

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.11.849

모형 가스터빈 연소기에서의 스윙수와 혼합길이에 따른 화염구조와 NO_x배출에 관한 실험적 연구

최도욱* · 김규보** · 전충환† · 송주헌** · 장영준**

(2009년 4월 27일 접수, 2009년 10월 6일 수정, 2009년 10월 8일 심사완료)

The Study on Flame Structure and NO_x Emissions by Swirl Numbers and Fuel-Air Mixing Length in a Dump Combustor Gas Turbine

Do Wook Choi, Gyu Bo Kim, Ju Hun Song,
Young June Chang and Chung Hwan Jeon

Key Words: Mixing Degree(혼합 정도), Swirl Number(스윙수), Equivalence Ratio(당량비), OH* Chemiluminescence(OH* 자발광), Mixing Length(혼합 길이)

Abstract

The experimental study was performed to investigate the effects of partial premixing, varying the equivalence ratio, mixing degree, swirl intensity, mixing length on the characteristics of flame structure and NO_x emission. Experiments were conducted in a dump combustor at 1 bar using methane as fuel. Inlet air temperature was 570K. OH chemiluminescence images were acquired with an ICCD camera. As a result of the experimental investigation of characteristics of flame and NO_x emission in partial premixed combustor, we can conclude the results as below. With the increase of swirl number, The flame length decreases and the flame width increases and it helps flame stabilization. It means that lean flammability limit is extended. With the increase of mixing of fuel-air length ratio, Flame goes to be stabilized and NO_x emission and OH* intensity decrease. Through the comparison of preceding results, It is possible that the exhausted NO_x emission from a gas turbine combustor will be able to predict through the OH* intensity.

1. 서 론

최근 가스터빈 연소에서 가장 문제가 되며 제어가 어려운 배기 배출물은 NO_x이다. NO_x 생성은 온도에 지배적이며 CO 생성과는 서로 반대되는 특성을 지니고 있다.⁽¹⁾ 이러한 NO_x는 각 나라마다 강해지고 있는 NO_x 배출규제로 인하여 차세대 가스터빈의 연구들은 고성능 및 저배기에 집중되고 있다.

연소기의 성능과 배출특성을 결정하는 주요한

요인으로는 연료-공기 혼합정도, 당량비, 혼합 공기 온도, 스윙 강도 등이 있다. 하지만 연소기의 성능은 좌우하는 주요소는 온도로써 온도가 증가하면 다량의 NO_x를 배출하는 특성을 가지고 있습니다. 이렇게 성능과 배기 배출물은 상반된 경향을 가지기 때문에 최적의 성능을 위해서는 앞서 언급한 주요한 요인들을 적절한 제어를 통해 성능과 배출물을 최적화 할 수 있는 연구가 필요하다.⁽²⁾

화염 구조 및 배기 배출물의 특성과 관련한 연구는 일반적으로 연료와 공기의 초기 상태에 의해 결정되는 확산 화염과 예혼합 화염에 관한 연구가 주를 이루었다. 하지만 실제 연소시스템, 특히 가스터빈, 디젤엔진, 연소로에서 빈번하게 부분 예혼합 화염의 형태가 발생한다. 이 부분 예혼합 화염은 확산 화염에 비하여 배기 배출물의 수준이 낮고 회박 예혼합 화염보다 안정적인 상태를

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, PC³

E-mail : chjeon@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3051 FAX : (051)582-9818

* 부산대학교 기계공학부 대학원, 기계기술연구원

** 부산대학교, 화력발전에너지분석센터(PC³)

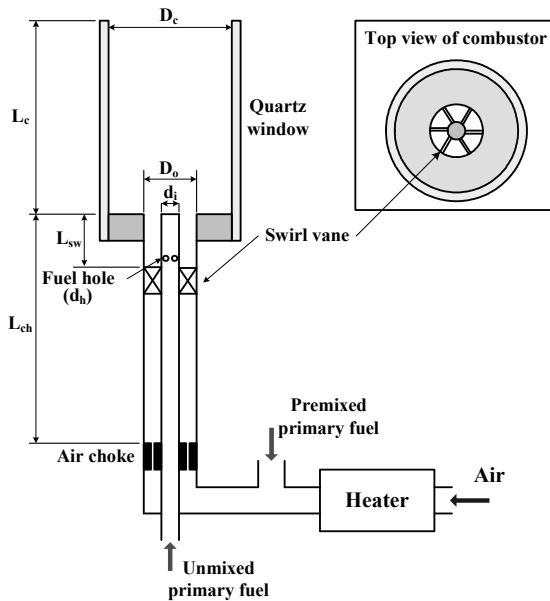


Fig. 1 Schematic of the dump combustor

가지는 장점으로 인해 환경문제에 대한 관심 고조와 함께 배기 배출물의 저감에 한 방법으로 연구되어지고 있다.⁽³⁾

Gore 등⁽⁴⁾은 층류 부분 예혼합 화염에서 내부관의 공기를 증가시킴으로 당량비의 변화에 따른 NOx가 최소가 되는 영역의 존재를 확인하였고, 또한 난류 부분 예혼합 화염을 변화함으로써 NOx를 최소화할 수 있는 영역을 확인하였다. 이를 OH*와 CH*를 이용하여 NOx와의 밀접한 관계를 연구하였다.

Cheng 등⁽⁵⁾은 스월을 적용한 부분 예혼합 화염에서 체류시간에 따른 EINOx와 EICO등의 전체적인 배기배출물의 생성률(global pollutant production rate)은 예혼합 공기가 증가할수록 화염의 길이와 화염 온도의 증가, 그리고 연소 영역의 강화로 배기 배출물의 생성률이 증가한다고 하였다.

Santoro 등⁽⁶⁾은 스월러를 설치한 덤프 연소기에서 안정 영역과 불안정 운전 조건에서 PLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence)를 통한 화염 단면 구조와 OH 자발광을 이용하여 화염 구조를 살펴보았다. 또한 국소 레일라이 지수를 통해 연소 불안정을 증가/소멸 시키는 구역에 대한 정보를 제공하였다.

Zinn 등⁽⁷⁾은 소형 저 NOx 가스터빈 연소기에서 불안정 영역과 안정영역에 대한 Map을 구하였으며, 위상에 따른 선 적분 된 CH 자발광과 화염이 축대칭이라는 가정 하에서 그를 아벨 변환한 결과

Table 1 List of the combustor dimensions

Dimension	Value[mm]
Chamber length, L_c	410
Chamber diameter, D_c	42
Outer tube length, L_o	500
Outer tube diameter, D_o	12.5
Inner tube diameter, d_i	8
Axial swirler location, L_{sw}	50
Choked location, L_{ch}	400
Mixing distance, L_{mix}	24, 40, 56
Fuel injection hole, d_h	1

와 비교하여 화염구조를 살펴보았다.

Muruganadam 등⁽⁸⁾은 스월 덤프형 가스터빈 연소기에서 자연적으로 발생하는 자발광을 이용하여 연소기의 상태를 진단 혹은 모니터링 할 수 있다고 보고하였다. 또한 CH/OH 자발광의 비로서 국소 당량비를 구하였는데, 이는 연료-공기 혼합과 열 방출의 비 균일성이 연소기 출구에서 비균일한 온도분포를 초래하고 NOx 배출물을 증가시킬 수 있다고 보고하였다.

Venkataraman 등⁽⁹⁾은 bluff-body 보염기를 가지는 모형 가스 터빈 연소기에서 LPP 조건시 당량비, 입구 속도, 입구 연료 분포, bluff-body 중심 위치, 스월을 매개변수로 하여 연구를 수행하였다. 스월이 없는 경우 당량비와 입구 속도가 증가할수록 연소 불안정성이 증가하였고, bluff-body의 중심위치가 덤프면에서 안쪽으로 들어갈수록 안정한 연소가 발생한다고 하였다. 연료분포 역시 연소에 상당한 영향을 끼쳤으며, 스월은 높은 당량비에서는 화염을 안정시키지만 희박연소한계에 가까운 당량비에서는 연소불안정성을 야기하는 역할을 한다고 하였다.

따라서 본 연구에서는 고효율 및 저공해 가스터빈 연소기의 개발에 필요한 기초자료를 제공하기 위하여 가스터빈 연소기를 모사한 모형 가스터빈 연소기를 통하여 연료-공기 혼합정도, 당량비, 혼합 길이, 스월 강도가 화염구조 및 NOx 배출특성에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 연소기

실험 장치의 구성은 크게 연소기와 데이터 취

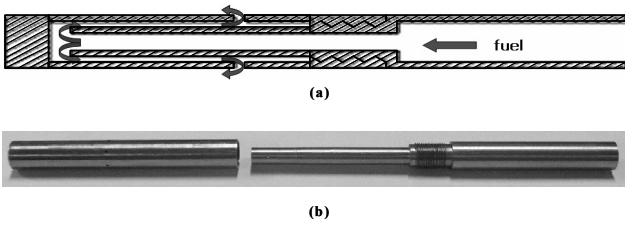


Fig. 2 (a) Schematic of fuel nozzle
(b) Photograph of fuel nozzle

특부로 나눌 수 있다. Fig. 1은 본 연구에서 사용되어진 연소기의 개략도를 나타내었으며 또한 연소기의 치수는 Table 1과 같다. 연소부는 광학적 접근이 가능하도록 석영관을 사용하였으며 혼합부와는 어댑터로 연결하였다. 석영관과 어댑터 사이는 연소로 인한 열팽창을 고려하여 0.5mm의 공간을 두었으며, 이 공간은 석면으로 밀봉하여 석영관과 어댑터를 연결하였다.

연료-공기의 혼합 정도(mixing degree, σ)의 효과를 살펴보기 위해 연료를 두 위치에서 혼합부에 공급하였다. 하나는 히터를 통과한 예열공기와 바로 혼합되어 공급되며, 다른 하나는 직경(d_b) 8mm의 연료노즐을 통해 덤프면으로부터 상류방향으로 24mm, 40mm, 56mm가 되는 위치에서 지름(d_h) 1mm인 6개의 구멍을 통해 원주 방향으로 초킹된 후 공급된다. 연료가 공급되는 연료 노즐의 설계는 Seonghyeon Seo⁽¹⁰⁾의 연구를 참고하였으며, 그 개략도는 Fig. 2와 같다. 연료-공기 혼합 정도는 각 위치에서 공급되는 연료의 질량유량의 비로써 정의하며 그 정의는 식 (1)과 같다.

$$\sigma = \left(1 - \frac{Q_{inertube}}{Q_{total fuel}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

연료는 연료-공기 혼합정도(σ)가 100, 50, 0%의 조건으로 공급되며, 모든 연료가 공기와 예혼합된 상태에서 공급되는 경우를 $\sigma = 100\%$, 모든 연료가 안쪽관의 6개의 구멍을 통하여 공급되는 경우를 $\sigma = 0\%$ 로 정의한다. 그러나 $\sigma = 0\%$ 의 화염이 확산 화염을 의미하지는 않는다. 왜냐하면, Fig. 1에서 보듯 안쪽관의 연료 공급 구멍이 덤프면으로부터 L_{mix} 거리에 위치하기 때문에 연료가 연소실로 들어오기까지 L_{mix} 까지 약간의 혼합은 이루어지기 때문이다. 연료-공기 혼합길이

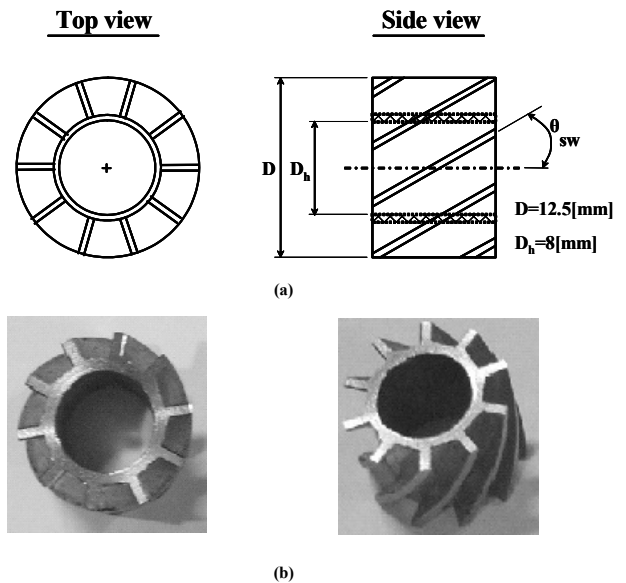


Fig. 3 (a) Schematic of the vane swirler
(b) Photograph of the vane swirler

는 L_{mix} 와 L_{sw} 되며 그 정의는 식 (2)와 같다.

$$M_i = \frac{L_{mix}}{L_{sw}} \quad (2)$$

식 (2)을 통하여 계산된 연료-공기 혼합 길이정도는 연료-공기 혼합 길이가 8mm, 24mm, 40mm 일 때 M_i 는 0.16, 0.48, 0.8이 되게 된다. 또한 이 실험에서 실제 가스터빈의 흡입공기 온도 (180~630 °C)와 유사한 조건에서 실험을 수행하기 위해 발열용량 3kW인 히터를 사용하여 혼합부 끝단에서의 혼합기 온도가 일정하게 유지되도록 하였다.

본 연구에 사용된 스윙러는 15°, 30°, 45°이다. 스윙각(θ_{sw})은 Fig. 3에 나타난 것처럼 스윙러의 축과 날사이의 각으로 정의된다. 스윙각에 따른 스윙 강도는 스윙수(Swirl number, S_n)로 정의한다. 스윙수는 Gupta 등⁽¹¹⁾이 선회기의 형상에 기초해서 정의한 식을 이용하였다. 그 식은 다음과 같다.

$$S_n = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (D_h/D)^3}{1 - (D_h/D)^2} \right] \tan \alpha \quad (3)$$

위의 식에 의해 계산된 스윙수는 스윙각이 각각

Table 2 List of experiment condition

Dimension	Value[mm]
Fuel	CH ₄
Inlet air temperature [K]	570
Equivalence ratio	0.6, 0.66, 0.73, 0.79, 0.85
Mixing degree [%]	0, 50, 100
Swirl number	0.21, 0.48, 0.8
Mixing length ratio	0.16, 0.48, 0.8

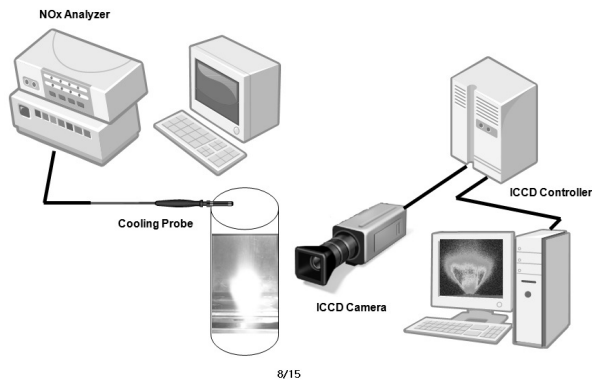


Fig. 4 Schematic of experimental setup

15°, 30°, 45°일 때 0.21, 0.48, 0.8이 된다.

2.2 실험 장치 및 조건

스윙 강도에 따른 화염구조의 특성 및 배기 배출물을 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 측정 장비를 구성하였다. 탄화수소 화염 내에서 CH*, C2*, OH*은 국소 열 방출과 전체 열 방출을 나타내는 지표로 사용되어 왔다. OH*을 당량비 변화에 대한 지표⁽¹²⁾ 또는 열 방출의 지표⁽¹³⁾로 실험한 선행연구를 바탕으로, 본 연구에서도 비교적 강도가 강하고 측정이 용이한 OH*을 사용하였다. 따라서 화염 구조 특성을 확인하기 위하여 ICCD 카메라의 렌즈에 OH* 대역필터를 장착하여 OH* 이미지를 획득하였다.

배기 배출물을 측정하기 위해 쿨링프로브를 사용하였다. 내경은 4mm이고 선단의 흡입구경은 1.5mm의 스텐레스 3중 수냉관 구조로서, 흡입된 연소 가스는 냉각되어 프루브내에서 반응이 일어나지 못하도록 하였다. 배기중의 성분은 NOx를 대상으로 하였다. 프루브를 가시화창의 끝단의 정

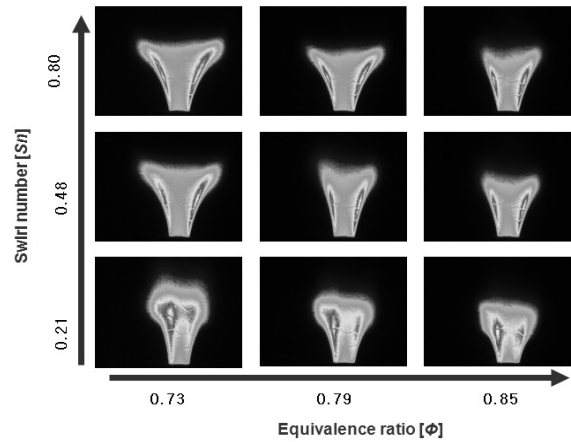


Fig. 5 Flame structures for different swirl number equivalence ratio(M₁=0.48, σ=100%)

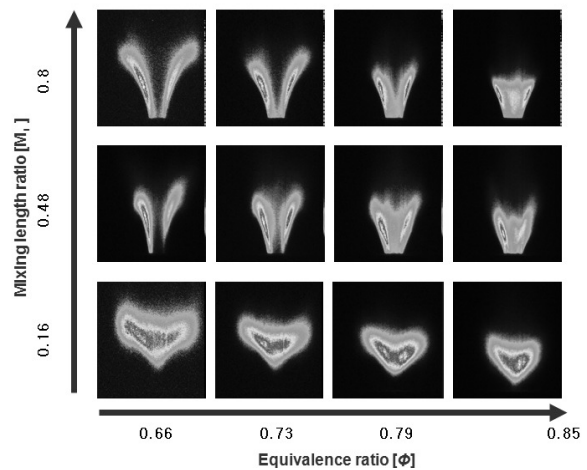


Fig. 6 Flame structures for different mixing length ratio and equivalence ratio (S_n=0.8, σ=0%)

중앙에 설치하여 배기 배출물을 획득한 후 가스 분석기를 통하여 특성을 확인하였다.

실험조건은 Table 2와 같다. 실험변수로는 희박 영역에서 당량비, 확산 화염과 예혼합 화염의 특성을 확인하기 위한 연료-공기 혼합정도, 연료 분사홀의 위치에 따른 특성을 파악하기 위한 연료-공기 혼합 길이, 재순환 영역을 형성시키는 스윙 강도와 같은 실험조건을 두어 전체적인 화염 구조 및 NOx 배출의 특성을 파악할 수 있도록 하였다. 또한 고정 변수로는 연료를 메탄, 공기 온도는 570K로 실제 가스터빈에 사용되는 유사한 특성을 지닐 수 있도록 히터를 통해 가열하였다. 라이너 내부에서 노즐 출구의 분사속도는 당량비의 변화에 따라 5.3m/s에서 7m/s까지 변화시켜 실험을 하였다.

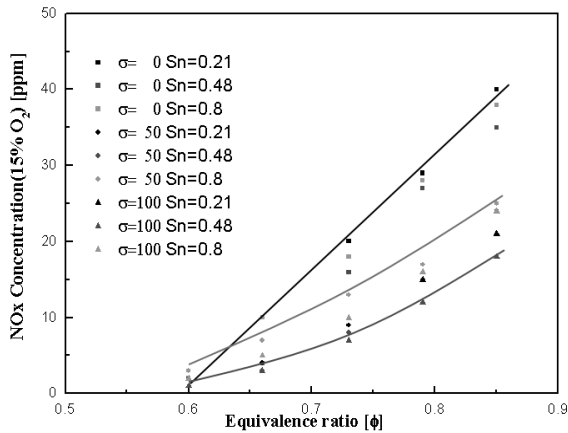


Fig. 7 NOx emission performance of dump combustor ($M_1=0.48$)

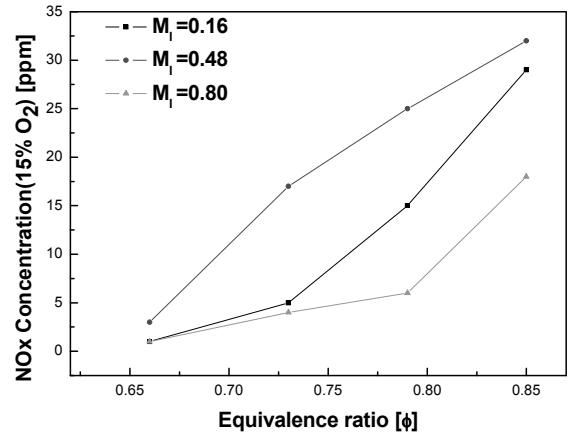


Fig. 8 NOx emissions as a function of fuel-air mixing length ratio ($S_n=0.8$, $\sigma=0\%$)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 화염 구조

본 실험에서 화염의 구조적 특성을 파악하기 위해 OH 자발광을 통하여 화염의 구조를 분석하였다. Fig 5는 연료-공기 혼합 길이 비를 0.48, 연료-공기 혼합정도를 100%로 고정시킨 상태에서 스윙 강도 및 당량비에 따른 화염의 특성을 보여 주고 있다.

여기서 당량비는 연료의 양을 고정시킨 후 산화제인 공기의 양을 통하여 조절하였고, 이는 다시 말해서 당량비가 증가 할수록 출구의 유속은 떨어진다는 것을 의미하게 된다. 따라서 당량비가 증가함에 따라 화염길이도 줄어들어 가는 것을 확인 할 수가 있다. 또한 스윙 강도가 증가하게 되면 반경 방향으로 화염의 폭은 증가하고 화염의 주반응대 또한 반경 방향으로 분포되어 있다. 이것은 스윙러의 영향에 의해 스윙 강도가 커짐에 따라 축 방향으로 발생하던 유동 속도가 반경 방향으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 스윙 강도에 따라서 화염의 길이와 폭이 변하기 때문에 챔버의 크기와 폭에 따라서 적절한 스윙 강도가 필요하다는 것을 알 수가 있다.

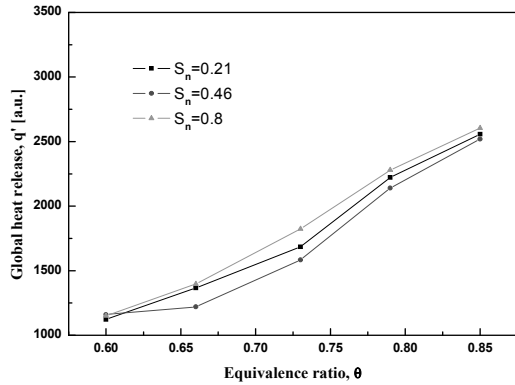
Fig. 6은 연료-공기 혼합 길이 비와 당량비에 따른 화염 특성을 보여주고 있다. 스윙수를 0.8로 고정시킨 후 예혼합 연소인 경우에는 미리 연료와 공기가 혼합되어지기 때문에 연료-공기 혼합 길이 비에 대한 특성이 중요하지 않으므로 연료-공기 혼합 길이 비에 따른 특성에 영향을 받는 확산 화염에서 가장 가까운 조건에서 그 특성을

알아보기 위하여 연료-공기 혼합 정도를 0%로 고정시켰다. Fig. 6에서도 Fig. 5와 같이 당량비가 증가하게 되면 화염의 길이가 줄어들어 가는 것을 확인할 수 있다. 그리고 연료-공기 혼합 길이 비가 작아진다는 의미는 화염의 확산 화염에 가깝다는 것을 의미하게 되는데 연료-공기 혼합 길이 비가 0.16인 경우에는 화염이 노즐에 착화되지 않고 부상 화염이 형성되어져 있는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 연료와 공기가 노즐 출구 근방에서 혼합되는 것으로 짧은 혼합 길이로 인해 혼합이 원활하게 이루어지지 못하게 되고 결과적으로 반응이 느려져 화염이 부상되는 특성을 나타내는 것으로 사료된다. 연료-공기 혼합 길이 비가 커질수록 화염이 반경 방향으로 커지는 것을 알 수가 있는데 이는 연료-공기 혼합 길이 비가 길수록 측면에서 공급된 연료가 스윙에 대한 효과를 많이 받아 반경 방향으로의 모멘텀(momentum)이 나타나는 것으로 판단된다.

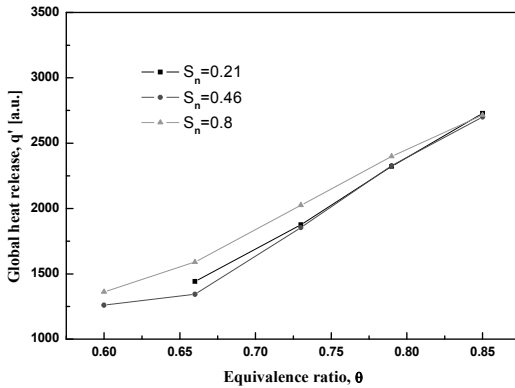
4.2 NOx 및 OH 자발광

4.2.1 NOx 특성

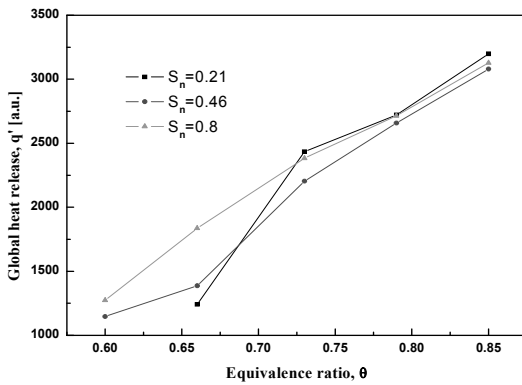
스윙 강도 및 연료-공기 혼합 정도에 따른 NOx 배출 변화 특성을 알아보기 위하여 스윙수 및 연료 공기 혼합 정도를 변화시켜가며 NOx 농도를 측정하였다. Fig. 7은 연료-공기 혼합 길이비를 0.48로 고정시킨 후 실험한 결과이다. 전체적으로 당량비가 희박 영역에서 이론 당량비 영역으로 증가할수록 NOx 배출 농도는 증가하는 것을 알 수가 있으며, 또한 연료-공기 혼합 정도는 적을수록 즉, 예혼합에서 확산 화염의 방향으로 갈수록



(a) $\sigma = 100\%$



(b) $\sigma = 50\%$



(a) $\sigma = 0\%$

Fig. 9 Global heat release with effect of swirl number in different methane-air mixing rate ($M_I=0.48$)

NO_x 배출 농도가 증가하는 것을 알 수가 있다. Fig 7에서 보여주는 NO_x 증가 추이 그래프에서 연료-공기 혼합정도가 적을수록 당량비 증가에 따른 NO_x가 증가하는 폭이 커지는 것을 보여주고 있다. 여기서 확인할 수 있듯이 희박 영역에서 예혼합 조건이 NO_x 배출을 최소화 시키는 방법이라는 것을 확인할 수 있다.

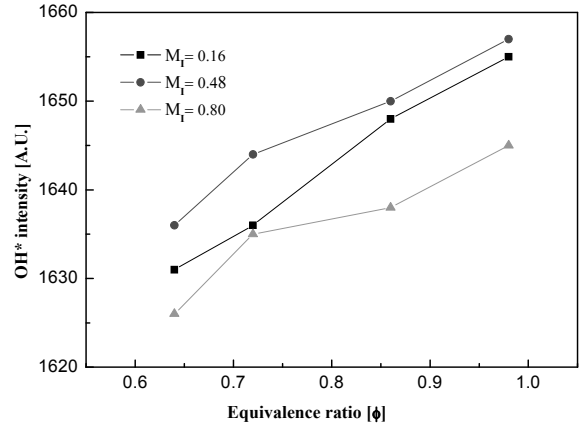


Fig. 10 Global heat release with effect of mixing length ratio($S_n=0.8, \sigma=0\%$)

이렇게 확산화염에 가까울수록 NO_x가 증가하는 것을 확인할 수 있는데 이는 국부적인 열점(hot spot)에 의한 Thermal NO_x의 증가가 하나의 원인이다. 이는 Thermal NO_x 생성의 원인이 되고 억제하는 방법으로는 희박한 공기에 의해 산소농도가 낮아지고 연료와 산소의 반응, 즉 연소속도를 지연시켜서 화염의 최고온도를 저하시켜 NO_x 생성을 억제한다. 이 방법은 Thermal NO_x에 대한 저감 효과는 있다. 이러한 방법을 이용할 경우 국부적인 열점을 줄일 수 있다.

Fig. 8에서는 확산 화염에 가까운 연료-공기 혼합정도가 0%일 때에 스윙수 0.8로 고정을 시킨 후 연료-공기 혼합 길이 비에 따른 NO_x 배출 농도를 표현하였다. 연료-공기 혼합 길이 비가 0.16인 경우에는 Fig. 6과 같이 화염이 안정화되지 못하고 부상 화염을 나타내고 있으므로 NO_x 배출량 비교 하는데 무리가 있으므로 0.48인 경우와 0.8인 경우를 비교를 하면 NO_x 배출 농도는 연료-공기 혼합 길이 비가 클수록 작아지는 것을 확인할 수가 있다. 이는 비가 클수록 예혼합 화염에 가까워지기 때문이다.

4.2.2 OH* 강도

본 연구에서 전체 열 방출량의 특성을 알아보기 위하여 OH 자발광을 이용하여 그 변화의 특성을 알아보았고, NO_x와의 상관관계를 확인하였다. Fig. 9는 전체 열 방출량이 연료-공기 혼합 정도에서 당량비 증가와 스윙 강도가 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 실험한 결과이다. 스윙 강도에 따른 열 방출량은 연료-공기 혼합 정도가 50%, 100%일 때에 스윙수가 0.46인 경우에는 모

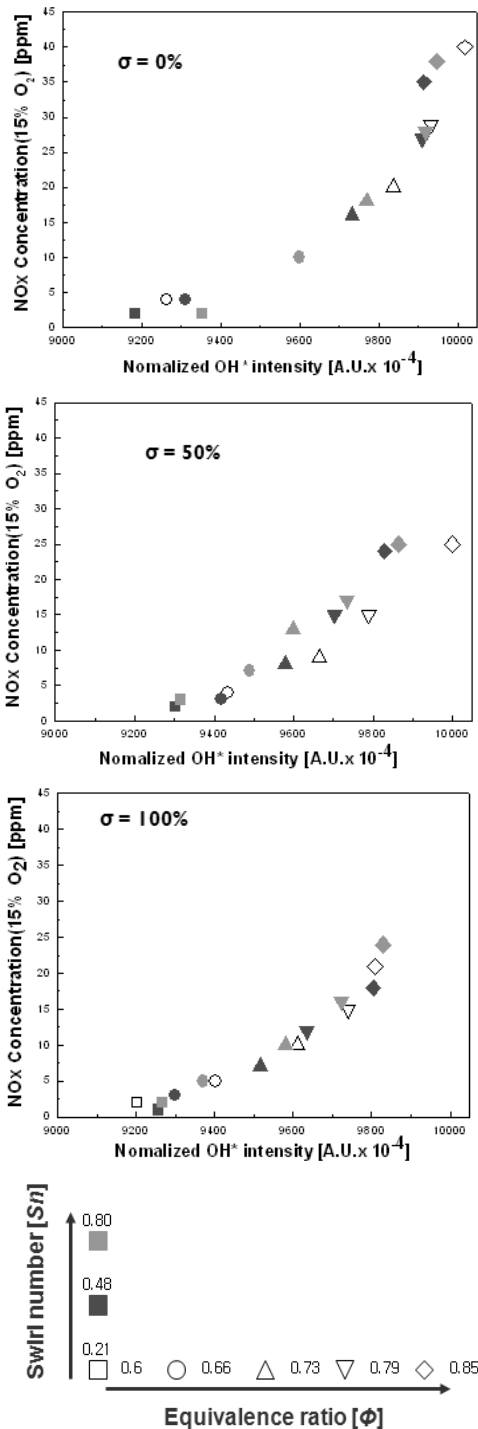


Fig. 11 NOx emission and OH* intensity with effect of swirl number ($M_i=0.48$, $\sigma=0$, 50, 100%)

든 당량비 조건에서 적은 열 방출량을 보여주고 있으며, 스윙수가 0.8인 경우에는 열 방출량이 많은 것을 확인할 수 있다. 연료-공기 혼합 정도가 0%이고 당량비가 0.66인 경우에는 스윙수가 0.21

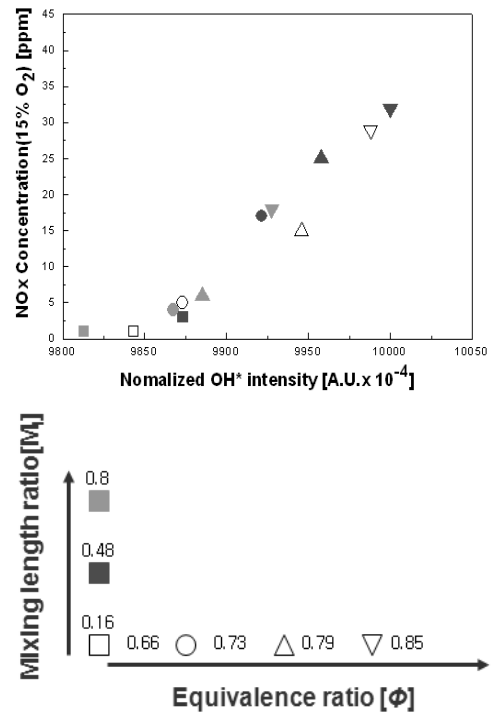


Fig. 12 NOx emission and OH* intensity with effect of mixing length ratio ($S_n=0.80$, $\sigma=0\%$)

일 때 열 방출량이 적었다. 이러한 이유는 이 조건에서는 부상화염이 생성되어 열 방출량이 급격히 감소하였기 때문이다. 그리고 연료-공기 혼합정도가 0%, 50%이고 당량비가 0.6인 경우는 화염이 생성되지 않았다. 이는 화염속도에 비하여 유동속도가 빠르기 때문으로 사료된다. 이러한 결과는 스윙 강도에 따른 OH*의 강도의 변화에서도 NOx가 증가하면 자발광 또한 증가하는 경향을 확인할 수 있었습니다. 위의 결과를 통하여 화염안정화와 희박한계영역에 스윙러가 도움이 되는 것을 확인할 수 있었으며, 따라서 최적의 스윙 조건에 대한 연구의 필요성이 요구 되어질 수 있다.

Fig 10은 연료-공기 혼합 길이 비가 따른 변화를 나타낸 것이다. 혼합 길이 비가 0.8에서 적은 OH* 강도를 나타내고 있음을 확인할 수가 있다. 이것은 연료-공기 혼합 길이가 길어질수록, 즉 예 혼합이 될수록 적은 OH* 강도를 나타낸다.

위의 결과들을 통해 NOx 배출특성과 OH* 강도를 비교해 보았을 때, NOx의 양이 증가할수록 OH* 강도도 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 OH* 상대적인 강도와 NOx 발생량의 상관관계의 도출의 가능성이 있음을 예측할 수 있다.

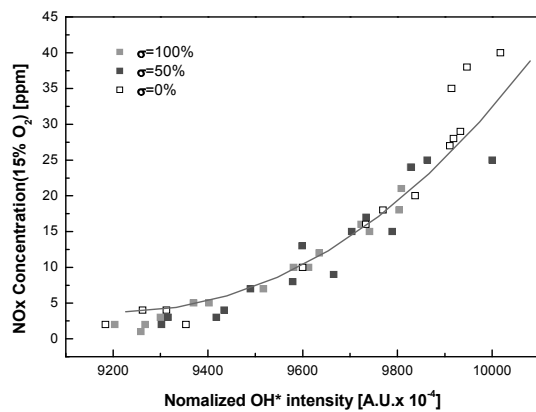


Fig. 13 Correlation of NOx emission and OH* intensity

4.3 NOx와 OH* 강도의 상관관계

앞에서 결과들을 통해 NOx와 OH* 강도의 상관관계를 보다 명확하게 나타내보았다. 우선 Fig. 11은 연료-공기 혼합정도와 스월 강도에 따른 NOx 배출 농도와 OH* 강도의 상관관계를 나타내었다. 여기서, 스월 강도에 따른 특성에서는 우선 NOx량을 감소시키기 위해서는 스월의 영향보다 연료-공기 혼합정도에 따른 특성이 더 효과적인 것을 알 수 있고, 또한 자발광의 특성도 더 명확히 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 12는 연료-공기 혼합 길이 비에 따른 NOx 배출 농도와 OH* 강도의 상관관계의 특성을 나타내고 있다. 여기서, 연료-공기 혼합 거리 비가 가장 클 때 낮은 OH* 강도 및 NOx 배출량을 나타내고 있음을 확인하였다.

이러한 실험에 결과들을 통하여 NOx 배출량과 OH* 강도 상관관계를 실험식을 통하여 나타내어 보았다. 본 연구에서의 Fig. 13은 연료-공기 혼합 정도와 당량비 증가에 따른 조건에서 NOx와 OH* 강도 상관관계의 특성을 확인한 결과를 다음과 같이 3차항의 실험식을 얻을 수 있었다.

$$E_{NOx} = -67763.23 + 21.72Q - 0.0023Q^2 + (8.284 \times 10^{-8} \times Q^3) \quad (4)$$

여기서 E_{NOx} 는 NOx 배출 농도를 나타내고 Q는 OH* 강도를 나타낸다. 또한 본 실험식의 결정계수(Coefficient of determination)는 98%이고 표준편차는 1.2이다. 이러한 실험적 결과를 통하여

NOx 배출량을 OH* 강도를 통하여 예측할 수 있는 방안을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 부분 예혼합 연소기에서 주요인자인 연료-공기 혼합정도 및 당량비, 스월 강도, 연료-공기 혼합 길이를 조절하여 NOx 농도 측정 및 OH* 강도를 측정된 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 스월은 화염의 안정화에 도움을 줄 뿐만 아니라 스월의 각도에 따라 혼합특성을 높여주어 각각의 연소기에 따라 최적화 되어진 강도의 스월을 사용할 경우 NOx의 발생량이 감소되어지는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 혼합 길이비가 커질수록 화염의 안정화 및 희박한계 영역에 도움이 되는 것을 확인할 수 있었으며, 또한 OH* 강도는 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 혼합 길이비가 커질수록 NOx량 감소되어질 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

(3) OH* 강도와 NOx 배출 농도에는 긴밀한 상관관계를 가지고 있어 OH* 강도를 통해 NOx량을 예측할 수 있는 실험식을 도출하였다.

(4) 모형 가스터빈 연소기에서 다양한 실험조건에서의 실험결과를 통하여 실제 가스터빈 연소기에서의 화염 구조, 화염의 안정화, 자발광 특성, NOx량의 제어 등과 특성 및 제어를 할 수 있는 방안을 확인할 수 있었다.

후 기

이 연구에 참여한 연구자는 2단계 BK21 사업과 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다

참고문헌

- (1) Lefebvre, 1999, "Gas Turbine Combustion," 2nd Ed, Taylor & Francis.
- (2) McDonell, V. G. and Samuelsen, G. S., 2000, "Measurement of Fuel Mixing and Transport Processes in Gas Turbine Combustion," *Meas. Sci.*

- Technol.* Vol. 11, pp. 870~886.
- (3) Lyle, K. H., Tseng, L. K., Gore, J. P. and Laurendeau, N. M., 1999, "A Study of Pollutant Emission Characteristics of Partially Premixed Turbulent Jet Flame," *Comb and Flame*, Vol 116, pp. 627~639.
- (4) Gore, J. P. and Zhan, N. J., 1996, "NO_x Emission and Major Species Concentrations in Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-Flow Jet Flames," *Combustion and flame*, Vol 105, pp. 414~427
- (5) Cheng, T. S., "Effects of Partial Premixing on Pollutant Emissions in Swirling Methane Jet Flames," *Combustion and flame*, vol.125, 2001, pp.865~878.
- (6) LEE, S. -Y., SEO, S., BRODA, J. C., PAL, S. and Santoro, R. J., 2000, "An Experimental Estimation of Mean Reaction Rate and Flame Structure During Combustion Instability in a Premixed Gas Turbine Combustor," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 28, pp. 775~782.
- (7) Torres, H., Lieuwen, T. C., Johnson, C., Daniel, B. R. and Zinn, B. T., 1999, "Experimental Investigation of Combustion Instabilities in a Gas Turbine Combustor Simulator," AIAA 99-0712.
- (8) Muruganandam, T. M., Kim, B., Olsen, R., Patel, M., Romig, B. and Seitman, J. M., 2003, "Chemiluminescence Based Sensors for Turbine Engines," AIAA-2003-4490.
- (9) Venkataraman, K. K., Preston, L. H., Simons, D. W., Lee, B. J., Lee, J. G. and Santavicca, D. A., 1999, "Mechanism of Combustion Instability in a Lean Premixed Dump Combustor," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 15, No. 6, pp. 909~918.
- (10) Seo, S., 1999, "Parametric Study of Lean Premixed Combustion Instability in a Pressurized Model Gas Turbine Combustor," Ph.D Thesis, The Pennsylvania State University.
- (11) Gupta, A. K., Lilley, D. G. and Syred, N., 1984, "Swirl Flows," Abacus Press, Tuhbridge Wells, England.
- (12) Dandy, D. S. and Vosen, S. R., 1992, "Numerical and Experimental Studies of Hydroxyl Radical Chemiluminescence in Methane-Air Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 82, pp. 131~150.
- (13) Paschereit, C. O., Gutmark, E. and Weisenstein, W., 1998, "Control of Thermoacoustic Instabilities and Emissions in an Industrial-Type Gas-Turbine Combustor," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 27, pp. 1817~1824.