


Fig. 2 Schematic diagram of the configuration of lifted impinging jet flame

2.3 수치해석 방법

본 연구에서 사용된 변수인 조성비(Composition ratio)와 무차원 층돌거리(Impinging distance, 이하 H/d), 당량비(Equivalence ratio, 이하 Φ), 그리고 레이놀즈 수(Reynolds number, 이하 Re)는 Table 1에 간략하게 나타내었다. 부상된 층돌 제트화염 같은 평면화염의 경우 층돌거리와 혼합기의 분사속도에 따라 화염의 형태와 거동이 확연히 다르게 됨을 볼 수 있는데, 이처럼 화염구조에 직접적인 영향을 미치는 전체 신장

Table 1 Numerical and Experimental conditions

Syngas fuel	H ₂ + CO
Oxidizer	High purified air
Simulation code	SPIN code
Impinging distance (H/d)	2.0
Reynolds number (Re)	2200
Equivalence ratio (Φ)	0.9
Global strain rate (a_g)	179.0 s ⁻¹
Surface temperature	323.15K ± 5K
Composition ratio	H ₂ : CO = 10 : 90 (10P) H ₂ : CO = 20 : 80 (20P) H ₂ : CO = 30 : 70 (30P) H ₂ : CO = 40 : 60 (40P) H ₂ : CO = 50 : 50 (50P)

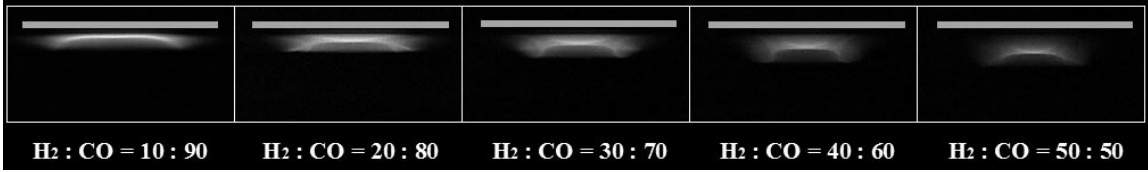


Fig. 3 Direct photo of lifted impinging jet flame with the composition ratios for $H/d = 2.0$, $\phi = 0.9$

률(Global strain rate, 이하 a_g)은 다음의 식 (1)과 같이 충돌거리와 분사속도의 함수로 통해 정의된다. 정의된 a_g 는 속도구배(du/dh)를 대신하여 부상된 충돌 제트 화염에서 Re , H/d 가 사용되었다.

$$a_g = \frac{du}{dh}, du \approx Re, dh \approx H/d \quad (1)$$

본 연구에서 사용된 수치해석에서는 노즐경으로 무차원한 노즐과 충돌판과의 거리(H/d)와 당량비(Φ) 그리고 레이놀즈 수(Re)에 대한 효과를 배제하기 위해 Φ 를 0.9, H/d 를 2.0 그리고 Re 를 2200으로 고정하였다. 따라서 본 연구의 주요변수는 H_2 - CO 의 조성비로서 $H_2 : CO = 10 : 90$ (10P)에서 $H_2 : CO = 50 : 50$ (50P)으로 변경하여 조절하였다. 수치해석 조건으로는 충돌판의 온도를 323.15K, 노즐에서 분사되는 혼합기의 온도를 300K로 고정하여 수치해석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염형상

본 절에서는 먼저 실험적으로 부상된 충돌 제트 화염의 조성비 변화에 따른 화염의 거동을 확인하고 이를 분석하여 부상된 충돌 제트화염의 형상을 파악하였다. Fig. 3은 H/d 를 2.0, Φ 를 0.9로 고정한 상태에서 조성비 변화에 따른 화염의 직접 사진을 나타내었다. 화염의 이미지는 모든 조건에서 동일한 노출 조건과 거리에서 촬영하였다. 비교적 H_2 의 조성비가

낮은 10P조건에서는 화염의 생성위치가 충돌판에 부딪혀 매우 얇은 평면화염이 형성된다. H_2 의 조성비가 증가함에 따라 화염대가 두꺼워지며, 화염대의 생성위치가 노즐 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상에 관해서는 다음절인 화염구조와 연소반응의 수치해석을 통해서도 확인되며 상세한 설명을 하게 된다. 한편, H_2 의 조성비 증가에 따라 나타나는 현상 중 하나인 화염의 떨림현상은 본 연구와 별도로 향후 지속된 연구를 통하여 그 현상을 규명하고자 한다.

3.2 화염구조

본 절에서는 H_2 - CO 의 조성비에 따른 화염의 구조적 특성을 살펴봄으로써 화염의 거동과 연소반응을 구체적으로 분석해 보기로 한다. 이를 위해 화염면 (Flame front) 전후에서 발생하는 반응의 변화를 분석하여 화염온도와 축 방향 속도의 변화 특성이 어떻게 변하는지 살펴보았다.

Fig. 4는 부상화염의 화염구조를 이해하고자 Φ 를 0.9, H/d 를 2.0으로 고정한 상태에서 대표적인 사례로 조성비가 30P인 경우 충돌거리에 따른 화염의 온도와 축 방향 속도, 밀도 분포를 보여주고 있다. 축 방향 속도는 분사 노즐 출구를 기준으로 감소하다가 화염대에서 온도의 증가와 함께 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 예혼합된 혼합기가 노즐에서 대기 중으로 확산되면서 운동량의 일부가 주변 공기로 전달됨에 따라 축 방향의 속도는 계속해서 감소하게 되는데 혼합기 연소에 의해 생성된 화염대에서 화염의 층류연소속도(Laminar burning velocity, 이하

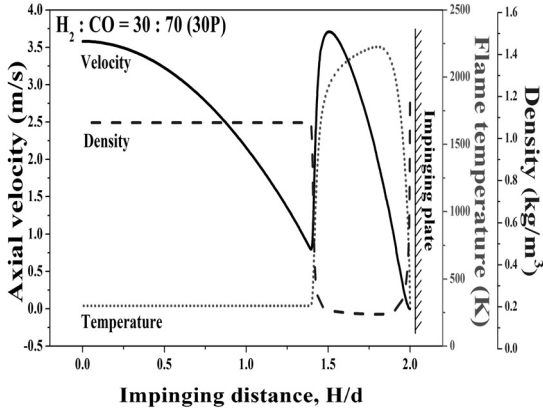


Fig. 4 Simulated axial velocity and flame temperature, density profiles at H₂ : CO = 30 : 70 (30P) for H/d = 2.0, Φ = 0.9

S_L)와 동일해지는 값을 갖게 된다. 이후 급격한 상승은 혼합기가 연소되어 발생하는 연소열에 의해 화염의 온도가 상승하고 이로 인해 밀도가 감소하여 축 방향의 속도가 급격하게 증가하는 것으로 판단하였다.

Fig. 5는 H/d를 2.0, Φ를 0.9로 고정한 경우에서 조성비가 변화함에 따른 축 방향 속도를 나타낸 그래프이다. 조성비가 10P에서 50P로 변화함에 따라 부상화염의 생성 위치가 노즐과 가까워지는 것과 반응대가 넓어지는 것을 볼 수가 있다. 이는 조성비가 10P에서 50P로 변화할수록, CO에 비해 연소속도가 매우 빠른 H₂의 함유량이 증가됨에 따라 화염대가 노즐 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

이는 Fig. 3에 나타낸 화염의 형상과 같은 거동으로 보이며, 이러한 현상은 선택확산(Preferential diffusion) 속도가 빠른 H₂의 증가로 인해 화염의 전파되어 들어오는 속도가 증가하고 그로인해 화염대의 위치가 노즐 쪽으로 이동하는 것으로 보인다. 이때 증가되는 화염의 S_L 는 화염대가 생성되는 위치의 축 방향의 속도 값을 통하여 확인 할 수 있다.

또한 조성비 변화에 따라 축 방향 속도의 최대값이 증가하는 것을 확인할 수 있는데 이는 조성비가 10P에서 50P로 변화할수록 H₂의 함유량 증가로 인해 H₂와 관련된 매우 빠른 연소반응이 촉진되어 반

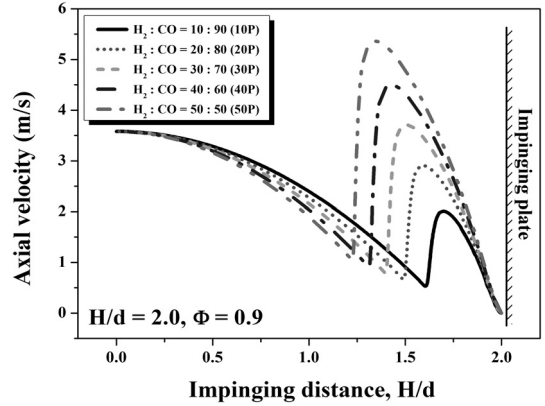


Fig. 5 Simulated axial velocity with various composition ratios for H/d = 2.0, Φ = 0.9

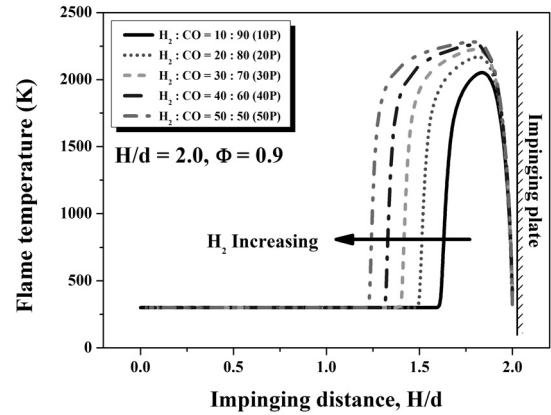


Fig. 6 Simulated temperature with various composition ratios for H/d = 2.0, Φ = 0.9

응성이 큰 H, OH 라디칼 생성이 급격하게 증가되고, 이에 따라 연소반응이 촉진되어 화염의 온도가 증가하고 그로 인해 축 방향의 속도가 증가하는 것으로 판단된다. 즉, H₂ 조성비 증가에 따라 연소속도가 빠른 H₂의 함유량이 증가하여 화염의 위치는 노즐과 가까워지고, 연소반응이 촉진되어 축 방향의 속도가 증가하는 것으로 판단하였다. 이러한 라디칼들의 증가에 대해서는 3.3절에서 자세히 설명될 예정이다.

Fig. 6는 H/d를 2.0, Φ를 0.9로 고정한 경우에서 조성비에 따른 화염의 온도를 나타낸 그래프이다. 조성비가 10P에서 50P로 변화할수록 반응대가 두꺼워지며, 화염의 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이

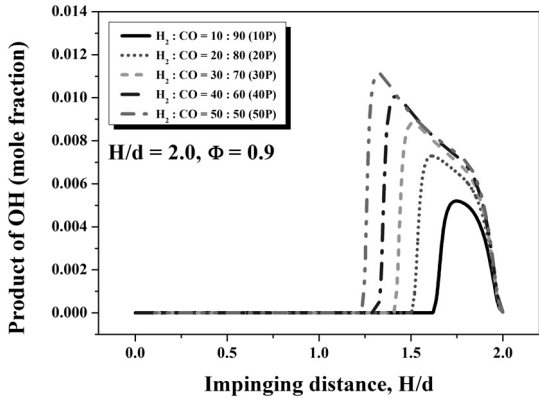


Fig. 7 Profiles of OH radical with various composition ratios for $H/d = 2.0$, $\Phi = 0.9$

러한 현상은 Fig. 3을 통하여 먼저 확인 할 수 있다. 이는 증가된 H_2 에 의해 연소속도가 증가하고 그로 인해 화염대가 노즐 쪽으로 이동하기 때문에 후반부의 반응대가 증가하여 나타나는 현상으로 보인다. 그런데 흥미로운 사실은 초기 반응대 이후 정체점 부근에서 화염의 온도가 최대값으로 나타난다는 것이다. 이와 같이 후반부의 반응대에서 온도가 지속적으로 증가하는 현상은 초기 반응대에서 연소되지 못한 H_2 와 CO 가 정체점 부근에서 각각 $R3(OH + H_2 = H + H_2O)$, $R28(CO + OH = CO_2 + H)$ 반응을 통한 최종 연소반응에 의해 화염의 온도가 증가하는 것으로 판단된다. 이에 대한 상세한 연소반응에 대해서는 다음 절에서 다시 설명이 된다.

3.3 상세 반응기구

Fig. 7는 앞 절에서 나타난 조성비가 10P에서 50P로 변화함에 따른 연소반응의 대해 상세 반응기구를 자세히 살펴보고자 H/d 를 2.0, Φ 를 0.9로 고정한 상태에서 조성비에 따른 OH 라디칼의 생성량을 보여 주고 있다. 보는 바와 같이 조성비가 10P에서 50P로 변화함에 따라 OH 라디칼의 생성량이 증가하고, 생성되는 구간이 두꺼워지는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 조성비가 10P에서

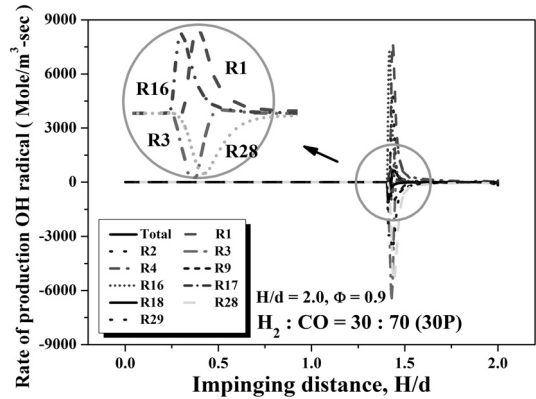


Fig. 8 Major reaction process of OH radical at $H_2 : CO = 30 : 70$ (30P) for $H/d = 2.0$, $\Phi = 0.9$

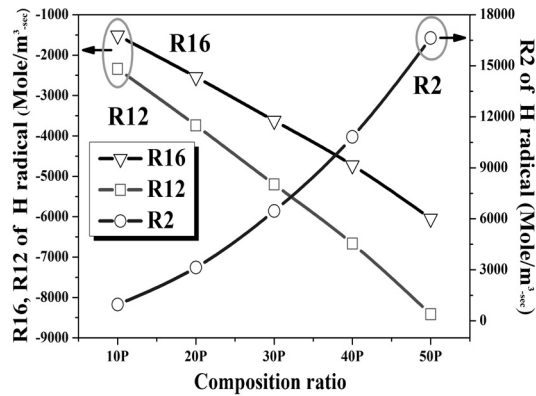


Fig. 9 Major reaction production process of OH radical for $H/d = 2.0$, $\Phi = 0.9$

50P로 변화함에 따라 화염의 반응대가 두꺼워지는 현상과 일치함을 알 수 있다. Fig. 7에 표시된 OH 라디칼 반응들에 대해 좀 더 엄밀히 살펴보고자 대표적으로 조성비가 30P인 경우 OH 라디칼의 반응율이 큰 상위 10개 반응을 Fig. 8에 나타내었으며, 그래프에 대한 이해를 돕기 위해 상위 10개의 상세 반응식은 표2에 간략하게 정리하여 나타내었다. 반응 중 $R1(H + O_2 = O + OH)$, $R16(HO_2 + H = OH + OH)$ 반응은 OH 라디칼의 주된 생성반응이고, $R3(OH + H_2 = H + H_2O)$, $R28(CO + OH = CO_2 + H)$ 반응은 OH 라디칼의 주된 소비반응임을 알 수 있다. 각각의 반응에 대한 자세한 분석은 R16 반응은 Fig. 9에서 R3 반응은 Fig. 10, R1과 R28 반응은

Table 2 Reaction equation

Reaction name	Reaction equation
R1	$H + O_2 = O + OH$
R2	$O + H_2 = H + OH$
R3	$OH + H_2 = H + H_2O$
R4	$H_2O + O = OH + OH$
R9	$H + OH + M = H_2O + M$
R16	$HO_2 + H = OH + OH$
R17	$HO_2 + O = OH + O_2$
R18	$HO_2 + OH = O_2 + H_2O$
R28	$CO + OH = CO_2 + H$
R29	$CO + OH = CO_2 + H$

Fig. 13에서 기술되고 있다.

먼저, Fig. 9는 OH 라디칼의 주요 생성반응으로 조성비에 따른 R16($HO_2 + H = OH + OH$), R12($H + O_2(+M) = HO_2(+M)$), R2($O + H_2 = H + OH$) 반응의 반응율을 나타낸 그래프이다. 그래프를 통해 알 수 있듯이 H₂ 조성비 증가에 따라 R16 반응의 반응율이 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 조성비가 10P에서 50P로 변화함에 따라 H₂를 소비하는 R2 반응의 반응율이 증가되고 그에 따라 H 라디칼의 생성량이 증가하게 된다. 이때 증가된 H 라디칼에 의해 R12 반응이 촉진되고 이로 인해 생성된 HO₂ 때문에 R16 반응의 반응율이 증가되는 것으로 판단된다. 즉, 조성비가 10P에서 50P로 변화함에 따라 증가된 H₂ 때문에 R2, R12반응이 촉진되고 그에 따라 R16 반응의 반응율이 증가하여 OH 라디칼 생성량이 증가하게 되는 것이다.

다음은 OH 라디칼 소비반응 중 소비율 역전현상이 나타나는 R3($OH + H_2 = H + H_2O$), R28($CO + OH = CO_2 + H$) 반응에 대해 자세히 살펴보고자 한다. Fig. 10은 H/d를 2.0, Φ를 0.9로 고정한 상태에서 R3, R28 반응의 반응율을 조성비에 따라 나타내었다. H₂ 조성비 증가에 따라 R3, R28 반응이 동일하게 증가하지만 조성비가 10P인 경우 R3 반응이 R28 반응보다 반응율이 작으나 이후 조성비가 30P로 증가함

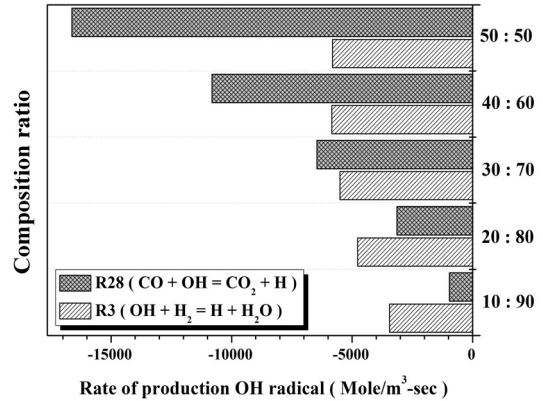


Fig. 10 Rate of progress R3, R28 of OH radical with composition ratios for $\Phi = 0.9$, $H/d = 2.0$

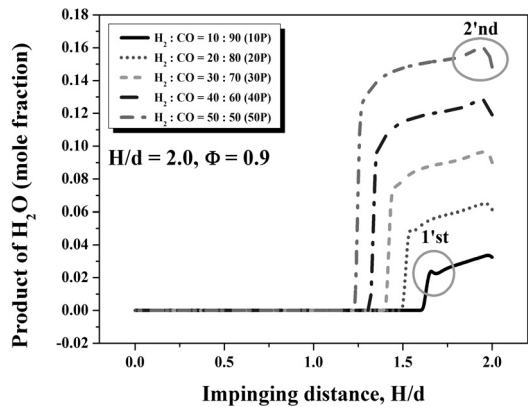


Fig. 11 Simulated product of H₂O concentration profiles with the composition ratios for $H/d = 2.0$, $\Phi = 0.9$

에 따라 R3 반응이 R28 반응 보다 반응율이 커지는 것을 볼 수가 있다. 이는 조성비가 10P일 때 생성된 OH 라디칼이 CO 보다 비교적 반응속도가 빠른 H₂를 포함한 R3 반응에 의해 먼저 소비반응이 일어나지만 H₂의 함유량이 매우 작기 때문에 R3 반응에서 미처 반응하지 못한 OH 라디칼이 R28 반응을 통해 소비되기 때문이다. 이후 조성비가 30P로 변화함에 따라 H₂의 함유량이 증가하여 R3 반응의 반응율이 증가되고, 이로 인해 R28 반응에 의해 소비되는 OH 라디칼이 감소됨에 따라 R28 반응의 반응율의 증가폭이 감소하여 역전현상이 나타나게 된다. 즉, 조성비가 10P에서 50P로 변화할수록 반응속도가 빠른 H₂의

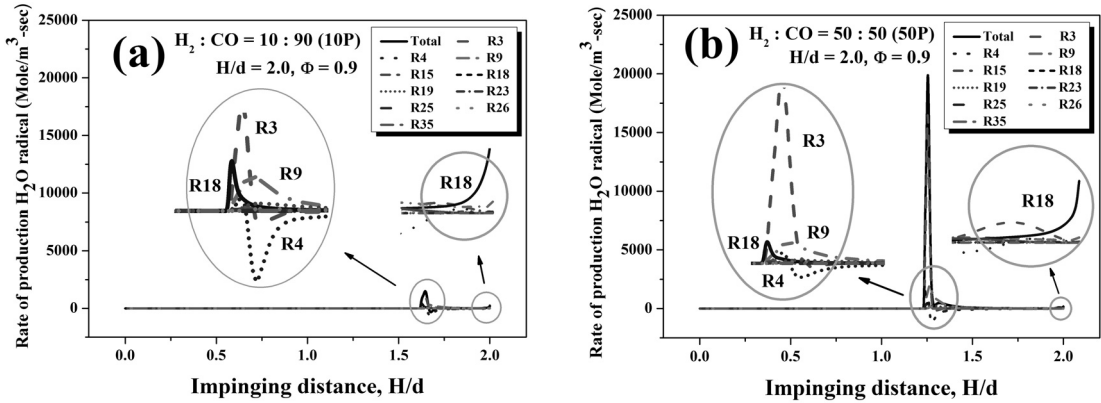


Fig. 12 Production rate of H₂O concentration with composition ratios for $\Phi = 0.9$, $H/d = 2.0$, (a) 10P, (b) 50P

함유량이 증가하여 R3 반응의 반응율이 증가하고, 이로 인해 R28 반응과 반응하는 OH 라디칼이 감소하여 R28 반응의 반응율이 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 11는 Φ 를 0.9, H/d 를 2.0으로 고정한 상태에서 조성비 변화에 따른 H₂O의 분포를 나타낸 그래프이다. 조성비가 변화함에 따라 H₂O의 생성량이 증가하는 구간의 Fig. 6에서 나타난 화염 온도가 증가하는 구간이 일치하는 것을 확인할 수 있으며, H₂ 조성비 증가에 따라 반응대에서 H₂O 생성량이 증가하고, 초기 반응대 부근에서 1차 피크점과 정체점 부근에서 2차 피크점이 나타나는 것을 볼 수가 있다. 이에 대한 현상은 다음의 Fig. 12를 통해서 확인할 수 있게 된다.

Fig. 12는 H/d 를 2.0, Φ 를 0.9로 고정한 상태에서 조성비가 (a)는 10P, (b)는 50P에서 H₂O 반응 중 반응율이 큰 상위 10개 반응을 나타낸 그래프이다.

Fig. 12-(a) 그래프를 통해 알 수 있는 것은 앞서 Fig. 11에서 나타난 1차 피크가 H₂O를 생성하는 반응 중 반응율이 큰 R3 ($OH + H_2 = H + H_2O$) 반응에 의해 기인된 것으로 판단된다. 또한 R3 반응 이후 R4($OH + OH = O + H_2O$) 반응의 역반응으로 인하여 H₂O가 소비되지만 R9($H + OH + M = H_2O + M$) 반응에 의해 다시 H₂O가 생성되어 Fig. 11의 10P 그래프에서 1차 피크 후 잠시 감소된 H₂O가 다시 증가

하는 것을 볼 수가 있다.

Fig. 11의 2차 피크 현상은 Fig. 12에서 나타난 그래프의 정체점 부근에서 반응율이 증가하는 R18 ($HO_2 + OH = O_2 + H_2O$) 반응에 의해 나타나는 것으로 판단된다. 이는 Fig. 9에서 나타난 H 라디칼 반응 중 R2($O + H_2 = H + OH$) 반응을 통해서 생성된 H 라디칼로 인해 R12($H + O_2(+M) = HO_2(+M)$) 반응이 정체점 부근에서 반응율이 증가하여 R18 반응에 관여하는 HO₂ 생성량이 증가됨에 따라 R18 반응도 정체점 부근에서 증가하는 것으로 사료된다. 즉, H₂ 조성비 증가에 따라 R3, R12 반응이 촉진되어 H₂O 생성량이 증가하는 것으로 판단된다.

한편, CO 산화반응에 관하여 살펴보면, Fig. 13은 $H/d = 2.0$, $\Phi = 0.9$ 에서 조성비가 50P인 경우 CO의 주요 산화반응 과정을 보여주고 있다. 그래프에서 알 수 있는 것은 CO 산화반응이 $R29 \rightarrow R1 \rightarrow R28$, R4 과정을 통해서 산화반응이 진행됨을 확인할 수 있다. 조성비가 10P에서 50P로 변화함에 따라 화염대에서 OH 라디칼 생성량이 증가하여 CO가 소비되는 R29 ($CO + OH = CO_2 + H$) 반응이 촉진되고 이에 따라 생성된 H 라디칼이 R1($H + O_2 = O + OH$) 반응을 촉진시키게 된다. 이후 R1 반응에 의해 생성된 OH 라디칼은 다시 CO 산화과정인 R28($CO + OH = CO_2 + H$) 반응, O 라디칼은 연쇄 분기과정인 R4

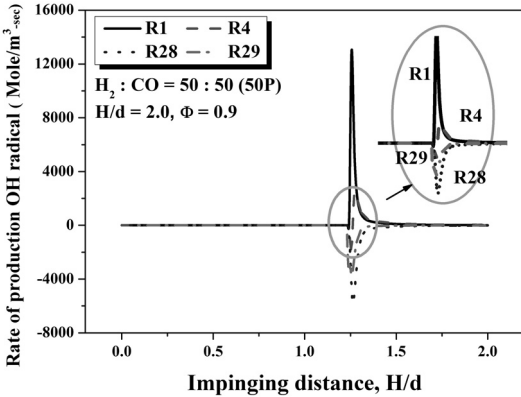


Fig. 13 Oxidation of CO at H₂ : CO = 50 : 50 (50P) for H/d = 2.0, $\Phi = 0.9$

($\text{H}_2\text{O} + \text{O} = \text{OH} + \text{OH}$) 반응을 촉진시키는 것으로 CO의 연소 산화반응이 진행되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

합성가스(H₂/CO) 예혼합 층돌 제트화염에서 연료 조성비에 따른 부상된 평면 화염의 상세 연소반응 및 화염구조를 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 부상된 평면 H₂ 조성비 증가에 따라 화염의 두께가 두꺼워지며, 화염의 위치는 노즐과 가까워지는 것을 확인하였다.
- 혼합물의 축 방향 속도는 고온의 화염에 의해 감소된 밀도로 인해 화염의 반응대에서 급격하게 증가하며, H₂ 함유량이 증가함에 따라 화염의 온도가 증가하여 이로 인해 축 방향 속도 또한 증가하는 것으로 나타났다.
- 화염의 고온부에 위치하는 OH 라디칼은 화염의 반응대가 두꺼워지는 현상과 일치함을 확인하였으며, H₂ 조성비 증가에 따라 R3과 R28 반응율에서 역전현상이 발생하였는데, 이는 반응속도가 빠른 H₂의 함유량이 증가함에 따라 R3 반응을 촉진시켜 나타나는 현상으로 분석되었다.

4) H₂ 조성비 증가에 따라 H₂O 라디칼의 반응 영역대가 두꺼워지고, 생성농도도 증가하는 것으로 나타났다으며, 초기 반응대와 정체점 부근에서 1차, 2차 피크점이 나타나는 것을 확인하였다.

5) 초기 반응대에서 OH 라디칼의 1차 피크현상은 R3 반응에 의해 기인되며, 2차 피크현상은 조성비 변화에 따라 H₂의 함유량이 증가됨으로 R2 반응에 의해 생성된 H가 R12 반응을 촉진시켜 생성된 HO₂가 최종적으로 R18 반응을 촉진시켜 H₂O 생성물에 2차 피크가 나타나는 현상으로 파악되었다.

6) 본 연구를 통해 R29 반응에 의해 생성된 H 라디칼은 R1 반응을 촉진시켜 OH와 O 라디칼을 생성시키고 이들 라디칼들은 다시 R28과 R4 반응을 촉진시켜 이루어지는 CO의 주요 산화반응임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제번호:2015-2010-103050).

References

- Z. Zhang, Z. Huang, and J. Xiang, "Measurements of laminar burning velocities and Markstein lengths for methanol/air/nitrogen mixtures at elevated pressures and temperatures", *Combustion and Flame*, 2008, Vol. 155, p. 358-368.
- C. Prathap, and M. R. Ravi, "Investigation of nitrogen dilution effects on the laminar burning velocity and flame stability of syngas fuel at atmospheric condition", *Combustion and Flame*, 2008, pp. 31-37.
- K. S. Sim, B. L. Jang, K. M. LEE, "A Study on the Lifted Flames Structure with Strain Rate

- in Premixed Impinging Jet Flames of Syngas (H_2/CO)”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society., 2015, Vol. 26, No. 4, pp. 347-356.
4. B. G. Jeong, K. M. LEE, “A Study on the Laminar Burning Velocity and Flame Structure with Content in a Wide Range of Equivalence Ratio of Syngas (H_2/CO)/Air Premixed Flames” The Korean Soc. of Combust, 2014, Vol. 19, No. 1, pp. 17-28.
 5. K. J. Kang, T. J. Park, C. H. Hang, and K. M. LEE, “A Study on Combustion Characteristic of Synthetic Gas Air Lifted Premixe Flames with High Strain Rate in an Impinging Jet Combustion Field”, The Korean Soc. of Combust, 2011, Vol. 16, No. 4, pp. 31-37.
 6. J. Y. Park, K. M. Lee, C. H. Hwang, “Stability Characteristic of Syngas (H_2/CO)/Air Premixed Flames using an Impinging jet Burner”, Korean Soc. of Combust, 2011, Vol. 16, No. 1, pp. 15-21.
 7. M. E. Coltrin, R. J. KEE, G. H. Evans, E. Meeks, F. M. Rupley, and J. F. GREAR, “Spin (Version 3.830: A Fortran Program for Modeling One-Dimensional Rotating Disk/Stagnation Flow Chemical Vapor Deposition Reactor”, Sandia National Lab., 1991.
 8. R. J. KEE, F. M. Rupley, and J. A. Miller, “CHEMKIN-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics”, Sandia National Lab., SAND89-8009-1989.
 9. M. E. Coltrin, R. J. Kee, and F. M. Rupley, “SURFACE CHEMKIN (Version 3.7): A Fortran Package for Analyzing Heterogenous Chemical Kinetics at a Solid Surface Gas Phase Interface”, Sandia National Laboratory Report, SAND90-8003, 1990.
 10. R. J. Kee, Dixon Lewis, G. J. Warnatz, M. E. Conltrin, and J. A. Miller, “A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multi Component Transport”, Sandia National Laboratory Report, SAND86-8246, 1986.
 11. J. F. Grear, “The Twopnt Program for Boundary Value Problems”, SAND91-8230, 1991.
 12. S. G. Davis, A. V. Joshi, H. Wang, F. Egolfopoulos, “An Optimized Kinetic Model of H_2/CO Combustion”, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, pp. 1283-1292, 2005.