

분젠 버너법을 이용한 합성가스(H₂/CO)/공기 예혼합화염의 층류 연소속도 측정

정병규* · 이기만**†

Measurement of Laminar Flame Speed of Syngas(H₂/CO)/Air Premixed Flame using the Bunsen Burner Method

Byeonggyu Jeong*, Kee-Man. Lee**†

ABSTRACT

Syngas laminar flame speed 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. Representative syngas mixture compositions (H₂:CO) such as 25:75%, 50:50% and 70:25% and equivalence ratios from 0.5 to 1.4 were investigated. The measured laminar flame speeds were in good agreement with the previous numerical data as well as experimental data available in the literatures over a wide range of equivalence ratio tested. It was reconfirmed that the laminar flame speed gradually increased with the increase in H₂ content in a fuel mixture. In particular, the significant increasing rate of flame speed was observed with the increase in equivalence ratio.

Key Words : Syngas, Bunsen flames, Flame speed, Flame stability, Schlieren image

합성가스(Syngas) 연료 중에서 제철소 및 정유공정의 부생가스, 석탄의 가스화 공정 등에서 발생하는 혼합가스 연료는 수소(H₂)와 일산화탄소(CO)가 주성분으로 되어있다. 이러한 합성가스는 다른 일반적인 가스연료에 비해 발열량이 상대적으로 낮지만, 연소효율 및 연소 배출물 발생에 있어서 우수한 성능을 갖는 것으로 알려져 있다. 그러나 연료의 주요 성분인 H₂와 CO의 조성비 변화는 점화 및 역화현상, 화염불안정 등 연소성능에 큰 영향을 미친다고 알려져 있다. 이에 따라 화염의 안정성 및 최적화를 위한 설계정보를 도출하기 위해서는 연료 성분비와 당량비 변화와 같은 연소기 운전조건에 따른 연소속도의 상세한 정보가 1차적으로 요구된다.

연료와 공기가 예혼합된 상태에서의 미연소가스에 관련된 화염속도나 화염전파 과정은 앞서 설명한 연소기 기본성능과 연소 배기성능에 직접적인 영향을 미치게 된다. 또한 화염 연소속도는 혼합기의 구성 조건인 연료의 조성비, 당량비, 온도, 압력 등에 의존된다는 사실은 잘 알려져 있다. 화염의 층류 연소속도를 실험적으로 측정하

는 연구들도 오래전부터 많은 연구가 진행되어 왔는데, 주로 분젠식(Bunsen type) 버너에서 형성된 원추형화염(conical flame)을 이용하는 방법과 잘 혼합된 밀폐된 용기 내 점화봉의 점화로 퍼져 나가는 구형화염(spherical flame)을 이용하는 방법이 적용되었다. 이 중에서 분젠식 화염을 이용하는 방법에서는 버너노즐에 부착되어 형성된 삼각형 형상에서 구한 화염꼭지 각도를 연소속도 정의를 이용하여 기하학적으로 계산하는 방법과 원추형 화염의 표면적을 구해서 질량보존식을 이용하여 측정하는 방법으로 분류된다.

본 연구에서는 실험장치 구성과 측정방법이 간단하면서 비교적 정확한 방법으로 알려진 분젠식 노즐버너(nozzle burner)를 이용하여 형성된 원추형 층류 예혼합화염을 대상으로 하여 H₂와 CO가 주성분으로 되어 있는 합성가스의 조성비 및 당량비별 연소속도를 측정하였다. 측정결과는 본 연구팀에서 선행된 수치해석 결과[1] 및 유사한 조성비와 당량비에서 수행된 문헌결과들과 직접 비교되었다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도를 도시한 것이다. 버너 출구에서 균일한 속도 분포를 각지 위해 주로 사용되는 교축비가 25인 수축 노즐형 형상이 적용되었다. 노즐버너는 출구 직경이 10mm, 길이 200mm이고, 혼합이 잘

* 순천대학교 우주항공공학전공

** 순천대학교 기계우주항공공학부

† 연락처, kmlee@sunchon.ac.kr

TEL : (061)750-3828 FAX : (061)-750-3820

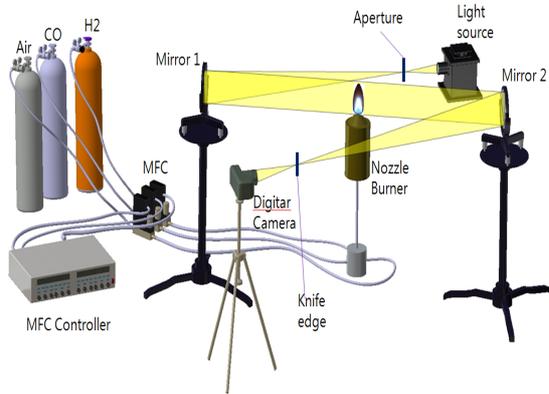


Fig. 1 Experimental set-up.

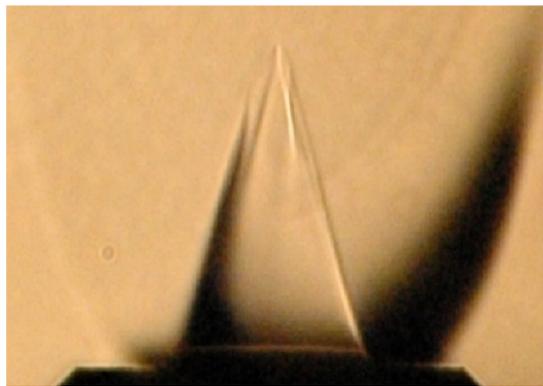


Fig. 2 Example of a Schlieren image (10mm nozzle burner, 25/75% H₂/CO).

이루어지고, 역화방지를 위하여 버너 높이 2/3지점까지 직경 2.5mm의 스테인레스 볼(ball)과 가는 매쉬로 구성되었다. 연료는 화염의 특성을 엄밀하게 관찰하기 위하여 순도 99.99% 고순도 수소와 일산화탄소를 사용하였으며, 연소용 공기도 순도 99.99%의 고순도 공기를 사용하였다. 이들 유량은 습식 가스미터와 버블 유량계로 교정된 질량 유량계(MFC)를 통해 정밀하게 조절되었다.

실험조건은 이전 연구[1, 2]의 수치결과와 비교하기 위하여, 몰분율 기준으로 대표적 연료 조성비(H₂:CO)는 25:75%, 50:50%, 70:25%가 적용되었으며, 예혼합기의 당량비는 0.5에서 1.4까지로 고려되었다. 고려된 연료의 조성은 수소의 성분 변화에 따라 층류 연소속도의 변화폭이 매우 크기 때문에 수소 함량이 작은 조건에서는 화염 안정성을 고려하여 낮은 혼합기 평균유속의 조건에서 실험이 수행되었으며, 수소 함량이 큰 경우에는 혼합기의 유속이 증가된 조건에서 실험이 이루어졌다. 원추형 화염사진은 쉘리렌법을 사용하여 촬영하였으며 대표적인 쉘리렌 이미지는 Fig. 2와 같다.

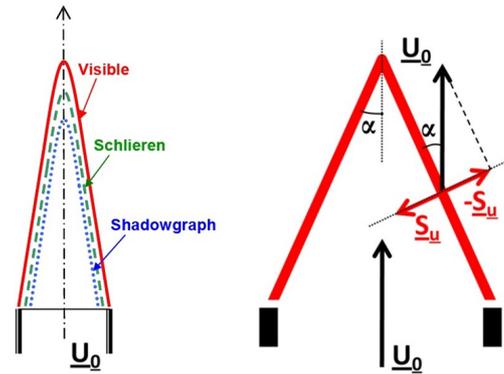


Fig. 3 Illustration of the cone angle methodology

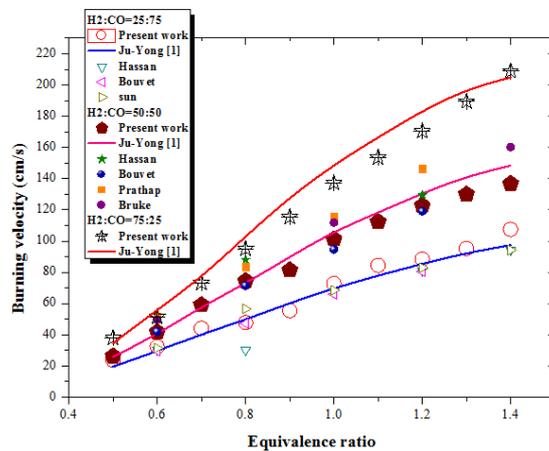


Fig. 4 Laminar flame speeds of different H₂/CO mixture ratios (H₂/CO=25/75, 50/50 and 75/25). (U₀: bulk velocity of fresh reactants, a: half cone angle of the flame).

Fig. 3은 Schlieren 이미지를 이용한 층류 화염속도의 측정 원리를 나타낸 것이다. 층류 화염속도 (S_u)는 식(1)을 통해 측정된다. 본 실험에서 촬영한 이미지에서의 각도는 adobe photoshop cs를 사용하여 측정하였다.

$$S_u = U_0 \sin \alpha \quad (1)$$

Fig. 4는 대표적 syngas 연료성분들에 대하여 당량비에 따른 층류 화염속도를 도시한 것이다. 측정된 실험값은 선행된 수치해석 결과 그리고 문헌에서 확인된 측정값들과 비교되었다. 본 실험에서 측정된 연소속도는 이전 연구결과들과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 동일한 당량비의 조건에서 연료의 수소 성분이 증가함에 따라 연소속도는 증가하며, 이러한 차이는 당량비가 증가됨에 따라 더욱 크게 발생되고 있음을 재 확인할 수 있다.

본 연구에서는 전통적인 분젠 버너법을 이용한 syngas의 층류 화염속도의 측정에 대한 기초연구를 수행하였으며, 향후 보다 정확한 값의 측정을 위해 부분적인 개선이 요구된다. 또한 보다 다양한 온도 및 압력에서의 층류 연소속도에 대한 예측은 향후 syngas를 이용한 다양한 용도의 연소기 설계를 위한 기초 정보로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

and Pressure", *Combustion and Flame*, Vol. 151, 2007, pp. 104-119

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2012-009856)

참고 문헌

- [1] J.Y Park, K.M Lee, C.H Hwang, "Stability Characteristics of Syngas (H_2/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] N. Bouvet, C. Chauveau, I. Gokaip, S.Y. Lee and R.J. Santoro, "Charaterization of Syngas Laminar Flames using the Bunsen Burner Configuration", *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, 2011, pp. 992-1005
- [4] H.J. Burbano, J. Pareja and A.A. Amell, "Laminar Burning Velocities and Flame Stability Analysis of H_2/CO /Air mixture with Dilution of N_2 and CO_2 ", *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, 2011, pp. 3232-3242
- [5] 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
- [6] Z. Zhang, Z. Huang, X. Wang, J. Xiang, X. Wang and H. Miao, "Measurements of laminar burning velocities and Markstein lengths for methanol/air/nitrogen mixtures at elevated pressures and temperatures," *Combustion and Flame*, Vol. 155, 2008, pp.358-368
- [7] Natarajan J, Lieuwen T and Seitzman J, "Laminar Flame Speeds of H_2/CO Mixture : Effect of CO_2 Dilution, Preheat Temperature,