

열-음향학적 불안정 현상의 능동제어를 위한 동역학적 모델링 및 시스템 식별기법 현황

나선화* · 고상호**

Dynamical modeling and system identification for active control of thermo-acoustic instabilities: survey

Seonhwa Na* · Sangho Ko**

ABSTRACT

This paper surveys the recent research activities regarding dynamical modeling of high amplitude - high frequency thermo-acoustic instabilities occurring in gas-turbine engines, rockets, and etc, which are fundamental to actively control of such phenomena. For this, we introduces the reduced-order system modeling approaches, conducted after 1990s. Particularly, we deal with the grey-box approach, which determines the structure of the model based on physical rules and uses system's input-output data for estimating parameters of the model, and the black-box approach, which uses model structure without physics-based interpretation. At the end of the paper, we briefly discuss future directions and feasibilities of the research in this field.

초 록

본 논문에서는 가스터빈 엔진, 로켓 등과 같은 연소시스템에서 발생하는 고진폭-고주파 열음향학적 불안정을 능동적으로 제어하는데 필수적인 동역학적 모델링에 대한 연구 동향을 소개한다. 이를 위하여 1990년대 이후에 진행되었던 연구를 저차의 시스템 모델링 기법을 중심으로 조사하였으며, 특히 물리적 원리로부터 모델의 구조를 결정하고 시스템의 입출력 데이터를 기반으로 모델 파라미터를 추정하는 그레이박스 접근방법과 물리적 원리의 적용 없이 시스템 특성을 추정하는 블랙박스 기법을 소개한다. 또한 동 분야에 대한 향후 가능성에 대하여 간략히 기술한다.

Key Words: Thermo-acoustic instability(열음향학적 불안정), system identification(시스템 식별), limit cycle(제한사이클), heat release(열방출)

1. 서 론

* 한국항공대학교대학원 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과
연락처자, E-mail: sanghoko@kau.ac.kr

열음향학적 불안정성은 가스터빈 엔진, 액체 및 고체 로켓, 램제트 엔진, 맥동 연소기 등과

같은 대부분의 연소 시스템에서 고진폭-고주파 압력이 발생하는 이상 진동 현상이다. 이로 인해 연소기 시스템에 구조적 손상, 추력 감소 및 엔진 정지 등과 같은 문제가 발생하기도 한다. 최근에는 산업용 가스터빈의 연소 현상에서 발생하는 환경공해의 주요 성분인 NOx를 감소시키기 위하여 작은 당량비(equivalence ratio)를 사용하는 희박연소(lean combustion)로 인해 연소 불안정성이 야기되어 엔진 시스템에 이상 진동 현상이 발생하기도 한다.

이 현상은 연소 과정에서 음향학적 압력(acoustic pressure)과 열방출(heat release) 사이의 양의 피드백 연동(positive feedback coupling)에 상호작용에 의해 발생된다는 사실이 Rayleigh에 의해 처음으로 규명되었으며, 다음의 Rayleigh 조건[1]

$$\int_0^T \int_0^V p'q'dvdt > \int_0^T \int_0^V \Phi dvdt$$

에 의해 설명된다. 즉, 연소 과정에서 압력(p')과 열방출률(q') 섭동성분이 동조하여 증가되는 에너지가 연소 시스템 내부에 존재하는 감쇠성분(Φ)에 의해 감소되는 에너지보다 크게 되면 불안정성이 발생하게 되며, 이와 반대가 되면 불안정성이 감쇠된다.

연소 시스템에서 불안정 현상을 줄이기 위해 다양한 방법이 시도되어 왔는데 지금까지는 주로 연소기의 형태나 크기를 변경함으로써 연소기 내부의 음향학적 모드특성을 변화시키는 방법과 연소기 내에 배플(baffle)과 같은 물리적인 장애물을 도입함으로써 특정 진동 모드의 발생을 방지하는 피동적 방법이 주로 적용되어 왔으나, 최근에는 연소기의 구조적인 변경 없이 연소기 내부의 압력이나 열방출량 등을 측정하는 센서와 스피커나 연료분사변조를 작동기로 이용하여 불안정 현상을 줄이거나 제거하는 능동적 방법에 대한 연구들도 진행되고 있다.

이와 관련한 연구가 국외에서는 오래 전부터 다양하게 수행되었다[2-4]. 최근 국내에서도 자력으로 로켓을 개발하는 과정에서 연소 불안정 현상을 경험하였고 이를 이론적으로 정립하려는 노력이 시도되고 있으나 국외에서 진행되는 연

구에 비해 상대적으로 미진하다고 판단된다 [5-10].

특히 제어이론을 적용하여 능동적으로 열음향학적 연소 불안정을 제어하기 위해서는 현상에 대한 동역학적 모델링이 필수적이지만, 열-유체 역학과 연소공학으로부터 유도되는 방정식은 비선형 편미분 방정식이며, 이와 같은 방정식을 이용하여 능동적으로 실시간 제어를 한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 능동적으로 제어를 수행하기 위해서는 연소 불안정성 현상에 대한 저차의 상미분 방정식(reduced-order ordinary differential equation)이 요구된다.

본 연구에서는 이와 같은 목적을 위해 대략 1990년대 이후에 진행되고 있는 열음향학적 불안정성의 능동적 제어를 위한 동역학적 모델링, 특히 시스템 데이터에 기반을 두는 시스템 식별 기법에 대한 현황을 조사하고, 앞으로 불안정 현상의 능동적 제어를 위해 수행되어야 할 방향에 대해 토론하고자 한다.

다른 현황조사 연구에서와 같이 본 연구 목적과 관련된 기존 연구들을 모두 조사하거나 본 논문에서 언급한다는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 조사연구에서는 열음향학적 불안정의 능동제어에 초점을 맞추고 관련된 실현 가능한 저차의 동역학적 모델을 중심으로 기술하고자 한다.

본 논문의 대략적 전개는 다음과 같다. 다음 2장에서는 동적 시스템에 대한 동역학적 모델링에 대한 기법에 대한 소개를 하고, 3장에서는 본 연구논문에서 소개될 모델들의 이론적 배경을 설명하고, 4장에서는 1990년대 이후 열음향학적 불안정성에 대한 대표적인 저차의 동역학적 모델을 소개하고, 마지막으로 5장에서는 기존 연구의 한계와 앞으로의 연구 가능성에 대하여 기술한다.

2. 동역학적 모델링 기법

물리적 시스템의 동역학적 모델링 기법은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 즉, 물리적, 화학적 법칙 등의 1차적 원리를 이용하여 시스템을 모

모델링하는 화이트박스(white-box) 모델링 기법과 대상 시스템의 주요한 변수에 대한 측정 데이터에 기초를 하여 모델 구조를 결정하고 매개변수들의 값을 추정하는 블랙박스(black-box) 모델링 기법이 있으며 이는 물리적 모델을 얻기 어렵거나 복잡한 특성을 갖는 시스템에 유용하게 적용될 수 있다. 마지막으로 화이트박스 모델링과 블랙박스 모델링을 혼합한 기법으로서, 화이트박스 모델링을 통하여 시스템 모델 구조를 결정하고, 측정 데이터를 활용하여 기결정된 시스템의 파라미터 값을 추정하는 그레이박스(grey-box) 모델링 기법이 있다.

앞에서 언급된 바와 같이 능동제어를 위한 열음향학적 불안정 현상의 모델링은 어느 정도 오차가 존재하지만 현상을 거시적으로 보았을 때 (macroscopic) 불안정성과 관련된 주요한 특성을 가급적 저차로 표현하는 것이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 화이트박스 모델링보다는 그레이박스 모델과 블랙박스 모델링 기법을 중심으로 기술한다.

3. 열음향학적 불안정현상 모델의 이론적 배경

본 연구에서 소개되는 열음향학적 불안정 구동 및 감쇠 메커니즘에 대한 모델링들의 대부분은 열음향학적 시스템의 물리적 방정식인 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식과 상태 방정식을 이용하여 파동 방정식에 진동의 감쇠 효과를 인위적으로 추가한 후 모드 확장(mode expansion) 및 저차화(reduction)를 통하여 얻어지며, 본 장에서는 이러한 과정에 대하여 기술한다.

3.1 지배방정식

연소 시스템의 수학적 모델링에 필요한 기초 방정식은 유동 및 연소 현상의 보존 법칙인 질량, 운동량, 에너지 방정식과 상태 방정식으로부터 얻어진다[11,12].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right] + \nabla p = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \gamma p \nabla \cdot u + u \cdot \nabla p = (\gamma - 1)q \quad (3)$$

$$p = \rho R T \quad (4)$$

여기에서 ρ 는 유체의 밀도, u 는 유체의 속도, T 는 온도, γ 는 비열비, p 는 압력, q 는 열방출률을 나타낸다. 압력, 밀도, 그리고 속도를 평균값과 섭동 성분의 합으로 표시하고($p = \bar{p} + p'$, $\rho = \bar{\rho} + \rho'$, $u = \bar{u} + u'$) 위의 식들에 대입한 후 일련의 절차를 통하면 다음의 선형화된 파동 방정식(linearized wave equation)을 얻게 된다.

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 p' = (\gamma - 1) \frac{\partial q'}{\partial t} \quad (5)$$

여기에서 c 는 음속, q' 는 열유속의 변동성분이다.

3.2 모드 확장 방법

식(5)의 파동방정식의 해를 얻는 대표적 방법은 직교하는 음향학적 모드를 확장시키는 방법으로서 갤러킨 확장(Galerkin expansion) 방법과 그린 함수(Green's function)를 이용한 방법을 사용한다.

- 갤러킨 확장(Galerkin expansion)

갤러킨 확장 방법은 압력섭동 p' 을 급수형태로 표현하며, 이를 갤러킨 급수(Galerkin series)라고 한다.

$$p'(x,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \eta_m(t) \psi_m(x) \quad (6)$$

여기에서 $\psi_m(x)$ 는 직교함수로 경계조건을 만족한다. 식 (6)를 식 (5)에 대입한 후 열방출이 연소기 내 한 지점에서만 발생한다고 가정하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{m=1}^{\infty} (\ddot{\eta}_m + \omega_m^2 \eta_m) \psi_m = (\gamma - 1) \frac{\partial q'}{\partial t} \quad (7)$$

이 방법은 Papanizos and Culick[13], Proncia [12,14], Dowling[15-18], Bloxsidge[19]등에서 사용되었다.

- 그린 함수 기법(Green's function technique)

불안정연소에 의해 발생된 압력 섭동 p' 를 결정하기 위해 그린함수를 사용하여 모델을 확장하고, 그린함수는 다음과 같이 정의된다.

$$G(x|x_0, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \eta_n(t) \psi_n(x) \quad (8)$$

이 식 (8)을 파동방정식 (5)에 대입하면 압력에 대한 해를 다음과 같이 얻는다.

$$\hat{p}(x) = \frac{i\omega}{c_p} \int G\hat{q}(x_0) dx_0 \quad (9)$$

이 방법은 Dowling[15], Bloxidsge[19]등, Schuermans[20]이 사용하여 시스템의 안정성을 확인하였다.

4. 열음향적 불안정성의 모델링 기법

4.1 그레이박스 모델링 기법

1990년 이후인 최근에 수행된 열음향학적 불안정성에 대한 그레이박스 모델링 기법은 크게 다음의 네 줄기로 나눌 수 있었다.

- UTRC-Peracchio-Proscia 계열: Paparizos 와 Culick[13]에서 해석된 파동 방정식을 깰러킨 확장을 통한 후 비선형 열방출 모델을 사용한 기법계열로, 대상시스템을 가스터빈엔진으로 함.
- MIT-Annaswamy 계열: 깰러킨 근사화를 통한 음향모델과 유속과 당량비의 영향을 고려한 열방출 모델을 사용한 기법 계열로, 대상시스템을 가스터빈엔진으로 함.
- Cambridge-Dowling 계열: 열음향학적 불안정에 대해 버너에 직접 실험을 하고 화염에 대한 연구를 진행하는 Dowling [15-18], Bloxidsge [19] 모델 계열로, 대상시스템을 후부연소기(afterburner)나 덕티드 연소기로 함.
- Network 계열: 열음향학적 불안정을 전달함수로 표현하고 실험을 수행한 Schuermans [20,21]모델 계열로, 대상시스템을 리케튜브버너으로 함.

4.1.1 UTRC-Peracchio-Proscia계열

• Paparizos-Culick

Paparizos and Culick[13]는 보존방정식의 일반적인 확장기법인 깰러킨 기법을 사용하여 보다 보편적인 근사화 방법을 통한 2차 음향모드의 엄밀해를 구하였다. 대부분의 실제 시스템에서는 공간/주파수 도메인에서 불안정장의 특성의 선형 음향 분석에 의해 실험적, 수치적 데이터들을 얻는다. 그래서 이 기법은 불안정과 관련된 연소 분석에 사용되는데 비섭동 음향장에서 음향과 변동 p' 를 다음과 같이 표현하고 있다.

$$p' = \bar{p} \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n(t) \psi(r) \quad (10)$$

이는 음향모드 진폭에 대한 이차 비선형 방정식을 다음 식 (11)과 같이 표현하고 진폭의 변화가 매우 작다면 그 진폭은 다음 식 (12)와 같은 해를 얻게 된다.

$$\ddot{\eta}_n + \omega_n^2 \eta_n = F_n \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \eta_n(t) &\approx r_n(t) \cos(\omega_n t - \phi_n(t)) \\ &= A_n(t) \sin(\omega_n t) + B_n(t) \cos(\omega_n t) \end{aligned} \quad (12)$$

음향 모드를 이론적으로 정립한 식들은 Pronscia [12,14]등, Dowling[15-18], Bloxidsge[19]등, Schuermans[20,21]의 열음향 현상을 모델링하고 식별하는데 사용되었고, 두 가지 모드에 대한 수치학적인 해를 구하는 연구가 Yoon[22,23]등에 의해 수행되었다.

• Peracchio-Proscia

Peracchio-Proscia[12,14]에서 근본적 불안정성 메카니즘은 혼합길이, 당량비와 속도 민감 열방출을 필수적인 요소로 가지고 있으며, 압력모드의 상호작용과 당량비의 함수인 열방출률과 상호연관성이 있다. 이 메카니즘은 가진 및 감쇠 진동의 형태로 다음 식(13)과 같은 모델구조로 표현되고, 여기에 묘사된 H는 당량비에 관한 함수로 비선형성을 가지며, 열방출률 q를 식 (14)로 표현하였다.

$$\ddot{\eta} + \omega^2 \dot{\eta} + 2\alpha\eta = N \frac{d}{dt} [H(\dot{\eta}(t - \tau))(1 + A)] \quad (13)$$

$$q(t) = H(u(t - \tau)) \quad (14)$$

Figure 1에 나타난 선형 시스템(G)과 시간지연(τ)을 식별하고 비선형성(W)을 매개변수화함으로

써 제한 사이클 시스템에 대한 안정성을 검증하고 UTRC/DARPA 노즐에 직접 실험을 하여 압력과 열방출률을 측정하였다.

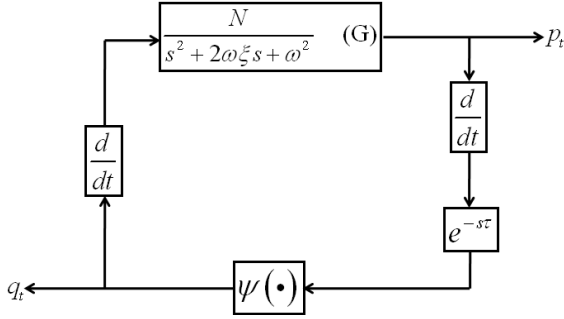


Fig. 1 combustion model of Peracchio-Proscia[1]

• Dunstan

Dunstan[1]은 Peracchio-Proscia모델[12,14]을 기본모델로 선정하고 이를 선형 그레이박스 모델링을 이용하여 시스템과 매개변수를 식별하고 여러 제어기법을 사용하여 모델에 적용하였다. 식별된 시스템을 다양한 기법으로 해석하기 위해 비선형적인 툴인 기술 함수(describing function)를 사용한 분석 기법, 위상 묘사(phase portrait)분석기법, 분기함수(bifurcation function)를 이용한 분석 기법을 통한 시스템 식별을 수행하였다. Fig. 2는 선형 폐회로를 나타낸 것으로 Peracchio-Proscia 모델에 제어기들을 추가한 형태이다.

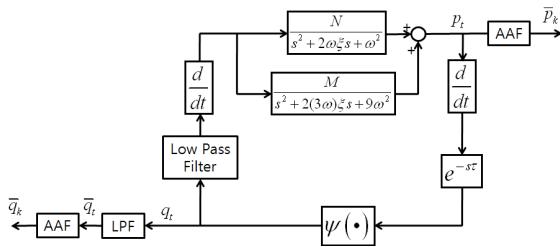


Fig. 2 candidate model structure[1]

4.1.2 MIT-Annaswamy 계열

• Annaswamy

Annaswamy[24-26]등은 연소 모델을 유속 섭동 u'와 당량비 섭동 phi'를 고려한 열방출 모델과 깎

러킨 근사화를 통해 표현한 음향모델을 해석하고 그 두 모델의 조합으로 모델구조를 결정하였으며 그 모델의 안정성을 확인하는 연구를 수행하였다.

음향모델은 깎러킨 방식을 이용하여 당량비와 속도에 대한 함수로, 유한 차원모델(finite dimension model)을 식 (15)로 나타낸다.

$$\ddot{\eta}_i + 2\zeta\omega_i\dot{\eta}_i + \omega_i^2\eta_i = \frac{\tilde{b}_i}{A_c} [d_0u' + d_1(u'_\pi(t)) + d_2(\phi'_\pi(t)) + d_3\phi'(t) + d_\phi\phi'(t)] \quad (15)$$

선형모델을 유도하기 위해 속도 u와 당량비 phi 섭동에 대한 함수로 총 열방출 Q를 표현한다.

$$Q = \kappa(\phi) \int_0^R \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \zeta}{\partial r}\right)^2} dr \quad (16)$$

여기에서 $\kappa(\phi) = 2\pi\rho_u S_u(\phi)\Delta h_r(\phi)$ 이고, S_u 는 연소속도, ρ_u 는 연소 전 혼합물의 밀도이고, Δh_r 은 반응열을 나타낸다.

기본모드의 수가 n이라고 할 때 연소 시스템의 안정성을 알아보기 위해 유한 차원 근사화(finite dimensional approximation)를 통해 전달함수를 단일 모드 표현과 다수모드의 표현을 사용한다. 단일 모드의 표현은 입출력 관계를 통해 나타내고 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$G_1 = \frac{a_0s}{s^2 + \omega^2}, \quad G_2 = \frac{sb_2}{s + b_3} \quad (17)$$

$$\beta = \frac{\frac{d\Psi}{dx}(x_0)\Psi(x_0)}{k^2 E} \quad (18)$$

다수 모드는 단일모드에서 E가 대각 행렬일 때 경계조건($\tilde{u}'_0 = G_q(s)\tilde{q}'_0$, $\tilde{q}'_0 = H_u(s)\tilde{u}'_0$)를 조합하여 전달함수를 얻는다.

$$G_q(s) = a_0 \sum_{i=1}^n \beta_i \frac{s}{s^2 + \omega_i^2} \quad (19)$$

$$H_u(s) = \frac{b_2s}{s + b_3} \quad (20)$$

$$\beta_i = \frac{\frac{d\Psi}{dx}(x_0)\Psi_i(x_0)}{k_i^2 \int_0^L \Psi_i^2(\xi) d\xi} \quad (21)$$

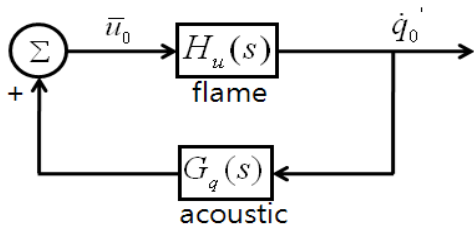


Fig. 3 thermoacoustic instability in a combustion system[24]

4.1.3 Cambridge-Dowling 계열

• Dowling

Dowling[15,16]과 Dowling and Morgans[17,18]은 비정상 연소와 음향파의 상호작용으로 일어나는 비선형진동에 대한 모델을 이론적으로 설명했다. 열음향현상의 비선형성은 열방출률에 의해 발생하므로 Bloxisidge[19]등이 나타낸 선형 화염 모델로 열방출률 q 를 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\hat{q}}{q'} = \frac{1}{1 + i\omega\tau_1} \frac{\hat{u}}{u'} e^{-i\omega\tau_2} \quad (22)$$

이는 순간 열방출률과 유동속도 u_1 에서의 선형섭동의 관계를 설명한다. 비선형섭동을 해석하기 위해 포화형태(saturation type)인 정상상태 열방출 q_{ss} 라는 개념을 도입하여 시간도메인에서 1차 미분 방정식을 표현한다.

$$\tau_1 \frac{dq}{dt} + q(t) = q_{ss}(u_1(t - \tau_2)) \quad (23)$$

Dowling[15,16]과 Dowling and Morgans[17,18]은 덕트에서의 음향파에 대해 연소 전과 후의 관계를 덕트 유동의 함수 f, g, h, j 를 사용하여 나타내고 이 유동함수의 표현으로 유동 매개변수들을 결정할 수 있으며 시간지연항이 있는 전달함수를 설명한다.

$$\begin{aligned} p(x, t) &= \bar{p}_1 + f\left(t - \frac{x-b}{c_1 + u_1}\right) + g\left(t + \frac{x-b}{c_1 - u_1}\right) \\ &= \bar{p}_2 + h\left(t - \frac{x-b}{c_2 + u_2}\right) + j\left(t + \frac{x-b}{c_2 - u_2}\right) \end{aligned} \quad (24)$$

여기에서 b 는 Fig. 3에서 나타낸 것과 같이 불연속되는 지점이다. 식 (22)과 f, g 의 관계, h, j 의 관계를 이용하여 음향파를 g, h, q 로 표현하면 다음

과 같다.

$$X \begin{bmatrix} g(t) \\ h(t) \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} g(t - \tau_u) \\ h(t - \tau_d) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (q(t) - \bar{q})/Ac_1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

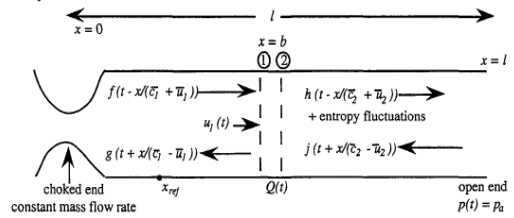


Fig. 4 Scheme of the geometry and flow[16]

4.1.4 Network 계열

• Schuermans

Schuermans[20]와 Schuermans[21]등, Niederberger[27]은 연소불안정 현상을 물리법칙에 기반을 둔 네트워크 모델(networks model)을 사용한다. 연소시스템을 입구, 버너, 화염, 출구, 덕트가 하나의 시스템으로 구성되어 있음을 나타내는 네트워크 모델에서 스피커 입력과 마이크 신호에 의해 얻어진 전달함수는 버너의 영역불연속(area discontinuity)과 화염의 공간적 조건(jump condition)을 고려하여 나타내고 이 값은 측정된 값과 거의 일치한다. Schuermans[20]는 특히 버너와 화염의 전달함수를 구하는데 초점을 맞추었다.

버너모델은 불안정 베르누이 방정식과 연속방정식의 선형화와 음향손실 요소 ζ 와 축소길이 L_{red} 개념을 도입함으로써 표현된다. 비회전성을 갖지 못하는 유동의 음향에너지가 와류로 전환되는 과정을 묘사한 음향손실요소 ζ 와 불연속 위치에서의 평형을 맞추는 유체 질량을 고려한 축소 길이 L_{red} 를 이용하여 상·하류관계를 고려한 버너 전달함수를 표현한다.

$$\begin{pmatrix} p'_u \\ u'_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \rho c \left(M(1 - \zeta - \left(\frac{A_u}{A_d}\right)^2) - i \frac{\omega}{c} L_{red} \right) \\ 0 & \frac{A_u}{A_d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p'_d \\ u'_d \end{pmatrix} \quad (26)$$

여기에서 M 은 마하수, c 는 음속, $i^2 = -1$ 이다.

화염모델은 열입력 때문에 일어난 음향속도의 점프(jump)현상을 음향학적으로 해석한다. 이 모델에서 소개한 τ 는 대류 수송 지연(convective transport lag)으로 표준편차 σ_τ^2 인 정규분포를 갖는다. 속도섭동과 열방출률 섭동의 상관관계를 나타내는 상관지수 n 과 시간지연 τ 를 이용하여 유동의 상·하류 관계를 나타낸 화염전달함수는 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{pmatrix} p'_u \\ u'_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & k + ne^{-i\omega\tau} e^{-\frac{1}{2}\omega^2\sigma_\tau^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p'_d \\ u'_d \end{pmatrix} \quad (27)$$

네트워크 모델은 열음향 시스템의 안정성을 행렬의 고유값 문제와 직결시켜 모델의 식별을 수행한다. Fig. 3은 네트워크 모델의 블록선도로, \hat{p} 와 u 사이의 전달함수 H 와 비선형성을 나타낸 화염전달함수를 표현하기 위한 포화함수(saturation function) Γ 와 버너모델과 화염모델을 나타낸다.

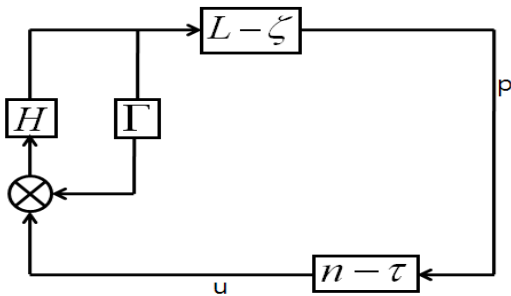


Fig. 5 Block diagram of $L-\zeta$ and $n-\tau$ model

4.2 블랙박스 모델링 기법

2장에서 소개된 바와 같이 열음향학적 불안정성의 동역학적 모델링을 위하여 물리적 원리를 사용하지 않거나 최소로 적용한 블랙박스 접근방법이 최근에 2000년 대 이후에 조금씩 시도되고 있다.

Blonbou[28]등은 리케튜브(Rijke tube)에서 일어나는 열음향학적 불안정성에 대해 물리법칙에 근거한 모델을 세우지 않고 실험을 통해 얻어진 입력과 출력만을 이용한 인공 신경망 회로(artificial neural networks)를 사용하여 연소 시

스템에 대한 동역학 모델을 얻어 능동제어를 수행하였다. 이러한 신경망 회로기법은 일반적으로 고전적 회귀방식(classical regression method)과 비교할 때 소수의 매개변수로도 비선형함수를 근사화할 수 있어 연소모델의 비선형 특성을 모델링하는데 용이하다.

블랙박스 기법의 또 다른 시도는 Ko and Bitmead[29]에 의해 수행되었는데, 이 연구는 Figure 6에 도시된 바와 같이 선형 전달함수 $G(q)$ 와 정적 비선형성 $N(\cdot)$ 이 페루프로 연결되어 제한 사이클로 작동되는 일반적인 자기가진(self-excited) 시스템에 대하여 $G(q)$ 의 출력인 y_k 변수의 측정데이터만을 이용하여 두 요소를 추정하는 기법이다. 이를 위해 두 요소를 모두 직교기저함수(orthonormal basis function)으로 나타내고, 조화균형법(harmonic balance methods)을 적용하였다. 이 연구는 열음향학적 불안정성의 모델링에 직접적으로 응용될 수 있다. 4장의 앞에서 언급된 다른 그레이박스 모델링 기법과 비교할 때 하나의 변수 데이터만 식별에 사용되므로 추정결과는 상대적으로 오차가 많이 발생되지만, 연소기를 사용하는 실제 공학시스템에서 가급적 적은 물리변수의 측정데이터를 사용하여 실시간으로 식별하고 능동제어를 하는데 적절한 개념이라고 판단된다.

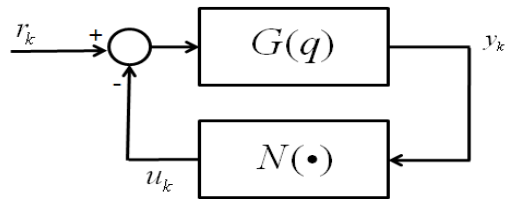


Fig. 6 standard nonlinear feedback system[29]

5. 문제점 및 가능성

지금까지, 음향장과 열방출의 상호작용으로 발생하는 열음향학적 불안정성을 능동적으로 제어하는데 필수적인 동역학적 모델링 기법에 대하여 1990년대 이후에 수행된 연구를 중심으로 기

술하였으며, 특히 저차의 모델링을 위하여 시스템의 입출력데이터를 활용하여 시스템의 동역학적 특성을 추정하는 시스템 식별기법과 관련된 연구에 대해서도 소개하였다.

현재 국외 여러 학교와 UTRC, GE Global Research Center와 같은 기업 연구소를 중심으로 열유향학적 불안정성에 대한 연구가 진행되고 있다. 추후 동 분야에 대한 발전 방향성으로는 산업용 가스터빈, 램제트 엔진 및 로켓에서 실시간으로 불안정 현상을 탐지하고, 식별하며, 또한 능동적으로 제어할 수 있는 기법에 요구되리라 판단된다. 이를 위해서는 열유향학적 불안정성에 대하여 어느 정도 오차가 있더라도 가급적 단순한 동역학적 모델링이 요구되며, 또한 실시간 탐지 및 식별에는 적은 수의 물리적 측정 변수로 가능하여야 한다.

열유향학적 불안정성의 해석 및 능동제어는 연소공학, 열/유체공학, 동역학 그리고 제어공학이 융합된 분야로서 국외에서는 1990년 이후에 활발하게 연구가 진행되고 있고, 현재 국내에서도 조금씩 몇몇 학교를 중심으로 연구가 진행되고 있으나 상대적으로 미흡하다고 판단된다.

본 현황조사 및 소개 연구를 통하여 국내에서도 동 분야와 관련된 여러 세부 분야의 전문가들이 협력하여 활발한 연구가 이루어지는 기회가 되길 바란다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(331-2008-1-D00105).

참 고 문 헌

1. Wayne J. Dunstan, "System identification of nonlinear resonant systems", 2003
2. G. F. Carrirer, The mechanics of the Rijke tube, pp.383-395, 1955

3. David T. Harrje, Liquid propellant rocket combustion instability, National Aeronautics and Space Administration, 1972
4. F. E .C. Culick, Vigor Yang, Liquid Rocket Engine Combustion Instability, pp3-37, 1995
5. 권영필, 이주원, 임정빈, 이동훈, "표면 연소기의 연소 진동음에 관한 연구", 공기조화 냉동공학회, 동계학술대회, pp. 329-334, 1996
6. 이길용, 윤웅섭, 손채훈, 김영목, "고주파 연소불안정 예측을 위한 수치적 해석모델", 한국항공우주학회, pp.559-568, 2001
7. 홍정구, 이민철, 신현동, "열-음향에 의한 난류회박 예혼합연소의 불안정성에 관한 실험적 연구", 대한기계학회, 제16호 ,pp. 1166-1171, 2004
8. 성대현, 허환일, 손채훈, "액체 로켓엔진의 연소 불안정성 연구 동향", 한국항공우주공학회 제32호, pp. 153-161, 2004
9. 김현준, 배수호, 신현동, "덤프 연소기에서의 열음향 불안정에 관한 수치적 연구", KOSCO SYMPOSIUM 논문집, 제31회, pp. 294-301, 2005
10. 김병선, 김동준, 김현성, 윤영빈, "연소불안정 저감을 위한 음향학적 감쇠기능성 스월 인젝터", 한국추진공학회, 제28호, pp. 1007-1011, 2006
11. F. E. C. Culick, "combustion instabilities in liquid-fueled propulsion systems - an overview", AGARD conference, no.450, 1988
12. R. M. Murray, C. A. Jacobson, R. Casas, A. I Khibnik, C. R. Johnson Jr., R. Bitmead, A. A. Peracchio, W. M. Proscia, "System identification for limit cyclein systems: a case study for combustion instabilities", American Control Conference, pp.2004-2008, 1998
13. Neonidas G. Pappazios, F. E. C. Culick, "The two-mode approximation to nonlinear acoustics in combustion chambers", Combustion science and technology, vol.65, pp.39-65, 1989

14. A. A. Peracchio, W. M. Proscia, "Nonlinear heat-release/acoustic model for thermoacoustic instability in lean premixed combustors", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 121, pp.415-421, 1999
15. A. P. Dowling, "The calculation of thermoacoustic oscillations", *Journal of Sound and Vibration*, vol.184, no.4, pp.557-581, 1995
16. A. P. Dowling, "Nonlinear acoustically-coupled combustion oscillations", *AIAA and CEAS*, pp.1-12, 1996
17. A. P. Dowling, A. S. Morgans, "Feedback control on combustion oscillation", *Annual Review of Fluid mechanics*, vol.36, pp. 151-182, 2005
18. A. S. Morgans, A. P. Dowling, "Model-based control of combustion instabilities", *Journal of sound and vibration*, vol.299, pp.261-282, 2006
19. G. J. Bloxidge, A. P. Dowling, P. J. Langhorne, "Reheat buzz: an acoustically coupled combustion instability", *Journal of Fluid mechanics*, vol.193, pp.445-473, 1988
20. Bruno Schuermans, "Modeling and control of thermoacoustic instabilities", 2003
21. Andre S. P. Niederberger, Bruno B. H. Schuermans, Lino Guzzella, "Parameter identification for a low-order network model of combustion instabilities", *International journal of spray and combustion dynamics*, vol.1, pp.113-142, 2009
22. Hyun-Gull Yoon, John Peddieson, Kenneth R. Purdy, "Mathematical modeling of a generalized Rijke tube", *International Journal of Engineering Science*, pp.1235-1264, 1998
23. Hyun-Gull Yoon, John Peddieson, Kenneth R. Purdy, "Non-linear response of a generalized Rijke tube", *International Journal of Engineering Science*, pp.1707-1723, 2001
24. A. M. Annaswamy, A. F. Ghoniem, "Active control in combustion systems", *IEEE Control System*, vol.15, no.6, pp.49-63, 1995
25. A. M. Annaswamy, M. Fleifil, Jennifer W. Rumsey, Ravi Prasanth, Jean-Pierre Hathout, A. F. Ghoniem, "Thermoacoustic instability: model-based optimal control designs and experimental validation", *IEEE Transactions on control systems technology*, vol.8, no.6, pp.905-918, 2000
26. A. M. Annaswamy, A. F. Ghoniem, "Active control of combustion instability: theory and practice", vol.22, no.6, pp.37-54, 2002
27. Andre S. P. Niederberger, investigations of thermoacoustic oscillation-modeling, identification and control, 2006
28. R. Blonbou, A. Laverdant, S. Zaleski, P. Kuenmann, "Active control of combustion instabilities on a Rijke tube using Neural Networks", *Proceedings of the Combustion Institute*, vol.28, pp.747-755, 2000
29. Sangho Ko, Robert R. Bitmead, "Identification for nonlinear feedback limit-cycle systems using harmonic balance methods", *IEEE CDC*, pp. 2506-2511, 2006