

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.6.443>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5234(Online)

열분포를 고려한 열음향 모델의 개선

김 대 식*[†] · 김 규 태**

* 강릉원주대학교 기계자동차공학부, ** GE Global Research Center

Improved Thermoacoustic Model Considering Heat Release Distribution

Daesik Kim*[†] and Kyu Tae Kim**

* School of Mechanical and Automotive Engineering, Gangneung-Wonju Nat'l Univ.,
** GE Global Research Center

(Received November 28, 2013 ; Revised March 12, 2014 ; Accepted March 18, 2014)

Key Words: Combustion Instability(연소 불안정), Thermoacoustic Model(열음향 모델), Flame Location(화염 위치), Heat Release Distribution(열분포)

초록: 가스터빈 희박 예혼합 연소기에서 발생하는 연소 불안정 현상을 예측하기 위하여 열음향 해석 기법이 폭넓게 사용되고 있다. 그러나 이러한 모델들은 전체 연소기 시스템과 화염의 형상을 과도하게 단순화함으로써, 모델 정확도에 한계를 드러내왔다. 본 연구에서는 두 가지 측면에서 열음향 모델의 정확도를 개선하고자 하는 노력을 시도하였다. 우선 화염의 위치를 연소기 입구가 아닌 실제 계측 결과를 반영할 수 있도록 열음향 모델을 수정하였으며, 두 번째로는 열 발생 위치가 얇은 화염의 형태가 아닌, 실제 화염의 형상과 같이 열 분포 현상을 반영할 수 있도록 하였다. 모델 수정 결과 기존의 열음향 모델 대비, 불안정 현상의 성장률을 예측하는데 있어서 오차가 줄어드는 것으로 나타났다.

Abstract: Thermoacoustic (TA) models have been widely used to predict combustion instability characteristics in a gas turbine lean premixed combustor. However, these techniques have shown some limitations in improving the model accuracy related to an over-simplification of the combustion system and flame geometry. Efforts were made in the current study to improve the limitations of the TA models. One strategy was to modify the actual flame location in the model, and another was to consider the heat release distribution through the flames. The modified TA model results show better accuracy in predicting the growth rate of instabilities compared with the previous results.

- 기호설명 -

A : 압력파의 복소 진폭
 c : 음속
 f : 주파수
 FTF : 화염 전달 함수
 k : 파수
 L, l : 길이
 n : 전달 함수 이득값
 P, p : 압력

Q, q : 열발생량
 S : 면적
 τ : 시간 지연
 ρ : 밀도
 γ : 비열비
 ω : 각진동수

1. 서론

최근 배출 가스 규제 강화와 고효율 가스터빈에 대한 개발 요구의 증가로 인하여 희박 예혼합 연소기에 대한 관심이 갈수록 증가하는 추세에 있다. 그러나 희박 예혼합 연소 시스템은 고유의

[†] Corresponding Author, dkim@gwnu.ac.kr
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

압력과와 당량비 또는 흡기의 유량 변화에 의하여 발생하는 열발생률의 변동이 서로 위상이 일치하였을 경우 상호 커플링으로 인한 연소 불안정(combustion instability) 현상이 크게 문제로 대두되고 있다. 이러한 불안정 현상은 시스템의 압력 변동 및 진동의 증가를 야기하고 결국 시스템 또는 일부 부품에 치명적인 손상을 일으킨다.

열음향(thermoacoustic) 해석 모델은 연소 불안정을 예측하기 위하여 보편적으로 개발되고 있는 모델링 기법 중의 하나로서, 실제 연소 시스템을 간소화하게 정의한 후, 경계 조건 및 상대적으로 영향이 작은 인자들을 단순화하여 음향파(acoustic wave)와 연소장 사이의 상호 관계식을 도출하여, 엔지니어 및 설계자가 비교적 쉽게 연소장 내부의 열음향 특성을 예측하고, 주요 인자들에 대한 영향 분석을 가능하게끔 하는 해석 기법을 말한다.^(1~7)

저자들의 초기 연구^(1~4)에서는 실험적으로 규명된 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 주파수의 함수로 가진하여 이에 대한 열발생률의 섭동 진폭을 측정 또는 해석하는 방법으로서, 다음과 같은 식으로 정의된다.

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

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

초기 모델의 예측 결과로부터 TA 모델은 불안정 주파수 및 초기 성장률의 전체적인 경향은 어느 정도 예측하는데 성공하였으나, 특정 운전 구간에서는 과도하게 넓은 범위의 불안정을 예측하는 것으로 나타났다. 특히 이러한 과대 예측은 화염의 길이가 긴 경우에 특히 더욱 두드러지는 것으로 드러났다. 또한 저자들의 최근 연구⁽⁵⁾에서는 TA 모델의 오차의 주원인은 화염의 공간상의 분포를 고려하지 못하는 데서 기인한다고 하였고,

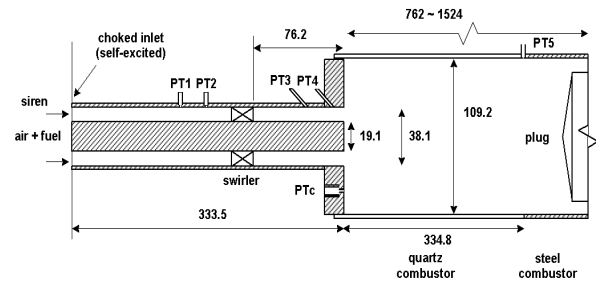


Fig. 1 Schematic of the model combustor

이를 해결하고자 실제 화염 길이를 고려하여 열음향 해석 모델에 반영할 수 있는 방안을 제시하였고, 기존 모델 대비 정확도의 향상을 평가하였다. 그러나 이러한 연구에서도 열방출을 공간이 아닌 한 점에서의 현상으로 규정함으로써 화염에 걸친 열 분포를 고려하지 못하였고, 이에 따른 오차가 상당히 크게 나타난 것으로 드러났다.

본 연구에서는 기존의 TA 모델링 결과들로부터 오차의 원인 및 이를 해결하고자 시도되고 있는 방안들을 정리하며, 실제 화염의 형상 및 열 분포를 모델링에 반영하여 모델의 정확도 향상을 평가하고자 한다.

2. 열음향 해석 모델 및 대상 연소기

2.1 해석 대상 연소기 및 실험 조건

Fig. 1은 본 논문에서 해석 대상으로 선정한 연소기 및 노즐의 개략도이다. 본 연구에서는 Kim 등^(9,10)의 연구에서 소개된 연소기를 해석 대상으로 선정하고, 실험 결과와의 비교를 통하여 모델 검증을 시도하였다. 그림에서 보이듯이, 연소 불안정 발생 조건을 계측하기 위하여 덤프면으로부터 762~1,524mm까지 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. Table 1은 모델 개발을 위해 사용된 연소기의 운전 조건을 나타낸다.

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.^(9,10)

2.2 열음향 해석 모델 및 문제점

열음향학 시스템 해석에 있어서 시스템의 다양한 요소들은 몇 개의 개별 인자로 나누어서 해석하는 네트워크 모델이 사용된다. 본 해석 모델에서는 Fig. 2와 같이 연소 시스템이 노즐과 화염 및 연소기로 크게 3가지의 요소로 간소화될 수 있다.

선형 음향학 이론에 따라 음향파의 속도와 압력은 다음의 지배 방정식에 의하여 정의된다.^(3,7-9)

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

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

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.^(3,7-9)

Fig. 3은 화염 길이를 고려하지 않은 상태로 화염의 위치가 연소기 입구에 부착되어 있다고 가정하였을 경우, 연소기 길이 변경에 따른 연소 불안정이 발생하는 영역을 실험값(도형)과 예측값(실선)을 비교한 것이다. 예측값에서 연소 불안정이 발생하는 조건은 불안정의 성장률(growth rate)이 0보다 큰 영역을 의미한다.^(3,7-9) 그림에서 보듯이 실험값에서는 연소기 길이가 1.35~1.6m 사이에서 연소 불안정이 발생하는 것으로 나타났다. 해석 결과로부터, 이는 Fundamental 모드로부터 기인한 것을 알 수 있으나, 예측값에서는 1.1~1.75m 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^(3,5)에서는 이러한 연소 불안정 구간의 과대 예측(overestimation)은 화염 형상의 단순화로부터 오는 것으로 설명하였다.

Poinsot 등⁽⁸⁾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 0.01이상이 되면 화염의 길이의 영향이 고려되어야 한다고 하였다. 본 논문에서 사용된 조건의 경우에 200Hz의 연소 불

Table 1 Selected test conditions for model validation

Inlet pressure	1atm
Inlet temperature	200°C
Mixture velocity	60m/s
Equivalence ratio	0.6
Fuel composition (in vol.)	100%CH ₄ , 55%CH ₄ + 45%H ₂

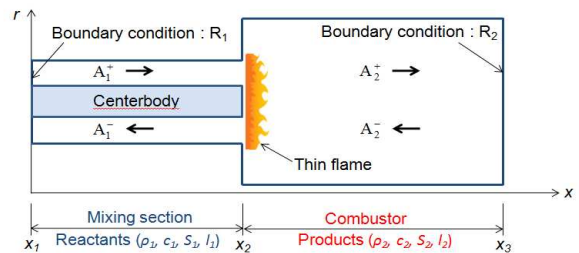


Fig. 2 Simplified model combustor for thermoacoustic analysis

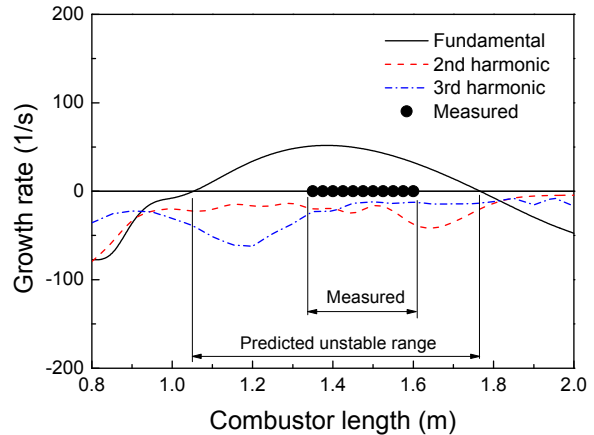


Fig. 3 Instability characteristics as a function of combustor length (for 100% CH₄ flame)

안정에 대하여 계산된 헬름홀츠 수는 0.07~0.18로 Poinsot 등이 제시한 기준을 훨씬 넘는 것으로 나타났으며, 따라서 본 계산의 경우 정확한 연소 불안정 예측을 위해서는 화염의 위치에 따른 영향이 반영되어야 한다는 것을 의미한다.

또한, Kim 등⁽¹¹⁾ 및 Kim 등⁽⁹⁾은 실험적인 방법을 통하여 특히 낮은 당량비 또는 높은 혼합기 속도와 같이 상대적으로 긴 화염이 나타나는 운전 영역에서는 열발생 분포가 화염 전체에 걸쳐서 넓게 나타나는 것으로 측정하였고, 이를 “heat

release distribution factor⁽¹¹⁾” 및 “local transfer function⁽⁹⁾” 등의 개념을 각각 소개하여 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 소개하였다.

Cheung 등⁽¹²⁾과 Kato 등⁽¹³⁾은 이러한 긴 화염에 걸친 열 분포는 식 (1)에서처럼 화염 입구에서 발생한 섭동 성분이 화염에 전달되기까지의 지연 시간(τ)에 대한 오차를 증가시키고, 이는 전체적인 열음향 모델의 정확도에 큰 영향을 미친다고 설명하였다. 이로부터 이들은 각각의 수식적인 모델을 통하여 ‘ $\tau \pm \Delta\tau$ ’의 형태로 열발생을 한 점이 아닌 공간상의 형태로 설명할 수 있는 방안을 제시하였다.

2.3 열음향 모델의 수정

산업용 가스터빈 연소기에서 계측되는 화염의 경우에 대부분 한 점으로 무시할 수 없을 만큼 긴 길이를 보이는 것으로 알려져 있다. 예를 들면, 본 연구의 해석 대상 연소기 노즐의 경우에 운전되는 조건에서 계측된 화염의 이미지로부터, 화염의 길이는 40~100mm 사이의 범위를 갖는 것으로 나타났다.⁽¹⁰⁾ 전술하였듯이, 열음향 모델은 Fig. 2에서와 같이 화염이 얇은 막 형태로 연소기 입구에 존재한다는 가정으로부터 출발한다. 그러나 실제 많은 산업용 연소기에서 계측된 화염 형상의 경우, 화염의 길이를 무시할 수 없을 때가 대부분이다. 저자들의 최근 연구⁽⁵⁾에서는 독일 뮌헨공대의 Sattelmayer⁽¹⁴⁾가 네트워크 모델에서 제안한 방법을 본 연구에서의 열음향 모델에 적용하였다.

Fig. 4는 화염 위치를 수정한 네트워크 요소에 대한 개략도이다. 그림에서 보이듯이 화염의 위치를 참고문헌⁽¹⁰⁾ 상에서 계측된 값으로 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 열발생물의 변동값[W/m³]을 나타낸다.

$$p'(x_5) = p'(x_4) \tag{4}$$

$$S(x_5)u'(x_5) - S(x_4)u'(x_4) = \frac{\gamma - 1}{\gamma\rho_0} \dot{Q}_T \tag{5}$$

또한 면적 변화가 발생하는 연소기 입구 전(②)

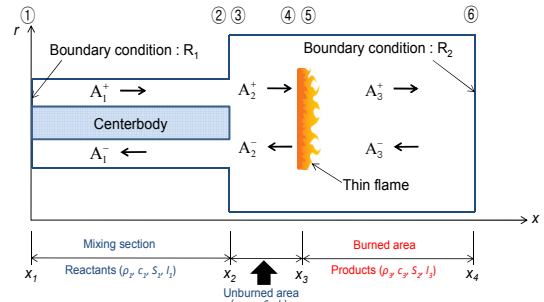


Fig. 4 Modified model combustor for thermoacoustic analysis

과 후(③) 사이의 음향 조건은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$p'(x_3) = p'(x_2) \tag{6}$$

$$u'(x_3) = \frac{S_3}{S_2} u'(x_2) \tag{7}$$

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 invariant 전개로부터 다음과 같이 유도될 수 있다.^(5,14)

$$u'_{2,4} = \frac{u'_{1,3}}{2} (e^{-ik_j L} + e^{ik_b L}) + \frac{p'_{1,3}}{2\bar{c}_{1,3}\bar{\rho}_{1,3}} (e^{-ik_j L} + e^{ik_b L}) \tag{8}$$

$$\frac{p'_{2,4}}{c_{2,4}\bar{\rho}_{2,4}} = \frac{u'_{1,3}}{2} (e^{-ik_j L} + e^{ik_b L}) + \frac{p'_{1,3}}{2\bar{c}_{1,3}\bar{\rho}_{1,3}} (e^{-ik_j L} + e^{ik_b L}) \tag{9}$$

또한, 옮겨진 화염 위치에서 열 분포 영향($\Delta\tau$)을 고려하기 위하여 Cheung 등⁽¹²⁾이 제시한 식을 이용하여 식 (1)을 대체하였다.

$$FTF(\omega) = n(\omega) \frac{e^{i\omega(\tau+\Delta\tau)} - e^{i\omega(\tau-\Delta\tau)}}{i\omega 2\Delta\tau} \tag{10}$$

3. 수정 열음향 모델의 해석 결과

Fig. 5와 Fig. 6은 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 82mm 하류로 세팅하였다. 또한 이 위치에서 $\Delta\tau$ 는 측정된 τ 값의 50%로 고정하였다. 30%와 80%에 대한 $\Delta\tau$ 값의 영향 분석 결과에서도 경향 상의 큰 차이가 나타나지 않은 관계로 본 연구에서는 50%의 결과만 소개되었다. 그래프에서 사각형 실선은 수정 전의 열음향 모델의 예측 결과이고, 삼각형 실선은 화염의 위치만을 측정된 화염의 중심으로 옮긴 상태에서 모델의 해석 결과이고, 마지막으로 별표 실선은 화염의 위치 수정 및 열 분포($\Delta\tau$)까지 고려한 모델의 예측 결과이다.

먼저, Fig. 5는 동일한 운전 조건에서 연소기 길이를 변화시켜가며 측정된 연소 불안정 주파수를 도시한 결과이다. 그림에서 보이듯이, 기존 열음향 모델의 주파수 예측값은 실험 결과 대비, 약 20% 정도 과대평가하는 것으로 나타났다. 주원인은 연소기 내부 온도의 과대 예측과 관련된다.^(3,5) 즉, 화학 평형(chemically equilibrium) 상태에서 계산된 최고 온도값에 해당하는 음속값이 연소기 전체에 걸쳐서 유지되는 것으로 해석 모델에 적용되고, 이는 주파수 해석에 있어서 과대평가로 연결되었을 것으로 분석된다. 수정 열음향 모델의 경우 이러한 주파수 해석에 있어서 오차를 줄이는 것으로 나타났으나, 여전히 실험값과는 10% 이상의 차이가 있는 것으로 드러났다. 이는 여전히 연소기를 기연 영역과 미연 영역으로 나누었음에도 불구하고, 화염 존에서 실제 실험값보다 큰 온도(즉, 음속)가 사용되었기 때문이다.

반면에, Fig. 6에서와 같이 성장률의 예측은 화염 영역의 이동 및 열 분포를 고려하였을 때 불안정 영역의 예측 정확도를 크게 개선하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 모델 예측 정확도를 모델 연소기의 운전 조건 중에서 비교적 짧은 화염이 나타나는 운전 영역에서 검증한 것이다. 이를 위하여 Fig. 6과 당량비 및 입구 속도의 운전 영역은 동일한 상태에서 연료 중에서 수소 분율을 45%까지 증가시킨 경우(55%CH₄ + 45%H₂ in volume)에 대하여 나타내었다. 이때의 측정된 화염의 길이는 40mm이었다.⁽¹⁰⁾ 그림에서 보이듯이, 이 경우에 측정된 연소 불안정 구간은 연소기 길이 0.95~1.12m인 것으로 나타났다. 기존 열음향 모델의 예측 결과도 Fig. 6에서의 긴 화염 대비 오차가

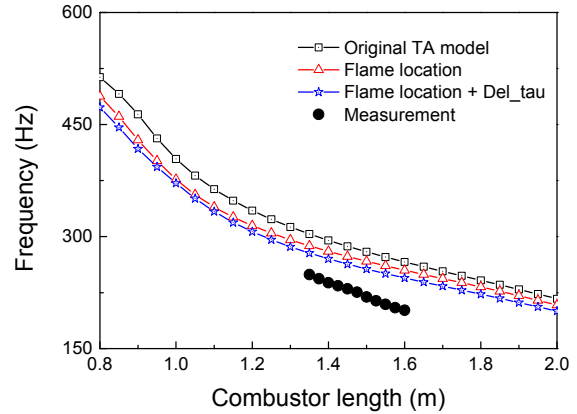


Fig. 5 Instability frequency prediction with original and modified TA models (for 100%CH₄ flame)

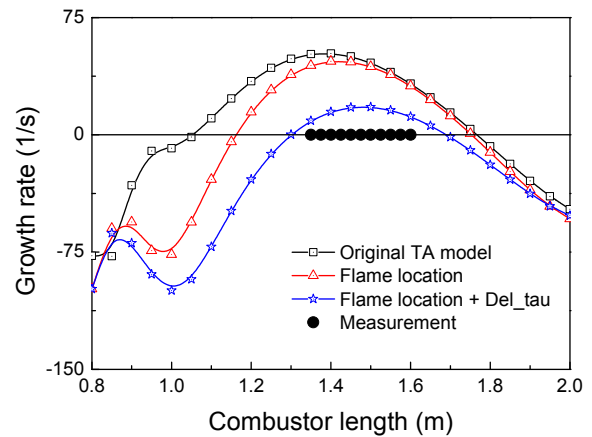


Fig. 6 Growth rate prediction with original and modified TA models (for 100%CH₄ flame)

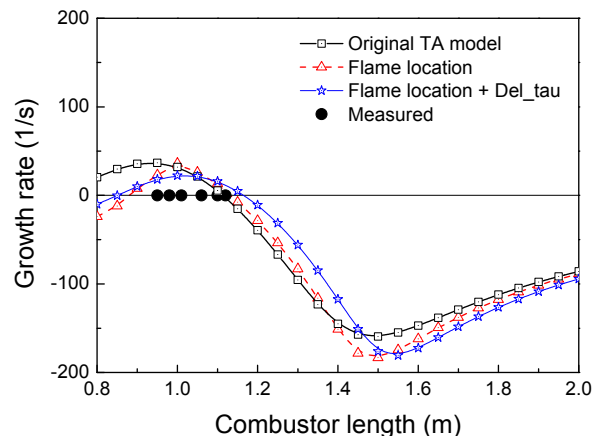


Fig. 7 Growth rate prediction with original and modified TA models (for 55%CH₄ + 45%H₂ flame)

감소하였음을 알 수 있다. 이는 짧아진 화염(82 → 40mm)으로 인하여 화염 중심이 덤프면과 가깝고, 또한 열 분포도 좁은 영역에서 이루어지기

때문이다. 그러나 이 경우에도 마찬가지로, 화염의 위치 이동과 열 분포를 고려한 수정 모델을 통하여 예측한 결과, 해석 정확도가 더욱 개선된 것으로 확인하였다.

4. 결 론

열음향 모델은 해석 대상 노즐과 연소기 시스템을 몇가지 요소로 간략화한 후, 음향 해석으로부터 불안정 현상이 발생하는 주파수 및 성장률을 해석을 통한 불안정 운전 조건을 예측하는 기법이다. 그러나, 기존의 열음향 모델은 화염의 과도한 단순화로부터 주파수 및 성장률 예측값이 크게 해석되는 본질적인 단점을 가지고 있다. 이러한 제한 사항을 개선하기 위하여 본 연구에서 제안한 수정 열음향 모델에서는 화염의 위치를 기존의 덤프면 입구가 아닌 실제 계측된 위치를 고려하여 열음향 지배 방정식을 재해석하였으며, 또한 연소기 길이 방향에 걸쳐서 넓게 존재하는 열분포를 고려하여 열응답 모델을 수정하였다. 수정된 열음향 모델로부터, 주파수 예측의 경우 실험값과의 오차가 다소 줄어들기는 하였으나, 여전히 과도한 연소실 내 온도(음속)의 사용으로부터 과대 예측하는 경향이 나타났으나, 성장률 예측 결과는 해석 정확도가 크게 개선되는 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2013R1A1A2A10009253).

참고문헌 (References)

- (1) Kim, D., 2011, "Introduction to Flame Transfer Function in a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 9, pp. 975~979.
- (2) Kim, D., 2012, "Linear Stability Analysis in a Gas Turbine Combustor using Thermoacoustic Models," *Journal of the Korean Society of Combustion*, Vol. 17, No. 2, pp. 17~23.
- (3) Kim, D. and Kim, K., 2012, "Thermoacoustic Analysis Model for Combustion Instability Prediction - Part 1 : Linear Instability Analysis," *Journal of the Korean Society of Propulsion*, Vol. 16, No. 6, pp. 32~40.
- (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) Kim, D. and Kim, K., 2013, "Thermoacoustic Analysis Considering Flame Location in a Gas Turbine Combustor," *Journal of the Korean Society of Combustion*, Vol. 18, No. 2, pp. 1~6.
- (6) Lieuwen, T., 2003, "Introduction: Combustion Dynamics in Lean-Premixed Prevaporized (LPP) Gas Turbines," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 5, pp. 721.
- (7) Truffin, K. and Poinsot, T., 2005, "Comparison and Extension of Methods for Acoustic Identification of Burners," *Combustion and Flame*, Vol. 142, No. 4, pp. 388~400.
- (8) Poinsot, T. and Veynante, D., 2005, "Theoretical and Numerical Combustion," 2nd ed., Edwards, Philadelphia, pp. 375~430.
- (9) Kim, K., Lee, J., Quay, B. and Santavicca, D., 2010, "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.
- (10) Kim, K., 2009, "Forced Response of Swirl Stabilized Flames in Hydrogen Enriched Gas Turbines," Ph.D. Dissertation, Pennsylvania State University.
- (11) Kim, D., Lee, J., Quay, B., Santavicca, D., Kim, K. and Srinivasan, S., 2010, "Effect of Flame Structure on the Flame Transfer Function in a Premixed Gas Turbine Combustor," *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 132, No. 2, 021502.
- (12) Cheung, W., Sims, G., Copleston, R., Tilston, J., Wilson, C., Stow, S. and Dowling, A., 2003, "Measurement and Analysis of Flame Transfer Function in a Sector Combustor under High Pressure Conditions," *Proceedings of ASME Turbo Expo*, GT2003-38219
- (13) Kato, S., Fujimori, T., Dowling, A. and

- Kobayashi, H., 2005, "Effect of Heat Release Distribution on Combustion Oscillation," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 1799~1806.
- (14) Sattelmayer, T., 2003, "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.