

가스터빈 연소기내 2차연료분사에 의한 연소 불안정성의 제어

전충환*, Domenic A. Santavicca**

Control of Combustion Instabilities in a Gas Turbine Combustors Through Secondary Fuel Injection

C. H. Jeon and Domenic A. Santavicca

Key word : Combustion instability(연소불안정성), Secondary fuel injection(이차연료분사), Instability mode(불안정 모드), Sound level(음의 크기, 음압)

ABSTRACT

The results of study on the active control of naturally occurring combustion oscillations with a single dominant frequency in an atmospheric dump combustor are presented. Control was achieved by an oscillatory injection of secondary fuel at the dump plane. A high speed solenoid valve with a maximum frequency of 250Hz was used as the actuator and a sound level meter, located at the combustor exit, measured the pressure fluctuations which served as the feedback signal for the control loop. Instability characteristics were mapped over a range of mean mixing section velocities from 6.7 m/s - 9.3 m/s and with three mixing conditions. Different fuel/air mixing conditions were investigated by introducing varying percentages of primary fuel at two locations, one at the entrance to the mixing section and one 6 mixing tube diameters upstream of the dump plane. Control studies were conducted at a mean velocity of 9.3 m/s, with an air temperature of 415°C, and from flame blowout to the stoichiometric condition.

* 부산대학교 기계공학부, ** Pennsylvania State University

1. 서 론

온실효과에 의한 지구 온난화에 대한 우려가 전 세계적으로 증폭되면서, 항공기 배기가스에 대한 규제가 날로 강화되고 있다. 이에 따라, 국제 민간항공기구(ICAO)에서도 1970년대 후반부터 배기가스 규제를 위한 국제 협의체를 구성하였으며, 1980년대 말에 항공환경규제위원회(CAEP)를 발족한 바 있다. 고도 3000ft 이하의 공항근처에서는 CO, HC, NOx 및 Smoke에 대한 규제가 주안점이었다. 최근에는 고공에서 배출되는 NOx는 촉매작용을 일으켜 오존감소를 유발하기 때문에 1991년 환경규제위원회는 기존의 NOx 규제치를 20% 낮추어 강화하기로 합의한 바 있으며, 앞으로 계속하여 규제가 강화될 전망이다[1].

저공해 연소기술, 특히 NOx의 발생을 저감시키는 기술은 환경보호 차원에서 뿐만 아니라 항공기용(또는 산업용) 가스터빈 엔진의 경쟁력을 향상시키는 위해 더욱 필수적인 기술로 인식되고 있다. 천연가스를 주연료로 사용하는 산업용엔진과 비교하여, 액체연료를 사용하는 항공기용 엔진은, 연료 미립화 및 증발이라는 부가적인 과정과 높은 연소온도 등에 기인하여 NOx 발생을 줄이는 것이 더욱 어려운 문제이다. 이러한 NOx 발생을 줄이는

한가지 연소기술이 희박/예혼합/예증발(LPP, Lean Premixed Prevaporized) 연소기이다. 기존의 연소기는 연료를 주연소영역에 직접 분사하는 방식이기 때문에, 국부적으로 이론공연비 근처에서 연소가 발생하는 것을 피할 수 없고, 그 결과 NO_x 생성률이 높아진다. LPP 연소기의 개념은 연료와 공기를 완전히 혼합하여 얻은 균일한 혼합기를 주연소영역에 공급하고, 당량비를 희박가연한계에 가깝게 유지하는 것이다. 이에 따라 저온의 균일한 연소온도를 유지할 수 있어서 상당한 NO_x의 발생을 줄일 수 있다[2]. LPP 연소기의 부수적인 장점으로 soot의 생성이 거의 없으며, 따라서 열복사량이 감소하고 라이너 벽 냉각에 필요한 공기량을 줄일 수 있다. 또한 주연소영역 전체에서 온도를 1900K 이하로 유지함에 따라 NO_x의 발생률이 잔류시간에 의존하지 않게 되어 연소체적을 증가시킴으로서 CO와 UHC를 동시에 줄일 수 있다[3]. 그러나 LPP 연소기의 큰 단점은 예혼합/예증발에 요구되는 시간이 길어 입구온도가 높을 경우 자기발화(auto-ignition)와 역화(flashback)가 발생할 수 있고, 특히 연소기 내의 공명현상에 의한 불안정 연소(combustion instability)의 영역들이 이러한 조건하에 존재한다는 것이다. 이로 인해 NO_x의 발생을 줄일 수 있는 운전범위가 제한되어 LPP 연소기의 개발에 큰 장애가 되고 있다. LPP 연소기에서의 연소불안정은 연소기 내의 압력파와 주기적인 열방출이 상호 중첩될 때 발생되고 압력변동의 급격한 증가로 인해 연소기의 구조적인 강도에 손상을 줄 수 있는 진동을 일으킨다.

지금까지 다양한 형태의 연소장에 대한 연소불안정의 특성을 밝히고 제어하려는 노력이 시도되었다. Heitor 등은 1984년 음향공명기에 관련된 연소진동은 열방출율의 분포가 중요함을 밝히고 레이리판별법(Rayleigh criterion)을 이용하여 열방출에 의해 유도되는 연소불안정에 대해 보고하였다[4]. Whitelaw 등은 Heitor의 실험을 보완하여 다양한 덕트의 형상이나 구조에 따라 발생하는 연소기내 압력파의 특성을 주파수 분석을 통해 조사하였다[5]. 1991년 Hendricks 등은 이와 같은 연소불안정을 제어하기 위해 비정상적인 2차연료의 공급을 제안하였고 상류측에 전체연료의 18%정도의 2차연료를 공급하는 방식을 통해 제어가 가능함을 보였다[6]. 본 연구의 목적은 LPP 연소기 내의 연소불안정을 제어하는 효율적인 방법을 개발하는 것이다. 첫째는 모형 LPP 연소기를 제작하여 연소 불안정을 발생시키는 모드, 음압의 특성에 따라 작동조건을 결정한 후, 전 운전조건에 걸쳐 안정영역(stability map)을 찾는다. 둘째는 연소불안정을 줄이기 위한 제어시스템을 설계, 제작하고 그 효과를 밝히고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 연소기

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도이다. 본 연구에 사용된 연소기는 직경 12 mm, 길이 710 mm의 혼합부와 직경 42 mm, 길이 380 mm의 연소부로 구성되어 있다. 연소영역은 광학측정이 가능하도록 석영으로 된 튜브를 사용하였다. 혼합부와 석영튜브는 황동으로 된 어댑터에 의해 연결되고 그 내부에 2차 연료를 공급할 수 있는 분사공이 연소실 방향으로 설치되어 있다. 직경 0.9 mm의 스테인레스로 만들어진 십자형 보임기가 어댑터로부터 3 mm 정도의 간격을 두고 설치되어 있다. 연소부 입구의 황동 어댑터의 스템에 의한 재순환영역이 화염안정화에 큰 도움이 되지만, 보임기 역시 화염의 위치를 일정하게 유지시

켜 준다. 주연료와 2차연료로 메탄을 사용하였고, 주연료는 두 가지 위치에서 공급된다. 하나는 혼합부의 입구에서(직경의 약 60배 되는 위치) 나머지는 직경 3mm의 튜브를 거쳐 황동 어댑터로부터 혼합부 직경의 6배 되는 위치에 동축방향으로 공급된다. 주연료를 혼합부의 입구에서만 공급하면 100% 예혼합기(100% premix)이지만 분리하면 불완전 혼합기가 된다. 따라서 주연료의 공급량을 혼합부입구에 100%, 50%, 0%의 세가지로 나누어 공급하였다. 연료유량은 유동속도에 따라 0.05 kg/s ~ 0.18 kg/s의 범위이며, 메탄의 발열량을 55.5kJ/kg으로 하면 연소기의 열방출량은 2.8 kW ~ 10 kW 정도이다. 공기의 예열은 발열용량 627 W인 두 개의 가열테이프를 사용하였다. 혼합부 내의 평균유속이 9 m/s일 때 600 °C 이상 예열 가능하였으므로 혼합부 끝에 설치된 K형 열전대와 연결된 온도제어기를 이용하여 평균유속 6~10m/s 에 관계없이 예열온도 400~500 °C 범위를 유지할 수 있었다.

2.2 연소불안정의 제어시스템

LPP 연소기에서의 연소불안정은 음향공명에 의한 연소기 내의 압력과 주기적인 열방출이 상호 중첩될 때 발생되므로, 제어시스템의 기능은 연소기의 압력을 감시하여 연소불안정이 발생된 것을 확인하고 연소불안정이 나타내는 탁월주파수의 실제시간과 위상에서 이차연료를 분사시킴으로서 압력과 열방출의 위상이 중첩되지 않고 서로 상쇄되는 위상으로 이동시키는 것이다[7-9]. Fig. 2는 이와 같은 제어계의 개략도이다. 실험에서 사용된 피드백 장치는 실용적인 소음계(SLM, Sound level meter)로서 최고값은 126 dB이고, 표시계와 아울러 전압으로 직접출력이 가능하다. 소음계의 위치는 연소기의 출구에 수직이며 중심과 동일한 높이에 40 cm 떨어진 거리에 고정하였다. 제어회로는 신호처리기, 고속 솔레노이드밸브 구동기로 구성된다. SLM의 출력전압이 제어회로의 입력신호로 주어지면 우선 증폭기를 통해 증폭된후 고역필터(high pass filter)에 의해 DC 오프셋 및 저주파 잡음이 제거되면 밸브구동기를 쉽게 작동시킬수 있는 사각파의 TTL 신호로 변환된다. 이때 제어회로는 TTL발생 전압을 조정하여 트리거 신호보다 낮은 크기의 신호만 통과시킴으로서 사각파의 제어신호를 발생시키는 서레쉬홀드 레벨(threshold level)의 역할을 하게된다. 또한 카운터를 통해 입력주파수의 1/2, 1/4 등으로 출력주파수를 변화시킬수 있다. 고속 솔레노이드 밸브와 구동기는 펄스폭을 최소 250 μ s까지 주파수는 250Hz로 작동할 수 있고 입력신호에 대해 밸브구동 출력신호를 0.1ms~10sec 범위에서 지연시킬수 있다. 밸브는 직경 0.8mm 의 오리피스를 포켓에 의해 개폐시키는 방식으로 작동되며 포켓의 내구성은 백만 사이클 이상을 가지고 있다.

2차연료 인젝터는 제어시스템의 중요부로 8개의 구멍이 펄스신호에 따라 정확한 양의 연료를 연소부의 중심에 공급할 수 있어야 한다. Fig. 3은 밸브 작동주파수 25, 50, 100Hz에 대해 밸브 개방시간에 따른 연료의 양을 나타낸다. Fig. 4는 펄스당 연료공급량으로 환산한 것으로 주파수에 관계없이 개방시간에 선형적으로 비례함으로서 개방시간의 변화에 따른 2차연료량의 정밀한 제어가 가능함을 보여준다. 공급연료압력은 2기압이며 분당 최대 0.4 리터(0.4LPM)까지 공급할 수 있었다.

2.3 실험방법

불안정연소 조건에서 화염구조의 변화과정을 관찰하기 위하여 압력변동의 위상에 따라(phase-resolved) 화염으로부터 CO₂ 라디칼 발광화상(emission image)을 ICCD(Intensified

CCD) 카메라로 촬영하였다. 화염으로부터 CH, C₂, OH, CO₂ 발광화상은 반응대의 위치나 열 발생을 등을 추론하기 위한 도구로 사용되어 왔다[10,11]. CO₂ 는 화염으로부터의 열발생율을 나타내고 비교적 강한 발광스펙트럼으로 인해 높은 S/N비를 가지므로 선택하였다. 중심 파장 450 nm, 반치폭 40 nm 인 광학필터를 이용해 분광하였고, 각 위상에서 36 mm × 36 mm 인 100개의 화상을 평균하였다. 제어회로의 피드백 신호로 작용하는 연소기 내의 압력변동은 SLM으로 측정된 음압을 사용하였다. SLM의 신호를 통해 120dB 이상을 불안정 연소시의 음압으로 하고 100dB 이하를 안정된 연소영역으로 하여, 각 조건마다 음압의 최소신호의 사이클을 한 사이클로 하고 이 최소지점과 2차연료 분사개시점의 위상차 만큼을 시간지연시켜 분사하였다.

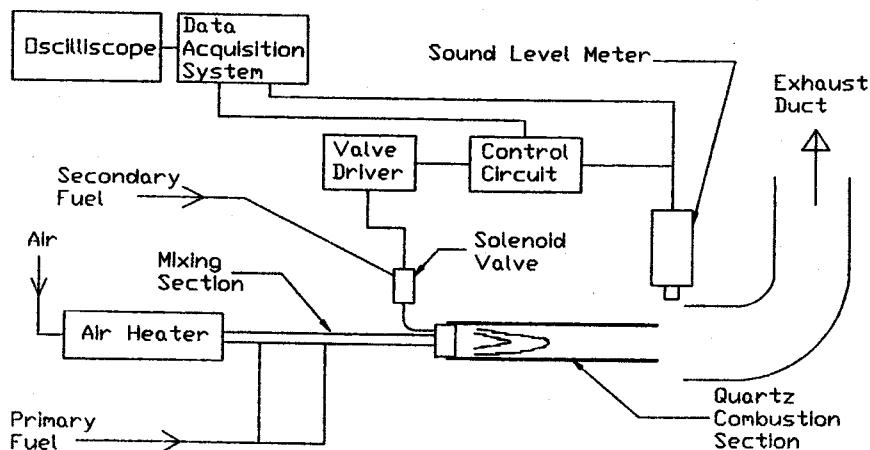


Fig. 1 Schematic drawing of the test apparatus

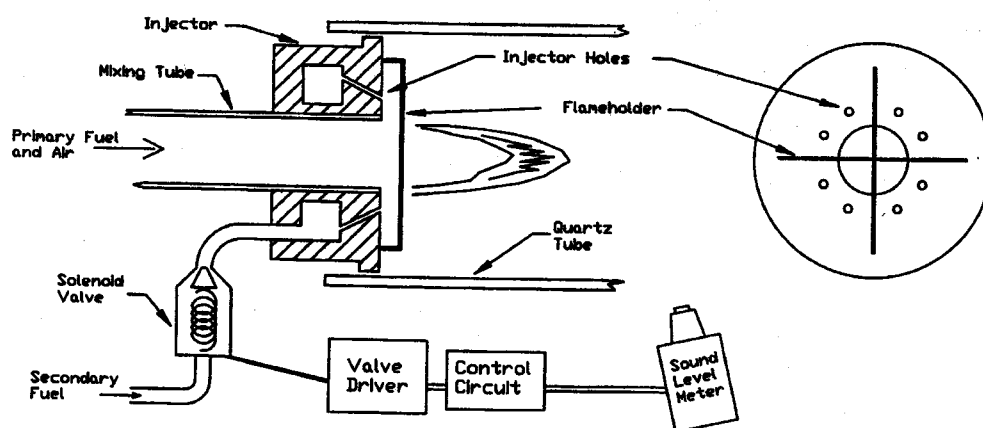


Fig. 2 Control system for using secondary fuel injection

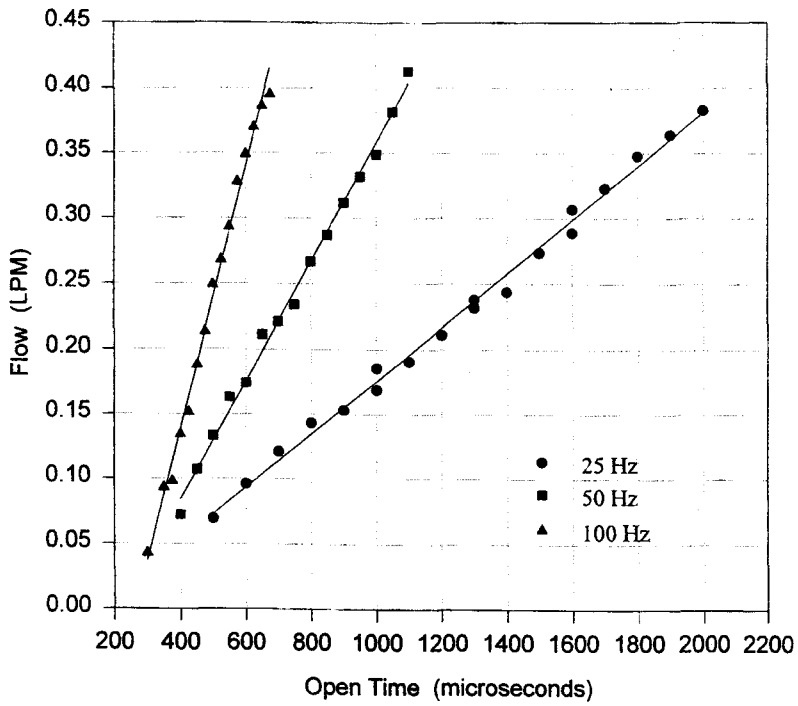


Fig. 3 Solenoid valve mass flow vs. open time at pressure of 200kPa

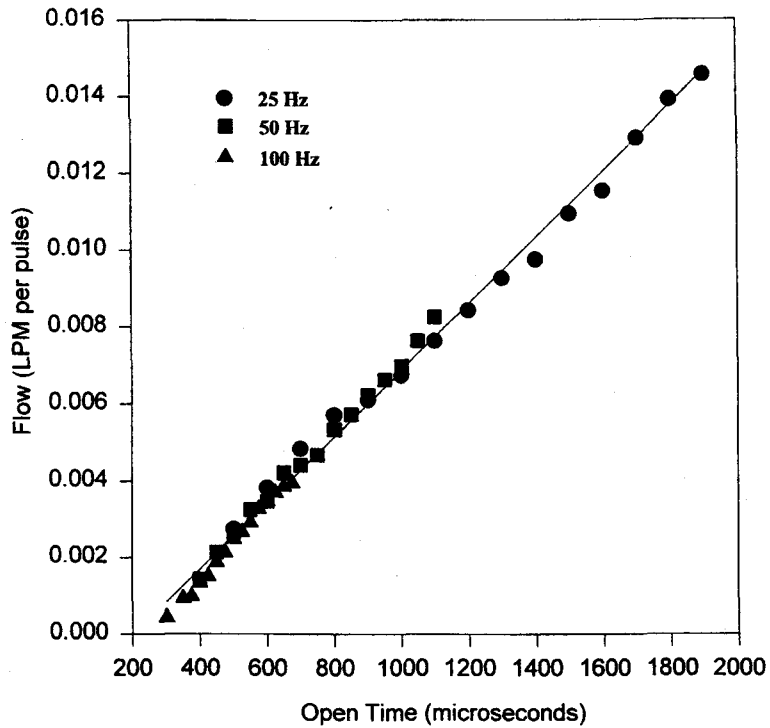


Fig. 4 Solenoid valve mass flow per pulse vs. open times

3. 실험결과 및 고찰

전 작동범위에 걸쳐 안정한계의 영역(stability map)를 표시하기 위하여 당량비의 작은 변화에 대해 급격한 음압의 증가를 불안정 연소의 시작으로 보고 당량비에 대한 음압(dB)으로 나타낸다. 작동변수로서 공기온도는 350, 415와 500℃, 평균속도는 6.7 ~ 9.3 m/s, 그리고 연료공급방법에 따른 예혼합도를 100, 50, 0%로 나누어 공급한다. 각 운전조건에서 당량비는 1.0에서 희박가연한계까지 변화시켜가면서 음압을 측정하고 불안정 연소조건에서 음압의 위상에 따라 화염의 구조를 촬영하였다.

3.1 불안정 연소의 특성

불안정 연소조건을 연소기 작동조건의 작은 변화에 대한 급격한 음압의 증가로 정의하였으므로 Fig. 5는 음압 120 dB 이상의 불안정 연소조건에서 얻은 SLM의 신호이다. Fig. 6은 이 신호를 푸리에 변환하면 주파수 350 Hz에서 단일 탁월 주파수만을 가지는 전형적인 종파모드의 불안정 연소특징을 나타내고 있다. 연소기의 길이가 직경에 비해 3배 이상인 경우 압력파는 연소기 내에서 $\frac{1}{4}$ 파(quarter wave)의 주파수를 가지며 그 값은 음속을 연소기 길이의 4배로 나눈값이다. 연소기 길이는 710 mm, 연소기 내의 평균온도가 대략 1100 K 일 때 음속은 약 616 m/s 이므로 $\frac{1}{4}$ 파(quarter wave)의 주파수는 380 Hz가 되어 실험의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 7은 연료가 50% 예혼합기인 경우 불안정의 뚜렷한 시작점을 나타내 보인다. 혼합기의 속도가 증가함에 따라 더욱 낮은 당량비에서 불안정이 시작되며 그 현상도 뚜렷해져서 당량비 0.5정도의 비교적 적은 변화에 음압은 20dB 이상의 큰 변화를 보인다. 이것은 유동장의 운동에너지가 증가함으로써 더 큰 압력파가 발생되어 불안정의 시작점이 빨라지고 일단 발생되면 급격히 불안정 상태에 도달되기 때문이다. 안정영역의 음압은 거의 일정하고 속도가 증가할수록 상대속도에 다른 유동소음이 증가하지만 불안정조건에서는 120 - 123 dB의 비교적 같은 크기를 가진다. Fig. 8은 100% 예혼합기인 경우로 이와 같은 경향이 더욱 뚜렷하다. 안정지역의 음압은 90dB정도이지만 불안정 영역은 약 120dB까지 증가하고 있다. 불안정의 시작점은 높은 속도에서는 당량비 0.73, 낮은 속도에서는 0.95의 넓은 영역에서 발생하고 있다. 50% 예혼합기인 경우는 각각 당량비 0.80, 1.0으로 100% 예혼합기에 비해 약간 뒤에서 발생된다. 이것은 예혼합도가 클수록 더욱 일정한 열발생율을 가지게 되어 압력파와의 중첩이 쉬워져서 불안정 현상이 낮은 당량비에서도 일어난다고 사료된다.

Fig. 9, Fig. 10은 세가지 예혼합도에 따라 희박가연한계(lean blow out limit, L.B.O.L.)까지 음압의 변동폭을 나타내었다. 전체적으로 온도가 낮은 경우에 비해 온도가 증가하면 경향이 일치하지 않음을 알 수 있다. 유속이 빨라지고 온도가 높아지면 50% 예혼합기인 경우가 100% 예혼합기에 비해 먼저 불안정해진다. 이것은 낮은 온도의 경우와 반대의 경향이다. 0% 예혼합기의 경우 높은 속도에서는 계속적으로 불안정 연소를 나타낸다. 또한 50%와 0% 예혼합기의 경우 높은 온도에서 불안정이 발생된 후 음압이 15dB 정도의 감소하고 음압의 변동폭도 온도가 높을수록 증가하였다. 온도가 415℃에서 500℃로 증가하면서 100% 예혼합기의 안정영역의 음압이 속도 9.3m/s 때는 5dB, 7.3m/s 때는 10dB 정도 감소하였다.

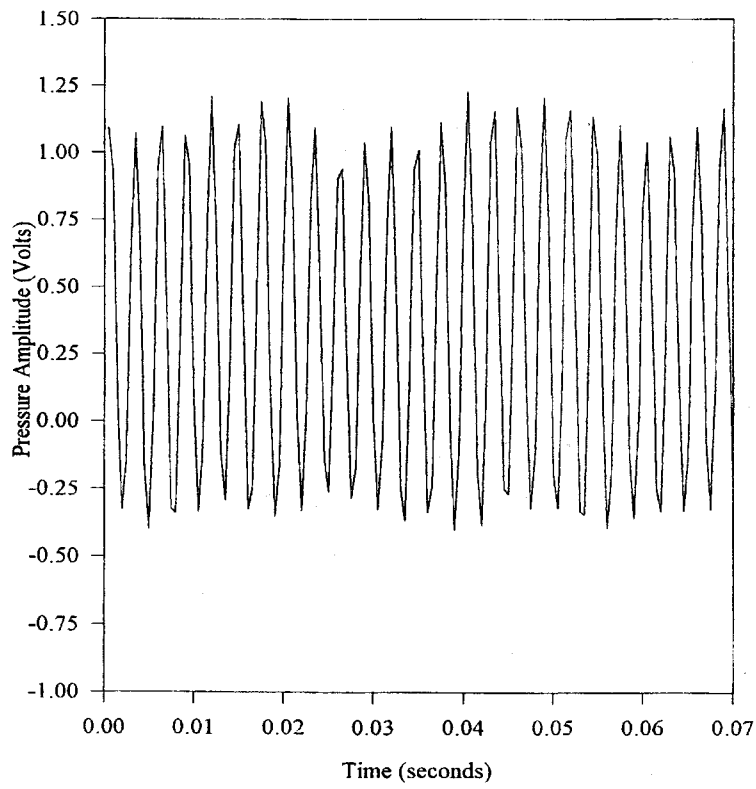


Fig. 5 Pressure vs. time signal in a 710mm combustor tube

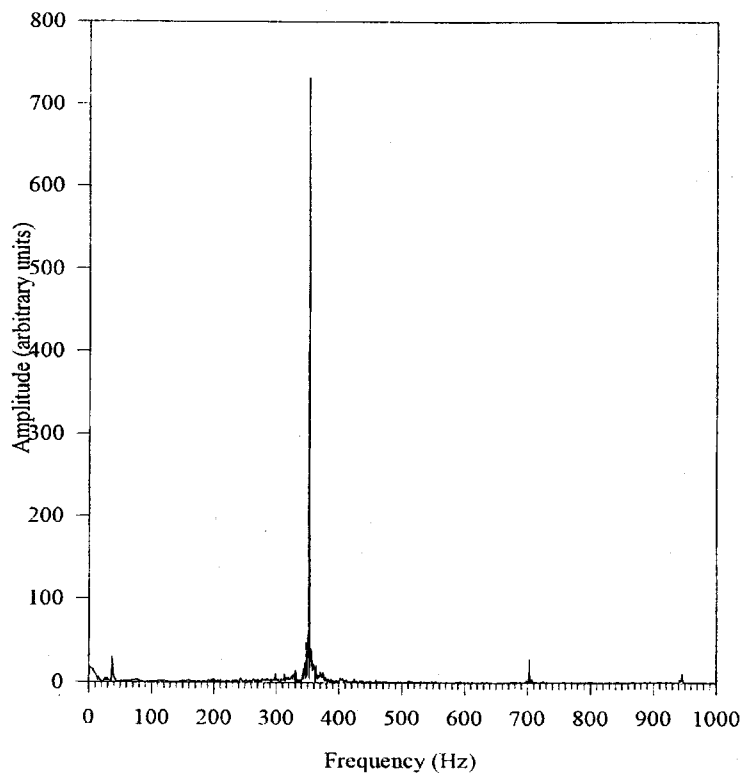


Fig. 6 Frequency spectrum of an unstable flame

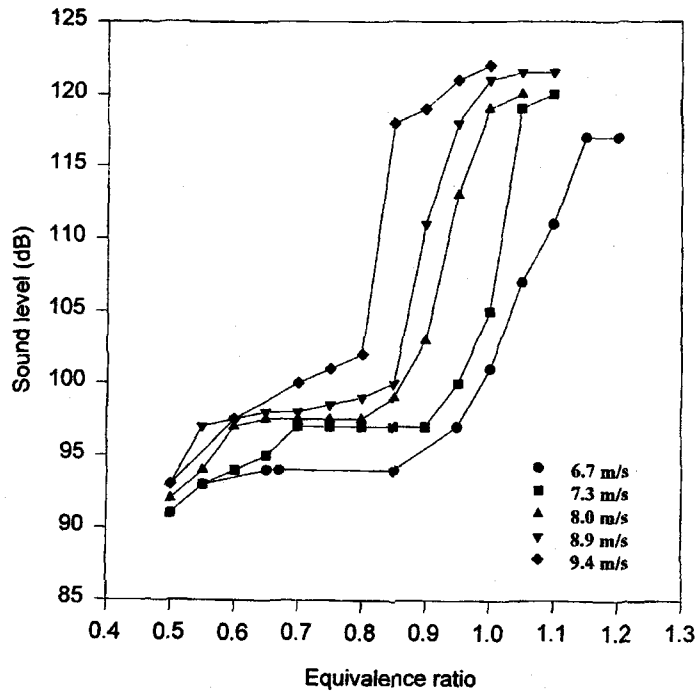


Fig. 7 Instability characteristics for 50% premix, 350°C

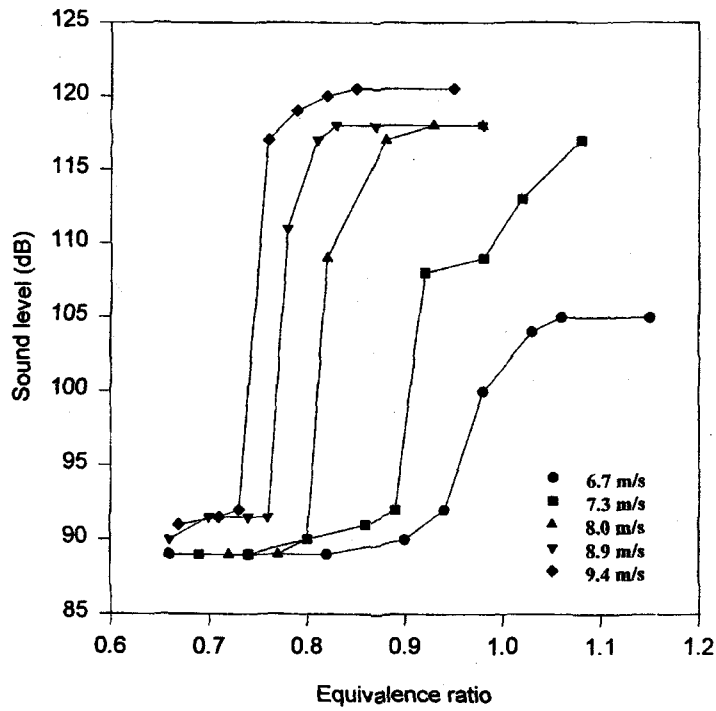


Fig. 8 Instability characteristic for 100% premix, 350°C

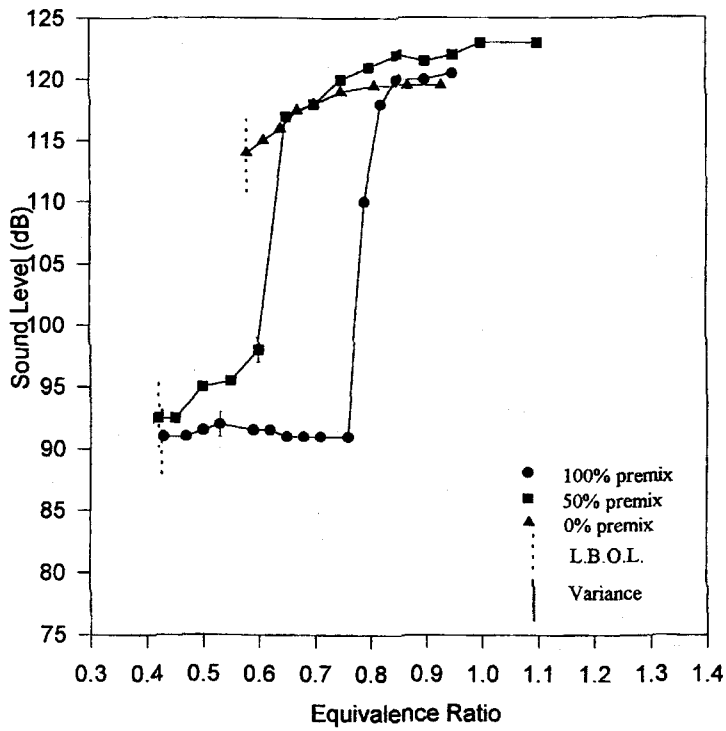


Fig. 9 Instability characteristic for 9.3 m/s, 415°C

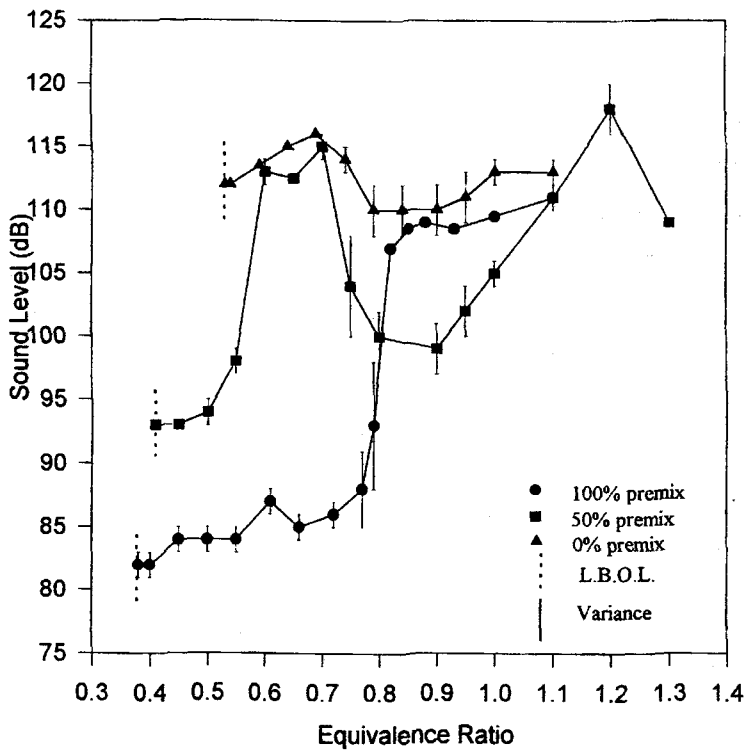


Fig. 10 Instability characteristic for 9.3 m/s, 500°C

3.2 불안정 연소의 화염구조

Fig. 11은 당량비 0.7, 유속 9.3 m/s, 공기온도 415 °C의 불안정 연소조건에서 발생되는 음압신호를 30° 씩 나누어 위상에 따라 CCD 카메라와 동기시켜 촬영한 CO₂ 라디칼 화상에 의한 화염의 구조를 나타낸다. 화염은 압력파와 열발생율이 중첩될 때 발생하는 불안정 조건에서 음압의 변동 사이클과 일치하면서 위상에 따라 주기적으로 진동함을 보여준다. 최대 음압을 180° 로 볼 때 최대 열발생율은 약 150° 부근에서 발생되므로 약 30° 정도의 위상차가 있음을 알 수 있다.

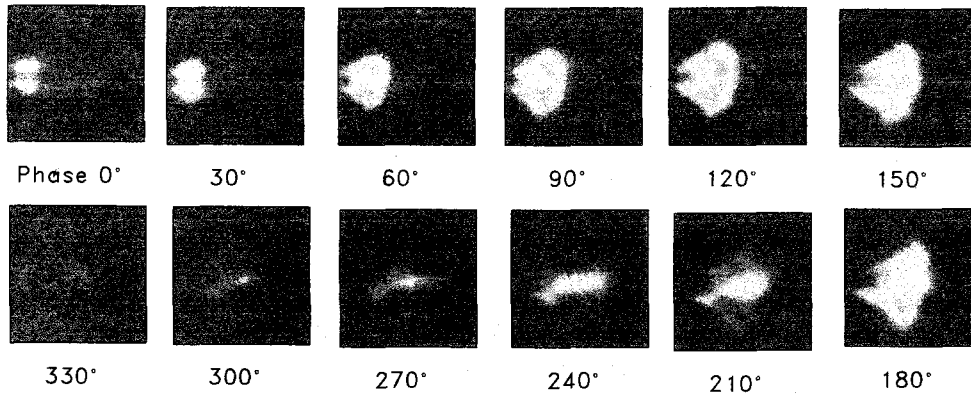


Fig. 11 Flame structure evolution at an overall equivalence ratio of 0.7

3.3 불안정 제어 특성

2차 연료분사에 의한 불안정 현상의 제어가능성 및 그 과정을 이해하기 위해서 넓은 범위에 걸친 불안정 영역에서 제어 대상으로 당량비 0.7, 유속 9.3m/s, 415 °C, 50% 예혼합기 경우를 선정하였다. 당량비 0.6에서 시작되어 당량비 1.0까지 뚜렷한 불안정 영역을 가지며 음압의 변동도 매우 적은 특성을 가지고 있기 때문이다.

Fig. 12는 불안정의 제어를 위해 2차연료를 분사한 압력파의 위상과 그때의 제어된 음압의 크기를 나타낸 그림이다. 제어하지 않으면 115dB이상의 높은 음압을 나타내지만 위상에 따른 제어가 적용되면 급격한 음압 감소의 제어특성이 각각 나타난다. 제어가 시작된 후 최대 100 Hz의 2차 연료분사에 의한 불안정 현상의 제거에는 약 0.6초 정도의 시간이 걸린다. 일단 불안정이 제어되면 압력파가 일정 크기를 넘어설 경우에만 2차연료분사 신호가 발생되기 때문에 0.45초 동안 7회 정도인 15 Hz의 작동주파수로 충분한 불안정 제어가 가능하였다. 이것은 2차 연료의 분사량이 전체 연료량의 10% 이내에서 제어 가능함을 보여준다. 위상 100° ~250° 범위에서는 효과적이지만 이 범위를 벗어나면 도리어 음압이 증가하였다. 이것은 2차연료의 분사로 압력파와 열발생율의 위상을 어긋나게 하여 음압을 감소시키기 보다는 위상을 서로 중첩시켜 음압을 더욱 증폭시키는 위상구간으로 작용하기 때문이다. 불안정을 제어하기 위한 최적의 위상은 210° 부근에서 발생되었다. 이것은 음압신호의 최대점 직후이지만 Fig. 11에 나타난 최대열발생율 위상 150° 와 비교하면 화염으로부터 열발생율이 적어지기 시작하는 지점에서 2차 연료를 분사함으로써 화염의 열발생율 주기를 음압의 주기와 어긋나게 하는 특성과 잘 일치함을 알 수 있다.

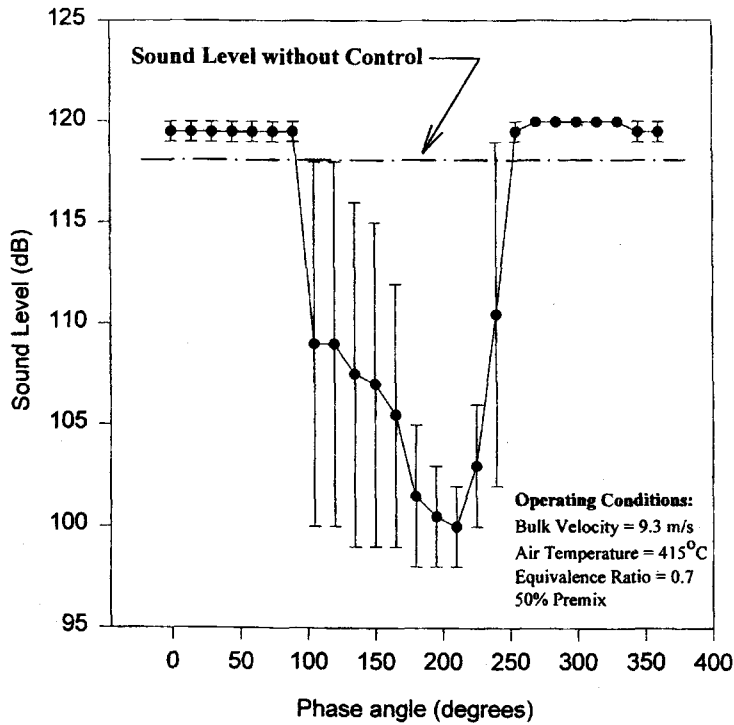


Fig. 12 Control effectiveness in control phase angle

4. 결 론

LPP 연소기내에서 발생하는 불안정 연소의 특성 및 효율적인 제어 방법을 개발하기 위한 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 연소기내의 압력파와 열발생율의 중첩에 의해 발생하는 불안정 연소영역을 당량비, 예혼합도, 온도, 유속에 따라 나타내고 불안정이 높은 대표적인 조건인 당량비 0.7, 유속 9.3 m/s, 공기온도 415 °C의 불안정 조건에서 위상에 따라 화염의 구조를 가시화하여 화염의 진동현상을 밝혔다. 이를 제어하기 위해 중첩된 압력파와 열발생율의 위상을 고속 솔레노이드에 의한 2차연료의 공급함으로서 어긋나게 하는 방법이 효과적임을 보이고, 2차연료량은 전체연료량의 10%정도이고 최적의 분사시기는 위상 210° 임을 확인하였다. 앞으로 화염구조의 정확한 해석을 위해 OH PLIF 및 2차연료의 공급위치 변화에 따른 제어특성에 대해 연구가 계속되어야 하겠다.

후 기

본 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의해 미국 펜실베이니아 주립대학의 Turbulent Combustion Laboratory에서 수행된 연구결과의 일부입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.