

가스터빈 연소기에서 화염의 위치를 고려한 열음향 해석

김대식** · 김사량* · 김규태**

Thermoacoustic Analysis Considering Flame Location in a Gas Turbine Combustor

Daesik Kim, Sa Ryang Kim and Kyu Tae Kim

ABSTRACT

Authors' previous works on thermoacoustic(TA) model development showed good results in predicting combustion instability characteristics in a gas turbine combustor. However, they also suggested there were some limitations in growth rate estimation, which might be related with over-simplification of flame structure. As a first trial for improving the model accuracy, the current paper introduces the modified TA model considering the actual flame location in the combustor. The combustor is divided into the unburned and the burned area before and after the flame location, and then acoustic equations are re-organized. The modified TA model results show a better accuracy in predicting the growth rate of instabilities comparing with the previous results. However, obtained results still overestimate the conditions where the combustor goes unstable. Further researches considering heat release distribution through flames are required.

Key Words : Combustion instability(연소 불안정), Flame transfer function(화염 전달 함수), Thermoacoustic analysis(열음향 해석), Flame location(화염 위치)

기 호 설 명

Alphabets

A : Complex amplitude of pressure wave
 c : Speed of sound
 f : Frequency
 FTF : Flame transfer function
 k : Wave number
 L, l : Length
 n : Gain of transfer function
 P, p : Pressure
 Q, q : Heat release

R : Reflection coefficient

V, u : Velocity

Greeks

τ : Time delay

ϕ : Phase

ρ : Density

γ : Specific heat ratio

ω : Angular frequency

λ : Wavelength

1. 서론

강화되는 배출가스 규제와 유가의 상승으로 인하여 산업용뿐만 아니라 항공용에서도 기존의 비예혼합 방식의 연소기로부터 희박 예혼합 연소 방식을 채택하는 가스터빈의 수요가 갈수록 증가하고 있다. 이런 추세와 더불어 희박 예혼합 연소 시스템에서

자주 발생하는 연소 불안정(combustion instability)을 제어하고 발생 메커니즘을 규명하는 연구가 전 세계적으로 크게 주목을 받고 있다[1-5].

저자들의 이전 일련의 연구[1-4]에서는 연소 불안정 현상을 예측할 수 있는 기술 중의 하나로서, 측정된 화염 전달 함수(flame transfer function)로부터, 열음향 해석(thermoacoustic analysis)을 통하여 불안정 주파수 및 발생하는 조건 등을 예측할 수 있는 모델링 기법을 소개하였다. 화염 전달 함수는 화염 입구에서의 속도 변동에 따른 열발생률을 정량적으로 분석하기 위하여 연소기 입구에서 속도의 진폭을 주

* 강릉원주대학교 기계자동차공학부

** GE Global Research Center

† 연락저자, dkim@gwnu.ac.kr

파수의 함수로 가진하여 이에 대한 열발생률의 섭동 진폭을 측정 또는 해석하는 방법으로서, 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$FTF(\omega) = \frac{\widehat{Q}/\bar{Q}}{\widehat{u}/\bar{u}} = n(\omega)e^{j\omega\tau} \quad (1)$$

여기서 \bar{Q} , \bar{u} 는 열발생률과 입구 속도의 평균값과, \widehat{Q} , \widehat{u} 는 섭동량을 각각 의미하고, 전달함수는 주파수 또는 각진동수(ω)의 함수로 표현되며, 결과값은 이득값(n)은 지연시간(τ)의 형태로 나타나게 된다.

열음향 해석 모델이란 실제 가스터빈과 같은 복잡한 연소 시스템을 간략하게 단순화하고, 영향이 미비한 인자들을 제거한 후, 음향파(acoustic wave)와 연소장 사이의 상호 관계식을 도출하여, 시스템 내부의 열음향 특성을 예측하고 연소 불안정 특성을 예측하는 기술을 의미한다. 식 (1)에서 정의된 화염 전달 함수는 음향 관계식에서 연소장과 음향장을 연결하는 정보를 제공하는 역할을 하게 된다[1,3,6,7].

열음향 해석은 시스템 단순화 과정을 통하여 화염은 매우 짧은 형태로 연소기 입구에서 얇게 존재한다고 가정한다. 그러나 이전의 연구 결과[1,3]에서 소개하였듯이, 실제 시스템에서의 화염은 일부 조건에서는 전체 연소실 길이의 상당 부분을 차지할 정도로 긴 화염 구간(특히, 낮은 당량비 영역)이 존재하게 되고, 이러한 조건에서는 열음향 해석 모델의 예측 정확도가 크게 떨어지는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 실제 화염 길이를 고려하여 열음향 해석 모델에 반영할 수 있는 방안을 제시하고, 기존 모델 대비 정확도의 향상을 평가하고자 한다.

2. 열음향 해석 모델 및 대상 연소기

2.1. 해석 대상 연소기 및 실험 조건

Fig. 1은 본 논문에서 해석 대상으로 선정된 연소

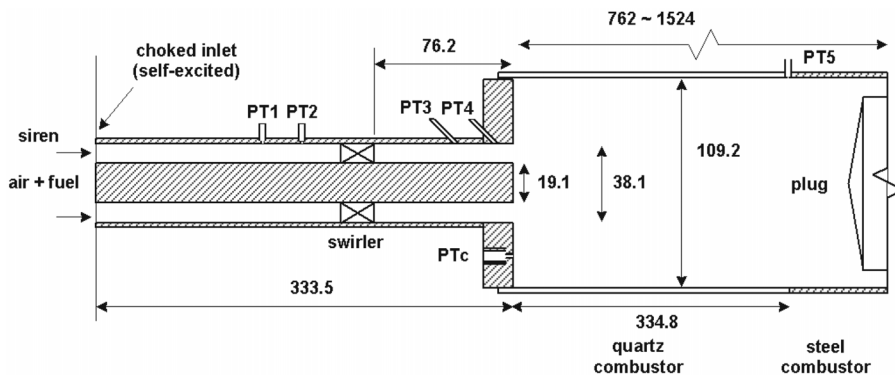


Fig. 1. Schematic of the model combustor, Dimensions in millimeters.

기 및 노즐의 개략도이다. 본 연구에서는 Kim et al. [8,9]의 연구에서 소개된 연소기를 해석 대상으로 선정하고, 실험 결과와의 비교를 통하여 모델 검증은 시도하였다. 그림에서 보이듯이, 연소 불안정 발생 조건을 계측하기 위하여 덤프면으로부터 762~1,524 mm까지 길이를 변화시킬 수 있는 가변 신장 연소기로 구성되었다. 또한 화염 전달 함수 측정 시에는 석영 연소기 후방을 완전 개방하여 시스템 음향 특성을 배제할 수 있도록 고안되었다.

연소기 및 노즐에서의 압력이 측정되고, 열발생률 및 화염의 이미지 측정을 위하여 PMT 및 ICCD 카메라를 통하여 CH* 화학 발광 기법이 적용되었다. 해당 연소기의 구조 및 측정 기법에 대한 더 많은 정보는 이전의 참고 문헌을 통하여 확인할 수 있다 [3,8,9].

2.2. 기존의 해석 모델 및 결과

2.2.1. 기존의 열음향 해석 모델

열음향학 시스템 해석에 있어서 시스템의 다양한 요소들은 몇 개의 개별 인자로 나누어서 해석하는 네트워크 모델이 사용된다. 해석을 위하여 본 연구의 개발 모델에서는 Fig. 2와 같이 연소 시스템이 노즐과 화염 및 연소기로 크게 3가지의 요소로 간소화되었다.

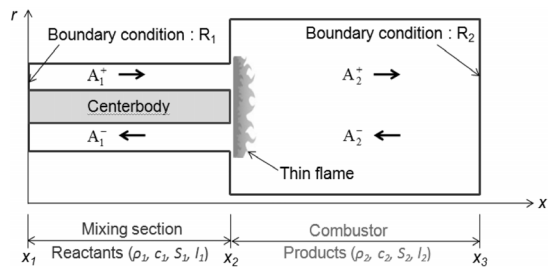


Fig. 2. Simplified model combustor for thermoacoustic analysis.

선형 음향학 이론에 따라 음향파의 속도와 압력은 다음의 지배 방정식에 의하여 정의된다[1,3,7].

$$\frac{\partial u'}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{\gamma p_0} \frac{\partial p'}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial (Su')}{\partial x} = \frac{\gamma - 1}{\gamma p_0} \dot{q}'_T \quad (3)$$

화염을 연소기 길이에 비하여 무한히 짧다고 가정하고, 식 (2)와 (3)을 x 방향으로 화염 바로 전후인 x_2^- 부터 x_2^+ 까지 적분하고 한계 값을 취하면 얇은 화염에 대한 음향 조건(acoustic jump condition)을 구하면 다음과 같다.

$$p'(x_2^+) = p'(x_2^-) \quad (4)$$

$$S(x_2^+)u'(x_2^+) - S(x_2^-)u'(x_2^-) = \frac{\gamma - 1}{\gamma p_0} \dot{Q}'_T \quad (5)$$

상기한 식에서 모든 변수에 대하여 음향학적 진동 형태의 함수로 변환하면 노즐과 연소기에서의 음향파의 압력과 속도 성분을 각각 계산할 수 있고, 계산 과정에 대한 세부 정보는 이전 연구에서 자세히 소개되었다[1,3].

2.2.2. 기존 해석 모델의 문제점

Fig. 3은 화염 길이를 고려하지 않은 상태로 화염의 위치가 연소기 입구에 부착되어 있다고 가정했을 경우, 연소기 길이 변경에 따른 연소 불안정이 발생하는 영역을 실험값(도형)과 예측값(실선)을 비교한 것이다. 예측값에서 연소 불안정이 발생하는 조건

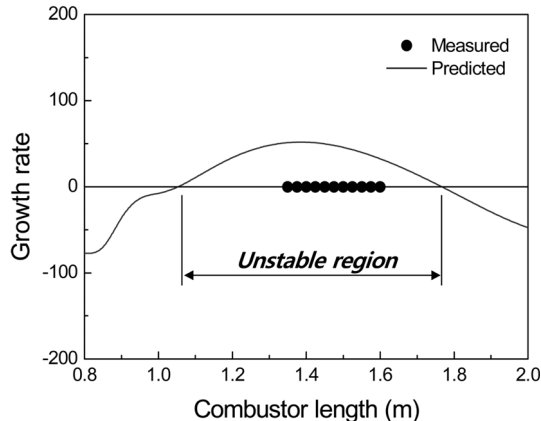


Fig. 3. Instability characteristics as a function of combustor length ($V_{\text{mean}} = 60 \text{ m/s}$, $\phi = 0.6$, $\text{H}_2 = 0\%$).

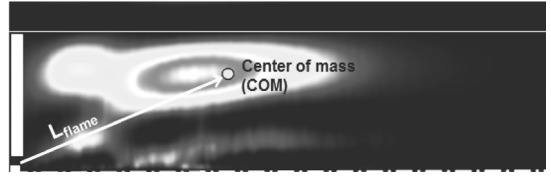


Fig. 4. Example of flame shape ($V_{\text{mean}} = 60 \text{ m/s}$, $\phi = 0.55$, $\text{H}_2 = 0\%$): Replotted from Ref[9].

Table 1. Selected test conditions for model validation

Inlet pressure	1 atm
Inlet temperature	200 °C
Mixture velocity	60, 70 m/s
Equivalence ratio	0.55 - 0.7
Fuel composition	100%CH ₄ , 55%CH ₄ + 45%H ₂

은 불안정의 성장률(growth rate)이 0보다 큰 영역을 의미한다[1,3,7].

그림에서 보이듯이 실험값에서는 연소기 길이가 1.35~1.6 m 사이에서 연소 불안정이 발생하는 것으로 나타났으나, 예측값에서는 1.1~1.75 m 사이에서 성장률이 0보다 큰 것(즉, 이 구간에서 연소 불안정이 발생하는 것)으로 나타나, 그 운전 영역에서 두 배 가까이 넓게 예측하는 것으로 나타났다. 이전 저자들의 분석[1,3]에서는 이러한 연소 불안정 구간의 과대 예측(overestimation)은 화염 형상의 단순화로부터 오는 것으로 설명하였다.

이를 정량적으로 분석하고, 수정 모델을 개발하기 위하여 Fig. 4는 Table 1에서 요약된 실험 조건 중에서 상대적으로 화염의 길이가 길게 나타나는 희박 조건인 당량비 0.55 조건에서의 CH* 자발광 촬영을 통하여 얻어진 화염의 형상이다. 본 조건의 덤프면에서부터 화염의 COM(Center of Mass)까지의 거리는 98 mm로 측정되었으며, 이는 전체 석영 연소기 길이(334 mm)와 비교할 때 약 30% 수준에 해당한다.

Fig. 5는 평균 속도 60 m/s에서의 당량비와 연료 중의 수소 분율에 따른 화염 길이(CH^*_{COM})의 변화를 도시한 것이다. 이 속도 조건에서 최소 화염 길이는 39 mm 이상인 것으로 나타났다.

Poinsot 등[7]은 열음향 모델 및 연소 불안정 예측 기법에서 화염의 길이를 무시할 수 있는 “flame compactness”를 헬름홀츠 수(Helmholtz number (wL_{flame}/c))를 통하여 판단할 수 있다고 설명하였고, 헬름홀츠 수가 0.01 이상이 되면 화염의 길이의 영향이 고려되어야 한다고 하였다. 본 논문에서 사용된 조건의 경우에 200 Hz의 연소 불안정에 대하여 계산된 헬름홀츠 수는 0.07~0.18로 Poinsot이 제시한 기준을 훨씬 넘는 것으로 나타났으며, 따라서 본 계산의 경우 정확한 연소 불안정 예측을 위해서는 화염의 위치에 따른

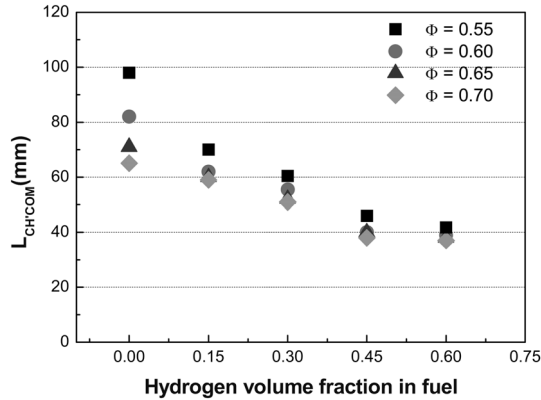


Fig. 5. Effects of equivalence ratio and hydrogen fraction on flame length ($V_{\text{mean}} = 60$ m/s) : Replotted from Ref[9].

영향이 반영되어야 한다는 것을 의미한다. 이를 모델에 반영하기 위한 방안이 다음 절에서 설명된다.

2.2.2. 화염 위치를 고려한 수정 열음향 모델

전술하였듯이, 선형 음향 관계식에서의 가정과 달리, 일부 조건에서는 모델의 정확도에 영향을 미칠 만큼 연소기 입구로부터 떨어진 곳에 화염의 중심이 위치하게 된다. 이 영향을 모델에 반영하기 위하여 독일 뮌헨공대의 Sattelmayer[10]가 고유의 연소 해석 네트워크 모델에 사용하기 위하여 제안하였던 방안을 적용하였다. Fig. 6은 화염 위치를 수정한 네트워크 요소에 대한 개략도이다. 그림에서 보이듯이 화염의 위치를 Fig. 5에서 소개된 각 조건에서의 실제 측정 위치를 옮긴 후, 이에 따른 선형 음향 관계식을 도출하였다.

이를 위하여 화염 전(④)과 화염 후(⑤)의 얇은 화염에 대한 음향 조건은 다음과 같다. 여기서, ρ_0 와 S 는 축 방향의 함수로써, 각각 평균 밀도와 단면적을

나타내고, γ 는 비열비, \dot{Q}'_T 는 열발생률의 변동값 [W/m^3]을 나타낸다.

$$p'(x_5) = p'(x_4) \quad (6)$$

$$S(x_5)u'(x_5) - S(x_4)u'(x_4) = \frac{\gamma-1}{\gamma\rho_0} \dot{Q}'_T \quad (7)$$

또한 면적 변화가 발생하는 연소기 입구 전(②)과 후(③) 사이의 음향 조건은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$p'(x_3) = p'(x_2) \quad (8)$$

$$u'(x_3) = \frac{A_3}{A_2} u'(x_2) \quad (9)$$

마지막으로, 노즐 내부(① → ②) 및 화염 전의 연소기 내부(③ → ④)의 음향 전파 조건은 덕트 내부에서의 진행하는 음향파(propagation wave)의 순방향(forward)과 역방향(backward) Riemann invariants[10] 전개로부터 다음과 같이 유도될 수 있다[10,11].

$$u'_{2,4} = \frac{u'_{1,3}}{2} (e^{-ik_f L} + e^{ik_b L}) + \frac{p'_{1,3}}{2\bar{c}_{1,3}\bar{\rho}_{1,3}} (e^{-ik_f L} + e^{ik_b L}) \quad (10)$$

$$\frac{p'_{2,4}}{\bar{c}_{2,4}\bar{\rho}_{2,4}} = \frac{u'_{1,3}}{2} (e^{-ik_f L} + e^{ik_b L}) + \frac{p'_{1,3}}{2\bar{c}_{1,3}\bar{\rho}_{1,3}} (e^{-ik_f L} + e^{ik_b L}) \quad (11)$$

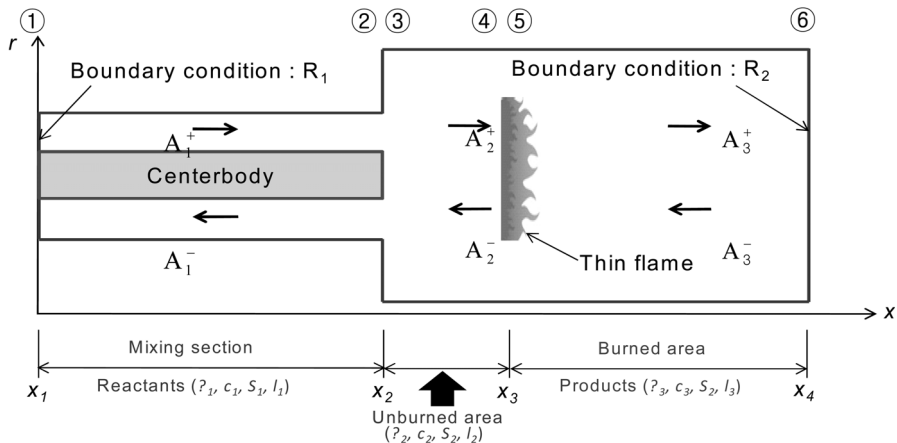


Fig. 6. Modified model combustor for thermoacoustic analysis.

3. 수정 모델을 통한 해석 결과

Fig. 7은 Fig. 3과 동일 조건에서 화염의 위치를 고려한 수정된 열음향 모델을 통하여 얻어진 연소 불안정 예측 결과이다. 이를 위하여 화염의 위치는 실제 측정 형상에서 CH^*_COM 으로 이동시켜서 덤프면으로부터 82 mm 하류로 세팅하였다. 그림에서 보이듯이 수정된 열음향 모델을 통하여 얻어진 불안정 구간은 연소기 길이는 1.23~1.74 m로 예측되었다. 여전히 실제 연소 불안정 발생 구간(1.35~1.6 m)보다는 과대한 예측 결과를 보였으나, 화염 위치를 수정하기 전인 모델의 결과(1.1~1.75 m) 대비 정확도가 향상된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 모델 예측 정확도를 비교적 짧은 화염이 나타나는 운전 영역에서 검증한 것이다. 이를 위하여 Fig. 7과 당량비 및 입구 속도의 운전 영역은 동일

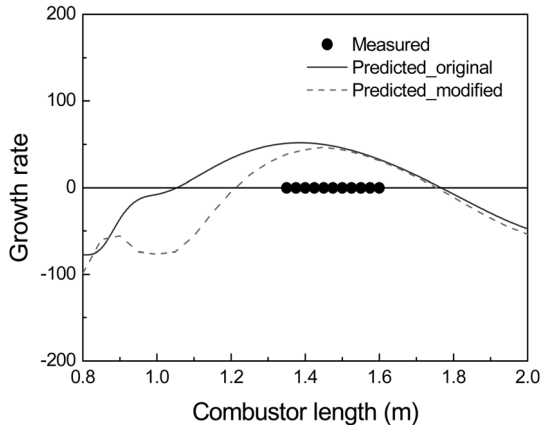


Fig. 7. Growth rate prediction of TA model with and without flame location considerations($V_{mean} = 60$ m/s, $\phi = 0.6$, $H_2 = 0\%$).

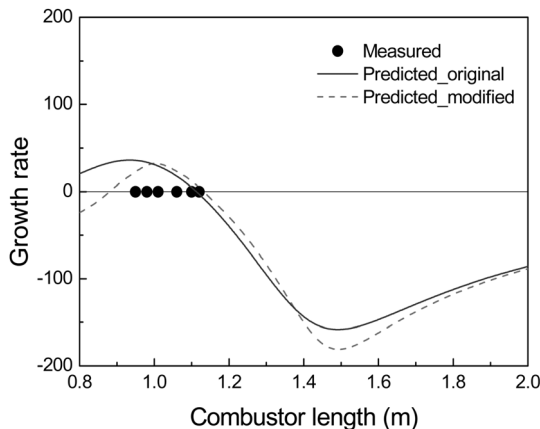


Fig. 8. Growth rate prediction of TA model with and without flame location considerations($V_{mean} = 60$ m/s, $\phi = 0.6$, $H_2 = 45\%$).

한 상태에서 연료 중에서 수소 분율을 45%까지 증가시킨 경우(55% $CH_4 + 45\%$ H_2 in volume)에 대하여 나타내었다. 이때의 화염의 길이는 Fig. 5에서 나타나듯이 40 mm이었다. Fig. 8의 결과에서 이 경우에 측정된 연소 불안정 구간은 연소기 길이 0.95~1.12 m인 것으로 나타났다. 동일 경우에 대하여 기존의 화염 위치가 덤프면에 존재한다고 가정된 기존의 모델 예측 결과 대비, 화염 위치를 실제 측정된 화염 길이로 옮긴 수정 모델의 불안정 예측 결과는 0.88~1.13 m로 이 경우에 대해서도 Fig. 7의 조건과 마찬가지로 모델의 정확도가 크게 개선된 것을 확인하였다.

두 조건에서의 열음향 모델의 결과로부터 실제 화염의 위치를 고려하여 수정된 모델의 경우에 화염이 덤프면에 위치한다고 가정한 기존의 모델 대비 불안정 영역 예측 정확도를 크게 개선한 것으로 나타났다. 그러나 두 조건에서 모두 실제 불안정 구간 대비 예측된 불안정 구간이 실제 구간보다 넓게 예측되는 현상이 여전히 발견되었다. 이에 대하여 여러 가지 원인이 있을 수 있으나, 가장 큰 요인 중의 하나는 화염면에서의 열분포(heat release distribution)일 것으로 사료된다[1,3]. 본 수정 모델에서 화염의 위치를 실제 측정된 값에 맞추어 이동시킨 후, 기존의 연소장을 기연 구간(burned area)과 미연 구간(unburned area)으로 구별하여 모델의 정확도를 향상시켰다고는 하나, 현재의 모델에서도 여전히 화염은 극히 얇다는 가정 하에서 출발하였다. 그러나 실제의 화염은 Fig. 6의 도식도에처럼 조밀하지 않고, Fig. 4와 같이 연소기에 걸쳐서 넓게 분포하게 된다. 이러한 이유로 야기된 모델의 오차를 개선하기 위하여 Kim[8] 등은 실험적으로 화염의 열분포를 정량화할 수 있는 국부 화염 전달 함수 측정(local flame transfer function measurement)을 제시하였으며, Cheung[12]과 Kato[13] 등은 수식적으로 열분포를 고려하여 모델에 반영할 수 있는 각각의 방안을 제시하였다. 향후 연구에서는 현재의 결과에서 보여준 화염의 위치를 고려한 모델과 더불어 열분포를 반영할 수 있도록 현재 연구 해석 모델을 개선하여 예측 정확도를 더욱 향상시킬 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

4. 결론

저자들의 이전 연구에서 소개된 열음향 모델은 주어진 화염 전달 함수의 결과를 토대로 음향 관계식에 대입하여 비교적 간단하게 가스터빈 희박 예혼합 연소기에서 연소 불안정 특성을 예측할 수 있음을 보였다. 그러나 이러한 이전 결과들은 가스터빈 연소기에서 존재하는 화염의 형상을 과도하게 단순화함으로써, 실제 연소 불안정 결과 대비, 크게 불안정 구간을 과대 예측하는 오차를 야기하였다. 본 연구

에서는 이러한 오차를 최소화하고, 모델의 정확도를 향상시키기 위한 첫 번째 노력으로서, 화염의 실제 위치를 반영할 수 있는 모델을 소개하였다. 이를 위하여 화염면을 실제 측정된 화염 위치로 이동시킨 후, 연소장을 미연구구간과 기연구구간으로 구별하여 음향 관계식을 재유도하였다. 개선된 열음향 모델을 연소 불안정 예측에 도입한 결과, 기존의 이전 결과들 대비 불안정 구간 예측 정확도를 크게 개선한 것으로 나타났다. 그러나 여전히 실제 측정값 대비 불안정 구간을 과대 예측하는 것으로 나타났는데, 이에 대한 주요 원인 중의 하나는 열분포를 반영하지 않고, 화염면이 여전히 매우 얇다는 가정에서 기인한 것으로 판단된다. 현재의 연구 결과로부터 향후 연구에서는 화염의 공간상의 분포(즉, 연소실 내 온도 분포)에 대한 인자들을 평가할 수 있는 방안을 마련하여, 개발 모델의 예측 정확도를 향상시키는 노력이 필요하다.

후 기

이 논문은 2012년도 강릉원주대학교 학술연구조성비지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- [1] 김대식, “열음향 해석 모델을 통한 가스터빈 연소기에서의 선형 안정성 분석”, 한국연소학회지 제17권 제2호, pp. 17-23, 2012.
- [2] 김대식, “난류 예혼합 연소기에서의 흡입 유동 섭동에 대한 화염의 동적 거동”, 한국연소학회지 제14권 제4호 pp. 48-53, 2009.
- [3] 김대식 등, “연소 불안정 예측을 위한 열음향 해석 모델-Part 1: 선형 안정성 해석”, 한국추진공학회지 제16권 제6호, pp. 32-40, 2012.
- [4] Kim, D., “Combustion instability measurements in a lab-scale gas turbine combustor and linear thermoacoustic model development”, Proceedings of 1st KOSCO Workshop, pp. 231-242, 2011.
- [5] Lieuwen, T., “Introduction: Combustion dynamics in lean-premixed prevaporized(LPP) gas turbines”, Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No. 5, pp. 721, 2003.
- [6] Truffin, K. et al., “Comparison and extension of methods for acoustic identification of burners”, Combustion and Flame, Vol. 142, No. 4, pp. 388-400, 2005.
- [7] Poinsot, T. et al., “Theoretical and numerical combustion”, 2nd ed., Edwards, 2005.
- [8] Kim, K. et al., “Spatially distributed flame transfer functions for predicting combustion dynamics in lean premixed gas turbine combustors”, Combustion and Flame, Vol. 157, No. 9, pp. 1718-1730, 2010.
- [9] Kim, K., “Forced response of swirl stabilized flames in hydrogen enriched gas turbines”, Ph. D. Dissertation, Pennsylvania State University, 2009.
- [10] Sattelmayer, T., “Influence of the combustor aerodynamics on combustion instabilities from equivalence ratio fluctuations”, Journal of Engineering for gas turbines and power, Vol. 125, No. 1, pp. 11-19, 2003.
- [11] Davies, P. O. A. L., “Practical flow duct acoustics”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 124, pp. 91-115, 1998
- [12] Cheung, W. et al., “Measurement and analysis of flame transfer function in a sector combustor under high pressure conditions”, Proceedings of ASME Turbo Expo 2003, GT2003-38219.
- [13] Kato, S. et al., “Effect of heat release distribution on combustion oscillation”, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, pp. 1799-1806, 2005.