

발전용 가스터빈에서 발생하는 연소진동 특성 및 이상연소진동의 저감

서석빈[†] · 안달홍^{*} · 정재화^{*}

Characterization of Combustion Oscillation and Reduction of Abnormal Oscillation in a Power Generation Gas Turbine

Seo, Seok-Bin, Ahn, Dal-Hong, Chung, Jae-Hwa

Key Words: Combustion Oscillation(연소진동), Gas Turbine(가스터빈), Lean Premixed Combustion(희박예혼합연소)

Abstract

Gas Turbine combustors for power plant can be reduced NOx emissions using lean premixed combustion technology. But the combustors are likely to occur combustion oscillations which damage operation reliability and mechanical life of the gas turbines. In this paper, characterizations of oscillation in a gas turbine combustor for power plant are presented. Combustion dynamics occur 1 ~ 1.5 psi in amplitude with low frequency less than 140Hz during normal operation. An abnormal high level dynamics, 2.0 psi amplitude occur at 125 Hz frequency. Abnormal combustion oscillation is reduced by modulation of fuel supply valve control schedule.

기호설명

Lc: 연소기 길이

P: 압력

Q: 열발생률

Rc: 연소기 반경

T: 진동주기

V: 연소기 부피

c: 음속

f: 주파수

t: 시간

λ : 고유상수

1. 서 론

발전용 가스터빈 설비는 현재 국내 발전설비의 약 23%를 차지하고 있으며 지속적으로 설비용량이 증가될 것으로 전망된다. 한편, 2005. 1월부터 대기환경 규제처 강화(대기환경규제에 관련 법령, 2002, 환경부), 지방자치단체와의 환경규제를 위한 자율협정 등 발전설비에 대한 환경배출 규제가 강화되고 있다. 이에 따라 국내에서 최근 건설되어 운용중이거나 건설예정인 가스터빈은 NOx 배출량을 줄이기 위해 희박예혼합(Lean Premix, LPM) 연소기술을 채용하고 있다. LPM 연소기술은 연료/공기비를 낮추어 희박하게 혼합하여 연소함으로써 화염온도를 낮추고 열적 NO의 형성을 줄이는 기술이다. 그러나 LPM 연소는 당량비가 낮은 희박연소를 함에 따라 안정운전 영역이 좁아 연소진동, 역화 등이 빈번히 발생하여 운전 신뢰성을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 연소기 부품을 소손시키는 문제점이 발생하고 있

† 한전전력연구원

E-mail : dolbin@kepri.re.kr

TEL : (042)865-5482 FAX : (042)865-5489

* 한전전력연구원

다. 본 논문은 이러한 발전용 LPM 가스터빈인 ABB 11N 가스터빈에서 발생하는 연소진동 특성을 분석하고 저감한 내용을 기술하였다.

2. 본 론

2.1 희박예혼합연소의 연소불안정

LPM 연소기는 연료와 공기를 미리 예혼합하여 연소하는 방식으로 연료/공기비를 이론당량비 이하로 낮추어 예혼합함으로써 화염온도를 떨어뜨려 열적 NO 형성을 줄일 수 있다. 그러나 LPM 연소기는 희박연소에 따라 연소불안정이 발생하기 쉬우며 재래식 연소기와 달리 연소기 주위에 희석용 공기 흘러 없어 연소 시 발생하는 연소음향에너지를 흡수하지 못해 연소진동이 발생하기가 쉽다.

LPM 연소기에서 발생되는 연소진동은 연소기 내의 압력파가 되먹임(feed back)되어 열방출률과 결합될 때 발생한다⁽¹⁾. 이 개념을 Fig. 1과 같은 폐회로(closed loop) 시스템으로 나타내었다. 열방출률 변동 $\dot{Q}(t)$ 은 연소기내에 음향장의 급격한 교란을 발생시킨다. 연소기내에서 연소과정에서 발생하는 연소 음의 반향과 음향손실이 조합되어 압력변동 $P'(t)$ 을 발생시킨다. 만일 음향이 연소기 벽에 부딪혀 되먹임 되는 음압이 연소과정에서 발생되는 열방출률과 결합되면 연소진동이 발생한다. 연소진동이 발생하는 조건식은 (1)식으로 알려진 Rayleigh 기준식⁽²⁾이다.

$$\frac{1}{T} \int_0^T \int_V P(x, t) \dot{Q}(x, t) dV dt > \text{acoustic losses} \quad (1)$$

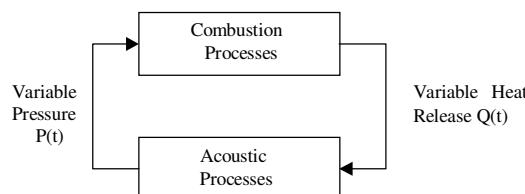


Fig. 1 Schematic of processes occurring during combustion oscillation⁽¹⁾

본 논문에서 대상으로 하는 연소기는 발전용 ABB 11N 가스터빈의 사일로(silo) 타입의 연소기로서 LPM 방식을 채용하고 있다. 이 연소기에서도 LPM 연소에 따른 연소불안정이 발생되고

있는데 특히, 연료공급밸브의 튜닝 상태에 따라서 연소진동이 발생하거나 NOx 발생이 증대되는 문제점이 있다.

2.2 가스터빈 예혼합 연소기 형상

본 연구에서 대상으로 한 발전용 예혼합 가스터빈 연소기는 ABB 11N 기종의 가스터빈 연소기이다. 정격출력은 79.5MW이며 연료는 천연가스 및 D.O(Distillate Oil) 연료를 사용할 수 있으며 천연가스를 주 연료로 하고 있다. 연소기는 사일로(silo)타입의 연소챔버로 구성되어 있다. Fig. 3에 연소기의 기본 구조를 나타내었다.

연소기 연료공급 베너는 EV 베너라고 불리며 2등분 원뿔이 어긋나게 겹쳐져 있는 형상을 하고 있다. 어긋난 틈새로 연소용 공기가 공급되며 가스연료는 공기유입구와 평행으로 설치된 2열의 세공에서 분사된다. 연료와 공기는 원뿔형 베너 내에서 빠른 유속과 강한 스월로 인해 혼합된 후 연소된다. 연소기에 설치된 36개 EV베너는 6개의 그룹으로 나누어져 각각의 연료공급밸브를 통해 공급된다. 가스터빈의 부하증가에 따라 그룹별로 아래와 같은 순서에 따라 연료공급밸브가 열려 연료를 공급하게 된다.

- 1) Group 2 Full open(10% Load)
- 2) Group 1 Full open(25% Load)
- 3) Group 3 open: 30% Load에서 시작하여 부

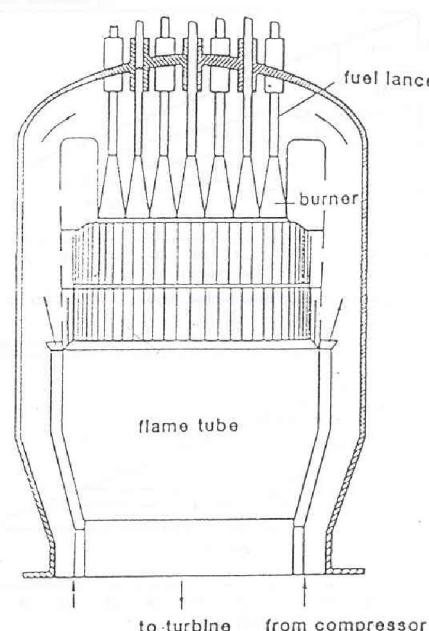


Fig. 2 ABB 11N Combustor

- 하증대에 따라 개도 증가
 4) Group 4~6을 부하증대에 따라 차례로 open하여 개도 증가

2.3 연소진동 특성 분석 결과

2.3.1 연소진동 특성분석 결과

연소기에서 발생하는 연소진동을 측정하기 위해 연소진동 측정 probe를 연소기 외부 케이싱과 라이너를 관통하여 설치하였다. 동압센서는 probe 반대쪽 끝단에 부착하여 연소기 내부의 동압을 전기신호로 변환하여 계장부품으로 전송하며 P.C에서 분석소프트웨어를 이용하여 데이터를 측정하고 분석하였다. Fig. 3는 본 연구에서 사용한 연소진동측정장치의 구성도이다.

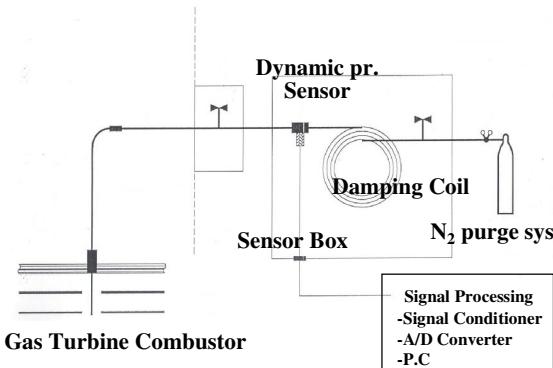


Fig. 3 Combustion oscillation measurement system

Fig. 4는 연소기에서 발생하는 연소진동을 3가지 주파수대역으로 나누어 측정한 결과를 보여주고 있다. 연소진동의 크기는 주파수 140Hz 대이하에서 가장 높게 나타났으며 그 크기는 1~1.5psi(peak-peak)로 나타났다. 주로 나타난 주파수는 13~70Hz로 저주파수이다.

이 주파수대의 연소진동은 연료공급설비의 미소한 운전조건변동에 의해 연소열발생율이 변동되어 나타난 것으로 추정된다.

2.3.2 연소불안정 발생 및 저감

이 가스터빈이 운전 중 100% 부하에서 연소불안정이 발생되었으며 이때 발생된 연소진동의 크기는 평균 2.0 psi이고 주파수는 125Hz로 분석되었다. 이 연소불안정으로 인해 가스터빈의 기계적 진동이 동반되었다.

이 연소불안정은 연소기 형상에 관련된 고유음

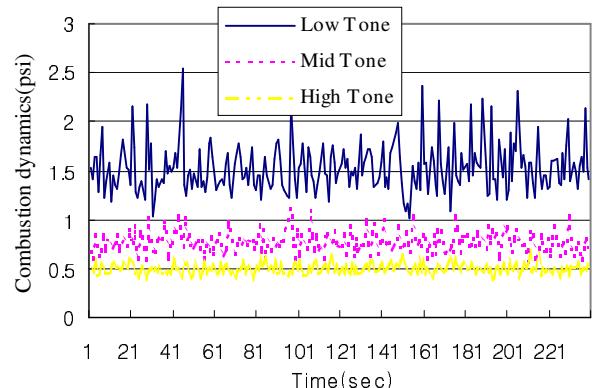


Fig. 4 Combustion dynamics in ABB 11N Combustor

향주파수 1L 모드인 것으로 판단된다. (2)식은 연소기의 형상에 따른 공명 음향모드 주파수의 예측식이다⁽³⁾.

$$f_{\ell m n} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\lambda_{m,n}^2}{R_c^2} + \frac{\ell^2 \pi^2}{L_c^2}\right)} \quad (2)$$

$\ell, m, n = 0, 1, 2, \dots$

이 식에 Table 1과 같이 운전조건 및 연소기 형상자료로부터 공명 음향모드의 주파수를 예측하였다. 그 결과 대상 연소기의 공명 음향모드 1L 모드 주파수가 135Hz 인 것으로 나타났으며 이는 실험에서 나타난 연소불안정 주파수 125Hz와 근사한 값이었다. 이 결과로부터 연소불안정이 연소기 형상에 따른 고유음향수파수 1L 모드와 연소 열방출율이 결합되어 나타난 것으로 판단된다. 이와 같이 연소기의 형상과 관련된 고유 음향진동과 연소 열방출률이 결합되는 것을 방지하기 위해서는 형상자체의 변경 또는 운전조건을 변경시키는 방법을 고려할 수 있다.

Table 1 Design and operation data

Item	Value
Power Output(MW)	80
Fuel Flow rate(kg/s)	5.19
TIT(°C)	1,027
Equivalent ratio	0.6
Combustion chamber size (simplify), cm	Φ200x3,100
1L Mode, Hz from equation (2)	136

본 실험에서는 현실적으로 형상자체의 변경은 채용하기 어렵기 때문에 후자와 같이 운전조건을 변경하였다. 기존 연구에서 운전 당량비를 희박한 조건에서 이론당량비 근처로 높이면 열방출률의 변동이 적어지기 때문에 연소불안정이 감소될 수 있다는 것을 밝혔다^[4]. 이 결과를 이용하여 연료밸브의 열리는 시점을 늦추어 이상연소진동이 발생되는 시점에서 각 연료공급버너의 운전 당량비를 높였다. Fig. 5는 연소조정 전, 후의 연소진동, NOx 발생량 및 가스터빈 출력을 나타내었다. 조정 전에 발생되고 있는 주파수 125Hz의 이상연소진동의 크기가 평균 2.0 psi로 높았으나 (Fig. 5의 빗금 친 영역), 조정 후에는 0.5 psi로 감소되었으며 연소진동으로 인해 동반되었던 터빈의 기계적 진동도 감소되었다. 반면에 배기ガ스의 NOx 발생은 72ppm@13%O₂에서 80ppm@13%O₂로 약간 증대되었다. 이 같은 지역의 대기환경오염기준치 100ppm을 만족하였다.

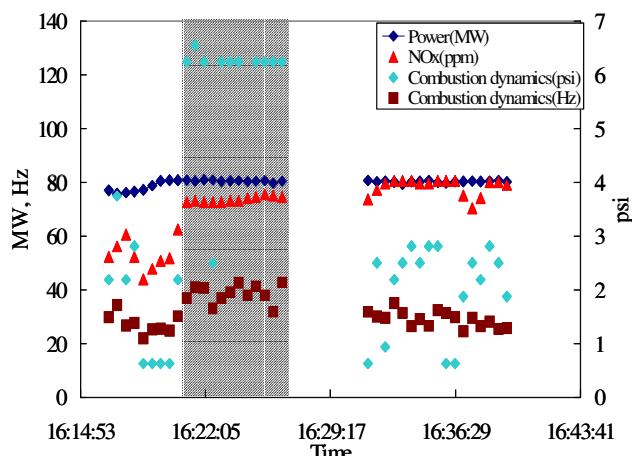


그림 5 Reduction of abnormal combustion oscillation

4. 결 론

발전용 예혼합 연소기(ABB 11N 가스터빈)를 대상으로 연소진동을 측정하고 분석하였다. 또한 운전 중에 발생된 비정상적인 연소진동을 감소시키기 위해 연료밸브의 조정을 통해 연소진동을 저감하였다. 주요 실험결과는 다음과 같다.

1) 대상 발전용 LPM 연소기에서 발생하는 연소진동은 140Hz 이하의 저주파수 대역에서 높게 나타났으며, 그 크기는 1~1.5psi(peak-peak)이었다.

2) 연소불안정으로 인해 이상 연소진동이 125 Hz에서 발생되었으며 그 크기는 평균 2.0 psi로 높았다. 분석 결과, 이는 연소기 형상과 관련된 고유 음향모드(1L 모드)와 일치하는 것으로 나타나 이상연소진동이 연소기 고유 음향모드와 연소 열방출률이 결합되어 나타난 것으로 판단된다.

3) 연소기의 연료공급밸브의 열리는 시점을 조정하여 각 베너에서의 운전 당량비를 높여 연소 열발생률의 변동을 감소시켰으며 이로 인해 이상연소진동이 0.5 psi로 감소되었다.

4) 조정 후 NOx 발생은 다소 증대되는 것으로 나타났으며 따라서 대상 연소기에 대해 이상연소진동이 발생되지 않으면서 NOx 발생이 대기환경 규제치를 넘지 않도록 적절하게 운전점을 설정하는 것이 필요하다고 하겠다.

후 기

이 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업의 기금을 지원받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Richards, G. A., Gemmen, R. S. and Yip, M. J., 1998 "A Test Device for Premix Gas Turbine Combustion Oscillations" J of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol.120, p.294-302,
- (2) Rayleigh, J. S. W., 1945 "The Theory of Sound", Dover, New York, Vol.2, p.226
- (3) E. Laudien, R. Pongratz, R. Pierro and D. Preclik, "Experimental Procedures Aiding the Design of Acoustic Cavities" AIAA paper, 1994
- (4) T. Lieuwen, H. Torres, C. Johnson, B. T. Zinn, 2001 "A Mechanism of Combustion Instability in Lean Premixed Gas Turbine Combustors", J of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol.123, p.183