

# 희박 예혼합 정도에 따른 모형 덤프 가스터빈 연소기의 화염 구조와 NO<sub>x</sub>배출 특성

유혜연<sup>†</sup>, 전충환\*, 장영준\*\*

## Characteristics of Flame Structure and NO<sub>x</sub> Emission in a Dump Gas Turbine as Fuel-Air Mixing Degrees

Hye Yeon Ryu, Chung Hwan Jeon and Young June Chang

**Key Words:** Lean-premixed(희박예혼합), Fuel-Air Mixing degree(연료-공기혼합도), Rayleigh index(레이레이지수), OH Chemiluminescence(OH자발광)

### 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 ration ranging from 0.53 to 0.79. The evaluation 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.

### 기호설명

a : 음속(m/s)

$d_h$  : 연료 분사 구(mm)

$d_i$  : 내부 관 지름(mm)

f : 연소 불안정 주파수 (Hz)

l : 연소기 길이 (m)

$p'$  : 압력변동(A.U.)

$q'$  : 열 방출 변동 (A.U.)

$D_c$  : 연소실 지름(m)

$D_o$  : 외부 관 지름(m)

I : 라디칼 강도(A.U)

$L_c$  : 연소실 길이(m)

R : 기체상수(kJ/kmol · K)

R(x) : 레일라이 지수

$S_n$  : 스월 수

$T_0$  : 주입 공기 온도(K)

$T'$  : 연소기에서의 가스온도(K)

T : 연소 불안정 주기(ms)

V : 유동의 평균속도(%)

$\Theta$  : 위상 각(degree)

$\Theta_{sw}$  : 스월 각(degree)

$\rho$  : 덤프가스터빈연소기 내의 가스밀도(Kg/m<sup>3</sup>)

<sup>†</sup> 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

E-mail : June-hy0105@hanmail.net

TEL : (051)510-3035 FAX : (051)582-9818

\* 회원, 부산대학교 기계공학부

\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

$\sigma$  : 연료-공기 혼합정도(%)  
 $\phi$  : 등가율

## 1. 서론

고성능 연소 시스템의 필요성과 더불어 환경에 대한 전 세계의 관심이 증대되면서 가스터빈 연소시 발생하는 배기가스 규제도 날로 엄격해지고 있다.

NOx 배출량을 저감시키기 위한 기술 중에서 희박 예혼합 연소는 초기에 연료와 공기를 예혼합시켜 균일한 혼합기를 주 연소 영역에 공급하고, 당량비를 희박 가연한계에 가깝게 유지시킴으로써 화염온도를 낮춰 NOx를 상당량 저감시킬 수 있다. 그리고 낮은 화염온도에서는 체류시간이 길어져도 NOx 양이 증가하지 않아<sup>(1)</sup>, 체류시간이 길도록 연소기를 설계하여 NOx 배출은 저감시키면서, CO 및 UHC를 줄일 수 있는 장점도 있다. 하지만 희박 예혼합 연소의 큰 단점은 연소기 자체의 압력과 열방출 사이의 상호작용으로 인한 연소불안정이 일어나기 쉽다는 것이다. 이러한 큰 압력변동으로 인해 발생하는 연소불안정은 연소기 자체를 손상시킬 뿐 아니라 상당한 소음을 발생시키게 된다.

따라서 희박 예혼합 연소시 문제가 되는 연소불안정에 대한 연구가 많은 연구자들에 의해 진행되고 있다. 특히 동축 모형 가스터빈 연소기내의 연소불안정 현상에 대한 연구는 다른 연구자에 의해 이미 수행되었다.<sup>(5)</sup>

하지만, 이 같은 선행 연구에서는 실제 가스터빈 연소기내의 연소 현상을 모사하기에는 말소의 제한성을 갖고 있었다. 그러므로 실제 가스터빈 연소기에서의 연소불안정과 배기배출 특성을 조

사하기 위해서는 더욱 실험에 근접한 연소시스템이 필요하므로 선행 연구의 시스템을 더욱 발전시켜 불안정 모형 가스터빈 연소기를 재현하기 위해 선회기를 설치하였으며 화염의 안정화를 돕는 보염기로 블럽-바디(Bluff-body)를 사용하였다.

본 연구의 목적은 고효율 및 저공해 가스터빈 연소기의 개발에 필요한 기초자료를 제공하기 위한 것으로, 연료-공기의 혼합정도가 화염구조, 국소 레일라이 분포, 국소 열방출(heat release) 및 NOx 배출특성에 미치는 영향을 알아보는 것이다. 화염구조 파악 및 열방출 조사는 ICCD를 통해 취득한 OH\* 이미지를 사용하였다. 또한 화염의 중앙 단면 정보를 얻기 위해 선 적분된 이미지를 아벨 역변환 시켰다. NOx 배출특성은 NOx 분석기를 사용하여 알아보았다.

본 연구에서 취득한 상기 결과들은 불안정 가스터빈 연소기내의 연소불안정과 열방출 및 NOx 배출특성 사이의 관계를 더욱 잘 이해하는데 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험 장치는 크게 두 부분으로 이루어져 있다. 연소기, 공기 예열용 히터로 구성되어진 연소 시험부와 소음계(sound level meter, SLM), 앰프, 게이트 콘트롤러(DG-535), ICCD 카메라, 컴퓨터, 배기가스 분석장치로 구성되어 있는 데이터 취득부로 구성되어 있다. Fig. 2는 연소기의 특성 및 연소불안정 영역 파악, 블

Table 1 Experimental conditions

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

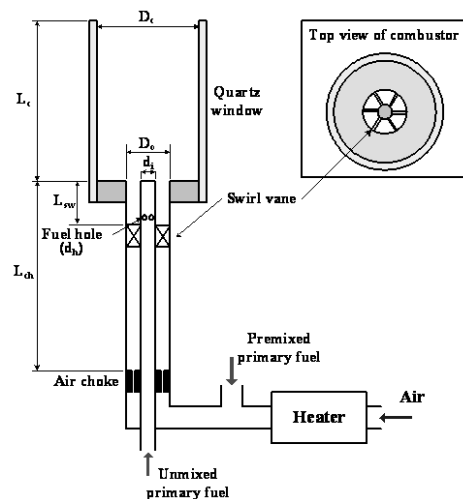


Fig. 1 Schematic of dump combustor

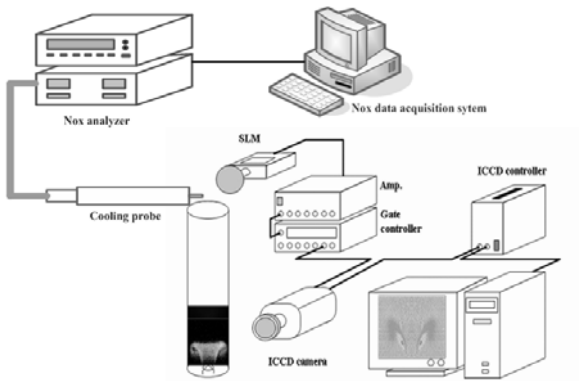


Fig. 2 Schematic of experimental setup

안정 연소의 특성 파악, OH 자발광 이미지를 위한 장치구성도와 배기배출물 특성을 파악하기 위한 장치구성도이다.

### 2.1.1 연소기

실험에 사용한 Fig.1의 동축 덤프 연소기는 기존의 연소기에 선회기와 보염기를 추가하여 개량된 것이다. 따라서 실제 가스터빈 연소기의 연소 현상에 더 근접하여 실험을 할 수 있었다. 연소기는 직경 12.5mm, 길이 550mm의 혼합부와 직경 42mm, 길이 410mm의 연소부로 구성되어 있다.

혼합 부분을 상부에서 450mm아래에 설치하여 연소시 발생하는 급격한 압력변동의 영향이 혼합기에 미치는 영향을 최소화하였다. 연료-공기의 혼합도를 변화시키기 위해서 혼합되지 않은 연료가 공급되는 6개의 구멍을 상부에서 24mm지점에 설치하였다. 연소의 광학 측정을 하기위해 석영관을 연소기 위에 설치하였고, 석영관과 어댑터 사이에 석면을 붙여서 열팽창에 의한 손상이 없도록 하였다.

연료는 메탄을 사용하였고, 부분예혼합의 정도에 변화를 줄 수 있도록 두 곳에서 연료를 공급하도록 하였다. 하나는 히터를 통과하여 공기와 바로 혼합이 되고, 다른 하나는 덤프면 상부에서 4mm아래 지점에서 공급이 되도록 하였다. 첫 번째 부분에서 모든 연료가 공급되면 혼합정도( $\sigma$ )가 100%, 두 번째 부분에서 모두 공급이 되면 0%라고 할 수 있다.

일반 가스 터빈의 흡입공기(Tinlet)의 온도인 180~630℃와 유사한 조건을 얻기 위해 3.5kW인 히터를 사용하여 300℃의 온도에서 혼합이 되도록 하였다.

록 하였다.

### 2.1.2 OH 이미지 취득 및 배기 배출물 측정 장치

연소기에서의 연소불안정시 화염구조와 배기배출물 특성을 측정하기 위한 장치의 개략도가 Fig. 2에 있다.

연소기에서 발생하는 소음을 소음측정기(SLM, Sound Level Meter)를 사용하여 측정하였다. 소음 측정기에서 나온 신호를 증폭하여 게이트 조절기(DG-535)의 트리거 신호로 입력하여 ICCD와 동기시켰으며, 대역필터를 지나 위상별로 OH를 측정하였다.

배기배출물의 특성 조사는 석영관 끝에서 20mm 떨어진 곳에 냉각 프로브를 설치하여 NOx를 분석하였다.

### 2.2 실험방법

연료-공기 혼합정도가 연소 불안정에 미치는 영향을 알기 위해 화염내의 CH, CO<sub>2</sub>, OH를 측정하여 열방출을 나타내는 지표로 사용한다.<sup>(17, 18, 25)</sup>

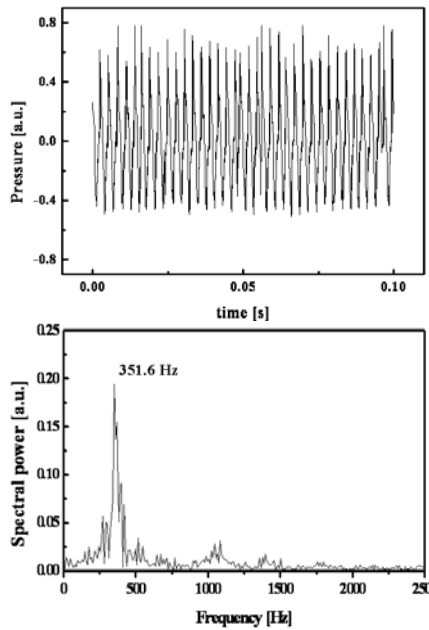
특히, OH가 강도가 강하고 측정이 용이하기 때문에 열방출의 지표로 사용하였으며, 불안정연소조건에서 압력변동의 위상에 따라 측정하였다. 하나의 당량비 조건에 대해 연료-공기 혼합정도를 변화시켜 불안정 연소 영역을 측정하였고 당량비를 0.53-0.79로 변화시켜 실험하였다. 불안정 연소 영역에서는 2.84~2.89ms의 주기로 진동하였는데 한주기의 압력을 16등분하여 각 위상에서 노출시간을 50μs로 50개의 이미지를 얻어 평균화하여 각 위상의 이미지를 취득하였다. 이때 선적분된 이미지를 아벨 역변환을 통해서 화염 중앙 단면 정보를 알 수 있었다.

배기 배출물 측정은 연소기 상부에 설치한 프로브에서 얻은 배출물을 분석하였으며 약 5분간은 시간 내 안정된 NOx 배출량을 측정하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 연소기 특성

연료-공기 혼합정도가 100%이고 연소불안정이 발생할 경우에 시간에 대한 음압변동을 FFT변환을 하면 Fig. 3과 같은 결과를 얻을 수 있다.



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

351.6Hz의 주파수에서 큰 반응을 보이는 불안정 연소특징을 알 수 있다.

### 3.2 불안정 연소의 화염구조

연소불안정에 연료-공기 혼합이 미치는 영향을 알기 위해 OH이미지 압력 파동에 따른 시간 분해능에 따라 취득하였다. 이것은 선 적분된 이미

지로 단면구조를 보여주지 못한다. 따라서 아벨 변환을 통해 화염의 중간 단면구조를 얻어낼 수 있다. 이는 아벨 역변환을 통해서 화염구조에 관한 유용한 정보를 얻을 수 있다는 것을 암시한다.<sup>(6)</sup>중앙 단면구조를 Fig. 4에 보였으며 좌측은 선 적분된 이미지이고, 우측은 아벨변환으로 얻은 단면 구조이다.

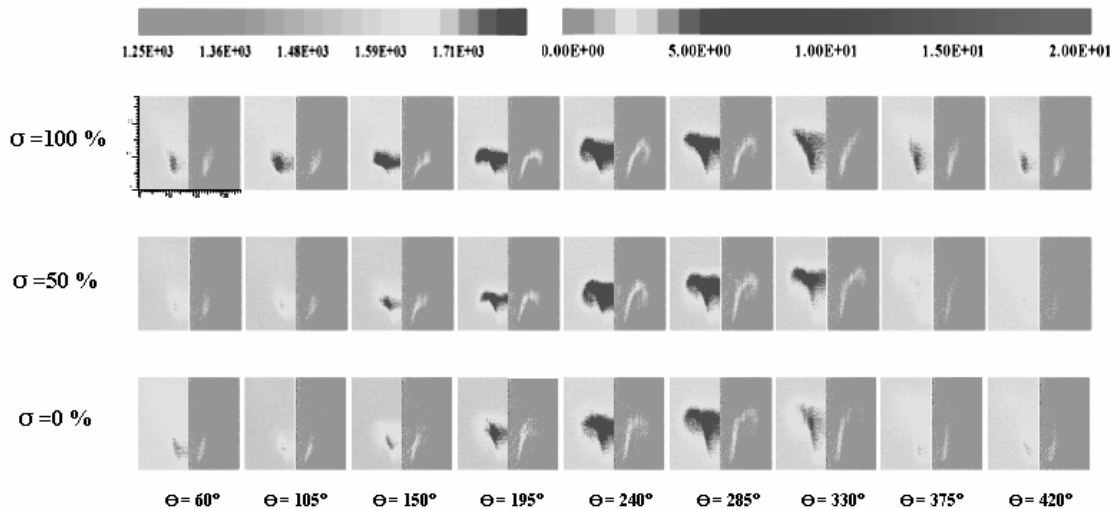
화염의 변화 추이를 보면, 위상이 커짐에 따라 재순환영역이 생겼다가 다시 처음의 형상으로 돌아가고 있다. 연료-공기의 혼합이 덜 될수록 재순환 영역의 반경이 감소하고 화염의 높이가 높아 가는 것을 알 수 있다. 선회기가 있는 연소기의 화염구조가 선회기가 없는 연소기보다 확연한 차이를 보여주는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 국소 열방출률

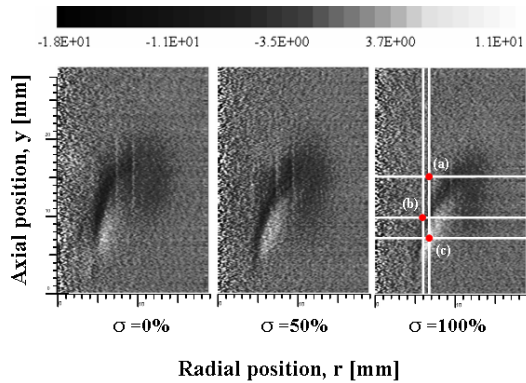
Fig. 4에서 한 주기당 시간에 따른 열방출 변화를 확인할 수 있었다. 여기서 측정된 압력 결과로 레일레이 지수 분포  $R(x, y)$ 를 구할 수 있다.

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

$R(x,y)$ 의 물리적 의미는 열방출 변동과 압력변동사이의 상관관계를 나타내는 척도로서, 임의의 지점(x,y)에서의 연소불안정 발생 또는 소멸 특성을 나타낸다..<sup>(7)</sup>



**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



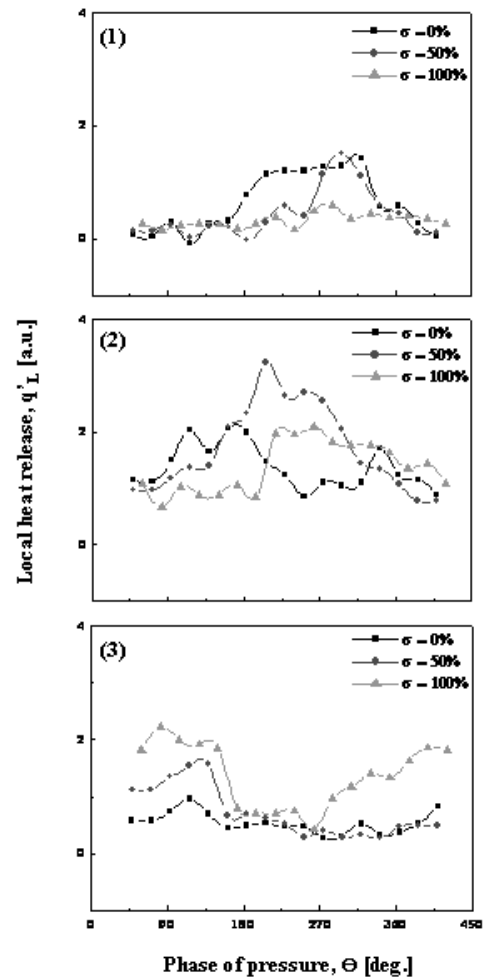
**Fig. 5** 2-D Rayleigh index distributions obtained at different mixing degree conditions (1pixel=103  $\mu m$ )

Fig. 5는 각 연료-공기 혼합정도에 따른 레일레이 지수 분포를 나타내고 있다. 밝은 부분은 열 방출과 압력변동이 동일한 위상에 있다는 것을 의미하고, 어두운 부분은 다른 위상에 있다는 의미이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 연료-공기 혼합정도가 감소하면서 연소불안정이 소멸되는 영역이 화염의 중심으로 이동하는 것을 알 수 있다. 연소불안정이 증가되고 소멸되는 영역인 (a), (b), (c)영역에서 국소 열방출을 살펴보면, Fig. 6의 결과를 얻을 수 있다. (a)와 (b)는  $R(x, y)$ 가 음의 영역으로 연료-공기 혼합의 정도가 커질수록 국소 열방출이 감소하고, (c)는  $R(x, y)$ 가 양인 영역으로 연료-공기 혼합의 정도가 커질수록 국소 열방출이 증가하고 위상과 압력이 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서 (c)지점을 보면 국소 열방출의 경향을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 국소 열방출을 보면,  $R(x, y)$ 가 양인 영역에서는 압력변동의 위상과 일치하고 음인 영역에서는 압력변동과 반대되는 경향을 확인할 수 있다. 즉, 연료-공기 혼합정도에 따른  $R(x, y)$ 를 확인할 수 있다. 이 관계를 이용하면, 연소 불안정을 연료의 양의 조절없이 연료-공기 혼합정도를 변화시켜서 제어할 수 있다.

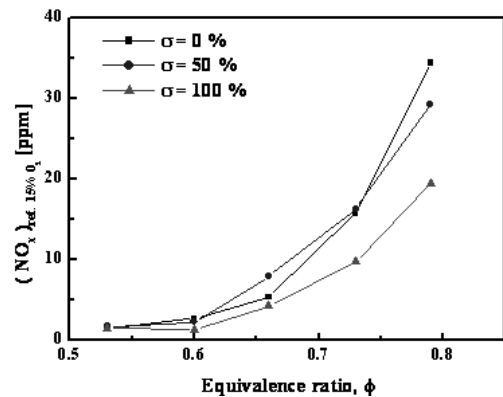
### 3.4 배기배출물 특성

연료-공기 혼합 정도에 따라  $NO_x$  농도가 달라짐을 확인할 수 있고, 희박연소영역에서는 연료-공기 혼합이 잘 되었을 때가  $NO_x$  발생이 적음을 발견할 수 있다. 이는  $NO_x$  규제측면에서 희박조건에서 연소가 이루어져야 함을 다시금 보여주는



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

결과이며, 아울러 연료-공기 혼합정도의 제어가  $NO_x$  배출규제를 만족시키기 위한 주요한 과제라는 것을 알려주는 결과라 하겠다. 이에 대한 원인을 살펴보면, 연소불안정이 발생함에 따라 연



**Fig. 7**  $NO_x$  emission characteristics at different fuel-air mixing degree conditions

소장 내 온도가 떨어짐으로써, Zeldovich 기구에 의한 열적(thermal) NO<sub>x</sub>의 감소 또는 NO<sub>x</sub> 발생 메커니즘의 변화에 의한 것으로 사료된다. 한편 으론, 맥동을 가지는 연소가 NO<sub>x</sub> 발생량을 저감 시킨다는 연구결과(8)와 같이, 연소불안정성이 발생할 경우 화염은 일정한 주기를 가지는 맥동연소로 가정할 수 있고, 이러한 맥동현상으로 인해 NO<sub>x</sub> 발생량이 저감되었을 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 불안정 모형 가스터빈 연소기에서 연료-공기 혼합정도가 연소 불안정에 미치는 영향을 각 위상에서 획득한 OH\*이미지와 각 조건에서의 NO<sub>x</sub> 농도를 취득함으로써 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 혼합정도에에서 연소 불안정을 증폭시키거나 소멸시키는 영역에 대한 정보를 얻을 수 있었다.

(3) R(x,y)가 양(+) 또는 음(-)인 지점에서의 당량비에 따른 국소 열방출 결과로부터, 압력과의 위상관계를 확인할 수 있었다.

(4) 각 연료-공기 혼합정도에 따른 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 파악함으로써, 희박 연소 영역에서는 연료-공기 혼합이 잘 될수록 NO<sub>x</sub> 발생이 적음을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 "2단계 BK21사업"의 지원비를 받았음

본 연구는 중소기업청의 산학협력실 지원 사업에 의해 지원되었음.

#### 참고문헌

- (1) Leonard, G. and Stegmaier, J., 1993, "Development of an Aero-derivative Gas Turbine Dry Low Emissions Combustion System," *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 116, pp. 542-546.
- (2) Lee, J. H., 2005, "An Experimental Study on the Flame Structure and Temperature Characteristics in a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Ph.D. Thesis*, Pusan National University.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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
- (6) Lee, B. J., Preston, L. H. and Santavicca, D. A., 1998, "A Study on the Combustion Instability in a Bluffbody Dump Combustor," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 22, No. 7, pp. 1022-1029.
- (7) Rayleigh, J., 1945, "The theory of sound," Vol. 2, Dover, New York, P. 226.
- (8) 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.