J. Korean Soc. Combust. 28(1) (2023) 9-16

〈학술논문〉 DOI: https://doi.org/10.15231/jksc.2023.28.1.009 ISSN 1226-0959
eISSN 2466-2089

가스터빈 연소기에서 스월 수와 연소실 길이에 따른 연소불안정 특성

한선우* · 이신우* · 황동현* · 안규복*†
*충북대학교 기계공학부

Combustion Instability Characteristics according to Swirl Number and Combustion Chamber Length in a Gas Turbine Combustor

Sunwoo Han*, Shinwoo Lee*, Donghyun Hwang* and Kyubok Ahn*†
*School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

(Received 8 November 2022, Received in revised form 17 December 2022, Accepted 28 December 2022)

ABSTRACT

Combustion instability characteristics were investigated through combustion tests using ethylene and air in a model gas turbine combustor. At various flow conditions, the swirl number and combustion chamber length were changed independently. Dynamic pressure transducer and photomultiplier tube with a bandpass filter were used to measure pressure oscillations and heat release fluctuations. Analysis of phase difference and flame structure showed that the unstable mode had resonant frequencies of the combustion chamber and the inlet mixing section. When the swirl number increased, it was confirmed that the instability mode corresponding to the resonance frequency of the inlet mixing section disappeared. In addition, resonance mode analysis was performed using the OSCILOS code and compared with the experimental results.

Key Words : Gas turbine, Combustion instability, Turbulent lean premixed flame, Swirl number

기 호 설 명

Lc	: Combustor chamber length	PMT	: Photomultiplier tube
MFC	: Mass flow controller	q'	: Heat release fluctuation
n	: Harmonic mode	Re	: Reynolds number
p'	: Pressure oscillation	RMS	: Root mean square
PSD	: Power spectrum density	SN	: Swirl number
ϕ	: Equivalence ratio		

1. 서 론

전기 자동차와 같은 운송수단의 동력원 변화와 급속한 도시화의 영향으로 가속화되고 있는 전력 사용량의 증가로 전력 생산 시 발생하는 공해 가스 배출 또한 증가하고 있다. 이에 많은 국가와 세계기구에서 배출가스를 규제하기 위해 엄격한 정책을 시행하고 있고 이를 극복하기 위한 여러 기술적 시도들이 이루어지고 있다. 연소방식의 전력 생산에 적용되는 가스터빈은 높은 화염 온도에 의한 불완전 연소로 인해 thermal NOx 및 탄화수소 등의 공해 가스를 배출한다. 이 때문에 연료와 산화제의 예혼합 기체를 연소실에서 점화시켜 낮은 화염 온도에서 가스터빈을 운용하는 기술이 많이 연구되고 있다[1-3]. 하지만 이러한 희박 예혼합 가스터빈은 희박 가연 한계에서 운용되기 때문에 화염 공급 시 발생하는 작은 유동 섭동에도 영향을 받을 수 있다. 이는 화염의 열방출 섭동을 일으키고 연소기 내부의 압력진동과 반응하여 연소불안정이 발생한다. 연소불안정이 지속될 경우 과도한 진동과 벽면으로의 열응력 축적 등으로 인해 연소기의 성능을 저해시키고 수명을

†Corresponding Author, kbahn@cbnu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licences/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

감소시킬 수 있다[4-5].

운용조건 외에도 가스터빈에서 사용되는 연료의 변화를 통해 공해 가스 배출을 감소시킬 수 있다. 가장 널리 사용되는 탄화수소 연료인 메탄을 수소와 혼합하여 사용하거나 완전히 수소로 전환하여 생성되는 탄소생성물을 감소시키려는 노력이 이루어지고 있다[6]. 다른 대체 연료인 암모니아는 수소와 마찬가지로 연소 시 생성되는 이산화탄소가 없으므로 탄소 중립 발전 연료로 주목받고 있다. 또한 수소와 달리 농업에서 필수적인 요소로 이미 생산과 유통 인프라가 많이 구축되어 있어 쉽게 이용할 수 있다[7]. 하지만 기존 연료와는 다른 연소특성을 가지는 연료를 사용할 시 연소 시스템에 큰 변화가 필요하다. 특히 메탄과는 완전히 다른 연소특성을 가진 수소를 기존과 같은 운전조건에서 운용할 경우 연소불안정이 발생할 수 있다[8]. 이러한 이유로 새로운 연료를 적용하기 위해선 다양한 연료에 따른 연소불안정 특성 변화를 먼저 파악하여야 한다.

가스터빈에서의 연소불안정은 연소기에 따라 진동의 크기와 주파수가 다양하게 나타나기 때문에 정량적인 수치로 연소불안정을 정의하기는 불가능하다. 이에 학계에서는 열방출 섭동과 압력진동의 거동을 관찰하고 수학적으로 표현한 레일리 기준을 통해 연소불안정을 정의하였다[9-10]. 레일리 기준이 연소불안정의 필수 정보를 제공할 수 있지만 충분조건이 되지는 못한다. Kim 등[11]은 초기 레일리 기준이 음향에너지 및 엔트로피 손실과 화염 거동에 따른 열방출 섭동은 포함하지 않기 때문에 연소불안정을 정의하기에 충분하지 못하다고 판단하였다. Hwang 등[12]은 레일리 기준을 만족하지만, 안정적인 연소를 보이는 조건들을 관찰하였다. 그들은 이를 통해 레일리 기준이 연소불안정의 필요조건을 만족하지만 필요충분조건이 되지는 못한다고 주장하였다.

연소불안정은 압력진동이 연소기의 고유주파수와 일치하게 되면서 진폭이 증가하게 되고 열방출 섭동과 정 위상 상호작용 상태가 되면서 발생하게 된다. 이 때문에 전체 연소 시스템이 형성하는 음향모드를 파악하는 것은 연소불안정 연구를 수행하는데 필수적이다. Fritsche 등[13]은 유한요소 해석을 통해 전체 연소 시스템의 음향 고유모드를 구하였다. 그들은 음향에너지의 분포를 확인하는 것으로 불안정 주파수의 진폭을 억제하거나 제한할 수 있다고 주장하였다. Kim 등[14]은 OCSILOS 코드를 사용하여 종방향 연소불안정 주파수를 예측하였다. 또한 그들은 해석상에 화염전달함수(flame transfer function)를 적용하는 것으로 주파수 천이 현상과 같은 연소불안정의 특성을 예측할 수 있다고 판단하였다.

가스터빈 연소기에서 널리 이용되고 있는 스월 유동은 화염을 안정시키는 효과적인 방법이다[15]. 스월에 의해 만들어지는 재순환 영역은 저 유동속도 구간을 형성할 수 있으며 재순환 영역의 구조에 따라 화염의 형상이 달라질 수 있다[16]. Durox 등[17]은 가동 블레이드가 장착된 스월러를 사용해 다양한 스월 수에서의 스월 화염을 관찰하였다. 그들은 스월 수에 따라 화염이 서로 다른 두 가지 주파수의 불안정 주파수를 가지는 것을 관측하였다. Lee 등[18]은 다수 노즐 및 단일 노즐에서 화염을 안정화하는데 스월러 베인 각도 선정이 중요함을 강조하였다.

본 연구에서는 모델 가스터빈에서 형성되는 연소불안정의 특성을 파악하기 위해 연소실 길이를 변경하며 에틸렌과 공기를 이용해 연소실험을 수행하였다. 각각의 연소실 길이마다 당량비, 입구 속도 그리고 스월러를 변경하면서 압력진동, 열방출 섭동, 화염 형상 등의 동적 특성을 관측하였다. 이를 통해 두 가지 공진주파수의 불안정 모드를 확인하였고, 스월 수의 변화가 연소불안정에 미치는 영향과 혼합기 영역의 음향장이 화염 형상에 미치는 영향을 관측하였다.

2. 실험 장치

Fig. 1에 본 연구에 사용된 모델 가스터빈 장치를 나타내었다. 모델 가스터빈은 혼합기 영역과 연소실 영역으로 구성된다. 혼합기 영역은 choked plate로부터 덤프 평면까지로 지름 37.1 mm의 원형 단면이며 길이는 350 mm이다. 혼합기 바닥으로부터 35 mm 떨어진 지점에서 산화제와 연료가 공급된다. 산화제와 연료의 질량 유량은 MFC(MKP, VIC-D240/CAF-150)를 통해 제어된다. Choked plate는 혼합기 바닥으로부터 110 mm 지점에 설치되어 공급된 연료와 산화제의 예혼합 조건을 만족시킨다. 덤프 평면으로부터 상류 방향으로 66 mm 지점에 축방향 스월러가 설치되었다. 스월러의 베인 각도는 30°, 45° 60°이며, 각 스월러의 스월 수는 0.43, 0.75, 1.30으로 계산된다[19]. 유동 조건을 요약하여 Table 1에 나타내었다.

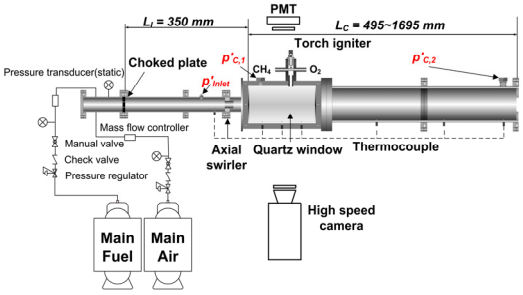


Fig. 1. Schematic of model gas turbine combustor.

연소실 영역은 두 개의 영역으로 구분된다. 첫 번째 영역은 스테인리스강 몸체 양쪽에 2개의 석영창을 부착하여 광학 관측을 가능하게 하였다. 95 mm × 95 mm의 정사각형 내부 단면을 가지며 길이는 215 mm이다. 이어지는 영역은 마찬가리로 스테인리스강으로 제작하였으며 지름 95.6 mm 원형의 단면 플렌지 파이프로 연소실 길이를 495 mm에서 1695 mm까지 100 mm 간격으로 증가시킬 수 있다. 출구에 설치된 노즐은 85% blockage ratio를 가지고 있어 막힌 음향 경계가 형성된다.

덤프 평면에서 상류방향으로 130 mm, 하류 방향으로 60 mm 지점 그리고 연소실 끝단 노즐로부터 상류방향으로 60 mm 지점에 3개의 동압 센서를 설치하여 연소 시 발생하는 압력진동을 측정하였다. 화염 면에서 발생한 CH* 자발광 섭동은 431.5±5 nm band pass filter가 장착된 photomultiplier tube를 통해 측정하였다. 연소실과 혼합기 영역의 벽면 온도를 여러 개의 K-type thermocouple을 통해 측정하였다. 모든 데이터는 NI-cDAQ에서 10 kHz의 샘플 속도에서 동시에 1초 동안 기록되었다. 순간적인 화염 이미지는 high-speed camera(Vision Research, Phantom v9.1)를 통해 4 kHz의 샘플 속도와 200 μs의 노출 시간에서 측정하였다.

Table 1. Experimental conditions

Fuel	C_2H_4		
Oxidizer	Air		
$\bar{u}$ [m/s]	10	15	20
Re	24000	36000	48000
ϕ	0.60 ~ 0.80, Δ0.05		
Lc [mm]	495 ~ 1695		
P_{Inlet} [Mpa]	1.01		
T_{Inlet} [K]	298		
Blockage ratio [%]	85		

3. 실험 결과

3.1 연소불안정 정의

측정된 자발광 데이터와 동압데이터는 100 Hz 와 3000 Hz의 통과대역에 의해 필터처리 되었다. 본 실험에서는 연소실 압력진동의 RMS가 2 mbar 이상인 조건들에서 다음과 같은 연소불안정 특성을 보였다. Fig. 2(a)는 SN = 1.30, $\bar{u}$ = 10 m/s, L_C = 1595 mm, ϕ = 0.60, 0.80에서 압력진동의 PSD를 나타낸 것이다. 안정적인 연소가 이루어진 ϕ = 0.60 조건과 달리 연소불안정이 발생한 ϕ = 0.80에서 특정 주파수에 가파르고 강력한 피크를 확인할 수 있다. Fig. 2(b)는 동일한 조건에서 관측한 압력진동과 열방출 섭동의 시간 그래프를 보여준다. 연소불안정이 발생하지 않은 ϕ = 0.60에서의 열방출 섭동은 노이즈 수준의 진폭을 보여준다. 하지만 연소불안정이 ϕ = 0.80에서의 자발광 섭동은 훨씬 큰 진폭을 보여주며 압력진동과 동일한 주파수로 진동하며 위상차 43°로 정위상 상호작용을 하고 있음을 알 수 있다[20].

3.2 OSCILOS 코드를 이용한 공진주파수 분석

Fig. 3 (a)는 L_C = 895 mm, $\bar{u}$ = 10, ϕ = 0.60 조건에서 OSCILOS 코드를 이용해 예측한 음향 모드이다. 해석을 위해 유입구, 화염, 배출구의 경계조건과 위치를 설정하였고, OSCILOS 코드에 내재된 열물성치를 적용하였다. 본 실험에서 달라지는 연소실 길이는 형상 모델링에서의 노즐 위치 변화를 통해 나타냈다. 결과에서 closed-open 타입의 혼합기 공진주파수의 음향 모드와 closed-closed

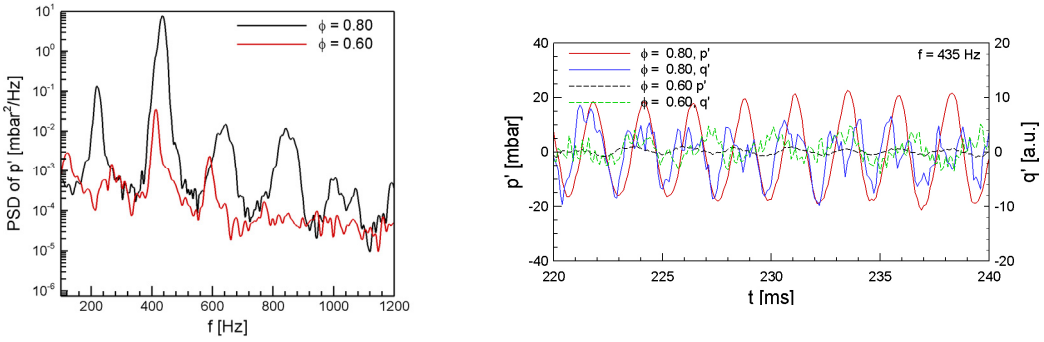
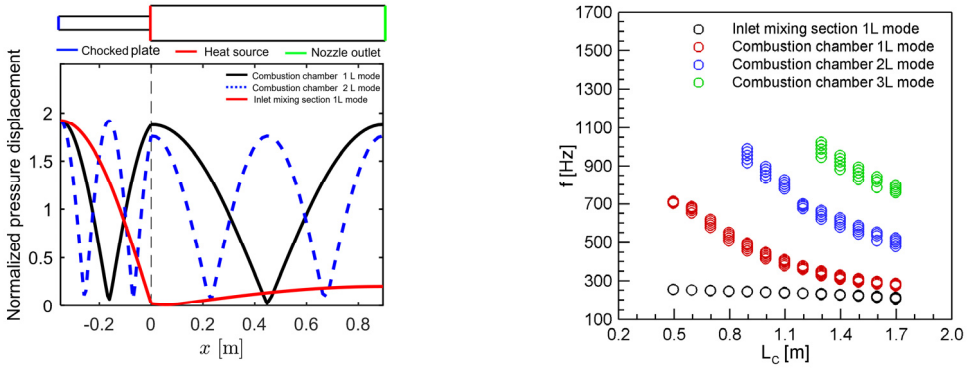


Fig. 2. (a) Power spectral densities of the filtered pressure fluctuation and (b) time histories of the filtered dynamic pressure and heat release data at SN = 1.30, L_C = 1595 mm, $\bar{u}$ = 10 m/s, ϕ = 0.60 and ϕ = 0.80.



(a) (b)

Fig. 3. (a) Shape of longitudinal mode at L_C = 895 mm, $\bar{u}$ = 10, ϕ = 0.60 and (b) Predicted longitudinal mode dominant frequency for all combustion chamber length.

타입의 연소실 공진주파수의 음향모드가 모두 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 음향 모드를 모든 연소실 길이와 당량비, 그리고 $\bar{u}$ = 10 m/s에서 조사하여 지배주파수와 입구 길이의 함수로 Fig. 3 (b)에 나타내었다. 직접적인 연소 반응이 일어나지 않는 혼합기에서 형성되는 음향모드의 지배주파수는 연소실 길이와 당량비에 반응하지 않고 일정한 것을 알 수 있다. 하지만 연소실에서 발생하는 음향모드의 지배주파수는 연소실 길이와 당량비에 따라 달라진다.

3.3 두 가지 공진주파수의 불안정 모드

연소실의 노즐과 덤프 평면이 막힌 음향 경계라고 가정하면 연소실의 양 끝에 열음향파의 배가 형성된다[21]. 이에 불안정 모드가 연소실 공진주파수의 짝수 조화 모드(n = 2, 4, 6,⋯)를 가질 경우 연소실의 양 끝단에 설치된 두 개의 동압 센서는 위상차($\theta_{p'_{C1}-p'_{C2}}$)가 180°로 나타나고, 홀수 조화 모드(n = 1, 3, 5,⋯)에 해당할 경우 0°로 나타난다. Fig. 4는 연소불안정 조건을 연소실에 설치된 두 개의 동압 센서의 위상차와 연소실 길이의 함수로 나타낸 것이다. 스월 수 1.30에서 대부분의 연소불안정 조건은 동압 센서 간의 위상차가 0° 혹은 180°로 나타나는 것으로 연소실 공진주파수의 불안정 모드를 가지는 것을 알 수 있다. 하지만 스월 수 0.43과 0.75의 경우 연소실 동압 센서간의 위상차가 0° 혹은 180°으로 나타나지 않는 조건이 다수 발견된다. 해당 조건들은 연소실 길이에 따라 선형적으로 위상차가 달라지는 것을 알 수 있다. 이러한 조건들은 지배주파수를 분석하였을 때 연소실 온도와 길이에 상관없이 일정한 주파수를 유지하는 것으로 나타났으며, 혼합기 영역의 음향 경계를 closed-open으로 가정하였을 때 혼합기 영역

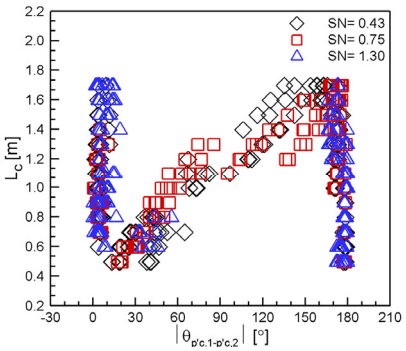


Fig. 4. Phase difference between two dynamic pressure transducers in combustor chamber.

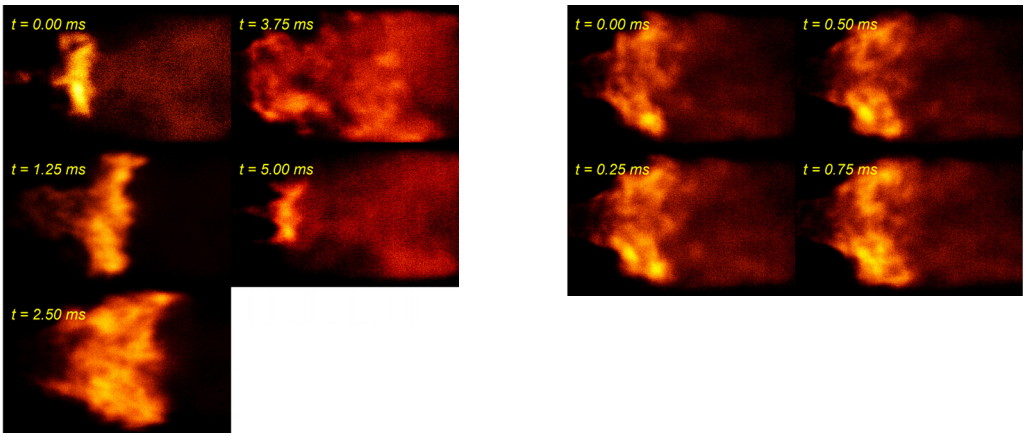
공진주파수와 일치하였다. 이를 통해 본 연구에서 발생한 연소불안정이 두 가지 공진주파수를 가진 것을 알 수 있다. 또한 스월 수에 따라 커플되는 공진주파수 영역이 달라짐을 알 수 있다.

Fig. 5는 두 가지 공진주파수의 화염이 high-speed camera를 통해 촬영된 사진이다. Fig. 5 (a)의 화염은 혼합기 영역에 커플된 200 Hz의 화염이다. 4000 Hz의 샘플 속도에서 촬영되기 때문에 한주기에 20장의 사진을 얻을 수 있다. 20장의 사진 중 화염 두께의 변화와 열방출 패턴의 변화를 명확히 확인할 수 있는 5장의 사진을 나타내었다. 화염의 길이는 는 t = 0.00 ms에서 가장 짧게 나타나고 t = 2.50 ms에서 가장 길게 나타난다. 이러한 화염 길이는 t = 5.00 ms에서 다시 최대로 짧아지게 되고 같은 과정을 반복하면서 일정한 주기를 가지게 되는데 이는 불안정 주파수가 가지는 주기와 일치하였다. 이러한 주기성은 열방출 패턴의 변화에서도 동일하게 나타난다. Fig. 5 (b)는 연소실에 커플된 연소불안정의 화염으로 900 Hz로 진동하기 때문에 한

주기에 4장의 화염 사진을 얻을 수 있다. 혼합기 영역에 커플된 화염과 달리 열방출 패턴과 화염 길이의 변화가 큰 차이 없이 일정한 것을 알 수 있다.

3.4 다양한 변수에 따른 연소불안정 특성

Fig. 6는 본 연구에서 발생한 모든 연소불안정 조건을 연소실 길이와 지배주파수의 함수로 나타낸 것이다. 기호의



(a) (b)

Fig. 5. Instantaneous flame structure captured by high speed camera at (a) SN = 0.43, L_C = 1195 mm, $\bar{u}$ = 20 m/s, ϕ = 0.80 and (b) SN = 0.43, L_C = 1195 mm, $\bar{u}$ = 15 m/s, ϕ = 0.75.

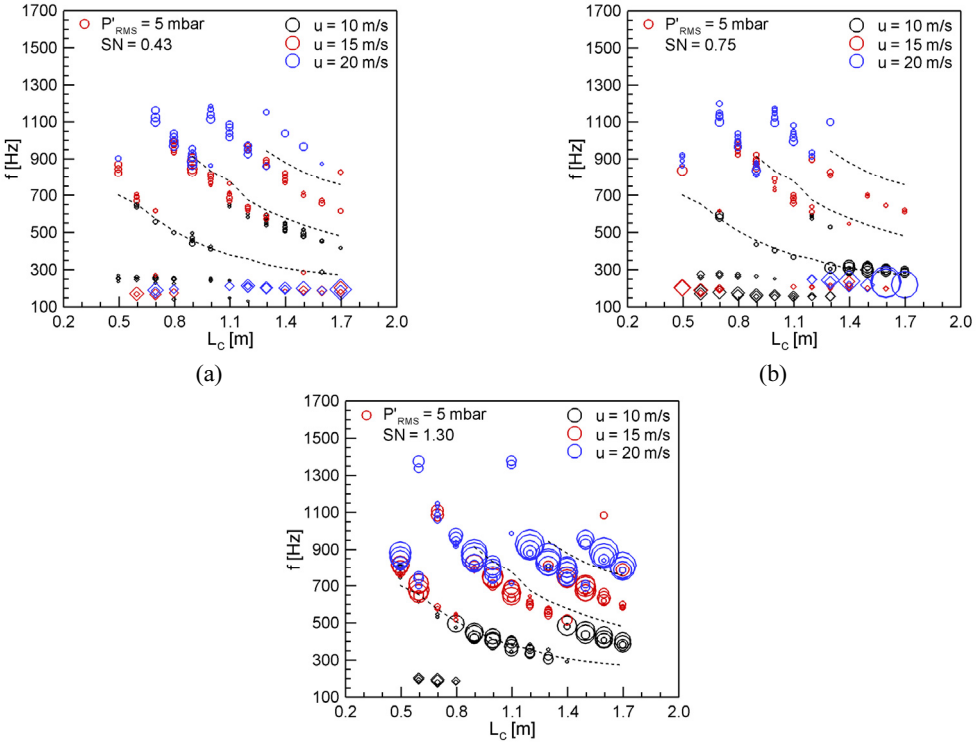


Fig. 6. RMS values of the filtered pressure fluctuations as a function of combustion chamber length and dominant frequency. (a) SN = 0.43, (b) SN = 0.75 and (c) SN = 1.30.

크기로 연소실에서 발생한 압력진동의 RMS 값의 크기를 비교하였으며 연소실 공진주파수의 연소불안정 조건은 원 모양의 기호로, 혼합기 영역 공진주파수를 가지는 불안정 모드는 사각형 모양의 기호로 구분하였다. 3.2 장에서 OSCILOS 코드를 사용하여 예측한 연소실 공진주파수를 점선으로 표현하여 비교하였다. 연소실 길이가 증가함에 따라 연소실에 커플된 연소불안정 모드의 주파수는 감소하는 것을 알 수 있다. 스월 수 0.43, 0.75에서 연소실 길이가 긴 조건들은 연소실 공진주파수의 연소불안정이 대부분 사라지고 혼합기 영역 공진주파수의 연소불안정이 나타나는 것을 알 수 있다. 연소실 길이가 증가하게 되면 연소실의 1차 종방향 모드와 혼합기의 공진주파수가 거의 일치하기 때문이다[21]. 이러한 혼합기 공진주파수의 연소불안정은 스월 수 1.30에서 대부분 사라지는 것을 알 수 있다. 스월 수 1.30의 스월러가 형성하는 음향 경계에 의해 연소실과 입구영역을 음향적으로 분리하기 때문이다[22].

Fig. 7은 SN = 1.30 L_C = 1295 mm, 1695 mm에서 발생한 연소불안정의 지배주파수와 연소실 동압 센서 간의 위상차를 나타낸 것이다. L_C = 1295 mm 연소불안정 조건에서 지배주파수가 증가하면서 위상차가 180°에서 0°, 다시 180°으로 변하는 것으로 연소실 공진주파수의 짝수 조화모드와 홀수 조화모드가 번갈아 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 불안정 모드의 지배주파수가 연소실 공진주파수의 2차, 3차 그리고 4차 조화 모드와 일치한다. 이와 동일하게 L_C = 1695 mm의 경우 불안정 모드는 3차, 4차, 5차의 조화모드를 가지는 것을 알 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6에서 입구 속도가 증가하면서 연소실 공진주파수의 불안정 모드의 천이 현상이 일어나는 것을 알 수 있다. 하지만 혼합기 공진주파수의 불안정모드는 입구 속도가 증가하여도 동일하게 낮은 주파수 대역에 나타나는 것을 알 수 있다.

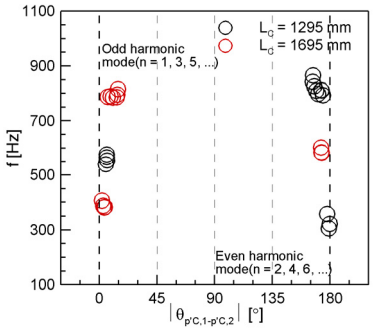


Fig. 7. Dominant frequency as a function of phase difference between the two dynamic pressure sensors at L_C = 1295 mm and L_C = 1595 mm.

4. 결 론

모델 가스터빈 연소기에서 에틸렌과 공기를 이용해 연소실험을 수행하였다. 다양한 기하 조건과 유동 조건의 난류 예혼합 화염에 발생한 열방출, 동압, 온도를 측정하고 화염 형상을 촬영하였다.

압력진동과 열방출 섭동이 레일리 기준을 만족하면서, 특정한 주파수에서 강력하고 가파른 픽이 나타나는 조건들을 연소불안정으로 정의하였으며 이때의 연소실 압력진동의 RMS는 2 mbar 이상이었다.

연소실에 설치된 두 개의 동압 센서의 위상 분석과 OSCILOS 코드를 통한 공진주파수 예측을 통해 불안정 모드가 연소실 공진주파수 혹은 혼합기 공진주파수를 가지는 것을 알 수 있었다. 또한 서로 다른 영역의 공진주파수를 가진 화염의 거동 또한 달라지는 것을 관측하였다.

위상 분석과 화염의 거동을 통해 입증된 두 가지 공진주파수의 연소불안정이 기하 조건과 유동 조건에 따라 서로 다른 특성을 보이는 것을 발견하였다. 혼합기 공진주파수의 연소불안정은 스월 수 1.30에서 대부분 사라졌으며 연소실 길이 변화에 상관없이 낮은 주파수 영역에 집중되어 있다. 연소실 공진주파수의 연소불안정은 지배주파수가 연소실 길이에 반비례하였으며, 입구 속도가 증가함에 따라 지배주파수가 높은 차수의 조화모드로 천이되는 것을 발견하였다.

후 기

본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단(RS-2022-00156358) 및 한국항공우주연구원(KARI-FR21C00)의 지원을 받아서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

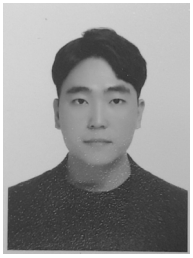
[1] S. Hayashi, H. Yamada, NOx Emissions in Combustion of Lean Premixed Mixtures Injected into Hot Burned Gas, Proc. Combust., 28(2) (2000) 2443-2449.

[2] R.E. Foglesong, T.R. Frazier, L.M. Flamand, J.E. Peters, R.P. Lucht, Flame Structure and Emissions Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor, The 35th Joint Proupulsion Conference and Exhibit, 1999.

[3] Y. Huang, V. Yang, Dynamics and Stability of Lean-Premixed Swirl Stabilized Combustion, Prog. Energy Combust. Sci., 35 (2009) 293-364.

[4] J. Lee, M. Kim, S. Park, J. Lee, Y. Yoon, An Experimental Study of Instability Mode Analysis in a Model Gas Turbine Combustor, J. Korean Soc. Combust., 15 (2010) 12-21.
[5] C.M. Jones, J.g. Lee, D.A. Santavicca, Closed-Loop Active Control of Combustion Instabilities Using Subharmonic Secondary Fuel Injection, J. Propul. Power, 15(4) (1999) 584-590.
[6] D. Kim, Review on the Development Trend of Hydrogen Gas Turbine Combustion Technology, J. Korean Soc. Combust., 24(4) (2020) 1-10.
[7] J. Tallaksen, F. Bauer, C. Hulteberg, M. Reese, S. Ahlgren, Nitrogen Fertilizers Manufactured using Wind Power: Greenhouse Gas and Energy Balance of Community-Scale Ammonia Production, J. Clean. Prod., 107 (2015) 626-635.
[8] H. Kim, U. Jin, D. Shin, A Review of Carbon Neutral Gas Turbine Combustion Technology. J. Korean Soc. Combust., 27(2) (2022) 14-38.
[9] J.C. Broda, S. Seo, R.J. Santoro, G. Shirhattikar, V. Yang, An Experimental Study of Combustion Dynamics of a Premixed Swirl Injector, Symposium (International) on Combustion, 27 (1998) 1849-1856.
[10] D. Hwang, K. Ahn, Open-Loop Control of Combustion Instability in Hot-Firing Test Using Gaseous Hydrocarbon Fuel, J. Korean Soc. Propul. Eng., 22(6) (2018) 28-36.
[11] K.T. Kim, Combustion Instability Feedback Mechanisms in a Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustor, Combust. Flame, 171 (2016) 137-151.
[12] D. Hwang, K. Ahn, Experimental Study on Dynamic Combustion Characteristics in Swirl-Stabilized Combustors, Energies, 14 (2021) 1609.
[13] D. Fritsche, M. Füri, K. Boulouchos, An Experimental Investigation of Thermoacoustic Instabilities in a Premixed Swirl-stabilized flame, Combust. Flame, 151 (2007) 29-36.
[14] J. Kim, J. Yoon, Y. Yoon, Combustion Instability Analysis of Partially Premixed Model Gas Turbine Combustor with 1D Lumped Method, J. Korean Soc. Combust., 22(1) (2017) 39-45.
[15] Y. Huang, V. Yang, Effect of Swirl on Combustion Dynamics in a Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustor, Proc. Combust., 30 (2005) 1775-1782.
[16] A.M. Elbaz, W.L. Roberts, Conical Quarl, Swirl Stabilized Non-Premixed Flames: Flame and Flow Field Interaction, Energy Proced., 120 (2017) 206-213.
[17] D. Durox, J.P. Moeck, J.F. Bourgouin, P. Morenton, M. Viallon, T. Schuller, S. Candel, Flame Dynamics of a Variable Swirl Number System and Instability Control, Combust. Flame, 160(9) (2013) 1729-1742.
[18] B.J. Lee, K.D. Choi, The Effect of Swirl on the Blowout Velocities of Partially Premixed Interacting Flames, J. Korean Soc. Combust., 14(2) (2009) 26-31.
[19] D. Hwang, Y Song, K. Ahn, Combustion Instability Characteristics in a Dump Combustor using Different Hydrocarbon Fuels, Aeronaut. J., 123 (2019) 586-599.
[20] D. Hwang, K. Ahn, Study on Flame Structure and Combustion Instability in a Swirl-Stabilized Combustor, J. Korean Soc. Combust., 25(2) (2020) 1-10.
[21] D. Kim, S. Joo, Y. Yoon, Effects of Fuel Line Acoustics on the Self-Excited Combustion Instability Mode Transition with Hydrogen-Enriched Laboratory-Scale Partially Premixed Combustor, Int. J. Hydrogen Energy, 45(38) (2020) 19956-19964.
[22] D. Hwang, C. Kang, K. Ahn, Effect of Mixing Section Acoustics on Combustion Instability in a Swirl-Stabilized Combustor, Energies, 15 (2022) 8492.

저자정보



한선우

한선우는 충북대학교 기계공학과 석사과정이며, 관심분야는 난류 화염 가시화 및 덤프 연소기에서의 연소불안정 연구이다.

이신우

이신우는 충북대학교 기계공학과 석사과정이며, 관심분야는 액체로켓엔진 및 가스터빈엔진에서의 케로신 연료 열분해 연구이다.

황동현

황동현은 충북대학교 기계공학과 박사이며, 관심분야는 로켓엔진 개발 및 가스터빈 연소기 연소불안정 연구이다.

안규복

안규복은 충북대학교 기계공학부 교수이며, 관심분야는 유체역학, 분무공학, 연소공학, 추진공학 응용 분야의 연구이다.