

## 연소불안정 모델링 - 1D 접근법 기반

김대식\* · 윤명곤\*

## Combustion Instability modeling - 1D approach

Daesik Kim\* · Myunggon Yoon\*

## ABSTRACT

Various combustion modeling approaches have been developed and verified in a combustion system such as rockets, gas turbines, and so on. This study introduces basic theory and recent research activities on 1D network model where a system is divided into a series of acoustic element and mass/momentum/energy conservations are applied in the component. Each component is connected to the neighboring ones with proper jump conditions. Flame transfer function and acoustic transfer function are determined and effects of the each function on the system instability is investigated.

## 초 록

다양한 연소불안정 모델링 기법이 로켓 및 가스터빈 등 연소시스템에 적용되어 개발, 검증되고 있다. 이 중 본 연구에서는 시스템의 각 요소를 음향 네트워크로 구성하여 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식을 풀 다음, 각 요소들의 경계 조건을 대입하여 전체 시스템의 불안정 특성을 해석하는 1D 네트워크 모델의 기초 이론부터 최신 연구 동향을 소개하고자 한다. 특히 화염전달함수(flame transfer function)와 음향전달함수(acoustic transfer function)을 각각 정의하고, 서로의 상호 관계에 대하여 규명하였다.

Key Words: Combustion Instability(연소불안정), Network Model(네트워크 모델), Flame Transfer Function(화염전달함수), Acoustic Transfer Function(음향전달함수)

연소불안정성을 예측하기 위한 여러 기법 중에서 LES(Large Eddy Simulation), RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)와 같은 전산 유동해석 방법[1]의 경우는 많은 계산비용과 시간을 필요로 한다. 이에 대한 대안으로 열음향

해석 모델(thermoacoustic analysis model)등[2]이 제안되었다. 이는 다시 실제 3차원 구조를 격자계를 구성하여 Helmholtz 방정식을 풀게 되는 FEM 기반의 모델링 기법과 실제 복잡한 시스템을 일련의 네트워크 요소로 정의한 후에 각 요소에서 지배 방정식을 풀 다음 경계 조건을 적용하여 시스템 불안정 문제를 풀게 되는 1D 네트워크 모델로 구분될 수 있다. 소개한 두가지

\* 강릉원주대학교 기계자동차공학부

† 교신저자, E-mail: dkim@gwnu.ac.kr

접근 방법 모두 음향 이론에 기반하여 음향장을 해석하게 되고, 화염으로부터의 비정상 열방출 특성은 실험 또는 CFD를 통하여 화염전달함수 (flame transfer function, FTF)으로부터 정의하게 된다.

본 연구에서는 1D 기반의 네트워크 모델링의 배경 및 기초 이론과 최신 연구 결과들을 소개하고자 한다. 특히, 열음향 해석기법을 적용하는데 열-음향장의 동적 특성은 음향전달함수 (acoustic transfer function, ATF)로, 그리고 동적인 연소특성은 화염전달함수로 모델링 하였다.

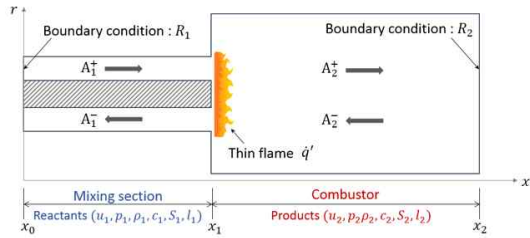


Fig. 1 Schematic diagram of combustor for thermoacoustic analysis.

음향전달함수는 연소기 내에서 발생하는 비정상 열발생 섭동이 시스템내의 유동 속도와 압력에 미치는 영향을 정량적으로 전달함수의 형태로 표현한 것이다.

해석 대상으로 선정된 가스터빈 연소기 시스템의 속도, 압력, 열발생을 사이의 관계식을 정의하기 위하여, Fig. 1을 제시하였다. 본 논문에서 고려하는 연소기의 경우 Fig. 1에서와 같이 화염면을 전후로 하여 연소기의 단면적이 증가하기 때문에, Dowling 등[3]이 논문에서 언급한 바와 같이 운동량(momentum)이 증가함을 고려하여 다음과 같은 지배방정식을 표현하였다.

$$\begin{aligned}
 [\rho u A]_1^2 &= 0 \\
 [p]_1^2 A_2 + [\rho u^2 A]_1^2 &= 0 \\
 [(\eta p u + \rho u^3/2) A]_1^2 &= \dot{q}, \quad \eta = \frac{\gamma}{\gamma-1}
 \end{aligned} \quad (2)$$

압축성, 비정상(unsteady), 비점성 유동, 그리고 1차원 파장만을 고려한다는 가정 하에 작은 섭동이 노즐부에서 유도된다고 할 때, 음향과의 압력과 속도는 평균값과 섭동의 합의 형태로 Eq. 2와 같이 표현될 수 있다[4].

$$\begin{aligned}
 u_k(x, t) &= \bar{u}_k + \frac{1}{\rho_k c_k} \left[ A_k^+ \left( t - \frac{x - x_{k-1}}{c_k + u_k} \right) - A_k^- \left( t - \frac{x_k - x}{c_k - u_k} \right) \right] \\
 p_k(x, t) &= \bar{p}_k + A_k^+ \left( t - \frac{x - x_{k-1}}{c_k + u_k} \right) + A_1^- \left( t - \frac{x_k - x}{c_k - u_k} \right) \\
 (k = 1, 2)
 \end{aligned} \quad (2)$$

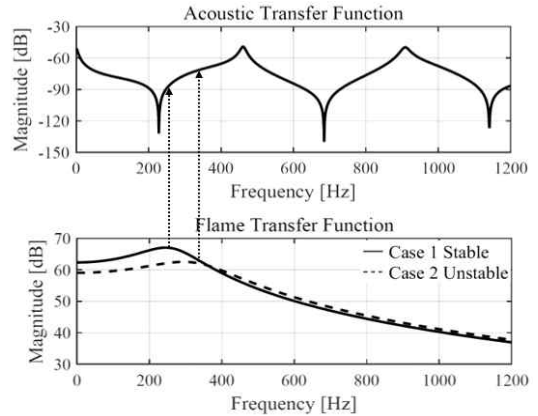


Fig. 2 Bode plots of a common ATF and two different FTFs[4]

Fig. 1의 해석 대상 연소기의 임의 조건에서 계산된 ATF와 FTF의 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 그림에서와 같이 임의의 화염전달함수가 주어진다면, 그 피크에 해당하는 ATF의 값을 참조하여 전체 시스템의 불안정 여부를 사전에 판단할 수 있게 된다. 또한, 반대로 ATF의 값을 알고 있다면 시스템의 안정(또는 불안정) 상태가 가능한 FTF의 특성을 미리 도출할 수 있게 된다.

## 후 기

본 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2015R1D1A1A01058410) 및 산업통상자원부 항공우주부품기술개발사업(10067074)의 지원을 받아 수행된 결과입니다.

## 참 고 문 헌

1. B. Franzelli, E. Riber, L. Gicquel and T. Poinsot, Large Eddy Simulation of Combustion Instabilities in a Lean Partially Premixed Swirled Flame, *Combustion and Flame*, 159(2) (2012) 621-637.
2. J. Kim and D. Kim, Combustion instability prediction using 1D thermoacoustic model in a gas turbine combustor, *Journal of ILASS-Korea*, 20(4) (2015) 241-246.
3. T. Lieuwen and V. Yang, *Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines*, AIAA, 210 (2005).
4. M. Yoon, J. Kim and D. Kim, A flame transfer function with nonlinear phase, *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 20(3) (2016) 78-86.