



이중 콘형 부분 예혼합 GT 노즐의 다단 연소특성

†김한석 · 조주형 · 김민국 · 황정재 · 이원준

한국기계연구원

(2019년 11월 3일 접수, 2020년 2월 20일 수정, 2020년 2월 21일 채택)

Characteristics of Multi staged Combustion on a Double-cone Partial Premixed Nozzle

†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 November 3, 2019; Revised February 20, 2020; Accepted February 21, 2020)

요약

산업용 혹은 발전용 가스터빈에 사용되는 이중 콘형 예혼합 연소기의 다단 연소 특성을 이해하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 기존에 모두 경사면에 공급되는 연료를 콘부분으로 일부 할애하는 방식으로 다단 연소 방식을 구성하였으며 콘에서 분사되는 연료공급은 축방향과 콘 경사면 방향으로 하였다. 다단연소 연소특성을 이해하기 위하여 콘에서의 연료 분사 방향과 연료 분배율 변화에 대한 NO_x와 CO의 배출농도 그리고 벽면 온도 분포를 측정하였다. 그 결과 총 연료에 대한 콘으로의 분배율이 3%인 경우 콘에서의 연료 분사방향에 관계없이 노즐내의 예혼합 영역에서 연료가 공기와 균일하게 혼합됨으로서 연소영역의 고온점 감소에 의하여 NO_x 배출농도가 감소된다. 그러나 콘에서 축방향으로 분사되는 연료분배율이 8%로 증가하는 경우 노즐 내부 예혼합 영역으로의 화염 역화로 인하여 NO_x의 배출농도가 오히려 증가하게 된다.

Abstract - Experimental investigations were conducted to understand the multi-staged combustion characteristics of a swirl-stabilized double cone premixed burner nozzle used for industrial gas turbines for power generation. Multi-staged combustion is implemented by injecting the fuel through the existing manifold of the side slots as well as through the apex of the cone with two fuel injection angles which are slanted or axial. NO_x and CO emissions, and wall temperature distributions were measured for various fuel distributions and operating conditions. Results show that NO_x emissions are decreased when the fuel distribution to the apex is 3% of the total amount of fuel, which is due to more uniform fuel distribution inside the nozzle, hence less hot spots at the flame. NO_x emissions are rather increased when the fuel distribution to the apex is 8% of the total amount of fuel for axial fuel injection by occurrence of flash back in premixing zone of burner.

Key words : Double cone type combustor, Jet in cross flow, Partial pre-mixed combustor, Gas turbine combustor, Penetration length, Premixing zone

1. 서론

가스터빈 발전은 석탄이나 원자력 발전에 비하

여 부하 추종성이 우수하지만 엔진 내부는 고온, 고압으로 운전되기 때문에 손상이 심하여 연소기, 터빈 블레이드 등의 고온부품은 일정기간 사용 후 부품을 새로 교체하거나 성능을 개선하여 사용하고 있다. 특히 가스터빈은 성능향상을 위하여 연소실 출구 온도를 높이고 있어 고온부에서 주로 발생

†Corresponding author:haskim@kimm.re.kr

Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

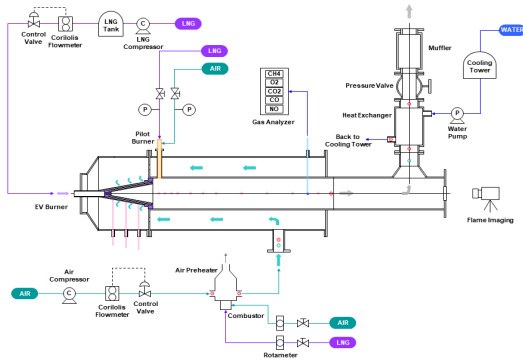


Fig. 2. Schematic of combustion test system

되는 NO_x 배출의 증가가 우려되고 있으며 이에 따라 NO_x 저감 연소기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1-4]

현재 가스터빈 연소기에 주로 이용되는 NO_x 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 중간에서 다량의 공기를 공급함으로써 연소반응을 완료하게 하여 고온 영역을 최소화시키는 방법으로 액상연료를 사용하는 항공기 엔진에 주로 사용되는 기술이다.[5,6] 예혼합 희박연소 방법은 연소 노즐의 예혼합기에서 연료를 공기와 당량비 1이하로 희박하게 예혼합한 후 연소실의 연소영역으로 공급하여 화염대의 국부적 고온부의 발생을 억제시키는 연소방법으로 현재 발전용으로 가장 많이 사용되고 있는 기술이다. 이러한 예혼합 희박연소 화염은 확산화염(Diffusion flame)에 비하여 NO_x의 발생이 억제되지만 연소 영역이 고정되어 있지 않고 화염이 불안정하여 CO의 배출 증가와 화염부상, 연소진동 또는 역화우려가 크다.[7,8]

본 연구의 대상인 발전용 가스터빈용 예혼합 이중 콘형(Double cone-type) 연소노즐은 노즐 내부에 공기와 연료의 예혼합 영역이 존재하는 구조로 되어 있다. 종래의 연구자들은 본 노즐에 대하여 공기/연료의 예혼합도와 NO_x 발생의 상관관계 그리고 화염의 거동에 대하여 주로 수치해석 방법을 통하여 연구를 수행하였다. 연소노즐 경사면의 연료 분사구 배치 및 형상에 따라 연소노즐 내부의 연료/공기 혼합도가 영향을 받으며 예혼합 영역에서 혼합도가 나쁘면 NO_x의 배출이 크게 증가함을 예상하였다.[11,12] 또한 단일화염온도가 큰 경우

화염이 연소노즐 내부로 역화되고 연소진동의 변화가 크게 되는 원인을 규명하였다.[13]

본 연구는 이중 콘형(Double cone-type)의 부분 예혼합 희박 연소노즐의 성능 개선을 목표로 하였다. 기존 노즐의 외형 변경 없이 콘 끝 부분에 새로운 연료 분사구를 설치하였고 기존 노즐에서 경사면에 공급되는 연료를 일부 콘 끝 분사구로 할애했으며 콘 분사구 연료의 분사 방향과 분배비에 대한 연소특성 연구를 수행하였다. 이를 위하여 실험플랜트에 사용되는 이중 콘형 희박 연소노즐에 대한 유동해석을 진행하였으며 콘에 할애되는 각 연료분사 조건에 대한 연소 실험은 상압의 연소용 공기로 온도 370℃, 유량은 0.5 kg/s를 이용하였다.

II. 연소노즐의 구조

실험 대상 연소노즐은 Fig. 1과 같이 발전용 가스터빈 연소기에 사용되는 NG용 저 NO_x 연소노즐이며 콘 절반이 엇갈려 있는 2중원추형으로 연소용 공기는 두 개의 엇갈린 공기 슬롯(slot)을 통하여 접선방향으로 외부에서 연소노즐 안으로 공급되는 구조이다. 연료는 공기 슬롯의 각 경사면에서 동일한 간격과 직경(1.2mm)의 공급구(32개)를 통하여 연소용 공기 흐름에 수직(Jet in cross type)으로 공급된다. Fig. 1에서와 같이 공기에 수직으로 분사되는 연료의 분사구 직경과 유속은 공기 유로내의 연료 침투 거리에 영향을 주게 되어 연소노즐내의 공기/연료의 예혼합 특성에 영향을 준다.[9]

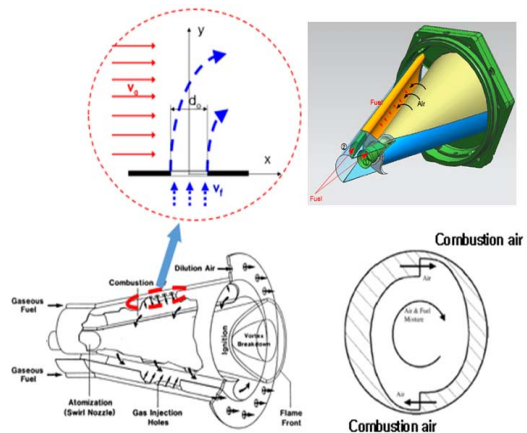


Fig. 1. Schematic of double cone premixed burner nozzle.

III. 실험 장치 및 실험 방법

3.1. 실험 장치

실험장치는 Fig. 2와 같이 연소노즐, 공기 및 가스연료 공급장치 그리고 측정장치로 구성되어 있다. 공기 압축기에서 공급된 연소용 공기는 코리올리스 유량계와 밸브로 유량제어 후 열교환기를 통하여 가열되어 연소기에 공급되게 구성하였다. 연

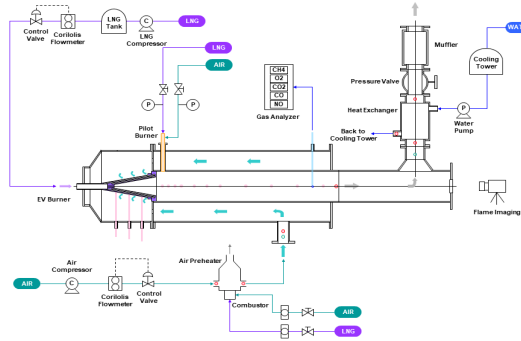
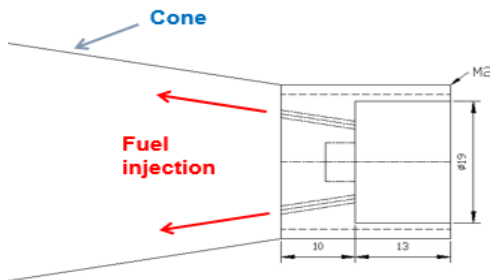
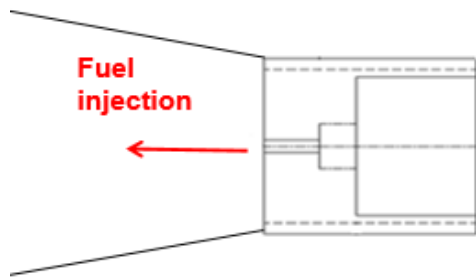


Fig. 2. Schematic of combustion test system



(a) Slanted injection



(b) Axial injection

Fig. 3. Fuel injection configurations through the apex of the cone.

소용 연료는 도시가스 배관에 공급되는 NG를 펌프로 가압하여 사용하였다. 연소실의 내부 직경은 355mm, 길이는 1600mm이며 연소용 공기는 케이싱과 연소실 사이를 연소실 내부 유동과 반대로 흐른 후 연소노즐 입구의 윈드박스에 공급되는 구조로 하여 연소 노즐 입구 연소용 공기의 유동을 균일화하였다. 연소노즐에 공급되는 공기 온도 측정은 윈드박스 내의 K-type의 열전대를 이용하였으며 NOx의 배출은 연소영역의 온도에 크게 영향을 받기 때문에 케이싱 외벽을 100mm의 두께로 단열하는 경우와 외부 노출하는 경우를 비교할 수 있게 하였다. 화염대의 온도분포에 대한 정보를 얻기 위하여 공기/연료의 예혼합 공간인 연소노즐 내부 표면부와 연소실 벽면(두께의 중간지점)에 K-type 열전대를 용착하였다. 배가스 농도 측정을 위하여 포집관을 연소실 출구에 설치하였으며 포집된 가스는 급랭시킨 후 수분제거 후 표준가스로 보정된 가스 분석기(Green line MK2)를 이용하여 NOx, O₂ 그리고 CO 농도를 측정 하였다.[8,9]

연소기의 정확화를 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.

3.2. 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 경사면에 공급되는 기존의 연료 노즐을 콘 끝부분으로 연료를 일부 할애하여 분사하는 다단 분사 방법을 이용하였으며 분배 비율과 분사 방향에 대한 연소특성의 변화를 비교하였다. 연소 노즐 콘 끝 부분으로의 연료 분

Table 1. Fuel injection pattern

	Case1 (Conventional)	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7
Dia.(mm)	-	1.2	1.2	1.5	2.1	2.7	3.4
Hole No.(ea)	-	3	5	5	1	1	1
Fuel ratio(%)	0.0	3.0	5.0	8.0	3.1	5.1	8.0
Direction	-	Slanted	Slanted	Slanted	Axial	Axial	Axial
Shield	O, X	X	X	X	O	O	O

배 비율은 총 분사구 출구의 면적비를 기준으로 계산하여 Table 1에서와 같이 콘 끝에 공급하도록 하였고 연료의 분사방향은 연소노즐의 경사방향(축 방향으로부터 10°)과 축 방향으로 제작하였다. Table 1에서와 같이 case 2 ~ 4는 케이싱 외부 단열을 하지 않았고 case 5 ~ 7은 외부 단열을 하였으며 콘 연료 분사구가 없는 기존 방식인 case 1은 케이싱의 외부 단열과 노즐 두 조건에 대하여 실험을 수행하여 단열 효과에 대한 영향을 예상하였다.

연소 실험은 발전편람을 참고로 하여 실편트 가스터빈 연소기의 단일 연소노즐을 기준으로 제작유량을 고려하여 상압의 연소용 공기 (0.5 kg/s)를 이용하였고 연소용 공기온도는 가스터빈 플랜트의 연소기 입구 공기온도(370°C)와 동일하게 하였다. 연소노즐 내부와 연소실의 내벽 온도 측정은 공기/연료의 질량비를 35로 하였으며 배가스 측정은 연료량의 변화에 대하여 수행하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 비연소 유동 해석

Fig. 4는 연소노즐에 대하여 공기량 0.5kg/s, 공기 온도 370°C인 경우 CFD-ACE+ 상용프로그램 (mesh 2,500,000ea)을 이용한 비연소 유동해석 결과이다.[10] 연소노즐 공기 슬롯 하류 끝 단면의 유속 분포 결과인 Fig.4 (a)의 점선부에서 보면 바깥으로 갈수록 유속이 감소됨을 알 수 있으며 슬롯 바깥부에서 인입된 유동은 연소노즐 표면을 따라 선회유속이 증가되며 연소노즐의 중심으로 갈수록 선회유속이 감소됨을 알 수 있다. Fig.4 (b)의 연소노즐 측면의 유속 분포 결과로부터 축 중심부는 선회유동에 의한 재순환 유동이 발생됨을 알 수 있다. Eq. (1)로부터 선회수 (S, Swirl Number)는 0.78이며 연소시에는 연소노즐 내부로 역류되는 고온의 연소생성가스가 화염을 안정화시키는 역할을 한다.

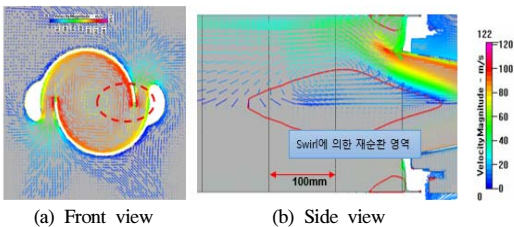


Fig. 4. Cold flow simulation of a double cone burner nozzle

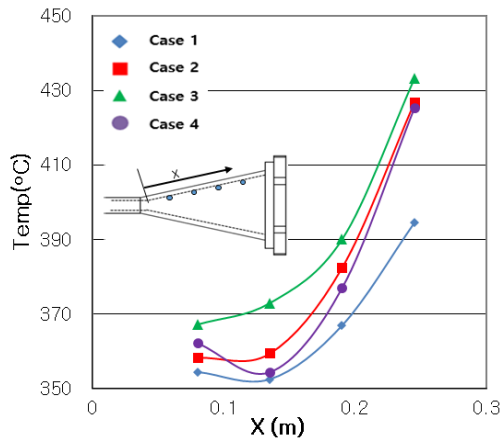
$$S = \frac{G_{\theta}}{G_x R} = \frac{\text{tangential momentum}}{\text{axial momentum}} \quad (1)$$

$$G_x = \int_0^R \rho u_x^2 r dr, \quad G_{\theta} = \int_0^R \rho u_x u_{\theta} r^2 dr$$

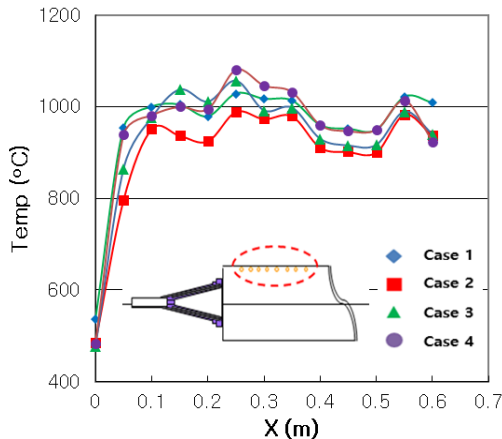
4.2. 연소 특성 실험

Fig. 5는 Table 1의 case 1 ~ case 4의 연료 분사 방식을 연소노즐의 경사면 방향으로 분사하는 경우 공연비 35에 대한 연소노즐과 연소실 내부 표면의 온도분포이다. Fig. 5 (a)의 결과로부터 연소노즐의 상류 부분은 공급 연소용 공기보다 온도가 낮는데 이는 Fig. 1에서 예상되었듯이 슬롯에서 분사된 연료가 노즐 내부 표면을 냉각시키기 때문이며 각 case에서 하류의 연소영역에 접근할수록 온도가 증가하는 것으로 판단된다. 슬롯에서 모든 연료가 경사면에서 분사되는 case 1의 온도가 제일 낮게 분포하게 되며 case 2와 case 3의 경우 콘 부분의 연료 분사량이 증가되면서 상대적으로 경사면으로 공급되는 연료량의 감소로 노즐 내부 벽면 온도가 증가되는 것으로 판단된다. 그러나 콘 연료 분사량이 8%로 증가한 case 4의 경우 case 2와 case 3에 비하여 낮은 표면 온도분포를 보인다. 그 이유는 case 4의 경우 경사면 방향으로의 연료량이 많으며 연료 분사구 직경이 크기 때문에 연료의 침투거리가 커서 콘에서 분사된 연료가 경사면을 냉각시키는 효과가 상대적으로 크기 때문으로 판단된다. Fig. 5 (b)의 결과로부터 연소실 벽면의 최고 온도는 연소노즐 출구로부터 0.3m 부분이다. 그리고 연소노즐 경사방향으로 연료의 침투거리와 유량이 가장 큰 case 4의 온도가 가장 높으며 동일 분사 직경인 case 2와 case 3의 경우에는 case 2의 경우 총 분사면적 감소로 인한 연료의 분사 유속증가로 연료의 침투거리가 약 2% 상승되지만 이 영향보다는 연료량이 상대적으로 많은 case 3의 벽면 온도가 높게 된다.[9]

Fig. 6은 Table 1의 case 1 ~ case 4의 연료 분사 방식을 이용한 연료량 변화에 대한 NOx와 CO의 배가스 분석결과이다. Fig. 6에서 x 좌표는 배가스 O2를 나타낸 결과로 O2가 9%, 14%인 경우 공기/연료의 질량비는 각각 28.4와 47.5이다. Fig. 6 (a)의 결과로부터 각 case에 대하여 연료량 증가로 배가스 O2의 농도가 감소할수록 NOx의 배출 농도가 대체로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 공급 연료량이 증가할수록 연소영역의 온도가 증가 하여 고온영역에서 주로 발생하는 Thermal NOx의 발생량이 증가하기 때문이다. Fig. 6 (a)의 결과로부터 콘으로의 연료분배가 3%인 case 2의 경우 NOx의 배출이



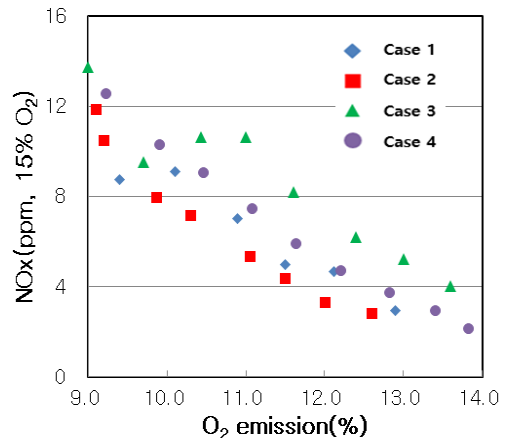
(a) Interior cone surface



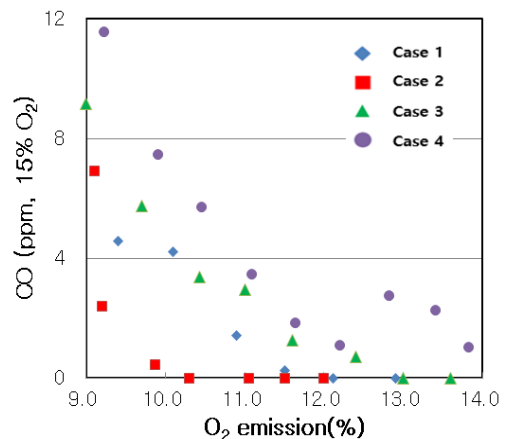
(b) Liner wall

Fig. 5. Measured temperature distributions

가장 적게 되는데 Fig. 1에 나타난 바와 같이 슬롯에서 공기로의 연료 침투거리가 감소되지만 이보다는 노즐 내부 연료의 분산효과가 커 예혼합 특성이 좋아지기 때문에 판단된다. 그러나 case 3의 경우 NOx 배출의 증가는 슬롯에서의 연료량 감소로 연료침투거리 감소에 의한 혼합특성이 저하되기 때문이다. 연료 침투거리가 가장 큰 case 4의 경우는 콘에서 분사되는 연료가 재순환 영역의 외부 유로를 따라 유동되어 주연소 영역을 지나쳐버리기 때문에 주 연소 영역의 온도가 낮아져 case 3에 비하여 NOx의 배출이 감소되는 것으로 판단된다. Fig. 6 (b)의 CO 배출 농도의 결과로부터 모든 경우에 대하여 배가스 O₂가 감소할수록 산화제 감소로 인하여 CO의 배출 농도가 대체로 증가하는 경향을



(a) NOx



(b) CO

Fig. 6. The dependence of NO and CO emissions on the exhaust O₂

보인다. Case 2의 경우 CO의 배출이 가장 적은 것은 Fig. 6 (a)에서 언급하였듯이 연료의 분산효과로 연료로의 산화제 공급이 원활하기 때문으로 판단된다. 그리고 콘에서 분사되는 연료의 침투거리가 가장 큰 case 4의 경우 연료가 주 연소 영역을 지나치기 때문에 CO의 배출이 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 케이스를 단열하여 Fig. 5와 동일한 방법으로 수행한 case 1과 연료의 분사각을 축 중심 방향으로 한 case 5 ~ 7에 대하여 연소노즐과 연소실 내부 표면의 온도 분포를 나타낸 결과이다.

Fig. 7 (a)와 Fig. 6 (a)의 비교로부터 동일한 연료 분배의 경우인 Fig. 7 (a)의 case 5와 6은 Fig. 6 (a)의 case 3, 4와 비슷한 온도분포를 보이지만 case 7은

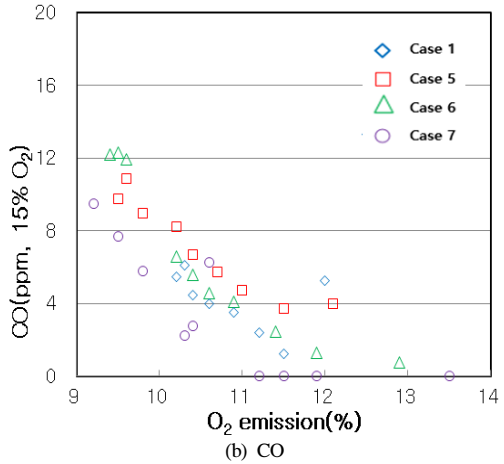
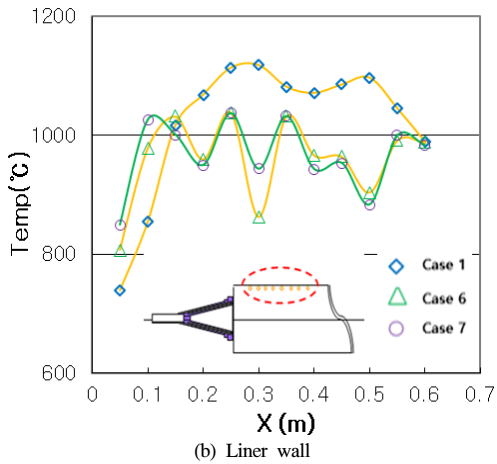
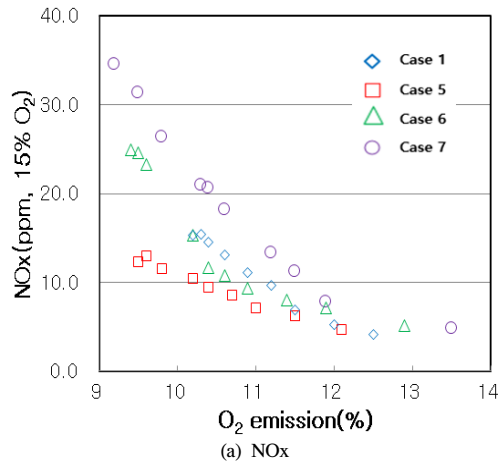
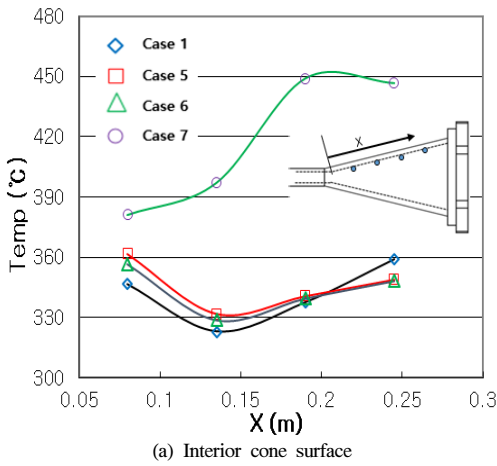


Fig. 7. Measured temperature distributions (Casing insulated)

Fig. 8. The dependence of NO and CO emissions on the exhaust O₂ (Casing insulated)

case 4의 경우와 다른 온도분포를 보인다. Case 7의 경우 축 중심 방향으로 분사되는 연료량이 많고 침투거리가 크기 때문에 Fig. 4에 나타난 바와 같이 노즐 중심부로 유입되는 고온의 재순환가스에 의하여 점화되어 노즐 내부 표면온도가 급격히 상승하는 것으로 판단된다. 케이싱이 단열된 Fig. 7 (b)와 Fig. 5 (b)의 case 1 비교로부터 케이싱을 단열하는 경우 외부로의 열손실 억제로 연소실 내벽의 최고 온도가 90°C 정도 상승 되는 것을 알 수 있으며 Fig. 7 (b)의 case 1에 비하여 case 6과 7은 연소노즐 중심축 방향으로 분사되는 연료량 증가로 고온 영역이 중심 축방향 으로 이동하여 연소실 벽면 온도는 낮게 된다.

Fig. 8은 case 1과 case 5 ~ 7을 이용한 상태에서의 연소실험 결과이다. Fig. 8 (a)과 Fig. 6 (a)의 case 1 비교로부터 케이싱을 단열하는 경우 연소영역의 온도 상승으로 인하여 NOx의 배출이 증가됨을 알 수 있다. 연료분배가 3.1%인 case 5의 경우 Fig. 6의 결과에서와 같이 NOx 배출이 가장 적음을 알 수 있으며 case 7의 경우 NOx의 배출이 가장 크게 되는데 이는 슬롯에서 연료의 예혼합 특성 저하뿐만 아니라 Fig. 7에서 언급한 바와 같이 콘에서 단일 연료 분사구를 통해 분사된 연료가 노즐 출구에서 예혼합 연소되지 않고 연소노즐 내부로 역화되어 고온의 연소영역을 형성하기 때문으로 판단된다. Fig. 8 (b)의 CO 배출 농도의 결과로부터

case 7의 경우 CO의 배출이 가장 적게 되는 것은 연소노즐 내부에서 안정된 화염이 형성되기 때문으로 판단된다. 그러나 상대적으로 적은 양의 연료가 콘에서 공급되는 case 5와 case 6의 경우 재순환 가스의 연료 희석 등으로 콘에서 분사된 연료가 안정된 화염을 형성하지 못하여 전반적으로 높은 CO의 배출 농도를 보이게 된다.

V. 결론

본 연구에서는 발전용 가스터빈에 사용되는 이중 콘형의 예혼합 희박 연소방식의 저 NO_x 가스터빈 연소기노즐의 성능개선을 위하여 비연소 유동 해석을 수행하였으며, 연료를 콘으로 일부 할애하였고 축방향과 노즐 경사면방향으로 분사하여 다단연소 특성 실험을 수행하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연소노즐은 선회유동의 선회수가 0.78로 예상되었다.
- (2) 공연비가 커지게 되면 NO_x와 CO의 배출이 감소되며, 연소실 케이싱을 단열하는 경우 연소실 온도가 상승하고 NO_x의 배출도 증가한다.
- (3) 콘으로의 연료 분배에 의한 다단 연소는 콘에서 분사되는 연료량과 방향에 따라 연료/공기의 혼합도와 화염대의 위치가 이동되어 NO_x와 CO의 배출이 변하게 된다.
- (4) 콘으로의 다단 연소 방법은 콘 분배율이 3% 이내인 경우 분사 방향에 관계없이 NO_x의 배출이 저감되지만 축 방향으로 8% 연료가 분사되는 경우 예혼합영역인 노즐 내부에 고온의 연소 영역이 형성되어 NO_x의 배출이 증가하며 CO의 배출은 감소한다.

감사의 글

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

REFERENCES

- [1] Lefebvre, A., H., "Gas Turbine Combustion.", McGraw-Hill, (1983)
- [2] Mellor, A. M., "Design of Modern Turbine Combustor.", Academic Press, (1990)
- [3] H. Cohen, G. F. C. Rogers, H. I. H. Saravannamutto, "Gas Turbine Theory(3th)", Longman Scientific & Technical, (1987)
- [4] Fenimore CP, "Studies of fuel-nitrogen in rich flame gases.", *17th Proc. Combust. Institute*, 17(1), 661-669, (1979)
- [5] Alan S. Feitelbery, Michael A. Lacey, "The GE Rich-Quench-Lean Gas Turbine Combustor", *ASME 97-GT-127*, (1997)
- [6] Peter Griebel, "Experimental Investigation of an Atmospheric Rectangular Rich Quench Lean Combustor Sector for Aeroengines", *ASME 97-GT-146*, (1997)
- [7] Northern Research and Engineering Corporation, Woburn, Massachusetts, U.S.A., "The Design and Development of Gas Turbine Combustors", (1980)
- [8] Kim HS, Lim AH, Ahn KY., "Study on the combustion characteristics of a lean premixed combustor." *Journal of Korean Society of Combustion*, 9, 25-31, (2004)
- [9] Han S. Kim, Vaibhav K. Arghode and Ashwani K. Gupta, "Combustion characteristics of a lean premixed LPG-air combustor", *I. J. Hydrogen Energy*, 34, 1045-105, (2009)
- [10] CFD-ACE+, Ver, (2009)
- [11] Cheon Hyeon Cho, Gwang Min Baek, Chae Hoon Sohn, Ju Hyeong Cho, Han Seok Kim, "A numerical approach to reduction of NO_x emission from swirl premix burner in a gas turbine combustor", *Applied Thermal Engineering* 59, 454-463, (2013)
- [12] Fernando Biagioli, Felix Gu, "Combustion dynamics linked to flame behaviour in a partially premixed swirled industrial burner", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 1344-1353, (2008)
- [13] Fernando Biagioli, Felix Gu, "Effect of pressure and fuel-air unmixedness on NO_x emissions from industrial gas turbine burners", *Combustion and Flame*, 151, 274-288, (2007)