

동압 데이터의 감쇠계수를 활용한 연소 안정마진 실시간 평가 코드 개발

송원준* · 안광호** · 박세익*** · 김성철*** · 차동진****†

Code Development for Online Assessment of Combustion Stability Margin by Utilizing Damping Ratios of Dynamic Pressure Data

Won Joon Song*, Kwangho Ahn**, Seik Park***, Sungchul Kim***, Dong Jin Cha****†

ABSTRACT

Combustion stability margin of a model gas turbine has been assessed by utilizing damping ratios of measured dynamic pressure data. It is known that acoustic oscillations in combustion chambers can be described as a superposition of nonlinearly interacting oscillators. Based on this theoretical background, CSMA (Combustion Stability Margin Assessment) code has been developed. The code has been employed into a model gas turbine combustion experiment, focused on the combustion instability, to show its capability to determine the damping ratio of measured dynamic pressure and further to assess combustion stability margin of the experiment, and turned out that the code works well.

Key Words : Gas turbine, Combustion instability, Stability margin, Dynamic pressure, Damping ratio

최근 대기 오존층 고갈, 지구 온난화, 기후 변화 등, 환경에 관한 관심이 증대되면서 청정연료로 알려진 천연가스의 사용이 권장되고 있고, 또한, 합성천연가스의 사용도 추진되고 있다[1]. 그러나 천연가스 연료도 질소산화물(NO_x)를 배출하여 대기환경문제를 야기할 수 있다. 따라서 천연가스를 발전용 연료로 사용하는 경우에도 NO_x 규제치는 나날이 엄격히 강화되고 있다[2]. 천연가스의 경우, 연소 중 NO_x 발생 메카니즘은 고전적으로 알려진 세 발생 메카니즘 중 주로 thermal NO_x 에 기인한다. 이 메카니즘은 화염온도에 직접적인 영향을 받기 때문에 종래의 확산연소방식보다 화염온도를 낮추어 NO_x 를 저감할 수 있는 희박 예혼합연소방식이 채택되고 있다. 그러나 희박 예혼합연소방식은 희박가연한계 근처에서 연소되므로 연소불안정을 초래할 수 있다. 이는 과도한 연소소음을 발생시켜 운전자의 불편을 초래하며, 또한 과도한 연소동압 등의 부작용을 유발시켜 발전설비의 안정적인 운전에 지장을 준

다.

발전용 가스터빈의 연소불안정은 연소기 형상의 음향 모드와 열방출을 변동이 결합되었을 때 발생하며, 열방출률 변동은 볼텍스 웨딩(vortex shedding), 혼합기 변동, 그리고 연료 및 산화제 공급계통에 대한 음향 피드백 등의 다양한 메카니즘에 의해 발생한다[3]. 연소불안정의 메카니즘에 대한 보다 체계적인 보고로 McManus et al.[4] 등이 있다.

연소불안정 현상은 주로 연소실 내의 연소동압을 측정하여 관찰하게 되며, 실험실 조건의 모형 가스터빈 연소기에서는 압전소자방식(piezoelectric type) 동압센서를 축방향(필요시 반경방향)으로 다수 설치하여 연소동압의 공간적 분포까지 파악하게 된다. 상업운전중인 가스터빈의 경우는 연소실의 적절한 위치(acoustic assess point)에 도파관(waveguide)을 설치하여[5] 이를 통하여 연소가스의 동압을 동일한 동압센서를 이용하여 측정하게 된다. 실 발전용 가스터빈의 동압은 시운전(commissioning) 시 또는 계획예방정비(overhaul) 중 측정하여 가스터빈의 튜닝에 활용하는 것이 일반적이다. 그러나 연료의 화학조성 변동 가능성이 높은 석탄가스, 부생가스 등이 사용되고, 기타 운전조건의 변동이 높아질 것으로 예상되는 향후 발전용 가스터빈의 운전에서는 연소불

* 한밭대학교 생산융합기술연구소

** 한밭대학교 설비공학과 대학원

*** 한국전력공사 전력연구원

**** 한밭대학교 설비공학과

† 연락처자, djcha@hanbat.ac.kr

안정의 척도인 연소동압을 상시 감시하는 Health monitoring이 필수적이 될 것으로 예상된다.

최근 Lieuwen[6]은 가스터빈의 안정적인 운전 에 도움을 줄 있는 안정마진(stability margin) 평가에 관한 연구결과를 보고하였다. 즉 가스터빈 운전자가 연료 배분(fuel splits) 변화 등 운전 조건을 변화시킬 때, 이들 변화가 가스터빈의 안정성에 미치는 영향 그리고 잔여 안정마진의 크기 등에 관한 내용이다.

본 연구에서는 Lieuwen[6]이 제안한 안정마진 평가 이론을 토대로 매트랩 기반으로 소스코드를 개발하고 실제 모형 가스터빈연소기[7]의 연소불안정 실험에 적용하여 해당 모델 연소기의 연소안정마진을 유의미하게 평가하여 개발한 코드의 성능을 조사하였다. 또한 개발한 코드를 실시간 DAQ 시스템에 장착하여 연소 마진을 온라인 평가할 수 있음도 확인하였다.

연소실 내의 음향 진동은 다양한 비선형적인 상호작용하는 음향진동기의 중첩으로 묘사될 수 있음[8]에 근거하여, 연소안정 마진 평가 소스코드(Combustion Stability Margin Assessment, CSMA)는 연소기 내 연소동압 신호로부터 음향모드(acoustic mode)의 주파수에 해당하는 신호를 분리하고 수치해석적인 기법을 통해 해당 주파수 성분의 감쇠비(damping ratio)를 계산하여 이를 연소안정 마진의 평가 인자로 사용한다. 감쇠비가 상대적으로 크다는 것은 연소동압의 해당 주파수 성분이 시간이 지남에 따라 자연감쇠되고, 이는 연소가 안정되게 진행됨을 의미한다. 즉 해당 주파수 성분에 의한 연소불안정이 발생할 가능성이 상대적으로 작아짐을 의미한다고 해석할 수 있다. 반면, 상대적으로 작은 감쇠비를 갖는 경우, 자연감쇠의 확률이 낮아지면서 연소불안정 발생 가능성이 커지게 된다. Figure 1은 CSMA의 흐름도이다.

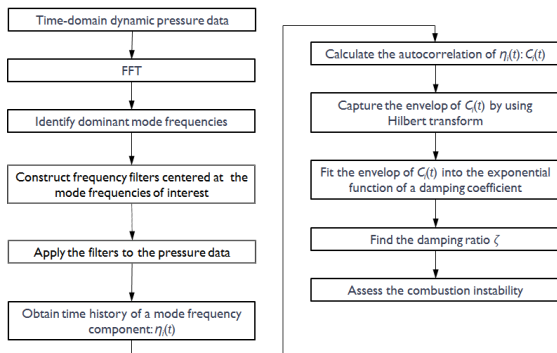


Fig. 1 Flowchart of CSMA, Combustion Stability Margin Assessment, developed in this study.

개발한 CSMA 코드의 타당성을 조사하기 위해 실 발전용 가스터빈 연소분사기의 축소모델을 장착한 상압 모델 가스터빈연소기의 연소실험에 적용하였다. 합성천연가스를 연료로 사용하였으며 연소용 공기는 약 250°C로 가열하여 약 1,000 slpm로 공급하였다. 이 때 당량비를 0.47에서 0.73까지 변화시키며 연소동압을 측정하였다. Figures 2 및 3은 각각 이 실험에서의 당량비와 연소동압의 시간변화를 보여주고 있다. 보다 자세한 연소실험에 관한 자료는 참고문헌 7를 참고할 수 있다.

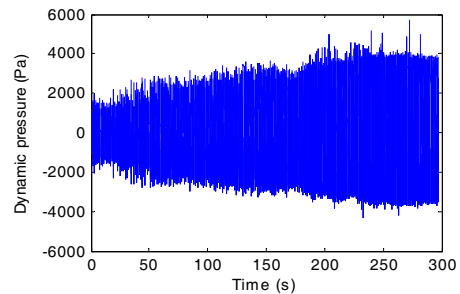


Fig. 2 Time history of dynamic pressure in the model gas turbine combustor

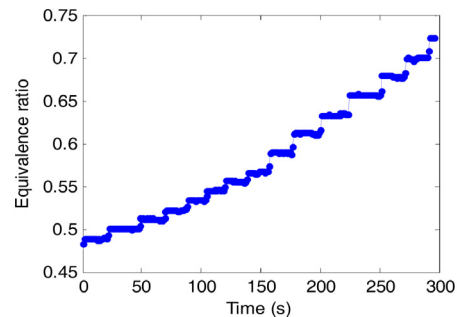


Fig. 3 Time trace of the change in equivalence ratio

획득한 연소동압 데이터를 CSMA 코드에 입력하여 당량비 변화에 따른 연소동압의 rms값 P_{rms} 와 감쇠비 계산 결과가 각각 Fig. 4와 Fig. 5이다. Figure 4에서 보는 바와 같이 해당 연소실험에서는 당량비 증가에 따라 연소동압이 선형적으로 증가하나, 약 0.66 근처에서 포화되었다. 포화된 연소동압은 연소실 압력(상압) 대비 약 2%의 크기로 발전소 운전자들이 인식하고 있는 연소불안정 동압(3 psi)[5]의 상대적 크기에 해당한다. 이 때 연소동압 데이터로부터 계산한 감쇠비 결과가 Fig. 5이다. 그림에서 보는 바와 같이, 저당량비 영역에서의 감쇠비는 상대적으로 큰 값을, 약 0.58부터는 작은 값으로 계산되었다. 따라서 감쇠비의 변화 추이를 감시함으로써, 실제 연

소불안정이 발생하는 당량비 0.66 근처에 도달하기 이전인 약 0.58에서 연소불안정을 사전에 예측할 수 있었다. 또한 개발한 CSMA 코드를 모델 가스터빈 연소시험장치의 실시간 DAQ 시스템에 장착하여 연소동압의 감쇠비를 온라인으로 표시할 수 있음도 확인하였다.

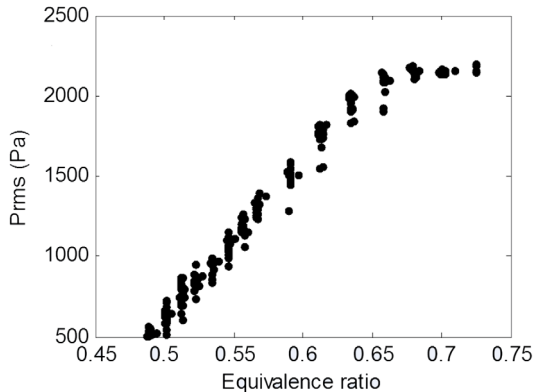


Fig. 4 Variation of P_{rms} as a function of the equivalence ratio

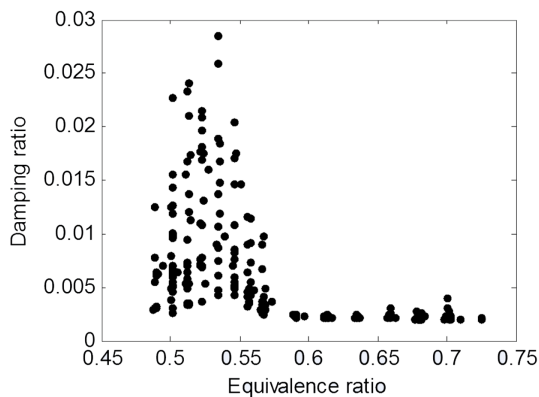


Fig. 5 Variation of damping ratio as a function of the equivalence ratio

발전용 가스터빈의 연소동압 데이터의 감쇠비를 실시간으로 계산하여 연소안정 마진을 예측할 수 있는 CSMA 코드를 개발하여, 모형 가스터빈 연소기의 연소불안정 실험에 적용하였다. 보다 체계적인 실험과 조사가 필요할 것으로 사료되지만, 개발한 코드의 현장 적용 타당성은 충분한 것으로 판단한다. 발전소 운전자들이 온라인으로 표시되는 연소동압의 감쇠비를 활용하여 연소안정마진을 실시간 예측하여 발전설비의 보다 안정적 운영을 도모할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2013년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 일부 지원(과제명 : 한국형 300 MW급 IGCC 실증플랜트 기술개발사업 연구)을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] J. M. Beer, "Minimizing NO_x Emissions from Stationary Combustion: Reaction Engineering Methodology," *Chemical Engineering Science*, Vol. 49, No. 24A, 1994, pp. 4067-4083.
- [2] A. H. Lefebvre, "The Role of Fuel Preparation in Low-emission Combustion," *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 117, 1995, pp. 617-654.
- [3] G. A. Richards and M. C. Janus, "Characterization of Oscillations During Premix Gas Turbine Combustion," *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 120, 1998, pp. 294-302.
- [4] K. R. McManus, T. Poinot, and S. M. Candel, "A Review of Active Control of Combustion Instabilities," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 19, 1993, pp. 1-29.
- [5] L. Angello, Tuning Approaches for DLN Combustor Performance and Reliability, EPRI Technical Report 1005037, 2005, Ch. 2.
- [6] T. Lieuwen, "Online Combustor Stability Margin Assessment Using Dynamic Pressure Data," *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 127, 2005, pp. 478-482.
- [7] S. Park, U. Kim, J. Chung, J. Hong, S. Kim, and D. Cha, "Effects of Hydrogen in SNG on Gas Turbine Combustion Characteristics," *Trans of the Korean Hydrogen and New Energy Society*. Vol. 23, No. 4, 2012, pp. 412-419.
- [8] F. E. C. Culick, "Nonlinear Growth and Limiting Amplitude of Acoustic Oscillations in Combustion Chambers," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 3, 1971, pp. 1-16.