

M501J 가스터빈 연소기 단별 연료비율이 연소상태에 미치는 영향 고찰

유 원 주*·정 진 도**

*한국동서발전(주)·**호서대학교 에너지기후융합기술학과

Effects of Combustor Stages on M501J Gas Turbine Combustion

Won-Ju Yu*·Jin-Do Chung**

*Korea East-West Power Co.·**Hoseo University

Abstract

Most of gas turbine combined cycle power plants are located in urban areas to provide peak load and district heating. However, NO_x(nitrogen oxides) of exhaust gas emission from the power plants cause additional fine dust and thus it has negative impact on the urban environment. Although DLN(dry low NO_x) and multi-stage combustors have been widely applied to solve this problem, they have another critical problem of damages to combustors and turbine components due to combustion dynamic pressure. In this study, the effect of different fuel ratio on NO_x emission and pressure fluctuation was investigated regarding two variable conditions; combustor stages and power output on M501J gas turbine.

Keywords : Gas Turbine, Combustor, NO_x, Combustion Dynamics, Pre-mixed Flame

1. 서론

최근 전 세계적으로 친환경 에너지에 대한 요구가 증가하면서 가스터빈 복합 발전설비에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다.[1] 그러나 국내 가스터빈 설비는 주로 첨단부하를 담당하거나 전력조류 해소와 열공급을 위하여 대도시 근처에 설치하여 질소산화물 배출 등에 의한 대기 환경 오염을 가중시키는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다단 연소와 예혼합 희박연소를 통한 저 NO_x 연소기를 개발하여 적용하고 있으나,[2] 연소불안정이 발생하여 연소기와 터빈부품의 손상이 증가하고 신뢰성이 저하되는 문제점을 가지고 있다.[3] MHPs사의 M501J 가스터빈은 해결방안으로 확산화염인 기존 Pilot 노즐의 영향을 줄이기 위해 100MW이상 고출력시에는 예혼합화염 희박연소 형식의 Pilot 노즐 mode로 전환하여 운전하도록 적용하였다.[4]

[Figure 1]은 질소산화물 배출농도와 연소동압의 상관관계를 나타내었으며[3], [Figure 2]는 가스터빈연소기 형식별로 배출되는 질소산화물 발생농도를 범위를 나타내는 그림이고[5], [Figure 3]은 예혼합 희박 연소기에서 연료분사 위치로부터 화염의 형성거리에 따라 발생하는

연소시 압력 변동량인 연소동압과의 관계를 나타낸 그림이다.[6]

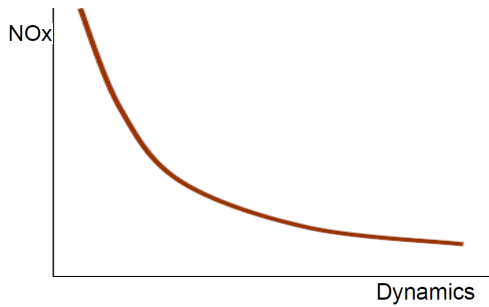
가스터빈 압축기를 통하여 유입된 공기는 연료와 혼합되어 연소되는데, 이때의 연소방법과 조건에 의해 질소산화물 배출농도가 달라지고 연소불안정 및 연소동압의 발생정도도 다르게 나타난다. 연소동압이 과다하게 발생할 경우에는 연소기와 터빈부품에 손상이 발생하여 대형 고장사고로 이어지게 된다. 그러므로 질소산화물 배출을 최소화하면서도 안정적인 연소상태를 유지하기 위해서는 연소기 단별로 미치는 영향을 파악하여 최적 운전조건을 찾아야 한다.

기존 연구는 주로 모형 연소기에 대하여 시험하여 연구[7,8]하거나 수치적 연구[9,10] 등의 사례는 다수 있으나, 실제 운전되는 발전용 대형 M501J 가스터빈의 연소기에 대하여 단별 연료비율을 변경하면서 연소상태를 실험하여 연구한 사례는 없는 실정이다.

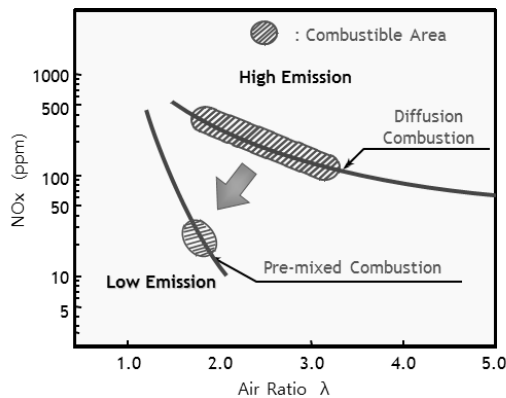
본 연구에서는 가스터빈의 안정적인 운영과 질소산화물 배출을 최소화하기 위한 방안으로, 연소기 각 단별로 연료를 공급하는 시점에서 단별 연료비율을 변경하면서 질소산화물 배출농도와 연소동압에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

†Corresponding Author Won-ju Yu, Technical Expertise Center, Korea EWP Co., 30, Gyoro-gil, Dangjin, Chungnam,
E-mail: u86104@ewp.co.kr

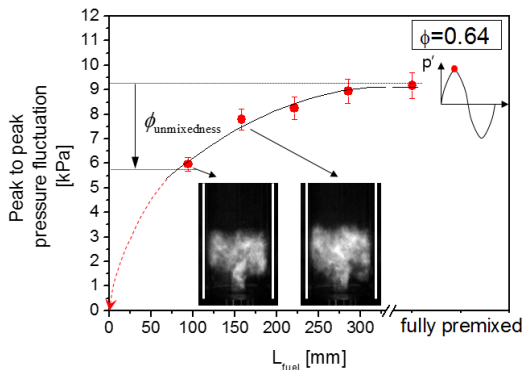
Received April 14, 2019; Revision April 27, 2019; Accepted June 27, 2019



[Figure 1] NOx-combustion dynamics characteristics[3]



[Figure 2] NOx emission characteristics[5]



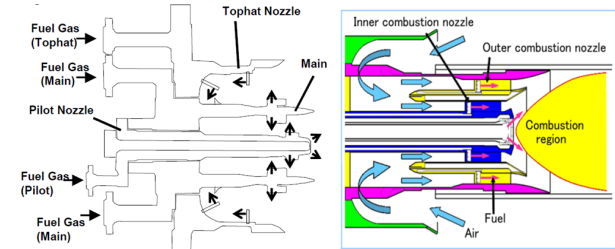
[Figure 3] Pressure fluctuation of pre-mixed flame[6]

2. 실험대상 및 방법

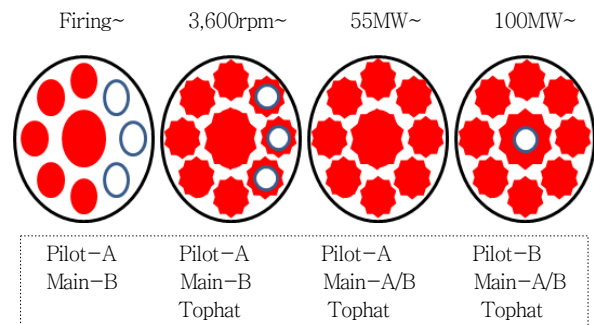
[Figure 4]는 실험대상 M501J 가스터빈의 연소기 구성도를 나타내었으며[11], [Figure 5]는 대상 연소기의 출력별/단별 화염을 형상화한 것이다.

실험대상인 M501J 가스터빈은 출력 320MW급이며 다단(Main-A/B, Tophat, Pilot-A/B)의 16개 연소기로, 확산화염인 Pilot-A 외에는 모두 예혼합 희박연소 방식을 적용하였다. [Figure 4]에서와 같이 1개의 연소기에는 중심부에 확산화염의 Pilot-A와 예혼합 화염인 Pilot-B가 있고, 주변에 예혼합 화염으로 5개의 Main-A

와 3개의 Main-B 노즐이 있으며 하부에서 분사되는 16개의 Top-hat 노즐로 구성되어 있다. 운전중 연료비율은 Pilot와 Tophat 노즐에 의해 조정되고 Main-A/B는 연동하여 변화도록 되어 있다.



[Figure 4] M501J gas turbine combustor stages and flow[11]



[Figure 5] M501J gas turbine flame with combustor stages

따라서 연소기 단별로 미치는 영향을 파악하기 위하여 단별 연료 전환시점인 무부하, 55MW, 100MW와 정상출력 운전 과정에서, 총 연료량과 연소공기 압력은 동일하게 유지한 상태에서 노즐별 연료비율을 변화시키면서 질소산화물 배출농도 변화와 연소동압 변화를 측정하고 상관관계 분석하였다.

2.1 질소산화물 배출농도 분석

가스터빈 배기가스는 연소기에서 연소후 터빈 후단을 통하여 배출되는데, 본 실험에서는 시운전 기간에 임시연돌을 설치하여 배기가스를 배출시키면서 대기공정시험법에 의한 TMS로 질소산화물(NOx) 농도를 측정하였다. 연돌의 배기가스는 연소되는 시점과 배출하여 센서에 도달하는 시점이 다르기 때문에 5~10분정도의 시차를 두고 운전상태를 유지하면서 측정하였다.

질소산화물은 질소와 산소의 화합물로 아산화질소(N₂O), 일산화질소(NO), 이산화질소(NO₂), 삼산화질소(N₂O₃)가 가스체로 존재하나, 환경보존법에는 이산화질소와 질소산화물의 환경기준이 정해져 있다. 본 연구에서는 질소산화물의 배출농도를 기준으로 측정하여 분석하였다.

2.2 연소동압 변화 분석

<Table 1>은 M501J 가스터빈의 연소동압 관리기준을 주파수 범위별로 나타낸 것이다.

연소동압은 16개의 연소기 내부로 연결된 압력변화 센서에서 측정된 최대값을 기준으로 하였으며, 연소시 순간적으로 발생하는 압력 변화량과 발생 주파수를 측정하여 분석하였다.

<Table 1> Combustor dynamic pr. limit (kPa)

Items		Frequency (Hz)	Pre-alarm	Alarm	Limit
Band 1	Low	5~30	3	4	8
Band 2	Mid 1	30~70	12	15	17
Band 3	Mid 2	70~110	12	15	17
Band 4	Mid 3-1	110~140	12	15	17
Band 5	Mid 3-2	140~200	12	15	17
Band 6	High	200~500	7	8	12
Overall		0~500	-	-	-
Band 7	HH 1	500~1200	8	10	12
Band 8	HH 2	1200~2500	8	10	12
Band 9	HH 3	2500~3400	2	2.5	3
Band10	HH 4	3400~4200	1	1.5	2
Band11	HH 5	4400~5000	1	1.5	2

3. 결과 및 논의

3.1 질소산화물 배출농도 영향

3.1.1 Pilot-A 연료비율 변화

[Figure 6(a)]는 무부하 운전시점, [Figure 6(b)]는 Main-B 노즐을 추가로 공급하여 운전하는 55MW 시점, [Figure 6(c)]는 Pilot-A mode에서 Pilot-B mode로 교체하는 100MW 운전시점의 질소산화물 배출농도 변화를 측정된 결과이다. Pilot-A 연료량 비율변화에 따른 질소산화물 배출농도 변화는 모두 동일한 방향으로 비례하여 변하는 것으로 나타났다.

[Figure 7]은 Pilot-A mode 65~255MW 운전상태의 질소산화물 배출농도 변화를 측정된 결과이다. 모두에서 Pilot-A 노즐의 연료량 비율변화에 따른 질소산화물 배출농도 변화는 동일한 방향으로 비례하여 변하는 것으로 나타났다.

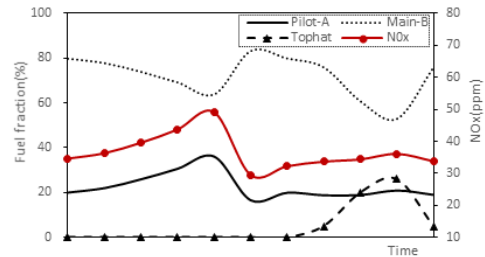
[Figure 8]은 2개호기의 실험결과에 대해 출력별 Pilot-A 연료량 1%에 의한 질소산화물 배출농도 영향을 다음과 같이 계산하여 나타낸 결과이다.

$$NOx \ p = \frac{(NOx \ max - NOx \ min)}{(P \ max - P \ min)} \quad (1)$$

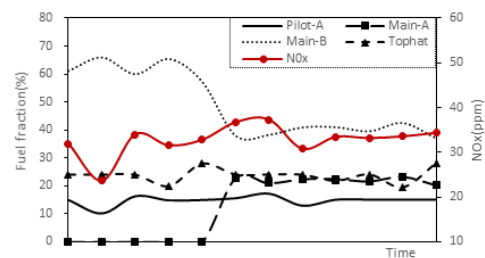
NOx p : Pilot-A 연료 %당 NOx

NOx max : 최대 NOx 배출농도

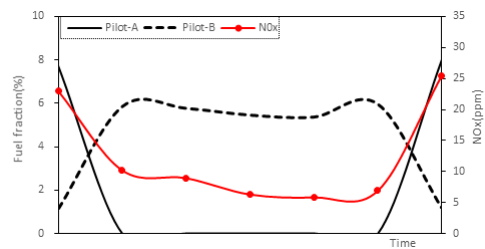
NOx min : 최소 NOx 배출농도



(a) full speed no load

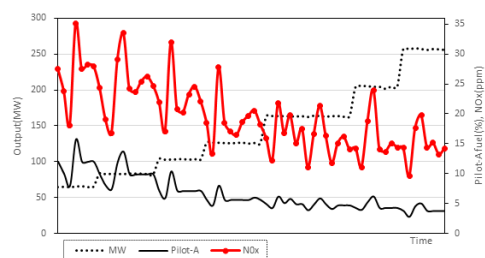


(b) 55MW (Pilot-A mode)

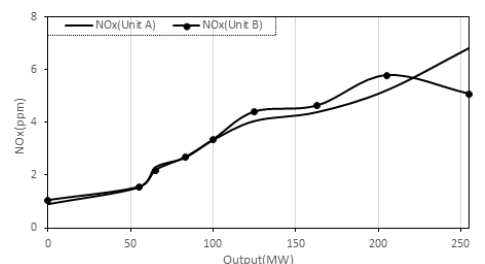


(c) Pilot-A/B mode change at 100MW

[Figure 6] Comparison of NOx emission with combustor stages



[Figure 7] NOx emission during Pilot-A mode 65~255MW



[Figure 8] NOx emission with output per Pilot-A%

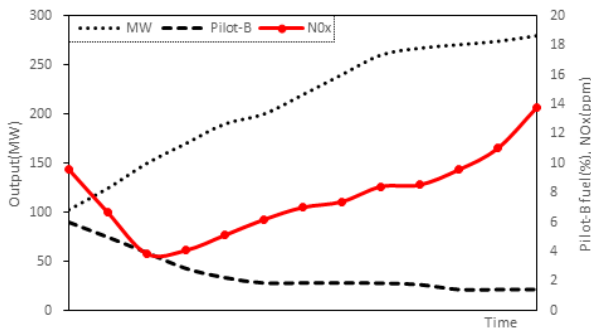
P_{max} : 최대 Pilot-A 연료 %

P_{min} : 최소 Pilot-A 연료 %

[Figure 8]에서와 같이 확산화염인 Pilot-A 영향은 출력이 증가할수록 더 크게 나타났다. 이는 기존연구와 동일하게 확산화염인 Pilot-A 노즐의 연료비율이 질소산화물 배출농도에 절대적인 영향을 주는 것으로 나타났다.

3.1.2 Pilot-B 연료비율 변화

[Figure 6(C)]는 100MW Pilot-A/B mode 전환시점, [Figure 9]는 Pilot-B mode 100~280 MW 운전시의 질소산화물 배출농도 변화를 측정한 결과이다.



[Figure 9] NOx emission during Pilot-B mode 100~280MW

[Figure 6(C)]에서와 같이 Pilot-A/B 연료 전환으로 연소가 불안정한 시점에도 질소산화물 배출농도가 다소 증가하였으나 예혼합화염인 Pilot-B mode로 전환후에는 20ppm 정도에서 5ppm으로 약 75%까지 저감되는 것으로 나타났다. 그러나 [Figure 9]에서와 같이 Pilot-B mode 운전에서는 고출력일수록 연료비율 감소에도 불구하고 출력이 증가할수록 Pilot-A mode와 달리 질소산화물 배출농도가 증가하는 추세로 나타났다. 이는 고출력에서 연소기내 총 연료량이 증가하고 예혼합 화염인 Pilot-B 연료비율이 화염집중 효과에 영향을 주어 발생되는 것으로 판단된다.

3.1.3 Tophat 연료비율 변화

[Figure 6(a)], [Figure 6(b)]에서와 같이 Tophat 노즐 연료량 비율이 증가할 경우에 질소산화물 배출농도는 미세하게 증가하는 것으로 나타났다.

[Figure 10]은 Pilot-A mode에서 Tophat 연료량에 의한 질소산화물 배출농도 영향을 다음과 같이 계산하여 나타낸 결과이다.

$$NOx_t = \frac{(NOx_{max} - NOx_{min})}{(T_{max} - T_{min})} \quad (2)$$

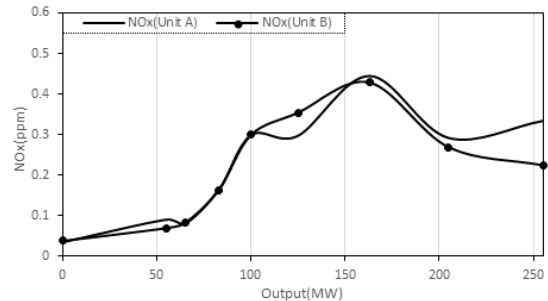
NOx_t : Tophat 연료 %당 NOx

NOx_{max} : 최대 NOx 배출농도

NOx_{min} : 최소 NOx 배출농도

T_{max} : 최대 Tophat 연료 %

T_{min} : 최소 Tophat 연료 %



[Figure 10] NOx emission with output per Tophat%

[Figure 10]에서와 같이 출력에 따라 증가하다가 150MW이상 고출력에서는 더 이상 증가하지 않고 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Tophat 연료가 연소기 하부에서 분사되어 예혼합되는 형식이나, 중심부에도 공급되어 확산 화염인 Pilot 연료비율에 영향을 줌으로써 질소산화물 배출농도가 변화되는 것으로 판단된다. 고출력에서는 Pilot 연료비율이 감소하면서 중심부에서의 화염집중 현상이 완화되어 Tophat 연료에 의한 질소산화물 배출농도가 감소하는 것으로 판단된다.

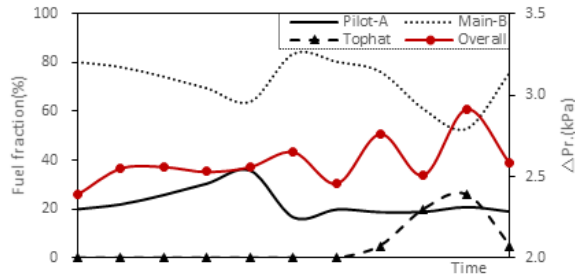
3.1.4 Main-A/B 연료비율 변화

[Figure 6(a)], [Figure 6(b)]에서와 같이 Main-A 노즐에 연료가 공급되는 시점에는 일시적으로 질소산화물 배출농도가 조금 증가하였으나, Main-A/B 노즐에 분배가 완료되면 기존의 배출농도와 변화가 없는 것으로 나타났다.

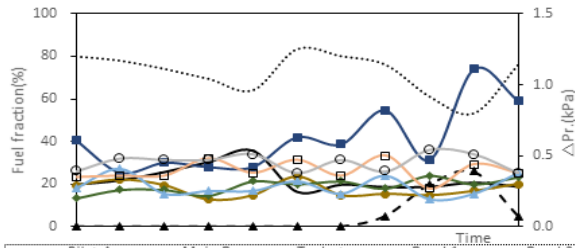
이는 Main-A/B 모두 예혼합 화염으로 총 연료비율이 같을 경우 질소산화물 배출농도에 영향을 주지 않으나, [Figure 6(b)]와 같이 Main-A 전환시점에는 화염변화와 연소불안정에 의해 일시적으로 배출농도가 증가하는 것으로 판단된다.

3.2 연소동압 발생 영향

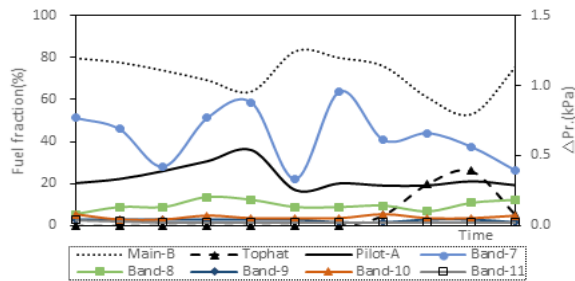
3.2.1 Pilot-A 연료비율 변화



(a) over-all



(b) low-band



(c) high-band

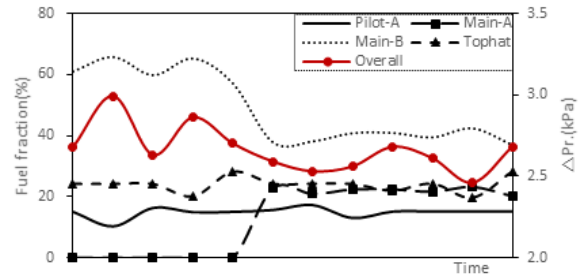
[Figure 11] Combustion dynamics at no load

일반적으로 Pilot-A mode와 같은 확산화염은 연소동압이 크게 발생되지 않고, 예혼합 연소기에서 Pilot-A 연료비율 변화는 연소동압과 반비례 관계로 알려져 있다.[3,5]

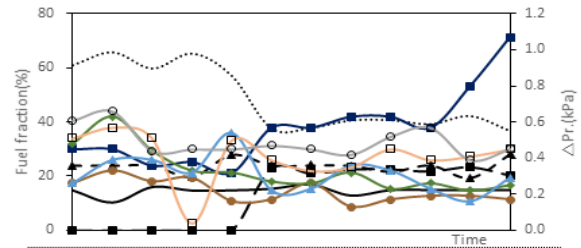
[Figure 11]은 무부하시 Tophat 연료공급 시점, [Figure 12]는 55MW Main-A 연료공급 시점의 연소동압 발생 상태를 측정된 결과이다. Pilot-A 연료비율 감소하는 시점에 Over-all과 Band-2 연소동압은 높아지는 추세로 나타났으나 Band-7은 비례하여 변화하였다. [Figure 13]은 출력운전에 따른 연소동압 주파수별 변화 추세를 나타낸 것이다. 저출력에서는 Band-2(30~70Hz), 고출력일수록 높은 주파수대의 Band-3~6(70~500 Hz)로 이동하면서 연소동압이 높게 나타났다.

3.2.2 Pilot-B 연료비율 변화

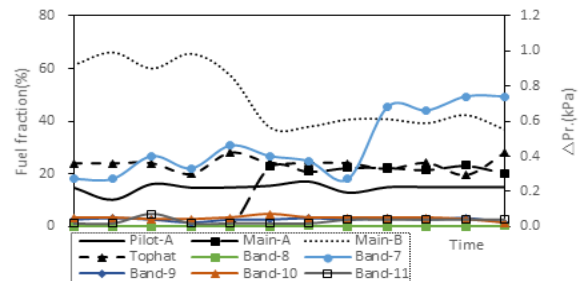
[Figure 14]는 출력 100MW 시점에 Pilot-A mode에서 Pilot-B mode로 전환하면서 연소동압을 측정된 결과이고, [Figure 15]는 Pilot-B mode 운전시 연소동압 변화 추세를 나타낸 것이다. 확산화염인 Pilot-A mode



(a) over-all



(b) low-band



(c) high-band

[Figure 12] Combustion dynamics at 55MW

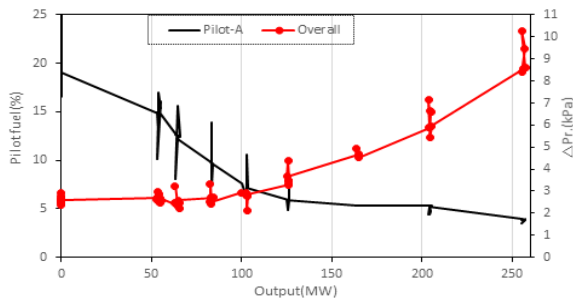
에서 Pilot-B mode로 전환할 경우에 연소동압이 증가하는 것으로 나타났으며, Band-6과 Band-7의 변화가 매우 크게 나타났다.

[Figure 15]에서와 같이 출력 증가시와 Pilot-B 연료비율 감소시에는 연소동압이 지속적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 출력이 증가할수록 Band-3,4(70~140Hz)의 중간 주파수대에서 Band-6(200~500Hz)의 고주파수대로 이동하면서 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

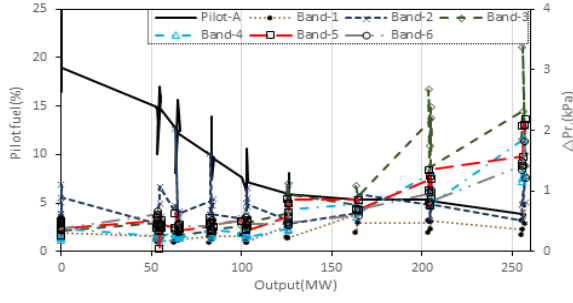
이는 [Figure 3]에서와 같이 확산화염인 Pilot-A mode보다 예혼합 화염인 Pilot-B mode가 연료노즐로부터의 화염형성 거리가 증가함에 따라 연소동압이 증가하는 것으로 판단된다.

3.2.3 Tophat 연료비율 변화

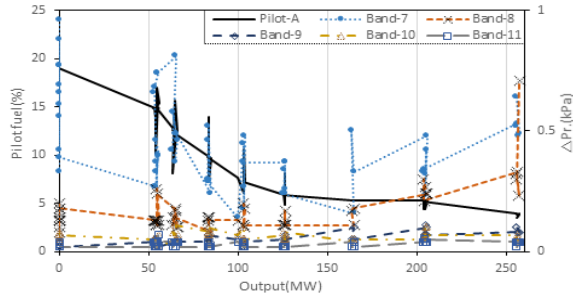
일반적으로 예혼합 화염은 연소동압 발생에 직접적인 영향이 있는 것으로 알려져 있으며 [2,6], 이와 관련이 있는 Tophat 노즐의 연료량 비율에 따른 연소동압 변화는 [Figure 11], [Figure 12]에서와 같이 Over-all과 Band-2,



(a) over-all



(b) low-band



(c) high-band

[Figure 13] Combustion dynamics during Pilot-A mode operation

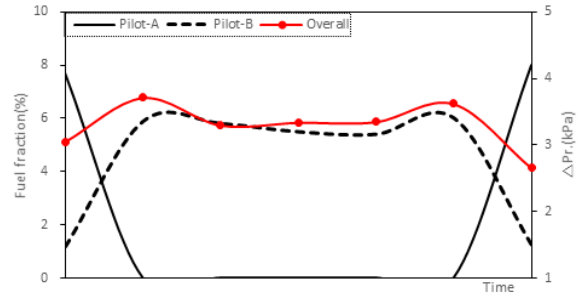
Band-6이 비례관계로 나타났고, Band-7은 Main-B 공급전까지 비례관계로 나타났다.

이는 Tophat 연료비율이 연소기내에서 예혼합 화염 분위기를 만들면서 발생하는 현상으로 판단되며, 주로 Band-2(30~70Hz), Band-6(200~ 500Hz), Band-7(500~1200Hz) 연소동압 변화에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

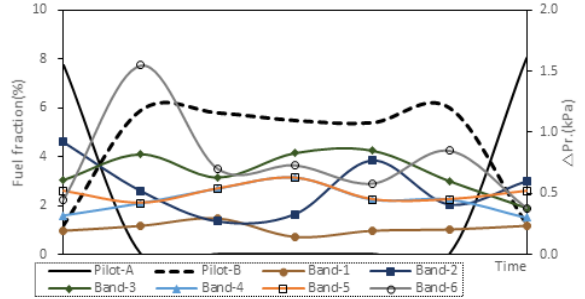
3.2.4 Main-A/B 연료비율 변화

[Figure 12]와 같이 Main-B에서 Main-A 노즐로 연료가 분산되어 공급되는 시점에는 Band-2, Band-7이 증가하였으나 전반적으로는 연소동압이 안정되는 것으로 나타났다. 안정후 Main-A/B 연료를 감소시키고 Tophat을 증가시킨 경우에 Band-2 연소동압이 높아지는 것으로 나타났다.

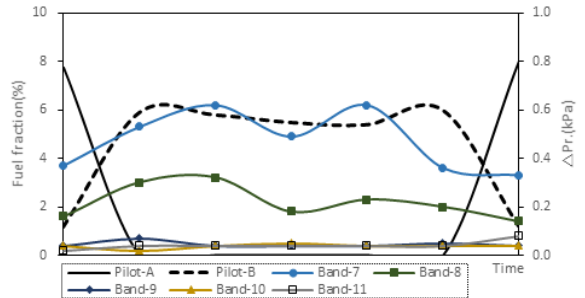
이는 Main-A 연료비율이 Tophat과 같이 연소기내



(a) over-all



(b) low-band



(c) high-band

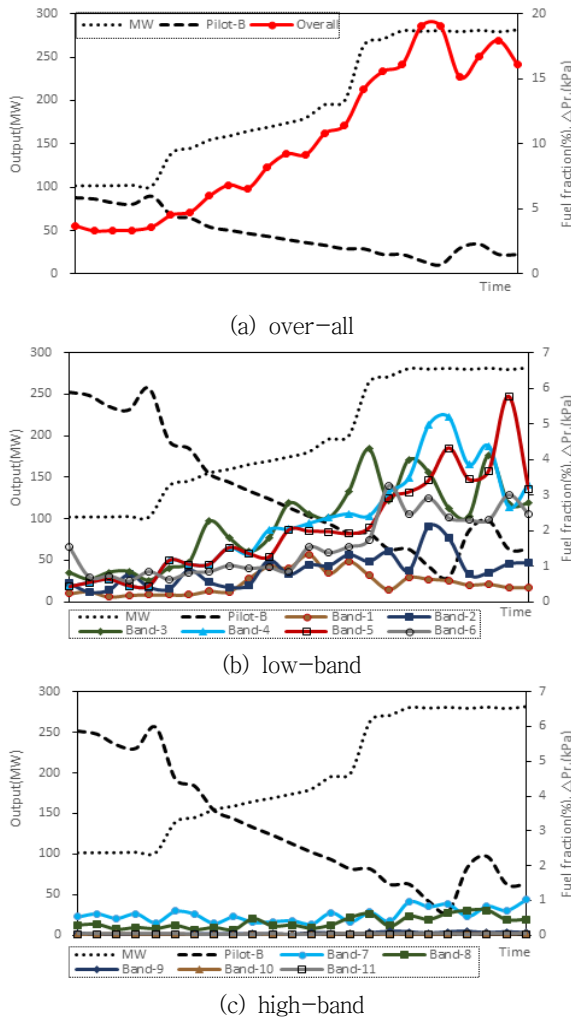
[Figure 14] Combustion dynamics at 100MW during Pilot-A/B mode change

예혼합 화염 분위기를 만들어 유사한 현상이 발생되나, 공급시점에는 Main-A,B가 분배되면서 연소기내 화염안정에 도움을 주어 전반적으로 연소진동이 안정되는 것으로 판단된다.

3.3 질소산화물 배출농도와 연소동압 관계

[Figure 6(C)], [Figure 14(a)]와 같이 확산화염인 Pilot-A mode에서는 기존의 연구와 같이 질소산화물 배출농도와 연소동압 발생량은 서로 반비례하는 것으로 나타났다.

[Figure 9]와 [Figure 15(a)]와 같이 예혼합 화염인 Pilot-B mode의 경우 150MW 이하에서는 Pilot-A mode와 동일한 형태로 나타났으나, 그 이상의 출력에서는 Pilot-A mode와 다르게 질소산화물 배출농도와 연소동압이 동일하게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 예혼합 화염인 Pilot-B mode도 고출력에서는 동일한 공간에서



[Figure 15] Combustion dynamics during Pilot-B mode operation(100~290MW)

연소공기 증가보다 총 연료량이 더 많이 증가하면서 화염을 집중시키는 역할을 하여 질소산화물 배출농도도 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 M501J 가스터빈 연소기 단별 연료비율이 연소에 미치는 영향에 대하여 고찰하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 질소산화물 배출농도 영향을 분석한 결과, 확산화염인 Pilot-A 연료비율의 영향이 가장 큰 비례적인 관계로 나타났으며 고출력에서는 영향이 더욱 크게 나타났다. Tophat은 중심부로 유입된 연료가 확산화염에 영향을 일부 주는 것으로 나타났으며, 변화폭은 적으나 비례적인 관계로 나타났다. 예혼합 화염인 Pilot-B mode에서는 확산

화염인 Pilot-A mode보다 배출농도가 매우 낮아지는 것으로 나타났다. 그러나 고출력에서는 Pilot-A mode 운전과는 다르게 Pilot-B 연료비율을 감소시켜도 출력에 따라 질소산화물 배출농도가 증가하는 방향으로 나타났다.

(2) 연소동압 발생 영향을 분석한 결과, Pilot-A와 Pilot-B 연료비율은 모두 연소동압과 반비례의 관계로 나타났으나, 예혼합 화염인 Pilot-B mode에서는 Pilot-A mode보다 연소동압이 더 크게 나타났다. 저출력에서는 낮은 주파수대의 연소동압이 증가하였고, 고출력에서는 중·고주파수대 영역으로 점차적으로 이동하면서 연소동압이 증가하는 것으로 나타났다.

(3) 질소산화물 배출농도와 연소동압 발생 상관관계를 분석한 결과, 확산화염인 Pilot-A mode에서는 기존의 연구와 같이 서로 반비례하는 것으로 나타났다. 예혼합 화염인 Pilot-B mode에서는 150MW이하에서 Pilot-A mode와 동일한 형태로 나타났으나, 그 이상의 출력에서는 Pilot-A mode와 달리 질소산화물 배출농도와 연소동압이 모두 동일한 방향으로 증가하는 것으로 나타났다.

따라서 가스터빈에서 발생하는 질소산화물 배출농도를 최소화하기 위해서는 화염안정을 위한 Pilot 노즐에도 예혼합 화염 형식의 연소기 적용이 효과적임을 알 수 있다. 그러나 예혼합 화염으로 인해 연소동압이 증가함으로써 설비손상 발생위험 또한 증가함을 알 수 있다. Pilot 노즐에 예혼합 화염을 적용하기 위해서는 연소불안정과 연소동압 발생의 최소화 방안이 필요하며, 이를 해결하기 위해서는 연소기 단별 연료비율에 따른 연소동압 발생시점과 발생하는 주파수영역 분석을 통하여 해당시점의 연소안정을 위한 최적화 연구가 동시에 이루어져야 한다.

5. References

- [1] KEMRI(2018), "World Energy Outlook 2017." KEMRI. 2018 Vol.1
- [2] SIEMENS(2001), "Dry Low NOx(DLN) Combustion System." Gas Turbine Users Group Conference
- [3] Tim Lieuwen, Ron Hitzel.(2006), "Combustor Dynamics." SIEMENS Presentation
- [4] MHPS(2013), "Instruction of MISUBISHI Gas Turbine." MHPS Gas Turbine Engineering Department
- [5] H. D. Shin(2008), "An Instruction to Combustion." KAIST Combustion Engineering Research Center presentation
- [6] J. G. Hong, H. D. Shin(2007), "Effect of Unmixedness of Fuel and Air on the Pressure Fluctuation in a

- Model Gas Turbine Combustor.” Spring conference of the KSME, pp. 507–512
- [7] D. S. Han(2014), “A Study of Flow, Combustion and Emission Characteristics with Fue Staging in a Downscale Gas Turbine Combustor under Elevated Pressure.” Pusan National University press
- [8] H. G. Pae(1999), “Low NOx Characteristics of Premixed Lean-Burn Gas Turbine Combustor.” Hanyang University press
- [9] C. H. Cho(2014), “A Numerical Study on Flame interaction and NOx Formation in a Gas Turbine Combustor with Multi-burner.” Sejong University press
- [10] B. K. Cho(2009), “Experimental Investigation on Flame Structure and Emission Characteristics in a Partial Premixed Dump Chamber.” Pusan National University press
- [11] MHPS(2013), “Instruction of MISUBISHI Gas Turbine.” MHPS Gas Turbine Engineering Department

저자 소개



유 원 주

울산대학교 대학원 산업경영공학과 석사 취득.
현재 한국동서발전(주) 발전기술개발원 기술
전문센터 책임전문원(부장) 재직 중
관심분야 : 가스터빈 복합설비 운영, 발전설비
손상 분석, 가스터빈 고온부품과 연소기 개발 등



정 진 도

충남대학교 열유체공학과 박사 취득,
Kanazawa대학교(일본) 환경공학과 박사
취득 후 현재 호서대학교 교수 재직 중
관심분야 : 열·유체 기술, 에너지 기술, 에너지
기후융합 기술, 환경설비 관련 기술개발 등