

# Combustion Instability Modeling for a Lean Premixed Gas Turbine Combustor using Flame Transfer Function Approach

Daesik Kim<sup>\*\*</sup>, Dong-Jin Cha<sup>\*\*</sup>

## ABSTRACT

In an IGCC plant, one of the most important issues on fuel flexibility in the lean premixed combustor is combustion instabilities. They are characterized by large amplitude pressure oscillations which are caused by unsteady heat release from the flames. The relationship between the unsteady heat release and flow oscillation can be qualitatively and quantitatively explained by flame transfer function. This paper introduces combustion instability modeling methods based on the flame transfer function approach.

**Key Words** : IGCC, Lean Premixed Combustor, Combustion instability, Flame Transfer Function

IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle)는 친환경, 고효율이라는 점에서 기존의 화력발전을 대체할 수 있는 차세대 발전 시스템으로 전 세계적인 관심을 받고 있다. IGCC 시스템은 석탄을 고온 고압 아래에서 기체화하여 복합발전에 이용하여 전기를 생산하는 친환경 발전 기술 방식으로서, 기존의 석탄 화력 발전에 비해 높은 효율을 가지며, 질소산화물(NO<sub>x</sub>)과 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 크게 절감하는 것이 가능하다. 그러나 가스화된 합성연료(synthetic gas 또는 syngas)는 기존의 메탄(CH<sub>4</sub>), 일산화탄소(CO) 뿐만 아니라 다량의 수소를 함유하고 있고, 연료의 생성 방식에 따라 연료 조성이 크게 변동하게 되어, 기존의 천연 가스만을 연료로 사용하는 열병합 발전의 회박 예혼합 연소기 대비, 화염 및 연소 특성이 확연히 달라지게 되어 가스터빈의 연소기 적용 기술에도 크게 영향을 미치게 된다[1].

이러한 연료의 다변화가 가스터빈의 화염 및 연소 특성에 미치는 다양한 영향 중, 연소 동특성에 의한 연소 불안정 현상의 특성 변화는 성공적인 IGCC 가스터빈 연소기 기술 개발을 위한 핵심 인자로 여겨지고 있다. 회박 예혼합 연소기에서 연소 불안정은 화염으로부터 발생한 불안정 열방출과 연소기 고유의 압력파의 상호 작용으로부터 기인한다. 구체적으로 설명하자면, 열발생과

와 연소기 내부의 압력파가 서로 위상이 동일할 경우(in-phase), 서로의 진폭을 가진시게 된다. 이 때, 연료의 조성이 바뀌게 된다면, 이는 화염의 속도와 형상이 변하게 되고, 이는 결국 압력파와 열발생율의 위상차에 영향을 미치게 되어 연소 불안정 현상이 나타나는 조건도 크게 달라지게 된다[2].

따라서, 가스터빈 연소기에서 연소 불안정 현상이 나타나는 조건을 예측하고 더 나아가서 이러한 현상이 억제될 수 있도록 제어하기 위해서는 연료 조성 변화에 대한 화염으로부터의 열발생율의 정확한 위상 제어 및 예측이 무엇보다 중요한 인자라고 할 수 있다. 이를 위하여 가장 보편적으로 연구되고 있는 방법이 화염 전달 함수(flame transfer function, FTF)를 구하는 것이다[3-6]. 화염 전달 함수란 내부 압력파에 의하여 발생한 당량비 및 혼합기 속도와 같은 유동 섭동 인자에 의하여 화염의 진동을 정량적, 정성적으로 구하는 것으로서, 다음의 식을 통하여 주파수( $f$ )의 함수로서 얻어질 수 있다.

$$FTF(f) = \frac{Q'(f) / Q_{mean}}{V'(f) / V_{mean}} \quad (1)$$

여기서,  $Q_{mean}$ 은 열발생율의 시간 평균값이고,  $V_{mean}$ 은 입구 유동 속도의 평균이며,  $Q'$ 과  $V'$ 은 각각의 시간 섭동값이다.

Figure 1은 당량비의 섭동이 없는 완전 예혼합 화염에서 연료의 조성 변화(100% CH<sub>4</sub> vs. 55% CH<sub>4</sub> + 45% H<sub>2</sub>)에 따른 화염의 형상 및 화염 전달 함수의 측정 결과를 나타낸 것이다. 그림에

\*+ Contact Author, [dkim@gwnu.ac.kr](mailto:dkim@gwnu.ac.kr)  
Gangneung Wonju National University  
TEL : (033)760-8728, FAX : (033)760-8721  
\*\* Hanbat National University

서 보이듯이, 연료 중에 수소의 함유량이 증가하면서 수소의 빠른 화염 속도로 인하여 화염의 형상이 크게 짧아지고, 이는 연소 동특성에도 영향을 미치게 되어 화염 전달 함수의 이득값도 크게 변화하게 됨을 볼 수 있다.

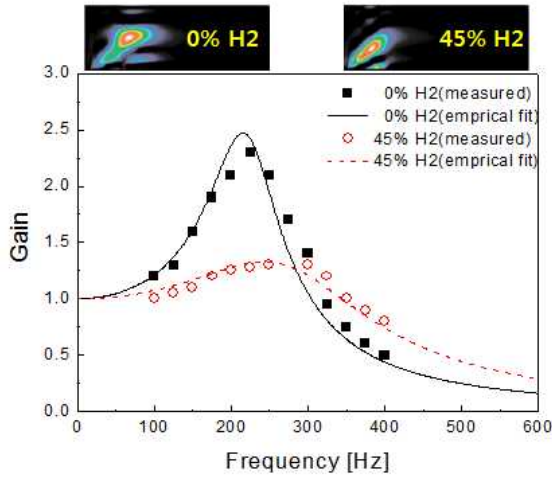


Fig. 1 Gain of flame transfer function as a function of frequency [6]

이렇게 얻어진 화염 전달 함수로부터 연소 불안정이 발생하는 조건을 예측하기 위하여 다양한 형태의 연소 불안정 모델링 기법에 적용이 가능하다[7]. Figure 2는 가스터빈에서 발생하는 연소 불안정 현상을 예측하기 위해 다양하게 시도되고 있는 모델링 기법을 정리한 것이다.

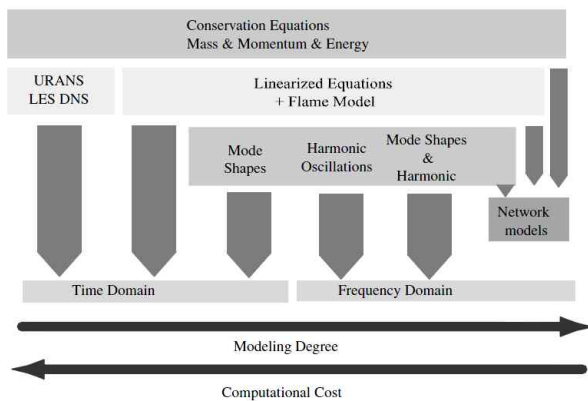


Fig. 2 Simulation methods for predicting combustion instability [7]

이 중에서 본 연구에서는 선형화된 음향 관계식과 화염 전달 함수를 통하여 음향과의 모드 분석이 가능한 3D FEM 코드를 적용하는 방안[8]과, 연소기의 주요 구성품을 각각의 네트워크 성분으로 나누어 각각의 입출구를 서로 연동하여

간단하게 음향장을 계산하는 열음향 네트워크 모델[6]을 이용한 두가지의 연소 불안정 모델이 적용되었다.

특히 본 연구의 주 목적은 IGCC에서처럼 다양한 연료 조성이 화염 동특성(즉, 화염 전달 함수의 결과)에 미치는 영향을 분석하고, 이에 따른 연료 불안정 모델에 적용하는 방안을 해석적으로 제시하는 것이다.

### Acknowledgement

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(과제명 : 한국형300MW급IGCC실증플랜트기술개발사업 연구)을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### Reference

[1] C. Descamps, C. Bouallou, M. Kanneche, "Efficiency of an Integrated Gasification Combined Cycle(IGCC) Power Plant", Energy, Vol. 33, 2008, pp. 874-881.

[2] T. Lieuwen, V. McDonell, E. Peterson, D. Santavicca, "Fuel Flexibility Influences on Premixed Combustor", J. Eng. Gas Turbines Power, Vol. 130, 2008, pp. 67-76.

[3] T. Lieuwen, "Modeling Premixed Combustion-Acoustic Wave Interactions", J. Propul. Power, Vol. 19, 2003, pp. 765 - 781.

[4] R. Balachandran, B.O. Ayoola, C.F. Kaminski, A.P. Dowling, E. Mastorakos, "Experimental Investigation of the Nonlinear Response of Turbulent Premixed Flames to Imposed Inlet Velocity Oscillations", Comb. Flame, Vol. 143, 2005, pp. 37 - 55.

[5] D. Kim, J.G. Lee, B.D. Quay, D.A. Santavicca, K. Kim, S. Srinivasan, "Effect of Flame Structure on the Flame Transfer Function in a Premixed Gas Turbine Combustor, ASME paper GT2008 - 51014.

[6] 김대식, 김규태, "연소 불안정 예측을 위한 열음향 해석 모델-Part 1 : 선형 안정성 해석", 한국추진공학회지, 2012 (under publication).

[7] J. Pieringer, T. Sattelmayer, "Simulation of Combustion Instabilities in Liquid Rocket Engines", J. Propul. Power, Vol. 25, 2009, pp. 1020 - 1031.

[8] 김성구, 최환석, 차동진, "연소시스템의 열음향 불안정 예측을 위한 Helmholtz Solver 개발", 한국항공우주학회지, Vol. 38, 2010, pp. 445 - 455.