

자려 연소진동에 관한 연소제어와 징후의 검출

양영준†

(원고접수일 : 2004년 6월 20일, 심사완료일 : 2004년 9월 17일)

Combustion Control and Symptom Detection on Self-excited Combustion Oscillation

Young-Joon Yang†

Abstract : An idea to suppress the self-excited combustion oscillation was applied to the flames. The characteristics of unsteady combustion were examined and the unsteady combustion was driven by forced pulsating mixture supply that can modulate its amplitude and frequency. The self-excited combustion oscillation having weaker flow velocity fluctuation intensity than that of the forced pulsating supply can be suppressed by this method. The effects of the forced pulsation amplitude and frequency on controlling self-excited combustion oscillations were also investigated comparing with the steady mixture supply. The unsteady combustion used in this experiment plays an important role in controlling self-excited combustion oscillation. Symptoms of self-excited combustion oscillation were also studied in order to predict the onset of combustion oscillation before it proceeded to a catastrophic failure. For the purpose, the unique measures to observe the onset of self-excited combustion oscillations based on the careful statistics of fluctuating properties in flames, such as pressure or emission of OH radicals, have been proposed.

Key words : Combustion Oscillation(연소진동), Combustion Control(연소제어), Symptom of Combustion Oscillation(연소진동의 징후), Detection(검출), Unsteady Combustion (비정상 연소)

1. 서 론

연소기의 연소부하률을 높이거나 NO_x를 저감시키는 유효한 연소 방식으로서 예혼합연소가 사용되어지고 있다. 그러나 예혼합연소를 채용할 때 연소의 불안정과 연소에 의한 자려진동이 문제되

는 경우가 있으며 산업용 보일러, 가스터빈, 로켓 엔진 등에 이르기까지 폭넓게 그 문제점이 보고되어지고 있다.^[1] 일반적으로 자려연소진동은 음향학적 연소진동과 헬륨홀쓰 연소진동으로 크게 나누어진다. 두 경우 모두 연소진동은 연소장치의 연소실, 연료와 공기의 공급계의 배관, 배기네트

† 책임저자(오사카대학교 대학원 기계물리공학과), E-mail : yangyj@hanmail.net, T : 051)204-1779

등의 유체역학적 고유진동과 연소반응에 의한 열발생률의 변동이 공진함에 의해 발생한다. 연소진동의 발생 개시 여부는 다음 식의 레일리 표준(Rayleigh's criterion)을 만족한 경우에 일어난다.

$$E = \oint p' q' dt > 0 \quad (1)$$

여기서, p' 과 q' 은 연소실내의 압력변동과 발열률변동을 나타낸다. 즉 위의 식은 압력변동과 발열률변동이 모두 단진동이라고 하면 그 위상차 τ 가 $-\pi/2 < \tau < \pi/2$ 의 범위에 있을 경우 연소진동이 발생하는 것을 나타낸다.

연소진동의 억제법으로서는 연소기의 형태 등을 변경하는 수동제어 (passive control)와^[2], 연소기내의 압력변동 신호를 위상 변화시켜 혼합기 공급계에 피드백함으로써 연소기내의 압력변동을 상쇄하는 능동제어 (active control)가 있다^[3]. 그러나 능동제어에는 복잡한 제어시스템이 필요하게 되므로 고비용의 결점이 있다. 연소진동의 메커니즘 자체를 밝힐 목적으로 또는 펄스연소와 같이 연소진동의 이점을 적극적으로 활용하려고 하는 관점으로부터도 연구가 행하여지고 있다^{[4], [5]}. 이 경우 연소진동의 거동을 파악하기 위한 중요한 계측량은 압력변동과 발열률변동의 관계이다. 압력변동에 관해서는 연소실에 직접 또는 연결관과 연결한 압력센서를 이용하여 계측하는 경우가 많다. 그러나 이 경우, 연결관내에서의 압력신호의 변형에 주의할 필요가 있다.^{[6], [7]} 한편 발열률변동은 직접 계측하는 것이 곤란하기 때문에 발열률을 나타내는 양으로서 OH 라디칼 자발광 또는 CH 라디칼 자발광이 이용되어지고 있다.^{[7]-[9]} 실용연소기의 대부분은 난류연소를 이용하고 있지만, 혼합기의 대부분은 소위 정상류로서 공급 되어지고 있다. 혼합기류중의 난류변동에는 여러 주파수성분이 포함되어져 있지만, 그 중의 피크가 되는 주파수로 인해 연소진동이 발생하지 않고 오히려 연소장치측의 고유진동수 등에 의존해 발생한다. 따라서 연소진동의 피크 주파수와는 전혀 무관계한 주파수 변동을 공급혼합기에 가한 경우 자려진동의 발생이 어떠한 영향을 받는가 하는 것은 흥미있는 부분이다.

본 연구에서는 간헐연소(intermittent combustion)를 함으로써 생기는 펄스연소의 연소소음을 줄이면서 또한 그 장점을 최대한 증진시킬 수 있는 연속연소(continuous combustion)를 행하는 강제변동공급의 효과에 대해 조사하였다. 연소시스템에 연소진동의 피크 주파수와는 무관계한 주파수를 갖는 강제변동공급을 가하는 방법은 연소진동 제어에 유효하다는 것이 확인되었다. 종래의 연소진동 제어법의 대부분은 연소진동이 발생한 후에 대처하는 것이었다. 그러나 강한 연소진동이 발생한 후에는 제어 자체가 곤란할 뿐만 아니라, 발생 후에 대처하는 제어만으로는 연소진동 제어의 근본적인 해결책이 되지 않는다. 즉, 연소진동 발생의 정후를 어떤 무언가의 방법으로 검출할 수 있으면 보다 효과적으로 연소진동의 발생 억제에 대처할 수 있다고 생각되어진다. 연소진동의 억제법에 대해서는 여러 방법이 제안되어지고 있지만 실험적으로 연소진동의 정후를 검출하려고 하는 시도는 거의 찾아볼 수 없다.

본 연구에서는 연소진동이 발생하기 시작하는 조건의 전후에 있어서 프로판-공기 혼합기의 당량비를 아주 미세한 간격으로 변화시켜 연소진동의 강도가 증가하는 천이과정을 상세하게 관찰하였다. 이로서 연소진동 발생에 대한 정후의 검출을 시도하여, 강한 연소진동이 발생하기 전에 미리 탐지함으로써 이에 대처할 수 있도록 하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에서 이용한 장치를 나타낸다. 공급 공기량은 147 L/min로 일정하고 혼합하는 프로판 유량을 변화시킴으로써 혼합기의 당량비를 변화시켰다. 압축기로부터 공급되어지는 고압의 공기는 드라이 필터를 지나 제습되어진 후, 1차공기와 2차공기로 나누어진다. 1차공기는 벤츄리믹서에서 프로판과 혼합되고, 2차공기는 강제맥동 발생장치(Hitachi, 0.2 OP-5T)에서 맥동이 주어진 후 1차공기와 프로판의 혼합되어 정류부를 지나 연소부에 공급되어진다. 즉 강제변동을 가한 경우에는 연소실에 공급되는 혼합기

의 유량과 함께 당량비도 변동하지만 시간평균치는 언제나 일정하다. 강제맥동 발생장치는 인버터에 의해 회전수 가변인 직류모터로 구동되어진다. 강제맥동 발생장치는 최대압력이 0.5 MPa, 보아 50 mm, 스트로크 18 mm인 1기통이다. 연소실은 유로 상류측으로부터 정류부, 연소실, 배기덕트 3개의 부분으로 구성되어진다. 혼합기는 내측 단면이 총 25 mm x 횡 40 mm의 정류부를 통해 연소실 직전에 설치된 높이 28 mm의 스텝에 의해 일단 축류되어진 후 40 mm x 40 mm의 단면을 가지는 연소실에 급확대되어 스텝후류에 형성되어지는 재순환 영역에 화염이 형성되어진다. 연소실의 양 측면에는 바이코어 그래스(Vycor glass)가 장착되어 화염 관찰이 가능하다. 배기덕트는 내측단면이 40 mm x 40 mm로 길이 150, 300, 600 mm의 3종류를 조합함으로서 덕트길이를 변화시킬 수 있다. 예혼합기의 당량비를 0.01 간격으로 변화시킬 수 있도록 프로판 유량 계측용에 최대유량이 각각 15 L/min와 1 L/min의 유량측정기(Rotameter)를 병렬로 배열하여 최대유량 1 L/min의 유량측정기만을 이용하여 혼합기의 당량비를 미세 조정할 수 있도록 하였다.

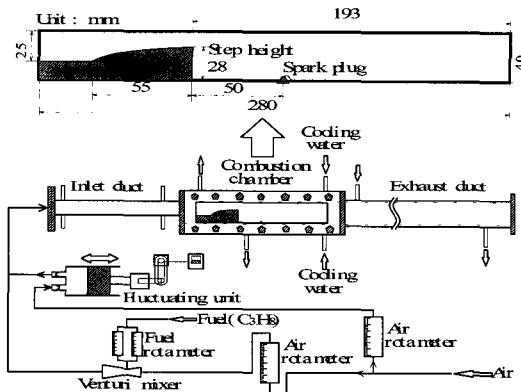


Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2에 본 실험에서 이용한 계측시스템을 나타낸다. 본 계측시스템에서는 화염으로부터의 OH와 CH 라디칼 자발광상 및 자발광, 예혼합기의 변동유량, 연소실 2곳의 압력을 동시에 시계열로서 계측 가능하다. 화염으로부터의 자발광상의 측정에는 고속도 CCD 카메라 (Kodak Co. Ltd. Ekatapro HS Model 4540)를 이용했다. 이때 동일영역에 있는 서로 다른 2파장의 화상을 1대의 고속도 CCD 카메라로 동시에 촬영하기 위해서

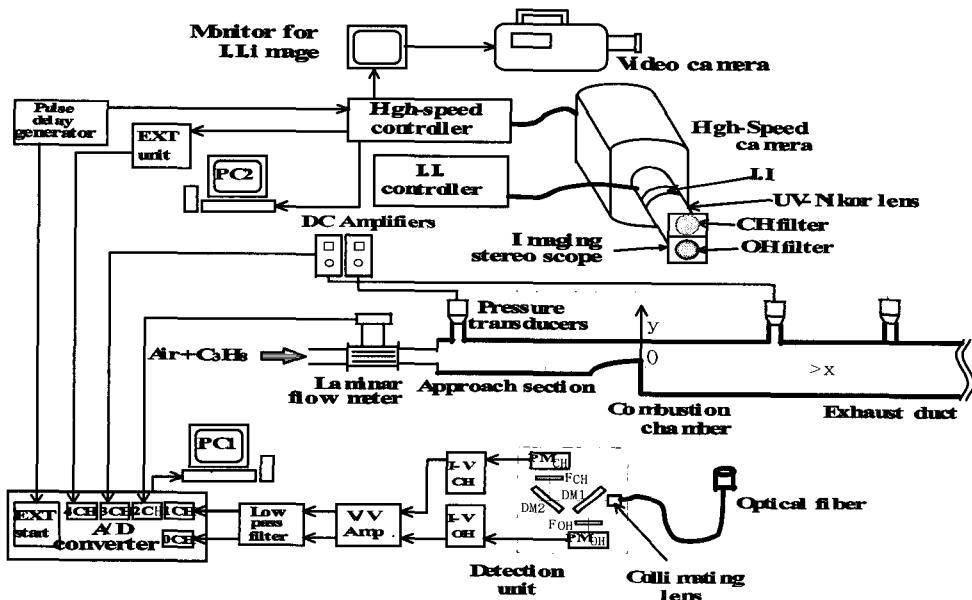


Fig. 2 Set-up of instrumentation

화상입체경(Imaging stereoscope, Lavision Co. Ltd.)을 이용하였다. 화염상은 광간섭필터(OH 라디칼 자발광용 : 중심파장 308.5 nm, 반차폭 18 nm, CH 라디칼 자발광용 : 중심파장 430.5 nm, 반차폭 1.0 nm)를 설치하여 영상증배장치(Image intensifier)에서 휘도 증폭되어 영상속도(Frame rate) 4500 fps로 연속 1024 장 촬영되어진다. 연소실에 공급되어지는 예온합기의 변동유량 측정은 스텝 상류 730 mm의 위치에 층류유량계(Soken, LFE-200LM)를 설치하여 그 전후의 차압을 차압변환기에 의해 전압신호로 변환하여 A/D변환기(NEC Sanei Co. Ltd., DL2300, 샘플링 속도 : 50 kHz)를 지나 기록되어진다. 정류부, 연소실, 배기덕트 각부의 압력변동의 계측에는 냉각어댑터(Cooling adaptor)가 부착된 반도체 압력변환기(Semi-conductor pressure transducer, Toyoda, Type PMS-5, 최대응답주파수: 10 kHz)을 이용했다. 연소장치와 압력센서와의 접속관내의 압력신호의 변형 방지를 고려하여 접속관은 길이 40 mm, 직경 9 mm의 원통관으로 했다.^[6] 연소실에서 스텝 하류로 171 mm, 배기덕트부에서는 150 mm마다 관벽 상부에 압력측정이 가능하다. 압력변환기로부터의 전압신호는 V/V증폭기에서 증폭되어 A/D변환기를 지나 기록되어진다.

Table 1. Experimental conditions of forced pulsating flows.

	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Nondimensional Fluctuation Intensity FI	0.30	0.22	0.19	0.20	0.20	0.19
Frequency Hz	30	30	30	35	40	45

고속도 CCD카메라와 A/D변환기의 동기에는 펄스 지연 발생장치(Pulse Delay Generator, Stanford Research Systems, WC Model DG535)를 이용하였다. 연소실 전체로부터의 OH 와 CH 라디칼 자발광 신호를 계측하기 위해 광파이버 시스템을 이용하였다. 연소실 전체로부터의 발광은 자외광 투과형 파이버(Mitsubishi

Densen Co. Ltd., STU1000H, NA = 0.2, 중심직경 = 1 mm)에 의해 광분리기에 들어와 콜리메이팅 렌즈(Collimating lens)에 의해 평행광으로 되어 다이크로익 미러(Dichroic mirror), 광간섭 필터에서 광 분리되어진 후, 광전자 증배관에서 전류신호로 변환되어진다. 발광 전류신호는 I/V변환 후 증폭되어 로우 패스 필터(low-pass filter)에 의해 고주파 노이즈를 제거하고 A/D변환기(NEC, DL2300, 샘플링률: 50 kHz)에 의해 12 bit로 디지털신호로 기록되어진다.

본 계측시스템에서는 고속도 CCD카메라에 의해 화염으로부터의 OH와 CH 라디칼 자발광상, 광파이버를 이용한 연소실 전체로부터의 OH와 CH 라디칼 자발광 강도의 신호, 예온합기의 변동유량, 연소실내 2곳의 압력, 즉 총 2화상과 5신호를 동시에 시계열로서 계측 가능하도록 되어있다.

Table 1은 공급하는 혼합기에 강제변동을 가한 경우의 실험조건을 나타낸 것이다. 실험은 1차공기와 2차공기의 유량의 합계를 147 L/min (Mean Reynolds number, $Re_m=5,030$) 일정으로 하여 그 비율을 바꿈으로써 유량의 변동강도(Nondimensional fluctuation intensity, $FI=Q_{rms}/Q_{mean}$)를 변화 시켰다. 또한 강제변동 발생장치를 15 Hz부터 45 Hz까지, 5 Hz 간격으로 구동시켜 강제변동의 주파수를 변화시켰다. 조건 #1, #2, #3에서는 강제변동의 주파수가 30 Hz로 일정하지만 유량의 변동강도가 변화하고 있다. 한편 조건 #3, #4, #5, #6에서는 유량의 변동강도가 거의 일정 (Error estimate : $\pm 2\%$) 하지만 강제변동의 주파수가 변화하고 있다. 본 실험에서 강제변동을 가하지 않고 예온합기를 공급한 경우에 "정상공급", 강제변동을 가한 경우에 "강제변동공급"이라고 정의한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 강제변동공급에 의한 자려연소진동의 제어

Fig. 3은 당량비 변화에 대한 연소실내 압력변동의 rms값을 나타낸다. 배기덕트 길이가 450

mm의 경우에는 당량비 0.9, 600 mm의 경우에는 당량비 0.8, 900 mm 경우에는 당량비 0.75에서 압력변동이 급격히 증가하여 연소진동이 일어나기 시작한 것을 알 수 있다. 덱트길이가 길수록 낮은 당량비로부터 연소진동이 발생하기 시작하고 발생한 압력변동 값도 크다. Fig. (1)에 나타낸 것과 같이 시스템내에서 압력변동이 자발적으로 증폭되기 위해서는 국소적인 에너지의 공급(또는 제거)과 압력변동과의 사이에 정의 상관이 필요하다. 즉, 압력변동을 증폭시키기 위해서는 변동하는 열원(발열률)이 필요하다. 여기서 연소진동은 모든 조건에서 당량비 0.05 간격사이에 급격히 발생하고 있는 것이 관측되어진다.

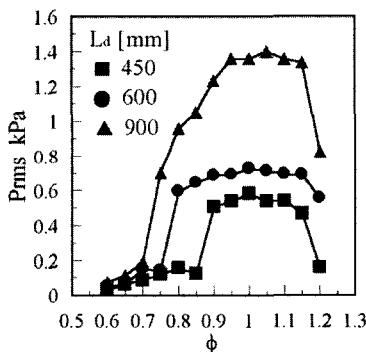


Fig. 3 Variations of RMS value of pressure fluctuations with respect to equivalence ratio

Fig. 4는 연소진동이 발생하기 시작하는 덱트길이 600mm, 당량비 0.8의 경우에 대해 고속도 CCD카메라로 촬영된 화염으로부터의 OH 및 CH 라디칼 자발광상, 연소실내의 압력변동, 연소실 전체로부터의 OH 및 CH 라디칼 자발광 신호(자발광상의 전 핵심 휘도값에 대한 적산치)와 유입하는 혼합기의 유량 변동을 나타낸 것이다. 연소진동이 발생하는 경우에 신호의 명확한 주기성이 관측되어진다. 연소영역에 대응하는 와류모양의 발광부가 규칙적으로 변동하고 있는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 본 연소시스템의 자려연소진동은 스텝 후류에 형성된 와류모양의 운동에 관계한다고 생각되어 진다. 화상(a)에 나타낸 것과 같이 압력이 극소치가 되기 직전에 혼합기 유량은

증가하기 시작한다. 혼합기 유량이 증가함에 따라 발열률에 대응하는 OH, CH 라디칼 자발광 신호의 강도가 조금씩 상승한다. 발열률의 증가에 따라 압력이 점차 증가하는 것을 화상 (b), (c)로부터 알 수 있다. 화상 (d)는 발열률이 극대치가 된 후에 압력이 극대치가 되는 것을 나타낸다. 연소실내 압력이 증가하기 때문에 연소실내로 들어오는 혼합기 유량은 감소하며 그 결과 발열률과 압력도 저하하여 화상 (a)의 상태로 돌아가는 과정이 화상 (e), (f)이다. 연소실내의 압력과 연소실 전체로부터의 OH와 CH 라디칼 자발광 신호도 주기적이고 위상차도 자려 진동의 발진조건인 $-\pi/2 < \tau/\pi/2$ 의 범위에 있다. Fig. 4의 압력변동 신호의 육안관찰에 의해서도 알 수 있는 바와 같이, 압력변동에 대한 주파수해석 결과에 의하면 본 조건에서의 피크주파수는 98 Hz를 나타내었다.

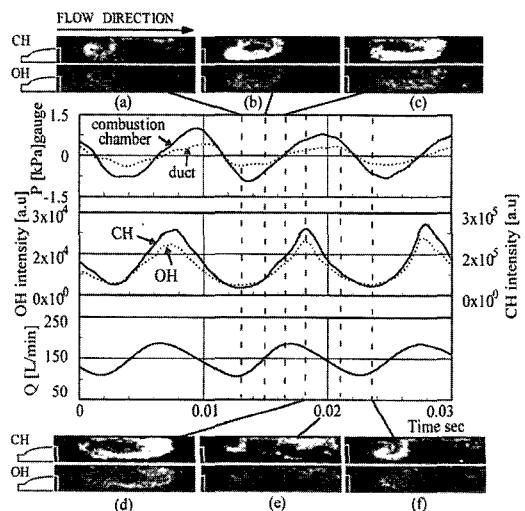


Fig. 4 Time series signals and flame images in the case of self-excited combustion oscillation
($L_d=600\text{mm}$, $f=0.8$)

이상에서 서술한 연소진동의 특성을 토대로 하여 자려연소진동이 발생할 때에 혼합기에 강제변동공급을 가한 경우를 조사해 본다.

Fig. 5는 정상공급의 경우 자려연소진동이 발생하는 조건에, 공급혼합기류에 Table 1에 나타낸 강제변동을 주었을 때의 연소실내 압력변동의 rms값을 정상공급의 경우와 비교한 것이다. Fig.

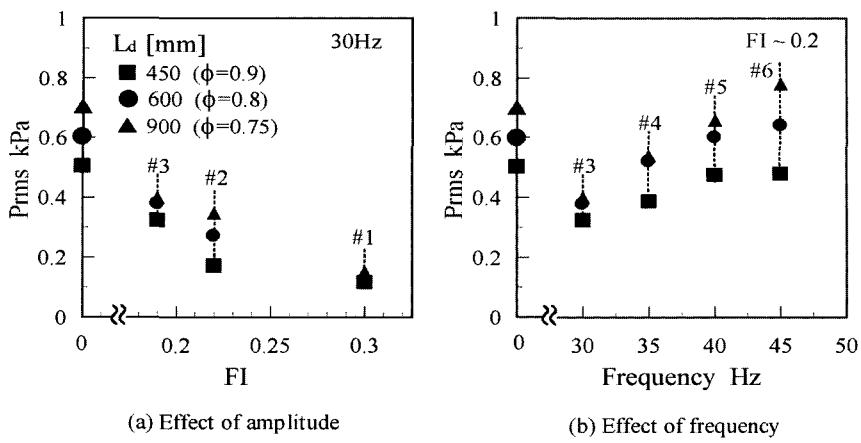
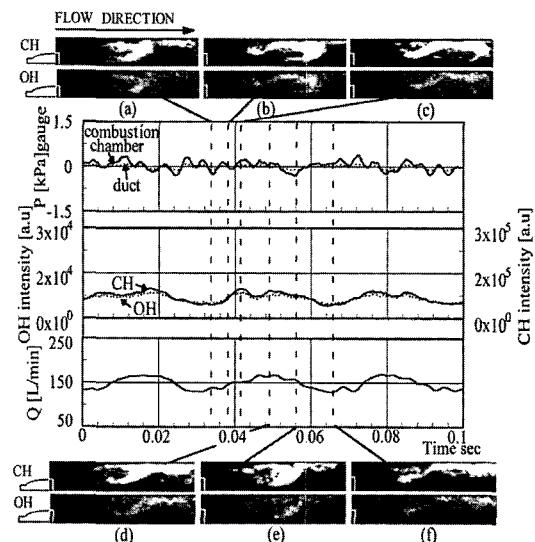


Fig. 5 Effects of forced pulsating mixture supply on combustion oscillation.

5(a)는 강제변동 주파수가 30Hz로 일정할 때 강제변동강도의 조건 #1, #2, #3를 나타낸 것이고, Fig. 5(b)는 강제변동강도는 거의 일정하지만, 강제변동의 주파수를 변화시킨 경우의 #3, #4, #5, #6의 결과이다. Fig. 5(a)에 의하면 예혼합기 유량의 변동강도가 증가함에 따라 연소실내의 압력변동은 감소하고 모든 덕트길이에 대해 그림 중에 FI=0으로 나타낸 정상공급의 경우보다 낮은 값을 나타내고 있다. Fig. 5(b)에 의하면 강제변동 주파수의 증가에 따라 연소실내의 압력변동의 rms값이 증가하는 경향을 보인다. 이러한 결과로부터 연소진동의 억제에는 강제변동 주파수를 높이는 것보다 진폭이 큰 변동을 주는 것이 보다 효과적이다.

덕트길이 $L_d = 600$ mm일 때 자려연소진동이 발생하기 시작하는 당량비 0.8의 조건에서, Table 1에 나타낸 #1의 강제변동을 부가함에 따라 연소진동이 억제된 때의 경우를 Fig. 6에 나타낸다. 화상에서의 연소영역은 불규칙하게 그 위치와 형태가 변화하고 있지만 압력변동은 혼합기에 가한 30 Hz의 강제변동에 대응하는 주기성은 발견되지 않으며 변동 또한 불규칙적인 것을 알 수 있다. 이것은 30 Hz의 강제변동의 주파수와 98 Hz의 자려연소진동 주파수의 변동이 서로 상쇄된 결과라고 생각되어진다. 그러나 자발광 신호와 혼합기 유량은 불규칙하지만 거의 30 Hz의 주파수

로 작게 변동하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 자려연소진동의 주파수보다 혼합기 유량에 가한 강제변동에 의해 지배되고 있기 때문이라고 예측된다. 라디칼 자발광 강도의 변동은 확인되어지지만 Fig. 4에 나타낸 자려연소진동이 일어나고 있는 경우와 비교하면 훨씬 그 진폭이 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 6 Time series signals and flame images when self-excited combustion oscillation is controlled using forced pulsating mixture supply(supply condition: #1, $L_d=600$ mm, $f=0.8$)

혼합기에 강제변동을 가함으로써 연소진동이 억제되어지는 이유로서, 공급하는 강제변동이 자려 연소진동에 의해서 발생하는 압력변동과 간섭되어짐으로써 연소진동의 압력변동 진폭을 감쇠시키기 때문이라고 예상되지만 아직 명확한 이유는 알 수 없다.

Fig. 7은 정상공급시에 자려연소진동의 발생에 대해서 생기는 연소실내의 압력변동과 조건 #1의 강제변동을 가해 자려연소진동이 억제되어질 때의

연소실내의 압력변동의 rms값을, 당량비에 따른 값과 비교한 것이다. Fig. 7(a), (b) 모두 공급당량비의 시간평균치는 같지만, (a)는 Fig. 1에 나타낸 것처럼, 연소실내에 공급되는 혼합기의 유량변동과 함께 당량비도 변동하는 경우이고, 한편 (b)는 벤츄리믹서를 1차공기와 2차공기가 분리되기 직전의 위치로 이동시켜 혼합기 유량이 변동하더라도 당량비는 항상 일정한 경우이다. 그림 중에 정상공급의 경우는 백색 표시, 강제변동공급의 경

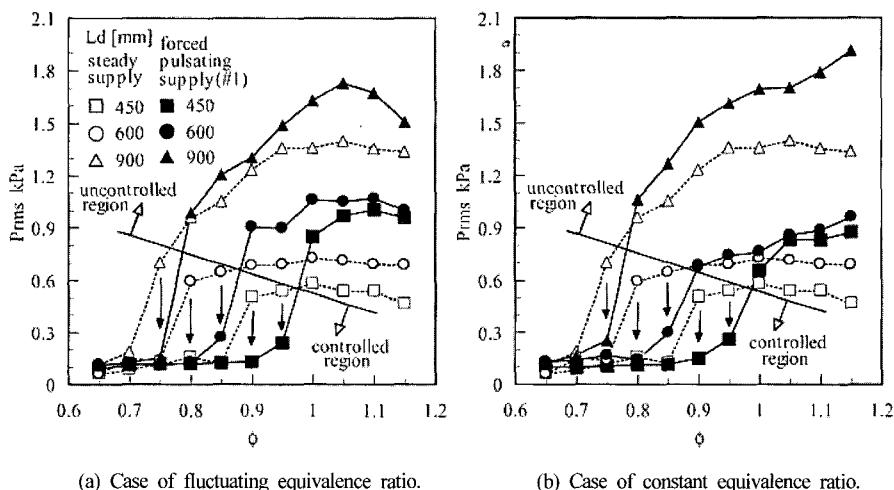


Fig. 7 Influences of forced pulsating supply(#1) on self-excited combustion oscillations with respect to equivalence ratio.

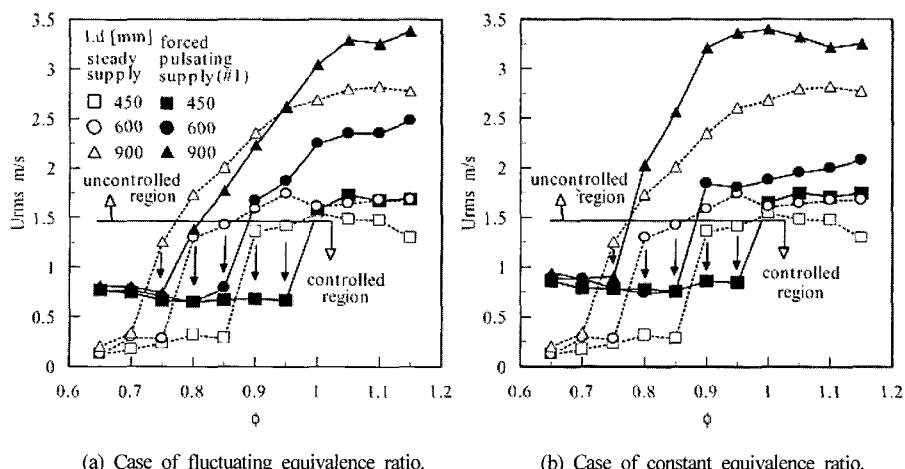


Fig. 8 Influences of forced pulsating supply(#1) on self-excited combustion with respect to equivalence ration.

우는 흑색 표시로 나타내었다. 또한 강제변동공급에 의해서 자려연소진동이 억제되어지는 범위를 나타내었다. Fig. 7의 (a)와 (b)를 비교하면 혼합기유량에 가한 강제변동과 연동해서 혼합기 농도가 변동하는 (a)의 경우와, 혼합기 농도는 일정하고 유량만 변동하는 (b)의 경우도 연소진동이 억제되어지는 당량비범위는 거의 같다. 이것으로부터 강제변동공급에 의한 연소진동의 억제에는 혼합기의 당량비 변동보다도 유량변동에 의한 효과가 지배적이라고 생각된다. 그러나 억제 가능한 한계는 당량비와 덕트길이에 의해서 변화하기 때문에 압력변동강도가 어떤 값 이하라면 억제 가능하다는 결론에는 이르지 않는다.

따라서 스텝부에 있어서의 유속변동의 rms값을 종축으로 취해 Fig. 7의 결과를 다시 나타낸 것이 Fig. 8이다. 강제변동공급에 의해서 연소진동이 억제되어지는 범위는 유속변동의 rms값이 약 1.5 m/s의 수평선이며 유속변동의 rms값이 1.2~1.5 m/s일때의 연소진동이 억제되는 것을 알 수 있다. 또한 정상공급의 경우, 자려연소진동이 발생하지 않는 낮은 당량비일때 강제변동류를 부가함에 의해 연소진동에는 이르지 못하지만 유속변동의 강도가 증가하고 있다. 이것은 정상공급시의 난류변동에 부가한 강제변동이 중첩되어지기 때문이라고 예상되어진다.

조건 #1. FI=0.3의 강제변동을 스텝 통과시의 유속변동의 rms값으로 환산하면 약 1.5 m/s가 된다. 이것으로부터 자려진동발생시의 유속변동강도가 부가한 강제변동에 의한 유속변동강도보다 작은 경우에는 연소진동이 억제되어지는 것을 알 수 있다. 즉, 자려연소진동이 억제되어지는 것은 공급되어지는 강제변동류가 가지는 유속변동에 비해 자려진동에 의한 변동강도가 작은 경우에 한하여 억제되어지는 것을 알 수 있다. 유속변동치가 약 1.5 m/s이상의 경우에는 자려연소진동이 억제되지 않을 뿐만 아니라, 부가한 강제변동이 중첩되어 연소진동의 강도는 더욱 증가되어진다.

3.2 자려연소진동의 징후 및 검출

연소진동의 발생 징후가 어떤 수단에 의해 검출

되어질 수 있다면 연소진동의 제어에 대단히 유효하다 할 수 있다. 연소진동이 발생하는 징후를 검출하기 위해서 혼합기의 당량비를 0.01의 미세한 간격으로 점진적으로 증가시켜 연소진동에 이르는 천이과정을 상세하게 조사했다.

Fig. 9(a), (b)는 $L_d = 600$ mm의 경우에 연소진동이 발생하지 않는 당량비 0.75로부터 연소진동이 발생하기 시작하는 당량비 0.8의 범위에 걸쳐 당량비를 0.01간격으로 증가시켜 연소실의 압력과 OH 자발광 신호의 시계열 데이터를 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 당량비가 증가함에

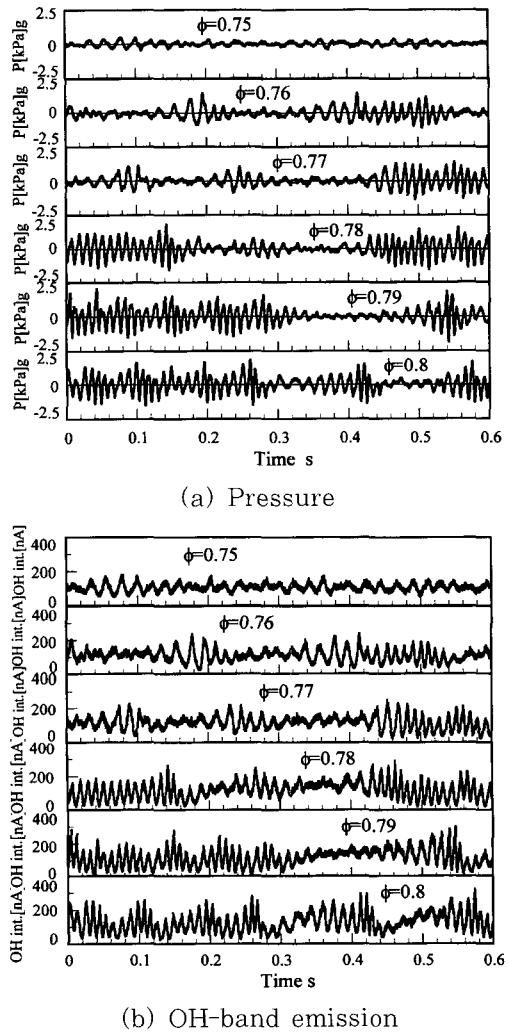
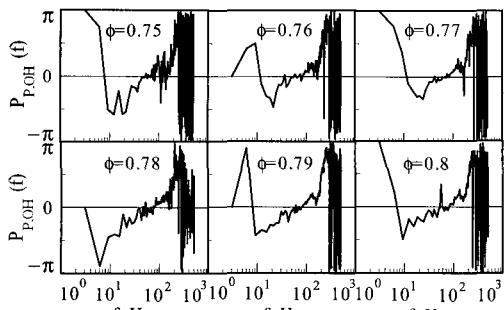
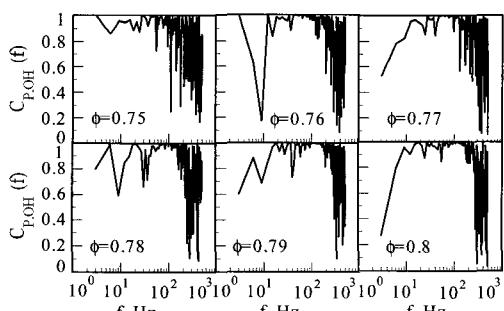


Fig. 9 Time series signals with the change of equivalence ratio.

따라 양 신호의 변동이 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다. OH 자발광 신호의 경우 연소진동을 나타내는 큰 변동이 있은 후 연소진동이 발생하지 않는 작은 변동을 나타내지만, 이 기간에 OH 자발광 신호 강도의 평균치는 압력변동의 경우와 비교해 높은 값을 나타낸다. 이것은 연소진동이 발생할 때의 높은 발열량의 영향 때문이라고 예상되어진다.



(a) Phase



(b) Coherence

Fig. 10 Phase and coherence between pressure and OH in FFT with fine base frequency.

시계열 데이터를 직접 관찰하면 연소진동이 발생하지 않는 당량비 0.75의 경우와 연소진동이 발생하고 있는 당량비 0.8의 경우의 차이는 쉽게 식별할 수 있지만, 어느 당량비부터 연소진동이 발생하고 있는가를 정량적으로 판단하는 것은 곤란하다. 즉, 연소진동이 발생하기 시작하는 조건에서 그 정후라고 생각할 수 있는 어떤 특징적인 경향을 발견할 수 있다면 그 정후를 검출한 순간부

터 연소진동의 억제대책에 돌입할 수 있어 피해를 미리 막는 것이 가능하다. 여기서 이와 같은 특징을 발견하기 위해 압력과 라디칼 자발광 신호의 시계열 데이터에 대한 주파수 해석을 하였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 Fig. 9에 나타낸 연소실내의 압력과 OH 자발광 신호사이의 페이즈(phase)와 코히런스(coherence)를 나타낸 것이다. Fig. 10과 Fig. 11의 데이터 정리에서 이용한 총 데이터 수는 32,768개로 동일하지만 FFT 처리의 설정이 다르다. Fig. 10은 FFT처리시의 데이터 수를 $2^{14}=16,384$ 로 설정(기본주파수 3 Hz)하고 평활화(smoothing)를 위한 블록 수는 2로 한 경우의 결과이다. 한편 Fig. 11의 경우에는 FFT처리시의 데이터 수를 $2^{10}=1,024$ 로 설정(기본주파수 49 Hz)하고 평활화를 위한 블록 수는 32로 하였다.

페이즈와 코히런스의 산출법은 다음과 같은 방법으로 하였다. A/D 변환된 시계열 데이터를, FFT처리시의 데이터 개수(2^n)와 평활화를 위한 블록수를 바꾸어 복소 스펙트럼(complex spectrum)으로 변환했다. 시계열 신호 $f_i(t)$ 의 복소 스펙트럼을 $F_i(f)$ 으로 하면 파워 스펙트럼(power spectrum) $W_i(f)$, 크로스 스펙트럼(cross spectrum) $X_{ij}(f)$ 는 다음식에 의해 구해진다.

$$W_i(f) = F_i(f) \cdot \overline{F_i(f)} \quad (2)$$

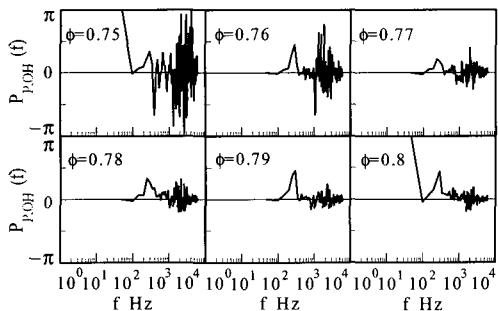
$$X_{ij}(f) = F_i(f) \cdot \overline{F_j(f)} \quad (3)$$

여기서 $\overline{F_i(f)}$ 는 $F_i(f)$ 의 공역 복소 스펙트럼(conjugate complex spectrum)이다. 또한 첨자 i, j 는 연소실의 압력변동과 연소실 전체 화염으로부터의 OH 자발광 신호로 치환되어진다. 페이즈 $P_{ij}(f)$ 는 다음식에 의해 크로스 스펙트럼의 편각으로서 구해진다. 즉 페이즈는 2신호간의 각 주파수 성분에 대한 위상차를 나타낸다.

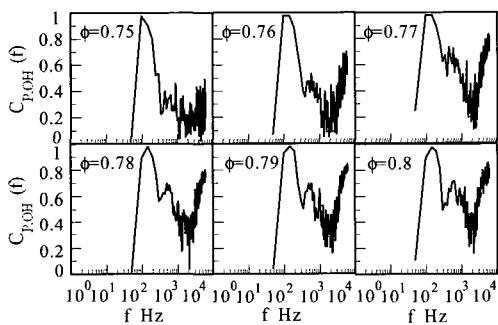
$$P_{ij}(f) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(X_{ij}(f))}{\text{Re}(X_{ij}(f))} \right] \quad (4)$$

코히런스 $C_{ij}(f)$ 는 각 주파수 성분에 있어 크로

스 스펙트럼의 절대치를 그 주파수에서의 양 신호의 파워 스펙트럼의 기하평균값(geometric mean value)으로 정규화된 것으로 2개의 신호의 주파수영역에서의 상호상관계수에 상당하며 다음 식으로 정의 되어진다.



(a) Phase



(b) Coherence

Fig. 11 Phase and coherence between pressure and OH in FFT with coarse base frequency.

$$C_{ij}(\mathcal{f}) = \frac{|X_{ij}(\mathcal{f})|}{\sqrt{W_i(\mathcal{f}) \cdot W_j(\mathcal{f})}} \quad (5)$$

Fig. 10의 결과를 보면 연소진동이 발생하고 있지 않은 당량비 0.75로부터 연소진동이 발생하기 시작하는 당량비 0.8의 모든 조건에서 페이즈, 코히런스가 함께 고주파수 영역에서 크게 진동하고 있어 양 신호에는 상관관계가 관측되지 않는다. 그러나 Fig. 11(a)의 페이즈 값은 당량비 0.75의 경우와 같이 연소진동이 발생하지 않는 조건에서는 고주파수 영역에서 페이즈는 크게 진동하고 있지만 연소진동이 발생하기 시작한 당량비 0.8의 조건에서는 고주파수 영역에서 페이즈가 0

부근에서 작은 진폭으로 진동하는 것처럼 된다. 또한 Fig. 11(b)의 코히런스도 고주파수 영역에서 비교적 높은 값이 되어 압력과 OH 라디칼 신호가 고주파수 영역에서 상관관계가 높은 것을 나타내고 있다.

Fig. 10과 Fig. 11의 차이는 FFT처리 시의 데이터 수(기본주파수)와 평활화를 위한 블록수에 기인한다. 고주파수 성분까지 정확히 해석하기 위해서는 FFT처리시의 데이터 수(2^n)를 많게 하여 기본 주파수를 크게 해 주파수 분해능을 높게 처리한 Fig. 10의 결과가 정확한 현상을 나타내고 있다고 생각하는 것은 주지의 사실이다. 그러나 기본 주파수를 크게 취하여 FFT의 주파수 분해능을 낮게 하고 평활화의 회수를 늘려 현상을 평균화하여 관찰하면 100 Hz전후의 연소진동에 대해서는 분해능을 가지지만, 1 kHz에 가까운 고주파수에 대해서는 분해능을 잃어버린다. 이것이 높은 상관관계(코히런스가 높고, 페이즈가 0부근)가 저주파수 영역의 고조파의 영향에 기인하여 고주파수 영역에 있어서도 상관관계가 높은 것과 같은 결과가 되는 원인이 된다. 연소진동이 발생하고 있는 압력과 OH 라디칼 신호에 피크 주파수(peak frequency)의 성분이 있으면, 고주파수 영역의 변동은 단지 저주파수 영역의 큰 변동에 겹쳐진 노이즈가 되어버린다. 따라서 이 경우 낮은 주파수 분해능(큰 기본 주파수)을 가지고 통계처리를 하면 낮은 주파수 영역의 고조파의 영향으로 높은 주파수 영역에서 두 신호는 높은 상관관계(즉, 코히런스가 높고 페이즈가 0 부근)로 나타난다. 한편 연소진동이 일어나지 않는 경우에 얻어진 피크 주파수가 없는 데이터라면, 모든 주파수영역에서 두 신호사이에는 어떤 상관관계도 없고 코히런스와 페이즈도 아무 의미없이 크게 진동하게 된다. 다시 말하면 저주파수 영역에서의 피크 주파수의 존재 유무에 따라 신호의 고주파수 성분을 상대적으로 크게 하기도 하고 작게 하기도 한다.

이 데이터 처리방법을 이용하면 연소진동이 나타나기 시작하는 것을 고주파수 영역의 통계량으로부터 감지할 수 있기 때문에 연소진동의 정후로서 이용되어질 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결 론

유로 도중에 스텝상의 급격대부를 가진 연소기를 이용해 자려연소진동의 특성과 공급혼합기에 강제적인 변동을 가함에 의한 연소진동의 억제 가능성을 검토했다. 또한 실험적으로 연소진동 발생의 정후에 대한 검출을 시도해 다음과 같은 결론을 얻었다

- (1) 정상공급시에 자려연소진동이 발생한 경우, 연소진동이 비교적 약할 때에는 예혼합기에 적절한 강제변동을 부여함으로써 자려진동연소가 억제되는 경우가 있으며, 이 방법은 자려연소진동의 발생을 억제하는 수단으로서 이용될 수 있는 가능성이 있다. 그러나 일단 강한 연소진동이 발생하면 예혼합기에 강제변동을 부가해도 억제효과는 기대할 수 없다.
- (2) 공급 예혼합기에 강제변동을 부가함에 의해 자려연소진동을 억제하는 경우, 부가하는 강제변동의 주파수를 올리기보다 진폭을 증가시키는 것이 보다 효과적이다.
- (3) 강제변동에 의해서 발생한 혼합기의 유속변동 강도에 비해 자려연소진동에 의해 발생한 유속변동강도가 작은 경우에 자려진동은 억제된다.
- (4) 연소진동의 정후를 검출하기 위해 혼합기의 당량비를 미세 간격으로 점진적으로 증가시켜 연소진동에 이르는 천이과정을 상세히 조사하였다. 그 결과 변동신호의 해석에 있어 기본 주파수를 크게 취하고 FFT의 주파수 분해능을 작게 하여 평활화의 회수를 늘리고 현상을 평균화하여 관찰하면, 압력과 OH 라디칼 자발광 신호의 페이즈가 연소진동이 발생하고 있는 경우에는 0 부근에서 작은 진폭으로 진동한다. 이것을 이용하여 연소진동의 정후를 검출할 수 있다.

주파수 해석에 관해서 유익한 조언을 해주신 Kokushikan 대학의 키시모토 켄(Kishimoto Ken) 교수님에게 사의를 표합니다.

참고문헌

- [1] A. A. Putnum, "Combustion-Driven Oscillation in Industry", Elsevier, London, 1971.
- [2] M. Katsuki and J. H. Whitelaw, "The Influence of Duct Geometry on Unsteady Premixed Flames", Combustion and Flame, Vol. 63, pp. 83-94, 1986.
- [3] K. R. McManus, T. Poinsot and S. M. Candel, "A Review of Active Control of Combustion Instabilities", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 19, pp. 1-29, 1993.
- [4] H. Ichiro and S. Kazuo, "Development of Small Twin-Valveless Pulse Combustors : Effect of Injection System", Combust. Sci. and Tech., Vol. 94, pp. 43-55, 1993.
- [5] C. Poppe, S. Sivasegaram and J. H. Whitelaw, "Control of NOx Emissions in Confined Flames by Oscillations", Combustion and Flame, Vol. 113, pp. 13-26, 1998.
- [6] D. R. Englund and W. B. Richards, "The Infinite Line Probe", Proceedings of the 30th International Instrumentation Symposium, Instrument Society of America, pp. 115-124, 1984.
- [7] G. A. Richards and M. C. Janus, "Characterization of Oscillations During Premixed Gas Turbine Combustion", ASME Trans., Vol. 120, pp. 294-302, 1998.
- [8] J. O. Keller and K. Saito "Measurement of the Combustion Flow in a Pulse Combustor", Combust. Sci. and Tech., Vol. 53, pp. 137-163, 1987.
- [9] K. R. McManus, U. Vandsburger and C. T. Bowman, "Combustor Performance Enhancement Through Direct Shear

Layer Excitation", Combustion and Flame, Vol. 82, pp. 75-91, 1990.

저 자 소 개



양영준 (Young-Joon Yang)

1967년생, 1991년 2월 동아대학교 기계공학과 졸업 (공학사), 1996년 2월 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업 (공학석사), 2002년 7월 오사카 대학교 대학원 기계물리 연소공학 전공 (공학박사), 1996년 1월 ~ 1998년 2월 (주)한국중공업, 2002년 4월 ~ 2003년 2월 (주)이온공학연구소(일본 국가연구기관), 현 동아대학교 기계공학과 연구원