

연소실 압력변동과 2차 연료 분사가 스윙 화염에서 화염안정화와 배출 특성에 미치는 영향

김종률* · 최경민† · 김덕줄**

Influence of changing combustor pressure and secondary fuel injection on flame stabilization and emission characteristic in swirl flame

Jong-Ryul Kim, Gyung-Min Choi, Duck-Jool Kim

ABSTRACT

Influence of changing combustor pressure on flame stabilization and emission index in the swirl-stabilized flame was investigated. The combustor pressure was controlled by suction fan at combustor exit. Pressure index ($P^*=P_{abs}/P_{atm}$), where P_{abs} and P_{atm} indicated the absolute pressure and atmosphere pressure, respectively, was controlled in the range of 0.7~1.3 for each equivalence ratio conditions. The flammable limits of swirl flames were largely influenced by changing combustor pressure and they showed similar tendency with laminar flames. NOx emission index decreased with decreasing pressure index for overall equivalence ratio conditions. R.m.s. of pressure fluctuations is increased with decreasing combustor pressure. This flame fluctuation caused incomplete combustion, hence CO emission index increased. These oscillating flames were measured by simultaneous CH* chemiluminescence time-series visualization and pressure fluctuation measurement.

Key Words : Changing combustor pressure, Secondary fuel injection, Swirl-stabilized flame, Flame stabilization, Pressure fluctuation, NOx emission

1. 서론

에너지 수급 문제와 환경 문제를 해결하기 위하여 기체연료 즉 LNG, 탄화 수소계 연료의 수요가 증대 되고 있다. 따라서 연료를 보다 효율적으로 이용하고 배출 가스를 억제하기 위하여 다양한 연소기가 개발 되고 있다. 연소기 개발에

있어서 가장 중요한 것은 화염의 안정화와 배출 가스를 제어 하는 것이다.

안정된 화염을 형성하기 위해 다양한 기구가 연구되고 있으며 공업용 버너에서는 대표적으로 스윙 유동을 이용한 버너를 사용한다. 스윙 유동은 재순환 영역과 강한 난류를 형성함으로써 연료와 공기의 적절한 혼합을 이루어 질 수 있게 하여 화염을 안정화 시키고 연소효율을 향상시킨다.[1,2]

저 NOx 연소를 제어하는 방법 또한 다양하게 연구되어 왔다. 대표적인 방법으로 연료의 화학적 성질을 변화시켜 저NOx 연소를 실현하는 촉매연소법이 있고, 연소반응 영역의 분포를 변화

* 부산대학교 대학원 기계공학과

† 부산대학교 기계공학부

부산대학교 기계기술연구소

** 부산대학교 기계공학부

하여 저 NO_x 연소를 하는 희박연소(lean combustion)[3,4], 연료 및 공기를 단계적으로 나누어 공급하여 완전 연소 시킴으로써 연소효율의 저하 없이 NO_x 배출을 저감시키는 방법(multi-stage combustion)[5,6,7], 음향가진(acoustic excitation)을 이용하여 확산화염의 유동과 NO_x에 대한 제어 연구 방법[8] 등이 알려져 있다. 최근에는, 연소실 압력의 변동을 이용한 NO_x저감 기술과 화염안정화에 관한 보고가 저자들에 의해 이루어 졌다.[9]

저자들은 선행 연구를 통하여 연소실 압력을 대기압이상으로 가한 경우에 좁은 고온 영역이 형성되어 NO_x배출량이 증대하나, 연소실 압력을 대기압 이하로 감압한 경우에는 화염대가 연소실에 넓고 균일하게 분포하며, 국소 고온 영역이 제거되어 NO_x 저감 효과가 뛰어난 것을 보고하였다. 그러나 선행 연구에서는 층류화염을 대상으로 함에도 불구하고 연소실 압력을 감압할 경우, 화염의 진동에 관찰되었고, 이러한 진동 주파수는 압력 변동 크기에 관계없이 일정함을 알 수 있었다[10]. 그러나 이러한 압력 변동을 이용한 저NO_x 연소기법이 난류화염에도 적용 가능할지는 조사되고 있지 않은 실정이다. 한편, 선행 연구에서는 화염 진동에 의해 주위의 공기가 유입되고, 결과적으로 화염진장이 일어났다. 일반적으로 화염 진동은 화염 불안정을 일으키고 진동이 심한 경우, 시스템 파손을 초래하기도 한다. 따라서 압력변동을 이용한 저NO_x 연소기법이 실제 연소시스템에 적용될 경우, NO_x배출량은 증가시키지 않으면서 화염을 안정화시킬 새로운 연소기법 개발이 요구된다.

따라서 본 연구에서 연소실 압력변동이 스윙 연소기에서 형성된 화염의 안정화 및 연소 배출가스에 미치는 영향을 조사하여 실제 연소 시스템에 적용 가능성을 평가하였다. 한편, 압력 변동에 따른 연소진동으로 불안정해진 화염을 안정화시키기 위하여 2차 연료 분사 기법을 도입하고, 그 영향을 상세히 조사하였다.

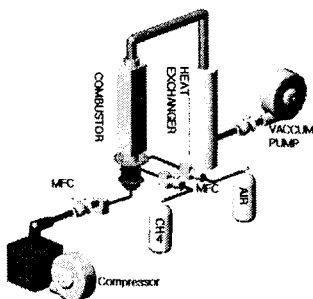


Fig.1 Experimental setup of combustion system

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험 장치를 Fig.1에 나타내었다. 장치는 크게 연소실 압력을 조절하는 부분과 혼합기를 공급하는 부분으로 나눌 수 있다. 연소실 압력을 형성할 때 두 가지 상반된 유동형태를 가진다. 연소실에 공급되는 주위 공기류는 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 MFC-3660)를 거쳐 혼합실로 공급되어 다양한 당량비의 혼합기를 생성한다. 혼합실내에는 세라믹 볼과 허니콤을 설치하여 혼합기의 유동을 정류하였고, 역화를 방지하는 기능으로도 사용되었다. 다양한 압력 변화에 대해 높은 난류와 안정적인 화염 형성을 위해 스윙 인젝터와 2차 연료 분사 노즐이 설치되었다. 연소기는 가로 110mm 세로 110mm 1100mm인 사각파이프 형태이며, 연소기 측면에는 연소실 압력 측정용 센서가 설치되어있다. 혼합실은 혼합가스의 분사압력과 분사속도를 균일하게 유지하고 다양한 연소실 압력 조건에서 화염의 안정 영역을 넓히기 위해 사용하였다.

Fig. 2는 실험에서 사용한 스윙러와 2차 연료 분사 노즐을 상세히 나타낸 것이다. 스윙러 외경은 30mm 이고, 내경은 14mm이며, 스윙 베인은 6개, 각은 45°인 스윙을 사용하였다. 압력 변동에 대하여 화염의 안정화를 위해 중심 출구를 중심으로 반경 4mm 지점에 지름 0.5mm인 2차 연료 인젝터를 45°로 6개 설치하였다.

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

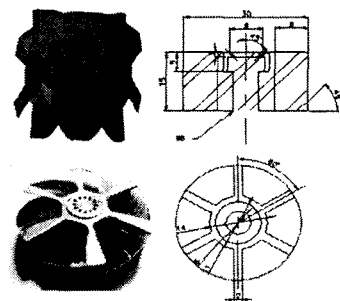


Fig. 2 Detail diagrams of swirler and secondary fuel injector

Table 1. Experimental conditions of mixture

Equivalence ratio, ϕ	Mixture flow rate	Air condition	Pressure index(P^*)
0.8 ~ 1.2	75	Suction	0.7 ~ 0.9
Secondary	~	Suction +	1
fuel injection	125	Blow	
0, 5, 10%	(lpm)	Blow	1.1 ~ 1.3

2.2. 실험 조건 및 방법

실험에서 화염 안정화와 배출특성 및 그 원인을 규명하기 위하여 당량비, 압력지수를 조절하였다. 당량비는 연료와 연소용 공기를 조절하여 0.8~1.2까지 변화시켰다. 압력지수는 압력 지수 P^* ($P^* = P_{abs} / P_{atm}$)로 나타내며, 각 당량비 조건에서 0.7~1.3까지 조절하였다. 압력은 연소실 출구부 100mm 지점에 압력센서를 설치하여 측정하였고, 본 연소시스템에서는 P^* 가 0.7이하, 1.3이상의 조건에서 연소실 내부압력이 약하게 진동하여 정압조건을 유지하기 힘든 조건이 존재하였으므로, 본 연구에서는 P^* 가 0.7 이상, 1.3이하의 조건에서 실험을 수행하였다. 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

실험은 스윙유동의 난류버너에서 연소실 압력 변동, 당량비 변화와 혼합기 유량에 따른 화염 안정성과 배출특성을 조사하기 위하여 가연한계, 연소실 압력변동, 배출가스 계측, CH^* 화학 자발광과 연소실 압력 변동을 동시 계측하였다.

연소기 내에 압력 변화에 따른 화염의 블로우오프(blow-off) 한계를 측정하기 위하여 각각의 압력에 대한 혼합물 공급유량을 조절하였다. 화염이 부상하여 화염이 소멸될 때까지의 최대 혼합기량을 화염 안정 범위라 하였고, 공기량을 고정한 후 연료량을 증가시켜 가면서 가연 한계를 조사하였다.

연소실 내부의 압력변동은 압력센서(Kistler 7507)를 이용하여 계측하였다. 고온의 연소실 내

부 압력을 연속으로 계측하기 위하여 센서를 소성하였다. 센서의 압력변동은 증폭기(Kistler 5011)에서 신호변조된 후, AD-Converter에 의해 저장되었다. 이 때, 센서의 시간분해능은 1kHz이고, 조건별 계측 시간은 10초간 이루어졌다.

배기가스 중의 질소산화물(NO_x)와 일산화탄소(CO)의 농도를 측정하기 위해서 화학 발광식 가스 분석기(A&D system-9000 series)를 사용하였다. 배출가스의 측정을 위하여 스테인리스 샘플링 프로브를 사용하였으며 프로브의 과열을 방지하기 위해 수냉식 2중관을 설치하였다. 프로브의 샘플링 홀의 크기는 1mm로 하였고, 연소가스의 포집은 연소기 출구부에서 이루어졌다. 포집된 연소 가스는 soot와 수분을 1차적으로 실리카겔과 거즈를 통하여 여과하여 가스 분석기로 공급하였다. 이때 연소실 압력이 가변하기 때문에 진공펌프와 유량계를 이용하여 500cc/min의 연소가스를 가스 분석기에 일정하게 공급하였다.

CH^* 화학 자발광은 고속도 카메라(Phantom 5.1V)와 파장대가 $\lambda = 430.7$ nm인 CH^* filter를 사용하여 초당 1000장의 화상을 취득하였다. 이때 연소실 압력 변동을 측정한 압력센서와 동기화하여 동시 계측을 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 연소실 압력변동에 따른 화염안정화와 배기가스 배출특성

Fig. 3은 스윙 화염에서 혼합기의 유량, 연소실 압력 변화에 따른 화염의 가연한계를 나타낸 것이다. 각각의 혼합기 유량에 대하여 연료의 유량을 감소시켜 화염이 날아가는 당량비를 가연한계라 정의하였으며, 그래프에서 가연한계 선보다 파놓은 영역은 화염 안정영역으로 하였다. 압력 지수(P^*) 1이하인 조건에서 압력지수가 증가할수록 가연한계가 증가하는 것을 관찰 할 수 있

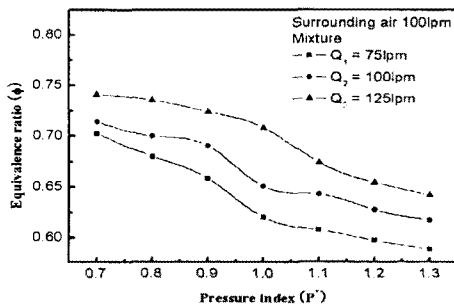


Fig. 3 Flammable limits as function of mixture flow rate and pressure index

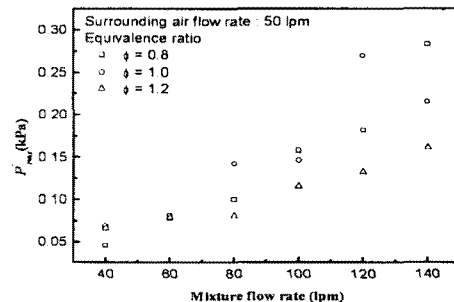


Fig. 4 R. m. s. of pressure fluctuations as functions of mixture flow rate and equivalence ratio

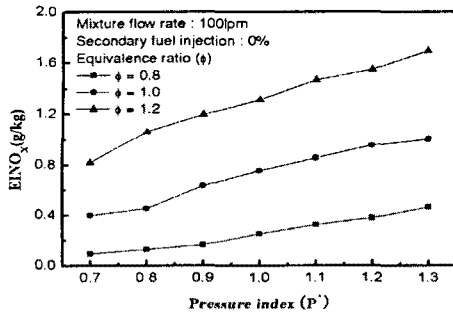


Fig. 5 Emission index NOx as function of equivalence ratio ($Q_M=100\text{lpm}$)

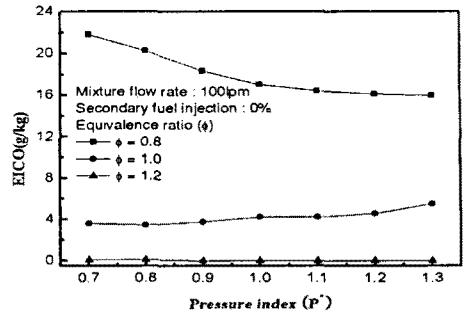


Fig. 6 Emission index CO as function of equivalence ratio ($Q_M=100\text{lpm}$)

다. 반면에, 압력지수가 1 이상인 압력조건에서는 압력지수가 증가 할수록 가연한계가 좁아지는 것을 관찰 할 수 있다. 전반적으로 혼합기의 유량이 증가함과 함께 가연한계가 감소되는 경향이 나타난다.

미연혼합기의 유량과 공급 당량비의 변화에 따른 연소실 내부 압력변동의 r.m.s 값을 Fig. 4에 나타내었다. 전반적으로 당량비가 증가할수록 압력변동치가 증가하는 경향이 나타난다. 미연혼합기의 유량이 60lpm까지는 압력변동에 큰 차이를 보이지 않았으며, 60lpm 이상의 혼합기 조건에서 유량의 증가와 함께 압력변동치가 크게 증가함을 관찰 할 수 있다. 즉 유량이 증가할수록 압력 변동치가 크게 나타나는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 발열량의 증가에 따른 진동연소 현상이라 사료된다. Fig. 3의 가연 한계분포와 종합해보면 화염의 진동 현상이 가연 한계에 작은 영향을 미치는는 하나 혼합기 유량이 더 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 진동 현상이 두드러지는 혼합기 유량 100lpm을 기준으로 실험을 수행 하였다.

Fig. 5는 공급 당량비와 압력지수의 변화에 따른 NOx배출 농도를 나타낸 것이다. NOx 배출농도는 당량비가 증가할수록 크게 나타났다. 연소실 압력이 감소할수록 NOx배출 농도는 단순 감소하고 있다. 당량비가 낮은 영역보다 높은 영역에서 압력 변동의 영향을 크게 받고 있으며, 질소 산화물은 압력지수에 거의 비례하여 증가하는 경향을 관찰 할 수 있다. 이는 본 연구 팀에서 연구한 층류화염에서 결과와 유사하였다.

Fig. 6은 당량비와 압력지수에 따른 CO 배출 농도를 나타낸 것이다. Fig. 5의 NOx 배출량 그래프와 반대의 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. $\phi=0.8$ 조건에서는 CO 배출량이 크게 나타나는 것을 관찰 되고, 연소실 압력 변동의 영향을 크게 받고 있다. 반면 과농 영역에서는 반대의 결과가 나타났다. 앞의 NOx 배출량 그래프와 종합하여 분석해 보면 연소실 압력이 대기압 이하의 조건일 때 화염의 진동 현상으로 불완전 연소

가 발생하여 위와 같은 결과가 나타나는 것으로 사료된다.

Fig.7은 압력 변동치가 큰 혼합기 유량 조건에 있어서 당량비와 압력지수에 따른 압력 변동치를 나타낸 것입니다. 낮은 당량이 조건에서 연소실 압력 변동의 영향을 크게 받고 있으며, 압력 변동치도 큰 것을 관찰 할 수 있다. $\phi \geq 1$ 조건에서는 $\phi=0.8$ 조건보다 연소실 압력의 영향을 작게 받고 있으며, 압력 변동치도 작은 것을 관찰 할 수 있다. 이는 앞의 배출가스 결과와 종합해 볼 때 연소실 압력변동은 연소 현상에 큰 영향을 미치고 이으며, 압력 변동치가 큰 연소실 압력 조건에서 불완전 연소가 발생하여 희박한 조건의 화염에서 CO 배출량이 크게 증가하는 것으로 보인다.

3.2 2차 연료 분사가 화염안정화와 배기가스 배출 특성에 미치는 영향

Fig. 8은 2차 연료의 분사가 가연한계에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 2차 연료가 없는 경우에는 하한 가연 한계가 당량비 0.75이상이었으나, 2차 연료를 공급하면 가연한계가 크게 확대되었다. 이와 같은 하한 가연한계의 확장은 스웰 인젝터 중심으로부터 화염대에 분사되는 2차 연료가 파일릿 화염 역할을 하기 때문이다. 2차 연료가 없는 경우는 공급되는 연료가 100% 공기와 예혼합되어 연소실로 공급되기 때문에 완벽한 예혼합 화염이 형성되나, 2차 연료가 분사될 경우, 공급되는 연료 유량은 변함이 없으나, 2차 연료 노즐로부터 분사되는 연료는 확산화염형태로 연소되기 때문에 NOx배출량이 증가할 가능성이 높을 것으로 예상 된다.

Fig. 9는 2차 연료 분사가 NOx 배출 농도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 2차 연료 분사 유량의 증가와 함께 NOx 농도가 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 이와 같은 NOx 저감 현상은 대기압 이하에서 두드러지며, 압력지수가 커짐에 따라 2차 연료 분사의 영향은 작아진다. 2차 연

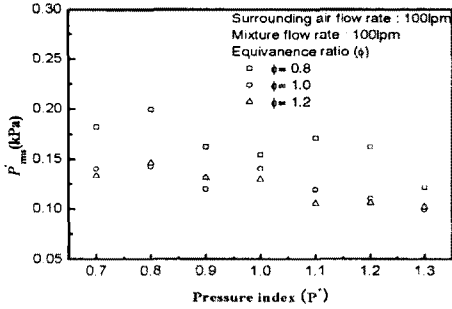


Fig. 7 R. m. s. of pressure fluctuations as functions of equivalence ratio ($Q_M=100\text{lpm}$)

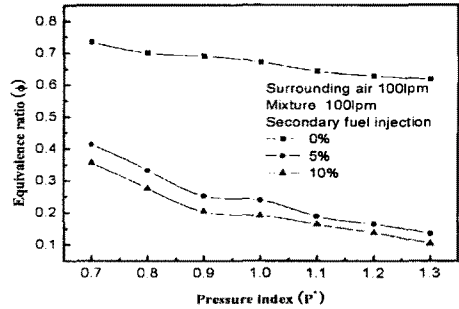


Fig. 8 Flammable limits as function of secondary fuel injection (100lpm)

료로서 순수한 메탄 가스가 분사됨에도 불구하고 NOx 배출 농도가 낮아지는 것은 고속으로 분사되는 2차 연료에 의하여 스윙 화염이 다소 부상하고, 이러한 부상화염의 형성에 의하여 화염 반응대가 형성되었기 때문이라 분석된다.

Fig. 10은 2차 연료 분사가 CO 배출 농도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 2차 연료 분사 유량의 증가와 함께 CO 배출 농도가 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 이와 같은 CO 저감 현상은 대기압 이하의 조건에서 두드러지며, 압력지수가 1.2 이상의 압력 조건에서 2차 연료 분사량이 10%인 조건에서 배출 농도의 변화가 크게 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 11은 2차 연료 분사가 연소실 내부 압력 변동에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 2차 연료를 5% 분사함에 따라 확연히 압력변동치가 감소하는 현상을 관찰할 수 있다. 대기압 이상의 조건에서는 2차 연료를 분사함으로써 압력 변동치가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 2차 연료 분사에 의하여 보염이 강화된 것에 기인한다고 사료된다.

Fig. 12는 연소실 압력 변화와 2차 연료 분사량에 따른 CH* 평균 강도 이미지를 나타낸 것이다. 대기압 이하의 압력 조건에서 화염이 상대적으로 신장되고, 부상하는 것을 관찰할 수 있으며, 대기압 이상의 연소실 압력 조건에서는 화염의 길이와 폭이 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 낮은 압력 조건에서는 중심반응대의 분포가

화염의 위쪽에 분포하며, 높은 압력 조건에서는 중심반응대가 화염 아래쪽에 이동하는 것을 관찰할 수 있다. 2차 연료 분사량이 증가 할수록 화염이 부상하는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 앞의 NOx 농도 분포에서 2차 연료가 증가함에 따라 농도가 감소하는 현상을 뒷받침 해준다.

Fig. 13은 2차 연료 분사와 연소실 압력 변동에 따른 중심 반응대의 높이를 나타낸 것이다. 중심 반응대의 높이는 2차 연료를 분사할 수 록 감소하는 것을 관찰 할 수 있었으며, 압력에 따라 중심 반응대는 스윙 노즐 선단부로 내려오는 것을 관찰 할 수 있다. 2차 연료가 0%인 조건에서 압력지수에 따른 중심반응대의 높이 변화는 상대적으로 작으나, 2차 연료 분사율이 5%이상인 조건에서는 압력지수에 대하여 높이 변화가 크게 나타나는 것을 관찰 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 연소실 압력변동과 2차 연료 분사에 따른 스윙(Swirl) 화염의 화염안정화와 배기가스 배출 특성을 조사하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연소실 압력 변동은 난류 스윙 화염의 안정화에 큰 영향을 미쳤으며, 2차 연료를 분사함으로써 스윙 화염의 가연한계는 크게 확장되었

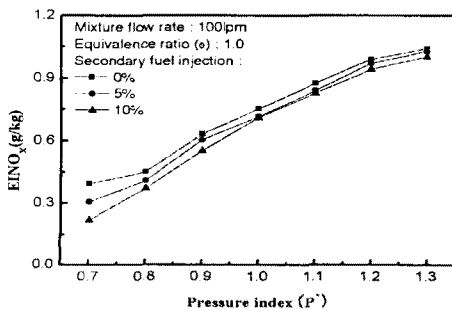


Fig. 9 Emission index NOx with secondary fuel injection ($Q_M=100\text{ lpm}$, $\phi=1.0$)

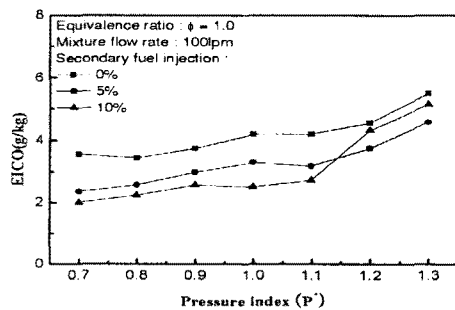


Fig. 10 Emission index CO with secondary fuel injection ($Q_M=100\text{ lpm}$, $\phi=1.0$)

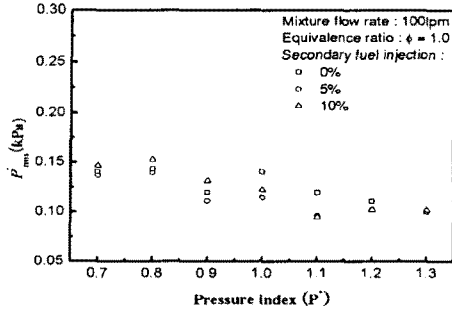


Fig. 11 R. m. s. of pressure fluctuations as functions of secondary fuel injection ($Q_M=100\text{lpm}$, $\phi=1.0$)

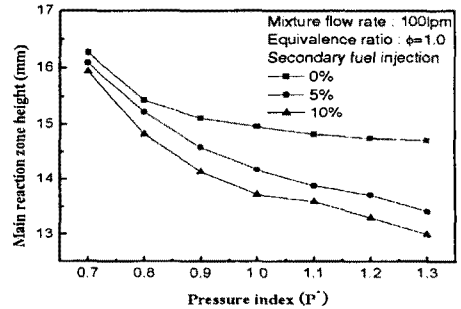


Fig. 13 Height of primary reaction zone as function of pressure index and secondary fuel injection rate

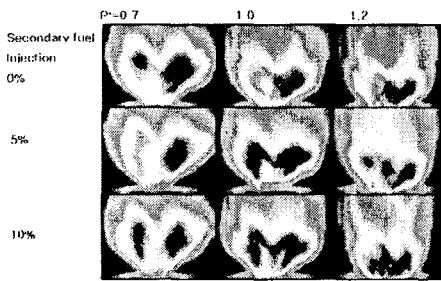


Fig. 12 CH* intensity image as function of pressure index ($Q_M=100\text{lpm}$, $\phi=1.0$)

고, 가연한계의 정성적 특성은 층류화염과 유사했다.

(2) 연소실 내부의 압력 변동은 미연혼합기의 유량 증가와 함께 급격한 증가를 보였고, 희박한 연소 조건에서 압력 변동이 크게 나타났다.

(3) NOx배출 농도는 공급 당량비의 증가와 함께 증가하였고, 각 당량비 조건에 있어서 압력이 증가함에 따라 증가하는 것을 관찰 할 수 으며, CO 배출 농도는 공급 당량비의 증가와 함께 감소하였고, 희박연소 조건에서 압력에 따른 변화가 크게 나타났다.

(4) 2차 연료 분사를 이용하여 가연한계가 확장되고, NOx, CO배출량을 저감시킬 수 있었다.

(5) CH* 중심 반응대의 분포는 압력 지수가 증가 할 수 록 넓어지는 것을 볼 수 있으며, 2차 연료 분사량이 많을수록 압력변화의 영향이 크게 작용한다.

후기

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

참고문헌

[1] Feikema, D., et al., 1990, "Enhancement of Flame Blowout Limits by the Use of Swirl", *Combustion & Flames*, 80, pp. 183~195

[2] Shioji, M., et al., 1998, "Flame Stability and NOx Formation in a High-Intensity Swirl Burner", *Transactions of JSME (parts 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

[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] J. M. Ballester, C. Dopazo, N. Fueyo, M. Her nabdez and P. J. Vidal, 1997, "Investigation of low-NOx strategies for natural gas combustion," Elsevier Science Ltd. *Fuel* Vol.76 No.5, pp.435-446.

[6] J. P. Smart, R. Webber, 1989, "Reduction of NOx and optimisation of burnout with an aerodynamically air-staged burner and air-staged precombustor burner," *Journal of the Institute of Energy*, pp.237-245.

[7] Ahn K. Y., Kim H. S., Cho E. S., Ahn J. H. and Kim Y. M., 1999, "An Experimental Study on Combustion Processes and NOx Emission Characteristics of the Air- Staged Burner", *KSME*, vol 13, pp.477-486.

[8] C. POPPE, S. SIVASEGARAM, J. H. WHITELAW, 1998, "Control of NOx Emissions in Confined Flames by Oscillations." *Combustion and Flame* vol 113, pp.13-26

[9] 김종률, 최경민, 김덕출, 2005, "연소실 압력 변동을 이용한 저 NOx 연소의 새로운 접근". *대한기계학회논문집 B권* Vol. 29, 제10호, pp.1148-1155

[10] 김종률, 최경민, 김덕출, 2005, "연소실 압력 변동에 따른 화염 진동현상의 관찰", 제31회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집 pp.275-280