

희박 예혼합 모형 가스터빈 내에서 연료/공기 혼합정도가 온도 특성에 미치는 영향

이종호* · 장영준** · 전충환**

Effect of Fuel/Air Mixing Quality on Temperature Characteristics in a Lean Premixed Model Gas Turbine

Lee Jong Ho* · Chang Young June** · Jeon Chung Hwan**

ABSTRACT

Experimental investigations were carried out in an atmospheric pressure, optically accessible and laboratory-scale dump combustor. The objective of this study is to obtain the phase-resolved gas temperatures at different phases of the oscillating pressure cycle during unstable combustion. To see the effect of incomplete fuel-air mixing on phase-resolved temperature characteristics, CARS temperature measurements were performed. Results including phase-resolved averaged temperature, normalized standard deviation and temperature probability distribution functions (PDFs) were provided in this paper. It could be found that the profile of mean temperature showed the in-phase relationship with pressure cycle. Temperature PDFs give an insight on the flame behavior as well as NO_x emission characteristics. These results would be expected to play an important role in better understanding of driving mechanisms and thermo-acoustic interactions.

초 록

광학적 접근이 가능한 대기압, 실험용 덤프 연소기에서 실험적 연구를 수행하였다. 본 연구의 목적은 불안정 연소 동안 주기적으로 변하는 압력 사이클의 위상에 따른 온도를 측정함에 있다. 특히, 연소 불안정에 영향을 미치는 연료/공기의 혼합정도가 온도특성에 미치는 효과를 살펴보기 위해 반 스톡스 라만 분광학을 이용하였다. 본 논문에서는 위상에 따른 평균온도, 표준 오차, 확률 밀도함수 및 1900K 이상의 고온이 발생할 확률에 대한 결과가 제시되어있다. 실험결과에 대해 간략히 살펴보면, 압력위상에 따른 평균온도는 압력위상과 거의 동일 위상을 가짐을 확인할 수 있었고, 평균온도의 최대-최소 차이는 연료/공기 혼합이 양호할수록 작아지는 것을 발견할 수 있었다. 온도 확률밀도 함수는 화염 거동과 질소산화물 배출 특성에 대한 기본 자료를 제시해 주었다. 이러한 결과들은 궁극적으로 연소 불안정 발생 메커니즘과 열-음향학적 상호작용을 이해함에 있어 중요한 역할을 할 것으로 기대된다 하겠다.

Key Words: Combsution Instability(연소 불안정), Phase-resolved Gas Temperature(위상별 가스 온도), CARS(반 스톡스 라만 분광학), Fuel/Air Mixing Quality(연료/공기 혼합정도)

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 기계공학부, 기계기술 연구소
연락처, E-mail: chjeon@pusan.ac.kr

1. 서 론

최근, 가스터빈 연소분야에서 희박 예혼합 연소기술이 강화되고 있는 NOx 배출 규제를 만족시킬 수 있는 대안으로 주목받고 있다. 그러나 희박 예혼합 연소기는 연소과정 중의 열 방출과 음향공진사이의 상호작용에 의해 열-음향학적 연소 불안정이 쉽게 일어나는 단점을 가지고 있다. 연소 불안정은 연소기 형상, 국소 열방출률, 당량비의 변화와 같은 많은 메커니즘에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 이에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다[1-2]. 연소 불안정 메커니즘과 이에 대한 능동제어에 관해서는 잘 정리된 몇몇 논문에서 찾아볼 수 있다[3-4]. 전술한 메커니즘들 중에서, 연료-공기 혼합 정도가 연소 불안정에 미치는 영향을 살펴보는 것은 희박 예혼합 연소기 설계뿐만 아니라 연소기 배출특성 및 연소 불안정 발생측면에서도 아주 중요한 일이라 하겠다. 일반적으로 연소과정 중에 연료-공기의 불균일성이 생기면 연소기내 국소 고온 영역이 발생하게 되는데, 이 영역은 NOx 발생이 많은 영역으로 여겨지고 있다. 이처럼 연료-공기의 불균일 분포가 NOx 발생 및 성능 특성에 미치는 영향에 관한 연구 또한 활발히 수행되었으며 [5-6], 가스터빈 연소에서 연료-공기 혼합에 관한 전반적인 내용을 요약한 논문도 찾아볼 수 있다 [7]. 본 연구에 사용된 CARS 기법은 잘 정립된 비접촉식 진단 툴로서, 시간적-공간적 분해능을 가지는 순간온도측정이 가능하다. CARS 기법은 많은 실험실 스케일 또는 실용 연소기에 적용되었으며[8-9], 최근에는 LDV 또는 PLIF 기법 등과 아울러 연소현상을 명확히 규명하기 위하여 활발히 이용되고 있다[10-11].

전술한 바와 같이, 희박 예혼합 연소기에서 많은 이론적, 실험적 연구가 수행되었다. 하지만 연소 불안정 조건하에서의 온도측정에 관한 논문은 거의 찾아보기 힘들었으며, 또한 이들 논문들은 대부분 속도, 압력, 화염형상 가시화에 국한되어 있음을 발견할 수 있다.

이에 본 연구에서는 특정 고유주파수(dominant

frequency)를 가지는 압력 사이클을 12등분하여 각 위상에서의 온도를 측정하였으며 화염 내 특정위치에서 연료-공기의 혼합정도가 위상별 온도에 미치는 영향을 살펴보았다. 이는 연소불안정 현상을 좀 더 명확히 이해하기 위한 기초 자료를 제공함과 아울러 NOx 발생 및 당량비 변동에 미치는 영향을 파악하고자 함에 그 목적이 있다. 이런 시도는 연소불안정 메커니즘에 대한 통찰력을 제공함과 동시에 이를 제어하기 위한 모델 개발에 일조를 할 것으로 기대된다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 연소기

본 실험에 사용된 광학적 접근이 가능한 덤프 연소기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 연소기는 직경 12 mm, 길이 500mm의 연료-공기 혼합부와 직경 42mm, 길이 440mm의 연소부로 구성되어 있다[6,12]. CARS를 이용한 온도 측정에 있어 석영관의 직경이 너무 작아 레이저 빔의 초점이 관 표면을 손상시키는 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위해, 석영관은 스테인리스 스틸 재질로 대체되었으며, 2.5mm 구멍을 내어 창을 통한 광학적 접근을 시도하였다. 이러한 광학적 구성은 Bradley 등의 논문[9]에서도 찾아볼 수 있다. 공기는 질량유량계를 사용하여 대기압 하에서 45.7 ℓ/min으로 일정하게 공급하였으며, 실제 가스터빈과 유사한 조건에서 실험을 수행하기 위해 2kW 용량의 히터를 사용하여 혼합부 끝단에서의 온도가 650K로 일정하게 유지되도록 하였다. 연료로는 메탄을 사용하였으며, 두 군데 위치에서 혼합부에 공급하였다. 공급되는 이들 두 질량유량의 비로써 본 연구의 중요한 실험변수인 혼합 정도(mixing quality, ϵ)가 정의되는데, 그 정의는 다음과 같다.

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

$\epsilon = 100\%$ 라는 것은 모든 연료가 공기와 예혼합된 상태에서, $\epsilon = 0\%$ 는 모든 연료가 안쪽 관으로 공급됨을 의미한다. 그러나 $\epsilon = 0\%$ 의 화염이 확산화염을 의미하지는 않는다. 왜냐하면, Fig. 1에서 보듯 안쪽관이 혼합부 끝단으로부터 7.2cm 상단에 위치하여 연소부로 들어오기까지 상당한 연료-공기의 혼합이 발생하기 때문이다.

2.2 CARS 측정 장치

실험에 사용된 CARS 시스템의 개략도는 참고 문헌[13]을 참조하기로 한다. CARS 장치의 평균 온도 측정오차는 온도범위 1000~2400K에서 2% 이하이며[17], 측정불륨은 지름 $100\mu\text{m}$, 길이 1~2 mm이다.

CARS 온도측정을 위한 실험장치와 신호동기 시스템의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. SLM에서 나오는 출력전압은 대략 200mV로써 레이저 동작을 위한 트리거 신호로 사용하기에는 너무 약한 값이었기에, 증폭회로를 통과시켜 5V 출력이 나오도록 하였다. 또한 레이저 시스템이 최적화되어 있는 반복율(10Hz)과 비슷하게 레이저 헤드 램프가 터지도록 하기 위해, SLM에서 나온 341.7Hz의 신호를 카운터 회로를 이용하여 10Hz 근처의 신호로 변환시켜 주었다. 이 신호는 최종적으로 게이트 조절기(DG-535)로 보내져 TTL신호(5V→0V)로 변환된 후 레이저 동작을 위한 제어신호로 사용되었다.

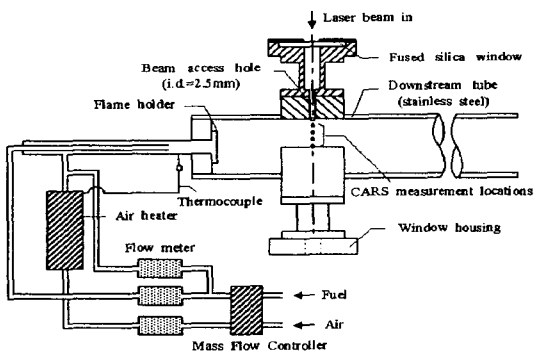
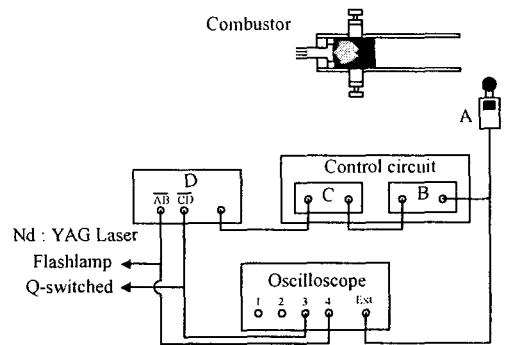
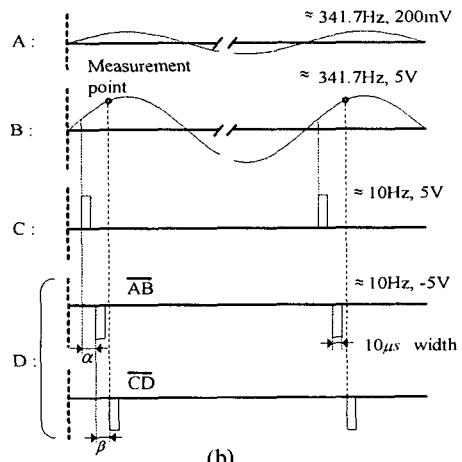


Fig. 1 Schematic of the dump combustor



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Schematic diagram of experimental apparatus and (b) Chart for signal synchronization ; A, sound level meter (SLM); B, amplifier circuit; C, counter circuit; D, delay generator (DG-535)

2.3 실험 방법

Fig.2 (b)에 나타낸 신호동기 시스템의 개략도를 간략히 설명하면 다음과 같다. SLM으로부터 나온 신호(A)를 5V의 전압신호(B)로 증폭시킨다. 카운터 회로를 이용하여 일정 임계값(2Volt)에서 TTL 신호를 만들고 동시에 회로에 내장된 마이크로 칩에서 25~40개의 신호를 카운터하여 버림으로써 10Hz 근방의 TTL 신호(C)를 만들어준다. 이 신호는 게이트 조절기(D)로 보내지는데, 그림에서 보듯 “β”는 레이저의 출력을 조절하는 플래쉬 램프와 Q-스위치사이의 시간지연으로

본 실험에서는 $150\mu s$ 로 일정하다. 그러므로 “ α ”만을 조절함으로써 압력신호의 임의의 위상에서 연소기내 온도측정이 가능하게 된다. 본 실험에서는 “ α ”를 $250\mu s$ (또는 $125\mu s$)간격으로 한 주기의 압력 사이클 동안 24번 측정하였는데, 이는 대략 위상각 15° 에 상응한다. 각 위상에서 500번의 단발 스펙트럼을 받아 평균온도와 히스토그램 등을 구하였으며, 배경신호의 변동을 고려하여 100번의 배경 스펙트럼을 획득하였다. Table 1은 실험조건을 요약한 것으로, CARS 온도측정은 축 방향($H=20,25,30mm$) 중심지점에서 행하였으며, 일정지점($H=20mm, R=0mm$)에서는 연료공기의 혼합정도(ϵ)가 위상별 온도변화에 미치는 영향을 조사하였다.

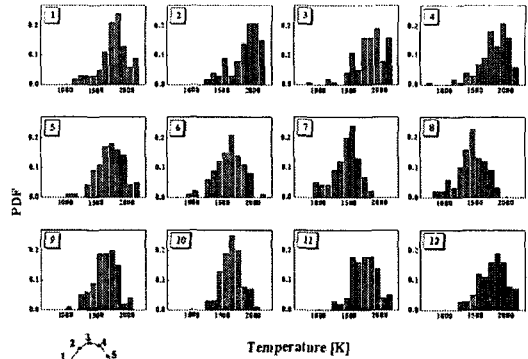
3. 실험 결과 및 고찰

연소불안정이 발생하였을 때의 시간에 따른 압력신호를 받아 그 신호를 FFT 변환하여 $341.7Hz$ 의 고유주파수를 가진 것을 발견할 수 있다.

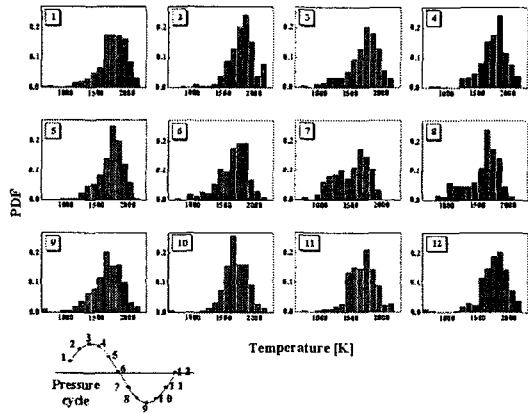
Fig. 3에 $H=20mm, R=0mm$ 지점에서의 연료-공기 혼합정도(ϵ)에 따른 위상별 온도의 확률분포함수(PDFs)를 나타내었다. Fig. 3 (a), (b)에서의 각각 12개의 그림은 좌측 하단에 표시된 주기성을 띄는 압력 사이클의 12 위상에서의 PDFs 측정 결과를 나타낸다. 전체적으로 온도 변동 폭이 $500K$ 정도의 가우시안 형태라기보다는 $1000K$ 정도의 온도 변동 폭을 가지는 베타 함수 형태를 보여주고 있다. 또한, $\epsilon=100\%$ 에 가까워질수록 온도 변동 폭이 넓어지는 경향을 나타냄을 발견할 수 있다. 이에 대한 자세한 고찰은 다음에 나타낸 Fig. 4~6에서 하기로 한다.

Table 1. Experimental conditions

Parameters	Test ranges
Inlet temperature (K)	650
Overall equivalence ratio	0.50
Fuel-air mixing quality (%)	100, 87.5, 75
Mean velocity(m/s)	15
Phase angle(deg.)	$0 \sim 360$
Measurement locations(mm)	$H=20,25,30$



(a)



(b)

Fig. 3 Temperature PDFs obtained at the equally spaced 12 phases of periodic pressure cycle at the location of $H=20mm, R=0mm$ (a) $\epsilon=75\%$ (b) $\epsilon=100\%$ conditions

$\epsilon=75, 87.5, 100\%$ 조건하에서의 위상에 따른 평균온도의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 우선, 세 조건에서의 결과 모두가 압력신호와 아주 비슷한 주기성을 띠는 것을 알 수 있다. 반면에, 전체적인 경향은 압력신호에 비해 약간 좌측으로 평행 이동된 것 또한 발견할 수 있는데, 이는 화학반응에 의한 시간지연에 따른 결과로 사료된다. 또한, $\epsilon=75\%, 87.5\%, 100\%$ 조건에서의 12개 위상평균온도의 평균은 각각 $1762K, 1725K, 1697K$ 로써, ϵ 가 낮을수록 즉, 연료/공기 혼합이

불완전할수록 높게 나타났다. 아울러 각 조건에서의 12개 위상평균온도의 최대-최소 차이를 살펴보면, 각각 456K, 399K, 279K로써 연료/공기 혼합이 불완전할수록 온도의 변동 폭이 크다는 사실을 발견할 수 있다.

Fig. 5에 $\epsilon=75, 87.5, 100\%$ 조건하에서의 위상 변화에 따른 무차원 표준편차(Normalized standard deviation, σ_N) 결과를 나타내었다. 이 파라미터는 각 위상에서 얻은 500개의 온도 데이터로부터 표준편차를 구한 후 그 위상에서의 평균온도로 나누어 준 것으로 정의되는데, 예를 들어, $\sigma_N=0.1$ 이라는 것은 그 위상에서의 표준편차가 평균온도의 10%라는 것을 의미한다. 이러한 접근방식은 원래 속도 데이터에서 국소 난류강도(local turbulent intensity)를 구하기 위해 많이 사용되었는데, 이를 온도 데이터에 적용시킴으로써 특정 지점에서의 시간(또는 위상)에 따른 난류강도에 관한 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. σ_N 에 대한 자세한 물리적 의미는 참고 문헌[10]을 참조하기로 한다.

결과를 살펴보면, 특정 ϵ 에서 위상(또는 시간)에 따른 σ_N 가 거의 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 위상에 따른 평균온도 결과와는 달리, 압력 위상의 변화가 측정위치에서의 무차원 표준편차에 미치는 영향은 크지 않다는 것을 의미한다. 또한 주목할 점은, 12개 무차원 표준편차의 평균을 비교해 볼 때 $\epsilon=75\%$ 에서는 0.104 인 반면에 $\epsilon=100\%$ 에서는 0.140으로 $\epsilon=75\%$ 조건에서 오히려 더 작은 값을 가진다는 것이다. 이는 Fig. 3에서 고찰한 $\epsilon=100\%$ 에서 온도 변동 폭이 더 넓어진다는 내용과 일치하는 결과라 하겠다. 즉, 온도 변동 폭이 500K정도 되는 가우시안 분포는 $\epsilon=75, 87.5\%$ 조건에서 발생할 확률이 높다는 것을 의미한다.

연료/공기의 혼합정도(ϵ)가 온도에 미치는 영향은 Fig. 6에서 더욱 뚜렷하게 관찰할 수 있다. ϵ 가 고온 발생에 미치는 영향을 알아보기 위해 Fig. 3의 온도 PDFs 결과로부터 ϵ 에 따른 1900K 이상의 온도가 발생하는 확률분포 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

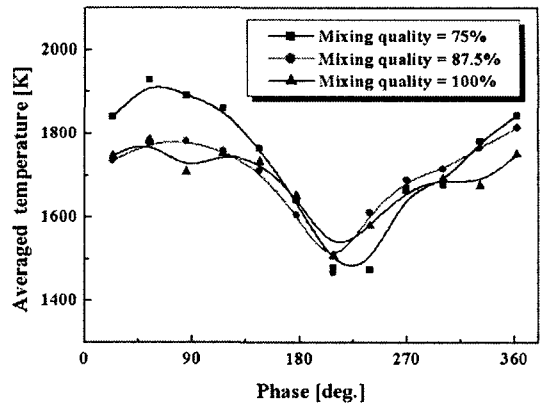


Fig. 4 Profiles of phase-resolved temperature at $\epsilon=75, 87.5$ and 100% ($H=20\text{mm}, R=0\text{mm}$)

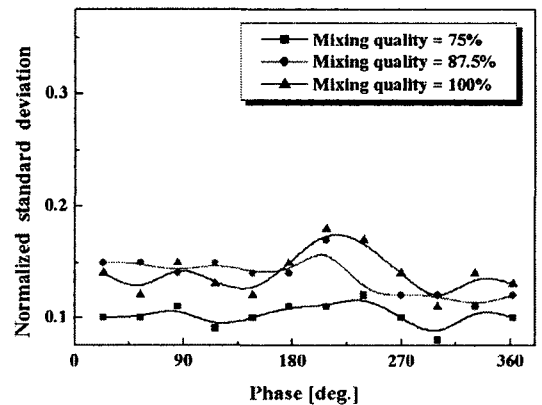


Fig. 5 Profiles of N-std at the condition of $\epsilon=75, 87.5$ and 100% ($H=20\text{mm}, R=0\text{mm}$)

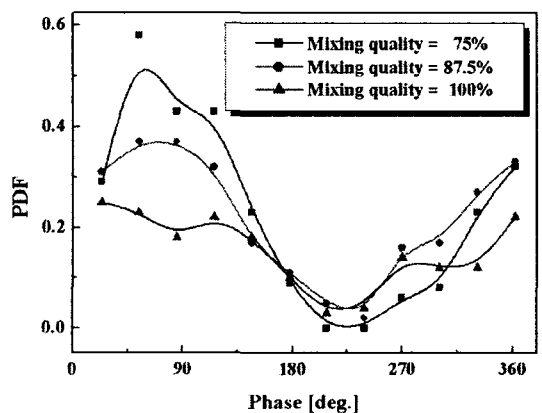


Fig. 6 PDFs profiles of high temperature occurrence at the condition of $\epsilon=75, 87.5$ and 100%

1900K을 설정한 이유는 일반적으로 이 온도이상에서 NO_x의 발생이 급격히 증가한다는 보고에 근거하여[14], ϵ 가 NO_x 발생에 미치는 영향을 알아보기 위함이다. 연소기 내 NO_x 생성에 관한 이해를 돕는 관점뿐만 아니라, 화염 온도로부터 화염내의 국소 당량비를 유추할 수 있다는 보고[15]의 관점에서 이러한 접근은 특별한 관심 대상이라 하겠다.

본 실험에 사용된 연료/공기 혼합기의 전체 당량비(Overall equivalence ratio)는 0.5로써, 이에 상응하는 계산된 화염단열온도는 1760K이다. 한편, 1900K은 당량비 0.575에 대응하는 화염단열온도라는 것을 고려하면, 온도 결과중의 고온의 존재는 당량비 변동과 관련지어 설명이 가능하다는 것을 발견할 수 있다. Fig. 6을 살펴보면, $\epsilon=75, 87.5, 100\%$ 조건 모두에서 위상각 90° 근처에서 피크값을 가지는 반면에, 225° 근처에서는 고온이 거의 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 특히, $\epsilon=75\%$ 조건에서는 50%이상의 스펙트럼이 1900K 이상의 온도를 나타내고 있다. 또한 주목할 점은, 고온발생 경향이 압력 신호의 형태, 주기와 거의 일치하는 사인파 모양을 띠는 것으로써, 이는 Lieuwen 등이 행한 수치적 연구결과와 잘 일치하는 결과이다. 예상대로, 연료-공기의 혼합정도가 불완전할수록 진폭은 커진다는 것 또한 발견할 수 있었으며, 이는 연료/공기의 혼합정도가 불완전 할수록 NO_x 발생이 많을 것이라는 것과 희박 예혼합 연소를 함에 있어 연료/공기의 혼합이 NO_x 발생에 얼마나 중요한 역할을 하는 지를 잘 보여준 결과라 하겠다. 이러한 NO_x 배출 특성은 선행연구결과[6]에서도 찾아 볼 수 있다.

4. 결론

매탄을 연료로 한 모형 가스터빈 연소기에서 CARS 기법을 이용한 각 위상에서의 온도를 측정함으로써, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 위상에 따른 평균온도는 모든 연료/공기 혼합정도(ϵ) 조건에서 압력 신호와 유사한 형태를 가지는 반면에, 혼합이 불완전할수록 평균온도는 높았으며 최대-최소 평균온도의 차이가 커진다는 것을 발견할 수 있었다.

(2) 무차원 표준편차는, 위상평균온도 결과와는 달리, 측정지점에서의 위상에 따라 변화가 거의 없는 일정한 값을 나타내었다. 또한, 12-위상의 평균 무차원 표준편차는 $\epsilon=75\%$ 조건이 $\epsilon=100\%$ 보다 오히려 더 낮다는 것을 알 수 있었다.

(3) 연료/공기 혼합정도(ϵ)가 NO_x 발생 및 당량비 변동에 미치는 영향은 각 위상별 고온 발생 확률을 살펴봄으로써 명확히 관찰할 수 있었는데, 연료/공기 혼합이 불완전할수록 진폭이 큰 형태를 나타내었다. 이는 그 지점에서 당량비의 변동이 심할 뿐만 아니라 NO_x 발생이 많을 것으로 판단되었다. 아울러, 위상에 따른 고온 발생 결과는 압력신호와 거의 일치하는 주기를 가지는 사인파 형태를 나타냄을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

1. Lee, S. Y., Seo, S., Broda, S. P., and Santoro, R. J., "An Experimental Estimation of Mean Reaction Rate and Flame Structure during Combustion Instability in a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 28, 2000, pp. 775~782.
2. Venkataraman, K. K., Preston, L. H., Simons, D. W., Lee, B. J., Lee, J. G., and Santavicca, D. A., "Mechanism of Combustion Instability in Lean Premixed Dump Combustor," *J. Propulsion and power*, Vol. 15, 1999, pp. 909~918.
3. McManus, K. R., Poinso, T., and Candel, S. M., "A Review of Active Control of Combustion Instabilities", *Prog. Energy*

- Combust. Sci.*, Vol. 19, 1993, pp. 1~29.
4. Zinn, B. T., and Neumeier, Y., "An Overview of Active Control of Combustion Instabilities," *AIAA paper*, 1997, 97-0461.
 5. Fric, T. F., "Effects of Fuel-Air Unmixedness on NO_x Emissions," *AIAA paper* 1992, 92-3345.
 6. Shih, W. P., Lee, J. G., and Santavicca, D. A., "Stability and Emissions Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 26, 1996, pp. 2771~2778.
 7. McDonnell, V. G., and Samuelson, G. S., "Measurement of Fuel Mixing and Transport Processes in Gas Turbine Combustion", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 11, 2000, pp. 870~886.
 8. Mokhov, A. V., Aptroot, R., and Levinsky, H. B., "Experimental Observation of Correlation between the Temperature of a Laminar Flame and Acoustic Oscillations", *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 120, 1996, pp. 1~9.
 9. Bradley, D., Gaskell, P. H., Gu, X. J., Lawes, M., and Scott, M. J., "Premixed Turbulent Flame Instability and NO Formation in a Lean-burn Swirl Burner," *Combust. Flame*, Vol. 115, 1998, pp. 515~538.
 10. Hedman, P. O., Flores, D. V., and Fletcher, T.H., "Observations of Flame Behavior in a Laboratory-scale Pre-mixed Natural gas/Air Gas Turbine Combustor from CARS Temperature Measurements," *ASME*, 2002, GT-2002-30054.
 11. Foglesong, R. E., Frazier, T. R., Flamand, L. M., Peters, J. E., and Lucht, R. P., "Flame Structure and Emissions Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *AIAA paper*, 1999, 99-2399.
 12. Jones, C. M., Lee, J. G., and Santavicca, D. A., "Closed-loop Active Control of Combustion Instabilities using Sub-harmonic Secondary Fuel Injection," *J. Propulsion and power*, Vol. 15, 1999, pp. 584~590.
 13. Hahn, J. W., Park, C. W., and Park, S. N., "Broadband Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy with a Modeless Dye Laser," *Appl. Opt.*, Vol. 36, 1997, pp. 6722~6728.
 14. Lefevbre, A. H., "Gas Turbine Combustion," 2nd Ed., *Taylor & Francis*, 1999, pp. 324~344.
 15. Docquier, N., and Candel, S., "Combustion Control and Sensors: A Review," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 28, 2002, pp. 107~150.