정규직교분해법을 이용한 가스터빈 연소불안정 고속 화염거동의 이해

윤석현* · 박혜미* · 이민철*,†

Understanding of the High-speed Flame Movement of Gas Turbine Combustion Instability using a Proper Orthogonal Decomposition Method

Seokhyun Yoon · Hyemi Park · Min Chul Lee*†

ABSTRACT

This paper presents the methods and examples of proper orthogonal decomposition analysis for the understanding of high speed flame movements induced by combustion instabilities in a gas turbine. Phase resolved high-speed flame images were obtained from the combustion test of an industrial gas turbine at the rate of 2000 frame per second, and were utilized for the proper orthogonal decomposition. This analyzing method provided useful information regarding combustion instability characteristics bringing alleviation idea of the instabilities, such as principle modes of flame movement and their energy fractions which mean by which modes and how much the flame coherent structures are composed.

Key Words : Gas Turbine Combustion, Combustion Instability, Proper Orthogonal Decomposition

가스터빈 및 추진기관에서의 연소불안정은 질소산화물 저감 및 효율증대를 위해 희박예혼합 연소기술의 사용과 함께 매우 중요한 문제로 대두되어 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다. 이러한 연구는 연소불안정의 현상적 관찰[1]과 메카니즘 분석[2, 3] 등을 통해 그 다양한 원인을 이해하고, 이를 저감시키기 위해 수동적, 능동적 방법을 사용[4]하는 등의 노력으로 확대되어 왔다.

본 연구는 최근 연소불안정 발생현상을 조사한 논문 중 하나로서 고속촬영기법을 통해 가시화하고, 그 현상을 수학적 기법을 통해 분석한 연구로서 정규직교분해법(Proper Orthogonal Decomposition, POD)을 사용하여 화염의 고속거동에 관한 다양한 정보를 이해할 수 있는 연구 방법론을 소개하였다.

1. 열유체 분야에 있어 POD의 활용

POD는 주성분분배법(Principal Component Analysis, PCA)방법과 유사하게 종속적 관계를 가질 수 있는(possibly correlated) 집합을 선형독립(linear independent)이면서 직교(orthogonal)하는 변수들의 집합으로 변환하여 그 주성분을 파악하는 통계적 분석방법이다. 이 방법은 열유체 분야에 있어서 속도벡터장을 이차원적인 행렬값으로 변환하여 주된 유체의 흐름파악이나, 난류강도의 계산에 활용되기도 하고, 화염이미지와 같은 스칼라장의 주기적 섭동성분을 직교모드별로 구분하여, 주된 모드를 파악하는데 활용되기도 하며, 영상처리 분야에 있어서는 화염의 이미지를 전체모드가 아닌 주된 모드만을 추출하여, 재현함으로서 영상의 크기를 줄여 압축 저장·재생하는데 활용되기도 한다.

2. POD 해석 절차

본 연구에서는 연소불안정 발생시 영상증폭 고속카메라(Image Intensified High Speed Camera)를 이용하여 빠르게 진동하는 화염의 OH 자발광을 Fig. 1과 같이 계측하고 이를 POD 분석에 사용하였다.

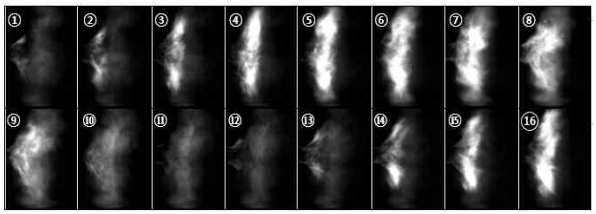

Fig. 1 Instantaneous OH-chemiluminescence images

* 인천대학교 안전공학과
† 연락저자, LMC@inu.ac.kr
TEL : (032)-835-8295 FAX : (032)-835-0779

획득된 2차원의 이미지는 시간에 따라 정열하고, 그 이미지를 x-y 공간 매칭하여 Correlation Matrix(**U**)를 생성한다. 이 후 식 1에 의해 Covariance를 계산하여 Spatially correlated matrix, **C**를 생성하고, 이에 대해 singular value decomposition(SVD)을 이용하여 고유치(eigenvalue)와 그에 대응하는 고유벡터(eigenvector)를 식2 와 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{C} = \mathbf{U}\mathbf{U}^T \quad \cdots\cdots \text{(식 1)}$$

$$\mathbf{C}\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x} \quad \cdots\cdots \text{(식 2)}$$

여기서 λ와 **x**는 각각 고유치와 그에 대응하는 고유벡터이다. 이 후 기저함수(ϕ)는 식 3을 통해 계산할 수 있고, 이를 정규화(normalization) 하면 식 4와 같이 정규화된 기저함수(Normalized basis function) 구할 수 있다.

$$\phi = \mathbf{U}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} \quad \cdots\cdots \text{(식 3)}$$

$$\phi_{n,ij} = \frac{\phi_{ij}}{\left(\sum_j \left(\phi_{ij}\right)^2\right)^{1/2}} \quad \cdots\cdots \text{(식 4)}$$

다음으로 Correlation Matrix, U와 정규기저함수 ϕ_n을 행렬곱하여 이미지에 대한 시간계수행렬(**T**)을 식 5와 같이 얻을 수 있는데, 이는 각각의 사용된 이미지가 서로 직교하는 성분으로 행렬의 Norm이 1인 행렬을 곱함으로써 각각의 고유치 방향으로 정규직교분해되는 것을 의미한다.

$$\mathbf{T} = \mathbf{U}\phi_n(\mathbf{x}) \quad \cdots\cdots \text{(식 5)}$$

이 때 **T** 행렬은 각각의 촬영된 이미지의 시간간격을 둔 대표하는 계수 값들에 해당하고, 특정모드들의 결합번호를 곱할 때 그 모드들의 합으로 화염의 거동을 구현할 수 있으므로 계수행렬이라 지칭한다.

이후 기저함수 ϕ_n을 이미지 형태로 전환하여 저장할 경우 각각의 주된 POD 모드를 그 주된 성분이 큰 순서대로 얻을 수 있다. 이는 SVD의 특징이기도 한다. 이미지 행렬을 얻을 때, 사용되는 행렬은 이해도를 높이기 위해 식 6 및 7과 같이 성분별 나타내었다.

$$\mathbf{B}_{(1)} = \begin{pmatrix} \phi_{1,1} & \cdots & \phi_{1,792} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{1,723096} & \cdots & \phi_{1,72388} \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots \text{(식 6)}$$

$$\mathbf{B}_{(1)} = \begin{pmatrix} \phi_{1,1} & \cdots & \phi_{1,792} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{1,723096} & \cdots & \phi_{1,72388} \end{pmatrix} \quad \cdots\cdots \text{(식 7)}$$

3. POD에 사용되는 이미지 수가 해석결과에 미치는 영향분석

POD 분석결과로 얻어지는 주된 모드의 대표 화염이미지는 Fig. 2와 같이 얻어진다. POM(Proper Orthogonal Mode, POM)-1 부터 사용된 이미지의 개수만큼 그 모드를 구할 수 있지만, 여기서는 POM-7까지만을 도시하였고, 특히 고유치가 큰 순서대로 나열되었기에 대분의 주성분이 포함되어 있다고 말할 수 있다. 한편 POD분석에 사용되는 이미지의 수가 결과에 미치는 민감도를 Fig. 2 및 3과 같이 분석하였다. 사용된 이미지의 수 즉 U 행렬을 구성하는데 사용된 OH자발광 이미지의 수를 500개, 400개, 300개, 200개, 100개, 50개, 25개로 변화시켰을 때, 그 결과를 Fig. 2와 같이 도시하였는데, 400~500개의 이미지를 사용하면 POM들이 거의 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉 400개의 이미지와 500개의 이미지는 그 활용도 측면에서 동일한 POD 결과를 얻게 하므로 계산시간 측면에서 400개의 이미지 만을 활용하는 것이 효율적이다라고 할 수 있다. 또한 300개 이하의 이미지를 사용할 때 점점 더 500개를 사용할 때와 하위 POM으로 갈수록 모드 이미지의 차이를 보이다가 50개와 25개에서는 현저한 이미지의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 한편 시간계수행렬을 통해서 POM별 상관관계를 회귀분석법(Regression Analysis)에 분석해 보면, Fig. 3과 같이 상호상관계수를 얻을 수 있고, 이는 400개의 이미지 데이터를 활용시 POM-1부터 POM-5까지 상관계수가 모두 1이 됨을 확인할 수 있는 반면, 300이하에서는 하위모드인 POM-5부터 상관계수가 낮아져서, 이미지의 수가 100이하에서는 상관계수가 낮은 모드일 경우 더 현저히 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

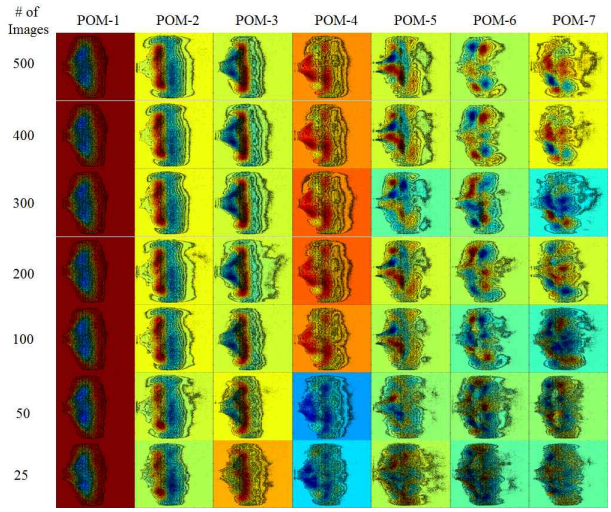

Fig. 2 Principle POMs with respect to the number flame images for POD calculation

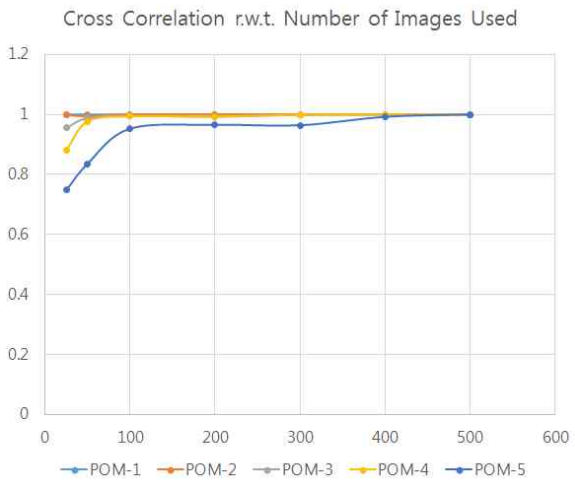

Fig. 3 Cross correlation coefficients between time coefficients of the POD analysis case using 500 images and time coefficients of the other cases using 400, 300, 200, 100, 50 and 25 images.

POD분석을 통해 주된 화염의 모드는 POM-1에서 화염의 평균장 이미지와 같은 중심된 모드를 대표적으로 볼 수 있고, 이후 POM-2와 POM-3에서 길이방향 모드(Longitudinal Mode)의 화염진동을 이후 POM에서는 스월유동의 화염진동 모드를 볼 수 있으며, 이하 고차 모드에서는 난류화염강도 특성을 대표하는 모드의 변화가 심하고, 그 상대적 위치 분포영역이 작은 모드가 주로 관찰되었다. 이렇듯 POD분석을 통해 고속 진동하는 화염의 주된 진동모드 및 그에 대응하는 에너지 강도 그리고 모드들 간의 상관관계를 이해하는 등 많은 정보들을 얻을 수 있다.

후 기

이 논문은 인천대학교에서 수행 중인 국민안전처의 기업재난관리 전문인력 양성사업으로 지원되었습니다.

참고 문헌

[1] Rogério Pirk et al., “Liquid rocket combustion chamber acoustic characterization”, J. Aerosp.Technol. Vol.2(3), 2010, pp. 269-278.
[2] M. C. Lee et al., “Investigation into the Cause of High Multi-mode Combustion Instability of $H_2/CO/CH_4$ Syngas in a Partially Premixed Gas Turbine Model Combustor”, Proc of the Comb Inst Vol. 35, 2015, pp. 3263 - 3271.
[3] Nicholas Syred, “A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 32, 2006, pp. 93-161.
[4] Christian oliver paschereit et al., “Control of thermoacoustic instabilities and emissions in an industrial-type gas-turbine combustor”, Twenty-seventh Symposium (international) on Combustion/the Combustion Institute, 1998, pp. 1817 - 1824.