

# 희박 예혼합 모형 가스터빈 연소기의 화염구조와 배기특성에 관한 실험적 연구

문건필\*·이종호\*·전충환\*\*·장영준†

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

Gun Feel Moon, Jong Ho Lee, Chung Hwan Jeon and Young June Chang

**Key Words:** Combustion Instability(연소불안정성), Lean Premixed(희박예혼합), Abel Inversion(아벨 역변환), NO<sub>x</sub>(질소산화물)

### Abstract

The objective of this study is a qualitative comparison between line-integrated OH chemiluminescence (OH\*) image and its Abel inversion image 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. Also NO<sub>x</sub> 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 NO<sub>x</sub> emissions was expected largely due to the exponential dependence of thermal NO<sub>x</sub> mechanism on flame temperature.

### 기호설명

$T_{inlet}$  : 공기 공급 온도 (°C)  
 $V$  : 혼합기 평균속도 (m/s)  
 $\phi$  : 당량비  
 $\theta$  : 위상각 (deg.)  
 $I$  : OH\* intensity

### 1. 서 론

최근 가스터빈 연소분야에서 희박 예혼합 연소 기술이 강화되고 있는 NO<sub>x</sub> 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 NO<sub>x</sub> 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 성능과 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 LP 연소기술은 연소영역의 화염온도를 낮추어 NOx 배출을 저감시키는 것으로, 화염내 온도가 1900K를 넘지 않아 체류시간(residence time)이 길어져도 NOx의 양이 증가하지 않는다<sup>(4)</sup>는 장점을 가지고 있다. 이는 체류시간이 길도록 연소기를 설계하여 낮은 수준의 NOx를 유지하면서 CO와 미연탄화수소(UHC)를 줄일 수 있음을 의미한다. 또 다른 장점으로서는 탄소형성이 없다는 것으로, 이는 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.

반면에 LP 연소를 하는 실제 가스터빈 연소기에는 연소불안정성이 발생하기 쉽다는 단점이 있다. 이러한 현상은 연소기 자체가 공진기 역할을 하여 압력파와 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 연소불안정성이 발생한다는 문제점을 안고 있다.

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

Country	NOx	CO
	(@15% O2)	(@15% O2)
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 유동교란을 주어 연소불안정성을 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 사용되고 있다. 후자와 같은 제어방법의 경우 실시간 피드백 신호가 필요한데, 많은 연구자들은 압력 또는 OH\*,<sup>(10)</sup> CH\*,<sup>(11)</sup> CO2\*<sup>(8,12)</sup>을 이용하여 능동 제어를 실현하고 있다.

이에 본 연구에서는 효율적인 능동제어 시스템 설계를 위한 선행연구로서, 연소불안정 현상에 대한 화염구조와 NOx 배출 특성을 살펴보았다. 화염구조 파악과 제어를 위한 피드백 신호로서의 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.<sup>(4,13-14)</sup> 연소부는 광학적 접근이 가능하도록 석영관을 사용하였으며 혼합부와는 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 ℃)와 유사한 조건에서 실험을 수행하기 위해 발열용량 2kW인 히터를 사용하여 혼합부 끝단에서의 혼합기 온도가 360 ℃로 일정하게 유지되도록 하였다.

#### 2.1.2 OH\* 이미지 취득 장치

연소기내에서 연소불안정이 발생할 경우 화염은 일정한 주파수를 가지고 움직이게 된다. 이런 주기성을 가지는 화염의 구조를 관찰하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다.

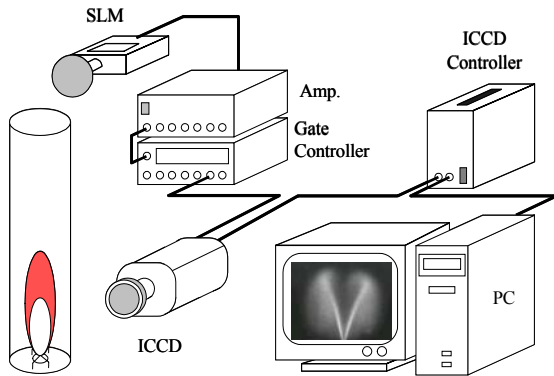


Fig. 1 Schematic of OH\* image acquisition system

연소기에서 발생하는 음원을 실시간 측정하기 위해 소음측정기를 사용하였으며, 측정의 일관성을 위해 연소기 끝단에서 축 방향으로 5 cm, 반경 방향으로 7 cm 떨어진 곳에 소음측정기를 고정시킨 후 모든 실험을 수행하였다. 소음측정기에서 나온 신호를 일정크기로 증폭시켜 게이트 조절기(DG-535)의 트리거 신호로 입력하여 ICCD와 동기시켰으며 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. 개략도를 Fig. 2에 나타내었으며, 추적 입자는 평균직경 2 $\mu$ m의 올리브 오일을 사용하였다.

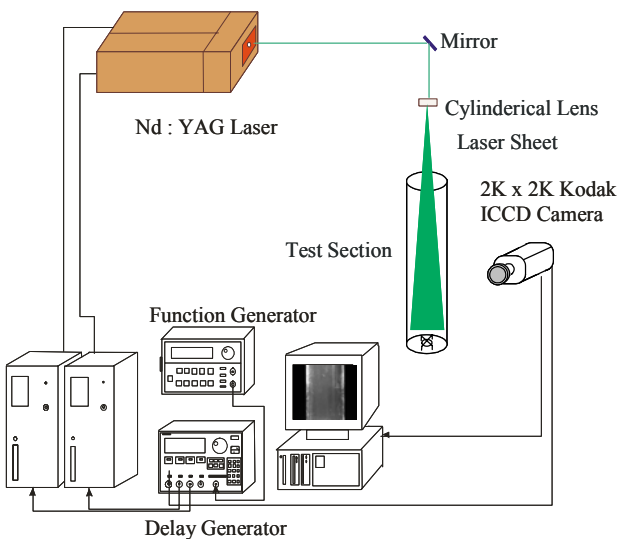


Fig. 2 Schematic of PIV measurement system

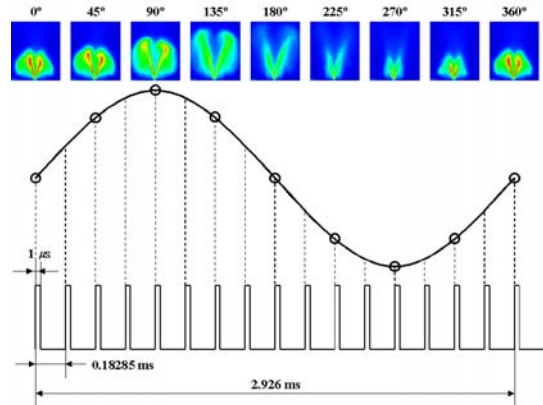


Fig. 3 Schematic of OH image acquisition

Table 2 Experimental conditions

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

2.2 실험 방법

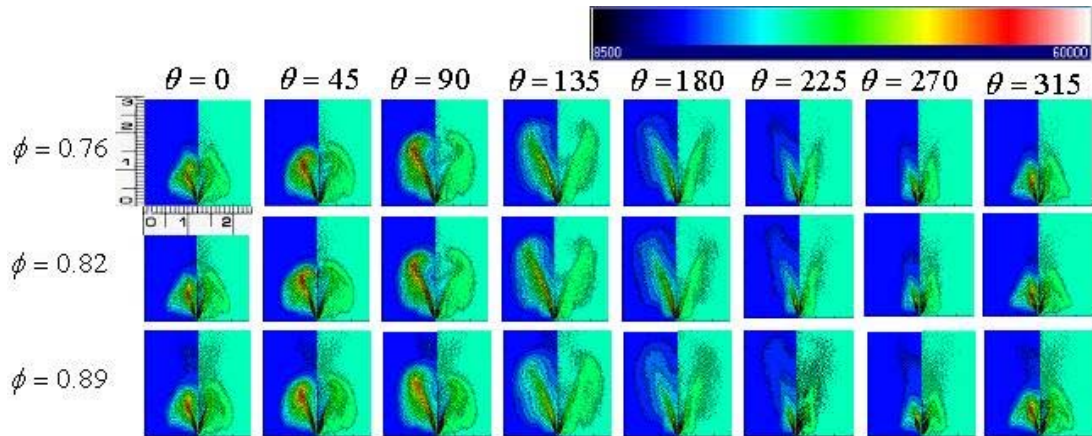
탄화수소 화염 내에서 CH\*, CO<sub>2</sub>\*, OH\*은 국소 열 방출과 전체 열 방출을 나타내는 지표로 사용되어 왔다. OH\*을 당량비 변화에 대한 지표<sup>(12)</sup> 또는 열 방출의 지표<sup>(7)</sup>로 실험한 선행연구를 바탕으로, 본 연구에서도 비교적 강도가 강하고 측정이 용이한 OH\*을 압력변동의 위상에 따라 측정하였다. Fig.3에 화염사진 촬영을 위한 ICCD 작동 개략도를 나타내었다. 불안정 연소가 발생할 경우 화염은 341.8Hz, 약 2.9 ms의 주기를 가지고 진동하였는데,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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염구조

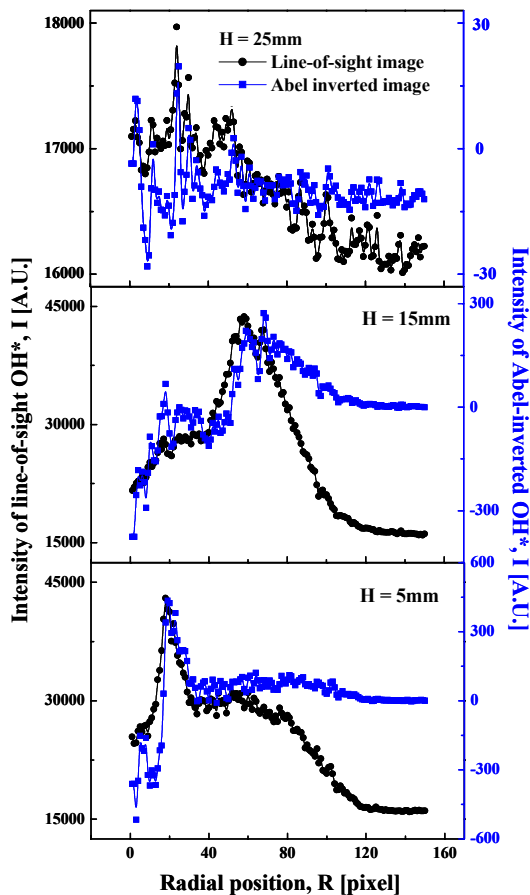
3.1.1 OH\* 이미지

압력 변동에 따른 시간 분해능을 가지는 화염 내 열 방출 영역의 구조를 파악하기 위해 OH\* 이미지를 취득하였다.



**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.

이렇게 취득한 이미지는 선 적분된 정보를 나타내기 위해 아벨 역변환을 이용하여 화염 단면정보를 얻었으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.



**Fig. 5** Comparison of OH\* intensity between line-of-sight and Abel-inverted images

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> 일례로, 당량비 0.82, 위상 90도 조건에서 선 적분된 OH\*와 아벨 역 변환된 강도의 비교 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 결과에서 보듯, OH\* 강도가 상대적으로 강한 화염의 하단부분(5, 15mm)에서는 최대강도가 발생하는 위치와 정성적인 경향이 서로 잘 일치한다는 것을 발견할 수 있다. 화염상단(25mm)에서도 비록 강도가 약하긴 하지만 전체적인 경향은 충분히 만족스러운 결과를 보여주고 있다. 이는 선 적분된 OH\* 강도를 연소불안정을 제어하는 실시간 피드백 신호로 사용하는 것이 충분한 가능성을 가진다는 것을 의미한다.

또한, 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 Rayleigh Index라 하며, 아래 식과 같이 표현된다.

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

식(1)에서, t는 불안정연소의 한 주기, p는 음압, q는 열 방출량을 나타낸다. R(x)가 양(+)의 값을 가지면 음압과 열 방출의 위상이 일치하여 연소불안정성을 증가시키고, 음(-)의 값이면 두 위상이 어긋나 연소불안정을 소멸시킴을 의미한다.

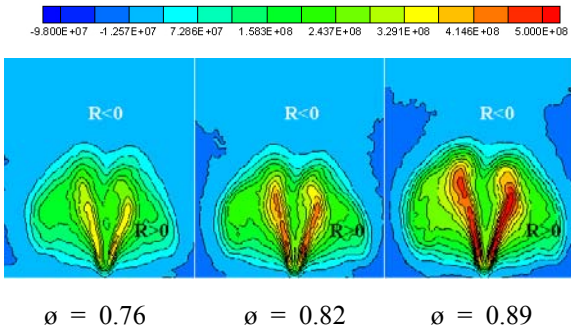


Fig. 6 Rayleigh index distribution.

다. 아울러 본 실험의 결과를 Fig.6에 나타내었다.

3.1.2 PIV 속도측정

PIV 기법을 이용하여 비 연소장 조건에서 거시적 유동패턴을 살펴보기 위하여, 속도와 와도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7 (a)에서 보듯, 연소기 출구에서 빠른 속도를 가지다가 일정 높이에서 연소기 벽면을 타고 재순환되어 들어오는 전형적인 단일 노즐에서의 재순환 유동형태를 보여주고 있다. 유선의 결과를 살펴보면 30-50mm 높이에서 유동이 재순환되는 것을 발견할 수 있는데, 이는 화염의 구조와 아주 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다.

Fig. 7 (b)의 와도결과는 위에서 살펴보았던 내용을 충분히 뒷받침하고 있다. 재순환되어 들어오는 높이부근에서 큰 스케일의 와가 형성되어 있는 것을 발견할 수 있다. 그림에서 적색은 양(+)의 값으로 반시계 방향 움직임, 청색은 음(-)의 값으로 시계방향 유동을 나타낸다.

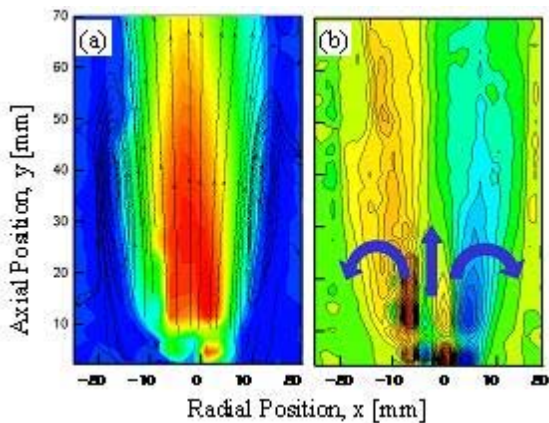


Fig. 7 PIV measurement results; (a) Velocity and streamlines (b) Vorticity contours (positive value indicate counterclockwise motion)

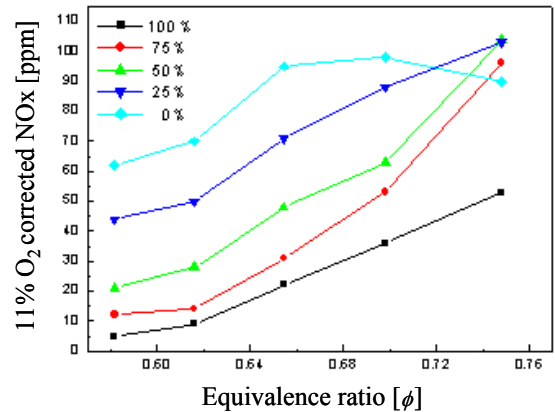


Fig. 9 NOx emission characteristics at different fuel-air mixing quality under lean operation.

3.2 NOx 배출 특성

연료-공기의 혼합이 연소불안정 및 NOx 배출 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 연료-공기의 공간적 혼합을 달리하여 NOx 농도를 측정 한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 결과에서 보듯, 희박연소영역에서는 연료-공기 혼합이 잘 되었을 때가 NOx 발생이 적음을 발견할 수 있다. 이는 NOx 규제측면에서 희박조건에서 연소가 이루어져야함을 다시금 보여주는 결과이며, 아울러 연료-공기 혼합정도의 제어가 NOx 배출규제를 만족시키기 위한 주요한 과제라는 것을 알려주는 결과라고 하겠다. 이에 대한 원인을 살펴보면, 연소불안정이 발생함에 따라 연소장 내 온도가 떨어짐으로써, Zeldovich 기구에 의한 열적(thermal) NOx의 감소 또는 NOx 발생 메커니즘의 변화에 의한 것으로 사료된다. 한편으론, 맥동(pulse)을 가지는 연소가 NOx 발생량을 저감시킨다는 연구 결과<sup>(7)</sup>와 같이, 연소불안정성이 발생할 경우 화염은 일정한 주기를 가지는 맥동연소로 가정할 수 있고, 이러한 맥동현상으로 인해 NOx 발생량이 저감되었을 것으로 사료된다. 이에 대해서는 CARS 기법을 이용한 연소기내 온도 측정결과를 통해 차후에 구체적인 해석을 하기로 한다.

4. 결 론

메탄을 연료로 한 모형 가스터빈 연소기에서 PIV 기법을 이용한 속도장, 각 위상에서의 OH\* 이미지 획득과 아울러 아벨 역변환을 이용한 단면 정보 취득, 희박 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 역변환 한 이미지사이의 정성적인 OH 강도 비교를 통하여, OH\* 강도가 불안정연소를 억제하기 위한 능동제어의 실시간 피드백 신호로써의 사용가능성을 검토하였다.

(2) PIV 기법을 통하여 비연소장에서의 속도, 유선, 와도 등의 유동구조를 파악하였으며, 화염 구조와의 관계에 대한 기초 자료를 취득하였다.

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

### 참고문헌

- (1) Nicloas Docquier, Sebastien Candel, 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 Samuelson, 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., Poinson, 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