

희박 예혼합 가스터빈 연소기에서의 화염 전달 함수 소개[§]

김 대 식^{*†}

* 강릉원주대학교 기계자동차공학부

Introduction to Flame Transfer Function in Lean Premixed Gas Turbine Combustor

Daesik Kim^{*†}

* School of Mechanical and Automotive Engineering, Gangneung-Wonju Nat'l Univ.

(Received June 21, 2011 ; Revised July 11, 2011 ; Accepted July 11, 2011)

Key Words: Gas Turbine(가스터빈), Lean Premixed Combustor(희박 예혼합 연소기), Combustion Instability(연소 불안정), Flame Transfer Function(화염 전달 함수)

초록: 희박 예혼합 가스터빈 연소기는 강화되는 NOx 배출가스 규제를 만족시키기 위한 가장 현실적인 방법으로 인식되고 있다. 그러나 이러한 희박 예혼합 연소기에서는 열발생과와 시스템 내부의 압력과 사이의 상호 피드백 관계에 의한 연소 불안정 현상으로 인하여 그 적용이 제한되거나, 이를 회피하기 위한 기술의 적용으로 인하여 설계 비용의 상승이 불가피하다. 본 논문에서는 연소 불안정 현상이 발생하는 기본 메커니즘을 소개하고, 연소 불안정 원인 규명의 일환으로 최근 활발히 연구되고 있는 화염 전달 함수 측정이 실험적으로 규명되었고, 주요 측정 결과가 소개되었다.

Abstract: Lean premixed gas turbine combustors were successful in meeting current NOx emission regulations. However, these combustors have been found to be susceptible to combustion instability. In this study, general mechanisms for combustion dynamics and instabilities in lean premixed gas turbine combustors are introduced. In addition, the flame transfer functions in the combustor are experimentally determined. The inputs to the flame transfer function are the imposed velocity fluctuations of the mixture. The key results of the measurements are reviewed.

- 기호설명 -

- P : 압력
- Q : 열발생률
- L : 시스템 감쇠
- H : 화염 전달 함수
- V : 속도
- L_{flame} : 화염 길이
- L_{wave} : 파장
- f : 주파수
- St : 스트로울 수

1. 서론

가스터빈은 내연기관과 같은 다른 연소 시스템

과 비교할 때, 높은 비출력과, 고효율, 또한 저공해 측면에서의 장점으로 인하여, 항공 분야뿐만 아니라 산업 분야에 걸쳐서 폭넓게 사용되고 있다. 또한 최근에는 IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle) 시스템과 같은 열병합 발전에 대한 관심과 연구가 늘어나면서 그 수요는 더욱 증가할 것으로 기대된다.⁽¹⁾

가스터빈 연소기 개발에 관한 최근 연구 동향은 산업 및 항공 분야에서 강화되는 배출 가스 규제로 인하여, 연료 소비율을 줄이면서 NOx 배출물의 저감을 동시에 이루기 위한 희박 예혼합 연소기 개발에 관한 연구로 집중되고 있다. 기존의 연소기는 연료를 주연소 영역에 직접 분사하는 방식이기 때문에 국부적으로 이론 공연비 영역의 농후한 운전 조건에서 연소 온도의 상승에 따른 높은 NOx 생성이 불가피하다. 그러나 희박 예혼합 연소의 개념은 연료와 공기를 완전히 혼합하여 얻은 균일한 혼합기를 주연소 영역에 공

[§] 이 논문은 대한기계학회 2011년도 강원지회 춘계 학술대회(2011. 5. 20., 강원대) 발표논문임

[†] Corresponding Author, dkim@gwnu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

급하고, 당량비를 희박 가연 한계에 가깝게 유지하는 것이다. 이에 따라 저온의 균일한 연소 온도를 유지할 수 있어서 상당한 NOx의 발생을 줄일 수 있다. 이러한 연소 특징들로부터 희박 예혼합 연소기는 항공기 및 산업용 가스터빈의 배출 가스 규제에 대응하기 위한 획기적인 기술로서 인식되고 있다.

그러나 희박 예혼합 연소기에서는 열발생율의 변화와 압력과의 상호 작용에 의한 연소 불안정 (Combustion instability) 현상이 큰 문제점으로 대두되고 있다. 희박 예혼합 가스터빈 연소기의 경우, 대부분의 운전 조건이 lean blow out 영역의 매우 낮은 당량비 영역에서 이루어지고, 이러한 영역에서의 화염은 미세한 외부 인자의 섭동에도 쉽게 반응하게 되어, 결국 연소기 입구에서의 작은 당량비 또는 혼합기 속도 변화 등에 대하여 열발생율의 변동이 쉽게 진폭될 수 있게 된다. 이러한 열발생율의 진동은 연소기 내에서의 압력 진동을 초래하게 되고, 다시 연소실 내부 압력 진동은 상류의 노즐 및 연료 공기 혼합 공간으로 피드백되어 혼합기의 속도 및 당량비와 같은 열역학적 상태량의 진폭을 가진시키는 역할을 하게 된다.^(1,2) Figure 1은 이러한 가스터빈 연소기에서의 연소 불안정 현상을 야기하는 열발생과와 압력과 사이의 피드백 과정에 대한 개략도를 보여 준다.

또한 세부적으로 연소 불안정 현상이 발생할 수 있는 조건은 Rayleigh criterion에 의하여 구체화될 수 있으며, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 식 (1)의 좌변에 해당하는 값이 양의 값을 가질 경우 (즉, 압력과 (P)와 열방출과 (Q)의 위상차가 90도 이내일 경우), 비정상 열발생에 의한 시스템 내부의 에너지(acoustic energy)가 증가하게 되고, 이 때, 좌변의 값이 시스템 에너지 손실 (L) 과정

을 나타내는 우변의 값보다 커지게 될 경우, 연소실은 불안정해지게 된다.^(1,3)

$$\int_V \int_T p'(x,t)q'(x,t)dt dV \geq \int_V \int_T \sum_i L_i(x,t)dt dV \quad (1)$$

이러한 연소 불안정 현상이 일정 시간 이상 지속될 경우, 열응력의 축적과 과도한 진동 등으로 인하여 연소실 라이너 및 연료 노즐과 같은 연소기 부품에 손상을 야기할 수 있으며, 더욱 악화될 경우, 터빈과 전체 시스템의 변형 및 파괴로 이어지게 된다. Figure 2는 연소 불안정 현상에 의하여 파괴된 연소기의 부품 사진을 보여 준다.

이러한 문제로 인한 부품의 검사, 수리, 교체를 위한 직접적인 비용 손실과 이를 위한 전체 시스템의 다운타임과 튜닝을 위한 시간적인 손실을 고려할 경우, 막대한 총 비용 손실이 불가피하게 된다.^(2,3) 따라서 희박 예혼합 가스터빈을 설계, 제작, 사용을 위해서는 연소 불안정 현상에 대한 명확한 이해와, 제어 알고리즘의 파악과 적절한 운전 영역의 선택이 필수적이다.

최근 지난 20여년에 걸쳐 전세계의 가스터빈 제조사, 관련 연구 단체, 대학 및 정부의 관련 연구들로부터, 기초 화염 동특성부터 연소 불안정 현상에 대한 다양한 메커니즘과 제어에 미치는 인자들에 이르기까지 많은 가시적인 결과들이 성공적으로 도출되어 왔다. 그러나 지속적으로 희박 예혼합 연소기의 적용 분야 및 그 수요가 증가하고 있는 시점에서, 불안정 연소 예측 기술과 같이 여전히 많은 분야들에 있어서, 연구 개발을

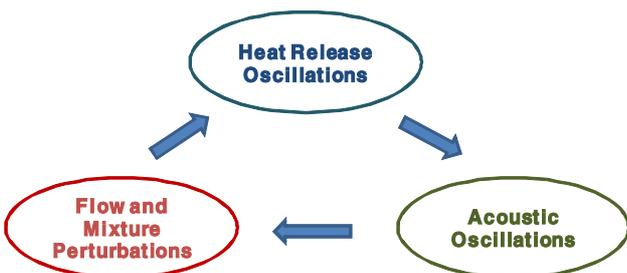


Fig. 1 Feedback relationship between pressure wave and heat release oscillations



Fig. 2 Combustors damaged from combustion instabilities (Ref. (2))

위한 더욱 많은 노력과 투자가 필요한 실정이다.

2. 화염 전달 함수

2.1 화염 전달 함수의 소개

연소 불안정이 발생하는 주파수 및 위상 정보를 보다 정확하고, 효과적으로 예측할 수 있는 이론적인 모델 개발에 많은 노력이 경주되고 있으며, 이를 위해 반드시 선결되어야 할 필수 조건은 유동 변동(flow fluctuation)에 따른 화염의 동적 반응(flame dynamics)에 대한 명확한 이해이다. 이의 정량화를 위하여 가장 보편적으로 시도되고 있는 방법이 화염 전달 함수(Flame transfer function)를 구하는 것이다.⁽³⁻⁶⁾

본 연구에서 예혼합 연소기에서의 화염 전달 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$H(f) = \frac{Q' / Q_{mean}}{V' / V_{mean}} \quad (2)$$

이와 같은 화염 전달 함수는 실험 및 계산 등을 통하여 다양한 방법으로 얻어지고 있으며, 연소 모델링의 기초 자료로 활용되고 있으며 주어진 연소기에서 화염의 동적 반응을 이해하는데 반드시 이해되어야 하는 선결 조건으로 여겨지고 있다. 그러나, 지금까지 얻어진 화염 전달 함수는 장치 구성 및 해석 등의 어려움으로 인하여 대부분 수치 해석적인 접근으로 의존하여 왔고, 일부 연구자들에 의하여 실험에 의한 방법이 시도되고 있으나, 분젠 버너(Bunsen Burner)와 같이 매우 단순한 연소기에서 소개되어 왔었다.⁽³⁻⁶⁾

본 연구에서는 실제 예혼합 가스터빈에서의 연소기와 유사한 선회류(Swirl flow)를 갖는 난류 연소기에서 입구 속도 변동에 대한 화염의 동적 반응이 실험적으로 규명된다. 또한, 다양한 조건에서 화염의 구조가 예측되어 화염의 형상과 동적 반응 특성간의 상호 관계에 대한 정량적, 정성적인 데이터를 제공하고자 한다.

2.2 실험 방법

Figure 3은 본 연구에서 화염 전달 함수를 실험적으로 구하기 위하여 사용한 실험 장치의 개략도이다. 그림에서와 같이, 화염 구조 및 열발생을 계측이 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.

유동 변조 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 400Hz까지의 변조 주파수(modulation frequency)를 얻을 수 있다. 또한 변조

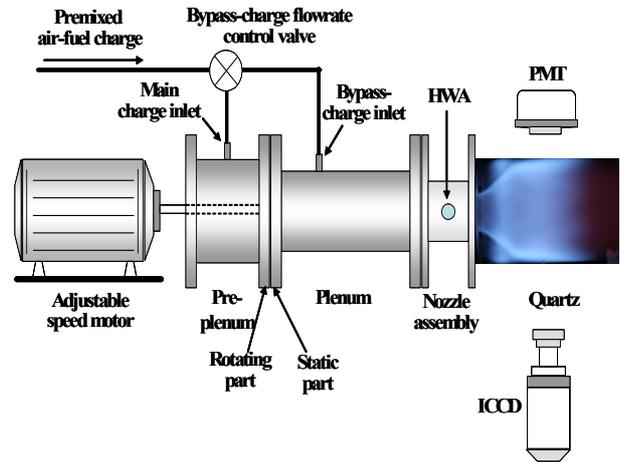


Fig. 3 Schematic drawing of test setup for flame transfer function

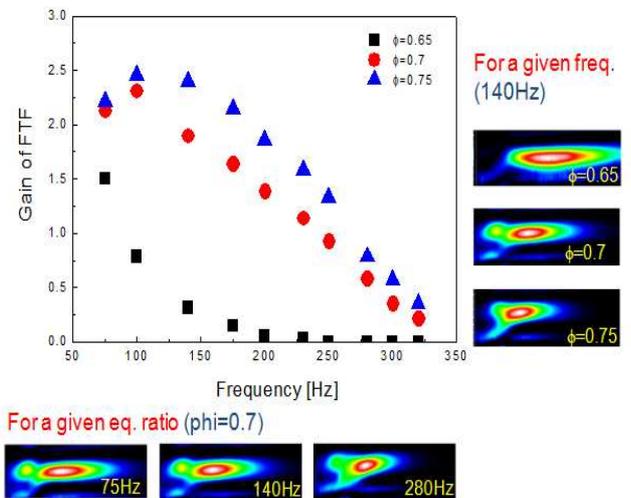


Fig. 4 Effects of modulation frequency and equivalence ratio on the flame transfer function and flame structure

진동폭(modulation amplitude)은 예혼합실을 통과하는 유량과 그렇지 않는 유량의 제어를 통하여 제어될 수 있도록 제작되었다.

3. 결과

Figure 4는 입구 평균 속도 30m/s, 속도 변동 진폭(V'/V_{mean}) 0.07에서의 주파수 및 당량비 변화에 따른 화염 전달 함수의 이득값과 한 사이클 동안의 평균 화염 구조를 보여준다. 그림에서 보이듯이 주파수의 증가에 따라 전달 함수의 이득값은 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. 또한, 당량비가 증가할수록 이득값은 증가하게 된다. 화염의 구조 역시 주파수와 당량비의 영향을 크게 받게 되어, 당량비와 주파수가 증가할수록 화염의 길이는 크게 짧아지고 있음을 확인할 수 있다.

상기 결과와 같이 다양한 조건에서 얻어진 화염 동특성의 일반화를 위하여 식 (3)과 같은 무차원수인 Strouhal 수가 정의되었다. Strouhal 수는 식에서도 보이듯이 화염의 길이와 파장의 비를 의미하고, Figure 5는 Strouhal 수에 대한 이득값의 변화를 보여준다. 그림에서 나타나듯이 외부 유동 섭동을 받는 화염의 반응은 무차원수인 Strouhal 수에 의하여 일반화될 수 있음을 알 수 있다.

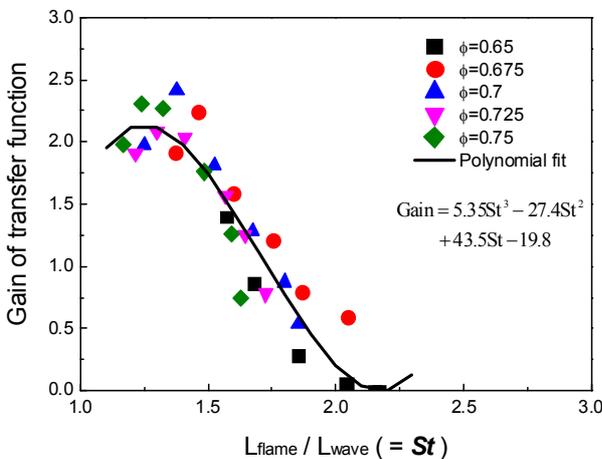


Fig. 5 Gain of transfer function as a function of Strouhal number (Ref. [6])

4. 결론

본 논문에서는 희박 예혼합 가스터빈 연소기의 설계 및 운전시 가장 큰 문제점으로 대두되고 있는 연소 불안정 현상에 대하여 기술하였다. 또한 이러한 연소 불안정 현상의 메커니즘을 규명하기 위한 노력의 일환으로 현재 활발하게 이루어지고 있는 화염 전달 함수 측정에 대한 기본 개념 및 핵심 측정 결과를 소개하였다.

화염 전달 함수의 이득값은 속도 및 당량비 등의 운전 조건과 더불어 동일한 운전 조건에서도 섭동 조건에 따라서도 크게 의존하며 화염의 구조 또한 이러한 실험 조건에 영향을 받는 것으로 나타났다. 측정 결과로부터 화염 전달 함수는 화염의 길이와 섭동파의 파장의 비를 대표하는 Strouhal 수에 의하여 정의될 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Liewen, T. and Yang, V., 2005, "Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines," *AIAA*, Washington.
- (2) Preetham, T., 2007, "Modeling the Response of Premixed Flames to Flow Disturbances," Ph.D. thesis, Georgia Inst. of Tech.
- (3) Liewen, T., 2003, "Modeling Premixed Combustion- Acoustic Wave Interactions: A Review," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 5, pp. 765~781.
- (4) Santosh, H. and Sujith, R. I., 2005, "Kinematic Coupling Effects on Heat-Release Transfer Function of a Premixed Flame," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 21, No. 4, pp. 591~599.
- (5) Birbaud, A. L., Durox, D., Ducruix, S. and Candel, S., 2007, "Dynamics of Confined

Premixed Flames Submitted to Upstream Acoustic Modulations," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 1257~1265.

(6) Kim, D., Lee, J., Quay, B., Santavicca, D., Kim, K. and Srinivasan, S., 2010, "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.