

발전용 저 NO_x 가스터빈의 연소불안정 안정화에 관한 연구

정재모 · 안달홍* · 박정규**

한국서부발전(주), *한전전력연구원, **건국대학교
jjmo@iwest.co.kr

Stabilization of Abnormal Combustion of Dry Low NO_x Gas Turbine Combustor for Power Generation

Jai-Mo Jeong, Dal-Hong Ahn* and Jung-Kyu Park**

Korea Western Power

*KEPRI

**KONKUK University

요 약

회박 예혼합 연소방식을 채용한 150 MW급 대형 저 NO_x 가스터빈 연소기에서 발생하는 급격한 연소진동 발생을 저감하였다. 회박 예혼합 연소기에서는 연소튜닝이 적절히 이루어지지 않은 경우에 연소불안정에 기인한 높은 연소진동의 발생과 함께 NO_x 배출량이 높아질 가능성이 있다. 대상 가스터빈의 연소모드 전환 중에 발생하는 연소진동의 주파수와 크기는 각각 80 Hz 및 4~9 psi로 나타났으며, 대기온도가 낮아짐에 따라 연소진동의 크기가 증가하는 경향을 보였다. 연소진동에 영향을 미치는 인자로서 버너노즐로 공급되는 연료유량을 균등화하기 위한 연소튜닝과 연소모드 전환시 연료라인에 연료를 미리 공급(pre-filling)하는 것이 화염안정에 매우 큰 효과가 있었다. 그 결과 연소모드 전환 중에 발생하는 연소진동을 2.5 psi까지 저감할 수 있었으며, 150 MW 기저부하 운전 중에 NO_x 발생량을 35~43 ppm(15% O₂)으로 유지할 수 있었다.

Abstract — Stabilization and reduction of combustion noise and NO_x emission from dry low NO_x combustor of GE MS7001F gas turbine were achieved. Dry low NO_x gas turbines that adopt the lean premixed combustion technology frequently generate the flame instability and high NO_x emissions if not adequately tuned. Dynamic pressure oscillation during the combustion mode transfer increased as ambient temperature decreased with frequency of 80Hz and magnitude of 4~9 psi. Effects of both combustor tuning for uniform fuel flow with burner nozzles and fuel pre-filling into transfer fuel valves on stabilisation of the dry low NO_x combustor were very significant. Dynamic pressure oscillation during the combustion mode change was decreased up to 2.5 psi. Also, NO_x emission from GE7F DLN-1 combustor can be maintained as low as 35~43 ppm (15% O₂) in base load operation of 150 MW.

1. 서 론

가스터빈 복합발전은 열효율이 높고 환경특성이 우수하여 발전설비로 보급이 급격히 증가되고 있다. 기존의 기력 발전시스템의 효율이 38~40%인데 비하여, 가스터빈 복합화력의 열효율은 현재 기술로 약 55% 정도로 높고 기술개발에 따라 향후 60%를 상회할 것으로 기대되고 있다. 가스터빈 복합발전 시스템은 청정연료인 천연

가스를 사용함에 따라 환경성이 매우 우수한 특성이 있다. 대표적인 환경오염물질인 NO_x의 경우, 대부분 50 ppm 이하로 설계되어 있으며, 최근에는 15~20 ppm이하로 낮게 배출되어 기존의 화력발전 시스템에 비하여 매우 우수한 환경특성을 지니고 있다.

현재 가스터빈에 활용되고 있는 질소산화물 저감시스템은 연소기에 물이나 증기를 분사하는 방식과 건식 저 NO_x(Dry Low NO_x(DLN)) 방식이 적용되고 있다. 물

분사 방식은 확산화염 연소방식에 적용하며, 연소기내 화염온도를 낮추어 열적 NO(thermal NO)를 저감하는 방식이나, 가스터빈 효율이 낮아지고, 물분사로 인해 고온부의 수명이 단축되며, 용수 사용이 많은 문제점이 있다. General Electric사의 경우 DLN 연소기의 성능개선을 통하여 질소산화물 배출농도를 9 ppm까지 낮추고 출력증가와 열소비율을 대폭 개선하고 있다.

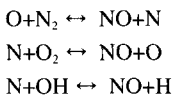
NOx 저감기술인 DLN 연소기술의 핵심은 희박예혼합연소(lean pre-mixed combustion, LPM)이다. LPM 가스터빈은 연료와 공기를 미리 혼합하여 연소실에 공급하는 연소 방식으로 화염온도가 상대적으로 낮아 열적 NO를 줄임으로써 결과적으로 NOx를 저감하게 된다. 그러나 LPM 기술은 당량비 0.6 근처의 희박연소로 화염이 불안정하여 연소진동이 발생되고 있어 안정적인 설비 운전에 장애가 초래하고 있다. LPM이 채택된 발전용 가스터빈의 경우 연소모드 변환 중 연소불안정으로 인한 연소진동이 발생되고 있으며, 이로 인하여 일부 발전설비에는 연소기 노즐 및 라이너 등 설비의 수명이 단축되어 정비 비용이 증가 되고 설비 신뢰도가 저하되고 있다.

본 연구에서는 서인천 복합화력에서 운용하고 있는 희박예혼합 저 NOx 연소방식을 채용한 대형 발전용 가스터빈 GE 7F에서 발생하는 연소불안정/진동의 발생 원인을 밝히고, 이를 연소최적화 조정을 통하여 저감한 결과를 소개하였다.

2. 건식 저 NOx 가스터빈

2-1. 희박 예혼합 연소의 특징

열적 NO(thermal NO)는 가스터빈 연소기의 고온영역에서 발생한다. 열적 NO는 산소와 질소가 존재하는 연소기내에서 일련의 화학반응에 의하여 형성된다. 연소공기 내에 존재하는 산소와 질소가 해리되어 결과적으로 NO를 형성하게 된다. 주요한 화학반응식은 Zeldovich 메카니즘으로 알려져 있으며 다음과 같다¹⁾.



Zeldovich 메카니즘에 의하면 열적 NO의 생성은 온도증가에 따라 지수함수적으로 증가하고 체류시간에 따라서 선형적으로 증가한다.

Fig. 1a 및 1b는 재래식 연소기와 희박예혼합연소(lean pre-mixed combustion)의 저 NOx 연소기를 비교한 것이다. Fig. 1a는 재래식 연소기로서 확산연소방식을 채용하여 연료와 공기가 별도로 공급된다. 연소는 지역적

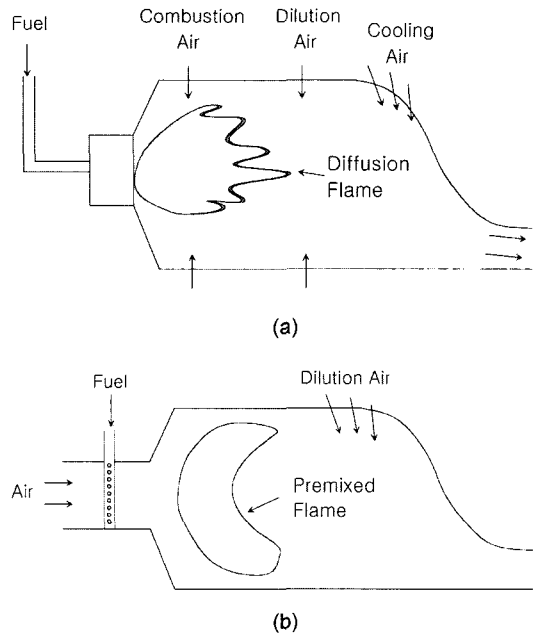


Fig. 1. a. Schematic of conventional combustor, b. Schematic of lean pre-mixed combustor.

으로 연료/공기혼합의 이론 당량비 표면에서 일어나며 결과적으로 여기에 고온부가 형성되어 NOx 발생이 높아진다. 재래식 연소기에서는 화염영역에 물 또는 증기를 분사하여, 열을 흡수함으로써 화염온도를 낮추어, 열적 NOx의 생성을 감소시킨다²⁾. 그러나 연소기에서 화염온도를 낮추기 위하여 물 또는 증기를 추가로 분사함으로써 불완전 연소생성물인 CO 및 UHC가 증대되며, 고온부품의 열 피로(thermal fatigue)에 의한 수명단축과 수증기 배가스 현열에 의한 시스템 열효율의 감소를 가져온다.

Fig. 1b는 최신의 저 NOx 연소기로서 희박한 상태로 연료/공기 혼합물을 미리 혼합함으로써, 화염온도의 최고치를 감소시키고, 결과적으로 열적 NO의 생성을 감소시킨다. 이 기술의 기본적인 원리는 연소구역에 완전한 균질의 희박한 연료/공기 혼합물을 공급하는 것이다. 희박예혼합연소(lean pre-mixed combustion)가 매우 낮은 NO를 발생시키지만, 이 방식은 희박 가연한계(lean flammability limit)에 매우 가깝게 운전됨으로써 여러 가지 제약점을 가지고 있다. 이 연소방식은 화염소실, CO 과다 발생 뿐만 아니라 연소진동을 유발한다. 이는 재래식 연소기와 달리 연소기 주위에 냉각용 공기 홀이 없어 연소시 발생하는 연소 음향 에너지를 흡수하지 못해 연소진동이 발생하기가 쉽다.

LPM 연소기에서 발생하는 연소진동은 연소기내의 압

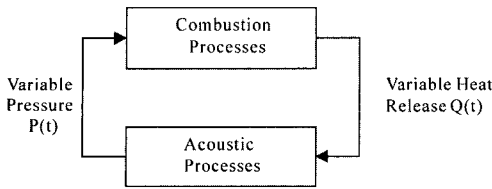


Fig. 2. Schematic of processes occurring during combustion oscillation^{[4][5]}.

력파가 되먹임(feed back)되어 열방출률과 결합될 때 발생한다. 이 개념을 Fig. 2와 같은 폐회로(closed loop) 시스템으로 나타내었다. 열방출률(heat release rate)의 변동 $\dot{Q}(t)$ 은 연소기내에 음향장(acoustic field)의 급격한 교란을 발생시킨다. 연소기내에서 연소과정에서 발생하는 연소 음의 반향과 음향 손실이 조합되어 압력변동 $P(t)$ 을 발생시킨다. 만일 연소음향이 연소기 벽에 부딪혀 피드백 되는 음압이 연소과정에서 발생하는 열방출률과 결합되면 연소진동이 발생한다. 연소진동이 발생하는 조건식은 아래식(1)로 잘 알려진 Rayleigh^[3] 기준식이다^{[4][5]}.

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

NOx 발생과 연소진동 발생을 감소시키기 위하여, 발전용 가스터빈에서는 일반적으로 LPM 연소와 확산화염 연소를 혼합한 형태가 주로 사용되고 있다. 예를 들면, 저부하 운전에서는 화염 안정을 위해 확산화염을 사용하고 고부하에서는 예혼합연소방식을 취하는 혼합형태를 취하고 있다^[5].

본 논문에서 대상으로 하는 연소기는 발전용 LPM 연소기(GE 7F 가스터빈)이며 위와 같은 혼합연소방식을 채용하고 있다. 그러나 이 연소기에서도 LPM 연소에 따른 연소불안정이 발생되고 있는데 특히, 연소 형태가 확산화염 연소에서 예혼합연소로 전환될 때 기계진동을 동반한 심한 연소진동이 발생되는 문제점이 있다.

2-2. 저 NOx 연소기의 구조

본 연구에서 대상 가스터빈의 출력은 150 MW이며 연료는 천연가스 및 D.O(Distillate Oil) 연료를 사용할 수 있으며 천연가스 연료를 주 연료로 하고 있다. 연소기는 캔(Can)형태의 14개 연소챔버로 구성되어있다. Fig. 3에 연소기 기본 구조를 나타내었다. 연소기는 벤츄리 목에 의해 1차 연소구역과 2차 연소구역으로 나누어져 있어 연소모드에 따라 연소가 되는 구역이 달라진다. 이 연소기의 출력에 따른 연소모드 형태와 연소구역은 다음과 같다^{[5][6]}.

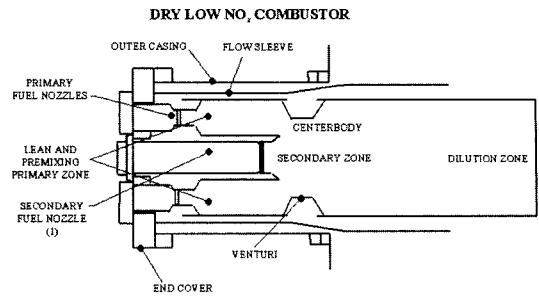


Fig. 3. Schematic of LPM combustor for General Electric 7F gas turbine^{[5][6]}.

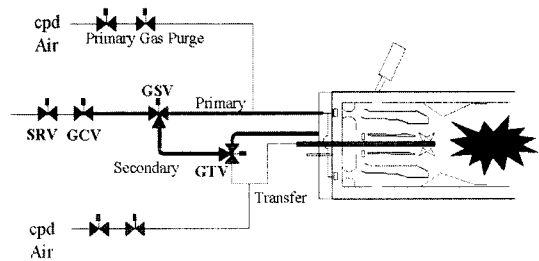


Fig. 4. Schematic of gas fuel piping system^{[6][7]}.

- (1) 1차 연소모드(Primary mode)
점화부터 정격출력의 20% 부하까지 적용되며 연소는 1차 연소구역에서 확산화염 형태로 이루어진다.
- (2) 확산화염모드(Lean-lean mode)
정격출력의 20%~40% 부하까지 적용되며 1, 2차 연소구역 모두에서 연소되며 주 화염 형태는 확산화염이다.
- (3) 연소전환 모드(Transfer mode)
확산화염모드에서 예혼합 연소모드로 전환되는 모드이다. 1차 연소구역의 화염이 소화되고 2차 연소구역에서만 예혼합연소가 되도록 1분이내의 짧은 시간에 연료 분배가 조정된다.
- (4) 예혼합 연소모드(Pre-mix mode)
정격출력의 40%~100% 부하의 고출력에서 적용되며 2차 연소구역에서만 예혼합 화염으로 연소가 이루어진다.

2-3. 연소동압 측정장치

연소기내의 연소불안정을 측정하기 위하여 연소동압 측정장치를 가스터빈 연소기에 설치하였다. Fig. 5는 본 연구에서 사용한 연소진동 측정장치의 설치 구성도를 나타낸다. 이 시스템은 3가지의 주요 구성부품으로 되어 있다. (1) 연소동압 샘플링 프로브 및 파동가이드, (2) N₂ 퍼지 시스템을 포함한 센서박스 그리고 (3) 신호처리를 위한 측정계장부로 되어있다. 연소동압 프로브와 파동가이드는 1/4" 튜브로 만들어졌다. 연소동압 프로브는 14

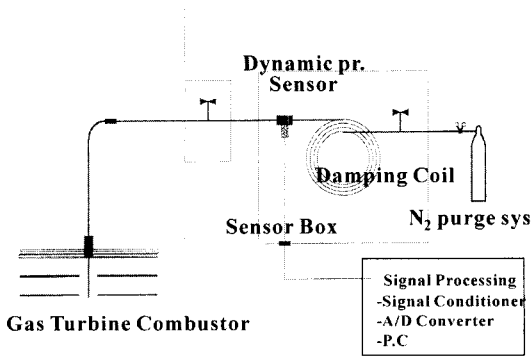


Fig. 5. Schematic of combustion oscillation measurement system.

개 연소기 캔에 모두 설치되어 있다. 파동 가이드는 단순한 튜브로서 음파신호를 연소기로부터 압력센서박스로 전달하는 역할을 한다. 센서박스에는 8개의 압력센서가 설치되어있다. 각각의 센서는 연소기내의 동압에 비례하는 전압신호로 만들어내어 계장부로 보내어 신호를 처리한다.

연소기내의 연소동압(dynamic pressure oscillation) 측정은 연소기 외부에서 라이너 표면 속으로 삽입한 반경 방향의 프로브(radial probe)에 의하여 측정하였다. 이 프로브는 압력베셀의 외부 케이싱을 통과하여 연소기 외부에서 동압변환기에 연결된다. 가스터빈에는 14개의 연소기가 있으며, 연소상태가 가장 나쁜 연소기의 연소상태를 측정하기 위하여 이들 모두에 동압프로브를 설치하여 측정하였다¹⁾. GE7F 가스터빈의 연소모드전환(확산 연소모드에서 희박에혼합 연소모드로)시에 발생하는 급격한 연소진동의 원인을 파악하기 위하여, 연소동압측정과 함께 연료밸브개도율, NOx 배출량, 터빈회전자의 진동 그리고 터빈의 배기가스 온도분포 등 GE7F 가스터빈의 주요 운전특성 자료를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

발전용 LPM 연소기 GE7F 가스터빈의 연소모드별 연소진동 특성을 분석하고, 연소모드가 확산연소모드에서 예혼합 연소모드로 전환되는 동안 발생하는 연소진동의 특성을 분석하여 비정상적인 급격한 연소진동을 저감하였다.

3-1. 연소모드 전환중 연소불안정 발생

Fig. 6은 확산화염 연소모드에서 희박에혼합 연소모드로의 전환하는 중에 연소기의 내부에서 발생하는 연소진동과 연료밸브의 동작을 나타낸 그림이다. 그림에서와

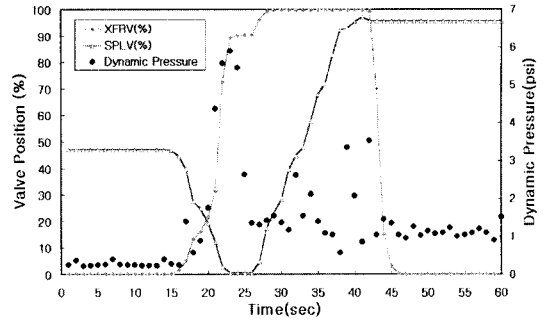


Fig. 6. Dynamic pressure and fuel valves position during mode change.

같이 연소모드 전환 중에 1차연료가(primary fuel) 연료 전환용연료(transfer fuel)로 전환될 때 연소동압(dynamic pressure oscillation)이 급격히 상승되는 것을 관찰할 수 있었다. 이 시점에서 1, 2차 연료분배를 담당하는 연료 분배밸브(Splitter valve; SPLV)가 동작하여 연료를 2차 연료로(secondary fuel)만 공급되며 동시에 연료전환용 밸브(Transfer valve, XFRV)가 열려서 1차연료가 연료전환용 연료로 전환된다. 이 시점에서 연료전환이 원활하게 이루어지지 않아 총 연료유량이 일시적으로 감소된 것으로 나타났으며, 이로 인해 가스터빈 출력이 실제로 급감되는 것을 관찰하였다. 이러한 연료유량의 급감으로 인해 연소기내에서 일시적으로 연료/공기비가 감소되어 희박연소가 되어 연소불안정이 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 대상 연소기의 연소모드 전환 중에 발생하는 전형적인 연소진동을 주파수 대역을 3가지로 나누어 측정한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 확산화염 모드에서는 동압이 0.2~0.4 psi 이었으며, 연소모드 전환 시점에서는 연소불안정으로 4~9 psi 까지 급격히 증가되다가 연소모드 전환 후 예혼합 연소모드에서는 1~1.5 psi 범위에서 안정되었다. 확산화염모드에서

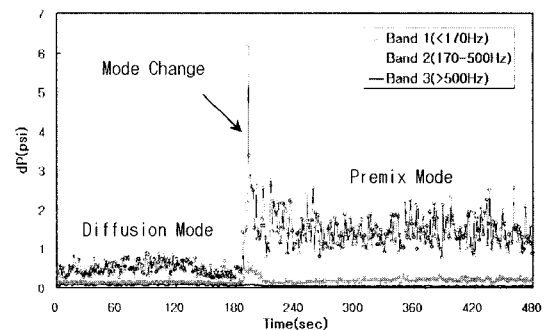


Fig. 7. Dynamic pressure of frequency bands.

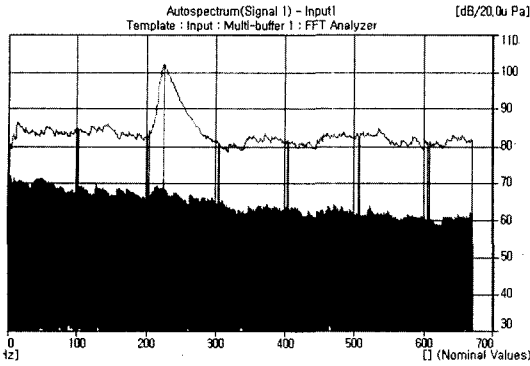


Fig. 8. Acoustic wave outside combustor.

는 고온의 안정한 화산화염을 형성함으로써 연소상태가 안정되어 연소진동이 낮게 나타난다. 그러나 희박 예혼합 연소에서는 낮은 당량비로 화염온도가 낮고 연소상태가 불안정하여 연소진동이 높게 나타난다. 가장 높은 연소진동은 0~170 Hz 범위의 저주파수 대역에서 나타났다. 최고치를 보인 연소진동 주파수는 80 Hz였으며 동압(dynamic pressure)의 최고치는 4~9 psi 범위에서 나타났다. 이 연소기의 가장 낮은 음향공명 모드는 연소기의 길이 방향 종파(longitudinal standing wave)에 기인하는 것이다¹⁰⁾. Fig. 8은 연소기의 외부에서 BNK 음향측정기를 사용하여 측정된 연소 소음파(acoustic wave)의 크기를 나타낸다. 이때 연소기 외부 최대소음의 주파수는 80 Hz 크기는 102 dB로 측정되었으며 지속시간은 6~8초였다. 이는 연소기내에서 측정된 연소동압의 주파수와 동일하였다.

3-2. 대기온도의 영향

Fig. 9는 대기온도가 연소동압(combustion dynamic pressure)의 변화에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 연소모드 전환중 발생하는 연소진동은 대

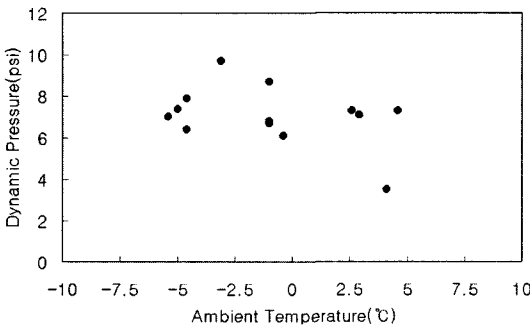


Fig. 9. Dynamic pressure oscillation vs ambient temperature.

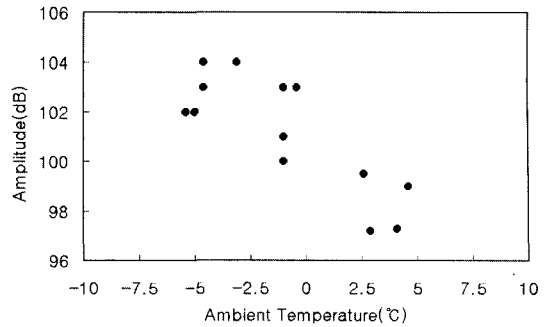


Fig. 10. Acoustic wave outside combustor vs ambient temperature.

기온도가 낮아질수록 그 크기가 증가한다. 특히 대기온도가 0°C 이하로 낮아지는 경우 연소모드 전환중 발생하는 연소불안정이 그림에서와 같이 매우 높아지는 것을 관찰할 수 있었다.

이는 대기온도가 낮아 공기밀도가 높아짐에 따라 압축기를 통하여 연소기로 유입되는 공기량이 많아지고, 동일한 가스터빈 입구온도(Turbine Inlet Temperature, TIT)를 유지하기 위하여 연료공급량이 증가하기 때문이다. 이로 인해 연소기에서 연소 중 총 열방출량이 증대되어 연소모드 전환과 같은 연소불안정 요인이 발생할 때 더 큰 연소진동을 야기시키는 것으로 판단된다. 겨울철에는 낮은 대기온도로 인하여 가스터빈의 출력이 80~90 MW로 높은 상태에서 연소모드전환(화산연소로부터 희박예혼합연소의 전환)이 이루어진다. 이에 따라 높은 출력이 비례하여 연소불안정이 더욱 심하게 나타난다.

Fig. 10은 연소기 외부에서 BNK 음향측정기(sound meter)를 이용하여 측정된 연소음향과 대기온도와의 관계를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 연소기 외부의 연소음향 역시 대기온도가 낮아짐에 따라서 높아지는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 연소기 외부 음향의 크기는 연소기 내부의 연소동압의 크기에 비례하는 것으로 나타났다. 이에 따라 연소기 외부에서 측정된 연소음향(combustion acoustic)의 크기는 연소기 내부에서 발생하는 연소동압(dynamic pressure)의 크기를 간접적으로 확인할 수 있는 참고자료로 활용할 수 있을 것이다.

3-3. 연소모드 전환용 연료 예공급(pre-filling)의 영향

Fig. 11은 1차 연소구역으로부터 2차 연소구역으로의 연료전환을 원활히 하기 위하여 연료전환 밸브(fuel transfer valve)의 열림율(opening rate)을 상향 조정할 전, 후의 연소기 외부에서 측정된 음향의 크기 변화 정도를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 연소기 외부에서 측정된 음향의 크기가 102 dB에서 94 dB로 감소되었다. 현

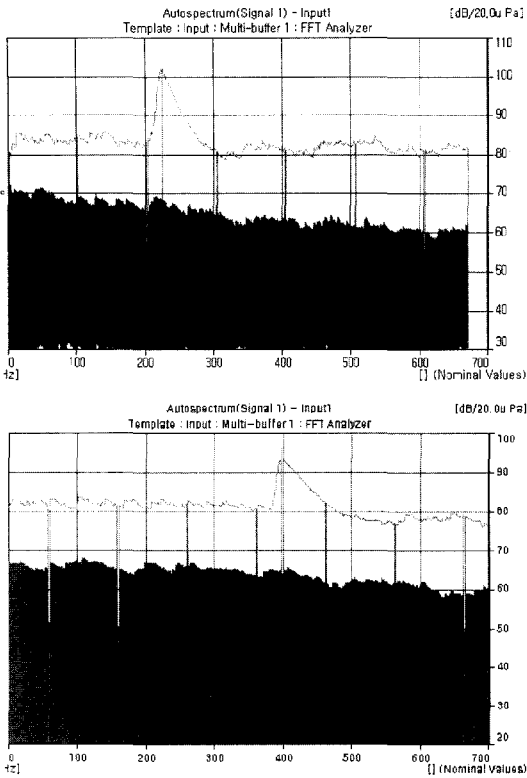


Fig. 11. Reduction of magnitude of acoustic wave measured outside combustor.

장에서의 수많은 실험결과 연소모드의 전환 중에 발생하는 급격한 연소불안정은 연료밸브의 열림시기가 부적절하여 발생한 연료부족이 원인이라는 것이 본 실험으로 확인되었다.

연소기에서 일어나는 이러한 비정상적인 연소동압의 급격한 변동을 방지할 수 있는 가장 효과적인 방법은 연소모드의 전환 전에 비어있는 연료 전환 파이프라인에 연료를 미리 공급하는 것임을 발견하였다. 연료전환밸브의 파라미터를 조정하여 연소모드의 전환 전에 비어있는 연료파이프라인에 연료를 미리 공급할 수 있도록 하였다. 그 결과 연소진동이 약 60% 정도 현격하게 감소하였다.

Fig. 12 및 13은 연소모드전환용 연료의 예공급(pre-filling) 시행 전, 후의 연료전환밸브의 개도와 연소진동을 나타낸 것이다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 연소모드 전환 시 연소진동이 급격하게 증대된 것이 총 연료의 일시적인 감소에 의한 것으로 판단되어 이를 보정하여 연소진동을 저감하기 위한 실험을 수행하였다. 연료감소를 보정하기 위해 연소모드 전환직전에 연소모드 전환용 연료밸브를 2% 미리 열어 확산화염형태인 연소모드

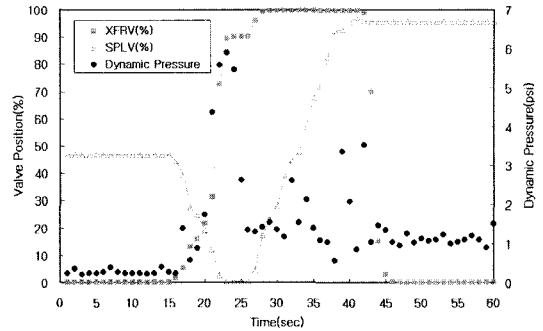


Fig. 12. Mode change data (before pre-filling).

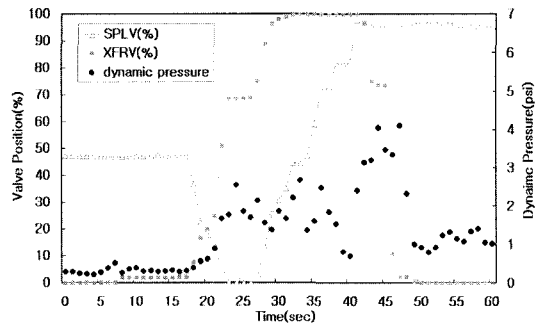


Fig. 13. Mode change data (after pre-filling).

전환용 연료를 공급하였다. 그 결과 그림에서와 같이 연소모드전환용 연료의 예 공급(pre-filling)으로 인해 연소동압(dynamic pressure)이 현저히 감소됨을 알 수 있다. 그리고 이전에는 연소모드의 전환중 연소진동과 함께 비정상적으로 발전기의 출력이 약 10 MW 정도 급격하게 감소되는 현상이 발생하였었는데, 이 후 출력변동도 측정된 결과 출력의 일시적인 급감 현상도 나타나지 않았다.

3.4. 버너 노즐간 연료유량 균등화의 영향

본 연구대상 가스터빈에는 캔형 DLN-1연소기 14개가 설치되어있다. 따라서 이들 14개의 버너노즐 사이의 연료유량을 균등하게 유지하기 위한 버너점검이 매우 중요하다. 버너 노즐들 사이의 유량차이가 2%를 초과하는 연료노즐은 교체 해야만 한다. 연료유량분포의 불균형은 연소기내에서 연료/공기비의 당량비 과다지역(fuel rich zone)과 희박연소지역(fuel lean zone)을 동시에 생성하게 된다. 따라서 연료과다 영역에서는 NO_x 발생이 과다하고 연료희박 영역에서는 연소진동이 과다하게 유발한다.

Fig. 14는 가스터빈 수리점검(overhaul) 전, 후에 측정된 14개 연소기 챔버의 연소진동 최대치의 분포를 비교한 것을 보여주고 있다. 수리점검으로 유량최적화 후에

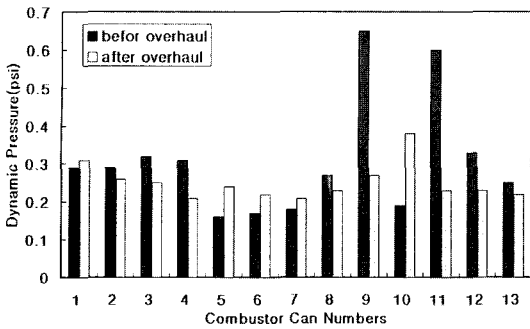


Fig. 14. Comparison of dynamics pressure before and after overhaul.

는 연소동압이 0.2~0.4 psi로 균등하게 낮은 상태를 유지하고 있다. 수리점검 전에 이들 동압의 분포는 0.15~0.65 psi로 넓게 분포하고 있었다. 버너노즐들 간의 연료유량분배가 균등하게 되도록 연소기를 튜닝한 후에는 연소동압이 매우 낮은 상태로 유지되었다. 본 연구에서 NOx 배출량과 또한 연소진동을 낮은 상태로 유지하기 위해서는 버너노즐들 간의 연료유량분배가 균등하게 유지되어야 한다는 것을 발견하였다.

Fig. 15는 서인천복합발전소의 가스터빈을 연소튜닝 전

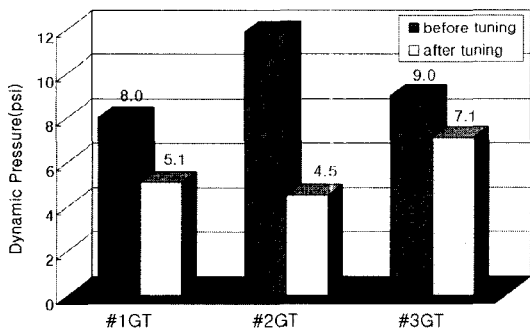


Fig. 15. Effect of burner nozzle tuning on dynamics.

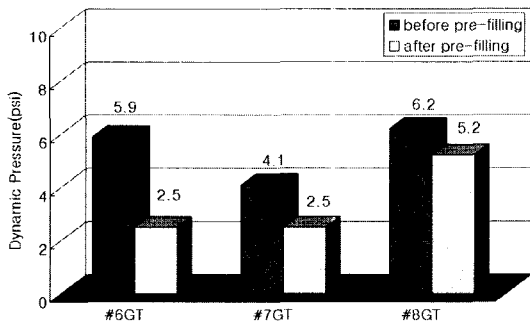


Fig. 16. Effect of fuel pe-filling on dynamics.

후에 연소동압의 크기를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 #2GT의 연소진동이 수리점검 후 11.9 psi로부터 4.5 psi로 현저히 감소되었음을 보여준다. 그리고 Fig. 16에서는 가스터빈에서 연료예공급(fuel pre-filling)을 실시하기 전, 후의 연소동압치의 비교를 나타내었다. 그림에서와 같이 연료 예공급을 연료전환밸브에 적용했을 때 #6GT의 경우 연소동압이 5.9 psi로부터 2.5 psi로 현저히 감소한 것을 볼 수 있다. 이러한 사실로부터 버너노즐들 사이의 연료유량 균등화와 연료전환 밸브로의 연료 예공급이(pre-filling) 저 NOx 연소기의 회염안정에 매우 큰 효과가 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서 회박 예혼합 연소방식을 채용한 150 MW 급 대형 발전용 저 NOx 가스터빈 연소기에서 발생하는 급격한 연소음향 발생 및 NOx 과다 발생량을 저감하기 위한 연구를 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 회박 예혼합 연소기술을 채용한 건식 저 NOx 연소(DLN) 방식에서는 연소튜닝이 적절히 이루어지지 않은 경우에 연소불안정(combustion instability)에 기인한 높은 연소진동(combustion dynamic pressure oscillation)의 발생과 함께 NOx 배출량이 높아질 가능성이 있다.

2) 본 연구 대상 저 NOx 연소기에서 발생하는 연소진동은 1700 Hz 이하의 저주파수 대역에서 높게 나타났다. 연소진동의 크기는 저부하의 확산회염모드에서 0.2~0.4 psi로 낮았고, 연소모드 전환 중에 급격하게 4~9 psi까지 증가하였으며, 고출력에서 예혼합연소모드 운전 중에는 다시 1~1.5 psi 로 안정되게 유지되었다.

3) 회박예혼합 연소기에서 발생하는 연소불안정은 대기온도와 밀접한 관련을 보인다. 대기온도가 낮아질수록 연소진동이 높아지며, 대기온도가 0°C 이하에서는 연소모드 전환 중 연소진동이 매우 높게 증가되어 때때로 연소모드의 전환이 실패하는 경우가 발생되기도 한다. 이는 저온의 연소공기량 증가로 연료유량이 증가하여 연소실내의 열방출률이 증대되어 연소진동이 증대되는 것으로 판단된다.

4) 확산연소에서 회박예혼합연소로 모드 전환중 가스 터빈의 출력이 급감하고 연소진동이 급증한 것을 관찰 하였다. 이는 연소모드 전환 중 연료유량이 일시적으로 감소된 때문으로 분석되었다. 연소모드 전환용 연료를 전환연료 노즐 측에 미리 공급함으로써 연소진동을 저감할 수 있었으며, 출력급감 현상도 방지할 수 있었다.

5) 버너노즐로 공급되는 연료유량을 균등화하기 위한 연소튜닝과 연소모드 전환시 비어있는 연료라인에 연료

를 예공급(pre-filling)하는 효과가 저 NO_x 연소기의 화염안정에 매우 큰 효과가 있었다. 그 결과 연소모드 전환중에 발생하는 연소진동을 9.9 psi에서 2.5 psi로 저감할 수 있었으며, 150 MW 기저부하 운전중에 NO_x 발생량을 35~43 ppm (15% O₂)으로 유지할 수 있었다.

참고문헌

1. Zeldovich, Y.B., Sadvnikov, P.Y. and Frank-Kamenetskii, Y.A.: "Oxidation of Nitrogen in Combustion", Academy of Sciences of USSR, Ins. of Chemical Physics, Moscow-Leningrad (1947).
2. Bill Major: "Cost analysis of NO_x control Alternatives for Stationary Gas Turbines", ONSITE SYCOM Energy co. (1999).
3. Rayleigh, J.S.W.: "The Theory of Sound", Dover, New York, 2, 226 (1945).
4. Richards, G.A., Gemmen, R.S. and Yip, M.J.: "A Test Device for Premix Gas Turbine Combustion Oscillations", J of Engineering for Gas Turbine and Power, 120, 294 (1998).
5. Richards, G.A. and Janus, M.C.: "Characterization of Oscillations During Premix Gas Turbine Combustion", J of Engineering for Gas Turbines and Power, 120, 294, (1998).
6. Davis, L.B.: "Dry Low NO_x combustion systems for GE Heavy-Duty Gas Turbine", General Electric Co.
7. Claeys, J.P., Elward, K.M. and Mick, W.J.: "Combustion System Performance and Field Test Results of the MS7001F Gas Turbine", ASME, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 115/537, July (1993).
8. Lieuwen, T., Torres, H., Johnson, C. and Zinn, B.T.: "A Mechanism of Combustion Instability in Lean Premixed Gas Turbine Combustors", J of Engineering for Gas Turbine and Power, 123, 183 (2001).
9. Brandt, D.E.: "The design and Development of an Advanced Heavy-Duty Gas Turbine", ASME, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 110/243, April (1988).