

페어링 비대칭성이 캔-환형 연소기의 열음향 불안정에 미치는 영향

배다현* · 문기훈**† · 김규태*

*한국과학기술원 항공우주공학과

Influence of Pairing Asymmetry on Thermoacoustic Instabilities in a Can-annular Combustor

Dahyun Bae*, Kihun Moon**† and Kyu Tae Kim*

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

(Received 28 December 2022, Received in revised form 2 March 2023, Accepted 9 March 2023)

ABSTRACT

The influence of pairing asymmetry on thermoacoustic instabilities was experimentally investigated in an odd-numbered can-annular combustion system, using 3D FEM-based Helmholtz simulation and acoustic wave decomposition method. We show that a pair of degenerate mode is split into two modes with a frequency difference of 6 Hz, which is induced by a pairing-asymmetry-related geometrical property. Interestingly, the modal interaction between splitting modes gives rise to the periodic transition between standing and spinning azimuthal instabilities in the annular cross-talk section.

Key Words : Azimuthal instabilities, Can-annular combustor, Combustion instability, Cross-talk, Hydrogen

1. 서 론

발전용 가스터빈 연소기는 대기오염물질 배출을 저감하기 위해 희박 예혼합 연소 방식으로 운용된다. 하지만 희박 예혼합 연소기는 연소불안정(combustion instability)이라는 고질적인 문제를 가지고 있다. 연소불안정이란 난류 화염의 열 방출률 섭동이 연소실 내 고유 음향장과 공진 결합하여 강한 진동이 발생하는 현상으로, 연소실 외벽으로의 열전달 증가, 부품의 피로 파괴 등 시스템에 치명적인 손상을 일으킨다[1]. 이처럼 바람직하지 않은 연소진동 현상을 규명하기 위해 수행된 대부분의 연구는 스월 안정화 화염 구조에 집중되어 있다. 대표적인 예시로 Huang과 Yang[2]은 대외류모사 기법을 이용하여 스월 안정화 연소기에서 스월 수에 따른 화염 응답 특성을 연구하였다. Kim 등[3,4]은 화염전달함수(flame transfer function) 및 화염묘사함수(flame describing function)를 이용하여 음

향 및 유동 섭동 간의 간섭 현상에 따른 화염 동특성을 실험적으로 연구하였다.

최근 이산화탄소 배출량을 제한하는 국제 사회의 노력에 따라 수소와 같은 무탄소 연료로의 전환이 이루어지고 있다. 하지만 기존의 거대 스월 노즐은 수소의 높은 반응성에 따른 역화(flashback) 현상에 취약하여, 이에 대한 대안으로 밀리미터 스케일의 군집 다중노즐 배열이 주목받고 있다. 예를 들어 York 등[5]은 마이크로믹서 노즐을 이용하였을 때 수소 연소기의 역화 현상이 완화되며 질소산화물 생성이 억제됨을 보였다. Choi 등[6]은 4×4 배열의 메조스케일 노즐에서 수소 체적 분율에 따라 희박가연한 계가 낮아짐을 확인하였다. 다중노즐 배열의 연소 동특성을 분석하기 위한 연구로 Durox 등[7]은 원뿔형, V형, M형, 그리고 다중원뿔형 화염 형상에 대한 화염전달함수를 비교하였다. 또한 Æsøy 등[8]은 삼중 노즐 배열에서 노즐 간격이 짧아지거나 수소 분율이 증가할수록 화염전달함수의 차단 주파수가 증가함을 확인하였다. Lee 등[9]은 OH PLIF 이미지를 이용하여 60개의 메조스케일 노즐로 구성된 다중노즐 배열에서 수소 화염의 구조를 분석하였다. 동일한 실험 설비로 Jin 등[10]은 수소/메탄 혼소 조건에서 연료 스테이징 기법을 적용하였을 때 내부 및 외부 화

†Corresponding Author, kimoona@ethz.ch

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.

염의 위상상쇄를 통해 자발 불안정 진폭이 완화될 수 있음을 보였다. Kang 등[11]은 수소 전소 실험을 통해 예혼합 수소 화염이 고주파의 음향 모드와 쉽게 결합됨을 확인하였다.

이와 같이 연소불안정 현상에 관한 연구들은 단일 연소기를 중심으로 수행되었다. 하지만 실제 가스터빈 엔진은 단일 연소기 구조가 아닌 짝수개의 연소기를 원주 방향으로 배치한 캔-환형 구조를 채택하고 있다. 이러한 구조는 개발 비용이 상대적으로 저렴하며, 전력 생산의 대용량화에 유리하다. 그러나 터빈 1단 노즐 상류에 존재하는 크로스톡(cross-talk) 영역으로 인해 연소기 간 음향 상호작용이 발생하여, 연소불안정 현상을 더욱 복잡하게 만든다. 이처럼 독특한 음향 환경을 갖는 캔-환형 연소기의 열음향 불안정을 이해하기 위해 많은 연구가 수행되고 있다. 수치적 연구의 대표적인 예시로 Kaufmann 등[12]은 3차원 유한요소법을 기반으로 SGT5-8000H 캔-환형 연소 시스템을 분석하여 단일 연소기 구조에서 예측되지 않는 동특성을 규명했다. von Saldern 등[13]은 비선형 G-방정식을 이용한 저차 모델링을 기반으로 캔-환형 연소기에서 고유 모드 사이의 상호작용으로 인해 복잡한 동특성이 발생할 수 있음을 보였다. 최근 Yoon[14]은 다중 연소기 구조의 연소불안정 현상을 분석하기 위해 다중 입력 다중 출력 전달 함수를 이용한 저차 열음향 모델을 제안하였다. 실험적 연구로 Moon 등[15]은 음향상호작용이 발생하는 이중 연소기 시스템에서 푸시-푸시(push-push), 푸시-풀(push-pull) 모드의 존재를 규명하였다. 해당 연구를 확장하여 Moon 등[16]은 환형 크로스톡 영역으로 연결된 사중 캔-환형 연소기를 실험했다. 특히 이들은 모드 국소화(mode localization) 및 모드 군집화(mode clustering)와 같은 캔-환형 연소기만의 독특한 현상들을 보고하였다. Venkatesan 등[17]은 크로스톡으로 연결된 2개의 다중노즐 연소기에서 노즐의 연료 분배량 조절에 따라 푸시-푸시 및 푸시-풀 모드가 나타남을 확인하였다.

최근에는 캔-환형 구조의 연소진동을 완화하기 위해 비대칭적인 운용 기법을 적용한 연구가 수행되고 있다. 수치적 연구로 Ghirardo 등[18]은 저차 모델링을 기반으로 캔-환형 연소기의 동특성을 해석하여 비대칭적인 화염 응답에 의해 모드 분리(mode splitting) 현상이 발생할 수 있음을 보였다. Jegal 등[19]은 이중 연소기 시스템에서 비대칭 음향 경계 조건에 따른 연소 동특성을 분석하여 진폭 억제 현상을 보고했다. 더불어 이들은 비대칭적 화염 응답 조합을 이용하여 압력 진폭을 제어할 수 있는 수동제어 기법을 제시하였다[20]. Moon 등[21]은 캔-환형 구조에서 화염 응답의 회전 비대칭성이 연소진동을 완전히 제어하지 못

하고, 오히려 크로스톡 영역에서의 방위 방향 회전 모드 등 복잡한 패턴의 상호작용 모드가 야기됨을 보였다. 최근 Buschmann 등[22]은 8개의 연소기로 구성된 캔-환형 구조에서 연소기 간 음향 상호작용의 비대칭성이 모드 형상에 영향을 주어 비대칭적인 압력 진폭 분포를 형성시킬 수 있음을 보였다.

이처럼 다중 연소기 시스템의 열음향 불안정을 제어하기 위해 다양한 비대칭 조건을 이용한 연구는 이뤄졌지만, 홀수개의 연소기에서 발생하는 구조적 비대칭성에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 페어링 비대칭성이 오중(N=5) 캔-환형 연소기의 열음향 불안정에 미치는 영향을 고찰하였다. 이를 위해 모든 연소기가 동일한 당량비를 갖는 조건에서 압력 및 열 방출률 신호를 측정하였다. 더불어 연소기의 고유 모드와 모드 형상을 계산하기 위하여 3차원 유한요소법 기반의 고유치 해석을 수행하였으며, 이를 실험 결과와 비교하였다. 마지막으로 측정된 신호에 대해 파동분해기법(acoustic wave decomposition method)을 이용한 음향파 분석을 수행하여 캔-환형 열음향 불안정의 특성을 자세히 분석하였다.

2. 방법론

2.1 실험 장비, 계측 방법 및 운용 조건

Fig. 1(a)는 완전한 환형 크로스톡 영역으로 연결된 오중 예혼합 연소기를 나타낸 그림이다. 캔-환형 연소기에서 발생하는 연소기 간 음향 상호작용에 따른 동특성을 연구하기 위해 제작된 이 장비는 다섯 개의 동일한 연소기로 구성되어 있으며, 각 연소기는 하류에서 완전한 환형 크로스톡 영역으로 연결된다. 개별 연소기는 입구 플레넘(plenum), 노즐 어셈블리, 석영관, 트랜지션 피스(transition piece), 연소실, 그리고 배기구로 구성되어 있다. 실험에 사용한 노즐의 단면도를 Fig. 1(b)에 도시하였다. 노즐 어셈블리는 총 97개의 동일한 인젝터로 구성되며, 인젝터의 직경은 3.0 ± 0.05 mm이다. 해당 노즐 구조는 선행 연구 결과[11]를 바탕으로 설계되었으며, 화염장은 다수의 작은 화염으로 이루어진다. Fig. 1(c)는 개별 연소기의 단면도를 보여 주고 있다. 연소기 상류로부터 멀리 떨어진 위치에서 순도 99.999%의 수소를 주입하여 완전 예혼합 조건을 달성하였다. 혼합물은 노즐 어셈블리를 거쳐 텀프면으로 분사되며, 연소 생성물은 연소실과 피스톤을 거쳐 배기구를 통해 외부로 배출된다. 연소기의 길이 방향으로 단원 음향 경계 조건을 형성하기 위해 노즐 상류에는 초크 오리피스 가 설치되어 있고 하류에는 막힘률 80.5%의 피스톤이 설치되어 있다. 그리고 Fig. 1(c)에 나타냈듯이, 연소실 내부 압력

섭동($p'_{k,i}$)을 계측하기 위해 총 25개의 동압 센서(PCB piezotronics, 112A22)를 연소기의 길이 방향 및 크로스톡 영역의 방위 방향에 설치하였다. 이때 하첨자 k 는 동압 센서의 위치이며, 하첨자 i 는 연소기의 번호이다. 화염의 열 방출률 섭동(q'_i)을 정량적으로 계측하기 위해 OH^* 대역 필터가 장착된 광증배관(Hamamatsu, H7732-02)을 이용하였다.

Fig. 1(d)는 크로스톡 영역에서의 단면을 나타낸 그림이다. 본 실험에서는 두 연소기 간의 간격(400 mm)과 크로스톡의 내경(43 mm)을 일정하게 유지하였다. 크로스톡 영역의 압력 섭동을 계측하기 위해 5개의 동압 센서를 72° 씩 균등한 간격으로 배열하여 인접한 연소기들의 중앙에 위치하도록 설치했다.

본 연구에서 고려한 운전 조건은 다음과 같다. 완전 예혼합된 수소-공기 혼합물을 $200 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 예열하여 모든 노즐에 $30 \pm 1 \text{ m/s}$ 의 평균 유속으로 공급하였다. 반응물의

당량비는 0.48로 단열화염온도 1744 K에 해당하며, 모든 연소기가 동일한 당량비를 갖도록 설정했다. 이때 계산된 당량비의 불확실성은 약 1.5%이다. 그리고 크로스톡 영역의 위치는 1300 mm로 고정하였다. 해당 조건에서 시스템이 한계 진동 상태일 때, 모든 압력 및 열 방출률 신호를 24 kHz 샘플링 주파수로 4초간 동시에 획득하였다.

2.2 3차원 유한요소법 기반 고유치 해석

본 연구에서는 COMSOL Multiphysics의 3차원 유한요소법 기반의 음향 해석 소프트웨어를 이용하여 캔-환형 연소기에 대한 고유치 해석을 수행하였다. 해석 대상인 이중 캔-환형 연소기는 공간적으로 이산화되어 약 2200만 개의 격자로 구성했으며, 소프트웨어 공급사에서 제공한 격자 품질 기준을 만족하였다.

본 시뮬레이션에서 사용한 지배 방정식은 헬름홀츠(Helmholtz) 방정식으로 식 (1)과 같이 표현된다.

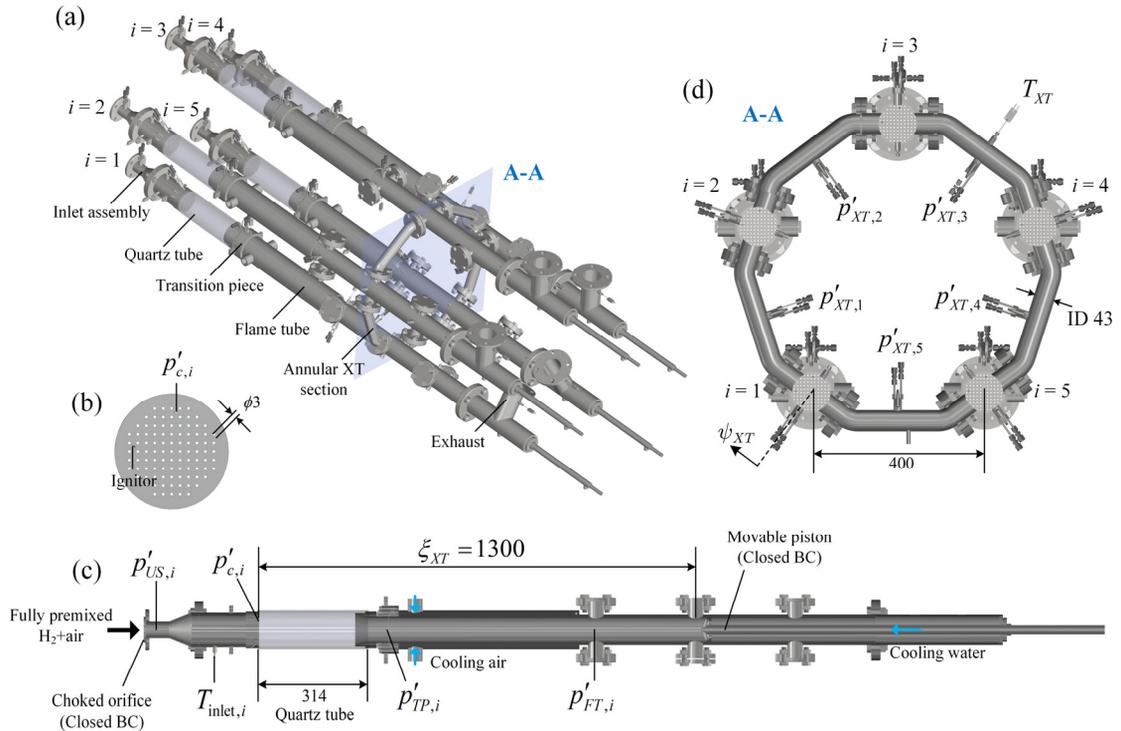


Fig. 1. Illustration of experimental setup. (a) Five lean-premixed tunable combustors equipped with small-scale multi-element injectors. (b) Square lattice arrangement of multi-element injectors consisting of a total of 97 nozzles. (c) Cross-sectional view of individual combustor. (d) Cross-sectional view of cross-talk section (A-A plane). Circumferential coordinate for annular cross-talk section (ψ_{XT}) is defined with respect to the centerline of Combustor 1 in clockwise direction. $p'_{k,i}$ and $T_{k,i}$ indicate pressure transducers and thermocouples. i = combustor index, c = combustion chamber, US = upstream, TP = transition piece, FT = flame tube, XT = cross-talk. All dimensions in mm.

$$\nabla \cdot (\nabla \hat{p}) + \frac{\omega^2}{c^2} \hat{p} = 0 \quad (1)$$

여기서 \hat{p} 는 압력 섭동의 복소 진폭, ω 는 복소 각주파수, 그리고 c 는 음속을 의미한다. 캔-환형 연소기는 입구부, 연소실, 그리고 크로스톡 영역으로 세분화할 수 있으며, 입구부 온도는 반응물 온도와 동일하게 설정하였고 연소실 온도는 이전 실험에서 측정된 단일 연소기에서의 불안정 주파수 결과로부터 도출하였다[16]. 그리고 크로스톡 영역에서의 온도는 Fig. 1(d)에 표시한 열전대(T_{XT})로 직접 측정한 값으로 설정하였다. 더불어 연소기의 입구와 출구 도메인은 닫힌 음향 경계 조건으로 설정하였다. 본 연구에서는 점성 및 열 경계층에서 발생하는 음향 소산을 무시하였기에 이와 관련된 영향을 고려하지 않았다[23]. 마지막으로 본 연구에서는 화염의 정보인 화염전달함수와 화염묘사함수를 포함하지 않은 순수 음향장에 대한 해석을 진행하였다. 이러한 기법은 정확한 열음향 안정성을 분석할 수는 없지만 시스템의 고유 모드 및 상응하는 상호작용 패턴을 분석하는 데 이용하였다. 자세한 해석 기법은 [16,21]에서 다루었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 시계열 분석 및 고유치 해석 결과

Fig. 2(a)는 모든 연소기에 대한 압력 섭동 및 열 방출률 신호의 시계열 결과이며, Fig. 2(b)는 3차원 헬름홀츠 방정식으로 계산된 고유치 해석을 포함한 주파수 영역에서의 결과이다. 이때 오중 연소기 구조에서 계산되는 고유 모드의 상호작용 패턴을 오등분으로 나뉜 원형 심볼로 표현했다. 동일한 색상은 정위상 관계이며 다른 색상은 역위상 관계를 의미한다. 이 중 하얀색으로 표시된 영역은 진폭이 없는 안정적인 연소기를 의미한다.

Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이, 모든 압력 신호에서 하나의 파형이 1초 동안 6번 반복되는 맥놀이(beat) 현상을 관찰할 수 있다. 이는 열 방출률 신호에서도 동일하게 관찰된다. 이때 발생한 상호작용 모드를 분석하기 위하여 푸리에 변환을 통해 계산된 주파수 특성을 Fig. 2(b)에 나타냈다. 오중 연소기 구조($N=5$)의 불안정은 554 Hz와 560 Hz의 주파수에서 발생했고, 이들의 주파수 차이는 맥놀이 주파수인 6 Hz와 동일하다. 다음으로 Fig. 2(b)에 도시한 고유치 해석 결과를 보면, 다양한 상호작용 패턴을 갖는 길이 방향 고유 모드가 400-1000 Hz 사이에 세 개의 군집으로 존재한다. 예를 들어 첫 번째 군집에는 모든 연소기가

정위상으로 진동하는 푸시-푸시 모드(473 Hz)와 이외의 푸시-풀 모드(485 Hz 그리고 529 Hz)가 존재한다. 중요한 점은 전체 군집에서 푸시-푸시 모드를 제외한 모든 상호작용 모드가 축퇴된 상태로 존재하는 것이다. 여기서 고유치 축퇴(eigenvalue degeneracy)란 하나의 고유 주파수에 여러 개의 고유 상태가 존재하는 현상으로, 이와 같은 거동 이 링 형태로 연결된 진동자 구조에서도 발생할 수 있음이 보고되었다[24]. 중요한 점은 Fig. 2b에서 측정값과 고유치 해석 결과를 비교해보면, 실제 불안정 주파수인 554 Hz와 560 Hz 근처에 529 Hz의 축퇴된 고유 모드가 존재한다는 것이다. 이를 통해 두 불안정 모드는 축퇴된 모드와 연관됨을 유추할 수 있다.

두 불안정 모드에 대한 동적 특성을 엄밀히 파악하기 위해, 각 연소기의 주요 신호들을 분석하여 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3(a)는 554 Hz로 야기된 상호작용 모드의 압력 및 열 방출률 신호에 대한 시계열 결과이다. 1번과 4번 연소기 간에 정위상 관계가 형성되며, 이에 대해 2번, 3번, 그리고 5번 연소기는 역위상 관계이다. Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이, 560 Hz의 불안정 모드도 유사한 상호작용 패턴을 갖는다. 중요한 점은 두 불안정 모드가 Fig. 2(b)에 나타난 529 Hz의 축퇴 모드와 동일한 상호작용 패턴이라는 점이다. 두 불안정 모드가 529 Hz의 축퇴 모드임을 보이기 위해, 모드 형상 분석을 수행하였고 이는 Fig. 4에서 자세하

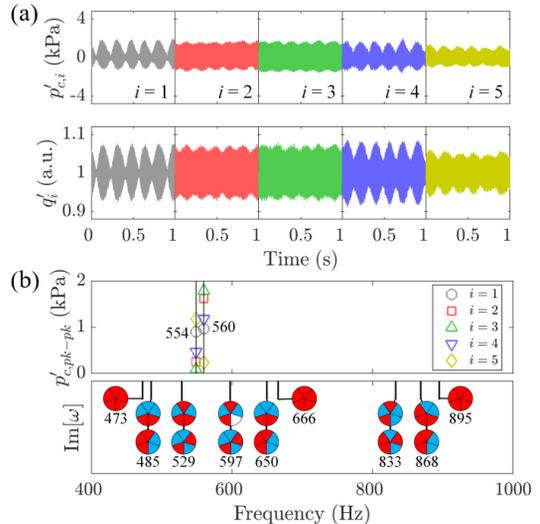


Fig. 2. (a) Time traces of combustor pressure and heat release rate oscillations. (b) Comparison between the measurement (upper panel) and eigenvalue analysis (lower panel). $p'_{c,pk-pk}$ means the peak-to-peak amplitude of combustor pressure oscillations.

게 분석하겠다.

Figs. 3(c) 그리고 3(d)의 그림에서 막대의 높이는 각각 열 방출률 및 압력 섭동의 진폭이며, 색상은 각각 열 방출률과 압력 섭동 사이의 위상차 그리고 압력 섭동 간의 위상차를 의미한다. 만약 압력과 열 방출률 신호의 위상차가 90° 이내로 보강간섭한다면, 레이리 기준(Rayleigh criterion)이 만족되며 시스템 내에 불안정이 발생할 수 있음을 의미한다[25]. Figs. 3(c) 그리고 3(d)의 왼쪽 그림에서 알 수 있듯, 각 연소기에서의 압력과 열 방출률 신호가 0° 에 가까운 위상 차이를 보이므로, 이로 인해 전체 시스템의 섭동 에너지가 공급되어 불안정으로 성장할 수 있음을 알 수 있다. 더불어 각 불안정 모드 내에서 압력 진폭이 클수록 열 방출률 진폭도 크게 나타나므로, 연소기 압력 및 열 방출률의 상대 진폭이 서로 상관성을 보이고 있다. 한편 압력 섭동의 진폭 분포를 보면 오중 연소기 구조의 독특한 진동 특성을 관찰할 수 있다. 예를 들어 560 Hz의 상호작용 모드에서 1번, 3번, 그리고 5번 연소기가 정위상 관계이며 이에 대해 2번과 4번 연소기가 역위상으로 진동하고 있다. 이때 3번 연소기의 진폭은 1.8 kPa이지만 5번 연소기는 0.2 kPa에 불과할 정도로 비대칭적인 진폭 크기가 두드러진다.

두 불안정 모드의 상태를 규명하기 위하여, Fig. 4에서는 계측된 압력 신호와 유한요소법 기반의 음향 시뮬레이션에서 계산된 모드 형상을 비교하였다. 여기서 ψ_{XT} 는 Fig. 1d에서 표기한 환형 크로스톡 영역의 원주 방향 좌표이다. 25개의 동압 센서로 계측한 압력 신호가 시뮬레이션으로 도출된 모드 형상과 잘 일치함을 보인다. 먼저 554 Hz로 야기된 상호작용 모드의 결과를 보면, 압력 노드가 연소기 길이 방향으로 3개 그리고 크로스톡 영역의 방위 방향으로 4개가 형성된다. 그리고 Fig. 3(c)의 결과와 같이, 전체 시스템의 압력 분포가 매우 비대칭적임을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)에 도시한 560 Hz의 불안정 모드도 554 Hz의 결과와 매우 유사한 모드 형상을 보이므로 인접한 두 주파수가 본래에 축퇴된 모드임을 알 수 있다. 그러므로 축퇴된 두 모드는 서로 동일한 음향학적 특징을 유지한 채 6 Hz의 주파수 차이로 분리되어 발생하였다. 이와 같이 축퇴된 두 고유 모드가 서로 다른 주파수로 발생하는 현상을 모드 분리 현상이라 하며, 주로 환형 및 칸-환형 연소기에서 대칭적 구조가 붕괴됨에 따라 발생하는 것으로 알려졌다[18,26-29]. 또한 본 연구와 동일한 운전 조건에서 계측된 페어링 대칭을 만족하는 사중 연소기($N=4$)에서는 이러한 현상이 발견되지 않았으므로[30], 칸-환형 시스템

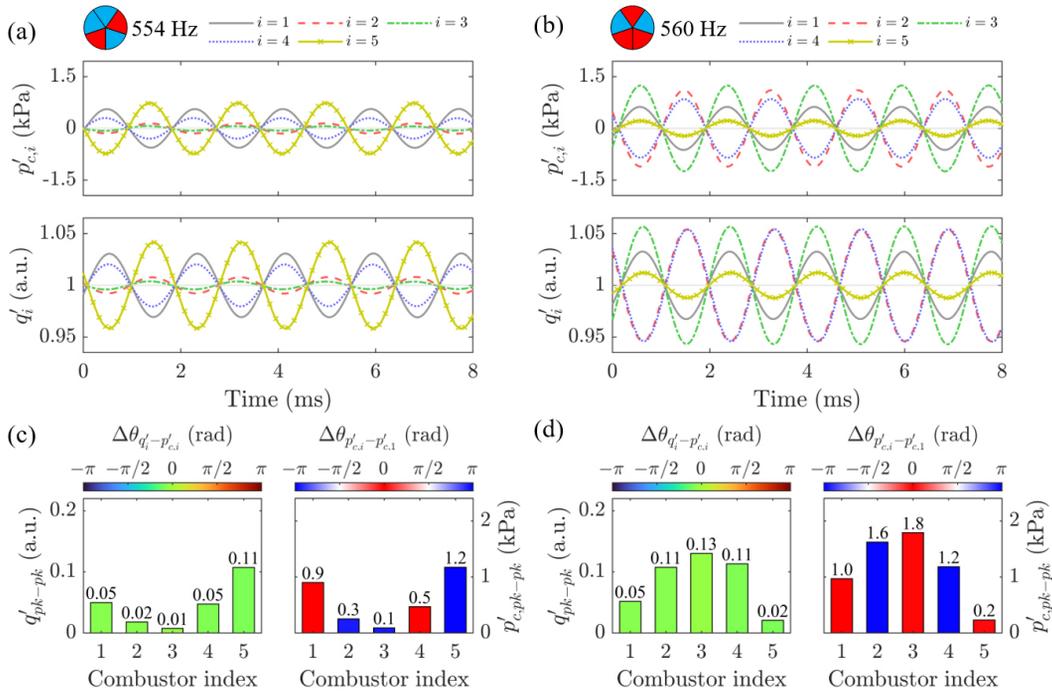


Fig. 3. (a, b) Time series of combustor pressure oscillations (upper panel) and heat release rates (lower panel) at 554 Hz and 560 Hz. (c, d) Peak-to-peak amplitudes of heat release rate (left) and combustor pressure oscillations (right), colored by key phase differences ($\Delta\theta_{q'_i-p'_{c,i}}$ and $\Delta\theta_{p'_{c,i}-p'_{c,i}}$).

의 구조적인 비대칭성이 동특성에 큰 영향을 미치는 주요한 인자임을 알 수 있다.

3.2 모드 상호작용이 환형 크로스톡 영역에 미치는 영향

모드 분리 현상에 의해 발달한 두 모드 간의 상호작용이 크로스톡 영역의 동특성에 미치는 영향을 알기 위해, 크로스톡 압력 신호($p'_{XT,i}$)에 대해 파동분해기법을 적용하였다. 이때 도출된 시계 방향 음향파의 진폭(A_-)과 반시계 방향 음향파의 진폭(A_+)을 이용하여 회전비를 계산하였으며, 회전비는 식 (2)와 같이 표현된다[31].

$$SR = \frac{A_+ - A_-}{A_+ + A_-} \quad (2)$$

참고문헌에서는 회전비 값에 따라 시스템의 동역학적 상태를 판별했다[32]. $-1/3 < SR < 1/3$ 범위에 해당할 경우, 정상 모드가 우세하며 이 밖의 범위에선 회전 모드가 우세함을 의미한다.

Fig. 5(a)는 전체 계측 시간 동안의 회전비를 보여주며, Fig. 5(b)는 파동분해기법을 통해 계산된 두 음향파의 진폭(A_+ 와 A_-)의 결합확률분포로, 회색 경계선을 기준으로 동역학적 상태가 나뉜다. 그리고 Fig. 5(c)는 Fig. 5(a)의 빨간 점으로 표시한 네 개의 연속적인 구간에서의 압력 신호를 보여주며, 각각의 위상차를 Fig. 5(d)에 도시하였다. 마지막으로 Fig. 5(e)는 각 순간에 대한 A_+ 와 A_- 의 결합확률분포를 보여주고 있다.

Fig. 5(a)에서 확인할 수 있듯이, 환형 크로스톡 영역의 동역학적 상태는 하나의 방위 방향 모드로 정의되는 것이

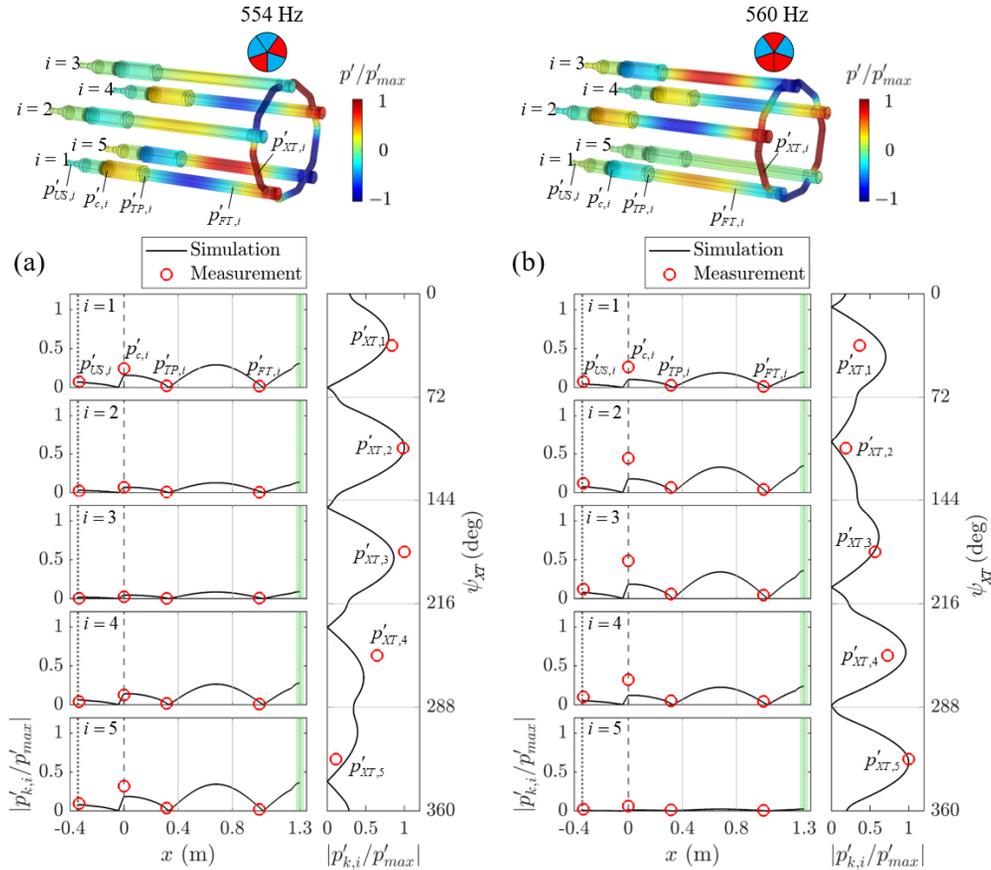


Fig. 4. (a, b) Mode shapes in five combustors and annular cross-talk section at 554 Hz and 560 Hz. Pressure amplitude was normalized by value at pressure antinode (p'_{max}). Vertical dashed line at $x = 0$ indicates position of combustor dump plane, and vertical shaded region between 1280 and 1320 mm indicates axial location of cross-talk section. Circumferential coordinate (ψ_{XT}) for annular cross-talk section is defined in Fig. 1d.

아닌 정상 모드와 회전 모드가 교대로 발달하고 있음을 알 수 있다. 이와 마찬가지로 Fig. 5(b)는 두 음향파의 진폭에 대한 결합확률분포가 정상 모드 및 회전 모드를 포함한 넓은 영역에서 분포하고 있음을 보여주고 있다. 다음으로 주기적으로 변화하는 동역학적 상태를 임의의 한 주기에 대해 자세히 분석하였다. Fig. 5(c)에서 확인할 수 있듯이, t_1 구간에서의 위상차는 정위상 또는 역위상 관계로 나뉘고 있으므로, 해당 구간에선 정상 모드가 발달하였음을 알 수 있다. 또한 Fig. 5(d)에 나타낸 위상차와 Fig. 5(e)의 결합확률분포가 이를 뒷받침하고 있다. 그러므로 첫 번째 시간 구간에선 정상 모드가 발달하였음을 보여준다. 반면, 두 번째 시간 구간인 t_2 에서 크로스톡 압력 신호의 진폭이 서로 유사한 크기를 보이고 있다. 센서 간의 위상차를 계산하였을 때, 센서 간의 물리적 위치 차이와 측정된 압력

신호의 위상차는 선형적이며 결정계수(R^2)는 0.9974로 계산된다. 따라서 이는 반시계 방향 회전 모드가 발생하였음을 보여준다. t_3 구간에서는 다시 위상 관계가 정위상 또는 역위상으로 나뉘지만, t_1 구간과는 다른 마디선(nodal line)을 갖는 정상 모드가 발달하였다. 마지막 네 번째 시간 구간인 t_4 에서는 압력 신호 간에 유사한 크기의 진폭을 보이고 있지만, 앞선 t_2 구간과는 반대로 시계 방향 회전 모드가 발달하였다. 따라서 연속적인 네 개의 시간 구간을 분석하였을 때 크로스톡 영역에서는 정상 모드와 회전 모드 간의 주기적인 전이가 일어남을 보여주고 있다. 정리하면, 오중 갠-환형 연소기($N=5$)는 축퇴된 모드가 서로 다른 두 모드로 분기되고, 이들의 상호작용으로 인해 크로스톡 영역에서는 주기적인 모드 전이가 동반된 방위 방향 불안정이 야기될 수 있음을 보여준다.

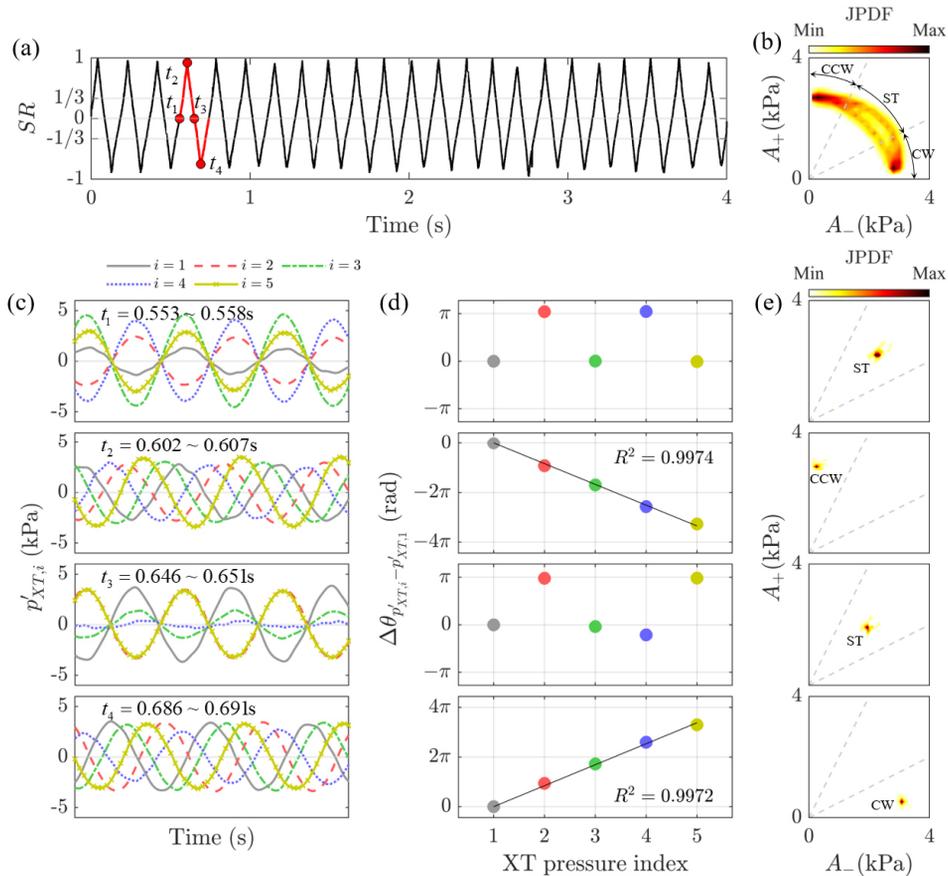


Fig. 5. Azimuthal instabilities in the annular cross-talk section. (a) Time traces of spin ratio (SR). (b) Joint probability density function (PDF) of the amplitude of two waves travelling in counter-clockwise (A_+) and clockwise (A_-) directions. Dashed lines refer to spin ratio = $\pm 1/3$ boundaries. (c) Local time series of cross-talk pressure signals. (d) Relative phase angles in the annular cross-talk section. (e) Joint PDF of A_+ and A_- . Four successive intervals are indicated as red symbols in Fig. 5a.

4. 결론

캔-환형 구조에서 크로스톡 영역을 통한 연소기-연소기 음향 상호작용은 전체 시스템의 열음향 특성에 상당한 영향을 미쳐 복잡한 연소진동 현상을 만든다. 이와 관련된 선행 연구들은 실제 발전용 가스터빈 구조에 맞게 짝수개로 구성된 다중 연소기들의 동적 특성을 분석하였다. 하지만 본 연구에서는 오중 연소기($N=5$)에서 나타나는 열음향 불안정 특성을 분석하여, 홀수개로 이루어진 캔-환형 구조에 대한 기초 연구를 수행했다. 특히 3차원 유한요소법 기반의 고유치 해석을 수행하여, 해당 구조에서 나타나는 페어링 비대칭성으로 인해 본래에 예측된 고유 모드 쌍이 서로 다른 주파수로 나뉘는 모드 분리 현상이 나타남을 보였다. 분리된 두 모드의 상호작용으로 인해 시스템 내에 강한 맥놀이 현상이 나타났고, 특히 환형 크로스톡 영역에서는 방위 방향 정상 모드와 회전 모드가 주기적으로 발달하며 짝수개의 캔-환형 구조에서 발견되지 않던 복잡한 동적 특성을 발생시켰다. 하지만 본 연구는 대표적인 운용 조건에 대한 결과에 국한되기에 향후에는 회전 비대칭 조건을 포함한 광범위한 조건에서 홀수개 연소기의 동적 특성을 분석할 예정이다.

후 기

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20206710100060, 분산발전 가스터빈용 수소 전소 저 NOx 연소기 개발).

References

[1] T. Lieuwen, V. Yang, Combustion instabilities in gas turbine engines: operational experience, fundamental mechanisms, and modeling, AIAA, 2005.
 [2] Y. Huang, V. Yang, Effect of swirl combustion dynamics in a lean-premixed swirl-stabilized combustor, Proc. Combust. Inst., 30 (2005) 1775-1782.
 [3] K.T. Kim, D.A. Santavicca, Interference mechanisms of acoustic/convective disturbances in a swirl-stabilized lean-premixed combustor, Combust. Flame, 160 (2013) 1441-1457.
 [4] K.T. Kim, Combustion instability feedback mechanisms in a lean-premixed swirl-stabilized combustor, Combust. Flame, 171 (2016) 137-151.
 [5] W.D. York, W.S. Ziminsky, E. Yilmaz, Development and testing of a low NOx hydrogen combustion

system for heavy-duty gas turbines, J. Eng. Gas Turbines Power, 135 (2013) 022001.
 [6] J. Choi, R. Rajasegar, W. Lee, T. Lee, J. Yoo, Hydrogen enhancement on a mesoscale swirl stabilized burner array, Int. J. Hydrogen Energy, 46 (2021) 23906-23915.
 [7] 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.
 [8] E. Aesøy, T. Indlekofer, F. Gant, A. Cuquel, M.R. Bothien, J.R. Dawson, The effect of hydrogen enrichment, flame-flame interaction, confinement, and asymmetry on the acoustic response of a model can combustor, Combust. Flame, 242 (2022) 112176.
 [9] T. Lee, K.T. Kim, Curvature distribution of lean-premixed mesoscale multinozzle hydrogen flames, J. Korean Soc. Combust., 26 (2021) 14-21.
 [10] U. Jin, K.T. Kim, Influence of radial fuel staging on combustion instabilities and exhaust emissions from lean-premixed multi-element hydrogen/methane/air flame, Combust. Flame, 242 (2022) 112184.
 [11] H. Kang, K.T. Kim, Combustion dynamics of multi-element lean-premixed hydrogen-air flame ensemble, Combust. Flame, 233 (2021) 111585.
 [12] P. Kaufmann, W. Krebs, R. Valdes, U. Wever, 3D Thermoacoustic properties of single can and multi can combustor configurations, in: ASME Conference Proceedings, GT2008-50755.
 [13] J.G.R. von Saldern, J.P. Moeck, A. Orchini, Nonlinear interaction between clustered unstable thermoacoustic modes in can-annular combustors, Proc. Combust. Inst., 38 (2021) 6145-6153.
 [14] M. Yoon, Thermoacoustics and combustion instability analysis for multi-burner combustors, J. Sound Vib., 492 (2021) 115774.
 [15] K. Moon, K.T. Kim, Combustion-acoustic interactions through cross-talk area between adjacent model gas turbine combustors, Combust. Flame, 202 (2019) 405-416.
 [16] K. Moon, H. Jegal, C. Yoon, K.T. Kim, Cross-talk-interaction-induced combustion instabilities in a can-annular lean-premixed combustor configuration, Combust. Flame, 220 (2020) 178-188.
 [17] K. Venkatesan, A. Cross, C. Yoon, F. Han, Heavy duty gas turbine combustion dynamics study using a two-can combustion system, in: ASME Conference Proceedings, GT2019-90327.

- [18] G. Ghirardo, C.D. Giovine, J.P. Moeck, M.R. Bothien, Thermoacoustics of can-annular combustors, *J. Eng. Gas Turbines Power*, 141 (2019) 011007.
- [19] H. Jegal, K. Moon, J. Gu, L.K.B. Li, K.T. Kim, Mutual synchronization of two lean-premixed gas turbine combustors: phase locking and amplitude death, *Combust. Flame*, 206 (2019) 424-437.
- [20] H. Jegal, J. Gu, L.K.B. Li, K.T. Kim, Influence of asymmetric flame transfer functions on can-to-can acoustic interactions between two lean-premixed combustors, *Proc. Combust. Inst.*, 38 (2021) 6051-6058.
- [21] K. Moon, C. Yoon, K.T. Kim, Influence of rotational asymmetry on thermoacoustic instabilities in a can-annular lean-premixed combustor, *Combust. Flame*, 223 (2021) 295-306.
- [22] P.E. Buschmann, N.A. Worth, J.P. Moeck, Thermoacoustic oscillations in a can-annular model combustor with asymmetries in the can-to-can coupling, *Proc. Combust. Inst.*, in press.
- [23] S. Kim, H.S. Choi, H.J. Kim, Y.S. Ko, C.H. Sohn, Finite element analysis for acoustic characteristics of combustion stabilization devices, *Aerosp. Sci. Technol.*, 42 (2015) 229-240.
- [24] T. Endo, S. Mori, Mode analysis of a ring of a large number of mutually coupled van der Pol oscillators, *IEEE Trans. Circuits Syst.*, 25 (1978) 7-18.
- [25] J. Rayleigh, The explanation of certain acoustical phenomena, *Nature*, 18 (1878) 319-321.
- [26] N. Noiray, M.R. Bothien, B. Schuermans, Investigation of azimuthal staging concepts in annular gas turbines, *Combust. Theory Model.*, 15 (2011) 585-606.
- [27] A. Faure-beaulieu, T. Indlekofer, J.R. Dawson, N. Noiray, Imperfect symmetry of real annular combustors: beating thermoacoustic modes and heteroclinic orbits, *J. Fluid Mech.*, 925 (2021) R1.
- [28] M. Bauerheim, P. Salas, F. Nicoud, T. Poinsot, Symmetry breaking of azimuthal thermo-acoustic modes in annular cavities: a theoretical study, *J. Fluid Mech.*, 760 (2014) 431-465.
- [29] G. Ghirardo, J.P. Moeck, M.R. Bothien, Effect of noise and nonlinearities on thermoacoustics of can-annular combustor, *J. Eng. Gas Turbines Power*, 142 (2020) 041005.
- [30] K. Moon, Y. Choi, K.T. Kim, Experimental investigation of lean-premixed hydrogen combustion instabilities in a can-annular combustion system, *Combust. Flame*, 235 (2022) 111697.
- [31] G. Ghirardo, M.R. Bothien, Quaternion structure of azimuthal instabilities, *Phys. Rev. Fluids*, 3 (2018) 113202.
- [32] J. Bourgoquin, D. Durox, J.P. Moeck, T. Schuller, S. Candel, Self-sustained instabilities in an annular combustor coupled by azimuthal and longitudinal acoustic mode, in: *ASME Conference Proceedings*, GT2013-95010.

저자정보



배다현

배다현은 한국과학기술원 항공우주공학과 석사과정이며 관심 연구 분야는 발전용 가스터빈 연소불안정이다.



문기훈

문기훈은 취리히 연방 공과대학교 박사후연구원이며, 관심 분야는 수소 전소/혼소 화염의 동특성, 발전용/항공용 가스터빈 연소불안정에 대한 실험 및 모델링 관련 연구이다.



김규태

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