

네트워크 모델링 기법을 이용한 환형 가스터빈 연소기(GT24) 에서의 음향장 해석

장재우* · 노현구** · 김대식*†

Acoustic Analysis in an Annular Gas Turbine Combustor (GT24) Network Modeling Approach

Jaewoo Jang, Hyungu Roh, and Daesik Kim

Key Words: Annular combustor(환형 연소기), Combustion instability(연소불안정), Network model(네트워크 모델), Acoustic analysis(음향 해석)

Abstract

In this research, a network model was developed to predict combustion instability in an annular gas turbine combustor (GT24) for power generation. The model consisted of various acoustic elements such as several ducts and area changes which could represent a real combustor with a complex geometry, applied mass, momentum, and energy equations to each element. In addition, a one-dimensional network model through a cylindrical coordinate system has been proposed to predict various acoustic modes. As a result of the analysis, the key resonant frequencies such as longitudinal, circumferential, and complex modes were derived from the EV combustor of GT24, and the reliability of the current model was verified through comparison with the 3D Helmholtz solver.

기호설명

p : 압력
 ρ : 밀도
 u : 속도
 t : 시간
 x : 축방향
 r : 반경방향
 k : 축방향 파수

n : 원주방향 파수
 c : 음속
 T : 온도
 β : 면적비
 \pm : 상류와 하류
 q : 열방출
 $-$: 평균값

1. 서 론

최근 전세계적으로 발전 분야의 탄소중립을 실현하기 위한 방안으로 기존의 천연가스 가스터빈 발전을 수소 연료로 전환하기 위한 움직임이 매우 활발하다⁽¹⁻³⁾. 이는 천연가스 발전 인프라와 비용을 그대로 활용하면서 신규 투자 비용을 최소화할 수 있을 뿐만 아니라, 수소 경

(Received: 12 Jun 2023, Received in revised form: 31 Jul 2023, Accepted: 1 Aug 2023)

*강릉원주대학교 기계공학과

**인덕대학교 기계자동차학과

†책임저자, 회원

E-mail : dskim@gwnu.ac.kr

TEL : (033)760-8728 FAX : (033)760-8721

제로의 전환에 기여할 수 있다는 측면에서 국내에서도 가스터빈 제작사와 발전사 및 관련 연구 기관에서도 해당 기술 개발에 박차를 가하고 있다.

기존 천연가스를 수소로 전환하기 위한 가스터빈 개발과 운전시, 압축기, 터빈, 성능, 제어, 연료공급 시스템 등 많은 가스터빈 부품과 전체 통합 기술 개발이 필수적이나, 이 중에서도 천연가스와 매우 다른 수소의 연소 특성으로 인하여 수소 혼소와 전소를 안전하게 운영할 수 있는 연소기술 개발이 핵심 과제로 여겨지고 있다.

이에 대한 최근의 기술고찰 논문들^(2,3)에 따르면, 수소의 빠른 화염속도에 따른 역화(flashback) 문제와 천연가스 대비 수소의 높은 화염온도로 인한 NOx 증가 등의 문제가 해결되어야 하며, 예혼합 연소기술 적용시 대두되는 연소불안정(combustion instability)에 대한 개발 연소기의 데이터베이스가 사전에 예측되고, 이를 회피하기 위한 해법이 제시되어야 한다.

특히 연소불안정 측면에서, 기존의 천연가스와 매우 다른 수소의 진동 특성이 보고되고 있는데, 대부분의 관련 연구⁽⁴⁻⁶⁾에서는 수소 혼소와 전소시 연소진동이 발생하는 주파수 대역이 크게 변경된다고 한다. 따라서, 기존 천연가스 운전시 연소진동 측면에서 최적화된 음향학적 댐핑 메커니즘과, 운전 제어 전략이 수소 연소로 전환될 경우 변경이 불가피하므로, 이에 대한 사전 분석이 요구된다.

2022년 한국중부발전(주)과 한국기계연구원에서는 공동으로 보령복합발전소에 설치된 150 MW 급 가스터빈(모델: GT24(Alstom))을 수소 혼소로 전환하는 기술 개발에 착수하였다. 성공적인 연료전환을 달성하기 위해서는 수소 혼소시 발생 가능한 연소불안정 조건과 주파수 대역에 대한 사전 모델링 기술 개발이 필수적이다. 그러나 대상 엔진은 일반적인 발전용 대용량 가스터빈의 캔(CAN) 방식이 아닌 환형 연소기를 채택하고 있어서, 길이 방향뿐만 아니라 다양한 음향 모드를 예측할 수 있는 해석 기술 개발이 요구된다⁽⁷⁾.

본 연구에서는 GT24의 수소 혼소 기술 개발을 위한 초기 결과물로서, 우선 환형 연소기의 다양한 음향모드를 해석 가능한 예측모델을 개발하였다. 이를 통하여 대상 시스템의 연소진동 발생 가능 주파수 대역을 도출하였고, 이를 3D 상용코드의 결과와 비교하여 본 연구에서 개발된 음향 모델의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

2. 대상 연소기 및 해석 모델

2.1 GT24 가스터빈 및 EV 연소기

개발 대상 엔진이 GT24 (Alstom, 현 GE)는 재열(reheat) 방식의 150 MW급 가스터빈으로써, 1단연 소기(EV, EnVironmental)와 고압터빈 및 2단 연소기(SEV, Sequential EV)와 저압터빈으로 구성된다. Fig. 1은 GT24 가스터빈의 전체 구성도를 보여준다. 본 개발 과제의 1단계는 EV 연소기의 수소 혼소 적용 가능성을 검토하는 것으로서, 현재의 연구에서는 EV버너의 입구와 연소기 출구까지를 해석 대상으로 선정하였다.

Figure 2는 해석 대상인 EV 버너(노즐)와 연소기의 3D 형상 및 내부 단면에 대한 도식도를 나타낸 것이다. EV버너는 측면의 입구 공기슬릿(air slit)을 통하여 강한 스웰윙동을 형성하며 “Vortex breakdown”을 통하여 화염 안정화 메커니즘을 채택하고 있다. 총 30개의 환형 방향으로 균등하게 배분된 EV 버너를 통하여 유입된 혼합기가 환형 연소기로 흘러 들어가서 연소실 출구의 고압 터빈으로 연소가스가 배출되는 구조를 가지고 있다. EV버너의 세부 구조와 화염 안정화 방식은 관련 이전 논문들^(8,9)에서 자세하게 기술되어 있다.

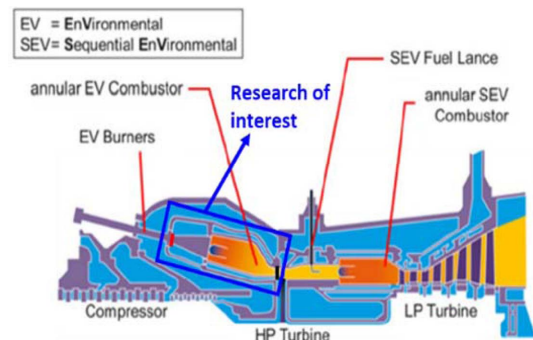
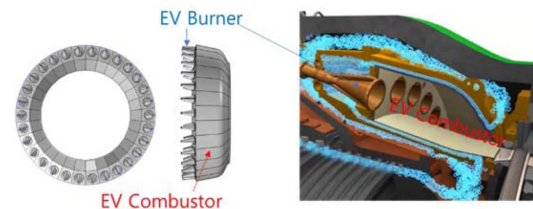


Fig. 1 Schematics of GT24 (Source: GE website)



(a) 3D schematic

(b) Sectional view

Fig. 2 EV burner and combustor

2.2 환형 연소기 해석을 위한 지배방정식

기존 저자들의 가스터빈에서의 음향장 및 연소 불안정 해석을 위한 연구들^(10,11)은 길이 방향의 모델 개발이 주를 이루어 왔다. 그러나 전술하였다시피, 본 연구의 해석대상인 EV 연소기는 환형 연소기 시스템으로써, 길이 방향, 원주 방향 및 이들의 복합 모드 등 다양한 음향파의 해석이 가능한 모델 개발이 필요하다⁽¹²⁾.

따라서 직교 좌표계가 아닌 원통형 좌표계(x, r, θ)를 지배방정식에 적용하였다. 단, 본 해석에서는 원주 및 길이에 비하여 매우 짧은 반경 방향의 특성을 고려하여 “r” 방향의 성분은 무시하였다. 또한, 유동의 점성 효과는 고려되지 않았으며, 연소 전후의 모든 유체는 이상기체로 가정하였다⁽¹³⁾.

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

상기 가정으로부터 출발하여 식 (1)과 같은 방정 식을 적용하였으며, 단 현재의 연구에서는 열섭동을 고려하지 않은 음향장 해석만을 대상으로 하였기 때문에 식 오른쪽 항의 q' 은 0으로 두고 해석을 진행하였다. 환형 연소기의 음향장 해석을 위한 세부 지배방정식과 모델 개발을 위한 유도과정 등을 위하여 Dowling과 Stow⁽¹³⁾이 제시한 모델링 기법을 적용하였으며, 현재 논문에서는 일부만을 요약하였고, 세부 내용은 참고문헌에 자세하게 기술 되어있다.

먼저 라플라스 변환(Laplace transformed) 형태의 압력(\hat{p}), 밀도($\hat{\rho}$), 축방향 속도(\hat{u}), 원주방향 속도($\hat{\omega}$)는 원통 좌표계에서 식 (2)~(5)에서 보이는 것과 같이 표현 될 수 있다.

$$\hat{p} = A \pm e^{ik_{\pm}x} \quad (2)$$

$$\hat{\rho} = \frac{1}{\bar{\rho}} A \pm e^{ik_{\pm}x} \quad (3)$$

$$\hat{u} = -\frac{k_{\pm}}{\bar{\rho} \alpha_{\pm}} A \pm e^{ik_{\pm}x} \quad (4)$$

$$\hat{\omega} = -\frac{n}{R \bar{\rho} \alpha_{\pm}} A \pm e^{ik_{\pm}x} \quad (5)$$

여기서 A 는 음파의 크기를 나타내며, 하첨자 \pm 는 상류/하류 방향, k 와 n 은 각각 축방향 파수(wave number)와 원주방향 파수를, \bar{c} 는 평균 음속을 나타내며, $\alpha_{\pm}, k_0, j_{\pm}, \omega_c$ 는 아래와 같다.

$$\alpha_{\pm} = \omega + \bar{u}k_{\pm} \quad (6)$$

$$k_0 = -\frac{\omega}{\bar{u}} \quad (7)$$

$$k_{\pm} = \frac{\bar{M} \omega \mp (\omega^2 - \omega_c^2)^{1/2}}{\bar{c}(1 - \bar{M}^2)} \quad (8)$$

$$\omega_c = \frac{n \bar{c}}{R} \sqrt{1 - \bar{M}^2}, \quad M : \text{Mach number} \quad (9)$$

이로부터 각 변수들의 섭동은 다음과 같은 특성 행렬 F 와 W 를 이용하여 행렬식으로 표현이 가능하다.

$$(\hat{p}, \hat{\rho}, \hat{u}, \hat{\omega})^T = F \cdot W(x) \quad (10)$$

$$F = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_{+}}{\bar{\rho} \alpha_{+}} & -\frac{k_{-}}{\bar{\rho} \alpha_{-}} & 0 & \frac{n \bar{u}}{\bar{\rho} \bar{c}^2} \\ \frac{1}{\bar{c}^2} & \frac{1}{\bar{c}^2} & -\frac{1}{\bar{c}^2} & 0 \\ -\frac{n}{R \bar{\rho} \alpha_{+}} & -\frac{n}{R \bar{\rho} \alpha_{-}} & 0 & \frac{k_0 R}{\bar{\rho} \bar{c}} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$W(x) = (A_{+} e^{ik_{+}x}, A_{-} e^{ik_{-}x}, 0, 0)^T \quad (12)$$

여기서 임의의 축방향 위치 x_0 로부터 길이가 x_1 만큼 이동시의 전파행렬식은 다음과 같다.

$$W(x_0 + x_1) = P(x_1) W(x_0) \quad (13)$$

$$P(x_1) = \begin{pmatrix} e^{ik_{+}x_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{ik_{-}x_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{ik_0 x_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{ik_0 x_1} \end{pmatrix} \quad (14)$$

상기와 같이 정의된 섭동항들을 질량유량 ($\dot{m} = A \rho u$), 축방향 운동량($f_x = A p + \dot{m} u$), 원주방향 운동량($f_{\theta} = \dot{m} \omega$)과 에너지 ($e = \frac{A \gamma p u}{\gamma - 1} + \frac{\dot{m}}{2} (u^2 + \omega^2)$)의 정의로부터 섭동 성분에 대한 라플라스 변환을 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$(\hat{m}_x, \hat{f}_x, \hat{f}_{\theta}, \hat{e})^T = G \cdot (\hat{p}, \hat{\rho}, \hat{u}, \hat{\omega})^T \quad (15)$$

where,

$$G = \begin{pmatrix} 0 & \bar{\rho} & \bar{u} & 0 \\ 1 & 2\bar{\rho}\bar{u} & \bar{u}^2 & 0 \\ 0 & 0 & e^{ik_0x_1} & R\bar{\rho}\bar{u} \\ n\bar{u} & n\bar{p} + \frac{3\bar{p}\bar{u}}{2} & \frac{\bar{\mu}^3}{2} & 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

2.3 대상 시스템의 네트워크 모델 구현

Figure 3은 Fig. 2에서 설명한 실제 대상 시스템을 네트워크 모델로 구현하기 위하여 간략화한 형상을 나타낸 것이다. EV 버너와 연소기는 음향 입구, 직선 덕트, 경사면 덕트, 유로의 단면적 변화, 음향 출구 등의 다양한 음향 요소의 결합을 통하여 묘사될 수 있다⁽¹³⁾. 특히 연소기 및 버너의 경사면은 여러 개의 면적변화로 표현을 하였다⁽¹⁴⁾. 또한 30개의 버너로부터 1개의 연소실로 합쳐 지는 구간에서의 Jump condition은 식 (17)로부터 면적 변화와 유로 병합을 반영하여 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{pmatrix} \hat{m}_2^n \\ \hat{f}_{x2}^n \\ \hat{f}_{\theta 2}^n \\ \hat{e}_2^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{30} & 0 & 0 & 0 \\ E^* & F^* & 0 & G^* \\ 0 & 0 & \frac{1}{30} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{30} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{m}_1^n \\ \hat{f}_{x1}^n \\ \hat{f}_{\theta 1}^n \\ \hat{e}_1^n \end{pmatrix} \quad (17)$$

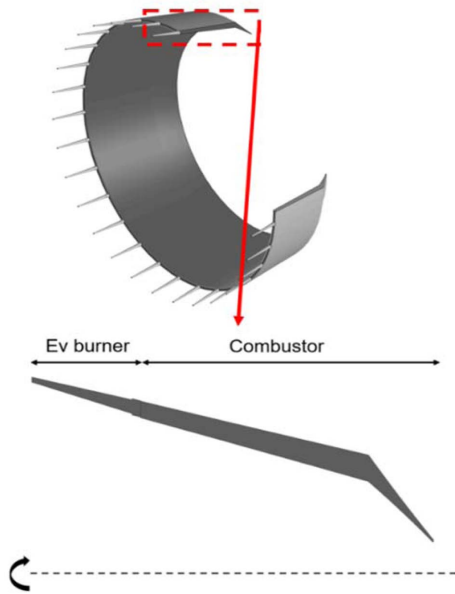


Fig. 3 Geometrical simplification of target system for 1D network model

Table 1. Gas properties

Location	EV burner	Combustor
Pressure	25.9[Bar]	
Temperature	815.15[K]	1444[K]
Density	11.03[kg/m ³]	6.24[kg/m ³]
Sound speed	572.3[m/s]	761.7[m/s]

$$E^* = \left[\frac{\gamma_1 + \frac{1}{2}M_1^2(\gamma_1 - 1)}{M_1^2 - \gamma_1} \right] u_1(30\beta - 1) \quad (18)$$

$$F^* = \left[1 - \frac{\gamma_1 M_1^2(\gamma_1 - 1)}{M_1^2 - \gamma_1} \right] (30\beta - 1) \quad (19)$$

$$G^* = \left[\frac{M_1^2(\gamma_1 - 1)}{M_1^2 - \gamma_1} \right] \frac{1}{\mu_1}(30\beta - 1) \quad (20)$$

2.4 해석 조건

Table 1은 해석에 사용된 기체의 물성치를 정리 한 것이다. EV버너와 연소실에서의 물성치는 연소기의 Full 부하 운전 조건을 그대로 적용하였다.

해석 대상의 입출구 음향 경계 조건으로는 버너 입출구에서의 전체 단면적 대비 매우 좁은 유로 개방 면적을 고려하여(버너 입구와 연소실 출구에서의 blockage ratio는 각각 85%와 78%이므로, 모두 음향학적 단힘(acoustically closed) 경계 조건을 부여하였다.

또한, 개발된 네트워크 모델의 검증을 위하여 상용 3D Helmholtz solver인 COMSOL Multi-physics가 사용되었고, 이 때의 해석은 동일한 가스 물성치에서 실제 EV버너와 연소실 형상이 그대로 적용되었다.

3. 해석 결과 및 고찰

Figures 4와 5는 음향장 해석 결과, 가장 낮은 주파수에서 발생하는 첫 번째 원주방향 (1st circumferential, 이하 1C) 모드에서의 네트워크 모델과 비교를 위한 3D FEM(finite element method)의 해석결과를 보여준다. 두 결과에서 모두 2개의 압력 진폭(node)와 2개의 안티노드(anti-node)를 갖는 전형적인 1C 모드를 확인할 수 있었으며, 1D 모델의 경우 105.9 Hz, 3D 해석 결과로는 112.9 Hz

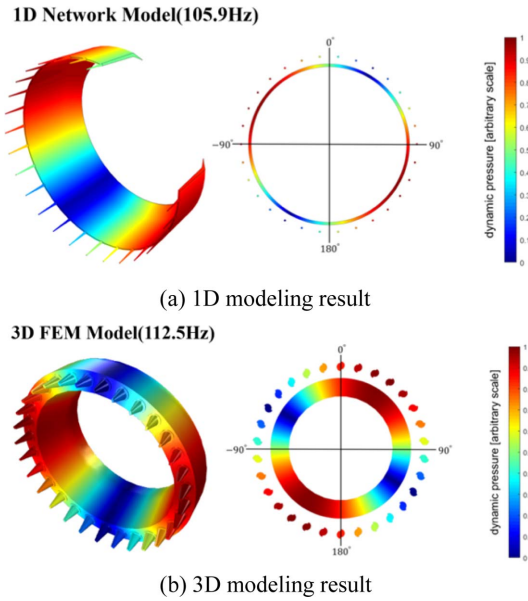


Fig. 4 Acoustic analysis results for 1C mode

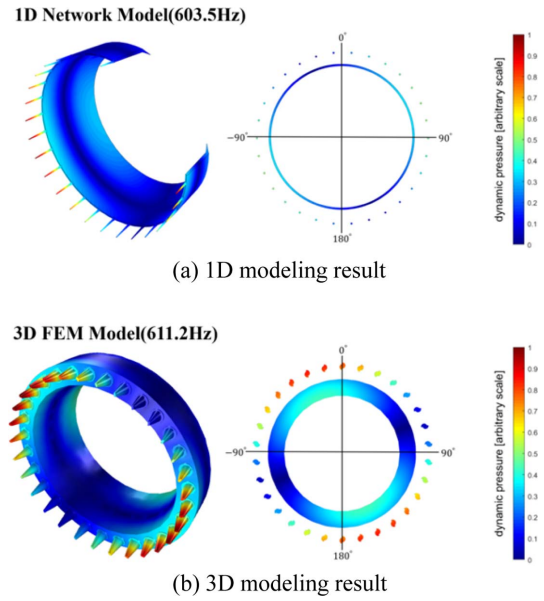


Fig. 6 Acoustic analysis results for 1C1L mode

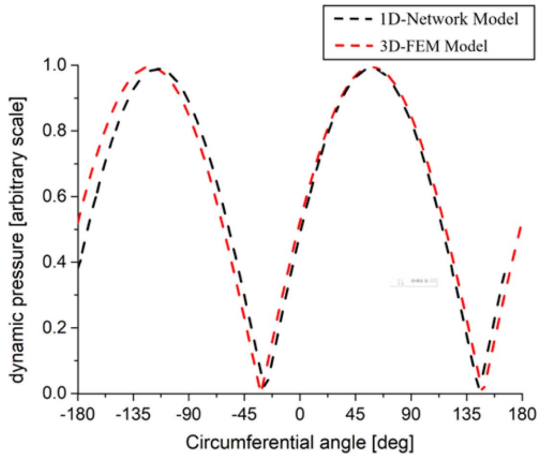
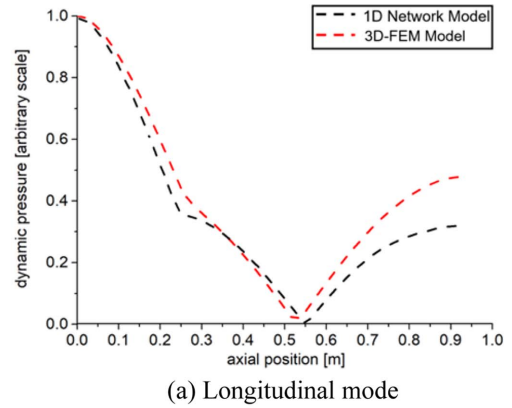


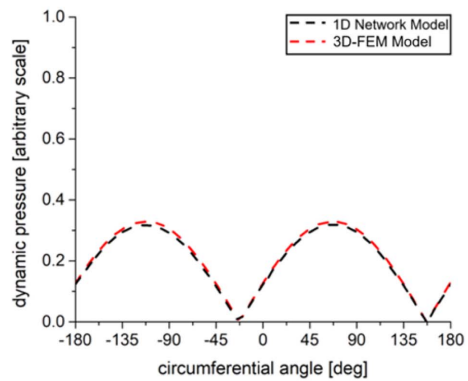
Fig. 5 Comparison of dynamic pressure distribution at a circumferential direction for 1C mode

로 약 7 Hz 수준의 차이가 있는 것으로 나타났다. 그러나, Fig. 5의 모드 분포의 직접 비교로부터, 현재의 1D 모델은 구조의 단순화 과정에도 불구하고 3D 모델과 거의 동일한 1C 모드의 압력 진폭을 보이는 것으로 확인되었다.

Figures 6과 7은 1D 모델의 복합 모드 예측 정확도를 검증하기 위하여 Fig. 4와 동일한 비교를 첫 번째 길이-원주 방향 복합(1st circumferential & 1st longitudinal, 이하 1C1L)모드에 대해서도 실시 한 것이다. 대상 시스템의 해당 모드 주파수는 1D 해석 결과로는 603.5 Hz, 3D 결과는 611.2 Hz로 이 역시 유사한 결과를 보였다. Fig. 7의



(a) Longitudinal mode



(b) Circumferential mode

Fig. 7 Comparison of dynamic pressure distribution

Table 2. Comparison frequencies of 1D Network Model and 3D-FEM Model

Acoustic Mode	1D Network Model	3D FEM Model	Error
1C Mode	105.9Hz	112.5Hz	-5.8%
2C Mode (Combustor)	212.1Hz	224.4Hz	-5.7%
3C Mode (Combustor)	317.6Hz	334.8Hz	-5.4%
1L Mode	594.9Hz	586.7Hz	+1.4%
1C1L Mode	603.5Hz	611.2Hz	-1.2%
2L Mode	819.3Hz	844.1Hz	-3%

모드 비교 결과에서 확인 가능하듯이 복합모드의 길이 방향과 원주 방향 동압 분포에서 현재 모델의 결과는 3D 모델링 결과와 높은 일치도를 보이는 것으로 나타났다. 특히 길이 방향 분포에서 보이듯이, 입출구의 닫힘 경계 조건으로 인하여 버너 입구와 연소기 출구에서 모두 노드점이 형성되었으며, 연소기보다는 버너에서 상대적으로 높은 동압의 진폭이 관찰되었다.

끝으로 Table 2는 일반적인 가스터빈의 연소 불안정 관심 주파수 대역인 1 kHz 미만에서 예측된 대상 시스템의 모든 공진 모드들을 나열한 것이다. 1D와 3D 해석 결과에서 모두 총 6개의 관심 모드가 예측이 되었으며, 개발된 1D 모델은 3D 모델의 결과와 비교하였을 때, 최대 5.8%의 오차 범위 이내에서 주파수를 예측하는 것으로 나타났다. 특히 길이방향 모드를 제외하고는 모두 3D 해석에서는 주파수가 조금씩 증가하였는데, 이는 1D 모델을 구현하면서 구조 간략화에 따른 영향인 것으로 판단된다.

현재 논문의 해석 결과는 화염의 동특성이 반영되지 않은 순수 음향장만의 해석 결과로서, 향후 연구를 통하여 화염전달함수(flame transfer function)와 같은 화염장의 동적 거동과 결합한 불안정 해석이 이어져야 한다. 화염의 동적 거동은 Table 2에서 나열된 다양한 모드 중에서 어느 하나 또는 복수개의 모드들과 커플링 될 수 있다.

이러한 결과물은 향후 연구를 통하여 세부적인 내용이 발표될 예정이다.

4. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 기존의 천연가스로 운전되고 있는 발

전용 대형 가스터빈을 수소 혼소로 전환하기 위하여 고려되어야 하는 연소 문제 중, 연소불안정을 사전에 예측하기 위한 음향장 해석 모델 개발과 그 주요 결과를 발표하였다. 대상 연소기는 한국중부발전의 보령복합화력에서 운전 중인 150 MW급 GT24이다. 본 가스터빈은 재열 가스터빈으로서, 이번 연구에서는 1단 연소기인 EV버너를 해석 대상으로 선정하였다. 해당 연소기는 환형 구조로서, 연소불안정과 음향장 해석을 위해 복합 음향 모드를 예측할 수 있는 모델 개발이 선행되어야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 원주 및 길이 방향 등 다양한 복합 모드를 예측할 수 있는 음향 모델 개발이 진행되었고, 실제 연소기의 운전 조건에서 주요 음향 모드들이 도출되었다. 1D모델의 해석 결과를 실제 형상에 기반한 3D모델 결과와 비교하였고, 본 모델은 다양한 모드의 주파수와 동압 분포를 높은 정확도를 가지고 예측할 수 있는 것으로 확인되었다.

현재 연구에서 도출된 관심 음향 모드들을 바탕으로 하여, 향후 연구에서는 화염 동특성과 결합한 불안정 예측 연구로 확장해 나갈 예정이다. 특히 수소 혼소율이 변하게 되면 화염의 동특성에 영향을 미치게 되므로, 이에 대한 세부적인 연구와 보고가 필요하다. 또한, 해당 연소기에서의 실험과 CFD 해석이 현재 진행 중에 있으며, 이러한 결과가 추가되어 본 연구 결과의 신뢰성이 추가 검증될 예정이다.

후 기

본 연구는 2022년 중부발전의 지원(제2022-현장-16호)을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) S. Park, U. Kim, J. Chung, J. Hong, S. Kim, D. Cha, "Effects of Hydrogen in SNG on Gas Turbine Combustion Characteristics", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 23, No. 4, 2012, pp. 412~419.
- (2) 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.
- (3) Y. Joo, M. Kim, J. Park, S. Park, J. Shin, "Hydrogen Enriched Gas Turbine: Core Technologies and R&D

- Trend”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 4, 2020, pp. 351~362.
- (4) N. Tekin, M. Ashikaga, A. Horikawa, H. Funke”, Enhancement of Fuel Flexibility of Industrial Gas Turbine by Development of Innovative Hydrogen Combustion Systems”, *Gas Energy*, 2(2018) 1~6.
- (5) S. Hong, D. Kim, “Combustion Instability Modeling in a Hydrogen-natural Gas Mixed Fuel Gas Turbine Combustor using a 3-Dimensional Finite Element Method Approach”, *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 27, No. 1, 2022, pp. 36~41.
- (6) M. Choi, D. Shin, I. Gu, E. Cho, Y. Shin, “Comparisons of Flashback Characteristics of Hydrogen Flames by Combustion Models in an industrial Gas Turbine Combustor”, *Journal of The Korean Society of Combustion*, Vol. 27, No. 4, 2022, pp. 40~49.
- (7) Y. Pyo, H. Park, S. Jung, D. Kim, “Acoustic Field Analysis using 1D Network Model in an Aero Gas Turbine Combustor”, *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 23, No. 2, 2019, pp. 38~45.
- (8) G. Kim, H. Cho, D. Lee, H. Kim, C. Sohn, S. Lee, M. Kim, K. Ahn, “Experimental Study on Combustion Characteristics of a Swirl-stabilized Conical Burner”, *Journal of The Korean Society of Combustion*, Vol. 24, No. 4, 2014, pp. 1~7.
- (9) F. Peter, Z. Martin, L. Rudolf, B. Stefano, and M. Christian, “Development and Design of Alstom’s Staged Fuel Gas Injection EV Burner for NOx Reduction”, *ASME Turbo Expo*, 2007, GT2007-27730.
- (10) J. Son, S. Hong, J. Hwang, M. Kim, D. Kim, “Acoustic Modeling in a Gas Turbine Combustor with Backflow Using a Network Approach”, *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 25, No. 5, 2021, pp. 18~26.
- (11) S. Kim, 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.
- (12) J. Lim, D. Kim, “3D Acoustic Field Analysis in an Annular System under a Cold Flow Condition”, *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 6, 2017, pp. 49~56.
- (13) S.R. Stow, A.P. Dowling, “Thermoacoustic Oscillation in an Annular Combustor”, *ASME Turbo Expo 2001*, New Orleans, Louisiana, U.S.A., ASME GT2001-0037, Jun, 2001.
- (14) G.J. Bloxsidge, A.P. Dowling, P.J. Langhorne, “Reheat Buzz: an Acoustically Coupled Combustion Instability. Part 2. Theory”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 346, 1997, pp. 271~290.