

1D Lumped Method를 이용한 모형 부분 예혼합 가스터빈 연소기의 연소불안정 해석

김정진* · 윤지수* · 주성필* · 김성현* · 손채훈** · 윤영빈****

*서울대학교 기계항공공학부 · **세종대학교 기계공학과 · ****서울대학교 항공우주신기술연구소

Combustion Instability Analysis of Partially Premixed Model Gas Turbine Combustor with 1D Lumped Method

Jeongjin Kim*, Jisu Yoon*, Seongpil Joo*, Seongheon Kim*, Chae Hoon Sohn** and Youngbin Yoon****

*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

**Department of Mechanical Engineering, Sejong University

****Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University

(Received 6 January 2017, Received in revised form 25 February 2017, Accepted 27 February 2017)

ABSTRACT

Combustion instability analysis of partially premixed model gas turbine combustor was conducted with 1D lumped method. Flame Transfer Function(FTF) was obtained with variation of fuel composition by Photo Multiplier Tube(PMT) and Hot Wire Anemometry(HWA). Decreasing instability frequency was observed when combustor length increased and multi-mode instability was confirmed. Instability frequency mode was changed while H₂ composition rate was increased and had agreement with experimental value. This work confirms that prediction of longitudinal combustion instability mode of partially premixed combustor is possible using 1D lumped method.

Key Words : Combustion instability, Multi-mode instability, Flame transfer function, 1D lumped method, Instability prediction

1. 서론

근래에 봄철마다 동아시아 지역에서 미세먼지 발생이 이어지고 있다. 특히나 빈발하는 국내 고농도 미세먼지 사태 해결을 위해 작년 6월 3일에 정부차원의 대책이 수립되어 발표되었다[1]. 미세먼지 관리 특별대책 중에는 미세먼지 발생원인 중 하나인 석탄화력 발전소의 축소와 신산업 육성이 명시되어 있다. 전력 통계자료를 참고하면 친환경 발전 형태인 복합가스터빈의 발전량이 설비용량에 비해 낮은 수준이기에 점진적으로 복합가스터빈의 비중을 높여나가는 전략이 미세먼지 저감에 큰 역할을 할 것으로 기대된다[2].

가스터빈 분야에서는 배기배출물 저감 효과가 크고, Syngas, Synthetic Natural Gas(SNG), Biogas 등 다양한 조성의 연료를 사용할 수 있는 저NOx 연소기 개발이 국내외에서 활발하며, 특히 항공용 저NOx 연소기 중 하나로 Twin-annular pre-swirl(TAPS) 연소기가 개발 중에 있다[3]. 이러한 저NOx 연소기는 기본적으로 희박연소로 설계되어 있으며 연소불안정 현상이 발생할 가능성을 내포하고 있다.

가스터빈의 경우 연소불안정 현상이 발생하면 연소기 파괴뿐만 아니라 후단 파트에 악영향을 주게 되며[4], 안정적인 전력공급의 차질을 초래한다. 그렇기에 가스터빈 연소기 개발에 있어 다양한 연료 조성에 대한 연소불안정 특성을 이해하는 것이 중요하다. 특히 연소불안정 현상을 분석하고 예측할 수 있다면 사전에 연소불안정 현상이 일어날 조건을 회피하는 연소기 설계를 할 수 있고 혹은 실제 운용 중에 발생한 연소불안정 조건을 효과적으로 회피하는데 도움이 된다.

† Corresponding Author, ybyoon@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.

연소불안정의 예측하기 위한 시도는 국내의에서 다양한 방법으로 시도되고 있으며, 크게 Lower order model[5,6], Direct method (RANS, LES)[7], Linearized equations in time domain[8], Helmholtz solver[9] 등이 연구되고 있다. 이 중 Lower order model의 한 사례로 1D lumped method 기반의 open source code, OSCILOS 가 있다.

OSCILOS는 영국 임페리얼 대학교의 Aimee S. Morgans 그룹이 개발한 코드로 주파수 도메인과 시간 도메인에서 연소불안정을 예측할 수 있다. 개발진은 연소기의 형상 정보만으로 OpenFOAM의 PaSR 툴을 활용하여 Flame Describing Function(FDF)을 획득한 후, 이를 통해 OSCILOS로 해석한 예측값이 연소불안정 주파수 실험값과 일치함을 확인하였다[5]. 국내에서도 OSCILOS를 활용하여 한밭대학교 Cha 등이 Santavicca 그룹의 예혼합 가스터빈 연소기의 실험데이터를 사용하여 연소실 길이변화와 경계조건 변화에 따른 연소불안정 예측을 수행하였다[10]. 본 연구그룹에서는 모형 부분 예혼합 연소기에 대한 연소불안정 실험을 수행하였으며[11], 해당 조성에 대한 Flame Transfer Function (FTF)를 획득하

였다[12].

본 연구에서는 사전 연구를 통해 획득한 FTF를 사용하여, 1D lumped method로 모형 부분 예혼합 연소기에서의 다양한 연료조성에서의 연소불안정 특성을 분석하여 실제 연소실험에서의 결과와 비교하는 연구를 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 화염전달함수 계측 장치

화염전달함수 계측을 위한 실험 장치는 Fig. 1과 같이 연소기, 가진장치, Hot Wire Anemometry(HWA), Photo Multiplier Tube (PMT)로 구성되어 있다. 연소실 구조에 의한 고유음향파의 영향을 제거한 화염 전달함수 계측을 위해 연소기와 배기덕트로 분리하였으며, 분리된 공간으로 미연가스가 유출되지 않도록 배기덕트 최종 단에 팬을 설치하였다. 가시화를 위해 설치한 석영쿼츠와 PMT 시스템을 통해 열방출과 섭동을 계측하고, HWA 시스템을 통해 연료 라인에서의 유량 섭동량을 계측하였다.

FTF 계측 실험에 사용한 연료는 사전연구를 통해

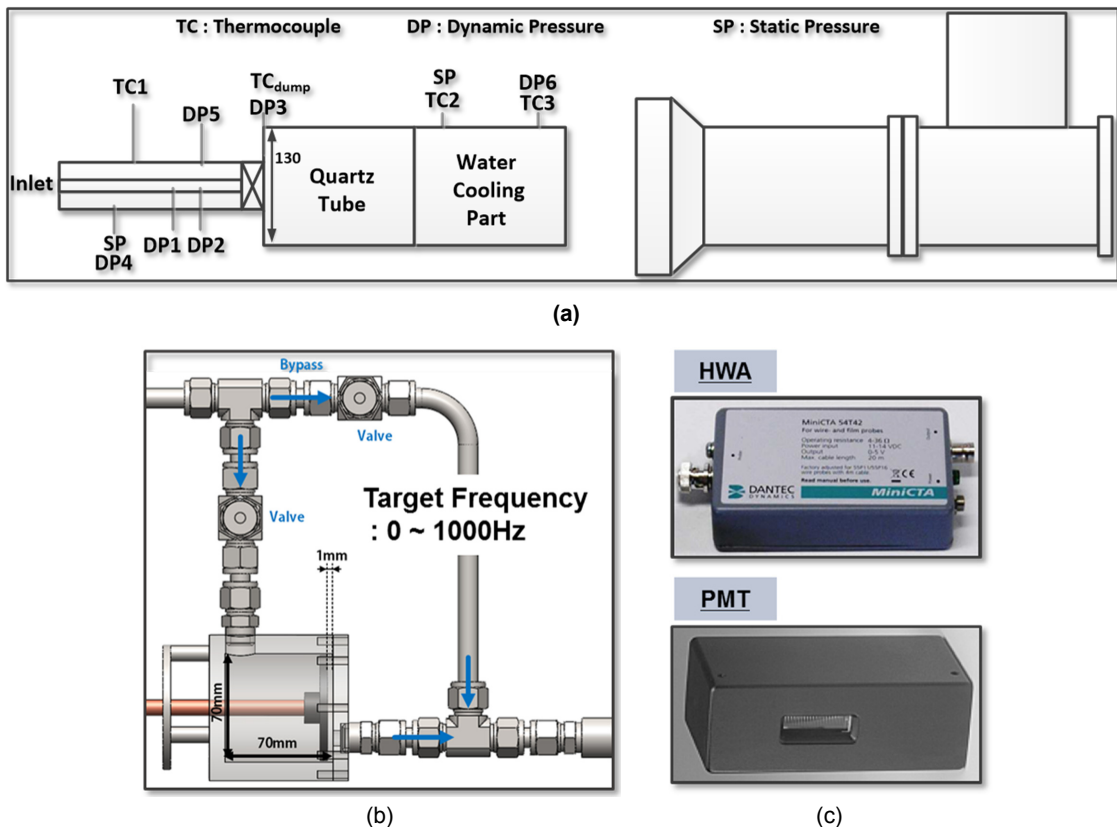


Fig. 1. Measurement system for flame transfer function (a) schematic diagram of test rig for FTF (b) perturbation device on fuel line (c) HWA and PMT system.

연소불안정 현상이 자주 발생함을 확인한 H₂와 CH₄의 혼합 가스를 사용하였으며, 이를 통해 다양한 연료조성(H₂ 기준으로 25%-87.5%, 12.5% 간격)에서의 화염전달 함수를 획득하였다.

2.2. 1D lumped method with OSCILOS

1D lumped model을 기반으로 연소불안정 현상을 해석하는 오픈소스코드인 OSCILOS는 Fig. 2와 같이 구성된다. 입력변수로서 연소기의 길이정보, 열물성치, 화염모델, 경계조건을 설정하여 입력한 후 주파수 도메인에서 연소불안정을 해석한다. 종방향 음향파에 비해 반경방향의 섭동이 무시할 만큼 작다고 가정하여 1D plane의 종방향 음향파만을 고려한다. 연소실을 다수의 모듈로 구분하여 경계를 기준으로 연속적이며, 지배방정식을 만족하는 조건으로 풀게 되면 최소의 오차를 가지게 되는 고유주파수별 성장률을 얻을 수 있다.

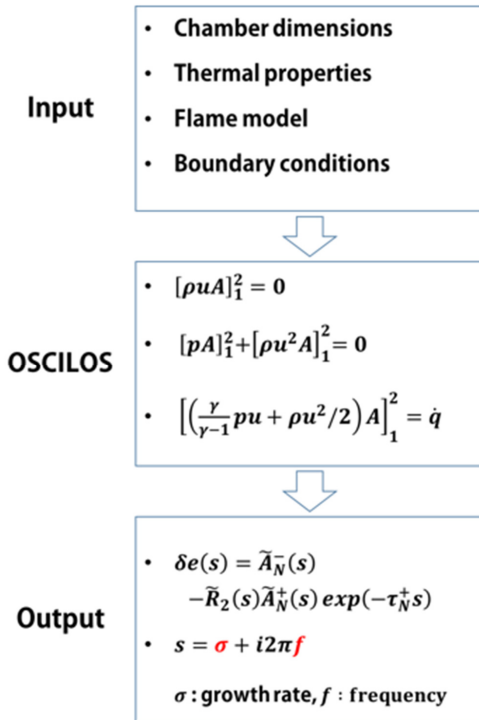


Fig. 2. Software structure of OSCILOS.

2.2.1. 화염모델

연소불안정 예측을 위해서는 필수적으로 화염전달 함수 계측이 선행되어야 한다. 화염전달 함수는 연소기 내부의 음향 섭동량과 열방출 섭동량의 관계를 표현해준다. 본 연구에서 고려한 화염전달 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$FTF(s) = \frac{\hat{q}(s)/\bar{q}(s)}{\hat{u}(s)/\bar{u}(s)} \quad (1)$$

정의된 화염전달 함수를 계측하여 추후에 화염모델로서 아래와 같은 근사식으로 입력하였다.

$$FTF(s) = \frac{b_1 s^{n-1} + b_1 s^{n-2} + \dots + b_{n-1} s + b_n}{a_1 s^{m-1} + b_2 s^{m-2} + \dots + b_{m-1} s + b_m} \quad (2)$$

보다 정확한 연소불안정 해석을 위해서는 주파수 뿐만 아니라 유량섭동에 대한 함수인 화염묘사 함수가 필요하지만 실험장치의 한계로 본 연구에서는 화염전달 함수를 화염모델로 사용하였다.

정밀 계측한 FTF 결과를 직접 사용하기 위하여 Matlab 코드를 사용하여 곡선 접합을 시도하였다. 실험을 통하여 계측된 FTF 함수의 특성을 유지할 수 있도록 gain의 경우 y절편의 값을 1로, phase의 경우 y절편의 값을 0으로 고정하였다. 곡선 접합 후 Fig. 3과 같이 균등한 간격으로 연료조성별로 획득하여 연소불안정 해석 및 예측에 사용하였다.

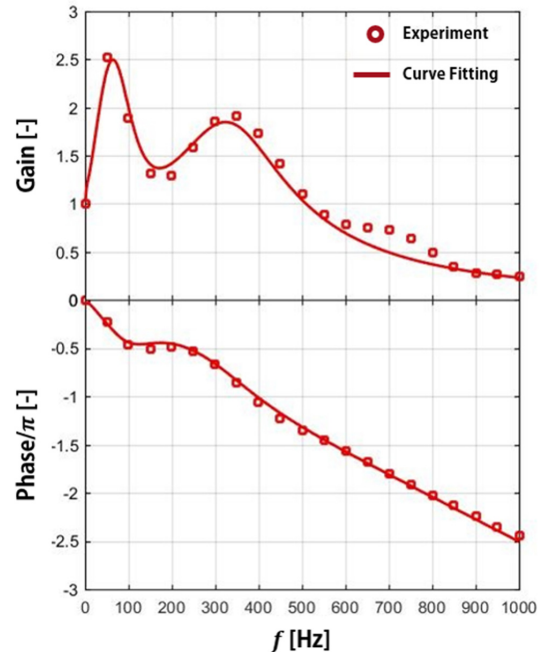


Fig. 3. Flame transfer function of H₂ 25% + CH₄ 75%.

2.2.2. 열물성치

1D lumped method 코드는 예혼합 연소기를 전제로 구성되어 있기에 공기와 연료의 유로 구분이 없다. 따라서 NASA의 CEA code[13]를 활용하여 예측에 필요한 열물성치를 사전에 계산해 입력하였다.

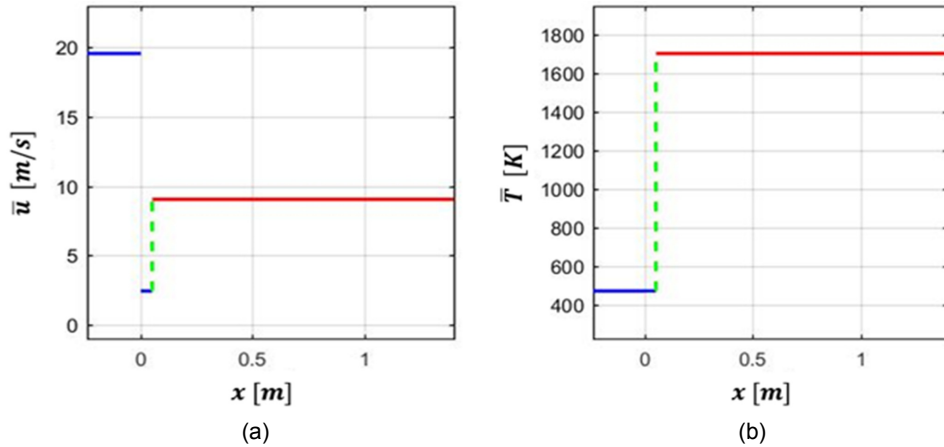


Fig. 4. Plots of the properties: (a) velocity and (b) temperature, in sections of the combustor. (H₂ 25% + CH₄ 75%).

실제 모형 가스터빈 실험에서 얻은 물성치와 일치하도록 설정하였으며, Fig. 4와 같이 계단 함수의 형태로 예측 모델에 사용된다. x축의 원점은 실제 연소기의 덤프면 기준이다.

2.2.3. 연소실 형상 및 화염위치 선정

Fig. 1(a)의 시스템을 사용하여 스월 노즐에 대한 화염전달함수 정보를 얻어 Fig. 5(a)와 같은 연소기에서의 연소불안정 해석 및 예측을 수행하였다. 연소실 후단부 노즐의 위치 변화를 통해 연소실 길이를 1160 mm에서 1400 mm까지 변화시킬 수 있다. 1D lumped method를 통한 해석 및 예측을 위해서 Fig. 5(b)에서와 같이 유입구, 화염, 연소기, 배출구와 경계조건으로 구성하였다.

서울대학교 Yoon 등은 모형 부분 예혼합 연소기의 연소불안정 현상에서 주요한 변수로서 convection time을 제시하였다[12]. 예혼합 연소기에서와 달리 부분 예혼합 연소기의 혼합 길이가 상대적으로 짧기에 덤프면에서 화염면까지의 거리에 따른 convection time이 중요하다. 따라서 해당 1D lumped method는 예혼합 연소기를 대상으로 개발되었지만 화염의 위치를 조절하여 유의미한 convection time의 변화를 만들어

Table 1. Prediction result of frequency on flame location (H₂ 25% + CH₄ 75%)

Item	L_coi	L_ub	Experiment
Length [mm]	35	51	-
Frequency [Hz]	568	565	505
Error [%]	-12.5	-11.9	-

부분 예혼합 연소기에서의 연소불안정 해석 및 예측을 수행하고자 하였다.

화염위치 선정을 위하여 덤프면에서 OH 자발광 이미지의 밝기강도를 통해 구한 화염중심까지의 거리 L_coi와 OH-PLIF 이미지를 통해 획득한 덤프면에서 미연가스까지 거리인 L_ub를 설정하여 Table 1과 같이 H₂ 25%, CH₄ 75% 연료 조성에서의 연소불안정 주파수를 비교하였다. 약 1% 차이지만 L_ub를 사용하였을 때 예측 오차가 적음을 확인하였다. 이는 상대적으로 긴 혼합 길이가 convection time의 대부분을 결정짓는 예혼합 연소기와 달리, 부분 예혼합 연소기에서는 혼합 길이가 상대적으로 짧기 때문에 미연가스가 덤프면에서 화염면에 도달하기까지의 거리가 convection time을 결정짓는 주요 변수로 작용하기 때문으로 생각된다[12]. 이처럼 부분 예

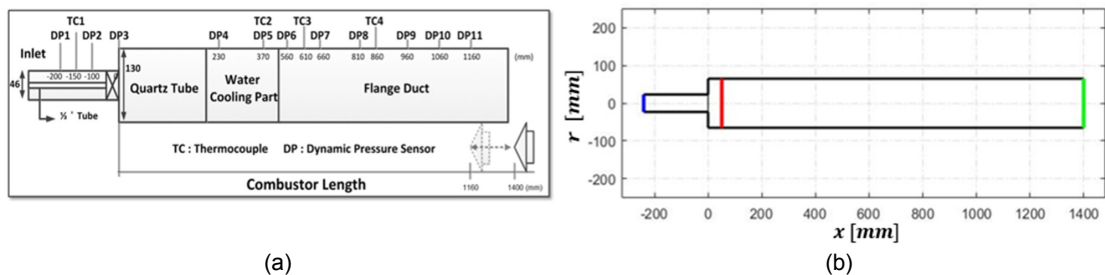


Fig. 5. Schematics of (a) a partially premixed model combustor and (b) chamber modeling.

혼합 연소기의 convection time 특성을 보다 잘 나타낼 수 있는 L_{ub} 을 사용하여 이후의 연소불안정 해석 및 예측에 사용하였다.

2.2.4. 경계조건

유입구의 경우 전단의 스트레이너를 기준으로 설정하였으며, open boundary로 설정하였다. 배출구의 경우는 연소실 길이를 조절하기 위해 설치한 후단의 플러그 노즐을 기준으로 설정하였으며, closed boundary로 설정하였다. 실제 연소현상에서 주파수에 따라 반사파와 투과파의 비율이 변하지만 본 연구에서는 일정한 상수로서 입력하였으며, 이는 연구 결과 중에 성장률이 과대평가되는 오차를 발생시켰다.

2.3. 실험조건

본 연구그룹의 사전연구 결과에서 연소불안정 현상이 주로 발생하였던 H_2 , CH_4 연료조성을 사용하였다. 또한 Table 2와 같이 입열량은 40 kW로, 공기 유량을 1,100 slpm으로 고정시킨 상태에서 연소실 길이, 화염의 위치, 연료 조성을 변화시켜 가며 예측을 수행하였다.

Table 2. Selected condition for prediction

Fuel	H_2/CH_4
Heat input [kW]	40
Air temperature [K]	473
Air volume flow rate [slpm]	1100
Combustor length [mm]	0.51-0.57
Flame position [mm]	30-51
H_2 percentages of fuel composition [%]	25-87.5

3. 해석 결과

3.1. 연소실 길이변화

연소실 길이 변화에 따른 연소불안정 해석을 수행하였다. 연소실 길이를 1160 mm에서 1400 mm까지 변화시켜가며 1D lumped method를 적용하면 최소의 오차를 가지는 고유주파수와 성장률을 획득할 수 있다. Fig. 6은 연소실 길이 1,340 mm에서 얻은 주파수 및 성장률로, 각각의 연소실 길이에서도 이와 같은 예측을 수행하였다. 성장률이 0보다 큰 경우 연소불안정 영역이고, 반대로 성장률이 0보다 작은 경우 연소안정 영역이다. 또한 연소불안정한 영역 중에서도 성장률이 가장 큰 종방향 주파수를 1st peak으로, 2번째로 큰 종방향 주파수는 2nd peak으로 구분하여, 이후 해석에서 성장률이 0보다 큰 불안정한 영역의 주파수를 분석하였다. Fig. 7은 H_2 25%, CH_4 75%

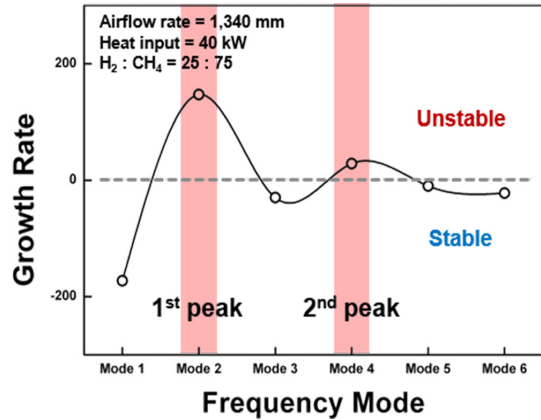


Fig. 6. Combustion instability possibility by frequency mode.

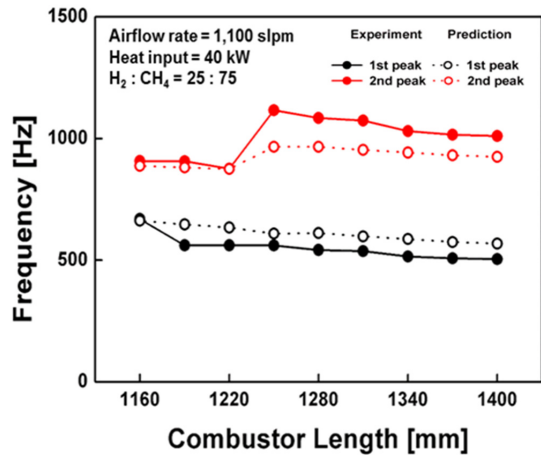


Fig. 7. Instability frequency tendency during variation of combustor length.

연료조성에서 연소실 길이 변화(1160 mm-1400 mm, 30 mm 간격)에 따른 연소불안정 주파수의 경향을 도시하였다. 불안정 주파수 예측에 평균적으로 약 10%의 오차가 있지만 연소실 길이가 증가함에 따라 불안정 주파수의 감소 및 지배적인 불안정 주파수 이외의 불안정 주파수가 공존하고 있는 모형 가스터빈에서의 연소불안정 특성을 잘 예측함을 확인할 수 있다. 또한 2nd peak, 2번째로 큰 종방향 불안정 모드 또한 길이의 증가에 따른 주파수 감소하는 경향성은 물론 연소실 길이 1250 mm에서 서브 불안정 모드가 3rd에서 4th로 천이하는 현상 또한 확인하였다.

3.2. 화염 위치 변화

연료조성을 H_2 25%, CH_4 75%로 설정하고 공기공급량을 고정시킨 상태에서 임의로 화염의 위치를 텀프면 기준 30 mm에서 51 mm로 변화시켰을 경우 성

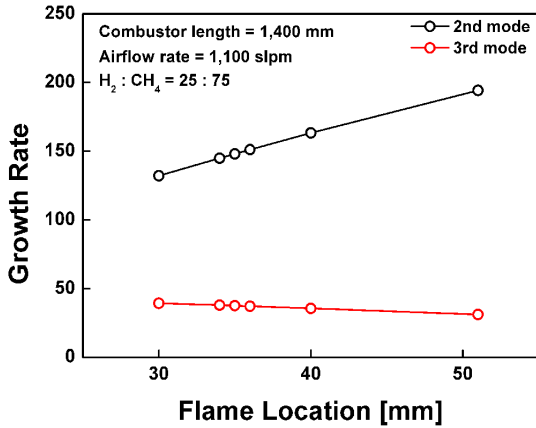


Fig. 8. Growth rate of 2nd, 3rd mode during variation of flame location.

장률의 변화를 살펴보았다. Fig. 8에서와 같이 화염의 길이가 짧아질수록 지배적인 불안정 주파수였던 2nd 모드의 성장률이 점차 감소하고 반대로 3rd 모드의 성장률이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 덤프면에서 화염면까지 미연가스거리가 주요한 변수 중 하나인 부분예혼합 연소기의 연소불안정 특성에 의한 것으로 생각된다. 즉 해석에서도 동일한 화염전달합수 및 연료공기조건에서 화염의 위치 변화만으로 모드천이현상을 예측할 수 있는 가능성을 확인하였다.

실제로 모형 가스터빈에서의 당량비 변화에 따른 연소불안정결과와 비교하였을 때, CH₄ 100% 연료 조성에서 당량비가 증가할수록 화염의 길이가 짧아지면서 불안정 주파수가 2nd 모드에서 3rd 모드로 증가하는 경향과 일치하였다[12].

3.3. 연료조성 변화

연소실 길이를 1400 mm로 고정시킨 상태에서 FTF 예측이 가능하였던 연료조성비와 화염위치를 변화시켜 가며 해석을 수행하였다. Fig. 9와 같이 연료조성비가 H₂ 기준으로 25%인 경우, 실제 연소실험에서의 결과와 동일하게 지배적인 종방향 불안정 주파수가 2nd 모드에서 발생할 것으로 예측하였다. 또한 연소 실험에서와 같이 다중 불안정 모드 발생을 보여줌을 확인하였다. H₂ 기준으로 50% 조성의 경우는 4th 모드, H₂ 기준으로 75% 조성의 경우는 5th 모드에서 불안정이 발생하는 것을 예측하였다.

Fig. 10은 FTF data를 확보하였던 H₂ 조성비 25%에서 87.5%까지의 변화를 주었을 때의 불안정 주파수의 예측 결과이다. 지배적인 불안정 모드는 검은 원으로, 2번째로 강한 불안정의 경우 회색 원으로 표시하였다. 연료 조성에서 H₂의 비율이 높아질수록

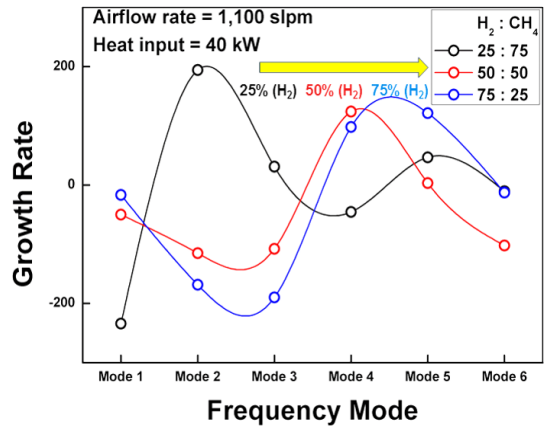


Fig. 9. Growth rate variation of each fuel composition condition.

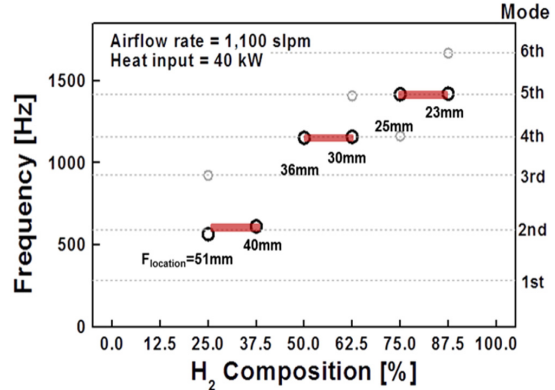


Fig. 10. Instability frequency mode shifting during variation of fuel composition.

화염의 길이가 짧아지는 현상을 화염의 위치를 덤프면에 가깝게 설정하는 것으로 모사하였다. 예측결과, 연료조성 별로 연소실험에서 발생하였던 불안정 모드가 공존하는 현상이 나타남을 확인하였다. 또한 실험에서의 연소불안정 주파수 천이 현상과 마찬가지로 H₂ 비율이 증가함에 따라 지배적인 불안정 모드가 증가하는 것을 예측하였다. 이는 예혼합 연소기와 달리 부분 예혼합 연소기에서의 unburned mixture length를 기반으로 한 convection time이 불안정 모드를 결정하는 주요한 변수였다는 결과로 해석될 수 있다.

다만 H₂ 기준으로 75% 조성에서 실험에서는 6th 모드의 종방향 불안정이 발생하였지만 예측에서는 5th 모드의 종방향 불안정을 지배적인 불안정으로 판단하는 차이가 있었다. 이는 주파수의 변화에 상관없이 일괄적인 수치를 적용하여, 5th 모드에 해당되는 반사계수의 gain의 입력값이 실제보다 큰 수치인 점이 원인으로 보인다. 향후 FTF 보다 정확한 FDF

와 반사계수를 획득하여 적용한다면 예측의 정확도 향상에 도움이 될 것으로 생각된다.

4. 결론

1D lumped method를 사용하여 모형 부분 예혼합 연소기에서의 연소불안정 특성에 대한 분석 및 예측을 수행하였다. 불안정 주파수 예측에 평균적으로 약 10%의 오차가 있지만 종방향 연소불안정 주파수와 불안정 모드의 공존 예측이 실험의 결과와 유사함을 확인하였다. 연소실 길이 증가에 따라 연소불안정 주파수의 감소와 지배적인 불안정 주파수의 천이를 확인하였으며 이는 실험에서의 불안정 특성과 일치하였다.

연소실 화염의 위치를 미세하게 조정하여 부분 예혼합 연소기의 연소불안정 특성에 주요한 요소로서 작용하는 점을 확인 하였으며, 이에 따라 H₂ 비율이 변화하는 다양한 연료조성에 대한 해석을 수행하였다. 그 결과 부분 예혼합 연소기에서 나타난 특이 현상이었던 주파수 천이현상을 1D lumped method로 충분히 예측함으로써 비록 종방향 모드가 추가되는 중횡비가 제한된 연소기에 한해서지만 연소불안정 특성 전반을 대표하여 예측할 수 있는 가능성을 충분히 보여주었다.

이를 바탕으로 실험을 통해 노즐의 FTF 결과를 확보하거나, CFD를 활용하여 노즐의 형상 정보로 FTF를 획득하면 연소기 제작 전에 충분히 연소불안정 특성에 대한 예측이 가능함을 확인하였다. 즉 1D lumped method를 통해 적은 비용과 시간만으로도 개략적인 회피설계 및 운용상에 연소불안정 조건을 벗어나는 제안을 할 수 있을 것으로 사료된다. 추가적으로 부분 예혼합 연소기에서의 실제의 반사계수를 적용한다면 보다 정확한 불안정 주파수 예측이 가능할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 한국연구재단의 핵심연구지원사업(No. 2015R1A2A2A010043)과 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과이며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] <http://www.me.go.kr/issue/finedust2/>
- [2] The Monthly Report on Major Electric Power Statistics, KEPCO, 2016.
- [3] TAPS II Combustor Final Report, GE Aviation, 2014.
- [4] T. Poinsot, D. Veynante, Theoretical and Numerical Combustion, Edwards, PA, USA, 2005.
- [5] X. Han, J. Li, A.S. Morgans, Prediction of Combustion Instability Limit Cycle Oscillations by Combining Flame Describing Function Simulations with a Thermoacoustic Network Model, Combust. Flame., 162 (2015) 3632-3647.
- [6] J. Kim, M. Yoon, D. Kim, Combustion Stability Analysis using Feedback Transfer Function, J. Korean. Soc. Combust., 21(3) (2016) 24-31.
- [7] L. Selle, G. Lartigue, T. Poinsot, R. Koch, Compressible large eddy simulation of turbulent combustion in complex geometry on unstructured meshes, Combust. Flame., 137(4) (2004) 489-505.
- [8] J. Li A.S. Morgans, Time domain simulation of nonlinear thermoacoustic behavior in a simple combustor using a wave-based approach, J. Sound Vibration., 346 (2015) 345-360.
- [9] C.F. Silva, F. Nicoud, T. Schuller, D. Durox, S. Candel, Combining a Helmholtz solver with the flame describing function to assess combustion instability in a premixed swirled combustor, Combust. Flame., 160 (2013) 1743-1754.
- [10] D.J. Cha, J.K. Song, J.G. Lee, A Case Study on Combustion Instability of a Model Lean Premixed Gas Turbine Combustor with Open Source Code OSCIOS, J. Korean. Soc. Combust., 20(4) (2015) 10-18.
- [11] J. Yoon, S. Joo, J. Kim, M.C. Lee, Y. Yoon, Instability Mode and Flame Structure Analysis of Various Fuel Compositions in a Model Gas Turbine Combustor, J. Mech. Sci. Technol., 29(3) (2015) 889-907.
- [12] J. Yoon, S. Joo, J. Kim, M.C. Lee, J.G. Lee, Y. Yoon, Effects of Convection Time on the High Harmonic Combustion Instability in a Partially Premixed Combustor, Proc. Combust. Instit., 36(3) (2016) 3753-3761.
- [13] <https://www.grc.nasa.gov/WWW/CEAWeb/>