

# 모형연소기에서 연료-공기의 혼합정도 및 당량비가 NOx 배출과 열 방출량에 미치는 영향에 대한 연구

조봉국\* · 최도욱\* · 김규보\*\* · 장영준\*\*\* · 송주헌\*\*\* · 전충환†  
(2008년 8월 21일 접수, 2009년 7월 17일 수정, 2009년 7월 23일 심사완료)

## Effect of the Degree of Fuel-Air Mixing and Equivalence Ratio on the NOx Emission and Heat Release in a Dump Combustor

Bong Kug Cho, Do Wook Choi, Gyu Bo Kim, Young June Chang, Chung Hwan Jeon and Ju Hun Song

**Key Words:** Combustion Instability(연소불안정), Heat Release Rate(열방출률), Lean-Premixed(희박예혼합), NOx(질소산화물), OH Chemiluminescence(OH자발광)

### Abstract

Lean premixed combustors are used for significant NOx reduction which one of issues in current gas turbine combustor. This study was investigated to estimate the effects of the unmixedness of fuel-air, equivalence ratio on the instability mechanism, NOx emission and combustion oscillation in a lean premixed combustor. The experiments were conducted in a dump combustor at atmospheric pressure conditions using methane as fuel. The swirler angle was 45°, the degrees of fuel-air mixing were 0, 50 and 100 and inlet temperature was 650K. The equivalence ratio was ranging from 0.5 to 0.8. This paper shows that NOx emission was increased when the degree of fuel-air mixing is increased in same equivalence ratio and when equivalence ratio is increased. And the range of the combustion instability was enlarged as a function of increasing of the degree of fuel-air mixing.

### 기호설명

- $f$  : 주파수
- $q_G'$  : 전체 열 방출량 (A.U.)
- $V$  : 유동의 평균속도(%)
- $\theta$  : 위상 각 (deg)
- $\sigma$  : 연료-공기 혼합정도(%)
- $\Phi$  : 당량비
- $T_{in}$  : 예열공기온도

### 1. 서론

가스터빈을 이용한 발전시스템은 일반적인 화력 발전에 비하여 발생하는 공해 물질 배출량이 현저하게 적으며 효율 면에서도 높기 때문에 계속적으로 주목을 받고 있다. 하지만 업체들 간의 경쟁과 계속적으로 강화되고 있는 NOx배출규제, 환경 관련 법규로 인하여 차세대 가스터빈 연소기와 관련된 많은 연구들은 고성능 및 저배기에 집중되고 있다.

특히 질소산화물(NOx)의 경우는 가스터빈 연소에서 가장 제어가 어려운 배기 배출물질 중 하나이며, NOx는 크게 Thermal NOx, Fuel NOx, 그리고 Prompt NOx의 세 가지로 분류하고 있으며, 가스터빈 연소에서 발생하는 NOx는 고온연소에 의

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부  
E-mail : chjeon@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-3051 FAX : (051)582-9818

\* 부산대학교 대학원 기계공학부  
\*\* 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터(PC3)  
\*\*\* 부산대학교 기계기술연구원(RIMT) 기계공학부

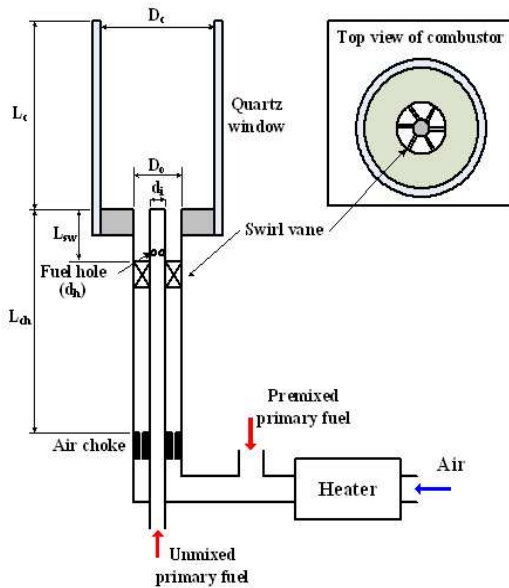


Fig. 1 Schematic of the dump combustor

한 영향으로 대부분 Thermal NOx로 구성된다. 이러한 Thermal NOx는 온도에 지배적이며 CO생성과 서로 반대되는 특성을 지니고 있다.

따라서 NOx 배출을 줄이기 위한 기술로 희박 예혼합 연소, 과농연소/급속냉각, 촉매연소와 같이 연소장 내의 화염 온도를 줄이기 위한 기술들을 적용하고 있으며,<sup>(1)</sup> 특히 희박 예혼합 연소는 다른 기술들에 비해 상용 가스터빈 엔진에 적용이 용이하고 NOx 수준을 급격히 저감 할 수 있기 때문에 주목을 받고 있다.<sup>(2)</sup>

희박 예혼합 연소는 초기에 연료와 공기를 혼합시켜 균일한 혼합기를 주연소 영역에 공급하고 당량비를 희박 가연한계에 가깝게 유지시킴으로서 화염온도를 낮추어 NOx 배출량을 상당히 저감시킬 수 있다. 또한 화염 내 온도가 1900K을 넘지 않아 체류시간이 길어져도 NOx 배출량이 증가하지 않으므로 체류시간이 길도록 연소기를 설계하여 불완전 연소생성물인 CO, UHC, soot의 배출을 줄일 수 있는 장점이 있다.<sup>(3)</sup> 특히 soot의 감소는 연소기 벽면으로의 복사에 의한 열전달을 감소시키는 효과가 있는 것으로 벽면을 냉각하기 위한 공기의 양을 감소시키는 효과가 있다. 그 결과 더 많은 양의 공기가 연소영역의 온도를 낮게 하는데 사용이 되어 연소를 좋게 한다.

그러나 희박 예혼합 연소를 통해 배기 배출물질의 저감을 확보할 수 있는 대신 압력과 (Pressure Wave) 와 열방출(Heat Release) 사이의

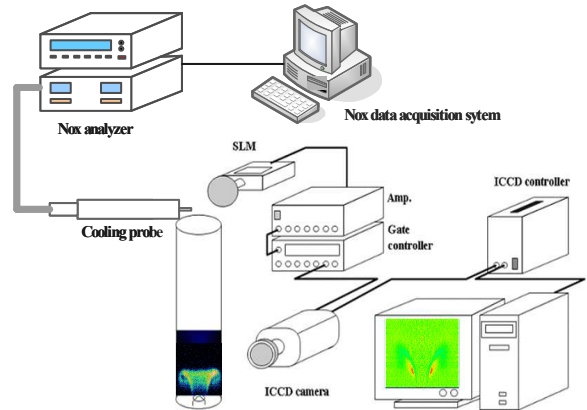


Fig. 2 Schematic of experimental setup

상호작용에 의해 연소불안정성이 발생할 수 있다.<sup>(4)</sup> 이러한 연소불안정의 발생으로 인하여 압력파에 의한 소음 및 진동이 연소기부에 생성되게 되고 가스터빈 주요부품에 악영향을 줄 수 있다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 가스터빈 연소기의 연소 현상을 모사한 모형 연소기에서 연료-공기의 혼합정도와 희박영역에서의 당량비가 NOx 배출량과 열 방출량에 미치는 영향을 살펴보고, 조건에 따른 연소불안정성을 평가하여 가스터빈 연소기에서의 NOx 배출저감을 위한 연소조건에 따른 영향에 대해서 알아보하고자 한다.

## 2. 실험장치

### 2.1 실험 장치

실험 장치의 구성은 크게 연소기와 데이터 취득부로 나눌 수 있다. Fig. 1은 본 연구에서 사용되어진 연소기의 개략도이고, Fig. 2는 OH 자발광 이미지 취득, NOx 측정, 음압의 고유 주파수 획득 등 데이터 취득을 위한 장치 구성도이다.

#### 2.1.1 연소기

Fig. 1은 본 연구에 사용된 모형 연소기로 연료-공기의 혼합정도, 공급공기 온도, 스월비, 당량비를 조절해 가며 실험할 수 있게 제작하였다. 본 실험에서는 연료-공기 혼합정도와 당량비만을 조절하여 실험을 진행하였다. 연소기는 직경 ( $D_0$ ) 12.5mm, 길이 ( $L_{ch}$ ) 500mm의 연료-공기 혼합부와 직경 ( $D_c$ ) 42mm, 길이 ( $L_c$ ) 410mm의 연소부로

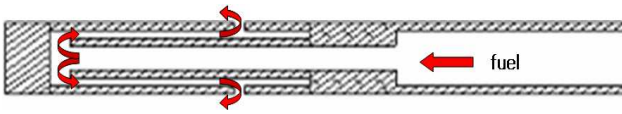


Fig. 3 Schematic of the inlet tube

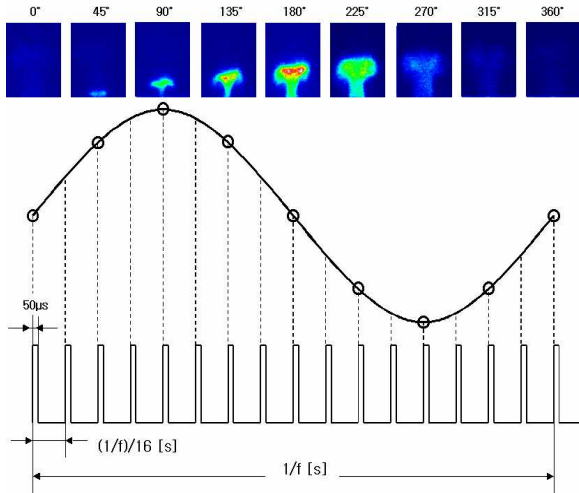


Fig. 4 Schematic of detecting position

구성되어 있다. 연소부는 가시화 및 광학적 접근이 가능토록 석영관을 사용하였다.

연료 및 공기는 질량유량계(MFC)를 사용하여 각각 조절 하였으며, 연료의 경우에는 연료-공기 혼합정도에 따른 변화량을 파악하기 위하여 서로 다른 두 위치에서 공급하였다. 하나는 히터를 통과한 650K으로 예열된 공기와 바로 혼합되어 공급되며, 다른 하나는 연료 관을 통해 덤프 면으로부터 상류방향으로 길이,  $L_{sw}$ , 40mm의 위치에서 지름,  $d_h$ , 1mm인 6개의 연료 분출공을 통해 원주 방향으로 초킹된 후 공급된다. 연료가 공급되는 연료 관의 설계는 Seo<sup>(5)</sup>의 연구를 참고하였으며 Fig. 3을 통해 개략도를 나타내었다.

연료-공기 혼합정도는 각 위치에서 공급되는 연료의 유량의 비로써 정의하며 식 (1)과 같이 표현한다.

$$\sigma = \left(1 - \frac{Q_{inner\ fuel}}{Q_{total\ fuel}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

연료-공기 혼합정도가 100%인 경우는, 안쪽의 연료 관을 통하여 공기와 혼합되지 않은 연료가 들어오지 않고, 바깥쪽 관을 통하여 연료-공기가 혼합되어 공급된다. 즉 모든 연료가 공기와 혼합된 상태에서 공급되는 예혼합 연소를 의미한다. 그러나 연료-공기 혼합정도가 0%인 화염의 경우

는 엄밀한 의미에서 확산화염을 의미하지는 않는다. 왜냐하면 안쪽의 연료 관에서 나오는 연료 공급 구멍으로부터 연소부까지의 길이, 약 40mm의 혼합길이를 가지고 있으므로 연소 전 연료-공기가 부분적으로 혼합될 수 여유가 있기 때문이다.

화염의 안정화와 외부 조건의 영향을 최소화하기 위하여 bluff-body를 사용하였으며 혼합기의 선회각도를 변화시키기 위한 선회기는 연소부로부터 50mm ( $L_{sw}$ ) 아래 부근에 설치하였다. 선회기는 연소실로 공급되는 혼합기를 고온의 연소 생성물과 잘 혼합 될 수 있도록 도와준다. 본 실험에서 사용된 선회기의 선회각도 ( $\theta_{sw}$ )는 45°이며 선회각도는 선회수로 정의하였다. 선회수는 Gupta 등<sup>(6)</sup>이 선회기의 형상에 기초해서 정의하였으며, 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$S_n = \frac{2}{3} \left[ \frac{1 - (D_h/D)^3}{1 - (D_h/D)^2} \right] \tan \theta_{sw} \quad (2)$$

식 (2)에 의해 계산된 선회기의 선회수는 0.83이 된다.

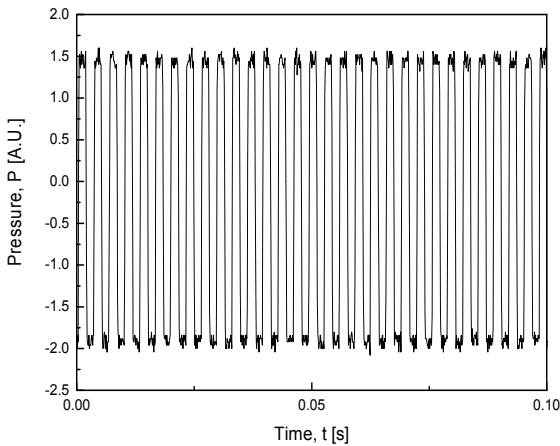
### 2.1.2 데이터 취득부

연소기에서 발생하는 음원을 실시간 측정하기 위하여 소음측정기(Sound Level Meter, SLM)를 사용하였다. 이 장치는 음원에서 발생하는 음압을 0.5초 간격으로 0.1dB씩 LCD 창에 나타내며 AC, DC 전압으로 출력이 가능하다. 측정범위는 Low : 35 ~ 100dB, High : 65 ~ 130dB 두 종류가 있으며, 실험시 High에 두고 응답시간은 125ms인 F (Fast Response) 상태에서 음압 정도를 측정 하였다. 위치는 연소기 끝부분에서 축 방향으로 50mm, 반경방향으로부터 70mm 떨어진 곳에 설치하였다.

SLM (Sound Level Meter) 에서 나오는 신호를 일정크기로 증폭시켜 게이트 조절기(Delay Generator)의 트리거 신호로 입력하여 ICCD 카메라와 동기 시켜 화염의 이미지를 획득하였다. 탄화수소 화염 내에서  $CH^*$ ,  $C_2^*$ ,  $OH^*$ 은 국소 열 방출과 전체 열 방출을 나타내는 지표로 사용되어 왔다.<sup>(7-9)</sup>  $OH^*$ 을 열방출의 지표로<sup>(7)</sup> 선형연구를 바탕으로 본 연구에서도 분광스펙트럼이 간단하고 감도가 좋으며 연소 반응에서 중요한 역할을 하

**Table 1** Experimental condition

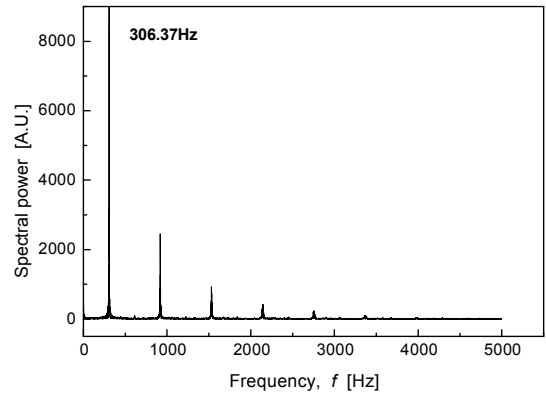
Parameter	Operating ranges
Degree of fuel-air mixing ( $\sigma$ )	0, 50, 100%
Inlet air temperature ( $T_{in}$ )	650K
Overall equivalence ratio ( $\Phi$ )	0.53, 0.60, 0.66, 0.74, 0.81
Mean velocity(V)	6.4 m/s
Swirl vain angle( $\Theta_v$ )	45°
Phase angle ( $\Theta$ )	0 ~ 360 deg.



**Fig. 5** Typical pressure trace with respect to time

는 OH\*을 측정하기 위하여 대역필터(중심파장 307nm, FWHM =10nm)를 장착하여 위상별로 OH\* 이미지를 측정하였다. Fig. 4는 OH\* 이미지 촬영을 위한 ICCD 카메라 작동 개략도를 나타내었다. SLM에서 획득한 주파수를 가지고 시간 단위로 변경하여 한 주기의 압력을 22.5°간격으로 16등분하여 각 위상에서 노출시간을 50μ로 50개의 화상을 얻어 적분하여 각 위상에서의 화염의 OH\* 이미지를 취득하였다.

연소에서 발생하는 NOx 배출량을 측정하기 위하여 NOx 분석기를 사용하였으며 본 장치의 정확도는 ±2ppm이며 측정범위는 0~200ppm 범위로 보정하여 측정하였다. Probe의 위치는 연소가스가 충분히 균일한 유동을 발달시킬 수 있는 지점과 외부 공기의 유입을 최소화 할 수 있는 위치를 고려하여 축 방향으로 20mm, 반경방향으로부터 0mm(축 중심) 지점에 고정하여 설치하였으며, 각 실험조건에 따른 NOx 배출량을 취득하여 배출특성을 평가하였다.



**Fig. 6** Frequency spectrum of an unstable flame in the combustor

연료-공기 혼합정도와 당량비에 의한 NOx 농도 변화와 열방출량을 변화를 확인하기 위하여 실험한 조건을 Table 1과 같이 결정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 주파수

연소 불안정이 발생한 경우 시간에 대한 음압의 변동을 확인 할 수 있다. Fig. 5는 희박 예혼합인 연료-공기 혼합정도 100%이고 당량비가 0.74일 때의 SLM에서 획득한 값을 음압의 변동 특성으로 나타내었다. 결과에서 나타낸 것과 같이 음압이 시간에 따라 사인과 형태의 일정주기를 가지는 것을 알 수 있으며, 지배적인 주파수를 알아보기 위하여 FFT 변환을 수행하였다. Fig. 6은 Fig. 5에서의 결과를 FFT 변환하여 나타낸 결과이다. Fig. 6에서 나타난 결과와 같이 전형적인 종파모드를 가지고 있는 것을 알 수 있으며 지배적인 주파수를 확인할 수 있다. 이러한 주파수는 음속과 특성파장의 관계로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (3)에서 주파수 ( $f$ ) 는 음속 ( $c$ ) 에 큰 영향을 받으며 음속 ( $c$ ) 는 연소기내 온도 ( $T$ ) 에 영향 받으므로 주파수와 연소기내 온도가 관련성 있음을 알 수가 있다.

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (3)$$

$\gamma$ 는 연소기내 공기의 비열비로 1.4이며 공기의 평균 분자량 ( $M$ ) 은 28.95g/mol로 측정된 주파수

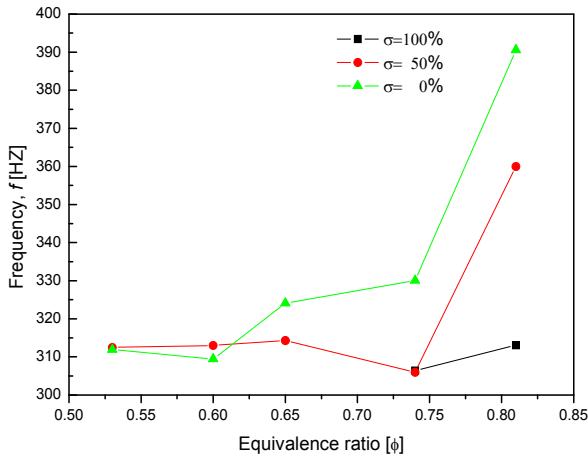


Fig. 7 Frequencies as a function of equivalence ratio at different fuel-air mixing quality degrees

를 이용하여 식 (3)에 적용하면 연소기 내 온도를 나타낼 수 있다. 여기서 나타내는 연소기 내 온도는 정확한 수치를 나타내는 것이 아니라 정성적인 온도임을 밝혀둔다. 또한  $\lambda$ 는 특성파장으로서 본 실험에 사용된 연소기는 길이/지름 비가 9.76으로 S. Sivasegaram의 실험결과<sup>(10)</sup>에 의하면 1/4 파 모드에 해당되는 것을 알 수가 있다.

Fig. 7은 당량비 및 연료-공기 혼합정도에서 따른 주파수를 변화에 대해서 표현하였다. Fig. 7에서 보듯 연료-공기 혼합정도가 증가할수록 주파수는 감소하는 경향을 확인 할 수 있었다. 이러한 경향은 식 (3)을 통해 유추해 볼 때, 특성파장이 고정된 상태에서 음속의 변화를 지배하는 연소기 내 온도의 감소가 주파수 감소를 초래한 것으로 사료된다. 또한 당량비를 증가 시킬 때에는 연료-공기 혼합정도가 미치는 영향과는 반대로 연소기에서 주파수가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 희박 영역에서 연료-공기 혼합정도가 감소하거나 당량비가 증가하였을 시 연소기내 온도가 증가함을 간접적으로 확인할 수가 있다. 일반적으로 연료-공기 혼합정도 증가할수록 연소반응을 촉진시키지만, 2장에서 설명하고 있는 연료공기의 혼합정도는 확산화염과 부분 예혼합, 예혼합 화염의 정도를 나타내는 기준으로, 연료-공기 혼합정도의 증가는 예혼합 화염의 형성을 의미하며, 특히 희박영역에서는 상대적으로 낮은 온도를 유지함으로써 thermal NOx를 줄이고자 하는 기술을 적용함에 있어 혼합정도가 높은 희박 예혼합 화염의 온도가 감소하는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다.

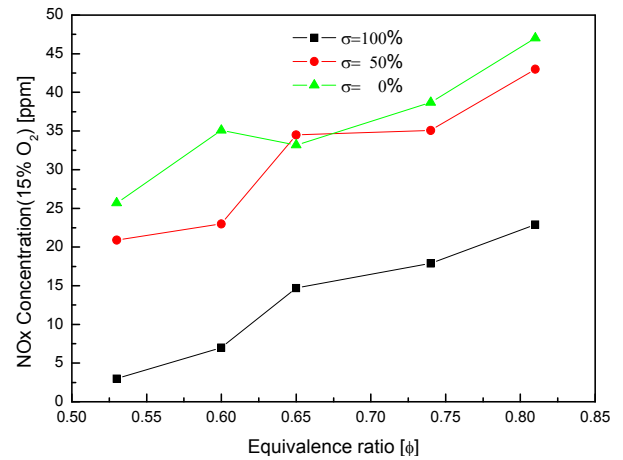


Fig. 8 NOx emissions as a function of equivalence ratio at different fuel-air mixing quality degrees

부가적으로, Fig. 10의 열방출량 결과를 참고하면 혼합도가 증가하는 예혼합 화염의 경우에서 열방출량이 가장 낮은 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 연료-공기 혼합정도의 증가로 화염 내의 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2 NOx 배출 특성

희박영역에서 연료-공기 혼합정도와 당량비가 NOx 배출 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 연료-공기 혼합정도 및 당량비를 달리하여 NOx 농도를 측정하였다. 기존 실험들은 연료량을 고정시킨 후 공기량을 변화시켜 당량비 및 혼합정도를 변화시킨 경우가 많았으나<sup>(11-13)</sup> 본 연구에서는 연소기 출구부에서 나오는 속도를 고정시킨 후 연료량과 공기량을 동시에 조절하여 실험을 진행 하였다. 속도는  $6.9 \pm 0.4$  m/s이며 NOx 농도의 측정결과는 Fig. 8과 같이 나타내었다. 결과에서 보듯 연료-공기 혼합정도에 따라서 NOx 농도가 달라지는 것을 확인할 수 있었으며 연료-공기 혼합정도가 100% 인 경우 NOx 농도가 현저히 낮음을 확인할 수 있었다. 당량비에 따른 NOx 농도 역시 당량비가 증가 할수록 농도가 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 연소장 내 온도가 떨어짐으로써 Thermal NOx의 감소 또는 NOx 발생 메커니즘의 변화에 의한 것으로 예측된다. NOx 규제 측면에서 희박 예혼합 조건에서 연소가 이루어져야 함을 보여주는 결과이며 계속적으로 강화 되고 있는 NOx 규제에 만족하기 위해서는 희박 예혼합 연소에 대한 연구가 주요한 과제라는 것을 알려주는 결과라고 하겠다.

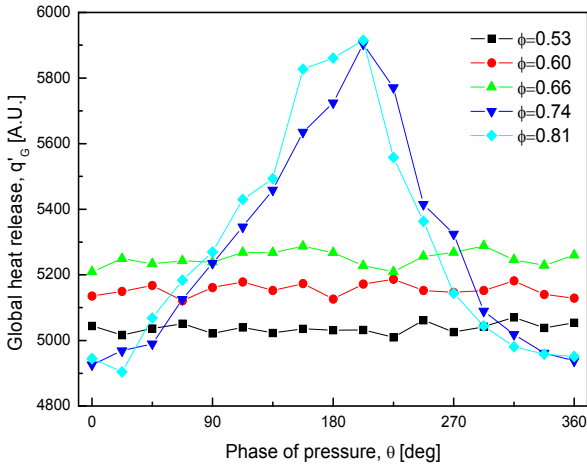


Fig. 9 Global heat release rate with phase of pressure

3.3 전체 열 방출률

NOx 배출량 특성을 알아보기 위하여 진행한 동일한 조건에서 연료-공기 혼합정도 및 당량비가 전체 열 방출량의 어떠한 영향을 나타내는 지 알아 보았다. 희박 예혼합 연소에서 OH\*, CH\*, C2\* 등의 자발광은 반응 영역의 위치와 국소, 전체 열 방출율을 나타내는 지표로 많은 연구자들에 의해 사용되어지고 있으며,<sup>(14,15)</sup> 이러한 자발광 이미지에서 열 방출율은 다음과 같은 방법으로 구해진다. 2차원 자발광 강도(I<sub>2D</sub>)는 국소 화염 단면적(A<sub>local</sub>)과 국소 자발광 강도(I<sub>local</sub>)로 다음과 같이 표현된다.<sup>(13)</sup>

$$I_{2D} = I_{local} \cdot A_{local} \quad (4)$$

또한, 2차원 열방출은 다음과 같이 표현된다.

$$q_{2D} = q_{local} \cdot A_{local} \quad (5)$$

식 (5)를 국소 단면적에 관하여 전개하여 식 (4)에 대입하면

$$I_{2D} = C_{2D} \cdot q_{2D} \quad (6)$$

C<sub>2D</sub>는 국소 화염 온도와 화염 온도에 영향을 주는 요소들에 의존하는 상수로서, 당량비와 공급 온도를 일정하게 고정하고 화염온도의 영향은 일정하다고 가정하였을 경우, 2차원 자발광 강도는 이미지 내에서 2차원 열방출을 나타낸다.<sup>(13)</sup>

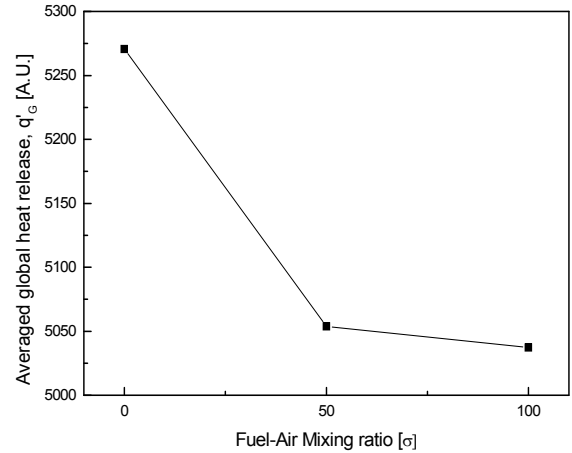


Fig. 10 Averages global heat release rate with fuel-air unmixedness

당량비가 일정한 경우 연소기내 화염온도는 공간적 위치에 따라 차이를 보이지만, C<sub>2D</sub>를 일정하다는 가정 하에서 2차원 열방출을 구하였다. 그리고 그 중에 비교적 강도가 강하고 측정이 용이한 OH\* 를 측정하여 강도를 표시하였다.<sup>(11,13)</sup>

Fig. 9는 연료-공기 혼합정도가 100%로 고정시킨 후 당량비를 변화 시켜 얻은 열 방출량을 나타내었다. 당량비에 따른 열 방출량은 당량비가 증가할수록 증가함을 확인 할 수 있었으며, 연소 불안정이 나타내는 경우에는 위상별로 열 방출량이 변화함을 확인 할 수 있었으며 180° 부근에서 가장 큰 열 방출량을 확인할 수 있었다. 이는 당량비 0.74와 0.81인 조건에서 연소불안정이 발생이 되고, 이 연소불안정 영역에서 화염의 열 발생량이 Peak가 되는 지점이기 때문이다.

Fig. 10은 당량비 0.53에서 연료 공기 혼합정도에 따른 열 방출량 특성을 나타냈으며 혼합정도가 적어질수록 열 방출량이 증가함을 확인 할 수 있었으며 Fig. 8에서의 NOx 배출 특성 결과와 비교하였을 때, 열 방출량이 증가함으로써 화염 내의 온도가 비교적 증가하여 NOx 배출량이 상대적으로 증가함을 확인 할 수가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 모형 가스터빈 연소기에서 연료-공기 혼합정도 및 당량비를 조절하여 주파수 측정, NOx농도 측정 및 열 방출량을 측정된 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 연소 불안정이 발생 시 연소기 내 음압의 측정결과를 통해 주파수를 확인한 결과, 연료-공기의 혼합정도 및 당량비가 주파수에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었으며, 연료-공기 혼합정도의 증가는 주파수의 감소를 알 수 있었으며 당량비의 증가는 주파수의 증가를 나타내었고, 주파수 관계식으로부터 화염온도를 예측할 수 있었다.

(2) NO<sub>x</sub> 배출 특성을 확인한 결과, 당량비의 증가하면 NO<sub>x</sub> 배출 농도는 증가함을 재확인하였고, 또한 연료-공기 혼합정도의 증가는 희박 예혼합 화염을 형성하면서 NO<sub>x</sub> 농도를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

(3) 각 연료-공기 혼합정도 및 당량비 조건에서의 압력 위상에 따른 전체 열방출량은 연료-공기 혼합정도가 증가할수록 감소하고 당량비가 증가함에 따라 증가하며 연소 불안정이 발생한 경우에는 압력 위상에 따라서 열 방출량이 변화하는 것을 확인 할 수 있었다.

(4) 주파수, NO<sub>x</sub> 배출 농도 및 열 방출량은 서로 상관관계를 가지고 있음을 보여 주었다. 열 방출량 증가는 NO<sub>x</sub> 농도 증가 및 주파수 증가를 열 방출량 감소는 NO<sub>x</sub> 농도 감소 및 주파수 감소를 확인 할 수 있었다. 따라서 연료-공기 혼합정도 및 당량비 변화를 통해서 NO<sub>x</sub> 농도, 주파수 및 열 방출량을 조절할 수 있다.

위의 결론을 통해 희박 예혼합 화염에서의 저온 특성을 통한 NO<sub>x</sub> 저감효과를 확인하였고, 가스터빈 연소기의 적용가능성을 재확인 하였다.

## 후 기

이 연구에 참여한 연구자는 2단계 BK21 사업과 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다

## 참고문헌

(1) Wulff, A. and Hourmouziadis, J., 1997, "Technology Review of Aeroengine Pollutant Emissions," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 8, pp. 557~572.  
 (2) Lefebvre, 1999, "Gas Turbine Combustion," 2nd Ed, Taylor & Francis.  
 (3) Leonard, G. and Stegmaier, J., 1993, "Development

of an Aero-derivative Gas Turbine Dry Low Emission Combustion System," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 116, pp. 542~546.

- (4) Jones, C. M., Lee, J. G. and Santavicca, D. A., 1999, "Closed-loop Active Control of Combustion Instabilities Using Subharmonic Secondary Fuel Injection," *J. of Propulsion and Power*, Vol. 15, No. 4, pp. 584~590.  
 (5) Seo, S., 1999, "Parametric Study of Lean Premixed Combustion Instability in a Pressurized Model Gas Turbine Combustor," *Ph.D Thesis*, The Pennsylvania State University.  
 (6) Gupta, A.K., Lilley, D. G. and Syred, N., 1984, "Swirl Flows," *Abacus Press, Tuhbridge Wells*, England.  
 (7) 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.  
 (8) Samaniego, J. M., Egolfopoulos, F. N. and Bowman, C. T., 1995, "CO<sub>2</sub>\* Chemiluminescence in Premixed Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 109, pp. 312~332.  
 (9) 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.  
 (10) Sivasegaram, S. and Whitelaw, J. H., 1987, "Oscillations in Axisymmetric Dump Combustors," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 42, pp. 413~420.  
 (11) Jong Ho Lee, Dae Hyun Kim, Chung Hwan Jeon and Young June Chang, 2004, "Experimental Investigation on Flame Structure and Emission Characteristics in a Lean Premixed Model Gas Turbine Combustor," *Journal of KAME(B)*, Vol. 28, No. 4, pp. 425~432.  
 (12) Yong ki Jung, Jeong seog Oh, Chung Hwan Jeon and Young June Chang, 2005, "Detailed Local Chemiluminescence Measurement (OH\*, CH\*, C<sub>2</sub>\*) and Nitrogen Oxides Emissions in Laminar Partially Premixed CH<sub>4</sub>/Air Flames," *Journal of KAME(B)*, Vol. 29, No. 2, pp. 263~270.  
 (13) 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.

(14) 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.

(15) 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