



이중 콘형 부분예혼합 GT 연료노즐의 연소특성 및 발전플랜트 실증

†김한석 · 조주형 · 김민국 · 황정재 · 이원준 · 민경욱 · 강도원
한국기계연구원
(2021년 10월 22일 접수, 2021년 12월 7일 수정, 2021년 12월 8일 채택)

Combustion Characteristics and On-site Performance Test of a Double-cone Partial Premixed Nozzle with Various Fuel hole Patterns

†Han Seok Kim · Ju Hyeong Cho · Min Kuk Kim · Jeongjae Hwang
Won June Lee · Kyungwook Min · Do Won Kang
*Korea Institute of Machinery & Materials,
171 Jangdong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea
(Received October 22, 2021; Revised December 7, 2021; Accepted December 8, 2021)*

요약

발전용 가스터빈에 사용되는 이중 콘형 예혼합 연소기의 성능 개선 및 검증을 위하여 기존 노즐에서 연료 분사 특성을 개선한 노즐(분사구 직경 증가, 분사구 수 감소, 총 분사면적 유지)을 이용하여 고압 및 다중화염 조건에서 실험 연구를 수행하였으며 배기가스 특성을 기존 노즐과 비교하였다. 실험 결과로는 노즐의 연료 직경을 크게 한 경우 연소용 공기로 연료의 침투 거리가 증가하기 때문에 큰 내부에서 연료와 공기의 혼합특성이 개선되어 상압뿐만 아니라 압력 상승 시 NO_x 배출 농도는 감소하며 다중 화염의 경우 화염간 연소영역의 중첩이 감소하게 되어 NO_x 배출은 감소하지만 화염 안정성은 저하된다. 연료 분사구를 개선한 노즐의 발전 플랜트 실증 결과는 실험 결과와 같이 기존 노즐에 비하여 NO_x 농도가 낮게 배출되었다.

Abstract - Combustion characteristics were examined experimentally for a swirl-stabilized double cone premixed burner nozzle used for industrial gas turbines for power generation. An original model and a variant with a different fuel injection pattern are tested to compare their combustion characteristics such as NO_x, CO and stability in pressurized conditions with single burner-flame and in an ambient multi-flame conditions with multi-burners. Test results show that NO_x emissions are smaller for the variant, whose number of fuel holes is reduced with the same total area of fuel holes, in ambient and pressurized single-flame conditions with single burner, which results from enhanced fuel/air mixing due to a higher penetration of fuel into the air stream. The multi-burnerflame test results show that NO_x emissions are smaller for the variant due to reduced flame interactions, which, on the contrary, slightly reduces the stability margin. On-site test results from an actual power plants also show that NO_x emissions are reduced for the variant, compared with the original one, which is in agreement with the lab test results stated above.

Key words : double cone type partial premixed nozzle combustor, partial pre-mixed combustor, gas turbine combustor, pressure effect, multi-flame interaction, fuel hole patterns, fuel penetration, fuel/air mixing

†Corresponding author: haskim@kimm.re.kr
Copyright © 2021 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

가스터빈 발전은 부하 추종성이 우수하지만 가스터빈 내부는 고온, 고압으로 운전되기 때문에 고온부품은 일정기간 사용 후 열손상 등으로 부품을 새로 교체하거나 교체 시 성능을 개선하여 사용하고 있다[1]. 특히 연소실의 고온부에서 주로 발생되며 초미세먼지의 원인이 되고 있는 NO_x 저감을 위한 연소기 개선 연구는 효율 상승과 함께 활발히 진행되고 있다[1-6].

현재 가스터빈 연소기에 주로 이용되는 NO_x 저감 기술은 과농-희박 연소(Rich-lean Combustion) 방법과 예혼합 희박연소(Lean-premixed Combustion) 방법이 있다. 과농-희박 연소 방식은 미연가스의 배출이 증대될 우려가 크지만 부하변동에 대하여 비교적 안정된 화염을 유지할 수 있어 항공기 엔진에 주로 사용된다[6,7]. 예혼합 희박연소 방법은 연소용 공기와 연료를 당량비 1 이하로 예혼합한 후 연소영역에 공급하여 화염대의 국부적 고온부 발생을 억제시키는 연소방법으로 현재 발전용으로 가장 많이 사용되고 있는 저 NO_x 연소기술이다. 예혼합 희박연소 방법은 연소영역에서 고온부가 적어 NO_x의 발생이 억제되는 장점이 있지만 운전 조건에 따라 CO의 배출 증가와 연소영역이 고정되지 않아서 화염부상, 연소진동 또는 역화우려가 크기 때문에 관련하여 많은 연구가 진행되고 있다[8-9]. 예혼합기 내부에서 공기에 대한 연료의 침투거리 영향을 예상하기 위하여 연료 분사구의 수와 직경을 변화시켜 연료의 분산효과와 침투거리 변화에 대한 연구가 종래에 수행되었으며 연료의 침투거리 증대는 NO_x의 배출 저감에 효과가 있음을 예상하였다[10].

본 연구의 대상인 가스터빈용 예혼합 이중 콘형(double cone-type) 연소노즐은 노즐 내부에 공기와 연료의 예혼합 영역이 존재하는 구조이다[1, 16]. 공기와 연료의 예혼합 정도와 NO_x 발생의 상관관계 그리고 공연비 증가 시 화염이 연소노즐 내부로 역화되고 연소진동의 변화가 크게 증가하는 원인을 파악하였다[12-14]. 콘으로 연료를 분할 주입하는 다단 연소특성에 대해서는 콘에서 분사되는 연료량과 방향에 따라 연료와 공기의 혼합도가 변하고 화염대의 위치가 이동되며 NO_x와 CO의 배출이 변하게 됨을 예상하였다[1]. 동일 크기로 설치되어 있는 다수의 연료 분사구를 변형시킨 분사구 형태에 대하여 NO_x 배출과 화염 안정성과의 관계에 대한 연구가 수행되었다. 연료 분사구의 총 면적을 동일하게 유지하고 분사구 개수를 일부 줄여 분사 직경을 크게 하면 공기 유로에 수직으로 공급되는 연료의 침투 거리가 커져서 연소영역이 노즐 축 중심방향으로 이동되며 예혼합 특성이 향상

되어 NO_x 저감에 효과가 있음을 예상하였다[16]. 그러나 이러한 연구 결과들은 단일 노즐의 상압 연소조건에서 수행한 것이기 때문에 고압 조건의 대용량 발전용 가스터빈 플랜트에 본 결과를 직접 적용하기에는 위험성이 있다. 따라서 본 노즐의 다중화염, 고압 연소 특성을 사전에 파악하여 위험성을 최소화 할 필요가 있다[13].

본 연구에서는 종래의 상압 단일 노즐 연구 결과를 다중화염과 고압 연소 조건에서 적용하여 기존 노즐 특성과 비교하였으며 가스터빈 발전플랜트에 적용하여 특성을 확인하였다.

본 연구를 위하여 상압 단일 노즐 연소조건에 대한 연구 결과를 참고로 연료분출구 수를 줄이고 직경을 상대적으로 크게 한 축소노즐을 고압과 다중노즐 연소에 이용하였다[1,16]. 고압 연소실험은 단일 노즐을 이용하였으며 상압의 다중노즐 연소실험은 7개의 노즐 균을 이용하였다. 그리고 개선된 노즐을 기존 노즐과 동일 기종의 가스터빈 발전플랜트 연소기에 적용하여 동일 조건에서 NO_x 배출 농도를 비교하였다.

II. 적용 대상 가스터빈 연소기

2.1. 적용 대상 가스터빈 연소기의 구조

본 연구의 대상인 가스터빈은 A사의 80MW급 가스터빈으로 압축비는 정격에서 11.5이며 연소기는 Silo type이다. 본 가스터빈에 사용된 silo type 연소기

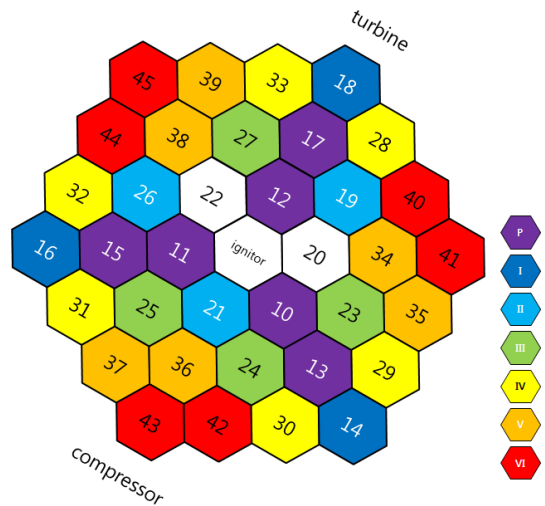


Fig. 1. Configuration of silo type combustor with double cone premixed burner nozzles.

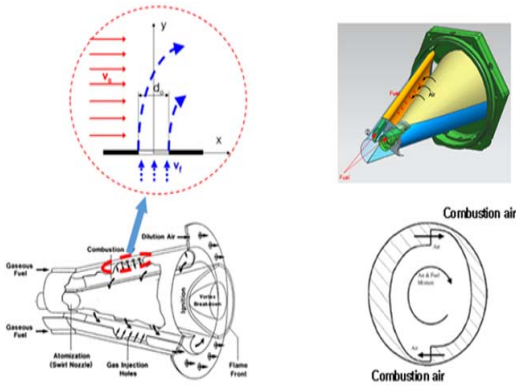


Fig. 2. Schematic of double cone premixed burner nozzle.

에는 Fig.1과 같이 상부에 예혼합 이중 콘형(double cone-type) 노즐이 별집모양으로 조립되어 있어 각 노즐 간의 화염 간섭이 예상된다. Fig. 1의 중심부 ignitor를 제외하면 총 36개의 예혼합 이중 콘형 노즐이 장착되어 그룹제어 방식으로 운용되고 있으며 20. 22번 노즐은 연료 공급 없이 공기만 공급되게 운전되고 있다.

2.2. 예혼합 이중 콘형 노즐의 구조

대상 가스터빈 연소기에 사용되는 NG용 연소노즐은 Fig. 2와 같은 2중원추형으로 연소용 공기는 두 개의 엇갈린 공기 슬롯(slot)을 통하여 공급되는 구조이며 연료는 두개의 공기 슬롯 경사면에서 일렬로 구성된 다공의 분사구를 통하여 공급된다[1,16]. 연료의 분사구 직경과 분사 유속은 공기 유로내의 연료 침투 거리에 변화를 주게 되어 노즐 내부에서 공기와 연료의 예혼합 특성에 영향을 준다[16].

III. 고압 및 다중노즐 연소실험

3.1. 연소 노즐의 제작

본 연구에서는 Fig. 2의 경사면 공기 슬롯에서 연료 분사구 패턴을 Fig. 3과 같이 기존 case 1과 case 1에 비하여 분사구수를 1/2로 줄이고 직경을 크게 하여 평균 침투거리를 27% 증가시킨 case 2와 같은 노즐 패턴을 이용하였다[16]. 본 노즐에 대한 종래의 단일 노즐 연소특성 연구 결과에 따르면 case 1에 비하여 case 2는 연료의 침투거리가 증가하여 연소 영역이 노즐 축 중심으로 이동되며 연료의 혼합특성 향상으로 NOx 배출 저감되는 특징이 있다[16]. 실험실 공기 공급 장치의 제한된 공급 유량을 고려하여 Table 1에 나타낸 실스케일 노즐의 1/9 크기(면적 기준)로 축소된 노즐

Table 1. Details of fuel injection hole patterns

Pattern	Hole Dia (mm) x EA	Total Hole No(EA)	Area ratio	Average Penetration
Case 1	1.5x32	32	1.00	1.00
Case 2	2.1x16	16	0.98	1.27

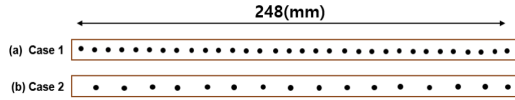


Fig. 3. Fuel injection hole patterns of nozzle.

(case-s 1, case-s 2)을 각각 제작하여 고압과 다중 노즐 연소 실험을 수행하였다.

3.2. 실험 장치

Fig. 4와 같이 고압연소는 단일 노즐을 이용하여 5 barA까지 연소가 가능하도록 구성하였으며 다중 노즐은 7개의 노즐로 구성하여 노즐 간 화염 간섭 영향을 예상할 수 있게 하였다. Fig. 4 (a)와 같이 실험장치는 연소기(연소노즐과 연소실), 공기 공급장치, 연료 공급장치 및 측정 장치로 구성되어 있다. 다중 노즐 연소장치의 연소실 내부 직경은 실스케일 단일 노즐 연소실과 같은 355mm이며 고압 연소 장치는 120mm로 하였고 길이는 모두 1600mm이다.[1,16] 이 경우 동일 공기온도, 노즐출구속도, 공연비 연소실험 조건에서 단일 실스케일 노즐과 고압용 축소 노즐 실험장치를 비교하면 연소 후 생성가스의 연소실 체류시간 차이는 1% 미만이며 다중 노즐의 연소가스의 연소실 체류시간은 이에 대하여 약 1.29배이다. 압축기에서 공급된 연소용 공기는 코리올리스 유량계와 밸브로 유량 제어 후 열교환기를 통하여 가열되어 연소기에 공급되게 구성하였다[1,16]. 연소용 연료는 도시가스 배관에 공급되는 NG를 가압하여 사용하였으며 조성은 가스공사 자료를 활용하였다. 배가스 농도 측정을 위하여 포집관을 연소실 출구에 설치하였으며 포집 가스는 급랭시킨 후 수분을 제거하여 보정된 가스 분석기(Green Line MK2)를 이용하여 NOx와 O₂, CO 농도를 측정하였다[10,11].

3.3. 실험 방법

축소된 단일 노즐의 상압 연소 실험은 실스케일 상압 단일 연소노즐의 연소용 공기량(0.5 kg/s)의 1/9로 하여 실스케일 노즐과 공기 유속과 연소조건을 같게 하였고 압력상승 시에는 질량을 증가시켜 체적유량을 일정하게 하였다[1,16]. 상압 연소조건인 다중 노즐의 경우 7개의 노즐을 고려하여 상압 실스케일 단일

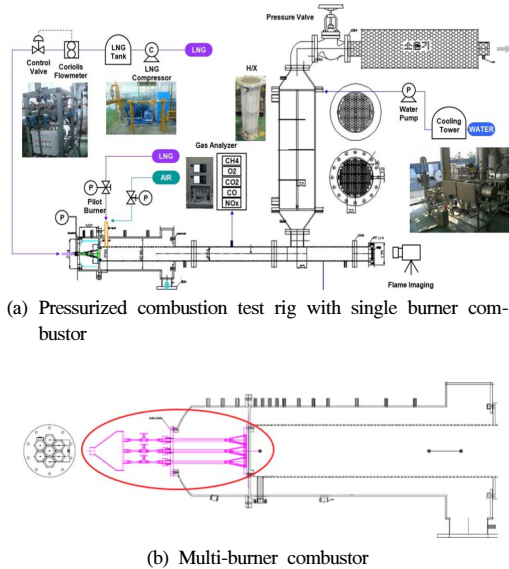


Fig. 4. Schematic of combustion test system.

노즐의 연소용 공기량(0.5 kg/s)의 7/9로 공급하였다. 연소용 공기온도는 본 노즐을 적용할 가스터빈 플랜트의 압축기 출구 조건을 고려하여 370°C를 기준으로 하였으며 각 조건에서 연소용 공기량을 일정하게 하고 연료량 변화에 대한 연소 실험을 수행하였다[1,16]. 화염 안정성 실험은 가스터빈 플랜트의 연소기에 공급되는 압축기 출구 공기온도의 4계절 변화를 고려하여 연소용 공기 온도는 330°C, 350°C 그리고 370°C로 하였으며 각 조건에서 연료량을 감소시키면서 소멸되는 공연비로 화염 안정성을 평가하였다.

3.4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 5는 Table 1의 case 1, case 2의 1/9 축소 다중 노즐(case-s 1(7), case-s 2(7); (7)은 노즐수)과 실스케일인 case 1 노즐의 연료량 변화에 대한 NOx와 CO의 측정결과를 O₂ 15%로 환산하여 배가스 O₂ 대하여 나타낸 결과이다. Fig. 5의 x-좌표에서 O₂가 10.2%, 12%인 경우 공기/연료의 질량비는 각각 31.2와 37.5이다. Fig. 5 (a)의 결과로부터 다중 노즐의 경우에 실스케일 단일 노즐 결과와 같이 O₂의 농도가 감소할수록 연료량 증가에 의하여 연소영역의 온도가 상승하여 NOx의 배출 농도가 높아지게 된다[1,16]. Fig. 5 (a)의 결과로부터 case 1의 실스케일 노즐과 1/9로 축소된 7개의 case-s 1 노즐로 구성된 다중 노즐의 경우 NOx의 배출 농도는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이것은 실스케일 노즐에 비하여 다중 노즐의 고온가스 연소실 체류시

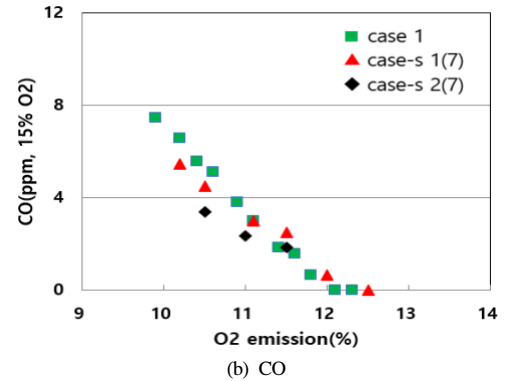
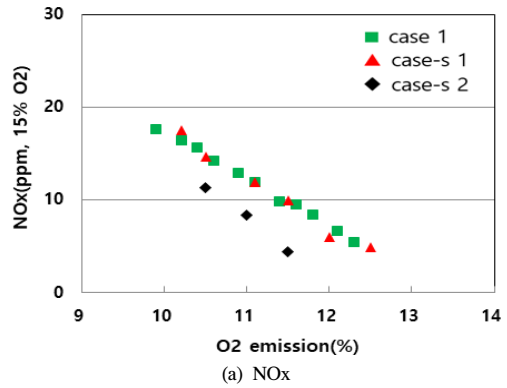


Fig. 5. The dependence of NOx and CO emissions on the exhaust O₂.

간이 크고 각 노즐의 연소영역 중첩이 예상되지만 이 보다는 총 공급 연료량이 7/9로 적어 상대적으로 열손실이 커져서 실스케일 노즐과 비슷한 NOx의 배출 농도를 보이는 것으로 예상된다. Case-s 1(7)과 case-s 2(7)의 축소 다중 노즐의 비교로부터 case-s 2(7)의 경우 Table 1에 나타난 바와 같이 평균 침투 거리 증가로 혼합특성이 증가하고 case-s 1(7)에 비하여 화염이 노즐 중심축 안으로 향하기 때문에 연소영역의 중첩이 작아져서 고온 영역이 축소되어 NOx의 배출이 감소되는 것을 예상할 수 있다[16]. Fig. 5 (b)의 CO 배출 농도 결과로부터 축소 다중 노즐의 경우 실스케일 단일 노즐과 같이 O₂ 농도가 감소할수록 연료로 공급되는 산화제 감소로 CO의 배출 농도가 증가하는 경향을 보인다[16]. Case 1의 실스케일 단일 노즐과 동일 형태의 축소된 7개의 case-s 1(7) 다중 노즐의 비교로부터 단일 노즐보다는 다중 노즐은 연소영역으로 산화제의 원활한 공급과 연소실 체류시간 증대로 CO의 배출은 대체로 감소된다. Case-s 1(7)과 case-s 2(7)의 축소 다

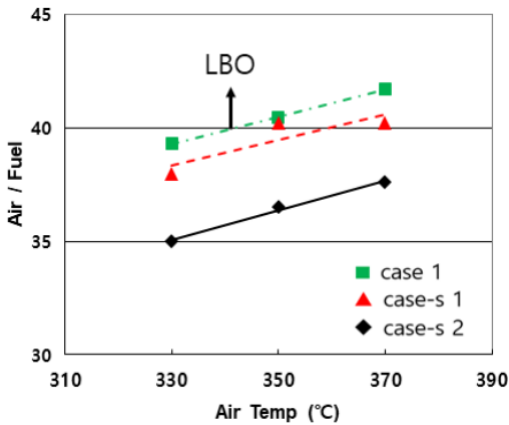


Fig. 6. Flame stability characteristics.

중 노즐의 비교로부터 case-s 2(7)는 연료의 평균 침투 거리가 크기 때문에 예혼합 영역에서 공기와 연료의 혼합 특성이 증가하고, 연소영역의 중첩이 감소되어 연소영역으로의 산화제 공급이 증가하기 때문에 CO의 배출이 감소되는 것을 예상할 수 있다[16].

Fig. 6은 연소용 공기 온도에 대한 각 노즐의 화염 안정성 결과를 공연비를 기준으로 나타낸 결과이다. 연소용 공기 온도가 높을수록 노즐 출구의 예혼합가스의 유속은 증가하지만 공기 유속증가에 의한 연료의 평균 침투 거리가 감소되어 노즐 표면에 보다 많은 연료가 분포되며 또한 화염온도가 증가하여 더 높은 공연비에서도 화염이 안정되게 유지된다[16]. Case 1의 실스케일 단일 노즐에 비하여 case-s 1(7)의 다중 노즐은 화염 안정성이 조금 감소되는데 다중 노즐의 경우 실스케일 단일 노즐에 비하여 총 공급 열량이 7/9로 적고 분할화염 형성에 의한 열손실이 상대적으로 증가하여 연소영역의 온도가 낮아져서 화염안정성이 저하되기 때문으로 예상된다. Case-s 1(7)과 case-s 2(7)의 다중 노즐의 비교로부터 case-s 1(7)은 평균 침투 거리가 적어 노즐 표면에 더 가깝게 연료가 존재하여 화염을 안정시킬 뿐만 아니라 연소영역의 중첩이 크기 때문에 연소영역의 고온부가 더 많이 형성되어 화염안정성이 향상됨을 예상할 수 있다[16].

Fig. 7은 공연비가 35.7인 경우(배가스 O₂ 농도: 11.5%) 연소용 공기온도 370°C 조건에서 case-s 1과 case-s 2의 단일 노즐을 이용한 연소실 압력에 대한 NO_x 배출 결과이다. Fig. 5(a)의 O₂ 농도 11.5% 조건에서 다중노즐의 case-s 1과 case-s 2의 NO_x 농도와 동일 조건인 Fig. 7의 1 bar 압력에서 단일 노즐의 NO_x 농도를 비교하면 case-s 2의 경우 단일 노즐과 다중노즐의 NO_x 농도는 5 ppm 근처에서 유사한 값을 보

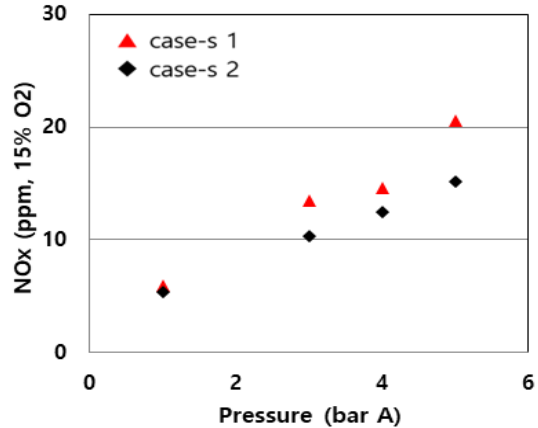


Fig. 7. Pressure dependence of NO_x emissions. (A/F=35.7)

지만 case-s 1의 경우 다중노즐의 NO_x 농도가 단일노즐의 약 2배로 차이가 현저함을 알 수 있다. 이것은 Fig. 5에서 언급한바와 같이 case-s 1의 노즐은 case-s 2노즐보다 연료의 침투 거리가 작기 때문에 화염이 노즐 중심축에서 멀게 형성되고 이로써 다중노즐에서는 연소영역의 중첩 효과가 상대적으로 증가하여 고온부의 중첩 영역에서 NO_x의 배출이 증가하는 것으로 예상된다.[2] Fig. 7의 결과로부터 연소실 압력이 증가할수록 각 노즐의 경우 NO_x 배출 농도가 증가하며 연료의 침투거리 향상으로 예혼합특성이 우수한 case-s 2의 경우 case-s 1의 경우에 비하여 압력의 증가에 대한 NO_x 배출 농도증가 정도가 감소함을 예상할 수 있다[13].

IV. 개선 노즐의 발전플랜트 적용

Fig. 8은 case 1 노즐과 case 2 노즐을 A사의 80MW급 가스터빈에 적용하여 각 시간(x-좌표)의 전력 부하에 대하여 발전소 스택에서 측정된 NO_x의 배출 농도를 상대 비교한 결과이다. 연소기에 공급되는 압축기 출구 공기 온도는 대기온도에 따라 변하며 이것은 예혼합연소 화염에 큰 영향을 주기 때문에 이에 대한 영향을 최소화하기 위하여 동일 기종의 가스터빈을 동시에 동일 운전 방법으로 가동하여 비교하였다. 본 실험은 플랜트 현장 여건상 CO 배출 농도와 기타 정량적인 데이터는 얻을 수 없었으며 case 1과 case 2 노즐의 상대적 NO_x 배출 농도 비교를 목적으로 하였다. Fig. 8의 결과로부터 낮은 발전 용량인 60MW의 경우 두 case 노즐에서 모두 높은 NO_x 배출량을 나타내었는데 이는 낮은 부하 조건에서 연료가 공급되지 않는

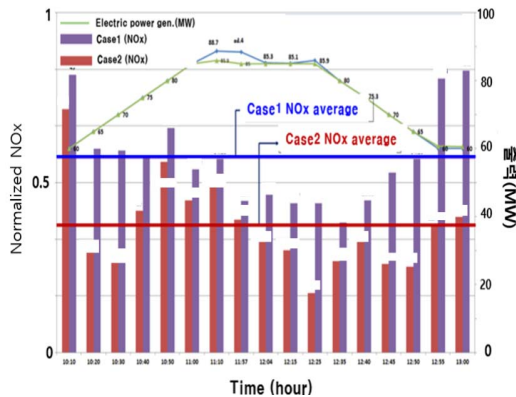


Fig. 8. On-site test results of NOx emissions measured from actual power plants.

노즐의 공기에 의한 소염 방지를 위하여 연료 공급 노즐의 공연비를 낮게 운전시켜서 국부적으로 고온부가 많이 발생되기 때문에 판단된다. 그리고 case 1 과 case 2에 대하여 부하 상승 시와 하강 시 동일 부하 조건에서 NOx 배출 농도가 서로 다른데 이것은 발전사에서 NOx의 배출뿐만 아니라 연소진동과 소염 등을 고려하여 부분 부하 운전을 하였기 때문으로 예상된다. Fig. 8의 60 ~85 MW 모든 부하에서 case1에 비하여 case 2 노즐의 경우 평균 30% 이상 NOx 배출이 감소됨을 예상할 수 있었으며 실스케일 및 축소 다중 노즐의 상압 연소실험 결과와 유사한 NOx 저감 특성 결과를 얻을 수 있었다[16]. 따라서 실험실 수준의 연소실험으로 대용량 고압 발전플랜트의 NOx 배출에 대한 비교 평가는 일부 가능할 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 발전용 가스터빈에 사용되는 이중 콘형(double cone-type) 예혼합 희박 연소방식의 가스터빈 연소기노즐의 성능개선을 위하여 기존 노즐의 연료 분사구를 변경하여 연료의 침투거리를 증가시킨 노즐에 대한 고압 및 다중 노즐 연소 특성을 확인하였으며 발전플랜트용 가스터빈에 적용하여 기존 노즐의 NOx 배출 특성과 비교하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 다중 노즐에서 발생하는 연소영역의 중첩은 NOx 증가의 원인이 되지만 화염 안정성을 개선시킨다.
- (2) 연료의 평균 침투거리가 큰 노즐은 연소영역의 중첩이 감소하고 연료의 혼합특성이 우수하여 NOx

배출이 저감되지만 화염 안정성은 저하된다.

(3) 연료의 혼합특성이 우수한 노즐은 압력상승에 따른 NOx의 증가가 크지 않다.

(4) 연료 침투거리가 큰 노즐은 발전플랜트용 GT 실증시험에서도 NOx 농도가 낮게 배출되었으며 실험 결과와 유사한 경향성을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP, NO. 2018-1110-100290)의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] Kim, H. S., Cho, J. H., Kim, M. K., Hwang, J. J.M and LEE, W. J., "Characteristics of Multi staged combustion on a Double-cone Partial Premixed Nozzles", *KIGAS*, 24(1), 49-55, (2020)
- [2] Lefebvre, A. H., "Gas Turbine Combustion.", *McGraw-Hill*, (1983)
- [3] Mellor, A. M., "Design of Modern Turbine Combustor.", *Academic Press*, (1990).
- [4] Cohen, H., Rogers, G. F. C., Saravanamutto, H. I. H., "Gas Turbine Theory(3th)", *Longman Scientific & Technical*, (1987)
- [5] Fenimore, C. P., "Studies of fuel-nitrogen in rich flame gases.", *17th Proc. Combust. Institute*, 661-670, (1979)
- [6] Feitelbery, A. S., Lacey, M. A., "The GE Rich-Quench-Lean Gas Turbine Combustor", *ASME*, 97(127), (1997)
- [7] Peter, G., "Experimental Investigation of an Atmospheric Rectangular Rich Quench Lean Combustor Sector for Aeroengines", *ASME*, 97(146), (1997)
- [8] Northern Research and Engineering Corporation, Woburn, Massachusetts, U.S.A., "The Design and Development of Gas Turbine Combustors", (1980).
- [9] Kim, H. S., Lim, A. H., Ahn, K. Y., "Study on the combustion characteristics of a lean premixed combustor." *Journal of Korean Society of Combustion*, 9, 25-31, (2004)
- [10] Kim, H. S., Arghode, V. K., and Gupta, A. K., "Combustion characteristics of a lean premixed LPG-air combustor", *I. J. Hydrogen Energy*, 34, 1045-1053, (2009)

- [11] Cho, C. H., Baek, G. M., Sohn, C. H., Cho, J. H., Kim, H. S., "A numerical approach to reduction of NOx emission from swirl premix burner in a gas turbine combustor", *Applied Thermal Engineering*, 59, 454-463, (2013)
- [12] Fernando, B., Felix, G., "Combustion dynamics linked to flame behaviour in a partially premixed swirled industrial burner", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 1344-1353, (2008)
- [13] Fernando, B., Felix, G., "Effect of pressure and fuel-air unmixedness on NOx emissions from industrial gas turbine burners", *Combustion and Flame*, 151, 274-288, (2007)
- [14] Kim, H. S., Arghode, V. K., and Gupta, A. K., "Hydrogen addition effects in a confined swirl-stabilized methane-air flame", *I. J. Hydrogen Energy*, 34, 1054-1062, (2009)
- [15] Kim, H. S., Arghode, V. K., and Gupta, A. K., "Flame characteristics of hydrogen-enriched methane-air premixed swirling flames", *I. J. Hydrogen Energy*, 34, 1063-1073, (2009)
- [16] Kim, H. S., Cho, J. H., Kim, M. K., Hwang, J. J.M and LEE, W. J., "Combustion Characteristics of Double-cone Partial Premixed Nozzles with Various Fuel hole Patterns ", *KIGAS*, 24(4), 25-31, (2020)