

진동연소 발생에 관한 징후와 이의 검출

양 영 준

동아대학교 공과대학 기계공학과

E-mail : yangyj@daunet.donga.ac.kr

Symptoms on Generation of Combustion Oscillation and their Detection

Young-Joon Yang

Department of Mechanical Engineering, Dang-A University, 840 Hadan2-dong, Saha-gu, Busan 604-714, Korea

요 약

본 연구에서는 고가인 고속도 CCD카메라가 아닌 비교적 간단한 광파이버 시스템을 이용한 자러진동연소 발생에 관한 검출과, 진동연소가 발생하기 전에 이를 미리 예견할 수 있는 통계학적 수법에 관해 조사를 하였다. 먼저 자러진동연소의 발생시에 사용될 수 있는 광파이버의 유용성이 검증되었다. 광파이버에 의해 검출되어진 OH 라디칼 자발광 강도는 고속도 CCD카메라에 의해 얻어진 값과 강한 자러진동연소가 발생할 때에 거의 일치할 하였다. 자러진동연소가 발생하면 시스템과 연소기기에 손상을 가하게 된다. 이러한 피해가 발생하기 전에 자러진동연소의 발생 징후를 미리 포착하려는 시도를 하였다. 이를 위해 압력과 OH라디칼 자발광과 같은 화염에서의 변동성분에 대한 통계학적 처리를 이용하여 자러진동연소의 발생을 예견할 수 있는 독특한 수법에 관해 조사를 하였다.

Abstract — Usefulness of an optical fiber was demonstrated by detecting the generation of self-excited combustion oscillations. OH chemiluminescence intensity detected by the optical fiber showed mostly excellent agreement with those obtained by high speed CCD camera measurements when combustion oscillations were strong. 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, we have found and proposed unique measures to tell 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.

1. 서 론

각종 연소기에서 여러 요인에 의해 연소의 불안정성이 발생하며 이로부터 강렬한 압력변동을 동반하는 자러진동연소(self-excited combustion oscillation)가 일어나는 경우가 있으며 이는 연소기나 주위환경에 악영향을 끼치게 된다. 자러진동연소로 인한 압력변동이 연소기의 내압을 넘어서는 경우 시스템의 파괴의 원인이 되기도 하며 통상 큰 소음을 동반한다. 자러진동연소의 발생여부는 다음 식의 Rayleigh의 판정 조건에 의해 구별되어진다^[1].

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

여기에서 p' 과 q' 은 연소실내의 압력변동과 발열률변동을 나타낸다. 일반적으로 자러진동연소는 그 위상차 τ 가 $-\pi/2 < \tau < \pi/2$ 의 범위에 있으면 진동연소가 발생한다는 것을 나타낸다. 진동연소의 메카니즘 자체를 밝힐 목적으로 또는 펄스연소와 같이 진동연소의 이점을 적극적으로 활용하려고 하는 관점으로부터도 많은 연구^[2,3]가 행하여지고 있다. 이 경우 진동연소의 거동을 파악하기 위한 중요한 계측량은 압력변동과 발열율변동의 관계이다. 압력변동에 관해서는 연소실에 직접 또는 연결관과 연결하여 접속된 압력센서를 이용하여 계측하는 경우가 많다. 그러나 이 경우 연결관내에서의 압력신호의 변형에 주의할 필요가 있다^[4,5]. 한편, 발열율변동에 관해서는 직접 계측하는 것이 곤란하기 때문에 발열율변동을 나타

내는 양으로서 Richards *et al.*^[4], Keller *et al.*^[6]는 OH 자발광을 McManus *et al.*^[7]는 CH 자발광을 이용하고 있다. 이때 엄밀하게는 연소실전체의 화염으로부터 나오는 자발광을 화상으로 촬영하여 이의 휘도의 적산치의 변동을 계측할 필요가 있다. 이를 위해서는 화염전체를 위한 광학창이 필요하기 때문에 실용적으로는 연소실전체를 커버하는 광파이버(optical fiber)를 연소실 측면에 배치하여 라디칼 자발광 강도의 변동을 계측하는 방법이 고려되어진다. 그러나 광파이버를 이용하여 얻어진 라디칼 자발광 강도가 자발광 화상의 휘도의 적산치로부터 얻어진 값과 어느정도 대응하고 또한 발열을 변동을 나타내는 신호로서 사용될 수 있는가 하는가는 검증되어진 바가 없다.

본 연구에서는 그 타당성을 명확히 하기 위해 고속도 CCD카메라에 의해 시계열로 얻어진 라디칼 자발광 화상의 휘도를 적산함으로써 연소기 전체로부터의 라디칼 자발광 강도를 계측한 결과와, 연소기 전체를 커버하는 광파이버를 이용하여 간략적으로 측정된 결과와 비교하였다.

종래의 진동연소 제어법의 대부분이 진동연소가 발생한 후에 대처하는 것이었다. 그러나 강한 진동연소가 발생한 후에는 제어자체가 곤란할 뿐만 아니라 발생 후에 대처하는 제어만으로는 진동연소 제어의 근본적인 해결책이 되지 않는다. 즉 진동연소 발생의 징후를 어떤 무언가의 방법으로 검출할 수 있으면 보다 효과적으로 진동연소의 발생억제에 대처할 수 있다고 생각되어진다. 진동연소의 억제법에 대해서는 여러 가지의 방법이 제안되어지고 있지만 실험적으로 진동연소의 징후를 검출하려고 하는 시도는 거의 찾아볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 진동연소가 발생하기 시작하는 조건의 전후에 있어서 프로판-공기 예혼합기의 당량비를

아주 미세한 간격으로 변화시켜 진동연소의 강도가 증가하는 천이과정을 상세하게 관찰함으로써 진동연소 발생에 대한 징후의 검출을 시도하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 이용한 실험장치를 Fig. 1에 나타낸다. 공급공기량은 147 l/min으로 일정하고 혼합하는 프로판 유량을 변화시킴으로서 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 예혼합기와 혼합되어 정류부를 지나 연소부에 공급되어진다. 즉 강제변동을 가한 경우에는 연소실에 공급되는 예혼합기의 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. 연소기는 유로 상류측으로부터 정류부, 연소실, 배기덕트 3개의 부분으로 구성되어진다. 혼합기는 내측단면이 종 25 mm×횡 40 mm의 정류부를 통과해 연소실 직전에 설치된 높이 28 mm의 스텝에 의해 일단 축류되어진 후 40 mm×40 mm의 단면을 가지는 연소실에 급확대되어 스텝후류에 형성되어지는 재순환 영역에 화염이 형성되어진다. 연소실의 양 측면에는 바이콜 글래스(vycor glass)가 장착되어 화염 관찰이 가능하다. 연소가스는 연소실 하류의 배기덕트를 지나 대기중에 방출되어진다. 배기덕트는 내측단면이 40 mm×40 mm로 길이 150, 300, 600 mm의 3종류를 조합함으로써 덕트길이를 변화시킬 수 있다. 예혼합기의 당량비를 0.01 간격으로 변화시킬 수 있도록 프로판유량 계측용에 최대유량이 각각 15 l/min와 1 l/min의 로타미터(rotameter)를 병렬로 배열하여 최대유량 1 l/min의 로타미터만을 이용하여 혼합기의 당량비를 미세 조정할 수 있도록 하였다.

본 실험에서 이용한 계측시스템을 Fig. 2에 나타낸다. 본 계측시스템에서는 화염으로부터의 OH와 CH 라디칼 자발광상, 예혼합기의 변동유량, 연소실의 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 이미징 스테레오스코프(imaging stereoscope, Lavision Co. Ltd.)를 이용했

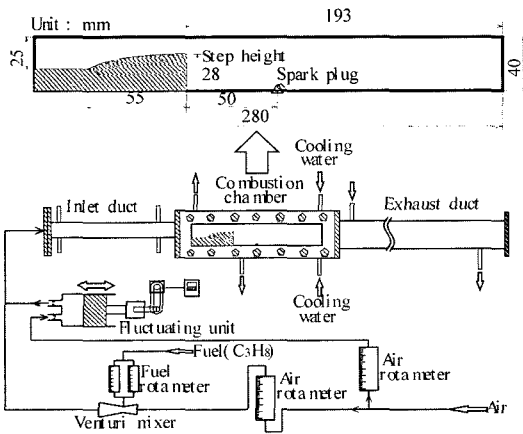


Fig. 1. Experimental apparatus.

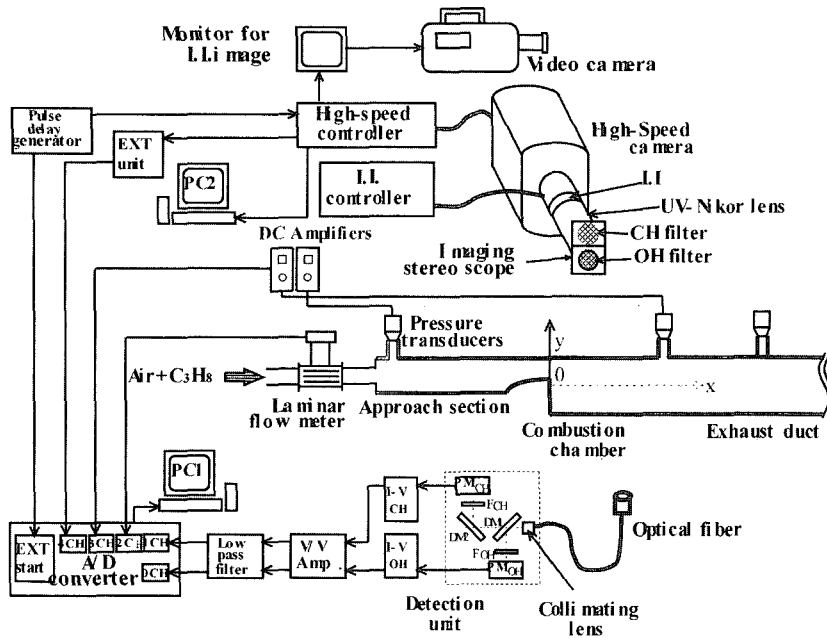


Fig. 2. Set-up of instrumentation.

다. 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 화상 증폭기(image intensifier)에서 휘도 증폭되어 플레임 율(flame rate) 4500 fps로 연속 1024장 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/D컨버터(NEC Sanei Co. Ltd., DL2300, sampling rate : 50 kHz)를 지나 기록되어진다. 정류부, 연소실, 배기덕트 각부의 압력변동의 계측에는 냉각아답터가 부착된 반도체 압력변환기(semi-conductor pressure transducer, Toyoda, Type PMS-5, 최대응답주파수 10 kHz)을 이용했다. 연소장치와 반도체 압력변환기와의 접속관내의 압력신호의 변형 방식을 고려하여¹⁸⁾ 접속관은 길이 40 mm, 직경 9 mm의 원통관으로 했다. 연소실에서 스텝 하류로 171 mm, 배기덕트부에서는 150 mm마다 판벽 상부에 압력을 측정하는 것이 가능하다. 반도체 압력변환기로부터 전압신호는 V/V앰프에서 증폭되어 A/D컨버터를 지나 기록되어진다. 고속도 CCD카메라와 A/D컨버터의 동기에는 펄스 딜레이 제너레이터(pulse delay generator(PDG), Stanford Research Systems, WC Model DG535)을 이용했다. 연소실전체로부터의 OH와 CH 라디칼 자발광신호를 계측하기 위해 광파이버에 연소실 전체로부터의 자발광이 커버되도록 배치하고 또

한 연소실 이외로부터의 빛을 제한하기 위해서 차폐판을 설치했다. 연소실 전체로부터의 발광은 자외광투과형 파이버(Mitsubishi Densen Co. Ltd., STU1000H, NA=0.2, Core diameter=1 mm)에 의해 파장분리기에 들어와 콜리메이팅 렌즈(collimating lens)에 의해 평행광으로 되어 다이크로의 미러(dichroic mirror), 광간섭 필터에서 파장 분리되어진 후, 광전자 증배관에서 전류신호로 변환되어진다.

발광 전류신호는 I/V변환 후 증폭되어 로우패스 필터(low-pass filter)에 의해 고주파 노이즈를 제거하고 A/D 컨버터(NEC, DL2300, Sampling rate: 50 kHz)에 의해 12bit로 디지털 기록되어진다. 본 계측시스템에서는 고속도 CCD카메라에 의해 화염으로부터의 OH와 CH 라디칼 자발광상, 광파이버를 이용한 연소실 전체로부터의 OH와 CH 라디칼 자발광 강도, 예혼합기의 변동유량, 연소실내 2 곳의 압력, 즉 총 2화상과 5신호를 동시에 시계열로서 계측 가능하도록 되어있다. 본 실험에서 강제맥동을 가하지 않고 예혼합기를 공급한 경우를 “정상공급”, 강제맥동을 가한 경우를 “강제변동공급”라 부른다. 강제변동공급 조건으로서는 1차공기와 2차공기의 유량의 합계를 147 l/min (평균 레이놀드수, $Re_m=5030$) 일정으로 하여 그 비율을 비꼬므로서 유량의 변동강도(Fluctuation Intensity, $FI=Q_{rms}/Q_{mean}$)을 변화시켰다. 본 실험에서는 강제변동공급의 경우에 $FI=0.3$ 으로 맥동발생장치의 주파수를 30 Hz로 고정하였다.

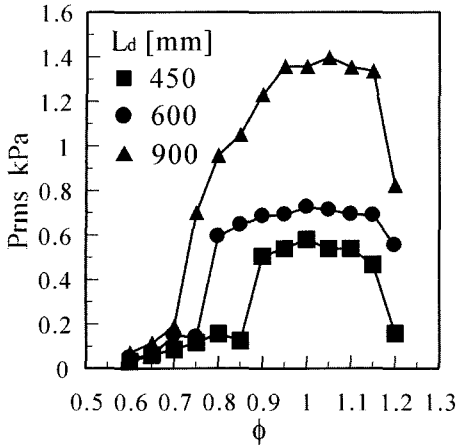


Fig. 3. Variations of RMS value of pressure fluctuations with respect to equivalence ratio.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 광파이버를 이용한 라디칼 자발광 계측

Fig. 3은 당량비 변화에 대한 연소실내 압력변동의 rms 값을 나타낸다. 배기덕트 길이가 450 mm의 경우에는 당량비 0.9, 600 mm의 경우에는 당량비 0.8, 900 mm 경우에는 당량비 0.75에서 압력변동이 급격히 증가하여 진동연소가 일어나기 시작한 것을 알 수 있다. 덕트 길이가 길수록 낮은 당량비로부터 진동연소가 발생하기 시작하고 발생한 압력변동값도 크다. 식 (1)에 나타난 것과 같이 시스템내에서 압력변동이 자발적으로 증폭되기 위해서는 국소적인 에너지의 공급(또는 제거)과 압력변동과의 사이에 정의 상관이 필요하다. 즉 압력변동을 증폭시키기 위해서는 변동하는 열원(발열율)이 필요불가결하다. 여기서 진동연소는 모든 조건에서 당량비 0.05의 간격으로 갑자기 발생하고 있는 것이 관측되어진다.

화염의 불안정성과 진동연소의 발생을 검출하기위해서 광파이버를 이용한 라디칼 자발광 계측이 행하여지고 있다. 화염으로부터의 라디칼 자발광 화상을 고속도 CCD카메라로 촬영하여 화상 휘도를 적산함으로써 발광강도의 시계열 변동을 검출하는 방법과, 광파이버를 이용하여 간략적으로 계측되어진 라디칼 자발광 강도의 변동을 비교하는 것은 광학 계측법의 관점으로부터도 흥미있는 일이다. 또한 진동연소의 강도를 평가할 때 압력센서에 의한 압력변동과 광파이버에 의한 라디칼 자발광 신호 강도의 변동 사이에 강한 상관관계가 있다면, 양자중에 한쪽만을 측정함으로써 진동연소를 평가할 수 있다고 생각되어진다.

광파이버를 이용하여 계측된 OH 라디칼 자발광 강도

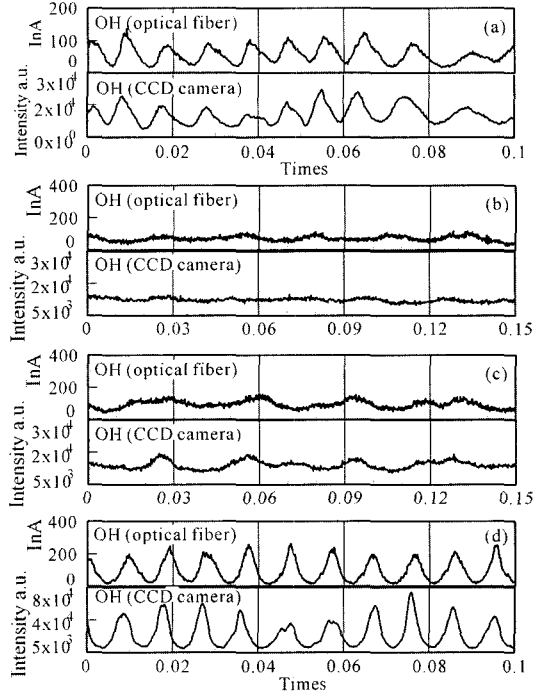


Fig. 4. Signals obtained by optical fiber and CCD camera.

의 시계열 신호와, 고속도 CCD카메라에 의해 촬영된 OH 라디칼 자발광상의 휘도를 적산함으로써 구한 발광강도의 시계열 신호를 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4(a)는 예혼합기를 정상공급하여 덕트 길이 Ld=600 mm인 진동연소가 발생하기 시작한 당량비 0.8의 경우이다. Fig. 4(b), (c), (d)는 각각 덕트 길이 Ld=900 mm이고 (b) 예혼합기를 정상공급하여 진동연소가 발생하지않는 당량비 0.7의 경우 (c) 당량비 0.75로 하여 진동연소가 발생한 후에 강제 변동류를 가해 진동연소가 억제되어진 경우 (d) 예혼합기를 정상공급할때 가장 강한 자려진동연소가 발생한 당량비 1.0의 경우이다. 이들 결과로부터 진동연소가 발생하고 있는 조건에서는 광파이버에 의한 OH 자발광 신호와 고속도 CCD카메라에 의한 화상휘도의 적

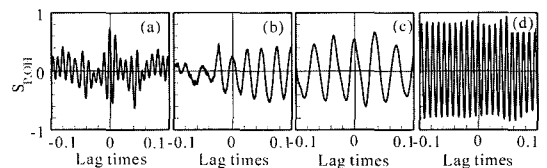


Fig. 5. Cross-correlation coefficient between optical fiber and CCD camera.

산치로서의 OH 라디칼 자발광 신호 사이에는 높은 상관관계가 있는 것을 알 수 있다.

그러나 시계열 신호만으로는 정량적인 평가는 할 수 없기 때문에 양 신호의 상호상관계수를 나타낸 것이 Fig. 5이다. 상호상관계수의 최대치에 주목하면, 강한 진동연소가 발생하고 있는 (d)에서는 0.94, 진동연소가 발생하기 시작한 (a)에서는 0.74, 강제 변동류를 가해 진동연소를 제어한 (c)에서는 0.67, 진동연소가 발생하지 않는 (b)에서는 0.45로 되어 있다. 진동연소가 발생하기 시작한 조건으로부터 강한 진동연소가 발생하고 있는 조건에서는 상관계수의 값이 0.74~0.94로 높은 값을 나타내고 진동연소가 강해질수록 광파이버를 이용하여 계측된 OH 라디칼 신호와 고속도 CCD 카메라를 이용하여 계측된 OH 라디칼 화상 사이에는 높은 상관관계가 있는 것을 알 수 있다. 다른 변동강도와 맥동발생장치 주파수를 가해 진동연소를 제어하는 경우, 일반적으로 진동연소의 억제 효과가 낮은 조건일수록 상관계수는 높아지며 징후 검출도 용이하게 된다.

따라서 고가인 고속도 CCD 카메라를 이용하지 않고 광파이버를 이용한 자발광 계측에 의해 진동연소의 평가가 가능하며, 강한 진동연소가 발생할수록 그 계측 수법의 신뢰성은 높아진다고 할 수 있다.

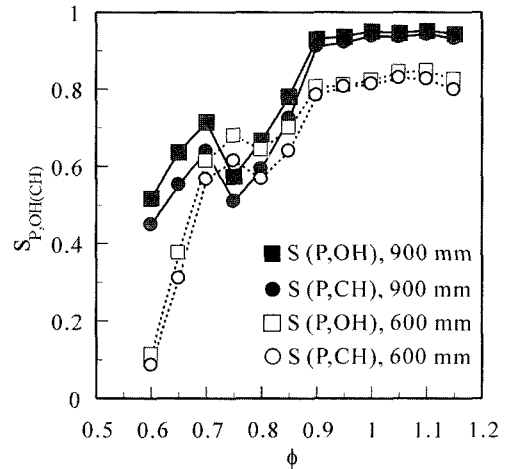


Fig. 6. Variation of cross-correlation coefficient between pressure and OH, CH.

3-2. 자러진동연소 발생의 징후

진동연소의 발생 징후가 검출되어진다면 그 억제에 대단히 유효하다. Fig. 6은 연소실내의 압력과 광파이버를 이용한 연소실 전체로부터의 OH 또는 CH 라디칼 자

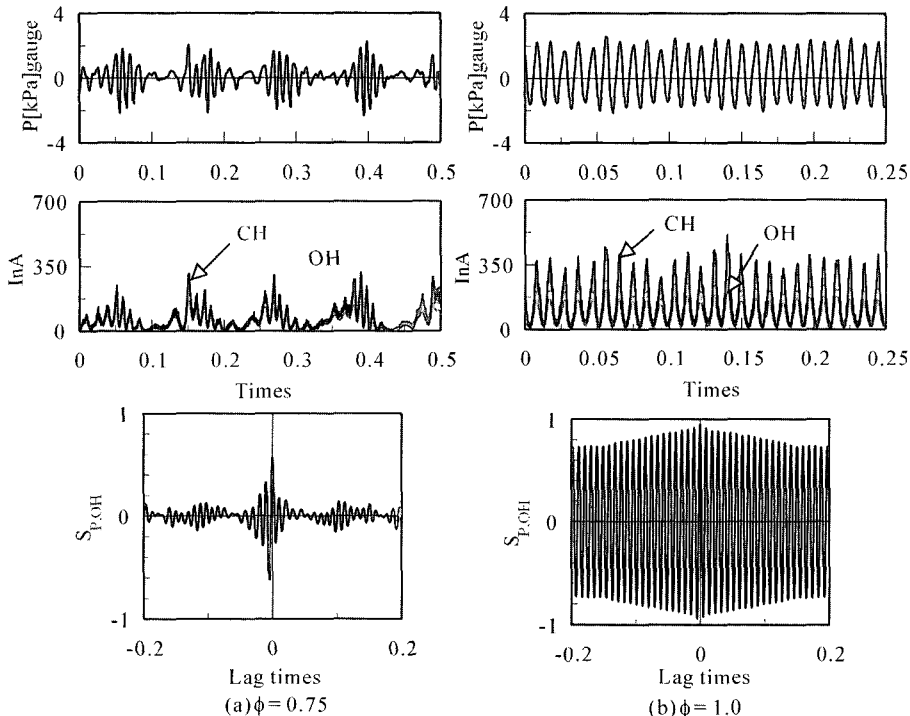


Fig. 7. Pressure and OH, CH-band signals and cross-correlation coefficients.

발광 신호의 상호상관계수의 최대치를, 예혼합기의 당량비에 대해 나타내었다. 본 실험에서 가장 강한 진동연소가 발생하는 덕트길이 $L_d=900$ mm의 경우는 $L_d=600$ mm의 경우와 비교하여 전체적으로 상호상관계수의 최대치가 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 진동연소의 강도가 강할수록 압력변동과 발열율변동이 높은 상관관계를 가진다는 것을 의미한다. 또한 덕트길이 $L_d=900$ mm의 경우에는 당량비 0.75의 조건에서, $L_d=600$ mm의 경우에는 당량비 0.8의 조건에서 상호상관계수의 최대치가 일단 감소하여 극소치를 취하고 있다. 주의하여 보면 이들 조건은 진동연소가 발생하기 시작하는 당량비에 대응하고 있다. 또한 강한 진동연소가 발생하는 덕트길이 $L_d=900$ mm의 경우가 그 강하하는 정도가 크다. 이들 원인에 대해서는 후술하지만, 진동연소가 발생하기 시작할 때 압력과 라디칼 자발광 신호의 상호상관계수의 최대치가 극소치를 취하는 것도 진동연소 발생의 징후라고 말할 수 있다. 또한 덕트길이 $L_d=900$ mm, 600 mm의 경우도 당량비가 0.9 이상에서는 압력과 광파이버에 의한 라디칼 자발광 신호에 높은 상관관계를 나타낸다. 특히 덕트 길이 $L_d=900$ mm에서 혼합기의 당량비가 양론당량비(stoichiometry)에 가까운 조건에서는 상호상관계수가 0.95 정도로 아주 높기 때문에 광파이버에 의한 라디칼 자발광 계측과 압력센서에 의한 압력계측의, 어느 한쪽의 계측만으로도 충분히 진동연소의 평가가 가능하다고 생각되어진다. 즉 광파이버와 일체화한 점화플러그를 연소기벽에 설치한다면 진동연소의 검출센서로서의 역할을 가지게 하는 것이 가능하다.

진동연소가 발생하기 시작하는 당량비에서 전술한 압력과 라디칼 자발광신호의 상호상관계수의 최대치가 저하하는 원인을 조사하기 위해 그 시계열 데이터와, 압력과 OH 라디칼 자발광신호의 상호상관계수를 나타낸 것이 Fig. 7이다. (a)는 덕트길이 $L_d=900$ mm의 경우로 진동연소가 발생하기 시작하는 당량비 0.75의 조건에서 상호상관계수의 최대치가 가장 낮은 값을 나타낸 경우이고 (b)는 가장 강한 진동연소가 발생하는 당량비 1.0의 경우이다. (b)에서는 양 신호가 함께 주기적인 변동을 나타내고 있다. 그러나 (a)의 진동연소가 발생하기 시작하는 당량비에서는 압력과 라디칼 자발광 신호가 높은 상관관계를 가지고 변동하는 경우와 그렇지 않은 경우가 교대로 일어나는 것을 알 수 있다. 즉 진동연소시에는 압력과 발열율에 대응하는 라디칼자발광 강도는 어느 위상차를 가지고 변동하며 이것에 대응하는 지연시간을 가지고 높은 상호상관계수를 취한다. 그러나 진동연소가 일어났다가 멈추었다가 하는 불안정한 조건에서는 양 신호가 일정한 위상차로 특징 있는 변동을 나타

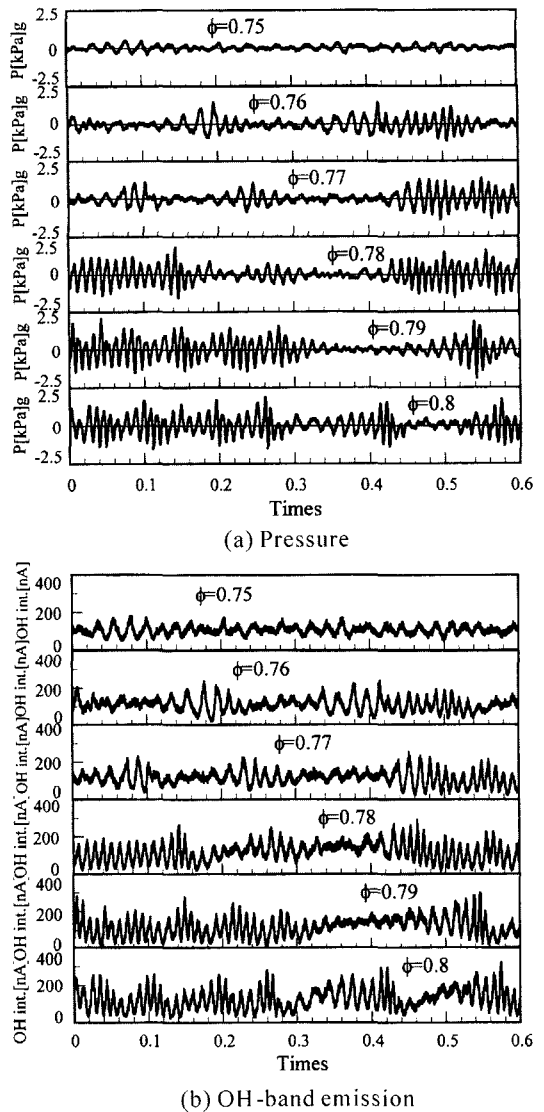
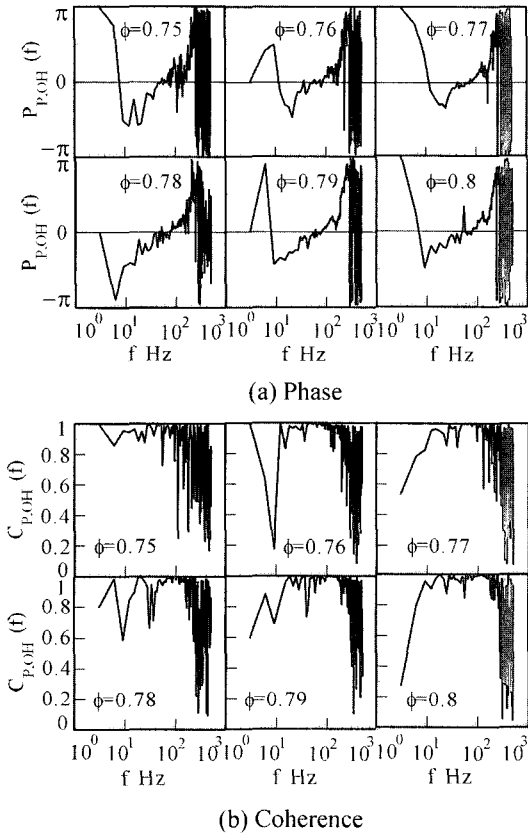


Fig. 8, Time series signals with the change of equivalence ratio.

내지는 않는다. 이것이 진동연소가 발생하기 시작하는 당량비에 있어서 상호상관계수가 저하하는 원인이라고 생각되어진다.

진동연소가 발생하는 징후를 검출하기 위해서 혼합기의 당량비를 0.01의 미세한 간격으로 점진적으로 증가 시킴으로서 진동연소에 이르는 천이과정을 상세하게 조사했다. Fig. 8(a), (b)는 $L_d=600$ mm의 경우에 진동연소가 발생하지 않는 당량비 0.75로부터 진동연소가 발생하기 시작한 당량비 0.8의 범위에 걸쳐 당량비를 0.01 간격으로 증가시켜 연소실의 압력과 OH 자발광 신호의



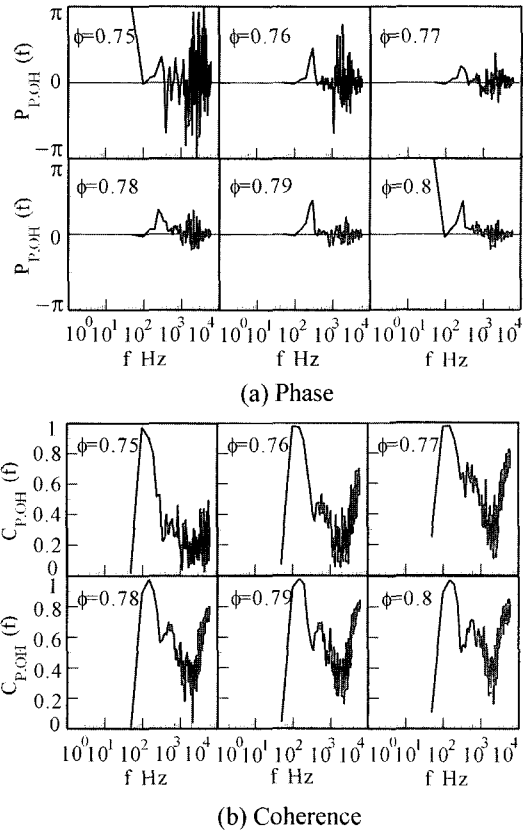
(a) Phase

(b) Coherence

Fig. 9. Phase and coherence between pressure and OH in FFT with fine base frequency.

시계열 데이터를 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 당량비가 증가함에 따라 양 신호의 변동이 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다. OH 자발광 신호의 경우 진동연소를 나타내는 큰 변동이 있는 후 진동연소가 발생하지 않는 작은 변동을 나타내지만, 이 기간에 OH 자발광 신호 강도의 평균치는 압력변동의 경우와 비교해 높은 값을 나타낸다. 이것은 진동연소가 발생할때의 높은 발열량의 영향때문이라고 생각되어진다.

시계열 데이터를 직접 관찰하면 진동연소가 발생하지 않는 당량비 0.75의 경우와 진동연소가 발생하고 있는 당량비 0.8의 경우의 차이는 쉽게 식별할 수 있지만, 어느 당량비로부터 진동연소가 발생하고 있는가 판단해야만 하는가에 대해서 정량적으로 판단하는 것은 곤란하다. 즉 진동연소가 발생하기 시작하는 조건에서 그 징후라고 생각할 수 있는 어떤 특징적인 경향을 발견할 수 있다면 그 징후를 검출한 순간부터 진동연소의 억제대책에 돌입할 수 있어 피해를 미리 막는 것이 가능하다. 여기서 이와 같은 특징을 발견하기 위해 압력과 라더칼



(a) Phase

(b) Coherence

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

자발광 신호의 시계열 데이터에 대한 주파수해석을 하였다.

Fig. 9와 10은 Fig. 8에 나타낸 연소실내의 압력과 OH 자발광 신호사이의 페이즈(phase)와 코히런스(coherence)를 나타낸 것이다. Fig. 9와 Fig. 10의 데이터 정리에서 이용한 총 데이터 수는 32,768개로 동일하지만 FFT처리의 설정이 다르다. Fig. 9는 FFT처리의 데이터 수를 $2^{14}=16,384$ 로 설정(기본주파수 3 Hz)로 하고 평활화(smoothing)를 위한 블록 수(the number of block)는 2로 한 경우의 결과이다. 한편 Fig. 10의 경우에는 FFT처리의 데이터 수를 $2^{10}=1,024$ 로 설정(기본주파수 49 Hz)로 하고 평활화를 위한 블록 수는 32로 하였다.

페이즈와 코히런스의 산출법은 다음과 같은 방법으로 하였다. A/D변환된 시계열 데이터를, FFT처리의 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 주파수성분에 있어 크로스 스펙트럼의 절대치를 그 주파수에서의 양 신호의 파워 스펙트럼의 상승평균(geometric mean value)으로 정규화된 것으로 2개의 신호의 주파수영역에서의 상호상관계수에 상당하며 다음식으로 정의 되어진다.

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

Fig. 9의 결과를 보면 진동연소가 발생하고 있지 않은 당량비 0.75로부터 진동연소가 발생하기 시작하는 당량비 0.8의 모든 조건에서 페이즈, 코히런스가 함께 고주파수 영역측에서 크게 진동하고 있어 양 신호에는 상관관계가 관측되지 않는다. 그러나 Fig. 10(a)의 페이즈 값은 당량비 0.75의 경우와 같이 진동연소가 발생하지 않는 조건에서는 고주파수 영역에서 페이즈는 크게 진동하고 있지만 진동연소가 발생하기 시작한 당량비 0.8의 조건에서는 고주파수 영역에서 페이즈가 0 부근에서 작은 진폭으로 진동하는 것처럼 된다. 또한 Fig. 10(b)의 코히런스도 고주파수 영역에서 비교적 높은 값이 되어 압력과 OH 라디칼 신호가 고주파수 영역에서 상관관계가 높은 것을 나타내고 있다.

Fig. 9와 Fig. 10의 결과의 차이는 FFT처리시의 데이터 수(기본주파수)와 평활화를 위한 블록수에 기인한다. 고주파수 성분까지 정확히 해석하기 위해서는 FFT처리시의 데이터 수(2ⁿ)를 많게 하여 기본주파수를 작게 해 주파수 분해능을 높게 처리한 Fig. 9의 결과가 정확한 현상을 나타내고 있다고 생각하는 것은 주지의 사실이다. 그러나 기본주파수를 크게 취하여 FFT의 주파수 분해능을 낮게하고 평활화의 회수를 늘려 현상을 평균화하여 관찰하면 100 Hz 전후의 진동연소에 대해서는 분해능을 가지지만, 1 kHz에 가까운 고주파수에 대해서는 분해능을 잃어버린다. 이것이 높은 상관관계(코히런스가

높고, 페이즈가 0 부근)가 저주파수 영역의 고조파(higher order harmonic wave)의 영향에 기인하여 고주파수 영역에 있어서도 상관관계가 높은 것과 같은 결과가 되는 원인이 된다. 진동연소가 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 기본주파수)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 진동연소가 일어나지 않는 경우에 얻어진 어떤 피크 주파수가 없는 데이터라면, 모든 주파수 영역에서 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 하는 것이다.

이 데이터 처리방법을 이용하면 진동연소가 나타나기 시작하는 것을 고주파수 영역의 통계량으로부터 감지할 수 있기 때문에 진동연소의 징후로서 이용되어질 수 있다고 생각되어진다.

4. 결 론

진동연소의 검출에 있어 광파이버를 이용한 라디칼 자발광 측정의 유용성과 진동연소 발생의 징후의 검출에 착안해 실험을 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 진동연소가 발생하고 있는 조건에서 광파이버에 의한 OH 자발광 신호와 고속도 CCD 카메라에 의한 화상의 적산치로서의 OH 라디칼 자발광 신호는 연소실의 압력변동 신호에 대해 높은 상관관계를 가진다. 따라서 광파이버에 의한 OH 자발광 측정은 진동연소의 검출에 유효한 수단이다.

(2) 진동연소의 징후를 검출하기 위해 혼합기의 당량비를 미세 간격으로 점진적으로 증가시켜 진동연소에 이르는 천이과정을 상세히 조사하였다. 그 결과 진동연소가 발생하기 시작하는 조건에서는 압력신호와 라디칼 자발광 신호가 높은 상관관계를 가지고 변동하는 경우와 그렇지 않은 경우가 교대로 나타나기 때문에 양 신호의 상호상관계수가 저하하지만 강한 진동연소가 발생하면 상호상관계수는 높게 된다. 따라서 이 상호상관의 저하가 진동연소 발생의 징후로서 이용되어질 수 있다.

(3) 변동신호의 해석에 있어 기본주파수를 크게 취하고 FFT의 주파수 분해능을 낮게 하여 평활화의 회수를 늘리고 현상을 평균화하여 관찰하면, 압력과 OH 라디칼 자발광 신호의 페이즈가 진동연소가 발생하고 있는

경우에는 0 부근에서 작은 진폭으로 진동한다. 이것을 이용하여 진동연소의 정후를 검출할 수 있다.

감사의 말

주피수 해석에 관해서 유익한 조언을 해주신 Kokushikan 대학의 키시모토 교수님에게 사의를 표합니다.

참고문헌

1. Putnum, A.A.: "Combustion-Driven Oscillation in Industry", Elsevier, London (1971).
2. Poppe, C., Sivasegaram, S. and Whitelaw, J.H.: "Control of NOx Emissions in Confined Flames by Oscillations", *Combustion and Flame*, 113, 13 (1998).
3. Dec, J.E. and Keller, J.O.: "Pulse Combustor Tail-Pipe Heat-Transfer Dependence on Frequency, Amplitude, and Mean Flow Rate", *Combustion and Flame*, 77, 359 (1989).
4. Richards, G.A. and Janus, M.C.: "Characterization of Oscillations During Premix Gas Turbine Combustion", *ASME Trans.*, 120, 294 (1998).
5. Englund, D.R. and Richards, W.B.: "The Infinite Line Probe, Proceedings of the 30th International Instrumentation Symposium", *Instrument Society of America*, 115 (1984).
6. Keller, J.O. and Saito, K.: "Measurement of the Combustion Flow in a Pulse Combustor", *Combustion Science and Technology*, 53, 137 (1987).
7. McManus, K.R., Vandsburger, U. and Bowman, C.T.: "Combustor Performance Enhancement Through Direct Shear Layer Excitation", *Combustion and Flame*, 82, 75 (1990).
8. Englund, D.R. and Janus, M.C.: "The Infinite Line Probe", *Proceedings of the 30th International Instrumentation Symposium, Instrument Society of America*, 115 (1984).