

# 희박 예혼합 모형 가스터빈 연소기의 OH 자발광을 이용한 연소불안정성에 대한 실험적 연구

이재호\* · 이종호\*\* · 장영준\*\*\* · 전충환\*\*\*

## Experimental Study on Combustion Instability Mechanism in a Lean Premixed Model Gas Turbine Combustor using OH Chemiluminescence Images

Lee Jae Ho\* · Lee Jong Ho\*\* · Chang Young June\*\*\* · Jeon Chung Hwan\*\*\*

### ABSTRACT

Measurements of heat release are very important for controlling combustion instabilities, which are closely connected with combustion instabilities. OH\* images were acquired through a ICCD in this study, which were in use as indicating index of the reacting region, global and local heat release rate in the lean premixed combustion. The objectives of this study are to see the effect of equivalence ratio on global heat release rate and local Rayleigh index distribution. The local Rayleigh index distribution was acquired by information from central section of flame. This information was from the line-of-sight images which were inverted by the Abel de-convolution. In each condition, the mean value of heat release increased exponentially with equivalence for a periodic time. Local Rayleigh index distribution clearly showed the region of amplifying or damping the combustion instability as the equivalence ratio increased. This could provide an insight on the region of combustion instability and the structure of flames on the equivalence ratio.

### 초 록

연소불안정과 밀접한 관련이 있는 열방출의 측정은 연소불안정을 제어하는데 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 희박예혼합연소에서 반응영역의 위치와 전체, 국소 열방출률의 지표로 많이 사용되는 OH\* 이미지를 ICCD를 이용해 취득하였다. 본 연구의 목적은 당량비가 전체 열방출률과 국소 레일라이 지수 분포에 미치는 영향을 알아보는 것이다. 국소 레일라이 지수 분포는 선적분된 이미지를 아벨 역 변환 시켜서 화염의 중앙 단면 정보를 통해 얻을 수 있었다. 각 당량비 조건에서, 한 주기 동안의 열방출의 평균값은 당량비가 증가함에 따라 지수 함수적으로 증가하였다. 국소 레일라이 지수 분포 결과로부터, 연소불안정을 증폭시키거나 소멸시키는 영역을 분명히 알 수 있었다. 이것은 넓은 당량비 조건에 대한 화염구조와 연소불안정 영역에 대한 통찰력을 제공한다.

Key Words: Combsution Instability(연소 불안정성), Lean Premixed(희박 예혼합), Abel Inversion (아벨 역변환), OH Chemiluminescence(OH 자발광), Rayleigh Index(레일라이 지수)

\* 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 부산대학교 기계공학부

연락처, E-mail: chjeon@pusan.ac.kr

## 1. 서 론

가스터빈 연소에 관한 최근 연구동향은 날로 엄격해지는 환경 규제를 충족시키기 위해 NOx 배출을 저감시키는 방향으로 진행되고 있다. 특히 NOx를 저감시키는 연소방법으로 희박 예혼합이 크게 주목을 받고 있다[1-2]. 하지만 희박 예혼합 연소는 연소불안정을 일으키기 쉬운 단점을 가지고 있다. 연소불안정은 연소기 자체의 압력과 열방출 사이의 상호작용으로 발생하게 된다[3]. 이러한 큰 압력변동으로 인해 발생하는 연소불안정은 연소기 자체를 손상시킬 뿐 아니라 상당한 소음을 발생시키게 된다. 이론적으로 이러한 연소불안정은 연소에 의한 음압과 열방출의 위상을 어긋나게 해서 제거할 수 있다[4]. 많은 연구자들은 이런 개념에 기초해서 연소불안정을 줄이기 위한 연구를 수행하고 있다.

연소불안정과 밀접한 관련이 있는 열방출의 측정은 연소불안정을 제어하는데 아주 중요하다. 희박 예혼합 연소에서  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{CO}_2^*$  등의 자발광은 반응 영역의 위치와 전체, 국소 열방출률을 나타내는 지표로 많이 사용되고 있다[5-7]. 자발광의 측정은 대역필터를 장착한 ICCD를 이용하여 이루어진다.

따라서 본 연구에서는 비교적 신호세기가 강한  $\text{OH}^*$  이미지를 ICCD를 통해 얻음으로써, 당량비가 전체 열 방출(global heat release)에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 선 적분된 이미지를 아벨 역변환시켜서 화염의 중앙 단면 정보를 얻을 수 있었으며[8-10], 이를 통해 당량비에 따른 레일리 지수 변화를 조사하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 연소기

실험에 사용된 동축 모형 가스터빈 연소기는 연료-공기 혼합부와 연소부로 구성된다. 연소부는 광학적 접근이 가능하도록 석영관을 사용하였으며, 혼합부와는 어댑터로 연결하였다.

연료는 메탄( $\text{CH}_4$ )을 사용하였고, 실제 가스터빈의 흡입공기 온도(180~630℃)와 유사한 조건에서 실험을 수행하기 위해 발열용량 2kW인 히터를 사용하여 혼합부 끝단에서의 혼합기 온도를 360℃로 일정하게 유지하였다. 연소기에 대한 구체적인 사양은 참고문헌에 자세히 기록되어 있다[11].

### 2.2 $\text{OH}^*$ 이미지 취득 장치

연소기내에서 연소불안정이 발생할 경우 화염의 구조를 관찰하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

연소기에서 발생하는 음원을 실시간 측정하기 위해 소음측정기(SLM, Sound Level Meter)를 사용하였으며, 측정의 일관성을 위해 연소기 끝단에서 측방향으로 5cm, 반경방향으로 7cm 떨어진 곳에 소음계를 고정시킨 후 모든 실험을 수행하였다. 소음측정기에서 나온 신호를 일정크기로 증폭시켜 게이트 조절기(DG-535)의 트리거 신호로 입력하여 ICCD와 동기시켰으며, ICCD에 대역필터(중심파장 307nm, FWHM=10nm)를 장착하여 위상별로  $\text{OH}^*$ 을 측정하였다. 각 위상에서 50개의 이미지를 취득하여 평균하였다.

### 2.3 실험 방법

탄화수소 화염내에서  $\text{CH}^*$ ,  $\text{CO}_2^*$ ,  $\text{OH}^*$ 은 국소 열방출과 전체 열방출을 나타내는 지표로 사용되어 왔다.

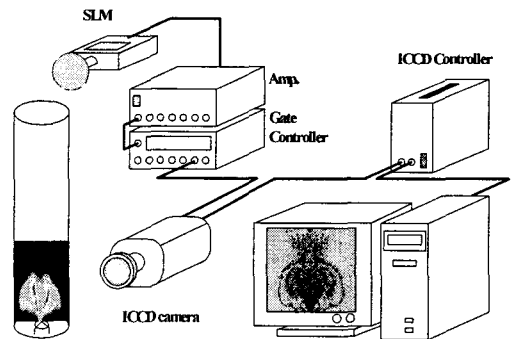


Fig. 1 Schematic of  $\text{OH}^*$  image acquisition system

특히,  $\text{OH}^*$ 을 당량비에 대한 지표[12] 또는 열방출의 지표[13]로 실험한 선행연구에 기초하여, 본 연구에서도 비교적 강도가 강하고 측정이 용이한  $\text{OH}^*$ 을 불안정 연소조건에서 압력변동의 위상에 따라 측정하였다. 불안정 연소가 발생할 경우 화염은 341.8Hz, 즉 약 2.9ms의 주기로 진동한다. 한 주기의 압력을 22.5°간격으로 16등분하여 각 위상에서 노출시간 1 $\mu\text{s}$ 로 50개의 화상을 얻어 평균함으로써 각 위상에서의 이미지를 취득하였다. 선 적분된 이미지의 아벨 역변환은 Dash[14]의 보고를 근거로 한 Hwang[15]의 연구를 참조하였다. 실험조건은 Table 1과 같다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 연소기 특성

연소기에서 연소불안정성이 발생한 경우, 시간에 대한 음압의 변동을 FFT 변환을 하면 Fig. 2와 같이 341.8Hz의 단일 주파수만을 가지는 불안정 연소특징을 나타낸다.

Table 1. Experimental conditions

Parameters	Test range
Inlet temperature( $T_{\text{inlet}}$ )	360°C
Equivalence ratio( $\phi$ )	0.63, 0.76, 0.89
Phase angle( $\theta$ )	0~360°

#### 3.2 전체 열방출률

불안정 연소 동안 화염 내 열방출 분포를 파악하기 위해, ICCD를 이용하여 압력 변동에 따른  $\text{OH}^*$  이미지를 취득하였다. 이는 선 적분된 정보로써 화염의 단면 구조를 나타내지는 못한다. 따라서 화염을 축대칭으로 가정하여, 아벨 역변환시켜 화염의 단면 정보를 얻었으며, 그 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 화염의 좌평면은 선 적분된 이미지를, 우평면은 아벨 역변환된 이미지를 나타낸다.

그리고 각 당량비 조건에서 압력위상에 따른 전체 열방출 강도 변화와 한 주기 동안의 평균값을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)와 같이, 당량비가 증가함에 따라 전체 열방출량은 증가하고 위상에 따른 주기성을 가진다. 또한 압력위상

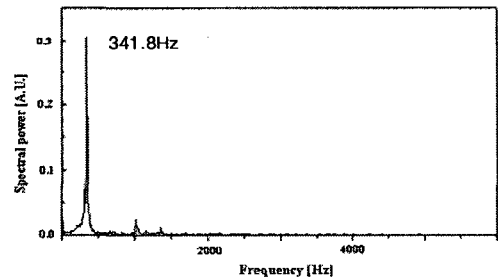


Fig. 2 Frequency spectrum of an unstable flame in the combustor

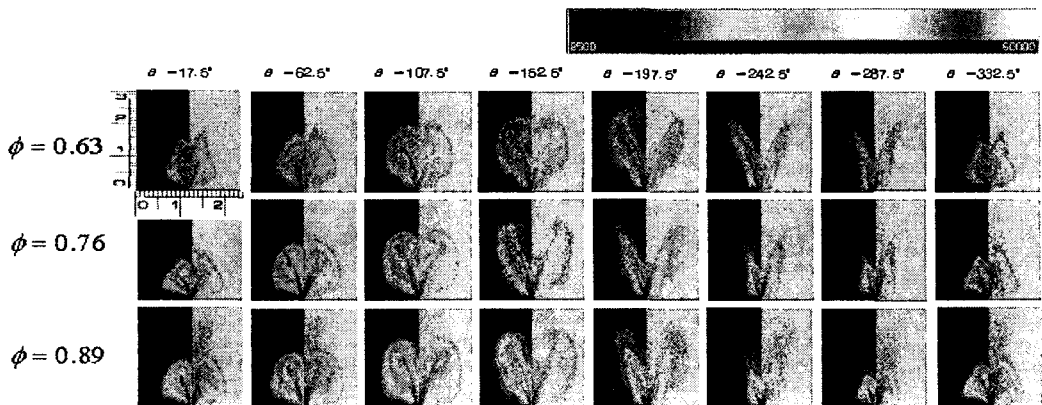


Fig. 3 Phase-resolved  $\text{OH}^*$  images of a 341.8 Hz combustion instability. Left half of the picture is the line-of-sight image and the right half is the Abel inverted one.

이 270° 부근에서 열방출량이 최소가 됨을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 한 주기 동안의 열방출량을 평균한 결과를 나타낸다. 본 연구의 당량비 범위 (0.63~0.89)에서 당량비에 따른 평균 열방출량의 경향이 지수 함수적으로 증가하는 것을 발견할 수 있었다. 이것은 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, OH<sup>\*</sup>를 이용한 선행연구 결과[9,16]와도 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 이는 이들 자발광을 형성하는 반응 메커니즘에서 반응물이 온도에 지수 함수적으로 의존하기 때문으로 사료된다.

### 3.3 국소 레일리 지수 분포

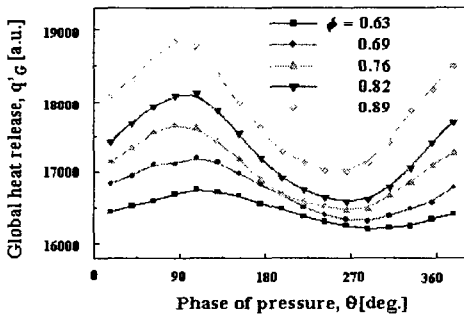
Fig. 4의 화염구조 이미지는 화염 내 열방출 강도와 위치 정보 뿐만 아니라 한 주기 동안의 시간에 따른 변화를 보여준다. 이를 측정된 압력과 조합하면, 아래 식으로 표현되는 레일리 지수(Rayleigh Index) 분포 R(x,y)를 구할 수 있다.

$$R(x, y) = \frac{1}{\tau} \int_{\tau} p'(x, y, t) q'(x, y, t) dt$$

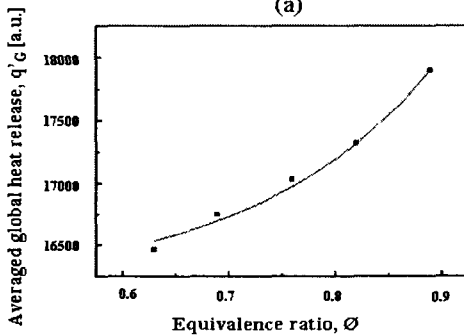
R(x,y)의 물리적 의미는 열방출과 압력변동사이의 상관관계를 나타내는 척도로서, 둘 사이의 결합강도를 나타낸다. 여기서, τ는 불안정연소의 한 주기, p'는 음압 변동, q'는 열방출 변동을 나타낸다. 압력파의 파장이 화염길이보다 훨씬 큰 경우 압력은 열방출 영역에서 공간적으로 균일하다고 가정할 수 있기 때문에[17], p'(x,y,t)는 p'(t)로 표현이 가능하다.

Fig. 5에 각 당량비 조건에서의 R(x,y) 분포를 그레이 스케일로 나타내었다. 흰색 부분은 R(x,y)가 양(+)의 값을 가지며, 열방출과 압력 변동의 위상이 일치관계(in-phase)를 이루게 되어 열방출은 압력 변동을 증폭시킨다. 반대로 검은색 부분은 R(x,y)가 음(-)의 값을 가지며, 열방출과 압력변동의 위상이 어긋난 관계(out-of-phase)를 이루게 되어 열방출이 압력변동을 소멸시킨다. 이처럼 R(x,y)는 연소불안정이 증폭되고 소멸되는 영역을 조사하는데 유용하게 사용될 수 있다.

Fig. 5에서는 2개의 소멸 영역을 발견할 수 있다. 그 하나는 Fig. 5(a)의 당량비 0.63에서의 결과에서 보듯, 화염 보염기 바로 뒤쪽 영역, 즉 화염의 전단층과 중심축 사이의 영역이고, 다른 하나는 축 방향 위치 y=150~200 부근 영역이다.



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Global heat release rate during one period of combustion instability and (b) averaged global heat release rate with respect to the equivalence ratio

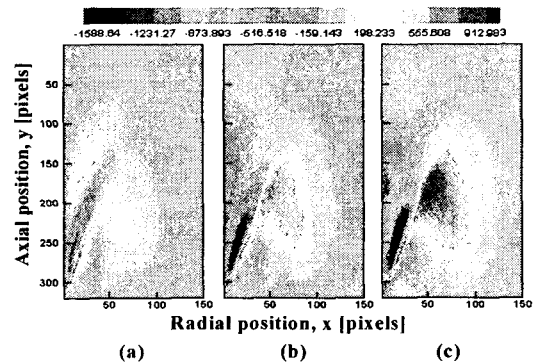


Fig. 5 Local Rayleigh index distribution at different equivalence ratio conditions ; (a) φ=0.63, (b) φ=0.76, (c) φ=0.89

후자는 당량비가 낮은 조건에서는 나타나지 않지만, 당량비가 커질수록 현저히 나타나는 것을 발견할 수 있다. 이로써 당량비 변화에 따른  $R(x,y)$ 의 변화를 분명히 파악할 수 있었다. 이는 능동제어에서 최소한의 이차연료를  $R(x,y)$ 가 음의 값을 갖는 영역에 분사해서 연소불안정을 제어함으로써, 이차 연료 분사위치에 대한 정보를 제공해 줄 수 있다[9,17].

#### 4. 결론

회박 예혼합 모형 가스터빈 연소기에서 압력 위상에 따른  $OH^*$  이미지를 통해 화염의 열방출을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 각 당량비 조건에서의 압력 위상에 따른 전체 열방출은 당량비가 증가함에 따라 증가하고 위상의 차이는 거의 없었다. 한 주기 동안의 열방출 평균값은 당량비 증가에 따라 지수 함수적으로 증가함을 알 수 있었다.
- (2) 국소  $R(x,y)$  분포 결과로부터, 각 당량비 조건에서 연소불안정을 증폭시키거나 소멸시키는 영역에 관한 정확한 정보를 얻을 수 있었으며, 이는 연소 불안정 제어에 중요한 기초 자료를 제공한다.
- (3) 당량비 변화에 따른 국소  $R(x,y)$ 의 변화를 살펴봄으로써, 넓은 당량비 조건에 대한 화염구조와 연소불안정 영역에 관한 통찰력을 얻을 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음

#### 참 고 문 헌

1. Nicloas Docquier and Sebastien Candel,

"Combustion Control and Sensors: A review," Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 28 pp. 107-150, 2002

2. Lefebvre, "Gas Turbine Combustion," 2nd ed., Taylor & Francis., 1999
3. Jones, C. M., Lee, J. G., and Santavicca, D. A., "Closed-Loop Active Control of Combustion Instabilities Using Subharmonic Secondary Fuel Injection," J. Prop. Power, Vol. 15, No. 4, pp. 584-590, 1999
4. Rayleigh, L., "Theory of Sound," Dover, New York., Vol. 2, p. 226, 1945
5. Higgins, B., McQuay, M. Q., Lacas, F., Rolon, J-C., Darabiha, N. and Candel, S., "OH Chemiluminescence as an Active Control Parameter for Fuel-Lean, High-Pressure, Premixed, Laminar Flames", Fuel, Vol. 80, pp. 67-74, 2001
6. Haber, L., Vandsberger, U., Saunders, W. and Khanna, V., "An Examination of the Relationship Between Chemiluminescence Light Emissions and Heat Release Rate Under Non-Adiabatic Conditions," ASME paper 2000-GT-0121
7. Ikeda, Y., Kojima, J., Nakajima, T., Akamatsu, F. and Katsuki, M., "Measurement of the Local Flame-Front Structure of Turbulent Premixed Flames by Local Chemiluminescence," Proc. Combust. Instit., Vol. 28, pp. 343-350, 2000
8. Smith, G. P., Luque, J., Park C. Jeffries J. B. and Crosley D. R., "Low Pressure Flame Determinations of Rate Constants for  $OH(A)$  and  $CH(A)$  Chemiluminescence," Combust. Flame, Vol. 131, pp. 59-69, 2002
9. Lee, J. G. and Santavicca D. A., "Experimental Diagnostics for the study of Combustion Instabilities in Lean Premixed Combustor," J. Prop. Power, Vol. 19, No. 5, pp. 735-750, 2003

10. Kevin, T., Walsh, Joseph Fielding, and Marshall B. Long, "Effect of Light-Collection Geometry on Reconstruction Errors in Abel Inversions," *Optics letters*, Vol. 25, No. 7, pp. 457-459, 2000
11. Lee, J. H., Lee, Y. J., Jeon, C. H. and Chang, Y. J., "Study on Mechanism of Combustion Instability in a Dump Gas Turbine Combustor," *Trans. KSME (B)*, Vol. 26, No. 9, pp. 1284-1291, 2002
12. Dandy, D. S. and Vosen, S. R., "Numerical and Experimental Studies of Hydroxyl Radical Chemiluminescence in Methane-Air Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 82, pp. 131-150, 1992
13. Paschereit, C. O., Gutmark, E. and Weisenstein, W., "Control of Thermoacoustic Instabilities and Emissions in an Industrial-Type Gas-Turbine Combustor," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 27, pp. 1817-1824, 1998
14. Cameron, J. Dasch, "One-Dimensional Tomography: a Comparison of Abel, Onion-Peeling, and Filtered Backprojection Methods," *Appl. optics*, Vol. 31, No. 8, pp. 1146-1152, 1992
15. Hwang, J. Y., "An Experimental Study on the Sooting Characteristic in Diffusion Flames," M. S. thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Seoul National University., 1995
16. Samaniego, J. M., Egolfopoulos, F. N. and Bowman, C. T., "CO<sub>2</sub>\* Chemiluminescence in Premixed Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 109, pp. 312-332, 1995
17. Lee, J. G., Kim, K. W. and Santavicca, D. A., "Effect of Injection Location on the Effectiveness of an Active Control System Using Secondary Fuel Injection," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 28, pp. 739-746., 2000