

3차원 유한요소해석 기법을 사용한 수소-천연가스 혼소 가스터빈 연소기에서의 연소불안정 해석

홍수민* · 김대식*[†]

Combustion Instability Modeling in a Hydrogen-Natural Gas Mixed Fuel Gas Turbine Combustor using a 3-Dimensional Finite Element Method Approach

Sumin Hong and Daesik Kim

Key Words: Combustion Instability(연소불안정), Finite Element Method(유한요소법), Thermo-acoustic Analysis(열음향해석), Hydrogen Combustion(수소연소)

Abstract

In this study, the combustion instability characteristics according to the change in the hydrogen ratio in the fuel in the single nozzle system of the hydrogen-natural gas mixed gas turbine for power generation was analyzed using a three-dimensional finite element analysis-based Helmholtz solver. This combustor shows the instability characteristics in which mode transition occurs from a mode having a low amplitude near 70 Hz to a mode having a high amplitude of 250 Hz or higher as the hydrogen fraction in the fuel increases. The current modeling results are found to reasonably predict the main characteristics of the change in measured instability frequency and growth rate with the change in fuel composition.

기호설명

ρ : 밀도 (density)
 p : 압력 (pressure)
 ω : 각 진동수 (angular frequency)
 c : 음속 (speed of sound)
 Q : 열 발생량 (heat release rate)
 u : 속도 (velocity)
 n : 이득값 (gain)
 τ : 시간 지연 (time delay)
 $\bar{\quad}$: 평균량 (mean quantity)

$\hat{\quad}$: 섭동량 (perturbation quantity)

1. 서론

기존의 화력발전을 수소터빈을 활용한 저탄소(수소혼소) 또는 무탄소(수소전소) 발전으로 전환하려는 움직임은 탄소중립을 위한 전 세계 발전 시장의 불가피한 선택으로서, 국내외 주요 가스터빈 제작사들의 관련 기술 개발을 위한 관심과 투자가 매우 뜨거운 실정이다. 기존 LNG를 연료로 사용하던 가스터빈을 수소터빈으로 전환하기 위해서는 가스터빈의 모든 부품의 설계 변경이 요구된다. 예를 들어서, 수소의 특성을 반영한 연료공급 시스템 및 배관이 수정되어야 하며, 동일 발열량을 얻기 위하여 수소의 체적유량 증가를 반영한 압축기와 터빈 설계 변경과 수소연소에 적합한 압축기와 터빈의 튜닝 및 수소용 제어로직이 탑재되어야 한다. 그렇지만, 역시

(Received: 27 Feb 2022, Received in revised form: 4 Mar 2022, Accepted: 7 Mar 2022)
^{*}강릉원주대학교 기계공학과
[†]책임저자, 회원
E-mail: dkim@gwnu.ac.kr
TEL: (033)760-8728 FAX: (033)760-8721

연료가 바뀔때 따라 안정적으로 운전이 가능한 수소연소기의 설계가 가장 핵심기술로 여겨진다.

Kim⁽¹⁾의 연구에 따르면, 수소 혼소/전소 연소기 개발 시 고려되어야 할 사항으로 역화와 질소산화물 배출과 더불어 연소불안정 회피 설계 기술을 제시한 바가 있다. 기존 천연가스로부터 수소로의 연료 전환시에 연소불안정 특성 변화에 관한 연구는 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. 현재까지의 공통적인 연구 결과로서, 혼소율의 증가시 기존 천연가스 연소 대비 화염이 짧아지고, 동시에 전체 화염 구조가 크게 변경된다. 이는 전술하였던 열발생과 동압 섭동 간의 위상차에 영향을 미치게 되고, 이러한 위상차의 변화는 불안정 모드와 주파수에 서의 변화를 초래한다. 따라서 수소터빈에서의 연소불안정 제어와 회피 설계를 위해서는 개발 대상 시스템에서 음향 모드 및 불안정 특성을 정확하게 예측하고 모델링하는 기술 개발이 매우 중요하다⁽¹⁾.

본 연구에서는 실제 발전용 수소혼소 터빈으로 개발이 진행 중인 예혼합 연소기의 싱글 노즐 시험 리그를 대상으로 3차원 헬름홀츠 솔버(Helmholtz solver)를 사용하여 연소불안정 모델링을 진행하였다. 모델링 결과를 동일 리그에서 측정된 동압 특성과 비교하여 검증하였으며, 이를 통하여 수소혼소 연소기에서의 불안정 모델링시 고려해야 할 인자들의 영향성을 평가하고자 한다.

2. 해석 모델 및 방법

2.1 음향 지배방정식

연소불안정을 예측하기 위하여 본 연구에서는 상용코드인 COMSOL Multiphysics⁽²⁾를 사용하였고, 그 중에서도 3D FEM을 기반으로 하는 Acoustics module을 통해 연소불안정 모델링을 진행하였다. 이때, 사용된 지배방정식 (2)은 식 (1)과 같다.

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \nabla \hat{p} \right) - \frac{\omega^2}{\rho c^2} \hat{p} = \hat{Q} \quad (1)$$

여기서 ρ , \hat{p} , ω , c , \hat{Q} 는 각각 밀도, 시스템의 압력 섭동, 각진동수, 음속 그리고 열발생 섭동량을 의미한다.

2.2 화염전달함수

본 연구에서는 식 (2)와 같이 가장 보편적으로 사용되는 화염전달함수(Flame Transfer Function, FTF)의 형태인 $n-\tau$ 모델을 적용하였다.

$$FTF(\omega) = \frac{\hat{Q}/\bar{Q}}{\hat{u}/\bar{u}} = n(\omega)e^{i\omega\tau} \quad (2)$$

여기서 \bar{Q} , \hat{u} , \bar{u} , n , τ 는 각각 평균 열발생량, 속도 섭동량, 평균 속도, 이득값, 그리고 시간지연을 나타낸다.

신뢰도가 높은 연소불안정 모델링을 위해서는 불안정이 예측된 동일한 조건(연소기 형상과 운전 조건 등)에서의 별도 실험 또는 수치해석을 통한 화염전달함수 데이터가 확보되어야 한다. 그러나 Park et al.^(3,4), Yoon et al.⁽⁵⁾과 Kim et al.⁽⁶⁾의 가스터빈 연소기에서 실험적 연구를 통하여 정교하게 예측된 화염이미지(즉, 화염길이, L_{flame})와 유속(U)을 통하여도 시간지연(τ)을 도출할 수 있음을 확인하였고($\tau = L_{flame}/U$), 이외에도 많은 이전 연구들^(7,8)에서 화염의 길이로부터 계산된 τ 를 이용하여 연소불안정 모델링을 진행한 바가 있다.

현재 연구에서도 τ 를 예측된 화염이미지를 통하여 도출하였으며, 이때 FTF의 이득값(n)은 기존의 부분 또는 완전 예혼합 시스템⁽⁹⁻¹¹⁾에서의 일반적인 범위로 주어진다. 0.1~3.0 사이에서 변수로 적용하여 해석을 진행하였다.

2.3 해석 대상 연소기

본 연구에서 선정된 해석 대상 시스템⁽¹²⁾은 한국기계연구원에서 개발 중인 발전용 수소 혼소 가스터빈 싱글 노즐 시스템이다. 시스템의 구조는 크게 공기 입구, 공기 통로, 플레넘(Plenum), 노즐, 연소실 그리고 플러그 등으로 구성되어 있다. Fig. 1에서 나타난 유동 흐름과 같이 연소실 후단에 있는 입구를 통해 공기가 유입되고 연소기 상단으로 이동한다. 공기 중 일부는 플레넘에 위치하는 연료 노즐 상류 쪽으로 진행되고 나머지 공기는 유출 냉각 홀을 통해 연소실로 진행한다. 연료 노즐로 유입된 공기는 파일럿(Pilot)과 메인(Main) 노즐로 나누

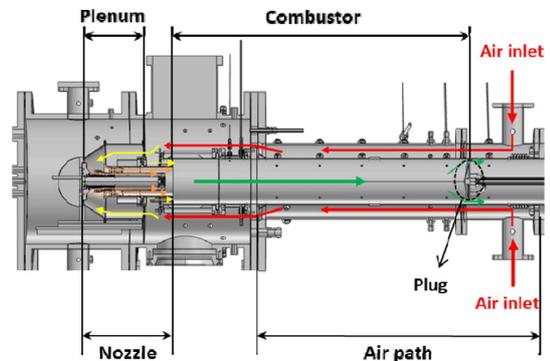


Fig. 1 Schematic of hydrogen-natural gas mixed fuel gas turbine single nozzle system⁽¹²⁾

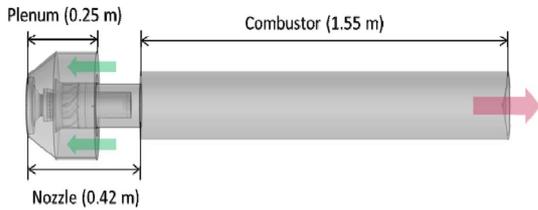


Fig. 2 Simplified geometry for acoustic modeling

어져 이동하고 연료와 혼합되어 연소실에서 연소가 이루어지고 연소된 배기가스는 연소실 후단으로 이동한 후 플러그(Plug)를 통과하여 나간다.

그러나 본 모델링에서는 플레넘 입구에서 좁은 유로 면적으로 인하여 음향학적 단힘 경계 조건을 형성하게 되는 관계로 해석 영역은 재생 냉각 유로는 제외하고 플레넘에서부터 플러그까지로 선정하였으며⁽¹³⁾, Fig. 2 는 모델링 형상만을 단순화하여 나타낸 것이다.

2.4 해석 조건

본 연구에서 사용한 모델링 조건은 순수 메탄(CH₄) 100%의 경우, 공기유량 0.342 kg/s, 당량비 0.484로 선정되었다. 입구 온도와 압력은 718 K, 1.3 bar로 고정되었으며, 구체적으로 음향 해석을 위해 사용된 화염 전후의 물성치는 Table 1과 같다. 표에서 사용된 기호의 하첨자 “1”은 연소 전 상태를 의미하고, “2”는 연소 후 상태이며, 연소실에서의 물성치는 단열화염온도 조건이 적용되었다. 전체 연료 혼합물에서 수소의 비율은 0% (즉, CH₄ : 100%)에서 65%까지 변화시켰다.

또한, 연소실 출구는 플러그에 의하여 음향학적으로 단힘 조건이 형성되었으며, 플레넘 입구 역시 전체 단면적 대비, 매우 좁은 개방 면적(19%)으로 인하여 음향학

Table 1 Modeling conditions

Parameters	Notation	Value
Air flow rate		0.342 kg/s
Equivalence ratio		0.484
Hydrogen fraction in total fuel (in vol.)		0 ~ 65%
Temperature	T_1	718 K
	T_2	1781 K
Pressure	p_1	1.3 bar
	p_2	

적 단힘 조건(reflection coefficient : 1)을 부여하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시간 지연(time delay) 값의 도출을 위한 화염 이미지 분석

Figure 3은 수소 혼소율의 증가에 따른 정상상태 화염 특성 변화를 분석하기 위하여 한국기계연구원⁽¹²⁾에서 OH-PLIF(Planar Laser Induced Fluorescence)을 통하여 얻은 결과를 활용하였다. 현재 연구에서 불안정 측정은 혼소율 0~65%에서 이루어 졌으며, Fig. 3의 화염 이미지는 대표적인 3가지 연료 조성에 대해서만 도시하였다. 그림의 가장 강한 자발강도(붉은색)의 위치에서 보이듯이, 수소 비율의 증가에 따라 화염의 전체 길이가 짧아지게 되고 노즐과 덤프 면에 더욱 가까워지는 특성을 보인다.

식 (2)에서 설명하였듯이, 전통적인 FTF는 주어진 유동 섭동에 대한 화염으로부터의 열발생율의 섭동이 크기 비율인 이득값(gain, m)과 이들의 시간지연(time delay)인 τ 로 표현되며, 본 연구에서는 전술하였듯이, 연료 인젝터 출구(노즐 입구에서 33.5 mm)로부터 화염면 중심

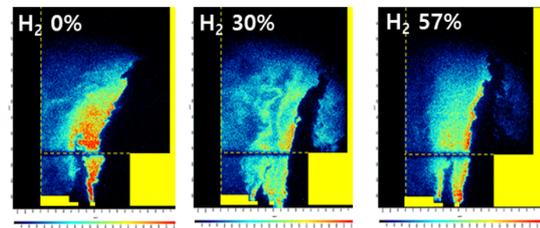


Fig. 3 OH-PLIF images with various hydrogen compositions in fuel⁽¹²⁾

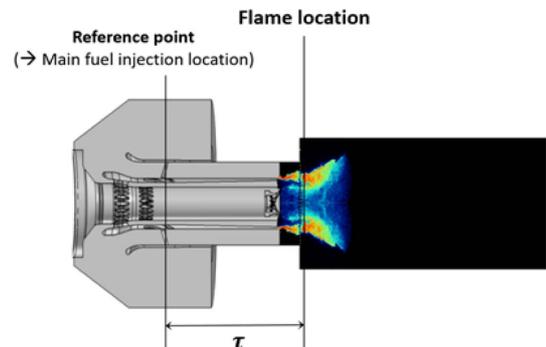


Fig. 4 Definition of time delay for thermo-acoustic modeling

까지의 거리와 각 구간의 평균 유속으로부터 정의되고, 세부적인 내용은 Fig. 4와 같다. 각 연료 조성에서의 대표적인 화염 길이는 OH-PLIF 이미지의 화염 중심으로 정의되었다.

시간지연 값을 분석한 결과, τ 의 가장 큰 값은 메탄 100%의 화염에서의 5.1 ms이었으며, 가장 작은 경우는 수소 57%(메탄 43%)에서 3.1 ms인 것으로 나타났다. 따라서 현재 연구에서 τ 의 범위는 3.1~5.1 ms로 선정하였으며, 또 다른 FTF의 주요 변수인 이득값(n)은 일반적인 Lab-scale 가스터빈 연소기에서 실험적으로 도출된 범위인 0.1~3.0에서 영향성 평가를 수행하였다.

3.2 수소 혼소율 변화에 따른 불안정 모드 천이

Figure 5는 본 해석 시스템의 수소 혼소율 변화에 따른 연소불안정의 대표적인 특성 변화를 요약한 결과이다. 그림은 덤프 면에서 측정된 동압의 주파수와 크기를 각 수소 혼소율의 함수로 나타내었다. 그림에서 보이듯이, 낮은 수소 혼소율의 경우(0%와 15% 혼소율)에 각각 65 Hz와 71 Hz에서 매우 약한 불안정이 나타났다. 그러나 혼소율이 30% 이상으로 증가하게 되면, 251~280 Hz로 모드 천이가 발생한다. 또한, 수소 혼소율 40%에서는 가장 강한 동압 크기가 계속되었다. 이후의 결과에서는 Fig. 5에 나타난 낮은 혼소율의 70 Hz 근처의 불안정을 “Mode1”(압력 분포 특성상 첫번째 길이 방향 모드)로, 높은 혼소율의 250 Hz 이상의 강한 불안정을 “Mode2”(길이 방향 모드의 조화 주파수)로 구분하였다.

3.3 연소불안정 모델링 결과

Figure 6에서는 화염전달함수의 n 과 τ 의 변화에 따른

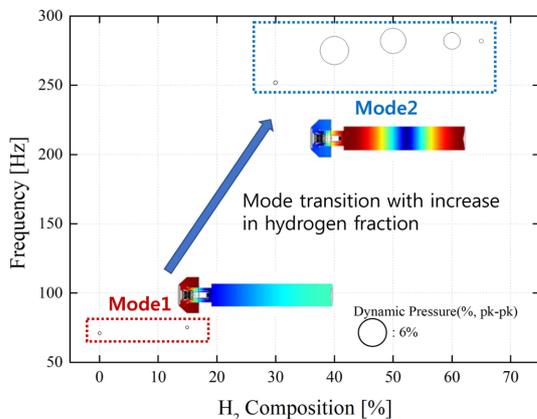
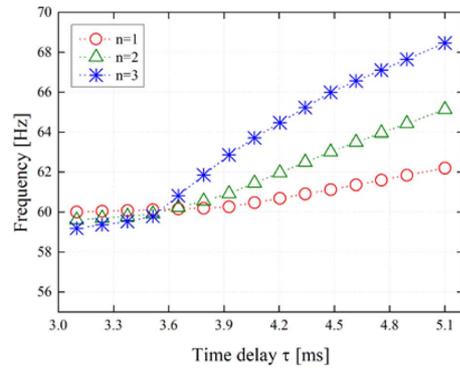
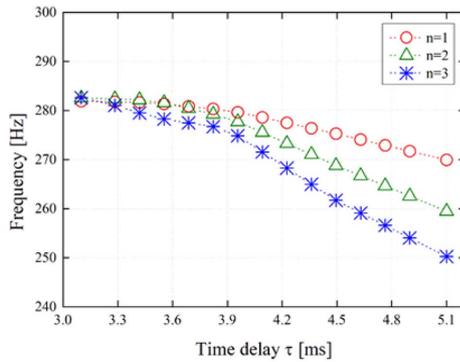


Fig. 5 Mode transition with increase in hydrogen fraction



(a) Model1



(b) Model2

Fig. 6 Predicted instability frequencies as a function of gain and time delay

연소불안정 주파수의 변화를 Mode1과 Mode2를 분리하여 분석하였다. 그림에서 보이듯이 n 과 τ 모두 불안정 주파수에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Kim et al.⁽¹⁴⁾은 해석학적 연구를 통하여 화염전달함수가 폐회로 시스템의 안정성에 미치는 연구 결과를 통하여, n 과 τ 가 각각 시스템의 근궤적의 극점을 이동시킨다는 사실을 이론적으로 증명한 바가 있다. 또, 각각의 영향은 시스템의 형상과 주파수 등 다른 인자들과 복잡한 형태로 나타나게 된다고 하였다. 현재의 연구에서도 Mode1은 n 과 τ 의 증가에 대하여 주파수가 증가하는 반면에, Mode2는 반대로 주파수가 감소하였다.

또한 본 연구에서의 n 과 τ 의 범위에서 Mode1에 의한 불안정 주파수는 59~69 Hz, Mode2의 불안정 주파수는 250~282 Hz로 계산되었으며, 이는 Fig. 5에서 소개한 실험으로 측정된 불안정 주파수의 범위와 매우 유사함을 확인하였다.

Figure 7은 Fig. 6과 동일 조건에서 계산된 불안정의

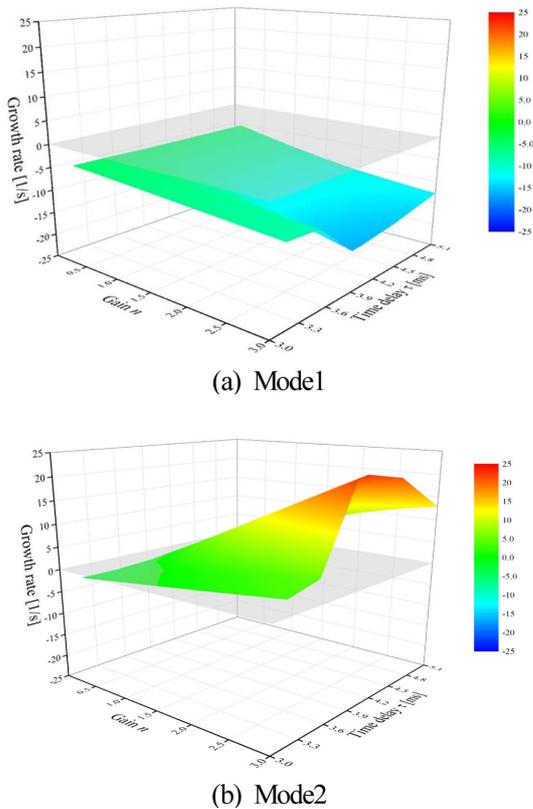


Fig. 7 Predicted instability growth rate as a function of gain and time delay

성장률을 도시한 것이다. Mode1의 경우 n 과 τ 의 변화에 따라 성장률은 큰 차이를 보이지 않고 있으며, 해석 조건에서 모두 성장률이 0보다 작은 음의 값(즉, 안정 상태)을 보이고 있다. 반면에 Mode2의 경우에 n 과 τ 에 더욱 큰 영향을 받는다. 특히 Mode2의 불안정은 계산된 넓은 범위의 n 과 τ 에서 불안정한 것(즉, 양의 성장률)으로 나타났으며, τ 값이 4.0 ms 근처에서 가장 큰 성장률을 보였는데, 3.1절의 수소 혼소율 변화에 따른 화염 길이 특성으로부터 판단하면 40~50%의 수소 혼소율에 해당한다.

특히, Fig. 5의 실험결과와 비교하였을 때, 현재의 모델링 결과는 Mode1보다는 Mode2에서 강한 성장률(즉, 더 높은 동압 크기)을 예측한 것과, 실험에서 가장 큰 동압이 예측된 혼소율과 모델링 결과상에서 가장 높은 성장률을 보이는 τ 가 유사한 범위를 나타낸다는 측면에서 해석의 합리성을 확보하였다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 발전용 수소 혼소 가스터빈의 싱글 노즐 시스템에서 연료 중 수소 비율의 변화에 따른 연소 불안정 특성 변화를 3차원 유한요소해석 기반의 헬름홀츠 솔버를 사용하여 해석하였다. 이를 위하여 COMSOL Multiphysics를 사용하여 연구를 진행하였다. 모델 검증 을 위하여 한국기계연구원에서 개발 중인 노즐 리그에서 측정된 화염이미지와 불안정 동특성 데이터가 사용되었다. 연소불안정 모델링을 위해 요구되는 화염전달함수의 매개변수 중, 시간지연(τ)은 수소 혼소율 변화에 따라 측정된 화염 길이와 유동장의 평균 속도로부터 계산된 값을 사용하였으며, 이득값(n)은 일반적인 부분 및 완전 예혼합 화염에서의 범위인 0.1~3.0의 값을 적용하였다.

본 연구 대상인 수소혼소 가스터빈 연소기 싱글 노즐은 수소 혼소율이 증가하면서 70 Hz 근처의 낮은 진폭을 갖는 불안정 영역에서 250 Hz 이상의 높은 진폭을 갖는 불안정 영역으로 모드 천이가 발생하는 특징을 보였다. 현재 연구에서의 모델링 결과는 수소 혼소율에 따른 불안정 주파수와 성장률 계산 결과에 있어서 실험 결과의 주요 특성을 합리적으로 예측하는 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20206710100030)받아 수행된 결과입니다.

참고문헌

- (1) D. Kim, "Review on the development trend of hydrogen gas turbine combustion technology", Journal of The Korean Society of Combustion, Vol. 24, No. 4, 2019, pp. 1~10.
- (2) COMSOL Acoustics Module Users Guide.
- (3) J. Park and M. Lee, "Combustion instability characteristics of H₂/CO/CH₄ syngases and synthetic natural gases in a partially-premixed gas turbine combustor: Part 1-Frequency and mode analysis", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 41, No. 18, 2016, pp. 7484~7493.

-
- (4) J. Park and M. Lee, "Combustion instability characteristics of H₂/CO/CH₄ syngases and synthetic natural gases in a partially-premixed gas turbine combustor: Part 2-Time lag analysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 2, 2016, pp. 1304~1312.
 - (5) J. Yoon, S. Joo, J. Kim, M. Lee, J. Lee and Y. Yoon, "Effects of convection time on the high harmonic combustion instability in a partially premixed combustor", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 36, No. 3, 2017, pp. 3753~3761.
 - (6) D. Kim, J. Lee, B. D. Quay, D. A. Santavicca, K. Kim and S. Srinivasan, "Effects of flame structure on the flame transfer function in a premixed gas turbine combustor", *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 132, No. 2, 2010, pp. 1~7.
 - (7) T. Sattelmayer, "Influence of the combustor aerodynamics on combustion instabilities from equivalence ratio fluctuations", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 125, No. 1, 2003, pp. 11~19.
 - (8) J. Kopitz, A. Huber, T. Sattelmayer and W. Polifke, "Thermoacoustic stability analysis of an annular combustion chamber with acoustic low order modeling and validation against experiment", *The American Society of Mechanical Engineers Turbo Expo*, 2005, GT2005-68797, pp. 583~593.
 - (9) J. Park, M. Yoon and D. Kim, "Development of thermoacoustic network model using transfer matrix method", *Journal of The Korean Society Combustion*, Vol. 24, No. 2, 2019, pp. 9~16.
 - (10) J. Yoon, M. Lee, S. Joo, J. Kim and Y. Yoon, "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, 2015, pp. 899~907.
 - (11) S. Kim, D. Kim and D. Cha, "Finite element analysis of self-excited instabilities in a lean premixed gas turbine combustor", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 120, 2018, pp. 350~360.
 - (12) M. Kim, J. Hwang, D. Kang, W. Lee, K. Min, J. Cho and H. Kim, "Development of gas turbine combustor for 300MWe-class gas turbine with 50% hydrogen co-firing", *61th KOSCO SYMPOSIUM*, 2021, pp. 193~194.
 - (13) J. Son and D. Kim, "Combustion instability modeling in a reverse-flow gas turbine combustor using a network model", *Journal of The Korean Society Combustion*, Vol. 26, No. 4, 2021, pp. 20~28.
 - (14) S. Kim and D. Kim, "Analysis of combustion instabilities in a 2-stage duct system using transfer functions", *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 26, No. 4, 2021, pp. 182~188.