〈학술논문〉

ISSN 1226-0959 eISSN 2466-2089

# 희박 예혼합 모델 가스터빈 연소기에서 스월유동 특성이 화염 간 상호작용에 미치는 영향

이지호<sup>\*</sup>·박준형<sup>\*\*</sup>·한동식<sup>\*\*</sup>·김규태<sup>\*†</sup> <sup>\*</sup>한국과학기술원 항공우주공학과 ·<sup>\*\*</sup>두산중공업 GT연소기개발팀

## Swirl Flow Effects on Flame-Flame Interactions in a Model Lean-Premixed Gas Turbine Combustor

Jiho Lee\*, Junhyeong Park\*\*, Dongsik Han\*\* and Kyu Tea Kim\*\*

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

\*\*Doosan Heavy Industry & Construction

(Received 29 January 2018, Received in revised form 23 February 2018, Accepted 5 March 2018)

#### ABSTRACT

The effect of swirl flow structures on combustion dynamics of two interacting, lean-premixed flames was experimentally investigated, with a particular emphasis on swirl numbers and swirl rotational directions. Our results show that the amplitude of limit cycle oscillations is very sensitive to the combination of swirl numbers and rotational directions, while the instability frequency remains nearly unchanged. The counter-rotating cases show significantly lower pressure perturbations, and this behavior appears to be related to the formation of compact interacting zone with higher heat release rate, indicating the presence of increased flame surface wrinkling caused by intense turbulence.

Key Words : Combustion instability, Flame-flame interactions, Lean-premixed combustion, Swirling array, Swirl number

## 1. 서 론

스월 유동은 고속의 유동 조건에서 화염을 안정 화 시키는 효과적인 방법으로, 가스터빈 연소기에서 널리 이용되고 있다[1-3]. 스월에 의해 만들어지는 재순환영역은 저유동속도 구간을 형성하여 화염을 부착시킨다. 따라서 재순환 영역의 분포와 구조에 따라 화염의 형상이 달라지며[4-6], 재순환 영역 자 체도 스월 수에 따라 변화한다[7].

한편 스월 수가 증가할수록 시스템의 연소진동이 강력해지고 주파수가 증가하는 현상이 관찰되었고 [8-11], 작은 스월 특성의 변화가 전체 시스템에 큰 영향을 미친다는 사실이 확인되었다[12-13].

현재 학계에서 이루어지고 있는 연구는 대부분 이 단일노즐에 관한 것으로서, 실제 가스터빈에서 사용되는 다중 노즐 시스템에 대한 접근은 이제 막 시작단계에 들어 선 상황이다. 다중노즐 시스템에서 는 화염 간 상호작용이 중요한 요인이 되며, 그러한 상호작용구간은 각 노즐의 특성에 따라 변화한다. Liu 등[14]은 다중 노즐의 스월 방향이 서로 다를 때 시스템의 안정한 작동 범위가 증가함을 보였으며 Worth 등[15], Dawson 등[16]은 노즐간의 거리를 좁 히면 화염 간 상호작용구간이 상류로 올라옴을 보 였다. 그 밖에 노즐의 스월 수와 당량비에 따른 상 호작용 구간의 변화[17], 직접수치모사식 모델을 이 용한 화염 간 상호작용의 모사[18], CH\* 자발광 방 법을 활용한 화염 간 상호작용 구간의 삼차원 구조 파악[19] 등 다중 노즐 시스템에 대한 접근이 점차 적으로 이루어지고 있다.

<sup>\*</sup> Corresponding Author, kt\_kim@kaist.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.



Fig. 1. Cross section of lean-premixed, swirl-stabilized two-nozzle rig for self-excited combustion instability measurements.

본 연구에서는 기존의 접근방법을 좀 더 확장시 켜, 두 개의 노즐을 장착한 희박 예혼합 가스터빈 연 소기를 이용, 스월 수와 스월 방향에 따른 유동장의 변화가 연소불안정에 미치는 영향에 대해 알아보고 자 하였으며 화염 간 상호작용에 대한 정량적 분석 을 수행 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

#### 2.1. 실험장치의 구성

본 연구에 사용된 실험 장치는 Fig. 1과 같다. 두 노즐의 상류가 완전히 분리되어있어 유량, 당량비, 스 월 수 등의 독립적인 제어가 가능하다. 연료는 99.9% 메탄을 사용했고 연소기에서 멀리 떨어진 상류에서 분사되어 완전예혼합 상태로 연소기로 공급된다. 연 소실로 들어오는 유동은 초크입구를 지나면서 상류 로부터 발생하는 섭동의 영향을 받지 않게 된다. 화 염이 위치한 곳에는 석영관을 이용하여 광 계측이 가능하게 했다.

Photomultiplier Tube(PMT, Hamamatsu, H7732-10) 를 사용하여 열 방출율을 측정하였으며, 그 중 CH\* 라디칼 강도의 계측을 위해 Andover에서 제작한 필 터(center wavelength = 431.9 nm, FWHM = 10.4 nm)를 사용했다.

또한, ICCD(PI-MAX4\_1024i, Princeton Instruments) 카메라를 사용하여 다양한 실험 조건에 따른 화염의 형상을 정량적으로 분석했다.

Fig. 2(a)는 연소기의 덤프면을 나타낸 그림이다.



Fig. 2. (a) Cross section of the dump plane containing two nozzles. Dimensions in millimeters. (b) Flame photograph under stable condition.

Fig. 2(b)는 상호작용하는 두 스월 화염의 사진을 보여 준다. 연소기 입구 조건은 다음과 같다: *T<sub>in,1</sub>* = *T<sub>in,2</sub>* = 200℃, *ū*<sub>1</sub> = *ū*<sub>2</sub> = 30 m/s, *φ*<sub>1</sub> = *φ*<sub>2</sub> = 0.65. 연소기 길 이를 1200에서 1800 mm까지 20 mm 간격으로 증가 시키며, 각 조건에서 3 kHz로 4초 동안 고속데이터 계측을 수행하였다.

#### 2.2. 실험방법

본 연구에서는 6개의 얇은 베인을 갖는 축 유동 스월러를 이용하였고, 이들은 스월 수 0.45, 0.65, 0.75 를 갖는다[1]. Fig. 3은 본 연구에서 고려한 동방향 회전(co-rotating)과 역방향 회전(counter-rotating)의 노 즐 조합을 도식화한 것이다. 동방향 회전의 경우, 화 염 간 상호작용 영역에서 두 스월 유동의 접선방향 속 도 성분이 서로 충돌하기 때문에 속력이 크게 감소한



Fig. 3. Schematics of the rotational direction of swirling flows: (a) co-rotational (b) counter-rotational configurations.

 
 Table 1. Test conditions. CW = clockwise, CCW = counter clockwise rotation

#	Nozzle 1		Nozzle 2		4	Nozzle 1		Nozzle 2	
	S	Ω	S	Ω	#	S	Ω	S	Ω
1	0.45	CCW	0.45	CCW	7	0.45	CW	0.45	CCW
2	0.65	CCW	0.65	CCW	8	0.65	CW	0.65	CCW
3	0.75	CCW	0.75	CCW	9	0.75	CW	0.75	CCW
4	0.65	CCW	0.45	CCW	10	0.65	CW	0.45	CCW
5	0.75	CCW	0.45	CCW	11	0.75	CW	0.45	CCW
6	0.75	CCW	0.65	CCW	12	0.75	CW	0.65	CCW

다. 반면, 역방향 회전의 경우에는 두 노즐에서 p. / p. 분사되는 유동의 접선성분이 같은 방향으로 회전하 므로 상호작용 영역에서 접선 속도가 보존된다.

실험에 사용된 운전조건들은 Table 1과 같다. 스월 수의 조합에 따른 동방향 회전(왼쪽)과 역방향 회전 (오른쪽) 각 6개, 총 12개의 조건에서 실험이 진행되 었다. 각 배열에서 두 노즐의 스월 수가 동일한 경우 (# 1~3, 7~9) 유동장은 대칭이 되며, 스월 수가 다를 경우(# 4~6, 10~12) 유동장은 비대칭이 된다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 연소불안정 주파수

Fig. 4는 계측된 연소불안정 주파수를 케이스 #에 대하여 나타낸 것이다. 주어진 스월러 조합에 대해 주파수가 변하는 것은 피스톤의 위치(유효 연소기 길 이)가 바뀌었기 때문이다. 모든 조건에 대해 주파수 가 200 Hz와 220 Hz 사이의 값을 갖는다. 이 주파수 는 연소기의 길이에 따른 종방향(longitudinal) 모드의 값에 해당한다. 이 결과는 국부적인 스월 유동 구조 의 변화가 시스템 전체의 응답에는 큰 영향을 미치 지 않음을 의미한다.



Fig. 4. Instability frequencies for all test cases.

#### 3.2. 연소실내 열 방출율 및 압력 섭동

Fig. 5는 동방향 회전 조건에서 계측된 연소기 내 부 압력의 진폭을 스월 수 도메인에서 나타낸 것이 다. 두 노즐의 스월 수가 0.45 근처일 때 시스템은 가 장 안정한 모습을 보인다. 이와 반대로 두 스월 수가 모두 0.65 근방일 때 약 2.3%의 상대적으로 강한 연 소불안정이 발생한다. 이처럼 스월 수의 조합에 따 라 시스템의 안정성에 현저한 변화가 발생함을 알 수 있다. 또한 두 노즐의 스월 수의 합이 중요한 변 수로 판단되며, 그 값이 약 0.9로 매우 작거나 1.5로 매우 큰 경우 시스템은 안정하며, 1.2 정도의 중간 값



Fig. 5. Stability map  $(p'_c/\overline{p}_c)$  for co-rotating configurations.  $l_c = 1700 \text{ mm.}$ 



**Fig. 6.** Stability map  $(p'_c/\overline{p}_c)$  for counter -rotating configurations.  $l_c = 1700$  mm.

을 가질 때 시스템은 불안정한 모습을 보인다. 이 그 래프는 연소기 길이 1700 mm의 조건에서 측정된 데 이터로, 이 길이에서 시스템은 가장 강력한 연소불안 정을 갖는다.

Fig. 6은 역방향 회전 조건에서 계측된 내부 압력 의 진폭을 나타낸 것이다. 주목할 점은, 측정된 압력 섭동의 크기가 동방향 회전의 경우와 비교했을 때 모든 스월 수 구간에서 절반가량 감소한다는 것이다. 다시 말해 운전 조건들이 동일한 상황에서 스월의 방 향만을 달리하는 것만으로도 시스템의 안정성이 획 기적으로 증가한다는 것이다. 또, 스월 수  $S_1 = 0.75$ ,  $S_2 = 0.65$  조건과  $S_1 = 0.45$ ,  $S_2 = 0.45$  조건에서는 동방 향, 역방향 조합에 관계없이 시스템이 매우 안정함을 확인할 수 있다.

동방향 회전 조건에서의 열방출율의 진폭을 나타 낸 Fig. 7을 살펴보면, 동일한 동방향 조건에서 압력 의 섭동을 나타낸 Fig. 5와 비슷한 양상을 보임을 확 인할 수 있다. 이러한 압력과 열방출 섭동의 유사성 은 Rayleigh criterion과 관련이 있다. Fig. 8은 역방향 회전 조건에서 계측된 열방출율의 진폭을 나타낸다. 이 경우에도 동방향 조건과 마찬가지로 압력-열방출 율의 그래프가 매우 유사한 패턴을 보임을 확인할 수 있다. 또한, 앞서 언급한 대로 모든 스월 수 조합에 대해 동방향 회전의 경우보다 열방출율 섭동의 크 기가 절반가량으로 작음을 확인할 수 있다.

이 결과들은 시스템의 동적 안정성이 스월 수와 스



Fig. 7. Stability map $(q'_{\Sigma}/\overline{q}_{\Sigma})$  for co-rotating configurations.  $l_c$  = 1700 mm.



**Fig. 8.** Stability map  $(q'_{\Sigma}/\overline{q}_{\Sigma})$  for counter -rotating configurations.  $l_c$  = 1700 mm.

월 유동의 조합에 매우 민감하게 반응한다는 것을 증 명한다. 스월 유동의 특성이 어떠한 방식으로 시스 템에 영향을 주는지 좀 더 알아보기 위해 리그의 상 부에 카메라를 설치하여 화염 이미지 계측을 진행 하였다.

#### 3.3. CH\* 이미지 분석

Fig. 9는 동방향과 역방향 스월 배열에서 촬영한 화 염사진을 보여준다. 동방향 배열의 경우 화염 간 상 호작용이 일어나는 구간이 반경방향으로 넓게 분포 하는 반면, 역방향 배열의 경우에는 그 구간이 상대 적으로 좁고 날카로우며 강도가 더 높음을 확인할 수 있다. 또한, 화염이 전반적으로 동방향 배열에 비 해 상류로 이동한 모습을 보인다.



**Fig. 9.** DSLR images of two interacting flames for corotating (left) and counter- rotating (right) configurations. S<sub>1</sub> = S<sub>2</sub> = 0.45,  $l_c$  = 1200 mm.

Fig. 10은 ICCD 카메라로 촬영한 CH\* 이미지를 보여준다. 위쪽 행과 아래쪽 행은 각각 동방향 스월 배열과 역방향 스월 배열의 이미지이다. 첫 번째 열 의 스월 수 조합은 S<sub>1</sub> = 0.45, S<sub>2</sub> = 0.45이며, 오른쪽 열로 갈수록 노즐 2의 스월 수는 유지된 채 노즐 1 의 스월 수가 각각 0.65, 0.75로 증가한다. 각 이미지 에 표시된 숫자는 CH\* 라디칼의 최대 강도를 뜻한 다. 결과를 살펴보면, 역방향 배열의 경우 화염의 최 대 강도가 동방향 배열의 경우보다 10%에서 30% 가량 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 노즐 1의 스월 수가 커질수록 CH\*의 강도가 증가하는 모습을 보인다.

이러한 현상은 상호작용구간에서 난류강도와 연 관이 있는 것으로 보인다. 그 이유는 역방향 배열의 경우 동방향 배열과 달리 유동장의 접선속도 성분 이 보존되기 때문이다. 그로 인해 두 노즐의 유동이 만나는 영역에 존재하는 화염의 면적을 증가시키는 (wrinkled) 효과가 나타나는 것으로 생각된다[1,4].

Fig. 10의 이미지들을 보다 더 정량적으로 분석하 기 위해 이미지의 기준 축을 정의하였다. 이미지의 좌 우방향으로 정 중앙에서부터 뻗어나가는 축을 r축 이



Fig. 10. Time-averaged CH\* chemiluminescence images of two interacting flames under (top row) co-rotating and (bottom row) counter-rotating swirling arrays.

라 정의하고(Fig. 10 이미지의 하단), 위에서 아래로 유동의 방향으로 향하는 축을 x축 이라고 정의한다 (Fig. 10 이미지의 좌측). 이미지의 좌우로 움직이는 점을 지나는 수직선상의 화염 강도를 모두 더해 r축 위에 나타낸 그래프가 Fig. 11(a)와 11(b)이며, 이미지 의 상하로 움직이는 점을 지나는 수평선상의 화염 강 도를 모두 더해 x축 위에 나타낸 그래프가 Fig. 11(c) 와 11(d)이다.

Fig. 11(a)와 11(b)를 보면, 앞서 언급한 대로 동일 한 스월 수 조합에 대해 역방향 배열의 경우 최대 밝기가 동방향 배열의 경우보다 크며, 같은 방향의 배열일 경우 스월 수가 증가함에 따라 최대 밝기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 스월 수의 증가에 따라 최대강도가 나타나는 위치가 오른쪽으로 이동 하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 노즐 1의 스월 수 가 증가하여 전단층이 벌어지면서 화염이 상호작용 하는 구간이 오른쪽(노즐 2)으로 이동하기 때문이 다. 이로 인해 노즐 2의 화염이 벽으로 밀려나 벽과 상호작용하면서 화염의 강도가 부분적으로 증가하 는 모습도 나타난다. Fig. 11(c)와 11(d)를 보면, 동일 한 배열에서 스월 수가 증가할수록 최대 강도가 나 타나는 지점이 상류로 이동하는 현상을 정량적으로 확인할 수 있다. 다음으로 스월 수와 스월 방향을 함께 고려해 보 자. Fig. 11(a)와 11(b)를 보면, 동방향 배열의 경우 두 노즐 중앙부의 화염강도가 국부적으로 감소하는 경향을 볼 수 있는데 역방향 배열의 경우 반대로 화 염강도가 증가하는 양상을 보인다. 주목할 점은 동 방향 배열의 경우 스월 수가 증가함에 따라 두 노즐 중앙부 화염강도 양상이 역방향 배열과 비슷해져간 다는 점이다. 이러한 양상은 Fig. 11(c)와 11(d)에서 도 나타난다. 스월 수가 커질수록 동방향 배열에서 강도그래프의 양상이 역방향 그래프의 양상과 닮아 간다. 즉 역방향 스월 조합의 효과가 스월 수 증가 의 효과와 동일하다는 것이다[14].

마지막으로, Fig. 11은 화염 간 상호작용 영역을 정의하는 적절한 기준을 제시한다. 만약 두 노즐이 충 분히 멀리 떨어져 있다면 화염간의 상호작용은 일 어나지 않을 것이다. 그 상태에서 화염 하나의 형상 은 Fig. 11(a)와 11(b) 그래프를 고려할 때 중앙은 약 하고 좌우에 최대강도가 나타나는 모습이 될 것이 다. 즉 화염 간 상호작용이 일어나지 않는 독립적인 화염의 최대강도는 r≈ ±60 mm 부근의 값이다. 노 즐 2(우측)의 화염은 벽과의 상호작용 때문에 부분 적인 강도의 증가가 일어났음을 생각하면 실질적인 단일 화염의 최대 강도는 r≈ -60 mm 부근에서의 값



Fig. 11. Normalized intensity profiles on the (top row) vertical line and (bottom row) horizontal line of the ICCD images for co-rotating(left column) and counter-rotating(right column) cases. COR: co-rotating, CTR: counter-rotating.

이다. 주목할 점은 연소기 중심의 화염 강도가 가장 자리의 화염강도보다 더 크다는 점이다. 즉 화염 간 상호작용이 일어나면 화염의 강도는 단일 화염일 때보다 더 증가하며, 바꾸어 말하면 화염강도가 특 정 값 이상으로 큰 지점을 화염 간 상호작용이 일어 나는 구간으로 정의할 수 있는 것이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 두 개의 노즐을 갖는 예혼합 모델 가스터빈 연소기에서 스월 수와 스월 방향의 조합에 따른 시스템의 안정성 평가 및 화염 간 상호작용 특 성을 파악했다.

동방향과 역방향 배열의 차이가 확연하게 드러났 는데, 역방향의 경우 모든 스월 수 조합에서 동방향 의 경우보다 시스템의 불안정 강도가 50%가량 감소 했다. 시스템 전체의 스케일을 생각해 볼 때 노즐 하 나의 스월 방향만을 바꾸어 시스템의 안정성이 비약 적으로 높아진다는 점은 주목할 만하다. 화염 이미 지 계측 결과 CH\* 강도가 역방향의 경우 동방향보 다 10에서 30% 가량 컸다. 또한 화염 간 상호작용 구 간의 형태가 날카로워지고 상류로 이동함을 확인했 다. 이러한 현상은 스월 방향에 따른 유동구조의 차 이 때문인 것으로 사료된다. 역방향의 경우 화염면 적이 더 넓어져 스월 수가 증가하는 것과 같은 효과 를 갖는다.

마지막으로 화염 간 상호작용 구간을 정의하는 기 준을 제시했다. 상호작용 없는 하나의 화염보다 서로 상호작용하는 두 화염의 CH\* 강도가 더 컸으며, 결 과적으로 화염 간 상호작용 구간을 정의할 때 그 기 준을 특정 값 이상의 화염강도로 사용하면 된다는 것이다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 입니다(No. 201310101070A).

#### References

- Y. Huang and V. Yang, Effect of Swirl on Combustion Dynamics in a Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustor, Proceedings of the Combustion Institute, 30, 2005, 1775-1782.
- [2] J. Driscoll and J. Temme, Role of Swirl in Flame Stabilization, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2011.
- [3] Y.A. Eldrainy, H.S. Aly, K.M. Saqr and M.N.M. Jaafar, A Multiple Inlet Swirler for Gas Turbine Combustors, Proceedings of the International Conference on Fluid Mechanics, Heat Transfer and Thermodynamics, World Academy of Science, Engineering and Technology, 3, 2009, 1260-1263.
- [4] A.M. Elbaz, W.L. Roberts, Conical Quarl Swirl Stabilized Non-Premixed Flames: Flame and Flow Field Interaction, Energy Procedia, 120 (2017) 206-213.
- [5] L.Y.M. Gicquel, G. Staffelbach, T. Poinsot, Large Eddy Simulations of Gaseous Flames in Gas Turbine Combustion Chambers, Prog. Energy Combust. Sci., 38(6) (2012) 782-817.
- [6] P. Palies, D. Durox, T. Schuller, S. Candel, The Combined Dynamics of Swirler and Turbulent Premixed Swirling Flames, Combust. Flame, 157(9) (2010) 1698-1717.
- [7] T.H. Kim, S.D. Kim, Y.I. Jin, S.K. Min, Effect of Flare Angle in Counter-Rotating Swirler on Swirling Flow, J. Korean Soc. Combust., 21(1) (2016) 31-37.
- [8] 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.
- [9] J.P. Moeck, J.F. Bourgouin, D. Durox, T. Schuller, S. Candel., Nonlinear Interaction between a Pre-

cessing Vortex Core and Acoustic Oscillations in a Turbulent Swirling Flame, Combust. Flame, 159 (8) (2012) 2650-2668.

- [10] M.S. Jang, K.M. Lee, A Study of Combustion Instability Mode according to the Variation of Combustor Length in Dual Swirl Gas Turbine Model Combustor, J. Korean Soc. Combust., 21(2) (2016) 29-37.
- [11] 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.
- [12] S. Wang, V. Yang, Unsteady Flow Evolution in Swirl Injectors with Radial Entry, Phys. Fluids, 17(4) (2005) 045107.
- [13] M. Stohr, I. Boxx, C.D. Carter, W. Meier, Experimental Study of Vortex-Flame Interaction in a Gas Turbine Model Combustor, Combust. Flame, 159(8) (2012) 2636-2649.
- [14] W. Liu, B. Ge, Y. Tian, S. Zang, S. Weng, Experimental Study on Instability Characteristics of Low-Swirl Flames in a Multi-Nozzle Combustor with Different Swirling Arrays, J. Eng. Gas Turb. Power 139(6) (2017) 061503
- [15] N.A. Worth, J.R. Dawson, Cinematographic OH-PLIF Measurements of Two Interacting Turbulent Premixed Flames with and without Acoustic Forcing, Combust. Flame, 159(3) (2012) 1109-1126.
- [16] J.R. Dawson, N.A. Worth, Flame Dynamics and Unsteady Heat Release Rate of Self-Excited Azimuthal Modes in an Annular Combustor, Combust. Flame, 161(10) (2014) 2565-2578.
- [17] T. Asai, S. Dodo, M. Karishuku, N. Yagi, Y. Akiyama, A. Hayashi, Performance of Multiple-Injection Dry Low-NOx Combustors on Hydrogenrich Syngas Fuel in an IGCC Pilot Plant, J. Eng. Gas Turb. Power, 137(9) (2015) 091504.
- [18] T.D. Dunstan, N. Swaminathan, K.N.C. Bray, N.G. Kingsbury, Flame Interactions in Turbulent Premixed Twin V-Flames, Combust. Sci. Technol., 185 (1) (2013) 134-159.
- [19] J. Samarasinghe, S. Peluso, M. Szedlmayer, A.D. Rosa, B. Quay, D. Santavicca, Three-Dimensional Chemiluminescence Imaging of Unforced and Forced Swirl-Stabilized Flames in a Lean Premixed Multi-Nozzle Can Combustor, J. Eng. Gas Turb. Power, 135(10) (2013) 101503.