

모델 가스터빈 연소기내의 자발 불안정성에 관한 실험적 연구

이민철* · 홍정구* · 신현동**†

An Experimental Study on the Self-excited Instabilities in Model Gas Turbine Combustor

Min Chul Lee, Jung Goo Hong and Hyun Dong Shin

ABSTRACT

Most of gas turbines is operated by the type of dry premixed combustion to reduce NOx emission and economize fuel consumption. However this type operation, combustion induced instability brought failure problems cause by high pressure and heat release fluctuations. Though there has been lots of studies since Lord Rayleigh to understand this instability mechanism and control the instabilities, none of them made matters clear. In order to understand the instability phenomena, a simple experimental study with dump combustor was conducted at the moderate pressure and ambient temperature conditions. From this model gas turbine combustor self-excited instabilities at the resonance mode(200Hz) and bulk mode(10Hz) were occurred and observed at the three points of view; pressure, heat release and equivalence ratio which are acquired by peizo-electric transducer, HICCD camera and acetone LIF respectively. From this results we could see the instability mechanism clear with the account of time scale analysis which explained by the propagation of pressure wave to the upward of mixture stream and convectional transfer of the equivalence ratio fluctuation by this pressure fluctuation.

Key Words : Combustion Instability, Gas turbine, Lean Premixed Combustion, acetone LIF

기 호 설 명

P'	pressure fluctuation	T	interior temperature of combustion chamber
Q'	heat release rate fluctuation	L_{fuel}	distance from dump plane to the fuel injection location
m_a'	mass flow rate fluctuation of air	HICCD	High speed Intensified Charge Coupled Device
ϕ'	equivalence ratio fluctuation	LIF	Laser Induced Fluorescence
\bar{U}	mean velocity of fuel and air mixture		
c	speed of sound		

1. 서론

최근 환경오염 문제가 심각하게 대두됨에 따라

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

† E-mail : hdshin@kaist.ac.kr

TEL : 042-869-8821

유해 공해물질의 배출을 억제하고자하는 연구들이 많이 진행되고 있지만 이에 따른 부작용으로 야기되는 문제들과 해결해야 할 과제들이 많이 남아있다. 본 연구는 발전용 가스터빈 내의 NOx 배출량을 줄이고자 하는 노력에서 나오는 문제점들 중 하나인 연소 불안정성을 해결하기 위한 연구이다. 근래 대부분 상용가스터빈은 종전의 확산연소 방식이 아닌 예혼합연소 방식을 사용하고

있다. 이는 확산연소의 특성인 국부적인 고온부 발생으로 기인한 NOx 생성량을 줄이고, 연료 소비율을 줄이기 위한 이유에서이다. 그러나 이러한 예혼합 방식의 연소는 비정상적인 연소에 기인한 불안정성의 문제가 발생하기 쉬우며, 이는 화염의 날림(blow off)이나 역화(flash back)뿐만 아니라 연소실 내에서 큰 압력 변동으로 인한 연소실 내벽의 피로파괴 및 연소실 전후단의 연결부 및 터빈 블레이드에 기계적 손상을 일으키므로 크게 문제시 되고 있다. 이를 해결하기 위한 노력으로 불안정성 생성 기구 및 제어에 관한 연구가 국내외에서 활발히 진행 중이다. 연소 불안정성 생성기구를 화염과 와동의 상호작용으로 보고, 이에 관해 덤프형 연소기내에서 링형 와동(ring vortex)이 생성될 때만 심한 압력 변동을 발생시킨다고 보고된 바[2, 3]가 있고, 또 다른 연구로 불안정성의 지속 및 증폭기구로 압력의 변동, 열발생의 변동 그리고 당량비의 변동이 상호작용하여 그 결과 되먹임 시스템(feed back system)을 이루며 화염의 불안정성을 일으킨다고 보고된 바[4, 5]가 있다. 또한 연소 불안정성의 제어를 목적으로 이차 공기[6, 7] 및 이차 연료[8]의 주입 위치 및 주입 주기와 양에 따른 압력변동의 감소율에 관한 연구도 있었다.

Fig. 1에서 P' , Q' , m_a' , ϕ' 은 각각 압력변동 (pressure fluctuation), 열발생을 변동(heat release rate fluctuation), 공기질량유량 변동(air mass flow rate fluctuation), 당량비 변동(equivalence ratio fluctuation)을 의미하며, 이 기구는 다음과 같이 설명된다. 우선 연소실내에서 압력변동과 열발생의 변동이 Rayleigh Criterion을 만족시켜서, 압력변동이 증폭되어 맥동연소를 일으키기 시작하면 이 압력변동은 음속으로 상·하류로 전달된다. 상류방향으로 전달되는 압력파는 연료가 분사되는 위치에서 공기의 밀도와 연료분사량을 변화시키며 이에 당량비가 시간에 따라 달라지는 결과를 가져온다. 이 당량비의 변동은 하류 쪽으로 다시 전달되어 연소장에까지 영향을 미치며 이에 다시 화염대에서 열발생의 변동을 가져오고, 이는 또 연소장에서의 압력변동을 가져오는 것이다. 즉 불안정성의 인자인 변동성분들이 계속해서 순환하는 되먹임 시스템구조를 이루는 것이다.[1]

본 연구의 궁극적인 목적은 실제 가스터빈 연소기에서의 불안정한 연소 현상을 실험실 스케일의 연소기를 통해 모사하고, 그 현상을 분석하고 이해함으로써 최종적으로 안정적인 가스터빈의 운전에 기여하는 데에 있다. 또한 이 연구에서 자세히 살펴보고자 하는 부분은 이전의 연구에서 Fig. 1과 같이 분석한 시간 스케일 지연 기구를 고속카메라와 Acetone LIF(Laser Induced

Fluorescence)를 이용하여 열발생과 당량비의 변화 등의 측면에서 자세히 살펴보고, Fig. 1과 같은 기구를 실험적으로 검증하는 데에 목적이 있다.

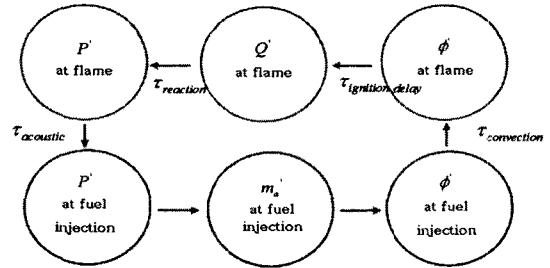


Fig. 1 Flow chart of thermo-acoustic instability mechanism (feedback system coupling)

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 실험조건

본 연구의 실험 장치 및 계측장비는 Fig. 2와 같다. 열-음향 불안정성을 재현성있게 발생시킬 수 있는 실험실 스케일의 연소기를 그림과 같이 제작하였고, 그 형상은 후방확대 덤프형 연소기(rearward-step dump combustor)로 확대면을 중심으로 아래의 버너와 연소실로 구분할 수 있다. 연소실은 가시화를 위해 버너 위에 세워진 석영관(지름: 80mm, 높이: 700mm, Aspect ratio: 8.75)을 사용하거나 연소실 벽면의 압력을 측정하기 위해 스테인레스 스틸 덕트를 사용하였다. Mass Flow Controller(MFC)에 의해 공기, 주연료 그리고 파일럿 화염을 위한 연료가 각각 따로 조절되어 삼중관으로 구성된 버너로 공급되고, 주연료로는 프로판이 주연료 분사구(main fuel injection holes, $\phi 0.7\text{mm} \times 8$ 개소)에서 분사되며, 공기와 혼합되는 혼합거리(L_{fuel})를 거친 후, 스월러(swirler)를 통해 연소실내로 투입된다.

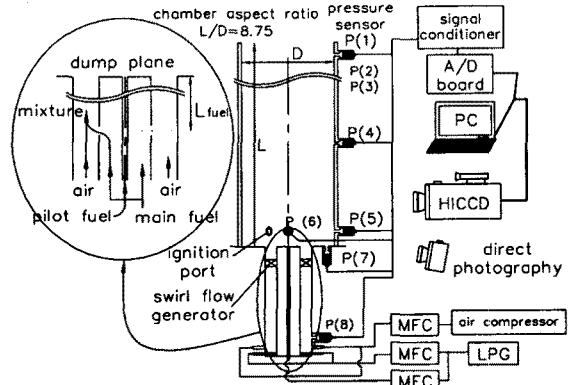


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

Table. 1 Experimental conditions

fuel/oxidizer	LPG / air
equivalence ratio	0.5~0.9
combustion chamber	geometry : H700 * D80mm material : quartz and stainless steel
parameters	equivalence ratio(Φ), distance from dump plane to fuel injection location (L_{fuel})
inlet velocity	$\bar{U} = 21.22$ m/s
inlet conditions	moderate pressure & ambient temperature
external force	no (self-excited instability)

2.2 측정 장치 및 측정 방법

관심있는 불안정한 화염을 대상으로 압력변동, 열발생의 변동 그리고 연소실 덤프면 위 입구에서의 당량비의 변동을 측정하였다. 수 msec 이하의 변동 성분을 관찰하기 위해 빠른 응답 특성을 갖는 장비가 사용되었고, 장비들간의 동기를 통해 압력, 열발생 그리고 당량비를 동일한 시간 축에서 비교하였다.

2.2.1 압력변동 측정 방법

압력변동을 측정을 위해서 PCB 106B model의 압력센서를 사용하였으며, 이 센서는 1kPa당 44mV의 민감도를 가지고 있고, 주파수 응답성능면에서는 0.5Hz 이상 40kHz이하의 동압측정이 가능하다. 그 측정 위치는 스테인리스 스틸 튜브로 제작된 연소실벽면에 Fig. 2와 같이 축방향으로 등간격인 위치에 압력센서를 장착하였으며, 또한 원주형의 압력 변화를 알아보기 위해 연소실 벽면의 압력센서 중 가장 아래쪽 센서(P(5))와 원주를 따라 90도 회전한 위치에 또 다른 센서를 장착하였다. 또한 덤프면과 버너내부에 압력센서를 더 장착하여 총 8개의 압력센서를 통해 각기 다른 위치에서 동시에 압력변동 특성을 알아보았다.

2.2.2 열발생 변동 측정 방법

화염의 자발광 이미지를 통해 그 열발생 변동에 관한 정보를 얻었다. 수 msec 이하의 시간차원의 열발생 변동을 알아보기 위해 High speed Intensified CCD camera를 사용하였으며, 1초당 5000frame을 찍음으로써 본 연구에서 필요로 하는 시간 분해능을 가지는 영상을 획득하였다. 또

한 영상처리기법(image processing)을 통해 화염대를 선명하게 구분하였으며 영상의 수치화를 통해 압력신호와와의 정성적 비교를 할 수 있었다. 또한 열발생율의 변동은 열발생의 시간에 대한 미분값을(미소구간의 기울기)를 통해 구할 수 있었다.

2.2.3 당량비 변동 측정 방법

아세톤(acetone)의 레이저형광 신호를 통해 당량비의 변동을 알아보았다. 여기서 아세톤은 프로판과 그 조성이나 특성이 비슷하여 프로판의 거동을 대신하여 나타낼 수 있으므로 프로판이 대부분인 LPG연료를 사용하는 본 실험에서 연료의 거동을 알아볼 수 있는 좋은 입자이다. 또한 acetone LIF 신호는 280~290nm의 파장대의 레이저 빛에 의해 최대의 형광신호가 생성되기 때문에 Nd-YAG laser, dye laser 그리고, frequency doubler를 이용하여 283nm의 레이저 광을 생성하였다. 이렇게 생성된 레이저 광은 볼록렌즈를 거쳐 실험부인 덤프면에서 2~6mm 위쪽에 위치하도록 하였다. 형광신호획득을 위해 CCD카메라 렌즈에 중심파장이 450.14 nm이고, 10% band width가 12.21nm인 band pass filter를 장착하였고, 레이저 펄스광에 동기하여 영상을 획득하였다.

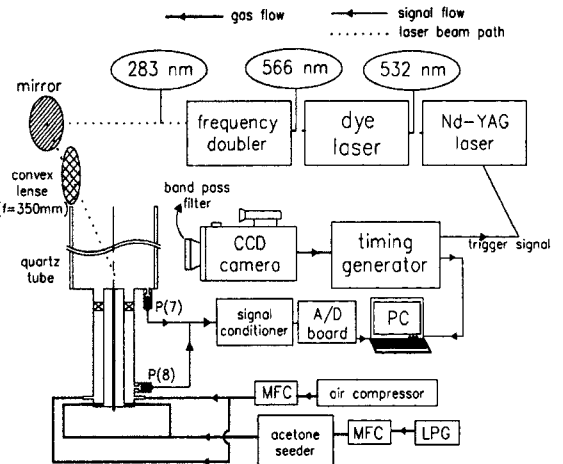


Fig. 3 Schematic diagram of the acetone LIF measurements

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염의 특성에 따른 모드 구분

당량비에 따른 연소실 내의 압력변동과 화염의 형상을 관찰하고 그에 따라 Fig. 4와 같이 다섯 가지 모드로 구분하였으며, 압력변동이 큰 I 과 II의 모드에 대하여 실험을 수행하였다.

	mode I	mode II	mode III	mode IV	mode V
direct photo					
ϕ	1~0.78	0.78~0.73	0.73~0.67	0.67~0.61	0.61~0.54
p-p pressure [kPa]	12.6	14.0	1.6	1.4	1.6

Fig. 4 Photographs of various flame modes according to the equivalence ratio

3.2 압력 변동 측정 결과

3.2.1. 모드별 압력 특성

Fig. 2의 7번 위치에서 측정한 압력변동은 모드 I에서 Fig. 5와 같이 약 6kPa의 크기, 200Hz의 주파수특성을 나타내었으며 모드 II에서 Fig 6과 같이 넓게 분포된 주파수 특성과 10Hz주기로 압력변동이 큰 구간(200Hz fluctuating region)과 다시 변동이 없는 구간(silent region)이 반복하여 나타났다. 이 모드II에서의 음압특성은 이전에 연료 주입위치를 변수로 하여 실험하고 그 시간스케일을 계산하여 본 결과를 통해 그 원인과 이와 같은 음압 특성이 나타나는 기구를 밝힌 바 있다.[1] 본 연구에서는 이와 같은 압력 변동과 동시에 HICCD와 acetone LIF 등의 계측방법을 통해 열발생과 당량비 변동을 알아봄으로써 더 자세하고 정확한 불안정성 발생기구를 알아보고자 한다.

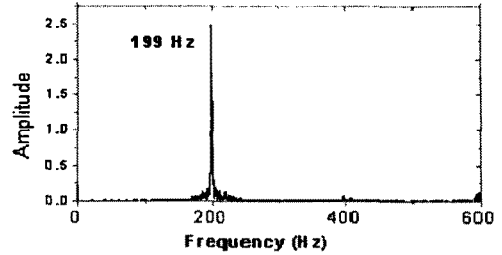
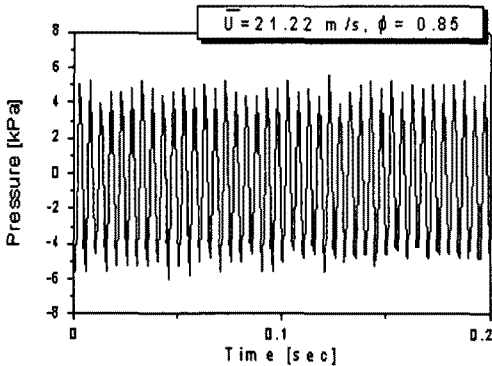


Fig. 5 Pressure signal of mode I in time and frequency domain ($\phi=0.85$, $L_{fuel}=285mm$)

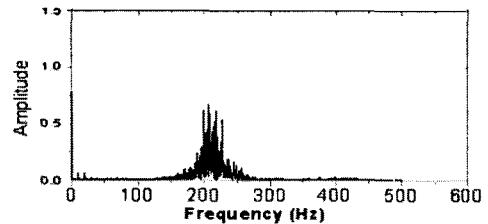
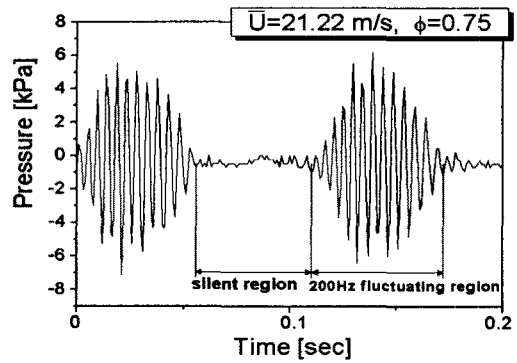


Fig. 6 Pressure signal of mode II in time and frequency domain ($\phi=0.75$, $L_{fuel}=285mm$)

3.2.2. 측정위치에 따른 압력특성

Fig. 2의 장치도에서 1, 5, 8번의 위치에 측정한 압력신호를 Fig. 6과 같이 도시하였다. 그 압력신호는 화염대와 가장 가까운 P(5)에서 가장 크기가 크고, 신호도 제일 먼저 나타나는 것을 볼 수 있다. 여기서 연소에 의하여 순간적인 부피 팽창과 덤프면과 연소실 벽면에 의한 공간적 제한은 압력의 변동을 발생시키고 이 압력 변동은 다시 상·하류로 전파되어 아래와 같이 약 0.5msec 정도의 시간 지연이 있는 후에 하류의 P(1)과 상류의 P(8)에서 그 크기가 줄어든 압력 신호가 관찰되었다. P(5)~P(1)의 거리는 650mm 이고, P(5)~P(8)에서의 거리는 300mm임에도 불구하고 압력파가 전파되는 데 걸리는 시간이 거의 동일한 이유는 압력파의 전파속도는 그 매질

의 온도와 식 (1)과 같은 관계를 가지기 때문이다.[9]

대기 중에서의 음속

$$c = c_o \sqrt{1 + \frac{1}{273} T} \quad \text{식 (1)}$$

$c_o = 331.42 \text{ m/s}$: 0°C 대기 중에서의 음속

T : 연소실내 섭씨온도

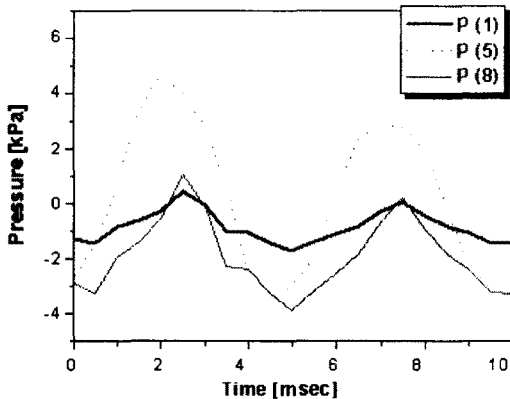


Fig. 7 Pressure signals at the measuring points of P(1), P(5) and P(8)

3.3 열발생 변동 측정 결과

3.3.1. 모드 I에서의 열발생 변동 특성

압력센서와 HICCD 카메라를 이용하여 주기가 5msec(200Hz)인 모드 I에서 화염의 형상을 Fig. 7과 같이 관찰하였다. 화염이 압력변동과 밀접하게 관계하여 주기적으로 변화하고 있고, 가장 강하게 탈 때는 압력 변동이 최고가 되기 약 0.8msec전(①, ②)이며, 압력변동이 최저치가 되기 0.8msec전(⑦, ⑧)의 위치에서는 거의 열발생이 없는 것을 확인할 수 있다.

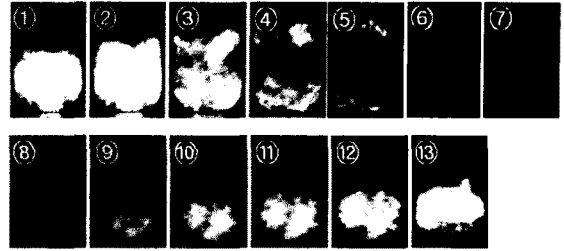
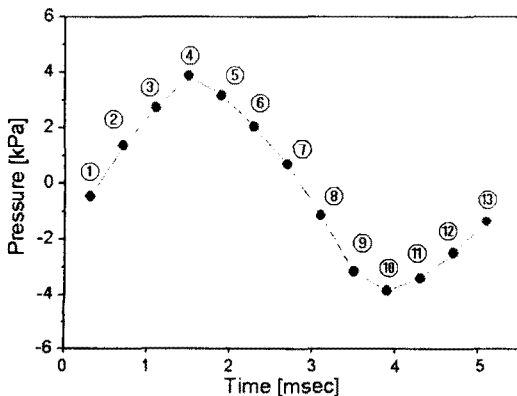


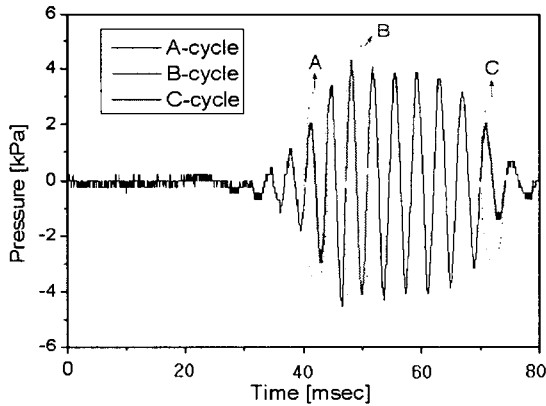
Fig. 8 Pressure signal and HICCD images of mode 1 (0.4msec between frames)

3.3.2. 모드 II에서의 열발생 변동 특성

모드 II의 silent region에서의 화염은 200Hz fluctuating region에 비해 시간에 따른 변화가 느리고, 처음 25msec정도는 열발생이 작다가 200Hz fluctuating region으로 들어가기 전 급속도로 열발생이 증가한다. 연소실내에서 압력변동과 열발생의 변동이 전체적 연소장에 걸쳐서 위상차가 90도 이상으로 벗어나지 않아서(Rayleigh Criterion), 압력변동이 증폭되어 맥동연소를 일으키기 시작한다. 이러한 연소에 의하여 발생된 압력변동은 음속으로 상하류로 전달되고, 상류쪽으로 전달된 압력파는 연료가 분사되는 위치에서 연료의 유량을 변화시키게 되며 이에 따라 당량비가 시간에 따라 달라지는 결과를 가져오며, 이 당량비의 변동은 하류쪽으로 다시 전달되어 연소장내까지 영향을 미치며 이에 다시 화염에서 열발생의 변동을 가져오고, 이는 다시 연소장에서의 압력변동을 가져온다는 것이다. 이와 같이 200Hz fluctuating region에서의 압력변동이 silent region에서의 당량비 변동을 가져오는 것을 알 수 있는데 이 큰 폭의 당량비 변동은 연소율을 떨어뜨리고, 그 결과 연소장 내에서는 약 25msec정도는 열발생이 작다가 새로운 혼합기로 연소실이 가득 차게 되면, 그 때부터 열발생이 하류에서부터 급속히 증가하여 상류로 화염이 전파하는 것을 Fig. 9-(b)를 통해 확인할 수 있다. 200Hz fluctuating region에서는 화염이 5msec 주기로 변화하는 것을 확인할 수 있었으며 이는 Fig. 9-(c)와 같이 각 cycle별로 200Hz fluctuating region의 초기 발달 부분의 A-cycle, 가장 압력변동이 큰 B-cycle 그리고 종료부분인 C-cycle로 구분하여 나타내었다. A-cycle에서는 열발생의 변동이 작은 것을 확인할 수 있으며 B-cycle에서는 열발생의 변동이 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 연소로 인한 순간적인 열발생은 온도의 상승과 그에 따른 부피 팽창을 가져오며, 본 실험장치와 같이 한쪽이 덤프면으로 막혀진 연소실의 경우 압력의 상승을 가져오게 되기 때문에 열발생의 변동과 압력의 변동이 비례하는 것을 볼 수 있다.

또한 B-cycle의 경우 inner core 쪽에 화염이 항상 존재하여 pilot 화염과 같은 역할을 하여 강한 압력변동으로 인한 속도의 변동에도 화염이 blow off되지 않게 하여 주는 것을 볼 수 있다. C-cycle 에서는 heat release의 변동이 다시 작아지고, 화염이 전체적으로 약해진 것을 볼 수 있다. 이는 화염의 변화가 압력변동과 매우 관련 깊게 그리고 그 크기와 강도 측면에서 정성적으로 비례하여 거동한다는 것을 의미한다.

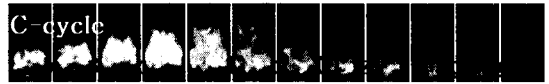
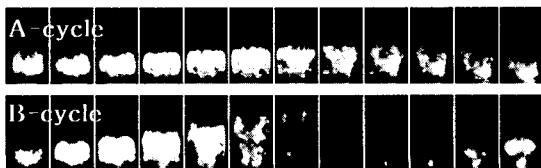
Fig. 9와 같이 나타난 각각의 화염 형상의 픽셀(pixel)과 강도(intensity) 정보를 통해 수치적으로 그 열발생을 정성적으로 알 수 있으며, Fig. 10은 각각의 영상을 화염의 관심영역에서 공간적으로 적분한 값을 압력신호와 함께 도시하기 위하여 각각 그 최대값으로 정상화(normalization) 시킨 것이다. Mode II의 silent region에서는 초기에 열발생이 거의 없다가 연소실 안이 새로운 혼합기로 가득 차게 되자 열발생이 급속히 증가하며 화염이 상류로 타들어가면서 열발생이 넓은 공간에 걸쳐서 강해지므로 이 지역에서 가장 큰 열발생이 나타나는 것을 볼 수 있다. 그리고 모드 I의 결과에서 본 바와 같이 200Hz beating region에서는 열발생이 압력신호보다 약 0.8msec 정도 선행하며 거의 비슷한 특성으로 변화하는 것을 볼 수 있다.



(a) pressure signal



(b) silent region
(Time interval between frames is 5msec)



(c) 200Hz fluctuating region
(Time interval between frames is 0.4msec)

Fig. 9 Pressure signal and HICCD images of mode II

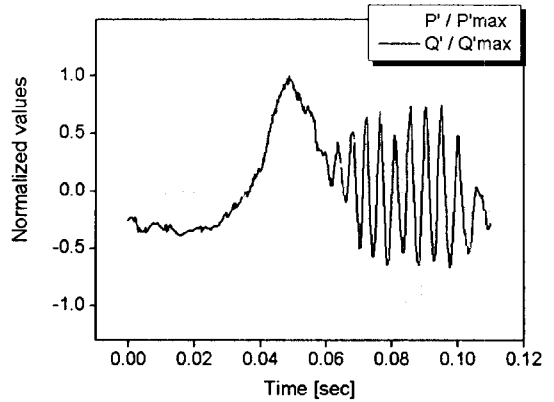


Fig. 10 Pressure and heat release fluctuations of mode II

3.3.1. 열발생 변동과 열발생율의 변동 특성

열발생율은 열발생의 시간에 대한 미분값으로부터 구할 수 있고, 모드 I 과 모드 II 에 대해 각각 Fig. 11과 Fig. 12와 같이 그 결과를 도시하였다. 열발생율의 변동에 관해서는 식(2)와 같이 R.B Price의 연구 결과[10]와 본 실험의 연구 결과를 비교하여 볼 수 있다.

$$p_{rms} = K \left[\frac{dQ}{dt} \right]_{rms} \quad \text{식 (2)}$$

K : constant for a fixed composition of the combustible mixture and a fixed distance of the microphone from the flames

위 식으로부터 열발생율 변동은 압력 변동과 선형적으로 비례하는 관계가 있음을 알 수 있다. 본 실험에서는 Fig. 11을 통해 열발생율 변동에 -1을 곱한 결과와 압력변동이 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 다시 말해서 압력 변동과 열발생율 변동의 rms(root mean square)값은 선형적으로 비례하지만 180도의 위상차이가 있음을 알 수 있고, 열발생 변동보다 열발생율의 변동이 더 압력과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 모드 II의 결과를 통해 더 확실시 되어진다. Fig. 10에서는 열발생 변동이 200Hz fluctuating region에 들어가기 전에 최대값이 되는 것을 볼 수 있지만, Fig. 12의 열발생율 변동은 압력과 그 정성적인 경향이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

이와 같은 결과를 통해 열발생보다는 열발생율의 변동의 크기가 압력변동과 일치정도가 불안정성의 발생정도를 잘 나타낸다고 할 수 있다.

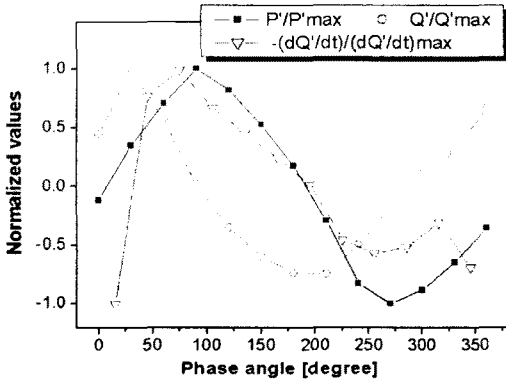


Fig. 11 Pressure, heat release and heat release rate fluctuation of mode 'I'

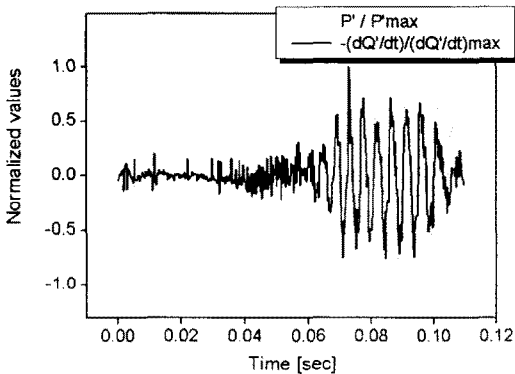
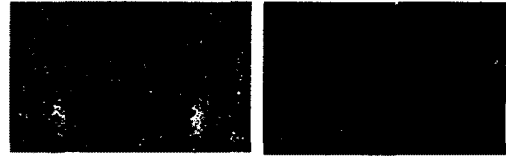


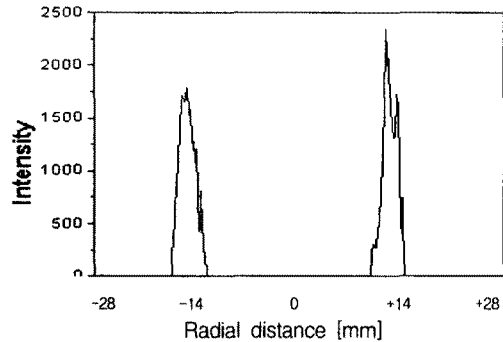
Fig. 12 Pressure and heat release rate oscillations of mode II

3.4 당량비 변동 측정 결과

필스광에 의한 형광신호를 이용하는 아세톤 LIF는 연속적인 신호를 얻을 수가 없기 때문에, LIF영상과 동시에 얻은 압력신호를 통해 각각 다른 cycle에서 얻은 영상을 위상별로 맞추어서 한 주기에 대한 정보를 얻었다. 그러나 모드II의 해석에서는 위상각에 대한 정보가 신뢰수준이 높지 않고, 아세톤 주입으로 인한 연료특성이 조금 바뀌어서 10Hz를 주기로 하는 진동의 재현성이 떨어져서 200개의 영상에 대한 강도를 모집단으로 하여 산술평균과 표준편차를 구하고, 당량비의 변동 결과를 이로부터 유추하였다. Fig. 13-(a)은 각각 아세톤 LIF 영상의 가장 강도가 큰 영상과 작은 영상의 예시이다. 여기서 그 강도를 혼합기 유동 방향에 대하여 적분하여 반경 방향 변위와 강도를 각각 x, y축으로 하여 Fig 13-(b)와 같이 나타내었다.



(a) Examples of acetone LIF images



(b) Radial direction cross sectional intensity of acetone LIF

Fig. 13 acetone LIF images and cross sectional intensity

3.4.1 모드 I 에서의 당량비 변동 특성

아세톤 LIF이미지를 통해서 당량비의 변동만을 측정하는 것이 아니라 혼합기의 유속이 압력에 의해 변동하는 영향을 포함한다. Fig. 14를 통해 당량비 변동은 mode I의 경우 혼합기의 유속이 압력 변동에 영향을 받아 압력과 반대의 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 본 실험 mode에서는 이러한 유동에 의한 영향이 당량비 변동보다 큰 것을 볼 수 있고, 이는 순간적인 열발생에 의한 압력의 상승이 혼합기가 연소실로 유입되는 것을 막기 때문이다. 이는 간단한 음향방정식에서 알 수 있듯이 압력과 입자속도는 180도 반대의 위상임을 보여주는 결과와 일치한다. 즉 압력이 높을 때는 혼합기와 함께 연료유입이 거의 없는 것을 확인할 수 있고, 반대로 압력이 가장 낮을 때 연료의 유입이 가장 크다. 즉 이와 같이 혼합기의 불규칙한 유입은 다시 열발생의 변화를 일으키고, 결국 불안정한 연소 현상이 되먹임 시스템을 이루며 계속된다.

3.4.2 모드 II에서의 당량비 변동 특성

총 200개의 Acetone LIF 단면 데이터를 다음과 같이 silent region과 200Hz fluctuating region으로 구분하고, 그 변동성분의 평균과 표준편차를 Fig. 15와 같이 나타내었다. 이는 Time Lag Analysis와 부합하는 결과로서 앞서 설명한 바와 같이 모드II에서 200Hz fluctuating region의 큰 압력변동이 상류로 전파하여 연료 주입구

에서 공기입자속도와 연료 주입량의 변동을 함께 일으켜 결국 당량비의 변동을 크게 일으키고, 이는 다시 하류로 흘러나와 연소실 입구에서 아래와 같이 silent region에 해당할 때 즉, time scale analysis[1]에 따른 시간(음향시간+대류시간=50msec)이 지체된 후에 당량비의 변동이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 당량비의 변동은 200Hz fluctuating region에서 기인하여 silent region에서 나타난 것이며 이렇게 큰 당량비의 변동은 완전한 연소를 막아 Fig. 10에서 확인하였듯이 초기 열발생을 지연시키다가 새로운 혼합가스로 연소실이 가득 차서 연소할 수 있는 분위기가 충분히 형성되면 열발생이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 이러한 당량비의 변동은 1msec 이하의 시간 분해능을 가지는 농도측정이 필요하므로 추후에 질량분석기 등의 추출에 의한 방법을 통해 농도를 측정해 볼 계획이다.

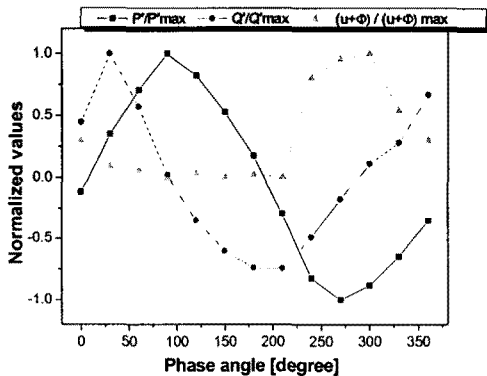


Fig. 14 The pressure, heat release and equivalence ratio fluctuations of mode I

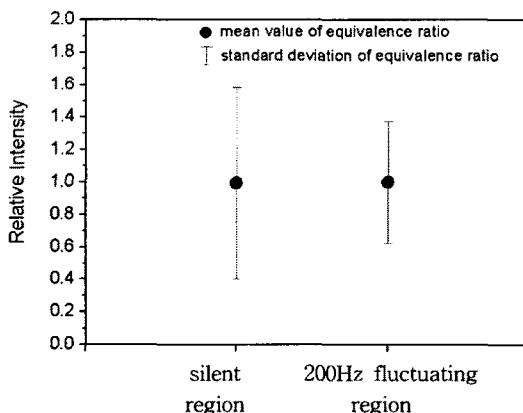


Fig. 15 Statistical results of equivalence ratio fluctuation of mode II

4. 결론

본 연구는 실험실 스케일의 연소기를 제작하여 상용프로판/공기의 난류회박 예혼합연소를 통해 관공명주파수인 200Hz의 진동모드와 10Hz 모드의 연소진동을 구현하였고, 그 화염을 피에조 압력센서, HICCD 카메라 그리고 acetone LIF를 통해 관찰하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 이전에 수행되었던 연구[1]는 당량비의 변동을 연소현상에 기인하여 예측하였으나, 본 연구에서는 압력 신호와 동시에 열발생 및 당량비의 변동을 측정함으로써 시간 스케일 해석을 더욱 명확히 할 수 있었고, 열발생과 압력, 당량비의 변동의 순서와 지연시간을 알 수 있었다.
- (2) 모드 I에서는 압력변동, 열발생변동, 혼합기 입자속도 변동은 서로가 영향을 주며 본 연구에서는 열발생이 압력변동보다 앞서고, 혼합기의 유속의 변화가 압력변동주기보다 뒤쳐져서 나타나는 것을 알 수 있다.
- (3) 모드 II에서는 불안정한 연소장에서 발생한 압력변동은 상류와 하류로 전파되며 상류로 전파된 압력변동은 연료의 분사 위치에서 분사되는 양의 변화에 영향을 줌으로써 당량비의 변동을 일으켜 결국 화염의 형태와 불안정성에 영향을 주는 것을 알 수 있다.
- (4) 압력변동이 큰 불안정한 연소가 일어날 경우 열발생보다는 열발생율의 변동의 크기가 압력변동과 잘 일치한다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)와 BK21의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 홍정구, 이민철, 신현동, "열-음향에 의한 난류회박 예혼합연소의 불안정성에 관한 실험적 연구", 대한 기계학회 2004년도 추계학술대회 논문집, 2004, pp. 1166-1171.
- [2] C. Kulsheimer and H. Buchner, "Combustion Dynamics of Turbulent Swirling Flames", *Combustion and Flame*, Vol. 131, 2002, pp. 70-84.
- [3] K. C Schadow, E. Gutmark, T. P. Parr, D. M. Parr, K. J. Wilson and J. E. Crump, "Large-Scale Coherent Structures as Drivers of Combustion Instability", *Combustion Science and Tech.*, Vol. 64, 1989, pp. 167-186.
- [4] T. Lieuwen, H. Torres, C. Johnson and,

- B.T. Zinn, "A Mechanism of Combustion Instability in Lean Premixed Gas Turbine Combustors", *ASME*, vol. 123, January 2001.
- [5] Seonghweon Seo. "Combustion Instability Mechanism of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor", *KSME International Journal*, Vol. 17 No. 6, 2003, pp. 906-913.
- [6] Jong Guen Lee, Kwanwoo Kim and D.A. Santavicca "Effect of Injection Location on the Effectiveness of an Active Control System Using Secondary Fuel Injection", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, 2000, pp. 739-746.
- [7] H.Iba, M.Nomura, T. Karakami and T.Koga, "Advanced Monitoring system for Combustor Pressure Fluctuation", *IGTC*, 2003
- [8] H. Büchner and H. Bockhorn, "Aerodynamic Suppression of Combustion-driven Pressure Oscillations in Technical Premixed Combustors", *Symposium on energy eng. in the 21st century*, 2000, pp.1573-1580,
- [9] 정일록, "소음 진동학", 신광출판사, 1999, pp. 29-37.
- [10] R. B Price , I. R. Hurle and T.M. Sugden, "Optical Studies of the Generation of Noise in Turbulent Flames", *12th Symposium on Combustion*, 1968, pp. 1093-1102.