

# 가스터빈 연소기에서의 연소 불안정 측정에 관한 연구

김대식\* · 이종근\*\* · Domenic Santavicca\*\*\*

## Study on combustion instabilities in gas turbine combustors

Daesik Kim\* · Jong Guen Lee\*\* · Domenic Santavicca\*\*\*

### ABSTRACT

An experimental study of the flame response in a turbulent premixed combustor has been conducted in order to investigate mechanisms for combustion instabilities in lean premixed gas turbine combustor. A lab-scale combustor and mixing section system were fabricated to measure the flame transfer function. Measurements are made of the velocity fluctuation in the nozzle using hot wire anemometry and of the heat release fluctuation in the combustor using chemiluminescence emission. The results are analyzed to determine the phase and gain of the flame transfer function as a function of the modulation frequency and operating conditions.

### 초 록

희박 예혼합 가스터빈에서 발생하는 연소 불안정 현상의 메커니즘을 규명하기 위하여 입구 속도 변동에 대한 열발생 변동을 정량화한 화염 전달 함수가 실험적으로 구현되었다. 이를 위하여 실제 가스터빈과 유사한 형태를 갖는 모형 연소기가 제작되었으며, 열발생율의 측정을 위한 가시화 연소기가 장착되었다. 또한 흡기 속도의 변조를 위하여 가변 속도 모터 및 유량 제어 장치가 설계되었고, 이러한 장치들을 통하여 입구 속도 변동이 열발생율의 진폭에 미치는 영향 및 화염 구조의 변화를 실험적으로 측정하였다.

Key Words: Combustion Instability(연소 불안정), Lean Premixed Combustor(희박 예혼합 연소기), Flame Transfer Function(화염 전달 함수), Velocity Modulation(속도 변조)

### 1. 서 론

희박 예혼합 연소기의 운전 영역인 희박 한계 근처에서는 작은 외부 유동 섭동에 대하여도 화염이 매우 민감하게 반응하게 되어 열발생율의 변동으로 이어지고, 이는 다시 연소기 고유의 압력파와의 상호 작용에 의하여 연소 불안정 (combustion instability) 현상이 발생하게 된다.

\* 국립강릉원주대학교 기계자동차공학부

\*\* University of Cincinnati

\*\*\* Pennsylvania State University

† 교신저자, E-mail: dkim@gwnu.ac.kr

이러한 연소 불안정 현상은 시스템의 압력 변동 및 진동의 증가를 초래하고 결국 연소기 또는 일부 부품에 치명적인 손상을 일으킨다.

지난 수십년간 연소 불안정과 관련된 연소기 내부에서의 다양한 현상을 이해하고, 원인을 분석하여 불안정 연소 운전 구간을 예측하기 위한 다양한 노력이 전세계적으로 이루어져 왔음에도 불구하고, 여전히 연소 불안정 현상에 대한 많은 의문점들이 희박 예혼합 연소기의 적용을 제한하고, 운전 비용을 증가시키는 주된 원인으로 남아 있다.

본 연구에서는 연소 불안정 현상의 기본 메커니즘을 규명하기 위한 접근법 중의 하나로서, 실제 가스터빈 연소기에 존재하는 예혼합기의 섭동을 임의적으로 모사하여 이에 대한 화염의 반응을 규명하는 화염 전달 함수 (flame transfer function)을 실험적으로 구현하였다. 최근 전세계의 다양한 연구 그룹에서는 이러한 화염 전달 함수의 측정 또는 계산을 통하여 얻어진 주어진 속도 및 당량비의 섭동에 대한 화염의 반응을 이득값과 위상차로 정량화하여 연소 불안정 현상의 원인을 규명하고 제어 방법을 찾는 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다. Eq. 1은 완전 예혼합 화염에서의 입력 속도 진폭에 대한 열발생율의 진폭 변화를 나타내는 화염 전달 함수를 나타낸다.

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

현재의 실험에서는 상용 예혼합 가스터빈 연소기와 유사한 선회류(swirl flow)를 갖는 난류 연소기를 Lab-scale로 제작하여, 입구 속도 변동에 대한 화염의 거동 측정 결과를 고찰하였다.

## 2. 실험 방법 및 조건

Figure 1은 본 연구에서 화염 전달 함수를 사용된 연소기 및 노즐의 개략도를 보여준다. 그림에서와 같이 연료는 노즐 입구에서 공기와 충분히 예혼합되어 공급되고, 또한 노즐 내에서의 압

력 변동이 연료 공급에 미치는 영향을 제거하기 위하여 혼합기 공급 위치 이후가 초킹(choking)될 수 있도록 제작하였다. 화염 구조 및 열발생율의 측정이 가능하도록 하기 위하여 150mm의 내경과 300mm의 길이를 갖는 석영 재질의 연소기가 제작되었고, 연료와 공기의 혼합을 위하여 125mm의 내경과 500mm 길이의 혼합실이 연소기 상류에 설치되었고, 또한 흡기의 유동 변조(modulation)를 위하여 유동 변조 장치가 혼합실 상류에 제작되었다. 연료와 공기의 완전한 혼합을 위한 충분한 시간을 갖도록 하기 위하여 바이패스 밸브 상류의 튜브를 기준으로 하여 20배 이상의 길이를 갖는 예혼합 튜브가 설치된다.

또한 화염 전달 함수의 구현을 위하여 유동 변조 장치는 속도 조절이 가능한 AC 모터와 더불어 회전판 (rotating plate), 고정 플레이트 (static plate)와 중간에 예혼합실로 구성된다. 회전판은 축을 통하여 가변 속도 모터와 연결되고, 이 장치를 통하여 400Hz까지의 변조 주파수(modulation frequency)를 얻을 수 있다. 또한, 변조 진폭폭(modulation amplitude)은 예혼합실을 통과하는 유량과 그렇지 않는 유량의 제어를 통하여 제어될 수 있도록 제작되었다.

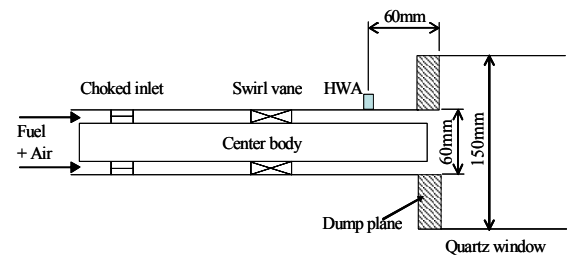


Fig. 1 Schematic drawing of combustor and nozzle assembly

## 3. 결과 및 검토

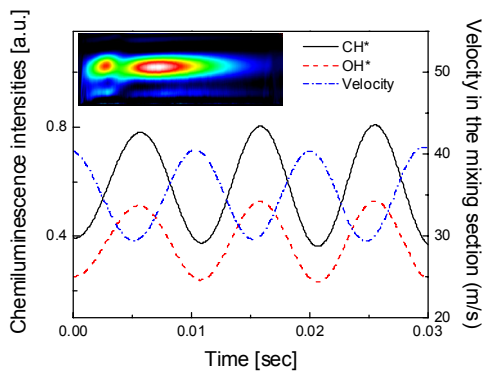
Figure 2는 화염 전달 함수의 기본 측정 결과로서 연소실로부터 측정된 CH\* 및 OH\*의 변동과 노즐에서 측정된 속도 변화의 관계를 시간 영역에서와 Fast Fourier Transform(FFT)를 통한

## 후 기

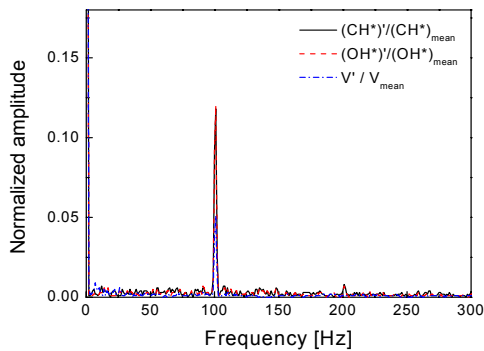
주파수 영역에서의 도시 결과이다. 결과에서 보듯이  $\text{CH}^*$  및  $\text{OH}^*$  사이에 평균값에 있어서는 실험 장치의 세팅 조건에 따라 큰 차이를 보여지나, 속도 파형과 비교했을 때, 위상차 및 진폭에 있어서는 거의 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

학회 발표를 통하여는 더욱 다양한 조건에서의 화염 전달 함수 측정 결과와 변조 조건 및 운전 상태의 변화에 따른 화염의 동특성에 대한 결과 및 검토 내용이 소개될 것이다.

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2010-0007679)



(a) Time domain



(b) Frequency domain

Fig. 2 Time traces and frequency spectra of  $\text{CH}^*$ ,  $\text{OH}^*$ , and velocity fluctuations under modulation ( $V_{\text{mean}} : 35\text{m/s}$ ,  $\phi : 0.75$ ,  $V'/V_{\text{mean}} : 6.6\%$ ,  $f : 100\text{Hz}$ )