

연소실 압력변동이 스월 화염에서 화염 안정화와 NOx 배출에 미치는 영향

김종률* · 최경민† · 김덕줄**

Influence of changing combustor pressure on flame stabilization and NOx emission in swirl flame

Jong-ryul Kim, Gyung-min Choi and Duck-jool Kim

Keywords : Swirl flames(스월화염), NOx reduction(질소산화물 감소), Combustor pressure(연소실 압력),
Flame stabilization(화염안정화)

Abstract

In present study, the influence of changing combustor pressure on flame stabilization and nitrogen oxide (NOx) emission in the swirl flame with secondary fuel injection was investigated. The combustor pressure was controlled by suction at combustor exit. Pressure index ($P^*=P_{abs}/P_{atm}$), where P_{abs} and P_{atm} indicated the absolute pressure and atmosphere pressure, was controlled in the range of 0.7~1.15 for each equivalence ratio conditions. It could be observed that flame stable region became narrower with decreasing equivalence ratio and pressure index. In this combustion system, stable flames were formed until $P^*=0.7$. Emission index decreased with decreasing pressure index for overall equivalence ratio conditions and NOx reduction rates were almost identical for $P^*<1$ regardless of equivalence ratio though EINOx values showed different level with change of equivalence ratio for $P^*\geq 1$. It is also observed that EINOx decreased with increasing secondary fuel injection ratio. Emission index of nitric oxide was controllable by adjusting the changing combustor pressure and injecting secondary fuel and this NOx reduction technology is applicable to industrial furnaces and air conditioning system.

1. 서론

대부분의 가스연소기들은 스월(swirl)유동을 동반하는 버너들을 채택한다. 이것은 재순환 영역과 높은 난류를 형성함으로써 연료와 공기의 혼합을 촉진 시키고, 화염을 안정화 시킬 뿐만 아니라 고부하 저공해 연소가 가능하여 많은 연소 학자들에 의해 연구되어 왔으며, 일반적으로 가스터빈, 보일러, 산업용 노 등에서 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 화염의 안정화와 배출가스의 제어 문제 등 많은 문제를 야기하고 있다.

최근 연소기의 연구 동향은 다른 배출물의 양은 적게 유지 시키면서 질소산화물 배출을 저감시키는 방향으로 진행되고 있다. 저 NOx 연소 현상을 제어하는 방법은 다양하게 연구되어 왔다.[1, 2] 특히 부분 예혼합 연소 기술은 NOx 배출량을 급격히 저감할 수 있는 기술로 주목 받고 있다. 부분 예혼합 연소는 균일한 혼합기를 주 연소 영역에 공급하여 낮은 온도로 연소시켜 NOx 배출물을 줄이는 것이다.[3, 4] 그러나 이러한 연소 방법은

NOx 배출물은 제어 가능하나 압력진동을 동반하는 불안정 연소가 발생하여 심각한 문제를 일으키고 있다. 연소기 자체가 공진기 역할을 하여 음압과 열방출 사이의 상호작용으로 연소불안정성이 야기 된다. 큰 압력변동으로 나타나는 연소불안정성은 연소기에 손상을 가할 뿐만 아니라 높은 소음을 발생 시킨다. 또한 연소불안정성을 제어하기 위하여 2차 연료의 분사위치가 연소진동의 능동제어에 미치는 영향을 조사한 연구가 이루어지고 있다.[5] 2차 연료 분사방식 적은 양의 에너지로 효과적인 연소진동의 제어가 가능하다. 그러나 이러한 2차 연료의 분사는 분사된 연료가 확산화염의 형태로 연소됨으로 인한 질소산화물의 증가가 문제시 되어왔다. 따라서 효과적으로 연소진동을 제어하면서 질소산화물도 저감시킬 수 있는 제어방식의 개발이 요구된다. 따라서 연소형상의 중요인자 중 하나인 연소실 압력변동과 2차 연료분사가 화염 안정화와 배출 특성에 어떤 영향을 미치는지 연구 할 필요가 있다.

선행연구에 의하면, 고압 연소 조건에서 연소실 압력이 증가함에 따라 연소 반응율과 온도가 증가하는 관계를 규명한 연구[6]가 수행되었고, 모델링을 통하여 고압의 연소 조건에서 질소산화물(nitric oxides)의 생성 기구를 관찰[7]한 연구도 수행되었다. 그리고 연소실 내부의 압력을 변동함으로써 대기압 이하의 압력 조건에서 저NOx 현상을 관찰한 연구[8]도 본 연구팀에 의해 수행되었다.

* 부산대학교 기계공학과, kjr1024@pusan.ac.kr
부산대학교 기계기술연구소

† 부산대학교 기계공학부, choigm@pusan.ac.kr
부산대학교 기계기술연구소

** 부산대학교 기계공학부, djkim@pusan.ac.kr

그러나 본 연구팀의 선행 연구는 층류연소 영역에 국한되어 실제 연소 시스템에 적용하기에는 정보가 부족하다. 본 연구에서 연소실 압력변동이 난류 화염의 배출특성과 화염 안정화에 미치는 영향을 조사하기 위하여 압력지수, 당량비의 변화에 따른 연소실내의 유동형태와 화염의 형상 변화에 대하여 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험 장치를 Fig.1 에 나타내었다. 장치는 크게 연소실 압력을 조절하는 부분과 혼합기를 공급하는 부분으로 나눌 수 있다. 연소실 압력을 형성할 때 두 가지 상반된 유동형태를 가진다. 연소실내 대기압 이상의 압력을 형성할 경우, 연소실 입구에서 공기를 공급하고 출구밸브를 조절하여 압력을 형성하고, 대기압 이하의 압력을 형성할 경우, 출구부에서 연소실의 공기를 외부로 배출하고 입구밸브를 조절하여 압력을 형성하게 된다. 연소실에 공급되는 공기는 질량유량계(KOFLOC HFC-300)를 통하여 계측되어지고, 게이트 밸브로 제어하여 연소실 압력을 조절하였다.

혼합기를 공급하는 부분은 공기와 연료를 제어하는 부분으로 구성된다. 공기와 연료는 질량유량계(KOFLOC HFC-3660)를 거쳐 혼합실로 공급되어 다양한 당량비의 혼합기를 생성한다. 혼합실내에는 ceramic ball과 허니콤을 설치하여 혼합기의 유동을 정류하였고, 역화를 방지하는 기능으로도 사용되었다. 다양한 압력 변화에 대해 높은 난류와 안정적인 화염 형성을 위해 Swirl과 2nd fuel injector를 사용하였다.

Fig. 2는 실험에서 사용한 연소기와 혼합실을 상세히 나타낸 것이다. 연소기는 가로 110mm 세로 110mm 높이 1100mm인 사각 파이프 형태이며, 연소기 측면에는 연소실 압력 측정용 센서가 설치 되어있다. 혼합실은 혼합가스의 분사압력과 분사속도를 균일하게 유지하고 다양한 연소실 압력 조건에서 화염의 안정 영역을 넓히기 위해 사용하였다. 스월러의 외경은 30mm 이고 내경은 10mm이며, 스월 베인은 6개, 각은 45°인 스월을 사용하였다. 압력 변동에 대하여 화염의 안정화를 위해 중심 출구를 중심으로 반경 3.5mm 지점에 지름 0.5mm인 2차 연료 인젝터를 6개 설치하였다.

실험에서 연료는 순도 99.99%의 메탄(CH₄)을 사용하였으며 연소용 공기로는 습기가 제거된 압축 공기를 사용하였다.

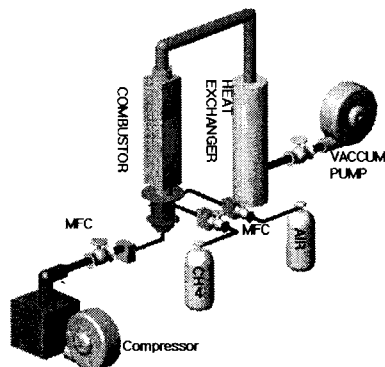


Fig. 1 Schematic of combustion system including pressure control system

2.2. 실험조건

실험에서 배출특성과 그 원인을 규명하기 위하여 당량비, 압력지수를 조절하였다. 절하였다. 당량비는 연료와 공기량을 조절하여 0.8~1.2까지 다양하게 형성하였다. 2차연료를 사용하여 동일한 당량비에서 전체 연료량의 0%, 5%, 10% 화염을 형성하여 실험하였다. 압력지수는 각 당량비 조건에서 0.7~1.15까지 조절하였다. 압력은 연소실 입출구부 100mm 지점에 압력센서를 설치하여 측정하였고, 본 연소시스템에서는 P*가 0.7이하, 1.15이상의 조건에서 연소실 내부압력이 약하게 진동하여 정압조건을 유지하기 힘든 조건이 존재하였으므로, 본 연구에서는 P*가 0.7 이상, 1.15이하의 조건에서 실험을 수행하였습니다. 압력지수는 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$P^* = \frac{P_{abs}}{P_{atm}} \quad (1)$$

혼합기의 유속은 주위공기류의 유속(2.0 m/s)에 따라 2.0~5.0m/s 까지 조절하였다.

실험 조건은 Table 1 에 나타내었다.

2.3. 실험방법

실험은 스월유동의 난류버너에서 연소실 압력변동, 당량비 변화와 2차 연료 분사율에 따른 배출특성과 화염안정 영역을 규명하기위하여 가연한계, 질소산화물(NOx)와 직접 사진을 통한 화염의 형상 변화를 조사 하였다.

연소기 내에 압력 변화에 따른 화염의 블로우 오프(blow-off) 한계를 측정하기 위하여 각각의 압력에 대한 예혼합 공기량을 조절하였다. 화염이 부상하여 화염이 소멸될 때까지의 최대 혼합기량을 화염 안정 범위라 하였고, 공기량을 고정한 후 연료량을 증가시켜 가면서 최대 희박 당량비 값을 조사 하였다.

화염 유동장의 가시화를 위하여 직접사진을 촬영하였으며, 촬영에는 수동 초점 조정이 되는 디지털 카메라(NIKON-D100)를 이용하였다. 카메라의 셔터속도는 1/125sec로 촬영하였다.

배기가스 중의 질소산화물(NOx)의 농도를 측정하기 위해서 화학 발광식 가스 분석기(SHIMADZU, NOA-7000)를 사용하였다. 질소산화물(NOx)의 측정을 위하여 스테인리스 샘플링 프로브를 사용하였으며 프로브의 과열을 방지하기 위해 수냉식 2중관을 설치하였다. 프로브의 샘플링 홀의 크기는 1mm 로 하였고, 연소가스의 포집은 연소기 출구부에서 이루어졌다. 포집된 연소 가스는 soot와 수분을 1차적으로 실리카겔과 거즈를 통하여 여과하

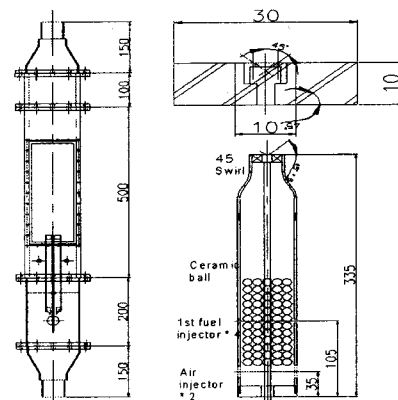


Fig. 2 Detail diagram of combustor , mixture chamber and swirl

Table 1. Experimental conditions of mixture

Equivalence ratio, ϕ	Air condition	Pressure index(P^*)
0.9 ~ 1.2	Suction	0.7
		0.8
		0.9
	Atmospheric pressure	1
	Blow	1.1
		1.15

여 가스 분석기로 공급하였다. 이때 연소실 압력이 가변하기 때문에 진공펌프와 유량계를 이용하여 500cc/min의 연소가스를 가스 분석기에 일정하게 공급하였다. 측정된 값은 EINOx (Emission Index NOx)로 표시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연소실 압력 변동이 가연한계에 미치는 영향

Fig. 3은 swirl 화염에서 혼합기의 유속, 연소실 압력 변화에 따른 화염의 가연한계를 나타낸 것이다. 각각의 혼합기 유속 ($U_M=2.0, 3.5, 5.0$ m/s)에 대하여 연료의 유량을 감소시켜 화염이 날아가는 시점의 당량비를 가연한계라 하며, 그 이전의 영역을 화염 안정영역으로 하였다. 압력지수(P^*) 1이하인 조건에서 압력 지수가 증가 할수록 가연한계가 증가하는 것을 관찰 할 수 있고, 압력지수(P^*)가 1인 영역에서 가연한계가 가장 넓어지는 것을 관찰 할 수 있다. 압력지수(P^*)가 1이상인 대기압 이상의 압력조건에서 압력지수가 증가 할수록 가연한계가 좁아지는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 연소실 분위기 압력이 대기압보다 높게 형성 될 경우 화염의 역화(flash back)가 발생하여 가연한계가 좁게 나타나는 것으로 보인다. 혼합기의 유속이 높은 영역보다 낮은 영역에서 가연 한계가 확장되는 것을 관찰 할 수 있다.

Fig. 4는 2차 연료 분사량에 따른 가연한계를 나타낸 것이다. 2차 연료의 분사가 있는 조건에서는 압력 지수가 증가 할수록 가연 한계가 확장 하는 것을 볼 수 있다. 그리고 2차 연료 분사

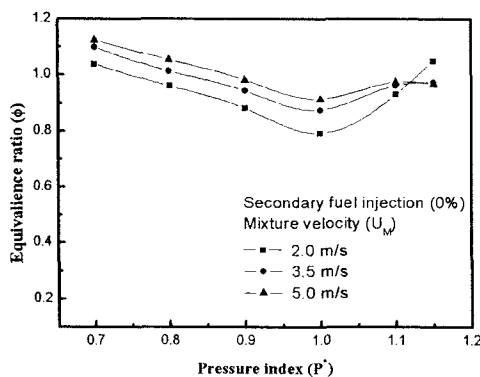


Fig.3 Distribution of Flammable limits with the variation of pressure index and mixture velocity

량이 5%인 경우 압력지수가 증가할수록 가연한계가 선형적으로 증가하는 것이 관찰 되고, 2차 연료 분사량이 10%인 경우 대기압 이하의 조건에서 압력지수가 증가할 수 록 가연한계가 급격히 증가하다가 대기압 이상에서는 가연한계의 변화가 둔화되는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 대기압 이상의 연소실 압력조건에서 2차 연료 분사에 의해 휘염이 나타나는 현상과 밀접한 관련이 있다고 생각된다.

본 연구의 연소시스템에서 가연한계를 측정함으로써 연소실 분위기 압력이 화염 안정 영역에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

3.2 연소실 압력변동이 화염형상에 미치는 영향

Fig. 5는 압력지수에 따른 직접 사진(Direct photograph)을 나타낸 것이다. Swirl에서 분사된 미연혼합기는 내염영역에서 1차 연소반응을 일으키고, 일부 미연성분은 외염영역에서 주위 공기류와 2차 연소반응을 일으키는 것을 관찰 할 수 있다.

압력지수가 증가 할수록 화염의 길이와 폭이 좁아지는 것을 관찰 할 수 있으며, 2차 연료의 분사율이 증가하면 화염이 부상하는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 상류영역의 온도 감소로 인해 NOx 배출이 부상화염에 비해 감소 할 것을 예상할 수 있다.[8] 2차 연료의 분사율이 10%인 경우 대기압 이상의 연소실 압력 조건에서 휘염이 나타나는 것을 관찰 할 수 있다. 이로서 연소실 분위기 압력이 화염의 형상을 제어 할 수 있는 주요한 인자임을 알 수 있다.

3.3 연소실 압력변동이 배출 특성에 미치는 영향

Fig. 6는 각 실험조건에 따른 NOx의 농도분포를 나타낸 것이다. NOx의 배출량은 전체적으로 압력지수가 감소함에 따라 약 30~50% 정도 감소하였다. 당량비가 1.0 인상인 조건에서 NOx 배출량이 다른 조건 보다 감소 정도가 크게 나타난다. 이는 연소실 압력변동을 대기압 이하 일 경우 희박연소 조건 보다 과농연소 조건에서 효과적인 것을 관찰 할 수 있다. 당량비가 1 이상의 조건에서는 대기압조건에서 NOx의 최대치를 나타내고, 전후로 NOx의 배출량이 감소하는 현상을 관찰 할 수 있다. 대기압이상의 조건에서 압력의 상승과 함께 NOx가 줄어드는 현상은 불완전연소와 관련 있다고 사료된다.

Fig. 7은 2차 연료의 분사량에 따른 NOx의 농도 분포를 나타낸 것이다. 압력지수가 증가함에 따라 NOx 배출량이 증가하다가 대기압 이상의 압력 조건에서 감소하는 것을 관찰 할 수 있

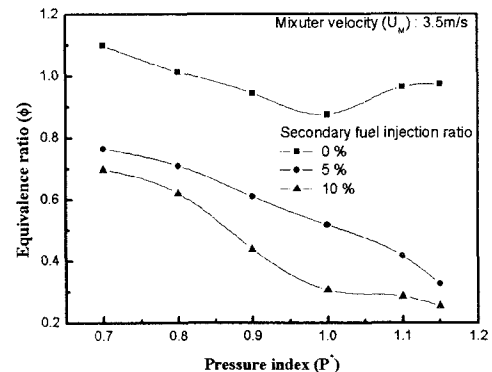


Fig.4 Distribution of Flammable limits with the variation of secondary fuel injection rate

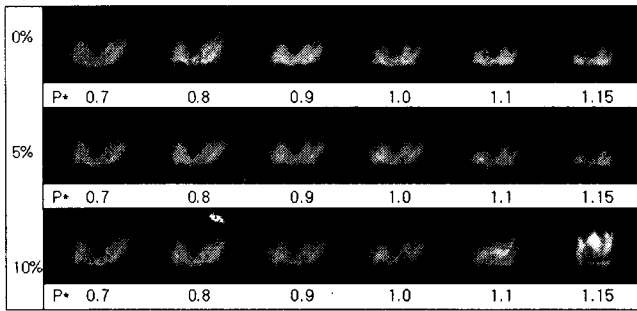


Fig. 5 Variation of direct photograph as function of pressure index & secondary fuel injection ratio

다. 그리고 2차 연료 분사율이 증가 할수록 NOx의 배출량이 감소하는 것을 관찰 할 수 있다. 이것은 Fujimori등[8]의 부상화염과 부착화염의 비교 실험에서 부상화염의 경우 화염 상류영역의 온도 감소로 인해서 NOx 배출이 부착화염에 비해 현저히 감소됨을 보인 것과 같은 현상으로 사료된다. 2차 연료 분사량의 증가와 함께 연소실 압력 변동에 따른 NOx 농도 변화는 작으나, 전체적인 조건에서 저 NOx 현상을 나타내고 화염의 안정 범위는 확장 시키므로 2차 연료 분사법이 매우 유용함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 연소실 압력변동에 따른 스윙(Swirl) 화염의 화염안정화와 NOx 배출 특성을 규명하기 위하여 가연한계, 화염의 형상 그리고 NOx 배출량에 대하여 조사하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연소실 압력변동이 화염 안정화에 큰 영향을 미쳤으며, 2차 연료분사를 통하여 스윙 유동의 화염안정영역이 확장 되었다.
- (2) $P^* < 1$ 조건에서 화염반응면의 신장현상이 뚜렷이 나타났으며, 대기압 이상의 압력조건에서는 화염이 역화하는 현상이 관찰 되었다.
- (3) 대기압 조건에서 NOx 배출량의 최대치가 관찰 되었으며, $P^* < 1$ 조건에서는 P^* 의 감소와 함께 저 NOx 연소가 관찰되었 다.
- (4) 2차 연료를 분사함으로써 NOx의 배출량이 감소되었다.

후기

이 논문은 에너지관리공단 학술진흥사업의 지원에 의하여 연구 되었습니다.(2004-E-ID03-P-02-0-000)

참고문헌

- [1] Arthur H. Lefebvre, 1999, Gas turbine combustion - 2nd ed., Taylor & Francis.
- [2] Shioji, M., Kim, I. S., Ilegami, M. and Murakami, K., 1998, "Flame stability and NOx Formation in a High-Intensity Swirl Burner", Transactions of JSME (Part B), vol. 64, No. 621, pp. 222-227.
- [3] Toshio Shudo, Takashi Mizuide, 2002, NOx emission characteristics in rich-lean combustion of hydrogen. JSAE Review 23, pp.9-14

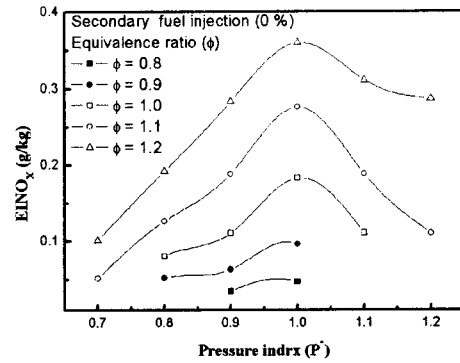


Fig. 6 Distribution of NOx Concentration with the variation of pressure index

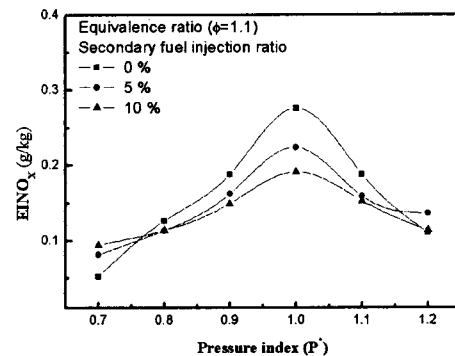


Fig. 7 Distribution of NOx Concentration with the variation of secondary fuel injection ratio

- [4] D. BRADLEY, P. H. GASKELL, X. J. GU, M. LAWES, AND M. J. SCOTT, 1998, Premixed Turbulent Flame Instability and NO Formation in a Lean-Burn Swirl Burner. COMBUSTION AND FLAME 115, pp.515-538
- [5] Gyung-Min Choi, Mamoru Tanahashi and Toshio Miyauchi Proceedings of the Combustion Institute, Volume 30, Issue 2, January 2005, Pages 1807-1814
- [6] H.H. Liakos, M.A. Founti, N.C. Markatos, 1999, The relative importance of combustion mechanisms in industrial premixed flames under high pressure. Applied Thermal Engineering, vol 20, pp.925-940.
- [7] D. DOUGLAS THOMSEN, 1999, Modelling of NO Formation in Premixed, High-Pressure Methane Flame. Combustion and Flame, vol 119, pp.307-318.
- [8] 김종률, 최경민, 김덕출, 2005, 연소실 압력변동을 이용한 저 NOx 연소의 새로운 접근. 대한기계학회논문집 B권 제29권 10호, 2005. 10, pp. 1148 ~ 1155
- [8] Fujimori, T., Riechelmann, D. and Sato, J., 1988, 'Effect of liftoff on NOx Emission of turbulent Jet Flame in High-Temperature Co-flow Air', Twenty-Seventh Symposium on Combustion, The Combustion Institute pp.1149-1155.