J. Korean Soc. Combust. 25(2) (2020) 1-10

《학술논문》 DOI: http://dx.doi.org/10.15231/jksc.2020.25.2.001 ISSN 1226-0959
eISSN 2466-2089

스월-안정화 연소기에서 화염구조와 연소불안정에 대한 연구

황동현* · 박수진* · 안규복*†
*충북대학교 기계공학부

Study on Flame Structure and Combustion Instability in a Swirl-Stabilized Combustor

Donghyun Hwang*, Sujin Bak* and Kyubok Ahn*†
*School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

(Received 14 October 2019, Received in revised form 31 October 2019, Accepted 7 November 2019)

ABSTRACT

Flame structure and combustion instability characteristics in a swirl-stabilized combustor were investigated by changing fuel, inlet mean velocity, equivalence ratio, and swirler geometry. Two different premixed gases consisting of air and hydrocarbon fuels (C_2H_4, CH_4) were supplied to a combustion chamber through an inlet section and an axial swirler. Dynamic pressure transducer and ICCD camera with a bandpass filter were used to measure pressure fluctuations and flame structures, respectively. The experimental results showed that the pressure fluctuations significantly increased, accompanied by the flame structure transition under certain conditions. Hollow cone flames were mainly formed under stable combustion, but heat release was distributed near the central axis of the combustion chamber under the combustion instability.

Key Words : Combustion instability, Flame structure, Heat release pattern, Turbulent lean premixed flame

1. 서 론

기존 확산연소에서 문제가 되던 질소산화물을 감소시키기 위해 최근 가스터빈 연소기에는 희박 예혼합연소가 적용되고 있다[1-3]. 하지만 이러한 조건에서는 열방출 진동과 압력섭동이 상호작용하여 증폭되는 연소불안정이 종종 발생하게 된다[4-6]. 연소불안정은 작게는 연소효율 감소나 오염물질 증가를 일으킬 수 있고, 크게는 과도한 열전달이나 압력섭동으로 연소기에 구조적 손상을 야기할 수 있다.

가스터빈 연소기 스월러에 의해 생성된 와류 유동은 차가운 반응물과 뜨거운 생성물의 혼합을 강화시키고, 중심 재순환 지역을 생성하여 화염을 안정화시킬 뿐만 아니라, 오염물질을 감소시키기도 한다[7,8]. 당량비, 입구온도, 스월러의 형상에 따른 유동특성은 압력섭동, 열방출 패턴과 같은 연소특성에 영향을 준다는 사실이 많은 연구자들에 의해 보고되었다[9-12].

Ghoniem 등[13]은 스월-안정화 연소기에서 메탄과 수소를 이용하여 화염구조 변이와 연소불안정과의 관계를 연구하였다. 그들은 당량비를 증가시키면서 관측된 4개의 화염구조 중, 외부 재순환 지역에 화염이 출현하는 지점이 연소불안정의 시작과 연관됨을 제시하였다. 안정성 평가를 위해 연료에 수소를 첨가한 실험에서도 수소조성에 관계없이 비슷한 결과를 얻었음을 나타내었다. Huang 등[5]은 증가된 입구온도는 중심 재순환 지역에 안착된 화염을 외부 재순환 지역으로 밀어내고, 이를 통해 화염역화 현상이 발생하면서 유동진동이 급격히 증가함을 보여주었다. Fritsche 등[14]은 천연가스와 공기를 이용하여 유사한 실험을 수행하였다. 그들은 안정한 상태에서 불안정한 상태로 변화하는 화염구조와 불안정한 상태에서 안정한 상태로 변하는 화염구조를 관측하여, 이러한 변화는 단열화염온도와 Damköhler 수를 이용하여 정확하게 예측할 수 있음을 제시하였다. Kim 등[15]은 연소불안정이 재순환 지역의 섭동을 유발하며, 재순

†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.

환 지역의 주파수는 불안정주파수와 동일함을 발견하였다. 재순환 지역의 섭동은 재순환 지역 내 질량유량과 열방출의 섭동을 야기하고, 이는 연소불안정을 강화시킴을 제시하였다. Runyon 등[16]은 화염날림(blowoff)과 연소안정성 사이의 관계를 연구하였으며, 화염날림은 열방출, 화염위치 등과 연관됨을 나타내었다.

위와 같은 연소불안정 특성과 화염구조 사이의 상관관계에 대한 연구들을 바탕으로, 스월-안정화 연소기에서 연소불안정의 수동 및 능동제어 연구들이 많이 진행되고 있다[8,17]. 하지만 대부분의 연구가 특정 연료나, 하나의 스월러 형상, 그리고 좁은 범위의 유동조건에서 수행되어 포괄적인 결과를 도출하기에 무리가 있었다. 일반적인 경향성을 도출하기 위해서는 2가지 이상의 연료 및 넓은 작동조건에서 연소특성의 결과를 비교하는 것이 필수적이다.

본 연구는 연료에 따른 연소특성을 명확하게 관측하기 위해 탄화수소 계열 연료 중 화염속도, 화염두께, 그리고 단열화염온도 등의 차이가 큰 에틸렌과 메탄을 이용하여 실험을 수행하였다. 또한 다양한 스월 형상과 유동조건에서 화염구조와 화염길이를 측정하였고, 더 나아가 연소불안정의 시작과 화염구조 변이 현상 사이의 관계를 분석하였다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험장치

2.1.1 모델 덤프 연소기 설계

연소실험을 위해 Fig. 1과 같은 스월-안정화 모델 덤프 연소기를 설계 및 제작하였다. 연소실의 단면은 75 × 75 mm의 정사각형이며, 길이는 320 mm이다. 입구영역의 단면은 원형이며, 직경(d)은 30 mm, 길이는 300 mm이다. 연료와 공기는 입구 하단에서 하류방향으로 35 mm에서 각각 반대방향으로 주입된다. 이때 공기는 초킹 오리피스를 이용하여, 연료는 MFC를 사용하여 유량을 제어하였다. 예혼합된 기체는 입구영역과 축방향 스월러를 지나 연소실로 공급된다. 이때 축방향 스월러는 덤프 평면에서 상류방향으로 20 mm 지점에 설치되었다. 입구영역에서 연료와 공기가 공급되는 라인을 제외한 나머지 포트들과 스피커 마운트는 추후 연구를 위해 준비되었지만, 본 연구에서는 모두 캡과 플랜지로 기밀하였다. 연소실의 전/후면에 석영창을 설치하여 화염을 가시화하였다.

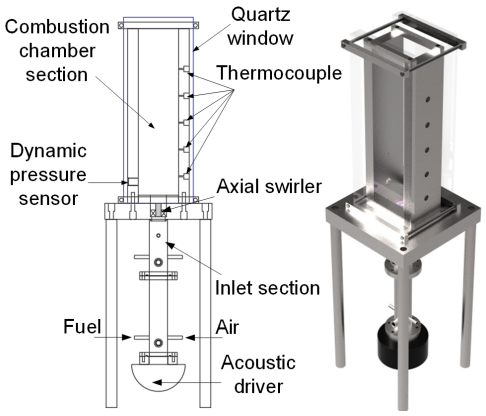

Fig. 1. Schematic and 3-D modeling of the model dump combustor.

덤프 평면에서 하류방향으로 25 mm 지점에 동압센서(PCB Piezotronics, 123A21)를 설치하여 압력섭동을 측정하였다. 압력섭동은 NI-cDAQ에 의해 10 kHz의 샘플링 속도로 1초 동안 계측되었다. 연소실의 온도를 측정하기 위해 5개의 K형 열전대를 50 mm 간격으로 설치하였다. 그리고 CH* 자발광 이미지를 촬영하기 위해 431.5 ± 5 nm의 대역 필터가 부착된 ICCD 카메라(Andor DH334T-18U-03)를 사용하였다.

2.1.2 축방향 스월러 설계

본 연구에 사용된 스월러는 연소실에 탈부착이 가능하도록 Fig. 2와 같이 설계하였다. 스월러는 3D 프린터를 이용하여 XM-19 재질로 제작되었다. 8개의 베인을 갖는 스월러는 각도에 관계없이 위에서 바라본 베인 단면의 면적이 동일하도록 베인의 두께를 Table 1과 같이 다르게 설계하였다. 이는 같은 유량에서 각 스월러를 통과한

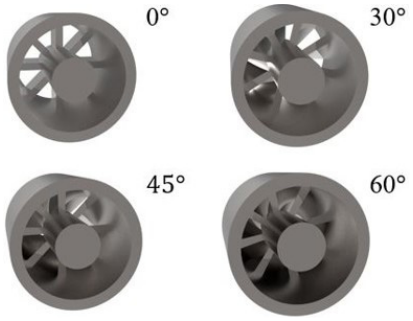

Fig. 2. 3-D modeling of the axial swirlers.

Table 1. Detailed dimensions of the axial swirler vanes

α [°]	0	30	45	60
Thickness [mm]	2.00	1.82	1.65	1.48
Cross-sectional area [mm^2]	13.95			
SN	0.00	0.42	0.73	1.26

축방향 속도가 동일한 값을 갖도록 한 것이다. 축방향 스월러의 스월 수(SN)는 아래 식과 같이 정의된다[18].

$$SN = \frac{2}{3}\left[\frac{1-(D_h/D_t)^3}{1-(D_h/D_t)^2}\right]\tan\alpha \quad (1)$$

여기서 D_h는 허브 직경(10 mm)을, D_t는 스월러 내경(24 mm)을 나타낸다. α는 베인의 각도이다.

2.2 실험조건

본 연구는 다양한 범위의 유동조건에서 실험하기 위해 스월러 끝단 평면에서의 축방향 속도(u)를 10, 15, 20 m/s로 변화하였다. 당량비(φ)는 에틸렌을 기준으로 희박 가연한계 조건부터 화염역화 현상이 발생하기 이전 조건인 0.55부터 0.80까지 설정하였다. Table 2에 자세한 실험조건을 정리하였다.

Table 2. Experimental conditions

u [m/s]	10	15	20
Fuel	C_2H_4	CH_4	
φ	0.55 ~ 0.80, △0.05		
α [°]	0, 30, 45, 60		

3. 실험결과

3.1 화염구조 특성

3.1.1 스월 수에 따른 화염구조

스월-안정화 연소기에서 스월 형상과 연료에 따른 화염의 기초적인 특성을 알아보기 위해, 실험조건마다 30장의 CH* 자발광 이미지(노출시간 20 ms)를 촬영하였다. 30장의 사진은 난류섭동에 의한 임의적 특징을 제거하기 위해 평균되었고, 노이즈 제거 및 뚜렷한 화염구조를 나타내기 위해 정규화 되었다. Figs. 3, 4는 이러한 과정을 거친 에틸렌, 메탄의 CH* 자발광 이미지 결과이다.

스월 수가 0인 경우, 낮은 당량비에서 에틸렌 화염은 부상하였다. 하지만 당량비가 증가함에 따라 빨라진 연소속도로 인해 화염이 덤프 면에 안착되고 있다. 이러한 현상은 축방향 속도, 당량비에 관계없이 메탄 화염에서는 나타나지 않았다. 이는 동일한 유동/당량비 조건에서는 메탄 화염이 상대적으로 느린 연소속도를 갖기 때문이다. 층류화염속도는 당량비 0.65인 에틸렌 화염에서 31 cm/s로, 당량비 0.80인 메탄 화염에서 24 cm/s로 계산된

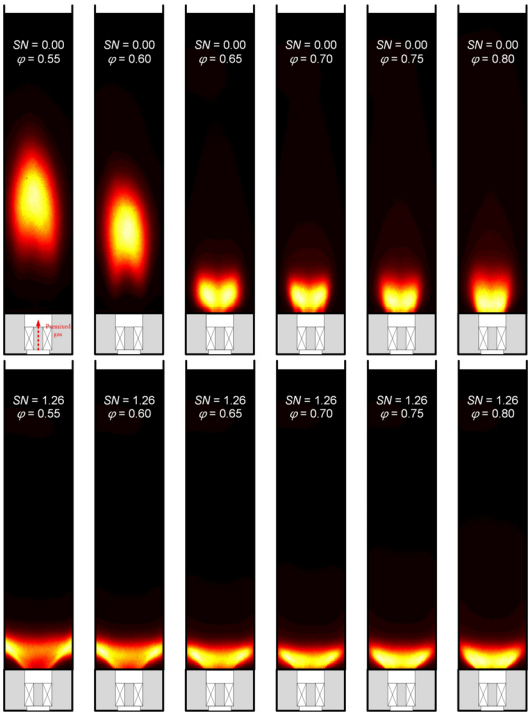

Fig. 3. Normalized CH* chemiluminescence images using C_2H_4 and air at u = 20 m/s.

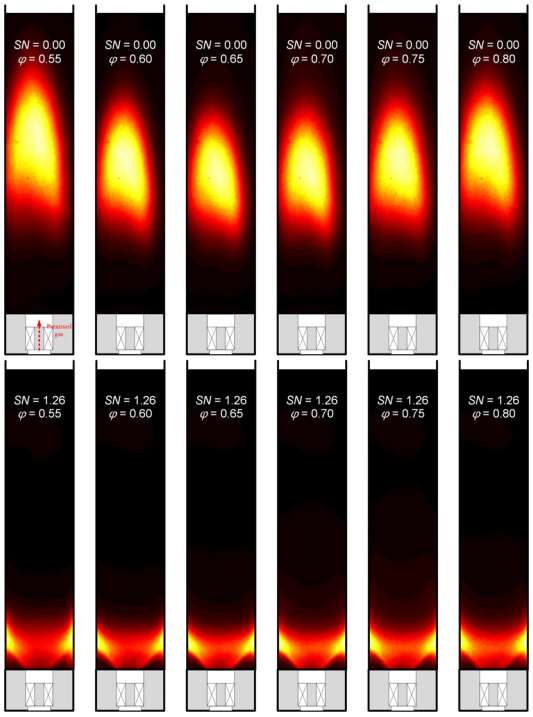

Fig. 4. Normalized CH* chemiluminescence images using CH_4 and air at u = 20 m/s.

다[19]. 따라서 연소속도 관점에서 메탄 화염은 본 연구의 실험조건에서는 안착되지 않는다. 다만 유사한 층류 화염속도에서 에틸렌 화염이 연소실 음향과 동조되어 더 강한 압력파를 입구영역으로 전달하게 되는데, 이는 예혼합된 기체의 속도섭동을 증가시키고 유사한 연소속도에서 짧은 화염길이를 유도할 수 있다[20].

스월 수가 1.26으로 증가한 경우, 화염은 연료에 상관없이 모든 조건에서 덤프 면에 안착되었다. 동일한 당량비 조건에서는 에틸렌의 화염길이가 메탄에 비해 짧은 것을 알 수 있으며, 메탄의 경우 낮은 반응성으로 인해 강한 열방출이 연소실 벽 근처에서 발생하고 있다. 이러한 스월-안정화 연소기에서 전형적으로 나타나는 화염구조는 Fig. 5에 제시된 유동특성의 결과이다. 덤프 면에서 갑작스런 확대에 의해 생성된 외곽 재순환 지역(CRZ, corner recirculation zone)과 스월 유동에 의해 유도된 중심 재순환 지역(CTRZ, central toroidal recirculation zone)이 화염안정화 지역을 제공한다. 또한 전단층(SL, shear layer)은 공급되는 반응물과 국부적으로 속도가 낮은 지역의 사이에서 발생하게 된다[5,7].

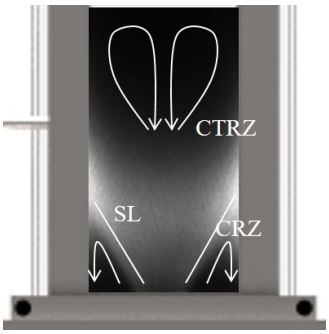

Fig. 5. Flow field characteristics in a swirl-stabilized combustor.

3.1.2 화염길이 변화

화염길이는 연소효율, 열방출 및 열전달, 그리고 질소산화물 형성에 영향을 미치는 원인 중 하나이다. 이는 연소불안정과도 연결될 수 있으므로, CH* 자발광 이미지를 이용하여 실험조건에 따른 화염길이 변화를 측정하였다. 본 연구에서는 평균-정규화된 CH* 자발광 이미지에서 최대강도의 10% 이상의 값을 갖는 영역만을 화염으로 정의하고, 입구 직경(d)으로 정규화 하였다.

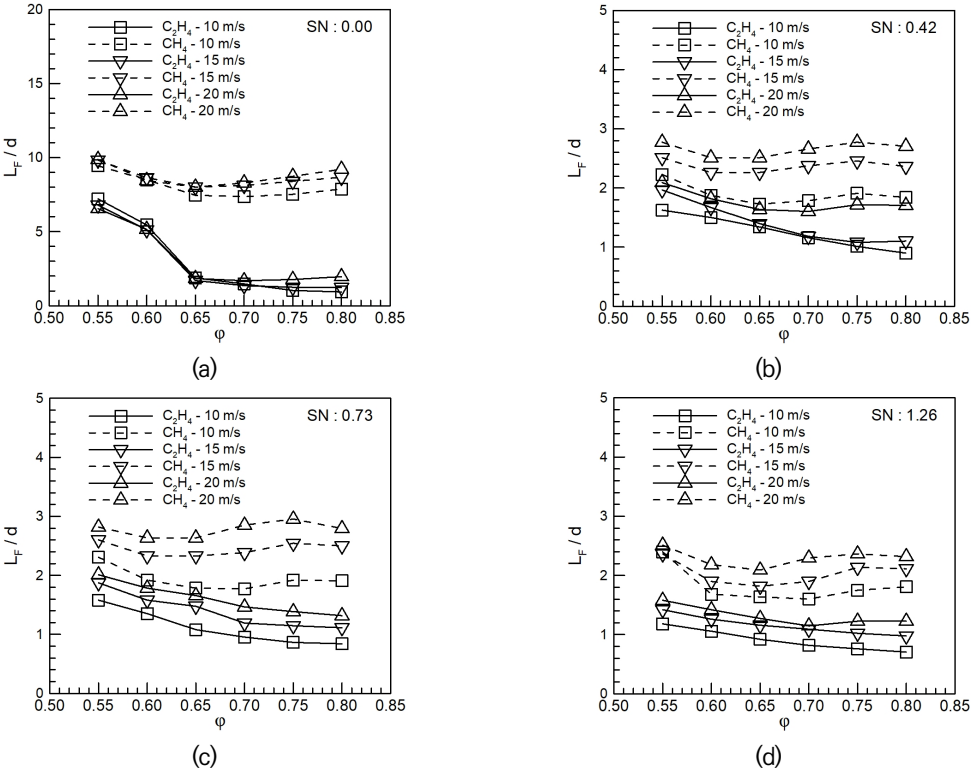

Fig. 6. Normalized flame lengths as a function of the equivalence ratio: (a) SN = 0.00, (b) SN = 0.42, (c) SN = 0.73, and (d) SN = 1.26.

Fig. 6은 연료, 입구속도, 당량비, 그리고 스월 수가 화염길이에 미치는 영향을 나타낸다. 동일한 당량비에서 입구속도가 빨라짐에 따라 화염길이는 증가하였다. 스월 수의 증가는 Figs. 3, 4에서와 같이 화염길이를 감소시킨다. 이는 증가된 스월 각도가 중심 재순환 지역을 덤프면 근처로 이동시키며, 난류강도와 화염속도를 증가시키기 때문이다[7]. 동일한 조건에서 메탄 화염은 에틸렌 화염에 비해 긴 것을 알 수 있는데, 이는 메탄의 낮은 화염속도로 인해 연소가 지연되어 하류방향으로 길게 지속되기 때문이다.

3.2 연소불안정 특성

측정된 압력섭동은 직류 및 노이즈 성분의 제거를 위해 30 ~ 3,000 Hz로 필터링 되었다. 연소불안정 영역을 살펴보기 위해 필터링된 압력섭동의 RMS(root mean square) 값을 Fig. 7에 나타내었다. RMS 값이 10 mbar 이상일 때, 특정 주파수에서 명확한 PSD(power spectral density) 피크(peak)가 나타났다. 반면 RMS 값이 10 mbar보다 작은 경우, 피크와 노이즈는 구분하기 힘들었다. 따라서 본 연구에서는 압력섭동의 RMS 값이 10 mbar 이상에서 연소불안정이 발생하였다고 정의하였다.

에틸렌의 경우 스월 수가 증가함에 따라 연소불안정의 발생 영역이 넓어진 것을 확인할 수 있다. 입구속도가 10 m/s에서는 모든 조건에서 안정적인 연소가 이루어졌지만, 입구속도가 증가함에 따라 연소불안정의 발생 가능성이 증가하였다. 마찬가지로 당량비의 증가는 집중된 강한 열방출과 높은 에너지 밀도로 인해 압력섭동을 증가시키는 주요한 요인 중 하나임을 확인하였다. 메탄의 경우 스월 수를 제외한 작동조건에 대해 압력섭동의 반응은 전체적으로 에틸렌과 유사한 결과를 나타내었지만, 모든 조건에서 상대적으로 낮은 압력섭동을 보여주었다.

안정한 연소조건과 연소불안정이 발생한 조건에서 시간에 따른 압력섭동의 변화를 Fig. 8에 도시하였다. 당량비 0.55, 입구속도 10 m/s, 스월 수가 0일 때의 압력섭동은 난류에 의한 노이즈 수준의 안정적인 값을 나타낸다. 에틸렌과 메탄은 이와 같은 조건에서 압력섭동의 차이가 크지 않다. 하지만 연소불안정이 발생한 당량비 0.80, 입구속도 20 m/s, 스월 수가 1.26인 경우, 에틸렌과 메탄의 압력섭동은 매우 큰 차이를 나타내는 것을 알 수 있다. 에틸렌이 메탄에 비해 더욱 강한 연소를 유도하며 이는 동

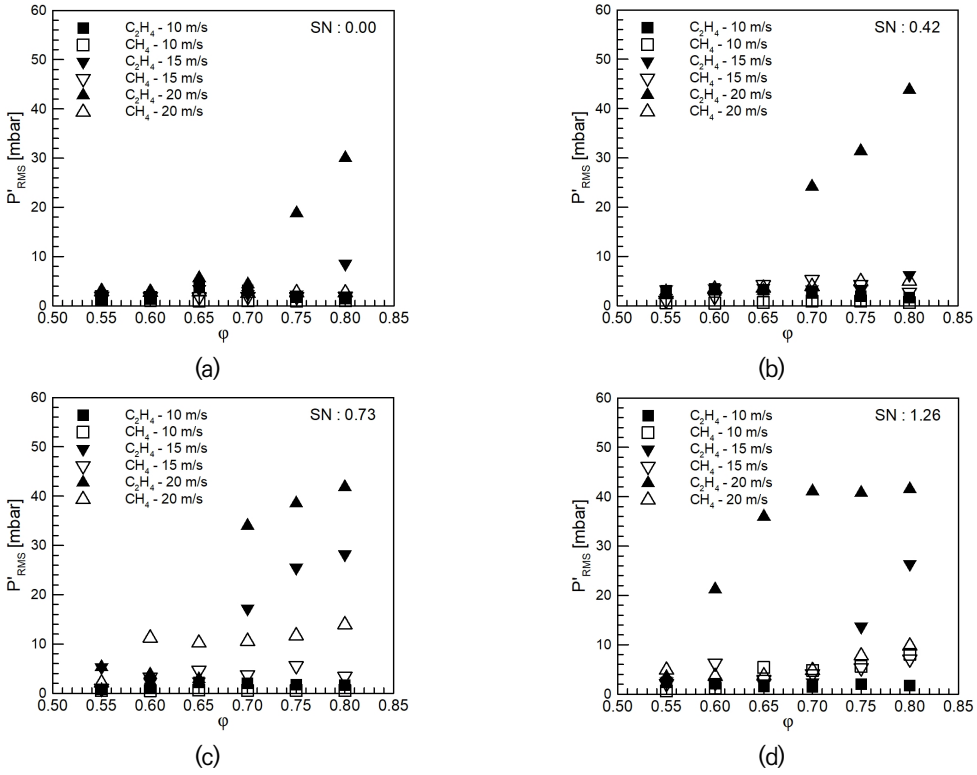

Fig. 7. RMS values of the filtered pressure fluctuations: (a) *SN* = 0.00, (b) *SN* = 0.42, (c) *SN* = 0.73, (d) *SN* = 1.26.

일한 당량비에서 연료에 따른 특성화학시간의 차이인 것으로 판단된다.

에틸렌 연소에서 연소불안정이 발생한 조건에서의 PSD와 불안정 주파수를 Fig. 9에 나타내었다. 스월 수, 유속의 증가는 전반적으로 최대 PSD를 증가시켰다. 불안정 주파수는 실험조건에 관계없이 대략 360 ~ 380 Hz로 분석되었는데, 이는 연소실의 1차 종방향 모드에 해당한다. 이러한 결과로부터 스월러 형상이 불안정 주파수에 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 메탄의 경우도 에틸렌에 비해 PSD는 작았지만 유사한 결과를 나타내었다.

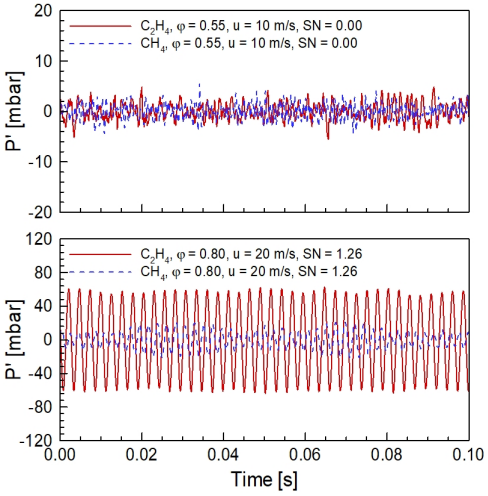

Fig. 8. Time histories of the filtered dynamic pressure.

3.3 연소불안정의 발생과 화염구조 변이의 관계

본 절에서는 연소불안정과 화염구조 사이의 관계에 대해 분석하였다. Fig. 10은 에틸렌 연료, 입구속도 15 m/s, 스월 수 0.73에서 당량비에 따른 화염구조를 나타낸다. 모든 이미지의 좌표는 연소실과 동일하며 입구영역의 직경으로 정규화 하였다. 좌측 절반은 평균-정규화된 CH* 자발광 이미지이고, 우측 절반은 아벨 변환된 이미지이다. 이에 대한 압력섭동의 RMS 값은 Fig. 7(c)에 나타나 있다. 당량비 0.55부터 0.65까지는 압력섭동이 매우 낮은 안정한 조건이지만, 0.70부터 0.80까지는 압력섭동의 RMS 값이 10 mbar 이상인 연소불안정 영역에 해당한다. 당량비가 낮은 경우, 좌측의 정규화된 이미지에서는 불

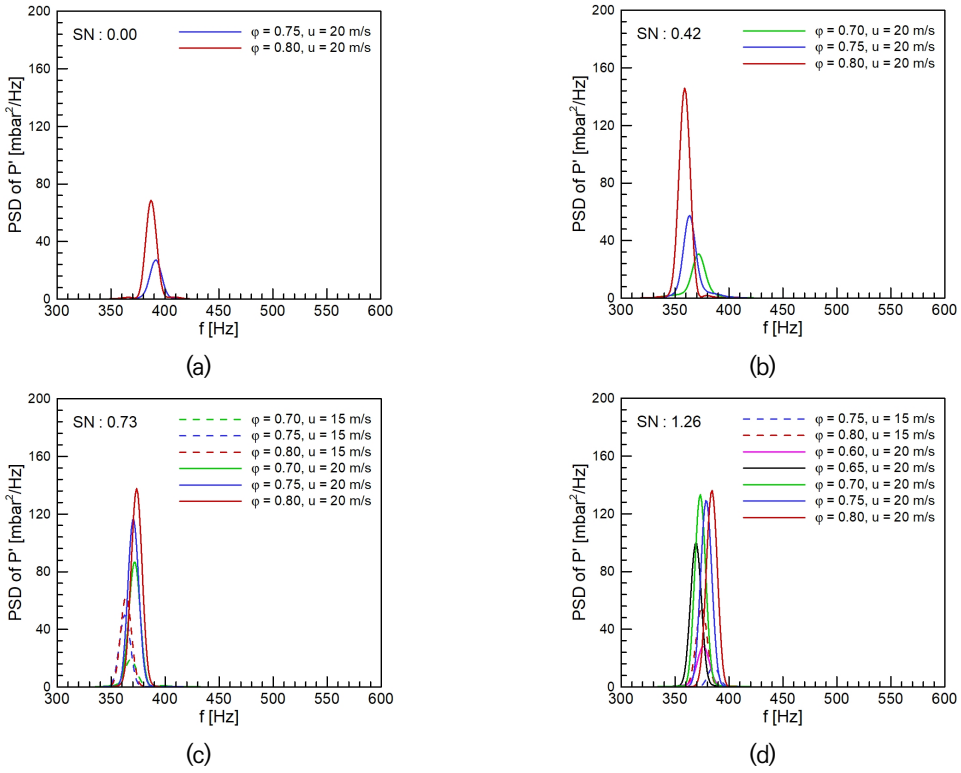

Fig. 9. Power spectral densities of the pressure fluctuations using C_2H_4 and air under combustion instabilities: (a) *SN* = 0.00, (b) *SN* = 0.42, (c) *SN* = 0.73, and (d) *SN* = 1.26.

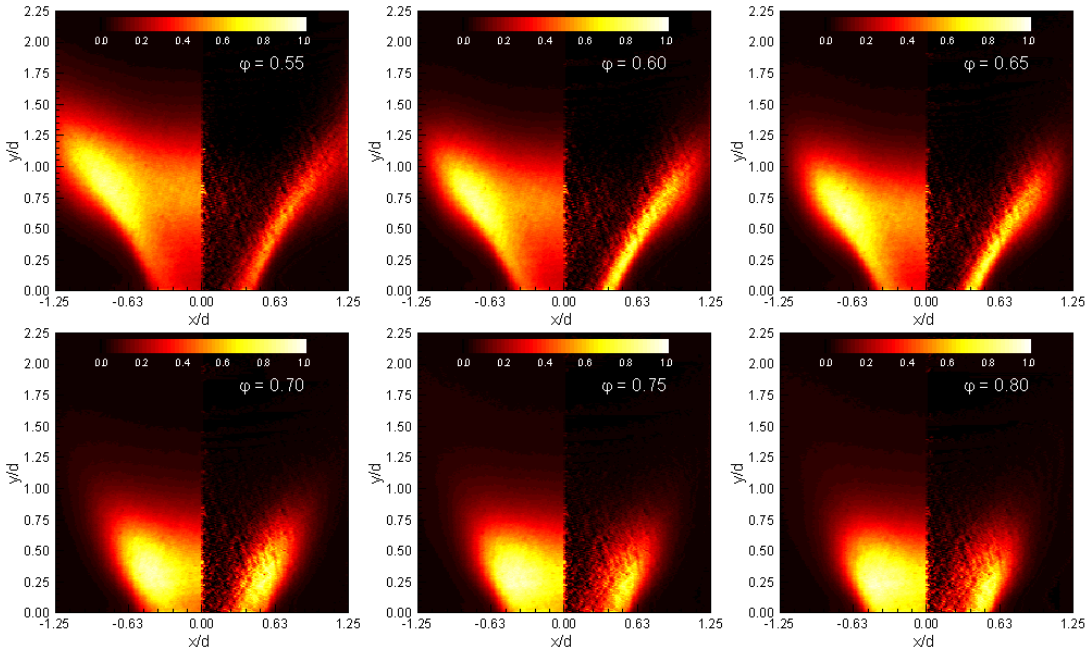

Fig. 10. CH* chemiluminescence and its Abel transformed image using C_2H_4 and air at u = 15 m/s and SN = 0.73.

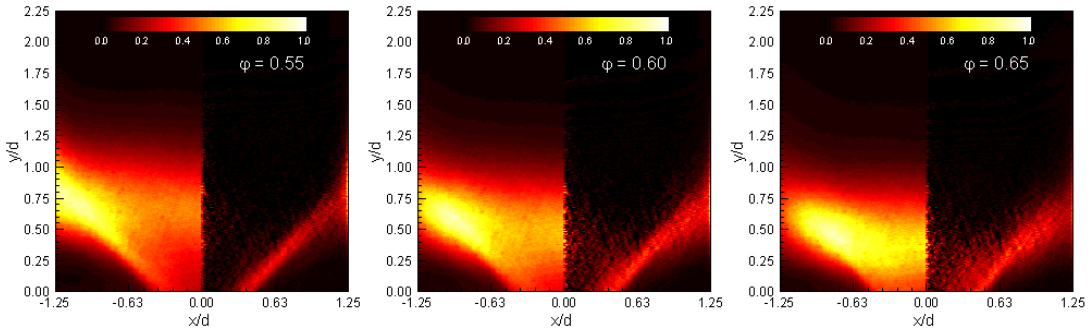

Fig. 11. CH* chemiluminescence and its Abel transformed image using C_2H_4 and air at u = 20 m/s and SN = 1.26.

분명해 보이지만 우측의 아벨 변환된 이미지에서는 강한 열방출이 전단층에 존재하며 중심축 부분에는 거의 나타나지 않는 것을 분명히 알 수 있다. 즉, 화염은 속이 빈 중공원추형 형상을 갖게 된다.

하지만 연소불안정이 발생한 당량비 0.70부터 강한 열방출이 연소실의 중심으로 이동하는 것을 알 수 있다. 연소불안정이 발생하게 되면 화염면이 두꺼워지며 연소실의 중심 근처에서도 열방출이 나타난다. 이러한 화염구조 변이 현상은 모두 연소불안정이 발생하는 조건에서 시작되며, 변이 이후 입구속도나 당량비가 더 증가하여도 변화된 화염구조 현상이 지속적으로 관측되었다.

Fig. 11은 에틸렌 연료, 입구속도 20 m/s, 스월 수 1.26, 당량비 0.55 ~ 0.65에서의 화염 이미지이다. 다른 스월 형상과 비교하여, 안정한 조건인 당량비 0.55에서 강한 열방출 지점은 높은 스월 수에 의해 연소실 벽면에 집중되어있는 것을 알 수 있다. 연소불안정의 시작지점인 당량비 0.60에서 화염구조 변이 현상은 발생하지만 당량비 0.65에서 연소실 중심 근처에 분배된 반응영역을 명확하게 나타낸다. 즉, 스월 수에 따라 정도의 차이는 있지만 연소불안정의 시작지점과 화염구조 변이 현상은 정확하게 일치함을 확인할 수 있다.

화염구조 변이 현상은 같은 실험에서도 다르게 나타날

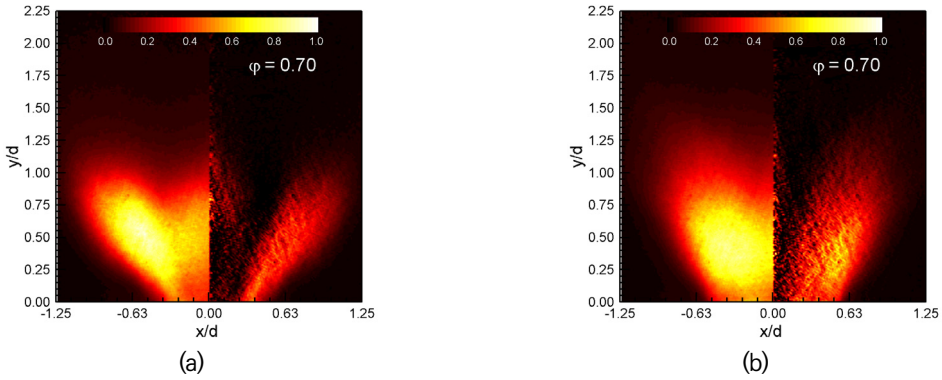

Fig. 12. Instantaneous CH* chemiluminescence and its Abel transformed image using C_2H_4 and air at u = 20 m/s and SN = 0.42.

수 있다. Fig. 12는 에틸렌 연료, 입구속도 20 m/s, 당량비 0.70일 때, 측정된 30장의 이미지 중 서로 다른 2장을 나타낸다. Fig. 12(a)는 안정한 연소일 때 나타나는 화염구조와 같이 강한 열방출이 연소실 중심에 분배되어 있지 않다. 하지만 Fig. 12(b)는 중심 근처에 강한 열방출이 분배되어 있으며, 아벨 변환된 이미지 또한 같은 경향을 나타낸다. 이와 같은 현상은 당량비가 0.65인 경우에서도 마찬가지로 나타났다. 하지만 당량비 0.65와 0.70에서 압력섭동은 매우 다른 크기를 갖는다는 것을 Fig. 7(b)에서 알 수 있다. 이는 측정된 30장의 이미지 중, Fig. 12(a)와 같이 연소실 중심 근처에 강한 열방출이 분배되지 않은 화염구조가 차지하는 비율을 통해 설명이 가능하다. 당량비가 0.65인 경우 안정한 연소조건의 화염형상이 80% 정도 측정되는 반면, 0.70에서는 20%만이 안정한 화염구조임이 확인되었다. 이러한 경향은 다른 조건에서도 동일하게 나타났다. 실험 중에 화염구조 변이 현상이 나타나는 경우 어떠한 화염구조가 지배적으로 출현하느냐에 따라 연소불안정 시작의 조건이 될 수 있음을 설명한다.

메탄 연료의 경우는 연소불안정이 발생하여도 압력섭동이 에틸렌에 비해 매우 낮기 때문에, 연소실 중심 근처에서 강한 열방출이 상대적으로 낮게 측정되었다. 하지만 위와 같은 연소불안정과 화염구조 사이의 관계는 메탄에서도 일정하게 나타났다.

4. 결 론

스월 수, 입구속도, 당량비, 연료 종류에 따른 화염구조, 연소불안정 특성, 그리고 둘 사이의 관계를 파악하기 위한 실험적 연구를 모델 스월-안정화 연소기에서 난류 예혼합 화염을 이용하여 수행하였다.

동일한 당량비에서 입구속도의 증가는 화염길이를 증가시켰지만, 스월 수의 증가는 중심 재순환 지역을 덤프면으로 내려오게 하여 화염길이를 감소시킴을 확인하였다. 또한 같은 실험조건는 빠른 연소속도에 의해 에틸렌의 화염길이가 메탄에 비해 짧은 것을 확인할 수 있었다.

일반적으로 입구속도, 당량비, 그리고 스월 수의 증가는 압력섭동을 증가시킨다. 압력섭동은 실험조건에 의해 점차적으로 증가하는 것이 아니라 특정 조건에서 급격하게 증폭되었다. 하지만 불안정 주파수는 실험조건에 크게 영향을 받지 않았다. 또한 스월 수의 증가는 연소불안정 영역을 넓게 유도하였다.

급격하게 상승하는 압력섭동의 조건은 화염구조 변이 현상이 발생하는 조건과 일치하였다. 전단층에 안정화된 강한 열방출은 특정 조건에서 연소실의 중심 근처로 분배되었다. 이러한 현상은 정도의 차이만 있을 뿐, 연료나 실험조건에 관계없이 연소불안정이 시작하는 지점에서 나타나는 것을 확인하였다. 본 연구는 화염구조 및 열방출 패턴과 연소불안정의 관계가 다양한 변수에 의해 영향을 받는 것을 보여주었다.

후 기

본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2013R1A5A1073861, NRF-2017R1A1A1A05001237, NRF-2018M1A3A3A02065683)을 받아서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

[1] A.W. Lefebvre, Lean Premixed/Prevaporized Combustion, NASA CP-2016, 1977.

[2] R.E. Foglesong, T.R. Frazier, L.M. Flamand, J.E. Peter, R.P. Lucht, Flame Structure and Emissions Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor, 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1999, 1999-2399.

[3] S. Tachibana, L. Zimmer, Y. Kurosawa, K. Suzuki, Active Control of Combustion Oscillations in a Lean Premixed Combustor by Secondary Fuel Injection Coupling with Chemiluminescence Imaging Technique, Proc. Combust. Inst., 31 (2007) 3225-3233.

[4] Y. Huang, H.G. Sung, S.Y. Hsieh, V. Yang, Large-Eddy Simulation of Combustion Dynamics of Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustor, J. Propul. Power, 19 (2003) 782-794.

[5] Y. Huang, V. Yang, Bifurcation of Flame Structure in a Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustor: Transition from Stable to Unstable Flame, Combust. Flame, 136 (2004) 383-389.

[6] J.W.S. Rayleigh, The Theory of Sound, Dover Books on Physics, 1945.

[7] Y. Huang, V. Yang, Effect of Swirl on Combustion Dynamics in a Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustor, Proc. Combust. Inst., 30 (2005) 1775-1782.

[8] Z.A. LaBry, S.J. Shanbhogue, R.L. Speth, A.F. Ghoniem, Flow Structure in a Lean-Premixed Swirl-Stabilized Combustor with Microjet Air Injector, Proc. Combust. Inst., 33 (2011) 1575-1581.

[9] M.C. Janus, G.A. Richards, M.J. Yip, E.H. Robbey, Effects of Ambient Conditions and Fuel Composition on Combustion Stability, Techinical Report, DOE, 1997.

[10] T. Lieuwen, V. McDonell, E. Petersen, D. Santavicca, Fuel Flexibility Influences on Premixed Combsutor Blowout, Flashback, Autoignition, and Stability, J. Eng. Gas Turb. Power, 130 (2008) 11506.

[11] D. Ferguson, D. Straub, G. Richards, E. Robey, Impact of Fuel Variability on Dynamics Instabilities in Gas Turbine Combustion, 5th US Combustion Meeting, March 25th-28th, 2007.

[12] J. Lee, J. Park, D. Han, K.T. Kim, Swirl Flow Effects on Flame-Flame Interactions in a Model Lean-Premixed Gas Turbine Combustor, J. Korean Soc. Combust., 23 (2018) 21-27.

[13] S. Taamallah, Z.A. LaBry, S.J. Shanbhogue, A.F. Ghoniem, Thermo-Acoustic Instabilities in Lean Premixed Swirl-Stabilized Combustion and Their Link to Acoustically Coupled and Decoupled Flame Macrostructure, Proc. Combust. Inst., 35 (2015) 3273-3282.

[14] D. Fritsche, M. Furi, K. Boulouchos, An Experimental Investigation of Thermoacoustic Instabilities in a Premixed Swirl-Stabilized Flame, Combust. Flame, 151 (2007) 29-36.

[15] M.K. Kim, J. Yoon, S. Park, M.C. Lee, Y. Yoon, Effects of Unstable Flame Structure and Recirculation Zones in a Swirl-Stabilized Dump Combustor, Appl. Therm. Eng., 58 (2013) 125-135.

[16] J. Runyon, R. Marsh, P. Bowen, D. Pugh, A. Giles, S. Morris, Lean Methane Flame Stability in a Premixed Generic Swirl Burner: Isothermal Flow and Atmospheric Combustion Characterization, Exp. Therm Fluid Sci., 92 (2018) 125-140.

[17] A. Borsuk, J. Williams, J. Meadows, A.K. Agrawal, Swirler Effects on Passive Control of Combustion Noise and Instability in a Swirl-Stabilized Combustor, J. Eng. Gas Turb. Power, 137 (2015) 041504.

[18] B. Khandelwal, D. Lili, Y. Sethi, Design and Study on Performance of Axial Swirler for Annular Combustor by Changing Different Design Parameters, J. Energy Inst., 87 (2014) 372-382.

[19] J. Göttgens, F. Mauss, N. Peters, Analytic Approximations of Burning Velocities and Flame Thickness of Lean Hydrogen, Methane, Ethylene, Ethane, Acetylene, and Propane Flames, Proc. Combust. Inst., 24 (1992) 129-135.

[20] D. Hwang, K. Ahn, Y. Yoon, Flame Length Scaling of C_2H_4-Air Premixed Flames Under Acoustic Forcing, JAFM, 11 (2018) 647-654.

저자정보

황동현

충북대학교 기계공학과 박사과정이며, 관심분야는 가스터빈에서 난류 예혼합 화염의 연소불안정이다.

박수진

충북대학교 기계공학과 석사과정이며, 관심분야는 전단 동축형 분사기를 이용한 연소불안정이다.

안규복

충북대학교 기계공학과 부교수이며, 관심분야는 액체로켓엔진의 연소 및 추진 그리고 분사기 설계, 미립화, 분무특성 연구이다.