

## 모형가스터빈 연소기내 연소불안정성에 대한 연구

이중호\* · 이연주\*\* · 전충환† · 장영준\*\*\*  
(2002년 2월 27일 접수, 2002년 6월 27일 심사완료)

### Study on Mechanism of Combustion Instability in a Dump Gas Turbine Combustor

Jong Ho Lee, Yeon Joo Lee, Chung Hwan Jeon and Young June Chang

**Key Words:** Combustion Instability(연소불안정성), LPP Combustion(예증발 희박연소), OH Chemiluminescence(OH 자발광), Heat Release Rate(열방출률), Rayleigh Index(Rayleigh 지수), NOx Emission(NOx 배출)

#### Abstract

Combustion instabilities are an important concern associated with lean premixed combustion. Laboratory-scale dump combustor was used to understand the underlying mechanisms causing combustion instabilities. Experiments were conducted at atmospheric pressure and sound level meter was used to track the pressure fluctuations inside the combustor. Instability maps and phase-resolved OH chemiluminescence images were obtained at several conditions to investigate the mechanism of combustion instability and relations between pressure wave and heat release rate. It showed that combustion instability was susceptible to occur at higher value of equivalence ratio ( $>0.6$ ) as the mean velocity was decreased. Instabilities exhibited a longitudinal mode with a dominant frequency of  $\sim 341.8$  Hz, which corresponded to a quarter wave mode of combustor. Heat release and pressure waves were in-phase when instabilities occurred. Rayleigh index distribution gave a hint about the location where the strong coherence of pressure and heat release existed. These results also give an insight to the control scheme of combustion instabilities. Emission test revealed that NOx emissions were affected by not only equivalence ratio but also combustion instability.

#### 1. 서론

##### 기호설명

- $T_{inlet}$  : 공기 공급 온도 ( $^{\circ}C$ )
- $V$  : 혼합기 평균속도 (m/s)
- $\phi$  : 당량비
- $\theta$  : 위상각 (deg.)
- $a$  : 음속(m/s)
- $R$  : 일반기체상수( $J/kg \cdot K$ )
- $\gamma$  : 연소기내 공기의 비열비
- $l$  : 연소기 길이(m)

가스터빈 연소에 관한 최근 연구동향은 다른 배출물의 양을 적게 유지시키면서 NOx 배출을 저감시키는 방향으로 진행되고 있다.<sup>(1)</sup> NOx를 저감시키는 연소방법은 주연소 영역의 연료분포를 변화시키는 방법과 연료의 화학적 성질을 변화시키는 방법으로 대별된다. 전자의 예로서는, 과농연소/급속냉각/희박연소(RQL), 예증발 희박연소(LPP), 희박 직접분사(LDI)등이 있고, 후자의 경우에는 촉매연소(CC)가 있다. 이러한 방법들 중에서 LPP 연소는 실제 가스터빈 연소기에 적용이 용이하고 강화되고 있는 각 나라의 NOx 배출규제를 만족시킬 수 있는 대안으로 주목을 받고 있다.<sup>(2)</sup> 발전용 가스터빈에 대한 각국의 배기규제를 살펴보면, 다음의 Table 1과 같다.<sup>(1)</sup> CO 배출은 80ppm이하를 만족시켜야 하는 동시에 NOx 배출을 25ppm 이하로 하여야 하는데, 이를 만족

---

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계기술연구소  
E-mail : chjeon@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-3051 FAX : (051)582-9818  
\* 부산대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 한국타이어주식회사 중앙연구소  
\*\*\* 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

시킴을 위해서는 희박조건에서 연소시켜야 함을 알 수 있다. 이러한 원리에서 나오게 된 LPP 연소방법은 연소영역의 화염온도를 낮추어 NOx 배출을 저감시키는 것으로, 화염내 온도가 1900K를 넘지 않아 체류시간(residence time)이 길어져도 NOx의 양이 증가하지 않는다.<sup>(3)</sup> 이것은 체류시간이 길도록 연소기를 설계하여 낮은 수준의 NOx를 유지하면서 CO와 미연탄화수소(UHC)를 줄일 수 있음을 의미한다. 또 다른 장점으로는 탄소형성이 없다는 것이다. 이것은 매연의 감소뿐만 아니라 연소기 벽면으로의 복사에 의한 열전달이 줄어들어 벽면을 냉각하기 위한 공기의 양을 감소시키는 효과가 있다. 그 결과 더 많은 양의 공기가 연소영역의 온도를 낮추는데 사용되어 배기 특성을 향상시키게 된다. 이러한 장점이 있는 반면에 LPP 연소를 하는 실제 가스터빈 연소기에는 라이너 홀과 벽면 냉각슬롯이 없고 딱딱한 라이너 벽면에 의한 음의 손실과 흡수가 거의 없어 연소불안정성이 쉽게 발생하게 된다. 이러한 현상은 연소기 자체가 공진기 역할을 하여 압력과 열방출 사이의 상호작용으로 발생하게 된다.<sup>(4)</sup> 큰 압력변동으로 발생하는 연소불안정성은 연소기에 손상을 가할 뿐만 아니라 상당한 소음을 발생시킨다. 이론적으로 이러한 연소불안정성을 제거하는 방법은 연소에 의해 야기되어지는 음압과 열방출의 위상을 어긋나게 하는 것이다.<sup>(5)</sup> 이러한 개념을 기본으로 하는 불안정 연소의 제어 방법으로는 수동적(passive) 제어와 능동적(active) 제어가 있다. 수동적 제어는 압력 증폭을 방지하기 위해 연소기 형상을 바꾸거나 방음재를 추가하는 것<sup>(6)</sup>으로, 이러한 방법은 연료의 변화나 작동조건 변화로 인해 또 다른 연소불안정성이 발생한다는 문제점을 안고 있다.

이러한 제한적인 제어효과로 인하여 수동적 제어방법은 효과적인 불안정연소 제어방법으로 주목받지 못하고 있다. 이에 반해 능동적 제어는 유동에 교란을 주어 연소불안정성을 효과적으로 제어할 수 있는 제어방법으로 많은 연구자들에 의해 연구가 수행되어지고 있다. 능동제어방법으로 스피커를 사용하여 음압을 첨가하는 방법<sup>(7,8)</sup>과 2차 연료를 사용하여 열원(heat source)을 추가하는 방법<sup>(9-12)</sup>이 사용되고 있다. 이에 본 연구에서는 효율적인 능동제어 시스템 설계를 위한 선행연구로서, 연소불안정 현상에 대한 이해와 발생 메커니즘을 규명해 보고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

#### 2.1.1 연소기

실험에 사용된 동축 덤프 연소기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 직경 12 mm, 길이 500 mm의 혼합부와 직경 42 mm, 길이 440 mm의 연소부로 구성되어 있으며, 연소부는 광학적 접근이 가능하도록 석영관을 사용하였으며 혼합부와는 황동으로 된 어댑터로 연결되어 있다. 석영관과 어댑터 사이에 열팽창을 고려한 0.5 mm의 공간이 있으며 이 공간은 세라믹 테이프로 봉하여 연소기의 길이를 가변 시킬 수 있도록 하였다.

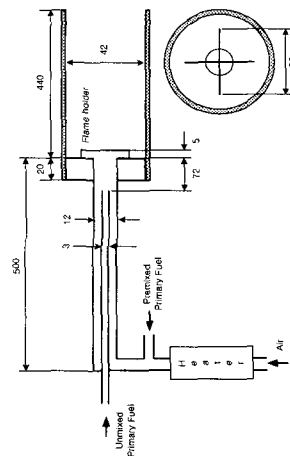


Fig. 1 Schematic of dump combustor

Table 1 Emission limits for stationary gas turbines

Country	NOx (@15% O <sub>2</sub> )	CO (@15% O <sub>2</sub> )	Rates power
ECC	25 vppm	Not stated	>50MW/h
France	40 vppm	80 vppm	>50MW/h
Italy	29 vppm	48 vppm	>50MW/h
U.K.	28 vppm	80 vppm	>50MW/h
Japan (Tokyo)	28 vppm	No limits	Not stated
USA(California)	9 vppm	Not stated	Not stated

화염 안정화를 위하여 십자(+) 형태의 보염기를 어댑터 상단 5mm 지점에 설치하였다. 돌연확대에 의한 재순환 유동이 화염안정화에 충분한 도움을 줄 것으로 생각되지만, 화염위치의 변동이 없도록 하기 위해 보염기를 사용하였다. 연료는 메탄(CH<sub>4</sub>)을 사용하였고, 연료와 공기를 충분히 혼합시킨 상태에서 실험을 행하였다. 또한, 실제 가스터빈의 흡입공기 온도(180 ~ 630 ℃)와 유사한 조건에서 실험을 행하기 위해 발열용량 2kW 인 히터를 사용하여 혼합부 끝단에서의 혼합기 온도를 360 ℃로 일정하게 유지하였다.

### 2.1.2 측정장치

연소기내에서 연소불안정이 발생할 경우 화염은 일정한 주파수를 가지고 움직이게 된다. 이러한 주기성을 띠는 화염을 위상에 맞추어 관찰하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

연소기에서 발생하는 음원을 실시간 측정하기 위해 소음측정기(sound level meter)를 사용하였으며, 측정의 일관성을 위해 연소기 끝단에서 측방향으로 5 cm, 반경방향으로 7 cm 떨어진 곳에 소음계를 고정시킨 후 모든 실험을 수행하였다.

소음계에서 나온 신호를 일정크기로 증폭시켜 게이트 조절기(DG-535)의 트리거 신호로 입력하여 ICCD와 동기시켰으며 ICCD에 UG-11, WG-305 필터를 장착하여 위상별로 OH 자발광을 측정하였다. 각 위상에서 50개의 화상을 취득하여 평균하였으며, 이렇게 얻어진 화상은 PC로 보내져 저장된다.

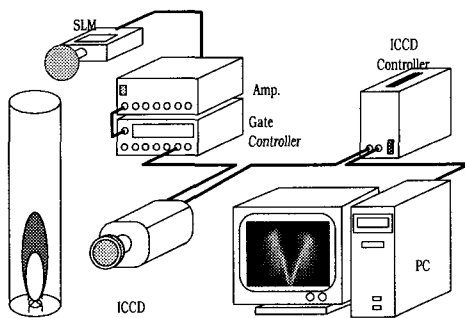


Fig. 3 Schematic of experimental setup

### 2.2 실험방법

탄화수소 화염내에서 CH, CO<sub>2</sub>, OH 자발광은 국소 열방출과 전체 열방출을 나타내는 지표로 사용되어 왔다. 특히 Dandy<sup>(13)</sup>는 OH 자발광이 당량비의 변화를 민감하게 나타내어 주는 좋은 지표라고 하였으며, Paschereit<sup>(8)</sup>는 OH 자발광을 열방출의 지표로 실험에 사용하였다. 본 연구에서는 열방출의 지표로 비교적 강도가 강하고 측정이 용이한 OH 자발광을 불안정 연소조건에서 압력변동의 위상에 따라 측정하였다. 당량비를 고정시키고, 연료와 공기의 유량을 조절하여 유속을 변화시켜가며 연소불안정 영역을 측정하였다. 측정결과 불안정 연소가 활발히 일어나는 특정한 조건에 대해 한 주기 동안의 OH 자발광 화상을 촬영하였다. Fig. 3은 불안정 연소에서 발생하는 음압에 동기시켜 화염을 촬영한 위치를 나타내고 있다. 불안정 연소가 발생할 경우 화염은 341.8Hz, 즉 약 2.9ms의 주기를 가지고 진동을 한다. 한 주기 동안 22.5° 간격으로 각 위상에서 노출시간 1μs로 50개의 화상을 평균하여 17장의 화상을 취득하였다.

실험조건을 정리하면 아래의 Table 2와 같다

Table 2 Experimental conditions

Parameters	Test range
Inlet temperature( $T_{inlet}$ , ℃)	360
Equivalence ratio( $\phi$ )	0.82
Mean velocity( $V$ , m/s)	8.5, 9.3, 10, 10.8
Phase angle( $\theta$ , deg.)	0~360

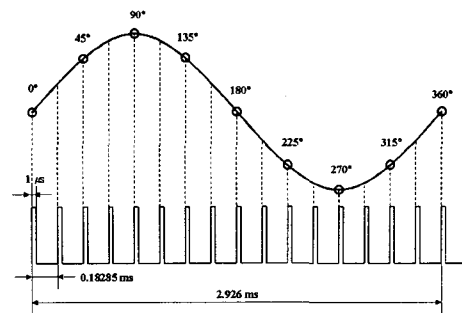


Fig. 4 Schematic of frame detecting position

3. 실험결과 및 고찰

Heitor<sup>(14)</sup>와 Katsuki<sup>(15)</sup>는 각각의 연구에서 운전 조건의 작은 변화에 압력변동이 크게 증가하는 것을 연소불안정성의 시작으로 정의하였다. LPP 조건에서 연소불안정성이 얼마나 나타나는가를 알아보기 위해 불안정 영역(instability map)을 당량비에 대한 음압으로 나타내었다. 각 운전조건에서 당량비는 과농에서 희박가연한계까지 변화시켜 음압을 측정하고 불안정연소 조건에서 음압의 위상에 따라 화염의 구조를 측정하였다.

3.1 연소기 특성

Fig. 4는 연소기에서 연소불안정성이 발생한 경우의 시간에 대한 음압의 변동을 나타낸 것이다. 일정한 주기를 가지는 것을 확인할 수 있으며, 이를 FFT 변환을 하면 Fig. 5와 같이 341.8 Hz의 단일 주파수만을 가지는 전형적인 종파모드 불안정 연소특징을 나타낸다.

본 실험에 사용된 연소기는 길이/지름 비(ratio)가 10.5로서, S.Sivasegaram의 실험결과<sup>(16)</sup>에 의하면 1/4파 모드(quarter wave mode)에 해당하는 단일 길이방향 주파수를 가질 것으로 예상된다. 1/4파 모드(n=4)의 주파수는 다음 식과 같다.

$$f \text{ (Hz)} = \frac{a}{l} \cdot \frac{1}{n} \quad (\text{단, } a = \sqrt{\gamma R T})$$

여기서, f는 주파수(Hz), a는 음속(m/s), l은 연소기 길이(m), n은 모드값,  $\gamma$ 는 연소기내 공기의 비열비, R은 기체상수(J/kg · K), T는 연소기내 공기의 온도(K)이다.

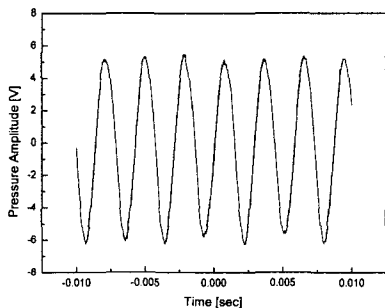


Fig. 5 Pressure vs. time signal for an unstable flame

l은 440mm이고, 비열비( $\gamma$ )와 연소기내의 평균 온도를 각각 1.3, 1100K라고 가정했을 경우 음속은 640 m/s정도이므로, 위의 식을 적용하면 1/4파 모드의 주파수는 364.1 Hz가 된다. 연소기내의 평균온도를 가정한 것과 음압을 측정한 소음계의 위치등을 고려해 볼 때 비교적 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 6은  $T_{inlet}=360^\circ\text{C}$ 에서 유속변화에 따른 불안정 연소영역을 나타낸 것으로, 불안정성의 발생 (onset of instability)에 대한 뚜렷한 경향을 보여주고 있다. 즉, 속도가 빨라짐에 따라 연소 불안정이 더 낮은 당량비에서 발생하고 있음을 알 수 있는데, 이는 유속이 증가할수록 공급되는 연료가 많아지고 그 결과 열방출량이 커질 것이며, 열방출량이 증가한다는 것은 유동측면에서 볼 때 유동장의 운동에너지가 증가한다는 것을 의미한다.<sup>(17)</sup> 그러므로 이렇게 증가된 유동장의 운동에너지가 더 큰 압력파를 발생시키고 이로 인해 불안정 연소의 시작점이 빨라지게 될 것이다.

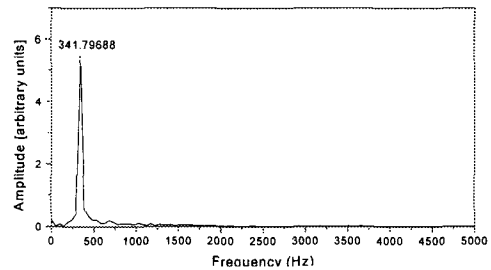


Fig. 6 Frequency spectrum of an unstable flame in the combustor

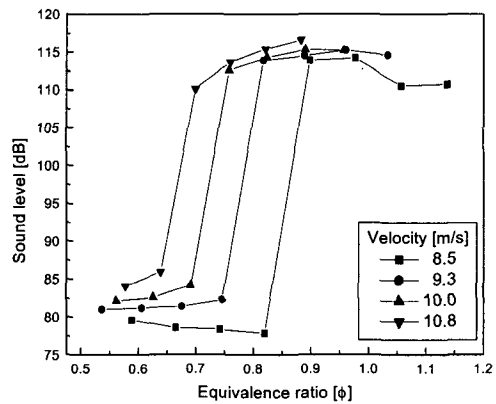


Fig. 7 Instability map at  $T_{inlet}=360^\circ\text{C}$

안정한 연소영역에서의 음압은 주어진 속도값에서 거의 일정한 값을 가지며, 불안정성이 발생하였을 경우의 음압은 속도값에 상관없이 거의 비슷한 수준( $115 \pm 2$  dB)을 나타내었다.

또한 주목할 만한 점은, 연소 불안정성이 회박조건이 아닌 이론당량비 근처의 일정구간의 운전조건에서 발생하고 있으며, 회박한 조건에서는 오히려 안정한 연소를 보이고 있다는 것이다.

Heneghan 등<sup>(18)</sup>의 결과를 비롯하여 대다수의 선행연구에서는 당량비가 줄어들어 따라 압력파의 진폭이 커져 불안정성이 발생한다고 보고하고 있다. 본 실험의 결과는 이와 상반되는 것이지만 Shih 등<sup>(19)</sup>도 같은 현상을 관찰한 바 있다고 보고하고 있다. 이러한 현상의 원인으로서는 회박혼합기의 열발생율이 연소기가 가지고 있는 고유의 음감쇠(inherent acoustic damping) 능력을 극복하기에 충분하지 못하기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 본 실험에 사용된 모형 연소기는 이론당량비 근처에서조차 불안정연소가 발생하는 특징을 가지고 있지만, 본 연구에서는 모든 실험조건에서 불안정연소가 발생하는  $\phi=0.82$ 에 초점을 맞추어 불안정연소 발생 메커니즘을 규명하고자 하였다.

### 3.2 화염 구조

압력 변동에 따른 시간 분해능을 가지는 화염 내 열 방출 영역의 구조를 파악하기 위하여 OH 자발광 이미지를 획득하였다. 전반적으로 불안정 연소가 발생하기 쉬운  $\phi=0.82$ ,  $T_{inlet}=360$  °C 조건에서  $V = 9.3, 10, 10.8$  m/s로 변화시켜가며 촬영한 이미지를 Fig. 7에 나타내었다. 유속이 증가할수록 공급되는 혼합기의 양이 증가하므로 화염이 커지고 OH 강도도 강해진다. 속도변화에 따른 열 방출 영역의 구조는 별다른 차이가 없는 것으로 관찰되었으며, 화염이 성장하는  $270^\circ \sim 90^\circ$ 에서 열 방출이 활발하고 화염이 소멸되는  $90^\circ \sim 270^\circ$ 에서는 작아지는 것으로부터 압력파의 위상과 밀접한 관계가 있음을 예상할 수 있었다. 압력 위상과의 관계를 살펴보기 위해, 각 화상의 OH 강도의 합으로 계산되어진 열방출과 소음측정기에서 측정된 압력파와의 위상관계를 Fig. 8에 나타내었다. 음압과 열방출 사이에는 약  $37^\circ$ 의 위상차를 가지는, 전반적으로 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다. 즉, 압력변화와 열방출률이 동일 위상이면 화염이 불안정해진다는 Rayleigh 이론과 일치함을 확인할 수 있었다.

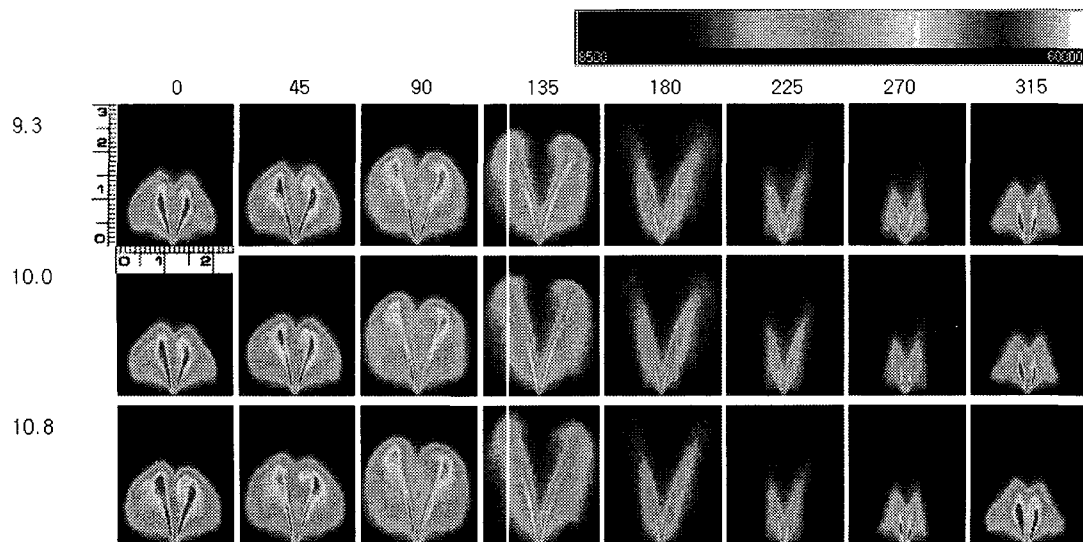


Fig. 8 Phase-resolved OH chemiluminescence for an unstable flame ( $\phi = 0.82$ ,  $T_{inlet} = 360$  °C,  $V = 9.3, 10, 10.8$  m/s)

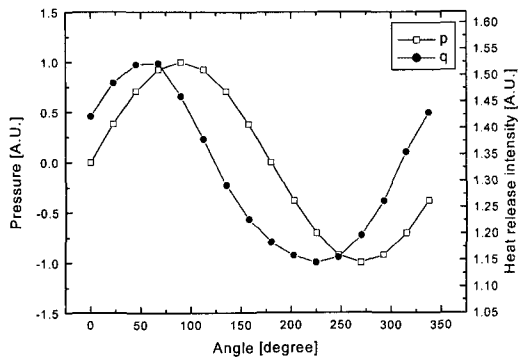


Fig. 9 In-phase between pressure and heat release

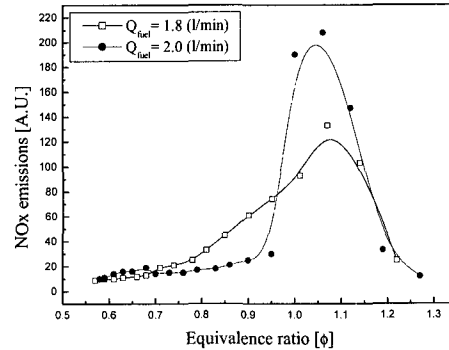


Fig. 11 Comparison of NOx emission characteristics

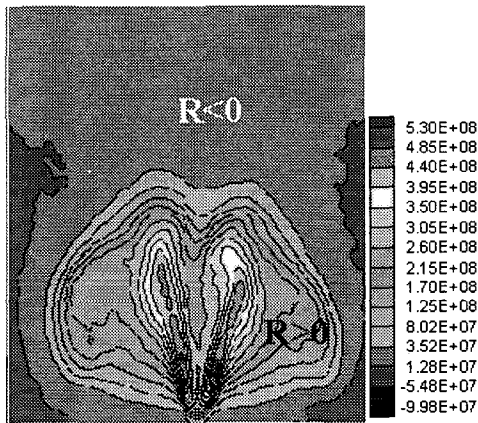


Fig. 10 Rayleigh Index distribution

연소 불안정성에 미치는 압력변화와 열 발생률과의 상관계수를 Rayleigh Index라 하고, 아래 식과 같이 표현된다.

$$R(x) = \frac{1}{t} \int_t p(t) q(t) dt$$

여기서,  $t$ 는 불안정연소의 한 주기이며,  $p$ 는 음압,  $q$ 는 열방출량이다.  $R(x)$  값이 양(+)이면 음압과 열방출의 위상이 일치하여 연소불안정성을 증가시키고, 음(-)이면 두 위상이 어긋나 연소불안정성을 감소시킴을 의미한다.

본 실험에서 획득한 OH 자발광 이미지의 전 영역에서  $R(x)$  값이 양이었으며 이는 연소불안정성이 발생한 경우 영역 전체가 연소불안정성을 지속시키는 근원이 될 수 있음을 의미한다. 특히 OH 강도가 최대인 영역, 즉 좌우  $-2.5 \sim 2.5$  mm, 상하  $2 \sim 6$  mm에  $R(x)$  값이 최고인 부분이 존재하였다.

Lee 등<sup>(9)</sup>의 이차 연료 분사에 의한 연소불안정성의 능동제어 연구에서  $R(x)$ 와 이차 연료에 의해 발생하는 열 방출의 위치가 일치한 경우 제어효과가 뛰어났다는 보고에 근거하면, 불안정 연소 제어시 압력변동과 열방출의 위상이 어긋나도록 열원을 공급할 위치는  $R(x)$  값이 최고인 지점에, 그리고 제어 시기는 열 방출이 활발한  $270 \sim 0^\circ$  ( $360^\circ$ )의 약 1.45ms 사이에 공급하는 것이 가장 효과적일 것으로 생각된다.

### 3.3 배기배출물 특성

연료유량을 1.8과 2.0 l/min으로 고정하고 공기 유량을 변화시켜가며 전 당량비 범위에서 NOx와 CO의 배출 특성을 관찰하였다.

연료유량이 1.8 l/min인 경우에는 연소불안정이 발생하지 않은 반면에, 연료유량이 2.0 l/min인 경우에는 당량비가 0.7~0.95 범위에서 연소불안정이 발생하였다. 모든 실험은 대기압하에서 수행되었으며, 각각의 조건에서의 NOx 배출 특성을 Fig. 10에 나타내었다.

예상한 바와 같이 NOx의 배출은 당량비의 함수로 이론 당량비 근처( $\phi=1.05$ )에서 최대값을 보이며 서서히 감소하는 경향을 나타내었다. 여기서 주목할 점은, NOx 배출량이 연소불안정이 발생한 구간에서 당량비에 대한 경향을 유지하면서 그렇지 않은 경우에 비해 급속히 감소했다는 것이다. 이는 연소불안정성이 발생함에 따라 연소장내 온도가 떨어짐으로써 Zeldovich 기구에 의한 thermal NOx의 감소 또는 NOx 발생 메커니

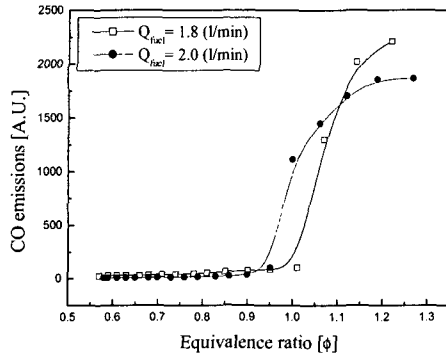


Fig. 12 Comparison of CO emission characteristics

증의 변화에 의한 것이라 생각되어진다. 또한 맥동(pulse)을 가지는 연소가 NO<sub>x</sub> 발생량을 저감시킨다는 Gutmark 등<sup>20)</sup>의 연구결과와 같이, 연소 불안정성이 발생할 경우 화염은 일정한 주기를 가지는 맥동연소로 가정할 수 있고, 이러한 맥동 현상으로 인해 NO<sub>x</sub> 발생량이 저감되었을 것으로 사료된다. 보다 정확한 원인규명을 위하여 CARS 기법을 이용한 연소기내 온도 측정을 통해 지속적인 연구가 필요하다 하겠다.

Fig. 11에 각 조건에서의 측정된 CO 배출 특성을 나타내었다. 연소불안정이 발생함에도 불구하고 CO의 배출 특성에는 별다른 영향을 미치지 않았으며, 당량비에 따라 증가하는 경향을 그대로 유지하는 경향을 나타내었다.

#### 4. 결론

메탄을 연료로 한 모형 가스터빈 연소기에서 불안정 모드와 혼합기의 속도에 따른 연소 불안정 발생 메커니즘의 변화, 각 위상에서의 OH 자발광 이미지를 획득과 아울러 각 조건에서의 NO<sub>x</sub> 배출특성에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 혼합기의 유속변화에 따른 연소 불안정 모드 및 발생 영역을 조사하여 속도가 빨라짐에 따라 연소 불안정은 더욱 희박한 영역에서 발생하였다.

(2) 연소 불안정 현상은 발생 메커니즘상 주로

희박 연소에서 발생하는 현상이지만 연소기 형상에 따라 당량비가 과농한 조건에서도 발생할 수 있음을 확인하였다.

(3) 연소 불안정시 압력 변동의 위상별 OH 자발광 이미지를 획득함으로써 화염내 열 방출 영역의 구조를 파악하였고, 압력변화와 열방출률이 동일 위상에서 연소 불안정이 발생한다는 Rayleigh 이론과 잘 일치하였고, 이를 통해 불안정 연소 제어위치와 시기에 대한 정보를 얻을 수 있었다.

(4) 연소불안정 발생 유무에 따른 NO<sub>x</sub>, CO의 배출특성을 살펴보았으며, 이는 온도 의존성이 큰 발생 메커니즘 측면에서 CARS 기법을 이용한 지속적인 연구가 필요함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) Nicloas Docquier, Sebastien Candel, 2002, "Combustion Control and Sensors: a Review," *Prog. in Energy and Combustion Science* Vol. 28 pp. 107~150.
- (2) Lefebvre, 1999, "Gas Turbine Combustion," 2nd Ed, Taylor & Francis.
- (3) Leonard, G., and Stegmaier, J., 1993, "Development of an Aeroderivative Gas Turbine Dry Low Emissions 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," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 15, No. 4, pp. 584~590.
- (5) Rayleigh, L., 1945, "Theory of Sound," Dover, New York.
- (6) Schadow, K. C., and Gutmark, E., 1992, "Combustion Instability Related to Vortex Shedding in Dump Combustors and Their Passive Control," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 18, pp. 117~132.
- (7) McManus, K. R., Poinso, T., and Candel, S. M., 1993, "A Review of Active Control of Combustion Instabilities," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 19, pp. 1~29.

- (8) Paschereit C., O., Gutmark, E., and Weisenstein, W., 1998, "Control of Thermoacoustic Instabilities and Emissions in an Industrial-type Gas-turbine Combustor," *27th Symposium on Combustion*, pp. 1817~1824.
- (9) 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," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 739~746.
- (10) C.H.Jeon, Santavicca, D. A., 1998, "Control of Combustion Instabilities in a Gas Turbine Combustors Through Secondary Fuel Injection", *Journal of The Korean Society of Combustion*, Vol. 3, No. 1, pp. 59~70.
- (11) Jones, C. M., Lee, J. G., and Santavicca, D. A., 1999, "Closed-Loop Active Control of Combustion Instabilities Using Subharmonic Secondary Fuel Injection," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 15, No. 4, pp. 584~590.
- (12) Kim, K., Lee, J. G., and Santavicca, D. A., 1999, "Active Control of Combustion Instability in a Model Gas Turbine Combustor," *11th Annual Symposium*, The Pennsylvania State University.
- (13) Dandy, D. S., and Vosen, S. R., 1992, "Numerical and Experimental Studies of Hydroxyl Radical Chemiluminescence in Methane-Air Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol. 82, pp. 131~150.
- (14) Heitor, M. V., Taylor, A. M. K. P., and Whitelaw, J. H., 1984, "Influence of Confinement on Combustion Instabilities of Premixed Flames Stabilized on Axisymmetric Baffles," *Combustion and Flame*, Vol. 57, pp. 109~121.
- (15) Katsuki. M., and Whitelaw, J. H., 1986, "The Influence of Duct Geometry on Unsteady Premixed Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 63, pp. 87~94.
- (16) S.Sivasegaram and J.H.Whitelaw, 1987, "Oscillations in Axisymmetric Dump Combustors" *Combust. Sci. and Tech.* Vol. 42, pp. 413~420.
- (17) Byeong-Jun Lee, L.H.Preston, D.A.Santavicca, 1998, "A study on the Combustion Instability in a Bluffbody Dump Combustor" *Journal of KSME(B)* Vol. 22, No. 7, pp. 1022~1029.
- (18) S.Heneghan, A.L.Lesmerises and G.J.Sturgess, 1990, "Acoustic Characteristics of a Research Step Combustor" *AIAA Paper*, No. 90-1851.
- (19) Shih, W. P., Lee, J., Santavicca, D. A., 1996, "Stability and Emissions Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *26th Symposium on Combustion*.
- (20) C.O.Paschereit, E.Gutmark and W.Weisenstein, 1998, "Control of Thermoacoustic Instabilities and Emissions in an Industrial-type Gas Turbine Combustor" *Pulse Combustion: The Mechanics of NOx Production*, *27th Symposium on Combustion*. pp. 1817~1824.