

마이크로 스케일 난류에 의한 화염안정성 및 NO_x 생성

김인수* · 서정무** · 이근선*** · 이충원****

Flame Stability and NO_x Formation by Micro scale Turbulence

I.S.Kim, J.M.Seo, G.S.Lee and C.W.Lee

Key Words: Micro Scale Turbulence, Swirl, Flame Structure, Low NO_x

Abstract

The effect of micro scale turbulence on flame structure and stability were experimentally investigated by changing the area of micro turbulence generator(MTG) and air velocity in terms of low NO_x and high efficiency combustion. NO_x and CO concentration were also measured for different MTG areas to investigate whether a vane swirler having MTG has a possibility of using as part for low NO_x combustor. From the obtained results, it is shown that flame stability region increases and flame size becomes small as MTG area increases since MTG in itself makes small scale recirculation flow and swirler does large scale recirculation one. It is also shown that low NO_x concentration(about 20~30ppm@O₂ 11%) is achieved for all MTG areas without any increase in CO concentration regardless of air velocity range tested in this study when the equivalence ratio is 0.7. The results obtained in this study can give basic guideline for the design of compact low NO_x high efficiency combustor using a vane swirler having MTG.

기호설명

MTG : Micro Turbulence Generator

* 포스코 환경에너지부
** 경북대학교 대학원
*** 구미1대학 컴퓨터응용기계설계과
**** 경북대학교 기계공학부

θ : 베인 각도	[$^{\circ}$]
S : 스윙 수	
d : 스윙러 허브 직경	[mm]
D : 스윙러 외경	[mm]
U_{air} : 공기 속도	[m/s]
ϕ : 당량비	

1. 서론

매년 증가하는 화석연료의 소비량과 유해 배기 가스량은 지구적 차원에서 긴급히 해결해야 될 문제로 대두되어 오고 있다. 이러한 현상은 연속연소를 행하는 보일러의 버너, 각종 공업로의 버너, 가스터빈 연소기에 있어서도 예외가 아니어서 이들 연소기에 있어서는 특히, 산성비, 지구온난화, 광화학 스모그의 원인이 되고 있는 질소산화물의 저감이 그 무엇보다도 중요한 선결 과제가 되었다. 연속연소를 행하는 연소기로부터의 질소산화물을 저감하기 위한 방법으로는 연소과정의 제어에 의한 방법으로서 종래부터 널리 이용되어 오던 2단 연소⁽¹⁾,

다단연소⁽²⁾, 연소영역내로의 스팀분사⁽³⁾ 등의 방법이 널리 사용되어 왔고, 연소 후 처리과정으로는 암모니아를 이용한 SCR (Selective Catalytic Reduction)법⁽⁴⁾이 널리 사용되어 왔고, 최근에는 과산화수소수를 이용한 SNCR(Selective Non Catalytic Reduction)법⁽⁵⁾의 연구도 진행되고 있는 실정이다. 그러나 이들 NOx저감법에는 몇 가지 제약이 뒤따르고 있는데, 2단 연소의 경우, 1차 연소가스와 주위 공기의 난류혼합속도, 1차 연소 가스의 당량비 등의 설정에 의해 NOx농도가 극소가 되는 지점이 존재하고, 이들 값의 적절한 선택이 되지 않을 경우, CO농도의 증가 즉, 연소효율의 저하를 가져오게 된다. 이런 현상은 NOx저감을 위한 다른 연소과정 제어에서도 나타나기 때문에 NOx저감과 CO 및 THC생성 억제를 동시에 주의해야만 한다.

한편, 연소후 처리과정인 암모니아를 이용한 SCR법은 NOx저감이 가능한 반응온도가 1200K 부근에서 최대의 효과를 얻을 수 있기 때문에 실제의 연소 배기가스에는 재가열등의 공정이 필요하므

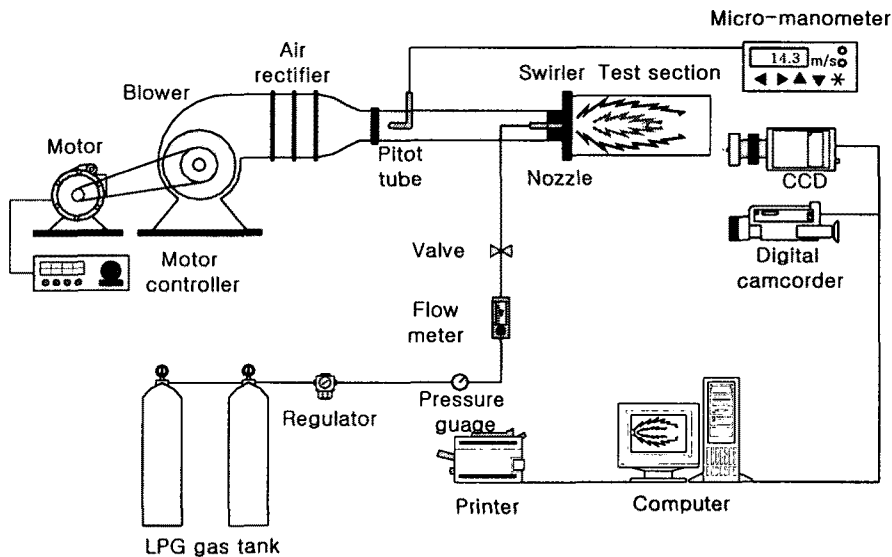


Figure 1 Schematics of experimental apparatus

로 실용가능성이 낮다. 또한, 암모니아 SCR법과 촉매사용을 병행한 경우에는 NOx저감의 반응온도는 낮출 수 있지만, 촉매가 고가이고 유지, 보수에 어려움이 있다는 것이 단점이다.

따라서 본 연구에서는 연소효율을 유지하면서 NOx저감을 꾀할 수 있는 방법으로 연료와 공기의 혼합이 마이크로 스케일의 난류들에 의해 급속히 혼합될 때, 연료·공기의 혼합기 농도가 균일하게 되고, 이로 인해 연소영역의 온도가 고온 국소 영역이 되는 것을 방지함으로써 thermal NOx 생성을 억제할 수 있다는 점에 착안하였다.

본 연구에서는 우선 선회연소기의 스윌러에 썩기모양의 마이크로스케일 난류발생기를 설치하여 이것이 화염구조, 화염안정성, NOx생성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1에 본 실험에 사용된 장치의 개략도를, Fig. 2에는 노즐의 상세도를 나타낸다. 연소용 공기는 원심형 블로어를 통해 공급된 후, 균일 유동이 되도록 하기 위해 허니콤 형식으로 만든 정류기를 거친 후, 스윌러를 통해 연소 영역으로 공급된다. 이 때 연소용 공기의 속도는 스윌러 전단에 피토판을 설치하고 디지

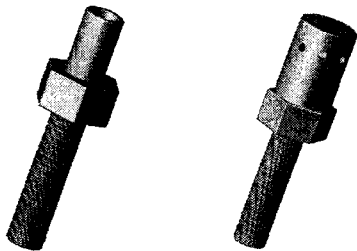


Figure 2 Details of test nozzles

털 마노미터(FCO12, Furgas사)를 이용하여 측정하였고, 그 값들은 각각 10~30m/s까지 5m/s 간격으로 설정하였다. 연료는 C3H8의 함유량이 부피비로 98% 이상인 시판의 가정용 프로판을 사용하였고, 레귤레이터와 유량계를 거친 후 직경 10mm인 동축 방향 분사 단공 노즐 및 직경 3.6mm로 8개의 분출구를 갖는 동축 방향에 수직인 노즐의 2종류를 통해 연소영역으로 공급되었다. 스윌러는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 내경이 78mm이고 8개의 베인형 날개를 가진 $\theta = 40^\circ$ 각도의 허브형을 사용하였고 마이크로스케일 난류발생을 위해 스윌러 날개에 연소용 공기 통과 면적의 0%, 3%, 7%, 12%가 되도록 삼각형의 썩기를 붙였다. 스윌러의 선회수S는 Mahur⁽⁶⁾가 제안한 다음 식에 의해 0.67로 계산되어진다.

$$S = \frac{2}{3} \left(\frac{1-z^3}{1-z^2} \right) \tan \theta \quad (1)$$

연소통의 직경은 156mm, 길이는 700mm로 하여 긴 화염에 대해서도 충분히 연소통 안에서 연소가 완전히 되도록 실험을 행하였다. 배기가스 중의 NOx, CO, O2농도는 배기가스 분석계 (Green Line MK2, Eurotron사)를 이용하여 측정하였고, 연소영역의 온도는 R-Type 열전대를 이용하여 측정하였다.

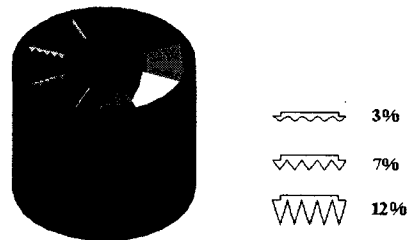


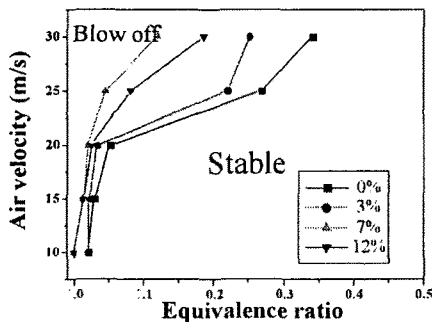
Figure 3 Schematics of swirler

3. 결과 및 토의

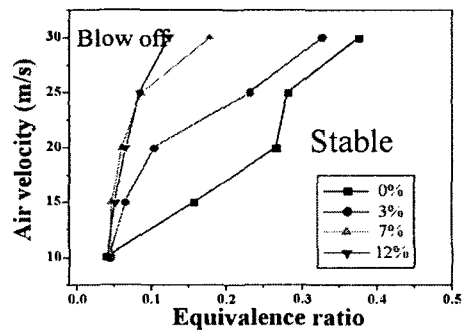
연소기 설계에 있어서 가장 중요한 인자가 화염안정성이기 때문에 먼저, 동축 방향 연료분사 노즐과 수직방향 연료분사 두 종류의 노즐에 대해 연소용 공기 속도 U_{air} 와 마이크로 스케일 난류발생기의 영역을 변수로 하여 화염안정영역을 조사하고 그 결과를 Fig.4에 나타낸다. Fig.4에서 알 수 있듯이 동축 방향 연료분사는 수직 방향 연료분사에 비해 공기 속도와 마이크로 스케일 난류발생기의 면적에 상관없이 화염안정성이 좋음을 보여주고 있는데, 이는 동축 방향 연료분사인 경우 단공 노즐로 확산화염형태로 연소가 일어나는데 반해 수직방향 연료분사인 경우 다공 노즐을 사용하여 예혼합 연소에 가깝게 연소하기 때문이다. 난류발생기 면적에 따른 화염안정성을 살펴보면, 동축 방향 연료분사에 대해서는 연소용 공기속도가 약 20m/s 이상에서, 수직방향 연료분사에 대해서는 연소용 공기속도가 약 15m/s 이상에서 난류발생기 면적이 커질수록 화

염이 안정화됨을 알 수 있는데, 이는 연소용 공기속도가 비교적 빠른 영역에 대해서 연료와 공기가 혼합되어 연소가 미처 일어나기도 전에 혼합기가 하류로 유동되는 것을 마이크로 스케일 난류발생기가 무수히 작은 크기의 난류를 발생시켜 이들이 연료와 연소용 공기의 혼합을 조장함은 물론, 연소의 화학반응을 빠른 시간 안에 조장시켜 활성화학종인 OH 등의 생성을 촉진한 뒤 이들을 재순환 영역속으로 순환시킴으로써 화염을 안정화시키기 때문이라고 생각된다.

Fig. 5에 마이크로 스케일 난류발생기가 화염형상 미치는 영향을 연소용 공기속도 $U_{air}=16\text{m/s}$, 당량비 $\phi=0.7$ 인 경우에 대해 동축 방향 노즐과 수직방향 노즐에 대해 관찰하고, 그 결과를 나타낸다. Fig. 5에서 나타나듯이 확산 화염형태로 연소되는 동축 노즐에 대해서는 난류발생기의 면적이 증가하여도 화염형상 자체에는 큰 변화가 없다. 그러나, 화염의 색깔은 중앙부의 휘염 부분이 난류발생기 영역 0%에서는 관찰되지 않지만 3%에서 나타난 후 7%에서 최대가 된 후 12%에서 다시 줄어드는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

Figure 4 Flame Stability by MTG area and air velocity (a) for coaxial single nozzle fuel injection, (b) for vertical multi nozzle fuel injection.

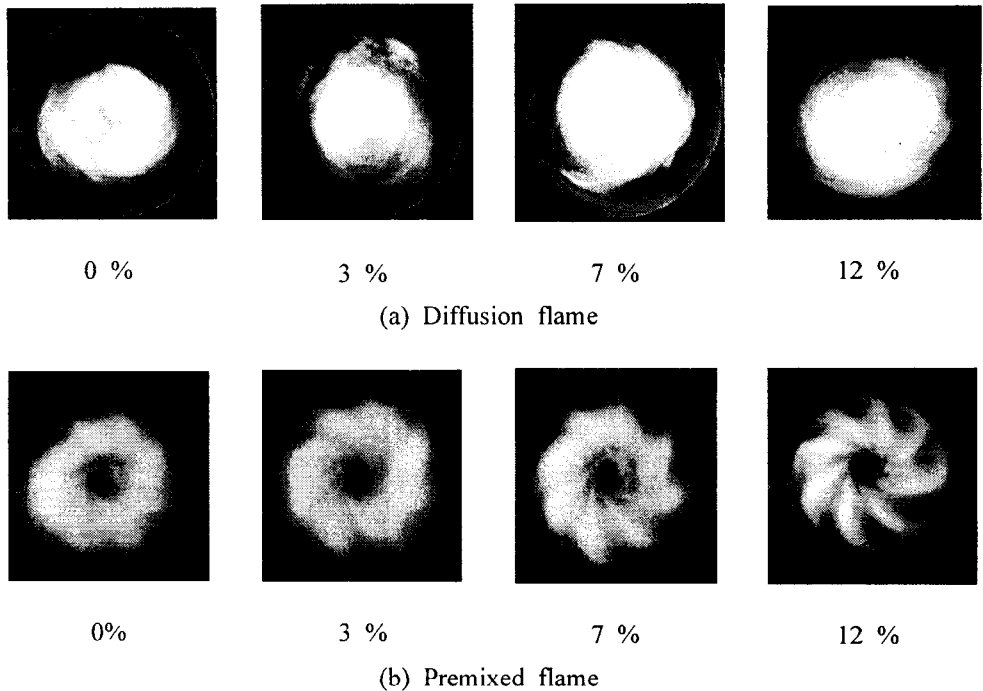
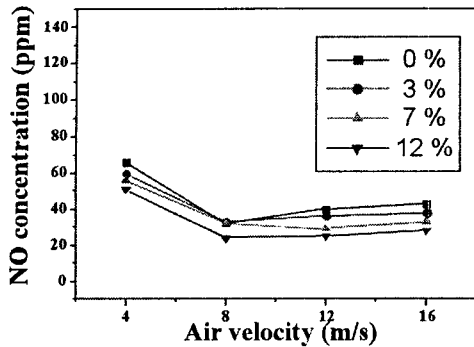


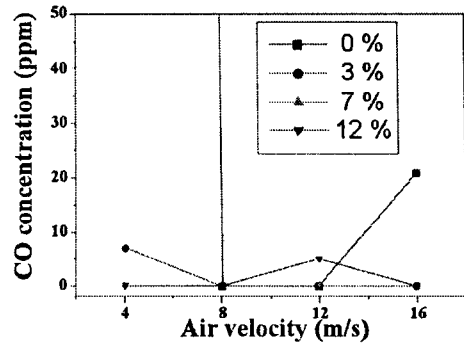
Figure 5 Some photographs of flame when $U_{air}=16$ m/s and $\phi=0.7$.

이는 NOx발생과 관계가 깊은 국부 고온 영역의 발생, 즉, 휘염이 난류발생기 면적이 7%일 때 최대가 되고 그 후에는 국부 고온영역의 발생이 줄어들음을 의미한다. 이에 반해 예혼합 화염 형태로 연소되는 수직분사 노즐의 경우에는 난류발생기의 면적이 늘어남에 따라 화염형상이 확연히 구분되어짐을 알 수 있다. 즉, 난류발생기의 면적이 증가함에 따라 화염의 크기는 줄어들고 스윌러 베인 부근의 밝은 청색부분이 늘어나고 베인사이 부분과의 색상차가 뚜렷해짐을 알 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 난류발생기가 마이크로 스케일의 무수히 많은 난류를 발생시켜 스윌러에 의한 재순환 영역 형성 이외에 국소적 재순환 영역을 형성하며, 이 부근에서 연료와 공기의 급속 균일 혼합이 이루어져 비교적 짧은 시간내에 연소 반응이 완결되는 고부하

연소가 일어나기 때문이라고 생각된다. 이 결과로부터 예혼합 연소에 대해 본 연구에서 행한 난류발생기 면적범위에 대해서는 난류발생기 면적이 증가하면 증가할수록 NOx농도가 낮은 고부하 균일 연소가 실현 가능함을 알 수 있었다. 마이크로 스케일 난류발생기에 의해 화염의 형상이 작아지고 고부하 연소가 가능하여 연소기의 콤팩트화가 가능하나, 현재 가장 문제가 되고 있는 저공해성에 대해서는 미지수이기 때문에 Fig. 5에서 실험한 동일한 조건에 대해서 연소기 출구에서의 NOx 및 CO농도를 측정하여 그 결과를 Fig. 6에 나타낸다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 연소용공기의 속도에 관계 없이 마이크로 스케일 난류발생기의 면적이 증가하면 증가할수록 NOx농도는 감소함을 알 수 있다. 이 사실은 앞에서 세운 가설, 즉 난류발생기의 면적이 증



(a) NO concentration



(b) CO concentration

Figure 6 Emission characteristics change by MTG area rate.

가하면 난류발생기에 의한 재순환이 증가하고 연료와 공기의 난류 급속 균일 혼합이 잘 이루어져서 전체 연소영역에 있어서의 국부 고온영역이 줄어든다는 것을 잘 뒷받침해 주고 있다. CO농도 또한 난류발생기가 장착된 경우에는 연소용 공기속도에 관계없이 낮음을 알 수 있다. 이상으로부터 스윌러에 난류발생기를 장착해 마이크로 스케일 난류를 연소에 이용한 경우, NOx농도와 CO농도 모두 낮은 고효율·저공해 연소가 가능하고 화염형상도 소형화되어 연소기 전체의 콤팩트화가 가능하다

3. 결론

고효율저공해 연소를 목적으로 설치한 난류발생기에 의해 생성되는 마이크로 스케일 난류가 화염구조에 미치는 영향을 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 난류발생기의 면적이 증가할수록 난류발생기 자체에 의한 재순환 영역과

스윌러에 의한 재순환 영역의 증대로 화염안정성은 증가한다.

2. 난류발생기 면적증가에 의해 화염은 길이가 짧아지고 폭이 줄어들어 연소기 소형화가 가능함을 알 수 있었다.

3. 난류발생기 사용으로 NOx농도와 CO농도가 모두 낮은 고효율·저공해 연소가 가능함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Syred, N et al., *Combust and Flame* 23, pp.143 (1974).
- (2) Sato. H et al., *Journal. ASME* 120, 41 (1998).
- (3) Maughan. J et al., *Journal. ASME* 118, 78 (1996).
- (4) Miller. J et al., *Combust. And Flame* 43, 81 (1981).
- (5) Kim. I et al., *SAE paper* SAE2000-01-1931 (2000).
- (6) Mathur, M.L. and Maccallum, N.R.L., *Swirling Air Jets Issuing from Vane Swirlers PART1:Free jets*, *J.Inst.Fuel*,39,214 (1967).