

# 불안정 가스 터빈 연소기에서 부분 예혼합이 화염구조와 NO<sub>x</sub> 배출 특성에 미치는 영향

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

## Effects of Partial Premixing on Flame Structure and NO<sub>x</sub> Emission Characteristics in an Unstable Gas Turbine Combustor

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

### ABSTRACT

Experiments were carried out in an atmospheric pressure, lab-scale gas turbine combustor to see the effect of partial premixing on unstable flame structure and NO<sub>x</sub> emission characteristics. The swirl angle is 45 deg., fuel-air mixing degrees were varied 0, 50 and 100% respectively at equivalence ratio ranging from 0.53 to 0.79. The evolution of phased-locked OH chemiluminescence images were acquired with an ICCD. NO<sub>x</sub> emission characteristics were also investigated at each experimental condition. The effect of the fuel-air mixing degree on the flame structure was obtained from phase-locked OH\* images. And it was obtained from local heat release characteristics that the information about the region which the combustion instability was amplified or damped. It also could be confirmed that  $\sigma$  has greatly influence on NO<sub>x</sub> emission characteristics at lean regimes. It would be expected that it could provide invaluable data for understanding the mechanism of combustion instability.

### 초 록

본 연구는 연료-공기 혼합정도가 불안정 화염 구조와 NO<sub>x</sub> 배출 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 대기압, 모형 가스 터빈 연소기에서 실험을 수행하였다. 선회각은 45°이며, 연료-공기 혼합정도는 당량비 0.53에서 0.79 범위에서 0, 50, 100%로 변화시켰다. 화염구조를 파악하기 위해, 당량비 0.79에서 ICCD를 사용하여 위상 동기화된 OH 자발광 이미지를 취득하였다. NO<sub>x</sub> 배출은 각 상기 실험조건에서 NO<sub>x</sub> 분석기를 이용하여 취득하였다. 위상에 대한 OH\* 이미지를 취득함으로써 연료-공기 혼합정도가 화염의 구조에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 또한 국소 열방출의 특성을 통해, 연료-공기 혼합정도에 따른 연소불안정이 발생하거나 소멸되는 영역에 대한 정보를 얻을 수 있었으며, 혼합정도에 따른 NO<sub>x</sub> 농도를 측정함으로써 회박 연소 영역에서는  $\sigma$ 가 커질수록 NO<sub>x</sub> 발생이 적음을 확인할 수 있었다. 이런 결과들은 연소불안정 현상의 메카니즘을 이해하는데 중요한 기초자료로 사용될 것으로 기대된다.

Key Words: Fuel-Air Mixing degree( $\sigma$ , 연료-공기 혼합도), OH Chemiluminescence(OH 자발광), Swirl angle(선회각), Abel-Inversion(아벨 역변환), Rayleigh index(레이라이 지수)

## 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<sup>(1,2)</sup>. 하지만 희박 예혼합 연소는 연소불안정을 일으키기 쉬운 단점을 가지고 있다. 연소불안정은 연소기 자체의 압력파와 열방출 사이의 상호작용으로 발생하게 된다<sup>(3)</sup>. 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<sup>(4)</sup>. 많은 연구자들은 이런 개념에 기초해서 연소불안정을 줄이기 위한 연구를 수행하고 있다.

연소불안정에 영향을 미치는 인자로는 공급온도( $T_{inlet}$ ), 연료-공기 혼합정도( $\phi$ ), 당량비( $\phi$ ), 체류시간, 공급되는 연료 분포 등 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 연료-공기 혼합정도에 중점을 두었다.

연소불안정에 대한 연료-공기 혼합정도의 영향을 살펴보기 위해, 연소불안정과 밀접한 관련이 있는 열방출을 측정하였다. 희박 예혼합 연소에서  $OH^*$ ,  $CH^*$ ,  $CO_2^*$  등의 자발광은 반응 영역의 위치와 전체, 국소 열방출률을 나타내는 지표로 많이 사용되고 있다<sup>(5-7)</sup>. 자발광의 측정은 대역필터를 장착한 ICCD를 이용하여 이루어진다.

따라서 본 연구에서는 비교적 신호세기가 강한  $OH^*$  이미지를 ICCD를 통해 얻음으로써, 연료-공기 혼합정도가 연소불안정성과 배기배출물의 특성에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 또한 선 적분된 이미지를 아벨 역변환시켜서 화염의 중앙 단면 정보를 얻을 수 있었으며<sup>(8-10)</sup>, 이를 통해 연료-공기 혼합정도에 따른 레일리 지수 변화를 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

#### 2.1.1 연소기

실험에 사용된 동축 덤프 연소기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 본 연소기는 이전의 선행 연구자의 연소기를 더욱 발전시킨 것으로, 이전 연소기와 크게 다른 점은 실제 가스터빈 연소기의 연소 현상에 더욱 근접하게 모사하기 위해 선회기를 도입한 것과 보염기의 형태를 십자형에서 덤프면으로 변경한 것이다. 연소기는 직경 12.5mm, 길이 550mm의 혼합부와 직경 42mm, 길이 410mm의 연소부로 구성되어 있다. 혼합부는 연소시 발생하는 급격한 압력변동의 영향이 공급되는 혼합기에 미치는 영향을 최소화하기 위해 덤프면 상류 450mm 부근에서 초킹되도록 설계하였다. 그리고, 연료-공기의 혼합도를 변화시키기 위해, 혼합되지 않은 연료가 초킹된 후 공급될 수 있도록 6개의 구멍을 덤프면 상류 24mm에 뚫었다. 또한 혼합기의 선회 강도를 변화시키기 위해, 덤프면 상류 45mm 부근에 선회기를 설치하였다. 연소부는 광학 측정이 가능하도록 석영관을 사용하였으며, 혼합부와 연소부는 스테인리스로 된 어댑터로 연결되어 있다. 석영관과 어댑터 사이를 연소로 인한 열팽창을 고려하여 0.5mm의 공간을 두었으며, 이 공간은 석면으로 밀봉하여 석영관과 어댑터를 연결하였다.

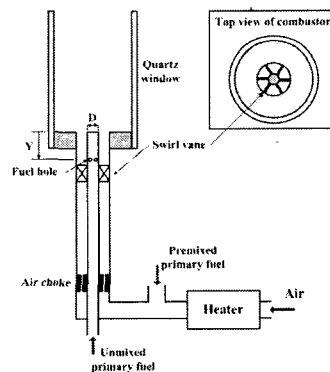


Fig. 1 Schematic of dump combustor

\* 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 부산대학교 기계공학부

연락처자, E-mail: chjeon@pusan.ac.kr

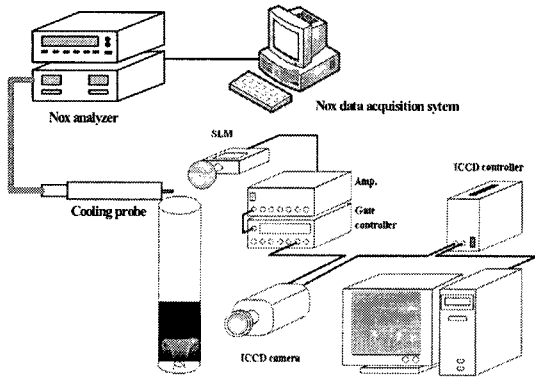


Fig. 2 Schematic of experimental setup

연료는 메탄(CH<sub>4</sub>)을 사용하였고, 부분예혼합의 효과를 알아볼 수 있도록 두 곳에서 공급하였다. 하나는 히터를 통과한 공기와 바로 혼합되어 공급되며, 다른 하나는 직경 8mm의 관을 통해 덤프면 상류로부터 40mm 위치에서 6개의 구멍을 통해 원주 방향으로 초킹된 후 공급된다. 연료는 연료-공기 혼합정도(φ)가 100, 50, 0%의 조건으로 공급되며, 혼합부를 통해 연료가 모두 공급되는 경우를 100%, 덤프면 상류의 6개의 구멍을 통하여 모든 연료가 공급되는 경우를 0%로 정의한다.

실제 가스터빈의 흡입공기의 온도(180~630 °C)와 유사한 조건에서 실험하기 위해 발열용량 3.5kW인 히터를 사용하였다. 실험은 덤프면에서의 혼합기의 온도를 300°C로 일정하게 유지하여 수행하였다. 이전 연소기에 대한 구체적인 사양은 참고문헌에 구체적으로 제시되어 있다.<sup>(11)</sup>

### 21.2 OH<sup>\*</sup> 이미지 취득 및 배기 배출물 측정 장치

연소기내에서 연소불안정이 발생할 경우 화염의 구조를 관찰하기 위한 실험장치의 개략도 및 배기배출물 특성을 측정하기 위한 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

연소기에서 발생하는 음원을 실시간 측정하기 위해 소음측정기(SLM, Sound Level Meter)를 사용하였으며, 측정의 일관성을 위해 연소기 끝단에서 축방향으로 50mm, 반경방향으로 70mm 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 OH<sup>\*</sup>을 측정하였다. 각 위상에서 50개의 이미지를 취득하여 평균하였다.

배기배출물 특성을 조사하기 위해 연소기 끝단으로부터 20mm 떨어진 곳에 냉각 프로브를 설치하여 NO<sub>x</sub> 량을 측정하였다. NO<sub>x</sub> 측정시 사용된 분석기는 Teledyne instruments Inc.의 M-200AH 모델을 사용하였다.

### 22 실험방법

연료-공기 혼합정도가 연소불안정에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 위상에 동기화된 OH<sup>\*</sup> 자발광 이미지를 취득하였다. 탄화수소 화염내에서 CH<sup>\*</sup>, CO<sub>2</sub><sup>\*</sup>, OH<sup>\*</sup>은 국소 열방출과 전체 열방출을 나타내는 지표로 사용되어 왔다.

특히, OH<sup>\*</sup>을 당량비에 대한 지표<sup>(12)</sup> 또는 열방출의 지표<sup>(13)</sup>로 실험한 선행연구에 기초하여, 본 연구에서도 비교적 강도가 강하고 측정이 용이한 OH<sup>\*</sup>을 불안정 연소조건에서 압력변동의 위상에 따라 측정하였다. 당량비를 고정시키고 공급되는 공기 유량을 조절하여 연료-공기 혼합정도에 따른 불안정 연소 영역을 측정하였다. 불안정 연소가 발생할 경우 화염은 연료-공기 혼합정도가 0, 50, 100%로 변함에 따라 346.1~351.6Hz, 즉 약 2.84~2.89ms의 주기로 진동한다. 한 주기의 압력을 22.5°간격으로 16등분하여 각 위상에서 노출시간 50μs로 50개의 화상을 얻어 평균함으로써 각 위상에서의 이미지를 취득하였다. 선적분된 이미지의 아벨 역변환은 Dash<sup>(14)</sup>의 보고를 근거로 한 Hwang<sup>(15)</sup>의 연구를 참조하였다.

배기 배출물 농도 측정 시 연소실 끝단으로부터 20mm 위치에 프로브를 설치하여 실험을 수행하였다. 배출되어지는 배출물이 안정화된 후 측정하기 위하여 연소기 운전 조건을 변화시키고 약 5분 후에 NO<sub>x</sub> 량을 측정하였다.

실험조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Range
Mixing quality, $\sigma$ [%]	100, 50, 0
Inlet air temperature, $T_0$ [K]	570
Swirl angle, $\Theta_{sw}$ [degree]	45
Equivalence ratio, $\phi$	0.53 ~ 0.79
Mean velocity, $V$ [m/s]	19
Phase angle, $\Theta$ [degree]	0~360

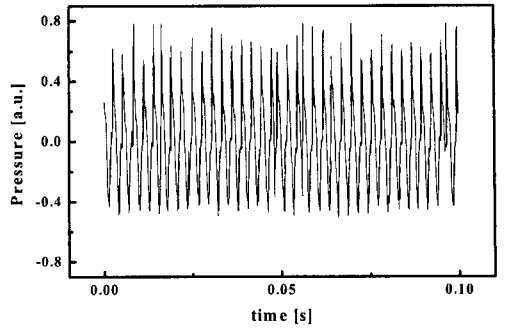
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 연소기 특성

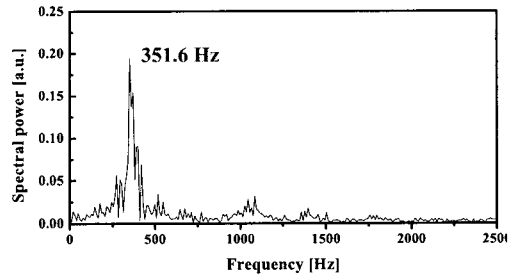
연료-공기 혼합정도가 100%일 때, 연소기에서 연소불안정성이 발생한 경우, 시간에 대한 음압의 변동을 FFT 변환을 하면 Fig. 3과 같이 351.6 Hz의 단일 주파수만을 가지는 불안정 연소특징을 나타낸다.

#### 3.2 불안정 연소의 화염구조

연료-공기 혼합정도가 연소불안정에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 열방출의 지표로 사용되는 OH\* 이미지를 압력 변동에 따른 시간 분해능에 따라 취득하였다. 이는 선 적분된 정보로써 화염의 단면 구조를 나타내지는 못한다. 따라서 화염을 축대칭으로 가정하여, 아벨 변환과정을 통해



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Typical pressure trace with respect to time (b) Frequency spectrum of an unstable flame in the combustor ( $\sigma = 100\%$ )

연료-공기 혼합정도에 따른 화염의 단면정보를 얻었다. 그 결과를 Fig. 4에 나타내었으며, 좌측 반평면은 선 적분된 이미지를, 우측 반평면은 아벨 변환된 이미지를 나타낸다.

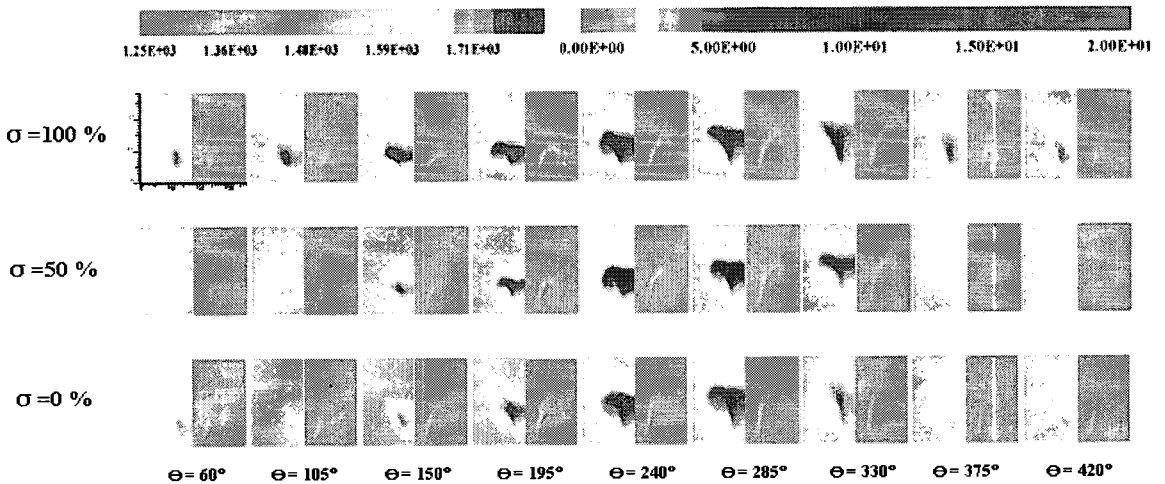


Fig. 4 Phase-locked OH\* images during one period of unstable combustion. Left half of the picture is the line-of-sight image and the right half is the Abel inverted one.

이 2차원 이미지는 불안정 연소 동안 화염 구조의 시간에 따른 변화와 불안정 현상 자체에 관한 통찰력을 제시해 준다. 본 연구에서는 선회각도가 0.83(선회각 45°)인 선회기가 장착된 연소기를 사용하였다. 화염의 변화 추이는 위상이 증가함에 따라 선회기의 영향으로 재순환 영역이 급속하게 발생하였다가, 위상이 더 커짐에 따라 재순환영역이 사라지면서 화염 초기의 형상으로 되돌아오고 있다. 또한  $\sigma$ 가 작은 값을 가질수록, 즉 연료-공기의 혼합이 덜 될수록 선회기에 의한 재순환 영역의 반경이 크게 감소함을 알 수 있다. 그리고 혼합정도가 감소함에 따라 화염의 최대 신장 길이도 증가하는 것을 알 수 있다. 열방출은 화염이 성장하는 60°~285°에서 활발하고 화염이 소멸되는 285°~60°에서는 작아짐을 알 수 있다. 이처럼 선회기가 있는 불안정 연소기에서의 화염구조는 선회기가 없는 연소기에서의 화염구조와 뚜렷한 차이가 있음을 알 수 있다. 선회기가 없는 연소기의 화염구조에 대한 결과는 본 저자들의 이전 논문에 구체적으로 다루고 있다.<sup>(11)</sup>

### 3.3 국소 열방출률

Fig. 4에서 살펴본 바와 같이, 2차원 화염구조 이미지는 화염내 열방출의 강도와 위치뿐만 아니라 한 주기에서의 시간에 따른 열방출 변화를 보여준다.

이를 측정된 압력 결과와 조합하면, 아래 식으로 표현되는 레일리 지수 분포  $R(x,y)$ 를 구할 수 있다.

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

$R(x,y)$ 는 열방출 변동과 압력변동사이의 상관관계를 나타내는 척도로서, 임의의 지점(x,y)에서의 연소불안정 발생 또는 소멸 특성을 나타낸다. 식(1)에서  $p'(t)$ 는 국소 압력 변동으로, 압력파의 파장이 화염길이보다 훨씬 클 경우 압력은 열방출 영역에 걸쳐 공간적으로 균일하다고 가정되어질 수 있다. 그러므로 압력은 단지 시간의 함수로 표현이 가능하다.<sup>(17)</sup>

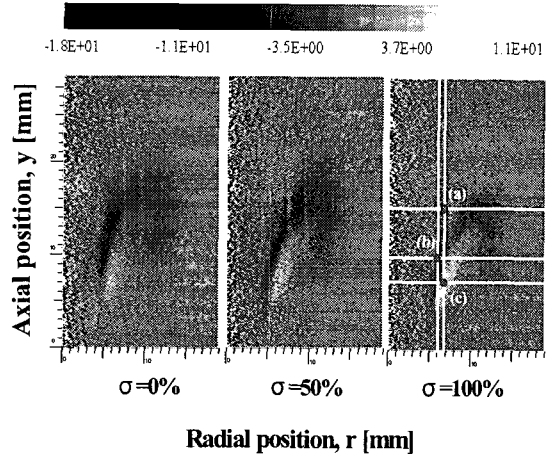


Fig. 5 2-D Rayleigh index distributions obtained at different mixing degree conditions (1pixel=103 $\mu$ m)

Fig. 5에 각 연료-공기 혼합정도에 대한  $R(x,y)$  분포를 나타내었다. 밝은 부분은 양(+)의 값으로 열방출과 압력변동이 동일 위상(in-phase) 관계에 있으며, 이 경우 열방출은 압력 변동을 증폭시키게 된다. 반대로, 어두운 부분은 음(-)의 값을 가지며 열방출과 압력 변동의 위상이 어긋난(out-of-phase) 관계에 있으며, 이 경우 열방출은 압력 변동을 소멸시키게 된다. Fig. 5에서는 연소불안정이 소멸되는 영역이 연료-공기 혼합정도가 감소함에 따라 점점 화염의 중심축 방향으로 이동하면서 그 정도가 증가함을 알 수 있다. 또한 연소불안정이 증가하는 영역은 연료-공기 혼합정도가 증가함에 따라 중심축에서 멀어지며 그 정도가 증가하였다.

따라서 본 연구에서는 연소불안정이 증가하는 영역과 소멸되는 영역인 Fig. 5의 (a), (b), (c) 세 지점에서의 연료-공기 혼합정도에 따른 국소 열방출의 변화를 살펴보았으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 (a)와 (b)는  $R(x,y)$ 가 음(-)인 영역으로 연료-공기 혼합정도가 커질수록 국소 열방출은 감소하고, 위상은 압력과 상반되는 경향을 나타내고 있다. (c)는  $R(x,y)$ 가 양(+)인 영역으로 연료-공기 혼합도가 증가함에 따라 국소 열방출은 증가하고, 위상은 압력과 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

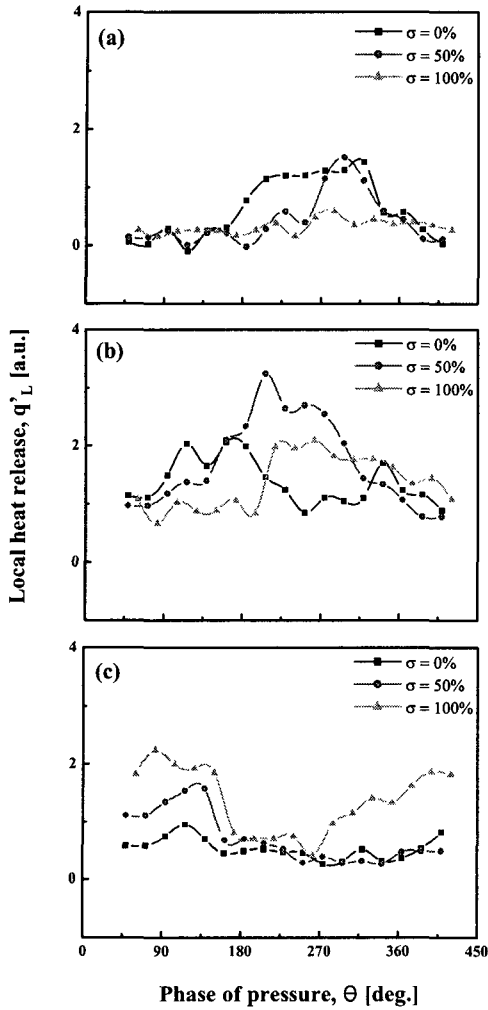


Fig 6. Local heat release rate obtained at three references locations indicated in Fig. 5

특히 (c) 지점은 연료-공기 혼합정도에 대한 국소 열방출의 경향이 뚜렷하게 나타났다. 요약하자면, 국소 열방출의 위상변화가 Fig. 5에서  $R(x,y)$ 가 양(+)인 영역에서는 압력변동의 위상과 일치하고 음(-)인 영역에서는 압력변동과 반대되는 경향을 나타냈다. 이로써 연료-공기 혼합정도의 변화에 따른  $R(x,y)$ 의 변화 경향을 확실히 알 수 있었다. 이러한 접근은 능동제어에 있어서 추가적인 이차 연료의 공급 없이도 연료-공기 혼합정도를 변화시킴으로서 연소불안정을 제어하기 위한 정보를 제공해 줄 수 있을 것으로 사료된다.

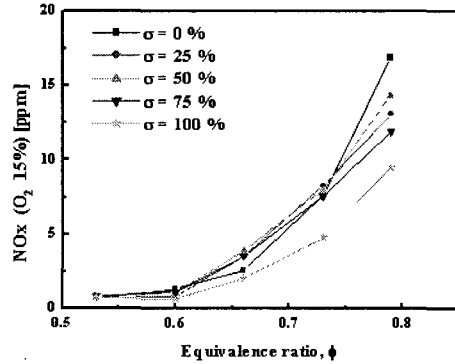


Fig. 7 NOx emission characteristics at different fuel-air mixing degree conditions

### 3.4 배기배출물 특성

일정한 속도조건에서 연료유량을 2200~3300 [cc/min] 까지 변화시켜가며 혼합정도에 따른 NOx 배출 특성을 살펴보았으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 혼합정도에 따른 NOx 결과를 살펴보면, 희박 연소 영역에서는 연료-공기 혼합이 잘 되었을 때가 NOx 발생이 적음을 확인할 수 있다. 이는 연료-공기 혼합정도의 제어가 NOx 규제를 만족시키기 위해 중요하다는 것을 나타내는 것이다. 이러한 NOx 배출 특성은 연소불안정이 발생함에 따라 Zeldovich 기구에 의한 열적 NOx의 감소 또는 NOx 발생 메커니즘의 변화에 의한 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 불안정 모형 가스터빈 연소기에서 연료-공기 혼합정도가 연소 불안정에 미치는 영향을 각 위상에서 획득한 OH\* 이미지와 각 조건에서의 NOx 배출 특성을 획득함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 연료-공기 혼합정도에 따라 위상에 대한 화염의 구조가 뚜렷한 차이를 보였으며, 혼합정도가 증가함으로써 선회기에 의한 화염의 재순환 영역이 중심축으로부터 바깥쪽으로 이동함을 확인할 수 있었다. 또한 화염의 신장 길이는 혼합정도가 감소함에 따라 증가하는 것을 확인할

수 있었다.

(2) 국소 R(x,y)분포 결과로부터, 각 연료-공기 혼합정도에서 연소불안정을 증폭시키거나 소멸시키는 영역에 대한 정보를 얻을 수 있었다.

(3) 각 연료-공기 혼합정도에 따른 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 파악함으로써, 회박 연소 영역( $\phi=0.53 \sim 0.79$ )에서는 연료-공기 혼합이 잘 될수록 NO<sub>x</sub> 발생이 적음을 확인할 수 있었다.

### 후기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었습니다.

### 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 Radcal 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.