

# SNG 연료의 셀 불안정성 및 층류연소속도에 관한 실험적 연구

김동찬\* · 조준익\*\* · 이기만\*\*\*†

## An Experimental on Cellular Instability and Laminar Burning Velocity of SNG Fuel

Dongchan Kim\*, Junik Jo\*\*, Keeman Lee\*\*\*†

### ABSTRACT

This article describes a cellular instability and laminar burning velocity of simulated synthetic natural gas(SNG) including 3% hydrogen. In this study, experimental apparatus is employed using cylindrical bomb combustor, and investigation is carried out with high speed camera and Schlieren system. The cellular instability is caused by the buoyancy, hydrodynamic instability. Unstretched burning velocity can be determined by extrapolated stretch rate of zero point from measured results. These results were also compared with numerical calculation by Chemkin package with GRI 3.0, USC-II, WANG, C3 Fuel mechanism. As an experimental conditions, equivalence ratios was adjusted from 0.8 to 1.3. From results of this work, the one was found that the cellular instability has occurred by effect of thermal expansion rate and flame thickness. As the other results, unstretched laminar burning velocity was best coincided with GRI 3.0 mechanism.

**Key Words** : SNG(Synthetic Natural Gas), Cellular Instability, Laminar Burning Velocity, Markstein Length, Cylindrical Bomb Combustor

합성천연가스(Synthetic Natural Gas, 이하 SNG)는 화석연료를 대체 할 수 있는 친환경적이고 비교적 높은 에너지 전환 효율을 가진 연료로 다른 연료에 비해 상대적으로 가채연수가 긴 석탄을 이용하여 고온-고압에서 가스화 한 후, 가스정제와 합성 공정을 거쳐 제조되는 메탄( $\text{CH}_4$ )에 프로판( $\text{C}_3\text{H}_8$ )을 첨가하여 생성된다. SNG연료는 메탄을 이용한 점에서는 천연가스와 유사하지만 연소하기 쉬운 기체로 공기나 산소와 접촉하면 쉽게 발화되는 수소( $\text{H}_2$ )를 포함하고 있기 때문에 기존 천연가스와 비교하면 연소특성이 달라질 것으로 예측되며, 본 연구팀은 SNG연료에 대한 연구를 진행하였다. [1, 2]

이에 본 연구에서는 상용화된 실제 SNG 연료의 조성비와 유사한 수소함유량이 3%인 모사 SNG 연료에 대하여 구형으로 전파되는 화염을 측정할 수 있는 원통형 연소기를 이용하여 셀 불안정성(Cellular instability)과 연소기 설계 및 운전 조건 설정에서 가장 중요한 물리량 중 하나인 층류연소속도(Laminar burning velocity)를 측정하고, PREMIX 코드를 이용한 수치해석 값들과 비교를 통하여 알

맞은 수치해석 모델 선정에 초점을 두어 연구를 진행하였다. [3, 4]

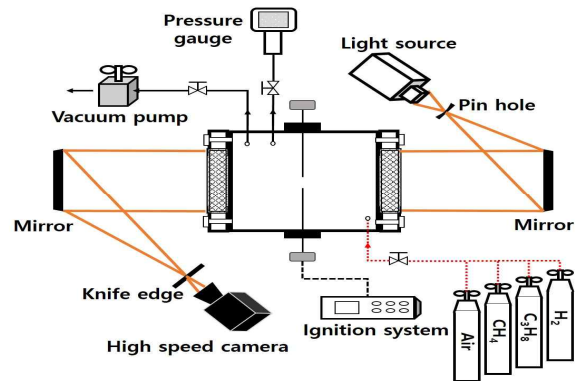


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

Figure 1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도이다. 본 연구에 사용된 연소기는 구형으로 전파되는 화염을 측정하는 장치로서 체적이 일정한 실린더 형으로 두께 40mm의 석영(Quartz)창을 부착하여 슈리렌 시스템을 이용한 가시화를 가능하게 하였으며 초고속카메라(High speed camera)를 이용하여 6000fps로 이미지를 획득하였다. SNG연료 각각의 부분압력은 진공상태를 만든 후 디지털 입력계(Bit02B)를 이용하여 압력별로 실험조건에 맞게 공급하였다. 연소기 내부에 직경 0.5mm 텅스텐 전극봉을 설치하여 18kV의 전극을 공급하여 점화하였다. 측정에 이용된 화염 반경은 1

\* 순천대학교 우주항공공학전공

\*\* 쌍용자동차 기술연구소

\*\*\* 순천대학교 기계우주항공공학부

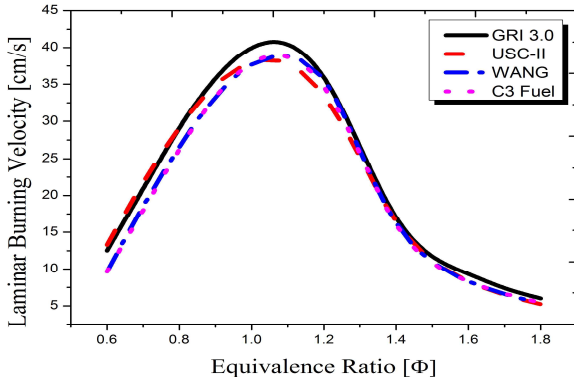
† 연락처, kmlee@sunchon.ac.kr

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

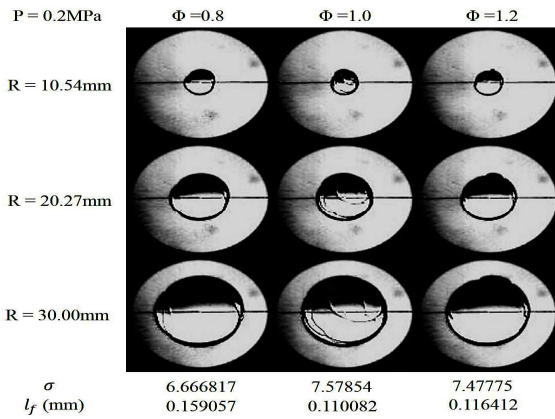
0mm에서 30mm 범위로 정하였는데 각각 전극봉의 영향과 연소기내부벽에 의한 영향을 배제하기 위하여 선정하였다.

**Table 1** Experimental conditions

Fuel	CH <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , H <sub>2</sub>
Oxidizer	Air
Equivalence ratio( $\Phi$ )	0.8 ~ 1.3
Composition ratio of simulated SNG fuel(%)	CH <sub>4</sub> : C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> : H <sub>2</sub> = 91 : 6 : 3



**Fig. 2** Laminar burning velocity comparison of various numerical calculation of SNG fuel ( $\Phi=0.6\sim 1.8$ , 0.1MPa)



**Fig. 3** Schlieren pictures of SNG fuel at 0.2MPa, and at equivalence ratios of 0.8, 1.0, and 1.2

Figure 2는 SNG연료의 층류연소속도를 당량비 0.6에서 1.8까지 수치해석으로 계산한 그래프이다. 수치해석에 사용된 4가지 모델은 GRI 3.0 메카니즘[5] 과 University of Southern California의 USC-II 메카니즘[6], H. Wang의 메카니즘[7], 그리고 S.G. Davis와 C.K. Law의 C<sub>3</sub> Fuel 메카니즘[8]을 이용하였다.

셀 불안정성은 부력에 수력학적 불안정성으로 발생된다. 부력에 의한 불안정성의 경우  $0.3[g(d/2)]^{1/2}$ 으로 확인할 수 있으며, 본 실험장치에서는 임계화염반경에 대응하는  $d=60\text{mm}$ 로 부력의 영향은  $16.27\text{cm/s}$ 로 계산되는데 수치해석의 결과 0.1MPa 조건에서 당량비(Equivalence ratio,  $\Phi$ ) 0.7이하와 1.4이상에서의 연

소속도가 부력에 의한 영향을 받는 것으로 나타나 계산된 값과 비교하여  $\Phi=0.8\sim 1.3$  범위에서 실험을 실시해 부력에 의한 영향을 배제하였다.[9]

수력학적 불안정성은 기연가스와 미연가스의 밀도 차에 의해 발생되며 열 팽창율(Thermal expansion ratio,  $\sigma = \rho_u/\rho_b$ )로 열 팽창율이 크면 불안정성이 증가한다. ( $\rho_u$  : 미연가스의 밀도,  $\rho_b$  : 기연가스의 밀도) 또한, 화염두께(Flame thickness,  $l_f$ )도 수력학적 불안정성을 좌우하는 중요한 변수이며, 화염두께가 얇으면 곡률의 영향을 감소시키고  $\nabla \rho \times \nabla P/\rho^2$ 로 정의되는 baroclinic torque intensity를 향상시켜 불안정성을 증가시킨다. 따라서 수력학적 불안정성을 평가하기 위하여 C. K. Law 연구팀이 제안한 (1) 식을 사용하여 확인하였다.

$$\square = \frac{\lambda/c_p}{\rho_u S_u^o} \quad (1)$$

$\lambda$ 와  $c_p$ 는 미연가스 온도와 화염대의 평균에 해당하는 1400 K에서의 열전도도와 비열을 의미한다.[10, 11]

술리렌 이미지를 이용하여 획득한 화염의 구형이미지를 이용하여 식 (2)으로 스트레치를 받는 연소속도( $S_b$ )를 구할 수 있다.

$$S_b = \frac{dR}{dt} \quad (2)$$

여기서 R은 구형화염의 반경이며 t는 시간이다.

$$K = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{1}{4\pi R^2} \frac{8\pi R dR}{dt} = \frac{2}{R} \frac{dR}{dt} \quad (3)$$

다음 식 (3)으로 스트레치 율(Stretch rate, K)을 나타낼 수 있다. 식 (2), (3)으로부터 스트레치를 받는 연소속도와 스트레치율을 외삽법을 통해 스트레치가 0인 연소속도( $S_u$ )를 구할 수 있다.

$$S_u - S_b = L_b K \quad (4)$$

식 (4)에서  $L_b$ 는 Markstein Length이며  $S_u$ 와  $L_b$ 의 그래프에서 음의 기울기로 정의 하였으며, 층류연소속도( $S_L$ )는 질량보존관계식을 이용하여 식 (5)으로 나타낼 수 있다.[12, 13]

$$S_L = S_u \left( \frac{\rho_b}{\rho_u} \right) \quad (5)$$

Figure 3은 0.2MPa에서 당량비 0.8, 1.0 그리고 1.2의 슐리렌 이미지를 반경 10mm씩 간격을 두어 나타내었다. 슐리렌 이미지에서 나타난 것과 같이 셀 불안정성이 발생하지 않았지만 당량비 1.0에서 다른 조건과 비교하였을 때 셀이 형성되는 것을 확인할 수 있는데

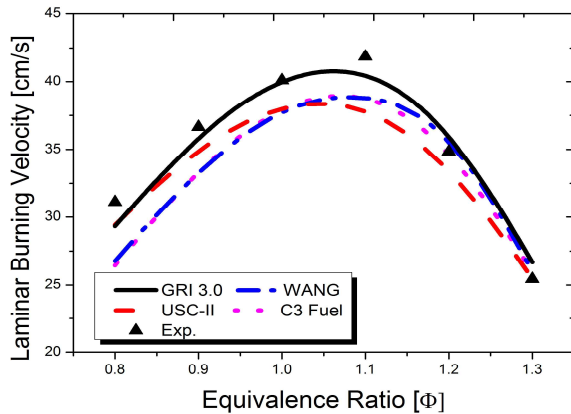


Fig. 4 Unstretched laminar burning velocity of SNG fuel compared with numerical calculation ( $\Phi=0.6\sim 1.8$ , 0.1MPa)

이는 열 팽창율이 가장 크고 화염두께가 가장 얇아서 셀 불안정성을 야기한 것으로 볼 수 있다.

Figure 4은 0.1MPa에서 당량비 0.6부터 1.8까지 4가지 메카니즘으로 수치 해석된 층류연소속도 값과 실험값을 비교한 그래프이다. 그래프에서 나타난 것과 같이 실험값이 GRI 3.0 mech으로 계산된 연소속도 값과 비슷한 경향이 나타나는 것을 볼 수 있는데 본 실험에서 사용된 SNG 연료의 91%가 메탄이기 때문에 GRI 3.0 mech과 비슷한 경향을 나타내는 것으로 판단되지만 수소가 첨가되었기 때문에 메카니즘에 알맞지 않아서 수치계산된 값보다 약간 높은 값을 보이는 것으로 사료된다.

본 연구에서 SNG 연료의 셀 불안정성과 층류연소속도를 계산하여 알맞은 메카니즘을 선정해 보았다. 0.2MPa에서는 셀 불안정성이 발생하지는 않았지만 당량비 변화에 따라 셀이 형성되었는데 열 팽창율과 화염두께에 영향을 받는 수력학적 불안정성으로 사료된다. 이는 압력을 더 증가시켜 수력학적 불안정성에 대한 영향을 확인해 보아야 할 것이며, 향후 연구에서는 셀 불안정성을 발생하는 요소 중 물질-열확산 불안정성에 대하여도 연구를 진행하여야 할 것이다. 층류연소속도는 메탄에 적합하다고 알려진 GRI 3.0 mechanism이 가장 알맞지만, 보다 더 적합한 메카니즘 선정을 위하여 필요한 선형 및 비선형 모델간의 비교도 진행하여야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 과제입니다.(과제번호 : 2015-2010-103050)

## 참고 문헌

- [1] D.C. Kim, K.S. Sim, K.M. Lee, "A Comparison Study on Laminar Burning Velocity Measurement Method of SNG Fuel", *The Korean Society of Combustion*, No.50, pp. 83-86
- [2] I.C. Choi, K.M. Lee, "Combustion Characteristics of Dual Swirl Combustor according to Hydrogen Content in Simulated SNG Fuel", *The Korean Society of Combustion*, Vol.2014 No.5[2014], pp. 111-113
- [3] Derek Bradley, P.H. Gaskell, X.J. Gu. "Burning Velocities, Markstein Lengths, and Flame Quenching for Spherical Methane-Air Flame: A Computational Study", *Combustion and Flame* 104: 176-198, 1996
- [4] X.J. Gu, M.Z. Haq, M. Lawes, R. Woolley, "Laminar Burning Velocity and Markstein Lengths of Methane-Air Mixtures", *Combustion and Flame* 121 : 41-58, 2000
- [5] Gregory P. Smith, David M. Golden, M. Frenklach, et al. GRI-3.0 mechanism, [http://me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://me.berkeley.edu/gri_mech/)
- [6] Hi Wang, X. You, Aranya V., Joshi, Scott G. Davis, A. Laskin, F. Egolfopoulos, Chung K. Law, USC Mech Version II, High-Temperature Combustion Reaction Model of H<sub>2</sub>/CO/Cl-C<sub>4</sub> Compounds [http://ignis.usc.edu/USC\\_Mech\\_II.htm](http://ignis.usc.edu/USC_Mech_II.htm)
- [7] Sun, C. J., Sung, C. J., Wang, H., and Law, C. K. "On the Structure of Nonsmoking Counterflow Ethylene and Acetylene Diffusion Flames.", *Combustion and Flame*, 107: 321-335 (1996)
- [8] S.G. Davis, C.K. Law and H. Wang, "Propene pyrolysis and oxidation kinetics in a flow reactor and laminar flames", *Combustion and Flame*, 119, pp. 375-399 (1999)
- [9] M.S. Cha, P.D. Ronney, "Propagation rates of non-premixed edge flames", *Combustion and Flame*, Vol. 146, 2006, pp. 312-328
- [10] C.K. Law, G. Jomaas, J.K. Bechtold, "Cellular instabilities of expanding hydrogen/propane spherical flames at elevated pressures: theory and experiment", *Combustion Institute* 30 (2005) 159-167
- [11] TM Vu, J. Park, O.B. Kwon, J.S. Kim, "Effects of hydrocarbon addition on cellular instabilities in expanding syngas-air spherical premixed flames", *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 34, 2009, pp.6961-6969
- [12] TM Vu, J. Park, O.B. Kwon, D.S. Bae, J.H. Yun, S.I. Keel, "Effects of diluents on cellular instabilities in outwardly propagating spherical syngas-air premixed flames", *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 35, 2010, pp.3868-3880

[13] C. Prathap, Anjan Ray, MR. Ravi, "Investigation of nitrogen dilution effects on the laminar burning velocity and flame stability of syngas fuel at atmospheric condition", *Combustion and Flame* 155 (2008) 145-160

[14] Wonsik Song, Jeong Park, Ohboong Kwon, Jinhan Yun and Sangin Keel, "Experimental Study on Effects of Syngas Addition in Flame Propagation and Stability of DME-Air Premixed Flames", *The Korean Society of Combustion*, Vol.17, No.4, pp. 44-50(2012)