

Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2014.18.5.087>

## 유동섭동에 대한 화염응답 특성의 실험적 연구동향

서성현<sup>a,\*</sup> · 박용진<sup>a</sup>

### Current Research Status on Flame Response Characteristics to Flow Disturbances

Seonghyeon Seo<sup>a,\*</sup> · Yongjin Park<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Korea

\*Corresponding author. E-mail: shseo@hanbat.ac.kr

#### ABSTRACT

It becomes critical to understand an energy coupling mechanism between flow perturbations and combustion heat release rate fluctuations for the understanding of high-frequency combustion instabilities occurring in high-performance combustion/propulsion systems. A significant amount of experimental researches have been carried out to understand flame dynamic characteristics by use of flame transfer functions with artificial flow disturbances. Among them, there exist substantial studies on flame response by the excitation of inlet flow. Recently, experimental studies simulating transversal modes excited in actual combustion systems are under way.

#### 초 록

고성능 연소추진 시스템의 고주파 연소불안정 현상을 이해하기 위해서는 연소 열발생과 유동 섭동 간의 에너지 교환 메커니즘 이해가 필수적이다. 화염의 동적 특성 변화를 인위적인 섭동을 통해 화염 전달함수로 표현하고 이해하고자 하는 다수의 실험적 연구가 진행되어 왔다. 이 가운데 특히 연소기 입구 유동에 섭동을 가진하여 축 방향 섭동에 대한 화염반응을 살펴보는 연구가 활발히 진행되었다. 최근에는 실제 연소시스템에서 발생하는 횡 방향 음향모드를 모의하는 연구들이 진행되고 있다.

Key Words: Combustion Instability(연소불안정), Flame Transfer Function(화염전달함수), Flow Disturbance(유동섭동), External Excitation(외부가진)

#### 1. 서 론

연소불안정 현상에 대한 연구는 고압 연소실을 갖는 로켓엔진 개발과 함께 시작되었다고 할 수 있다[1]. 1990년대 이후에는 공해배기물질을 줄이기 위해 희박예혼합(lean premixed) 가스터빈 엔진 개발이 적극적으로 진행되면서 또 다시

연소불안정 현상에 대한 관심이 증가하고 있다 [2,3]. 국내에서는 한국형발사체 개발사업으로 개발되는 액체로켓엔진 연소시스템의 안정적인 개발을 위한 필수 확보기술로 여겨져 연구 관심이 지속되고 있다. 이와 특수한 경우를 제외하고 연소불안정 현상을 이해하고자 하는 동기는 연소시스템에 부정적인 영향을 미치는 연소불안정을 회피하거나 억제하고자 하는 노력에서 기인한다. 연소 불안정현상은 다양한 형태로 나타날 수 있으나, 연소 추진 시스템의 기능과 성능에 큰 영향을 미치는 것은 일반적으로 1 kHz 대역의 주파수 특성을 갖는 고주파 연소불안정(high-frequency combustion instability)이라 할 수 있다. 고주파 연소불안정은 연소실 내부에서 발생하는 물리 현상이 연소실의 음향 공진 모드에 결합된 동적 특성을 갖는 것이 특징이다. 연소불안정현상 발생 시 연소 열발생과 압력이 연소실 내부에서 시간에 따라 급격한 변화를 보인다. 연소실 내부 음향에너지는 열발생과 압력간의 에너지 변환 상관관계에 따라 에너지의 증폭 또는 감소가 발생하게 된다.

따라서 연소불안정 회피 또는 제어를 위해서는 무엇보다도 연소실 내부 음향 에너지 증폭을 야기하는 연소열과 압력 간에 서로 영향을 주고받는 관계를 체계적이며 명확하게 규명할 필요가 있다.

본 논문에서는 외부 가진과 같은 인위적이며, 적극적 방법을 통한 열발생/압력 섭동 간의 상관관계 규명을 위한 연구가 현재 어떻게 진행되고 있는지 정리하고 향후 연구에 대한 제언을 하고자 한다. 다음에서는 연소실 내부 불안정발생에 따른 열발생/유동섭동 간의 관계와 화염전달함수에 대한 정의에 대해서 논하고, 이어서 본 연구주제와 관련된 최신 결과 가운데 실험적 접근결과를 중심으로 연구동향을 정리하였다. 마지막에는 현재까지 밝혀진 연구결과 정리와 향후 연구 방향에 대해 서술하였다.

## 2. 배 경

### 2.1 에너지 결합 (energy coupling)

연소과정에서 배출되는 열과 압력변화간의 에너지 교환에 의한 연소실 내부 음향에너지 변화와 관련된 상관관계는 다음과 같이 표현될 수 있다[4].

$$\Delta e'_{CV} = \frac{k-1}{\rho c^2} \int_0^T \int_0^V p' q' dV dt - \int_0^T \int_0^V \Phi dV dt \quad (1)$$

위 식에서 화염을 포함하고 있는 검사체적에서 음향에너지 밀도 변화(왼쪽 항)는 Rayleigh 조건에 해당하는 압력과 열발생 섭동 결합에 의한 에너지(오른쪽 첫 번째 항)와 검사체적 내에서의 에너지소산(오른쪽 두 번째 항)에 의해 결정되는 것으로 표현할 수 있다. 즉 첫 번째 항은 계인 또는 증폭(amplification)에 해당하고, 두 번째 항은 감쇠(damping)에 해당한다. 연소불안정이 발생하여 이 두 개의 항과 관련된 메커니즘 사이의 에너지가 평형을 이룰 때, 연소는 limit cycle에 도달하게 된다.

즉 대상 연소추진시스템의 연소 안정성을 평가하기 위해서는 관심 대상 화염과 결합된 음향 에너지의 증감여부를 예측하는 것이 중요하다. 그리고 Rayleigh 적분항의 증감 여부와 대상 화염과 관련된 음향 에너지 소산 메커니즘이 어떻게 형성되는가를 판단하는 것이 중요하다. 음향 에너지 소산은 항상 음의 값을 가지므로 결국 Rayleigh 적분항 값을 예측하는 것이 연소불안정 발생 여부를 판단 짓는 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다.

### 2.2 화염전달함수 (flame transfer function)

압력 섭동,  $p'$ 과 열 발생 섭동,  $q'$ 결합의 분석적 표현을 위해서도 이 두 가지 동적 물성치 간의 관계를 파악하는 것이 특정 연소시스템 연소 안정성 특성 파악에 있어서 무엇보다도 우선한다. 물리적으로 이해하면, 열발생 섭동과 음향(압력) 섭동은 상호 영향을 끼치는데, 압력(속도) 섭동이 화염면의 크기 변화를 야기하여, 궁극적으로 열 발생 섭동을 일으키는 경우가 발생한다.

특히 희박에혼합 가스터빈 연소기와 같이 압력 (속도) 섭동이 연소실 내부로 유입되는 연료 또는 산화제의 유입을 방해하여, 당량비 변화가 발생, 결과적으로 열발생 변화를 야기한다.

이와 같이 유동 섭동과 열 발생 섭동간의 관계를 나타내기 위해서 주파수의 함수로 표현되는 화염전달(응답)함수(flame transfer function),  $F(\omega)$ 를 구해야 한다. 화염전달함수는 다음과 같이 표현될 수 있다[5,6].

$$F(\omega) = \frac{\dot{q}' / \dot{Q}_0}{u' / U_0} = G(\omega) e^{i\phi(\omega)} \quad (2)$$

위 식에서  $G(\omega)$ 는 화염전달함수의 게인(gain)이며,  $\phi(\omega)$ 는 위상차에 해당한다.

### 3. 연구 동향

#### 3.1 입구유동 가진 (inlet flow excitation)

인위적으로 발생시킨 섭동을 통한 화염전달함수 파악을 위한 연구의 대부분은 Fig. 1에 도시한 것과 같이 연소실로 유입되는 입구유동(inlet flow)에 섭동을 인가한 경우에 대해서 이루어졌

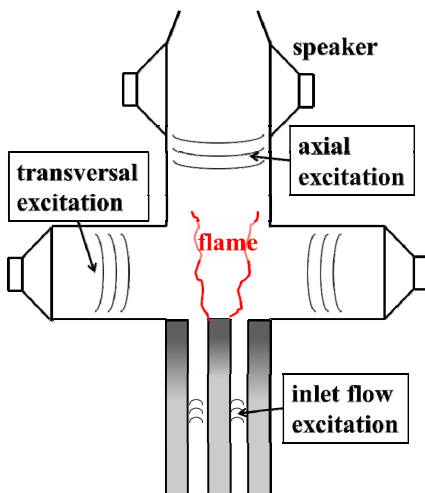


Fig. 1 Various approaches of external flow excitations for the study of flame response.

는데, 이에 대한 최신연구동향은 다음과 같이 층류 또는 난류 화염을 대상으로 한 연구로 구분 지을 수 있다.

#### Lean Premixed Laminar Flame

본 연구분야에서는 프랑스 에콜 샹트랄 파리 대학의 Candel 교수를 중심으로 한 연구그룹이 많은 연구 성과를 발표하였다. 원뿔형 층류 메탄 화염을 활용하여 입구유동에 음향섭동을 인가하여 화염 형상과 안정성 특성을 변화시킬 수 있음을 관찰하였다[7]. 버너 출구 노즐 유동에 섭동이 가해진 환경에서 원뿔형 메탄 화염 반응에 대한 분석적 해석과 실험을 동시에 실시하였으며, 화염전달함수를 5~300 Hz대역에서 버너 치수( $R$ ), 층류화염속도( $S_L$ ), 원뿔반각도( $\alpha$ ) 그리고 각속도( $\omega$ )를 포함한 reduced frequency,  $\omega^*(= (\omega R) / (S_L \cos \alpha))$ 를 적용해 표현하였다[8]. 또한 원뿔모양과 V모양화염의 화염전달함수를 분석적

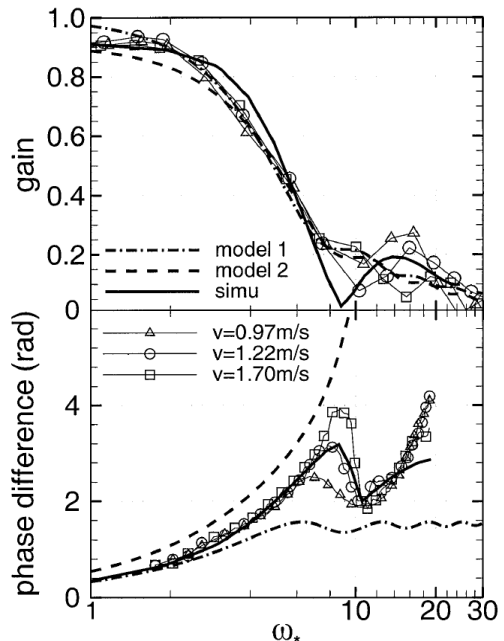


Fig. 2 Comparison between predictions (lines) and experimental data (symbols) for the transfer function of a conical flame submitted to strong flow perturbations. reprint permission granted[9].

접근 방법으로 구하였다[9]. 결국 화염전달함수를 구한다는 것은 Fig. 2에서와 같이 섭동 주파수에 따른 계인과 위상차 정보를 획득한다는 것이다. 이들 결과에 의하면 화염의 동적특성은 무차원 주파수와 층류화염속도/유동속도 비에 크게 영향을 받는 것으로 밝혔다. 후속연구로 particle image velocimetry(PIV)와 laser doppler velocimetry(LDV)를 동시에 적용하여, 원뿔 화염의 축 방향으로 일차원 계측을 실시하여 화염전달함수의 축 방향 변화를 관찰하였는데, 외부가진에 의한 유동 섭동과 화염면 링클링에 의한 되먹임이 서로 상호작용을 일으켜 화염 동적특성이 결정되는 것으로 보았다[10].

#### *Lean Premixed Turbulent Flame*

Thumuluru 등[11-13]은 천연가스/공기 유입 혼합기체에 스피커로 압력 섭동을 유도했을 때 와류 화염의 반응을 유체역학적 관점에서 실험을 통해 살펴보았다. 화염 켓의 칼럼, 와류, 전단층, 화염 안정성, 후방계단에서 유체역학적 불안정 등의 요소를 포함하는 화염의 동적특성이 가진 주파수, 진폭, 유동 속도에 영향을 받는 것으로 결론지었다. Worth와 Dawson[14]은 두 개의 연료 노즐 간격 즉 인접한 화염 간격을 조절하면서 특정 주파수를 갖는 인위적 섭동의 크기에 대한 화염반응을 살펴보았다. 가진 주파수가 증가함(40, 160, 350 Hz)에 따라 화염반응함수의 계인이 이전결과와 유사하게 감소함을 확인하였다.

Palies 등[6,15]은 LDV 또는 hot wire anemometer(HWA)와 OH\* photo multiplier tube(PMT)를 활용하여 화염전달함수의 계인과 위상차를 가진 주파수(0~400 Hz) 변화에 따라 구했는데, 유입 유동 섭동의 크기에 관계없이 유사한 패턴을 보이는 것을 확인하였다. Palies 등의 연구그룹은 후속연구로 동일한 실험 장치를 대상하는 해석적 접근방법으로 damping rate을 구해 연소실 길이에 따른 안정성 지도를 도출해 내었다.

많은 연구들이 당량비 변화에 의한 영향을 배제한 상태 즉 완전 예혼합 조건에서 연구를 진

행한 반면에 Kim 등[16]은 부분 예혼합 경우에 화염전달함수를 연구하였다. 완전 예혼합인 경우, 화염전달함수가 섭동의 크기에 관계없이 일정한 계인을 보이는 반면, 부분 예혼합인 경우, 섭동크기( $u'/U_0$ )가 증가할수록 계인이 줄어드는데 이를 당량비와 속도 섭동간의 위상차로 설명하였다. 동일한 연소기에서 당량비 변화가 없는 조건에서 수행한 결과[17]에 의하면 화염전달함수는 저주파 통과 필터(low pass filter)와 같은 특성을 갖는다고 보고하였다. 유사한 장치조건에서 실험한 또 다른 결과에서 또한 연료(천연가스 또는 프로판)에 상관없이 화염전달함수가 저주파 통과 필터와 같은 특성을 보이며, 평균당량비가 감소할수록 계인이 감소함을 확인하였다[18].

Balachandran 등[19]은 swirl이 없는 bluff body를 갖는 버너(에틸렌+공기)에서 화염전달함수 특성을 확인하였는데, 유입유동 가진 크기가 평균보다 15%를 초과할 때, 열발생 섭동이 비선형 특성을 갖는 것으로 관찰하였다. 이 값은 가진 주파수와 당량비에 의존한다고 밝혔다.

Kim과 Hochgreb[20]은 이중와류로 당량비의 공간적 분포가 단층을 이룬 연소기에서 화염전달함수를 구하였는데, 당량비 단층의 차이에 의해 화염전달함수의 계인과 위상차 특성이 변화함을 관찰하였다.

#### 3.2 연소실 축 방향 가진 (axial excitation)

연소실측에서 연소실 축 방향(Fig. 1 참조)으로 압력 섭동을 인가하여 화염 반응을 살펴본 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

Yilmaz 등[21]은 수소와 메탄 혼합기체의 희박 와류 예혼합 연소에서 축방향 외부 음향 가진(85, 125, 222, 399 Hz)에 대한 화염 반응을 실험적 연구를 통해 살펴보았다. 특정 주파수를 갖는 외부 음향 가진 조건에서 수소의 혼합 농도 변화에 따른 화염 반응을 살펴보았는데, 수소 농도가 증가할수록 화염 뿌리 부분에서의 커플링의 세기를 강화시키는 역할을 한다고 보고하였다. 또한 화염 길이 또한 줄어들음을 확인하였다.

Kang 등[22]은 와류 수(swirl number)가 0.7정도의 와류 강도를 갖는 버너에서 화염 다이내믹

스를 관찰하였다. 22~400 Hz 대역의 음향가진(음향 섭동의 크기는 peak-to-peak 압력 섭동 값이 대기압의 0.1%에 해당)에 대한 화염 반응을 관찰하였는데, OH planar laser induced fluorescence(PLIF)을 활용하였다. 레일라이 지수(Rayleigh index) 계산에 의한 토로이달 패턴화인으로 열과 음향간의 결합이 전단 혼합 영역에서 존재함을 확인하였다. 이러한 토로이달 구조가 축 방향 유동 변화에 의한 것으로 결론지었다.

Bellows 등[23]은 희박 예혼합 화염에서 화염 외부 가진에 대한 비선형 반응 특성을 실험적으로 살펴보았다. 외부가진은 연소기 축 방향 끝단(화염에서 5 m 떨어진)에서 2차 공기를 주기적으로 주입함으로써 이루어졌다. 이들은 화염의 비선형적인 반응특성이 유동의 섭동과 화염간의 비선형 상호작용에 의한 것으로 보았다.

### 3.3 연소실 횡방향 가진 (transversal excitation)

앞에서 언급한 것과 같이 예혼합 가스터빈엔진이나 액체로켓엔진과 같은 고성능 파워 추진 시스템의 경우 횡 방향 연소실 음향모드에 결합된 고주파 연소불안정성이 주로 발생한다. 이와 같은 이유로 횡 방향 음향 섭동(Fig. 1 참조)에 의한 화염반응을 연구한 결과들이 최근 들어 발표되고 있다.

프랑스 에콜 상트랄 파리 대학 연구그룹 결과[24,25]는 실제 액체로켓엔진 연소기와 동일하게 액체산소/가스메탄을 적용한 실험에서 외부 측면에 유량 출구 노즐(최대 전체유량의 15%까지 토출)을 장착하여, 계산으로 예측한 1차 횡 방향 음향모드 주파수로 가진하는 실험을 수행하였다. 그 결과로 원상태에서 안정적인 화염이 가진 상태에서는 음향모드와 화염이 횡 방향으로 강하게 결합하고 있음을 보고하였다.

조지아 공과대학 연구그룹은 2차원 모델 연소기를 활용하여 횡 방향 외부 가진 음향파에 의한 화염반응에 관한 체계적인 연구를 수행하였다. 고리형태 노즐 제트화염에서 횡 방향 음향가진이 주어졌을 때 화염장이 가진 음향파의 상대적인 위치에 따라 특성이 변화함을 보고하였

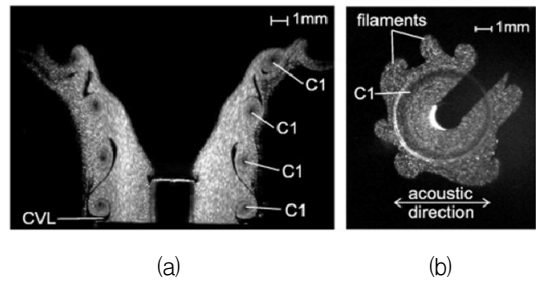


Fig. 3 Laser tomography views of the seeded jet in the presence of the flame at  $f_0 = 510$  Hz: (a) in the axial plane  $y=0$  mm; (b) in the horizontal plane  $z=1$  mm. CVL stands for counterrotating vorticity layer. C1 indicates class 1 of compact vortices. reprint permission granted[32].

다[26]. 또한 연료 노즐끝단의 전단층이 외부 음향가진과 쉽게 연동하여 열발생 섭동이 유도된다고 보았다[27-29]. 후속 연구결과에서는 횡 방향 속도섭동에 대한 축 방향 속도섭동간의 속도 응답함수 개념을 도입하였다[30]. 축 방향 속도 섭동은 횡 방향 연소불안정 시에도 발생하는데, 이는 횡 방향 음향모드, 횡 방향 섭동의 주파수 그리고 노즐 음향특성에 영향을 받는다고 보고하였다.

조지아 공대 그룹과 유사하게 2차원으로 구성된 연소실험장치에서 수행한 실험결과[31,32]에 의하면, 횡 방향 음향가진이 축 방향 유량(속도) 섭동을 야기하여, Fig. 3에서와 같이 와류발생과 함께 화염 면적 변화에 따른 열발생 섭동이 증가하는 것으로 결론지었다.

접선방향 연료 노즐이 장착된 연소기의 축방향과 횡방향 외부 가진이 동시에 이루어질 때 화염반응을 살펴본 연구결과[33]에 의하면 화염이 가진 주파수와 연동하여 회전하는 모습을 관찰할 수 있었지만 이를 설명하는 정량적인 메커니즘은 찾지 못하였다.

## 4. 정리하는 글

본 논문에서는 연소기 유동에 인위적인 섭동을 가진하여 이에 반응하는 화염의 동적인 특성

을 관찰하고 분석한 최신 연구 동향을 정리하였다. 외부 섭동은 연소기 혼합기체 입구 유동, 연소실 측에서 축 방향 유동 또는 횡 방향 유동 등에 가진하는 세 가지 방법이 시도되었다.

화염동적특성을 표현하기 위한 화염전달함수는 계인과 위상차로 구성된다. 기존 연구의 공통 결과를 정리하면 층류와 난류 화염에서 화염전달함수 계인은 주파수가 증가하면 감소하는 저주파 통과 필터와 같은 경향을 보이며, 섭동크기에 영향을 받지 않는 것으로 보인다.

기존 연구의 대부분이 메탄/공기 예혼합 화염을 대상으로 수행되었으며, 입구 혼합기체에 섭동을 인가한 조건에서 이루어졌다. 또한 가진 주파수 대역이 1,000 Hz 미만인 경우가 대부분이며 실제 연소기에서 발생하는 연소불안정은 횡방향 고주파가 발생하는 것으로 판된다.

향후 연구에서는 비선형 특성이 예상되는 1,000 Hz 대역의 가진에 대한 좀 더 심도 있는 연구와 횡 방향 섭동에 대한 연료 노즐의 동적 특성에 대한 연구가 필요하며 이를 진행 중에 있다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단(교육부)의 일반연구지원사업(NRF-2013R1A1A2005304)에 의해 지원받았습니다. 이에 감사드립니다.

## References

- Harrje, D.T. and Reardon, F.H., "Liquid Propellant Rocket Combustion Instability," NASA SP-194, 1972.
- Candel, S., "Combustion Dynamics and Control: Progress and Challenges," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, No. 1, pp. 1-28, 2002.
- Lieuwen, T.C. and Yang, V., *Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling*, Vol. 210, Progress in Astronautics and Aeronautics Inc., 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA, 20191-4344, 2005.
- Dowling, A.P. and Eforwcs, J.E., *Sound and Sources of Sound*, Ellis Horwood Limited, West Sussex, England, 1983.
- Cuquel, A., Durox, D. and Schuller, T., "Theoretical and Experimental Determination of the Flame Transfer Function of Confined Premixed Conical Flames," *7th Mediterranean Combustion Symposium*, pp. 11-15, 2011.
- Palies, P., Durox, D., Schuller, T. and Candel, S., "The Combined Dynamics of Swirler and Turbulent Premixed Swirling Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 157, Issue 9, pp. 1698-1717, 2010.
- Durox, D., Ducruix, S. and Baillet, F., "Strong Acoustic Forcing on Conical Premixed Flames," *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 27, No. 1, pp. 883-889, 1998.
- Ducruix, S., Durox, D. and Candel, S., "Theoretical and Experimental Determinations of the Transfer Function of a Laminar Premixed Flame," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 765-773, 2000.
- Schuller, T., Durox, D. and Candel, S., "A Unified Model for the Prediction of Laminar Flame Transfer Functions: Comparisons between Conical and V-flame Dynamics," *Combustion and Flame*, Vol. 134, No. 1, pp. 21-34, 2003.
- Birbaud, A.L., Durox, D. and Candel, S., "Upstream Flow Dynamics of a Laminar Premixed Conical Flame Submitted to Acoustic Modulations," *Combustion and Flame*, Vol. 146, Issue 3, pp. 541-552, 2006.
- Thumuluru, S.K. and Lieuwen, T.,

- "Characterization of Acoustically Forced Swirl Flame Dynamics," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32, No. 2, pp. 2893-2900, 2009.
12. Thumuluru, S.K., "Effect of Harmonic Forcing on Turbulent Flame Properties," Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 2010.
  13. Thumuluru, S.K., Ma, H.H. and Lieuwen, T., "Measurements of the Flame Response to Harmonic Excitation in a Swirl Combustor," *45<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, Reno, Nevada, pp. 845, Jan. 2007.
  14. Worth, N.A. and Dawson, J.R., "Cinematographic OH-PLIF Measurements of Two Interacting Turbulent Premixed Flames with and without Acoustic Forcing," *Combustion and Flame*, Vol. 159, No. 3, pp. 1109-1126, 2012.
  15. Palies, P., Durox, D., Schuller, T. and Candel, S., "Nonlinear Combustion Instability Analysis Based on the Flame Describing Function Applied to Turbulent Premixed Swirling Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 158, Issue 10, pp. 1980-1991, 2011.
  16. Kim, K.T., Lee, J.G., Quay, B.D. and Santavicca, D.A., "Response of Partially Premixed Flames to Acoustic Velocity and Equivalence Ratio Perturbations," *Combustion and Flame*, Vol. 157, Issue 9, pp. 1731-1744, 2010.
  17. Jones, B., Lee, J.G., Quay, B.D. and Santavicca, D.A., "Flame Response Mechanisms Due to Velocity Perturbations in a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 133, No. 2, pp. 021503-021511, 2011.
  18. Ranalli, J.A., Martin, C.R., Black, P.R., Vandsburger, U. and West, R., "Measurement of Flame Transfer Functions in Swirl-Stabilized, Lean-Premixed Combustion," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 6, pp. 1350-1354, 2009.
  19. Balachandran, R., Ayoola, B.O., Kaminski, C.F., Dowling, A.P. and Mastorakos, E., "Experimental Investigation of the Nonlinear Response of Turbulent Premixed Flames to Imposed Inlet Velocity Oscillations," *Combustion and Flame*, Vol. 143, pp. 37-55, 2005.
  20. Kim, K.T. and Hochgreb, S., "The Nonlinear Heat Release Response of Stratified Lean-Premixed Flames to Acoustic Velocity Oscillations," *Combustion and Flame*, Vol. 158, Issue 12, pp. 2482-2499, 2011.
  21. Yilmaz, İ., Ratner, A., Ilbas, M. and Huang, Y., "Experimental Investigation of Thermoacoustic Coupling Using Blended Hydrogen-Methane Fuels in a Low Swirl Burner," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 1, pp. 329-336, 2010.
  22. Kang, D.M., Culick, F.E.C. and Ratner, A., "Combustion Dynamics of a Low-Swirl Combustor," *Combustion and Flame*, Vol. 151, Issue 3, pp. 412-425, 2007.
  23. Bellows, B.D., Neumeier, Y. and Lieuwen, T., "Forced Response of a Swirling, Premixed Flame to Flow Disturbances," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 22, No. 5, pp. 1075-1084, 2006.
  24. Richecoeur, F., "Experimentations et Simulations Numeriques des Interactions Entre Modes Acoustiques Transverses et Flammes Cryotechniques," Doctoral Dissertation, Ecole Centrale Paris, 2006.
  25. Richecoeur, F., Scoufflaire, P., Ducruix, S. and Candel, S., "High-Frequency Transverse Acoustic Coupling in a Multiple-Injector Cryogenic Combustor," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 22, No. 4, pp. 790-799, 2006.

26. O'Connor, J., Natarajan, S., Malanoski, M. and Lieuwen, T., "Disturbance Field Characteristics of a Transversely Excited Annular Jet," *ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air*, Glasgow, U.K., GT2010-22133, June. 2010.
27. O'Connor, J. and Lieuwen, T., "Further Characterization of the Disturbance Field in a Transversely Excited Swirl-Stabilized Flame," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 134, No. 1, pp. 011501-01159, 2012.
28. O'Connor, J., "Response of a Swirl-Stabilized Flame to Transverse Acoustic Excitation," Doctoral Dissertation, Georgia Institute of Technology, May 2012.
29. O'Connor, J. and Lieuwen, T., "Recirculation Zone Dynamics of a Transversely Excited Swirl Flow and Flame," *Physics of Fluids*, Vol. 24, No. 7, 075107, 2012.
30. O'Connor, J. and Acharya, V., "Development of a Flame Transfer Function Framework for Transversely Forced Flames," *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition*, San Antonio, Tex., U.S.A., GT2013-95900, June. 2013.
31. Lespinasse, F., Baillot, F. and Boushaki, T., "Responses of V-flames Placed in an HF Transverse Acoustic Field from a Velocity to Pressure Antinode," *Comptes Rendus Mecanique*, Vol. 341, No. 1, pp. 110-120, 2013.
32. Baillot, F. and Lespinasse, F., "Response of a Laminar Premixed V-flame to a High-Frequency Transverse Acoustic Field," *Combustion and Flame*, Vol. 161, Issue 5, pp. 1247-1267, 2013.
33. Hauser, M., Lorenz, M. and Sattelmayer, T., "Influence of Transversal Acoustic Excitation of the Burner Approach Flow on the Flame Structure," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 133, No. 4, 041501-1-8, 2011.