

각도법과 동심형 확장 채널 연소기를 이용한 연소속도 측정 및 화염 발광 특성에 관한 연구

윤승호* · 이기만**†

A Study on the Laminar Burning Velocity Using an Angle Method and Annular Diverging Channel Combustor and Characteristics Of Chemiluminescence

Seungho Yun*, Keeman Lee**†

ABSTRACT

In this study, the laminar burning velocities of SNG fuel were studied using both experimental measurements and kinetic simulations. They were measured using the angle method of Bunsen flame configuration and the annular diverging channel combustor. And they were also numerically calculated by CHEMKIN Package with GRI 3.0 mechanisms. Spectrometer was used for characteristics of flame chemiluminescence of SNG fuels. From results of this work, first, we found that according to adding H₂ contents in the fuels the laminar burning velocities of SNG fuels were increased. And second, we also discovered existence of OH*, CH*, C₂*, HCO*, CH₂* radicals and their correlation.

Key Words : Laminar Burning Velocity, Angle Method, Chemiluminescence, Annular Diverging Channel Combustor, Radical

최근 가파른 경제성장으로 인해 전 세계적으로 에너지 수요가 급증하고 이에 따라 화석연료의 사용도 늘어나고 있다. 하지만 이는 궁극적으로 화석연료의 고갈 및 심각한 환경문제를 초래하는 결과를 가져왔고, 자연스레 화석연료를 대체 할 수 있는 효율적이고 친환경적인 연료에 대한 관심이 커지고 있다. 이러한 노력의 일환으로 다른 연료에 비해 상대적으로 가체연수가 길고 경제적인 석탄을 이용한 합성천연가스(SNG, Synthetic Natural Gas) 제조기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이 합성천연가스는 저가의 석탄을 고온 고압에서 가스화한 후 정제와 합성 공정을 거쳐 90%이상의 메탄을 제조한 후 프로판(C₃H₈)을 첨가하여 생산되는데 비교적 높은 에너지전환 효율 때문에 효과적인 석유 대체 제품으로 손꼽힌다.

이미 미국, 일본, 유럽 등 에너지 선진국에서는 이 SNG연료를 상용화하여 산업체 및 가정에 공

급하는 단계에 이르렀고 이에 대한 개질 및 향상을 위한 연구 개발이 꾸준히 진행되고 있다. 물론 국내에서도 POSCO, 한국 전력공사를 중심으로 SNG연료의 상용화를 위한 노력이 꾸준히 이루어지고 있다.

이러한 최근 동향에 맞춰 본 연구에서는 실험실 차원에서 모사된 SNG연료의 층류 연소속도와 화염의 발광 특성에 초점을 맞춰 연구를 수행하였다.

지금까지 연소속도를 측정하는 방법으로 솔리덴 이미지를 이용한 측정 방법, 평면 화염 연소기를 이용한 측정 방법을 비롯하여 비교적 다양

Table 1 Experimental conditions.

Fuel	CH ₄ , C ₃ H ₈ , H ₂
Oxidizer	Air
Diameter of nozzle(mm)	10
Equivalence ratio(Φ)	0.8 ~ 1.6
Composition ratios of simulated SNG fuel (CH ₄ : C ₃ H ₈ : H ₂)	100 : 0 : 0 (Ref.)
	95 : 5 : 0 (C0)
	91 : 6 : 3 (C3)
	85 : 8 : 7 (C7)
	80 : 9 : 11 (C11)

* 순천대학교 우주항공공학전공

** 순천대학교 기계우주항공공학부

† 연락처, kmlee@scnu.ac.kr

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

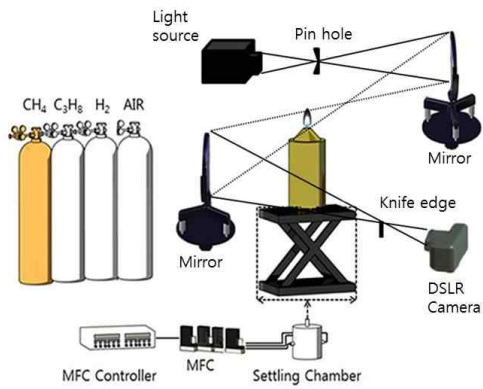


Fig. 1 Experimental apparatus I (Schlieren method).

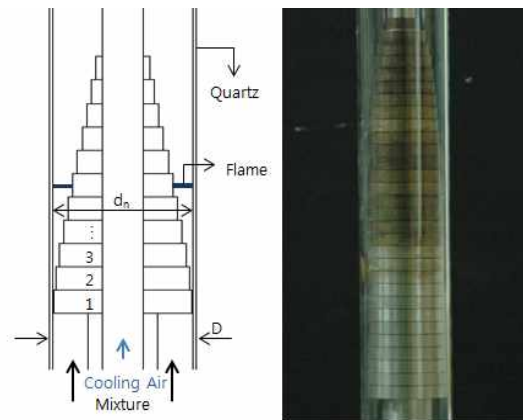


Fig. 2 Experimental apparatus II (Annular diverging channel combustor).

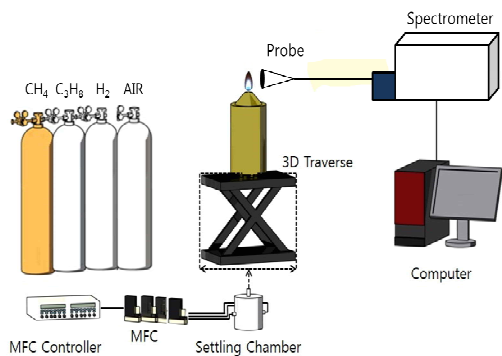


Fig. 3 Experimental apparatus III (Spectrometer).

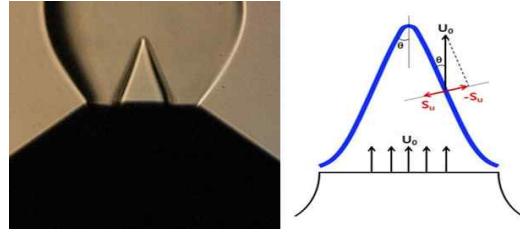


Fig. 4 Example of a schlieren(left) and illustration of the cone angle methodology(right).

한 방법이 제시되었다. 본 연구에서는 연소속도 측정법의 가장 대표적인 방법인 슐리렌 이미지를 이용한 측정법과 유동방향으로 단면적이 확장된 동심관을 가진 ‘동심형 채널 연소기’를 이용하여 SNG 연료의 연소속도를 비교 측정하였다.[4]

Figure 1에 슐리렌 실험장치를 개략적으로 나타내었다. 사용된 버너는 출구에서 균일한 층류 유동을 형성하기 위해 교축비가 25인 수축형 노즐을 사용하였고, 버너 출구의 내경은 10mm, 버너의 길이는 200mm이다. 균일한 혼합과 역화 방지를 위하여 버너의 하단부에 지름 2.5mm의 스테인리스 볼(ball)을 넣고 그 위에 메쉬층(mesh layer)을 차례로 놓음으로써 완전 발달된 층류 유동이 잘 형성되어 분사되도록 설계하였다. 슐리렌 이미지는 DSLR 카메라를 이용하여 촬영하였다.

Figure 2는 연소속도 비교 측정을 위한 ‘동심형 채널 연소기’이다. 이를 이용하여 연소속도를 측정하는 원리는 $Q=AV$, 즉 연속방정식이다. 다시 말하면 연소기 하단부에서 일정한 유량을 공급하게 되면 위로 올라갈수록 단면적이 넓어지므로 혼합기의 속도는 감소하게 된다. 점화 후 화염은 연소기 안으로 전파되어 오다가 연소속도와 혼합기의 속도가 같아지게 되는 지점에서 형성이 되고, 화염의 연소속도는 그 지점에서 혼합기의 속도로 결정이 된다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 연소기의 가장 안쪽 관으로 Cooling Air를 공급하고 충분한 냉각 시간을 두어 예열된 온도에 의한 실험 오차를 최소한으로 줄이도록 하였다.

Figure 3은 연료의 화염 발광 특성을 파악하기 위하여 사용된 분광기이며, 보다 정밀한 측정을 위하여 프로브(probe)를 이용하여 200nm부터 800nm 까지 1nm 간격으로 측정하였다.

공급된 연료는 실험실 차원에서 SNG연료를 모사하기 위해 고 순도 수소와 메탄, 그리고 상용 LPG를 주성분으로 고 순도 공기를 산화제로 이용하여 실험하였다. 이들의 유량은 습식(wet) 가스미터와 버블(bubble) 유량계를 이용하여 최초 교정을 하고, 질량유량계(MFC)를 통해 정밀하게 조절하여 사용하였다.

Figure 4는 각각 대표적인 화염의 슐리렌 이미지(좌)와 이를 이용한 층류 화염 속도의 측정원리를

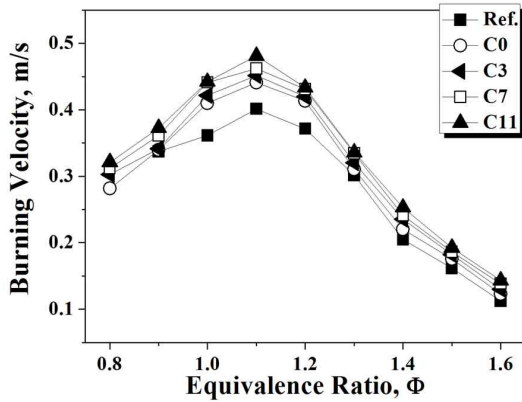


Fig. 5 Experimental Laminar burning velocity of different mixture ratios (Using schlieren method).

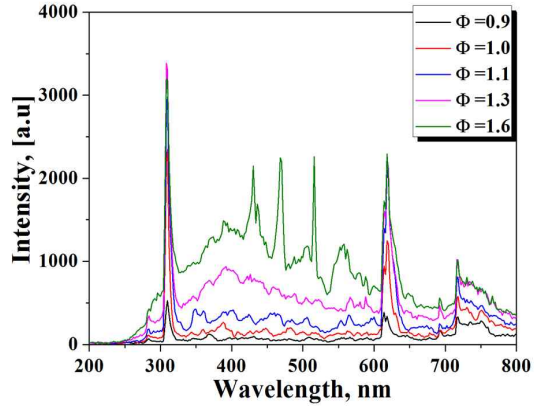


Fig. 8 Characteristics of chemiluminescence for reference case.

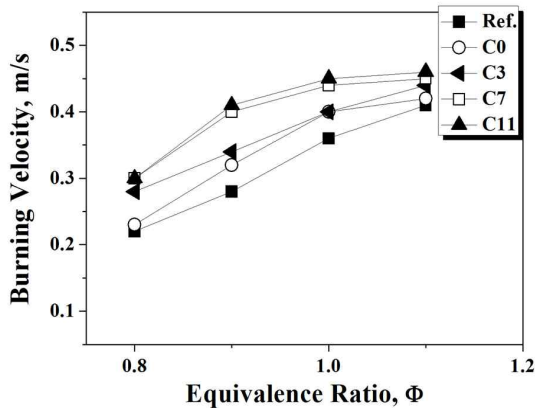


Fig. 6 Experimental Laminar burning velocity of different mixture ratios in lean region (Using annular diverging channel combustor).

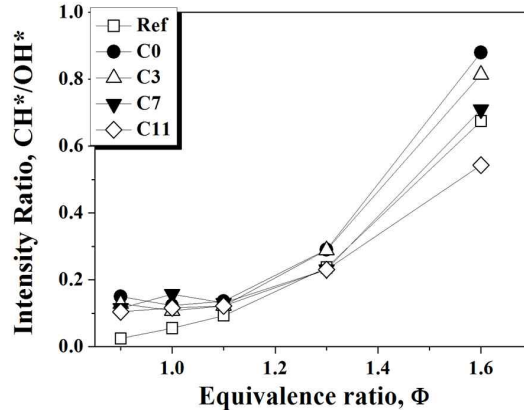


Fig. 9 Chemiluminescence intensity ratio(CH*/OH*) for all cases.

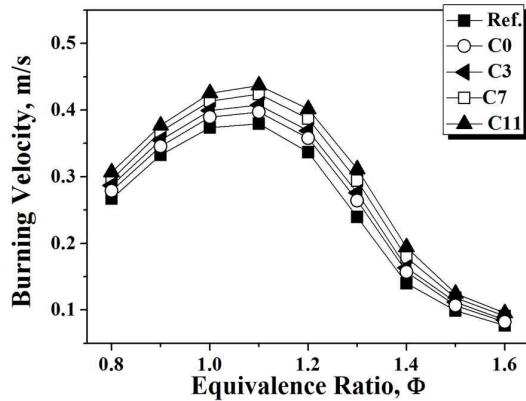


Fig. 7 Laminar burning velocity of different mixture ratios (Numerical calculation).

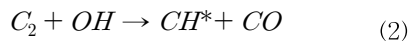
나타낸 것이다. 층류 화염속도(S_u)는 식(1)을 통해 구하였고, 촬영된 이미지의 각도(α)는 Adobe Photoshop CS를 사용하여 측정하였다.

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

Figure 5와 Fig. 6는 본 연구자가 각각 쉐리렌 방법과 동심형 채널 연소기를 이용하여 측정된 연소속도 그래프이다. 쉐리렌 방법으로 측정된 연소속도는 전 당량비 구간에서 일반적으로 알려진 연소속도 경향성과 일치하였으나, 동심형 채널 연소기를 이용하여 측정된 연소속도는 이론 당량비 구간인 1.1을 기준으로 희박한 구간에서는 비교적 잘 측정이 되었으나 이보다 과농한 구간에서는 상당한 오차가 있었고, 이에 Fig. 6에는 당량비 0.8부터 1.1까지의 연소속도만을 나타내었다. 이러한 오차는 연소기의 기하학적 문제로 사료되

며, 향후 추가적인 실험으로 보완이 필요하다. Fig. 7은 Chemkin-II Package의 GRI 3.0 Mechanism을 이용하여 수치적으로 계산한 연소 속도 그래프이다. 실험 및 이론 그래프에서 보이는 전반적인 경향은 연료 조성비에 관계없이 화염의 연소속도가 최대가 되는 당량비 1.1을 기준으로 이보다 희박한 구간에서는 당량비가 증가함에 따라 연소속도가 증가하는 경향을 보이고, 이보다 과농한 구간에서는 당량비가 증가함에 따라 연소속도가 감소하는 경향성을 보였다. 또한 연료에 수소의 함량이 증가하면서 화염의 연소속도 또한 모든 당량비 구간에서 증가함을 확인하였다.

Figure 8은 분광기를 이용하여 측정된 메탄 100% Reference경우의 화염 발광 특성을 보여주는 그래프이고, 나머지 조성비에서도 이와 동일한 경향성을 보였다. 전체적으로 당량비가 증가하면 화염의 라디칼 강도가 커짐을 알 수 있고 특히 당량비 1.6에서 CH^* (430nm), C_2^* (470nm, 510nm)의 강도가 현저히 증가함을 확인하였다. 식(2)의 반응으로부터 알 수 있는 CH^* 라디칼의 발광 특성은 다음과 같다. 연소과정 동안 OH^* 라디칼은 반응 영역에 넓게 분포하지만 C_2^* 라디칼은 과농한 영역에서만 나타나기 때문에 CH^* 라디칼의 발광 강도 또한 과농한 영역에서 강함을 알 수 있다.



또한 이전 연구에서는 연소 과정 동안 나타나는 주요한 CH^* , OH^* , C_2^* 라디칼 사이의 상관관계에 대한 연구를 수행하였고, 그 결과 C_2^*/OH^* , C_2^*/CH^* , CH^*/OH^* 의 비는 당량비가 증가하면 선형적으로 증가함을 알아내었다. 이들 라디칼의 강도비 중 열 방출과 반응 영역의 지표를 알려주는 OH^* 와 CH^* 라디칼의 비를 Fig. 9에 나타내었다. 이전 연구에서 보고한 바와 마찬가지로 당량비가 증가함에 따라 이들 라디칼의 비가 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 여기서 본 연구자는 당량비 1.1 이후 연료에 프로판과 수소가 첨가되는 C0, C3, C7, C11의 그래프의 증가율이 주목하였다. 수소의 함량이 증가함에 따라 그 증가율이 점차 감소하였는데 이는 수소가 증가하면서 연료 내 CH 분자가 감소하고 OH 분자가 상대적으로 증가하여 CH^*/OH^* 값의 증가율이 감소하는 결과로 보여진다.

본 연구에서는 전통적인 분젠 화염의 각도법과 동심형 채널 연소기를 이용하여 SNG 연료의 층류 화염속도를 비교 측정하였고 화염 발광 특성에 대한 연구를 수행하였다. 또한 보다 다양한 온도 및 압력에서의 층류 연소속도에 대한 예측은 향후 SNG를 이용한 다양한 용도의 연소기 설계를 위한 기초 정보로 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2014년도 미래창조과학부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.
(과제번호 : 2014-2010-102780).

참고 문헌

- [1] 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
- [2] B.G. Jeong, K.M. Lee, "Measurement of Laminar Flame Speed of Syngas (H_2/CO) /Air Premixed Flame using the Bunsen Burner Method" The Korean Society of Combustion, No.43, 2012, pp. 181-183
- [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] N.I. Kim, G.T. Kim, "Comparison of Burning Velocity Measurement Method Using a Flat Flame and an Annular Diverging Channel Combustor" The Korean Society of Combustion, No.40, 2010, pp. 21-24
- [5] S.M Kang, W.N. Lee, "The CH^* Chemiluminescence Characteristics of Premixed Flames and Their Variation with Equivalence Ratio and Heat Release Rate" The Korean Society of Automotive Engineers, 2006, pp. 64-69
- [6] S.M Kang, W.N. Lee, "The Dependency of CH^* Chemiluminescence of a Laminar Premixed Flame on Fuel Types" The Korean Society of Combustion, No.2, 2008, pp. 14-22