

공기-다단 연소기에서의 NOx 발생특성

성용진* · 조은성* · 정석호**

An Experimental Study on NOx Characteristics in Air-Staging Burner

Yongjin Sung, Eun-Seong Cho and Suk Ho Chung

Key Words : Air-Staging Burner(공기-다단 연소기), Primary Combustion Zone Equivalence Ratio(일차 연소 지역 당량비), Global NO Production(총 NO 발생량)

Abstract

Air-staging combustion is a relatively well-known technique to reduce NOx emission and used in combination with other techniques nowadays. However, the design variables are still selected depending upon operating circumstances. Though the fuel-rich condition of the primary combustion zone is very helpful to NOx reduction, its range is known to be restricted by the increase of carbon monoxide. However, in many cases carbon monoxide level is so low not to be the restriction at all. So we tried to expand the equivalence ratio range to the richer condition in the primary combustion zone and make the function of each burner component and its contribution to the overall NOx production clear.

1. 서론

인간의 활동에 의하여 발생되는 질소산화물(NOx)의 많은 부분이 연소과정에 의하여 이루어지고 있다. 질소산화물은 광화학 스모그의 원인으로 인체에 해를 기치며, 산성비의 원인이 되는 것으로도 알려져 있다.⁽¹⁾ 최근 환경규제가 강화됨에 따라 실용 연소기에서의 질소산화물 발생을 억제해야 하는 필요성 또한 날이 증가하고 있다.

공기-다단연소(Air-Staging Combustion)는 질소산화물 저감을 위한 방법 중 상대적으로 잘 알려져 있고 또 많이 사용되는 기법으로, 최근에는 NOx 저감 효율을 높이기 위하여 배기가스재순환(FGR), 재연소(Reburning), 잉여공기주입(OFA) 등과 함께 적용되기도 한다. 이로 인한 유동과 화학 반응의 복잡한 결합은 실제 연소기와 노의 설계 시에 일관된 규칙의 적용을 어렵게 만들고, 연소과정에 대한 이해보다는 적정 운전조건 선택에 주목하게 만든다. 그러나 질소산화물의 생성을 최대한 억제하기 위해서는 다양한 설계 변수들이 연소과정에서 발생하는 NOx 생성에 미치는 영향에 대한

체계적인 이해가 선행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 공기 이단 버너를 대상으로 여러 가지 조건의 변화에 따른 NOx 발생특성을 조사하였다. 일차 연소지역의 당량비 제어를 위하여 총 공기량은 변화 없이 일, 이차 각 단의 공기 비율을 변화시켜 실험하였고, 일차 공기의 출구단면적을 조절함으로써 이차 공기와의 상대적인 분사 위치 및 속도 변화를 시도하였다. 또한, 선회기(swirler)의 경사각도를 조절함으로써 선회 강도에 따른 연소특성을 확인하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 측정을 용이하게 하기 위하여 15kW 용량의 모델 연소기를 대상으로 하였다. 연료는 LPG를 사용하였으며, 산화제로는 대기 중의 공기를 압축하여 사용하였다.

일차 공기의 출구단면적 변화를 위하여 4 종류(출구단면적-107, 170, 314, 530 mm²)의 스로틀(throttle)을 제작 사용하였으며, 선회강도 변화를 위하여 베인의 각도가 다른 3 종류(30, 45, 60°)의 선회기를 이용하여 실험하였다.

* 회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

2.1 공기-다단 연소기

Fig.1 은 실험에 사용된 버너의 개략도 이다. 공기는 일차와 이차로 구분되어 공급되며, 연료분사 각도는 일반 산업용 연소기에서 많이 사용되고 있는 방식을 따라 공기에 대하여 연료가 45°의 각도로 분사되도록 하였다. 일차 공기 공급부에는 화염의 안정을 위하여 선회기를 사용하였고 일차 공기 출구 단면적을 조절하기 위하여 스로틀을 제작하였다. 그러나 선회강도 효과를 관찰하는 실험에서는 스로틀을 제거하여 선회수의 감소를 막았다.

화염의 길이를 줄이기 위해서는 연료 노즐의 출구를 가능한 한 작게 만드는 것이 유리한데, 이때 화염의 안정성은 가로지르는 공기의 유속에 의존하므로, 연료 노즐 출구의 축소는 출구면적과 다단 비율의 선택을 제한한다.

실험은 연료 노즐 0.4mm 에서 주로 수행되었으며, 1.2mm 노즐에서 그 타당성을 확인하였다.

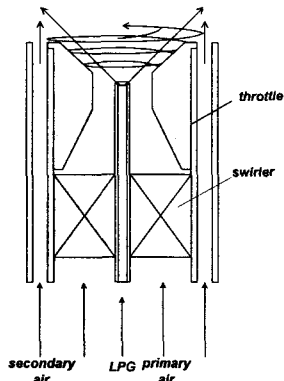


Fig. 1 Schematic diagram of air-staging low NOx burner

2.2 측정 장치

연소실내부 및 화염의 온도는 고온측정이 가능한 B Type 열전대(측정온도 600℃~1700℃)를 이용하여 0.9mm×1.3mm 의 측정 체적을 만들어 측정하였다.

질소산화물은 화학적 발광기법을 이용한 YANCO 사(Japan)의 제품을 이용하여 측정하였다. 총발생량은 크기 680mm×680mm×970mm 의 노상부 스택에서 채취한 값을 사용하였으며, 국소 발생량은 탐침봉(내경 2mm, 외경 3.4mm)을 화염 내에 직접 삽입하여 채취하였다. 측정에 사용된 연소실과 연료 및 공기공급 등의 기타 실험 장치의 구성은 Fig. 2 와 같다.

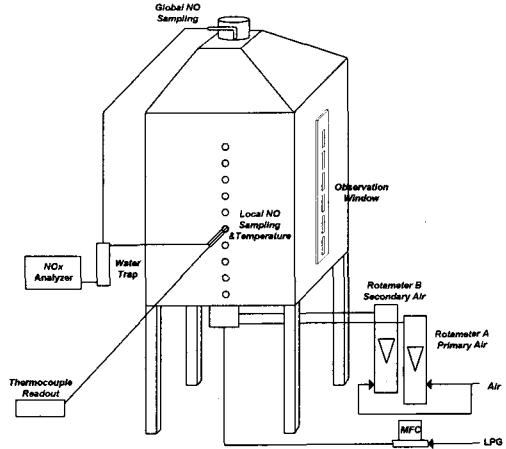


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

화학 반응지역에서의 연료와 공기의 혼합특성 파악을 위하여 LPG 연료대신 공기와 아세톤을 섞어 실험 조건의 연료와 동일한 운동량을 갖도록 유량을 조절하여 연료 노즐을 통하여 분사하였다. 실험은 비연소장에서 수행되었으며 파장 266nm, 출력 60mJ 의 Nd:YAG 레이저(Spectra-Physics, LAB-170-10)를 이용하여 연료노즐로 분사되는 아세톤을 여기 시킨 후 발생하는 형광신호를 ICCD 카메라(Roper Scientific, PI-MAX)를 이용하여 평면형광 신호(PLIF)를 얻었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 실험 조건 내에서의 화염 형상

화염 형상만으로 화염의 특성을 설명하는 것은 무리이며, 실용 연소기에서는 더욱 힘든 일이다. 그러나 연소기의 사용 목적에 따라 서로 다른 화염 모드가 필요한데, 이들은 배출 특성과 직접적인 연관을 맺지 않는 경우가 많다. 직접사진은 다른 자료들과 함께 연소기의 사용목적에 맞는 화염을 선택하는데 도움을 줄 것이다.

본 실험에서 주로 사용된 화염 모드는 연료노즐직경 0.4 mm(16 홀), 스웰수(S) 0.74 의 경우로 Fig. 3 에 직접사진을 통한 화염모양을 일차 연소영역의 당량비 변화에 따라 나타내었다. 그림에서와 같이 일차 공기의 공급량이 적어짐에 따라 화염길이 줄어 들고 있으나 (d)의 당량비 7.9 의 경우 오히려 화염이 다소 길어지는 것을 볼 수 있다. 전반적으로 일차 연소영역의 당량비 변화에 따라

화염모양이 크게 변화함을 볼 수 있다. Fig. 4 는 노즐직경 1.2mm(8 홀)의 경우로 화염이 다소 불안정함을 보여주고 있다.

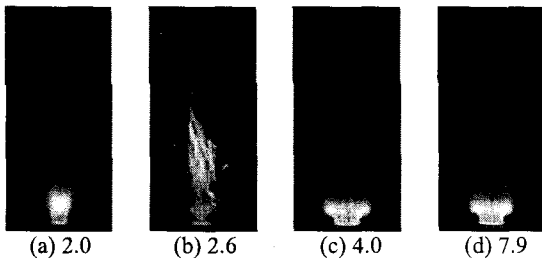


Fig. 3 Flame shape with primary zone equivalence ratio change, nozzle dia. 0.4mm

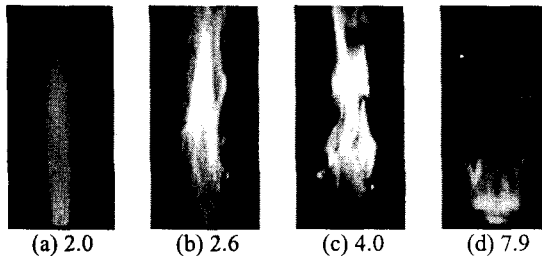


Fig. 4 Flame shape with primary zone equivalence ratio change, nozzle dia. 1.2mm

3.2 일차 연소 지역의 당량비 변화

다단계 저 NOx 연소기에서 일반적으로 사용하고 있는 일차 연소 지역의 당량비는 1.2 정도 이나⁽²⁾, 반응지역 내 온도와 산소 농도의 하락으로 인한 thermal NO의 저감, 그리고 CH 라디칼에 의한 질소산화물의 환원⁽¹⁾ 등 연료-과농 연소가 질소산화물의 배출에 미치는 이점을 생각하여 볼 때, 일차 연소 지역의 당량비를 연료-과농 지역으로 확장하는 것이 유리하다. 일차 연소지역의 당량비는 질소산화물 저감에 따른 일산화탄소 증가와 타협하여 선정하는 것이 일반적이나, 노의 크기가 충분한 경우 고온지역에서의 산화반응으로 일산화탄소의 배출은 중요한 변수가 되지 않는다.

Fig. 5 와 Fig. 6 은 각각 직경 0.4mm 와, 1.2 mm 노즐에서 일차 연소지역의 당량비 변화에 따른 NO 발생특성을 일차 공기의 출구단면적을 변화시켜 가면서 측정된 것이다. 그림에서 나타나는 것과 같이 일차 연소 지역의 당량비가 증가함에 따라 총 NO 발생량은 감소한다. NO 감소 비율은 당량비의 증가에 따라 차츰 줄어들며, 연료 노즐의 직경이 0.4mm 인 경우 1.2mm 경우와 달리 당량비

7.9 지점에서는 NO 생성이 다시 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 연료노즐속도가 크기 때문에 일차 공기의 공급량이 적은 경우 상대적인 연료분사 모멘텀의 증대로 혼합을 촉진시켜 NO 발생을 증가시키는 것으로 생각되어진다.

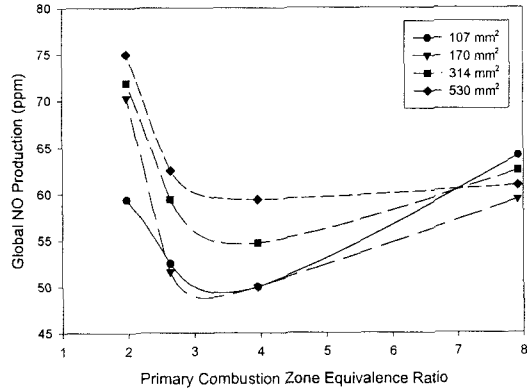


Fig. 5 Global NO production with equivalence ratio, primary air exit area changed, nozzle dia. 0.4mm

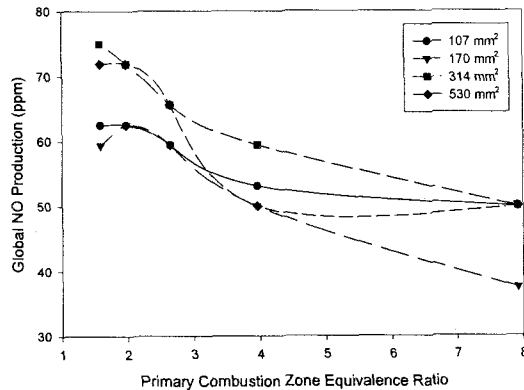


Fig. 6 Global NO production with equivalence ratio, primary air exit area changed, nozzle dia. 1.2mm

노즐 직경 0.4 mm 조건에서의 당량비 4.0 과 7.9 의 NOx 생성 분포를 비교하기 위하여 화염내부의 NO 농도분포를 측정하여 보았다. Fig. 7 은 각각의 조건에서 NO 농도분포를 나타낸 것으로 상대적으로 이차 공기의 유속이 증가된 당량비 7.9 의 경우 이차 공기가 일차 연소 지역을 침범하고 있음을 확인할 수 있다.

이것은 비연소장에서 수행된 각 조건의 아세톤 PLIF 사진 Fig. 8 에서도 확인할 수 있는데, 당량비 7.9 의 경우 이차공기의 운동량 증가로 화염의 폭이 줄어들었음을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상

은 연료-과농과 연료-희박의 두 단계로 진행되어야 하는 다단연소가 하나의 연소지역으로 합쳐지고 있음을 의미하는 것으로, 일차 연소지역을 연료-과농의 상태로 만들 때 이차 공기가 그 안으로 유입되지 않도록 이차 공기의 속도를 조절해야 함을 의미한다.

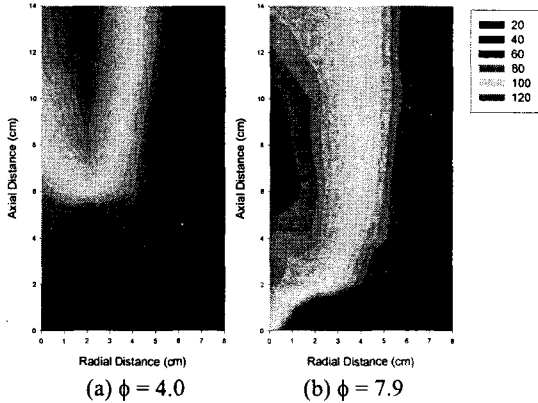


Fig. 7 NO (ppm) distribution with primary combustion zone equivalence ratio (primary air exit area 107mm²)



Fig. 8 Acetone PLIF image with primary combustion zone equivalence ratio change

3.3 일차 공기의 출구 면적 변화

일차 공기의 출구 면적이 증가함에 따라 총 NOx 발생량이 증가함을 Fig. 5, Fig. 6에서 확인할 수 있었다.

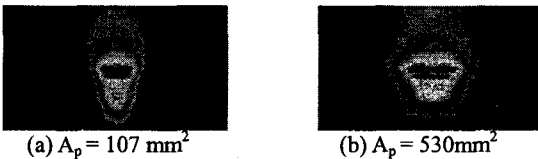


Fig. 9 Acetone PLIF image with primary air exit area changed

Fig. 9는 일차 공기의 출구단면적 차이에 따른 혼합특성을 나타낸 아세톤 PLIF 사진으로 일차 출

구면적이 증가함에 따라 반응지역이 확장되는 것을 볼 수 있다. 이것의 화염이 넓게 분포하면서 고온영역에서의 체류시간 증대에 의하여 NO 생성의 증가를 가져오는 것으로 생각된다.

일차 공기의 출구단면적 증대에 따라 일차 연소지역은 이차 공기가 분사되는 지점으로 다가가는데, 이차공기는 연소지역의 온도에는 크게 영향을 미치지 않으나 분사지점의 당량비를 낮추어 국소적으로 NO 저감에 기여하고 있음을 Fig. 10에서 확인할 수 있다.

그러나, 이 경우에도 일차 연소지역과 이차연소지역의 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⁽⁵⁾의 결과와는 구별되어야 한다.

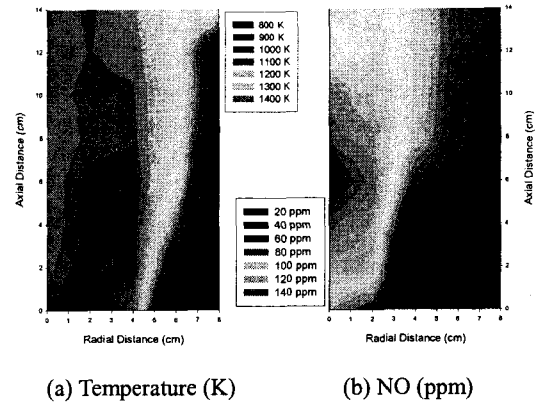


Fig. 10 Temperature and NO distribution within the flame (primary combustion zone equiv. ratio 4.0, pri. air exit area 530mm²)

1800K 이하의 온도에 대해서는 thermal NO를 배제할 수 있는데,⁽³⁾ 실험 조건 모두에서 반응 온도가 1600K를 넘지 않고, Fig. 10에서의 온도 분포와 NO 발생량이 서로 다른 분포를 보이므로 본 실험에서 생성된 NO의 경우 상당부분 prompt NO로 생각할 수 있다.

3.4 일차 공기의 선회수 변화

Fig. 11은 선회강도에 따른 NO 발생특성을 나타낸 것으로 일차 연소지역의 당량비에 따라 차이가 있으나, 일차 공기의 선회강도가 증가함에 따라 전체적인 NO 발생량이 증가함을 확인할 수 있다.

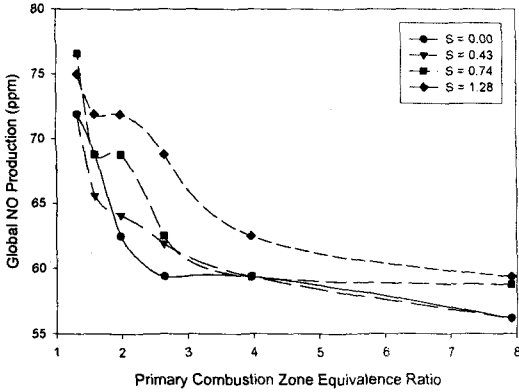


Fig. 11 Global NO production with primary combustion zone equivalence ratio, primary air swirl number changed

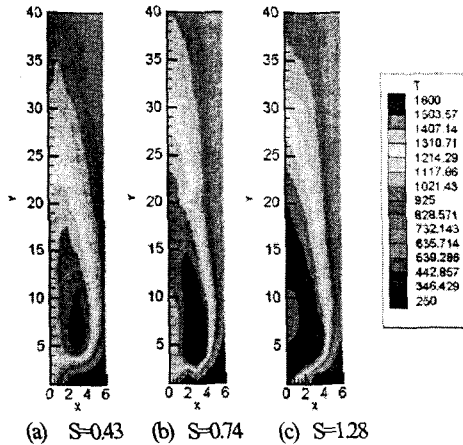


Fig. 12 Temperature (K) distribution for various swirl number (no staging, unconfined condition)

Fig. 12 는 선회강도에 따른 화염온도 분포를 나타낸 것으로 고온 지역을 연료와 산화제의 혼합이 주로 발생하는 반응지역으로 생각할 때, 선회강도에 따른 반응지역의 확장과 이로 인한 질소산화물의 증가를 확인할 수 있다. 실제로, 선회기가 화염의 안정성을 증가시킨다는 사실은 여러 실험결과에서 보고되고 있으나⁽⁷⁾, 질소산화물 저감에 기여하는 경우는 제한적임이 확인되었다.

4. 결론

1. 일차 연소지역에서의 당량비 4.0 까지 질소산화물의 생성이 감소하는 경향을 확인하였으며 그 이후로는 연소 지역들의 혼합으로 다단 연소의 효율

이 감소되어 질소산화물의 배출이 증가하는 것을 확인하였다.

2. 일차 공기의 출구면적 변화로 일차 연소지역의 크기를 조절할 수 있음을 보였다. 일차 연소지역이 이차 공기의 분사지점으로 다가가는 경우 연소 지역들의 혼합이 발생하여 다단 연소의 효율 감소를 가져와 질소산화물 발생이 증가하였다.

3. 선회 강도가 증가함에 따라 질소산화물의 배출이 함께 증가함을 확인하였다. 본 실험 조건에서 선회기의 사용은 화염의 안정성을 다소 증가시키는 이외의 다른 큰 효과를 가져오지 않았다.

후기

이 연구는 한국생산기술연구원의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) C. T. Bowman, "Control of Combustion-Generated Nitrogen Oxide Emissions: Technology Driven by Regulation," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 24, pp. 859-878, 1992
- (2) M. Xu, Y. Fan, J. Yuan, C. Sheng, and H. Yao, "Modeling NOx Emissions during Staged Combustion," *Int. J. Energy Res.*, Vol. 23, pp. 683-693, 1999
- (3) S. R. Turns, "Understanding NOx Formation in Nonpremixed Flames: Experiments And Modeling," *Prog. Energ. Combust. Sci.*, Vol. 21, pp. 361-385, 1995
- (4) J. F. Driscoll, R. Chen, and Y. Yoon, "Nitric Oxide Levels of Turbulent Jet Diffusion Flames: Effects of Residence Time and Damkohler Number," *Combust. Flame*, Vol. 88, pp. 37-49, 1992
- (5) R. Chen, and J. F. Driscoll, "Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flames: Effects of Coaxial Air and Other Mixing Parameters", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 23, pp. 281-288, 1990
- (6) R. F. Huang, and J. M. Chang, "The Stability and Visualized Flame and Flow Structures of a Combusting Jet in Cross Flow," *Combust. Flame*, Vol. 98, pp. 267-278, 1994
- (7) D. Feikema, R. Chen, and J. F. Driscoll, "Enhancement of Flame Blowout Limits by the Use of Swirl," *Combust. Flame*, Vol. 80, pp. 183-195, 1990