

# 비에혼합화염과 예혼합화염의 속도 섭동에 따른 응답 특성

안명근\* · 김태성\* · 윤영빈\*†

## How to Prepare the Manuscript for Submission to the Proceedings of KSPE Conference

Myunggeun Ahn\* · Taesung Kim\* · Youngbin Yoon\*†

### ABSTRACT

An experimental study investigates the flame response characteristics of non-premixed flame and premixed flame. Air was used as the oxidant. Hydrogen(H<sub>2</sub>)/methane(CH<sub>4</sub>) was used as the fuel, and the mixing ratio of the fuel was 50/50%. Flame response characteristics for various velocity perturbations were experimented. The flame images was acquired using the OH fluorescence measurement and the images were digitized using MatLab code. The results of the premixed flame show that flame perturbation increases as the oscillation amplitude increases. As the amplitude increases, the gain value of the flame transfer function is observed to be a linear behavior. The flame length of a nonpremixed flame decreases as the oscillation amplitude increases. Also, it was confirmed that the gain value according to the amplitude behaves nonlinearly.

### 초 록

비에혼합화염과 예혼합화염의 화염응답특성을 속도섭동을 다양하게 변경하며 실험하였다. 연료로는 수소(H<sub>2</sub>)/메탄(CH<sub>4</sub>)을 50/50 %로 혼합한 혼합연료를 사용하였으며 산화제로는 공기를 사용하였다. OH 자발광(OH fluorescence)을 이용하여 화염이미지를 계측하였으며 PMT(Photo Multiplier Tube)를 이용하여 열 방출량을 계측하였다. 계측된 이미지는 MatLab 코드를 이용하여 수치화하였다. 예혼합화염의 결과에서는 진폭이 증가할수록 화염섭동이 증가하는 경향성을 보았으며 진폭에 따라서 화염전달함수의 게인 값이 선형적인 거동을 하는 것을 관찰하였다. 비에혼합화염의 화염길이는 진폭이 증가할수록 짧아지는 것을 관찰하였고 게인 값은 진폭에 비선형적인 거동을 하는 것을 확인하였다.

Key Words: Flame Response Characteristics, Non-premixed Flame, Premixed Flame, Flame length, Flame Transfer Function (FTF)

### 1. 서 론

\* 서울대학교 기계항공공학부

† 교신저자, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

1930년대 로켓엔진에서 발견되었던 연소불안정 현상은 연소를 이용하는 모든 시스템에서 발견되고 있다. 이러한 문제는 아직까지 완벽하게 해결하지 못하였으며 세계 각 나라에서 연소불안정연구를 활발히 진행하고 있다. 연소불안정은 음향학적 섭동, 열 방출량의 섭동, 속도 섭동의 상호작용에 의하여 나타난다. 이 중 한가지 요인이 다른 요인에 영향을 미치고 다시 처음으로 되돌아오는 양성피드백 연동(positive feedback coupling)을 통하여 세기가 증폭이 될 때 발생하고 세기가 감소될 때 발생하지 않는다고 알려져 있다.

연소불안정의 기초연구로 비예혼합화염과 예혼합화염에 대한 연구가 많이 진행되어왔다. Lakshminarasimhan 등은 강한 진폭으로 가진 시 확산화염의 화염길이와 발광성 그리고 강한 진폭이 연료와 산화제의 혼합도에 미치는 영향을 실험적으로 수행하였다[1,2]. 주 등은  $H_2/CO/CH_4$ 의 혼합가스를 이용하여 부분예혼합 모델 가스터빈 연소기에서 화염길이와 EINOx 그리고 ANN(Artificial Neural Network)의 실험적 연구를 하였다[3]. 윤 등은  $H_2/CH_4$ 의 혼합가스를 이용하여 부분예혼합 연소기에서 연소불안정의 모드천이현상의 실험적 연구를 하였다[4]. 황 등은  $H_2/CO$ 를 연료로 사용한 난류 제트확산화염의 화염안정화와 화염길이에 대한 EINOx의 실험적 연구를 하였다[5,6]. 김 등은 확산화염 연소기에서 벅-슈만화염(Burke-Schumann flame)의 수치적 연구와 실험적 연구의 비교를 통하여 수치적연구와 실험적연구가 부분적으로 유사한 경향성이 나타나는 것을 확인하였다[7].

본 연구에서는 비예혼합화염과 예혼합화염의 화염특성 비교를 하였으며 연료는 수소와 메탄의 혼합연료를 산화제로는 공기를 사용하였으며 수소와 메탄의 혼합비는 50/50 %의 비율을 적용하였다. OH 자발광(OH fluorescence) 계측을 통하여 화염이미지를 획득하였으며 PMT(Photo Multiplier Tube)를 이용하여 열 방출량을 계측하였다. 계측된 열 방출량을 이용하여 화염전달함수를 계산하였으며 계측된 이미지를 이용하여 화염길이를 수치화하였다. 수치화된 데이터를 이

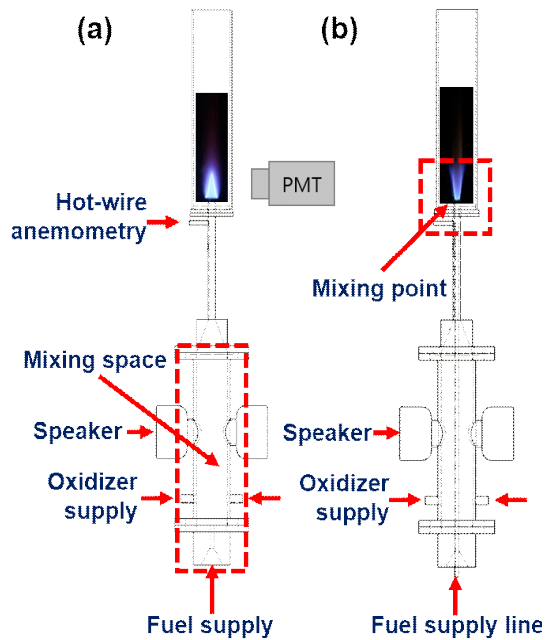


Fig. 1 Schematic diagram of the burner; (a) premixed flame burner (b) non-premixed flame burner.

용하여 두 화염의 정량적인 화염특성을 비교하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1 은 실험에 사용된 연소기의 단면도이다. Fig. 1의 (a)는 예혼합화염 연소기의 단면도로 연료는 연소기 하단에서 공급이 되며 공기는 양쪽에서 공급이 되어 공급즉시 연료와 산화제가 공급이 된다. 속도섭동을 위한 가진은 양쪽에 장착되어있는 스피커를 통해 가진되며 공기속도를 측정하기 위한 HWA()는 노즐부근에 장착하였다. Fig. 2의 (b)는 비예혼합화염 연소기의 단면도로 연소기 하단의 연료공급라인에서 연료가 공급이 되고 양쪽에서 산화제가 공급이 되어 각가 공급된 연료와 산화제는 노즐 끝에서 화염을 형성하게 된다. 연료공급라인과 동축으로 정렬된 산화제 공급라인의 외경은 각각 6.35 mm와 12.7 mm이다. 두 연소기 모두 지름이 35 mm인 원형 석영 관(Quartz tube)이 장착되어 있는데 이는

연소 시 외부공기의 유입을 차단하기 위하여 1차 설치하였다. 연료와 산화제는 MFC()제어를 통해 공급이 되며 연료는 메탄/수소를 각각 0.98 slpm으로 공급되며 공기의 공급유량은 11.40 slpm으로 공급하였다. 화염섭동을 위한 가진주파수는 40 Hz부터 300 Hz 까지 20 Hz씩 증가시키며 공급하였으며 다양한 화염섭동을 관찰하기 위하여 평균속도 대비 속도섭동의 크기인 진폭은 비예혼합화염은 0.12, 0.15, 0.25, 0.35로 공급하였으며 예혼합화염은 0.15, 0.30, 0.45으로 공급하였다.

Table 1. Experimental conditions.

Parameter	Change
Fuel & Oxidizer	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> & Air
Fuel compositions	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> (50/50 %)
Supply rate of fuels	0.98 slpm (respectively)
Supply rate of air	11.40 slpm
Forcing frequency	40 - 300 Hz (20 Hz steps)
Magnitudes of amplitude	
Non-premixed flame	0.12, 0.15, 0.25, 0.35.
premixed flame	0.15, 0.30

slpm : standard liter per minute (L/min)

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1 예혼합화염의 응답과 위상차

본 연구에서는 유동섭동과 열 방생량 섭동의 관계를 파악하기 위하여 제어의 전달함수 개념을 화염에 대해 적용하여 섭동주파수의 함수로 나타내는 화염전달함수 (Flame Transfer Function)를 사용하였다. 화염전달함수는 다음과 같이 표현한다.

$$F(\omega) = \frac{q' / \dot{Q}_0}{u' / U_0} = G(\omega)e^{i\phi(\omega)} \quad (2)$$

위 식에서  $G(\omega)$ 는 화염전달함수의 게인(gain)이라 하며 응답세기를 나타내고  $\phi(\omega)$ 는 위상차로 실수부는 시스템의 고유주파수, 허수부는 초

기 불안정인자의 성장률로 허수부가 음수일 때

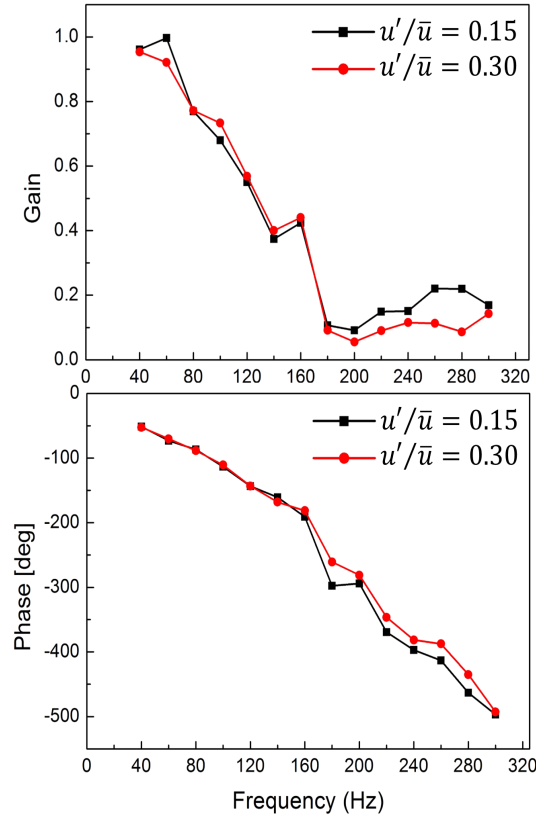


Fig. 2 The result of premixed flame response characteristics with gain and phase.

불안정이 증폭한다.

Fig. 2는 예혼합화염의 화염전달함수 응답값과 위상차의 결과이다. 예혼합화염 0.15와 0.30의 진폭을 측정하였다. 먼저 게인 값은 180 Hz 이전에는 감소하는 기울기를 보이지만 180 Hz 이후에는 기울기가 평평해지는 것을 확인할 수 있다. 화염전달함수의 위상차는 연료라인의 섭동이 열 방출과의 섭동으로 발생되기까지의 위상 차이를 나타내는 것으로 진폭에 의한 위상차가 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

#### 3.1 비예혼합화염의 응답과 위상차

Fig. 3은 비예혼합화염의 화염전달함수 응답값과 위상차의 결과를 나타낸 그래프이다. 비예혼합화염의 진폭변수는 0.12, 0.15, 0.25, 0.35이다. 화염

전달함수의 게인 값의 결과 0.12와 나머지 세 진폭 값이 다른 거동을 하는 것을 볼 수 있다. 40 Hz에서는 모든 게인 값이 같은 값을 가지지만 60 Hz에서 0.12와 0.15는 같은 값을 0.25와 0.35는 서로 다른 값을 가진다. 80 Hz에서는 퍼져있던 게인 값들이 다시 모이며 이후 0.12와는 다르게 0.15, 0.25, 0.35은 같은 거동을 하는 비선형적인 거동을 보여준다. 이러한 실험결과로 미루어 보아 0.20 이상의 진폭은 진폭이 얼마나 커지든 같은 열 방출량 값을 가지지만 0.20 이하에서는 진폭에 따라 다른 열방출량을 가지는 것을 알 수 있다.

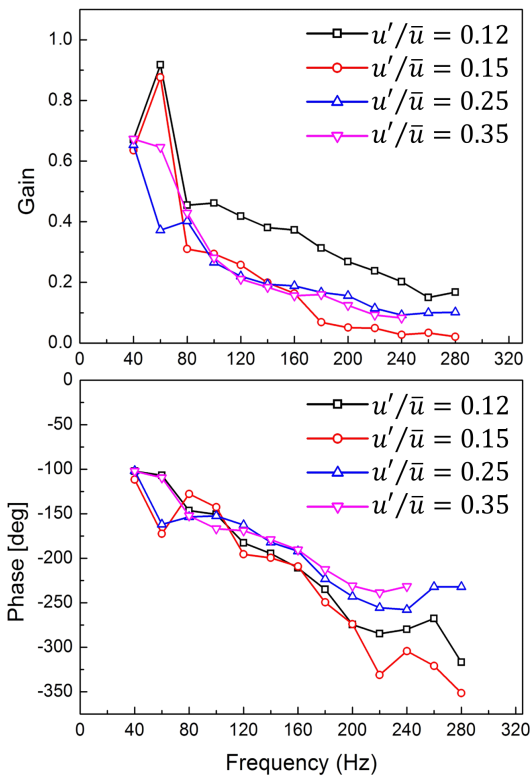


Fig. 3 The result of jet-diffusion flame response characteristics with gain and phase.

#### 4. 결론

본 연구에서는 비예혼합화염과 예혼합화염의

화염동특성을 연구하였다. 연료는 수소와 메탄의 혼합연료를 사용하였으며 혼합비는 50/50 %이다. 산화제로는 공기를 사용하였으며 실험변수로 40 - 300 Hz까지 20 Hz씩 증가시킨 가진주파수와 평균속도 대비 속도섭동크기를 나타내는 진폭을 다양하게 공급하였다. 화염전달함수의 결과 예혼합화염의 경우 화염전달함수의 진폭이 증가함에 따라 게인 값의 차이가 없는 선형적인 거동을 하는 것이 확인되었고 비예혼합화염의 경우에는 진폭이 증가함에 따라 같은 게인 값의 차이를 보임으로 비예혼합화염의 화염전달함수 게인 값은 비선형적인 거동을 하는 것을 확인했다.

#### 후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1A2A2A010043). 본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다.

#### 참 고 문 헌

1. K. Lakshminarasimhan, N. T. Clemens and O. A. Ezekoye, "Characteristics of Strongly-forced Turbulent Jets and Non-premixed Jet Flames", *Experiments in fluids*, Vol. 41, No.4 pp. 523-542, 2006.
2. K. Lakshminarasimhan, M.D. Ryan, N.T. Clemens and O.A. Ezekoye, "Mixing Characteristics in Strongly Forced Non-premixed Methane Jet Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vo. 31, No. 1, pp. 1617-1624, 2007.
3. S. Joo, J. Yoon, J. Kim, M.C. Lee and Y. Yoon, "NOx Emissions Characteristics of

the Partially Premixed Combustion of  $H_2/CO/CH_4$  Syngas using Artificial Neural Networks," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 80, 436-444, 2015.

4. J. Yoon, S. Joo, J. Kim, M.C. Lee, J. Lee and Y. Yoon, "Effects of Convection Time on the High Harmonic Combustion Instability in a Partially Premixed Combustor," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vo. 36, No. 3, pp. 3753-3761, 2017.
5. J. Hwang, N. Bouvet, K. Sohn and Y. Yoon, "Stability of Attached Flame in  $H_2/CO$  Syngas Non-premixed Turbulent Jet Flame,"

*Journal of the Korean Society of Combustion*, Vol. 17, No. 1, pp. 22-29, 2012.

6. J. Hwang, K. Sohn, N. Bouvet and Y. Yoon, "Flame Length and EINO<sub>x</sub> Scaling of Syngas  $H_2/CO$  Turbulent Non-premixed Jet Flames," *Journal of the Korean Society of Combustion*, Vol. 17, No. 4, pp. 30-37, 2012.
7. T. Kim, M. Ahn, J. Hwang, S. Kim and Y. Yoon, "The Experimental Investigation on The Response of The Burke - Schumann Flame to Acoustic Excitation," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vo. 35, No. 1, pp. 1629-1636, 2017.