

이중 콘형 부분 예혼합 GT 노즐의 연료 분사구 형상 변화에 대한 연소특성

†김한석·조주형·김민국·황정재·이원준

한국기계연구원

(2020년 7월 9일 접수, 2020년 7월 30일 수정, 2020년 7월 31일 채택)

Combustion Characteristics 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

Korea Institute of Machinery & Materials,

171 Jangdong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea

(Received July 9, 2020; Revised July 30, 2020; Accepted July 31, 2020)

요약

산업용 혹은 발전용 가스터빈에 사용되는 이중 콘형 예혼합 연소기의 연소 특성을 이해하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 노즐의 여러 연료 분사 방식에 대하여 NO_x와 CO의 배출 특성, 화염 안정성 및 연소실 온도 분포에 대한 연소특성을 비교하였다. 주 연구 결과로는 연료홀 개수가 동일하고 연료 홀 직경이 감소하는 경우와 연료 홀 면적이 동일하고 연료 홀 수가 감소되는 경우 연료의 연소용 공기층 침투가 커지기 때문에 NO_x의 배출은 감소하지만 화염 안정성은 감소하게 된다. 그리고 동일 연료 홀 면적을 이용하는 분사방식에 있어서 연료 홀을 교차 변경하는 경우 연료의 평균 침투거리 증가로 NO_x의 배출이 감소되며 연료 침투거리가 적은 연료가 화염을 안정화시키는 역할을 한다.

Abstract - Experimental investigations were conducted to examine the combustion characteristics of a swirl-stabilized double cone premixed burner nozzle used for industrial gas turbines for power generation. Several variants with different fuel injection patterns are tested to compare the combustion characteristics such as NO_x and CO emissions, stability, and wall temperature distributions. Main results show that NO_x emissions and stability are decreased either when the fuel hole diameter is decreased with the same number of fuel holes, or when the number of fuel holes is reduced with the same total area of fuel holes, both of which are due to a higher penetration of fuel into the air stream. Not only is NO_x reduced but also stability is enhanced when the fuel hole diameter varies in an alternating manner with the same total area of fuel holes, showing that NO_x reduction is due to a higher penetration of mean fuel injection path while stability enhancement is due to a lowered penetration of minimum fuel injection path.

Key words : double cone type combustor, jet in cross flow, partial pre-mixed combustor, gas turbine combustor, penetration length, fuel hole patterns, premixing zone

†Corresponding author:haskim@kimm.re.kr

Copyright © 2020 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

가스터빈 발전은 석탄이나 원자력 발전에 비하여 부하 추종성이 우수하지만 엔진 내부는 고온, 고압으로 운전되기 때문에 연소기, 터빈 블레이드 등의 고온부품은 일정기간 사용 후 부품을 새로 교체하거나 교체 시 성능을 개선하여 사용하고 있다 [1]. 특히 가스터빈은 최근 성능향상을 위하여 연소실의 출구 온도를 높이고 있기 때문에 고온부에서 주로 발생하는 NOx 배출의 증가가 우려되고 있어 초미세먼지의 원인인 NOx의 저감 연소기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1-6]

현재 가스터빈 연소기에 주로 이용되는 NOx 저감 기술은 고온 영역을 최소화시키는 과농-희박 연소(Rich-lean Combustion)방법과 예혼합 희박연소(Lean-premixed Combustion) 방법이 있다. 과농-희박 연소 방법은 연소영역 상류부의 당량비를 1이상으로 연료를 과농하게 연소시키고 연소실 하류에서 다량의 공기를 공급함으로써 고온 영역을 최소화시키며 연소반응을 완료하게 하는 방법이다. 이러한 과농-희박 연소 방식은 예혼합 희박 연소방식에 비하여 연소실 중간에서 다량의 공기를 공급하기 때문에 주연소영역에서 배출된 연료과농 생성가스와 공기의 혼합이 수월하지 않아 미연가스의 배출이 증대될 우려가 있지만 부하변동에 대하여 비교적 안정된 화염을 유지할 수 있어 항공기 엔진에 주로 사용된다.[6,7] 예혼합 희박연소 방법은 연소 노즐의 예혼합기에서 대부분의 연소용 공기와 연료를 당량비 1이하로 희박하게 예혼합한 후 연소실의 연소영역으로 공급하여 화염대의 고온부 발생을 억제시키는 연소방법으로 현재 발전용으로 가장 많이 사용되고 있는 저 NOx 연소기술이다. 이러한 예혼합 희박연소 화염은 확산화염(Diffusion flame)에 비하여 국부적 고온부가 적어 NOx의 발생이 억제되지만 예혼합기에서 연료와 공기의 예혼합도를 높인 후 혼합가스를 연소영역으로 공급해야 NOx의 배출이 억제되며 안정한 연소영역이 되지 않고 화염이 불안정하여 CO의 배출 증가와 화염부상, 연소진동 또는 역화위험이 크기 때문에 관련하여 많은 연구가 진행되고 있다.[8-9] 예혼합기 내부에서 연료의 침투거리에 대한 영향을 예상하기 위해 연료 분사구의 수와 직경을 변화시켜 연료의 분산효과와 침투거리에 대한 연구가 수행되었으며 연료의 분산효과보다는 침투거리가 NOx의 배출에 큰 영향을 주는 것을 예상하였다.[10]

본 연구의 대상인 발전용 가스터빈용 예혼합 이중 콘형(Double cone-type) 연소노즐은 노즐 내부에

공기와 연료의 예혼합 영역이 존재하는 구조로 되어 있다.[1] 종래의 연구자들은 본 노즐에 대하여 공기와 연료의 예혼합도와 NOx 발생의 상관관계 그리고 화염의 거동에 대하여 연구를 수행하였으며 연소노즐 내부의 예혼합 영역에서 혼합도가 저하되면 NOx의 배출이 크게 증가함을 예상하였다. 또한 화염온도가 높은 경우 화염이 연소노즐 내부로 역화되고 연소진동의 변화가 증가하는 원인을 규명하였다.[12-14] 콘으로 연료를 분할 주입하는 다만 연소특성에 대해서는 콘에서 분사되는 연료량과 방향에 따라 연료/공기의 혼합도와 화염대의 위치가 이동되어 NOx와 CO의 배출이 변하게 됨을 예상하였다.[1]

본 연구는 발전용 가스터빈 연소기에 사용되고 있는 이중 콘형(Double cone-type) 부분 예혼합 희박 연소노즐의 성능 개선을 목표로 하였다. 기존 연소노즐의 외형 수정 없이 연료 분사패턴 변화에 대한 연소특성 연구를 수행하였다. 본 연구를 위하여 발전 플랜트에 사용되는 연소노즐의 연료 분사구를 보완하여 이용하였으며 연소용 공기온도는 플랜트의 연소조건을 고려하여 370℃로 하여 0.5 kg/s의 상압 공기를 이용하였다.

II. 연소노즐의 구조

실험 대상 연소노즐은 Fig. 1과 같이 발전용 가스터빈에 사용되는 NG용 저 NOx 연소노즐로 콘 절반이 엇갈려 있는 2중원추형으로 연소용 공기는 두 개의 엇갈린 공기 슬롯(slot)을 통하여 접선방향으로 외부에서 연소노즐 안으로 공급되는 구조로 선회수 (S, Swirl Number)는 0.78이며 노즐 축 중심부는 선회유동에 의한 재순환 유동이 발생되어 연소 중에는 연소생성 가스가 노즐 축 중심 축 입구로 일부 역류되어 연소영역을 외곽으로 이동시키고 화염을 안정화시키는 역할을 한다.[1] 연료는 두개의 공기 슬롯 경사면에서 연소용 공기 흐름에 수직(Jet in cross type)방향의 일렬로 구성된 다공의 분사구를 통하여 공급된다. Fig. 1에서와 같이 연료의 분사구 직경과 유속은 공기 유로내의 연료 침투 거리에 영향을 주게 되어 연소노즐내의 공기/연료의 예혼합 특성에 영향을 준다.[1, 10] 본 연구에서는 Fig. 1의 경사면 공기 슬롯에서 연료 분사구 패턴을 변화시킨 노즐을 Fig. 2와 같이 7종을 제작하였고 세부 사항을 Table 1에 정리하였으며 침투거리에 대한 예상은 Fig. 3과 같은 실험식을 이용하였다.[10] Table 1에서 Area는 case 1에 대한 총 분사면적의 비이며, Penetration (L, S)는 case 6과 7의

큰 분사구와 작은 분사구의 case 1에 대한 침투거리 비이고, Average Penetration은 각 분사구의 침투 거리에 각 분사구 면적비를 곱한 값을 case 1에 대한 비율로 나타내었다. Table 1에서와 같이 기존 노즐인 case 1에 대하여 case 2는 분사구수를 줄이고 분사직경을 크게 하여 연료의 침투거리를 증가시켰으며 case 3 ~ 4는 case 2와 동일한 위치에 분사구 직경을 작게 하여 연료 유속을 증가시켜 연료의 침투거리를 증가시켰다. Case 5는 case 2와 동일 분사직경과 분사구수를 갖지만 상류 첫 분사구를 축방향 하류로 8mm 이동시켰고 분사구 간의 간격을 감소시켰다. 발전 플랜트는 연료 공급을 공급 압력을 기준으로 운전되기 때문에 case 6과 case 7은 case 3에 대하여 총 분사면적을 유지(면적비 차이 1%) 하여 분사압력 변화를 최소화하였고 경사면 방향으로 분사구 크기를 교차변경하여 동일 노즐 내에서 각 분사구의 연료 침투 거리를 다르게 하였다.

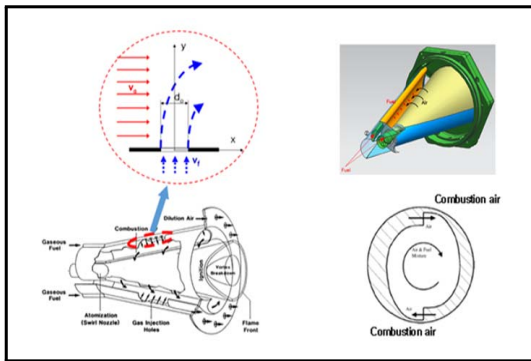


Fig. 1. Schematic of double cone premixed burner nozzle.

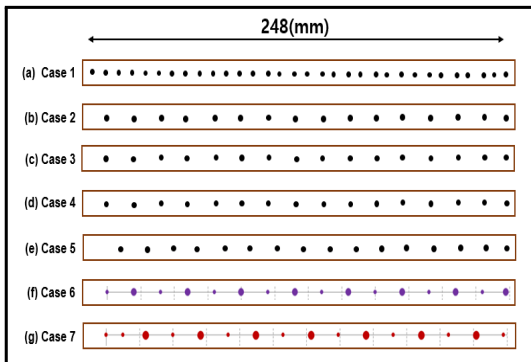


Fig. 2. Fuel injection hole patterns of nozzle.

III. 실험 장치 및 실험 방법

3.1. 실험 장치

실험장치는 Fig. 4와 같이 연소노즐, 공기 및 가스연료 공급장치, 측정장치로 구성되어 있다. 공기 압축기에서 공급된 연소용 공기는 코리올리스 유량계와 밸브로 유량제어 후 열교환기를 통하여 가열되어 연소기에 공급되게 구성하였다.[1] 연소용 연료는 도시가스 배관에 공급되는 NG를 펌프로 가압하여 사용하였다.

연소실의 내부 직경은 355mm, 길이는 1600mm이며 연소용 공기는 케이싱과 연소실 사이를 연소실 유동과반대로 흐른 후 연소노즐 입구의 윈드박스 에 공급되는 구조로 하여 연소 노즐 입구 연소용 공기의 유동을 균일화하였다. 연소노즐에 공급되는 공기 온도 측정은 윈드박스 내의 K-type의 열전대를 이용하였으며 외부 온도의 영향을 최소한으로 하고 실험의 안전을 위하여 케이싱 외벽을 100mm의 두께로 단열하였다. 화염대의 온도분포는 연소실 벽면에 K-type 열전대를 용착하여 이용하였다. 배가스 농도 측정을 위하여 포집관을 연소실 출구에 설치하였으며 포집된 가스는 급랭시킨 후 수분을 제거하여 표준가스로 보정된 가스 분석기(Green Line MK2)를 이용하여 NO_x 와 O₂ 그리고 CO 농도를 측정하였다.[1, 10-11]

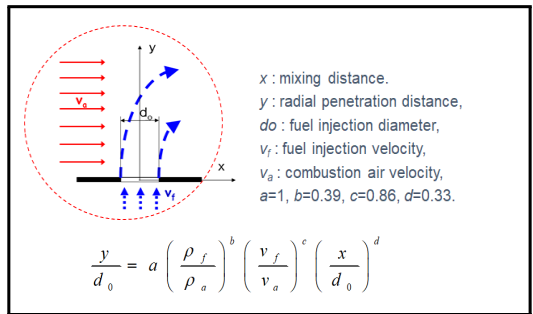


Fig. 3. Fuel penetration estimation.

Table 1. Fuel injection patterns

Pattern	Dia (mm) x EA	Area	Penetration (L, S)		Average Penetration
Case 1	1.5x32	1	1.00	-	1.00
Case 2	2.1x16	0.98	1.27	-	1.27
Case 3	2.0x16	0.89	1.34	-	1.34
Case 4	1.95x16	0.85	1.38	-	1.38
Case 5	2.1x16	0.98	1.27	-	1.27
Case 6	2.4x8, 1.5x8	0.89	1.51	1.11	1.40
Case 7	2.6x7, 1.4x9	0.9	1.58	1.04	1.43

3.2. 실험 방법

연소 실험은 발전편람을 참고로 하여 실플랜트 가스터빈 연소기의 단일 연소노즐을 기준으로 체적유량을 고려하여 상압의 연소용 공기 (0.5 kg/s)를 이용하였고 공기온도는 370°C로 하여 가스터빈 플랜트의 연소기 입구 공기온도와 유사하게 하였으며 연료량을 변화시켜 연소실험을 수행하였다.[1] 연소기의 점화를 위하여 연소실 상류 측면부에 설치한 메탄용 Pilot burner를 사용하였으며 실험의 안정성을 확보하기 위하여 pilot 화염을 유지한 상태에서 연소 실험을 수행하였으며 주연소 화염에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 pilot 화염의 연료량은 주연소 연료량의 1% 이하로 공급하였다. 화염안정성 실험은 기존 제품인 Table 1의 case 1을 기준으로 하여 각 case에 대하여 상대 비교를 위하여 수행하였으며 상압의 연소용 공기(0.5 kg/s, 370°C)를 이용하여 연료량을 감소시켜 소멸되는 공연비를 기준으로 연소 안정성을 평가하였다.

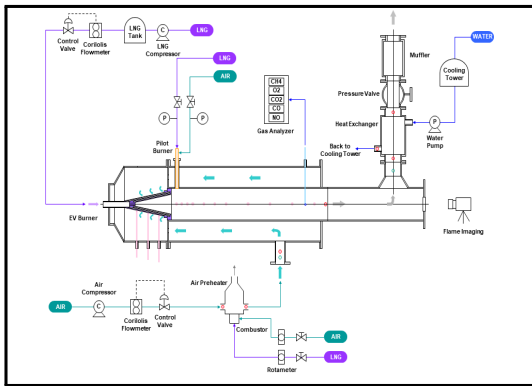


Fig. 4. Schematic of combustion test system.

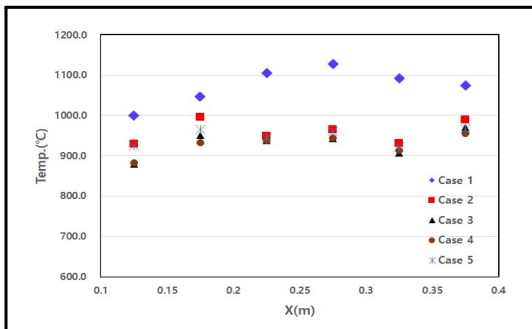
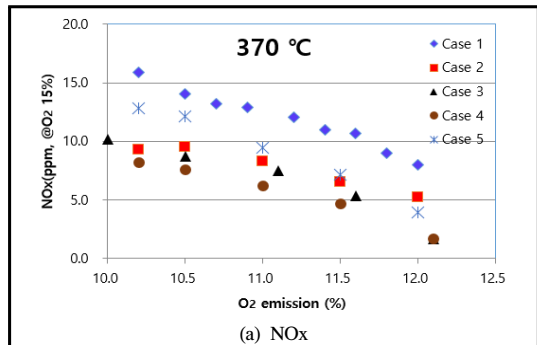


Fig. 5. Liner temperature distributions (cases 1 to 5).

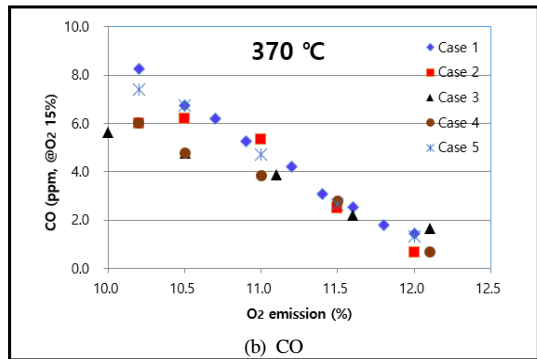
IV. 결과 및 고찰

Fig. 4는 Table 1의 case 1 ~ case 5의 연료 분사 방식을 이용하는 경우 공연비 32.5에 대한 연소실 내부 표면의 온도분포이다. Fig. 5의 결과로부터 Table 1의 Average penetration이 작을수록 높은 온도를 보임을 알 수 있다. 이것은 Fig. 1에서와 같이 연료 분사방향이 노즐의 예혼합 영역 중심 방향으로 향하기 때문에 본 실험 범위에서 연료의 침투거리가 작을수록 분사된 연료가 슬롯의 공기층을 충분히 침투하지 못한 상태로 혼합가스가 예혼합기 내부를 선회하며 연소실로 공급되기 때문에 연소실 표면의 공연비가 낮아져 연소실 표면 온도가 증가하는 것으로 예상된다. 그리고 case 2와 case 5의 비교로부터 연료분사구가 하류로 이동되는 경우 연소실 벽면온도가 조금 낮게 분포된다.

Fig. 6은 Table 1의 case 1 ~ case 5의 연료 분사 방식을 이용한 경우에 연료량 변화에 대한 NO_x와 CO의 배가스 분석결과이다. Fig. 6에서 x 좌표는 배가스 O₂를 나타낸 결과로 O₂가 10.2%, 12%인 경우



(a) NO_x



(b) CO

Fig. 6. The dependence of NO and CO emissions on the exhaust O₂ (cases 1 to 5).

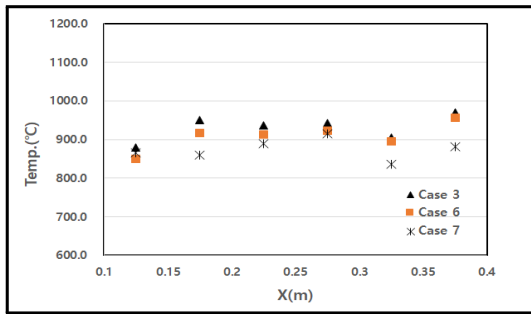


Fig. 7. Liner temperature distributions (cases 3, 6, 7).

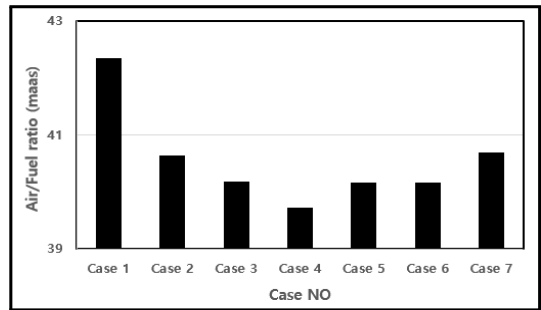


Fig. 9. Flame stability characteristics (cases 1 to 7)

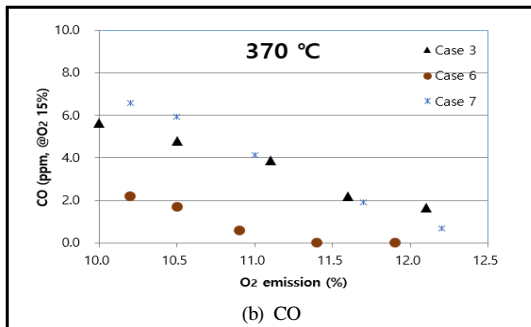
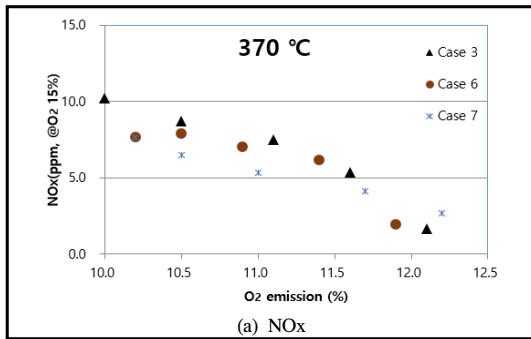


Fig. 8. The dependence of NO and CO emissions on the exhaust O₂ (cases 3, 6, 7).

공기/연료의 질량비는 각각 31.2와 37.5이다. Fig. 6 (a)의 결과로부터 각 case에 대하여 연료량 증가로 배가스 O₂의 농도가 감소할수록 NO_x의 배출 농도가 대체로 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 공급 연료량이 증가할수록 O₂의 농도는 감소하지만 연소 영역의 온도가 증가하여 고온영역에서 주로 발생하는 Thermal NO_x의 발생량이 증가하기 때문이다.[1] Table 1의 Mean penetration이 증가할수

록 NO_x의 배출이 감소되는데 이것은 슬롯의 공기 층을 연료가 충분히 침투할 수 있어 예혼합 영역에서 공기와 연료의 혼합특성이 향상되기 때문에 NO_x의 생성이 적게 되는 것으로 판단된다. 연료 분출구 총면적 차이가 1% 미만인 case 1과 case 2의 NO_x 배출 비교로부터 case 1의 분사구수 증가에 의한 공기흐름방향의 공기/연료 혼합 증대보다는 case 2의 연료침투거리 증가에 의한 혼합 특성 증대가 크기 때문에 case 2의 NO_x의 배출농도가 더 적게 되는 것으로 판단된다. 그리고 case 2에 비하여 case 5는 연료 분사구 간격이 좁고 분사구가 하류로 이동되어 공기와의 혼합거리가 감소하여 NO_x 배출 농도는 증가한다. Fig. 6 (b)의 CO 배출 농도 결과로부터 본 실험 범위에서 NO_x에 비하여 CO의 배출 농도 영향은 적으며 O₂ 농도가 감소할수록 연료로 공급되는 산화제 감소로 인하여 CO의 배출 농도가 대체로 증가하는 경향을 보인다. Case 1의 경우 분사직경이 작고 분사구수가 많지만 연료의 침투거리가 적어 연료로의 산화제의 공급이 상대적으로 작아 CO의 배출이 크며 case 4의 경우 CO의 배출이 가장 적은 것은 연료분사구의 직경 감소뿐만 아니라 연료의 침투거리 증가로 인하여 연료로의 산화제 공급이 원활하기 때문으로 판단된다.

Fig. 7은 분출구 총면적 차이가 1% 미만인 case 3과 case 6, 7의 연소실 내부 표면 온도를 비교한 결과이다. Table 1의 Average penetration (연료 평균 침투거리)이 커지면 표면 온도가 낮아지는 것을 알 수 있는데 case 6과 case 7의 작은 연료분사구는 case 3보다 침투거리가 작지만 분사면적을 기준으로 총 분사 유량의 30% 정도로 적기 때문에 연소실 표면 온도가 크게 상승되지는 않는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 case 3과 case 6, 7에 대한 NO_x와 CO의

배가스 분석결과이다. Fig. 8 (a)의 결과로부터 Table 1의 연료의 평균 침투거리가 큰 case 7의 경우 NOx 배출이 가장 낮고 case 6의 경우 CO의 배출이 가장 낮게 분포된다. 따라서 총 연료 분사면적을 동일하게 하여 연료 공급 압력을 유지하고자 하는 경우에 일정한 직경으로 구성된 연료 분사구의 직경을 교차 변경하여 연료의 평균 침투 거리를 증가시키는 것이 NOx와 CO의 배출 저감에 유리할 것으로 판단된다.

Fig. 9는 각 case에 대한 화염 안정성 결과를 나타낸다. Fig. 9의 결과로부터 연료 분사 직경을 교차 변경하지 않는 case 1 ~ case 4의 경우 침투거리가 작을수록 높은 공연비에서 화염이 소멸되며 화염 안정성이 증가되는 것을 알 수 있는데 이것은 Fig. 5에서 언급하였듯이 연료의 침투거리가 작을수록 연소노즐 큰 표면 근접 영역의 연료 농도가 상대적으로 커 고온 영역을 형성함으로써 화염을 안정화 시키는 역할을 하지만 Fig. 6의 결과에서와 같이 이러한 고온 영역의 형성은 thermal NOx의 발생을 증가시키는 것을 예상할 수 있다. Case 2와 case 5의 비교로부터 case 2의 경우 보다 하류에서 연료가 공급되는 case 5의 경우 화염이 상대적으로 불안정 하게 됨을 알 수 있다. 그리고 연료의 총 분사면적을 유지한 case 3과 case 6, case 7의 결과로부터 case 3에 비하여 case 6과 case 7은 평균 연료의 침투거리는 증가하지만 화염은 보다 안정된 결과를 얻을 수 있었다. 이것은 연료가 침투거리가 상대적으로 작은 직경으로 분사된 연료가 화염을 안정화시키는 역할을 하기 때문으로 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 발전용 가스터빈에 사용되는 이중 콘형의 예혼합 희박 연소방식의 저 NOx 가스터빈 연소기노즐의 성능개선을 위하여 공기 슬롯 경사면에서 일렬로 분사되는 연료 분사 방식을 변경하여 연소특성을 예상하였다. 본 실험 범위에서의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 연료의 평균 침투거리가 감소하는 경우 연소실 내부 표면 부의 공연비 감소로 벽면 온도가 낮게 된다.

(2) 노즐에서 분사되는 연료의 침투 거리가 증가하면 NOx의 배출은 감소하지만 화염을 안정화시키는 고온 영역의 감소로 화염 안정성은 저하된다.

(3) 분사구 총면적을 유지하고 분사구 직경을 교차 변경시키면 분사되는 총 연료의 평균 침투거리

가 증가되어 NOx의 배출이 억제되고 침투거리가 적은 분사구 직경의 연료는 화염안정성을 개선시킨다.

(4) 연소영역의 고온부는 화염 안정성을 개선시키지만 NOx의 배출 증대 우려가 있어 가스터빈 플랜트 운전의 안정성을 고려한 노즐 설계가 필요하다.

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-GT-127, (1997)
- [7] Peter, G., "Experimental Investigation of an Atmospheric Rectangular Rich Quench Lean Combustor Sector for Aeroengines", *ASME*, 97-GT-146, (1997)
- [8] Northern Research and Engineering Corporation, *The Design and Development of Gas Turbine Combustors*, Northern Research and Engineering Corporation, Woburn, Massachusetts, U.S.A., (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(1), 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(2), 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(1-2), 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(7), 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(1-2), 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(2), 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(2), 1063-1073, (2009).