

## 메탄-산소 층류화염전파속도 측정

오정석\* · 노동순\* · 이은경\* · 홍성국\*

### Determination of Laminar Burning Velocity in Premixed Oxy-Methane Flames

Jeongseog Oh\* · Dongsoon Noh\* · Eungyeong Lee\* · Seongkook Hong\*

#### ABSTRACT

The laminar burning velocity in premixed Oxy-CH<sub>4</sub> flames was studied in a lab-scale Bunsen burner. CH\* chemiluminescence method and Schlieren photography were used. Experimental results were compared with numerical prediction which was calculated with a CHEMKIN 3.7 package with a PREMIX code. Global equivalence ratio of oxy-CH<sub>4</sub> mixture was varied from 0.5 to 2.0 in a laminar flow region. The laminar burning velocity was measured as 3.1 m/s for Schlieren photograph and 2.9 m/s for CH\* chemiluminescence technique (angle method).

#### 초 록

실험용 분젠 연소기를 사용하여 예혼합된 메탄-산소 층류화염전파속도를 연구하였다. 이를 위해 CH\* 자발광 측정기법과 슐리렌 사진술이 사용되었다. 실험결과는 CHEMKIN 3.7을 이용한 수치해석 결과와 비교하였다. 층류화염전파속도를 측정하기 위하여 층류여역 내에서 전체 당량비는 0.5에서 2.0까지 조절하였다. 동축 화염에서 화염전파속도는 각도측정법을 사용하였으며 슐리렌 사진에서는 3.1 m/s로 CH\* 자발광 사진에서는 2.9 m/s로 측정되었다.

Key Words: Oxy-fuel combustion (메탄-산소 연소), Bunsen burner (분젠 버너), Premixed flame (예혼합 화염), Laminar burning velocity (층류화염전파속도), Angle method (각도 측정법)

#### 1. 서 론

금세기 들어 화석에너지 특히 석유자원 고갈 및 지구온난화에 대한 우려가 증가함에 따라 과거 고비용으로 주춤했던 순산소 연소방식이 주

목받기 시작했다. 궁극적으로는 신재생에너지가 기존의 화석연료를 대체할 것으로 보되나 높은 제조단가 등으로 인하여 본격적인 시장 형성 시점은 2030년 전후가 될 것으로 예상된다[1].

이산화탄소 포집 및 저장(CCS; carbon capture and storage) 방법에는 연소 전/중/후 포집방법

\* 한국에너지기술연구원 산업효율센터

† 교신저자, E-mail: jeongs5@kier.re.kr

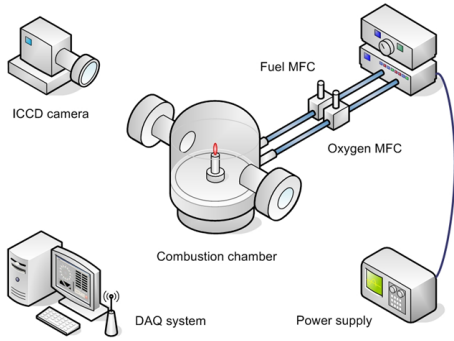


Fig. 1 Schematic diagram of an experimental setup for chemiluminescence measurements and Schlieren photographs.

이 있는데 순산소 연소는 연소 중 포집에 해당된다. 연소 전 및 후 포집 방법은 가스 분리에 사용되는 필터를 사용하는 반면 연소 중 처리에는 순산소를 이용한다. 앞으로 가스 필터 및 산소 제조비용에 따라 이산화탄소 포집방식이 결정될 것으로 보인다[2].

층류화염전파속도(laminar burning velocity)는 연료의 연소특성 중 하나로 아래의 식 (1)은 층류화염전파속도( $S_L$ ) 선행연구결과이다[3].

$$S_L(Z, \chi) = S_L \left( 1 - c \times \frac{\chi}{\chi_q} \right) \quad (1)$$

where

$$S_{L,0}(Z_{st}) = S_{L,0} = S_{L,ref} \times \left( \frac{T_u}{T_{u,ref}} \right)^\gamma \times \left( \frac{P_u}{P_{u,ref}} \right)^\beta \times (1 - 2.1 \times Y_{dil}),$$

$$\frac{S_{L,0}}{S_L} = 1 + Ma \times Ka$$

여기서  $Z$ 는 혼합분율,  $\chi$ 는 소산율(dissipation rate),  $T$ 는 온도,  $P$ 는 압력,  $Y_{dil}$ 은 희석가스 몰분율,  $Ma$ 은 마크슈타인 수(Markstein number),  $Ka$ 는 칼로비츠(Karlovitz number)이다.

공기를 이용한 연소에서 층류화염전파속도에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나 순산소 연소의 경우 관련 자료가 미흡한 실정이다[4-6]. 본

연구에서는 분젠버너를 이용하여 메탄-산소 층류화염전파속도를 측정하고자 하였다. 연구목적은 메탄-산소 층류화염전파속도를 실험적으로 구하고 이를 계산결과와 비교하는 것이다.

## 2. 연구방법

### 2.1 실험장치

실험장치 개요를 Fig. 1에 나타내었다. 연소기는 동축류 형상(axisymmetric type)의 분젠 연소기(Bunsen burner)로 노즐 직경( $d_R$ )은 2.03 mm 이었다.

자발광(chemiluminescence) 영상을 취득하기 위하여 ICCD(intensified charge-coupled device) 카메라(PI-MAX 512, Princeton Instruments Inc., Trenton, NJ, USA)를 사용하였다. 화염구조를 관찰하기 위하여  $CH^*$  라디칼을 선택하였다. 협대역 필터(narrow band pass filter; Andover Co., Salem, NH, USA)와 UV렌즈(105 mm; Nikkor f/4.5, Nikon Co., Tokyo, Japan)를 ICCD(intensified charge coupled device) 카메라에 연결하여 촬영하였다. 필터의 취득파장대역은  $430 \pm 5$  nm 이었고 최소 투과율은 45% 이었다.

슐리렌(Schlieren) 사진을 촬영하기 위하여 디지털 일안반사식(DSLR; digital single lens reflex) 카메라(D300s, Nikon Co., Tokyo, Japan)를 사용하였다. 이 때 카메라는 연소기 및 두 개의 렌즈( $FL=500$ mm,  $D=100$  mm, plano-convex fused silica lens, Sigma Koki Co., Tokyo, Japan)와 일직선상 놓이도록 정렬하였다. 슈도우 화상(Shadow graph)의 선명도와 명암대비를 높이기 위하여 광원부에 핀홀렌즈( $d_H=0.25$  mm,  $FL=32$  mm,  $f/128$ , PinholeArt Co., Seoul, Korea)을 촬영부에 나이프 에지(knife edge)를 설치하였다.

### 2.2 실험조건

메탄-산소 층류 예혼합 화염의 당량비( $c$ )는 0.5~2.0 범위에서 0.1 씩 조절하였다. 이 때 예혼합기의 레이놀즈 수(Reynolds number)와 프라우

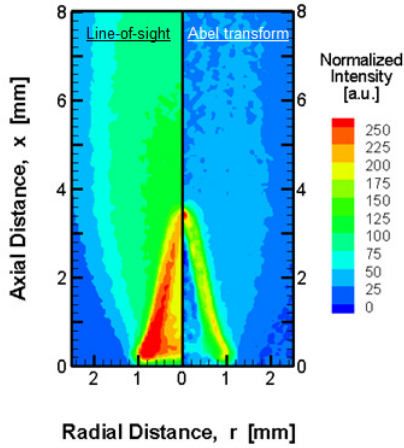


Fig. 2 Premixed laminar oxy-CH<sub>4</sub> flame structure at  $u_R=0.12$  m/s and  $G=1.1$  which was measured by CH\* chemiluminescence methods; an original line-of-sight image (left) and Abel-inverted image (right)

드 수(Froude number)는 각각  $Re_R=962\sim 2506$ ,  $Fr_R=57\sim 142$  이었다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 화염구조

Figure 2는 CH\* 자발광을 촬영한 사진으로 메탄-산소 화염구조를 보여주고 있다. 왼쪽 그림은 CH\* 자발광의 경로적분된(line-of-sight) 값이고 오른쪽 그림은 아벨 변환한(Abel inverted) 사진이다. 경로적분된 그림은 화염 앞에서 찍은 것으로 반응영역에서 나오는 빛이 ICCD 카메라의 촬상소자에 누적되어 나타난 결과이므로 화염단면을 관찰하기 어렵다. 그러나 화염을 동축으로 가정하고 아벨 변환하게 되면 경로적분된 화상에서 화염 단면구조를 얻을 수 있다. Fig. 2의 오른쪽 그림을 보면 케탄-산소 층류 예혼합 화염이 예열지역(preheat zone)과 반응지역

(reaction zone)으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 즉 노즐 출구에서 분사된 메탄-산소 예혼합기는 예열지역을 지나서 반응영역에 이르러 반응을 함으로서 CH\* 자발광을 방출하게 된다.

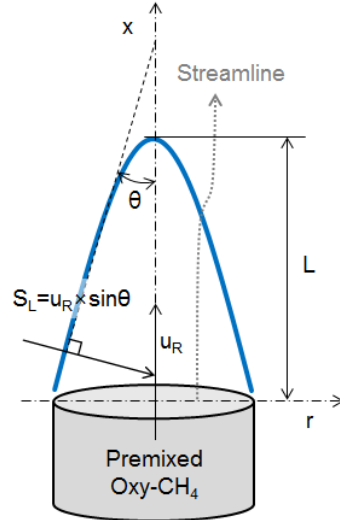


Fig. 3 Burner stabilized flame technique (angle method) to calculate the laminar burning velocity.

#### 3.2 각도 측정법

층류화염전파속도를 측정하기 위하여 선행연구자들에 의해 여러 방법들이 제안되었다 [4]. 대표적으로 원통에서 예혼합기를 넣고 착화시키는 자유전파화염 속도측정법(freely propagating flame method)과 대향류 화염(counter flow flame)에서 노즐출구에서의 분사속도와 화염면의 정체점(stagnation point) 위치를 구하여 화염전파속도를 측정하는 방법 그리고 슬롯 및 동축연소기에서 화염면 각도를 측정하는 각도측정법(angle method)이 있다. 본 연구에서는 층류화염전파속도를 구하기 위하여 자발광 및 슬리렌 화상을 이용한 각도측정법을 사용하였다.

Figure 3에 화염면 각도측정법 개요를 나타내었다. 층류화염전파속도( $S_L$ )는 아래의 식 (2)를 사용하였다[6].

$$S_L = u_R \times \sin\theta \quad (2)$$

여기서  $u_R$ 은 예혼합기의 노즐 출구에서의 평균 유속이고  $\phi$ 는 노즐 중심축과 화염면이 이루는 각도이다.

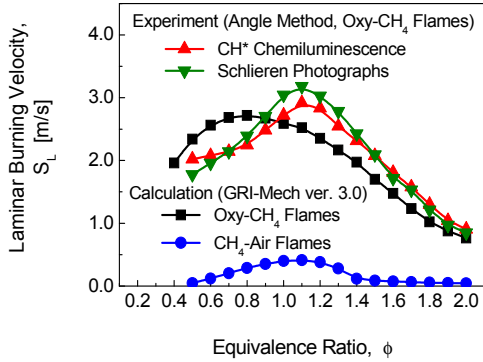


Fig. 4 Comparison of the laminar burning velocity between experiments (CH\* chemiluminescence measurements and Schlieren photographs) and calculations (GRI-Mech ver. 3.0) as a function of global equivalence ratio

### 3.3 층류화염전파속도

Figure 4는 자발광과 슈릴렌 사진에서 각도 측정법을 이용하여 실험적으로 구한 층류화염전파속도와 CHEMKIN 3.7 패키지의 PREMIX 코드를 사용하여 구한 해석결과를 비교한 그림이다. 파란색 원으로 표시한 메탄-공기 화염 해석결과에 비하여 메탄-산소 결과는  $\phi=1.1$ 에서 약 8배 이상 속도차이가 났다.

상온상압 조건에서 최대 층류화염전파속도는 슈릴렌 사진촬영에서는 3.1 m/s로 CH\* 자발광 사진촬영에서는 2.9 m/s로 측정되었다. 반면 CHEMKIN GRI 3.0을 이용한 해석결과에서 메탄-공기 화염의 경우 선행연구결과와 유사한 경향성을 나타내었으나 메탄-산소 화염의 경우 실험값과 차이가 나타났다. 실험결과에서 최대 층류 화염전파속도는  $\phi=1.1$ 에서  $S_L=2.9\sim 3.1$  m/s 이었으나 해석결과의 경우  $\phi=0.8$ 에서  $S_L=2.7$  m/s로 예측되었다. 이를 볼 때 순산소 연소의 경우 수치해석과 실험과의 상호 보완이 필요할 것으로 생각된다.

Figure 3의 결과에서 보듯 순산소 연소를 이용한 연소기를 설계할 경우 빠른 화염전파속도와 화학반응속도로 인하여 작은 체적 내에서 짧은 시간에 연소가 이루어지는 만큼 순산소 화염은 외부의 교란(external disturbance)에 보다 강한 저항성을 지닐 것으로 예상된다.

## 4. 결 론

실험용 분젠 연소기를 이용한 동축류 메탄-산소 화염에서 각도측정법을 이용하여 층류화염전파속도를 측정하였으며 아래의 결론을 얻었다.

- (1) 당량비 0.5~2.0 조건에서 메탄-산소 층류 예혼합 화염구조는 예열영역과 반응영역으로 이루어졌다.
- (2) 상온상압 조건에서 최대 층류화염전파속도는 슈릴렌 사진촬영에서는 3.1 m/s로 CH\* 자발광 사진촬영에서는 2.9 m/s로 측정되었다.

후속연구를 통하여 순산소 연소에서 압력, 온도 및 희석가스 물분율 등이 층류화염전파속도에 미치는 영향을 살펴 볼 예정이다.

## 참 고 문 헌

1. 에너지관리공단 신·재생에너지센터, "신·재생에너지 RD&D 전략 2030 시리즈 - 04 석탄이용", 북스힐, 2008
2. 김재창, "이산화탄소 포집 및 저장기술", 청문각, 2008
3. Turns S., "An Introduction to Combustion : Concepts and Applications - 2nd Edition", McGraw-Hill, New York, USA, 2002
4. Singer J.M., 2009, "Burning velocity measurements on slot burners; Comparison with cylindrical burner determinations", Symposium (International) on Combustion, Vol. 4, pp.352-358
5. Yamamoto K., Ozeki M., Hayashi N.,

Yamashita H., 2009, "Burning velocity and OH concentration in premixed combustion", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 32, pp.1227 - 1235

6. Bouvet N., Chauveau C., Gokalp I., Lee S.Y., Santoro R.J., 2011, "Characterization of syngas laminar flames using the Bunsen burner configuration", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, pp.992-1005