

## 연료 조성에 따른 부분예혼합 연소기 내부 연소불안정 해석

남재현<sup>a</sup> · 여재익<sup>a,\*</sup>Numerical Investigation of the Combustion Instability  
inside a Partially Premixed Combustor according to  
Fuel CompositionJaehyun Nam<sup>a</sup> · Jai-ick Yoh<sup>a,\*</sup><sup>a</sup>Department of Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea\*Corresponding author. E-mail: [jjyoh@snu.ac.kr](mailto:jjyoh@snu.ac.kr)

## ABSTRACT

Numerical study is conducted to analyze combustion instability in the partially premixed combustor. The simulations are performed according to fuel conditions, and Large Eddy Simulation(LES) model and PaSR combustion model are implemented in the solver. Comparison with the experimental result is conducted to confirm the validity of simulation, and quantitative and qualitative agreement is confirmed. The flame characteristics in the combustor are subsequently investigated, and the association with the occurrence of combustion instability is clarified. According to the simulation results, the flame length varies greatly depending on the fuel conditions. When the flame length becomes sufficiently long, flame-vortex interactions occurred around the wall sections, which works as the main cause of combustion instability.

## 초 록

부분예혼합 연소기 내 연소불안정 분석을 위한 수치적 연구가 수행되었다. 해석은 연료 조건에 따라 수행되었으며 대와류모사(Large eddy simulation, LES) 기법 및 PaSR 연소 모델이 솔버 내에 도입되었다. 수치해석의 타당성을 확인하기 위한 실험과의 비교 검증이 완료되었으며 정량적, 정성적인 일치도가 확인되었다. 연료 조건에 따라 변화하는 연소기 내 화염 특성이 이어서 조사되었으며 연소불안정 발생과의 연관성이 조사되었다. 해석 결과에 따르면 연료 조건에 따라 화염 길이가 크게 변화하였다. 그리고 화염 길이가 충분히 길어질 경우 화염-와류 상호작용이 벽면 주변에서 발생하였으며 이는 연소 불안정 발생의 주요 원인이 되었음이 확인되었다.

Key Words: Large Eddy Simulation(대와류모사), Gas Turbine Combustor(가스터빈 연소기), Hydrogen(수소), Combustion Instability(연소불안정)

Received 28 December 2020 / Revised 9 March 2021 / Accepted 12 March 2021

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

## 1. 서 론

연소불안정은 연소실 내의 고유 음향파와 연소로 인한 열 발생, 그리고 주입되는 연료 유량의 섭동이 연계되어 엔진 내에서 자체적으로 발생하는 압력의 떨림으로서 소음 발생이나 엔진 손상의 주요 원인이 된다. 이와 같은 연소불안정은 can-annular 형태의 산업용 가스터빈 연소기 [1], annular 형태의 제트엔진 연소기 [2] 등 여러 형태의 연소기에서 발생하며, 발생 방지를 위한 주의 깊은 연구가 요구된다. 이에 대하여 몇몇 해석적 연구들이 보고된 바 있다. 대표적으로 Franzelli 등 [3]은 부분예혼합 연소기에 대하여 대와류모사 기법을 적용한 해석을 시도하였으며, 난류 해석이 연소불안정 결과를 잘 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한 Han 등 [4]은 오픈소스 연소해석 솔버인 OpenFOAM 과 음향해석 솔버를 연계하여 연소기 내부의 연소불안정을 성공적으로 해석한 바 있다. 한편, Zettervall 등 [5]은 annular 연소기 내부에서 발생하는 연소불안정 현상에 대하여 대와류기법을 이용한 해석을 진행하였으며, 아음속 난류 연소 솔버를 이용해 정확한 결과가 도출될 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 연소불안정 현상은 연료 주입 조건에도 크게 영향을 받는다. 이에 대하여 실험적인 연구가 진행된 바 있으며, 주입 길이 [6] 및 연료 조성 [7]이 연소불안정에 미치는 영향성이 확인되었다. 그러나 이에 대한 해석적인 연구는 수행된 바가 적으며, 연료 조건의 영향성 분석을 위한 추가적인 연구가 필요한 상황이다 [8]. 이를 바탕으로 하여 본 연구에서는 원통형의 부분예혼합 연소기를 대상으로 연료 조건에 따른 수치해석을 수행하였다. 연료로는 연소 모델이 정립된 메탄 및 수소 가스가 선정되었으며, 연료 조성과 연료 유량에 따른 해석이 이루어졌다. 해석을 위하여 선행 문헌을 바탕으로 한 난류 및 연소 모델이 설정되었으며 오픈소스 CFD 솔버와의 결합이 이루어졌다. 해석 결과에 대한 검증이 이어서 수행되었으며 연료 조건에 따른 연소불안정 특성과 그 원인에 대한 분석이 이루어졌다.

## 2. 본 론

## 2.1 실험 조건

Fig. 1과 같은 연소기가 본 해석에 고려되었다. 해당 연소기는 연료와 산화제가 부분예혼합되어 분사되며, 이에 대한 실험적인 연구 [7]가 보고된 바 있다. 추력 발생을 위하여 메탄 및 수소가 이루어진 혼합 연료가 사용되었으며 실온 조건에서 연료의 공급이 이루어졌다. 산화제로는 공기가 사용되었으며 473 K의 온도 조건에서 공급이 이루어졌다. 연료 및 산화제는 연소기 내에서 점화되기 전 3 mm 가량의 짧은 혼합 구간에서 부분예혼합이 이루어졌다. 혼합 구간은 연소기 좌측의 선회 노즐에 위치하고 있으며, 해당 노즐의 선회도(Swirl number)는 0.832로 설정되었다. 연료의 초기 점화는 스파크를 사용하여 이루어지며, 화염이 안정화된 후에는 고온의 재순환 가스가 지속적인 점화를 돕는다. 해석에 사용된 원통형 연소기의 축 방향 길이는 1.1 m이며 반경 방향 길이는 0.13 m이다. 주입구로부터 축 방향으로 0.2 m 구간까지는 투명한 퀴츠 튜브가 위치하고 있으며, 해당 구간에서는 속도 측정을 위한 particle image velocimetry(PIV) 실험 및 화염 형상 확인을 위한 OH 자발광 이미지 측정 실험이 이루어진 바 있다. 연소기의 축방향 출구 부분에는 원뿔 형태의 플러그가 위치하고 있으며, 출구 면적의 90%를 막고 있다. 따라서, 단형 형상으로 인하여 압력파가 부분적으로 연소기 입구에 되돌아온다. 이와 같은 효과는 연소기 내부에서 발생하는 연소 현상, 노즐에서 공급되는

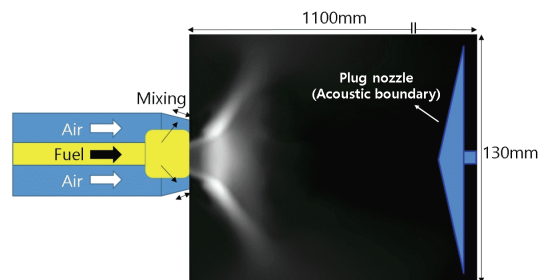


Fig. 1 Schematic of the partially premixed combustor.

연료와 상호작용하여 연소불안정을 발생시키게 된다. 연소불안정 발생으로 인한 압력 떨림을 계측하기 위하여 연소기 내부에 압력 센서가 장착되었으며 이를 바탕으로 시간에 따른 압력 결과가 도출되었다. 이와 같이 실험에서 계측된 압력, 속도, 화염 이미지 등의 파라미터들은 해석 결과의 검증과 분석에 활용되었다.

## 2.2 해석 기법

해석을 위하여 질량보존, 나비에-스토크스, 에너지, 화학종 방정식으로 이루어진 지배방정식이 사용되었다. 연소기 내에서 발생하는 선회 유동을 해석하기 위하여 대와류모사(Large eddy simulation, LES) 모델을 기반으로 한 난류 모델이 적용되었으며, 이에 따라 유동 내부의 커다란 소용돌이(eddy)는 직접 계산되었고 작은 소용돌이는 모델링을 통하여 계산되었다. 이에 대한 난류 모델링을 위하여 본 연구에서는 대와류모사 모델의 일종인 WALE 모델[9]이 적용되었다. 이에 대한 세부사항은 아래 식과 같다.

$$V_{sgs} = (C_w \Delta)^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(S_{ij} S_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (1)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

이 때, 모델 상수  $C_w$ 에 대해서는 0.325의 값이 적용되었다. 위 식에서,  $\bar{S}_{ij}$ 는 변형률텐서,  $S_{ij}^d$ 는 속도구배텐서이다. 추가적으로, 아격자 스케일에서 발생하는 화학반응을 효과적으로 모사하기 위하여 난류-연소 연계모델이 화학종 방정식의 production rate 항에 대하여 적용되었다. 본 연구에서는 부분예혼합 화염의 모델에 적합한 Partially Stirred Reactor(PaSR) 모델[10]이 해석에 사용되었다.

연소기 내 유동에 대하여 이상기체 상태방정식이 적용되었으며, 각 화학종의 엔탈피는 NASA

polynomial 식을 기반으로 한 식을 바탕으로 계산되었다. 이어서, 확산(diffusion)에 대한 Fick의 법칙이 적용되었으며 열전도도에 대한 Fourier의 법칙이 적용되었다. 유동 내의 점성(viscosity)은 온도에 대한 함수로 가정되었으며 Sutherland 법칙을 따라 계산되었다.

해석에 사용된 메탄 및 수소 연료의 해석을 위하여 아레니우스 식 기반의 연소 모델이 솔버 내에 적용되었다[11]. 해당 연소 모델은 15개의 화학종과 23개의 화학반응식으로 구성되었으며, 연료의 화염 속도를 적절히 해석할 수 있도록 고안되었다. 이와 같은 수치 기법들은 오픈소스 CFD 패키지인 OpenFOAM[12] 내에 도입되어 해석이 수행되었다. 해석 솔버로는 OpenFOAM 내의 아음속 솔버인 rhoReactingFoam 이 사용되었다. 지배방정식 내 시간 항의 차분을 위해서는 2차 정확도의 Crank-Nicholson 기법이 사용되었으며, 공간 확산항의 차분을 위해서 2차 정확도의 central difference 기법이 사용되었다. 그리고 공간 대류항의 차분을 위해서는 가파른 구배에 대해 1차 정확도의 upwind 기법을, 그렇지 않은 구배에 대해서는 2차 정확도의 central difference 기법을 사용하는 단조법(monotonic scheme)을 적용하였다. 이어서 압력 기반의 아음속 솔버에서 발생하는 압력-속도 연계 현상을 해결하기 위하여 Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO) 알고리즘이 적용되었다. 이에 따라 운동방정식이 계산된 후 압력에 대한 포와송 방정식(Poisson equation) 이 계산되며, 계산된 압력값으로부터 속도 값이 갱신된다. 이와 같은 갱신을 residual 이 충분히 작아질 때까지 반복하여 수렴성을 확인한다. 해석은 CFL 수가 0.4 이하인 조건에서 수행되었으며 해석 시간 범위는 0.2초까지이다.

해석을 위하여 분사구 입구부터 연소기 출구까지 해석 도메인 설정을 진행하였다. 해석에 앞서 연소기의 설계도를 바탕으로 한 STL 파일이 오픈소스 소프트웨어인 SALOME[13]를 이용하여 제작되었다. 경계조건 설정 시 연소기 출구 면적의 90%가 벽면 조건으로 설정되었으며, 플러그를 장착한 것과 동일한 효과를 적용하였다.

이어서 cfMesh 프로그램을 이용한 격자생성작업을 완료하였다. 연소기 내에서 발생하는 난류 경계층의 적절한 해석을 위하여 연소기 및 분사구 벽면 주변에는 1 mm 미만의 작은 격자를 적용하였다. 그리고 벽면 주변의 첫번째 격자에 해당하는  $y^+$  값은 약 25 가량이다.

이어서 노즐 내에서 발생하는 부분예혼합 현상을 적절히 모사하기 위하여 혼합 구간에 0.2 mm 미만의 매우 작은 격자가 배치되었다. 연소기 내부에서는 화염 발생의 유무에 따라 격자 크기를 다르게 설정하였으며 화염 미발생 구간에서는 4 mm 크기의 격자를, 화염 발생 구간에서는 2 mm 크기의 격자를 배치하였다. 전체 해석 구간에서 비정렬격자가 사용되었으며 총 격

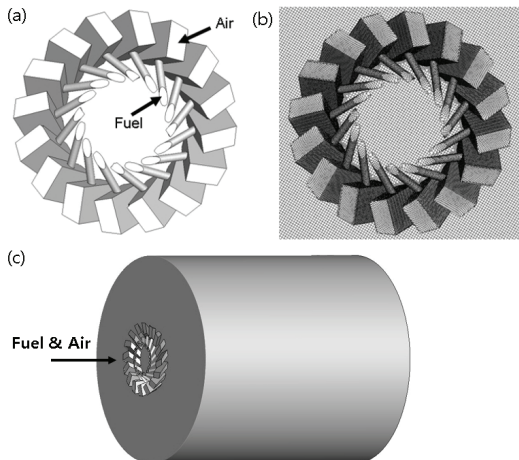


Fig. 2 (a) Schematic of nozzle, (b) grid distribution in the simulation, and (c) location of nozzle in combustor.

Table 1. Initial conditions of the simulated cases.

Case	A	B	C
H <sub>2</sub> mole Fraction (%)	100	50	50
Heat input (kW)	40	40	40
Fuel flow rate (slpm)	222	102	51
Air flow rate (slpm)	1100		
Fuel temperature (K)	320		
Air temperature (K)	473		
Equivalence ratio	0.480	0.552	0.276

자의 개수는 약 350만 개 가량이다. 해석에 사용된 노즐의 형상 및 격자분포도는 Fig. 2와 같다.

이어서 경계조건 설정 작업이 완료되었다. 벽면 주변에는 no-slip 단열 벽 조건이 고려되었다. 연료 및 공기의 주입구에는 디리클레(Dirichlet) 경계 조건이 적용되었으며 주어진 유량을 바탕으로 주입 속도가 계산되었다. 이어서 연소기의 출구 부분에는 압력에 대하여 대기압의 (1 atm) outflow 조건이 주어졌으며, 다른 파라미터들에 대해서는 뉴먼(Neumann) 경계 조건이 적용되었다. 해석을 위하여 총 3가지의 연료 분사 조건이 설정되었다. 연료 조성이 변경되었을 때, 총 열 발생량 값은 40 kW로 고정되어 일정한 추력이 발생할 수 있도록 조정하였다. 이어서 동일 조건에서 열 발생량 값을 달리해 유속과 당량비를 변경한 조건을 고려하였다. 연료 조건에 관계없이 공기 분사 조건은 1100 liter/min의 값이 유지되었다. 해석 조건에 대한 세부사항은 Table 1에 정리되었다.

### 2.3 해석 결과

연소 해석에 따라 연소기 내에서 선회 화염이 형성되었다. 서로 다른 연료 조건에서 화염 형상이 각각 도출되었으며 실험 결과와의 정성적인 검증이 수행되었다. 화염 형상에 대한 후처리를 위하여 3차원 조건의 해석에서 계산된 OH 분자의 질량 분율이 2차원으로 적분되었다. 이후 화염의 경계면을 명확히 확인하기 위하여 아벨 변환 기법이 적용되었다. 도출된 결과는 실험에서 보고된 OH 분자의 자발광 이미지와 비교되었으며 각각의 연료 조건에 대해 해석이 적절히 수행되었음이 확인되었다(Fig. 3).

해석된 결과는 실험 결과에 비하여 다소 확산 정도가 강한 특성을 나타내었으며 이는 연료-공기 혼합 구간의 난류가 다소 부정확하게 해석되어 예혼합 정도가 더 약하게 도출되었기 때문이다. 연소기 내 화염은 연료 내 수소의 함량이 증가함에 따라 짧게 형성되며, 이는 수소 연료의 높은 확산성과 층류 화염 속도가 원인으로 보인다.

이어서 해석된 속도 결과에 대한 실험(PIV)과의 비교가 수행되었다. 실험 결과와의 비교는 수

소/메탄 50:50 의 연료 조건에서 연소기 입구에서 축방향으로 5 mm, 15 mm, 25 mm 구간에 대하여 수행되었다. 이에 대한 결과는 Fig. 4와 같으며, 해석에서 도출된 속도장이 실험결과와 정량적으로 잘 일치한다는 것을 확인할 수 있다.

수소/메탄 50:50에 대한 연료 조건에서 강한 연소불안정이 연소기 내에 형성되었다. 연소기 입구 부분에서 연소불안정으로 인한 압력 섭동 결과가 축 방향으로부터 50 mm 떨어진 구간의 벽면에서 도출되었으며, 동일 위치에서 계측한 실험 결과와의 비교가 이루어졌다. 섭동의 주파수 및 진폭을 분석하기 위하여 결과에 대한 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)이 이루어졌으며 이에 대한 결과는 Fig. 5와 같다.

수소/메탄 연료에 대한 실험 결과는 연소기의

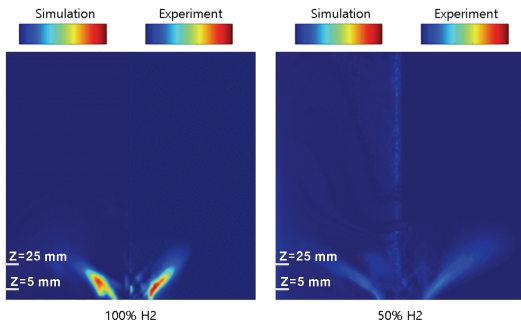


Fig. 3 Comparison of Abel-inverted simulation and experimental flame structure in two different fuel conditions.

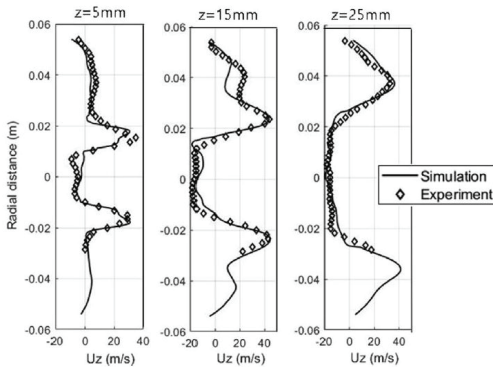


Fig. 4 Time-averaged numerical (line) and experimental (dot) axial velocity components in hydrogen-methane fuel condition.

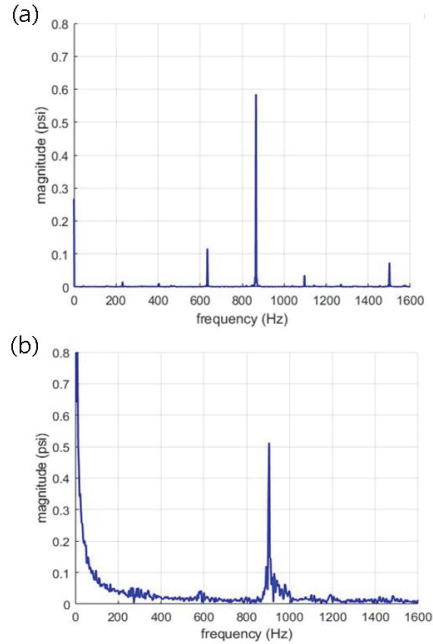


Fig. 5 FFT results for (a) experimental and (b) numerical pressure oscillation in combustor.

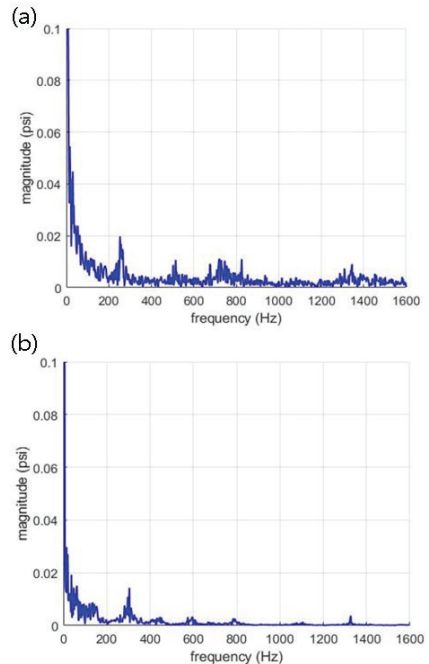


Fig. 6 FFT results for (a) increased hydrogen composition and (b) reduced flow rate conditions.



2번째 harmonic 모드에 해당하는 600 Hz의 주파수 및 연소기의 3번째 harmonic 모드에 해당하는 860 Hz의 주파수에서 연소불안정이 발생하였음을 나타내었다. 동일 조건에서 진행한 해석 결과는 900 Hz의 주파수에서 연소불안정이 발생하였음을 도출하였으며, 실험 결과와의 유사성이 확인되었다.

그리고 1차원 RMS 압력 분석을 통해 실험과 동일한 3번째 harmonic mode에서 불안정이 발생하였음이 확인되었다(Fig. 7). 해석 결과에서 나타난 연소불안정의 진폭은 실험 결과[7]보다 다소 낮은 값을 나타내었으며, 이는 해석이 진행되는 구간에서 수치적인 감쇠가 발생한 것이 원인으로 보인다. 또한 실험보다 다소 높은 주파수에서 불안정이 발생하였으며 연소기 내부 온도 차이로 인한 음속의 불일치가 원인으로 보인다. 해석에서 적용한 단일 조건은 실험에서 적용한 벽면 cooling 현상을 반영하지 못했으며, 이에 따라 연소기 내부 온도가 높게 해석되었을 것으로 판단된다. 실험 및 해석에서 발생한 연소불안정 특성은 Table 2에 정리되었다.

Table 2. Initial conditions of the simulated cases.

Case	Exp.	LES
Frequency (Hz)	860	900
Magnitude (Psi)	0.651	0.521
Harmonic mode	3 L	3 L

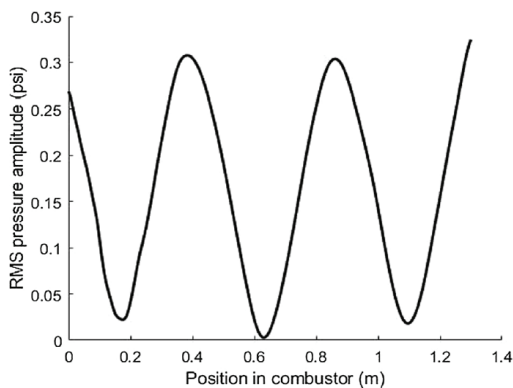


Fig. 7 RMS pressure amplitude distribution in the combustor (case B).

동일 열 발생량에서 수소 연료만을 사용했을 경우 수소/메탄 연료 조건에서와 달리 연소불안정이 발생하지 않는 해석 결과가 도출되었다. 이와 유사하게 수소/메탄 연료 조건에서 열 발생량을 감소할 때 역시 연소불안정이 발생하지 않았다. 해당 조건들에서 FFT 분석이 수행되었으며 이에 대한 결과는 Fig. 6과 같다.

선행 문헌[7]에서는 수소 연료에 대한 실험에서 연소불안정이 발생하지 않았음을 보고하였으며, 해석에서 역시 동일한 결과가 도출되었다. 이로부터, 동일 출력 조건에서도 연료 조성에 따라 연소불안정 발생 여부가 달라질 수 있음이 확인되었다. 또한, 유속이 감소하였을 경우에도 연료 조성이 달라졌을 때와 유사하게 연소불안정 발생 여부가 달라질 수 있음이 확인되었다.

이어서 연소불안정 발생에 영향을 미치는 요인을 조사하기 위하여, 연소불안정이 발생한 수소/메탄 50:50에 대한 연료 조건에 대해 유동 분석이 이루어졌다. 결과에 따르면, 연소불안정 발생으로 인하여 공급 유동이 강하게 섭동하고 이에 따라 연소기 내 화염이 강하게 떨리는 결과가 나타났다. 섭동하는 화염은 총 5가지의 다른 위상(phase)으로 나타났으며 이에 대한 결과는 Fig. 8과 같다. 첫번째 위상( $0^\circ$ )에서는 이전까지 지속되었던 유동의 역류가 멈춤으로서 연료 및 산화제가 노즐 내부에서 막히며 이로 인해 작은 화염 구조가 나타났음이 확인된다. 해당 구간에서는 벽면 부분에서 생성되는 와류와 분출되는

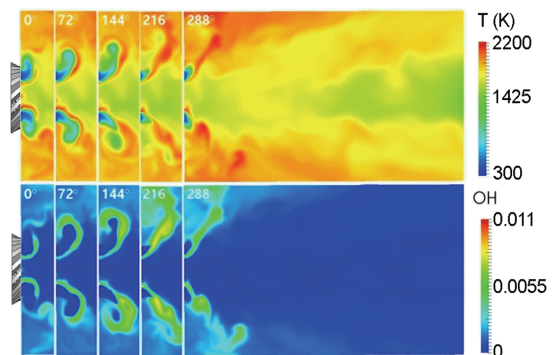


Fig. 8 Temperature (above) and OH mass fraction (bottom) profiles of oscillating flame in five different phases.

화염의 상호작용이 거의 발생하지 않으며, 반응이 완료된 생성물만이 와류를 따라 이동함이 확인되었다. 이어서 나타나는 두번째 위상(72°)에서는 노즐 내부의 압력이 낮아짐에 따라 연료가 연소기 내부로 급격히 분출되는 현상이 나타난다. 이에 따라 화염의 크기가 급격히 커지며 벽면의 와류에 에너지를 공급하기 시작하고 열 발생량이 증가한다. 세번째, 네번째 위상(144°, 216°)에서는 연료가 연소기 내로 지속적으로 공급됨에 따라 화염-와류 상호작용이 지속되고 화염 구조가 커지는 결과가 나타난다. 마지막으로 다섯번째 위상(288°)에서는 노즐 내의 압력이 증가함으로 인해 공급되는 유동이 역류하기 시작하며, 이에 따라 화염이 소산되기 시작한다. 그러나, 재순환 영역에서는 화염이 여전히 남아있으며, 이에 따라 해당 위상에서 열 발생량이 최대 올라가는 결과가 도출된다. 이와 관련하여 노즐 내 유동 섭동에 대한 속도 분포는 Fig. 9와 같다. 위상의 변화에 따른 유동 공급의 증감이 확인되었으며 주기의 반복에 따라 유사한 경향성이 나타남이 확인된다.

각각의 위상에서 나타난 연소기 내 열 발생량과 압력의 연관성은 Fig. 10과 같이 나타난다. 연소기 영역 내에서 도출된 미소 열 발생량 모두 더하는 방식으로 열 발생량이 측정되었으며, 압력은 화염이 주로 발생하는 연소기 입구로부터 30 mm 떨어진 지점에서 측정되었다. 섭동하는 압력과 열 발생량의 위상은 시간 영역에 대하여 45도 이내의 각도를 유지하였으며, 이에 따라 Rayleigh 기준이 성립하였음이 확인되었다.

각 위상에서 보여진 화염과 유선을 함께 그려, 해석 결과에서 나타난 화염-와류 상호작용을 Fig. 11과 같이 모사하였다. 결과에 따르면, 외부 재순환 영역이 노즐과 주입되는 유동 사이에서 형성되었음이 확인된다. 또한 연소기의 축방향 벽면을 따라 내부 재순환 영역이 형성되었음이 확인된다. 이 내부 재순환 영역은 화염으로 인해 연소가 완료된 반응 가스를 다시 주입구 부분으로 공급하며, 연료의 지속적인 점화에 기여한다. Fig. 11에서 확인되는 바와 같이 수소/메탄 화염에서 진동하는 화염 구조는 외부/내부 재순환

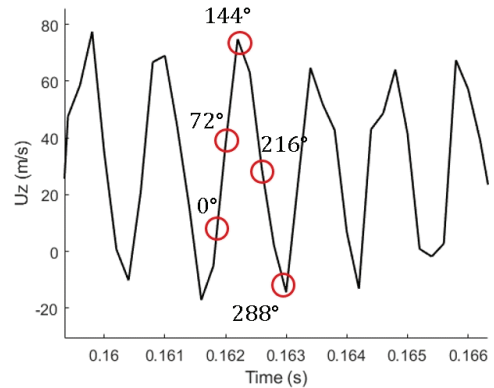


Fig. 9 Oscillating velocity profile marked at 5 different phases.

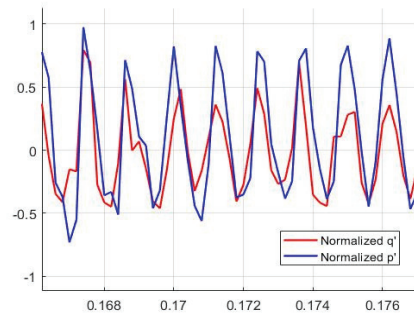


Fig. 10 Temporal variation of normalized  $p'$  and  $q'$  profiles at the combustor in unstable case.

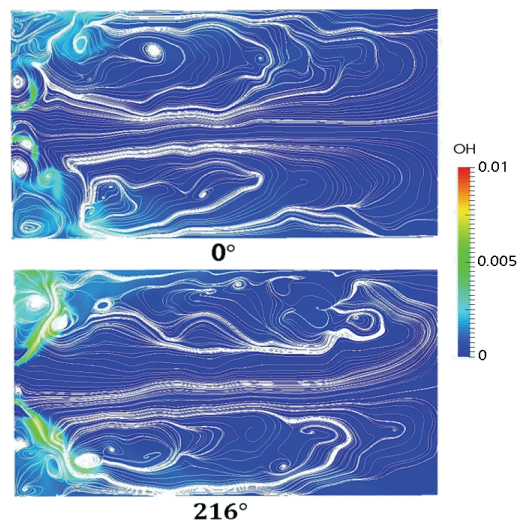


Fig. 11 Oscillating flame in two different phases shown with streamline.

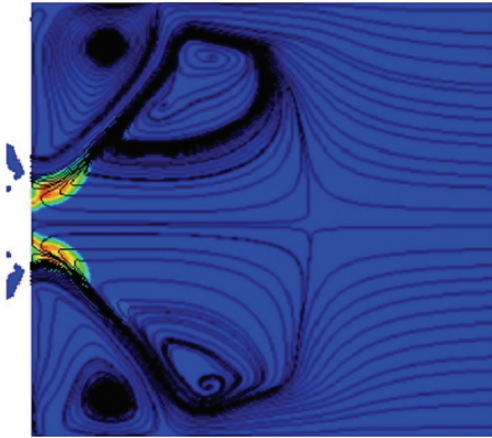


Fig. 12 Stable hydrogen flame shown with streamline.

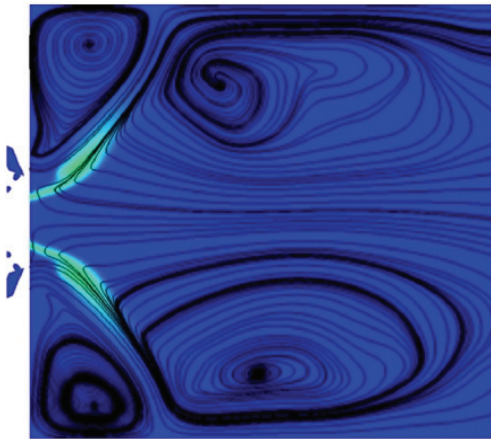


Fig. 13 Stable hydrogen/methane flame (reduced flow rate) shown with streamline.

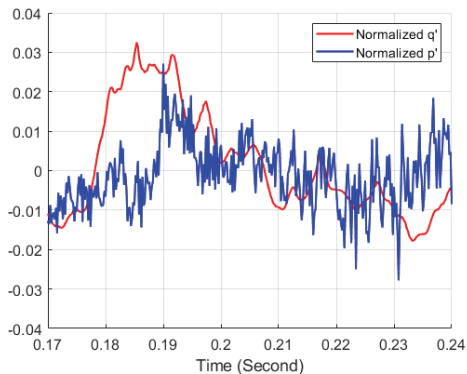


Fig. 14 Temporal variation of normalized  $p'$  and  $q'$  profiles at the combustor in hydrogen flame.

영역의 경계선 역할을 한다. 주입 유량이 섭동함에 따라 재순환 영역의 구조 역시 강하게 섭동하며, 와류 내 연소 현상이 주기적으로 발생하게 된다. 이와 같은 와류 연소 현상은 연소기 내에서 발생하는 열 발생의 주요 원인이 되며, Rayleigh 기준 성립에 주요 원인으로 작용한다.

이어서 조사된 수소 화염(Fig. 12)은 수소/메탄 화염과 다른 연소특성 및 경향성이 나타난다. 수소의 높은 가연성으로 인하여 수소 화염은 주입구에서 매우 가까운 곳에서 점화되며, 한정된 좁은 영역에서 화염이 발생한다. 이와 같은 작은 화염 구조는 벽면 주변에서 형성되는 재순환 영역 내 와류에 영향을 줄 만큼 충분히 길게 형성되지 못하였다. 또한 안정화된 화염의 영향을 받아 일정한 형상의 재순환 영역이 벽면을 따라 형성되었다.

수소 화염에 대하여 열 발생량의 섭동과 압력의 섭동을 계측한 결과는 Fig. 14와 같다. 결과에 따르면, 연소기에서 발생하는 압력파의 영향으로 높은 주파수의 압력 섭동이 발생하였다. 그러나 압력 섭동의 진폭은 매우 낮았으며, 화염에서 나타나는 열 발생 섭동의 주파수와도 일치하지 않았다. 따라서 Rayleigh 기준이 성립하지 않았으며 연소불안정이 발생하지 않았다.

기존의 수소/메탄 조건에서 유량이 절반으로 감소되었을 경우 연료의 수소 조성이 증가와 유사한 변화가 발생하였다(Fig. 13). 감소한 유속으로 인하여 화염이 좁은 영역에서 발생하기 시작했으며, 짧게 형성된 화염 구조의 영향으로 화염-와류 연계 현상이 발생하지 않았다. 압력과 열 발생 섭동 주파수의 불일치로 연소불안정 역시 발생하지 않았으며 이에 따라 안정화된 화염과 재순환 영역이 도출되었다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 연소기 내 연료 분사 조건에 따른 연소불안정 발생 경향성과 그 원인이 조사되었다. 난류 유동의 해석을 위하여 대와류모사 모델이 적용되었으며, 난류-연소 연계 현상의 해



석을 위하여 PaSR 연소모델이 적용되었다. 해석은 3가지의 연료 조건에 대하여 수행되었으며, 이에 따른 연소기 내부 유동장과 압력 분포 특성이 조사되었다. 결과에 따르면, 주입 연료의 조성과 유량에 따라 연소불안정 발생 여부가 달라지는 결과가 도출되었다. 주입 연료의 화염 속도가 증가하였을 경우 연소기 내에서 짧은 화염이 형성되었으며, 주입 연료의 유량이 감소하였을 경우에도 이와 동일한 결과가 나타났다. 화염 구조와 연소불안정 발생 여부의 연관성에 대한 분석이 이어서 수행되었다. 연소기 내 화염 길이가 충분히 길어질 경우, 화염은 연소기 벽면에 형성되는 재순환 영역과 연계되어 압력파와 동일한 위상의 강한 열에너지를 분출하며 연소불안정 발생의 주요 원인이 되었음이 확인되었다. 반면, 수소 함량이 증가하거나 유량이 감소된 조건에서는 짧은 화염 구조로 인하여 화염-와류 연계 현상이 발생하지 않는 결과가 도출되었다. 이에 따라, 연소불안정이 발생하지 않았으며 비교적 안정된 유동장이 형성되었음이 확인되었다. 이와 같은 연구 결과는 연소불안정 발생 방지를 위한 연소기 설계에 있어 중요한 발견이 될 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 서울대학교 정밀기계연구소와 연계된 중소기업기술정보진흥청의 지원을 받아 수행한 중소기업기술혁신개발사업(82839656)의 연구 결과입니다.

## References

1. Luque, S., Kanjirakkad, V., Aslanidou, I., Lubbock, R., Rosic, B., and Uchida, S., "A New Experimental Facility to Investigate Combustor-turbine Interactions in Gas Turbines with Multiple Can Combustors," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 137, 051503, 2015.
2. Ghirardo, G., Juniper, M.P., and Moeck, J.P., "Weakly Nonlinear Analysis of Thermoacoustic Instabilities in Annular Combustors," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 805, pp. 52-87, 2016.
3. Franzelli, B., Riber, E., Gicquel, L.Y.M., and Poinso, T., "Large Eddy Simulation of Combustion Instabilities in a Lean Partially Premixed Swirled Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 159, No. 2, pp. 621-637, 2012.
4. Han, X., Li, J., and Morgans, A.S., "Prediction of Combustion Instability Limit Cycle Oscillations by Combining Flame Describing Function Simulation with a Thermoacoustic Network Model," *Combustion and Flame*, Vol. 162, No. 10, pp. 3632-3647, 2015.
5. Zettervall, Z., Worth, N.A., Mazur, M., Dawson, J.R., and Fureby, C., "Large Eddy Simulation of CH<sub>4</sub>-air and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> - air combustion in a model annular gas turbine combustor," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 37, No. 4, pp. 5223-5231, 2019.
6. Kim, M.K., Yoon, J., Oh, J., Lee, J., Yoon, Y., "An experimental study of fuel-air mixing section on unstable combustion in a dump combustor," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 62, pp. 662-670, 2014.
7. Yoon, J., Lee, M.C., Joo, S., Kim, J., Yoon, Y., "Instability mode and flame structure analysis of various fuel compositions in a model gas turbine combustor," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 3, pp. 899-907, 2015.
8. Taamallah, S., Vogiatzaki, K., Alzahrani, F.M., Mokheimer, E.M.A., Habib, M.A., and Ghoniem, A.F., "Fuel flexibility, stability and emissions in premixed hydrogen-rich gas turbine combustion:

- Technology, fundamentals, and numerical simulations," *Applied Energy*, Vol. 154, pp. 1020-1047, 2015.
9. Nicoud, F. and Ducros, F., "Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor," *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 62, pp. 182-200, 1999.
  10. Chomiak, J. and Karlsson, A., "Flame liftoff in diesel sprays," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 26, No. 2, pp. 2557-2564, 1996.
  11. Egolfopoulos, F.N., Cho, P., and Law, C.K., "Laminar flame speeds of methane-air mixtures under reduced and elevated pressures," *Combustion and Flame*, Vol. 26, No. 3, pp. 2557-2564, 1996.
  12. Weller, H.G., Taber, G., Jasak, H., Fureby, C., "A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques," *Computers in Physics*, Vol. 12, No. 6, pp. 620-631, 1998.
  13. Ribes, A., Caremoli, C., "Salome platform component model for numerical simulation," *COMPSAC 07: Proceeding of the 31st Annual International Computer Software and Applications Conference*, pp. 553-564, 2007.