

비정상연소의 적극적 이용법에 관한 연구

양영준* · 이치우* · 김봉환* · 아카마쓰 후미테루**

A Study on Positive Use of Unsteady Combustion

Young-Joon Yang*, Chi-Woo Lee*, Bong-Hwan Kim* and Fumiteru Akamatsu**

ABSTRACT

The usefulness of unsteady combustion was experimentally investigated using confined premixed flames stabilized by a rearward-facing step. For this purpose, apparatus of forced pulsating mixture supply, which could be modulated its amplitude and frequency, was designed. The unsteady combustion used in this experiment plays an important role in controlling self-excited combustion oscillations and furthermore it exhibits desirable performance, from a practical point of view, such as high load combustion and reduction of pollutant emission like nitric oxide.

Key Words : Unsteady combustion, Forced pulsating mixture supply, Premixed combustion, Combustion oscillation, NOx

1. 서론

가스연소의 형태를 크게 나누면 확산연소와 예혼합연소로 나누어진다. 확산연소방식은 혼합에 시간과 거리가 필요하고 화염이 길어지기 때문에 연소장치가 대형화 되는 경우도 있지만, 안전하고 다루기 쉬운 연소법이라는 이점 때문에 많은 실용 연소장치에서 채택되어지고 있다. 그러나 예혼합연소는 고부하연소의 실현 및 유해 연소배출물 저감과 함께 연소가 단시간에 종료하기 때문에 연소실을 소형화할 수 있다는 이점 때문에 폭넓게 활용되어지고 있다[1,2]. 그러나 예혼합연소를 사용할 때 연소의 불안정성 또는 연소진동 발생이 문제가 되는 경우가 많다[3]. 연소장치에는 연소실 및 연료와 공기의 공급계의 배관, 배기덕트 등이 존재하여 이로 인한 유체역학적 고유진동과, 연소반응에 의한 열발생률의 변동이 서로 연동함으로써 자려 연소진동(self-excited combustion oscillation)이 발생한다[3-5]. 자려 연소진동의 발생 개시 여부는 다음 식의 Rayleigh 이론을 만족한 경우에 일어난다.

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

여기서, p' 과 q' 은 각각 연소실 내의 압력변동과 발열률변동을 나타낸다. 즉 위의 식은 압력변동과 발열률변동이 모두 단진동이라고 하면 그 위상차 τ 가 $-\pi/2 < \tau < \pi/2$ 의 범위에 있을 때 연소진동이 발생하는 것을 나타낸다[4].

이러한 연소진동을 제어하기 위한 방법으로 연소기의 기하학적 형태 등을 변경하는 수동제어(passive control)[6]와 연소기내의 압력변동 신호를 위상 변화시켜 혼합기 공급계에 피드백(feedback)함으로써 연소기내의 압력변동을 상쇄하는 능동제어(active control)[7]가 있다. 그러나 능동제어에는 복잡한 제어시스템이 필요하게 되어 고비용의 결점이 있으며, 수동제어는 연소진동이 발생할 때 최악의 경우에는 재설계를 해야 하는 결점이 있다. 따라서 위의 두 가지 외의 다른 방법으로 연소진동을 제어하려는 연구가 시도되어지고 있다[8].

한편, 이 연소진동의 이점을 적극적으로 이용하려고 하는 관점으로부터 많은 연구가 또한 이루어지고 있다[9-11]. 그 대표적인 예가 펄스연소기이다. 펄스연소는 이 연소진동을 적극적으로 발생시켜 진동에 의한 유동혼합 촉진 및 큰 가스운동량을 이용하는 방식이다[3]. 그 기본적인 발생기구는 연소진동과 동일하지만 압력변동을 유

* 진주산업대학교 자동차공학과

** 오사카대학 기계물리

† 연락처, yangyj@jinju.ac.kr

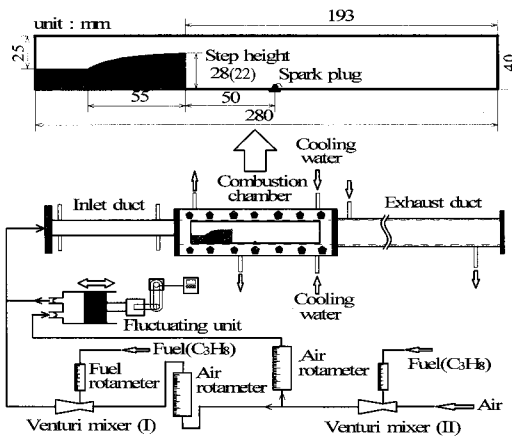


Fig. 1 Experimental apparatus

동의 간헐성과 연관시켜 간헐연소(intermittent combustion)를 행하고 있다. 그 결과 펄스연소는 연소장치, 특히 후미 파이프(tail pipe) 내의 유속 변동이 격렬하기 때문에 고부하연소, 고열전달성, 유해배출물의 저감 등에 뛰어난 연소기술[12,13]이며 추진기, 가열기, 건조기 등에 응용되어지고 있다. 그러나 이와 같은 펄스연소에서는 활용될 수 있는 큰 운동량이 있기 때문에 연소기의 개선에 도움이 될 수 있지만, 이에 따른 참기 어려울 정도의 큰 소음이 발생하는 문제점도 있다[14].

본 연구에서는 비정상연소를 적극적으로 이용할 수 있는 방법에 관하여 고찰을 하였다. 즉 연소진동의 제어방법으로써 수동제어와 능동제어가 아닌 혼합기류 중에 연소진동의 피크주파수(peak frequency)와는 전혀 무관계한 주파수 변동을 공

급혼합기에 가한 경우 자려연소진동의 억제 가능성에 대하여 조사하였다. 또한 간헐연소를 수행함으로써 얻어지는 장점을 최대한 살릴 수 있는 연속연소(continuous combustion)를 행하는 강제 맥동공급의 효과에 대해 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

유로계의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 전 공급공기량을 147 L/min 로 일정하게 하고 프로판 유량을 변화시킴으로써 공급 예혼합기의 당량비를 변화시켰다. 이 유로계에서는 공급하는 연료와 공기를 혼합시키는 벤츄리믹서의 위치를 I 또는 II의 위치의 어느 한쪽에 놓음으로써 2종류의 혼합기 공급이 가능하도록 하였다. 먼저 벤츄리믹서를 I 에 놓을 경우, 압축기로부터 공급되어지는 고압의 공기는 드라이 필터를 지나 제공되어진 후, 1차공기와 2차공기로 나누어진다. 1차공기는 벤츄리믹서에서 프로판과 혼합되고, 2차공기는 강제맥동 발생장치(Hitachi, 0.2 OP-5T)에서 맥동이 주어진 후 1차공기와 프로판의 예혼합기와 혼합되어 정류부를 지나 연소부에 공급되어진다. 즉 강제변동을 가한 경우에는 연소실에 공급되는 예혼합기의 유량과 함께 당량비도 변동하지만 시간평균치는 언제나 일정하다. 강제맥동 발생장치는 인버터에 의해 회전수가 변인 직류모터로 구동되어진다. 강제맥동 발생장치는 최대압력이 0.5 MPa, 보아 50 mm, 스트로크 18 mm인 1기통이다. 연소기는 유로 상류측으로부터 정류부, 연소실, 배기덕트 3개의 부분으로 구성되어진다. 혼합기는 내측단면이 종 25 mm x 횡 40 mm의 정류부를 통과해 연소실 직전에 설치된 높이 28 mm 및 22 mm의 스텝에 의해 일단 축류 되어진

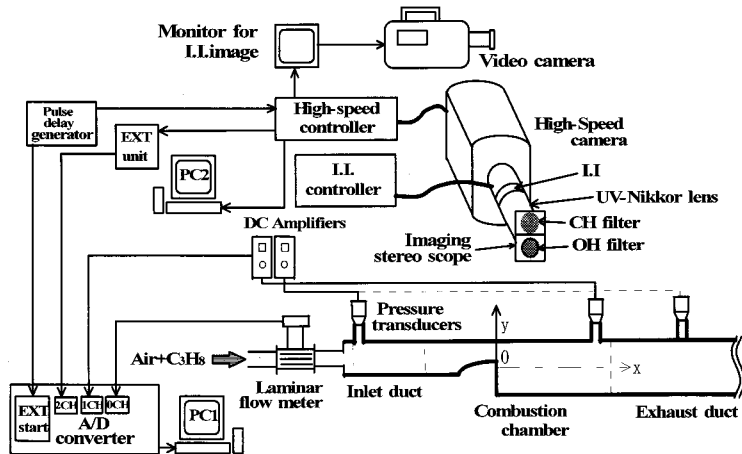


Fig. 2 Set-up of instrumentation

후 40 mm x 40 mm의 단면을 가지는 연소실에 급확대 되어 스텝후류에 형성되어지는 재순환 영역에 화염이 형성되어진다. 본 실험에서는 스텝 높이가 28 mm 인 경우(high step)는 어느 당량비 범위에서 자려연소진동이 발생하는 경우이며, 스텝 22 mm 인 경우(low step)는 전 당량비 범위에서 전혀 자려연소진동이 발생하지 않는 경우이다. High step의 경우에는 자려연소진동의 제어를, low step의 경우에는 연소특성 개선을 목적으로 사용하였다. 연소실의 양 측면에는 바이콜 유리 (vycor glass)가 장착되어 화염 관찰이 가능하다. 배기덕트는 내측단면이 40 mm x 40 mm로 길이 150, 300, 600 mm의 3종류를 조합함으로써 덕트길이를 변화시킬 수 있다. 한편, 벤츄리믹서를 II에 놓을 경우, 전 공급공기에 대해 연료가 혼합되어진다. 그 후 예혼합기는 1차 혼합기와 2차혼합기로 나누어진다. 즉 이 경우의 혼합기는 강제변동의 유무에 관계없이 당량비가 일정하고 강제변동을 가하는 경우에도 변동하는 것은 연소실에 공급되어지는 예혼합기의 유량뿐이고 당량비는 변하지 않는다.

Figure 2에 본 실험에서 이용한 계측시스템을 나낸다. 본 계측시스템에서는 화염으로부터의 OH와 CH 라디칼 자발광상, 예혼합기의 변동유량, 연소실 2곳의 압력을 동시에 시계열로서 계측 가능하다. 화염으로부터의 자발광상의 측정에는 고속도 CCD 카메라 (Kodak Co. Ltd. Ekatapro HS Model 4540)를 이용하였다. 이때 동일영역에 있는 서로 다른 2파장의 화상을 1대의 고속도 CCD 카메라로 동시에 촬영하기 위해 화상입체경(Imaging stereoscope, Lavisision Co. Ltd.)을 이용하였다. 화염상은 광간섭필터(OH 라디칼 자발광용 : 중심파장 308.5 nm, 반치폭 18 nm, CH 라디칼 자발광용 : 중심파장 430.5 nm, 반치폭 1.0 nm)를 설치하여 영상증배장치(Image intensifier)에서 휘도 증폭되어 영상속도(Frame rate) 4500 fps로 연속 1024장이 촬영되어진다. 연소실에 공급되어지는 예혼합기의 변동유량 측정은 스텝 상류 730 mm의 위치에 총류유량계(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 이용하였다. 연소장치와 압력센서와의 접속관내의 압력신호의 변형 방지를 고려하여[15] 접속관은 길이 40 mm, 직경 9 mm의 원통관으로 하였다. 고속도 CCD카메라와 A/D변환기의 동기에

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

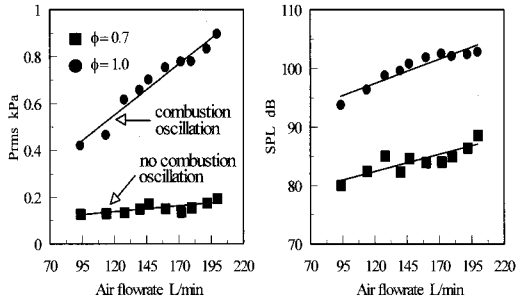
는 펄스지연 발생장치(pulse delay generator, stanford research systems, WC model DG535)를 이용하였다. 본 계측시스템에서는 고속도 CCD 카메라에 의해 화염으로부터의 OH와 CH 라디칼 자발광상, 예혼합기의 변동유량, 연소실내 2곳의 압력, 즉 총 2화상과 3신호를 동시에 시계열로서 계측 가능하도록 되어있다.

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 예혼합기를 공급한 경우에 "정상공급", 강제변동을 가한 경우에 "강제변동공급"이라고 정의한다. NOx의 측정에는 덕트 출구단면 중심으로부터 150 mm 상류측의 단면중앙에서 행하였다. 샘플링된 연소가스는 가스중의 수증기 제거용의 실리카겔이 들어 있는 샘플링 유로를 지나 화학 발광식 NOx 분석기 (BCL-611A.511)에 흡인되어 분석이 이루어진다. 연소가스의 샘플링은 1분간의 평균치로서 NOx 성분농도가 ppm으로 표시 되어진다. 연소실내부의 온도측정에는 바이콜 유리 대신에 열전대 삼입용의 구멍을 가진 강판을 이용하여 직경 100 μ m의 R-type 열전대를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연소진동이 연소기에 미치는 영향

Figure 3은 당량비를 일정하게 유지하고 전 유량을 변화시킨 경우에 있어서 압력변동과 소음레



(a) Pressure fluctuation (b) Sound pressure level

Fig. 3 Variations of pressure fluctuation and sound pressure level with respect to air flowrate ($L_d=600\text{mm}$)

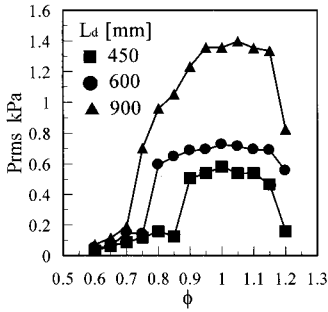


Fig. 4 Variations of rms of pressure fluctuations with respect to equivalence ratio

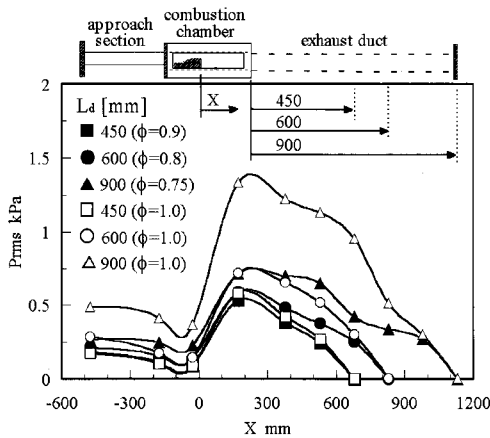


Fig. 5 Spatial distribution of rms of pressure fluctuations in total length of system

벨의 측정결과를 나타낸다. 이 결과에 의하면 명확히 유량이 증가함에 따라서 압력변동과 소음레벨이 증가함을 알 수 있다. 특히 연소진동이 발생하는 경우($\phi=1.0$)의 압력변동의 증가율이 높은 것을 알 수 있다. 즉 유량이 증가한다는 것은 공기와 연료가 함께 증가하는 것을 나타내며, 유량이 증가하면 유체의 흐름에 의한 노이즈가 증가하고 동시에 연소강도도 증가함에 의해 압력변동과 소음레벨의 증가를 일으키는 것으로 예상되어진다.

Figure 4는 당량비의 변화에 대한 연소실내 압력변동의 rms 값을 나타낸 것이다. 당량비가 화학양론비로부터 양론비(stoichiometric ratio)에 가까워짐에 따라 배기덕트 길이가 450 mm의 경우에는 당량비 0.9 이상, 600 mm의 경우에는 0.8 이상, 900 mm의 경우에는 0.75 이상에서 압력변동이 급격히 강해지고 연소진동이 일어나기 시작하는 것을 알 수 있다. 또한 배기덕트 길이가 길수록 낮은 당량비로부터 연소진동이 발생하기 쉽고 연소진동이 발생한 때의 압력변동도 강하다는 것을 알 수 있다. 덕트 길이가 길수록 낮은 당량비로부터 연소진동이 발생하기 시작하고 발생한 압력변동도 크다. 식 (1)에 나타난 것과 같이 시스템 내에서 압력변동이 자발적으로 증폭되기 위해서는 국소적인 에너지의 공급(또는 제거)과 압력변동과의 사이에 정의 상관성이 필요하다. 즉 압력변동을 증폭시키기 위해서는 변동하는 열원(발열률)이 필요하다.

Figure 5에 모든 덕트길이에 대해 연소진동이 개시되는 당량비와, 강한 연소진동이 발생하는 당량비 1.0의 경우에 있어서 압력변동의 rms 값에 대한 연소기시스템 전체에 있어서의 공간적 분포를 나타낸다. 이 그림으로부터 본 실험에서 사용한 연소기 시스템에서는 스텝(rearward-facing step) ($X=0\text{mm}$) 근방이 압력변동의 절(node)이 되고 연소실이 압력변동의 배(anti-node), 더욱이 다시 배기덕트 출구 근방이 압력변동의 절이 되는 거의 3/4 파장모드를 가지는 정재파가 형성되어지는 음향학적 연소진동이 일어나고 있음을 알 수 있다. 또한 연소진동이 시작되는 희박한 당량비에 있어서도 강한 연소진동이 발생하는 경우와 거의 같은 모드의 공간분포가 되는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 이용한 연소기 시스템에서는 위에서 나타난 것과 같이 음향학적 연소진동이 발생하고 있다. 이와 같은 음향학적 연소진동이 발생하고 있는 경우, 연소기 시스템 내에는 어떠한 현상이 일어나고 있는가에 대해서는 보다 상세하게 살펴볼 필요가 있다.

Figure 6은 Fig. 5의 조건 중에서 음향학적 연소진동의 강도가 중간정도의 강도를 가지는 $L_d=600$ mm, $\phi=1.0$ 의 경우의 압력 변동파형을

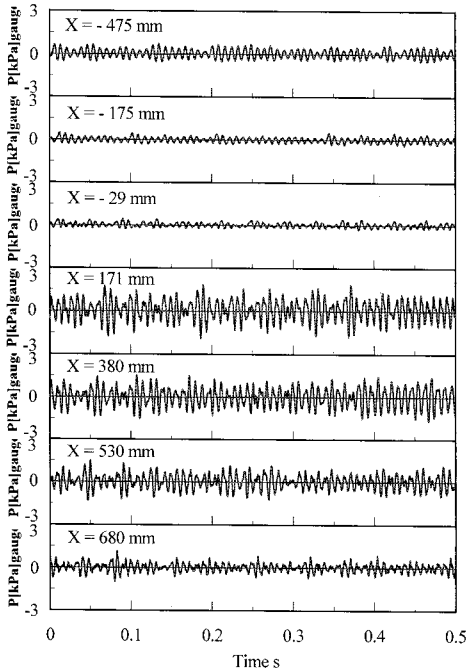


Fig. 6 Pressure fluctuations with respect to location in the system ($L_d=600\text{mm}$, $\phi=1.0$)

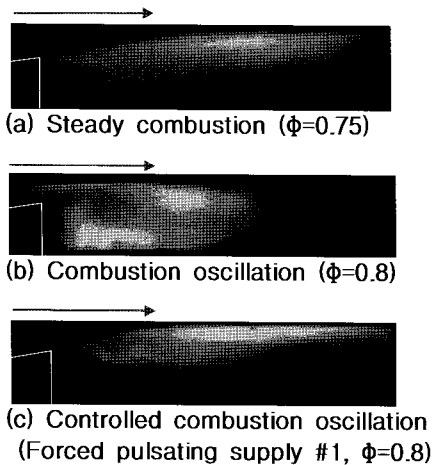


Fig. 7 Comparison of flame

나타낸 것이다. 압력변동은 정류부의 상류측 ($X=-475\text{ mm}$)로부터 조금씩 감소하여 스텝의 약간의 상류측에서 최소가 되고 연소실내 ($X=-171\text{mm}$)에서 압력변동은 최대가 된 후, 덕트의 출구측에 접근함에 따라 다시 감소하고 있음을 알 수 있다. 연소진동이 발생하면 연소실뿐만 아니라 공급계인 정류부의 상류측에도 압력변

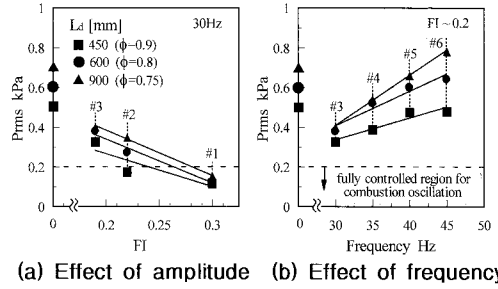


Fig. 8 Effects of forced pulsating mixture supply (#1~#6) when combustion oscillation is occurred

동의 영향이 나타난다. 이와 같은 현상은 연소진동이 발생하기 쉬운 연소기 설계의 경우에 특히 주의할 필요가 있다. 비록 지면의 제약 때문에 제시하는 것을 생략하지만, Fig. 6의 신호에 관한 파워스펙트럼을 조사하였다. 그 결과 스펙트럼의 강도는 정류부의 상류부로부터 감소하여 연소실에서 최대가 된 후 다시 감소하였고 이는 Fig. 6의 모양과 일치하였다. 또한 피크주파수는 음향학적 연소진동이 발생하면 시스템 전체에 걸쳐서 모두 동일한 122 Hz ($L_d=600\text{mm}$, $\phi=1.0$)를 나타내는 것을 알 수 있었다. 더 나아가 Fig. 6의 신호에 대해 자기상관계수를 구한 결과 신호의 지연시간은 약 8 ms였다. 파워스펙트럼과 자기상관계수와의 관계[16,17]에서 알 수 있는 바와 같이 주기 약 8ms는 피크주파수 122 Hz의 역수에 해당하는 것으로서 자기상관계수에 의해서도 그 주기성을 확인할 수 있다. 이것으로부터 본 실험장치에서 발생하는 자려연소진동은 연소기 시스템의 전 영역에 걸쳐서 모두 동일한 피크주파수를 가지는 음향학적 연소진동이 발생하고 있다고 할 수 있다. 본 연구에서는 기존에 수행된 연구들과 동일하게, 화염의 불안정성과 연소진동 발생을 연소실내 압력변동을 통해서만 다루고 있으나[6, 7, 18], 다른 관점으로부터의 접근이 반드시 필요하다고 사료된다.

3.2 비정상연소를 이용한 연소진동의 제어

Figure 7은 자려연소진동이 전혀 발생하지 않은 경우(a), steady supply, $L_d=600\text{mm}$, $\Phi=0.75$), 자려연소진동이 발생한 경우(b), steady supply, $L_d=600\text{mm}$, $\Phi=0.8$)와 강제변동류에 의해 연소진동이 억제된 경우(c), forced pulsating supply(#1), $L_d=600\text{mm}$, $\Phi=0.8$)의 직접사진이다. 연소진동이 발생한 경우는 급격한 압력변동이 발생하고 외견상의 화염길이가 짧다. 한편 강제변동류에 의해 연소진동이 억제된 경우의 화염(c)

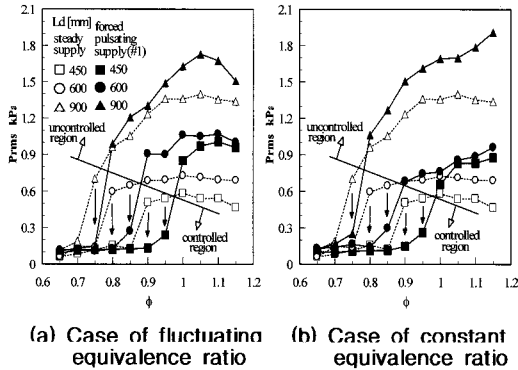


Fig. 9 Influences of forced pulsating supply (#1) on self-excited combustion oscillations with respect to equivalence ratio

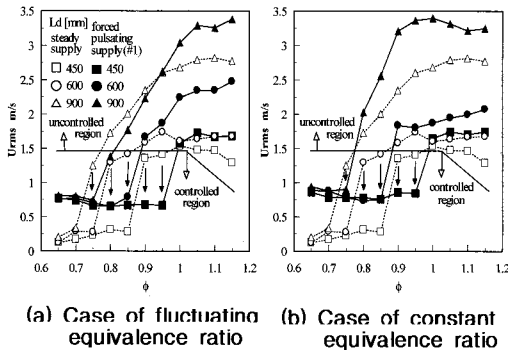


Fig. 10 Influences of forced pulsating supply (#1) on self-excited combustion oscillations with respect to equivalence ratio

은 정상류의 경우(a)와 거의 같은 외견을 하고 있다.

Figure 8은 정상공급시 자려연소진동이 발생하는 조건에서 예혼합기에 Table 1에 나타난 6종류의 강제변동을 가할 때, 연소실내의 압력변동의 rms값이 어떻게 변화하는 가를 정상공급의 경우와 비교한 것이다. (a)는 조건 #1, #2, #3를 이용하여 강제변동주파수 30Hz 일정 하에 변동강도를 변화시킨 경우, (b)는 조건 #3, #4, #5, #6을 이용하여 변동강도가 거의 일정하고 강제변동주파수를 변화시킨 경우의 결과이다. (a)에 의하면 연소실내의 압력변동은 예혼합기 유량의 변동강도가 증가함에 따라서 감소하고 또한 변동강도를 변화시킨 전 범위에 걸쳐 정상공급의 경우보다 낮은 값을 나타내고 있다. 또한 (b)를 보면 강제변동주파수의 증가에 따라서 연소실내의 압

력변동의 rms 값이 증가하고 어느 주파수 이상에서는 정상공급의 경우보다 높은 값을 나타내고 있다. 이것들로부터 진동연소의 제어에는 강제변동의 주파수를 올리는 것보다도 진폭이 큰 변동을 가하는 것이 보다 효과적이라고 예상되어진다. 여기서 강제변동공급에 의한 진폭증가로 인하여 Fig. 4의 당량비 0.6~0.65의 회박영역에서는 화염소멸과 같은 부수적인 화염의 불안정성을 야기하였다.

Figure 9는 정상 공급시에 자려연소진동의 발생에 의해서 생기는 연소실내의 압력변동과 조건 #1의 강제변동을 가해 자려연소진동이 억제되어질 때의 연소실내의 압력변동의 rms 값을 당량비에 따른 값과 비교한 것이다. Fig. 9(a), (b) 모두 공급당량비의 시간평균치는 같지만, (a)는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이, 연소실내에 공급되는 혼합기의 유량변동과 함께 당량비도 변동하는 경우(벤츄리믹서 I)이고, 한편 (b)는 벤츄리믹서를 1차공기와 2차공기가 분리되기 직전의 위치로 이동시켜 혼합기 유량이 변동하더라도 당량비는 항상 일정한 경우(벤츄리믹서 II)이다. 그림 중에 정상공급의 경우는 백색 표시, 강제변동공급의 경우는 흑색 표시로 나타내었다. 또한 강제변동공급에 의해 자려연소진동이 억제되어지는 범위를 나타내었다. (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 당량비 범위는 거의 같다. 이것으로부터 강제변동공급에 의한 연소진동의 억제에는 혼합기의 당량비 변동보다도 유량변동에 의한 효과가 지배적이라고 예상되어진다. 그러나 억제 가능한 한계는 당량비와 덕트길이에 의해서 변화하기 때문에 압력변동강도가 어떤 값 이하라면 억제 가능하다는 결론에는 이르지 않는다.

따라서 스택부에 있어서의 유속변동의 rms 값을 종축으로 취해 Fig. 9의 결과를 다시 나타낸 것이 Fig. 10이다. 강제변동공급에 의해서 연소진동이 억제되어지는 범위는 유속변동의 rms 값이 약 1.5 m/s의 수평선이며 유속변동의 rms 값이 1.2~1.5 m/s일 때의 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 스택 통과시의 유속변동의 rms 값으로 환산하면 약 1.5 m/s가 된다. 이것으로부터 자려진동발생시의 유속변동강도가 부가한 강제변동에 의한 유속변동강도보다 작은 경우에는 연소진

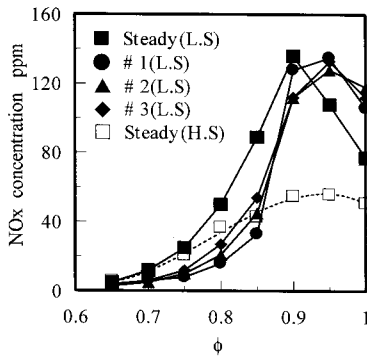


Fig. 11 Comparison of NOx concentration in the exhaust gas between steady and forced pulsating supply (#1~#3) (Ld=600mm, HS : high step, LS ; low step)

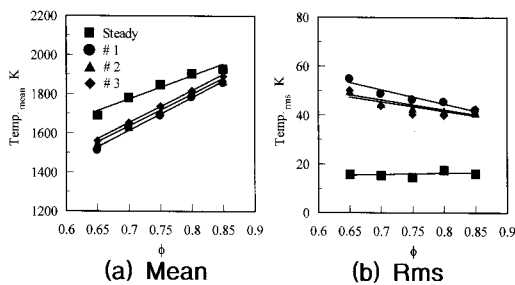


Fig. 12 Comparison of temperature in the case of steady supply and forced pulsating mixture supply (#1~#3, Low step, Ld=600mm)

동이 억제되어지는 것을 알 수 있다. 즉 자려연소 진동이 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 증가 되어진다.

본 연구에서는 강제변동을 가하기 위한 장치를 고안하는데 있어 특히 유량의 변동강도(진폭)를 결정하기 위한 실험조건을 찾는 데 많은 어려움이 있었으며 또한 이로 인해 오차가 발생하였을 것으로 예상되어진다. 본 실험에서 적용한 주파수와 유량의 변동강도 외에 연소진동 제어 인자로서 시도해 볼 수 있는 흥미 있는 많은 요소가 있다. 특히 본 연구의 결과보다 더욱 정확한 현상을 도출하기 위해서는 변동강도의 주파수와 진폭을 자유로이 또한 정확하게 조절할 수 있는 강제변

동 공급장치를 고안할 필요성이 있는 것으로 사료된다.

3.3 비정상연소를 이용한 연소특성 개선

본 실험에서 이용한 연소기는 연소실의 형상(스텝의 높이)을 변경함으로써 전혀 다른 특성을 갖는다. 즉 high step의 경우에는 어느 당량비를 넘으면 자려연소진동 현상이 관찰되지만, low step의 경우에는 크게 화염위치가 이동하는 평범한 난류화염이다. 이 실험의 경우는 벤츄리믹서의 위치를 1으로만 고정하였다.

덕트길이 Ld=600 mm일 때 회박영역에 있어서 low step과 high step의 경우의 NOx 농도의 변화를 나타낸 것이 Fig. 11이다. 혼합기의 공급에는 정상공급조건과 강제변동 #1~#3의 조건을 이용하였다. 먼저 정상공급의 경우에 대해 NOx 농도를 관찰하면, high step의 경우가 가장 낮은 NOx 농도를 나타내고 있으며 당량비 0.9에서는 NOx 농도가 최대 약 80 ppm 낮다는 것을 알 수 있다. 이것은 연소진동 현상을 이용하여 저 NOx 화를 실현시키는 펄스연소기와 같이 스텝 후류에 주기적으로 형성되어지는 큰 와류형상의 연소영역에 연소가스가 말려드는 것에 기인하여 연소온도가 통상의 화염보다 낮기 때문인 것으로 추정되어진다. 강제변동을 가한 경우에 있어서는 당량비 0.9 이하의 범위에서 정상공급의 경우보다 NOx의 배출량이 저감하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 당량비 0.85에서 최대 약 50 ppm의 NOx 농도의 저감이 나타난다. Low step의 경우에는 자려연소진동은 일어나지 않으며 또한 스텝 후류에 주기적으로 큰 와류형상의 화염이 형성되어지지 않는다. 그러나 스텝에 의해 보여되는 난류화염은 강제변동에 의해 주기적으로 크게 펄럭이는 것과 같은 운동을 하기 때문에, 역시 미연 혼합기와 연소가스의 교반이 일어나 피크온도가 낮은 연소가 일어나고 있으며 이것으로부터 thermal NOx의 발생량이 저감되었을 것으로 추측되어진다. 또한 실험을 행한 범위에서는 강제변동의 진폭을 변화시켜도 NOx 농도의 큰 차이가 나타나지 않는 것으로부터 강제변동의 진폭이 어느 정도 이상이라면 미연혼합기와 연소가스의 교반에 의한 연소온도의 저하의 영향은 크게 변하지 않는다. 이 점을 확인하기 위해 다음에 국소 연소가스의 온도측정 결과를 나타내었다.

Figure 11의 low step의 경우에 대해서 평균온도와 온도변동의 rms 값을 나타낸 것이 Fig. 12이다. 이것은 Ld=600 mm의 조건에서 연소실의 스텝으로부터 하류방향으로 단면중심 130 mm 떨어진 위치에서 계측한 것이다. 이 길이는 연소실 전체 길이에 대해서 하류방향으로 약 2/3만큼 떨어진 곳으로 본 연소실내의 연소특성을 가장

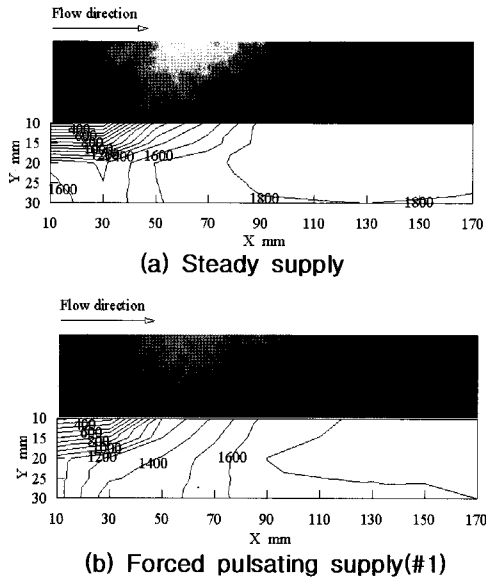


Fig. 13 Comparison of CH chemiluminescence images and spatial temperature distributions (Low step, $L_d=600\text{mm}$, $\phi=0.8$)

잘 나타내고 있다고 판단하였다. 당량비 0.9 이상에서는 고온에 의해서 열전대의 소선이 단선되기 때문에 계측을 할 수 없었다. Fig. 12(a)에 의하면 정상공급과 강제변동공급의 경우 모두 당량비의 증가와 함께 평균온도가 상승한다. 여기서 강제변동 #1~#3 를 부가한 경우, 평균온도와 온도변동의 rms 값의 큰 차이는 관찰되지 않지만 정상공급의 경우와는 크게 다른 경향을 나타내고 있다. 즉 강제변동공급의 경우, 정상공급의 경우보다 평균온도는 100~200 K 정도 낮은 값을 나타내고 있고, Fig. 11에 나타난 바와 같이 강제변동에 의한 NOx 농도의 저감이 화염중의 평균온도의 저하에 의한 것임이 확인되어진다. 온도변동의 rms 값은 강제변동공급의 경우가 정상공급의 경우보다 크다. 또한 회박영역일수록 온도변동의 rms 값은 크다. 이것은 회박영역일수록 발열량 및 평균온도가 낮기 때문에, 변동에 의해 혼합기와 교반되어지는 연소가스(heat sink로서 불활성가스)의 영향을 받기 쉽기 때문이라고 추측되어진다.

Figure 13(a), (b)는 low step, $L_d=600\text{mm}$, $\phi=0.8$ 의 경우에 있어서, 연소실내의 CH 라디칼 자발광 화상과 평균온도분포를 나타내었다. 정상공급의 경우(a)와 강제변동 공급의 경우(b)의 CH 라디칼 자발광 화상은 각각 CH 라디칼 자발광 강도의 시간평균치(약 1주기 동안의 화상을 겹쳐놓은 것)이며, 상대적으로 2개의 조건의 발광

강도를 비교하기 위한 목적으로는 유효하다고 사료된다. 이로서 CH 라디칼 자발광 강도는 정상공급의 경우가 강제변동공급의 경우보다 높은 것을 알 수 있다. 각각의 경우의 평균온도 분포와 비교하면 CH 라디칼 자발광 강도가 강한 부분에서는 온도구배가 크다. 정상류의 경우에는 연소실의 하류영역에 1800 K를 넘는 고온영역이 관측되지만 강제변동을 가한 경우에는 높은 곳에서 1700 K 정도인 것을 알 수 있다. 즉 강제변동에 의해 연소실 전체에 약 100~200 K 정도의 온도저하가 관측되어진다. 이상으로부터 Fig. 11에 나타난 NOx 농도의 저하는 강제변동류에 의해 혼합기와 연소가스의 혼합이 촉진된 결과 연소온도가 저하되어 thermal NOx가 형성되어지는 평균온도 1800 K 이상의 고온영역이 형성되지 않기 때문인 것으로 예상되어진다.

그러나 앞에서 언급한 것과 같이(3.2절), 본 연구에서 사용한 강제 변동장치의 특성상, 유량의 변동강도(진폭)값에 오차의 가능성이 있으며, 또한 변동하는 공기유량 측정시의 오차로 인하여 당량비에 오차가 발생했을 가능성도 배제할 수 없다. 기존의 연구결과에 의하면, 과농영역에서는 발열량의 증가로 강제변동의 효과가 감소하며, 강제변동에 의한 NOx 저감효과는 당량비의 회박영역에서 관측되어진다[19, 20]. 본 실험에서는 위에서 언급한 오차의 가능성으로 인하여, 정상상태와 비교하여 NOx 저감효과가 관측되기 시작하는 정확한 당량비를 결정할 수 없으리라 사료된다. 보다 정확한 결과를 위해서는 변동하는 공기유량의 엄밀한 측정 및 주파수와 변동강도(진폭)를 정확하게 조정할 수 있는 장치 고안이 선행되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결론

비정상연소의 적극적인 이용법에 관해 스텝상의 급확대부를 갖는 연소기를 이용하여 실험을 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 자려연소진동이 발생하면 연소실뿐만 아니라 공급계에도 영향을 미치며, 본 실험장치에서는 연소기 시스템의 전 영역에 걸쳐서 모두 동일한 피크주파수를 갖는 음향학적 연소진동이 발생하였다.
- 2) 공급혼합기에 강제변동을 가하는 것에 의한 연소진동의 억제에는 부가하는 강제변동의 주파수를 올리는 것보다 진폭이 큰 변동을 가하는 것이 보다 효과적이다.
- 3) 공급혼합기류에 대해 자려연소진동에 의해 발생하는 유속변동강도보다 큰 강제유속변동을 가하면 연소진동이 억제 가능하다.
- 4) 연소진동이 발생하지 않는 조건에 강제변동공

급을 이용한 비정상연소를 적용하였다. 그 결과 펄스연소기의 단점인 연소소음이 없으면서 또한 NOx 배출량이 적은 연소가 가능하였다.

참고문헌

- [1] 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一 編著, “燃燒現象의基礎,” 오름社, 2001.
- [2] 日本機械學會, “燃燒工學ハンドブック,” 丸善株式會社, 1995.
- [3] 岸本健, “家庭用燃燒器의騒音と振動,” 燃燒研究 102, 1995, pp. 9-17.
- [4] A. A. Putnum, “Combustion-Driven Oscillations in Industry,” Elsevier, 1971.
- [5] 富永昭, “熱音響工學의基礎,” 內田老鶴圃, 1998.
- [6] M. Katsuki and J. H. Whitelaw, “The Influence of Duct Geometry on Unsteady Premixed Flames,” *Combustion and Flame* 63, 1986, pp. 83-94.
- [7] K. R. McManus, T. Poinsot and S. M. Candel, “A Review of Active Control of Combustion Instabilities,” *Prog. Energy Combust. Sci.* 19, 1993, pp. 1-29.
- [8] S. Sivasegaram, R. R. Tsa and J. H. Whitelaw, “Control of Combustion Oscillations by Forced Oscillation of Part of the Fuel Supply”, *Combust. Sci. and Tech.* 105, 1995, pp. 67-83.
- [9] 石野洋二郎, 鈴木學, 阿部友昭, 大岩紀生, 山口譽起, “官内脈動流의流動および伝熱特性,” 日本機械學會論文集B編, 63, 613, 1997, pp. 3137-3143.
- [10] T. Bai, X. C. Cheng, B. R. Daniel, J. I. Jagoda and B. T. Zinn, “Performance of a Gas Burning Rijke Pulse Combustor with Tangential Reactants Injection,” *Combust. Sci. and Tech.* 94, 1993, pp. 1-10.
- [11] Y. Neumeier, B. T. Zinn and J. I. Jagoda, “Frequency Domain Analysis of the Performance of a Valved Helmholtz Pulse Combustor,” *Combust. Sci. and Tech.* 94, 1993, pp. 295-316.
- [12] J. E. Dec and J. O. Keller, “Pulse Combustor Tail-Pipe Heat-Transfer Dependence on Frequency, Amplitude and Mean Flow Rate,” *Combustion and Flame* 77, 1989, pp. 357-374.
- [13] J. O. Keller, P. A. Eibeck, T. T. Bramlette and P. K. Barr, “Pulse Combustion: Tailpipe Exit Jet Characteristics,” *Combust. Sci. and Tech.* 94, 1993, pp. 167-192.
- [14] 鈴木邦男, “燃燒に伴う騒音,” 日本機械學會論文集, 80, 708, 1977, pp. 1188-1192.
- [15] D. R. Englund and W. B. Richards, “The Infinite Line Probe,” *Proceedings of the 30th International Instrumentation Symposium, Instrument Society of America*, 1984, pp. 115-124.
- [16] 日野幹雄, “スペクトル解析,” 朝倉書店, 1998.
- [17] 南戎夫, “デジタル信號處理,” 工業調査會, 2000.
- [18] A. J. Riley, S. Park, A. P. Dowling, S. Evesque and A. M. Annaswamy, “Advanced Closed-loop Control on an Atmospheric Gaseous Lean-premixed Combustor,” *J. of Engineering for Gas Turbines and Power.* 126, 2004, pp. 708-716.
- [19] C. Poppe, S. Sivasegaram and J. H. Whitelaw, “Control of NOx Emissions in Confined Flames by Oscillations,” *Combustion and Flame.* 113, 1998, pp. 13-26.
- [20] R. C. Steele, J. H. Tonouchi, D. G. Nicol, D. C. Horning, P. C. Malte and D. T. Pratt, “Characterization on NOx, N2O and CO for Lean-Premixed Combustion in a High Pressure Jet-Stirred Reactor,” *J. of Engineering for Gas Turbines and Power.* 120, 1998, pp. 303-310.