

[特輯] 技術論文

화염 전달 함수를 이용한 열음향 연소 불안정 해석 모델 소개

김대식*

Introduction to Thermoacoustic Models for Combustion Instability Prediction Using Flame Transfer Function

Daesik Kim*

ABSTRACT

This paper reviews the state-of-the-art thermoacoustic(TA) modeling techniques and research trend to predict major parameters determining combustion instabilities in lean premixed gas turbine combustors. Linear TA modeling results give us an information on eigenfrequencies and initial growth rate of the instabilities. For the prediction, linear relation equation between acoustic waves and heat release oscillations should be derived in the determined system. Key information for this analysis is to determine the heat release fluctuations in the combustor, which is typically obtained by using n - τ function from flame transfer function measurements and/or predictions. Great advancement in the linear TA modeling has been made over a couple of decades, and some successful prediction results have been reported in actual gas turbine combustors. However nonlinear TA model developments which are required to analyze nonlinear system behaviors such as limit cycle saturation and transition phenomena are still limited in a very simple system. In order to fully understand combustion instabilities in a complicated real system, nonlinear flame dynamics and acoustic wave interaction with nonlinear system boundary conditions should be explained from the nonlinear TA model developments.

초 록

본 논문에서는 많은 가스터빈 산업체 및 연구기관에서 연소불안정 현상과 관련된 변수들을 예측하기 위해 가장 보편적으로 이루어지고 있는 열음향 해석 모델에 대한 기술 소개 및 최근의 연구 동향을 분석하였다. 선형 시스템 해석을 통하여 연소 불안정이 발생하는 고유 주파수 및 불안정 초기 성장률의 예측이 가능하다. 이를 위하여 정의된 시스템에서의 음향파와 열발생을 섭동간의 선형 관계식을 선형 음향 이론으로부터 유도할 수 있고, 이 관계식의 해를 구하기 위해서 가장 중요한 부분은 화염 전달 함수로부터 n - τ 함수를 구하여 열발생을 섭동 결과에 대한 정보를 얻는 것이다. 현재까지의 연구 결과로부터 선형 특성 해석에는 상당한 진보가 이루어져 왔고, 실제 가스터빈 연소기에 적용하는 노력이 있었으나, 한계 진폭과 과도기 현상 예측을 위해서 요구되는 비선형 동적 특성 모델링 기술 개발은 현재 간단한 연소기와 버너의 적용에 머물러 있는 실정이다. 실제 복잡한 가스터빈과 같은 연소 시스템에 적용되기 위해서는 비선형 경계 조건을 고려한 시스템 동적 특성 연구와 화염의 비선형 거동을 더욱 정확히 설명할 수 있는 전달 함수에 대한 예측 기술이 선행되어야 한다.

Key Words: Combustion Instability(연소 불안정), Lean Premixed Combustor(희박 예혼합 연소기), Flame Transfer Function(화염 전달 함수), Thermoacoustic Model(열음향 모델)

접수일 2011. 7. 13, 수정완료일 2011. 10. 20, 게재확정일 2011. 10. 27

* 정희원, 강릉원주대학교 기계자동차공학부

† 교신저자, E-mail: dkim@gwnu.ac.kr

1. 가스터빈에서의 연소 불안정 현상

가스터빈은 왕복동 엔진 등의 다른 연소 시스

템과 비교할 때, 높은 비출력과, 고효율, 또한 저공해 측면에서의 장점으로 인하여, 항공 분야뿐만 아니라 산업 분야에 걸쳐서 폭넓게 사용되고 있다. 또한 최근에는 열병합 발전에 대한 관심과 연구가 늘어나면서 그 수요는 더욱 증가할 것으로 기대된다[1, 2].

가스터빈 연소기 개발에 관한 최근 연구 동향은 산업 및 항공 분야에서 강화되는 배출 가스 규제로 인하여, 연료 소비율을 줄이면서 NOx 배출량의 저감을 동시에 이루기 위한 희박 예혼합 연소기 개발에 관한 연구로 집중되고 있다. 기존의 연소기는 연료를 주연소 영역에 직접 분사하는 방식이기 때문에 국부적으로 이룬 공연비 영역의 농후한 운전 조건에서 연소 온도의 상승에 따른 높은 NOx 생성이 불가피하다. 그러나 희박 예혼합 연소의 개념은 연료와 공기를 완전히 혼합하여 얻은 균일한 혼합기를 주연소 영역에 공급하고, 당량비를 희박 가연 한계에 가깝게 유지하는 것이다. 이에 따라 저온의 균일한 연소 온도를 유지할 수 있어서 상당한 NOx의 발생을 줄일 수 있다. 이러한 연소 특징들로부터 희박 예혼합 연소기는 항공기 및 산업용 가스터빈의 배출 가스 규제에 대응하기 위한 획기적인 기술로서 인식되고 있다.

그러나 희박 예혼합 연소기에서는 열발생율의 변화와 압력파의 상호 작용에 의한 연소 불안정(Combustion instability) 현상이 큰 문제점으로 대두되고 있다. 희박 예혼합 가스터빈 연소기의 경우, 대부분의 운전 조건이 lean blow out 영역의 매우 낮은 당량비 영역에서 이루어지고, 이러한 영역에서의 화염은 미세한 외부 인자의 섭동에도 쉽게 반응하게 되어, 결국 연소기 입구에서의 작은 당량비 또는 혼합기 속도 변화 등에 대하여 열발생율의 변동이 쉽게 증폭될 수 있게 된다. 이러한 열발생율의 진동은 연소기 내에서의 압력 진동을 초래하게 되고, 다시 연소실 내부 압력 진동은 상류의 노즐 및 연료 공기 혼합 공간으로 피드백되어 혼합기의 속도 및 당량비와 같은 열역학적 상태량의 진폭을 가진시키는 역할을 하게 된다[1, 3, 4]. Fig. 1은 이러한 가스터빈 연소기에서의 연소 불안정 현상을 야기하

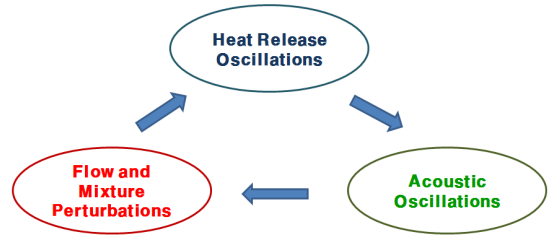


Fig. 1 Feedback relationship between pressure wave and heat release oscillation in combustors [4]

는 열발생과 압력파 사이의 피드백 과정에 대한 개략도를 보여 준다.

또한, 세부적으로 연소 불안정 현상이 발생할 수 있는 조건은 Rayleigh criterion에 의하여 구체화될 수 있으며, Eq. 1과 같이 표현할 수 있다. Eq. 1의 좌변에 해당하는 값이 양의 값을 가질 경우(즉, 압력파(p)와 열발생과(q)의 위상차가 90도 이내일 경우), 비정상 열발생에 의한 시스템 내부의 에너지(acoustic energy)가 증가하게 되고, 이 때, 좌변의 값이 시스템 에너지 손실(L) 과정을 나타내는 우변의 값보다 커지게 될 경우, 연소실은 불안정해지게 된다[1, 3, 4].

$$\int_V \int_T p'(x,t)q'(x,t)dt dV \geq \int_V \int_T \sum_i L_i(x,t)dt dV \quad (1)$$

이러한 연소 불안정 현상이 일정 시간 이상 지속될 경우, 열응력의 축적과 과도한 진동 등으로 인하여 연소실 라이너 및 연료 노즐과 같은 연소기 부품에 손상을 야기할 수 있으며, 더욱 악화될 경우, 터빈과 전체 시스템의 변형 및 파괴로 이어지게 된다. Fig. 2는 연소 불안정 현상에 의하여 파괴된 연소기의 부품 사진을 보여 준다. 이러한 문제로 인한 부품의 검사, 수리, 교체를 위한 직접적인 비용 손실과 이를 위한 전체 시스템의 다운타임과 튜닝을 위한 시간적인 손실을 고려할 경우, 막대한 총 비용 손실이 불가피하게 된다[3, 5]. 따라서 희박 예혼합 가스터빈을 설계, 제작, 사용을 위해서는 연소 불안정 현상에 대한 명확한 이해와, 제어 알고리즘의 파악과 적절한 운전 영역의 선택이 필수적이다.

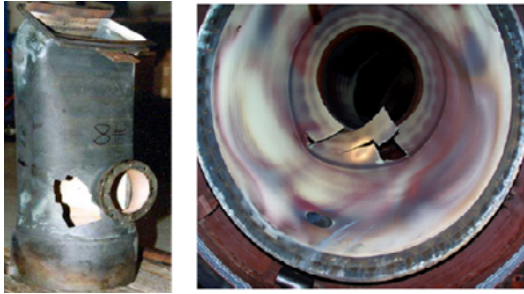


Fig. 2 Transition pieces and combustor liner damaged from combustion instabilities [3]

2. 연소 불안정 해석

전술하였듯이 희박 예혼합 가스터빈 연소기의 설계시, 불안정 연소에 대한 해석 및 예측은 매우 중요한 사항이다. 이를 위하여 전 세계 수많은 가스터빈 산업 분야의 기관들은 앞 다투어 이를 위한 연구 개발 관련 노력을 경주하고 있으며, 이러한 결과들로부터 일부 불안정 연소 특성에 대한 효과적인 예측 기술 개발이 이루어지기도 하였다. 그러나 여전히 많은 부분에서는 예측 기술의 한계로부터 직접적인 실험에 의존하고 있고, 이러한 실험 결과들은 다시 불안정 연소 모델링 기술 발전의 기초 자료로써 활용되고 있다. 좀 더 세부적인 측면에서 현재까지의 모델링 기술 동향을 살펴볼 때, 다음의 세 가지 연소 불안정 특성이 예측 및 해석될 필요가 있다.

2.1 연소 불안정 주파수

세 가지 연소 불안정 특성 중 상대적으로 가장 예측 기술이 보편화된 분야이다. 주파수 및 압력파의 모드 분석은 일반적으로 시스템의 선형 동특성(system linear dynamics) 해석과 평균 연소장 온도 분포만으로도 실험 결과들과 비교할 때, 비교적 높은 정확도를 갖는 모델 개발이 성공적으로 이루어져 왔다[1, 6, 7]. 그러나 Schuller 등의 연구 결과[8]에서와 같이 비선형 시스템 경계 조건을 고려한 해석적 모델(analytical model)의 개발 및 가스터빈 연소기에서의 실증이 요구되고 있다.

2.2 불안정 연소가 나타나는 조건의 예측

가스터빈 연소기의 많은 운전 조건 중 어떤 조건에서 불안정 연소 현상이 나타날지에 대한 예측은 가스터빈 설계자뿐만 아니라, 운영자에게까지 폭넓은 관심 분야일 수밖에 없다. 이를 정확하게 예측하기 위해서는 유동 및 혼합기 섭동에 대한 화염의 동적 거동(flame dynamics)에 대한 이해와 더불어 시스템 감쇠(damping) 과정에 대한 해석도 필수적이다. 이와 관련하여, 지난 10여 년간의 연구 결과들은 음향학적 파동의 교란(acoustic wave disturbances)에 의하여 발생하는 혼합기의 속도 및 당량비의 진동에 대한 화염의 동적 거동을 구하는 것에 집중되어 왔었다[1, 3, 7]. 이를 위해 반드시 선결되어야 할 필수 조건은 유동 변동(flow fluctuation)에 따른 화염의 동적 반응(flame dynamics)에 대한 명확한 이해이다. 이의 정량적 분석을 위하여 가장 보편적으로 시도되고 있는 방법이 화염 전달 함수(flame transfer function)를 구하는 것이다[7-13]. 화염 전달 함수를 통하여 임의의 섭동 성분(혼합기 입구 속도 진동(V') 또는 당량비 진동(ϕ'))에 대하여 화염을 노출시킨 후 열발생율의 진동(Q')이 얻어지게 된다. 이로부터 얻어진 화염의 반응을, 시스템 선형 분석 모델(linear system analysis)에 반영할 경우, 연소 불안정 운전 조건을 예측할 수 있게 된다.

Figure 3은 실험적으로 구하여진 화염 전달 함수의 한 예로써, 가스터빈 연소기에서 완전 예혼합 화염($\phi'=0$)의 경우에 주어진 속도 진동에 대하여 당량비 및 섭동 주파수의 변화에 따른 열발생율의 진동을 보여준다.

그러나 실제 시스템에서 연소 불안정 현상은 연소기의 비선형 동적 특성(nonlinear dynamic characteristics)에 의하여 결정되므로, 시스템 선형 해석을 통한 예측 결과는 실제 연소실에서 발생하는 연소 불안정 결과와의 직접적인 비교를 제한하기도 한다[3, 7]. 따라서 최근의 연구 동향은 이러한 비선형 화염 응답 모델(nonlinear flame response model)을 통한 해석학적 모델 개발[8, 13]에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이나, 현재까지 아직 태동 단계에 그치고 있고,

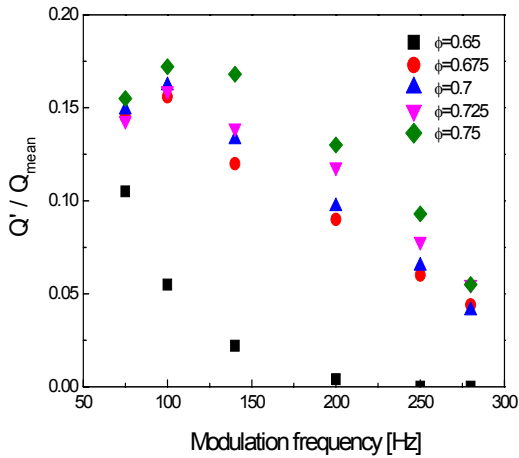


Fig. 3 Effects of modulation frequency and equivalence ratio on heat release oscillation for a given mean velocity perturbation for premixed flames [9]

더욱 많은 연구 및 모델에 대한 개선이 필요하다.

2.3 불안정 연소시 한계 진폭

연소 불안정 현상의 발생시, 연소실 내의 초기 진동은 아주 미세한 값으로부터 어느 일정 수준까지 선형적으로 성장하다가 임의의 한계 진폭(limit cycle amplitude)에서 포화(saturation) 상태에 도달하게 된다. Fig. 4는 한계 진폭을 설명하기 위한 실험 결과의 한 예로써, 화염이 안정된 상태에서부터 연소 불안정시의 한계 진폭에 이르기까지 시간에 따른 연소실 내 동압의 변화를 나타낸 그림이다.

그림에서 보이듯이, 안정 상태에서부터 연소 불안정 현상이 발생할 경우 초기에는 어느 지점까지 압력 진폭은 선형적으로 증가하게 된다. 이때, 진폭의 성장률은 연소기 상류의 유동 섭동 성분과 화염의 동적 반응 사이의 선형 관계에 의하여 결정된다[7-12]. 따라서 이러한 시스템의 선형 지배 과정으로부터 초기 불안정 현상의 성장률과 주파수 특징을 도출할 수 있게 된다. 그러나 불안정 연소의 한계 진폭은 비선형 시스템 과정과 밀접하게 관련되고, 주로 화염의 비선형 반응에 의하여 지배되는 것으로 알려져 있다

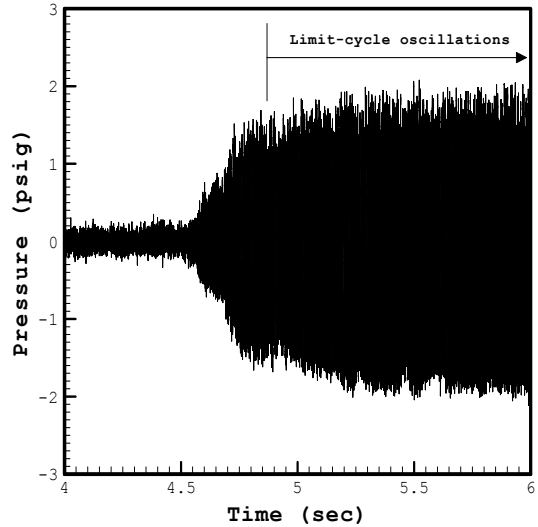


Fig. 4 Dynamic pressure measurement result during transition period from stable to unstable condition [11]

[10-13]. 그러므로 이러한 비선형 화염 동특성은 불안정 한계 진폭을 해석하는데 있어서 매우 결정적인 인자 역할을 하게 된다. 또한 Kim[11]은 이러한 한계 진폭의 크기가 시스템 주파수 천이 현상에도 영향을 미친다는 것을 실험적으로 규명하였다.

정리해 보면, 연소 불안정 현상의 한계 진폭을 정확히 예측하기 위해서는 진폭 변화에 따른 화염 및 시스템의 비선형 거동에 대한 완전한 이해가 이루어져야 만이 가능하다. 가스터빈 설계시 한계 진폭을 예측할 수 있다면, 설계 측면에서 시스템의 안전 계수 등을 설정할 수 있고, 가스터빈의 전체적인 안정성을 평가하는데 매우 유용한 정보가 될 수 있다. 그럼에도 불구하고, 상기하였듯이 비선형 화염 모델 구현의 어려움으로 인하여 다른 두 가지 해석 인자들과 비교할 때, 한계 진폭의 예측은 가장 어려운 난제로 여겨지고 있는 실정이다. 현재까지의 관련된 선행 연구는 연소기의 경계 조건들이 잘 정의된 간단한 층류 화염에서의 해석 기술 개발로 제한되어 있고[8, 13], 실질적인 가스터빈 연소기에서 보이는 난류 연소 현상의 모델링에는 적용되지 못하고 있는 실정이다.

3. 열음향 연소 불안정 해석 모델 소개 및 연구 동향

열음향 해석 모델(thermoacoustic analysis model)이란 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. 본 절에서는 선형 및 비선형 열음향 해석 모델의 해석 방법을 제시하고, 현재까지의 주요 연구 결과를 소개하고자 한다.

3.1 선형 해석 모델

선형 열음향 해석 모델이란 선형 음향 이론(linear acoustic theory)에 따라, 음향 속도와 음향 압력 사이의 지배 방정식을 풀어서 연소 불안정 현상이 발생하는 시스템의 고유 주파수 해석을 통한 시스템 안정성 평가 모델이다.

시스템 선형 해석을 위한 한 예로 해석 대상 물인 임의의 2-D 연소기가 Fig. 5에서 소개되었다. 여기서, 길이 방향의 음향파만이 지배적이고, 화염은 음향파의 파장 대비 매우 짧다고 가정할 때, 선형 음향 이론(linear acoustic theory)에 따라, 음향 속도와 음향 압력 사이의 지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[6, 12].

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

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

여기서, $S = S(x)$ 는 덕트 단면적, q_T' 은 비정상 열발생을 섭동, u' 은 속도 섭동, p' 은 압력 섭동, γ 는 비열비를 각각 의미한다. 화염이 Fig. 5에서와 같이 $x = x_i$ 에서 고정되어 있을 경우(왼쪽 : l , 오른쪽 : r), 화염을 전후로 상류에서 하류로의 음향파의 전파 조건은 화염 전후의 다음의 식으로 정리될 수 있다.

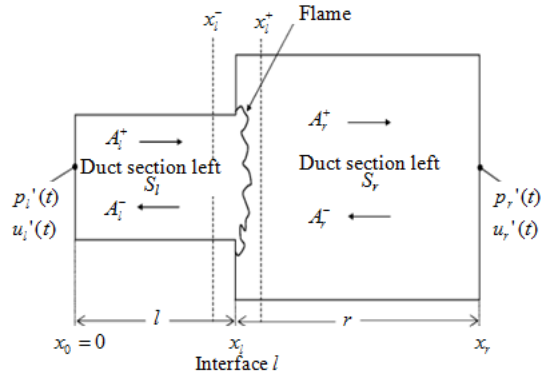


Fig. 5 Schematic diagram of a combustor for linear system analysis [6]

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

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

Equation 2와 3을 적분하여 각각의 항목에 대하여 한계값($x = x_i^-$ 부터 x_i^+ 까지)을 취하고, Eq. 4와 5의 음향파 전파 조건을 적용하면, 선형 가정 하에 유도되는 음향파와 열발생을 섭동간의 선형 관계식을 얻게 되고, 이 선형 관계식의 해로부터 화염 상류 및 하류의 속도와 압력의 섭동이 모두 계산되어 진다.

유사한 연구 결과로서, 많은 연구 그룹들에 의하여 “선형 오일러 방정식(linear Euler equation)[14]”, “음향 섭동 방정식(acoustic perturbation equation)[15]”, “선형 파동 방정식(linear wave equation)[16]”, “헬름홀츠 방정식(Helmholtz equation)[17]” 및 “분산 관계식(dispersion relation equation)[12, 13, 18]” 등과 같은 다양한 형태의 선형 관계식이 질량, 운동량 및 에너지 보존 방정식과 선형 음향 이론으로부터 제안되었다.

그런데 공통적으로 이러한 선형 관계식들의 해를 구하기 위하여 가장 중요한 정보는 Eq. 5에서와 같이 연소기로부터의 발생한 열발생물의 섭동 항을 어떻게 정의하는가이다. 이를 위하여 가장 많이 사용되고 있는 방법이 $n-\tau$ 모델 [10-19]을 이용한 화염 전달 함수를 구하여 화염

으로부터의 열발생을 변화를 예측하는 것이다. 입구 속도 진동에 대한 화염 응답 모델 또는 화염 전달 함수(F)의 결과들은 다음과 같은 $n-\tau$ 함수로 표현된다.

$$F(\omega) = \frac{Q' / Q_{mean}}{u' / u_{mean}} = n(\omega)e^{i\phi(\omega)}, \quad \phi = \tau\omega \quad (6)$$

여기서 ω 는 각진동수(angular frequency)를 의미하고, ϕ 는 화염 전달 함수에서 속도와 열발생과 사이의 위상차를 나타낸다. 또한 τ 는 임의의 지점에서 화염 입구 섭동 성분이 화염에 전달되어 열발생율의 변화로 나타나기까지의 시간 지연을 나타내고, n 은 반응의 강도를 의미한다. 이때, n 과 τ 는 실험으로 측정된 값을 커브 피팅(curve fitting)을 통하여 일반적으로 사용되나, Schuller 등[10]은 계산을 통하여 예측하기도 하였다.

Figure 6은 실험 데이터의 커브 피팅을 통하여 시스템 해석을 위한 n 값을 구한 예를 보여주고, Fig. 7은 해석적 전달 함수 기법을 통하여 구해진 n (gain)과 위상차의 계산 결과의 예를 보여준다.

Figure 8은 층류 예혼합 화염을 통해 해석한

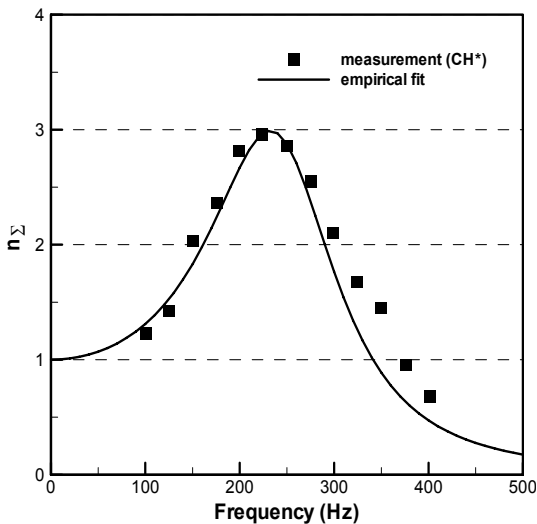


Fig. 6 Measured gain (symbol) and empirical fits (line) as a function of frequency [12]

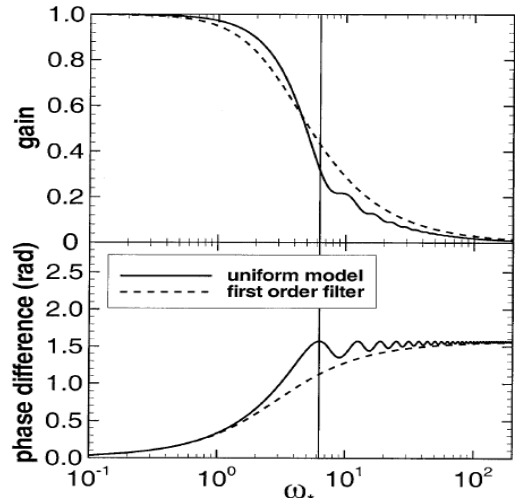


Fig. 7 Example of flame transfer function calculation [10]

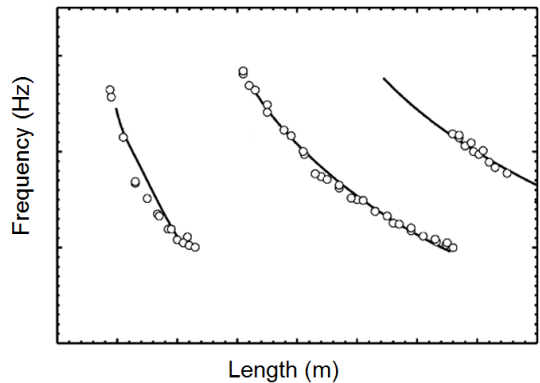


Fig. 8 Example of linear thermoacoustic analysis results (symbol : measurement, line : calculated) [18]

프랑스 국립과학연구소의 연구 결과[18]의 한 예로 연소기의 길이 변화에 따른 음향파의 고유 주파수 분석 결과를 보여준다.

3.2 비선형 열음향 해석 모델

예혼합 연소 시스템에서, 연소기로부터 발생하는 열발생과의 진폭은 당량비 또는 속도 등의 진폭 증가에 따라 초기에는 선형적으로 증가하기 시작한다. 그러나 어느 일정 수준 이상으로 외부 교란 인자의 진폭을 증가시킬 경우 열발생과의 진폭은 더 이상 증가하지 않고 어느 값에

서 포화 상태에 이르게 되어 비선형적으로 반응하게 된다. 이러한 화염의 비선형 거동은 와류 생성(vortex shedding), 당량비 섭동 등 다양한 메커니즘에 의하여 발생하고, 이는 실제 가스터빈의 연소 불안정 현상을 초래하는 중요한 인자로 여겨지고 있다[1]. Fig. 9는 가스터빈 연소기의 예혼합 화염에서 화염 전달 함수 측정 결과 중의 하나로서, 입구 속도 진폭의 증가에 따른 열발생율의 비선형 거동을 보여 주는 예이다. 그림에서 보이듯이, 속도 섭동 진폭 증가 초기에는 열발생율(즉, $(CH^*)/(CH^*)_{mean}$)의 진폭도 선형적으로 증가하다가, 임의의 속도 진폭에 이르러서는 더 이상 열발생율이 증가하지 않고, 포화되어 열발생율은 일정한 값을 보이거나 경우에 따라서는 감소하는 비선형 거동을 보이게 된다. 이러한 비선형 거동이 나타나기 시작하는 속도 진폭은 주파수와 운전 조건의 변화에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다[3, 9].

그러나 앞 절에서의 선형 안정성 해석을 이용해서는 이러한 연소기의 비선형 거동을 해석하는 것은 불가능하다. 따라서 선형 해석을 통해서 는 불안정 현상의 고유 주파수 분석 및 초기 성장률 등의 예측이 가능하나, 더 나아가서 불안정 연소시의 한계 진폭과 천이 과정의 예측을 위해서는 비선형 시스템 거동에 대한 해석이 필수적

이다[3, 8, 12, 13]. 이러한 비선형 모델을 통한 시스템 안정성 해석은 최근 세계 여러 연구 기관에서 관심이 집중되고 있는 분야이나, 실제 가 시적인 연구 결과의 발표는 현재까지도 매우 드 문 실정이다.

Figure 9에서도 보듯이, 화염으로부터의 열발 생은 주파수뿐만 아니라 진폭($|u'|$)에도 크게 의 존하고, 연소기의 비선형 거동을 결정하는 주요 한 인자이다. 따라서 선형 해석시 화염 전달 함 수를 예측하기 위해 사용되었던 Eq. 6은 다시 주파수와 진폭의 함수 형태로 Eq. 7과 같이 재 구성될 수 있다.

$$F(\omega, |u'|) = n(\omega, |u'|) e^{i\phi(\omega, |u'|)} \quad (7)$$

Noiray의 연구[13]에서는 Fig. 10과 같이 실험 결과로부터 속도 진폭과 주파수의 함수로써, 화 염 전달 함수를 구한 뒤, 외삽(extrapolation)과 내삽(interpolation)을 통하여 Eq. 7과 같은 형태 로 표현한 후, 시스템 분산 관계식에 대입하여 비선형 안정성 분석을 하는데 성공하였다.

그러나 이들의 해석에서는 시스템 안정성이 화염 응답 모델의 비선형에만 의존하고, 시스템 감쇠에는 영향을 받지 않는다고 가정하였으나, 최근의 연구 결과[8]에서는 어느 정도 경계 조건 의 비선형성에도 시스템 불안정이 의존하는 것

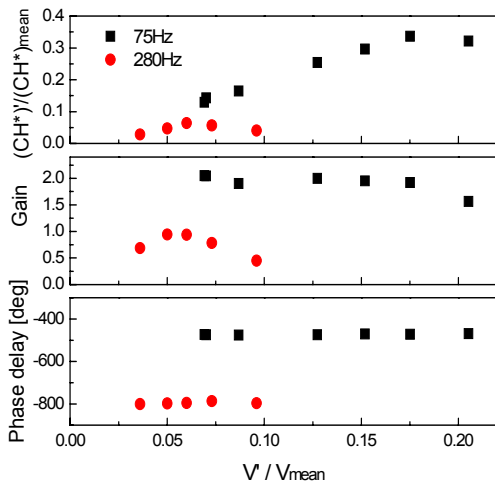


Fig. 9 Effect of amplitude of velocity perturbation on flames' nonlinear behaviors [9]

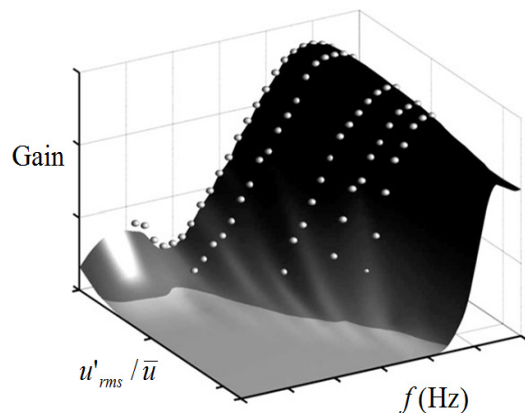


Fig. 10 Flame response model as a function of frequency and amplitude of velocity perturbations [13]

으로 밝혀졌다. 따라서 향후에는 비선형 경계 조건을 고려한 열음향 시스템 안정성 분석 이론에 대한 연구가 더욱 활성화될 것으로 예상된다.

4. 결 론

세계적으로 가스터빈의 수요는 지속적으로 증가하고 있고, 향후에는 더욱더 강화되는 배출 가스 규제 등으로 인하여 희박 예혼합 연소기의 적용은 필수적인 사항으로 여겨지고 있다. 따라서 희박 예혼합 연소기에서 발생하는 연소 불안정 현상에 대한 연구의 필요성은 갈수록 증대될 것으로 보인다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 연소불안정 현상과 관련된 변수들을 예측하기 위해 가장 보편적으로 이루어지고 있는 열음향 해석 모델에 대한 기술 소개 및 최근의 연구 동향을 조사하였다.

선형 시스템 해석을 통하여 연소 불안정이 발생하는 고유 주파수 및 불안정 초기 성장률의 예측이 가능하다. 이 과정에서 선형 이론으로부터 분산 관계식을 유도할 수 있고, 이 관계식의 해를 구하기 위해서 가장 중요한 부분은 열발생을 섭동 결과에 대한 정보이다. 이를 위하여 실험 및 해석적인 방법을 통한 화염 전달 함수로부터 $n-\tau$ 함수를 구하여 열발생 방향의 처리가 가능하다.

또한 연소 불안정 구간에서 천이 과정 특성 및 한계 진폭을 예측하기 위해서는 화염의 비선형 특성이 고려되어야 하고, 이를 위하여 비선형 열발생 특성을 예측하기 위한 화염 전달 함수 및 해석적 방안이 마련되어야 한다.

현재까지의 연구 결과로부터 선형 특성 해석에는 상당한 진보를 이루어지고 왔고, 실제 가스터빈 연소기에 적용하는 노력이 있었으나, 비선형 동적 특성 예측 기술 개발은 아직까지는 간단한 연소기와 버너의 적용에 머물러 있는 실정이다. 실제 복잡한 가스터빈과 같은 연소 시스템에 적용되기 위해서는 비선형 경계 조건을 고려한 시스템 동적 특성 연구와 화염의 비선형 거

동을 더욱 정확히 설명할 수 있는 전달 함수에 대한 예측 기술이 선행되어야 할 것으로 예상된다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2011-0004109)

참 고 문 헌

1. Lieuwen, T., and Yang, V., "Combustion instabilities in gas turbine engines," AIAA, Washington, 2005
2. 오정석, 윤영빈, "가스터빈에서의 연소불안정 현상," 한국추진공학회지, 제12권, 제4호, 2008, pp.63-77
3. Preetham, T., "Modeling the response of premixed flames to flow disturbances," Ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology, 2007
4. 김대식, "희박 예혼합 가스터빈 연소기에서의 화염 전달 함수 소개," 대한기계학회논문집 B권, 제9호, 2011, pp.975-979
5. Lieuwen, T., "Introduction: Combustion dynamics in lean-premixed prevaporized (LPP) gas turbines," Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No. 5, 2003, pp.721
6. Truffin, K., Poinot, T., "Comparison and extension of methods for acoustic identification of burners," Combustion and Flame, Vol. 142, No. 4, 2005, pp.388-400
7. Lieuwen, T., "Modeling premixed combustion-acoustic wave interactions: a review," Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No. 5, 2003, pp.765-781
8. Schuller, T., Tran, N., Noiray, N., and Durox, D., "The role of nonlinear acoustic

- boundary conditions in combustion/acoustic coupled instabilities," ASME paper, GT2009-59390, 2009
9. Kim, D., Lee, J., Santavicca, A., Kim, K., and Srinivasan, S., "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, 2010, pp.021502.1-021502.7
 10. Schuller, T., Durox, D., and Candel, S., "A unified model for the prediction of laminar flame transfer functions: comparisons between conical and V-flame dynamics," *Combustion and Flame*, Vol. 134, No. 1, 2003, pp.21-34
 11. Kim, K., "Forced response of swirl stabilized flames in hydrogen enriched gas turbines," Ph.D. Dissertation, Pennsylvania State University, 2009
 12. Kim, K., Lee, J., Quay, B., and Santavicca, D., "Spatially distributed flame transfer functions for predicting combustion dynamics in lean premixed gas turbine combustors," *Combustion and Flame*, Vol. 157, No. 9, 2010, pp.1718-1730
 13. Noiray, N., Durox, D., Schuller, T., and Candel, S., "A unified framework for nonlinear combustion instability analysis based on the flame describing function," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 615, 2008, pp.139-167
 14. Yu, Y. C., Sisco, J. C., Sankaran, V., and Anderson, W. E., "Effects of mean flow, entropy waves, and boundary conditions on longitudinal combustion instability," *Combustion Science and Technology*, Vol. 182, No. 7, 2010, pp.739-776
 15. Pankiewitz, C., and Sattelmayer, T., "Time domain simulation of combustion instabilities in annular combustors," *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 125, No. 3, 2003, pp.677-685
 16. Pieringer, J., and Sattelmayer, T., "Simulation of Combustion Instabilities in Liquid Rocket Engines with Acoustic Perturbation Equations," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 5, 2009, pp.1020-1031
 17. 김성구, 최환석, 차동진, "연소시스템의 열음향 불안정 예측을 위한 Helmholtz Solver 개발," *한국항공우주학회지*, 제38권, 제5호, 2010, pp.445-455
 18. Noiray, N., Durox, D., Schuller, T., and Candel, S., "Self-induced instabilities of premixed flames in a multiple injection configuration," *Combustion and Flame*, Vol. 145, No. 3, 2006, pp.435-446
 19. Fleifil, M., Annaswamy, A., Ghoneim, G., and Ghoniem. A., "Response of a laminar premixed flame to flow oscillations: a kinematic model and thermoacoustic instability results," *Combustion and Flame*, Vol. 106, No. 4, 1996, pp.487-510