

모사 SNG 연료를 적용한 모델 가스터빈 연소기의 연소 불안정성에 관한 실험적 연구

최인찬* · 이기만***

*순천대학교 대학원 우주항공공학전공 · **순천대학교 기계우주항공공학부

An Experimental Study on Combustion Instability in Model Gas Turbine Combustor using Simulated SNG Fuel

Inchan Choi* and Keeman Lee***

*Department of Aerospace Engineering, Sunchon National University

**School of Aerospace and Mechanical Engineering, Sunchon National University

(Received 2 February 2015, Received in revised form 27 February 2015, Accepted 28 February 2015)

ABSTRACT

The combustion instability was experimentally investigated in model gas turbine combustor with dual swirl burner. When such instability occurs, a strong coupling between pressure oscillation and unsteady heat release excites a self-sustained acoustic wave which results in a loud sound, and can even cause fatal damage to the combustor and entire system. In present study, to understand the combustion instability with a premixed mixture, the detailed periods of pressure and heat release data in unstable flame mode were investigated by various measurement methods at relatively rich condition and lean condition near flammable limits. Also, to prepare the utilization of synthetic natural gas (SNG) fuel in gas turbine system, an investigation was conducted using a simulated SNG including methane as a reference fuel to examine the effects of H₂ content on flame stability. These results provide that the instability due to flash-back behaviour like CIVB phenomenon occurred at rich condition, while the repetition of relighting and extinction caused the oscillation of lean condition near flammable limit. From the analysis of H₂ content effects, it is also confirmed that the instability frequency is proportional to the laminar burning velocity at both rich and lean condition.

Key Words : Gas turbine, Combustion instability, Dual swirl burner, Lean premixed, SNG, Hydrogen, Flashback, Relighting, Extinction

기 호 설 명

P : Pressure fluctuation

Q : Heat release rate fluctuation

Φ_M : Main equivalence ratio

t : time(sec)

S_L : Laminar burning velocity(m/s)

Arbi. : Arbitrary

1. 서론

가스터빈에서 희박 예혼합 연소(lean premixed com-

bustion)는 NO_x와 CO를 동시에 줄일 수 있는 우수한 배출성능을 지니고 있지만, 상대적으로 연료가 적고 과잉의 산화제로 연소되는 관계로 희박 가연한계 근처나 실제 운전 상태에서 화염이 불안정해지는 문제점을 안고 있다. 이처럼 불안정한 연소가 발생되면 가스터빈의 궁극적인 목적인 에너지 공급에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 심지어는 연소기의 성능과 시스템 수명을 저해시키는 주된 요인이 되게 된다[1-6].

가스터빈 연소기에서 발생하는 연소 불안정에 대

† Corresponding Author, kmlee@snu.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.

한 원인과 기구는 여러 가지가 있지만 연소실 내 열 방출파와 압력파간의 상호작용으로 발생하는 열음향 불안정(thermal acoustic instability)이 주된 원인인 것으로 알려져 있다. 이는 연소에 의한 열에너지(열 방출)와 음향에너지(압력방출) 간 에너지 교환이 반응유동을 매개로 한 상호작용(interaction)에서 발생하는 동적현상(dynamic phenomenon)으로, Rayleigh가 제안한 다음과 같은 식 (1)에 표현되는 Rayleigh criterion을 만족할 때 발생하는 것으로 되어있다[7].

$$\iint P(t) Q(t) dt > 0 \quad (1)$$

즉, 발생한 열섭동주기가 압력과 진동주기와 위상 내(in-phase)에서 위 조건을 만족하는 공진주파수(resonance frequency)가 발생하게 되면 화염이 심한 진동과 함께 불안정한 상태로 연소가 된다는 것이다.

한편, 최근 석유를 대체할 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 석탄은 향후 석유를 대체하여 에너지원을 확보할 수 있는 가장 현실적이며 유력한 후보로 여겨지고 있다. 이에 따라 그간 낮은 발열량과 이용의 불편함으로 인해 사용빈도가 낮았던 석탄을 활용한 산업이 재조명을 받고 있다. 이러한 산업 중의 하나가 석탄 가스화를 통해 얻어진 합성천연가스(synthetic natural gas, 이하 SNG) 생산인데, 석탄가스화로 제조한 합성가스(Syngas)를 메탄화 공정을 통해 소량의 수소(H₂)와 85% 이상의 메탄(CH₄)에서 프로판(C₃H₈)을 첨가하여 발열량을 현재 액화천연가스(이하 LNG) 기준에 맞춘 SNG를 생산하여 시판하는 산업이다.

국제적 추세에 따라 국내에서도 이미 SNG 생산을 위한 플랜트 건설과 공정개선에 대한 연구가 진행되고 있는데, 대표적으로 포스코와 발전사에서 2014년 까지 생산플랜트 완공을 목표로 진행하여, 올해부터는 합법적인 생산과 판매를 개시하는 것으로 예정되어 있다. 그런데 SNG에 포함된 수소 성분은 연소기기의 안정성과 설비에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되어, 본격적인 SNG 보급 시 우선 적용이 예상되는 산업용 가스터빈 연소기에서 SNG 연소특성에 대한 체계적인 연구가 급속히 진행되어야 할 것이다. 일환으로 국내는 Park [8]이 수행한 대용량 발전용 가스터빈 연소기에서 수소함량에 따른 화염 형상과 NO_x 배출에 관한 연구 정도로, 아직까지 가스터빈 연소기에서 SNG 적용에 대한 연구는 전무한 실정이다. 또한 계속 강화되는 NO_x 규제를 위해 희박연소에 대한 관심이 높아짐에 따라, 희박상태로 연소되는 산업용 가스터빈에서도 운전조건을 보다 희박한 영역으로 확대시키는 추세인데 SNG에 포함된 미량의 수소가 어떠한 효과를 나타내는지에 대한 면밀한 검토가 우

선적으로 요구된다.

이에 본 연구에서는 SNG 내 함유된 수소 영향을 실험실 차원에서 파악하기 위해 0~11%로 비교적 큰 함유량까지로 해서, 수소 조성비 변화에 따른 화염형상, 안정화 지도, 연소 불안정 특성을 살펴보고자 한다. 이 경우 비교를 위해 LNG 주성분인 메탄 100% 연료와 빠른 연소속도, 높은 화염온도, 단위 부피당 낮은 발열량이 특징인 수소가 함유된 SNG 연료의 연소 불안정성에 미치는 특성을 집중적으로 살펴봄으로써 향후 본격적으로 보급될 SNG 가스터빈 연소기에 필요한 유용한 설계 정보를 제공하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 이중선회 연소기 및 실험조건

본 연구에서는 분산발전용 가스터빈의 희박연소용으로 고안된 모델 연소기를 사용하였는데, 내·외부 각각의 버너에 축방향 선회기와 접선 방향의 선회기로 구성된 이중선회 연소기이다. 연소기에 대한 상세한 형상과 구조 및 유로는 이전 논문에서 잘 기술되어 있으나 간략하게 설명하면 다음과 같다[9-11]. 메인(main, 이하 메인) 버너의 역할을 수행하는 외부 버너는 접선방향으로 공급되는 산화제와 연료를 예혼합시킴으로써 메인 화염을 형성하게 된다. 또한 파일럿(pilot, 이하 파일럿) 화염 역할을 하는 45°각도 날개(vane)방식의 축 방향 내부버너가 있는데, 파일럿 버너는 메인 버너출구 전에서 부분 예혼합되어 연소되는 형태를 갖는다.

실험조건으로는 본 연구진에서 연소기 상용화를 위해 최적화한 선행 연구[9,10]를 통해 얻어진 운전조건을 참조하여 설정한 조건으로 Table 1에 자세하게 표시하였다. 모든 운전조건은 상온 상압의 유동조건으로, 사용된 연료는 LNG를 대신해 순도 99.99%의 메탄(CH₄)과 모사된 SNG를 사용하였는데, 모사된 SNG 조성에 대해서는 뒤에서 자세히 설명하기로 한다. 버너의 열용량(heat power)은 3~8 kW까지 1 kW 간격으로 관찰하였으며, 연료 유량은 버블메터

Table 1. Experimental conditions

Condition	Pilot burner	Main burner
Equivalence ratio	0.7	0.4~1.1
Swirl number	0.81	2.32
Heat release ratio	Pilot : Main = 2 : 8	
Combustor dia.	74 mm (inner)	
Combustor length	200~800 mm (Ref. 400)	
Thermal power	3~8 kW	
Fuel	CH ₄ / SNG(Simulated)	

로 검증된 질량유량조절기(MFC)를 사용하여 파일릿과 메인 버너간 부하 비율이 2 : 8이 되도록 하여 각각의 버너에 공급하였다. 또한, 파일릿 버너의 당량비는 0.7로 고정된 상태에서 메인 버너의 당량비를 0.4~1.1까지 0.1간격으로 조절하였고, 선회강도는 각각 선회 수 0.81, 2.32에 해당되는 선회익으로 고정하여 수행하였다.

연소실은 가스터빈 연소실 형상을 스케일 다운한 크기로 화염의 직접적인 관찰과 각종 가시화를 위해 직경 74 mm 원형 석영관을 길이 200~800 mm로 변화시켜 조사하였으나, 본 원고에는 기본 길이인 400 mm에서 수행한 내용만을 우선 보고하기로 한다.

2.2. PLIF system을 통한 화염 단면 가시화 및 열방출 주기성 측정

가스터빈 연소기의 열음향 불안정 현상을 일으키는 열 방출에 관한 주기 내역을 살펴보고자 화염을 직접 가시화할 수 있는 OH-PLIF(Planar Laser Induced Fluorescence) 진단법을 사용하여 화염의 주기성을 분석하였다. 알려진 바와 같이 화염에서 생성된 OH 라디칼 농도는 고온영역에 대한 정보를, CH 라디칼은 화염 면에 대한 정보를 직접 제공해 준다. 따라서 본 연구에서는 기존방식인 ICCD 카메라와 PMT를 통해 적분된 화염의 자발 광(光)에 의한 측정방식을 포함해서, 고속 OH-PLIF법을 통해 화염단면으로부터 열방출에 대한 주기 정보를 다음과 같은 장치구성과 방법으로 취득하였다.

사용된 PLIF 계측시스템을 Fig. 1에 개략적으로 나

타내었다. Single edge wave(283.01 nm)의 Nd-YAG Laser(30 W, pulse length of 10 ns)와 SIRAH Allegro High-Speed Dye Laser(566 nm, 1.5 W at 10 kHz)가 사용되었고, fused-silica lens(300 mm focal length)와 cylindrical lens를 사용하여 폭 80 mm, 두께 0.5 mm의 매우 얇은 sheet beam을 대상 화염에 조사시켰다. 조사된 레이저 빔을 통해 화염으로부터 직접 얻게 되는 CH*와 OH 라디칼의 거동 이미지는 각각 2대의 High Speed Star6(HSS6), CMOS Camera를 이용하여 768 × 768 pixel 해상도와 10 kHz(width 200 ns)의 촬영 조건으로 취득하였다. 이렇게 취득한 이들 라디칼 이미지에 대한 정보는 화염 단면상인 각 프레임(frame)당 전체 이미지 강도와 사전 가시화 실험을 통해 설정한 특정 위치 한 지점(one point)에서의 강도 값을 취득한 시간에 대한 FFT 주파수 분석을 통하여 화염의 거동주기를 얻었다[11].

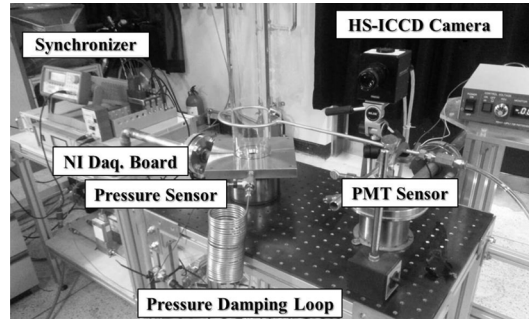


Fig. 2. Direct photo of pressure and heat release measurement system.

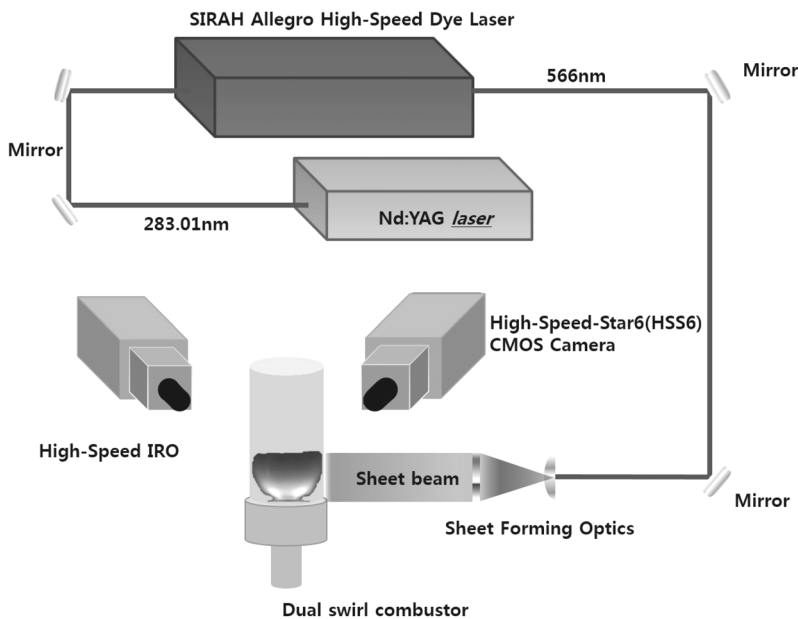


Fig. 1. Schematic of fast-response CH* and OH-PLIF system.

2.3. HS-ICCD와 PMT를 통한 열방출과 동압센서를 통한 압력파 측정

본 연구에서는 OH-PLIF 기법 이외 화염의 열 방출 주기를 고속 영상장치인 HS-ICCD 카메라(Photron Co., Fastcam-apx I2)와 광(光) 증폭 검출기인 PMT(Hamamatsu Co., H10722-110)를 사용하여 화염으로부터 발생하는 주요 라디칼들의 자발 광 분석을 통해 얻었다. 고속 ICCD카메라로 취득한 CH* 자발 광 이미지는 해당 CH 광학필터(optical filter, 434 nm, FWHM = 17 nm)를 카메라 렌즈 앞에 부착한 후 화염의 거동 주기를 고려하여 초당 6000장인 512 × 512 pixel 조건으로 촬영하였다. 또한 광 검출기인 PMT에서는 OH* 자발 광에 대한 정보를 마찬가지로 별도 OH 광학필터(315 nm, FWHM = 15 nm)를 사용하여 취득하였으며, HS-ICCD 카메라의 CH* 이미지로부터 획득한 주기 정보와 비교할 수 있도록 하였다.

열방출로 야기된 음향(압력)파에 대한 정보는 연소실 덤프면에 지름 2 mm의 압력 홀을 뚫어 압전 소자의 동압센서(PCB Co., 106B)를 설치하였고, 이를 통해 파형 및 FFT 주파수 등 압력파의 주기성을 정밀하게 분석하였다. 또한 압력 신호의 노이즈 및 음향 반사를 고려하여 내경 1.8 mm, 길이 5,400 mm의 압력 probe를 압력센서 후방에 위치시켰으며, 신호 컨디셔너(PCB CO., 480E09)를 통해 노이즈 신호를 최소화 하였다. 압력 전달을 위한 어댑터 설계와 압력 probe에 대한 자세한 사항은 참고문헌을 통해 설계하였다[19]. 압력센서를 통해 얻은 압력파와 고속 ICCD카메라 및 PMT로부터 얻는 열방출 주기에 대한 신호 동기화는 함수 발생기(Agilent Co., 33220A)의 트리거 신호를 사용하였으며, 정보 취득 및 저장에는 전용 데이터 수집기(DAQ board, NI 9234 module)를 사용하여 분석하였다.

2.4. 모사 SNG 연료

희박 예혼합 연소로 운전되는 가스터빈용 연소기에 SNG 연료가 사용되었을 때 수소함량에 따른 연

Table 2. Simulated SNG

Fuel composition	Unit	Reference	C3	C7	C11
CH ₄	%	100	90	85	80
C ₃ H ₈	%	0	7	8	9
H ₂	%	0	3	7	11

소특성을 알아보기와 같이 수소함량이 0~11% 조성비를 갖는 모사 SNG 연료를 고 순도의 메탄(CH₄), 프로판(C₃H₈), 수소(H₂)를 사용하여 제조하였다. 모사된 SNG는 웨버지수(Webbe index)에 의거해 메탄 100%와 동일한 저위 발열량을 기준으로 조성비가 조절되는데, 상대적으로 단위 부피당 메탄에 비해 낮은 수소의 발열량을 보완하기 위해 상용 SNG와 동일하게 프로판(C₃H₈)을 사용하여 보정하였다.

본 연구에서 사용된 모사 SNG 종류는 수소 함유량을 기준으로 수소가 3%, 7%, 11% 포함된 연료를 각각 C3, C7, C11라고 명하였으며, 기존 LNG용 연소기 성능과 비교하기 위해 100%의 메탄을 기준 연료(Reference)로 하였다. 따라서 Table 2에서 표시된 수소 함유량을 기준으로 한 조성비 변화에 따라 SNG 용 모델 가스터빈 연소기의 연소 특성을 안정영역 변화, 화염발광과 연소 불안정을 중심으로 살펴보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 이중선회 연소기의 연소특성

3.1.1. 이중선회 화염구분(6개 모드)

이중선회 연소기 연소특성에 대해 논하기 전에, 먼저 기본적인 화염구분을 화염형상과 거동특성을 중심으로 Fig. 3과 같이 ICCD 카메라의 CH* 자발 광 이미지와 DSL 카메라의 직접사진을 기반으로 6가지 화염모드로 구분하였다. 이 경우 ICCD 카메라 특성상 운전 가능한 모든 당량비 영역에서 화염 형상을 왜곡됨 없이 관찰하기 위해 취득된 CH* 자발 광 이미지의 발광범위는 auto-scale로 하였다. 6가지 모드로 구분되는 화염형상은 사용된 기준 연료인 메탄

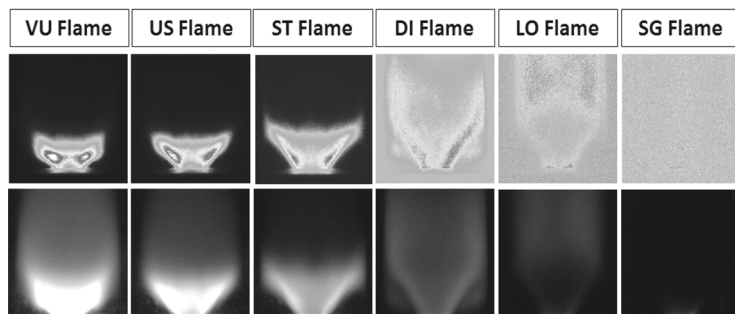


Fig. 3. Typical six flame modes according to the main equivalence ratio.

이나 SNG 연료 모두에서 유사하게 관찰이 된다.

먼저 Fig. 3 첫 번째 열에 해당하는 VU(Very Unstable) 화염모드는 당량비 $\phi = 1.1$ 이상의 비교적 과농(Rich)한 부근에서 관찰되는 화염으로, 강한 발광(luminescence) 정도와 큰 소음을 동반하며, 버너노즐 출구 덤프면 근처에서 납작한 U자 형상에 상하로 심하게 진동하는 형태를 취하고 있다. 두 번째인 US(Unstable) 화염은 당량비 0.9~1.1 구간에서 VU 화염과 비슷한 구조를 나타내지만 소음과 화염의 떨림이 간헐적 또는 주기적으로 나타나는 것이 특징이다. 세 번째 열인 ST(Stable) 화염에서는 전형적으로 안정된 V자 형태의 선회화염 구조를 보여주고 있는데, 당량비가 0.7~0.8 구간에서 주로 관찰된다. 이 구간에서는 시간에 따라 화염의 형상변화가 거의 없고, 비교적 작은 연소 음으로 운전이 된다.

또한 위 세 가지 화염모드보다 상대적으로 더 희박한 영역에서는 다시 크게 세 가지 형태의 화염모드로 구분된다. 먼저 당량비 0.6 부근으로, ST 화염에 비해 V자 형태가 크게 발달하여 화염이 연소실 벽면에 부딪혀 상하로 넓게 전개되는 형태를 DI(Diamond) 화염으로 구분하였다. 이러한 DI 모드에서는 당량비가 상대적으로 과농한 VU와 US 화염모드에 비해 저주파수의 불안정 현상이 관찰되기도 한다. 마지막으로 당량비가 0.55 정도로 더욱 낮아지게 되면 매우 열은 V자 화염 위로 길게 선회화염이 발달하게 되는 LO(Long) 화염이 생성된다. 이 경우 화염은 전체적으로 매우 낮은 화염 발광성을 보이게 되는데, 이중 선회 연소기의 파일럿 화염 영향으로 부상된 메인 화염이 날아가지 못하고 덤프면 상류 부근에서 부착(anchor)되어 있는 형태이다. 여기서 당량비가 0.5 이하로 더욱 희박해져 가연한계 근처로 이동하게 되면, 메인 화염은 더 이상 부착되어 있지 못하고 날리게(blow-off)되며 파일럿 화염만 존재하는 SG(Single) 화염모드가 된다.

3.1.2. 이중선회 연소기의 화염거동 특성

앞 절에서는 당량비 변화에 따른 화염 형상과 특성에 따라 화염을 6개 모드로 구분을 하였다. 여기서는 앞 절의 화염구분과는 달리 연소 불안정 관점과 관련하여 화염의 거동에 대해서 구체적으로 살펴보고자, 전체적인 화염거동을 불안정 모드(unstable mode)와 안정모드(stable mode)로 구분하여 그 형태와 거동 특성에 대해서 분석해 보았다. 이중선회 화염의 불안정성을 이해하기 위해서는 안정과 불안정 모드의 각 연소영역에서 화염의 직접적인 거동주기에 대한 분석이 필요하였다.

이를 위해 PLIF 기법을 사용하여 열방출과 관련된 OH 라디칼의 직접적인 거동 주기내역을 살펴보았

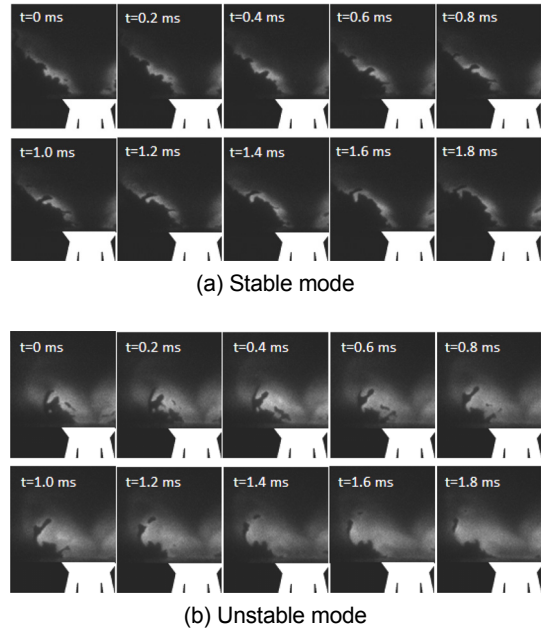
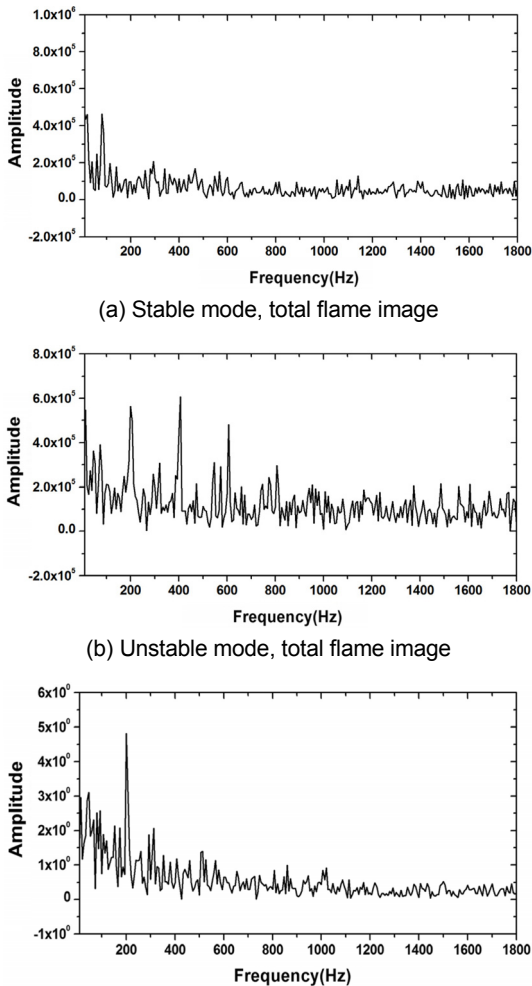


Fig. 4. Series of instantaneous of OH-PLIF images for CH₄ flame.

다. 본 연구의 대표적인 안정모드(당량비 $\phi = 0.7$)와 불안정모드(당량비 $\phi = 1.1$)에서 거동하고 있는 OH-PLIF 이미지들을 메탄연료의 예로 Fig. 4에 나타내었다. 먼저, 안정모드로 거동하는 화염인 경우 Fig. 3의 ST 화염과 같은 전형적인 선회화염 형상인 V자형 라디칼 분포가 시간에 대해서 거의 일정한 형태로 유지되고 있음을 Fig. 4(a)를 통해서 확인할 수 있다. 이에 반해 Fig. 4(b)의 불안정모드에서의 라디칼 분포는 하류 쪽으로 크게 발달하지 못하고, 전단층에서 형성된 화염이 내부 재순환 영역(IRZ, inner recirculation zone) 내에서 스퀴징(squeezing)됨과 동시에 외부 재순환 영역(ORZ, outer recirculation zone)의 거대 볼텍스(vortex)가 강하게 작용하는 것을 볼 수 있다. 이러한 불안정한 연소모드에서는 앞서 설명한 VU 화염과 같이 매우 큰 소음과 함께 화염이 상하로 심하게 진동하는 형태를 보인다. 각 모드에서 화염의 거동주기에 대한 정보를 얻고자 OH-PLIF 이미지의 강도를 수치화하여 FFT 주파수 분석을 하였다.

Fig. 5는 Fig. 4에서 취득한 이미지 1500장의 주파수 분석 결과이다. Fig. 5(a) 그래프에서도 확인할 수 있듯이 안정모드에서는 Fig. 4(a)의 OH-PLIF 이미지들에서 본 바와 같이 시간에 따른 변동이 없으므로 FFT 분석 결과 값에서도 특정 주파수가 없음을 볼 수 있다. 그런데 Fig. 5(a)에서 관찰된 100 Hz 미만 저주파수에서 보인 신호는 불안정 모드에 비해 약한 강도 값으로, 더욱이 저주파에 대한 사항은 본 연구의 논의 내용이므로 이에 대한 설명은 생략하도록 한다.



(a) Stable mode, total flame image
 (b) Unstable mode, total flame image
 (c) Unstable mode, particular location of flame image
Fig. 5. FFT analysis with time of heat release oscillation based on OH-PLIF intensity for CH₄ flame.

이에 반해 불안정 모드에서는 규칙적인 주기운동이 이루어지고 있음을 볼 수 있는데, Fig. 5(b)에서는

취득한 1500장 각각의 이미지 강도 전체 합을 통하여 시간에 대한 강도 변화이며, Fig. 5(c)는 사전 관찰을 통해 화염이 가장 강하게 진동하는 덤프면 근처 특정한 한 지점(point)에 대한 OH 라디칼 강도변화를 FFT 분석한 결과이다. 보는 바와 같이 Fig. 5(b)에서 반복성 주기가 조화(harmonic) 주파수 대역으로 각각 200 Hz, 400 Hz, 600 Hz에서 비슷한 크기로 주기성이 나타남을 알 수 있다. 따라서 이러한 결과로부터 200 Hz가 반복 주기성을 갖는 기본(fundamental) 주파수임을 알 수 있으며, 특히 Fig. 5(c)에서 표현된 버너 출구 덤프면 근처 한 지점에서 취득한 OH 라디칼의 거동 주기를 보면 약 200 Hz가 불안정 주기의 기본 주파수임을 확실하게 알 수 있다. 이는 화염이 진동하는 주기, 즉 연소 불안정 모드에서의 열 방출에 대한 주기가 약 200 Hz임을 예상할 수 있는 결과이다.

3.1.3. 연소 불안정모드 특성(역화기구)

본 절에서는 앞 절의 불안정 모드에서 화염거동 중 특히 선회화염의 화염기저가 덤프면 중앙인 버너 노즐 안쪽으로 빨려 들어가면서 심한 떨림과 소음이 발생하는 역화(flash-back) 현상에 대해 살펴본다.

분석을 위하여 안정된 화염모드에서 불안정한 화염모드로 변하는 과도과정(transient)을 디지털 캠코더를 이용하여 취득한 동영상의 직접사진과 HS-PLIF 시스템을 통한 OH-PLIF 이미지들을 Fig. 6에 나타내었다. 특히 Fig. 6 하단의 이미지들은 trigger 신호 수신 가능한 제어장치에서 유량을 매우 짧게 순간적으로 조절하여 당량비가 0.7에서 1.1 상태가 되도록 하여, 연소기 덤프면에서 안정적으로 연소되는 화염이 모드가 바뀌어 역화되는 과정을 10 kHz의 촬영조건으로 동기화시켜 취득한 정보들이다.

먼저 Fig. 6 상단 동영상의 직접사진을 살펴보면, 당량비 0.7인 안정된 화염모드에서 과농한 불안정한 화염으로 진행됨에 따라 버너 출구 위에서 존재하던

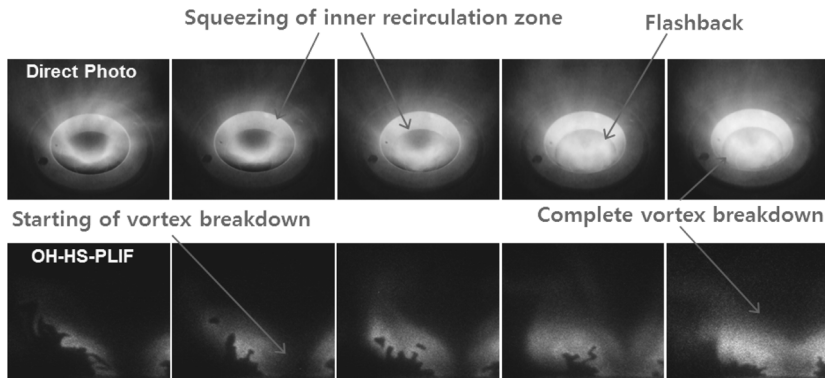


Fig. 6. Sequences of the transitional process during instability occurrence for CH₄ flame.

화염기저 부분이 점차적으로 노즐 중앙으로 집중되는 것을 볼 수 있다. 이후 화염기저 중심 부분이 노즐 출구 안쪽으로 빨려 들어가면서 화염이 가득 차지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 OH-PLIF 이미지를 통해서도 확인할 수 있는데, Fig. 6 하단에서 나타난 이미지들은 V자 형태의 안정모드 화염에서 불안정모드가 되면 노즐 출구 근처에서 내부 재순환 영역의 화염들이 스퀴징(squeezing)되는 현상을 거치면서 화염이 역화되는 것을 보여주고 있다.

이러한 현상은 Ahsan Choudhuri[13]의 연구 결과와 유사한 현상으로, 덤프면 근처 내부 재순환 영역에서 형성된 회전방향이 반대(counter-rotating)인 거대 볼텍스 쌍(pair) 구조가 서로 떨어져 있다가 압착(스퀴징)되면서 붕괴되는 CIVB (Combustion Induced Vortex Breakdown) 기구에 의해 역화되는 것으로 판단된다. 특히 Fig. 6에서 보여진 마지막 이미지들은 Fig. 3의 화염모드에서 VU나 US 형태로, 덤프 모양의 납작한 화염이 심한 떨림과 소음을 발생하면서 연소 불안정모드가 시작되는 것을 보여주고 있다. 한편, 최근 J. F. Driscoll 등[14,15]의 연구에서도 외부 재순환 영역에서 거대 와동에 의한 역화현상이 불안정 현상에 지배적이라고 보고하고 있어, 가스터빈 선회연소에서 발생하고 있는 연소 불안정모드가 거대 와동으로 야기된 역화 현상과 관련이 깊은 것으로 사료된다.

따라서 당량비 0.9 이상인 상대적으로 과농한 연소구간에서 현저하게 발생하는 본 이중선회 가스터빈 연소기의 연소 불안정 현상은, 버너 출구 근처에 존재하는 재순환 영역 내 거대 볼텍스 거동과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 다시 말해, 뒤에서 SNG와 관련하여 설명하게 되는, Fig. 7의 연소 안정화 선도 상에서 나타난 당량비 0.9 이상 과농한 구간에서 발생하는 연소 불안정은 역화현상과 직접 관련이 있는 메커니즘으로 분석된다.

3.2. 모사 SNG 연소특성

3.2.1. 수소함량에 따른 화염 안정화 선도

당량비 변화에 따른 화염 형상을 토대로 이중선회 연소기에서 SNG의 수소함량 변화에 따른 안정화 선도를 나타내고자, 당량비를 과농한 영역부터 가연한계 범위의 희박한 구간까지($\phi = 1.1 \sim 0.4$) 조정하여 그 결과를 각각 Fig. 7과 8에 나타내었다.

먼저 Fig. 7에 발열량 5 kW인 모사 SNG의 수소함량 따른 대표적인 안정화 선도를 표시하였다. 그 그래프에서 볼 수 있듯이 연료의 조성비와 무관하게 당량비 0.7~0.9 범위 내에서는 V형태를 유지하는 안정된 ST 화염모드를 보여주고 있다. 이러한 ST의 안정화 영역을 기점으로 과농영역과 희박영역으로 구

분하여 수소함량 증가에 따른 각 영역별 특징을 살펴보면, Fig. 7의 상단 부분인 과농 영역에서는 수소함량이 증가됨에 따라서 점차적으로 US 화염모드가 발생하는 당량비가 감소하고 있음을 알 수 있다. 반면에 VU 화염모드의 한계(limit)는 다소 과농한 영역 쪽으로 이동하는 경향을 나타냈다. 결과적으로 과농 영역의 전반적인 경향은 수소함량이 증가함에 따라 불안정모드가 시작되는 US 화염모드의 한계가 낮은 당량비 쪽으로 이동하여, 궁극적으로 안정된 희박연소의 운전범위를 좁히는 결과로 작용하고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 7의 하단 부분에 표시된 희박영역에서는 100%의 메탄으로 연소하는 경우(Ref.)에 비해 수소가 함유되는 SNG인 경우 수소함량이 증가했을 때, 전반적인 각 화염모드별 한계가 더 희박한 영역으로 이동하는 경향을 나타냄으로써 수소첨가가 화염안정화 영역을 확대시키는데 긍정적인 요소로 작용됨을 확인하였다. 희박 연소 기술에서 중요시 여겨지는 관건은 “얼마만큼 더 희박한 조건에서 안정적인 운전이 가능한가”이다. 이를 위해 수소함량에 따라 희박영역이 확대되는 정도를 파악할 수 있도록 Fig. 7과 8에 가능성을 표시하여 보았다.

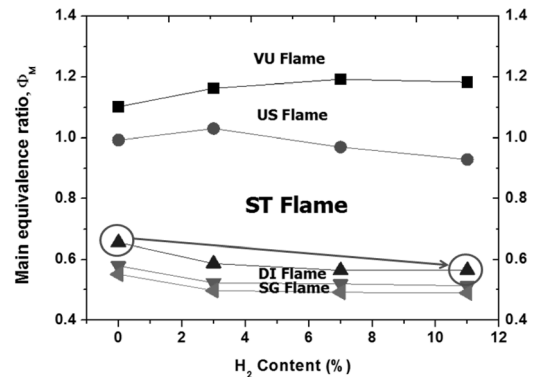


Fig. 7. Stability curve with H₂ contents.

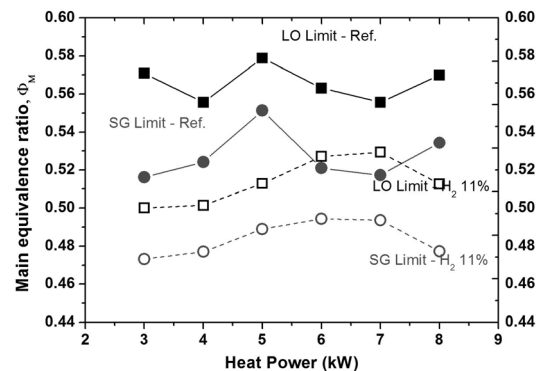


Fig. 8. Stability curve with heat power (for Ref. vs H₂ 11%)

먼저 Fig. 7에서 연료 내의 수소함량이 11%까지 증가하였을 경우에는 DI 화염모드의 한계가 당량비 0.66에서 0.58로 낮아져 약 12% 정도 희박연소 구간이 확대됨을 확인할 수 있으며, 궁극적으로 메인 화염이 완전히 blow-off되는 SG 화염의 한계는 약 11% 정도 개선되는 것을 알 수 있었다. 같은 방식으로 Fig. 8에서는 순수 메탄(Ref.)으로 연소한 경우와 SNG의 수소함량이 11%(C11)인 경우 화염모드 한계치, 즉 운전가능 한계치 경향을 열용량에 따라 나타내었다. 열용량이 증가함에 따라 어느 정도 차이가 있으나 가연한계의 경향이 확연하게 더 희박한 구간으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 R.W. Schefer 등[16,17]의 보고와 유사한 결과로 “수소함량이 증가함에 따라 희박연소의 운전가능 한계가 증가된다.”라는 것과 동일한 결과이다. 또한 Park 등[8]에 의하면 위와 같은 현상은 수소의 강한 반응성으로 인한 자가 촉매작용(auto catalytic effect)에 의해 가연 영역이 넓어지는 것으로 보고하고 있다.

3.2.2. 수소함량에 따른 연소 불안정 특성

SNG 연료 내 수소함량 증가에 따라 희박연소의 운전영역이 개선됨을 앞에서 확인하였다. 하지만 수소의 빠른 연소 속도와 높은 화염 온도가 예혼합 상태로 운전되는 연소기인 경우, 빈번하게 발생하는 연소 불안정 현상에 대해서도 주목해야 할 필요성이 있어 수소함량에 따른 연소 불안정 특성에 대해서 살펴보았다.

Fig. 9는 당량비 1.1인 상대적으로 과농한 구간에서 발생하는 압력변동과 열방출 섭동의 주기성을 살펴보고자 동기화된 각 신호의 FFT 분석 결과를 보여주고 있다. 여기서 (a), (b), (c) 그래프는 압전 소자의 동압 센서와 HS-ICCD, PMT를 통해 획득한 결과들이다. 압력 변동주기를 나타낸 Fig. 9(a)를 보면, 전반적으로 200 Hz의 기본(fundamental) 주파수와 400 Hz와 500 Hz 부근의 조화(harmonic) 주파수 피크 값을 갖는 것을 알 수 있다. 반면에 열섭동의 주기를 보여주는 Fig. 9(b), (c)에서는 두 경우 모두 200 Hz 부근에서 기본 주기성을 갖는 피크치를 나타내었다. 따라서, 압력신호에서 C7과 C11 경우 500 Hz 부근에서 조화 주파수가 발생하였으나, 압력 섭동과 열 섭동 모두 200 Hz 부근에서 연소 불안정의 지배적인 주기성을 보임으로써 Rayleigh criterion을 만족하는 열음향 불안정성 기구로 나타나는 현상임을 확인하였다.

이는 앞 절에서 설명한 과농한 영역에서 이중선 회 연소기의 역화현상에 의한 200 Hz의 불안정모드 주파수와 일치하는 결과이다. 또한 Fig. 9에서 수소함량이 증가함에 따라 연소 불안정의 주기성이 200

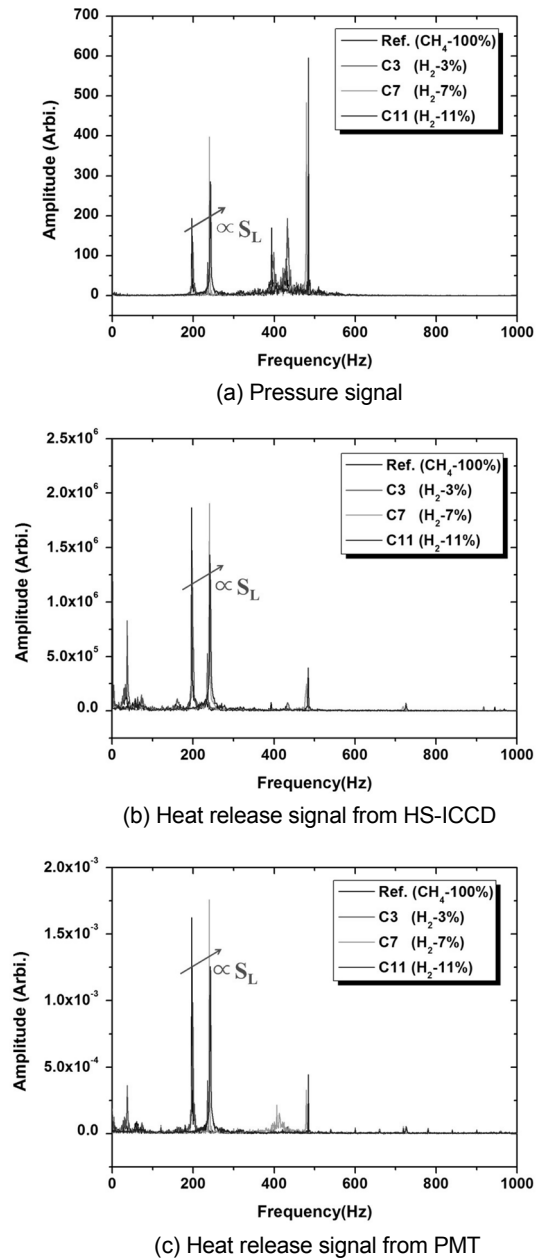


Fig. 9. Pressure and heat release FFT results according to H₂ contents at 5 kW heat power, $\phi = 1.1$.

Hz 부근을 중심으로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 특히, C3에서 C7으로 수소함량이 증가하게 되면 더 큰 폭으로 주파수가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 Allison 등[18]이 보고한 현상과 유사한 경우로, 층류 연소속도와 주기성 주파수가 비례적인 관계가 있음을 본 연구에서도 확인할 수 있었다.

한편 가스터빈의 연소 불안정 현상은 당량비가 과농한 영역에서의 역화기구(본 연구의 분석은 CIVB

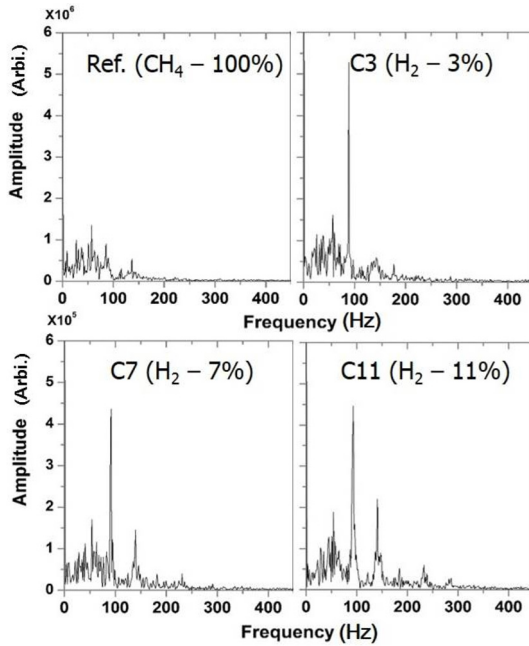


Fig. 10. Heat release FFT results with H₂ contents at 5 kW heat power, $\phi = 0.6$.

현상)와 밀접한 관련이 있는 것 이외, 희박한 가연한계 근처 구간에 이르게 되면 화염의 재점화(relight)와 국부적인 소멸(extinction) 등에 기인한 연소 불안정이 발생하게 된다. Fig. 10은 당량비가 0.6인 비교적 희박한 조건에서 메탄 100%인 기준연료와 수소 함량이 다른 SNG의 화염을 HS-ICCD를 통해 얻은 열방출 주기성 그래프들이다. 여기서 그래프의 각 피크치는 희박한 예혼합 연소조건에서 혼합기와 화염이 재점화와 소멸을 반복하면서 발생하는 연소 불안정 현상의 주기라 할 수 있다.

이 경우 메탄 화염인 경우 비교적 낮은 54 Hz의 주기성을 보여주는 반면, 수소가 첨가되면 확연히 그 주기가 2배 가까이 증가되는 것을 확인할 수 있는데, 수소함량의 증가는 발생주기를 증가시키는 결과로 작용하고 있음을 알 수 있다. 이는 희박 예혼합 화염과 혼합기와 소멸과 재점화 동작이 반복되면서 발생하는 연소 불안정 현상에서, 수소의 빠른 연소속도 특성이 재 점화율을 증가시켜 불안정 주기가 빨라지게 되는 결과(주파수 증가)이며, 이로 인해 가연 한계도 개선되는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Fig. 9에서 나타난 층류연소속도와 주파수간 비례적인 관계와 일치하는 현상이기도 하다.

또한 수소함량별 시간에 따른 열방출 크기를 Fig. 11에 표시하였는데, 수소함량이 증가함에 따라 진폭이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 수소함량의 증가가 재점화 주기를 증가시킬 뿐 아니라 연

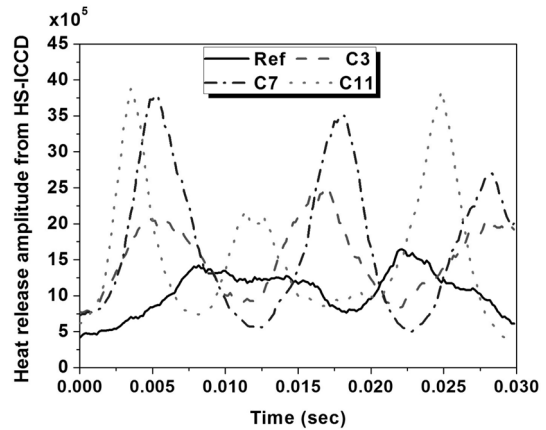


Fig. 11. Time trace of heat release with H₂ contents at 5 kW heat power, $\phi = 0.6$.

소 불안정의 크기(강도)도 증가되는 것으로 보아 강한 점화율 혹은 연소율을 야기시키는 것으로 판단된다. 하지만 이러한 희박한 구간에서 발생하는 저주파수의 큰 진폭 상승은 또 다른 연소 불안정 문제를 일으킬 수 있으므로 적절한 제어가 필요한 것으로 여겨진다.

4. 결론

본 연구에서는 메탄과 모사 SNG 연료를 적용한 이중선회 모델 가스터빈 버너의 연소 불안정성에 관한 실험적 연구를 통해, 상대적으로 과농한 영역과 가연한계 근처의 희박영역에서 각각 발생하는 불안정성 발생기구 확인하고, 연료 내 포함된 수소함량이 연소 불안정 특성에 미치는 영향을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이중선회 연소기의 화염모드 분석을 통한 안정 모드 화염과 불안정모드의 화염거동에서 서로 상이한 볼텍스 구조로 거동하고 있음을 고속 OH-PLIF의 화염 가시화로 확인하였다. 또한 압전 센서로 획득한 압력과 신호와 고속 ICCD, PMT로 취득한 열방출 정보 간 연관성 분석을 통해 연소가 불안정한 구간에서는 일정한 주기를 갖는 공진 주파수 특성임을 알았다.

2) 당량비 0.9 이상 상대적으로 과농한 연소구간에서 발생하는 연소 불안정성은 내부 재순환 영역 내 거대 볼텍스 붕괴로 야기된 역화현상의 주기적인 진동연소로, 그 주기는 약 200 Hz 근처이며 수소함량에 비례하고 있음을 알았다.

3) SNG에 포함된 수소는 화염의 희박연소 한계를 개선하여 DI 화염의 연소한계가 12% 정도 개선하는 효과를 보였고, 이중선회 버너에서 실질적인 화염날

람인 메인화염이 blow-off되는 SG 화염의 한계는 11% 정도 개선되는 효과를 확인하였다. 또한 희박영역에서도 수소함량이 증가함에 따라 과농구간에서와 동일하게 불안정 주파수가 증가됨을 확인하여 층류 연소속도와 발생 주파수간에 비례적인 관계가 있음을 확인하였다.

4) 희박 가연한계 근처에서 수 십Hz 정도의 저주파수 불안정 현상을 새롭게 관찰하였는데, 이는 화염의 재점화와 국부적인 소멸에 기인한 반복된 주기로 판단되며, 수소함량 증가는 수소의 빠른 연소속도로 재점화율이 증가되어 섬동주기가 빨라질 뿐만 아니라 불안정성의 강도도 증가하는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2014년도 미래창조과학부의 재원으로 한국에너지평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제입니다(과제번호 : 2014-2010-102780).

참고문헌

- [1] Y. Huang and V. Yang, "Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion", *Progress in Energy and Combustion Science*, 35 (2009) 293-364.
- [2] A.M. Steinberg, I. Boxx, M. Stöhr, C.D. Carter and W. Meier, "Flow-flame interactions causing acoustically coupled heat release fluctuations in a thermo-acoustically unstable gas turbine model combustor", *Combust. Flame.*, 157 (2010) 2250-2256.
- [3] J.S. Lee, M.K. Kim, S.S. Park, J.G. Lee and Y.B. Yoon, "An Experimental Study of Instability Mode Analysis in a Model Gas Turbine Combustor", *J. Korean Soc. Combust.* 15 (2010) 12-21.
- [4] K. Zahringer, D. Durox, and F. Lacas, "Helmholtz behavior and transfer function of an industrial fuel swirl burner used in heating systems", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46 (2003) 3539-3548.
- [5] Wang-Ping Shih, J.G. Lee and Domenic A. Santabicca, "Stability and Emissions Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor", *The 26th International Symposium on Combustion*, 1996, 2771-2778.
- [6] S.Y. Lee, S. SEO, J.C. Broda, S. Pad and R. J. Santoro, "An experimental estimation of mean reaction rate and flame structure during combustion instability in a lean premixed gas turbine combustor", *Proc. Combust. Inst.*, 28 (2000) 775-782.
- [7] Lord Rayleigh, "The explanation of certain acoustical phenomena", *Notices of the proceedings meetings members of the Royal Institution of Great Britain*, 8 (1878) 536-542.
- [8] S.I. Park, U.I. Kim, M.C. Lee, S.C. Kim and D.J. Cha, "The effects and characteristics of hydrogen in SNG on gas turbine combustion using a diffusion type combustor", *International Journal of Hydrogen Energy*, 38 (2013) 12847-12855.
- [9] T.J. Park, C.H. Hwang, and K.M. Lee "Development of Hybrid/Dual Jet Combustor for a MGT - Part I : Experimental Study on Geometric Optimization," *The Korean Society of Propulsion Engineers*, 17 (2013) 60-69.
- [10] I.C. Choi, K.M. Lee, Mrinal Juddoo and A.R. Masri, "A Study of Combustion Instability mode in Dual Swirl Gas Turbine Combustor by PLIF and Chemiluminescence Measurement", *The Korea Society of Combustion*, 19(1) (2014) 29-37.
- [11] J.I. Jo, T.J. Park, C.H. Hwang, K.M. Lee, "A Study on the Flame Shape and the Interaction between Pilot and Main Flame in a Dual Swirl Combustor", *The Korea Society of Propulsion Engineers*, 18(4) (2014) 33-42.
- [12] N. Syred, M. Abdulsada, A. Griffiths, T. O'herty and P. Bowen, "The effect of hydrogen containing Fuel blends upon flashback in swirl burners", *Applied Energy*, 89(1) (2012) 106-110.
- [13] B. Dam, G. Corona, M. Hayder, A. Choudhuri, "Effects of syngas composition on combustion induced vortex breakdown (CIVB) flashback in a swirl stabilized combustor", *Fuel*, 90(11) (2011) 3274-3284.
- [14] Jacob E. Temme, Patton M. Allison and James F. Driscoll, "Combustion instability of lean premixed prevaporized gas turbine combustor studied using phase-averaged PIV," *Combust. Flame.*, 161 (2014) 958-970.
- [15] Sulabh K. Dhanuka, Jacob E. Temme, James F. Driscoll, "Lean-limit combustion instabilities of a lean premixed prevaporized gas turbine combustor", *Proc. Combust. Inst.*, 33 (2011) 2961-2966.
- [16] R.W. Schefer, "Hydrogen enrichment for improved lean flame stability", *International Journal of Hydrogen Energy*, 28 (2003) 1131-1141.
- [17] R.W. Schefer, D.M. Wicksall and A.K. Agrawal, "Combustion of Hydrogen-enriched Methane in a

- Lean Premixed Swirl-stabilized Burner”, Proc. Combust. Inst., 29 (2002) 843-851.
- [18] Patton M. Allison, James F. Driscoll, Matthias Ihme, “Acoustic characterization of a partially-premixed gas turbine model combustor: Syngas and hydrocarbon fuel comparisons”, Proc. Combust. Inst., 34 (2013) 3145-3153.
- [19] David R. Englund and W. B. Richards, “The Infinite Line Pressure Probe”, NASA Technical Memorandum 83582, 1984.
- [20] Derek Dunn-Rankin, “Lean Combustion Technology and Control”, Academic Press is an imprint of Elsevier, 2007.