

SNG/공기 화염의 층류 연소속도 측정 - 분젠과 구형 화염법 비교 -

김동찬¹ · 이기만^{2†}

¹순천대학교(원) 우주항공공학과, ²순천대학교 기계·우주항공공학부

Laminar Burning Velocity Measurement of SNG/Air Flames - A Comparison of Bunsen and Spherical Flame Method -

DONGCHAN KIM¹, KEEMAN LEE^{2†}

¹Department of Aerospace Engineering, Suncheon National University

²School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon National University, 255, Jungang-ro, Suncheon-si, Jeollanam-do, 57922, Korea

Abstract >> This article describes a comparison on laminar burning velocity measured by Bunsen and spherical flame methods of synthetic natural gas (SNG) with various composition of hydrogen. In this study, the laminar burning velocity measurements were employed by Bunsen burner and cylindrical constant combustor at which flame images were captured by Schlieren system. These results were also compared with numerical based on CHEMKIN package with GRI 3.0, USC-II and UC Sandiego mechanism. In case of spherical flames, the suitable flame radius range and theoretical models were verified using the well-known previous results in methane/air flames. As an experimental condition, hydrogen content of SNG was adjusted 0% to 11%. Equivalence ratios of Bunsen flames were adjusted from 0.8 to 1.6. On the other hand, those of spherical flames were adjusted from 0.6 to 1.4, relatively. From results of this study, the both laminar burning velocities measured in Bunsen and spherical flame methods were resulted in similar tendency. As the hydrogen content increased, the laminar burning velocity also increased collectively. Laminar burning velocity of measured SNG-air flames was best coincided with GRI 3.0 mechanism by comparison of reaction mechanisms.

Key words : Synthetic Natural Gas(합성천연가스), Laminar Burning Velocity(층류 연소속도), Bunsen Flame(분젠 화염), Spherical Flame(구형화염), Hydrogen Content(수소함량)

Nomenclature

S_b : propagation burning velocity at burned mixture, cm/s

S_b^0 : unstretched laminar burning velocity at burned mixture, cm/s

S_u^0 : unstretched laminar burning velocity at unburned mixture, cm/s

K : stretch rate, s⁻¹

L_b : Markstein length at burned mixture, mm

R_f : flame radius, mm

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

Received : 2016.12.4 in revised form : 2016.12.20 Accepted : 2016.12.30

Copyright © 2016 KHNES

R_{fL} : lower flame radius, mm

R_{fU} : upper flame radius, mm

R_W : inner radius of chamber, mm

ρ_b : burned mixture density, g/cm³

ρ_u : unburned mixture density, g/cm³

Super & Subscripts

0 : unstretch (stretch rate = 0)

b : burned mixture

u : unburned mixture

1. 서 론

매장량이 풍부하다고 알려진 석탄을 활용한 방법 중 하나가 석탄 가스화(coal gasification) 기술이다. 석탄 가스화 기술은 석탄을 고온 고압에서 가스화하여 합성가스(synthetic gas)로 만들어 정제 후 석탄 가스화 복합발전(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC), 석탄액화 플랜트 연계를 통한 대체 석유 개발, 화학제품 생산을 통한 나프타(naphta)의 대체, 그리고 합성 천연가스(Synthetic Natural Gas, 이하 SNG) 제조와 같은 여러 분야에 이용할 수 있게 된다^{1,2)}.

이 중 SNG 제조 기술은 천연가스를 대체할 수 있는 기술로써 석탄 가스화 공정에서 정제된 합성가스를 메탄화 공정(methanation process)을 거쳐 메탄(CH₄)과 수소(H₂)를 생성하고 여기에 천연가스와의 호환성을 맞추기 위해 프로판(C₃H₈)을 첨가하여 발열량을 맞추으로써 기존과 유사한 천연가스를 생산하는 기술이다. 이렇게 제조된 SNG는 메탄을 주성분으로 하지만 물성치가 다른 프로판과 수소를 혼합하기 때문에 SNG 연료의 연소 특성을 파악하는 것이 중요한 사항이 된다.

SNG 연료의 연소에 관한 이전 연구들을 보면 Park et al.은 확산형 가스터빈 연소기에서 SNG의 조성비

변화에 따른 화염 형상과 연소효율 그리고 NO_x 배출에 관한 영향에 대해 연구^{3,4)}를, Lee et al.는 가스터빈 연소기에서 천연가스 내 미량의 수소함량이 NO_x, CO 배출과 동압특성에 미치는 영향에 관하여 조사하였다⁵⁾. Choi et al.⁶⁾는 이중선회 모델 가스터빈 연소기에서 수소함량에 따른 연소 불안정 특성에 관하여, Oh et al.는 합성 천연가스의 조성변화에 따른 확산화염의 화염 안정성과 부상화염과 같은 연소특성에 관하여 연구하였다⁷⁾.

그런데 위에서 알 수 있듯이 가스터빈 연소기에서 SNG의 적용에 대한 연구에 비해 기초 연소특성에 대한 연구가 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 SNG의 연소특성 중의 하나인 연소속도에 관한 연구를 진행하였다.

기초적인 연소특성 중 층류 연소속도(laminar burning velocity)는 연소현상을 이해하는데 필요한 필수 물리량으로 가연 혼합물의 확산과 반응성 그리고 발열에 대한 기본적인 정보를 포함하고 운전조건 설정 및 연소기에서 날림(blow off)이나 역화(flash back)와 같은 실제 연소현상을 제어하는데 가장 중요한 설계 인자이다.

이러한 층류 연소속도를 측정하는 실험적 방법은 화염의 형상에 따라 매우 다양한 방법이 제시되어 왔다. 대표적인 방법으로 분젠버너에서 솔리렌(schlieren) 이미지를 이용하여 원뿔형 화염의 각도를 측정하는 방법^{8,9)}, 평면 화염을 이용하여 연소기의 표면온도를 측정하는 방법¹⁰⁾, 대향류 연소기와 PIV (Particle Image Velocimetry)를 이용하여 측정하는 방법¹¹⁾, 정적연소기 내부에서 전파되는 구형화염을 이용하여 측정하는 방법¹²⁻¹⁴⁾등이 있다. 실험적인 방법 외 계산으로는 PREMIX 코드¹⁵⁾를 이용한 수치해석법이 있는데 이 경우 SNG 연료의 연소 반응을 잘 모사하고 있는 반응 기구를 선정하여야만 한다.

본 연구에서는 실험적인 방법으로 분젠화염과 구형화염을 이용하여 수소함량에 따른 SNG의 층류 연

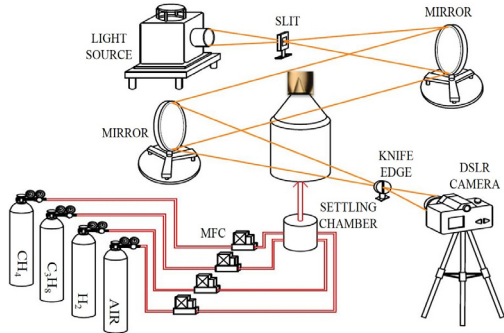


Fig. 1 Schematic diagram of Bunsen burner with schlieren systems

소속도를 측정하였다. 또한 SNG에 대한 반응 메커니즘이 알려져 있지 않기 때문에 알맞은 메커니즘을 선정하고자 메탄에 최적화되어있는 GRI 3.0¹⁶⁾, 수소와 C₁-C₄반응을 포함하는 University of Southern California의 USC-II¹⁷⁾와 C₁-C₃반응을 포함하는 UC Sandiego¹⁸⁾ 반응 기구를 이용하여 계산된 연소속도 값을 실험값과 비교하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 실험장치

2.1.1 분젠버너

Fig. 1은 본 연구에 사용된 분젠버너와 솔리렌 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 버너의 전체길이는 200 mm로 버너출구 노즐의 직경은 14 mm로 화염에 의해 예열되지 않도록 최대한 얇고 날카롭게 가공하였다. 연료와 산화제의 균일한 혼합을 위해 버너 하단부에 스테인리스 볼을 넣고 차례로 메쉬층(mesh layer)을 놓음으로써 노즐출구에서 균일한 유동분포를 가질 수 있도록 설계하였다. 연료는 습식 가스미터와 버블(bubble) 유량계를 이용하여 교정된 질량유량제어기(mass flow controller, 이하 MFC)를 통해 정밀하게 조절하여 사용하였다. MFC를 통하여 공급된 연료와 공기는 정체실(settling chamber)에서 균일하

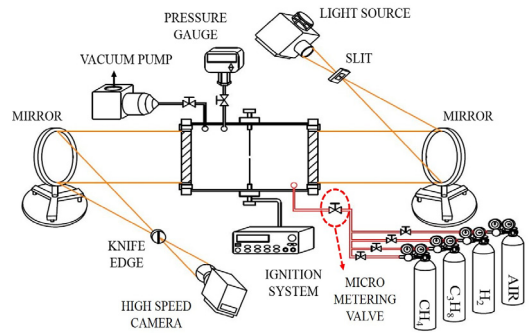


Fig. 2 Schematic diagram of cylindrical constant combustor with schlieren systems

게 섞이게 한 후 버너로 공급하였다. 솔리렌 장치는 100 W 할로겐 광원(light source) 램프와 2개의 광학(optical)거울 그리고 슬릿 slit과 나이프에지(knife edge)로 구성되어 있다. 솔리렌 장치는 측정영역의 밀도구배에 따른 굴절률의 변화를 이용하여 솔리렌 상을 나타내는 원리이다. 이러한 솔리렌 상은 DSLR 카메라(nikon D70s)를 이용하여 촬영하였다.

본 연구에서 사용된 SNG 연료는 고순도의 메탄과 수소, 프로판을 사용하여 실험실 차원으로 제조한 모사 SNG 연료이며 산화제도 고순도의 압축 공기를 사용하였다.

2.1.2 원통형 정적연소기

Fig. 2은 본 연구에 사용된 정적연소기와 솔리렌 장치를 나타낸 개략도이다. 연소기는 내부 직경 200 mm에 길이 220 mm의 원통형으로, 광학적인 접근을 위해 양쪽에 직경 150 mm, 두께 45 mm의 퀴츠(quartz)창을 설치하였다. 솔리렌 장치는 앞서 분젠버너에서의 설명과 동일하며, 화염의 점화를 위한 점화장치와 연소기 내부압력측정을 위한 전자압력계(digital pressure gauge, Bit02B), 연료를 유입하기 전에 연소기 내부를 진공상태로 만들기 위한 진공펌프(vacuum pump)로 구성되어 있다. 마지막으로 연료 유입의 정밀성을 높이기 위해 미세조절밸브(micro metering valve)를 연결하여 조절하였다. 화염의 솔리렌 이미지는 고속카

Table 1 Composition ratio of SNG fuel

Case	Composition ratio (%)		
	CH ₄	C ₃ H ₈	H ₂
C0	95	5	0
C3	91	6	3
C7	85	8	7
C11	80	9	11

메라(Photron Inc., fastcam 1024pci)를 이용하여 초당 6,000장의 이미지를 취득하여 분석하였다.

구형화염으로 층류 연소속도를 측정하는데 사용된 가스는 분젠화염에서와 동일한 순도의 연료와 산화제를 사용하였으며 구형화염의 실험장치인 정적연소기의 특징 중 하나는 다양한 압력에서 측정이 가능한 장점이 있지만 본 연구에서는 분젠화염과의 비교를 위해 1기압으로 고정된 상태로 연구를 진행하였다.

2.2 측정방법

2.2.1 각도법

분젠화염을 이용한 측정방법에서 연료의 조성비와 당량비(equivalence ratio, ϕ)를 주요 실험변수로 하였으며, 연료의 조성비 변화는 발열량을 동일하게 하여 Table 1에 나타난 것과 같이 설정하였고 당량비는 0.8에서 1.6까지 0.1씩 증가시키며 실험을 수행하였다.

이 경우 당량비와 조성비별로 연소속도가 달라져 화염의 날림이나 역화가 발생하게 되기 때문에 노즐에서 안정되게 부착되어 원뿔형 화염이 유지되는 유동조건으로 유량을 엄밀하게 조절하여 축소형 버너 노즐 출구에서 안정되게 부착된 화염을 DSLR 카메라로 촬영하여 Image-J software를 이용하여 화염의 각도를 측정하였다.

분젠 화염에서 화염이 정지 상태로 존재하기 위해서는 각 지점에서의 화염속도와 미연 혼합기의 수직 속도 성분이 같아야 한다. 따라서 층류 연소속도(S_u)

는 식 (1)을 통해 구할 수가 있다.

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

여기서, U_0 는 미연소 혼합기의 속도를 나타내며, θ 는 슐리렌 이미지로 측정된 화염 각도를 나타낸다.

2.2.2 화염전파법

구형화염을 이용한 측정방법에서 연료 조성비 또한 Table 1과 같이 하였으며, 당량비는 0.1씩 증가시키며 분젠화염과는 다르게 0.6부터 1.4까지 실험을 수행하였다.

일반적으로 메탄의 가연한계는 0.46에서 1.64로 알려져 있으나 가연한계는 혼합물의 순수 물리적 특성으로만 정의되고 있는 이론적인 범위이다. 따라서 실제 실험적으로는 혼합물의 특성과 시스템에서의 열 손실 사이의 관계에 의해 결정되기 때문에 일반적으로 가연한계는 실험장치에 의해 변경된다고 알려져 있다¹⁹⁾. 이러한 이유로 두 실험장치에서 구현된 희박과 과농 양측에서의 당량비 값이 약간 차이가 있으나 연소특성을 파악하는 대부분의 당량비 구간은 동일하였다.

측정방법은 먼저 연소기 내부를 진공펌프를 이용하여 진공상태로 만든 후, 연료와 산화제를 실험조건에 따른 부분압력 값에 맞춰 공급한다. 그 후 연소기 내부에 있는 전극봉에 의해 점화되어 구형모양으로 퍼져나가는 화염의 이미지를 고속카메라를 이용하여 촬영하고 매프랩 코드를 이용하여 시간당 화염 반경의 연소속도를 구하게 된다.

이 경우 기연가스의 스트레치를 받는 연소속도(S_b)는 dR_f/dt 로 나타낼 수 있으며, 구형화염은 전파될수록 스트레치의 영향을 받게 되며 이러한 스트레치율(Stretch rate, K)은 $K=(2/R_f)S_b$ 로 나타낼 수 있다.

기연가스의 스트레치를 받지 않는 연소속도(un-

stretched burning velocity, 이하 S_b^0)와 Markstein length (L_b)를 구하기 위해 S_b 와 K 를 외삽 (extrapolation)을 통해 $K=0$ 인 지점을 구할 수 있으며 이 지점을 S_b^0 라고 하며, 이는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$LM : S_b = S_b^0 - L_b K \quad (2)$$

식 (2)는 선형모델 (Linear Model, 이하 LM)이라 하며 이 모델 외에 비선형모델을 이용하여 층류 연소속도를 구할 수 있으며 이를 식 (3), (4)에 나타내었다.

$$NM I : S_b = S_b^0 - S_b^0 L_b \frac{2}{R_f} \quad (3)$$

$$NM II : \ln(S_b) = \ln(S_b^0) - S_b^0 L_b \frac{2}{S_b R_f} \quad (4)$$

식 (3)은 비선형모델 I (Nonlinear Model I, 이하 NM I)^{20,21)}이라고 하며 S_b 와 $2/R_f$ 를 외삽하여 S_b^0 와 L_b 를 구할 수 있고, 식 (4)는 비선형모델 II(Nonlinear Model II, 이하 NM II)²²⁾이라 하고, $\ln(S_b)$ 와 $2/S_b R_f$ 를 외삽하여 $\ln(S_b^0)$ 와 L_b 를 구할 수가 있다.

3가지 이론모델에서 공통적으로 S_b^0 를 구할 수 있으며 본 연구에서 이용한 구형화염의 층류 연소속도는 미연가스의 스트레치를 받지 않는 연소속도(S_u^0)로 질량보존관계식 $S_u^0 = (\rho_b/\rho_u)S_b^0$ 으로 구할 수 있다. 여기서 ρ 는 밀도를 의미하며, 아래첨자 b 와 u 는 각각 기연가스와 미연가스를 의미한다.

또한 위의 식 (2),(3),(4)에 적용되는 화염반경(R_f)는 최소 화염 반경(R_{fL})과 최대 화염 반경(R_{fU})사이의 거리로 나타내어야 하며 각각 점화의 영향과 내부 벽의 영향을 받게 된다.

Bradley et al.는 점화에너지의 변화가 화염 연소속

Table 2 Flame radius range (unit : mm)

case1	case2	case3	case4	case5
6 - 29	6.5 - 19	6 - 25	10 - 25	6.6 - 26.6

도에 미치는 영향을 조사하였는데 R_{fL} 이 6 mm 이상이 되면 점화에너지의 영향이 제거되기에 적절하다고 보고 있다²³⁾. 정적연소기 내부 벽의 영향에 관한 Zheng Chen의 보고에 의하면 $R_{fU}/R_W < 25\%$ 이상이 되면 내부 벽의 영향을 제거할 수 있다고 하였다²⁴⁾. 여기서 R_W 는 내부 반경을 의미하며, 비 원형 연소기에서 $R_W = (3V/4\pi)^{1/3}$ 이므로 실험 시 구하게 되는 최대 화염 반경인 R_{fU} 의 값을 구할 수 있게 된다. 이를 이용하여 화염반경 범위를 본 연구에 사용된 연소기에 적용한다면 최대화염반경 범위는 $6 < R_f < 29.54(mm)$ 이다. 이 범위 중 사용된 연소기에 적용하기에 알맞은 화염반경 범위를 알아보기 위해 이전 연구자들의 반경 범위와 유사한 범위로 설정하여 Table 2에 5가지 경우(case)로 나누어 나타내었고, 이 5가지 경우를 각 이론모델에 적용시켜 연소속도를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연소기 검증을 위한 메탄/공기의 연소속도

SNG의 층류 연소속도를 측정하기에 앞서 본 연구에서 사용된 관계식과 결과가 일관되게 도출되고 있는지를 확인하기 위해 메탄/공기 화염의 층류 연소속도를 측정하여 이전 연구자들의 실험값과 비교를 통해 검증하였다.

먼저 구형화염에 대해 화염반경 범위와 이론모델로 측정된 실험값을 Fig. 3에 이전연구자들의 연구결과와 같이 비교하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 본 연구에서 측정된 연소속도 값이 이전 연구자들의 실험값과 유사한 것을 확인할 수 있었다.

본 연소기와 알맞은 화염반경 범위와 이론모델을

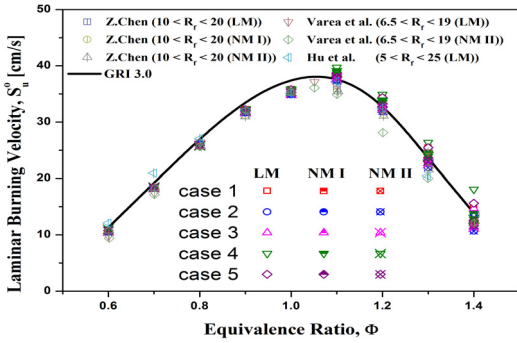


Fig. 3 Comparison on S_u^0 of spherical flames of CH₄/air flames with previous different groups

선정하는데 더 정밀하게 확인하기 위해 구형화염에서 측정된 연소속도 값과 GRI 3.0로 계산된 값의 오차를 Fig. 4에 나타내었다. 당량비 0.6부터 1.3까지 모든 데이터의 오차가 10 % 이내인 것에 반해 당량비 1.4에서는 반경범위와 모델에 따라 오차가 급격하게 증가하는 것을 확인 할 수 있었는데 이는 구형화염의 특성상 연소속도 측정의 불확실성에 영향을 주는 복사나 연료조성의 정밀성과 같은 복합적인 요인 때문인 것으로 판단되며 보고된 연구들에서도 과농한 당량비에서는 이러한 현상들에 대해 비슷한 결과를 나타내고 있다.

각 반경범위와 이론모델별 평균오차를 Table 3에 나타내었고, 반경범위 $10 < R_f < 25$ 인 case4의 NM II에서 평균오차가 3.78 %로 가장 작게 나타났으며,

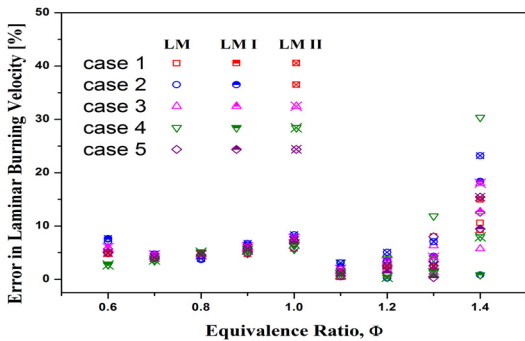


Fig. 4 Error of S_u^0 from different radius range and theoretical models at CH₄/air flames

Table 3 Error rate of S_u^0 measured by spherical CH₄/air flames

Error (%)	case1	case2	case3	case4	case5
LM	5.08	4.7	4.43	7.91	5.30
NM I	4.11	6.57	5.01	4.38	4.19
NM II	5.27	7.76	6.26	3.78	5.42

이에 오차가 가장 적은 case 4의 반경 범위와 NM II인 식 (4)를 사용한 구형화염의 층류 연소속도를 분젠화염법으로 측정된 값과 비교하는데 사용하였다.

Fig. 5는 본 연구에서 이용한 분젠버너와 원통형 연소기를 통해 구한 메탄/공기의 층류 연소속도를 다른 연구자들의 실험값과 비교한 그래프이다. 비교 결과 두 화염 모두 이전 연구자들의 데이터와 유사하였으며, 또한 GRI 3.0로 계산된 계산 값과도 유사하게 측정되었다. 따라서 이와 같은 메탄/공기의 층류 연소속도 측정을 통해 본 연구에서 사용된 분젠버너와 원통형 연소기의 측정에 대한 타당성을 검증할 수 있었다.

3.2 조성비별 SNG의 층류 연소속도

Fig. 6은 Table 1에서 표시한 SNG의 C0 조성조건에서 분젠화염과 구형화염의 층류연소속도를 측정하여 3가지 반응 기구의 계산결과와 비교하여 나타낸 그래프이다. 분젠화염인 경우는 전체적으로 잘 일치

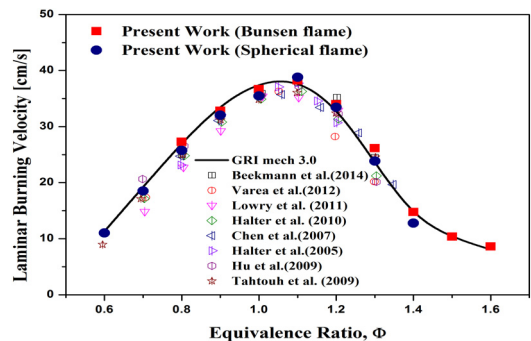


Fig. 5 Comparison on laminar burning velocity from Bunsen and spherical flames of CH₄/air with different group

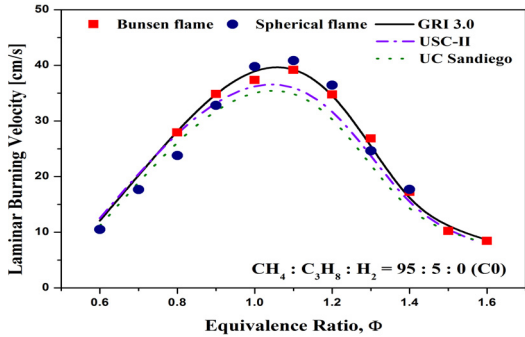


Fig. 6 Comparison on laminar burning velocity from Bunsen and spherical flames of SNG (C0) with different numerical results

하였지만 분젠화염에 비해 구형화염으로 측정된 값은 희박영역에서 UC Sandiego 메커니즘과의 오차가 적게 나타났지만 전체적인 결과는 GRI 3.0으로 계산된 값과 유사하였으며 이는 C0의 조성조건에서 메탄이 다량 함유되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7은 SNG의 C3 조성조건에서 분젠화염과 구형화염, 그리고 3가지 반응 기구로 계산된 층류 연소속도를 비교하여 나타낸 그래프이다. 희박한 영역에서 구형화염의 층류 연소속도는 C0와 유사한 경향을 보였으며 전체적으로는 GRI 3.0과 유사하게 나타났다.

Fig. 8과 9는 앞서 설명한 C0와 C3의 조성에서와 동일하게 각각 Table 1의 SNG C7와 C11 조성에서 분젠화염과 구형화염의 층류 연소속도를 역시 3가지 반응 기구와 같이 비교하여 나타낸 그래프이다. C0

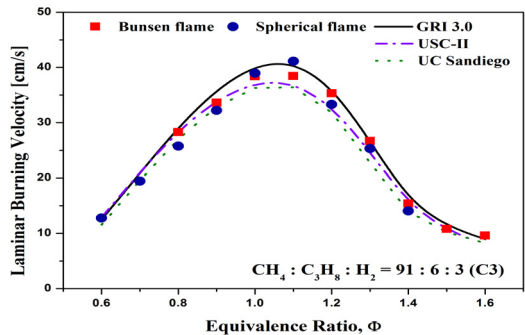


Fig. 7 Comparison on laminar burning velocity from Bunsen and spherical flames of SNG (C3) with different numerical results

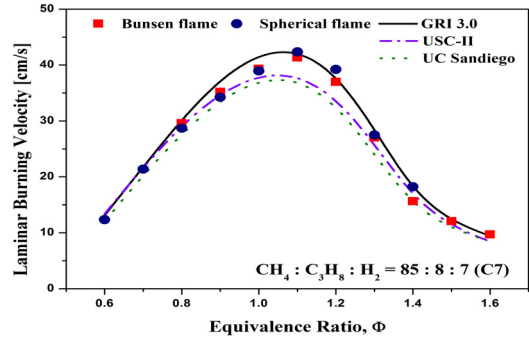


Fig. 8 Comparison on laminar burning velocity from Bunsen and spherical flames of SNG (C7) with different numerical results

와 C3에 비해 수소함량이 증가한 C7과 C11의 경우 전체적으로 연소속도가 증가한 것을 볼 수 있으며 조성비의 변화와 상관없이 실험적으로 측정된 값들이 전체적으로 GRI 3.0로 계산된 값과 가장 잘 일치하는 것을 보여주고 있다. 이는 조성비 변화에 상관없이 80~90 % 이상의 메탄이 주성분인 SNG의 연소 특성으로 인해 메탄에 최적화되어 있는 GRI 3.0의 반응 기구와 가장 잘 일치하는 것으로 판단된다.

3.3 측정법에 따른 오차의 발생 요인

분젠화염을 이용한 층류 연소속도를 측정하는 실험은 손쉽게 화염을 형상화 할 수 있었으며 당량비에 따라 엄밀하게 유량제어를 할 수 있으면 이론적

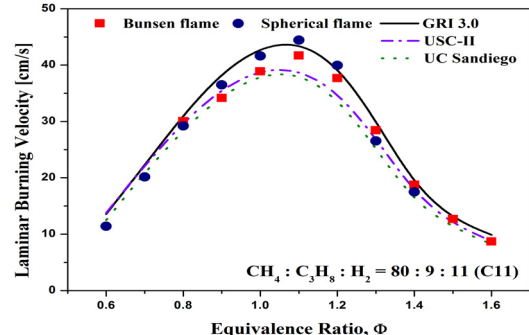


Fig. 9 Comparison on laminar burning velocity from Bunsen and spherical flames of SNG (C11) with different numerical results

으로 간단한 각도법을 적용하여 비교적 쉽게 층류 연소속도를 측정할 수 있다. 그런데 이 경우 발생하는 실험적 오차에 대해서는 주변의 유동에 의한 교란과 스트레치의 영향이 대부분이므로 이에 대한 주의가 필요하며 촬영된 이미지에서 화염의 초점이 잘 맞게 되면 각도를 측정하는데 오차는 발생하지 않게 된다.

구형화염인 경우 실험은 실험 장치를 설치하는데 난이도가 있었으며, 진공상태로 만들기 위한 노력이 필요하였다. 그리고 화염이 점화 시 구형이 아닌 찌그러진 형태의 화염으로 퍼져나가는 경우도 발생하였다. 하지만 여러 연구자들에 의해 제안된 측정법을 이용하여 여러 가지 방법들로 연소속도를 구하여 더 정확한 측정값을 구할 수 있었다. 실험적 오차는 측정하는 압력계의 정확도와 구형화염에 대한 부력과 복사와 같은 영향 때문에 발생하는 것이며 이미지 처리는 매틀랩 코드를 이용하여 정확하게 측정하였기 때문에 이미지 처리에서 발생할 수 있는 오차는 없을 것으로 판단된다.

SNG의 조성비의 변화가 미세할 뿐만 아니라 실험적으로 층류 연소속도를 측정할 때의 다른 요인으로 인한 오차가 발생할 경우 단지 수소함량에 따른 연소속도의 증가를 확인하는데 어려움이 발생한 것으로 판단된다.

4. 결 론

분젠화염과 구형화염을 이용하여 SNG의 수소함량에 따른 층류 연소속도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분젠화염과 구형화염을 형성하는 두 연소기의 타당성을 위해 메탄/공기 층류 연소속도의 측정을 통하여 실험값과 메탄 반응 묘사에 최적화된 계산결과와 함께 검증을 실시하였다.
- 2) SNG를 분젠화염과 구형화염을 이용하여 층류 연

소속도의 측정을 하였으며, 수소함량이 증가할수록 미세하게 연소속도가 증가하는 것을 확인하였다.

- 3) 분젠화염으로 측정된 연소속도에 대한 실험적 오차는 외부 유동과 스트레치의 영향으로 발생하는 것으로 판단하였다.
- 4) 구형화염으로 측정된 연소속도에 대한 실험적 오차는 압력계의 정확도와 구형화염에 대한 부력과 복사와 같은 영향으로 발생하는 것으로 분석하였다.
- 5) SNG의 조성비 변화에 상관없이 분젠화염과 구형화염의 실험값은 GRI 3.0의 계산값과 오차가 가장 적게 나타났다. 이는 SNG의 주요 성분이 메탄이기 때문에 그로 인해 메탄반응에 최적화 되어 있는 GRI 3.0과 잘 일치하는 것으로 판단하였다.
- 6) SNG의 조성비에서 수소함량의 차이가 미세하여 실험값에서의 차이가 미미하였으며, 이는 실험적 오차와의 관계로 인한 것으로 판단하였다.

후 기

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

References

1. M. Chandel and E. Williams, "Synthetic Natural Gas (SNG): Technology, Environmental Implications, and Economics", Climate Change Policy Partnership, 2009.
2. S.H. Kang, J.H. Ryu, S.H. Kim, J.H. Kim, H.S. Kim, K.J. Jeong, J.E. Lee, Y.D. Yoo, and D.J. Koh, "Recent Trends in Production Technology for Synthetic Natural Gas (SNG) from Coal", Journal of Energy & Climate Change, Vol. 9, No. 1, 2014, p. 3-18.
3. S.I. Park, U.S. Kim, J.H. Chung, J.P. Hong, S.C. Kim and D.J. Cha, "Effect of Hydrogen in SNG on

- Gas Turbine Combustion Characteristics”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 23, No. 4, 2012, p. 412-419.
4. S.I. Park, U.S. Kim, M.C. Lee, S.C. Kim and D.G. Cha, “The effects and Characteristics of Hydrogen in SNG on Gas Turbine Combustion using a Diffusion Type Combustor”, International Journal of Hydrogen Energy, 38, 2013, p. 12847-12855.
 5. M.C. Lee, S.I. Park, S.C. Kim, J.S. Yoon, S.P. Joo and Y.B. Yoon “Effect of Low H₂ Content in Natural Gas on the Combustion Characteristics of Gas Turbine”, The Korean Society of Combustion, No. 46, 2013, p. 109-110.
 6. I.C. Choi and K.M. Lee, “An Experimental Study on Combustion Instability in Model Gas Turbine Combustor using Simulated SNG Fuel”, J. Korean Soc. Combust. 20(1), 2015, p. 32-42.
 7. J.S. Oh, S.G. Dong, J.B. Yang, “Characteristics of Non-premixed Synthetic Natural Gas-Air Flame with Variation in Fuel Compositions”, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, No. 9, Vol. 37, 2013, p. 829-836.
 8. D.A. Senior, “Burning Velocities of Hydrogen-Air and Hydrogen-Oxygen mixtures : Determination by Burner Method with Schlieren Photography”, Combust. Flame, Vol. 5, 1961, p. 7-10.
 9. N. Bouvet, C. Chauveau, I. Gokalp, S.Y. Lee and R.J. Santoro, “Characterization of Syngas Laminar Flames using the Bunsen Burner Configuration”, International Journal of Hydrogen Energy, 36, 2011, p. 992-1005.
 10. A. Van Maaren, D.S. Thung and L.R.H. DeGoey, “Measurement of Flame Temperature and Adiabatic Burning Velocity of Methane/Air Mixtures”, Combust. Sci. and Tech, Vol. 96, 1994, p. 327-344.
 11. A.J. Smallbone, W. Liu, C.K. Law, X.Q. You and H. Wang, “Experimental and Modeling Study of Laminar Flame Speed and Non-premixed Counterflow Ignition of n-heptane”, Proc. Combust. Inst. 32, 2009, p. 1245-1252.
 12. E. Varea, V. Modica, A. Vandiel and B. Renou, “Measurement of Laminar Burning Velocity and Markstein Length Relative to Fresh Gases using a New Postprocessing Procedure : Application to Laminar Spherical Flames for Methane, Ethanol and Isooctane/Air Mixtures”, Combust. Flame, 159, 2012, p. 577-590.
 13. J. Jayachandran, R. Zhao and F.N. Egolfopoulos, “Determination of Laminar Flame Speeds using Stagnation and Spherically Expanding Flames: Molecular Transport and Radiation Effects”, Combust. Flame, 161, 2014, p. 2305-2316.
 14. F. Wu, W. Liang, Z. Chen, Y. Ju and C.K. Law, “Uncertainty in Stretch Extrapolation of Laminar Flame Speed from Expanding Spherical Flames”, Proc. Combust. Inst. 35, 2015, p. 663-670.
 15. R.J. Kee, J.F. Grcar, M.D. Smooke, J.A. Miller and E.Meeks, “Premix : A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flames”, Sandia National Laboratories Report, 1985, SAND 85-8240.
 16. G. Smith, T.Bowman and M. Frenklach, http://me.Berkeley.edu/gri_mech/
 17. H. Wang, X. You, Ameya V. Josh, S.G. Davis, A. Laskin, F.N. Egolfopoulos and C.K. Law, USC Mech Version II, High-Temperature Combustion Reaction Model of H₂/CO/C₁-C₄ Compounds, http://ignis.usc.edu/USC_Mech_II.htm
 18. “Chemical-Kinetic Mechanisms for Combustion Applications”, San Diego Mechanism web page, Mechanical and Aerospace Engineering (Combustion Research), University of California at San Diego (<http://combustion.ucsd.edu>).
 19. C.K. Law and F.N. Egolfopoulos, “A Unified Chain-Thermal Theory of Fundamental Flammability Limits”, Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, 1992, p. 137-144.
 20. T.Tahtouh, F. Halter and C. Mounaim-Rousselle, “Measurement of Laminar Burning Speeds and Markstein Lengths using a Novel Methodology”, Combust. Flame, 156, 2009, p. 1735-1743.
 21. F. Halter, T.Tahtouh and C. Mounaim-Rousselle,

- “Nonlinear Effects of Stretch on the Flame front Propagation”, *Combust. Flame*, 157, 2010, p. 1825-1832.
22. A.P. Kelley and C.K. Law, “Nonlinear Effects in the Extraction of Laminar Flame Speeds from Expanding Spherical Flames”, *Combust. Flame*, 156, 2009, p. 1844-1851.
23. D. Bradley, P.H. Gaskell and X.J. Gu, “Burning Velocities, Markstein Lengths, and Flame Quenching for Spherical Methane-Air Flames: A Computational Study”, *Combust. Flame*, 104, 1996, p. 176-198.
24. Z. Chen, “On the Accuracy of Laminar Flame Speeds Measured from Outwardly Propagating Spherical Flames: Methane/Air at Normal Temperature and Pressure”, *Combust. Flame*, 162, 2015, p. 2442-2453.