

덤프형 가스터빈 연소기에서의 화염 불안정성의 사전 감지 인자

이 병 준[†] · D.A. Santavicca^{*}
(2001년 11월 9일 접수, 2002년 2월 7일 심사완료)

Pre-detection Parameter of the Combustion Instabilities in the Gas Turbine Combustor

Byeong-Jun Lee and D.A. Santavicca

Key Words: Combustion Instability(연소불안정성), Rayleigh Index(Rayleigh 지수), Cross Correlation Coefficient(교차상관계수)

Abstract

The effect of equivalence ratio and velocity on the stability of flame in dump combustor was studied in an atmospheric pressure, laboratory scale dump combustor operating natural gas. Traditionally, peak-to-peak pressure, fluctuation of the heat release rate and Rayleigh index were used to find and control the combustion instability. Cross correlation coefficients, C_{ij} which is defined as the normalized value of the integration of the product of two of the mixer pressure, dump plane pressure and heat release rate, are introduced to see whether the flame is stable or not. C_{ij} shows more sensitive to combustion status than Rayleigh index in steadily burning flame. Also, the result indicates that the amplitude of C_{ij} between heat release and mixer pressure goes up before the flame at the rich de-stabilizing equivalence ratio near $\phi=0.85$. It means C_{ij} at this case has a potential to detect the de-stabilizing moment in prior to becoming unstable in dump combustor.

1. 서 론

최근 환경문제의 관점에서 희박 연소에 의한 NOx 저감형 연소기가 각광을 받고 있다. 그러나 이러한 희박 연소기에서는 열발생률의 변화와 압력과의 상호작용에 의한 연소 진동과 화염날림이 큰 문제점이 된다. 이러한 연소진동은 연소기 설계의 초기 단계에서 나타나는 문제가 아니라 연소기의 시운전이나, 부하 변동에 따른 급격한 연소상태의 변화 혹은 연료의 다변화에 따른 연소

기 내부의 연소상황의 변화 등에 수반하여 발생하게 된다.⁽¹⁾ 이러한 연소진동의 제어 방법으로는 능동적인 방법과 수동적인 방법이 사용된다.⁽²⁾ 수동적인 제어방법은 연소기 내부에 칸막이나 공간기 등을 사용하거나, 연료 공급관의 길이나 연료 공급위치의 변화등으로 화염에 공급되는 연료의 분포변화와 연료의 분사 시기 등을 조절하는 것으로 주로 시행착오법에 의하여 화염진동을 제어한다. 이에 반하여 능동적 제어 방법은 연소진동이 일어나는 압력과 혹은 열발생률과 동기시켜 부가적인 2차 연료를 공급하여 화염진동을 제어하는 방법이다. 이러한 능동제어는, 미리 정해진 주파수로 2차 연료를 분사하는 개방형 제어⁽³⁾와, 변화하는 연소기의 상황을 피드백신호로 사용하여 미리 지정된 변수로 제어하는 밀폐형(closed loop) 제어,^(3,4) 연소기의 상황에 따라 제어하는 변수를 찾아가는 적응형제어로 나누어진다.⁽⁵⁾

[†] 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : bjlee@yu.ac.kr

TEL : (053)810-3526 FAX : (053)813-3703

^{*} Pennsylvania State University

화염진동이 발생하는 주파수나 이 주파수를 정수로 나눈 주파수로 능동적 제어를 할 때, 화염이 불안정해진 후에 화염을 안정화시키기 위하여 공급하는 2차 연료의 양이, 안정적인 제어를 수행하고 있는 경우에 비하여 더 많이 요구된다.⁽⁴⁾ 일반적으로 제어용 2차 연료는 비예혼합 화염(혹은 부분 예혼합화염)의 형태로 타게 되므로 증가된 2차 연료는 NO_x 증가를 가져와 희박 연소기에서 저감한 NO_x를 상쇄시키는 역할을 하게된다. 이러한 연료의 사용량과 NO_x의 관점뿐만 아니라, 연소진동이 일어나면 연소기 자체의 손상을 초래하게되므로, 연소진동을 조기에 제어하는 것이 중요하다. 이러한 조기 제어를 위해서는 화염진동의 조기 발견이 요구된다.

본 연구는 이러한 연소진동의 조기 발견과 관련된 연구로서, 연소기의 평균 속도와 당량비 변화에 따라 발생하는 연소 진동을 조기에 발견할 수 있는 파라미터를 찾는 것이 목적이다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용된 연소기(Fig. 1 참조)는 참고문헌 6과 유사한 급속확대형(backward facing dump combustor)연소기이다. 참고문헌 6에서는 내경 110mm, 길이 850mm 의 전체 연소기를 석영관으로 하였으나, 본 연구에서는 연소진동에 의한 연소실의 잦은 파손으로 인하여 연소실 교체의 편의를 위하여 1000mm 연소실 중의 상류 300mm 만 석영관으로 하고 나머지 영역은 스테인레스 강으로 대체하였다. 실제 연소기를 모사하기 위하여 이 스테인레스관 하류를 수직으로 막고 그 중앙에 직경 19.1 mm의 구멍을 가공하여 출구로 하였다. 또한 화염 진동시에 발생하는 과도한 소음을 줄이기 위하여 연소기 하류에 소음기를 설치하였으며, 이 소음기의 과열을 막기 위하여 연소기 출구로부터 100 mm 지점에서 물을 분사하였다. 연료는 dump 면 상류 25.4 mm에 원주 방향으로 16 개의 구멍(직경 0.4mm)을 통하여 초킹된 후 공급된다. 연소진동시 발생하는 급격한 압력변동이 공급되는 공기의 양에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 dump면 상류 300mm 영역에서 초킹이 되도록 하였다. 350°C로 가열된 공기는 초킹된 후 급속확대면 상류 70mm 영역에 설치된 30도 기울기의 얇은 박판형 선회기에 의

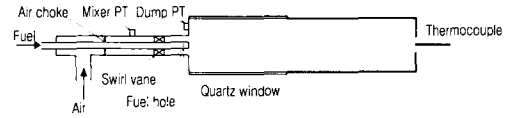


Fig. 1 Schematic of the dump combustor. (PT means pressure transducer)

하여 선회된 후 연료와 부분 예혼합되어 연소기에 공급된다.

혼합관과 연소기의 압력 변화를 측정하기 위하여 급속확대관 앞 75mm와 급속확대면에 압력측정기를 설치하였다. 연소실 내부의 열발생률을 측정하기 위하여 화염의 CH 자발광을 광증배관을 사용하여 측정하였다. 또한 기연가스의 온도를 측정하기 위하여 연소기 출구에 열전대를 부착하였다.

화염이 없는 경우의 연소기 내부 평균속도를 본 연구에서의 특성 속도로 하였으며, 본 실험에서는 4, 5.5, 7 m/s의 경우에 대하여 당량비 0.5~0.9 영역에서 실험을 수행하였다. 정상상태의 해석을 위한 실험은 주어진 속도에서 당량비를 변화시켰으며, 연소진동이 일어나는 순간과 연소진동이 사라지는 순간에 관한 비정상 상태의 해석을 위한 실험은, 주어진 속도와 당량비에서 연료의 양을 당량비 약 0.005/min 정도의 섭동을 주면서 수행하였다.

3. 결과 및 검토

본 연소기의 화염진동시 소음 및 연소기 내부 압력변동의 주된 주파수는 390Hz 부근이므로, 급속 확대면에서 측정한 압력 성분 중 390Hz 부근의 주파수 성분을 측정하면 화염의 불안정성을 파악할 수 있다. Figure 2는 속도와 당량비 변화 및 실험의 방향에 따른 화염의 안정성을 나타낸다.

5.5 m/s인 경우에 당량비를 0.5로부터 증가시키면, 연소기 내부의 390Hz 부근의 압력변동이 완만히 커져서 당량비 0.55에서 화염이 완전히 불안정해지는 것을 볼 수 있다. 당량비 증가에 따라 0.7 근처에서 급격히 안정화되고, 당량비 0.83 부근에서 화염이 다시 불안정해진다. 당량비를 감소시키는 경우의 경향도 증가시키는 경우와 유사한 것을 볼 수 있다.

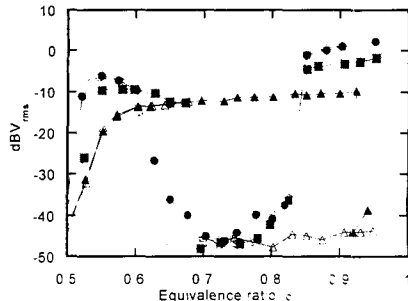


Fig. 2 Stability map as a function of velocity, equivalence ratio, ψ , and direction of changing ψ . (triangle : 4.0 m/s, square : 5.5 m/s, circle : 7.0 m/s ; filled symbols : increasing ψ , open symbols : decreasing ψ)

그러나 당량비를 증가시키는 경우와 감소시키는 경우에 화염이 안정화되고 불안정화되는 당량비가 서로 차이가 남을 볼 수 있다. 안정한 상태에서 당량비를 증가시키면 더 높은 당량비까지 안정한 화염이 형성되고, 불안정한 상태에서 당량비를 감소시키면 더 낮은 당량비까지 화염이 불안정한 것을 볼 수 있다. 이는 노즐부착화염과 부상화염에서, 화염 기저부의 유속, 당량비 조건 및 노즐로의 열전달 등의 차이로 축대칭 제트 화염의 화염부상이 일어나는 유량과 부상된 화염이 다시 노즐에 부착되는 유량이 차이가 나는 현상인 hysteresis 현상과 유사하다.⁽⁷⁾ 이러한 축대칭 제트 화염의 hysteresis 원인과 아울러, 중앙의 centerbody의 가열 및 냉각도 중요한 한 원인인 것으로 사료된다. 전체적인 경향을 보면 유량 증가에 따라 hysteresis 영역이 줄어들어 유속 7 m/s에서는 그 차이가 미미함을 볼 수 있다. 유속 증가에 따라, 당량비 0.5~0.6 근처에서 일어나는 희박 불안정 영역이 더 희박한 영역에서 나타나고, 불안정한 압력의 변동 성분의 강도도 증가하는 것을 볼 수 있다.

Figure 3은 유속 5.5 m/s에서 당량비를 감소시킬 때 연소기와 혼합부의 압력변동 및 열발생률의 주파수 분석 결과를 나타낸다. 검정색에서 흰색으로 갈수록 강도가 커짐을 나타낸다. 당량비 0.6 이하의 희박 불안정영역에서는 390 Hz 근처의 기본 주파수가 당량비 증가에 따라 증가하나 0.8이상의 영역에서는 기본주파수가 거의 일정한 것을 볼 수 있다.

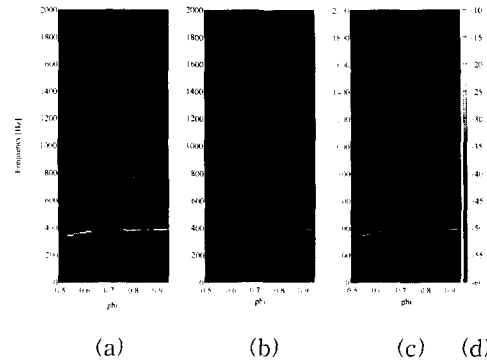


Fig. 3 Frequency components of the pressures and heat release rate for 5.5 m/s and decreasing ψ cases (a) pressure at dump plane, (b) pressure at mixer section, (c) heat release rate, (d) color bar scale

이러한 경향은 압력의 변동이나 열발생률에서 모두 유사하다. 기본 주파수에서 가장 강한 강도가 나타나고, 이 주파수의 정수배에서는 이보다 강도가 약해짐을 볼 수 있다. 특이한 것은 낮은 당량비의 경우에 비하여 당량비 0.9 근처에서는 고차 주파수의 강도가 상대적으로 커짐을 볼 수 있다. 이는 불안정한 화염에서 공급받은 에너지를 소산하기 위하여 높은 주파수로의 에너지 전이가 일어난 것으로 사료된다. 이와 아울러 안정한 영역인 당량비 0.6~0.8 사이에서도 미약한 390 Hz 근처의 주파수 성분을 볼 수 있다. 이러한 연소기 내부에 항상 존재하는 주파수 성분이 당량비 변화에 따라 열발생으로 부터 에너지를 공급받아 전체 화염진동으로 전이하는 것으로 사료된다.

Figure 4는 연소기 출구의 온도 변화를 나타낸다. 당량비 증가에 따라 연소기 출구 온도가 증가하나, 안정한 영역의 온도가 불안정한 영역의 온도에 비하여 약 50도 낮음을 볼 수 있다. 이는 열발생률이 당량비에 비선형적으로 증가하는 것⁽⁸⁾과 불안정 화염의 경우 당량비의 변화가 최고 30%에까지 이르는 것⁽⁹⁾으로 설명되어질 수 있다. 출구온도를 900°C, 화염의 온도를 2300K, 비열비를 1.4로 가정하여 연소기 내부의 음속을 계산하면 898m/s이고, 본 연소기의 형태상 연소기 내부에서 음파의 조건이 입출구에서 마디에 해당한다고 가정하여 이론적인 주파수를 계산하면

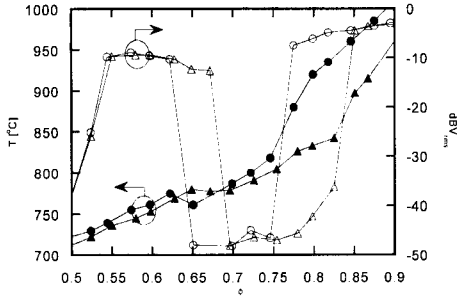


Fig. 4 Exit temperature as a function of ψ and changing ψ directions. (triangle : increasing ψ , circle: decreasing ψ cases)

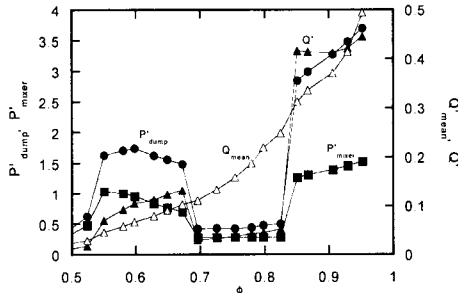


Fig. 5 Effects of ψ on the mean heat release rate and peak-to-peak values of the heat release rate and the pressures at dump plane and mixer section for increasing ψ case

439Hz로 우리 실험의 기본 주파수인 390Hz와 유사한 값을 알 수 있다. 그러나 당량비가 낮은 영역에서의 당량비에 따른 주파수 증가(Fig. 3 참조)는 화염온도와 출구온도의 증가로 인한 음속의 증가로 설명할 수 있으나, 0.8 이상의 당량비에서 일정한 불안정 주파수에 관해서는 좀더 엄밀한 해석이 요구된다.

Figure 5는 압력파 변동의 크기와 열발생률의 평균 및 변동성분의 크기를 나타낸다. 변동성분의 크기는 연소불안정성이 발생하는 경우 안정한 경우에 비하여 두 배 이상 증가함을 볼 수 있다. 열발생률의 평균치는 당량비 증가에 따라 비선형적인 증가와 안정영역에서 미세한 감소를 볼 수 있다. 이러한 열발생률의 변화가 Figure 3의 온도 변화를 초래한 것으로 사료된다. 연소기에서의 압력변동성분이 당량비 0.8 이상의 경우가 희박

불안정영역에 비하여 현저히 증가한 것을 볼 수 있다. 이러한 현저한 증가에도 불구하고 Figure 2의 0.8 이상에서의 압력파의 강도 증가로 이어지지 않은 것은 Figure 3에서와 같이 기본 주파수만의 강도 증가가 아니라 2차 혹은 3차 고조파의 강도 증가를 수반한 것에 기인한다.

압력변화(P')와 열발생률의 변동성분(q')이 동일 위상이면 화염이 불안정해진다는 Rayleigh의 이론⁽¹⁰⁾에 따라, 이러한 관계를 나타내는 계수를 Rayleigh 지수라고 하고 다음과 같이 정의된다.

$$R = \frac{1}{T} \int_T P' q' dt \quad (1)$$

Rayleigh 지수는 p' 과 q' 이 크고 동일 위상인 경우에는 그 값이 커지게 된다. 불안정화염이 되면 p' 과 q' 의 위상차가 작아지고 p' 과 q' 의 크기가 커지므로 Rayleigh 지수의 값은 커지게 된다. 본 연구의 목적이 화염의 불안정성을 사전에 감지하는 변수를 찾는 것에 있으므로, 화염이 불안정하여 p' 과 q' 의 크기가 커지기 전에 변화하는 변수를 정의하여야 한다. 이러한 변수로서 Rayleigh 지수와 유사하게 정의된 값을 p' 과 q' 의 rms(root mean square)값으로 무차원화한 것을 채택하기로 한다. 이와 관련된 식은 식 (2)와 같다. 이는 유체역학에서 사용되는 상관계수(cross correlation coefficient)와 같은 식이므로 이 이름을 본 연구에서 사용하기로 한다.

$$C_{i,j} = \frac{\frac{1}{T} \int_T w_i' w_j' dt}{w_{i',rms} w_{j',rms}} \quad (2)$$

여기서 w 는 압력 혹은 열발생률을 나타내고 상첨자 '는 변동성분을 나타낸다.

만약 w_i' 와 w_j' 가 동일 주파수이고 그 위상차가 θ 이면 $C_{i,j}$ 는 $\cos\theta$ 를 나타낸다.

Figure 6은 당량비에 따른 상관계수와 Rayleigh 지수를 나타낸다. Rayleigh 지수는 불안정한 영역에서 양의 값을 나타내고, 열발생률, 혼합부 압력, 연소기 압력 사이의 상관관계는 불안정한 영역이 되면 그 값의 크기가 0.25 이상임을 볼 수 있다. 상관 관계나 Rayleigh 지수 모두 연소 불

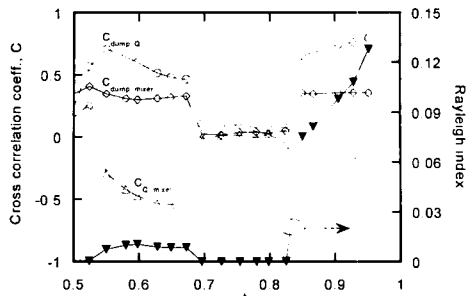


Fig. 6 Cross correlation coefficients and Rayleigh indexes as a function of ψ for 5.5m/s and increasing ψ cases

안정성을 판단하는 자료로 쓸 수 있음을 알 수 있다. 330Hz 근처의 가청소음이 존재함을 확인한 당량비 0.53의 조건에서 Rayleigh 지수는 0 근처이나, 상관관계는 0.25 이상이므로 상관계수가 Rayleigh 지수보다 더 민감한 불안정성의 판단 자료임을 알 수 있다.

Figure 7-9는 연소 불안정성이 일어나는 순간을 포착한 신호, Rayleigh 지수 및 상관계수를 나타낸다. 여기서 시간 0 ms는 데이터를 획득하기 시작한 시간을 나타낸다.

Figure 7은 당량비 0.52의 경우로서 혼합부와 연소기의 압력 신호가 특정한 주파수를 가지는 불안정성이 발생하다가 사라지는 경우이다. 열발생률은 낮은 당량비로 인하여 작은 것을 볼 수 있다. Rayleigh 지수는 압력의 진폭이 커지는 220~320, 350~540 ms 영역에서 증가하고 나머지 영역에서는 줄어들어 이 영역이 불안정한 영역임을 보여주고 있다. Rayleigh 지수가 진폭 변화를 잘 추종하고 있음을 볼 수 있다. 열발생률 덤프면의 압력 및 혼합부 압력 사이의 상관계수의 크기도 이 영역에서 0.3 이상의 값으로 상관계수로도 연소불안정성을 판별할 수 있음을 알 수 있다. 이 영역 이외에도 40ms, 120 ms 부근에서 상관계수의 크기가 0.3 이상인 영역이 나타나는 것으로 미루어 국부적으로 불안정성이 발생하였다가 소멸된 것으로 사료된다. 그러나 이 경우 Rayleigh 지수나 상관계수 모두 화염의 불안정성을 미리 감지할 수 있는 변수로는 사용할 수 없다.

Figure 8은 당량비 0.59, 유속 5.5 m/s의 경우

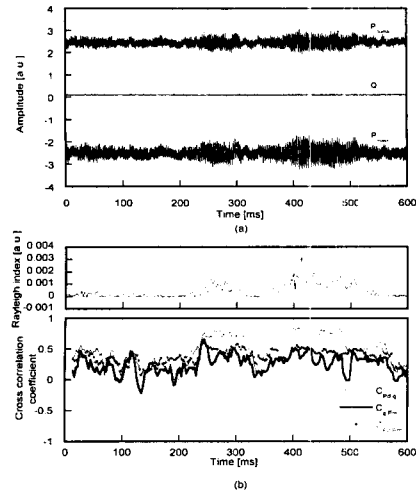


Fig. 7 Signals at the moment of becoming unstable flame for 5.5 m/s $\psi = 0.52$ case. (a) signals, (b) Rayleigh index and cross correlations. (P_d , P_m mean dump plane pressure and mixer pressure respectively)

로서 화염이 갑자기 불안정해지는 경우를 나타낸다. 화염은 25ms 내에 불안정해짐을 볼 수 있다. 불안정한 영역에서의 열발생률과 압력변동의 폭이 커짐을 볼 수 있다. Rayleigh 지수도 압력 진폭 변화와 유사하게 급격히 상승함을 볼 수 있다. 상관계수도 불안정한 영역에서는 그 크기가 0.3 이상임을 볼 수 있다. 혼합부 압력과 열발생률 사이의 상관계수는 압력변동과 최고치에 이룬 후 25ms부터 일정해지나, 덤프면 압력과 열발생률 사이의 상관계수, $C_{pd,q}$ 는 더 급격히 상승하여 압력이 최고가 되는 점보다 약 15ms 전에 최고점에 도달함을 알 수 있다. $C_{pd,q}$ 를 사용하는 경우, 화염이 불안정하게 되기 전에 화염의 불안정성을 감지할 수는 있으나, 실용적으로 이를 이용하여 화염을 제어하기에는 짧은 시간으로 사료된다.

Figure 9는 5.5m/s, 당량비 0.82에서 화염이 불안정해지는 경우를 나타낸다. 이 경우 Rayleigh 지수와 압력의 진폭은 급격히 상승함을 볼 수 있다. 열발생률과 혼합부의 상관계수의 크기는 화염이 불안정해지기 전 150ms에서 이미 변화가 있음을 볼 수 있다. 이러한 상관계수의 변화는 전술한 바와 마찬가지로 압력이 커지기 전에 미리

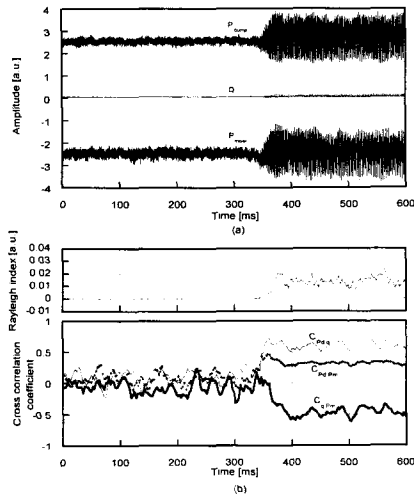


Fig. 8 Signals at the moment of becoming unstable flame for 5.5 m/s $\psi=0.59$ case. (a) signal, (b) Rayleigh index and cross correlations. (P_d , P_m mean dump plane pressure and mixer pressure respectively)

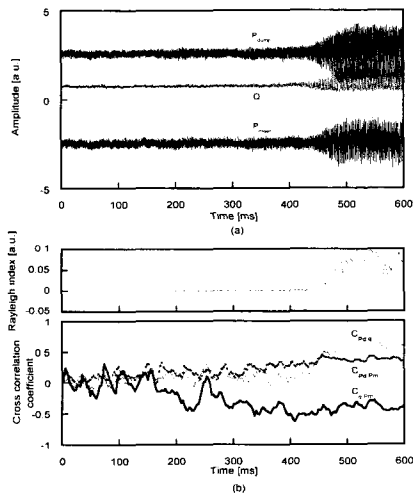


Fig. 9 Signals at the moment of becoming unstable flame for 5.5 m/s $\psi=0.82$ case. (a) signal, (b) Rayleigh index and cross correlations. (P_d , P_m mean dump plane pressure and mixer pressure respectively)

압력과 열발생률이 일정한 위상차를 가지고 있음을 의미한다. 응용면에서 이러한 150ms 전의 화염불안정성 감지는 화염불안정성으로 발전하는

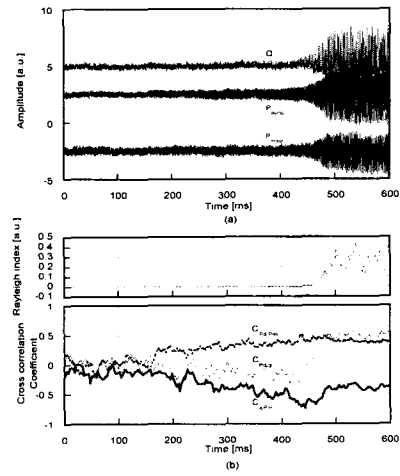


Fig. 10 Signals at the moment of becoming unstable flame for 7.0 m/s $\psi=0.85$ case. (a) signal, (b) Rayleigh index and cross correlations. (P_d , P_m mean dump plane pressure and mixer pressure respectively)

것을 막기 위한 조작시간으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

Figure 10은 7m/s 당량비 0.85인 경우에 화염이 불안정화되는 순간을 나타낸다. 이 경우 유속 증가 및 당량비 증가에 따라 열발생률이 5.5m/s의 경우에 비하여 많이 증가함을 볼 수 있다. 압력의 상승은 5.5m/s의 경우에 비하여 상대적으로 완만함을 볼 수 있다. 5.5m/s와 유사하게 덤프면 압력과 혼합부 압력 사이의 상관계수는 화염이 불안정해지기 250ms 전에, 혼합부 압력과 열발생률 사이의 상관계수는 150ms 전에 이미 변화가 있음을 볼 수 있다. 이 경우 상관계수를 사용하면 화염의 불안정성을 미리 감지할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

당량비 및 유속변화에 따른 덤프형 연소기의 화염불안정성에 관하여 고찰하였다. 화염 불안정성이 나타나는 경우 연소기 출구의 온도가 상승하며, 열발생률과 압력의 진폭이 커짐을 확인하였다. 당량비 0.6 근처 영역의 불안정성에서 화염은 진폭이 완전히 커지기 전에 미리 압력과 열발생률 사이의 위상차가 먼저 일정한 값에 도달함

을 확인하였다. 또한 0.8이상의 영역에서 발생하는 불안정성의 경우에 상관계수를 이용하면 화염의 불안정성을 미리 감지할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 도움으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Poins, T.J., Bourienne, F., Candel, S., Esposito, E. and Lang, W., 1989, "Suppression of Combustion Instabilities by Active Control," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 5, pp. 14~20.
- (2) Candel, S.M., 1992, "Combustion Instabilities Coupled by Pressure Waves and Their Active Control," *Twenty-Fifth Symposium on Combustion*, pp. 1277~1296.
- (3) Lee, J., Kim, K. and Santavicca, D.A., 2000, "Effect of Injection Location on the Effectiveness of an Active Control System Using Secondary Fuel Injection," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol 28, pp. 739~746.
- (4) Jones, L.M., Lee, J.G. and Santavicca, D.A., 1999, "Closed Loop Active Control of Combustion Instabilities Using Subharmonic Secondary Fuel Injection," *Journal of Propulsion and Power*, Vol 15, pp. 584~590.
- (5) Blonbou, R., Laverdant, A., Zaleski, S. and Kuentzmann, P., 2000, "Active Adaptive Combustion Control Using Neural Networks," *Combustion Science and Technology*, Vol 156, pp. 25~47.
- (6) 이병준, Preston, L.H., Santavicca, D.A., 1998, "가스터빈 연소기의 화염 불안정성에 관한 연구, 대한기계학회논문집(B), 제22권 제7호, pp. 1022~1029.
- (7) Gollahalli, S.R., Savas, O., Huang, R.F. and Rodriguez, J.L., 1986, "Structure of Attached and Lifted Gas Jet Flames in Hysteresis Region," *Twenty-First Symposium (International) on Combustion*, 1463.
- (8) Docquier, N., Belhafaoui, S., Lacas, F., Darabiha, N. and Rolon, C., 2000, "Experimental and Numerical Study of Chemiluminescence in Methane/air High-Pressure Flames for Active Control Application," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 1765~1774.
- (9) Lee, J., Kim, K. and Santavicca, D.A., 2000, "Measurement of Equivalence Ratio Fluctuation and Its Effect on Heat Release During Unstable Combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 415~421.
- (10) Rayleigh, J., 1945, *The Theory of Sound*, Vol. II, Dover, New York, p. 226.