

# 희박 예혼합 모형 가스터빈 연소기의 화염구조와 배기특성에 관한 실험적 연구

이종호\*·김대현\*·전충환\*\*·장영준\*  
(2003년 9월 17일 접수, 2004년 3월 10일 심사완료)

## Experimental Investigation on Flame Structure and Emission Characteristics in a Lean Premixed Model Gas Turbine Combustor

Jong Ho Lee, Dae Hyun Kim, Chung Hwan Jeon and Young June Chang

**Key Words:** Combustion Instability(연소불안정), Lean Premixed(희박예혼합), Abel Inversion(아벨 역변환), NOx(질소산화물)

### Abstract

The objective of this study is a qualitative comparison between line-integrated OH chemiluminescence (OH\*) image and its Abel inverted image to investigate the flame structure at different phase of the oscillating pressure field. PIV(Particle Image Velocimetry) measurements were conducted under non-reacting conditions to see the global flow structure and NOx emission was measured to investigate the effect of fuel-air premixing on combustion instability and emission characteristics. Experiments were carried out in an atmospheric pressure, laboratory-scale dump combustor operating on natural gas. Combustion instabilities in present study exhibited a longitudinal mode with a dominant frequency of ~341.8 Hz, which corresponded to a quarter wave mode of combustor. Heat release and pressure waves were in-phase when instability occurred. Results gave an insight about the location where the strong coherence of pressure and heat release existed. Also an additional information on active control to suppress the combustion instabilities was obtained. For lean premixed combustion, strong correlation between OH\* and NOx emissions was expected largely due to the exponential dependence of thermal NOx mechanism on flame temperature.

### 기호설명

- H : 축 방향 거리 [mm]
- R : 반경 방향 거리 [mm]
- $\phi$  : 당량비
- $\theta$  : 위상각 [deg.]
- I : OH\* 강도 [A.U.]
- V : 평균속도 [m/s]

### 1. 서론

최근 가스터빈 연소분야에서 희박 예혼합 연소 기술이 강화되고 있는 NOx 배출 규제를 만족시킬 수 있는 대안으로 주목받고 있다.<sup>(1,2)</sup> 발전용 가스터빈에 대한 각 국의 배기 규제를 Table 1에 나타내었다.<sup>(1)</sup> CO 배출은 80ppm이하를 만족시켜야 하는 동시에 NOx 배출을 25ppm 이하로 하여야 하는데, 이를 만족시키기 위한 첫째 조건으로 희박조건에서 연소시켜야 함을 알 수 있다. 또한, 연료분사와 연료-공기의 혼합은 연소기 성능을 결정하는 주요한 요인으로 알려져 있다.<sup>(3)</sup> 하지만, 연소기의 성과와 배출특성은 상반된 경향 (trade-off relationship) 을 가지기 때문에,<sup>(3)</sup> 최적의

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부  
E-mail : changyj@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-2332 FAX : (051)512-5236  
\* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부 기계기술연구소

성능을 위해서는 이상적인 연료-공기의 혼합과 아울러 적절한 제어방법이 절실하다 하겠다.

이러한 고출력, 저공해 연소기에 대한 요구에서 나오게 된 희박 예혼합 연소기술은 연소영역의 화염온도를 낮추어 NO<sub>x</sub> 배출을 저감시키는 것으로, 화염내 온도가 1900K를 넘지 않아 체류시간(residence time)이 길어져도 NO<sub>x</sub>의 양이 증가하지 않는다<sup>(4)</sup>는 장점을 가지고 있다. 이는 체류시간이 길도록 연소기를 설계하여 낮은 수준의 NO<sub>x</sub>를 유지하면서 CO와 미연탄화수소(UHC)를 줄일 수 있음을 의미한다. 또 다른 장점으로는 탄소형성이 없다는 것으로, 이는 매연의 감소뿐만 아니라 연소기 벽면으로의 복사열에 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.

반면에 희박 예혼합 연소를 하는 실제 가스터빈 연소기에는 연소불안정성이 발생하기 쉽다는 단점이 있다. 이러한 현상은 연소기 자체가 공진기 역할을 하여 압력과 열방출 사이의 상호작용으로 발생하게 된다. 큰 압력변동으로 발생하는 연소불안정성은 연소기에 손상을 가할 뿐만 아니라 상당한 소음을 발생시킨다. 이론적으로 이러한 연소불안정성을 제거하는 방법은 연소에 의해 야기되어지는 음압과 열 방출의 위상을 어긋나게 하는 것이다.

이러한 개념을 기본으로 하는 불안정 연소의 제어 방법으로는 수동 제어(passive control)와 능동 제어(active control)가 있다. 수동 제어는 압력 증폭을 방지하기 위해 연소기 형상을 바꾸거나 방음재를 추가하는 것<sup>(5)</sup>으로, 이러한 방법은 연료의 변화나 작동조건의 변화로 인해 또 다른 연소 불안정성이 발생한다는 문제점을 안고 있다.

**Table 1** Emission limits for stationary gas turbine

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

수동적 제어방법이 이러한 제한적인 제어효과로 인하여 효과적인 불안정연소 제어방법으로 주목받지 못하고 있는 반면에, 능동 제어는 유동에 교란을 주어 연소불안정을 효과적으로 제어할 수 있는 제어방법으로 많은 연구자들에 의해 연구가 수행되어지고 있다. 능동제어방법으로 스피커를 사용하여 음압을 첨가하는 방법<sup>(6,7)</sup>과 2차 연료를 사용하여 열원(heat source)을 추가하는 방법<sup>(8,9)</sup>이 주로 많이 사용되고 있다. 후자와 같은 제어방법의 경우 실시간 피드백 신호가 필요한데, 많은 연구자들은 압력 또는 OH\*,<sup>(10)</sup> CH\*,<sup>(11)</sup> CO<sub>2</sub>\*<sup>(8,12)</sup>을 이용하여 능동 제어를 실현하고 있다. 이에 본 연구에서는 효율적인 능동제어 시스템 설계를 위한 선행연구로서, 연소불안정 현상에 대한 화염구조와 NO<sub>x</sub> 배출 특성을 살펴보았다. 화염구조 파악과 제어를 위한 피드백 신호로써의 OH\* 강도의 타당성을 검증하기 위한 이미지를 취득하였으며, PIV를 이용하여 비 연소 조건에서 순간속도를 취득하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

#### 2.1.1 연소기

실험에 사용된 동축 모형 가스터빈 연소기는 직경 12 mm, 길이 500 mm의 연료-공기 혼합부와 직경 42 mm, 길이 440 mm의 연소부로 구성되어 있다. 연소기에 대한 구체적인 사양 및 장치도는 참고문헌<sup>(4,13,14)</sup>에 자세히 소개되어 있으며, 여기서는 간단히 기술하기로 한다. 연소부는 광학적 접근이 가능하도록 석영관을 사용하였으며 혼합부 외는 어댑터로 연결하였다. 돌연확대에 의한 재순환 유동이 화염안정화에 충분한 도움을 줄 것으로 사료되지만, 화염위치 변동을 없애기 위해 십자형 보염기를 사용하였다. 연료는 메탄(CH<sub>4</sub>)을 사용하였으며, 실제 가스터빈의 흡입공기 온도(180~630 °C)와 유사한 조건에서 실험을 수행하기 위해 발열용량 2kW인 히터를 사용하여 혼합부 끝단에서의 혼합기 온도가 360 °C로 일정하게 유지되도록 하였다.

#### 2.1.2 OH\* 이미지 취득 장치

연소기내에서 연소불안정이 발생할 경우 화염

은 일정한 주파수를 가지고 움직이게 된다. 이런 주기성을 가지는 화염의 구조를 관찰하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 연소기에서 발생하는 음원을 실시간 측정하기 위해 소음측정기를 사용하였으며, 측정의 일관성을 위해 연소가 끝난에서 축 방향으로 5 cm, 반경방향으로 7 cm 떨어진 곳에 소음측정기를 고정시킨 후 모든 실험을 수행하였다. 소음측정기에서 나온 신호를 일장크기로 증폭시켜 게이트 조절기(DG-535)의 트리거 신호로 입력하여 ICCD와 동기 시켰으며 ICCD에 UG-11, WG-305 필터를 장착하여 위상별로 OH\*을 측정하였다. 각 위상에서 50개의 화상을 취득하여 평균하였다.

2.1.3 PIV 속도 측정 장치

PIV 실험장치는 크게 연소기, 광학 장치부, 입자 공급부, 데이터취득 및 유동장 해석을 위한 이미지 처리부로 구성되어 있다.

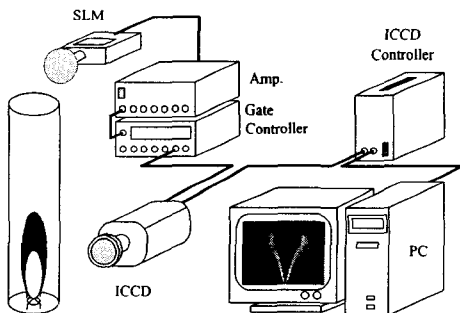


Fig. 1 Schematic of OH\* image acquisition system

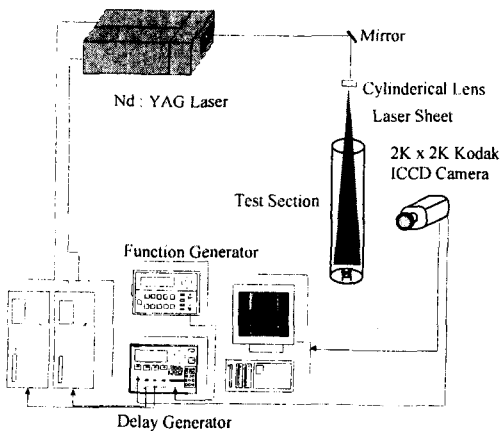


Fig. 2 Schematic of PIV measurement system

Fig. 2에 실험장치에 대한 개략도를 나타내었다. 광원은 Nd:YAG 레이저 2차 고조파인 532nm를, 화상취득은 2K×2K의 해상도를 가지는 CCD 카메라를 사용하였다. 일반적으로 가스유동의 PIV 측정에는 라스킨 노즐을 이용한 식용오일이 많이 사용되는데, 본 실험에서는 올리브 오일을 사용하였으며 평균직경 2μm이다. 입자를 일정하게 공급하기 위해 혼합탱크를 사용하였고 오일의 양은 임의로 조절이 가능하다.

2.2 실험 방법

탄화수소 화염 내에서 CH\*, CO₂\*, OH\*은 국소 열 방출과 전체 열 방출을 나타내는 지표로 사용되어 왔다. OH\*을 당량비 변화에 대한 지표<sup>(12)</sup> 또는 열 방출의 지표<sup>(7)</sup>로 실험한 선행연구를 바탕으로, 본 연구에서도 비교적 강도가 강하고 측정이 용이한 OH\*을 압력변동의 위상에 따라 측정하였다. Fig. 3에 화염사진 촬영을 위한 ICCD 작동 개략도를 나타내었다. 불안정 연소가 발생할 경우 화염은 341.8Hz, 약 2.9ms의 주기를 가지고 진동하였는데, 한 주기 동안 22.5°간격으로 각 위상에서 노출시간 1μs로 50개의 화상을 평균하여 17장의 화상을 취득하였다. 실험조건을 정리하면 Table 2와 같다.

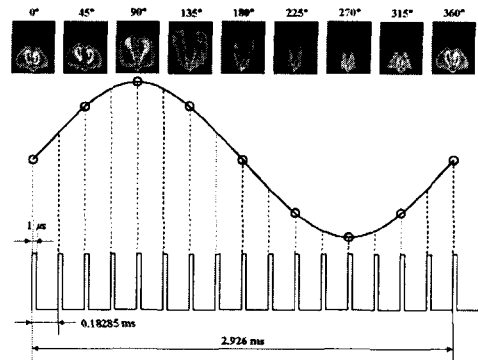


Fig. 3 Schematic of OH image acquisition

Table 2 Experimental conditions

Parameters	Test range
Inlet temperature( $T_{inlets}$ , °C)	360
Equivalence ratio( $\phi$ )	0.76, 0.82, 0.89
Mean velocity(V, m/s)	10
Phase angle( $\theta$ , deg.)	0 ~ 360

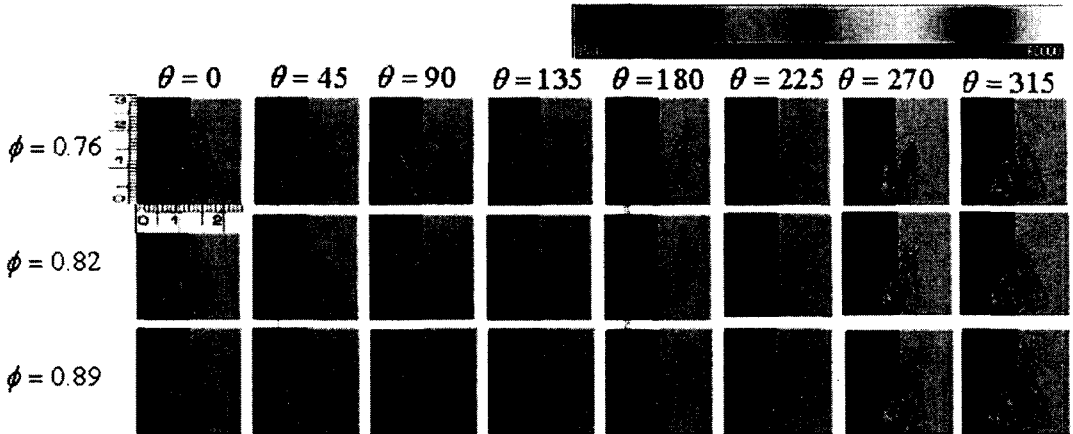


Fig. 4 Phase-resolved OH\* images of a 341.8Hz combustion instability. Left half of the picture is the line-of-sight image and the right half is the Abel inverted image

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 화염구조

##### 3.1.1 OH\* 이미지

압력 변동에 따른 시간 분해능을 가지는 화염 내 열 방출 영역의 구조를 파악하기 위해 OH\* 이미지를 취득하였다. 이렇게 취득한 이미지는 선 적분된 정보를 나타내고 있는데, 비록 화염이 완전한 축대칭은 아닐지라도 OH\* 이미지에서 좌우가 어느 정도 대칭이라는 것을 발견할 수 있다. 이는 아벨 역변환을 통해서 화염구조에 관한 유용한 정보를 얻을 수 있다는 것을 암시한다.<sup>(15)</sup> 아벨 역변환을 이용하여 화염 단면에 대한 이미지 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림을 살펴보면, 압력과 열 방출 지표로 사용된 평균 OH\* 강도 사이에는 위상이 일치한다는 것과 좌, 우 이미지를 통한 화염구조가 유사하다는 것을 발견할 수 있다. 선 적분된 이미지와 아벨 역 변환된 이미지 사이의 정성적인 비교를 위하여, 당량비 0.82, 위상 90도 조건에서의 강도 비교 결과를 Fig. 5에 나타내었다. OH\* 강도가 상대적으로 강한 화염 부분(5, 15mm)에서는 최대강도가 발생하는 위치와 정성적인 경향이 아주 잘 일치한다는 것을 발견할 수 있다. 화염 상단(25mm)은 비록 몇몇 위상값에 대해서만 화염이 존재하는 상대적으로 강도가 약한 영역이긴 하지만, 전체적인 경향은 충분히 만족스러운 결과를 보여주고 있다. 이는 선 적분

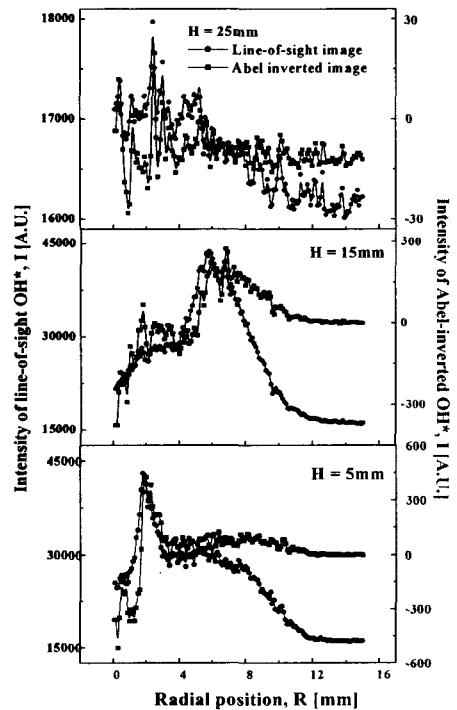


Fig. 5 Comparison of OH\* intensity between line-of-sight and Abel-inverted images ( $\phi=0.82, \theta=90^\circ$ )

된 OH\* 강도를 연소불안정을 제어하는 실시간 피드백 신호로 사용하는 것이 충분한 가능성을 가지는 것으로 판단된다.

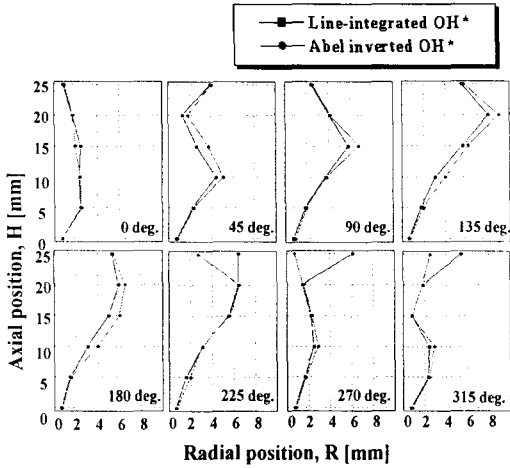


Fig. 6 Location of maximum OH\* intensity at five different axial positions (H=5,10,15,20,25mm)

압력 위상의 변화에 따른 화염구조 변화 경향을 좀 더 자세히 살펴보기 위하여, 일정 높이(H=5,10,15,20,25mm)에서 OH\* 강도가 최대가 되는 지점에 대한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. OH\* 강도가 큰 영역을 살펴보는 것은 NOx 발생과의 상관관계 측면에서 아주 중요한 의미를 가진다 왜냐하면, thermal NOx 와 prompt NOx 생성 메커니즘은 초평형상태(super-equilibrium)의 산소원자(O atom)에 크게 의존하는데, 만약 산소원자와 OH가 부분 평형상태라고 가정하면 OH가 많이 존재하는 영역은 초평형상태의 산소원자가 존재하는 영역에 대한 좋은 지표이기에 OH\* 강도가 최대인 영역에 대한 관찰은 NOx 발생에 대한 예측을 가능하게 하기 때문이다.<sup>(13,16)</sup>

이러한 분석은 화염 구조에 관한 몇 가지 유용한 정보 또한 제공해 준다. 첫째, 선 적분된 이미지와 아벨 역 변환된 이미지 사이에서 최대 OH\* 강도를 가지는 위치는, 화염상단(H=25mm)의 225°~315° 경우를 제외하고는 거의 일치하는 경향을 보여주었다. 이는 본 연소기와 같이 스월이 강하지 않은 축대칭에 가까운 화염에서는 선 적분된 OH\*와 아벨 역변환된 OH\* 강도가 정성적으로 잘 일치한다는 것을 보여줌과 동시에 Fig. 5에서 살펴보았던 선 적분된 OH\* 정보가 제어신호로서의 사용 가능성을 확인시켜주는 결과로 해석된다. 둘째, 사진 관찰로는 불가능 했던 화염의 미시적 구조에 관한 정보를 얻을 수 있다.

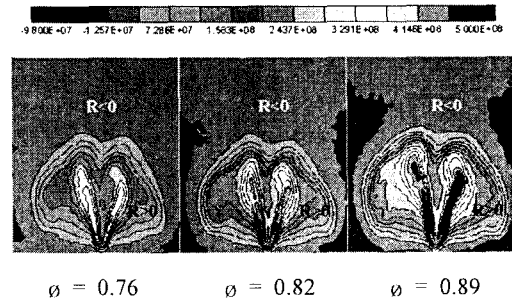


Fig. 7 Rayleigh index distribution

H=5mm 높이에서 최대 OH\* 강도가 발생하는 반경방향 위치에 대해 살펴보면, 위상 180°에서 R=1.4mm로 최소이며 0도에서 R=2.4mm로 최대로써 화염의 한 주기 동안 위치변화는 1mm에 불과했다. 반면에 H=15mm의 경우는 위상 315°에서 R=0.8mm로 최소이며 135°에서 R=6.1mm로 최대로써 위치변화는 5.3mm에 달하였으며, H=20mm의 경우, 위상 135°에서 R=9.0mm로 최대이며 90° 이전과 이후인 45°와 270°에서 각각 R=1.3mm, R=1.4mm로 최소를 가지는 화염형태를 보여 주었다. 이는 전술한 바와 같이 화염의 미시적 구조를 관찰에 대한 정보 획득 뿐만 아니라 이차연료 분사와 같은 능동제어를 위한 제어위치 선정에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

한편, 화염이 성장하는 270°~90°에서 열 방출이 활발하고 화염이 소멸되는 90°~270°에서는 작아지는 주기적인 경향으로부터 압력과 열 방출의 밀접한 관계를 예상할 수 있다. 연소 불안정성에 미치는 압력변화와 열 발생률과의 상관계수를 레일라이 지수(Rayleigh Index)라 하며, 아래 식과 같이 표현된다.

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

식 (1)에서, t는 불안정연소의 한 주기, p는 음압, q는 열 방출량을 나타낸다. R(x,y)가 양(+)의 값을 가지면 그 위치는 음압과 열 방출의 위상이 일치하여 연소불안정성을 증가시키고, 음(-)의 값이면 두 위상이 어긋나 연소불안정을 소멸시킴을 의미한다. 아울러 본 실험의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 당량비가 변함에도 불구하고, R(x,y)가 양(+)이 되는 영역은 모두 화염형상과 유사한

모양을 가졌으며, 화염 후류영역은 연소불안정 소멸 또는 감소시키는 영역으로 판단되었다.

3.1.2 PIV 속도측정

비 연소장 조건에서 거시적 유동패턴을 살펴보기 위해 PIV 기법을 이용하여 속도장, 와도, 유선 등을 측정하였다. 실험에 앞서 모눈종이를 이용하여 석영관의 굴절되는 정도를 살펴보았는데, 곡률이 심한 모서리에서 약 0.5mm의 굴절이 있을 뿐 전체적인 왜곡현상이 없다는 것을 확인하였다. 먼저, 연소기 중양 단면에서의 순간 속도를 500회 측정하여 평균한 속도장을 Fig. 8에 나타내었다. 반경방향으로 연소기 중심을 약간 벗어난 위치에서 빠른 속도를 가지는 것은 십자형 보염기에 기인한 결과로 사료되며, 전체적인 유동 패턴은 일정 높이에서 연소기 벽면을 타고 재순환되어 들어오는 전형적인 단일 노즐에서의 재순환 유동구조를 보여주고 있다는 것을 발견할 수 있다. Fig. 9에 유선의 형태를 나타내었다. Fig. 8과 비교해볼 때, 연소기 중심에서의 빠른 축 방향 속도는 연소기 벽면으로 퍼지면서 점점 느려져 H=20-60mm 높이에서 재순환되어 들어오면서 와(vortex)를 형성하는 것을 발견할 수 있다. 그런데 이 위치는 OH\* 강도가 가장 큰 영역과 거의 일치한다. 이는 화염 구조와 밀접한 관련이 있는 것으로, 화염/와 상호작용(flame/vortex interaction)이 연소불안정에 미치는 영향을 살펴보는 데 중요한 자료로 사용될 것으로 사료된다.

Fig. 10에 나타낸 와도(vorticity) 측정 결과로부터 다시금 확인할 수 있다. 그림에서 적색은 양(+)의 값으로 반시계 방향, 청색은 음(-)의 값으로 시계방향 유동을 의미한다. 특히 H=30mm 아래의 영역에서 벽면으로의 강한 회전운동을 예상할 수 있는데, 실제 화염 또한 이와 비슷한 크기를 가지는 것으로 관찰되었다.

3.2 NOx 배출 특성

연료-공기의 혼합이 연소불안정 및 NOx 배출특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 연료-공기의 공간적 혼합을 달리하여 NOx 농도를 측정된 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 연료-공기의 혼합 정도를 나타내는 파라미터,  $\sigma$ , 에 대한 정의는 식 (2)에 나타내었으며 자세한 내용은 참고문헌<sup>(13)</sup>에 소개되어 있다.

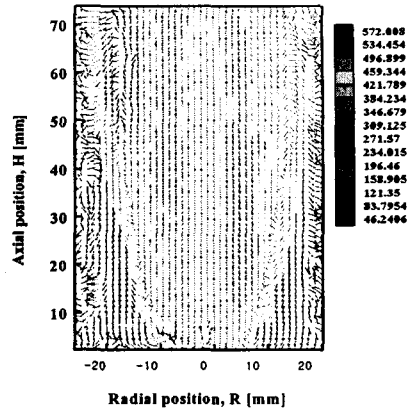


Fig. 8 Velocity field at the center plane (V=10m/s)

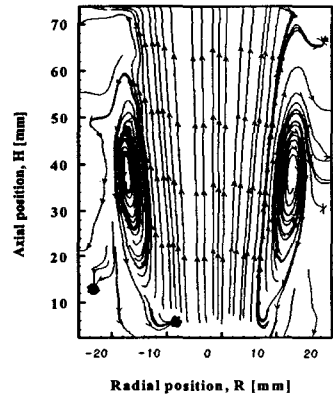


Fig. 9 PIV measurement results; Streamlines

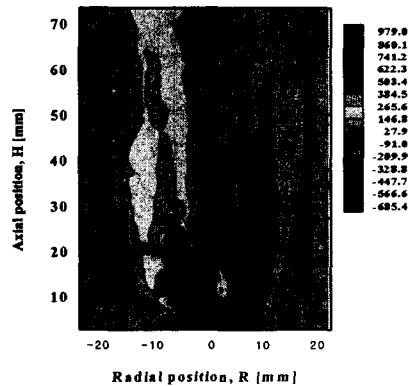


Fig. 10 Vorticity contours (negative value indicate clockwise motion)

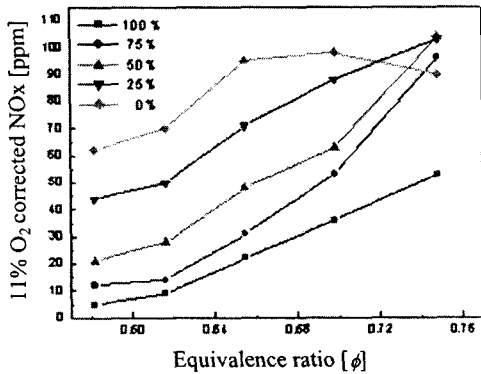


Fig. 11 NO<sub>x</sub> emission characteristics at different fuel-air mixing quality under lean operation

$$\sigma = \left(1 - \frac{Q_{\text{inner tube}}}{Q_{\text{total fuel}}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

즉,  $\sigma=100\%$ 는 잘 혼합된 연료-공기의 공급을,  $\sigma=0\%$ 는 상대적으로 불균일한 공간적 분포를 가진다는 것을 의미한다. 결과를 살펴보면, 회박연소영역에서는 연료-공기 혼합이 잘 되었을 때 NO<sub>x</sub> 발생이 적음을 발견할 수 있다. 이는 NO<sub>x</sub> 규제측면에서 회박조건에서 연소가 이루어져야함을 다시금 보여주는 결과이며, 아울러 연료-공기 혼합정도의 제어가 NO<sub>x</sub> 배출규제를 만족시키기 위한 주요한 과제라는 것을 알려주는 결과라고 하겠다. 이에 대한 원인을 살펴보면, 연소불안정이 발생함에 따라 연소장 내 온도가 떨어짐으로써, Zeldovich 메커니즘에 의한 thermal NO<sub>x</sub>의 감소 또는 NO<sub>x</sub> 발생 메커니즘의 변화에 의한 것으로 사료된다. 한편으로, 맥동(pulse)을 가지는 연소가 NO<sub>x</sub> 발생량을 저감시킨다는 연구결과<sup>(7)</sup>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. 결론

메탄을 연료로 한 모형 가스터빈 연소기에서 PIV 기법을 이용한 속도장, 각 위상에서의 OH\* 이미지 획득과 아울러 아벨 역변환을 이용한 단면 정보 취득, 회박 예혼합 조건에서 연료-공기

혼합정도에 따른 NO<sub>x</sub> 배출특성에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 선 적분된 OH\* 이미지와 아벨 역 변환한 이미지사이의 OH\* 강도 비교를 통하여 정성적으로 잘 일치한다는 사실을 확인함으로써, OH\* 강도가 불안정연소를 억제하기 위한 능동제어에서 실시간 피드백 신호로서의 사용에 대한 가능성을 제시하였다.

(2) 선 적분된 OH\* 이미지와 아벨 역 변환한 이미지사이의 최대 OH\* 강도 지점을 비교함으로써, 위상에 따른 화염의 미시적 구조 관찰에 대한 방법을 제시와 NO<sub>x</sub> 발생과의 상관관계를 예측하였다.

(3) PIV 기법을 이용한 속도장, 유선, 와도 등을 측정함으로써 비연소장에서의 유동구조를 파악하였으며, 화염구조와의 관계에 대한 기초 자료를 취득하였다.

(4) 회박 예혼합 연소 조건에서 연료-공기의 혼합이 NO<sub>x</sub> 배출 및 불안정연소에 미치는 영향을 살펴보았으며, OH\* 강도를 이용하여 온도 의존성이 강한 NO<sub>x</sub> 배출과의 상관관계 도출을 위한 기초 자료를 얻을 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Docquier, N. and Candel, S., 2002, "Combustion Control and Sensors: A Review," *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 28 pp. 107~150.
- (2) Lefebvre, 1999, "Gas Turbine Combustion," 2nd Ed, Taylor & Francis.
- (3) McDonell, V. G. and Samuelsen, G. S., 2000, "Measurement of Fuel Mixing and Transport Processes in Gas Turbine Combustion," *Meas. Sci. Technol.* Vol. 11, pp. 870~886.
- (4) Leonard, G. and Stegmaier, J., 1993, "Development of an Aeroderivative Gas Turbine Dry Low Emissions Combustion System," *J. Engng Gas Turb Power*, Vol. 116, pp. 542~546.

- (5) Schadow, K. C. and Gutmark, E., 1992, "Combustion Instability Related to Vortex Shedding in Dump Combustors and Their Passive Control," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 18, pp. 117~132.
- (6) McManus, K. R., Poinso, T. and Candel, S. M., 1993, "A Review of Active Control of Combustion Instabilities," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 19, pp. 1~29.
- (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.*, 27, pp. 1817~1824.
- (8) 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.*, 28, pp. 739~746.
- (9) Jones, C. M., Lee, J. G. and Santavicca, D. A., 1999, "Closed-Loop Active Control of Combustion Instabilities Using Subharmonic Secondary Fuel Injection," *J. Prop. Power*, Vol. 15, No. 4, pp. 584~590.
- (10) 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.
- (11) Coker, A., Neumeier, Y., Lieuwen, T., Zinn, B. T. and Menon, S. 2003, "Studies of Active Instability Control Effectiveness in a High Pressure, Liquid Fueled Combustor," AIAA-2003-1009.
- (12) 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.
- (13) Shih, W. P., Lee, J. and Santavicca, D. A., 1996, "Stability and Emissions Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Proc. Combust. Instit.*, 26, pp. 2771~2778.
- (14) 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 KSME (B)*, Vol. 26, No. 9, pp. 1284~1291.
- (15) Torres, H., Lieuwen, T. C., Johnson, C., Daniel, B. R. and Zinn, B. T., 1999, "Experimental Investigation of Combustion Instabilities in a Gas Turbine Combustor Simulator," AIAA-99-0712.
- (16) Foglesong, R. E., Frazier, T. R., Flamand, L. M., Peters, J. E. and Lucht, R. P., 1999, "Flame Structure and Emissions Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," AIAA-99-2399.