가스터빈 연소기의 화염 불안정성에 관한 연구

이병준* · L.H. Preston** · D.A. Santavicca**

(1998년 2월 2일 접수)

A Study on the Combustion Instability in a Bluffbody Dump Combustor

Byeong-Jun Lee, L.H. Preston and D.A. Santavicca

Key Words: Combustion Instability(화염 불안정성), Gas Turbine(가스터빈), Rayleigh Index (Rayleigh 지수), Dump Combustor(dump형 연소기)

Abstract

The relation of the inlet fuel distribution, velocity, and overall equivalence ratio to the stability of a lean burning no-swirl dump combustor was examined. Premixed or partially premixed natural gas was introduced into the air stream, which flowed to the dump region through an annular inlet pipe. Inlet air was preheated upto 400°C. Combustion instability was observed to occur at higher value of equivalence ratio (>0.6) as the degree of unpremixedness was increased. Instablilties exhibited a dominant frequency of ~500 Hz, which corresponded to a half wave mode of combustor. CH chemiluminescence and pressure fluctuations were in-phase when combustion instabilities occurred. Acetone LIF images revealed that there was a strong fuel concentration gradient across the inlet annulus. Phase resolved OH LIF images showed that inlet fuel distribution was affected by the combustion instabilities.

1. 서 론

가스터빈 연소기는 가압된 공기의 통로, 안쪽에 형성된 화염부및 이들 사이에 위치한 공기 유입이 가능한 통으로 구성되어있으며, 화염부는 주연소영역, 이차 영역, 희석 영역으로 영역으로 구분된다. 주연소영역에서는 주입된 연료의 연소가 이루어지고, 이차영역에서는 주연소 영역에서 과농하여 완전히 연소되지않은 연료의 연소와 일차영역에서 이루어진 열분해의 손실 회복이 이루어진다. 희석 영역에서는 적절한 터빈 입구의 온도분포가 되도록 고온의 기연 가스를 희석 및 냉각시켜준다. 초기의 가스터빈 배기물 규제는 주로 매연과 CO와 연관된 것이었다. 이러한 CO와 매연은 엔진 아이들링 때에 최고가 되고, 최고출력일 때 최저가 되므로 이들의 저감 대책은 일반적으로 엔진 연소실을 고온으로 운전하게 설계하는 것이었다. 이 방법은 매연과 CO의 저감은 가져왔으나, 화염온도를 상승시키고 온도의 지수함수에 비례하여 생성되는 NOx의 증가를 가져오게 되었다. 이와같이 온도의 상반된 효과를 가진 배출물을 저감시키는 방법 중에서 1970년대 이후의 가스터빈 연소기의 설계 방향은 다른 배출물의 양을 적게 유지시키면서, NOx 배출을 저감시키는 방향으로 연구가 진행되어오고 있다.[1]

일반적인 가스터빈 연소기는 액체 연료를 주연소영역으로 분사시킨다. 연료 액적이 무화, 기화되면서 공기와 혼합이 일어나게되고, 당량비가 이론 당량비인 영역을 따라 연소가 일어나게된다. 이때 형

*영남대학교
**Pennsylvania state university

성된 화염은 안정성은 좋으나, 화염 온도가 높아 높은 NOx 형성에 기여하게된다. 연소 영역에서 고온 화염 온도를 피하는 것이 NOx 저감 방법이므로, 열역학적 효율의 저감 없이 희박 연소를 실행하는 것이 NOx 저감에 대한 하나의 방법이 된다. 연소기 내에서 균일한 연료의 분포가 NOx를 저감시키는 기술이되므로 연료분사기의 설계가 NOx저감의 핵심적인 방법이 된다. Tacina[2]는 저 NOx 배출을위해 과농연소/급속냉각/희박연소(RQL), 선기화 희박연소(LPP), 희박 직접분사(LDI) 등의 3가지 개념을 NOx 저감을 위한 방법으로 정리하였다.

RQL연소기에서는 과농연소의 일차영역과 희박연소의 이차 영역을 물리적으로 고립시키기 위하여, 일차 영역 출구부에서 희석 공기를 빨리 연소실을 가로질러 공급한다. 이로써 이론당량비로 연소될 시간을 줄여주어 NOx 의 저감을 꾀하는 방법이다. 이 방법은 자발화나 역화의 문제가 없는 반면에 급격하고 균일한 혼합이 요구되는 것과 일차영역에서의 매연형성이 단점으로 작용한다.[3]

LPP연소기는 미리 기화된 연료를 희박하게 혼합하여 균일하게 연소실로 공급한다. 이러한 LPP의 설계에서는 많은 연료 분사점과 연료의 기화와 혼합이 일어나는 부분으로 이루어져있다. 고온에서의 자발화와 역화가 가장 큰 문제점이다.[4] 또 하나의 문제점은 희박 운전조건에서의 연소 불안정성이다. 이러한 연소 불안정성은 연소실의 음파 특성과 연관된 공진 현상으로서, 높은 소음과 구조적인 결함을 유발할 수 있는 압력 진동으로 나타난다.[3]

LDI 연소기는 LPP와 유사하나 혼합관이 없는 방법이다. 연료는 높은 전단층이 있는 영역으로 분사되어 일차영역에서 혼합이 이루어지게 된다. 이 방법에 의한 NOx 저감은 연료분사점의 크기와 전단층으로의 분사와 위치선정이 관건이된다.[5] 이러한 여러 가지 NOx 저감 방법중에 연소 불안정성이 가장 큰 걸림돌이 되므로, 연소기 형상과 연료분사과정이 화염 안정성에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다. 또한 이러한 연소 안정성에 대한 연구를 위해서는 연소 과정에 대한 정밀 분석과 이해가 필요하며, 이를 위해 속도, 온도 및 농도를 정확하게 측정하는 것이 요구된다.

연소기 입구의 연료/공기 혼합정도가 화염 형상과 연소 안정성 및 배출물에 많은 영향을 미침이 최근 밝혀졌다.[6,7] 예혼합화염이 가장 적은 공해 배출을 유발하지만, 안정성의 문제를 야기한다. Bluffbody 연소실인 경우, 연소실 형상이 vortex shedding을 통해 연소실내부의 음파 특성과 유체역학적인 결합에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.[8~10] 따라서 연료분포가 연소 불안정성과 배출물에 미치는 영향에 대한 평가는 희박연소기에서 일어나는 기본적인 현상 이해에 많은 도움을 줄 것이다.

레이저를 이용한 연소진단을 위하여, 광학적 접근이 가능한 천연가스 연료의 모델 연소기를 제작하였다. 연료와 공기의 혼합을 쉽게 해주며 액체연료 분사와 관련된 어려움을 제거해 주기위해 기체 연료를 사용하였다. 아세톤 LIF(laser induced fluorescence)를 사용하여 연소실 입구에서의 연료 분포를 측정하였다. 연소 불안정은 음파 측정기로부터 측정하였으며, 압력 변환기 신호로부터 불안정 화염의 특성 주파수를 측정하였다. 또한 연소실 입구 연료분포가 연소 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 불안정 연소시에 위상별로 분해된 화염 자발광과 OH PLIF로부터 연소 특성을 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

사용된 연소기는 backward facing dump combustor이다(Fig. 1 참조). 동축인 두 관 사이의 공간(외경 35.6 mm, 내경 19.1 mm)으로 이루어진 혼합부를 통하여 공급된 연료와 공기는, 직경 110 mm의 급속확대면으로 이루어진 연소실에서 연소가 이루어진다. 혼합부를 구성하는 내부 관은 끝을 수직으로 막고 급속 확대면과 평행하게 설치하였다. 연소실(내경 110 mm, 길이 850 mm)은 가시화를 위하여 석영으로 만들었으며, 연소실 끝은 반구형이고 그 중앙에 직경 19.1 mm의 출구를 가공하였다. Fig. 1의 그림에서 2X DETAIL로 표시한 부분은, 다른 각도에서 혼합부 출구(또는 연소실 입구)를 보았을 때의 모양을 확대하여 나타낸 것이다.

연료 혼합이 연소 불안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 연료를 두 부분으로 나누어 연소실에 공급하였다. 연료의 일부는 dump면 상류 870 mm에서 가열된 공기에 공급하여, 혼합부에서 혼합이 이루어져 예혼합 상태로 연소실로 공급되게 하였다. 나머지 연료는, dump 면 상류 25.4 mm

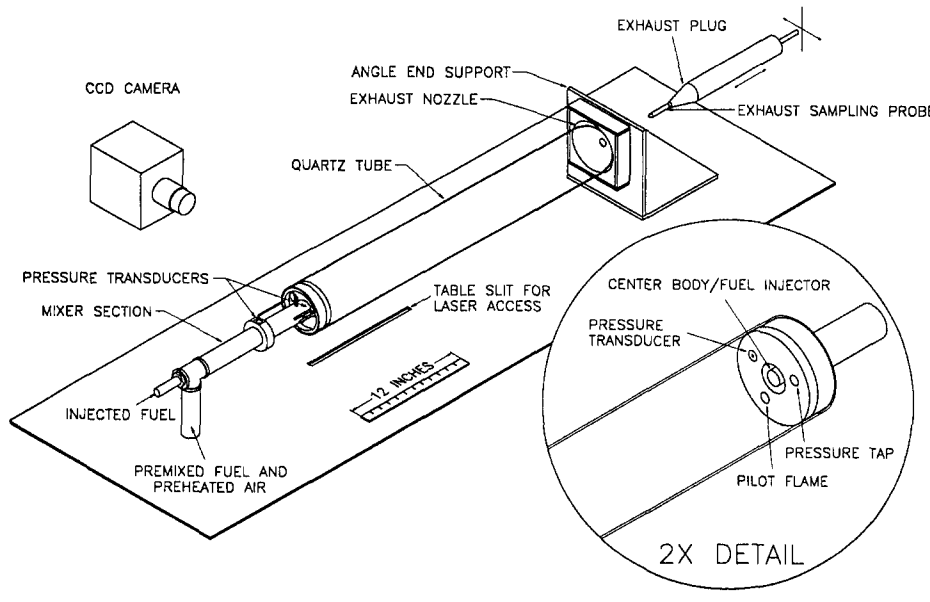


Fig. 1 Dump combustor facility.

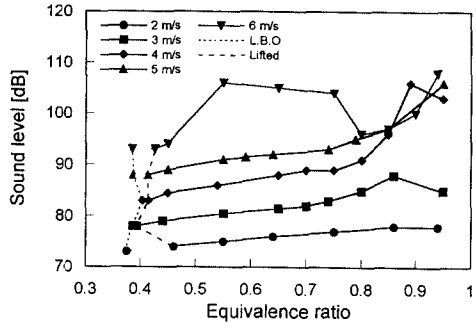
에 원주 방면으로 16 개의 구멍(직경 0.4mm)을 가진 혼합부의 내부 관을 통하여 비예혼합적으로 연소실에 공급되도록 하였다. 이들 두 연료의 비가 본 실험에서의 변수중 하나인 비예혼합도, σ, 로서 전체 연료질량중 비예혼합 상태로 공급되는 연료의 질량비를 나타낸다. 연소 불안정성에 의한 연소기 내부의 압력 변동을 측정하기위하여 압력 변환기를 혼합부와 연소실 내의 dump plane에 설치하였다. 또한 소음의 강도 측정을 위하여 음파 측정기를 사용하였다. dump plane에있는 압력 변환기의 신호를, 연소 불안정시에 형성된 화염의 위상분해 영상 촬영용 동기 신호로 사용하였다. 불안정 화염의 발달 과정의 이해를 위해 CH자발광을 측정하였다.

3. 결과 및 검토

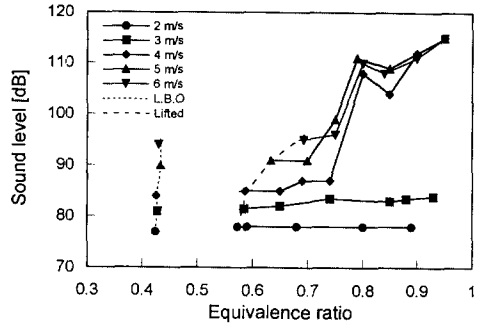
본 실험에서의 변수는 입구 연료 분포, 속도, 당량비의 변화등이다. 주어진 비예혼합도, 입구온도의 조건에서, 연소실 내부의 평균 속도가 2 m/s에서 6 m/s (혼합부 내부의 속도는 27~80 m/s), 당량비가 희박 연소한계로부터 당량비 1 의 범위에서 실험을 수행하였다. 실험은 연소기 내부 압력 1 기압 부근에서 수행하였다. 본 고에서 나타내는 속도는 미연기체를 기준으로한 연소실의 평균속도를 나타낸다.

당량비와 연소실 내부 속도 변화 및 비예혼합도 변화에 따른 화염의 안정성을 Fig. 2 에 나타내었다. 당량비 0.7에서 점화한 후 당량비를 감소시키면, 내부 dump plane에 붙어있던 화염은 섭동이 심한 엷은 청색 화염으로 변하여 부상(liftoff)하게 되고, 어느 당량비 이하가 되면 소염되었다. 당량비 0.7로부터 당량비를 증가시키면 유속과 당량비의 조건에 따라 연소기에서 발생하는 소음이 감자기 커지면서 연소 불안정성이 발생하였다. 이때 발생한 소음 및 연소실 내부 압력 변동은 동일한 주파수였다. 완전히 예혼합된 상태로 연료를 공급하는 경우인 Fig. 2.(a)의 경우, 유속 2, 3m/s에서는 연소 불안정성이 존재하지않았으나, 4 m/s에서는 당량비 0.85, 5 m/s에서는 당량비 0.75, 6m/s에서는 당량비 0.55 이상에서 연소 불안정성이 나타났다. 이때 발생되는 소음의 주파수는 500 30Hz 로서, 당량비 증가에따라 증가하는 경향을 보였다. 이러한 주파수는 연소기 입구와 출구가 작기 때문에 음향학적으로 마디의 조건으로 보고 계산한 반파장의 주파수와 대략 일치한다. 즉, 공기의 비열비를 1.3, 연소실의 온도를 1600-2000K로 가정하면 반파의 주파수는 대략 450-500Hz로 본 실험의 결과와 일치한다. 비예혼합도가 0.5 인 (b)의 경우도 (a)와 유사하나 특이한 것은 6 m/s의 경우에 불안

정성이 발생하는 당량비가 0.75 부터라는 것과 부상 화염의 영역이 완전 예혼합의 경우보다 더 넓게 존재하고, 희박 가연한계가 당량비 0.38에서 0.42 부근으로 상승 하였다는 점이다. 또한 소음의 강도도 비예혼합의 경우가 증가하였음을 볼 수 있다. 따라서 연소기 입구에서의 연료의 분포가 화염의 안정성에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.



(a) $\sigma=0.0$

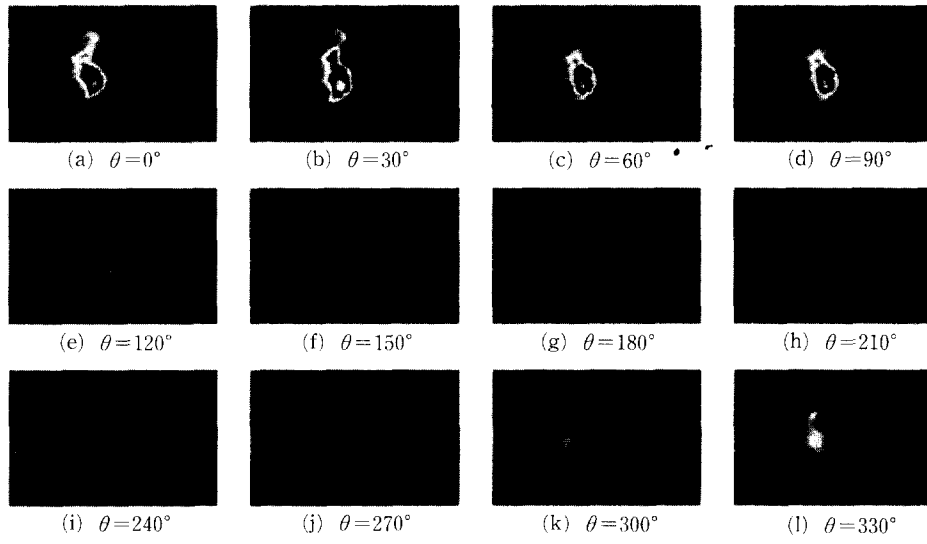


(b) $\sigma=0.5$

Fig. 2 Stability maps-sound level vs equivalence ratio.

당량비 0.85인 경우 연소 불안정성은, 4 m/s에서는 359oC, 5 m/s에서는 320oC이상의 입구온도에서 발생하였다. 입구온도가 400°C일 때가 가장 넓은 당량비에서 발생하였다.

Figure 3은 연소 불안정이 발생할 때, 자발 방출 CH의 위상별 변화를 보여준다. 이 CH 자발광 영상 촬영을 위해 중심파장 430 nm, 선폭 10 nm 의 필터를 사용하였으며, 한 위상당 32 영상을 평균하였다. 검정색에서 청색, 노랑색, 빨강색, 흰색으로 갈수록 빛의 강도가 큰 것을 나타낸다. 위상 0°는 압력이 평균 압력이고, 압력 변동의 기울기가 양의 기울기로 변하는 점을 나타낸다. 30° 에서부터 위상이 커짐에따라, CH 자발광이 발생하는 영역과 광도가 줄어들면서 후류로 이동하고 있으며, 150° 와 180° 사이에서 새로운 vortex가 형성됨을 볼 수 있다. 기 생성되어 약해진 vortex는 위상 240° 부근에서 소멸되고 새로 생긴 vortex가 성장하여 전체 사이클을 이룸을 볼 수 있다. 이러한 영상은 선적분된 영상이므로, 단면 영상으로 변환 시키기위하여 Abel 변환을 수행하였으며, Abel 변환된 CH 자발광의 총 강도 변화와 압력 변화의 관계를 Fig. 4 에 나타내었다. CH자발광의 총 강도 변화가 압력 변화보다 40° 정도 앞서면서 서로 깊은 상관관

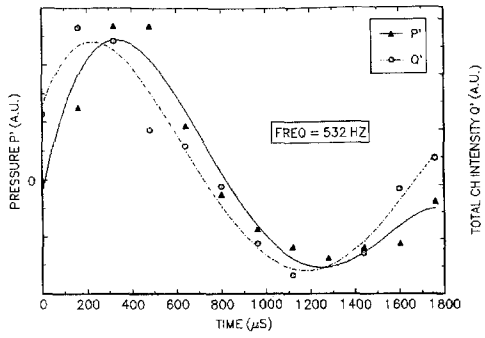


(a) $\theta=0°$ (b) $\theta=30°$ (c) $\theta=60°$ (d) $\theta=90°$

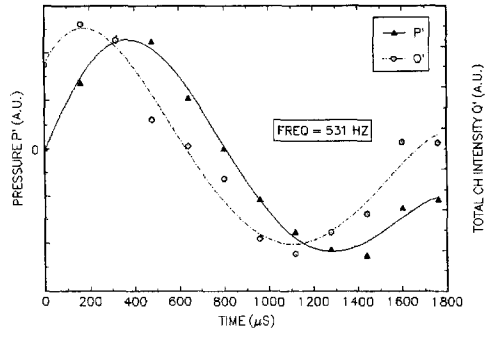
(e) $\theta=120°$ (f) $\theta=150°$ (g) $\theta=180°$ (h) $\theta=210°$

(i) $\theta=240°$ (j) $\theta=270°$ (k) $\theta=300°$ (l) $\theta=330°$

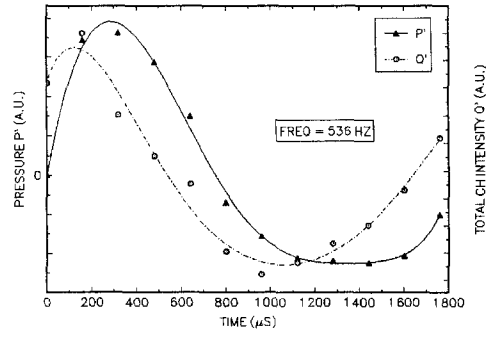
Fig. 3 Phase resolved CH images-6m/s, $\psi=1.0$, $\sigma=0.0$



(a) $\sigma=0$

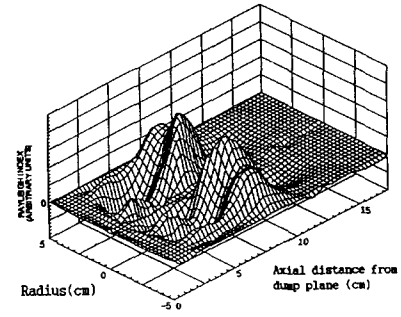


(b) $\sigma=0.25$

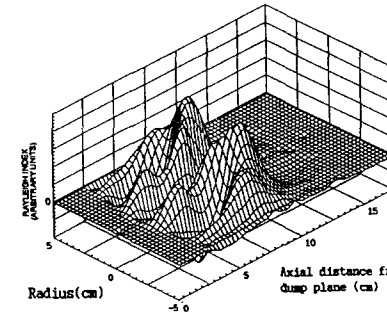


(c) $\sigma=0.5$

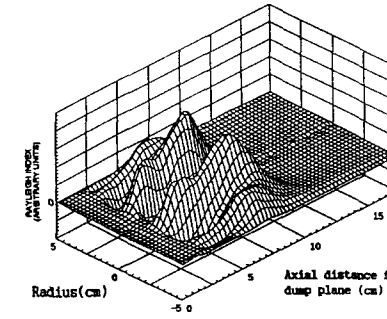
Fig. 4 Pressure and heat release cycles-6m/s, $\phi=1.0$.



(a) $\sigma=0.0$



(b) $\sigma=0.25$



(c) $\sigma=0.5$

Fig. 5 Rayleigh index-6m/s, $\phi=1.0$.

계를 갖고 있음을 볼 수 있다. CH자발광은 화염의 열발생과 관련이 있으므로, 연소 불안정이 발생하는 경우 화염의 열발생율과 압력 변화는 서로 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이는 압력변화와 열발생율이 동일 위상이면 화염이 불안정해진다는 Rayleigh의 이론[11]과 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 상관 계수를 Rayleigh index라고하고 다음과 같이 정의된다.

$$R(x,\ y)=\frac{1}{T}\int P'(t)\,q'(x,\ y,\ t)\,dt$$

여기서 P'은 압력 변화를 q'은 열발생율의 변화를 나타내고, x, y는 좌표, t는 시간, T는 주기를 나타낸다.

Figure 5.는 Fig 4.의 조건에서의 Rayleigh index를 나타낸다. 여기서 양의 Rayleigh index는 열 발생율이 압력 변화를 이끌고, 음의 값은 열 발생율이 압력변화를 감소시키는 것을 나타낸다. 축방향 7.5 cm 영역에서 높은 양의 Rayleigh index

값이 나타나고 있음을 볼 수 있으며, 그 이전에 있는 음의 Rayleigh index값이 나타나는 영역은 비예혼합도가 증가할수록 감소되어가는 것을 볼 수 있다. 연료 공기의 혼합정도가 화염을 안정화시키는 영역과 불안정화시키는 영역에 영향을 미침을 볼 수 있다.

연소실 입구에서 연료의 분포를 측정하기위하여 아세톤 LIF를 수행하였다. LIF 신호의 강도는 다음 식으로 주어진다.[12]

$$I_{LIF}(x,\ y)=aNI_{laser}(x,\ y)$$

여기서 I_{LIF}는 LIF 신호의 강도를, I_{Laser}은 입사되는 레이저광 강도의 공간분포를, N은 아세톤 입자의 개수를, a는 소광율과 Einstein계수 및 정렬과 관련된 비례상수를 나타낸다. 비례상수와 입사 레이저광의 공간 분포를 구하기위하여 완전 예혼합된 영상을 기준 영상으로 사용하였다. 이 기준 영상을 상첨자 *로 표시하면

$$I_{LIF}(xy)^*=aN^*I_{laser}(x,\ y)^*$$

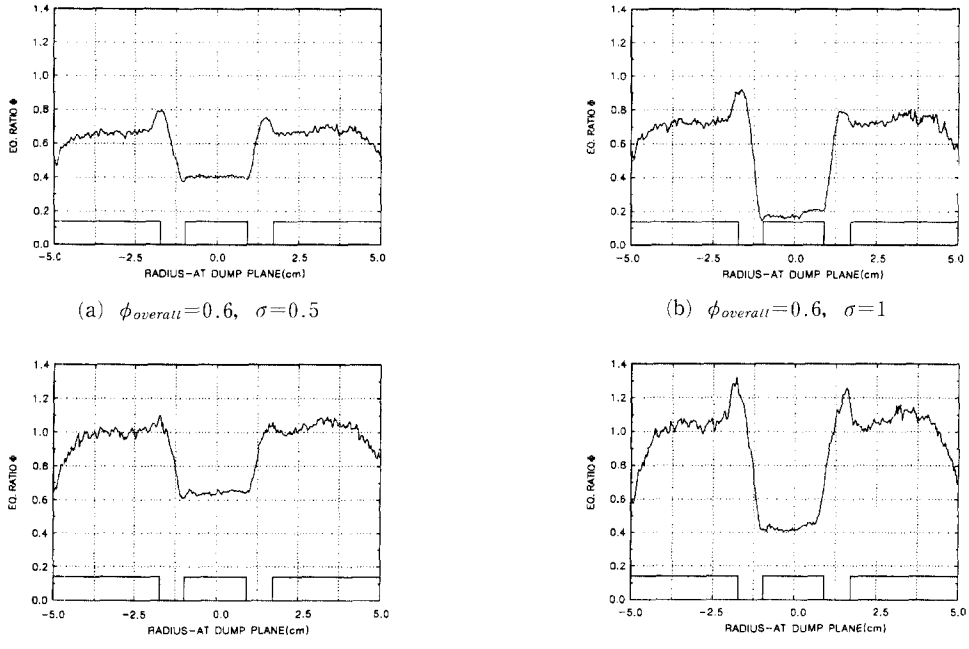
위 두 식으로부터

$$\frac{N(x,\ y)}{N^*(x,\ y)}=\frac{I_{LIF}(x,\ y)}{I^*_{LIF}(x,\ y)}\frac{I^*_{laser}(x,\ y)}{I_{laser}(x,\ y)}$$

여기서 입사 레이저광의 분포가 일정하게 유지된다고 가정하고, $N^*(x,\ y)$는 완전 예혼합기로 연소실이 채워진 경우일때의 아세톤 분자갯수의 값이므로 일정하다고 가정할 수있으므로

$$N(x,\ y)=\beta\frac{I_{LIF}(x,\ y)}{I^*_{LIF}(x,\ y)}$$

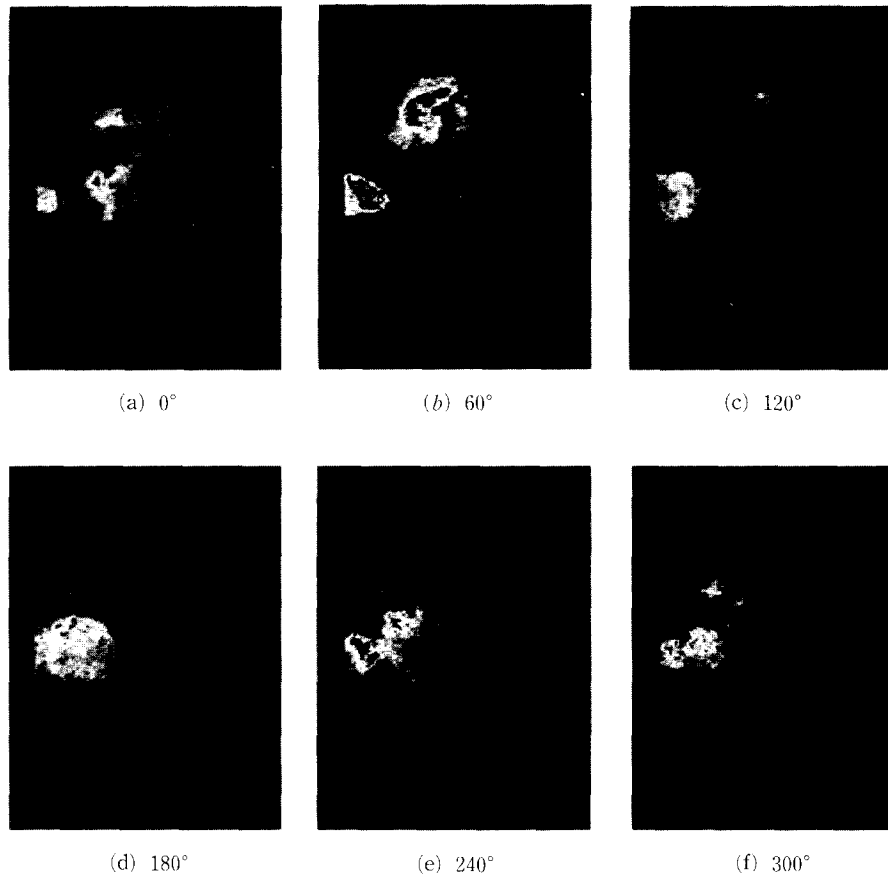
여기서 β는 상수로서 아세톤 분자수로부터 당량비로 환산할 때-단면 전체의 평균당량비가 입사되는 연료의 당량비라고 가정-결정되어지는 상수이다. 아세톤 LIF를 수행하기위하여 사용한 레이저의 파장은 283 nm이다. Shot noise를 제거하기위하여 100번의 영상을 평균하여 사용하였다. Figure 6은 입구온도 200°C, 유속 5 m/s인 경우에 대해 아세톤 LIF의 결과로부터 얻은 연소기 입구에서의 당량비를 보여준다. 비예혼합도가 0.5와 1인 경우 모두 연소기 입구에서 급격한 농도 변화가 일어나고 있으며 연소기 상하로(그림에서는 좌우로) 불균일한 연료분포가 일어남을 볼 수 있다. 또한 혼합기의 바깥부분으로 연료 농도의 overshoot이 발생함을 볼 수 있다. 이는 연소실 입구로부터 25 mm상류에 위치한 작은 구멍(직경 0.4 mm)을 통하여 고속으로 분출되는 비예혼합 연료가, 예혼합 연료와 충분히 혼합되지 못하고 연소실에 공급되는 것에



(a) $\phi_{overall}=0.6,\ \sigma=0.5$ (b) $\phi_{overall}=0.6,\ \sigma=1$

(c) $\phi_{overall}=0.9,\ \sigma=0.5$ (d) $\phi_{overall}=0.9,\ \sigma=1$

Fig. 6 Inlet fuel distribution for 5 m/s.



(a) 0° (b) 60° (c) 120°

(d) 180° (e) 240° (f) 300°

Fig. 7 Phase resolved OH PLIF 6m/s, $\phi=0.7$, $\sigma=0.0$.

기인하는 것으로 사료된다. Bluffbody에서 형성된 재순환 영역에서의 vortex에 의하여 bluffbody 부근에서도 연료가 존재함을 볼 수 있다. 연소기 바깥쪽에서 연료의 농도가 감소하는 것은 연소기 벽면에서의 냉각과 레이저광의 반사에 기인하는 오차에의한 것으로 사료된다.

Figure 7은 연소 불안정이 발생한 경우에 대하여 (당량비 0.7, 속도 6 m/s, $\sigma=0.0$) OH라디컬의 PLIF를 나타낸다. 여기 레이저 라인은 $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$ (1, 0) 밴드의 $Q_1(8)$라인(283.55 nm)을 채택하였다. LIF 신호의 수광부는 (0, 0)와 (1, 1) 천이 영역(306~326 nm)이되도록 WG305와 UG11 필터를 사용하였다. 동일 위상에서 5 영상을 평균한 결과를 나타낸다. 그림에서 dump 면 근처에서 존재하는 검은색으로 나타나는 부분은 OH라디컬이 존재하지 않는 부분으로, 화염이 존재하지 않는 연료와 공기가 유입되는 부분을 나타낸다. 일반적으로 OH 라디컬은 화염면과 그 후류에서 높게 나타나고, 온도가 높은 지역에서 많이 나타나므로, OH 농도가 높게 나타나는 영역은 화염의 바로 후면이거나 화염이 존재하는 영역으로 유추할 수 있다. 위상 180°에서부터 위상 300°로 가면서 미연 연료(검은부분으로 나타나는부분)가 계속해서 증가해서 화염 및 기연 영역으로 침투해감을 볼 수있다. 위상 0°일때의 영상에서 검은 영역에 의하여 OH가 존재하는 부분이 두곳으로 나누어진 것으로 미루어 화염의 경계가 두곳 즉, 끊어진화염(split flame)의 형태가 됨을 알 수 있다. 위상이 증가하면서 dump 면에 붙어 있던 고온의 기연 가스 영역이 커져서(분사된 미연 가스를 연소시켜) 위상 180o에서는 두 개로나뉘어 있던 화염이 다시 결합하여 사이클이 계속됨을 볼 수 있다. 그러나 이러한 현상이, 연소실 내부에서의 압력 변동에 의해 공급되는 연료가 가진을 받아서 일어난 현상인지, 단지

vortex shedding에의해 일어난 현상인지는 상류의 연료 혼합부에서 연료변동을 측정하여야 알 수 있으므로 이부분에 대한 계속적인 연구가 요구된다.

4. 결 론

연소기 입구 연료의 불균일성, 유속, 당량비의 변화가 희박 연소기에서 발생하는 화염 불안정성에 미치는 영향에 관하여 연구하였다.

입구에서의 유속이 증가할수록 화염 불안정성이 발생하는 영역이 증가하였으며, 입구 연료의 불균일성과 총체적 당량비에따라 화염 불안정성의 특성이 영향을 받음을 확인하였다.

본 조건에서 발생하는 불안정성은 연소기의 반파장 주파수와 연관이있는 500Hz 부근임을 확인하였다. 이러한 불안정성이 발생하는 조건에서는 CH 자발광의 총 강도와 압력 변동이 서로 동일 위상일 때 발생하므로, Rayleigh 이론과 잘 일치함을 확인하였다.

아세톤 LIF의 결과로부터, 공급되는 연료에 급격한 농도구배가 존재함을 확인하였다. 화염 불안정성이 존재하는 OH LIF 영상으로부터 공급된 미연 연료와 화염 불안정성이 상호 관련이 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 해외 Post-Doc 연수지원과 General Electric Aircraft Engines의 공동 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Sturgess, G. J., McKinney, R. G., and Morford, S. A., 1993, "Modification of Combustor Stoichiometry Distribution for Reduced NOx Emission From Aircraft Engines," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-trans. of ASME,* Vol. 115, pp. 570～580.

(2) Tacina, R. R., 1990, "Low Nox Potential of Gas Turbine Engines," *AIAA 28th Aerospace Science Meeting,* (AIAA-90-0550), pp. 8～11.

(3) Lefebvre, A. H., 1995, "The Role of Fuel Preparation in Low Emission Combustion," *ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress,* pp. 1～42.

(4) Snyder, T. S., Rosjford, T. J., Mcvey, J. B., and Chiappetta, L. M., 1994, "Comparisons of Liquid Fuel-Air Mixing and NOx Emissions for Tan gential Entry Nozzle," *ASME* paper No. 94-GT-283.

(5) Al-Shaikhly, A. F., Andrews, G. E., and Aniagolu, C. O., 1992, "Jet Shear Layer Turbulent Diffusion Flames for Ultralow NOx Emissions," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,* Vol 114, pp. 55～62.

(6) Shih, W. P., Lee, J. and Santavicca, D. A., 1996, "Stability and Emissions Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Twenty-Sixth International Symposium on Combustion.*

(7) Lyons, V. J., 1991, "Fuel/Air Nonuniformity-Effect on Nitric Oxide Emissions," *AIAA J,* Vol. 20, pp. 660～665.

(8) Yu, K. H., Trouve, A., and Daily, J. W., 1991, "Low Frequency Pressure Oscillations in a Model Ramjet Combustor," *Journal of Fluid Mechanics,* Vol 232, pp 47～72.

(9) Heitor, M. V., Taylor, A. M. K. P., and Whitelaw, J. H., 1984, "Influence of Confinement on Combustion Instabilities of Premixed Flames Stabilized on Axisymmetric Baffles," *Combustion and Flames,* Vol. 57, pp. 109～121.

(10) Sivasegaram, S., and Whitelaw, J., 1987, "Oscillations in Axisymmetric Dump Combustors," *Combustion Science and Technology,* Vol. 52, pp. 413～426.

(11) Rayleigh, J., 1945, *The Theory of Sound,* Vol. II, Dover, New York, p. 226.

(12) 이병준, 길용석, 한재원, 정석호, 1996, "레이저유도 형광법을 이용한 화염내 OH 농도분포 계측," 대한기계학회논문집(B), 제20권, 제2호, pp. 710～719.