다양한 조성비를 갖은 합성가스(H_2/CO)/공기 예혼합 화염의 층류 연소속도에 관한 실험적 연구

정병규*, 이동환*, 이기만**
순천대학교 *우주항공공학전공, **기계우주항공공학부
e-mail : kmlee@sunchon.ac.kr

An Experimental Study on the Laminar Burning Velocity of the Synthetic Gas(H_2/CO)/Air Premixed Flame with a Various Composition Ratio

Byeong-gyu Jeong*, Dong-hwan Lee* and Kee-man Lee**
Department of Aerospace engineering, Sunchon national University*

요 약

본 연구에서는 층류 연소속도 측정을 노즐 버너로 형성된 분젠화염에서 각도법과 면적법을 이용하여 다양한 조성비를 갖는 합성가스의 층류 연소속도를 실험적으로 측정하였다. 수행된 연구의 합성가스 조성비는 H_2:CO 비가 10:90%, 25:75%, 50:50%, 75:25%이며, 당량비는 이전 연구와의 비교를 위해 0.5에서 1.4까지 수행하였다. 측정된 층류 연소속도는 수행된 다양한 조성비와 당량비 범위에서 수치계산 결과와 타 연구자들의 실험 결과 값들과 잘 일치하였다. 본 연구에서도 층류 연소속도는 H_2 함유량 증가와 함께 증가됨을 알 수 있었으며, 연소속도의 중요한 증가 현상은 당량비의 증가로 확인되었다.

1. 서론

최근 원유 및 천연가스 가격 상승 및 화석연료의 사용으로 야기되는 지구온난화 문제의 해결을 위해 기존 화석연료에 대한 의존을 탈피하기 위한 노력이 활발히 진행되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 합성가스(synthetic gas)를 활용하는 방안으로 연구가 활발히 진행되고 있는데, 합성가스는 제철소 및 정유사 공정의 부생가스와 석탄의 가스화 공정 등에서 발생되는 혼합 가스이다. 특히 석탄 가스화 공정의 합성가스는 석탄가스화복합발전(IGCC)에서 사용되는 주연료로 발열량이 다른 연료에 비해 상대적으로 낮은 저급 연료로 분류되지만, 제조 과정에 따라 N_2, CO_2, H_2O, CH_4 등이 포함되어 있으나 이 합성연료의 주성분이 H_2 와 CO로 되어 있어, 연소효율 및 연소배출물 발생에 있어서 우수한 성능을 갖는 것으로 알려져 있다.

그런데 일반 탄화수소 연료에 비해 연소속도가 빠른 연료의 주요 성분인 H_2와 CO의 조성비 변화는 점화와 역화현상, 화염불안정 등 연소 성능에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이에 따라 화염의 안정성 및 최적화를 위한 설계정보를 도출하기 위해서는 연료의 성분비와 당량비 변화와 같은 연소기 운전조건에 따른 연소속도의 상세한 정보가 요구된다. 이러한 합성가스 버너 설계 혹은 버너 시스템에서의 환경오염 물질 저감을 위해서는 다양한 조성의 합성가스 연료에 대한 기초 연구가 필요하게 된다. 그중에서도 주성분인 H_2와 CO의 조성비 변화에 따른 연소현상, 특히 화염 안정화 성능과 관련된 연소속도 변화 특성은 이러한 합성가스 특성 연구에서 가장 먼저 파악되어야 할 중요한 연구 분야이다.

화염의 층류 연소속도를 실험적으로 측정하는 연구들은 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 연소속도의 정의를 이용하여 기하학적으

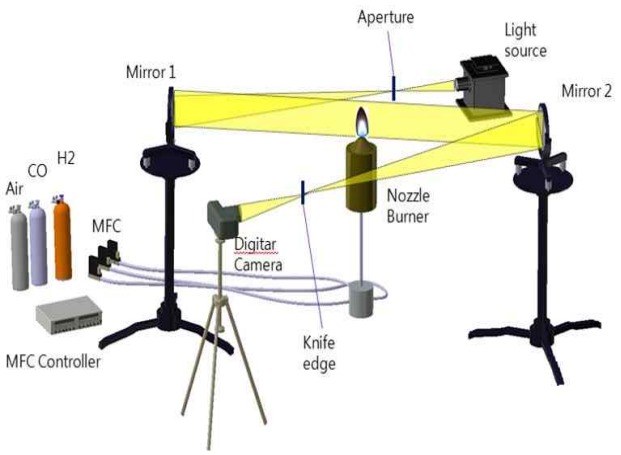
로 계산하는 방법과 원추형 화염의 표면적을 구해서 질량보존 방정식을 이용하여 측정하는 방법으로 분류된다.

본 연구에서는 실험장치의 구성 및 측정방법이 다른 실험장치보다 비교적 간단하면서 정확한 방법으로 알려진 분젠식 노즐버너(nozzle burner)를 이용하였으며, 형성된 원추형 층류 예혼합 화염을 대상으로 하여 H_2와 CO가 주성분으로 되어 있는 합성가스의 조성비 및 당량비별 층류 연소속도를 측정하였다. 측정결과는 본 연구팀에서 선행된 수치해석 결과[1][2]와 유사한 조성비와 당량비에서 수행된 타 연구자들의 실험 결과 값들과 직접 비교되었다[3]-[7].

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 버너는 출구에서 균일한 층류 유동을 형성하기위해 교축비가 25인 노즐형 버너로 제작되었다. 노즐의 출구는 내경 10mm, 길이가 200mm로 혼합이 잘 이루어지고 역화를 방지하기 위하여 버너의 하단 부분에 지름 2.5mm의 스테인레스 볼을 넣고 그 위에 메쉬를 차례로 놓음으로써 완전 발달된 층류 유동이 형성되도록 하였다.



[Fig. 1] Experimental set-up

연료는 화염의 특성을 엄밀하게 관찰하기 위하여 순도 99.99%의 고순도 수소와 일산화탄소를 사용하였으며, 연소용 공기도 순도 99.99%의 고순도 공기를 사용하였다. 이들 유량은 습식 가스메터와 버블유량계로 교정된 질량 유량계(MFC)를 조정기로 하여 정밀하게 조절하여 사용하였다.

연료와 산화제의 원활한 혼합을 위하여 버너 유입 직전 혼합 용기를 설치하였으며, 실험 시 안전을 위하여 각 용기의 출구에 역화 방지기를 설치하여 사용하였다. 원추형 화염사진은 슐리렌법 영상으로 촬영하였으며, 슐리렌 이미지는 DSLR 카메라(Nikon D70)를 사용하여 각 조건별 화염 이미지를 취득하였다.

[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 fuel	H_2:CO=10:90 H_2:CO=25:75 H_2:CO=50:50 H_2:CO=75:25

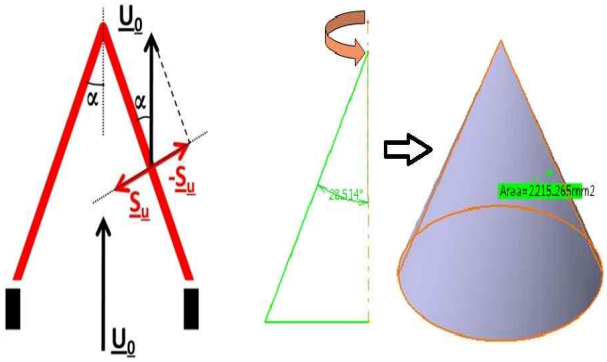
2.2 실험조건 및 방법

본 연구에서는 이전 연구[1, 2]의 수치결과와 비교하기 위하여, 몰분율 기준으로 다양한 연료 조성비(H_2:CO)로 10:90%, 25:75%, 50:50%, 그리고 75:25%로 하였으며, 예혼합기의 당량비는 본 연구팀의 이전 연구와의 비교를 위해 0.5에서 1.4까지로 하였다. 고려된 연료의 조성은 수소의 성분 변화에 따라 층류 연소속도의 변화폭이 매우 크기 때문에 수소 함량이 작은 조건에서는 화염 안정성을 고려하여 낮은 혼합기 평균 유속의 조건에서 실험이 수행되었으며, 수소의 함량이 큰 경우에는 화염 역화현상 발생으로 비교적 유속이 증가된 조건으로 실험이 진행되었다.

본 연구의 주된 관심사인 화염의 연소 속도 비교를 위해 Chemkin-II Package의 Premix Code를 이용하여 H_2:CO 연료 조성비에 따른 합성가스 연료의 연소속도를 계산하였고, 계산은 Davis Mechanism을 적용하여 상온, 대기압 조건으로 수행하였다.

한편, Fig. 2는 취득한 슐리렌 영상을 이용한 층류 화염 속도의 측정 원리를 나타내고 있다. 보는 바와 같이 슐리렌법을 이용하여 취득한 분젠 화염의 옆모서리부분의 각도는 Adobe photoshop CS를 이용하여 측정되었으며, 층류 연소속도(S_u)는 다음의 식 (1)로 정의되는 연소속도 식으로 구하였다.

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



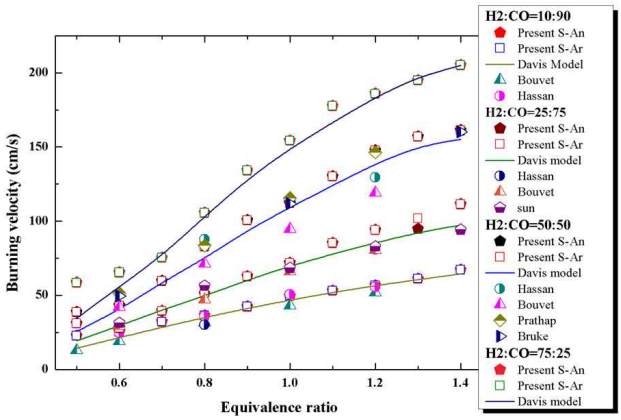
[Fig. 2] Illustration of the cone angle and area methodology

또한 연소 속도 측정은 화염의 표면적으로도 측정이 가능한데, 본 연구에서는 화염이 이루고 있는 원추형 표면적을 3차원 모델링 소프트웨어인 CATIA CAD를 이용하여 측정된 슐리렌 화염 영상의 표면적을 구하여 다음과 같이 정의된 식 (2)를 통해 구하였다.

$$\rho_u s_u A = \rho_u \dot{Q} \;\rightarrow\; s_u = \frac{\dot{Q}}{A} \qquad (2)$$

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3는 다양한 조성비를 갖는 합성가스의 당량비 변화에 따른 층류 화염속도를 도시한 그래프이다. 본 연구를 통해 측정된 실험값은 선행된 수치해석 결과 그리고 타 연구자들의 선행 연구에서 확인된 측정값들과 비교되었다.



[Fig. 3] Laminar flame speeds of different H_2/CO mixture ratios (H_2/CO=10/90,H_2/CO=25/75, 50/50 and 75/25).

Fig. 3에서 보는 바와 같이 슐리렌 이미지의 각도를 이용한 각도법과 면적법을 이용하여 측정한 실험적 결과들이 수치해석을 통한 계산 결과와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 타 연구자들의 실험 결과들과도 비교적 잘 일치하고 있음을 보여 주고 있다. 본 연구에서도 동일한 당량비의 조건에서 연료의 수소 성분이 증가함에 따라 연소속도는 증가하며, 이러한 차이는 당량비가 증가됨에 따라 더욱 크게 발생되고 있음을 재확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 비교적 구성이 간단한 전통적인 분젠 버너법을 이용한 합성가스의 층류 화염 속도를 각도법과 면적법을 이용하여 수치 계산된 결과와 타 연구자들의 실험 결과와 비교하여 비교적 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 최근 관심이 높은 저 발열량의 합성가스 연료 사용 증대로 인해 다양한 연료 조성비와 연소기 운전조건에서 운용될 합성가스 연소기의 설계 자료에 중요한 기초정보로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구의 일부입니다.(NRF-2012-0001474)

참고문헌

[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 H2/CO/Air mixture with Dilution of N2 and CO2", 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, and Pressure", Combustion and Flame, Vol. 151, 2007, pp. 104-119