

FDF를 이용한 메탄 희박 예혼합 연소기의

비선형 열음향학적 불안정성 해석

오승택* · 신영준* · 김용모*†

FDF-based analysis of nonlinear combustion instability

in the lean premixed combustor

Seungtaek Oh, Yungjun Shin, Yongmo Kim*†

ABSTRACT

In the present approach, the flame-acoustics interaction is represented by FDF (Flame Describing Function) which is an important source term in the Helmholtz' equation. In this study, the combustion instability is analyzed by the forced mode strategy with the measured FDF. Numerical results indicate that the present approach reasonably well predicts the essential features of the combustion instability characteristics in the lean premixed combustor under the gas-turbine like environment.

Key Words : Lean premixed flames, Turbulent swirling flows, Helmholtz equation, Flame Describing Function, Flame-acoustics interaction,

엄격한 공해 배출물 기준을 맞추기 위하여 대부분의 연소기들은 희박 예혼합 상태에서 작동된다. 하지만, 이러한 경우에는 열음향학적 연소 불안정이 쉽게 일어난다는 단점이 존재한다. 이를 미리 인지하고 피하기 위하여 수치적으로 다음과 같은 두 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 Self excited mode 기법을 이용하여 열음향학적 불안정을 분석할 수 있다. 하지만, 이 방법은 LES와 같은 SRS(Scale Resolving Simulation) 모델들을 이용하기 때문에, 매우 긴 주기 동안 계산을 수행하여야 하며, 과도한 cpu time이 요구되어 cost가 매우 큰 방법이다. 두 번째 방법은 Forced mode 기법인데 첫 번째 방법보다는 cost가 작고, 여러 가지 parametric study를 통하여 연소 불안정성을 폭넓게 연구할 수 있는 장점이 있다. 이 방법에는 화염과 음향학적 결합이 FTF나 FDF를 통하여 모델링이 되고, 이것은 Helmholtz식의 source항으로 작용하게 된다. FTF나 FDF는 해석적, 실험적, 그리고 수치적으로 구할 수 있다. FDF는 FTF의 한계를 극복하기 위하여 나온 모델이다. 기존의 FTF가 linear zone에서만 적용가능하다면, FDF는 linear zone 부터 limit-cycle zone까지 원하는 만큼 범위를

확장시킬 수 있다. 한 주파수에 대하여 섭동비를 변화시키기에 따라 FTF를 구한 것이 FDF인데, 이를 통하여 비선형적인 열음향학적 거동도 나타낼 수 있다. 대표적으로는 hysteresis, frequency shifting, mode changing 등이 있다. 이 논문에서는 두 번째 방법인 Forced mode를 택하였고, FDF는 Ecole Centrale에서 측정된 실험 데이터를 사용하였다. 여기서 사용된 Helmholtz 식은 다음과 같다.

$$\frac{w^2}{\rho c^2} \hat{p} + \frac{\nabla^2 \hat{p}}{\rho} = Q^{CM}$$

$$Q^{CM} = \frac{\gamma - 1}{\rho c^2} \lambda \hat{q} \quad [1/s]$$

$$\lambda = -iw$$

$$\hat{q} = \frac{\hat{q}}{iw \rho_{ref} u} \eta e^{iw\tau} \cdot \nabla \hat{p} \cdot \vec{n}_{ref} \quad [w/m^3]$$

(1)

$$FDF\left(\frac{\hat{u}_{ref}}{u_{ref}}, w\right) \equiv \frac{\hat{q}/\bar{q}}{\hat{u}_{ref}/u_{ref}} = \eta e^{iw\tau} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} u = \bar{u} + \hat{u} \\ u' = \hat{u} e^{-iwt} \end{pmatrix}$$

식 (1)은 주파수 영역에서 풀게 되고, mean flo

* 한양대학교 기계공학부

† 연락저자, ymkim@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0428 FAX : (02)-2220-0339

w 속도가 0이라는 가정을 하게 된다. 열음향학적인 벽면조건은 임피던스를 이용하여 상황에 맞게 조절할 수 있다. 하지만 임피던스는 수치적으로는 아직까진 구할 수가 없기 때문에 보통 실험을 통해 나온 값이나 아니면 이상적인 조건으로 가정하고 적용한다.

연구는 Ecole Centrale 연소기에 대하여 열음향학적 해석을 진행하였다. 연소기 내의 온도, 밀도, 음속장을 2-duct로 가정하여 적용하였고, plenum과 chamber의 길이를 바꿔가며 이에 따른 진동주파수와 instability map을 작성하였다. case는 Flame A, Flame B에 대하여 각각 12가지씩, 총 24가지의 경우에 대하여 계산을 진행하였다.

Flame A/B의 구동조건은 Table 1에 나와 있다. 각 덕트별 스칼라장 정보는 Table 2에 나와 있다. 24가지 경우 중, 예시로 Flame A의 plenum 길이가 96mm, chamber의 길이가 100, 150, 200, 400mm인 경우를 살펴보자(case1~case4). Fig. 1을 봤을 때 초록색선은 실험에서 측정된 시스템의 내부 damping rate이고, 검정색선은 이번 계산결과에 따른 damping rate이다. 이 선들의 오른쪽에 history선들이 위치하면 불안정하다고 볼 수 있다. 또한 4경우 모두 다 섭동비가 커짐에 따라 밑에서 위로 history선들이 진행하였다. case 1~3들은 섭동비가 변화하여도 항상 안정하다는 결과가 나왔지만, case 4의 경우에는 항상 불안정하다는 결과가 나왔다. 이는 실험과도 동일한 결과를 낳았다.

또한, limit cycle에 도달하였을 때 진동주파수와 이때의 섭동비를 구하여 실험data와 비교하였을 때 비슷한 결과를 보였다(그림은 생략).

결론적으로, FDF를 helmholtz식과 같이 이용하였을 때 연소기의 열음향학적 불안정성을 잘 예측할 수 있었고, 이를 실제 가스터빈 연소기에 적용시킨다면 역시 좋은 결과를 낼 것으로 기대 된다.

Table 1 Flame A/B의 구동조건

당량비	0.7	0.7
입구속도	2.67 [m/s]	4.16 [m/s]
열방출량	1.94 [kW]	3.03 [kW]

Table 2 각 덕트별 스칼라장 정보

	온도 [K]	압력 [atm]	밀도 [kg/m ³]	감마
Unburnt gas	300	1	1.177	1.4
Burnt gas	1600	1	0.2206	1.4

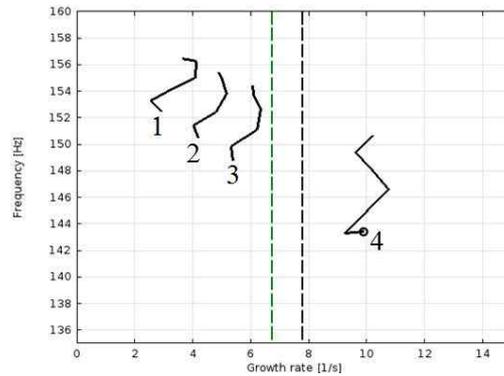


Fig. 1 Flame A의 case1~4에 대해 섭동비에 따른 진동주파수와 growth rate변화

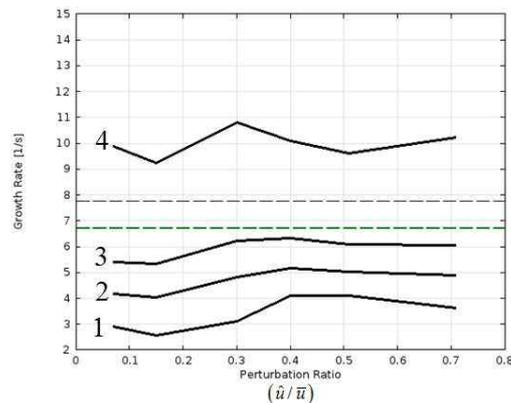


Fig. 2 Flame A의 case1~4에 대해 섭동비에 따른 growth rate변화

후 기

본 연구는 2015년 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KEPTEP)의 지원을 받아 수행한 한국형 300MW급 IGCC 실증플랜트기술개발사업 연구과제입니다.

참고 문헌

[1] A. Kaufmann, F.Nicoud(2002) "Flow forcing techniques for numerical simulation of combustion instabilities", Combustion and Flame, Vol. 131, p. 371-385
 [2] Giovanni Campa, Sergio Mario Camporeale(2014) "Prediction of the thermoacoustic combustion instabilities in practical annular combustors", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 136(9), 091504
 [3] C. F. Silva, F. Nocoud, T. Schuller, D. Durox, S. Candel(2013) "Combining a Helmholtz solver with the flame describing function to assess combustion instability in a premixed swirled combustor", Combustion and Flame, Vol. 160, p. 1743-1754