

## 구형 전파화염에서 SNG 연료의 층류연소속도와 마크스타인 길이 측정에 관한 연구

송준호<sup>1</sup> · 이기만<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>순천대학교 우주항공공학과, <sup>2</sup>순천대학교 기계·우주공학부

### A Study on Measurement of Laminar Burning Velocity and Markstein Length of SNG Fuel in Spherical Propagation Flame

JUNHO SONG<sup>1</sup>, KEEMAN LEE<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Aerospace Engineering, Suncheon National University, 255 Jungang-ro, Suncheon 57922, Korea

<sup>2</sup>School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon National University, 255 Jungang-ro, Suncheon 57922, Korea

†Corresponding author :  
kmlee@scnu.ac.kr

Received 27 December, 2018

Revised 30 January, 2019

Accepted 28 February, 2019

**Abstract** >> An experimental study was conducted to measure laminar burning velocity and Markstein length of SNG fuel with 3% of hydrogen contents from spherical propagating flames at normal and elevated initial pressure. These results were compared with numerical calculations by Premix code with GRI-mech 3.0, USC II and UC San Diego to provide suitable mechanism for SNG fuel. As a result of this work, it was found that the burning velocities and Markstein lengths of SNG fuel decrease with increase of initial pressure regardless of equivalence ratio. In addition, numerical calculations with GRI-mech 3.0 were coincided with experimental results.

**Key words** : Synthetic natural gas(합성천연가스), Laminar burning velocity(층류연소속도), Markstein length(마크스타인 길이), Spherical propagating flame(구형 전파화염), Elevated initial pressure condition (높은 초기압력 조건)

## 1. 서론

최근 환경오염으로 인한 기후변화 문제와 에너지 소비증가로 인한 에너지 부족 현상이 심각해지고 있는 가운데 비교적 가격 상승 정도가 크지 않고 전 세계적으로 매장량이 풍부한 석탄을 이용하여 생산되는 합성천연가스(synthetic natural gas, SNG)가 액화

천연가스(liquefied natural gas, LNG)를 대체할 수 있을 것으로 기대되고 있으며, 제조 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>1)</sup>. SNG 연료는 석탄의 가스화 공정(gasification)과 탈황과정(desulfurization)을 통하여 생성된 합성가스(syngas)에 메탄화 공정(methanation process) 후 생성된 메탄(CH<sub>4</sub>)과 발열량을 높이기 위한 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)을 첨가하여 생성된다<sup>2)</sup>.

이러한 과정으로 생성된 SNG 연료는 LNG와 동일한 발열량을 가지지만, 제조 공정상 메탄과 서로 다른 연소 특성을 가진 프로판과 수소가 포함되어 있어 LNG와는 다른 연소 특성을 나타낼 것으로 예상된다. 따라서 SNG 연료를 LNG의 열량 기준에 맞추어진 기존 연소기에 사용하기 위하여 연료의 연소 특성을 파악하는 과정이 선행되어야 한다.

기초적인 연소 특성 중 하나인 층류연소속도(laminar burning velocity)는 가연 혼합물의 당량비와 연료조성에 관련된 물성치로 1차원 예혼합 화염에서 화염면에 수직한 방향으로 미연혼합기(unburned mixture)가 전파하는 속도로 정의되며, 실제 연소현상을 이해하고 제어하는데 중요한 인자임과 동시에 화학 반응 메커니즘의 정확도를 높이는 데 중요한 역할을 한다<sup>3,4)</sup>. 또 다른 가연성 혼합물의 연소 특성인 마크스타인 길이(Markstein length)는 스트레치(stretch)에 대한 연소속도의 변화를 특성화하고 선호확산(preferential diffusion)과 관련된 화염 불안정성(flame instability)을 정의하는 중요한 인자이다<sup>5)</sup>.

이러한 층류연소속도와 마크스타인 길이를 실험적으로 측정하기 위한 다양한 방법들이 개발 및 발전되어 왔으며 층류연소속도를 측정하는 대표적인 방법에는 분제 버너를 사용한 각도 측정 방법, 층돌 유동을 이용한 방법, 평면화염을 이용한 방법, 대항류 연소기를 이용한 방법과 구형으로 전파하는 화염을 이용하는 방법 등이 있으며, 특히 구형으로 전파하는 화염의 경우 쉽게 초기압력 조건을 높일 수 있는 장점이 있어 널리 사용되고 있다<sup>6)</sup>.

SNG 연료의 층류연소속도에 관한 이전 연구들을 보면 Kim과 Lee<sup>2)</sup>는 1기압 조건에서 수소함량에 따라 구형 전파화염 방법으로 SNG 연료의 층류연소속도를 측정하여 분제 버너 방법으로 측정된 층류연소속도와 비교 연구를 진행하였다. 하지만 고정된 화염의 반경을 이용하여 구형 전파화염의 층류연소속도를 측정하였으며, 이는 큰 불확실성을 발생시킬 수 있어<sup>7)</sup> 층류연소속도 측정에 사용될 화염의 반경을 정밀하게 검증하는 단계가 필요하다. 또한 일반적인 내연기관의 연소가 고압 조건에서 이루어지는 것을

고려하였을 때, 높은 압력 조건에서 화학반응 메커니즘의 정확도를 높이기 위하여 고압 조건에서 층류연소속도를 측정하는 것이 반드시 필요하다<sup>8)</sup>.

이에 본 연구는 최적화된 반응 메커니즘이 알려져 있지 않은 SNG 연료의 층류연소속도를 상온, 상압 그리고 고압 조건에서 측정하기 위하여 정적 연소기 내부의 구형으로 전파하는 화염을 이용하였다. 층류연소속도 측정을 위하여 사용된 화염의 반경 범위(flame radius range)와 이론 모델(theoretical model)은 이전 보고에서 메탄/공기 혼합기를 이용한 연소기 검증을 통하여 가장 낮은 오차율을 가지는 이론모델과 화염의 반경(flame radius,  $R_f$ ) 범위를 이용하였으며, SNG 연료에 알맞은 메커니즘을 선정하고자 ANSIS CHEMKIN PRO의 Premix code<sup>9)</sup>를 이용하여 계산된 연소속도값을 실험값과 비교하였다.

## 2. 실험장치 및 측정 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 정적연소기와 솔리렌 장치를 나타낸 개략도이다. 연소기는 내부 직경 200 mm, 길이 220 mm로 화염의 가시화를 위한 직경 150 mm, 두께 40 mm의 석영창(quartz windows), 연소기 중앙에는 혼합기의 점화를 위한 텅스텐 전극봉과 연소기 내부의 압력을 측정하기 위하여 전자압력계가 설치되어 있다. 또한 연료 유입 전 연소기 내부를 진

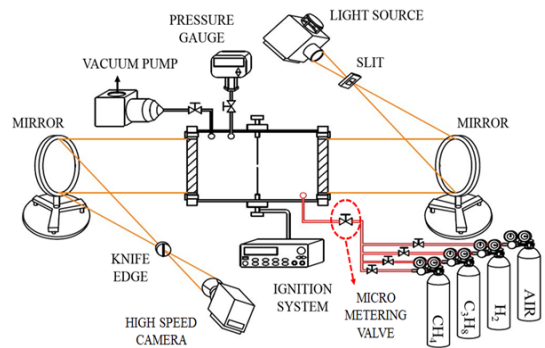


Fig. 1. Schematic diagram of experimental system

**Table 1.** Experimental conditions

Description	Specification
Fuel	CH <sub>4</sub> (99.999%), C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (99.5%), H <sub>2</sub> (99.999%)
Composition of SNG (%)	CH <sub>4</sub> :C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> :H <sub>2</sub> =91:6:3
Oxidizer	Air (99.999%)
Equivalence ratio (Φ)	0.7-1.3
Initial Pressure (MPa)	0.1, 0.3, and 0.5

공상태로 만들기 위한 진공펌프(vacuum pump)와 연료 유입의 정밀성을 높이기 위한 미세조절 밸브(micro metering valve)가 사용되었다.

솔리렌 장치는 100 W 할로겐 광원(light source) 램프와 2개의 광학(optical)거울 그리고 슬릿 slit)과 나이프에지(knife edge)로 구성되어 있어 측정 영역에서의 화염의 밀도구배에 따른 굴절률을 나타내며, 솔리렌 이미지는 고속카메라(Photron Inc., fastcam 1,024 pci, 6,000 fps, 384×368 pixel)를 이용하여 이미지를 취득하였다.

본 연구에 사용된 연료는 화염의 특성을 엄밀하게 관찰하기 위하여 고순도의 메탄(99.999%), 프로판(99.5%) 그리고 프로판(99.999%)을 사용하여 실험실 차원으로 제조된 모사 SNG로 그 비율은 91:6:3으로 Table 1에 표기하였다. 또한 순도 99.999%의 압축공기를 산화제로 사용하였다.

## 2.2 실험 및 측정 방법

정적연소기를 사용한 실험 방법은 먼저 연소기 내부를 진공펌프를 사용하여 진공상태로 만든 후 Dalton의 분압법을 이용하여 연료와 공기를 실험 조건에 따라 각각의 몰분율(mole fraction)에 상응하는 부분압(partial pressure)을 조절하여 낮은 몰분율을 가지는 연료부터 차례대로 공급한다. 연소기 내부로 공급된 혼합기의 안정화를 위하여 10분의 대기시간 후 점화장치(ignition system)로 전류를 유입시켜 두 전극봉 사이에서 발생한 스파크(spark)에 의하여 점화가 시작된다. 이때 생성된 화염의 핵(flame kernel)

은 연소기 중앙에서 미연가스 방향으로 구형으로 전파하다 연소기의 벽에 의하여 켄칭(quenching)되어 소화된다. 연소 후 배기가스와 응축된 수증기는 압축공기를 사용하여 실험실 외부로 배출하였다.

화염의 전파속도를 측정하기 위하여 솔리렌 장치와 고속카메라를 이용하여 구형으로 전파하는 화염의 이미지를 취득하였으며, 매트랩 코드를 이용하여 이미지를 분석함으로써 단위 시간당  $R_f$ 의 변화량을 얻을 수 있다.

기연가스의 스트레치를 받는 연소속도(stretched burning velocity,  $S_b$ )는  $dR_f/dt$ 로 정의될 수 있으며, 스트레치율(stretch rate,  $K$ )은  $K=(2/R_f)S_b$ 으로 나타낼 수 있다. 이미지 분석과 위의 계산식을 통하여  $S_b$ 와  $K$ 를 계산할 수 있는데,  $S_b$ 와  $K$ 는 다음과 같은 선형관계를 갖는다<sup>10)</sup>.

$$LM: S_b = S_b^0 - L_b K \tag{1}$$

식 (1)은 선형모델(linear model, LM)이라 하며, 여기서  $S_b^0$ 는 기연가스의 스트레치를 받지 않은 연소속도(unstretched burning velocity at burned gas)이고  $L_b$ 는 기연가스의 마크스타인 길이(Markstein length at burned gas)이다. 식 (1)로 표현되는 LM은 일반적으로 실험 결과를 분석하는 데 사용되며, 본 연구에서는 점화에너지(ignition energy), 연소기 벽(confinement) 그리고 화염의 불안정성(flame instability)에 의한 영향을 파악하기 위하여 사용되었다.

LM 외에도 2종류의 비선형모델이 있으나 이전 보고에서 연소기 검증의 결과를 통하여 비선형모델 II (Nonlinear Model II, NMII)가 계산값과의 비교에서 가장 낮은 오차율을 가지는 것으로 확인되었으며 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$NMII: \ln(S_b) = \ln(S_b^0) - S_b^0 L_b \cdot 2/(R_f S_b) \tag{2}$$

식 (2)는 Kelly와 Law<sup>11)</sup>에 의하여 제안되었으며  $\ln(S_b)$ 와  $2/(R_f S_b)$ 의 그래프에서 외삽을 통하여  $S_b^0$ 와  $L_b$ 를 구할 수 있다.

위의 식 (2)에서  $S_b^0$ 를 이용하여 구형 전파화염의 층류연소속도, 즉 미연가스의 스트레치를 받지 않은 연소속도(unstretched laminar burning velocity at unburned gas,  $S_u^0$ )는 질량보존 관계식  $S_u^0 = (\rho_b/\rho_u)S_b^0$ 을 통하여 계산된다. 여기서  $\rho_b$ 와  $\rho_u$ 는 각각 기연가스와 미연가스의 밀도를 의미한다.

SNG 연료의  $S_u^0$ 와  $L_b$ 를 측정하는 실험은 0.1 MPa 조건에서  $S_u^0$ 의 값이 15 cm/s 이상이 되는 조건인 당량비 0.7에서 1.3까지 0.1씩 증가시키며 진행되어 부력(buoyancy)에 의한 영향을 피할 수 있었으며<sup>12)</sup>, 결과의 불확실성을 줄이고자 각 조건당 최소 3번씩 실험을 진행하였다. 또한 SNG 연료에 최적화된 메커니즘을 선정하고자 GRI-Mech 3.0<sup>13)</sup>, USC-II<sup>14)</sup>, UC San Diego (UCSD)<sup>15)</sup> 3가지의 메커니즘을 이용하여 수치해석 결과값과 실험 결과의 비교를 진행하였으며, 초기압력 조건의 영향을 살펴보기 위하여 초기압력을 0.1 MPa에서 0.5 MPa까지 0.2 MPa씩 압력을 증가시키며  $S_u^0$ 와  $L_b$ 의 변화를 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 $R_f$ 범위와 이론모델의 재검증

$R_f$ 의 범위는  $S_u^0$ 와  $L_b$  측정에 가장 중요한 변수 중 하나이다. 화염이 전파하는 과정에서 발생하는 점화에너지, 연소기 내부 벽과 화염 불안정성에 의한 영향들이 층류연소속도 측정에 불확실성을 발생시키며 이를 피하기 위한 다양한 연구들이 진행되었다. Bradley 등<sup>16)</sup>은  $R_f$ 가 6 mm 이상일 경우 점화에 의한 영향을 배제할 수 있음을 보고하였으며, Zhou 등<sup>17)</sup>은 화염 전파 초기 단계에 점화에너지가 화염 전파 속도에 미치는 영향을 실험값과 수치해석 결과를 비교하였다. Burke 등<sup>18)</sup>은 구형 연소기의 내부 반지름과 최대 화염의 반경의 비율이 25% 이하일 경우 연소기 내부 벽에 의한 영향을 무시할 수 있으며 원통형 연소기의 경우 내부 반경은  $R_W = (3V/4\pi)^{1/3}$ 으로 얻어지게 되는데, 본 연구에 사용된 연소기의 경우 29.54 mm로 계산된다. 여기서  $R_W$ 와  $V$ 는 각각

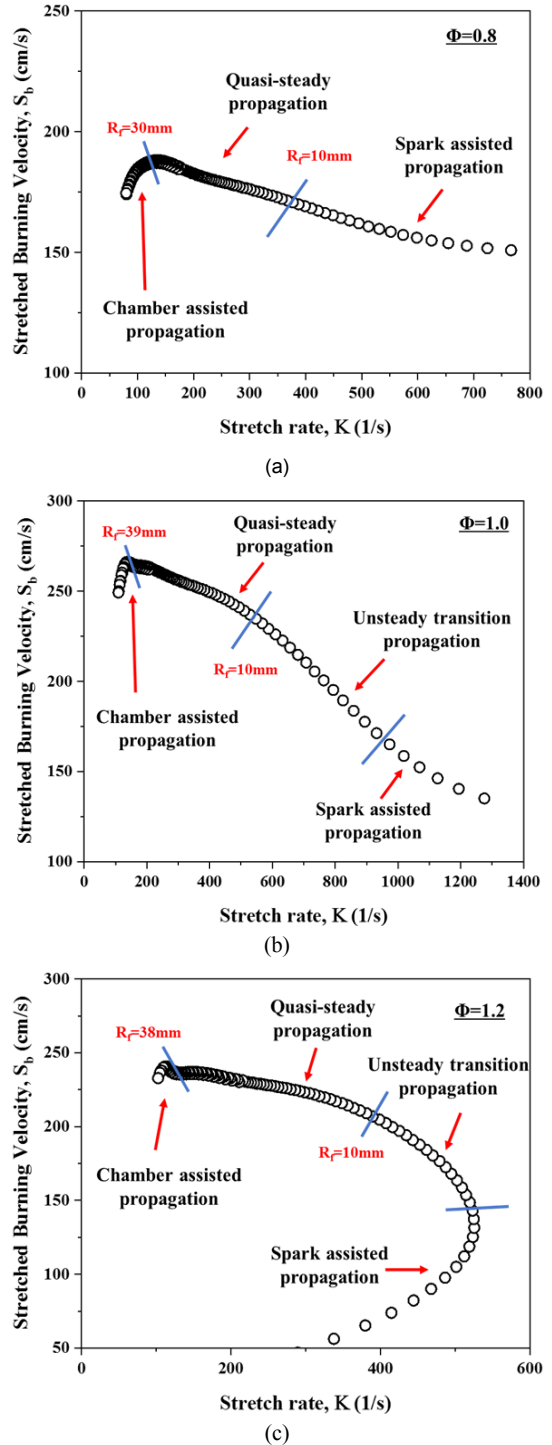


Fig. 2. Stretched burning velocities of SNG/air as function of  $K$  at 0.1 MPa condition and 298 K: (a)  $\Phi=0.8$ , (b)  $\Phi=1.0$ , and (c)  $\Phi=1.2$

연소기 내부 반경과 연소기 체적을 의미한다. 또한 Cai 등<sup>7)</sup>은 구형 전파화염에서 층류연소속도를 측정하기 위한 적절한  $R_f$  범위가 연료의 종류, 연소기, 점화에너지, Le 수 등에 의존적이라고 보고하였다.

본 연구팀의 이전 보고에서 메탄/공기 혼합기를 이용하여 점화에너지와 연소기 벽에 의한 영향을 피할 수 있는 최대  $R_f$ 의 범위를 10-29 mm, 층류연소 속도 측정에 가장 적절한  $R_f$ 의 범위를 10-20 mm로 검증하였으며 메탄이 주성분인 SNG 연료도 동일할 것으로 예상되지만, 연소 특성이 서로 다른 소량의 수소와 프로판이 포함되어 있어 재검증이 필요하며, 최대  $R_f$ 의 범위가 동일하다면 적절한  $R_f$ 의 범위도 동일할 것으로 가정하여 연구를 진행하였다. Fig. 2는 SNG/공기 혼합기를 사용하였을 때 최대  $R_f$ 의 범위가 메탄/공기 혼합기와 동일함을 확인하기 위하여 대표적으로 당량비 0.8, 1.0, 1.2 조건에서  $K$ 에 대한  $S_b$ 의 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 2 외에도 모든 당량비 조건에서  $R_f$ 가 10 mm 이하인 경우에만 화염 전파 초기 점화에너지에 의하여 영향을 받는 전파구간(spark assisted propagation)과 천이구간(unsteady transition propagation)이 관측되었으며, 29 mm 이상에서  $S_b$ 가 급격히 감소하는 연소기 벽에 의하여 영향을 받는 전파구간(chamber assisted propagation)이 확인되었다.  $S_b$ 가 선형적으로 증가하는 전파구간(quasi-steady propagation)은 10-29 mm로 메탄/공기 혼합기의 결과와 동일한 것이 검증되었기에, SNG/공기 혼합기의 층류연소속도를 측정하기 위하여 사용된  $R_f$ 의 범위를 10-20 mm로 선정하였다.

$R_f$ 의 범위와 마찬가지로 이론모델의 경우도 사용 연료가 달라짐에 따라 재검증이 필요하다. 메탄/공기 혼합기의 경우 희박 구간과 양론비 구간에서 선형과 비선형 모델 모두 수치해석 결과와의 차이가 매우 작았지만, 과농한 당량비 구간에서 비선형적인  $K$ 의 거동으로 인하여 NM II가 가장 낮은 오차율을 갖는 것으로 확인되었으며 보고된 연구들에서도 동일한 경향을 나타내고 있다.

SNG/공기 혼합기에서 각 이론모델의 영향을 확인하기 위하여 당량비 0.8, 1.0, 1.2 조건에서 LM과

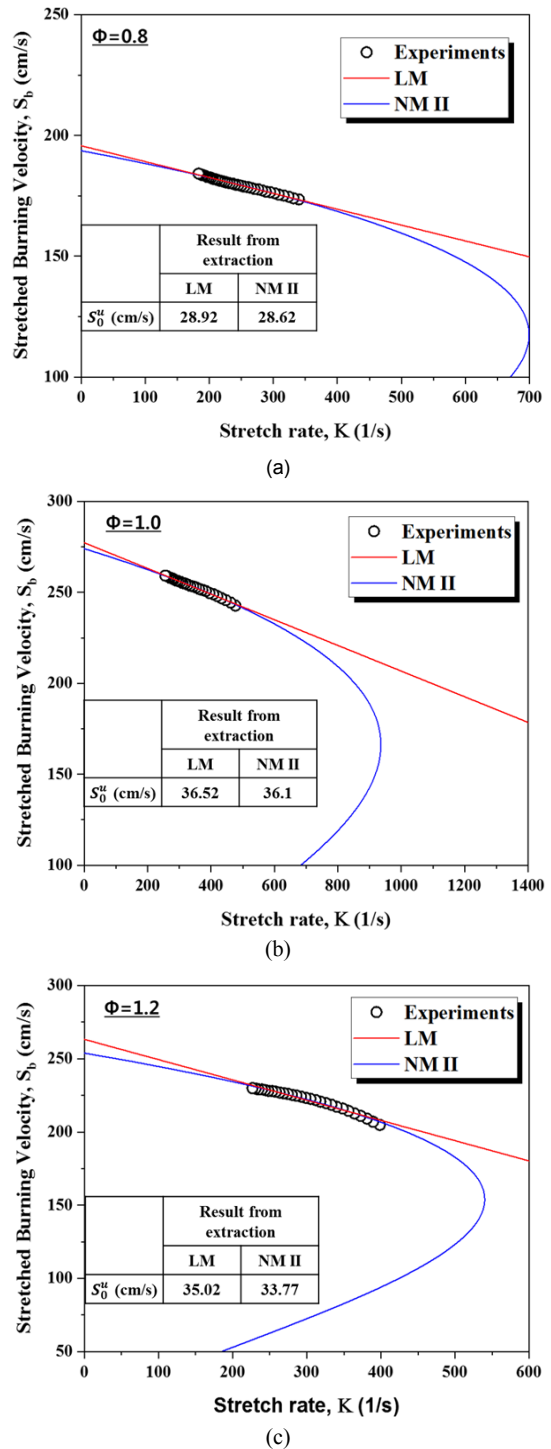


Fig. 3. Effects of different models on extracted laminar burning velocities at 0.1 MPa condition and 298 K: (a)  $\Phi=0.8$ , (b)  $\Phi=1.0$ , and (c)  $\Phi=1.2$



NMII에 따른  $S_u^0$ 를 Fig. 3에 나타내었다. SNG 연료의 경우에서도 메탄/공기 혼합기와 동일하게 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)의 경우, 즉 당량비가 0.8과 1.0일 때 모델별로 측정된  $S_u^0$ 의 차이가 약 0.3 cm/s와 0.4 cm/s로 매우 작은 것이 확인되었지만, Fig. 3(c)의 경우, 즉 당량비가 1.2인 조건에서는 1.2 cm/s 그리고 최대 3 cm/s까지 차이가 벌어지는 것을 당량비 1.3 조건에서 확인하였다. 메탄/공기 혼합기와 마찬가지로 SNG 연료에서도 과농한 당량비 구간에서  $K$ 의 비선형적 거동이 나타나 이러한 차이를 일으키는 것으로 판단되며, 이는 SNG 연료에서도 NMII를 사용하는 것이 정확한  $S_u^0$  측정에 도움이 되는 것을 의미한다.

### 3.2 SNG 연료의 메커니즘 검증

SNG 연료에 가장 적합한 화학반응 메커니즘을 선정하기 위하여 검증된  $R_f$ 의 범위(10-20 mm)와 NM II을 사용하여 실험적으로 측정된  $S_u^0$ 를 기준으로 53개의 화학종과 325개의 반응식을 포함하며 천연가스 연소해석에 적합하다고 알려진 GRI-mech 3.0, 111개의 화학종과 784개의 반응식을 포함하며 수소와 C1-C4 연료의 연소해석에 적합한 것으로 알려진 USC-II 그리고 50개의 화학종과 247개의 반응식을 포함하는 UCSD, 세 가지 모델을 이용한 수치해석 결과와 비교하였다.

Fig. 4는 초기압력에 따라 실험과 수치해석으로 계산된 SNG 연료의  $S_u^0$ 를 비교한 그래프이다. Fig. 4(a)는 0.1 MPa 조건을 나타내며, 가장 높은 연소속도는 당량비 1.0과 1.1 사이에 나타날 것으로 예측되는데, 메탄/공기 혼합기의 경향과  $S_u^0$ 의 값이 유사하게 나타나는 것으로 확인된다. 또한 모든 당량비 조건에서 계산값의 오차율이 비교적 낮은 것을 확인할 수 있으며, USC-II로 계산된 값이 실험값과의 4.23%의 가장 작은 오차율을 가지는 것으로 확인되었다. Fig. 4(b)는 0.3 MPa 조건으로, 전체적으로 연소속도가 0.1 MPa 조건에 비하여 감소한 것을 확인할 수 있으며 희박 조건과 양론비 구간에서 10% 미

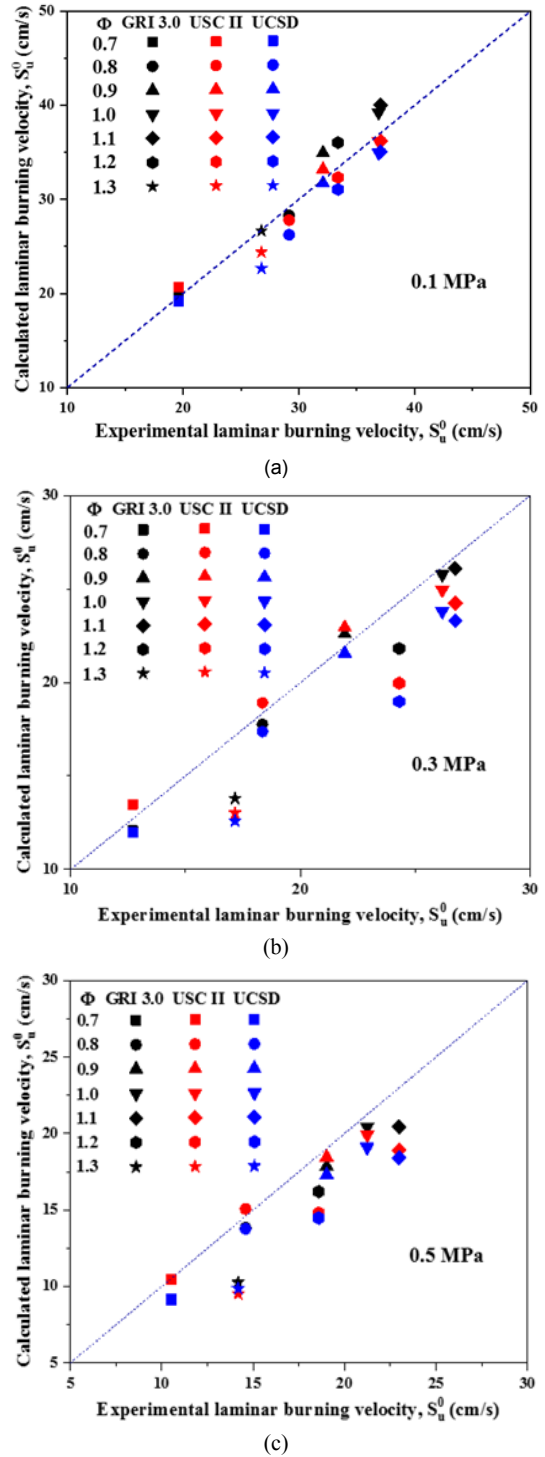


Fig. 4. Comparison of laminar burning velocities between experiments and calculations at 298 K: (a)  $P=0.1$  MPa, (b)  $P=0.3$  MPa, and (c)  $P=0.5$  MPa

**Table 2.** Average error in calculated laminar burning velocity of SNG with different mechanisms

Initial pressure (MPa)	Error rate (%)		
	GRI-mech 3.0	USC-II	UCSD
0.1	5.46	4.23	6.64
0.3	6.39	9.99	11.9
0.5	11.46	12.03	15.77
Avg. error (%)	7.77	8.75	11.44

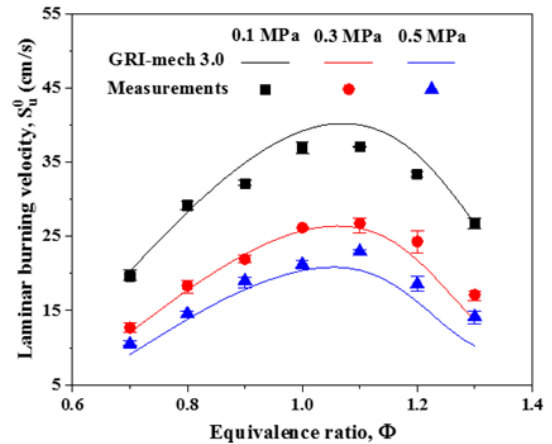
만의 비교적 낮은 오차율을 갖는데 비하여 과농 조건, 특히 당량비 1.3에서는 최대 오차율이 UCSD의 경우 26%까지 증가하는 것을 확인되었다. 해당 압력 조건에서 GRI-mech 3.0으로 계산된 값이 6.4%의 가장 낮은 평균 오차율을 가진다. 0.5 MPa 조건의 결과를 나타내는 Fig. 4(c)에서도 과농 영역의 오차율이 다른 조건에 비하여 더 큰 것을 볼 수 있으며, 최대 오차율이 당량비 1.3 조건에서 32.8%로 가장 크게 나타났다. 전반적으로 메탄/공기 혼합기를 사용한 이전 연구보다 오차율이 다소 높게 측정되었는데, 이는 다중 연료가 단일 연료에 비하여 더 높은 불확실성을 가지는 것과<sup>19)</sup> SNG 연료에 최적화되지 않은 메커니즘으로 인한 결과로 판단된다.

평균 오차율을 확인한 결과 Table 2와 같이 GRI-mech 3.0 메커니즘이 7.71%로 가장 작은 평균 오차율을 가지는 것으로 본 연구에 이용된 3가지 메커니즘 중 SNG 연료에 가장 적합한 것으로 판단하였으며, 실험값과의 비교를 위하여 GRI-mech 3.0 메커니즘으로 계산된 값을 사용하였다.

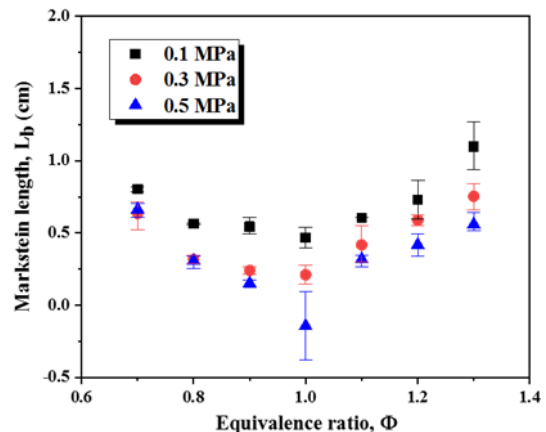
### 3.3 SNG 연료의 $S_u^0$ 와 $L_b$ 측정

정적연소기를 이용하여 구형 전파화염의  $S_u^0$ 를 측정하는 방법의 장점을 이용하여 0.1 MPa에서 0.5 MPa까지 압력을 증가시키며  $S_u^0$ 와  $L_b$ 를 측정하였으며, 수치해석 결과와  $S_u^0$ 의 비교를 진행하였다.

Fig. 5는 NMII와  $R_f$ 의 반경(10-20 mm)을 이용하여 측정된  $S_u^0$ 와 GRI-mech 3.0 메커니즘으로 계산된 값을 압력과 당량비에 따라 나타낸 그래프이며, Fig.



**Fig. 5.** Experimental and numerical laminar burning velocities as function of  $\Phi$  with different pressure condition at 298 K



**Fig. 6.** Markstein lengths as function of equivalence ratio with different pressure condition at 298 K

6은 압력 변화와 당량비에 따른  $L_b$ 를 나타낸 그래프이다.

Fig. 5에서 실험으로 얻은  $S_u^0$ 와 계산값이 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있지만, 초기압력이 높은 경우 과농 당량비 구간에서의 차이가 다소 높아지는 것이 확인되었다. 또한 초기압력이 증가함에 따라  $S_u^0$ 가 감소하는데 이는 초기압력 증가에 따라 같은 당량비 조건에서, 단열화염온도에 민감한 체인분기 반응(branching reaction)인  $H + O_2 \rightarrow OH + O$  (이체 반응)가 일정한 반면 온도에 둔감한 체인종결

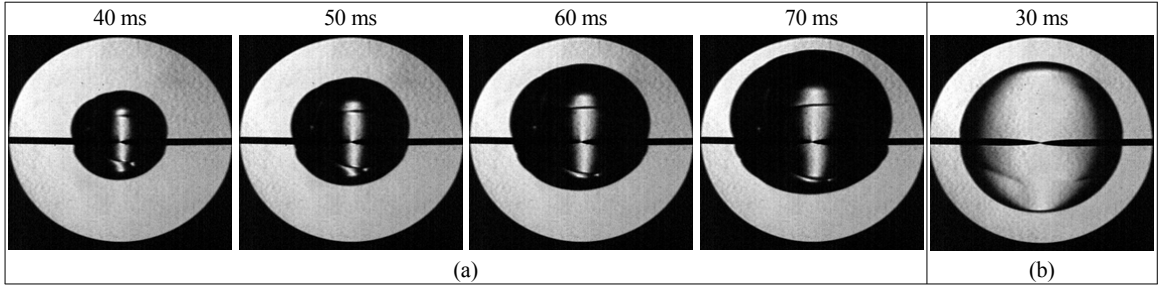


Fig. 7. Schlieren images of SNG/air premixed flames at  $\Phi=0.7$  and 298 K (a) 0.5 MPa, (b) 0.1 MPa

반응(inhibiting reaction)인  $H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$  (삼체 반응)이 강화되는 것과 내부 미연가스의 밀도가 증가하기 때문이다<sup>20)</sup>.

$L_b$  또한 압력증가에 따라 감소하며 이는 비선형적인  $K$ 의 거동의 영향이 감소하는 것을 의미한다<sup>9)</sup>. 하지만 0.5 MPa, 당량비 0.7인 조건에서 측정된  $L_b$ 의 경우 0.3 MPa 조건보다 높게 측정된 것이 확인되었는데, 이는 압력이 증가함에 따라  $S_u^0$ 가 15 cm/s보다 낮아지며 부력의 영향을 받는 것으로 확인되었다. Fig. 7은 초기압력 조건 0.5 MPa, 0.7 당량비 조건의 화염이 전파하는 과정과 0.1 MPa 조건의 화염을 나타낸 슈리렌 이미지이다. Fig. 7(a)에서 부력에 의한 영향으로 구형 화염의 중심점이 시간이 지남에 따라 수직 방향으로 상승하는 반면 Fig. 7(b)의 경우 화염이 전극봉을 중심으로 전파되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 높은 압력 조건에서 부력에 의하여 추가된 상승속도가 전파속도에 추가되어 측정된  $S_u^0$ 와  $L_b$ 가 영향을 받은 것으로 판단된다.

당량비 1.0, 초기압력 0.5 MPa의 경우 측정된  $L_b$  간의 오차가 크게 확인되는데, 이는  $L_b$ 가 음의 수를 가지게 될 경우 열확산 불안정성이 증가하며 화염 표면에 주름이 발생하기 때문에<sup>21)</sup>  $L_b$  측정에 오차를 야기한 것으로 판단된다.

## 4. 결론

정적 연소기 내에 구형으로 전파하는 화염으로부터 SNG 연료의 층류연소속도와 마크스타인 길이를 측정 및 수치해석 결과와 비교하였으며 다음과 같은

결론을 얻었다.

1) 메탄/공기 혼합기를 이용한 이전 보고에서 최적화된  $R_f$ 의 범위(10-20 mm)와 이론모델(NMII)이 SNG 연료의  $S_u^0$ 와  $L_b$  측정에서도 적합함을 SNG 연료를 사용한 재검증을 통하여 확인하였다.

2) 세 가지 메커니즘으로 계산된 SNG 연료의 수치해석 결과와 실험값으로 측정된  $S_u^0$ 의 비교를 통하여 0.1 MPa 조건에서는 USC-II 메커니즘이 4.23%로 가장 낮은 오차를 가지지만, 평균 오차율 7.77%를 가지는 GRI-mech 3.0 메커니즘이 가장 낮은 오차를 가지는 것으로 확인되었다.

3) 동일한 당량비 조건에서 초기압력이 증가함에 따라 삼체 반응이 강화되며, 미연가스의 밀도가 증가하기 때문에  $S_u^0$ 가 감소하는 것으로 판단된다. 또한 초기압력 증가에 따라 수치해석 결과와의 오차가 증가하였다.

4) 초기압력이 증가함에 따라  $L_b$ 도 감소하는 경향이 확인되었으며,  $S_u^0$ 가 15 cm/s 이하인 조건에서 부력에 의하여 영향을 받는 구간이 존재함을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 산업통상자원부와 한국에너지기술연구원(KETEP, No. 2018-1110-100290)과 한국에너지기술연구원(KETEP, No. 2015-2010-103630)의 지원을 받아 작성되었다.



## References

1. 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, pp. 3-18. Retrieved from <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE06204586>.
2. D. Kim and K. Lee, "Laminar Burning Velocity Measurement of SNG/Air Flames - A Comparison of Bunsen and Spherical Flame Method -", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No. 6, 2016, pp. 737-746, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2016.27.6.737>.
3. B. G. Jeong and K. M. Lee, "A Study on the Laminar Burning Velocity and Flame Structure with H<sub>2</sub> Content in a Wide Range of Equivalence Ratio of Syngas(H<sub>2</sub>/CO)/Air Premixed Flames", *Journal of the Korean Society of Combustion*, Vol. 19, No. 1, 2014, pp. 17-28, doi: <https://doi.org/10.15231/jksc.2014.19.1.017>.
4. C. K. Law, C. J. Sung, H. Wang, and T. F. Lu, "Development of Comprehensive Detailed and Reduced Reaction Mechanisms for Combustion Modeling", *AIAA J.*, Vol. 41, No. 9, 2003, pp. 1629-1646, doi: <https://doi.org/10.2514/2.7289>.
5. Z. Chen, "On the extraction of laminar flame speed and Markstein length from outwardly propagating spherical flames", *Comb. and Flame*, Vol. 158, No. 2, 2011, pp. 291-300, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.09.001>.
6. Z. Chen, "On the accuracy of laminar flame speeds measured from outwardly propagating spherical flames: Methane/air at normal temperature and pressure", *Comb. and Flame*, Vol. 162, No. 6, 2015, pp. 2442-2453, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.02.012>.
7. X. Cai, J. Wang, H. Zhao, Y. Xie, and Z. Huang, "Effects of Initiation Radius Selection and Lewis Number on Extraction of Laminar Burning Velocities from Spherically Expanding Flames", *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 190, No. 2, 2018, pp. 286-311, doi: <https://doi.org/10.1080/00102202.2017.1389912>.
8. G. Rozenchan, D. L. Zhu, C. K. Law, and S. D. Tse, "Outward propagation, burning velocities, and chemical effects of methane flames up to 60 atm", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, No. 2, 2002, pp. 1461-1470, doi: [https://doi.org/10.1016/S1540-7489\(02\)80179-1](https://doi.org/10.1016/S1540-7489(02)80179-1).
9. 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.
10. C. K. Wu and C. K. Law, "On the determination of laminar flame speeds from stretched flames", *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 20, No. 1, 1984, pp. 1941-1949, doi: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(85\)80693-7](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(85)80693-7).
11. A. P. Kelley and C. K. Law, "Nonlinear effects in the extraction of laminar flame speeds from expanding spherical flames", *Comb. and Flame*, Vol. 156, No. 9, 2009, pp. 1844-1851, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.04.004>.
12. P. D. Ronney and H. Y. Wachman, "Effect of Gravity on Laminar Premixed Gas Combustion 1: Flammability Limits and Burning Velocities", *Comb. and Flame*, Vol. 62, No. 2, 1985, pp. 107-119, doi: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(85\)90139-7](https://doi.org/10.1016/0010-2180(85)90139-7).
13. M. Frenklach, T. Bowman, and G. Smith, "GRI-Mech". Retrieved from [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).
14. H. Wang, X. You, A. V. Josh, S. G. Davis, A. Laskin, F. N. Egolfopoulos, and C. K. Law, "USC Mech Version II". Retrieved from [http://ignis.usc.edu/USC\\_Mech\\_II.htm](http://ignis.usc.edu/USC_Mech_II.htm).
15. UC San Diego, "The San Diego Mechanism". Retrieved from <http://web.eng.ucsd.edu/mae/groups/combustion/mechanism.html>.
16. D. Bradley, P. H. Gaskell, and X. J. Gu, "Burning Velocities, Markstein Length, and Flame Quenching for Spherical Methane-Air Flames: A Computational Study", *Comb. and Flame*, Vol. 104, No. 1-2, 1996, pp. 176-198, doi: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(95\)00115-8](https://doi.org/10.1016/0010-2180(95)00115-8).
17. M. Zhou, G. Li, J. Liang, H. Ding, and Z. Zhang, "Effect of ignition energy on the uncertainty in the determination of laminar flame speed using outwardly propagating spherical flames", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 37, No. 2, 2018, pp. 1615-1622, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2018.07.084>.
18. M. P. Burke, Z. Chen, Y. Ju, and F. L. Dryer, "Effect of cylindrical confinement on the determination of laminar flame speeds using outwardly propagating flames", *Comb. and Flame*, Vol. 156, No. 4, 2009, pp. 771-779, doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.01.013>.
19. F. N. Egolfopoulos, N. Hansen, Y. Ju, K. Kohse-Höinghaus, C. K. Law, and F. Qi, "Advances and challenges in laminar flame experiments and implications for combustion chemistry", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 43, 2014, pp. 36-67, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.04.004>.
20. C. K. Law, "Combustion Physics", Cambridge University Press, UK, 2010, pp. 278-282.
21. E. C. Okafor, Y. Nagano, and T. Kitagawa, "Experimental and theoretical analysis of cellular instability in lean H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-air flames at elevated pressure", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 15, 2016, pp. 6581-6592, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.151>.