

# 희박 예혼합 덤프 연소기에서 OH 자발광을 이용한 열 방출에 관한 실험적 연구

문건필<sup>†</sup>·이종호\*·전충환\*\*·장영준\*\*

## Experimental Study on Heat Release in a Lean Premixed Dump Combustor using OH Chemiluminescence Images

Gun Feel Moon, Jong Ho Lee, Chung Hwan Jeon and Young June Chang

**Key Words:** Combustion Instability(연소불안정), Lean Premixed(희박 예혼합), Abel Inversion(아벨 역변환), OH Chemiluminescence(OH 자발광), Rayleigh Index(레이라이 지수)

### Abstract

Measurements of OH chemiluminescence in an atmospheric pressure, laboratory-scale dump combustor at equivalence ratios ranging from 0.63 to 0.89 were reported. The signal from the first electronically excited state of OH to ground state was detected through a band-pass filter with an ICCD. The objectives of this study are two: One is to see the effects of equivalence ratio on global heat release rate and local Rayleigh index distribution. To get the local Rayleigh index distribution, the line-of-sight images were inverted by tomographic method, such as Abel de-convolution. Another aim is to investigate the validity of using OH chemiluminescence acquired with an ICCD as a qualitative measure of local heat release. For constant inlet velocity and temperature, the overall intensities of OH emission acquired at different equivalence ratio showed periodic and higher value at high equivalence ratio. OH intensity averaged over one period of pressure increased exponentially with equivalence ratio. Local Rayleigh index distribution clearly showed the region of amplifying or damping the combustion instability as equivalence ratio increased. It could provide an information/insights on active control such as secondary fuel injection. Finally, local heat release rate derived from reconstructed OH images were presented for typical locations.

### 1. 서 론

#### 기호설명

$q'_G$	: 전체 열방출률
$q_{local} \cdot q_{2D}$	: 국소 · 2차원 열방출률
$I_{local} \cdot I_{2D}$	: 국소 · 2차원 자발광 강도
$A_{local}$	: 국소 단면적
$\emptyset$	: 당량비
$\theta$	: 압력의 위상각 (deg.)
$V_{in}$	: 혼합기 평균속도(m/s)
$T_{in}$	: 혼합기 공급온도(K)

최근 가스터빈 연소분야에서 희박 예혼합 연소 기술이 날로 엄격해지는 환경 규제를 충족시킬 수 있는 대안으로 주목받고 있다. 하지만 희박 예혼합 연소는 연소불안정을 일으키기 쉽다는 단점을 가지고 있다. 연소불안정 현상은 연소기 자체가 공진기 역할을 하여 압력과 열방출 사이의 상호작용으로 발생하게 된다. 큰 압력변동으로 발생하는 연소불안정은 연소기에 손상을 가할 뿐만 아니라 상당한 소음을 발생시킨다. 이러한 연소불안정을 규명하기 위해 많은 실험적·이론적 연구가 이루어져 왔다.<sup>(1~3)</sup> 최근에는 연소불안정을 제어하기 위한 연구가 활발히 진행 중인데, 이러한 일련의 연구에서 열방출의 측정은 아주 중요

<sup>†</sup> 논문발표자, 회원, 부산대학교 기계공학부  
E-mail : mgf@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-1379 FAX : (051)512-5236

\* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부 기계기술연구소

한 위치를 차지하고 있다. 비록 화염 자발광 강도와 다른 물리량사이의 일반적, 정량적 상관관계는 없지만,<sup>(1)</sup> 희박 예혼합 연소에서  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{CO}_2^*$  등의 자발광은 반응 영역의 위치와 국소, 전체 열방출률을 나타내는 지표로 많은 연구자들에 의해 사용되어지고 있다.<sup>(4-6)</sup> 한편, 연소불안정이 발생하였을 때와 같이 시간의 변화에 따른 화염구조 관찰이 중요하다거나 압력과 열 방출의 상관관계를 의미하는 레일리 지수[Rayleigh Index:  $R(x,y)$ ]를 구하는 것이 목적인 경우에는 후자의 방법을 많이 이용하고 있다.<sup>(7,8)</sup> 대역필터를 장착한 ICCD를 통해 얻은 이미지는 선 적분된 정보를 제공하기 때문에, 일반적으로 아벨 역변환과 같은 기법을 통하여 단면에 관한 정보를 얻을 수 있다.<sup>(8-10)</sup>

따라서 본 연구에서는 비교적 신호세기가 강한  $\text{OH}^*$  자발광 이미지를 ICCD를 통해 획득함으로써, 당량비가 전체 열 방출(global heat release)에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 선 적분된 이미지를 아벨 변환시킴으로써 중앙 단면의 정보를 재구축하였으며, 이를 통해 당량비에 따른 레일리 지수의 변화 추이를 조사하였다. 그리고 당량비 증가에 따라  $R(x,y)$ 의 변화 경향이 서로 다른 임의의 10지점에 대해, 당량비에 따른 국소 열 방출을 조사해 봄으로써 ICCD를 통해 얻은 2차원 이미지에 있어서의 정보가 국소 열방출로서의 사용 가능성을 조사해보고자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

#### 2.1.1 연소기

실험에 사용된 동축 모형 가스터빈 연소기는 연료-공기 혼합부와 연소부로 구성되어 있다. 연소부는 광학적 접근이 가능하도록 석영관을 사용하였으며 혼합부와는 어댑터로 연결하였다. 연료는 메탄( $\text{CH}_4$ )을 사용하였으며, 실제 가스터빈의 흡입공기 온도( $180\sim 630\text{ }^\circ\text{C}$ )와 유사한 조건에서 실험을 수행하기 위해 발열용량 2kW인 히터를 사용하여 혼합부 끝단에서의 혼합기 온도가 650K로 일정하게 유지되도록 하였다. 장치에 관한 자세한 내용은 본 저자들의 이전 문헌에 잘 나타나 있다.<sup>(7)</sup>

#### 2.1.2 $\text{OH}^*$ 이미지 취득 장치

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

연소기에서 발생하는 음원을 실시간 측정하기 위해 소음측정기를 사용하였으며, 측정의 일관성을 위해 연소기 끝단에서 축 방향으로 5 cm, 반경 방향으로 7 cm 떨어진 곳에 소음측정기를 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 각 위상에서 50개의 화상을 취득, 평균하였다.

### 2.2 실험 방법

탄화수소 화염 내에서  $\text{CH}^*$ ,  $\text{CO}_2^*$ ,  $\text{OH}^*$ 은 국소 열 방출과 전체 열 방출을 나타내는 지표로 사용되어 왔다.  $\text{OH}^*$ 을 당량비 변화에 대한 지표<sup>(11)</sup> 또는 열 방출의 지표<sup>(12)</sup>로 실험한 선행연구를 바탕으로, 본 연구에서도 비교적 강도가 강하고 측정이 용이한  $\text{OH}^*$ 을 압력변동의 위상에 따라 측정하였다. 불안정 연소가 발생할 경우 화염은 341.8Hz의 주파수를 가지고 진동하였는데, 이는 시간적으로 약 2.9ms에 해당된다. 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 Dasch의 연구결과<sup>(13)</sup>를 참조하였다. 또한, 역 변환된 결과에서의 과도한 노이즈를 방지하기 위해 세 점을 이용한 데이터 처리 작업을 수행하였다.

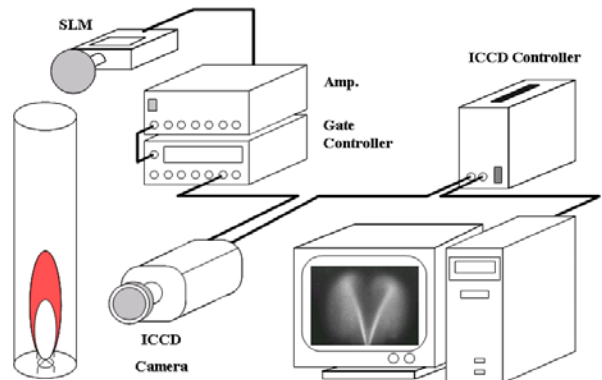


Fig. 1 Schematic of  $\text{OH}^*$  image acquisition system

### 3. 실험결과 및 고찰

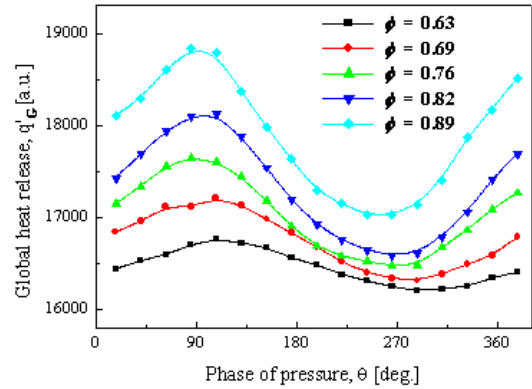
#### 3.1 전체 열방출률

불안정 연소 동안 화염 내 열방출의 공간분포를 나타내는 화염구조를 알아보기 위해, ICCD를 이용하여 압력 변동에 따른 OH 자발광 이미지를 취득하였다. 이는 선 적분된 정보로써 화염의 단면 구조를 나타내지는 못한다. 따라서 화염을 축대칭으로 가정하여, 아벨 변환 과정을 통해 화염 단면정보를 얻었으며 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 좌측 반평면은 선 적분된 이미지를, 우측 반평면은 아벨 변환된 이미지를 나타낸다.

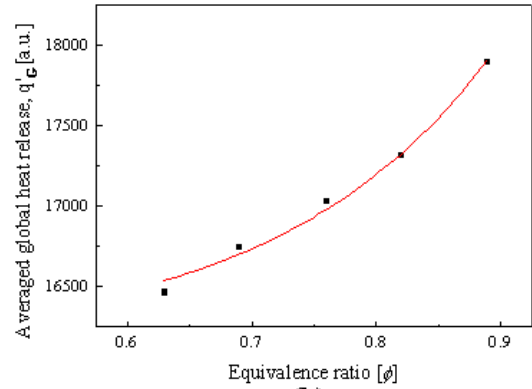
그리고 각 당량비 조건에서의 압력위상에 따른 전체 열방출 강도 변화와 한 주기 동안의 평균값을 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3(a)에서 보듯, 당량비가 증가함에 따라 전체 열방출량은 증가하고 위상에 따른 주기성을 보여준다. 또한 앞에서 살펴본 바와 같이, 압력 위상이 270도 근방에서 열방출량이 최소가 됨을 다시금 확인할 수 있다. Fig. 3(b)는 한 주기에 해당하는 16개 압력위상에서의 열방출량을 평균한 결과를 나타낸다. 본 연구의 당량비 범위(0.63~0.89)에서 당량비에 따른 평균 열방출량의 경향이 지수 함수적으로 증가하는 것을 발견할 수 있었으며, CO<sub>2</sub><sup>\*</sup>, OH<sup>\*</sup>, CH<sup>\*</sup>를 이용한 선행연구 결과<sup>(9,14)</sup> 와도 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 이는 이들 자발광(CO<sub>2</sub><sup>\*</sup>, OH<sup>\*</sup>, CH<sup>\*</sup>)을 형성하는 반응 메커니즘에서 반응물이 온도에 지수 함수적

으로 의존하기 때문인 것으로 사료된다.



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Global heat release rate with phase of pressure, (b) Averaged global heat release rate vs. equivalence ratio

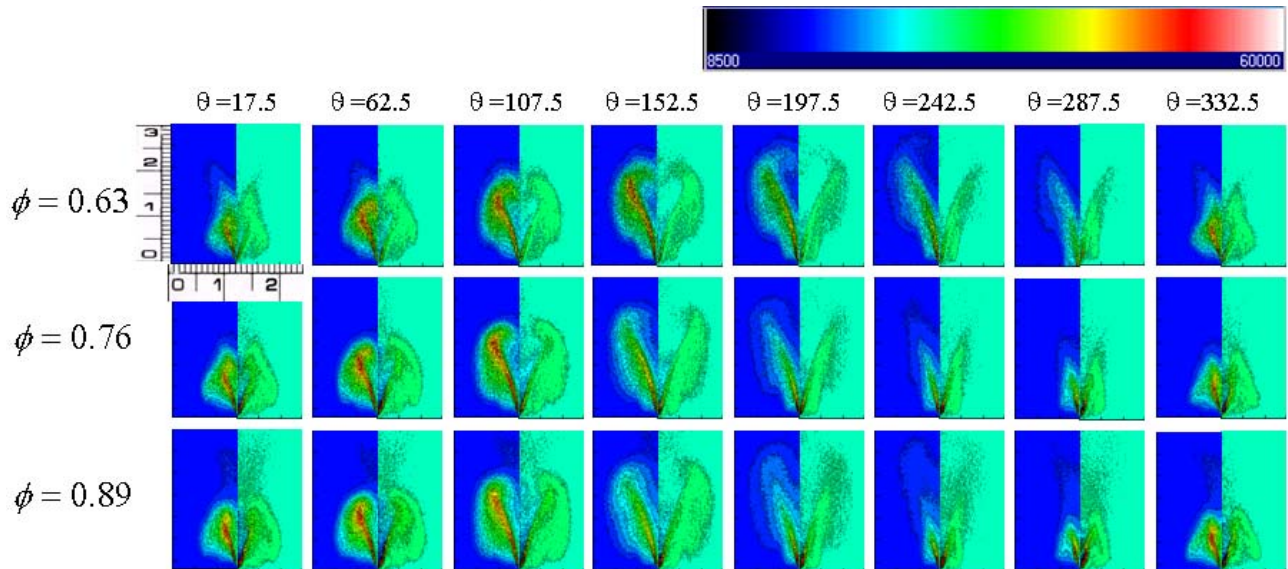


Fig. 2 Phase-resolved OH\* images of a 341.8Hz combustion instability. Left half of the picture is the line-of-sight image and the right half is the Abel inverted one.

3.2 국소 레일라이 지수 분포

Fig. 2에 나타난 2차원 화염구조 이미지는 화염 내 열방출의 강도와 위치뿐만 아니라 한 주기 동안 시간에 따른 변화를 보여준다. 이를 측정된 압력과 조합하면, 아래 식으로 표현되는 레일라이 지수 분포  $R(x,y)$ 를 구할 수 있다.

$$R(x, y) = \frac{1}{T} \int_t p'(x, y, t)q'(x, y, t)dt \quad (1)$$

$R(x,y)$ 의 물리적 의미는 열방출 변동과 압력변동사이의 상관관계를 나타내는 척도로서, 둘 사이의 결합 강도(coupling strength)를 나타낸다. 식 (1)에서  $p'(x,y,t)$ 는 국소 압력 변동으로, 압력과의 파장이 화염길이보다 훨씬 큰 경우 압력은 열방출 영역에 걸쳐 공간적으로 균일(uniform)하다고 가정되어질 수 있다. 그러므로 압력은 단지 시간의 함수로 표현이 가능하게 된다.

Fig. 4에 각 당량비 조건에서의  $R(x,y)$  분포를 그레이 스케일로 나타내었다. 흰색 부분은 (+)의 값으로 열방출과 압력 변동이 동일 위상(in-phase) 관계에 있으며, 이 경우 열방출은 압력 변동을 증폭시키게 된다. 반대로, 검은색으로 표현된 (-) 값을 갖는 영역은 열방출과 압력 변동이 어긋난 위상(out-of-phase)관계에 있으며, 이 경우 열방출은 압력 변동을 소멸시키게 된다. Fig. 4에서는 2개의 소멸 영역을 발견할 수 있다. 하나는 Fig. 4(a)의 당량비 0.63에서의 결과에서 보듯, 화염의 전단층과 중심축사이의 영역이고, 다른 하나는 축 방향 위치  $y=150\sim 200$  부근 영역이다. 후자는 당량비가 낮은 희박한 조건에서는 거의 나타나지 않지만, 당량비가 커질수록 현저히 나타나는 것을 발견할 수 있다.

3.3 국소 열방출률

당량비가 증가함에 따른 국소  $R(x,y)$  경향을 Fig. 5에 나타내었다. (+)인 지점은 당량비에 따른  $R(x,y)$  변화가 양의 기울기를 갖는 영역이고, (-) 값을 가지는 곳은 음의 기울기를 의미한다. 이는 당량비 변화에 따른 국소  $R(x,y)$  변화 특성에 관한 정보를 제공한다.

자발광 이미지에서 2차원 자발광 강도( $I_{2D}$ )는 국소 화염 단면적( $A_{local}$ )과 국소 자발광 강도( $I_{local}$ )로 다음과 같이 표현된다.<sup>(9)</sup>

$$I_{2D} = I_{local} \cdot A_{local} \quad (2)$$

또한, 2차원 열방출은 다음과 같이 표현된다.

$$q_{2D} = q_{local} \cdot A_{local} \quad (3)$$

식 (3)를 국소 단면적에 관하여 전개하여 식 (2)에 대입하면

$$I_{2D} = C_{2D} \cdot q_{2D} \quad (4)$$

$C_{2D}$ 는 국소 화염 온도와 화염 온도에 영향을 주는 요소들에 의존하는 상수로서, 당량비와 공급 온도를 일정하게 고정하고 화염온도의 영향은 일정하다고 가정하였을 경우, 2차원 자발광 강도

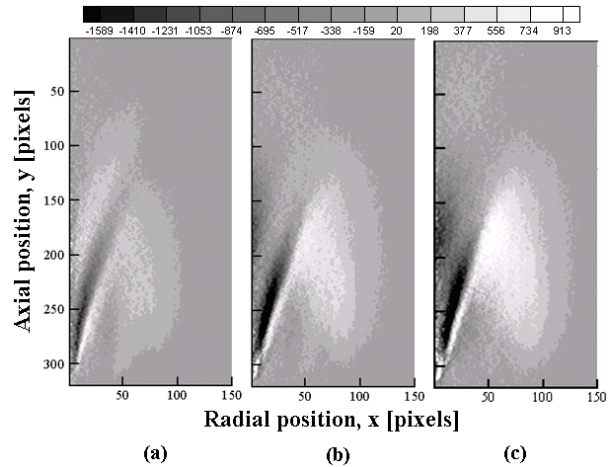


Fig. 4 Local Rayleigh index distributions at different equivalence ratio conditions; (a)  $\phi=0.63$ , (b)  $\phi=0.76$ , (c)  $\phi=0.89$

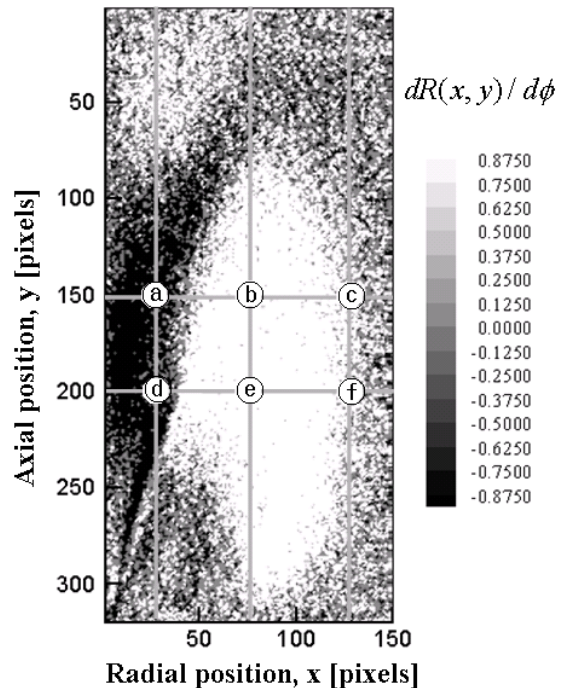


Fig. 5 Rayleigh index distribution variation with equivalence ratio(1 pixel=100 $\mu$ m)



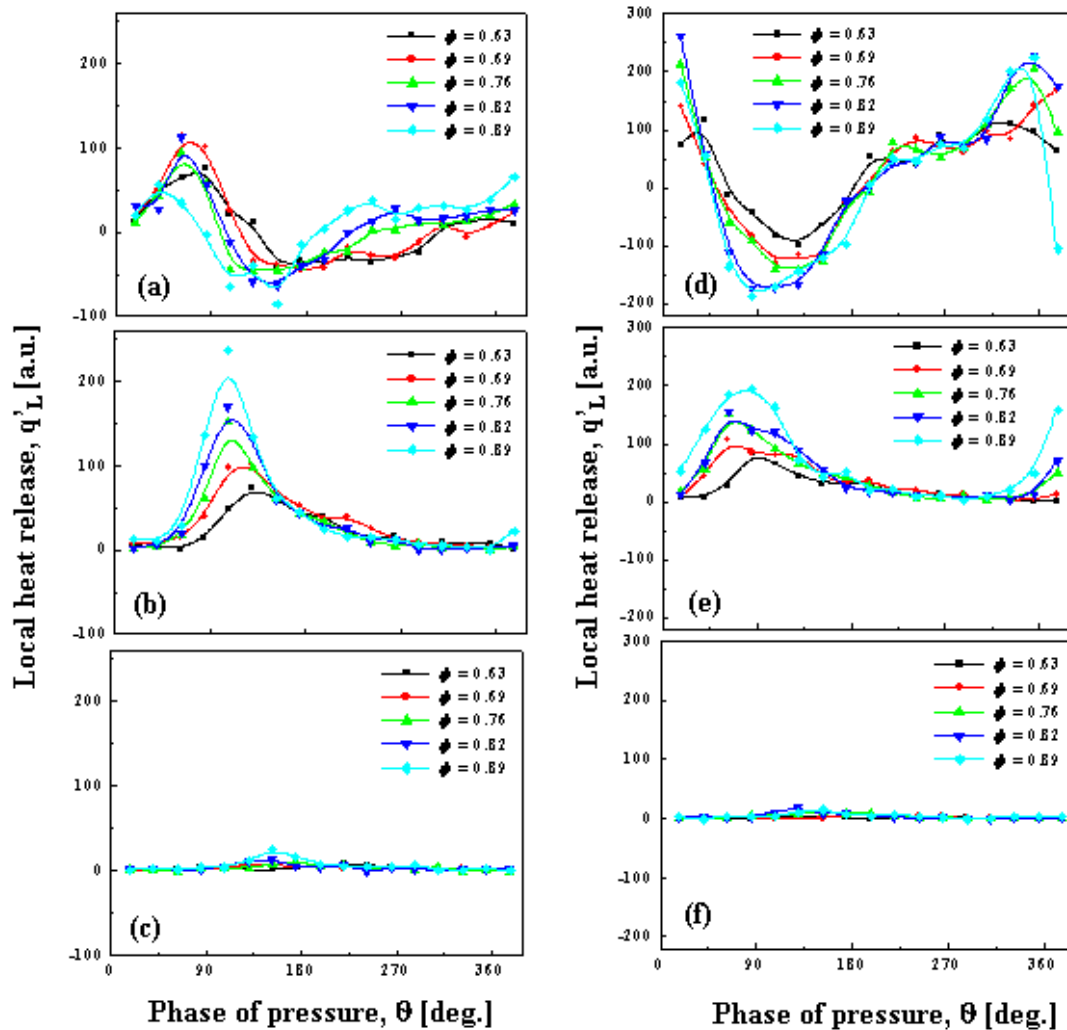


Fig. 6 Local heat release rate with phase of pressure

는 이미지 내에서 2차원 열방출을 나타낸다.<sup>9)</sup> 당량비가 일정한 경우, 연소기내 화염온도는 공간적 위치에 따라 차이를 보임에도 불구하고, 이 영향은 일정하다는 가정 하에서  $R(x,y)$ 를 구한다. 이를 근거로, 본 실험에서는  $C_{2D}$ 를 일정하다고 가정하고, 2차원 열방출을 구해 보았다.

따라서 본 연구에서는  $y=150, 200$ 에서 각각 5개의 반경 위치에서의 당량비 변화에 따른 국소 열방출률의 변화를 살펴보았으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 (a)는  $R(x,y)$ 가 양(+)인 지점으로 당량비가 증가함에 따라 국소 열방출은 감소하고, 위상은 압력보다 약간 앞서는 경향을 발견할 수 있다. 그러나 (b)에서 (c)로 갈수록, 즉 중심축에서 반경방향으로 멀어질수록 국소 열방출은 줄어들고 당량비가 높을수록 국소

열방출이 많음을 알 수 있다. 특히 (b)와 같이 화염의 중심에 있는 지점에서는, 당량비에 따른 국소 열방출 경향이 뚜렷할 뿐만 아니라 압력과 거의 동일한 위상을 가진다는 것을 알 수 있다.

$y=200$ 에서의 결과를 살펴보면, 이와 같은 결과를 확인할 수 있다. 아울러 (d)지점과 같은  $R(x,y)$ 가 음(-)인 즉, 연소불안정을 소멸시키려는 성질을 갖는 지점에서의 국소 열방출은 압력과 완전히 상반된 위상을 가지는 것을 확인하였다.

#### 4. 결론

희박 예혼합 덤프 연소기에서 압력 위상에 따른  $OH^*$  이미지를 획득하여 화염으로부터의 열방출을 살펴본 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻

을 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, 연소불안정을 증폭·소멸시키는 영역에 관한 정보를 알 수 있었으며, 이는 빠른 응답 특성의 액츄에이터와 연소불안정 제어에 중요한 기초 자료를 제공한다.

(3) 당량비 변화에 따른 국소  $R(x,y)$ 의 변화를 살펴봄으로써, 화염구조와 연소불안정 영역에 관한 통찰력을 얻을 수 있었다.

(4)  $R(x,y)$ 가 양(+) 또는 음(-)인 지점에서의 국소 열방출 결과로부터, 압력과의 위상관계를 확인하였고, ICCD를 통해 얻은 이미지에서의 자발광 강도를 국소 열방출에 대한 정성적 지표로 사용가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) Lee, J. G., Kim, K. W. and Santavicca, D. A., 2000, "Effect of Injection Location on the Effectiveness of an Active Control System Using Secondary Fuel Injection," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 28, pp. 739~746.
- (2) Shih, W. P., Lee, J. and Santavicca, D. A., 1996, "Stability and Emissions Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 26, pp. 2771~2778.
- (3) Bellows, B. D., Zhang, Q., Neumeier, Y., Lieuwen, T. C. and Zinn, B. T., 2003, "Forced Response Studies of a Premixed Flame to Flame Disturbances in a Gas Turbine Combustor," *AIAA* 2003-0824.
- (4) Higgins, B., McQuay, M. Q., Lacas, F., Rolon, J.-C., Darabiha, N. and Candel, S., 2001, "OH Chemiluminescence as an Active Control Parameter for Fuel-Lean, High-Pressure, Premixed, Laminar Flames," *Fuel*, Vol. 80, pp. 67~74.
- (5) Haber, L., Vandsberger, U., Saunders, W. and Khanna, V., 2000, "An Examination of the Relationship Between Chemiluminescence Light Emissions and Heat Release Rate Under Non-Adiabatic Conditions," *ASME paper* 2000-GT-0121.
- (6) Ikeda, Y., Kojima, J., Nakajima, T., Akamatsu, F. and Katsuki, M., 2000, "Measurement of the Local Flame-Front Structure of Turbulent Premixed Flames by Local Chemiluminescence," *Proc. Combust. Instit.*, 28, pp. 343~350.
- (7) Lee, J. H., Lee, Y. J., Jeon, C. H. and Chang, Y. J., 2002, "Study on Mechanism of Combustion Instability in a Dump Gas Turbine Combustor," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 26, No. 9, pp. 1284~1291.
- (8) Smith, G. P., Luque, J., Park C., Jeffries J. B. and Crosley D. R., 2002, "Low Pressure Flame Determinations of Rate Constants for OH(A) and CH(A) Chemiluminescence," *Combust. Flame*, Vol. 131, pp. 59~69.
- (9) Lee, J. G. and Santavicca D. A., 2003, "Experimental Diagnostics for the Study of Combustion Instabilities in Lean Premixed Combustors," *J. Prop. Power*, Vol. 19, No. 5, pp. 735~750.
- (10) Kevin, T., Walsh, Joseph Fielding, and Marshall B. Long, 2000, "Effect of Light-Collection Geometry on Reconstruction Errors in Abel Inversions," *Optics letters*, Vol. 25, No. 7, pp. 457~459.
- (11) Dandy, D. S. and Vosen, S. R., 1992, "Numerical and Experimental Studies of Hydroxyl Radical Chemiluminescence in Methane-Air Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 82, pp. 131~150.
- (12) Paschereit C. O., Gutmark, E., and Weisenstein, W., 1998, "Control of Thermoacoustic Instabilities and Emissions in an Industrial-Type Gas-Turbine Combustor," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 27, pp. 1817~1824.
- (13) Cameron, J. Dasch, 1992, "One-Dimensional Tomography: a Comparison of Abel, Onion-Peeling, and Filtered Backprojection Methods," *Appl. optics*, Vol. 31, No. 8, pp. 1146~1152.
- (14) Samaniego, J. M., Egolfopoulos, F. N. and Bowman, C. T., 1995, " $\text{CO}_2^*$  Chemiluminescence in Premixed Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 109, pp. 312~332.