

희박 예혼합 다단 연소기에서의 주파수 동조에 의한 연소불안정 증폭

최용석[†] · 한경현 · 김규태
한국과학기술원 항공우주공학과

Amplification of Combustion Instabilities in a Lean-premixed Axially-staged Combustor due to Frequency Synchronization

Yongseok Choi[†], Gyeonghyun Han and Kyu Tae Kim

Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

(Received 27 February 2024, Received in revised form 15 March 2024, Accepted 15 March 2024)

ABSTRACT

The self-excited dynamics of a lean-premixed axially-staged combustor, with respect to the characteristic acoustic frequency, were experimentally investigated by varying the hydrogen mole fraction in the primary flame while maintaining the fuel composition of the secondary flame constant. It is observed that the dominant instability frequency transitions from lower to higher acoustic modes with varying hydrogen concentrations during single-flame combustion. We demonstrate that under axially-staged conditions, the more complex instabilities can be triggered and sustained by the combination of local heat release fluctuations generated from the primary flame and secondary transverse reacting jets. When the instability frequencies of the primary and secondary flames synchronize with each other, especially within the same acoustic mode, the amplitudes of pressure fluctuations are significantly amplified compared to those observed with single flame condition.

Key Words : Combustion instability, Hydrogen, Axial fuel staging, Gas turbine combustion

1. 서 론

지구온난화로 촉발된 기후변화를 완화하기 위해 에너지 생산 분야는 온실가스 배출 감축과 동시에 효율 향상이라는 과제를 직면한 상태이다. 해당 분야에서 큰 비중을 차지하는 가스터빈 산업계는 이를 달성하기 위해 연소 방식 개선, 연료 다변화 등 다양한 시도를 하고 있다[1-5]. 열역학적 관점에서 가스터빈 사이클의 효율 향상에는 터빈 입구 온도 상승이 필수적이며, 이는 연소실의 화염 온도 상승을 통해 이뤄질 수 있다. 하지만 화염 온도의 증가는 연소실 온도와 체류 시간에 비례하여 생성되는 열적 질소산화물(thermal NO_x)의 배출량이 증가하는 문제점을 수반한다[6,7]. 이를 보완하기 위해 제시된 연소기술 중 하나

는 축 방향 다단연소기법(axial fuel staging)이다[8].

축 방향 다단연소기법은 연소실 내부의 반응영역을 연소실 축 방향으로 다중 배치하는 방식이다. 해당 기법은 연소실 상류의 주 반응영역에서는 상대적으로 낮은 당량비 연소를 통해 전체적인 화염 온도를 낮춰 질소산화물 생성을 억제하고, 당량비가 비교적 높은 2차 화염을 연소실 출구 근처에 배치해 터빈 입구 온도를 높여 효율을 증대시킬 수 있다. 이때, 2차 반응영역과 터빈 입구까지의 체류 시간 또한 짧아, 질소산화물의 생성을 억제할 수 있다. 또한, 각 연소영역의 운전 조건 변경을 통해 연료 다변화 및 턴다운(turndown) 증대와 같은 장점이 있어, 산업계 및 학계에서 많은 연구가 이뤄지고 있다. 특히, 2차 연소실의 대표적인 화염 구조인 횡단류 반응 제트(reacting jet in crossflow)와 관련된 화염-유동 안정성 및 경계층 불안정, 그리고 운전 조건에 따른 NO_x 생성 경향에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다[9-13].

Panda 등[9,10]은 고속 입자영상유속계(particle image velocimetry, PIV) 및 OH 평면레이저 유도형광 기법(OH

[†]Corresponding Author, yongseok_choi@kaist.ac.kr

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

planar laser induced fluorescence, OH PLIF)을 통해서 선 회 횡단류 유동장에서 수소/질소 그리고 예혼합 천연가스를 이용해 수직 분사 화염의 후방에 생성되는 후류 와류 구조에 관한 연구를 진행했으며, Wagner 등[11]은 유사한 실험 방법을 이용해 예혼합 에틸렌 제트 화염 주변의 유동 구조와 화염 안정 메커니즘을 규명했다. 연구 결과를 통해서 운동량 플럭스 비(momentum flux ratio, J)가 화염 위치 및 안정화 메커니즘에 큰 영향을 미치는 변수로 확인되었다. 다단연소에서 발생하는 질소산화물 배출량의 경우, 주로 2차 반응영역 전후의 온도 상승분에 비례함이 실험적으로 확인되었다[12].

가스터빈 연소기에서 연소불안정 현상은 주로 연소실의 고유 압력장과 난류 화염의 열 방출률 사이에 양성 피드백이 형성되어 발생할 수 있다[14,15]. 이러한 불안정이 발생하는 경우, 고 진폭의 동압 및 속도 섭동, 열 방출 섭동으로 인한 역화(flashback)나 화염 날림(blow-off)이 발생해 가스터빈 운용 성능의 하락을 유발할 수 있을 뿐만 아니라, 주기적인 기계적 부하로 인해 연소기 및 시스템의 오작동 혹은 파손으로 이어질 수 있다. 따라서 연소불안정은 연소기 설계 및 운용 단계에서 반드시 고려해야 하는 사항이다. 이러한 연소불안정 현상은 연소기 구조, 연료 조성, 그리고 분사 방식 변화 등 다양한 요인에 의해 발생할 수 있어 지금까지 많은 연구가 진행되었다.

Durox 등[16]은 서로 다른 4가지의 화염 형태에서의 음향 가진에 대한 화염 반응을 측정했으며, 화염 구조가 열 방출 섭동의 비선형성에 크게 영향을 미치는 것을 확인했다. Lee 등[17,18]은 동일 연료 조건에서 대형 스윙 노즐과 소형 다중노즐 배열의 비교를 통해, 다중노즐에서 더 높은 주파수의 불안정이 발생할 수 있음을 보였다. Joo 등[19]은 부분 예혼합 스윙 화염에서 합성가스(syngas)에서의 조성 변화에 대한 연소 동특성 변화를 확인했으며, 몇몇 연료 조성 조건에서는 다중모드 불안정이 발생할 수 있음을 보였다. Kang 등[20]은 소형 다중노즐 배열 연소기에서 메탄/수소 분율 변화에 따른 연소 동특성을 실험적으로 측정했다. 이 과정에서 수소 분율 상승에 비례한 화염 전파 속도의 증가로 인해 화염은 점차 독립적인 거동을 보였으며, 불안정 주파수가 증가함을 확인했다. 또한, 1 kHz가 넘는 고주파 불안정이 발생하는 것이 확인되었다.

다단연소 시스템에서는 2차 연소영역에서 발생하는 유동 불안정을 포함하여, 연소기 내부 다중 열원에 기인한, 기존보다 더 복잡한 형태의 불안정이 발생할 수 있다. Schulz 등[21]은 재열 연소기(reheat combustor) 구조에서 2차 화염의 불안정한 자발화에 기인한 불안정이 전체 시스템의 섭동을 유발할 수 있음을 실험적으로 보였고, 이는

1차와 2차 사이 연료 혼합 영역의 유속 및 온도의 섭동과 크게 연관되어 있음을 확인했다. Gopalakrishnan 등[22]은 오일러 방정식(Euler equation)에 기반한 1차원 모델링을 위와 유사한 재열 가스터빈 연소기에 적용하여, 2차 연소실의 자발 화염은 열음향 피드백 과정에서 독특한 고조파 불안정을 보이는 것을 확인했다. 최근 Choi 등[23]은 축방향 다단연소 시스템이 적용된 희박 예혼합 연소기에서 축방향 연료 스테이징에 따른 연소불안정 거동을 계측했다. 연구 결과, 단일연소 조건과 비교해 다단연소 조건일 때 더 다양한 불안정이 발생하는 것을 보였으며, 다단연소 시스템에서 각 화염의 특성 주파수와 음향장 내 2차 화염의 상대적인 위치가 연소불안정에 중요한 변수로 작용할 수 있음을 시사했다.

본 연구에서는 다단연소 시스템에서 1차 화염의 수소/메탄 혼소 비율 변화에 따른 특성 주파수 변화를 이용하여, 이러한 변화가 1차와 2차 화염의 연소불안정에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위해 실험 조건은 선행 연구 결과 [23] 를 기반으로 결정되었으며, 압력 및 열 방출, 그리고 OH* 고속 이미지 계측을 수행했다. 해당 이미지는 위상 동기화, 2차원 고속 푸리에 변환(2D spatial Fast Fourier transform, 2D FFT), 그리고 동적 모드 분해(Dynamic mode decomposition, DMD) 기법을 적용하여 후처리 되었다 [24].

2. 실험 장비 및 분석 기법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 희박 예혼합 다단 연소기와 2차 연소실의 단면, 그리고 특정 운전 조건에서의 1차와 2차의 안정 화염을 나타냈다. Fig. 1(a)에 묘사된 전체 연소기의 단면을 보면, 크게 4가지 요소로 구성되어 있다. 우선 Fig. 1(b)를 참고하면, 1차 연소기는 직경 6.5 mm의 노즐 60개가 4개의 동심원 구조로 배열된 다중노즐이며, 각 노즐 출구 기준 333 mm 상류에는 초크 오리피스, 76 mm 상류에는 베인 각 44°의 스윙러가 탑재되었다. 1차 연소실은 원형 석영관으로 제작되어 화염 가시화 및 광 계측이 가능하다. 1차 연소실 후방에는 다단연소 모사를 위해 정사각 단면의 모듈식 2차 연소기를 배치했다. 2차 연소기의 노즐은 1차 연소기와 동일 직경의 원형 노즐 9개가 사각격자 구조로 배열되어 연소기 벽면에 매립된 형태이다. 2차 연소실도 1차와 마찬가지로 화염 관측 및 광 계측이 가능하도록 석영관이 탑재되었다. 2차 연소기 하류에는 이동 가능한 피스톤이 장착된 스틸 연소기와 배기구가 위치하며, 이때 피스톤의 막힘률은 약 80.5%이다. 유동 방향은 왼쪽에서 오른쪽이며, 상류의 초크 오리피스와 하류의 피

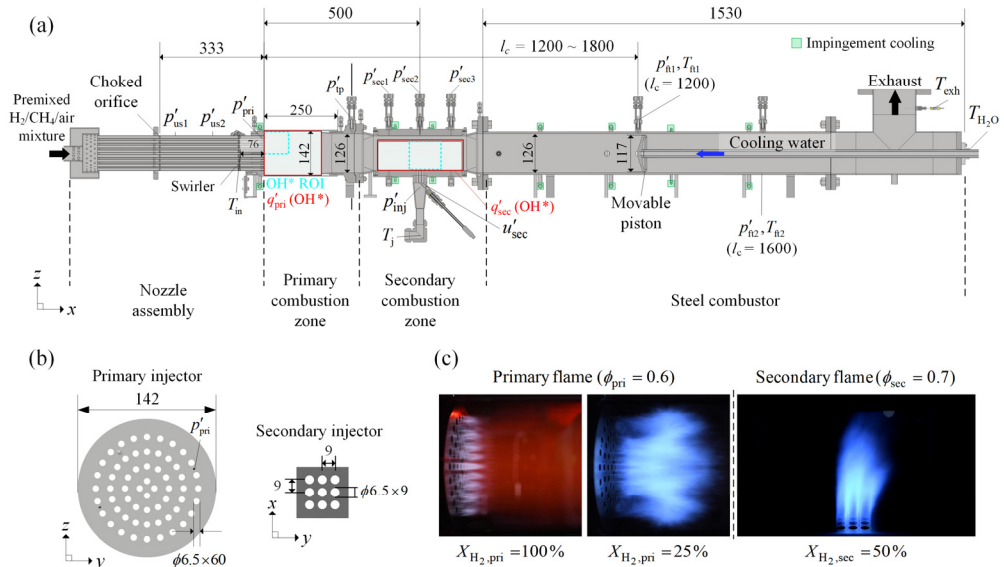


Fig. 1. (a) Cross-sectional view of laboratory-scale axial fuel staging combustion test rig. (b) Injector configurations of the primary and secondary combustor. (c) Representative flame photographs of the primary flame with different H_2 fraction in sideview and secondary reacting jet-in-crossflow; DSLR Nikon D850, ISO12800, $f/3.2$ with two different exposure time of $1/60$ for pure H_2 condition and $1/160$ for the other conditions including secondary flame. Abbreviations/subscripts: p' = dynamic pressure transducers, T_i = K-type thermocouple, u' = Hot wire anemometer, pri = primary, sec = secondary, tp= transition piece, ft = flame tube, exh = exhaust section. Dimensions in millimeters.

스톤을 통해 실제 가스터빈 연소기와 유사한 음향학적 단힘-단힘(acoustically closed-closed) 경계조건을 형성한다 [25]. 1차 연소영역의 경우, 전기 히터를 통해 200°C 로 가열된 공기와 히터 출구부에 수직방향으로 삽입된 노즐에서 분사되는 순도 99.999%의 수소와 99.95%의 메탄과 완전 예혼합되어 공급되며, 반응물은 노즐 출구에서 고전압 점화 플러그를 통해 점화되어 석영관을 통해 가시화된다. 2차 연소영역의 경우, 상온의 공기가 공급되어 연료와 예혼합된 후, 주 유동에 수직 방향으로 분사된다. 분사된 연료/공기 혼합물은 상류의 고온 상태의 연소생성물과 혼합되어 연소한다. 두 연소기 모두 연료 공급 지점을 연소기 입구에 상대적으로 멀리 떨어진 위치에 두어 완전 예혼합 조건을 달성했다. 다만 연소기에서 관찰되는 대표적인 화염 형상을 Fig. 1(c)에 나타냈다.

연소실 내의 압력 섭동(p')은 연소기 내부 및 축 방향으로 동압센서(PCB piezo electronics, 112A22) 10개를 설치해서 측정했으며, 각 연소실의 화염에서 발생하는 열 방출 섭동(q')들은 지면과 수평 방향으로 배치된 광증배관에 OH^* 대역 필터(308 ± 10 nm)를 부착하여 측정했다. 이때 각 광증배관 사이에는 흑색 가림막을 장착해 광 경로 중첩에 의한 신호 간섭을 최소화했다. 마지막으로, 다단연소

상황에서는 2차 노즐에서의 속도 섭동을 확인하기 위해서 열선유속계(TSI 1750, 1210-20)를 2차 노즐 상류에 설치했다. 각 신호는 계측 지점마다 12 kHz의 샘플링 주파수로 4초간 수집되었다.

불안정 상태에서의 각 화염의 거동 및 압력 섭동과의 상호작용을 보다 자세하게 확인하기 위해서 고속 이미지 계측을 수행했다. 계측은 고속 CMOS 카메라(Phantom, VEO 1010L)에 증폭기(Invisible Vision 1850-10)와 OH^* 대역 필터를 장착해 진행했으며, 초당 12000장씩 2초간 측정했다. 데이터 검증 및 분석 기법 적용을 위해 압력 및 광증배관을 통한 열 방출 섭동을 동시에 측정했으며, 추후 시계열 데이터로 비교했다. 추가로 위상 동기화, 2D FFT, 그리고 DMD 기법을 적용해 분석했다.

본 연구에서는 연소기 내부에 설치된 피스톤의 위치를 조절하여 연소기 내부 체적을 변화시켰으며, 시스템의 고유주파수 변화에 따른 자발 불안정 특성을 파악했다. 고려된 실험 조건은 선행 연구 결과를 참고하여 1차와 2차 화염에 의한 불안정이 독립적으로 발생한 조건을 선정했으며, 이는 다음과 같다. 1차와 2차 연소실의 열량은 56, 24 kW이며, 각 연소실의 당량비는 0.6, 0.7로 일정하게 유지되었다. 1차 화염의 수소 물분율 변화에 따른 연소 동특성

을 확인하기 위해서, 2차 화염 없이 1차 화염의 수소 혼소율을 25%부터 100%까지 25%씩 증가시키며 신호 계측을 진행했다. 이후 2차 화염이 있는 상태에서도 계측을 동일하게 반복했다. 이때, 2차 화염의 수소/메탄 혼소율은 50:50 조건으로 고정된 상태로 진행되었다. 각 조건마다 연소기 길이를 1200부터 1800 mm까지 50 mm간격으로 조정하며 신호를 계측했다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 수소 물분율이 연소불안정에 미치는 영향

Fig. 1(c)는 수소 물분율 변화에 따른 화염의 형상을 보여준다. 1차의 다중노즐 구조에서 수소 비율이 높은 화염을 보면, 수소의 빠른 반응성으로 인해 화염 길이가 단축됨과 동시에 각 노즐에 독립적으로 화염이 부착되는 것을 확인할 수 있다. 반면, 수소 비율이 낮은 화염의 경우 상대적으로 느린 반응 속도로 노즐 입구 부분에서는 화염이 분리되어 있지만, 하류로 진행함에 따라 거대구조를 형성한다. 앞서 살펴본 화염 형상의 차이는 연소불안정 거동에 큰 변화를 일으킬 수 있으며, 상대적으로 수소 혼소율이 높은 화염일수록 더 높은 고유주파수와 결합하여 불안정을 발생한다는 것을 여러 선행 연구에서 확인할 수 있다 [18-20].

다단연소 조건에서의 연소 동특성을 확인하기 전, 단일연소 조건에서 수소 비율 변화에 따른 1차 화염의 특성 주파수를 확인했다. Fig. 2는 단일연소 조건의 전체 연소기 길이에서 발생한 불안정에 대해 주파수와 연소실 압력 섭동의 진폭을 나타냈다. 그래프의 각 기호는 수소 비율에 대응되며, 추가로 주파수 대역에 해당하는 연소기 고유주파수를 같이 표시했다. 각 음향 모드의 고유주파수는 3차원 유한요소법 기반의 헬름홀츠 솔버(Helmholtz solver)

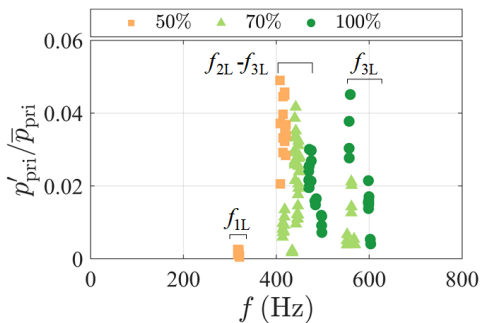


Fig. 2. Normalized amplitudes of primary combustor pressure plotted against dominant frequencies for three different H₂ concentrations, measured without second-stage reaction.

를 이용해 계산했다. 실험 결과를 보면 수소 물분율 증가에 따라 불안정 주파수 대역이 높은 대역으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 수소 물분율 50% 이상인 조건들에서는 높은 진폭의 불안정이 발생했다. 이때 주목할 점은 수소 25% 물분율 조건에서는 모든 연소기 길이 구간에서 불안정 현상이 관측되지 않았다는 점이다. 따라서 그래프에도 해당 조건은 표시하지 않았다. 본 실험 결과를 기반으로 다음 절에서는 다단연소 환경에서의 연소 동특성을 기술했으며, 1차 화염 수소 물분율 25%와 100%에 대해서 중점적으로 살펴보았다.

3.2 특성 불안정 주파수 변화에 따른 다단연소 시스템에서의 연소불안정 거동

다음으로 Fig. 3은 단일연소 및 다단 연소 조건에서의 발생한 불안정 주파수와 압력 및 열 방출 섭동의 진폭을 비교했다. 1차 화염의 수소 물분율은 안정했던 25%와 강한 불안정이 발생한 100%로 선정했다. 불안정 주파수의 경우, 연소기의 음향 고유주파수와 같이 표시했다. 먼저 Fig. 3(a)의 단일연소 조건을 보면, 수소 물분율 25% 1차 화염은 앞 절에서 확인했듯이 전체 연소기 길이 구간에서 안정 거동을 보인다. 이 때문에 주파수는 표기하지 않았다. 다단연소의 경우, 연소기 길이 1300과 1800 mm 부근에서 570±10 Hz와 605±5 Hz 대역으로, peak-to-peak 최대 14

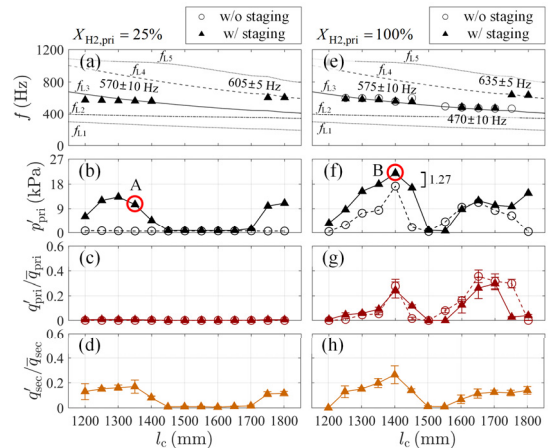


Fig. 3. Dominant self-excited frequencies and calculated combustor's eigenfrequencies, peak-to-peak pressure amplitudes measured at the primary chamber, and the normalized heat release rate fluctuations emitted from each reaction zone, plotted against combustor length regardless of the second-stage reaction. Left row - X_{H₂} = 25% (a-d), Right row - X_{H₂} = 100% (e-h).

kPa의 압력 섭동이 발생하는 것을 관측했다. 발생한 연소 불안정의 주파수 대역은 각각 길이 방향 3차 및 4차 고유 주파수에 해당한다. Fig. 3(c)와 (d)에 나타난 각 화염의 열 방출 섭동 진폭을 보면 1차 화염은 매우 작게 나타났고, 2차 화염은 압력 섭동의 진폭과 거의 유사한 형상으로 나타난다. 이는 2차 화염이 길이 방향 음향장에 결합해 불안정을 유발한 것으로 볼 수 있다. 여기서 주목할 점은 단연소 환경의 연소 불안정은 1차 화염의 섭동 없이, 2차 화염의 열 방출 섭동만으로 발생할 수 있다는 점이다.

Fig. 3(e)에 나타난 수소-물분율 100% 1차 화염 단일연소 조건에서는 1500과 1800 mm를 제외한 대부분의 연소기 길이 구간에서 불안정이 발생하는 것을 확인했다. 측정된 불안정 주파수 대역은 470-580 Hz로, 길이 방향 3차 고유주파수 대역에 해당한다. 따라서 불안정은 1차 화염이 연소기 길이 방향 3차 음향모드와 결합하여 발생한 것으로 볼 수 있다. 주목할 점은 짧은 연소기 길이 구간에서 1차 화염에 의해 발생한 불안정 주파수는, 앞서 살펴본 낮은 수소 비율 조건에서 2차 화염에 의해 발생한 불안정과 거의 동일한 주파수 대역이라는 점이다. 이는 다시 말해 해당 길이 구간에서는 1차와 2차 화염이 같은 연소기 음향 모드에 동시에 결합할 가능성이 있음을 보여준다.

단연소 조건에서의 불안정 거동을 보면, 단일연소 조건과 유사하게 나타났으며, 1차 화염의 섭동 진폭은 거의 동일 형태로 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 압력 섭동의 진폭은 짧은 연소기 길이 구간에서 단일연소 조건보다 증폭되었으며, 최대 진폭끼리 비교 시 약 30% 더 크게 나타나는 것을 확인했다. 또한, 단일연소 조건에서는 안정했던 1800 mm에서는 추가로 강한 불안정이 나타나, 불안정 구간의 증가를 확인했다. 이러한 변화에 원인이 되는 2차 화염의 동특성을 살펴보면, 열 방출 섭동의 진폭은 압력과 유사한 형태로 나타나며 상대적으로 짧은 연소기 길이 구간에서 진폭이 큰 것을 알 수 있다. 또한, 1800 mm에서는 1차 화염보다 상대적으로 큰 열 방출 섭동을 보이는 것을 확인했다.

이러한 결과를 통해서 몇 가지 중요한 사실을 알 수 있다. 먼저, 압력 섭동 증폭은 1차와 2차 화염의 불안정 주파수 대역이 일치하는 구간에서 발생했다는 점이다. 2차 화염의 불안정 주파수 대역과 맞지 않는 1600-1700 mm 길이 구간의 경우, 2차 화염의 섭동이 있음에도 불구하고 압력 섭동의 진폭은 단일연소와 비교해 큰 차이가 나지 않았다. 2차 화염의 열 방출 섭동은 1차 화염의 섭동으로 인한 횡단류 유동 섭동의 영향을 받아 나타난 것으로 보인다 [23]. 결과적으로, 1차와 2차 화염의 불안정 주파수 대역의 일치가 불안정 증폭에 필요조건임을 알 수 있다. 추가

로 1800 mm에서 발생한 불안정을 통해서 2차 화염은 1차 화염의 강한 섭동 없이도 강한 불안정을 일으킬 수 있음을 재확인했다.

각 화염의 동특성에 대한 더 자세한 분석을 위해 Fig. 3(b)와 (f)에 A, B로 표시한 지점에서 압력 및 열 방출 섭동의 시계열과 힐베르트(Hilbert) 변환으로 계산된 위상차를 Fig. 4에 나타냈다. 상단은 1차 연소실에서의 압력과 1차 화염의 열 방출 섭동, 중단은 2차 연소실의 압력, 2차 화염의 열 방출 섭동, 그리고 2차 노즐 상류에서 측정된 속도 섭동이다. 이때 위 그래프에 나타난 모든 신호는 기본 불안정 주파수를 중심으로 ± 10 Hz로 대역 통과 처리되었으며, 열 방출 섭동들과 속도 섭동의 경우 각 측정값의 평균값을 이용해 정규화했다. 그래프는 기본 불안정 주기 기준 2주기 동안의 시계열을 나타냈다. 하단에는 각 연소실의 압력과 열 방출 섭동 사이의 Rayleigh 기준의 만족 여부를 확인하기 위해서 4초간의 위상 차이를 나타냈다.

Fig. 4(a)의 수소 25% 1차 화염의 시계열을 보면, 1차 화염의 섭동은 거의 나타나지 않고 압력 섭동만 나타나는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 1차 화염의 주기적 거동은 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 낮은 화염 진폭으로 인해 1차 연소실에서 계산된 위상차는 표시하지 않았다. 반면, 2차

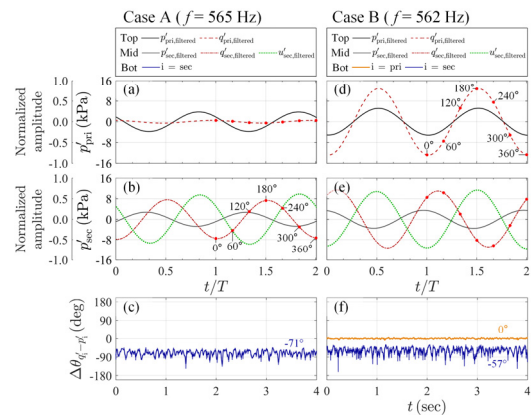


Fig. 4. (a, d) Time evolutions of pressure and heat release rate oscillations from the primary combustion zone with time-normalized by dominant frequency for Case A and B, marked as a red circle in Fig. 2a and f, respectively. Top panel represents for the primary combustor, and middle panel, for the second stage, additionally includes pressure and normalized velocity fluctuations in the secondary injector plenum (b, e). Corresponding Rayleigh angles for each combustor during 4 sec to clarify the role in driving instability (c, f).

연소실에서는 화염과 압력이 동시에 강하게 섭동하는 것을 알 수 있으며, 계산된 위상차를 보면 90°도 이내로 Rayleigh 조건을 만족하는 것을 알 수 있다. 이로써 해당 조건에서 발생한 불안정은 2차 화염에 의해서 주도적으로 발생한 것임을 알 수 있다. 2차 노즐 상류에서 측정된 속도 섭동은 주 유동 방향에 수직으로 배치된 노즐에서도 피드백 사이클이 형성될 수 있음을 보여주며, 주 유동 섭동에 기인한 수직 분사 화염의 섭동이 길이 방향 불안정에 에너지를 공급할 수 있음을 의미한다.

수소 100% 1차 화염 조건의 시계열인 Fig. 4(d)를 보면, 1차 연소실의 압력 및 열 방출 섭동의 위상이 거의 일치하는 것을 볼 수 있으며, 강한 압력 진폭을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 정위상 거동을 통해 1차 화염의 섭동이 불안정 발생에 큰 역할을 한 것으로 보인다. 동시에 1차와 거의 반대 위상으로 나타나는 2차 화염의 열 방출 섭동 또한, 2차 연소실 압력의 위상과 90° 이내로 2차 연소실에서도 Rayleigh 기준을 만족하는 것을 알 수 있다. 압력 섭동의 증폭은 각 화염이 동시에 Rayleigh 기준을 만족시켜 발생한 것으로 보인다.

다단연소 환경에서 발생한 연소 동특성의 시계열 분석을 통해서 2차 화염에 의해 불안정이 발생하는 경우, 2차 연소실의 압력과 화염 사이 Rayleigh 기준을 만족하는 것을 확인했다. 불안정 증폭이 발생한 경우, 각 연소실 모두 Rayleigh 조건을 만족하는 것을 확인했다. 다음 절에서는 불안정 상태에서의 1차와 2차 화염의 동역학을 고속 이미징 기술을 통해 기술했다.

3.3 다단 연소기의 화염 동역학

Fig. 5에는 앞 절에서 설명한 두 지점에서 촬영한 1차와 2차 화염의 고속 이미지를 위상 동기화, 2D FFT, 그리고 DMD를 이용해 분석한 결과를 나타냈다. 좌측 2열은 A 지점에서의 1차와 2차 화염 이미지 계측 결과이고, 우측 2열은 B 지점에서의 결과이다. 이미지 촬영 영역은 Fig. 1(a)에 표시했다. 위상 동기화 이미지의 경우, 한 주기의 불안정을 60° 간격으로 6장씩 나타냈으며, 각 이미지는 단일 고속 이미지 300장을 앙상블 평균(ensemble average)하여 획득했다. 각 이미지 위상에 대응하는 시계열 데이터를 확인하기 위해 Fig. 4의 시계열 위에 붉은 점과 위상을 표시했다.

Fig. 5(a)를 보면 비교적 낮은 수소 비율의 1차 화염은 거대 화염 구조를 형성하며, 위상에 따른 큰 변화를 보이지 않았다. 이는 시계열 계측 결과에서도 확인된 바이다. 일정 강도 이상의 불안정 거동이 보이지 않아, 2D FFT 계산

결과에서도 불안정 주파수의 진폭 영역이 보이지 않았다. 하단의 DMD 계산 결과는 불안정 주파수에 해당하는 유동장의 모드를 나타낸다. 색으로 표현된 영역은 유동장 내부에 불안정 주파수로 섭동하는 부분이며, 각 색은 상대적인 위상이다. Fig. 5(e)를 보면, 1차 화염이 위치한 영역에 색이 다른 구간이 교대로 존재하는 것을 알 수 있다. 이는 해당 영역들이 서로 반대되는 위상으로 섭동 상태임을 의미하며, 화염 내부에 불안정에 의한 속도 섭동이 존재함을 유추할 수 있다. 하지만 이러한 섭동은 서로 역 위상 거동 하기에 영역 간 열 방출 섭동의 상쇄를 일으켜, 전체적인 섭동의 크기가 작게 나타난 것으로 보인다. 불안정에 섭동 에너지를 공급하는 주요 메커니즘은 화염 면의 변화에 의한 열 방출 섭동이기며, 1차 화염은 시스템의 불안정에 기인한 유동 섭동의 영향을 받을 뿐, 에너지 공급 역할은 미약할 것으로 추측된다.

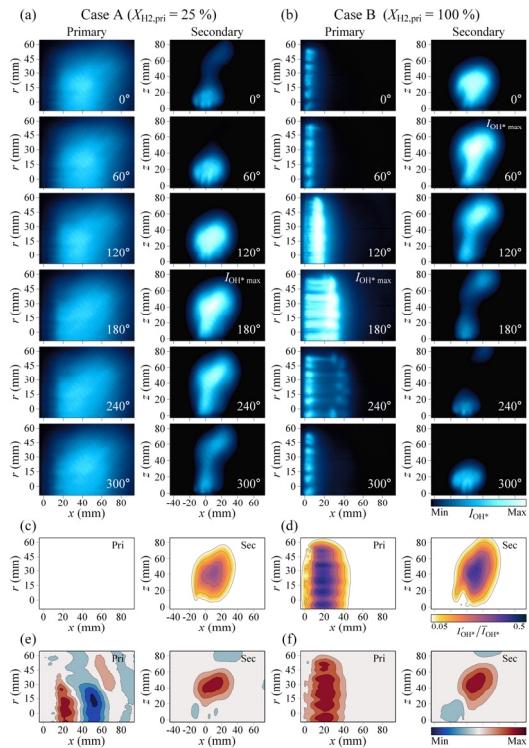


Fig. 5. Left/right columns: Cases A and B. (a, b) Sequence of phase-resolved OH* chemiluminescence images for the primary and secondary flame during a period of limit cycle oscillations. (c, d) Normalized emission intensities corresponding to dominant frequencies. (e, f) Spatial distribution of DMD Mode 1 and Mode 2.

Fig. 5(a) 우측에 있는 2차 화염의 거동을 보면, 횡단류 수직 분사 화염은 주 유동 방향으로 약간 기울어진 채, 수직 방향으로 강한 움직임을 보인다. 0°에서는 노즐 입구 근처에서 반응영역이 형성되기 시작하며, 최대 강도 지점인 180°까지 점차 수직 방향으로 성장하는 것을 보인다. 이후 화염 상단부는 pinch-off 되어 횡단류 방향으로 이동, 소산되고, 하단부는 노즐 입구 부근으로 급격히 후퇴하는 것을 볼 수 있다. 이러한 비대칭 형태로 나타난 주기적인 화염 면의 변화는 열 방출 섭동으로 이어지며, 강한 압력 섭동을 유발할 것을 짐작할 수 있다. 2D FFT와 DMD 계산 결과에서도 불안정 주파수의 섭동 영역 대부분이 동위상으로 강하게 섭동하는 것을 알 수 있으며, 열 방출 섭동은 연소실 중앙에 집중되어 있는 것을 볼 수 있다. 위 결과를 종합했을 때, 다단 연소 환경에서는 1차 화염이 상대적으로 안정한 상태에서 2차 연소실의 비대칭 형태의 횡단류 수직 분사 화염은 연소기 음향장과 결합하여 불안정을 유발할 수 있으며, 이때 수직 분사 화염은 기울어진 채 반복적으로 팽창과 수축을 반복하는 것을 확인했다.

B 지점에서의 1차 화염의 거동을 보면 A 지점과 달리, 유동 방향으로 신장-수축이 반복되는, 길이 방향 불안정에서 발생하는 대표적인 거동을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 5(d)와 (f)에 나타난 2D FFT와 DMD 계산 결과에서도 1차의 근집 화염은 마치 하나의 화염처럼 동기화되어 움직이는 것을 확인할 수 있다. 이러한 거동은 1차 화염이 음향장과 강하게 결합해 불안정에 에너지를 공급하는 것으로 볼 수 있다. 2차 화염의 위상 동기화 이미지를 보면, A 지점에서의 결과와 거의 유사한 거동을 보인다. 이는 2차 화염의 섭동 메커니즘이 A와 B 지점 모두 유사함을 의미한다. 2차 화염의 최대 강도 지점의 위상을 보면, 1차 화염과 거의 반대 위상으로 나타난다. 이를 각 연소실의 압력 섭동과 같이 살펴보면, 1차 화염이 음향장과 결합한 것처럼 2차 화염 또한 음향장과 결합하여 불안정 발생에 일조했음을 확인할 수 있다. Fig. 5(d)와 (f)에 나타난 2D FFT와 DMD를 보면, 1차 화염의 최대 열 방출 영역과 섭동 영역이 일치하는 것을 확인할 수 있다. 2차 화염의 경우, A 지점에서의 화염보다 수직 및 수평 방향으로의 섭동이 더 넓게 나타남을 알 수 있다. 이는 2차 화염이 1차 화염 하단에 위치하기에, 강한 횡단류 섭동의 영향이 반영되어 나타난 것으로 보인다.

지금까지의 계측 결과를 기반으로 1차 화염의 섭동으로 유발된 연소실 내 속도 섭동은 하류의 2차 화염의 섭동을 증폭시킬 수 있으며, 반대로 2차 화염 거동에서 발생한 압력파는 상류의 1차 화염 섭동에 영향을 줄 수 있음을 보여준다. 이로써 다단연소 시스템에서 1차와 2차 화염 간의

불안정 주파수 대역이 일치할 때, 음향 속도, 압력장을 통한 화염 간 상호작용이 시스템의 불안정을 증폭시킬 수 있음을 실험적으로 확인했다.

4. 결론

가스터빈에서의 배기가스 감소 및 효율 향상을 위해 제안된 다단연소 시스템은 연소실 내부에 화염이 복수로 존재해, 연소실장과 화염의 상호작용으로 나타날 수 있는 불안정의 복잡성이 단일연소 조건보다 더 높다. 하지만 지금까지 다단연소 시스템 전체 관점에서의 불안정 연구는 충분히 이뤄지지 않았다. 본 연구에서는 다단연소 시스템에서 1차 화염의 연료 조성을 변화시켜, 1차 화염의 불안정 주파수 변화에 기인한 불안정 거동의 변화와 2차 화염과의 상호작용 메커니즘을 실험적으로 연구했다. 실험 결과, 1차 화염은 수소 몰분율에 따라 다른 불안정 주파수 대역을 보였다. 몰분율이 낮은 경우 상대적으로 안정한 거동을 보이지만, 높은 경우 높은 주파수 영역에서 강한 불안정이 발생하는 것을 확인했다. 다단연소의 경우, 1차 화염이 안정한 상태이더라도 2차 화염의 독자적인 섭동을 통해서 상대적으로 높은 주파수의 불안정이 발생할 수 있음을 확인했다. 또한, 1차 화염의 수소 몰분율 증가로 불안정 주파수 대역이 높아져 2차 화염의 불안정 주파수 대역으로 근접하는 경우, 기존 단일연소 조건에서 발생한 불안정보다 더 강한 불안정이 나타남을 확인했다. 시계열 및 화염 거동을 분석한 결과, 각 연소실에서 Rayleigh 조건이 만족되는 것을 확인했으며, 2차 화염의 섭동은 자체적인 불안정 외에도 1차 화염 섭동에서 유발된 횡단류 유동 섭동의 영향을 추가로 받는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 음향-횡단류 섭동의 상호작용이 다단연소에서 불안정을 증폭시킬 수 있음을 확인했다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00270080, 수소터빈 연소기 시험평가 기술개발, 기여율 100%).

References

- [1] W.D. York, W.S. Ziminsky, E. Yilmaz, Development and testing of a low NO_x hydrogen combustion system for heavy-duty gas turbines, *J. Eng. Gas Turb. Power.*, 135 (2013) 022001.

- [2] M.A. Nemitallah, S.S. Rashwan, I.B. Mansir, A.A. Abdelhafez, M.A. Habib, Review of novel combustion techniques for clean power production in gas turbines, *Energy Fuels*, 32 (2018) 979-1004.
- [3] D. Kim, Review on the development trend of hydrogen gas turbine combustion technology, *J. Korean Soc. Combust.*, 24 (2019) 1-10.
- [4] H. Kim, U. Jin, Y. Go, M. Choi, I. Gu, M. Baek, K.T. Kim, D. Shin, A review of carbon neutral gas turbine combustion technology, *J. Korean Soc. Combust.*, 27(2) (2022) 14-38.
- [5] M. Moliere, The fuel flexibility of gas turbines: a review and retrospective outlook, *Energies*, 16 (2023) 3962.
- [6] M.G. Michaud, P.R. Westmoreland, A.S. Feitelberg, Chemical mechanisms of NO formation for gas turbine conditions, *Symposium (International) on Combustion*, 24 (1992) 879-887.
- [7] S.M. Correa, Power generation and aeropropulsion gas turbines: from combustion science to combustion technology, *Symp. (Int.) Combust.*, 27 (1998) 1793-1807.
- [8] G.E. Andrews, Ultra-low nitrogen oxides (NOx) emissions combustion in gas turbine systems, in: P. Jansohn, *Modern gas turbine systems*, Woodhead Publishing, Sawston, 2013, 715-790.
- [9] P.P. Panda, M. Roa, P. Szedlacsek, W.R. Laster, R.P. Lucht, Structure and dynamics of the wake of a reacting jet injected into a swirling, vitiated cross-flow in a staged combustion system, *Exp. Fluids.*, 56 (2015).
- [10] P.P. Panda, O. Busari, M. Roa, R.P. Lucht, Flame stabilization mechanism in reacting jets in swirling vitiated crossflow, *Combust. Flame.*, 207 (2019) 302-313.
- [11] J.A. Wagner, M.W. Renfro, B.M. Cetegen, Premixed jet flame behavior in a hot vitiated crossflow of lean combustion products, *Combust. Flame.*, 176 (2017) 521-533.
- [12] M.D. Sirignano, E. Goh, A. Hoffie, V. Nair, E. Vedanth, B. Emerson, S. Menon, J. Seitzman, T.C. Lieuwen, High temperature, low NOx combustor concept development (Final Technical Report), Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, 2019.
- [13] J. Hwang, M. Kim, W. Lee, K. Min, D. Kang, H. Kim, Combustion characteristics of axial fuel staging nozzles for gas turbine combustors, *J. Korean Soc. Combust.*, 28(4) (2023) 21-29.
- [14] S. Candel, Combustion dynamics and control: Progress and challenges, *Proc. Combust. Inst.*, 29 (2002) 1-28.
- [15] K.T. Kim, Combustion instability feedback mechanisms in a lean-premixed swirl-stabilized combustor, *Combust. Flame.*, 171 (2016) 137-151.
- [16] D. Durox, T. Schuller, N. Noiray, S. Candel, Experimental analysis of nonlinear flame transfer functions for different flame geometries, *Proc. Combust. Inst.*, 32 (2009) 1391-1398.
- [17] T. Lee, K.T. Kim, Direct comparison of self-excited instabilities in mesoscale multinozzle flames and conventional large-scale swirl-stabilized flames, *Proc. Combust. Inst.*, 38 (2021) 6005-6013.
- [18] T. Lee, K.T. Kim, Combustion dynamics of lean fully-premixed hydrogen-air flames in a mesoscale multinozzle array, *Combust. Flame.*, 218 (2020) 234-246.
- [19] M.C. Lee, J. Yoon, S. Joo, J. Kim, J. Hwang, Y. Yoon, Investigation into the cause of high multi-mode combustion instability of H₂/CO/CH₄ syngas in a partially premixed gas turbine model combustor, *Proc. Combust. Inst.*, 35 (2015) 3263-3271.
- [20] H. Kang, M. Lee, K.T. Kim, Measurements of self-excited instabilities and nitrogen oxides emissions in a multi-element lean-premixed hydrogen/methane/air flame ensemble, *Proc. Combust. Inst.*, 39 (2023) 4721-4729.
- [21] O. Schulz, U. Doll, D. Ebi, J. Droujko, C. Bourquard, N. Noiray, Thermoacoustic instability in a sequential combustor: large eddy simulation and experiments, *Proc. Combust. Inst.*, 37 (2019) 5325-5332.
- [22] H.S. Gopalakrishnan, A. Gruber, J.P. Moeck, Computation and prediction of intrinsic thermoacoustic oscillations associated with autoignition fronts, *Combust. Flame.*, 254 (2023) 112844.
- [23] Y. Choi, K.T. Kim, Mode shape-dependent thermoacoustic interactions between a lean-premixed primary flame and an axially-staged transverse reacting jet, *Combust. Flame.*, 255 (2023) 112884.
- [24] Y. Choi, K.T. Kim, Strong flame interaction-induced collective dynamics of multi-element lean-premixed hydrogen flames, *Int. J. Hydrogen Energy*, 48 (2023) 2030-2043.
- [25] N. Lamarque, T. Poinso, Boundary conditions for acoustic eigenmodes computation in gas turbine combustion chambers, *AIAA J.*, 46 (2008) 2282-2292.

저자정보



최용석

최용석은 카이스트 항공우주공학과 박사과정이며, 관심분야는 지상발전/항공용 가스터빈 다단 연소 시스템, 및 연소불안정이다.



한경현

한경현은 카이스트 항공우주공학과 석사과정이며, 관심분야는 가스터빈 다단연소 시스템 및 연소불안정이다.



김규태

김규태는 카이스트 항공우주공학과 부교수로 재직중이며, 캔-환형 가스터빈 다중 연소기 열음향 상호작용, 수소 전소/혼소 특성과 항공 엔진 연소불안정에 대한 실험 및 모델링 관련 연구를 진행하고 있다.