

석탄가스화 합성가스(H₂/CO)-공기 예혼합화염의 층류 연소속도에 관한 연구

정병규¹ · 이기만^{2†}

¹순천대학교 우주항공전공, ²순천대학교 기계우주항공공학부

A Study on the Laminar Burning Velocity of Synthetic Gas of Coal Gasification(H₂/CO)-Air Premixed Flames

BYEONGGYU JEONG¹, KEEMAN LEE^{2†}

¹Division of Aerospace Engineering of Suncheon National Univ., 413, Jungang-ro, Sunchoen-Si, Jellanam-do, 540-742, Korea

²School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon National Univ., 413, Jungang-ro,
Sunchoen-Si, Jellanam-do, 540-742, Korea

Abstract >> Syngas laminar burning velocity measurements were carried out at atmospheric pressure and ambient temperature using the Bunsen flame configuration with nozzle burner as a fundamental study on flame stability of syngas fuel. Representative syngas mixture compositions (H₂:CO) such as 25:75%, 50:50% and 75:25% and equivalence ratios from 0.5 to 1.4 have been conducted. Average laminar burning velocities have been determined by the stabilized nozzle burner flames using the angle method, radical surface area method and compared with the data obtained from the other literatures. And the results of each experimental methodologies in the various composition ratios and equivalence ratios were coincided with the result of numerical simulation. Especially, it was confirmed that there was necessary to choice a more accurate measurement methodology even the same static flame method for the various composition ratios of syngas fuel including hydrogen. Also, it was reconfirmed that the laminar burning velocities gradually increased with the increasing of hydrogen content in a fuel mixture.

Key words : Syngas(합성가스), Laminar burning velocity(층류연소속도), Flame angle method(화염각도법), Flame surface area method(화염면적법), Schlieren image(솔리렌 이미지), Radical self chemiluminescence(라디칼자발형광)

Nomenclature

U : injection velocity, m/s
S : laminar burning velocity, m/s
 α : angle, degree(°)

ρ : density, kg/m³
 \dot{Q} : total volumetric flow rate, m³/s
A : area, m²
 Φ : equivalence ratio

Subscripts

u : unburned gas condition
o : burner outlet condition

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

[접수일 : 2012.9.28 수정일 : 2012.10.15 게재확정일 : 2012.10.26]

Copyright © 2012 KHNES

H₂ : hydrogen
CO : carbon monoxide

1. 서 론

최근 전 세계적으로 화석연료 고갈로 인한 에너지 부족현상과 산성비, 지구온난화 등 환경오염 문제를 해결하기 위한 노력이 진행되고 있는 가운데 에너지 자원의 고갈로 인해 현재 잘 쓰이지 않는 연료를 효율적으로 사용하는 방법들이 연구 중에 있다. 이러한 노력중의 하나가 이전에는 발열량이 낮아 저급 연료로만 여겨졌던 합성가스(synthetic gas) 연료를 활용하는 연구이다. 산업적으로 응용될 수 있는 합성가스에는 제철소 및 정유사 공정의 부생가스, 매립지 등에서 얻어지는 바이오가스 그리고 석탄의 가스화 공정 등에서 생산되는 혼합가스 등이 있는데, 이들 합성가스를 본격적인 산업용 연료로 활용하기 위한 핵심기술로 연소특성 향상 및 배출물 저감 등에 대한 연구가 수행되고 있다.

특히, 석탄은 전 세계적으로 매장량이 풍부하여 대부분 국가에서 매우 중요한 화석에너지임에도 불구하고 연료 특성상 불편함과 환경 오염물질이 대량 배출되는 문제점을 안고 있어 고체연료인 석탄을 가스화하여 기체연료로 연소시키는 청정에너지 자원화에 대한 시도가 오래전부터 진행되어 왔다. 최근 들어 이처럼 청정에너지로 자원화 된 석탄가스를 대규모로 적용하는 사례가 석탄가스화복합발전(IGCC) 분야인데 이곳에 사용되는 주 연료가 고체인 석탄을 가스화시켜 생산한 석탄가스화 합성가스 연료이다.

이 합성가스 연료는 발열량이 다른 가스연료에 비해 상대적으로 낮아 저급 연료로 분류되지만, 연료의 주요 성분이 수소(H₂)와 일산화탄소(CO)가 대부분이어서 연소효율과 연소배가스 배출성능 등에서 우수한 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다. 그런데 주 성분인 수소는 다른 일반 탄화수소 연료에 비해 연소속도가 매우 빨라서 이들 조성비 변화가 연소기의 주요 성능인 점화와 소염, 역화현상, 화염불안정 등 연소성능에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

이에 이러한 합성가스 연료 연소기의 안정성과 최적화된 설계정보를 도출하기 위해서는 혼합가스 연료의 조성비(composition ratio)와 당량비(equivalence ratio) 변화와 같은 연소기 사양과 운전조건에 따른 기초 연구가 우선적으로 수행되어야 한다. 그 중에서도 주성분인 수소와 일산화탄소의 조성비 변화에 따른 연소현상, 특히 미래 에너지 자원에서 중요한 역할을 할 것으로 기대되는 수소 성분이 포함되는 경우, 연소기 안정화 성능과 밀접하게 관련된 연소속도 특성은 이러한 합성가스 연소기 응용연구에서 가장 먼저 파악되어야 할 중요한 연구 분야이다.

한편, 화염의 연소속도 특히 층류 연소속도(laminar burning velocity)를 측정하는 연구 방법들은 오래 전부터 많은 노력들이 있어 왔는데, 크게 두 가지 방법으로 분류하면 버너에 화염이 원추형 화염(conical flame) 형태로 부착되어 안정화된 화염을 대상으로 하는 정지 화염법(static flame method)과 연료와 산화제의 가연 혼합물이 밀폐된 챔버(bomb) 내에서 점화되어 구형 화염(spherical flame)으로 전파되어 가는 속도를 측정하는 비정지 화염법(non static flame method)으로 나눌 수 있다. 이 중에서 정지 화염법은 버너에 삼각형 형상으로 부착되어 형성된 예혼합된 분젠화염(Bunsen flame)의 꼭지 각도를 솔리렌 영상 등을 이용하여 구한 뒤 후술하게 되는 층류 연소속도 정의식 (1)을 통하여 기하학적으로 계산하는 각도법(angle method)과 원추형 화염의 표면적을 기타 광학적 방법으로 구한 뒤 미연 혼합물의 질량 보존방정식 (2)로부터 구하는 면적법(area method)으로 구분된다.

본 연구에서는 앞서 설명한 두 가지 층류 연소속도를 측정하는 방법에서 실험장치의 구성과 측정이 비교적 간단하면서 정확한 방법으로 알려진 첫 번째 방법인 정지 화염법으로 수행하였는데, 사용된 버너는 측정의 엄밀성을 높이기 위해 버너 출구에서 속도분포가 균일한 유동장을 형성하도록 노즐(nozzle) 형태의 버너를 사용하였으며, 정지화염법의 두 가지 방법인 각도법과 면적법을 동시 측정으로 구한 후 그 결과를 서로 비교하였다.

석탄가스화 합성가스의 층류 연소속도 측정에서 주

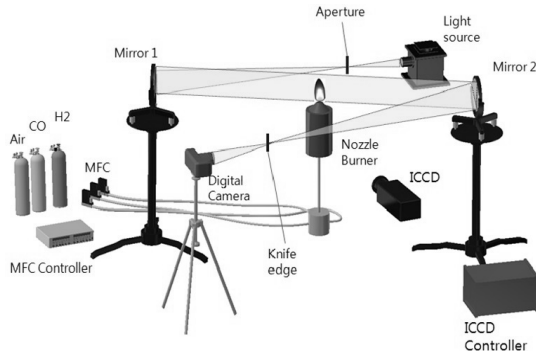


Fig. 1 Experimental set-up

성분인 수소와 일산화탄소의 조성비율과 당량비 범위는 본 연구팀에서 수행된 이전 연구결과^{1,2)}와 동일한 범위로 수행하였다. 또한, 측정결과는 Chemkin-II Package의 PREMIX Code를 이용하여 수치 계산한 결과와 비교를 하였다. 계산은 수소-일산화탄소 연소속도 계산에 비교적 적합한 것으로 알려진 Davis Mechanism을 사용하였으며, 본 연구와 유사한 측정 범위에서 수행된 타 연구자들의 실험결과 값³⁻⁹⁾과 비교 분석하여 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 보다 정확한 연소속도 측정을 위하여 버너는 출구에서 속도분포가 균일한 층류 유동을 형성하도록 버너 출구 직경 대비 교축비가 25인 수축형(contraction type) 노즐로 제작되었다. 노즐버너 출구 직경은 내경 10mm로 노즐 끝 팁(tip) 부분은 화염에 의한 예열 현상이 억제되도록 최대한 얇고 날카롭게 가공하였다. 버너 길이는 200mm로 연료와 공기의 혼합이 잘 이루어지면서 역화를 방지하기 위하여 버너 하단 부분에 지름 2.5mm 스테인레스 볼(ball)을 적층하고 그 위에 메쉬층(mesh layer)을 차례로 형성시킴으로써 예혼합된 합성가스-공기 반응물이 완전 발달된 층류 상태로 분사되도록 하였다.

Table 1 Experimental conditions

Fuel	H ₂ , CO
Oxidizer	Air
Nozzle contraction ratio	25
Diameter of nozzle	10mm
Equivalence ratio(Φ)	0.5 ~ 1.4
Composition ratio of mixture	H ₂ :CO=25:75 H ₂ :CO=50:50 H ₂ :CO=75:25

연료는 화염의 특성을 보다 엄밀하게 관찰하기 위하여 순도 99.999%의 고순도 수소와 일산화탄소를 사용하였으며, 연소용 공기도 순도 99.99%의 고순도 공기를 사용하였다. 이들 유량은 버블(bubble) 유량계로 교정한 습식(wet)가스미터와 질량유량계(MFC)를 통해 정밀한 양으로 측정되어 합성가스 조성비 변화에 따른 당량비 계산에 사용하였다.

연소속도 측정에 사용된 광학계로는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 100W 할로겐 램프 광원과 2개 미러 및 핀홀(pin hole)과 나이프에지(knife edge)로 구성된 슈리렌(schlieren) 광학 시스템과 화염의 반응대역에서 자체적으로 발생하는 라디칼들(OH, CH)의 화학발광(chemiluminescence)된 광 신호를 증폭하여 수신하는 ICCD 카메라와 콘트롤러로 이루어진 ICCD 이미지 시스템으로 구성된다. 측정된 영상이미지들은 각도법에 의한 연소속도 계산에서는 슈리렌 이미지 영상을 그리고 면적법은 ICCD 영상 이미지를 통하여 계산되는데, 연료의 각 조성비와 당량비 조건별 슈리렌과 ICCD 이미지의 화염 영상은 동시에 취득되어 각각의 연소속도 계산에 사용된다.

2.2 실험조건 및 측정원리

본 연구의 실험조건을 Table 1에 요약하였다. 합성가스 조성비 조건은 본 연구팀의 이전 연구^{1,2)} 결과와 비교하기 위해 동일한 조건인 몰 분율(mole fraction) 기준으로 수소와 일산화탄소의 혼합 조성비(H₂:CO)를 25:75%, 50:50% 그리고 75:25%로 하였으며, 예혼합기의 당량비는 수치해석으로 구한 연소속도 값

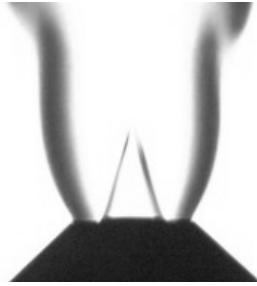


Fig. 2 Example of a Schlieren image (10mm nozzle burner, H₂:CO = 25:75%)

과 타 연구자들의 실험값들을 비교하기 위해 0.5에서 1.4까지로 하였다. 고려된 연료의 조성은 수소 성분 변화에 따라 층류 연소속도의 변화폭이 매우 크기 때문에 수소 함량이 상대적으로 적은 조건에서는 화염의 안정성을 고려하여 낮은 혼합기 평균 유속의 조건에서 주로 실험이 수행되었으며, 수소의 함량이 많은 경우에는 화염의 역화현상 발생으로 비교적 유속이 증가된 조건에서 연소속도 측정을 수행하였다.

앞서 설명한 바와 같이 정지 화염법에 의한 두 가지 연소속도 측정법에서 Fig. 2는 각도법에 의한 연소속도 측정을 위해 취득한 대표적인 솔리렌 영상 이미지를 보여주고 있으며, Fig. 3은 Fig. 2에서 취득된 삼각형 솔리렌 이미지에서 층류 연소속도를 결정하는 측정 원리를 나타내고 있다. 일반적으로 화염의 층류 연소속도에 대한 정의는 공간적으로 1차원 화염에서 화염면에 수직한 방향으로 미연 혼합기(unburned

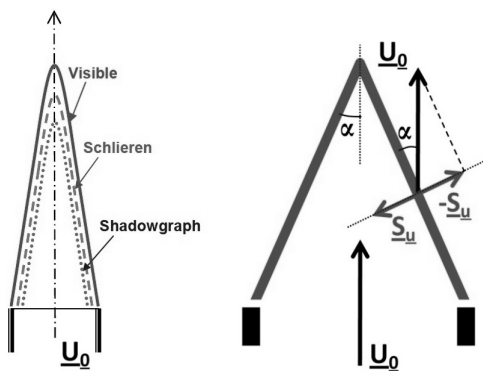


Fig. 3 Illustration of the cone angle methodology

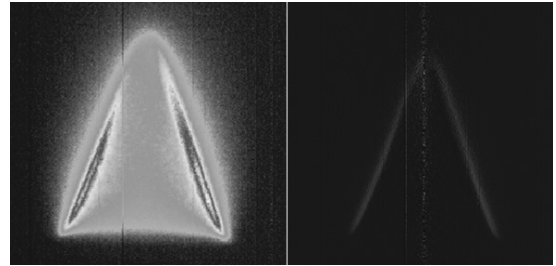


Fig. 4 Example of radical chemiluminescence image(left) and Abel-inverted image(right)

mixture) 쪽으로 전파하여 들어오는 속도를 말하는데, Fig. 3에서 속도 S_u 값을 나타낸다. 따라서 연소속도 S_u 값은 미연 혼합기 분출 속도인 U₀ 값과 화염면 모서리 각도인 α 값만 알면 다음의 층류 연소속도 정의식 (1)로부터 구할 수 있게 된다.

$$\cos\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right) = \frac{S_u}{U_0} \rightarrow S_u = U_0 \sin\alpha \quad (1)$$

여기서 삼각형 형상의 분젠화염 모서리 각도는 Adobe photoshop CS 프로그램을 이용하여 정확한 각도를 구하였으며, 미연 혼합기 분출 속도 U₀는 연속방정식을 이용하여 버블 메터로 측정된 미연 혼합기 체적유량을 버너노즐 출구 직경기준의 면적으로 나누어 구한 뒤 정의식 (1)로부터 화염 모서리 각도법에 의한 층류 연소속도 값을 결정하게 된다.

Fig. 4는 정지 화염법의 두 번째 방법인 면적법에 의한 연소속도 측정을 위해 취득한 대표적인 OH 라디칼의 자발 형광 이미지(좌측)와 아벨 변환(Abel inversion)된 이차원 단면 이미지(우측)를 보여주고 있다. Fig. 5는 Fig. 4에서 아벨 변환된 2차원 삼각형 분젠화염 이미지에서 층류 연소속도를 결정을 위한 3차원 원추형 형태의 분젠화염 표면적을 구하는 원리를 나타내고 있다. 즉, Fig. 4에서 취득한 화염 반응대에서 형성되는 자발상태의 OH*와 CH* 라디칼들의 형광 이미지는 공간적으로 라디칼의 신호들이 적분된 상태이므로 정확한 이차원의 단면 형광 신호를 얻기 위하여 MATLAB 프로그램을 사용하여 아벨 변환으

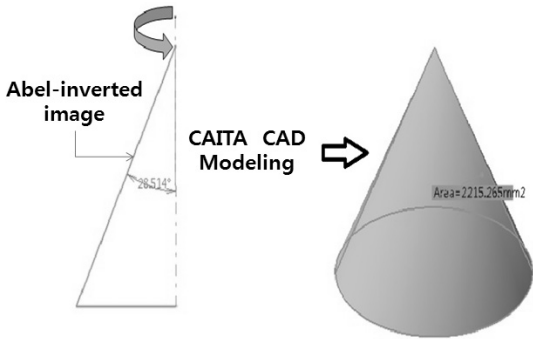


Fig. 5 Illustration of the area methodology by 3D modeling

로 단면상의 라디칼 이미지를 얻은 뒤 CATIA CAD 로 모델링(modeling)하여 다시 3차원 원추형 형상으로 된 분젠 화염에서 화염의 표면적을 구하였다.

이 경우 분젠 화염의 층류 연소속도 S_u 는 화염의 표면적(A)으로 유입되는 미연 혼합기의 질량보존 방정식인 다음의 식 (2)로부터 구하게 되는데, 각도법에서 설명한 버블 메터로 미연 혼합기인 반응물의 체적유량(\dot{Q})을 측정된 후 ICCD 카메라로 취득한 라디칼들의 형광 신호를 앞서 설명한 방법대로 구한 3차원의 분젠 화염 표면적 A로 나누어 주게 되면 면적법에 의한 층류 연소속도를 구할 수 있게 된다.

$$\rho_u S_u A = \rho_u \dot{Q} \rightarrow S_u = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 연소속도 측정 방법의 검증

본 연구에서 수행한 원추형 분젠 화염을 솔리덴 영상을 통해 측면의 각도를 측정하여 연소속도를 구한 각도법(S-Angle로 표시)과 화염의 반응대에서 자발적으로 발광하는 CH와 OH의 형광 이미지를 아벨 변환 후 3D 모델링으로 분젠 화염의 표면적을 구하여 계산한 면적법(CH-Area 및 OH-Area로 표시)이 적절한 측정 방법인지를 확인하기 위하여, 수소:일산

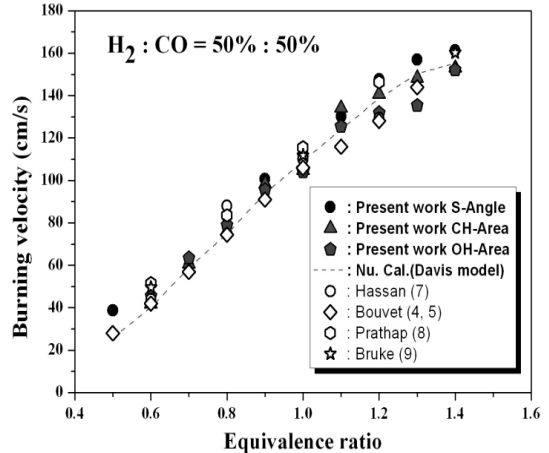


Fig. 6 Validation of the angle and the area methodology through comparison with the other experimental and numerical results for the laminar burning velocity of 50/50% H₂/CO-air mixture

화탄소 비율이 50: 50인 동일한 조성비와 유사한 당량비 범위에서 수행된 다른 연구자들의 실험값들과 Davis 모델을 사용하여 PREMIX 코드로 수치 계산한 비교 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 본 연구에서 사용한 각도법과 면적법의 측정값들이 타 연구자들의 실험값들과 당량비 0.6에서 1.0까지는 매우 유사한 결과를 보이고 있으며, 1.1~1.3에서 약간의 차이를 보이다가 이후 유사한 분포를 보임으로써 전체적으로 다른 연구자들의 결과들과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 비교를 위해 수치 계산한 값도 본 연구의 측정값들과 매우 잘 일치함을 보여주고 있다. 지면 관계상 수행한 세 가지 조성비에서 수소와 일산 화탄소 비율이 각각 절반인 50:50% 경우에서만 비교 결과를 나타내었지만 나머지 두 조건인 25:75%와 75:25%인 경우에서도 다른 연구자들의 측정값들과 비슷한 결과를 보임으로써 본 연구에서 사용한 화염 각도법과 특히 주요 라디칼인 CH와 OH의 최대 자발형광신호의 2차원 지점들을 추적하여 3차원으로 모델링한 면적법이 석탄가스화 합성가스 연료의 연소속도 측정에도 적합한 것으로 판단할 수 있었다.

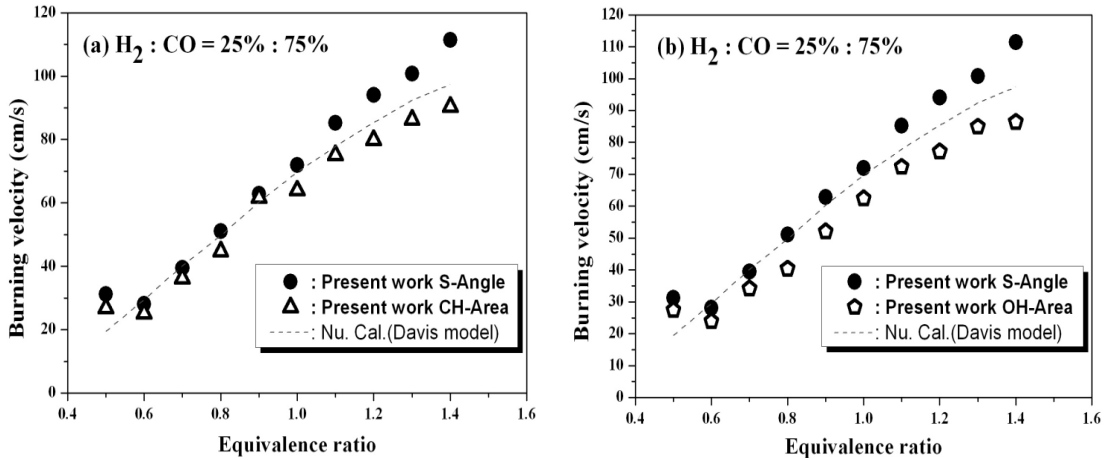


Fig. 7 Comparison of the flame angle(Schlieren) and the flame surface area(CH* & OH* radical self chemiluminescence intensity trace) approaches for syngas composition of 25/75% H₂/CO : (a) Angle vs CH Area, (b) Angle vs OH* Area

3.2 조성비에 따른 적절한 연소속도 측정 필요성

본 연구의 실험조건인 합성가스 조성비와 당량비 변화를 통해 관찰한 화염의 겉보기 형상으로는 유사한 당량비 조건에서 수소 함유량이 적은 경우가 많은 경우에 비해서 좀 더 넓고 완만한 형태의 원추형 화염이 형성되는데 비해, 수소 함유량이 증가하게 되면 완만하였던 화염이 수소의 빠른 반응효과에 의해 점점 좁아지고 화염의 경계가 선명해 지면서 화염 선단이 예리한 삼각형 형상으로 변화된다. 또한 동일한 수소 함유량에서 당량비가 변화하게 되면 당량비가 희박한 영역에서는 희박한 반응조건에 의해 미연 혼합기가 동일한 조성비임에도 원추형 화염이 좁은 형태로 형성된다. 그런데 상대적으로 잉여의 반응조건인 농후한 당량비 영역에서는 앞서 수소 함유량이 적은 경우처럼 내측 예혼합 화염 후류에 부분 예혼합된 외측 화염이 둘러싸고 있는 겉보기에 넓고 완만한 형태의 화염 형상을 띄게 된다.

따라서 앞 절에서 확인한 두 가지 연소속도 측정 방법에서 단일 성분의 순수 연료가 아닌 다(多) 성분의 혼합 연료인 합성가스인 경우 연료의 혼합비율인 합성가스 조성비와 운전조건인 당량비에 따라 어느 연소속도 측정방법이 좀 더 적절한 것인가를 파악하기

위하여 본 연구의 실험조건에서 각도법과 면적법으로 측정된 층류 연소속도 실험값을 수치 계산과 비교한 결과를 Fig. 7에서 Fig. 9까지 나타내었다. 조성비로는 수소:일산화탄소 혼합 비율이 각각 25:75%, 50:50%, 75:25%인 세 가지이며, 각 조성비 조건에서 당량비 변화는 IGCC발전소 가스터빈 연소기에서 저공해 연소를 위해 주로 희박 예혼합 상태로 운전을 하는데, 주 관심 운전영역인 당량비 0.5의 희박(lean)한 상태에서 상대적으로 과농(rich)한 운전 범위인 당량비 1.4까지로 설정하여 비교 분석하였다.

먼저 Fig. 7에서는 상대적으로 수소 함유량이 적은 수소:일산화탄소 조성비가 25:75%인 경우로, (a) 번 그래프에서는 슬리렌 각도법(S-Angle로 표시)과 CH 라디칼에 의한 면적법(CH-Area로 표시)이 수치 계산한 결과 값(Davis로 표시)과 비교되는 것을 보여주고 있으며, (b)는 (a)번의 동일한 슬리렌 각도법과 수치 계산한 값에 이번에는 OH 라디칼 측정에 의한 면적법(OH-Area로 표시)이 비교되는 것을 각각 보여주고 있다. 그리고 Fig. 8과 Fig. 9에서는 조성비가 수소:일산화탄소 비율이 동일한 50:50%인 경우와 75:25%로 상대적으로 수소 함유량이 많은 경우인데, 그래프에서의 표시 방법과 순서는 앞서 설명한 Fig. 7의 경우와 동일한 방법으로 표시하였다.

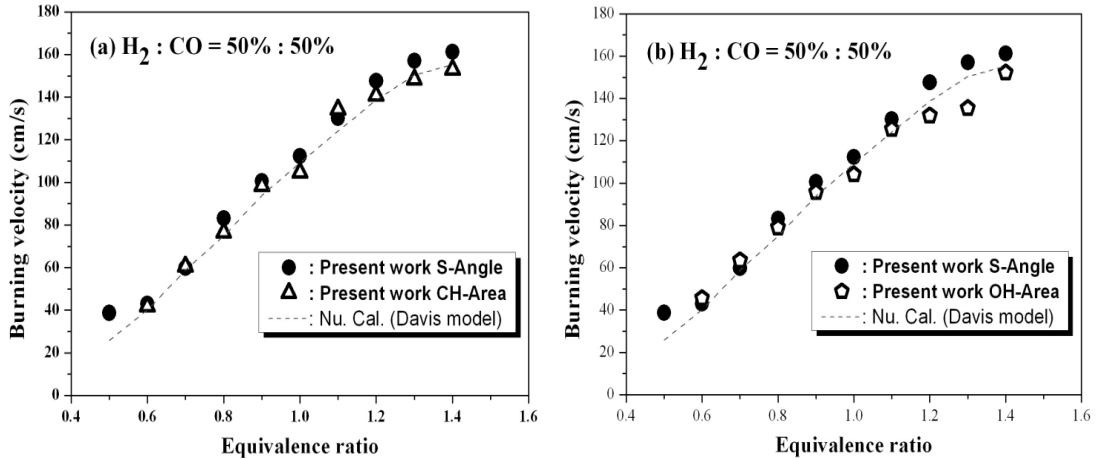


Fig. 8 Comparison of the flame angle(Schlieren) and the flame surface area(CH* & OH* radical self chemiluminescence intensity trace) approaches for syngas composition of 50/50% H₂/CO : (a) Angle vs CH* Area, (b) Angle vs OH* Area

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 수소 함유량이 상대적으로 적은 경우 수치 계산으로 예측한 연소속도 값이 각도법에 의해 측정된 연소속도 값보다 특히 (a)번 CH 라디칼 신호로 측정된 면적법에 의한 실험값에 근접하고 있음을 알 수 있다. 반응물의 상태가 희박한 당량비 0.6~1.0 사이에서는 두 방법에서 차이가 미비하나 당량비 1.1 이상 상대적으로 과농한 영역에서는 수치 계산한 연소속도 값이 화염 반응대의 라디칼에 의한 면적법 결과 쪽으로 근접하는 것을 볼 수 있다. 이처럼 과농 영역에서 나타나는 차이는 앞서 동일 조성비에서 당량비 변화에 따른 화염 형태를 설명한 바와 같이, 과농한 영역에서는 화염의 형태가 화염 후류까지 잔존하는 라디칼 영역으로 인해 라디칼의 최대 강도 신호를 감지하여 화염의 표면적을 계산하는 면적법에서 라디칼 표면적이 과다 측정되어, 반응물의 1차 밀도 구배선이 화염의 모서리 각도 선이 되는 각도법에 의한 연소속도 측정값보다도 낮게 측정되는 결과로 사료된다.

따라서 수치적으로 계산한 결과와 비교해 보면 수소 함유량이 적은 조성비에서는 면적법에 의한 연소속도 측정값이 상대적으로 적절한 방법으로 판단된다.

Fig. 8은 수소와 일산화탄소 함유량이 동일한 50:50%인 경우로 이 조성비에서는 그림에서도 알 수 있듯

이 각도법과 면적법에 의해 측정된 값들이 큰 차이를 보이질 않고 있는데다가 수치적으로 예측된 값도 이 두 가지 방법에 의한 측정값들과도 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 이 경우에는 각도법과 면적법에 의한 연소속도 측정에 차이가 미비할 것으로 판단된다.

다음은 수소가 상대적으로 많이 함유되어 있는 75:25% 조성비인 경우의 연소속도 측정법에 대한 비교가 Fig. 9에 표시되었다. 그런데 흥미로운 사실은 앞서 수소 함유량이 적은 25%인 경우에는 수치 계산한 결과가 면적법 결과에 좀 더 근접하고, 함유량이 비슷한 50%인 경우에는 두 가지 측정법 모두에 비슷한 결과를 보이다가, 수소 함유량이 많은 75% 조성비에서는 (a), (b)번 모두에서 화염 라디칼 신호에 의한 면적법보다 각도법으로 측정된 결과가 수치 계산한 예측값과 매우 잘 일치한다는 것이다.

수소 함유량이 많은 이 경우에는 앞서 수소 함유량 변화에 따른 화염 형태 변화에 대해서 설명한 바와 같이 수소 함유량이 많아지게 되면 수소의 빠른 반응속도 영향으로 겉보기 화염의 특징은 다소 끝이 예리하면서 좁고 선명한 삼각형 형상의 화염 형태를 취하게 된다. 이로 인해 이 경우에는 반응대 선단에서 발생하는 라디칼의 최대 강도에 의한

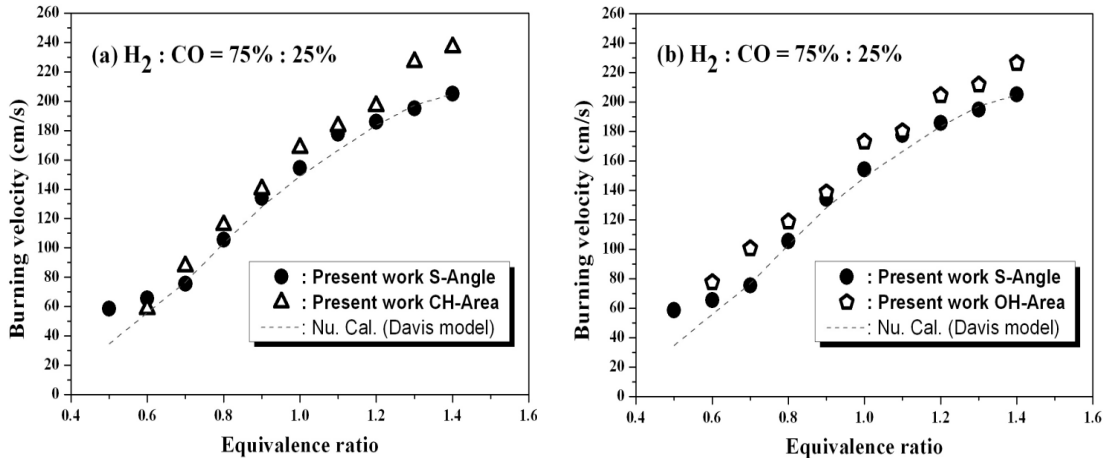


Fig. 9 Comparison of the flame angle(Schlieren) and the flame surface area(CH* & OH* radical self chemiluminescence intensity trace) approaches for syngas composition of 75/25% H₂/CO : (a) Angle vs CH* Area, (b) Angle vs OH* Area

표면적이 다소 과소적으로 측정되게 되므로 슈리렌 영상에 의한 화염 모서리 각도로 측정된 연소속도 값보다는 크게 측정되는 것으로 판단된다. 따라서 수소 함유량이 상대적으로 많이 포함된 경우의 정밀한 연소속도 측정은 화염 모서리 각도법에 의한 측정이 면적법보다는 더 정확한 방법으로 판단된다.

Fig. 10은 앞서 살펴 본 세 가지 조성비 모두에서 측정된 슈리렌의 각도법과 CH와 OH 라디칼에 의한 면적법 그리고 PREMIX 코드로 수치 해석한 결과들

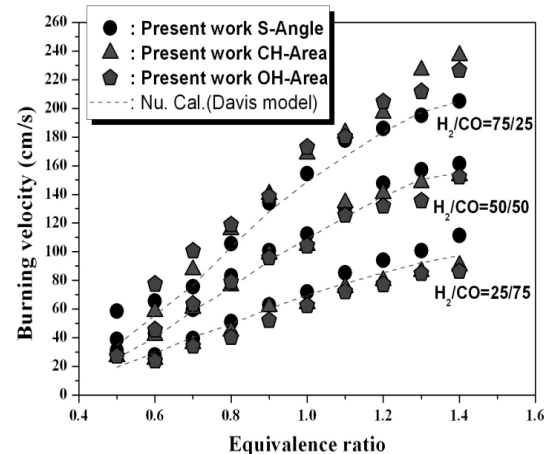


Fig. 10 Comparison of the laminar burning velocity measurement methodology for various composition ratios of premixed syngas flames

을 비교하기 좋게 종합해서 일목요연하게 정리한 그래프이다. 이 그림에서 좀 더 명확하게 볼 수 있듯이 혼합가스 연료인 경우 가스성분의 조성비에 따라 비록 같은 정지 화염법에 의한 연소속도 측정이라도 각도법과 면적법에서 차이를 보일 수 있으므로 보다 정확한 측정은 혼합비율인 조성비에 따라 각각 적절한 방법으로 달리 측정되어야 한다는 사실을 보여주고 있다.

본 연구를 통해 수소 함유량이 적은 합성가스 조성비에서는 면적법이, 상대적으로 수소 함유량이 많은 조성비에서는 각도법이 좀 더 정확한 층류 연소속도를 구할 수 있는 것으로 판단되며, 대(多) 성분의 혼합연료 연소인 경우 보다 정확한 연소속도 측정을 위해서는 조성비에 따라 측정방법을 달리해야 한다는 사실을 새롭게 알게 되었다.

3.3 반응물에서 수소 함유량 영향

Fig. 11은 합성가스 연료 조성비에서 체적 기준의 수소 용량 변화가 연소속도에 미치는 영향을 파악하고자 각도법으로 측정된 연소속도 변화를 각 당량비 별로 표시한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 반응물 상태가 희박한 영역인 당량비 0.8 이하에서는 수소 함유량 증가에 따른 연소속도 증가율은 다소

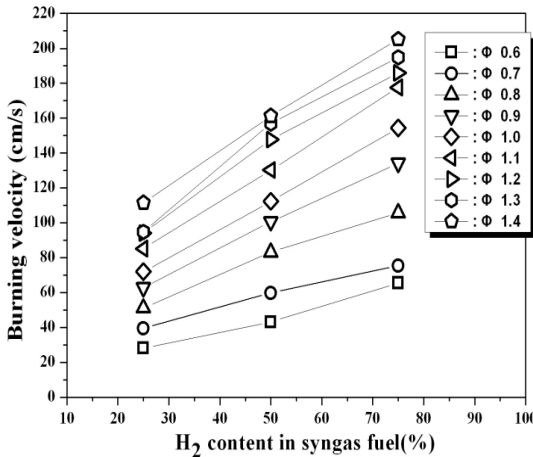


Fig. 11 Laminar burning velocity versus H₂ content at the various equivalence ratio

완만하나 당량비 0.9 이상에서는 증가율이 커지는 등 합성가스 연료의 연소속도는 수소 함유량이 증가함에 따라 모든 당량비 조건에서 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 수소 함유량이 25%에서 75%까지 큰 범위로 서로 다름에도 불구하고 연소속도가 선형적으로 증가하는 현상은 이전의 연구들과 일치하는 결과이다.

이처럼 반응물에서 수소 함유량이 증가함에 따라 연소속도가 증가하는 이유로는 Yong He이 최근의 연구¹⁰⁾에서 설명한 바와 같이 수소 성분이 증가하게 되면 수소와 관련된 매우 빠른 반응들을 통해 연소반응을 촉진시키는 H와 OH 라디칼의 생성이 급속하게 증가되면서 화염의 연소속도가 증가하는 것으로 판단된다. Yong He는 이 연구에서 수소 함유량이 0%와 25%인 각각의 경우에서 반응대의 화염온도와 H 및 OH 라디칼 농도분포를 수치 계산을 통하여 수소 함유량이 25%인 경우가 배 이상 높은 라디칼 생성율을 제시함으로써 이러한 라디칼들의 연쇄반응(chain reaction) 증가로 인해 연소반응이 가속화 되는 것이라고 설명하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수축형 노즐버너에 의한 석탄가스

화 합성가스 예혼합 분제화염을 통하여 정지 화염법의 대표적 방법인 각도법과 면적법 모두로 동시에 층류 연소속도를 측정된 후 수치 계산한 결과와 비교를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 솔리덴 영상에 의한 각도법과 화염 반응대의 라디칼 영상에 의한 면적법으로 측정된 연소속도 측정값들은 동일한 조성비와 당량비 조건에서 수행된 다른 연구자들의 실험값들과 수치 계산한 결과와 비교하여 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다.
- 2) 수소-일산화탄소가 주성분인 합성가스의 세 가지 조성비에서 당량비 변화에 따른 연소속도 측정을 통해 수소 함유량이 적은 조성비에서는 면적법, 상대적으로 수소 함유량이 많은 조성비에서는 각도법이 좀 더 엄밀한 측정법으로 판단되었다.
- 3) 특히 본 연구를 통해 다 성분이 혼합된 혼합가스 연료에서 보다 정확한 연소속도 측정을 위해서는 조성비에 따라 측정방법을 달리해야 한다는 사실을 새롭게 밝혔다.
- 4) 다양한 조성비에서 수소 함유량이 큰 폭으로 증가하더라도 층류 연소속도는 선형적으로 증가하게 되며 증가율은 당량비 증가에 따라 기울기가 커지는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)재원인 한국연구재단 연구비의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2012-0001474).

그리고 본 연구의 면적법 이미지프로세싱에 도움을 주신 한국기계연구원(KIMM)의 김민국박사님께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 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 Society of Combustion, Vol. 16, No. 1, 2011, pp. 15-21.
2. K.J. Kang, T.J. Park, C.H. Hwang and K.M. Lee, “A Study on Combustion Characteristics of Synthetic Gas Air Lifted Premixed Flames with High Strain Rate in an Impinging Jet Combustion Field”, The Korean Society of Combustion, Vol. 16, No. 4, 2011, pp. 31-37.
 3. Dong C, Zhou Q, Zhang Y, Xu T and Hui S, “Experimental study on the Laminar Flame Speed of Hydrogen/Carbon Monoxide/Air Mixture”, Fuel, Vol. 88, 2009, pp. 1858-1863.
 4. N. Bouvet, C. Chauveau, I. Gokaip, S.Y. Lee and R.J. Santoro, “Characterization of Syngas Laminar Flames using the Bunsen Burner Configuration”, Int. Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, 2011, pp. 992-1005.
 5. N. Bouvet, C. Chauveau, I. Gokaip and F. Halter, “Experimental studies of the fundamental flame speeds of syngas(H₂/CO)/air mixtures”, Proceedings of the Combustion Institute 33, 2011, pp. 913-920.
 6. H.J. Burbano, J. Pareja and A.A. Amell, “Laminar Burning Velocities and Flame Stability Analysis of H₂/CO/Air mixture with Dilution of N₂ and CO₂”, Int. Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, 2011, pp. 3232-3242.
 7. Hassan MI, Aung KT and Faeth GM, “Properties of laminar premixed CO/H₂/air flames at various pressures”, J. of Propulsion Power, Vol. 13, 1997, pp. 239-245.
 8. Prathap C, Ray A and Ravi MR, “Investigation of nitrogen dilution effects on the laminar burning velocity and flame stability of syngas fuel at atmospheric condition”, Combustion and Flame, Vol. 155, 2008, pp. 145-160.
 9. Burke MP, Qin X, Ju Y and Dryer FL, “Measurement of hydrogen syngas flame speeds at elevated pressure”, 5th US Combustion Meeting, San Diego, March, 2007, pp. 25-28.
 10. Yong He, Z. Zhang, Li Yang, R. Whiddon, Zhongshan Li, Junhu Zhou and Kefa Cen, “Investigation of laminar flame speeds of typical syngas using laser based Bunsen method and kinetic simulation”, Fuel, Vol. 95, 2012, pp. 206-213.