

네트워크 모델을 사용한 역류형 가스터빈 연소기에서의 연소불안정 예측

손주찬* · 김대식*†

*강릉원주대학교 기계공학과

Combustion Instability Modeling in a Reverse-Flow Gas Turbine Combustor using a Network Model

Juchan Son* and Daesik Kim*†

*Department of Mechanical Engineering, Gangneung-Wonju National University, Korea

(Received 15 October 2021, Received in revised form 8 November 2021, Accepted 17 November 2021)

ABSTRACT

In this paper, combustion instability in a reverse-flow gas turbine combustor was analyzed using a 1D network model. Two different approaches of flame transfer functions were considered; one is a classical $n-\tau$ model and the other is a modified model considering the time delay distribution. As a result of constructing a network model by rearranging acoustic elements in the flow direction, the analysis results of frequency and mode distribution similar to the measurement were obtained. In addition, the feedback instability prediction results considering the time delay distribution have shown modeling results closer to the experiment compared to the classical $n-\tau$ model.

Key Words : 1D network model, Acoustic mode, Feedback instability analysis, Flame transfer function, Resonant frequency

기 호 설 명

Alphabets

A_{\pm} : Complex amplitude of acoustic wave
 c : Speed of sound
 k : Axial wave number
 n : Circumferential wave number
 M : Mach number
 \dot{Q} : Heat release rate
 T : Temperature
 x : Axial coordinate

Greeks

ρ : Density
 τ : Time delay
 $\Delta\tau$: Distribution of time delay
 ω_c : Cutoff frequency
 w : Complex angular frequency

1. 서 론

연소불안정이란 연소기 내부의 음향파(acoustic wave)가 유동의 속도 및 당량비 섭동을 생성하여 비정상 열 방출

섭동을 발생시키고 이러한 비정상 열 방출 섭동은 다시 음향파와 결합하여 상호피드백 작용으로 인해 연소실 내의 압력이 점차 증가하는 현상을 말한다. 연소불안정을 예측하는 방법의 하나인 LES(Large Eddy Simulation), RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes)와 같은 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하는 방법은 질량, 운동량, 에너지 보존방정식을 사용하여 음향장과 연소장을 결합하여 예측한다[1]. 하지만 이는 많은 시간과 계산 비용을 요구한다. 따라서 단순하면서도 높은 정확도를 확보하

†Corresponding Author, dkim@gwnu.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.

는 열음향 네트워크 모델(thermoacoustic network model)을 이용한 연소불안정 해석에 대한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다[2-5]. 네트워크 모델은 실제 연소 시스템을 단순화한 후, 음향요소로 나누어서 해당 요소에서의 지배방정식을 적용하여 계산한다.

그러나 이 모델링 접근법은 실제 복잡한 시스템에서 적용시 네트워크 요소화 및 형상의 단순화 과정에서 기인하는 적용의 한계 및 이에 대한 오차의 정량적 평가에 대한 고민을 수반하게 된다. 특히, 현대의 가스터빈은 제한된 연소 공간에서의 효율, 배출가스, 냉각, 진동 등의 다양한 인자에 대한 성능을 최적화하기 위하여 Fig. 1(a)에서와 같이 역류형 연소기를 채택하고 있다. 이 경우에 그림에서 보이듯이 연소기 중심축을 따라 동일한 x 좌표에 대하여 서로 다른 유동의 방향을 갖게 되고, 이 경우에 주어진 시스템을 전통적인 네트워크 모델링 접근법에 기반하여 1차원 음향 문제로 정의하기에는 어려움이 존재하게 된다. 이에 대한 대안으로써, Hubbard and Dowling[3]은 대상 시스템에서 관심 모드가 길이방향에 국한된다는 가정으로부터 Fig. 1(b)에서와 같이 실제 유동의 경로에 따라 음향 요소를 재배치하여 1차원 문제로 시스템을 수정하여 모델링하는 방법을 제안하였고, 실제 역방향 연소기의 실

험과 비교하여 합리적인 음향장 해석 결과를 도출하였다.

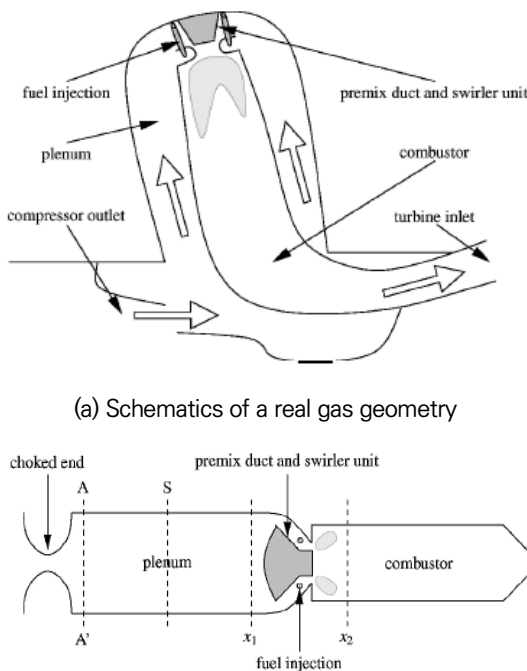
또한, 저자들은 최근에 이에 대한 기초 연구[6]로서, 역류형 구조를 갖는 연소기에 대하여 동일한 모델링 접근법을 활용하여 음향장 예측 결과를 도출하고, 이를 3차원 유한요소해석 결과와 비교한 바가 있다. 그러나 해당 연구에서는 화염섭동이 고려되지 않은 순수 음향장 해석 결과에 초점을 맞추다 보니, 실제 화염동특성과 연계되어 예측된 연소불안정의 주파수와 압력 섭동 모드 분포까지 확장하여 검증하지는 못하였다.

현재의 연구는 기존 저자들의 연구[6]를 확장하여 화염의 동특성과 연계한 네트워크 모델을 통해 불안정 특성 예측 결과를 도출하고, 이를 실험에서 예측된 주파수와 모드 분포의 비교를 통하여 본 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 열음향 모델에서 시스템의 불안정을 해석하기 위해 음향장과 결합하는 화염의 동적 특성을 화염전달함수(FTF, Flame Transfer Function)로 정의하여 해석을 진행하였고, 현재의 연구에서는 가장 기본적인 FTF 형태인 Crocco[7]의 $n-\tau$ 모델을 적용하였으며, 추가적으로 실제 화염의 공간적 분포를 고려한 $\Delta\tau$ 의 영향을 함께 검토하였다. 본 연구그룹의 현재 연구 단계에서는 실험적 또는 수치해석적인 방법에 의한 직접적인 FTF가 제공되기 전단계인 관계로, 이를 대신하여 예측된 화염의 기본 형상과 유동 속도로부터 τ 와 $\Delta\tau$ 를 정의하였고, FTF의 또다른 인자인 이득값(n)은 관심 범위를 지정하여 그 영향성을 평가하였다.

2. 해석 모델 및 방법

2.1 네트워크 모델에서의 지배방정식

본 연구에서의 네트워크 모델은 음향 파동방정식(Acoustic wave equation)을 지배방정식으로 하여 시스템의 연소불안정 형상을 예측한다. 대상 시스템의 해석을 위하여 좌표계는 원통 극좌표계(x, r, θ)를 사용하였다. 이때 연소불안정 주파수는 일반적으로 특성 길이에 지배적으로 나타난다. 따라서 길이방향(x)과 원주방향(θ)에 비해 특성 길이가 짧은 반경방향(r)은 해석에서 제외하였다. 상태량은 이상기체로 가정한 상태방정식($p = R_{gas} \rho T$)을 적용하였으며, 이때 열확산과 점성등의 효과는 무시하였다. 음향학적 해석에 적용되는 물성치는 평균 성분값($\bar{\cdot}$)과 섭동 성분값(\prime)의 합으로 나타낼 수 있다(예, 압력의 경우, $p = \bar{p}(x) + p'(x, \theta, t)$). 음향 파동방정식은 질량, 운동량, 에너지에 대한 보존방정식(Conservation equation)과 상태방정식(Equation of state)을 선형화하고 결합하여 유도된다. 이때 유도된 파동방정식은 아래와 같다[2,3,6].



(a) Schematics of a real gas geometry

(b) Relocation of acoustic module with backflow

Fig. 1. Example of relocation of acoustic module with backflow for network model[3].

$$\frac{1}{c^2} \frac{\overline{D}^2 p'}{Dt^2} - \nabla^2 p' = \frac{\gamma-1}{c^2} \frac{\overline{D}Q}{Dt} \quad (1)$$

음향장 해석을 위해 좌측 항의 비정상 열발생 섭동이 Q' 가 0인 경우 음향의 파동방정식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\overline{D}^2}{Dt^2} - \nabla^2 \right) p' = 0 \quad (2)$$

이로부터 음향장의 압력(p), 밀도(ρ), 축방향 속도(u), 원주방향 속도(w)의 섭동식을 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$p'(x, \theta, t) = \text{Re} [\hat{p}(x) e^{i(\omega t + n\theta)}] \quad (3)$$

$$\text{where } \hat{p}(x) = A_{\pm} e^{ik_{\pm}x}$$

$$\rho'(x, \theta, t) = \text{Re} [\hat{\rho}(x) e^{i(\omega t + n\theta)}] \quad (4)$$

$$\text{where } \hat{\rho}(x) = \frac{1}{c^2} A_{\pm} e^{ik_{\pm}x}$$

$$u'(x, \theta, t) = \text{Re} [\hat{u}(x) e^{i(\omega t + n\theta)}] \quad (5)$$

$$\text{where } \hat{u}(x) = -\frac{k_{\pm}}{\rho\alpha_{\pm}} A_{\pm} e^{ik_{\pm}x}$$

$$w'(x, \theta, t) = \text{Re} [\hat{w}(x) e^{i(\omega t + n\theta)}] \quad (6)$$

$$\text{where } \hat{w}(x, \theta, t) = -\frac{n}{\rho\alpha_{\pm}} A_{\pm} e^{ik_{\pm}x}$$

여기서 A 는 전달되는 음파의 크기를 나타내며, ω 는 복소주파수를, 상첨자($\hat{\cdot}$)는 Fourier 영역에서의 섭동량을 의미한다. 그리고 하첨자 \pm 는 음향장에서의 상류와 하류 방향을 의미하고, n 과 k 는 각각 원주방향 및 길이방향의 파수이다. 또한 \bar{c} 는 평균 음속이고, α_{\pm} 및 k_0, k_{\pm} 는 아래와 같다.

$$\alpha_{\pm} = \omega + \bar{u}k_{\pm} \quad (7)$$

$$k_0 = -\frac{\omega}{\bar{u}} \quad (8)$$

$$k_{\pm} = \frac{\bar{M}\omega \mp (\omega^2 - \omega_c^2)^{\frac{1}{2}}}{\bar{c}(1 - M^2)} \quad (9)$$

$$\omega_c = n\bar{c} \sqrt{1 - M^2} \quad (10)$$

이렇게 정의된 섭동 성분들은 네트워크 모델에 적용하기 위해 행렬 Ψ_1 과 λ 을 결합하여 Eq. 13으로 정의되고, 이때 λ 과 Ψ_1 은 각각 Eqs. 11과 12로 나타난다.

$$\lambda = (A_+ e^{ik_+x}, A_- e^{ik_-x}, 0, 0)^T \quad (11)$$

$$\Psi_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{c^2} & \frac{1}{c^2} & 0 & 0 \\ -\frac{k_+}{\rho\alpha_+} - \frac{k_-}{\rho\alpha_-} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{n}{\rho\alpha_+} - \frac{n}{\rho\alpha_-} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$(\hat{p}, \hat{\rho}, \hat{u}, \hat{w})^T = \Psi_1 \cdot \lambda \quad (13)$$

이들 물성치를 이용하여, 질량(m), 축방향 운동량(f_x), 원주방향 운동량(f_{θ}), 에너지(e)에 대한 관계식으로 나타내면 다음과 같다[2,3,6].

$$m = A\rho u \quad (14)$$

$$f_x = Ap + mu \quad (15)$$

$$f_{\theta} = mw \quad (16)$$

$$e = \frac{A\gamma\rho u}{\gamma-1} + \frac{m}{2}(u^2 + w^2) \quad (17)$$

이들 Eqs. 3-6에서 정의된 Fourier 변환된 섭동항에 대하여 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$(\hat{m}, \hat{f}_x, \hat{f}_{\theta}, \hat{e})^T = \Psi_2 \cdot (\hat{p}, \hat{\rho}, \hat{u}, \hat{w})^T \quad (18)$$

$$\Psi_2 = A \begin{pmatrix} 0 & \bar{u} & \bar{\rho} & 0 \\ 1 & \bar{u}^2 & 2\rho\bar{u} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho\bar{u} \\ \frac{\gamma\bar{u}}{\gamma-1} & \frac{\bar{u}^{-3}}{2} \left[\frac{\gamma\bar{p}}{\gamma-1} + \frac{3\rho\bar{u}^{-2}}{2} \right] & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

네트워크 모델은 임의 요소에서 다른 요소로 넘어가는 경계 조건에 대하여 위의 식들에서 정의한 상태량의 보존

법칙을 적용하게 된다. 대표적인 예로써 면적변화가 없는 직관형태의 연결에서는 모든 상태량이 그대로 보존되며, 반면에 임의의 면적변화가 있는 경우에는 면적비에 따라 운동량의 증가 또는 감소를 고려하며, 화염과 같이 특정위치에서 열발생 섭동이 존재하는 경우에는 에너지 보존식에서 추가적인 열-소스항(heat source term)을 고려하게 된다. 각각의 경우에 대한 세부적인 내용은 기존의 네트워크 모델 관련 참고문헌들[2,3,6]을 통하여 확인할 수 있다.

2.2 화염 모델

열음향 모델에서 연소가 고려될 경우, 열발생율의 존재에 의한 소스항(source term)을 고려하여야 한다 ($Q = \bar{Q} + Re(\hat{Q}(\omega)e^{i(\omega t + n\theta)})$). 이때 섭동 성분 \hat{Q} 은 화염전달함수(FTF)에 의해 정의될 수 있다. 본 해석에서 FTF는 Crocco에 의하여 처음 제시된 기본적인 $n - \tau$ 모델(본 연구에서 FTF₁)을 적용하였다.

$$FTF_1 = \frac{\hat{Q}/\bar{Q}}{\hat{u}/\bar{u}} = -n e^{-i\omega\tau} \quad (20)$$

이때 Q, u, n, ω, τ 는 각각 열발생량, 축방향 속도, FTF의 이득값, 각진동수 그리고 시간지연을 나타낸다.

열음향 모델링시 화염동특성 정보를 반영하기 위해서는 연소불안정이 예측된 동일한 조건(연소기 형상과 운전 조건 등)에서 정확한 화염전달함수를 실험 및 수치해석을 통하여 직접적으로 도출하여야 한다. 그러나, Yoon et al.[8]과 Kim et al.[9]의 Lab-scale 가스터빈 연소기에서 실험적 연구를 통하여 정교하게 예측된 화염이미지(즉, 화염 길이, L_{flame})와 유속(U)을 통하여도 시간지연(τ)을 도출할 수 있음을 확인하였고($\tau = L_{flame}/U$), 실제 많은 연구그룹[13-18]에서 실험 및 CFD를 통해 얻어진 화염의 길이와 유속의 정보를 통하여 얻어진 τ 를 이용하여 연소불안정 모델링을 진행한 바가 있다.

현재 연구에서도 불안정 해석을 위한 τ 를 실험적으로 예측된 화염이미지를 통하여 도출하였으며, 이때 FTF의 이득값(n)은 기존의 부분예혼합 시스템[1,2-5,8-14]에서의 일반적인 범위로 주어진 0.1~3.0 사이에서 변수로 적용하여 해석을 진행하였다. 또한, 화염의 공간적 분포를 고려하기 위해 Sattelmeyer[13]가 제시한 τ 의 분포를 나타내는 $\tau \pm \Delta\tau$ 모델을 적용하여, FTF₂로 정의한 후, FTF₁의 해석 결과와 비교 분석하였다.

$$FTF_2 = \frac{\hat{Q}/\bar{Q}}{\hat{u}/\bar{u}} = -n \frac{e^{-i\omega(\tau - \Delta\tau)} - e^{-i\omega(\tau + \Delta\tau)}}{2i\omega\Delta\tau} \quad (21)$$

3. 해석 대상 연소기 및 조건

3.1 해석 대상 연소기의 형상

본 연구에서의 해석 대상연소기는 한국기계연구원에 서 개발단계에 있는 실제 규모의 산업용가스터빈 싱글 노즐 연소기이다[6]. Fig. 2는 시스템의 전체 공기 유입 경로와 연소기와 노즐 및 라이너를 포함한 전체 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 전체 공기 유량은 연소실 후단에 위치한 공기 입구 통로(4th chamber)를 통하여 유입되고, 연소실 라이너를 통과한다. 이 때, 연소실 라이너는 연소실을 둘러싸고 있으며 주유동 흐름 방향과는 반대의 유동을 가지면서 연소실 냉각을 담당하고, 노즐이 위치한 플레넘(plenum)으로 유입된다. 연소실은 화염가시화를 위한 석영(quartz)과 강철(steel) 연소기 부분으로 구분된다. 특

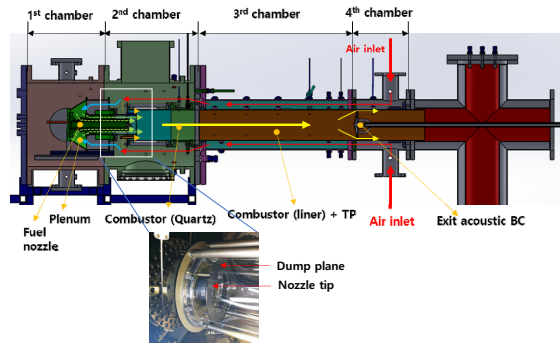
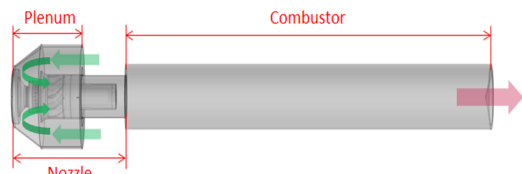
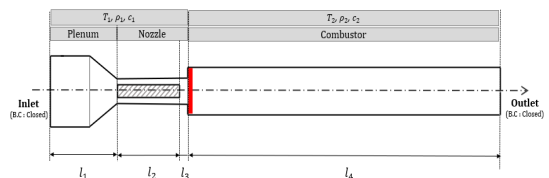


Fig. 2. Schematic diagram of the overall combustion system including flow direction and enlargement of nozzle tip and quartz liner.



(a) Acoustic analysis area of the entire system



(b) Relocated acoustic modules for network model

Fig. 3. Acoustic analysis region of the system and its reorganization for network model.

히 그림의 아래 사진에 나타나듯이, 본 연소기의 주요 특징은 노즐 팁과 덤프면이 동일한 축 방향 길이에 위치하지 않고, 노즐 팁이 덤프면의 위치로부터 52 mm만큼 플레넘 방향으로 후퇴(recess)하여 있어서, 화염면의 생성 위치(즉, 노즐 팁)가 덤프면 상류에 존재할 수 있다(Fig. 4의 화염 이미지 참고). 따라서 노즐팁에서의 화염 부착 영역을 가시화하기 위하여, 노즐팁 부분이 가시화 영역에 포함될 수 있도록 노즐 팁 상류까지 석영 실린더를 적용하였다.

반면 Fig. 3은 Fig. 2의 전체 시스템 중에서, 본 연구에서 수행된 음향장 및 연소불안정 해석을 위한 관심 영역만을 도식화한 것이다. 전술하였듯이, 유입된 공기는 연소실 라이너를 통하여 광계측을 위하여 필요한 매우 넓은 부피를 갖는 석영 연소실 외부로 거쳐서 매우 좁은 개방 면적을 갖는 플레넘을 통하여 노즐과 연소실 내부로 흐르게 된다. 따라서, 이 경우에 플레넘 입구에서 음향학적으로 닫힌 경계 조건을 부여하여, Fig. 2에서 보이는 공기 입구, 라이너와 석영 연소실 외부 공간은 배제하고, 플레넘 입구부터 연소실 내부 공간과 후단의 플러그까지를 해석대상으로 선정하였다. 이를 나타낸 것이 Fig. 3(a)로써, 열음향 해석 관점에서, 플레넘(plenum) 입구에서 공기가 유입되고(그림의 방향에서 우측에서 좌측으로), 플레넘 내부에서 유동의 방향이 반전되어 노즐의 스웰러에서 연료와 혼합된 후, 연소실로 흐르게 된다(그림에서좌측에서 우측방향). Fig. 3(b)에서 보이듯이 이러한 시스템을 네트워크 모델로 구현하기 위하여, 유동의 흐름의 순서에 따라 플레넘의 역방향 유동 거리에 해당하는 영역을 노즐 입구에 배치하여 본 연구의 관심 모드인 길이 방향의 음향적 특성 길이를 동일하게 유지하였다. 또한, Fig. 3(a)와 같이 플레넘의 일부가 경사면으로 구성되어 있는데, 이를 네트워크 모델에 반영하기 위하여 Bloxsidge 등[4]의 연구에서와 같이 경사면을 단면적이 점진적으로 감소하는 다단 덕트로 묘사하였다.

Table 1 Operating conditions

Parameters	Notation	Value
Temperature	T_1	719 K
	T_2	1788 K
Pressure	p_1	1.5 bar
	p_2	
Density	ρ_1	0.730 kg/m ³
	ρ_2	0.287 kg/m ³
Speed of sound	c_1	523.9 m/s
	c_2	800.0 m/s

3.2 해석조건

본 해석에서 선정한 운전 조건은 공기유량 0.3424 kg/s, 당량비 0.484, 연료로는 순수 메탄(CH₄), 입구온도와 압력은 719K, 1.5bar이며, 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.

또한, 연소실 출구는 플러그(plug)에 의하여 음향학적으로 닫힌 조건이 형성되었으며, 플레넘 입구 역시 전체 단면적 대비, 매우 좁은 개방 면적(19%)으로 인하여 음향학적 닫힌 조건($u' = 0$, reflection coefficient : 1)을 부여하였다.

3.3 화염전달함수 매개변수 조건

화염전달함수는 화염 동특성의 절대값 인덱스(index)인 n , 그리고 시간지연 τ 에 의해 정의된다. 이때 τ 는 2.2 절에서 설명한 바와 같이, 연료 인젝터 출구(노즐 입구에서 33.5mm)로부터 화염면 중심까지의 거리와 각 구간의 평균 유속에 의해 정의하였고, 구체적인 내용은 Fig. 4와 같다. 본 논문에서는 한국기계연구원에서 해당 운전 조건에서의 실험을 통해 얻어진 OH* 자발광 이미지로부터 화염 영역의 중심(center of mass)을 화염 길이로 정의하였

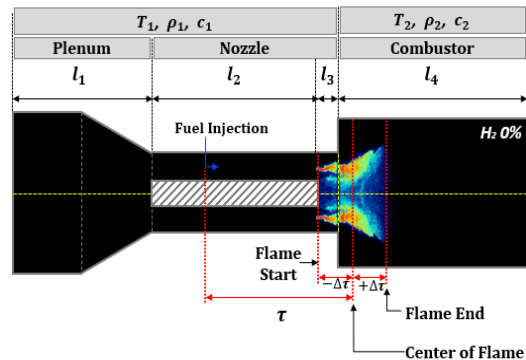


Fig. 4. Definition of τ and $\Delta\tau$ from the measured flame structure.

Table 2. FTF Parameters value

Parameters	Notation	Value
Time delay	τ	6.2 ms
Distribution of time delay	$\pm \Delta\tau$	2.4 ms
Gain	n	0.1 ~ 3.0

다. 또한 그림의 화염 형상에서 보이듯이 네트워크 모델에서 일반적으로 가정하는 “얇은 화염면(thin flame)”이 아닌 공간상으로 넓은 분포를 보이고 있고, 이는 열유량 모델링시 시간지연이 임의의 고정된 값(τ)보다는 시간지연 분포($\pm \Delta\tau$)의 형태가 더욱 적절할 수 있음을 의미한다 [11-14]. 특히 본 연소기 구조와 운전조건에서는 화염의 시작점이 연소실 덤프면이 아닌 노즐 끝단과 일치하였고, 이로부터 화염 중심으로부터 노즐 끝단까지의 거리를 통하여 $-\Delta\tau$ 를 정의하였고, 동일한 크기의 $+\Delta\tau$ 를 통하여 화염의 후단을 정의하였다.

본 연구에서 또다른 FTF의 주요 변수인 이득값(n)은 일반적인 Lab-scale 가스터빈 연소기에서 실험적으로 도출된 범위인 0.1~3.0에서 영향성 평가를 수행하였으며, Table 2는 이 내용들을 요약한 것이다.

4. 해석결과

4.1 FTF₁ 적용 결과

Fig. 5는 시간 지연분포를 고려하지 않은 전통적인 $n-\tau$ 모델인 FTF₁을 적용시에 대표적인 3가지 모드의 주파수와 성장률을 나타낸 것이다. 우선 τ 는 Table 2와 같으며, 현재 결과에서 n 은 편의상 1로 고정하여 해석을 진행하였다. 또한, 본 연구에서 모델링 결과의 비교를 위하여 많은 불안정 연구를 통하여 해석 타당도가 검증된 OSCILOS [15]의 결과를 함께 나타내었다. 동일 조건의 실험결과에서는 115Hz의 단일 불안정 모드가 계측되었는데 그림에서는 세로 점선으로 표시하였다.

한편 Fig. 6은 Fig. 5에서 나타난 3가지 모드에 대하여 노즐과 연소실 길이 방향에 대하여 동압 분포를 나타내었고, 마찬가지로 OSCILOS 및 한국 기계연구원에서 수행된 동

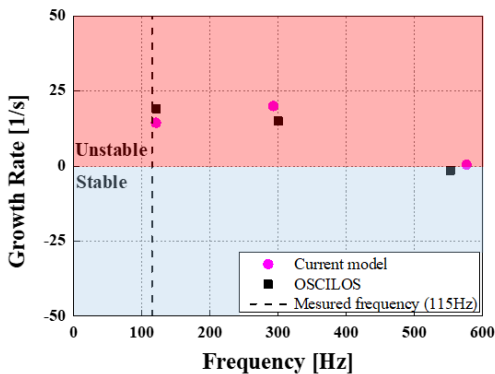
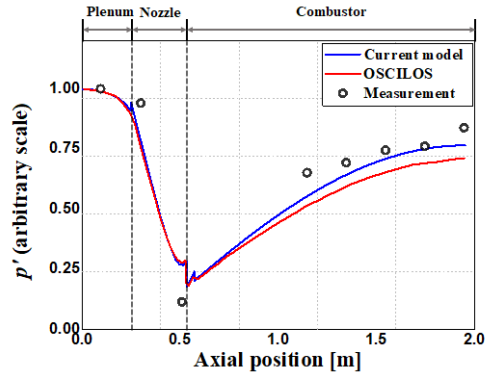
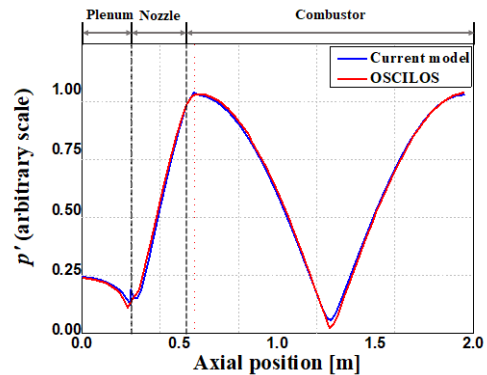


Fig. 5. Frequency and growth rates of the resonant modes.

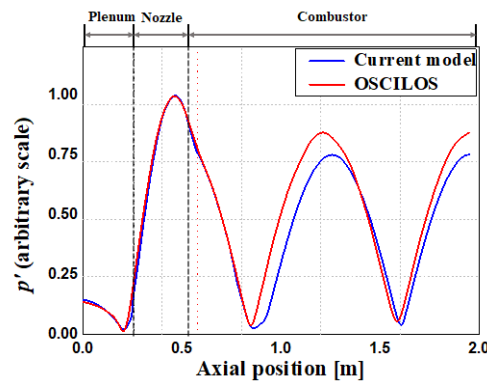
압 데이터 실험결과와 비교하였다. 그림에서 보이듯이, 본 결과의 3가지 모드는 모두 노즐과 연소실에 걸쳐 분포하는 길이 방향 모드인 것으로 확인되었고, 해석 결과상에서 120 Hz, 293 Hz, 568 Hz는 각각 길이 방향의 첫 번째



(a) 1L (First mode) : 120 Hz



(b) 2L (Second mode) : 293 Hz



(c) 3L (Third mode) : 563 Hz

Fig. 6. Comparison of axial mode shape distribution between the network model and OSCILOS calculation result.

(1L), 두 번째(2L), 세 번째(3L)의 조화(harmonic) 주파수 임을 알 수 있다. 또한, 해석상으로는 1L 및 2L에서는 성장률이 0보다 큰, 즉 불안정한 주파수이고, 3L에서는 0 근처인 과도기적 상태인 것으로 나타나나, 전술하였듯이 실험 결과에서는 1L(115 Hz)만이 불안정한 것으로 나타났고, 이러한 차이는 n (1로 고정)과 $\Delta\tau$ (현재 결과에서는 미반영)의 영향일 것으로 판단된다. 그러나, 현재 연구에서 적용한 네트워크 모델 및 해석 접근으로부터 얻어진 기본적인 공진 모드의 예측 결과와 모드 분포의 해석 결과는 OSCILOS와 실험 결과와의 비교로부터 타당성을 확보하였다고 판단되었다.

4.2 FTF₂ 적용 결과

Fig. 7은 Fig. 5와 동일 조건에서 시간지연분포를 고려하지 않은 FTF₁ 모델과 시간지연 분포가 반영된 FTF₂ 모델을 사용하였을 경우 전체 시스템 불안정 특성을 비교한 결과이다. 그림에서 보이듯이 시간지연 분포는 본 연소기의

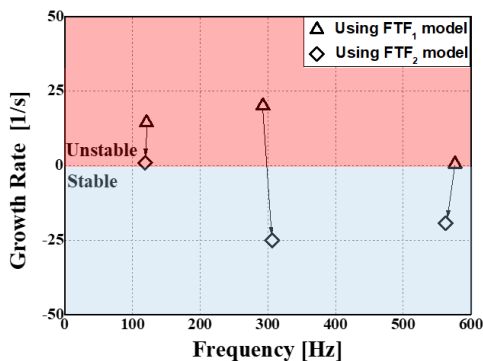


Fig. 7. Comparison of instability modeling results between FTF₁ model with FTF₂ model.

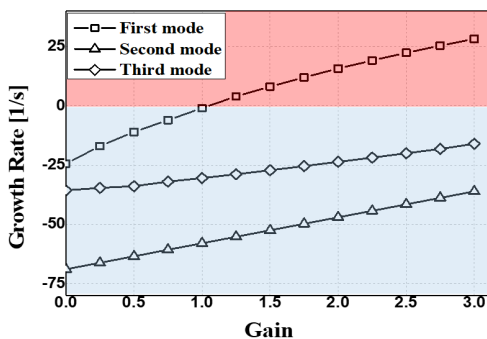


Fig. 8. Effects of the gain of flame transfer function on the change in the growth rate (using FTF₂ model).

관심 주파수에서 모두 댐핑 역할(즉, 성장률을 감소시키는 역할)을 하는 것으로 나타났다. 이는 시간지연분포에 대한 이전 연구들의 일반적인 연구 결과들[11-14]과 동일하였다. 특히 본 연구 결과에서 상대적으로 고주파수인 2L과 3L에서 $\Delta\tau$ 의 고려에 따른 댐핑 효과가 두드러졌으며, 결과로서 FTF₂ 모델 적용시에 불안정한 모드는 1L만이 존재하는 것으로 나타났다. 그러나 현재의 연구에서 분석한 $\Delta\tau$ 의 영향은 고정된 화염 형상에 대해서 도출된 값을 사용한 것으로서, 연료 조성 또는 운전 조건의 변화로 인하여 화염의 형상이 변경될 경우, $\Delta\tau$ 에 따른 불안정 특성도 영향을 받을 수 있다. 이에 대한 추가적인 연구는 계속된 다양한 조건에서의 화염 형상을 토대로 향후 연구를 통하여 보고될 예정이다.

Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 τ 와 $\Delta\tau$ 를 적용하되, n 을 고정 값이 아닌 0.1~3.0으로 변화시켰을 때, 각 모드에 대하여 성장률의 영향을 도시한 것이다. 결과에서 나타나듯이, 세 가지 모드에 대하여 모두 n 의 증가는 성장률의 증가를 초래하였다. 전술하였듯이, 본 해석조건과 동일한 연료 및 운전 조건의 실험에서는 115Hz(1L)의 불안정만이 계속되고, 2L과 3L의 불안정은 나타나지 않았다. 주목할만한 점은 이번 동일 조건의 해석결과에서도 2L과 3L에서는 현재 검토된 n 의 범위에서 모두 안정한 것으로 나타났고, 1L만이 n 의 값에 따라 안정 및 불안정 영역이 존재할 수 있었다.

5. 결론 및 향후계획

본 논문에서는 역류형 구조를 가지는 산업용 가스터빈 싱글노즐 연소기에서 화염의 동특성과 연계한 네트워크 모델을 통해 연소기에서의 피드백 불안정을 해석했다. 사용된 화염전달함수의 매개변수로서 실제 실험에서 측정된 화염 이미지의 후처리 과정을 통해 시간지연평균값(τ)과 이의 분포($\Delta\tau$)를 도출하였으며, $\Delta\tau$ 를 고려한 모델(FTF₂)과 그렇지 않은 전통적인 $n-\tau$ 모델(FTF₁)로 두가지 화염전달함수를 사용해 해석을 진행했다.

먼저, FTF₁ 모델을 사용하여, 본 역류형 연소기의 1차원 네트워크 모델을 적용을 위한 네트워크 요소의 재배치를 통한 해석 결과는 실험결과와 비교로부터 유사한 불안정 주파수 및 모드 분포를 예측하는 것으로 나타났고, 또한 개방형 오픈 열음향 코드인 OSCILOS의 해석 결과와도 동일하였다. 또한, $\Delta\tau$ 를 고려한 FTF₂를 적용시에 시간지연분포는 본 연소기에서 나타난 공진 모드에 대하여 댐핑 역할을 하는 것으로 나타났다. 화염전달함수의 이득값인 n 에 대하여 영향성을 평가한 결과, n 의 증가는 공진 모드

의 성장률의 증가를 초래하였다. 그러나 실험에서 불안정 영역으로 예측된 모드는 본 해석 결과에서 n 의 증가에 따라 안정 영역에서 불안정 영역으로 이동한 반면에, 실험에서 불안정 주파수로 예측되지 않은 모드는 본 해석 조건에서의 n 의 범위에서 성장률의 증가에도 불구하고, 모두 안정한 영역에 존재하였다.

현재의 연구에서는 정상 조건에서 예측된 화염 이미지로부터 도출된 τ 및 $\Delta\tau$ 를 사용하여 n 의 일반적인 범위를 가정한 후에 피드백 불안정 모델링을 실시하였다. 그러나, 실제 불안정 조건하에서 화염의 구조는 정상상태의 화염과 다를 수 있고, 또한 현재는 화염 중심부까지의 1차원적인 축방향 거리로부터 평균 τ 값을 도출하였는데, 연소실 반경 방향으로의 화염 분포 또는 지연 시간 분포 역시 고려의 대상이 될 수 있다. 이러한 불확실성에 대한 정량적 오차를 제시하기 위하여, 현재 본 연구그룹에서는 화염전달 함수 예측을 위한 실험 장치를 구축 중에 있으며, 향후 연구에서는 예측된 화염전달함수를 바탕으로 불안정 모델링을 실시하여 현재의 연구 결과에 대한 타당성을 추가적으로 검증할 계획이다.

후 기

본 연구는 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20206710100030)을 받아 수행된 연구 결과입니다.

References

[1] T.C. Lieuwen, V. Yang, Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines, AIAA 210, 2005.

[2] S.R. Stow, A.P. Dowling, Thermoacoustic Oscillations in an Annular Combustor, The American Society of Mechanical Engineers TURBO EXPO, 2001, June 4th-7th, 2001.

[3] S. Hubbard, A.P. Dowling, Acoustic Instabilities in Premix Burners, 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, June 2nd-4th, 2001.

[4] G. Bloxsidge, A.P. Dowling, P.J. Langhorne, Reheat buzz: an acoustically coupled combustion instability. Part 2. Theory, J. Fluid Mech, 193(1) (1988) 445-473.

[5] J. Park, M. Yoon, D. Kim, Development of thermoacoustic network model using transfer matrix method, J. Korean Soc. Combust, 24(2) (2019) 9-16.

[6] J. Son, S. Hong, J. Hwang, M. Kim, D. Kim, Acoustic modeling in a gas turbine combustor with backflow using a network approach, J. Korean Soc.

Prop. Eng., 25(126) (2021) 18-26.

[7] L. Crocco, Aspects of combustion stability in liquid propellant rocket motors Part I: Fundamentals, low frequency instability with monopropellants, AIAA, 6 (1951) 163-178.

[8] J. Yoon, High Harmonic Combustion Instability in a Fuel Flexible Partially Premixed Combustor, Seoul National University 2017.

[9] D. Kim, J.G. Lee, B. Quay, D. Santavicca, K. Kim, Effect of flame structure on the flame transfer function in a premixed gas turbine combustor, J. Eng. Gas Turb Power, 132 (2008) 757-765.

[10] G. Campa, S.M. Camporeale, Prediction of the thermoacoustic combustion instabilities in practical annular combustors, J. Eng. Gas Turb Power, 136(9) (2014) 1489-1499.

[11] K. Kim, J. Lee, D. Quay and D. Santavicca, Spatially distributed flame transfer functions for predicting combustion dynamics in lean premixed gas turbine combustor, Combustion and Flame, 157(9) (2010) 1718-1730.

[12] S. Kim, D. Kim, D. Cha, Finite element analysis of self-excited instabilities in a lean premixed gas turbine combustor, Int. J. Heat Mass Transfer, 120 (2018) 350-360.

[13] T. Sattelmayer, Influence of the combustor aerodynamics on combustion instabilities from equivalence ratio fluctuations, J. Eng. Gas Turb Power, 125(1) (2003) 11-19.

[14] J. Kopitz, A. Huber, T. Sattelmayer, 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, June 6th-9th, 583-593.

[15] <http://www.oscillos.com/>

저자정보



손주찬

강릉원주대학교 기계공학과 석사과정이며, 관심분야는 가스터빈 연소기의 연소불안정 네트워크 모델링이다.



김대식

강릉원주대학교 기계공학과 교수이며, 관심분야는 연소불안정 모델링 및 제어, 가스터빈 연소기 설계, 수소활용 발전기술이다.