

산업용 가스터빈의 NO_x 배출 특성에 관한 연구

정재모** · 박정규**

A Study on NO_x Emission Characteristics of An Industrial Gas Turbine

Jeong Jai Mo** , Park Jung Kyu**

ABSTRACT

The purposes of this study are to analyze nitrogen oxides(NO_x) formation mechanism and to reduce abnormal NO_x emissions in gas turbines. Industrial gas turbines emissions have potential to negative affect to the atmosphere in many different ways such as photochemical smog, acid rain and global warming. In conventional gas turbine combustors, one of the main pollutants such as nitrogen oxide(NO_x) species, are principally formed from combustion process of fuel with oxygen in the primary combustion zone, and their emission levels are highly depend on peak temperatures in the combustor. In order to examine the characteristics and the effect of NO_x formation, we used gas turbine of which commercial operating in Korea. From the examination, it has been found that NO_x emissions are relatively high at low load(output) and during combustion mode change. Also, the effect of Air/Fuel ratio was considered. As the Air/Fuel ratio was increased in Lean-Lean mode, the NO_x emission was decreased. The results of this study indicated that NO_x emission levels are highly depend on peak temperature and pressure of combustion process in the combustor.

Key Words : Gas turbine, NO_x, DLN(Dry Low NO_x), Combustion Mode, Combustion dynamic pressure, Lean premixed burn, Fuel ratio

1. 서 론

산업사회의 급격한 발전과 인구증가로 인하여 환경 파괴가 가속화되고 있다. 자연환경 변화는 지속적인 경제활동은 물론 인류생존까지 위협하게 되었으며, 생활양식을 포함한 모든 인간 활동에 있어서 환경을 가장 중요하게 고려하지 않으면 안 될 상황에 직면하게 되었다.

환경문제는 그 영향이 광범위하고 지구촌 공동의 문제로 발전됨에 따라 지구적 현안과제로 확대되었으며, 지구온난화, 오존층파괴 등은 환경문제뿐만 아니라 지구환경문제와 연계하여 국가 간

의 협상과 국제 무역규제로 발전되고 있다[1].

우리나라에서 전력산업은 1898년에 시작되었으므로 약 100년이 되고 있다. 특히 70년대 이후 고도 경제성장을 통해 전력소비의 급격한 증가로 발전시설의 증설이 이루어 졌으며, 환경에 대한 국민의식 수준의 향상과 환경규제가 강화됨에 따라 청정발전시스템으로 설비의 효율이 높고 건설 기간이 짧은 가스터빈 복합발전 시스템이 80년대 후반부터 건설되기 시작하여 수십 호기가 산업 운전되고 있다.

가스터빈 발전시스템은 연료를 천연가스나 청정한 액체연료를 사용함에 따라 타 발전시스템에 비해 환경성이 우수하여 전력 소비가 많은 신도시와 인구밀집지역인 수도권 지역에 집중적으로 건설되어 운영되고 있다. 그러나 최근 수도권 지역의 지자체에서 NO_x에 대한 배출허용기준을 강화함에 따라 특정 운전조건에서는 배출기준을 초

* 한국서부발전(주) 발전처

† 연락저자, E-mail : jjmo@iwest.co.kr

** 건국대학교 기계공학과

과하는 사례가 빈번히 발생하고 있어 안정적인 설비 운영에 장애가 초래되었다[2].

일반적으로 질소산화물에는 N_2O , NO , N_2 , O_3 , NO_2 , N_2O_5 , NO_3 로 구분되나, NO 및 NO_2 를 제외하고는 대기환경에서 미량으로 존재하여 큰 문제가 되지 않는다. 대기중에서 NO 는 약 4일, NO_2 는 약 3일정도 체류하며, N_2O 순환, NH_3 순환, NO_x 순환을 거쳐 질산염으로 산화되어 지표로 침강하거나 질산(NO_3)으로 변환되어 산성비의 원인물질로 작용하기도 한다. 또한 태양의 광화학반응으로 오존이나 광학 스모그를 생성하기도 하며, NO_2 는 대기중에서 가시광선을 흡수하여 yellow plume을 형성하기도 하여 시각적인 오염을 유발하기도 한다[3]. 특히 도시권에 위치한 가스터빈 발전소의 초기 기동시 NO_2 의 발생량이 높아 또 다른 환경문제를 일으키기도 한다[4].

이러한 관점에서 본 연구에서는 국내 발전용 가스터빈의 운전현황을 통해 질소산화물의 배출특성을 분석하였다. 특히 기동 정지시 가스터빈 운전모드의 변환시 NO_x 배출특성을 규명하였다. 또한 상업운전 중인 GE 7F 가스터빈을 대상으로 NO_x 발생농도의 영향 요소를 분석하고, 운전변수에 대한 NO_x 발생의 상관관계를 분석하여 NO_x 발생을 최대한 낮출 수 있는 최적 운전조건을 제시하였다.

2. 가스터빈 질소산화물 발생특성

가스터빈에서 NO_x 생성은 연소 과정중의 온도, 체류시간 및 연소용공기의 농도에 직접 관련되어 있다. 배출농도는 연소기에 따라 다르며, 동일 연소기에 대해서도 운전조건에 따라 변화된다. 가스터빈에서 생성되는 오염물질은 질소산화물(NO , NO_2) 과 일산화탄소(CO), 미연 탄화수소(HC) 등이 있다. 일산화탄소나 미연탄화수소의 경우 저출력 조건에서 최고치를 보이고, 출력이 증가할수록 감소한다. 반면, 질소산화물이나 스모그는 저출력에서는 미미하나, 출력이 증가함에 따라 증가하는 경향이 있다[5-7]. 가스터빈의 출력에 따른 각종 환경오염물질 배출특성은 Fig. 1과 같다[7].

가스터빈 정상운전중 질소산화물(NO_x) 배출농도는 40~65ppm으로 매우 양호하나 기동중 일정시간(lean-lean mode, transfer mode) 동안은 배출농도가 상대적으로 높아 정부 및 지자체의 배출허용기준치를 초과하는 사례가 발생할 수 있다.

가스터빈은 설비특성상 잦은 기동 및 정지가 필요한 설비로서 기저부하용의 석탄, 원자력발전소와는 달리 전력계통의 주파수 조절을 위해

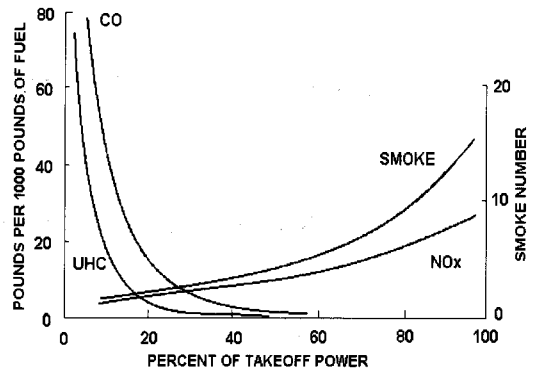


Fig. 1 Pollutant emissions of gas turbine (Lefebvre, 1999)

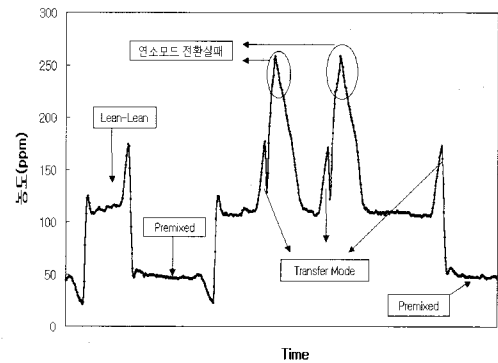


Fig. 2 Characteristics of NO_x emissions for GE7F gas turbine (at LNG combustion)

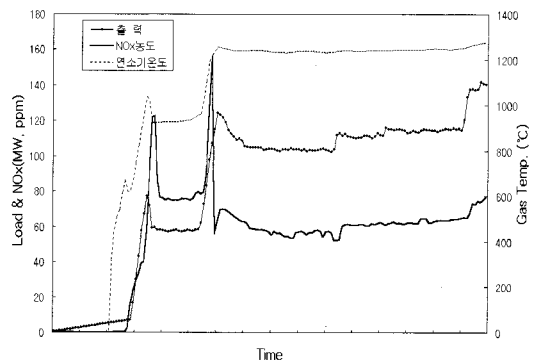


Fig. 3 Variation of NO_x emissions and gasp temperature with GT output

eak 부하는 물론 전력부하가 낮아지는 중·석식 시간대에 60~75MW의 저부하 운전이 불가피하다. 이때의 가스터빈 연소모드는 lean-lean mode

로서 premixed mode에 비해 NOx 배출농도가 높게 배출된다[8].

국내 발전용 가스터빈은 저 NOx 연소설비가 채용된 발전소는 100ppm 이하, 표준연소기가 채용된 가스터빈은 물 분사 설비를 가동하지 않을 경우 약 300ppm 까지 배출되고 있다.

GE7F가스터빈 연소기의 운전모드 변환에 따른 NOx 발생의 전형적인 특성은 Fig. 2와 같으며, 출력에 따른 연소온도와 NOx는 Fig. 3과 같다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험대상설비

본 연구에서 적용한 대상 설비는 미국 General Electric사에서 개발한 GE7F 가스터빈이다. GE7F 가스터빈의 주요특성으로 출력은 155MW, 연소용공기의 압축비는 13.5, 복합발전 시스템의 설비효율은 49.4%로 설계되어 있으며, 1992년에 설치가 완료되어 약 10여년간 운전되고 있다.

본 가스터빈은 NOx 저감을 위하여 DLN(Dry Low NOx) 연소시스템이 채택되어 있으며 정상 운전상태에서 NOx 배출농도는 약 50ppm이하로 배출되도록 설계되어 있다. DLN 가스터빈 연소기는 희박 예혼합 화염을 채용하여 thermal NOx를 줄이도록 설계되어 있다. 또한 경유 연소시 NOx 저감을 위하여 물 주입시스템이 설치되어 있다[9].

가스터빈의 주요사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of Gas Turbine

| | |
|-------------------------------|-------|
| Flame temperature(℃) | 1,260 |
| Compression ratio | 13.5 |
| Exhaust temperature(℃) | 587 |
| Output (MW) | 155 |
| Combined-cycle efficiency (%) | 49.4 |
| NOx(ppm) | 50 |

3.1.1 연소기 구조

General Electric사의 DLN-1 연소시스템은 압축기 출구 주위로 14개의 연소 chamber가 can-annular로 배열되어 있으며, 주요 부품으로는 fuel nozzles, combustion liner, flow sleeves, cap assemblies, crossfire tubes, transition pieces, spark plug ignition system, flame detector로 구성되어 있다. 설비의 개략도는 Fig. 4와 같으며, 연소기 노즐 형상은 Fig. 5와 같다.

3.1.2 연소기운전모드

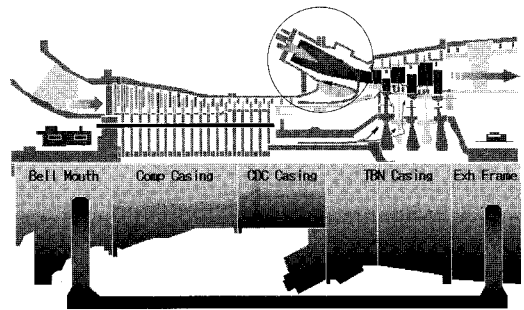


Fig. 4 General Electric 7F gas turbine

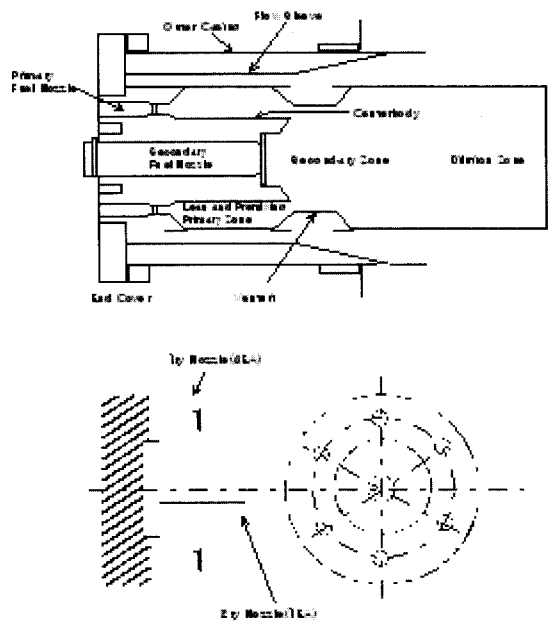


Fig. 5 Schematic of GE7F DLN1 combustor

DLN-1 연소시스템은 운전조건에 따라 다양한 연소모드로 운전되며, primary mode, lean-lean mode, transfer mode, premixed mode로 구분된다.

Primary mode는 짐화에서부터 약 16%부하까지 운전되는 mode이며, 연료는 1차 노즐을 통해 1단 연소실(연소기의 1차 노즐에서부터 벤츨리까지의 연소공간)로만 공급된다.

Lean-lean mode는 16% 부하에서 약 50~60% 부하까지 운전되며, 연료는 1차와 2차 노즐을 통해서 1단과 2단 연소실(연소기의 벤츨리 부분 이후의 연소공간)로 공급된다.

Transfer Mode는 터빈 출력이 50~60% 부하에서 일시적으로 운전되는 mode로서 2차

transfer는 온도가 1,107°C 이상시 1차 노즐에 연료공급을 중단하고 gas transfer 밸브가 55% 개방된다.

Premixed transfer에서는 1차 화염영역이 소화되고 5초 후 gas splitter 밸브가 100% 열리고, gas transfer 밸브도 55%에서 100%로 열린다. Premixed mode는 출력이 50~60%에서 100%까지 운전되는 모드로서 연료는 1차와 2차 노즐을 통해서 공급되며 1단 연소실에서는 화염이 생기지 않는다[10-12].

연소모드별 연료분배율은 Table 2와 같으며, 가스터빈 연료 제어 시스템은 Fig. 6과 같다.

Table 2 Operation mode

| Mode | Primary | Lean-Lean | Transfer | Premix | | |
|---------------|----------|-----------|----------|--------|-------|----|
| Fuel Flow (%) | 1ry | 100 | 50 | 0 | 100 | 93 |
| | 2ry | 0 | 50 | 45 | 0 | 7 |
| | Transfer | 0 | 0 | 55 | 0 | 0 |
| Output [MW] | 0~25 | 25~75 | 75~95 | 75~95 | 95 이상 | |

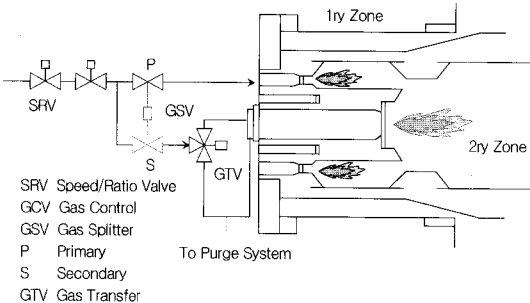


Fig. 6 Schematics of fuel control system

3.2 사용연료 특성

GE7F 가스터빈은 사용연료를 주 연료로 액화 천연가스(LNG)와 정제된 경유를 사용할 수 있도록 설계되어 있다. 그러나 본 설비가 수도권에 위치하고 있어 오염물질 배출을 최소화 하기 위하여 주로 LNG를 사용한다.

본 연구에서 사용한 천연가스의 화학 조성은 중량 백분율로 표시하였을 때 메탄 88.12%, 에탄 6.64%, 프로판 2.80%, 부탄 1.24%, 펜탄 0.03% 및 질소 0.17%로 구성되어 있으며, Table 3과 같다.

Table 3 Specifications of fuel(LNG)

| Heat Calorific Value (kcal/kg) | Specification (mol. %) | | | | | |
|--------------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|
| | CH ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₈ | C ₄ H ₁₀ | C ₅ H ₁₂ | N |
| 13,019 | 89.12 | 6.64 | 2.80 | 1.24 | 0.03 | 0.17 |

3.3 실험방법

상용 운전중인 가스터빈을 대상으로 NOx 배출 특성을 분석하였다. 일반적으로 가스터빈은 제작사에서 제공한 운전 절차에 따라 운전하게 되는데 이 경우 가스터빈의 일반적인 NOx 발생의 특성을 조사하고 NOx 생성에 미치는 영향요소를 분석하였다. 국내 발전용으로 운전되고 있는 가스터빈의 특성을 분석하고 국내에 가장 많은 용량이 설치되어 있으며, 특히 Dry Low NOx(DLN-1) 설비가 채용되어 있는 General Electric사의 7F 가스터빈을 대상으로 NOx 배출 특성을 분석하였다.

가스터빈을 기동하여 최대출력까지 출력을 증가시키며, 이때 출력에 따른 연소모드가 자동 변환하게 된다. 연소모드별 각각의 운전변수들을 조사하고 이때 NOx 발생농도를 분석하여 운전변수에 따른 영향을 조사하였으며, 일반적인 가스터빈 NOx 발생 메카니즘과 비교하였다.

특히 연소모드의 전환시 각 모드별 운전변수와 NOx 배출의 상관관계를 도출하고 연소기의 온도 등 운전변수에 따른 NOx 발생의 상관관계를 분석하여 발전용 가스터빈의 NOx 생성원인을 규명하였다. 그리고 NOx 저감을 위한 운전조건을 도출하고 상용 가스터빈에 적용하여 효과를 분석하고 최적화 방안을 제시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 NOx 생성요인 분석

가스터빈의 NOx 발생농도에 미치는 영향요소를 고찰하였다. 질소산화물은 각종 연소시 생성되는데 연소과정에서 발생하는 NOx는 그 생성기구에 따라 분류하면 연소공기중의 질소분자가 고온상태에서 산화되어 발생하는 thermal NOx와 탄화수소계 연료에서 화염면 및 그 인근에서 급격한 연소로 생성되는 prompt NOx가 있다. 가스터빈에서 발생하는 NOx는 대개 발생하는 thermal NOx로서 연소온도에 밀접한 상관관계가 있다. 따라서 연소온도에 미치는 요인으로 연소압력과 연소온도의 상관관계를 분석한 결과 동압

이 증가할수록 연소온도도 비례하여 증가하였으며, Fig 7과 같다.

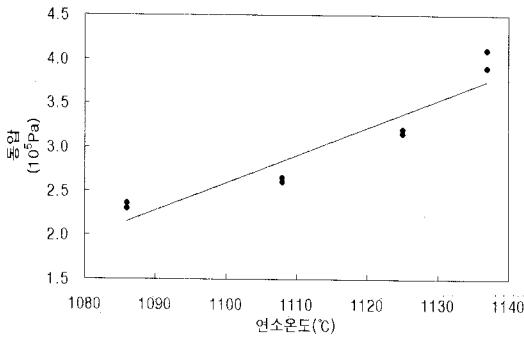


Fig. 7 Variation of combustion temperature with dynamic pressure

연소압력의 영향요인을 분석해 본 결과 연소모드 전환시 gas transfer 밸브(GTV)의 개방속도가 늦어질수록 동압은 증가하였다. 이는 GTV의 개방속도가 늦어질수록 1차 영역에서 국부적인 부하가 증가되어 연소압력이 증가되는 것으로 판단된다. GTV 개방속도에 따른 동압은 Fig. 8과 같다.

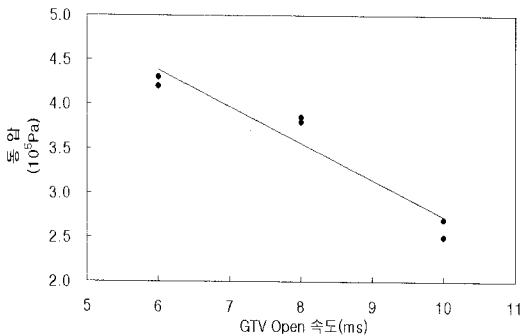


Fig. 8 Variation of dynamic pressure with GTV open rate

GTV 개방속도와 연소온도의 상관관계는 Fig. 9와 같다. 연소압력이 일정할 경우 GTV 개방속도가 8~9ms 까지 증가할수록 연소온도는 증가하나 이후에는 급격히 감소하였다.

동압과 연소온도, GTV 개방속도의 상관관계는 Fig. 10과 같다.

따라서 NOx 생성농도를 낮추기 위해 연소온도를 낮게 유지해야 하며, 이를 위해 연소동압은 가능한 낮게, GTV 개방속도를 최적으로 유지되어야 한다.

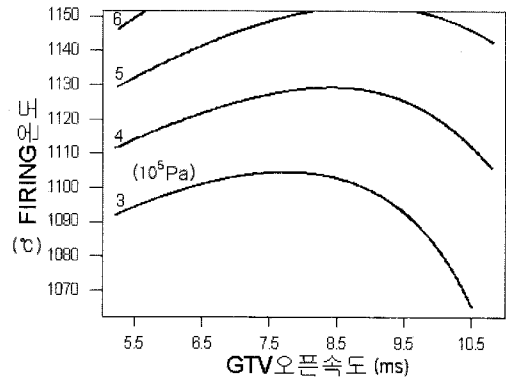


Fig. 9 Variation of combustion temperature with GTV open rate

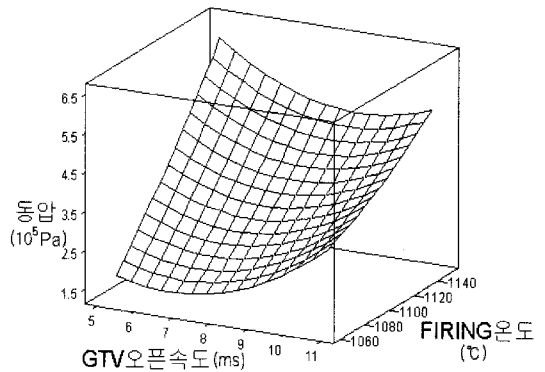


Fig. 10 Correlation of dynamic pressure, GTV open rate and combustion temperature

4.2 연료 분배율 조정

Lean-lean mode에서 연료분배율은 1차 노즐과 2차 노즐이 50:50으로 공급된다. 그러나 상대적으로 용량이 적은 2차 연소영역에서는 열부하가 증가되어 국부적으로 연소온도가 높아져 NOx 발생농도가 높아지게 된다. Fig. 11은 lean-lean mode에서 2차에 대한 1차 노즐의 연료분배율에 따른 NOx 배출농도이다.

2차 노즐은 화염의 고온영역이 넓어 NOx 발생이 증가하나 1차 영역은 노즐이 6개로 구성되어 있어 50% 분배율일 경우 각각의 노즐로 8.3%의 연료가 공급되므로 상대적으로 열부하가 낮다. 따라서 1차 영역의 분배율이 커질수록 국부적인 온도상승이 억제되어 NOx 발생농도가 낮아진다.

그러나 premixed mode에서는 연료분배율 변화에 따른 NOx 발생농도는 약간 증가하였다. 예혼합 연소인 premixed mode에서는 정상적인 경우

1차와 2차 화염영역의 연료분배율이 93:7 로 운전된다. 1차 분배율에 따른 NOx 배출농도를 측정 한 결과 1차 분배율이 증가할수록 NOx 생성농도는 높아졌다. Premixed mode에서 연료분배율에 따른 NOx 발생농도는 Fig. 12와 같다.

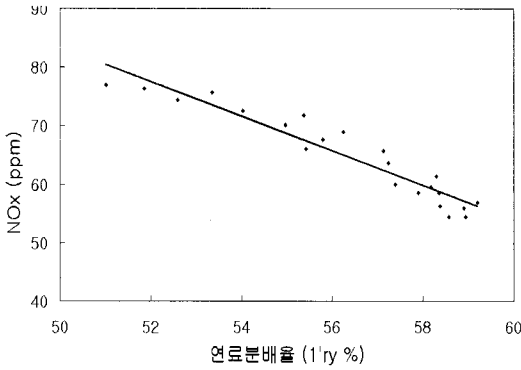


Fig. 11 NOx emission with 1ry fuel ratio in lean-lean mode

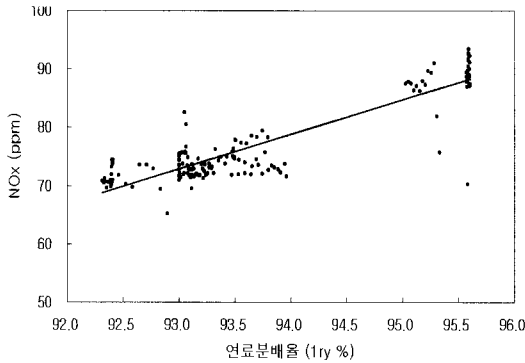


Fig. 12 NOx emission with 1ry fuel ratio in premixed mode

4.3 연소용 공기량에 따른 영향

lean-lean mode 운전중 연소실에서는 연소용 및 냉각용 공기가 동시에 공급되나 냉각용 공기가 부족할 경우 연소온도가 증가되기 때문에 NOx 발생량이 증가하게 된다. 이러한 문제에 대한 해결 방법으로 IGV(Inlet Guide Vane)의 open 각도를 조절하여 연소공기량을 증가시킬 경우 과잉공기에 의한 냉각효과로 연소온도는 저하되고 따라서 NOx 생성농도가 낮아진다. IGV 개도에 따른 NOx 발생농도는 Fig. 13과 같다.

Premixed mode에서는 IGV 개도조정에 따른 NOx 발생에는 Fig. 14와 같이 영향이 없었다. 따라서 lean-lean mode에서는 IGV 개도를 54도에

서 56도로 조정하는 것이 NOx 저감에 효과가 있는 반면 premixed mode에서는 조정 할 필요가 없다.

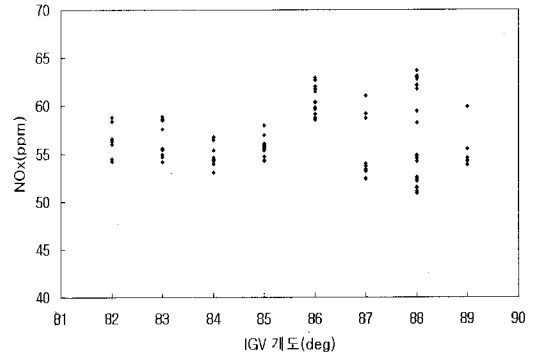


Fig. 13 NOx emission with IGV open ratio in premixed mode

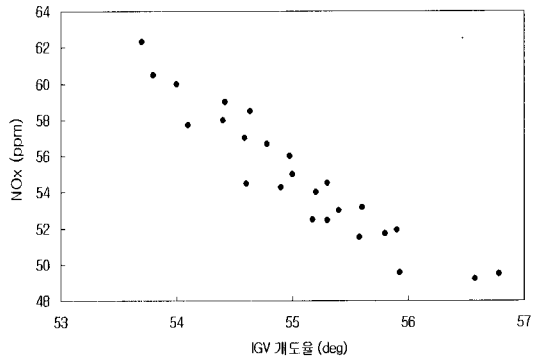


Fig. 14 NOx emission with IGV open ratio in lean-lean mode

4.4 기동시 저 출력유지 및 비정상 Mode 전환방지

가스터빈 기동시 스팀터빈의 최적운전 조건을 위해 일정시간 동안 저부하운전(60MW)을 유지 하게 되는데 이때의 연소모드는 lean-lean mode 이므로 높은 농도의 NOx 배출이 불가피 하다.

이에 대한 대책으로 가스터빈 기동중 lean-lean mode holding시 부하를 60MW에서 50MW로 유지함으로써 공급되는 연료량이 적게 되어 1, 2차 영역의 연소온도가 약 100℃ 낮아지기 때문에 NOx 배출농도는 낮아진다. 저부하시 출력에 따른 NOx 배출농도는 Fig. 15와 같다.

연소모드의 비정상전환에 의해 NOx가 증가되는 요인은 저부하 운전에서 premixed mode로 모드전환이 실패하거나 premixed mode 운전중

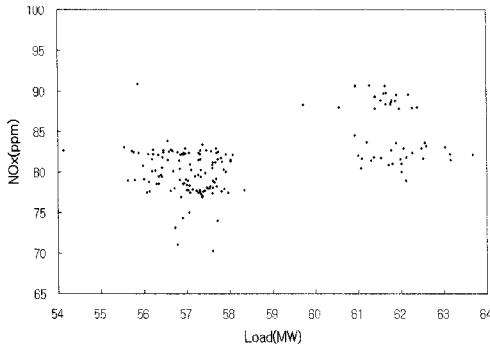


Fig. 15 NOx emission with GT output in low load

lean-lean mode로 자동 전환되는 경우이다.

이 두 경우 모두 연소기의 화염불안정, 난반사 등 여러 가지 요인에 의해 연소모드가 비정상적으로 전환되는 것인데 이때는 출력이 100MW 이상이기 때문에 연료는 많이 공급되는 반면 1차 영역에서 연료와 공기의 예혼합이 되지 않고 바로 화염이 형성되는 lean-lean mode 운전이기 때문에 NOx 배출량은 크게 증가된다.

연소모드의 비정상전환 상황이 발생했을 경우 자동으로 출력을 50MW까지 감발하여 NOx 발생을 억제 가능하였다.

5. 결론

국내 발전용 가스터빈을 대상으로 NOx 배출특성을 분석하였다. 본 연구에 적용한 GE 7F 가스터빈의 연소모드별 NOx 배출특성을 분석하였으며, lean-lean mode에서 국부적인 고온부가 발생되어 NOx 배출농도가 높았다.

연소기 압력과 연소온도, GTV(Gas Transfer Valve) 개방속도의 상관관계를 조사하였다. 연소기 압력과 연소온도는 비례하였으며, 압력과 GTV 개방속도는 반비례하였다.

저부하시 2차 연소 영역의 열부하를 줄이고 1차 영역의 연료 과농 조건을 형성시키기 위하여 1차 노즐의 연료분배율을 상향 조정한 결과 NOx 발생량이 대폭 저감되었다.

연소용 공기량을 조절하는 IGV(Inlet Guide Vane)의 개방각도에 따른 NOx 영향을 분석한 결과 lean-lean mode에서는 개방각도를 증가시킬 때 따라 과잉공기에 의한 냉각효과로 NOx 발생량이 저감되었다.

가스터빈 발전의 특성상 일정한 저부하 운전이 불가피하다. lean-lean mode 유지시 부하를 60MW에서 50MW로 변경하여 운전한 결과 NOx 배출량이 저감되었으며, 연소모드가 비정상적으로

로 전환될 경우 가스터빈 부하를 자동적으로 50MW까지 감발하여 NOx 배출농도가 급격히 증가되는 현상이 방지되었다.

참고문헌

- [1] 조광명, "대기오염", pp.1~30, 청문각, 1999.
- [2] 안달홍, 김종진, 정재화, 서석빈, 박호영, "가스터빈 연소기의 이상연소/열유동 안전화 및 연소진동 저감", 한국전력공사 전력연구원, 2003.
- [3] 이우근, 선우 영 공역, "대기오염제어공학", pp.27~48, 동화기술, 1999
- [4] R. Homma, J. Y. Chen, "Reduced Mechanism for Prediction of NO2 Formation and Ignition Delay in Methane-Air Combustion", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, Vol. 123, pp.303-307.
- [5] Backlund, J., and A. Spoomaker, "Experience With NOx Formation/Reduction Caused by Supplementary Firing of Natural Gas in Gas Turbine Exhaust Streams", The American Society of Mechanical Engineers. New York. 85-JPGC-G7-18.
- [6] "NOx Control and Heat Rate Improvement Through Primary Measures Based on Advanced Furnace Control", F. Rodriguez, L. Salvador-Camacho, M. Morales, L. Cadas, Mega Symposium, 2002.
- [7] H. Lefebvre, "Gas Turbine Combustion", Taylor & Francis, pp.311-379, 1999
- [8] "Alternative Control Techniques Document - NOx Emissions from Stationary Gas Turbines", U.S. Environmental Protection Agency, EPA-453/R-93-007, 1993.
- [9] Maughan, J.R., J.H. Bowen, D.H. Cooke and J.J. Tuzson, "Reducing Gas Turbine Emissions through Hydrogen-Enhanced, Steam-Injected Combustion," Proceedings of ASME Cogen-Turbo Conference, pp.381-390, 1994.
- [10] STAG 107F Operation & Maintenance Manual(1-2), Utility application Block 2, Korea Electric Power Corporation ILDO Combined Cycle Power Plant, 1991.
- [11] MS7001F Gas Turbine-Generator Operation Training, Korea electric Power Corp. Ildo Combined-Cycle Project, 1991.
- [12] "Gas Turbine Familiarization Training Manual- KEPCO Block 3 Seo Incheon Combined Cycle Power Plant", GE Power Systems, 1995.