

Silo 형 가스터빈 연소기에서 발생하는 연소진동 분석 및 저감

서 석 빈[†], 안 달 홍, 차 동 진*, 박 중 호**
한전전력연구원, 한밭대학교* 건축설비공학과, 충남대학교** 기계공학과

Analysis of Combustion Oscillation and its Suppression in a Silo Type Gas Turbine Combustor

Seo, Seok-Bin[†], Ahn, Dal-Hong, Cha, Dong-Jin*, Park, Jong-Ho**

Korea Electric Power Research Ins., Daejeon 305-760, Korea

**Dept. of Building Services Engineering, Hanbat University, Daejeon 305-701, Korea*

***Department of Mechanical Engineering, Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea*

(Received June 26, 2008; revision received January 9, 2009)

ABSTRACT: The present study describes an investigation into the characteristics of combustion oscillation and its suppression instability of a silo type gas turbine combustor in commercial power plant. Combustion oscillation is occurred the combustor in near full load during operation. As a result of FFT analysis of the combustion dynamics, the frequency of the oscillation is analyzed as the 1'st longitudinal mode of acoustic resonance of the combustor. For suppress of the instability, combustion tuning with adjust of fuel valve schedule is carried out, which changes equivalent ratio of each burners. As the result, the oscillation is successfully reduced with meeting the level of NOx emission regulation.

Key words: Combustion oscillation(연소진동), Gas turbine(가스터빈), Lean premixed combustion (희박에혼합연소), Combustion instability(연소불안정)

기 호 설 명

- L_c : 연소기 길이 [m]
- P : 압력 [m]
- Q : 열발생률
- R_c : 연소기 반경 [m]
- T : 진동주기 [sec]
- V : 연소기 부피 [m³]
- c : 음속 [m/sec]
- f : 주파수 [Hz]
- λ : 고유상수

1. 서 론

발전용 가스터빈 설비는 현재 국내 발전설비의 약 23%를 차지하고 있으며 지속적으로 설비용량이 증가될 것으로 전망된다. 한편, 2005년 1월부터 대기환경 규제치 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 희박에혼합(Lean Premix, LPM) 연소기술을 채용하고 있다. LPM 연소기술은 연료/공기비를 낮추어 희박하게 에혼합하여 연소함으로써 화염온도를 낮추고 열적 NO의 형

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-865-5372; fax: +82-42-865-5497

E-mail address: ssb1029@kepco.co.kr

성을 줄이는 기술이다. 그러나 LPM 연소는 당량비가 낮은 희박연소를 함에 따라 안정운전영역이 좁아 연소진동, 역화 등이 빈번히 발생하여 연소기 부품의 수명단축 뿐만 아니라 기계적 손상을 유발하여 막대한 손실이 발생하는 사례가 발생하고 있다.⁽¹⁾ 본 논문은 이러한 발전용 LPM 가스터빈 중의 하나인 사일로 타입연소기에서 발생하는 연소진동 특성을 분석하고 저감한 내용을 기술하였다.

2. 본 론

2.1 LPM 연소기의 연소진동 발생

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 흡이 없어 연소 시 발생하는 연소음향을 감쇄하지 못해 연소진동이 발생하기가 쉽다.

LPM 연소기에서 발생하는 연소진동은 연소기 내의 압력파가 되먹임(feed back)되어 열방출률과 결합될 때 발생한다.⁽²⁾ 이 개념을 Fig. 1과 같은 폐회로(closed loop)시스템으로 나타내었다. 연료공급변동 등에 의해 연소 시에 발생하는 열방출률 변동 Q(t)은 연소기내의 음향장의 급격한 교란을 발생시킨다. 연소기내에서 연소과정에서 발생하는 연소 소음의 반향과 음향손실이 조합되어 압력변동 P'(t)을 발생시킨다. 만일 음향이 연소기 벽에 부딪혀 되먹임 되는 음압이 연소 과정에서 발생하는 열방출률과 결합되면 연소진동이

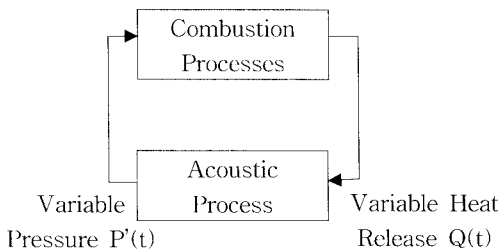


Fig. 1 Schematic of processes occurring during combustion oscillation.

발생한다. 연소진동이 발생하는 조건식은 식(1)으로 알려진 Rayleigh 기준식⁽³⁾이다.

$$\frac{1}{T} \int_0^T \int_V P'(x, t) \dot{Q}(x, t) dV dt > acoustic losses \quad (1)$$

2.2 Silo 형 가스터빈 연소기 설비

본 연구에서 대상으로 한 발전용 LPM 가스터빈 연소기는 ABB 11N 기종의 Silo 형의 가스터빈 연소기이다. 정격출력은 79.5 MW이며 연료는 천연가스 및 D.O(Distillate Oil)연료를 사용할 수 있으며 천연가스를 주 연료로 하고 있다.

연소기 연료공급 버너는 EV 버너라고 불리며 2등분 원뿔이 어긋나게 겹쳐져 있는 형상을 하고 있으며 연료와 공기는 원뿔형 버너 내에서 빠른 유속과 강한 스윙로 인해 예혼합된 후 연소된다. 단일 Silo 형 연소기에는 36개의 EV 버너가 Fig.

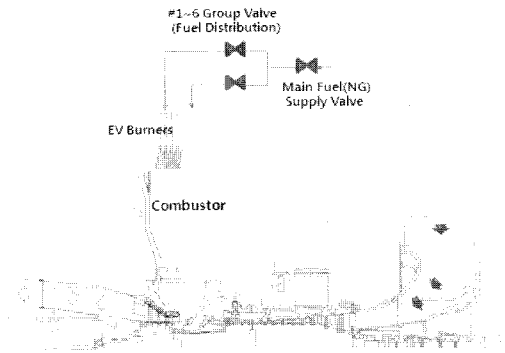


Fig. 2 Silo type combustor(ABB 11N Gas Turbine).

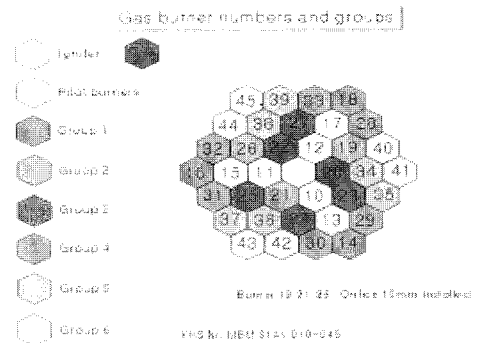


Fig. 3 Fuel burners of each group valves.

3와 같이 배열되어 설치되어있으며, 36개 EV 버너는 6개의 그룹으로 나누어져 각각의 그룹밸브에 의해 유량이 조절되도록 되어있다. 가스터빈의 출력증가에 따라 10% 출력에서 Group 2 연료밸브, 25% 출력에서 Group 1 연료밸브가 완전히 열리며, 30% 출력이상에서 Group 3~6 연료밸브가 출력증가에 따라 개도가 증가된다.

2.3 연소동압(combustion dynamic pressure) 측정 및 분석

대상연소기에서 발생하는 연소동압을 측정하기 위해 1/4" 도관을 연소기 외부 케이싱과 라이너를 관통하여 설치하고 이 관을 통해 연소기내부 동압(dynamic pressure)이 외부의 센서로 전달되도록 하였다. 동압센서는 퀴즈(quartz) 재질의 압전 동압센서(piezoelectric dynamic pressure sensor)

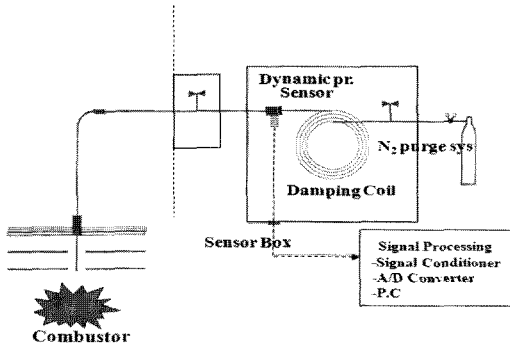


Fig. 4 Scheme of measurement of combustion dynamics.

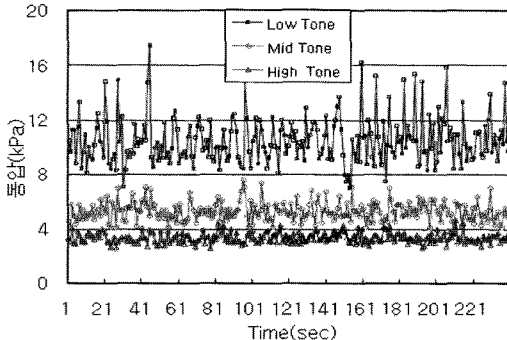


Fig. 5 Combustion dynamic pressure pressure in each band frequency.

이며 도관의 반대쪽 끝단에 부착하여 연소기 내부의 동압을 전기신호로 변환하여 계장부품으로 전송한다. Fig. 4는 본 연구에서 사용한 연소동압 측정장치의 구성도이다. 사용된 센서는 pcb사의 M205 model이며 다이내믹신호 분석은 NI 사의 PXI 4472 board를 사용하였다. Fig. 5는 대상연소기에서 정상운전 중 발생하는 연소다이내믹을 FFT 분석 후 3가지 주파수대역으로 나누어 측정된 결과를 보여주고 있다. 연소다이내믹의 크기는 주파수 100 Hz 이하의 저주파수대역에서 가장 높게 나타났다으며 그 크기는 7~10 kPa(peak-peak)로 나타났다.

2.4 연소진동 발생 및 저감

이 가스터빈 연소기가 운전 중 98% 부하에서 연소진동이 발생되었으며 연소다이내믹을 측정하

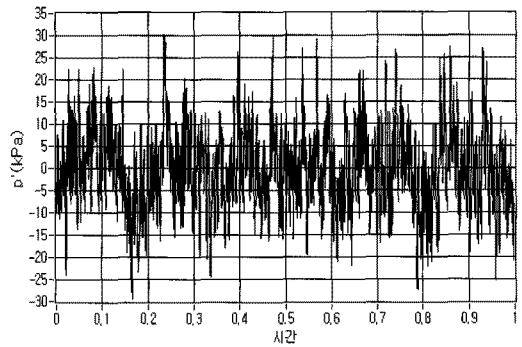


Fig. 6 Time chart of combustion dynamics in instability.

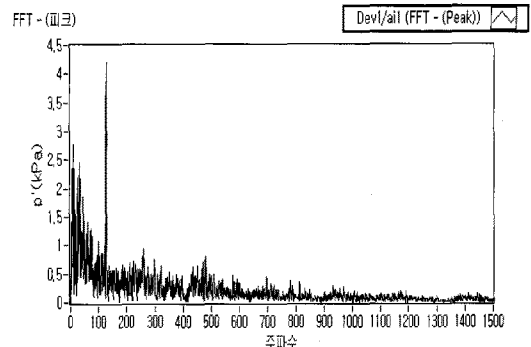


Fig. 7 FFT chart of combustion dynamics in instability.

결과 이때 발생된 주 연소진동의 주파수는 125 Hz로 나타났다(Fig. 6~Fig. 7). 이 연소진동으로 인해 가스터빈의 축 진동 상승이 동반되어 가스터빈의 정상적인 출력운전이 제한되었다.

연소진동 발생 시 운전조건은 Table 1과 같으며 단순화한 연소기 형상자료로부터 연소기의 음향 공명 주파수를 식(2)에 의해 예측하였다.⁽⁴⁾

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

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

그 결과 대상 연소기의 축방향 1L 모드 공명 음향 주파수가 135 Hz인 것으로 나타났으며 이는 측정된 연소진동 주파수 125 Hz와 근사한 값이었다. 이 결과로부터 연소불안정이 연소기 형상에 따른 고유음향주파수 1L 모드와 연소 열방출율이 결합되어 나타난 것으로 판단된다.

이와 같이 연소기의 형상과 관련된 고유 음향 진동과 연소 열방출율이 결합되는 것을 방지하기 위해서는 형상자체의 변경 또는 운전조건을 변경시키는 방법을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 상용운전중인 설비를 대상으로 하고 있어 현실적으로 형상자체의 변경은 채용하기 어렵기 때문에 후자와 같이 운전조건을 변경하였다.

기존 연구에서 운전 당량비를 최박한 조건에서 이론당량비 근처로 높이면 열방출율의 변동이 적어지기 때문에 연소불안정이 감소될 수 있다는 것을 밝혔다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 Fig. 3와 같은 연소기의 연료버너 배열에서 6개 버너 그룹 중 #6 그룹밸브(해당

Table 1 Operation data during combustion oscillation

Item	Value
Power Output(MW)	80
Fuel Flow rate(kg/s)	5.19
TIT(℃)	1,027
Equivalent ratio	0.6
Combustion chamber size(simplify), cm	Φ 200 × 3,100
1L Mode, Hz from equation(2)	136

Table 2 Relative change in gas flow each burner group of silo type combustor at relative load of 98% at modifying group 6 gas control valve schedule

Burner Group	1	2	3	4	5	6	Pilot
Relative Change in Gas Flow(%)	0.47	0.57	0.57	0.57	0.58	-3.65	0.60

버너는 #40~45)의 가스연료공급 스케줄을 변경하여 연소기 내부의 국부운전당량비를 높여 연소진동을 저감할 수 있었다. 즉, 연소진동이 발생하는 부하조건인 약 98% 상대부하에서 연료공급량이 일정한 조건에서 #6 그룹밸브의 개도를 38%에서 32%로 줄였으며 이로 인해 나머지 그룹의 버너(#1~5 그룹 버너 및 파일롯트 버너 영역)의 운전 당량비를 높였다. #6 그룹밸브의 개도변경 전, 후에 수치 해석적으로 예측된(유사한 수치 해석 결과⁽⁶⁾ 참조) 각 버너 그룹별 연료공급량 변동치는 Table 2와 같다. #6 그룹밸브의 스케줄 변경으로 #6 그룹의 버너에 공급되는 연료량은 감소하였으나 #1~5 그룹의 버너 및 파일롯트 버너에 공급되는 연료량은 증가한 것을 볼 수 있다. 대상 연소기에 공급되는 연소공기량은 일정하므로 연료공급량 변화는 운전당량비 변화와 동등하다고 해석 할 수 있어 #1~5 그룹 버너 및 파일롯트 버너의 운전당량비는 0.47%에서 0.60% 정도 증가되었다.

Fig. 8은 연소조정 전, 후의 연소동압, NOx 발생량 및 가스터빈 출력을 나타내었으며 Fig. 9는

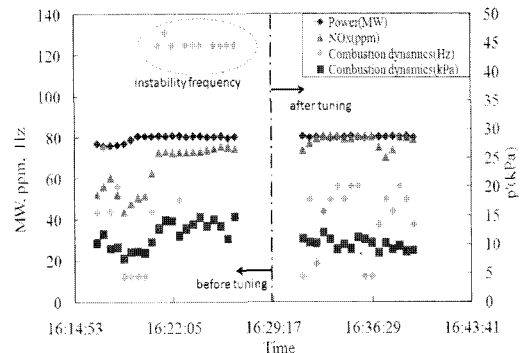


Fig. 8 Comparison of operation parameter before and after combustion tuning.

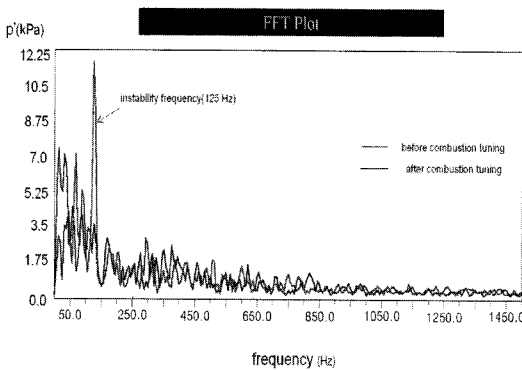


Fig. 9 Comparison of FFT Chart before and after Combustion Tuning.

연소조정 전, 후의 연소동압의 스펙트럼을 비교한 그림이다. 조정 전에 연소진동이 발생하는 주파수 125 Hz의 크기가 평균 14 kPa로 높았으나, 조정 후에는 이 주파수대의 연소진동이 나타나지 않았으며 연소진동으로 인해 동반되었던 터빈의 기계진동도 감소되었다. 반면에 배기가스의 NOx 발생은 72 ppm@13%O₂에서 80 ppm@13%O₂로 약간 증대되었다. 이 값은 대상 가스터빈이 위치한 도시지역의 대기환경오염기준치 100 ppm을 만족하였다.

3. 결 론

발전용 가스터빈의 Silo 타입 예혼합 연소기의 연소진동 특성을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) Silo 타입 예혼합 연소기에서 발생하는 연소진동은 100 Hz 이하의 저주파수 대역에서 높게 나타나며, 그 크기는 7~10 kPa(peak-peak)이다.

(2) 연소기가 특정 부하에서 연소진동이 발생하며 측정 결과 이때 연소진동 주파수는 125 Hz 이고 그 크기는 약 14 kPa(pick-pick)이며 이는 연소기 형상에 대한 고유 음향모드(1L 모드)와 일

치하는 것으로 나타났다.

(3) 연소기의 연료공급밸브의 열리는 시점을 조정하여 운전 당량비를 높임으로써 연소진동을 감소할 수 있다.

(4) 한편, 연료밸브 조정 후 NOx 발생은 다소 증대하였으며, 따라서 연소기에 대해 연소불안정이 발생되지 않도록 연료밸브를 조정하되 NOx 변화를 고려하여 적절하게 설정하는 것이 필요한 것을 알았다.

참고문헌

1. L. Angello, 2004, "Guidelines for combustor Dynamic pressure Monitoring of combustion dynamic monitoring", EPRI Technical Progress Report, pp. 21-25.
2. 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, pp. 294-302.
3. Rayleigh, J. S. W., 1945, "The Theory of Sound", Dover, New York, Vol. 2, p. 226.
4. E. Laudien, R. Ponggratz, R. Pierro and D. Preklik, 1994, "Experimental procedures Aiding the Design of Acoustic Cavities" AIAA paper.
5. 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.
6. Park, E. C. and Cha, D. J., 2001, "Stabilization of Fuel Flow in a Multi-nozzle Combustion System Burning Natural Gas", Korean J of Air-conditioning and refrigerating Engineering, Vol. 12. No. 12. pp. 1255-1265.