

합성가스(H₂/CO) 예혼합 충돌 제트화염에서 신장률에 따른 부상된 화염 구조에 관한 연구

심근선¹ · 장병록² · 이기만^{1†}

¹순천대학교 기계·우주항공공학부, ²(주)에스에이씨 기술연구소

A Study on the Lifted Flame Structure with Strain Rates in Premixed Impinging Jet Flames of Syngas (H₂/CO)

KEUNSEON SIM¹, BYOUNGLOK JANG², KEEMAN LEE^{1†}

¹School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon National University,
413, Jungang-ro, Sunchoen-si, Jeollanam-do, Korea

²R&D Center, SAC Co., Ltd., Injusandan-ro, Chungnam-do, Korea

Abstract >> A study has been conducted numerically to investigate the lifted flat syngas flame structure of impinging jet flame configuration with the global strain rates in 10% hydrogen content. In this study, the effects of strain rate were major parameters on chemistry kinetics and flame structure at stagnation point. The numerical results were calculated by SPIN application of the CHEMKIN package. The strain rates were adjusted with Reynolds numbers of premixed syngas-air mixture. Different flame shapes were observed with different strain rates. As strain rate has increased, the flame temperature and axial velocity have been decreased due to the flame heat loss increment, and the OH radical reaction zones become narrower but each mole fractions are still constant. Also, the reversion of H₂O product near stagnation point has been found out when strain rate has increased. This phenomenon is attributed to the rapid production of oxidizing radical reaction such as the R12 (H+O₂(+M) = HO₂(+M)), which makes the R18 (HO₂ + OH = O₂ + H₂O) reaction increment.

Key words : Impinging jet flame(충돌 제트화염), Syngas(합성가스), Lifted flame(부상화염), Strain rate(신장률), Flame structure(화염구조)

Nomenclature

H/d : dimensionless impinging distance

Φ : fuel/air equivalence ratio

Re : Reynolds number

q''_{st} : heat flux of stagnation point, kW/m²

a_g : global strain rate, s⁻¹

S_L : laminar burning velocity, m/s

1. 서론

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

Received: 2015.08.04 in revised form: 2015.08.20 Accepted: 2015.8.30

Copyright © 2015 KHNES

충돌 제트화염(impinging jet flame)은 연소실내에서 대상물이나 열교환기 등에 화염을 직접 부딪쳐

가열하는 연소방식으로 탁월한 전열성능을 가지고 있어 반도체 제조 및 금속, 제지, 유리 가공 등의 산업전반에서 사용되어 왔다. 이러한 충돌제트를 사용한 공정에서는 균일가열을 위해 예혼합 방식의 단일 연료를 사용해왔지만, 최근 에너지고갈 문제로 인하여 기존에 사용되던 단일조성 연료가 아닌 연료를 혼합하여 사용하는 혼합가스(blend gas)를 연료로 사용하는 추세이다¹⁾.

혼합가스에는 제철소와 정유사 공정과정의 부생가스(by-product gas), 매립지 등에서 배출되는 바이오가스(biogas)와 석탄의 가스화공정에서 생산되는 합성가스(syngas) 등이 있다. 이중 합성가스의 경우 수소(H₂)와 일산화탄소(CO)가 대부분으로 다른 일반 탄화수소계열의 연료에 비해 연소속도가 빠르고 연소효율 및 배기 배출성능이 뛰어난 것으로 알려져 있다^{2,3)}.

하지만 주성분인 수소는 다른 일반 탄화수소 연료에 비해 연소속도가 매우 빠르고 화염거동도 상이하여 조성비의 변화가 연소기 주요성능인 점화와 소염, 역화현상, 화염불안정 등 연소성능에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다^{4,5)}.

따라서 이처럼 수소가 함유된 합성가스 연소에서 연소기의 안정성과 최적화된 설계정보를 도출하기 위해서는 조성비(composition ratio), 당량비(equivalence ratio)의 변화와 같은 연료사양과 운전조건에 직결된 연소에 관한 연구가 우선적으로 수행되어야 한다.

본 연구팀에서는 관련 분야에 유익한 정보를 제공할 목적으로 수소가 포함된 청정연료의 충돌가열을 모사할 수 있도록 합성가스 충돌제트 연소시스템을 구성하여 이에 대한 연구를 진행하였다. 이 경우 피가열물로 모사된 충돌판(impinging plate)은 열교환기 형태로 화염으로부터 피가열물로 전달되는 열전달율을 정량적으로 측정할 수 있어 화염의 연소성능과 함께 열전달성능을 동시에 평가할 수 있다는 관점에서 좋은 장점을 지니게 된다. 이때 충돌판의 정

체점(stagnation point)에서 발생하는 유체역학적 특성과 연소혼합물의 화학반응사이의 상관관계는 충돌제트의 연구에서 매우 중요한 물리적 특성을 갖게 된다.

이러한 정체점에서의 연소반응은 거시적인 화염의 형상을 통하여 확인하기에는 제한적이며, 엄밀한 화염의 연소반응을 확인하기 위한 화염의 구조(structure)에 대한 이해가 필요하다. 화염의 형상은 물리적으로 3차원의 형상을 갖지만 충돌 제트화염에서의 주된 연구관점인 정체점에서의 유체역학적 특성과 화학반응사이의 상관관계는 정체점 기준으로 1차원 해석만으로도 충분한 모사가 가능하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 이전연구^{6,7)}와 동일한 수소 10%의 조성비에서 실험적으로 파악하기 어려운 충돌화염의 상세구조를 이해하기 위하여 1차원의 기하학적 형상을 갖는 부상된 충돌 제트화염을 통해 충돌 제트화염의 특성을 파악하고자, 부상된 일자(-字)형상인 평면형태의 충돌 제트화염을 해석하기에 적합하도록 Coltrin 등이 개발한 Chemkin code를 기반으로 개발된 1차원 수치해석 코드인 SPIN-Code⁸⁾를 통해 수치해석을 수행하였다.

2. 실험장치 및 수치해석

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 이전에 보고한 연구^{4,7)}와 유사한 실험장치로 Fig. 1에 개략적으로 나타내고 있다. 보다 정확한 화염의 특성을 관찰하기 위하여 버너는 출구에서 속도분포가 균일한 층류 유동을 형성하도록 버너 출구직경 대비 교축비가 36인 수축형 노즐(contraction type nozzle)을 사용하였다. 버너의 노즐직경은 내경이 10 mm로 노즐 끝(tip) 부분은 화염에 의해 예열되지 않도록 최대한 얇고 날카롭게 가공하였다. 버너의 전체적인 길이는 200

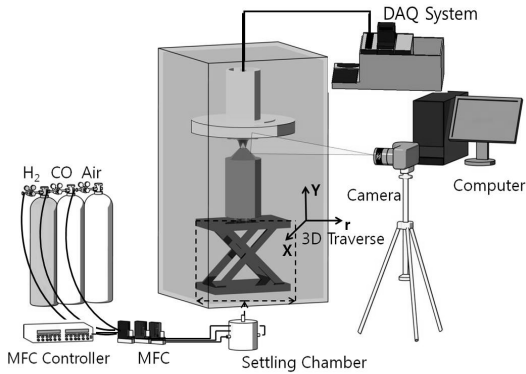


Fig. 1 Experimental Set-up

mm로 역화방지와 난류억제를 위하여 버너 하단부에 지름 2.5 mm인 스테인레스 볼을 넣었고 그 위에 메쉬층(mesh layer)을 차례로 형성시킴으로써 버너로 공급되기 전 정체실(settling chamber)을 거쳐 균일하게 예혼합된 합성가스-공기의 혼합기가 완전 발달된 층류상태로 분사되도록 하였다. 또한 층류화염 인관개로 외부 교란에 의한 화염 떨림을 방지하기 위해 사각형의 아크릴 실드(shield)를 버너와 충돌판 바깥쪽에 설치하였다.

연구는 화염의 특성을 보다 엄밀하게 관찰하기 위하여 99.999%의 고순도수소와 일산화탄소를 사용하였으며, 산화제도 99.99%의 고순도 압축용 공기를 사용하였다. 이들 유량은 버블(bubble) 유량계로 교정한 습식가스미터(wet gas meter)와 질량유량계(MFC)를 통해 정밀한 양으로 측정되어 합성가스 조성비에 따른 당량비 계산에 사용하였다.

충돌판은 각 실험조건에서 화염의 크기를 고려하여 지름 180 mm의 알루미늄 재질로 제작하였으며 노즐과 충돌판간 조절은 상하 이송기구와 좌우 이송장치를 이용하여 고정된 충돌판에 대해 상대적으로 3차원이송이 가능하게 하였다. 충돌판의 중심에는 화염으로부터 전달되는 전열성능을 측정하기 위해 전체 열유속(total heat flux) 양을 측정할 수 있는 열유속 센서(Vatell co., TG-1000 수냉식)를 장착하였고, 센서 냉각과 충돌판 표면에 응축수가 생성되는

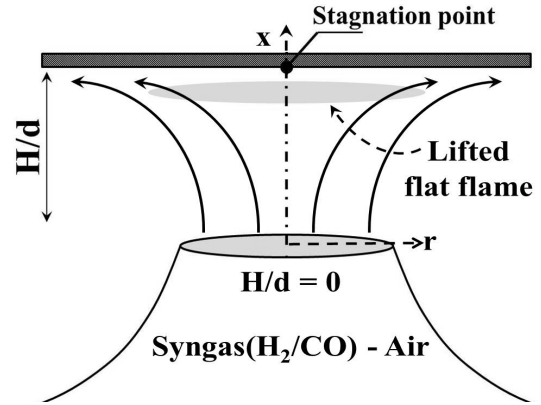


Fig. 2 Schematic diagram of the configuration for lifted impinging jet flame

것을 방지하기 위해 별도의 온도조절기를 통하여 냉각수의 온도를 약 50°C로 유지시켰다.

2.2 수치해석모델

부상된 예혼합의 충돌 제트화염은 Fig. 2처럼 화염이 노즐에서 부상되어 노즐과 충돌판 사이에서 충돌판과 평행하게 형성된 일자(-)형 평면화염으로, 정체점을 기준으로 1차원적 상사성을 갖게 된다. 이러한 일차원의 화염을 수치해석하기 위해 SPIN-Code⁹⁾를 사용하였다.

SPIN-Code는 무한대의 직경을 갖는 노즐과 무한대의 직경을 갖는 충돌판 사이에 존재하는 1차원의 평면화염을 모사하며, 이를 수치해석 하기 위해 화학소스(chemical source) 및 지배 방정식(governing equation) 등은 Kee 등이 제작한 Sandia National Lab.의 Chemkin package¹⁰⁾를 기반으로 하고 있으며, 전달 물성치 등은 Transport package¹¹⁾, 충돌판에서 일어나는 화학반응을 모사하기 위해 Surface chemkin package¹²⁾, 수치해석 알고리즘은 Twopnt software¹³⁾ 사용하여 개발되었다. 본 연구의 상세반응기구로는 2003년도 H₂, CO의 고온연소에 적합하다고 확인되어 Syngas 연료 등의 계산에 주로 사용되는 Davis mechanisms를 사용하였다.

2.3 수치해석 방법

본 연구에 사용된 대표적인 변수조건인 레이놀즈 수 (Reynolds number, 이하 Re), 무차원 층돌거리(Impinging distance, 이하 H/d) 그리고 당량비(Equivalence ratio, 이하 Φ)는 Table 1에 요약하여 나타내었다. 부상된 층돌 제트화염 같은 평면화염의 경우 화염의 스트레치는 혼합기의 분사 속도(u)나 층돌거리(h)의 구배로 정의되는데, 이 경우 전체 신장률(Global strain rate, 이하 a_g)은 다음의 식(1)을 통해 정의되는데, 본 연구에서 정의된 a_g 는 부상된 층돌 제트화염에서 Re, H/d 대신 사용하였다.

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

또한 본 연구의 수치해석에서는 당량비(Φ)와 노즐 경으로 무차원한 노즐과 층돌판간의 거리(H/d)에 대한 효과를 배제하기 위해 $\Phi = 0.9$, H/d = 2.0으로 고정하고, Re를 최소 600에서 최대 2200으로 변경하여 a_g 를 조절하였다.

수치해석은 실험과 동일하게 층돌판의 온도를 323.15K, 노즐에서 분사되는 혼합기의 온도는 300K로 고정하였다. 합성가스의 조성비는 물분율 기준으로 H₂:CO = 10:90, 혼합 당량비는 0.9로 고정하였다.

Table 1 Experimental and Numerical conditions

Fuel	High purified H ₂ , CO
Oxidizer	High purified Air
Composition ratio	H ₂ :CO = 10:90
Diameter of nozzle (d)	10 mm
Equivalence ratio (Φ)	0.9
Reynolds number (Re)	600 - 2200
Impinging distance (H/d)	2.0
Simulation code	SPIN code

3. 결과 및 고찰

3.1 화염 형상

본 절에서는 층돌 제트화염의 중요 변수인 Φ 와 a_g 의 변화에 따른 층돌 제트화염의 형상을 확인하고, 이를 분석하여 부상된 층돌 제트화염의 특성을 파악하고자 한다.

Fig. 3에는 H/d를 2.0으로 고정하고 Re를 조절하여 변경한 a_g 의 변화에 따라 Φ 별로 나타난 층돌 제트화염의 대표적인 안정화 선도를 나타내었다. 전체적인 특징으로는 Φ 의 변화에 상관없이 높은 a_g 에서 부상된 층돌 제트화염이 나타나는 것을 볼 수 있으며, Φ 가 증가할수록 부착된 층돌 제트화염의 영역이 넓어지는 것을 볼 수 있다. 이는 이전 연구자^{3,4)}들이 보고한 바와 같이 H₂:CO=10:90의 조성비에서 합성가스 층류 연소속도(laminar burning velocity, 이하 S_L)가 Φ 가 2.5인 근처에서 가장 빠르게 나타나기 때문에 Φ 가 증가하여 2.5에 가까워지면서 S_L 이 증가하여 화염이 높은 a_g 에서도 쉽게 부상되지 않고 노즐에 부착된 층돌 제트화염 형태로 존재하는 것으로 판단된다.

Fig. 3에서 나타난 층돌 제트화염의 안정화 선도 상에서 본 연구의 대상화염은 부상된 평면화염에 대

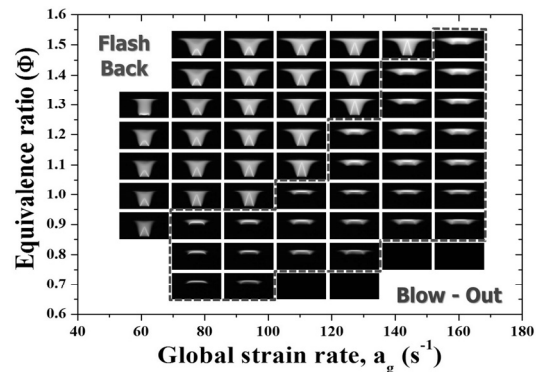


Fig. 3 Stability map of impinging jet flames with the strain rates, for H/d=2.0(Insides red line are lifted- flame)

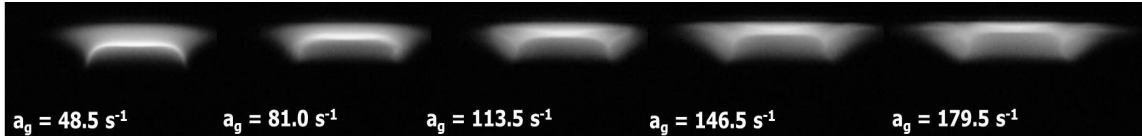


Fig. 4 Direct photo of lifted impinging jet flame with the strain rates for $H/d = 2.0$ and $\Phi = 0.9$

한 것이며, 본 연구의 수치계산 대상에 해당되는 부상된 평면화염이 비교적 넓은 영역에서 분포하는 $\Phi = 0.9$ 조건에서 a_g 의 변화에 따른 화염의 거시적인 형상을 Fig. 4에 별도로 나타내었다. 낮은 a_g 에서의 화염은 청염의 반응대 이후에 적염의 외부 반응대가 나타나며, a_g 가 증가할수록 내부 반응대가 충돌판에 가까워지면서 외부화염대가 없어지는 것을 볼 수 있다. 부상된 충돌 제트화염은 a_g 가 증가할수록 스트레치 되어 정체점 부근의 화염이 얇아지고, 전체적으로 넓어지는 것을 볼 수 있다.

3.2 연소반응

본 절에서는 수치해석을 통하여 부상된 충돌 제트 화염의 연소반응을 확인하고, a_g 의 변화에 따른 화염의 연소반응 변화를 파악하고자 한다.

Fig. 5는 a_g 을 113.5, Φ 를 0.9으로 고정한 경우 충돌면간의 거리에 따른 정체점을 기준으로 1차원 수치 해석한 부상된 충돌 제트화염의 온도 및 축 방향 속도분포를 나타내고 있다. 축 방향의 속도는 충돌면으로 진행하면서 예혼합된 혼합기가 노즐을 지나 대기중으로 분사되어 확산되면서 감소하던 혼합기의 유속이 부상된 충돌 제트화염의 화염대 부근에서 갑자기 급속하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 미연 혼합기가 화염대에서 연소되어 발생하는 연소열에 의해 온도가 증가하고 그로 인해 밀도가 낮아지면서 혼합기의 유체 속도가 증가하는 현상으로 나타나기 때문이다.

Fig. 6은 Φ 를 0.9, H/d 를 2.0으로 고정한 조건에서 a_g 에 따른 화염의 온도 분포를 나타낸 그래프 이다.

a_g 가 증가함에 따라 화염 온도의 최대점이 낮아지고 화염의 반응대가 얇아지는 것을 볼 수 있다. 이는 a_g 가 증가함에 따라 화염이 스트레치 되어 화염이 얇아지고 충돌판에 가까워져 화염에서 생성된 연소열이 충돌판으로 전달되어 화염의 열손실(heat loss)이 증가하고 그로 인해 화염의 온도가 감소하는 것으로 판단된다. 또한 반응대 내에서 온도분포를 살펴보면

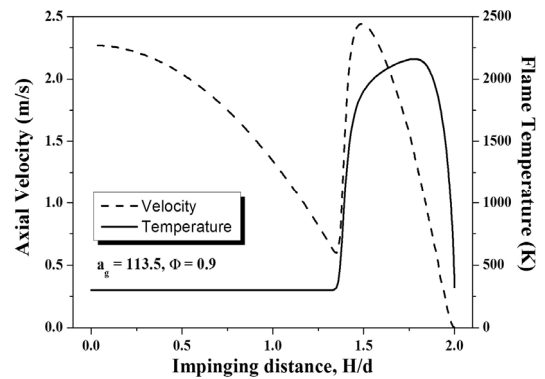


Fig. 5 Simulated axial velocity and flame temperature profiles for $a_g = 113.5$, $H/d = 2.0$, $\Phi = 0.9$

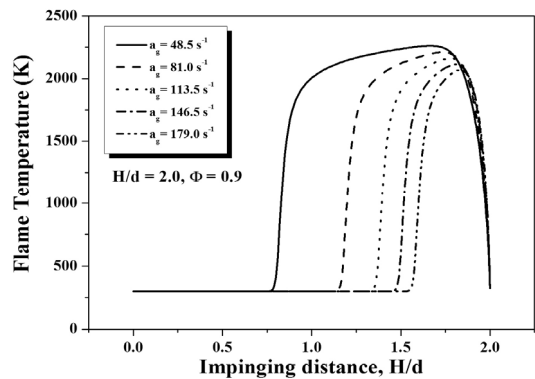


Fig. 6 Simulated flame temperature profiles with the strain rate for $H/d = 2.0$, $\Phi = 0.9$ ($a_g = 48.5 \text{ s}^{-1}$, 81.0 s^{-1} , 113.5 s^{-1} , 146.5 s^{-1} , 179.0 s^{-1})

초기 반응대보다 후반부의 반응대에서 온도가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이처럼 반응대 후반부에서 화염의 온도가 증가하는 현상은 초기 반응대에서 다 연소되지 못한 H₂와 CO가 연소반응 하면서 화염의 온도를 지속적으로 증가시키는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 Φ 를 0.9, H/d를 2.0으로 고정한 조건에서 a_g 의 변화에 따른 정체점의 열유속(heat flux, q''_{st})을 실험적으로 측정하여 나타낸 그래프이다. 정체점의 열유속은 화염에서 층돌판으로 전달되는 화염의 열 전달 특성을 정량적으로 측정할 수 있으며, 이를 통해 a_g 의 변화에 따라 화염에서 층돌판으로 전달되는 열손실의 정도를 파악할 수 있다. Fig. 7에서 나타난 바와 같이 a_g 가 증가함에 따라 정체점의 열유속이 증

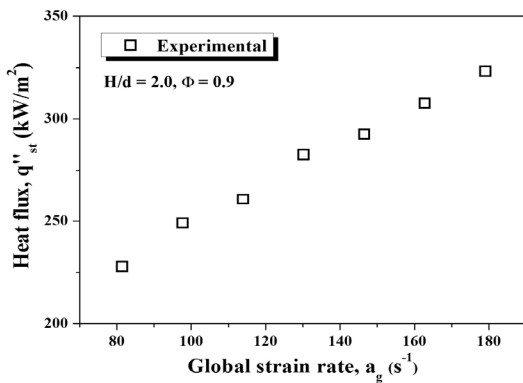


Fig. 7 Experimental results of stagnation point heat flux with the strain rates for H/d = 2.0, $\Phi = 0.9$

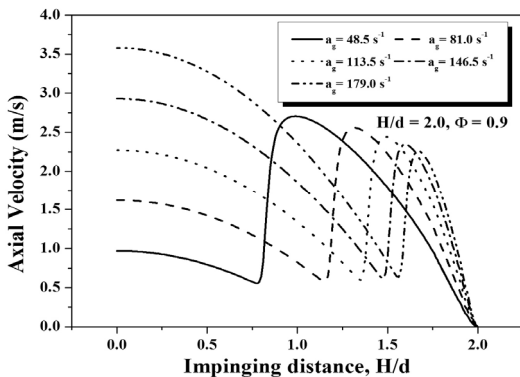


Fig. 8 Simulated axial velocity profiles with the strain rate for H/d = 2.0, $\Phi = 0.9$ ($a_g = 48.5 \text{ s}^{-1}$, 81.0 s^{-1} , 113.5 s^{-1} , 146.5 s^{-1} , 179.0 s^{-1})

가하는 것을 볼 수 있다. 이는 a_g 가 증가하여 화염대가 층돌판에 가까워지면서 화염과 층돌판사이의 열 전달이 활발해져 나타나는 현상으로, 이로 인해 화염의 온도가 낮아지게 되는데 이는 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 a_g 이 증가하게 되면 화염의 온도가 낮아지는 것으로 확인할 수 있다.

Fig. 8은 Φ 를 0.9, H/d를 2.0으로 고정한 조건에서 유체의 분출속도를 조절하여 a_g 따라 축 방향의 속도 분포를 나타내었다. a_g 가 증가함에 따라 축속도의 최대점이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 a_g 가 증가함에 따라 화염의 열손실이 증가하여 화염의 온도가 감소해 혼합기의 밀도가 높아지게 되므로 이로 인한 속도의 감소 현상으로 판단된다.

3.3 상세반응기구

본 절에서는 연소 반응시 발생하는 반응물과 생성물의 상세반응기구를 통해 부상된 층돌 제트화염의 구조를 파악하고자 한다.

Fig. 9는 a_g 를 113.5, Φ 를 0.9, H/d를 2.0으로 고정하고 정체점을 기준으로 1차원 수치 해석한 부상된 층돌 제트화염의 반응물과 주요 생성물들의 농도분포를 나타낸 그래프이다. 반응 분포들의 특성을 살펴

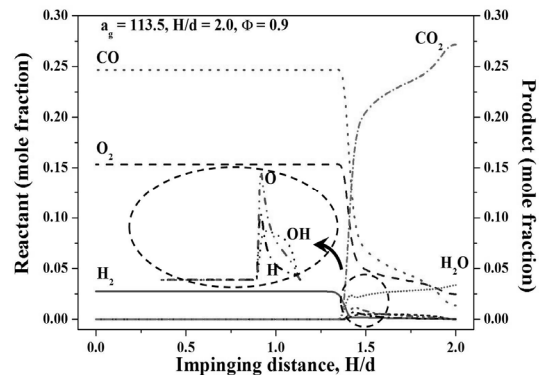


Fig. 9 Simulated reactants (H₂, CO, O₂) and products (O, OH, H, CO₂, H₂O) profiles for $a_g = 113.5$, H/d = 2.0, $\Phi = 0.9$

보면 먼저, 반응물인 H₂, CO, O₂가 노즐에서 분사되어 일정한 몰 분율(mole fraction)을 유지하다가 화염의 반응대에서 연소 반응이 일어나면서 소모되어 농도들이 급격하게 감소되는 반면, 중간 생성물인 O, OH, H들이 일시적으로 생성되다가, 최종 생성물인 CO₂와 H₂O로 반응하는 것을 볼 수 있다. 이 경우 화염의 고온 영역대에서 생성되는 OH 라디칼의 농도 분포를 통해 화염의 연소 반응대를 확인할 수 있으며, H₂O 생성물의 농도분포를 통하여 반응대 이후에서도 고온의 온도로 인해 화학반응이 계속해서 일어나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 $\Phi = 0.9$, $H/d = 2.0$ 으로 고정한 조건에서 a_g 변화에 따른 OH 라디칼의 농도분포를 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 a_g 가 증가하면 OH 라디칼이 발생하는 화염의 고온반응대가 좁아지는 것을 볼 수 있다. 이는 a_g 의 증가에 따라 화염의 반응대가 좁아지면서 화염의 고온 영역대 또한 같이 좁아지는 현상으로 앞서 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 화염의 신장물이 증가함에 따라 화염의 두께가 얇아지는 현상과 일치함을 알 수 있다. 그런데 흥미로운 사실은 OH 라디칼의 반응대는 좁아지지만 최대치는 거의 일정하게 나타남을 볼 수 있다. 이는 좁은 반응대에서도 연소 혼합물이 충분한 연소 반응율로 반응하고 있음을 확인 할 수 있다. 이 경우 Fig. 6에서 나

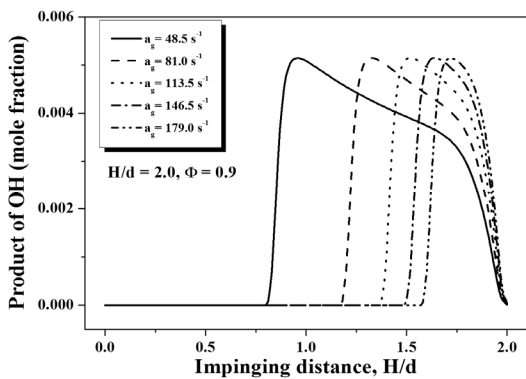


Fig. 10 Simulated product of OH radical profile with the strain rates for $H/d = 2.0$, $\Phi = 0.9$ ($a_g = 48.5 \text{ s}^{-1}$, 81.0 s^{-1} , 113.5 s^{-1} , 146.5 s^{-1} , 179.0 s^{-1})

타난 것처럼 화염의 온도가 낮아지는 현상은 열손실에 의한 영향이 지배적인 것으로 판단된다.

Fig. 11에는 $\Phi = 0.9$, $H/d = 2.0$ 으로 고정하고 a_g 를 최소 값인 48.5 s^{-1} 와 최대 값인 179.0 s^{-1} 으로 조절하여 OH 라디칼의 반응식에 따른 반응율이 큰 상위 7가지 반응을 비교하여 나타낸 그래프이다. 그래프를 보면 a_g 의 변화에 따라 각 반응에서 OH 라디칼의 생성과 소비의 반응률이 약간의 차이가 나지만 거의 일정한 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 10에서 나타난 OH 라디칼의 최대 값이 일정한 현상과 일치하며, a_g 의 변화는 OH 라디칼의 반응율에 큰 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다.

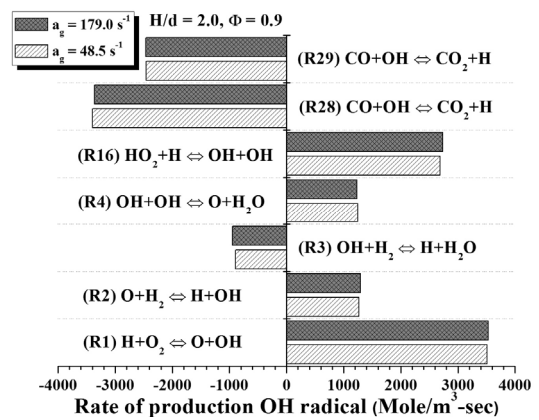


Fig. 11 Rate of progress variable of OH radical with strain rates for $H/d = 2.0$, $\Phi = 0.9$ ($a_g = 48.5 \text{ s}^{-1}$, 179.0 s^{-1})

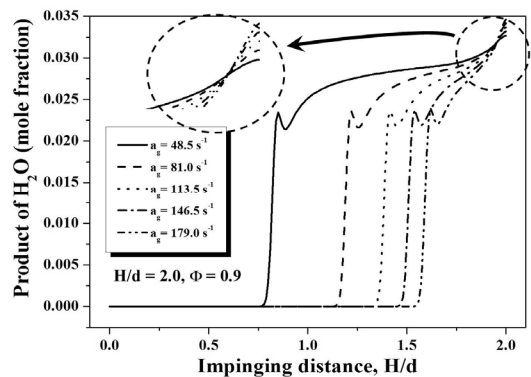


Fig. 12 Simulated product of H₂O concentration profile with the strain rates for $H/d = 2.0$, $\Phi = 0.9$ ($a_g = 48.5 \text{ s}^{-1}$, 81.0 s^{-1} , 113.5 s^{-1} , 146.5 s^{-1} , 179.0 s^{-1})

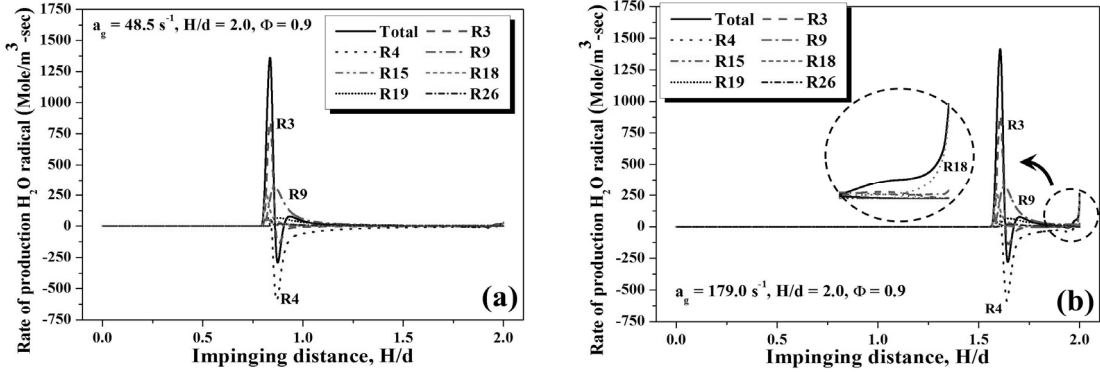


Fig. 13 Production rate of H₂O concentration with the strain rates (a) $a_g = 48.5 \text{ s}^{-1}$, (b) $a_g = 179.0 \text{ s}^{-1}$

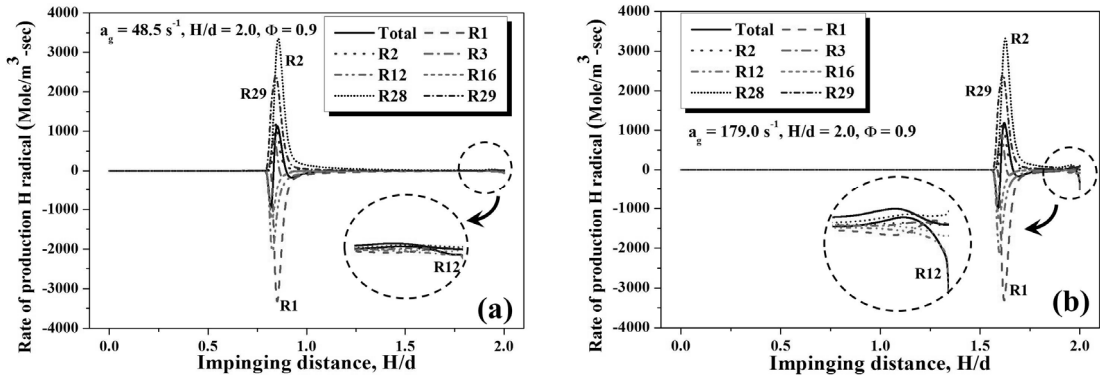


Fig. 14 Production rate of H radical with the strain rates (a) $a_g = 48.5 \text{ s}^{-1}$, (b) $a_g = 179.0 \text{ s}^{-1}$

Fig. 12는 a_g 에 변화에 따른 H₂O의 분포를 나타낸 그래프이다. 화염의 반응대에서 급격히 증가하다 한번의 1차 피크점을 나타낸 후 감소하다 다시 증가하여 2차 피크점을 타나내는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상에 대한 이유는 다음의 그래프인 Fig. 13에서 자세히 언급하겠다. 2차 피크점은 정체점에서 나타나며 2차 피크점은 a_g 의 변화에 따라 역전 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 13는 $\Phi = 0.9$, $H/d = 2.0$ 으로 고정하고 a_g 를 48.5s^{-1} (Fig. 13-(a))와 179.0s^{-1} (Fig. 13-(b))으로 조절할 때 H₂O 생성물의 반응율이 큰 상위 7개 반응을 나타낸 그래프이다. 앞서 Fig. 12에서 나타난 1차 피크는 H₂O를 생성하는 반응들 중에서 반응율이 가장 큰 R3(OH + H₂ = H + H₂O) 반응에 의해 나타난 현

상으로, 이후 H₂O가 R4(OH + OH = O + H₂O)의 역반응에 의해 소비되어 감소하다 지속된 R9(H + OH + M = H₂O + M)반응에 의해 다시 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 12의 2차 피크의 역전 현상은 상대적으로 높은 a_g 인 Fig. 13(b) 그래프의 정체점에서 활발하게 반응하는 R18(HO₂ + OH = O₂ + H₂O)반응에 의해 생성된 H₂O에 증가에 의해 나타나는 현상에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 14는 $\Phi = 0.9$, $H/d = 2.0$ 으로 고정하고 a_g 를 48.5s^{-1} (Fig. 14(a))와 179.0s^{-1} (Fig. 14(b))으로 조절하여 H 라디칼의 반응율이 큰 상위 7개 반응을 나타낸 그래프이다. 그래프를 보면 H 라디칼은 R2, R28, R29반응에 의해 생성되고, R1, R12, R16반응에 의해 소비됨을 알 수 있다. 위 반응들 중 흥미로운 현상을

Table 2 Reaction equations of major reaction

Reaction number	Reaction equation
R1	$H + O_2 = O + OH$
R2	$O + H_2 = H + OH$
R3	$OH + H_2 = H + H_2O$
R4	$OH + OH = O + H_2O$
R9	$H + OH + M = H_2O + M$
R12	$H + O_2 (+M) = HO_2 (+M)$
R15	$H_2O + H = O + H_2O$
R16	$HO_2 + H = OH + OH$
R18	$HO_2 + OH = O_2 + H_2O$
R26	$H_2O_2 + OH = HO_2 + H_2O$
R28	$CO + OH = CO_2 + H$
R29	$CO + OH = CO_2 + H$

나타내는 반응이 있다. 상대적으로 Fig. 14(a)의 조건에 비해 a_g 가 높은 Fig. 14(b)의 그래프를 보면 정체점 부근에서 H 라디칼을 소비하는 R12 반응이 활발하게 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 a_g 가 증가하면서 화염대가 층돌판과 가까워져 혼합기가 정체점 부근에 층돌해 생성된 과잉의 에너지를 안정화하기 위해 제 3체(third body, +M)를 필요로 하는데, 이때 정체점에서 H를 소비하며 제 3체를 포함한 반응인 R12($H + O_2(+M) = HO_2(+M)$) 반응이 활발하게 일어나는 것으로 판단된다. 또한 R12 반응을 통해 생성된 HO_2 라디칼은 R18($HO_2 + OH = O_2 + H_2O$) 반응을 촉진시켜 Fig. 13(b) 그래프의 정체점에서 H_2O 생성을 야기하는 것으로 보이며, 이 경우 최종적으로 생성된 H_2O 농도는 Fig. 12에서 나타난 a_g 이 증가에 따라 발생하는 2차 피크의 역전 현상을 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 조성비가 일정한 합성가스(H_2/CO)-공기 예혼합 층돌화염에서 전체 신장률(a_g)의 변화에 따른 부상된 평면 화염의 상세연소반응 및 화염구조

를 파악하여 다음과 같은 결론은 얻었다.

- 1) 층돌 제트화염은 높은 a_g 에서 부상된 일자(-)화염을 형성하며, Φ 가 2.5에 가까워지면 S_L 이 증가하여 쉽게 부상되지 않으며 노즐에 부착된 층돌 제트화염을 형성하는 것을 확인했다.
- 2) 부상된 층돌 제트화염은 a_g 가 증가할수록 화염의 두께가 얇아지며, 층돌판에 화염의 반응대가 가까워지는 것을 확인하였다.
- 3) 연소혼합물의 축 방향 속도는 화염대의 고온에 의해 감소된 밀도에 의해 증가하며, a_g 의 증가는 화염대에서 층돌판으로 열손실을 증가시켜 화염의 온도를 감소시키고 그로 인해 혼합기의 축 방향 속도 또한 감소시키는 것을 확인했다.
- 4) a_g 의 증가로 인해 화염의 고온부에 위치하는 OH 라디칼의 반응 영역대가 협소해지나 생성농도는 일정한 것으로 나타났으며, 정체점에서 발생하는 H_2O 생성물에 2차 피크점의 역전현상이 나타나는 것을 알았다.
- 5) 정체점에서의 H_2O 생성물의 역전현상은 a_g 의 증가로 인해 정체점 부근에 혼합기가 층돌해 생성된 과잉의 에너지를 안정화시키기 위해 나타나는 R12($H + O_2(+M) = HO_2(+M)$)반응에 의해 생성된 HO_2 가 R18($HO_2 + OH = O_2 + H_2O$)반응을 촉진시켜 나타나는 것으로 확인되었다.

후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제번호 : 2013-2010-101860).

References

1. T. K. Kim, J. Park, and H. C. Cho, "Study on Combustion Characteristics of H_2/CO Synthetic

- Gas”, *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 17, No. 6, 2008, pp. 689-698.
2. Hugo. J. Burbano, Jhon Pareja, Andrés A. Amell, “Laminar burning velocities and flame stability analysis of H₂/CO/air mixtures with dilution of N₂ and CO₂”, *International Journal of Hydrogen energy*, Vol. 36, 2011, pp. 3232-3242.
 3. J. Natarajan, S. Nandula, T. Lieuwen, and J. Seitzman, “Laminar Flame Speeds of Synthetic Gas Fuel Mixtures”, *ASME Turbo Expo 2005*, No. GT2005-68917, pp. 677-686.
 4. J. Y. Park, K. M. Lee, and C. H. Hwang, “Stability Characteristics of Syngas (H₂/CO)/Air Premixed Flames using an Impinging Jet Burner”, *The Korean Soc. of Combust.*, Vol. 16, No. 1, 2011, pp. 15-21.
 5. K. J. Kang, T. J. Part, C. H. Whang, and K. M. Lee, “Study on Combustion Characteristics of Synthetic Gas Air Lifted Premixed Flames with High Strain Rate in an Impinging Jet Combustion Field”, *The Korean Soc. of Combust.*, Vol. 16, No. 4, 2011, pp. 31-37.
 6. B. G. Jeong, Y. H. Lee, and K. M. Lee, “A Study on Combustion and Heat Transfer in Premixed Impinging Flames of Syngas (H₂/CO)/Air Part I: Characteristics of Combustion”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 25, No. 1, 2014, pp. 47-58.
 7. K. S. Sim, B. G. Jeong, Y. H. Lee, and K. M. Lee, “A Study on Combustion and Heat Transfer in Premixed Impinging Flames of Syngas (H₂/CO)/Air Part II: Heat Transfer Characteristics”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, 2014, Vol. 25, No. 1, pp. 59-71.
 8. M. E. Coltrin, R. J. Kee, G. H. Evans, E. Meeks, F. M. Rupley, and J. F. Grear, “Spin(Version 3.83): A Fortran Program for Modeling One-Dimensional Rotating Disk/Stagnation Flow Chemical Vapor Deposition Reactor”, *Sandia National Lab.*, 1991.
 9. Neal Sullivan, Melvyn C. Branch, Mark Strobel, John Park, Michael Ulsh and Beth Leys, “The Effects of an Impingement Surface and Quenching on the Structure of Laminar Premixed Flames”, *Combust. Sci. and Tech.*, 2000, Vol. 158, pp. 115-134.
 10. 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 Laboratories Report, SAND89-8009* 1989.
 11. Kee, R. J., Dixon Lewis, Warnatz. G. J, Conltrin. M. E and Miller J. A, “A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multi Component Transport”, *Sandia National Laboratory Report, SAND86-8246*, 1986.
 12. 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.
 13. J. F. Grear, “The Twopnt Program for Boundary Value Problems”, *SAND91-8230*, 1991.