

다단연소기를 이용한 저 NO_x 연소특성 연구

조은성* · 성용진* · 정석호†
(2002년 4월 15일 접수, 2002년 12월 7일 심사완료)

An Experiment on Low NO_x Combustion Characteristics in a Multi-Staged Burner

Eun-Seong Cho, Yongjin Sung and Suk Ho Chung

Key Words : Low NO_x Burner(저 NO_x 버너), Multi-staged Burner(다단연소기), Air-staging(공기 다단), Fuel-staging(연료다단), PLIF(평면 레이저유도형광법)

Abstract

Staged combustion, such as air- and fuel-staging, is a relatively well-known technique for reduction of NO_x emission and used in combination with other techniques nowadays. However, the design variables are still selected depending upon operating conditions. There are many variables tested to investigate the NO_x emission characteristics for changing of fuel or air velocity, swirl intensity, and staging ratio of air and fuel in multi-staged burner. In air-staging case, the fuel-rich condition of the primary combustion zone is very helpful to reduce NO_x emission and its range is known to be restricted by the increase of carbon monoxide. However, in many cases carbon monoxide level is not too high to be restricted operating condition. So we tried to expand the equivalence ratio range to the richer condition in the primary combustion zone and certificate the function of each burner component and its contribution to the overall NO_x production.

기호설명

ϕ_p : 주 연소영역 당량비
 A_p : 1차공기 출구 단면적 [cm²]
 S : 선화수

1. 서론

질소산화물(NO_x)은 대부분 연소과정에 의하여 발생하는데, 그 발생기구에 따라 분류하면 공기 중의 질소분자가 고온상태에서 산화되어 발생하는 thermal NO_x와 탄화수소계(CH) 연료에서 화염

면근처에서 급격한 반응으로 생성되는 prompt NO_x 및 연료중에 포함된 질소성분이 연소시 산화되어 발생하는 fuel NO_x로 나눌 수 있다. 질소산화물은 광화학 스모그의 원인으로 인체에 해를 끼칠 뿐 아니라 산성비의 원인이 되어 생태계에도 심각한 영향을 미친다. 최근에 들어 환경문제가 사회문제로 대두됨에 따라 실용 연소기에서의 규제도 한층 강화되어 질소산화물 발생을 억제해야 하는 필요성이 점차 증대되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

다단연소 (staged combustion) 방법은 질소산화물 저감방법 중 상대적으로 잘 알려져 있고 또 널리 사용되는 기법으로, 질소산화물은 당량비 1.0 부근의 이론공연비 조건에서 가장 많이 발생하므로 연료과농/연료희박의 두 영역에서 순차적으로 화염을 형성시켜 질소산화물 발생을 저감시키는 방법이다.⁽⁵⁾ 최근에는 NO_x 저감 효율을 높이기 위하여 배기가스재순환 (FGR), 재연소 (reburning), 연료다단 (fuel staging) 등과 함께 적용되기도 한다.

* 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부
† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : shchung@snu.ac.kr
TEL : (02)880-7114 FAX : (02)889-1842

이로 인하여 유동과 화학반응의 복잡한 상호작용은 실용 연소기의 설계시에 일관된 규칙의 적용을 어렵게 하며, 연소과정에 대한 이해보다는 적정 운전조건 선정에 초점이 맞추어져 있다. 따라서 질소산화물의 생성을 최대한 억제하기 위해서는 다양한 설계변수들이 연소과정에서 발생하는 NO_x 생성에 미치는 영향에 대한 체계적인 이해가 선행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 다단 연소용 버너를 대상으로 다양한 변수에 따른 NO_x 발생특성을 조사하였다. 1차 연소영역의 당량비 제어를 위하여 총 공기량은 변화 없이 (당량비 0.9, 과잉공기 10% 조건) 1, 2차 각 단의 공기 비율을 변화시켰으며, 1차 공기의 출구단면적을 조절함으로써 2차 공기와의 상대적인 분사 위치 및 속도 변화를 시도하였다. 또한, 선회기 (swirler)의 베인(vane) 경사각도를 조절함으로써 선회 강도에 따른 연소특성을 확인하였으며 공기다단조건에 연료다단도 적용하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 15kW 용량의 모델 다단연소기를 대상으로 실험하였다. 사용연료는 액화석유가스 (LPG)로 사용연료량은 10.44 lpm 이며, 산화제로는 상온의 압축공기를 사용하였으며 공기량은 273 lpm 이다.

2.1 다단연소기

실험에 사용된 다단연소 버너의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 공기 및 연료는 1차와 2차로 구분되어 공급되며, 1차연료의 경우 연료 분사각도는 일반 산업용 연소기에서 널리 사용되고 있는 방식과 같이 연료와 공기의 혼합을 촉진시키기 위하여 공기에 대하여 연료가 45°의 각도로 분사되도록 하였다. 1차공기 공급부에는 화염의 안정화를 위하여 선회기를 사용하였고 선회강도 변화를 위하여 베인의 각도가 다른 3 종류(30, 45, 60°, 선회수 $S = 0.43, 0.74, 1.28$)를 선정하였으며 선회강도 효과와 관련된 실험에서는 스톱트(throat)를 제거하고 실험을 수행하였다. 1차공기의 출구단면적 변화를 통한 출구속도 영향을 확인하기 위하여 4종류 ($A_p = 107, 170, 314, 530\text{mm}^2$)의 스톱트를 제작 사용하였으며, 2차연료 노즐은 환형의 링에 pin hole ($\phi 0.4 \text{ mm} \times 8 \text{ EA}$)을 내어 사

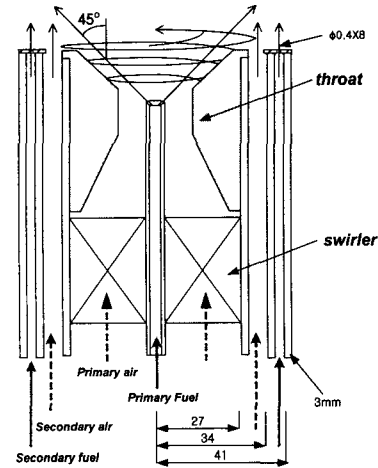


Fig. 1 Schematic diagram of multi-staged burner

용하였다.

화염의 길이를 줄이기 위해서는 연료노즐의 출구를 가능한 한 작게 만드는 것이 유리하지만, 이때 화염의 안정성은 가로지르는 공기의 유속에 의존하므로, 연료 노즐 출구의 축소는 출구속도와 다단 비율의 선택을 제한하게 되어 적절한 선택이 필요하다.

실험은 1차 연료노즐 직경 0.4 mm (16홀)에서 주로 수행되었으며, 직경 1.2 mm (8홀) 노즐에서도 특성을 확인하였다.

2.2 실험장치

측정에 사용된 연소실과 연료 및 공기공급 등의 기타 실험 장치의 구성은 Fig. 2와 같다. 연료는 질량유량조절기 (MFC)를 통하여 1단 및 2단으로 공급되며, 연소용 공기는 1, 2단 각각의 로타메타에 의하여 공급량을 조절하였다.

연소실내부 및 화염의 국소 온도는 고온측정이 가능한 B 형 열전대 (측정온도 600°C ~ 1700°C)를 이용하여 측정하였으며 (직경 0.9 mm), 질소산화물은 화학적 발광기법을 이용한 가스분석기를 이용하여 측정하였다. NO 총발생량은 크기 680 mm × 680 mm × 970 mm의 연소실 상부 스택에서 채집한 값을 사용하였으며, 국소 발생량은 탐침봉 (내경 2 mm, 외경 3.4 mm)을 화염 내에 직접 삽입하여 채집하였다. 연소실에 관측창을 설치하여 각 조건에서의 화염형상을 관찰하였다.

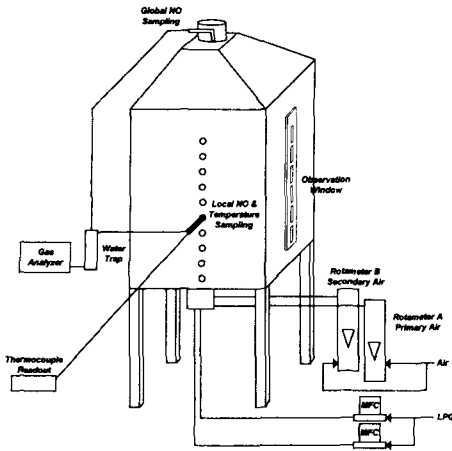


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

화학반응 지역에서의 연료와 공기의 혼합특성을 파악하기 위하여 LPG 연료대신 공기와 아세톤을 섞어 실험 조건의 연료와 동일한 운동량을 갖도록 유량을 조절하여 연료 노즐을 통하여 분사하였다. 실험은 비연소장에서 수행되었으며 파장 266 nm, 출력 60 mJ의 Nd:YAG 레이저 (Spectra- Physics, LAB-170-10)를 이용하여 아세톤을 여기시킨 후 발생하는 형광신호를 ICCD 카메라 (Roper Scientific, PI-MAX)를 이용하여 평면형광신호 (PLIF)를 얻었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염형상 특성

연소기는 사용 목적에 따라 서로 다른 화염 모드가 필요한데 화염 형상만으로 화염의 특성을 설명하는 것은 무리이며, 특히 실용 연소기에서는 더욱 어렵다. 직접사진은 다른 자료들과 함께 연소기의 사용목적에 맞는 화염을 선택하는데 도움을 줄 수 있다.

본 실험에서 주로 사용된 화염 모드는 연료노즐직경 0.4 mm, $S = 0.74$ 의 경우로 Fig. 3(a)에 직접사진과 아세톤 PLIF 방법에 의한 연료분포를 1차 연소영역의 당량비 변화에 따라 나타내었다. 그림에서와 같이 1차공기 공급량이 감소함에 따라, 즉 연료와 1차공기와의 당량비인 1차 연소영역의 당량비가 증가함에 따라 화염길이 줄어 들고 있으나 당량비 7.9의 경우 오히려 화염이 다소 길어지는 것을 볼 수 있다. Fig. 3(b)는 노즐직

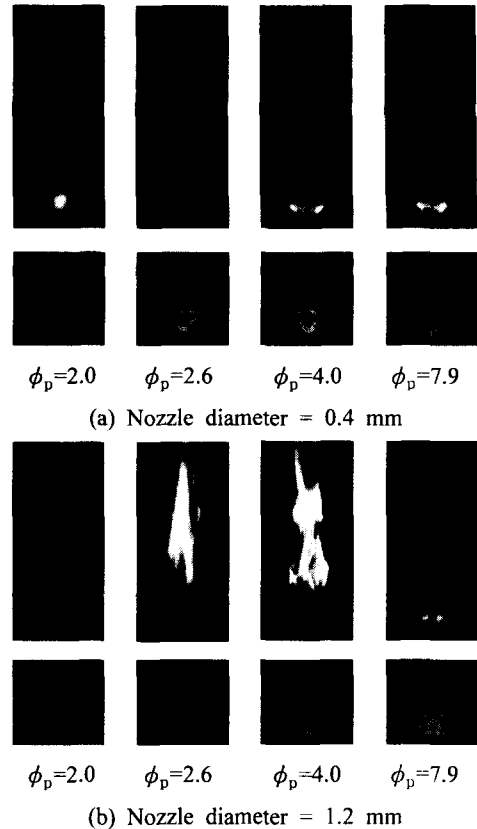


Fig. 3 Flame shape and acetone PLIF image with primary combustion zone equivalence ratio

경 1.2 mm의 경우로 화염이 다소 불안정함을 보여주고 있다. 아세톤 PLIF 이미지는 버너선단의 연료 분포를 나타내는데 연료 농도분포를 확인함으로써 화염모양을 예측할 수 있다. 0.4 mm 노즐의 경우 연료의 모멘텀 증가로 1.2 mm 노즐에 비하여 넓은 연료분포를 나타내고 있어 공기와의 혼합특성 증가에 의해 안정된 화염을 나타낼 수 있다. 전반적으로 1차 연소영역의 당량비 변화에 따라 화염모양이 크게 변하고 있음을 확인할 수 있다.

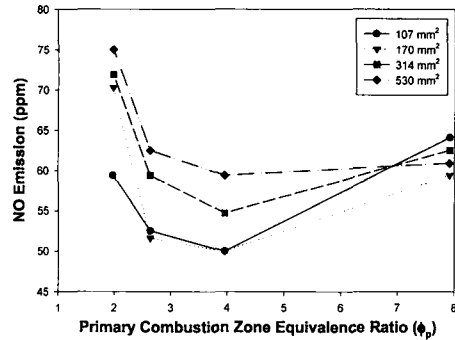
3.2 1차 연소영역 당량비에 따른 특성

다단계 저 NO_x 연소기에서 일반적으로 사용되고 있는 1차 연소지역의 당량비는 1.2 정도 이나,⁽⁶⁾ 반응지역 내 온도와 산소농도의 감소로 인한 thermal NO의 저감, 그리고 탄화수소 (CH) 라디칼에 의한 질소산화물의 환원⁽²⁾ 등 연료과농 연소가 질소산화물의 배출에 미치는 이점을 고려

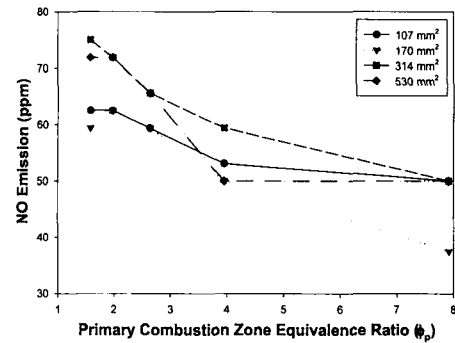
하여 볼 때, 1차 연소지역의 당량비를 연료과농 지역으로 확장하는 것이 유리하다. 1차 연소영역의 당량비는 질소산화물 저감에 따른 일산화탄소 증가를 고려하여 선정하는 것이 일반적이나, 노의 크기가 충분하여 고온지역에서의 산화반응으로 일산화탄소의 배출은 거의 나타나지 않아 본 연구에서는 중요한 변수가 되지 않았다.

Figure 4 (a), (b)는 각각 노즐직경 0.4 mm와, 1.2 mm 에서 1차 연소영역의 당량비 변화에 따른 NO 발생특성을 1차공기의 출구 단면적을 변화시키면서 측정된 결과를 나타낸다. 1차공기의 출구단면적 변화에 따른 영향을 살펴보면 1차 연소영역의 당량비에 따라 다소 차이가 있으나 (a), (b)의 모든 그래프에서 전반적으로 출구 단면적이 큰 경우가 NO 발생량이 많음을 알 수 있다. 이는 공기속도의 감소에 의한 화염영역에서의 체류 시간증대 및 연소영역의 증대효과로 볼 수 있다. 1차 연소지역의 당량비가 증가함에 따라 총 NO 발생량은 감소한다. NO 감소 비율은 당량비의 증가에 따라 차츰 줄어들며, 연료 노즐의 직경이 0.4 mm인 경우 1.2 mm와 달리 당량비 4.0 이후 7.9 지점에서 NO 생성이 다시 증가하였다. 연료 분사속도가 큰 0.4 mm 노즐의 경우 1차공기의 공급량이 매우 적을 경우 (당량비 7.9, 1차 12%, 2차 88% 조건) 분사연료 운동량의 상대적인 증대로 혼합을 촉진시켜 NO 발생을 증가시키는 것으로 유추되어진다. Figure 3(a)의 아세톤 PLIF 사진을 보면 NO 발생이 높은 1차 연소영역의 당량비가 2.0인 조건과 7.9 조건의 연료농도가 비슷한 분포를 보여 같은 연소 모드로 사료되나 (b)의 경우는 전혀 다른 농도분포를 보임을 알 수 있다.

일반적으로 1차 연소영역의 당량비가 커짐에 따라 즉, 연료과농 조건일수록 NO 생성량은 감소하는 경향을 볼 수 있는데 앞서 살펴본 것과 같이 Fig. 4(a)의 노즐 직경 0.4 mm 조건에서는 당량비 7.9 에서 NO 발생이 당량비 4.0 에 비하여 증가하는 경향을 보여주므로 이 조건에 대하여 확인하기 위하여 1차공기 출구 단면적 107 mm² 조건에서 화염내부의 NO 농도분포를 측정하여 보았다. Figure 5는 각각의 조건에서 NO 농도분포를 나타낸 것으로 상대적으로 2차공기의 유속이 증가된 당량비 7.9의 경우 2차공기가 1차 연소지역을 침범하고 있음을 확인할 수 있다. 이 조건에서 1차와 2차공기의 속도는 각각 4.7 m/s



(a) Nozzle diameter = 0.4 mm



(b) Nozzle diameter = 1.2 mm

Fig. 4 NO emission characteristics with primary combustion equivalence and primary air exit area

(선회를 고려하지 않고 throat 출구 단면적 기준), 5.0 m/s 이므로, 이와 같은 현상은 연료과농/연료 희박의 두 단계로 진행되어야 하는 다단연소가 두 공기속도가 비슷하여 하나의 연소지역으로 합쳐지고 있음을 의미하는 것으로, 1차 연소영역을 연료과농의 상태로 만들 때 2차공기가 그 안으로 유입되지 않도록 2차공기의 속도를 조절해야 함을 의미한다. 이것은 물론 연료와 공기의 속도비에 따른 혼합특성에 따라 다른 경향을 보일 수도 있다.

3.3 1차공기의 출구 면적 변화에 따른 특성

1차공기의 출구 면적이 증가함에 따라 총 NO 발생량이 증가함을 Fig. 4에서 확인할 수 있었다. Figure 6은 노즐직경 0.4 mm 조건에서 1차공기의 출구 단면적 차이에 따른 혼합특성을 나타낸 아세톤 PLIF 사진으로 보면 1차공기의 출구면적이 증가함에 따른 속도감소로 연료의 침투특성이 증가되어 혼합지역이 확장되는 것을 볼 수 있다. 이것은 화염이 넓게 분포하면서 고온영역에서의

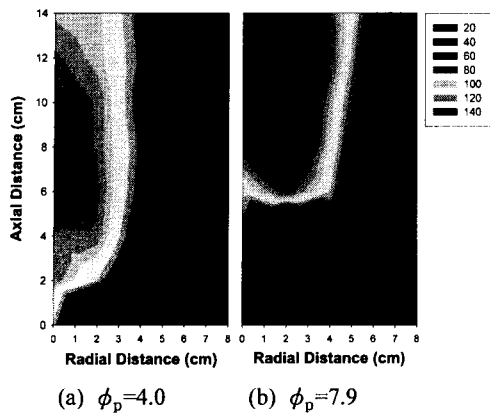


Fig. 5 NO distribution with primary combustion zone equivalence ratio ($A_p=107\text{mm}^2$)

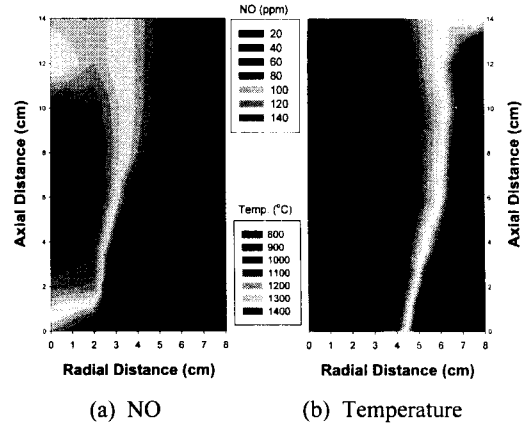


Fig. 7 NO and temperature distributions in flame zone ($\phi_p=4.0, A_p=530\text{mm}^2$)

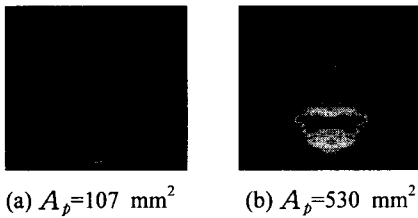


Fig. 6 Acetone PLIF images with primary air exit area

체류시간 증대에 의하여 NO 생성의 증가 (주로 thermal NO)를 가져오는 것으로 생각된다.

1차공기의 출구단면적 증대에 따라 1차 연소지역은 2차공기가 분사되는 지역으로 접근하는데, 2차공기는 연소지역의 온도에는 크게 영향을 미치지 않으나 분사지점의 당량비를 낮추어 국소적으로 NO 저감에 기여하고 있음을 같은 0.4 mm 노즐 조건의 Fig. 5(a)와 Fig. 7(a)의 비교를 통하여 확인할 수 있다.

그러나, 이 경우에도 1차 연소영역과 2차 연소영역의 혼합으로 다단 연소의 효율은 감소하고, 전체 NO 발생량은 증가한다. 이는 동축 공기를 화염 속으로 강제 주입시키는 경우 화염 길이의 단축으로 단순 제트 화염에 비해 질소산화물의 배출이 감소된 Chen 등⁽⁷⁾의 결과와는 구별되어야 한다.

1800K 이하의 온도에서는 thermal NO의 생성을 억제할 수 있는데,⁽⁸⁾ 실험 조건 모두에서 반응온도가 1600K를 넘지 않고, Fig. 7에서의 온도분포와 NO 발생량이 서로 다른 분포를 보이므로

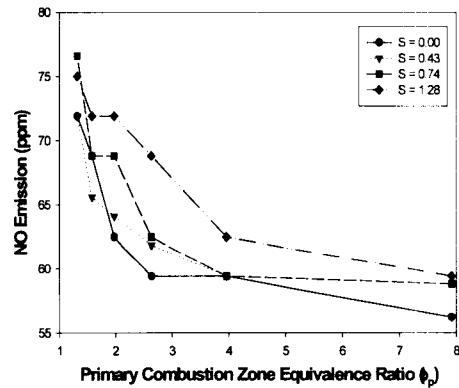


Fig. 8 NO emission with swirl number

본 실험에서 생성된 NO의 경우 thermal NO와 더불어 상당부분은 prompt NO로 생각할 수 있다

3.4 선회강도에 따른 특성

Figure 8은 0.4 mm 노즐조건에서 선회효과를 높이기 위해 throat를 제거한 조건 ($A_p=2114\text{mm}^2$)에서 선회강도에 따른 NO 발생특성을 나타낸 것으로 1차 연소영역의 당량비에 따라 차이가 있으나, 1차공기의 선회강도가 증가함에 따라 연료와 공기의 혼합특성 증대에 의한 연소특성 향상으로 전체적인 NO 발생량이 증가함을 확인할 수 있다.

Figure 9는 선회강도에 따른 화염온도 분포를 나타낸 것으로 고온 지역을 연료와 산화제의 혼합이 주로 발생하는 반응지역으로 생각할 때, 선회강도에 따른 반응지역의 확장과 이로 인한 질

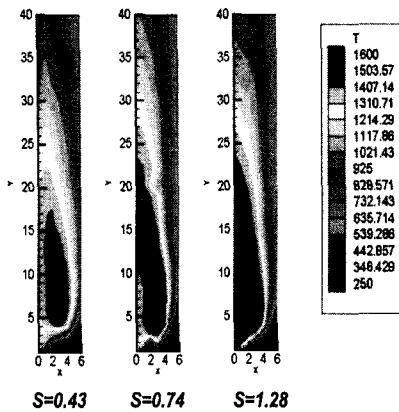


Fig. 9 Temperature distributions with swirl number (with staging, unconfined condition)

소산화물의 증가를 확인할 수 있다. 실제로, 선화기가 화염의 안정성을 증가시킨다는 사실은 여러 실험결과에서 보고되고 있으나,⁽⁹⁾ 질소산화물 저감에 기여하는 경우는 제한적임이 확인되었다.

3.5 연료다단 연소법

공기다단 연소와 같은 방법으로 총 연료량의 변화 없이 연료를 1차, 2차로 나누어 공급하는 연료다단의 특성을 확인하여 보았다. 설계된 다단연소기가 1차 연소영역으로 100% 공기를 공급할 경우 화염이 불안정하여 소화 (blow off)되는 경우가 많아 1차 연소영역으로 100% 공급하지 못하고 공기다단 연소조건에서 실험한 결과 중 NO 발생이 많은 1차공기 공급량 70% ($\phi_p=1.3$)의 경우와 NO 발생이 적은 1차공기 공급량 30% ($\phi_p=3.0$)의 두 경우에 대하여 연료다단 연소를 수행하였다.

연료다단은 각각 1차공기 비율 30%, 70%의 공기다단 조건에서 1차연료 비율을 100%, 90%, 80%, 70%의 4 조건에서 실험하였다. 0.4 mm 노즐을 사용하였으면 1차공기 출구단면적은 530 mm²이다.

Figure 10은 각 조건에서의 직접사진이며, Fig. 11은 NO 발생량을 나타내었다. NO 발생량을 살펴보면 공기다단의 결과와 같이 1차공기 30%의 경우가 70%에 비하여 낮은 NO 발생량을 나타내고 있으며 두 경우 모두 2차연료의 공급량이 증가함에 따라 NO 발생은 급격히 감소함을 알 수 있다. 그러나 30% 이상으로 2차연료를 공급할 경

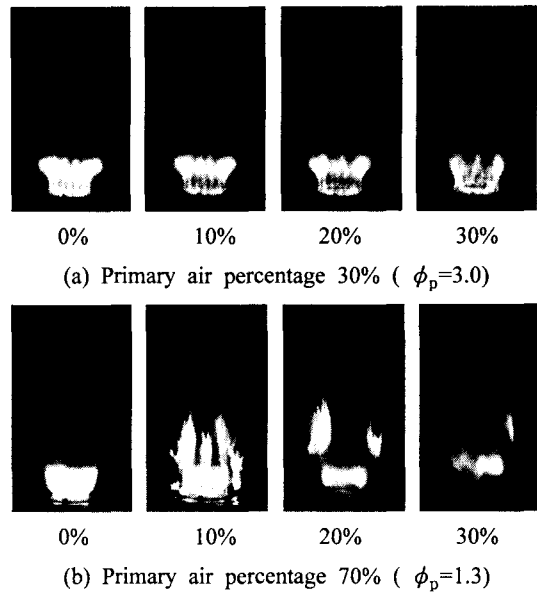


Fig. 10 Flame shape with fuel staging ratio

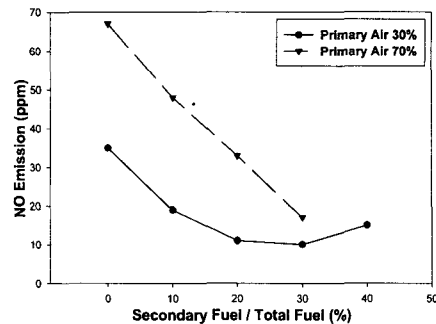


Fig. 11 NO emission with fuel staging ratio

우 CO 발생량이 급격히 증가하여 일반적으로 20% 이내의 2차연료 공급이 적절하다고 판단된다. 즉, 본 실험조건에서는 1차공기량 30%의 조건에서 2차연료 20% 공급조건이 최적의 NO 발생조건이었다.

4. 결론

(1) 다단 연소기에서 1차 연소영역의 당량비 변화에 따른 NO 발생특성을 살펴본 결과 당량비가 커짐에 따라 즉, 1차 연소영역의 연료과농 정도가 증가함에 따라 NO 발생이 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 노즐직경 0.4 mm의 경우 당량비 7.9에서 질소산화물의 생성이 다시 증가하는 경

향이 나타나 화염내부를 국소 측정된 결과 1, 2차 연소지역이 합쳐져 연료과농/연료희박의 다단 연소의 효율이 감소되어 질소산화물의 배출이 증가하는 것을 확인하였다.

(2) 1차공기의 출구면적 변화로 1차 연소영역의 크기를 조절할 수 있음을 보였다. 1차공기의 출구 단면적이 큰 경우 1차 연소영역이 2차공기의 분사지역으로 접근하여 연소지역들이 합쳐져 다단연소의 효율 감소를 가져와 질소산화물 발생이 증가하였다.

(3) 선회강도가 증가함에 따라 질소산화물의 배출이 함께 증가함을 확인하였다. 본 실험 조건에서 선회기의 사용은 화염의 안정성을 다소 증가시키는 이외의 다른 큰 효과를 가져오지는 않았다.

(4) 연료다단 연소의 경우 2차연료의 증가에 따라 NO 저감효과를 얻을 수 있었으나 30% 이상의 경우 CO 발생량이 급격히 증가하였다. 공기다단과 연료다단을 동시에 할 경우 보다 높은 NO 저감효과를 얻을 수 있었다. 즉, 1차공기 공급 30%의 조건에서 20%의 2차연료 공급으로 본 실험 조건하에서 최적의 NO 저감효과를 얻을 수 있었다.

후 기

이 연구는 한국생산기술연구원의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Miller, J. A. and Bowman, C. T., 1989, "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 15, pp. 287~338.
- (2) Bowman, C. T., 1992, "Control of Combustion Generated Nitrogen Oxide Emissions : Technology Driven by Regulation," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 24, pp. 859~878.
- (3) Ahn, K. Y., Kim, H. S., Cho, E. S., Ahn, J. H. and Kim, Y. M., 1999, "An Experimental Study on Combustion Processes and NO_x Emission Characteristics of the Air-Staged Burner," *KSME Int. J.*, Vol. 13, No. 6, pp. 477~486.
- (4) Sung, Y. J., Cho, E. S. and Chung, S. H., 2001, "An Experimental Study on NO_x Characteristics in Air-Staging Burner," *KSME Autumn Conference Proceeding B*, pp. 167~171.
- (5) Turns, S. R., 2000, *An Introduction to Combustion 2nd Edition*, McGraw-Hill, New York.
- (6) Xu, M., Fan, Y., Yuan, J., Sheng, C. and Yao, H., 1999, "Modeling NO_x Emissions during Staged Combustion," *Int. J. Energy Res.*, Vol. 23, pp. 683~693.
- (7) Chen, R. and Driscoll, J. F., 1990, "Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flames: Effects of Coaxial Air and Other Mixing Parameters," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 23, pp. 281~288.
- (8) Turns, S. R., 1995, "Understanding NO_x Formation in Nonpremixed Flames: Experiments And Modeling," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 21, pp. 361~385.
- (9) Feikema, D., Chen, R. and Driscoll, J. F., 1990, "Enhancement of Flame Blowout Limits by the Use of Swirl," *Combust. Flame*, Vol. 80, pp. 183~195.
- (1) Miller, J. A. and Bowman, C. T., 1989, "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 15, pp. 287~338.