

## 研究論文

## 당량비 및 섭동 조건 변화가 화염 전달 함수에 미치는 영향

김대식\*

## Effects of Changes in Equivalence Ratio and Modulation Condition on Flame Transfer Function

Daesik Kim\*

## 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 a 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 show that the flame transfer functions are greatly dependent on the modulation frequency as well as operating conditions such as equivalence ratio. Flame dynamics can be generalized as a function of Strouhal number which is a ratio of flame length to modulation wave length.

## 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 가스 터빈과 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 계측하였다. 실험 결과 화염 전달 함수는 당량비와 같은 운전 조건과 더불어 속도 섭동 조건에 대하여도 크게 의존하며, 화염의 길이와 섭동과 파장의 비율을 의미하는 Strouhal 수에 의하여 일반화될 수 있었다.

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

접수일 2011. 5. 6, 수정완료일 2011. 7. 19, 게재확정일 2011. 7. 22

\* 정희원, 강릉원주대학교 기계자동차공학부

† 교신저자, E-mail: dkim@gwnu.ac.kr

## 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 압력과와의 상호 작용에 의하여 연소 불안정 (combustion instability) 현상이 발생하게 된다. 이러한 연소 불안정 현상은 시스템의 압력 변동 및 진동의 증가를 초래하고 결국 연소기 또는 일부 부품에 치명적인 손상을 일으킨다[1-3].

지난 수십년간 연소 불안정과 관련된 연소기 내부에서의 다양한 현상을 이해하고, 원인을 분석하여 불안정 연소 운전 구간을 예측하기 위한 수많은 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)를 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[3-6]. Eq. 1은 완전 예혼합 화염에서의 입력 속도 진폭에 대한 열발생율의 진폭 변화를 나타내는 화염 전달 함수를 나타낸다.

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

본 연구에서는 상용 예혼합 가스터빈 연소기와 유사한 선회류(swirl flow)를 갖는 난류 연소기를 Lab-scale로 제작하여, 입구 속도 섭동에 대한 화염 전달 함수의 기본적인 측정 내용이 고찰되었다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Figure 1은 본 연구에서 화염 전달 함수 측정을 위하여 사용된 연소기 및 노즐의 개략도를 보여준다. 그림에서와 같이 연료는 노즐 입구에서 공기와 충분히 예혼합되어 공급되고, 또한 노즐 내에서의 압력 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 150 mm의 내경과 300 mm의 길이를 갖는 석영 재질의 연소기가 제작되었고, 연료와 공기의 혼합을 위하여 125 mm의 내경과 500 mm 길이의 혼합실이 연소기 상류에 설치되었고, 또한 흡기의 유동 섭동(modulation)을 위하여 유동 섭동 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 섭동 장치는 속도 조절이 가능한 AC 모터와 더불어 회전판(rotating plate), 고정 플레이트(static plate)와 중간의 예혼합실로 구성된다. 회전판은 축을 통하여 가변 속도 모터와 연결되고, 이 장치를 통하여 400 Hz까지의 섭동 주파수(modulation frequency)를 얻을 수 있다. 또한, 섭동 진폭폭(modulation amplitude)은 예혼합실을 통과하는 유량과 그렇지 않은 유량의 제어를 통하여 제어될 수 있도록 제작되었다.

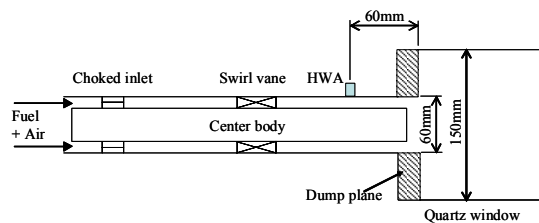


Fig. 1 Schematic drawing of combustor and nozzle assembly

## 2.2 실험 방법

혼합기 유동의 속도 측정을 위하여 열선 유속계(Hot wire anemometry, TSI model 1210)가 사용되고, 열발생의 정량화를 위하여 본 연구에서는  $\text{CH}^*$ 와  $\text{OH}^*$  라디칼의 자발광이 PMT (Hamamatsu model 928A)를 사용하여 전체 화염으로부터 측정되고, 이를 위하여 각각  $430 \pm 5 \text{ nm}$ 와  $307 \pm 5 \text{ nm}$ 의 필터가 사용된다. 또한 일부 관심 영역의 경우, 화염으로부터의 자발광 측정을 위하여 ICCD 카메라(Princeton Instruments model 576G)가 사용된다. 얻어진 원시 이미지로부터 2차원 단면에서의 화염 구조로 재구성하기 위하여 Abel Deconvolution[7]이 사용되었다. 또한 연료로는 메탄 96% 함유의 천연가스가 사용되었다.

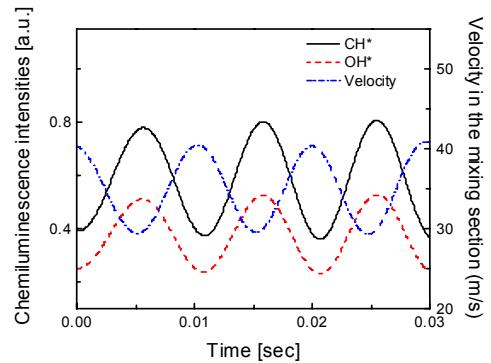
Table 1은 본 실험이 이루어진 실험 조건이다. 실험은 대기압 조건에서 수행되었다.

Table 1. Operating conditions

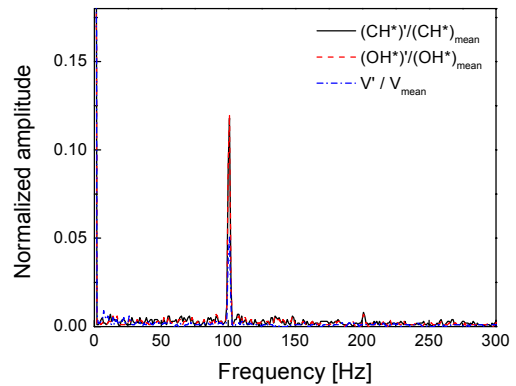
Mean velocity (m/s)	35
Equivalence ratio	0.65 ~ 0.75
Inlet temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	20
Modulation frequency (Hz)	70 ~ 280
$V'/V_{mean}$ (%)	7%
Mixture	Premixed

## 3. 결과 및 검토

Figure 2는 화염 전달 함수의 기본 측정 결과로서 당량비( $\phi$ ) 0.7, 주파수( $f$ ) 100 Hz에서 연소 실로부터 측정된  $\text{CH}^*$  및  $\text{OH}^*$ 의 변동과 노즐에서 측정된 속도 변화의 관계를 시간 영역에서와 Fast Fourier Transform(FFT)를 통한 주파수 영역에서의 도시 결과이다. 결과에서 보이듯이  $\text{CH}^*$  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.



(a) Time domain

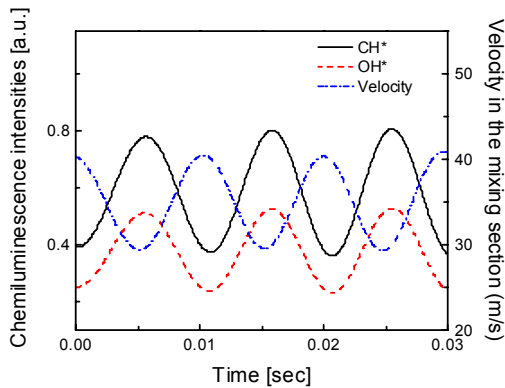


(b) Frequency domain

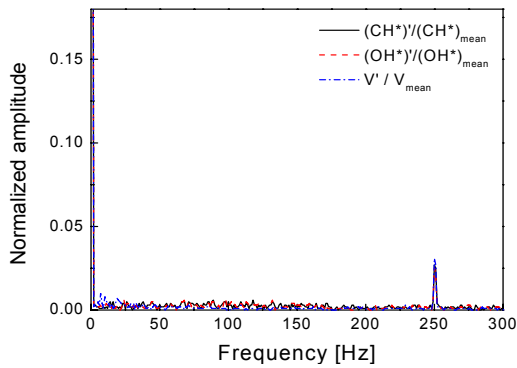
Fig. 2 Time traces and frequency spectra of  $\text{CH}^*$ ,  $\text{OH}^*$ , and velocity fluctuations under modulation ( $V_{mean} : 35 \text{ m/s}$ ,  $V'/V_{mean} : 5.2\%$ ,  $\phi : 0.7$ ,  $f : 100 \text{ Hz}$ )

본 조건에서 측정된 시간 영역의 데이터로부터 FFT한 결과,  $V'/V_{mean}$ 은 5.2%이었고, 이 때의  $(\text{CH}^*)/(\text{CH}^*)_{mean}$  및  $(\text{OH}^*)/(\text{OH}^*)_{mean}$  값은 각각 12.1%와 12.3%로 측정되었다. 이로부터 계산된 화염 전달 함수의 이득값(gain)은 Eq. 1로부터 2.347이 된다(이하,  $\text{CH}^*$  기준).

Figure 3은 섭동 주파수의 변동이 화염 전달 함수의 결과에 미치는 영향을 비교하기 위하여 동일 당량비와 입구 속도에서 주파수 250 Hz,  $V'/V_{mean}$  4.3%에서 측정된 실험 결과이다. 이 조건에서 측정된 화염 전달 함수의 이득값은 1.168로서 100 Hz의 섭동 조건으로부터 약 50% 가까이 감소하였음을 알 수 있다. 이는 동일한 입구



(a) Time domain



(b) Frequency domain

Fig. 3 Time traces and frequency spectra of  $\text{CH}^*$ ,  $\text{OH}^*$ , and velocity fluctuations under modulation ( $V_{\text{mean}} : 35 \text{ m/s}$ ,  $V'/V_{\text{mean}} : 5.2\%$ ,  $\phi : 0.7$ ,  $f : 250 \text{ Hz}$ )

속도의 섭동 진폭에 대하여 화염으로부터 발생한 열발생율의 진동이 100 Hz에서가 250 Hz에서보다 약 2배 정도 더 큰 진폭을 보이게 됨을 의미한다. Kim et al.[6]등은 유동 섭동 한 사이클 동안의 연속적인 화염 이미지 촬영으로부터, 동일한 운전 조건에서 입구 섭동파의 파장( $L_{\text{wave}} = V_{\text{mean}}/f$ )이 상대적으로 긴 경우(즉, 섭동 주파수가 낮은 경우) 섭동파의 움직임에 따라 상대적으로 화염의 전체 길이 변화가 매우 크게 변동하는 것을 발견하였고, 반대로 입구 섭동파의 파장이 상대적으로 짧은 경우(즉, 섭동 주파수가 높은 경우) 화염의 전체적인 길이 변화보다는 화염의 국부적인 wrinkling 현상이 상대적으로 두드

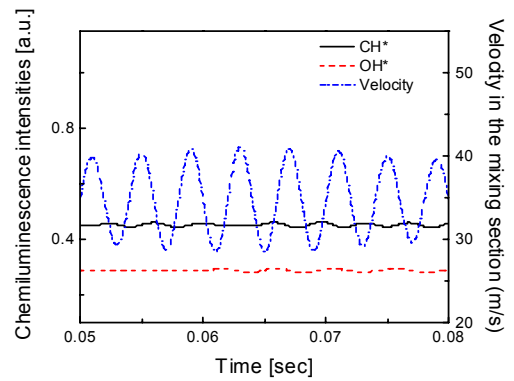


Fig. 4 Time traces of  $\text{CH}^*$ ,  $\text{OH}^*$ , and velocity fluctuations under modulation ( $V_{\text{mean}} : 35 \text{ m/s}$ ,  $V'/V_{\text{mean}} : 4.5\%$ ,  $\phi : 0.65$ ,  $f : 250 \text{ Hz}$ )

러진다는 사실을 발견하였다. 또한 Balanchandran 등[8]은 비정상 화염에서의 순간 화염 이미지 결과와 열발생율 변화의 측정 결과로부터 화염으로부터의 열발생율 변화는 국부적인 화염 wrinkling보다는 전체적인 화염의 길이 변화에 크게 의존한다고 하였다. 또한 Lieuwen[3]은 해석학적 모델링 연구 결과로부터 유사한 영향으로 인하여 화염은 저역 통과 필터(low pass filter)와 같은 기능을 하여, 저주파의 섭동 성분에 대하여 더욱 강하게 반응한다고 하였다.

Figure 4는 운전 조건의 변화가 화염의 동특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 당량비 0.65 및 250 Hz 주파수,  $V'/V_{\text{mean}}=4.5\%$ 에서 화염 전달 함수를 측정할 결과이다. Fig. 3과 속도 진폭에 있어서는 큰 차이가 없었음에도 불구하고, 열발생율의 측정값에 있어서는 많은 차이를 보였다. 이 경우 주목할만한 열발생율 진동이 측정되지 않았으며, 실제 화염 전달 함수의 이득값 또한 0.05 미만으로 측정되었다. Kim et al.[6]은 주어진 입구 속도에서 당량비가 증가할 경우 화염 속도의 증가에 따라 화염의 길이가 크게 감소하였고, 동일한 섭동 주파수에서 열발생율의 반응이 크게 증가한다는 사실을 발견하였다. 이는 앞서서의 설명과 유사한 방법을 통하여 주어진 섭동파의 파장에 대하여 화염의 길이가 감소할 경우, 화염의 전체적인 신장 변화가 상대적으로 더욱 두드러지게 되고, 반대로

섭동파의 파장이 일정한 상태에서 화염의 길이가 길어지게 되면 화염 전체의 신장 변화보다는 화염 표면의 국부적인 wrinkling 현상이 상대적으로 더욱 두드러지게 된다고 발표하였다. 본 연구에서도 이러한 연유로 인하여 동일한 250 Hz의 섭동에서 당량비의 감소(즉, 화염 길이의 증가)로부터 화염 전달 함수의 이득값이 감소하게 됨을 알 수 있다. 이러한 화염의 길이 및 섭동 파장의 상관관계는 Fig. 6에서 더욱 정량적으로 평가될 것이다.

Figure 5는 속도 섭동 진폭의 영향을 배제하고, 주파수 및 당량비의 변화에 따른 영향을 정량화하기 위하여  $V_{mean}=30$  m/s,  $V'/V_{mean}=7\%$ 에서의 당량비 및 주파수 변화에 따른 화염 전달 함수의 이득값을 도시한 결과이다. 그림에서 보이듯이 주파수의 증가에 따라 전달 함수의 이득값

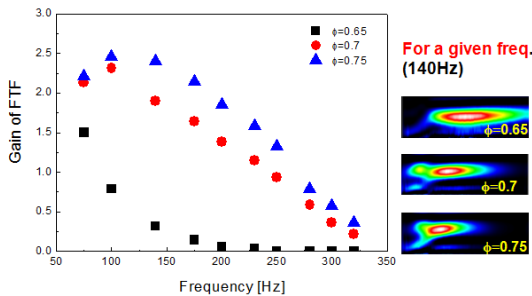


Fig. 5 Effect of equivalence ratio and modulation frequency on the gain of flame transfer function ( $V_{mean} : 30$  m/s,  $V'/V_{mean} : 7\%$ ) [9]

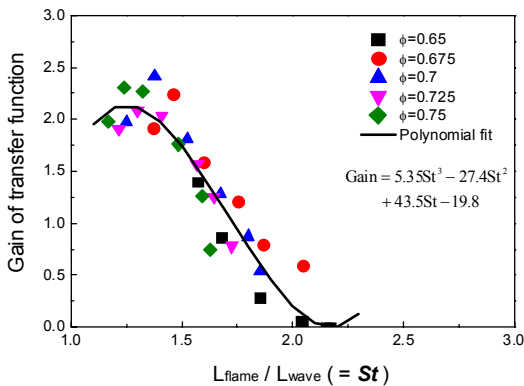


Fig. 6 Gain of flame transfer function as a function of Strouhal number [6]

은 급격하게 감소하여 화염은 저역 통과 필터 (low pass filter)와 같은 역할을 하게 되어 고주파 영역으로 갈수록 열발생율의 변동은 주어진 속도 섭동에 대하여 급격히 감소하게 된다. 한편 일정한 섭동 주파수에서는 당량비가 증가할수록 이득값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그래프의 오른쪽은 각 당량비에서 안정된 화염 상태에서 ICCD 카메라로부터 촬영된 화염의 구조를 도시한 것이다. 그림에서 보이듯이 당량비가 증가할수록 화염은 점점 더 짧아지는 일반적인 결과를 확인할 수 있는데, 특히 본 연구 조건의 경우 당량비 0.65에서는 덤프면 주변에서의 화염 재순환 영역(recirculation zone)이 생성되지 않고, 화염의 길이가 크게 증가하는 구조를 가지고 있음을 알 수 있고, 이러한 긴 화염의 구조에서 화염 전달 함수의 이득값은 크게 감소하는 것으로 나타났다.

위에서 언급한 다양한 조건에서 얻어진 화염 동특성의 일반화를 위하여 Eq. 2와 같은 무차원수인 Strouhal 수가 정의되었다. Strouhal 수는 식에서도 보이듯이 화염의 길이와 섭동파의 파장의 비를 의미하고, Fig. 6은 Strouhal 수에 대한 이득값의 변화를 보여준다. 그림에서 나타나듯이 외부 유동 섭동을 받는 화염의 반응은 무차원수인 Strouhal 수에 의하여 일반화될 수 있음을 알 수 있다. 요약하자면 화염 전달 함수의 결과는 화염의 길이와 섭동파의 파장의 비율인 Strouhal 수에 의하여 정의될 수 있다.

$$St = \frac{f \times L_{flame}}{V_{mean}} = \frac{L_{flame}}{L_{wave}} \quad (2)$$

#### 4. 결 론

본 연구에서는 가스터빈 예혼합 연소기에서 발생하는 연소 불안정 현상을 이해하고자, 연소기 입구 속도 섭동에 따른 화염의 동특성을 정량적으로 분석하기 위한 화염 전달 함수가 실험적으로 구하여졌다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 동일한 운전 조건에서 속도 섭동 주파수가 증가할 경우(섭동 파장이 감소할 경우), 주어진 속도의 진폭에 대하여 열발생율의 진폭이 감소하여 화염 전달 함수의 이득값이 감소한다.
- 2) 섭동 주파수가 일정하다면, 연료-공기 당량비가 증가하게 될 경우, 화염의 길이가 감소하게 되고, 주어진 속도 섭동 조건에 대하여 열발생율의 진폭이 증가하여 화염 전달 함수의 이득값이 증가한다.
- 3) 이러한 관계로부터 화염의 동특성은 화염의 길이와 섭동 파장의 비율인 Strouhal 수에 의하여 정의될 수 있다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

1. 오정석, 윤영빈, "가스터빈에서의 연소불안정 현상," 한국추진공학회지 제12권, 제4호, 2008, pp.63-77
2. Ducruix, S., Schuller, T., Durox, D., and Candel, S., "Combustion dynamics and instabilities: elementary coupling and driving mechanisms," Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No. 5, 2003, pp.722-734
3. Lieuwen, T., "Modeling premixed combustion - acoustic wave interactions: a review," Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No. 5, 2003, pp.765-781
4. Santosh, H., and Sujith, R. I., "Kinematic coupling effects on heat-release transfer function of a premixed flame," Journal of Propulsion and Power, Vol. 21, No. 4, 2005, pp.591-599
5. Birbaud, A. L., Durox, D., Ducruix, S., and Candel, S., "Dynamics of confined premixed flames submitted to upstream acoustic modulations," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, 2007, pp.1257-1265
6. 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, 2010
7. Dasch, C. J., "One-dimensional tomography: a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered backprojection methods," Applied Optics, Vol. 31, No. 8, 1992, pp.1146-1152
8. Balachandran, R., Ayoola, B.O., Kaminski, C.F., Dowling, A.P., and Mastorakos, E., "Experimental investigation of the nonlinear response of turbulent premixed flames to imposed inlet velocity oscillations," Combustion and Flame, Vol. 143, 2005, pp.37-55
9. 김대식, "연소 불안정 현상의 소개와 가스터빈 연소기에서의 화염 전달 함수 측정," 대한기계학회 춘계학술대회논문집, 2011, pp.457-460