

모형 가스터빈 연소기내 연소불안정성에 대한 실험적 연구

이연주* · 이종호* · 전충환** · 장영준**

An Experimental Study on Combustion Instability Mechanism in a Dump Gas Turbine Combustor

Youn-Joo Lee, Jong-Ho Lee, Chung-Hwan Jeon, and Young-June Chang

Key Words: LPP(Lean Premix Prevaporize), Combustion instability (연소불안정성), Sound level (음의 크기, 음압), Heat release (열방출), OH chemiluminescence (OH 자발광)

Abstract

The knowledge of flame structure is essential for control of combustion instability phenomena. Some results of an experimental study on mechanism of naturally occurring combustion oscillations with a single dominant frequency are presented. Tests were conducted in a laboratory-scale dump combustor at atmospheric pressure. Sound level meter was used to track the pressure wave inside the combustor. The observed instability was a longitudinal mode with a frequency of ~ 341.8 Hz. Instability map was obtained at the condition of inlet temperature of 360°C , mean velocities of $8.5 \sim 10.8$ m/s and well premixed mixture. It showed that combustion instability was susceptible to occur in the lean conditions. In this study, unstable flame was observed from stoichiometric to 0.7 in overall equivalence ratio. At selected unstable conditions, phase-resolved OH chemiluminescence images were captured to investigate flame structure with various mean velocities. As mean velocity is increased, the flame grows and global heat release was changed. Due to these effects, combustion instability can be maintained at more lean air-fuel ratio. Also, these results give an insight to the controlling mechanism for an increasing heat release at maximum pressure.

1. 서론

항공산업의 발달 및 산업현장에서의 고출력 요구로 가스터빈의 사용이 증가하고 있으나 환경규제 강화로 인해 최근 연구들은 배기 배출물 감소 기술에 집중되고 있다.

현재 개발된 항공기용 가스터빈엔진의 경우 이착륙시 그리고 운항중 발생하는 CO와 미연탄화수소(UHC)의 양은 상당히 감소 시켰으나 NO_x 발생량은 아직 상당한 수준이다. 이러한 NO_x 수준

을 저감하기 위해 주연소 영역(primary zone)에서 연료의 분포를 변화시키거나 촉매를 사용하여 화염의 화학적 성질을 변화시켜 연소온도를 저감하는 방법들이 사용되고 있다. 주연소 영역의 연료 분포를 변화시키는 방법으로는 LPP(lean premix prevaporize), RQL(rich burn - quick quench - lean burn), LDI (lean direct injection) 연소가 대표적이다. 특히 LPP 기술은 NO_x 수준을 급격히 저감할 수 있는 제어방법으로 주목을 받고 있다⁽¹⁾.

LPP 연소의 개념은 균일한 희박 연료-공기 혼합기를 주연소 영역에 공급하여 낮은 온도로 연소를 시켜 NO_x 배출물을 줄이는 것이다. 그러나 이러한 연소방법으로 NO_x는 저감되지만 압력진동을 동반하는 심각한 불안정 연소가 자주 발생한다. 연소기 자체가 공진기 역할을 하여 음압과 열방출 사이의 상호작용으로 연소불안정이 야기

* 부산대학교 기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

된다. 즉, 압력파(pressure wave)와 주기성을 띄는 열방출(heat release)과의 결합으로 발생하게 되는 것이다⁽²⁾. 큰 압력변동으로 나타나는 연소불안정성은 연소기에 손상을 가할 뿐만 아니라 상당한 소음을 발생시킨다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로는 수동적 제어와 능동적 제어가 있다. 먼저 수동적 제어는 연소기 형상을 바꾸거나 방음재를 추가하는 것이다^{(3), (4)}. 그러나 이러한 방법은 작동조건에 한계가 있으며 연소기의 변형등 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 이에 반해 능동적 제어는 많은 연구자들에 의해 수행되어지고 있다^{(2), (5)-(8)}. 능동제어에 대한 연구의 대부분은 유동에 교란을 주어 압력변동과 열방출의 위상이 어긋나도록 열원(heat source) 또는 음파(acoustic wave)를 첨가하는 방법이 사용되고 있다. 그 중에서도 2차연료를 분사하여 연소 불안정성을 제어하려는 연구가 많이 시도되고 있다.

본 연구의 목적은 우선 능동제어에 앞서 제어 대상인 연소기의 특성 및 연소불안정 영역을 파악하고 이를 근거로 불안정 연소시 발생하는 단일 주파수에 ICCD 카메라를 동기시켜 위상별로 화상을 취득하여 불안정 연소 발생기구에 대해 규명하는 것이다. 최종적으로 촬영된 화상으로부터 불안정화염구조의 특성을 파악하여 능동제어시

효율적인 2차연료의 분사시기와 위치를 결정하는 것이다.

2. 실험장치

2.1 연소기

Fig. 1은 본 연구에 사용된 동축 덤프 연소기의 개략도이며, 실험은 대기압 하에서 수행하였다. 본 연구에 사용된 연소기는 직경 12 mm, 길이 500 mm의 혼합부와 직경 42 mm, 길이 410 mm의 연소부로 구성되어 있다. 연소부는 광학측정이 가능하도록 석영관을 사용하였으며 혼합부와 연소부는 황동으로 된 어댑터로 연결되어 있다. 석영관과 어댑터 사이에 열팽창을 고려한 0.5 mm의 공간이 있으며 이 공간은 세라믹 테이프로 밀봉하여 연소기의 길이를 가변 시킬 수 있도록 하였다.

어댑터 스텝상에서의 화염 안정화를 도와주는 십자(+) 형태의 보염기를 어댑터 상단 5 mm 지점에 설치하였다. 본 실험의 주운전 영역에서 어댑터 스텝에 의한 재순환영역이 화염안정화에 충분히 도움을 주지만, 화염위치의 변동이 없도록 하기 위해 보염기를 사용하였다.

연료는 메탄(CH_4)을 사용하였고, 부분에혼합의 영향을 알아 볼 수 있도록 두 곳에서 공급하였다. 하나는 히터를 통과하여 혼합부를 통해 공급되며 다른 하나는 직경 3 mm의 관을 통해 황동 어댑터로부터 혼합부 직경의 6배 되는 위치에 동축방향으로 공급이 된다. 연료는 fuel split percentage(σ)가 100, 50, 0%의 3조건으로 공급이 가능하며 혼합부를 통해 연료가 모두 공급되는 예혼합의 경우를 $\sigma = 100\%$, 혼합부와 3 mm관에 반씩 연료를 주입한 경우를 $\sigma = 50\%$, 3 mm관에 모두 주입한 경우를 $\sigma = 0\%$ 로 정의하였다.

실제 가스터빈의 흡입공기 온도($180 \sim 630^\circ C$)와 유사한 조건에서 실험을 행하기 위해 발열용량 2kW인 히터를 사용하였다. 외부로의 열손실을 최소화하기 위해 혼합부 외벽에 단열재를 사용하였으며 히터의 온도조절기를 $950^\circ C$ 로 하였을 때 혼합부 끝에서 혼합기 온도가 최고 $550^\circ C$ 까지 예열이 가능하였다. 실험은 히터가 안정적으로 작동하는 $600^\circ C$ 로 조절하여 혼합부 끝에서 혼합기 온도를 $360^\circ C$ 로 일정하게 유지하여 수행하였다.

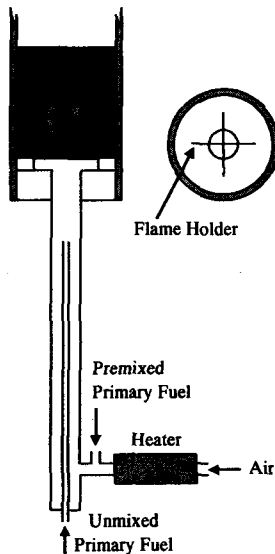


Fig. 1 Schematic of the combustor.

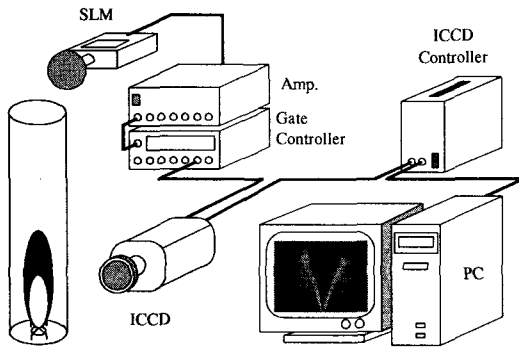


Fig. 2 Schematic of experimental setup

2.2 측정장치

연소기내에서 연소불안정이 발생할 경우 화염은 일정한 주파수를 가지고 움직이게 된다. Fig. 2는 이러한 주기에 따른 위상에 맞추어 화상을 획득하기 위한 실험장치의 개략도이다. 연소기에서 발생하는 음원을 실시간 측정하기 위해 실용소음계(SLM, Sound level meter)를 사용하였다. 이 장치는 음원에서 발생하는 음압을 측정하여 수치를 dB 단위로 보여 줄 뿐만 아니라 전압으로 출력력이 가능하다. 음압 측정에 일관성을 가지기 위해 연소기 끝부분에서 축상으로 5 cm, 반경방향으로 7 cm 떨어진 곳에 SLM을 고정하여 모든 실험을 수행하였다. SLM에서 나온 신호를 일정크기로 증폭시켜 게이트 조절기의 트리거 신호로 입력하여 ICCD 카메라와 동기시켰으며 ICCD 카메라에서 위상별로 측정된 화상은 PC를 통해 보여지게 된다.

2.3 실험방법

탄화수소 화염내에서 CH, CO₂, OH 자발광은 국소 열방출과 전체 열방출을 나타내는 지표로 사용되어 왔다⁽⁹⁾. 본 연구에서는 열방출의 지표로 비교적 강도가 강하고 측정이 용이한 OH 자발광을 불안정 연소조건에서 압력변동의 위상에 따라

Table 1 Test range of parameters

Parameter	Test range
Fuel split	$\sigma = 100\%$
Inlet temperature	$T = 360^\circ\text{C}$
Equivalence ratio	$\phi = 0.82$
Mean velocity	$V = 8.5, 9.3, 10, 10.8 \text{ m/s}$
Phase angle	$0 \sim 360 \text{ deg.}$

측정하였다. ICCD 카메라에 UG-11, WG-305 필터를 장착하여 OH 자발광을 측정하였으며, 각 위상에서 50개의 화상을 평균하여 촬영하였다.

실험은 유속을 변화시켜 가며 연소불안정 영역을 측정하였으며, 측정결과 불안정 연소가 활발히 일어나는 특정한 조건에 대해 한 주기 동안의 OH 자발광 화상을 촬영하였다. 실험조건은 Table 1과 같다.

3. 실험결과

Katsuki, Whitelaw⁽¹⁰⁾와 Heitor⁽¹¹⁾는 각각의 연구에서 운전조건의 작은 변화에 압력변동이 크게 증가하는 것을 연소불안정성의 시작으로 정의하였다. LPP 조건에서 연소불안정성이 얼마나 나타나는가를 알아보기 위해 불안정 영역(instability map)을 당량비에 대한 음압으로 나타내었다. 각

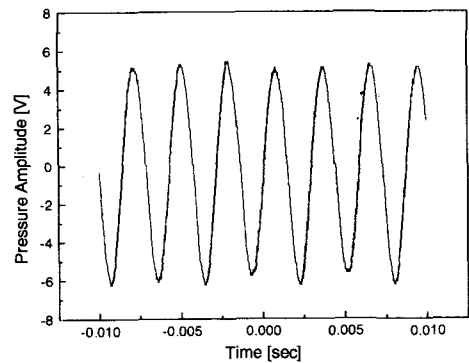


Fig. 3 Pressure vs. time signal for an unstable flame.

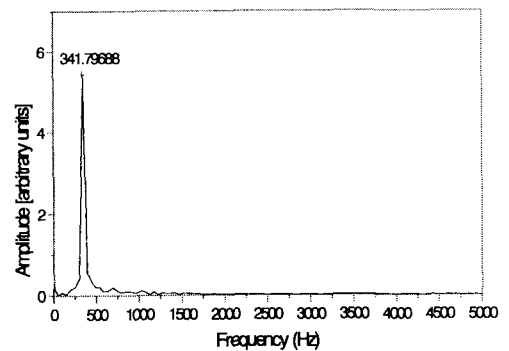


Fig. 4 Frequency spectrum of an unstable flame in the combustor.

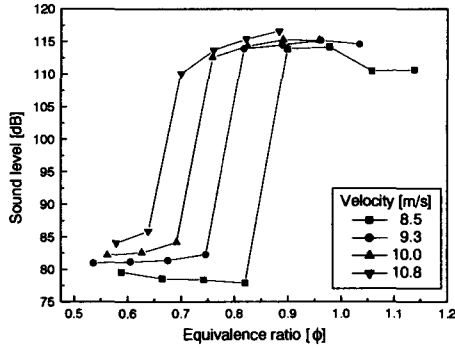


Fig. 5 Instability map for $\sigma = 100\%$, $T = 360^\circ\text{C}$ 운전조건에서 당량비는 과농에서 희박가연한계까지 변화시켜 음압을 측정하고 불안정연소 조건에서 음압의 위상에 따라 화염의 구조를 측정하였다.

3.1 연소기의 특성

Fig. 3은 410 mm 석영관 연소기에서 연소불안정성이 발생한 경우의 시간에 대한 음압의 변동을 나타낸 것이다. 주기성을 가지는 음압을 FFT 변환을 하면 Fig. 4와 같이 341.8 Hz의 단일 주파수만을 가지는 전형적인 종파모드 불안정 연소특징을 나타낸다. 연소기의 길이 대 직경의 비가 3 배 이상인 경우 압력파는 연소기 내부에서 1/4파

(quarter wave)의 주파수를 가지며 그 값은 다음과 같다.

$$\text{Quarter wave(Hz)} = \frac{\text{Sound speed(m/s)}}{\text{Tube length(m)} \times 4}$$

연소기의 길이가 410mm이고, 연소기내의 온도가 1100 K이라고 가정을 했을 경우 음속은 616 m/s이므로 위의 식을 적용하면 1/4파의 주파수는 375.6 Hz가 된다. 연소기내의 온도를 가정하여 계산한 값임에도 비교적 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 5는 100 % 예혼합, 공기온도 360 °C인 경우 유속변화에 따른 불안정 연소영역을 나타낸 것이다. 연소기의 주운전영역인 당량비 0.7~1.0 부분에서 연소불안정성이 나타남을 알 수 있다. 유속이 증가할수록 공급되는 연료가 많아지고 그 결과 열방출량이 커져 좀더 희박한 조건까지 연소 불안정성이 지속되는 것으로 사료된다.

3.2 불안정 연소의 화염구조

불안정 연소가 발생할 경우 화염은 341.8Hz, 즉 약 2.9ms의 주기를 가지고 진동을 한다. 한주기 사이에 22.5° 간격으로 각 위상당 50개의 화상을 평균하여 17장의 화상을 취득하였다. Fig. 6은 연소불안정 영역에서 전반적으로 불안정 연소가 발

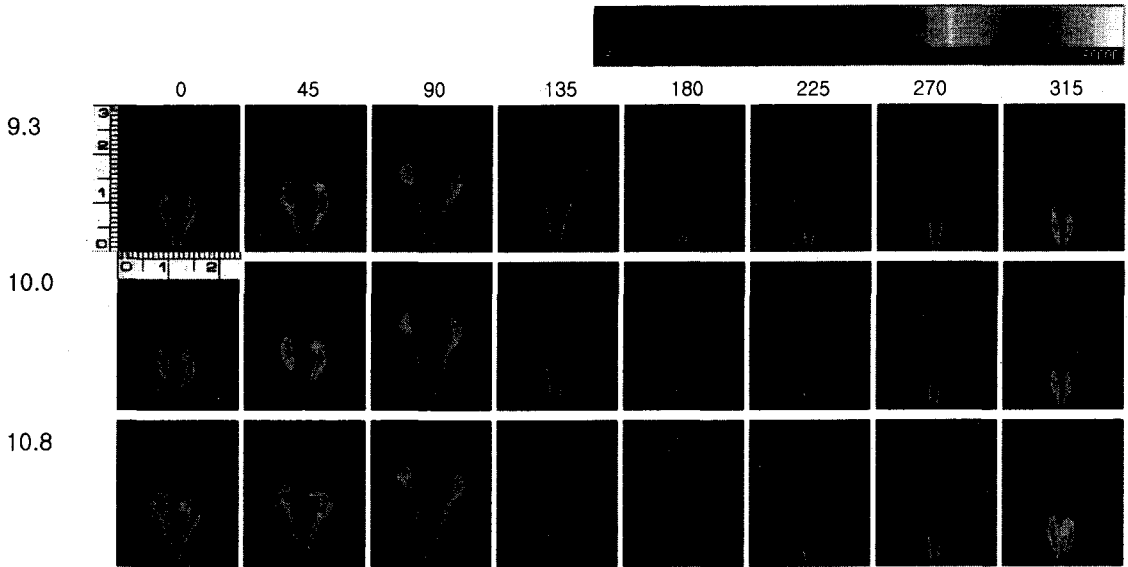


Fig. 6 Image evolution of phase-averaged OH chemiluminescence for unstable flame over one period. (Operating condition : $\sigma = 100\%$, $\phi = 0.82$, $V = 9.3, 10, 10.8$ m/s, $T = 360^\circ\text{C}$)

생하기 쉬운 당량비 0.82, 예혼합($\sigma = 100\%$), 공기 온도 360 °C, 유속 9.3, 10, 10.8 m/s인 경우 45° 간격으로 촬영한 OH 자발광 화상이다. 유속이 증가할수록 화염이 커지고, 공급되는 연료의 양이 증가하므로 OH 강도도 높아짐을 알 수 있다. 이렇게 증가한 OH 강도로 인해 열방출량이 증가하여 연소불안정 영역이 희박영역까지 증대되는 것으로 사료된다.

열방출은 화염이 성장하는 270° ~ 90°에서 활발하고 화염이 소멸되는 90° ~ 270°에서는 작아짐을 알 수 있다. 이로부터 능동제어시 2차연료는 열방출이 활발한 270° ~ 0° 사이의 약 1.45ms 사이에 분사되는 것이 연소 불안정성을 효율적으로

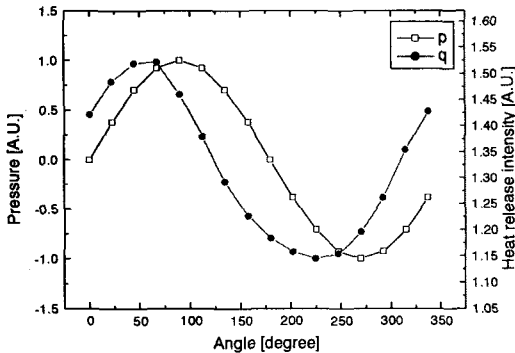


Fig. 7 Variation of pressure and heat release with phase.

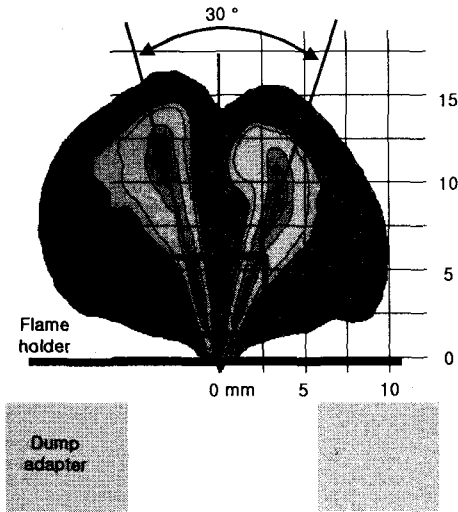


Fig. 8 Region of maximum OH intensity

로 제어할 것이라 사료된다.

측정된 OH 화상에서 OH 강도는 열방출량과 비례하므로 각 화상의 강도의 합으로 전체 열방출량을 계산하였다. Fig. 7은 이렇게 계산되어진 열방출량과 SLM에서 측정된 압력파와의 위상관계를 나타낸 것이다. 음압과 열방출 사이에 약 37°의 위상차이가 나타났으나 두파의 위상이 상당히 잘 일치함을 확인할 수 있다. 이와 같은 압력과 열방출의 결합으로 불안전 연소가 발생하는 것을 확인하였다.

Fig. 8에서와 같이 OH 자발광 화상은 약 30°의 각을 가지는 좌우대칭의 기둥모양이다. 전 위상에 대해 OH 자발광의 강도가 최고가 되는 위치는 보염기의 중심에서 좌우 -2.5~2.5 mm, 상하 2~6 mm 사이의 기둥상에 존재하였다. 속도가 변하더라도 두기둥 사이의 각은 거의 일정하였으며, 약간의 차이가 나더라도 강도가 가장 강한 지점이 기둥의 하단부에 있어 변위가 작아 처음 설정한 영역 내에 포함되었다. 그러므로 압력변동과 열방출의 위상이 어긋나도록 2차연료를 분사할 위치는 열방출이 가장 활발한 이 영역에 하는 것이 효과적일 것이라 사료된다.

4. 결론

본 연구에 사용한 연소기는 LPP 조건에서 불안정 연소시 341.8 Hz의 단일 주파수를 가지며, 공기온도 360 °C, $\sigma = 100\%$, $V = 8.5, 9.3, 10, 10.5$ m/s인 조건에서 불안정 연소영역을 조사한 결과 당량비 0.7~1.0의 주연소영역에서 연소불안정성이 발생하는 것을 확인하였다. 불안정 연소시 발생하는 압력변동에 ICCD 카메라를 동기 시켜 위상에 따라 화염의 OH 자발광을 촬영하여 화염의 진동현상을 밝혔다.

OH 자발광 화상에서 계산된 열방출과 SLM에서 측정된 음압의 위상이 잘 일치하여 연소불안정성이 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 불안정 연소를 유발시키는 음압과 열방출의 위상이 어긋나도록 하는 능동제어시 2차연료의 분사시키는 열방출이 활발한 270° ~ 90° 사이에, 분사 위치는 보염기의 중심에서 좌우 -2.5~2.5 mm, 상하 2~6 mm인 열방출이 가장 강한 지점에 분사하는 것이 효과적이라 사료된다.

참고문헌

- (1) Arthur H. Lefebvre, 1999, Gas turbine combustion - 2nd ed., Taylor & Francis.
- (2) C. M. Jones, J. G. Lee, and D. A. Santavicca, July-August 1999, "Closed-loop Active Control of Combustion Instabilities Using Subharmonic Secondary Fuel Injection," J. of Propulsion and Power, Vol. 15, No. 4,
- (3) Schadow, K. C., and Gutmark, E., July 10-12, 1989, "Review of Passive Shear-Flow Control Research for Improved Subhamonic and Supersonic Combustion," AIAA paper 89-2786, 25th Joint Propulsion Conference, Monterey, CA.
- (4) Zinn, B. T., and Neumeier, Y., Jan. 6-10, 1997, "An Overview of Active Control of Combustion Instabilities," AIAA paper 97-0461, 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV.
- (5) K, Kim, J. G. Lee, and D. A. Santavicca, November 18-19, 1999, "Active Control of Combustion Instability in a Model Gas Turbine Combustor," 11th Annual Symposium, The Pennsylvania State University.
- (6) K. K. Venkataraman, J. G. Lee, and D. A. Santavicca, November 18-19, 1999, "On the Testing of a Model for Heat Release Fluctuation During Unstable Combustion," 11th Annual Symposium, The Pennsylvania State University.
- (7) K. R. McManus, T. Poinsot and S. M. Candel, 1993, "A Review of Active Control of Combustion Instabilities," Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 19.
- (8) 천충환, D. A. Santavicca, 1998, "가스터빈 연소기내 2차연료분사에 의한 불안정성의 제어," 한국연소학회지 Vol. 3, No. 1.
- (9) Bandaru R. V., Miller S., Lee J., and Santavicca D. A., 1998, "Sensors for Measuring Primary Zone Equivalence Ratio in Gas Turbine Combustors," Proceedings of SPIE, International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, Vol. 3535, pp. 104-114
- (10) Katsuki M. and Whitelaw J. H., 1986, "The Influence of Duct Geometry on Unsteady Premixed Flames," Combustion and Flame, Vol. 63.
- (11) Heitor M. V., Taylor A. M. K. P. and Whitlaw J. H., 1984, "Influence of Confinement on Instability of Premixed Flames with Axisymmetric Baffles," Combustion and Flame, Vol. 57.