

CARS를 이용한 희박 예혼합 가스터빈 연소기내 온도 측정 (II)

-당량비가 위상별 온도에 미치는 영향-

이종호*·전충환*·박철웅**·한재원***·장영준†
(2004년 2월 16일 접수, 2004년 8월 12일 심사완료)

Phase-Resolved CARS Temperature Measurements in a Lean Premixed Gas Turbine Combustor (II)

-Effects of Equivalence Ratio on Phase-Resolved Gas Temperature-

Jong Ho Lee, Chung Hwan Jeon, Chul Woong Park, Jae Won Hahn
and Young June Chang

Key Words: Phase-Resolved Gas Temperature(위상 평균 온도), CARS(반 스톡스 라만 분광법), Combustion Instability(연소 불안정), Equivalence Ratio(당량비)

Abstract

The effect of equivalence ratio and fuel/air mixing quality on the phase-resolved gas temperatures at different phases of the oscillating pressure cycle was experimentally investigated. An atmospheric pressure, optically accessible and laboratory-scale dump combustor operating on methane with heat release rate of 1.59kW was used. Temperature measurements were made using coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (CARS) at several spatial locations for typical unstable combustion conditions. Analysis was conducted using parameters such as phase-resolved averaged temperature, normalized standard deviation and temperature probability distribution functions (PDFs). Also the probability on the occurrence of high temperature (over 1900K) was investigated to get the information on the perturbation of equivalence ratio and NOx emission characteristics. It was shown that most of temperature histograms exhibit Gaussian profile which has short breadth of temperature fluctuation at equivalence ratio of 0.6, while beta profile was predominant for the cases of other equivalence ratios ($\Phi=0.55, 0.50$). It was also shown that phase-resolved averaged temperature oscillated in phase with pressure cycle, while normalized standard deviations which represent temporal turbulent intensity of temperature showed nearly constant value around 0.1. The characteristics on the occurrence of high temperature also displayed periodic wave form which was very similar to the pressure signal. And the amplitude of this profile went larger as the fuel/air mixing quality became poorer. These also provided additional information on the perturbation of equivalence ratio at flame as well as NOx emission characteristics.

기호설명

$T_{ave, phase}$: 위상평균온도 [K]

T_{ave} : 위상평균온도들의 평균 [K]

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

σ_N : 무차원 표준편차

E-mail : changyj@pusan.ac.kr

ϵ : 연료-공기 혼합 정도 [%]

TEL : (051)510-2332 FAX : (051)512-5236

Φ : 당량비

* 회원, 부산대학교 기계공학부 기계기술연구소

H : 축 방향 위치 [mm]

** 한국표준과학연구원 레이저계측그룹

R : 반경 방향 위치 [mm]

*** 회원, 연세대학교 기계공학부

1. 서론

회박 예혼합 연소기술은 가스터빈 연소분야에서 최근 강화되고 있는 NO_x 배출 규제를 만족시킬 수 있는 대안으로 주목받고 있다. 그러나 회박 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.⁽¹⁻⁶⁾ 연소 불안정 메커니즘과 이에 대한 능동제어에 관해서는 잘 정리된 몇몇 논문에서 찾아볼 수 있다.^(7,8) 전술한 메커니즘들 중에서, 당량비 및 연료/공기 혼합 정도가 연소 불안정에 미치는 영향을 살펴보는 것은 회박 예혼합 연소기 설계뿐만 아니라 연소가스 배출특성 및 연소 불안정 발생측면에서도 아주 중요한 일이라 하겠다. 일반적으로 연소과정 중에 연료-공기의 불균일성이 생기면 연소기내 국소 고온 영역이 발생하게 되는데, 이 영역은 NO_x 발생이 많은 영역으로 여겨지고 있다. 이처럼 연료/공기의 불균일 분포가 NO_x 발생 및 성능 특성에 미치는 영향에 관한 연구 또한 활발히 수행되었으며,^(2,9) 가스터빈 연소에서 연료/공기 혼합에 관한 전반적인 내용을 요약한 논문도 찾아볼 수 있다.⁽¹⁰⁾ 이와 아울러, 혼합기의 불균일성의 지표 또는 원인으로 여겨지는 당량비 변동(perturbation of equivalence ratio)에 관한 연구 또한 활발히 수행되어 왔으며, 다수의 논문에서 이에 대해 보고하고 있다.^(3,11-13)

본 연구에 사용된 CARS 기법은 잘 정립된 비접촉식 진단 기법으로서, 시간적-공간적 분해능을 가지는 순간온도측정이 가능하다. CARS 기법은 많은 실험실 스케일 또는 실용 연소기에 적용되었으며,^(14,15) 최근에는 LDV 또는 PLIF 기법 등과 아울러 연소현상을 명확히 규명하기 위하여 활발히 이용되고 있다.⁽¹⁶⁻¹⁹⁾ 전술한 바와 같이, 회박 예혼합 연소기에서 많은 이론적, 실험적 연구가 수행되었다. 하지만 연소 불안정 조건하에서의 온도측정에 관한 논문은 거의 찾아보기 힘들었으며, 또한 이들 논문들은 대부분 속도, 압력, 화염 형상 가시화에 국한되어 있음을 발견할 수 있다.

이에 본 연구에서는 특정 고유주파수(dominant frequency)를 가지는 압력 사이클을 12등분하여

각 위상에서의 온도를 측정하였다. 본 실험은 크게 두 부분으로 구성되어 있다. 첫째로, 연료유량을 고정한 후, 공기유량을 변화시켜 당량비에 따른 연소기내 축 방향과 일정 높이에서의 반경 방향 온도분포를 측정하였다. 이는 연소기내 특정 위치에서 온도가 어떻게 변하는지에 관한 정보를 줄 뿐만 아니라, 이미 획득한 화염이미지 결과와 비교하기 위해 수행되었다. 둘째로, 화염 내 특정 위치에서 당량비가 위상별 온도에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한, 연료/공기 혼합 정도에 따른 온도결과와 비교하였다. 알려진 바에 의하면, 연소불안정 조건에서 위상별 온도를 측정한 실험적, 이론적 연구가 거의 전무한 실정하기에 연소 불안정 현상을 좀 더 명확히 이해하기 위한 기본 자료를 제공함과 아울러 NO_x 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 내경 12mm, 길이 500mm의 연료/공기 혼합부와 내경 42mm, 길이 440mm의 연소부로 구성되어 있다.^(2,20) 화염구조를 관찰할 때에는 석영관을 연소부로 사용하였는데, CARS를 이용한 온도 측정에 있어 석영관의 직경이 너무 작아 레이저 빔의 초점이 관 표면을 손상시키는 문제가 발생하였다.

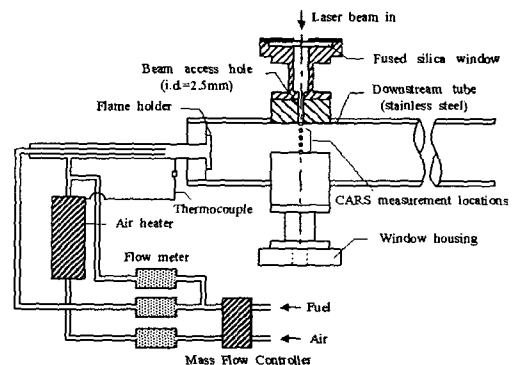


Fig. 1 Schematic diagram of the dump combustor

이를 해결하기 위해, 석영관은 스테인리스 스틸 재질로 대체되었으며, 직경 2.5mm의 구멍을 뚫어 창을 통한 광학적 접근을 시도하였다. 이러한 광학적 구성은 Bradley 등의 연구⁽¹⁵⁾에서도 찾아볼 수 있다. 공기는 질량유량계를 사용하여 대기압 하에서 일정하게 공급하였으며, 실제 가스터빈과 유사한 조건에서 실험을 수행하기 위해 2kW 용량의 히터를 사용하여 혼합부 끝단에서의 온도가 650K로 일정하게 유지되도록 하였다. 연료는 메탄을 사용하였으며, 고위발열량에 근거한 열 방출율은 1.59kW이다. 연료의 공급위치는 두 군데로써, 공급되는 이들 두 질량유량의 비로써 실험변수중 하나인 혼합정도(mixing quality, ϵ)가 정의되는데, 그 정의는 다음과 같다.

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

$\epsilon = 100\%$ 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. 본 실험에서는 $\epsilon = 75\%$ 조건에서 당량비에 따른 온도결과를 비교하였으며, 당량비 0.5 조건에 대해서는 $\epsilon = 100\%$ 의 결과와 비교하였다.

2.2 CARS 측정 장치

실험에 사용된 광대역 이동형 CARS 시스템의 광학적 개략도에 관한 자세한 내용은 참고문헌⁽²¹⁾을 참조하기로 한다. 본 실험에 사용된 CARS 장치의 평균온도 측정오차는 온도범위 1000~2400K에서 2%이하이며,⁽²¹⁾ 측정체적은 지름 100 μ m, 길이 1~2mm이다.

CARS 온도측정을 위한 실험장치와 신호동기시스템의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 본 실험에 사용된 센서는 마이크로폰 타입의 소음측정기(Sound Level Meter; SLM)로서 연소 불안정이 발생하였을 때의 음압을 측정하였다. 측정의 일관성을 위해 설치위치 및 방향을 일정하게 하였다.

SLM에서 나오는 출력전압은 대략 200mV로써 레이저 동작을 위한 트리거 신호(trigger signal)로

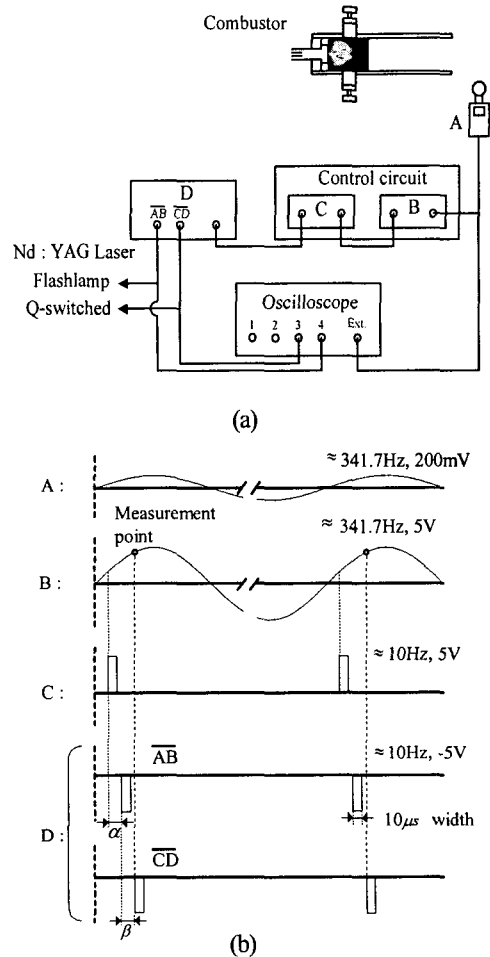


Fig. 2 (a) Schematic diagram of experimental apparatus and (b) Chart of signal synchronization for phase-resolved temperature measurement; A, sound level meter (SLM); B, amplifier circuit; C, counter circuit; D, delay generator (DG- 535)

사용하기에는 너무 약한 값이었기에, 증폭회로를 통과시켜 5V 출력이 되도록 하였다. 또한 레이저 시스템이 최적화되어 있는 반복율(10Hz)과 비슷하게 레이저 헤드램프가 작동하도록 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.

2.3 실험 방법

Fig. 2(b)에 나타난 신호동기 시스템의 개략도를 간략히 설명하면 다음과 같다. SLM으로부터 나온 신호(A)를 5V의 전압신호(B)로 증폭시킨다. 카운터 회로를 이용하여 일정 임계값(2Volts)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, Fig. 3(b)에서 보듯 “β”는 레이저의 출력을 조절하는 플래쉬 램프와 Q-스위치사이의 시간지연으로 본 실험에서는 150μs로 일정하다. 그러므로 “α”만을 조절함으로써 압력신호의 임의의 위상에서 연소기내 온도측정이 가능하게 된다. 본 실험에서는 “α”를 250μs 간격으로 한 주기의 압력 사이클 동안 12번 측정하였는데, 이는 대략 위상각 30°에 상응한다. 각 위상에서 500번의 단발 스펙트럼을 받아 평균온도와 히스토그램 등을 구하였으며, 배경신호의 변동을 고려하여 100번의 배경 스펙트럼을 획득하였다. 또한, 결과를 해석함에 있어 500개의 스펙트럼 중 공기의 공급온도보다 낮은 온도를 나타내는 0~10%의 데이터는 제거하였다. CARS 온도측정은 축 방향(H=20, 25, 30mm)과 H=30mm에서의 반경방향(R=0, 5, 10, 15mm)으로 행하였으며, 일정지점(H=20mm, R=0mm)에서는 당량비 및 연료/공기 혼합정도(ε)가 위상별 온도변화에 미치는 영향을 조사, 비교하였다. 실험조건을 요약하면 Table 1과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

연소불안정이 발생하였을 때의 시간에 따른 압력신호를 얻어 이 신호를 FFT 변환하면 341.7Hz의 고유주파수를 가진 것을 발견할 수 있다.

Table 1 Experimental conditions

Parameters	Test ranges
Inlet temperature (K)	650
Overall equivalence ratio	0.5, 0.55, 0.6
Fuel-air mixing quality (%)	75 (100)
Phase angle(deg.)	0~360
Measurement locations(mm)	R= 0~20 H= 20,30,160

이는 본 연소기의 길이/직경 비(ratio)가 8~12의 값을 가지기 때문에 quarter wave의 주파수를 가진다는 선행연구⁽²²⁾와 잘 일치하는 결과이다.

Fig. 3에 H=160mm에서 반경방향에 따른 당량비 변화가 평균온도에 미치는 영향을 나타내었다. 벽면 근처가 연소기 중앙에 비해 현저히 낮은 온도를 나타내고 있는데, 이는 단열되지 않은 벽면으로의 열손실 때문이다. 벽면 근처와 중앙에서의 온도차이는 대략 100K 정도로 나타났다. 또한, 배기가스가 연소기 출구에 가까워지면서 부력효과가 더욱 지배적이라는 것을 알 수 있다. 당량비가 감소함에 따라, 평균온도는 함께 감소하는 것을 발견할 수 있다. 이는 높은 당량비 조건에서 유입되는 유동의 속도와 난류강도가 낮아 상대적으로 많은 연료가 후연 영역까지 연소되지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 아울러, 각 당량비 조건에서의 단열화염온도를 살펴보면, Φ=0.50, 0.55, 0.60에서 각각 1757K, 1846K, 1931K로써 H=160mm에서의 반경방향 온도결과와 일치하는 경향을 나타내고 있다. 비록 본 논문에는 나타내지 못하였지만, ε=50%, 100% 조건에서도 H=160mm에서의 반경방향에 따른 평균온도 결과는 같은 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

Fig. 4에 H=160mm에서의 무차원 표준편차(σ_N) 결과를 나타내었다. σ_N은 6000회 측정된 온도의 표준편차를 평균온도로 나누어 준 값으로 정의되는데, 이는 변동하는 속도 데이터에서 국소 난류강도를 결정하기 위해 주로 사용되어지는 방법이다. σ_N을 도입함으로써 본 연구에서는 온도의

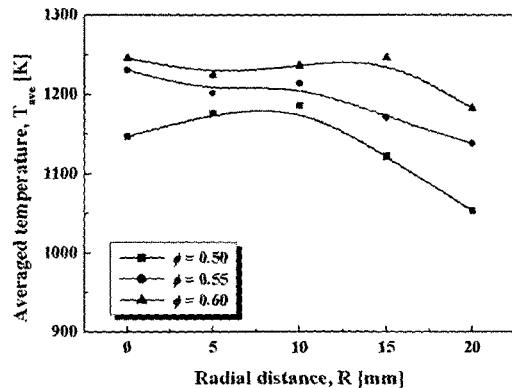


Fig. 3 Profiles of phase-resolved averaged temperature obtained at the axial location of 160mm

시간변화에 따른 난류강도(temporal turbulent intensity of temperature)에 관한 통찰력을 얻을 수 있을 것으로 사료된다. σ_N 에 대한 자세한 물리적인 의미는 참고문헌⁽¹⁶⁾을 참조하기로 한다.

Fig. 4의 결과를 살펴보면, 모든 당량비 조건에서 0.1 근방의 값을 가진다는 것을 발견할 수 있다. 이는 각 지점에서의 온도 표준편차가 평균온도의 10% 정도에 달한다는 것을 의미함과 동시에 온도의 시간변화에 따른 난류강도는 압력 사이클의 위상과는 무관하다는 것을 나타낸다. 아울러 주목할 점은, 상대적으로 높은 σ_N 을 가지는 위치가 당량비에 따라 다르다는 사실이다. 즉, $\Phi=0.50, 0.60$ 에서는 연소기 벽면근처에서 가장 높은 σ_N 을 가지는 반면에, $\Phi=0.55$ 의 경우 $R=20$ mm에서 다른 반경방향 위치보다 평균온도가 낮음에도 불구하고 σ_N 이 가장 낮게 나타나는 것을 발견할 수 있다. 이는 당량비를 변화시킴에 따른 연소불안정 발생 메커니즘과 화염구조가 바뀐 것에 기인한 결과로 사료된다.

Fig. 5에 $H=30$ mm 지점에서의 반경방향에 따른 평균온도와 무차원 표준편차(σ_N) 결과를 함께 나타내었다. 이 위치에서의 측정이유는 압력위상에 따른 화염구조 관찰결과로부터 화염이 가장 신장되었을 때의 화염높이와 거의 일치하는 화염 바로 후단에서의 온도결과를 살펴본 것이다. Fig. 3에 나타낸 $H=160$ mm 지점에서의 결과와는 상반되는 경향을 나타내었다. 즉, 당량비 0.50에서의 평균온도가 0.55 조건의 결과보다 오히려 약간 높게 나타나는 것을 발견할 수 있다. 한편, $\epsilon=50\%$,

100% 조건에서도 같은 경향을 나타냄을 알 수 있었으며, $\epsilon=100\%$ 에 가까울수록 연소기 중앙에서의 온도가 높아져 벽면근처 온도와의 차이는 커지는 것을 발견할 수 있었다. 이는 유입되는 공기의 속도 증가에 의한 난류강도의 증가가 연소를 촉진시킨 결과로 사료된다. 일반적으로 가스터빈 연소에서 연소기로 유입되는 연료의 질량유량은 정확히 알 수 있다. 반면에, 공기는 정확하게 계측하는 것이 불가능하기 때문에, 정확한 당량비를 추정하는 것이 쉽지 않음을 알 수 있다.⁽²⁴⁾ 이러한 근거에서 본 연구에서는 연료의 질량유량을 고정하여 연소기내 연료의 열 방출을 1.59kW로 고정한 후, 공기의 질량유량을 변화시키면서 당량비를 조정하였다. 고로, 공기의 유입속도가 빨라짐에 따라 연소불안정 메커니즘에도 영향을 미칠 뿐만 아니라 당량비의 변동(perturbation of equivalence ratio)또한 커져서 이 지점에서 낮은 당량비 조건에서 오히려 높은 평균온도가 나타난 것으로 사료된다. 무차원 표준편차(σ_N) 결과를 살펴보면, 반경방향에 대해 전체적으로 거의 일정하게 나타났으며, $\Phi=0.50$ 경우가 $\Phi=0.55$ 조건보다 낮게 나타났다. 이는 전술한바와 같이, σ_N 은 압력위상에는 무관한 반면에 측정위치 또는 운전조건에 영향을 받는다는 것을 의미한다.

주기적으로 변하는 온도의 특성을 자세히 살펴보기 위하여 확률분포함수(PDFs)를 사용하였다. CARS 온도측정은 주기적인 압력 사이클을 위상각 30° 간격으로 12등분하여 측정하였는데, 이는 $250\mu s$ 의 시간간격에 상응한다. Fig. 6에 $H=20$ mm,

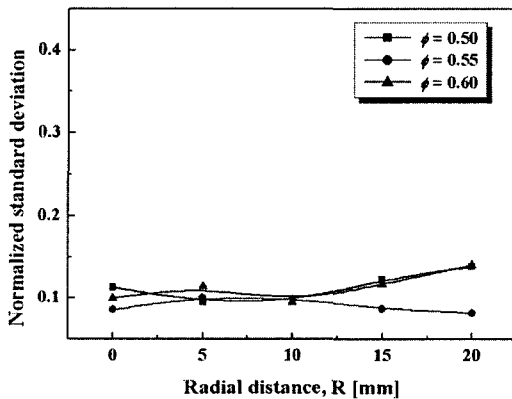


Fig. 4 Profiles of normalized standard deviation obtained at the axial location of 160mm

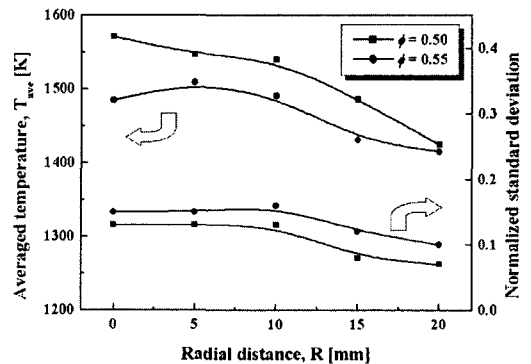


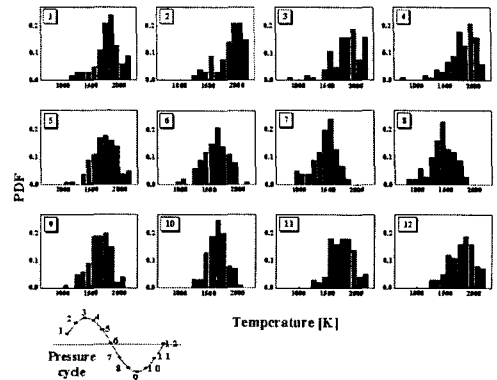
Fig. 5 Profiles of phase-resolved averaged temperature and normalized standard deviation obtained at the axial location of 30mm

R=0mm 지점에서의 당량비 변화에 위상별 온도의 PDFs를 나타내었다. Fig. 6(a), (b), (c)에서의 각각 12개의 그림은 좌측 하단에 표시된 12 위상에서의 측정 결과를 나타낸다. 전체적으로 $\Phi=0.60$ 조건에서는 온도 변동 폭이 500K 정도의 가우시안(Gaussian) 형태를 나타내며 일정구간 온도의 출현 최고확률도 35%에 달한다. 반면에, 당량비가 감소함에 따라 온도 변동 폭이 넓어져 1000K 정도의 변동 폭을 가지는 베타(Beta) 함수 형태를 보여주고 있다. 일정구간 온도의 출현 최고확률 또한 25%에 불과하다. 자세한 고찰은 다음에 나타낸 Fig. 7~9에서 하기로 한다.

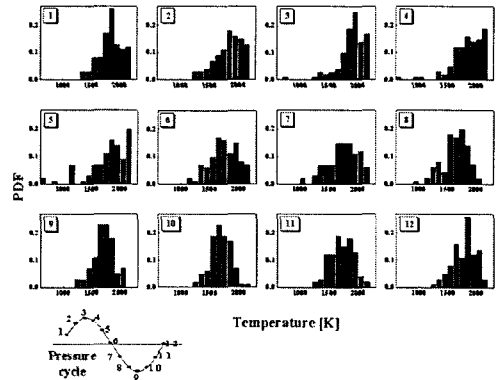
먼저, 용어의 혼란을 피하기 위해 각 위상에서 구한 500개의 온도를 평균한 것을 “ $T_{ave, phase}$ ”라고 정의하였다. 그리고 12개의 “ $T_{ave, phase}$ ”의 평균값을 “ T_{ave} ”로, 무차원 표준편차를 “ σ_N ”으로 정의하였다. 즉, “ T_{ave} ”는 압력의 위상을 고려하지 않고 구한 6000개 온도의 평균값이라 할 수 있다.

$\Phi=0.50, 0.55, 0.60$ 조건하에서의 위상에 따른 $T_{ave, phase}$ 의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 첫째, $\Phi=0.50, 0.55$ 조건에서는 압력신호와 아주 비슷한 주기성을 갖는다는 것을 발견할 수 있는 반면에, $\Phi=0.60$ 에서는 거의 일정한 온도를 나타내었다. 이는 속도 감소 또는 당량비 증가에 따른 연소불안정이 저감되어 안정한 연소영역, 즉 당량비 변동이 적은 영역으로 갈려고 하는 성질 때문인 것으로 사료된다. 그래서 평균온도 또한 연소불안정이 심한 경우에 비해 아주 낮은 값을 나타내고 있음을 발견할 수 있다. $\Phi=0.50, 0.55$ 조건에서 전체적인 경향은 압력신호에 비해 약간 좌측으로 평행 이동하였는데, 이는 화학반응에 의한 시간 지연 때문이다. 둘째, 당량비가 낮아짐에 따라 온도는 더욱 심하게 변하는 것을 발견할 수 있다. 이는 당량비가 희박 가연한계에 가까워질수록 연소불안정은 더욱 심해져 $T_{ave, phase}$ 의 최대-최소 차이가 커진다는 것을 의미한다. 아울러 $\varepsilon=100\%$ 조건과의 비교를 통해, 동일한 당량비에서는 연료/공기 혼합이 양호할수록 위상에 따른 온도 변동이 적음을 알 수 있다.

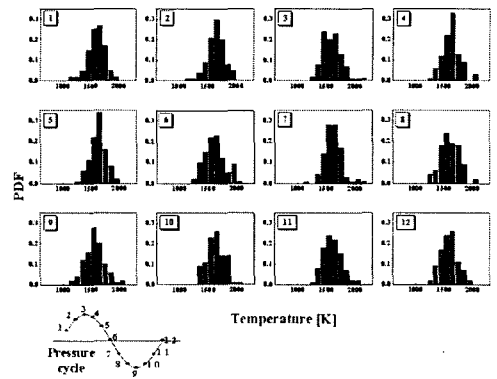
Fig. 8에 $\Phi=0.50, 0.55, 0.60$ 조건하에서의 위상 변화에 따른 무차원 표준편차(σ_N)의 결과를 나타내었다. Fig. 4와 Fig. 5에서 살펴본 바와 같이, 압력 사이클의 위상에 따른 σ_N 의 변화가 거의 없음을 발견할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Temperature PDFs obtained at the equally spaced 12 phases of periodic pressure cycle at the location of H=20mm, R=0mm (a) $\Phi=0.50$ (b) $\Phi=0.55$ (c) $\Phi=0.60$ conditions

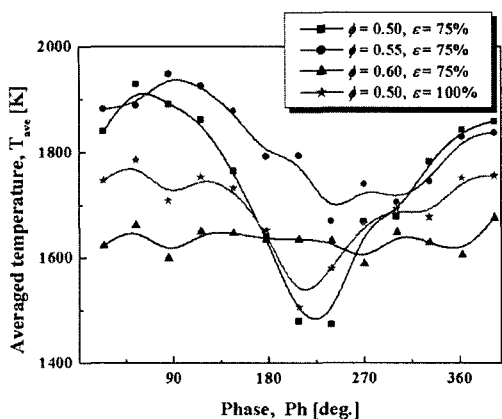


Fig. 7 Profiles of phase-resolved averaged temperature at different equivalence ratio conditions

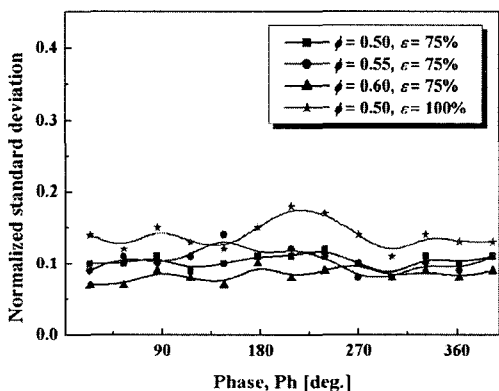


Fig. 8 Profiles of normalized standard deviations at different equivalence ratio conditions

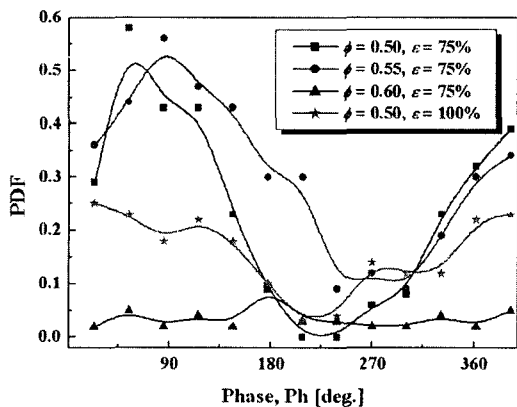


Fig. 9 PDFs profiles of high temperature occurrence at different equivalence ratio conditions

또한 주목할 점은 12개 σ_N 의 평균값을 비교해 볼때 $\Phi=0.60$ 에서 가장 낮았으며, $\Phi=0.50$ 조건에서는 $\epsilon=75\%$ 에서는 0.104로 $\epsilon=100\%$ 에서의 0.140보다 오히려 더 낮게 나타났다는 것이다. 이는 Fig. 6에서 고찰한 바와 같이 동일 당량비에서는 $\epsilon=100\%$ 에서, 그리고 동일 연료/공기 혼합정도에서는 당량비가 낮을수록 온도 변동 폭이 더 넓어진다는 내용과 일치하는 결과라 하겠다. 즉, 온도 변동 폭이 500K정도 되는 가우시안 분포는 ϵ 가 낮은 조건과 Φ 가 높은 조건에서 발생할 확률이 높다는 것을 의미한다.

당량비(Φ)와 연료/공기 혼합정도(ϵ)가 온도에 미치는 영향은 Fig. 9에서 더욱 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 두 파라미터가 고온 발생에 미치는 영향을 알아보기 위해 Fig. 6의 온도 PDFs 결과로부터 1900K 이상의 온도가 발생하는 확률분포를 도출하여 Fig. 9에 나타내었다. 1900K을 설정한 이유는, 일반적으로 이 온도 이상에서 NOx의 발생이 급격히 증가한다고 알려져 있기 때문에,⁽²³⁾ NOx 발생에 미치는 영향을 알아보기 위함이다. 연소기 내 NOx 생성에 관한 이해를 돕는 관점뿐만 아니라, 화염 온도로부터 화염내의 국소 당량비를 유추할 수 있다는 보고⁽²⁴⁾의 관점에서 이러한 접근은 특별한 관심대상이라 하겠다. 한편, 상용 프로그램(Gas equilibrium)을 이용해 구한 $\Phi=0.50$ 에서의 단일화염온도는 1757K이고 1900K는 $\Phi=0.58$ 에 대응하는 단일화염온도이다. 이를 고려하면, 온도 결과중의 고온의 존재는 당량비의 변동과 관련지어 설명이 가능하다. Fig. 9를 살펴보면, $\Phi=0.60$ 조건을 제외하고는 위상각 90° 근처에서 피크값을 가지는 것을 발견할 수 있다. 특히, $\epsilon=75\%$ 조건에서는 50%이상의 스펙트럼이 1900K 이상의 온도를 나타내고 있다. 반면에, 225° 근처에서는, $\Phi=0.55$ 에서 10%정도의 값을 가지기는 하지만, 고온이 거의 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 주목할 점은, 고온발생 경향이 압력 신호의 형태, 주기와 거의 일치하는 사인파(sine wave) 모양을 띤다는 것이다. 그리고 예상대로, ϵ 가 낮을수록 진폭은 커진다는 것을 발견할 수 있었다. 이는 연료/공기 혼합정도와 당량비 변화에 따른 연소불안정 현상이 희박 예혼합 연소를 함에 있어 NOx 발생에 얼마나 중요한 역할을 하는 지를 잘 보여준 결과라 하겠다. 선행연구⁽²⁾를 살펴보면, 이러한 고찰과 일치하는

즉, 연료/공기 혼합이 나뉠수록 NOx 발생이 많다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

메탄을 연료로 한 모형 가스터빈 연소기에서 당량비 및 연료/공기 혼합정도가 CARS 기법을 이용해 얻은 각 위상에서의 온도에 미치는 영향을 조사함으로써, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) H=30mm, 160mm에서 당량비가 평균온도에 미치는 영향은 상이한 경향을 보였으며, 벽면 근처가 연소기 중앙에 비해 100K 정도 낮다는 것을 알 수 있었다. 또한, 모든 당량비 조건에서 무차원 표준편차(σ_N)가 0.1 근방의 값을 가진다는 것을 발견할 수 있었는데, 이는 시간변화에 따른 온도의 난류강도는 압력 사이클의 위상과는 무관하다는 것을 의미한다.

(2) $\Phi=0.60$ 조건에서는 온도 변동 폭이 500K 정도의 가우시안(Gaussian) 형태를 나타내며 일정 구간 온도의 출현 최고확률도 35%에 달한 반면에, 당량비가 감소함에 따라 온도 변동 폭이 넓어져 1000K 정도의 변동 폭을 가지는 베타(Beta) 함수 형태를 보여주고 있다. 일정구간 온도의 출현 최고확률 또한 25%에 불과함을 확인하였다.

(3) H=20mm, R=0mm 지점에서의 당량비 변화에 따른 $T_{ave, phase}$ 결과로부터, $\Phi=0.50, 0.55$ 조건에서는 압력신호와 아주 비슷한 주기성을 갖는 반면에 $\Phi=0.60$ 에서는 거의 일정한 온도를 나타낸다는 것을 발견할 수 있었다. 즉, 당량비 변동이 적은 안정 연소영역에서의 평균온도는 연소 불안정이 심한 경우에 비해 낮다는 것을 의미한다.

또한, 당량비가 희박 가연한계에 가까워질수록 연소 불안정은 더욱 심해져 $T_{ave, phase}$ 의 최대-최소 차이가 커지는 것을 발견할 수 있다. 아울러, $\epsilon=75\%, 100\%$ 에서의 T_{ave} 는 각각 1762K, 1697K였고, 온도차는 각각 456K, 279K였다는 결과로부터 동일 당량비에서는 연료/공기 혼합이 양호할수록 위상에 따른 온도 변동이 적음을 알 수 있었다.

(4) H=20mm, R=0mm 지점에서의 당량비 변화에 따른 σ_N 의 결과로부터, 동일 당량비에서는 연료/공기 혼합정도가 양호할수록, 그리고 동일 연료/공기 혼합정도에서는 당량비가 낮을수록 온도 변동 폭(breadth)이 더 넓어짐을 발견할 수 있었다.

이는 운전조건에 따른 베타 또는 가우시안 함수 등의 온도분포 형태를 예상 가능하게 해 준다.

(5) H=20mm, R=0mm 지점에서의 당량비 변화에 따른 고온발생확률 결과로부터, 위상각 90° 근처에서 최고치를 갖고 225° 근처에서 최저치를 갖는 압력신호의 형태, 주기와 거의 일치하는 사인파 모양을 띤다는 것을 알 수 있었다. 또한, ϵ 가 낮을수록 진폭은 커진다는 결과로부터, 연료/공기 혼합정도가 희박 예혼합 연소를 함에 있어 NOx 발생에 미치는 영향을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원(KRISS)에서 수행되었으며, 실험에 도움을 주신 레이저계측그룹 연구원님들께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Keller, J. O. and Westbrook, C., 1986, "Response of a Pulse Combustor to Changes in Fuel Composition," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 21, pp. 547~555.
- (2) Shih, W. P., Lee, J. G. and Santavicca, D. A., 1996, "Stability and Emissions Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 26, pp. 2771~2778.
- (3) Lieuwen, T. and Zinn, B. T., 1998, "Theoretical Investigation of Combustion Instability Mechanisms in Lean Premixed Gas Turbines," *AIAA paper*, 98-0641.
- (4) Richards, G. A. and Janus, M. C., 1998, "Characterization of Oscillations During Premix Gas Turbine Combustion," *J. Eng. Gas Turb. Power*, Vol. 120, pp. 294~302.
- (5) Lee, S. Y., Seo, S., Broda, S. P. and Santoro, R. J., 2000, "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, pp. 775~782.
- (6) Venkataraman, K. K., Preston, L. H., Simons, D. W., Lee, B. J., Lee, J. G. and Santavicca, D.

- A., 1999, "Mechanism of Combustion Instability in Lean Premixed Dump Combustor," *J. Propulsion and power*, Vol. 15, pp. 909~918.
- (7) 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.
- (8) Zinn, B. T. and Neumeier, Y., 1997, "An Overview of Active Control of Combustion Instabilities," *AIAA paper*, 97-0461.
- (9) Fric, T. F., 1992, "Effects of Fuel-Air Unmixedness on NO_x Emissions," *AIAA paper*, 92-3345.
- (10) 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.
- (11) Lee, J. G., Kim, K. W. and Santavicca, D. A., 2000, "Measurement of Equivalence Ratio Fluctuation and Its Effect on Heat Release During Unstable Combustion," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 28, pp. 415~421.
- (12) Lieuwen, T., Neumeier, Y. and Zinn, B. T., 1998, "The Role of Unmixedness and Chemical Kinetics in Lean Premixed Combustors," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 135, pp. 193~211.
- (13) Lieuwen, T. and Zinn, B. T., 1998, "The Role of Equivalence Ratio Oscillations in Driving Combustion Instabilities in Low NO_x Gas Turbines," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 27, pp. 1809~1816.
- (14) Mokhov, A. V., Aptroot, R. and Levinsky, H. B., 1996, "Experimental Observation of Correlation Between the Temperature of a Laminar Flame and Acoustic Oscillations," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 120, pp. 1~9.
- (15) Bradley, D., Gaskell, P. H., Gu, X. J., Lawes, M. and Scott, M. J., 1998, "Premixed Turbulent Flame Instability and NO Formation in a Lean-Burn Swirl Burner," *Combust. Flame*, Vol. 115, pp. 515~538.
- (16) Hedman, P. O., Flores, D. V. and Fletcher, T. H., 2002, "Observations of Flame Behavior in a Laboratory-Scale Premixed Natural Gas/Air Gas Turbine Combustor from CARS Temperature Measurements," *ASME*, GT-2002-30054.
- (17) Foglesong, R. E., 2001, "Experimental Investigation of a Lean, Premixed Gas Turbine Combustor Using Advanced Laser Diagnostics," *Ph. D. Thesis*, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- (18) 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 paper*, 99-2399.
- (19) Woodmansee, M. A., 2001, "Experimental Measurements of Pressure, Temperature, and Density Using High-Resolution N₂ Coherent Anti-Stokes Raman Scattering," *Ph.D. Thesis*, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- (20) Jones, C. M., Lee, J. G. and Santavicca, D. A., 1999, "Closed-Loop Active Control of Combustion Instabilities Using Sub-Harmonic Secondary Fuel Injection," *J. Propulsion and power*, Vol. 15, pp. 584~590.
- (21) Hahn, J. W., Park, C. W. and Park, S. N., 1997, "Broadband Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy with a Modeless Dye Laser," *Appl. Opt.*, Vol. 36, pp. 6722~6728.
- (22) Sivasegaram, S. and Whitelaw, J. H., 1987, "Oscillations in Axisymmetric Dump Combustors," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 42, pp. 413~420.
- (23) Lefebvre, A. H., 1999, "Gas Turbine Combustion," 2nd Ed., Taylor & Francis, pp. 324~344.
- (24) Docquier, N. and Candel, S., 2002, "Combustion Control and Sensors: A Review," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 28, pp. 107~150.